

双折射滤光器的机械结构

李挺 倪厚坤

(南京天文仪器厂)

一、对滤光器机械结构的要求

双折射滤光器在光学上系由两组Sole级，一组Evans级和四组Lyot宽视场级组成，此外，还有三组宽视场结构的KD*P晶体调制器，其中一组置于最前方，用作磁场分析器，另两组分别夹在第2和第3Lyot宽场级当中，用于测量视向速度。每个Lyot级还附有调节透过的旋转波片。晶体片(水晶，冰洲石和KDP)外形尺寸为 $37 \times 37 \text{mm}^2$ ，共98片，加上各种用途的玻璃片，光学元件共约150件。为保证滤光器具有良好的性能，其机械结构应满足以下要求：

- 1) 保证诸晶体片空间位置的准确性：相互平行度和晶体光轴的方位角的准确度均在 $2'$ 以内。
- 2) 具有尽可能好的保温性能：为高精度测量视向速度(~ 1 公里/秒)，滤光器中央(最厚Lyot级所在处)工作温度的稳定性应优于 $1/200^\circ\text{C}$ 。
- 3) 防止硅油泄漏，以免空气进入晶体工作面，损害成像质量。还要防止硅油污染变色。
- 4) 四块旋转波片的转动引出滤光器。
- 5) 能安全可靠地装入望远镜或取出。

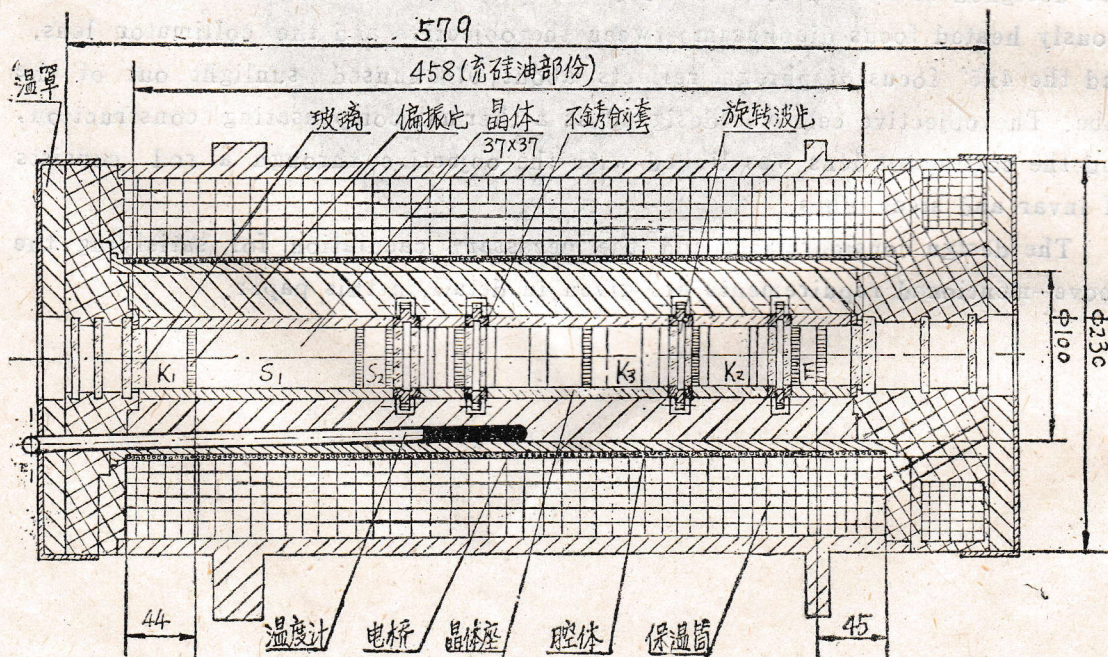


图1 滤光器剖视图

二、机械结构设计

图1示出滤光器结构的剖视图，未示出转动波片的传动装置。晶体置于用LC4铝合金制的组合方形晶体座内，选用LC4铝合金的理由是：不污染硅油；导热性好， $\lambda=133 \frac{\text{大卡}}{\text{米}\cdot\text{时}\cdot\text{度}}$ ；导温系数大，热惯量小，达到热平衡的速度较快；重量轻；机械加工性能好等等。共有5段铝合金座，每两段之间夹着一个装有旋转波片的不锈钢齿轮套。鉴于不锈钢与铝合金（经过阳极氧化处理）摩擦，会使与其接触的硅油变成黑色，因此，在晶体座端安装不锈钢银套，作为不锈钢齿轮圈在其内转动的轴承。晶体座再固定在Ly12铝合金园筒腔体内，后者也是由两半拼合而成的。此园筒塞入一个Ly12铝合金恒温筒内，它经氧化着黑色处理，其外园柱面上形成了一层绝缘的氧化铝薄膜，由锰铜丝和铜丝构成的惠斯登电桥密绕于其上。在腔体外园面和恒温筒内表面上加工出长槽，测量滤光器中部温度的精密水银温度计便插在这个槽内。

五个晶体座的内表面是在与腔体下部机械固连后，在坐标镗床上一次加工而成的，以保证安装于内的晶体的光轴准直性。每个晶体座端都有厚度调节片，根据每晶体座内光学元件的厚度及相关尺寸的实测数值，最终确定垫片的厚度，以保证晶片之间有0.01mm左右的硅油膜厚度。

在机械结构方面，最重要的是保证晶体座端面互相平行以保证诸晶片的相互平行性。为此，将装配好的晶体座和腔体下部一并置于坐标镗床上，按腔体母线找正后，用靠表测出诸端面与母线的不垂直度，最大可达0.05，然后取出晶体座，对相应端面进行修正，误差控制在0.02之内。最后用光学测角仪测量组合精度，如图2所示。晶体座端装上接触面经过精密研磨（不平度 $<5\mu$ ）的压圈，于其上安置平面平行玻璃板，在测角仪目镜内可看到诸表面反射的标尺像，从而判断诸面的平行度，测量表明诸表面的不平行度小于 $1.5'$ 。*)

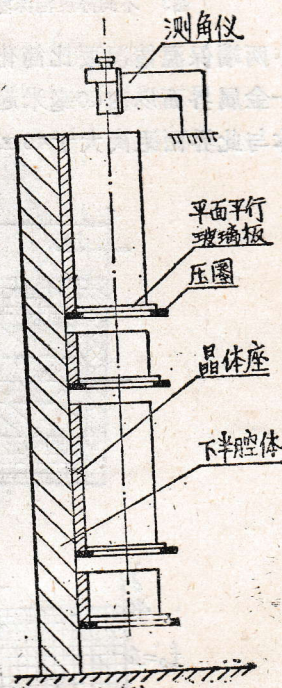


图2 晶体座端面平行度的检测

三、保温设计和温度的测量

滤光器恒温筒直径12厘米，长47.8厘米，向外的热量主要是通过外园柱面散发，这部分是用厚4.5厘米，外径21厘米的硬质泡沫塑料筒保温的。这个厚度的选择，一方面是受结构尺寸的限制，同时，通过散热功率的计算，表明这厚度的选择是合适的。图3示出散热功率与泡沫塑料筒厚度的关系：壁厚45mm处于曲线上较平坦的部份，再增加壁厚，散热功率的

*)由北京天文台文国祥测定

减小就相当缓慢。有关散热功率的计算可参阅本文的附录。

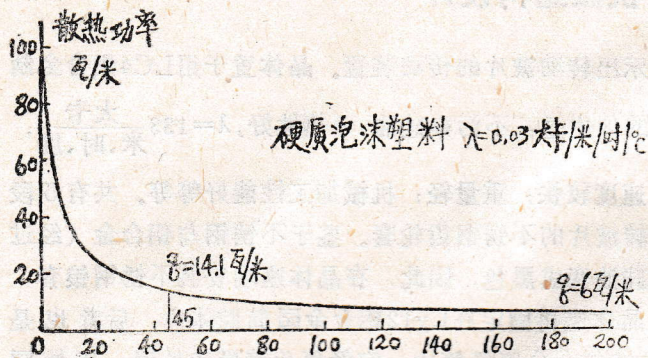


图3 不同厚度泡沫塑料筒的散热功率 厚度 (mm)

滤光器两端盖是用具有一定的机械刚度而且导热性差的玻璃纤维增强尼龙做的。在进行机械结构设计之前,曾按图4a所示的简化模型,用有限差分法(图4b)计算滤光器内部的温度分布,获得如图4c所示的等温线。在计算中,方形晶体用等面积园形代替,其导热系数取冰洲石,石英和玻璃的平均值。泡沫塑料筒和塑料端盖都取较大的导热系数值,放热系数也取偏大的值。此外,实际结构中两端保温情况要比简化模型好得多。因此,计算结果是很保险的。由图4c可见,在塑料—金属界面以内40毫米起,温差小于 0.01°C (环境温度为 2°C),在具体设计时,使双折射晶体与此界面距离大于40mm。

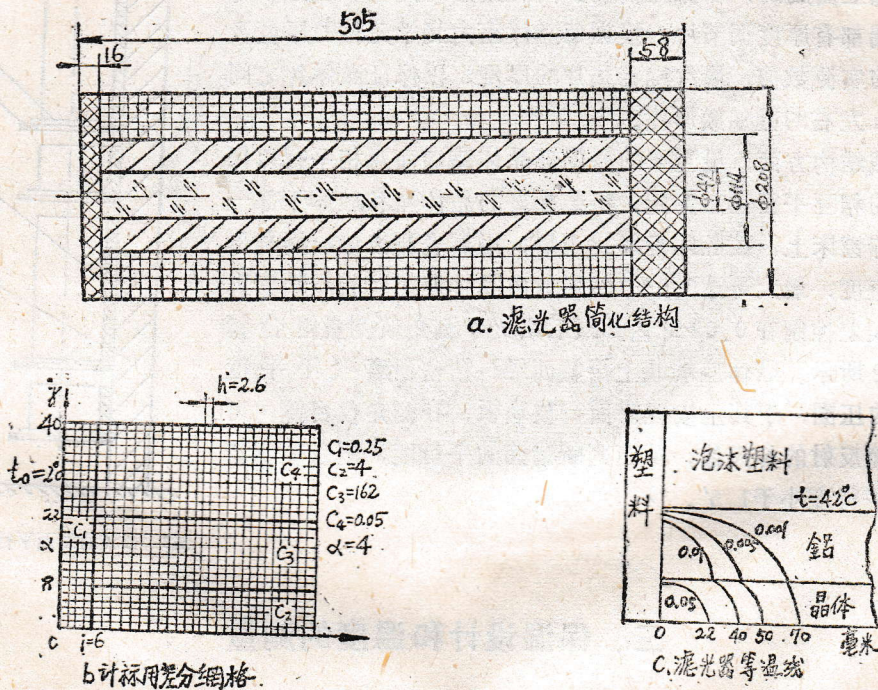


图4 滤光器温度分布的计算

在结构设计上还采取其它措施以增强保温性能:两端塑料盖尽可能挖空,并填以泡沫塑料。恒温筒端铣出若干小凸台与塑料盖接触及固连。在两端还加了两个辅助加热罩,可当环境温度很低时适当加温,以减小端面散热。转动四个波片的连杆是用不锈钢做的,在所有金属材料中,不锈钢的热传导最低($\lambda \sim 15 \frac{\text{大卡}}{\text{米} \cdot \text{时} \cdot \text{度}}$),因此,由它带到滤光器外面的热量

也较少。

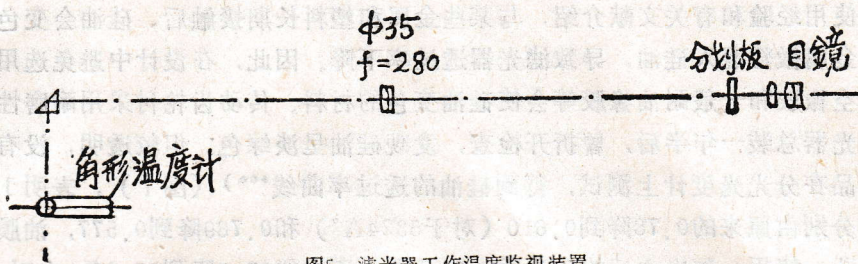


图5 滤光器工作温度监视装置

为检测滤光器中部工作温度的稳定性，在恒温筒和铝合金腔体交界处插入一根特制的直角形水银温度计，它的测量范围由41.5℃到43℃，分划值0.01℃（线距离0.465mm），利用读数望远镜（光学系统见图5）可在主望远镜末端目视估读，精度接近0.001℃。实测结果是在1天工作期间内看不读数变化，即工作温度稳定到0.002~0.001℃。

四、油封设计和硅油的污染附录

滤光器的恒温腔体内充满硅油，以保证内部光学元件之间有一稳定而薄（~0.01 mm）的油膜，以消除界面反射导致的光损失。为防止气泡进入腔体之内，出现在光路中间影响成像质量，在结构设计上必须确保不漏油。恒温腔体有许多连接环节，其中大部分是固定连接，用一般O形密封橡胶圈便可达到封油目的。问题在于四根转动杆的活动密封，大多数牌号的橡胶，包括工业上常用的耐油胶圈，在硅油中都发生显著溶胀，用来做转动密封，会增大摩擦阻力矩，甚至卡死。为解决这个问题，选用三种航空用的橡胶材料进行溶胀试验**）：将小片丁晴、氯丁及氟橡胶置于烧杯中，注入适量硅油，热后置入烘箱加温到100℃，保温24小时，用天平称出每块样片加热前后的重量 m_0 和 m_1 ，便可计算出重量溶胀率

$$E_m = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \%$$

更重要的是测出体积溶胀率，为此，将天平的秤盘浸没在水中，称出样片重量 Δm_0 和 Δm_1 ，按阿基米德原理， $\Delta m_0 = m_0 - v_0$ ， $\Delta m_1 = m_1 - v_1$ ，其中 v_0 和 v_1 是加温前后样片的体积，由此可得出材料的体积溶胀率： $E_v = \left(\frac{m_1 - \Delta m_1}{m_0 - \Delta m_0} - 1 \right) \%$ 。

表1 三种橡胶材料的硅油溶胀率

	5080丁晴胶	4172氯丁胶	7270氟橡胶
E_m	+24.33%	+27.67%	-0.056%
E_v	+28.17%	+35.57%	+0.157%

显见氟橡胶的溶胀最小，接近于零，最适宜于做转动密封之用。实际使用的O形胶圈的内径为 $\phi 6$ mm，截面 $\phi 2$ mm，压缩量0.15 mm。转动阻力矩很小，长期使用表明其性能相当稳定。

由于恒温腔体内各种材料的膨胀系数都小于硅油，因此，在滤光器升温过程中，硅油膨胀，会在薄弱环节渗出，当滤光器冷却下来时，就会有气泡进入，为此，在滤光器前端加了一个缓冲贮油器，可容纳因热胀而溢出的硅油。此外，还可用它为入口，注入新鲜硅油。图

**）由南京511厂中心试验室朱永年同志提供

6 示出缓冲贮油器的结构。

根据以往使用经验和有关文献介绍，与某些金属和塑料长期接触后，硅油会变色，传动付磨损也会使金属微粒混入硅油，导致滤光器透过率下降。因此，在设计中避免选用紫铜，夹布胶木，真空橡胶和一般耐油橡胶等会使硅油变色的材料。传动齿轮付采用耐磨性能较好的不锈钢。滤光器总装一年半后，曾拆开检查，发现硅油呈淡绿色；但较透明，没有混浊现象，将它的样品在分光光度计上测试，得到硅油的透过率曲线***）（图7），表明1厘米厚硅油的透过率分别由原来的0.78降到0.610（对于5324A°）和0.769降到0.577，油膜总厚度为1毫米，因此，使用一年半之后的硅油透过率分别由原来的97.5%降到95.2%（对于5324A°）和97.4%降到94.6%，也就是说将滤光器透过率分别降低2.4%和2.9%，因此并不严重。

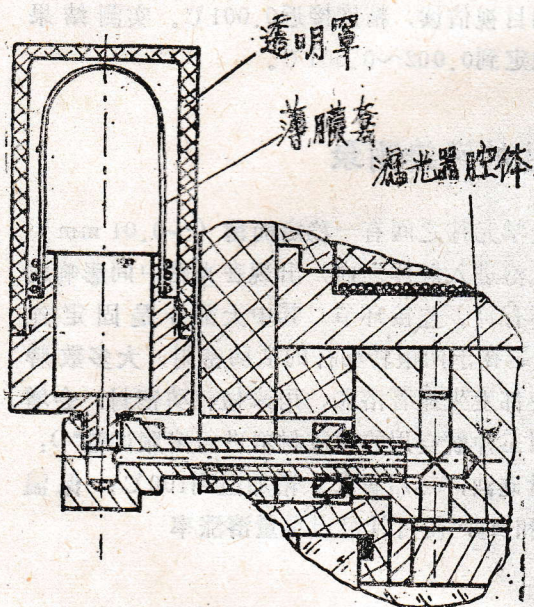


图6 缓冲贮油器

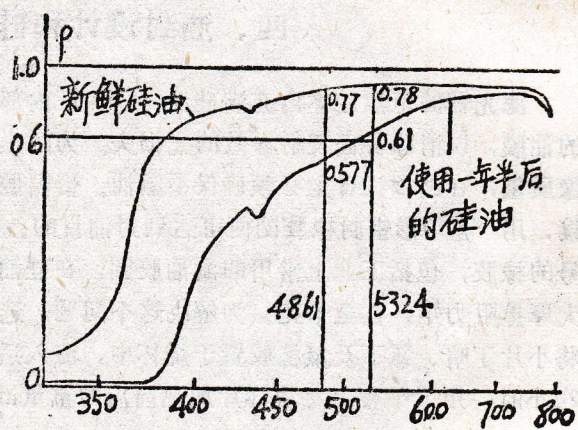


图7 硅油的分光透过率

附 录

散热功率的计算

在左图中， d_1 为滤光器恒温筒的外径， d_2 为保温的泡沫塑料筒的外径， d_3 是铝合金壳体外径， $d_3 = d_2 + 200$ 。 $d_1 = 120$ 。由于铝合金导热系数远大于泡沫塑料，可认为 d_2 和 d_3 两个外圆柱面上的温度相同，等于 t 。设环境温度为 0°C ，放热系数为 α ，泡沫塑料的导热系数为 λ ，则在单位长度上外圆柱面的散热量为

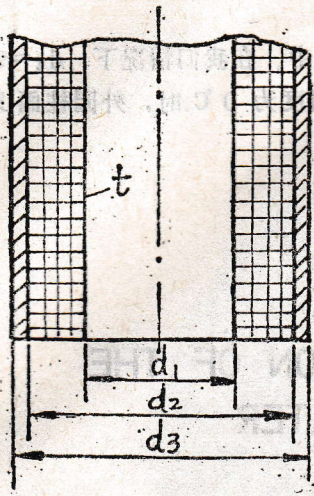
$$q = \frac{2\pi\lambda}{\ln(d_2/d_1)}(42-t) = \pi \cdot d_3 \cdot \alpha \cdot t \quad (1)$$

可得：

***）由南京天文仪器厂李开寿同志提供

$$t = \frac{1+k}{42}, \quad k = \frac{\ln(d_2/d_1) \cdot (d_2+0.2) \cdot \alpha}{2\lambda} \quad (2)$$

线散热功率



d_2	d_3	t	α	q
0.12	0.14	42	5.06	108.7
0.13	0.15	21.9	4.6	55.1
0.14	0.16	16.2	3.9	36.7
0.16	0.18	10.7	3.4	23.8
0.18	0.20	8.1	3.1	18.3
0.21	0.23	6.0	2.8	14.1
0.24	0.27	4.9	2.5	11.8
0.27	0.30	4.1	2.4	10.3
0.30	0.32	3.5	2.2	9.2
0.35	0.37	2.9	2.1	8.0
0.40	0.42	2.5	1.9	7.2
0.50	0.52	1.9	1.7	6.1

放热系数 α 是按苏联米海耶夫著“传热学基础”中第三章“流体自由运动时的放热”中的公式计算的：

$$\alpha = 0.54 \cdot \lambda_m \left(\frac{\beta_m \cdot g \cdot t \cdot \text{Pr}}{d_2 \gamma_m^2} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

式中 λ_m , β_m , γ_m 是当温度为 t_m 时空气的导热系数, 体胀系数和动粘性系数

$$\text{Pr} = \left(\frac{\mu \cdot g_{cp}}{\lambda} \right)_m, \quad \text{其中 } \mu \text{ 和 } g_{cp} \text{ 是内摩擦系数和定压比容。在我们的情况下,}$$

$t_m = \frac{1}{2}t$ 。这些系数都可在空气的物理常数表格上查到。

取 $d_2=0.12$ (无泡沫塑料保温), 0.13, 0.14, 0.16, 0.18, 0.21 (设计值), 0.24, 0.27, 0.30, 0.35, 0.40, 0.50米, 进行散热量的计算:

1) $d_2=0.12$, $t=42^\circ\text{C}$, $t_m=21^\circ\text{C}$, 查表得

$$\lambda_m=0.0224, \quad \gamma_m=1.516 \cdot 10^{-5}, \quad \text{Pr}=0.703, \quad \beta_m=\frac{1}{294}, \quad \text{代入(3)式:}$$

$$\text{有: } \alpha = 5.06 \frac{\text{大卡}}{\text{米}^2 \cdot \text{时} \cdot \text{度}} \quad \text{代入(1)式}$$

$$\text{得 } q = 93.5 \frac{\text{大卡}}{\text{米} \cdot \text{时}} = \frac{97.2}{0.86} \text{瓦/米} = 108.7 \text{瓦/米}$$

2) $d_2=0.13$, $d_3=0.15$ 。取第一次近似, $\alpha=4.8$, 由(2)式

得 $k=0.96$, $t=21.42$, $t_m=10.7$, 查表得

$\lambda_m=0.0216$, $\gamma_m=1.422 \cdot 10^5$, $Pr=0.705$, $\beta=\frac{1}{292}$ 代入 (3) 式

有 $\alpha=4.58$ 。再进行一次迭代, 得 $\alpha=4.6$, $t=21.86$, 便足够精确, 于是, $q=55.1$ 瓦/米。

3) 类似地用迭代法对其它 d_2 值进行计算, 其结果列于附表之中。在我们情况下, $d_2=0.21$ 米, $q=14.1$ 瓦/米。园柱部分长476mm, 于是, 当环境温度为 0°C 时, 外园柱面的散热功率为 $14.1 \cdot 0.46=6.7$ 瓦。

THE MECHANICAL CONSTRUCTION OF THE 0.15 Å BIREFRINGENT FILTER

Li Ting, Ni Houkun.

(Nanjing Astronomical Instrument Factory)

The 0.15Å birefringent filter is the key part of the 35cm solar telescope—magnetograph with the following features:

1). All the optical elements (calcite, quartz, KD*P crystal, electroconductive glass and polaroid) are enclosed in five mosaic cylinders made of aluminium alloy and with a square central hole of 37×37mm each. There are four rotatable half wave plates used for adjusting the passband of the filter, each wave plate is mounted in a gear circle, which is in between two adjacent cylindrical cavities and can be rotated through corresponding driving elements by hand in the left side of the telescope tube.

2). The five cylindrical cavities are mounted together in a thermostatic cylinder also made of aluminum alloy, its temperature (42°C) is accurately controlled by a bridge circuit wound around its outer cylindrical surface, which is well thermo-isolated by a 4.6cm foam cylinder. Two ends of the filter are thermo-isolated by thick plastic plates.

3) All the gaps inside the thermostatic cylinder are filled with silicon oil for eliminating the reflection losses on the optical surfaces (near 300!), so the great attention was paid to the oil sealing for a large number of the mechanical joints. Especially, the O-rings made of fluoroelastomer which does not be solu-expanded in the silicon oil are chosen for sealing the four stainless

steel shafts for rotating the half wave plates. In the front of the filter, a plastic casing is mounted for absorbing the expanding oil and then avoiding the oil leakage.

4). A fine mercury-in-glass thermometer with 0.01°C graduation is inserted in the middle part of thermostatic cylinder and just below the bridge circuit, and one can monitor the working temperature of the filter to an accuracy of about 0.001°C by means of a reading telescope, its ocular is attached to the front plate of the telescope tube.