

第 3 章

集成运算放大电路



任务导入

集成运算放大器(简称集成运放)是一种通用性很强的集成电路,是集成的运算放大器,应用相当广泛。通俗地讲,运算放大器是一种开环放大倍数高达万倍的直流放大器,它早期用在模拟计算机中作为基本运算单元,完成加、减、乘、除等数学运算,所以有运算放大器之称。本任务的重点是掌握集成运放的符号及元件的引脚功能,从理解它的基本运算电路入手,逐步掌握其他集成运算放大器电路的分析,并且会安装和使用集成运放组成的应用电路。

3.1 集成运算放大器



学习目标

- (1) 了解集成运放的电路结构及抑制零点漂移的方法。
- (2) 理解差模与共模、共模抑制比的概念。
- (3) 掌握集成运放的符号及元件的引脚功能;了解集成运放的主要参数,了解理想集成运放的特点。
- (4) 能识读由理想集成运放构成的常用电路(反相输入、同相输入、差分输入运放电路和加法、减法运算电路),会估算输出电压值,能正确使用集成运放组成的应用电路。
- (5) 理解反馈的概念,了解负反馈应用于放大器的类型。

3.1.1 认识集成运算放大器

1. 零点漂移

1) 零点漂移现象

用来放大直流信号的放大电路称为直流放大器。当放大电路处于静态,即输入信号

电压为零时,输出端的静态电压应为恒定不变的稳定值。但是在直流放大电路中,即使输入信号电压为零,输出电压也会偏离稳定值而发生缓慢的、无规则的变化,这种现象叫做零点漂移,简称零漂,如图 3-1-1(b)所示。在如图 3-1-1(a)所示直接耦合放大电路中,即使将输入端短路,在其输出端也会有变化缓慢的电压输出,即 $\Delta U_i = 0, \Delta U_o \neq 0$ 。

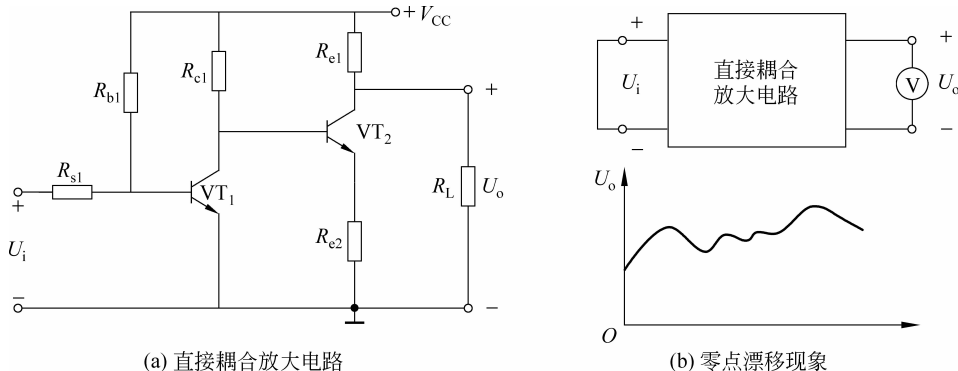


图 3-1-1 直接耦合放大电路及其零点漂移现象

2) 产生零点漂移的原因

产生零点漂移的原因有电源电压的波动、温度变化、元件老化等。其中,温度变化是产生零漂最主要的原因,因此也称为温度漂移。

3) 抑制零点漂移的措施

- (1) 选用稳定性好的高质量的硅管。
- (2) 采用高稳定性的稳压电源可以抑制由电源电压波动引起的零漂。
- (3) 利用恒温系统来减小由温度变化引起的零漂。
- (4) 利用两只特性相同的三极管组成差动放大器,有效地抑制零漂。

2. 差动放大电路

1) 电路组成

图 3-1-2 所示是一个基本差动放大电路,它由两个特性相同的三极管 VT_1 和 VT_2 组成对称电路,电路参数均对称(比如 $R_{C1} = R_{C2}, \beta_1 = \beta_2$ 等)。电路中有两组电源 V_{CC} 和 V_{EE} 。两个三极管的发射极连接在一起,并接了一个恒流源,它提供恒定的发射极电流 I_o 。这个电路有两个输入端和两个输出端,称为双端输入、双端输出差动放大电路。差动放大电路没有耦合电容,是直接耦合放大电路。

2) 静态特性

当没有输入信号,即 $u_{i1} = u_{i2} = 0$ 时,由于电路完全对称,这时两个三极管的集电极电流相等,则有 $I_{C1} = I_{C2} = I_o/2$,而 $I_{C1}R_{C1} = I_{C2}R_{C2}$,故 $u_o = u_{o1} - u_{o2} = 0$ 。也就是说,当输入信号为 0 时,其输出信号也为 0。

3) 动态特性

(1) 差模信号和共模信号

- 差模信号 u_{iD} : 一对大小相等,极性相反的信号称为差模信号,即 $u_{i1} = u_i/2, u_{i2} = -u_i/2, u_{iD} = u_{i1} - u_{i2}$ 。

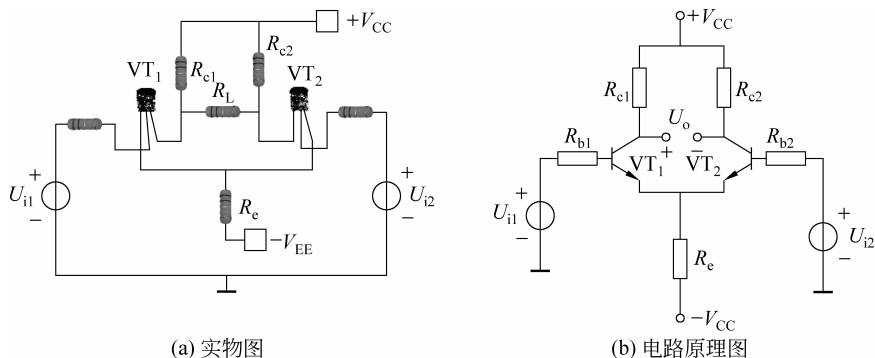


图 3-1-2 基本差动放大电路

- 共模信号 u_{IC} : 一对大小相等, 极性相同的信号称为共模信号, 即 $u_{i1} = u_{i2} = u_i/2$, $u_{iC} = (u_{i1} + u_{i2})/2$ 。

(2) 对差模信号的放大作用

在差模输入信号作用下, 差动放大电路一个三极管的集电极电流增加, 而另一个三极管的集电极电流减少, 使得 u_{o1} 和 u_{o2} 以相反方向变化, 在两个输出端将有一个放大的输出电压 u_o 。这说明, 差动放大电路对差模输入信号有放大作用。

(3) 对共模信号的抑制作用

在共模信号作用下, 由于电路参数对称, 两管集电极电流的变化是大小相等、方向相同, 因此 u_{o1} 和 u_{o2} 相等, 输出端 $u_o = u_{o1} - u_{o2} = 0$ 。这说明, 差动放大器电路对共模输入信号没有放大作用, 起抑制作用。

4) 共模抑制比

为了说明差动放大电路抑制共模信号的能力, 常用共模抑制比 K_{CMR} 这项指标来衡量。共模抑制比 K_{CMR} 的定义为: 放大电路对差模信号的电压放大倍数 A_d 和对共模信号的电压放大倍数 A_c 之比的绝对值, 即

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad (3-1-1)$$

差模电压放大倍数越大, 共模电压放大倍数越小, 则共模抑制能力越强, 放大电路的性能越优良。也就是说, 希望 K_{CMR} 的值越大越好。共模抑制比通常用分贝 (dB) 数来表示, 即

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \text{ (dB)} \quad (3-1-2)$$

在图 3-1-2 所示的差动放大电路中, 若电路参数完全对称, 则共模电压放大倍数 $A_c = 0$, 其 K_{CMR} 将是一个很大的数值, 理想情况下可以看成无穷大。

5) 抑制零点漂移

在差动放大电路中, 温度或电源电压的波动, 会引起两管集电极电流相同的变化, 其效果相当于共模输入方式。由于电路元件的对称性及发射极接有恒流源, 在理想情况下, 可使输出电压保持不变, 从而抑制了零点漂移。当然, 实际上要做到两管电流完全对称和理想恒流源是比较困难的, 由于实际的电路元件存在微小的不对称, 造成差动放大电路静

态时的输出电压不为0。但是,可以在差动放大电路中加上调零电路,使静态时的输出电压为0。

3. 集成运算放大电路简介

在半导体制造工艺的基础上,把整个电路中的元件制作在一块半导体基片上,构成特定功能的电子电路,称为集成电路。集成电路的体积小,性能好。集成电路分为模拟集成电路和数字集成电路两大类。模拟集成电路的种类繁多,有运算放大器、宽带放大器、功率放大器、直流稳压器以及电视机、收录机和其他电子设备中的专用集成电路等。在模拟集成电路中,集成运算放大器是应用最广泛的一种。表3-1-1列出了四种不同引脚分布的集成电路外形图。

表 3-1-1 四种不同引脚分布集成电路外形示意图

名称	实物图	解说
单列直插集成电路		引脚只有一列,引脚是直的
单列曲插集成电路		引脚只有一列,引脚是弯曲的
双列集成电路		引脚分成两列分布
四列集成电路		引脚分成四列分布

集成运放是一种有高电压放大倍数、高输入电阻和低输出电阻的多级直接耦合放大电路。

4. 集成运放的特点

- (1) 集成运放采用直接耦合方式,是高质量的直接耦合放大电路。
- (2) 集成运放采用差动放大电路克服零点漂移。由于在很小的硅片上制作很多元件,所以可使元件的特性达到非常好的对称性,加之采用其他措施,集成运放的输入级具有高输入电阻、高差模放大倍数、高共模抑制比等良好性能。
- (3) 用有源元件取代无源元件。用电流源电路提供各级静态电流,并以恒流源替代大阻值电阻。
- (4) 采用复合管,以提高电流放大系数。

5. 集成运放的组成及各部分的作用

集成运放有两个输入端,一个称为同相输入端,一个称为反相输入端,还有一个输出

端。其符号如图 3-1-3(b)所示。图中,带“-”号的输入端称为反相输入端,带“+”号的输入端称为同相输入端,三角形符号表示运算放大器。“ ∞ ”表示开路增益极高。它的三个端分别用 U_- 、 U_+ 和 U_o 来表示。一般情况下可以不画出电源连线。其输入端对地输入,输出端对地输出。

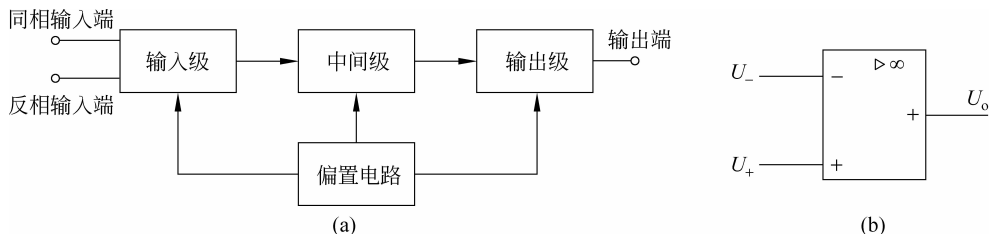


图 3-1-3 集成运放的符号及内部电路框图

集成运放内部电路由四个部分组成,包括输入级、中间级、输出级和偏置电路,如图 3-1-3(a)所示。

1) 输入级

输入级又称前置级,它是一个高性能的差动放大电路。输入级的好坏影响着集成运放的大多数参数。一般要求其输入电阻高,放大倍数大,抑制温度漂移的能力强,输入电压范围大,且静态电流小。

2) 中间级

中间级是整个电路的主放大器,主要功能是获得高的电压放大倍数。中间级一般由多级放大电路组成,并以恒流源取代集电极电阻来提高电压放大倍数,其电压放大倍数可达千倍以上。

3) 输出级

输出级应具有输出电压范围宽,输出电阻小,有较强的带负载能力,非线性失真小等特点。大多数集成运放的输出级采用准互补输出电路。

4) 偏置电路

偏置电路用于设置集成运放各级放大电路的静态工作点。与分立元件电路不同,它采用电流源电路为各级提供合适的集电极静态电流,从而确定合适的管压降,以便得到合适的静态工作点。

6. 集成运放的主要参数

为了合理地选用和正确使用集成运放,必须了解表征其性能的主要参数(或称技术指标)的意义。

1) 开环差模电压放大倍数 A_{od}

集成运放不外接反馈电路,输出不接负载时测出的差模电压放大倍数,称为开环差模电压放大倍数 A_{od} 。此值越高,所构成的运算电路越稳定,运算精度也越高。 A_{od} 一般为 $10^4 \sim 10^7$,即 $80 \sim 140\text{dB}$ 。

2) 输入失调电压 U_{io}

对于理想的集成运算放大器,当输入电压为 0(即反相输入端和同相输入端同时接地)时,输出电压应为 0。但在实际的集成运放中,由于元件参数不对称等原因,当输入电压为 0 时,输出电压 $U_o \neq 0$ 。如果这时要使 $U_o = 0$,必须在输入端加一个很小的补偿电压,它就是输入失调电压 U_{io} 。 U_{io} 的值一般为几微伏至几毫伏,显然它越小越好。

3) 输入失调电流 I_{io}

当输入信号为 0 时,理想的集成运放两个输入端的静态输入电流应相等,而实际上并不完全相等。定义两个静态输入电流之差为输入失调电流 I_{io} , $I_{io} = |I_{B1} - I_{B2}|$ 。 I_{io} 越小越好,一般为几纳安到 $1\mu\text{A}$ 之间。

4) 最大输出电压 U_{omax}

最大输出电压 U_{omax} 指集成运放工作在不失真情况下能输出的最大电压。

5) 最大输出电流 I_{omax}

最大输出电流 I_{omax} 指集成运放所能输出的正向或负向的峰值电流。通常给出输出端短路的电流。

除以上介绍的指标外,还有差模输入电阻、开环输出电阻、共模抑制比、带宽、转换速度等。

7. 常见集成运放芯片介绍

1) LM324

LM324 是在一块芯片上集成了 4 个通用运算放大器,适合需要使用多个运算放大器且输入电压范围相同的运算电路。主要技术参数如下:增益带宽为 1MHz,直流电压增益为 100dB,输入偏移电压为 2mV,输入偏移电流为 45nA,单电源供电电压为 32V,双电源输入电压为 $\pm 16\text{V}$,输入电流为 50mA,输入电压为 $0 \sim 30\text{V}$ (单电源供电)或 $-15 \sim 15\text{V}$ (双电源供电),工作温度为 $0 \sim 70^\circ\text{C}$ 。其引脚图如图 3-1-4 所示。

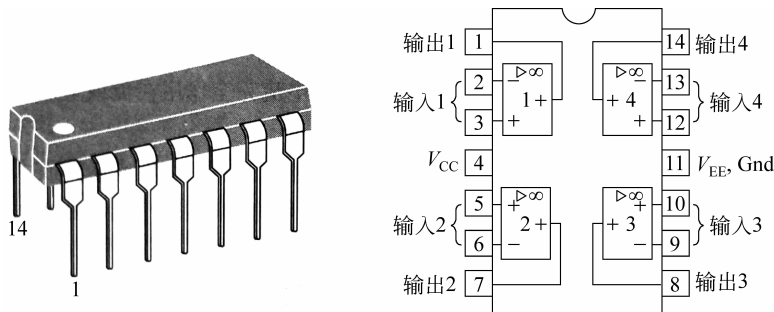


图 3-1-4 LM324 引脚图

2) MC4558C

MC4558C 是在一块芯片上集成了两个通用运算放大器。主要技术参数如下:增益带宽为 2MHz,直流电压增益为 90dB,输入偏移电压为 2mV,输入偏移电流为 80nA,电源供电电压为 $\pm 18\text{V}$,输入电流为 50mA,输入电压为 $0 \sim 30\text{V}$ (单电源供电)或 $-15 \sim 15\text{V}$

(双电源供电),工作温度为 $0\sim 70^{\circ}\text{C}$ 。其引脚图如图 3-1-5 所示。

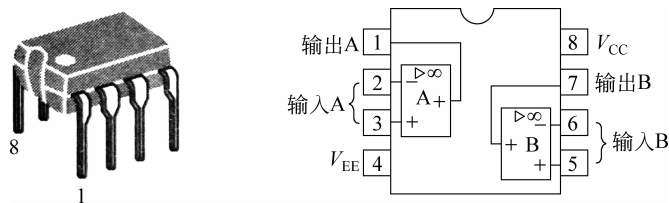


图 3-1-5 MC4588C 引脚图

其他常见的集成运放有 OP07、LF353、AD508 等。可以查询相关元器件手册,了解其供电电压、输入电压、电流等参数。

8. 理想运算放大器

尽管集成运放的应用是多种多样的,但是其工作区域只有两个。在电路中,它不是工作在线性区,就是工作在非线性区。而且,在一般分析计算中,都将其看成理想运放。

1) 理想运放

所谓理想运放,就是将各项技术指标都理想化的集成运放,即认为

- (1) 开环电压放大倍数 $A_{\text{od}} \rightarrow \infty$;
- (2) 差模输入电阻 $r_{\text{id}} \rightarrow \infty$;
- (3) 输出电阻 $r_{\text{o}} \rightarrow 0$;
- (4) 共模抑制比 $K_{\text{CMR}} \rightarrow \infty$;
- (5) 输入偏置电流 $I_{\text{B1}} = I_{\text{B2}} = 0$ 。

其等效电路如图 3-1-6 所示。

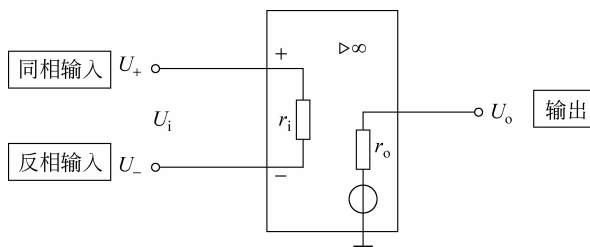


图 3-1-6 理想运放等效电路

由以上理想特性推导出如下两个重要结论。

(1) 虚短路原则(简称虚短)。集成运放工作在线性区,其输出电压 U_{o} 是有限值,而开环电压放大倍数 $A_{\text{od}} \rightarrow \infty$,则

$$U_{\text{i}} = \frac{U_{\text{o}}}{A_{\text{od}}} \approx 0$$

即

$$U_{\text{-}} = U_{\text{+}} \quad (3-1-3)$$

式(3-1-3)中的“ $U_{\text{+}}$ ”为集成运放同相输入端电位,“ $U_{\text{-}}$ ”为集成运放反相输入端电

位。反相端电位和同相端电位几乎相等,近似于短路,又不可能是真正的短路,称为虚短。

(2) 虚断路原则(简称虚断)。理想集成运放输入电阻 $r_{id} \rightarrow \infty$, 这样,同相、反相两端没有电流流入运算放大器内部,即

$$I_- = I_+ = 0 \quad (3-1-4)$$

式(3-1-4)中的“ I_+ ”为集成运放同相输入端电流,“ I_- ”为集成运放反相输入端电流。输入电流好像断开一样,称为虚断。

虚短原则和虚断原则简化了集成运算放大器的分析过程。由于许多应用电路中的集成运算放大器都工作在线性区,因此,上述两条原则极其重要,应牢固掌握。

2) 集成运放的传输特性

表示输出电压与输入电压之间关系的特性曲线称为传输特性曲线,如图 3-1-7 所示,分为线性区和非线性区。集成运算放大器可工作在线性区,也可工作在线性区,两个区的分析方法不同。

(1) 集成运算放大器工作在线性区时, U_o 和 U_i 是线性关系,即

$$U_o = A_{od}U_i = A_{od}(U_- - U_+) \quad (3-1-5)$$

式(3-1-5)中, A_{od} 是开环电压放大倍数。由于 A_{od} 很大,即使输入毫伏级以下电压的信号,也足以使输出电压 U_o 饱和,其饱和值 $+U_{om}$ 和 $-U_{om}$ 接近正、负电源电压值。所以,只有引入负反馈后,才能保证输出不超出线性范围,集成运放接入负反馈网络,电路如图 3-1-8 所示。负反馈的相关知识参阅后文,其输出、输入关系可用式(3-1-5)分析计算。

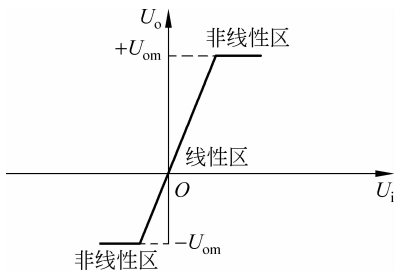


图 3-1-7 集成运放的传输特性曲线

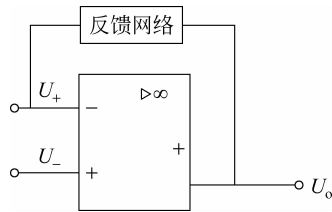


图 3-1-8 集成运放工作在线性区

(2) 集成运算放大器工作在线性区时,这时输出电压只有两种可能,即

$$\text{当 } U_- > U_+ \text{ 时, } U_o = -U_{om}$$

$$\text{当 } U_- < U_+ \text{ 时, } U_o = +U_{om}$$

此时虚短原则不成立, $U_- \neq U_+$; 虚断原则仍然成立, 即有 $I_- = I_+ = 0$ 。

3.1.2 集成运算放大器的基本运算电路

集成运放外接不同的反馈电路和元件等,可以构成比例、加减、积分、微分等各种运算电路。

1. 反比例运算电路

1) 电路结构

反比例运算电路如图 3-1-9 所示。输入信号 U_i 从反相输入端与地之间加入； R_F 是反馈电阻，接在输出端和反相输入端之间，将输出电压 U_o 反馈到反相输入端，实现负反馈。 R_1 是输入耦合电阻， R_2 是补偿电阻（也叫平衡电阻）， $R_2 = R_1 // R_F$ 。

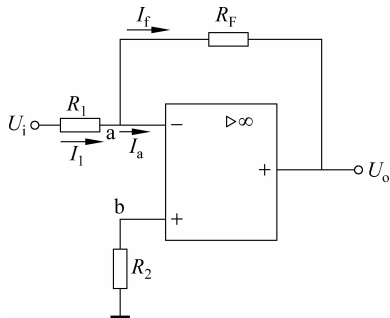


图 3-1-9 反比例运算电路原理图

2) 输出与输入的关系

由前面学习的虚断可知 $I_- = I_+ = 0$ ，所以图 3-1-9 所示电路中的 $I_1 \approx I_f$ ，同时 R_2 上的电压降等于零，即同相输入端与地等电位。根据虚短，有 $U_- = U_+ \approx 0$ ，则反相输入端也与地等电位，即反相端近于接地，称反相输入端为“虚地”，即并非真正“接地”。“虚地”是反比例运算电路的一个重要特点。

由上述分析可得其电压放大倍数为

$$A_{of} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{-R_F I_f}{R_1 I_1} = -\frac{R_F}{R_1} \quad (3-1-6)$$

因此，输出电压与输入电压的关系为

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_i \quad (3-1-7)$$

可见，输出电压与输入电压存在着比例关系，比例系数为 $\frac{R_F}{R_1}$ ，负号表示输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相位相反。只要开环放大倍数 A_{od} 足够大，闭环放大倍数 A_{of} 就与运算电路的参数无关，只决定于电阻 R_F 与 R_1 的比值。故该放大电路通常称为反比例运算放大器。

3) 实际应用(反相器)

根据反比例运算放大器输入与输出的关系 $U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_i$ ，若式中 $R_F = R_1$ ，则电压放大倍数等于 -1 ，输出与输入的关系为

$$U_o = -U_i$$

上式表明，该电路无电压放大作用，输出电压 U_o 与输入电压 U_i 数值相等，但相位是相反的。所以，它只是把输入信号进行了一次倒相，因此称为反相器，其电路图及符号图如图 3-1-10 所示。

【例 3-1-1】 反比例运算电路如图 3-1-9 所示。已知 $U_i = 0.3\text{V}$ ， $R_1 = 10\text{k}\Omega$ ， $R_F = 100\text{k}\Omega$ 。试求输出电压 U_o 及平衡电阻 R_2 。

解：(1) 根据式(3-1-7)，可得

$$U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_i = -0.3 \times \frac{100}{10} = -3(\text{V})$$

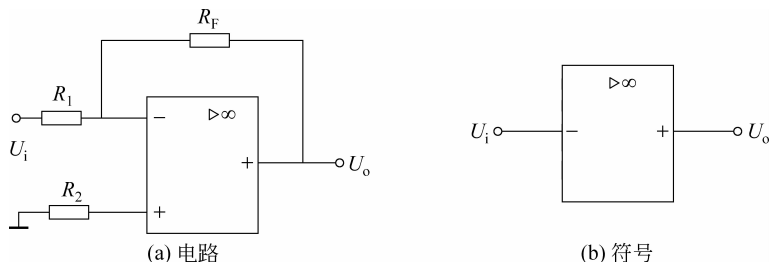


图 3-1-10 反相器

(2) 平衡电阻

$$R_2 = R_1 \parallel R_F = \frac{10 \times 100}{10 + 100} (\text{k}\Omega) = 9.09 (\text{k}\Omega)$$

2. 同相比例运算电路

1) 电路结构

同相比例运算电路如图 3-1-11 所示,输入信号电压 U_i 接入同相输入端,输出端与反相输入端之间接有反馈电阻 R_F 与 R_1 。为使输入端保持平衡, $R_2 = R_1 \parallel R_F$ 。

2) 输出与输入的关系

根据虚断可知,流入放大器的电流趋近于零;根据虚短可知,反相输入端与同相输入端的电位近似相等,所以

$$\frac{0 - U_-}{R_1} = \frac{U_- - U_o}{R_F}$$

即

$$-\frac{U_i}{R_1} = \frac{U_i - U_o}{R_F}$$

得输出电压与输入电压的关系为

$$U_o = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_i \quad (3-1-8)$$

同相放大器的电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{U_o}{U_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad (3-1-9)$$

可见,输出电压与输入电压也存在着比例关系,比例系数为 $\left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)$,而且输出电压 U_o 与输入电压 U_i 相位相同。只要开环放大倍数 A_{od} 足够大,闭环放大倍数 A_{of} 就与运算电路的参数无关,只决定于电阻 R_F 与 R_1 。故该放大电路通常称为同相比例运算电路。

3) 实际应用(电压跟随器)

在前面学习的同相比例运算电路中,在反馈电阻 R_F 短路或 R_1 开路的情况下,由式(3-1-8)和式(3-1-9)可知,其电压放大倍数等于 1,输出与输入的关系为

$$U_o = U_i$$

即输出电压的幅度和相位均随输入电压幅度和相位的变化而变化,故称为电压跟随器。它是同相比例运算电路的一种特例,电路如图 3-1-12 所示。