

2022年浙江省第十二届大学生物理科技创新竞赛

# 优秀作品集

**主办单位**

浙江省大学生科技创新竞赛委员会  
浙江省高等学校物理学类专业教学指导委员会  
浙江省物理学会

**承办单位**

浙江工业大学

2022年浙江省第十二届大学生物理科技创新竞赛

优秀作品集



# 目 录

基 SER 原子磁力仪心磁测量实验报告	01
霓虹再现实验演示仪	31
基于轴锥镜裸眼彩色动态 3D 数字全息实验系统的优化及物理学应用	52
基于 LabVIEW 的空气比热容比测定	73
基于水下无线通信技术的海体传感网络系统	84
基于 Arduino 的智慧安全外卖骑手保护头盔	103
老年人智能起居椅	129
激光专家——基于全自动激光切割设备的研究	144
数字化物联定位系统	187
可用于智能设备的新型紫外探测纳米芯片	240
基于光敏传感器的外挂式电梯无接触操控装置研究报告	255
皮影戏的数字化——健全非遗保护，助力数字经济	277
可视化家庭厨房下水管道疏通器	286
病毒(疫苗)培育中微孔胚蛋壳裂纹检测机	304
基于树莓派的“魔镜”设计和开发	328
基于液态金属的可拉伸柔性导线制备告	344
基于《密立根油滴实验》油滴喷射器的改进	358
磁场可视化仪器	373
基于半导体技术自制扬声器探索声学奥秘	387
分布式智能燃气泄漏监测系统	412
基于智能体温检测仪的疫情群体轨迹监测系统	420
脉搏血氧饱和度智能检测装置	430
多功能自动化商品展示仪	452
基于 WSN 的母羊体征监测系统设计与实现	465







# 基于 SERF 原子磁力仪心磁测量 实验报告

第十二届浙江省大学生  
物理实验与科技创新竞赛

**摘要：** 本小组选题为“磁场”，要求搭建能够产生磁场的实验装置，并对磁场进行测量表征；同时，制作一个利用磁场特性的实际应用装置或实验研究装置。本小组设计并制备了一组标准线圈作为产生磁场的实验装置，并采用已标定的原子磁力仪对线圈在通入不同电流时产生的磁场进行测量，描绘其磁场表征。在得到标准线圈的空间磁场分布与电流的关系后，再利用无自旋交换碰撞弛豫（SERF）原子磁力仪，分别对线圈模拟的心磁信号与人体心磁信号展开测量。

心磁测量需要极高灵敏度的磁力仪，通过学术调研，选取 SERF 原子磁力仪作为磁场探测方案。心磁测量对于心脏疾病的早期检测方面具有巨大优势，且其被动式测量的方式具有安全无创的测量效果，是心脏疾病的一种新型诊疗手段。目前心磁测量仪器主要基于超导量子干涉技术，具有超高灵敏度，但需要液氦降温，而液氦属于战略资源，中国严重缺乏，不仅价格昂贵且随时面临美国封锁。SERF 原子磁力仪是目前灵敏度最高的磁传感方案，它可以在常温下进行工作，因此解决了液氦资源短缺的问题，对技术发展具有重要战略意义。原子磁力仪的原理主要是通过圆偏振光泵浦将外层电子极化，将光子的角动量传递给电子，从而实现宏观极化。在外磁场作用下，宏观极化会产生拉莫尔进动，导致光强随外磁场变化，通过测量变化的光强，利用锁相放大器解调，进而得到磁场信息。实验用到的 SERF 原子磁力仪灵敏度 $\sim 90 fT/\sqrt{Hz}$ ，能够高效满足心磁测量。

**关键词：** 塞曼效应 光泵浦 原子磁力仪 心磁测量

## 一、选题及理解

本题目名称为“磁场”，目的主要包含三个方面：一、搭建产生磁场的实验装置。二、对磁场进行测量表征。三、利用磁场特性的实际应用装置。

针对产生磁场的装置，目前有两种最主要的方法，一种是利用永磁体磁化磁性材料产生磁场；一种是利用线圈通电产生磁场。本小组的目标是搭建能够产生模拟心磁信号的装置，对磁场的精度要求较高，因此使用标准线圈通电流产生磁场。



针对磁场的测量表征，关键在于方法和技术上的创新。由于模拟心磁信号是弱磁信号，对磁力仪的精度要求极高，一般的磁场测量的装置和仪器大多都是基于经典物理的方法，测量的误差大且推广价值小，因此为达到测量的精度要求，本小组给出一种基于现代物理技术，尤其是关于量子技术的磁场测量方案，即选用了精度极高的 SERF 原子磁力仪对磁场进行测量表征。

针对利用磁场特性的装置，由于题目要求我们设计的装置能推广于实际应用或实验研究，对于实际心磁信号的测量表征，实验装置的操作简易性必不可少。为此可以结合计算机编程进行自动的操作与控制，尽可能减少人对实验的手动干预，编写程序实现各种复杂操作的精确实现，实现精确性与简易性的并行提高，并结合各项参数对误差进行分析。

同时，在设计实验装置的过程中，还需要注意实验装置的正常运转需要的条件不能过于苛刻。这就需要装置的稳定性较好，在不同的环境下都能够较为精确的测量。

## 二、实验背景

磁场是最基本的物理量之一，精确的磁场测量，尤其是弱磁（ $< nT$ ）测量作为研究物质性质、探测未知世界的有效方式具有广阔的应用领域<sup>[1]</sup>，如地球物理<sup>[2-4]</sup>、矿业勘探<sup>[5]</sup>、工业检测<sup>[6, 7]</sup>、生物医学<sup>[8]</sup>等。

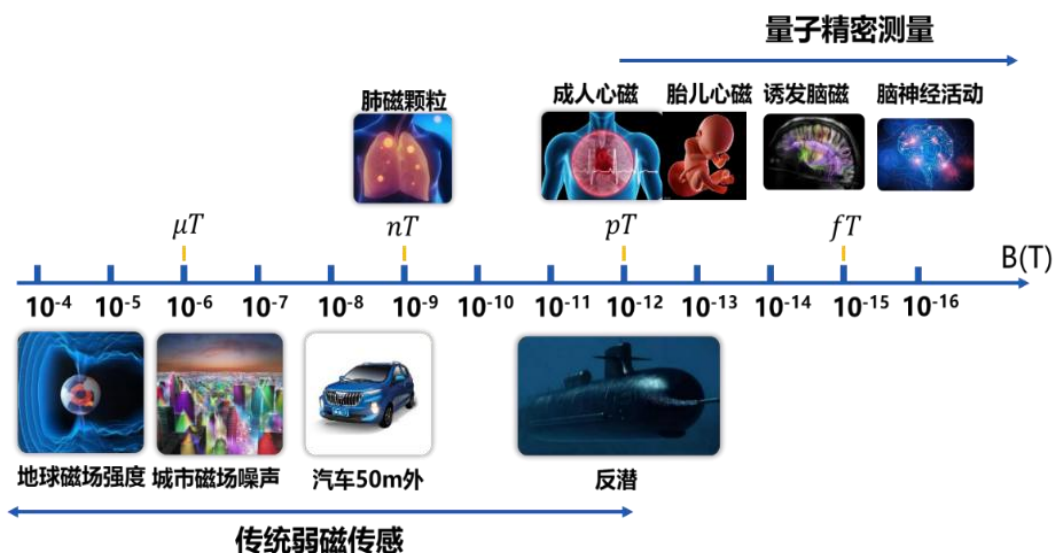


图 1 不同应用场景的磁场量级

不同的应用领域对应着不同的磁场量级，传统的弱磁传感在“ $nT$ ”级以上，而传统的检测手段无法满足军事勘探以及生物磁场等弱磁的测量要求，例如地磁场强度约为  $5 \times$



$10^{-5}T$ ，而心磁约为  $5 \times 10^{-12}T$ ，仅为地磁场的千万分之一，需要通过量子手段突破探测极限。

生物磁场探测对疾病检测具有非常重要的意义，例如心磁探测，我国心血管病情势严峻，根据《中国心血管健康与疾病报告 2020》显示，中国心血管病患病率处于持续上升阶段，推算心血管病现患人数 3.3 亿。心血管病死亡率仍居首位，占居民疾病死亡构成的 40% 以上，急性心梗死亡率呈现快速上升趋势，平均每 1 分钟就有 1 人死于心梗，而心磁检测对心脏健康检测具有重要意义。

同时心磁检测是其他心血管疾病诊断方法强有力的补充，在对心脏疾病的早期诊断上具有突出优势。它在临床应用上可以实现冠脉微循环障碍评估、心肌缺血预后评估，以及对体检人群和胎儿的早期疾病筛查。心磁检测属于被动式检测，具有“无辐射，无药物，无创伤，超敏感，不接触，低成本”等特点。

第一代心磁测量技术基于超导量子干涉<sup>[9, 10]</sup>，具有超高灵敏度，但需在低温状态下工作，要用液氦降温，而液氦属于战略资源，我国严重缺乏，一直依赖进口，价格昂贵，且随时面临美国的封锁。昂贵的液氦价格，使研究工作难以广泛开展。专家预计，未来我国会因为无液氦供应而使现有的许多涉及氦气和液氦的科研项目无法实施。近年来，原子磁力仪发展迅速，国际上用原子磁力仪测量心磁也取得了较大的进展，如利用铯原子光泵磁力仪和相干布居囚禁磁力仪等实现了心磁测量<sup>[11, 12]</sup>。不同于 SQUID 磁力仪，原子磁力仪可在常温下进行弱磁检测，不但解决了液氦封锁的危机，对技术发展具有重要战略意义，且 SERF 原子磁力仪是目前极限灵敏度最高的磁传感方案，能够高效满足心磁测量要求，为此我们基于 SERF 原子磁力仪实现了心磁的准确测量。

### 三、实验目的及原理

#### 3.1 实验目的

利用标准线圈，搭建能够产生所需磁场的实验装置，并利用定标后的高灵敏度 SERF 原子磁力仪，对产生的弱磁信号进行测量表征；同时，根据上述实验的原理，设计并制作能够测量人体心磁信号的装置。

#### 3.2 实验原理

##### 3.2.1 标准线圈

为产生所需的磁场，目前有两种最主要的方法：一种是利用永磁体磁化磁性材料产生磁场；一种是利用线圈通电产生磁场。本小组的目标是搭建能够产生模拟心磁信号的装置，对



磁场的精度要求较高，因此使用标准线圈通电生磁场。通过理论仿真和实验，本小组搭建了一套亥姆霍兹线圈实验装置，能够产生本实验所需的磁场。

### (1) 载流圆线圈的磁场

对一半径为  $R$  的圆线圈，通以大小为  $I$  的单向电流，根据毕奥萨法尔定律可得轴线上的磁场大小公式为：

$$B(x) = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2 \left[ R^2 + \left( \frac{R}{2} + x \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (1)$$

其中  $N_0$  为线圈匝数， $I$  为线圈电流强度， $R$  为线圈半径。可通过改变电流方向调节磁场方向，通过调节电流大小来改变磁场大小。

### (2) 亥姆霍兹线圈

亥姆霍兹线圈由两个相同的平行共轴线圈构成，两线圈间距和线圈半径相同。对两线圈通以同向等大电流，能在线圈之间的轴线上产生较大范围的均匀磁场。根据磁场叠加定律可知，轴线上的磁场大小公式为：

$$B(x) = \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2 \left[ R^2 + \left( \frac{R}{2} + x \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{\mu_0 N_0 I R^2}{2 \left[ R^2 + \left( \frac{R}{2} - x \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}} \quad (2)$$

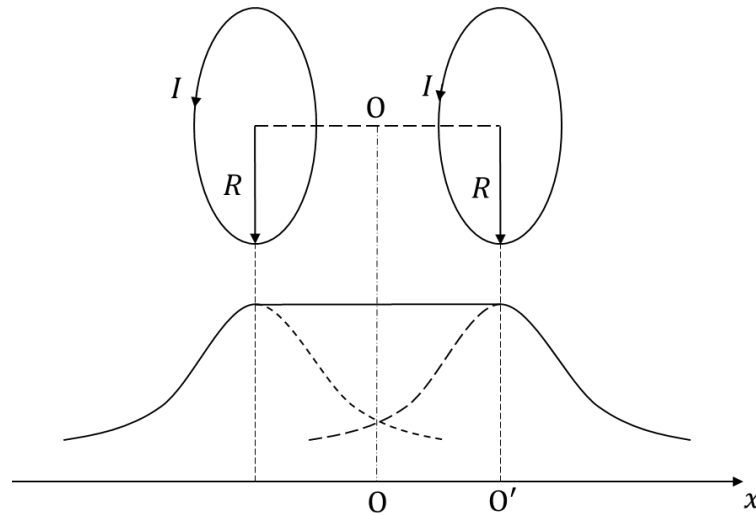


图 2 亥姆霍兹线圈磁场分布图

除作为测量对象的标准线圈外，在 SERF 原子磁力仪的全套仪器中，同样存在多组线圈。通过调节电流，便能产生所需的磁场。借由这些磁场，通过对亥姆霍兹线圈进行组合放置，便能实现诸如抵消剩磁、磁场定标、磁场调制等过程。SERF 原子磁力仪的测量精度高达 nT，

甚至是 pT 级别。因此对亥姆霍兹线圈通以  $\mu A$  级电流后，精确描绘随之产生的磁场便显得尤为重要。在实验装置这节中将详细展示线圈的仿真结果。

### 3.2.2 SERF原子磁力仪

原子磁力仪的原理主要是通过圆偏振光泵浦将原子的外层电子极化，将光子的角动量传递给电子，从而实现宏观极化。在外磁场作用下，宏观极化会产生拉莫尔进动，导致透射光强随外磁场变化，通过测量变化的光强，利用锁相放大器解调，进而得到磁场的特征。本节将整个的原理分为三个部分进行介绍：1. 激光泵浦过程。2. 光探测过程。3. 弛豫机制。

#### (1) 激光泵浦过程：

宏观角动量取决于不同能级上的电子数分布，可用极化强度  $P$  表示。自然状态下，碱金属原子自旋方向指向任意方向，原子磁力计在热平衡状态下服从玻尔兹曼分布，其极化强度表达为：

$$P_{th} = \tanh \frac{g_s \mu_B B}{2k_B T} \quad (3)$$

其中  $g_s$  为电子朗德因子， $\mu_B$  为玻尔磁子， $B$  为外磁场强度， $k_B$  为玻尔兹曼常数， $T$  是外界温度。室温情况下，地磁产生的宏观极化强度通过上式计算得到仅为  $1 \times 10^{-7}$ ，因此要通过激光泵浦提高极化强度到 1 左右。本实验仅考虑电子自旋，不考虑原子核自旋的光泵浦过程，光泵浦的过程如下图所示：

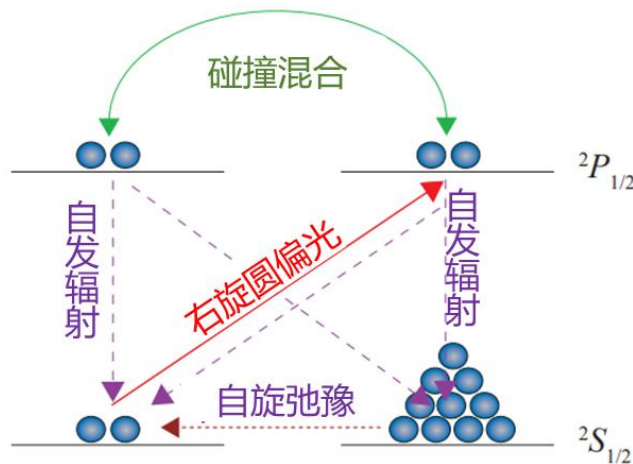


图 3 光泵浦过程图

根据跃迁选择定则， $\Delta m_j = \pm 1$  时，跃迁才能发生。在光场作用下， $m_j = -\frac{1}{2}$  的原子被泵浦到激发态  $2P_{1/2}$ ，由于激发态不稳定，大部分原子会自发辐射回落到基态  $m_j = \frac{1}{2}$  上。经过多



次上述过程，最终绝大部分原子处于基态  $^2S_{1/2}$  的能级  $m_j = \frac{1}{2}$  上，实现了宏观极化。

通过对光泵浦过程的定量分析，令  $\rho(-1/2)$  和  $\rho(+1/2)$  为基态子能级  $m_j = -\frac{1}{2}$  和  $m_j = \frac{1}{2}$  上的粒子数密度，则两个子能级粒子数密度变化满足下列方程组：

$$\begin{cases} \rho(-1/2) + \rho(+1/2) = 1 \\ \frac{d}{dt}\rho(-1/2) = -2R_{OP}\rho(-1/2) + 2(1-a)R_{OP}\rho(-1/2) \\ \frac{d}{dt}\rho(+1/2) = 2aR_{OP}\rho(+1/2) \end{cases} \quad (4)$$

其中  $R_{OP}$  是光泵率， $a$  为光泵有效参数。

原子自旋极化  $\langle S_z \rangle = \frac{1}{2}[\rho(+1/2) - \rho(-1/2)]$ ，假设在初始状态下  $\langle S_z \rangle = 0$ 。并且在真实的物理过程中，原子极化存在弛豫过程，用  $R_{rel}$  表示所有原子极化弛豫几率，对上述方程组进行求解可以得到：

$$\langle S_z \rangle = \frac{aR_{OP}}{2aR_{OP} + R_{rel}} (1 - e^{-(2aR_{OP} + R_{rel})t}) \quad (5)$$

长期稳定后宏观极化率  $P = 2\langle S_z \rangle$ ，可得：

$$P = \frac{2aR_{OP}}{2aR_{OP} + R_{rel}} \quad (6)$$

(2) 光探测过程：

本实验原子气室中原子密度大约为  $10^{12} - 10^{14} \text{cm}^{-3}$ ，考虑原子系综的演化，通过计算整体自旋极化平均值，考虑密度矩阵含时演化可以列出以下方程组：

$$\begin{cases} \rho = \frac{1}{N} \sum_i^N |\psi_i\rangle\langle\psi_i| \\ \langle S \rangle = \text{Tr}(S\rho) \\ i\hbar \frac{d}{dt}\rho = [H, \rho] \end{cases} \quad (7)$$

式中密度矩阵  $\rho$  表示原子系统状态， $N$  为原子总数， $|\psi_i\rangle$  为第  $i$  原子的态矢量。

将上述方程联立，可给出在外磁场下整体原子的自旋演化方程如下所示：

$$\frac{d}{dt}\langle S \rangle = \gamma \langle S \rangle \times B_0 \quad (8)$$

式中整体原子的自旋行为表现为拉莫尔进动。

由于本实验为高灵敏度心磁检测，因此需添加磁场强度为  $B_0$ ，调制频率为  $\omega_m$  的调制磁

场，在两种磁场的共同作用下，整体原子的自旋演化方程为：

$$\frac{d}{dt}S = \frac{1}{q} \left[ \gamma B \times S + R_{OP} \left( \frac{1}{2} \hat{z} - S \right) - R_{rel} S \right] \quad (9)$$

由于长期稳定后的宏观极化率  $P = 2\langle S_z \rangle$ ，将极化强度在  $x$  和  $y$  方向的投影记为  $P_{\pm} = P_x \pm iP_y$ ，上式可改写为：

$$\frac{d}{dt}P_{\pm} = \mp (\omega_0 + \omega_1 \cos(\omega_m t)) P_{\pm} - \frac{P_{\pm}}{T_2} + R_{OP} \quad (10)$$

$$\frac{d}{dt}P_z = -\frac{P_z}{T_1} \quad (11)$$

式中  $\omega_0 = \gamma B_0/q$ ， $\omega_1 = \gamma B_m/q$ ， $q$  为核减慢因子， $T_1$  为纵向弛豫时间， $T_2$  为横向弛豫时间。引入参数  $\lambda(t)$ ，采用参数法解上述方程<sup>[16]</sup>，则横向极化率解的期望形式为：

$$P_{\pm} = \lambda(t) e^{-t/T_2} e^{i\omega_0 t} e^{iM \sin(\omega_m t)} \quad (12)$$

式中  $M = \gamma B_m/(q\omega_m)$  为调制参数，将期望形式代入含时演化方程可以给出含有  $\lambda(t)$  含时演化方程为：

$$\frac{d}{dt} \lambda(t) = R_{OP} e^{t/T_2} e^{i\omega_0 t} e^{iM \sin(\omega_m t)} \quad (13)$$

求解上述方程可得：

$$P_{\pm} = R \sum_{n,p} \frac{J_n(M) J_{n-p}(M)}{\Gamma_2 + i(\omega_0 + n\omega_m)} e^{ip\omega_m t} \quad (14)$$

我们只考虑近零场( $n = 0$ )情况下，消除自旋交换碰撞弛豫进入 *SERF* 态的超高灵敏度原子磁强计<sup>[16]</sup>。将上述结果按照  $p$  值的奇偶性，分为两部分讨论。当  $n = 0$  且  $p$  取偶数时：

$$P_x = R_{OP} J_0(M) J_p(M) \frac{\Gamma_2}{\Gamma_2^2 + \omega_0^2} \cos(p\omega_m t) \quad (15)$$

当  $n = 0$  且  $p$  取奇数时：

$$P_x = R_{OP} J_0(M) J_p(M) \frac{\omega_0}{\Gamma_2^2 + \omega_0^2} \sin(p\omega_m t) \quad (16)$$

以上为零场型原子磁强计的核心原理，最后的磁场强度信息可以从对  $x$  方向的宏观极化率的探测获取，利用锁相放大器，由于已知的上式中正弦函数频率，对信号进行解调，即可得到其前面的系数，进而获得磁场强度信息。

(3) 弛豫机制:

上述原理介绍中将所有弛豫对磁强计的影响简化为了 $R_{rel}$ ，下面详细介绍各种弛豫机制。本文磁强计中包含的弛豫机制主要包括碰壁弛豫、自旋破坏弛豫、自旋交换弛豫等。

碰壁弛豫主要是碱金属原子热运动与气室碰撞后使得极化在同一方向的自旋无序化。在气室中只有碱金属原子时，原子热运动的平均速率为:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (17)$$

式中 $k_B$ 是玻尔兹曼常数， $T$ 是原子气室温度， $m$ 是碱金属原子质量。则碰撞的平均时间间隔 $T_{wall}$ 为:

$$T_{wall} = \frac{4V}{\bar{v}A} \quad (18)$$

式中 $V$ 是气室体积， $A$ 是气室的表面积。

本实验通过冲入缓冲气体，减小碱金属原子的平均自由程，达到限制碰壁弛豫几率的目的。冲入缓冲气体后，碱金属原子以扩散形式分布。扩散系数 $D$ 为:

$$D = \frac{1}{3} \lambda \bar{v} \quad (19)$$

式中 $\lambda$ 为平均自由程， $\bar{v}$ 为热运动速率。气体种类和压力不同时，扩散系数也不同，其变化关系为:

$$D = D_0 \frac{p_0}{p} \quad (20)$$

式中 $D_0$ 是压强为 $p_0$ 时的扩散系数， $D$ 是压强为 $p$ 时的扩散系数。

冲入缓冲气体后的碰壁时间由下式给出:

$$\frac{1}{T_{wall}} = D \left( \frac{\pi}{R} \right)^2 \quad (21)$$

式中 $R$ 是球形气室半径，此关系式同样适用于立方气室[?].

加入缓冲气体后，碰壁弛豫降低，但引入了碱金属原子与缓冲气体分子的自旋破坏碰撞。碰撞几率由下式给出:

$$R = n \sigma \bar{v} \quad (22)$$

式中 $n$ 是不同气体类型粒子数密度， $\bar{v}$ 是相对热运动速率， $\sigma$ 是碰撞时的碰撞截面。上式同样满足自旋交换碰撞弛豫的计算。

由上述讨论，冲入缓冲气体可有效减少碰壁弛豫，但会增加自旋破坏碰撞弛豫几率，因



此要综合考虑两方面的影响。

#### 四、实验装置

如图为实验装置的示意图，主要由光路平台、铷原子气室、恒温控制模块、磁屏装置和包括锁相放大器在内的信号检测装置组成。

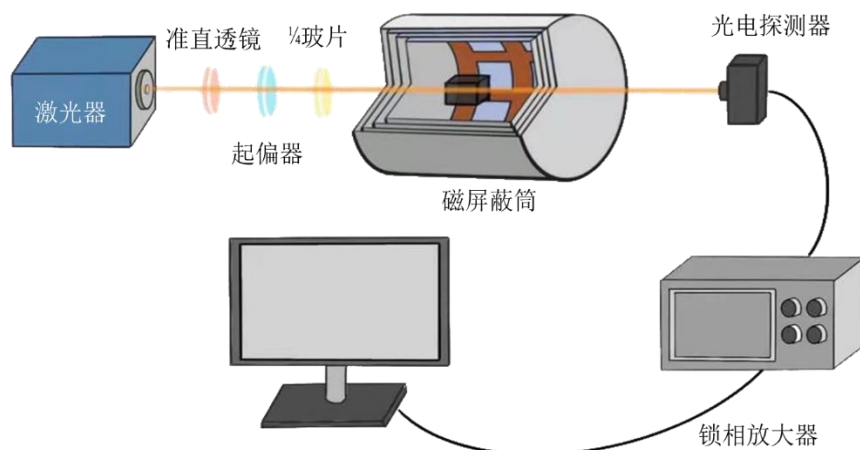


图 4 实验装置示意图

该实验装置的相关参数如下表所示：

表格 1 实验装置相关参数

参数	尺寸	重量
测量模块（不含外围光路）	25cm×15cm×2cm	200g
外围光路	40cm×20cm×15cm	—
测试机柜	50cm×50cm×80cm	—
大屏蔽桶（用于心磁测量）	半径=1.5m 桶长=2m	800kg
小屏蔽桶（用于线圈磁场测量）	半径=40cm 桶长=60cm	30kg

##### 4.1光源

本实验采用窄线宽半导体激光器作为激光源，LD 出射光束发散角较大不适合直接使用，需要对光束进行准直和整形，我们在激光器后放置准直透镜，使出射光为平行光，为使泵浦光为圆偏光，还需要起偏器和 1/4 玻片，激光通过起偏器将偏振方向调节至与 1/4 玻片光轴呈 45° 方向，同时纯化偏振态，通过 1/4 玻片将线偏振光转化为圆偏振光，再入射到原子气室。光束直径和原子气室内径相当，使得尽可能多的原子参与测量，提高探测器灵敏度。

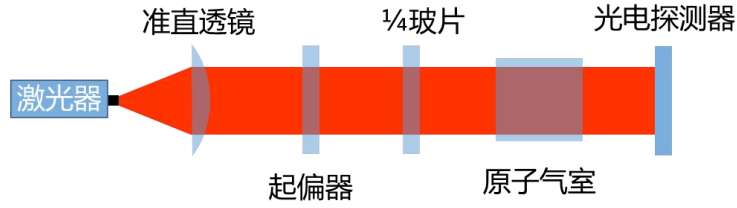


图 5 光源示意图

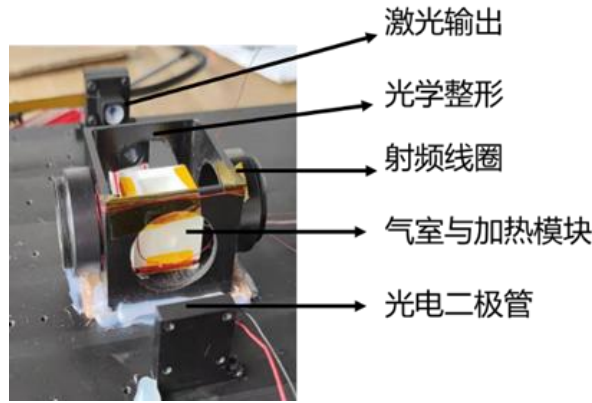


图 6 磁场探测模块

#### 4.2 铷原子气室

铷原子气室是本实验的核心器件，它是实现磁场测量的关键。铷原子气室包含有 $^{87}\text{Rb}$ 原子。原子磁力计的灵敏度与铷原子气室的大小成反比，具体关系可由下式：

$$\delta B \approx \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{\mu \sigma}{l^3 \tau}} \quad (23)$$

其中  $\gamma$  是旋磁比， $\bar{v}$  是热平均速率， $\sigma$  是由自旋交换弛豫的横截面积， $\tau$  是弛豫时间， $l$  是原子气室的大小。由上式的关系，本实验采用  $1\text{cm} \times 1\text{cm} \times 1\text{cm}$  大小的铷原子气室。本实验基于无自旋弛豫交换的基本原理，为了实现该原理，需要铷原子气室浓度达到很高，为此在铷原子气室内充入饱和的铷蒸汽。在实际测量时需要激光激励铷原子气室来实现磁场的探测，故铷原子气室壁经过严格抛光，实现四分之一波长以上的光学平整度，同时 SERF 磁力仪原子需加热至约  $150^\circ\text{C}$ ，因此本实验选取耐高温高硼硅玻璃作为气室的原材料。

#### 4.3 恒温控制模块

对原子气室的精准控温，是完成零场型原子磁强计测量弱磁实验的重要前提。为使原子磁强计进入无自旋交换弛豫机制，该实验需要在一定的温度下进行；同时，温度的飘动会影响磁力计的噪声水平。为保证测量的高灵敏度，我们对实验设备添加了配套的热源和恒温控制装置。

在热源方面，我们在气室周围安装了成对双绞线，对互相缠绕的双绞线通以反向电流，在有效抵消热源磁场的情况下产生热量，通过热传导对气室实现了加热。加热输出高频交流信号，磁力仪无法对该频率进行响应，对测试影响降低。

温度控制上，我们基于 LabVIEW 自主编写了相应的控制程序，使用热电偶采集气室温度。根据采集的温度数据，与控制系统构成反馈闭环，通过 PID 控制实时控加热功率，最终达到实验所需要的温度。

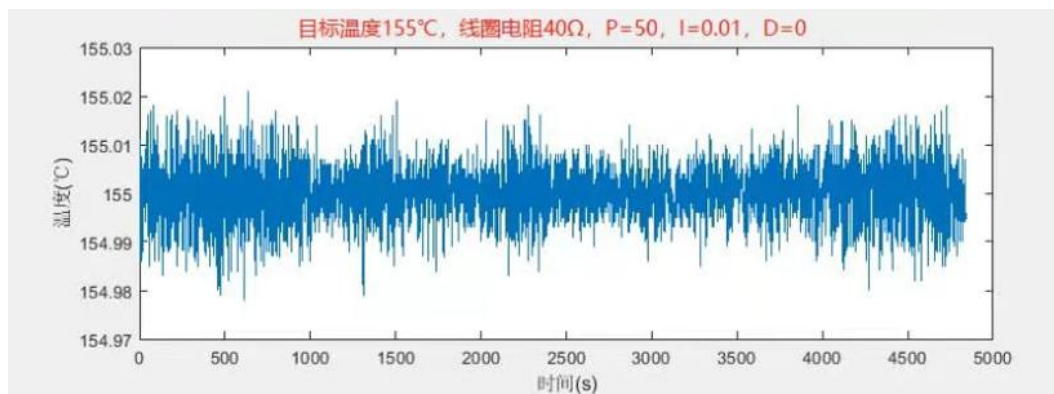


图 7 恒温控制要求

#### 4.4 产生磁场的装置

本实验采用对线圈通以电流的方式产生磁场，根据亥姆霍兹线圈磁场计算公式（2），本小组绕制了一组亥姆霍兹线圈来产生所需的磁场。本小组选取了线圈直径为 20cm，线圈间距为 10cm，匝数为 10 匝的线圈安置在仪器中

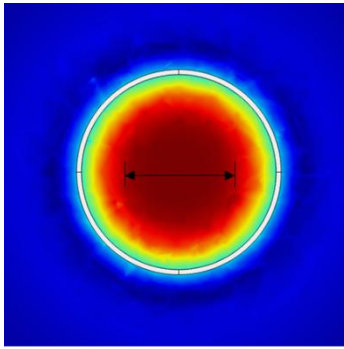
首先在实际绕制前，本小组针对所设计的线圈进行了有限元分析仿真，结果如图 8 所示：



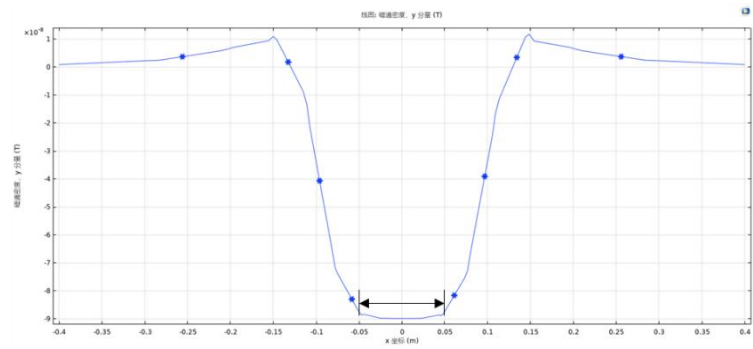
图 8 有限元分析仿真结果

利用有限元分析仿真结果，从横向对磁场进行分析，如图 9（b）所示，为对目标磁场进行精确控制，需选取磁场较为稳定的区域作为所需工作区域：





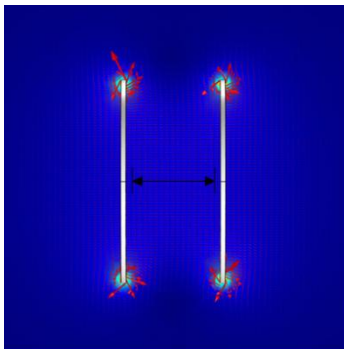
(a)



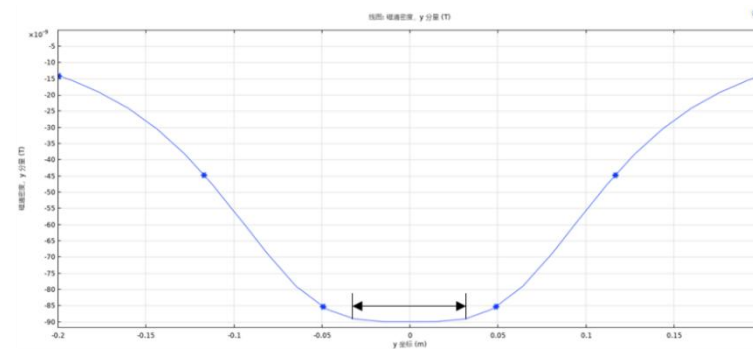
(b)

图 9 根据仿真结果选择横向有效区域

同样利用有限元分析仿真结果，从轴向对磁场进行分析，如图 10 (b) 所示，选取磁场较为稳定的区域作为所需工作区域：



(a)



(b)

图 10 根据仿真结果选择轴向有效区域

根据相关有限元分析仿真结果，本小组实际绕制的线圈如图 11 所示。



图 11 绕制线圈实物图

## 4.5 磁屏蔽装置

### 4.5.1 磁屏蔽桶

为屏蔽外界磁场对实验的干扰，本实验使用由五层坡莫合金制成的圆柱形磁屏蔽桶来安

置原子气室。最内层直径为 30cm，最外层直径为 60cm，圆柱桶轴向和侧面通光孔的直径为 3cm，该器材的制作材料磁导率高，磁力线则在该材料表面处发生了弯曲并进入材料内部，因此桶内部的将会形成极低的磁场，剩磁可以小于 5nT。

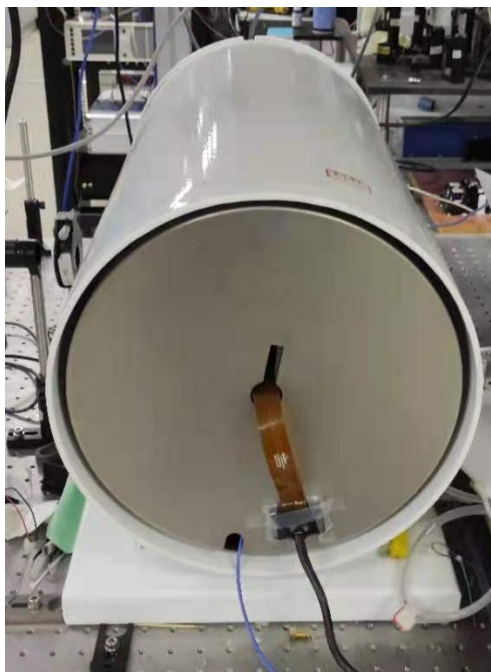


图 12 磁屏蔽筒

#### 4.5.2 线圈磁场补偿

为了更好的抵消剩磁，可通过主动屏蔽的方法，即通过线圈产生磁场，使其大小与环境剩磁相同、方向相反。在屏蔽桶内放置磁补偿线圈进一步补偿剩磁，将测试环境磁场补偿至零。我们使用两对鞍形线圈补偿 $x$ ， $y$ 轴磁场，一对亥姆霍兹线圈补偿 $z$ 轴磁场，通过对线圈电流的精细调节，即可实现符合实验需求的零场环境。

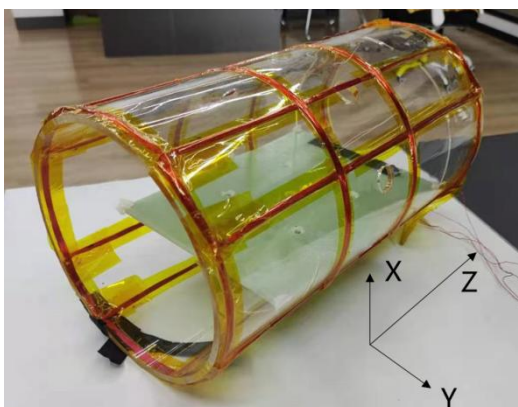


图 13 补偿线圈

#### 4.6 信号检测

信号检测主要的功能是对光信号进行转换、采集、处理与分析。信号检测主要分为三个

部分：光电转换部分；锁相放大器；计算机软件系统。光电转换系统将光信号转化为电信号；锁相放大器可以放大信号，从信号中读取有用的信号，过滤掉噪声信号；计算机软件系统用来对信号进行数据处理，并进行结果的展示。

#### 4.6.1 光电转换

光电转换部分采用光电二极管，将磁传感器所产生的光信号转化为电信号。为了方便测量，需要光电二极管工作在线性响应区域。因此对光电二极管添加零偏置电路，最大程度地减少暗电流，增加线性工作区。

#### 4.6.2 锁相放大器

收集到的信号通常伴随着较大的噪声。本实验采用锁相放大，得到高信噪比的信号，除去其他的噪声，输出正比于特定频率的幅值的直流信号。锁相放大器是根据相关性原理做成的相关性的检测设备，相关函数如下式：

$$R_{xy} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-x)dt \quad (24)$$

基于上述的公式，当输入信号含有与参考信号频率不同的信号成分时，其相关性较低；当频率相同，相关性较高。基于相关性的大小，用滤波器过滤掉与参考信号相关性较差的信号。

当被测信号含有 $V_{A0} = \sin(\omega_0 t + \phi)$ 分量，参考信号为 $\frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin[(2n+1)\omega_R t]$ ，将两个信号输入到乘法器，再通过滤波器可以得到输出电压：

$$V_{01} = \frac{2R_0 V_{A0} \cos[(\omega_0 - \omega_R)t + \phi + \theta_1]}{\pi R_1 \sqrt{1 + [(\omega - \omega_R)R_0 C_0]^2}} \quad (25)$$

由此可知被测信号含有与参考信号相同频率的分量时，锁相放大器会输出直流信号；被测信号含有其他频率的分量时，锁相放大器会输出幅值很小的交流信号。由上式的分母可知，被测信号包含的信号分量的频率与参考信号的频率差值越大，其输出的交流信号的幅值越小、频率越高。此信号经过滤波可以过滤掉与参考信号频率相差较大的频率，得到被测信号中有用的信号。

结合上述原理，锁相放大器具体工作的流程如图 4.5.2 所示。



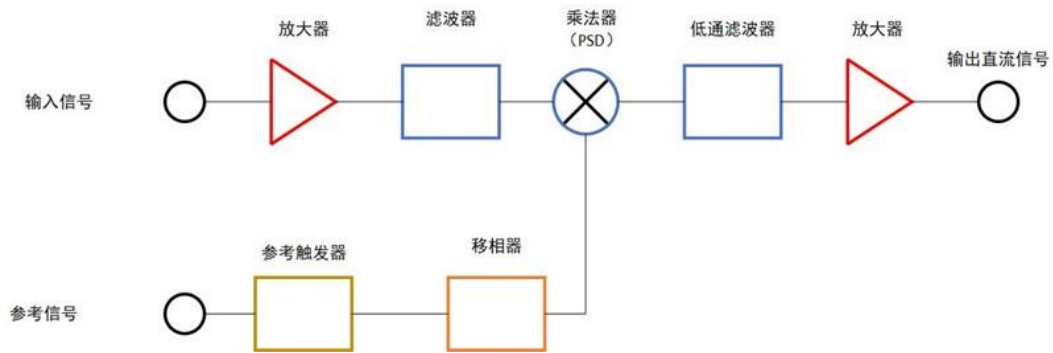


图 14 锁相放大器工作流程图

锁相放大器主要有放大器，移相器，乘法器，滤波器组成。放大器用于将微弱的信号放大；移相器是为了使参考信号的相位与待测的信号相位相同。将移相后的参考信号与放大的待测的信号同时输入到乘法器，再将得到的信号用低通滤波器过滤，过滤与参考信号无关的噪声信号，进而得到关于弱信号幅值。从公式（25）施加一个高频调制磁场可待测磁场，通过锁相放大器解调。输出调制频率信号幅值，该幅值和待测磁场成色散曲线关系，而在磁场极小的情况下，近似为线性关系，从而解调出与待测磁场成线性相关的幅值量。

锁相放大器输出的信号需要进一步转化为磁场强度的信号，并对结果进行分析。因此将锁相放大器输出的直流信号上传到上位机程序，对信号进行幅值标定，乘以转化系数可以得到实际磁场强度。在开始使用时需要对该系统进行校准：标准线圈对磁力仪施加已知大小的磁场强度，得到电压值，计算得出磁力仪的测量转换系数。

## 五、实验步骤

### 5.1 搭建并调节光路

首先调节激光器波长，使之出射能使铷原子 D1 能级发生跃迁的激光，如图 15 所示；其次调节激光光强和偏振态，使入射气室的光为右旋圆偏光，如图 16、17 所示。通过偏振分析仪进行偏振检测，保证输入光的偏振纯度。

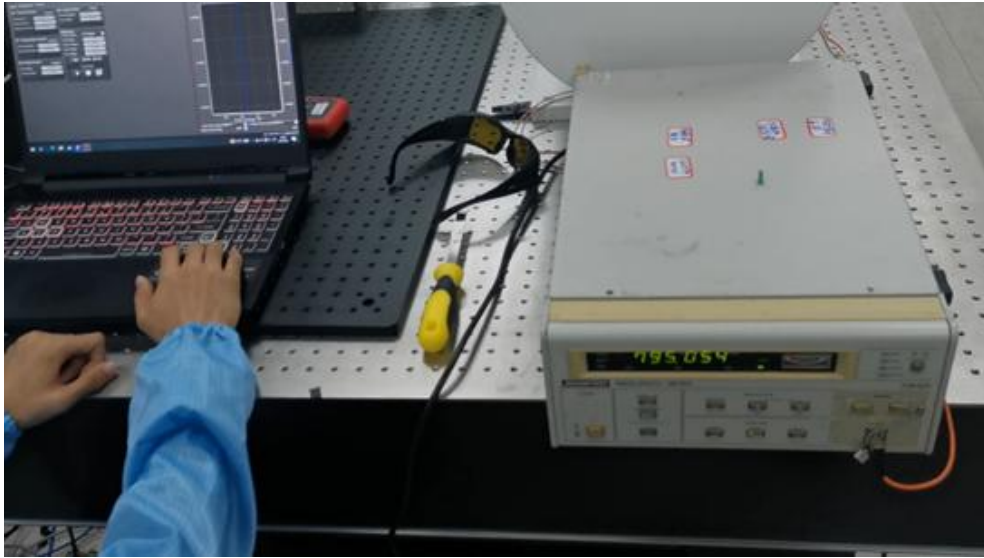


图 15 调节激光器波长

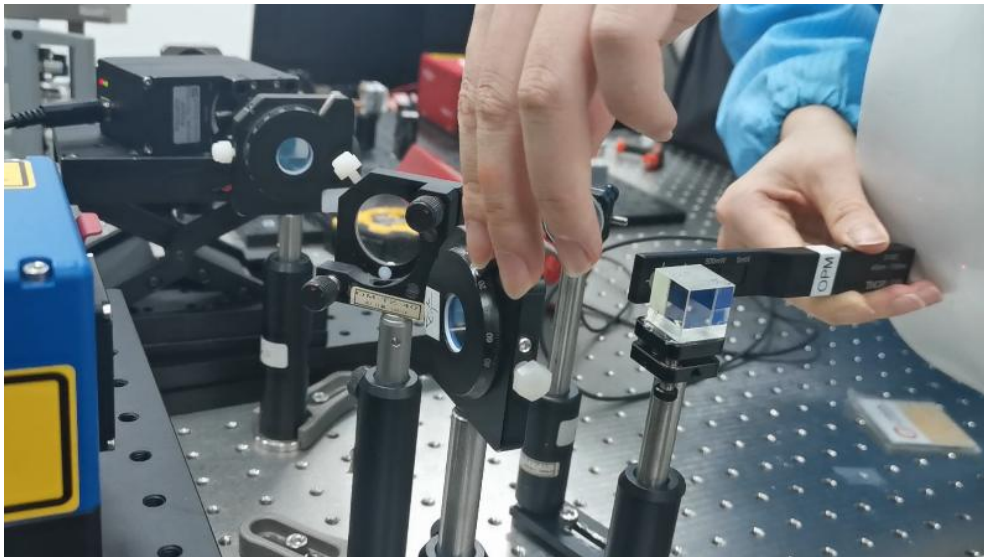


图 16 调节激光光强



图 17 调节激光偏振态

## 5.2 调节气室温度

为使原子磁强计进入无自旋交换弛豫机制，我们需要让原子气室的温度保持在 155 摄氏度。通过上述的温度控制模块，加热频率 1300KHz，加热 PID 控制参数：P=50；I=0.01；D=0；加热从室温到稳定目标温度时间约为 200 秒，温度稳定性达到 $\pm 0.02^{\circ}\text{C}$ 。稳定的无磁加热系统，降低了磁力仪因温度飘动而形成的长漂，降低了低频噪声。

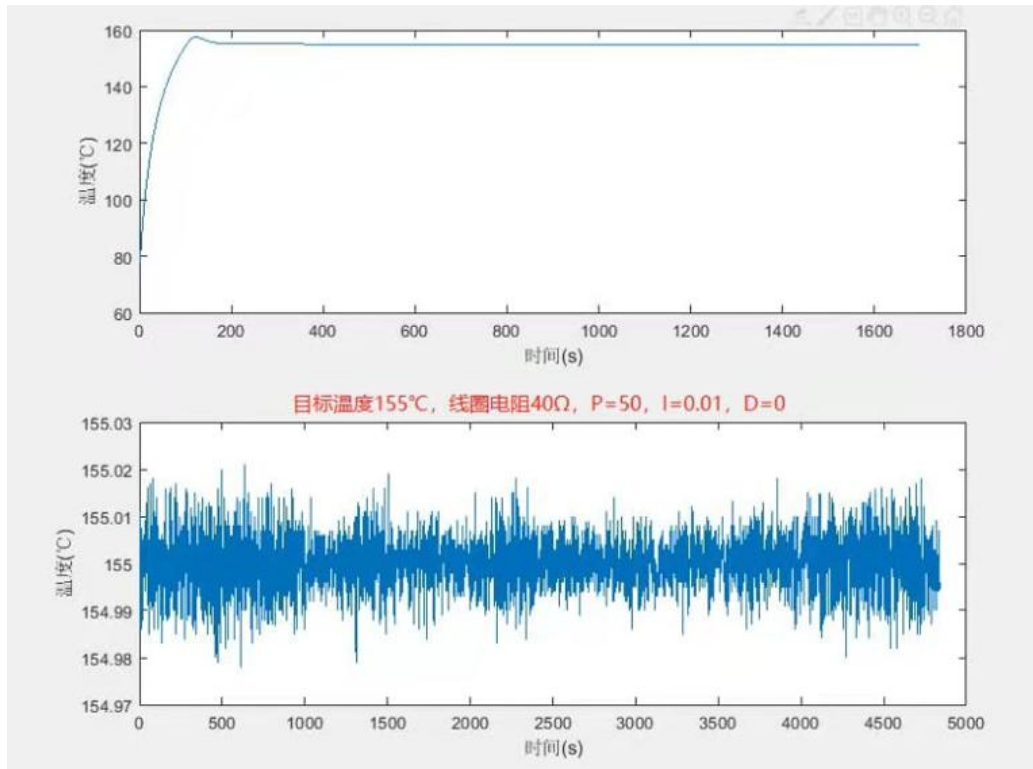


图 18 气室温度调节图

### 5.3 磁场调零

为减少地磁等外界磁场对桶内磁场的干扰，本实验采用层数共计 5 层，屏蔽系数大于  $10^5$  的磁屏蔽桶，进而可以使得桶内的剩磁几乎为零。

考虑到磁屏蔽桶并不能完全屏蔽外界的磁场，而且在不同环境中，磁场的影响各不相同，需要根据使用环境进一步降低背景磁场。本实验采用三维线圈的方法来进一步调零，用三维线圈产生的三个方向的磁场来抵消磁屏蔽桶内的剩磁。本实验不断地调节三个线圈的电流来调节三个方向的磁场的大小。

根据磁力仪的原理，由于外加射频磁场频率为  $\omega_0$ ，当磁场靠近 0 时，输出信号中频率为  $\omega_0$  的分量为零，但是频率为  $2\omega_0$  的分量不为零。因此要使得磁屏蔽桶内的剩磁为零，需要调节三个线圈的电流，使得输出信号为单一的倍频信号，即频率为  $\omega_0$  的分量为零、频率为  $2\omega_0$  的分量不为零，可以初步判断背景磁场接近 0（输出信号的波形如图 19 所示）。

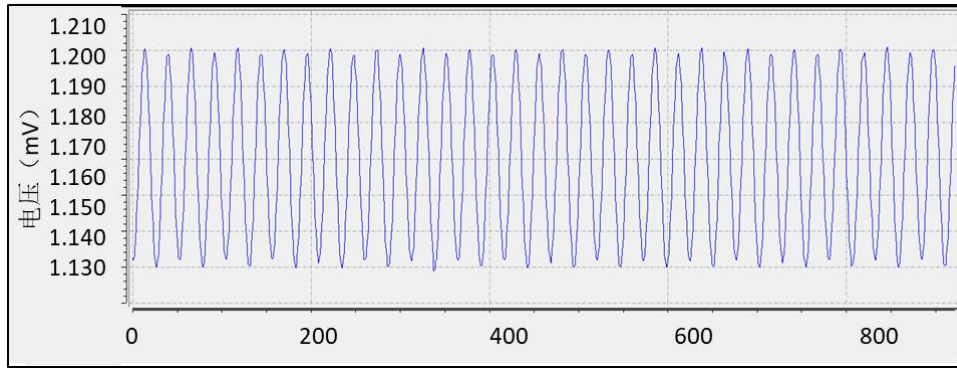


图 19 磁场调零信号图

#### 5.4 磁场标定及测量

从上文原理介绍可以知道，实验中的磁力仪是相对磁力仪，测量磁场的相对值而不是绝对值，因此需要对磁场线性区域进行定标。

根据选题中要求，我们采用一对亥姆霍兹标准线圈产生一个可控标准磁场，使用标准线圈，对磁力仪进行一个已知磁场强度 $B_s$ 台阶的激励，图 12 为原始信号，可见台阶信号被参考信号调制，通过锁相放大器解调信号，测量此台阶强度为 $V_d$ ，因此磁力仪的测量转化系数为

$k = \frac{B_s}{V_d}$ ，通过校准后真实测量值应为 $B_0 = kV_d$ 。

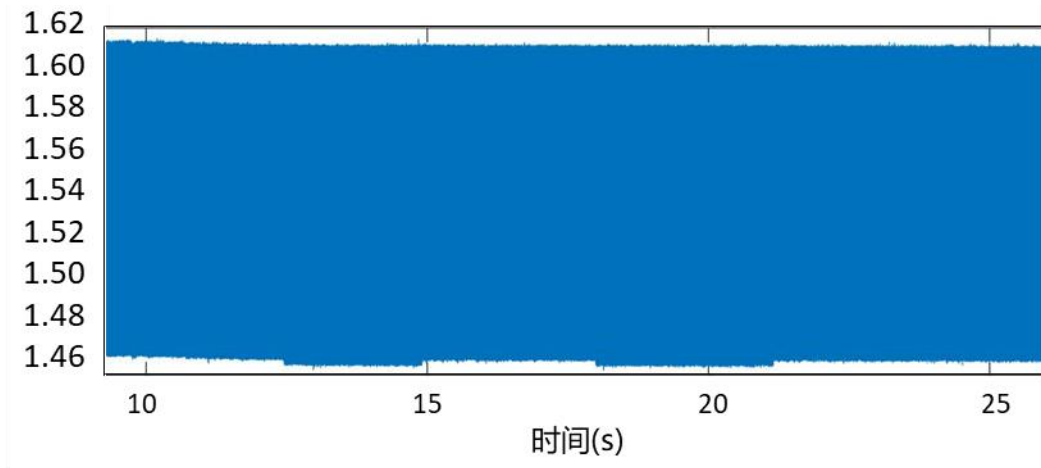


图 20 磁场原始信号



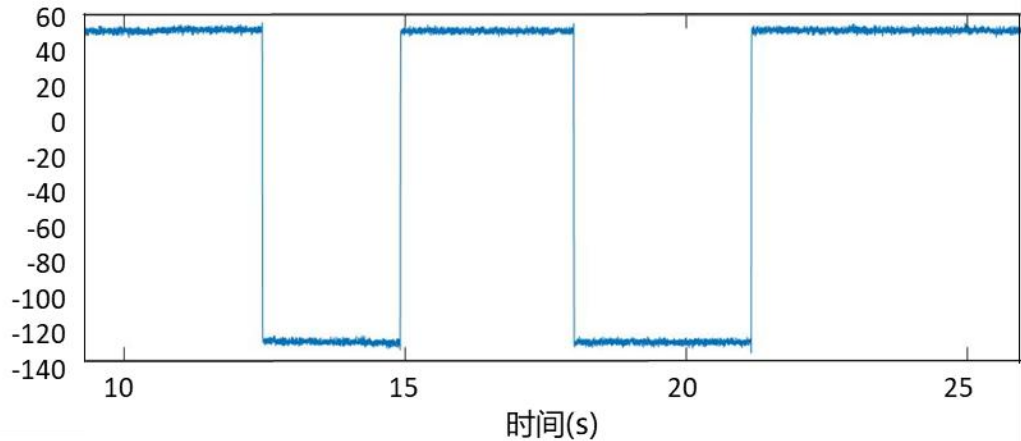


图 21 磁场解调后信号

磁场标定后，把待测磁场装入磁屏蔽桶中，观察解调信号。将光电二极管（PD）测量的电信号输入到锁相放大器待测信号输入通道，通过放大器放大微弱的电信号，再进行初步的滤波；将射频信号输入到锁相放大器的参考信号通道，再通过移相器移动相位。乘法器输出的信号通过低通滤波器，过滤掉高频信号，再进行放大，即可输出与磁场强度相关的信号。根据标定磁场所提供的数据，即可求出目标磁场的表征数据。

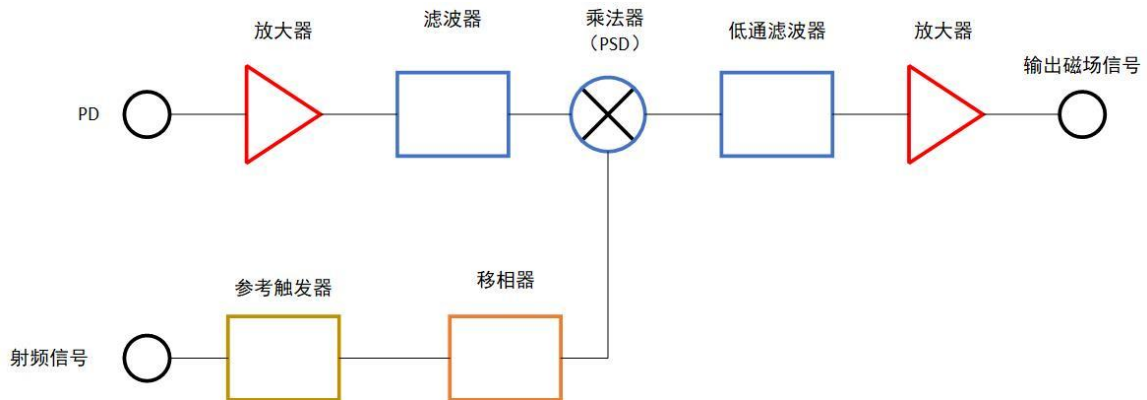


图 22 测量磁场过程

在最终的磁场测量环节中，本小组首先对标准线圈模拟的心磁信号进行了测量。将标准线圈放入小型磁屏蔽桶中，控制流经线圈的电流大小与方向，使其产生的磁场符合心磁信号的变化特征。经由前述操作，便能测量得到模拟心磁信号。

在测得线圈模拟的心磁信号后，为将实验成果推广到实际应用中，本小组将进一步着手进行人体心磁的测量。人体心磁测量是本实验所搭建装置的一个实际应用场景。在此场景中，实验志愿者进入大型磁屏蔽桶进行心磁测量实验。经由前述操作，最终测量得到人体心磁信号。

## 六、实验数据处理

### 6.1亥姆霍兹线圈磁场测量

为描述亥姆霍兹线圈的磁场表征，我们对标准线圈施加电流，使用中国计量院标定准确的磁力仪测量线圈中心的磁场大小。同时根据毕奥-萨伐尔定律，计算得到线圈中心磁场的理论值。根据所得结果绘制电流与中心均匀区域磁场大小的关系图线，最终结果如表 2 所示：

表格 2 不同电流对应的磁场理论/真实值

电流 $\mu A$	理论值 $pT$	测量值 $pT$	电流 $\mu A$	理论值 $pT$	测量值 $pT$
1	90	93.6	11	990	1029.6
2	180	187.2	12	1080	1123.2
3	270	280.9	13	1170	1216.9
4	360	374.4	14	1260	1310.5
5	450	467.9	15	1350	1404
6	540	561.5	16	1440	1497.5
7	630	655.3	17	1530	1591.2
8	720	748.7	18	1620	1684.7
9	810	842.3	19	1710	1778.5
10	900	936	20	1800	1872.1

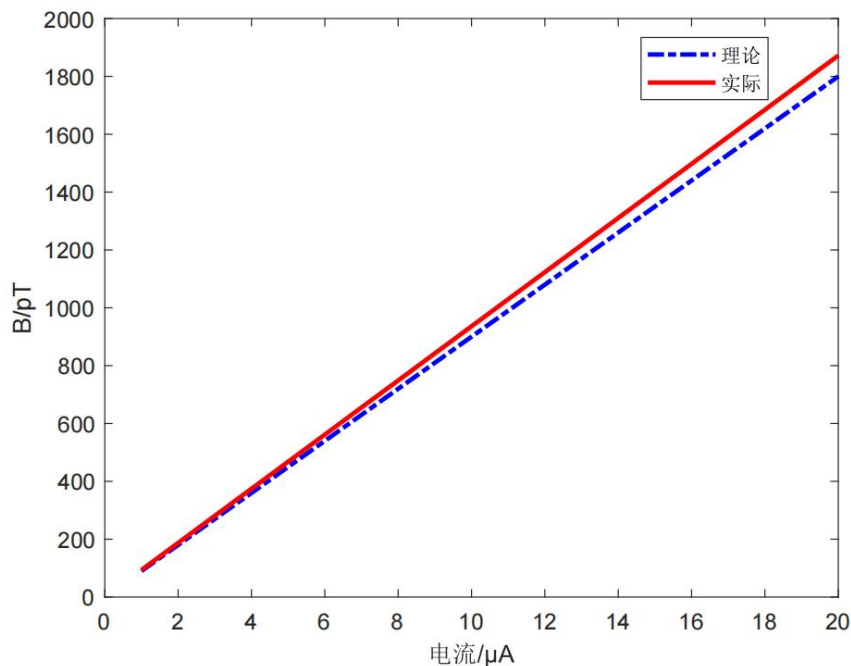


图 23 仿真的波形

通过绘制图表，比较理论值和实际值的大小可知，在弱磁场条件下，磁力仪测量值与实际值的误差在可接受范围内。为得到线圈电流和中心磁场的准确比例系数，需要对上述数据进行处理。

根据公式 $B = kI$ ，实际值的电磁转换系数 $k$ 表示为：

$$k = \bar{k} \pm \Delta \quad (26)$$

其中 $\bar{k}$ 的值可根据逐差法求得，具体公式如下所示：

$$\begin{aligned} \Delta \overline{B}_{10} = \frac{1}{10} [(B_{20} - B_{10}) + (B_{19} - B_9) + (B_{18} - B_8) + (B_{17} - B_7) + (B_{16} - B_6) \\ + (B_{15} - B_5) + (B_{14} - B_4) + (B_{13} - B_3) + (B_{12} - B_2) \\ + (B_{11} - B_1)] \end{aligned} \quad (27)$$

$$\bar{k} = \frac{\Delta \overline{B}_{10}}{5I} \quad (28)$$

总不确定度由 A 类不确定度和 B 类不确定度构成，可由如下公式进行计算：

$$\Delta = \sqrt{\Delta_B^2 + \Delta_A^2} \quad (29)$$

通过查阅相关资料，本实验装置的所使用电流源的 A 类不确定度为 $\Delta_A = 1 \times 10^{-7} \mu A$ 。

标准偏差计算公式：

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (30)$$

联立公式(26)(27)(28)(29)(30)，最终计算得到电磁转换系数 $k=93.60 \pm 0.01 pT/\mu A$ 。

在得到电流与线圈中心磁场的关系系数后，便能通过控制电流大小精确产生所需的磁场。

根据计算得到的系数 $k$ ，我们对线圈施加了模拟心磁波形信号，最终得到的结果如下：

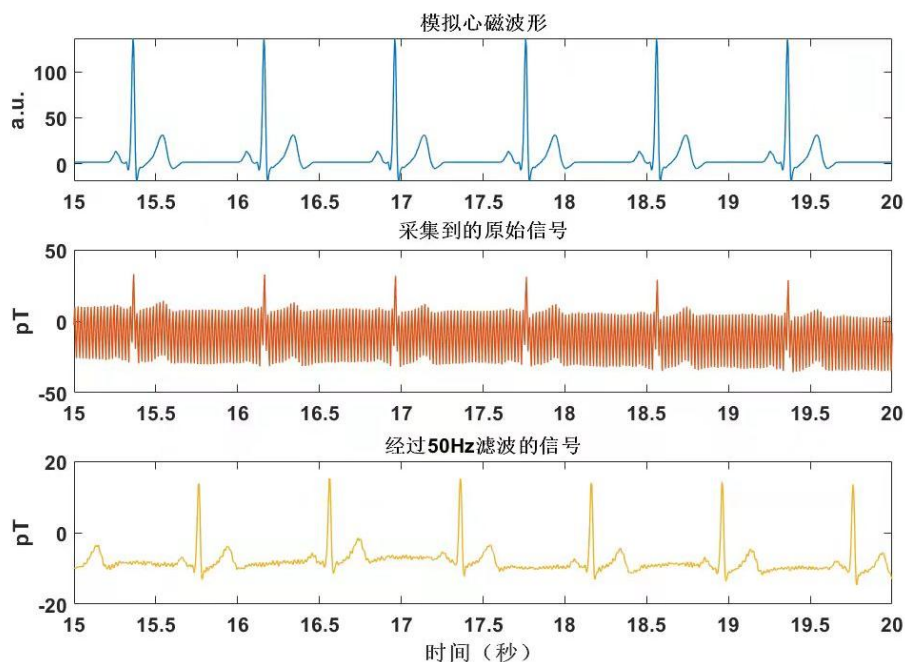


图 24 仿真波形

数字电流源产生模拟心磁波形的电流驱动信号如 24-1 所示。在图 24-2 中，该电流驱动信号通过标准线圈产生相应模拟心磁信号的磁场。利用本小组搭建磁传感器，探测得到了该磁场的信号。由于环境噪声和本身系统噪声，得到的磁场信号有叠加噪声，影响最大的是 50Hz 市电干扰，再将得到的磁场信号经过 50Hz 滤波，滤波后的信号即为图 24-3 的信号。

## 6.2 心磁测量

为了实现人体的心磁测量，必须提供一个大型的磁屏蔽环境，本实验中采用长 2 米，内径 1.2 米的磁屏蔽桶。受测者平躺在屏蔽筒中无磁测试床上进行测量。

SERF 原子磁力仪能够实现实时心磁测量，实验中将磁力仪置于测试自愿者胸口，图 15 为心磁测量信号的时域信号，原始信号中有较强的 50Hz 公频噪声，将原始信号经 50Hz 滤波后得到高信噪比的心磁信号。心磁信号的 P, Q, R, S, T 波均可清晰分辨。心磁信号峰峰值大约为 50~60pT，细节波形如 P 波，幅值仅为 5pT 左右，因此心磁信号非常微弱，而本实验中磁力仪灵敏度充分满足此测量需求。

### 6.2.1 50赫兹滤波器滤波过程

(1) 基本原理：

选择使用比较简单、容易实现，且滤波效果较好的梳状滤波器对 50Hz 市电进行滤波<sup>[13]</sup>。

选择其单位抽样响应  $h(n)$  全为 1，即：

$$h(n) = \begin{cases} 1 & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0 & n \leq 0, n \geq N \end{cases} \quad \# \quad (31)$$

式中 $N$ 为梳状滤波器的节数。

因此梳状滤波器的系统函数为：

$$H(z) = \sum_{n=0}^{N-1} z^{-n} = \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} = H_1(z)H_2(z) \quad (32)$$

式中 $H_1(z) = 1 - z^{-N}$ ,  $H_2(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}}$ 。

$H_1(z)$ 是由 $N$ 节延时单元组成的梳状滤波器，系统函数 $H_1(z)$ 的频率响应为：

$$H_1(e^{j\omega}) = 2je^{-j\frac{\omega N}{2}} \sin\left(\frac{\omega N}{2}\right) \quad (33)$$

子系统 $H_1(z)$ 幅值响应由许多按照一定频率间隔相同的通带和阻带组成，能够允许特定频率信号通过而阻止另一些特定频率信号通过，从而实现滤波的效果。

## (2) 滤波器设计

系统函数 $H(z)$ 由梳状滤波器 $H_1(z)$ 和 $H_2(z)$ 表示的一阶IIR“谐振子”级联组成，其频率响应为：

$$H(e^{j\omega}) = e^{-j\frac{\omega(N-1)}{2}} \frac{\sin\frac{\omega N}{2}}{\sin\frac{\omega}{2}} \quad (34)$$

式中 $\omega = 2\pi f/f_s$ ,  $f_s$ 为抽样频率。

梳状滤波器是具有线性相位的低通滤波器，为使其直流增益为1，在 $H(z)$ 中增加增益因子，其归一化后幅频响应为：

$$|H(e^{j\omega})| = \left| \frac{\sin\frac{\omega N}{2}}{\sin\frac{\omega}{2}} \right| \quad (35)$$

梳状滤波器在频率 $\omega_k = 2\pi k/N, k = 0, 1, 2, \dots, N-1$ 处幅值为0，能很好的抑制这些成分的信号。

为满足心磁信号去噪的要求，将(2)式修正为：

$$H(z) = \left[ \frac{1 - z^{-N}}{1 - z^{-1}} \right]^k \quad (36)$$

其频率响应为：



$$|H(e^{j\omega})| = \left| \frac{\sin \frac{\omega N}{2}}{\sin \frac{\omega}{2}} \right|^k \quad \# \quad (37)$$

对滤波效果进行实际测试，从下图中可以看出，原始信号中有较强的 50Hz 市电噪声，将原始信号经 50Hz 滤波后得到高信噪比的心磁信号。



图 25 心磁测量实验图

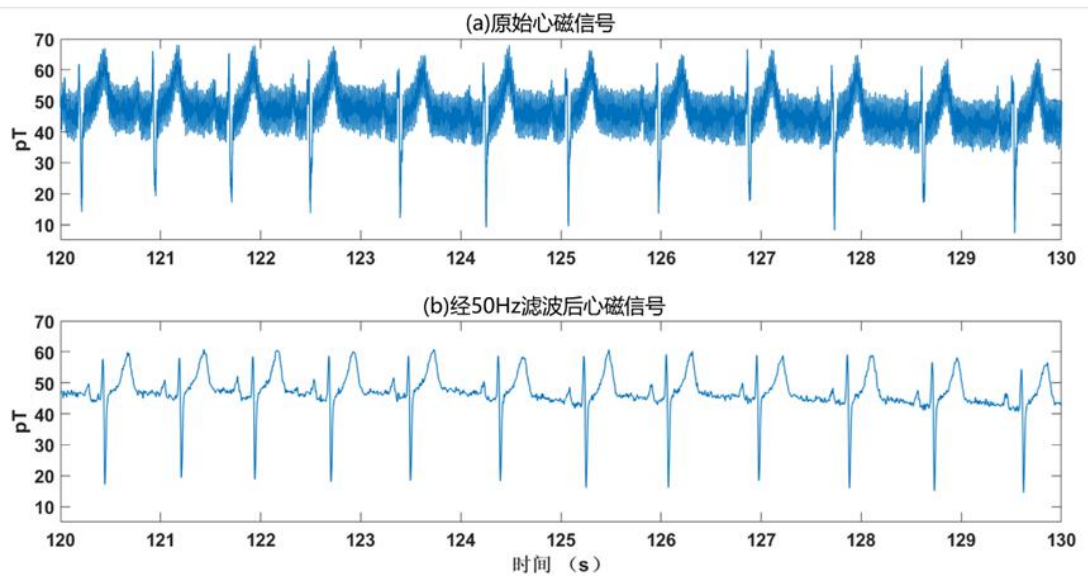


图 26 心磁信号

### 6.2.2 心磁信号与PQRST波

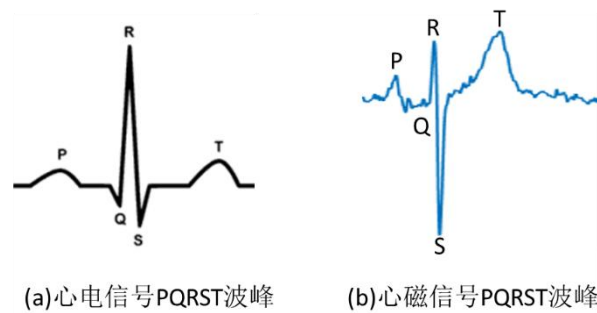


图 27 心电与心磁信号对比

心磁的磁感应强度-时间曲线波形基本类似心电图，可以类比找到它的 PQRST 波峰，其中 QRS 波幅度最大，成人此波幅度约为  $50\sim 100\text{pT}$ ; P 波及 T 波幅度较小，在  $10\text{pT}$  量级<sup>[14]</sup>。为了实现人体的心磁测量，必须提供一个大型的磁屏蔽环境，本实验中采用长 2m，内径 1.2 米的磁屏蔽桶。受测者平躺在屏蔽筒中无磁测试床上进行测量。

SERF 原子磁力仪能够实现实时心磁测量，实验中将磁力仪置于测试自愿者心尖搏动区约 1cm 处，志愿者保持放松静止状态，整个测量时间持续约 150s，图 16(a) 为心磁测量信号的时域信号，原始信号中有较强的 50Hz 公频噪声，将原始信号经 50Hz 滤波后得到高信噪比的心磁信号，如图 16(b) 所示。心磁信号的 P, Q, R, S, T 波均可清晰分辨。心磁信号 QRS 峰值大约为  $50\sim 60\text{pT}$ ，细节波形如 P 波，幅值仅为  $5\text{pT}$  左右，因此心磁信号非常微弱，而本实验中磁力仪灵敏度充分满足此测量需求。相关研究表明，心磁波形 P 波的波峰与 QRS 波的主波峰之间的时间差约为 0.15s, T 波的波峰与 QRS 波的主波峰之间的时间差约为 0.3s<sup>[15]</sup>。实验测得心磁信号满足相关条件。

## 七、误差与性能评估

### 7.1 测量动态范围与误差

线性度反映了一组数据的线性的程度，线性度越小说明该区间内的数据的更加趋近直线的变化，根据查阅的相关资料可知，线性度等于最大偏离值除以最大量程，公式如下：

$$\delta = \frac{\max\{y - kx - b\}}{y_{\max}} \quad (38)$$

其中 k 是根据数据拟合（本实验采用了最小二乘法拟合曲线）出来的直线的斜率，b 表示该直线的在 y 轴的截距， $\delta$  表示线性度， $y_{\max}$  表示最大的 y 值。通过线圈对磁力仪进行磁场扫描，得到外磁场和磁力仪测量磁场之间的关系，我们对上述的数据进行了区分，由于要使得磁场在线性区内，所以在实际测量时，主要选取原点附近的区间，为了选取合适的区间，

本实验选取了原点附近的对称区间来用线性度以及拟合优度来评估该区间的好坏。

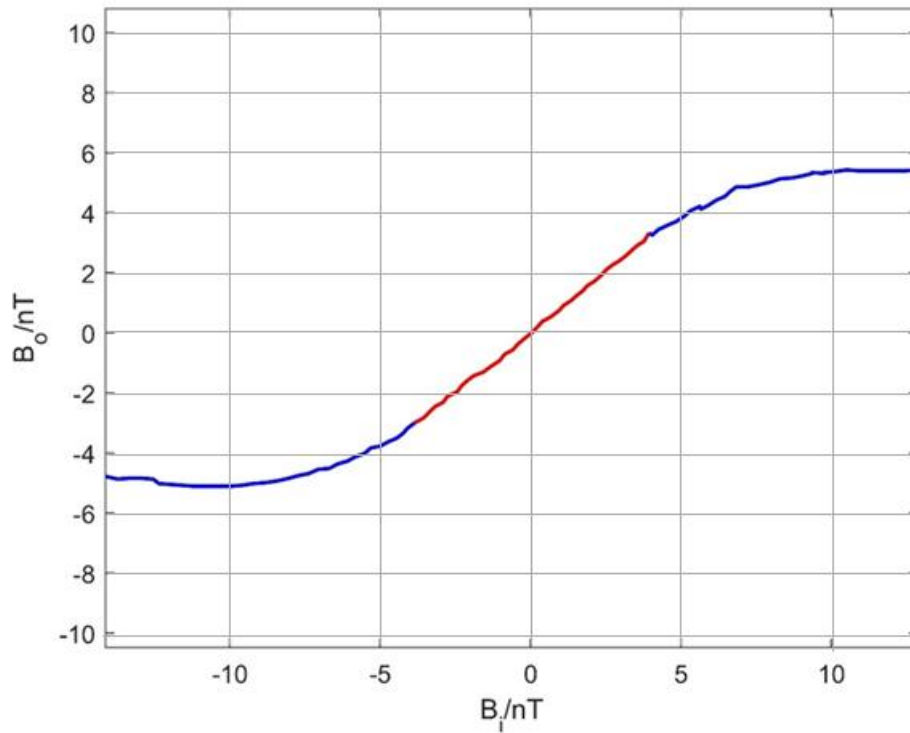


图 28 磁感应强度线性区域测量

图 28 为外磁场和磁力仪测量磁场之间的关系。对上述的小区间进行线性回归，计算不同区间的拟合优度、线性度，结果如下表所示：

表格 3 每一个区间的线性度、拟合优度

区间/(nT)	拟合优度	线性度
[-1, 1]	99.092%	0.0165
[-2, 2]	98.980%	0.0546
[-3, 3]	98.745%	0.0671
[-4, 4]	98.770%	0.0841
[-5, 5]	98.770%	0.0841

分析上表可知磁场的拟合精度很高，但随着测量区间的增大，拟合优度呈现微幅下降趋势。说明区间越大，偏离程度和数据误差都会随之增大。

可以看到在 $-3\text{nT} \sim 3\text{nT}$ 小范围内，磁力仪响应有较好的线性度，以及拟合优度，此为 SERF 原子磁力仪的测量范围。而超过此范围，线性度数值较大，出现非线性响应，因此在测量中测磁场大小必须在线性区内，否则将因为非线性响应出现误差。

## 7.2性能评估

测试零场下的信号噪声功率谱，可以用作评价磁力仪的探测灵敏度，本实验中实现了 $\sim 90 fT/\sqrt{Hz}$ （30Hz~40Hz平均值）的灵敏度水平。该灵敏度下可以实现对心脏生物磁场的准确测量。

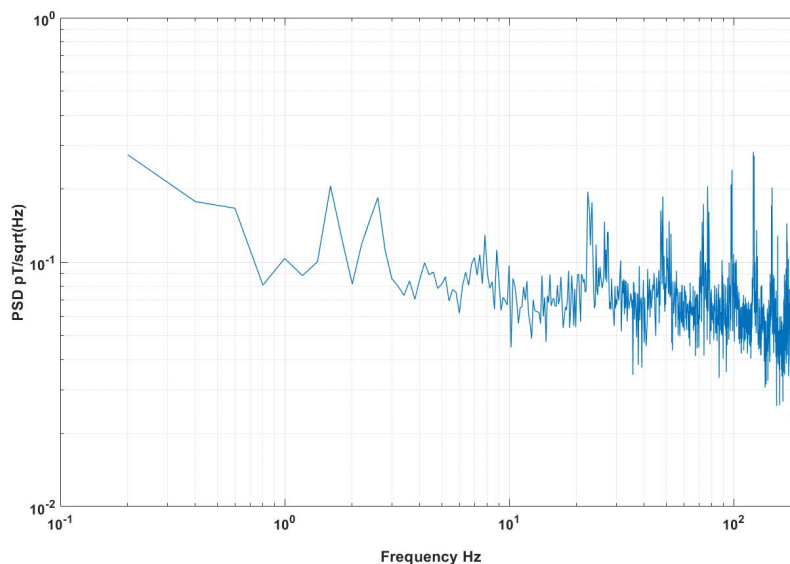


图 29 信号噪声功率谱密度

### 7.3 其他评价指标

在实验室环境下进行测量，当光路、温度条件、零场环境调节完毕后，能够实时测得目标磁场的大小并绘制图像

对于实验成本，具体如下所示：

表格 4 实验成本统计表

项目	成本/ 元
测量成本	5000
组装和制作成本	15070
其他成本	10040
总计	30110

由此可见，本小组的实验成本是可以接受的，且测量速度快，自动性强，很多步骤与调控均由软件与算法控制不需要过多的人工干预。

## 八、实验总结与展望

本小组选题为“磁场”，目的是搭建能够产生磁场的实验装置，并对磁场进行测量表征；

同时，制作一个利用磁场特性的实际应用装置或实验研究装置。传统的磁场测量方法存在精度低、不稳定等问题，且随着地质探测、资源探测和生物医学等诸多领域的高速发展，高精度磁场测量的需求日渐迫切，而国内对高精度磁场测量的探索仍然处于初步研究阶段，往往只能依靠国外的超导量子干涉仪等器械进行弱磁探测。为了获得更高的测量精度，本文基于量子理论，富有创新性地设计了基于 SERF 原子磁力仪的弱磁测量方法。

对于实验原理，原子磁力仪的原理主要是通过圆偏振光泵浦将外层电子极化，将光子的角动量传递给电子，从而实现宏观极化。在外磁场作用下，宏观极化会产生拉莫尔进动，导致光强随外磁场变化，通过测量变化的光强，利用锁相放大器解调，进而得到磁场的特征。实验步骤主要步骤方面，首先调节激光器波长，使之出射能使铷原子能级发生跃迁的激光，其次调节激光光强和偏振态，使入射气室的光为圆偏光，然后在气室外添加射频磁场，便于提取磁场信号，气室需在磁屏蔽筒内满足高温和零场条件，之后用光电探测器接收透射光，并用锁相放大器完成信号的解调，在数据采集方面已初步实现了计算机智能控制与数据的自动化采集

本小组利用上述基于 SERF 原子磁力仪的心测量方法进行实验，并通过分析装置的灵敏度可达到 $\sim 90 fT/\sqrt{Hz}$ ，本实验方案的精确度远远超过传统的弱磁测量方法，且能够高效满足心磁测量。

由于脑科学是全球战略研究方向，欧盟、美国、日本等国家对脑计划都有不小投入，中国更甚，因此我们希望在科技前沿领域占据优势地位。

表格 5 各国脑计划投入金额

国家	欧盟	美国	日本	中国
投入金额	>10 亿美元	>60 亿美元	>15 亿美元	~500 亿人名币

脑磁测量可用于癫痫、肿瘤的术前定位，以及用于脑认知、脑科学的研究，同时脑机接口也是目前热门的研究方向。因此心磁、脑磁等生物磁场的研究对临床医学以及科技发展具有非常重要的意义。为此，对本实验的展望，我们可以从以下角度入手：

- 1、进一步将实验装置小型化。
- 2、拓宽原子磁力仪的应用范围，如将实验装置的功能由心磁测量推广到脑磁测量等领域。
- 3、细化心磁测量的实验结果，建立依靠测得磁场推测器官健康状况的评价体系
- 4、提高激光的频率、功率稳定性，提高原子气室的温度稳定性，降低电路之间的串扰等，



从而进一步提高仪器的灵敏度。

### 参考文献

- [1] M. E. Limes, D. Sheng, and M. V. Romalis. He 3-Xe 129 Comagnetometry using Rb 87 Detection and Decoupling [J]. Physical Review Letters, 2018, 120(3): 033401.
- [2] M. J. S. Johnston, Y. Sasai, G. D. Egbert, R. J. Mueller, 张素琴. 期待很久的 2004 年 9 月 28 日 M6.0 级帕克菲尔德地震的震磁效应[J]. 世界地震译丛, 2006(06):14-31.
- [3] 白春华, 徐文耀, 康国发. 地球主磁场模型[J]. 地球物理学进展, 2008(04):1045-1057.
- [4] B. S. P. Sarma, B. K. Verma, S. V. Satyanarayana. Magnetic mapping of Majhgawan diamond pipe of central India[J]. Society of Exploration Geophysicists, 2012, 64(6):
- [5] Minerals; Reports from Uppsala University Advance Knowledge in Minerals [Magnetic mineralogy and rock magnetic properties of silicate and carbonatite rocks from Oldoinyo Lengai volcano (Tanzania)] [J]. Chemicals & Chemistry, 2018:
- [6] Hector Carreon. Fretting damage assessment in Ti-6Al-4V by magnetic sensing[J]. Wear, 2007, 265(1):
- [7] O. Životský, K. Postava, L. Kraus, Y. Jirásková, J. Juraszek, J. Teillet, K. Barčová, P. Švec, D. Janičkovič, J. Pištora. Surface and bulk magnetic properties of as-quenched FeNbB ribbons[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 320(8):
- [8] 王晓飞, 孙献平, 赵修超, 朱茂华, 叶朝辉, 周欣. 超灵敏原子磁力计在生物磁应用中的研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(02):164-176.
- [9] S. Fujimoto, K. Kazami, Y. Takada, T. Yoshida, H. Ogata, H. Kado. Cooling of SQUIDs using a Gifford-McMahon cryocooler containing magnetic regenerative material to measure biomagnetism[J]. Cryogenics, 1995, 35(2):
- [10] Masatoshi Kuroda, Shinsuke Yamanaka, Yoshihiro Isobe. Detection of plastic deformation in low carbon steel by SQUID magnetometer using statistical techniques[J]. NDT and E International, 2004, 38(1):
- [11] A. Weis, R. Wynands. Laser-based precision magnetometry in fundamental and applied research[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(3-5):
- [12] Georg Bison, Robert Wynands, and Antoine Weis. Optimization and performance of an optical

cardiomagnetometer [J]. J Opt Soc Am B, 2005, 22(1): 77-87.

[13] 陈天华, 陈茜. 一种消除心电信号噪声的数字滤波方法[J]. 世界科学技术 2005, (01): 123-6+44.

[14] Tavarozzi Isabella, Comani Silvia, Del Gratta Cosimo, Di Luzio Silvano, Romani Gian Luca, Gallina Sabina, Zimarino Marco, Brisinda Donatella, Fenici Riccardo, De Caterina Raffaele. Magnetocardiography: current status and perspectives. Part II: Clinical applications. [J]. Italian heart journal : official journal of the Italian Federation of Cardiology, 2002, 3(3):

[15] S. Yabukami, K. Kato, Y. Ohtomo, T. Ozawa, K. I. Arai. A thin film magnetic field sensor of sub-pT resolution and magnetocardiogram (MCG) measurement at room temperature[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2008, 321(7):

[16] 杜鹏程. 研制用于探测脑磁信号的超高灵敏度原子磁强计[D]. 中国科学院大学(中国科学院物理研究所), 2019.

# 霓虹再现实验演示仪

参赛者：鲍玺文 张祖婕 程凌霄 陈宣浩 丁烨

（浙江海洋大学信息工程学院，舟山 316000）

指导老师：王洁，尹会听

**摘要：**虹与霓是美丽的自然现象，一直以来被赋予美好的人文内涵，自古以来对于虹与霓的观测研究以及遐想不乏成文的记载，相应的科学理论也较为完备。本作品从理论和试验两个角度对虹与霓进行再现，从“二维”、“三维”“实景”三个维度层次化地解析这两个角度，通本作品实验现象明显，结果与理论相符合，达到了预期的效果。

**关键字：**霓虹、多角度、层次化、再现

## 一、设计理念

“虹与霓设计与再现”，小组成员讨论认为再现应该是多角度的，应包括理论再现和实景再现。霓虹之美应包括其理论美和实景美，均应再现出来。在选好角度之后，小组进行分层次理论推演和装置的搭建。本作品及其理论分为二维模拟、三维模拟、实景再现三部分，进行由点到面的再现。

在理论的推演时，我们发现各部分分别与初中、高中和大学的相关知识联系紧密。于是，在搭建装置的程中，尽力将各学习阶段的知识点体现出来。最终作品的设计要求是装置部分现象清晰、操作简洁、造价实惠，理论部分推理严谨、体系完备。在搭建完装置之后，尝试探究霓虹原理的实际应用。

## 二、研究背景

### 1. 历史上对于虹霓现象的认识

“两岸绝壁一线天，瀑布彩虹舞山涧。”在中国神话中，女娲炼五色石补天，彩虹即五色石发出的彩光。在西方社会，亚里士多德是第一个认真研究彩虹的人。他注意到，彩虹只会出现在夏季的早晨和傍晚，而不会出现在阳光直射的正午。14世纪初，欧洲有人提出彩虹是由水滴对阳光的折射及反射而形成的。

1637年，著名的数学家笛卡尔用玻璃球注水进行实验，得出水对光的折射指数，进而用

具体的数学数据证明彩虹是因为光在水滴内的折射、反射造成的。后来，物理学家牛顿用三棱镜把太阳光散射成彩色光带，彩虹形成的基本原理才终于被揭示出来。彩虹就像有魔力一样，每当“七彩拱圆”挂在半空时，似乎整个世界静止了，让人觉得一切都那么美好！

## 2. 中学阶段的教学需求

虹与霓是美丽的自然现象，知识点和美丽的图片频频出现在中学教材和读物中。在当下学校教育中，为开拓学生的眼界，提高学生的综合能力，实践型课堂成为教学改革和发展的一种趋势，并且被寄予很高的期望。但现实是很多学校课堂演示设备很少，有的甚至是空白，远远达不到教学发展的需要。面对这样现状，本项目希望能够搭建出一套霓虹再现装置，可以将挂在天空中的彩虹搬上课堂，可以分析和展现于三尺讲台的“方寸之间”，并伴有相关的理论剖析。

### 三、 装置介绍：

小组制作的“霓虹再现实验演示仪”，由二维到三维到实物层次化实验演示，考虑了各级教学（尤其是中学教学）的内容和需求。本装置可分为三个部分：二维模拟部分、三维模拟部分、实景再现部分。

#### 1. 二维模拟部分

本部分由激光笔、滑轨组、培养皿、光屏等构成，如图 1 所示，用来模拟二维理想平面的成虹和成霓光路。

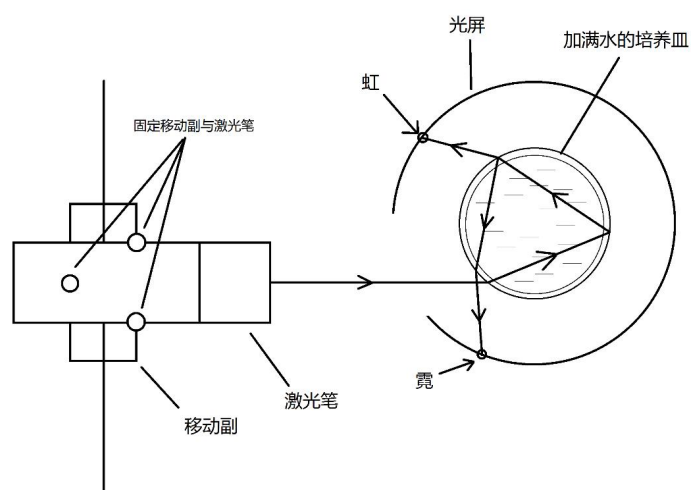


图 1

#### 2. 三维模拟部分

本部分由聚光手电、平面镜、主侧光屏、玻璃球、滑轨组等构成，如图 2 所示。用来模拟空间内平行光入射单个小水珠时，形成的成霓和成虹光线，是二维模拟的递进实验。

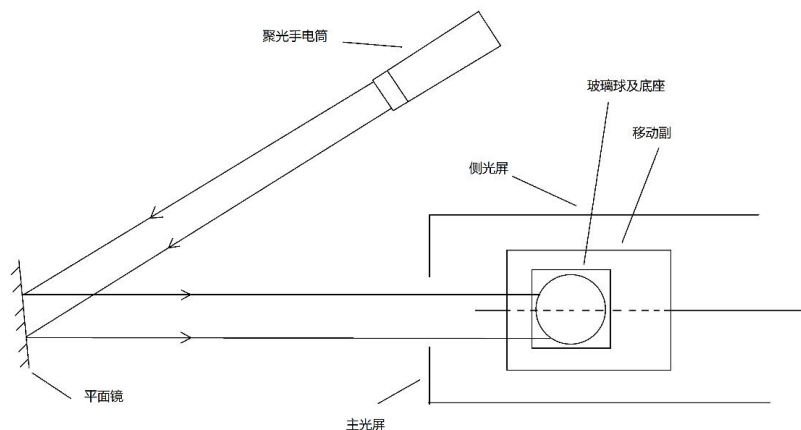


图 2

### 3. 实景再现部分

本部分由聚光手电、平面镜、暗箱、水循环系统等构成，如图 3 所示。用来模拟霓虹发生的实际情况。是三维模拟的递进实验。

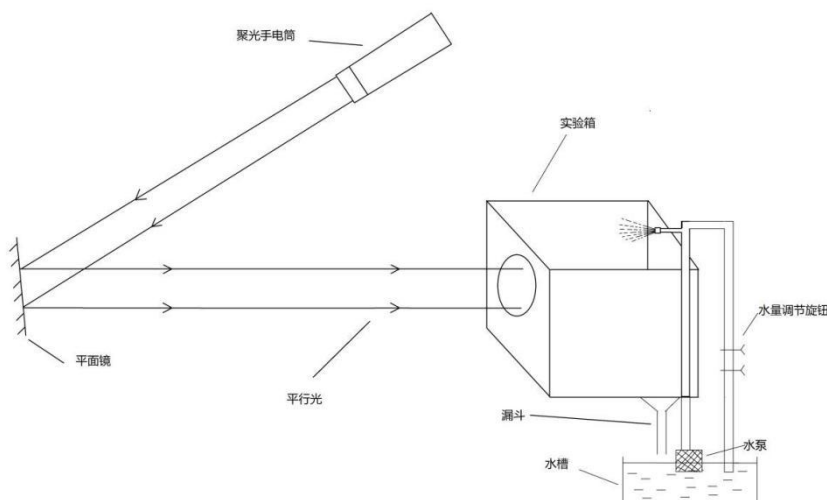


图 3

## 四、 实验原理：

### 1. 虹与霓现象的定性解释

#### 1.1 二维情况的定性解释

为了更好的说明虹与霓形成的原因，首先对平行光入射一个二维的圆形介质进行分析。当平行光射入圆形介质中时，发生第一次折射。由于构成白光的各种单色光的折射率不同。因此，光线在圆形介质中会产生色散现象（为了更直观的描述光路，在图片中

只展示折射率最小的红光和折射率最大的紫光，其他颜色的光路将介于两者之间）。这些折射光在圆形介质内继续传播，遇到介质的另一界面时一部分被反射回来，当出来时再一次发生折射回到空气中。这样，一部分自然光在介质中进行了两次折射和一次反射，就有可能形成虹，如图4所示；而如果一部分自然光在介质中进行了两次折射和两次反射，就有可能形成霓，如图5所示。

我们将入射光线与出射光线之间的夹角称为偏折角  $\alpha$ ，如图4、5所示。

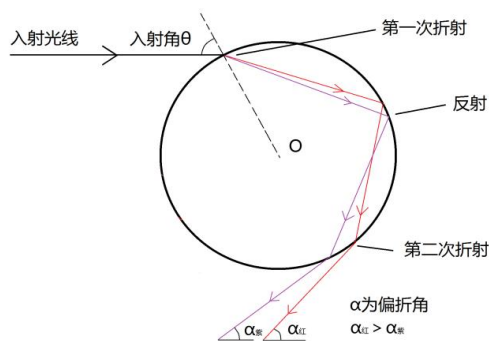


图 4

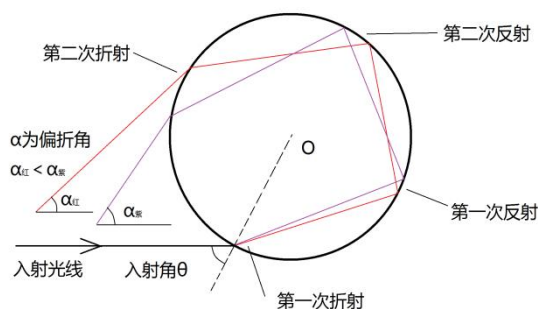


图 5

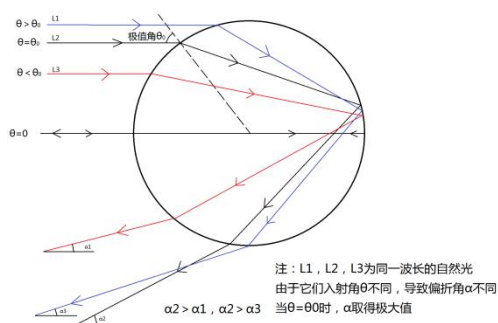


图6

对单色光，通过计算可以得到在不同入射角中，存在一个极值角  $\theta_0$ ，对虹来说，在入射

角从0度增大到90度的过程中，偏折角先逐渐增大，在入射角为极值角  $\theta_0$ 时达到最大，然后逐渐减小，如图6所示，霓则正好相反。入射角在极值角附近的偏折角变化率最小，有大量光线集中在这个角度范围内，因此，极值角附近的光线就是最终形成虹或霓的光线，我们将这部分光线称为成虹光线和成霓光线。

### 1.2 三维情况的定性解释

在三维情况中，我们可以将其视为二维平面圆形介质的拓展。将入射光L与球型介质的球心做一个平面，即可得到二维平面的分析结果，如图7所示。



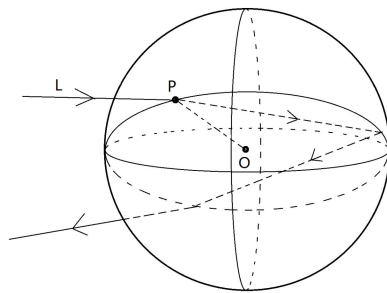


图7

以入射光线方向的球的直径为轴，成虹光线绕轴旋转一周，就形成了一个光锥，霓也是如此。对虹来说，虹的光线充满光锥内部，由于不同颜色光线在介质中的折射率不同，导致其最大偏折角也有所不同，形成光锥的角度也因此变化。其中红光光锥角度最大，橙光次之，黄光、绿光、蓝光、靛光、紫光依次减小，最终形成一个由多个光锥叠加成的彩色光锥，光锥颜色由外到内分别为红橙黄绿蓝靛紫，如图8所示。紫光光锥内部由于七种颜色光线都能到达，所以呈现白色。

而霓的光线位于光锥外部，紫光光锥的角度最大，靛光次之，蓝光、绿光、黄光、橙光、红光依次减小，最终也形成一个彩色光锥。光锥颜色由内到外分别为红橙黄绿蓝靛紫，紫光光锥外部由于七种颜色光线都能到达，所以呈现白色，与虹正好相反。

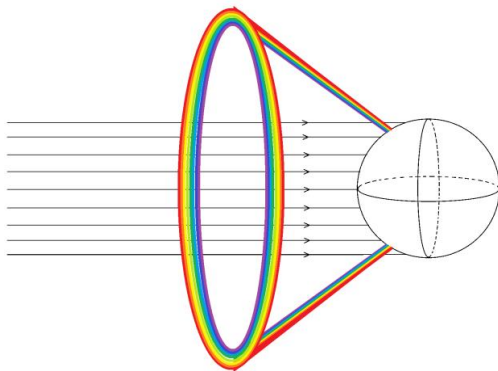


图8

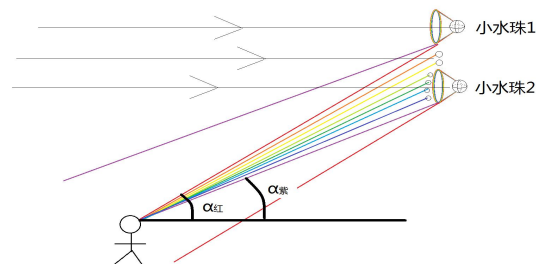


图9

### 1.3 实际情况的定性解释

实际情况中看到的虹与霓是三维部分的延伸。经过计算得到成虹光线中红光的偏折角为42.36度，紫光的偏折角为40.67度，如图9所示。当人眼的视角中心线与入射光线方向平行，那么小水珠位于人眼视角为42.36度时，小水珠发出光锥中的红光正好进入人眼。因此在人眼视角为42.36度的圆上观测到红色的圆环。小水珠位于人眼视角为40.67度时，小水珠发出光锥中的紫光正好进入人眼，因此在人眼视角为40.67度的圆上观测到紫色的圆环。同理，其他

颜色的圆环位于红色和紫色圆环之间，最终将观测到虹。

霓也是如此。在虹和霓的光锥之间因为没有光线被反射、折射到，会形成一个暗带，即亚历山大暗带。而一般情况下，因为地面的遮挡人们通常只能看到圆环的上半部分，只有在晴朗的天气，站在高山顶上或飞机舱中向下看，才能看到虹与霓的全貌，即完整圆环。

## 2. 虹与霓原理的定量分析

### 2.1 斯涅耳定律

光是一种电磁波，光的颜色是由光波的频率决定的。在我们人眼看到的范围内，红光频率最小，紫光的频率最大。光入射到不同介质的界面上会发生反射和折射，入射光和折射光位于同一个平面上，且与法线的夹角满足如下关系：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (1)$$

其中， $n_1$ 和 $n_2$ 分别是两个介质的折射率， $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 分别是入射光（或折射光）与法线的夹角，叫做入射角和折射角。这个定律被称为斯涅耳定律。虽然各种频率的光在真空中传播的速度都相同等于 $3.0 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，但是不同频率的单色光，在介质中传播时由于受到介质的作用，其折射率是不同的，如介质对红光的折射率小，对紫光的折率大。

### 2.2 虹与霓的光学原理（二维情况，介质为水）

为了更好的理解虹与霓的光学原理，我们采用了培养皿加水的方法来分析在二维情况下，光线的路径规律。为了更直观的研究，本次实验采用了绿色激光进行实验。

如图10所示，当绿色激光以入射角 $\theta$ 入射后，一般会经过折射-折射、折射-反射-折射以及折射-反射-反射-折射等路径。其中，虹的形成原因是由于折射-反射-折射的路径，霓的形成原因是由于折射-反射-反射-折射的路径。

因此，接下来重点讨论在二维情况下，折射-反射-折射以及折射-反射-反射-折射的路径的特点。

#### 2.2.1 折射-反射-折射的路径及特点

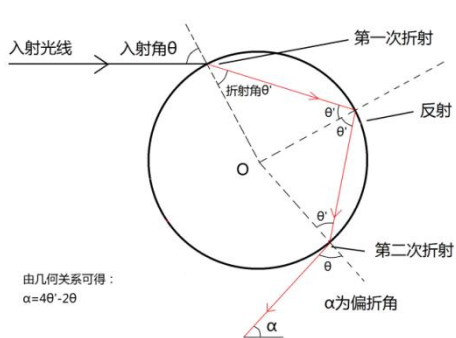


图10

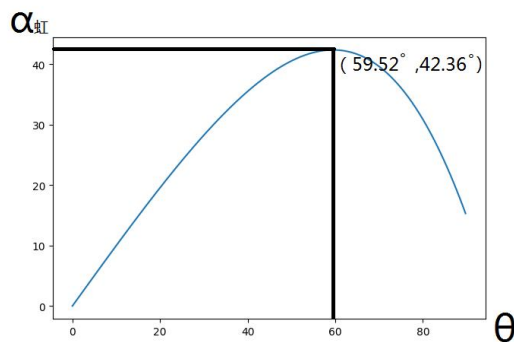


图11

我们对红光进行分析，设折射角为  $\theta'$ 。根据几何关系，得：

$$\alpha_{\text{虹}} = 4\theta' - 2\theta \quad (2)$$

根据斯涅耳定律，得：

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{\sin\theta}{n}\right) \quad (3)$$

根据公式 (2)、(3)，再由红光在水中的折射率  $n_{\text{红}} = 1.3311$ 。可以绘制  $\alpha_{\text{虹}}$  与  $\theta$  的函数图象如图11所示。

从函数图中我们可以看到，当光在入射角  $\theta$  增大时，偏折角  $\alpha_{\text{虹}}$  先增大后减小。

在红光入射角  $\theta$  为  $59.52^\circ$  时，偏折角  $\alpha_{\text{虹}}$  取到极大值  $42.36^\circ$ 。所以，当红光以  $59.52^\circ$  的入射角射入水滴的光线（该光线也称为成虹光线），其附近的其他光线从水滴射出时都接近成虹光线的偏折角。可见，大多数出射光线密集在成虹光线的出射线的方向，正是由于光线密集，人们才可以看到彩虹现象。且此时最终的折射光线和入射光线的夹角  $42.36^\circ$ ，这个角度被称为红光的“彩虹角”。我们所看到的彩虹中红色部分均来在这一角度附近。另外，由于水滴对不同色光的折射率不同，从而各色光的彩虹角略有不同。如对紫光  $n_{\text{紫}} = 1.3428$ ，可计算其彩虹角为  $40.67^\circ$ 。

除了采用计算机图像法来计算  $\alpha_{\text{虹}}$  与  $\theta$  的函数关系外，还可以使用求导的方法：

根据公式 (2)、(3)，得 
$$\frac{d\alpha}{d\theta} = 4 \frac{\cos\theta}{n \sqrt{1 - \left(\frac{\sin\theta}{n}\right)^2}} - 2 = 0$$

通过计算，得：

$$\theta = \arccos\sqrt{\frac{n^2-1}{3}} \quad (4)$$

## 2.2.2 折射-反射-反射-折射的路径的特点

当光以入射角  $\theta$  入射后，经折射-反射-反射-折射，最后射出水滴的现象称为霓。

我们对红光进行分析，折射角为  $\theta'$ 。如图12所示

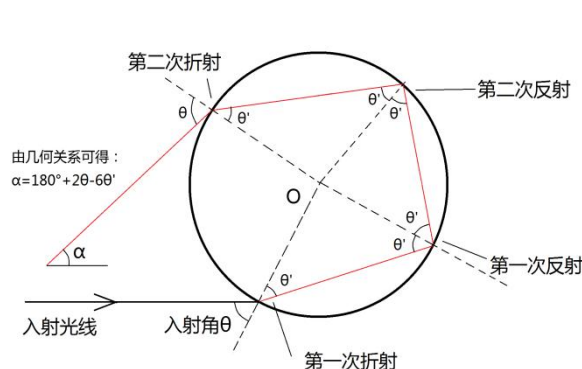


图12

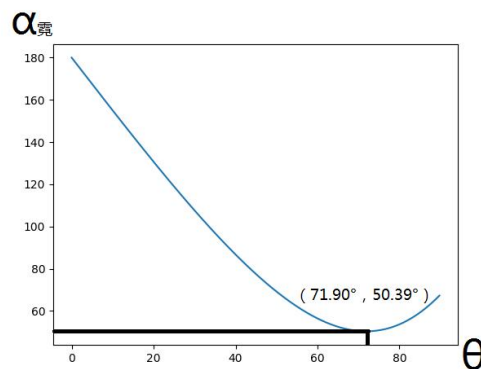


图13

我们对红光进行分析，设折射角为  $\theta'$ 。根据几何关系，得：

$$\alpha_{\text{霓}} = 180^\circ + 2\theta - 6\theta' \quad (5)$$

根据斯涅耳定律，得：

$$\theta' = \arcsin\left(\frac{\sin\theta}{n}\right) \quad (6)$$

根据公式 (5)、(6)，再由红光在水中的折射率  $n_{\text{红}} = 1.3311$ 。可以绘制  $\alpha_{\text{霓}}$  与  $\theta$  的函数图象如图13所示。

从函数图像 (图13) 中我们可以看到，当光在入射角  $\theta$  增大时，偏折角  $\alpha_{\text{霓}}$  先减小后增大，在红光入射角  $\theta$  为  $59.52^\circ$  时，偏折角  $\alpha_{\text{霓}}$  取到极小值  $50.39^\circ$ 。所以，当红光以  $59.52^\circ$  的入射角射入水滴的光线 (该光线也称为成霓光线)，其附近的其他光线从水滴射出时都接近成霓光线的偏折角。另外，由于水滴对不同色光的折射率不同，从而各色光的偏折角略有不同。如对紫光  $n_{\text{紫}} = 1.3428$ ，可计算紫光的偏折角  $\alpha_{\text{霓}}$  取到极小值  $71.53^\circ$ 。

## 2.3 虹与霓的光学原理 (三维情况，介质为玻璃)

三维情况可以说是二维情况的拓展，我们按照光线的方向和玻璃球的球心做一个平面，即可根据以上二维的规律进行总结。通过定性解释的内容，我们得到了虹与霓的彩

色光锥。在玻璃对光的折射率近似为1.5的情况下，通过计算得出虹与霓的光锥角度分别为 $22.84^\circ$  和 $86.87^\circ$ 。

此外，虹与霓之间还存在亮度差异，通过日常生活中和实验中都可以明显的看出虹的亮度比霓的亮度要高很多，所以在通常的彩虹情况下，我们只能比较明显的看到虹，而很难看到霓。我们通过如下的计算：

由于平行光照射水珠时，仅仅只有极值角附近一部分的光束能形成可观测的虹和霓。我们将入射角中的极值角对应的偏折角记为 $\alpha$ ，当入射角与极值角较为接近时，偏折角也在 $\alpha$ 附近。我们将偏折角为 $\alpha \pm 0.1^\circ$ 的范围对应的入射光线称为有效入射光线。

通过之前的计算可以得出，虹的偏折角为 $42.516^\circ$ ，对应的有效入射光线的入射角范围为 $(57.438^\circ, 61.683^\circ)$ 。霓的偏折角为 $50.101^\circ$ ，对应的有效入射光线的入射角范围为 $(70.483^\circ, 73.379^\circ)$ 。

我们令光通过一个小水珠的光通量为 $\phi$ ，

则虹的有效入射光线：

$$\begin{aligned} \phi_{\text{虹1}} &= \phi \frac{S_{\text{虹环}}}{S_{\text{总}}} = \frac{\phi}{\pi R^2} \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr = \frac{\phi}{\pi R^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \pi R^2 \sin 2\theta d\theta = \phi \left[ -\frac{\cos 2\theta}{2} \right]_{57.438^\circ}^{61.683^\circ} \\ &= 0.064665 \phi \end{aligned}$$

霓的有效入射光线：

$$\begin{aligned} \phi_{\text{霓1}} &= \phi \frac{S_{\text{霓环}}}{S_{\text{总}}} = \frac{\phi}{\pi R^2} \int_{r_1}^{r_2} 2\pi r dr = \frac{\phi}{\pi R^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \pi R^2 \sin 2\theta d\theta = \phi \left[ -\frac{\cos 2\theta}{2} \right]_{70.483^\circ}^{73.379^\circ} \\ &= 0.029795 \phi \end{aligned}$$

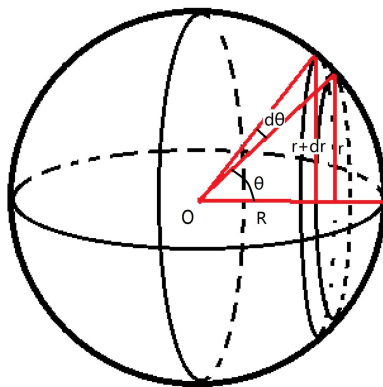


图14 积分示意图

### 2.3.1 s波与p波的规定:

对于电矢量 $E_1$ 垂直于入射面和平行于入射面的入射平面波。且反射光与折射光的振幅和相位关系并不相同,所以,有必要对这两种情况分别予以讨论。将电矢量 $E_1$ 分解为两个互相垂直的分量s波和p波。其中,s波的电矢量垂直于入射面。p波的电矢量平行于入射面。因为在自然现象中,太阳光可以近似看做平行光,同时也是自然光,所以有必要将自然光分解为s波与p波分别对反射率和透射率进行计算。

### 2.3.2 s波与p波的反射系数和透射系数

根据菲涅尔公式,

s波的反射波与入射波的振幅比称为s波的反射系数 $r_s$ :

$$r_s = \frac{A'_{1s}}{A_{1s}} = -\frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (7)$$

s波的折射波与入射波的振幅比称为s波的透射系数 $t_s$ :

$$t_s = \frac{A_{2s}}{A_{1s}} = \frac{2\sin\theta_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \quad (8)$$

p波的反射波与入射波的振幅比称为s波的反射系数 $r_p$ :

$$r_p = \frac{A'_{1p}}{A_{1p}} = \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \quad (9)$$

p波的折射波与入射波的振幅比称为s波的透射系数 $t_p$ :

$$t_p = \frac{A_{2p}}{A_{1p}} = \frac{2\sin\theta_2\sin\theta_1}{\sin(\theta_1 + \theta_2)\cos(\theta_1 - \theta_2)} \quad (10)$$

由菲涅尔公式还可以得到入射波、反射波和折射波的能量关系。R和T分别称为反射率和透射率。当光从空气中射向介质中时,令入射角为 $\theta$ ,折射角为 $\theta'$ 。可得到s波的反射率和透射率的表达式为:

$$R_s = (r_s)^2 = \left(\frac{A'_{1s}}{A_{1s}}\right)^2 = \frac{\sin^2(\theta - \theta')}{\sin^2(\theta + \theta')} \quad (11)$$

$$T_s = \frac{n\cos\theta'}{\cos\theta}(t_s)^2 = \frac{n\cos\theta'}{\cos\theta}\left(\frac{A_{2s}}{A_{1s}}\right)^2 = \frac{n\cos\theta'}{\cos\theta}\frac{4\sin^2\theta'\cos^2\theta}{\sin^2(\theta + \theta')} = \frac{\sin 2\theta\sin 2\theta'}{\sin^2(\theta + \theta')} \quad (12)$$

p波的反射率和透射率的表达式为:



$$R_p = (r_p)^2 = \left(\frac{A'_{1p}}{A_{1p}}\right)^2 = \frac{\tan^2(\theta - \theta')}{\tan^2(\theta + \theta')} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} T_p &= \frac{n \cos \theta'}{\cos \theta} (t_p)^2 = \frac{n \cos \theta'}{\cos \theta} \left(\frac{A_{2p}}{A_{1p}}\right)^2 = \frac{n \cos \theta'}{\cos \theta} \frac{4 \sin^2 \theta' \cos^2 \theta}{\sin^2(\theta + \theta') \cos^2(\theta - \theta')} \\ &= \frac{\sin 2\theta \sin 2\theta'}{\sin^2(\theta + \theta') \cos^2(\theta - \theta')} \quad (14) \end{aligned}$$

虹的光线是由光线在水中折射-反射-折射得到的。由于自然光分解为s波与p波,并且它们的能量相等,都等于自然光能量的一半,对于虹来说,  $\theta = 59.587^\circ$ , 因此:

$$\Phi_{\text{虹}2} = \frac{1}{2} \Phi_{\text{虹}1} (T_s^2 R_s + T_p^2 R_p) = 0.045767 \Phi_{\text{虹}1} = 0.0029595 \Phi$$

同样,霓的光线是由光线在水中折射-反射-反射-折射得到的,对于霓来说,

$\theta = 71.940^\circ$ , 因此:

$$\Phi_{\text{霓}2} = \frac{1}{2} \Phi_{\text{霓}1} (T_s^2 R_s^2 + T_p^2 R_p^2) = 0.019514 \Phi_{\text{霓}1} = 0.00058142 \Phi$$

所以,虹与霓的亮度比:

$$\frac{\Phi_{\text{虹}2}}{\Phi_{\text{霓}2}} = \frac{0.0029595 \Phi}{0.00058142 \Phi} = 5.0901$$

## 2.4 虹与霓的光学原理 (实际情况, 介质为水雾)

在霓虹再现实验演示仪的实景再现部分,可以较为清晰的看到虹与霓,为了更加精确的测量虹与霓的角度与亮度对比,本次实验采用索尼818相机进行拍摄,并根据像素位置和角度的对应关系、像素点的RGB值分别对虹与霓的角度与亮度进行测量。

### 3.1 虹与霓的角度测量

将索尼818相机的成像中心对准一米外的刻度尺的“0”处,并调整相机高度使其与“0”刻度一致,拍摄后,对照片进行分析,并记录10cm、20cm至100cm的位置。并得到像素位置与角度的函数关系。

### 3.2 虹与霓的亮度测量

根据像素点的RGB值,根据亮度:

$$L = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (15)$$

计算像素点的亮度。由于背景亮度可能会使虹与霓的亮度的测量值偏高。因此,在

计算实际亮度时，应该减去背景亮度再计算。在测量虹的亮度时，应该取虹以内部分的背景亮度；在测量霓的亮度时，应该取霓以外部分的背景亮度。所以：

$$L_{\text{实际}} = L_{\text{测量}} - L_{\text{背景}} \quad (16)$$

## 五、方案分析与技术创新

### 1. 二维模拟部分

#### 1.1 实验步骤

(1) 将培养皿、滑块、绿光激光笔、光屏放在底座的相应位置，并在培养皿底下放一张光路辅助纸。在培养皿内注入适量（液面与皿口差约 2mm）的水

(2) 将激光笔靠在滑块上，滑动滑块和激光笔，观察培养皿中的光路变化，并观察光屏上的光斑，分别确定虹与霓的光斑。

(3) 选取某一位置停止滑块的运动，记录此位置绿光在光屏上的光斑位置，然后更换不同颜色的激光笔，观察其光斑在该位置时与绿光光斑在光屏上的位置差异。并做记录分析。

#### 1.2 二维模拟部分的技术与创新

(1) 用载水培养皿系统演示单色光在单个二维平面内的光路，装置灵活，但会产生系统误差，所以本实验只能进行定性演示和分析。

(2) 设计“靠笔式”滑轨，方便光路的连续演示和激光笔的更换。

### 2. 三维模拟部分

#### 2.1 实验步骤

(1) 安装光具（聚光手电、平面镜、光屏、滑块底座、玻璃球、玻璃球底座）至对应位置，打开光源，微调平面镜使光线垂直入射带孔光屏，微调玻璃球在光屏圆孔周围及侧光屏上观察到对称清晰的像。

(2) 完成（1），观察到主光屏（圆孔光屏）上有圆形清晰光谱（自外而内依次为红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫），该光谱即为虹。应注意的是，这里的虹是平行光入射圆玻璃球产生的，与水珠所成虹原理相同但相关参数不同。观察到侧光屏和底座上有光带，颜色自内而外依次为（紫、靛、蓝、绿、黄、橙、红），这就是霓在光屏上所成光谱。应注意的是霓的光带看似是几条直线，但实际上是抛物线，只不过该抛线开口较大，看似成了直线。

(3) 移动滑块底座，观察到虹的圆形光谱半径增大，各色带变宽，霓的条形光谱向运动同方向移动，色带略微变宽。继续滑动底座观察到虹的光谱转移到侧光屏上，呈明显的抛物

线状，相对于霓， $a$  值较小，此时虹和霓的光谱同在侧光屏上。此时可对比观察虹和霓的差异。可观察到色带分布次序、亮度、抛物线开口大小、清晰程度等差异，对比明显。

(4) 将滑块复位，在主光屏上夹置方格纸，观察到虹的圆形光谱呈现在方格纸上。取一色带，这里以红色光带为例，在方格纸上的红色光带上取三个以上的点，做好标记，并读取此时底座贴尺上的位置数值。滑动底座一定距离，重复上述步骤。取下方格纸。将方格纸铺在较大白纸上，用尺规作图法找出所绘点所在圆的圆心，计算两圆半径差 $\Delta R$ ，并计算滑动距离 $\Delta l$ 。代入公式：

$$\theta = \arctan \frac{\Delta l}{\Delta r} \quad (17)$$

中，即可测算得到红光的大致圆锥角。同理可测算其他光线的角度。

仍以红光为例，在上述步骤中各位置取点时，同一位置时，在红色带的上下界限分别取点。仍按上述步骤实验。测得两位置四圆半径有小到大分别为 $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$ 、 $r_4$ ，滑动距离 $\Delta l$ ，代入公式：

$$\theta_{\underline{r}1} = \arctan \frac{r_3 - r_1}{\Delta l} \quad (18)$$

$$\theta_{\underline{r}2} = \arctan \frac{r_4 - r_2}{\Delta l} \quad (19)$$

即可算得红光圆锥角上下限。同理可测算其他色光的圆锥角范围。

### (5) 注意事项

在进行该部分实验时应注意光线的垂直入射，玻璃球球心与圆孔中心所成直线垂直光屏。另外，需要时（如主光屏上出现多个“虹”光谱或周围环境过亮引起的对比度过低等问题）应避免杂光的干扰。一般地，本部分实验可以在室内正常光照下进行，但调整室光昏暗，可以有效提高实验精度。

## 2.2 三维模拟部分的技术与创新

(1) 用圆玻璃球模拟单个球形水珠的霓虹现象，可以有效地放大该现象，并可以在实验室理想环境下进行观察分析和参数测量。只需要在分析时避免将玻璃球和水珠折射率混淆即可。

(2) 设计中心开圆孔（直径=玻璃球直径）的方形主光屏，可以有效地在通过所需光同时滤去多余光。安装侧光屏，使偏折角较大的霓呈现在光屏上。

(3) 使用附尺滑轨，方便直线上位置的改变和位置数据的获取。

(4) 使用平面镜反射聚光手电的光，并入射圆孔，可以在有限的纵向空间内增大光程，使入射光更加平行。

### 3. 实景再现部分

#### 3.1 实验步骤

(1) 打开聚光手电，调整光路至光线入射到暗箱圆孔内，调整室内灯光至合适（条件允许情况下，越黑暗观察效果越佳）。

(2) 在蓄水桶中加入适量水，打开水循环装置，微调喷头与止水夹至出水合适。

(3) 观察霓虹以及亚历山大暗带。条件允许情况下，可进行手机曝光，通过调整相机参数，拍摄记录清晰的现象照片。

#### 3.2 实景再现部分的技术与创新

(1) 设计暗箱，创在相对黑暗的独立环境，减少室光对实验的影响，同时可以作为水的收集装置，防止水雾外溅。

(2) 设计水循环系统，实现供水、集水、排水、蓄水的循环。

(3) 在供水管中间位置安装喷头，在喷头后水管上安装旋钮式止水夹有效控制喷头出水量。

(4) 利用手机拍照记录现象，并通过照片的像素等参数分析计算霓虹的角度与亮度。

## 六、数据处理与误差分析

### 1. 二维模拟实验

表一：二维实验偏折角记录表

入射角/ $^{\circ}$		0	10	20	30	40	50	60	70	80
虹的偏折角	理论值	0	10.01	19.61	28.33	35.60	40.67	42.51	39.82	31.08
	实际值	0	7.8	20.4	29.4	34.4	39.5	43.3	40.7	37.3
霓的偏折角	理论值	0	154.99	130.59	107.51	86.59	68.99	56.23	50.28	53.38
	实际值	-	-	136.5	109.6	88.7	73.3	53.2	45.7	47.7

#### 1.1 数据记录与处理

二维实验偏折角折线图，如图 15 所示。

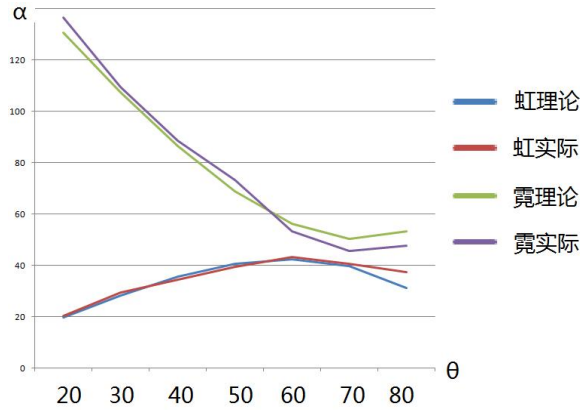


图 15

通过图像可以得到：虹在  $\theta = 60^\circ$  时， $\alpha$  取到最大值，最大值为  $43.3^\circ$ ，与理论值  $42.51^\circ$  的相对误差  $E = 1.858\%$ ；霓在  $\theta = 70^\circ$  时， $\alpha$  取到最小值，最小值为  $45.7^\circ$ ，与理论值  $50.28^\circ$  的相对误差  $E = 9.109\%$ 。

## 1.2 二维误差分析

### 1.2.1 系统误差

(1) 在本次二维模拟实验中，理论值的计算是根据折射率  $n = 1.33$  计算，但是在实际情况中，水的折射率会随着温度、杂质等因素影响，导致实际情况的折射率与理论值不同。

(2) 本次实验采用的是培养皿中加水来作为圆形介质，导致光路发生一定的变化，对实际情况的偏折角产生一定的影响，导致折射率变化。

### 1.2.2 随机误差：

- (1) 在使激光笔对准目标的入射光线时，存在一定的偏差。
- (2) 在对出射光进行画线时，存在随机误差。
- (3) 对出射光线用量角器进行测量时，存在随机误差。

## 1.3 结论

通过本次二维模拟实验，得到的实际情况与理论相差不大。通过图像可以明显的看出虹的偏折角随入射角先增大后减小，并且在入射角为  $60^\circ$  左右时，偏折角取得极大值。的偏折角随入射角先减小后增大，并且在入射角为  $70^\circ$  左右时，偏折角取得极小值。

## 2. 三维模拟实验

### 2.1 数据记录与处理

表二：三维取点数据记录表（红色带）

x	红 1	红 2	红 3	y	红 1	红 2	红 3	X0	Y0	r
2	2.13	8	14.85	2	1.27	4.57	0.42	8.25	-2.75	7.32
4	1.98	8	14.34	4	2.13	5.32	2.68	8.386	-2.68	8.014
6	2	8	14	6	3.11	6.08	4.21	8.577	-2.63	8.73
8	2	8	14	8	4	6.82	5.25	8.749	-2.57	9.417
10	2	8	14	10	4.9	7.58	6.21	8.871	-2.43	10.05
12	2	6	14	12	5.75	7.96	7.33	9.197	-2.55	10.99

根据逐差法进行计算： $k_{\text{红}} = \frac{(r_4+r_5+r_6)-(r_1+r_2+r_3)}{18} = 0.355$

偏折角  $\alpha = 19.53^\circ$

对应的  $n_{\text{红}} = 1.539$

表三：三维取点数据记录表（绿色带）

x	绿 1	绿 2	绿 3	y	绿 1	绿 2	绿 3	X0	Y0	r
2	2.17	8	14.74	2	1.14	4.48	0.45	8.261	-2.73	7.219
4	2	8	14.27	4	2.01	5.22	2.52	8.338	-2.62	7.852
6	2	8	14	6	2.99	5.93	4	8.524	-2.73	8.678
8	2	8	14	8	3.8	6.68	5.03	8.707	-2.48	9.19
10	2	8	14	10	4.7	7.42	5.96	8.805	-2.33	9.786
12	2	6	14	12	5.52	7.79	7.1	9.149	-2.42	10.68

根据逐差法进行计算： $k_{\text{绿}} = \frac{(r_4+r_5+r_6)-(r_1+r_2+r_3)}{18} = 0.328$

偏折角  $\alpha = 18.18^\circ$

对应的  $n_{\text{绿}} = 1.556$

表四：三维取点数据记录表（蓝色带）

x	蓝 1	蓝 2	蓝 3	y	蓝 1	蓝 2	蓝 3	X0	Y0	r
2	2.25	8	14.62	2	1.13	4.38	0.43	8.235	-2.75	7.132
4	2.09	8	14.22	4	1.88	5.06	2.32	8.327	-2.63	7.696
6	2	8	14	6	2.75	5.79	3.78	8.508	-2.65	8.459
8	2	8	14	8	3.6	6.5	4.74	8.63	-2.46	8.982



10	2	8	14	10	4.42	7.2	5.7	8.793	-2.38	9.61
12	2	6	14	12	5.25	7.55	6.81	9.106	-2.48	10.5

根据逐差法进行计算： $k_{\text{蓝}} = \frac{(r_4+r_5+r_6)-(r_1+r_2+r_3)}{18} = 0.323$

偏折角  $\alpha = 17.88^\circ$

对应的  $n_{\text{蓝}} = 1.559$

## 2.2 误差分析

### 2.2.1 系统误差

在本实验中，把聚光手电筒的光线通过镜面反射后再通过方形圆孔主光屏射向玻璃球。因此，射入玻璃球的光线不是严格意义上的平行光，导致一定的系统误差

### 2.2.2 随机误差：

(1) 在记录虹中同一单色光的三点时，由于红色、绿色、蓝色的条带较宽，所以在取点时，会造成误差。

(2) 在通过滑块调整玻璃球的位置时，由于刻度尺只能精确到 0.1cm，所以玻璃球位置有一定的误差。

## 2.3 实验结论：

通过三维模拟实验，可以使用反演法，通过测量不同光线的虹的偏折角，来进行计算球形介质的折射率。通过实验，可以同时清晰地看到虹与霓呈现在光屏的现象。其中，虹呈现在主光屏，霓呈现在侧光屏，并符合预期结果。

## 3. 实景再现

### 3.1 数据记录与处理

#### 3.1.1 虹与霓偏折角计算

求出索尼 818 相机的像素位置与中心线的角度  $\beta$  的函数关系。 $r$  表示目标点与中心点的像素距离。通过计算可以得出：

$$\beta = \arctan\left(\frac{r}{1900}\right) * \frac{180^\circ}{\pi} \quad (20)$$

根据虹的拍摄，对红色和蓝色的圆环分别取三点，并记录  $(x, y)$ ，记录结果如下：

表五：虹偏折角像素取点记录表

颜色	取点编号	x	y	颜色	取点编号	x	y
蓝	1	907	3247	红	1	1821	43
	2	537	845		2	427	755
	3	2053	157		3	845	3295

通过计算可以得出  $\alpha_{\text{蓝}} = 41.30^\circ$ ,  $\alpha_{\text{红}} = 42.48^\circ$

### 3.1.2 虹与霓亮度的比较

在虹上取三个点求亮度平均值。同样，对霓以及虹的背景、霓的背景上取三个点并求亮度平均值。结果如下：

表六：霓虹亮度像素取点记录表

取样源	取样编号	R	G	B	平均
虹	1	123	151	198	157
	2	93	113	200	135
	3	119	131	117	150
	平均	112	132	199	147.56
背景（虹）	1	71	92	149	104
	2	56	76	127	86
	3	77	97	158	111
	平均	68	88	145	100.33
霓	1	22	28	60	36
	2	32	40	43	38
	3	26	26	28	27
	平均	27	31	44	33.89
背景（霓）	1	20	23	38	27
	2	18	21	36	25
	3	17	20	37	25
	平均	18	21	37	25.56

所以， $L_{\text{虹}} = 147.56$ ,  $L_{\text{背景（虹）}} = 100.33$ ,  $L_{\text{霓}} = 33.89$ ,  $L_{\text{背景（霓）}} = 25.56$

$$L_{\text{虹实际}} = L_{\text{虹}} - L_{\text{背景（虹）}} = 47.23$$

$$L_{\text{霓实际}} = L_{\text{霓}} - L_{\text{背景(霓)}} = 8.33$$

所以，虹与霓的亮度比  $\frac{L_{\text{虹实际}}}{L_{\text{霓实际}}} = 5.67$ ,

与理论值 5.09 的相对误差为  $E = 11.4\%$

### 3.2 误差分析

#### 3.2.1 系统误差:

1. 在本实验中，把聚光手电筒的光线通过镜面反射后再射入实验箱中，所以，射入的光线并不是严格意义上的平行光，对偏折角有一定的影响。

2. 水的折射率随着温度的增大而减小，导致最终的偏折角发生一定变化。

3. 由于水珠的形状不是严格意义上的球形，所以会导致一些杂光，对亮度测量有一定的干扰。

4. 相机存在一定的畸变，导致换算为角度时不准确。

#### 3.2.2 随机误差:

1. 在选取三个点测量其 RGB 值时，相机本身的噪点有一定的干扰。

2. 在虹上取三个红光或蓝光的点时，由于条带较宽，导致随机误差

### 3.3 结论

在实景再现实验中，可以很清晰的看到整个圆环状的虹与霓。其中，虹由外到内为红、橙、黄、绿、蓝、靛、紫，霓则相反。在角度与亮度测量并计算得到的结果与预期理论值差别不大。

## 七、可拓性

本装置的实验内容还可以根据使用者的需求进行拓展。在探究霓虹原理和搭建装置时，我们小组对一些“浪漫”的想法进行了有益的尝试。我们将以上两点集中放在这一小节。

### 1. 二维不同液体实验

利用本实验的二维模拟部分可以进行“对比分析不同液体霓虹现象的二维光路差异”的实验。理论上霓虹现象不止在介质为水时存在，外界条件相同时，其他液体甚至固体（如本装置三维部分演示所用的玻璃球）都会产生虹与霓。只不过不同介质对同色光的折射率不同，所产生的的霓虹角度也会有所不同。

在本装置二维部分的培养皿内加入不同的液体，如酒精、食盐溶液等，仍用激光笔照射，

按照本组份的实验方案，便可以探究这些介质所产生霓虹光路的最简单的二维部分了，进而可以同理得出其三维模型和实景理论。

## 2. 测圆玻璃球的折射率

在本装置的三维部分，我们通过“斜率法”测得了虹的彩虹角，进而推算出了圆玻璃球的折射率。若在其他实验中需要测圆形透明物体的折射率，可以考虑采用这种方法，同时，这也是一种比较浪漫的方法。

## 3. 图片后期处理测量思路

在本装置的实景再现部分，在暗箱中模拟实际情况，现象的参数不易测量，我们尝试了一种新的思路，即用“像素法”进行分析。本方法通过把相机参数和所记录的图片参数相结合，找出经验函数，通过此函数测算霓虹的角度和亮度。误差约为10%，偏大，但不失为一次有益的尝试。在后续的改进中，我们希望通过获取更多的参数信息和取样数据对经验函数进行进一步修正，以期控制误差在合理范围内。也希望日后能够总结出适用不同型号相机的经验函数的推导方法。

## 4. 用菲涅尔透镜可制作虹状光环

在搭建这套“霓虹再现实验演示仪”时，我对光源的搭建做了很多尝试，其中，在尝试用点光源和菲涅尔透镜搭建平行光源时，以外发现用光源照射菲涅尔透镜的一面，即可在四周墙壁上观察到虹状光环，效果明显，但具体参数以及成因尚未细细分析，但也不失为一种简易构建虹状光环的方法。

# 八、应用前景

## 1. 作为教具进行应用推广

虹与霓是美丽与神秘的交织。本装置是分组份、多层次、可拆分设计，效果明显、造价低廉，设计理念和方案贴合物理课程标准，适用对象涵盖各年龄段。

1.1 装置的实物演示部分适合向各年龄段做演示实验。对于低年级学生，将彩虹搬上三尺讲台的方寸之间，会是很好的科学启蒙。对于高年级学生，则可以在教师的带领下进行实践，可以增强科学素养。

1.2 装置的二维演示部分适合初高中学生进行理想化模型分析。初中生可以进行定性分析和部分定量分析，高中生则可以进行全部推演。是很好的学科素质拓展项目。

1.3 装置的三维演示部分涉及立体几何和空间想象，适合初中生拓宽视野和高中生能力锻炼。

## 2. 球形珠宝鉴定

透明的球形物体如珠宝等，折射率难以测量，用本装置三维部分的思路，用该类物体的霓虹效应，辅以高精度的信息采集装置，便可测得该类物体的折射率，作为宝玉石鉴定的参考数据。这对霓虹原理的实际应用做了尝试性的探究。

## 九、 展望

本项目的完成，理论和装置演示效果均达到了预先设计的要求，但还有一些不足，如实景再现的参数没有准确的获得，相关的经验函数没有进一步修正，此外装置的一些设计还可以进行改进，使操作更加灵活简便。

竞赛提交作品后，本小组仍将就该课题的装置和理论作进一步完善，以期达到更好的使用体验，收获更好佳实验效果。另外，霓虹的原理可以带给人们很多启示，我们希望能够通过这套装置和理论发现霓虹更多的美，尝试霓虹原理的更多种实际应用。

## 参考文献

- [1] 顾建元. 人类对虹霓现象认识的探究[J]. 物理教师, 2021, 42(07):71-73.
- [2] 刘亚英, 潘莹莹. 雨后天空的七彩双姝——双生“霓、虹”解密[J]. 高中数理化, 2016(Z2):83-84.
- [3] 苏明义. 关于虹和霓的成因分析[J]. 物理教师, 2014, 35(04):53-54+73.
- [4] 郎军, 董洪琼. 用几何画板实验研究“虹”和“霓”的成因及特点[J]. 物理教学, 2017, 39(02):34-36.
- [5] 李志有, 孙敬姝, 梁浩, 刘国松, 王秉超. 彩虹现象的演示[J]. 物理实验, 2008(03):38-40.

# 基于轴锥镜裸眼彩色动态 3D 数字全息实验系统的优化及物理学应用

参赛者：缪佳奇，戴子博，王彦哲

（浙江大学物理学系，杭州 310023）

指导教师：陈星，郭红丽

**摘要：**本文提出了适合于实验教学的新型裸眼彩色动态 3D 数字全息实验系统——通过数字建模、公式导出、实物拍摄等方法得到三维点云数据；加入轴锥镜并设计具有交互性的动态图形界面相息图制作软件；提出一类标准校正模型及校正方法以提高彩色 3D 数字全息的校正精度；设计再现光路，使之能用同一套实验装置加载相应的 3D 相息图来实现空间划分、空间叠加彩色 3D 数字全息再现实验教学。

**关键词：**彩色动态 3D 数字全息，点云数据，成像校正，物理教学

## 1 研究背景

裸眼彩色 3D 全息显示能够更真实地重现或模拟与客观世界相同的场景，增强表达图像的深度感、层次感和真实性，能够提供逼真的三维显示效果，还能提供人眼所需的全部立体感知。裸眼 3D 显示是通过直接将三维数据场中的每一个体素成像在三维物理空间中的真实位置上，从而在空间里直接显示出具有真实物理深度的三维图像。

目前，国内高校没有用于教学的彩色 3D 全息仪器，大部分都是单色二维的，学生很难体会类似干板裸眼 3D 的效果。人眼可以辨别几千种颜色色调和亮度，相反只能辨别几十种灰度层次<sup>[1]</sup>，因此，颜色是信息描述物体的一种重要载体。然而，经典的干板全息教学没有彩色全息。除此之外，已有的相关数字全息研究所使用的模型数据基本上来自网络数据库，缺乏多样性，其应用价值也有所缺失；在彩色全息的实验操作中，校正也是极为重要的一环，但是之前并没有相关校正方法被提出，这将使得彩色 3D 全息以及彩色动态 3D 全息画面精度下降，画质不真实，甚至严重影响观赏。为解决上述问题，本文提出了适合于实验教学的新型裸眼彩色动态 3D 数字全息实验系统——通过数字建模、公式导出、实物拍摄等方法得到



三维点云数据；加入轴锥镜并设计具有交互性的动态图形界面相息图制作软件；提出一类标准校正模型及校正方法以提高彩色 3D 数字全息图的校正精度；设计再现光路，使之能用同一套实验装置加载相应的 3D 相息图来实现空间划分、空间叠加彩色 3D 数字全息再现实验教学。

我们的研究成果可用于近代物理教学，如现代信息光学、数字全息进阶内容、色度学配色实验等。除了宏观物体，我们的实验装置还可以很好地对物理微观模型（如晶格、能带等）建模并实现 3D 全息再现，为诠释和呈现微观立体物理模型提供了一种具有全新视觉特效的方法。

## 2 实验总体框架

本文所述之实验主要由三部分构成（如图 1），分别是数字建模、相息图制作和光路搭建。数字建模是建立数字模型，获得彩色 3D 点云数据；相息图制作是将点云通过不同方法转换成相息图；光路搭建就是将物体以光学方式复现，并力争最大程度的还原、逼真的呈现。

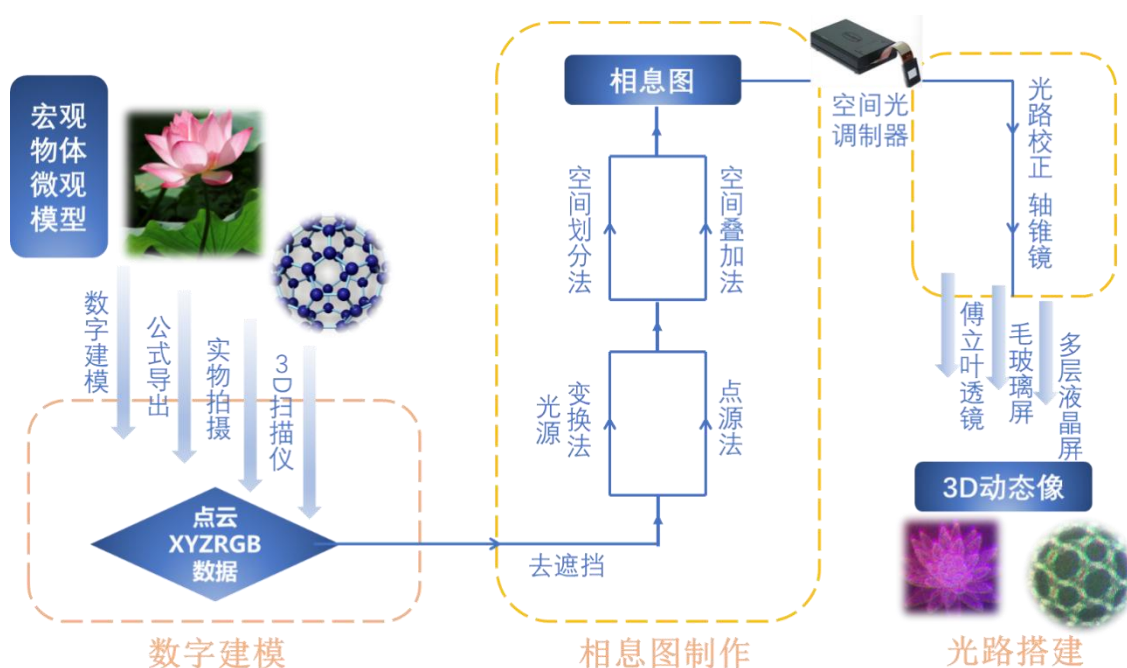


图 1 数字全息流程

## 3 实验原理

### 3.1 获得点云模型数据的方法

#### 3.1.1 数字建模

首先，使用 3Ds max 动画建模软件建对莲花、C60 等模型进行建模（如图 2）；然后，使用 MeshLab 软件将上述模型细分至接近目标精度的点数，并导出为“.obj”文件，从而获得

模型点云坐标（XYZ）和颜色（RGB）数据。

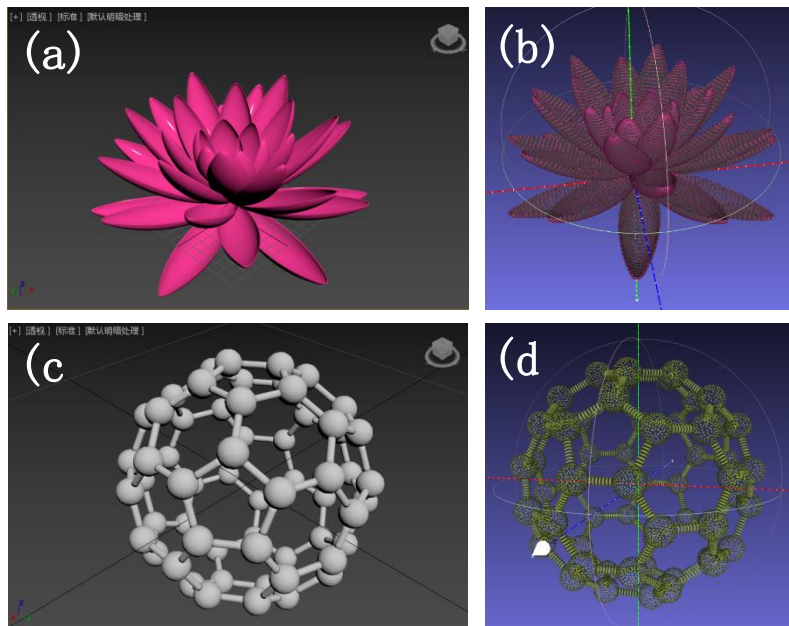


图 2 (a) 3Ds max 软件中的莲花模型 (b) 经过 MeshLab 细分后的莲花点云  
(c) 3Ds max 软件中的 C60 模型 (d) 经过 MeshLab 细分后的 C60 点云

### 3.1.2 公式导出

三维立体图像中的每一个点都与唯一的 XYZ 坐标值对应，若 X, Y, Z 三个坐标值之间有一定的函数关系，那么根据函数关系就可以得到该三维图像的坐标数据。例如：固体中的电子行为是由能带结构决定的，能带理论是固体物理学中的一个重要理论基础部分。根据能带公式可以得到晶格能带的点云数据，然后利用全息技术可以呈现动态立体晶格能带图。较平面显示，全息立体能带图更便于理解。

具体操作为：在 MATLAB 中输入能带公式，并根据目标点云数量确定 XY 取样数，其对应的能量为 Z 值，这样我们就获得了能带图点云的坐标数据。不同层能带添加不同的颜色值，导出上述数据即为能带的点云数据。比如，石墨烯能带函数为

$$E = \pm t \sqrt{3 + 2\cos(\sqrt{3}k_2) + 4\cos\left(\frac{3}{2}k_1\right)\cos\left(\frac{\sqrt{3}}{2}k_2\right)} \quad (1)$$

其中， $t$  为邻格点间电子跃迁强度， $k_1, k_2$  为动量空间坐标，并令晶格常数  $a$  为 1，作图得图 3 (a)。

又比如，kagome 晶格能带函数为

$$\begin{cases} E_{1,2} = t[1 \pm \sqrt{4(\cos^2 k_1 + \cos^2 k_2 + \cos^2 k_3) - 3}] \\ E_3 = -2t \end{cases} \quad (2)$$

其中， $t$  为邻格点间电子跃迁强度， $k_1, k_2, k_3$  为动量空间坐标，并令晶格常数  $a$  为 1，作图得图 3 (b)。

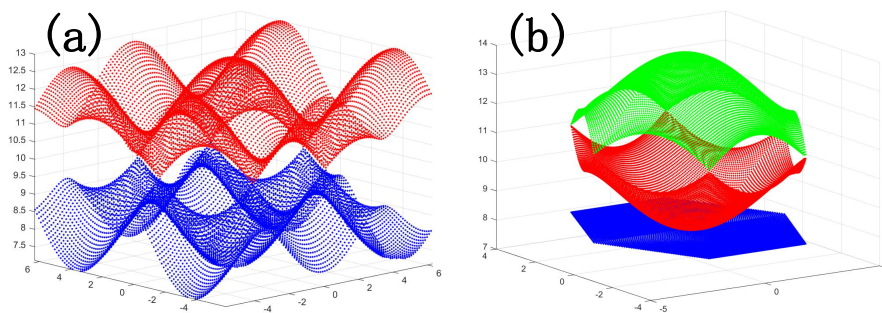


图3 (a) 石墨烯能带图的点云 (b) kagome 能带图的点云<sup>[2]</sup>  
(两图 x, y 轴表示 k 空间, z 轴表示能量)

### 3.1.3 实物拍摄

一个真实三维物体不同视角的图像反映了该物体不同方位的信息, 在不同方向上物体的照片经过合并可以重建出该物体的三维点云数据。以这种方式获得的点云数据的精度取决于拍摄图像的数量与不同角度摄像分布的均匀程度: 摄像数量越多、分布得越均匀, 点云数据与实际物体的符合程度就越好。

用手机或相机对目标物体进行多角度拍摄, 拍摄图像要尽可能多, 每张照片之间的角度差应尽可能小, 以反映物体不同角度的完整信息。将照片组导入 photoscan 软件, 先将各照片进行高精度对齐处理, 生成初步的 3D 点云数据, 再进一步优化对齐, 生成密集 3D 点云数据。

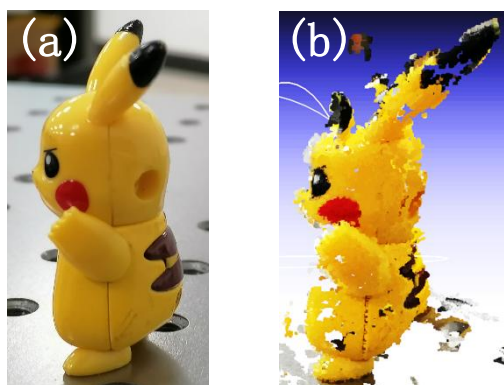


图4 (a) 皮卡丘实物图 (b) 皮卡丘实物拍摄法获得的点云图

### 3.1.4 3D 扫描仪

利用集成式拍摄、点云生成设备——3D 扫描仪直接扫描得到数据。

### 3.1.5 四种获得点云数据方法的比较

数字建模适合对简单模型进行建模或者已经熟练掌握相关 3D 软件的专业人员及爱好者进行操作, 它可以和 3D 动画进行结合, 有广阔的应用前景, 几乎可以对任何物体进行建模, 但难度在于掌握 3D 作图软件。公式导出主要适合有数学表达式的模型, 比如能带模型。实物拍摄和 3D 扫描仪在原理上是一样的, 但 3D 扫描仪的精度远高于实物拍摄, 其代价是 3D

扫描仪高昂的设备价格，它们适合对实物照片获取点云数据。

### 3.2 点云模型数据的处理——去遮挡

对于不透明的物体，不论是用相机摄影还是干板全息，都只能记录物体可以被看见的那一面的信息。同理，数字全息也只需选取并计算观察者所能看到的那一面，无需考虑看不到的背面，这就是去遮挡。去遮挡是一种非常实用的降采样方法。去遮挡可以是全息像更接近人们生活中的经验，使得物体更真实，避免了背面点云像对正面点云成像的干扰，而且还可以大大降低全息图的计算量，减少计算时间。

对点云模型进行去遮挡，首先，栅格化点云模型的 XY 平面，并将点云模型的 XY 平面（观察者所见的那一面）垂直于光束所在光轴的平面；然后，保留同一栅格内距离 SLM 平面最近的点，剩余的点为冗余点进行去除，以达到去除有遮挡关系的冗余点的效果。栅格大小

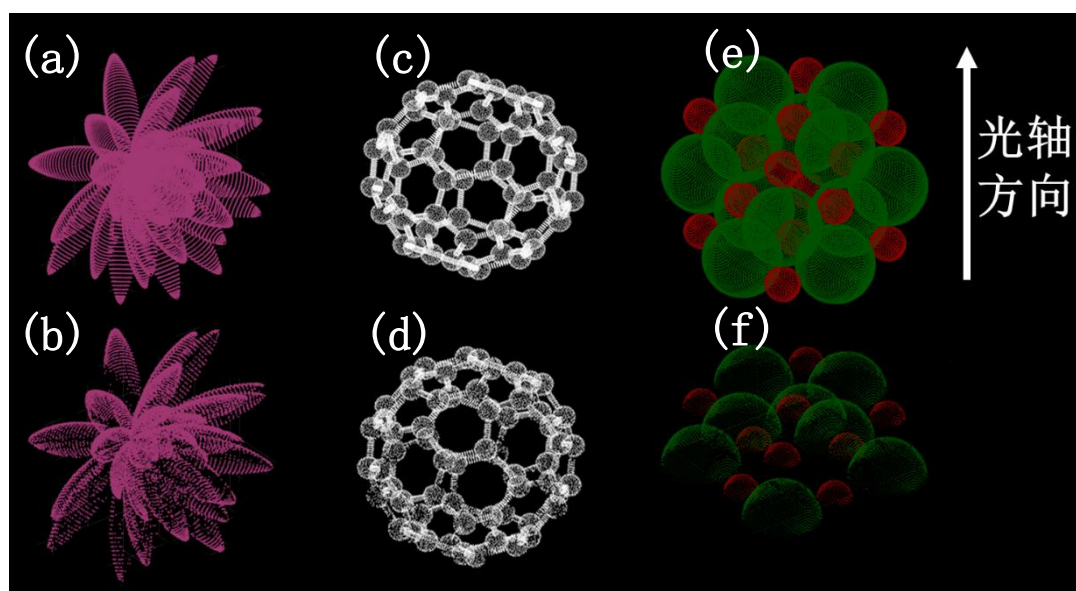


图5 (a) (b) 莲花去遮挡前后 (c) (d) C60 去遮挡前后 (e) (f) NaCl 去遮挡前后 (其中绿球代表 Cl, 红球代表 Na)

可以设定，但为了实现降采样，每个栅格仅保留一个点。

### 3.3 全息图的生成

本文采用两种方法——点源法和光源变换法——生成相息图。

#### 3.3.1 点源法

点源法是指将点云中的每一点都视为光源，对每一点的负一级衍射光的波前进行叠加，取能产生物像部分的一种方法。该方法主要使用的是离轴全息理论。

### 3.3.1.1 点源法原理

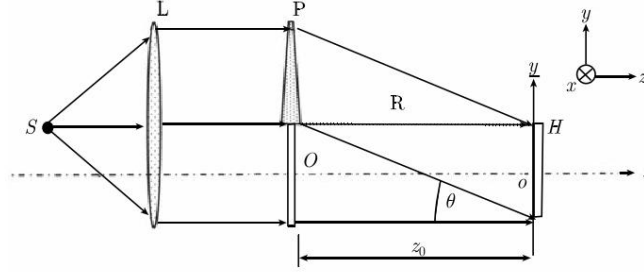


图6 离轴全息术示意图

(仅作原理示意, 实际由计算机完成计算)

我们使用了离轴数字全息理论<sup>[3]</sup>, 把像移到目标位置, 避免和 SLM 电极的衍射斑重叠。设参考光复振幅

$$R(x, y) = R_0 \exp[-k(\sin \theta)y], \quad k \stackrel{\text{def}}{=} \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

令物光复振幅分布为

$$O(x, y) = O_0(x, y)\exp[-i\phi_0(x, y)] \quad (4)$$

那么, 全息面上光场的复振幅分布为

$$u(x, y) = R(x, y) + O(x, y) \quad (5)$$

于是, 全息图的光强分布

$$I(x, y) = R_0^2 + |O(x, y)|^2 + O(x, y)R_0 \exp[ik(\sin \theta)y] + O^*(x, y)R_0 \exp[-ik(\sin \theta)y] \quad (6)$$

又设重现光复振幅为

$$A(x, y) = A_0 \exp[-k(\sin \theta)y] \quad (7)$$

全息图被重现光照射后, 衍射光则为

$$u'(x, y) = A(x, y)I(x, y) \quad (8)$$

第一项衍射光

$$u'_1 = A_0 R_0^2 \exp[-k(\sin \theta)y] \quad (9)$$

这是一束沿着重现光方向传播的平面波。

第二项衍射光

$$u'_2 = A_0 |O(x, y)|^2 \exp[-k(\sin \theta)y] \quad (10)$$

沿重现光方向传播的光波, 它沿传播方向轻微发散。

以上两束衍射光传播方向相同, 合成为零级衍射光。

第三项衍射光

$$u_3' = A_0 R_0 O_0(x, y) \exp[-i\phi_0(x, y)] \quad (11)$$

即正一级衍射光。它的波前和原来物光完全相同，且沿着原先物光的方向传播，迎着它看可以看到物体的虚像。

第四项衍射光

$$u_4' = A_0 R_0 O^*(x, y) \exp[-ik(2 \sin \theta)y] \quad (12)$$

即负一级衍射光。由于 $O$ 是由物体表面发出的发散光波， $O^*$ 则是汇聚为物体实像的光波。

$u_3'$ 和 $u_4'$ 分别位于零级衍射光两侧，如图7所示。

在实际计算中，我们只取对全息像有贡献的负一级衍射光。又因为我们的SLM是相位型SLM，所以我们对全息面每个点仅提取相位信息。

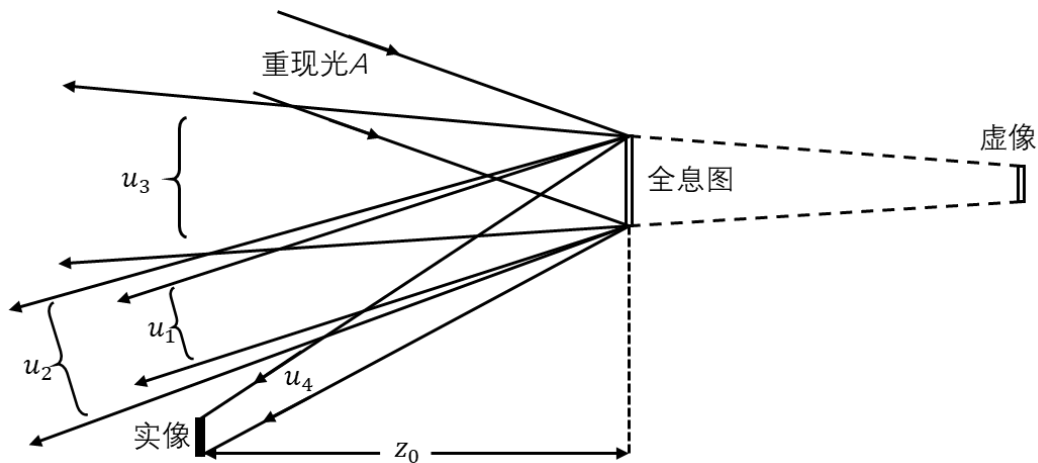


图7 离轴全息成像重现示意图

### 3.3.1.2 点源法的计算加速

我们使用了两种方法对全息计算进行加速，分别为GPU辅助计算和并行计算。

在MATLAB中使用gpuArray函数将普通矩阵转换为gpuArray型，就可以调用MATLAB内置的GPU辅助计算进行计算加速。在MATLAB中使用parfor语句替换for语句，就可以调用MATLAB内置的并行计算程序进行计算加速。

由表2可见，进行计算加速和去遮挡后计算速度较原先提升约35倍，相应地，计算时间缩短为原先的3%左右。



表 1 算法实施 PC 机主要性能参数

计算机配置	性能参数
CPU	Intel Core i5-9300H(1CPU,4Cores,2.40GHz)
GPU	NVIDIA GeForce GTX1650(1GPU,896Cores,1665MHz,4GB)
内存 1	Samsung DDR4(2667MHz,8GB)
内存 2	04CB DDR4(2667MHz,8GB)

表 2 算法实施 PC 机主要性能参数

设备\点数	60420 个点 (原始点云)	24989 个点 (去遮挡后)
原始	耗时 14457s	耗时 6012s
使用 parfor	耗时 13167s	耗时 5478s
使用 gpuArray	耗时 1056s	耗时 443s
使用 gpuArray+parfor	耗时 990s	耗时 417s

### 3.3.2 光源变换法

光源变换法是将曲面光源变换为等效平面光源簇，再对该平面光源簇中各平面光源分别应用菲涅尔衍射积分（S-FFT 算法或者 D-FFT 算法）获得全息图，过程中使用闪耀光栅将像移到目标位置。

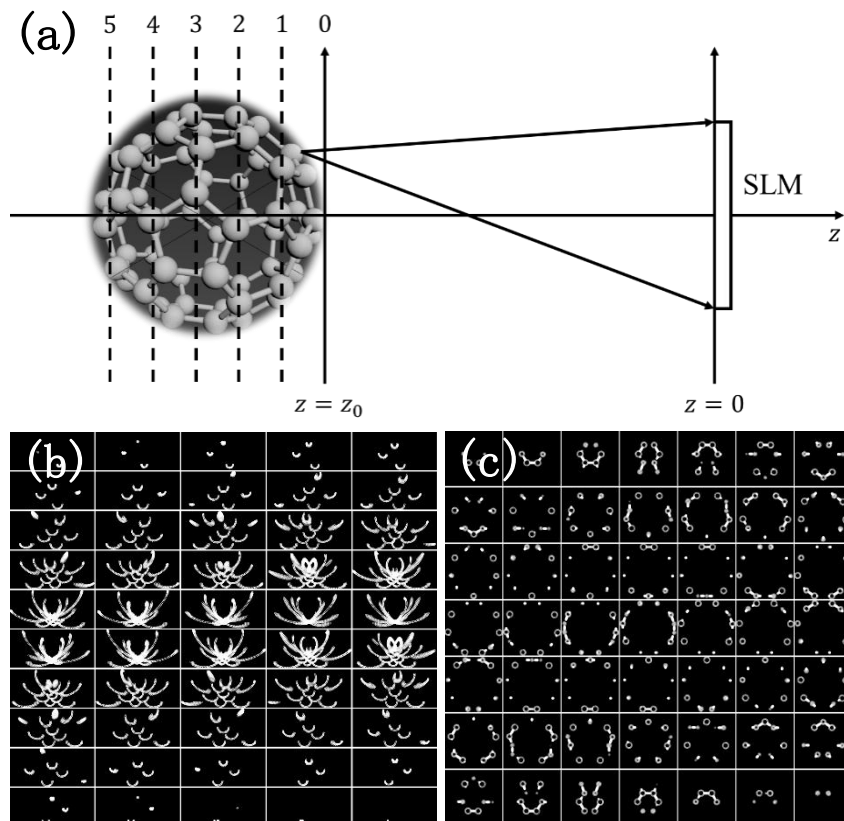


图 8 (a) 光源变换法原理图

(b) 莲花的光源变换法示意图 (c) C60 的光源变换法示意图



### 3.3.2.1 光源变换法原理<sup>[3,4]</sup>

下面介绍将曲面光源转换为平面光源的方法，其原理示意图如图 8 (a)。图中  $z = 0$  是 SLM 平面， $z = z_0$  平面是与曲面相切并垂直于光轴的平面。为将空间曲面光源的衍射场变换为  $z = z_0$  平面的衍射场，首先让一系列垂直于光轴的平面（简称映射平面）与空间曲面相交，将空间曲面分解为许多子曲面的集合。空间曲面光源发出的光波可以视为子曲面上的点源发出的球面波的叠加。当取样点源的分布满足取样定理时，将图中每一子曲面上所有不受遮挡的取样点源发出的球面光波映射到与该子曲面相邻的右方映射平面上，这样空间的曲面光源就可以等效为右边的平面光源簇。

### 3.3.2.2 光源变换法面光源的合适间距<sup>[3]</sup>

SLM 的脉冲响应式

$$h(x_i, y_i; \xi, \eta) = \frac{\alpha\beta}{\lambda z} N_x \Delta x^3 N_y \Delta y^3 \text{sinc}(\alpha/2) \text{sinc}(\beta/2) \times \text{sinc}\left[\frac{N_x \Delta x}{\lambda z} \left(x_i - \xi - \frac{\lambda z}{2\Delta x}\right)\right] \text{sinc}\left[\frac{N_y \Delta y}{\lambda z} \left(y_i - \eta - \frac{\lambda z}{2\Delta y}\right)\right] \quad (13)$$

式中， $(\xi, \eta)$  为物点， $\alpha, \beta$  为开口率， $\Delta x, \Delta y$  为像元中心间隔， $N_x, N_y$  为  $x, y$  方向上的像元数。

令  $T_x = \frac{\lambda z}{N_x \Delta x}$ ,  $T_y = \frac{\lambda z}{N_y \Delta y}$ ,  $x'_i = x_i - \xi - \frac{\lambda z}{2\Delta x}$ ,  $y'_i = y_i - \eta - \frac{\lambda z}{2\Delta y}$ , 那么像点光强分布与

$\left[\text{sinc}\left(\frac{x'_i}{T_x}\right) \text{sinc}\left(\frac{y'_i}{T_y}\right)\right]^2$  成正比。

以本文所用 SLM ( $N_x = 1920, N_y = 1080$ ) 为例，得到  $\left[\text{sinc}\left(\frac{x'_i}{T_x}\right) \text{sinc}\left(\frac{y'_i}{T_y}\right)\right]^2$  图像，如图 9。

可见，源的重建像光场能量主要局限于以像点坐标为中心，宽度分别为  $2T_x$  ( $x$  方向)、

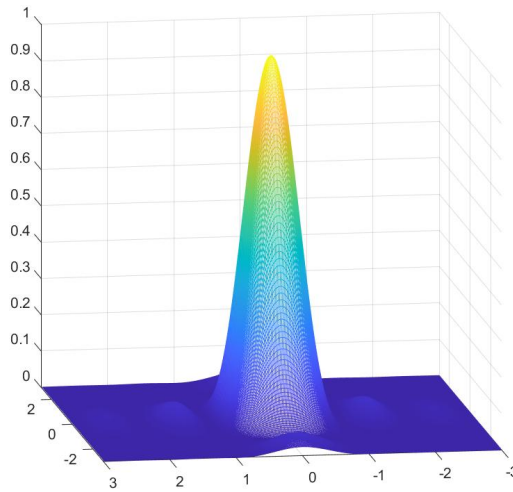


图 9  $\left[\text{sinc}\left(\frac{x'_i}{T_x}\right) \text{sinc}\left(\frac{y'_i}{T_y}\right)\right]^2$  曲线

$2T_y$  ( $y$  方向) 的矩形区域

$$2T_x = \left| \frac{z-z'}{z} \right| N_x \Delta x \quad (14)$$

$$2T_y = \left| \frac{z-z'}{z} \right| N_y \Delta y \quad (15)$$

令单面光源重建像焦深  $d_h \stackrel{\text{def}}{=} |z - z'|$ ，于是

$$d_{hx} = \frac{2\lambda z^2}{(N_x \Delta x)^2} \quad (16)$$

$$d_{hy} = \frac{2\lambda z^2}{(N_y \Delta y)^2} \quad (17)$$

取  $d_h = \min(d_{hx}, d_{hy})$ ，则

$$d_h = \frac{2\lambda z^2}{(N_x \Delta x)^2} \quad (18)$$

对平面光源簇而言，对于给定的 SLM，重建像的焦深随着衍射距离的增加而增加。又考虑到重建像的焦深与波长有关，我们可以取  $\min(\{d_h\})$  为该平面光源簇的焦深，称做最优景深分割宽度，即

$$d_h = \frac{2\lambda_B z_0^2}{(N_x \Delta x)^2} \quad (19)$$

式中， $\lambda_B$  为蓝光波长。

此时，面光源数为

$$n = \text{floor}\left(\frac{\text{depth}}{d_h}\right) = \text{floor}\left(\text{depth} \frac{(N_x \Delta x)^2}{2\lambda_B z_0^2}\right) \quad (20)$$

式中， $\text{depth}$  为像的目标景深， $\text{floor}()$  函数为向上取整函数。

### 3.3.2.3 菲涅尔衍射积分的 S-FFT 算法<sup>[3]</sup>

设  $U_0(x_0, y_0)$ ， $U(x, y)$  分别为物平面及全息面的光波复振幅， $z$  为两平面间的距离。菲涅尔衍射积分可以写为

$$U(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right] \iint_{-\infty}^{+\infty} \{U_0(x_0, y_0) \times \exp\left[\frac{ik}{2z}(x_0^2 + y_0^2)\right]\} \exp\left[-\frac{2\pi i}{\lambda z}(x_0 x + y_0 y)\right] dx_0 dy_0$$

式中， $\lambda$  为光波长， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 。

令物平面取样宽度为  $L_0$ ，取样数为  $N \times N$ ，即取样间距  $\Delta x_0 = \Delta y_0 = L_0/N$ ，令  $\Delta x = \Delta y$  是全息面的取样间距，式 (11) 可用快速傅里叶变换 FFT 表示为

$$U(p\Delta x, q\Delta y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(p\Delta x)^2 + (q\Delta y)^2]\right\} \times \text{FFT}\left\{U_0(m\Delta x_0, n\Delta y_0) \exp\left[\frac{ik}{2z}((m\Delta x_0)^2 + (n\Delta y_0)^2)\right]\right\} \frac{p\Delta x \ q\Delta y}{\lambda z \ \lambda z} \quad (22)$$

此算法只需要用到一次快速傅里叶变换,称为 S-FFT(Single-Fast Fourier Transformation),在计算机上,FFT 比二元积分更易实现,且时间复杂度仅为 $O(n\log n)$ ,是一种优秀的衍射积分数值算法。在后续 G-S 迭代算法中,基于 S-FFT 实现衍射场快捷而有效。

### 3.3.2.4 菲涅尔衍射积分的 D-FFT 算法<sup>[4]</sup>

令菲涅尔衍射的传递函数为

$$H(u, v) = \text{FFT}\left\{\frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left[\frac{ik}{2z}(x^2 + y^2)\right]\right\} \quad (23)$$

根据菲涅尔衍射的卷积形式,其积分计算可以分为两步:

(1) 从空域变换到频域

$$U(u, v) = \text{FFT}\{U_0(x_0, y_0)\} \times H(u, v) \quad (24)$$

(2) 从频域变换到空域

$$U(x, y) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \text{FFT}^{-1}\{U(u, v)\} \quad (25)$$

式中,  $\text{FFT}^{-1}$  表示傅里叶逆变换。

通过傅里叶变换的性质,菲涅尔衍射积分的传递函数的解析解为

$$\exp\{ikz[1 - \lambda^2(u^2 + v^2)/2]\} \quad (26)$$

所以,只需进行两次傅里叶变换即可

$$U(x, y) = \text{FFT}^{-1}\{\text{FFT}\{U_0(x_0, y_0)\} \times \exp(ikz[1 - \lambda^2(u^2 + v^2)/2])\} \quad (27)$$

在观察面的离散形式为

$$U(p\Delta x, q\Delta y) = \text{FFT}^{-1}\{G(m\Delta f_x, n\Delta f_y) \exp(ikz\sqrt{1 - (\lambda m\Delta f_x)^2 - (\lambda n\Delta f_y)^2})\} \\ (p, m = \left[-\frac{M}{2}, \frac{M}{2} - 1\right]; q, n = \left[-\frac{N}{2}, \frac{N}{2} - 1\right]) \quad (28)$$

式中,频域的取样间隔  $\Delta f_x = \frac{1}{L_{0x}}$ 、 $\Delta f_y = \frac{1}{L_{0y}}$ 。

### 3.3.2.5 结合 S-FFT 和 D-FFT 的优化算法

为了降低 S-FFT 补零损失,弥补 D-FFT 大小不足,选定需要的成像大小,计算得到 S-FFT 的衍射距离  $Z_1$ , D-FFT 衍射距离为  $Z_2$ ; 目标图像先进行  $Z_2$  距离的 D-FFT, 再进行  $Z_1$  距离的 S-FFT。

### 3.3.2.6 闪耀光栅

为使全息像不和 SLM 电极衍射斑重合,需移动像位置。可以通过在相息图上加载数字闪耀光栅使不同颜色的像重合。因为实验使用相位型 SLM, 所以只需在原来全息图基础上再叠加闪耀光栅的相位即可。

二维闪耀光栅的相位函数表达式为<sup>[5]</sup>

$$\varphi(x, y) = \frac{2\pi}{T} \text{mod}(bx + cy, T) \quad (29)$$

式中， $T$ 是光栅周期， $x, y$ 表示相位图的横纵坐标， $x = 0, y = 0$  对应相息图中心，不同的 $b, c$ 值表示不同的闪耀光栅方向， $\text{mod}$ 表示取余运算。

### 3.4 全息图的混合

彩色全息区别于单色全息的一个重要特点就是使用了色度学理论，将三基色的光混合从而获得彩色全息像。本文使用两种方法以实现三颜色通道全息图的混合，分别是空间划分法和空间叠加法。

#### 3.4.1 空间划分法

空间划分法就是将空间光调制器划分成三个等宽且独立的区域，左侧加载红色通道对应的全息图，中间加载绿色通道对应的全息图，右侧加载蓝色通道对应的全息图，再将三束激光通过适当宽度的狭缝，使得空间光调制器被三个独立且等宽的光带照亮，经过反射式相位型 SLM 反射，人眼能看到最终的成像。

#### 3.4.2 空间叠加法

空间叠加法则是将 RGB 三通道的全息图进行叠加得到最终的全息图，它的光路与空间划

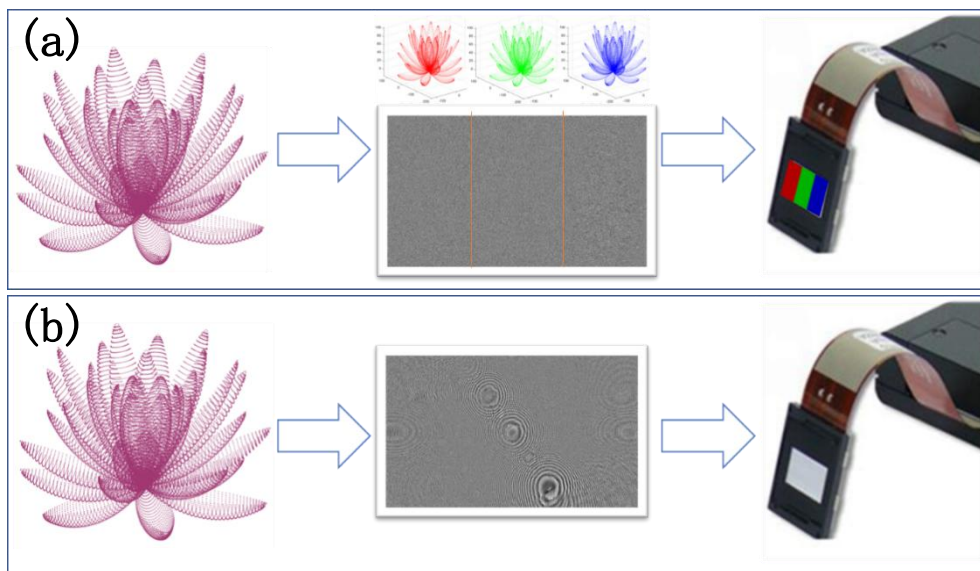


图 10 (a) 空间划分法示意图 (b) 空间叠加法示意图

分法类似，只是去掉了狭缝，三束激光直接照射整片 SLM，经过反射式相位型 SLM 反射，人眼能看到最终的成像。

### 3.5 光路校正

#### 3.5.1 标准校正模型

在对光路完成粗调后，还需要进行细调，这步尤为重要，将直接影响到成像的质量。但现有研究并未提出较为理想的校正方法，我们提出一类标准校正模型，以便于校正并提高校正精度。图 9 是两种标准校正模型。我们使用正交标准校正模型（如图 11（a））校正全息像的位置和颜色，并用星形标准校正模型（如图 11（b））检查校正结果。

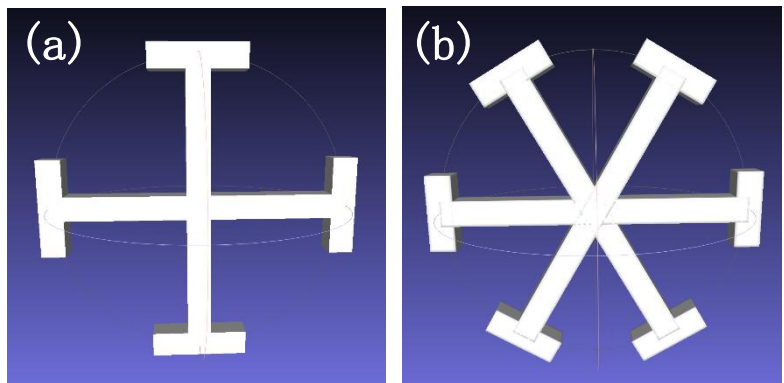


图 11 (a) 正交标准校正模型 (b) 星形标准校正模型

首先将正交标准校正模型的全息图加载到 SLM 上，调节屏的距离，使之清晰，且大小适当。调节平行光管位置、倾角以校正全息像的位置，确认三颜色通道全息像完全重合；调节偏振片以校正全息像的颜色，调节至全息像为白色（即[255 255 255]）。

将星形标准校正模型的全息图（应与正交标准校正模型全息图的成像距离一致）加载到 SLM 上，检查校正结果，并进行相应微调。

### 3.5.2 色度校正

在 3.5.1 中，我们提到使用偏振片校正成像颜色至白色，其理论依据是色度学原理。根据国际照明委员会的 CIE1931 标准，我们可以计算出目标颜色对应的色度学三刺激值( $R:G:B = 1:4.5907:0.0601$ )，并用光强计进行辅助调整。

调整各束激光光强使用的是偏振片。根据马吕斯定律，强度为  $I_0$  的偏振光通过检偏器后出射光强为  $I=I_0 \cos^2\theta$ 。

也正是如此，我们的实验设备也可以进行色度学教学、研究。

### 3.6 景深的增加<sup>[6,7]</sup>

传统的光学元件（如球面透镜）不能同时具有较长的焦深以及较高的横向分辨率，这是由于高横向分辨率需要高的数值孔径，而较长的焦深需要较低的数值孔径。在 1991 年，Davidson N 提出了一种新型的光学元件——全息轴锥镜，它可以在保持高横向分辨率的同时获得更大的焦深。

轴锥镜的相位函数为

$$\varphi(r) = \frac{\pi}{\lambda} \frac{r^2}{f_0 + \frac{Z_g}{R^2} r^2} \quad (30)$$

其中， $\lambda$ 为入射光波长， $f_0$ 为起始焦距， $R$ 为入射光半径， $Z_g$ 为焦深， $r$ 为径向坐标。

因为我们的实验使用的是相位型 SLM，所以只需在原来全息图基础上再叠加轴锥镜的相位，不需要购买昂贵的轴锥镜，更适合物理实验教学。

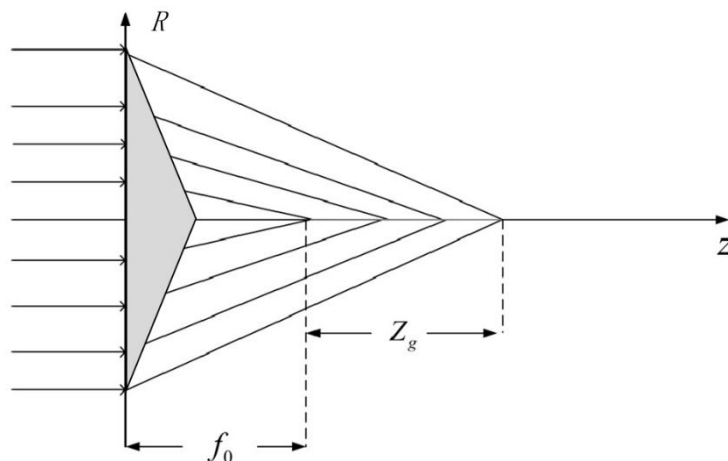


图 12 轴锥镜的聚焦几何示意图

## 4 实验装置

### 4.1 硬件——光路

实验仪器：红、绿、蓝三色激光器，平行光管，楔形分束镜，可调精准狭缝，偏振片，SLM，傅里叶透镜、毛玻璃屏、多层液晶屏。

使用同一套光路完成空间划分法和空间叠加法，差异只是狭缝。

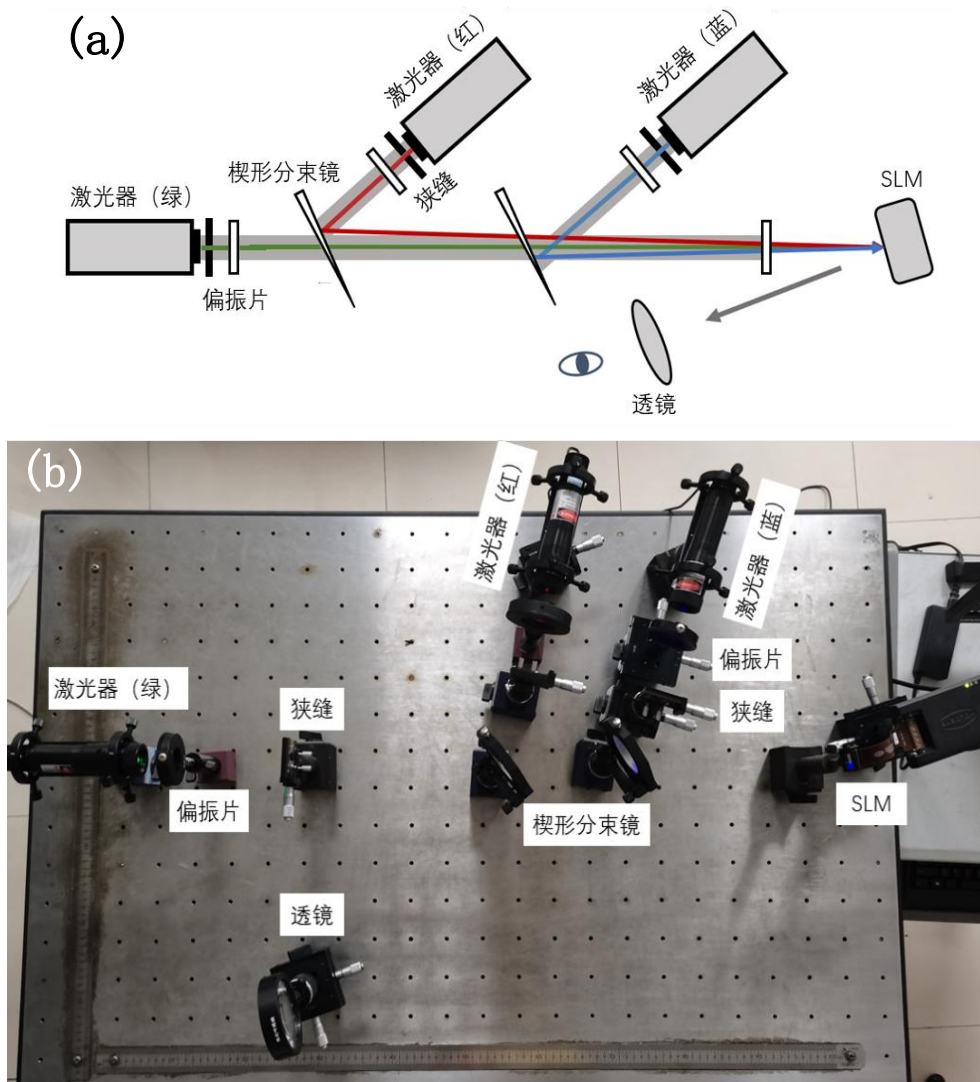


图 13 (a) 空间划分法光路示意图 (b) 空间划分法光路



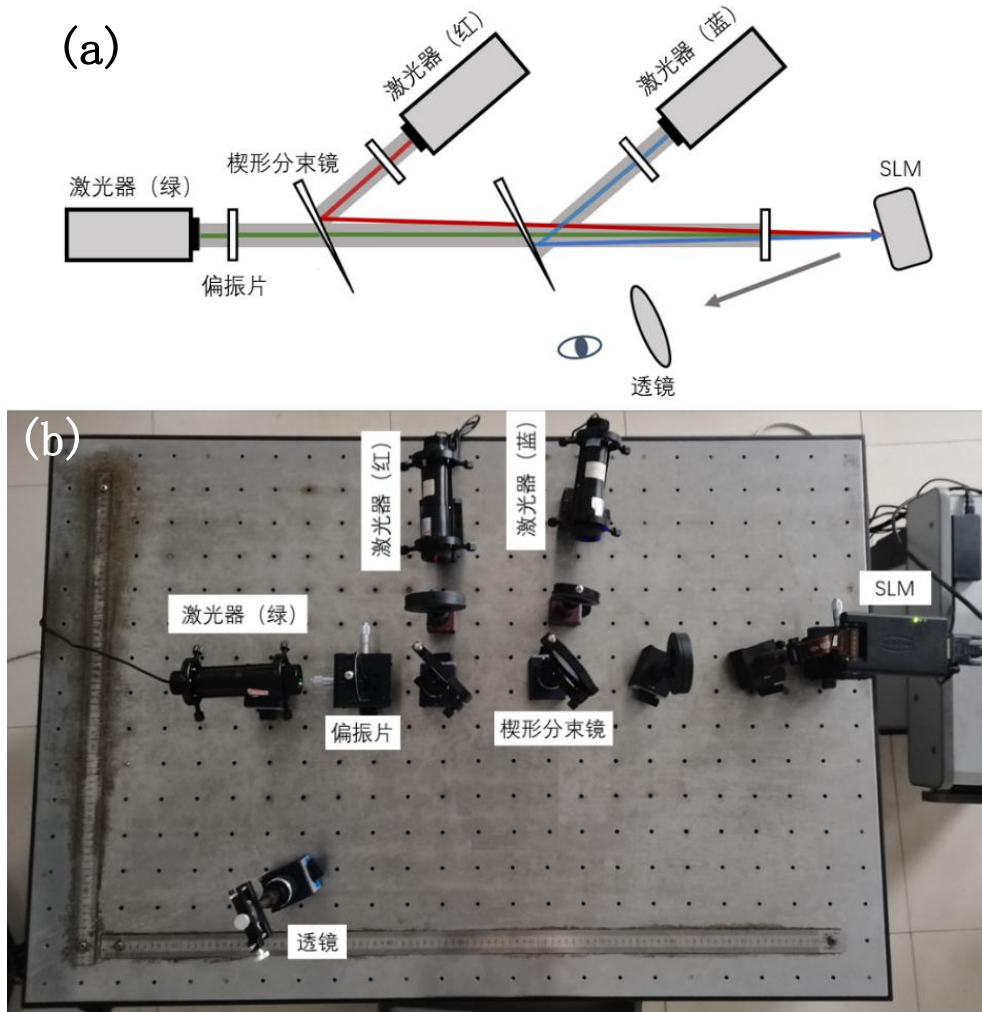


图 14 (a) 空间叠加法光路示意图 (b) 空间叠加法光路

## 4.2 软件

因为空间叠加法更为常用，所以我们设计了集成式的应用软件（空间叠加法），将常用的计算全息程序放在一起，方便全息计算的操作。



图 15 全息计算软件

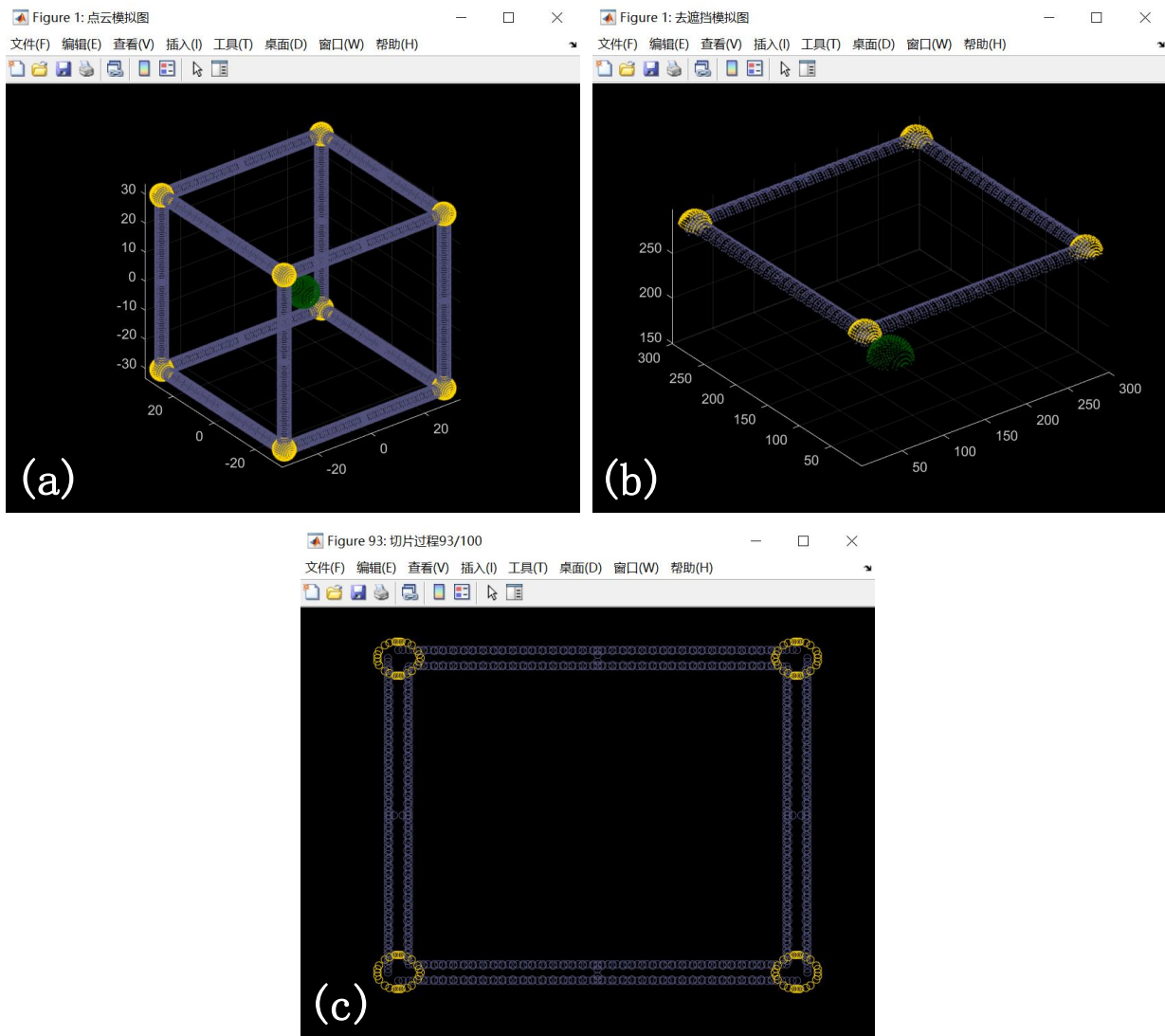


图 16 全息计算提示窗口

(a) 点云模拟图 (b) 去遮挡模拟图 (c) 切片过程



图 17 全息图提示窗口

## 5 实验步骤

以数字建模+空间叠加法为例，数字全息全部操作流程如下：

- (1) 使用 3Ds max 建模得到 3D 数字模型；
- (2) 使用 MeshLab 细分得到 (1) 中模型的点云 xyzrgb 数据；
- (3) 使用全息计算程序，计算得到对应全息图；
- (4) 调整激光器水平，并准直平行光管；
- (5) 搭建光路；

(6) 将正交标准校正模型的全息图加载到 SLM 上，调节屏的距离，使之清晰，且大小适当。调节行光管位置、倾角以校正全息像的位置，确认三颜色通道全息像完全重合；调节偏振片以校正全息像的颜色，调节至全息像为白色（即[255 255 255]）；

(7) 将星形标准校正模型的全息图（应与正交标准校正模型全息图的成像距离一致）加载到 SLM 上，检查校正结果，并进行相应微调；

- (8) 将 3 中得到的计算全息图加载到 SLM 上，即可在合适位置观察到全息像；
- (9) 可选择轴锥镜，观察轴锥镜对 3D 全息景深的作用；
- (10) 可改变偏振片角度，进行配色实验；
- (11) 可加上狭缝，更改成划分法的全息图，尝试空间划分法。

## 6 应用效果

### 6.1 轴锥镜实验效果

以 C60 为例进行实验（如图 13，14），可以看到，叠加轴锥镜相位后，成像清晰距离变大。而且轴锥镜焦距越大，成像清晰距离越大。

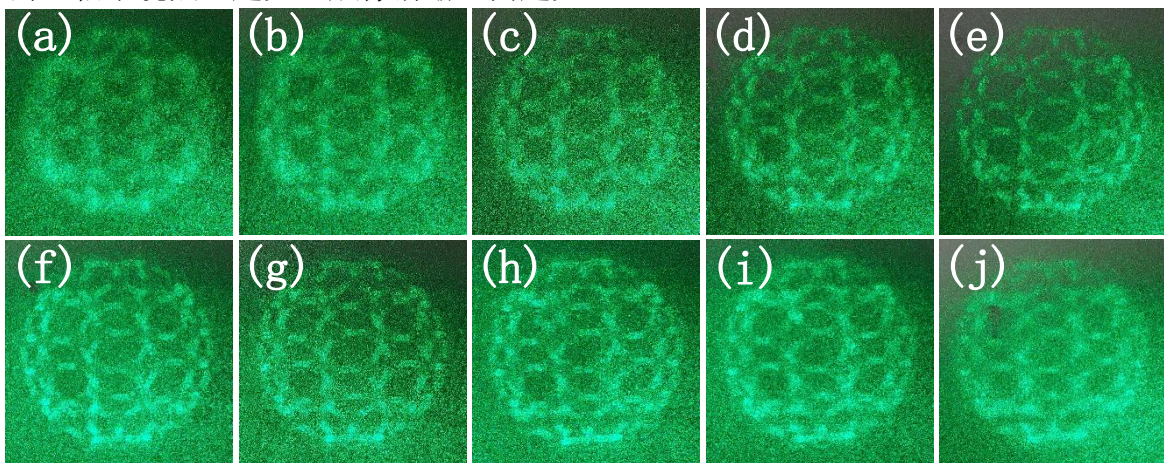


图 18 未叠加傅里叶透镜相位的全息再现像  
(a) ~ (j) 成像距离 860mm 至 1040mm，间隔 20mm



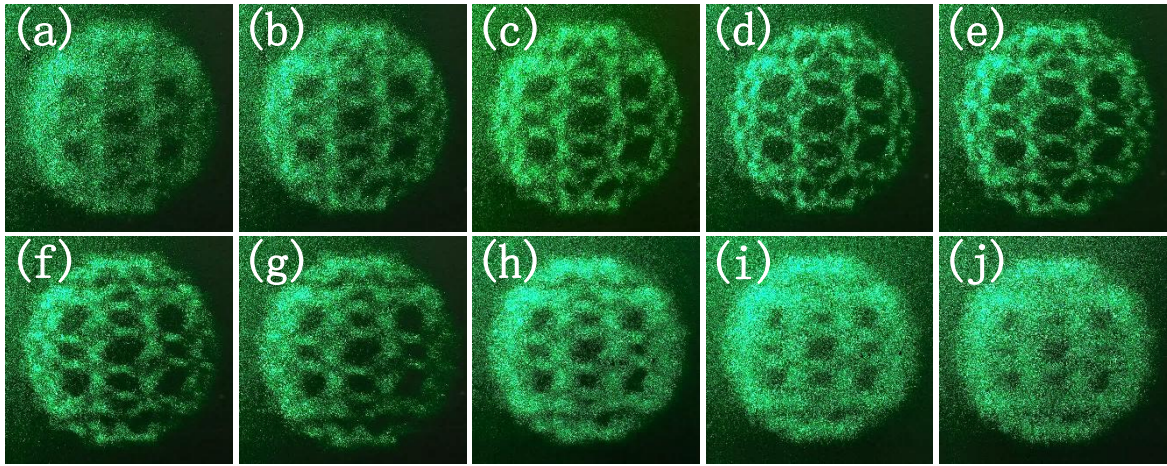


图 19 叠加轴锥镜（焦距 2000mm，焦深 100mm）相位后全息再现像  
 (a) ~ (j) 成像距离 580mm 至 760mm，间隔 20mm

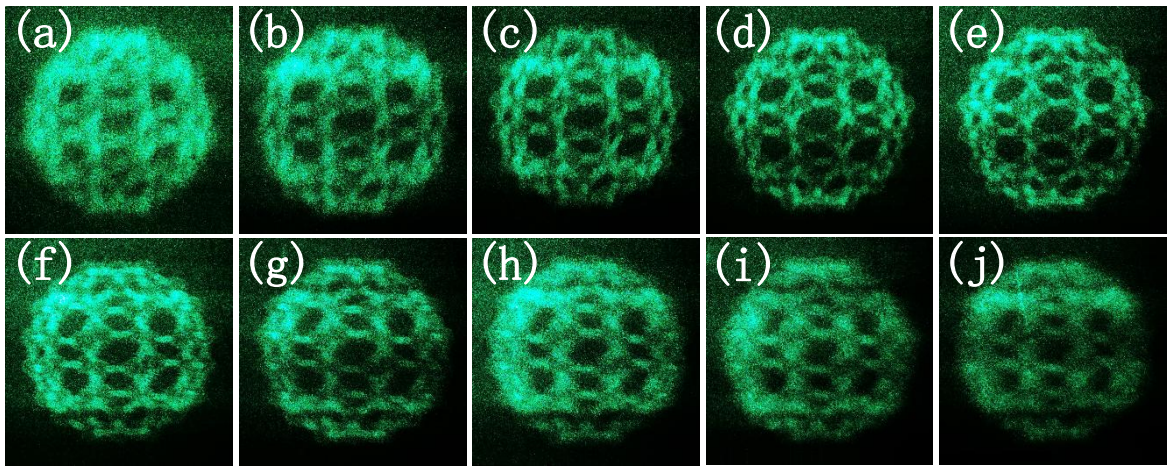


图 20 叠加轴锥镜（焦距 4000mm，焦深 100mm）相位后全息再现像  
 (a) ~ (j) 成像距离 700mm 至 880mm，间隔 20mm

## 6.2 数字全息实验效果

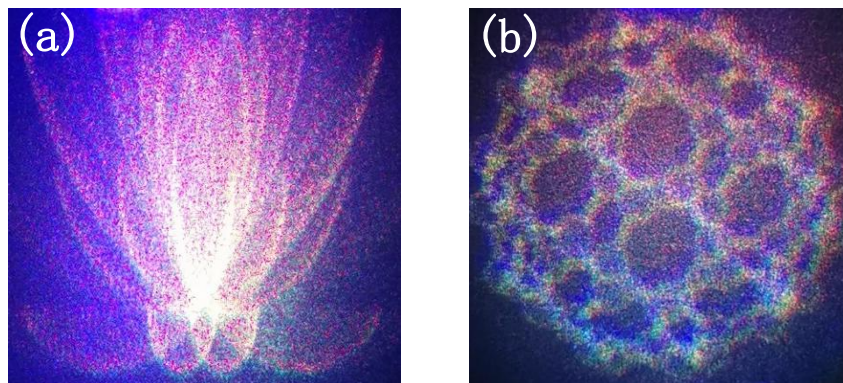


图 21 使用空间划分法制作相息图获得的全息投影像  
 (a) 莲花 (b) C60



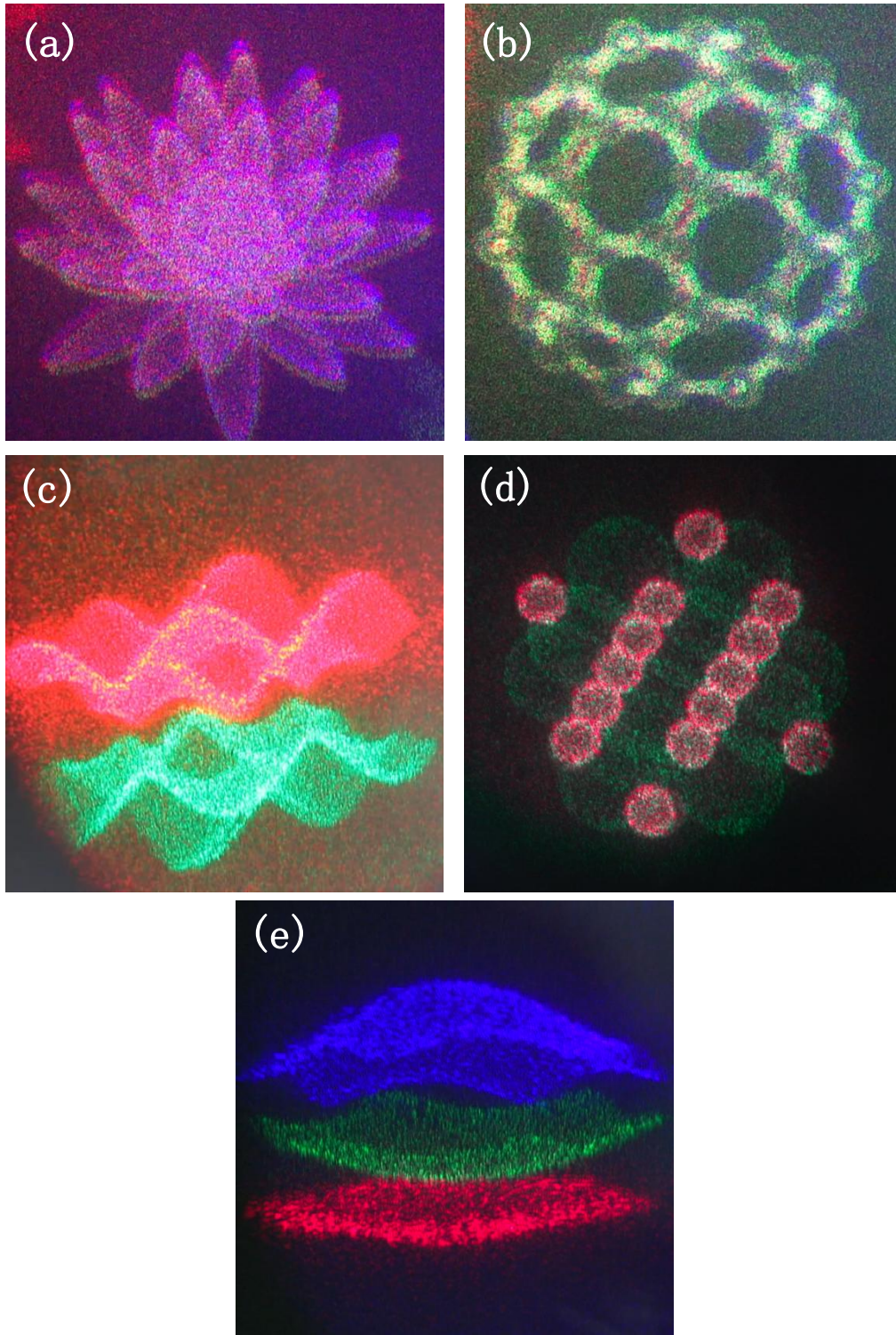


图 22 使用空间叠加法制作相息图获得的全息投影像  
 (a) 莲花 (b) C60 球棍模型 (c) 石墨烯能带  
 (d) NaCl 比例模型 (e) kagome 能带  
 请在视频材料中观看动态效果!

## 7 实验结论

在本文中，我们研制了一种适合实验教学的新型裸眼彩色动态 3D 数字全息实验系统。

### 7.1 创新特色

- (1) 使用数字建模、公式导出、实物拍摄等多种方法独立获得三维点云坐标及颜色数据；
- (2) 设计了轴锥镜还原物体空间的真实景深，增强全息投影的立体感；
- (3) 提出了全息像的校正方法，即使用正交标准校正模型校正全息像的位置和颜色，并用星形标准校正模型检查校正结果，使得全息像调控更为精准、便捷；
- (4) 实现了裸眼彩色动态 3D 数字全息，提供了逼真的 3D 显示效果。

### 7.2 不足与展望

但该系统仍有部分性能需要提升，这些也是彩色 3D 数字全息都仍面对的问题。首先是景深不足，特别是较小的立体像前后点云串扰严重，极大的限制了景深的增加。再者是视角小，无法和干板全息媲美。我们将在接下来的研究中继续探索以上问题和别的问题的解决方案，以求获得更为逼真的彩色立体像。

### 7.3 应用前景

我们的研究成果可用于近代物理教学，如现代信息光学、数字全息进阶内容、色度学配色实验等。除了宏观物体，我们的实验装置还可以很好地对物理微观模型（如晶格、能带等）建模并实现 3D 全息再现，为诠释和呈现微观立体物理模型提供了一种具有全新视觉特效的方法。

## 参考文献

- [1] 沈川. 彩色全息显示方法与系统概述[J]. 激光与光电子学进展, 2014.
- [2] 林志勇. Kagome 晶格的能带结构、磁性和拓扑性质[D]. 中国科学技术大学, 2019.
- [3] 李俊昌. 衍射计算及数字全息[M]. 北京 科学出版社, 2014.
- [4] 向东. 三维物体的计算全息图快速生成算法及显示研究[D]. 昆明理工大学, 2017.
- [5] 祖慈. 基于锥透镜的计算 LCOS 全息成像[D]. 安徽大学, 2016.
- [6] Davidson N., Friesem A. A., Hasman E.. Holographic axilens: high resolution and long focal depth[J]. Optics Letters, 1991, 16(7): 523-525
- [7] 洪青青. 基于衍射轴锥镜的全息投影系统研究[D]. 安徽大学, 2020.

# 基于 LabVIEW 的空气比热容比测定

参赛者：孙阳， 郑浩哲， 颜亚楠， 仇静， 何静雯  
(浙江农林大学光机电工程学院，杭州临安 311300)

指导教师：倪涌舟、徐一清

**摘要：**设计了一套基于 LabVIEW 系统的可视化空气比热容比快速测定仪。将实验装置与计算机结合，由 Arduino 单片机采集 BMP388 气压传感器数据，通过串口上传至上位机 LabVIEW 程序，实现了数据的自动采集和温度压力变化曲线的实时绘制存储，提高了实验的可视化和自动化程度，便于学生理解变化过程，也提高了实验结果的准确性。

**关键词：**气体比热容比，Labview，Arduino 单片机，气压变化曲线

## 一、研究背景

《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020年)》指出要“强化信息技术应用”。以计算机为核心的信息技术在科学研究、工业应用和日常生活等领域的使用越来越广泛，实验教学、技术的改革也应当要适应这个趋势。实验教学的数字化、信息化及相关资源的共享利用已成我国当前实验教学发展的热点话题。大力推进信息技术在教学过程中的普遍应用，促进信息技术与学科课程的整合，充分发挥信息技术的优势，为学生的学习和发展提供优良的学习环境和有力的学习工具，这是教育研究和探索的热点。

物理实验的教学，随着时代的发展越来越需要智能化和自动化。大学物理实验都离不开实验结果的可视化，可视化的手段通常采用绘制线状图等方式，以往传统的绘制方法，通常需要实验者先收集并记录数据（以书面或电子记录的方式），然后经过储存或传输，在另外的平台使用第三方工具进行图的绘制。这种传统的方法繁琐复杂，最重要的是很难做到实时绘图。在物理实验教学的课堂中，对于状态变化非常快的物理量，手动记录数据是不允许的，观察分析其快速变化过程中的细节也是非常困难的。

近年来，随着计算机技术和数字信号处理技术的进步，“虚拟仪器”、“虚拟实验室”等虚拟现实技术的应用变得越来越普及。国内部分高等院校也逐渐将这种技术应用到课堂教学、实验和科研工作中，尤其是在工程学和物理学等学科领域。因此，本文对测定空气比热



容比的传统实验装置进行改进，设计了一套基于 LabVIEW 虚拟仪器的可视化空气比热容比快速测定仪，实现了数据的自动采集和温度压力变化曲线的实时绘制存储，提高了实验的可视化和自动化程度，便于学生理解变化过程。该实验装置简单，内容丰富，既学习了空气比热容比测量方法，又把传感器技术、数据采集技术引入到大学物理实验中。

## 二、工作原理

### 2.1 空气比热容比的定义

在准静态绝热过程中，理想气体的压强  $p$ 、体积  $V$  和温度  $T$  遵守绝热过程方程  $pV^\gamma$  等于恒量的规律，其中  $\gamma$  是理想气体的比定压热容  $C_p$  和比定容热容  $C_v$  之比，通常称  $\gamma = C_p / C_v$  为该气体的比热容比。

### 2.2 实验原理

以储气瓶内空气作为研究的热力学系统，进行如下的实验过程：

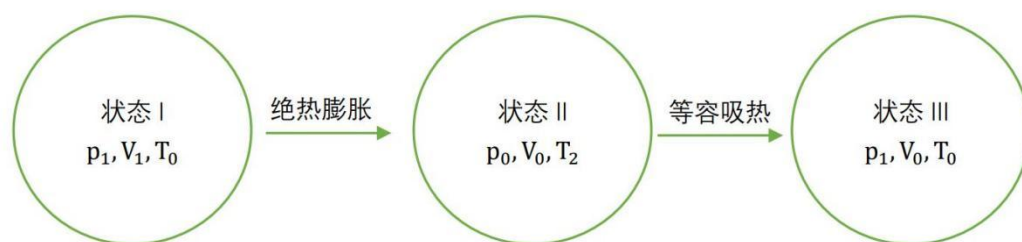


图 1 系统状态变化过程示意图

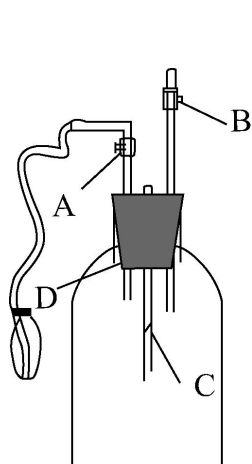


图 2 实验装置图

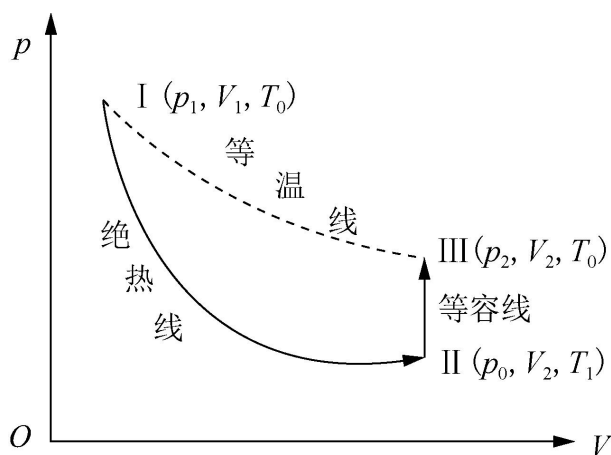


图 3 系统状态变化过程 p-V 坐标示意图

(1) 首先打开放气活塞 B, 使贮气瓶与大气相通, 再关闭放气活塞 B, 此时, 瓶内充满与周围空气同温同压的气体。

(2) 打开进气活塞 A, 用充气球向瓶内打气, 充入一定量的气体, 然后关闭进气活塞 A。此时瓶内空气被压缩, 压强增大, 温度升高, 待瓶内气体温度稳定时, 即达到与周围温度(室温)平衡, 此时的气体处于状态 I ( $p_1, V_1, T_0$ )。

(3) 迅速打开放气活塞 B, 使瓶内气体与大气相通, 当瓶内压强降至  $p_0$  时, 立刻关闭放气活塞 B, 将有体积为  $\Delta V$  的气体喷泻出贮存瓶。由于放气过程较快, 瓶内保留的气体来不及与外界进行热量交换, 可以认为是一个绝热膨胀过程。在此过程后瓶内保留的气体由状态 I ( $p_1, V_1, T_0$ ) 转变为状态 II ( $p_0, V_2, T_1$ )。  $V_2$  为贮气瓶体积,  $V_1$  为保留在瓶内这部分气体在状态 I 时的体积。

(4) 由于瓶内气体温度  $T_1$  低于室温  $T_0$ , 因此瓶内气体慢慢从外界吸热, 直至达到室温  $T_0$  为止, 此时瓶内气体压强也随之增大为  $p_2$ 。稳定后的气体状态为状态 III ( $p_2, V_2, T_0$ )。从状态 II  $\rightarrow$  状态 III 的过程可以看作一个等容吸热的过程。由状态 I  $\rightarrow$  状态 II  $\rightarrow$  状态 III 的过程, 如图 3 所示。

状态 I  $\rightarrow$  状态 II 是绝热过程, 由绝热过程方程得

$$p_1 V_1^\gamma = p_0 V_2^\gamma \quad (1)$$

状态 I 和状态 III 的温度均为  $T_0$ , 由气体状态方程得

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2)$$

合并式 (1) 和式 (2), 消去  $V_1$ 、 $V_2$  得

$$\gamma = \frac{\ln p_1 - \ln p_0}{\ln p_1 - \ln p_2} = \frac{\ln p_1 / p_0}{\ln p_1 / p_2} \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出, 只要测出  $p_0$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ , 就可以求得空气的  $\gamma$ 。

### 2.3 传统实验仪器的在教学中存在的缺点

在气体比热容比的测量实验中, 我校目前采用的是上海复旦天欣仪器有限公司生产的 FD-NCD-II 型空气比热容比测定仪 (见图 4、5), 它由扩散硅压力传感器  $P$ , 集成温度传感器  $T(AD590)$ 、测量仪表(装有数字电压表、直流稳压电源、固定取样电阻等)、大玻璃容器、充气球及导线等组成。扩散硅压力传感器连同内部电源及数字电压表用于测量容器内的气体压强, 该测量装置的转换灵敏度为  $20mV/kPa$ , 测量精度为  $5Pa$ 。它显示的是容器内的气体压强大于容器外环境大气压的压强差值, 集成温度传感器  $T(AD590)$  为线性测量元件, 灵敏度为  $1.00\mu A/^\circ C$ , 环境大气压强可以用福廷式气压计或指针式气压计测量。

数字电压表: 采用三位半数字电压表作硅压力传感器的显示仪表(测空气压强)、采用四位半数字电压表作为集成温度传感器显示仪表(测空气温度)。

扩散硅压力传感器配用三位半数字电压表，它的测量范围大于环境气压  $0\sim 10kPa$ ，转换灵敏度为  $20mV/kPa$ 。实验时，贮气瓶内空气压强变化范围约  $6kPa$ 。空气温度测量采用电流型集成温度传感器  $AD590$ 。

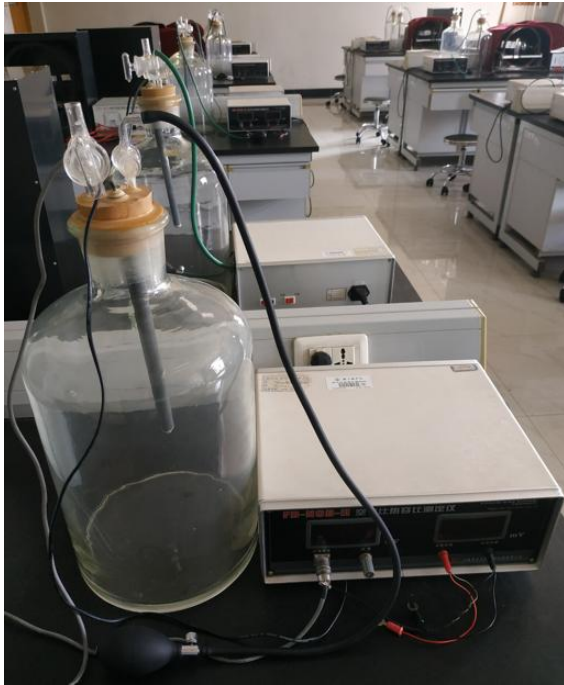


图 4 传统实验仪器

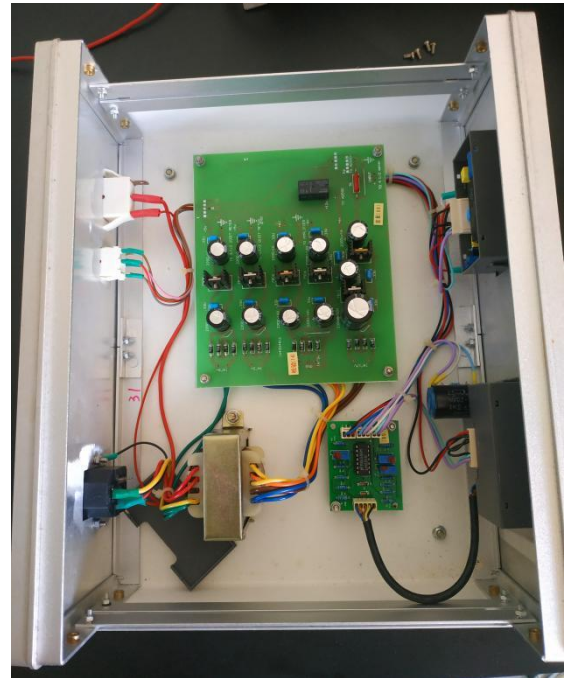


图 5 测量仪表内部结构

缺点分析：

- 1) 数据显示为电压值，需要进行一定的关系式转换成实际的压强差和温度值。
- 2) 无法获得初始的压强和温度大小，需要福廷式气压计和水银温度计测得实验室的初始大气压强和温度，然后再经过计算才能获得某一时刻装置内的气体压强值和温度大小。
- 3) 实验装置所用传感器灵敏度相对较低，读取数据存在延迟。
- 4) 气体比热容比实验在测量过程中经历了四个热力学过程，在四个过程中瓶内温度和压强都在不断的变化，传统实验中观察温度压强变化的方式的是观察数字电压表数值的瞬时变化，实验结束只能得到平衡状态时的数值，不便于观察装置内状态的实时变化。
- 5) 需要手动记录电压值换算，求出空气的  $\gamma$ ，计算量较大。

## 2.4 仪器改进方案

整个仪器改进系统如图 6 所示，由 BMP388 气压温度传感器、Arduino 单片机和上位机 LabVIEW 数据采集软件三部分组成，实现了气压温度采集、计算机串口通信、P-t 及 T-t 曲线显示和空气比热容比计算等功能，提高了实验的可视化和自动化程度，使得系统的视觉效果更好，人机交互性更强。

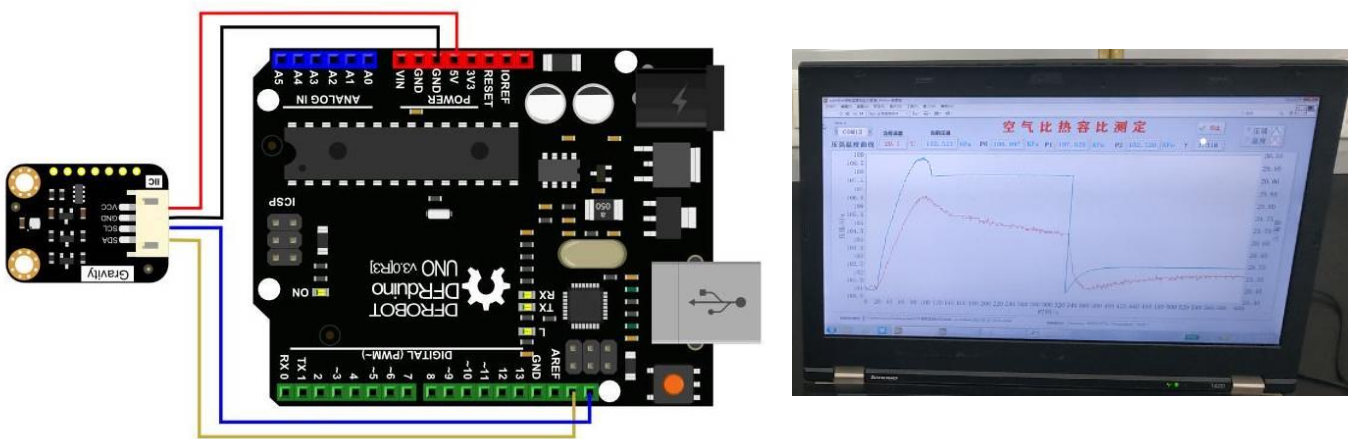


图 6 系统组成图

**BMP388气压温度传感器 + Arduino单片机 + LabVIEW上位机**

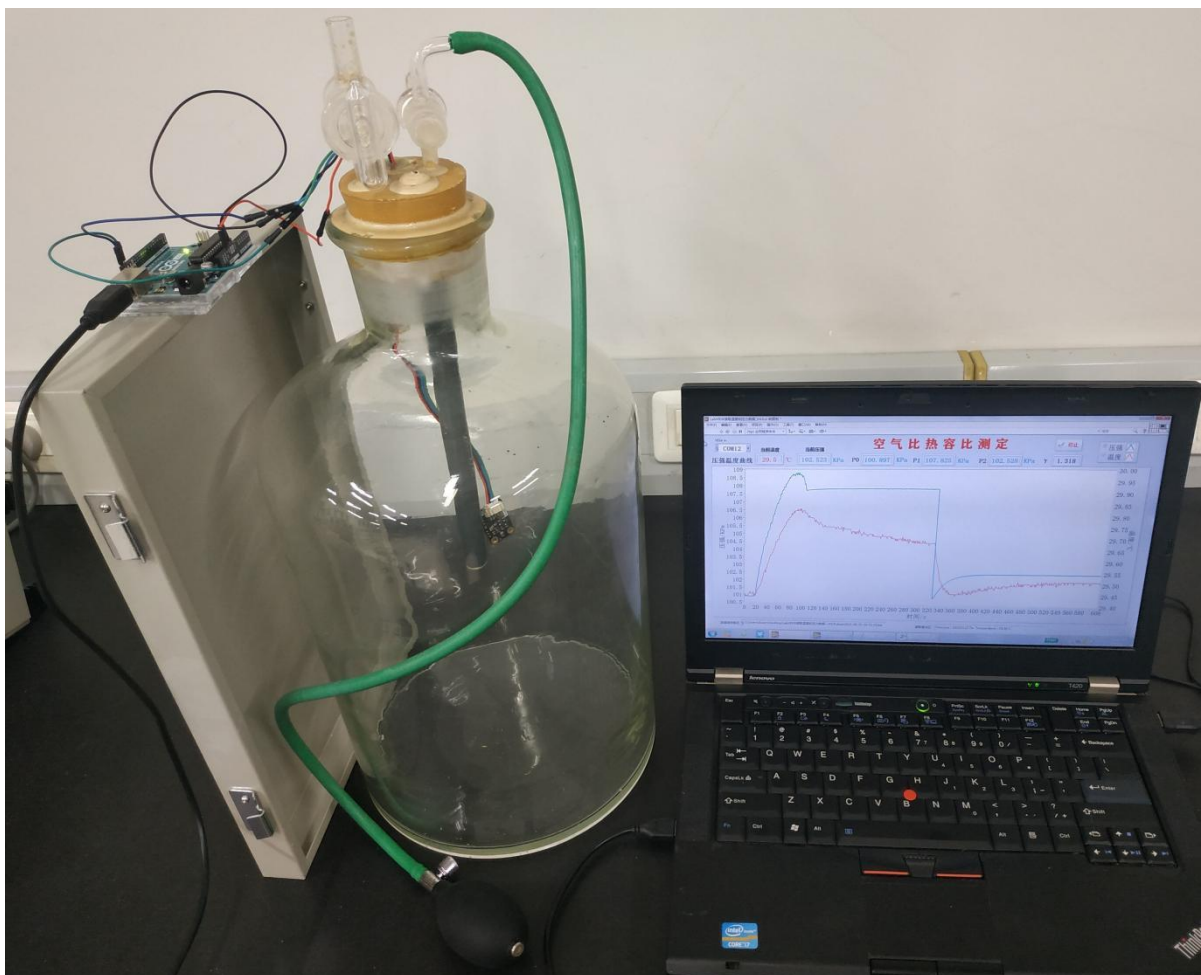


图 7 改进实验装置实物图

改进后实验装置拥有以下优势：

1、数据采集智能化：通过 Arduino 单片机实时读取 BMP388 传感器温度压力数据，通过串口上传至上位机的 LabVIEW 自编数据采集软件，不仅实现了对数据的采集功能，还实现



了对采集数据的快速分析、绘图、导出等功能。

2、装置内环境实时观察：BMP388 气压温度传感器采集的数据具有较高的精度， 经过处理，可在上位机中实时显示温度和压强变化曲线，数据自动存储和计算等功能。

3、利用固耐特密封硅橡胶和真空油脂对实验装置进行密封，保证装置气密性良好。

4、采用软件即仪器的全新理念。用更便宜的软件代替昂贵的硬件，并且方便复制和移植。

### 三、技术分析

#### 3.1 LabVIEW 介绍

LabVIEW(Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)是美国国家仪器公司(NI)开发的实验室虚拟仪器集成环境的简称，是目前虚拟仪器开发的一个标准工具。它采用全图形化编程，在计算机屏幕上利用其内含的功能库和工具库产生软件面板，用来为测试系统提供输入值并接受其输出值。它的内部还集成了大量生成图形界面的模板，如各种开关、表头、刻度杆、指示灯等，几乎包含了组成一个仪器所需的主要部件。基于 LabVIEW 开发的虚拟仪器系统可用于测试、过程处理和控制，用户使用鼠标操控虚拟面板上的按键、旋钮、开关等控件就能实现同传统仪器一样的测量功能。

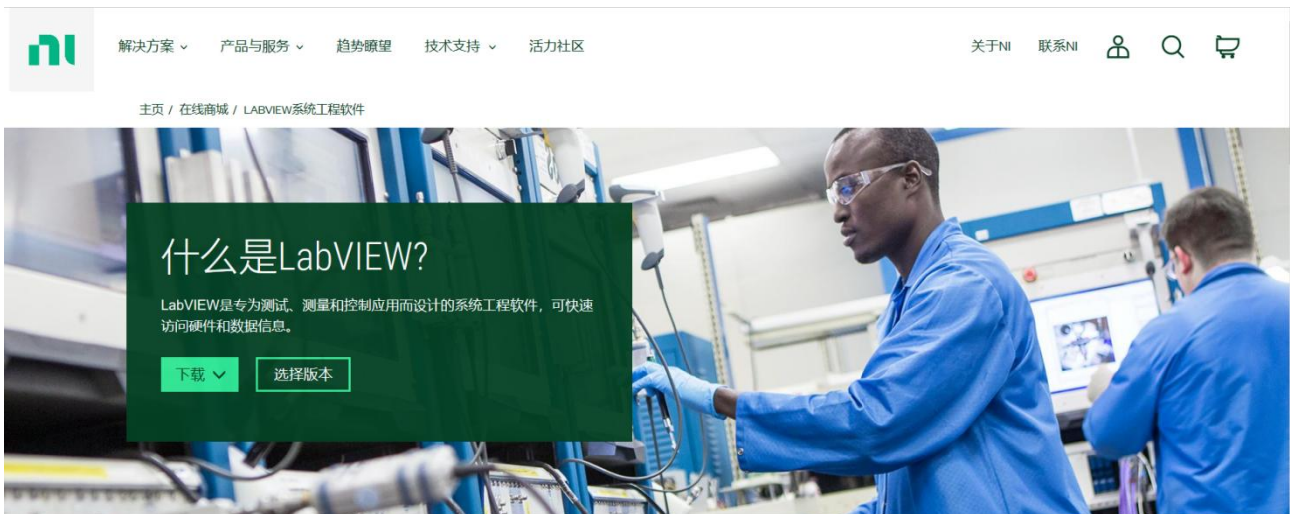


图 8 NI 公司中文主页界面

与传统仪器相比，虚拟仪器具有明显的优点。它的面板是由编程实现，不受“加工工艺”和“标准件”的限制，计算机的利用节省设备的同时也提高了系统的灵活性；仪器的功能由用户根据需要在软件上实现，仪器性能的改进和功能的扩展只需要相关软件设计的更新，研制周期大为缩短，同时具有开放、灵活、与网络及周边设备互连的特点。虚拟仪器技术还随着计算机技术的发展而发展。使用虚拟仪器技术，利用通用的仪器硬件还可以设计出高性能

价格比的仪器系统。具备这一切特性的根本原因在于“软件就是仪器”，因此虚拟仪器所具备的优势是传统仪器不可比拟的。虚拟仪器在物理实验教学和科研中的应用和发展是一种趋势。

### 3.2 上位机 LabVIEW 编程

LabVIEW 程序包括前面板及程序框图。前面板即程序界面，包括实验参量设置及测量结果显示。程序框图即程序的图形代码，根据串行口通讯协议，通过调用 LabVIEW 中函数实时读取 Arduino 单片机的数据，即 BMP388 传感器的压强和温度值，并将实验数据以文本形式保存于计算机磁盘。充分利用 LabVIEW 数据流驱动的优点，将采集的电压数据实时传送到图形显示控件 Waveform chart 中实时显示压强和温度变化曲线。

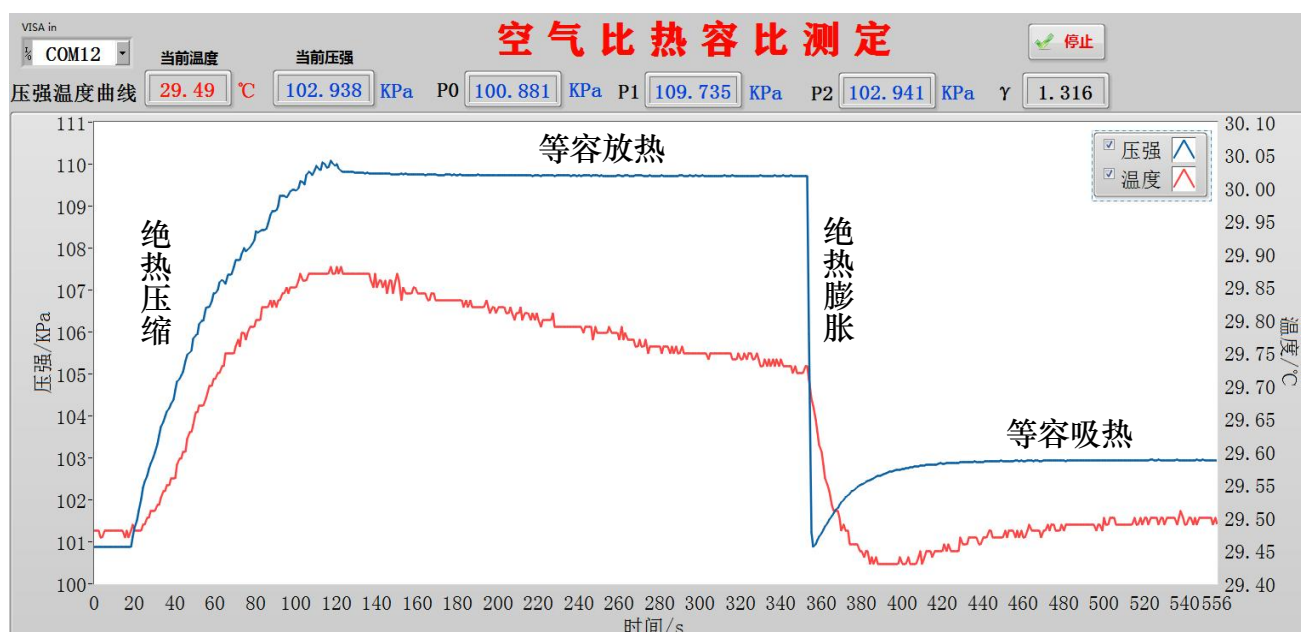


图9 前面板图

P0: 初始瓶内气压压强; P1: 等容放热稳定后瓶内气压压强;

P2: 等容吸热稳定后瓶内气压压强;  $\gamma$ : 空气比热容比

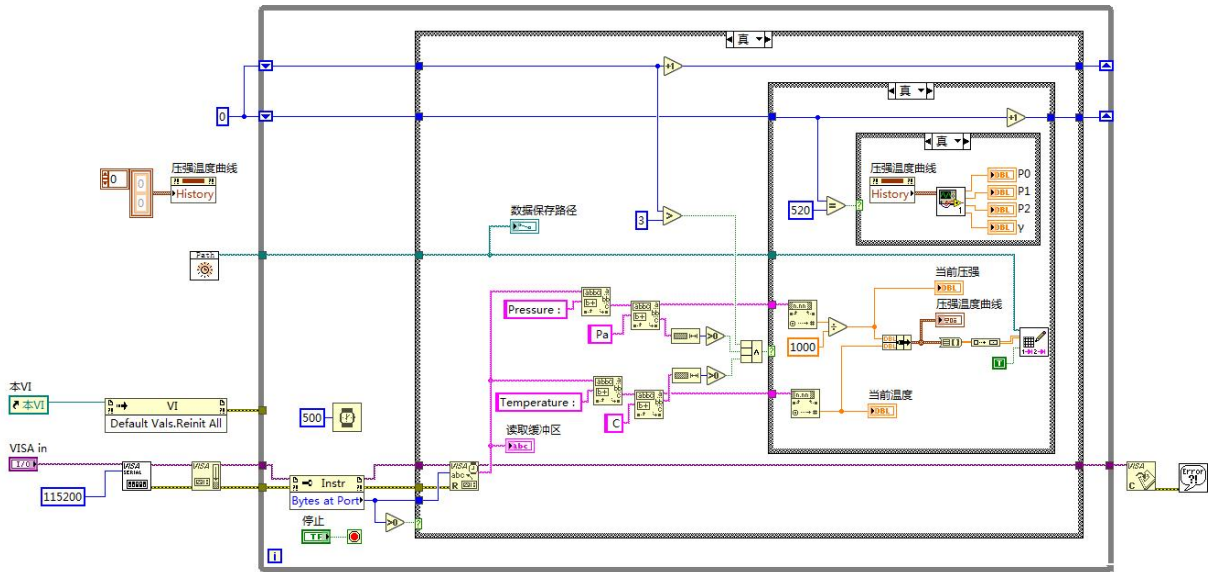


图 10 程序框图

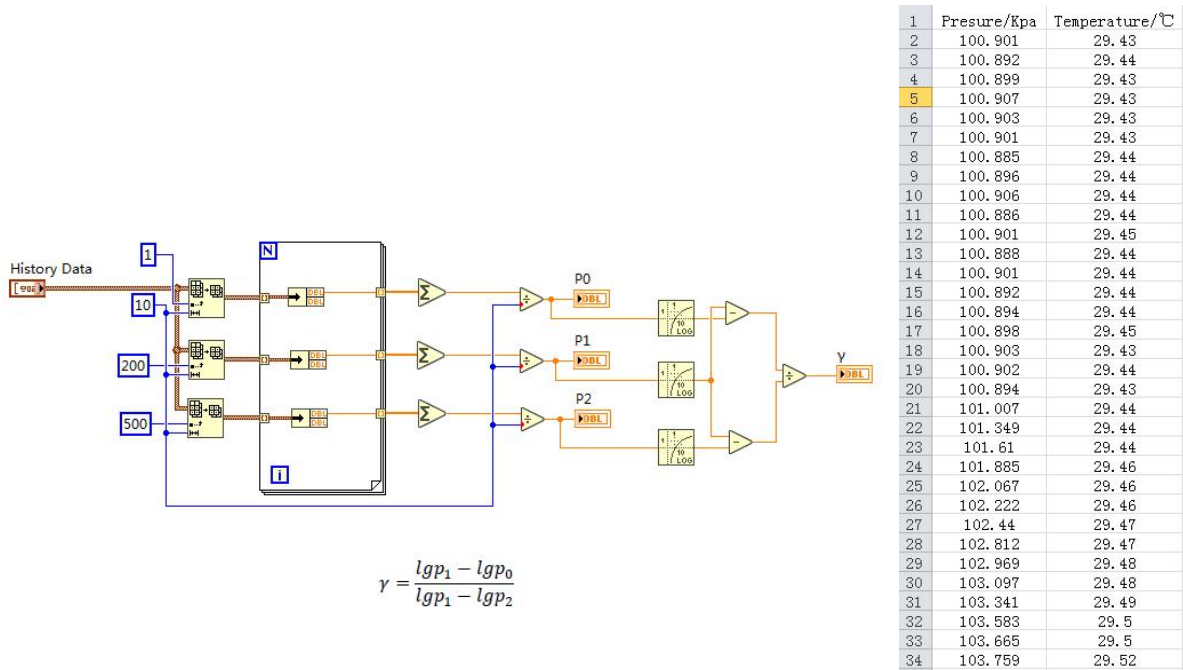


图 11 程序框图及保存的实时数据

### 3.3 下位机 Arduino 单片机编程

Arduino 是一款便捷灵活、开放性高的电子产品开发平台，由可编程的 Arduino 开发板和集成开发环境 Arduino IDE 构成。Arduino 开发板配备了多个 IO 引脚接口，可通过杜邦线连接各种元器件。通过在集成开发环境中编写程序，编译后，通过 USB 接口烧录进 Arduino 开发板中，Arduino 开发板可以对各种元器件反馈的数字或模拟信号进行接收，分析和处理，实现智能控制。



如图 7 所示，Arduino Uno 引脚可以分为以下四类：电源引脚、数字 IO 引脚、模拟输入引脚、以及串口通讯引脚；

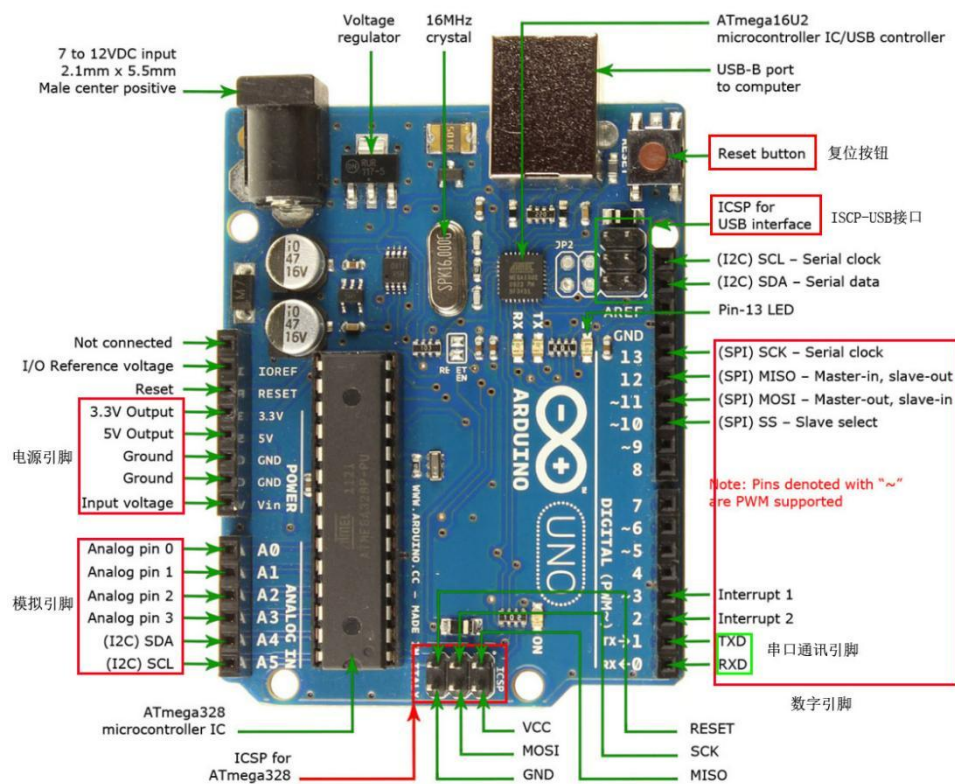


图 12 Arduino Uno 引脚图

Arduino Uno R3 作为本系统的主控平台，引脚丰富，软件程序开发效率高，库函数丰富，硬件成品开源免费，设备价格低廉。

本项目最终选定将 Arduino Uno 作为主控硬件平台，其优势主要是以下四个方面：

- (1) 多平台：Arduino 集成开发环境生态丰富，兼容 Windows、MacOS、Linux
- (2) 开发效率高：Arduino 库函数丰富，很多元器件模块都有对应的函数包和开发工具包，开发语言简洁易懂。
- (3) 开源性：Arduino 官方开源了开发板的硬件原理、集成开发环境、核心源码，在开源协议的许可范围内可以高度自定义，拥有广泛的用户群体。
- (4) 功能完善：Arduino 支持数字模拟引脚、脉冲宽度调制、软硬件中断、软硬件通讯串口，满足项目开发的硬件需求。

对于本系统来说，Arduino 主控制器实现手机信号接收，光电传感器数据采集分析和处理转发运算操作，并输出信号控制舵机动作，实现调光功能。

### 3.4 BMP388 气压温度传感器

BMP388（见图13）是一款 24 位高精度气压温度传感器，可实现精确的高度跟踪，检测大气压强、温度，支持 I2C/SPI 接口，兼容 3.3V/5V 电平。尺寸小，低功耗、低噪音，高精度，特别适用于无人机，精密高度计、环境监测和物联网等应用场景。

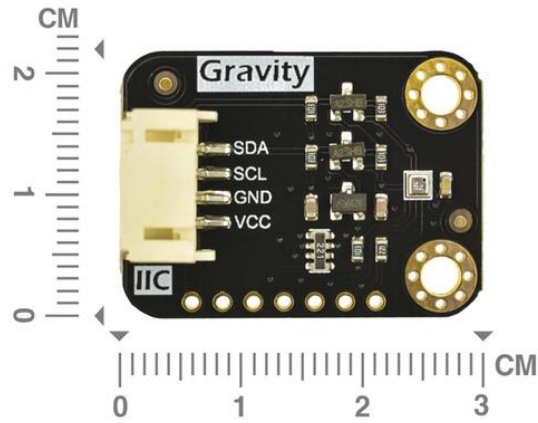


图 13 BMP388 气压传感器

气压检测范围	300~1250hPa
气压相对精度	300~1100hPa(分辨率 0.18Pa, 误差±1hPa)
温度漂移系数	±0.75Pa/K(700~1100hPa, -20~65°C)
温度绝对精度	±0.5°C(0~65°C)

表 1 BMP388 传感器的精度系数

## 四、应用前景

传统实验仪器中的传感器通过间接测量的方式来获取实验数据，需要经过一定的换算才能得到所需的温度和压强的实验数值。仪器改进后，采用BMP388气压温度传感器，能够将采集到的数据发送至Arduino单片机进行处理并通过串口传输至LabVIEW上位机。使用者可以直接读取所需的温度、气压实验数值，不必再进行人工换算处理。通过LabVIEW编程，使实验数据处理更准确，更便捷。Arduino单片机和BMP388气压温度传感器，也比传统实验装置更轻便、更不易损坏，有利于实验仪器的维护管理。

改进后的气体比热容比测试仪，测试精度更高、数据直观准确、测量时间短、测量方法

简单、能够更好的满足科研测试和教学实验的要求。实现数据的自动化测量，智能分析与处理，为师生提供更便捷的数据分析的方法，让学生把实践的重点放在对整个实验过程中的原理的理解与操作能力的锻炼，而不是花费更多的时间在数据的记录与计算上，从而大大提高实验的教学效率。同时，改进过的导热系数测试仪对与传热学科研实验测试也提供了极大的便利，该实验仪可以做到科研与教学共享的优势。

本实验所研发的采集系统可以很好的移植到其他实验仪器中使用，只需要对不同的传感器进行相应的设计，比如，可以对光信号，压力信号，压强信号，声音信号等常见信号进行转换设置，可对实验室有关测控类的实验仪器进行个性化定制设计。

### 参考文献

- [1] 戴朝卿, 王悦悦. 大学物理实验教程—公共基础平台与模块化实验[M]. 北京: 科学出版社, 2018.
- [2] 王桂忠, 安金保, 侯华明, 等. 基于 LabVIEW 的空气比热容比测定系统[J]. 中国科技博览, 2008, 000(019):49-50.
- [3] 姜帆, 周国友, 吴卫华, 等. 一种基于 IoT 技术的气体比热容比实验测量系统: CN108872307A[P]. 2018.
- [4] 陈吕洲, Arduino 程序设计基础(第二版)[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [5] 何雨华, 方恺, 陈铭南, 等. 智能型气体比热容比测定实验教学网络的系统设计[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(11):37-37.
- [6] 吴卫华, 朱小芹, 王海峰, 等. 一种智能化数字式空气比热容比的测量系统: CN109142423A[P]. 2019.
- [7] Martin Barmes. Virtual reality and simulation[C]. In:Proc of WSC94, 1994:7 - 14
- [8] 杨智, 袁媛, 贾延江. 《虚拟仪器教学实验简明教程—基于 LabVIEW 的 NI ELVIS》[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.

# 基于水下无线通信技术的海体传感网络系统

参赛者：励焯，陈骐毓，郑泽波，闻嵩涛，沈佳俊

（中国计量大学现代科技学院，义乌 322000）

指导教师：罗宏雷

**摘要：**本项目开发研制了一款基于水下无线通信技术的海体传感网络系统，以“海洋数字经济”为导向。针对水下通信难的问题，利用海水中传导电流远远大于位移电流的特性，实现了**以传导电流为载体的通信技术**，增加水下作业的安全性。并深度剖析传感器的工作原理，利用各种**传感器**采集海体的水质、温度等数据，以**物联网**技术为核心，通过该技术，形成传感网络，可让海体的水质相关数据联网化、实时化，大大提升了水下作业的针对性，也提供了可长期跟踪研究、分析该区域海洋环境的途径。

**主题：**水下无线通信 物联网 海洋数字经济 控制原理

**关键词：** 传导电流 传感网络 海体水质检测 海洋作业

## 1. 研究背景：

当前，水下通信方式主要分为有线通信和水下无线通信。水下有线通信系统需要导线连接，限制了潜水员的活动范围<sup>[1]</sup>。相比较之下水下无线通信技术的应用范围更广，能适用于更多的通讯环境。水下无线通信技术主要有水声通信、水下电磁波通信以及利用传导电流场进行通信<sup>[2]</sup>。

但相比于水下光通信对方向性要求极高，收发端方向稍有误差便会影响通信质量<sup>[3]</sup>的特性；电磁波在海水中衰减严重，天线尺寸太大不利于作业时携带<sup>[4]</sup>；水声通信技术易被水体的非均匀性造成的盲区所干扰，基于传导电流场理论的水下无线通信方式优点明显。水下环境虽存在极大不确定性，但即使存在通信盲区，传导电流场仍能通信<sup>[5]</sup>。

同时，“数字经济”作为十四五发展规划中的“新引擎”，通过大数据、物联网等新兴技术，实现资源的快速优化配置与再生、实现经济高质量发展的经济形态，大大节约了人力和克服了时间的约束，为行业的智能化转型带来了极好的平台。

基于以上研究背景，我们小组成员以“海洋数字经济”为目标方向展开了相关资料查阅，以解决水下通信困难为项目重点方向，利用电偶极子天线承载传导电流场进行通信的方法解

决该痛点问题。并在项目装置中设置水质、温度等与海洋环境相关传感器，以此作为海洋环境相关数据的监测工具，并接入物联网，实时提供精确数值，保障了海洋作业的安全性及准确性，也为海洋保护贡献自己的力量。

## 2. 系统框架：

如下图所示，是我们研发的系统总体逻辑架构及各模块的工作流程框架图：

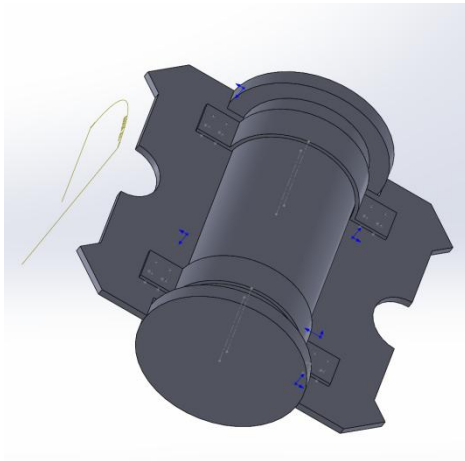


图 2. 1 系统装置建模图



图 2. 2 系统装置实物图

如图 2.1、图 2.2 所示，该装置为我们小组装置的初步结构，由图可知，该装置利用四个 45° 的推进器，配有对应电调，使用单片机发送信号，以此完成前进、后退、转向等姿态改变，并使用防水舱进行电控电路的摆放。装置的外侧分别装有 TDS 传感器、浊度传感器、温度传感器可实时将相关数据传送至单片机。

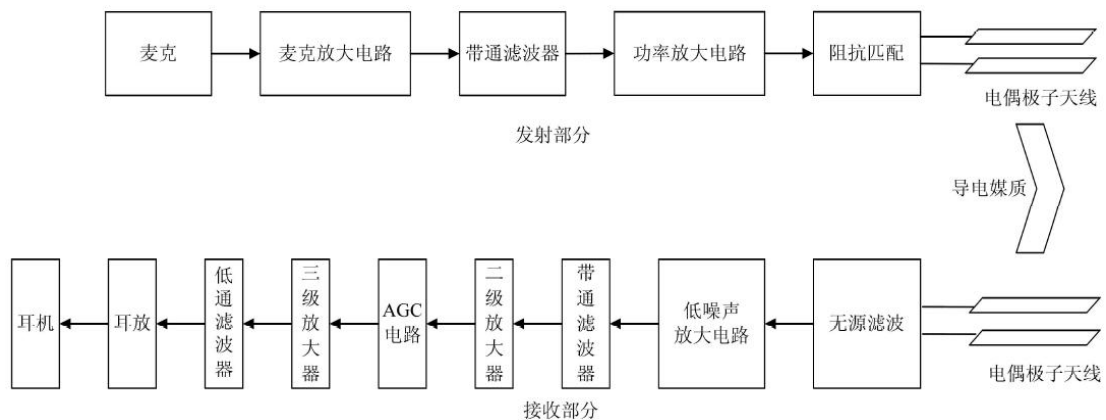


图 2.3 水下通信部分工作流程图

如图 2.3 所示，声音信息由麦克风进入，经由放大、滤波、阻抗匹配后，将电信号通过电偶极子天线转换为传导电流输出，并通过特定的通信协议使得另一端的电偶极子天线能够接

收传导电流，并经过解调、放大、DAC 等环节将电磁波转化为数字信号，传递给 FPGA, 最后 FPGA 将数字量的信号转换为真实的声音信号至耳机送出，该系统有良好的人机交互。

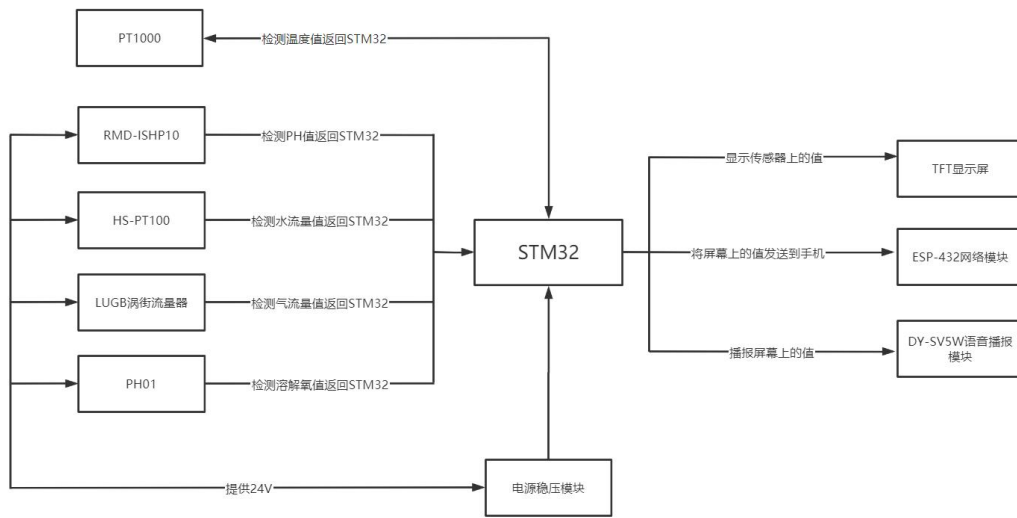


图 2.4 海体传感网络系统构架

如图 2.4 所示，海体传感网络系统以 STM32 为主控芯片，PH 值传感器、温度传感器、TDS 传感器等传感器分别用 IIC、USART 等方式向 STM32 传输数据，STM32 在接收并处理完数据后，便可将实时数据显示在 TFT 屏幕上，同时，这些数据也会在同一时刻传输到 WIFI、蓝牙模块，通过该模块，从物联网的接入端口，向控制中心发送数据，以此达到水质相关数据联网化、实时化，大大提升了水下作业的安全性和准确性。

### 3. 系统物理原理分析：

该系统在水下通信部分及各传感器部分均有涉及相关物理原理，以下内容将对其进行具体论述：

#### 3.1. 水下通信部分

在绝对真空和理想绝缘介质内部，没有能量损耗，电磁波可以无衰减的传播，但实际应用中，由图 3.1.1 可以看出<sup>[6]</sup>，海水的介电常数和电导率都比较高，因此，水下环境可以被认为是导电或半导体有损媒质，电磁波在导电媒质中传播时会有相移和衰减。



名称	电导率 $\sigma(S/m)$	相对介电常数 $\epsilon_r$
空气	0	1
海水	4	81
干沙	0.01	3~5
干粘土	1~10	3
岩石	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	4~10
饱和粘土	$10^2 \sim 10^3$	5~40
干混凝土	0.1~1	4~40
花岗岩	0.01~1	4~6
石灰石	0.5~2	4~8

图 3.1.1 常见物质的电磁特性参数

由于水下环境中信号集中在甚低频及以下频段<sup>[7]</sup>，结合趋肤深度的公式(3.1)可得，信号在传播的过程中，传播媒质的电导率越小，信号的频率越低，信号衰减越缓慢，越有利于信号的传播。以四分之一波长的天线为例，为了得到有效的辐射功率，在甚低频的范围内，天线的尺寸会非常大，而且将这种规模的天线架设在水下会大大增加架设难度和架设成本。

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (3.1)$$

式中： $\delta$ 为穿透深度， $\omega$ 为角频率， $\mu$ 为磁导率， $\rho$ 为电阻率， $\sigma$ 为电导率。

海水中含有大量的正负离子，这些离子在电磁波电场的作用下运动形成电流。由于海水是良导体，因此在海水中传播时，可将宏观情况下的位移电流<sup>[8]</sup>忽略而只考虑传导电流。基于该特性，采用传导电流场理论来解决通信难的无疑是解决上述问题的最有效的方法之一。

承担传导电流传输功能的就是电偶极子天线，电偶极子天线的工作原理可从基本的匀速运动电荷为最基本的模板展开研究。

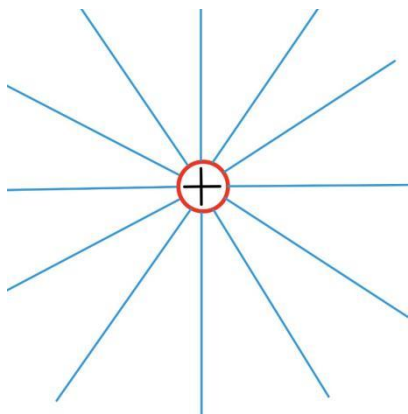


图 3.1.2 匀速运动电荷的电场图

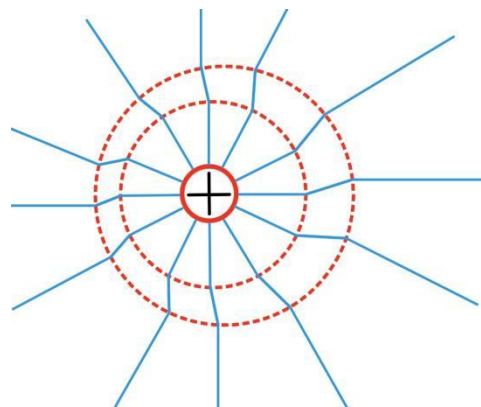


图 3.1.3 加速运动电荷的电场图



一个以恒定速度运动的电荷的电场图如图 3.1.2 所示，当该电荷开始作加速运动时，其电场发生改变，改变的情况可以图 3.1.3 所例，由于信息的传播速度仍是以光速传播，因此电荷速度突变的信息不会瞬间传递到整个电场，该电荷附近的电场受到它加速的影响发生改变，但是远处的电场因为传播速度的原因仍处在旧的状态，所以可在电场图 3.1.3 中以两个虚线红圈为界，划分出三个部分，内部红圈内的最新状态、两个红圈内的扭结状态以及外部红圈外的旧状态。

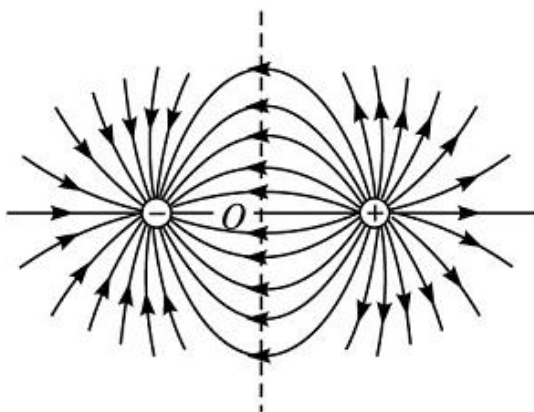


图 3.1.4 两个静止异性电荷的电场图

有了扭结的相关概念，可将两个异性电荷代入该研究，图 3.1.4 为两个静止异性电荷的电场图。利用两个异性电荷组成振荡电偶极子传播信息是扭结最好的体现，异性电荷在两端时速度为 0，在中间位置时速度最大，存在着连续的加速和减速的变化，为了便于分析，我们选取其中的一条电场线进行深入。

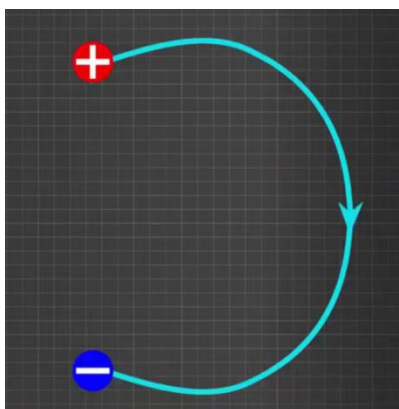


图 3.1.5 电场线示意图

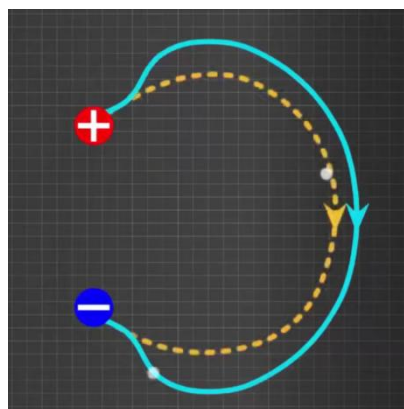


图 3.1.6 电场线变形示意图

当异性电荷向中间移动时，如图 3.1.6 所示，电场线变形，但电场线变形的实际情况与理论有差别，这种变形不到位的现象，也正是由于加速度下扭结的作用。当两个异性电荷继续运动并在中心点相遇时，变形的电场线也会在此刻交汇，之后便分离并发射出去，其完整过程如图 3.1.7 所示。其产生的辐射是完全正弦，同时变化的电场会自动产生垂直于它变化

的磁场。

以两个异性电荷为最小单位，将该现象运用到电偶极子天线上，将金属丝施加交流电压后，由于电压的影响，大量的电子将从右向左移动，产生正负电荷，随着电压的不断变化，正负电荷将在导线中来回穿梭，由此产生信号，如图 3.1.8 所示，电偶极子天线产生得辐射与异性电荷产生的相同。

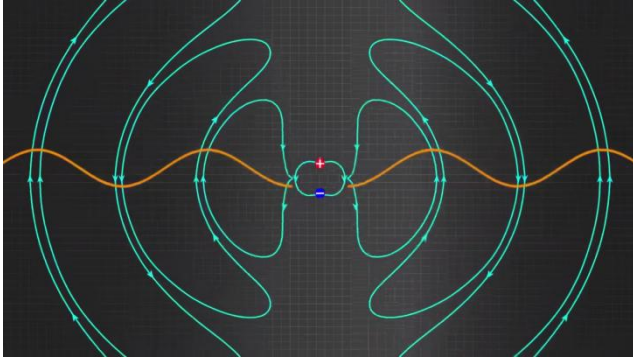


图 3.1.7 异性电荷产生辐射

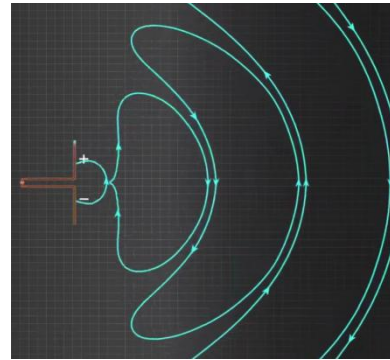


图 3.1.8 电偶极子天线产生辐射

对电偶极子天线的工作原理分析透彻后，便可将电偶极子天线代入实际项目中。研究电流场在海水中的特性时，可以选择某一时刻将其看作是一种准静电场。电介质中的静电场和导体中内部的恒流场具有类似特性，因此可以利用恒流场与静电场的对偶原理，得到电流场在水下的场特性以及传播规律。以下是我们小组成员对电偶极子天线的功能实现的分析和论证。

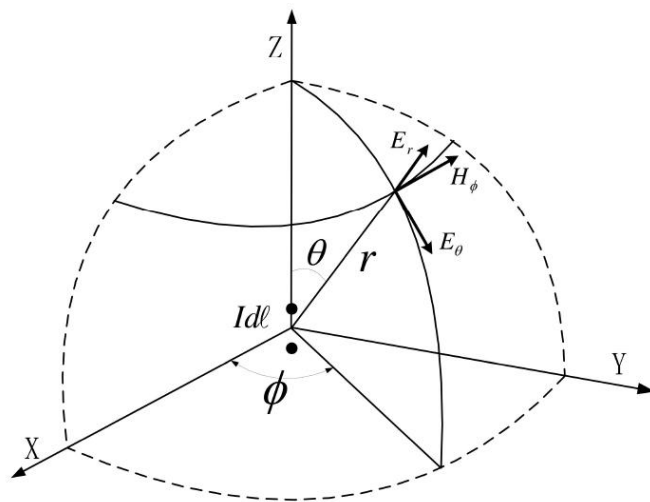


图 3.1.9 电偶极子电磁场分量示意图

如图 3.1.9 所示<sup>[8]</sup>，假设发射端是一个理想化的电偶极子，其电偶极矩为  $Idl$ ，将该电偶极子放置在原点处，与  $Z$  轴方向重合，在无限大均匀半导电媒质中与电偶极子天线相则在距离为  $r$ ，方位角  $\theta$  的观测点  $P$  产生的电场和磁场的示意图如图 3.1.9 所示， $P$  点所产生的电

场分量和磁场分量由以下这几部分构成<sup>[9, 10, 11]</sup>:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_r + \mathbf{E}_\theta + \mathbf{E}_\varphi$$

(3.2)

在无限大均匀介质中传播时的电场分量和磁场分量为:

$$\mathbf{E}_r = \frac{I_0 dl}{2\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)} \frac{\cos\theta}{r^3} (1 + \gamma r) e^{-\gamma r} \bar{r} \quad (3.3)$$

$$\mathbf{E}_\theta = \frac{I_0 dl}{4\pi(\sigma + j\omega\varepsilon)} \frac{\sin\theta}{r^3} (1 + \gamma r + \gamma^2 r^2) \bar{\theta} \quad (3.4)$$

$$\mathbf{E}_\varphi = 0 \quad (3.5)$$

$$\mathbf{H}_\varphi = \frac{I_0 dl}{4\pi} \frac{\sin\theta}{r^2} (1 + \gamma r) e^{-\gamma r} \bar{\varphi} \quad (3.6)$$

式中:  $I = I_0 e^{j\omega t}$  表示电偶极子天线的角频率电流, 单位为 A;  $\gamma = [-\varepsilon\mu\omega^2 + j\omega\mu\sigma]$  定义为传播常数;  $r$  为发射和接收电极之间的距离, 单位为 m;  $\sigma$  为导电媒质的电导率, 单位为 S/m;  $\mu$  为导电媒质的磁导率, 单位为 H/m;  $\varepsilon$  为导电媒质的介电常数, 单位为 F/m;  $(r, \theta, \varphi)$  为球坐标系的参数;  $\bar{r}, \bar{\theta}, \bar{\varphi}$  为如图所示方向的单位方向向量。

在实际接收过程中  $\gamma = \sqrt{-\varepsilon\mu\omega^2 + j\omega\mu\sigma}$  该部分很小, 可以忽略, 由此  $E_\theta$  和  $E_r$  可简化为 (3.7) 与 (3.8) 二式:

$$U_R = \int_0^d E ds \approx \frac{I_0 d d'}{4\pi\sigma r^3} \quad (3.7)$$

$$E_r \approx \frac{I_0 d \sin\theta}{2\pi\sigma r^3} \quad (3.8)$$

并使用 Matlab 对式 (3.7) 与 (3.8) 进行仿真, 得到  $E_\theta$  和  $E_r$  与角度  $\theta$  及距离  $r$  的关系:

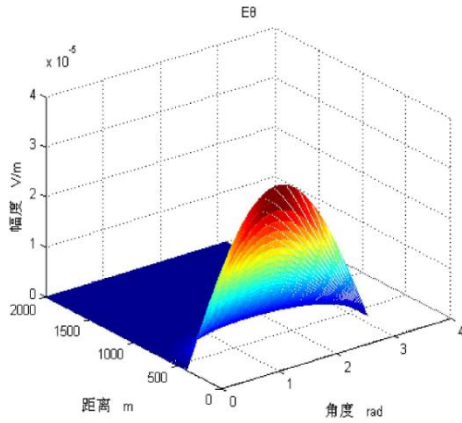


图 3.1.10  $E_{\theta}$  与角度  $\theta$  及距离  $r$  的关系图

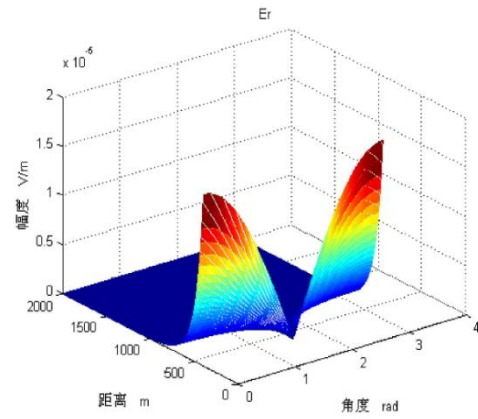


图 3.1.11  $E_r$  与角度  $\theta$  及距离  $r$  的关系图

由二图的仿真结果可以看出，在实际进行通信系统测试时，收发两端的天线应采用平行放置的方式，即  $\theta = 90^\circ$ ，接收端能够获得最大的电场强度，进而得到最大的接收端电压。因此将  $\theta = 90^\circ$  代入，得到的即是最大的电场强度及对应的电压值。

$$E = E_{\theta} \approx \frac{I_0 d}{4\pi\sigma r^3} \quad (3.9)$$

$$U_R = \int_0^d E ds \approx \frac{I_0 d d'}{4\pi\sigma r^3} \quad (3.10)$$

由公式 (3.9) 可知，系统接收信号强度与收发端天线两电极的距离及极板间电流强度成正比，与收发端天线距离的三次方成反比。在实际实验中，为提高通信距离同时提升通信质量，可以适当增大发射端、接收端电偶极子天线两电极的距离或是增大发射端的电流强度。

同时，对公式 (3.10) 利用 Matlab 对通信信道的幅频特性在以下条件下进行仿真。设定收发端天线极板距离均为  $d = 2m$ ，淡水环境电导率  $\sigma = 0.05S/m$ ，海水环境电导率  $\sigma = 4S/m$ ，磁导率  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}(H/m)$ ，相对介电常数  $\epsilon_r = 81$ 。

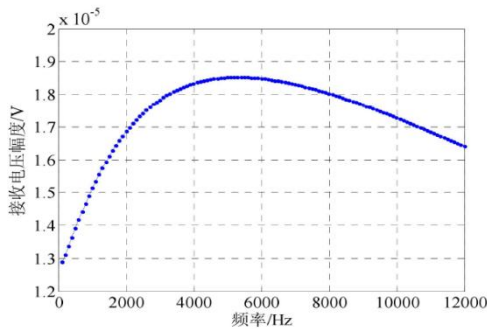


图 3.1.12 淡水环境下信道幅频特性仿真曲线

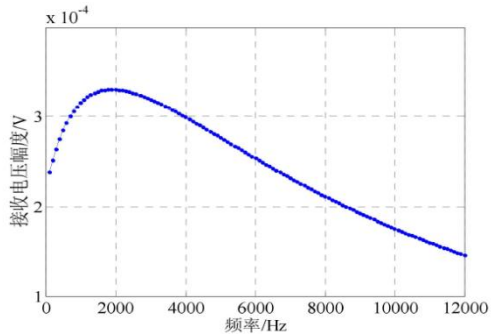


图 3.1.13 海水环境下信道幅频特性仿真曲线

根据仿真结果可以初步确定系统的最优载波频率及通信带宽。由图 3.1.12 及图 3.1.13 的曲线及相关数据可以看出，在淡水环境下，4kHz 左右的载波频率让接收电压来到了幅值，而在海水环境下，接受电压的最大值在 2kHz 左右出现，这两个载波频率对于我们接下来的方案选择具有重大的指导意义。

最后通过 DQPSK 调制技术、放大、DAC 解码后获得对应的输入内容，并由耳机传出，完成水下通信部分的功能。

### 3.2. 浊度传感器部分

浊度，一种光学效应，单位 NTU，国际标准 ISO7027<sup>[12]</sup>中定义是指水中不溶颗粒物对光线照射时所产生的妨碍程度。水的浊度是泥沙、粘土、微细的有机物等悬浮物质所引起的。这些杂质颗粒可成为细菌和病毒的载体与包裹层，降低了氯离子、UV 或臭氧对水的消毒杀菌作用，可能会引发疾病传播；而且在一些工业生产过程中，浊度的大小直接影响到产品质量的好坏。因此，对水体浊度的在线检测具有非常重要的现实意义。

浊度传感器的工作原理主要依据两个定律，即光的吸收定律和散射定律。其基本原理为当一平行光束射向待测液体时，部分光线直接透过样品继续向前传输，部分被样品内的悬浮颗粒物所吸收，而另一部分则被悬浮颗粒物散射，因被吸收的光线无法被检测，所以只能检测透过溶液的透射光束和被溶液散射的散射光束<sup>[13]</sup>。

#### 3.2.1. 朗伯-比尔吸收定律

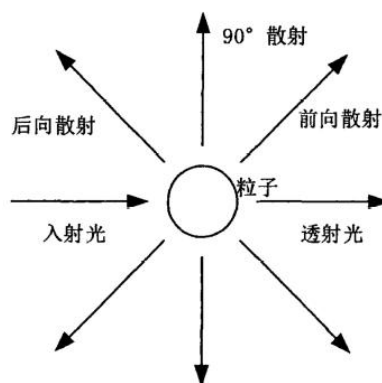


图 3.2.1 粒子散射示意图

如图 3.2.1 所示，当平行光束照射待测样品时，除一部分直接透射过介质外，另一部分被溶液中的悬浮颗粒物散射和吸收，造成消光作用，引起液体浑浊现象。如果知道光源发射光的强度，那么只要检测出透射光强度或者散射光强度，就可以表征溶液的浊度值。

如果光源的发射波长保持一定，那么待测样品对于入射光的消光作用就只与样品浓度和穿过溶液的光程有关。朗伯比尔定律<sup>[14]</sup>具体研究了溶液的消光程度与溶液中悬浮颗粒物的浓

度以及光在溶液中的传输距离之间的定量关系，也称为光的吸收定律。

假定待测溶液为均匀介质，当光源发出的强度为  $I_0$  的入射光射入待测溶液时，由于溶液中的悬浮颗粒物以及杂质的吸收和散射作用，穿过溶液的透射光强度减弱到  $I_t$ ，那么透射光强的大小遵循朗伯-比尔吸收定理，其理论公式如下：

$$I_t = I_0 \exp(-\alpha TL) \quad I_R = \frac{9\pi^2}{\lambda^4 r^2} \left( \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2 + 2n_1^2} \right)^2 v^2 N I_0 \left( \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \quad (3.11)$$

式中： $I_0$  为入射光强度； $I_t$  为透射光强度； $T$  为待测溶液浊度； $\alpha$  为衰减系数，是与溶液相关的系数； $L$  是透射光程。

### 3.2.2. 瑞利散射

英国科学家瑞利提出，当入射光穿过不均匀的溶液中，因为溶液内部折射率发生了改变，所以就产生了散射光。瑞利经过反复的计算得出，散射光的强度与光源波长以及溶液本身的一些参数有关，其理论公式如下：

$$I_R = \frac{9\pi^2}{\lambda^4 r^2} \left( \frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2 + 2n_1^2} \right)^2 v^2 N I_0 \left( \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \quad (3.12)$$

式中， $\lambda$  为入射光波长； $I_0$  为入射光强度； $I_R$  为散射光强度； $v$  为单个微粒的体积； $n_1$ 、 $n_2$  分别为微粒和样品的折射率； $N$  为单位体积中的微粒数； $\theta$  为散射光与入射光两者之间的角度； $r$  为颗粒到散射光强接收点的距离。

通常利用散射法的浊度传感器的检测角  $\theta$  取  $90^\circ$ ，在对溶液进行测量时，此时式 (3.12) 中的  $r$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $\lambda$  和  $v$  都可当作常数，则式 (3.12) 可简化为

$$I_R = k N I_0 \quad (3.13)$$

式中， $k$  为瑞利散射的散射系数。

### 3.2.3. 米氏散射

德国物理学家 Gustav Mie 通过对定态电磁波的麦克斯韦方程组求解，得到了任何尺寸均匀球形粒子散射问题的严格解，经后续研究者不断研究改进，最终提出了米氏散射定理<sup>[15]</sup>。

如果入射光的波长小于待测溶液中不溶颗粒物的粒径，则在其某一方向上的散射光强度可通过米氏散射理论得到，具体表达式为：

$$I_M = K_M A N I_0 \quad (3.14)$$



式中： $A$  为颗粒表面积； $K_M$  为米散射系数； $N$  为单位体积内的颗粒数。

综上所述，无论溶液中悬浮颗粒物直径是否大于入射光波长，在一定方向上散射光强度与溶液颗粒物浓度成正比，因此可用如下公式表示：

$$I_s = K_s T I_0 \quad (3.15)$$

式中： $I_s$  为散射光强； $K_s$  为散射系数； $T$  为样品浓度（浊度）。

### 3.3. 水流量传感器部分

水流量，是指单位时间内流经封闭管道或明渠有效截面的流体量，又称瞬时流量。其常用单位为每秒立方米，多用于河流、湖泊的断面的进出水量测量。用字母  $Q$  来表示。

水流量传感器是指通过对水流量的感应而输出脉冲信号或电流、电压等信号的水流量感应仪器，这种信号的输出和水流量成一定的线性比例，有相应的换算公式和比较曲线。因此可做水控方面的管理和流量计算，可当水流开关使用，同时也可以起到流量计的作用用于流量累计计算。

#### 3.3.1. 霍尔效应产生机理

取一个立方体作为霍尔元件，它的长宽高分别为  $a$ ,  $b$ ,  $d$ ，导体垂直方向上存在一个恒定的磁场，方向为竖直向上，它的磁感应强度为  $B$ ；在导体的左右两端施加一个恒定的电压，在导体中电流大小为  $I$ ，方向为由右向左，如图 1 所示。对导体中的运动电荷进行受力分析，在导体中任取一个运动的负电荷  $r$ ，它所带的电荷量为  $e$ ，运动方向与电流流向相反，速度大小为  $v$ <sup>[16]</sup>。

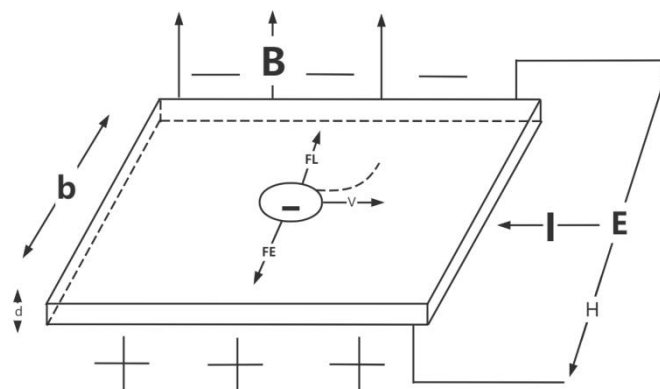


图 3.3.1 霍尔元件

运动电荷在洛伦兹力的作用下产生偏移，偏移方向由左手定则确定，则电荷  $r$  在磁场的作用下会向导体后面偏移。受到的洛伦兹力  $F_L$  大小如公式 (3.16) 所示，方向由前表面指向后

表面。

$$FL = vBE \quad (3.16)$$

在洛伦兹力的作用下，导体后表面上会产生负电荷的积累。同样的，在导体前表面会产生正电荷的积累。则在导体的前后两个面上会形成一个电势差，类似于带电的平行板电容器。则此运动电荷  $r$  会受到两个力的作用，洛伦兹力和电场力，其中电场力  $F_e$  的大小如公式 (3.17) 所示，其中  $U_H$  为导体前后两个表面的电势差，电场力方向由后表面指向前表面，即与洛伦兹力的方向刚好相反。

$$F_e = E_e = \frac{U_H e}{b} \quad (3.17)$$

随着电荷在导体前后表面上的聚集，运动电荷受到的电场力越来越大，比较而言，洛伦兹力的大小始终不变，当电荷积累到一定程度时，运动电荷受到的电场力与洛伦兹力大小相等，方向相反，成为一对平衡力，如公式 (3.18) 所示。

$$F_e = FL \quad (3.18)$$

此时，导体中的运动电荷受力平衡，不再产生偏移，导体前后两个表面上的电势差不再改变，该电势差  $U_H$  即为霍尔电势差（霍尔电压）。从电荷产生偏移到产生稳定的霍尔电势差用时非常短，可以近似认为霍尔效应是瞬时产生的，这便是霍尔效应产生的机理。

### 3.3.2. 水流计原理

水流量传感器是利用霍尔元件的霍尔效应来测量磁性物理量。在霍尔元件的正极串入负载电阻，同时通上 5V 的直流电压并使电流方向与磁场方向正交。当水通过涡轮开关壳推动磁性转子转动时，产生不同磁极的旋转磁场，切割磁感应线，产生高低脉冲电平。由于霍尔元件的输出脉冲信号频率与磁性转子的转速成正比，转子的转速又与水流量成正比，从而得到水流量。

脉冲信号和水流量的关系的公式如下：

$$f = 8.1q^{-3} \quad (3.19)$$

式中：  $f$  为脉冲信号频率；  $q$  为水流量；

## 4. 系统的总体情况及技术分析

### 4.1. 模拟语音通信系统设计

#### 4.1.1. 语音麦克放大电路

系统选择 MAX9814 进行语音信号放大，MAX9814 是一款具有 AGC 和低噪声麦克偏置电路的麦克风放大器，成本低，配置方便。内部集成了低噪声前置放大器、增益可调器、麦克风

偏压发生器以及自动增益控制电路，最大增益可选为 40dB、50dB 和 60dB 三种。

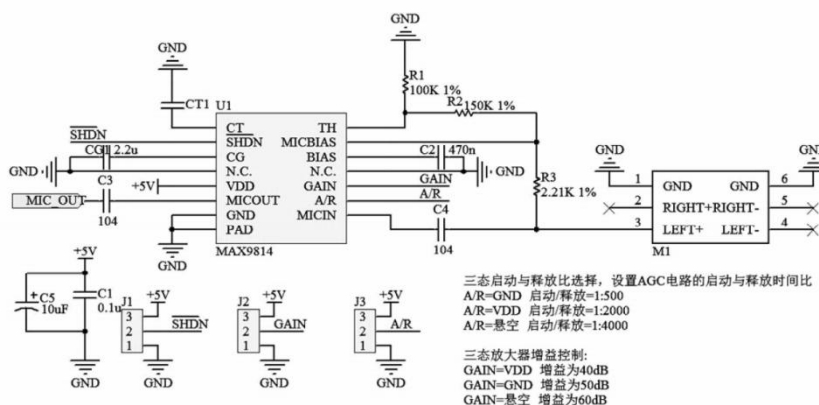


图 4. 1. 1 MAX9814 语音放大电路原理图

MAX9814 语音放大电路设计如图 4. 1. 1 所示。

#### 4. 1. 2. 功率放大电路

语音信号经 MAX9814 放大之后，还需经过功率放大电路处理。功放芯片采用 TI 公司生产的 LM1875，单管最多可输出 30W，1kHz 对应 20W 功率时失真仅为 0.015%。如图 4. 1. 2 所示，本装置采用级联两只 LM1875 音频功放管的设计，保证系统最大不失真功率可以达到 40W，满足参数设定范围。

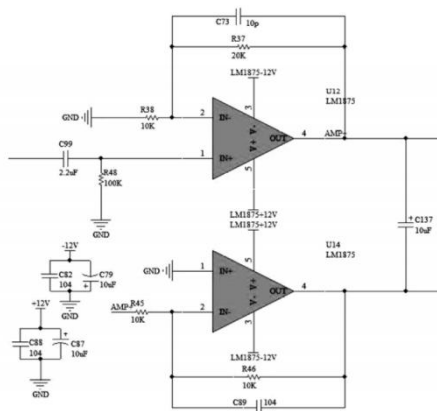


图 4. 1. 2 LM1875 音频功放电路原理图

#### 4. 1. 3. 带通滤波器电路

系统接收机通带范围为 300Hz~1.3kHz，本装置采用 LTC1068 进行设计，与数字系统中的有源滤波器设计类似，电路原理图如图 4. 1. 3 所示，幅频特性曲线如图 4. 1. 4 所示，由图可知此时-3dB 通带频率范围为 274Hz~1.41kHz，可见设计满足需求。

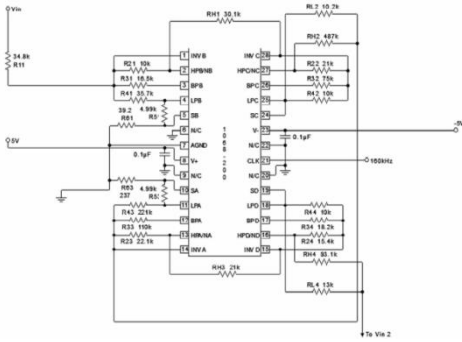


图 4.1.3 LTC1068 电路原理图

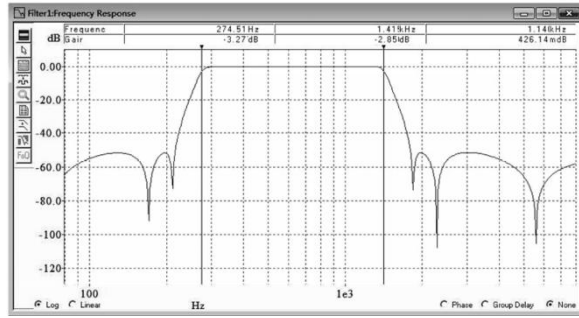


图 4.1.4 LTC1068 幅频特性曲线

#### 4.1.4. 耳机放大电路

最后语音信号经耳放输出，采用 TI 公司的双路音频放大器 NE5532，具有更好的噪声性能，驱动能力强，电源电压范围大等特点。如图 4.1.5 所示芯片前端各增加一个二阶无源滤波网络，滤除多余干扰。

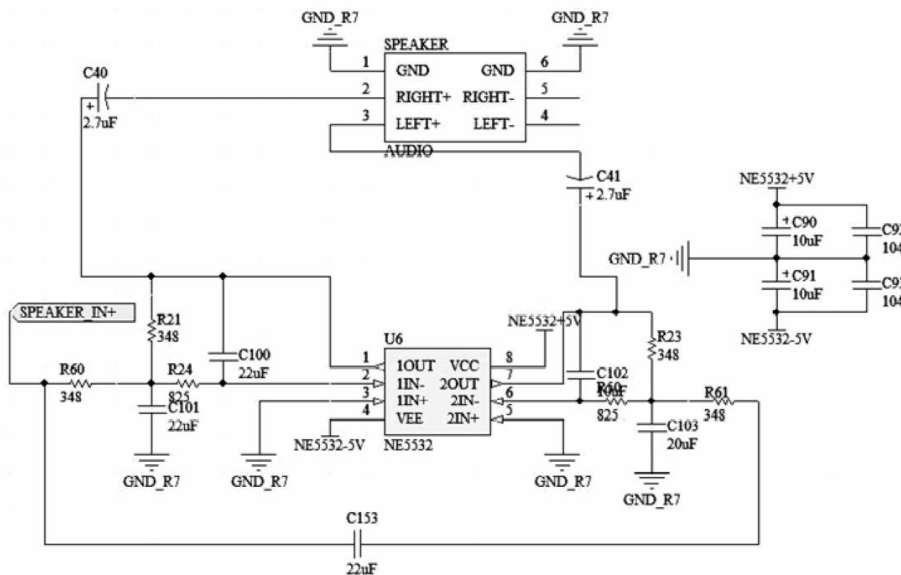


图 4.1.5 耳机放大器设计

## 4.2. 水下推进器部分

为了能使传感器检测到更多的数据，我们小组增加了水下推进器部分。主要是为了实现水下机器人前后、左右、沉浮的功能。通过蓝牙模块连接手机端，从而用手机控制水下机器人的行动。

我们小组的水下机器人有六个螺旋桨控制，其中四个螺旋桨四个角落成 90° 排布控制前进左右运动，垂直方向上两个螺旋桨推进器实现垂直向上的沉浮。基本能做到原地旋转，转弯半径为零。

如图 4.2.1 水下机器人实现右转。

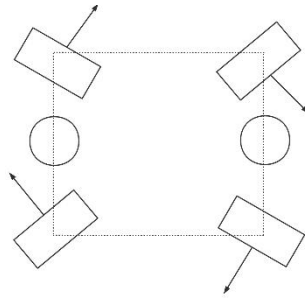


图 4.2.1 右转

如图 4.2.2 水下机器人实现左转。

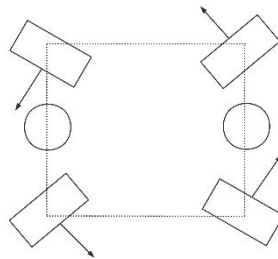


图 4.2.2 左转

如图 4.2.3 实线是水下机器人前进，虚线是水下机器人后退

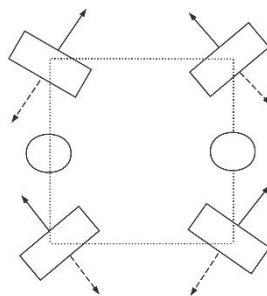


图 4.2.3 前进和后退

### 4.3. 上位机串口数据、波形显示工具

为使得到的数据更加直观，也便于使用者能够更加方便的观察出各数据的变化趋势，方便进一步的调节。我们小组成员利用 C#语言开发了一款可视化的串口数据、波形显示工具，该工具可使得到的串口数据自动绘制成一条曲线，以供相关人员直观地了解水体相关数据，能够更加精准地进行调试。

```

void mybluetooth_receive(byte[] RevData)/*数据处理函数*/
{
    /*通信协议阶段*/
    if (RevData[0] == Convert.ToInt64(Balance_A_text.Text.Trim(), 16))//帧头判断
    {
        Balance_RX_Buff = new byte[RevData.Length];
        Balance_RX_Buff = RevData;
    }
    else
        Balance_RX_Buff = Balance_RX_Buff.Concat(RevData).ToArray();

    if (Balance_RX_Buff[0] != Convert.ToInt32(Balance_A_text.Text.Trim(), 16) //帧头帧尾串口协议判断
        || Balance_RX_Buff[Balance_RX_Buff.Length - 1] != Convert.ToInt32(Balance_C_text.Text.Trim(), 16))
    {
        return;
    }

    /*确定各类型数据个数*/
    byte RT_num = 0; //接收数据数量变量
    if (chkB_bool.Checked) RT_num += Convert.ToByte(Balance_bool_text.Value);
    if (chkB_byte.Checked) RT_num += Convert.ToByte(Balance_byte_text.Value);
    if (chkB_short.Checked) RT_num += Convert.ToByte(Balance_short_text.Value * 2);
    if (chkB_int.Checked) RT_num += Convert.ToByte(Balance_int_text.Value * 4);
    if (chkB_float.Checked) RT_num += Convert.ToByte(Balance_float_text.Value * 4);

    /*校验阶段*/
    if ((RT_num == Balance_RX_Buff.Length - 3) || (RT_num == Balance_RX_Buff.Length - 2))
    {
        if (checkBox_verify.Checked)
        {
            int sum = 0; //数据校验
            for (int i = 1; i < Balance_RX_Buff.Length - 2; i++)
            {
                sum += Balance_RX_Buff[i];
            }
            if (sum % 0x100 != Balance_RX_Buff[Balance_RX_Buff.Length - 2])
            {
                return; //若数据校验位不合理, 返回
            }
        }

        byte buffsum = 0; //数据处理
        byte buff_bool = 0; //int数据保存位
        byte buff_byte = 0; //float数据保存
    }
}

```

图 4.3.1 核心代码

图 4.3.1 即为自制上位机串口数据、波形显示工具的核心代码。

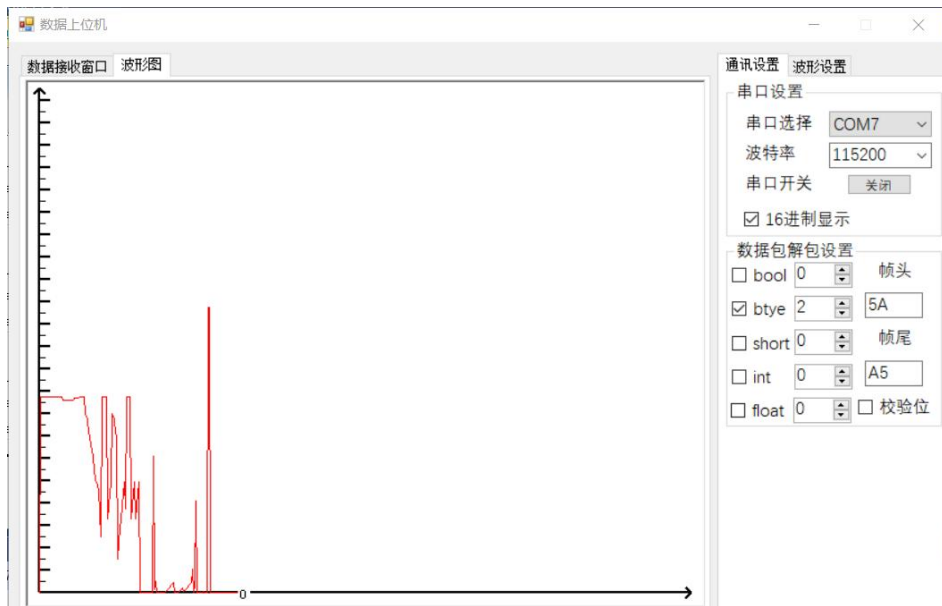


图 4.3.2 可视化波形

图 4.3.2 即为自制上位机串口数据、波形显示工具的可视化波形界面。

#### 4.4. 水平电偶极子天线



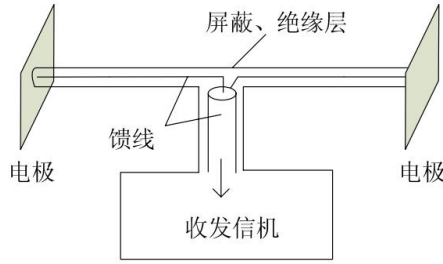


图 4.4.1 水平电偶极子收发信天线结构图

水平极子收发信天线结构图如图 4.4.1 所示。这种天线与超长波发射天线十分相似，有两端接地的电极和与周围介质绝缘的馈线，不同的是超长波发射天线位于空气与大地的界面或界面附近，而电偶极子接收天线可以被认为是处于无限大有耗媒质之中，将一个区域作为发射场区，其集肤深度很深，可形成等效环形天线。

(1) 水平电偶极子天线的输入阻抗，图 4.4.2 是海水中的水平电偶极子天线等效电路图。

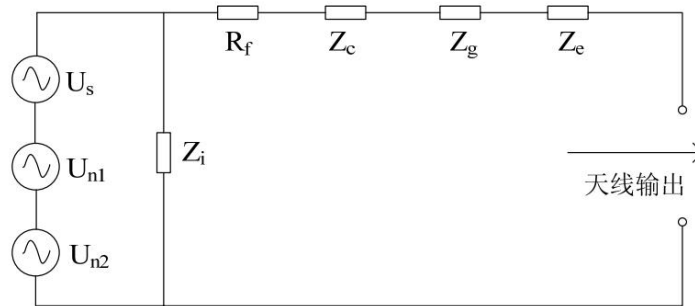


图 4.4.2 水平电偶极子收发信天线等效电路图

其中， $Z_i$  为电极阻抗，也就是接地阻抗； $Z_c$  为导线的内部阻抗， $R_f$  为辐射电阻； $Z_e$  为外部阻抗； $Z_g$  为两导线绝缘部分之间的阻抗，其中包括容抗和绝缘电阻； $U_s$  为信号电压； $U_{n1}$  为天线噪声电压（天线本身产生的噪声）； $U_{n2}$  为外部噪声电压。总阻抗为

$$Z = \frac{Z_i(Z_g + Z_c + Z_e + R_f)}{Z_i + (Z_g + Z_c + Z_e + R_f)} \quad (4.1)$$

在超低频频段，对电抗部分往往可以忽略。 $Z_i$  相对比较大， $R_f$  很小也可以忽略，则

$$r = R_c\{Z\} = r_g + r_c + r_e \quad (4.2)$$

其中  $R_g$  与频率有着复杂的关系，尚不能精确计算，频率较低时，往往按直流接地来计算。 $r_c$  在甚低频时要考虑集肤效应的影响，导线较长时还要考虑感抗。

(2) 水平电偶极子天线的有效长度。这种两端裸露在海水中，工作波长很大的电偶极子天线，其上的电流可近似为均匀分布，因此

$$|l_e|=l \quad (4.3)$$

式中  $l_e$  为有效长度， $l$  为两电极之间的直线距离（近似为收发天线的物理长度）。对于天线电极，可理解为在海水中测量两点之间电位差的探针。

因为海水虽属导电媒质，但毕竟非理想导体，内部的电场不等于零，除等位线上外，任意两点间都可以存在电位差，则天线输出端的开路电压为

$$u = El \quad (4.4)$$

式中  $E$  为水平电场强度。

(3) 水平电偶极子天线的方向图。将式 4.4 写成

$$u = El \cos \theta \quad (4.5)$$

式中  $\theta$  为电场水平分量与  $l$  之间的夹角； $\cos \theta$  为天线的方向函数。

水平电偶极子天线的方向图与超长波发射天线的相同，所以，为了收到较强的信号，收信时应把天线轴线尽量指向发信台。

## 5. 应用前景

项目响应十四五发展规划中大力发展“数字经济”的号召，以物理原理为重要抓手，从所处实际出发寻找痛点问题。

浙江省作为海洋大省，自 2003 年起，浙江省立足八个方面的优势，提出面向未来发展的八项举措，大力发展海洋经济。但在实际海洋开发时，由于水下的工作环境与地面不同，主要表现为能见度低，通讯困难等。在潜水员进行水下作业的过程中，如果无法与水下队员及水面船舶进行通信交流，会给潜水员造成心理压力，降低工作效率，甚至关系到任务的成败。

该项目使用的传导电流场解决了电磁波通信在水下衰减严重的问题，完成水下队员之间正常通信的目的。并利用各种传感器采集数据，通过物联网技术，形成传感网络，可让海体的水质相关数据联网化、实时化，大大提升了水下作业的安全性和针对性，同时，在物联网技术的加持下，该项目还可进一步推动了“数字经济”的发展。

该系统可以适用于渔业、深海采矿、海洋工程、海洋环境保护等，甚至一些科研方面的研究。国内这方面的研究大多局限于理论仿真及实验室试验系统等，实际产品的开发及外场测试的报道却很少，实际产品的落地及市场化将会填补该空白。

综上，该项目有着广阔的发展前景和现实意义。

## 参考文献

- [1] 王毅凡, 周密, 宋志慧. 水下无线通信技术发展研究[J]. 通信技术, 2014, 47(06):589-594.
- [2] 程恩, 袁飞, 苏为等. 水声通信技术研究进展[J]. 厦门大学学报, 2011, 50(02): 271-275.
- [3] 隋美红, 于新生, 刘西锋等. 水下光学无线通信的海水信道特性研究[J]. 海洋科学. 2009, 06:80-85.
- [4] D. Pompili, T. Melodic. An Architecture for Ocean Bottom Underwater Acoustic Sensor Networks (UWASN) [J]. Poster Presentation of Med-Hoc-Net, 2004, 554:20-25.
- [5] 曹发阳, 王伟, 谢广明, 罗文广. 水下电场通信研究综述[J]. 兵工自动化, 2013, 12(12):51-54.
- [6] 舒鑫. 便携式水下无线电磁通信系统设计与实现[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2017: 5-17
- [7] 杨卓. 对海水天线的初步研究[J]. 舰船电子工程. 2011, 12:101-103.
- [8] 赵永磊. 导电媒质中传导电流场特性及其应用技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学, 2014:5-20
- [9] A. K. Gogoi, R. Raghuram. Analysis of VLF Loop Antennas on the Earth Surface for Underground Mine Communication. 1996.
- [10] J. Mitola. Software radios, IEEE Communications Magazine, 1995, 33(5):24-25.
- [11] 向新, 罗奕, 易克初, 张仲礼, 田红心, 王继矿. 穿透岩层地下电流场通信信道分析[J]. 煤田地质与勘探, 2005, 04:77-79.
- [12] William F. Mecoy, Betty H. Olson. Relationship among turbidity, particle counts and bacteriological quality within water distribution lines[J]. Water Research, 1986, 20(8):1023-1029.
- [13] International Organization for Standardization. ISO7027 Water quality determination of turbidity[S]. 1999.
- [14] M. RaPhael, S. Rohani, On line estimation of solids concentrations and mean particle size using a turbidimetry method[J]. Power Technology, 1996(89):157-163.
- [15] Mizaikoff B. Infrared optical sensors for water quality monitoring[J]. Water Science and Technology, 2003, 47(2): 35-42.
- [16] 清华大学电子学教研组, 模拟电子技术基础(第三版) [M]. 高等教育出版社。

# 基于 Arduino 的智慧安全外卖骑手保护头盔

参赛者：詹毅祥，吴先垚，徐佳进，左超毅，沈文增

（浙江工业大学之江学院，绍兴 312000）

指导教师：郑利君，黄田浩

**摘要：**本研究报告简要介绍基于 Arduino 的智慧安全外卖骑手保护头盔设计。使用 MPU-6050 6 轴传感器实现对骑行姿态监测，并将骑行角度、加速度数据经 I2C 总线传入 Arduino，经过空间矩阵向量算法处理后缓存本地，等待与其他数据协同 Arduino 作出判断。使用 TP-Solar 激光测距模块实现对行驶中后方跟车距离监测，并将数据通过软串口传至 Arduino 缓存本地。使用 Neo-6M GPS 模块实现定位及骑行速度监测，并将数据传入 Arduino 缓存。Arduino 汇总分析以上三种数据，根据数据的不同情况，分别作出超速提醒、后车避让预警、事故报警等功能。功能自动控制，降低事故风险，提高骑行的安全性并具有经济实惠、使用方便、实用性强等特点。

**关键字：**Arduino；姿态监测；距离监测；速度监测；自动控制；

## 1 研究背景

如今，人们的生活与日益完备的互联网服务紧密结合，我国持续增长的网民规模，为数字餐饮行业提供了巨大用户基础，也为经济发展提供了强大的动力。如图 1、2，反映了近几年数字餐饮行业的发展趋势，根据两幅统计图可以发现，我国网民规模连年增长，互联网普及率不断创下新高，与此同时，互联网餐饮行业收入也在逐年提升。



图 1 网民规模和互联网普及率统计



图 2 中国互联网餐饮收入统计

随着数字餐饮行业的发展，骑手的安全保障成为当前社会所必须面临的问题。我国各大城市外卖小哥涉及的交通违法较为普遍，事故发生率也呈高发态势上海交警曾统计，2017年上半年外卖配送行业发生交通事故76起，平均每2.5天有1名外卖员伤亡。重庆交警统计，2016年两轮车交通事故占总体事故的40%，其中电动两轮车占一半。

下图 a、b、c 是外卖小哥发生交通事故的现场照片。



图 3 事故现场

保障数字餐饮行业的正常运行要求之一，就是保障外卖骑手的生命安全。根据国家相关统计，摩托车、电动车是引发致伤致亡交通事故的主要车型，其驾乘人员死亡事故中，约80%为颅脑损伤致死，而正确佩戴安全头盔、能够将伤亡风险大大降低。由此可见，头盔能很大程度的保障非机动车驾驶员的生命安全，对于外卖骑手来说，工作中大部分时间都用于驾驶电动车，工作强度大，路途中不确定性因素高，相比一般电动车驾驶员更容易发生交通事故，因此一款具有多功能保护系统的智能头盔，能更好地为骑手的生命安全作保障。

目前急需一款价格材质好功能全面囊括GPS定位、自主报警求援和具备语音播报等一系列功能，能满足骑手需要又能保障安全的头盔，而目前市场上存在的头盔仅有以下几种：

- ①普通头盔：质地坚韧，具有耐水、耐热、耐寒并能吸收较多的冲击能量。
- ②轮滑头盔：针对磕碰等伤害，透气散热性好。
- ③赛车比赛头盔：使用更高强度碳纤维材质，质量轻提供更好的冲击和穿透保护。
- ④抗雾霾骑行智能头盔：可通过“风幕”技术实现对人脸周边空气的有效净化。
- ⑤工业无线图传智能头盔：可以在不敷设线路的情况下，实现信息互动和回传。

而骑手所需要的专用头盔需要成本低性价比高，防护能力强能保护头部所受到的一般伤害，还能为运送过程中提供帮助。经过一个月的走访和问卷星抽样调查，收集了解骑手和群众对于公共安全的期盼，我们得出了骑手主要需要：事发自动报警救助，检测与后方车辆的距离，而这些是普通头盔所达不到的。

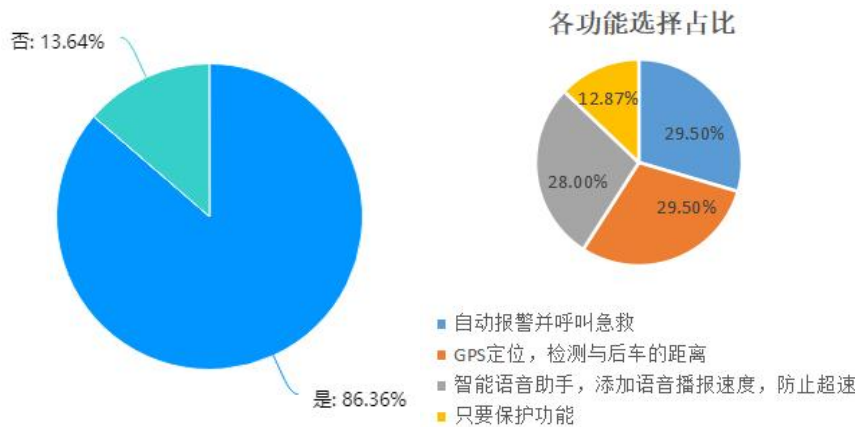


图 4 对于发展智能头盔的支持率

图 5 骑手对于头盔功能的需求

对此，设计一款基于 Arduino 的智慧安全外卖骑手保护头盔，有以下功能系统：GPS 定位、碰撞报警、超速提醒（国标 25km/h 为上限）、后方来车预警（国标 5m 为安全距离），实现系统功能分别使用 Neo 6M GPS 定位模块、TP-Solar 激光测距模块、MPU6050 6 轴传感器、Air724UG 4G 模块、UNV6288 语音模块（普通话报警）。系统总体框图及基本结构如下。

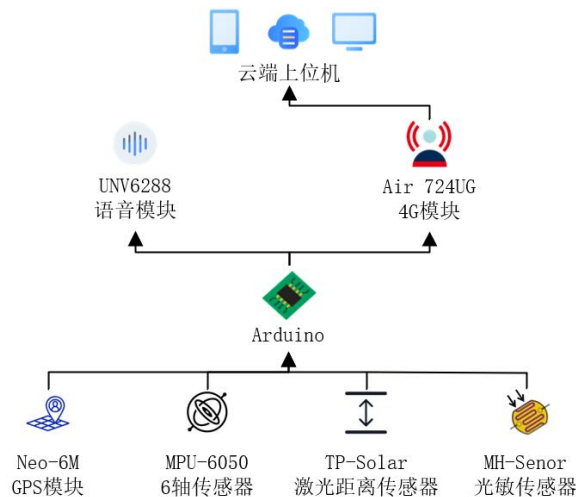


图 6 系统总体框图

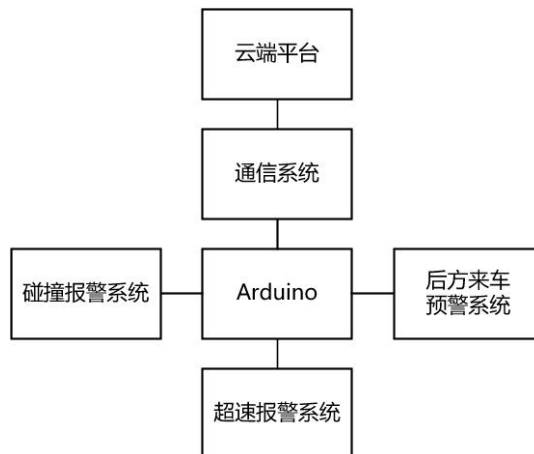


图 7 系统结构简图





图 8 作品实物图



图 9 云端软件界面

## 2 物理原理

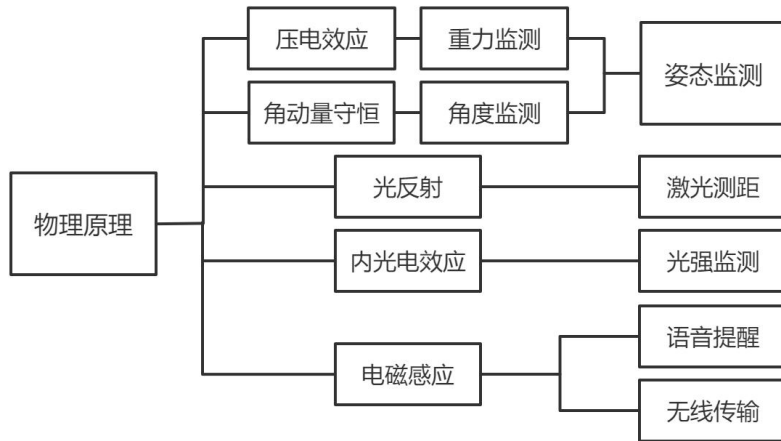


图 10 物理原理组成

### 2.1 压电效应

对于不存在对称中心的异极晶体，加在晶体上的外力除了使石英晶体发生形变以外，还将改变石英晶体的极化状态，在晶体内部建立电场，这种由于机械力作用使介质发生极化的现象称为正压电效应，其原理如图 11。

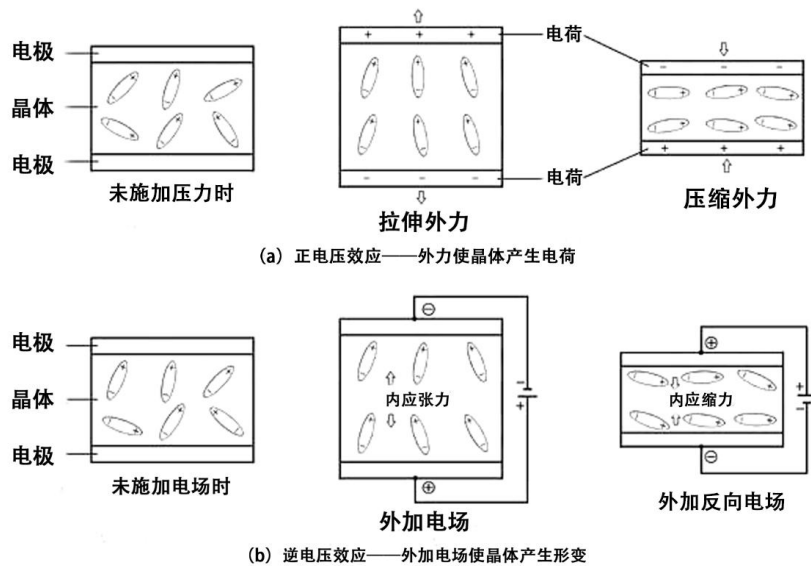


图 11 压电效应原理图

设压电陶瓷截面积为  $A$ ，厚度为  $t$ ，压电常数为  $g_{33}$ ，压力为  $F$ ，则其产生电压  $V$  计算公式如(1-1)所示。

$$V = F \times g_{33} \times t/A \quad (1-1)$$

利用石英晶体内部的加速度造成石英晶体形变来产生电压，只要计算出产生电压和所施加的重力加速度之间的关系，就可以将重力加速度转化成电压输出，实现重力监测，原理如图 12。

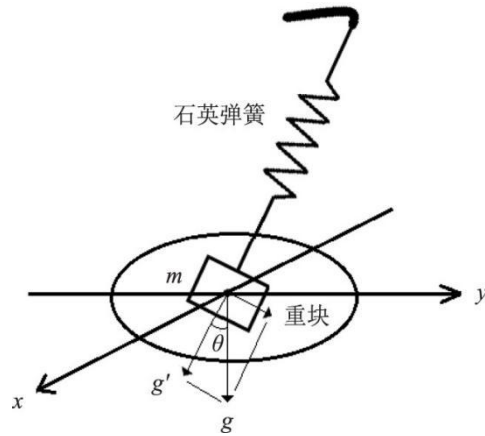


图 12 重力传感原理图

## 2.2 角动量守恒原理

作用在刚体上的冲量矩等于刚体角动量的增量，这个结论被称为刚体定轴转动的角动量定理。其公式(1-2)可以描述为

$$\int_{t_1}^{t_2} M dt = \int_{L_1}^{L_2} dL = L_2 - L_1 = J\omega_2 - J\omega_1 \quad (1-2)$$

其中  $\int_{t_1}^{t_2} M dt$  是力矩  $M$  在  $\Delta t = t_2 - t_1$  时间内的冲量矩， $L$  表示角动量， $J$  表示转动惯量， $\omega$  表示角速度(矢量)。

陀螺仪就是基于角动量守恒原理设计，它是一种用于感测与维持方向的装置。陀螺仪一旦开始旋转，由于转子的角动量，陀螺仪有抗拒方向改变的趋向。角速度传感器原理通俗地说，一个旋转物体的旋转轴所指的方向在不受外力影响时是不会改变的，再用多种方法读取轴所指示的方向，并将数据信号自动传给控制系统，即可测出当前运动下的角速度，原理如图 13。

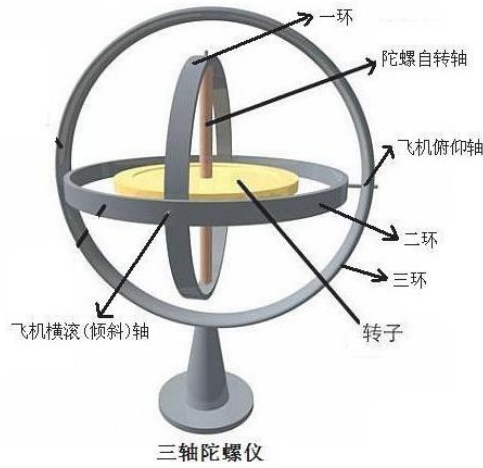


图 13 陀螺仪原理图

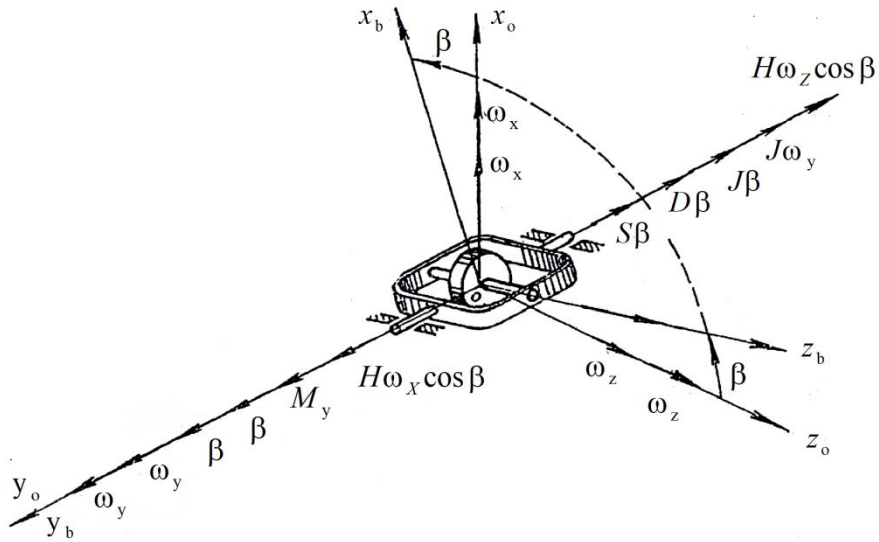


图 14 陀螺仪框架坐标系

取框架坐标系为  $ox_b y_b z_b$ ，壳体坐标系为  $ox_o y_o z_o$ 。这两个坐标系的原点均和陀螺仪的支承中心重合，其中  $z_o$  轴与自转轴重合， $x_o$  轴为输入轴（也即敏感轴），框架轴为输出轴。设陀螺仪绕框架轴相对壳体转动的角加速度、角速度和转角分别为  $\ddot{\beta}$ 、 $\dot{\beta}$ 、 $\beta$ 。设壳体绕壳体坐标系各轴相对惯性空间转动的角加速度为  $\dot{\omega}_z$ 、 $\dot{\omega}_y$ 、 $\dot{\omega}_x$ ，角速度分别为  $\omega_z$ 、 $\omega_y$ 、 $\omega_x$ 。

当陀螺仪相对壳体转动一个角度  $\beta$  时，由弹性元件产生的弹性约束力矩为公式(1-3)，

$$M_s = -S\beta \quad (1-3)$$

其中  $S$  为弹性约束系数。

当陀螺仪相对壳体有一个角速度  $\dot{\beta}$  时，由阻尼器产生的阻尼力矩为公式(1-4)，

$$M_d = -D\dot{\beta} \quad (1-4)$$

其中  $D$  为阻尼系数。

除弹性约束力矩和阻尼力矩外，还存在干扰力矩，用  $M_y$  表示。

当陀螺仪相对壳体出现角加速度  $\ddot{\beta}$ ，以及壳体绕  $y_o$  轴相对惯性空间出现角速度  $\dot{\omega}_y$  时，就会产生沿输出轴的相对转动惯性力矩和牵连转动惯性力矩，即公式(1-5)，

$$M_1 = -J\ddot{\beta} - J\dot{\omega}_y \quad (1-5)$$

其中  $J$  为陀螺仪绕输出轴的转动惯量。

当壳体绕和轴相对惯性空间以角速度和转动时，产生沿输出轴的哥氏惯性力矩即陀螺力矩，表示如公式(1-6)，

$$M_G = H\omega_x \cos\beta - H\omega_z \sin\beta \quad (1-6)$$

其中  $H$  为陀螺动量矩。

由动静法可得陀螺仪绕输出轴的力矩平衡方程为(1-7)，

$$M_s + M_y + M_d + M_1 + M_G = 0 \quad (1-7)$$

整理后可得(1-8)，

$$J\ddot{\beta} + D\dot{\beta} + S\beta = H(\omega_x \cos\beta - \omega_z \sin\beta) - J\dot{\omega}_y + M_y \quad (1-8)$$

由于转角  $\beta$  很小 ( $\cos\beta \approx 1$ )，在忽略干扰项的影响下，上式可简化为(1-9)，

$$J\ddot{\beta} + D\dot{\beta} + S\beta = H\omega_x \quad (1-9)$$

信号传感器输出的是电压信息，且电压大小与转角成正比，即  $U = k_u \beta$ ，

将其带入上面简化后的式子可得角速度陀螺仪工作特性方程(1-10)。

$$\ddot{U} + \frac{D}{J}\dot{U} + \frac{S}{J}U = k_u \frac{H}{J}\omega_x \quad (1-10)$$

### 2.3 光反射原理

用脉冲激光器向目标发射一系列很窄的光脉冲(脉冲宽度小于 50 ns)，光达到目标表面后部分被反射，通过测量光脉冲从发射到返回接收机的时间，可得出测距机与目标之间的距离，被测物距离与被测物最小边长的关系，原理如图 15。

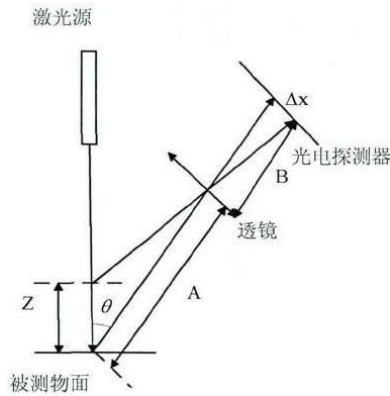


图 15 激光测距原理

设传感器与物体间的距离为  $D$ ， $c$  为光在大气传播速度， $t$  为光往返一次的时间，则距离公式为(1-11)。

$$D = ct/2 \quad (1-11)$$

## 2.4 内光电效应

光照射到半导体或绝缘体的表面时，使物体内部的受束缚电子受到激发，从而使物体的导电性能改变，这就称为内光电效应。光导管（又称光敏电阻）就是利用内光电效应制成的半导体器件。光照愈强，阻值就愈低，随着光照强度的升高，电阻值迅速降低，亮电阻值可小至  $1\text{K}\Omega$  以下。光敏电阻对光线十分敏感，其在无光照时，呈高阻状态，暗电阻一般可达  $1.5\text{M}\Omega$ 。原理如图 16 所示。

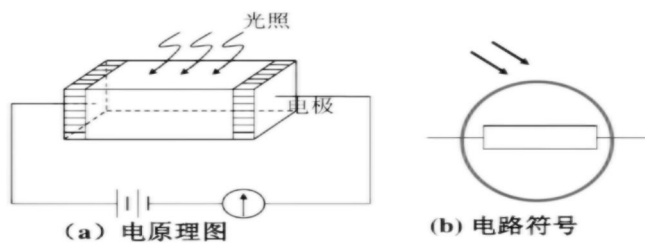


图 16 光敏电阻原理

设加在光敏电阻上的两端电压为  $U$  和  $U - dU$ ，光敏电阻阻值随光照强度改变为  $R$ ，通过其电流为  $dI$ ，则有(1-12)。

$$dU = RdI \quad (1-12)$$

## 2.5 电磁感应原理

放在变化磁通量中的导体，会产生电动势。此电动势称为感应电动势或感生电动势，若将此导体闭合成一回路，则该电动势会驱使电子流动，形成感应电流（感生电流）。



若闭合电路为一个  $n$  匝的线圈，则瞬时电动势又可表示为(1-13)

$$\varepsilon = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (1-13)$$

其中  $n$  为线圈匝数， $d\phi$  为磁通量变化量，单位 Wb， $dt$  为发生变化所用时间，单位为 s。  
 $\varepsilon$  为产生的感应电动势，单位为 V。

电磁式扬声器基于此设计，扬声器的音圈中通入交流电流，音圈在输入电流的作用下产生交变的磁场，而音圈又放置在永久磁铁中，音圈在这两个磁场的作用下做垂直于音圈电流方向的运动，这样音圈在电流作用下而往复运动。由于音圈与纸盆连接在一起，这样音圈运动带动纸盆的前、后振动，纸盆的振动推动空气的振动，人耳便能感受到空气的振动而产生声音。

高频振荡器产生高频电流，高频电流可以产生交替变化的电场，将高频电流加到天线上，天线周围会存在变化磁场，产生感生电流，感生电流附近又产生磁场，这样发射的电磁波就可以在空间传播。

### 3 智能头盔的软件控制与电路设计

#### 3.1 软件总体设计

软件运行流程描述对智能安全头盔的控制，如图 17。头盔佩戴者体验流程如图 18。

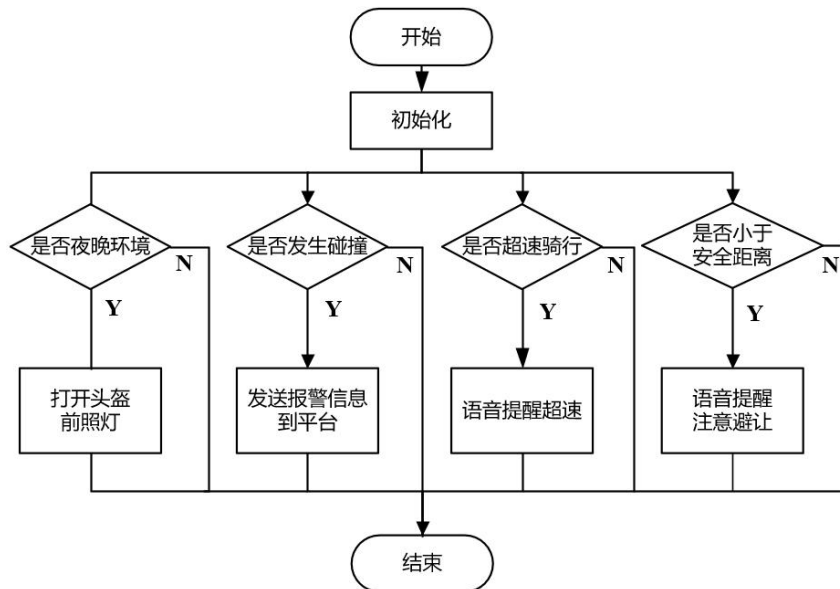


图 17 系统总体运行流程简图

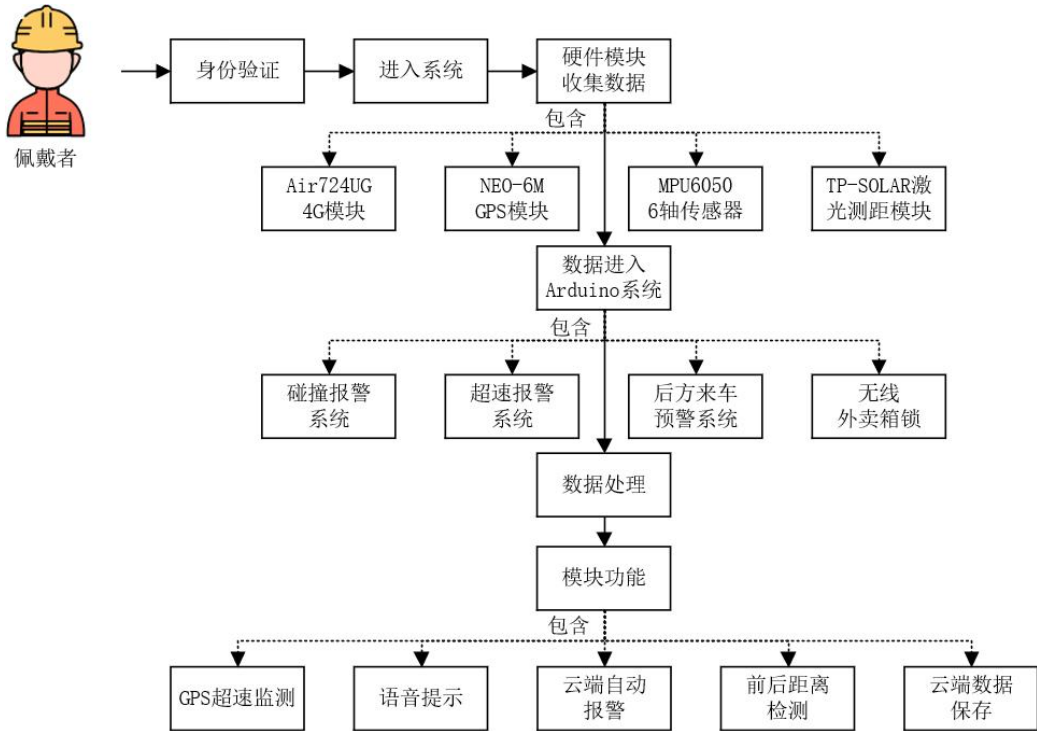


图 18 设计体验流程

因 I/O 口数量限制，本项目设计使用主、从两块 Arduino 板。

主板程序分为三部分：①GPS 数据获取及解析子程序，如图 19②Arduino 从板数据获取及解析子程序，如图 20③定时中断子程序，如图 21。

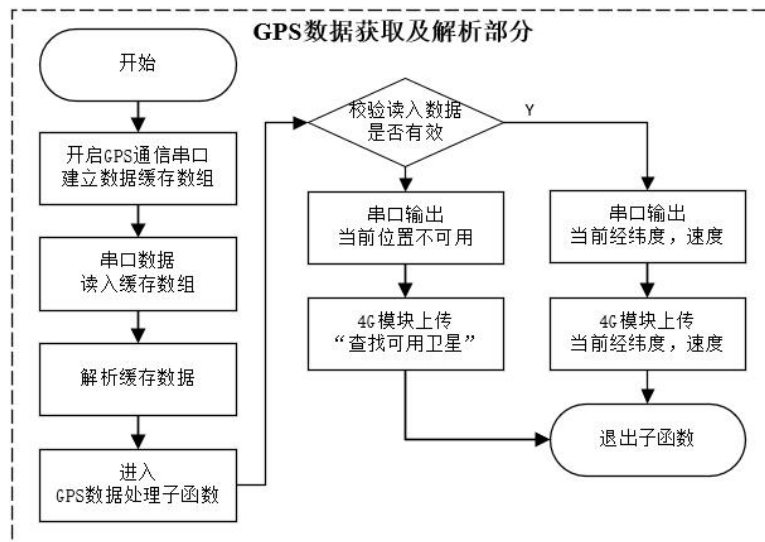


图 19 GPS 子程序概览图

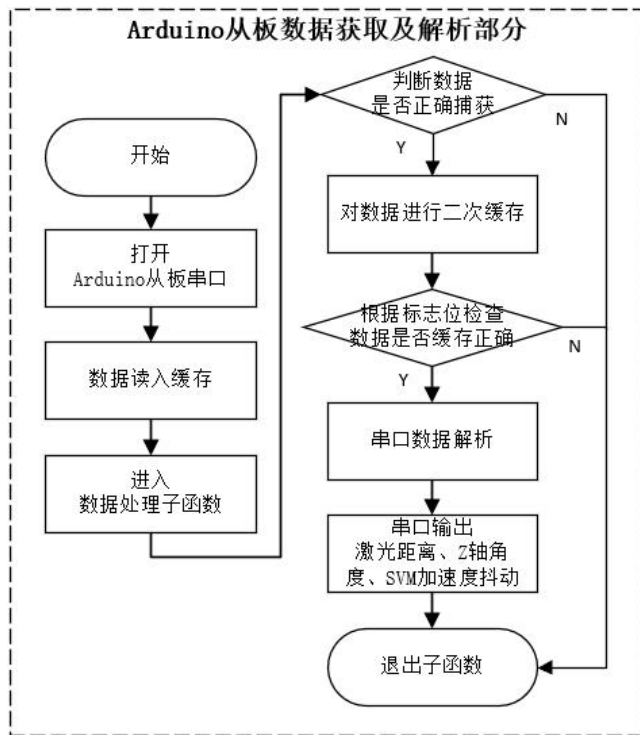


图 20 定时中断子程序概览图

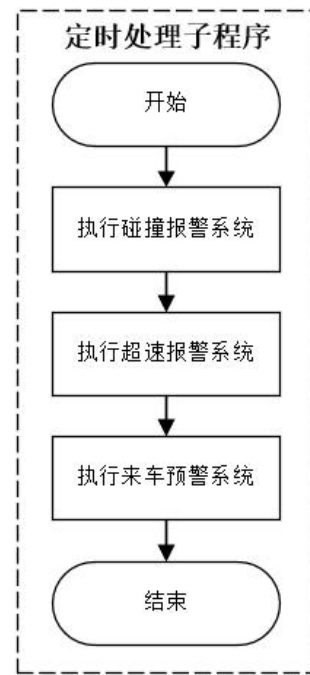


图 21 Arduino 从板数据解析子程序概览图

副板程序分为三部分：①激光测距模块数据获取及解析子程序，如图 22②6 轴传感器数据获取及解析子程序，如图 23③数据组帧发送子程序，如图 24。

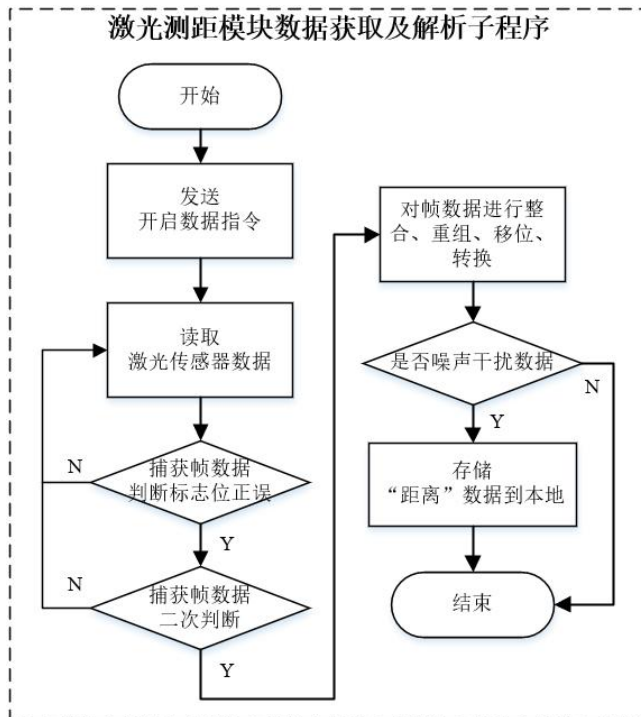


图 22 激光测距模块数据获取及解析子程序

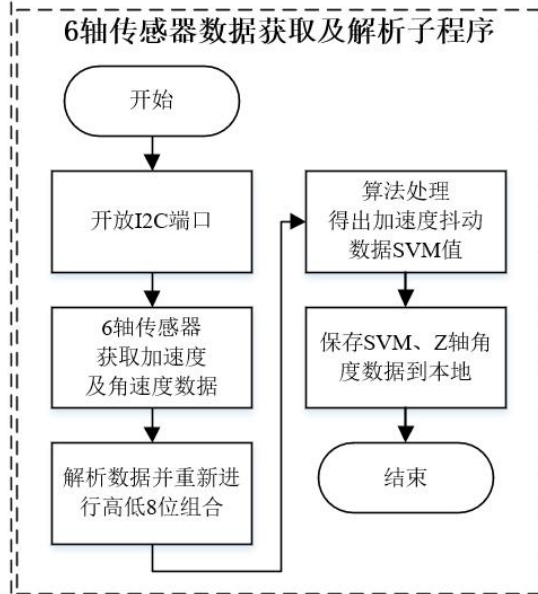


图 23 6 轴传感器数据获取及解析子程序

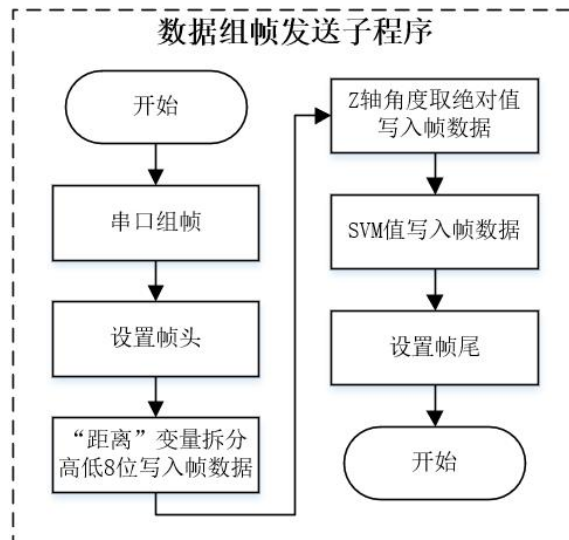


图 24 数据组帧发送子程序

### 3.1.1 来车预警系统

来车预警主要由激光距离传感器实现，系统使用激光扫描后方来车，骑行过程中，两车距离即将低于骑行安全距离时，通过语音提示骑手注意避让后方行车,系统流程如图 25。

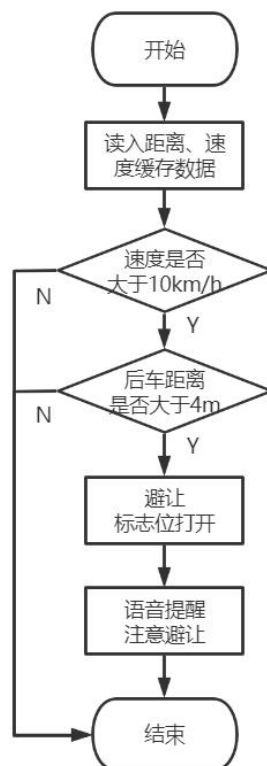


图 25 来车预警流程图

### 3.1.2 碰撞报警系统程序

碰撞报警系统主要由加速度传感与角速度传感实现。通过 MPU6050 检测加速度变化与三轴间角速度变化，并将数据传输到 Arduino，Arduino 根据信号来综合判定是否发生碰撞。将

GPS 信息和碰撞传感信息通过 NB-IOT 模块将信息实时传输给平台以供监测，并及时反馈信息，保障骑行安全，程序实现逻辑如图 26。

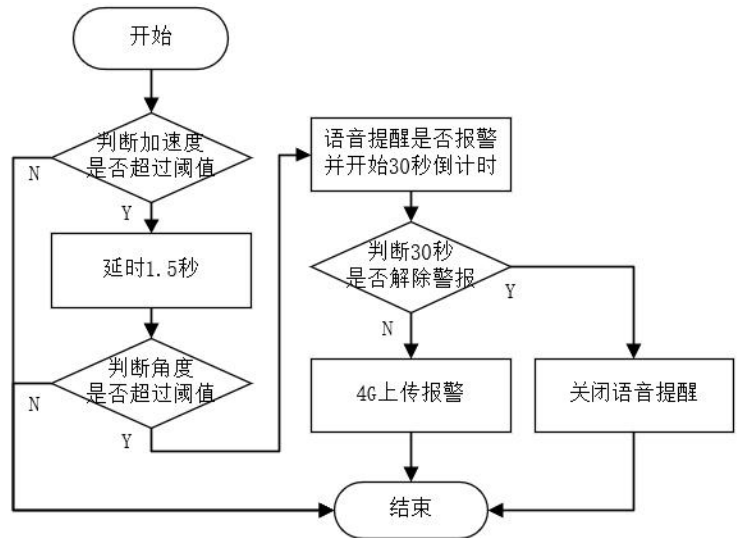


图 26 碰撞报警程序实现框图

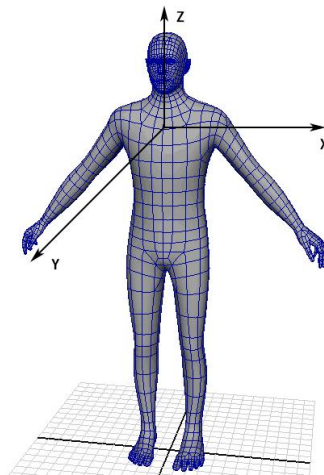


图 27 人体三维空间姿态

设 X 轴方向的加速度为  $a_x$ ，Y 轴方向的加速度为  $a_y$ ，Z 轴方向的加速度为  $a_z$ ，则合加速度如公式(1-14)。

$$SVM = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (1-14)$$

SVM 表示人体加速度向量幅值，是区分人体运动状态下不能倾斜态的重要参数，SVM 越小，人体运动越平缓，SVM 越大，人体运动越剧烈。当人体碰撞时，人体和地面接触有一个撞击阶段，此时加速度会达到峰值，比一般的行为更加明显，因此可以用阈值法来判断碰撞的发生。

当人碰撞经过一段时间后，人体会处于静止状态，此时人体和地面应处于水平状态，Z

轴加速度为 0。同时当人体向前或向后碰撞后，人体 Z 轴角度绝对值应小于 110°。

单片机对接收到的数据进行碰撞算法运算和判断。整个的实现过程可分为以下三个部分：

(1) 检测当前和加速度 SVM 是否大于阈值  $2.5 \text{ m/s}^2$ ，若小于  $2.5 \text{ m/s}^2$ ，则返回继续采样测量；若大于  $2.5 \text{ m/s}^2$ ，则认为疑似碰撞。

(2) 若检测到疑似碰撞，延时 1.5s，进入二次判断，检测人体角度是否在阈值范围内。若在这个范围，则认为碰撞。

### 3.1.3 超速报警系统程序

超速报警系统主要由 GPS 模块与差值算法实现。GPS 模块与卫星连接，接收卫星发送的 GPRMC 报文，Arduino 对报文进行实时解析，得出实时速度。

根据 GPS 经纬度差值随时间的变化得出骑手骑行速度，如果骑手违反交通规则，超速行驶，当系统监测到骑行速度超过阈值并且持续一段时间后，系统会语音提醒骑手减速，系统流程如图 28。

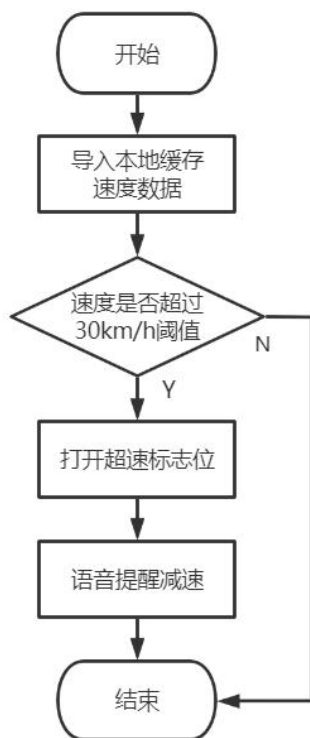


图 28 超速报警系统程序流程图

### 3.2 电路设计

根据本项目的需求，我们分别设计了电源电路、最小系统电路、串口通信电路、TTL 降压电路来实现本项目的功能。

首先是电源电路如图 29，使用 LM2940 输出电压固定的低压差三端稳压器，输出电压 5V，内含静态电流降低电路、电流限制、过热保护、电池反接和反插入保护电路。



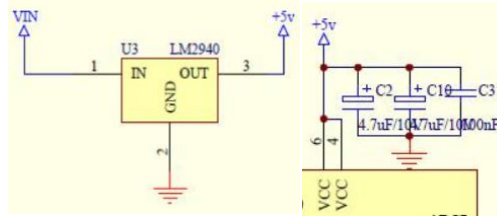


图 29 电源电路

最小系统电路是整个电路的核心部分，包括复位电路、时钟电路、单片机等三部分组成。其中复位电路是由按键、下拉电阻、组成，与单片机的 PC6 脚 RST 相连，如图 30。当 RST 按键按下，RST 输出高电平，对单片机进行复位。

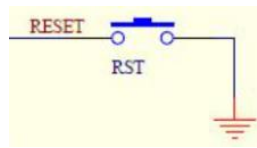


图 30 复位电路

时钟电路如图 31，通过两个引脚在并接一个晶体振荡器和两个电容就构成了一个自激振荡器，本设计晶振采用 16M。

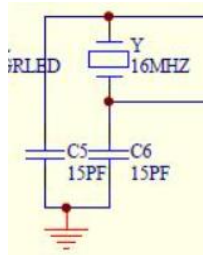


图 31 时钟电路

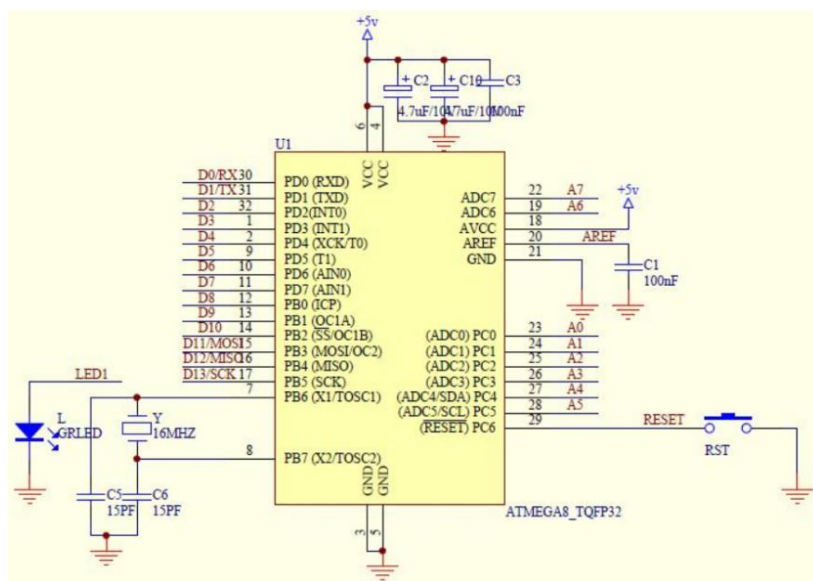


图 32 最小系统电路概览

串口通信电路如图 33。因电脑数据传输使用 USB 协议，无法直接与单片机 MCU 通信，此处使用了接口转换芯片 FT232RL，双向解析 USB 与 UART 接口的数据，实现电脑与 Arduino 单片机通信。

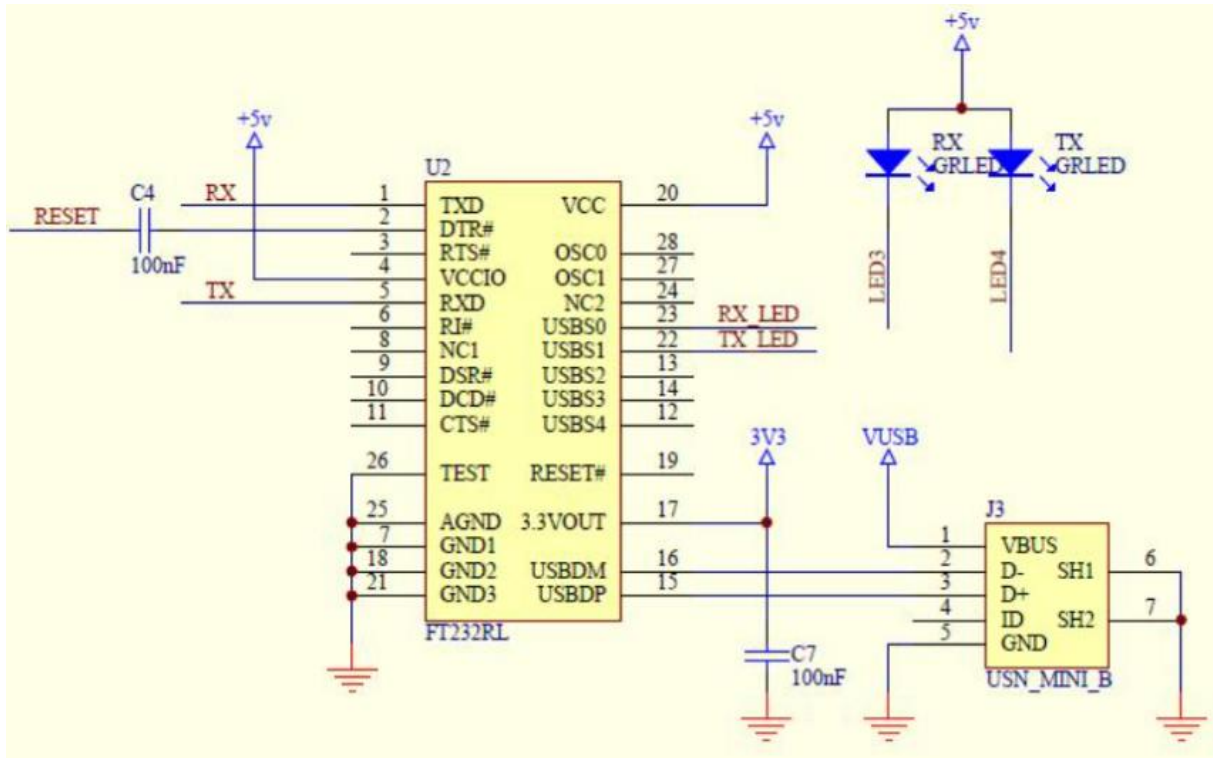


图 33 串口通信电路

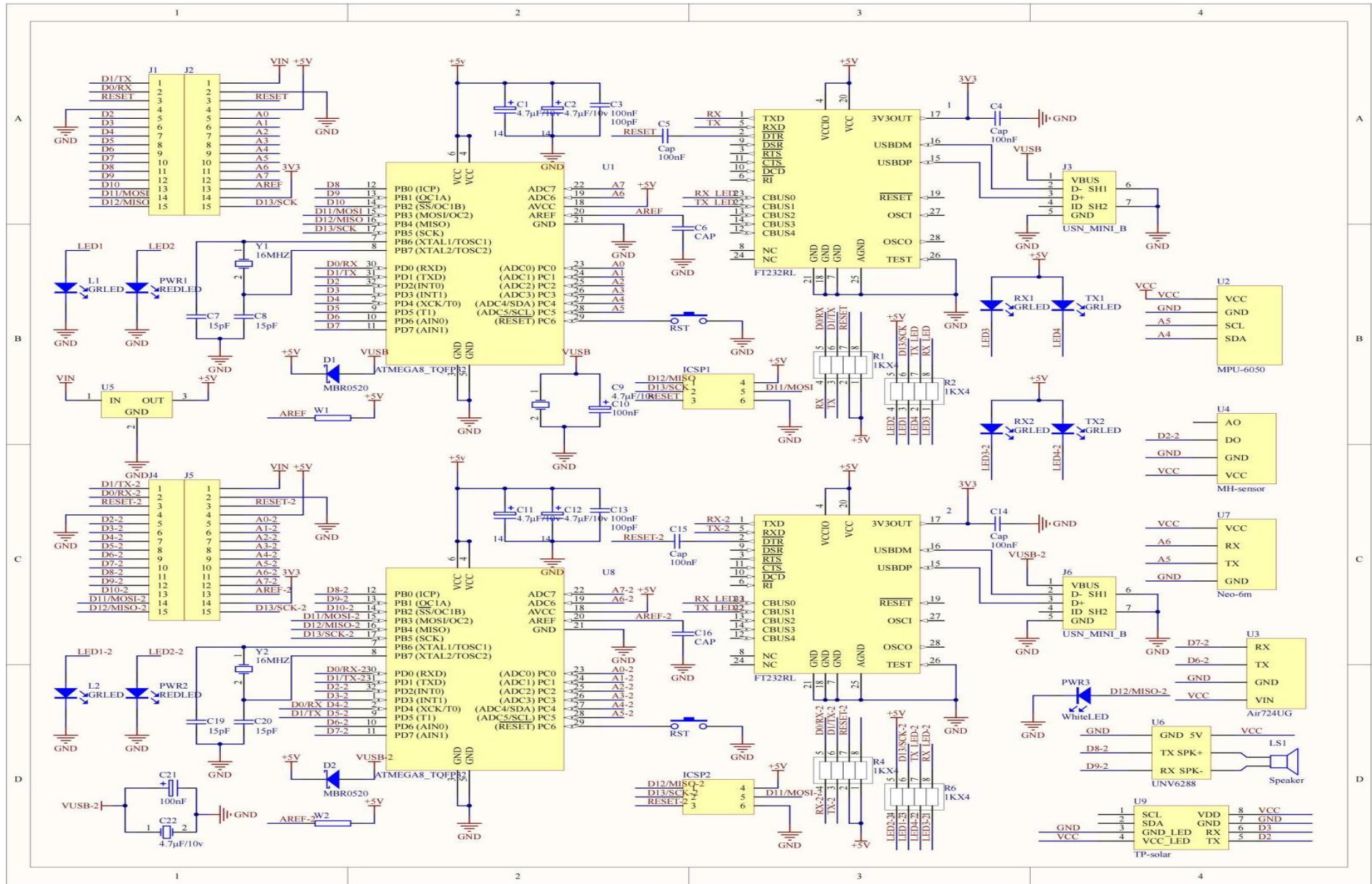


图 34 总电路图概览

## 4 工作原理

### 4.1 Arduino Nano 平台简介

Arduino Nano 是 Arduino USB 接口的微型版本，最大的不同是没有电源插座以及 USB 接口是 Mini-B 型插座。Arduino Nano 是尺寸非常小的而且可以直接插在面包板上使用。其处理器核心是 ATmega328(Nano3.0)，同时具有 14 路数字输入/输出口（其中 6 路可作为 PWM 输出），8 路模拟输入，一个 16MHz 晶体振荡器，一个 mini-B USB 口，一个 ICSP header 和一个复位按钮。ATmega328 包括了片上 16KB/32KB Flash，其中 2KB 用于 Bootloader。同时还有 1KB/2KBSRAM 和 0.5KB/1KB EEPROM。14 路数字输入输出口：工作电压为 5V，每一路能输出和接入最大电流为 40mA。每一路配置了 20-50K 欧姆内部上拉电阻（默认不连接）。除此之外，有些引脚有特定的功能：

①串口信号 RX（0 号）、TX（1 号）：提供 TTL 电压水平的串口接收信号，与 FT232R1 的相应引脚相连。

②外部中断（2 号和 3 号）：触发中断引脚，可设成上升沿、下降沿或同时触发。

脉冲宽度调制 PWM（3、5、6、9、10、11）：提供 6 路 8 位 PWM 输出。

③SPI（10(SS), 11(MOSI), 12(MISO), 13(SCK)）：SPI 通信接口。

④LED（13 号）：Arduino 专门用于测试 LED 的保留接口，输出为高时点亮 LED，反之输出为低时 LED 熄灭。

⑤6 路模拟输入 A0 到 A5：每一路具有 10 位的分辨率（即输入有 1024 个不同值），默认输入信号范围为 0 到 5V，可以通过 AREF 调整输入上限。

⑥TWI 接口（SDA A4 和 SCL A5）：支持通信接口（兼容 I2C 总线）。

Arduino Nano 引脚定义如图 35，实物图如图 36。

## NANO PINOUT

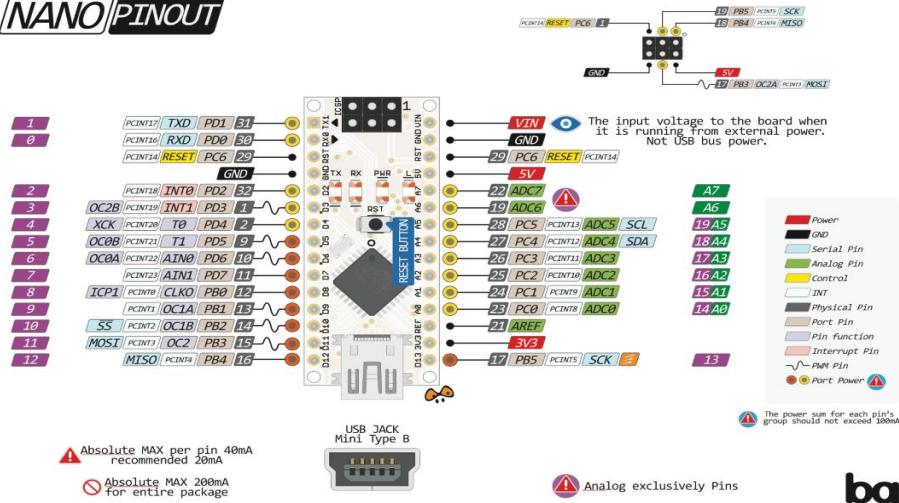


图 35 Arduino Nano 引脚定义图

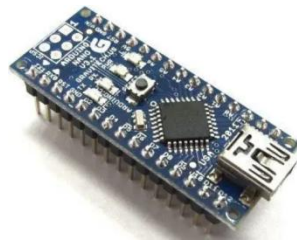


图 36 Arduino Nano 实物图

### 4.2 Neo-6M GPS 定位模块

GPS 定位模块实物图如图 37，它称为用户部分，能像“收音机”一样接收、解调卫星的广播 C/A 码信号，中以频率为 1575.42MHz。GPS 定位模块并不播发信号，属于被动定位。通过运算与每个卫星的伪间隔，接纳间隔交会法求出接收机的得出经度、纬度、高度和时间改善量这四个参数，特性是点位速率快，但偏差大。首次定位的模块至少必要 4 颗卫星参与计算，称为 3D 定位，3 颗卫星即可实现 2D 定位，但精度欠佳。GPS 定位模块通过串行通讯口不停输出 NMEA 标识的定位信息及帮助信息，辅助提高精度。GPS 的工作原理，简单地说来，是使用几何与物理上一些基本原理。假定卫星的位置、所在地点 A 至卫星之间的距离已知，那么 A 点一定是位于以卫星为中心、所测得距离为半径的圆球上。进一步，又测得点 A 至另一卫星的距离，则 A 点一定处在前后两个圆球相交的圆环上。测得与第三个卫星的距离，就可以确定 A 点只能是在三个圆球相交的两个点上，得到 A 点的精确位置。



图 37 GPS 模块实物图

### 4.2.1 特性参数

- ①模块带有放大电路，有利于无源陶瓷天线快速搜星。
- ②模块可通过串口进行参数设置，并可保存在 EEPROM。
- ③模块自带 SMA 接口，可以连接有源天线。
- ④模块兼容 3.3V/5V 电平，可以连接单片机系统。
- ⑤模块自带可充电电池，可以掉电保持星历数据。
- ⑥在主电源断开后，电池可以维持半小时左右的 GPS 星历数据的保存，以支持温启动或热启动，从而实现快速定位。

### 4.2.2 报文数据格式

GPRMC 最小定位信息数据:

\$GPRMC,<1>,<2>,<3>,<4>,<5>,<6>,<7>,<8>,<9>,<10>,<11>,<12>\*hh

<1> UTC 时间，hhmmss(时分秒)格式

<2> 定位状态

<3>纬度 ddmm.mmmmm(度分)格式

<4> 纬度半球 N(北半球)或 S(南半球)

<5>经度 ddmm.mmmmm(度分)格式

<6> 经度半球 E(东经)或 W(西经)

<7>地面速率

<8>地面航向

<9> UTC 日期，ddmmyy(日月年)格式

<10>磁偏角(000.0~180.0 度，前面的 0 也将被传输)

<11> 磁偏角方向，E(东)或 W(西)

<12>模式指示

### 4.3 TP-SOLAR 激光测距模块

用脉冲激光器向目标发射一系列很窄的光脉冲(脉冲宽度小于 50ns)，光达到目标表面后部分被反射，通过测量光脉冲从发射到返回接收机的时间，可得出测距机与目标之间的距离，被测物距离与被测物最小边长的关系如表 1 所示。本模块是一个基于单点 TOF 技术的传感器，采用 850nmLED 光源，测距范围为 0.2m~12m，结合相应的滤波算法处理，可以得到极低的测量噪声，实物图如图 39。

表 1 被测物距离与被测物最小边长的关系



被测物距离/单位: m	1	2	3	4	5
被测物最小边长/单位: mm	70	140	210	279	349

模块的发射/接收部分的光路示意图如图 38，另当被测物完全覆盖发射光源的时候，可以得到准确的距离信息，否则会出现距离偏差。

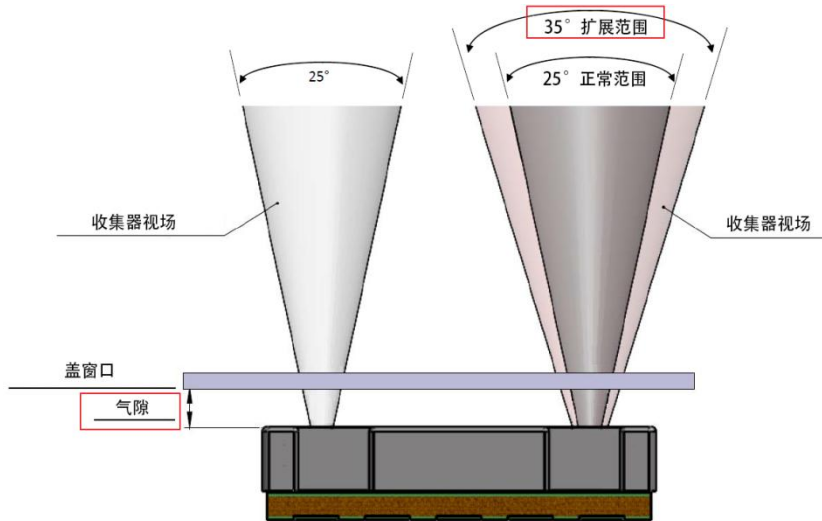


图 38 模组收发光线示意图



图 39 激光测距模块实物图

### 4.3.1 激光模块通信

激光传感器启动命令： F5 E0 01 00 00 00 9F 70 E9 32

表 2 激光返回数据格式

Bit0	Bit1	Bit2	Bit3	Bit4~Bit5	Bit6~Bit7	Bit8~Bit9	Bit10~Bit11	Bit12~Bit19	Bit20~Bit23
F5	E0	10	00	距离 (2byte)	温度 (2byte)	信号幅度 (2byte)	背景光 (2byte)	TOF 相位信息 (8byte)	CRC32(4byte)

表 3 主机发送数据格式

帧头	命令		数据位	校验码
0xF5	W/R	TYPE	LSB-----MSB	LSB-----MSB
1 byte	1 byte		4 byte	4 byte

表 4 模块响应数据格式

帧头	命令		数据长度		数据位	校验码
0xFA	W/R	TYPE	LSB	MSB	LSB-----MSB	LSB-----MSB
1 byte	1 byte		2 byte		N byte	4 byte

### 4.3.2 校验码生成

从帧头开始，到数据位结束的所有数据，进行 CRC32 冗余校验，从而避免或识别数据传输过程中出现干扰导致的异常错误数据。

#### 4.4 MPU6050 6 轴传感器介绍

MPU6050 是一款 6 轴运动处理传感器，根据角动量守恒原理工作，其运用到的物理原理主要有重力传感和角速度传感。

①重力传感是根据压电效应来工作的，所谓的压电效应就是“对于不存在对称中心的异极晶体，加在晶体上的外力除了使石英晶体发生形变以外，还将改变石英晶体的极化状态，在晶体内部建立电场，这种由于机械力作用使介质发生极化的现象称为“正压电效应”。利用其内部的加速度造成石英晶体形变来产生电压，只要计算出产生电压和所施加的重力加速度之间的关系，就可以将重力加速度转化成电压输出。

②角速度传感器，又名“陀螺仪”，它是一种用来感测与维持方向的装置，基于角动量守恒理论的设计。陀螺仪一旦开始旋转，由于转子的角动量，陀螺仪有抗拒方向改变的趋向。角速度传感器原理通俗地说，一个旋转物体的旋转轴所指的方向在不受外力影响时，是不会改变的，再用多种方法读取轴所指示的方向，并将数据信号自动传给控制系统，即可测出当前运动下的角速度。



图 40 6 轴传感器实物图

#### 4.5 Air724UG 4G 联网模块

4G 模块是指硬件加载到指定频段，软件支持标准的 LTE 协议，软硬件高度集成模组化的一种产品的统称。硬件将射频、基带集成在一块 PCB 小板上，完成无线接收、发射、基带信号处理功能。软件支持语音拨号、短信收发、拨号联网等功能。4G LTE 系统能够以 100Mbps 的速度下载，比拨号上网快 50 倍，上传的速度也能达到 50Mbps，并能够满足几乎所有用户对于无线服务的要求。而 4G LTE Advanced 采用载波聚合技术，下行峰值速度可达 150Mbps。在远程电力监控、水文水资源监测、山洪地质灾害监测预警、环保污染监测、气象数据采集、森林防火监控、工业远程数据采集/传输等领域受到广泛应用。



图 41 4G 模块实物图

表 5 4G 模块工作模式

模式	功能	
正常工作	SLEEP	在模块没有任何任务处理则会自动进入睡眠模式。睡眠模式下，模块的功耗会降到非常低，但模块仍然能够收发数据、短消息和来电。
	IDLE	软件正常运行。模块注册上网络，没有数据，语音和短信交互。
	TALK/Data	连接正常工作。有数据或者语音或者短信交互。此模式下，模块功耗取决于环境信号的强弱，动态 DTX 控制以及射频工作频率。
关机模式	此模式下 PMU 停止给基带和射频供电，软件停止工作，串口不通	
省电模式	此模式下，射频和 SIM 卡都不工作，但是串口仍然可以访问	
飞行模式	AT+CFUN=4 可以将模块设置为飞行模式，此模式下模块射频不工作	

#### 4.6 UYN6288 语音合成模块

UYN6288 中文语音合成芯片是北京宇音天下科技有限公司于 2010 年初推出的一款语音合成芯片。UYN6288 通过异步串口（UART）通讯方式，接收待合成的文本数据，实现文本到语音（或 TTS 语音）的转换。Arduino 和 UYN6288 语音合成芯片之间通过 UART 接口连接，可通过通讯接口向 UYN6288 语音合成芯片发送控制命令和文本，UYN6288 语音合成芯片把接收到的文本合成为语音信号输出，输出的信号经功率放大器进行放大后连接到喇叭进行播放，系统构成如图 42。



图 42 UYN6288 系统构成框图



图 43 UYN6288 实物图

#### 4.7 MH 光敏传感器模块

光敏传感器是对外界光信号或光辐射有响应或转换功能的敏感装置。

它能感应光线的明暗变化，输出微弱的电信号，通过简单电子线路放大处理，可以控制 LED 灯的自动开关，实物图如图 44。

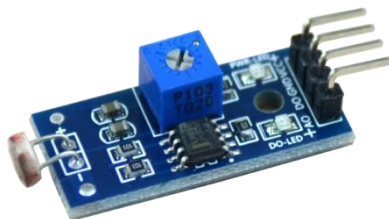


图 44 MH 光敏传感器实物图

## 5 创新特色

①实时监测碰撞：基于空间矩阵向量算法，分析当前倾斜角度与加速度，当行驶中加速度、倾斜角度大于阈值一段时间后判定为发生摔倒或碰撞。

②事故自动上报位置：碰撞发生 30s 后未取消预报警状态，位置发送至报警平台，为救援赢得宝贵时间。

③GPS 实时超速检测语音提示：Arduino 解析 GPS 报文，经算法分析时速，并将速度实时上传，当速度超过阈值一段时间后，通过语音报警提示减速，减少事故隐患，为交通骑行安全“上一把锁”。

④后方来车预警：解析激光测距传感器数据，当行驶中与后方来车小于安全距离时，提示骑手注意避让。

⑤夜晚自动照明：使用光敏传感器检测环境光照强度，当处于黑暗环境时，自动打开头盔前照灯。

## 6 应用前景

①相关政策方面：本产品响应国家“一盔一带”政策，应用于交通安全领域，为头盔的智能化提供了可行的方向。

②未来发展方面：在日益严峻的交通压力和外卖行业盛行下，必然驱使电动车保有量不断上涨，电动车出行成为一种现象级出行方式，普通功能单一头盔已不能满足需求，本设计主要结合了实时定位和事故预警，有效提高佩戴者的安全防护等级，降低事故发生概率，同时增强事故发生后的被救援能力。

③经济效益方面：在提升安全性的同时搭配多样化的功能，再加上极具性价比的价格能占领广阔的市场空间。

④行业内部方面：智能化头盔会促进传统安全头盔在各方面的改进，促进产品多样化发展，能更好地满足使用者的需求，保护使用者的安全。

## 7 技术分析

原本的头盔仅具备保护头部的功能，功能单一难以满足现如今用户的需求，本设计使用GPS模块测速限制速度安全行驶，通过激光传感器测量与后车距离，消除后顾之忧；面对事故的发生，及时报警求助挽救生命安全；另有语音提醒，提高驾驶安全性。

### 参考文献

- [1] 杨梦雨. 基于 MPU6050 的老年人摔倒检测系统设计[D]. 重庆大学, 2017.
- [2] 谢晓钟, 陈香广. MQTT 协议接入 OneNET 物联网的应用[J]. 木工机床, 2021(02):10-13+20.
- [3] 孙彦锋, 周颖熙. 手持激光测距仪测角功能校准方法的研究[J]. 计量与测试技术, 2021, 48(06):66-68.
- [4] 曹宇, 唐小波, 宋育泽, 王宁, 鲁洪江. 北斗卫星导航系统在一体化智能安全头盔中的应用[J]. 全球定位系统, 2021, 46(03):111-115.
- [5] 刘振鹏. SYN7318 中文语音交互模块识别模式的分析[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(11):48-49.

# 老年人智能起居椅

参赛者：季楚烨，苏子超，刘文龙，凌萧晨，彭伟杰

（浙江机电职业技术学院，杭州 310053）

指导教师：江一行，石磊

**摘要：**以解决老年人居家生活不便的问题为研究对象，针对老年人上下床困难以及上厕所不方便的问题，设计了老年人智能起居椅的方案。本作品由坐板开合功能、辅助拉起功能、行进运动功能三个功能组成。坐板开合功能我们使用 4 对锥齿轮来配合蜗轮蜗杆减速电机实现传动功能；辅助拉起功能元由电动推杆和曲柄滑块结构组成。通过电动推杆的伸缩带动曲柄滑块运动，以此来带动把手完成上下摆动运动，从而给老人提供一个辅助力，帮助老人站起；行进运动功能由两台电机，两个主动前轮，以及后侧两个辅助万向轮，再配以一个固定遥控器和一个无线蓝牙遥控器组成。从而帮助老年人居家生活时轻松的上下床和上厕所。

**关键字：**起居椅，智能传感、上下床、居家生活

## 1 研究背景及意义

21 世纪是人口老龄化的时代。目前，世界上所有发达国家都已进入老龄化社会，而许多发展中国家也正在或即将进入老龄社会。中国是较早进入老龄化社会的发展中国家之一，也是世界上老年人口数量最多的国家，占全球老年人口总量的五分之一。中国的人口老龄化不仅是中国自身的问题，还关系到全球人口老龄化的进程，备受世界关注。

在这样的时代背景下，解决老龄化社会带来的社会问题，充分满足老年人的精神文化需求，提高老年人的生活质量，具有重要的意义。

在科技全球化的进行下，越来越注重机器代替人力。以往的普通轮椅需要大量的人力进行辅助操作，并且不能给予老人很多的个人隐私空间。老年人需要有自己的独立空间，但老年人往往因为年纪的增大常常会出现下肢力量衰弱，从而导致碰撞、摔跤、起身困难等问题。

基于以上的研究背景，为解决老年人所遇到的这些问题以及诸多的生活不便，我们设计了这款辅助老年人生活的智能起居椅。





图1 老人上厕所不便图



图2 老人上厕所困难图

## 1.1 国外研究成果



图3 助力装置



图4 辅助站立机器人

目前市场上的助力装置很多，但多都需另有人进行辅助操作，主要有：

(1) 拐杖，是目前市场上最常见的助力设备。由手、手臂或腋下支撑辅助使用者站立行走，保持平衡的重要工具设备特点：使用方便，操作简单。拐杖最大的缺点是只能针对有部分行动能力，但行动不便的群体，不能用于下半身无行动能力或力量衰弱不足以平稳行动的人群；

(2) 助力装置（见图3），美国凯斯西储大学设计的一种垂直升降式辅助站立机构，工作原理为使用两个空气弹簧作为辅助起立装置，通过空气弹簧的伸缩为用户提供垂直向上的力，帮助使用者站起来。

(3) 辅助站立机器人（见图4）：日本高知工科大学所研制，利用使用者身上的各处传感器来获得使用者身体的姿态、重心的位置等运动状态，再根据情况来进行辅助施力。

## 1.2 国内研究成果

(1) 辅助站立扶手：可供手扶的器具，用来保持身体平衡或支撑身体。

(2) 辅助站立座椅：结合平面连杆机构的构造方法，引进了变胞机构的概念。

(3) 卫生护理机器人：基于对人体自然站立运动过程的分析，解决了由于老年人下肢肌力不足而不能正常洗浴的生活问题。

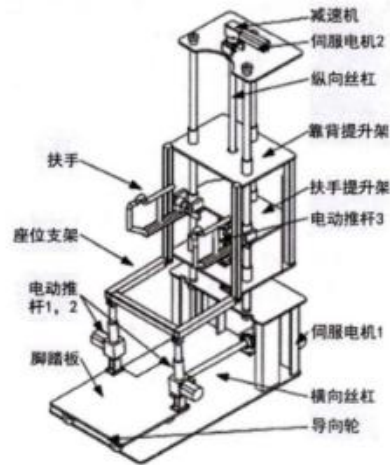


图 5 辅助站立座椅

## 2 老年人智能起居椅的工作原理

符合人机关系的传动功能和辅助功能应该同时具有传动稳定性和结构稳定性的特点，所谓传动稳定性就是指在传动的过程中，蜗轮蜗杆减速电机输出的动能能一比一的传动到坐板上，即传动比 1: 1，齿轮传动需要准确的啮合来保证稳定的传动比。其次就是要保证电动推杆带动拉杆的稳定性和强度，在辅助拉起过程中保证稳定性和强度，符合人机关系。

### 2.1 基于老年人智能起居椅所要具有的功能

符合人机关系的传动功能和辅助功能应该同时具有传动稳定性和结构稳定性的特点，所谓传动稳定性就是指在传动的过程中，蜗轮蜗杆减速电机输出的动能能一比一的传动到坐板上，即传动比 1: 1，齿轮传动需要准确的啮合来保证稳定的传动比。其次就是要保证电动推杆带动拉杆的稳定性和强度，在辅助拉起过程中保证稳定性和强度，符合人机关系。

### 2.2 基于老年人智能起居椅的总体设计模块

根据功能原理要求对本装置进行功能分解，如图 6，分解成多个功能元并逐个进行设计。分解后的功能元具体包括坐板开合功能元，辅助拉起功能元以及行进运动功能元。此外，要想实现老人自主控制智能起居椅的运动，就必须保证传动的效率和控制的稳定性。



图6 老年人智能起居椅的功能元分解

### 2.3 坐板开合功能元设计

我们考虑到机械结构的占用空间，所以我们使用4对锥齿轮来配合蜗轮蜗杆减速电机实现传动功能。我们每组锥齿轮都考虑到了齿轮啮合的效率和磨损，锥齿轮轮齿之间的啮合过程是一种过渡的过程，轮齿上的受力也是逐渐由小到大，再由大到小；我们使锥齿轮重合度增大，这样会使齿轮的承载能力提高，从而延长了齿轮的寿命。重合度主要取决于啮合时间，而锥齿轮的啮合时间长，接触面积大，则应力会减小，传动更加平稳。同时我们还在坐板下安装了压力传感器，在感受到坐板上有压力的存在时会及时反应，切断装置电源，停止坐板的开合运动，防止误操作产生的不良后果，以此保障操作者的安全性。

### 2.4 辅助拉起功能元设计

考虑到老人年长，身体素质较弱，站起或坐下时力量不够，较吃力，且可能导致身体不稳，所以我们设计了辅助拉起功能元，来帮助老人省力、方便、安全地站起坐下。



图7 辅助拉起功能元

辅助拉起功能元由电动推杆和曲柄滑块结构组成。通过电动推杆的伸缩带动曲柄滑块运动，以此来带动把手完成上下摆动运动，从而给老人提供一个辅助力，帮助老人站起。在老

人往下坐时，电动推杆缩回，使曲柄滑块下降，带动把手向下运动，老人握住把手稳稳的坐下。我们使用连接钣金、紧固螺钉和固定角钢对把手进行了紧固连接，增加把手的稳定性。

在我们多次试验与测量计算后，电动推杆选用了 24v，行程为 200mm，可带动把手的运动角度为 60°，这个行程是最为适合老人站起或下坐到床上的运动行程。配备限位开关，当伸缩杆达到顶点会自动停止，确保电机不会空烧；电动推杆是铝合金材质，表面经过二十七道抛光工艺，结构设计紧密，不会生锈；纯金属齿轮，粉末冶金技术，强度，韧性双倍提升且自带机锁，安全无忧；低电阻更加省电；电线采用无氧纯铜作为导体，低电阻，经久耐用，这些条件都很符合老人使用，安全可靠。

## 2.5 行进运动功能元设计

行进运动功能由两台电机，两个主动前轮，以及后侧两个辅助万向轮，再配以一个固定遥控器和一个无线蓝牙遥控器组成。

两个主动前轮的作用是用来传递电机传出的旋转动力，两个遥控器控制着主动前轮的运动，均采用手柄来控制实现无级调速与换向。

两台电机分别控制两个主动前轮，又通过遥控器统一控制来实现变速变向。由于两台电机分别控制，所以两个主动前轮可以做出不同的运动，转向时一台电机通电传递动力，一台电机静止不动，则可使主动前轮做出相应运动，使得整台起居椅做出操作者想要的转向运动。

起居椅后侧的两个万向轮的作用是辅助两个主动前轮，保持起居椅的平衡与稳定。两个辅助万向轮我们选用结构较小，承重力较高，运动平稳的型号，安全性高，稳定可靠。

固定遥控器（见图 8）采用了有线连接的形式，通过电线连接在供电装置上，进行工作。固定遥控器固定在起居椅前侧直立把手上，方便老人坐在起居椅上时进行控制与操作，把手的设计也保障了老人的安全。

无线遥控器选用，我们的第一原则是轻巧、便于手持、方便操控。因此我们选用了外形较小、材质轻盈的型号遥控器来进行配对，通过无线蓝牙连接，使老人可以在床上、沙发上等离起居椅距离较远的地方来控制起居椅运动，来到自己面前，更加地智能方便，可以使老人独立完成一系列的活动。

行进运动功能元实现了起居椅的运动，无级变速、变向的特性带给老人的体验也是轻松方便的。遥控器按钮我们设计的简单、一目了然，手柄操控方向的设计也使操作控制变得简单明了，很适合老人进行使用，可操作性强。

本产品除却三大功能元之外，还添设了几处辅助功能部分，来完成一些细节上的作用，使得老年人在使用本作品时更加安全、舒适，操作简单。

## 2.6 两侧水平固定扶手

我们在起居椅两侧设计安装了水平的固定扶手，老人在坐上本装置或从本装置上下来坐到床上时可以通过握住两侧固定扶手来保证身体的稳定，从而避免因无处借力而身体失稳。

固定扶手与起居椅两侧悬臂呈平行设置，采用螺栓连接，牢固且可承受较大力的作用。



图 8 无线蓝牙遥控器



图 9 水平固定扶手

## 2.7 膝盖处保护软包

起居椅主体结构采用钢结构，材质结实且硬，担心老人会不小心磕磕碰碰产生危险，我们在起居椅最外层会进行软包处理，用海绵与皮革制成柔软外包装，进行防护措施。

在起居椅内部的前端，我们设计了加厚软包来保护老人的膝盖，既可防止老人膝盖碰撞到起居椅内侧较硬的结构部分，也可起支撑作用，防止老人向前滑落，产生危险。



图 10 膝盖处保护软包

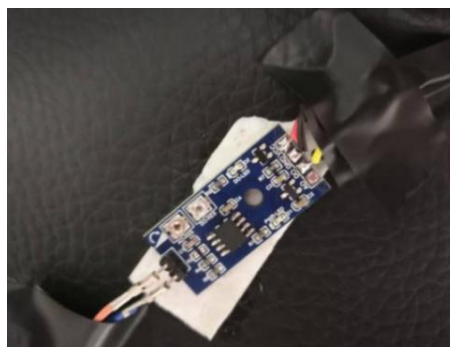


图 11 压力传感器电板

## 2.8 坐板上压力传感器

前面有提到坐板开合与拉杆拉起的顺序运动，我们还考虑到了坐板开合的安全问题。

在坐板上添加设置压力传感器，就解决了这个问题。压力传感器可以实现当老人身体离开坐板几秒后，遥控器开关才可以控制坐板进行开合，这样可以防止老人误操作，在自己仍坐在起居椅坐板上的情况下，按动了坐板打开的按键，而导致危险的发生。

## 2.9 安全牵引带

在起居椅前方把手上增设了安全牵引带，使老人在上下起居椅时更具安全性。当老年人



上床时，控制器控制座板打开，把手向下摆动，在安全牵引带的保护下老人能够缓慢坐到床上。老年人上车时手握把手，电动推杆下降，把手向上摆动，安全牵引带辅助老年人站到装置上，此时座板合拢，把手向下摆动，辅助老年人缓慢坐到座板上。



图 12 安全牵引带



图 13 牵引带卡扣

## 2.10 运动学仿真及推杆选型

我们采用了运动仿真的形式来校核电动的推杆的推力，为了简化仿真步骤，需要对虚拟样机模型进行简化，进行必要的连杆和运动副设置。仿真过程目录如图 14 所示；

根据辅助老年人起立的功能要求，把手所提供的辅助力约为 500N，简化虚拟样机后，在把手上施加一定方向的力 500N。设置后的仿真样机模型如图 15 所示。



图 14 仿真过程目录

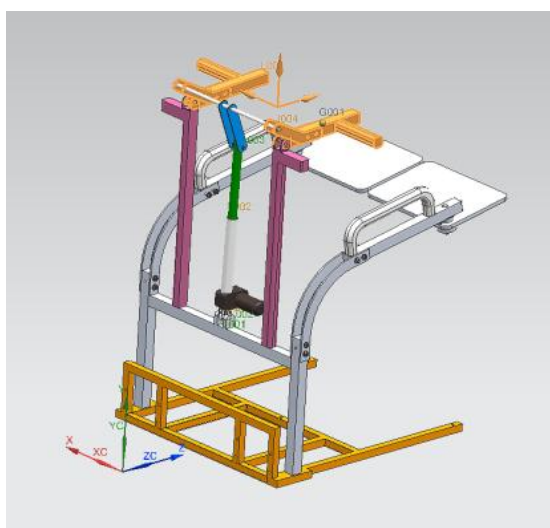


图 15 仿真样机模型

设定电动推杆为动力原件，设定滑动副的速度为 12.4mm/s 的恒定线速度，插入求解方案，设置时间为 8s，进行求解计算并查看仿真结果，仿真结束后的模型如图所示，此时把手与水平面的夹角约为 90 度，电动推杆的行程为 68mm，拉杆抬升角度基本符合设计要求。如图 16



所示。

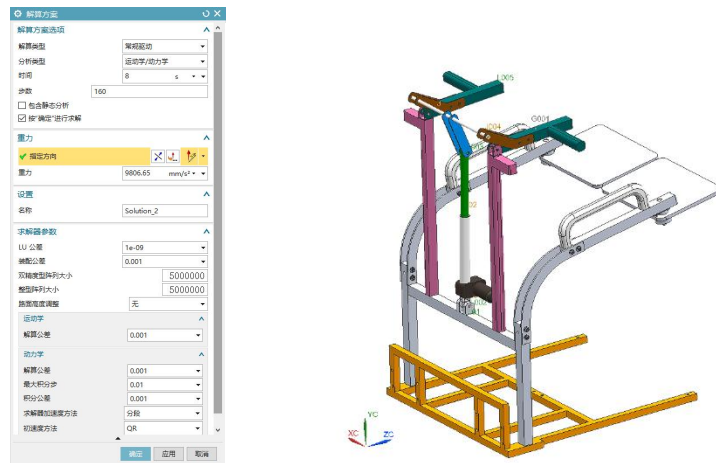


图 16 仿真动画模型

通过 UG 软件的测量技术，测出电动推杆的驱动力曲线如图 17 所示。

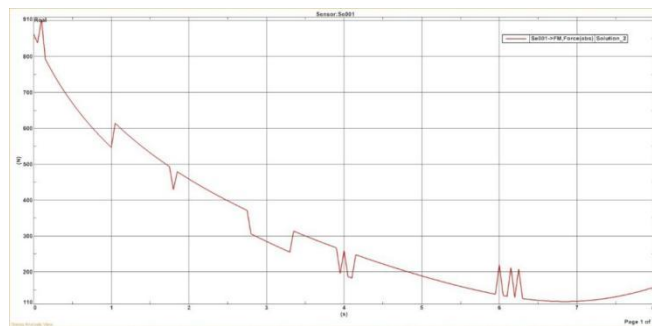


图 17 电动推杆驱动力曲线图

从图 17 所示的推杆驱动力曲线可知，推杆运行过程中，最大的驱动力约为 910N，考虑一定的安全系数和放置其余物品所引起的重量增加，最终选择驱动力 1000N, 速度 12mm/s, 极限位移量为 200mm 的电动推杆，如图 18 所示。



图 18 电动推杆参数

## 2.11 结构分析与优化

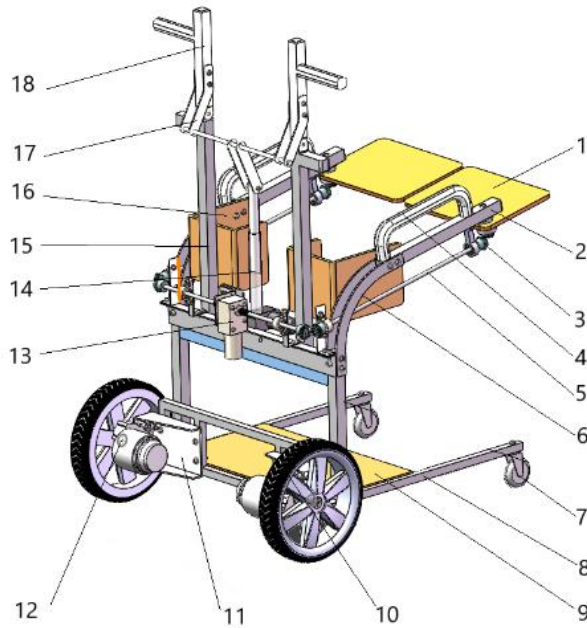


图 19 总体结构模型

1-坐板；2-水平支撑杆；3-锥齿轮（一对）；4-扶手；5-传动轴；6-弧形支撑梁；7-万向轮；8-底架；9-踏板；10-主动轮；11-电机固定板；12-行走电机；13-减速电机；14-电动推杆；15-直立把手座；16-膝盖防护板；17-把手连接板；18-把手

基于 ANSYS WORKBENCH 环境，根据设计和实物样机测试要求进行静态和瞬态结构有限元分析，以模拟结构在静态载荷和冲击载荷作用下的力学性能响应。有限元数值模拟分析的基本理论依据是经典力学理论，其动力学通用方程为：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F(t)\}$$

式中： $[M]$ 为质量矩阵， $[C]$ 为阻尼矩阵， $[K]$ 为刚度系数矩阵， $\{x\}$ 为位移矢量， $\{F\}$ 为力矢量。

### (1) 静态结构分析

线性静态结构分析通常用于计算结构在静态载荷作用下引起的位移、应力和应变等。对于本文所研究的起居椅结构，设计和实物样机测试要求其能够承受  $G=100\text{kg}$  测试载荷的作用而不发生不可逆塑性变形，这一外加测试载荷与时间无关，不考虑惯性影响因素，因此静态结构分析时的位移  $\{x\}$  可以通过以下简化后的力学方程求解。

$$[K]\{x\} = \{F(t)\}$$

老年人起居椅工作状态的主要受力状态是坐板承受老年人的体重，因此需要分析坐板以及坐板的支撑和传动结构在测试载荷作用下的强度和刚度。首先将模型结构简化如图 20 所示，

老年人体重通过两对对称的锥齿轮副由坐板传递到弧形支撑梁，再通过固定连接的方式由弧形支撑梁传递到底架。由简化模型的受力图可知：重点分析部件为弧形支撑梁，其为空间上受弯扭的悬臂梁，且因两个弧形支撑梁之间还有一根加强筋，将此加强筋视为刚体，则弧形支撑梁可视为超静定悬臂梁。

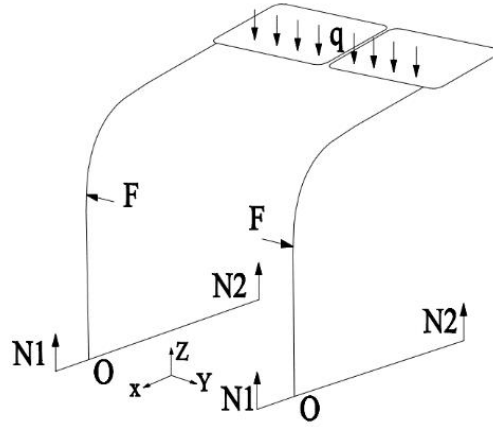


图 20 简化后的模型结构

将弧形支撑梁受力投影至 YZ 平面进行分析，投影及受力如图 21 所示。（a）为未解除约束受力图，（b）为解除约束后受力图。其中，因为 A 点处加强管在空间上是可平行移动的，所以 A 点的受力只有一个 y 方向的力，即  $F_{Az} = 0$ 。

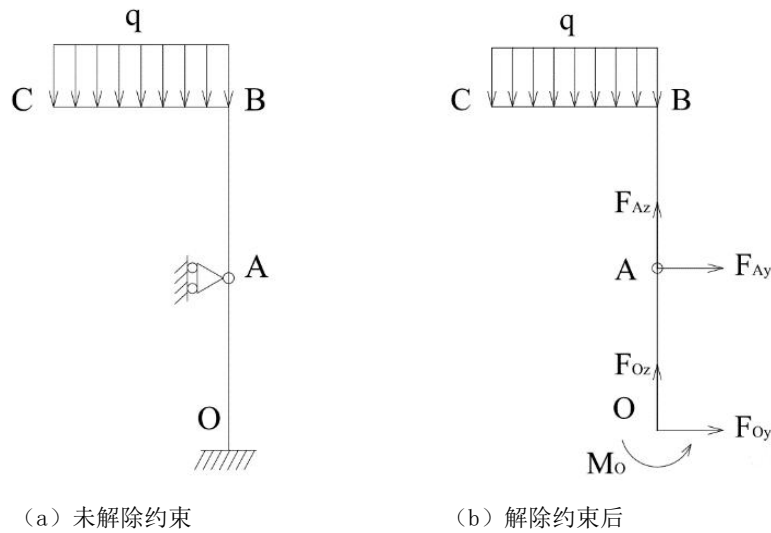


图 21 弧形支撑梁在 YZ 面上的受力投影

首先将均布测试载荷  $q = \frac{G}{2L_{BC}}$  转化到 B 点，则：

$$F_B = G/2$$

$$M_B = \int_0^{L_{BC}} q \cdot L = \frac{1}{4} G \cdot L_{BC}$$

由  $\sum M_o = 0$ ，得：

$$\frac{1}{4}G \cdot L_{BC} + M_o - F_{Ay} \cdot L_{OA} = 0 \quad (1)$$

设  $L_{OA} = \alpha \cdot L_{BC}$ ，其中  $\alpha$  为长度系数，则由 (1) 式得：

$$M_o = \alpha F_{Ay} \cdot L_{BC} - \frac{1}{4}G \cdot L_{BC}$$

因支点 A 的位移量即挠度为 0，由超静定理论可得：

$$\omega_A = -\frac{F_{Ay} \cdot L_{OA}^3}{3EI} + \frac{M_B \cdot L_{OA}^3}{2EI} = 0 \quad (2)$$

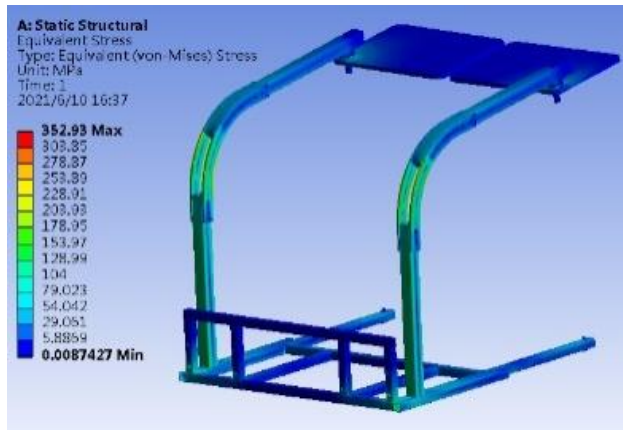
简化 (2) 得：

$$F_{Ay} = \frac{3}{8\alpha} \cdot G \quad (3)$$

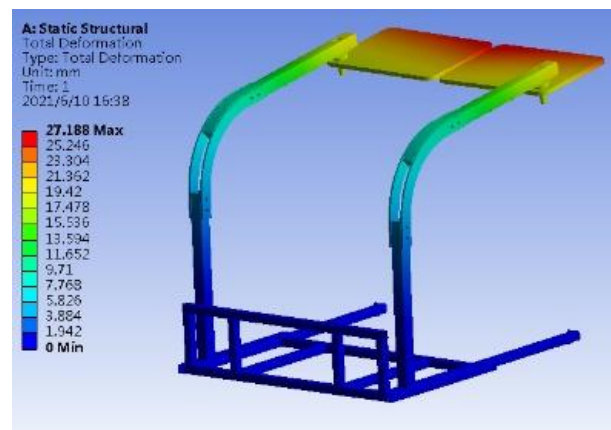
将简化后的模型以 step 格式导入到 AW 环境中的 Static Structure 模块，首先对模型进行材料设置，本文所设计起居椅主体结构为 SUS304 不锈钢焊接或螺栓紧固连接结构，坐板及回转支撑销轴采用 45 号优质碳钢材料，材料的主要性能参数如表 1 所示。完成材料设置后进行有限元仿真前处理，完成接触设置和网格划分以获得有限元模型。在两侧坐板分别施加重力方向上 500N 的测试载荷，通过公式 (3) 计算可以得到加强管对弧形支撑梁的作用载荷为  $F_{Ay}=373.5\text{N}$ ，并在底部框架连接孔上施加固定约束，运行求解后通过有限元后处理得到仿真结果。

表 1 起居椅结构材料及其力学性能参数

材料	密度 (Kg/m <sup>3</sup> )	屈服强度 (MPa)	抗拉强度 $\sigma_b$ (MPa)	泊松比 $\nu$
SUS304	7900	205 ( $\sigma_{0.2}$ )	520	0.29
45	7850	355 ( $\sigma_s$ )	600	0.3



22(a) 等效应力云图



22(b) 总体变形云图

图 22 静态仿真分析结果

由图 22 的静态结构分析结果可知，结构在静态测试载荷作用下，最大等效应力约为 352.9MPa，最大变形量为 27.2mm，较大应力主要集中在底部框架前端和弧形支撑梁位置，且最大等效应力超过了该处材料的屈服极限 205Mpa，所以结构会发生不可逆的塑性变形。

## (2) 瞬态结构分析

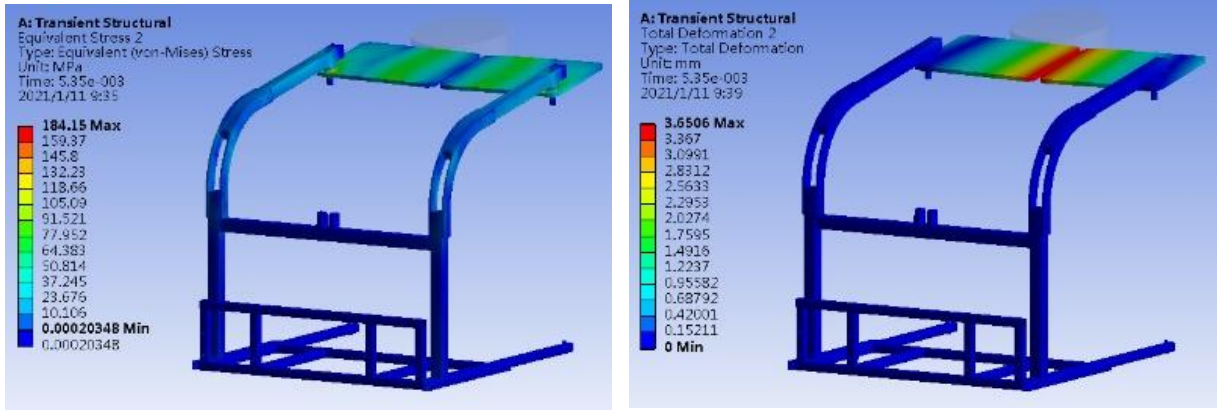
根据实物样机的冲击测试要求，还对结构进行了冲击仿真分析，冲击仿真属于瞬态结构分析范畴，与静态结构分析时不考虑惯性影响因素不同，瞬态结构分析时需要考虑重力加速度等惯性因素的影响。

分析时，在坐板上方设置一材料为 Q235 的柱形质量块来模拟 25Kg 的冲击测试载荷，实物冲击测试时要求重物是由 250mm 高度处自由落体冲击坐板，从而检验结构的抗冲击能力，为了减少有限元分析时的运算工作量，本文将质量块放置在坐板上方 10mm 位置并施加一定初始速度，以模拟其是由 250mm 高度自由落下，根据自由落体运动方程<sup>[2, 4-5]</sup>

$$v_1 = \sqrt{2gh} \quad (4)$$

式中： $v_1$  表示质量块自由落体下落至坐板上方 10mm 时的瞬时速度； $g$  表示重力加速度，取  $9.8m/s^2$ ； $h$  表示自由落体的高度，为 240mm。

带入数据计算后，得到  $v_1 = 2.1688m/s$ 。将简化后的模型导入到 AW 环境的 Transient Structure 模块，进行材料设置和有限元前处理后，施加约束、重力加速度和质量块初始速度等条件，并对时间进行设置。运行求解后得到结构在冲击载荷作用下的力学性能响应，由于冲击过程中结构的瞬态响应比较复杂，所以本文只提取冲击瞬间结构的最大响应云图如图 23 所示。



23 (a) 冲击载荷下的等效应力云图

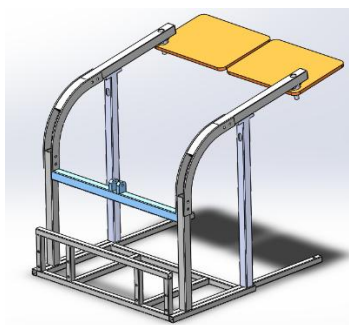
23 (b) 冲击载荷下的总体变形云图

图 23 瞬态结构分析结果

由图 23 可知，在冲击测试载荷冲击坐板瞬间，结构的最大等效应力约为 184.2MPa，最大变形量约为 3.7mm，较大应力主要集中在坐板及坐板回转支撑销轴附近，这与坐板的悬伸特性以及回转支撑部分的接触面积较小有关，但最大应力小于材料 355MPa 的屈服极限，因此结构在冲击载荷下不会发生塑性变形，最大变形量也在允许范围之内。

### (3) 结构优化设计

根据有限元仿真分析结果，静态载荷下较大的应力主要集中在底架前侧竖向支撑管以及与其相连的弧形支撑板上，分析产品结构不难看出，这主要是由于工作受载时，坐板上施加的载荷相当于悬伸力，在不干涉传动轴运转以及整个起居椅的前后行走与工作的前提下，优化设计时在两侧扶手下方设置了支撑杆，以提高框架的整体强度与刚度，如图 24 (a) 所示。冲击载荷下两侧坐板和回转支撑销轴同样存在较大的应力集中，优化设计时通过改变坐板结构增加坐板和回转支撑销轴的接触面，如图 24 (b) 所示。



24 (a) 添加支撑杆后总体结构

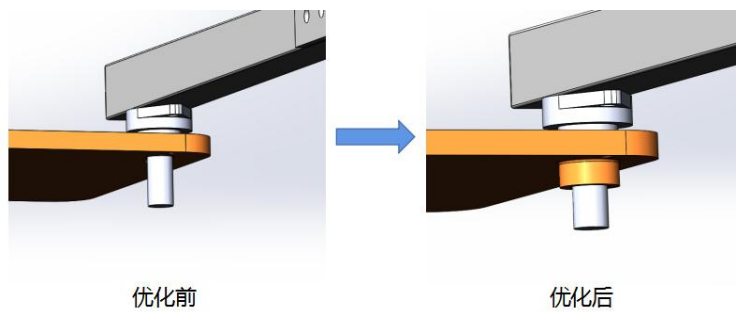
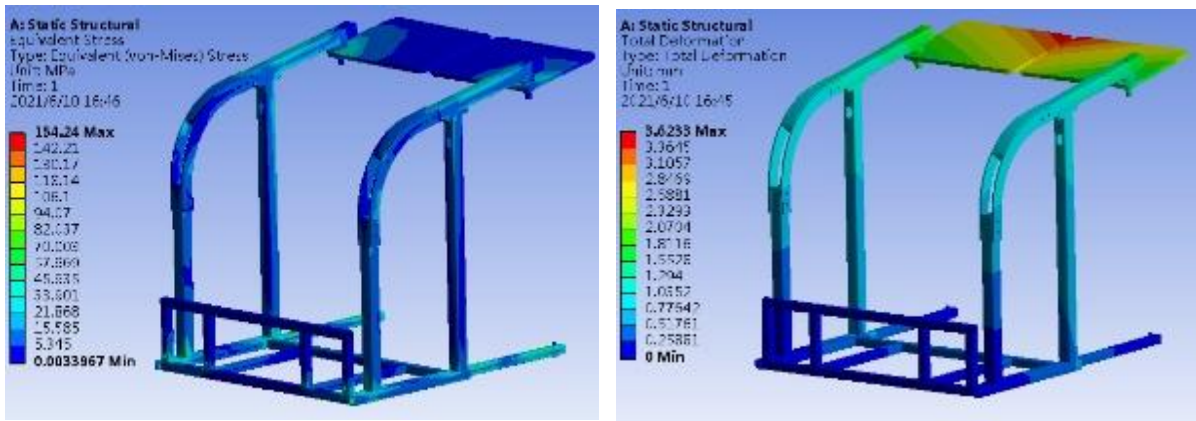


图 24 (b) 坐板结构优化

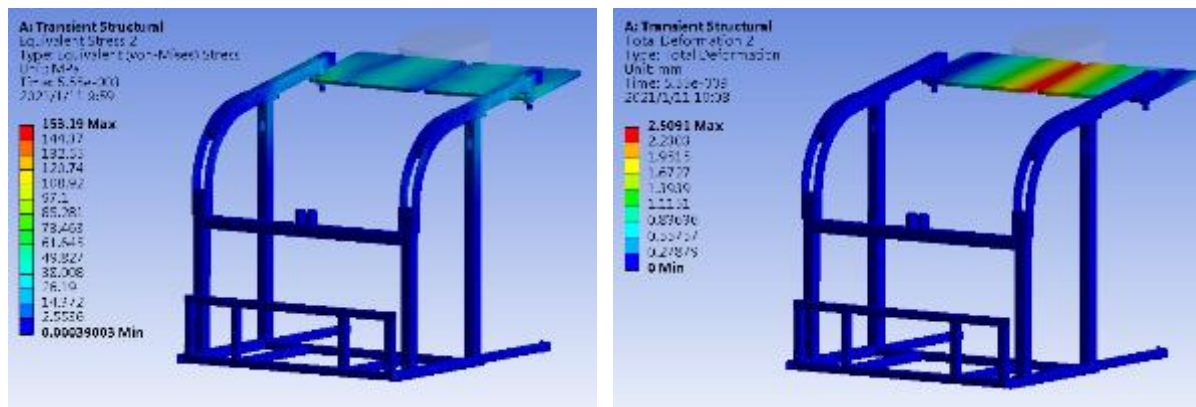
图 24 起居椅结构优化设计

为了检验优化设计的合理性和有效性，对优化后的模型进行有限元仿真分析，得到优化后结构的静态结构分析和瞬态冲击分析结果，如图 25 所示。





25(a) 优化后结构静态仿真结果云图



25(b) 优化后结构瞬态结构分析云图

图 25 优化后结构仿真分析结果

由图 25 (a) 可以看出, 优化后的结构在静态载荷作用下的最大等效应力约为 154.2MPa, 最大变形量约为 3.6mm, 最大应力远小于材料的屈服极限, 结构不会发生不可逆的塑性变形。由图 25 (b) 也可以看出, 优化后的结构在冲击载荷作用下, 最大等效应力约为 153.2MPa, 最大变形量约为 2.5mm, 结构强度和刚度得到进一步的提高, 优化后的结构符合产品的设计要求和实物样机测试要求。

### 3 创新特色

(1) 机械结构设置合理, 采用锥齿轮传动, 使运动平稳且准确, 还能增加坐板下方的空间, 方便座板运行至床或坐便器上方, 方便老人上下。

(2) 座板安装有压力传感器, 且每个位置都有限位开关, 使椅子更加智能化, 以保障老年人操作时的安全性。

(3) 把手上下两部分通过铰链连接, 且运用曲柄滑块机构使摆动幅度增加, 适应不同身高的老年人。

## 4 应用前景

本作品适用于老年人群体，作品整体体积适中，适合老年人居家使用。作品机身采用机械结构附加坐压传感器自动检测识别以及海绵软包等，使用安全性较高。作品自带可旋转座板、可摆动升降把手以及安全牵引带，能够方便老年人上下床和上厕所，适合老年人居家生活使用。本作品还附带无线遥控器，老年人在不需要本作品时，可以通过无线遥控控制其到合适的位置，给了老年人更多的生活空间。

本作品总体模型图如图 26 所示，最终实物图如图 27 所示。

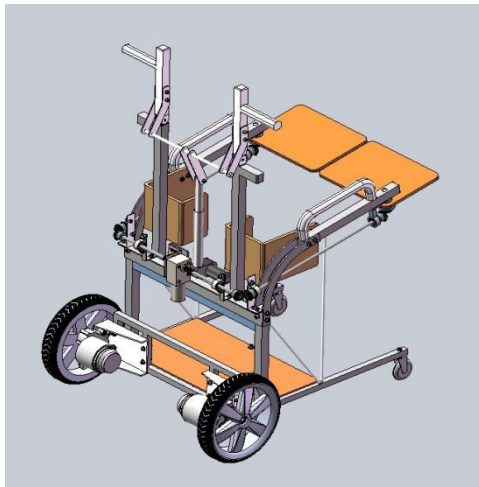


图 26 智能起居椅模型图



图 27 智能起居椅实物图

## 参 考 文 献

- [1] 中国电子信息产业发展研究院《2019 年中国家电市场报告》
- [2] 机械设计手册编委会. 机械设计手册 [M]. 3 版. 第 2 卷北京:机械工业出版社, 2004
- [3] 工程力学/张秉荣主编. [M]2 版. -北京:机械工业出版社, 2010. 1
- [4] 零件测量与质量控制技术[M]清华大学出版社, 2009. 08. 01
- [5] 高等数学第七版[M]同济大学数学系编, 高等教育出版社, 2014. 07. 01
- [6] 机械设计基础第六版[M]高等教育出版社, 2013. 08. 01

# 激光专家

## ——基于全自动激光切割设备的研究

参赛者：张志龙、周俊杰、吴世杰、沈凯凯

（温州职业技术学院智能制造学院，温州 325000）

指导教师：马金玉、何红军

**摘要：**本项目将激光技术引入到传统的制鞋行业，利用激光技术实现对鞋革的打标、雕刻、镂空和切割作业。鞋革行业是浙江温州经济的重要支柱产业之一，现在鞋业生产企业有 5200 多家，从业人员 40 多万，年产皮鞋 6 亿双以上（约占全国产鞋总量的四分之一）。我国鞋出口数量为 34.3 万吨，鞋出口金额为 3610.1 百万美元。2018 年中国皮草鞣制及制品加工行业规模以上企业数量达 685 家，同比增长 7.6%。2018 年，温州市鞋革行业实现工业总产值 1085 亿元，跻身千亿产业集群行列。同时温州鞋带市场总产值为 81.37 亿元，占温州鞋革市场的 7.5%，预计市场份额可达 2 亿。

国内鞋革制造业虽然庞大，但大多数的中小企业的制造过程中仍然是以低效率的手工制造为主。回望那些通过工业机器人实现“智造”的产业，产业的生产方式无一不是更加进步与高效。因此鞋业制造业也应当采用工业机器人设备。通过工业机器人设备推动生产管理、人力资源管理、信息化管理等管理方式转变和创新，组织更精益化、系统化，最终高效而有力的推动企业由“制造”向“智造”的转型升级。

基于机器视觉技术的不断提高，自动化技术的应用也在工业中越来越广泛，以及通过机器视觉技术与自动化控制技术的结合使用，发明了全自动激光切割设备，解决了鞋革制造业自动化程度不高，生产效率低下等问题。

针对市场需求我们研发出了新型鞋革设备，该设备创新性是将视觉引导激光切割的方案融入到设备中，使得设备更智能、更多样化，运用物理当中的热传递效应，通过 PLC 和触摸屏的协同工作，调整热能量的大小，最大程度的体现了柔性化生产且有效的解决了带有绒毛材质皮革烧焦现象的问题，解决了人工放置鞋革的问题，解决了激光辐射对人体伤害的问题，并且设备功能强，性能价格比高。

经过多次的改良，我们团队将产品的加工效率进行了提升，并对产品合格率进行了严格的把控，实现了自动化加工，互联网监测、管理的一条智能加工流水线，解决生产效率低下的问题。解决工件美观度及精度不高的问题。在操作激光切割的过程中，工人难免会受到激光的伤害，激光打标产生的废气会对人体健康造成极大伤害。通过我们团队的努力研发所采用的激光鞋革加工成套智能制造设备来代替人工并给机器添加一套视觉系统，将操作工人从流水线上替换下来，很大程度的避免了此类问题的发生。我们并推出前后机一体化私人定制，满足了皮鞋使用者个性需求。生产模块化，产品的成本能得到显著的降低，相似性的重用，可以使整个产品生命周期中的采购、物流、制造和服务资源简化。

**关键字：**全自动激光切割设备；机器视觉；热传递；光学成像

## 作品背景

现代制革行业于十九世纪中叶开始迅速发展，产业中心长期位于工业化程度、社会经济水平较高的发达国家由不发达国家向其提供大批量原料皮。下文将简要分析国内以及国外鞋革制造业面临的问题以及短板。

### 全球鞋革行业发展格局

进入二十一世纪，在经济全球化浪潮下，制革行业逐渐向发展中国家转移，形成了全球分工协作、差异化竞争的崭新格局。以意大利、西班牙、德国为代表的欧洲制革工业，因环保法规的日益严格而逐年萎缩，皮革生产、皮革贸易形势日显严峻。亚洲地区充分利用丰富的原料皮资源、廉价的劳动成本，以广阔的皮革消费市场为后盾，取得了长足发展，是世界重要的原料皮和成品革生产基地。

尤其东亚、东南亚地区制革工业迅速崛起，以中国、越南、印度、泰国等为代表，制革工业突飞猛进，进一步抢占了国际市场，且越发注重提高产品附加值，发展皮革产品深加工。以墨西哥、阿根廷和巴西为代表的美洲皮革生产国家，凭借原料皮资源优势、较先进的制革技术，由原料皮供应逐渐向皮革生产的角色转变，与亚洲皮革生产国家形成竞争。从世界生产状况来看，世界的皮革加工与销售中心已从欧洲转移到了亚洲：以意大利、西班牙、法国和葡萄牙为代表的欧洲地区皮革产量、原料皮产量占全球的比重分别为 27%、18%，北美和中美地区皮革产量、原料皮产量占全球的比重分别为 10%、17%；南美洲地区皮革产量、原料皮产量占全球的比重分别为 8%、13%；亚洲地区皮革产量、原料皮产量占全球的比重分别为 53%、40%。

### 国内鞋革行业发展现状

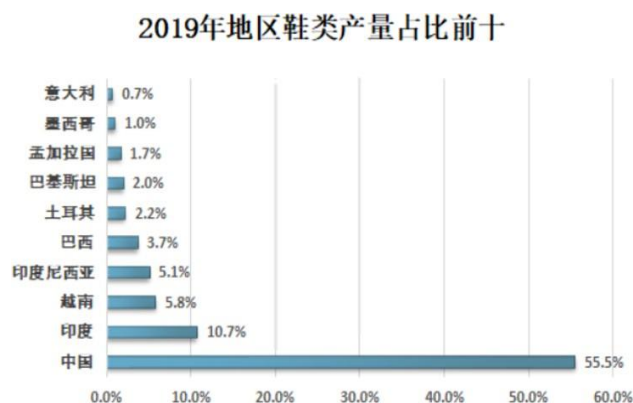


图 1-1 2019 年地区鞋类产量占比前十

中国是全球最大的鞋业生产和出口国，产量约占全球制鞋总量的 70%。温州更有中国鞋都的著称。中国在制鞋与销售方面，具有全球较完善的制鞋供应链、专业的行业集群；加上政府供给侧结构性改革等支持政策，推动了行业的良性发展；随着新材料和新技术的面世，也为行业带来新的动力。从鞋类地区产量来看，中国依旧是世界上鞋类生产和出口的第一大国。2019 年中国鞋类产量占全球的 55.5%，为全球鞋类产量占比最大的国家。

### 温州鞋革制造业存在的弊端

温州有中国皮鞋之都的美誉，鞋革行业是浙江温州经济的重要支柱产业之一，温州有规模以上鞋革制造企业 850 家，约占全省比重的 43.96%；温州鞋革制造业有 7 个中国名牌产品、82 枚中国驰名商标、196 家中国真皮标志企业，占据全国鞋革行业品牌榜的半壁江山。全市鞋革制造业年均增长 8%左右，实现工业总产值 1300 亿元，年产值超 30 亿元的企业达到 4 家，超 10 亿元的企业达到 10 家，每年新增技术改造投资 20 亿元以上。2020 年，温州市鞋革行业实现工业总产值 1002 亿元，跻身千亿产业集群行列。据温州鞋革协会数据显示温州革生产企业有 5200 多家，其中需要加工皮类鞋带的企业就有 3000 多家，但众多企业当中只有 25%的企业使用自动化的设备，还有 75%的企业急需机器换人，焕发生机。



图 1-2 温州 2021 中国鞋都·女鞋秋冬鞋交会正式登场

随着劳动力成本的上升、原材料价格上涨、汇率的变化及订单转移等问题的出现，中国鞋业的发展出现发展变缓、出口增速下降及订单减少等问题。如果不能很好地应对和解决这次危机，温州鞋业品牌曾经所拥有的诸如成本、规模生产、产业链、供应链、物流、渠道、品质、适应力等所有优势都将不复存在。

推动“中国鞋都”迈向“世界鞋都”，我市以工业经济高质量发展为目标，推动各大产业智能化改造举措，作为构建未来温州产业结构、培育产业新动能的重点方向。尤其是在“机器换人”方面，开展以能源高效化、生产清洁化、废弃物循环化为重点的绿色改造项目，温



州鞋革行业正积极探索智能制造道路，为走向“世界鞋都”积蓄能量。

在鞋服制造领域，激光切割设备应用广泛。我们团队走访调查温州的大小制鞋企业发现，这些鞋革企业传统的鞋革切割加工方式是以人工操作激光切割机对鞋革进行切割加工。主要是通过人工将待加工的鞋革放置与激光切割机上并固定，待激光打标机发射激光进行切割完成后再将鞋带成品取出。但由于产品体积小，数量大，对于工人的依赖特别严重，严重的影响了整个企业生产加工的效率，而且激光切割会产生有毒有害气体对人造成一定损害，同时手工操作不仅大大降低了生产效率，也严重制约了激光器高速的切割。

针对这一现象，我们总结出制鞋企业的三大痛点问题。

效率低，粗放型的手工操作生产效率低下，出错率高达 10%-20%。

成本高，人口红利的消失，大额的人工费用让企业发展缓慢。

工伤高，激光加工鞋革产生的废气对人体损伤巨大，激光对眼睛的伤害,对员工以后的生活留下很大的健康隐患。这三大痛点严重影响了企业的发展。

### 麦克斯韦-波尔兹曼全自动激光切割设备

#### 麦克斯韦-波尔兹曼全自动激光切割设备的研发背景

针对以上问题我们研发出了新型鞋革设备，该设备创新性是将视觉引导激光切割的方案融入到设备中，使得设备更智能、更多样化，运用物理当中麦克斯韦-波尔兹曼物理原理实现热传递效应，通过 PLC 和触摸屏的协同工作，调整热能量的大小，最大程度的体现了柔性化生产且有效的解决了带有绒毛材质皮革烧焦现象的问题，解决了人工放置鞋革的问题，解决了激光辐射对人体伤害的问题，并且设备功能强，性能价格比高。

#### 同步带直线滑台同步带型的作业原理

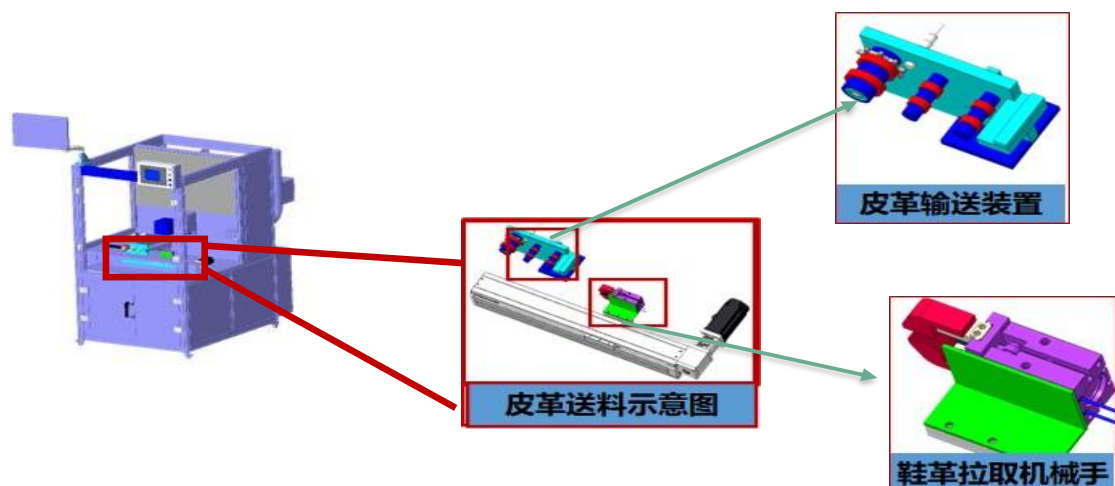


图 2-1 设备皮革送料示意三维设计图

皮带安装在直线滑台两边的传动轴，其间作为动力输入轴，在皮带上固定一块用于添加



设备工件的滑块。当有输入时，通过鼓动皮带而使滑块运动。

通常同步带型直线滑台通过特定的规划，在其一侧能够操控皮带运动的松紧，便利设备在生产进程中的调试，同步带型直线滑台的松紧操控均在直线滑台的左右边，通常选用螺丝来控制松紧。

同步带型直线滑台能够依据不一样的负载需求挑选添加刚性导轨来进步直线滑台的刚性。同步带型直线滑台的精度取决于其间的皮带质量和组合中的加工进程，动力输入的操控对其精度一起会发生影响。而我们滑台的精度能够达到 0.30mm，远大于企业 0.40mm 的要求。

为了解决安装与拆装的问题，最终确定将我们的工作平台架设在铝型材上，铝型材下安装万向轮方面设备移动，工作排面略高于激光打标机的工作平面，这样就可以将设备移动至激光打标机上，最后通过脚键连接，方便安装与拆卸。



图 2-2 JGXG200\*50 激光皮革加工成套智能设备总体结构图

### JGXG200\*50 激光皮革加工成套智能设备特点

(1) 设备便于安装拆卸，企业能够充分利用激光设备，使其最大化发挥作用。

(2) 激光皮革加工成套智能制造设备的效率是人工的 3 倍左右，效率明显提升。

设备切割精度能够达到 0.3mm，精度有一个质的提升，伺服滑台的有限行程达到 350mm。

一台设备企业能够在半年至八个月左右收回成本 JGXG200\*50A 激光皮革加工成套智能设备在研发 JGXG200\*50A 激光皮革加工成套智能设备时我们对成套设备提出了以下要求：

成套设备的精度要达到 0.20mm；

设备效率要提升至人工的 4 倍；

尽可能的降低激光的危害；

减少产品的体积，最大化利用设备空间。

而这对于我们团队来说又是一次巨大的考验。经过仔细的讨论和研究，为了使设备更加完善，决定改善结构，采用一体化设计。

我们的 JGXF200\*50A 激光鞋革加工成套智能设备拥有 JGXF200\*50 激光鞋革加工成套智能设备的全部优良的性能以外，同样的还在一些方面进行改进：

鞋革切割精度达到 0.20mm；

采用全封闭式的框架结构，保证产生的气体不外泄；

一体化结构设计，巧妙的将电脑等配件融入机器当中，减小设备体积；

选型合理，在保证设备功能的前提条件下，将成本降低；

设计人性化，将激光与人分离开来，使用排风系统与空气净化系统，降低环境污染；

采取双工位装置，将效率翻了一倍，提升至了 4 倍。



图 2-3 JGXF200\*50A 激光鞋革加工成套智能设备实体图

### G/ZDGKJ-2020 激光鞋革加工成套智能设备

我们对设备进行了长期的跟踪调查，分析和记录，并改进。不断完善后的设备，实现了机器的完美运行，但是后续的过程中我们发现，机器设备没有实现完整意义上的智能化。在成品生产之后，成品的鞋革在经过传送台之后，需要人工分类整理，人工的整理分类，速度慢，效率低，还有可能出现差错，并且会浪费大量的人力财力，降低整个企业的利润。通过讨论，决定在设备的运输区加上一个视觉引导运输吸取鞋革设备。自动将成品的鞋革进行分类，整理，分类精准且效率高。

最终我们采用运输带装置，将掉落散乱的鞋革，自动掉落于此，不再落在盒子里。运输

带将鞋革传送到工业机器位置，又机器拍照，并指挥机器人抓取鞋革，而水平关节机器人，将他改成气动设备，使其更加轻易的抓取鞋革。为了使设备更加快捷，传送时间更加短，我们团队经过多次实验，考虑机器本身，最终我们完善了设备，造出 G/ZDGKJ-2020 激光鞋革加工成套智能设备，如图 2-4 所示。



图 2-4 G/ZDGKJ02-2020 激光鞋革加工成套智能设备

并且我们团队在 G/ZDGKJ-2020 激光鞋革加工成套智能设备设计之初，就在构思如何将机器设备实现完全智能化，通过我们团队的讨论，发现将组态通过 DTU 与手机 APP 或者 PC 机连接，通过网络实时监控功能同样适用于我们的设备。

### **SRDZ 激光鞋革加工成套智能设备**

随着物质生活的日渐丰富，产品同质化现象的加剧，富裕阶层日益壮大，越来越多的人开始享受生活、品味生活，拒绝千篇一律，追求品质和个性化。国际化的大背景下，中国已经具备了定制消费的基础。在泉州，特步、361 度、乔丹、匹克等传统运动品牌也已纷纷开始试水 C2B(即消费者对企业)的个性化营销模式。“鞋子是否合适，只有脚知道答案。”男人去制鞋工坊定制皮鞋是西方的一种古老传统。而在中国，私人定制皮鞋也即将成为热潮。但手工定制一双鞋子需要 300 余道工序，最少需时半个月。争对定制行业的痛点，我们将打造的 SRDZ 激光鞋革加工成套智能设备这台设备，主要投放于品牌实体店，实现最短时间内给客户一个直观的感受，提高客户的满意度，缩减 C2B 的时间，打造出一个新的私人定制

时代。

产品的主要优点：将三维数据转换成鞋服应用的样板，可以快速的生产出鞋面的半成品；模块化的生产，简化了生产环节,从而降低了成本；集合了三维 CAD、CAM、CAE、管理等功能于一体的智能系统，不仅能进行设计，还能进行拆单堆积而管理，可使整个产品从开发到制造整个流程紧密衔接在一起，所以能轻松实现“前后一体化”。智能优化排产，规划开料方案，材料开料利用率 90%以上，同时满足生产流程的加工参数配置，一键输出生产加工数据，无缝对接各类品牌不同型号。

达到从前端发力后端，从后端靠拢前端，最终实现的目标前后端一体化，既满足门店终端的互动式设计、场景式营销、运营及生产对接等多维度需求，帮助门店提升客流量、成交率，极大降低设计师操作难度，又满足工厂精细化生产，提高下单拆单效率，材料开料利用率、生产设备对接效率，打通店厂对接过程的信息壁垒，消除软件与硬件的数据鸿沟。

### **设备的物理学原理解析**

#### **麦克斯韦-玻尔兹曼分布原理**

麦克斯韦-玻尔兹曼分布是一个描述一定温度下微观粒子运动速度的概率分布，在物理学和化学中有应用。最常见的应用是统计力学的领域。任何（宏观）物理系统的温度都是组成该系统的分子和原子的运动的结果。这些粒子有一个不同速度的范围，而任何单个粒子的速度都因与其它粒子的碰撞而不断变化。然而，对于大量粒子来说，处于一个特定的速度范围的粒子所占的比例却几乎不变，如果系统处于或接近处于平衡。麦克斯韦-玻尔兹曼分布具体说明了这个比例，对于任何速度范围，作为系统的温度的函数。

#### **麦克斯韦-玻尔兹曼分布的物理应用**

麦克斯韦-玻尔兹曼分布形成了分子运动论的基础，它解释了许多基本的气体性质，包括压强和扩散。麦克斯韦-玻尔兹曼分布通常指气体中分子的速率的分布，但它还可以指分子的速度、动量，以及动量的大小的分布，每一个都有不同的概率分布函数，而它们都是联系在一起。

通过麦克斯韦-玻尔兹曼分布可以用统计力学来推导（参见麦克斯韦-玻尔兹曼统计）。它对应于由大量不相互作用的粒子所组成、以碰撞为主的系统中最有可能的速率分布，其中量子效应可以忽略。由于气体中分子的相互作用一般都是相当小的，因此麦克斯韦-玻尔兹曼分布提供了气体状态的非常好的近似。

#### **麦克斯韦-玻尔兹曼分布的推导**

玻尔兹曼分布是描述理想气体在外加场的作用下的平衡态分布。

回顾以下平衡态的概念，平衡有四个要素：力平衡、热平衡、相平衡和化学平衡。在仅含理想气体的系统中，我们只用考虑力平衡和热平衡。

力平衡在这里体现为在位置空间中任意一点受到的合力为零。热平衡在这里体现为在位置空间中任意一点温度相同。

我们知道对于力学系统，通过每一个微粒的位置和动量我们可以确定系统的状态同样的，对于热力学系统（大量微粒的统计系统），我们可以通过位形空间的玻尔兹曼摩尔密度分布与速度空间的麦克斯韦速度分布来确定系统的状态。

### 麦克斯韦-玻尔兹曼分布的实际应用

在等离子体中，分子呈现多种激发状态。一些会呈现高能态其表现为不对称摆动状态。通过自然散发这种高能状态会下降到对称摆动形态以及放射出可能传播到任何方向的光子（一种波长  $10.6 \mu\text{m}$  的光束）。

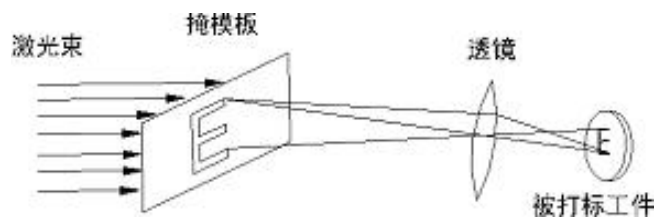


图 3-1 设备通过麦克斯韦-玻尔兹曼分布实现物理应用的实现模型

通过几个反光镜的折射，使光线传输到激光头，再由激光头上安装的聚焦镜将光线汇聚成为一点，而这一点可以达到很高的温度，从而实现切割。

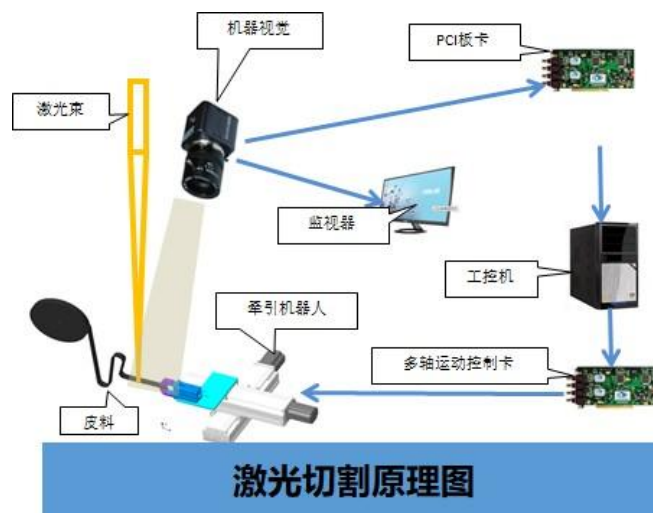


图 3-2 设备激光切割原理图

### 激光束对皮革热作用机理分析

#### 激光产生条件

产生激光，必须要满足以下条件：

只有将光子简并度提高，才能实现受激发射出来的光大于自发发射的光；

当粒子数反转满足  $n_2 - n_1 g_2 / g_1 > 0$  时，才能使受激发射光强大于受激吸收的光强；

粒子密度翻转分布所需的增益介质要由外界激励能源作用来提供。

其激光产生的物理基础：激光器产生激光的物理基础是光同物质间的共振作用，其中二者在相互作用中出现的受激辐射现象最为关键。爱因斯坦基于光量子概念将黑体辐射的普朗克公式重新进行了推导，发现原子的受激吸收跃迁、受激辐射跃迁及自发辐射跃迁过程均属于物质原子同光的相互作用。在研究过程中，可以将原子的能级设定为  $E_1$  和  $E_2$ ，表示组成黑体物质的原子中辐射场的能量密度， $n_1$  和  $n_2$  表示两个不同能级的原子数量的密度，并存在  $h\nu = E_2 - E_1$  的关系。

### 1、激光的受激辐射光放大

一个光子激发一个粒子产生受激辐射，可以使粒子产生一个与该光子状态完全相同的光子，这两个光子再去激发另外两个粒子产生受激辐射，就可以得到完全相同的 4 个光子，如此下去，在一个入射光子的作用下，可引起大量发光粒子产生受激辐射，并产生大量运动状态完全相同的光子，这种现象称为受激辐射光放大，如下图 3-3 所示。

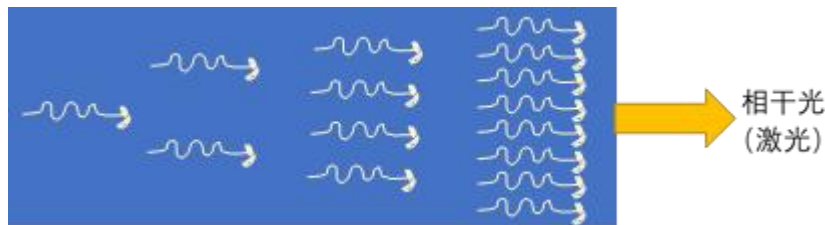


图 3-3 受激辐射光放大示意图

由于受激辐射产生的光子都属于同一光子态，因此它们是相干的。在受激辐射过程中产生并被放大的光，便是激光。但是，光与原子体系相互作用时，总是同时存在自发辐射、受激辐射和受激吸收三种过程。一束光通过发光物质后，光强增大还是减弱，要看哪种跃迁过程占优势。通常情况下，原子体系总是处于热平衡状态，各能级粒子数服从玻耳曼兹统计分布式中已令  $f_1 = f_2$ 。因  $E_1 < E_2$ ，所以  $n_1 > n_2$ ，即高能级集居数恒小于低能级集居数。而爱因斯坦理论指出原子受激辐射的概率和受激吸收的概率是相同的，即  $B_{21} = B_{12}$ 。因此，当频率  $\nu = (E_2 - E_1)/h$  的光通过物质时，受激吸收光子数  $n_1 W_{21}$  恒大于受激辐射光子数  $n_2 W_{12}$ 。因此，处于热平衡状态下的物质只能吸收光子，故光强减弱。

当  $T=300K$  时， $R \approx 10^{-35}$ 。由此可见，通常情况下受激辐射的概率是微乎其微的，占主导优势的是自发辐射。普通光源的相干性差正是由于绝大部分原子做自发辐射造成的。



在光与原子相互作用的三种基本过程中，存在着两种基本矛盾：受激辐射和受激吸收的矛盾，受激辐射和自发辐射的矛盾。而在正常情况下，受激辐射并不占优势。要想通过受激辐射光放大过程产生激光，就必须具备克服这两个矛盾的条件，从而确保受激辐射在三个过程中占主导地位。

## 2、激光的集居数反转

形成集居数反转分布是克服受激辐射和受激吸收的矛盾的必要条件。

为了产生受激辐射，就必须改变粒子的常规分布状态。如果采取诸如用光照、放电等方法从外界不断地向发光物质输入能量，把处在低能级的发光粒子激发到高能级上去，便可使高能级  $E_2$  的粒子数密度超过低能级的粒子数密度，这种状态称为粒子数反转或集居数反转，如图 3-4 所示。

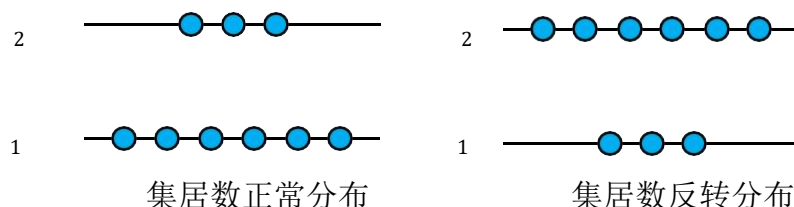


图 3-4 集居数分布

使发光物质处于粒子数反转的状态，受激辐射就会大于受激吸收，当频率为  $\nu$  的光束通过发光物质，光强就会得到放大，这便是激光放大器的基本原理。即便没有入射光，只要发光物质中有一个频率合适的光子存在，便像连锁反应一样，迅速产生大量相同光子态的光子，形成激光，这就是激光器的基本原理。可见，形成粒子数反转是产生激光或激光放大的必要条件。

## 3、激活粒子的能级系统

为了形成稳定的激光，首先必须有能够形成粒子数反转的发光粒子，称之为激活粒子。

它们可以是分子，原子或离子。这些激活粒子有些可以独立存在，有些则必须依附于某些材料中。为激活粒子提供寄存场所的材料称为基质，基质可以是固体或是液体。基质与激活粒子统称为激光工作物质。

并非各种物质都能实现粒子数反转，在能实现粒子数反转的物质中，也并非是在该物质的任意两个能级间都能实现粒子数反转。要实现粒子数反转必须有合适的能级系统。首先必须要有激光上能级和激光下能级；除此之外，往往还需要有一些与产生激光有关的其他能级。通常的激光工作物质都是由包含有亚稳态的三能级结构或四能级结构的原子体系组成。

对于二能级系统，如图 3-5 所示。

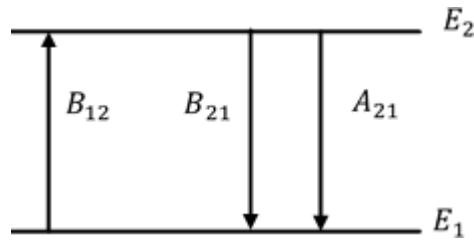


图 3-5 二能级系统

若原子体系受到强光的照射，处于低能级  $E_1$  上的原子会被激发到高能级  $E_2$  上。但是由于  $B_{12}=B_{21}$ ，所以，原子受激吸收速率  $W_{12}$  和受激辐射速率  $W_{21}$  也应相等，即  $W_{12}=W_{21}=W$ 。

典型三能级系统的示意图 3-6。

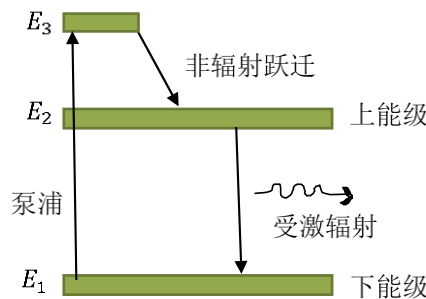


图 3-6 三能级系统

理论分析和实验结果都表明，三能级系统有可能实现粒子数反转。

三能级系统中，受激辐射在  $E_1$  和  $E_2$  两个能级之间产生。其中  $E_1$  为基态，作为激光下能级，泵浦源将激活粒子从  $E_1$  能级抽运到  $E_3$  能级， $E_3$  能级的寿命很短（通常约为  $10^{-8}$ s），激活粒子很快地经非辐射跃迁方式到达  $E_2$  能级。 $E_2$  能级的寿命（几毫秒）比  $E_3$  长得多，为亚稳态，作为激光上能级。只要抽运速率达到一定程度，就可以实现  $E_2$  与  $E_1$  两能级之间的粒子数反转，为受激辐射创造了条件。

固体激光器中红宝石激光器的激活粒子——铬离子就属于这类能级系统，它是用强的闪光灯作为泵浦源来激励激光介质。

从上面分析可以看出，三能级系统中实现粒子数反转的上能级是  $E_2$  能级，下能级是基态  $E_1$  能级，由于基态能级上总是聚集着大量粒子，因此，要实现  $n_2 > n_1$ ，外界泵浦作用需要相当强，这是三能级系统的一个显著缺点。

如图 3-7 就是一种典型四能级系统与三能级系统相比，此四能级系统是在基态能级之上多了一个能级，该能级的平均寿命非常短。

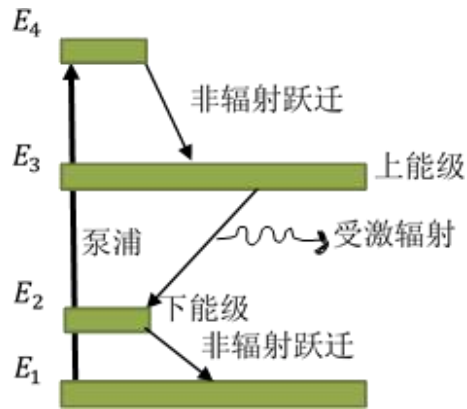


图 3-7 四能级系统

四能级系统的泵浦过程与三能级系统类似。其中  $E_3$  为激光上能级， $E_2$  为激光下能级，泵浦源将激活粒子从基态  $E_1$  抽运到  $E_4$  能级， $E_4$  能级的寿命很短，立即通过非辐射跃迁方式到达  $E_3$  能级。 $E_3$  能级寿命较长，是亚稳态。而  $E_2$  能级寿命很短，热平衡时基本是空的，因此易于实现  $E_3$  与  $E_2$  两能级之间的粒子数反转。固体激光器中的钕玻璃激光器及掺钕钇铝石榴石激光器 (Nd: YAG) 中的激活粒子——钕粒子便属于这类能级系统。由于四能级系统中激光下能级是  $E_2$  而不是基态，在室温下， $E_2$  能级上粒子会很快以非辐射跃迁方式回到基态  $E_1$ ，因此  $E_2$  能级粒子数非常少，甚至是空的，因而四能级系统比三能级系统更容易实现粒子数反转。

#### 4、光的自激振荡

根据前面的分析，受激辐射除了与受激吸收过程相矛盾外，还与自发辐射过程相矛盾。处于激发态能级的原子，可以通过自发辐射或受激辐射回到基态，在这两种过程中，自发辐射是主要的。可见，即使介质已实现粒子数反转，也未必就能实现以受激辐射为主的辐射。要解决受激辐射与自发辐射的矛盾，使受激辐射占绝对优势，还需要利用光学谐振腔来实现光的自激振荡，即激光振荡。要使  $n_2$  个激发态的原子以受激辐射为主产生跃迁，则要

$n_2 > n_1$ 。在一台激光器中，我们希望加上泵浦源之后就能输出激光，在产生激光的初始时刻，并不另外输入激励光子，引起受激辐射最初的激励光子应来自自发辐射。

关于方向性和单色性都很好的激光是如何产生的。设想有一粒子数反转的介质，其长度远远大于横向尺寸。起始时介质以自发辐射为主，而且凡是偏离轴向 1 的自发辐射光子很快地逸出介质。而沿着轴向传播的自发辐射光子会不断地引起受激辐射而得到加强，使相应的光场单色能量密度  $\rho \nu$  不断增大。如果增益介质足够长，就有可能使  $\rho \nu$  满足  $n_2 > n_1$ ，从而获得以受激辐射为主的输出。

过程如图 3-8 所示。

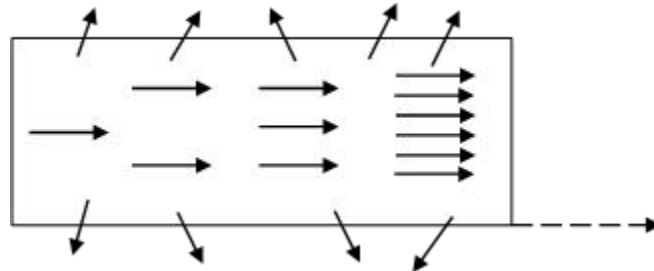


图 3-8 光在足够增益介质中的受激辐射放大

通常激光器并不需要采用一个很长的工作物质，而是利用光学谐振腔来解决这个问题。在工作介质的两头放置两块相互平行并与工作物质的轴线垂直的反射镜，这两块反射镜与工作介质一起，就构成一个光学谐振腔。沿轴向传播的光束可以在两个反射镜之间来回反射，被连锁式地放大，最后形成稳定的激光束，这一过程就是光的自激振荡，如图 3-9 所示。

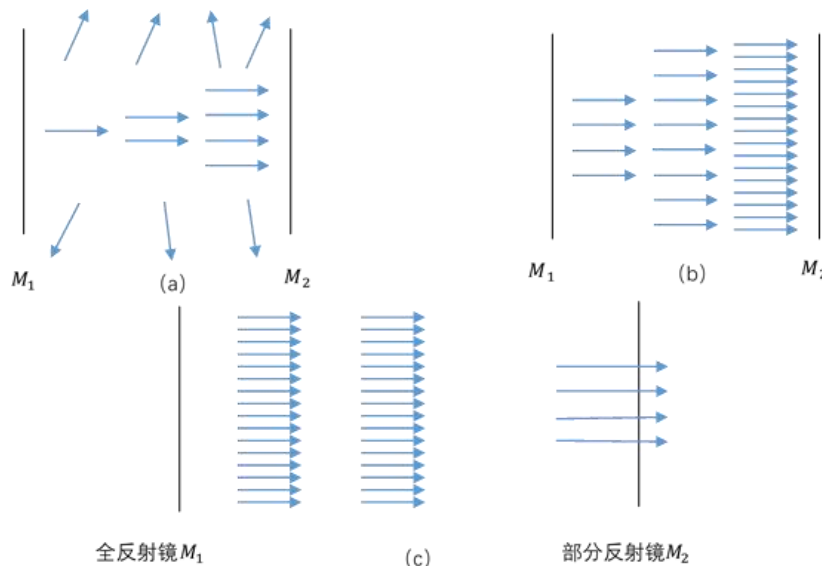


图 3-9 光的自激振荡

两个反射镜之一的反射率是 100%，另一个是部分反射镜，激光从部分反射镜输出。

反射镜可根据需要选择凹面镜、凸面镜、平面镜等，几种组合可构成各种各样的光学谐振腔。光学谐振腔对激光的形成及光束特性有多方面的影响，是激光器中最重要的部件之一。

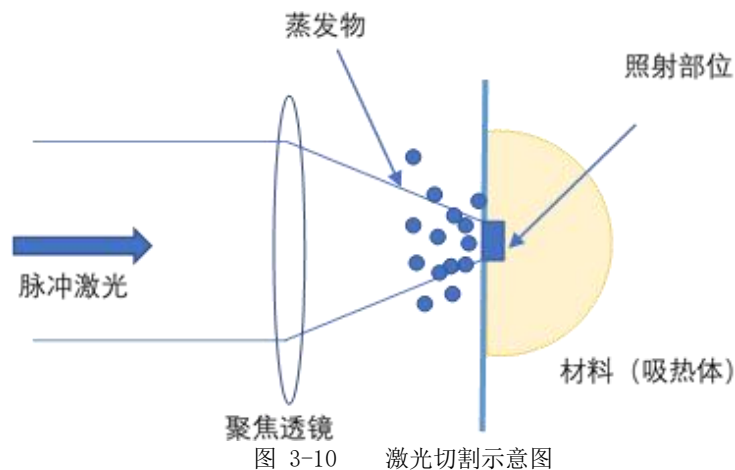
有了能实现粒子数反转的工作物质和光学谐振腔，还不一定能引起自激振荡而产生激光。要产生激光振荡，必须满足一定的条件，这个条件是激光器实现自激振荡所需要的最低条件，又称阈值条件。

推导这个条件。光通过激活介质时受到的放大作用的大小通常用增益（放大）系数  $G$  来描述。设在光传播方向上  $z$  处的光强为  $I(z)$ ，则增益系数定义为

即  $G(z)$  表示光通过单位距离激活物质后光强增长的百分数。在光强  $I$  很小时，增益系数近似为常数，记为  $G_0$ ，称为小信号增益系数。光放大的同时，还存在着光的损耗，用损耗系数  $\alpha$  来描述， $\alpha$  定义为

即光通过单位距离后光强衰减的百分数。同时考虑增益和损耗，则  $dI(z) = [g(I) - \alpha]I(z)dz$  起初，激光器中光强按小信号放大规律增长，设初始光强为  $I_0$   $I(z) = I_0 e^{(G_0 - \alpha)Z}$  要形成光放大，需满足这就是激光器的振荡条件（阈值条件）。

热切割与热传导激光最重要的特征之一就是高的准直性，利用这一特征通过透镜可以将激光聚焦成非常小的一个点，从而得到比普通光源高得多的照射强度。另外，若使激光形成脉冲振荡，那么光能瞬间就可集中在很小的区域，因此可以达到更高的照射强度。前者属于空间性能量集中，后者属于时间性能量集中。经过空间性、时间性集中的激光照射到材料的表面时，材料表面在激光的作用下将会向外溅射，这一现象称为激光蒸发。如下图 3-10 示意出经透镜聚焦的激光作用在材料表面引起的蒸发情形。



如果再进一步提高入射激光功率密度，将会观察到喷发的等离子体云（原子核最外层的电子挣脱了原子，分离成带正电的离子和带负电的电子，形成具有导电性的气体状态）。这种因激光照射瞬间喷发出的高温气体或等离子体的现象称为热效应激光蒸发。

图 3-11 激光热蒸发过程

如常用的  $CO_2$  激光束；很容易被非金属材料所吸收，它的低反射率和蒸发温度使吸收的光能几乎全部传入材料内部，并在瞬间引起气化形成空洞，进入切割过程的良性循环。皮革材料吸收聚焦到材料表面的激光能量，累积大量的热量，材料发生升温、熔化等现象。由于激光不能透过皮革等不透明材料，所以激光辐照到皮革材料表面的过程中能量转化遵循能量守恒定律，即：

$$E_0 = E_{\text{吸收}} + E_{\text{反射}}$$

对于激光热处理后的皮革材料，由于材质的不同，其对激光的吸收率和反射率也存在着差异；同一种皮革材料，表面特性的差异直接影响材料对激光的吸收率和反射率。一般情况下，照射激光在光滑材料表面会发生镜面反射等现象，反射率很高，因而对激光能量的吸收率就相对较低。

当光照射在不透明物体表面时，使一部分光被反射，另一部分光被吸收。一般认为光在金属表面层，能量就被吸收掉了，并把吸收的光能转化为热能，使材料局部温度升高，然后以热传导方式把热传到金属内部。此外，金属的反射率与金属的表面状况有关，粗糙的表面和有氧化物膜层的表面较之光滑表面有更小的反射率。非金属材料的反射率和吸收系数则在很大的范围内变化。

根据热传导理论可以计算激光照射下被加工材料表面的温度和内部的温度分布。知道温度场分布对判断能进行什么加工提供依据。如进行焊接必须达到材料的熔化温度，而打孔、切割一般必须达到气化（沸点）温度。长脉冲或连续激光正入射时，光点中央的温度上升值  $\Delta T$  与被吸收的光功率、导热系数之间的关系为

$$\Delta T = \frac{P}{\pi \omega_0^2 K}$$

式中， $P$  为被表面吸收的光功率， $\omega_0$  为光斑半径， $K$  为导热系数。

在一个脉冲作用时间内，材料通过单位面积吸收，使深度为  $h$  的材料温度升高到气化所需要的能量（未考虑传导、辐射等损耗）为

$$w = \rho h [C_s(T_m - T_0) + C_p(T_B - T_m) + L_m + L_r]$$

式中， $T_0$  是起始温度， $T_m$  是熔化温度， $T_B$  是沸点温度， $C_s$  是固体的比热， $C_p$  是液体的比热， $L_m$  和  $L_r$  分别是熔解热和汽化热， $\rho$  是材料密度， $h$  是孔的深度。

热传导是通过物体内部分子、原子和电子的微观振动、位移和相互碰撞而发生能量传递的现象。一般情况下，不同物体间或同一物体内部存在温度差时就会产生热传导现象。固体通过自由电子在晶格间的运动产生热传导。固体热传递的主要方式便是热传导，基本定律为傅立叶定律，即导热速率与微元所在处的温度梯度成正比。

$$q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

式中， $q_x$  为  $x$  向截面积的热流率， $\lambda$  为导热系数。激光对材料的辐照作用

可以理解为材料吸收激光的能量转化为热能继而向周边介质进行热扩散。因此可以将激光等效为材料的一个热源函数，研究热量在材料中的热传导问题。对于光学透镜模型，在圆



柱坐标系下，定义瞬态温度场为  $T(r, z, t)$ ，则物体内部的热交换可用以下的热传导方程来描述。

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} + \rho c \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + k \nabla^2 T = I(r, z, t)$$

式中， $T(r, z, t)$  表示在时间  $t$  时的温度分布； $\rho$ ， $c$ ， $k$  分别为密度、比热和热传导系数， $I(r, z, t)$

为激光热源函数。

激光加工阶段（第一阶段）

通过对激光切割加工过程进行的阶段分析“下面根据能量平衡方程和热传导公式”并结合实验数据”建立各个不同阶段的能量平衡表达式和温度场表达式。

该阶段能量平衡关系主要是激光能量被材料吸收转化为热能。应注意的是：材料在激光照射下由于温度升高且不断被氧化对激光的吸收率是逐渐增大的计算中可取其平均吸收率。

能量平衡表达式：

$P_1$ ：工件吸收的激光功率

$$P_1 = Q_h + Q_c$$

$$P_1 = A P_0$$

$A$ ：工件对激光的吸收率，第一级段的平均吸收率可取为 0.08 左右

$P_0$ ：激光器的输出功率

$Q_h$ ：激光照射处材料升温至燃点所消耗的热量

$$Q_h = m C \Delta T$$

$m$ ：激光照射处的材料质量

$\rho$ ：被加工材料的密度

$d$ ：激光束聚焦后的焦斑直径#  $C$ ：

被加工材料的比热容

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{\pi d^3 / 4}$$

$$m = \frac{\rho \pi d^3}{4}$$

$$12$$

$\Delta T$ : 材料从环境温度到燃点温度的温升

$Q_c$ : 热传导所消耗的热量也即为热传导温度场的热源, 根据前面的分析, 该热源应作为连续固定点热源计算形成半球形的温度场。

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

t: 传热时间

a: 材料的热扩散率  $\phi(u)$ : 或然率积分函数

激光加工阶段 (第二阶段)

因为发生了材料和氧气的燃烧反应, 所以能量平衡有了很大的变化。能量平衡表达式:

$$P_l + Q_b = Q_h + Q_c + Q_m$$

$Q_b$ : 燃烧反应所产生的热能

$$Q_b = \mu m \Delta Q / M_o$$

$\mu$ : 切缝材料中发生燃烧反应的材料所占的比例, 可取为 60%

m: 单位时间反应区材料的质量

h: 单位时间反应区的厚度

$$m = \rho h \pi r^2 / 4$$

r: 反应区的半径, 因起割点处反应区较大, 故应取为切缝宽度的 1.2-1.5 倍

$$h = V_n t$$

$V_n$ : 沿板厚向下的燃烧扩展速度 t: 反应时间

$Q_h$ : 将切缝材料加热至熔点所消耗的热量

$$Q_h = m C \Delta T$$

$Q_m$ : 将切缝材料熔化所消耗的热量, 即材料的熔化潜热

$$Q_m = m L_m$$

$L_m$ : 熔化相变的比焓

$Q_c$ : 热传导所消耗的热量 激光加工阶段 (第三阶段)

能量平衡关系的输入仍为激光束和材料与氧气的燃烧反应热, 此时的  $Q_b$  保持线热源的形式, 其强度和形状基本不再变化。在能量消耗方面, 高温的熔渣被氧气气流吹除将带走许多热量, 但这些热量仍是  $Q_h$  和  $Q_m$  直接转化来的, 因此输出能量还是由  $Q_h$ 、 $Q_c$  和  $Q_m$  三部分组成。

能量平衡表达式:  $P_l + Q_b = Q_h + Q_c + Q_m$

在第三阶段中, 材料已经被烧穿出小孔, 而小孔对激光的吸收率非常高, 计算中的平均

吸收率可取为 0.9 左右。

$Q_b = \mu m \Delta Q / M_0$   $Q_b$ : 燃烧反应所产生的热能

$m$ : 单位时间反应区材料的质量

$m = \rho b h v$   $h$ : 单位时间反应区的厚度

$b$ : 切缝宽度、 $v$ : 切割速度。

$Q_h$ : 将切缝材料加热至熔点所消耗的热量

$Q_h = m C \Delta T$

$Q_m$ : 将切缝材料熔化所消耗的热量, 即材料的熔化潜热

$Q_m = m L_m$

$L_m$ : 熔化相变的比焓

$Q_c$ : 热传导所消耗的热量, 其他的数值基本不变

在第三阶段, 切割头与材料作相对运动, 燃烧反应发生在整个板厚高度上, 产生的反应热热源也作等速运动, 形成了准稳定温度场。该温度场跟随热源一起移动, 像火车的车厢由车头带动行进一样。

不同时刻温度工件分布: 材料在 0.01s、0.05s、0.1s 和 0.2s 时刻的温度分布情况。

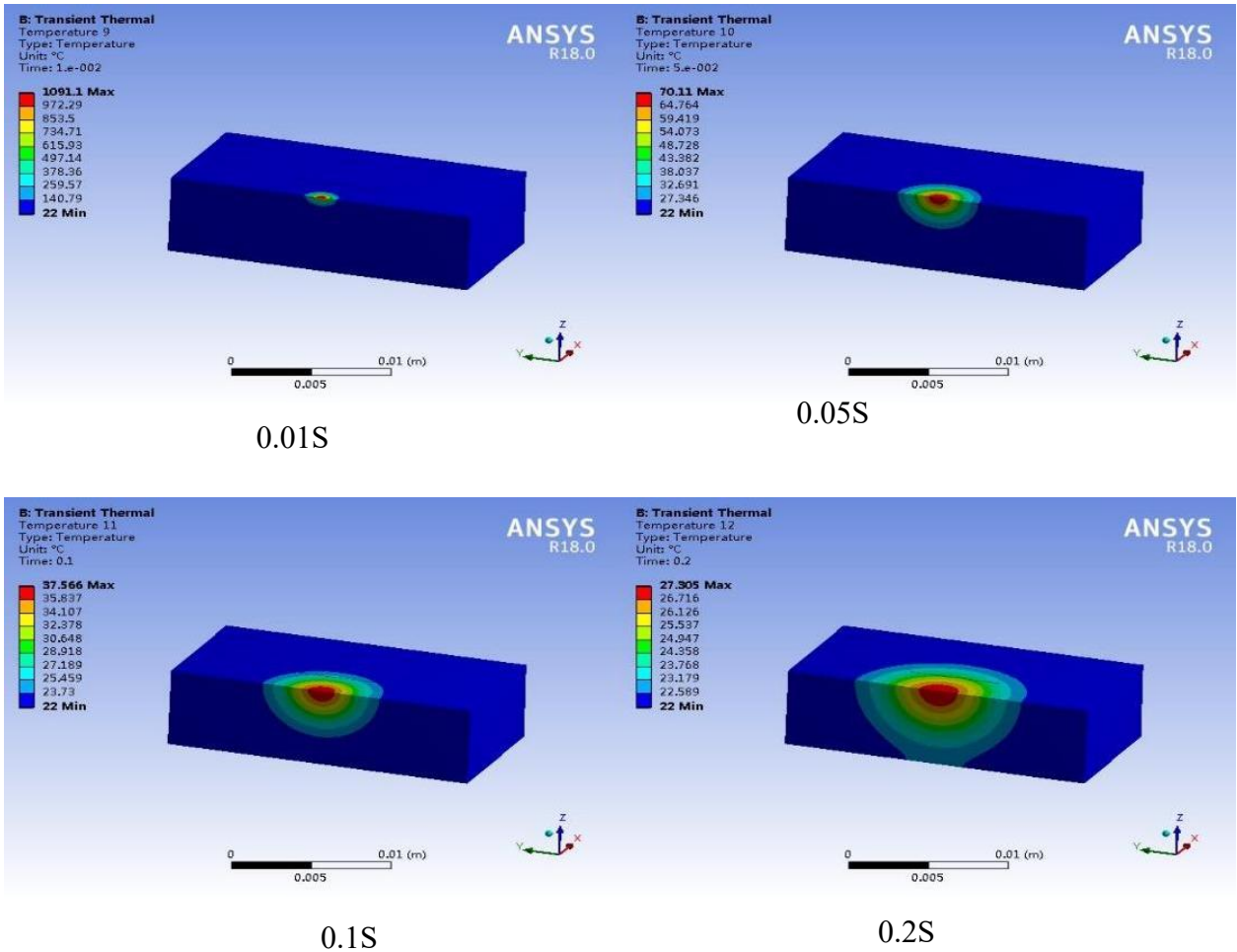


图 3-12 不同时刻工件温度场分布

加工过程包括材料在激光照射下温度逐渐升高，在达到燃点温度后，发生燃烧反应，燃烧不断向材料下层扩展，穿透材料后，熔渣被吹除，其间温度场的形式开始时为点热源的近似半球形，然后逐渐变为上部点热源，下部线热源的温度场形式，与前面所做的分析基本一致。

### 定量控制热传递热量大小

普通性的皮革在时是没问题的，但是带有绒毛的皮革在打标过程中会燃烧起来，因为激光打标是热传递，一切易燃物体会进行燃烧，因此应对此类产品必须有相应的办法。如图 3-13 所示为本设备激光打标前后的皮革。

经过加工

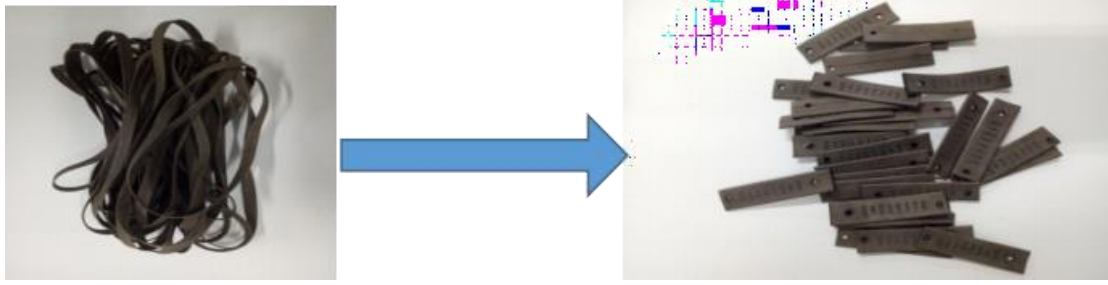


图 3-13 本设备激光打标前后的皮革

热传导(又称为导热)是指当不同物体之间或同一物体内部存在温度差时,就会通过物体内部分子、原子和电子的微观振动、位移和相互碰撞而发生能量传递现象。不同相态的物质内部导热的机理不尽相同。气体内部的导热主要是其内部分子做不规则热运动是相互碰撞的结果;非导电固体中,在其晶格结构的平衡位置附近振动,将能量传递给相邻分子,实现导热;而金属固体的导热是凭借自由电子在晶格结构之间的运动完成的。

我们了解到物体燃烧必须达到三个条件:易燃品,燃点温度和氧气。在目前已知发生热传导现象是不可避免的情况下看,我们只能靠降低燃点温度的办法,从根本上解决有容材质皮革烧焦现象的。其主要办法是通过喷雾系统事先把皮革进行喷雾湿润,控制方法由 PLC 和触摸屏进行协调工作。

### 机器视觉系统

在设备引入的机器人视觉技术中含有光学成像,光在我们周围无处不在,光学成像技术也和我们的生活密不可分,如各种相机、摄像机、望远镜、投影仪等。一个光学系统除了要考虑高斯光学的有关问题,诸如物像共轭位置、放大率、转像和转折光路等以外,还需考虑成像范围的大小、成像光束孔径角的大小、成像波段的宽窄以及像的清晰度和照度等一系列问题。满足一系列要求的实际光学系统往往不是几个透镜的简单组合,而由一系列透镜、曲面反射镜、平面镜、反射棱镜和分划板等多种光学零件组成,并且要通过合理设置光阑、精细校正像差和恰当确定光学零件的横向尺寸等手段才能得到合乎需要的高质量系统。

设备所采用的工业相机是 CMOS 芯片相机,CMOS 芯片相机是能应用当代大规模半导体集成电路生产工艺来生产的图像传感器,相比较 CCD 芯片相机具有成品率高、集成度高、功耗小、价格低等特点。CMOS 技术是世界上许多图像传感器半导体研发企业试图用来替代 CCD 的技术。现在 CMOS 的水平使它们更适合应用于要求空间小、体积小、功耗低而对图像噪声和质量要求不是特别高的场合。如大部分有辅助光照明的工业检测应用、安防保安应用和大多数消费型商业数码相机应用。



## 机器视觉系统技术

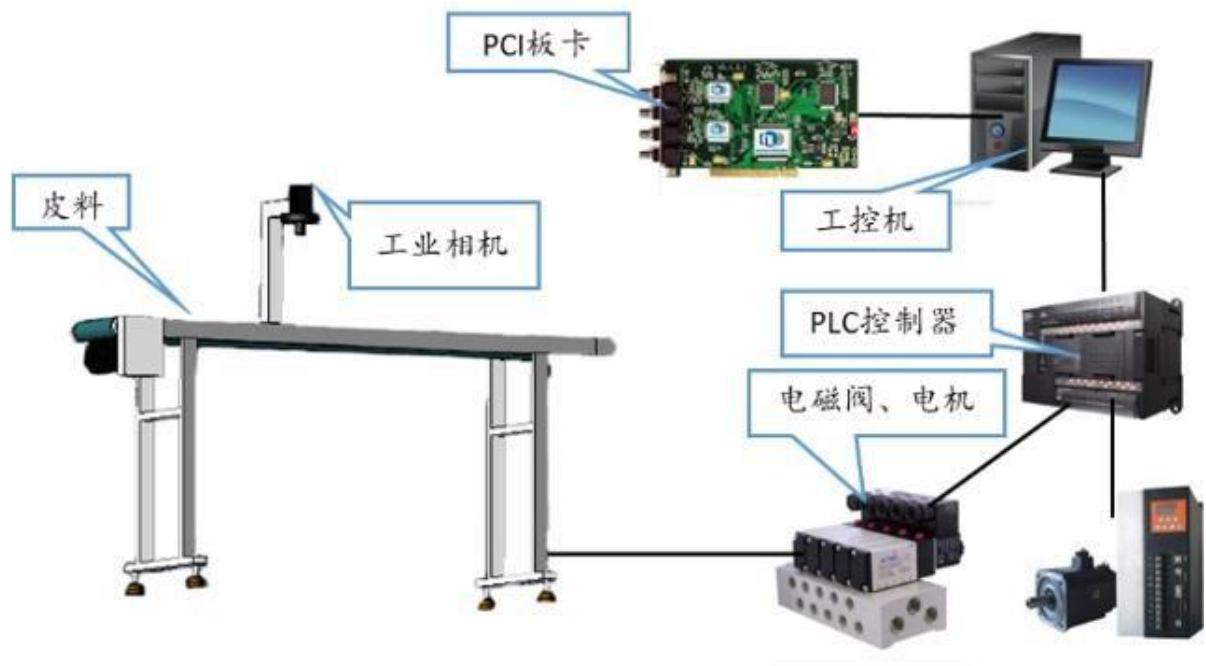


图 3-14 机器视觉系统示意图

激光鞋革加工智能成套设备开发初期是针对激光切割的自动化装配设备。为使设备适应不同的生产环境，本团队在原有的基础上引入机器人视觉技术，实现快速拍照并且精确定位，把位置信号发送给 PLC，驱动设备完成动作，以更好地适应不同的装配环境，从而减少人工成本，大大提高生产效率和生产自动化程度。

机器视觉系统的目的就是给机器或自动生产线添加一套视觉系统，其原理是由计算机或图像处理器以及相关设备来模拟人的视觉行为，完成得到人的视觉系统所得到的信息。人的视觉系统是由眼球、神经系统及大脑的视觉中枢构成，计算机视觉系统则是由图像采集系统、图像处理系统及信息综合分析处理系统构成。机器视觉系统的目的就是给机器或自动生产线添加一套视觉系统，其原理是由计算机或图像处理器以及相关设备来模拟人的视觉行为，完成得到人的视觉系统所得到的信息。人的视觉系统是由眼球、神经系统及大脑的视觉中枢构成，计算机视觉系统则是由图像采集系统、图像处理系统及信息综合分析处理系统构成。

### 器视觉系统的组成

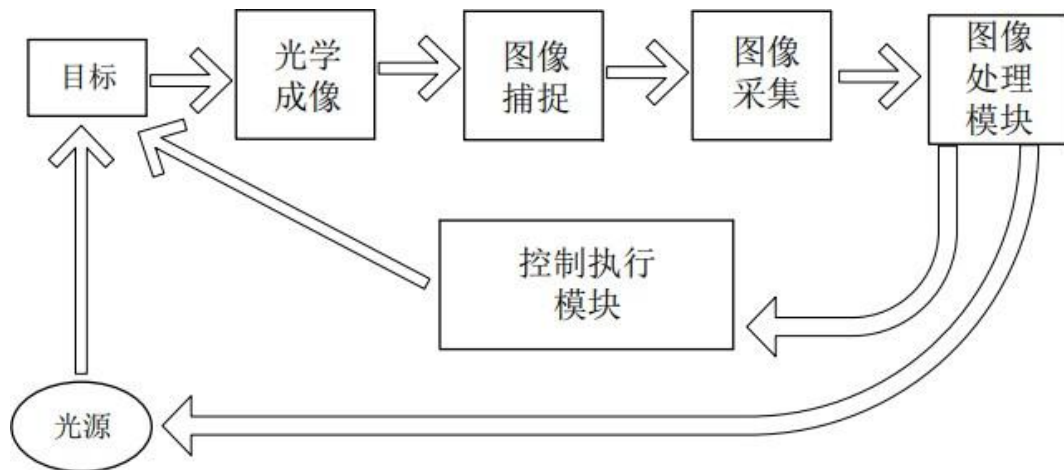


图 3-15 机器视觉系统组成

如图 3-15 所示，机器视觉系统主要由三部分组成：图像的获取、图像的处理与分析以及检测结果输出。

### 机器视觉系统工作流程

#### 图像的获取

为了使设备达到高效的生产效率和良好的适应性，设备选用 LED 光源作为系统光源、巴斯勒（acr-acA2500-14gm）Monochrome 工业相机作为系统图像获取设备。图像的获取是将被测物体的可视化图像和内在特征转换成能被计算机处理的数据。设备利用了光源、光学系统、相机、图像采集卡、图像处理单元获取被测物体的图像。

表 3-1 巴勒斯相机具体参数表

型号	BasleracA2500-14gmGigE
感光芯片	MT9P031
感光芯片类型	CMOS
感光芯片尺寸	5.7mmx4.3mm
水平/垂直分辨率	2592pxx1944px
分辨率	5MP
水平/垂直像素尺寸	2.2 $\mu$ mx2.2 $\mu$ m
帧速率	14fps
黑白/彩色	Mono
信噪比	38.3dB
接口	GigE

像素位深	12bits
曝光控制	programmableviathecameraAPI
电源要求	PoEor12VDC
功率 POE	2.7W
防水防尘等级	IP30
通信认证	FCC
相机接口	GenICam

### 图像处理与分析

工业相机固定在工作台上方的位置，检测产品位置的光电传感器发出信号至图像采集卡，随后图像采集卡发出信号，传输到光源的控制器以及工业相机，用于点亮光源和拍摄工件图像，工业相机按照系统设定拍摄照片，图像采集卡根据同步信号将工业相机采集的模拟信号数字化，并存入到工控机内存当中去，加入机器视觉在线检测系统是将视觉检测系统直接安装在生产线上，通过工业相机和图像处理单元等实时检测生产线上的产品，对生产过程进行实时反馈，以此来更好地指导生产，减少不必要的浪费，提高产品的合格率。如图所示为视觉系统工作的流程图。

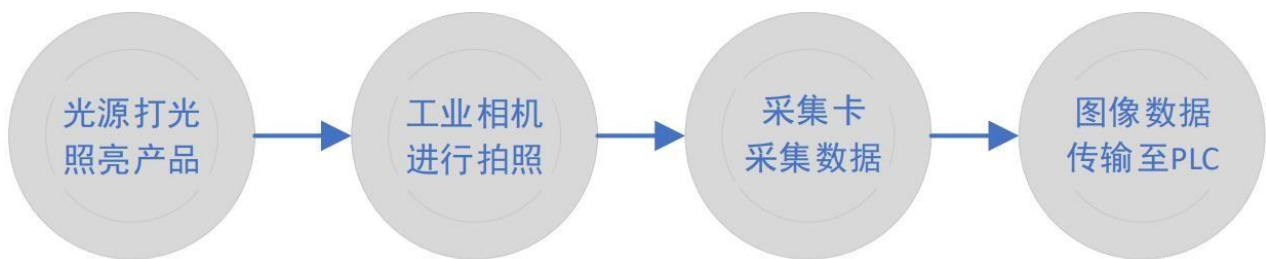


图 3-16 视觉系统工作流程图

### 机器视觉的通讯

本视觉系统的连接方式是采用 GIGE 的通讯协议，通过一条 232 网络线和一条 CCD 相机电源线与 PC 电脑进行连接。

我们通过 GIGE 通讯协议让相机跟 PC 端实现通讯，这种通讯协议可以通过以太网网线连接 PLC 和其它装置，无需复杂的接线方案和价格高昂的网络网关，也无需通过 VisionPrp 视觉软件对相机进行调试和初始化设置。

### 机器视觉切割鞋革

机器视觉工作流程是：首先让零件到达检测位置，然后传感器感应到感应物件时，触发视觉感应器工作。接着再零件照明获取图像并把资料数据化，再用视觉软件处理图像，最后离散输出，显示不良品画面和统计信息。

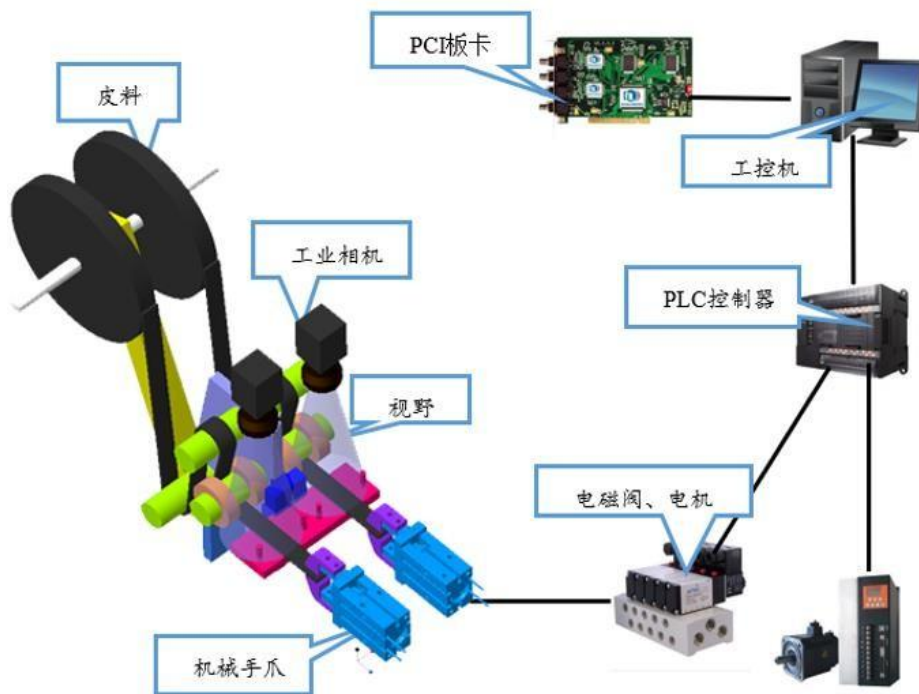


图 3-17 机器视觉设备的系统结构原理图

机器人视觉系统的优势：

- ① 提高机器的效率，缩短生产的时间。
- ② 生产成本大大降低，优化物流传输过程。
- ③ 提高了机器生产质量，减轻人员的劳动强度

坐标系之间的转换

计算机视觉通常涉及到四个坐标系：像素平面坐标系  $(u, v)$ 、像平面坐标系（图像物理坐标第  $(x, y)$ ）、相机坐标系  $(X_c, Y_c, Z_c)$  和世界坐标系  $(X_w, Y_w, Z_w)$ ，如图图 3-18 所示。

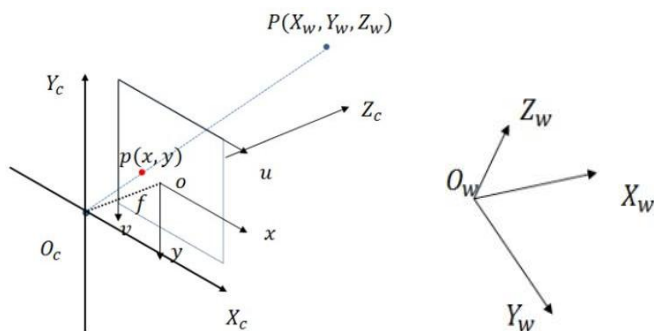


图 3-18 计算机视觉涉及到的四个坐标系

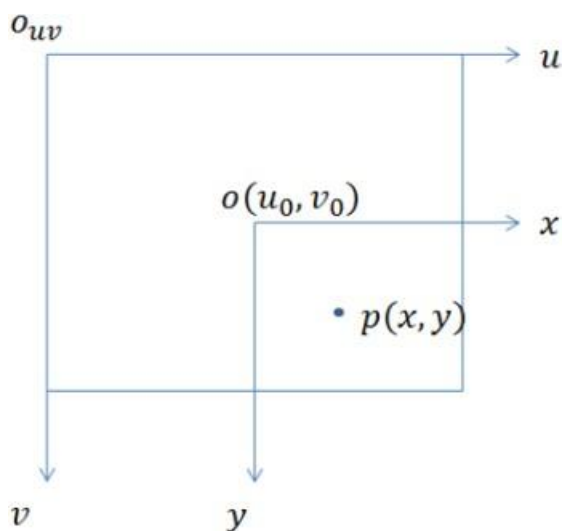
- $O_w$  : 世界坐标系, 描述相机位置, 单位 m
- $O_c$  : 相机坐标系, 光心为原点, 单位 m
- $(u, v)$  : 图像坐标系, 光心为图像中点, 单位 mm

$(x, y)$  : 像素坐标系, 原点为图像左上角, 单位 pixel  
 $P$  : 世界坐标系中的一点, 即为生活中真实的一点 :

$p$  : 点  $P$  在图像中的成像点, 在图像坐标系中的坐标为  $(u, v)$ , 在像素坐标系中的坐标为

$(x, y)$  ;

$f$  : 相机焦距, 等于  $o$  与  $O_c$  的距离,  $f = \|O_c - o\|$



相机坐标系到图像物理坐标系的转换

像素物理坐标系到像素坐标系的转换

系统精度要求和相机分辨率

X 方向系统精度(X 方向像素值)=视野范围(X 方向)/CMOS 芯片像素数量(X 方向)。Y 方向系统精度(Y 方向像素值)=视野范围(Y 方向)/CMOS 芯片像素数量(Y 方向)。

系统速度要求与相机成像速度：系统单次运行速度=系统成像(包括传输)速度+系统检测速度。

高斯光学中角放大率  $\gamma$  与垂轴放大率  $\beta$  的关系式：

### 机械手动力原理

在工业中，机械手可模仿人体手臂的某些动作，按固定程序实现抓取、装配、搬运等动作。它是最早出现的工业机器人，可代替人的繁重劳动以实现生产的机械化和自动化，能代替人类完成危险作业。因此机械手广泛应用于易燃易爆物品的装配、搬运、拆卸、检测，以及消防灭火、反恐防暴等高度危险的环境。

目前，机器人手臂的动力学建模有很多种方法，最为常见的有基于 Lagrange 方程的方法、Kane 方法、旋转代数法和 Newton—Euler 方法等。其中基于 Lagrange 方程的建模方法以编程方便，可以直接与通用的商业软件如 ANSYS、ADAMS 等对接而得到了广泛应用。而且它不涉及约束力，直接建立主动力与运动的关系，在机器人系统动力学特性的分析上有明显的优势。

Lagrange 方程是用系统的动能对广义坐标和广义速度的偏导数表示的动力学方程。

Hamilton 正则方程与 Lagrange 方程完全等价。应用 Lagrange 方程时，求出能量函数，以能量方式建模，可以避免方程中出现内力项。Lagrange 方程在完整系统中应用广泛且方便，对于非完整系统可采用 Lagrange 乘子。AndrFenili 利用 Lagrange 方程建立了两杆刚柔机械手的动力学模型；Martins, Tso 和杨玉维利用 Lagrange 方程对单杆柔性机械手进行了研究；该方法在使用时需要时间求导，使求解过程变得繁琐，尤其对于柔性系统，由于系统构型随着时间变化，微分运算过程更加复杂。

#### 一、拉格朗日函数定义：

在分析力学里，一个动力系统的拉格朗日函数，是描述整个物理系统的动力状态的函数，对于一般经典物理系统，通常定义为动能减去势能，以方程表示为

$\mathcal{L} = T - V$  其中  $\mathcal{L}$  为拉格朗日量， $T$  为动能， $V$  为势能。概念：

通常，动能的参数为广义速度  $\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dots$ ，（符号上方的点表示对时间  $t$  的全导数），而势能的参数为广义坐标  $q_1, q_2, q_3, \dots$ ；所以，拉格朗日函数的参数为



1, 2, 3, ... ; 1, 2, 3, ... ; 。

解析一个问题，最先要选择一个合适的广义坐标。然后，计算出其拉格朗日函数。假定这些参数（广义坐标、广义速度）都互相独立，就可以用拉格朗日方程来求得系统的运动方程。

假设一个物理系统的拉格朗日量为 $\mathcal{L}$ ，则此物理系统的运动，以拉格朗日方程表示为

$$\left( \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0,$$

其中， $t$  是时间， $q_i$  是广义坐标， $\dot{q}_i$  是广义速度。拉格朗日函数与作用量的关系

一个物理系统的作用量  $S$  是一种泛函，以数学方程定义为

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \mathcal{L}(q, \dot{q}, t) dt.$$

其中  $\mathcal{L}(q, \dot{q}, t)$  是系统的拉格朗日量，广义坐标  $(q_1, q_2, q_3, \dots)$  是时间  $t$  的函数，

$t_1, t_2$  分别为初始时间和终结时间。

假若，作用量的一次变分  $\delta S = 0$ ，作用量  $S$  为平稳值，则  $q(t)$  正确地描述这物理系统的真实演化。从这变分运算，可以推导出拉格朗日方程。

拉格朗日函数与能量守恒定律的关系

能量函数与拉格朗日函数有以下含时关系式：

$$h = - \mathcal{L}.$$

### 机械手动力学建模

由拉格朗日函数  $L$  所描述的系统动力学状态的拉格朗日方程为：

$$\left( \frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = T_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n).$$

式中  $n$  为连杆数目； $q_i$  为广义坐标 (m 或 rad)， $\dot{q}_i/s$  为广义速度 (m/s 或 rad/s)； $T_i$  为作用在第  $i$  个坐标上的广义力 (N 或  $N \cdot m$ )。

### 机械手系统动能

系统动能等于各杆的动能之和。即系统的动能为

因此， $n$  连杆的机械手总的动能为

则机械手连杆系统关节的传动装置总动能为

综上，即得到机械手系统(包括传动装置)的总动能为

气压传动是以压缩机为动力源，压缩空气作为工作介质，来进行能量传递和控制的一种传动形式。将各种元件组成不同功能的基本控制回路，若干基本控制回路再经过有机组合，就构成一个完整的气压传动系统。气压传动是实现各种生产控制、自动控制的重要手段之一。

压力压强的公式

气压传动系统一般由四部分组成，即气源装置、气动执行元件、气动控制元件和辅助元件。下面以胀管机工作原理示意图为例，说明其组成和工作原理，该系统主要用于铜管管端挤压胀形。

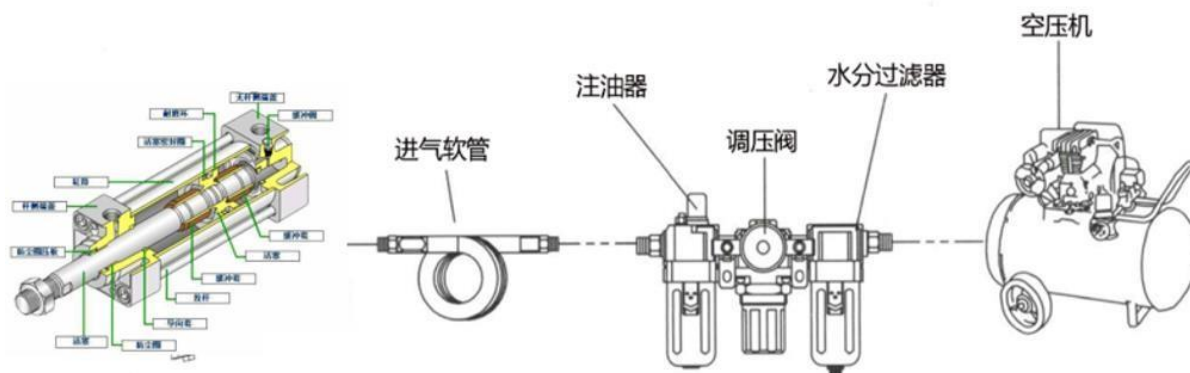


图 3-19 气压传动系统的组成

### 气源装置

气源装置是将原动机的机械能转化为气体的压力能的装置。气源装置的主体是空气压缩机(真空泵压缩机、空压机)，还配有储气罐、气源净化处理装置等。空气压缩机 2 由电动机带动旋转，从大气中吸入空气，空气经压缩机压缩后，通过气源净化处理装置(图中未画出)冷却、分离(将压缩空气中凝聚的水分、油分等杂质分离出去)，送到储气罐 3 级系统，此过程中，空气压缩机将电动机旋转的机械能转化为压缩空气的压力能，实现了能量转换。

使用气动设备较多的厂矿常将气源装置集中在压气站(俗称空压站)内，由压气站再统一向用气点(车间和用气设备等)分配、供应压缩空气。

### 气动执行元件

气动执行元件是将压缩空气的压力能转化为机械能的装置，它包括气缸和气马达、真空

吸盘，真空吸盘用于真空压力为动力源的系统。输入到气缸 8 和气缸 9 的是压缩空气的压力能，由气缸转换成输出往复直线运动的机械能，驱动模具合模、开模和对管端进行胀形。

#### 气动控制元件

气动控制元件是用来调节和控制压缩空气的压力、流量和流动方向的元件，以保证执行元件按要求的程序和性能工作。气动控制元件的种类繁多，除了普通的压力控制阀、流量控制阀和方向控制阀这三大类阀外，还包括各种逻辑元件和射流元件。输入到气缸，缸中的压缩空气的压力大小可根据负载的大小由减压阀 4 调节；气缸 9 活塞杆的伸出速度可通过流量控制阀 7 进行调节；气缸 8 和气缸 9 的往复运动方向分别由换向阀 6 和流量控制阀 7 进行控制；整个系统的最高压力由安全阀 1 限定。

#### 辅助元件

辅助元件是指用来解决元件内部润滑、消除噪声、实现元件间的连接以及信号转换、显示、放大、检测等所需的各种气动元件，如过滤器、油雾器、消声器、压力开关、各种管件及接头、气液转换器、气动显示器、气动传感器等。过滤器 13 用于过滤、去除杂质；油雾器 12 用于使润滑油雾化并注入到气流中，对润滑部位润滑；消声器 10、11 用于降低排气噪声。

**摩擦力：**利用机械手抓的凹凸面来增加摩擦力的物理学，循序渐进地紧固器物机件 能量转换：气压传动中将压缩气体的压力能转换为机械能并产生相当于应大小的抓力。

创新特色实现生产效率的提升经过多次的改良，我们团队将产品的加工效率进行了提升，并对产品合格率进行了严格的把控，实现了自动化加工，互联网监测、管理的一条智能加工流水线，解决生产效率低下的问题。如图 4-1 是我产品的加工对比图与产品对比图。

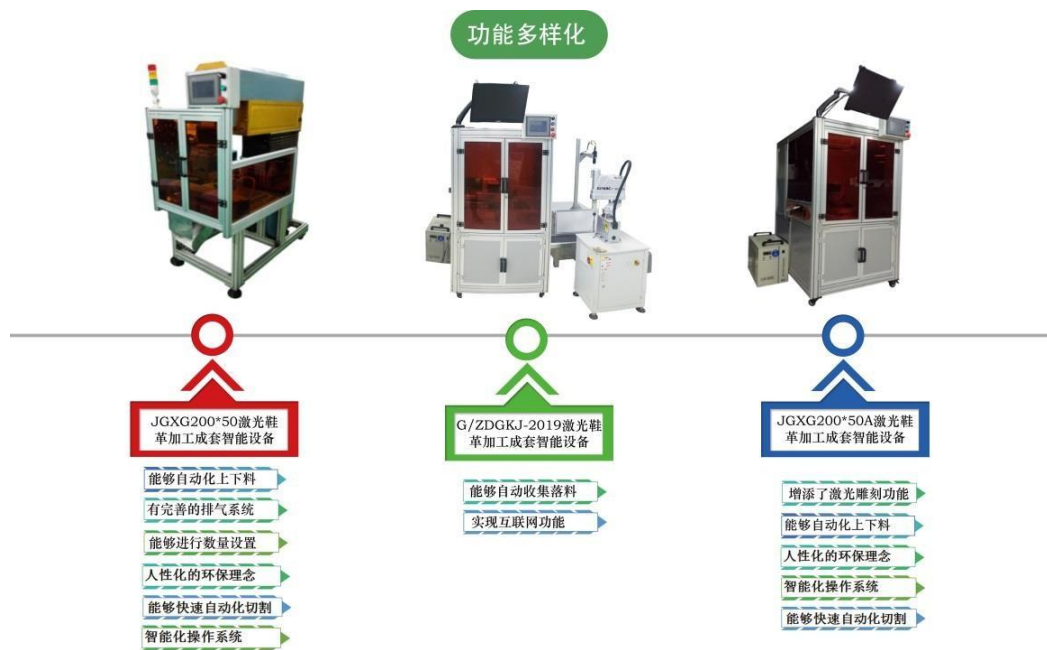
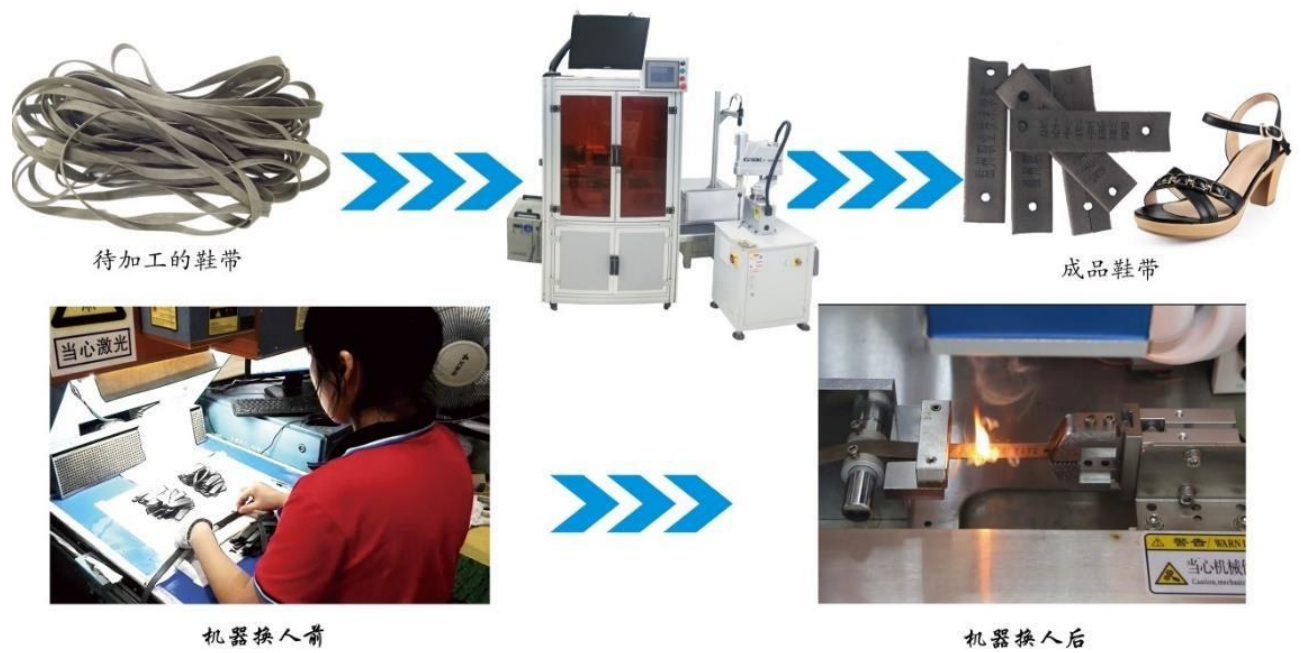


图 4-1 产品的加工对比

本设备经过了我们的多次改进，最终研制出了这台激光鞋革加工成套智能制造设备。表为机器与人工对比表，图 4-1 和图 4-2 为产品对比图。

表 4-1 机器与人工对比表

	工人	本团队机器人
工作时间	8 小时	可全天 20 小时工作

产量	一天约生产 3000 根	一天约可生产 21000 根
人力成本	4500 元/月	0 元/月

上表所示为该产品与人工的差别，从表中可以看出使用我们的产品大大提高了工作效率。

表 4-2 历代产品对比表

	GXG200*50 设备	JGXG200*50A 设备	G/ZDGKJ-2020 设备
滑台	同步带滑台	滚珠丝杠滑台	滚珠丝杠滑台
切割精度	0.30mm	0.20mm	0.10mm
工位	双工位	双工位	双工位
排气系统	有	有	有
工作效率	等于 6 个工人	等于 6 个工人	等于 11 个工人
净化系统	无	有	有
废气处理	无	有	有



图 4-2 产品的对比

据了解，企业普遍使用的鞋革机器相较于人工还能体现其优势，总体效率大概是人工的六倍左右。但是随着社会需求的提高，供不应求，本设备通过机器人视觉系统精准的定位以及机械爪的快速取放实现了速度的极大提升，并且在交互界面可随意调节动作的快慢，本设备全天二十小时工作，提高了生产效率，总体效率大概是人工的十一倍左右。生产效率的提高随之就带动了经济效益的提升。

解决工件美观度及精准度不高的问题普通性的皮革在激光打标时是没问题的，但是带有绒毛的皮革在打标过程中会燃烧起来，因为激光打标是热传播，一切易燃物体会进行燃烧，



因此应对此类产品必须有相应的办法。如图 4-3 所示为本设备激光打标前后的皮革。

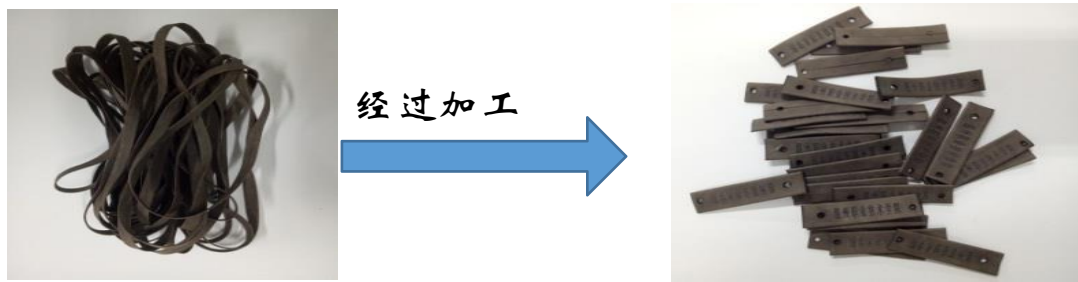


图 4-3 本设备激光打标前后的皮革

我们了解到物体燃烧必须达到三个条件：易燃品，燃点温度和氧气。以目前已知的情況下看，只能靠降低燃点温度的办法，从根本上解决有容材质皮革烧焦现象的。其主要办法是通过喷雾系统事先把皮革进行喷雾湿润，控制方法由 PLC 和触摸屏进行协调工作。

在激光打标完成之后，对于商家而言，每一个皮革的尺寸精度才是最主要的，常用的鞋革机器在工作完成之后将会由另一台专门检测的机器重新测量。而本设备引用了机器人视觉技术，让零件经过加工之后立马到达检测位置，直接开始测量检测，经测量后，分类并显示合格品与非合格品的统计信息，据数据表明，本设备的合格率高达百分之九十八。

#### 解决激光对人体伤害的问题

在操作激光切割的过程中，工人难免会受到激光的伤害如下：

激光打标产生的废气会伤害人体呼吸系统，激光辐射会刺伤视网膜，对人体健康造成极大伤害。

眼镜受激光照射后，人脑会产生眩晕感，对眼球及视网膜影响较大，容易出现视力模糊或眼前出现固定黑影，甚至视力丧失。

激光切割鞋革时，灼伤所产生的有毒气体，会影响工人的心肺功能。



图 4-4 切割过程中产生大量粉尘

首先，通过我们团队的努力研发所采用的激光鞋革加工成套智能制造设备来代替人工，将操作工人从流水线上替换下来，很大程度的避免了此类问题的发生。

其次，我们在设备的外部采用茶色塑料板，隔绝切割的光芒，弱化激光对人体，特别是



眼部的辐射。保护工人眼部的健康。

最后，完全密闭的生产空间有效隔绝有害气体与人的直接接触，保证工人肺部的健康。同时，在设备中加入排风系统，对于产生的有害气体及粉尘抽出，再通过净化设备对其进行过滤，达到相关标准后最终排放至室外，有效的阻止对人体的损伤和对大气的污染。

#### 解决人工放置及收集鞋革的问题

正常加工鞋革激光打标程序是，先把鞋革捋平放在加工台上，再操控激光打标机进行打字、穿孔，再将其切断，操作工人需要不断重复进行此动作。

为了加快机器生产效率，实现机器换人。我们创新性的提出将机械爪和输送装置用于实现皮革自动化切割。即提高了工作效率，又减少了人工成本，还能减少工伤的出现。

在激光切割鞋革后，鞋革会因为惯性原因导致鞋革位置随机，出现凌乱现象，经常需要人工干预，经过我们四代的改造，加入了机器人视觉引导系统与传输带装置，在鞋革经过检测部位时，传感器接收到了信息，并将信息处理好后传送到电脑终端，最后发出指令到达传输带装置，将切割好的鞋革一个个排好传输过去，最后利用机械排版将鞋革叠起来，这样子大大减免工人收集的时间。

#### 前后机一体化式私人定制

许多号称能“前后一体化”的软件仅仅是只做到了前端设计部分的非常优秀，或者是后端生产部分的拆单十分灵活，但真正能做到打通两者的对接，同时前后端部分的设计和拆单等功能也能做好的，寥寥无几。我们需要的软件方案是能够把制造规范严格带到设计端，实现设计过程中自动实现“与工厂的精密对话”，进而做到“能设计即允许制造，不能制造的无法设计”。依照这个逻辑，不懂软件的人也能得出结论：设计端和制造端必定需要一体化软件。我们产品集合了三维 CAD、CAM、CAE、管理等功能于一体的智能系统，不仅能进行设计，还能进行拆单堆积而管理，可使整个产品从开发到制造整个流程紧密衔接在一起，所以能轻松实现“前后一体化”。最重要的是我们的战略方案是：在实体店内进行设计，直接由一体化机进行半成品的生产，给消费者一个直观的消费体验，真正做到让消费者安心的“私人定制”新模式，让定制皮鞋满足消费者多元化的选择需求。

#### 生产模块化创新

一条流水线只能生产一款机型，随着科技进步和市场的变化，一个型号的产品生命周期越来越短，大批量生产方式变得不能适应竞争。面对温州复杂多变的鞋革环境，我们产品运用了模块化的生产。

我们在传统分工的基础上进一步将各个细分部分按照功能原则重新聚合，这种思想体现

在模块化生产方式中就是：产品被分解成独立的模块，这些模块可以在不同的专业化企业中独立地被设计、制造，而这种“独立性”正好可以使各模块生产企业的核心竞争力得到强化。传统的柔性制造模式 FMS、FA 和 CI 都是通过设备的高度自动化来尽可能地发挥规模经济，由于所加工的零件存在差异，其规模经济水平不可能比加工完全标准化的零件还高。但在模块化生产方式下，产品的成本能得到显著的降低，相似性的重用，可以使整个产品生命周期中的采购、物流、制造和服务资源简化。

### 机器视觉技术

我们给机器添加一套视觉系统。机器视觉是采用机器代替人眼来做测量与判断，通过计算机摄取图像来模拟人的视觉功能，实现人眼视觉的延伸。因为工作环境对身体的影响比较大，采用视觉系统可以在保障人员健康的基础下提高产品质量和生产效率。

精确性——由于人眼有物理条件的限制，在精确性上机器有明显的优点。

重复性——机器可以以相同的方法一次一次的完成检测工作而不会感到疲倦。

客观性——人眼检测还有一个致命的缺陷，就是情绪带来的主观性，检测结果会随工人心情的好坏产生变化，而机器没有喜怒哀乐，检测的结果自然非常可观可靠。效率高——机器视觉系统可以快速获取大量信息，实现更为快速的产品检测，同时也易于加工过程中的信息集成。

### 应用前景政治环境与时代环境

(1) 中国共产党第十九届中央委员会第五次全体会议上提出，坚持把发展经济着力点放在实体经济上，坚定不移建设制造强国、质量强国、网络强国、数字中国，推进产业基础高级化、产业链现代化。与会专家认为，全会把制造强国放在首位，体现出国家对大力发展制造业的重视。制造业是我国产业发展的基础和核心，而且我国在制造业具有一定的国际地位，大力发展制造业对我国未来产业发展来说，具有重要意义。我们要顺势而上把握机遇，顺应时代潮流，创新自动化技术和智能化机器，供给企业以帮助发展，服务并立足于此行业。

(2) 我国是工业机器人应用第一大国，近年来，我国工业机器人行业迅猛发展，产量持续增长。数据显示，2020 年我国工业机器人产量达 23.71 万套，同比增长 19.1%；2021 年 1-4 月我国工业机器人产量达 13.64 万套，同比增长 73.2%。

(3) 目前，温州共有激光与光电企业 100 余家，其中高新技术企业 32 家。2020 年，温州激光与光电行业的产值近 200 亿元，其中激光行业的制造激光元器件、激光器及激光应用设备等生产企业 20 多家，产值约 10 亿元。来自温州科技部门的数据，“十三五”期间，温州激光与光电行业将新增投资 260 亿元，“预计新增产值将突破 1000 亿元”。

近年来，随着工业 4.0 及中国制造 2025 等概念的持续推进，中国工业机器人产业得到了较好的发展。工业机器人作为工业自动化的通用设备，是“机器换人”的核心设备。据中华人民共和国工业和信息化部发布的机器人行业运行情况，2020 年 1—11 月，全国工业机器人完成产量 206851 台，同比增长 22.2%；全国规模以上工业机器人制造企业营业收入 453.3 亿元，同比增长 3.4%，实现利润总额 12.7 亿元，同比下降 51.7%。2020 年 11 月，全国工业机器人完成产量 25635 台，同比增长 31.7%。2020 年 1—11 月，全国规模以上特殊作业机器人制造企业营业收入 21.1 亿元，同比增长 34.4%，实现利润总额 0.3 亿元，同比下降 40%。2020 年 1—11 月，全国规模以上服务消费机器人制造企业营业收入 83.1 亿元，同比增长 25%，实现利润总额 0.5 亿元（去年同期亏损 16 亿元）。以自动化设备的典型代表工业机器人为例，随着机器人的高效性、稳定性、精准性逐渐被认可，工业机器人经济性愈发明显，对体力劳动者的替代作用也在日渐显现，工业机器人的经济替代效应拐点已经出现，预计到 2025 年预计中国制造业重点领域将全面实现智能化，其中关键岗位将由机器人替代。随着劳动力成本上升趋势的持续，以及工业机器人的价格下降、性能提升、应用领域逐渐扩大，工业机器人行业仍将保持高速增长的势头。

随着“机器换人”在浙江制造企业中轰轰烈烈的开展，众多企业纷纷更新设备，实行“机器换人”。在相关政策扶持下，作为中国鞋都的温州，正多条腿“修炼内功”高质量发展，为走向“世界鞋都”积蓄能量。





图 5-1 地方政策支持

我国自动化行业市场规模大、整体保持持续发展，伴随近年来产业结构的优化升级，未来发展前景看好工业自动化技术作为 21 世纪现代制造领域中重要的技术之一，主要解决生产效率与一致性问题。无论高速大批量制造企业还是追求灵活、柔性和定制化企业，都必须依靠自动化技术的应用。我国正处于工业化建设的中期，对于工业制造设备的投资需求非常大，工业自动化装备、智能化装备的投资需求相应很大，随着我国工业经济结构调整与产业升级发展，为国内工业自动化行业带来前所未有的市场机遇。此外，我国人口老龄化现象加剧，劳动人口短缺导致机器替代人工成为长期趋势；随着“调结构、促转型”政策的实施，自动化、智能化必然成为产业结构优化升级的方向之一。

在当下全球制造业开启“工业 4.0”进程的时候，我国亦提出了“工业 2025”计划，工业自动化行业将在中国制造业的未来发展起到举足轻重的作用，未来仍将保持较快的发展速度。自动化设备制造业的发展水平影响着工业自动化的进程，也是衡量国家工业发达程度的重要标志之一。

劳动力成本逐年上升，自动化设备的经济替代效应逐渐显现伴随着人口红利的消失，中国的体力劳动者适龄人口数量呈现持续减少的趋势，与此对应的是，中国的制造业平均工资持续快速增长，自动化设备的价格却在逐年下降。

以自动化设备的典型代表工业机器人为例，随着机器人的高效性、稳定性、精准性逐渐被认可，工业机器人经济性愈发明显，对体力劳动者的替代作用也在日渐显现，工业机器人的经济替代效应拐点已经出现，预计到 2025 年预计中国制造业重点领域将全面实现智能化，其中关键岗位将由机器人替代。随着劳动力成本上升趋势的持续，以及工业机器人的价格下

降、性能提升、应用领域逐渐扩大，工业机器人行业仍将保持高速增长的势头。

目前，由于绝大部分高端产品主要被国际厂商所掌握，大部分国内自动化系统集成企业并不掌握自动化控制系统的核心技术，较难针对客户实际需求对控制系统进行有效的二次开发，进而给客户id提供满足其要求的自动化成套设备及整体解决方案也面临着种种障碍，这种供需之间的矛盾是目前工业自动化行业亟需解决的问题之一。未来，随着越来越多的制造业企业纷纷步入自动化的行列，掌握自动化设备控制系统并针对下游制造业企业需求对控制系统进行二次开发应用，为下游企业提供满足其要求的定制化自动化成套设备及整体解决方案的企业将获得更多的发展空间。

### 经济环境与社会环境

在激烈的市场竞争下，温州鞋革行业积极探索智能制造道路，同时在新零售领域大力拓展线上线下融合。2020年，中国工业机器人市场整体增幅比较乐观，2021年1-4月我国工业机器人产量达13.64万套，同比增长73.2%，预测销售额达到66.3亿美元，同比增长37.3%。在宏观经济和制造业增速下滑的态势下，中国工业机器人市场继续维持30%以上增长速度。2020年，在产业政策的激励和市场需求的带动下，中国机器人产业实现快速增长，业内领军企业产业化能力不断提升，产业规模达到600亿元，2016-2020年的平均增长率达到20.5%，未来中国工业机器人产业规模将继续保持稳定增长。工业机器人在我国经济社会发展中发挥着重要作用。目前，因协作机器人部署成本低、灵活性强、安全性好等特性，可满足新兴行业的需求，人机协作在制造领域的重要性不断提升。

表 5-1 全国居民人均可支配收入图表（2016-2020 年）

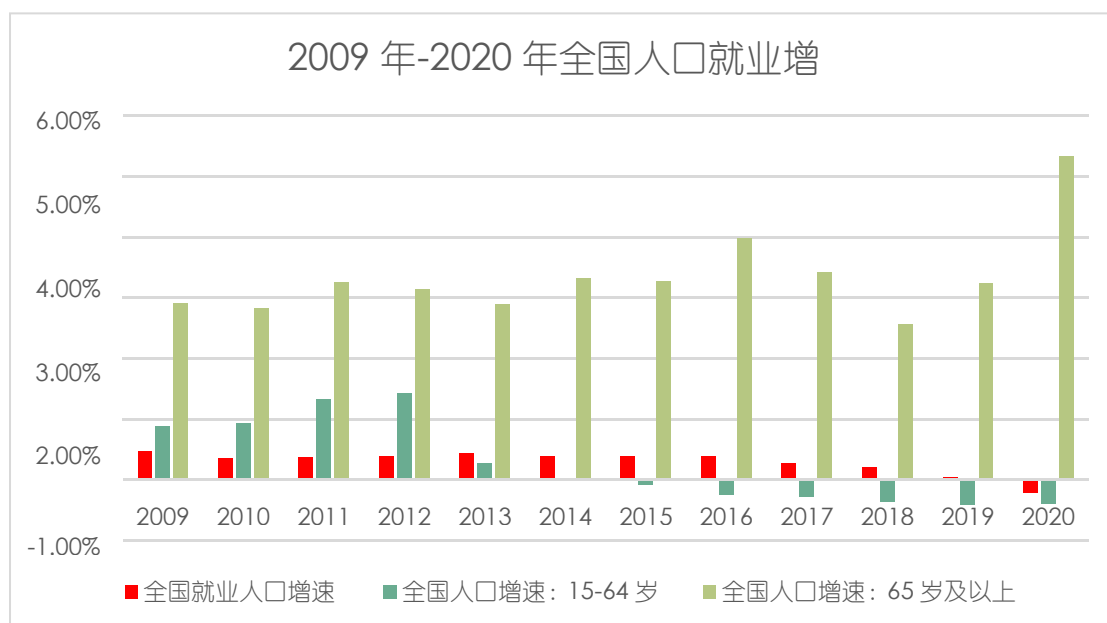


上图表表 5-1 是 2016-2020 年的全国居民人均可支配收入图表，可以看出人均收入正在逐年上涨，那么国民生活的水平，生活质量也会得到相对于的提升，这样对产品私人定制的要求也就增大了。

我国自动化行业市场规模大、整体保持持续发展，伴随近年来产业结构的优化升级，未来发展前景看好工业自动化技术作为 21 世纪现代制造领域中重要的技术之一，主要解决生产效率与一致性问题。无论高速大批量制造企业还是追求灵活、柔性和定制化企业，都必须依靠自动化技术的应用。我国正处于工业化建设的中期，对于工业制造设备的投资需求非常大，工业自动化装备、智能化装备的投资需求相应很大，随着我国工业经济结构调整与产业升级发展，为国内工业自动化行业带来前所未有的市场机遇。此外，中国人口老龄化现象加剧，劳动人口短缺导致机器替代人工成为长期趋势；随着“调结构、促转型”政策的实施，自动化、智能化必然成为产业结构优化升级的方向之一。在当下全球制造业开启“工业 4.0”进程的时候，中国亦提出了“工业 2025”计划，工业自动化行业将在中国制造业的未来发展起到举足轻重的作用，未来仍将保持较快的发展速度。随着“调结构、促转型”政策的实施，自动化、智能化必然成为产业结构优化升级的方向之一。



表 5-2 全国人口与就业增速表



中国正处于工业化建设的中期，对于工业制造设备的投资需求非常大，工业自动化装备、智能化装备的投资需求相应很大，随着中国工业经济结构调整与产业升级发展，为国内工业自动化行业带来前所未有的市场机遇。目前，温州有鞋革企业 5000 多家，年产值 1000 多亿，占据产业比重的重要位置。但是，本土企业还缺少高端制造，产品附加值相对不高，如何由传统迈向时尚制造，参与全球竞争。还需我们引入高科技技术，实现整体突围，推进行业发展。

装备的技术优势近年来，在行业形势及国家政策推动下，我国智能制造产业发展迅速，产值规模已经达到 15000 亿元。当前，世界经济进入下行趋势，各国对于制造业发展愈发重视，纷纷加快推动技术创新，促进制造业转型升级，智能制造战略由此不断升温。目前，因此，智能化、绿色化已成为制造业发展的主流方向。目前温州市制造业仍处于人工加工到自动化加工的转换过程中，本团队的技术和机械可以很好地帮助本地企业发展。

本团队经过多次对本地企业进行实地考察，发现了许多问题，在团队成员的讨论探究之后，经过一步一步的研究创新，制造出了许多适用于温州制造业的产品，并得到企业的一致好评。本团队的机器可以精准的按照人工设定的程序来工作，不需要人工手动操作，大大降低了人工成本和危险性，极高地提升了工作效率。

研发实力优势：本团队具有很强的系统开发能力，团队核心人员在研究开发方面拥有多年的自动化设备开发经验和实践基础，并且掌握了核心的技术。

产品设备优势：设备 1 天可持续工作 20 小时，合格率达 98%，产量相对于 4—7 个工

人 1 天的产量，有效减少 5 个工人，不仅节约了成本，显著提高了工作效率。管理团队优势：本团队拥有一个互补的自动化设备生产行业所必须的专业技术和管理团队，稳定性高，机动灵活。团队资源优势：本团队成立并立足于温州市地区，可以更快速及时的解决各类问题，并且能够及时的和本地的厂商进行沟通与合作。使得温州地区的智能制造设备行业的发展迅速，成为温州地区智能制造行业的龙头企业。维修和售后是我们团队的突出优势，可以快速增进双方企业对接，建立互信。

### 参考文献

- [1]胡汉平. 热传递理论[J]. 物理学. 2010(01): 1-5.
- [2]石顺祥, 张海兴, 刘劲松. 物理光学与应用光学[J]. 物理光学. 2008(07): 143-144.
- [3]罗蓉. 液压与气压传动[J]. 物理学. 2009(08): 55-57.
- [4]傅立叶. 热的解析理论[J]. 物理学. 2007(06): 30-33.
- [5]陆桂君. 激光切割的机理与机械工艺技术[J]. 科技创新与应用, 2017, 000(003): 122-122.
- [6]兴. 视觉定位技术在激光切割设备中的应用研究[D]. 广东工业大学, 2016.
- [7]段峰, 王耀南, 雷晓峰, 等. 机器视觉技术及其应用综述[J]. 自动化博览, 2002, 19(3): 59-61.
- [8]钟平, 陈益民, 张伟. 基于机器视觉激光切割自动寻边技术研究[J]. 纺织高校基础科学学报, 2006, 19(004): 394-397.
- [9]焦江林. 基于机器视觉的激光切割控制系统的研究[D]. 江苏大学, 2020.
- [10]阳伦娟. 一种基于机器视觉的激光加工装置:, CN210548820U[P]. 2020.
- [11]Dwyer, G., et al. "A Continuum Robot and Control Interface for Surgical Assist in Fetoscopic Interventions." *IEEE Robotics and Automation Letters* 2. 3(2019): 1656-1663.
- [12] The Maxwell - Boltzmann distribution[J]. *Molecular Physics*, 2005, 103(21-23): 2821-2828.
- [13]Prof. Dr. Hadis Morkoç. *Semiconductor Lasers: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* [M]. John Wiley & Sons, Ltd, 2013.
- [14] Rolt S. *Lasers and Laser Applications* [M]. 2020.
- [15] Sonka M, Vhlavác, Boyle R. *Image processing, analysis, and machine vision* [J]. *Journal of Elec*

tronic Imaging, 2014, xix.

[16] Beyerer J, F Puente León, Frese C. Machine vision [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2016, 10.1007/978-3-662-47794-6.

[17] Culp J C. Laser cutting: US, US20130073071A1 [P]. 2016.

[18] Nakano M, Kuno K, Osajima T, et al. Laser working method, laser working apparatus, and its manufacturing method [J]. US, 2016.

[19] Sonka, Milan. Image Processing, Analysis, and Machine Vision [C] // Thomson-Engineering. Thomson-Engineering, 2007.

[20] Mascenik J. Experimental determination of cutting speed influence on cutting surface character in material laser cutting [J]. M M Science Journal, 2016, 2016 (3) : 960-963.

# 数字化物联定位系统

参赛者：魏宽宽，余柯剑，梁文敏，方佳怡，陈思燕

（温州职业技术学院智能制造学院，温州 325006）

指导老师：金余义，董玲娇

**摘要：**目前，我国重点推进建设 5G 网络、数据中心、工业互联网等新型基础设施，而伴随着工业互联网的兴起，室内定位如火如荼地发展起来了。

基于此，本团队经过九个月的时间，设计和研发了一套采用 UWB 定位技术的系统来实时采集人员的位置信息，并将之取名为“数字化物联定位系统”（以下简称“数联定位”）。通过上位机软件，将人员位置信息以坐标的形式表达，实现人员定位的数字化。

“数联定位”中的定位工牌里集成了 UWB 定位模组，用来实时采集产业工人的具体位置信息。模组是采用“底板+模块”的架构集成到工牌中，底板以蓝牙 Nordic 52832 为主控芯片，射频模块中的核心射频芯片为 DW3000。本系统具有人员轨迹记录、智能化作业管理、电子围栏模式等八大功能。除功能更全外，相比市面上的同类产品，本作品具有 7cm 的定位精度、1600m 的测距距离、6 个月的续航能力等性能优势。为保护该作品的知识产权，本团队已成功申报专利 2 项，已登记软件著作权 3 项（以上所有专利、软著的发明人或著作人全部都是团队成员）。

**关键字：**UWB 数字化人员定位 DW3000 蓝牙 Nordic 基站 上位机

## 研究背景

### 技术背景

超宽带(Ultra Wide Band, UWB)无线通信技术起源于 20 世纪 60 年代 Dr.Gerlad F.Ross 对微波网络冲激响应的研究。UWB 实质上是以占空比很低的冲击脉冲作为信息载体的无线载波扩谱技术，它有着很陡的冲击脉冲。而 UWB 成形脉冲是基于 Hermite 矩阵和 Chirp 信号得到的。

2002 年 4 月，FCC 修正了“超宽带”定义，并通过了超宽带技术在限制功率辐射条件下的商用许可，并划定超宽带通信的频谱范围为 3.1~10.6 GHz。设计 UWB 的脉冲波形除了要满足室内和室外 UWB 系统的发射功率谱密度要求，还要尽可能地使得频谱利用率最大。所以对 UWB 的研究文章，大多是关于 UWB 功率谱密度和频谱利用率。

以下是 UWB 脉冲原理的分析：

设成形脉冲信号为  $\psi(t)$ ，其经过冲击响应为  $h(t)$ ，频率响应为  $H(f)$  的系统后，使其频谱尽可能大地分布在 FCC 规定的频谱限制范围内。定义成形脉冲信号的脉冲宽度为  $T_m$ ，则：

$$\lambda \varphi(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(\tau) h(t - \tau) d\tau \quad (1.1)$$

其离散的表达式为：

$$\lambda \varphi[n] = \sum_{m=-N/2}^{N/2} \varphi(m) h[n - m], n = -N/2 \dots, N/2 \quad (1.2)$$

而矩阵  $H$  为 Hermite 矩阵，所要求的成形脉冲  $\psi$  与衰减因子  $\lambda$  即可由  $H$  的特征向量与特征值矩阵获得。由于  $H$  为 Hermite 矩阵，因此所求得特征向量组为线性无关的正交向量组，并且特征值为实数，因此各个成形脉冲之间不相关，如下式所示：

$$\lambda \begin{bmatrix} \varphi(-N/2) \\ \varphi(-N/2+1) \\ \vdots \\ \varphi(0) \\ \vdots \\ \varphi(N/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h(0) & h(-1) & h(-N) \\ h(1) & h(0) & h(-N+1) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h(N/2) & h(N/2-1) & h(-N/2) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ h(N) & h(N-1) & h(0) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varphi(-N/2) \\ \varphi(-N/2+1) \\ \vdots \\ \varphi(0) \\ \vdots \\ \varphi(N/2) \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

由于 Chirp 信号具有时间带宽积大、旁瓣低的特点，为了应用 Chirp 信号作为成形脉冲的基函数，可以将其作为系统的冲击响应  $h(t)$ ，并令相应的带宽为 3.1~10.6GHz，则其时域表达式为：

$$h(t) = \cos(2\pi f_0 t + \pi k t^2) \quad (1.4)$$

利用上述理论，产生 Chirp 信号，后将其作为系统的冲击响应，再构造式(1.4)的 Hermite 矩阵  $H$ ，并由此计算相应的特征向量甲，得到所需要的成形脉冲。设脉冲采样点数  $N=1024$ ，脉冲持续时间  $T_m=10$  ns。随着波形带宽的不断增大，其时域波形越来越窄；如图 1-1，明显地表示了波形的功率谱密度。

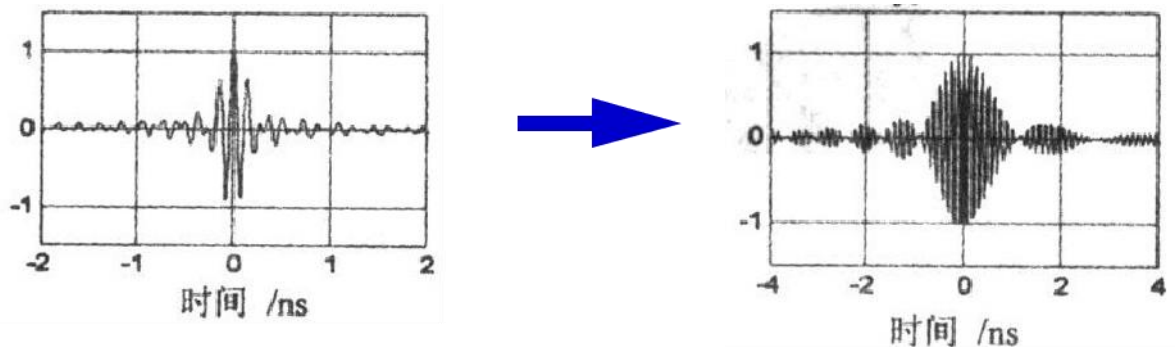


图 1-1 带宽的波形不断变宽

## 时代背景

今年国内三大攻坚战取得决定性成果，以信息技术为代表的高新技术突飞猛进，科技创新取得重大进展，民生得到有力保障。目前，我国重点推进建设 5G 网络、数据中心、工业互联网等新型基础设施。而伴随工业互联网的兴起，室内定位如火如荼地发展起来了。在传统的通信中，数据传输都必须使用载波来承载信息，同时各类定位 GPS、RFID、蓝牙等技术在应用于室内定位时，都遇到了形形色色的困难。而本团队决定采用 UWB 作为系统的核心技术，研发一套数字化的人员定位系统。

UWB (Ultra Wide Band, 超宽带) 技术是一种短距离无线载波的无线传输技术，相比传统的无线通信有着极大的差异，UWB 的信号发送与接收是采用**纳秒及纳秒级以下的窄脉冲**来传输数据而且能传送低功率的信号，可以穿越障碍物，能方便地实现定位功能，有着**定位精度高达厘米级且抗干扰能力强、测距距离远等优点**。

基于 UWB 技术的定位工牌能够迅速且准确的获取佩戴人员的位置信息，并且记录人员运动轨迹。通过可视化平台“上位机”，使**人员位置信息以坐标的形式表达**，更准确、具体。另外，“数联定位”根据不同定位场景，开发了人员轨迹查询、智能化作业管理、电子围栏模式等八项功能。除功能更全外，相比市面上的同类产品，**本作品具有 7cm 的测距精度、1600m 的测距距离、6 个月的续航能力等性能优势**。为保护该作品的知识产权，本团队已成功申报专利 2 项，已登记软件著作权 3 项（以上所有专利、软著的发明人或著作人全部都是团队成员）。

## 系统介绍

### 系统组成

“数联定位”主要由**一款集成了 UWB 模组的定位工牌、定位基站和加入了自主编写算法的上位机软件组成**。

如图 2-1 系统的硬件组成部分的硬件主要由以下 5 个模块构成：

#### 1. 信号产生模块

将 UWB 定位标签嵌入到工牌中，发出具有信号密度高、传输频率高、抗干扰能力强的脉冲信号。

#### 2. 信号放大模块

UWB 标签所发出的信号将经由功率放大器、低噪放大器，不失真地放大信号强度，提高



信号穿透力。

### 3. 信号接收模块

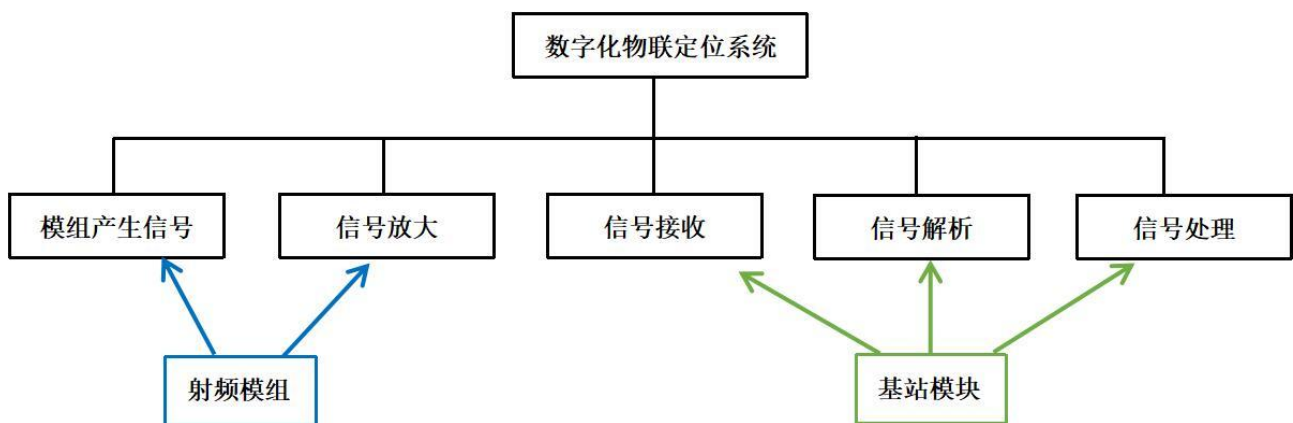
发出的定位信号将由 UWB 定位基站接收并处理，因标签最后发送的信号，与基站可接收的信号的相位相反，所以须在电路中添加一个施密特反向器，实现信号的初步接收、反相解析与放大。

### 4. 信号解析模块

通过反相放大器后，定位信息须传入互联网终端设备，因为定位信息须转化成计算机数据，所以在 UWB 定位基站中嵌入坐标解算器和 Wifi 互联网转化装置，实现定位信号的信息解析。

### 5. 信息处理模块

将解析后的定位信息传输到计算机终端后，经由上位机软件，将人员信息以坐标的形式表达；另外，本系统以将人员的位置信息直接导出到 Excel 中，实现位置信息数字化，进而实现定位信息的最终处理。



#### 1.1.1 载有超小、可拆卸 UWB 模组的定位工牌

本团队将自主研发的超小、可拆卸 UWB 模组应用在工牌上或集成于无人机中，可实现数字化的人员管理。如图 2- 2 定位工牌实体图。

本系统所用的 UWB 定位技术是一种无线载波通信技术，通过纳秒级非正弦波窄脉冲来传输数据，其频段分配为 3.1GHz~10.6GHz，穿透性极强，非常适合在工厂、隧道等封闭复杂环境中使用。

超小的模组体积，极大地削弱集成难度，解决了集成后的产品过重以及过大不易携带的问题，同时 UWB 模组的可拆卸性延长了产品寿命。



图 2- 2 定位工牌实体图

### 1.1.2 定位容量大、续航时间长的定位基站

本团队将 TDOA 技术应用在定位基站 ProAnc，作为信号的接收、解析、处理单元，基站的性能影响整个系统的运行情况。

本团队在比较 TDOA（时间差）与 TWR（双向测距）定位方式后，决定采用 TDOA 技术作为系统的通信技术。相比其他通信方式，TDOA 技术使定位基站**只需要接收或者发送信号就可以确定信号源的位置。**

TDOA 技术的特点为：

- **功率更小**

TWR 技术，基站既需要接收，同时也要发送信号，相比之下 TDOA 技术只需要接收信号，即可实现测距，运用在系统中时，消耗的功率更小，如图 2-3TWR 和 TDOA 技术通信方式。

- **定位容量更大**

由于只需要定位标签发送脉冲信号给基站即可实现测距。因此大量的定位标签可以在帧速率内传输信号。基站能相对容纳的定位终端数量更多，于是需要设置的基站数量也相对比较少。

- **对模组电路要求更高**

TDOA 技术尽管有很多优点，但是对电路的匹配度要求更高，而“数联定位”不仅采用了 TDOA 技术，**同时将基站和模组的匹配度达到了 90%**，甚至更高。



图 2-3 TWR 和 TDOA 技术通信方式

## 1.2 系统运行流程

### 1) 部署基站

在项目启动前，要每隔几百米部署不同序列号的基站，工人穿戴不同序列号的定位工牌进入定位区域。

### 2) 上位机记录人员进出

此时上位机软件会显示工人进入定位区域的时间，并持续对人员移动路径进行记录。

### 3) 工牌的 UWB 模组工作

标签中的射频模组，以一定频率发射脉冲，而这种脉冲并不足以被千米之外的基站接收，所以此时运用了放大器的原理，将射频模组的初始信号经过放大器的不失真放大后，与基站进行数据交互，从而扩大了定位范围。

### 4) 上位机持续追踪并记录人员轨迹

如图 2-4 所示，上位机将人员的坐标以 X、Y、Z 数值的形式表达，清晰地反映了人员的实际位置变化，并持续形成新的表格进行记录。

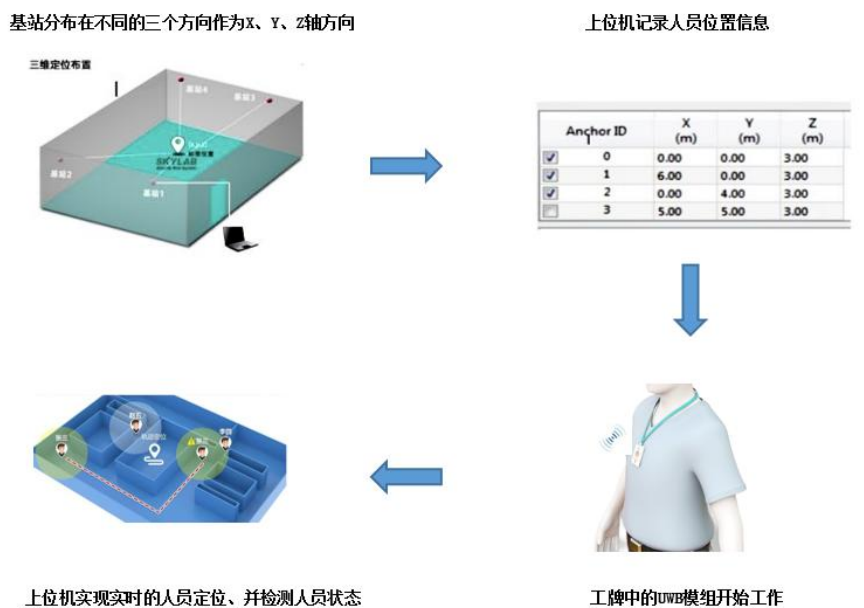
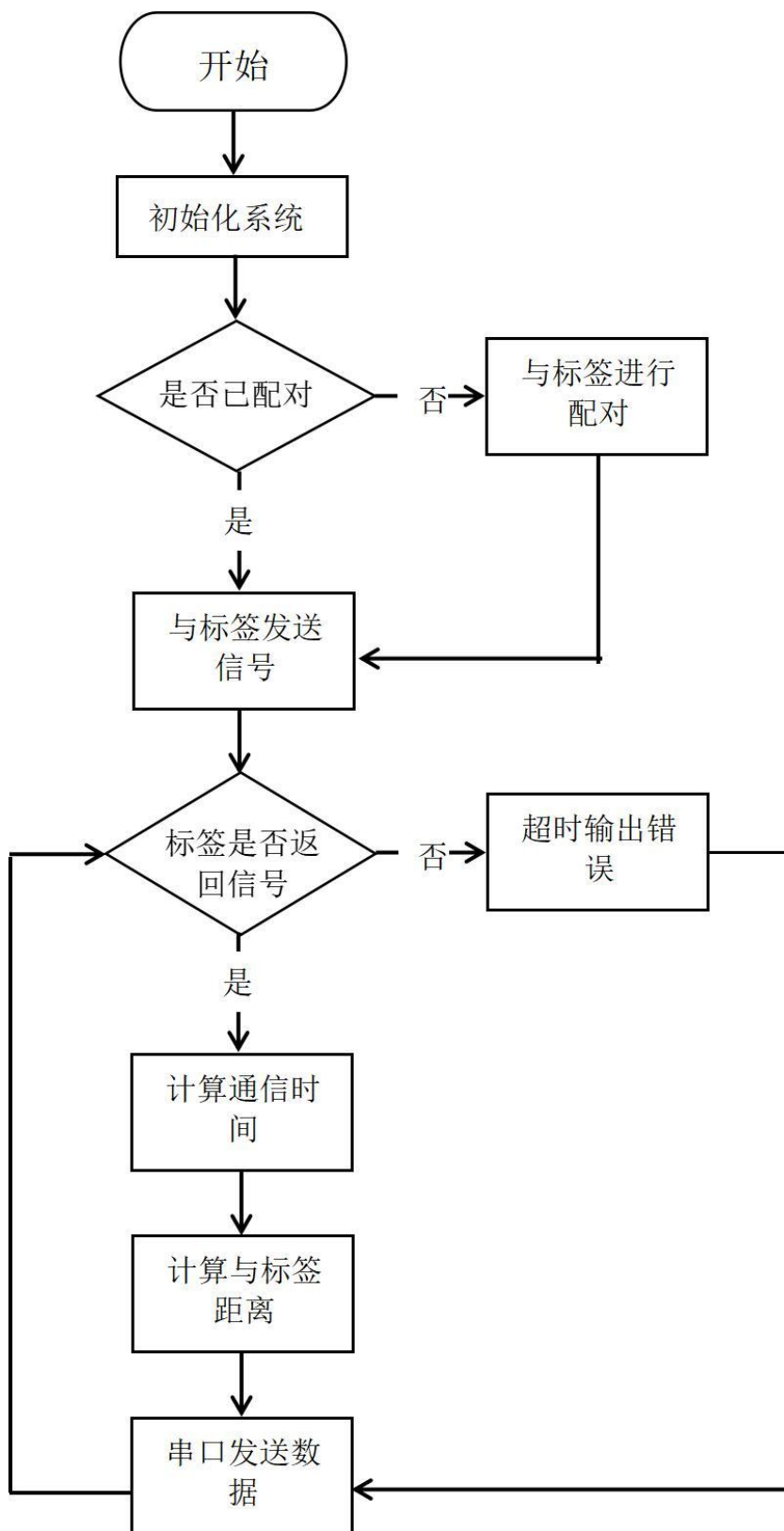
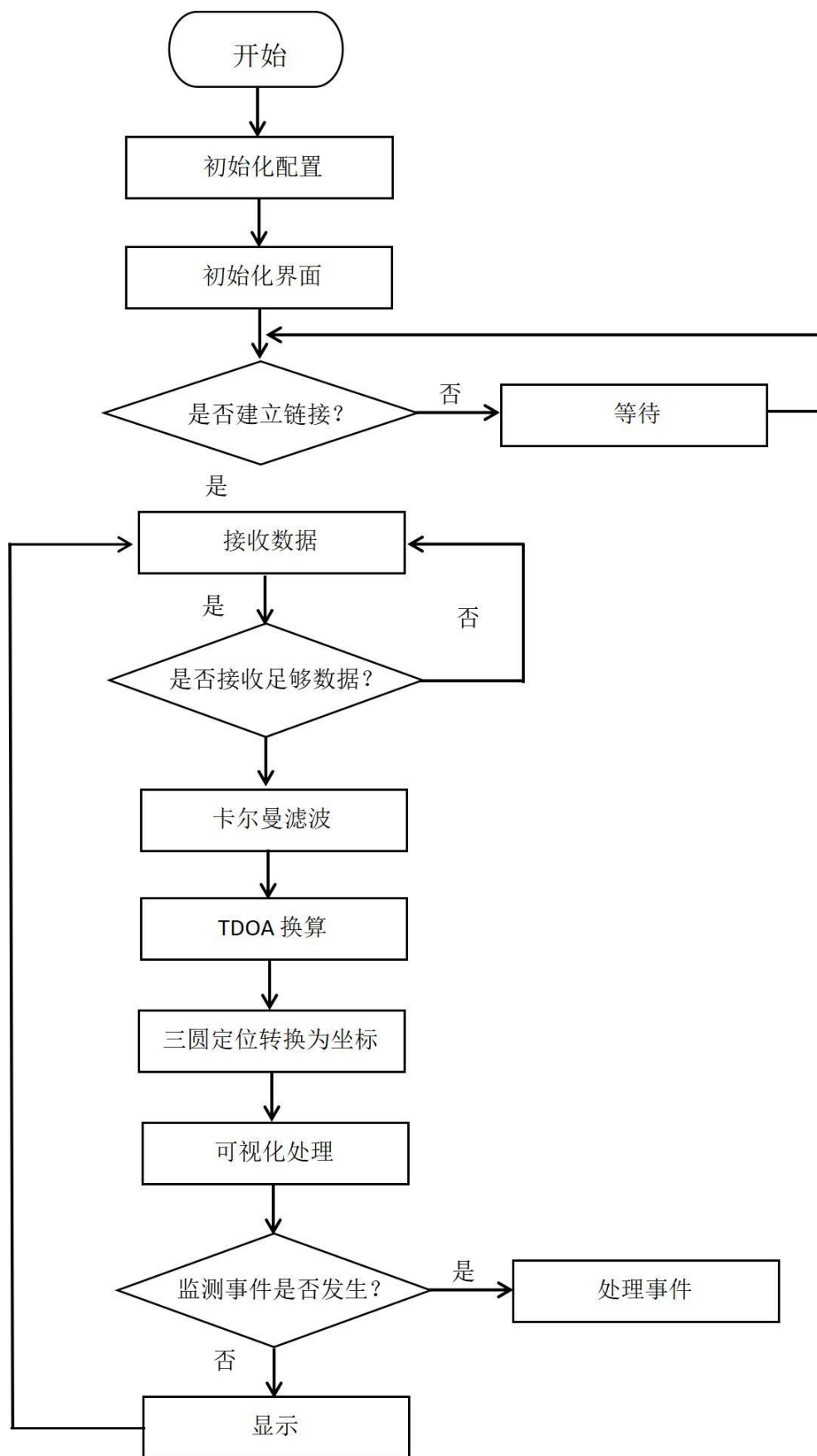


图 2-4 系统工作运行流程

### 1.3 嵌入式系统流程图



### 1.4 上位机运行流程图



## 技术原理

### 1.5 定位技术

“数联定位”采用 UWB 作为系统的核心定位技术。UWB 信号的信号传输稳定性高、速率快、穿透性强。而我们熟知的北斗、GPS 定位技术只能在室外进行粗略的米级定位, 并且有着数据传输速度慢、穿透性差、功耗高、不安全稳定等缺点, 而如图 3-1 所示。

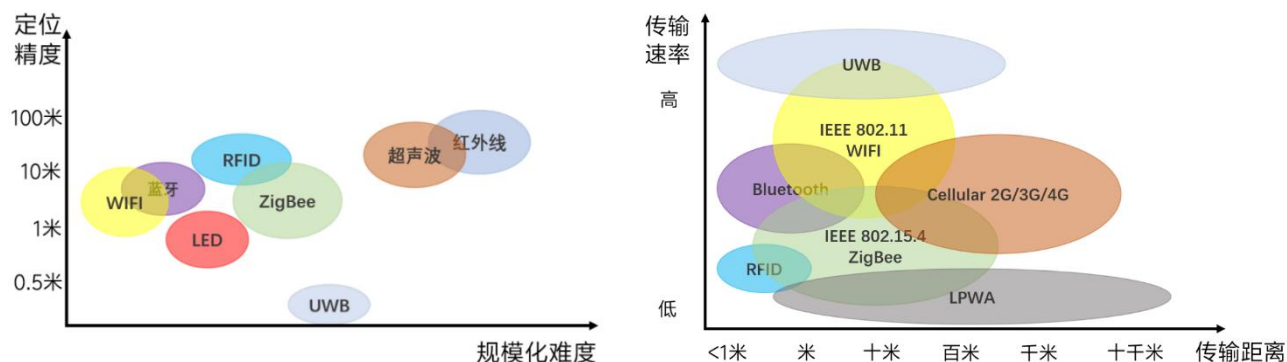


图 3-1 UWB 与其他定位技术对比

#### 1.5.1 性能分析

##### 1) 超长的频段分配

UWB 的频段分配为 3.1~10.6GHz, 而我们熟知的北斗、GPS 定位技术, 其频段最高只能达到 1.7GHz, 所以 UWB 的信号相较于 GPS 等定位技术而言, 穿透性更好、更稳定。

##### 2) 脉冲极窄, 可达纳秒级速率

UWB 与传统通信技术相比有显著不同的特点——它采用窄脉冲传输数据, 这种窄脉冲能达到纳秒级别传输速率, 使得定位时间延迟缩小至 10ms。

##### 3) 频带极宽

UWB 的带宽在 1GHz 以上, 相当于 1000 个电视频道或 30000 个 FM 广播频道, 因此单位频宽内的功率密度相当低, 甚至低于一般的噪声水平 (比如, 低于一部笔记本电脑的辐射), 产生的信号可以轻松穿越障碍物。因此, UWB 相对于其他通信设备而言, 相当于白噪声的存在, 同时加强了抗干扰性和系统稳定性, 开辟了一种新的时域无线电资源。

##### 4) 间歇短脉冲发送数据

本系统采用间歇短脉冲发送数据, 传输速率在 0.2~1.5ns 之间, 在高速通信时耗电量仅



为几百微瓦至几十毫瓦之间，耗电量极低。

### 1.5.2 测距原理

双向飞行时间法 (TW-TOF, two way-time of flight) 每个模块从启动开始即会生成一条独立的时间戳。模块 A 的发射机在其时间戳上的  $T_{a1}$  发射请求性质的脉冲信号，模块 B 在  $T_{b2}$  时刻发射一个响应性质的信号，被模块 A 在自己的时间戳  $T_{a2}$  时刻接收。如图 3-2。设备 A 的  $T_{round}$  和设备 B 的时间差  $T_{reply}$ ，最终得到  $T_{prop}$  如下：

$$T_{prop} = 1/2 (T_{round} - T_{reply}) \quad (3.1)$$

两个差值时间都是基于本地的时钟计算得到的，本地时钟误差可以抵消，但是不同设备之间会存在微小的时钟偏移，假设设备 A 和 B 的时钟偏移分别为  $E_a$  和  $E_b$ ，则  $T_{prop}$  值为：

$$T_{prop}' = 1/2 [T_{round}(1+E_a) - T_{reply}(1+E_b)] \quad (3.2)$$

于是测距误差 Error 如下：

$$Error = T_{prop}' - T_{prop} = 1/2 T_{reply} (E_a - E_b) + T_{prop}' E_a \quad (3.3)$$

又因为  $T_{reply} \gg T_{prop}$  所以可以忽略最后一项

$$Error = T_{prop}' - T_{prop} = 1/2 T_{reply} (E_a - E_b) \quad (3.4)$$

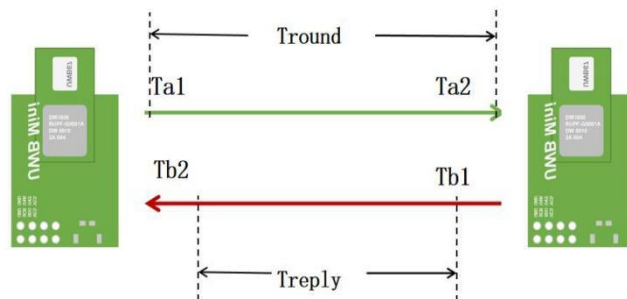


图 3-2 TOF 测距原理

### 1.5.3 测距技术

本系统采用了 TDOA (Time Difference of Arrival) 技术，该技术不需要标签与定位基站之间进行反复通信，只需要定位基站发射或只接收 UWB 信号，故能做到更细的定位动态和更大的定位容量。

利用被测标签 (B) 到各个已知基站 (P1、P2、P3) 的传输时间差，计算出标签 (B) 与基站 (P1、

P2、P3)的距离(以标签 B 为中心, 距离为半径作圆)。

$$\sqrt{x^2 + y^2 + (z - k)^2} = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + k)^2} + 2d \quad (3.5)$$

如果根据  $z$  重新排列, 则将其开发如下:

$$x^2 + y^2 + (z - k)^2 = x^2 + y^2 + (z + k)^2 + 4d\sqrt{x^2 + y^2 + (z + k)^2} + 4d^2 \quad (3.6)$$

当将转换为距离的 TDOA 值/2 时, P0 和 Pm 之间的双曲面方程如下:

$$-4d^2 - 4kz = 4d\sqrt{x^2 + y^2 + (z + k)^2} \quad (3.7)$$

整合方程, 得:

$$\sqrt{x^2 + y^2 + (z + k)^2} = -d - \frac{kz}{d} \quad (3.8)$$

将 (3.8) 公式去平方根后得:

$$x^2 + y^2 + z^2 + 2kz + k^2 = d^2 + 2kz + \frac{k^2 z^2}{d^2} \quad (3.9)$$

继续整合公式:

$$\left(\frac{k^2}{d^2} - 1\right)z^2 = x^2 + y^2 + k^2 - d^2 \quad (3.10)$$

最终结果为:

$$z = -\sqrt{\frac{x^2 + y^2 + k^2 - d^2}{\frac{k^2}{d^2} - 1}} \quad (3.11)$$

第一双曲面得方程式, 可通过以下二次方程式求解得到公式 (3.12):

解得:

$$(V_x^2 + V_y^2 + (1 - \frac{k^2}{d^2})V_z^2)t^2 + 2(V_x x_0 + V_y y_0 + (1 - \frac{k^2}{d^2})V_z z_0)t + k^2 - d^2 + x_0^2 + y_0^2 + (1 - \frac{k^2}{d^2})z_0^2 = 0$$

$$\begin{cases} a = V_x^2 + V_y^2 + (1 - \frac{k^2}{d^2})V_z^2 \\ b = 2(V_x x_0 + V_y y_0 + (1 - \frac{k^2}{d^2})V_z z_0) \\ c = k^2 - d^2 + x_0^2 + y_0^2 + (1 - \frac{k^2}{d^2})z_0^2 \end{cases} \quad (3.12)$$

将 (3.11) 代入公式 (3.12) 能够得出飞行时间 (TOF)。

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.13)$$

简单的来说，TDOA 技术是基站依据工牌标签发送信号与接收信号的时间差，计算出佩戴者的实时位置信息，而 TDOA 技术的难点在于如何提高系统的鲁棒性，即做到所有基站时间的同步。而本团队经过上万组的数据测量和硬件软件的升级，最终达到了纳秒级的信号传输速率和基站接收信号的时间同步最大化。

## 1.6 射频电路

### 1.6.1 射频电路性能

射频电路的核心是定位芯片 DW3000，它是 Decawave 公司生产的高性能、低成本、低功耗，定位精度高的定位芯片，其主要有以下性能：

- (1) 符合 IEEE802.15.4-2015 超宽带标准
- (2) 支持从 6.4GHz 到 8GHz 的射频波段
- (3) 支持 TDOA、双边测距、PDOA 位置定位方案
- (4) 低功耗
- (5) 支持 RTLS 中的高标签密度
- (6) 其设计遵守 FCC&ETSI UWB 的频谱标准
- (7) 供电为 2.8V~3.6V
- (8) 数据传输率为 850kbps，6.8Mbps 两种模式
- (9) 最大数据包长度为 1023 字节，满足高数据量交换的应用需求
- (10) 集成 MAC 支持功能
- (11) 支持双程测距和 TDOA 定位
- (12) 主机接口为 SPI

### 1.6.2 射频电路工作流程

本设计选择 DW3000 作为射频电路的核心芯片，是因为 DW3000 可完成短距离射频信号的发送和接收，易于集成，无需额外射频设计。再配以信号放大电路模块蓝牙 NRF52832 芯片为核心的底板，可实现更远距离，更高精度的定位，DW3000 芯片内部电路如图 3-3 所示。

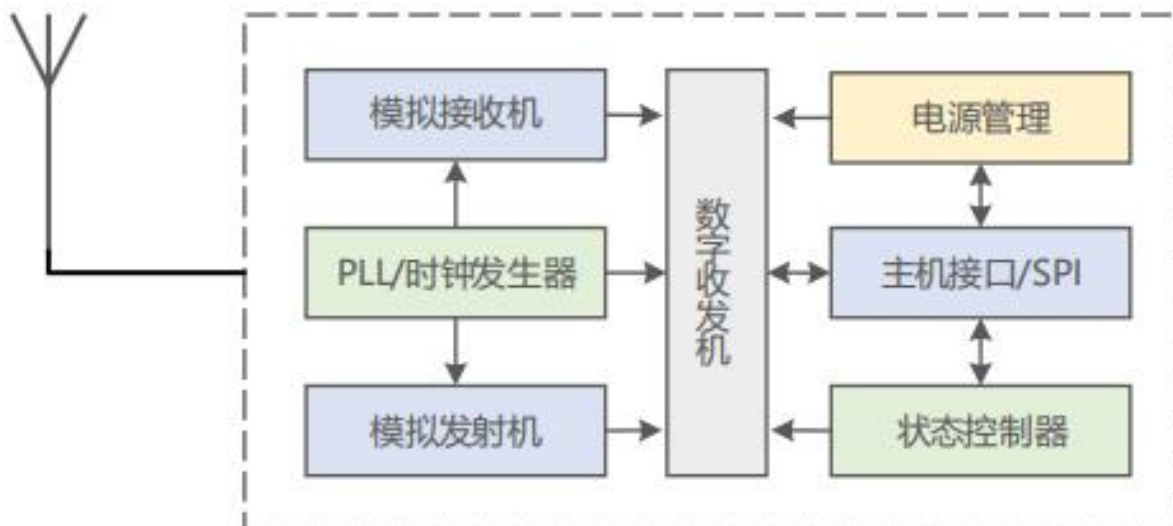


图 3-3 DW3000 内部电路框图

PLL 时钟发生器通过振荡器中的锁相环路为模拟发射机和模拟接收机提供稳定的高频时钟信号后，模拟接收器可以从中选出 UWB 的频率成分以及输出电磁波信号，由数字接收机接收信号并进行模数转换，再通过与主机接口相连的 NRF 芯片，驱动整个放大电路模块，将信号进行放大，从而提升测距范围。

## 1.7 放大电路

### 1.7.1 功率放大器 (PA)

放大模块采用 HMC326MS8G 为功率放大器 (PA)，如图 3-4 所示，引脚功能见表 3-1 所示，该放大器采用低成本、表面贴装且裸露基底的 8 引脚封装，旨在改善 RF 和热性能，同时它具有以下特性：

- 1) 饱和输出功率：+26 dBm；
- 2) 40% PAE；
- 3) 输出 IP3：+36 dBm；
- 4) 高增益：21 dB；
- 5)  $V_s$ ：+5V；
- 6) 超小型封装：MSOP8G。

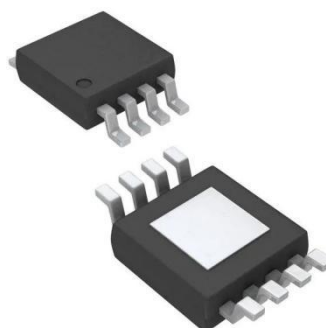


图 3-4 功率放大器 HMC326MS8G 芯片图

表 3-1 功率放大器引脚功能表

引脚序号	功能	引脚序号	功能
1 VPD	电源控制使能端	5 GND	电源端
2 GND	接地端	6 RFOUT	信号输出端
3 RFIN	信号输入端	7 GND	接地端
4 GND	接地端	8 VCC	电源端

### 1.7.2 低噪放大器 (LNA)

作品采用 BGB707L7ESD 为低噪放大器 (LNA) 如图 3-5 所示, 它是一款具有集成 ESD 保护功能 (射频输入端 3kV) 的宽带低功耗 (I<sub>cc</sub> 仅 2.1mA) 通用硅锗碳 MMIC 低噪放大器, 引脚功能如表 3-2 所示, 有以下特性:

- 1) 高增益: 27dB
- 2) 噪音系数: 0.4dB
- 3) 工作温度最大值: 150°C
- 4) 工作电压: 1.8 V 至 4.0 V
- 5) 工作电流: 2.1 mA 至 25 mA



图 3-5 BGB707L7ESD 芯片图

表 3-2 BGB707L7ESD 引脚功能表

引脚序号	功能	引脚序号	功能
1 VCC	电源控制使能端	4 RFOUT	信号输出端
2 VBias	电压调节端	5 VCtrl	使能控制端
3 RFIN	信号输入端	6 Adj	接地端
7 GND	接地端		

### 1.7.3 PA 与 LNA 的配合使用

当定位芯片 DW3000 发出信号的过程中, 调制振荡电路产生的射频信号功率很小, 需要经过一系列的放大, 才能馈送到天线上辐射出去。因此, 为了获得足够大的射频输出功率, 模块采用 HMC326MS8G 功率放大器。

而当不使用放大器时, 可以使用关断功能来节省流耗, 内部电路设计如图 3-6 所示, 其匹配

功能经过优化，可提供大于 40% 的 PAE。

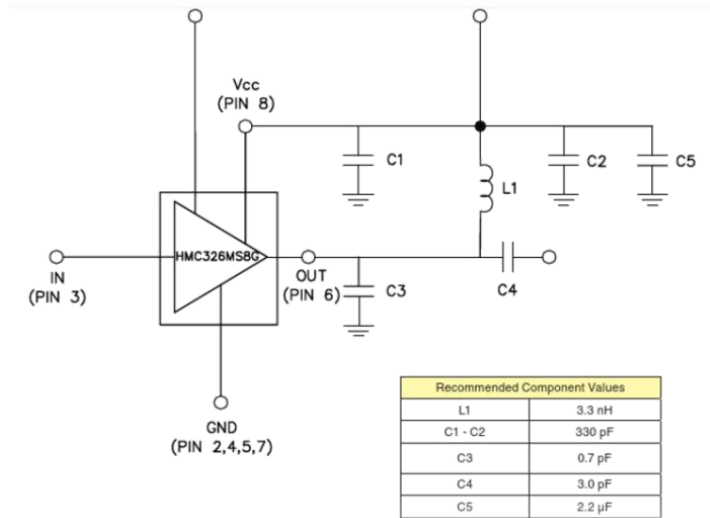


图 3-6 功率放大器内部电路图

经过功率放大器第一重放大之后，再由低噪放大器（LNA）进行信号的放大，来实现设备之间的无线连接和信息交换。

LNA 的特性是所有引脚集成 ESD，保护射频输入与接地保护，集成有源偏置电路，电路工作点比较稳定，并且芯片工作电压为 1.8V~4.0V，功耗低，提高模组的续航能力以及稳定性，并且外部电阻能够调节电流，到了 2.1mA~2.5mA 时，会自动断电保护，增加了电路的安全性，芯片内部电路如图 3-7 所示。

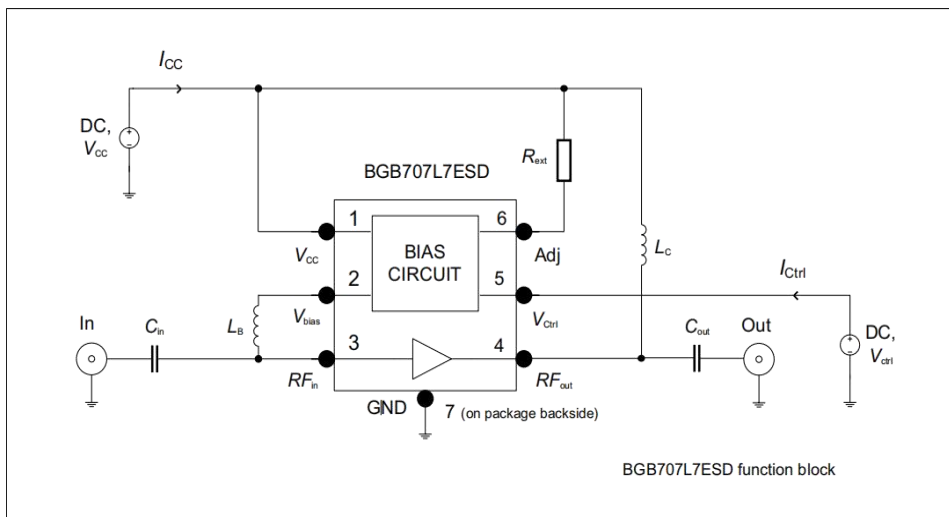


图 3-7 低噪声放大器内部电路图

DW3000 采用 GPIO5/6 来控制 PA 与 LNA，如图 3-8 功率放大器与低噪放大器工作。



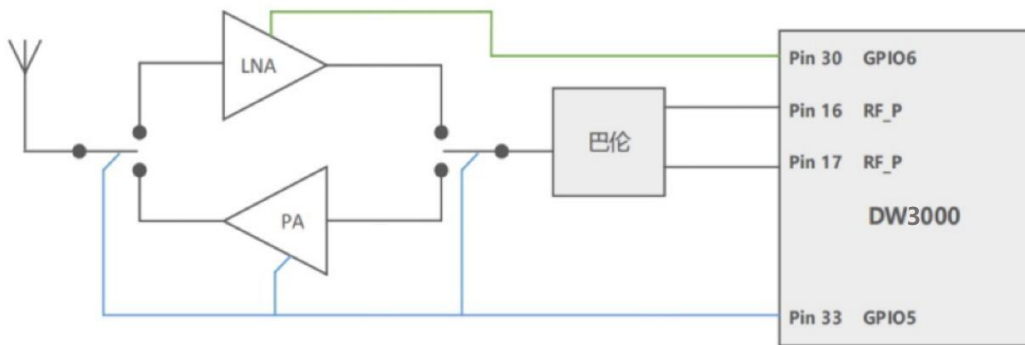


图 3-8 功率放大器与低噪放大器工作原理示意图

DW3000 发出的信号，经过 PA 和 LNA 的功率放大和低噪放大，其信号强度得到数量级的放大。根据示波器显示和公式计算，最终得出：原先-30dB 的初始信号，最终可放大到-20dB，极大地加强了信号的穿透性和传输距离。如图 3-9PA 和 LNA 共同放大信号

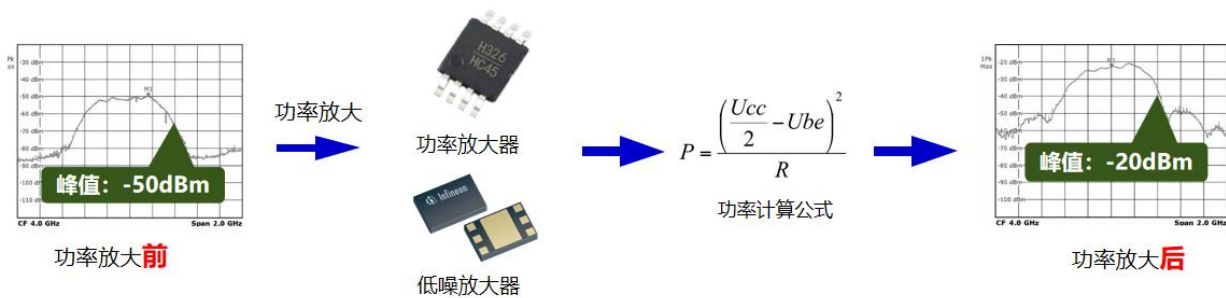


图 3-9 PA 和 LNA 共同放大信号

#### 1.7.4 反相放大器

因标签发送的信号，与基站接收的信号相位相反，所以在电路中添加一个施密特反相器，如图 3-10 所示为模块采用的 SN74LVC3G14DCTR 触发器，如表 3-3 所示为其引脚功能图。

- 1) 支持 5 伏 VCC，输入端可接受 5.5V 的电压
- 2) 在 VCC=3.3V 电压下，芯片启动时间 5.4ns
- 3) 低功耗，芯片最大电流 10uA
- 4) 在 VCC=3.3V 电压下可驱动 ±24mA 负载
- 5) 芯片有部分断电模式和后部电路驱动保护

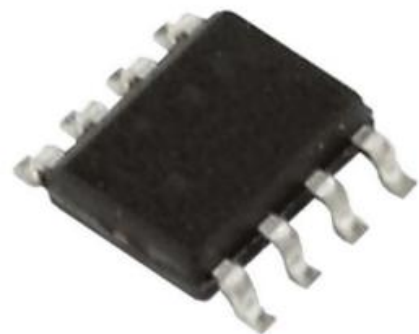


表 3-3 反相放大器引脚功能表

芯片管脚		功能	芯片管脚		功能
1	1A	第一输入端	5	2Y	第二输出端
2	3Y	第三输入端	6	3A	第三输出端
3	2A	第二输入端	7	1Y	第一输出端
4	GND	接地端	8	VCC	电源端

### 1.7.5 反相工作原理

作品中采用了 SN74LVC3G14DCTR 触发器，其反向电压传输特性如图 3-11，整形特性如图 3-12 所示，它能将定位标签缓慢输入的信号整形成边沿陡峭的矩形脉冲，并进行信号反相输出，形成基站所能接收的相位相反信号，使两者之间进行正常通讯。

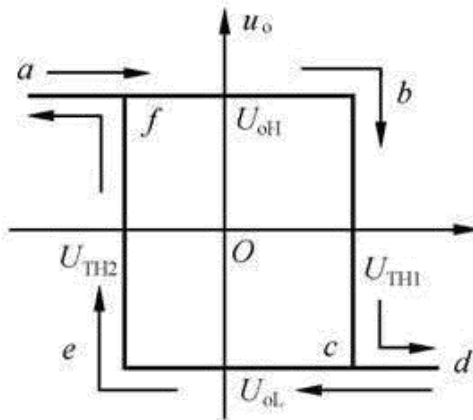


图 3-11 反向电压传输特性

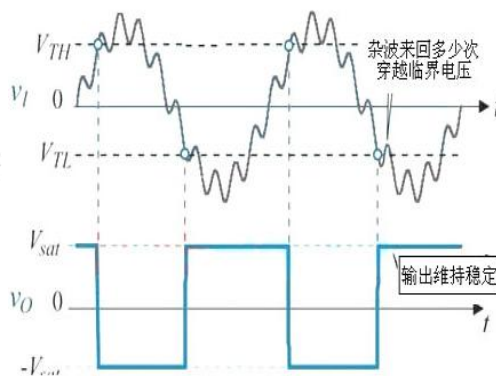


图 3-12 波形变换与整形

同时施密特触发器可以利用回差电压来提高电路的抗干扰能力，从而达到最终的输出要求，使基站能够准确接收并识别，施密特触发器原理图如图 3-13 所示：

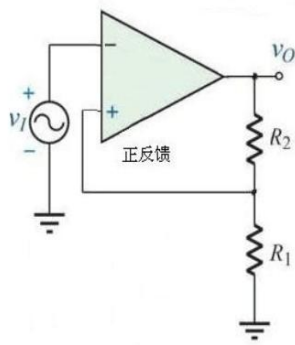


图 3-13 施密特触发器原理图

$$U_0 = \pm V_{sat} \quad (3.14)$$

输出点经由 R1、R2 分压后反馈到非反相输入端：

$$V_+ = \beta U_0 \quad (3.15)$$

其中反馈系数：

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (3.16)$$

当  $U_0$  为正饱和状态 ( $+V_{sat}$ ) 时，由正反馈得上临界电压，将 (3.15) ~ (3.16) 代入公式得：

$$V_{Th} = \beta U_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times (+V_{sat}) = \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat} \quad (3.17)$$

当  $U_0$  为负饱和状态 ( $-V_{sat}$ ) 时，由正反馈得下临界电压，将 (3.15) ~ (3.16) 代入公式得：

$$V_{Tl} = \beta U_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times (-V_{sat}) = -\frac{R_1}{R_1 + R_2} V_{sat} \quad (3.18)$$

$V_{Th}$  与  $V_{Tl}$  之间的电压差为滞后电压：

$$V_H = V_{Th} - V_{Tl} = 2\beta V_{sat} = \frac{2R_1}{R_1 + R_2} V_{sat} \quad (3.19)$$

### 1.7.6 晶振组成及其作用

晶振电路由无源晶振、电容组成，如图 3-14。该电路包括了一个板上 38.4MHz 的参考

晶振，通过把该晶振嵌入到电路中，可以把初始化频率误差降到大约百万分之二。

同时可以降低模块之间的载波频率偏移，从而提高接收机灵敏度，DWM3000 模块在生产时通过校准减少初始频率误差。通常，生产时进行的校准能够将频率偏移调整到小于 2ppm。

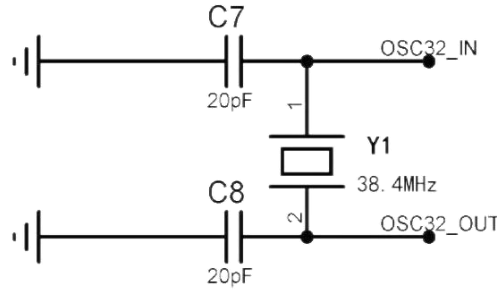


图 3-14 无源晶振电路

### 1.8 电源电路

电源电路主要是降压模块，本设计采用 LM2596S 可调式开关稳压芯片如图 3-15 所示，它内含固定频率振荡器（150KHz）和基准稳压器（1.23V），输出电压具有很好的线性和负载调节特性，能够输出 3A 的驱动电流，同时具有完善的保护电路、电流限制、热关断电路。

模块电路如图 3-16 所示，该模块支持输入电压为直流 3V 至 40V，输出电压为直流 1.5V 至 35V 电压连续可调，最大输出电流为 3A。在降压模块电路中，C3、C4、CF 为贴片电容起高频滤波作用，C2、C9 为贴片铝电解电容滤波起低频滤波作用，当输入输出电压中出现杂波时，杂波成分会通过滤波电容流入到共地端，滤除输入输出电压中的杂波脉冲，能够减小杂波对电子元件的影响。

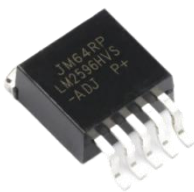


图 3-15 LM2596S-ADJ 芯片图

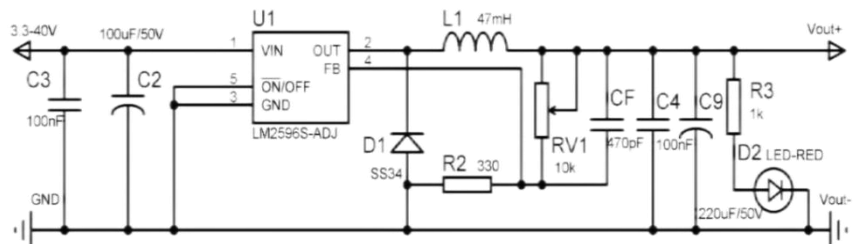


图 3-16 LM2596S DC-DC 可调降压模块电路

表 3-4 LM2596S-ADJ 芯片的降压原理

LM2596S-ADJ 芯片	肖特基二极管 SS34	电感 L1	输出电压
内部开关管导通	反偏	储能	$U_0 = U_I - U_L$ ( $U_I$ 为输入电压, $U_0$ 为

			输出电压, $U_L$ 为正向电压)
内部开关管关断	导通	供能	$U_O = U_{REF} * (1 + R_2 / R_{V1})$ (式中 $U_{REF}$ 为芯片内部基准电压)

锂电池管理电路，即过充电保护和过放电保护，内部电路图如图 3-17 所示。

过充电保护：当 U1 检测到电池电压达到过充保护门限，CO 管脚输出低电平，MOS 管开关 2 由导通转为关闭，充电回路关断，充电器无法再对电池充电，从而实现过充保护。

过放电保护：在电池放电过程中，当 U1 检测到电池电压低于过放保护门限时，DO 脚由高电平转变为低电平，MOS 管开关 1 关闭，使电池无法再放电；过放电保护状态下电池电压不能再降低，要求保护电路的电流极小，控制电路进入低功耗。

过流保护：正常情况下，电池对负载进行放电，电流经过两个串联的 MOS 管开关，VM 管脚检测到两个 MOS 管的压降电压为 U。若负载因某种原因导致 U 异常，使回路电流增大，当 U 大于一定值时，DO 管脚由高电压转变为低电压，MOS 管开关 1 关闭，从而使放电回路电流为零，达到过电流保护作用。

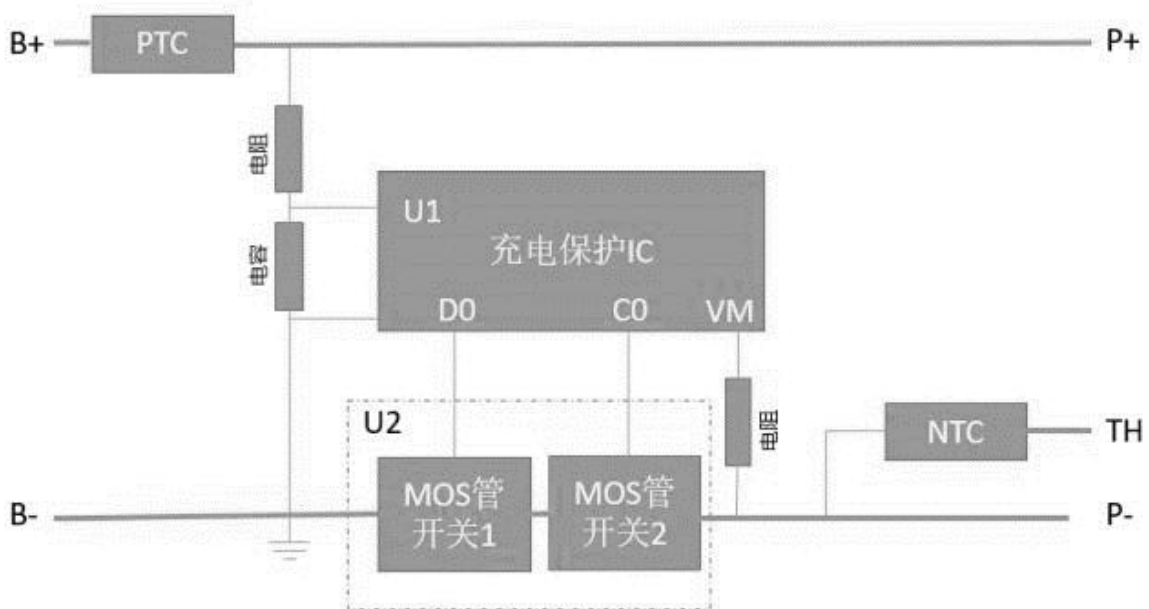


图 3-17 锂电池管理内部电路图

## 1.9 加速度传感器

加速度传感器是一种能够测量加速度的传感器，在设计中，加入了 LIS3DH 位移传感器，

如图 3-18 所示超低功耗高性能三轴线性加速度计，引脚分布如图 3-19 所示，并且它有以下六个优点：

- 1) 具有数字 I<sup>2</sup>C/SPI 串行接口标准输出；
- 2) 用户可选的±2g/±4g/±8g/±16g 满量程；
- 3) 能够以 1 Hz 至 5.3 kHz 的输出数据速率测量加速度；
- 4) 小型薄塑料焊盘栅格阵列封装（LGA）；
- 5) 可以配置为通过检测两个独立的惯性唤醒/自由落体事件以及设备本身的位置来生成中断信号；
- 6) -40° C 至+85° C 的扩展温度范围内工作。



图 3-18 LIS3DH 芯片图

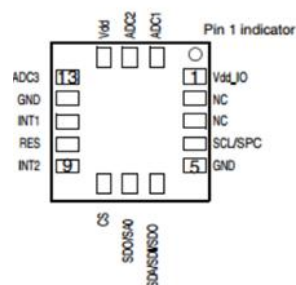


图 3-19 LIS3DH 芯片引脚分布图

三轴加速度传感器的好处就是在预先不知道物体运动方向的情况下，应用三维加速度传感器来检测加速度信号。当工牌不工作时，可进入休眠状态，为工牌提升更长的续航能力。LIS3DH 是三轴加速度传感器，因此其能检测 X、Y、Z 的加速度数据，如图 3-20 所示：

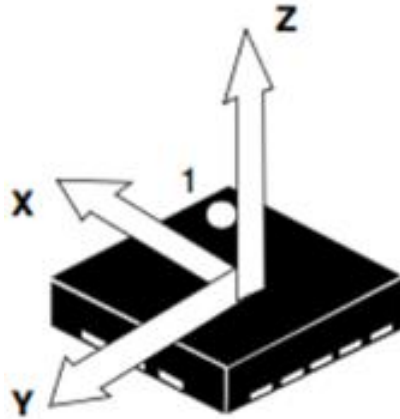


图 3-20 LIS3DH 是三轴加速度模型

$R_x$ 、 $R_y$ 、 $R_z$  就是用公式（加速度数据 = 加速度轴原始数据/加速度灵敏度）得出的各轴的加速度数据。R 也可以通过方程（3.20）导出

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2 + R_z^2} \quad (3.20)$$

最后通过下面的公式（3.21）~（3.23）

$$A_{xr} = \arccos\left(\frac{R_x}{R}\right) \quad (3.21)$$

$$A_{yr} = \arccos\left(\frac{R_y}{R}\right) \quad (3.22)$$

$$A_{zr} = \arccos\left(\frac{R_z}{R}\right) \quad (3.23)$$

得到 X, Y, Z 轴与力矢量 R 之间的角度 ( $A_{xr}$ ,  $A_{yr}$ ,  $A_{zr}$ )。

## 1.10 系统控制模块

### 1.10.1 低功耗蓝牙 SOC

本系统将蓝牙 Nordic 52832 芯片作为系统核心控制模块。NRF52832 是 Semiconductor 公司发布布采用微型封装尺寸的高性能单芯片低功耗蓝牙 SoC 器件，如图 3-21 其性能如下所示：

- (1) 支持多种协议：BLE、2.4G、ANT 和 NFC 等
- (2) 在低功耗蓝牙模式下拥有 -96 dBm 灵敏度
- (3) 其内核主频 ARM Cortex M4F32 位频率可达 64MHz



- (4) 在低功耗蓝牙模式下支持数据传输速率：1 Mbps，2 Mbps
- (5) RX 和 TX 的峰值电流为 5.5mA
- (6) 带可编程增益的 8 个 12 位的 ADC 通道
- (7) 自带温度传感器
- (8) 拥有 32 个 GPIO
- (9) 主机接口为 SPI
- (10) 支持 BLE、ANT、私有 2.46 多种协议 -2 组带主从模式的 12C 接口
- (11) 支持电压 1.7~3.6V -可编程外设接口(PPI)
- (12) 全自动切换 LDO 和 DC/DC 稳压模式 -正交解码器(QDEC)



图 3-21 NRF52832 芯片图

### 1.10.2 蓝牙 NRF 运行流程

在 NRF52832 要与 DW3000 定位芯片实现通信之前，**必须事先配置好 SPI 通信**。DW3000 定位芯片将 UWB 定位信号通过配置好的 SPI 接口传送给 NRF 芯片，由蓝牙 NRF 将此信号通过其内部电路送至前端射频电路。由前端射频电路负责将信号进行进一步的处理和放大使原本标签的信号覆盖范围进一步扩大，基站在更远的距离都能接收到标签发出的信号。实现更远的距离的定位。

### 1.11 上位机软件介绍

本系统的 PC 端上位机使用 QT 5.7.0 MinGM 上位机软件开发，编写语言为 C++，PC 端上位机效果图如图 3-22 所示。在 UWB 系统中主要实现以下功能：

- 1) 与 UWB 模块的虚拟串口 Virtual COM Port 建立连接；
- 2) 读取来自 UWB 模块的 TOF report message；
- 3) 基站列表：在该列表可以设置基站的实际摆放位置；

- 4) 标签列表：该列表可以显示标签距离基站的距离、以及标签的位置 (XYZ 坐标)；
- 5) 地图显示，支持自定义导入一张 PNG 格式的地图，能实现缩放与坐标微调；
- 6) 其他参数设置。

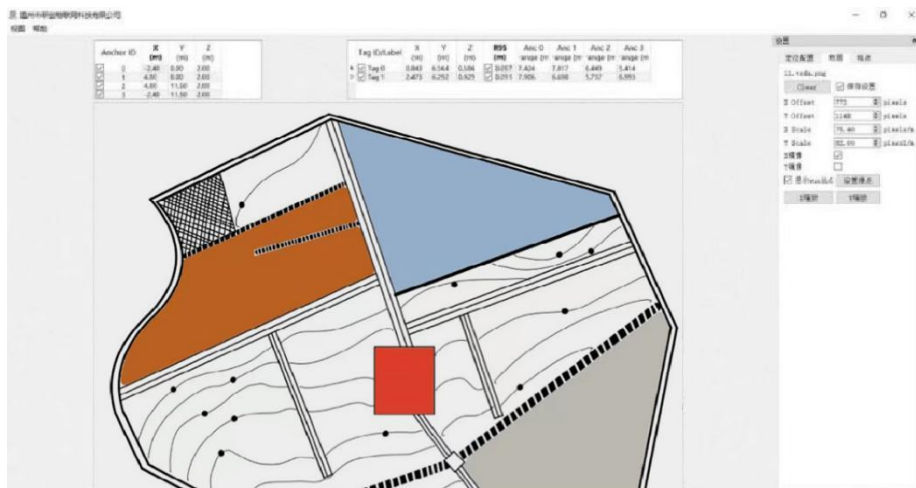


图 3-22 PC 端上位机效果图

## 1.12 定位系统 Graphics

- 1) Tag Table 任务栏包含 ID、测距信息、定位坐标，如图 3-23 所示。

Tag 标签双击可修改      R95 统计学变量

	Tag ID/Label	X (m)	Y (m)	Z (m)	R95 (m)	Anc 0 range (m)	Anc 1 range (m)	Anc 2 range (m)	Anc 3 range (m)
1	<input type="checkbox"/> Tag 6	3.846	2.628	2.272	<input type="checkbox"/>	4.736	3.484	4.169	

是否显示 Tag Table      Tag 解算的位置      来自模块的测距值 (标签-基站距离)

图 3-23 Tag Table 任务栏

- 2) Anchor Tables 任务栏包含 ID、基站的位置信息，如图 3-24 所示。

	Anchor ID	X (m)	Y (m)	Z (m)
<input checked="" type="checkbox"/>	0	0.00	0.00	3.00
<input checked="" type="checkbox"/>	1	6.00	0.00	3.00
<input checked="" type="checkbox"/>	2	0.00	4.00	3.00
<input type="checkbox"/>	3	5.00	5.00	3.00

图 3-24 Anchor Tables 任务栏

Floor Plan tab 任务栏包含导入地图、地图坐标信息、比例值，如表 3- 5 所示。

表 3- 5 Floor Plan tab 任务栏

名字	描述
Open	打开一张地图，并导入软件
X offset	在 X 方向上以像素为单位，平移地图
Y offset	在 Y 方向上以像素为单位，平移地图
X scale	在 X 方向上以像素为单位，缩放地图
Y scale	在 Y 方向上以像素为单位，缩放地图
Flip X	在 X 轴为对称轴，进行镜像
Flip Y	在 Y 轴为对称轴，进行镜像
show	是否显示原点
Set Origin	设置原点
X Scale button	点击这个按钮会产生一个小工具，用测量地图上距离，输入实际距离，设置 X 缩放值
Y Scale button	点击这个按钮会产生一个小工具，用测量地图上距离，输入实际距离，设置 Y 缩放值

### 1.13 核心算法

由无线信号强度渐变模型可以发现，当定位终端离基站距离越远时，接收到的 RSSI 值变化会越来越小，这就会导致距离越远，基站与定位终端的距离误差越大，相应的造成定位误差变大。由此，当多个基站同时工作时，本团队决定采用自主研发的三边定位算法，如图 3-25，取在 X、Y、Z 轴方向上最近的三个基站，对人员的位置进行更精确的三边计算，这避免了由

于定位终端距离基站过远，而导致定位误差的扩大的问题。



图 3-25 Trilateration 三边定位算法样式

### 1.13.1 三边定位原理

三边测量法的原理如图 3-26 所示，以三个节点 A、B、C 为圆心作圆，坐标分别为  $(x_a, y_a)$ ， $(x_b, y_b)$ ， $(x_c, y_c)$ ，这三个圆周相交于一点 D，交点 D 即为移动节点，A、B、C 即为参考节点，A、B、C 与交点 D 的距离分别为  $d_a$ ， $d_b$ ， $d_c$ 。假设交点 D 的坐标为  $(x, y)$ 。

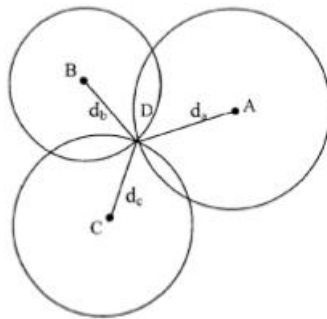


图 3-26 三边测量法的原理

$$\begin{cases} \sqrt{(x-x_a)^2+(y-y_a)^2}=d_a \\ \sqrt{(x-x_b)^2+(y-y_b)^2}=d_b \\ \sqrt{(x-x_c)^2+(y-y_c)^2}=d_c \end{cases} \quad (3.24)$$

由公式 (3.24) 可以得到交点 D 得坐标：

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2(x_a-x_c) & 2(y_a-y_c) \\ 2(x_b-x_c) & 2(y_b-y_c) \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} x_a^2-x_c^2+y_a^2-y_c^2-d_a^2 \\ x_b^2-x_c^2+y_b^2-y_c^2-d_b^2 \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

三边测量法的缺陷是：由于各个节点的硬件和功耗不尽相同，所测出的距离不可能是理

想值，从而导致上面的三个圆未必刚好交于一点，在实际中，肯定是相交于一个小区域，因此利用此方法计算出来的(X, Y)坐标值存在一定的误差。这样就需要通过一定的算法来估计一个相对理想的位置，作为当前移动节点坐标的最优解。

### 1.13.2 实现过程

在实际测量中，往往由于测量距离的误差，使三个圆并不交于一点，而相交于一块区域，如上图所示。在此种情况下，本作品采用最小二乘法或者三角形质心算法。最小二乘法计算过程如下：

针对 n 个基站 ( $n \geq 3$ )，已知 n 个基站的坐标分别为  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ ，未知终端坐标为  $(x, y)$ ，由以下步骤求解：

建立信标节点与未知节点距离方程组：

$$\begin{cases} (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 = d_1^2 \\ \vdots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 = d_n^2 \end{cases} \quad (3.26)$$

公式 (3.26) 为非线性方程组，用方程组中前 n-1 个方程减去第 n 个方程后，得到线性化的方程：

$$Ax = b \quad (3.27)$$

其中：

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_1 - x_n) & 2(y_1 - y_n) \\ \vdots & \vdots \\ 2(x_{n-1} - x_n) & 2(y_{n-1} - y_n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} x_1^2 - x_n^2 + y_1^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_1^2 \\ \vdots \\ x_{n-1}^2 - x_n^2 + y_{n-1}^2 - y_n^2 + d_n^2 - d_{n-1}^2 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

用最小二乘法求解上边方程得：

$$x = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (3.29)$$

解得的 x 便是未知终端的坐标计算值。

### 1.13.3 三角形质心算法

可以由无线信号强度渐变模型可以发现，当定位终端离基站距离越远时，接收到的 RSSI 值变化会越来越小，这就会导致距离越远，基站与定位终端的距离误差越大，相应的造成定

位误差变大。由此，**本作品采取加权的思想**，将距离小的（精确度高）赋予较大的权值，距离大的（精确度低）赋予较小的权值。

首先将基站分组，对收集到的所有基站，经由 ID 分为组 n 后，求组合数  $C(n, 3)$ ，并对每组分别进行三边定位。然后根据距离越大定位误差越大的原则，赋以权值(为每个基站到定位终端测得的距离)。最后，由每个组合得到的结果加权得到最终的定位结果。

计算过程如下：

已知：  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$

已知：未知点  $(x_0, y_0)$  到三点距离  $d_1, d_2, d_3$

以  $d_1, d_2, d_3$  为半径作三个圆，根据毕达哥拉斯定理，得出交点即未知点的位置计算公式：

$$(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2 = d_1^2 \quad (3.30)$$

$$(x_2 - x_0)^2 + (y_2 - y_0)^2 = d_2^2 \quad (3.31)$$

$$(x_3 - x_0)^2 + (y_3 - y_0)^2 = d_3^2 \quad (3.32)$$

解法推导：

设未知点位置为  $(x, y)$ ，令其中的第一个球形 P1 的球心坐标为  $(0, 0)$ ，P2 处于相同纵坐标，球心坐标为  $(d, 0)$ ，P3 球心坐标为  $(i, j)$ ，三个球形半径分别为  $r_1, r_2, r_3$ ， $z$  为三球形相交点与水平面高度。则有：

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad (3.33)$$

$$r_2^2 = (x-d)^2 + y^2 + z^2 \quad (3.34)$$

$$r_3^2 = (x-i)^2 + (y-j)^2 + z^2 \quad (3.35)$$

当  $z = 0$  时，即为三个圆在水平面上相交为一点，首先解出  $x$ ：

$$x = \frac{(r_1^2 - r_2^2 + d^2)}{2d} \quad (3.36)$$

将公式 (3.34) 变形，将公式 (3.33) 的  $z^2$  代入公式 (3.34)，再代入公式 (3.35) 得到  $y$  的计算公式：

$$y = \frac{(r_1^2 - r_2^2 - x^2 + (x-i)^2 + j^2)}{2j} \quad (3.37)$$

#### 1.13.4 卡尔曼滤波 (Kalman filtering)

卡尔曼滤波 (Kalman filtering) 是一种线性系统状态方程，通过系统输入输出观测数据，对系统状态进行最优估计的算法。该系统可用一个线性微分方程来描述。

$$X(k) = AK(k-1) + BU(k) + W(k) \quad (3.38)$$

$$Z(k) = HX(k) + V(k) \quad (3.39)$$

数据滤波是去除噪声还原真实数据的一种数据处理技术，Kalman 滤波在测量方差已知的情况下能够从一系列存在测量噪声的数据中，估计动态系统的状态。通过卡尔曼滤波，测距的数据误差，能从±10cm，降低到±5cm左右。滤波效果图见图 3-27。

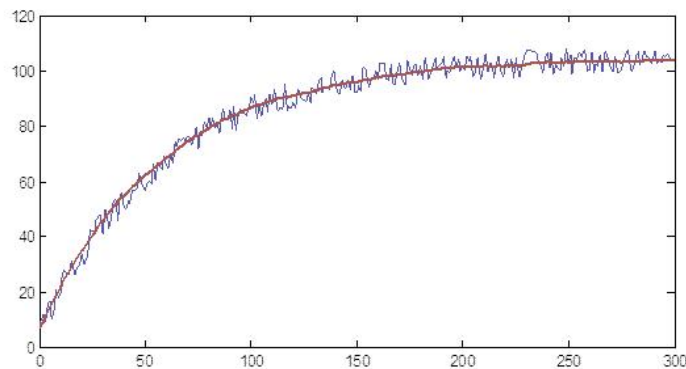


图 3-27 卡尔曼滤波效果图

#### 1.13.5 数据标定方法

一般情况下，校准只需要在现场进行一次，通过 1 个 Anchor 和 1 个 Tag 的测距，得到修正系数，并不需要每个 Anchor 和 Tag 都进行标定。利用 Microsoft 2016 Excel 软件，进行数据拟合，并生成拟合公式。



## 系统优势

### 1.14 作品创新点

#### 1.14.1 定位性能突破

##### (1) 将精度误差从 10 厘米减小到 7 厘米

本作品采用了 TDQA(Time Difference of Arrival)技术，该技术不需要标签与定位基站之间进行反复通信，只需要定位标签发射或只接收 UWB 信号，故能做到更细的定位动态、更大的定位容量和更精准的测距精度。

如图图 4- 1 所示通过 TDQA 算法（标签与基站的单向通信时间  $\times$  电磁波速度 = 标签与基站的距离）获得的基站与标签距离用于“三边定位算法”：在所有基站时间同步的前提下，根据被测标签 A 到各个已知基站 P1、P2、P3 的传输时间差，算出标签 A 与各个基站之间的距离。再通过卡尔曼滤波来抑制电路各级噪音，形成可以用线性微分方程来计算的平滑曲线，进一步提升精度。

而 TDQA 技术的难点在于如何提高系统的鲁棒性，即做到所有基站时间的同步。而本团队经过上万组的数据测量和硬件软件的升级，最终达到了纳秒级的信号传输速率和基站接收信号的时间同步最大化，同时增大了基站的定位容量。

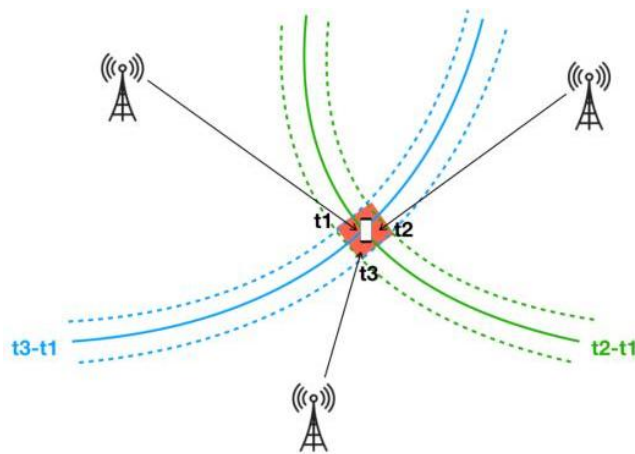


图 4- 1 TDQA 定位算法示意图

##### (2) 将测距距离从 800 米提升到 1600 米

射频芯片 DW3000 发出的信号，需要经过一系列的放大后，反馈到天线再辐射出去。为了获得足够大的射频输出功率，本团队在系统中实验测试、筛选了多款功率放大器、低噪放大器。

在前端射频放大电路中采用功率放大器（HMC326MS8G），经过第一级信号不失真的功率放大之后，再由通用硅锗碳 MMIC 低噪放大器（BGB707L7ESD）进行第二级信号放大，同时抑制电路中的的噪声减少对放大信号的影响。经过两级放大后，信号功率从-50dB 提升至-20dB，测距范围从 800 米提升至 1600 米，如图 4- 2。

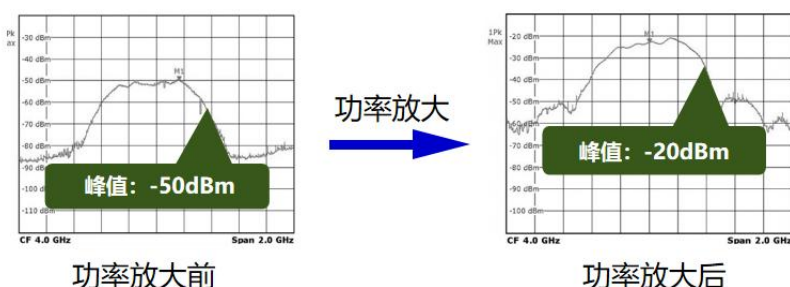


图 4- 2 信号经由两级功率放大后

## 1.14.2 系统实现多功能

### ● 人员轨迹记录

为规范人员区域管理制度，在人员定位上位机的人员管理一栏中勾选或搜索多个人员工牌序列号，得到该人员实时运动轨迹以及 7 天内历史轨迹。

### ● 智能化作业管理

如图 4-3，在地下作业中，每位工人都有指定的工作岗位，通过人员定位上位机与 Excel 的共同作业，实现对人员作业位置的规范，当人员坐标超出其作业范围时，上位机软件会反馈此信息，实现智能化的作业管理。

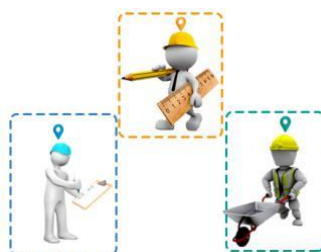


图 4-3 智能化作业管理

### ● 限制区域警告

如图 4- 4，为避免人员进入危险或未探测区域，利用电子围栏模式在人员定位上位机上划分红色限制区域，当人员靠近危险区域时会发出警报进行预警。



图 4- 4 限制区域警告

### 人员考勤智能化

如图 4- 5，基于作业环境的智能化人员进出工作环境的记录，本系统实现了智能考勤功能。当工人进入隧道并作业时，上位机会自动记录人员信息并通过对比出勤时间标记为是否准时出勤；当工作人员出入隧道后，上位机软件会再次记录人员工号，同时保持对仍在隧道内作业的人员记录。

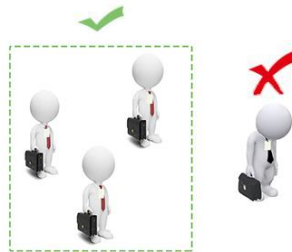


图 4- 5 人员考勤智能化

### ● 区域人员密度管理

如图 4- 6，为提高工作效率，增加经济效益。在人员定位上位机上可以查看每一块区域的人员密度及分布情况，在作业时指挥人员在系统中发出提示与现场的工作人员沟通协调可以进行合理人员的调配，提高人员的工作效率。



图 4- 6 区域人员密度管理

### ● 最终位置锁定

为应对发生事故，人员受困于地底的问题，人员定位上位机会将人员位置信息停留在没有接收到最新数据的前一刻，也就是发生事故时被困人员所在位置。

### ● 非正常位移报警

如图 4-7，为争取发生意外受伤时第一时间抢救，人员定位上位机会在检测到人员在极短的时间内发生长距离位移时，发出警告，显示工牌序列号和位置，例如：高位面跌落、受运货车撞击等。



图 4-7 非正常位移报警

### ● 事故报警

如图 4-8，为争取发生意外受伤时第一时间抢救，人员定位上位机会在发生巨大事故时发送警报，例如：工厂管理层、企业高管、政府预警部门

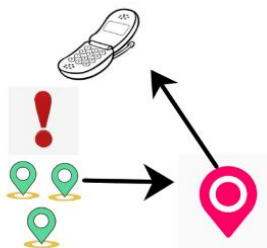


图 4-8 重大事故报警

## 1.15 系统优势

### 1.15.1 超低的系统运行功耗

本作品拥有 6 个月的续航能力，比市面上的普通定位产品延长了一倍续航时间。“数联定位”的工牌只在发送信号瞬间消耗功率较大，之后便进入休眠状态，在 1 秒中占比只有 1%，因此平均消耗功率极低。在项目初期，作品中使用 STM32 单片机作为系统控制模块，而现在，本作品将原先 STM32 芯片（F105/F103）更换成蓝牙芯片（NRF52832），一种低功耗的 MCU，提高信息传输速率的同时进一步降低功耗，如图 4-9 所示。此外，本系统增加了位移传感器且优化了算法，当检测到定位工牌长期不移动时，发出提示声并进入休眠状态，从而减少耗电量。

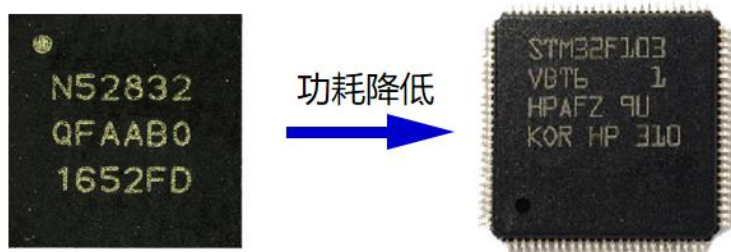


图 4-9 系统功耗降低

### 1.15.2 定位技术功耗低

UWB 定位技术在功率谱密度上远比窄带和宽带小，然而其高效的传输频率，同时 UWB 系统使用间歇的脉冲来发送数据，脉冲持续时间很短，一般在  $0.20\text{ns}\sim 1.5\text{ns}$  之间，有很低的占空因数，系统耗电可以做到很低，在高速通信时系统的耗电量仅为几百  $\mu\text{W}\sim$  几十  $\text{mW}$ 。民用的 UWB 设备功率一般是传统移动电话所需功率的  $1/100$  左右，是蓝牙设备所需功率的  $1/20$  左右。因此，UWB 设备在电池寿命和电磁辐射上，相对于传统无线设备有着很大的优越性。在保证定位信息的稳定发送之外，同时降低了所需功耗。

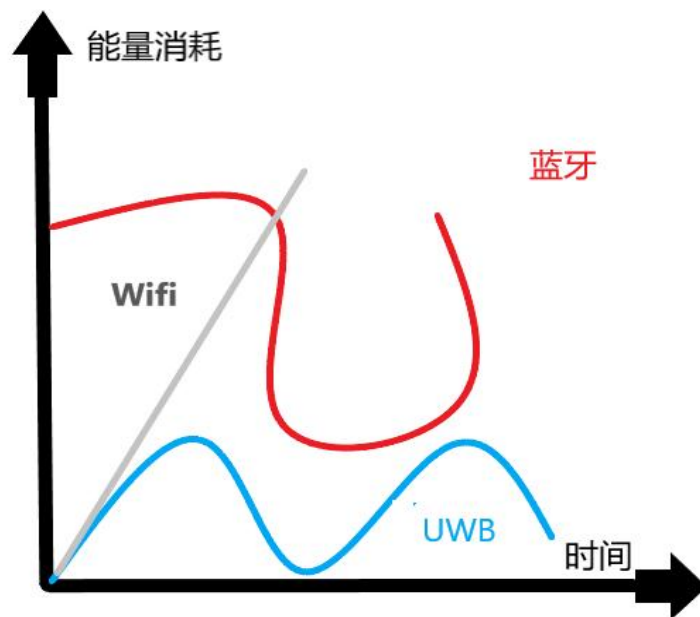


图 4-10 UWB、WiFi、蓝牙能量消耗对比

## 应用方向

### 1.16 技术应用

#### 1.16.1 技术要求

近两年关于人员定位的系统或解决方案层出不穷，涉及 WIFI、UWB、蓝牙等各种技术，电厂、化工厂、监狱、医院、隧道等各类场景。室内定位市场从一片蓝海也变成了红海，在形形色色的人员定位解决方案中，然而最关键的永远只有两点：安全与管理。

通俗的讲有以下三点：

1、建设智能化、数字化、人性化、安全化的智慧拓展基地现实需求；企业要想高大上的“智慧”，就需要一些高大上且实用的技术，人员定位技术凭借接地气、通俗易懂的优点完美适应这个需求。

2、提升管理水平、拓展企业安防级别，改善企业形象。提高对员工管理的响应速度，可通过对保安、外来人员的定位和越界报警，提供更优质的服务；

3、通过安保监控终端可以对员工行走轨迹、员工越界、突发事件等进行应急指挥。

#### 1.16.2 细分市场的应用领域

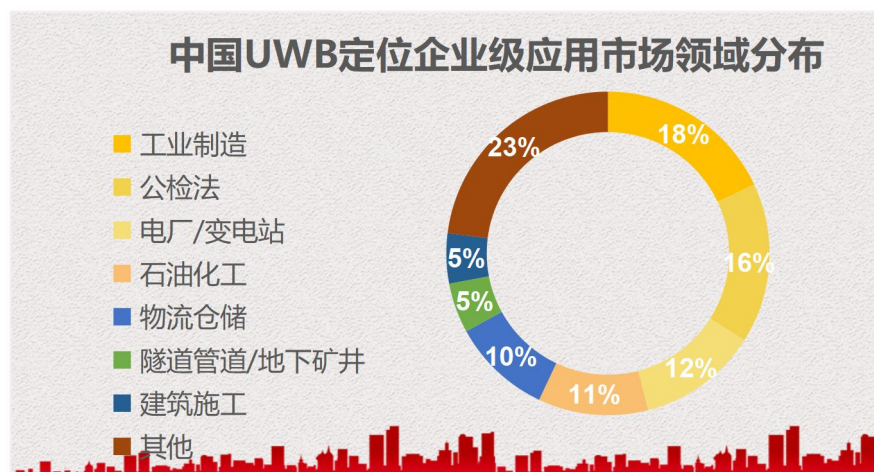


图 5-1 中国 UWB 定位企业级应用市场领域分布

数据来源：《2020-2025 年 UWB 定位行业风险投资态势及投融资策略指引报告》

如图 5-1，经过调研之后，本团队总结 UWB 定位技术最主要的几个应用领域：

**公检法：**在监狱、派出所、戒毒所等特殊场合中，需要对人员的轨迹进行精确的管理，不仅仅是防止和限制人员的逃跑，还能达到司法透明化的目的。这一领域因为有政策层面的



要求，所以目前是 UWB 技术的一个重要开拓市场。

**电厂/变电站：**这类场合属于危险系数比较高的场合，因此，需要对其中的生产人员进行轨迹监管，以预防人员进入危险环境并且在险情中可以第一时间进行有效的营救。

**工业制造：**当前在“工业 4.0”、“中国制造 2025”等概念的加持下，越来越多的企业通过先进的技术手段以提升生产效率，或者达到柔性化生产的目的，而 UWB 技术就可以在离散制造过程中对人员与物料的轨迹进行实施监管，达到可视化的目的。

**石油化工：**石油化工的场景也属于危险系数比较高的环境，因此采用 UWB 精准定位技术可以达到对现场作业人员进行险情预警以及方便援救逃生等目的。尤其是近些年，化工厂安全事故频繁，会促使相应的政策出台以保障现场人员的安全。

**物流仓储：**仓储物流环节的应用需求主要是解决仓库物资的高周转效率问题，这对于一个工厂的效益提升，意义是非常大的。而通过 UWB 高精度定位，可以实时的对仓库里各类物料以及人员进行精确的监控，甚至在某些 AGV 设备中能够实现无人化的物料周转，生产效益大为提升。

**隧道管廊/地下矿井：**包括矿井、隧道、管廊等施工场景，其特点是危险系数高，并且传统的卫星信号以及无线电信号无法覆盖。由于危险系数比较高，因此也有对于人员进行精准定位的需求。

**建筑施工：**在建筑施工行业采用 UWB 定位技术结合其他的一些技术方案，可以实现现场进度可控、减少浪费、提高效率以及提升施工人员的安全保障，尤其是对一些对于质量和进度有严格要求的重点项目。



此外，UWB 在自动驾驶、高校与科研机构、会展/博物馆、机器人、医院、行李箱跟随、养老院等场景中都有一些应用。



## 1.17 系统前景及其社会意义

目前市面上的定位系统虽然可以广泛应用于工厂、无人工厂和隧道作业等等，但设备都比较简易，当该系统中的定位人员或机器在现场工作时，进入未知区域、危险区域或者遇到紧急情况（人员受伤或机器受损时）难以寻求与协调工作人员进行辅助操作，容易发生安全事故。例如在没有信号、有一定危险性作业的场景，如煤矿、隧道、化工厂、重工厂等环境，或者在将来机器替代大部分人力时，如无人工厂，在没有一定的定位管理与约束时，出事的几率较高。为此一款以 UWB 为核心技术的精确位置定位系统（数字化物联定位系统），即可实现数字智能化的安全管理。

数字化物联定位系统集成了 UWB 定位标签，通过与 UWB 基站进行数据交互，将最终的精确位置传输给交换机。由此可以实时记录系统持有者的位置和运行轨迹，以此避免了无人工厂的机器与机器或机器与工人的两者之间相互碰撞，实现了数字化安全管理；并且系统可以检测人员或机器的考勤和工作状态，实现智能化考勤；本系统还设计了电子围栏模式，系统持有者一旦接近所设定的危险禁止区域或者未知区域系统就会震动并发出警报，同时在可视化平台“上位机”会给出弹窗提示，上报管理人员安排相关负责人前去查看情况，保障了作业人员的生命安全。同时，一旦发生人员受伤或机器受损长时间停留时，此系统可快速锁定该人员或机器的位置信息，为之后的救援或维修提供极其强大的助力。

UWB 技术可以根据自身的特点，与这些物联网场景紧密结合，给用户提供更好的服务体验。包括智能家居、增强现实、移动支付、看护跟踪、地质勘探、室内导航，都将是 UWB 技术的用武之地，拥有非常广阔的发展前景。

## 参考文献

- [1] 贾静茹. 基于 UWB 定位系统的设计及时延算法的研究[D]. 内蒙古: 内蒙古大学, 2018.
- [2] 袁国宝. 新基建 数字经济重构经济增长新格局[R]. 北京: 中国经济出版社, 2020.
- [3] 马文彦. 数字经济 2.0[R]. 北京: 民主与建设出版社, 2017.
- [4] 汪财. 基于 UWB 的室内移动车辆定位系统研究[D]. 安徽: 合肥工业大学, 2018.
- [5] 袁帅. 基于超宽带的智能小车定位与路径规划技术研究 [D]. 陕西: 西安电子科技大学, 2018.
- [6] 刘火良. STM32 库开发实战指南: 基于 STM32F103 (第 2 版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [7] 张洋. 原子教你玩 STM32 库函数版 (第 2 版) [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015.
- [8] 梁久祯. 无线定位系统 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2013.

# 机械式速度波动演示仪

参赛者：肖慧慧 郑语欣 徐恩达 李腾达

(温州职业技术学院，智能制造学院，温州 325035)

指导老师：林潘忠 胡陈春

**摘要：**为提高课堂中学生对机械系统中速度波动的感性认识，设计了一种新型的机械式速度波动演示仪。利用弹性膜囊在离心力作用下的体积变化来检测速度的波动，用液体传导提高响应。可完成机械系统中载荷、转动惯量和机构的平衡、动平衡等因素对速度波动的影响等实验，记录笔可直接记录系统的速度波动曲线，并通过激光笔将波形直接投影在黑板上，使速度波动这一抽象概念更加直观具体。研究结果对速度波动实验设计以及机械原理教学有很好的参考价值。

**关键字：**速度波动 机械原理 液体传导 离心力

## 1. 研制背景及意义

### 1.1 相关课程知识点教学情况

在进行机械机构的运动分析、机构的设计中，往往将原动件假设为匀速运动的，但在实际生产中，机械设备的原动件如电机等并不是匀速运动的，原动件的运动受机构中各构件的质量、转动惯量和作用在其上的驱动力、阻抗力等影响，原动件的运动并不是匀速运动而是波动的，因此为了对机构进行精确的运动分析和力的分析，就需要对机构原动件的运动规律进行精确的描述，这对于高速、高精度和高自动化程度的机械设计是十分重要的。因此“速度波动的调节”是机械类核心课程《机械原理》课中的重要内容。然而，我们结合自身的学习实际，并经过大量的调研发现，在《机械原理》课程教学与学习中，存在以下问题：

1. 在学习“速度波动的调节”之前，一般同学认为，“只要电机一开，它就是匀速运动的”，因此这一知识点的学习需改变同学们的传统观念；
2. 转动体速度的波动，由于速度变化是在转动体上的，很难像其它机构一样，用多媒体展示出来，同时，当速度波动变化量不大时，光凭肉眼是很难观察到的，因此需要用教学仪器进行展示；
3. 影响速度波动的因素有转速、驱动力、阻抗力、机构平衡、动平衡等等，然而各因

素对速度波动的影响大小是不同的，在机构设计中，应对各因素影响的大小有清晰认识，以便今后工程实践中抓住主要矛盾，提高设计水平，因此需要有相应的教学实验仪器让同学们进行不同因素下对速度波动影响的大小实验，从而得到感性认识。

## 1.2 目前速度波动实验台的相关情况

教具的开发不仅能直接使相关的老师和学生受益，同时教具的开发也可带来直接的经济效益。2012年教育部印发《教育十年发展规划（2011-2020年）》，确定了坚持面向未来，育人为本；坚持应用驱动，共建共享；坚持统筹规划，分类推进；坚持深度融合，引领创新的工作方针。2012年中央财政教育支出安排3781.32亿元。国家政策支持使得教具业生产有了政策和资金的保障，使教具产业方兴未艾，因此产生了很多教具企业，如湖南长沙形成了大型的教具工业园区，杭州、宁波等地出现了多家大型教具生产企业，如杭州天煌教仪公司等等，可见教具的开发不仅具有较好的社会效益，还有广阔的市场前景。

基于速度波动知识点的特殊性和这一教具的广阔市场前景，多个企业关注到了这一教具的研发，如湖南宇航科技公司，湖南百瑞德教具有限公司、上海东方教具有限公司、山东现代教具有限公司等都开发了相关产品，如图1所示。在现有的情况下，多个企业的教具呈现了基本相同的形式，其原理是用机械方式构成速度波动，用电子测控方式检测速度的波动。用这一形式具有结构简单、能数字化反应实验现象等优点，然而这些产品在以下几个方面具有提升的空间：



图1 现有速度波动实验仪产品

1. 由于对速度波动的测量是借助电子电路实现的，因此速度波动和呈现的波形之间存在一个“黑箱”，即如何将旋转速度变化成为波形的变化是不可见的。若要弄清中间

的变化需要花费较多的时间，但这不是课程教学内容，若忽视了这一“黑箱”，则老师的教学与学生的学习中，对事物的理解是存在断层的，教具的直观性有提高空间。

2. 现有产品具有一般的结构形式、系统构成较复杂，它需要用机械结构、传感检测系统、计算机系统等组成，这就导致于这一设备体积庞大，一般只能固定地放置于实验室中，难以带入课堂，难以成为一种教学展示的教具。
3. 这些产品主要的测试内容为不同转速、不同载荷、不同转动惯量等三个因素下进行实验，体现速度波动的影响因素较少，不利于学生的实验探索。
4. 由于产品系统复杂，并用了较多的电子设备，考虑到这一教学设备使用者一般是机械类老师和学生，所以电子设施对维修维护带来了困难。

鉴于上述情况，我们开发了“机械式速度波动演示仪”，我们的作品可根据需要调转速、变载荷，形成机构平衡、动平衡等不同联接方式，通过更换飞轮可改变转动惯量。用弹性膜囊在离心力变化时的体积变化，来反映转速的变化，用液体传动将旋转时径向的变化量变成浮力柱的上下移动量。用纸带记录速度波动波形，用激光笔将波动放大并投影。

## 2. 主要功能和性能指标

本作品是针对《机械原理》课程“速度波动与调节”这一章节内容开发的教具，帮助同学理解速度波动的概念，掌握速度波动的调节方法。可用于教室的课堂教学，也可用于同学小组实验与探索。可进行的实验如下：

实验一：载荷对速度波动的影响：在固定的转速下，对机构进行无级加载，通过观察固定转速下、不同载荷时速度波动的情况，并根据波形分析实验结果。

实验二：转动惯量对速度波动的影响：在其它因素不变的情况下，更换不同飞轮，进行转动惯量对速度波动的影响实验。

实验三：机构的平衡、动平衡等因素对速度波动的影响实验。

主要性能指标：

1. 外形尺寸 390x140x260mm，重 3.5Kg。
2. 电机：主电机功率 15W，交流，220V，纸带电机功率 0.04W，直流，12V。
3. 测量速度范围：电机转速  $0\sim 1440\text{r}/\text{min}$ ，无级调速，速度波动分辨率： $1\text{r}/\text{min}$ 。
4. 配置的飞轮转动惯量：大飞轮： $712\text{kg}/\text{mm}^2$ ，小飞轮： $323\text{kg}/\text{mm}^2$ 。

### 3 . 结构与原理

本作品主要由机械传动组件、液力检测组件和记录显示组件三大部分构成。作品外形尺寸 390×140×260mm，重 3.5Kg，功率 15W。

机械传动组件由两组曲柄滑块构成，可根据需要调转速、变载荷，形成机构平衡、动平衡等不同联接方式，通过更换飞轮可改变转动惯量。

液力检测组件：用弹性膜囊在离心力变化时的体积变化，来反映转速的变化，用液体传动将旋转时径向的变化量变成浮力柱的上下移动量。

记录显示组件由两部分组成，一是纸带记录部分，波动的大小可带动记录笔在移动的纸带上记录波形，进行量化实验；二是用激光笔将波动放大并投影，方便教室中学生远距离观察实验现象。

#### 3.1机械传动机构

机械传动机构如图 2 所示，1 为调速电机，转速范围为 0~1440r/min 可调。电机经带传动 2，带动主轴 3 转动，主轴的另一端连接两个圆盘，每个圆盘上各偏心安装了转轴，转轴与曲柄滑块机构的连杆 5、6 相连，其中转轴与主轴之间的中心距为曲柄长度。主轴旋转时，带动曲柄滑块机构运动。

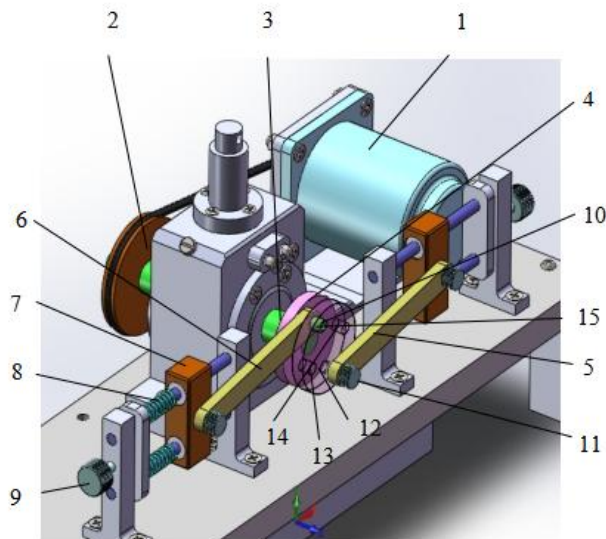


图 2 机械传动机构示意图

1. 调速电机 2. 带传动 3. 主轴 4. 曲柄圆 5. 连杆 1 6. 连杆 2 7. 滑块  
8. 弹簧 9. 加载螺钉 10. 转轴 1 11. 转轴 2 12. 孔 1 13. 孔 2 14. 孔 3 15. 孔 4

在图 2 所示的左侧曲柄滑块机构中，在导向柱上各加了一个加载弹簧，旋转螺钉 9，可压缩弹簧 8，实现对机构的加载。

主轴上两圆盘中，外侧圆盘上设有四个螺纹孔，可选择外圆盘上的四个位置，在 12 孔 1 中旋入为对心机构平衡，在 13，14 孔中旋入为偏心机构平衡，在 15 孔中旋入为同心机构平衡。这三种连接方式可用于学生学习探索不同平衡方法对速度波动的影响。

### 3.2 液力检测组件

将系统内部剖开，如图 3 所示：主轴的一端钻有孔（主轴内孔 3），孔的一端与三通接头 2 相联，另一端与主轴横孔相通，主轴横孔与轴座内孔相通，轴座内孔中装有导向套筒，导向套筒内装有浮动柱 8。三通接头的另两端各装上一个弹性膜囊 1；各孔与相应密封件构成内部空腔。

使用时，取出浮动柱 8，从导向套筒 7 向内部空腔注入液体，通过侧方的液面高度控制孔控制内部液体高度，重新放入浮动柱，浮动柱处于悬浮状态。

开动电机，使主轴旋转，弹性膜囊内的液体受到离心力的作用，使弹性膜囊体积产生变化。当主轴转速变高时，弹性膜囊膨胀，体积变大，导向套筒孔内的液面高度下降，浮动柱下移；当主轴转速变低时，弹性膜囊收缩，体积变小，导向套筒孔内的液面高度上升，浮动柱上移。这样，当主轴速度波动时，浮动柱就会上下运动。

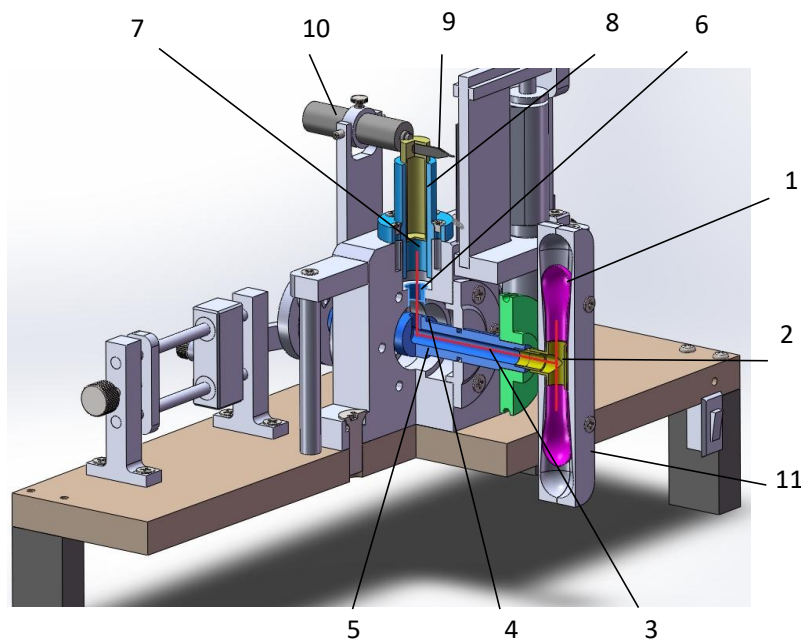


图 3 液力检测系统原理图

1. 弹性膜囊(上下各一个) 2. 三通接头 3. 主轴内孔 4. 主轴横孔 5. 主轴  
6. 轴座内孔 7. 导向套筒 8. 浮动柱 9. 记录笔 10. 激光笔 11. 护板

### 3.3 记录显示组件：

记录显示组件如图 4 所示，分纸带记录与激光显示两部分：

纸带记录部分：图 4 中记录笔 4 装在浮动柱 5 上，直流电机 1 旋转拉动纸带 6 慢速横向

移动，速度波动时使浮动柱上下移动，带动记录笔上下移动，并在纸带上画出线条，此时，速度波动的波形就在纸带上记录了下来。这个波形可即时反映速度波动的情况，这一记录可用于同学们小组实验。

激光显示：将激光笔 8 按如图 4 方式安装，激光笔可绕图中小轴 9 摆动，激光笔的尾端架在浮筒浮动柱上端面上，浮筒上下移动时，带动激光笔绕小轴 9 摆动。激光笔的激光照在墙壁或屏幕上，当激光笔摆动时，激光光斑也会上下移动，能即时地反映出速度波动的大小。同时，激光对波动的幅度进行放大，这样，教师在讲台上实验讲解时，全班同学均能看清楚，这种显示可用于课堂上进行实验演示。

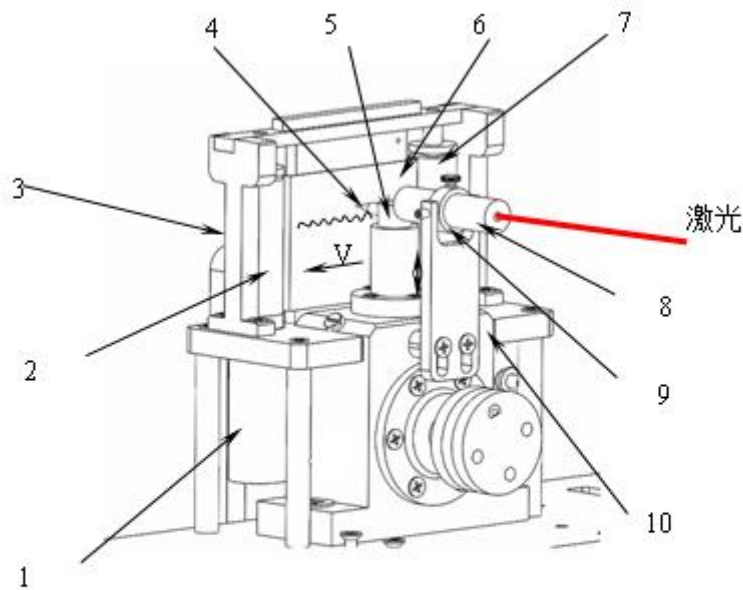


图 4 记录显示组件示意图

- 1.直流电机 2.卷纸主动轴 3. 支座组件 4. 记录笔 5. 浮动柱  
6. 纸带 7. 卷纸从动轴 8. 激光笔 9.小轴 10.激光笔支座

## 4 设计计算

### 4.1 电机的选型

电动机的极数一般可选 2、4、6 极。由于该试验台所检测的速度范围是  $0 \sim 600 \text{r/min}$ ，选取 4 极，转速为  $1440 \text{r/min}$  的电动机，因此所需的传动比  $i = 2.5$ 。

主轴的转速： $n_{\text{出}} = 400 \text{r/min}$

$$P_{\text{出}} = \frac{T \cdot n}{9550} = \frac{0.135 \times 400}{9550} = 0.0057 \text{kw}$$

系统的总效率： $\eta_{\text{总}} = \eta_{\text{带}} \cdot \eta_{\text{轴承}}^2$



查相关资料得

$$\eta_{\text{带}} = 0.92 \sim 0.97 \quad \eta_{\text{轴承}} = 0.98 \sim 0.99$$

$$\eta_{\text{总}} = \eta_{\text{带}} \cdot \eta_{\text{轴承}}^2 = 0.94 \times 0.98^2 = 0.90$$

电动机的功率:

$$P_{\text{电}} = \frac{P_{\text{出}}}{\eta_{\text{总}}} = \frac{0.0135}{0.90} = 0.015 \text{ kW} = 15 \text{ W}$$

查机械设计手册（2008版）选择的电动机的参数如下表1所示:

表1 电机规格参数表

型号	电压/V	额定功率/W	同步转速 r/min	满载转速 r/min	备注
YN70-15	220	15	1500	1440	

#### 4.2 带传动的设计计算

在此我们运用机械设计手册（电子版）进行了带轮的简单设计，设计过程如图下图所示:

①

②

初定轴间距

选择确定方法

根据结构要求定

通过计算确定

取  $a_0 = 136$  mm

通过计算确定

$$0.7(d_{d1} + d_{d2}) \leq a_0 < 2(d_{d1} + d_{d2})$$

$\leq a_0 \leq$

所需基准长度

$$L_{d0} = 2a_0 + \frac{\pi}{2}(d_{d1} + d_{d2}) + \frac{(d_{d2} - d_{d1})^2}{4a_0}$$

$L_{d0} = 412.88$  mm

选取基准长度

$L_d = 405$  mm

实际轴间距

$$a \approx a_0 + \frac{L_d - L_{d0}}{2}$$

$a \approx 132$  mm

③

单跟V带传递的额定功率

$P_1 = 2.8$  kW

传动比*i*=1的额定功率增量

$\Delta P_1 = 0.5$  kW

④

计算公式

带速  $v = \frac{\pi d_{d1} n_1}{60 \times 1000}$

小带轮包角  $\alpha = 180^\circ - \frac{d_{d2} - d_{d1}}{a} \times 57.3$

V带的根数  $z = \frac{P_d}{(P_1 + \Delta P_1) K_\alpha \cdot K_L}$

确定参数

小带轮包角修正系数  $K_\alpha = 0.99$

带长修正系数  $K_L = 0.96$

计算结果

$v = 1.31$  m/s     $\alpha = 163.5^\circ$      $z = 1$

⑤

计算公式

单跟V带的预紧力  $F_0 = 500 \left( \frac{2.5}{K_\alpha} - 1 \right) \frac{P_d}{zv} + mv^2$

作用在轴上得力  $F_r = 2F_0 z \sin \frac{\alpha}{2}$

确定参数

V带每米长的质量  $m = 0.12$  kg/m

计算结果

$F_0 = 6.03$  N     $F_r = 11.94$  N

⑥

计算结果如图所示：

## 设计结果输出

设计单位:	设计者:	设计时间: 20:56:39
名称	数值	单位
传动功率P	0.015	kW
主动轴转速n1	1440	r/min
从动轴转速n2	576	r/min
传动比i	2.5	无
设计功率Pd	0.02	kW
小带轮基准直径d	30	mm
大带轮基准直径D	75	mm
初定轴间距a0	200	mm
所需基准长度Ld	570	mm
实际轴间距a	201	mm
P1	2.8	kW
$\Delta P_1$	0.5	kW
带速v	2.26	m/s
小带轮包角 $\alpha$	167.17	°
V带的根数z	1	无
单根V带的预紧力	7.36	N

### 4.3 飞轮转动惯量的近似计算

#### 1. 飞轮调速原理

图 5 所示为在一个周期内等效构件角速度的变化曲线，其平均角速度  $\omega_m$  在工程实际中常用其算术平均值表示，即

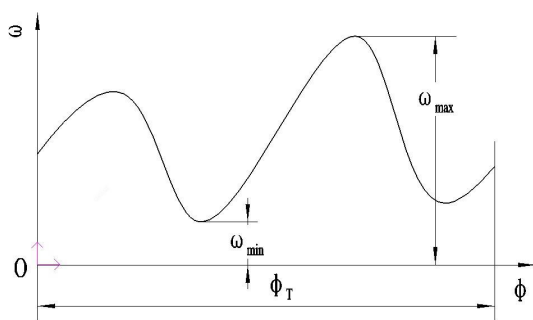


图 5 等效构件角速度变化示意图

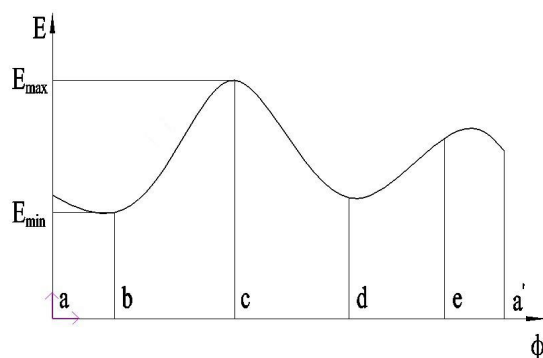


图 6 最大盈亏功

$$\omega_m = (\omega_{\max} + \omega_{\min}) / 2 \quad (1)$$

可见机械速度波动的程度不仅与速度变化的幅度  $\omega_{\max} - \omega_{\min}$  有关，也与平均角速度  $\omega_m$  的大小有关。

飞轮调速的基本原理 由图 6 可见，在 b 点处机械出现能量最小值  $E_{\min}$ ，而在 c 点处出现能量最大值  $E_{\max}$ 。故在  $\varphi_b$  与  $\varphi_c$  之间将出现最大盈亏功  $\Delta W_{\max}$ ，即驱动功与阻抗功之差的最大值：

$$\Delta W_{\max} = E_{\max} - E_{\min} = \int_{\varphi_b}^{\varphi_c} [M_{ed}(\varphi) - M_{er}(\varphi)] d\varphi \quad (2)$$

如果忽略等效转动惯量中的变量部分，即设  $J_e = \text{常数}$ ，则当  $\varphi = \varphi_b$  时， $\omega = \omega_{\min}$ ，当  $\varphi = \varphi_c$  时， $\omega = \omega_{\max}$ 。由式 (2) 可得

$$\Delta W_{\max} = E_{\max} - E_{\min} = J_e (\omega_{\max}^2 - \omega_{\min}^2) / 2 = J_e \omega_m^2 \delta$$

对于机械系统原来所具有的等效转动惯量  $J_e$  来说，等效构件的速度不均匀系数将为

$$\delta = \Delta W_{\max} / (J_e \omega_m^2)$$

当  $\delta$  不满足条件式  $\delta \leq [\delta]$  时，可在机构上添加一个飞轮。设在等效构件上添加的飞轮的转动惯量为  $J_F$ ，则有

$$\delta = \Delta W_{\max} / (J_e + J_F) \omega_m^2 \quad (3)$$

可见，只要  $J_F$  足够大，就可达到调节机械周期性速度波动的目的。

## 2. 飞轮的等效转动惯量

飞轮的等效转动惯量的计算公式为

$$J_F \geq \Delta W_{\max} / (\omega_m^2 [\delta]) - J_e \quad (4)$$

如果  $J_e \ll J_F$ ，则  $J_e$  可以忽略不计，于是式 (4) 可近似写为

$$J_F \geq \Delta W_{\max} / (\omega_m^2 [\delta]) \quad (5)$$

又如果式 (5) 中的平均角速度  $\omega_m$  用平均转速  $n$  (单位: r/min) 代换，则有

$$J_F \geq 900 \Delta W_{\max} / (\pi^2 n^2 [\delta]) \quad (6)$$

$J_F$  即为所需飞轮的惯量

## 5 实验应用方法说明

本作品可用于学生小组实验，也可用于课堂教学演示。实验与演示方法如下：

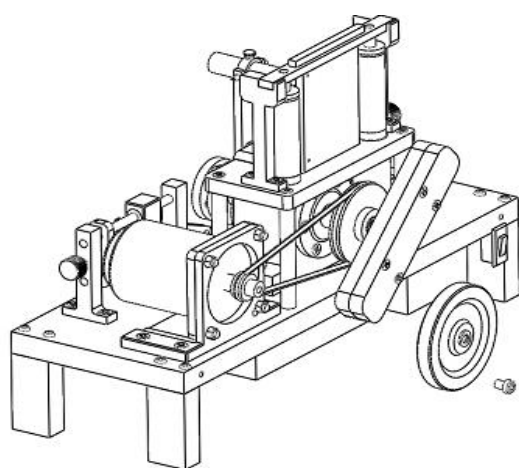
### 5.1 学生小组实验

#### 试验项目一：载荷大小对速度波动的影响

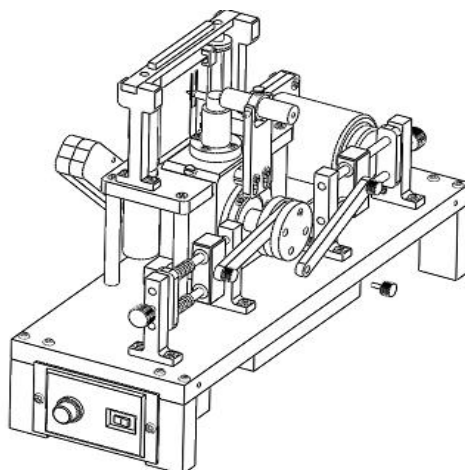
实验目的：在特定转速下，通过外载荷，观察记录分析外载荷对速度波动的影响。

实验步骤：

1) 调整传动机构，如图 7(a) 所示旋开螺钉，拆下飞轮。如图 7(b) 所示旋开螺钉，拆下右侧曲柄滑块机构。



(a) 拆下飞轮



(b) 拆下右侧轴柄滑块机构

图 7 实验准备一示意图

2

) 轻轻取出浮动柱，往密闭腔体内加水，待水刚好满到液位高度控制螺钉口处，停止加水。打开电机运行 1~2 分钟，排出密闭腔体内空气，注水到液位，旋上密封螺钉，如图 8 所示，放入浮动柱，并将记录笔调至与记录纸接触，将激光笔尾端靠在浮动柱上表面。

3) 启动主电机，机构运转；启动纸带电机，记录速度波动图形。完成上述实验后停机。

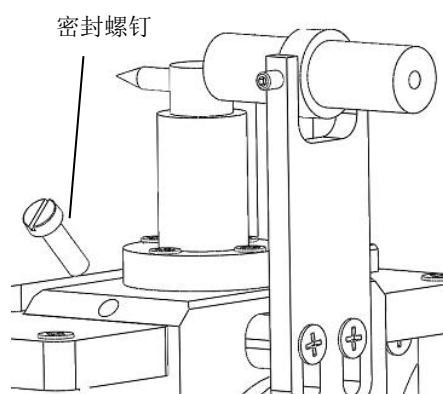


图 8 液面高度控制

图 9 为外载荷从零开始逐渐加大时记录的速度波形图。

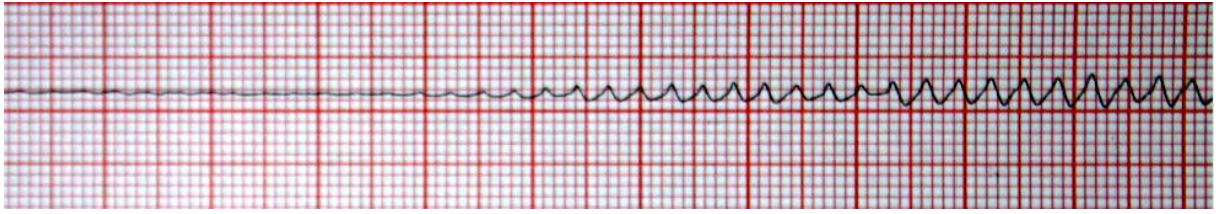


图 9 外载荷从零开始变大时记录的速度波形图

### 试验项目二：转动惯量对速度波动的影响

- 1) 在上述实验后，不改变载荷的大小，停机后，装上大飞轮，开机记录速度波动波形。并用转速计进行标定，测出波动时的速度最大值、最小值，计算平均值。
- 2) 停机换上小飞轮，开机运行并记录速度波动波形。
- 3) 观察所记录的波形，进行分析对比。

图 10 为无飞轮、加大飞轮、小飞轮情况下的记录的速度波动波形图。

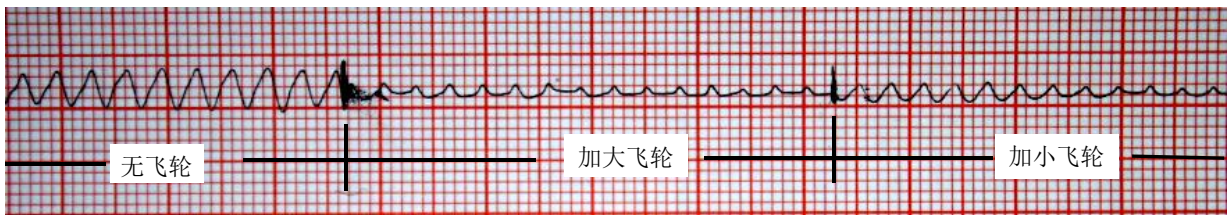


图 10 无飞轮、加大飞轮、小飞轮情况下记录的速度波动波形图

### 试验项目三：机构平衡、动平衡等因素对速度波动的影响探索

操作方法：在实验项目一的传动机构基础上，保持转速和外载荷不变，用如图 11 所示螺钉将右侧曲柄滑块机构与主外圆盘的对应孔相联接：

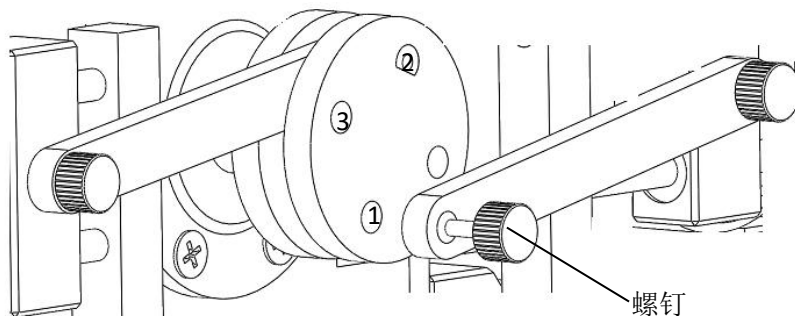


图 11 机构平衡与动平衡因素对速度波动影响实验

1) 当与孔 1 相联接时, (简称为对心联接), 此时两组曲柄滑块机构完全对称, 是最佳机构平衡状态, 但此时, 由于两组曲柄滑块机构不可能处于一个平面, 除了机构平衡外, 存在动不平衡现象。开机运行并记录速度波动波形。

2) 当与孔 2 相联接时, (简称为同心联接), 此时两组曲柄滑块对称性最差, 但此时机构动不平衡情况较好。开机运行并记录速度波动波形。

3) 当与孔 3 相联接时, (简称为偏心联接) 此时两组曲柄滑块对称性最差, 但此时机构动不平衡情况较好。开机运行并记录速度波动波形。

4) 分析波形如图 12 所示, 并与右侧曲柄滑块机构联接前的波形进行对比, 进行各因素对速度波动影响大小讨论。

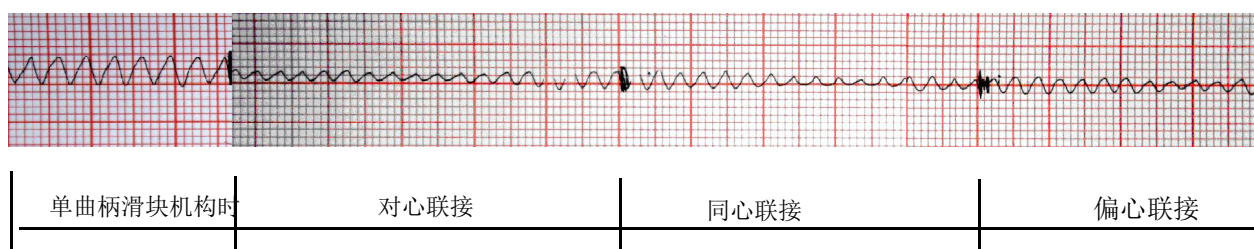


图 12 不同机构平衡对速度波动的影响实验

## 5.2 老师课堂实验演示

老师在课堂演示时, 实验操作方法与上述实验方法相同, 但此时由于学生与讲台之间有一段距离, 给学生观察实验现象带来了不便, 因此, 教室中实验演示采用激光笔投影的方法。因此实验时不用开动纸带电机, 取而代之的是打开激光笔开关, 并将激光投影到教室多媒体屏幕上, 建议采用如下方法进行演示:

1. 演示文稿中画出标尺如图 13 所示, 有条件的还可用手提电脑中的摄像功能进行同步投影视频。



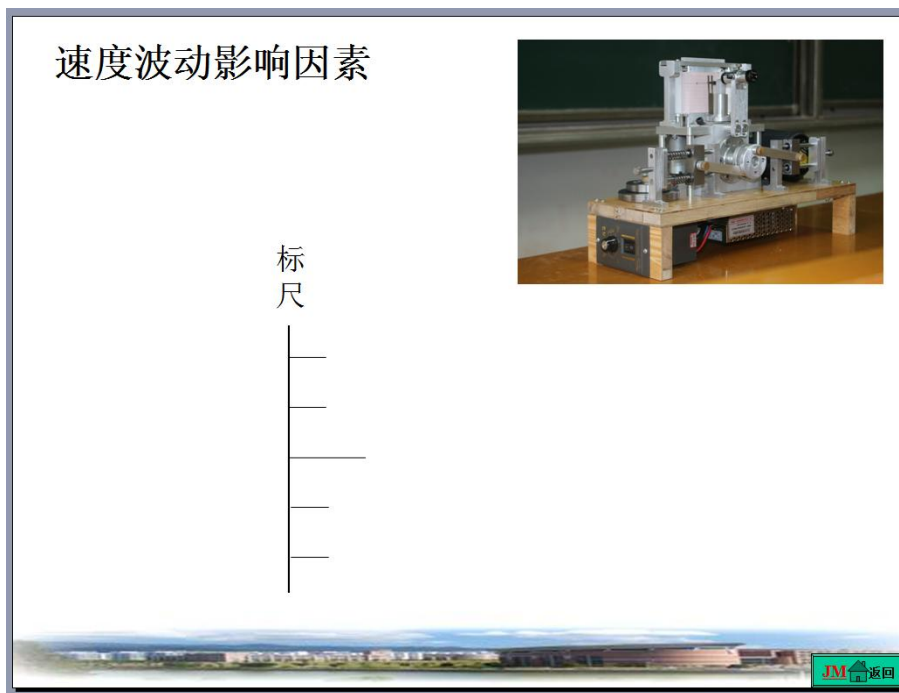


图 13 演示文稿示意图 1

2. 开演示仪进行运转，将激光投影到屏幕，并将光点与标尺对齐。在 PPT 演示时点右键，调出毡尖笔如图 14 所示

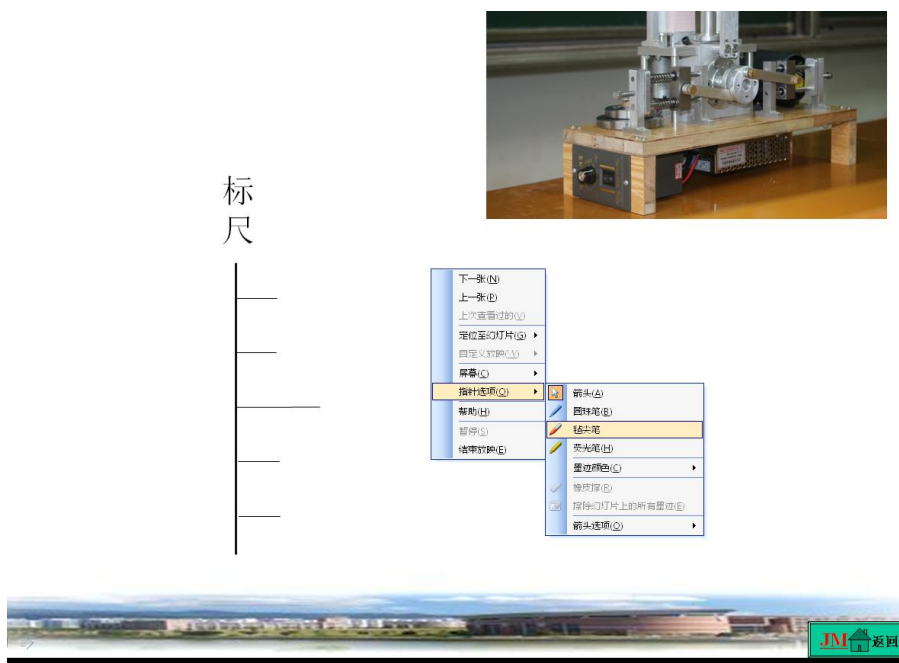


图 14 演示文稿示意图 2

3. 用同学们小组实验的方法进行实验，并用毡尖笔记录各种实验情况下的波动峰、谷点，记录波动范围，如图 15 所示，进行学习讨论

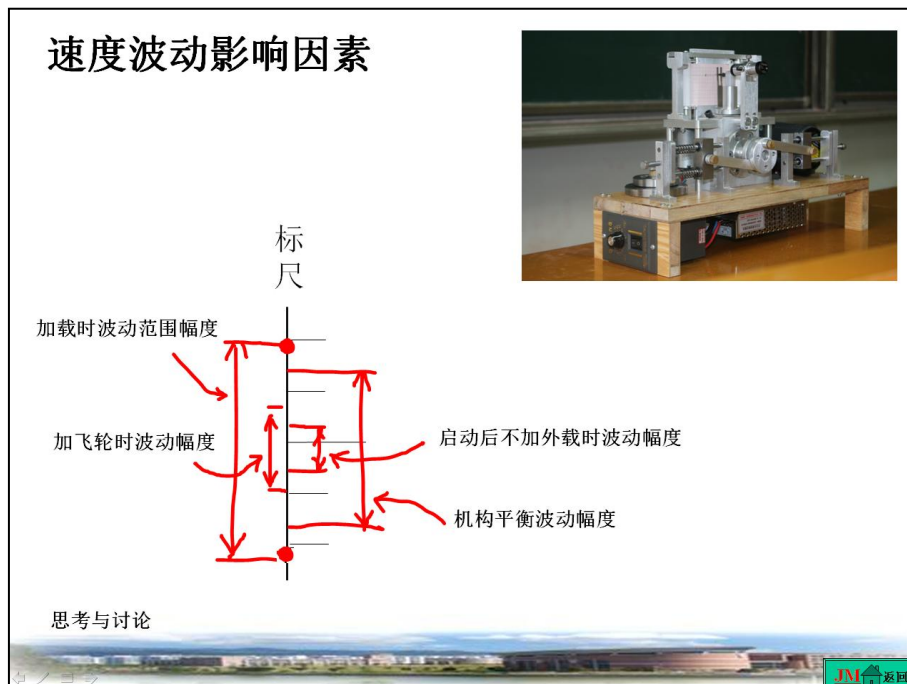


图 15 演示文稿示意图 3

## 6 创新点及应用前景

对于高速、高精度和高自动化程度的机械设计中，对机构原动件的运动规律进行精确地描述是十分重要的，因此“速度波动的调节”是机械类核心课程《机械原理》课中的重要内容。考虑到需改变同学们的传统观念，需要有相应的教学实验仪器让同学们进行不同因素下对速度波动的影响大小实验，得到感性认识。开发相应的速度波动实验仪，对于丰富课堂教学内容，进行相应的实验研究是十分必要的，本作品是在分析现有作品的基础上开发的新型实验演示仪，具有以下优点：

- 1、利用弹性膜囊在离心力作用下的体积变化来检测速度的波动，用液体传导提高响应速度。机械式结构，使作品易操作、易维护。
- 2、用记录笔直观地记录速度波动曲线，可让同学们方便地进行小组实验与探索。
- 3、用激光笔将波动量放大并投影，老师上课演示时，便于同学们远距离观察；

我们作品不仅可作为实验室的实验设备，同时又能带入课堂进行教学演示，具有直观性强、结构简单、易于维护、价格低等优点，由于速度波动知识点的特殊性本来受到各教具企业的关注，加上我们作品的创新性与独特性，这一作品必有其广阔的市场前景。

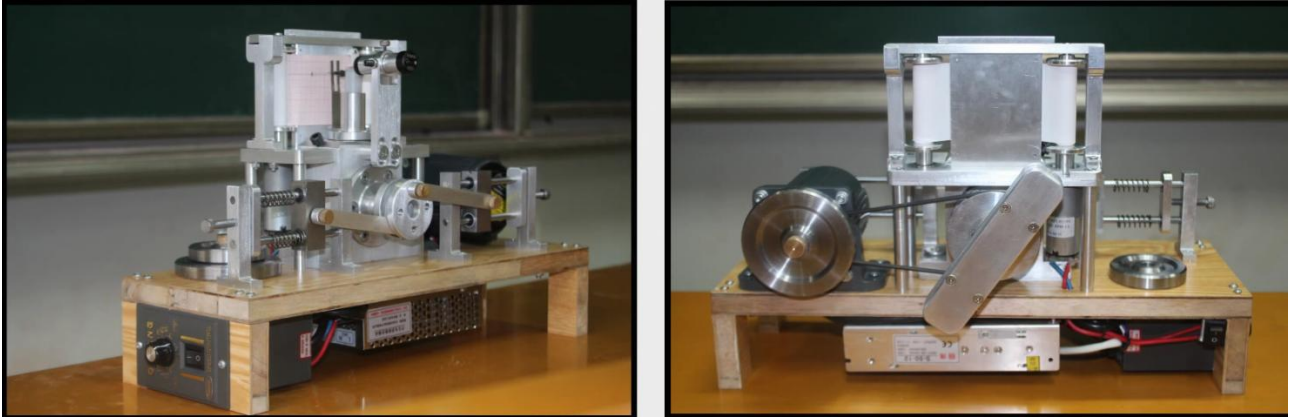


图 16 实物照片

### 参考文献

- [1]郭卫东. 机械原理(第二版)[M]. 北京:北京科学出版社, 2013. 1
- [2]Bonnardot F, El Badaoui M, Randall R B, et al. Use of the acceleration signal of a gearbox in order to perform angular resampling (with limited speed fluctuation)[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19(4): 766-785.
- [3]Shim D, Park J, Khargonekar P P, et al. Reducing automotive engine speed fluctuation at idle[J]. Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 1996, 4(4): 404-410.
- [4]Villa L F, Renones A, Peran J R, et al. Angular resampling for vibration analysis in wind turbines under non-linear speed fluctuation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2011, 25(6): 2157-2168.
- [5]梁宝英, 王永清, 武熙. 《机械原理》课程实践教学改革的探讨[J]. 山西大同大学学报:自然科学版, 2009, 25(1): 94-96.
- [6]李春明, 郭颖, 肖文生. 周期性速度波动调节的展示机构设计[J]. 机械设计, 2005 (z1): 125-126.
- [7]张群艳, 唐浙东. 机械运转调速实验系统的创新设计[J]. 机械设计与研究, 2009, 25(2): 109-111.
- [8]徐林林, 陈琪. 用变惯量飞轮实现往复压缩机速度波动的调节[J]. 压缩机技术, 2006, 19(4):1-4.
- [9]郭卫东, 李晓利, 于靖军. 机械速度波动调节实验的设计与实践[J]. 实验技术与管理, 2013, 30(10): 145-147.
- [10]游士琴. 飞轮转动惯量的计算[J]. 淮南职业技术学院学报, 2002, 2(4): 105-107.
- [11]徐秀忠, 容彬, 陈竹宁, 等. 机械的非周期性速度波动分析及飞轮设计[J]. 航天制造技术, 2013 (6): 63-65.
- [12]张磊. 基于微平面电机的姿控飞轮系统设计[D]. 航天制造技术, 长春:中国科学院研究生院, 2012.

# 可用于智能设备的新型紫外探测纳米芯片

参赛者：陈昕琪，张颖洁，王若男，程普佳，葛宇翔

（湖州师范学院，湖州 313000）

指导教师：吴璠

**摘要：**本文简要介绍了 ZnO 新型高精度紫外探测纳米芯片的物理原理，同时对其紫外吸收性、响应度、灵敏度进行表征，并与 ZnO 普通薄膜紫外探测纳米芯片进行对比。实验结果表明，本项目所制备的 ZnO 纳米棒状阵列与普通薄膜相比具有更多的优点：首先，限域效应显著。本项目中的 ZnO 纳米棒状阵列可使紫外线在微区内进行多次反射，电子通过纳米棒进行无损传输，吸收更多的紫外线；其次，制作工艺较为简单，成本较低；其三是 ZnO 是金属氧化物，具有很好的空气稳定性，能极大程度延长其使用寿命。同时输电系统和芯片数据进行云端结合，与数字经济联系紧密。未来可将其应用于输变电日常巡检、现场故障抢修和指挥以及变电系统状态的精确标定。预计本项目的新型紫外探测芯片在未来数字经济高速发展的时代背景下会有较大的应用前景和实用价值。

**关键字：**智能设备、氧化锌、紫外探测、纳米芯片

## 1. 研究背景

近年来，我国在社会发展和经济建设层面取得了世界瞩目的成就。以信息化和信息产业发展水平为主要特征的综合国力竞争日趋激烈，信息化成为世界各国关注的焦点，所以加快推进信息化成为经济和社会发展的战略任务。由于电力设备在发生绝缘故障前出现的局部放电问题导致我国每年损耗电能达 20.5 亿 kW/h<sup>[6]</sup>，同时全球臭氧层的破坏和紫外辐射量的增加，人们越来越多地关注紫外光的辐射与测量，对紫外探测技术和器件的需求也日益增长。



图 1. CCTV 对于紫外线的新闻报道

自从半导体材料进入人类视线以来，便在人们生活的各个领域扮演着重要的角色。目前紫外探测器的研究重点是制作以宽禁带半导体作为探测材料的器件<sup>[5]</sup>。据相关新闻报道过量的紫外线会导致皮肤受损、脱落甚至加大患皮肤癌的风险(如图 1 所示)。因此，人们对防晒更加关注，而作为防晒好帮手的防晒霜虽具有很好的防晒功能，但是其具有清洁麻烦、对皮肤有刺激性等缺点。

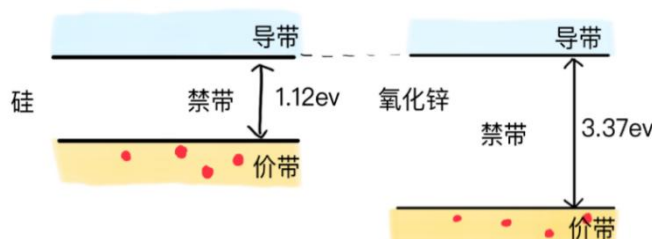


图 2. 硅材料和氧化锌禁带宽度的对比

至目前为止，以光电倍增管和硅为主的紫外探测器在人们生活中的应用已经屡见不鲜。但是由于光电倍增管易碎、体积大，硅管禁带宽度小的缺点使其应用受限。而作为在室温下禁带宽度远大于硅的半导体材料 ZnO（如图 2），对于紫外线探测则更为精准。同时其生长温度低、形貌多样、制备成本小、在恶劣环境下也能正常工作的优点<sup>[7]</sup>，更便于制成紫外线探测芯片。

本小组以紫外线精确探测作为研究目的，基于国家经济发展要求以及对紫外探测芯片的需求下，利用宽禁带半导体材料 ZnO 设计出高精度紫外探测纳米芯片。本项目应用于以手表为例的智能设备中，实现对紫外线的实时、自动、精准探测。同时数据储存上传做到在家知全球的效果，且与数字经济紧密相连。同时紫外探测部分所需电量均由芯片自身提供，不消耗原有手表电量。此外本芯片还可扩展应用于电力设备状态检修方面，通过探测设备中上的灰尘辐射的紫外光线强度来判断电晕放电强度，对于车载巡检系统意义非凡。

综上所述，若能在未来进行大规模生产并投入使用，将会极大的便利人们的日常生活，且响应了国家“打造数字经济和制造业高质量发展双引擎”的号召。此外科技和生活、物理和美学进行完美融合。

## 2. 物理原理

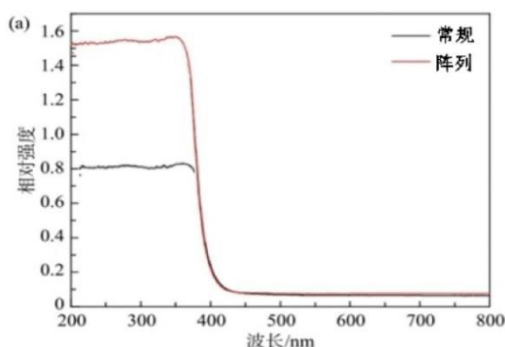


图 3. ZnO 的紫外吸收光谱图，及与普通薄膜的光谱对比图

ZnO 薄膜是一种透明的导电薄膜，可见光透射率高达 90%<sup>[7]</sup>。同时 ZnO 的禁带宽度大，其吸收光谱显示波长范围在可见光、红外光时，其相对光强趋近于零，而波长范围在紫外光时，其相对光强不为零（如图 3）。因此从吸收光谱中可以看出 ZnO 纳米棒状阵列在波长为紫外光范围内时，其相对光强远大于常规薄膜时的光强（如图 3）。

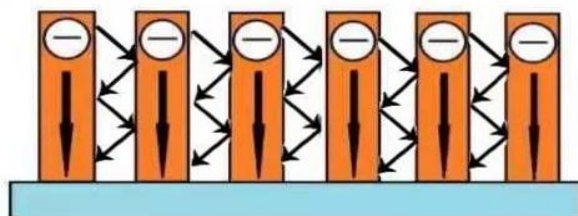


图 4. 紫外线在 ZnO 纳米阵列的棒状结构微区内多次反射图

ZnO 具有的直接带隙跃迁吸收特性使得制备的 ZnO 纳米阵列具有很好的紫外光响应作用。由于 ZnO 纳米阵列的棒状结构具有更大的比表面积且可以使紫外光线在微区内进行多次反射，提高了阵列捕捉紫外线的能力，也使电子进行无损传输<sup>[8]</sup>（如图 4）。ZnO 紫外探测纳米芯片可在极大程度上捕捉紫外线，并将紫外光线转化为光敏电阻阻值。通过检测到的光敏电阻的变化率来精确反应紫外线的强度。



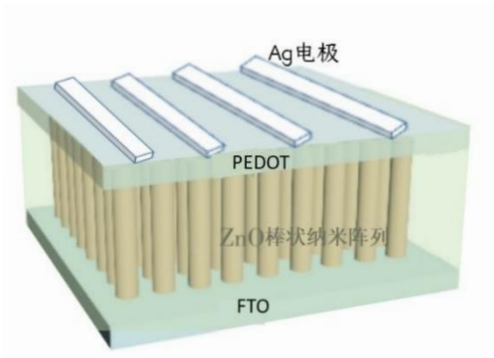


图 5. ZnO 紫外探测纳米芯片 3D 图

本项目制作的 ZnO 紫外探测纳米芯片主要由光电阳极材料、空穴传输层、金属 Ag 对电极构成。其中光电阳极材料是由实验室制备的以 FTO 玻璃为基底的棒状纳米结构 ZnO 阵列构成，由于 PEDOT:PSS 具有水醇溶性好、透光性高、能与活性层很好地融合等突出优点，可作为 ZnO 纳米芯片的空穴传输层材料<sup>[5]</sup>，再利用热蒸发的方式将导电材料沉积在空穴传输层上。ZnO 紫外探测纳米芯片 3D 图如图 5 所示。

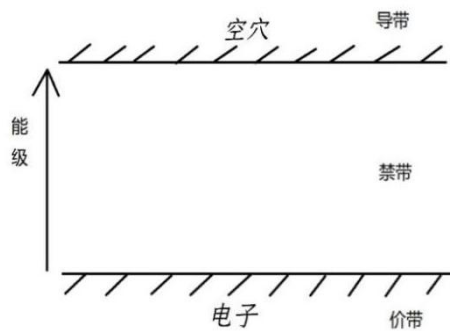


图 6. 无紫外光照射时 ZnO 纳米阵列内部导带价带的原理图

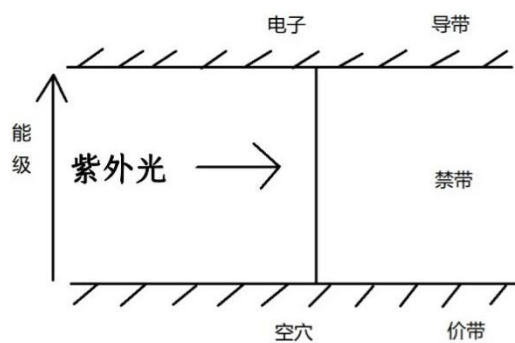


图 7. 有紫外光照射时 ZnO 纳米阵列内部导带价带原理图

ZnO 是一种半导体材料，其结构中含有导带和价带。当没有光照时，价带中的电子无法脱离束缚而跃迁到导带上，因此没有电流产生。而当紫外光照射时，入射光光子能量大于 ZnO 的带隙，价带中的电子吸收光子，并从低能级的价带跃迁到高能级的导带上形成自由电子，并在价带上留下空穴，形成电子—空穴对<sup>[9]</sup>。图 6 为无紫外光照射时 ZnO 纳米阵列内部导带



价带的原理图，图 7 为有紫外光照射时 ZnO 纳米阵列内部导带价带原理图。

ZnO 紫外探测纳米芯片受光照驱动，当紫外光照射在芯片上时，ZnO 纳米棒状阵列由于其较高的比表面积以及量子限域效应，对紫外线进行捕捉并形成电子—空穴对<sup>[10]</sup>。ZnO 的纳米棒可以使电子—空穴对中的电子无损传输到 FTO 电极上，使得 FTO 电极上聚集众多电子，而电子—空穴对中的光生空穴则被作为空穴传输层的 PEDOT:PSS 收集，并传输到金属 Ag 电极上，使得 Ag 电极上聚集众多空穴。FTO 电极中的电子和金属 Ag 电极中的空穴通过导线在外电路复合，使光敏电阻阻值减小，电导率增大。当紫外光再次关闭时，光生电子空穴对不再产生，芯片又将恢复到初始状态，进入下一个循环。

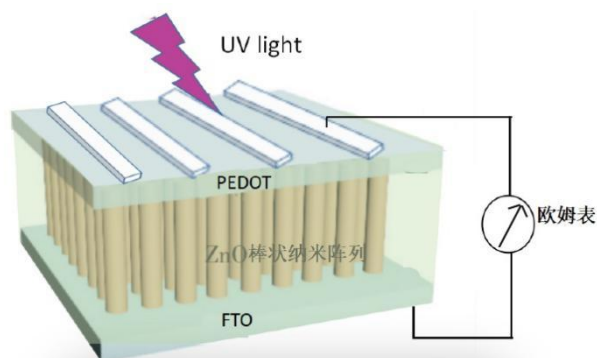


图 8. ZnO 紫外探测纳米芯片工作原理

当照射到 FTO 电极上的紫外光越强时，ZnO 纳米棒状阵列捕捉紫外线能力越强，并形成更多电子—空穴对。从而使 ZnO 纳米棒无损传输的电子变多，FTO 电极中的电子也相应变多，空穴传输层收集并传输到金属 Ag 电极中的空穴随之变多，光生电子—空穴对浓度增大，光敏电阻阻值减小，光电导性能提高，响应度也随之提高<sup>[11]</sup>。工作原理如图 8 所示。

### 3. 技术分析

本项目重点在于 ZnO 棒状纳米结构阵列芯片制作工艺简单，材料成本较低，易于实验室制备和大规模生产，且纳米芯片具有良好的重复性和稳定性，同时具有很好的光电响应速度。与手表的结合更具新颖实用性。

#### 3.1 实验室制备 ZnO 光电阳极

FTO 衬底用玻璃清洗剂、丙酮、异丙醇放入超声波震荡仪中依次震荡 30min，后用氮气吹干，并将清洁后的 FTO 玻璃干燥备用。

称取乙酸锌 0.327g，加入 2mL 去离子水之后在搅拌台上搅拌 3min—5min，后加入 8mL 乙醇和 200 $\mu$ L 冰乙酸，最后放至搅拌台过夜搅拌。将干燥的 FTO 玻璃进行紫外臭氧处理 30min。将匀胶机参数设置为：2000r/min；加热台设置为 100 $^{\circ}$ C。然后将制备好的 ZnO 溶液旋涂在 FTO 玻璃导电面上，每片 FTO 玻璃需在匀胶机上旋涂 4 遍并放至加热台上加热 1min。最后，将所

有旋涂好 ZnO 种子层溶液的 FTO 玻璃放入马弗炉退火(120min 从室温升至 350℃, 退火 60min), 最终制备出 ZnO 种子层。

称取硝酸锌 2.97g, 加入 400mL 去离子水, 放至搅拌台搅拌 10min 后, 加入 1.4g 的乌洛托品, 再搅拌 10min。将制备好的含有 ZnO 种子层的 FTO 玻璃固定在架台上, 并将架台浸入配制好的水热溶液中, 然后放入烘箱, 将烘箱温度设置为 90℃, 水热 3h 后, 将烧杯取出放至阴凉的地方等待其自然冷却。

将冷却后的 FTO 玻璃用棉签将其表面的白色沉积物擦除并用去离子水冲洗, 然后将所有处理好的样品放入去离子水中浸泡一夜, 最后取出样品用去离子水与乙醇冲洗, 并用氮气吹干, 获得 ZnO 光电阳极。

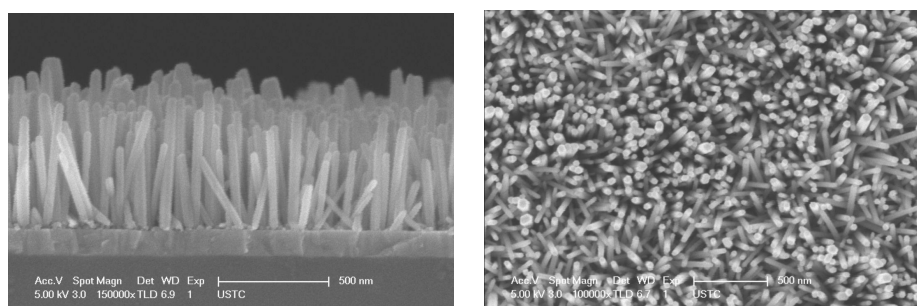


图 9. 水热法制备所得 ZnO 光电阳极的 SEM 图

如图 9, (a) 是通过水热法制备所得 ZnO 光电阳极的 SEM 图。从中可以看到高密度的 ZnO 纳米线均匀地生长于整个 FTO 衬底上。从 (b) 中可以看到 ZnO 纳米棒顶部呈现六棱柱型, 且具有光滑的表面。在紫外光照射时, 其纳米棒状结构便可使电子无损传输至 FTO 电极。

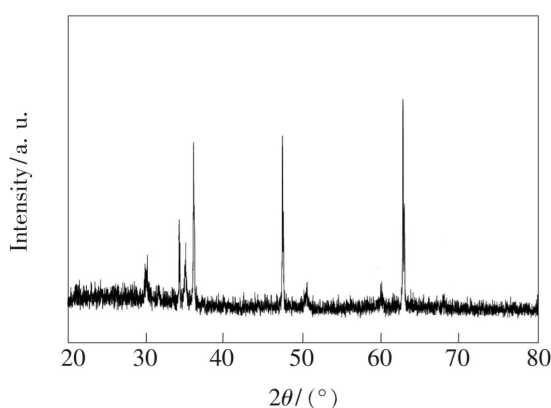


图 10. ZnO 棒状纳米结构阵列的 XRD 谱

如图 10 所示为 ZnO 棒状纳米结构阵列的 XRD 谱, 从图中可明显观察 ZnO 晶体的衍射峰较尖锐, ZnO 纳米棒的结晶度高<sup>[12]</sup>。

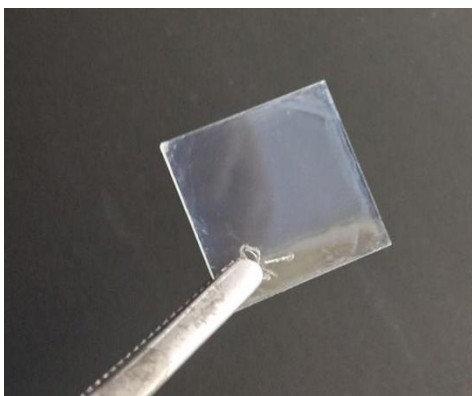


图 11. 实验室制备的 ZnO 光电阳极

如图 11 为实验室制备的 ZnO 光电阳极。

### 3. 2 构建 ZnO 紫外探测棒状纳米芯片

将 PEDOT: PSS 水分散液与异丙醇进行 1: 1 混合后用超声波震荡仪震荡 30min, 混合均匀后静置脱泡, 制得均匀的 PEDOT: PSS 液体。

将匀胶机参数设置为: 4500r/min; 加热台设置为: 140℃。吸取适量经过滤后混合均匀的 PEDOT: PSS 溶液一滴一滴铺在 ZnO 光电阳极导电面上直至铺满后等待数十秒进行旋涂, 使得 PEDOT:PSS 溶液能更好地渗透进 ZnO 纳米阵列中, 最后集体在加热台 140℃退火 10min, 并自然冷却。

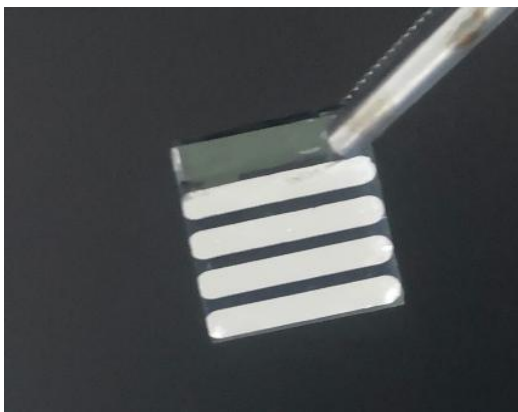


图 12. 实验室制备的 ZnO 紫外探测纳米芯片

最后通过热蒸发在 PEDOT 薄膜一侧制备金属 Ag 对电极, 构建 ZnO 紫外探测纳米芯片。图 12 为实验室制备的 ZnO 紫外探测纳米芯片。

### 3. 3 实验室制备 ZnO 普通薄膜芯片的对比实验

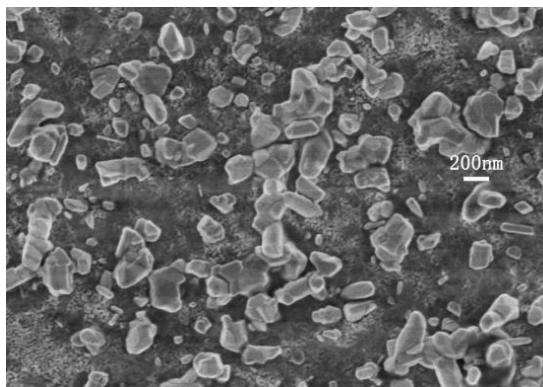


图 13. 场发射扫描电子显微镜中实验室制备的 ZnO 普通薄膜

将旋涂有 ZnO 薄膜的 FTO 玻璃放入马弗炉中进行退火完成后，直接在其表面旋涂作为空穴传输层的 PEDOT:PSS，最终蒸镀金属 Ag 电极便可得到 ZnO 普通薄膜芯片。图 13 为场发射扫描电子显微镜中实验室制备的 ZnO 普通薄膜。

### 3.4 可用于智能设备的新型紫外探测纳米芯片

#### 3.4.1 高精度紫外探测智能手表模型

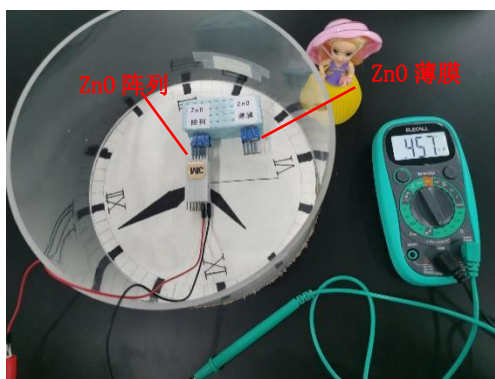


图 14. 手表模型示意图

本小组制作高精度紫外探测智能手表模型，选用透明有机玻璃制作出简易的智能手表模型。其整体是一个圆柱体，且其下表面选用有机玻璃板。将已经制备好的 ZnO 紫外探测纳米芯片装置镶嵌在底面玻璃板上，并使其芯片阳极向上能够充分吸收光照，使得其可捕捉更多的紫外光线。同时将普通 ZnO 薄膜芯片镶嵌在 ZnO 纳米阵列芯片旁边，用作对比。并分别用芯片测试夹进行连接，随后在人工紫外光条件下用万用表测量两芯片的光敏电阻阻值来模拟紫外光强的监测，实现了紫外光强的实时、精确探测与显示。其存储数据装置位于手表底盘边缘处，结构上不仅实现了手表的正常使用还达到了美观的效果，功能上利用大数据实现数据上传，适应人们日常生活的需要，同时与数字经济联系密切。用有机玻璃板模拟手表的上表盖，在最大程度上还原手表表盘的形貌特征，且其透明的特点极大程度上减少了紫外光线的损耗，同时也具有较好的塑性和支撑作用。在未来投入使用时，将 ZnO 紫外探测纳米芯片

导光面朝上直接镶嵌在手表底表盘上并外接导线，既可捕捉紫外光线并将其转化为光敏电阻，又极大缩小了手表内部的空间，减轻手表重量，提高了人们佩戴的舒适度。同时实现了实用与美观两者完美结合。图 14 为手表模型示意图。

### 3.4.2 车载智能巡检模型



图 15. 车载智能巡检模型

本小组制作基于 ZnO 高精度紫外探测纳米芯片的车载智能巡检模型，选用透明有机玻璃制作出简易的车辆底盘。其整体类似于普通轿车。将已经制备好的高精度紫外探测 ZnO 纳米芯片装置镶嵌在汽车底盘上，且芯片导光面朝上使其能充分吸收光照并用芯片夹进行连接（如图 15）。随后在人工紫外光条件下用万用表测量芯片的光敏电阻阻值来模拟汽车内部设备的紫外放电检测。芯片可根据汽车内部设备上的灰尘辐射的紫外线强度来判断电晕放电强度，当放电导致的紫外光强度增大时，芯片所探测到的紫外线强度越强，万用表电阻越大。不仅可以诊断汽车电力设备故障和故障隐患，有利于在事故发生前及时采取有效处理措施，也对保障我国用电安全和提升电力系统检修水平有重要意义。

### 3.5 ZnO 紫外探测纳米芯片性能测试

#### 3.5.1 ZnO 紫外探测纳米芯片光电性能表征

本项目在实验室通过光电化学工作站 (IviumStat.h, Netherlands) 分别在暗光和紫外光 (365nm) 下对 ZnO 纳米棒紫外探测器件与 ZnO 薄膜紫外探测器件的响应度、灵敏度特性和紫外探测性能进行精确测试。

响应度与灵敏度对于紫外探测器来说是一个非常重要的参数，其中：

响应度的定义为：

$$\eta = \frac{\Delta I}{PA} \quad \#(1)$$

式中  $\Delta I = I_{light} - I_{dark}$ ， $P$  为入射光的功率 ( $P = 0.2 - 1.4 \text{ W} / \text{m}^2$ )， $A$  为设备的有效面

积 ( $A = 0.16\text{cm}^2$ )

灵敏度的定义为:

$$S(\%) = \left( \frac{I_{UV} - I_{dark}}{I_{dark}} \right) \times 100 \#(2)$$

式中  $S$  是灵敏度,  $I_{UV}$  是光电流,  $I_{dark}$  为暗电流。

本小组利用式 (1) 计算出不同光强下 ZnO 纳米棒紫外探测器件与 ZnO 薄膜紫外探测器件的响应度大小, 利用式 (2) 计算出不同光强下 ZnO 纳米棒紫外探测器件与 ZnO 薄膜紫外探测器件的灵敏度大小。并以表 1 的形式加以呈现。

表 1. ZnO 纳米棒紫外探测器件与 ZnO 薄膜紫外探测器件的响应度与灵敏度

光强 ( $\text{W/m}^2$ )	响应度 $\eta$ ( $\mu\text{A}/\text{mw}$ )		灵敏度 $S$ (%)	
	ZnO 纳米棒	ZnO 薄膜	ZnO 纳米棒	ZnO 薄膜
	紫外探测器	紫外探测器	紫外探测器	紫外探测器
0.2	12.75	0.21	23	44
0.4	28.16	0.32	37	52
0.6	36.21	0.4	49	60
0.8	40.23	0.45	51	62
1.0	44.25	0.5	52	62
1.2	47.47	0.67	54	39
1.4	51.5	0.69	56	37

如表 1 所示, 随紫外光强度的增强, ZnO 纳米棒紫外探测器件与 ZnO 薄膜紫外探测器件的响应度成上升趋势<sup>[14]</sup>。且在同种紫外光强度的照射下, ZnO 纳米棒紫外探测器件的响应度比 ZnO 薄膜紫外探测器件的响应度高出 50 倍之多, 因此, ZnO 纳米棒在紫外光照射下表现出更加良好的紫外光响应特性, 说明本小组所制备的 ZnO 纳米棒紫外探测器件对紫外光具有高敏感特性<sup>[15]</sup>。



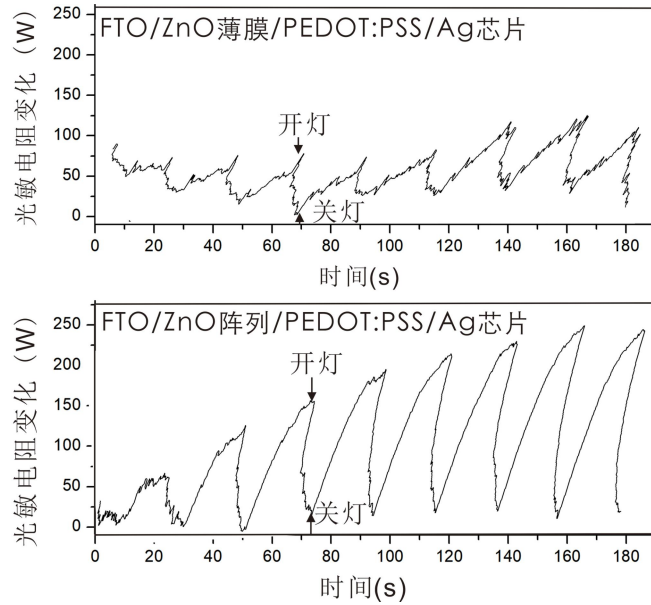


图 16. 光敏电阻随时间的变化情况

为进一步对比研究 ZnO 纳米棒紫外探测器件与 ZnO 薄膜紫外探测器件在不同紫外光强度照射下的稳定性和循环性。本小组以紫外光照射 10s 后关闭紫外光 10s 为一个周期，测量器件光敏电阻随时间的变化情况，共进行 8 个周期紫外光强度逐级递增的开关循环测试（结果如图 16 所示）。

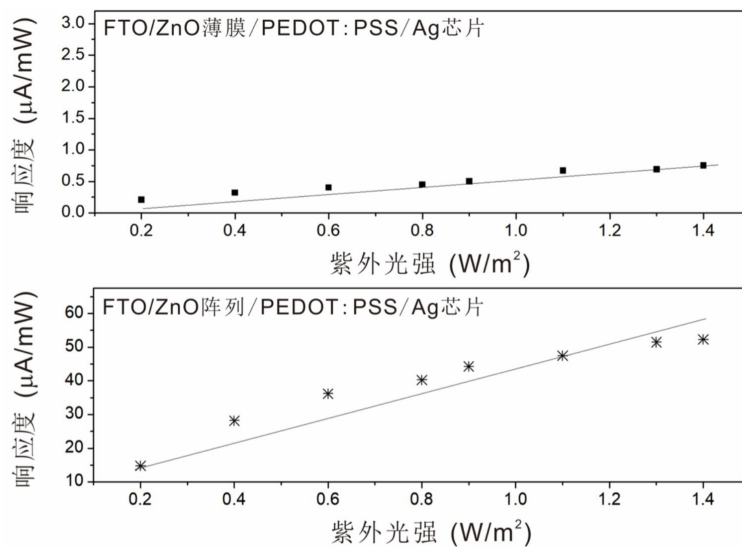


图 17. 芯片紫外光强和响应度的关系

从图中可以发现，当紫外光照射时，ZnO 纳米棒紫外探测器件与 ZnO 薄膜紫外探测器件中的电阻都会随着紫外光的照射而迅速上升。紫外光关闭后，探测器的电阻先是快速下降，然后进入弛豫状态，下降速度变得缓慢，最后恢复到光照前的初始电阻值。经过紫外光强度逐渐递增的 8 个周期的循环实验，在每个周期 ZnO 纳米棒紫外探测器件与 ZnO 薄膜紫外探测



器件电阻变化率都表现为相同的变化规律和趋势，且电阻变化率随着紫外光强度的上升而上升。通过对比发现在相同的紫外光强度的照射下，ZnO 纳米棒紫外探测器件的电阻变化率比 ZnO 薄膜紫外探测器件的电阻变化率高出将近 5 倍，这说明本小组所制备的 ZnO 纳米棒紫外探测器具有更好的紫外光响应和恢复特征，即器件具有良好的重复性和稳定性<sup>[16]</sup>。因此相比于 ZnO 薄膜紫外探测芯片，本小组所制备的 ZnO 纳米棒紫外探测器对紫外光具有更快更好的响应（如图 17 所示）。

#### 4. 应用前景

在即将实施的“十四五”规划和 2035 远景目标的背景下，数字化经济成为一种引领时代发展的主要趋势。而通过紫外高精度探测技术与智能手表、电力设备检测相结合，实现对手表智能化实时监控以及其对电力设施污秽的智能检测，正是数字化经济与制造业结合的双引擎。

与其他常规薄膜相比，ZnO 电子传输材料具有迁移率较高、稳定性好且价格低廉，制备工艺简单方便等特点<sup>[17]</sup>。同时金属 Ag 电极减少了 ZnO 纳米棒状阵列的表面态，有效地提高其间的暗电阻，提升芯片的光电响应速度。因此本项目采用 ZnO 制成纳米阵列增强光的限域效应<sup>[18]</sup>，并对紫外探测技术和相关器件进行研究。

本小组极具创新性的将其运用于智能手表中，实现了对紫外线的实时、无网络精确探测，并利用大数据与云计算可对全球各地紫外线强度进行汇总归纳。在实际投入使用时采用紫外辐射指数作为表盘，并将电阻值和紫外辐射量进行量化处理，更加适应人们日常生活的需要。此外，本项目所制备的 ZnO 纳米芯片智能手表模型具有成本低、无污染、节约能源等优势，芯片对紫外线的探测部分不消耗电能并且对环境无污染，完全符合国家对节能减排的号召，也满足了大众对无污染和低成本物品的需求。同时将芯片植入智能手环用于服务于社会生活，具有较大的发展潜力与发展前景，新能源与智能手表的一体化更加适应市场的需要，可进行大规模生产与应用。本项目的研发还适用于畏光病、皮肤癌患者以及“美黑”等人群的需求，并且农业工作者也可以通过佩戴这一高强度紫外线探测手表随时随地，快速了解田地环境的紫外线强度，进而对农作物进行相关遮盖等措施，减轻因紫外线过强或过弱对农作物生长造成的影响。因此，本项目所设计的紫外线探测的纳米芯片对各类人群均有益。

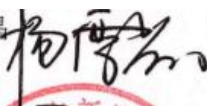
此外，高精度紫外探测芯片还可扩展运用到科技生活中的很多方面。汽车经过长时间的使用，发动机内部会积累较多的灰尘，而具有污秽的电力设备在高压运行中会由于局部的压强过高导致电晕放电，影响汽车设备稳定安全运行，若将这一探测紫外线强度的纳米芯片用于汽车内部设备的紫外放电检测，通过探测汽车内部设备上灰尘辐射的紫外光线的强度来判

断电晕放电强度，不仅可以诊断汽车电力设备故障和故障隐患，有利于在事故发生前及时采取有效处理措施，也对保障我国用电安全和提升电力系统检修水平有重要意义。

本小组制备的芯片也可应用于自动天窗、输变电日常巡检、现场故障抢修和指挥以及变电系统状态的精确标定。同时输电系统和数据云端结合对紫外线进行实时监控，与数字经济联系紧密。在未来进一步研究中，还有望继续提升芯片性能，改进小组装置设计。

## 5. 小结

综合以上对相关文献的分析，国内公开发表的中文文献中，在检索范围内：  
未见有利用宽禁带半导体材料 ZnO，并以 FTO 玻璃为基底，通过构筑 ZnO 种子层，采用水热法使之形成纳米棒状阵列，并在阵列表面旋涂空穴传输层 PEDOT:PSS，最后在蒸镀 Ag 电极后用导线外接电路制备出 ZnO 高精度紫外探测纳米芯片，将其用于车载电力巡检系统和智能手表中的研究报道。

查新员（签字）：杨雪晶  查新员职称：副研究馆员

查新员（签字）：姜雷  查新员职称：副研究馆员

审核员（签字）：李婧  审核员职称：副研究馆员

(科技查新专用章)

2021年9月17日

图 18. 查新结果

通过文献查新，综合对相关文献的分析，在国内公开发表的中文文献中，在检索范围内未见有利用宽禁带半导体材料 ZnO，并以 FTO 玻璃为基底，通过构筑 ZnO 种子层，采用水热法使之形成纳米棒状阵列，并在阵列表面旋涂空穴传输层 PEDOT:PSS，最后在蒸镀 Ag 电极后用导线外接电路制备出 ZnO 高精度紫外探测纳米芯片，将其应用于车载电力巡检系统和智能手表中的研究报道。图 18 为本项目的查新结果。

综上所述，高精度紫外探测 ZnO 纳米芯片具有实时、无网络、精确探测紫外线强度。ZnO 纳米棒状阵列相较于 ZnO 普通薄膜而言，纳米棒的径向传输功能使电子进行无损传输，同时也可使紫外线在微区内多次反射，提高捕捉紫外线的的能力，提高了芯片的响应度，优势显著。且高精度、高标准的紫外线探测系统适用于智能基础设施方方面面，具有较大的发展潜力与

发展前景。最后基于高精度紫外探测纳米芯片构筑智能基础设施一体化模型在一定程度上体现了物理、科技、生活与美学在数字经济中的完美融合。

### 参考文献

- [1] 马少吟,朱慧兰. 紫外线辐射的危害及其防护 [J]. 国际皮肤性病杂志. 2009 (06): 367-369.
- [2] 刘云燕,袁玉珍,李洁. ZnO 基紫外光电探测器的研究进展 [J]. 材料导报. 2007(10): 9-11,16.
- [3] 彭涛. 基于红外、紫外探测技术的车载电力巡检系统设计与实现 [D]. 天津大学. 2018.
- [4] Lilli Matteo, Sbardella Francesca, Bavasso Irene, Bracciale Maria Paola, Scheffler Christina, Rivilla Ivan, Xin Wenbo, De Rosa Igor Maria, Sarasini Fabrizio. Tailoring the interfacial strength of basalt fibres/epoxy composite with ZnO-nanorods [J]. Composite Interfaces, 2021: 4-23
- [5] 张意晨,徐海涛,赵春辉. 有机太阳能电池 PEDOT:PSS 空穴传输层及其改性的研究进展 [J]. 材料导报. 2021 (03): 3204-3208.
- [6] HosseiniSarvari Mona, Sarvestani Abdollah Masoudi. N-doped ZnO as an efficient photocatalyst for thiocyanation of indoles and phenols under visible-light. [J]. Photochemical & photobiological sciences, 2021:5-8
- [7] Jali Mohd Hafiz, Rahim Hazli Rafis Abdul, Johari Md Ashadi Md, Ahmad Aminah, Yusof Haziezol Helmi Mohd, Johari Siti Halma, Baharom Mohamad Faizal, Thokchom Siddharth, Dimyati Kaharudin, Harun Sulaiman Wadi. Integrating microsphere resonator and ZnO nanorods coated glass for humidity sensing application [J]. Optics and Laser Technology, 2021: 143-150
- [8] 张雯,张庆腾,贺永宁. ZnO 纳米线膜的可控生长及其量子限域效应研究 [J]. 西安交通大学学报. 2010(04): 82-86.
- [9] Barnett Chris J., McGettrick James D., Shenoy Gangoli Varun, Navarro-Torres Jorge, Watson Trystan, Maffeis Thierry G.G., Barron Andrew R., Orbaek White Alvin. Controlled and permanent induced Fermi shifts and upwards band bending in ZnO nanorods by surface stripping with argon bombardment [J]. Materials Letters, 2021: 301-310
- [10] 陈文会,陈江宁,王志勇. ZnO 纳米器件在紫外线强度监测报警中的应用 [J]. 传感技术学报. 2016 (04): 479-483.
- [11] Alghamdi A. K., Hjiri M., Abdel Daiem A. M., Abdel wahab M. Sh., Besbess H., Aida M. S.. Correction to: ZnO Nanorods growth via green chemistry using wormwood (Artemisia)[J]. Applied Physics A, 2021: 127-145

- [12] 马瑾, 计峰, 马洪磊. 退火处理对氧化锌透明导电薄膜的结构及电学性能的影响 [J]. 山东电子. 1997
- [13] 王蓉. 氧化锌制备方法与形貌控制 [J]. 当代化工研究. 2017
- [14] 张美林. 一维 ZnO 纳米阵列制备及其在太阳能电池中的应用研究 [D]. 中国科学院大学. 2014.
- [15] 李捷妮. 基于 ZnO 纳米棒阵列的紫外光探测器制备与性能研究 [D]. 中国科学技术大学. 2017.

# 基于光敏传感器的外挂式电梯 无接触操控装置研究报告

参赛者：左孝磊 王海波 胡永峰 刘宇 齐子凯

(浙江科技学院自动化与电气工程学院, 杭州 310023)

指导教师：徐然、郑永平

**摘要：**伴随着数字经济的发展，物联网技术开始走向人们的生活。根据国家最新防疫常态化指示，加强公共卫生已经成为我们日常生活中重要的一部分。在日常生活中，公共电梯按键上残留大量细菌病毒，疫情期间，如果仍用传统的接触性方式操控按键，会加速病毒的传播，不利于疫情防控。以华为为代表的企业开发的新型物联网电梯，适用于新建电梯，不适用于传统电梯。并且物联网电梯依赖于手机进行操控，不利于老人与小孩的使用。针对这样的问题，我们设计了外挂式无接触操控装置。本装置作为独立的装置，外挂于电梯的按键外。本装置通过光敏传感器探测技术定位手指位置、语音模块收集语音数据、手机连接等方式将用户想要去的楼层信息传给主控板，主控板发出信号驱动二维平台按键机构，按下对应电梯上对应楼层的按键。然后通过语音、按键灯光等信息反馈给用户。本装置具有成本较低，社会经济效益高，安装方便，满足数字经济发展等优点。

**关键词：**外挂式无接触按键装置 光敏传感器探测 语音模块 手机连接 二维平台按键机构 主控板

## 1. 研究背景

日常生活中，电梯为公共设施，按键每天会被许许多多的人按下，导致电梯按键上可能会残留有大量的细菌病毒。**接触性传播成为疫情期间病毒传播的主要途径之一。**疫情期间，人们通过牙签、纸巾等中介物形式操作电梯按键（如图 1 所示），这种方式在运行中需要消耗人力去替换，且不及时，同时暴露于空气中容易受到污染，进而进一步加速病毒的传播。



(a) 牙签接触电梯



(b) 纸巾接触电梯



(c) 笔接触电梯

图 1 疫情期间人们乘梯按键方式举例

市面上目前的解决方法有通过二维码扫描或手机 APP 等远程操控的方式，这需要对电梯本体进行改装。而电梯属于**特种设备**，对电梯的改造必须通过厂家并通过测试鉴定，改造周期长难度大，性价比不高，市场推广难度大。而已安装运行的电梯，因其配件升级、资产已归属业主，要想实现无接触按键改造，更是困扰重重，难以推广。

本项目，作为非电梯厂商，针对已安装的电梯，设计了一种无需对电梯内部结构进行改装的，具有多种无接触操作方式的外挂式电梯辅助装置。电梯按键外挂本装置后，乘客可以通过手指悬停，语音操控，手机操控等方式操控电梯。本项目遵循了党中央的防疫常态化知识。提升与完善了公共卫生体系。同时将物联网技术进一步带入人们的生活，满足数字与经济的发展，便利了人们的生活。

## 2. 系统设计与物理原理

### 2.1 系统设计

本装置是一种外挂装置，装置集合了光敏传感器定位模块，语音交互模块，无线通讯模块。通过语音模块收集语音数据、光敏传感器模块定位手指位置、无线传输等方式将用户想要去的楼层信息传给主控板，主控板发出信号驱动二维平台按键机构，按下对应电梯上对应楼层的按键。然后通过语音、按键灯光等信息反馈给用户。装置正面模型图如图 2 所示，装置背面模型图如图 3 所示。

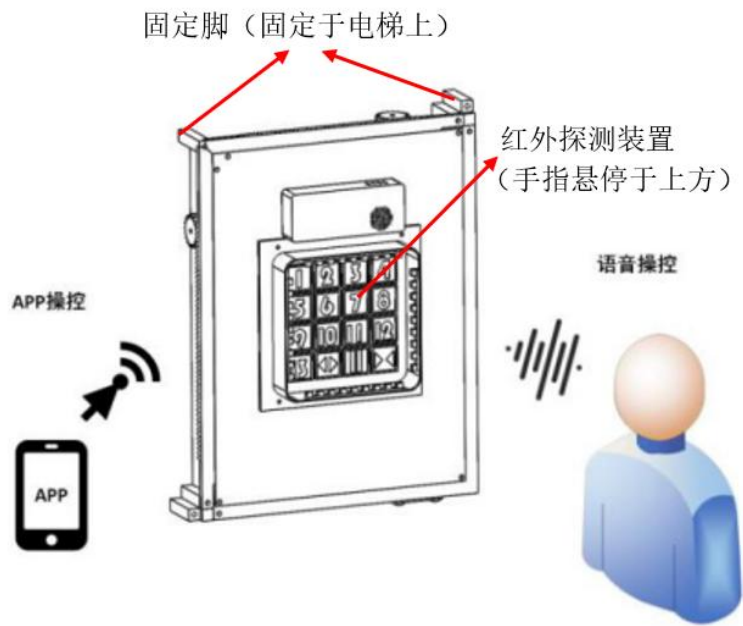


图2 装置正面模型图

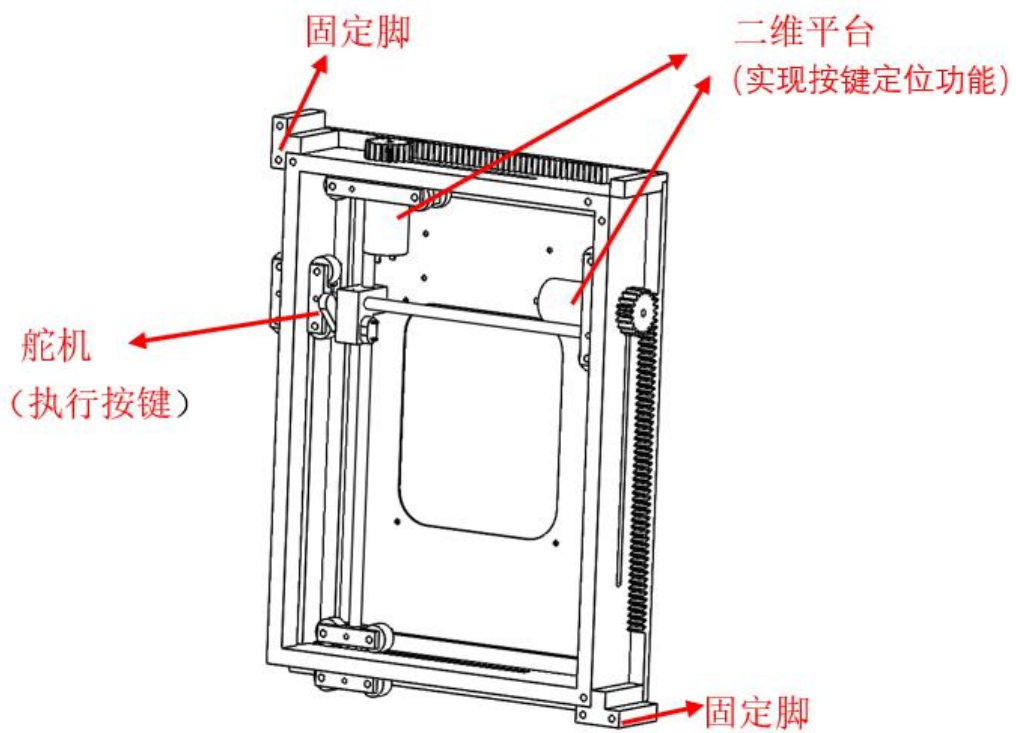


图3 装置背面模型图



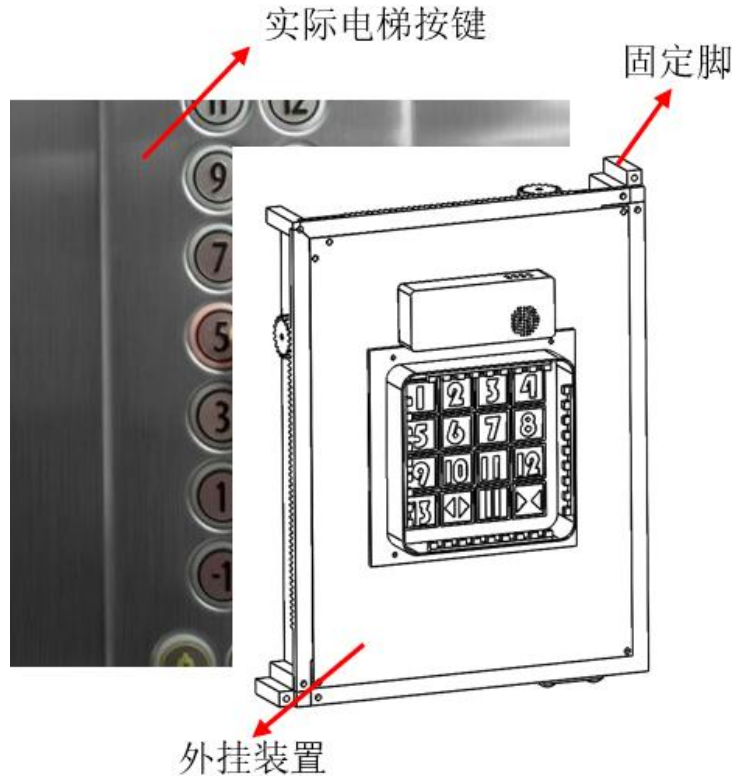


图4 装置使用示意图

本项目装置为完全独立于电梯使用（如图4所示），仅有与人工操作类似的柔性触点机械接触，从而不会对电梯的质保、年检造成任何影响。因而装置适用性广、安装方便，仅需对的电梯操作面板进行简单说明示教，即可快速安装投用。此外，本装置含有两种模式：疫情模式、日常模式。在疫情模式下，语音提示推荐优先使用语音或远程按键，同时也可以使用悬浮按键，并可选择是否关闭物理按键；在日常模式下，推荐优先使用悬浮按键或手机APP，语音和物理按键也同时开放，可以适用于多种情况满足更多人的需要。做到在不影响正常使用的情况下，增添了另外的功能。

系统包含的物理原理如下：

## 2.2 光敏传感器定位手指的物理原理

在装置（见图2）上层的楼层按键板四侧装有一定高度的面板，面板上有若横纵两对红外光栅，红外光栅上有若干对红外对射管。当手指置于其间时，由于阻隔了红外信号，对应坐标的光敏传感器的接收信号急剧下降，得到一个坐标值，同时另一个轴上也会得到一个坐标值，据此推断出手指的位置，经过对按键坐标的对比，转化为楼层数，实现对用户希望到达楼层数的读取。光敏传感器又叫光感电阻，其物理工作原理是基于光电效应。

## (1) 光电效应

光束里的光子所拥有的能量与光的频率成正比。光电子的能量与辐照度无关，只与光子的能量、频率有关。

光子所有能量都必须被吸收，用来克服逸出功，否则这能量会被释出。假若电子所吸收的能量能够克服逸出功，并且还有剩余能量，则这剩余能量会成为电子在被发射后的动能。

逸出功  $W$  是从金属表面发射出一个光电子所需要的最小能量。如果转换到频率的角度来看，光子的频率必须大于金属特征的极限频率，才能给予电子足够的能量克服逸出功。逸出功与极限频率  $\nu_0$  之间的关系为

$$W = h\nu_0$$

其中， $h$  是普朗克常数， $h\nu_0$  是光频率为  $\nu_0$  的光子的能量。

克服逸出功之后，光电子的最大动能为

$$K_{\max} = h\nu - W = h(\nu - \nu_0)$$

其中， $h\nu$  是光频率为  $\nu$  的光子所带有并且被电子吸收的能量。

实际物理要求动能必须是正值，因此，光频率必须大于或等于极限频率，光电效应才能发生。

## (2) 光敏电阻

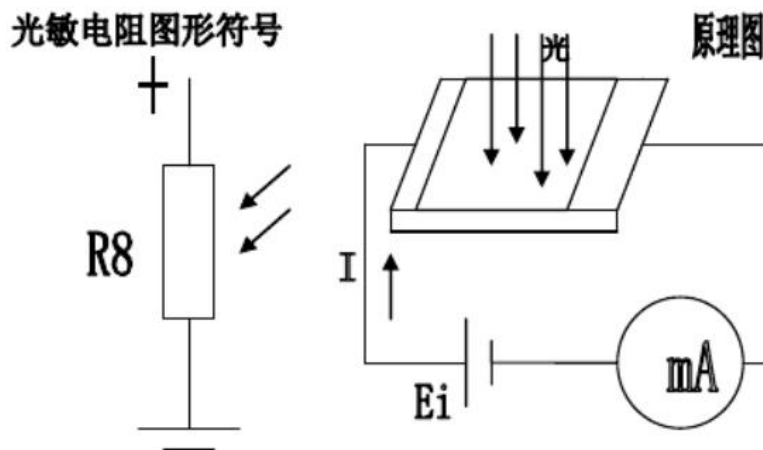


图 5 光敏电阻原理图

光敏电阻（如图 5 所示）是利用半导体的光电效应制成的一种电阻值随入射光的强弱而改变的电阻器；入射光强，电阻减小，入射光弱，电阻增大。光敏电阻器一般用于光的测量、光的控制和光电转换（将光的变化转换为电的变化）。

原理:它是基于半导体光电效应工作的。

光谱范围:从紫外线区到红外线区。

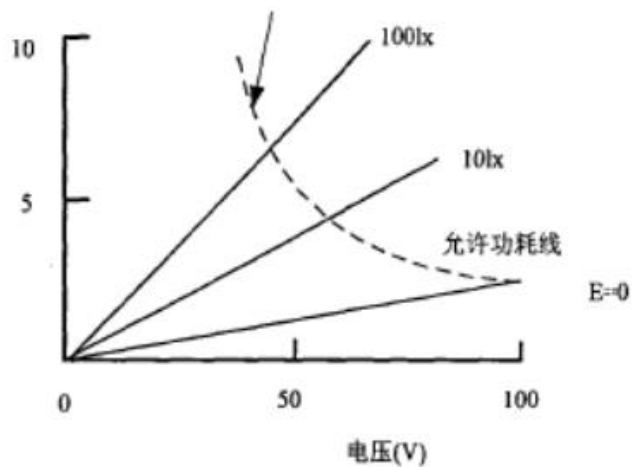


图6 光敏电阻伏安特性图

光敏电阻的伏安特性（如图6所示）：

1. 所加电压  $U$  越高，光电流  $I$  也越大，而且无饱和现象。
2. 在给定的光照下， $U-I$  曲线是一直线，说明电阻值与外加电压无关。
3. 在给定的电压下，光电流的数值将随光照的增强而增加。

### 2.3 步进电机指定点移动的物理原理

驱动装置下方两个步进电机，利用齿轮加齿条的机构，实现在滑块电梯按键上侧二维平面的移动。滑块上固定有舵机，舵机前有减震装置，当移动到需要按下的楼层按键时，驱动舵机，实现对电梯按键的按下。步进电机主要涉及**电磁学原理**，将**电能转化为机械能**。

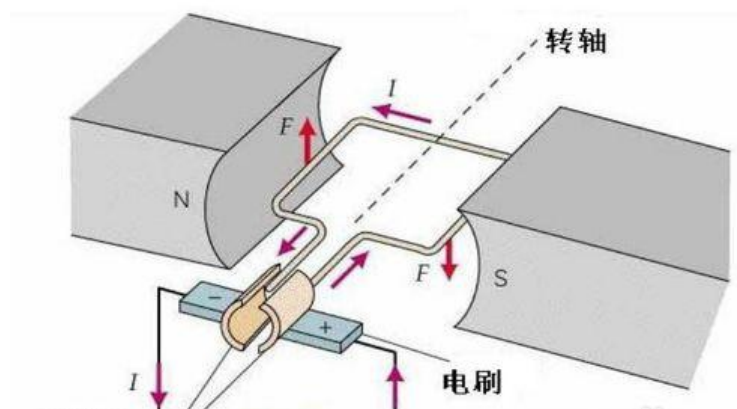


图7 电机旋转原理图

如图7所示，根据左手定则，磁场线穿过手掌心，四指指向电流的方向，大拇指所指方向就是带电导体在磁场中所受力的方向。这是维持内部转子转动的基本原理。当控制单片机传送指定脉冲，即可控制电机转动，从而带动传送带转动到达指定位置。

## 2.4 无线通讯的物理原理

无线通讯的本质是电磁波的传输，主要涉及的物理原理是**电磁感应**。其物理原理包括**电磁波的产生与传输**。

由麦克斯韦的电磁场理论，变化的电场产生变化的磁场，而变化的磁场又产生变化的电场，这样，**变化电场和变化磁场之间相互依赖，相互激发，交替产生，并以一定速度由近及远地在空间传播出去。这样就产生了电磁波。**微分形式的麦克斯韦方程组如下：

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad \text{公式 (1)}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad \text{公式 (2)}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad \text{公式 (3)}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \quad \text{公式 (4)}$$

公式 (1) 表示变化的电场可以产生磁场。公式 (2) 表示变化的磁场可以产生感应电场。公式 (3) 表示磁场是无源的。公式 (4) 表示静电场是有源的。方程组揭示了**变化的磁场会产生变化的电场，变化的电场也会产生变化的磁场。**电磁场的交变示意图如图 8 所示。

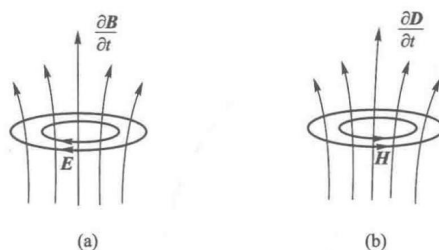


图 8 电磁场交变图

电磁波的传输由同向振荡且互相垂直的**电场与磁场**在空间中以波的形式移动，其传播方向垂直于电场与磁场构成的平面。电磁波在真空中速率固定，速度为光速。如图 9 电磁波的传播原理图：

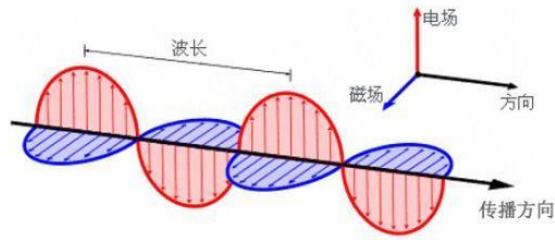


图 9 电磁波的传播原理图

电磁波的波长越长，可以传输的距离越远，电磁波的波长越短，可以携带的信息越多。为了更加适用于本场景的无线通讯，我们选择了一个微波段进行传输。如图 10 电磁波谱图：

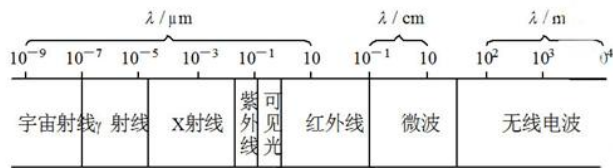


图 10 电磁波谱图

HC08 模块的工作频率 2.4GHz, 即波长 0.125 米, 属于微波频段。

### 3. 技术分析

#### 3.1 系统硬件设计

##### 3.1.1 系统硬件流程图

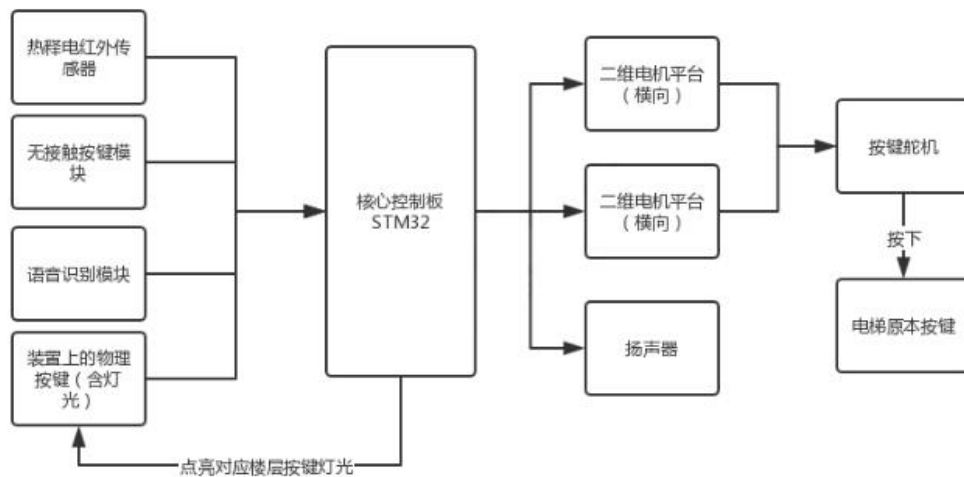


图 11 系统结构框图

本装置包括，红外光栅对射无接触输入、电机拟人按键、智能语音交互、低功耗蓝牙通

信等部分（如图 11 所示）。

装置通过红外光栅对射探测技术定位手指位置、语音模块收集语音数据、手机无线连接将用户想要去的楼层信息传给主控板，主控板发出信号驱动按键机构，按下对应电梯上对应的按键。

### 3.1.2 红外对射检测模块设计

在装置（见图 12）上层的楼层按键板四侧装有一定高度的面板，面板上有横纵两对红外光栅，红外光栅上有若干对红外对射管。当手指置于其间时，由于阻隔了红外信号，对应坐标的接收管接收的信号急剧下降，得到一个坐标值，同时另一个轴上也会得到一个坐标值，据此推断出手指的位置，经过对按键坐标的对比，转化为按键信号，实现对用户希望按下的按键的读取。

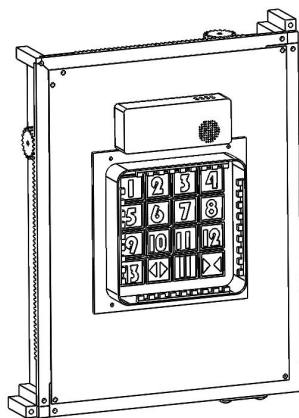


图 12 红外矩阵传感器

### 3.1.3 机电联动装置设计

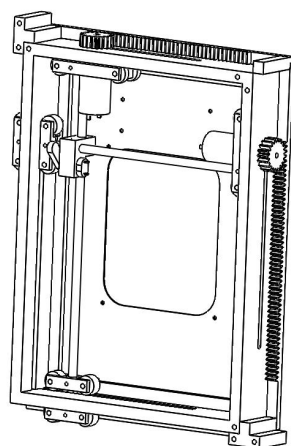


图 13 模拟按键装置

装置的背面为二维电机按键模块（如图 13 所示）。二维电机按键模块将接收到的远程控制指令、用户的语音、无接触按键扫描得到的信号，经过核心控制板分析后，计算出用户想要到达的楼层，驱动装置下方两个步进电机，利用齿轮加齿条的机构，实现在滑块电梯按键上侧二维平面的移动。滑块上固定有舵机，舵机前有减震装置，当移动到需要按下的楼层按键时，驱动舵机，实现对电梯按键的按下。

### 3.1.4 语音交互模块电路图

装置语音交互模块经过训练与测试，可以较高精确度的识别关键词，再根据事先设定好的答复进行播报与功能操作。装置电路原理图如下所示。

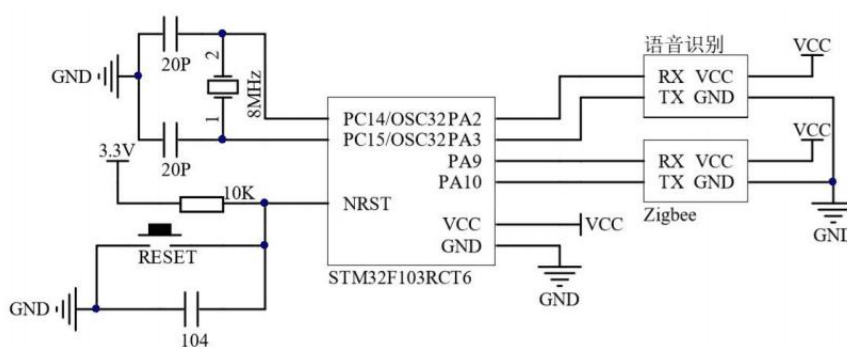


图 14 语音交互模块电路图

### 3.1.5 无线传输模块设计

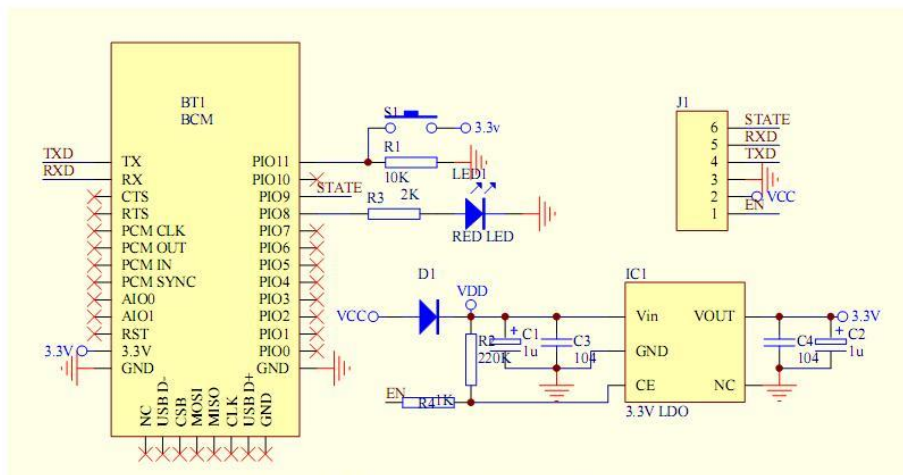


图 15 蓝牙模块电路原理图

本装置使用 HC08 无线通讯模块，中 HC 系列的模块目前用于单片机通信的方面最广，具有低功耗（以 HC08 为代表），操作极为简单（安装支持 BLE 的 APP 后无需对码且指令集简单），主从机一体，通信效果好这些。HC08 模块电路原理图如图 15 所示

### 3.1.6 控制电路设计



本装置控制电路的芯片采用 STM32F103RCT6 微处理器，该单片机功能丰富，具有低价格、低功耗、高性能等特点。其电路设计原理图如下图 16 所示：

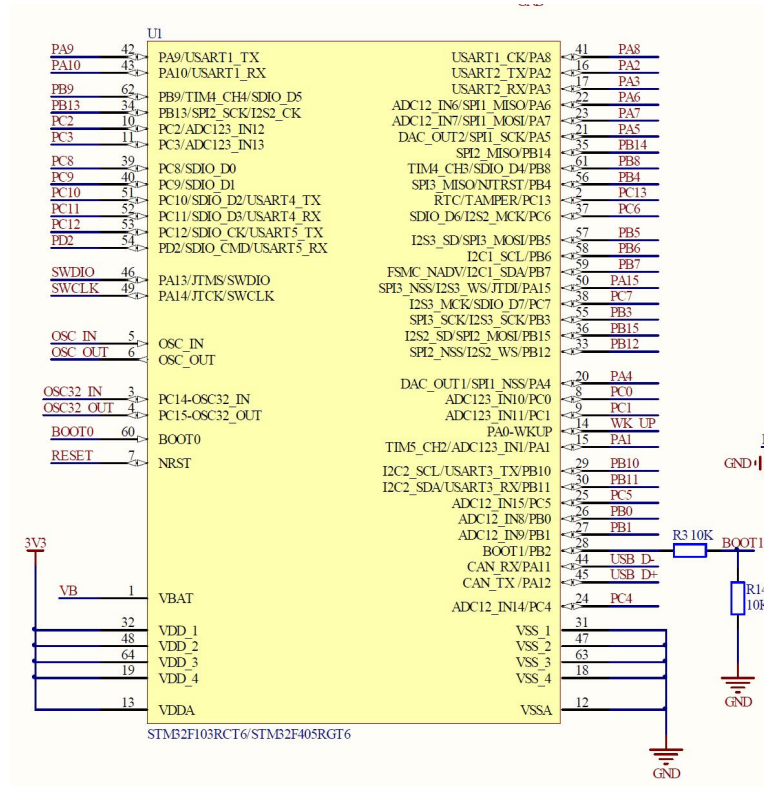


图 16 微处理器原理图

装置通过语音数据、光敏传感器模块定位手指位置、无线传输等方式将用户想要去的楼层信息传给微处理器，微处理器发出信号驱动二维平台按键机构，按下对应电梯上对应楼层的按键。

### 3.2 系统软件设计

#### 3.2.1 系统软件流程分析

系统在执行功能时，首先进行初始化。紧接着系统会判断接收到哪种指令（手机无线指令，语音指令，矩阵光敏传感器指令）。当接收到对应指令后，信息经过微处理器处理后，控制二维平台移动，带动舵机到达指定位置。之后舵机开始工作，代替手指按下按键。流程图如下所示：

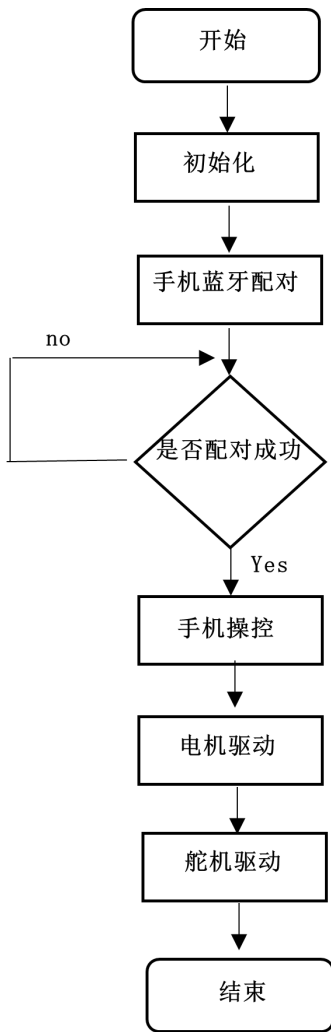


图 17 蓝牙控制流程

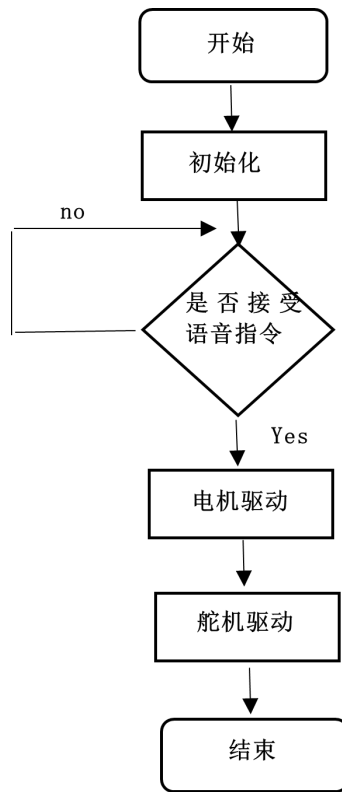


图 18 语音控制流程

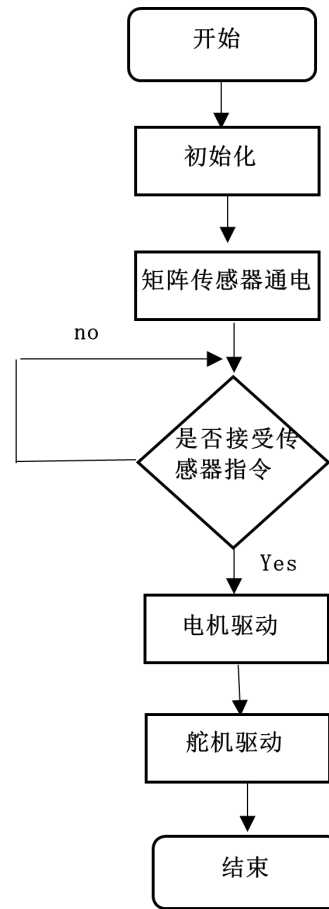


图 19 传感器控制流程

### 3.2.2 智能语音训练模块设计

当乘客呼叫“电梯管家”后，可以唤醒语音交互模块，紧接着乘客呼叫“一楼”即可驱动我们的二维平台驱动带动我们的舵机到达按键所在位置。同样的道理可以驱动二维平台带动舵机到达其他按键所在位置。

装置采集的语音信号首先需要进行预处理，包括滤波、采样、量化、加窗、预加重等过程。语音信号经预处理后，进行特征参数提取。

**隐马尔可夫模型**（Hidden Markov Model, HMM）由于其具有较强的时间序列结构的建模能力，被广泛被应用在语音识别中。80年代产生的HMM是语音信号处理技术的重大发展，隐含马尔可夫模型的算法是将语音看成是一连串的特定制状态，其中所处的某个状态是不可见，即不能被直接观测到的，比如该状态为语音的某个音素的特征，而各状态之间是根据转移概率矩阵进行转移的，状态转移的随机过程是隐含，这种隐含的关系与语音的观测量或者说语

音的特征相关联。并且这种隐含关系在 HMM 模型中通常以概率形式表现出来，模型的输出结果也以概率形式给出。经典的 HMM 语音识别一般过程为：

- (1) 前向后向计算  $P(O|A)$  用以评估模型；
- (2) 期望修正法 (Banum-Welch) 求出最优解  $\lambda^* = \arg \max \{P(O|A)\}$
- (3) Viterbi 算法求解最佳状态转移序列；
- (4) 根据最佳序列状态对应的  $\lambda^*$  选择候选音节或声韵母；
- (5) 通过语音模型形成词和句子。

基于 HMM 的孤立词语语音识别原理图如图 20 所示。

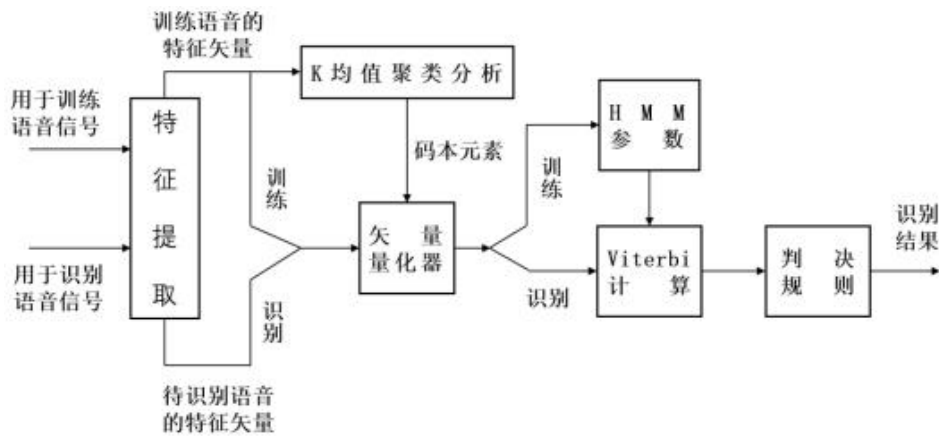


图 20 基于 HMM 的孤立词语语音识别原理图

### 3.2.3 显示屏模块与 APP 设计

本项目采用 LCD 屏幕进行显示。LCD 与主控板之间通过 IIC 的方式进行通讯。它是由数据线 SDA 和时钟 SCL 构成的串行总线，可发送和接收数据。这些信号中，起始信号是必需的，结束信号和应答信号，都可以不要。IIC 总线时序图如图 21 所示：

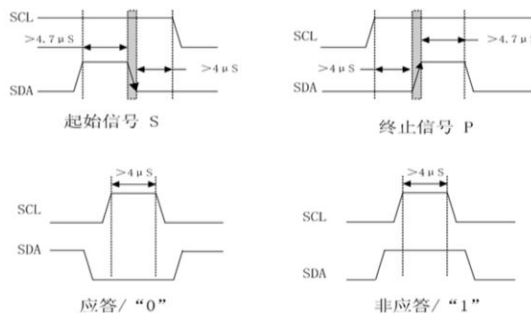


图 21 IIC 总线时序图

**开始信号：**SCL 为高电平时，SDA 由高电平向低电平跳变，开始传送数据。

**结束信号：**SCL 为高电平时，SDA 由低电平向高电平跳变，结束传送数据。

通过 APP 可以远程控制本装置。APP 的初始设置界面如图 22 所示。

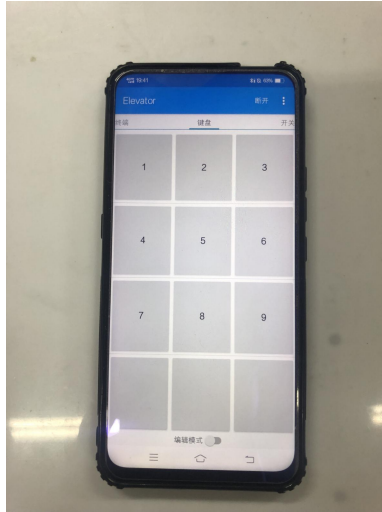


图 22 APP 操控初始界面图

如图 22 所示，当按下一号按键时，可操控二维平台带动舵机到达一楼按键所在位置。

同样的道理可以操控装置按下指定楼层按键。

## 4. 实验测试

### 4.1 组装模型：

整体装置图如图 23 所示。



图 23 装置整体图

该装置由四大模块组成。用户界面模块，基于光敏传感器的红外对射检测模块，语音交互模块，电机舵机驱动模块。在前期的研发中。我们将各个模块分开测试，再将测试好的模块整合到一起。模块的分开有利于我们的演示与答辩讲解，在后期的定产使用中，我们会将各模块整合到电路板上，形成装置的核心版，从而大大减小体积。

相应模块实物图如下所示：

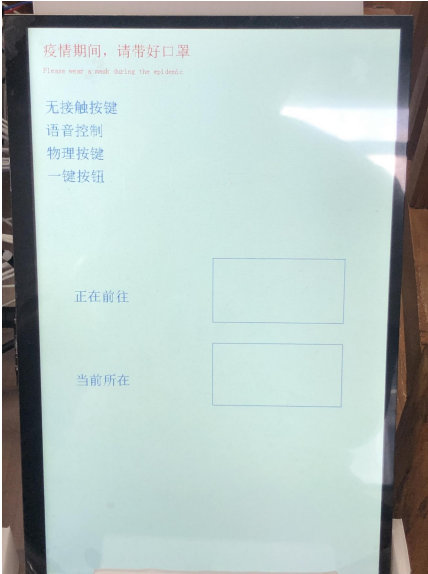


图 24 用户界面示意图

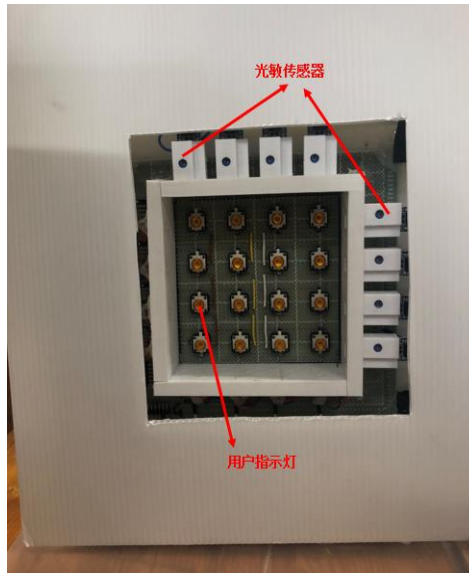


图 25 红外操控模块实物图

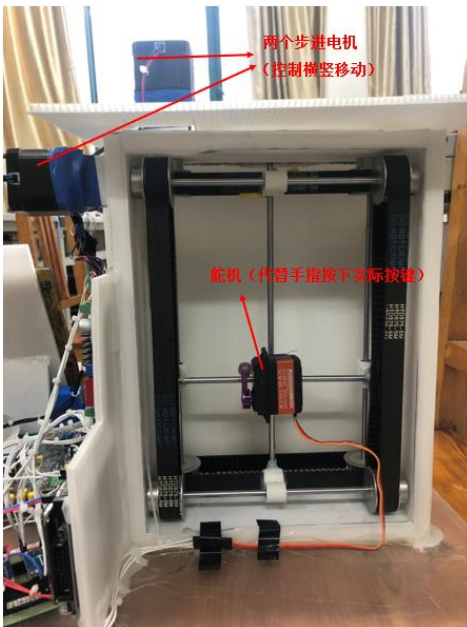


图 26 机电驱动模块实物图

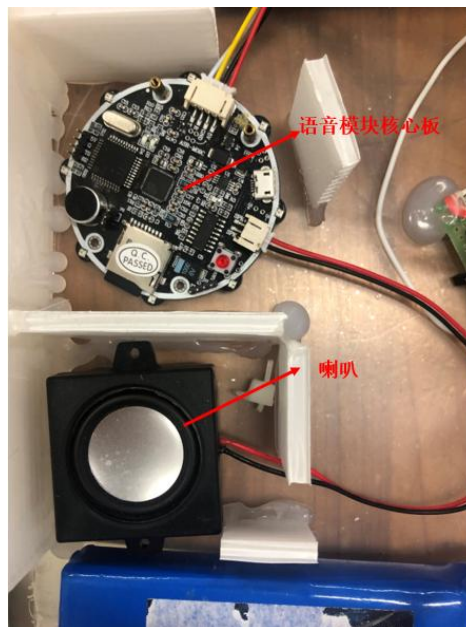


图 27 语音交互模块实物图

用户界面初步设定如图 24 所示，此原始界面的设定可以有效的提醒用户当前所在楼层位置，正在前往几楼。红外操控模块中的红外激光灯与光敏传感器可以定位悬停手指的位置（如



图 25 所示)。机电驱动模块中两个步进电机可以制舵机横向，纵向移动，从而使舵机达到指定位置（如图 26 所示）。语音交互模块中，核心版负责收集语音关键词，喇叭负责播报指定楼层位置等（如图 27 所示）。

## 4.2 装置运行测试

1. 由于在实验与演示环节，没有实际的电梯给我们进行演示与操作，所以我们自制了电梯按键，用来模仿实体电梯按键。如图 28 所示。



图 28 模拟按键

开始测试，我们以按一楼按键为例。

2. **红外探测模块测试：**手指先悬停于红外探测定位模块 1 号按键上方，如图 29 所示，指示灯亮起，并且显示屏上显示正在前往一楼。



图 29 初始用户界面图

3. **语音交互模块测试：**当播报电梯管家时，语音交互模块唤醒，当播报“一楼”时，语

音交互模块亮起，代表接受信息成功。如图 30 所示。

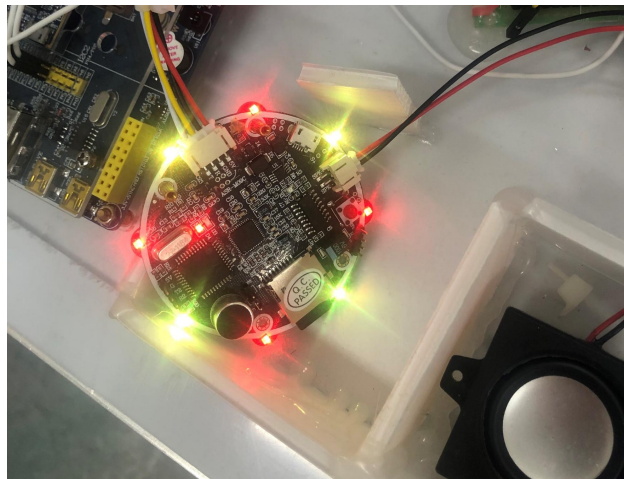
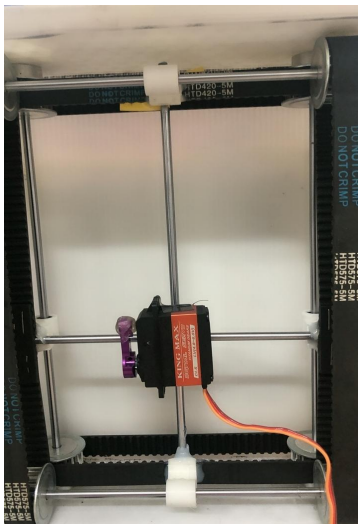


图 30 语音交互模块工作示意图

4. 当接受指令后，二维平台与舵机工作流程图如下：



(a) 舵机初始位置图



(b) 舵机到达指定点



(c) 舵机工作

图 31 二维平台与舵机工作流程图

当装置外挂上电梯后，舵机工作可代替手指按下一楼按键。如图 32 所示。



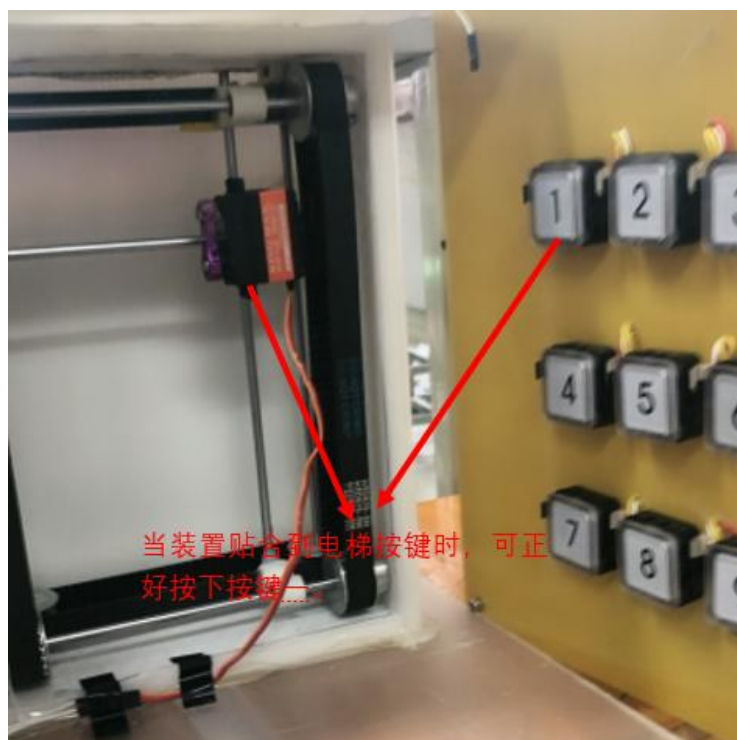


图 32 舵机工作示意图

4. 当舵机操作成功后，用户界面显示当前所在位置为一楼。如图 33 所示。



图 33 用户界面示意图

### 4.3 装置模块测试与数据分析

1. 红外对射检测模块的测试。在实验测试环节，当利用矩阵光敏传感器定位手指时，我们发现环境光线的强弱以及光线在模块上是否均匀分布都会造成矩阵光敏传感器定位手指时

产生偏差。所述光线分布不均匀即操作者在操作装置前或操作装置时，身体或者手臂可能会遮挡住部分光线，可能导致红外探测模块定位手指时不稳定。

表一：当其他条件不变时，单一控制环境的光线所测试出的数据

实验组数	判别次数	实验楼数	2	3	4	5	6	7	8
明亮环境	10	实验楼层 (单位楼)	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5、6	1、2、3、4、5、6、7	1、2、3、4、5、6、7、8
		准确率	100%	100%	100%	90%	80%	80%	80%
昏暗环境	10	实验楼层 (单位楼)	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5、6	1、2、3、4、5、6、7	1、2、3、4、5、6、7、8
		准确率	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%
光线不均匀环境	10	实验楼层 (单位楼)	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5、6	1、2、3、4、5、6、7	1、2、3、4、5、6、7、8
		准确率	80%	80%	90%	60%	50%	40%	25%

由表 1 数据得到图 34

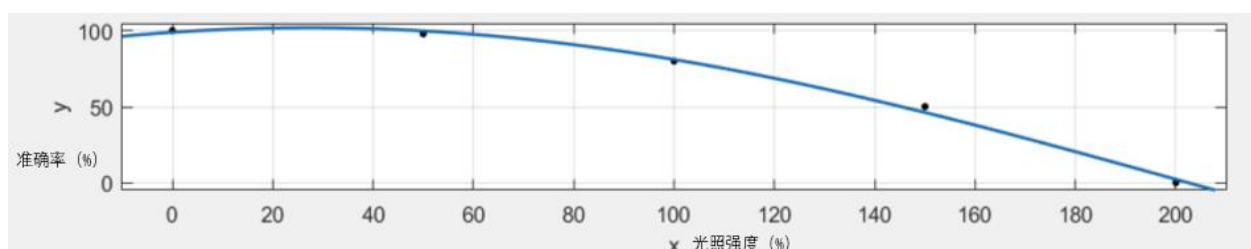


图 34 光照强度对准确率的影响

由实验可知在较暗环境下，装置的光敏控制模块稳定性最高；较亮环境下，装置的光敏控制模块稳定性较差；当光线较为不均匀的打在光敏模块上时，装置的光敏控制模块稳定性最差。

**2. 语音交互模块的测试。**实验中发现嘈杂环境下的语音识别准确率不够高，可能会产生误判；操作者过快的语速也会导致语音操控的精确率下降。

表 2：保持语速为标准语速，控制环境的嘈杂度，测试出数据。

实验组数	判别次数	实验楼数	2	3	4	5	6	7	8
安静环境	10	实验楼层 (单位楼)	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5、6	1、2、3、4、5、6、7	1、2、3、4、5、6、7、8
		准确率	100%	100%	100%	100%	100%	95%	95%
较为嘈杂环境	10	实验楼层 (单位楼)	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5、6	1、2、3、4、5、6、7	1、2、3、4、5、6、7、8
		准确率	100%	90%	80%	90%	60%	50%	40%
嘈杂环境	10	实验楼层 (单位楼)	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5、6	1、2、3、4、5、6、7	1、2、3、4、5、6、7、8
		准确率	60%	50%	50%	50%	30%	30%	25%

由表 2 数据得到图 35

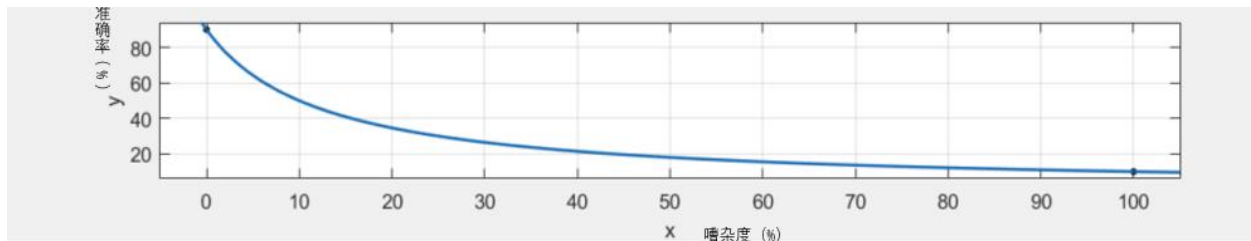


图 35 环境嘈杂度对准确率影响

由实验可知，当在较为安静的环境中进行语音播报可以精准的操控装置；当在较为嘈杂的环境中，语音播报的精准度较低；当在嘈杂的环境中，语音播报的精准度最低。

表 3: 保持环境为安静的环境，控制不同语速，测试出数据

实验组数	判别次数	实验楼数	2	3	4	5	6	7	8
正常语速	10	实验楼层 (单位楼)	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5、6	1、2、3、4、5、6、7	1、2、3、4、5、6、7、8

		准确率	100%	100%	100%	90%	100%	100%	95%
较慢 语速	10	实验楼层 (单位楼)	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5、 6	1、2、3、4、 5、6、7	1、2、3、4、5、 6、7、8
		准确率	100%	100%	100%	100%	100%	100%	90%
较快 语速	10	实验楼层 (单位楼)	1、2	1、2、3	1、2、3、4	1、2、3、4、5	1、2、3、4、5、 6	1、2、3、 4、5、6、7	1、2、3、4、5、 6、7、8
		准确率	90%	80%	90%	80%	80%	70%	60%

由表 3 数据得到图 36

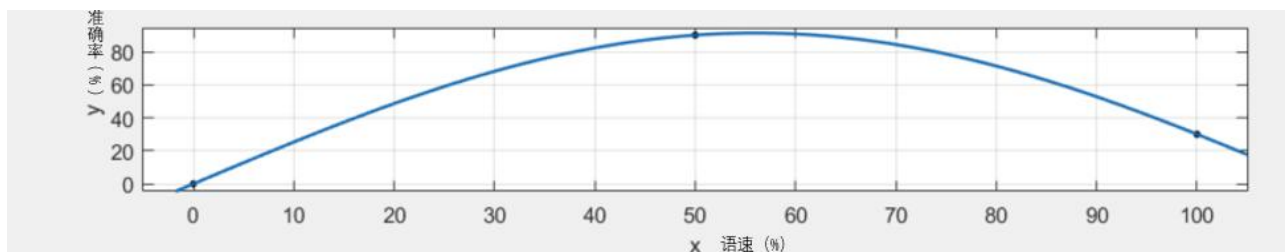


图 36 播报语速对准确率影响

由实验可知，当播报者的语速较慢或者正常时，语音操控的准确度较高。当播报者语音速度较快时，精确度较低。

## 5. 创新特色

本项目具有以下创新特色：

(1) **基于红外对射检测技术和语音识别的无接触输入：**语音识别电梯乘用人员特别是双手携带物品提供最大程度的交互方便；同时又避免因老人小孩等方言或口音严重的人员乘坐电梯时无法识别而影响电梯运行效率，通过将红外触摸屏的类似方式实现电梯的无接触操控。从而实现灵活地“隔空按键”，既卫生安全，又快捷方便。

(2) **手机蓝牙远程操控：**手机通过蓝牙与装置连接，将用户输入的楼层信号传输给装置核心板，经过信息处理后，装置智能识别需要按下的电梯按键，实现远程无接触乘梯。

(3) **机电结构拟人按键：**通过二维电机平台代替人手按下电梯原来的按键，而非使用串口或是无线通讯连接电梯中控系统，做到了未改装电梯本体结构，能够。

(4) **装置独立于电梯运作：**装置轻便，可以快速安装在轿厢内部按键及各楼层呼叫按键上，一个技术人员即可快速安装。装置无需改装对电梯机电系统进行任何改动，仅有仿人柔性触点机械接触，对现有电梯也仅需要匹配相应按键布局，方便推广。

(5) **关于本项目的专利已正在申报：**本项目工作已有一项专利已经受理；专利名为一种无接触电梯辅助按键装置及按键方法；专利号为 202010370612.5。

## 6. 应用前景：

日常生活中，电梯为公共设施，按键每天会被许许多多的人按下，导致电梯按键上可能会残留有大量的细菌病毒。**疫情中接触性传播**成为其主要的传播途径之一，而电梯按键作为高频接触使用的接触部件，成为建筑内疾病传播的重要风险点。外挂式电梯无接触操控装置主要利用红外对射检测技术，成本较低。并且此装置不需要改变电梯内部结构，安装简单，操作方便。可以有效的保证公共卫生。

## 参考文献

- [1] 张金德. 关于单片机的电梯控制系统分析[J]. 科技展望. 2015(02), 20-26
- [2] 章琪. 帮机器人看到重点—“深度学习”能够转化机器人的视觉[J]. 世界科学, 2015(1); 34-37
- [3] 韩飞, 张志伟. 电梯控制系统的设计[J]. 民营科技. 2016(12). 56-61
- [4] 杨子夫, 米良川, 李德升, 等. 舞蹈机器人步进电机驱动电路和程序设计[J]. 计算机应用, 2002; 20-25
- [5] 叶思义. 电梯楼层按键面板里的学问[J]. 职业教育(下旬刊), 2018(05): 38.
- [6] Design of Elevator Running Parameters Remote Monitoring System Based on Internet of Things. Xibo Wang, Hongshuai Ge, Wenbo Zhang, Yingzhen Li. Proceedings of 2015 IEEE 6th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS 2015) . 2015
- [7] 马志强, 梁书剑, 王文交, 王铁军. 基于 FPGA 的电梯控制器设计. 信息技术[J]. 2013(01). 69-73

# 皮影戏的数字化

## ——健全非遗保护，助力数字经济

组员 廖海燕 王婧怡 希治远 黄明扬 蔡瑾瑜

**摘要:**针对皮影表演动作复杂等问题，本文主要介绍了一套基于单片机处理、步进电机细分驱动等物理学原理的机电控制系统，该系统由控制模块、通信模块、执行模块组成的，控制模块中的 UNO R3 单片机开发板能够向控制皮影人物动作支点的 DA4240-A 电机驱动器发送命令，进而驱动 57mm 2 相步进电机转动，最终通过定滑轮、伸缩绳、弹簧、联轴器等执行元件，使系统挥舞皮影人进行精彩的表演。该设计实现了皮影节目编排的数字化，促进了皮影文化的保护与传承。

**关键字:**皮影戏；非遗保护；机电控制；数字化

### 研究背景

#### 1.18 发展现状

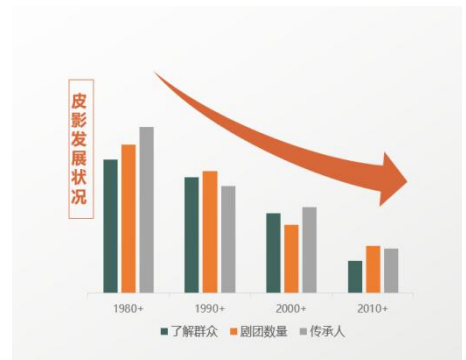
被誉为“一口道尽千古事，双手舞动百万兵”的皮影戏，曾有过辉煌过去，皮影戏兴旺时经常上演的剧目有一万多出，但由于难以跟上时代的步伐，现在能够演出的剧目不足 100 出，并且在传承和发展的过程中暴露出许多问题：1. 传统的表演动作复杂繁琐；2. 现有的机械表演装置结构简单，表演形式单一；3. 表演系统可扩展性弱，效率低；4. 皮影文化受众面变少。其现状和发展动态如图 1 所示。



(a) 繁琐低效的传统表演形式



(b) 表演形式单一的机械装置



(c) 表演者和受众越来越少

图 1 皮影戏的现状和发展动态



## 1.19 社会需求

### 1) 皮影文化传播的需要

据统计，目前国内有多所皮影文化展示馆，较著名的有西安、孝义的皮影博物馆，藏馆内多以静态形式展示精美的皮影人物，鲜少有生动的皮影戏表演，亟需通过栩栩如生的动态皮影戏表演来发扬皮影文化。

### 2) 皮影文化传承的需要

皮影戏是我国独有的民间戏剧形式，最早诞生于 2000 年前的西汉，2011 年，皮影戏被列入第一批国家级非物质文化遗产名录，是典型的非物质文化遗产，对皮影戏的保护与传承，对民族传统文化传承与保护具有重要意义。截至 2020 年，共有 35 个相关项目名录，涉及我国 16 个省见图 2，仅有 50 名相关项目国家级代表性传承人。

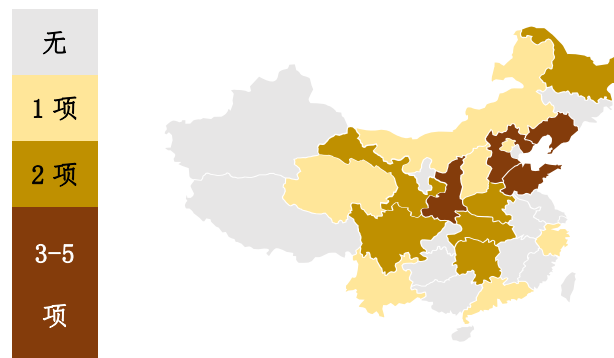


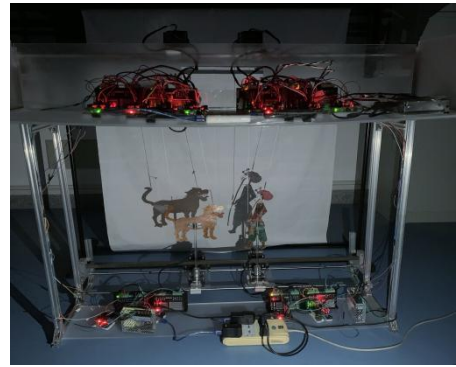
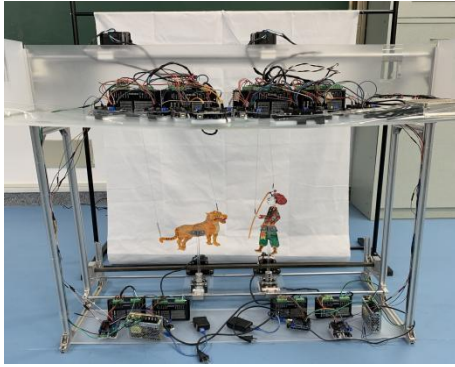
图 2 皮影戏项目分布省份

但目前，全国有传承能力的皮影团体不足 20 个，表演班社锐减、后继乏人，这表明传统的表演形式以及现有的机械表演装置已很难继续将皮影戏传承下去，而我们的设计实现了皮影节目编排的自动化，满足了社会对传承皮影文化的需求。

针对上述皮影戏发展瓶颈的现实需要，本设计充分运用了计算机指令控制系统，物理中的电路、机械、光学等知识，3D 打印等技术，将单片机系统结合机械零件设计出了一套机电控制系统，并制作出了相应的数字化机器人模型。

本作品的设计主要包括以下部分：**1.**研发分层控制系统软件，实现自动组合编排生成代码；**2.**通过 IIC 总线进行 ATmega 芯片系统之间的数据通信和传递；**3.**搭建执行层的机械结构，实现皮影人物 3 自由度的表演；**4.**完成一套高效、可重复利用的数字化表演皮影戏的机电控制系统。图 3 为作品实物模型图。





## 作品介绍

### 1.20 开发思路

#### 1.20.1 系统构建

本作品的设计思路分为系统构建、模拟调试、效果优化三大部分。

##### 1) 动作编排系统的实现

选取剧本后计算出人物的转动角度、动作时间等参数,结合电机转动的角度进行插值量化,运用 C 语言将其转化成控制指令,再根据分层指令集技术进行系统性的划分。

##### 2) 硬件的选取

辅助装置由驱动器、开发板、扩展板组成,由步进电机驱动人物手及头部的位置变换;由伸缩绳、弹簧连接滑轮和动作支点,由刚性联轴器实现人物的旋转变换

图 4 为本作品的设计总方案。

#### 1.20.2 运作流程

该系统的工作流程分为五大步骤。

##### 1) 外部提供电源启动系统;

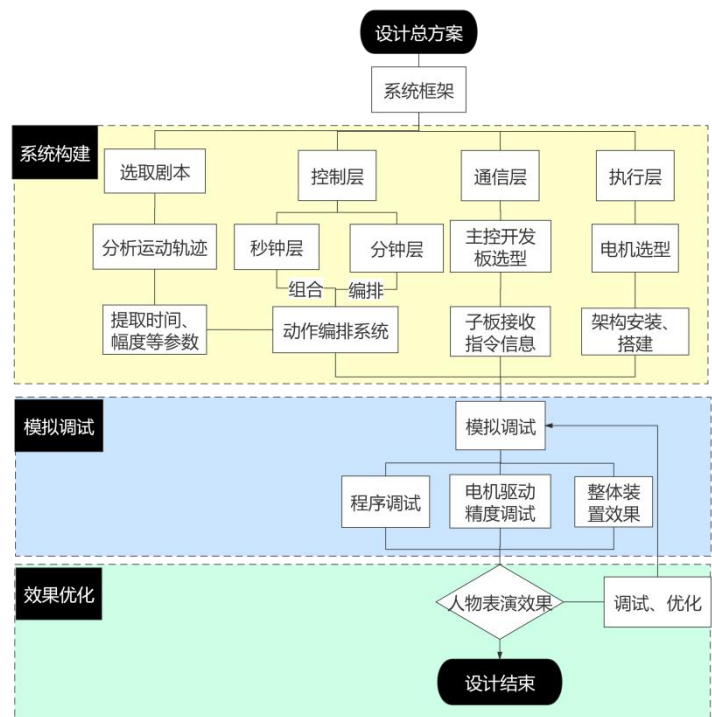


图 4 设计总方案

2) 由秒钟层控制的独立指令自动根据时间轴组合编排至分钟层；

3) 主机接收计算机动作指令，工作状态初始化，按下启动键触发通信层，通过 IIC 总线进行 ATmega 芯片系统之间的数据通信和传递；

4) 电机控制执行层中的机械装置，最后带动影人开始表演；

5) 当程序运行完成即表演完成时，整个系统将回到初始状态，若表演未结束则继续完成未完成动作。

图 5 为系统的运作流程图。

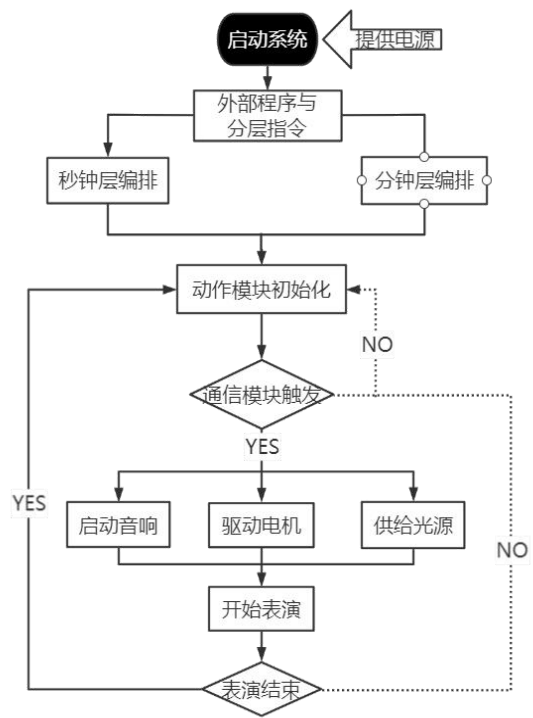


图 5 运作流程

### 1.20.3 涉及原理

#### 1) 机械原理

每个动作支点由两个电机组合调控，分别依靠齿轮、滑轮传递动作，完成上下左右移动；而位于底部的电机控制其完成转身动作，从而实现 3 自由度的表演。

#### 2) 针孔成像原理

通过“光沿直线传播”，当光线照射到不透明物体时，就会被挡住，从而形成一片相对较暗的区域，这也就是影子。影子并不是独立存在的实体，仅仅只是这个物体的投影，因此会根据物体的形状形成不同的影子，皮影戏正是利用这一原理来完成各种造型和场景的表演；

#### 3) 动画原理

动画原理以人眼的“视觉暂留”特性为基础，通过快速更换静态图像，利用“视觉暂留”特性而在大脑中形成图像内容连续运动的感觉。

## 1.21 作品设计

本作品开发的“智影”机器人模块构成由控制层、通信层、执行层三大模块构成组成，图 6 为系统模块构成图，表 1 为作品模块构成及其功能。

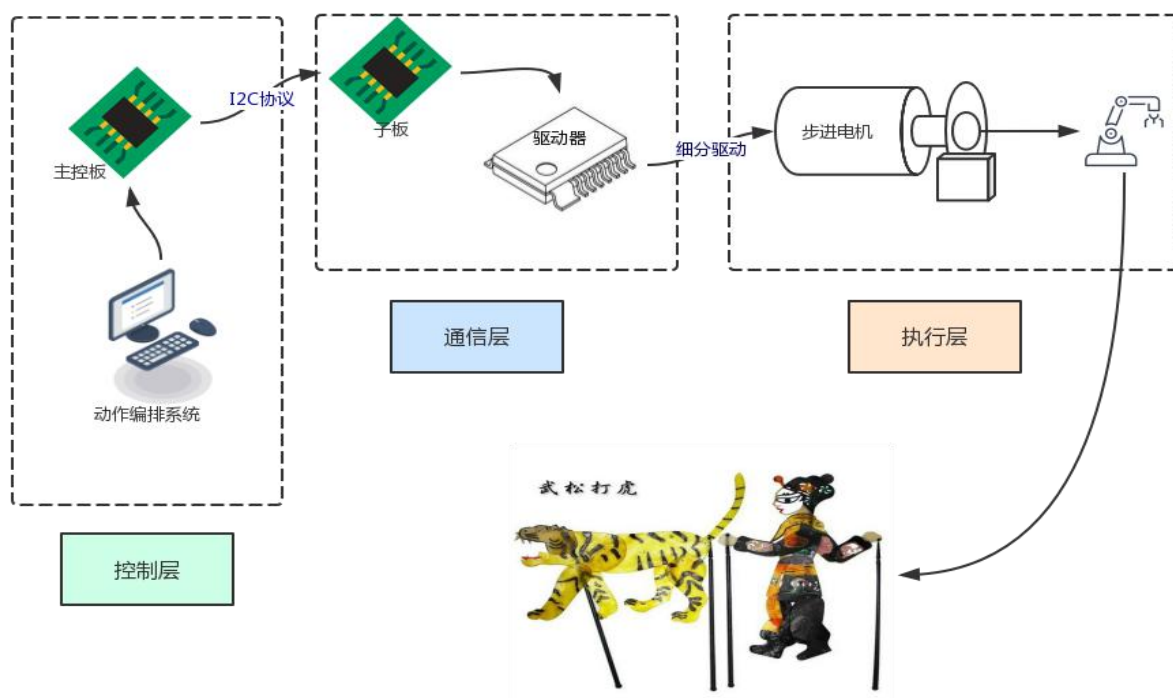


图 6 “智影” 机器人系统模块框架图

表 1 模块构成及其功能

模块构成	主要功能
控制层	基于 MCU 微控制器编程技术构建分层指令，将关节数据（如位置、速度信号以及各种通讯信息）转化得到关节位置变化或转速，再通过 C/C++ 语言完成人物角色的动作编排程序，并将程序烧录到主单片机开发板
通信层	基于 I2C 协议、步进电机微分驱动技术以及控制寄存器的设置执行特定功能，依次完成主机、子机、驱动器到电机的命令传递
执行层	通过滑轮、导轨、齿轮等机械装置，在达到每步精度在百分之三高精度的基础上，控制其移动完成带动皮影人物各个支点的运动，并持续一段时间的表演。

## 1.22 实物模型

“智影” 机器人系统的模型主要由 5 个部分组成：基于 ATmega 系列芯片的 UNO R3 开发板、DA4240-A 电机驱动器、57mm 2 相步进电机、机械结构、XH-A158 超清蓝牙功放板。

### 1) 主从机系统

主从机系统都选取 UNO R3 单片机开发板,该单片机是一种集成电路(IC),以 ATmega 16U2 作为主控芯片,调试信息通过串口输出,使用 IIC 进行该芯片与子机系统的通信,核心处理器是 AVR,具有先进的 RISC 体系结构,无需额外的编译器,直接连接电脑 USB 接口,即可使用 IDE 进行编程、编译、烧录,硬件 IIC 速度较快占用时间少,只需要将数据送到指定寄存器即可。



图 7 单片机开发板

### 2) 驱动器

DA4240-A 电机驱动器能够精确、高速稳定控制皮影人物产生微小步进,电流通过 PID 自动调节,具有低噪音、低振动、低发热优点,根据不同电机的性能参数上电后进行自动优化算法及电流,电机停止动作后电流自动下降为额定电流的 50%。



图 8 电机驱动器

### 3) 步进电机

基于控制寄存器的设置执行特定功能,选用高性能驱动的微分步进电机,能够达到每步精度在百分之三高精度控制其移动。微分步进电机选取 57mm 2 相步进电机,具有低温升和低噪音的优点。

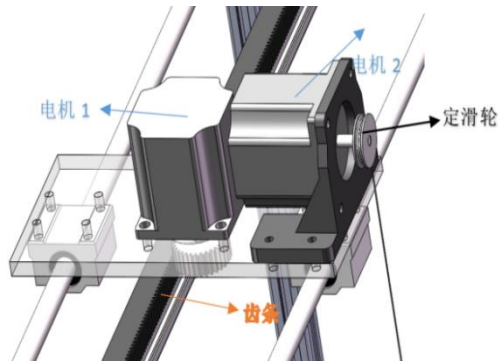


图 9 步进电机

#### 4) 机械结构

作品的硬件部分主要依靠齿轮传动和滑轮转动来实现三个自由度的机械动作，齿轮齿条的传动，能保证恒定的传动比，传递任意夹角两轴间的运动，其外部支架采用铝材、钢材等材质，使表演更稳定。

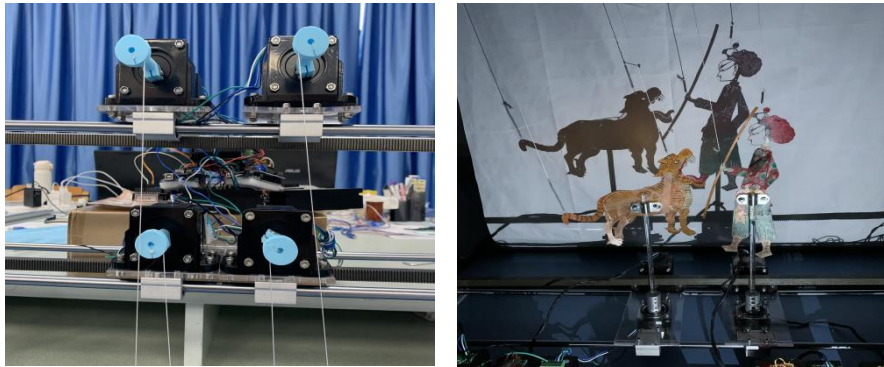


图 10 机械结构

#### 5) 蓝牙模块

为了增加人物表演的生动性，我们选用 XH-A158 超清蓝牙功放板播放音乐。该蓝牙模块主要由两块 PAM8403 芯片构成，连接了两个 5W 功率的优质扬声器，配接曲目可以放大 4 倍的音量并自由调整节奏。

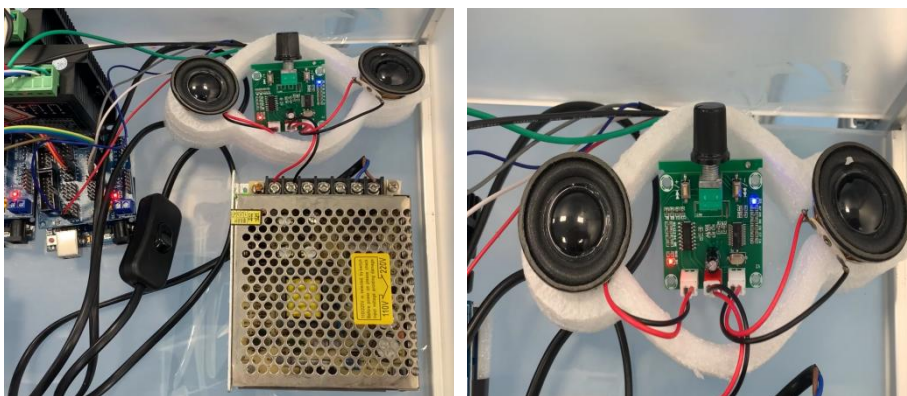


图 11 蓝牙连接模块

## 关键技术

### 1.23 层次化指令封装技术

基于 MCU 微控制器编程技术构建分层指令，将关节数据（如位置、速度信号以及各种通讯信息）转化得到关节位置变化或转速，再通过 C/C++ 语言完成人物角色的动作编排程序，基于分层指令集技术，由秒钟层、分钟层、时钟层自动编排组成动作编排系统。

- 1) **秒钟层**：作为独立的第三层指令，控制机械臂各个关节运动
- 2) **分钟层**：能够分解成若干第三层指令，完成一个独立动作程序
- 3) **时钟层**：能够分解成若干第二层指令，组合完成一套动作

### 1.24 主从机控制技术

采用主从机控制技术，每个从机控制一个皮影人关节，主机通过 IIC 接口给从机发送控制命令，从而使控制逻辑非常清晰，增加或减少关节时只需在主机中添加或删除相应的模块即可，极大的提高了系统的易用性，增强了系统的适应性和可扩展性。

## 作品创新点

### 1) 基于分层指令集技术的皮影戏动作编排系统

研发的分层指令集大大降低了软件的使用难度，使得皮影戏制作人员可以专心进行皮影戏内容创作，无需过多关注皮影角色动作的具体实现方法；皮影戏制作人员在编排内容时可以快速观看皮影角色动作效果，反复改进，大大提高了皮影戏制作效率和表演效果。

### 2) 采用分布式节点，代码自动生成系统

由于采用分布式节点，降低了代码自动生成系统的实现难度，采用代码自动生成系统能极大的方便皮影戏制作人员将创意搬上舞台，并且易于增加或减少皮影戏中采用的节点，可灵活调整皮影戏的舞台阵容。

### 3) 数字化的机器人表演模式

数字化的机器人表演模式是结合传统文化与数字科技的新型表演形式，相较于传统表演“幕后演员多”“舞台搭建耗时困难”，该模式做到了人员精简、设备简单成本低且可以重复使用，无需排练即可精准表演。



## 社会意义

本团队依靠自身的研发设计，打造出演绎皮影剧的可扩展机电控制系统，利用现代技术保护了传统文化。本作品能够使人们重视非遗文化的数字化保护，走出遗失的困境，并希望能将作品进一步开发，应用于皮影文化展示馆、博物馆等展馆，让皮影文化真正“活”起来。



图 12 皮影文化展示馆

## 参考文献

- [1] 符俊霞. 皮影在数字化动画过程中的再现[J]. 大众文艺, 2015, 000(011):112-113.
- [2] 高伟, 郭瑾, 郭舒婷. 中国传统皮影艺术在数字化动画中的应用与发展[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版), 2015(4):475-481.
- [3] 耿鸿业. 皮影戏的数字化应用与研究[D]. 重庆大学, 2011.
- [4] 潘长学, 周应斌. 从皮影艺术到互动媒体设计[J]. 装饰, 2003, 000(011):26-27.
- [5] 庾坤. 基于动作捕捉技术的荆楚皮影戏数字化研究[J]. 科教导刊—电子版(下旬), 2018, 000(007):223.



# 可视化家庭厨房下水 管道疏通器

参赛者：关芳杰，朱逸峰，何楚莹

（浙江工业大学大学机械工程学院，杭州 310023）

指导教师：王晨

**摘要：**本团队以厨房作为数字化经济发展创新的切入口，设计了一款可视化家庭厨房下水管道疏通器，针对家用厨房下水管道系统进行清理，疏通器通过电机驱动搭载扣钉进给器完成钢丝软轴螺旋前进，软轴头部装配保护套，利用头部旋转力矩完成管道内异物的清理。同时搭载蠕动泵细管实现下水管内清洁喷洗和污水抽取，达到管内清洗与去污同步化。在疏通过程中，运用了钢丝软轴螺旋传动和涡旋物理原理。同时，利用终端软件与软轴连接的内窥镜完成管内可视化清理，实现定点喷洒、专项清除。通过齿轮减速器完成直流电机调速实现整个系统进给速率调节。本疏通器能够防止油污及其附着的杂物引起下水管道堵塞问题的发生，可实现不更换软管而定期保养厨房下水管道系统的作用。

**关键字：**电机驱动 调速 蠕动泵 可视化 定点清除

## 1 研究背景及意义

### 1.1 研究背景

在信息化技术高速发展的现在，诸如电商、健康码、智能马桶等产品的智慧城市、人工智能类产品渗透在生活的方方面面。在本次大赛“物理学与数字化经济”的主题征集下，本团队通过实际的考察与对生活的所见所悟，决定以厨房为切入口，设计数字化产品。一日三餐无不依赖厨房，水池亦承载着洗菜、洗碗、洗锅等重重功用。但部分下水管道因版本老旧、餐饮下水油污大加之长期高频率的使用，常常会导致食物残渣，尤其是油垢淤积管壁，从而造成的下水管道堵塞。因此定期清理厨房下水管道对每个家庭而言都势在必行。



图 1-1 厨房下水管道堵塞情况

下水管道的堵塞首先会造成厨房反水、异味反扑。其次管道内包括大肠杆菌在内的大量致病菌在增殖过程中会产生大量恶臭有害气体,如含硫化合物、含氮化合物等、含氧有机物等有害气体,严重影响人体的健康。再之,废水中的酸、碱类物质易腐蚀管道壁,造成管道的损坏甚至破裂。据调查显示,在住宅排水系统中,厨房下水管道最容易发生堵塞,堵塞故障是其它下水口堵塞故障总和的若干倍,并且在堵塞后疏通还比较困难;此外,厨房下水管道疏通类商品月销数十万,其中某橙、某客的月销量更是高达 10W+,相关家政服务中仅某鸟一家就有二十余万人使用过下水管道疏通服务。可见解决厨房下水管道堵塞问题迫在眉睫。

解决厨房下水管道堵塞问题只有两种方法,一种是疏通,另一种是防堵。关于下水管道疏通目前主要有三种方法:一是购买管道疏通器械,如手摇式进给疏通器、电动式进给疏通器、加压式疏通器;二是使用化学方法如洗衣粉加白醋、下水管道疏通剂等物品;三是请来管道疏通专员。但厨房水池下水管道多为双槽多联通型,存在较多的拐角与清洁死角,前两种方法无法有效清除管内污垢,而第三种方法更是耗时耗力。为此我们针对双槽多联通型家用厨房水池的下水管道设计了一款全方面、深层次实现管道清洁、便于操作且价格实惠的家庭厨房下水管去油污疏通清洁器。



图 1-2 现有疏通器

## 1.2 研究现状及存在的问题

经过若干实例的调查研究表明，厨房下水管道堵塞的最根本原因是水流量太小，在管内流速慢，造成带油污、有粘性的食物残渣淤积。也就是说，造成这个问题的原因有两个：一是管道设计安装不合理，主要是下水管管径太大，而进入下水管道的水流量相对较小，造成管道内排水流速过慢，带粘性油污的食物残渣不能及时冲走，累积形成淤塞，小水流从松散的食物残渣中渗滤而过，大量固体物被拦截在管道内，日积月累下，这些食物残渣，除一部份腐烂被水带走，另一些不易腐烂的残渣同油脂混合钙化形成蜡块从而堵塞管道；另一个原因是水龙头出水量太小——实测数据表明，装于洗菜盆上的水龙头，由于设计原因出水量大约为 2-7 升/分，排出的水流不足以冲走管道内的粘性污物，日久积累形成堵塞。

疏通的工具与方法很多，最高效的疏通工具是高压水疏通机与专业水力疏通器，但这些都由于是专业工具因而售价很高，不适合居家购买使用。而较为适合家用的疏通仪器中：手摇进给式疏通器只能做到疏通，无法实现去污清洁的效果；电动进给式疏通器无法对缝隙处油污进行清洁，且价格高昂、体积庞大；加压式疏通器较之前二者对家用厨房下水管伤害最大，易冲破管道或使软管脱落，疏通过程常异物飞溅，无法保证疏通过程中周围环境的整洁，亦无法实现去油污功效。

综上所述，市面上多种疏通方案不仅增加了用户使用负担、价格高昂；更是都无法实现清洁管道油污的功能，没有从根本上解决堵塞问题，并不适宜家用厨房下水管道疏通。

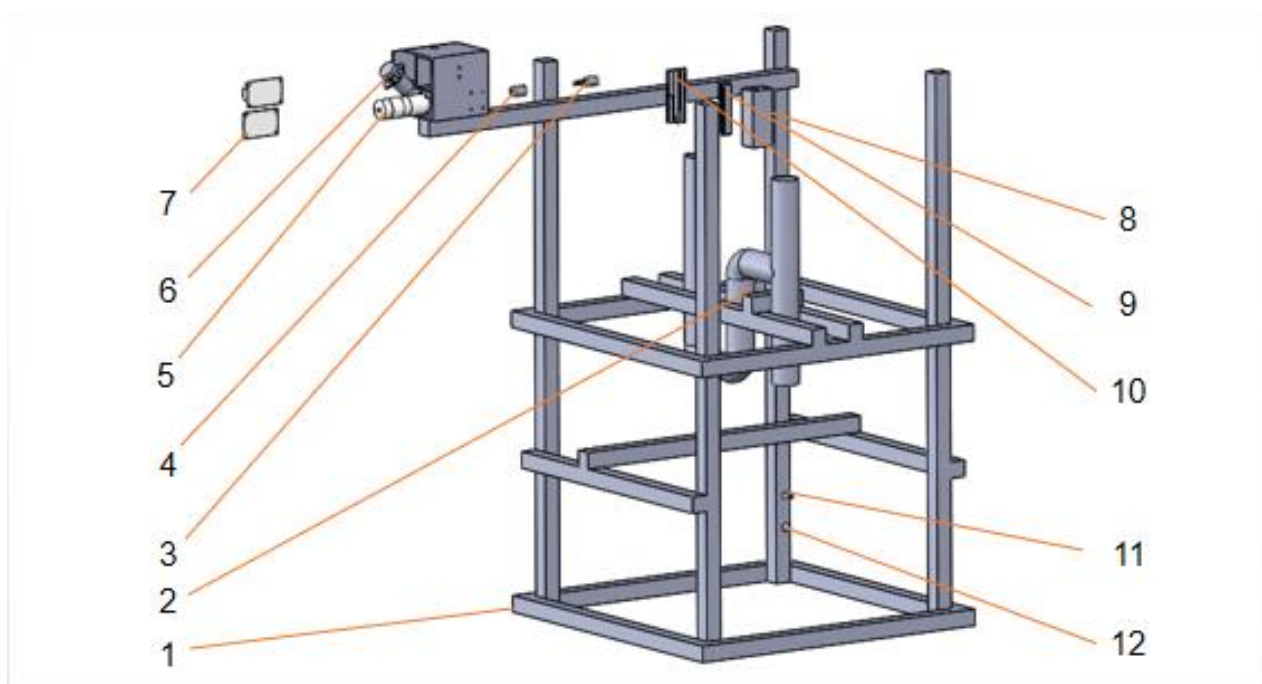
## 1.3 研究意义

本作品针对家用厨房水池的下水管道的清洁设计了一款操作便捷、价格实惠，能有效清理管道异物、清洁管内油污的可视化家庭厨房下水管道疏通器。巧妙地解决了现有产品无法去除油污、无法清理异物、价格高昂、耗时耗力等问题。为厨房提供更加健康卫生的烹饪环

境。

## 2 设计方案

通过对本次比赛主题的分析讨论，进行了大量的实地考察和资料收集，确定了本作品“可视化家庭厨房下水管道疏通器”的主题。根据要求，我们设计了由电机驱动系统、输/抽水系统、钢丝软轴传动系统、内窥镜系统等四部分组成，具有疏通管道污水、定点清理管道异物与管内油污、可监控清理进程等功能的家用厨房去油污疏通清洁器。如图 2-0。



- |         |         |         |         |          |         |
|---------|---------|---------|---------|----------|---------|
| 1-铝型材机架 | 2-水管    | 3-头簧连接器 | 4-联轴器   | 5-直流电机   | 6-水泵    |
| 7-电路板   | 8-进给器盒子 | 9-进给器下  | 10-进给器上 | 11-双头连接器 | 12-头簧套筒 |

图 2-0 (a) 家用厨房去油污疏通清洁器模型图

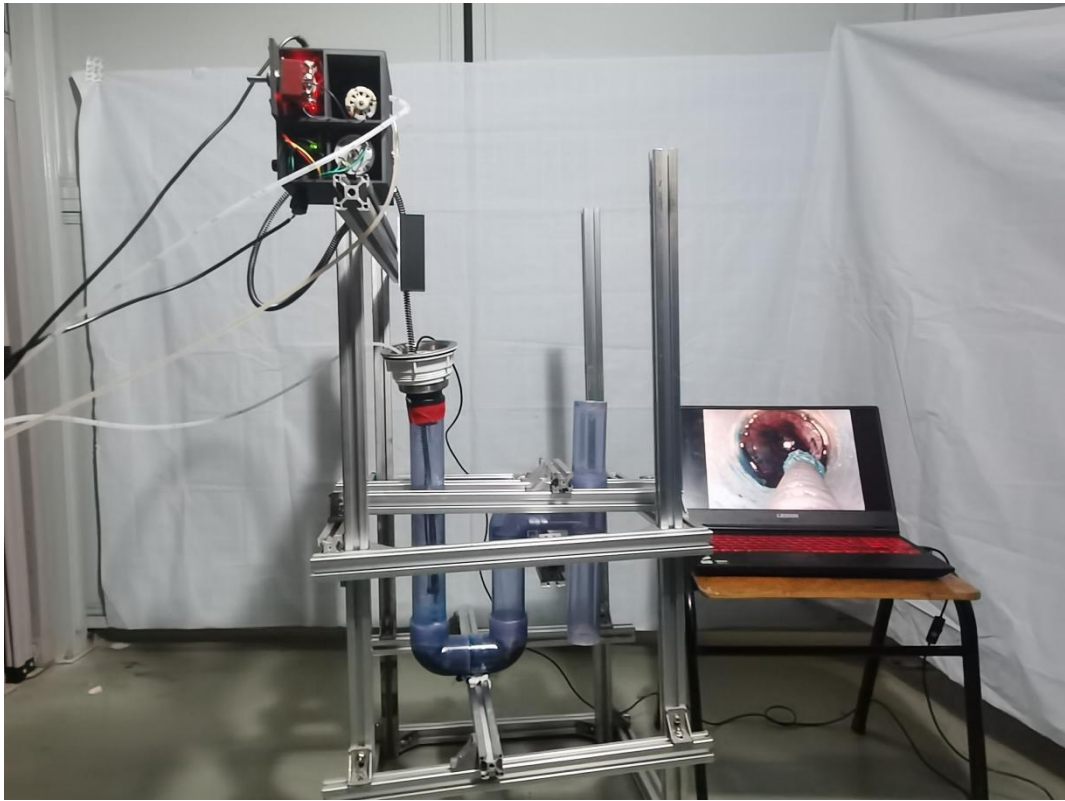


图 2-0 (b) 家用厨房去油污疏通清洁器实物图

## 2.1 电机驱动系统

电机驱动系统通过含有 LM324N 运算放大器的电路板控制电机从而控制螺旋管道的运动。如图 2-1 (a)：图中最左侧为电机与装配电机驱动系统的盒子；电路板左侧为电机正反转启动开关；电路板上方为电源接入口，通过 DC 电源公头接通电源；电路板右下方为调速旋钮，用于调节电机转速，从而控制螺旋管道行进速度。DC 电源公头接通电源后，按动双向按钮即可控制电机转动：I 为正转，即驱动螺旋管道进入下水管道；II 为反转，即驱动螺旋管道离开下水管道。电路板上，位于右上方的绿色发光二极管用于指示电路板的可正常运行状态，位于下方的两处红色发光二极管用于指示电机转向——左侧 CCW 亮则电机反转，右侧 CW 亮则电机正转。





图 2-1 (a) 驱动电机系统实物连线图

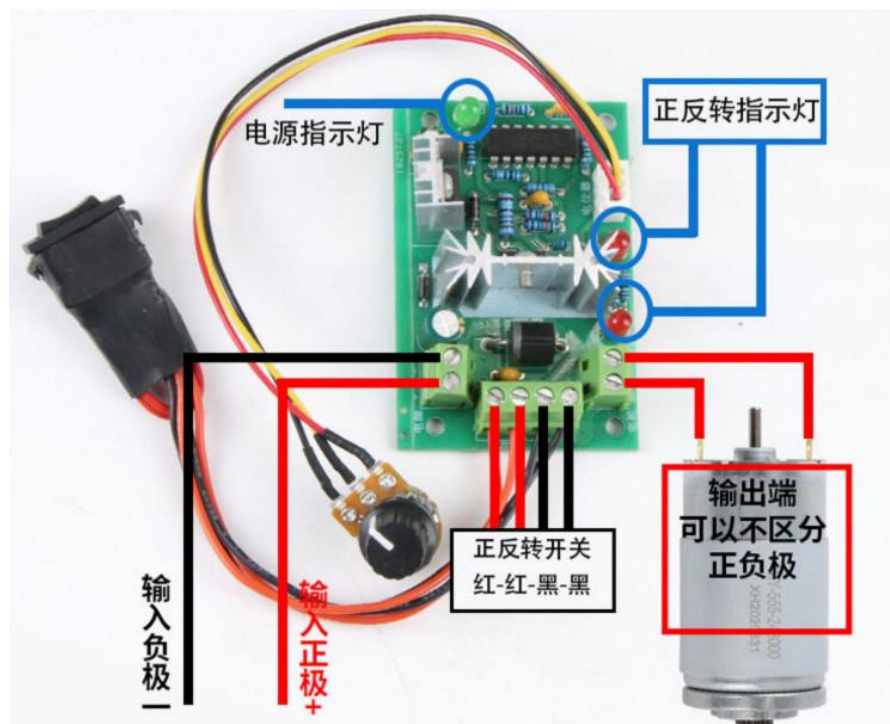


图 2-1 (b) 电机驱动板实物连线图

## 2.2 输/抽水系统

输/抽水系统用于抽出下水管道内污水及往下水管道内喷洒疏通剂。

输/抽水系统由两根水管、蠕动泵、电路板组成。如图 2-2 (a) 所示，最左侧红色物体

为电机开关用于控制电机正转、反转或是停止，及蠕动泵抽水、输水或是停止；开关内侧为电机驱动板；右侧为蠕动泵，由蠕动泵向外引出量水管软管，加长后跟随钢丝软轴进入下水管道内。接通电源后，按动双向按钮即可控制蠕动泵转动：I 为正转，即往下水管道内注入疏通剂；II 为反转，即将下水管道内固有污水抽出。在蠕动泵输出管子的固定部分，设计了特定角度，使其喷出的疏通剂能在管道内形成涡流，让管壁上附着的污垢清除的更加彻底。

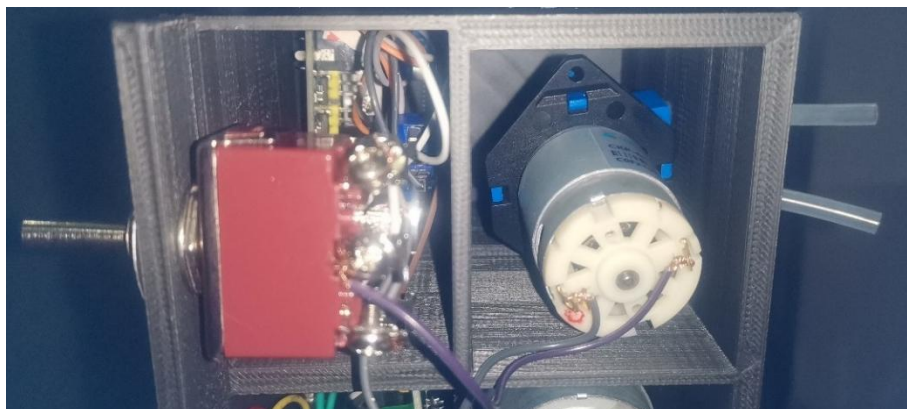


图 2-2 (a) 输/抽水系统

### 2.2.1 蠕动泵的选择

接通电源后，按动双向按钮即可控制蠕动泵转动：I 为正转，即往下水管道内注入疏通剂；II 为反转，即将下水管道内固有污水抽出。故选用参数为：含四种 12V 直流电机、流量范围为 5.2ml/min~90ml/min、工作环境温度要求 0-40℃、相对湿度要求 <80% 的 5W 160r/min 蠕动泵



图 2-2 (b) 5W 160r/min 蠕动泵

### 2.2.2 电机驱动板的选择

接通电源后，按动双向按钮即可控制蠕动泵转动：I 为正转，即往下水管道内注入疏通剂；II 为反转，即将下水管道内固有污水抽出。故选用如下参数电机驱动板 L298N。



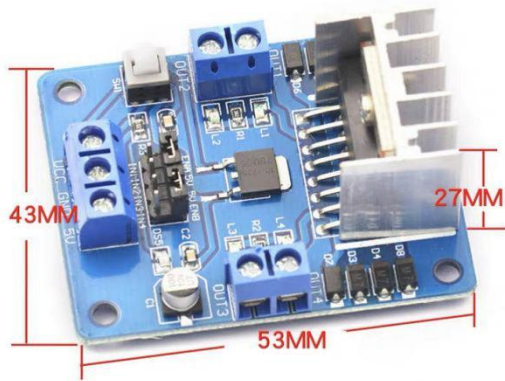


图 2-2 (c) 电机驱动板 L298N

驱动芯片	L298N 直流电机驱动芯片
驱动部分端子 供电范围Vs	+5V~+35V ; 如需要板内取电, 则供电范围Vs: +7V~+35V
驱动部分峰 值电流Io	2A
逻辑部分端子 供电范围Vss	+5V~+7V (可板内取电+5V)
逻辑部分工作 电流范围	0 ~ 36mA
控制信号输入 电压范围	低电平: $-0.3V \leq V_{in} \leq 1.5V$ 高电平: $2.3V \leq V_{in} \leq V_{ss}$
使能信号输入 电压范围	高电平: $2.3V \leq V_{in} \leq V_{ss}$ (控制信号有效) 低电平: $-0.3 \leq V_{in} \leq 1.5V$ (控制信号无效)
大功耗	20W (温度 $T=75^{\circ}C$ 时)
存储温度	$-25^{\circ}C \sim +130^{\circ}C$
其他扩展	控制方向指示灯, 逻辑部分板内取电

图 2-2 (d) 电机驱动板参数

### 2.3 钢丝软轴传动系统

钢丝软轴传动系统用于在电机驱动下引导输/抽水系统的水管软管及内窥镜进入下水管道。如图 3-3 (a) 所示, 钢丝软轴前端为一子弹头形盖帽, 盖帽上方为一三通圆柱形套筒, 套筒外侧两小圆柱形套筒分别用于连接内窥镜与水管软管, 最后由一恰好固定的螺旋形套壳实现圆柱型套筒在螺旋管道前端的相对旋转; 钢丝软轴末端即为钢丝软轴传动结构, 用于固定并控制螺旋管道根据电机的转动实现匀速运动。



图 2-3 (a) 钢丝软轴传动系统

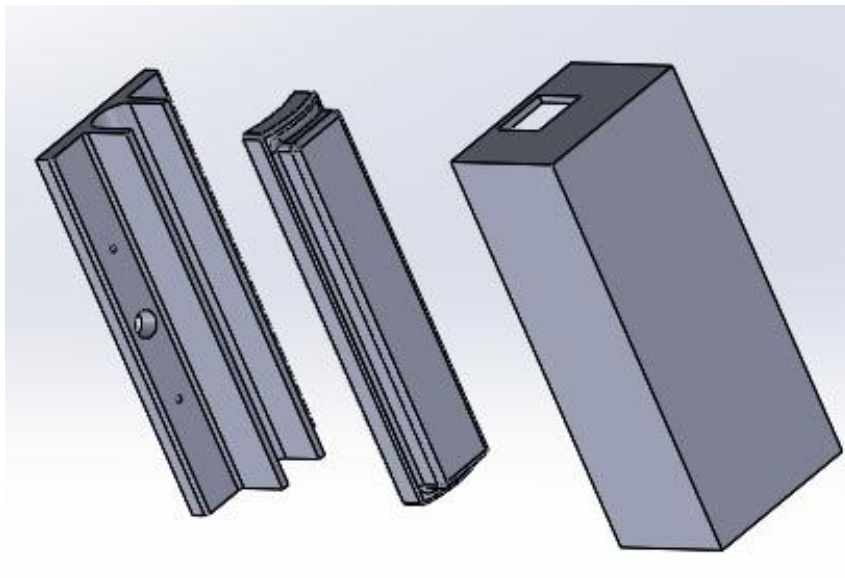


图 2-3 (b) 进给器装配示意图

### 2.3.1 钢丝软轴传动

如图 2-3 (b) 所示, 钢丝软轴主要用于轴线不在同一直线上的两个传动机构或工作时彼此要求有相对运动的空间传动, 可以沿着曲线传递力和力矩。根据本产品的设计要求: 水管软管与内窥镜镜头需在中间轴的引导下, 跟随电机转动逐步进入下水管道内。故本产品选用了钢丝软轴传动。

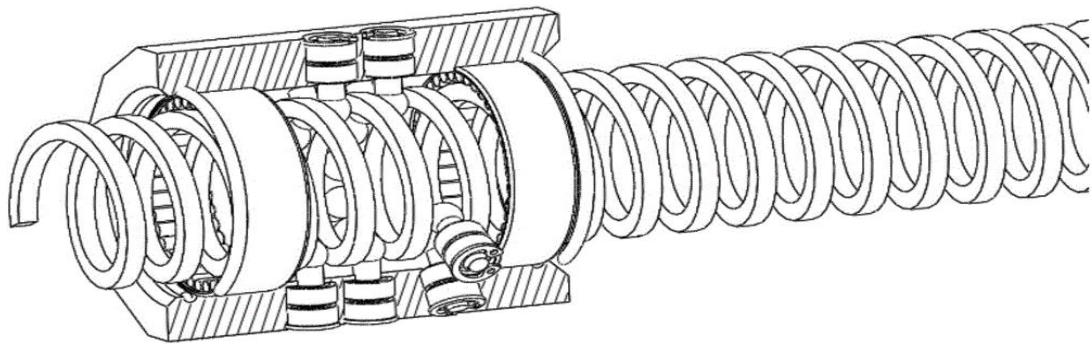


图 2-3 (c) 钢丝软轴传动

### 2.4 内窥镜系统

内窥镜系统由内窥镜、数据线、电脑/手机端 APP 构成。用于监控下水管道内部实况, 实现定点定位清理。

内窥镜系统通过数据线连接内窥镜与 APP。数据线一端与内窥镜镜头固定, 镜头通过螺旋管道前端的圆柱形三通套筒与螺旋管道及水管软管; 数据线另一端为一 USB 接口, 用于与电脑或手机相连, 从而达到实时监控, 定点喷洒疏通剂的功能。

因考虑到下水管道内可能存在的各种油污及固体物质, 选用防水、硬线类内窥镜镜头, 硬线类产品可伸出月 70cm, 遇到障碍物较软管更容易通过。

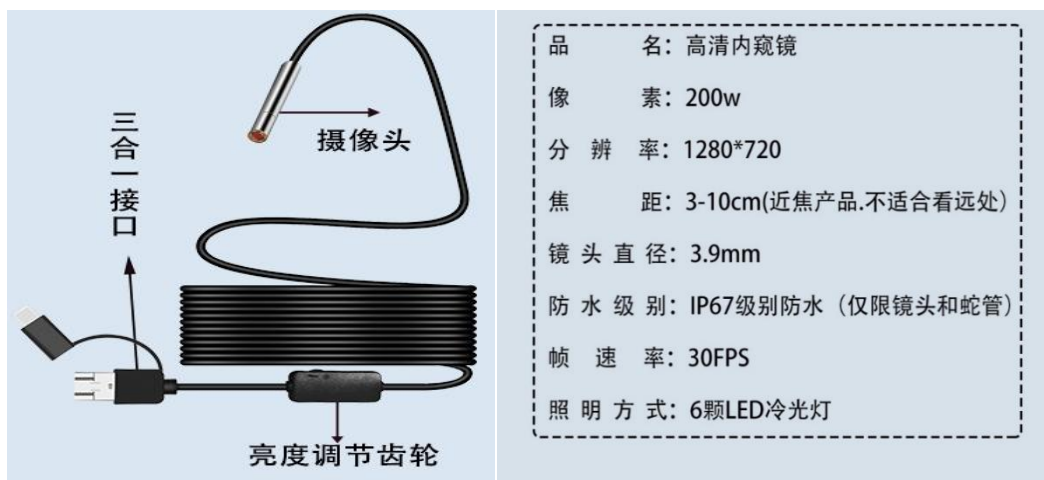


图 2-4 内窥镜及参数

## 3 电机的计算与选择

行星齿轮传动在机械设备中已获得了较广泛的应用，与普通齿轮传动相比较，它有许多独特的优点：在传递动力时可以进行功率分流；由于输入、输出轴同轴，使其结构紧凑；传动效率高。使用实践证明，行星传动减速机的重量和体积仅为普通齿轮减速机的 1/2。尽管结构较复杂，制造精度要求高，但随着齿轮加工工艺技术的不断发展，上述缺点会得到一定程度的解决。

搭载 555 型号电机输出额定功率，行星齿轮减速器由定位挡圈、行星齿轮架、行星齿轮和齿圈外壳组成。全金属齿轮实现传动平稳，耐磨性高，实现小体积大力矩输出。

参数名称	参考数据	实际数据		
		空载	额定	最大负载
电机功率 (kW)	3	22	17	/
电机转速 (rpm)	640	22	17	/
扭矩 (Kgf.cm)	/	/	43.4	100
电流(A)	/	0.3	1.3	4
减速比(1:X)	/	369		
重量(g)	/	460		
尺寸(mm)	/	45		
总长尺寸(mm)	/	102		
行星齿轮个数	3	/		
太阳轮齿数	20	/		
行星轮齿数	34	/		
内齿圈齿数	88	/		
齿轮模数	2.5			

空载转速 RPM	1540	570	300	160	98	58	37	22	16	11
额定扭力 Kg • cm	0.9	2.6	4.3	7.7	13.0	17.0	25.0	43.4	60.5	85

最大扭力 Kg · cm	3.8	11.5	19.1	34.5	55.2	76.5	100	100	100	100
-----------------	-----	------	------	------	------	------	-----	-----	-----	-----

图 3-0 (a) 行星电机参考数据与实际数据



图 3-0 (b) 行星电机齿轮



图 3-0 (c) 行星电机机壳

### 3.1 电机发热过程的计算

电动机负载运行时，电机内的功率损耗最终都将变成热能，这就会使电动机温度升高，超过周围环境温度。电动机温度比环境温度高出的值称为温升。一旦有了温升，电动机就要向周围散热，温升越高、散热越快。当电动机单位时间发出的热量等于散出的热量时，电动机温度不再增加，而保持在一个稳定不变的温升，即处于发热与散热平衡的状态。我们做出如下假设：(1)电动机长期运行，负载不变，总损耗不变；(2)电动机本身各部分温度均匀；(3)周围环境温度不变。若电动机单位时间产生的热量为  $Q$ ，则  $dt$  时间内产生的热量则为  $Qdt$ 。电动机单位时间散出的热量为  $A r$  (其中  $A$  为散热系数，它表示温升为  $1^{\circ}\text{C}$  时，每秒钟的散热量； $r$  为温升)，则  $dt$  时间内散出的热量为  $Ard r$ 。在温度升高的整个过渡过程中，电动机温度在升高，因此本身吸收了一部分热量。电动机的热容量为  $C$ ， $dt$  时间内的温升为  $d r$ ，则  $dt$  时间内电动机本身吸收的热量为  $Cd r$ 。由此可得热平衡方程式，即  $dt$  时间内，电动机的发热等于本身吸热与向外散热之和，整理后得：

$$\frac{C}{A} \left( \frac{d r}{dt} \right) + r = \frac{Q}{A}$$

$$T\theta \left( \frac{d\Gamma}{dt} \right) + \Gamma = \Gamma L$$

当初始条件为  $t=0, \Gamma = \Gamma F0$  时, 特解为

$$\Gamma = \Gamma L + (\Gamma F0 - \Gamma L)e^{-\frac{t}{T\theta}}$$

式中  $T\theta = \frac{C}{A}$  为发热时间常数,  $\Gamma L = \frac{Q}{A}$  为稳态温升,  $\Gamma F0$  为起始温升。

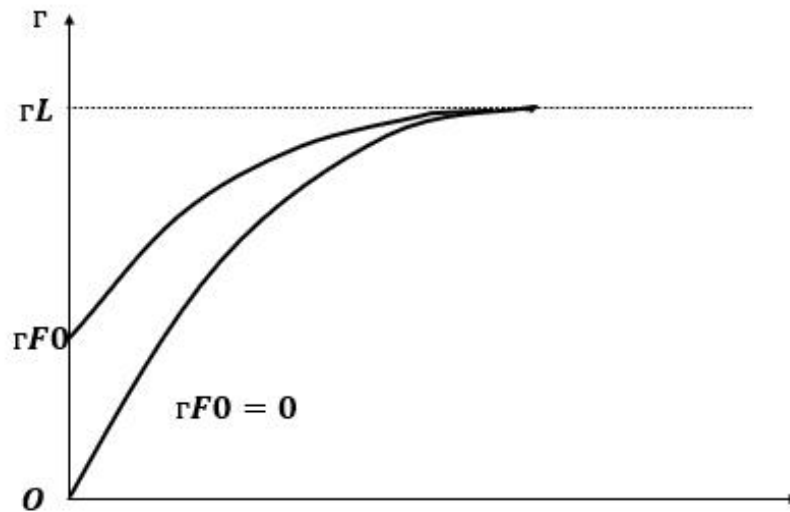


图 3-1 电动机发热过程温升曲线

### 3.2 额定功率

电动机的连续工作方式是指电动机工作时间  $t > (3 \sim 4)T\theta$ , 温升可以达到稳态值  $\Gamma L$ , 也称为长期工作制。连续工作方式下, 电动机输出功率以后, 电动机温升达到一个与负载大小相对应的稳态值。从出力和寿命综合考虑, 要最充分使用电动机, 就要使其长期负载运行时达到的稳态温升等于允许温升, 因此, 就取使稳态温升  $\Gamma L$  等于(或接近于)允许温升  $\Gamma_{max}$  时的输出功率  $P$  作为电动机的额定功率。 额定负载时, 电动机温升的稳态值为

$$\Gamma L = \frac{QN}{A} = \frac{0.24 \sum pN}{A}$$

因为

$$\sum pN = P_1 N - PN = \frac{PN}{\eta N} - PN = \left( \frac{1 - \eta N}{\eta N} \right) PN$$

代入得



$$rL = \frac{0.24}{A} \left( \frac{1 - \eta N}{\eta N} \right) PN$$

额定负载运行时  $rL$  应为电动机的允许温升  $r_{max}$ ，因此得到

$$PN = \frac{A\eta N r_{max}}{0.24(1 - \eta N)}$$

环境温度 40℃、电动机不调速的前提下，按照工作方式及工作时间选择标准工作时间电动机时，额定功率应满足

$$PN > PL$$

式中  $PL$  为生产机械的负载功率、 $PN$  越接近  $PL$  越经济。

针对本作品电机实际载荷计算，实际功率  $PN=31KW$ ，负载满足电机起动功率，效果良好。

## 4 性能指标与工作流程

### 4.1 性能指标

- 1) 螺旋管道进给速度  $0 \sim 22$  r/min;
- 2) 螺旋管道退出速度  $0 \sim 22$  r/min;
- 3) 输水系统启动时长 2 s;
- 4) 输水速度 2 ml/s;
- 5) 抽水速度 1.5 ml/s;

### 4.2 实物工作流程

可视化家庭厨房下水管道疏通器工作流程图如下图 5.2 (a)。将装置安放于水池排水口外侧，连接内窥镜与电脑/手机端，打开 APP。排除管道内堵塞的污水：先打开驱动电机开关至 I 挡，钢丝软轴头部浸入水中后，打开抽水系统开关至 II 端，多余水则会从蠕动泵另一端排除。清除污垢：先将驱动电机开关按至 I 档后电机转动，钢丝软轴随之转动而后逐步进入到下水管道内部；将蠕动泵另一端软管至于洗涤剂中，遇到污垢时打开输水系统开关，则可将洗涤剂送达污垢处，即可清除污垢。

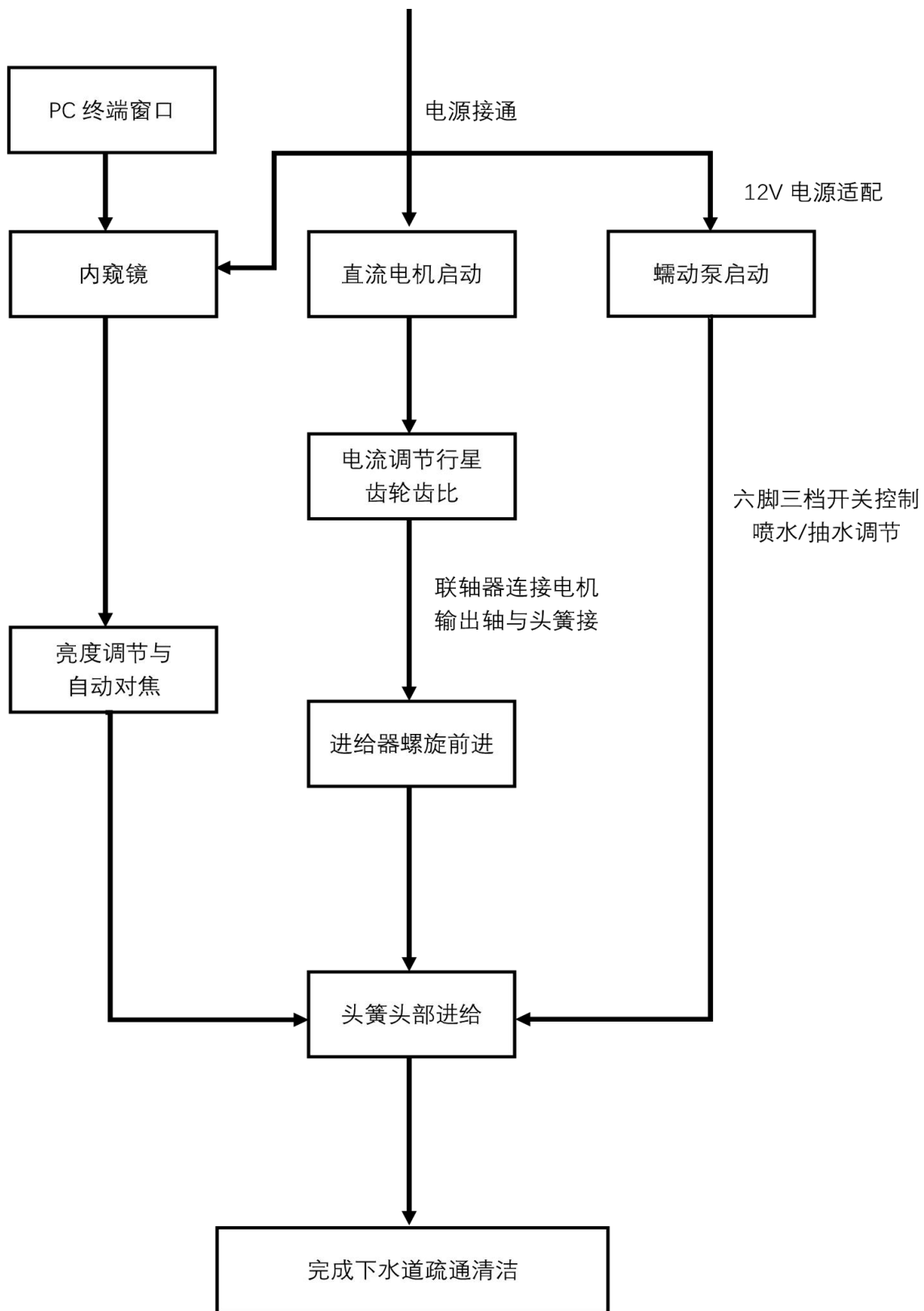


图 4.2 (a) 工作流程图

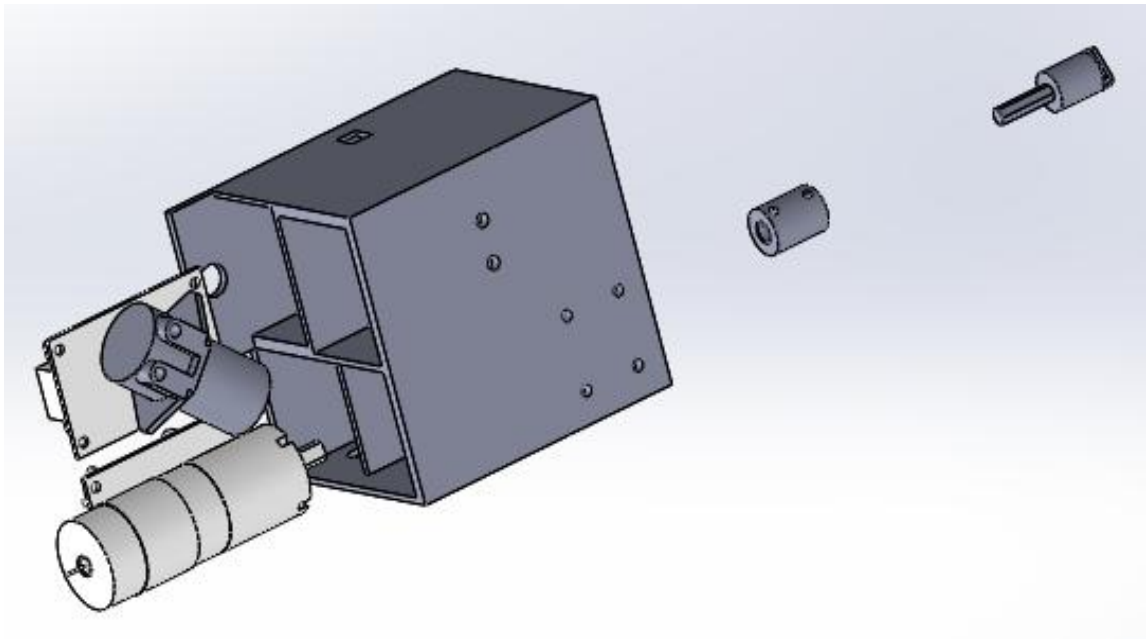
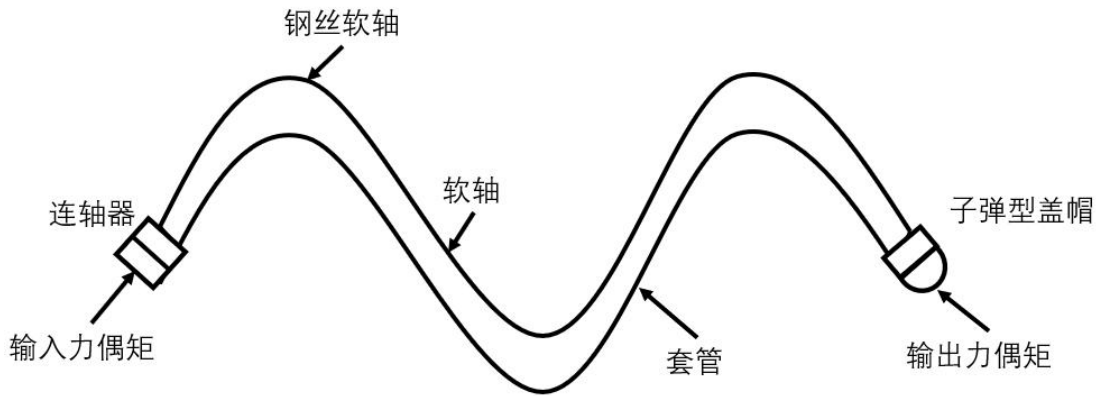


图 4.2 (b) 电机装配图

## 5. 物理原理

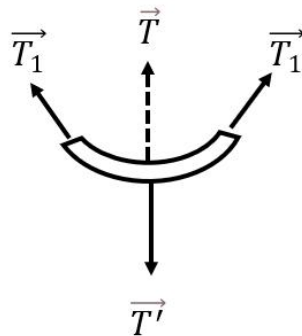
### 5.1 钢丝软轴螺旋传动

钢丝软轴一根平面曲杆在发生扭转变形时，其两端有离开轴线所在平面的趋势。若无阻碍(约束)，两端就会产生方向相反的离面位移；置于铅垂平面内的上凹平面曲杆，在受到正扭矩作用时，其在左半段有指向纸面外的离面位移，右半段有指向纸面内的离面位移，其俯视图如图 5-2 中，如果有约束，则会产生相应的约束反力。如果是点接触形式的约束，相应会产生集中力形式的约束反力；如果是线接触形式的约束，则会产生分布力形式的约束反力。套在软轴外面的不可压缩的套管给软轴弯曲部分左右段提供的正是这种分布形式的约束反力，这些分布约束反力对弯曲段的软轴所起的作用，恰好是构成一个约束反力偶矩  $T'$ （其合矢量为  $\vec{T}'$ ），与软轴在此段传递的扭矩（其合矢量为  $\vec{T}$ ）相平衡。这正是曲曲弯弯的钢丝软轴能够变着方向传递扭矩的本质原因。电机输出的扭矩通过连轴器输入到钢丝软轴上，输入的力偶矩再通过带有进给器的软轴传递，最终可传到疏通器的子弹盖帽中，使软轴完成预定的疏通任务，实现自动进给和疏通。



5-1 俯视图

钢丝软轴在弯曲段传递正扭矩时,两端的扭矩矢量将合成一指向软轴弧线法 向内侧的合矢量  $\vec{T}$  为了使此弯曲段平衡,该轴段上还必须一反向的力偶矢量  $\vec{T}'$  存在,  $\vec{T}'$  且在数值上要满足:  $T' = T$ , 所以能实现螺旋传动。



5-2 受力分析图

## 5.2 涡旋原理去除污垢

流体的涡旋运动大量存在于自然界中,如大气中的气旋、反气旋、龙卷、台风等,大气中的涡旋运动对天气系统的形成和发展有密切的关系。海底空腔等原因,导致海水向一点汇聚,由于动量守恒,半径越小线速度越大,所以形成了高速旋转的漩涡。本作品也同样使用了类似的原理,在钢丝软轴固定输出管道的固定零件中,设置的特定喷射的角度,使得被喷出的疏通剂能在下水管道内的流体区域内具有一定的流体涡度,使得输出的疏通剂能在管道内形成旋涡,快速高效的清洁管壁上的污垢。

## 6 应用前景

目前厨房下水管道的疏通主要以人力为主,因此本作品针对家用厨房水池的下水管道的

清洁设计了一款能够更方便、高效地清洁下水管道内堵塞的污水和附着于管壁的污垢，拥有可视化清理过程从而能够十分直观明了地监控清洁进度的可视化家庭厨房下水管道疏通器。巧妙地解决了现有产品无法去除油污、无法清理异物、价格高昂、耗时耗力等问题。为厨房提供了更加健康卫生的烹饪环境，实惠的价格和适中的体积也更加适合大多数家庭的使用和存储需求。

所以，针对一直存在且还会长时间存在的厨房下水管道疏通问题，基于目前的下水管道疏通市场，本产品在解放双手、不需漫长等待施工人员的前提下，实现了疏通过程的便捷性与直观性，更保证了清洁的彻底性，无论是从实际应用需求还是从市场潜力上来讲，都具有及其广阔的发展空间。

### 参考文献

- [1] 黄冠铖,王延文. 环保型厨房下水管道湾物清除装置[J]. 中学科技,2017,0(1):36-37.
- [2] 王良文. 巧法疏通厨房下水管道[J]. 农村新技术,2008,(3):44.
- [3] “休池”法消除沼气池浮渣结壳/谷糠的妙用/巧法疏通厨房下水管道[J]. 农村新技术,2008(3):44.
- [4] 卢明. 厨房垃圾下水管道粉碎机[J]. 中国食品,1999,(11):39.
- [5] 周思明. 一种厨房下水管道防堵疏通器及使用方法:CN201810957514.4[P]. 2018-12-28. [参考文献数字及英文为 Times New Roman,中文为宋体五号]

# 病毒（疫苗）培育中微孔胚蛋壳裂纹检测机

参赛者：李焕然，温天歌，屈昊，毛振洋，吉廷雪，

王勇金，潘雨霏，柳婷，段俊睿，龙潇南

（中国计量大学机电工程学院，杭州 310018）

指导教师：邱淑霞，赵明岩

**摘要：**在全球疫情日益严峻的情况下，研制疫苗俨然是抗击疫情的重要手段。病毒培养的方式多种多样，但蛋胚（5-15日活体蛋胚）最易被病毒感染，因而被全世界广泛采用。但将病毒注入蛋胚时，针头冲击会使蛋壳注射孔周围产生微裂纹（培育过程中少量蛋胚也会产生微裂纹），导致培养失败并污染同批病毒，因此必须将裂纹胚蛋剔除。然而目前微孔胚蛋壳的裂纹检测全部由人工肉眼完成，效率不高且精度较低。

针对上述问题，设计了微孔裂纹蛋胚自动检测系统，利用光电转换原理和模数转换器获取裂纹数值图像信号并提取出相应特征信息，提出采用裂纹有效面积指数和轮廓指数定量表征裂纹系统，利用BP神经网络对特征信息进行处理，实现对裂纹胚壳的精准和快速识别，并由执行终端将其自动分选和剔除。本作品具有识别快、精度高、自动化程度高等优点，在蛋胚病毒载体上的疫苗开发具有良好的应用前景。

**关键字：**疫苗（病毒）培养；微孔裂纹胚蛋；裂纹有效面积指数；裂纹有效轮廓指数；BP神经网络。

## 1 研究背景

### 1.1 蛋胚培养疫苗的必要性及优点

自2019年末新冠疫情爆发以来，全球感染人数不断攀升，抗击新冠疫情俨然成为目前的首要目标。为此，科研工作者正夜以继日的研发特效疫苗，这种疫苗对战胜疫情有着举足轻重的作用。通过此次疫情，更让人们意识到直接培养病毒（疫苗）的重要性。由于蛋胚营养丰富，温度适宜且为活细胞，是很好的病毒培养基，于是国内外均采用蛋胚进行疫苗的培养工作。

病毒寄生在活体动物（细胞）上才能正常发育，蛋胚有充足的营养，温度适宜，又是活细胞，是很好的病毒培养基。而蛋胚培养的技术比组织培养容易成功，也比接种动物的动物来源容



易，无饲养管理及隔离等的特殊要求，且蛋胚一般无病毒隐性感染，同时它的敏感范围很广，多种病毒均能适应，因此，是常用的一种培养动物病毒的方法。蛋胚培养法是用来培养某些对蛋胚敏感的动物病毒的一种培养方法，如牛痘病毒（*vaccinia virus*）和鸡新城疫病毒等。目前胚蛋病毒培养实验中，经常注射的病毒有 J 亚群禽白血病病毒，FAdV 病毒，也存在在蛋胚和细胞组织上培养鸡传染性法氏囊病毒(简称 IBD)；在蛋胚上分离甲型 H1N1 流感病毒等实验。由于蛋胚适合培养大部分的病毒，人们设计了全自动蛋胚疫苗注射机并使其得到了广泛的应用。

如图 1-1 为流水线式给蛋胚注射并培养病毒；图 1-2 为工人将蛋胚中培养好的病毒用于生产疫苗。



图 1-1 注射病毒



图 1-2 生产疫苗

## 1.2 微孔裂纹蛋胚检测的必要性

在注射病毒的过程中，虽然能将病毒注射入活体蛋胚之中，然而，针头的冲击会使部分蛋壳产生裂纹，微孔胚蛋壳裂纹的存在会导致病菌进入蛋胚、病毒浓度降低等情况发生，阻碍病毒生长，导致病毒（疫苗）培育失败。因此，必须对微孔蛋胚进行检测，并将微孔裂纹蛋胚剔除。图 1-3 和图 1-4 分别为注射成功和具有微孔裂纹（病毒培养失败）的蛋胚。



图 1-3 无裂纹蛋胚



图 1-4 有裂纹蛋胚

## 1.3 国内外裂纹蛋检测现状

目前国内外对蛋壳裂纹的识别，仅限于食用禽蛋的包装、运输等方面，检测方式有机器视觉及声学敲击振动两种方式。但对于培育病毒的胚蛋，尤其是注射后带有微小针孔的裂纹蛋壳，尚无相关方法及设备，如图 1-5 所示，目前全部由人工肉眼检测，且未有任何文献述及（见附录查新报告）。



图 1-5 人工肉眼检测微孔裂纹蛋胚

## 2 工作原理

机械部分包括蛋胚注射装置、蛋胚裂纹视觉检测系统、蛋胚分选机构等部分组成。上述部分分别完成培养病毒的注入、蛋胚裂纹情况的检测、判断蛋胚是否能够成功培养病毒以及剔除裂纹蛋胚等功能。

### 2.1 传送模块

如图 2-1 所示，传动模块主要由电机、同步轮、同步带、主动辊、链条、蛋胚托盘、蛋胚托盘固定模、控制按钮等部分组成。蛋托内部设计有缓冲装置用以减震，防止蛋胚因碰撞而产生裂纹。当按下启动按钮时，电机带动同步轮旋转，进而带动主动辊旋转，使链条开始运动。

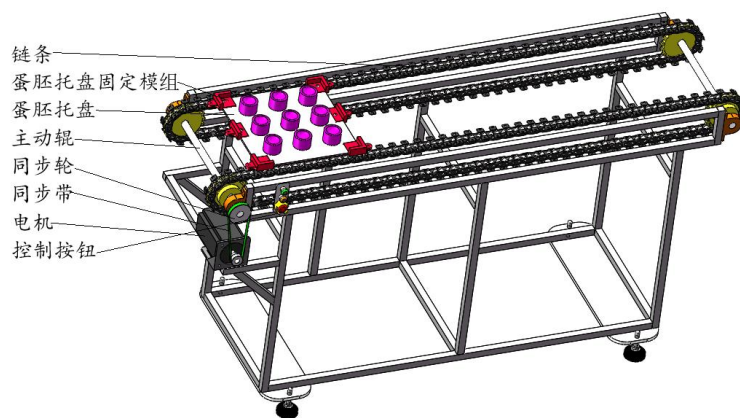


图 2-1 传送模块总体图

### 2.2 蛋胚注射模块

如图 2-2 所示，蛋胚注射模块由同步带升降装置、磁铁、电磁铁、滑动平台、注射针头组成，实现模拟打孔注射的操作。电磁铁通电产生磁性，将磁铁连同滑动平台吸附在初始位置。当蛋胚随传送模块移动到注射指定位置时，霍尔接近开关会发出信号，随后电磁铁断电失去磁性，滑动平台落下。注射针头刺穿蛋壳并注射病毒完成注射动作。随后同步带升降装置下降且电磁铁通电，滑动平台复位。完成注射动作的蛋胚随蛋托传送至检测模块。

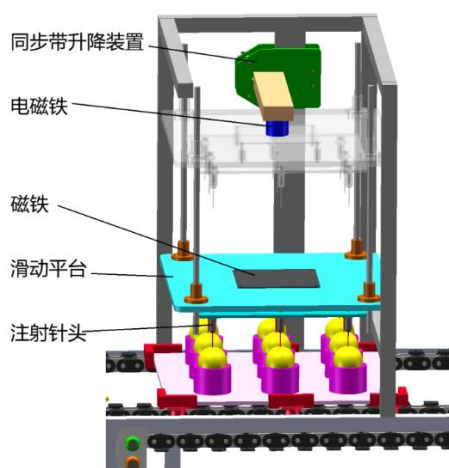


图 2-2 蛋胚注射模块工作图

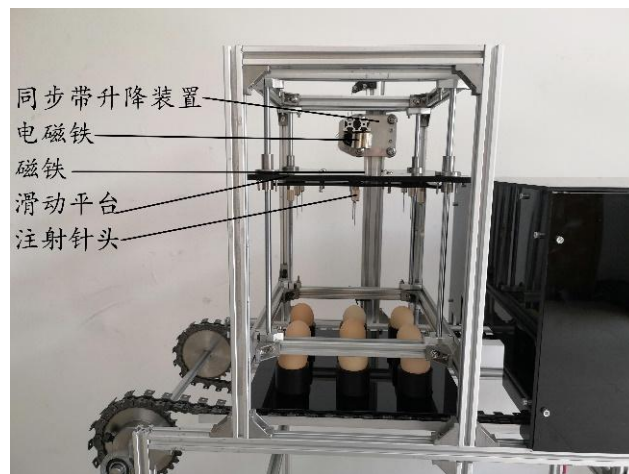


图 2-3 蛋胚注射模块实物图

### 2.3 视觉检测模块

如图 2-4 所示，视觉检测模块主要是由工业相机和冷光源组成的。这两部分都置于暗箱内，防止受到外界光照影响拍摄效果。蛋胚传送至暗箱时，光电传感器将发出信号，暗箱上方的工业相机对蛋胚裂纹出进行拍摄。拍摄的图片由程序进行边缘处理，得出蛋胚裂纹的特征参数，并与已设定的特征参数比对，分辨出完好蛋胚和裂纹蛋胚，并将此信息传递给裂纹蛋分选模块。拍摄完成后蛋胚随传送模块移至下一工位。

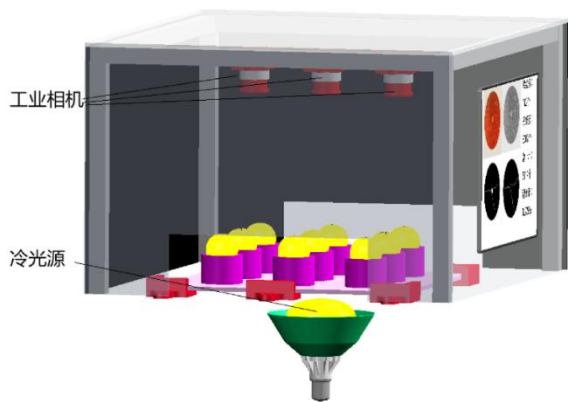


图 2-4 视觉检测模块



图 2-5 视觉检测模块实物图

### 2.3.1 光源选型

普通光源发出的热量会对蛋胚的检测造成影响，为此作品采用冷光源。冷光源发出热量小，对检测蛋胚裂纹没有影响。照蛋冷光源选择角度可调的 3V、LED 自然光。在暗室内，光线通过照蛋器上的小孔透射至蛋胚，微裂纹清晰可见，方便摄像头采集蛋胚图像。



图 2-6 照蛋冷光源

### 2.3.2 摄像头选型

选择带显微功能的 SN1080P60C 工业相机，该产品可高倍放大拍摄对象，具有**高清晰度、高精度、低噪声**等特点，且涵盖多种分辨率、多种数据传输方式，性能稳定，能够实现对胚蛋裂纹的清晰、准确识别。拍摄装置位于光源正上方，能够得到最大光照度，提高识别的准确性。相机距离胚蛋高度可调，且配备放大镜、光圈等设备，方便调焦，有利于后续图像处理。

SN1080P60C 是一种连续变倍单筒显微镜，它采用了独特的消杂光和大景深技术，具有成像清晰、立体感强及工作距离长、视野宽阔等特点，与高清晰度的彩色 CCD 和电视机配套使用。设计有 0.3X,0.5X,0.75X,1.5X,2X 系列附加大物镜和 0.35X,0.5X,0.75X,1X,1.5X,2X 系列摄影目镜，根据用户不同场合的使用要求，专门设计有多种照明装置，可按观察的样品选用上下双卤素灯（或 LED 灯），上卤素下荧光灯，环形 LED 灯，光纤冷光源，LED 同轴照明等照明方式。还可选配 XY 移动载物台、图像分析装置进行图像分析处理。



图 2-7 SN1080P60C 工业相机实物图



### 2.3.3 摄像头光学参数

该相机的光学放大率最大为 30X，总放大率最大可达 1776 倍（1/36CCD，143 监视器），工作距离最大 320mm，物方视场直径最大 90.7mm，采用 SN-0745（变倍比 1：6.5）0.7X~4.5X 变倍主物镜：

a.总放大率=光学放大率×数字放大率。

光学放大率=变倍主物镜放大率（0.7X~4.5X）×摄影目镜放大率×附加大物镜放大率。

数字放大率：与 CCD 摄像机规格及电视机（监视器）规格有关。

b.工作距离：只与主物镜和附加大物镜的放大率有关。

c.物方视场直径=  $\frac{CCD\text{靶面对角线尺寸}}{\text{光学放大率}}$

显微镜的物镜光学倍率是 0.7~4.5X，适配镜是 0.5X，显示器是 21.5 英寸，相机芯片是 1/2 倍率是 3.17X，总放大倍数为：

$$(0.7\sim 4.5) \times 0.5 \times 21.5 \times 3.17 = 23.8 \sim 153X。$$

### 2.4 裂纹蛋胚分选模块

如图 2-8 所示，裂纹蛋分选模块主要是由 X 方向平移机构、Z 方向平移机构、堵孔吸盘、裂纹蛋下料盒组成的。堵孔吸盘会根据视觉检测模块传递的信息将裂纹蛋胚吸取并移至裂纹蛋下料盒。完好蛋胚会随着传送模块移至下个工位。

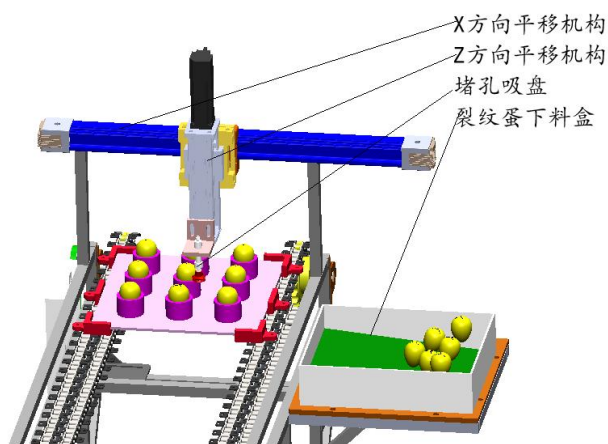


图 2-8 裂纹蛋分选模块总体图

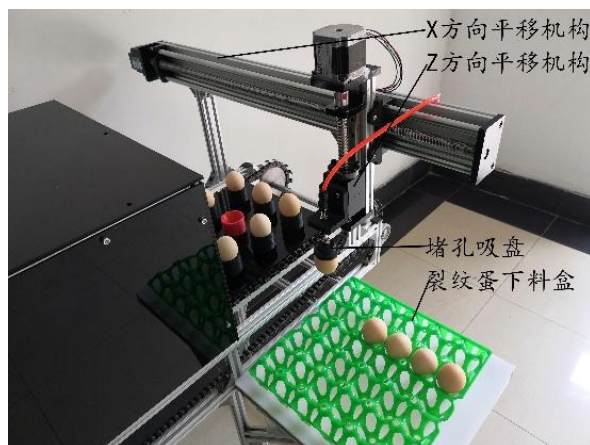


图 2-9 裂纹蛋分选模块实物图

## 3 物理原理

本系统利用计算机视觉（图像传感技术）以及显微摄影技术，构建了机器视觉技术与神经网络技术结合的微孔蛋胚裂纹检测系统在冷光源照射下，对注射病毒后的蛋胚进行在线检

测，依据裂纹长度与气室轮廓半径关系，微孔胚蛋壳的裂纹检测全部由装置自动完成。装置结合上述技术准确实现了带孔胚蛋壳裂纹的识别，从而实现对裂纹蛋胚的自动剔除。具有自动化程度高、成本低、精度高等优点。

本作品涉及到的关键物理原理如下：

**光电转换原理：**本装置视觉模块采用波长范围 450-465nm 的 LED 白色冷光源照射到物体上,蛋壳微裂纹表面对光源产生反射,这些反射出来的光穿过镜头照射到 CCD 工业相机上完成对被摄物体的成像，将被摄物体的像穿过镜头聚焦在像平面上。本装置应用的 CCD 相机内含电荷耦合器，其利用光电转换原理，实现光信号、电信号之间的转换。CCD 相机工作时，被摄物体某一时刻的光信息量，通过光子作为传递载体，以能量的形式穿过镜头传递到电荷耦合器即 CCD 上，从而 CCD 产生电信号，完成光电信号转换。之后再经过模数转换器将所得到的电信号转换成数字图像信号，再通过图像处理器将图像信号进行一系列处理压缩之后，储存到存储器中。

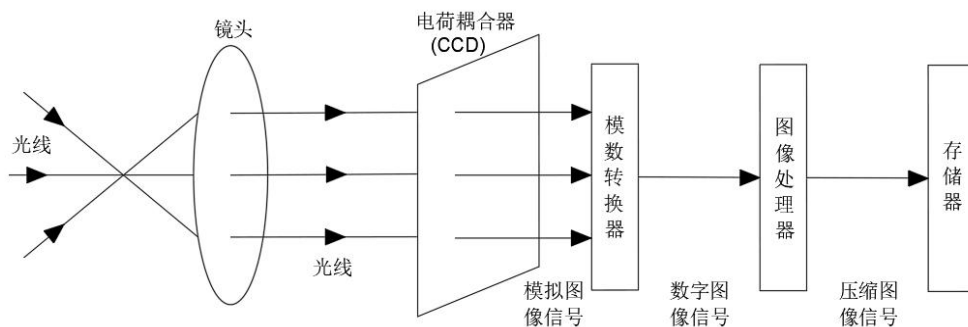


图 3-1 CCD 相机工作流程图

**电生磁原理：**本装置中蛋胚注射模块由升降装置、滑动平台组成，利用电生磁原理，通过电磁铁实现对升降平台的控制，完成蛋胚打孔注射操作。上料后，电磁铁通电产生磁性，将表面装有磁铁的升降装置平台吸附并固定在初始位置。当蛋胚在传送带的作用下运送到指定注射位置时，霍尔接近开关被触发，发出信号使电磁铁断电失去磁性，升降平台自行下落，平台尖端的注射针头刺穿蛋壳随后完成注射动作。随后升降装置下降同时电磁铁通电重新产生磁力，吸附升降平台复位，最后传送带将注射完成的蛋胚运送至检测模块。**霍尔效应：**在半导体上外加与电流方向垂直的磁场，会使得半导体中的电子与空穴受到不同方向的洛伦兹力而在不同方向上聚集，在聚集起来的电子与空穴之间会产生电场，电场力与洛伦兹力产生平衡之后，不再聚集，此时电场将会使后来的电子和空穴受到电场力的作用而平衡掉磁场对其

产生的洛伦兹力，使得后来的电子和空穴能顺利通过不会偏移。

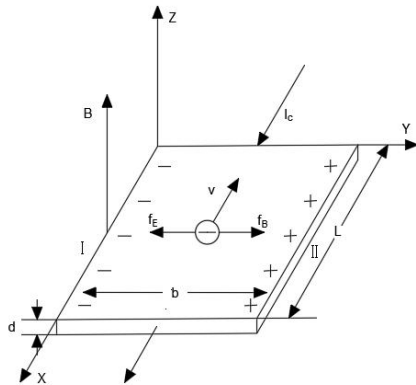


图 3-2 霍尔效应原理图

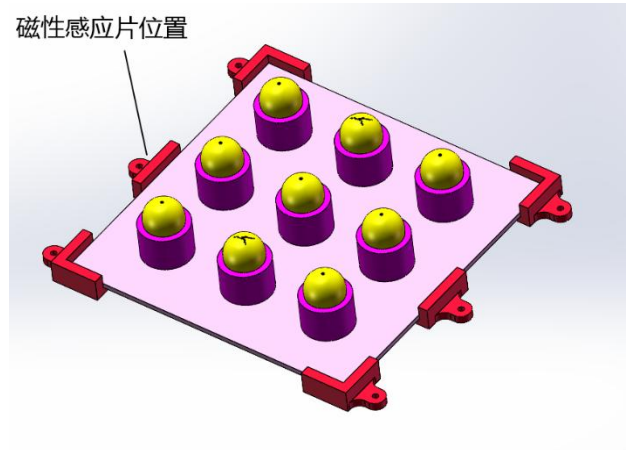


图 3-3 胚蛋盘磁性感应片布置图

本装置传送模块部分每个胚蛋盘的固定件上都有一个磁性感应片，当胚蛋盘到达注射位置时，霍尔接近开关检测面上的霍尔元件因产生霍尔效应而使开关内部电路状态发生变化，由此识别附近有磁性物体存在，进而控制开关的通或断，使胚蛋盘停止在注射位置并完成注射。再根据检测位置、分选位置的距离计算出胚蛋盘到达指定位置的脉冲数，由 plc 控制中心发送指定数目的脉冲驱动步进电机，使胚蛋盘依次到达不同的工作位。

## 4 技术分析

### 4.1 机器视觉部分

#### 4.1.1 机器视觉信息的特征提取

在剔除裂纹蛋时，先通过冷光源背面照射，有裂纹区域会显示亮光，且能观察到气室轮廓。当注射孔不在气室区域或者裂纹轮廓最大长度超过气室轮廓半径的某一值时，则被认定为需要剔除的裂纹蛋胚。在此定义裂纹有效面积指数及裂纹有效轮廓指数，提出了蛋壳亮斑消除算法，通过对注射孔裂纹特征的提取，实现裂纹蛋胚与完好蛋胚的准确判别。

$\Delta L$ ：表示裂纹有效轮廓指数，即提取的裂纹孔轮廓长度  $L$  与针头柱体周长之差和气室周长  $L_0$  之比，即：
$$\Delta L = \frac{L - 2\pi R}{L_0}$$

$\Delta S$ ：表示裂纹的有效面积指数，即提取的裂纹孔轮廓所围成的闭合区域面积  $S$  与针头柱体横截面积之差和气室面积  $S_0$  之比，即：
$$\Delta S = \frac{S - \pi R^2}{S_0}$$



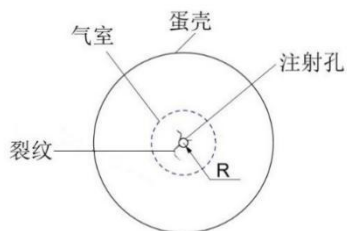


图 4-1 带裂纹蛋壳示意图

### 4.1.2 具体实施步骤

作品利用图像处理技术进行蛋胚裂纹的检测过程如图 4-2 所示。

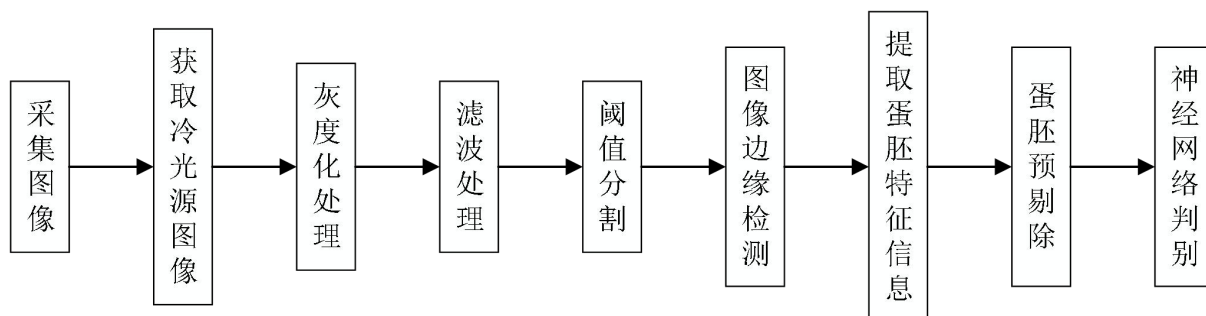


图 4-2 图像检测流程图

首先，利用摄像机对蛋胚图像进行采集，为了使裂纹更加清晰，还需要获取在冷光源照射下的蛋胚图像。然后对图像进行降维灰度化处理，减小数据处理难度。在去除图像中的噪声后进行阈值分割，使得图像的边缘、面积等特征更加明显，然后利用 Canny 算法提取出蛋胚裂纹的边缘与面积信息，并计算该蛋胚的有效轮廓指数和有效面积指数。同时，若裂纹超出气室区域，则会导致胚液与空气接触，大大增加蛋胚感染风险，因此需要对裂纹长度超出气室区域的蛋胚进行预剔除。在预剔除结束后，再将符合检测条件的蛋胚特征参数带入预先训练好的 BP 神经网络中进行裂纹蛋与否的判别，并将结果显示。

具体实施步骤如下：

**第一步：CCD 工业相机获取裂纹孔原图**，如图 4-4 所示，然后获取冷光源照射且放大后注射孔图像如图 4-5 所示。

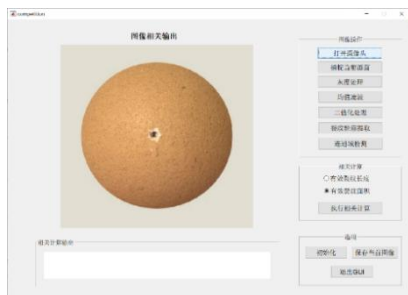


图 4-4 注射孔原图

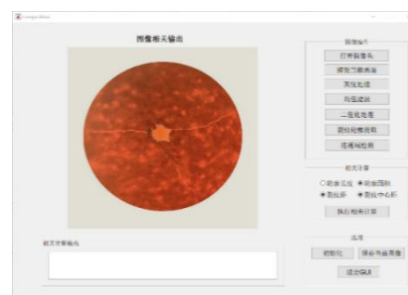


图 4-5 冷光源照射与放大后图像

**第二步：对获取的蛋壳图像先转灰度，然后进行均值滤波处理。**

均值滤波是对目标像素及周边像素取平均值来实现滤波目的的方法。图片中一个方块区域（一般为3×3）内，中心点的像素为全部点像素值的平均值。均值滤波就是对于整张图片进行以上操作,如图 4-6 所示。用  $g(x,y)$ 表示滤波后希望得到的函数,  $h(x,y)$ 是邻域算子,  $f(x,y)$ 是原图。结果可以表示为:

$$g(i,j) = \sum_{k,l} f(i+j,j+l)h(k,l)$$

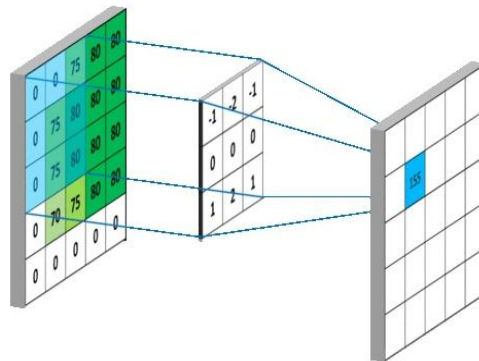


图 4-6 邻域滤波图例

本文采样 Kernel 数据采用 5×5 的矩阵，试验证明效果最好。处理效果如图 4-7 所示。

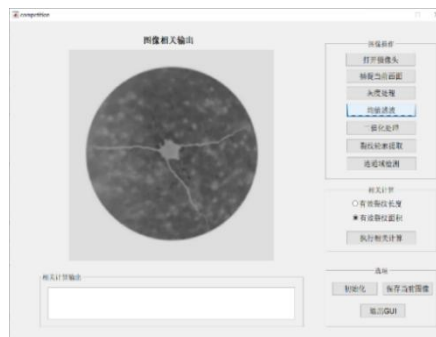


图 4-7 转灰度与均值滤波

**第三步：对均值滤波后的蛋壳图像进行阈值分割，通过实验发现，阈值选择 140 最合适，阈值分割效果如图 4-8 所示。**

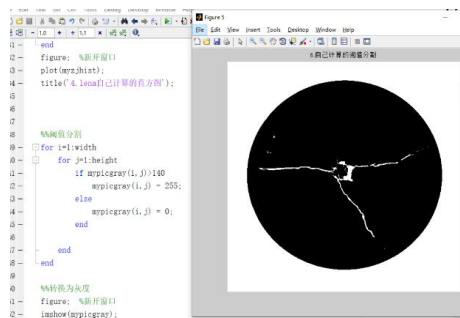


图 4-8 阈值分割图像

**第四步：对阈值分割后的蛋壳裂纹图像进行 Canny 边缘检测，** Canny 算法的基本思想是找寻一幅图像中灰度强度变化最强（梯度方向）的位置。平滑处理后图像中每个像素点的梯度可以由 Sobel 算子（一种卷积运算）来获得（opencv 中有封装好的函数，可以求图像中每个像素点的 n 阶导数）。接着利用如下的核来分别求得沿水平（x）和垂直（y）方向的梯度 G\_X 和 G\_Y。

$$K_{\{GX\}} = [-1 \ 0 \ 1; -2 \ 0 \ 2; -1 \ 0 \ 1]$$

$$K_{\{GY\}} = [-1 \ -2 \ 1; 0 \ 0 \ 0; 1 \ 2 \ 1]$$

之后便可利用如下公式求得每一个像素点的梯度幅值。

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

Canny 边缘检测的一般步骤如下：

**Step1:使用高斯滤波器，以平滑图像，滤除噪声。**

滤除噪声以防止由噪声引起的错误检测，减少边缘检测器上明显的噪声影响。高斯滤波器核的生成方程式由下式给出：

$$H_{ij} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i-(k+1))^2 + (j-(k+1))^2}{2\sigma^2}\right); 1 \leq i, j \leq (2k+1)$$

使用的是一个  $\sigma = 1.4$ ，尺寸为 3 尺寸的高斯卷积核：

$$H = \begin{bmatrix} 0.0924 & 0.1192 & 0.0924 \\ 0.1192 & 0.1538 & 0.1192 \\ 0.0924 & 0.1192 & 0.0924 \end{bmatrix}$$

若图像中一个 3 图像的窗口为 A，要滤波的像素点为 e，则经过高斯滤波之后，像素点 e 的亮度值为：

$$e = H * A = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} = \text{sum} \left( \begin{bmatrix} a \times h_{11} & b \times h_{12} & c \times h_{13} \\ d \times h_{21} & e \times h_{22} & f \times h_{23} \\ g \times h_{31} & h \times h_{32} & i \times h_{33} \end{bmatrix} \right)$$

## Step2: 计算图像中每个像素点的梯度强度和方向

图像中的边缘可以指向各个方向，因此 Canny 算法使用四个算子来检测图像中的水平、垂直和对角边缘。边缘检测的算子返回水平  $G_x$  和垂直  $G_y$  方向的一阶导数值，由此便可以确定像素点的梯度  $G$  和方向  $\theta$ 。

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$
$$\theta = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right)$$

其中  $G$  为梯度强度， $\theta$  表示梯度方向， $\arctan$  为反正切函数。下面以 Sobel 算子为例讲述如何计算梯度强度和方向。x 和 y 方向的 Sobel 算子分别为：

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

其中  $S_x$  表示 x 方向的 Sobel 算子，用于检测 y 方向的边缘；

$S_y$  表示 y 方向的 Sobel 算子，用于检测 x 方向的边缘（边缘方向和梯度方向垂直）。

在直角坐标系中，Sobel 算子的方向如下图 4-9 所示。

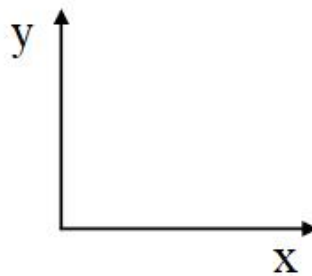


图 4-9 Sobel 算子的方向

若图像中一个 3 图像的窗口为  $A$ ，要计算梯度的像素点为  $e$ ，则和 Sobel 算子进行卷积之后，像素点  $e$  在 x 和 y 方向的梯度值分别为：

$$G_x = S_x * A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} = \text{sum} \left( \begin{bmatrix} -a & 0 & c \\ -2d & 0 & 2f \\ -g & 0 & i \end{bmatrix} \right)$$

$$G_y = S_y * A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \\ g & h & i \end{bmatrix} = \text{sum} \left( \begin{bmatrix} a & 2b & c \\ 0 & 0 & 0 \\ -g & -2h & -i \end{bmatrix} \right)$$

其中\*为卷积符号，sum表示矩阵中所有元素相加求和。根据公式便可以计算出像素点e的梯度和方向。

**Step3: 应用非极大值抑制，以消除边缘检测带来的杂散响应。**

非极大值抑制是一种边缘稀疏技术，对梯度图像中每个像素进行非极大值抑制的算法是：

(1)将当前像素的梯度强度与沿正负梯度方向上的两个像素进行比较。

(2)如果当前像素的梯度强度与另外两个像素相比最大，则该像素点保留为边缘点，否则该像素点将被抑制。

通常为了更加精确的计算，在跨越梯度方向的两个相邻像素之间使用线性插值来得到要比较的像素梯度，现举例如下。

如图4-10所示，将梯度分为8个方向，分别为E、NE、N、NW、W、SW、S、SE，其中0代表0°~45°，1代表45°~90°，2代表-90°~-45°，3代表-45°~0°。

像素点P的梯度方向为theta，则像素点P1和P2的梯度线性插值为：

$$\tan(\theta) = \frac{G_y}{G_x}$$

$$G_{p_1} = (1 - \tan(\theta)) \times E + \tan(\theta) \times NE$$

$$G_{p_2} = (1 - \tan(\theta)) \times W + \tan(\theta) \times SW$$

因此非极大值抑制的伪代码描写如下：

```

if  $G_p \geq G_{p_1}$  and  $G_p \geq G_{p_2}$ 
     $G_p$  may be an edge
else
     $G_p$  should be suppressed

```

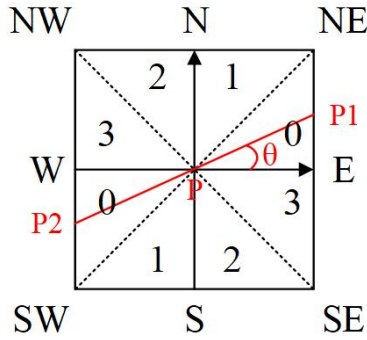


图 4-10 梯度方向分割

**Step4: 应用双阈值检测来确定真实的和潜在的边缘。**

在施加非极大值抑制之后，剩余的像素可以更准确地表示图像中的实际边缘。为了解决杂散响应，可以通过选择高低阈值来实现。阈值的选择取决于给定输入图像的内容。

双阈值检测的伪代码描写如下：

```

if  $G_p \geq \text{HighThreshold}$ 
     $G_p$  is an strong edge
else if  $G_p \geq \text{LowThreshold}$ 
     $G_p$  is an weak edge
else
     $G_p$  should be suppressed

```

**Step5: 通过抑制孤立的弱边缘最终完成边缘检测。**

此时，被划分为强边缘的像素点已经被确定为边缘（从图像中的真实边缘中提取而得）。

为计算简便，使用  $G_X$  和  $G_Y$  的无穷大范数来代替二范数。把平滑后的图像中的每一个点用  $G$  代替，通过 Canny 边缘检测后可得到蛋胚裂纹图像，如图 4-11 所示。

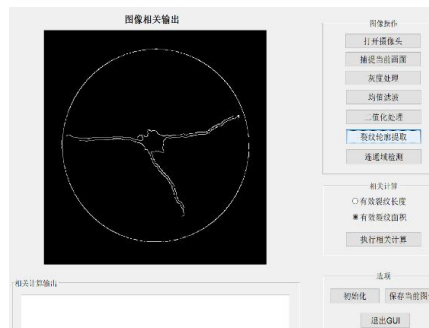


图 4-11 Canny 边缘检测图像

**Step6: 使用 `findContours(InputOutputArray image, OutputArrayOfArrays contours, OutputArray hierarchy, int mode, int method, Point offset=Point())` 函数寻找裂纹轮廓，再**

使用 `drawContours()` 函数进行裂纹轮廓绘制，方便距和中心距的计算，绘制结果如图 4-12 所示。

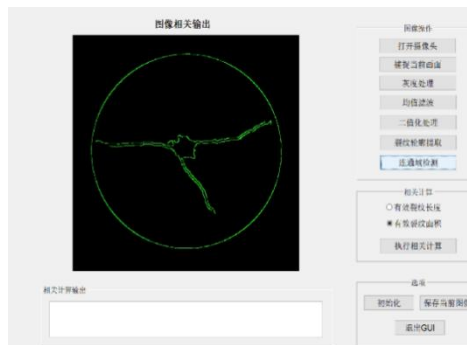


图 4-12 轮廓 blob 连通域检测+轮廓绘制

**Step7:** 计算出裂纹的有效面积指数  $\Delta S$  和裂纹有效轮廓指数  $\Delta L$ ，如图 4-13 所示，若检测结果显示为裂纹蛋胚，应当剔除。

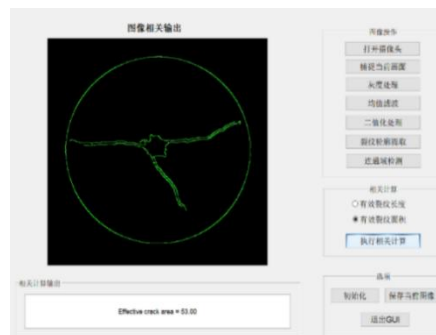


图 4-13 有效面积和有效轮廓指数计算

**Step8:** 对蛋胚进行预剔除检测。蛋胚的上方为气室区域，在此区域进行病毒注射，可以减少胚液接触到空气的几率，增加培养成功的概率。若针孔注射后，裂纹部分超过气室区域，会导致部分胚液与外界空气相接触，大大增加了蛋胚感染的风险。因此，需要在提取蛋胚轮廓特征之后，将裂纹超过气室区域的蛋胚进行剔除，即此类蛋胚不能用于病毒培养。

**Step9:** 建立 BP 神经网络，对蛋胚裂纹与否进行判别。将不符合条件的蛋胚进行预剔除后，通过前面步骤可以提取出样本蛋胚中的特征信息：**裂纹有效长度**和**裂纹有效面积**。在对样本蛋胚进行真实培育后，按照能否成功培育病毒将样本蛋胚的特征信息分为两类，如图 4-14、图 4-15 所示分别为培育病毒成功和未成功的蛋胚样本图。



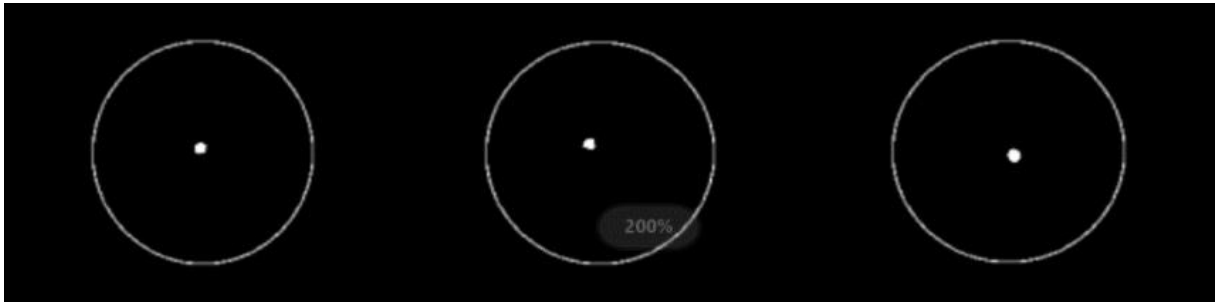


图 4-14 可成功培育病毒的蛋胚样本



图 4-15 不能成功培育病毒的蛋胚样本

通过培育实验可得到能够成功培育、不能成功培育病毒的两类蛋胚样本特征信息，因此可以通过 BP 神经网络算法建立蛋胚裂纹判别模型，对未知蛋胚进行裂纹与否的判别。BP 神经网络是一种多层前馈神经网络，该网络的主要特点是信息前向传递，误差反向传播。在前向传播的过程中，输入信号从输入层经隐含层处理，直至输出层。每一层的神经元状态只影响下一层神经元状态。如果输出层得不到期望输出，则转入反向传播，根据预测误差调整网络权值和阈值，从而使 BP 神经网络预测输出不断逼近期望输出，并通过不断地训练，根据现有的分类，进行分类器模型的构建。BP 神经网络分类的大致算法流程，如图 4-16 所示。

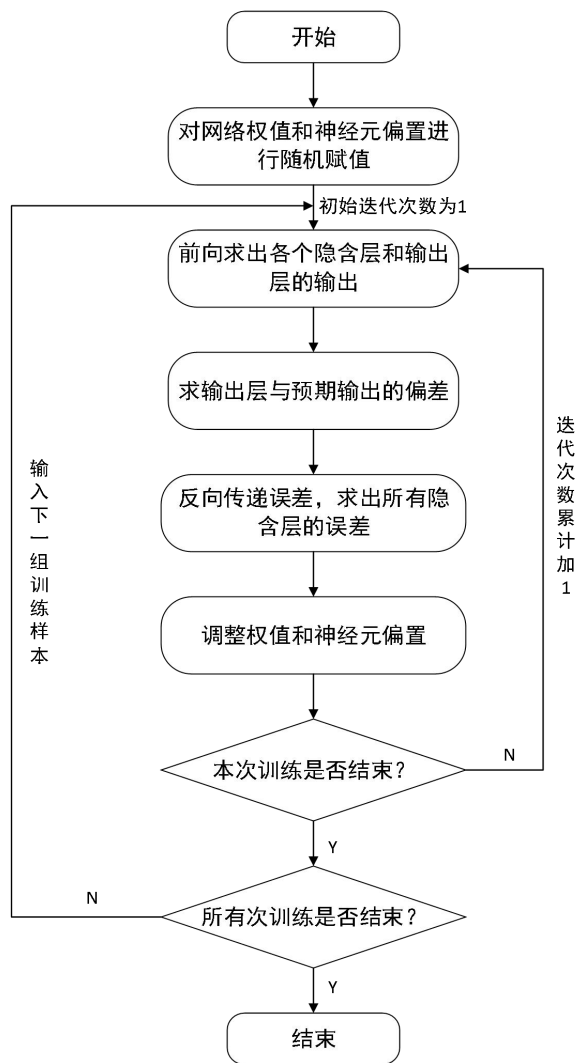


图 4-16 BP 神经网络算法流程图

根据图 4-16 所示的流程图，可得利用 BP 神经网络分类的具体步骤为：

**Step1:** 进行神经网络的初始化，对其进行初始化，主要是对于网络结构参数的设置：

①输入输出层的设计

该装置中 BP 神经网络模型是以提取的蛋胚图像特征信息（有效长度、有效面积）作为输入参量，即输入节点应为 2；以蛋胚样本是否产生裂纹（是否能够成功培养病毒）作为预测输出，输出节点值应为 2。

②隐层的设计

采用的是较通用的单隐层感知器，所以只需设置一个隐层即可。隐层神经元的表达式为：

$$l = \sqrt{m + n + r}$$

$m$ 、 $n$  即为输入输出节点的个数， $r$  表示人为设定常数，一般取值为[1,10]。

在此环节中取： $l \in [\sqrt{3} + 1, \sqrt{3} + 10]$ 。

此外还需要对输入层与隐层之间的权重  $\omega_{op}$ 、隐层与输出层之间的权重  $\omega_{pq}$ 、隐层阈值  $a$ 、输出层阈值  $b$  等相关参数进行初始化的设置。

Step2: 隐层输出的计算：在本题中，选用的隐层激励函数为 sigmoid 函数：

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

当输入变量为  $x$  时，隐层输出  $H$  为：

$$H_o = f\left(\sum_{o=1}^n \omega_{op} x_o - a_p\right)$$

Step3: 输出层输出的计算：根据上步求出的隐层输出  $H$ ，在这里作为输入，结合隐层与输出层之间的权重  $\omega_{pq}$  及输出层阈值  $b$ ，可求出输出层输出  $I$  为：

$$I_q = \sum_{p=1}^l H_p \cdot \omega_{pq} - b_q$$

Step4: 反向传递误差的计算：根据网络预测输出  $I$  与期望输出  $Y$ ，即可算出反向传递误差：

$$E = Y - I$$

Step5: 权值  $\omega_{op}$ 、 $\omega_{pq}$  的更新：根据反向传递误差  $E$ ，即可得到更新后的权值分别为：

$$\omega_{op} = \omega_{op} + \eta H_p (1 - H_p) x(o) \sum_{q=1}^m \omega_{pq} E$$

$$\omega_{pq} = \omega_{pq} + \eta H_p E$$

其中， $\eta$  为 BP 神经网络的学习效率。

Step6: 阈值  $a, b$  的更新：同上，根据反向传递误差可以更新阈值为：

$$a_p = a_p + \eta H_p (1 - H_p) x(o) \sum_{q=1}^m \omega_{pq} E$$

$$b_q = b_q + E$$

Step7: 根据上述算法流程图，逐一进行迭代循环即可。

BP 神经网络的模型图如下图 4-17 所示。

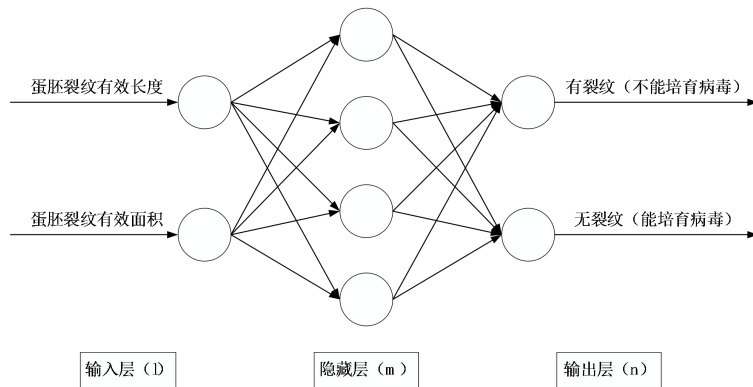


图 4-17 BP 神经网络原理图

将 BP 神经网络训练好后，通过对 500 组样本蛋胚试验结果进行分析可得：当裂纹有效轮廓指数  $\geq$  样本蛋胚试验、裂纹有效面积指数  $\geq$  裂纹有效面积时，认为蛋胚不合格。同时，在此判别依据下，该装置的检测精度可以达到 99.8%。

## 4.2 电控部分

### 4.2.1 控制器件的选择

作品采用的控制器为晶体管型 PLC 工控板 FX3U-40MT，相较于单片机，PLC 有更高的可靠性和抗干扰能力，以及较强的环境适应能力。该控制器采用 ARMCortex-M3 32 位 MISC 内核芯片，运算速度快，存储空间大。且该控制器具有 6 路 100K 脉冲输出口，6 路 8K 高速计数口，支持多个电机的控制。本作品需要精确控制的电机共 4 个，均为步进电机，该型号 PLC 能够满足作品需求。

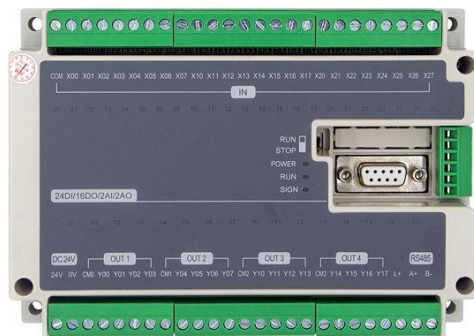


图 4-18 国产 FX3U-40MT 型 PLC

I/O 接口图设计方案：

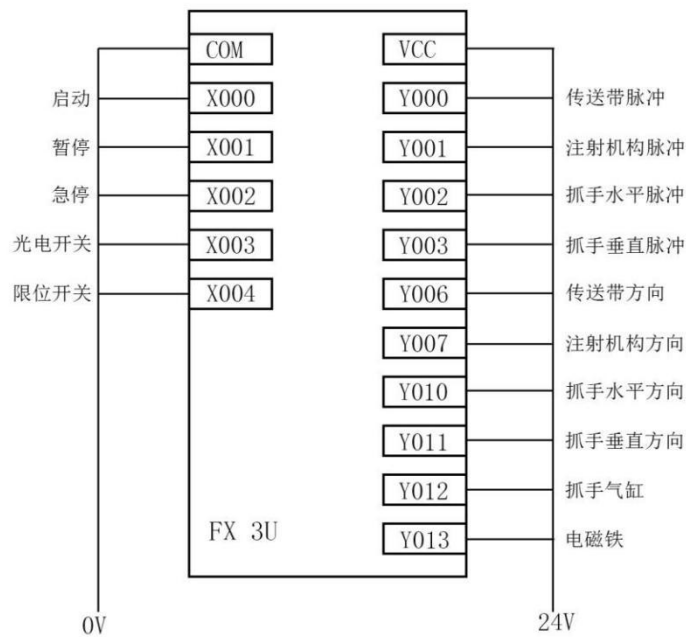


图 4-19 I/O 接口图

作品装有启动、停止、急停三个物理开关，启动和停止按钮用于控制设备工作的开始和结束状态；急停按钮用于终止当前工作的一切进程，可在设备异常工作时及时断电，保护人员及设备安全。光电开关 X003 用于判断当前是否有蛋托运动到分拣位，进而给出分拣机构的工作信号，执行后续进程。限位开关 X00 安装于注射机构的上限位,有信号时表示注射机构已到达原位。

输出端包括注射装置、传送机构、多自由度执行终端共四个步进电机的脉冲和方向端口，控制执行终端动作的气缸，以及控制注射头运动状态的电磁装置。

#### 4.2.2 串口通讯的选择：

PLC 控制传送带运送胚蛋到达黑箱中指定位置后，需要采用 Visual C++6.0 开发 PC 和 PLC 之间的串行通讯，实现胚蛋图像的采集以及图像检测结果的传送。

**上位机与 PLC 通信：**作品选用三菱 FX-3U 系列 PLC 与上位机的通信，并采用 RS485 通讯接口，如图 4-20 所示。

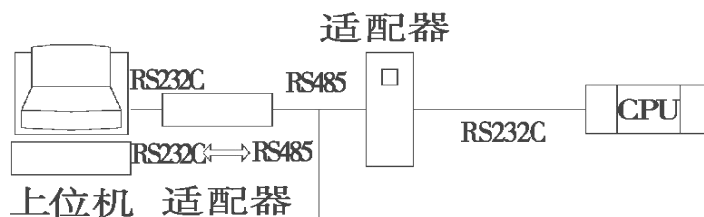


图4-20 上位机与PLC通信图

FX-3U 型 PLC 是三菱系列 PLC 中的重要成员,它支持多种通讯协议, 而其用户自定义协议很有特色,它通过用户程序可以控制 CPU 通讯口的操作模式。利用自定义协议模式,可以实现用户自定义的通讯协议连接多种智能设备。在自定义协议模式下,通讯完全由用户程序控制。用户程序通过使用接收中断、发送中断、发送指令(XMT)和接收指令(RCV)控制通讯口的操作,这给程序设计带来了很大的灵活性, 基于以上优势, 作品主要采用 FX-3U 型 PLC 通讯协议。

### 上位机串行通讯程序设计

作品选取可提供一系列标准通信属性和方法的 MSComm 控件, 建立应用程序与串行端口的连接。在对 MSComm 控件进行初始化之后, 就可以进行 PC 与 PLC 之间的串口通讯设计。

串口通讯设计需要实现:

- ①在传送带到达指定位置后发出信号采集蛋胚图像;
- ②将蛋胚检测结果传送至下位机进行剔除。

因此, 整个过程涉及到的程序有三个: 上位机主控制程序, 下位机移动程序, 摄像头 SDK 保存图像程序。三套程序各自的逻辑结构与配合关系如图 4-21 所示。

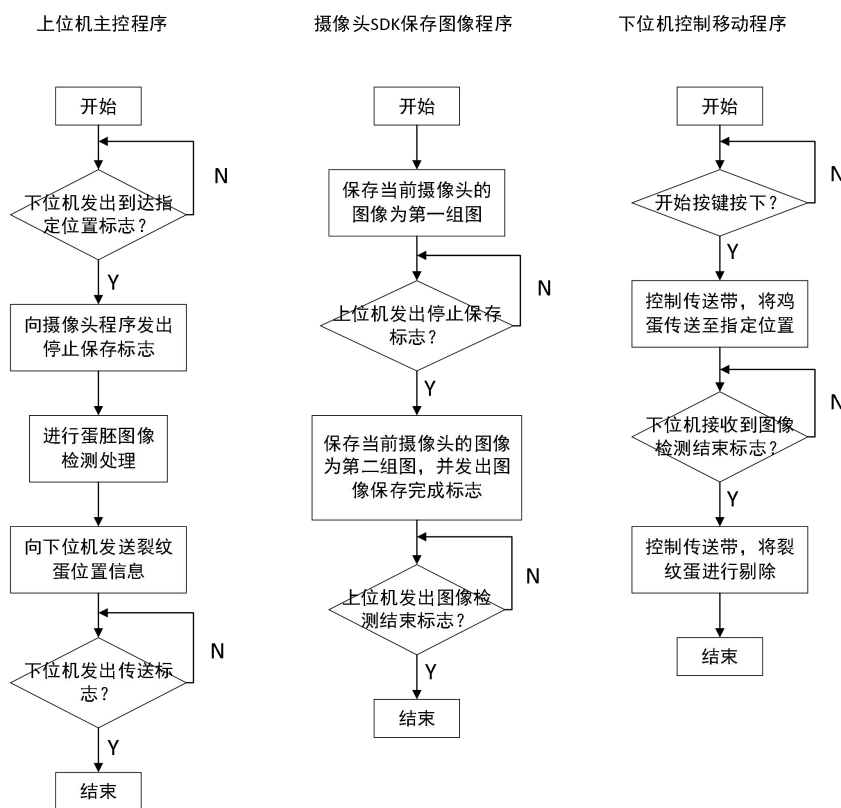


图 4-21 逻辑结构与配合关系图

整个通讯的逻辑顺序如下:

- ① 为提高采集速度，摄像头SDK保存图像程序在线时持续采集并保存图像，周期为20ms。
- ② 上位机主控程序接收到操作人员按下的程序启动事件。
- ③ 下位机启动，到达指定位置后发出到达指定位置标志。
- ④ 上位机接收到达标志后，发出停止保存标志。
- ⑤ 摄像头SDK保存图像程序接受到停止保存标志，停止保存图像。
- ⑥ 上位机利用最后一次采集的图像进行检测，并发出检测结束标志以及裂纹蛋位置信息标志。
- ⑦ 下位机接收到检测结束标志，并控制传送带将裂纹蛋剔除。

其中，摄像头SDK保存图像程序与上位机主控程序之间使用txt文件进行通信。摄像头SDK保存图像程序向上位机主控程序发出图像保存完成标志，即在专门的公共Bridge文件夹下新建Picture\_Save\_Ok.txt文件。上位机主控程序每隔5ms检测一次Bridge文件夹下是否有Picture\_Save\_OK.txt文件，若有则进入下一步操作，并删除Picture\_Save\_Ok.txt文件，如此两套程序便可实现互相通信。

## 5 创新点及优点

### 5.1 作品创新点

1. 构建了机器视觉技术与神经网络技术结合的微孔蛋胚裂纹检测系统，实现了带孔胚蛋壳裂纹的在线准确识别；
2. 定义了裂纹有效面积指数及裂纹有效轮廓指数，提出了蛋壳亮斑消除算法，通过对注射孔裂纹特征的提取，实现裂纹蛋胚与完好蛋胚的准确判别。

### 5.2 作品优点

1. 代替人工——实现对成功接种病毒的胚蛋进行带孔裂纹蛋的检测，效率高，准确性高。
2. 对胚蛋无二次伤害——机器视觉检测系统不会给胚蛋造成新的裂纹。
3. 成本低——摄像头、PLC、显示屏等硬件及机械本体成本低。
4. 操作简单——全自动化流水线式工作，只需要将胚蛋放置于初始工位即可完成后续的快速检测。
5. 产品性能好——设备运行高效稳定，使用寿命长，控制方便，市场潜力大。

## 6 应用前景



2019年国内用于培养病毒（疫苗）的蛋胚超过100亿枚。随着全球疫情的日益加重，所需活体蛋胚的数量也逐渐增加。然而，目前企业仍然采用人工肉眼检测裂纹蛋胚，不仅精度低，影响同批病毒品质，还会对工人视力造成一定程度的损害。

作品采用自动化流水线方式识别裂纹蛋胚，不仅检测效率较高且准确率可达100%。该装置可应用于培育新冠疫情相关疫苗以及一些其他利用蛋胚作为病毒载体的疫苗开发上，例如狂犬疫苗、麻疹疫苗、腮腺炎疫苗、新城疫苗等，为我国病毒（疫苗）开发行业做出贡献。

### 参考文献

- [1]樊三玲等. 蛋胚免疫疫苗的研究现状及展望[J]. 湖北农业学, 2018, 57(S2):154-157.
- [2]刘艳, 李庆武, 黄小微, 霍冠英, 周妍. 胚蛋透光图像特征提取与新鲜度检测模型研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(25):72-77.
- [3]孙力, 蔡健荣, 林颢, 赵杰文, 方根根. 基于声学特性的禽蛋裂纹实时在线检测系统[J]. 农业机械学报, 2011, 42(05):183-186.
- [4]戴其俊. 基于动力学信号分析的胚蛋蛋壳裂纹检测研究[D]. 江苏大学, 2017.
- [5]张世庆, 戴其俊, 孙力, 蔡健荣, 周青倩, 周小力. 禽蛋裂纹检测敲击装置力学分析与结构优化[J]. 农业机械学报, 2017, 48(05):363-368.
- [6]王芳, 文友先, 谭佐军等. 基于偏振光和聚类分析的皮蛋壳裂纹无损检测[J]. 农业机械学报. 2014. 30(9):249-255.
- [7]潘磊庆, 屠康, 赵立等. 敲击振动检测胚蛋裂纹的初步研究[J]. 农业工程学报. 2004 20(4):11-15.
- [8]孙力, 蔡建荣, 林颢等. 基于声学特性的禽蛋裂纹实时在线检测系统[J]. 农业机械学报. 2011. 5(5).
- [9]潘磊庆, 屠康, 苏子鹏等. 基于计算机视觉和神经网络检测胚蛋裂纹的研究[J]. 农业工程学报. 2007. 23(5):154-158.
- [10]刘鹏, 潘磊庆, 屠康等. 基于计算机视觉与敲击振动融合技术检测鸭蛋壳强度[J]. 农业机械学报. 2009. 40(8):175-180.
- [11]杨冬风, 马秀莲. 基于分形纹理分析的蛋壳裂纹识别[J]. 吉林大学学报. 2011. 7.
- [12]彭辉, 文友先, 王巧华等. 基于小波变换和BP神经网络的蛋壳破损检测[J]. 农业机械学报. 2009. 40(2):170-174.
- [13]唐雪, 王泉鸿, 蔡才, 等. 胚蛋注射技术对家禽生长的促进作用[J]. 家禽科学, 2020(02):53-58.
- [14]马巍陵, 蔺辉星. 鸡马立克氏病疫苗蛋胚免疫技术的应用[J]农业与技术, 2018, 38(7):8-9;12.
- [15]熊利荣, 王树才. 基于机器视觉的鸭蛋裂纹自动检测[J]. 湖北农业科学. 2009. 12.

- [16]Li Sun, Xia-kun Bi, Hao Lin, Jie-wen Zhao, Jian-rong Cai. On-line detection of eggshell crack based on acoustic resonance analysis[J]. Journal of Food Engineering, 2013, 116(1).
- [17]Cheng Jin, Lijuan Xie, Yibin Ying. Eggshell crack detection based on the time-domain acoustic signal of rolling eggs on a Step-plate[J]. Elsevier, 2015, 153.
- [18]H. R. Al-Ani, A. A. R. Al-Amiri. Effect of through Crack Size on Strength of Shell Structures[J]. Journal of Infrastructure Systems, 2014.
- [19]K. M. Dovbnya, N. A. Shevtsova. Studies on the Stress State of an Orthotropic Shell of Arbitrary Curvature with the Through Crack Under Bending Loading[J]. Strength of Materials, 2014, 46(3).
- [20]Peebles E D. In ovo applications in poultry: A review. [J]. Poultry science, 2018, 97(7) :2322-2338.

# 基于树莓派的“魔镜”设计和开发

参赛者：李家旺、黄嘉庆、邹凌云、党佳宁、敖成宽、何文军

(中国计量大学理学院，杭州 310018)

指导教师：姜伟棣、乔宪武

**摘要：**2021年6月2日，华为正式发布 HarmonyOS 2 及多款搭载 HarmonyOS 2 的新产品，预想实现万物互联的高效互动。我们深受启发，提出通过搭载一个微型电脑（即 Raspberry Pi），以及后续各个模块的加载应用，相较其他智能家居，我们的产品可以作为一个互联系统的主控中心，也就是我们的 MagicMirror。我们本文简要介绍了产品雏形、未来目标规划及应用前景。

**关键字：**万物互联设想、树莓派、主控平台及各模块可行性

## 1 研究背景及意义

鸿蒙系统的万物互联设想，就是让一个设备与其他的设备互相联系，如用投屏技术将手机与电脑联系起来。万物互联设想在当今社会具有极其重大的意义，也有着很广阔的发展前景。因此，我们团队决定紧跟科技的发展，沿着万物互联这个思路，做出一个能够符合当下社会发展的作品。

万物互联给予了我们很大的思想启发，我们的作品是在这种思考下逐渐完成的。但其实看起来简单的这样一个万物互联的设想，原理并不简单。两个设备的连接需要经历发现、配对、连接以及组合整个过程，包括对设备本身的身份验证。鸿蒙系统所研发的互联机制不需要其他以往十分繁琐的步骤，操作起来十分简单，这样就受到了广大的消费者的青睐。同样的，我们的作品也在操作这方面十分简单，可以更好地融入消费者。

在如今这样一个科技发展迅速的时代，越来越多的高科技产品出现在了人们的生活中，相关的产品也越来越注重使用方法的简洁性，但到目前为止，我们所使用的产品都还没有做到足够简洁便利。比如说我们看似操作十分简单空调、电视这些，它们都需要一种类似于手机软件的东西来调控，但我们想的是让其更加地方便操作，不用借助中间媒介来进行调控，直接操控空调等器具。

除此之外，当今社会人们的生活节奏快，生活压力大，只有相对简洁便利的使用物品才能够让人们更好地适应这个社会。为了应对人们日益增长的需求，我们应该让我们的产品更加地方便使用，这样就能够更加广泛地进入人们的生活，给用户提供更好的体验。那么要想能够在这么多的产品中脱颖而出，自主创新是必不可少的。

综上考虑，我们团队开发了基于树莓派面向以后万物互联的“魔镜”。

## 2 作品组成与工作原理

### 2.1 总体设计方案

本作品的技术方案是一种面向个人用户以及企业用户的信息交互系统 MagicMirror，主要包括信息展示系统、人机交互系统、核心运算系统。如图

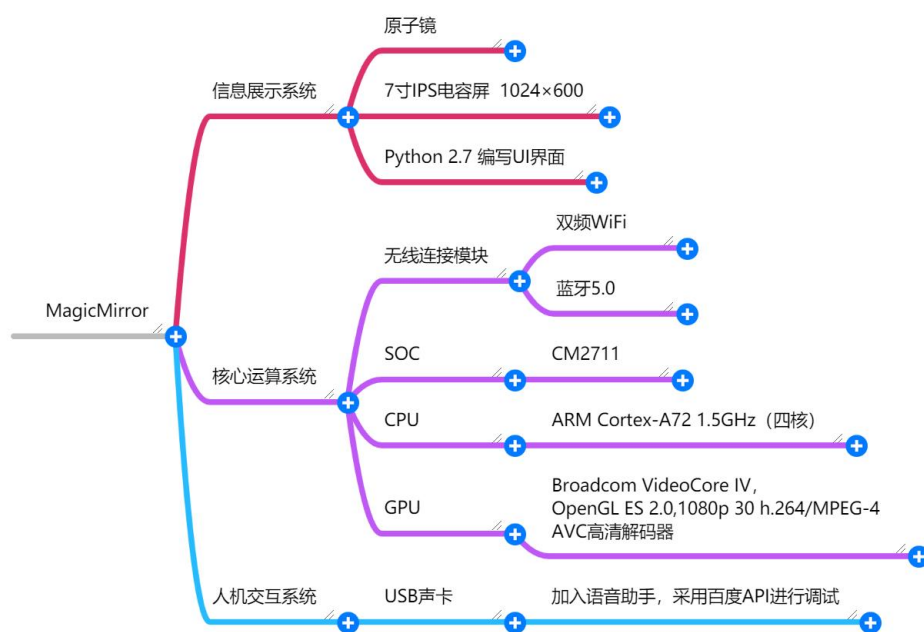


图 1 系统总体组成图

**信息展示系统：**采用分辨率为 1024×600 的 7 寸电容 IPS 屏幕，尽可能地降低系统的功耗，在达到智能化的同时努力追求节能环保。利用 Python2.7 编写界面 UI，做到整体风格简洁、美观、大方、多元。

**核心运算系统：**主要分为无线连接模块部分和核心运算部分。无线部分采用蓝牙 5.0 和 WiFi4.0 模块，加快 MagicMirror 从互联网获取新闻、实时天气、天气预报的速度。核心运算

模块 SOC(System on Chip)采用 CM2711 芯片, 载入较为简洁的 Linux 系统, 以降低运算压力, 减少载入时间, 改善 CPU 发热; CPU 采用锐龙 AMD Cortex-A72 四核处理器, 运行频率最高可达 1.5GHz, 为未来新增语言模块、红外传感模块、人脸识别模块等高级模块提供了可能。

**人机交互系统:** 尝试加入 USB 声卡, 采用百度的开放 API 编写语言助手, 最终希望达到人机之间可以进行简单对话的效果。

## 2.2 各子系统之间的联动方式——集成电路、无线网络

将核心运算系统集成在电路板上, 加入 2 个 USB 2.0 接口, 2 个 USB 3.0 接口, 给未来更多模块、元件的添加和升级留出接口。使用 HDMI 连线将屏幕控制板与主板连接, 使用 USB 连线将声卡与主板连接。

搭建网站对界面 UI 的各个模块进行实时控制, 利用计算机即可实现对 MagicMirror 的界面亮度、模块显示等的远程操作。

## 2.3 基于 Python 2.7 的 UI 界面设计即模块远程控制平台搭建

通过代码编写与开源文件的利用与修改, 最终作品的 UI 界面包括: 时间模块、实时天气模块、天气预报模块、日程模块和新闻模块。



图 2 UI 界面

考虑到未来对 MagicMirror 设置的便捷性，我们搭建了一个远程访问窗口，可以直接使用计算机对 MagicMirror 的亮度、对比度、各个模块的打开或关闭进行远程控制，提高了 MagicMirror 的个性化与便捷性。

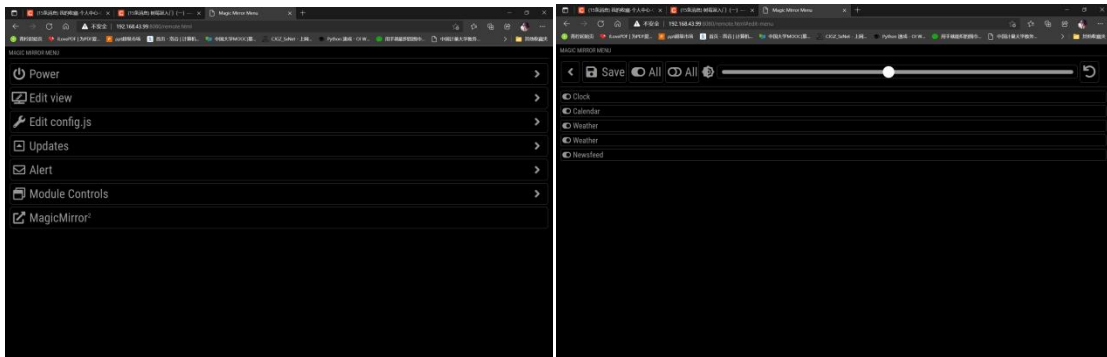


图 3 远程访问窗口

## 2.4 核心运算系统

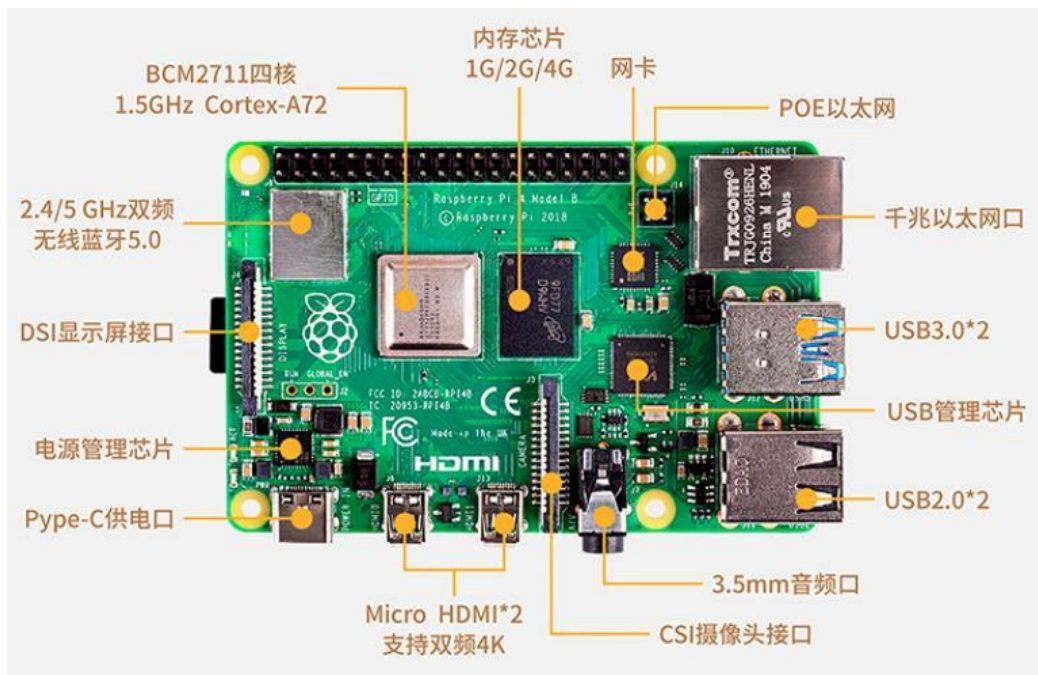


图 4 核心运算系统电路板实物图





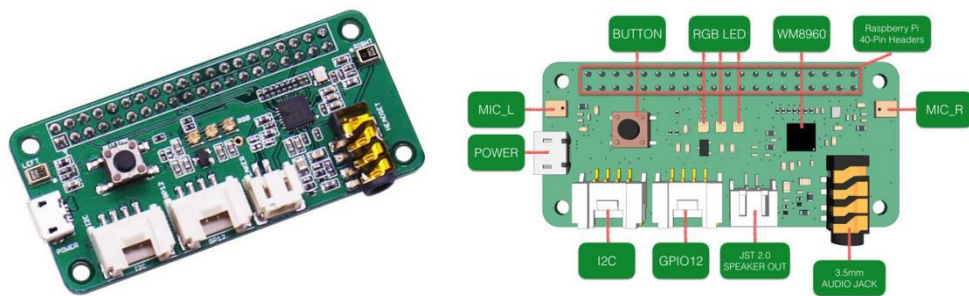


图 7 respeaker 2-Mics Pi HAT 双麦克风扩展版图

## (2) 显示模块：电容屏、控制板

**DSI 接口：**DSI 是由 MIPI（移动产业处理器接口联盟）定义的一种显示输出接口，DSI 定义了一个位于处理器和显示模组之间的高速串行接口，是一种串行传输方式，包括数据、指令、其他信息。DSI 的全称是显示器串行接口（Display Serial Interface）。作品所采用的 DSI 接口主要是 3 路差分信号，原理图如下：

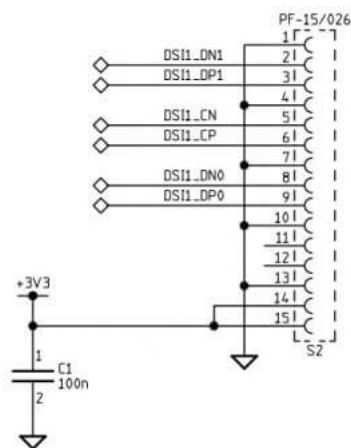


图 8 DSI 接口原理图

团队选择采用比较符合日常 PC 操作的设计思路，于 SOC 芯片上安装 Linux 系统，连接屏幕后直接进行类似 PC 端的操作，降低了后期各种模块搭载的难度，为后期维护和二次开发打下基础。

## (3) 信息获取模块

利用系统可以连接无线网络的特点，采用 Python 代码编写，直接从网络获取实时天气、天气预报、时间、日程等的具体信息，当作品在不同的地区时，只需要改变当地城市的 ID 即可获取当地的天气信息（模块代码见附录）。

## (4) 预留拓展模块

我们的作品开放程度较高，核心运算模块提供了一定的算力，因此在未来还可以加入例如温度湿度传感器、红外传感器、人脸识别模块等，以进一步提高 MagicMirror 的智能化，为此，我们预留了足够的拓展接口：

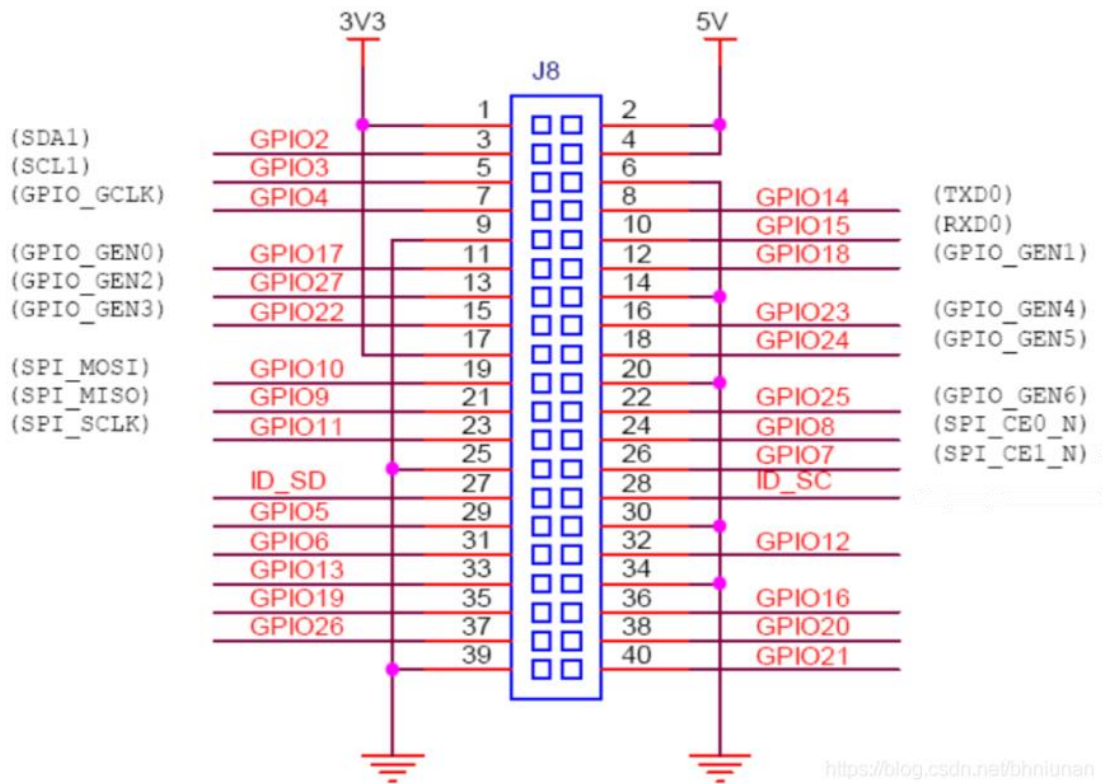


图 9 拓展接口原理图

未来可添加模块：

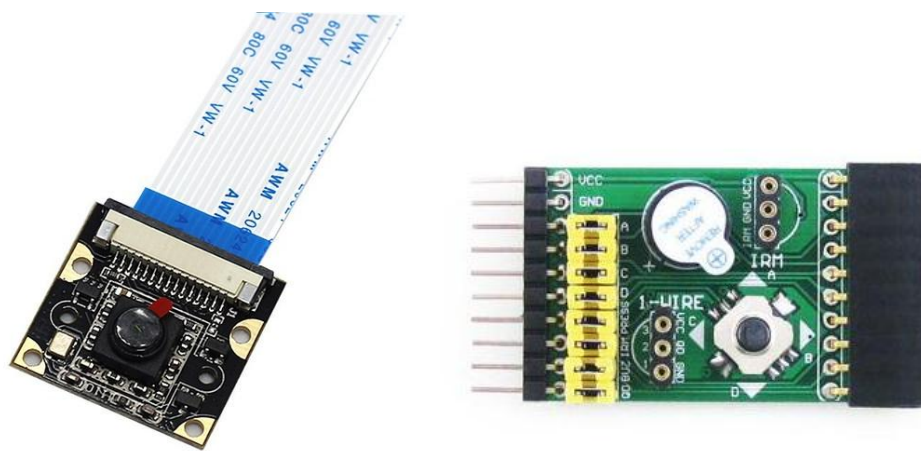


图 10 摄像模块、红外接收模块图

## 2.5 物理原理——原子镜

单向透光镜子能产生单面反光的效果，是因为镜子两面所处的环境光的强度不同而造成的。单面镜的玻璃面上涂有很薄的银膜或铝膜，这层膜并非反射所有的入射光，而是能让一半的入射光通过，而另一半被反射回去。

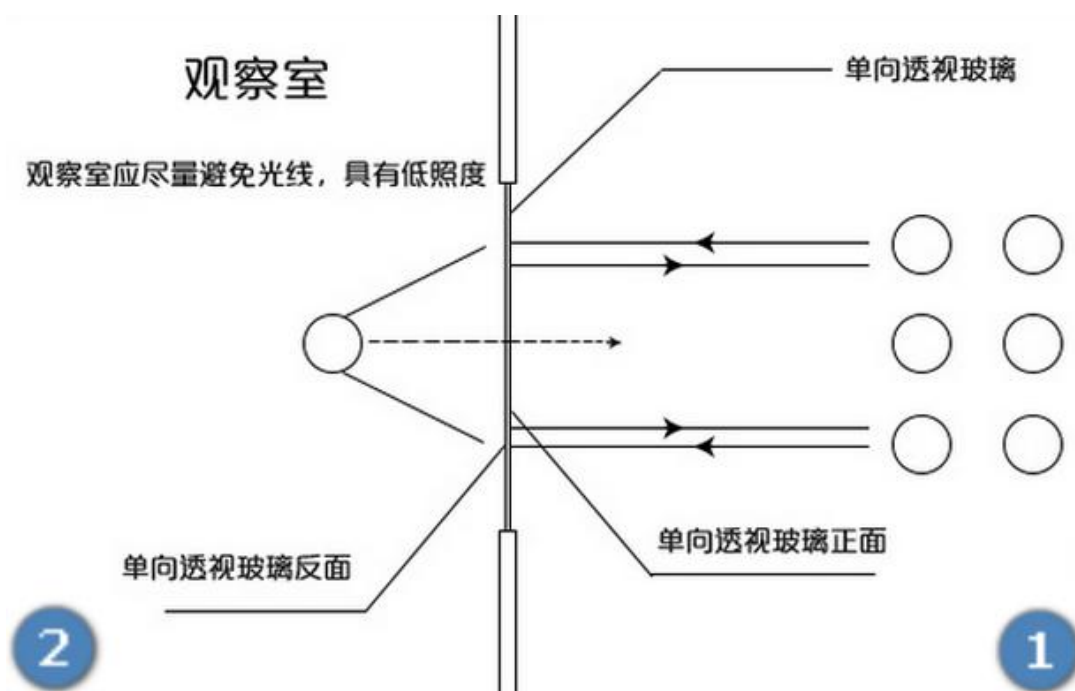


图 11 原子镜原理示意图

可以看到，房间 1 被反射回来的光比房间 2 透射过来的弱光要强得多，因此从 1 看向玻璃，只能看到 1 中物体。

而从 2 看向玻璃时，由于从 1 透射过来的光线要比 2 本身反射回来的光线强得多，则在 2 看到的是 1 中的物体。也就是说，从 1 看去，玻璃相当于一面平面镜，只能看到自己；从 2 看去，却可以看到 1 中的一切，但是不能把它当作镜子使用。如果将光照强度改变一下，1 弱 2 强，则看到的效果刚好相反。

利用原子镜的特性，将屏幕紧贴于镜面一侧，其余部分用遮光效果良好的黑布覆盖，在镜子另一侧即可获得一个显示天气、时间等信息的镜面效果。

### 3 创新点及相关产品对比

#### 3.1 用树莓派 DIY

本作品采用的是树莓派作为主体运算系统。众所周知，树莓派一开始是一款为学生计算机编程教育设计的卡片式电脑，其系统基于 Linux。



图 12 树莓派具体部件展示

#### 总结树莓派的创新点

树莓派相比于普通的单片机而言，具有更完整的操作系统，可以实现较为复杂的程序，甚至是多个程序的共同运行，这也使得我们的创意可以不局限于单片机的硬件限制上，可以去考虑更多更复杂的功能，以及多个功能的创新组合。而其机身小的优点，也可更容易地被运用到各种方面上，可以实现智能家居控制方面的各种实践，既可作为部件来控制某方面的功能，又可作为主控来对部件进行听懂并调控所需执行的指令。

### 3.2 采用镜面反馈信息，达到信息可视化



图 13 魔镜组装搭建实拍

我们所做的魔镜可以进行信息的可视化，相比于目前常见的智能家具，我们的优点是可以通过进行信息的反馈，而且是以文字的方式投放到镜子屏幕上的，后续也可根据此优点进行发展延伸，从而成为智能家具的总控中心。

### 3.3 后续可以跟进优化发展

由于树莓派本身对于程序的可适性大，不会局限于本身大小，而树莓派的端口很多，足够连接更多的板块，从而可以达到技术和功能上的创新，并且由于树莓派本身的优势，可以通过未来程序的编写从而增加我们作品的功能。（具体内容见 4.2）

## 4 应用前景及未来展望

### 4.1 时代背景及应用前景

我们的产品着重的是信息数字化，可视化以及人机交互的功能。在这万物互联和人工智能发展的时代，我们的产品也就顺应了时代的潮流，相信也能有很好的发展。

#### 4.1.1 万物互联

据预测，到 2020 年，全球物联网连接设备将超过 500 亿个，会产生 600 泽字节的信息。这么庞大的数据量，当然会影响并改变我们的生活和工作。





图 14 全球互联网化

近日，全球著名的未来学家 Peter Diamandis 描述了一个知识极大丰富的时代。在这个时代，我们将能随时随地获取任何我们想要了解的一切，而这将归功于未来全球的互联网化。同时，在这个时代，隐私将伴随着开放的网络而荡然无存。Diamandis 认为卫星、无人机、自动驾驶和增强现实这四大创新技术正在将全球所有设备通过传感器连接起来，从而创造一个真正的万物互联的社会。

### 万物互联具体表象



图 15 卫星成像和轨道物联网



图 16 自动驾驶汽车

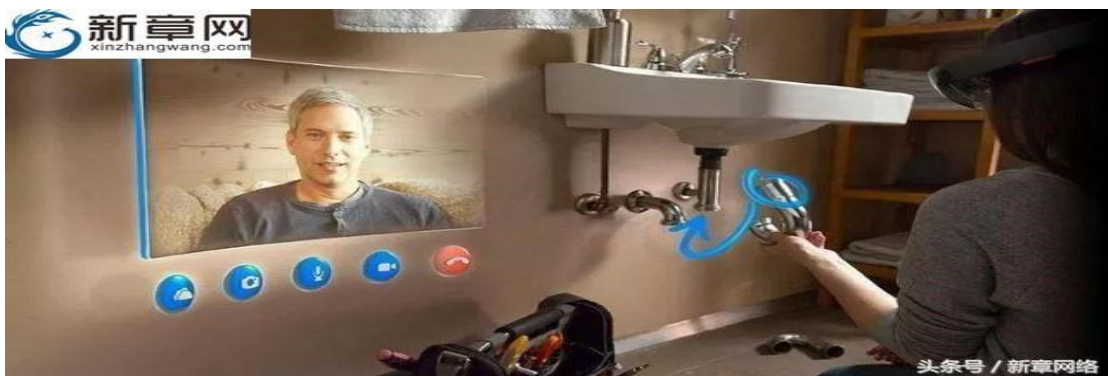


图 17 增强现实眼镜与人工智能

### 在这样的时代背景下的应用前景：

随着信息化，数据化的时代到来，数据的收集整理，信息的表达传递尤为重要，我们的作品目前达到了部分的数据收集以及部分的信息表达，同时，由于可以上升的空间大，再加上时代潮流的轨迹，相信在未来的发展中我们的作品可以利用时代的优势，在许许多多方面上进行创新，同时，由于它对于信息和数据的处理，相信在未来完善过后也会有很大的应用前景，通过拓展可以利用万物互联进行信息数据的收集传递，利用人工智能进行人机交互，家具总控等各方面都存在其潜在的价值。

### 4.2 应用场景

1. 本作品研发的魔镜主要是应用于家庭户内较为常见，可以当作镜子来梳理妆容，也可以观察镜面了解相关信息，同时结合其他智能家具，对家进行调控。
2. 本作品也可运用于企业车间，通过对温度湿度的感测与调控，以此保证车间的环境适宜。
3. 本作品也可运用于医院，可以用于检测异常体温，同时反馈出相应信息，确保进出安



全，也可对温湿度的调控，从而确保病房温度适宜，若是患者出现不适现象，也可通过警报来进行信息传递。

#### 4.3 后续优化思路：

进行对其他智能家具的调控

通过魔镜自身所携带的蓝牙系统，以及基础的人机交互的拓展，从而达到智能音箱的作用。

#### 从理论上想法可实现的原因（从智能音响的工作原理结合魔镜的功能拓展）

智能音箱提供内容和服务的工作原理：

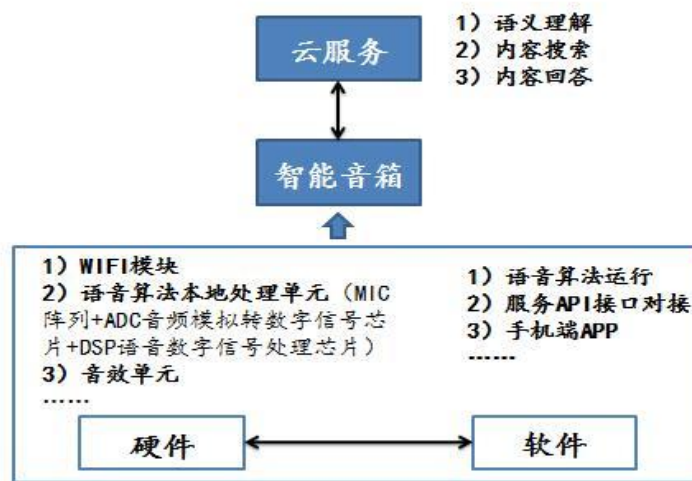


图 18 智能音箱工作示意图

(1) 假设消费者向智能音箱发出“查询 A 到 B 的机票”的指令，智能音箱的语音交互系统通过语音算法本地处理单元和音频解码单元收集语音、降噪、识别唤醒词、将语音信号转为数字信号，之后将处理后的数字信号上传至云端服务器，云端服务器将进行语音数字编码识别和语义理解，随后通过调用机票预订数据库中的信息传递给智能音箱，智能音箱将上述数字信号通过音效单元还原为语音信号并播放出来。

(2) 智能音箱控制智能家居的工作原理：假设消费者向智能音箱发出“关闭电灯”的指令，智能音箱通过语音收集、语音识别后将语音数字编码通过云端服务器进行语义理解，并将得到的信息回馈回到家庭路由器，通过路由器广播这条控制指令，智能家居设备拥有各自唯一的 IP 号，智能家居能够识别指令中是否涉及自身的 IP 号，最终电灯的插座识别完成后，完成关闭电灯的指令。

(3) 智能音箱的智能语音交互系统是实现其智能化的关键技术。智能语音交互系统需要具备：①远场识别；②唤醒词唤醒；③语音识别；④语义理解。任何支持智能语音交互系统的设备都可以成为以语音作为媒介的控制中枢，因此除了智能音箱外，还可以运用于汽车、手机、可穿戴设备等。

**实现对其他智能家具调控的意义：**可以通过各种智能家具工作时收集到的数据，反馈到我们的作品上，从而整合数据，例如对温度湿度的调控，对人体体温的检测，对语音声音的分析，对地面污渍的分析，从而整合一切智能家具的信息，可以达到在一定程度上对人体健康的分析，如果异常指标超过一定数目，则在主显示屏上给出相应的警告。同时，通过对其他智能家具的调控，可以更加方便地让我们控制家里的家具，从而提高便利性。

#### 4.4 对未来的展望

通过对时代的分析，我们知道这是一个万物互联与人工智能的时代，由于时代发展的速度，我们也可以对我们的作品进行一定程度的展望，可以根据目前的发展趋势来预测一下未来某些技术的成熟，从而进行对我们作品未来的预期进行一个规划。

**规划点 1：**基于目前 3D 技术的发展以及投影技术的作用，若是将两者相结合，我们的作品就可以突破镜子的拘束，从而把一切镜面的信息投影出来，可以以立体图形展现出来。

**规划点 2：**基于目前人工智能的发展前景，我们的作品可以依据人工智能的发展，从而通过大量数据分析，从而可以对我们之后的生活给出建议性的规划，并且可以给出多种的计划并分析每项计划的优劣。

**规划点 3：**基于目前万物互联的发展背景，我们的作品可以通过万物互联进行信息的收集与整理，同时根据我们平时所浏览的信息两者比对，把与我们所需要的相关最前沿的信息推送到屏幕上，当然，也可以设置哪些信息不要，哪些信息需要。

### 5 效益分析

#### 5.1 基本情况

**项目基本情况：**用树莓派 DIY 一个“魔镜”。实现根据不同的天气来展现每一天的情况，在镜面上表现出来。对于“魔镜”，在各个方面都有很大的发展空间和利用价值，而且相对材料和原理来说，都是可以运用在各个领域的。在我们六个人的共同协商下，不仅对“魔镜”目前的实用价值，还是未来的可用性都抱有很高的期望。

## 5.2 必要性和可行性

### 5.2.1 必要性

关于树莓派，想必从事嵌入式开发的开发者都有听过，与常见的 51 单片机和 STM32 等这类的嵌入式微控制器相比，它不仅可以完成相同的 IO 引脚控制之外，还能运行有相应的操作系统，可以完成更复杂的任务管理与调度，能够支持更上层应用的开发，为了开发者提供了更广阔的应用空间。比如开发语言的选择不仅仅只限于 C 语言，连接底层硬件与上层应用，可以实现物联网的云控制和云管理，也可以忽略树莓派的 IO 控制，使用树莓派搭建小型的网络服务器，做一些小型的测试开发和服务。

与一般的 PC 计算机平台相比，树莓派可以提供的 IO 引脚，能够直接控制其他底层硬件的功能，这是一般 PC 计算机做不到的，当然，树莓派体积小，成本低，照常可以完成一些 PC 任务与应用。

### 5.2.2 可行性

随着信息时代的发展，各行各业每时每刻都在产生大量的数据，为了应对这些大量数据的存储及处理需求，建立了众多的数据中心，包括基于公有云服务的数据中心和私有的大数据中心。这些大数据中心的建立都耗资巨大，服务器和机房设备通常都价格昂贵，同时运行成本高昂，服务器及冷却设备都需要消耗大量的能源

[1]. 农业大数据作为大数据技术在农业领域的应用同样面临这一问题，寻求一种低成本、低功耗的设备来组建数据中心，让数据中心更加经济、绿色环保，变得越来越重要

[2]. 国外研究者根据这一需求，搭建了一些基于 ARM 的低成本、低功耗的电脑组建的计算集群来研究低成本低功耗平台的计算集群应用的可行性。由于研究者大多使用上一代电脑和 Hadoop MapReduce 架构，研究结果多数因性能不足而不适合使用到生产环境，但人们仍然相信，使用新的 ARM 处理器和新的架构的计算集群可以满足低成本下大数据处理的需要

[3]. 新一代树莓派 2 性能较第 1 代有很大提高，同时比 Hadoop MapReduce 更快的 Spark 大数据计算框架的出现，让低成本的大数据应用成了可能。

### 5.3 “魔镜”的未来

对于“魔镜”，不论是教育、医学等方面，都是有很大未来发展潜力的。而我们所制作的“魔镜”，不过是最简便，最实用的一种而已，就现在的“小米之家”来说，这就是我们所知道的一个比较完整的系统了，它在网络和各方面的应用都是现在我们还不能做到的，但相信我们的“魔镜”在将来是可以，而且是一定可以达到的。

在最近的 20 峰会上 21 年 tiny ML, Raspberry Pi (树莓派) 联合创始人 Eben Upton 调侃了“Pi Silicon”的未来，“看来机器学习可以看到一个巨大的进步，多亏了树莓派的新闻内部芯片开发团队。”

据悉，树莓派的内部应用专用集成电路(ASIC)团队正致力于下一代产品的研发，似乎将重点放在用于超低功耗机器学习应用的轻量化加速器上。

在 Upton 40 分钟的演讲中，我们看到了“未来方向”，这张幻灯片显示了三个当前一代的“Pi Silicon”板，其中两个来自 board partners, SparkFun 的 MicroMod RP2040 和 Arduino 的 Nano RP2040 Connect。第三个来自 ArduCam，他们正在开发 ArduCam Pico4ML，它将机器学习、摄像头、麦克风和屏幕整合到一个 Pico 包中。

为什么要整合在一个 Pico 包中？因为如果我们只有把他们整合在一个 Pico 包中，或者说有一个具有相同的系统屏幕，我们才能实现与“小米之家”“鸿蒙系统”的相同优势，那我们的“魔镜”会变得更加的实用。在医学、教育等方面，也将成为一种潮流。这也是我们所制作的“魔镜”要实现的目标之一，对于未来，那么我们的“魔镜”将会更加广泛、实用，更加适合未来的生活。

### 参考文献

- [1]杨家乐、杨洋、张涵、严文娟，基于树莓派的盲人智能眼镜的设计与实现，长江师范学院电子信息工程学院
- [2]数字化赋能节能服务 智慧化创新能效管理，上海经信委
- [3]施巍松、孙辉、曹杰、张权、刘伟，边缘计算：万物互联时代新型计算模型，安徽大学

# 基于液态金属的可拉伸柔性导线制备

参赛者：蒋金华，罗兴怡，王博尧，陈钰晨，杨皓栋

（中国计量大学理学院，杭州 310018）

指导教师：乔宪武

**摘要：**柔性导线是柔性电子的重要组成部分，以液态金属为导电材料的柔性导线不仅具备高的变形、适形能力，还具备高的电导率，而掌握液态金属基导线的制备方法是其应用的关键。本项目总结了以往的研究成果，分析了液态金属的相关物理特性，并深入、系统地从浸润性，表面微观形态及注入速度三个方面研究液态金属可拉伸导线的制备性能，给出了液态金属可伸缩柔性导线的制备方法，并对基于液态金属柔性导线的现有制备方法的特点以及未来的发展方向进行了深入分析。

**关键字：**柔性电子技术；可拉伸导线；镓锑合金

## 1 研究背景

### 1.1 柔性电子技术

近几年来，柔性电子行业作为一个新兴的产业正在快速发展，未来市场前景十分广阔。柔性电子器件也以其独特的柔性和延展性以及高效、低成本的制造工艺，在信息、能源、医疗、国防等领域具有广泛应用前景。



图 1 柔性电子应用领域

#### (1) 国外研究现状

欧美发达国家对柔性电子领域的研究启动较早，并有计划地培养了一批相关领域的创新人才。早在 2007 年，欧盟通过第七框架计划中的 PolyApply 和 SHIFT 计划，投入了数十亿欧元的研发经费，重点支持柔性显示、光伏、传感和可穿戴器件等方面的研究；英国的“抛石机”计划、建设英国的未来计划则均将柔性电子作为先进制造业的重点领域；德国更是投资数十亿欧元，建立柔性显示大规模生产线；法国国立圣埃蒂安高等矿业大学的普罗旺斯微电子中心专设了柔性电子系，研究方向涉及柔性可拉伸微电池、柔性射频标签、电子皮肤、人工视网膜、有机晶体管和可穿戴器件等。

## (2) 国内研究现状

我国在柔性电子技术领域已做出颇多努力。国家自然科学基金委针对柔性电子技术专门设立了重大国际合作项目和系列面上项目。各高校、企业和地方政府也积极支持柔性电子技术的研究，为我国柔性电子技术的发展奠定了坚实基础。例如清华大学航天航空学院、柔性电子技术研究中心冯雪教授课题组，在柔性显示、柔性传感、柔性固体器件与健康医疗等方向取得了一系列重要突破，特别是在生物传感器的研究中，研发了类皮肤柔性电子生物传感器，实现了医疗级的血糖监测精度；通过将力学理论与信息、材料、化学等学科交叉，发展了一种能够在体温驱动下自动攀爬至外周神经束上的三维螺旋形缠绕电极，为外周神经调控技术在临床上的应用提供了崭新的思路，成果发表在固体力学顶级期刊。

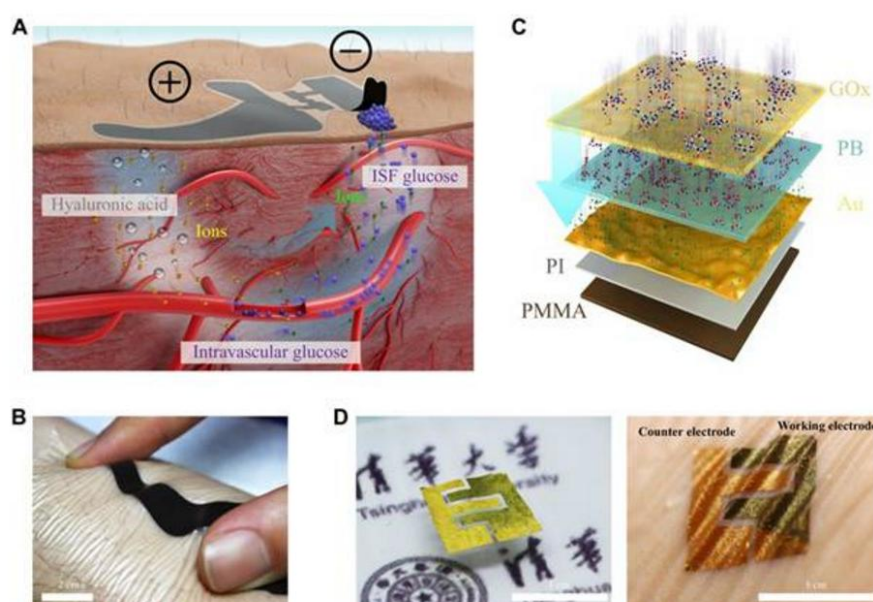


图 2 清华大学冯雪团队 Sci. Adv.: 类皮肤柔性电子器件实现医疗级无创血糖监测

柔性电子的发展将极大地启发健康科学，大量可穿戴、可植入设备围绕人体研发的应用



层出不穷，柔性电子传感器件将极大地丰富健康数据采集和疾病检测的手段。智能时代要求电子系统具有微型化、柔性化、泛在化等特征，以此为核心来实现人-机-物高度融合。而柔性电子是颠覆原有信息载体形态，全面提升信息感知、存储和显示等能力的关键技术基础，是智能时代的颠覆性创新技术。当前，我国电子信息技术的发展正处于系统创新和智能引领的重大变革期，深入开展柔性电子领域的研究是驱动我国创新发展的新引擎，是国家发展新兴信息产业的重大战略需求。

## 1.2 可拉伸导体

导体在科研中一直是热门话题，不同性能的导体可以灵活运用在生活、生产等方面，柔性导体如今面临着挑战：器件在使用中的极大形变以及曲面的紧密集成，这使得可伸缩导体的出现，近几年来尤其备受关注，并且已经取得一些突破性进展。由于它能够适应较大形变以及三维不规则表面实现无缝接触，可拉伸导体在信息、能源、医疗、国防等领域具有广阔的应用前景，主要可以运用在机器人皮肤模拟、3D 打印电路、身体传感器等。

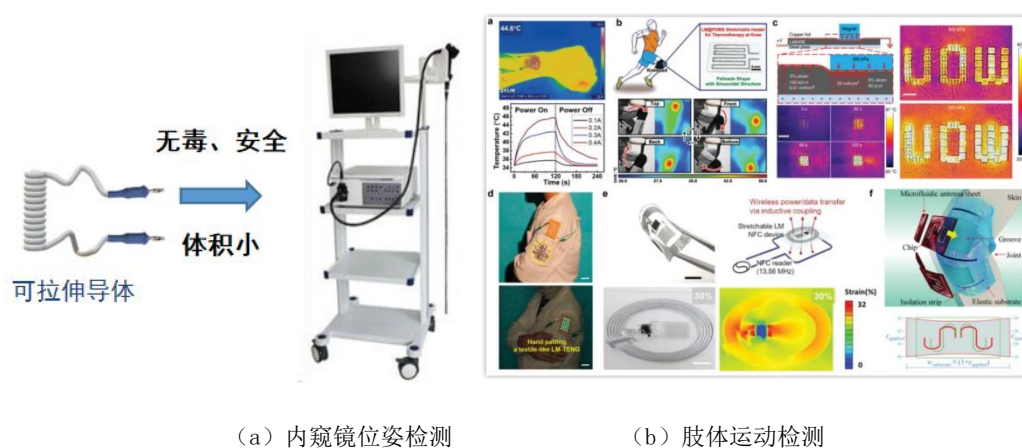


图 3 可拉伸导线相关应用

研究可拉伸导体的最终目标在于轻便、导电性能与伸缩性能合适，并且在一些特定环境下性能与结构稳定，可以持续使用等，基于该目标，许多研究人员通过改变材料与结构制作出多种可拉伸导体。

可拉伸导体的导电材料包括固态金属材料、碳材料、聚合物材料、液态金属合金等。而液态金属，又称“非晶合金”或者“金属玻璃”，是一种具有类似液体状态下原子结构的固体，具有特殊的结构和性能，是一种革命性的新材料。和传统晶态材料相比，液态金属无空位、位错、晶界等缺陷，而且还具有高强度、高硬度、高光洁度、高弹性、耐腐蚀和耐磨损等优异性能。目前，在全球研发的液态金属材料，在许多方面的性能表现都优于“材料之王”



石墨烯。此外，液态金属是一种新型的合金材料，由于其特殊的“液体形态”而具有极佳的电性能和热力学性能，还具备如吞食效应、变形变色等特殊性能，使其在诸多领域有着广泛的应用前景。

随着《国家增材制造产业发展推进计划(2015--2016年)》和《中国制造2025》的发布，液态金属柔性制造必将在可穿戴电子设备、柔性显示器、可伸缩天线等方面大有作为，对实现制造业强国的建设目标具有重要意义。



图 4 《中国制造 2025》

## 2 研究目的及意义

### 2.1 研究目的

(1) 研究液态金属性能，通过对材料的表面接触表现研究阐述两种材料的浸润性，并根据实验结果给出金属材料的选择方法；

(2) 根据液态金属的性能研究结果，设计可拉伸柔性导体结构的可实施方案，制备出一款符合期望的可伸缩柔性导体；

(3) 研究拉伸程度对弹性导体电导率的影响，并且根据实际进行相关应用与推广。

### 2.2 研究意义

本项目使用的方法是对导电材料进行结构设计，引入可拉伸结构，而使其在大形变的性能稳定，导电材料采用管状圆形结构的流道纤维，使用高电导率、高流动性的液态金属作为导体填料，制备具有灵敏度高、高拉伸、良好生物相容的力敏电阻响应性导体，由于其具有伸缩性，弹性导体在使用时也具有一定灵活性，可以在较大形变以及三维不规则表面进行使用，也能保持良好的导电性，在多方面得到应用。

### 3 研究内容

本项目基于液态金属具有高流动性、高导电性和可延伸性的特点，制作出一种具有高拉伸量和高导电性的可拉伸导线。如何选择合适的导电功能材料是制作弹性导体必须攻克的一大难题。导电功能材料不仅在电导率等参数上有严格的要求，还需要考虑其稳定性与延展性等问题。由于液态金属表面张力大，与柔性基材融合性差，研究两种材料表面接触性能是提高柔性导体性能的前提手段。液态金属表面接触性能的研究包括柔性基材表面浸润性的研究、柔性基材表面形貌的观察和表面接触性能的验证。除此以外需关注液态金属注入封装导管的速度、导体制备方法与结构设计。

#### 3.1 液态金属物接触性能的研究

##### 3.1.1 液态金属浸润性研究

浸润性指一种液体浸润固相表面的能力，即液体在一种固体表面的铺展能力。浸润性越强，液体在对应固体表面越容易铺展，反之容易聚集成团，甚至成球。

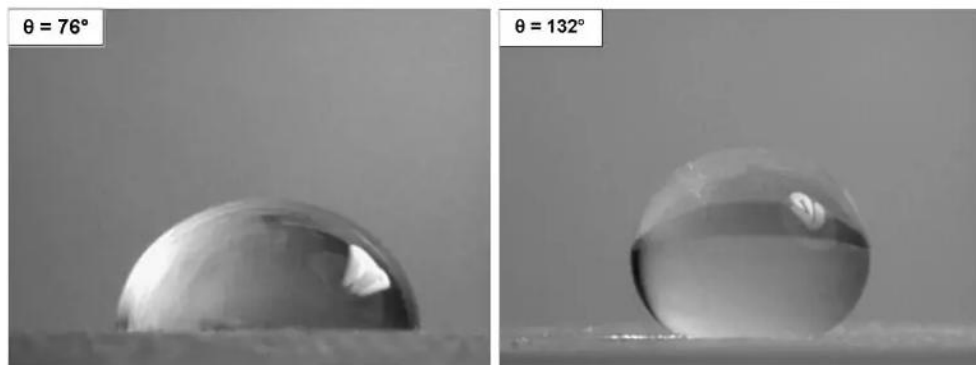


图 5 不同基底材料下形成浸润角

浸润性表现主要由两个因素决定，液体的表面张力和柔性基材的表面能。浸润性的大小一般由接触角  $\theta$  来表示，判断标准如下所示：

表 1 浸润性判断标准

接触角	浸润性表现描述
$\theta = 0$	完全浸润，液态在固体表面铺展
$0 < \theta < 90^\circ$	非完全浸润，液体在固体表面铺展的难度随着 $\theta$ 的值越大难度越高
$90^\circ < \theta < 180^\circ$	液体不能浸润固体
$\theta = 180^\circ$	完全不浸润，液体在固体表面聚集成球

选用 PDMS 作为基底材料，研究在不同固化程度下，液态金属与基底材料的浸润性表现，选择适合固化参数，减小液态金属由于表面张力带来的影响。影响基底材料浸润性的主要参数包括：PDMS 与固化剂的添加比例、固化时间、固化温度以及干燥处理。测量 PDMS 不同条件下与液态金属接触角的变化，绘制关系曲线，观察液态金属在不同情况下与 PDMS 的浸润关系。

### 3.1.2 柔性基材表面形貌观察

镓铟合金与基底材料表面摩擦力是反映两种材料结合性能的另一参数，比较粗糙的接触面产生的摩擦力大。通过显微镜观察 PDMS 表面形貌，找出适合结合的基体材料。



图 6 实验室观察 PDMS 表面形貌

### 3.2 液态金属挤入速度调节

镓铟合金的挤入速度是影响成型效果的重要参数，实验通过对比不同口径下，挤入速度对于柔性导体形状的影响，挤入速度过快，容易形成断点，挤入速度过慢会形成液态金属大块聚集，挤入速度太快或者太慢，都会影响最终产品成型的质量，结合实验，给出适合管道挤入速度。在系统能够承受的挤入压强范围内，通过提高挤入速度来提高导线的制作效率。



图 7 不同口径的热缩管

### 3.3 可拉伸柔性导体的制备

柔性导体的制备方法是将液态金属注入制得的 PDMS 管材，或将其注入热缩管，然后进行加热使其定型。该方法的难点在于如何将液态金属均匀注入导管中以及对工艺参数的精准控制，具体主要体现在以下方面：

(1) 常温下共晶镓铟合金和镓铟锡合金的表面张力分别高达  $624\text{mN/m}$ ，是水的 70-80 倍。巨大的表面张力使其容易聚集成团，形成线路困难，在注入热缩管时会出现断点等现象；

(2) 在注入时需要试验出注入速度，能使液态金属均匀进入导管中，从而实现弹性导线制作，并进行实验应用。

### 3.4 柔性导体的性能测试

性能测试主要从两方面进行，一方面是温度对柔性导体电阻和相关性能的影响，另一方面是柔性导体的弯曲程度，即外界受力对柔性导体所产生的影响。测试通过将液态金属柔性导体接入连接有灯泡的电路，通过改变温度或对柔性导体进行拉伸不同比例，观察灯泡的明暗程度和测得电阻率大小来衡量柔性导体的性能。

## 4 项目实现

### 4.1 寻找合适的液态金属作为制备材料

目前市面上的液态金属种类繁多，为了使金属能够在一定条件下保持其稳定性，并且有良好的流动性，能够满足柔性导体制备，达到预期效果，则需要一种导电性良好、在常温下

可以进行流动且易于达到固化条件的液态金属。根据以上原则，我们选择了一种合适的液态金属作为研究对象——镓铟合金。



图 8 镓铟合金

## 4.2 测定液态金属物的性能

实验选取液态金属作为填料，液态金属性质有多种，包括密度、表面张力、导电率等。而对于可伸缩导体制备而言，我们选择其中一部分性质进行研究与分析，包括表面张力、表面粗糙程度等。

### 4.2.1 拉脱法获得液态金属表面张力大小

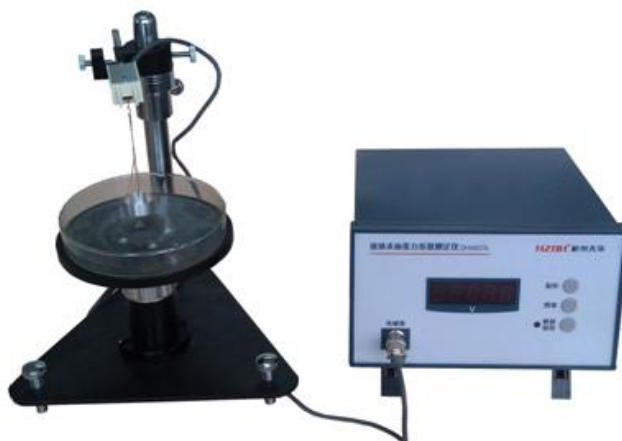


图 9 液体表面张力系数测定仪

采用拉脱法获得液态金属表面张力大小的步骤如下：

- (1) 开机预热；
- (2) 清洗溶液器皿和吊环，此时须清理之前的实验残留，避免影响后续实验。
- (3) 在玻璃器皿内放入镓铟合金的液态型，并安放在升降台上；

(4) 挂上砝码盘，分别放入 0.5g、1.0g、1.5g、2g、2.5g、3g 砝码对仪器进行定标；

(5) 挂上吊环，测定液体表面张力系数。当环下沿全部浸入液体内时，转动升降台的螺帽，使液面往下降。记下吊环拉断液面瞬间时的电压表的读书 U1，拉断后瞬间电压表读书 U2；

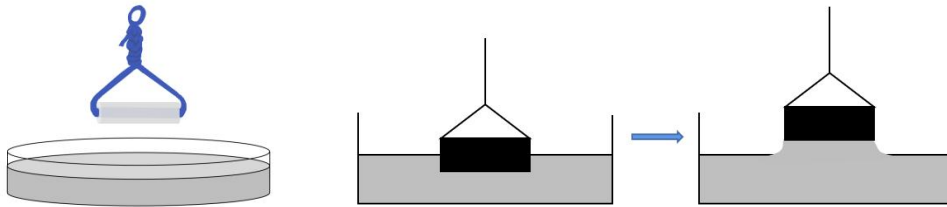


图 10 拉脱法测液态金属表面张力

(6) 纪录数据后，计算液态金属的表面张力系数，公式如下：

$$F = \alpha \cdot 2 \cdot (l + d)$$

表 2 测量表面张力系数

编号	U1 (mV)	U2 (mV)	$\Delta U$ (mV)	F (mN)	$\alpha$ (mN/m)
1	5.9	-0.1	6	3.376	233.14
2	8.5	0.1	8.4	4.727	326.45
3	11.3	-0.4	11.7	6.584	454.69
4	12.0	-0.2	12.2	6.866	474.17
5	11.1	-0.2	11.3	6.359	439.15

计算得液态金属表面张力系数为  $\alpha = 456.00$  (mN/m)。将其与同温度下的水的表面张力系数进行比较，发现约是其的 60 倍，由此得出，液态金属的表面张力较大，在普通板材上容易聚集成球，不易被封装，所以需要特殊材料，如 PDMS 溶液对液态金属进行封装。

#### 4.2.2 测量浸润角

对于浸润性的研究，选用 PDMS 作为基底材料，研究在不同固化性能程度下，液态金属与基底材料所成的浸润角，对照表 1 判断浸润状态。

浸润角的测定方法分为：

(1) 角度测量法：使用接触角测定仪直接测取接触角的大小，通过观察液滴或气泡在固体表面上的外形，在固、液、气三相交点处作一切线后，用量角器量取角度。

(2) 长度测量法：通过对在固体表面上液滴的高度、宽度等的测量，计算出接触角，如

液滴最大高度法、吊片法等。

(3) 重量法：利用吊片法测定液体表面张力的原理，可以测定液体对固体(吊片)的接触角。

本此采用方法角度测量法测量 PDMS 不同条件下，液态金属接触角的变化，结果如下：

表 3 固化比例 5: 1 时不同固化时间对应的接触角

固化时间(h)	4	8	24
左接触角(°)	67.9	59.4	105.5
右接触角(°)	62	62.6	112.8
平均接触角(°)	64.95	61.0	109.15

表 4 固化比例 10: 1 时不同固化时间对应的接触角

固化时间(h)	4	8	24
左接触角(°)	64.0	67.1	70.9
右接触角(°)	60.0	63.5	76.8
平均接触角(°)	62	65.3	73.85

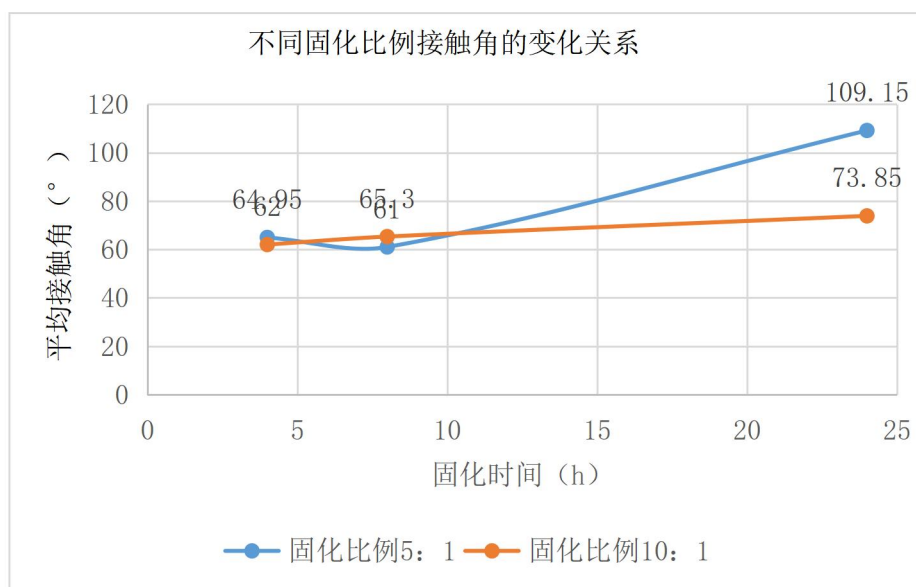


图 11 不同固化条件下液态金属接触角的变化

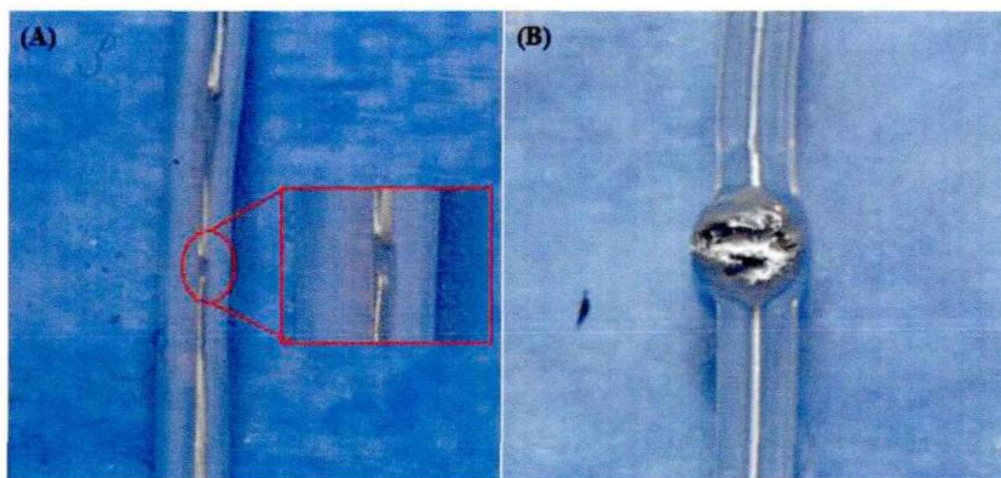


绘制关系曲线，找出接触角与固化参数之间的对应关系。选择适合固化参数，减小液态金属由于表面张力带来的影响。当平均接触角最小时，说明液态金属与 PDMS 浸润性最好，封装的效果最佳。

### 4.3 选择合适的 PDMS 固化比例

通过显微镜观察 PDMS 表面形貌，找出表面较粗糙的 PDMS 材料。较粗糙表面，摩擦力较大，能有效降低导线制作难度。结合平均接触角选择出了较适合的 PDMS 固化比例为 10:1。

### 4.4 镓铟合金的挤入速度调节



(A) 挤出速度过快 (B) 挤出速度过慢

图 12 不同挤出速度下的呈现效果

结合实验，给出适合的管道挤入速度。在系统能够承受的挤出压强范围内，通过提高挤入速度来提高导线的制作效率。

### 4.5 制备柔性导体

将液态金属按照合适挤入速度注入 PDMS 导管，或注入热缩管，室温下静置使液态金属分布均匀，然后进行加热使其定型。

### 4.6 实验成果

将制备好的可伸缩柔性导体应用在实际电路中，通过观察小灯泡的状态，检验其导电性和伸缩性。当可拉伸导线代替 LED 灯回路中的一段导线，可以观察到，LED 灯能够正常工作。进一步实验得出，当液态金属可拉伸导线受到拉伸时，LED 灯也能够正常工作，灯光强度未发生明显变化。

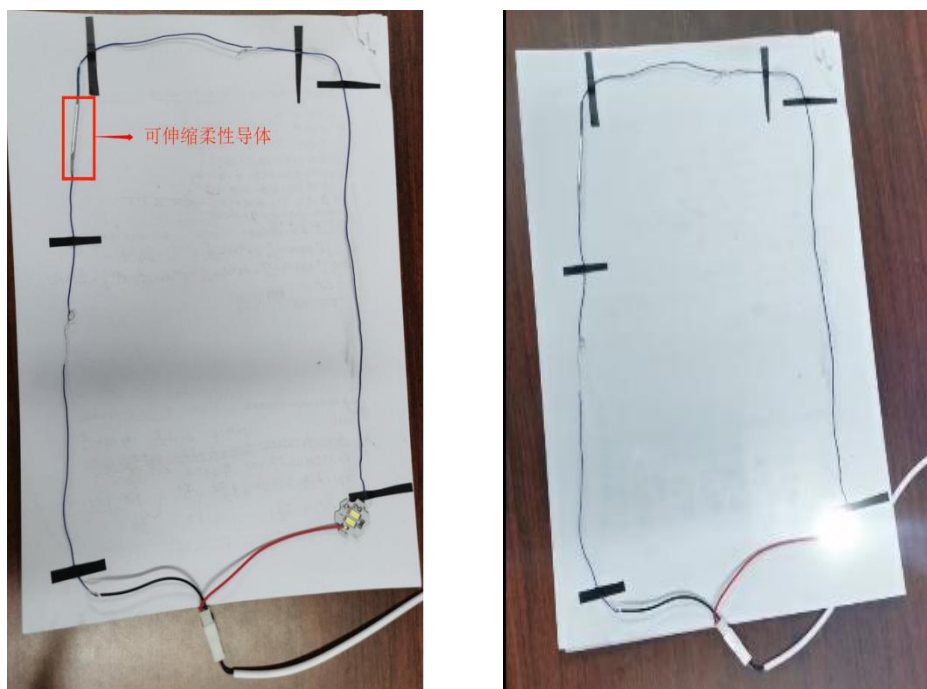


图 13 可拉伸导线代替 LED 灯回路中一段（左图） LED 灯正常工作（右图）

## 5 实验创新

(1) 本项目研究了液态金属的制备导线相关的基本性能，通过对材料的表面接触表现，研究和阐述了浸润性、柔性基材表面微观形态及挤出速度对液态金属可拉伸导线制备的影响，并根据实验结果给出柔性基材的选择方法。

(2) 本项目利用液态金属性质，采用了 PDMS 和热缩管对液态金属进行了封装，讨论了其拉伸效果等性能，制备了兼具高导电性和高拉伸量的液态金属可拉伸导线。

## 6 应用前景

传统的导体主要是由刚性填料和柔性聚合物基体共混制备而成，这类导体的缺点在于导电填料的杨氏模量高于基体杨氏模量约 5-6 数量级，导致导体在形变过程中刚性填料网络形变发生滞后，极大降低导体的电阻形变响应能力。而液态金属在常温下处于流动状态，具有高电导率、低模量，与柔性基体具有良好的机械性能匹配。然而，限制液态金属应用于可拉伸导体的技术瓶颈是其与柔性基体复合的相容性差，其在基体中容易发生溢出致使电导失效。因此，设计及制备安全稳定同时具备电阻-形变响应特性的高柔性、高拉伸、低驱动电压的导体具有重要应用前景。

基于铟镓可伸缩导体的优点，可将此具有伸缩性导体应用于以下场景：

(1) 智能可穿戴设备

智能可穿戴设备不仅提供硬件设备，更重要的是通过数据交换、云端交互等应用进一步提高生活质量。这一新兴领域的快速成长与柔性及可拉伸器件的开发是密不可分的。新颖的柔性电子器件（如传感器等）在消费电子市场、军事、医疗健康等各个领域均表现出了极大的应用潜力，正因如此，诸如可贴附、可穿戴、可折叠、可拉伸等柔性电子器件的研究备受国内外科研工作者的关注。

### （2）电子皮肤

具有触感能力的电子皮肤，主要应用于机器人和医疗技术方面，这种电子皮肤可以让几次人感知到物体的地点和方位以及硬度等信息，该项技术最关键在于表面的压力传感，并且电子皮肤需要具有轻薄、电阻率小、韧性强等特性。可拉伸、可贴附、电阻小等柔性电子器件能很好的应用于此中。

### （3）手指弯曲状态检测

肢体运动检测是柔性电子的一大应用方向，随着未来生活品质的提高，越来越多的健康检测产品将不断步入人们的生活，肢体运动检测是许多健康检测产品必不可少的功能。

柔性电子在可穿戴设备领域的应用是许多制作方法及产品研发的动力来源，可穿戴设备的研发一直贯穿着柔性电子领域的整个发展过程，甚至起到了相辅相成，相互促进的作用。

## 7 未来展望

### （1）经济效益：

柔性电子行业作为一个新兴的快速发展的产业，未来市场前景广阔。从全球市场来看，据统计，2019年全球柔性电子市场规模达到14.2亿美元，预计到2025年全球柔性电子市场规模将达到3049.4亿美元，2019-2025年CAGR为144.71%。

### （2）社会效益：

随着新一轮科技革命和产业变革的逐渐兴起，柔性电子会为我国带来新的自主创新战略机遇。柔性电子是在学科高度交叉融合基础上产生的颠覆性科学技术，能够突破经典硅基电子学的本征局限，可为后摩尔时代器件设计集成、能源革命、医疗技术变革等更新换代等提供创新引领，是我国自主创新引领未来产业发展的重要战略机遇。柔性电子器件使柔性电子主要体现之一。

综上所述，可见由液态金属制作的可拉伸柔性导体在未来拥有着广阔的发展前景。若基于液态金属的可拉伸导线能够实现大规模制备，并在柔性电子器件中得到合理的应用，对于促进柔性电子学的发展具有重大意义。而柔性电子学的重大理论突破和原理创新，将引领电

子信息科技的变革和跨越式发展，全面带动“FAMISHED”八大科学技术领域的快速发展，服务于我国信息技术产业升级，满足国家重大战略需求。

### 参考文献

- [1] 周西林, 刘宜伟, 郭智勇, 孙丹丹, 姚玉明, 李润伟. 基于液态金属的可拉伸导线制备与性能研究[J]. 功能材料, 2018, 49(03):3152-3155+3159.
- [2] 秦琴, 刘宜伟, 王永刚, 李润伟. 基于液态金属的柔性导线的制备方法研究进展[J]. 电子元件与材料, 2017, 36(04):1-8.
- [3] 詹俊赋. 液态金属基柔性电子器件 3D 同轴打印研究[D]. 浙江大学, 2018.
- [4] 阎海亮. 3D 直写式打印柔性可拉伸电子材料的研究[D]. 北京工业大学, 2017.
- [5] 张攀, 基于粘弹性流体挤压的多精度液态金属直写柔性电子加工工艺研究[D], 湖北: 华中科技大学, 2018.
- [6] 贾甜, 基于液态金属直写的柔性电子打印研究[D], 浙江: 浙江大学, 2017.
- [7] 王玉欣, 基于 PDMS 的弹性导电复合材料的制备及其应用研究[D], 云南: 昆明理工大学, 2019.
- [8] 杨锦斌, 基于液态金属的柔性电极电路的设计、制造及应用[D], 广东: 深圳大学, 2018.
- [9] 罗志伟, 液态金属电磁微喷行为及关键技术研究[D], 福建: 厦门大学, 2017.
- [10] 张琦, 基于液态金属的柔性压力传感器的研究[D], 广东: 深圳大学, 2020.
- [11] 王佳辰, 基于三维打印技术的可拉伸液态传感器件研究[D], 江苏: 南京大学, 2020.
- [12] 周尧, 杨卫如, 从专利视角看金属 3D 打印行业发展[J]: 中国科技信息. 2021, (10)
- [13] 丁建伟, 邱长军, 杨帆, 铜材料与镓基液态金属相容性的研究进展[J]: 机械工程师. 2021, (04)
- [14] 巫运辉, 介质模量对柔性导电复合材料电阻-应变行为的影响及性能调控[D], 广州: 华南理工大学, 2019.
- [15] 于永泽, 刘静. 液态金属 3D 打印技术进展及产业化前景分析[J]. 工程研究-跨学科视野中的工程, 2017, 9(06):577-585.

# 基于《密立根油滴实验》油滴喷射器的改进

参赛者：余益丰，丁子辛，季炫含，陈丽娜

（浙江农林大学数学与计算机科学学院，杭州临安）

指导教师：周益民，倪涌舟

**摘要：**本文介绍了经典的《密立根油滴实验》的仪器改进和技术分析。对油滴喷射器进行了改进，通过控制储油瓶内大气压强及喷口调节，控制喷射油滴的大小及多少，初步控制了油雾喷射质量；油滴喷射器带有油滴导向管，用以控制喷射方向和聚集程度。此外，本油滴喷射器大大减少了实验过程中漏油的可能性，操作更方便、稳定、可靠、安全、卫生，节省了实验成本，实验效果更佳。

**关键字：**密立根油滴 油滴喷射器 油滴导向管

## 1. 物理背景

密立根油滴实验现在是大学物理实验课程中的重要内容，是学生理解电荷量子化的重要途径。密立根油滴实验最早是美国物理学家密立根设计的用于测定电子电荷的实验。1907-1913年密立根利用在电场和重力场中运动的带电油滴进行实验，证明了任何带电体所带的电荷都是某一最小电荷——基本电荷的整数倍，明确了电荷的不连续性，并精确地测定了基本电荷的带电量（当时测定为 $e = (1.5924 \pm 0.0017) \times 10^{-19} C$ ），为实验测定其他一些基本物理量奠定了基础。

密立根油滴实验的仪器主要结构由油滴喷射器、油滴盒、CCD电视显微镜、监视器、平行极板等组成。实验中，利用油滴喷射器将带电油滴喷射到平行极板形成的电场中，通过CCD电视显微镜观测油滴的运动，选择合适的油滴进行测量。在以前的密立根油滴实验中，喷射器在喷射油滴时，油滴喷射器产生油滴的数量、大小、带电量以及喷出后油滴的空间分布等都不能有效准确控制。

本文主要讲油滴喷射器进行了改进，分析了改进前后对实验的影响，以解决密立根油滴实验的油滴喷射产生合适油滴的难点，从而提高实验过程中合适油滴的产生效率。

## 2. 工作原理

### 2.1 密立根油滴实验工作原理

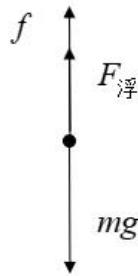


图 1 重力场中油滴受力示意图

由油滴喷射器喷射产生的带电油滴基本可以看出球形，在不加电场的情况下，油滴受重力作用自由下落，当重力与空气浮力和粘滞阻力平衡时，油滴匀速下落，竖直方向油滴受力关系如图 1，有：

$$mg - F_{\text{浮}} - f = 0 \quad (1)$$

式中： $m$  为油滴的质量， $F_{\text{浮}}$  为油滴受到的空气浮力， $f$  为空气的粘滞阻力。

如果设油滴匀速下落速度为  $v_f$ ，油滴的密度为  $\delta$ ，空气的密度为  $\rho$ ，油滴的直径为  $a$ ，空气的粘滞系数为  $\eta$ 。则

$$\text{油滴的重力可表示为：} \quad mg = \frac{4}{3} \pi a^3 \delta g ;$$

$$\text{空气的浮力可表示为：} \quad F_{\text{浮}} = \frac{4}{3} \pi a^3 \rho g ;$$

$$\text{空气的粘滞阻力可表示为：} \quad f = 6\pi\eta a v_f 。$$

于是(1)式变为：

$$\frac{4}{3} \pi a^3 \delta g = 6\pi\eta a v_f + \frac{4}{3} \pi a^3 \rho g \quad (2)$$

可得出油滴的直径为：

$$a = \frac{3}{2} \left( \frac{\eta v_f}{2g(\delta - \rho)} \right) \quad (3)$$

当带电油滴进入电场时，设油滴所带电量为  $q$ ，则油滴受到静电力  $qE$ ， $E$  为电场的电场强度。实验

中电场由平行极板产生，设平行极板两极板间的电势差为  $U$ ，两板间的距离为  $d$ ，则有  $E = \frac{U}{d}$ 。

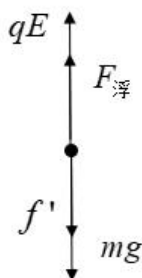


图 2 加电场实验原理图

实验中调节平行极板电势差  $U$  的大小和方向，使油滴受到电场的作用力向上运动，以  $v_e$  表示上升的速度。当油滴匀速上升时，如图 2 所示，有：

$$mg + f' = F_{\text{浮}} + qE \quad (4)$$

式中  $f'$  为向上运动的空气粘滞阻力，可表示为：

$$f' = 6\pi\eta a v_e \quad (5)$$

由(1)(4)(5)式得到油滴带电量  $q$  为：

$$q = \frac{mg + f' - F_{\text{浮}}}{E} = \frac{f + f'}{E} = \frac{6\pi\eta a(v_f + v_e)}{U/d} \quad (6)$$

(6) 式表明，按(3)式求出油滴的直径  $a$  后，由测定的油滴不加电场时下降速度  $v_f$  加上电场时油滴匀速上升的速度  $v_e$ ，就可以求出所带的电量  $q$ 。

根据上述原理，对不同的油滴进行测量。结果表明，油滴所带的电量总是某一个最小固定值的整数倍，这个最小电荷就是电子所带的基本电荷电量  $e$ 。由于大学物理实验课时限制，实际测量中一般要求选择 5 颗不同油滴进行测量，对每颗油滴进行 5 次测量。针对测量得到的油滴带电量，采用“倒过来验证法”确定油滴基本电荷的带电量。

## 2.2 影响实验的因素

### (1) 油滴大小与下落时间

首先，油滴大小适中。当电容器两极板不加电压时，若油滴太大，自由下落速度较快，时间测量偏差较大；当电容器两极板间加载电压时，因油滴较大，要使油滴达到平衡，需要油滴带较多电量，准确确定油滴带电个数较困难。若油滴太小，由于油滴不规则的布朗运动，影响实验结果。



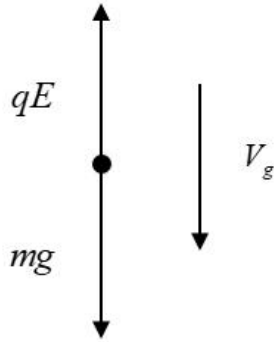


图 3 油滴受力与速度

其次，油滴下落速度和油滴大小有关，油滴质量越大，下落速度越快；油滴质量越小，下落速度越慢。油滴由油滴喷射器喷出，其质量与油滴喷射器结构有关。实验选取的油滴速度保持匀速下落。

根据多次实验测量结果，油滴竖直下落 1.5 mm–2.0 mm，下落时间在 15.0s 到 30.0s 内的油滴为合适油滴条件之一，不确定度相对较小。

## (2) 油滴带电量

油滴带电量较大时，不利于验证油滴带电量的粒子性。实验要求油滴带电量较小，油滴所受静电场力微小，利用静态平衡法，所受静电场力与重力相等。

根据理论分析，油滴带电量与平衡电压成反比，带电量越小，平衡电压越高，平衡电压取值一般取 200V 以上。

## 2.3 油滴喷射器原理

综上所述，实验中油滴的大小、带电量对实验结果会产生较大地影响，因此在实验中控制油滴的生产的油滴喷射器就极为关键。



图 4 原油滴喷射器

图 4 所示是密立根油滴实验所用的油滴喷射器，根据伯努利原理喷射出雾状的油滴。在密立根油滴实验中，通过挤压喷射器的橡胶球，使喷射器内外产生气压差，从而产生空气流

速的变化，在通过橡胶球上方的玻璃管时，低速流动的油滴流向高速流动的空气，空气从小孔上方喷出，油滴导向管的空气流速大，压强小，玻璃管下方受到大气压的作用，液体在快速流动的空气作用下，油与高速气流作用产生油滴，形成油雾。

目前使用的油滴喷射器喷口大，喷出油滴的大小、方向等不易控制，而且橡胶部件容易老化，需要辅助装置才能站立，容易漏油，实验时合适的油滴选取比较困难。

## 2.4 油滴喷射器的改进原理

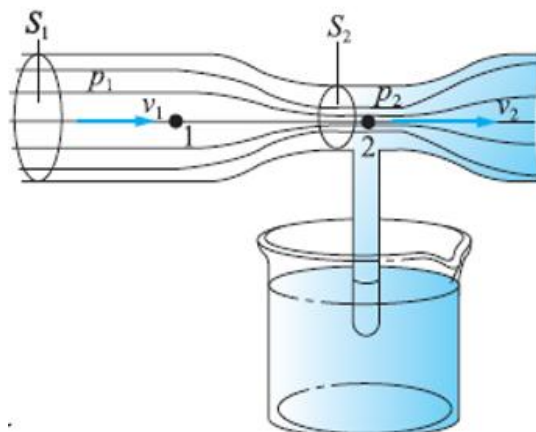


图 5 改进后油滴喷射器工作原理

为使实验中能够更好控制油滴的大小和带电量，我们对油滴喷射器进行了改进。

首先，我们运用空吸原理对油滴喷射器的油路进行了改进。如图 5 所示，在图中 1 处加装活塞，当活塞向运动时，会推动管内空气运动，根据流体力学的连续性方程：

$$sv = \text{常数}$$

可知，导管截面积小的地方（图中 2 处）流速会变得很快。

而根据流体力学伯努利方程： $P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{常数}$

可知流速越快的地方压强越小，当 2 处的压强小于大气压时，储油瓶中的油液将上升进入上方水平管，并随着空气一起从右口喷出。

另外，我们还研究了喷头大小对油滴的影响。喷射出的油滴与油滴喷射器喷头处喷嘴的大小和气流流速有关。当喷头处喷嘴小流速大时，液态油容易转变成细小油雾。

## 3. 技术分析

### 3.1 油滴喷射器改进设计

图 6 所示的密立根油滴实验的仪器主要结构由油滴喷射器、油滴盒、CCD 电视显微镜、

监视器、平行极板等组成。

图 7(a)所示为改进后油滴喷射器外观图，呈站立式圆柱形，图 7(b)为改进后油滴喷射器的结构分解图，瓶身为玻璃材质，易清洗，不老化变质。瓶盖是 PP/ABS 树脂、食品级硅胶环保材质。



图 6 实验仪器装置图



(a) 改进后油滴喷射器



(b) 改进后油滴喷射器分解图

图 7 改进后油滴喷射器结构图

### (1) 控制油滴大小。

首先，合适油滴选择条件一，合适油滴选择条件是油滴下落时间为  $10\sim 30\text{s}$ 。图 8 所示是油滴喷射器  $360^\circ$  可旋转喷头，图 9 是按压加压器，位于喷射器顶部，加压器用于控制油滴喷出油滴数量、大小及喷射距离。当瓶内压强较大时，喷出油滴数量多、油滴小、距离远，通过喷油嘴可调装置的调节，可以实现喷出油滴的大小与数量。另外，实验操作者可通过加压次数的增减，简易控制油滴喷射器产生的油滴。

此外，加入气压传感器及如图 10 压强显示屏，可精确显示瓶内气压值。便于选取最优压强。从而能够更准确有效筛选出合适油滴。



图 8 油滴喷射器喷头



图 9 按压加压器

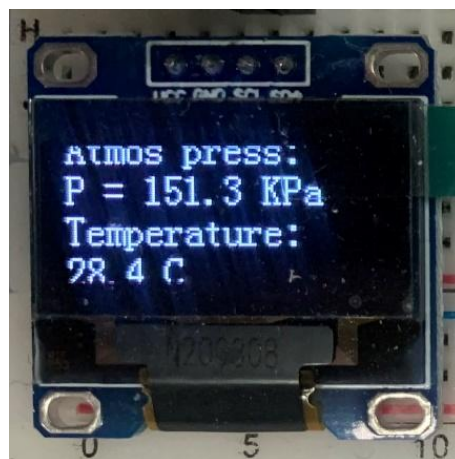


图 10 压强显示屏

### (2) 控制油滴方向

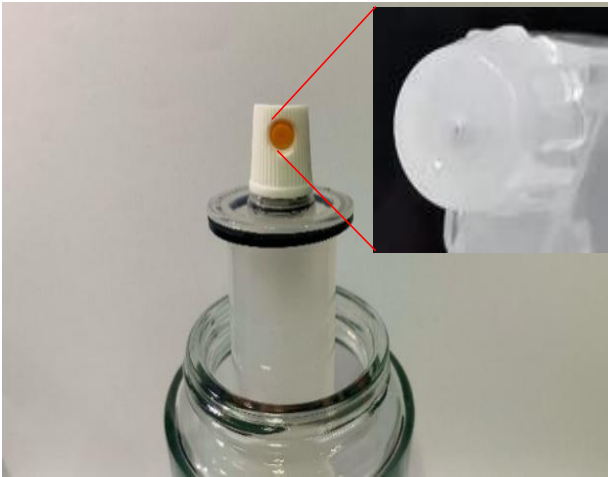


图 11 改进后油滴喷射器喷头



图 12 改进后油滴喷射器喷头盖

首先，更改油滴喷射器形状，将原油滴喷射器不稳定式椭圆状改为可站立式圆柱状油滴喷射器。有效防止油滴喷射器在向喷口喷射时的不稳定晃动导致油滴的四处乱飞。同时也避

免了漏油、撒油的风险。并且加固按压式喷头的位置，有效使油滴具有足够的耐性。此外，还加入了油滴喷射器的喷头盖（图 11 所示），由大小合适的喷头瓶盖与长度适中的吸管构成（ $D=0.4\text{cm}$ ， $L=1.0\text{cm}$ ）。可有效控制油滴的方向，使油滴集中在显示屏中间区域，便于实验观察以及油滴的选择。并且更易伸入油滴盒喷油口中，更有效地控制油滴的喷出方向。

### 3.2 油滴喷射器改进各参数的确定

#### 3.2.1 油滴喷头盖及喷射器导向管粗细确定

预选不同直径  $D$  喷射器的油滴导向管，分别是： $D=0.4\text{cm}$ ， $D=0.5\text{cm}$ ， $D=0.8\text{cm}$ ，图 13 所示，分别制作成喷头盖。将不同直径油滴油滴导向管的喷头盖安装并进行对比实验。观测不同直径油滴油滴导向管在平行极板间显示在显示屏中的油滴大小、数量与密集程度等，确定合适油滴油滴导向管直径。喷射效果如图 14 所示，当  $D=0.4\text{cm}$ ，油滴在显示屏中间区域集中度适中，分布较为均匀，满足合适油滴条件较多，实验者比较容易选择实验测量的合适油滴； $D=0.5\text{cm}$  时，油滴集中度更高，油滴分布均匀性降低，实验测量时合适油滴选择的难度增加； $D=0.8\text{cm}$  时，喷射油滴质量较大，运动速度较快，实验测量时合适油滴的选择更难。因此，在预选的油滴导向管尺寸中采用直径  $0.4\text{cm}$ 。

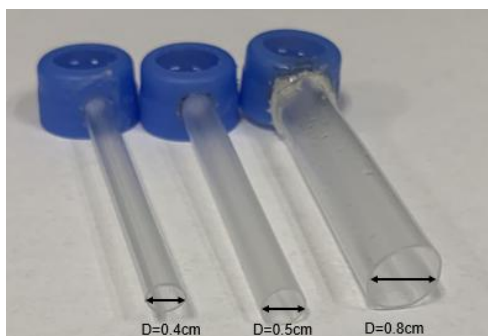
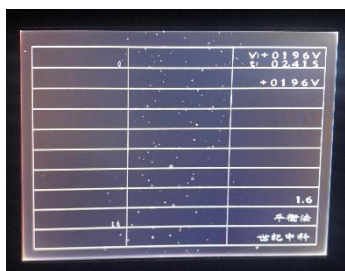


图 13 不同粗细油滴导向管



(a)  $D=0.4\text{cm}$



(b)  $D=0.5\text{cm}$



(c)  $D=0.8\text{cm}$

图 14 不同粗细油滴导向管显示屏

为了更好地验证该实验结论，本小组随机抽取 30 名实验操作者使用原油滴喷射器进行实验，统计实验操作者喷入合适油滴下落时间；再使用改进后油滴喷射器长度相同直径不同的油滴导向管进行多次实验，同样统计其合适油滴下落时间。汇总数据，小组成员分别统计计算了原油滴喷射器及几种直径的油滴导向管产生测量结果数据的方差和均值，图 15 所示，分析发现使用直径为  $D=0.4\text{cm}$  的油滴导向管进行实验所花费时间的方差较小。同时，小组成员计算了下落时间平均值，发现使用直径  $D=0.4\text{cm}$  的油滴导向管相较于其他直径的油滴导向管进行实验所花费的平均时间最小。实验操作者在使用该尺寸的油滴导向管实验时，找到合适油滴所花费时间较短且结果数据稳定。因此，使用直径为  $D=0.4\text{cm}$  的油滴导向管相较于其他直径的油滴导向管进行实验时找到合适油滴的效果更好。



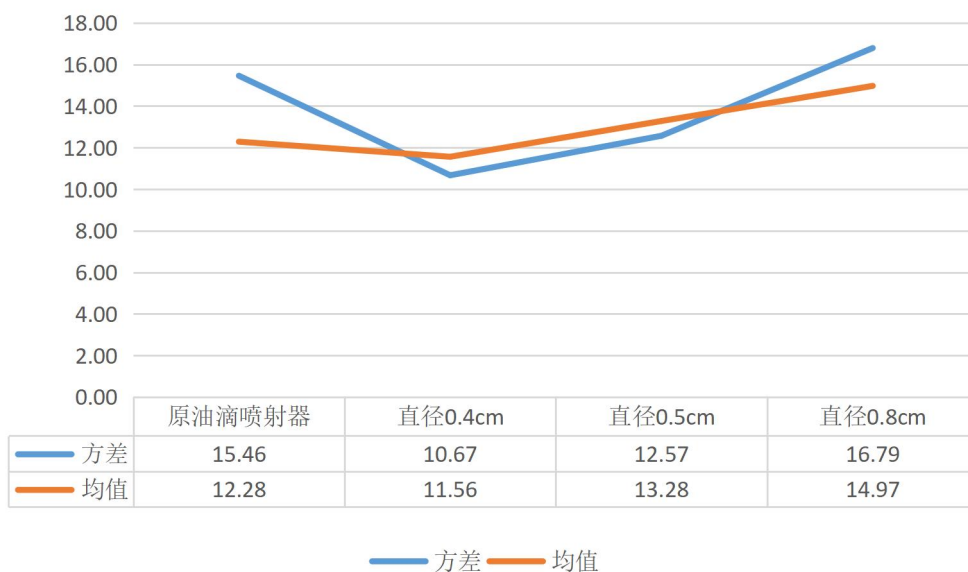


图 15 不同粗细油滴导向管数据

### 3.2.2 油滴喷头盖及喷射器导向管长短确定

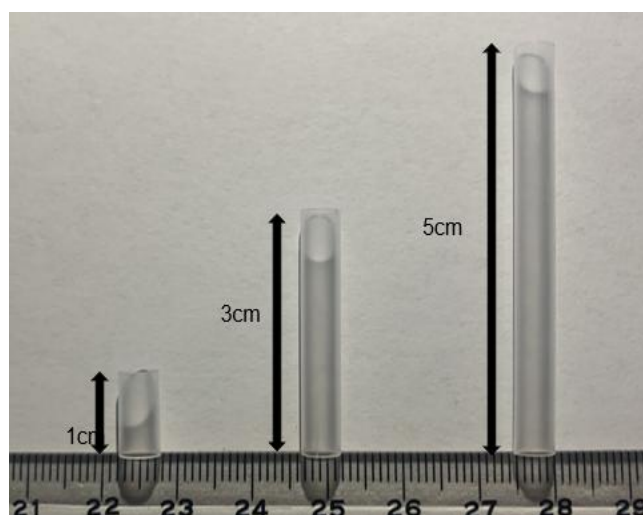


图 16 不同长短油滴导向管

如图 16，使用  $L=1\text{cm}$ ， $L=3\text{cm}$ ， $L=5\text{cm}$  的油滴导向管，分别制作成长度不同型号的油滴喷头盖。将不同油滴喷头盖进行安装测试。通过观察显示屏中油滴的大小、数量与油滴的密集程度选择合适油滴吸管直径。如图 17 所示，当  $L=1\text{cm}$  时，油滴集中在显示屏中间区域，符合实验要求的油滴较多，便于选择合适的油滴； $L=3\text{cm}$  时，油滴在显示屏中间区域分布比较密集，油滴数量过多，不便于实验者选取合适油滴；当  $L=5\text{cm}$  时，油滴分布最密集，运动速度比较快，实验者获取合适油滴的难度更大。另外，小组成员根据数据分析，得到关于原油滴喷射器与改进后油滴导向管长短不同的油滴喷射器实验对比数据，计算平均值和



方差，根据图 18 所示，发现长度为  $L=1\text{cm}$  的吸管，观测到油滴的平均时间最短，观测时间的变化幅度最小。因此，油滴导向管采用长度为  $L=1\text{cm}$  的吸管制最为合适。

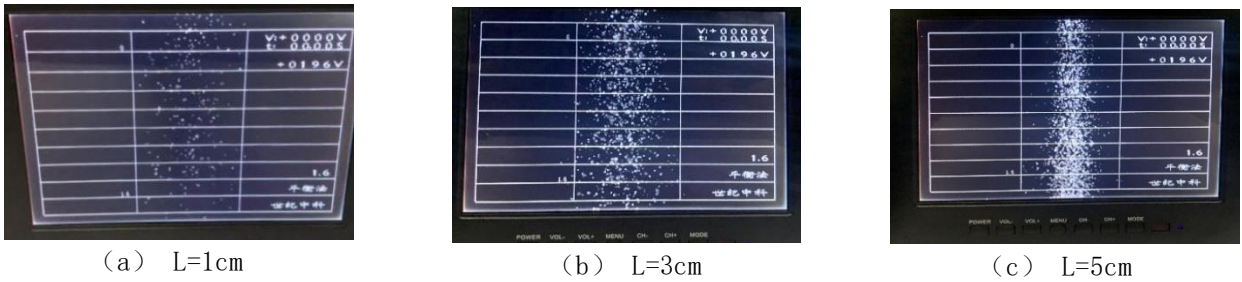


图 17 不同长短油滴导向管数据

小组参考上述选择油滴导向管合适直径的实验方法确定油滴导向管的长度。小组随机抽取 30 个实验操作测量数据作为样本，直径相同但长度不同的油滴导向管进行分析。统计合适油滴下落时间数据，如图 18 所示，比较统计方差和均值，分析发现：使用长度为  $L=1\text{cm}$  的油滴导向管实验时合适油滴下落时间方差与均值较小，实验者在使用该种油滴导向管实验时，测量出的合适油滴的下落时间比较稳定。因此，选用长度为  $L=1\text{cm}$  的油滴导向管，与其他长度测量结果相比，测量合适油滴效果更佳。

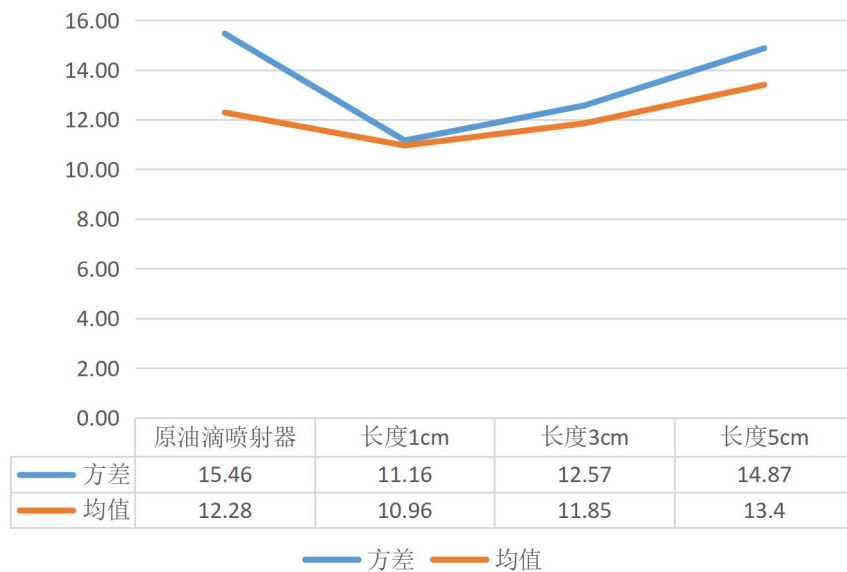


图 18 不同长度油滴导向管数据

#### 4.实验改进效果对比

##### (1) 油滴喷射器喷射油滴效果对比

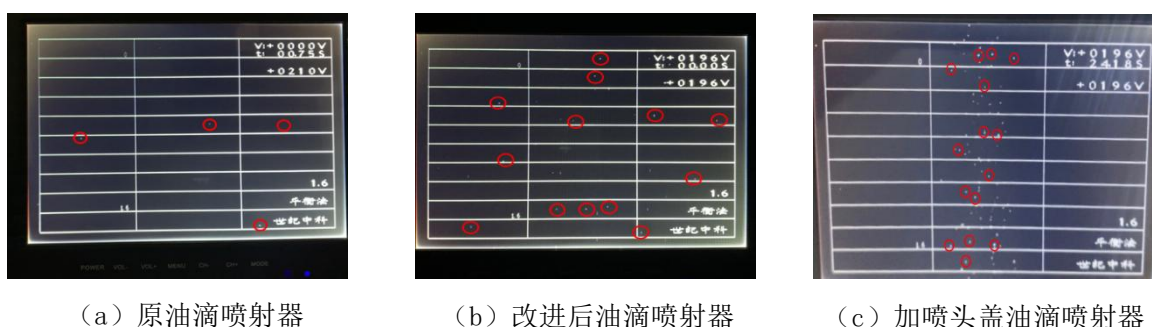


图 19 三组实验显示屏对比图

小组采用原油滴喷射器与改进后油滴喷射器对比实验。根据实验观测，原油滴喷射器喷射后显示屏中备选油滴较少，如图 19 (a) 所示，合适油滴确定较难，需要多次喷射、筛选油滴；改进后喷射器喷射后显示屏中备选油滴较多但分布相对分散，如图 19 (b) 所示，更便于确定合适油滴，合适油滴确定难度降低，相对容易确定；加入带油滴导向管喷头盖后，油滴主要集中在显示屏中间区域，如图 19 (c) 所示，备选合适油滴较多且多分布于中间区域，确定合适油滴相对更容易。

## (2) 油滴喷射器改进前后完整实验效果对比

将使用原油滴喷射器与改进后加喷头盖油滴喷射器进行完整实验操作对比。根据实验要求，某仪器厂生产 ZKY-MLG-6 型密立根油滴仪，油滴最适电压在 200V 以上，随机选取范围内 5 个不同最适电压，每电压条件下进行 5 次实验操作。重复多次，测得原油滴喷射器下油滴的带电量与带电个数数据，如表 1 所示。改进后加喷头盖油滴喷射器油滴带电量与带电数数据，如表 2 所示。

表 1 原油滴喷射器数据

油滴序号	平衡电压/V	时间平均值/s	时间 1/s	时间 2/s	时间 3/s	时间 4/s	时间 5/s	$q (\times 10^{-19})$ /C	n
1	196	29.11	29.75	28.41	28.66	28.79	29.88	2.72	1.69
2	205	20.41	20.54	20.49	20.26	20.43	20.35	6.22	3.88
3	250	18.16	18.2	18.15	17.98	18.11	18.36	6.8	4.25
4	270	15.92	15.94	15.91	15.92	15.84	15.99	7.49	4.68
5	290	20.1	19.87	19.95	20.27	20.03	20.38	6.31	3.84

表 2 改进后加瓶盖油滴喷射器数据

油滴序号	平衡电压/V	时间平均值/s	时间 1/s	时间 2/s	时间 3/s	时间 4/s	时间 5/s	$q (\times 10^{-19})$ /C	n
1	196	25.01	25.76	24.18	24.81	25.37	24.91	3.57	2.23
2	205	18.13	17.65	18.35	18.71	17.83	18.12	8.049	5.02
3	250	22.03	21.46	22.06	22.24	22.87	21.53	4.875	3.04
4	270	27.31	26.56	27.24	27.82	28.14	26.83	3.185	1.99
5	290	13.58	13.95	14.23	13.45	12.97	13.34	8.828	5.81

$q$  为油滴的带电量， $n$  为油滴的带电个数。测量油滴上所带电量  $q$  的目的是找出电子的最小带电量  $e$ ，已知数据  $e_0 = 1.602 \times 10^{-19} C$ ，根据实验测得油滴带电量  $q$ ，计算出油滴所带电个数，从而计算出不同油滴的带电个数。对不同油滴，分别测出其所带电量  $q_i$ ，其数值

理论上应接近电荷  $e$  的整数倍。通过实验测得油滴带电量，根据  $q = ne$  可计算出油滴的带电个数。标准情况下，油滴带电量为电子电荷电量的整数倍。由于实验多方面现实原因，测量所得  $n$  值通常是接近某一整数，但不一定是整数。实验中  $n$  比较接近整数分布，验证了电子带电量的颗粒性。即将表 1 与表 2 中  $n$  列结果数据进行取整处理。

表 3 表 1 数据整理

n	x	y
1.69	2	0.31
3.88	4	0.12
4.25	4	0.25
4.68	5	0.32
3.84	4	0.16

表 4 表 2 数据整理

n	x	y
2.23	2	0.23
5.02	5	0.02
3.04	3	0.04
1.99	2	0.01
5.81	6	0.19

$n$  为油滴的带电个数， $x$  为与油滴的带电个数最接近的整数， $y$  为与油滴的带电个数最接近整数和油滴的带电个数之差绝对值，即  $y = |x - n|$ 。

将每组数据中  $y$  求均值，均值越小，相对整数差值越小，该数值  $n$  越接近整数。

$$\bar{y} = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 n_i \quad (7)$$

$\bar{y}$  为与油滴的带电个数最接近整数与油滴的带电个数之差的平均值。通过计算两组数据中的平均值，分析两种油滴喷射器的实验结果。

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{5} (0.31 + 0.12 + 0.25 + 0.32 + 0.16) = 0.232 \quad (8)$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{5} (0.23 + 0.02 + 0.04 + 0.01 + 0.19) = 0.098 \quad (9)$$

由于  $\bar{y}_1 > \bar{y}_2$ ，可知改进后加盖油滴喷射器得到的油滴带电个数的结果更接近整数，即改进后油滴喷射器喷出的油滴效果更好，喷射出合适的油滴数量更多，更容易确定合适油滴，提高了实验的准确性，一定程度上节省了油滴选择时间。

## 5. 应用前景

本项目基于《密立根油滴实验》实验装置，改进了油滴喷射器。油滴喷射器加入压强传感器后，可显示储油瓶内具体大气压强，提高了实验的科学性，方便了实验者操作，储油瓶可稳定站立，减少了实验用油存储漏油可能性。油滴喷射器改进**创新点与优点**：

(1) 与传统的油滴喷射器相比，加入了充气加压装置及喷油口可调装置，喷射产生油滴可调、可控，更加稳定、可靠，可实现对产生油滴在大小、方向、集中度等方面控制与调节，提高了实验测量用油滴质量。

(2) 从油滴喷射器喷射的油滴分布看，改进后的喷射仪器加入了喷射油滴导向管，可调控喷射油滴的空间分布，油滴导向管优化后，油滴喷射空间分布效果更佳，节约了实验者确定合适油滴时间，提高了测量精度，节省了课堂时间，提高了课堂效率。

(3) 改进后的喷射仪器具有稳定的站立状态及更大的用油储存能力，不易撒漏，操作便捷，一次加油可长期使用，节省了使用和维护的时间成本。

(4) 改进后的喷射仪器主体玻璃材质，更利于油滴的保存且经久耐用。

本项目的**应用推广价值**：

(1) 教学方面，本小组所改进的油滴喷射器使实验操作更便捷，可以有效快速确定实验用合适油滴，方便实验者操作，大大提高课堂效率。可广泛应用在大学物理《密立根油滴实验》中。

(2) 本小组的主要创新点是加入储油瓶内加压装置、可调喷口、油滴导向管等，实现了更科学、有效、实用的设计。大大提高了密立根油滴实验油滴产生与获得环节的效率，节省了实验时间。

(3) 具有制作成本低、效果良好等优点，具有较高的实际应用价值。

作为大学物理课堂最常见和最经典之一的《密立根油滴实验》，改进的油滴喷射器设计，将《密立根油滴实验》更容易被同学们接受与认可，为实验教学贡献自己的一份力量。

## 参考文献

[1]陈学文, 张家伟, 方旺, 向思璇, 谢腾辉, 张欣笛. 密里根油滴实验的理论分析和测量结果讨论[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(07):150-153.

[2]阳劲松, 曾大鹏, 陈杰. 密立根油滴实验的理论及误差分析[J]. 大学物理, 2018, 37(12):37-40+64.

[3]李登峰, 薛书文. 密立根油滴实验教学中的几个问题[J]. 中国现代教育装备, 2011(15):79-80.

- [4]李文华,蔡秀峰.关于油滴实验几个问题的探讨[J].华北航天工业学院学报,2003(02):44-45.
- [5]董键.密立根油滴实验再认识[J].大学物理,2021,40(02):36-41+62.
- [6]陈尚明,李亮峰,潘琦.密立根油滴实验的动态测量法[J].大学物理,2020,39(04):60-66.
- [7]袁哲诚,王宽亮,陆李威,徐哲真,许飞,罗锻斌.密立根油滴实验的数据处理方法研究[J].物理实验,2019,39(05):13-16.
- [8]张颖涛,刘丽丽,李辉.密立根油滴实验中油滴选取的研究[J].大学物理实验,2019,32(01):46-49.
- [9]亓东林,鲍祎楠,张师平,裴艺丽,王荣明,吴平.基于大数据分析思路的油滴实验数据处理方法[J].物理与工程,2018,28(06):91-94+99.
- [10]张晓光,张风雷.密立根油滴实验数据处理方法改进[J].辽东学院学报(自然科学版),2017,24(03):221-223.
- [11]郑雪丽,李巧梅,汪涛,韩忠,雷迪.关于密立根油滴实验数据处理的新探讨[J].大学物理,2021,40(02):32-35.
- [12]陈浩民,陈周滨,贾志清,李雪梅.密立根油滴实验中一些问题的分析探讨[J].大学物理实验,2019,32(03):116-119.
- [13]关舒月,张明,张师平,吴平.密立根油滴实验中的布朗运动[J].大学物理,2019,38(06):48-54+59.
- [14]胡玮通,仲丽丽.密立根油滴实验教学设计探析[J].山西青年,2019(11):270.

# 磁场可视化仪器

参赛者：秦雨婷 曹素璟 夏薇 邱媛

（杭州师范大学物理学院，杭州 311121）

指导老师：祝宇红

**摘要：** 磁场作为一种客观存在的特殊物质，它看不见也摸不着。怎样将不可见的磁场以另一种形象具体的方式呈现在中学生的面前，让抽象的磁场可视化，已成为了中学教学的一大问题。本文介绍了一个可以实现磁场三维可视化的仪器。以特定直径的铁粉在磁场的影响下在特定密度的油中的分布情况，立体地将磁场呈现出来。该仪器与以往的仪器相比，实现了磁场可视化由二维向三维的跨越，使磁场的描绘变得更加直观，有利于加深中学学生对磁场的认识。

**关键词：** 磁场可视化 仪器开发

## 研究背景和意义

磁场作为一种客观存在的特殊物质，它广泛应用于我们的生产和生活中，成为了我们生活甚至地球中不可缺少的一部分。它无法用肉眼观测，也无法用肢体去感受。那怎样运用科学的方法在视觉上将磁场描绘出来，这成为了一个问题。而现有的描绘磁场的仪器，大都只能呈现出二维平面的磁场分布情况，故仪器存在局限性。

针对以上问题，我们小组在借鉴原有的磁场描绘仪器的基础上，对原有的仪器进行了创新与设计，制作了一款能将磁场三维立体展现出来的实验仪器。该仪器以铁粉受到磁场的影响，在特定密度的油中的分布情况直观地描绘出磁场。并且该仪器的灵活性很强，便于拆卸和更换磁源，可在学生面前以三维的形式直观地描绘出磁场，在中学教学中具有较高的实用性，并且该仪器的制作成本不高便于携带。

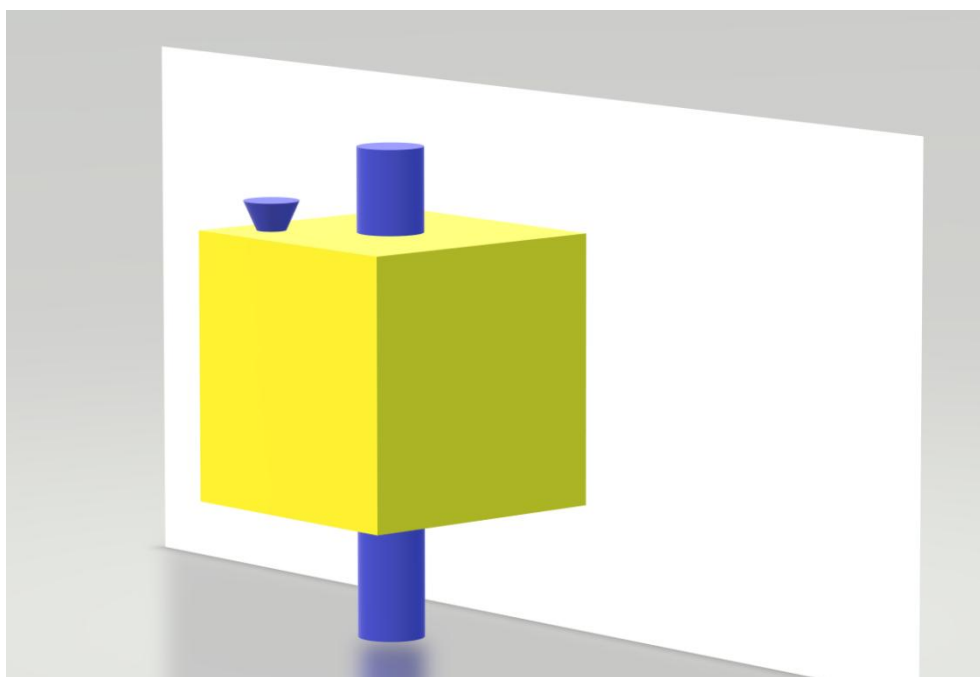


图 1 实验设计图

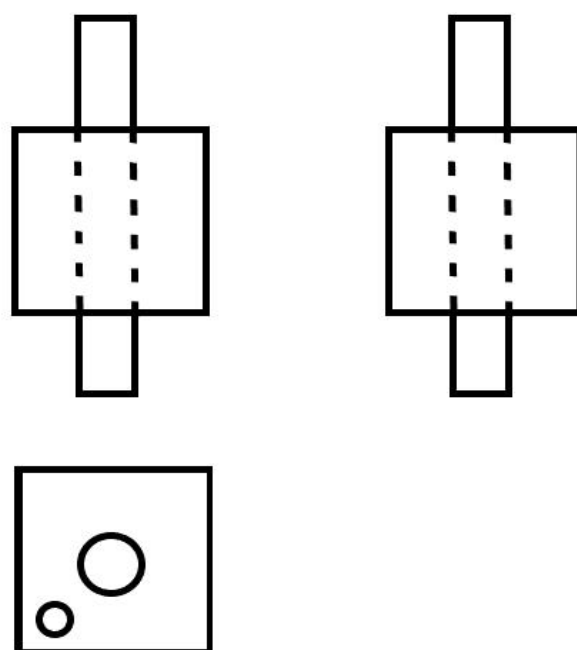


图 2 实验装置图三视图



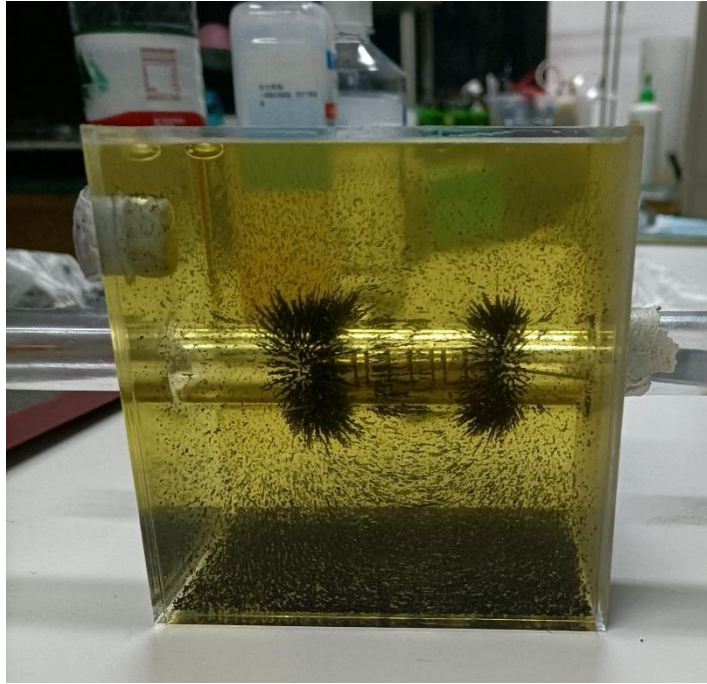


图3 装置图

## 工作原理分析

磁场是传递实物间磁力作用的场。磁场线是为了描绘磁场而引入的概念。我们创造出的模型有两个观察意义：其一是观察磁场分布的性质和规律，其二是根据磁场显示的状态来揭示空间中电与磁关系的原理。

磁铁之所以能够产生磁性，这是电磁力的作用。原子的组成有两部分，一部分是带正电荷的原子核，还有一部分是原子核外围带负电的电子。电子自旋会产生自旋磁矩，从而产生磁场。另一方面，原子核外的电子在轨道上运动还会产生轨道磁矩，这也会产生磁场。此外，原子核的自旋也有自旋磁矩，同样也能产生磁场。

原子中的各种磁矩结合在一起产生一个总的原子磁矩，而原子磁矩的有序度决定了物质是否具有磁性。如果原子中的磁矩互相叠加，原子磁矩有序度高，这样就会产生一个磁场，从而使物质具有磁性。这样的物质就是我们所说的磁铁，最常见的磁铁主要是由四氧化三铁组成。

另一方面，如果原子中的磁矩互相抵消，原子磁矩无序排列，这样无法产生磁场，物质也就没有磁性。

在磁铁产生的磁场的作用下，铁的原子磁矩排列会从混乱变成有序，从而被磁化，并产生磁场。这样磁铁和铁之间就能产生电磁力，所以磁铁可以吸铁。

如何让磁场可视化，我们在有一定粘滞系数的液体中加入粗铁粉，粗铁粉有一定的长度，当一定数量的粗铁粉在一起时，由于磁场是力场，具有磁性的铁粉在磁场中受到的磁力的作用下所显示出来的现象可以显示空间中磁场的分布与方向。

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin\theta}{r^2}$$

$$\vec{B} = \int_L \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \times \vec{e}_r}{r^2}$$

其中，液体我们选择了蓖麻油（常温下粘滞系数约为 0.99Pa\*s）、机油以及酒精（1.200Pa\*s），三种有机物需根据磁场和重力场要求用不同的比例调制。

如图所示



图 4 不同种类的油



图 5 铁粉在纯蓖麻油中的现象

呈现出的效果需做到清澈透明、易于流动，配比越适合的液体就越能减小误差，实际效果以实验结果为准。

选用容器时，考虑到光在液体中的折射，所以我们选用观察效果良好的正方体亚克力箱子。

## 硬件材料与技术分析

### 硬件材料

表 1 硬件清单

序号	名称	数量
1	亚克力板	6
2	亚克力管	1
3	粗/细铁粉	若干
4	蓖麻油	若干
5	无水乙醇	若干
6	软木塞	1
7	磁铁	若干
8	亚克力胶	若干
9	生料带	若干

## 亚克力板

10cm\*10cm\*4mm，用于制作封闭透明立方体盒子



图6 亚克力板

## 亚克力管

外径 2cm，管中放置磁性物质，产生磁场

## 粗/细铁粉

实验确定选择粗/细铁粉来描绘磁场形状

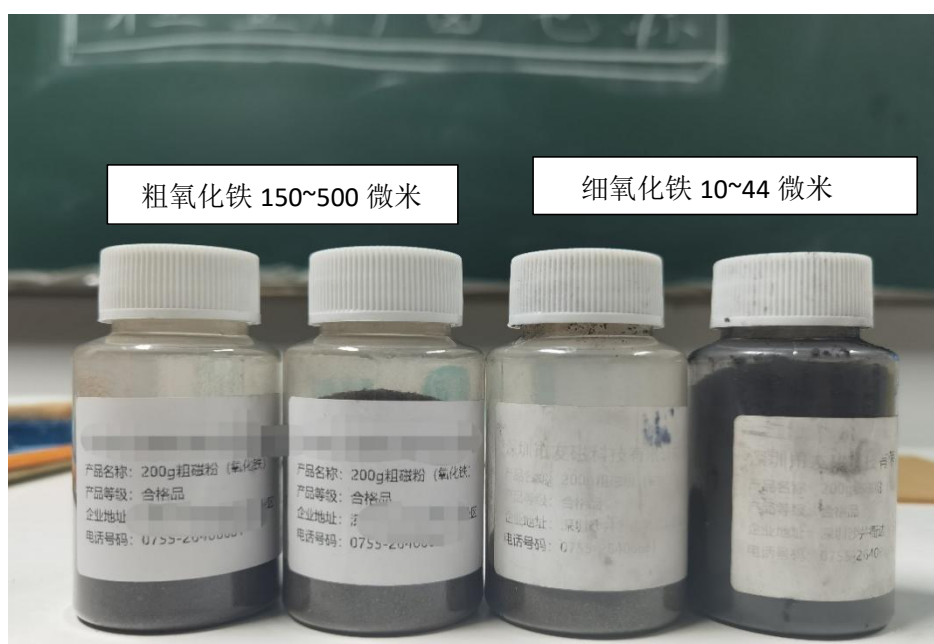




图7 铁粉图

## 蓖麻油、无水乙醇

表2 不同温度下蓖麻油粘滞系数

T ℃	$\eta$ Pa·s	T ℃	$\eta$ Pa·s	T ℃	$\eta$ Pa·s	T ℃	$\eta$ Pa·s	T ℃	$\eta$ Pa·s
4.5	4.00	13.0	1.87	18.0	1.17	23.0	0.75	30.0	0.45
6.0	3.46	13.5	1.79	18.5	1.13	23.5	0.71	31.0	0.42
7.5	3.03	14.0	1.71	19.0	1.08	24.0	0.69	32.0	0.40
9.5	2.53	14.5	1.63	19.5	1.04	24.5	0.64	33.5	0.35
10.0	2.41	15.0	1.56	20.0	0.99	25.0	0.60	35.5	0.30
10.5	2.32	15.5	1.49	20.5	0.94	25.5	0.58	39.0	0.25
11.0	2.23	16.0	1.40	21.0	0.90	26.0	0.57	42.0	0.20
11.5	2.14	16.5	1.34	21.5	0.86	27.0	0.53	45.0	0.15
12.0	2.05	17.0	1.27	22.0	0.83	28.0	0.49	48.0	0.10
12.5	1.97	17.5	1.23	22.5	0.79	29.0	0.47	50.0	0.06

表3 不同油在不同温度下的粘滞系数

温度/摄氏度	芥花油		玉米油		橄榄油		花生油		大豆油	
	(mPa·s)	(Pa·s)	(mPa·s)	(Pa·s)	(mPa·s)	(Pa·s)	(mPa·s)	(Pa·s)	(mPa·s)	(Pa·s)
23	63.5	0.0635	59.5	0.0595	74.3	0.0743	72.4	0.0724	57.1	0.0571
40	34.2	0.0342	33.5	0.0335	39.3	0.0393	38	0.038	31.1	0.0311
60	19.4	0.0194	19.8	0.0198	22	0.022	21.1	0.0211	18	0.018
80	12	0.012	12.9	0.0129	13.6	0.0136	13.1	0.0131	11.5	0.0115
100	8.1	0.0081	9	0.009	9.1	0.0091	8.7	0.0087	8	0.008

注：1 mPa·s = 0,001 Pa·s

## 技术分析

## 铁粉的选择

在制作前，我们先通过实验选择了粗铁粉作为材料。我们在两支试管中分别加入适量且等量的油，再分别加入质量相同的粗铁粉和细铁粉，震荡摇匀其中的铁粉，再在试管外用磁铁吸引，浅略的观察实验现象，发现细铁粉(10~44微米)因为颗粒太小，黑色浸染了油的颜色，完全看不清楚实验情况，且细铁粉的沉淀速度极为缓慢，不适用于做实验教具。

最后我们选择了颗粒较大的粗铁粉。



图 8 细铁粉在纯蓖麻油中的实验现象



图 9 粗铁粉在纯蓖麻油中的实验现象

## 亚克力盒的制作

取第一块亚克力板，在中心和偏侧边，分别打一个直径 2cm 的圆孔穿入亚克力管用于放置磁性物质，和一个直径 1.5cm 的注水口，此为上表面；取第二块亚克力板在中心打一个和第一块亚克力板完全对其的圆孔，亚克力管穿过，此为下表面；再取四块亚克力板将四周一圈围住，板与板之间的用亚克力胶水粘合，亚克力管两端和软木塞底部缠上生料带，减少渗漏情况，然后与粘黏完成的亚克力盒组装，静置一天，至此透明密封亚克力盒制作完成。

## 液体的调配

通过多种不同品种的油的混合以及油和乙醇之间不同比例的互溶，从而达到改变液体的粘滞系数，使铁粉在下落的过程中，受到不同大小的阻力，最完美的情况是阻力在竖直方向的大小可以近似等于铁粉的重力，或是略小，使得铁粉在液体中以缓慢的速度下落，但水平方向的阻力不能比磁性物质对铁粉产生的吸引力大，使得铁粉可以在磁力的作用下运动，将磁场描绘出来。

但这只是理想情况，实际情况还要考虑到，液体的颜色，液体的浓度越高，颜色越深，考虑到观察角度，液体的粘滞系数不宜过高；铁粉是否易在溶液中分散，在实验过程中我们发现，当液体浓度过高，粘滞系数过大的时候，铁粉易结块沉底，即使是倒置，也有绝大部分铁粉沿亚克力板壁滑落，而不能做到均匀的分散在液体中。

通过实验，我们发现，机油颜色太深；菜籽油粘滞系数过小，且摇晃时极易产生气泡，溶液变得浑浊；当蓖麻油和无水乙醇 10:3 混合时，实验效果为最佳。



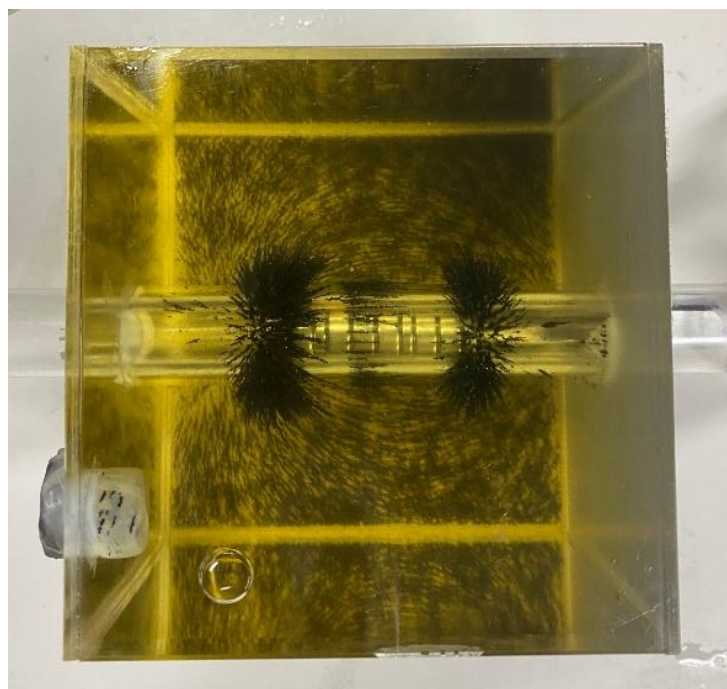


图 10 在特定比例下的实验效果图

## 应用实例与分析

### 条形磁铁横向放置

#### 实验目的

验证条形磁铁横向放置时周围磁场的分布情况

#### 实验材料和用具

条形磁铁、磁场可视化装置

#### 实验原理

通过查阅相关资料可知条形磁铁周围磁场分布如图

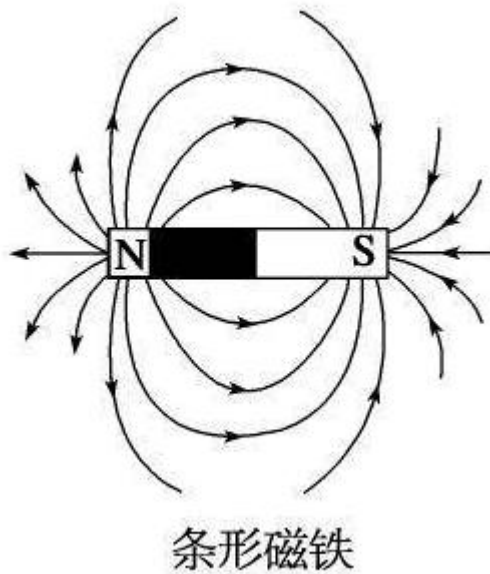


图 11 横向放置条形磁铁的磁场分布

### 实验内容

1. 旋转磁场可视化装置，使铁粉均匀分布在装置中
2. 迅速将条形磁铁横向塞入圆柱管中，观察实验现象

### 实验结果

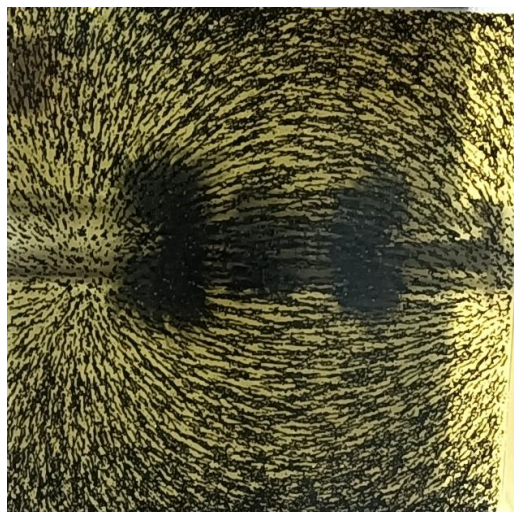


图 12 横向放置实验结果图

利用磁场可视化装置，观察到铁粉在装置中的分布与实验原理图中条形磁铁周围的磁场分布基本吻合。

## 条型磁铁竖向放置

### 实验目的

验证条形磁铁竖向放置时周围磁场的分布情况

### 实验材料和用具

条形磁铁、磁场可视化装置

### 实验原理

通过查阅相关资料可知条形磁铁周围磁场分布如图

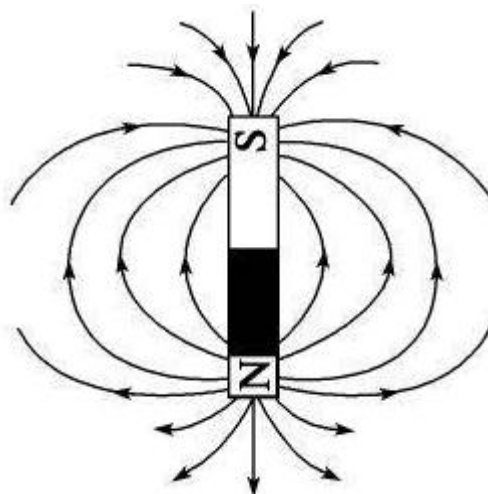


图 13 竖向放置条形磁铁的磁场分布

### 实验内容

1. 旋转磁场可视化装置，使铁粉均匀分布在装置中
2. 迅速将条形磁铁竖向放入圆柱管中，观察实验现象

## 实验结果

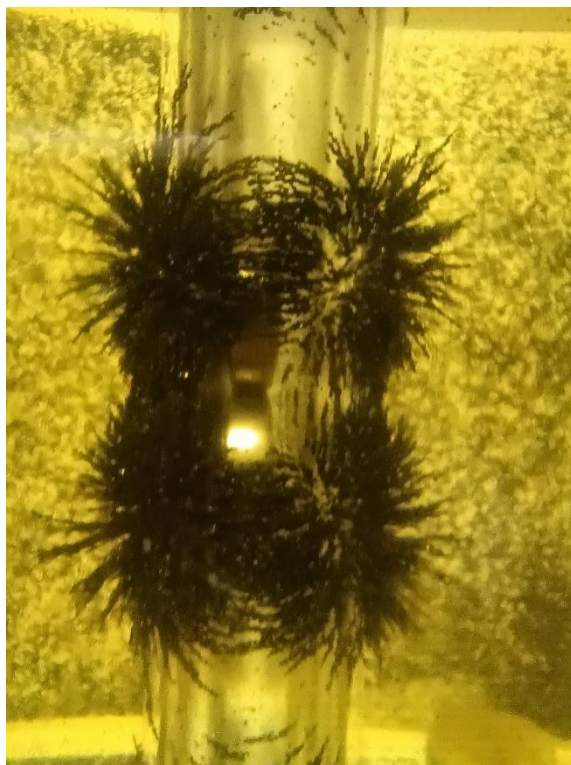


图 14 竖向放置实验结果图

利用磁场可视化装置，观察到铁粉在装置中的分布与实验原理图中条形磁铁周围的磁场分布基本吻合。

### 应用前景

磁体周围空间存在磁场，电流周围也存在磁场。磁场是一种看不见摸不着的特殊物质，不是由原子和分子组成，但它是一种客观存在，且可以说是普遍存在。在初高中对磁场这一概念的学习中我们仅仅局限于平面。在磁体旁边摆满小磁针，小磁针 N 极所指的方向则是磁场方向，在磁场中画出一系列有方向的闭合曲线，且使曲线上每一点的切线方向表示该点的磁场方向，也就是小磁针 N 极所指的方向，这就是磁感线。

但磁场不仅存在于一个平面，它是一个三维立体的概念。我们这款教具的设计，可以让学生观察到一个立体的磁场。将待测磁体放入该装置中，可以从多方面多角度观察磁场，对该物体的磁场产生一个全局的认识。在直观观察到磁场的走向的同时还能够了解到每个地方磁场强度的不同。不仅仅是本身带磁性的物体，还可以放入通电螺线管，同时给学生展示了电生磁的现象，也展示了通电螺线管周围的磁场分布。

该教具无需组装，为了更好的展示效果，可以根据磁场的强弱来调整液体的粘滞系数，

以达到最好的观察效果。由于此教具的操作简单、现象明显，可以广泛应用于初高中教学。

# 基于半导体技术自制扬声器探索声学奥秘

## 1. 实验背景与目的

柔性电子产品是近年来电子行业的一个热门研究和发展课题。同时声学一直是物理课程中十分重要的一块内容，并且随着现在科技水平的不断提高，师生们已经不满足于简单的课本知识。所以本实验通过自制扬声器教具将理论知识转化为实际操作，这能够极大地提高学生对声学知识的学习热情和兴趣。教师在授课过程中，可以通过扬声器教具与学生一起探究声音的产生，特征，能量等声学知识。运用自制扬声器教具来教授声学知识，给学生以声音的发生、传播、接收、性质及与其它物质的作用的丰富知识和广泛应用，以及声学与其它学科的联系，开阔学生视野，扩大知识面。用该教具进行辅助教学还可以加深学生对声学知识的理解，增强学习效果。在老师讲课的同时，让学生自己操作教具，更能激发学生的学习热情。

1. 掌握物理仿真软件和电路设计软件的使用和封装技术，学会自制薄膜扬声器；
2. 通过自制的薄膜扬声器了解扬声器音质的影响因素，发声原理及测试方法；
- 3 对表格数据进行总结，学会分析频响曲线；

## 2. 实验装置

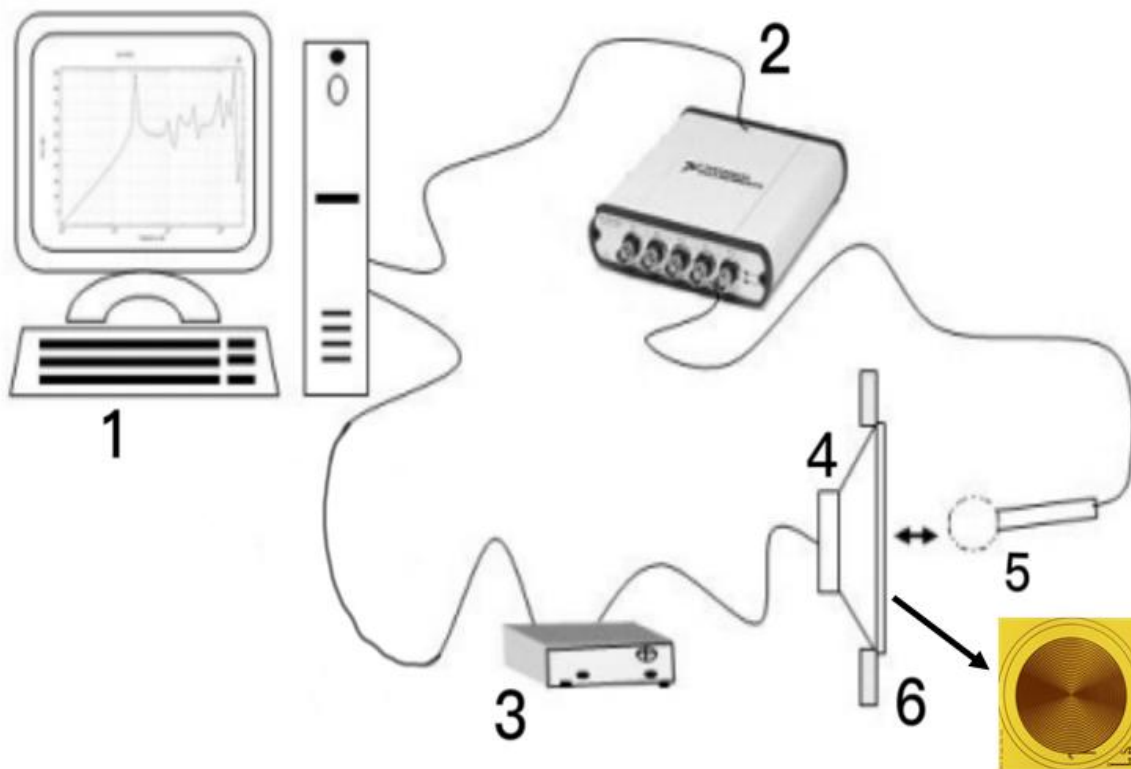


图 2-1 扬声器的测试装置

上图实验装置用来测量电声效率和总谐波失真。(1) 计算机, (2) AWA6128S 测试仪, (3) AWA14604 前级放大器, (4) 电波暗室, (5) AWA14425 传声器 (6) 可挠式薄膜扬声器。

### 2.1 模具下平面扬声器性能测试

AWA6128S 型扬声器测试仪执行《GB/T 12060.5-2011 扬声器主要性能测试方法》和《IEC 60268-5: 2007 Sound system equipment - Part5: Loudspeakers》等标准。该仪器可以测试扬声器, 也可以用于测试耳机或者受话器。能快速地完成电声产品扬声器的测试, 是基于生产线和质量控制 (QC)、操作简易的要求而开发的测试系统。它将功率放大模块, 声音测试模块集成在一台主机里。仪器可以同时测试扬声器频响、灵敏度、阻抗、 $f_0$  (谐振频率)、谐波失真、Rub&Buzz (异常音)、相位、Q 值和极性 etc 参数。



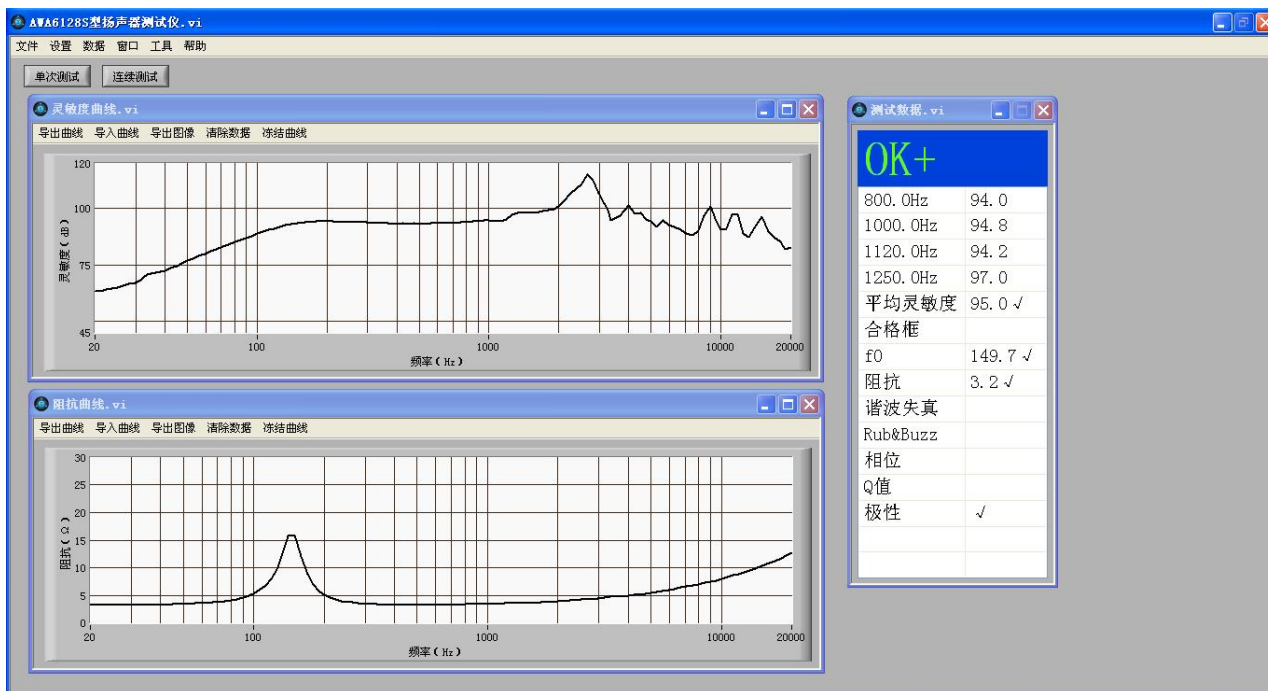


图 2-2 AWA6128S 型扬声器测试仪

## 2.2 AWA6128S 软件测试

扬声器的性能测试主要是测试扬声器的频响指标与失真率指标，AWA6128S 型扬声器测试仪输出电信号给被测扬声器，测试传声器接收相应声信号，经放大、A/D 转换后，再由计算机进行数据分析处理，最后把数据和曲线一起显示。对于如下图 2-3 所示的声学测量，相同的音频分析器被利用来产生刺激，并分析声振动和监视系自由场条件轴线上的麦克风，使用前级放大器，可用于驱动扬声器的高电信号，为了避免外壳将对环绕声的外部产生干扰，声级将通过信号调节器来测量。

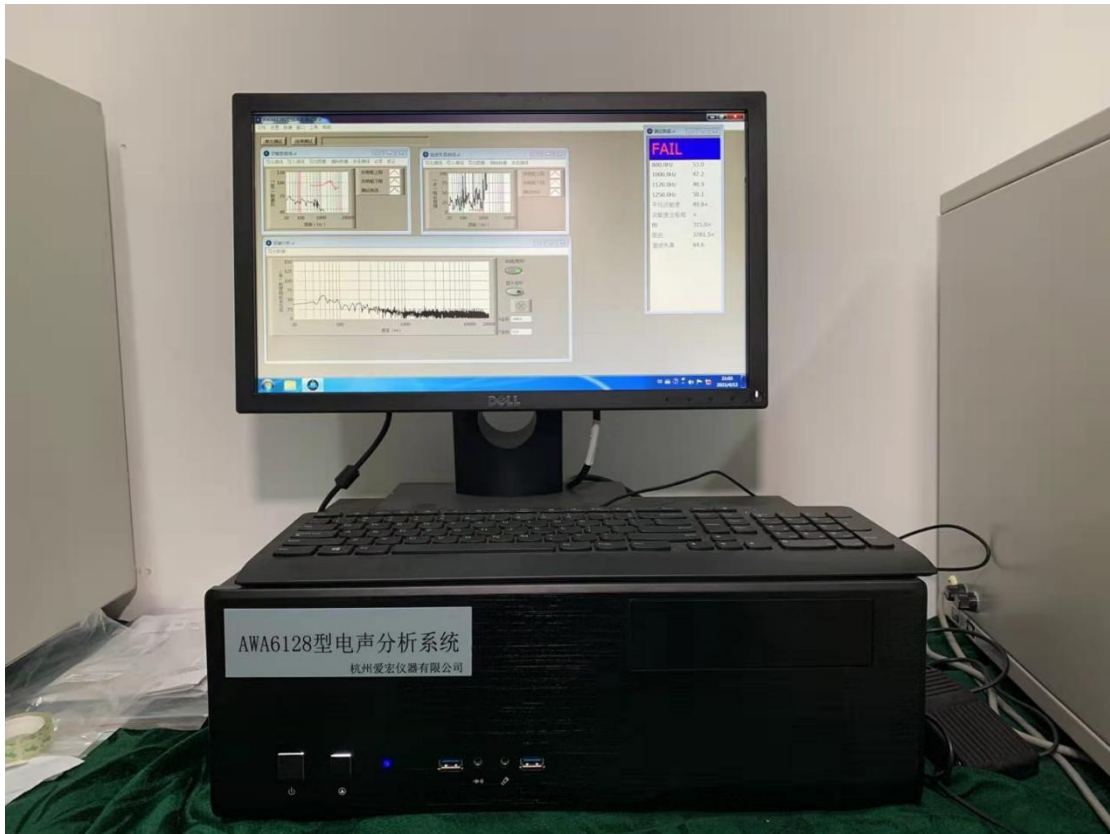


图 2-3 实际声音量测图



图 2-4 AWA6128S 测试仪

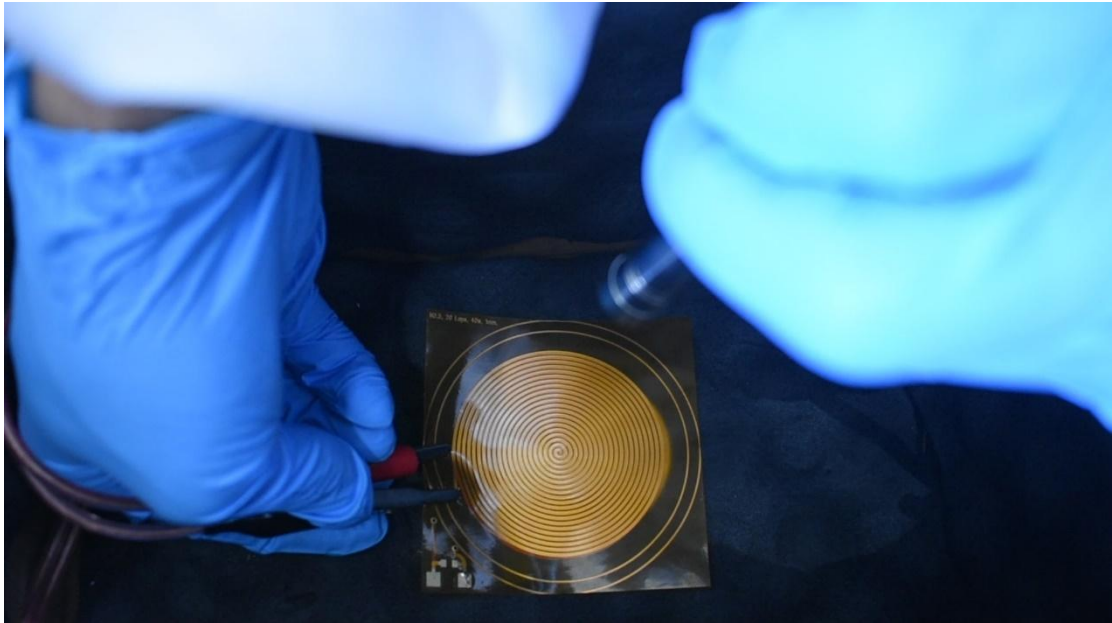


图 2-5 实际声音量测图

### 2.3 平面扬声器实际声压测量

声压变动的程度较于频率可用扬声器的音调质量图绘制表示。当没有上述信息时将无法得知分频元件大小。此外，一个系统的声压特性所提供的信息，在扬声器系统可能的反极化效应中能提供一个正确极化参考系统的声压曲线。当扬声器的最大声压（在一般功率下）、灵敏度（在 1W 时）在一个固定频率时，可量测距离最远为 1 米。其量测灵敏度（单位为 dBspl，功率为 1W，与麦克风距离 1 米）可储存量测频率响应时的参考值。测试装置需要一个功率放大器，已经校正标准的麦克风，再备用一个麦克风放大器。



图 2-5 扬声器校准图

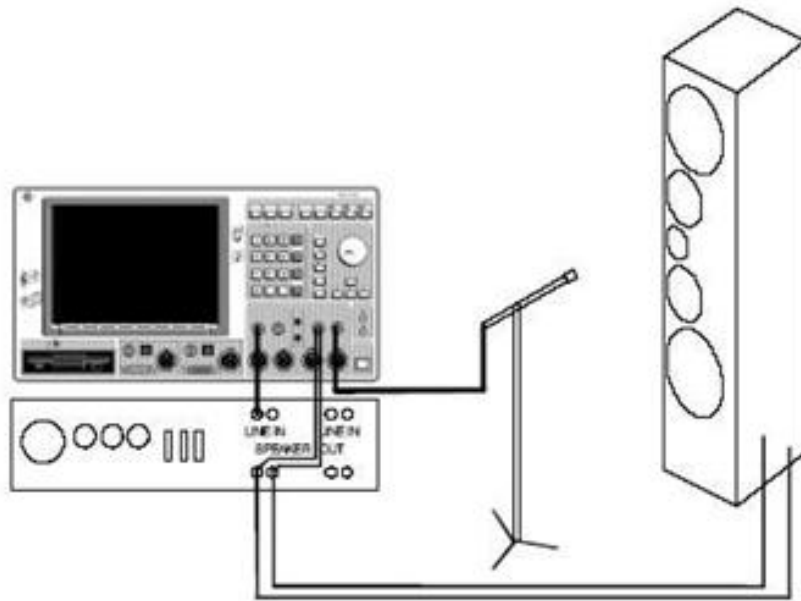
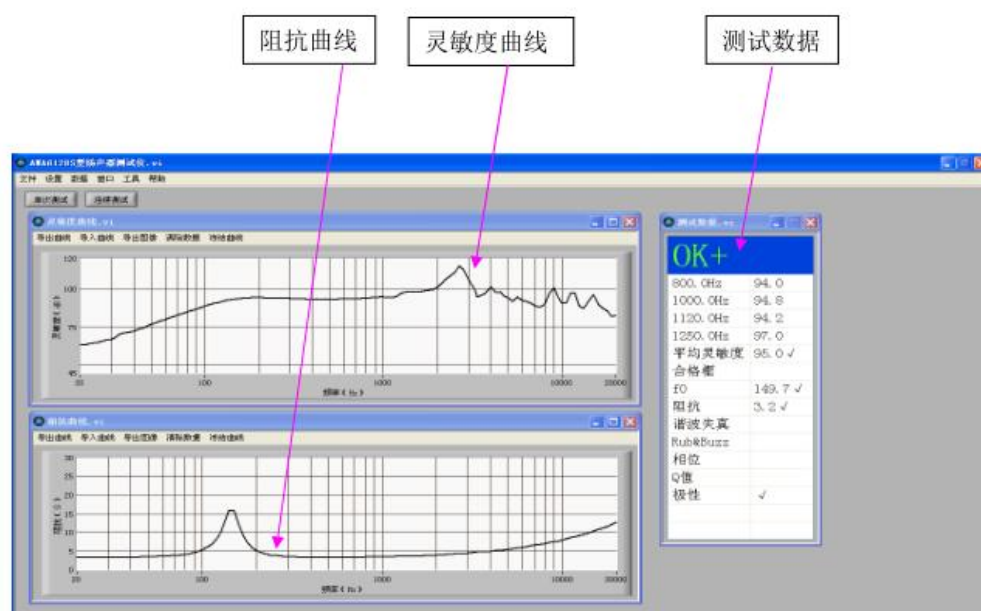


图 2-6 声压量测测试图



图 2-7 声压量测测试图

在声压测试的过程中，应处于量测时没有间接噪声的无回声实验室。若无此类型的实验室，在量测时会经由墙面，地板或天花板造成许多反射讯号放大或者是特定频率衰减声音位准，当同相或相差 90 度时在最强的放大量或衰减量会产生讯号叠加。实验过程中，当这种影响无法完全避免时，可以参考下列方式尽量减少叠加效应：将毛毯或窗帘等任意可吸收声音的物质覆盖所有墙面及地面，目的是减少回音量；适当的减小麦克风的最小距离，并且需要增加直接讯号量在与回音量的关系式中；选取最适合的位置来摆放标准麦克风和扬声器以增加回音的最大路径。以此方式可减低回音量并扩大一个无回音量测周期。在理想的情况下，尤其是在高频时可获得麦克风在回音到达之前端点的量测；使用噪声或突波讯号替代连续的正弦讯号。这样便可精确地量测回音量对电流的影响。判定结果窗口显示总判定、平均灵敏度、合格框、f0、阻抗、1kHz 谐波失真和



极性等扬声器参数测试结果。

图 2-8 测试页面图

将测试传声器固定在被测扬声器的正前方，测试传声器和被测扬声器轴线重合。声压量测可在近场，远场和结合近场/远场的量测上进行。远场量测，麦克风和扬声器之间的距离至少要三倍大于扬声器的大小。实际上，此距离一般为 1 米。麦克风和扬声器需置于椭圆中心处并且其表面靠在最接近的墙面。因为远场量测对于回响是非常敏感的，所以执行回响时必须在一无响室（Anechoic room）中进行。但基于在实验过程中，我们无法将误差全部排除，只能做到尽量使误差带来的影响最小，故选择近场测试。



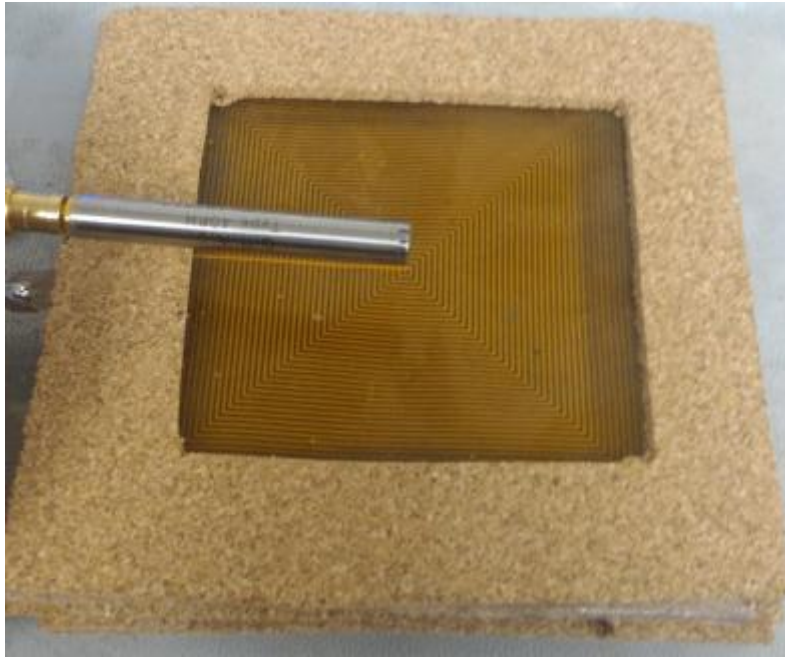


图 2-9 近场实际声压量测

所谓近场量测，就是指麦克风尽量可能地靠近扬声器。如此一来，便可得到极高的信号位准以及在许多情况中可忽略的反射讯号。麦克风与扬声器需位于虚拟球体的中心并且其表面靠在最接近的墙面。近场量测可在非完全声音吸收（sound-absorbing）的房间内执行。

## 2.4 自制平面薄膜发声教具

相较于传统扬声器相比，自制发声教具制作简单，成本低廉，适用于实验多次利用。可直接联系半导体封装企业批量生产价格低廉。

如果校方有条件，即可按照实验步骤自制：

- 1、在溅射法制得的清洗后的二层覆铜柔性基板上均匀涂布一层感光光阻材料（PI），然后进行烘烤。
- 2、将掩模板上的电路图图案，投影到涂布在二层覆铜柔性基板的感光电阻材料（PI）上。
- 3、UV 光透过掩模板，照射到曝光产品的感光电阻上表面，掩模板上的透明部分，UV 光能透过，能发生光阻反应，而不透明部分不发生光阻反应。从而掩模板上的电路图图案，投影到涂布在二层覆铜柔性基板上的感光电阻材料上。
- 4、将显影液喷淋到曝光过的产品表面，显影液会将 UV 光照射后发生光阻反应的感光电阻溶解掉，从产品表面去除，而没发生感光反应部分保留。
- 5、将蚀刻液喷淋到显影后产品表面，蚀刻液会把未被感光光阻覆盖住的二层覆铜柔性基板

上的铜蚀刻掉，留下被感光电阻 PI 保护的那一部分。

6、将脱膜液喷淋到蚀刻产品表面，脱膜液会脱去未被 UV 光照射的 PR 感光光阻，从而形成铜回路。制备工艺如图 2-10 所示。实物图 2-11。

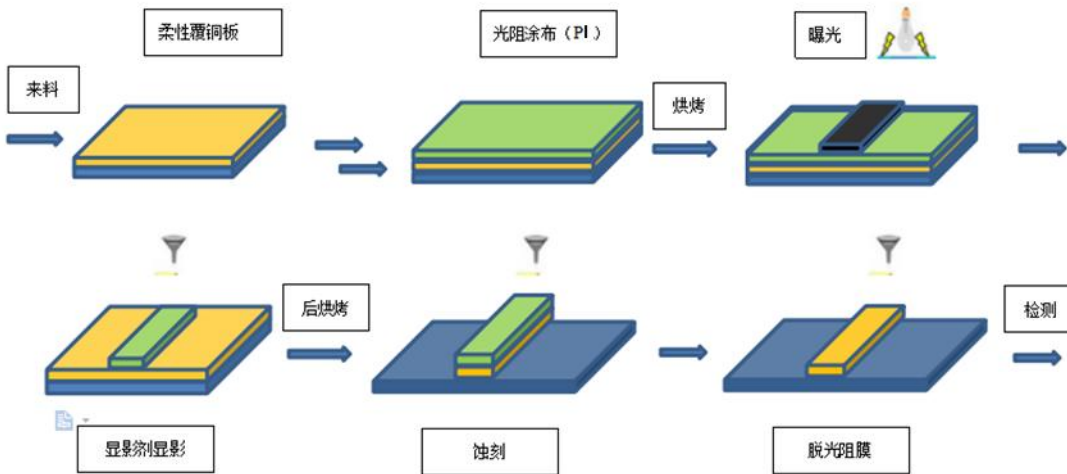


图 2-10 曝光显影制可控铜线线路

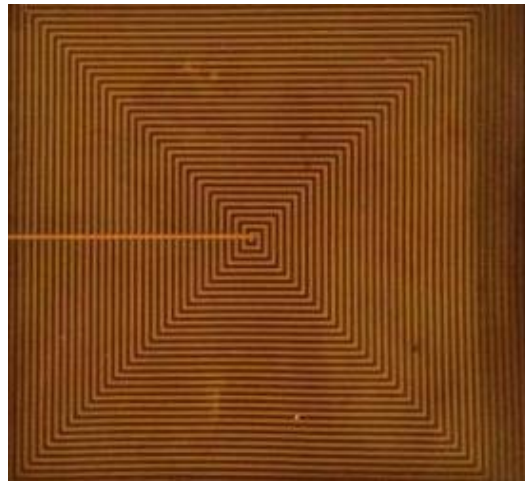


图 2-11 曝光显影后的铜系线路柔性基板



## 2.5 电波暗室

消声室是指在一个房间内可以完全消除任何声音或反射电磁波，并且可以绝缘外部噪声。结合这两个方面意味着他们模拟一个安静的无限维的开放空间。消声室由美国声学专家创造的术语狮子座贝拉尼克，最初用在上下文声学（声波），以尽量减少由于反射造成实验影响的一个房间。最近，根据消声室的设计，用来减少反射和外部噪声的无线电频率已被用于测试天线，雷达，或电磁干扰。电波暗室范围可从小型隔间的家庭规模微波炉到大型飞机库。腔室的大小取决于被测试的对象的大小和所使用的信号的频率，尽管比例模型有时可以用来通过较短的波长（较高频率）的检测。



图 2-12 电波暗室扬声器放置端

把扬声器和麦克风放置在电波暗房，使用频率输出 20-20kHz 的频率后，经过前级放大器，使声音放大后，然后进行测量。

## 3.实验原理

振动薄膜通电后产生磁场，交变电流正负极不断变化，振动薄膜便在外磁场的作用下振动发声。

频率是单位时间内某事件重复发生次数的度量，在物理学中通常以符号罗马字  $f$  或(希腊字  $\nu$ )表示，其国际单位为赫兹 (Hz)。

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

音速与频率  $f$  及波长  $\lambda$  之关系为:

$$c = \lambda f \quad (2)$$

$$c = \lambda / T \quad (3)$$

声压(sound pressure)指因物体振动产生大气压力,造成以大气压为中心的来回压力变化为音压(单位P, Pa = 1 N/m<sup>2</sup>, Pascal)。

设v为粒子前后振动的速度(m/s), c为音速, ρ为介质密度  
则其计算公式为:

$$P^2 = I / v = I \rho c \quad (4)$$

扬声器灵敏度是指在扬声器输入端加上额定功率为的电信号、距离扬声器轴方向所产生的声压级,主要用于度量声音强度,常用dB表示,常用的空气参考声压为

$$P_{ref} = 20 \mu\text{Pa} \text{ (微帕斯卡)} \quad (5)$$

声压的强弱是由声压的有效值决定的, P<sub>rms</sub>是有效值就是均方根值(RootMeanSquare Value, RMS)其计算公式为:

$$P_{rms} = \frac{1}{T} \sqrt{\int_{t_0}^{t_0+T} P^2 dt} \quad (6)$$

$$P = \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2 + \dots + P_n^2}$$

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P'} = 20 \lg \frac{\sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + P_4^2 + \dots + P_n^2}}{P'}$$

$$L_p = 20 \sqrt{\left(10^{\frac{L_{p1}}{20}}\right) + \left(10^{\frac{L_{p2}}{20}}\right) + \left(10^{\frac{L_{p3}}{20}}\right) + \dots + \left(10^{\frac{L_{pn}}{20}}\right)}$$

$$L_p = 20 \lg \frac{P}{P_0} + 10 \lg n$$

SPL(Sound Pressure Level)表示,声压水平(SPL)或声级是对数测量声音相对于参考值的有效声压。空气或其它气体的标准参考声压是20微帕斯卡,这通常被认为是对人的听觉。

即n=1时,

$$SPL = 20 \log \left( \frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) \quad (7)$$

阻抗定义为电压与电流的频域比率。阻抗的大小是电压振幅与电流振幅的绝对值比率,阻抗的相位是电压与电流的相位差。采用国际单位制,阻抗的单位是欧姆(Ω),与电阻的单位相同,其计算公式为:

$$Z = Z_m \angle \theta = \frac{V}{I} = \frac{U \angle \theta}{I \angle \theta} \quad (8)$$

## 4. 实验内容及步骤

1. 提出猜想：线圈的单双回路，形状，匝数，会影响平面扬声器的发生效果
2. 设计与仿真。利用 AD 软件进行电路设计实验所需的各类平面扬声器（交流阻抗均为 8 欧姆），在绘制过程中需利用网络脚本辅助编写阿基米德螺线圈，其次利用 COMSOL Multiphysics 仿真磁铁最佳放置位置，在软件中寻找 3\*3 磁铁与发声器件的最大受力距离。
3. 导入编写好的 ad 文件使用半导体封装机进行封装平面扬声器，其中选择的基底是柔性聚酰亚胺材料，单晶铜作为线材。制得系类实验平面扬声器。（若是没有相关器材可以直接委托商家生产）
4. 将不同的扬声器（ $\gamma$ 匝数， $\beta$ 单双回路， $\alpha$ 形状）放置于 3d 打印好的承载模型上进行调试，确保空腔体积  $v$ ，磁铁磁通量面积  $s$ ，空气温度  $c$ ，空气相对湿度  $w$ ，放大模块正常工作等其他环境因素不会影响到实验进行（空气传播损耗为定值常量）
5. 将装置连接电路放于暗室中隔绝外界声音影响，打开测试仪器，并架好探头处于平面扬声器正前端 10cm 处，准备测试数据。
6. 通电 2s，进行扫频测试，记录数据。
7. 将实验中的平面薄膜扬声器换下，换成另一参数的平面薄膜扬声器，重复实验。
8. 完成实验，把实验器材归还原位。
9. 对数据进行表格绘制，计算结果，再绘制表格。
10. 得出结论

### 4.1 阻抗模拟

首先通过模拟设计软件，精准控制线距比、线密度、线宽、回路形状、回路面积等设计，实现阻抗控制。导出为 Altium Designer 设计图，通过 Altium Designer 软件导出装配图，记录产品规格。而阻抗对声学影响体现在功率与最高灵敏度。为配合市面上广泛扬声器对应的功放，我们将阻值与感抗总和控制在 8 欧，保证了功放的匹配度达到最佳音效。

## Coil Designer

1: Select LDC Part

LDC1614

Parameter range for selected part	
Name	Range
Voltage (Oscillation Amplitude)	1 to 4 V
Operating Temperature	-40 to 125 °C
Sensor Frequency	1k to 10M Hz

2: Select Coil Type

Circular



Figure :Circular selected

3: Output Graph

Layers vs. Total Inductance

Circular  Square  Hexagonal  Octagonal

Y-axis: Total Inductance X-axis: Layers

4: Select Coil Geometry And Other Parameters

Parameter	Value	Units
LC sensor capacitance (C)	1000	pF
Outer diameter of inductor (D <sub>out</sub> )	10.160	mm
Layers (N)	2	
Turns per layer (N)	15	
Trace width (W)	0.1	mm
Spacing between traces (S)	0.09	mm
Copper thickness (t)	0.017	mm
Temperature (T)	25	°C

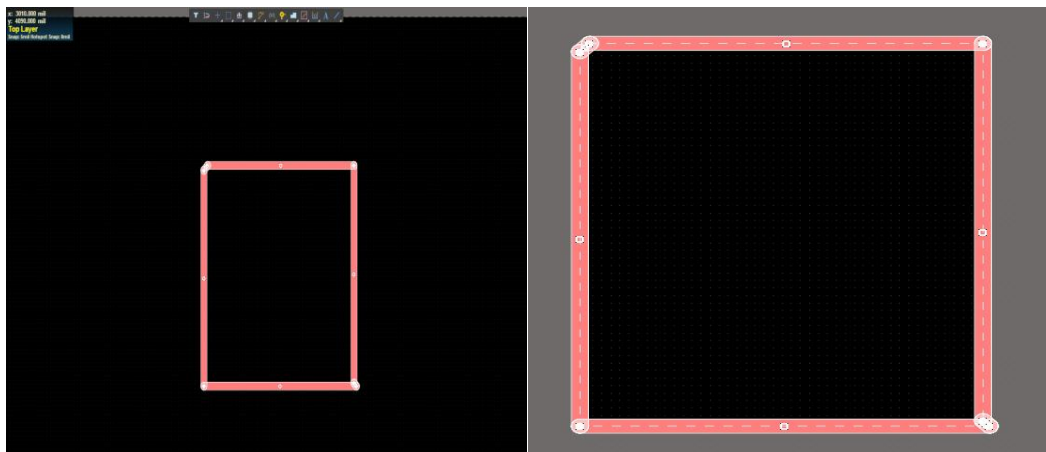
Output Parameters	
Name	Output
Total inductance - Circular	7.348 µH
Sensor frequency	1853.547 kHz
Q factor	10.385
AC resistance (skin effect only)	8.24 Ω
Coil fill ratio	0.438
Coil inner diameter (D <sub>in</sub> )	4.45 mm

5: Export Design

Export to CAD  
Share Design  
Reset  
More information  
Support & Community

图 3-1 软件设计控制阻抗

通过软件模拟数据在 Altium Design 软件进行设计，首先控制绘制版的大小，在板上按照设计需求按照脚本调试阿基米德螺线圈导入，脚本同时也能绘制其他形状。并导出 PCB 图。



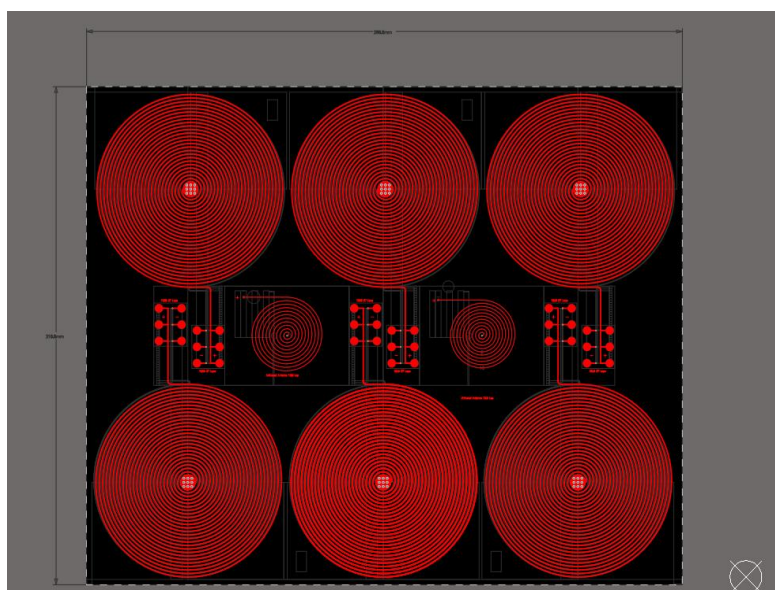
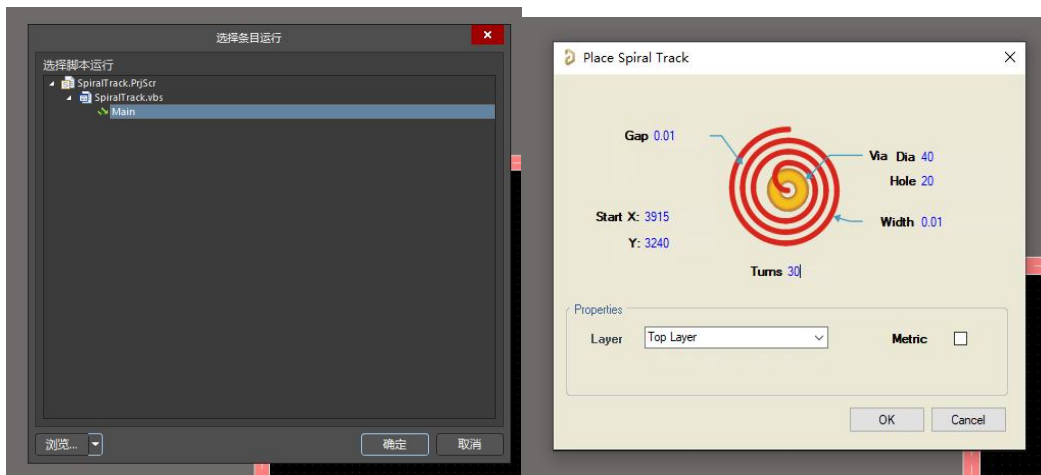


图 3-2Altium Design 设计过程

## 4.2 磁力线模拟

根据扬声器原理，音圈输入交流电流产生交变的磁场，在永久磁铁与交变磁场的作用下做垂直于音圈电流方向的运动。音圈运动带动纸盆的前、后振动，纸盆的振动推动空气的振动，使得人能感受到声音。因此团队准备了 3\*3 的磁铁并通过软件模拟进行实现。团队采用 COMSOLMultiphysics 软件进行物理量的耦合模拟软件采用数学方法展示物理现象。利用磁路仿真，设置永磁最佳摆放位置。

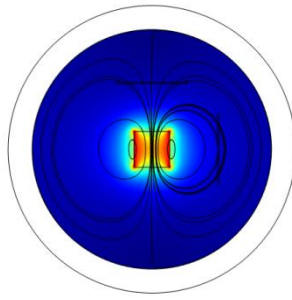


图 3-3 磁铁大小 3cm×3cm

为了了解磁铁的特性，所以进行了磁铁方向和磁通量密度的研究，从本研究模拟 3X3 大小的磁铁。

由下图 3-4 可以看到距离磁铁 2mm，磁通量密度是最大的，随着距离越来越远，磁通量密度也减少，磁力线也变得越来越平坦，磁铁中间磁通量密度比较强。

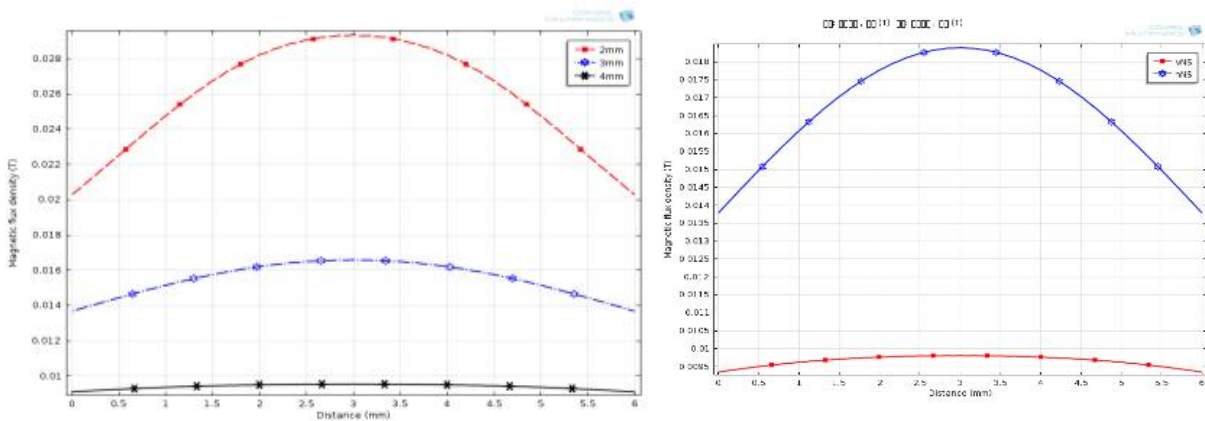


图 3-4COMSOL 磁力大小模拟图

### 4.3 扬声器实验测试

扬声器的最终性能，是依靠人耳的听感决定的，所以这个结果可能会因人而异。不过，还是可以将扬声器许多方面的特性通过数据的形式表达出来的。一些常见参数包括：

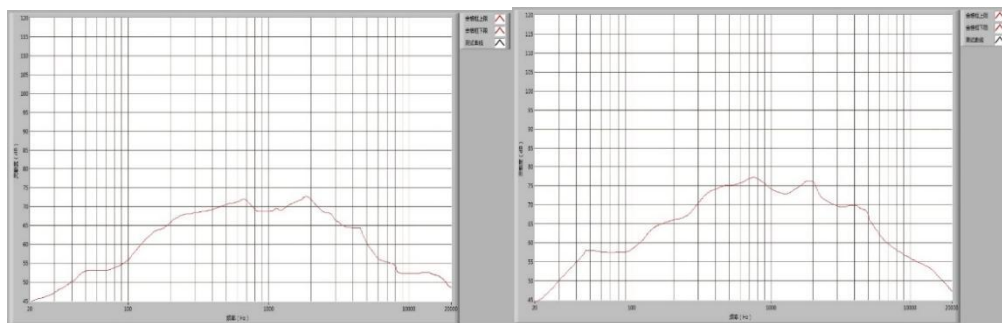
1. 功率：包括最大功率、额定功率、平均功率等，功率越大对应的声音就越大。
2. 频率：发声频率，由于一般很难制造出在 20-20000 赫兹范围内都表现良好的扬声器，所以通常将几个不同频率的扬声器组合起来构成扬声器系统。
3. 阻抗：通常为 2 的次方，例如 2 欧姆、8 欧姆、32 欧姆等等。
4. 失真：包括互调失真、谐波失真等参数。
5. 灵敏度（分贝/瓦）：灵敏度越高，细节表现力越强。

(1) 以下实验数据是通过改变导线之间的距离，实现圈数的改变来判断方形回路的薄膜扬声器频响曲线的效果，测试在 3v 灵敏度选取频响区间最为稳定的 800Hz, 1000 Hz, 1250 Hz 的平均值。失真率为 1000Hz 处总谐波失真。

表 1 不同尺寸的方形回路测试结果

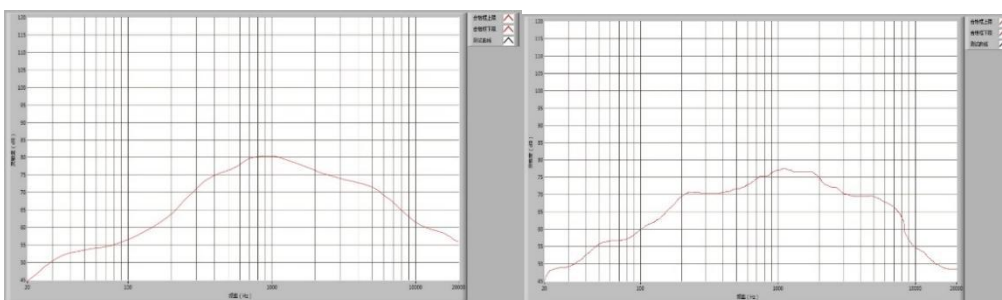
编号	尺寸/cm <sup>2</sup>	谐波失真	圈数	灵敏度	音质特点
方形#1	8*8	3.6%	5 圈	69dB	低中频的声压较高，低频,高频的声压不稳定
方形#2	8*8	2.4%	15 圈	70dB	中频的声压较稳定，中频及高频的声压较差
方形#3	8*8	2.4%	20 圈	73dB	低中频的声压较稳定，高中频及高频及低频的声压较差
方形#4	8*8	1.8%	25 圈	78dB	音域集中在中频，频响曲线稳定，并且灵敏度显著提升
方形#5	8*8	1.9%	30 圈	75dB	低中频的声压较稳定，中高频的声压较好
方形#6	8*8	1.6%	40 圈	73dB	低中频的声压较稳定，频响曲线向低频靠拢
方形#7	8*8	1.2%	50 圈	72dB	频响曲线向低频靠拢，低频的声压有所上升

### 灵敏度



图表 1 方#1

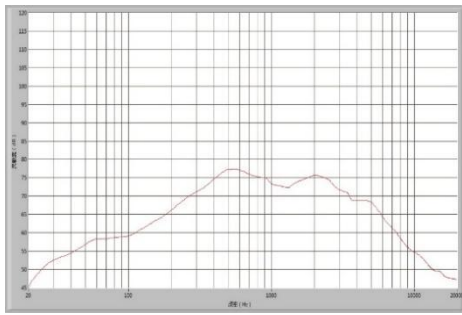
图表 2 方#2



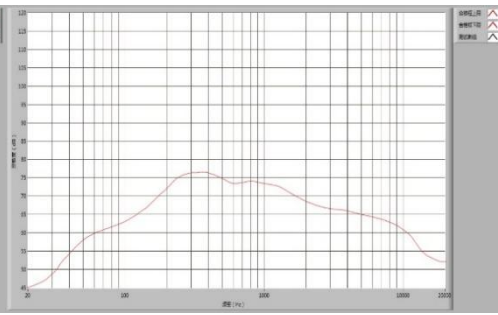
图表 3 方#3

图表 4 方#4

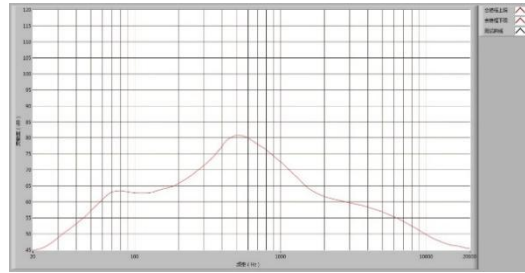




图表 5 方#5

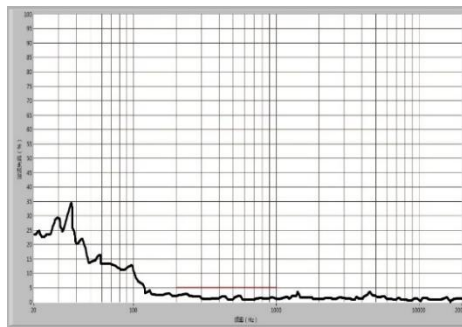


图表 6 方#6

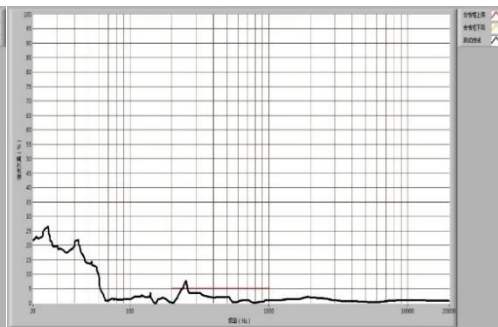


图表 7 方#7

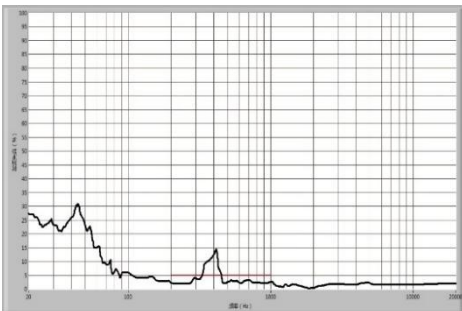
### 谐波失真



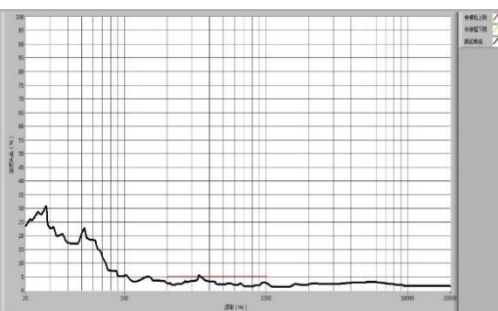
图表 8 方#1



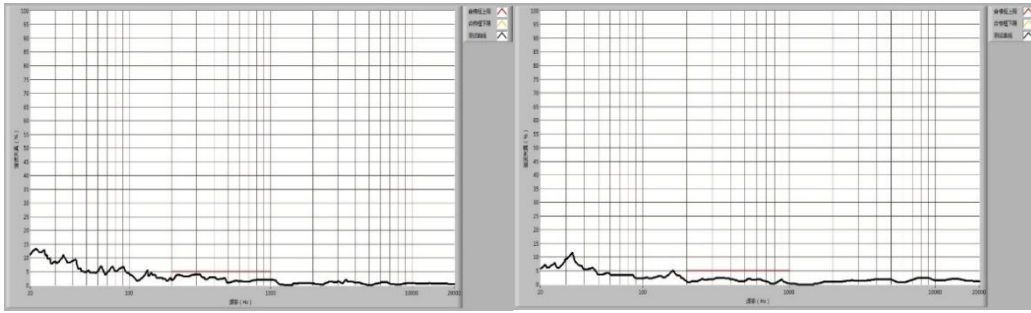
图表 9 方#2



图表 10 方#3



图表 11 方#4



图表 12 方#5

图表 13 方#6



图表 14 方#7

实验过程中统一控制方形回路扬声器阻值为 8 欧，磁铁放置扬声器距离为 2mm，声音灵敏度、谐波失真率与频响曲线在 5-50 圈数大小改变的比较。

- (1) 灵敏度在 25 圈时达到最大值，5 圈时为最小值。
- (2) 圈数越多谐波失真率越低
- (3) 随着圈数增加，频响曲线中音部分趋于稳定，高音部分逐渐降低，低音部分逐渐上升

频响曲线在于中音趋向平稳，随着圈数增多单位面积扬声器质量增大，高音会进一步衰弱，灵敏度降低，但是低音效果在逐渐上升，理论上只要形成密集的铜线圈排布在配合上相应功率的功放板就会形成低音的优秀表现。

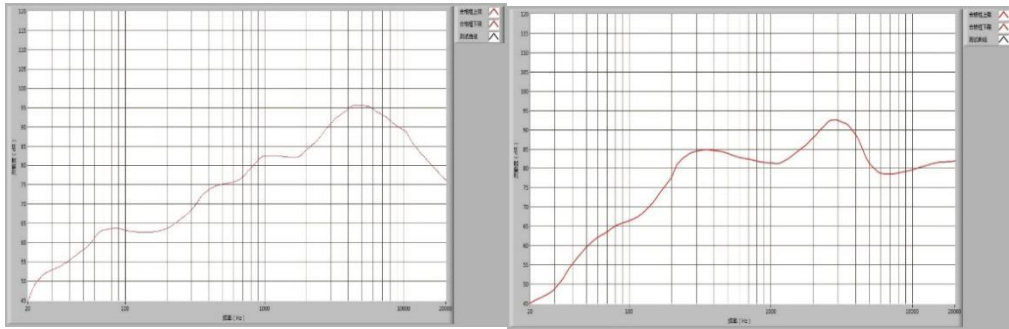
(2) 以下实验数据是通过改变导线之间的距离，实现圈数的改变来判断圆形回路的薄膜扬声器频响曲线的效果，测试在 3v 灵敏度选取频响区间最为稳定的 800Hz, 1000 Hz, 1250 Hz 的平均值。失真率为 1000Hz 处总谐波失真。

表 2 不同尺寸的方形回路测试结果

编号	尺寸/cm <sup>2</sup>	失真率	圈数	灵敏度	音质特点
圆形#1	8*8	1.2%	5 圈	80dB	声压集中在中频以及中高频，在高频后半段明显下降

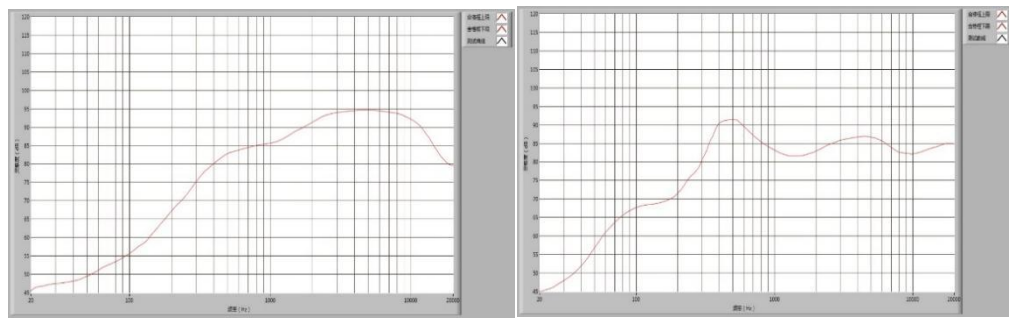
圆形#2	8*8	0.9%	15 圈	82dB	中频的声压较稳定，中高频表现能力交强
圆形#3	8*8	0.7%	20 圈	86dB	音域主要往中高频集中，最高可达 90dB
圆形#4	8*8	0.4%	25 圈	85dB	音域集中在中频灵敏度表现提升，中高频下降，频响曲线在高频也有所衍生
圆形#5	8*8	0.4%	30 圈	87dB	1000hz 上下频响突破 90dB,在其余音域表现也稳定
圆形#6	8*8	0.4%	40 圈	88dB	频响范围较长，高音部分稳定
圆形#7	8*8	0.4%	50 圈	86dB	频响范围较长，在高频区间有更好的衍生，

### 灵敏度



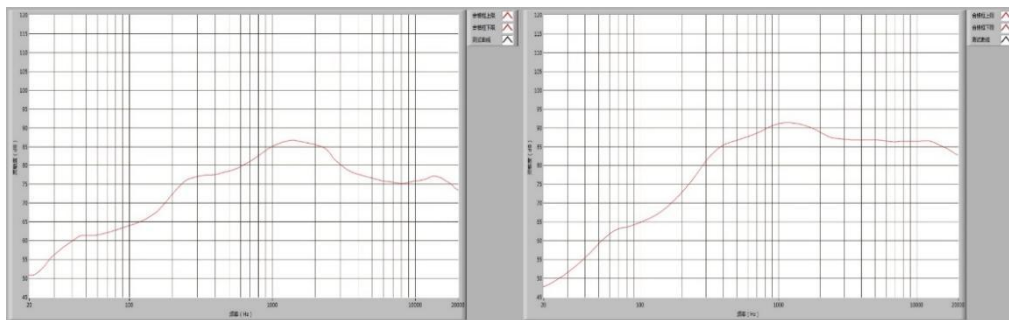
图表 15 圆#1

图表 16 圆#2



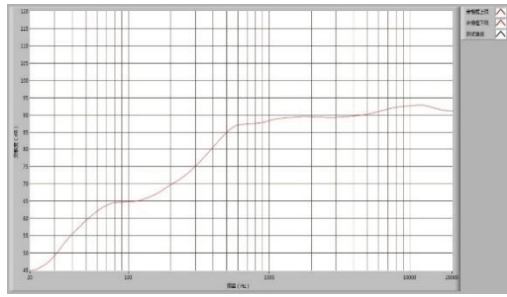
图表 17 圆#3

图表 18 圆#4



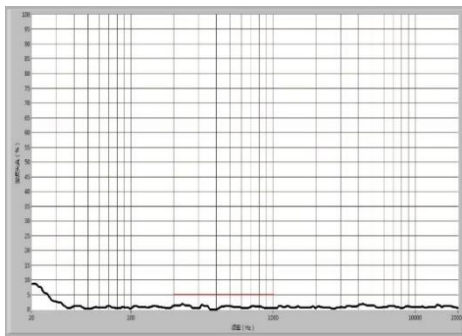
图表 19 圆#5

图表 20 圆#6

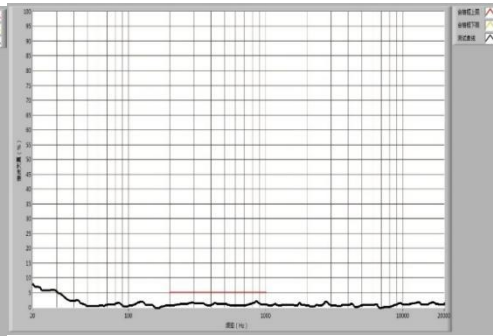


图表 21 圆#7

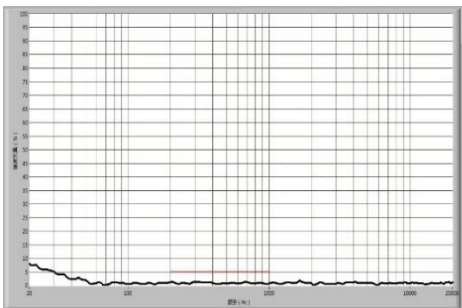
### 谐波失真



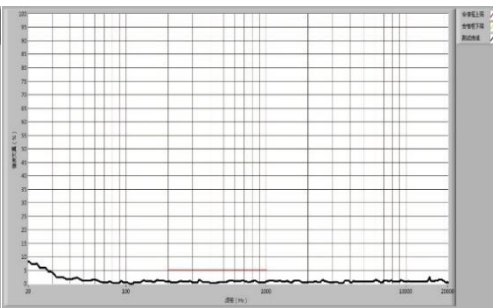
图表 22 圆#1



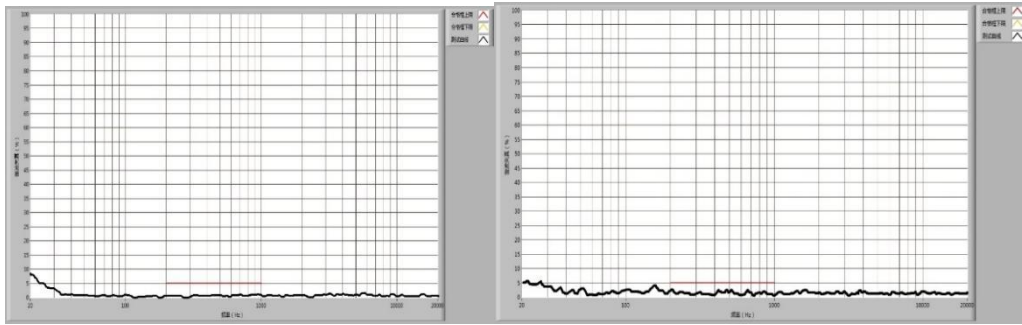
图表 23 圆#2



图表 24 圆#3

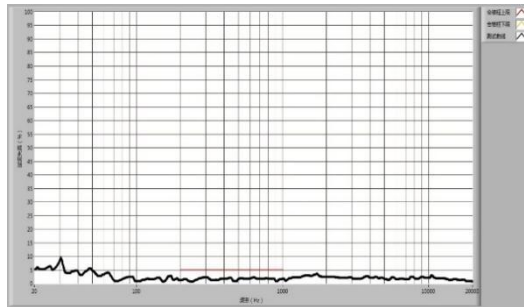


图表 25 圆#4



图表 26 圆#5

图表 27 圆#6



图表 28 圆#7

实验过程中统一控制扬声器阻值为 8 欧，测试磁铁放置扬声器距离为 2mm 时的声音灵敏度、谐波失真率与频响曲线在 5-50 圈数大小改变的比较。

- (1) 灵敏度在 40 圈时达到最大值，5 圈时为最小值。
- (2) 5-25 圈范围内谐波失真率随圈数增加而减小，并在 25 圈以后保持不变。
- (3) 随着圈数增加，频响曲线中音部分先趋于稳定，后逐渐上升。高音部分逐渐上升。

圆形回路与方形回路对比：

- (1) 与方形回路相比较，圆形回路失真率波动较小，失真率更低，降低了 0.8%。
- (2) 与方形回路相比较，圆形回路灵敏度分贝值更高，提高 10dB。
- (3) 方形回路音域集中于低频，而圆形回路中、高频音域分贝值更高，表现更出色。

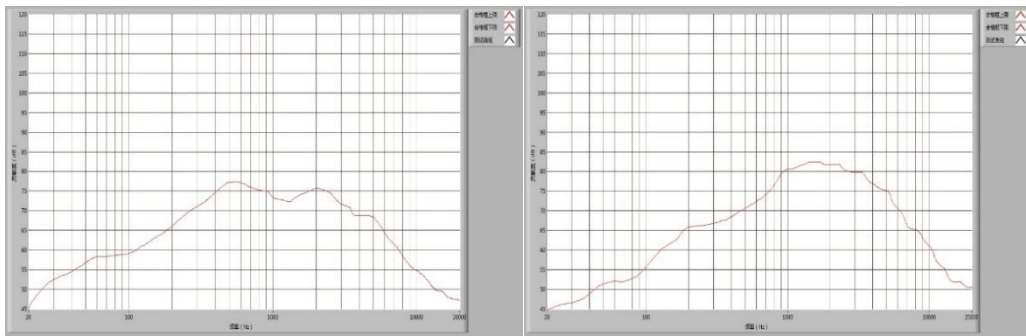
(3) 以下实验数据是利用 FPC 排线规律设计实现单面与双面回路的改变，测试在 3v 灵敏度选取频响区间最为稳定的 800Hz, 1000 Hz,1250 Hz 的平均值。失真率为 1000Hz 处总谐波失真。

表 3 不同尺寸的方形回路测试结果

编号	尺寸/cm <sup>2</sup>	谐波失真	圈数	灵敏度	音质特点
----	--------------------	------	----	-----	------

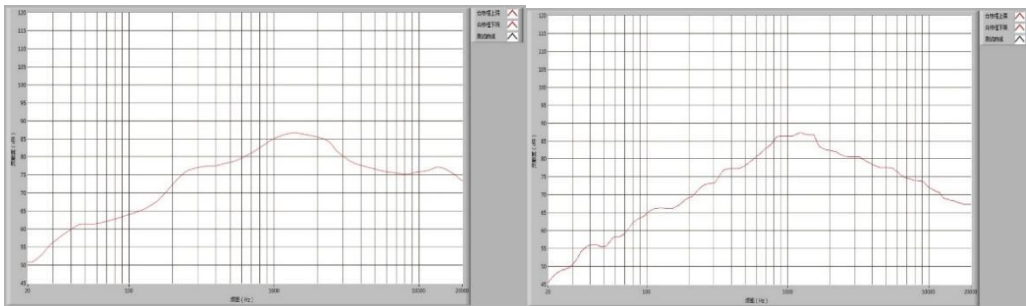
方形#5	8*8	1.9%	30 圈 (单)	75dB	低中频的声压较稳定, 中高频的声压较好
方形#8	8*8	0.8%	18 圈 (双)	79dB	中频表现更加突出, 灵敏度也有明显上升
圆形#5	8*8	0.4%	30 圈 (单)	87dB	1000hz 上下频响突破 90dB, 在其余音域表现也稳定
圆形#8	8*8	0.4%	17 圈 (双)	89dB	频响曲线在低音有更好的补偿, 中音表现更加优异, 高音有所下降

### 灵敏度



图表 29 方#5

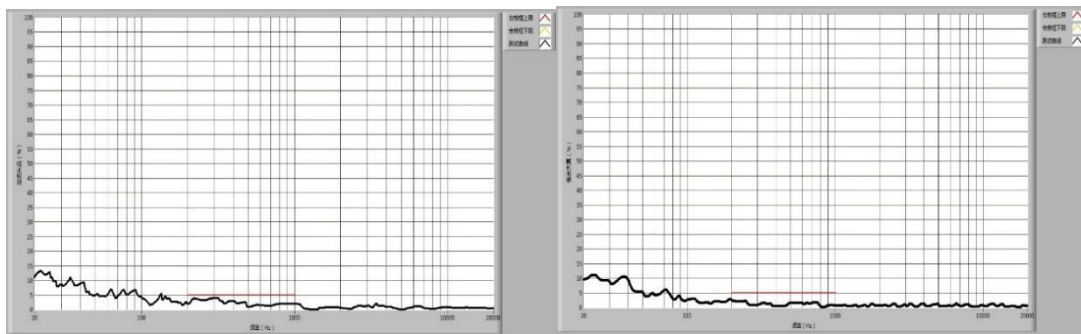
图表 30 方#8



图表 32 圆#5

图表 33 圆#8

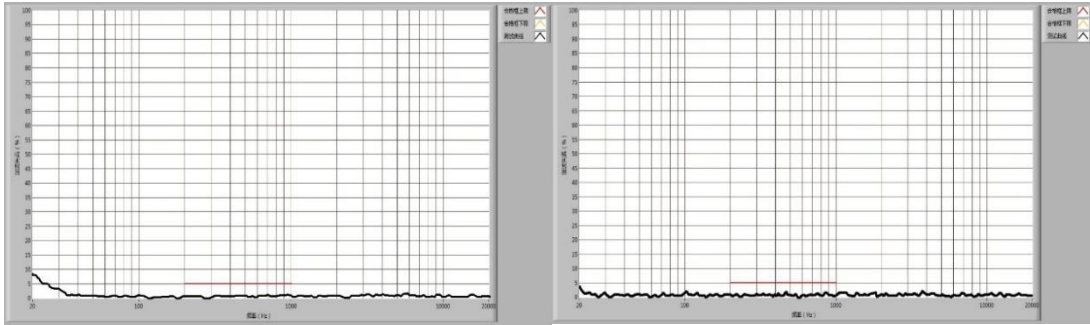
### 谐波失真



图表 34 方#5

图表 35 方#8





图表 36 圆#5

图表 3731 圆#8

- (1) 方形线圈双面回路谐波失真率低，声音灵敏度高。
- (2) 圆形线圈单双面回路谐波失真率相同，双面回路声音灵敏度更高。
- (3) 方形线圈与圆形线圈对比之下，圆形线圈单、双回路失真率均低于方形线圈；圆形线圈单、双回路声音灵敏度均高于方形线圈。

## 5. 系统误差分析

1. 由于实验过程中声音传播受空气介质影响，所以空气中声音传播存在损耗，因空气的粘滞性和热传导，在压缩，碰撞以及运动过程中，是一部分声能转化为热能而损耗，此外，声能与空气分子的振动能之间转化的之后也使声能被吸收（弛豫现象，当声波频率接近空气分子的振动固有频率时，能力交换愈多，声能吸收也愈多。在频率范围为 125~12500Hz，温度为 20 摄氏度时，可利用下式来计算上述介质总吸收所仪器声压级  $L_p$  的附加衰减量  $A_a$ ：

$r$ -测点距声源的距离=0.2m

$F$ -频率，Hz

$\phi$ -相对湿度（实验室经测试为 55%）

$$A_a = 7.4 \frac{f^2 r}{\phi} \times 10^{-8} \quad (\text{dB})$$

2. 上升的温度会对线圈进行加热，从而导致线圈内部阻抗改变，于是本实验将通电时间控制在 5s 中一次，每次实验将等至薄膜冷却至室温。

## 6. 实验总结

薄膜扬声器随着线圈圈数增多灵敏度呈现了先升高后降低的趋势，频响曲线在于中音趋向平稳，随着圈数增多单位面积扬声器质量增大，高音会进一步衰弱，灵敏度降低，但



是低音效果在逐渐上升，理论上只要形成密集的铜线圈排布在配合上相应功率的功放板就会形成低音的优秀表现。低圈数时低音市政明显，随着圈数增加，失真率减小。

圆形回路随着圈数上升，灵敏度也是先增加后减少，但减少幅度慢，主要音域不同于方形扬声器，集中于中高频，并且高频的频响衍生较长，主要原因分析是方形回路形成尖端放电使其高频率的电流无法实现较好的传输，无法实现高品质音质。并且圆形回路振动传输均匀，灵敏度较高，没有形成振动波抵消的现象。失真波动较小，1000Hz 的失真率基本在 1%以下。

双回路下的设计使得单位面积振动幅度比单回路大，推动空气更密集，使其频中频的表现力提升，低音层次也。并且更加有效的利用了磁路的磁性使其发声效果在人耳感官下更加舒适，并且一定程度上减轻了失真。单位面积的重量增加，降低低音大幅度振动时的失真。

## 7. 项目创新和特色

我们的薄膜扬声器采用以下三项先进技术，达成了轻薄、柔性、高音质的特点：

在选材上，我们选择了单晶铜和聚酰亚胺作为基底材料，通过采用柔性材料合成技术，将振膜和音圈合理配比，使其实现到 2 万次以上并无破损，并且能保证音质依旧能达到国际标准，扩展音频下线。并针对不同产品进行配比设计。

在设计上，团队设计的薄膜扬声器，选用 Altium Designer 软件将阿基米德螺旋线圈与产品的封装设计相结合，利用 FPC 轻薄弯曲性好，具有较强弹性等特点突破传统扬声器固化结构，采用了双面发声结构使发声更加全面，通过改变线距比和圈数来控制感抗和各类声学数值，扩展应用领域：智能家居，运动时尚，文娱传媒，消费电子，智能交通，办公教育等领域。通过 Altium Designer 将单晶铜设计为阿基米德螺旋圈使磁通线能更顺畅在音圈中通过，让音圈能更加彻底的切割磁通线，螺旋圈设计还能使薄膜呈多点波浪式震动，使扬声器获得更好的指向性；在线端口设置通孔链接上下两层电路，实现上下两层同时放声，在线圈中心还设置了通孔连接上下层，还能在线圈中心起到散热作用，延长了使用寿命。团队设计的薄膜可以根据不同频率的需求设计成不同圈数，可制备不同频率范围的发生器件。

最后，采用半导体先进封装工艺完成产品的封装，提升粘结度，压缩体积 90%以上，厚度控制在 12 $\mu$ m-100 $\mu$ m（低于 12 $\mu$ m 易形成褶皱，高于 100 $\mu$ m 无法推动薄膜振动），实现轻薄化；一体化结构，实现声波传递 0 误差，使产品达到轻薄的特点。

薄膜突破传统音响喇叭的结构设计，采用新型半导体封装技术，达到轻便易携带，同时还能发出高音质的效果。我们产品由于 12 化 1 的结构简化设计压缩了传统扬声器 99% 的体积，喇叭厚度在  $12\mu\text{m}$  到  $100\mu\text{m}$  之间，通过 FCD 回路设计技术设计的薄膜扬声器方便改变回路形状、线圈圈数等变量，简便了后期实验。指导老师提供了封装思路，薄膜扬声器的设计布图由学生设计完成。

基于未来推广，该扬声器同时也提供轻薄，柔性发声的解决方案，可以制作成柔性轻薄桌面音箱，提供创意性以及设计性。也可以为轻薄 的手机扬声器与电脑等消费电子领域提供高品质音质的解决方案。也可与中端音箱结合在保证功能性与音质不变前提下，实现轻量化。在未来，基于填补柔性发声空白这一特点可与各类弯曲产品实现柔性结合，比如投影仪幕布与窗帘等，为未来带来更多的柔性可能。

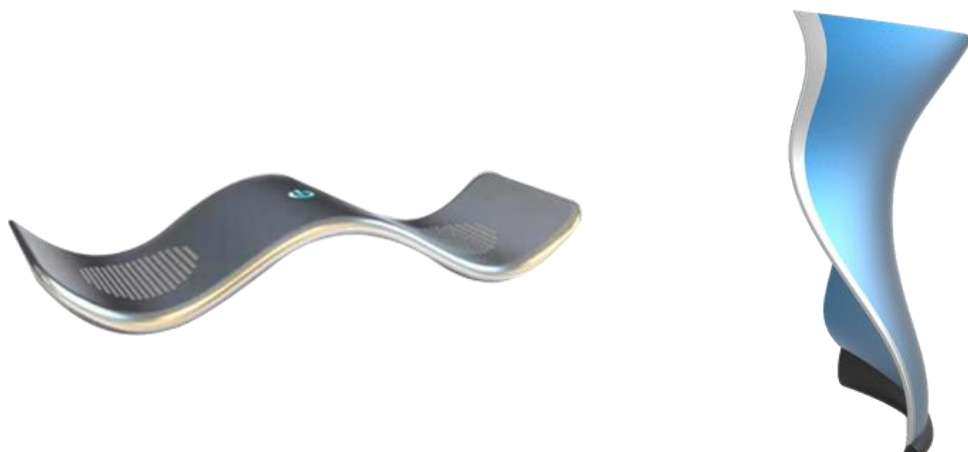


图 7-1 柔性桌面音箱

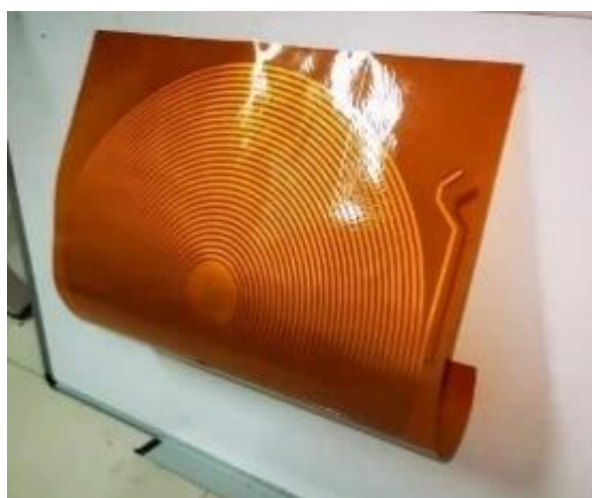


图 7-2 柔性投影屏扬声器

# 分布式智能燃气泄漏监测系统

参赛者：李秋晓，张苑，黄斌，杨泽，何依婷

（嘉兴学院信息科学与工程学院，嘉兴 314001）

指导老师：朱荷蕾，戈迪

**摘要：**随着城市化的高速进程，城市发展过快的弊端逐渐凸显出来：管道老化引起的煤气泄漏进而引发的爆炸就是典型案例。本项目立足于室内、密闭管道的场景，设计了一套可分布式放置的智能燃气泄漏监测仪系统。该智能燃气泄漏监测仪能实时检测密闭空间燃气等易燃易爆气体的浓度，当检测到浓度超过一定阈值时，将通过无线通信模块向上位机软件发送报警；在上位机端可查看到报警的燃气泄漏检测仪的编号和位置，从而快速精准的做出应急措施，避免燃气继续积累或者泄漏到空气中引发安全事故。本项目初步解决了现有市场上燃气泄漏监测仪只能单个独立放置且仅靠蜂鸣器报警从而只能针对家庭厨房的局限。本项目在成本尽可能低的情况下，消除了因燃气管道老化而带来的安全隐患，为城市化进程、数字化发展打好了坚实的生命财产安全基础。

**关键字：**智能监测；分布式；燃气泄漏监测；安全报警系统

## 1 研究背景

近年来随着城市化的高速进程，城市发展过快带来的隐患逐渐突显出来，其中燃气爆炸事故近年来屡次发生：2020年6月5日四川南充某小区发生天然气爆炸事故造成3人死亡，2人受轻伤，直接经济损失270余万元；2021年6月13日湖北省十堰市某小区发生天然气爆炸事故造成25人死亡、138人受伤，经济损失无数。为解决室内、密闭管道燃气发生泄漏而带来的安全隐患，现在亟需一款产品能实时检测密闭空间燃气等易燃易爆气体并在持续检测到气体浓度过高的情况下向上位机软件发送报警。

现有市场上的燃气泄漏监测仪器功能较少，针对环境场所单一。其大都仅由一个燃气浓度检测传感器和蜂鸣器构成，当传感器检测到燃气浓度升高时便发出警报，随后蜂鸣器发出警报。但是在地下管道，或者嘈杂的公共场所蜂鸣器的报警效果较差难以起到足够的预警作用，以上的情况就决定了其仅仅能用于家庭厨房等单一简单场景。在地下燃气管道，或者室内燃气管道存在的燃气泄漏从而引起的安全问题依旧存在。

本项目设计了一款智能燃气泄漏检测系统，该系统包含燃气监测模块和数据服务器。燃气监测模块主要有由天然气传感器模块、无线信号发射模块与排气扇和单片机控制板组成。单片机控制芯片启动传感器模块，按照一定的间隔时间采集空气中燃气的浓度值，通过串行通讯接口发送到控制板上单片机中，单片机对数据进行降噪、解码处理，并在编码后通过无线信号发射模块上传到数据服务器。数据服务器可以是单台电脑也可以是云服务器。数据通过无线路由器上传后，数据服务器对每一条记录数据进行校验并存储到数据库中，电脑端软件上位机中可以实现实时显示各个分布式燃气泄漏检测仪周围空间燃气浓度，同时利用手机端 APP 也可远程查看相关信息。当天然气传感器检测到某处燃气浓度升高之后，天然气传感器输出的模拟量也随之增高，通过个 AD 信号转换器将报警信号数据传递给单片机，单片机接收信号并发出指令，并通过无线信号发射模块上传到电脑端并立刻发出警报。根据电脑上位机端可以查看到发出警报的燃气泄漏检测仪位置从而实施紧急措施。

通过本项目的实施能够研发出一套燃气泄漏检测仪系统，解决现有地下燃气管道、室内燃气管道老化从而引起的诸多安全隐患问题，适用于居家、地下燃气管道等局部区域场合下燃气浓度信息采集和预警，具有成本低、便携方便、信息采集全面、易于快速安装布置的优点，能够消除燃气泄漏导致爆炸、火灾等事故的安全隐患，对于解决城市化进程中发展过快而显现出的安全问题具有重要的意义。

## 2 燃气泄漏监测工作的物理原理

### 2.1 吸附燃气原理

MQ-2 型烟雾传感器属于二氧化锡半导体气敏材料，属于表面离子式 N 型半导体。气敏传感器是在压电晶体表面涂覆层选择性吸附某气体的气敏薄膜，当该气敏薄膜与待测气体相互作用使得气敏薄膜的膜层质量和导电率发生变化时，引起压电晶体的声表面波频率发生漂移。气体浓度不同，膜层质量和导电率变化程度亦不同，即引起声表面波频率的变化也不同。通过测量声表面波频率的变化就可以准确的反应气体浓度的变化。

当处于二氧化锡被加热至 200~300 摄氏度时，二氧化锡吸附空气中氧气等具有负离子吸附倾向的氧化型气体，形成氧的负离子吸附，从而产生表面电势。同时其中的电子密度减少、半导体载流子减少，抑制了电子流动，从而使电阻增大。当二氧化锡表面暴露于可燃气体，如氢气、甲烷、一氧化碳中时，表面电势降低，电导率显著增加。同时若可燃气体的浓度增加，其电阻值的变化幅度也随之增加。

薄膜电阻率与给定的燃气浓度关系可用下述经验公式描述：

$$R_s = A[C]^{-\alpha} \quad (1)$$

式中， $R_s$ 为传感器的电阻值，对于给定的薄膜成分，A为特定常数；C为燃气的浓度， $\alpha$ 为燃气的 $R_s$ 曲线的特征斜率（如图1）。

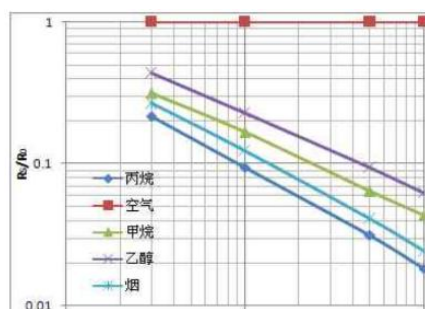


图1 传感器典型的灵敏度特性曲线

## 2.2 燃气浓度测量原理

### 2.2.1 惠斯通电桥

金属氧化物器件通过改变电阻率来表示存在可氧化气体，因此需要额外的电路来实现。典型的布置方法是将传感器作为惠斯通电桥的一个臂。惠斯通电桥电路是一种应用广泛，并且可以在传感器与信号调节器耦合之前有效实现比例测量技术(除法)和差分技术(减法)的电路。基本电桥电路如图2所示。阻抗Z可以是有功或无功的，即它可以是简单的电阻，也可以是电容或者电感，或者上述元件的组合。对于纯电阻，其阻抗是R;对于理想电容，阻抗等于 $1/2\pi fC$ ;对于电感，其阻抗则为 $2\pi fL$ 。f为通过桥臂的电流频率，至少一个桥臂是传感器。桥电路的输出电压值表示为

$$V_{out} = \left( \frac{Z_1}{Z_1+Z_2} - \frac{Z_3}{Z_3+Z_4} \right) V_{ref} \quad (2)$$

若满足以下条件，则电桥处于平衡状态

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad (3)$$

在平衡状态下，输出电压为0。如果电桥中至少有一个阻抗的值发生变化，那么电桥就会失去平衡，输出电压或正或负，这要取决于阻抗变化的方向。所以，可通过观察电桥电路的电势下降引起的不平衡来检测电阻的变化。带有一个线性并联电阻的NTC热敏电阻被用来根据传感器的温度来调整电桥的平衡点。

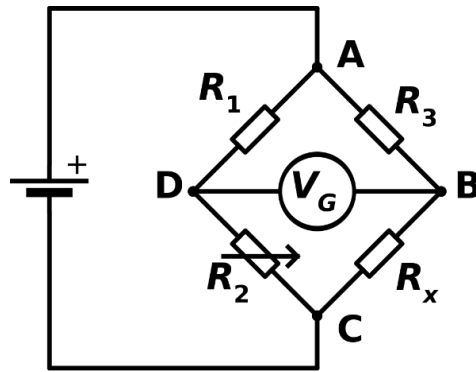


图2 惠斯通电桥

MQ-2 型烟雾传感器属于二氧化锡半导体气敏材料，属于表面离子式 N 型半导体。处于 200~300 摄氏度时，二氧化锡表面吸附空气中的氧，形成氧的负离子吸附，使半导体中的电子密度减少，从而使其电阻值增加。当与烟雾接触时，如果晶粒间界处的势垒受到烟雾的调至面变化，就会引起表面导电率的变化。利用这一点就可以获得这种烟雾存在的信息烟雾浓度越大导电率越大，输出电阻越低，则输出的模拟信号就越大。

### 2.2.2 阻值与浓度的计算

阻值  $R$  与空气被测气体的浓度  $C$  的计算关系式：

$$\log R = m \log C + n \quad (m, n \text{ 均为常数}) \quad (4)$$

（常数  $n$ ：与气体检测灵敏度有关，除了随传感器材料和气体种类不同而变化外，还会由于测量温度和激活剂的不同而发生大幅度的变化。常数  $m$ ：表示随气体浓度而变数的传感器的灵敏度（也称之为气体分离率））

### 2.2.3 模拟输出电压的计算

根据 MQ-2 的电路工作原理（如图 3）：其电导率随着气体浓度的增大而增大，其电阻是电导率的数，所以电阻是随之减小的。滑动变阻器

$$U = \left( \frac{R_{11}}{R_{11} + R_s} \right) V_c \quad (5)$$

$V_c$  为回路电压即电源电压，其加在 MQ-2 传感器的 1 脚、3 脚之间。 $U$  是传感器 4 脚、6 脚输出的电压， $R_s$  为传感器的体电阻。其中若气体浓度上升，必导致  $R_s$  下降。而  $R_s$  的下降则会导致，MQ-2 的 4 脚、6 脚对地输出的电压增大。所以气体浓度增大，其输出的电压也会

增大。

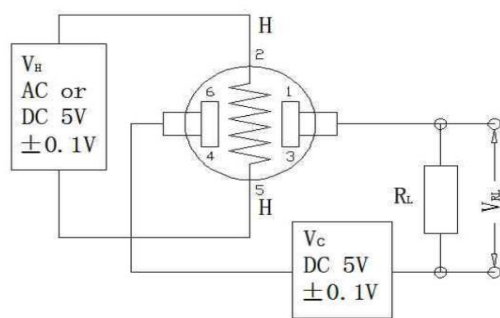


图3 MQ-2 传感器电路图

### 3 技术分析

#### 3.1 燃气检测

本项目自主设计的智能燃气泄漏检测仪外观模型如图 5 所示，智能燃气泄漏检测仪主要由天然气传感器模块、无线信号发射模块、排气扇和单片机控制板组成。内部居中的天然气传感器为 MQ-2 气体传感器，MQ-2 气体传感器是一种对液化气、甲烷、氢气、一氧化碳等可燃气体具有高灵敏性的气体传感器，该传感器能对的气体能对天然气等易燃易爆气体作出迅速反应，是一款适合多种应用的低成本气体传感器。无线信号发射模块型号采用蜂鸟远-T2L 模块，蜂鸟远-T2L 是一款小体积、大功率的 ASK/OOK 低电压发射模块。该模块采用高性能 RF 集成芯片，内置谐波抑制电路，具有超小体积、低功耗、宽电压范围、高稳定性、高性价比等特点。无线信号接收模块型号为蜂鸟远-R1，远-R1 是一款具有的 ASK 超外差接收模块，模块采用高性能 RF 集成芯片，内部集成了射频放大器、中频放大器、滤波器、解调器等功能模块。本项目通过蜂鸟远-R1 串口输出功能，采用 UART 接口通信方式与燃气监测信息系统对接。每一个智能燃气泄漏检测仪的单片机控制模块都集成了无线信号发射模块，同时在其周围的燃气监测环境中对应放置多个无线信号发射模块，以提高信号接收效率和准确性。



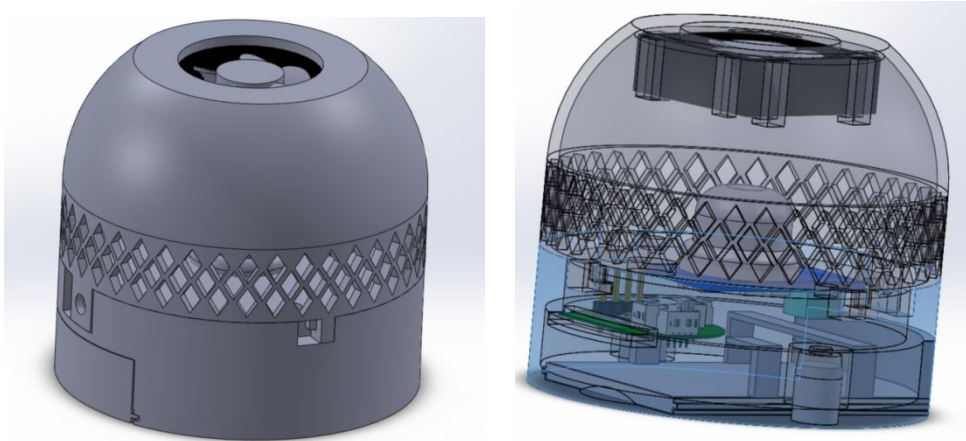


图5 智能燃气检测仪设计模型

整个系统框架示意图如图6所示。系统上电开始工作后，天然气传感器按照一定的时间间隔采集燃气浓度数据，并通过不同接口发送到STC单片机控制板，通过单片机上无线信号发射模块可以利用无线路由器将数据实时发送到服务器端，服务器端既可使用局域网内普通桌面级PC，也可以采用远端云服务器。最后服务器端的燃气数据与预警信息通过手机APP或者PC端的上位机软件显示出来。

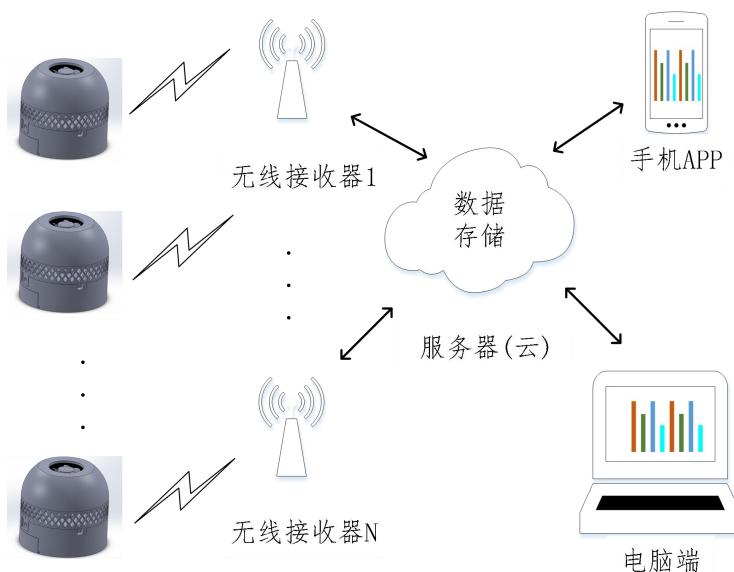


图6 智能燃气泄漏检测仪系统框架示意图

燃气检测过程如图7所示，整个检测过程主要分为开机上电、启动天然气传感器模块、数据处理发送、数据显示。系统上电后按下电源开关按钮，天然气传感器电源接通并启动，天然气传感器通过其通信接口与STC控制板中MCU进行串口通信，数据在MCU中滤波处理后，通过无线信号发射模块和无线接受器模块发送到服务器中存储，最后通过上位机可视化界面显示出来（如图8）。

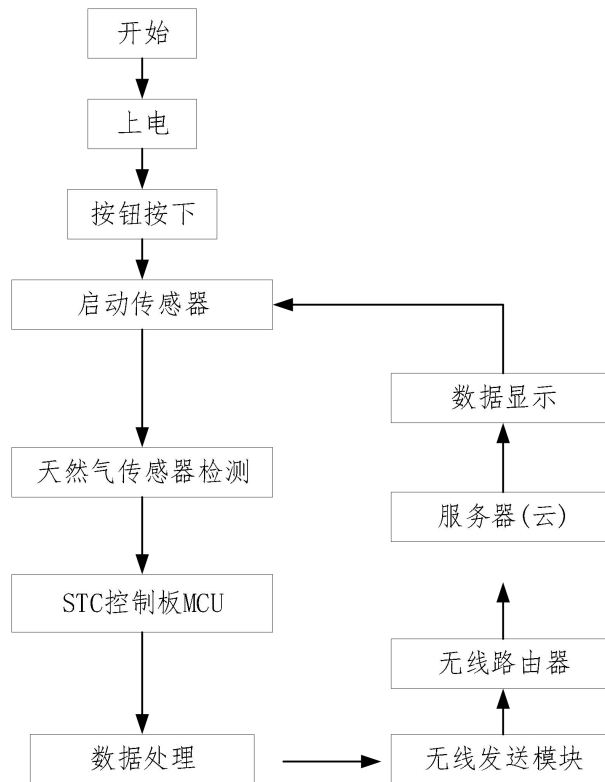


图7 智能燃气泄漏检测仪监测过程流程图

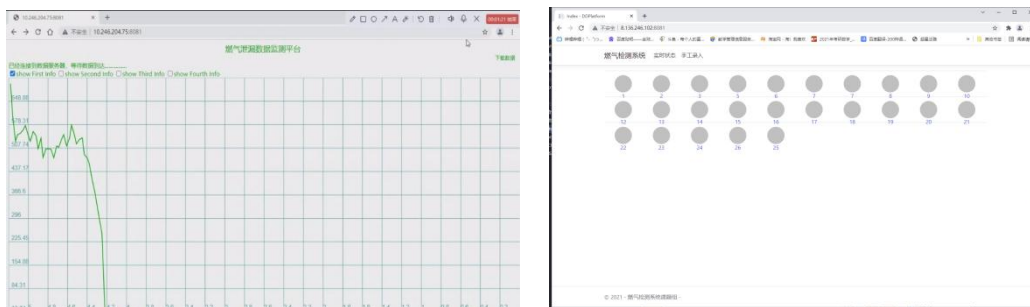


图8 智能燃气泄漏检测仪上位机显示界面

#### 4 应用前景

通过本项目的实施能够研发出一套燃气泄漏监测仪系统，解决现有地下燃气管道、室内燃气管道老化从而引起的诸多安全隐患问题，适用于居家、地下燃气管道等局部区域场合下燃气浓度信息采集和预警。在居家环境下可直接使用单个燃气泄漏监测仪，无论使用者是否在家一旦燃气泄漏仪检测到燃气浓度升高都会向其对应的手机 APP 发出警报。在车站、商场、菜市场、医院、办公大楼等复杂场所，本燃气泄漏监测仪可采用多个监测仪分布式放置的方式，每个位置的监测仪在上位机端都有其编号与位置信息，当其中一个监测仪检测到燃气浓度升高发出警报时，可通过上位机端直接查看该监测仪的编号以及所在区域，从而相关人员能迅速作出反应并且精准定位，避免燃气爆炸或者火灾的发生。具有成

本低、便携方便、信息采集全面、易于快速安装布置的优点，能够消除燃气泄漏导致爆炸、火灾等事故的安全隐患，对于解决城市化进程中发展过快而显现出的安全问题具有重要的意义。

## 5 创新特点

本项目所设计的分布式燃气泄漏检测仪系统，其创新之处体现在：

1) 实现了密闭环境中燃气的监测与报警的自动化、智能化、高效化。将半导体电导检测技术与无线传感技术相融合，解决了密闭场景下燃气泄漏带来的安全隐患。

2) 实现了密闭环境燃气浓度识别的精准化、快速化。通过四周镂空，顶部开孔的巧妙外形结构设计，在顶部风扇的驱动下，能大大加快空间内的气体与仪器内置传感器的交互效率。当密闭空间内燃气浓度升高的时候，能够在最短时时间内作发出警报，给予工作人员充足应对的时间。

3) 可分布式放置。基于硬件系统的结构分析与优化设计，有效简化和降低了系统的整体结构及设计复杂度，整体系统具有可分布式放置、成本低廉和易于安装升级等优点，有利于实际推广和应用。

## 参考文献

- [1] 丑晨. stc89c51 单片机的厨房燃气泄露检测报警系统设计与实现[J]. 电子测试(7).
- [2] 邓忠惠. 基于 Arduino 家居安防报警系统的设计[J]. 科技风, 2020, No. 422(18):14-15.
- [3] 廖俊学. 基于单片机的无线燃气泄漏报警装置[J]. 电子制作 (2018). 电脑迷, 2018(12):181.
- [4] 邵欣等. 基于物联网的焦炉燃气检测数采系统的设计与实现[J]. 工业安全与环保 44.08(2018):35-38.
- [5] 李帮军. 气敏传感器实验与 MQ 系列气敏元件特性研究[J]. 中国市场 000.014(2006):70.
- [6] 苗壮. 物联网视角下的焦炉燃气检测数据采集系统设计研究[J]. 工业加热 048.004(2019):61-64.
- [7] 岑涌等. 检测仪器数据采集系统设计与实现[J]. 工业控制计算机 31.009(2018):126-127, 130.
- [8] 王娟. 基于 nRF24L01 和单片机的无线燃气检测及报警系统[J]. 信息系统工程 000.002(2016):92-92.
- [9] 刘巧平等. 基于 STC89C52 单片机的燃气报警装置的设计.[J] 河南科学 36.008(2018):1188-1191.
- [10] 杨修国. 基于 MGS1100 传感器燃气报警系统设计[J]. 国外电子测量技术 07(2014):85-88.
- [11] 张群强, 赵巧妮. 基于 MQ-2 型传感器火灾报警系统的设计[J]. 价值工程 13(2015):96-98.
- [12] 赵华峰. 基于单片机的火灾报警系统的设计与实现[J]. 电脑知识与技术 11.025(2015):184-185.

# 基于智能体温检测仪的疫情群体轨迹监测系统

参赛者：应东淼，余红陆，周聪，靳泰荣，冯昕语

（嘉兴学院信息科学与工程学院，嘉兴 314001）

指导教师：戈迪，朱荷蕾

**摘要：**本项目设计了一套全新疫情群体轨迹监测系统，由智能体温仪和数据服务器等部分构成。上位机的 APP 通过 JAVA 的 ServerSocket 类实现对某一特定端口的监听。下位机（即智能体温仪）可以通过该端口与应用建立一个 TCP 连接，以约定好的报文形式传递数据。APP 接受到后，就对数据进行分析展现，并把它上传至云端数据库中。在 APP 中也可以多维地查询体温数据，如以 ID 为查找，以时间地点查找等。在路程预测方面，使用百度地图的 API 实现对某一被测人行走过的路线进行猜测。基于智能体温检测仪的多维度的数据特征提取，便可以追溯个人的温度、轨迹等信息，并可分析人群温度分布特征或进行异常警告、疫情预警、病毒传播建模等深层次应用。

**关键字：**体温检测；智能体温仪；红外检测；轨迹监测；数据分析

## 1 研究背景

2003 年 SARS 袭击中国之后，国家卫计委在全国层面为疾控管理打造了中国传染病疫情和突发公共卫生事件网络直报平台，对各类传染性疾病展开监测。此类传染病病例上报主要注重医院内部传染病确诊患者数据的上报，仍停留在“手工作业电子计算机化”的水平，因上报层级过多、对传染病危害判断无相同统一标准、非卫生防疫人员敏感度不高等原因，故对未知的传染病反应相对迟缓、滞后，确诊后对单个传染病患者的运动轨迹、传染范围、愈后等综合情况缺乏全方位的后续研究与管理。新型冠状病毒肺炎（COVID-19）已在全球累计感染超过五百万人，死亡超过 34 万人，目前国内疫情稍稍缓和受控。在抗击新型冠状病毒进入常态化的现在，“外防输入、内防反弹”的压力仍然较大，且以“封城”手段处理疫情与数字经济发展的要求有所冲突。经济发展与抗击疫情急需一种新的方法达到和谐共处的目的。

另一方面，人感染新冠病毒后最常见的症状是发热，体温测量既是筛查病情的主要手段，也是公共场所疫情防控的重要措施。但是目前的体温检测流程复杂，信息比较单一，各个检测点之间相对比较独立，不利于信息的跟踪和追溯。而且，现有的疫情回溯工作也

比较复杂，主要依靠人力，特别是社区工作人员的劳动量比较大，效率低下。

为解决现有体温检测设备存在问题，本作品以新冠病毒疫情防控等为应用背景，针对重点场所（学校、社区和医院等）疫情防控期间人员出入流程繁琐、安检人员劳动强度大和信息追踪难等问题，开发了一套以身份信息识别、人员定位、体温监测、活动轨迹监测等为主要内容的疫情群体轨迹监测系统，以实现发热疑似患者、确诊患者进行院内外连续跟踪、动态体温监管、活动轨迹追踪，医疗机构及疾控部门能够利用监测数据进行及时有效、松紧适度的管控。为疫情期间体温智能检测、多维数据采集分析，疫情预警与信息追溯等提供了一项切实可行的新技术，具有良好的实用价值和广泛的应用前景。

在数字经济规模日益壮大的今天，本项目也能很好地切合它的要求。本项目主要借助物联网、传感器、GPS、大数据等技术，依托于云数据库与云服务器，通过网络将用户的体温、位置、身份识别信息等多维信息进行过滤、处理再储存起来。对于这些处理过后的数据，可以快速、准确地进行分析并使用，如构造接触者网络，推算可能的运动路径。本项目将平常测过即弃的数据进行收集分析，在发生疫情时可以有效防控，避免巨大的经济损失，为生产生活提供了防护层面的保障。

## 2 物理原理

在本项目的实施过程当中，智能体温仪是一个比较重要的载体。那么，如何将人体散发的红外线辐射能量转换成体温信息？如何将体温信息转化成电信号？如何识别门禁卡或者身份信息呢？这里就用到了以下的物理原理：

### 2.1 斯特藩-玻尔兹曼定律

在自然界中，当物体的温度高于绝对零度时，由于它内部热运动的存在，就会不断地向四周辐射电磁波，其中就包含了波段位于  $0.75\sim 100\ \mu\text{m}$  的红外线。人体辐射峰值波长在  $9.2\sim 9.6\ \mu\text{m}$  之间。红外辐射的物理本质是热辐射。物体的温度越高，辐射出来的红外线越多，红外辐射的能量就越强。研究发现，太阳光谱的各种单色光的热效应从紫色光到红色光是逐渐增大的，而且最大的热效应出现在红外辐射的频率范围之内。

斯特藩-玻尔兹曼定律（Stefan-Boltzmann Law），又称斯特藩定律，是热力学中的一个著名定律，其内容为：一个黑体表面单位面积在单位时间内辐射出的总能量（称为物体的辐射度或能量通量密度）与黑体本身的热力学温度（又称绝对温度）的四次方成正比。基于斯特藩-玻尔兹曼定律的测温过程示意图如图 1 所示。

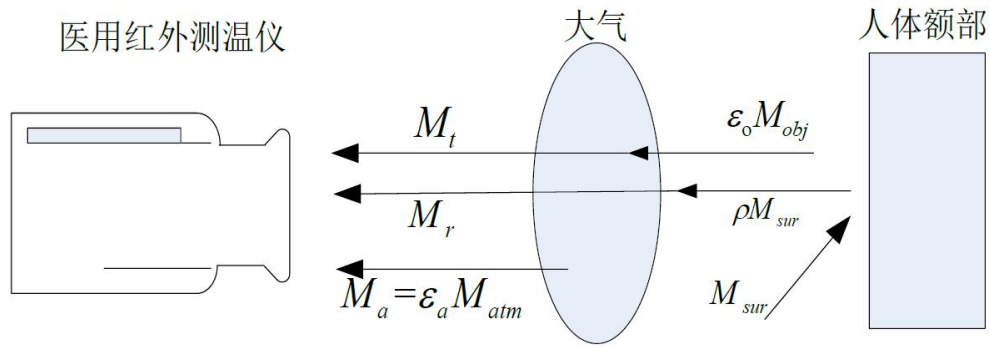


图1 体温检测原理示意图

红外测温接收到的总能量为:

$$M(\lambda, T) = M_t(\lambda, T) + M_r(\lambda, T) + M_a(\lambda, T) = \varepsilon_0 \tau M_{obj} + \tau \rho M_{sur} + \varepsilon_a M_{atm} \quad (1)$$

式(1)中,  $\varepsilon_0$ 是人体发射率,  $\varepsilon_a$ 是大气光谱的自身发射率,  $\rho$ 是人体反射率,  $\tau$ 是大气光谱透射率,  $M_{obj}$ 是理想状态下人体额部辐射能量,  $M_{sur}$ 是周围背景环境中存在的其他高温物体的辐射能量,  $M_{atm}$ 是大气自身理想状态下的辐射能量。 $M_t$ 是测温系统检测到的人体额部辐射能量, 与人体发射率和大气透射率有关;  $M_r$ 是测温系统检测到的人体额部反射周围环境物体的辐射能量, 其与人体反射率和大气透射率有关;  $M_a$ 是测温系统检测到的大气辐射能量, 与大气自身的发射率有关。

对于大气通常可认为 $\varepsilon_a = 1 - \tau$ , 则公式(1)可变为

$$M(\lambda, T) = \varepsilon_0 \tau M_{obj} + \tau(1 - \varepsilon_0) M_{sur} + (1 - \tau) M_{atm} \quad (2)$$

根据斯蒂芬-玻尔兹曼定律

$$M_o(\lambda, T) = \sigma T^4 \quad (3)$$

式(2)中,  $\sigma$ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数, 近似值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ 。由公式(2)和公式(3)得

$$\sigma T^4 = \sigma \varepsilon_0 \tau T_o^4 + \sigma \tau(1 - \varepsilon_0) T_u^4 + \sigma(1 - \tau) T_a^4 \quad (4)$$

式(4)中,  $T_o$ 是人体的实际温度,  $T$ 是红外测温系统测量得到的温度,  $T_u$ 是测量时背景的环境温度,  $T_a$ 是测量时背景的大气温度, 则人体温度可表示为

$$T_o = \left\{ \frac{1}{\varepsilon_0 \tau} [T^4 - \tau(1 - \varepsilon_0) T_u^4 - (1 - \tau) T_a^4] \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

## 2.2 第一热电效应

第一热电效应又称作塞贝克效应(Seebeck effect), 是指由于两种不同电导体或半导体的温度差异而引起两种物质间的电压差的热电现象(如图2所示)。塞贝克效应电势

差的计算公式为

$$E_{AB}(T) = \frac{kT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} = f(T) \quad (6)$$

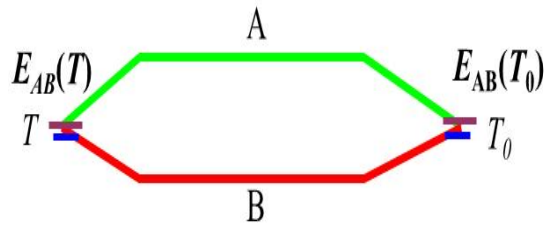


图2 塞贝克效应示意图

式(6)中,  $N_{AT}$  和  $N_{BT}$  分别为两种材料的塞贝克系数。如果它们不随温度的变化而变化, 上式即可表示成

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) = f(T) - f(T_0) \quad (7)$$

红外温度传感器利用辐射热效应, 使温度探测器在接收辐射能引起温度升高。由塞贝克效应可知, 温度探测器温度的升高将产生一定幅值的热电动势。

### 2.3 感应耦合原理

电力线路中流过电流时会产生交变磁场, 该磁场会在附近的电话线路上感应出一个电动势, 两者之间的耦合强度是和两个线路之间互阻抗的大小有关。一个回路接收到交变磁场后会在内部产生一个感应电流而产生一个特定频率的信号。

### 2.4 数据库索引技术

数据库索引是数据库查询优化的重要方法, 它的一个主要目的就是加快检索表中数据, 亦即能协助信息搜索者尽快地找到符合限制条件的记录 ID 的辅助数据结构。传统数据库索引技术根据数据存放的物理结构不同可分为聚集索引和非聚集索引[9], 聚簇索引是按照数据存放的物理位置为顺序的, 而非聚簇索引就不一样了; 聚簇索引能提高多行检索的速度, 而非聚簇索引对于单行的检索很快。在传统数据库索引技术中常用的索引数据结构主要有 ISAM 索引, HASH 索引, 和 B+树索引。表 1 列出了不同的索引技术与其应用的数据结构之间的关系。



索引技术	数据结构
二级索引	B+树
双层索引	b+树+BATON网 b+树+位图
多维索引	RD-tree RD-tree+CAN RD-tree 索引+虚拟节点
基于 Hadoop 的索引技术	HDFS

表 1 索引技术与其数据结构

## 2.5 B+树

B+树是一种树数据结构，通常用于数据库和操作系统的文件系统中。B+树的特点是能够保持数据稳定有序，其插入与修改拥有较稳定的对数时间复杂度。B+树元素自底向上插入，这与二叉树恰好相反。

B+树在节点访问时间远远超过节点内部访问时间的时候，比可作为替代的实现有着实在的优势。这通常在多数节点在次级存储比如硬盘中的时候出现。通过最大化在每个内部节点内的子节点的数目减少树的高度，平衡操作不经常发生，而且效率增加了。这种价值得以确立通常需要每个节点在次级存储中占据完整的磁盘块或近似的大小。

B+背后的想法是内部节点可以有在预定范围内的可变数目的子节点。因此，B+树不需要象其他自平衡二叉查找树那样经常的重新平衡。对于特定的实现在子节点数目上的低和高边界是固定的。

## 3 技术方案

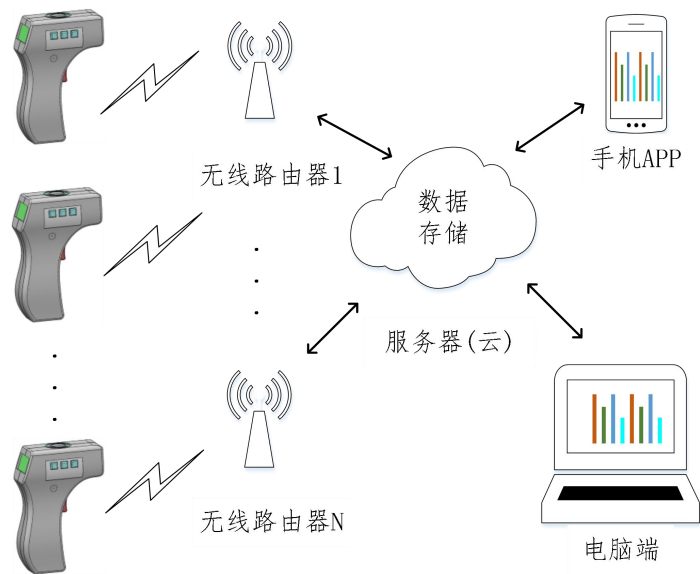


图 3 智能体温检测仪系统示意图

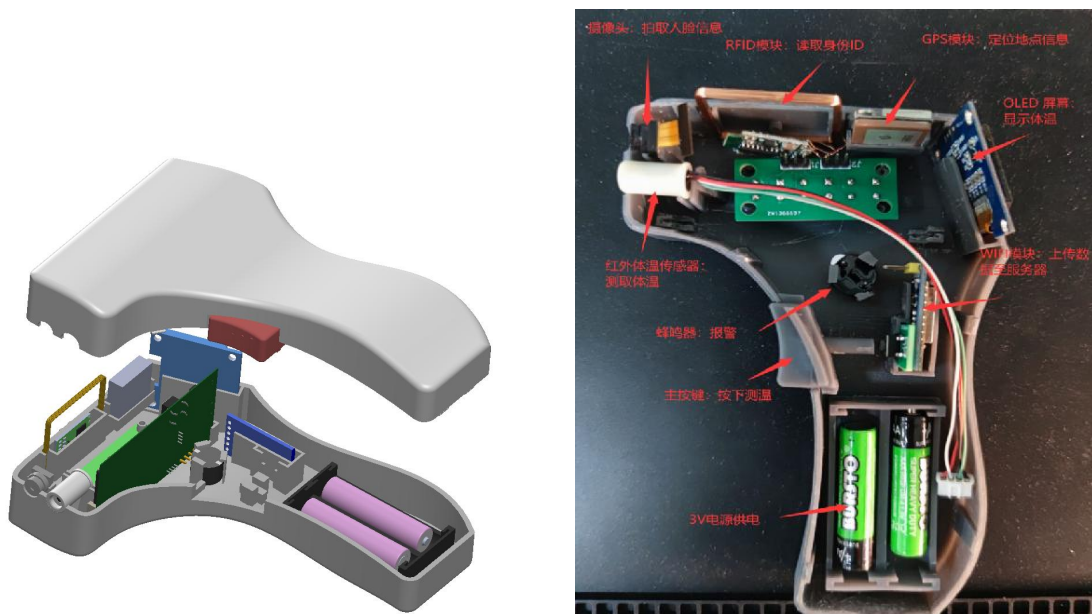


图 4 智能体温检测仪

本项目设计的疫情群体轨迹监测系统（如图 3 所示）以一种新型的智能体温检测仪为载体（如图 4 所示）。智能体温检测仪主要有温度传感器模块、RFID 模块、GPS 模块、摄像头模块、WIFI 模块、OLED 显示模块、电池模块、按钮模块和 ARM 控制板组成。扣动测温按钮后，各个传感器启动采集数据，并通过不同接口发送到 ARM 控制板，OLED 模块显示测量结果数值和系统状态，WIFI 模块可以利用无线路由器将数据实时发送到服务器端。智能体温检测仪的侧边有三个实体按钮，通过不同的按钮组合定义，可以设置相关参数和功能。WIFI 模块信号可以利用普通无线路由器接受，不需额外配置，因此可以做到智能体温检测

仪的快速便捷安装使用。服务器端既可使用局域网内普通桌面级 PC，也可以采用远端云服务器。

疫情群体监测系统检测过程如图 5 所示，整个检测过程主要分为开机上电、启动各个传感器模块、数据处理发送、数据显示。首先按钮按下后，各个传感器电源接通并启动，各个模块按照不同的通信接口与控制板中 ARM 处理器通信，数据在处理器中滤波处理后，通过 WiFi 模块和无线路由器发送到服务器中存储，并通过软件界面显示出来，轨迹监测功能如图 6 所示。

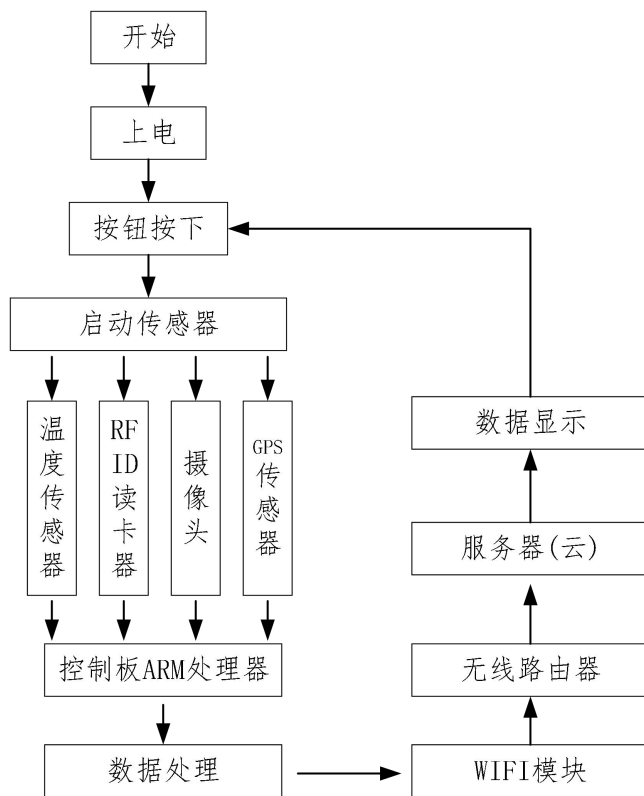


图 5 疫情群体监测系统检测过程流程图



图 6 APP 轨迹监测功能示意图

APP 主要包括四个界面（部分）。第一个界面显示 APP 接收并处理的数据；第二个界面提供多模态数据的查询；第三个部分负责打开手机的某个端口监听测温枪的连接；第四个界面实现对 APP 的信息显示和个性化操作。监听、处理和上传消息在 APP 后台执行，不会引起 UI 界面的卡顿。各功能如图 7 界面所示。



图 7 APP 四个功能界面

上位系统，即安卓软件，通过 java 的 java.net 类库，使用 ServerSocket 与 Socket 与下位机建立 TCP 连接，用于稳定快速的数据传输。同时，安卓软件也将收集到的数据通过 JDBC 的方式将数据上传到阿里云云数据库中，这样安卓软件就成为了硬件与云端沟通的中介，即如图 8 所示。

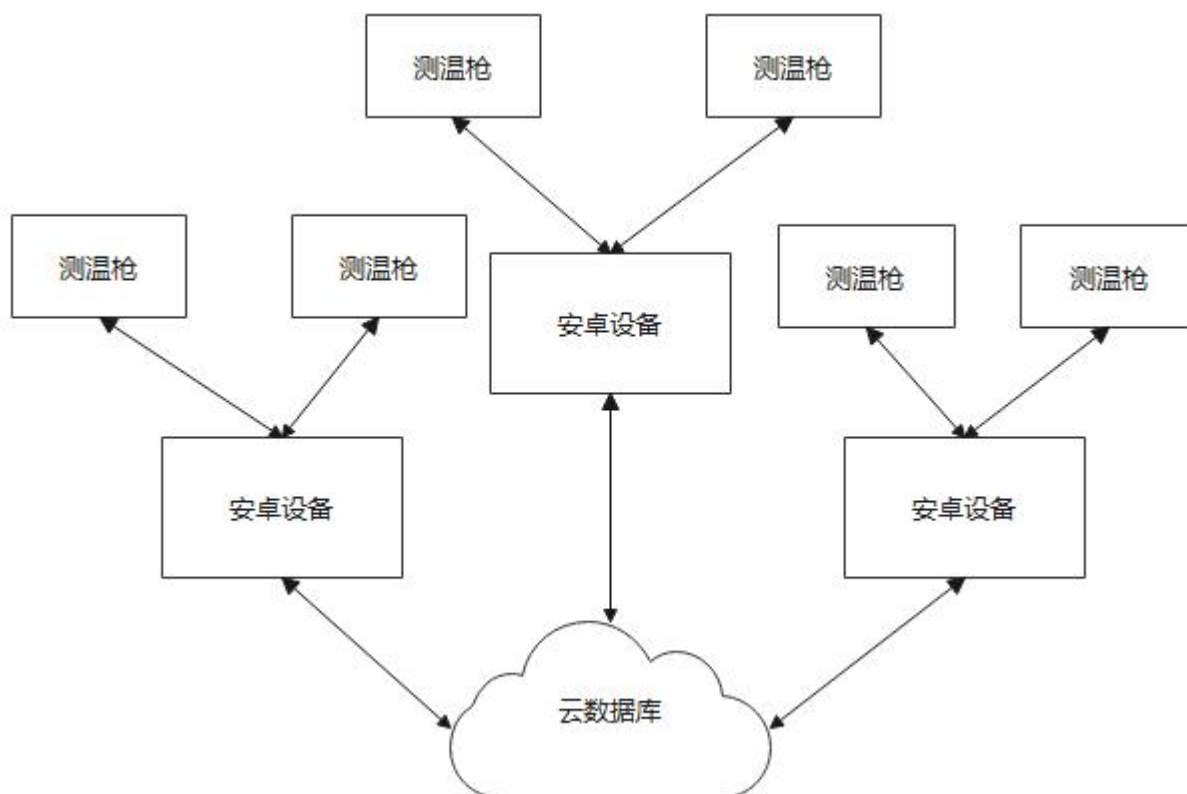


图 8 系统接入结构示意图

APP 采用百度地图的开源 API，实现了对地图的展现、定位等基本操作。在云数据库有足够多数据时，通过 ID 与日期进行筛查后得到一系列的坐标散点。再将坐标散点交付到服务器得到预测的路径轨迹以推测其真实路径。APP 再将其绘制到地图之上进行呈现。由于使

用离散的位置信息推测被测者实际的行走路线，所以本系统的表现与数据量大小正相关。如果广泛使用本系统，将常用的测温设备都替换成本系统的设备，那么就能对被测人群有接触情况建立一个很好的模型。所以，本系统的使用越广泛，收集的数据就越多，追踪路径也就越准确。

#### 4 创新特色

本项目以新冠病毒疫情防控为应用背景，为疫情期间体温智能检测、群体轨迹监测，疫情防控预警等提供一项切实可行的新技术。创新之处为：

1) **系统设计创新**。本系统采用软硬件相结合的设计，采用云数据库技术和大数据技术，实现了多维数据的采集、监测、追踪，有效突破了现有疫情监测设备的使用局限

2) **算法设计创新**。与大数据相结合，可以准确快速地计算出被测者的路径轨迹。利用距离分配权重，可快速、细致地划分中高低风险地区，在一定程度上降低对居民的工作生活的限制。快速查询感染者和密切接触者的行程轨迹，并筛查出相关接触者，进一步利用大数据分析方法对数据进行特征提取，可实现所辖区域的疫情预警、追溯和预测。

#### 5 应用前景

快速定位感染者所去过的地点，和筛选相关密切接触者是预防疫情再次爆发的重要措施。现有的防疫措施，在面临筛查与感染者有密切接触的人员时，具有一些局限性，感染者的行程轨迹的不确定性，接触人员存在瞒报等情况，全部排查的工作流程繁琐且强度较大。

“基于智能体温检测仪的疫情群体轨迹监测系统”，集体温智能检测、多维数据采集分析、群体轨迹监测与信息追溯等多项功能于一体，并采用大数据分析方法实现辖区内的人员轨迹监测、疫情防控预警。在新冠病毒疫情防控等背景下，项目的推广应用有助于实现疫情期间重点场所人员出入的自动化与智能化监管，降低安检人员的劳动强度，为疫情期间感染者的轨迹监测和密切接触者的的人员排查、疫情预警与信息追溯等提供一项切实可行的新技术。广泛采用本系统，就能够广泛采集集体温位置信息，构筑网络，实用价值高、应用前景广。

本系统已经在集市学校等人流密集场所投入了应用，并且取得了不错的效果。

## 参考文献

- [1] 郝彦琴. 体温计外壳双色成型复合抽芯机构三板模具设计[J]. 中国塑料, 2020, 34(03):85-92.
- [2] 奚肖玲, 俞旭东, 胡肖聪. 新型红外线额面测温仪的设计与研制[J]. 中国医学装备, 2020, 17(01):172-173.
- [3] 郁婷婷, 陈奇, 陈广阔. 自动调温带语音提示体温计检测架的设计及应用[J]. 中华卫生应急电子杂志, 2019, 5(06):378-379.
- [4] 张钊. 基于多用户移动节点的体温监护系统的设计与实现[D]. 西南交通大学, 2019.
- [5] 魏群, 吕丹. 无线高准确度基础体温计的设计与实现[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(01):14-17.
- [6] 景阳春. 一种低功耗的便携式体温计设计[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2018, 34(12):113-115.
- [7] 魏群, 吕丹. 无线高准确度基础体温计的硬件设计与实现[J]. 质量技术监督研究, 2018(05):24-28.
- [8] 钱琳琳, 刘婷. 基于 Android 系统的人体智能体温计设计与研究[J]. 中国医疗设备, 2018, 33(10):96-99.
- [9] 陈洪金, 邹鹏飞, 宋宪磊. 一种新型可穿戴式体温计设计[J]. 物联网技术, 2018, 8(09):111-113.
- [10] 陈杰. 基于 BLE 的可穿戴电子体温计的系统设计[D]. 上海交通大学, 2018.
- [11] 胡良文. 基于温度传感器阵列和深度学习的体温实时监测系统[D]. 西南交通大学, 2018.
- [12] 严琳. 一种非接触式红外体温计的设计[J]. 电子世界, 2018(03):198-199.
- [13] 苑冬梅, 杨坤, 张妍妍, 李宝杰. 基于 NTC 的体温测量系统设计[J]. 中国医疗设备, 2017, 32(11):98-103.
- [14] 顾志娥, 沈志梅, 胡娅莉, 王敏, 王丽佳. 轻便式体温计收发装置的设计与应用[J]. 现代临床护理, 2017, 16(08):82-84.
- [15] 符丙虹, 赵丽芬, 蒋祖军. 基于单片机的非接触式体温计设计[J]. 福建电脑, 2017, 33(07):22-23.
- [16] 丁岩. 红外体温测量管理系统的设计[D]. 内蒙古大学, 2017.
- [17] 杨勇, 杨超, 罗志尧, 高川. 一种超低功耗数字体温计的设计[J]. 数字技术与应用, 2017(04):162-163.
- [18] 张菁. 基于单片机的红外体温计设计[J]. 数字技术与应用, 2017(03):171-172.
- [19] 母凤雯. 数据库索引技术概述[A]. 电脑知识与技术, 2017.

# 脉搏血氧饱和度智能检测装置

参赛者：徐奕鸿，潘涛，何超鑫，钟依萍，李瑾慧，冯佳运

指导教师：杨国伟，周雪芳

**摘要：**针对目前人们对血氧饱和度监测的需求，本小组采用 esp32 芯片，MAX30102 血氧检测传感器，设计了基于光电容积脉搏波描记法（photoplethysmographic）信号的无创血氧饱和度测量终端。先分析了脉搏式血氧饱和度测量原理，后基于反射式测量原理进行了测量终端的方案设计：具体包括硬件和软件设计，最后设计了脉搏血氧仪微信小程序，在后台完成数据分析、计算、存储和传输，在终端实时显示血氧饱和度、心率。该装置在无创实时监测的基础上额外增加了报警功能，可以在测量数据异常时发送警报给使用者，更为人性化。对比测试表明：本装置的测量结果误差在 0.4% 以下，具有较高的准确性和推广性。

**关键字：**血氧饱和度；PPG；脉搏式血氧饱和度；esp32；微信小程序

## 1 研究背景

### 1.1 血氧饱和度的生理学意义及测量意义

#### 1.1.1 血氧饱和度的生理学意义

血氧饱和度是血液中氧合血红蛋白容量占全部可结合的血红蛋白容量的百分比，即血液中血氧的浓度。正常人体动脉血的血氧饱和度为 98% 左右。血氧饱和度较低，会引起一系列机体缺氧状况，血氧饱和度低于 95% 为轻度缺氧，会造成，头晕，心慌，心跳加快等状况。严重或长期缺氧，导致心肌衰竭、血压下降、血循环衰竭；缺氧直接损害大脑皮层，造成脑组织的变性和坏死。血氧饱和度低于 80% 即为低氧，对中枢神经系统，肝、肾功能有很大影响。心肌对缺氧十分敏感，急性心肌缺氧，可出现心室颤动以至心跳骤停。

低氧时首先出现的是代偿性心率加速，心搏及心排血量增加，循环系统以高动力状态代偿氧含量的不足。同时产生血流再分配，脑及冠状血管选择性扩张以保障足够的血供。但在严重的低氧状况时，由于心内膜下乳酸堆积，ATP 合成降低，产生心肌抑制，导致心动过缓，期前收缩，血压下降与心排血量降低，以及出现室颤等心率失常乃至停搏。



**血氧饱和度是反映呼吸、循环功能的一个重要生理参数，是衡量人体血液携带氧的能力指标。**因此开展动脉血氧浓度的实时监测在临床救护中非常重要<sup>[1]</sup>，脉搏血氧仪可有效地预防危险发生，如果出现缺氧状况，第一时间做出补氧措施，降低心脑血管疾病发作可能。

### 1.1.2 检测血氧饱和度的意义

氧是生命活动的基础，人体代谢过程的每一步都需要氧来配合完成。缺氧是导致许多疾病的根源，严重时直接威胁到人的生命。许多疾病都会造成氧供给的缺乏，因此，对动脉血氧饱和度的实时监测在临床和个人健康管理上十分必要，可以及时评价血氧饱和度的状态，极早地发现低氧血症及其他缺氧状况，从而更有效地预防或减少缺氧所致的意外死亡。

#### **造成血氧饱和度较低的原因主要有：**

(1) 患者患有各种心脑血管疾病，血液中血脂、垃圾较多，血管狭窄导致血流量不足，造成血氧不足，血氧饱和度较低。

(2) 患有慢性阻塞性肺病（COPD）和呼吸窘迫综合征（ARDS）及其它肺部疾病会引起呼吸困难，从而引起摄氧不足，造成心肺、大脑甚至肾脏不同程度的损伤。所以使用脉搏血氧仪检测血氧含量将大大降低呼吸系统疾病的发病率。

(3) 在高原生活者或从初进入高原区时的高山病患者的血氧饱和度会较低，因高海拔地区大气稀薄，此环境下人体正常血氧饱和度会有所下降。对于前往高海拔地区的旅客或者登山爱好者，携带小型血氧监测设备的监测，能很好的保证高原旅游、高海拔登山的旅程安全。

(4) 60 岁以上的老人心肺气管生理老化，导致依靠血液传输的氧气含量降低。需要每日检测血氧饱和度，一旦血氧低于警戒水平，需要赶紧补氧。

(5) 每天工作超过 12 小时的人。大脑耗氧量占全身摄氧量的 20%，脑力劳动过度的话，大脑耗氧量必然上升。这便出现入不敷出。除了造成头昏、乏力、记忆差、反应迟钝等问题之外，同样会对大脑、心肌造成严重伤害。所以此类人群同样需要每天测量血氧含量，实时监控血氧健康，确保心脑血管安康。

(6) 激烈运动影响血液循环，会使血氧下降，并直接影响机体的有氧能力，影响疲劳的消除速度。运动者需要进行科学运动。而科学运动依据的重要生理参数便是血氧饱和度值以及心率值。

(7) 密闭环境下作业者的血氧饱和度会偏低，如高空飞行、潜水作业、密闭舱或坑道内作业，如果处理不当或发生意外，都可发生缺氧。时常的检测自身血氧值以及心率值，并采取相应的摄氧手段可极大的避免由于缺氧发生的意外。

## 1.2 国内外相关研究现状

血氧饱和度的测量方式按照对人体是否有创伤来划分可以分为有创测量和无创测量两种方法。

有创测量首先要用设备破坏人体组织进行采血，然后用专用仪器对所采集的血液进行电化学分析或者光密度测量，最后通过分析测量的结果计算血氧饱和度。有创检测这种方式过程时间长、过程复杂、费用较高且无法对人体血氧饱和度进行连续监测。

为了解决有创血氧饱和度测量的这些缺点，人们发明了无创测量血氧饱和度的方法，此方法以朗伯-比尔定律为基础，根据心脏搏动引起的人体手指内动脉血量的周期性变化的特性，动脉血液中氧合血红蛋白和还原血红蛋白对红光和红外光的吸收率不同，通过检测血液容量波动引起的光吸收量的变化，从而计算动脉血液对红光和红外光吸收变化率的比值，然后根据这个比值与动脉血氧饱和度的关系，从而求出动脉血氧饱和度的值。无创检测这种方法具有安全、可靠、连续、实时、快捷及无损伤等优点，得到了临床普遍的欢迎和广泛应用。

在国外，人们对无创脉搏血氧饱和度的检测技术的研究可以追述到十九世纪，从朗伯-比尔定律的提出开始。

- 早在 1929 年，美国生理学家 Glen Millian 研究了血氧饱和度的测量原理，他提出了血氧仪“Oximcter”的概念，即血氧仪是一种光电测量仪器，这种仪器利用光穿透血管，对人体内动脉血氧饱和度进行连续测量。
- 1935 年，Matthes 研制了第一个双波长的耳部血氧测量探头，可以实现脉搏血氧饱和度的测量，不过这种设备测量缓慢，需要频繁校准而且不能区分动脉和静脉血流。
- 1949 年，Wood 设计的脉搏血氧饱和度测量仪将耳部的血液挤走以获得绝对零点来改进测量精度，这种设备光源稳定性要求高，每次测量需要繁琐调整，因此没有得到广泛应用。
- 直到 1964 年，Shaw R 研制出一种可以避免繁琐的仪器调整过程的八波长自调节的脉搏血氧仪，使该血氧仪在临床上获得成功<sup>[2]</sup>。

以上所介绍的血氧饱和度测量仪都是透射式的，对测量部位要求较高，不能测量人体多个部位的血氧饱和度。

而反射式血氧饱和度测量仪具有透射式血氧饱和度测量仪所不具有的一些优点，因此很多研究人员也在不断的探索反射式血氧饱和度测量仪的测量原理。

- 1962 年，Polayi 和 Hehir 通过研究建立了现代反射型血氧测量原理并据此研发了一种反射型血氧仪，该反射型血氧仪用选定的两个波长的光通过光导纤维照射血流，通过测量反射光强实现了血氧饱和度的测量。

- 90 年代 MoCormick 完成了可实用化的脑血氧饱和度测量装置的研制, 该装置利用反射光谱及独特的深浅双光路对比检测的特殊传感器设计, 实现了脑血氧饱和度的测量, 并把它推向市场成为临床上使用的反射型血氧仪。
- 2010 年, Rammohan V. Maikala 通过对朗伯-比尔定律进行修正, 成功研制了一种基于反射式检测原理血氧仪。

在国内, 对血氧饱和度检测技术的研究相对于国外来说不够成熟且起步较晚。

- 1993 年, 杨玉星等人通过研究脉搏式血氧仪的原理, 在国内研制出了一种脉搏血氧饱和度检测系统。
- 1996 年陈声权、王秀章等人设计了一种脉搏血氧饱和度检测系统, 它采用了新的调制解调方法, 脉搏波波动会引起光吸收量的变化, 通过检测经组织吸收后的光强变化计算出人体血氧饱和度。
- 进入 21 世纪, 很多学者开始研究消除血氧饱和度测量过程中误差的方法。
- 2001 年, 张虹、孙卫新等人利用自适应滤波器达到消除运动伪差目的。
- 2006 年, 李刚教授等提出了动态光谱的理论, 为消除非动脉血液和各层组织的吸收和散射的影响提供了依据, 提高了血氧的测量精度。
- 2009 年, 李庆波等人提出了分段滤波用于消除脉搏血氧检测中的运动干扰。虽然国内的血氧饱和度测量技术也在不断的发展, 但是相对于国外对血氧饱和度测量技术的研究还有一定的差距。

脉搏血氧仪的研制经过不断的发展, 已经开始不仅限于临床应用领域, 在家庭保健中也开始得到普及, 移动互联和远程医疗的发展使得医疗保健产品的发展趋势变为便携化、无线化和网络化, 满足了家庭监护广泛应用的要求<sup>[6]</sup>。

**综上所述: 目前市面上广泛采用的透射式血氧饱和度测量仪受测量装置的限制只能在指尖和耳垂进行测量, 且当病人末端毛细血管循环不良, 涂抹指甲油和患有灰指甲时便无法测得准确的血氧饱和度, 在临床使用上受到了限制。而本项目设计了一种应用场景更多的反射式血氧饱和度测量仪, 使用部位不受限制, 并且可以解决上述问题, 结合信息时代万物互联的特点自主开发了小程序, 使用者可以更加方便的在手机上查看自己的血氧饱和度, BMI 和心率等指标。**

## 2 工作原理

## 2.1 物理学原理

本装置使用脉搏法测量血氧饱和度，此方法主要基于两个基本的物理学原理，一是光电比色原理，即氧和血红蛋白和还原氧合血红蛋白对特定波长的光吸收存在一定差异；二是每次心脏跳动会引起血管内血液容量的变化，从而导致动脉血对特定波长的光的吸收量会产生变化<sup>[3]</sup>。

血管中某特定位置的血液的容量会随着脉搏波在血管内的传播而发生变化，当心脏收缩时，该部分的血液容积最大，而心脏舒张时，该部分的血液容积最小，血液容积的这种脉动变化被称为“容积脉搏波”，一般可由光容积脉搏传感器无创检测出，借助光电手段检测血液容积变化的这种无创检测方法称为“光容积脉搏波描记法”，简称 PPG。当一定波长的光束照射在皮肤表面时，光束将通过透射或者反射的方式传送到光电接收器，由于皮肤、肌肉、血液、组织和静脉血等对光的吸收保持不变，而血液容积在心脏跳动下呈搏动性变化，通过测量会得到容积脉搏信号波形，如图 2-1 所示：

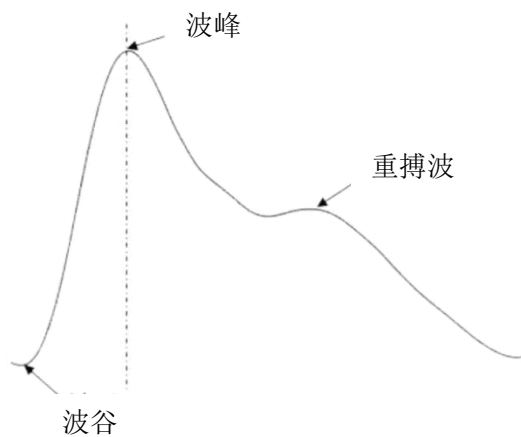


图 2-1 容积脉搏信号波形

从波谷到波峰，属于心脏收缩阶段，大量血液流入动脉血管，造成血管扩张，血液容积增大。

从波峰到一个周期最后，属于心脏舒张阶段，血液流出动脉血管，血液容积整体呈现下降趋势，在此过程中，由于心室舒张引起主动脉血液向心室方向反流，造成主动脉关闭，而反流的血液使主动脉根部扩张，受到已关闭的主动脉瓣膜阻挡而形成一个小波峰，在下降的过程中出现一个小波峰，称为重搏波。

心脏收缩和舒张原理图如图 2-2 和图 2-3 所示：

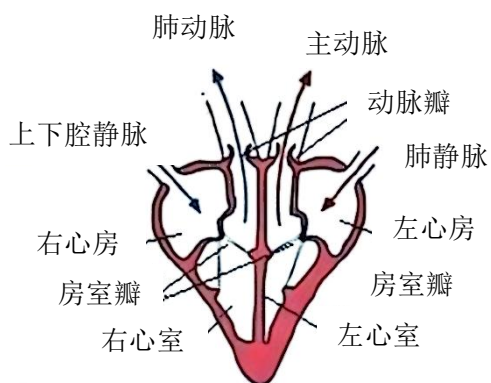


图 2-2 心脏收缩原理图

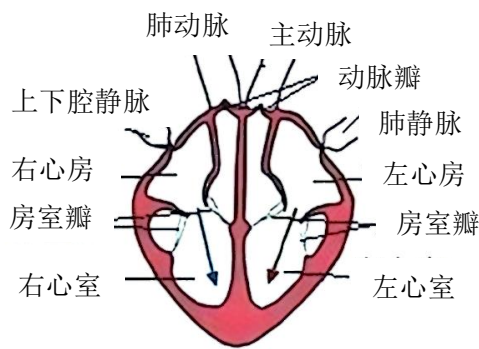


图 2-3 心脏舒张原理图

## 2.2 光电容积脉搏波描记法的基本检测原理

按照物理学上的 Lambert-Beer 原理，假设波长为  $\lambda$ ，光强为  $I_0$  的单色光垂直照射人体指端动脉血液，通过动脉血液的透光强度，

$$I = I_0 \cdot e^{-C_a \cdot \epsilon_a \cdot V_a} \quad (2-1)$$

其中  $\epsilon_a$  为动脉血吸光系数， $C_a$  为动脉血浓度， $V_a$  为动脉血容积，当透光区域动脉血容积变化  $\Delta V_a$  时，引起透光强度变化为  $\Delta I$ ，表示为

$$I - \Delta I = I_0 \cdot e^{-C_a \cdot \epsilon_a \cdot (V_a + \Delta V_a)} \quad (2-2)$$

式 (2-2) 除以式 (2-1) 再取对数得：

$$\ln\left(\frac{I - \Delta I}{I}\right) = \ln\frac{e^{-C_a \cdot \epsilon_a \cdot (V_a + \Delta V_a)}}{e^{-C_a \cdot \epsilon_a \cdot V_a}} = -C_a \cdot \epsilon_a \cdot \Delta V_a \quad (2-3)$$

因为  $\frac{\Delta I}{I} \ll 1$ ，取近似  $\ln\left(1 - \frac{\Delta I}{I}\right) \approx -\frac{\Delta I}{I}$ ，

$$\frac{\Delta I}{I} = C_a \cdot \epsilon_a \cdot \Delta V_a \quad (2-4)$$

由式 (2-1) 可得：

$$V_a = \frac{\ln \frac{I_0}{I}}{C_a \cdot \epsilon_a} \quad (2-5)$$

由式 (2-4) 和式 (2-5) 可得：

$$\frac{\Delta V_a}{V_a} = \left( \frac{1}{\ln \frac{I_0}{I}} \right) \cdot \frac{\Delta I}{I} \quad (2-6)$$

容积的变化和光强的变化成正比，通过光信号转化为电信号，经过适当的处理之后，将得出血液容积的变化，这就是光电容积脉搏波描记法（PPG）。

### 2.3 脉搏式血氧饱和度测量原理

脉搏式血氧饱和度检测方法大都以光电容积脉搏波描记法的检测原理为基础，测量原理分为透射和反射两种，测量方法如图 2-4，2-5 所示：

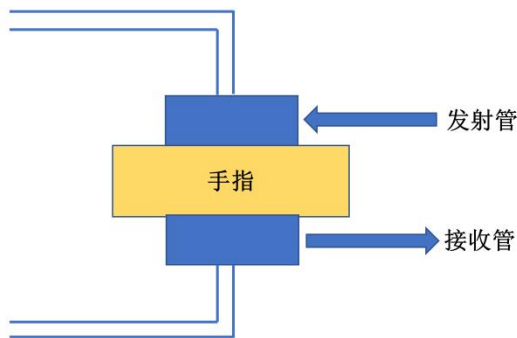


图 2-4 透射式

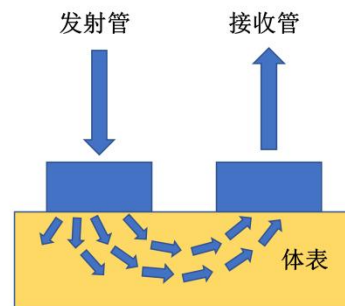


图 2-5 反射式

动脉血对光的吸收量可分为两部分，一部分是由皮肤、肌肉、骨骼和静脉血等对光吸收量是恒定的物质对光的吸收量，称为直流量（DC）；另一部分是动脉搏动时动脉血液对光的吸收量，这部分对光的吸收量会随着动脉血管搏动而发生变化，称为交流量（AC），如图 2-6 所示：

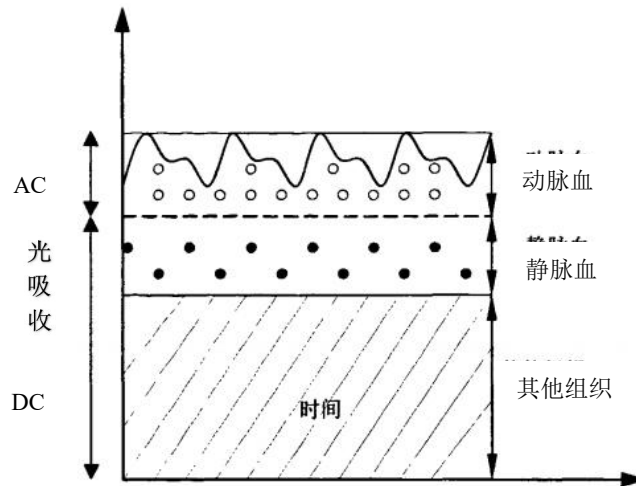


图 2-6 光吸收示意图

根据 Lambert-Beer 原理，当脉搏不搏动时，假设光强为  $I_0$  的单色光垂直照射人体，通过人体的透射光强为

$$I_{DC} = I_0 \cdot e^{-\varepsilon_0 C_0 L} \cdot e^{-\varepsilon_{HbO_2} C_{HbO_2} L} \cdot e^{-\varepsilon_{Hb} C_{Hb} L} \quad (2-7)$$

其中  $L$  为动脉血的光路长度， $\varepsilon_0$  为组织内非动脉成分及动脉血的吸光系数， $C_0$  为组织内非动脉成分及动脉血等吸光物质的浓度， $\varepsilon_{Hb}$ ， $C_{Hb}$  为还原血红蛋白的吸光系数和浓度， $\varepsilon_{HbO_2}$ ， $C_{HbO_2}$  为氧合血红蛋白的吸光系数和浓度。

当心脏收缩时，血管容积增大，假设动脉血液光路长度由  $L$  增加  $\Delta L$ ，此时的透射光强度由  $I_{DC}$  变为  $I_{DC} - I_{AC}$

$$I_{DC} - I_{AC} = I_{DC} \cdot e^{-(\varepsilon_{HbO_2} C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb} C_{Hb}) \Delta L} \quad (2-8)$$

对上式进行整理：

$$\ln \left( \frac{I_{DC} - I_{AC}}{I_{DC}} \right) = -(\varepsilon_{HbO_2} C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb} C_{Hb}) \Delta L \quad (2-9)$$

同理，由于  $\frac{I_{AC}}{I_{DC}} \ll 1$ ，可将上式化简为：

$$\frac{I_{AC}}{I_{DC}} = (\varepsilon_{HbO_2} C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb} C_{Hb}) \Delta L \quad (2-10)$$



上式中 $\Delta L$ 为未知量，所以采用两束不同波长的光作为入射光分别照射被测区域，即双光束法。

### 2.3.1 透射式血氧饱和度测量原理

分别取 $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 两束光，令 $D_{\lambda_1} = \frac{I_{AC}^{\lambda_1}}{I_{DC}^{\lambda_1}}$ ， $D_{\lambda_2} = \frac{I_{AC}^{\lambda_2}}{I_{DC}^{\lambda_2}}$

则：

$$\frac{D_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2}} = \frac{I_{AC}^{\lambda_1}/I_{DC}^{\lambda_1}}{I_{AC}^{\lambda_2}/I_{DC}^{\lambda_2}} = \frac{\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}^{\lambda_1} C_{Hb}}{\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_2} C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}^{\lambda_2} C_{Hb}} \quad (2-11)$$

将上式代入血氧饱和度计算公式：

$$SpO_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \times 100\% \quad (2-12)$$

可得：

$$SpO_2 = \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2} \cdot (D_{\lambda_1}/D_{\lambda_2}) - \varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}}{(\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} - \varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}) - (\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_2} - \varepsilon_{Hb}^{\lambda_2}) \cdot (D_{\lambda_1}/D_{\lambda_2})} \quad (2-13)$$

当 $\lambda_2$ 选取比较特殊，使得 $\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_2} = \varepsilon_{Hb}^{\lambda_2}$ 时，上式变为：

$$SpO_2 = \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}}{\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} - \varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}} - \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2}}{\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} - \varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}} \cdot \frac{D_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2}} \quad (2-14)$$

其中 $\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}$ ， $\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1}$ ， $\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2}$ 均为常数，可由光谱分析法获得，在上式中

设 $A = \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}}{\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} - \varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}}$ ， $B = \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2}}{\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} - \varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}}$ ，则上式可变为：

$$SpO_2 = A - B \cdot \frac{I_{AC}^{\lambda_1}/I_{DC}^{\lambda_1}}{I_{AC}^{\lambda_2}/I_{DC}^{\lambda_2}} \quad (2-15)$$

其中A,B为经验常数，可由定标得出<sup>[4]</sup>。

### 2.3.2 反射式血氧饱和度测量原理

反射式血氧饱和度测量光路如图 2-7 所示：

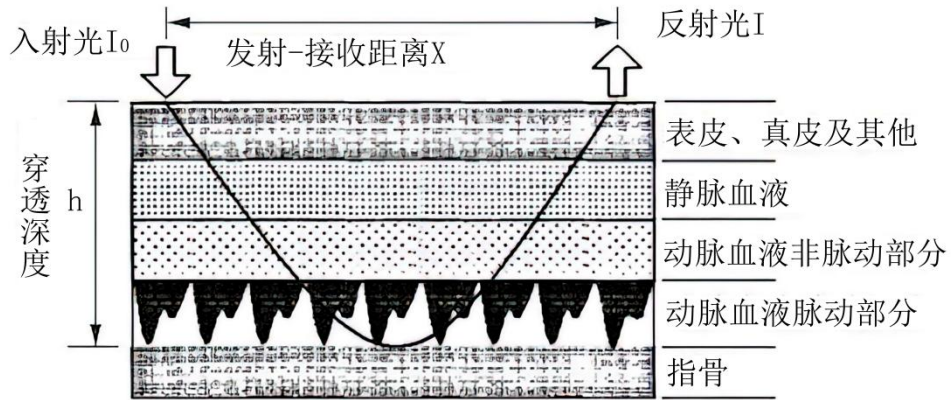


图 2-7 测量光路

设入射光光强为  $I_0$ ，当其穿过厚度为  $L$  的均匀介质后，设反射光强度为  $I$

$$I = I_0 \cdot e^{-C_a \cdot \epsilon_a \cdot L} \quad (2-16)$$

定义吸光度：

$$D = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = C_a \cdot \epsilon_a \cdot L \quad (2-17)$$

对于波长为  $\lambda_1$  的光，在脉搏波动一个周期内，由于光路长度的变化，会存在光程差，反射光会出现最强反射光强  $I_{max}^{\lambda_1}$  和最弱反射光强  $I_{min}^{\lambda_1}$ ，

$$I_{max}^{\lambda_1} = I_0 \cdot e^{-C_0 \cdot \epsilon_0 \cdot L} \quad (2-18)$$

$$I_{min}^{\lambda_1} = I_0 \cdot e^{-C_0 \cdot \epsilon_0 \cdot L} \cdot e^{-(\epsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} C_{HbO_2} + \epsilon_{Hb}^{\lambda_1} C_{Hb}) \Delta L} \quad (2-19)$$

由式 (2-18) 和式 (2-19) 可得出吸光度差值  $\Delta D_{\lambda_1}$  :

$$\Delta D_{\lambda_1} = \ln\left(\frac{I_{\max}^{\lambda_1}}{I_{\min}^{\lambda_1}}\right) = (\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}^{\lambda_1} C_{Hb}) \Delta L \quad (2-20)$$

同理可得  $\Delta D_{\lambda_2}$  :

$$\Delta D_{\lambda_2} = \ln\left(\frac{I_{\max}^{\lambda_2}}{I_{\min}^{\lambda_2}}\right) = (\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_2} C_{HbO_2} + \varepsilon_{Hb}^{\lambda_2} C_{Hb}) \Delta L \quad (2-21)$$

由式 (2-20) 和式 (2-21) 可得:

$$\frac{D_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2}} = \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1} C_{Hb} + \varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1} C_{HbO_2}}{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2} C_{Hb} + \varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_2} C_{HbO_2}} \quad (2-22)$$

可以得出式 (2-22) 和式 (2-11) 完全一致, 将式 (2-22) 代入血氧饱和度计算公式:

$$SpO_2 = \frac{C_{HbO_2}}{C_{HbO_2} + C_{Hb}} \times 100\%$$

并取  $\varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_2} = \varepsilon_{Hb}^{\lambda_2}$ , 得:

$$SpO_2 = \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}}{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1} - \varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1}} - \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2}}{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1} - \varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1}} \cdot \frac{D_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2}} \quad (2-23)$$

$$\frac{D_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2}} = \frac{\ln\left(\frac{I_{\max}^{\lambda_1}}{I_{\min}^{\lambda_1}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{\max}^{\lambda_2}}{I_{\min}^{\lambda_2}}\right)} = \frac{\ln\left(\frac{I_{\min}^{\lambda_1} + \Delta I}{I_{\min}^{\lambda_1}}\right)}{\ln\left(\frac{I_{\min}^{\lambda_2} + \Delta I}{I_{\min}^{\lambda_2}}\right)} \quad (2-24)$$

由于  $\frac{\Delta I}{I_{\min}^{\lambda_1}} \ll 1$ , 可将式 (2-24) 化简为:

$$\frac{D_{\lambda_1}}{D_{\lambda_2}} = \frac{\Delta I / I_{\min}^{\lambda_1}}{\Delta I / I_{\min}^{\lambda_2}} = \frac{I_{AC}^{\lambda_1} / I_{DC}^{\lambda_1}}{I_{AC}^{\lambda_2} / I_{DC}^{\lambda_2}} \quad (2-25)$$

将式 (2-25) 代入式 (2-23) 可得:

$$SpO_2 = \frac{\frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}}{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1} - \varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1}} - \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2}}{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2} - \varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_2}} \cdot \frac{I_{AC}^{\lambda_1}/I_{DC}^{\lambda_1}}{I_{AC}^{\lambda_2}/I_{DC}^{\lambda_2}}}{1} \quad (2-26)$$

在上式中设  $A = \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1}}{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_1} - \varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_1}}$ ,  $B = \frac{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2}}{\varepsilon_{Hb}^{\lambda_2} - \varepsilon_{HbO_2}^{\lambda_2}}$ , 则上式可变为:

$$SpO_2 = A - B \cdot \frac{I_{AC}^{\lambda_1}/I_{DC}^{\lambda_1}}{I_{AC}^{\lambda_2}/I_{DC}^{\lambda_2}} \quad (2-27)$$

由上述推导得出, 透射光强与反射光强的变化率是相等的, 都与吸收系数成正比, 在实际应用中, 利用透射检测和反射检测的方式得到的结果是相同的。

#### 2.4 双波长法波长的选择

血液中的脱氧血红蛋白与氧合血红蛋白对不同波长的光的吸收特性是不一样的, 参考氧合血红蛋白和脱氧血红蛋白的吸收光谱曲线, 如图 2-8 所示, 图中虚线为脱氧血红蛋白吸收系数曲线, 实线为氧合血红蛋白吸收系数曲线。

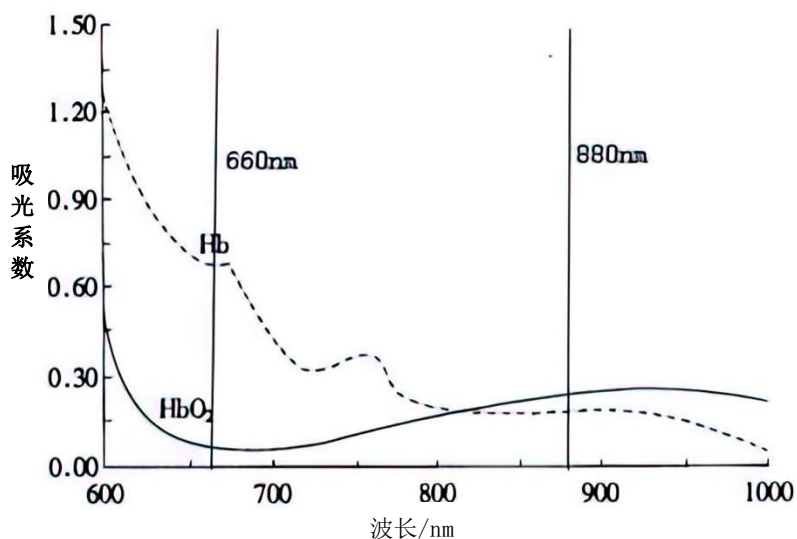


图 2-8  $HbO_2$  和  $Hb$  的吸收光谱曲线

选择波长时，要求  $HbO_2$  和  $Hb$  的吸光系数要大于非血液组织的吸光系数，但也不要太大导致传感器难以检测到光，可以选择在 650nm 附近， $HbO_2$  和  $Hb$  对此波长附近的光的吸光系数相差很大，当血氧饱和度不同时，血液对该波长附近的光吸收量最为敏感。而在测量原理推导中，要求其中一波长对应  $HbO_2$  和  $Hb$  的吸光系数相等，从图 2-8 中可知可选在 805nm 附近，但该波长附近吸光系数与波长的变化梯度较大，如果发光二极管存在个性差异的话，会导致误差，不利于调试替换。在 850-950nm 波长段里，两曲线变化缓慢且近似重合，所以交点一般选在该波长段比较适合<sup>[5]</sup>。

本项目所采用的传感器 MAX30102 内部自带 660nm 的红光二极管和 880nm 红外光二极管，可以满足测量对波长的要求。

### 3 技术分析

本项目的技术路线如图 3-1 所示：

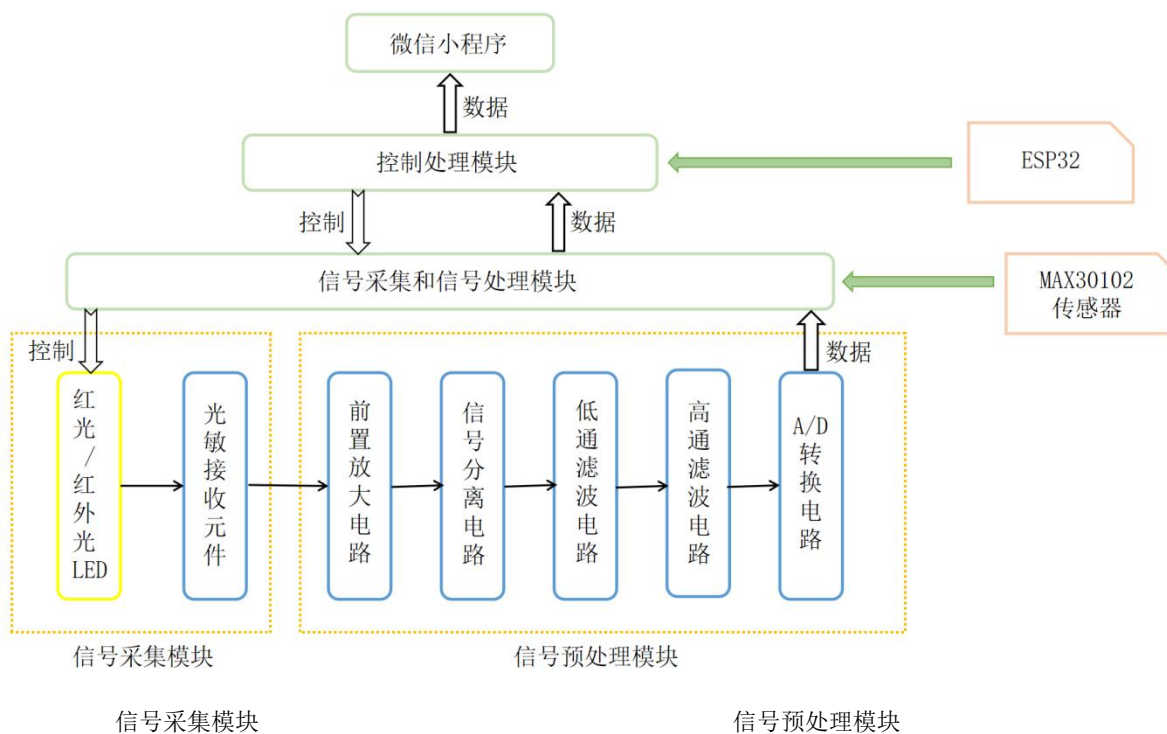


图 3-1 技术路线

### 3.1 硬件电路设计

#### 3.1.1 总体设计思路

血氧饱和度是本系统最重要的探测参数。光电传感器接收交替发出的红光和红外光，所得数据在经过电路转化以及算法运算最终得到被测者的血氧饱和度<sup>[8]</sup>。

图 3-2 所示是本项目的硬件流程图，该项目主要包括四个模块：信息采样模块，信息处理模块，控制处理模块和显示模块。其中信息采样模块和信息处理模块由 MAX30102 传感器和其内置的信号处理电路构成，控制处理模块选用乐鑫公司的 ESP-WROOM-32 芯片构成，最后连接显示模块输出二维码，使用者可以通过微信小程序进行扫码得到健康报表<sup>[10]</sup>。系统的硬件设计框图如图 3-3 所示：

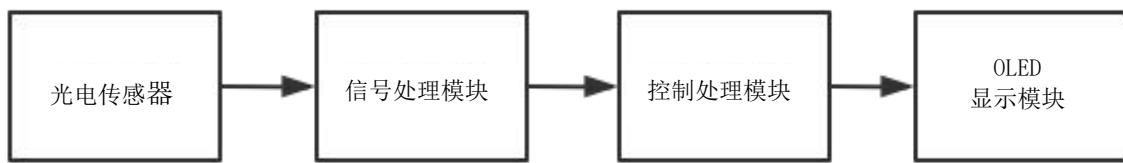


图 3-2 硬件流程图

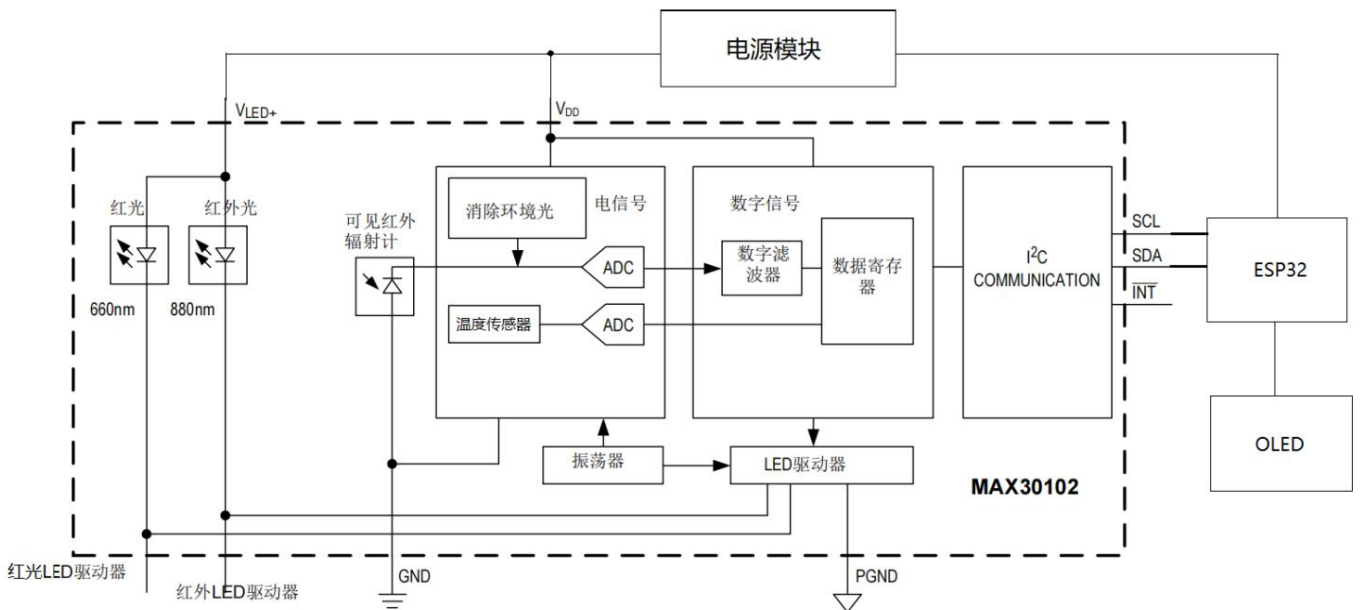


图 3-3 系统的硬件设计框图

### 3.1.2 MAX30102 传感器

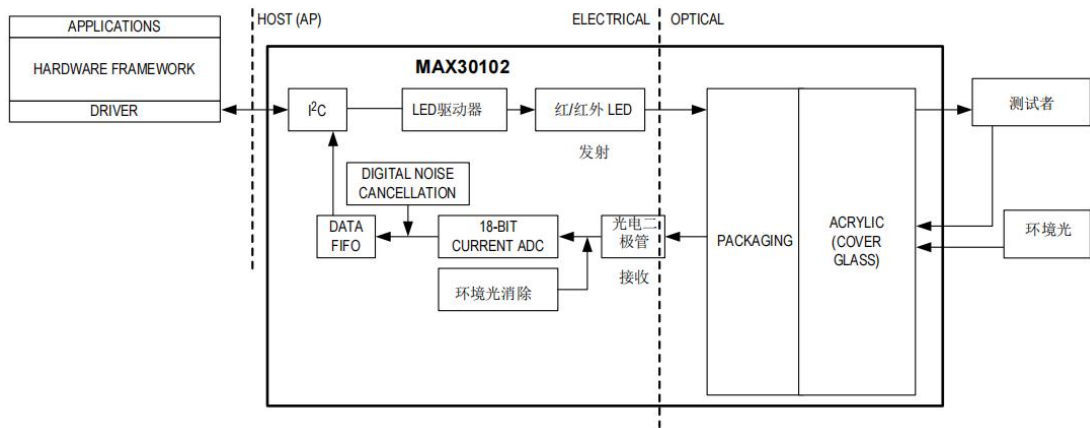


图 3-4 MAX30102 系统图

MAX30102 传感器内置双波长发射器（LED，波长为 660nm/880nm）和光电二极管接收器，其系统图如图 3-4 所示，其工作原理是将红光和红外光射向皮肤，透过皮肤组织反射回的光被光敏传感器接受并转换成电信号，再经过模数转换器转换成数字信号。即将光信号转化为电信号最后转化为数字信号<sup>[9]</sup>。

### 3.1.3 esp32 芯片

本项目所选用的 ESP32 是专为移动设备、可穿戴电子产品和物联网应用而设计的，具有超低功耗，高集成度，支持 WiFi 和蓝牙连接等特点。其功能框图如图 3-5 所示。

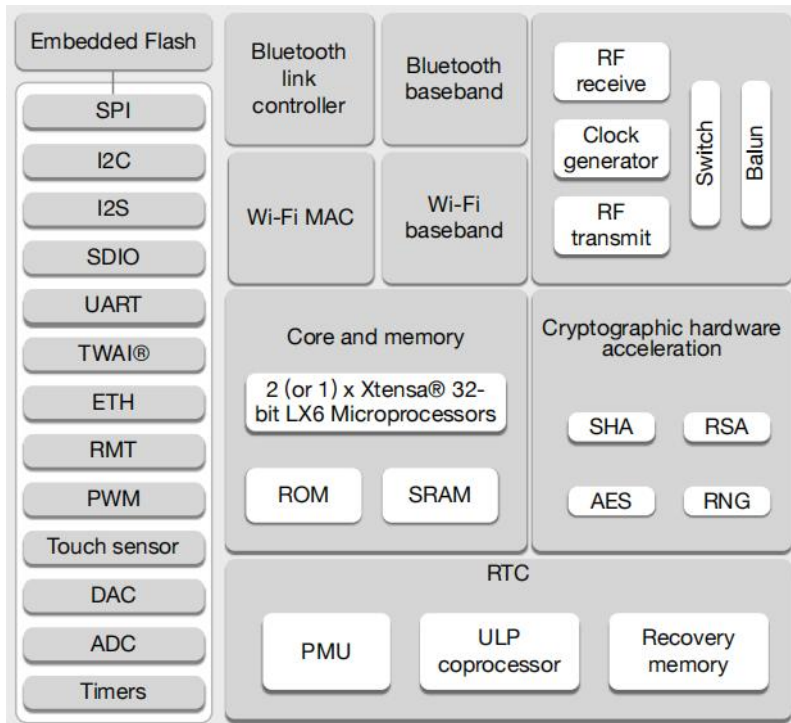


图 3-5 esp32 功能框图

## 3.2 软件



完成了系统的硬件设计，实现对光电容积脉搏波的采集之后，开始进行系统的软件设计。系统的软件设计主要是对光电容积脉搏波数字信号的处理。软件流程图如图 3-6 所示：

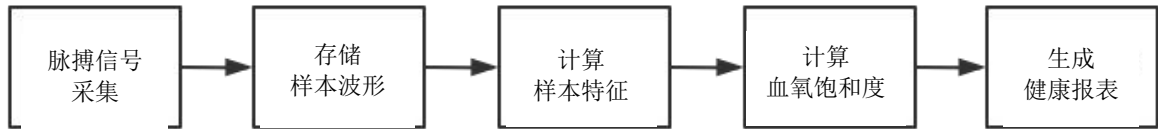


图 3-6 软件流程图

单片机读取到的数据为原始数据，会含有干扰，需要对数据进行实时处理，本项目采用中值滤波方法来去除 PPG 信号中的干扰，在对测量原理的推导中我们得出：

$$SpO_2 = A - B \cdot \frac{I_{AC}^{\lambda_1}/I_{DC}^{\lambda_1}}{I_{AC}^{\lambda_2}/I_{DC}^{\lambda_2}}$$

$$R = \frac{I_{AC}^{\lambda_1}/I_{DC}^{\lambda_1}}{I_{AC}^{\lambda_2}/I_{DC}^{\lambda_2}} \quad (3-1)$$

得到血氧饱和度的计算公式为： $SpO_2 = A - B \cdot R$ ，而经过大量的实践验证，经验化的血氧饱和度计算公式为：

$$SpO_2 = A \cdot R^2 + B \cdot R + C \quad (3-2)$$

其中，A、B、C 都为定标系数，根据实际的系统经过测量标定<sup>[7]</sup>。

对去除噪声后的 PPG 信号，检测出其波峰值和波谷值，带入式 (3-1) 进行计算得出 R，再将 R 带入式 (3-2) 计算得出血氧饱和度，再将计算得到的结果通过局域网上传，最终生成健康报表，使用者需用手机扫描 OLED 屏幕上显示出的二维码，即可在小程序内查看自己的健康报表。

#### 4 测试分析

装置由 MAX30102 传感器，esp32 芯片和 OLED 显示屏构成，实物图如图 4-1 所示，测量界面如图 4-2 所示：

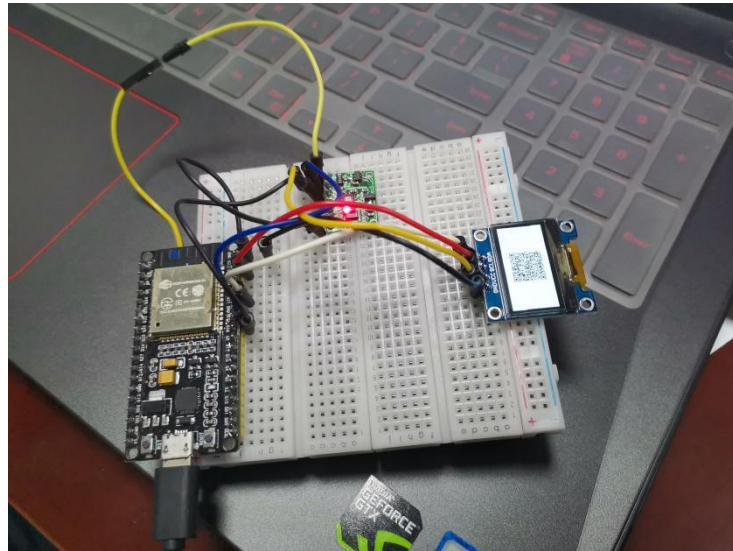


图 4-1 装置实物图

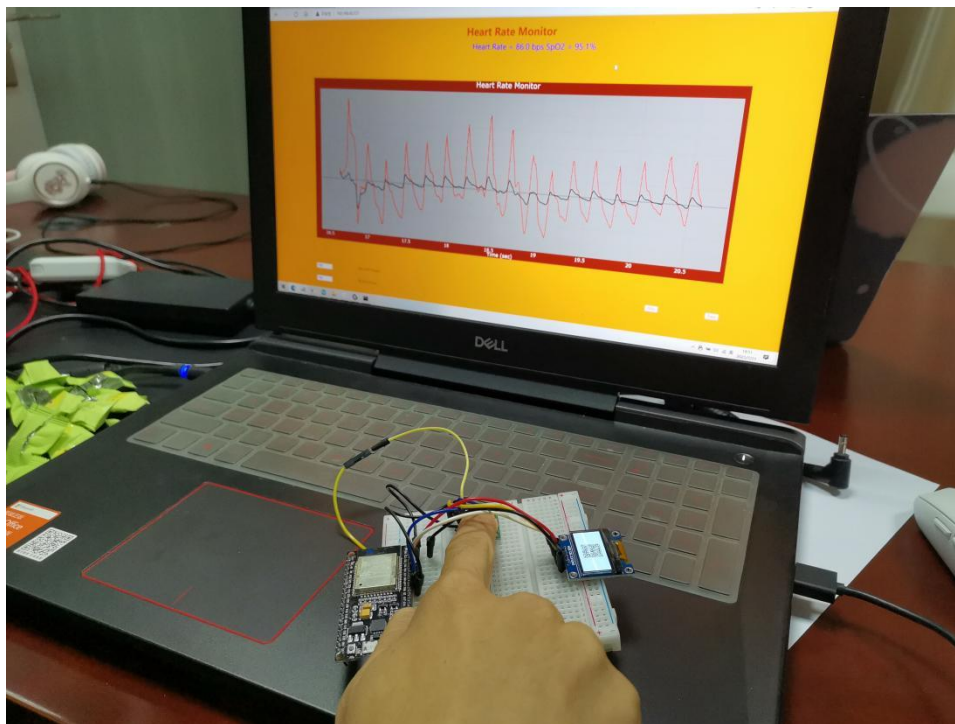


图 4-2 测量界面

同时我们小组使用本装置与目前医用脉搏血氧饱和度仪同时采集实验者的心率和血氧饱和度。其数据对比如表 1 和表 2 所示。测得血氧饱和度的对比曲线图如图 4-3 所示：

表 1 实验装置与医用脉搏血氧饱和度仪测得血氧饱和度对比

次数	实验装置	医用脉搏血氧饱和度仪	误差
1	97.1%	97%	0.1%
2	99.1%	99%	0.1%

3	96.9%	97%	0.1%
4	99.0%	99%	0
5	98.6%	99%	0.4%
6	97.4%	97%	0.4%
7	97.7%	98%	0.3%
8	98.8%	99%	0.2%
9	98.3%	98%	0.3%
10	98.8%	99%	0.2%
11	98.0%	98%	0
12	97.7%	98%	0.3%
13	98.3%	98%	0.3%
14	98.2%	98%	0.2%
15	98.4%	98%	0.4%
16	97.8%	98%	0.2%
17	99.2%	99%	0.2%
18	98.4%	98%	0.4%
19	98.2%	98%	0.2%
20	98.7%	99%	0.3%

表 2 实验装置与医用脉搏血氧饱和度仪测得心率对比 (次/min)

次数	实验装置	医用脉搏血氧饱和度仪	差值
1	64	60	4
2	65	61	4
3	66	61	5
4	73	74	1
5	70	65	5
6	69	66	3
7	62	64	2
8	73	77	4

9	72	67	5
10	68	63	5
11	80	81	1
12	84	85	1
13	83	85	2
14	87	89	2
15	85	88	3
16	86	90	4
17	91	86	5
18	85	86	1
19	86	84	2
20	83	82	1

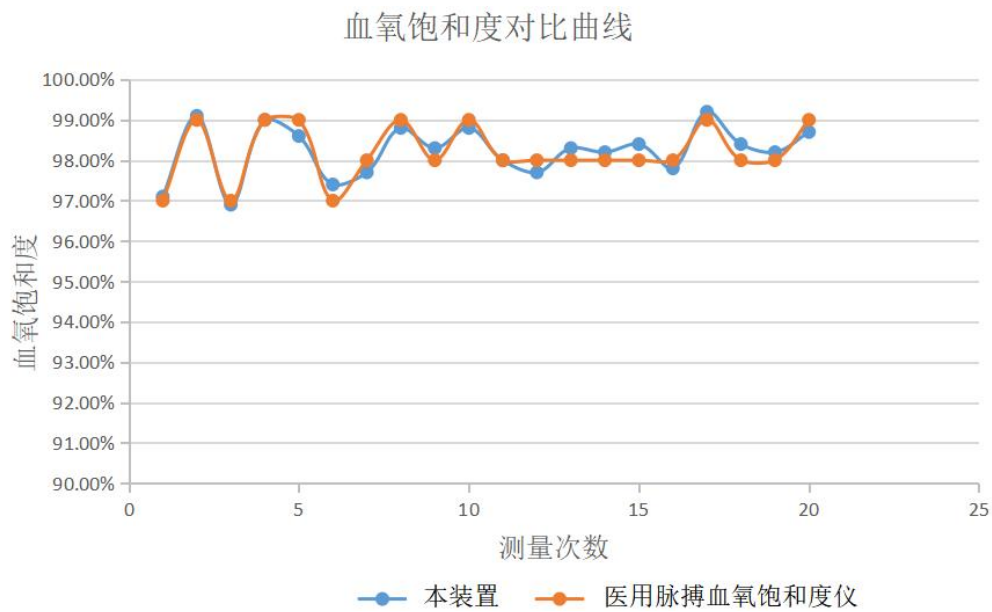


图 4-3 血氧饱和度对比曲线图

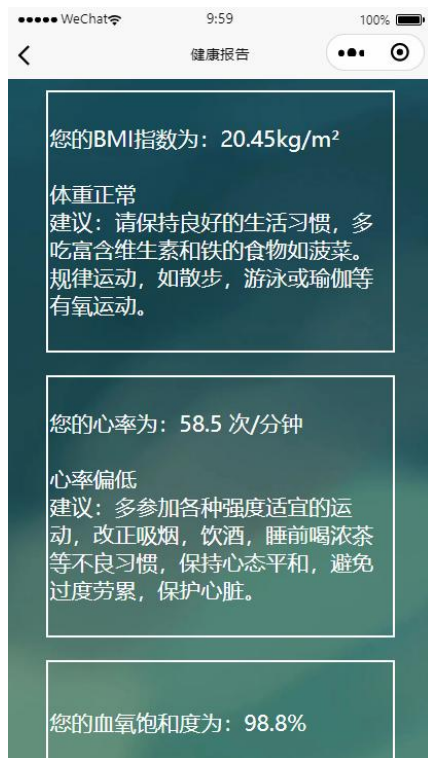
可以通过手机扫描 OLED 上显示的二维码，在微信小程序“蟠桃子”上查看所生成的健康报表，“蟠桃子”的页面截图如图 4-4 所示：



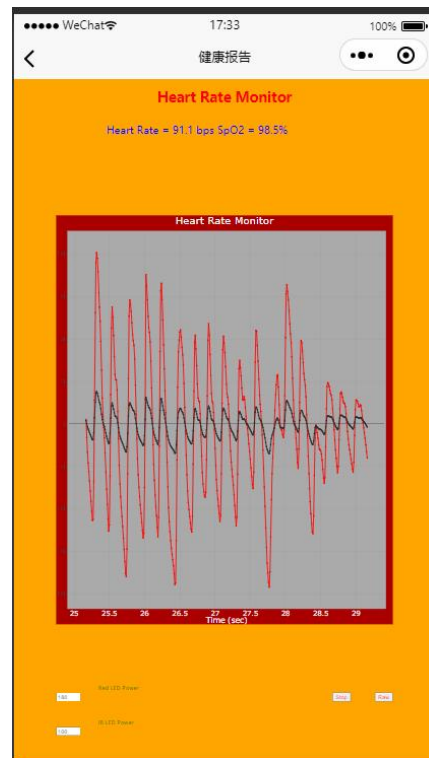
(a)



(b)



(c)



(d)

图 4-4 小程序页面截图

通过分析测量得到的数据可以看出，与医用脉搏血氧饱和度仪相比，本装置计算得出的血氧饱和度误差不超过 0.4%。二十次测试的平均误差率为 0.23%。心率误差值不超过 5 次，二十次测量平均误差值为 3 次，误差在可接受范围，可以满足实际测量需求。

## 5 创新特色

本装置体积小、功耗低、操作简便，并且可以将所测得的心率和血氧饱和度数据通过微信小程序保存至手机，方便进行实时监测。

1. 控制处理模块采用国产 ESP32，具有低功耗、低成本的特点，集成了很多外设接口。

2. 设计了脉搏血氧仪手机小程序，完成数据分析、计算、存储和传输，实时显示血氧饱和度和、心率。

3. 保存用户自己的数据，并且智能分析这些数据，对于不正常的数据对用户进行报警或者提示，使用户更加了解自己身体情况。

本装置目前的应用场景主要是药店，家庭，密闭工作环境等固定位置，满足特定人群及健康人群的检测需求。

## 6 未来展望

1、重新设计电源模块，可采用锂电池供电，提供更加稳定可靠的供电模块，达到完全的便携。

2、增加无线传输模块，建立个服务器，进行用户个人化，及时将数据传送给医护工作者和亲人，还可传送至网络平台，在网络平台自动生成并分辨出各种情况下测得血氧饱和度曲线图，实现远程医疗，提高医疗效率。

3、通过临床实验修正本方案的工作曲线以提高样机的精确度与扩大检测范围。

4、反射式容积脉搏波信号较为微弱，假如滤波不够彻底，引入的噪声也会造成脉搏周期的误判，应进一步改进脉搏周期判断的算法以及完善脉搏信号的去噪工作，用更有效的数字滤波算法提取有效的脉搏波形，去除运动干扰、基线漂移等干扰信号，实现多场景应用。

5、深度定制软件，更加人性化，提高用户体验，使用户根据自己需求选择功能，进行个性化的设置，如对得到的容积脉搏波信号进行分析，从而提供与心血管系统有关的信息，如心率、动脉压、硬度指数、脉搏传导时间、脉搏波传导速度、心输出量、动脉顺应性和外周阻力等。

## 7 结论

本文设计了一种基于 esp32 单片机与 MAX30102 传感器的脉搏血氧测量仪，通过反射式测

量法与光电容积脉搏波描记法实现了人体脉搏测量，并对得到的脉搏波进行数字信号处理计算血氧饱和度，通过扫描二维码将数据上传到开发的小程序中，具有较好的准确性和实用性。多次测试的结果表明，血氧饱和度测量的结果较为精准，误差一般小于 0.4%，心率检测误差小于 5 次，其精度达到了国家标准要求，使得本设计具有较好的使用价值。

当然，系统仍有一些可升级、优化之处，如进一步降低功耗，优化数字滤波算法分析，重新设置电源模块，增加无线传输模块，采用更高级的芯片以降低误码率提高样机精度，拓展小程序功能，扩大检测范围。

### 参考文献

- [1] None. Pronounced, episodic oxygen desaturation in the postoperative period: its association with ventilatory pattern and analgesic regimen. [J]. Anesthesiology, 1985, 63(3):20-28.
- [2] Takatani S, Cheung P W, Ernst E A. A noninvasive tissue reflectance oximeter[J]. Annals of Biomedical Engineering, 1980, 8(1):1-15.
- [3] 周峰. 大范围血氧饱和度无创检测的方法及模型研究[D]. 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院.
- [4] 严新忠, 杨静, 郭略. 人体血氧饱和度监测方法的研究[J]. 医疗装备, 2005, 018(012):12-24.
- [5] 甘永进. 反射式血氧饱和度检测仪研制[D]. 桂林电子科技大学, 2016.
- [6] 吴优, 庞宇, 黄博强, 等. 穿戴式抗干扰血氧饱和度采集装置设计[J]. 电子世界, 2017, 000(021):132-134.
- [7] 曹昌盛, 徐铭, 伍守豪. 基于 PPG 信号的无创血氧饱和度测量终端的设计[J]. 电子设计工程, 2017, 25(007):57-60.
- [8] 杨丹, 丁梦晓, 郑磊, 等. 便携式脉搏血氧饱和度测量仪的研制[J]. 微型机与应用, 2015, 34(22):92-95.
- [9] 白鹏飞, 刘强, 段飞波, 等. 基于 MAX30102 的穿戴式血氧饱和度检测系统[J]. 激光与红外, 2017, 47(010):1276-1280.
- [10] 罗堪, 周奇, 李尔松, 周伟斌. 基于 DSP 的脉搏波测试仪研制[J]. 电子测量技术, 2010(02):12-23
- [11] 高遵伯. 基于 DSP 的脉搏血氧饱和度测量仪的研制[D]. 国防科学技术大学, 2002.



# 多功能自动化商品展示仪

参赛学校：杭州电子科技大学

项目成员：李泽宇、莫佳洋、谢胡晗、蔡双隆、贺盛恒

指导老师：邵春强、周昱

**摘要：**本项目针对快闪店存在的不足之处，介绍了一种基于Arduino开发板和霍尔传感器的多功能自动化商品展示仪。展示仪主要依靠Arduino开发板，在此基础上使用红外接收三极管、霍尔传感器、WIFI-MCU及数字温湿度传感器监控是否有火情产生、并对消费者使用次数进行大数据分析以及对商品温湿度进行监控。该展示仪具有良好的安全性、稳定性和可靠性。

**关键字：**霍尔元器件、霍尔原理、Arduino开发板、红外接收三极管、WIFI-MCU、数字温湿度传感器、阿里云

## 一、项目的研究的背景、目的及意义

### 1.1 研究背景

据统计，截至2020年国内快闪店场景交易规模超过800亿元。随着电商的发展，消费者“只逛不买”比例有所提升。线上购买比线下购买更受消费者欢迎。如今，市场形势要求快闪店在短时间内提升消费者对商品品牌的认知。快闪店需要在短期提升消费者对品牌的认知，通过对消费者信息的收集来进行大数据分析来提高获客能力，获知消费者对商品的各方面需求，进一步减小租用空间，减少人力资源的浪费，快闪店需要变得更加智能化。而我们开发的多功能自动化商品展示仪就是针对这些需求诞生的，与数字经济的主题完美贴合。

### 1.2 研究目的

1、该展示仪能对用户体验各类商品次数进行统计，然后对数据进行分析，得出各种商品受用户欢迎程度大小，便于商家了解用户需求，更好地选择进货商品数量。

2、对用户在一天内不同时段（每一小时统计一次）对所有商品使用的总次数进行统计，并对所得到的数据进行分析，知道在哪些时段用户试用量大，可以在用户试用量大的时段增加展示商品数量。

3、对展示仪中商品的温度及湿度进行远程监控，防止某些商品因温度、湿度过高或过低产生损坏，影响用户体验。

4、具有报警机制，当试用商品被用户取走试用时长超过10分钟时，后台系统显示商品试用信息并默认该商品用户忘记归还原位或已被盗窃，并报警，然后通知现场工作人员回收该商品并放回原位。

5、具有火警机制，当展示仪着火时，红外接收三极管会感应到火焰并将信号发送给后台，后台报警并立刻通知现场工作人员灭火。

6、用户在试用完商品后，若想购买该商品，可以通过观察顾客端屏幕上显示的商品状态来了解对应商品的状态，如现场有货、现场无货但是有库存、售罄三种不同的状态。

### 1.3 研究意义

我们的多功能自动化商品展示仪与“快闪经济”完美契合，快闪店指商店存在于一个较短的时间维度内，短暂的使用空间，最大化企业文化传播效果，以吸引消费者，取得品牌效应，而我们的自动化商品展示仪体积小，用户体验感强烈，使用方便，能够完成考量本地受众细分、本地销售淡旺季、本地消费者购买欲望、本地用户期待项目、本地用户特殊需求等诸多方面的销售前数据统计的任务。除此之外，展示仪还可以监控商品温度以及库存等状态。只有抓住用户的需求才能抓住市场，获得最大的盈利。

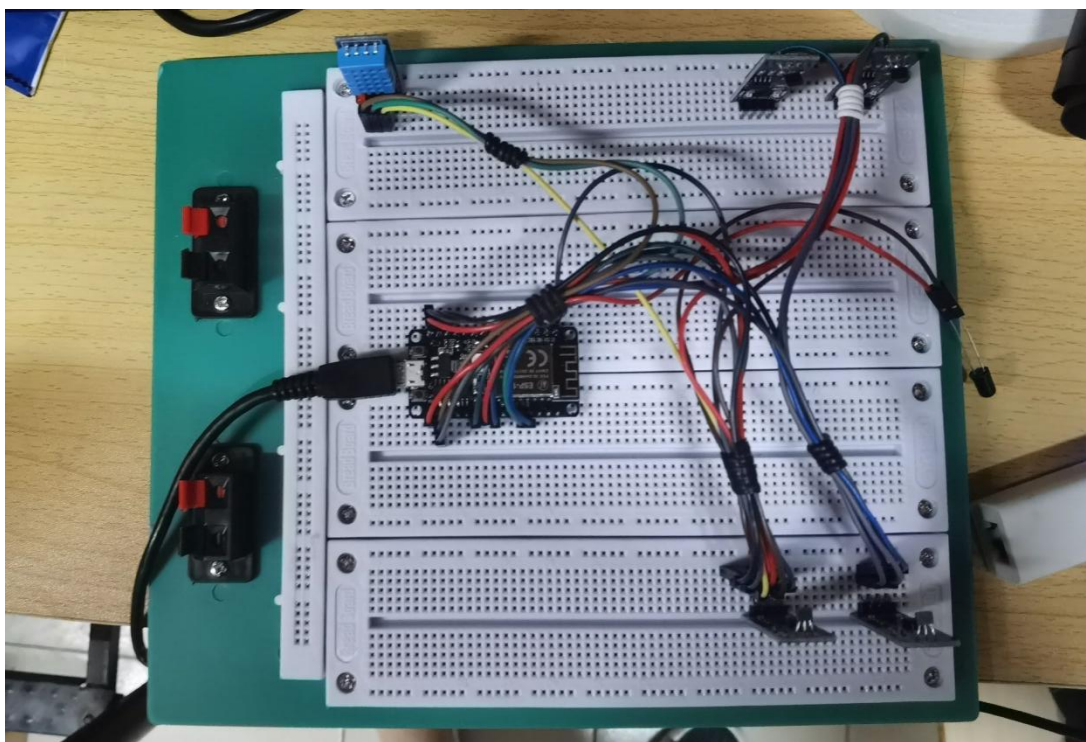
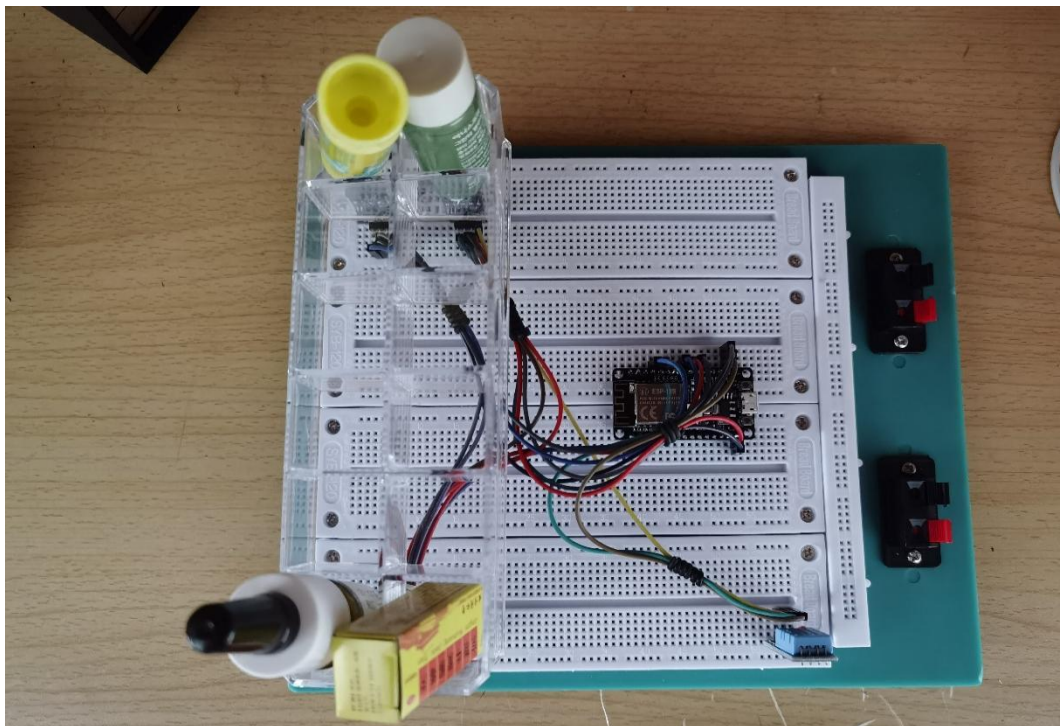
## 二、工作原理

将商品放置于展柜中并在每种展示商品的底部粘贴磁贴片，商品底部的磁贴片与霍尔传感器 ES3144 会产生霍尔效应电压，通过比较放大器得出数字信号用来判断磁场强弱，磁场强弱可以用来判断商品是否被拿走试用，霍尔传感器 ES3144 将模拟信号转化为数字信号输出至 Arduino 开发板中，在 Arduino 开发板中进行数据整合，然后通过 ESP8266 wi-fi MCU 上传到后端的阿里云平台，在阿里云中通过大数据分析，运用多种图像表格，如柱状图、折线图、饼图等将所得到的数据整合并清晰的展示出来，通过这些数据我们可以分析得到该商品的受欢迎程度，便于商家了解用户需求，更好的针对销售做出战略调整；亦可以通过试用时长的统计设置报警机制。

另外 DHT11 数字温湿度传感器负责检测展柜整体的温度和湿度，以免温湿度变化引起展品的损伤。DHT 传感器由电容式湿度传感器和热敏电阻两部分组成。湿度传感器利用电场中介质的变化导致电容变化特性而制作，利用感湿材料吸收水分后介电常数变化引起敏感电容变化进而表征湿度变化。热敏电阻则是利用了某些材料的电阻能够随着温度的变化而发生线性变化性质，通过检测电路通路内电流或者电压的变化，从而反应出监测物体温度的变化。

红外接收三极管会监测展示仪是否有火焰产生，以避免火势扩大，其利用红外线对火焰的敏感特性，用特制的红外线接收管来检测火焰，然后将火焰的亮度转化成电平信号供控制器处理。

产品效果展示



后台远程监控端

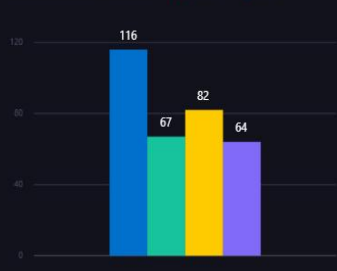


当前柜台状态

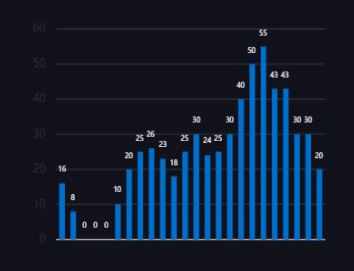
- 一名花匠液体肥
- 雷诺考特地奈德鼻喷雾剂
- 同仁堂京制牛黄解毒片
- 悦诗风吟



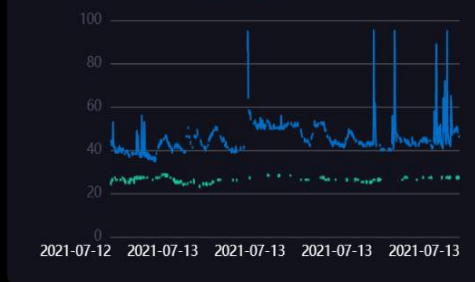
商品拿起次数统计



客流量统计



柜台历史温湿度曲线



面向客户端（商品信息展示）

- 品牌：一名花匠
- 商品名称：通用型花鱼共养水培植物营养液叶面肥 绿叶王绿萝富贵竹液体肥 大支(120ml)
- 商品编号：10025803301123
- 商品毛重：1.0kg
- 类型：其它

01:09:29

当前状态：  
**有货**

- 品牌：同仁堂
- 商品名称：同仁堂京制牛黄解毒片
- 商品毛重：100.00g
- 类别：中药
- 功效：清热解毒散风止痛 咽喉牙痛
- 使用方法：口服
- 适用类型：其它

- 品牌：悦诗风吟
- 商品名称：悦诗风吟
- 商品毛重：0.68kg
- 商品产地：中国大陆
- 功效：补水、保湿
- 适用人群：成人
- 适合肤质：干性、中性、油性、混合性

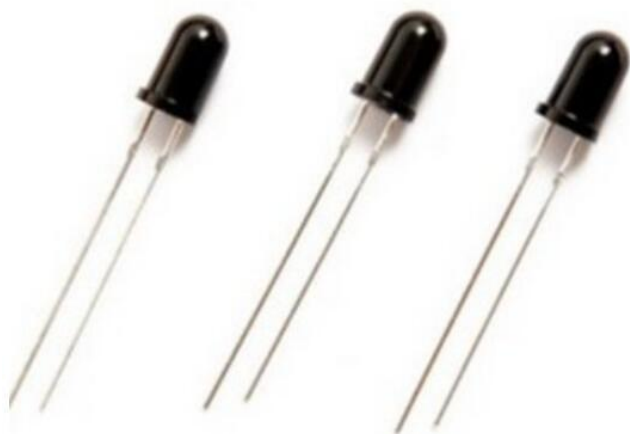
后台火情警报



### 三、技术分析

#### 3.1 红外接收三极管

火焰传感器（即红外接收三极管）是一种对火焰特别敏感的传感器。火焰传感器其利用红外线对火焰的敏感特性，用特制的红外线接收管来检测火焰，然后将火焰的亮度转化成电平信号供控制器处理<sup>[1]</sup>。



$$\Delta P_s = P \Delta T$$

$\Delta P_s$  为自发式极化强度变化量； $\Delta T$  为温度变化； $P$  为热释电系数<sup>[2]</sup>。

#### 3.2 霍尔传感器 ES3144

霍尔器件是一种磁传感器，可以检测磁场及其变化，可在各种与磁场有关的场合中使用。霍尔器件以霍尔效应为其工作基础的。在一块通电的半导体薄片上，加上和薄片表面垂直的

磁场  $B$ ，在薄片的横向两侧会出现一个电压，这种现象就是霍尔效应。这是因为通电半导体片中的载流子在磁场产生的洛仑兹力的作用下，分别向片子横向两侧偏转和积聚，因而形成一个电场，称作霍尔电场<sup>[3]</sup>。霍尔电场产生的电场力和洛仑兹力相反，它阻碍载流子继续堆积，直到霍尔电场力和洛仑兹力相等。

稳定的平衡条件即，载流子受到的电场力  $F_E$  与磁场力  $F_B$  大小相等，即  $qE = qvB$ ， $q$  代表每个载流子的带电量，即一个电子的电荷， $v$  代表自由电子定向移动形成电流的迁移速度，以下为霍尔效应的原理图。

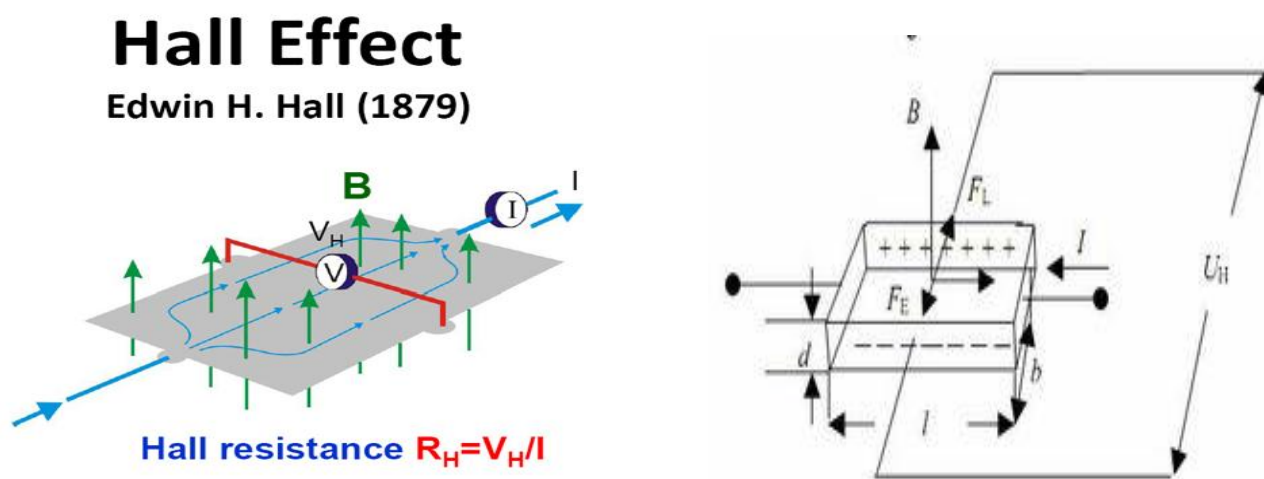


图1 霍尔效应图

霍尔器件是一种磁传感器。用它们可以检测磁场及其变化，可在各种与磁场有关的场合中使用。霍尔器件以霍尔效应为其工作基础。霍尔器件具有许多优点，它们的结构牢固，体积小，重量轻，寿命长，安装方便，功耗小，频率高（可达 1MHz），耐震动，不怕灰尘、油污、水汽及盐雾等的污染或腐蚀。霍尔线性器件的精度高、线性度好；霍尔开关器件无触点、无磨损、输出波形清晰、无抖动、无回跳、位置重复精度高（可达  $\mu\text{m}$  级）。取用了各种补偿和保护措施的霍尔器件的工作温度范围宽，可达  $-55^\circ\text{C} \sim 150^\circ\text{C}$ 。

在本装置中，我们应用了 ES3144 霍尔传感器，ES3144 是基于双极半导体 (Bipolar) 工艺设计和生产的霍尔器件，器件内部集成了霍尔效应片、电压调节器、反向电压保护器、信号放大处理电路、施密特触发器和一个开集电极输出驱动三极管<sup>[4]</sup>。ES3144 具有较宽的工作电压范围和较宽的工作温度范围，非常适合在汽车、工业电器和家电等产品中用作固态电子开关。按照霍尔器件的功能可将它们分为：霍尔线性器件和霍尔开关器件。前者输出模拟量，后者输出数字量。我们使用的 ES3144 有两个输出端口，ES3144 既可以输出模拟量也可以输出信号量，满足了我们的项目需求。以下为该型号的霍尔传感器的典型操作特征以及 ES1344 的功能框图

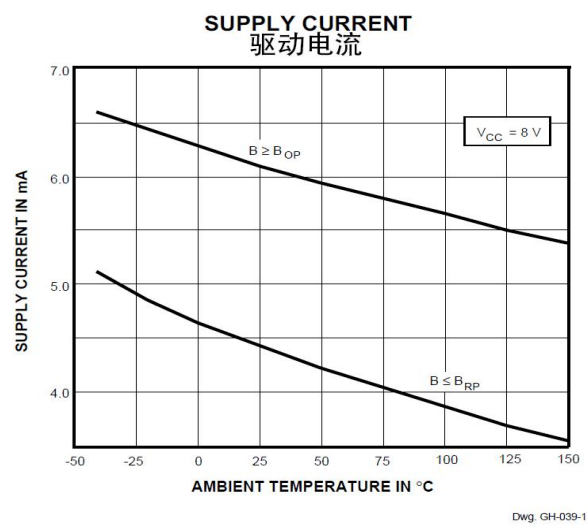
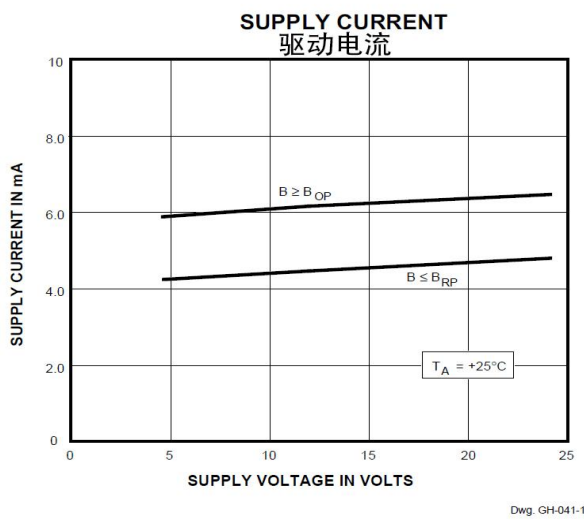
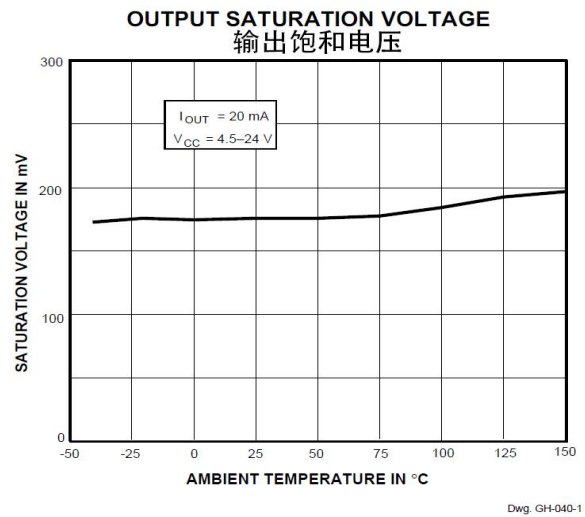
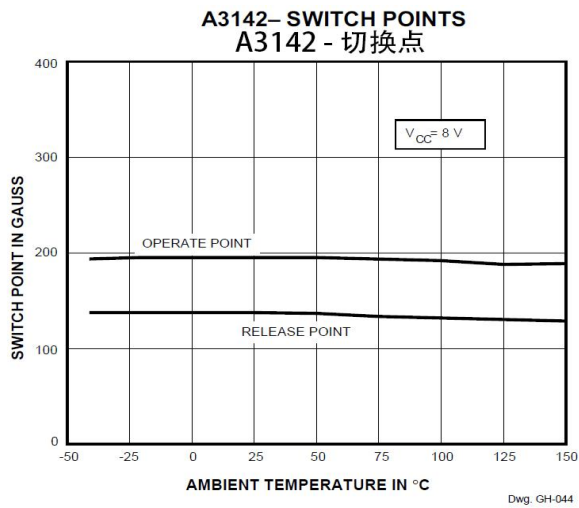


图 2 典型操作特征

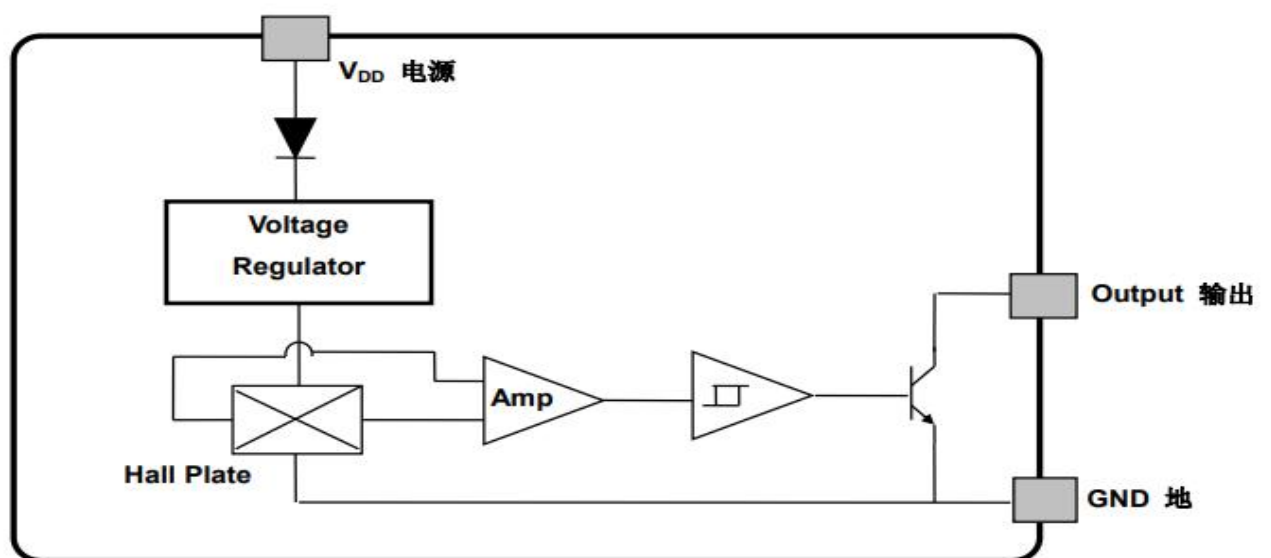


图 3 ES3144 的功能框图



### 3.3 Arduino 开发板

本装置的核心是一块 Arduino 开发板，该电路板配有一组数字和模拟 I/O 引脚，可以连接各种扩展板或面包板（屏蔽板）和其他电路。这些电路板具有串行通信接口，包括某些型号上的通用串行总线（USB），也用于从个人电脑加载程序。

本装置采用的是 Arduino Uno R3 型号的开发板，它是一款基于微控制器 ATmega328P 的开发板。ATmega328P 是一颗基于八位 AVR 单片机的高性能精简指令型微控制器，拥有 32KB 兼容读写的 ISP 快闪存储器。该芯片具有 1KB 的电气可抹除只读内存、2KB 随机存取内存、23 个通用输出输入线、32 个通用工作暂存器、3 个具备比对能力的计时计数器。同时具有可编程化的通用异步收发串列界面、一组字节导向的两线式串列界面、一组 SPI 串列埠、6 通道 10 位元类比数位转换器 (TQFP 及 QFN/MLF 包装中只有 8 通道)、一组具有内部震荡器的可编程化计时器、五组可选择的功率节约模式。这个单芯片的工作电压运作在 1.8V-5.5V 之间，但运作效能达到每百万赫兹 (Hz) 有 1 MIPS。正式因为有低功耗的以及低成本的优点，它被用于很多物联网的方案中。而搭载它的 Arduino Uno 有 14 个数字输入/输出引脚（这些引脚中有 6 个引脚可以作为 PWM 输出引脚），6 个模拟输入引脚，16 MHz 石英晶振，USB 接口，电源接口，支持在线串行编程以及复位按键<sup>[5]</sup>。

基于 Arduino 的物联网设备，运行速度快，功耗低且拥有简单的代码指令和强大的拓展性。所以综合考虑以上优点，我们的多功能自动化商品展示仪，就是采用 Arduino 连接传感器芯片，将获得的传感器数据集中处理。

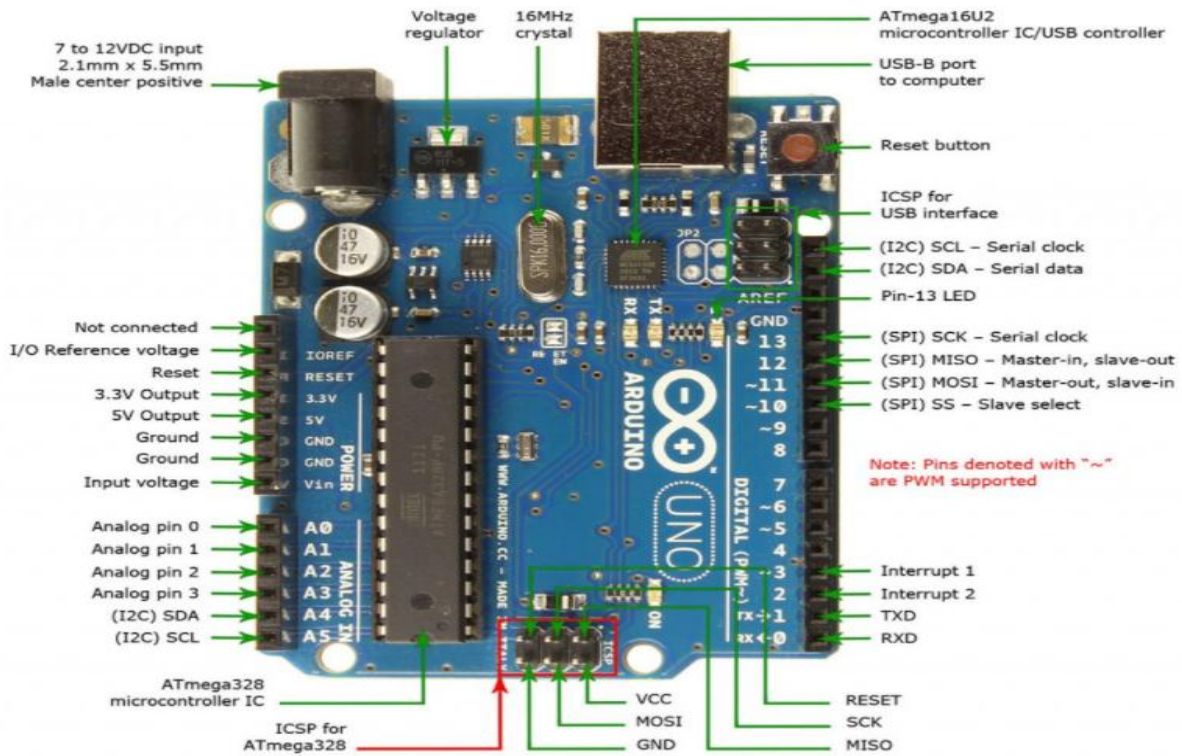


图 4 Arduino Uno R3 型号的开发板的说明图

### 3.4 ESP8266 Wi-Fi MCU

ESP8266 是一款可以作为微控制器使用的成本极低且具有完整 TCP/IP 协议栈的 Wi-Fi IoT 控制芯片。

ESP8266 主要具有四大优点。第一，很好的耐用性。该芯片工作温度范围很宽，因此它能够在工业环境中持续工作。该芯片具有高度集成的片上特性和最小的外部离散组件计数，提供了可靠性和紧凑性。第二，高集成度。小小的一块芯片中集成了 32 位的 Tensilica 处理器、标准数字外设接口、天线开关、RF balun、功率放大器、低噪声接收放大器、滤波器和电源管理模块。第三，良好的低功耗设计。ESP8266 本就为移动设备、可穿戴电子产品和物联网应用设计，通过结合多项专有技术实现低功耗，节能架构具有三种运行模式：主动模式、睡眠模式和深度睡眠模式，这使得电池供电的设计可以运行更长的时间。第四，强大的处理器性能。微控制器集成了 Tensilica 32 位 RISC 处理器，实现超低功耗和最大时钟速度 80 MHz。实时操作系统 (RTOS) 和 Wi-Fi 堆栈允许大约 80% 的处理能力用于用户应用程序编程和开发。

主要特性参数：

- 1) 基于 Tensilica Xtensa Diamond Standard 106Micro 的 L106 32 位 RISC 微处理器内核，运行时间为 80 MHz [5]

- 2) 32 KiB 指令 RAM、32 KiB 指令缓存 RAM、80 KiB 用户数据 RAM、16 KiB ETS 系统数据 RAM
- 3) 外部 QSPI 闪存：支持最高 16 MiB（通常包括 512 KiB 至 4 MiB）
- 4) IEEE 802.11 b / g / n Wi-Fi
- 5) 集成 TR 开关，换衡器，低噪音放大器，功率放大器和匹配网络
- 6) WEP 或 WPA / WPA2 身份验证或开放网络
- 7) 16 个 GPIO 引脚、串行外设接口（SPI）、10 位模拟数字转换器（ADC）



图 5 ESP8266 的实体展示图

### 3.5 DHT11 数字温湿度传感器

DHT 传感器由电容式湿度传感器和热敏电阻两部分组成。

电荷在电场中会受力而移动，当导体之间有了介质，则阻碍了电荷移动而使得电荷累积在导体上，造成电荷的累积储存，储存的电荷量则称为电容。该湿度传感器就是利用了电场中介质的变化而导致电容变化特性而制作，利用感湿材料(如聚酰亚胺)吸收水份后介电常数变化引起敏感电容变化进而表征湿度变化。该电容式湿度传感器灵敏度高、制造成本低、动态响应时间短、热损耗极小<sup>[6]</sup>。而热敏电阻则是利用了某些材料的电阻能够随着温度的变化而发生线性变化性质，通过检测电路通路内电流或是电压的变化，从而反映出监测物体温度的变化。

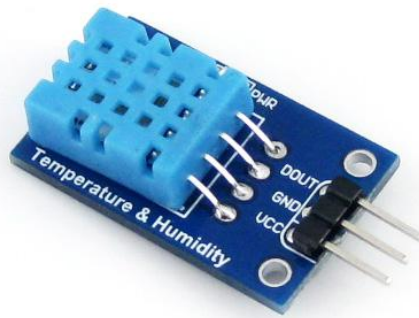


图6 DHT11 传感器实物图

在集成电路内部，这两个传感器与一个高性能 8 位单片机相连接，可以将些模拟信号到数字信号的转换，将温湿度以数字信号方式输出。因此该产品具有品质卓越、超快响应、抗干扰能力强、性价比极高等优点。每 DHT11 传感器都在极为精确的湿度校验室中进行校准。校准系数以程序的形式储存在 OTP 内存中，传感器内部在检测信号的处理过程中要调用这些校准系数。单线制串行接口，使系统集成变得简易快捷。超小的体积、极低的功耗，信号传输距离可达 20 米以上，使其成为各类应用甚至最为苛刻的应用场合的最佳选则。产品为 4 针单排引脚封装，连接方便，特殊封装形式可根据用户需求而提供。

本装置中采用了 DHT11 传感器同时检测自动化展柜的温度和湿度，再将得到的反馈通过数字输出到后台界面。数据传输采用单总线数据格式，一次传送 40 位数据，高位先出。输出数据的格式为 8bit 湿度整数数据+8bit 湿度小数数据+8bit 温度整数数据+8bit 温度小数数据+8bit 校验位<sup>[7]</sup>。以下为数据传输的信号时序图。

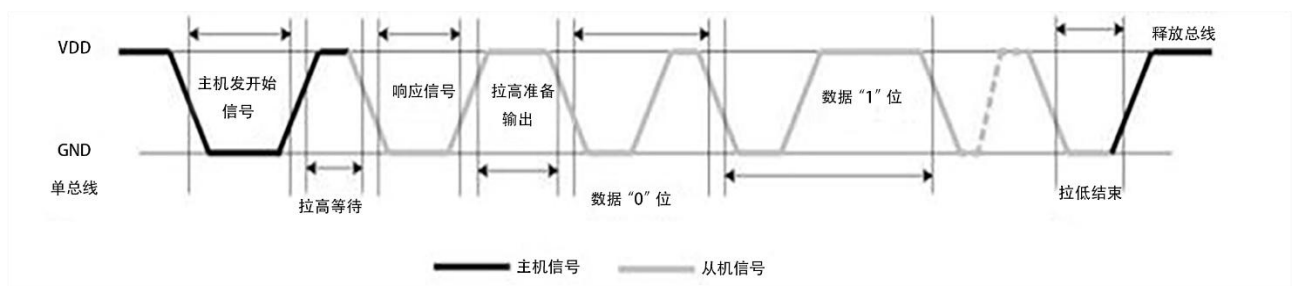


图7 信号时序图

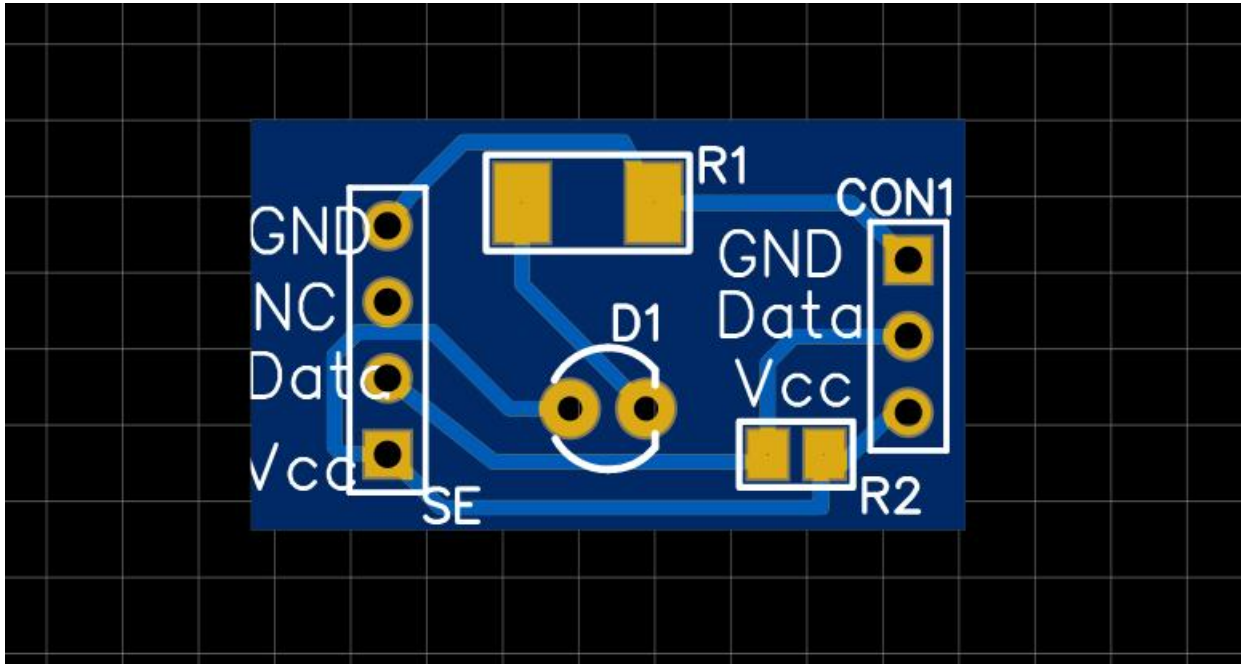


图8 DHT11 传感器的 PCB 图

#### 四、 应用前景

随着“快闪经济”市场规模的日益扩大，众多品牌希望提高在经济发达区域的知名度，这让我们多功能自动化商品展示仪的应用前景也变得愈加广阔。又因为我们的展示仪是一个多功能展示台与多种物理效应有关原理简单，且与用 IC 卡做商品信息识别相比我们的产品成本会大大降低，而我们现在还有很多功能可以去完善及拓展且会随着功能的完善使产品的市场空间更加广阔，如

- 1、 我们的多功能自动化商品展示仪可以通过与电子屏幕相连接来更加生动的演示展示物品的各项详细数据，如当一个商品从展台被顾客拿走，电子屏幕上就会立刻出现商品的详细信息、以此来更加贴合如今时代快闪店的主题，将快闪店的流通性与商品推销属性推动到更高层次。
- 2、 目前我们是制作了一个简易的库存数据库，并通过自动化商品展示仪上的绿黄红二极管的闪烁来分别表达物品在快闪店现场有货、库存有货、商品已告罄，但在我们以后的应用当中我们会建立一个更加完备的库存数据库，实现更大量的商品展示效果，并在数据库中实现对更多商品的分门别类，实时更新库存数据，更加满足当下快闪店对商品多样化的展示需求。
- 3、 我们的自动化商品展示仪与阿里云平台的连接，对客户各项数据进行大数据分析，只有在某种商品离开展示台 10 分钟以上才会发出报警，并以此监测展示商品是

否未归还或丢失然后将信息反应给现场工作人员,但还没有实现整个快闪店的无人化,因为我们的展示仪没有对每个商品的定位功能,无法判断商品是丢失了还是顾客未归还,也无法在知道商品丢失后进行及时处理。在未来,我们计划对每个商品增添三角定位功能,监测每个商品的位置,当商品位置超出快闪店范围时直接报警,使商品在快闪店的安全性大大提高,在快闪店的优秀发展前景下,使店铺真正做到无人化节约人力资源成本且能大大缩小店铺的租用面积,使商品的展示效率更高。

- 4、 在未来可以对我们的多功能自动化商品展示仪进行扩大与区域分化,并在每个区域增添冷气与湿度控制装置使各个区域的温度与湿度都处在展示商品的最适的温湿度(当所展示商品对温湿度有严格需求时)

### 参考文献

- [1] 钟铭. 多传感器信息融合的智能火灾探测系统开发与研究[D]. 燕山大学, 2019.
- [2] 郭少波, 闫世光, 曹菲, 等. 红外探测用无铅铁电陶瓷的热释电特性研究进展[J]. 物理学报, 2020.
- [3] 李慧, 周鸣宇, 吴世永. 霍尔效应[J]. 科技创新导报, 2015 (13): 16-16.
- [4] 易子川, 高玉梅, 刘黎明, 等. 基于 ES3144 霍尔传感器的电机测速应用[J]. 科教文汇(1):2.
- [5] 王尊冉, 庞俊腾, 陈均健, 等. 基于 Arduino 控制板的数据采集智能小车的控制系统设计与实现[J]. 计算技术与自动化, 2017, 36(001):66-73.
- [6] 韩丹翱, 王菲. DHT11 数字式温湿度传感器的应用性研究[J]. 电子设计工程, 2013, 21(13):83-85.
- [7] 倪天龙. 单总线传感器 DHT11 在温湿度测控中的应用[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2010, 10(006):60-62.

# 基于 WSN 的母羊体征监测系统设计与实现

参赛者：恽蓓蓓，唐瑞，曾冠玮

（浙江农林大学光机电工程学院，杭州 311300）

指导教师：陈均朗，曾松伟

**摘要：**针对母羊体征监测费时费力、传输距离受限等问题，设计了一套基于 WSN 的母羊体征监测系统。该系统首先通过颈环采集节点实时采集母羊加速度、体温等信息，再通过 ZigBee 和 GPRS 技术组成无线传感网络将数据传输至云服务器，服务器将数据存储于数据库并在网页平台实时显示。实验结果表明：基于 WSN 的母羊体征监测系统能够实时采集和传输母羊体征参数，测温相对误差及 3000m 内的网络丢包率均小于 1%。监测系统运行稳定，有利于提高管理人员的工作效率，也为建立母羊运动量及健康评估模型提供了技术基础。

**关键字：**颈环采集节点；无线传感网络；ZigBee；STM32 微处理器；体征监测

## 1 研究背景

肉羊产业作为畜牧养殖业最重要的组成部分之一，为我国经济发展提供了极大的助力。随着近年来肉羊养殖密度的增加，管理人员通过传统观测法并不能及时获取母羊的体征信息，致使其健康状况及日常运动量得不到保障，发病数量急剧上升<sup>[1]</sup>。因此，急需一套便捷有效的监测系统对母羊的日常体征进行实时监测，有助于尽早发现患病母羊。目前，对家畜的体征监测主要以奶牛、母猪作为研究对象<sup>[2-6]</sup>，鲜有针对母羊的相关研究。尹令等<sup>[7]</sup>采用 K 型热电偶监测奶牛鼻孔内体温，将呼出气体热度的高低变化算作一次呼吸频率，但当奶牛在采食和饮水时，热电偶易从鼻孔处掉落，且将传感器置于动物体内的监测方案易导致其产生异常反应。屈东东等<sup>[8]</sup>将实时采集的奶牛耳道边沿温度通过 WIFI 模组发送到服务器并存储于数据库，便于管理人员查询，但当传输距离超过 80 米时，数据丢包率明显增大。杨宇阆奕等<sup>[9]</sup>基于 ZigBee 技术设计了一套奶牛体征监测系统，实时采集奶牛的体温和加速度信息，但采集节点和上位机之间的通信距离有限，导致管理人员无法便捷的进行远程监测。

## 2 系统创新点



本文主要创新点包括以下几个方面：（1）本文研发的基于嵌入式的湖羊体征监测系统能够实时采集湖羊温度、加速度等体征信息，基于 Zigbee 和 GPRS 技术组成的无线传感网络，打破了通信距离的限制并保证了较低的丢包率，采集的数据最终发布于网页前端，使管理人员节省了时间和空间，提高了效率；（2）本文提出了一种基于区间阈值与 GA-SVM 分类模型的湖羊产前行为识别的方法，实现饮水、采食、反刍、行走、趴卧 5 种行为较高准确率的分类识别，可识别类型增多，且适用性提升，为建立产前湖羊运动量及健康评估模型、预测其分娩时间、人工助产决策等方面提供了理论依据。

### 3 系统总体设计

系统总体功能结构如图 1 所示。颈环采集节点通过松紧布带佩戴于母羊颈部下方，并使用魔术贴来调整佩戴的舒适程度。节点内部集成了温度和加速度传感器，可实时采集体征参数。采集到的数据通过 ZigBee 无线发送至协调器基站，该基站采用 STM32 为中央处理器，基于 FreeRTOS 实时操作系统运行 STemWin 图形界面应用程序并控制 GPRS 模块将数据传输至服务器后端。云服务器将数据存储于 MySQL 数据库并在 HTML 网页前端进行显示，方便管理人员查询及下载。

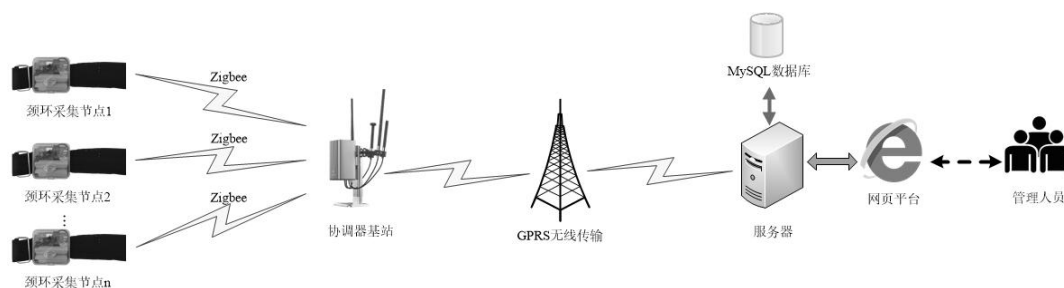


图 1 系统总体功能结构图

## 4 系统硬件设计

### 4.1 主控模块

颈环采集节点和协调器基站均采用意法半导体集团推出的 STM32F103RCT6 为主控芯片。该款芯片使用 ARM Cortex-M3 架构，LQFP64 封装<sup>[11]</sup>，具有高性能、低功耗、体积小等优点，非常适合在轻小型设备上应用。STM32 最小系统如图 2 所示。

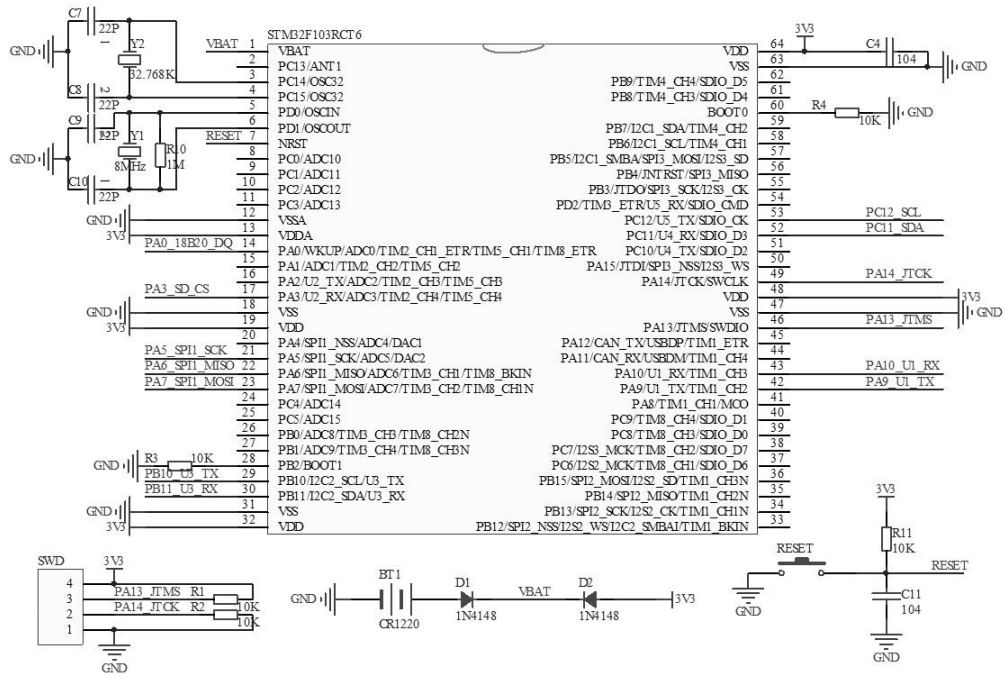


图 2 STM32 最小系统

## 4.2 体征参数采集模块

本系统采用 DS18B20 温度传感器和 MPU6050 加速度传感器对母羊的体征状况进行实时监测。DS18B20 采用单总线数据通信方式，测温范围为 $-55\sim 125^{\circ}\text{C}$ ，精度为 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，具有体积小、精度高、占用资源少、抗干扰性能强等优点<sup>[12]</sup>。MPU6050 运动处理组件通过 I2C 接口与 STM32 实现数据通信。AD0 引脚悬空，则传感器默认地址为 0x68。此外，MPU6050 内部集成了 3 轴加速度和 3 轴陀螺仪传感器，大大降低了开发难度。体征参数采集模块接口电路如图 3 所示。

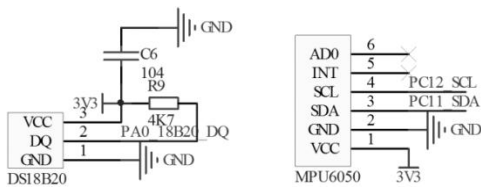


图 3 体征参数采集模块接口电路

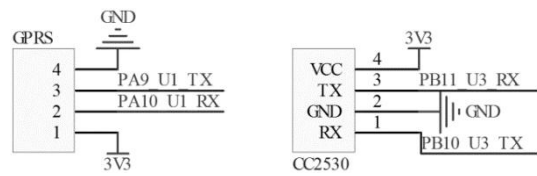


图 4 无线传输模块接口电路

## 4.3 无线传输模块

羊棚内数据的无线传输采用美国德州仪器的 CC2530 解决方案。分别将颈环采集节点和协调器基站中的 ZigBee 模块设置为终端模式和协调器模式，组成星型无线传感网络，通过板载 PCB 天线可实现 300 米内数据的稳定传输，满足羊场的实际需求。此外，低功耗的优点也提升了节点的续航时间。

协调器基站通过有人物联网技术有限公司的 GPRS 模块与云服务器之间进行无线通信，基于 SIM 卡的 4G 流量和移动通信基站实现数据传输，不再受到距离的限制。ZigBee 和 GPRS 均

采用 UART 串口与 STM32 进行交互，其接口电路如图 4 所示。

#### 4.4 存储模块

本系统在颈环采集节点中加入了 TF 卡存储模块，防止无线传输过程中丢包导致的数据遗漏。存储模块电路原理如图 5 所示。

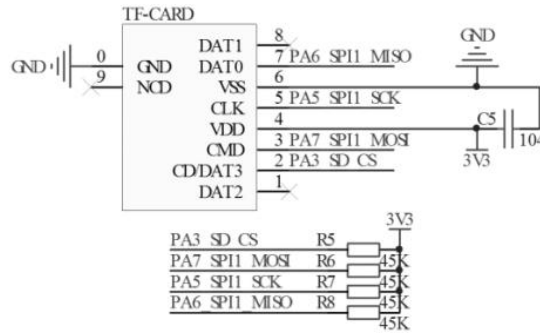


图 5 存储模块电路原理

#### 4.5 电源模块

颈环采集节点的电源模块必须满足质量轻小、续航持久等要求，本研究采用德玲达新能源科技电子厂生产的 3.7V/6800mA·h 锂电池作为电源输入，可确保颈环采集节点连续稳定工作 14 天左右。此外，选用 XC6206P33 转压芯片实现 3.7V 至 3.3V 的低压差稳压，其电路原理如图 6 所示。

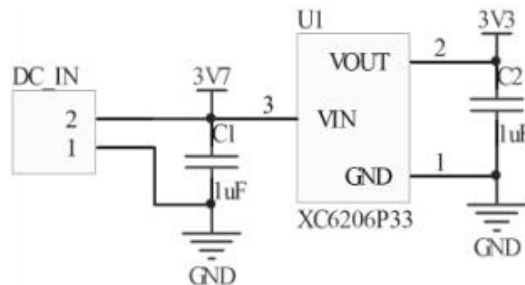


图 6 颈环采集节点电源模块电路原理

协调器基站采用 12V/1A 适配器作为电源输入，选用 MP1470 和 LM2596 实现 5V 和 3.3V 的转压，其电路原理如图 7 所示。

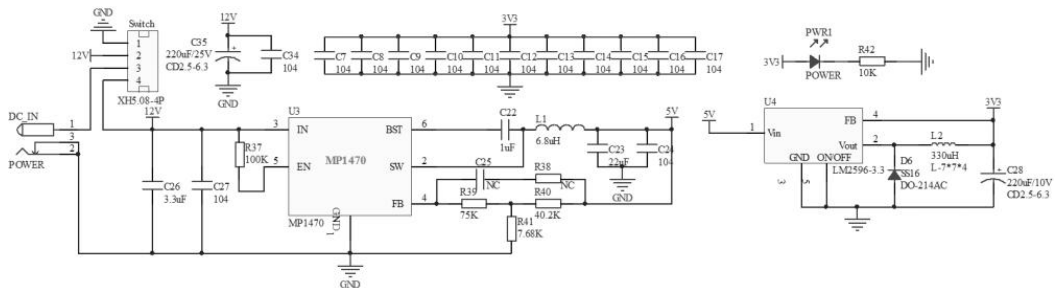


图 7 协调器基站电源模块电路原理

### 5 系统物理原理

## 5.1 三轴线加速度传感器

利用电磁力来平衡力得到  $F$ , 从而通过  $a=F/m$ , 得到加速度  $a$ , 通过获得加速度  $a$  与重力加速度  $g$  在坐标轴上的分量, 从而得到物体相对于水平面的倾斜角度  $\theta$ , 其  $y$  轴的输出即为:  $\sin(\theta) * g + \cos(\theta) * a$ 。通过分析和对比, 它可以检测出母羊的运动幅度, 从而稳定地采集体征数据, 确定母羊的运动状态。

但实际上, 运动加速度  $a$  是由线加速度  $v$  和角加速度  $\omega$  叠加而成的, 并且由于传感器并不在物品轴心, 若设传感器安装位置到轴心位置的长度为  $h$ , 则  $a = v + \omega * h$ 。

因此如果只用线加速度传感器来测量, 误差会很大。由此, 我们需要加入一个角速度传感器。

## 5.2 三轴角速度传感器

一个旋转物体的旋转轴所指的方向在不受外力影响时, 是不会改变的。三轴角速度传感器就是基于角动量守恒定律设计出来, 能够感测和维持方向的装置。它可以计算出某一方向的角速度  $\omega$ , 通过  $\theta = \omega * t$ , 得到物体转过的角度。

与前面提到的三轴线速度传感器的数据相结合、处理, 就可以得到较为准确的数据, 从而监测母羊的运动状态, 并可以人为判断正在做的事情。

# 6 系统软件设计

## 6.1 下位机软件设计

下位机软件主要包含颈环采集节点和协调器基站两部分。颈环采集节点基于 STM32 微处理器首先初始化各个功能外设及模块, 再挂载 TF 存储卡并建立基于终端节点的 ZigBee 网络。组网成功后, 基于数字型温度传感器 DS18B20 实时采集母羊的体温信息。通过软件将加速度传感器 MPU6050 的量程设置为  $\pm 2g$ , 实时监测加速度变化。采集完成后, 将数据打包存入 TF 卡并通过 ZigBee 网络进行发送。

协调器基站基于 STM32 运行 FreeRTOS+STemWin 图形界面实时操作系统。初始化各个功能模块后, 协调器基站与颈环终端节点建立连接, 组成星型拓扑结构的无线传感网络, 接收颈环终端节点实时发送的数据包并解析。此外, 协调器基站还需控制配置好 IP 和端口号的 GPRS 模块发送服务器连接请求。连接成功后, 基于 TCP 协议将数据发送至云服务器后端。

## 6.2 上位机软件设计

上位机软件主要包含云服务器、数据库、网页前端三部分。云服务器端采用 Java 编程语

言，通过 socket 类监听 GPRS 的连接状态。连接成功后，根据实际情况判断是否需要创建新的处理线程并基于 TCP 协议实现上下位机之间的通信，最终将接收到的数据通过 JDBC 接口分类并持久化存入 MySQL 数据库。

基于 HTML 编写网页前端，首先判断用户注册登录信息的有效性，再根据用户信息校验其权限，若有权则从 MySQL 数据库中读取数据并在网页前端显示，实现数据的增删改查。此外，还提供了本地的数据存储功能。软件系统工作流程如图 8 所示。

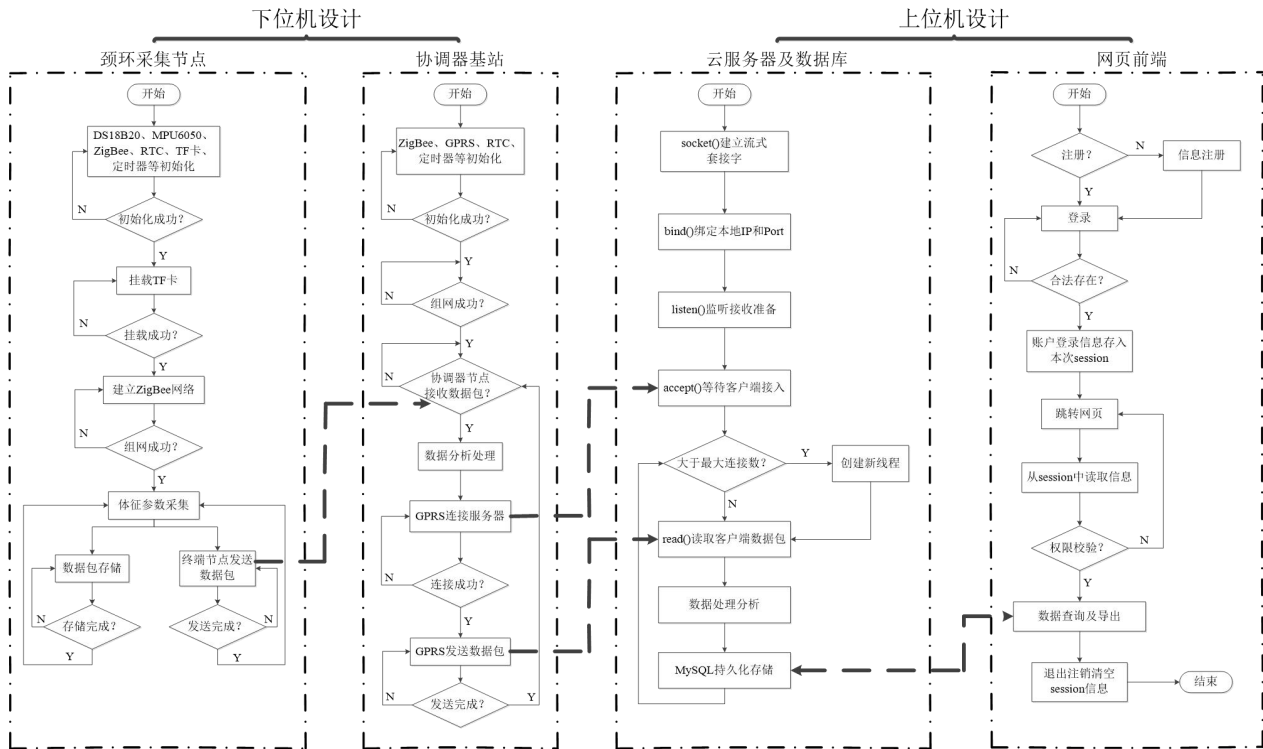


图 8 软件系统工作流程

## 7 测试与分析

### 7.1 颈环采集节点

颈环采集节点及固定方式如图 9 所示。节点尺寸为 75mm×75mm×25mm，总质量为 189g。整个节点封装在一个密闭防水塑料盒中，通过松紧布带固定于母羊颈部下方。将节点所在位置定为三维空间坐标原点，则三轴加速度传感器的 +X、+Y、+Z 轴分别指向母羊正前方、正右方、重力方向。

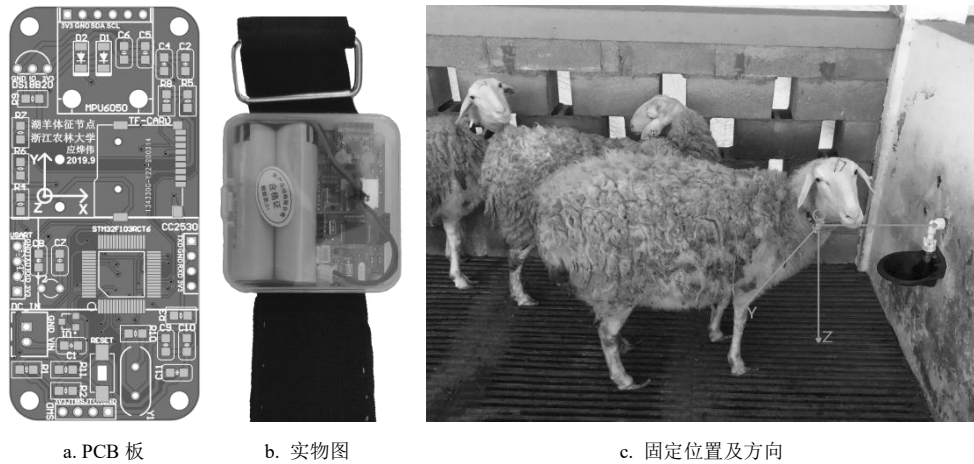


图9 颈环采集节点及固定方式

通过观看羊棚监控录像发现，母羊在佩戴颈环采集节点初期会出现互相撕咬松紧布带、刮蹭栏杆等异常行为，但在经过 24h 适应期后，其异常行为基本消失不见。因此，颈环采集节点不会对母羊的日常行为产生影响。此外，经过一个月的监测，颈环采集节点依旧牢固的绑在母羊颈部下方并稳定的采集体征数据，没有因其日常行为活动而面临掉落的风险，具有较好的实用性。

## 7.2 温度测试

在羊棚环境中，将高精度手持测温仪 AS837 采集的数据作为标准温度，对颈环采集节点的 DS18B20 温度传感器进行测温误差计算。本研究采用实时平均数算法来提高传感器的测温精度，即颈环采集节点每分钟采集 6 个温度数据，去掉最大值和最小值，剩余 4 个数据求取平均值以代表 1 分钟内的平均温度。计算相对误差=(测量温度-标准温度)/标准温度，其结果如表 1 所示。

表 1 测量温度与标准温度对比

颈环采集节点 ID	时间	标准温度/℃	测量温度/℃	相对误差/%
1	10:56:00	24.1	24.1	0
1	10:57:00	24.1	24.2	0.41
1	10:58:00	24.4	24.5	0.41
1	10:59:00	24.7	24.9	0.81
1	11:00:00	25.1	25.2	0.40

由表 1 可知，标准温度表现出逐步上升的趋势，而测量温度也同步的表现出上升趋势，且相对误差均小于 1%。因此，DS18B20 温度传感器能够精准的采集母羊体温信息，为母羊的异常体温监测奠定了基础。

## 7.3 无线传输及丢包率测试

将各个颈环采集节点分别佩戴于不同母羊的颈部下端，再将协调器基站放置于羊棚中心位置，组成无线传感网络，进行体征数据的实时采集和无线传输。基于 TCP 协议实现上下位

机的通信，最终将体征数据显示于网页前端，便于管理人员浏览及查询，大大节省了人力，提高了工作效率。网页显示效果如图 10 所示。



图 10 网页前端信息发布平台

为了验证基于 ZigBee 和 GPRS 技术的无线传感网络能否满足羊场的实际需求，本研究进行了不同距离下的丢包率测试。颈环采集节点的采样频率为 0.1Hz，协调器基站每隔 60s 发送 1 次体征数据包，每个数据包 80 个字节，在距离羊棚分别为 100、500、1000、3000、5000m 的地方登陆网页查看接收到的体征数据。丢包率=(发送字节数-接收字节数)/发送字节数，其测试结果如表 2 所示。

表 2 无线传感网络丢包率测试

颈环采集节点 ID	UART 波特率/(位/s)	测试包数/个	发送字节数/个	发送间隔/s	接收字节数/个	距离/m	丢包率/%
1	9600	2880	230400	60	230240	100	0.07
2	9600	2880	230400	60	229920	500	0.21
3	9600	2880	230400	60	229520	1000	0.38
4	9600	2880	230400	60	228800	3000	0.69
5	9600	2880	230400	60	227680	5000	1.18

由表 2 可知，1000m 内的网络丢包率都极低，不超过 0.5%，3000m 内的网络丢包率均小于 1%，5000m 的网络丢包率仅为 1.18%。数据的网络丢包率并没有随着距离的增加而明显增大，能够较好的应用于羊场。ZigBee 和 GPRS 技术的应用，打破了无线通信传输距离的限制，只要周边存在移动基站即可保证数据的稳定传输，也为远距离通信提供了一种解决方案。

## 8 应用前景

随着信息技术的发展，物联网技术与农业畜牧业之间的关系越来越密切。传统人为观测母羊健康状况的方法，费时费力且不能及时发现患病羊只。本研究设计了一套基于 WSN 的母



羊体征监测系统，通过颈环采集节点内的传感器实时采集母羊的体温和加速度信息，基于 ZigBee 和 GPRS 技术组成无线传感网络，将数据传输至云服务器并存入数据库，最终在网页前端显示。本系统实现了对母羊体征参数的实时监测及远距离传输，解放了养殖场的劳动力，提高了管理人员的工作效率。此外，本系统采集的体征参数解决了发现患病羊只的滞后性问题，对建立母羊运动量及健康评估模型具有十分重要的意义。

### 参考文献

- [1] 王翀, 杨金勇, 夏月峰, 等. 浙江省肉牛肉羊产业分析及养殖现状调研[J]. 畜牧与兽医, 2017, 49(3): 111—115.
- [2] 侯云涛, 蔡晓华, 吴泽全, 等. 奶牛行为特征识别方法的研究与实现—基于支持向量机[J]. 农机化研究, 2018, 40(8): 36—41.
- [3] 闫丽, 沈明霞, 姚文, 等. 基于 MPU6050 传感器的哺乳期母猪姿态识别方法[J]. 农业机械学报, 2015, 46(5): 279—285.
- [4] Rombach M, Münger A, Niederhauser J, et al. Evaluation and validation of an automatic jaw movement recorder (RumiWatch) for ingestive and rumination behaviors of dairy cows during grazing and supplementation[J]. Journal of Dairy Science, 2018, 101(3): 1—13.
- [5] 刘龙申, 沈明霞, 姚文, 等. 基于加速度传感器的母猪产前行为特征采集与分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(3): 192—196.
- [6] 王俊, 张海洋, 赵凯旋, 等. 基于最优二叉决策树分类模型的奶牛运动行为识别[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 202—210.
- [7] 尹令, 刘财兴, 洪添胜, 等. 基于无线传感器网络的奶牛行为特征监测系统设计与实现[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 203—208.
- [8] 屈东东, 刘素梅, 吴金杰, 等. 群养奶牛体温实时监测系统设计与实现[J]. 农业机械学报, 2016, 47(S1): 408—412.
- [9] 杨宇闯, 何东健, 刘唱, 等. 基于 ZigBee 的奶牛体征监测系统设计与实现[J]. 农机化研究, 2018, 40(9): 74—80.
- [10] 张曦宇, 武佩, 宣传忠, 等. 基于加速度传感器的种公羊运动行为识别[J]. 中国农业大学学报, 2018, 23(11): 104—114.
- [11] 董桂菊, 刘斯达, 陈海霞, 等. 基于 STM32 的羊群智能化养殖装置的设计[J]. 农机化研究, 2020(4): 95—99.
- [12] 刘忠超, 盖晓华. 基于单片机的温室多功能可调数显稳压电源设计[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(3): 70—73.