

项目3 人体红外探测报警器的制作与调试



项目概述

人体红外探测报警器主要由光学系统、热释电红外传感器、信号处理电路和报警电路等部分组成，其结构框图如图 3-1 所示。图中，光学系统中所采用的菲涅耳透镜可以将人体辐射的红外线聚焦到热释电红外传感器上，同时也产生交替变化的红外辐射高灵敏区和盲区，以适应热释电红外传感器要求信号不断变化的特性；热释电红外传感器是报警器的核心元器件，它可以把人体发出的红外信号转换为电信号以供信号处理电路使用；信号处理电路的主要作用是把传感器输出的微弱电信号进行放大、滤波、延迟、比较，为报警功能的实现打下基础。

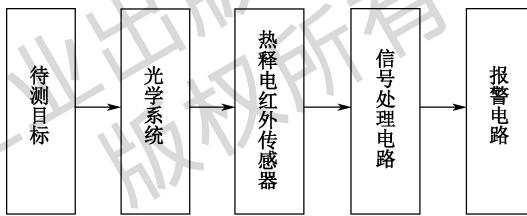


图 3-1 人体红外探测报警器的结构框图

本项目通过人体红外探测报警器的制作与调试，达到以下教学目标。



知识目标

- (1) 掌握差分放大电路的结构及性能特点。
- (2) 掌握用集成运算放大电路实现基本运算的方法。
- (3) 理解电压比较器电路结构与阈值电压的含义。
- (4) 了解集成运算放大器的主要参数、性能特点及其使用方法。
- (5) 会计算差模放大倍数、输入电阻阻值和电压比较器的门限电压。



技能目标

- (1) 会独立查阅二极管、三极管、热释电红外传感器等元器件的资料。
- (2) 掌握测试差分放大电路的技术指标与实现集成运算放大电路的方法。

- (3) 理解差模放大倍数、共模放大倍数的测试方法。
- (4) 掌握人体红外探测报警器电路中重要元器件的选择及参数测试方法。
- (5) 能针对电路特点，采取有效措施提高共模抑制比。
- (6) 熟练掌握人体红外探测报警器的安装、调试与检测。
- (7) 能对人体红外探测报警器电路的常见故障进行简单分析与检修。

3.1 直流放大器及差分放大电路

【学习目标】

- (1) 理解零点漂移的成因及抑制方法。
- (2) 熟悉差分放大电路的结构及性能特点。
- (3) 掌握共模信号、差模信号的含义及分析方法。
- (4) 掌握各种差分放大电路的工作原理及分析方法。

3.1.1 直流放大器



直流放大器的概念
及存在的问题

1. 直流放大器的概念

实际应用中，对于信号的放大，一般采用多级放大器，以达到较高的放大倍数。在多级放大器中，各级之间的耦合方式有三种，即阻容耦合、变压器耦合和直接耦合。对频率较高的交流信号进行放大时，常采用阻容耦合或变压器耦合。但是，在生产实际中，需要放大的信号往往是变化缓慢的信号，甚至是直流信号。对于这样的信号，不能采用阻容耦合和变压器耦合，只能采用直接耦合方式。

所谓直接耦合，就是将“放大器前级输出端与后级输入端”及“放大器与信号源或负载”直接连接起来，或者经电阻等允许直流信号通过的元器件连接起来。由于直接耦合放大器可用来放大直流信号，所以也称为直流放大器。在集成电路中加入耦合电容和电感元器件相当困难，因此制造集成电路一般都采用直接耦合方式。实际上，直流放大器不仅能放大直流信号，也能放大交流信号。所以，随着集成电路的发展，直流放大器得到了越来越广泛的应用。

2. 直接耦合存在的问题

在多级放大器中采用直接耦合存在两个特殊问题：一是前级、后级的电位配合问题，二是零点漂移问题。

1) 前级、后级的电位配合问题

如图 3-2 所示是一个采用直接耦合方式的多级放大器，可以看出 VT₁ 的集电极和 VT₂ 的基极是等电位的。由于 VT₂ 发射结压降 U_{BE2} 很小，所以 VT₁

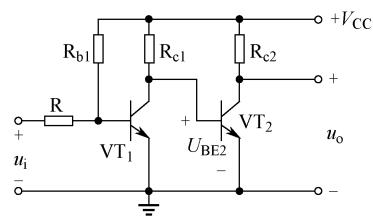


图 3-2 采用直接耦合方式的多级放大器

的集电极电位很低，工作点接近饱和区，工作范围大受限制，由此可知，这种耦合方式中，前级、后级电位不能合理配合，应设法改进。

2) 零点漂移问题

若将如图3-2所示电路的输入端对地短路，在输出端接一个电压表，从理论上讲，电压表的指针应该指向某个数值不变，此值称为输出端电压的起始值。但实际上，电压表示数会偏离起始值，出现忽大忽小、忽快忽慢的不规则变化。

放大器在输入信号为零时，输出电压偏离起始值的现象称为零点漂移，简称零漂。造成零漂的原因是电源电压的变动和三极管参数随温度的变化而变化，一般情况下，后者是主要原因。

放大器级数越多，输出端零漂越严重。衡量零漂的大小，需要将放大器输出的零漂电压折算到输入端再进行比较。当零漂电压大到可以和需要放大的有用信号电压相比拟时，将无法分辨有用信号电压和零漂电压，即有用信号淹没在零漂信号之中，造成直流放大器不能正常工作，所以零漂对直流放大器来说是个突出的问题。抑制零漂的主要措施有：采用高稳定度的稳压电源；采用高质量的电阻、三极管；采用温度补偿电路；采用差分放大电路等。其中，采用差分放大电路是目前应用最广泛的抑制零漂的方法。

3.1.2 差分放大电路

差分放大电路又称差动放大电路，它的输出电压与两个输入电压之差成正比，由此得名。差分放大电路广泛应用于集成电路中。

1. 基本差分放大电路

1) 电路组成及静态分析

如图3-3(a)所示是基本的差分放大电路，它由两个完全相同的单管放大器组成。由于两个三极管 VT_1 和 VT_2 的特性完全一样，外接电阻也完全相同，两边其他元器件的温度特性也都一样，因此两边电路是完全对称的。输入信号从两个三极管的基极输入，输出信号则从两个三极管的集电极之间输出。 R_e 为公共发射极电阻，用来抑制零漂并决定三极管的静态发射极电流。 R_{c1} 及 R_{c2} 为集电极负载电阻，其阻值相等。

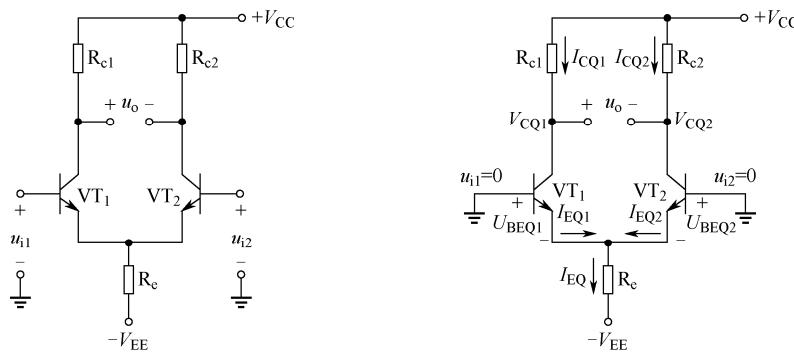


图3-3 基本差分放大电路

静态时，输入信号为零，即 $u_{i1}=u_{i2}=0$ ，其直流通路如图3-3(b)所示。由于电路左右对称，所以 $I_{BQ1}=I_{BQ2}$, $I_{CQ1}=I_{CQ2}$, $I_{EQ1}=I_{EQ2}$ 。根据基尔霍夫电流定律可知，流过 R_e 的电流 I_{EQ} 为 I_{EQ1} 与 I_{EQ2} 之和。由图3-2(b)可得：

$$V_{EE}=U_{BEQ1}+I_{EQ}R_e \quad (3-1)$$

所以：

$$I_{EQ}=\frac{V_{EE}-U_{BEQ1}}{R_e} \quad (3-2)$$

因此，两个三极管的集电极静态电流为：

$$I_{CQ1}=I_{CQ2}\approx\frac{V_{EE}-U_{BEQ1}}{2R_e} \quad (3-3)$$

两个三极管集电极对地电压为：

$$V_{CQ1}=V_{CC}-I_{CQ1}R_{c1}, \quad V_{CQ2}=V_{CC}-I_{CQ2}R_{c2} \quad (3-4)$$

可见，静态时，两个三极管集电极之间的输出电压为零，即：

$$u_o=V_{CQ1}-V_{CQ2}=0$$

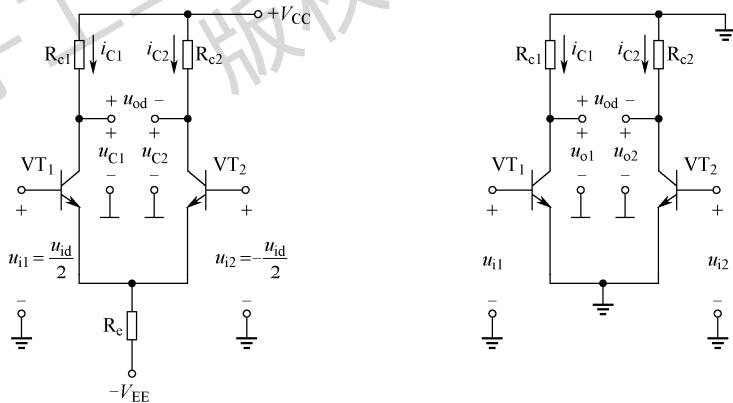


差分放大电路的
动态分析

2) 动态分析

(1) 差模输入与差模特性。在差分放大电路输入端分别输入大小相等、极性相反的信号，这种输入方式称为差模输入，所输入的信号称为差模输入信号。如图3-4(a)所示 ($R_{c1}=R_{c2}$)，此时 $u_{i1}=-u_{i2}$ 。两个输入端之间的电压用 u_{id} 表示，称为差模输入电压，则：

$$u_{id}=u_{i1}-u_{i2}=u_{i1}+u_{i1}=2u_{i1}=-2u_{i2} \quad (3-5)$$



(a) 输入差模输入信号

(b) 差模输入交流通路

图3-4 采用差模输入的差分放大电路

u_{i1} 使 VT_1 产生集电极增量电流 i_{c1} , u_{i2} 使 VT_2 产生集电极增量电流 i_{c2} ，由于差分放大电路的对称特性，所以 i_{c1} 和 i_{c2} 大小相等、方向相反，即 $i_{c2}=-i_{c1}$ 。因此， VT_1 和 VT_2 的集电极电流分别为：

$$\left. \begin{aligned} i_{c1} &= I_{CQ1} + i_{c1} \\ i_{c2} &= I_{CQ2} + i_{c2} = I_{CQ1} - i_{c1} \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

此时，两个三极管的集电极电压分别为：

$$\left. \begin{aligned} u_{c1} &= V_{cc} - i_{c1}R_{c1} = V_{cc} - (I_{cq1} + i_{c1})R_{c1} = V_{cq1} - i_{c1}R_{c1} = V_{cq1} + u_{o1} \\ u_{c2} &= V_{cq2} - i_{c2}R_{c2} = V_{cq2} + u_{o2} \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

式中, $u_{o1} = -i_{c1}R_{c1}$ 、 $u_{o2} = -i_{c2}R_{c2}$, 分别为 VT₁ 和 VT₂ 集电极的增量电压, 而且 $u_{o2} = -u_{o1}$ 。这样, 两个三极管集电极之间的差模输出电压 u_{od} 为:

$$u_{od} = u_{c1} - u_{c2} = u_{o1} - u_{o2} = 2u_{o1} \quad (3-8)$$

当电源电压产生波动或温度产生变化时, 会引起两个三极管集电极电流变化。由于集电极增量电流大小相等、方向相反, 流过 R_e 时相互抵消, 所以流经 R_e 的电流不变, 仍等于静态电流 I_{EQ} , 也就是说, 在差模输入信号的作用下, R_e 两端压降几乎不变, 即 R_e 对于差模信号来说相当于“短路”。由此画出差模输入时的交流通路, 如图 3-4 (b) 所示。

双端差模输出电压 u_{od} 与双端输入电压 u_{id} 之比称为差分放大电路的差模电压放大倍数 A_{ud} , 即:

$$A_{ud} = \frac{u_{od}}{u_{id}} \quad (3-9)$$

将式 (3-5) 和式 (3-8) 代入式 (3-9), 得:

$$A_{ud} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{2u_{o1}}{2u_{i1}} = \frac{u_{o1}}{u_{i1}} = A_{u1} \quad (3-10)$$

式 (3-10) 表明, 差分放大电路双端输出时的差模电压放大倍数 A_{ud} 等于单管的电压放大倍数 A_{u1} 。由图 3-4 (b) 不难知道:

$$A_{ud} = \frac{-\beta R_{c1}}{r_{be}} \quad (3-11)$$

若在如图 3-4 (a) 所示电路中, 两个三极管集电极之间接负载电阻 R_L , VT₁ 和 VT₂ 的集电极电位一增一减, 且变化量相等, 负载电阻 R_L 的中点电位始终不变, 为交流零电位, 则每边电路的交流等效负载电阻阻值 $R'_L = R_L / (R_L/2)$ 。这时差模电压放大倍数变为:

$$A_{ud} = \frac{-\beta R'_L}{r_{be}} \quad (3-12)$$

从差分放大电路两个输入端看进去所呈现的等效电阻称为差分放大电路的差模输入电阻, 其阻值用 R_{id} 表示, 由图 3-4 (b) 可得:

$$R_{id} = 2r_{be} \quad (3-13)$$

差分放大电路中, 从两个三极管的集电极之间看进去所呈现的等效电阻称为输出电阻, 其阻值用 R_o 表示, 由图 3-4 (b) 可得:

$$R_o \approx 2R_{c1} \quad (3-14)$$

【例 3-1】 在如图 3-3 (a) 所示差分放大电路中, 已知 $V_{cc} = V_{ee} = 12V$, $R_{c1} = R_{c2} = 10k\Omega$, $R_e = 20k\Omega$, 三极管 $\beta = 80$, $r_{bb} = 200\Omega$, $U_{BEQ} = 0.6V$, 两个输出端之间外接负载电阻, 阻值为 $20k\Omega$ 。试求:

① 静态工作点。

② A_{ud} 、 R_{id} 和 R_o 。

解: ① 求静态工作点:

$$I_{cq1} = I_{cq2} = \frac{V_{ee} - U_{BEQ}}{2R_e} = \frac{12 - 0.6}{2 \times 20} = 0.285(\text{mA})$$

$$V_{CQ1} = V_{CQ2} = V_{CC} - I_{CQ1}R_{c1} = 12 - 0.285 \times 10 = 9.15(V)$$

② 求 A_{ud} 、 R_{id} 和 R_o :

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)} = 200 + 81 \times \frac{26}{0.285} \approx 7.59(k\Omega)$$

$$A_{ud} = -\frac{\beta R_L}{r_{be}} = -\frac{80 \times \frac{10 \times 10}{10+10}}{7.59} \approx -52.7$$

$$R_{id} = 2r_{be} = 2 \times 7.59 \approx 15.2(k\Omega)$$

$$R_o = 2R_{c1} = 2 \times 10 = 20(k\Omega)$$

(2) 共模输入与共模抑制比。在差分放大电路两个输入端分别输入大小相等、极性相同的信号，这种输入方式称为共模输入，典型电路如图3-5(a)所示，此时 $u_{i1}=u_{i2}=u_{ic}$ 。在共模信号的作用下，VT₁和VT₂的发射极电流同时增加（或减小）。由于电路的对称特性，电流的变化量 $i_{e1}=i_{e2}$ ，则流过 R_e 的电流增加 $2i_{e1}$ （或 $2i_{e2}$ ）， R_e 两端压降的变化量为 $u_e=2i_{e1}R_e=i_{e1}(2R_e)$ ，也就是说， R_e 对每个三极管的共模信号有数值为 $2R_e$ 的负反馈效果，由此得到如图3-5(b)所示的交流通路。

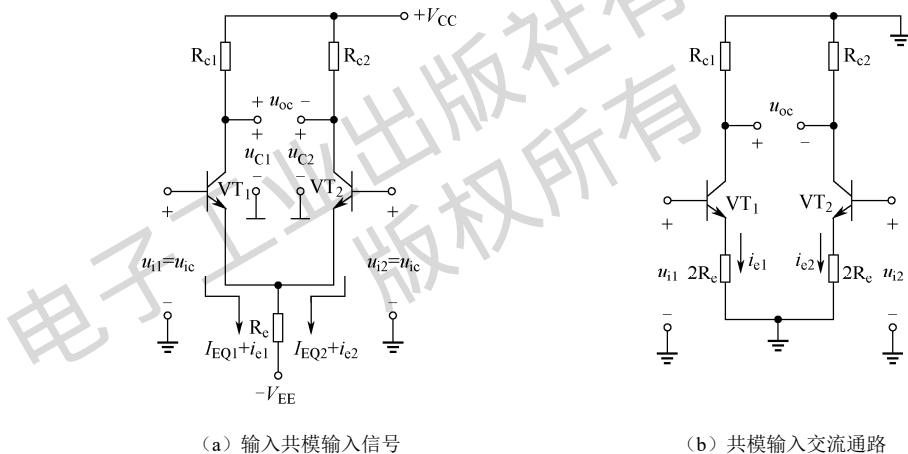


图3-5 采用共模输入的差分放大电路

由于差分放大电路中两个三极管所在的电路对称，对于共模输入信号来说，两个三极管集电极电位的变化相同，即 $u_{C1}=u_{C2}$ ，因此双端共模输出电压：

$$u_{oc}=u_{C1}-u_{C2}=0 \quad (3-15)$$

在实际电路中，两个三极管电路不可能完全相同，因此 u_{oc} 不等于零，但要求 u_{oc} 越小越好。双端共模输出电压 u_{oc} 与共模输入电压 u_{ic} 之比定义为差分放大电路的共模电压放大倍数 A_{uc} ，即：

$$A_{uc} = \frac{u_{oc}}{u_{ic}} \quad (3-16)$$

显然，对于完全对称的差分放大电路， $A_{uc}=0$ 。

由于电源电压波动或温度变化引起两个三极管集电极电流的变化是相同的，因此可以把它们的影响等效地看作差分放大电路输入端加入共模信号的结果，所以差分放大电路对温度的影响具有很强的抑制作用。另外，伴随输入信号一起引入到两个三极管基极的相同

的外界干扰信号也都可以看作是共模输入信号而被抑制。

实际应用中，差分放大电路两输入信号中既有差模输入信号成分，又有无用的共模输入信号成分。

设差分放大电路的两个输入信号为 u_{i1} 和 u_{i2} ，定义差模信号为两输入信号的差，即：

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} \quad (3-17)$$

定义共模信号为两个输入信号的算术平均值，即：

$$u_{ic} = \frac{u_{i1} + u_{i2}}{2} \quad (3-18)$$

则两输入信号 u_{i1} 和 u_{i2} 可以表示为：

$$\begin{aligned} u_{i1} &= u_{ic} + \frac{u_{id}}{2} \\ u_{i2} &= u_{ic} - \frac{u_{id}}{2} \end{aligned}$$

也就是说，任意的输入信号 u_{i1} 和 u_{i2} 中都包含了一对大小相等、相位相同的共模信号，一对大小相等、相位相反的差模信号。

差分放大电路应该对差模信号有良好的放大能力，而对共模信号有较强的抑制能力。为了表征差分放大电路的这种能力，通常采用共模抑制比 K_{CMR} 这一指标表示，它是差模电压放大倍数 A_{ud} 与共模电压放大倍数 A_{uc} 之比的绝对值，即：

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \quad (3-19)$$

若用分贝作为单位，则为：

$$K_{CMR} (\text{dB}) = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \quad (3-20)$$

K_{CMR} 越大，表明电路抑制共模信号的性能越好。当电路两边理想对称、双端输出时，由于 A_{uc} 等于零，故 K_{CMR} 趋于无限大。一般差分放大电路的 K_{CMR} 约为 60dB，较好的可达 120dB。

【例 3-2】已知差分放大电路的输入信号 $u_{i1}=1.01\text{V}$, $u_{i2}=0.99\text{V}$ ，试求差模和共模输入电压；若 $A_{ud}=-50$ 、 $A_{uc}=-0.05$ ，试求该差分放大电路的输出电压 u_o 及 K_{CMR} 。

解：① 求差模和共模输入电压。

差模输入电压：

$$u_{id} = u_{i1} - u_{i2} = 1.01 - 0.99 = 0.02(\text{V})$$

因此， VT_1 的差模输入电压等于 $u_{id}/2=0.01(\text{V})$ ， VT_2 的差模输入电压等于 $-u_{id}/2=-0.01(\text{V})$ 。
共模输入电压：

$$u_{ic} = (u_{i1} + u_{i2})/2 = (1.01 + 0.99)/2 = 1(\text{V})$$

由此可见，当用共模和差模信号表示两个输入电压时，则有：

$$u_{i1} = u_{ic} + \frac{u_{id}}{2} = 1 + 0.01 = 1.01(\text{V})$$

$$u_{i2} = u_{ic} - \frac{u_{id}}{2} = 1 - 0.01 = 0.99(\text{V})$$

② 求输出电压。

差模输出电压 u_{od} ：

$$u_{od} = A_{ud}u_{id} = -50 \times 0.02 = -1(V)$$

共模输出电压 u_{oc} :

$$u_{oc} = A_{uc}u_{ic} = -0.05 \times 1 = -0.05(V)$$

在差模信号和共模信号同时存在的情况下，对于差分放大电路来说，可以利用叠加定理求总的输出电压 u_o ，即：

$$u_o = A_{ud}u_{id} + A_{uc}u_{ic} = -1 - 0.05 = -1.05(V)$$

共模抑制比 K_{CMR} :

$$K_{CMR}(dB) = 20\lg\left|\frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right| = 20 \times \lg \frac{50}{0.05} = 20 \times \lg 1000 = 60(dB)$$



差分放大电路的
几种接法

2. 差分放大电路的几种接法

(1) 双端输入双端输出差分放大电路如图 3-4 (a) 所示。

(2) 双端输入单端输出差分放大电路如图 3-6 所示。

由于双端输入单端输出差分放大电路中，输出信号只从 VT_1 的集电极输出，所以其输出电压只有双端输入双端输出差分放大电路的一半，即差模电压放大倍数为：

$$A_{ud1} = \frac{1}{2}A_{ud} = -\frac{1}{2}\frac{\beta R_{c1}}{r_{be}} \quad (3-21)$$

如果从 VT_2 的集电极输出，仅是 u_o 的相位与前者相反，计算时将差模电压放大倍数的表达式去掉“-”号即可。

差模输入电阻阻值为：

$$R_{id} = 2r_{be} \quad (3-22)$$

输出电阻阻值为：

$$R_o = R_{c1} \quad (3-23)$$

(3) 单端输入双端输出差分放大电路如图 3-7 所示。

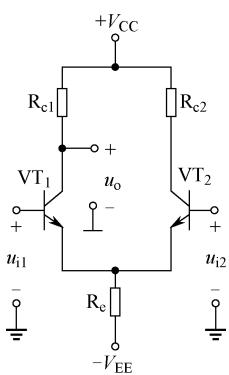


图 3-6 双端输入单端输出差分放大电路

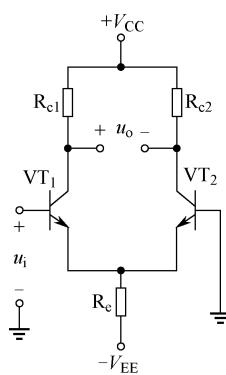


图 3-7 单端输入双端输出差分放大电路

单端输入差分放大电路的差模电压放大倍数、差模输入电阻阻值和输出电阻阻值的计算公式同双端输入差分放大电路一样。

(4) 单端输入单端输出差分放大电路如图 3-8 所示。

图 3-8 (a) 的差模电压放大倍数的表达式同式 (3-21)，即：

$$A_{ud1} = \frac{1}{2} A_{ud} = -\frac{1}{2} \frac{\beta R_{c1}}{r_{be}} \quad (3-24)$$

式中的“-”号表示输出电压与输入电压反相。

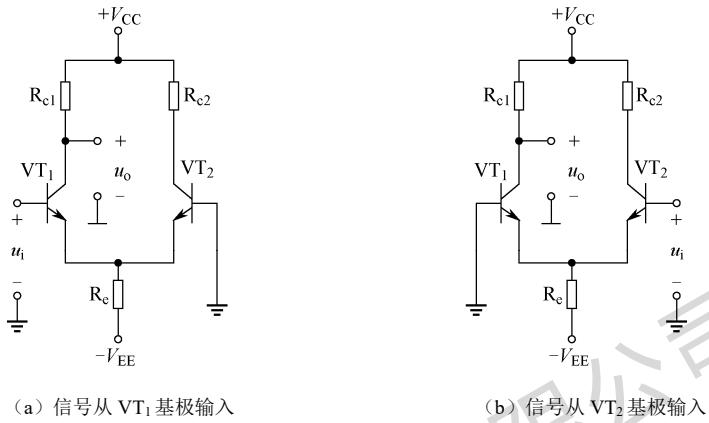


图 3-8 单端输入单端输出差分放大电路

图 3-8 (b) 的差模电压放大倍数的表达式为:

$$A_{ud2} = \frac{1}{2} A_{ud} = \frac{1}{2} \frac{\beta R_{c1}}{r_{be}}$$

式中无“-”号，表示输出电压与输入电压同相。

差模输入电阻阻值为:

$$R_{id} = 2r_{be} \quad (3-25)$$

输出电阻阻值为:

$$R_o \approx R_{c1} \quad (3-26)$$

以上对接法的讨论都按未接负载电阻进行，若输出端接有负载电阻 R_L ，则差模电压放大倍数表达式中的 R_{c1} 应变为 R'_L ，双端输出时 $R'_L = R_{c1} / (R_L/2)$ ，单端输出时 $R'_L = R_{c1} / R_L$ 。

比较四种不同的接法可以看出，差模电压放大倍数的大小与输入方式无关，只取决于输出方式；输入信号与输出信号的相位关系既与输入方式有关，也与输出方式有关。

在实际应用中，可根据是否需要对地平衡输入（出）及对地不平衡输入（出）选择相应的双端输入（出）或单端输入（出）的差分放大电路。

实训 差分放大电路的测试

一、实训目的

- (1) 通过实验进一步理解差分放大电路的工作原理。
- (2) 掌握差分放大电路的测试方法。

二、主要实训器材

直流稳压电源、万用表、实验线路板。

三、实训步骤

差分放大电路如图3-9所示。

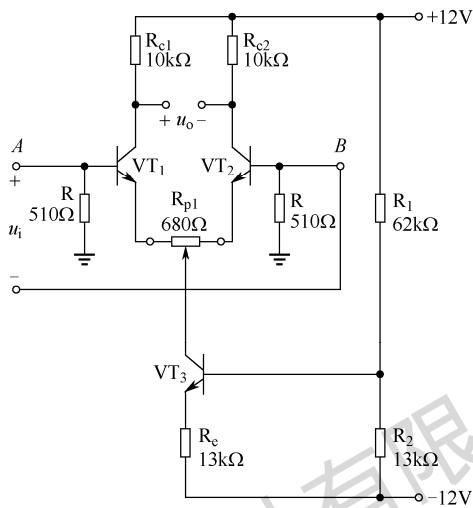


图3-9 差分放大电路

1. 测量静态工作点

- (1) 将A、B点短路接地(↓)。
- (2) 将±12V电源接入电路。
- (3) 调节R_{p1}阻值使u_o=0V，此后R_{p1}阻值不再变动，以保证电路的对称性。
- (4) 测量VT₁~VT₃各极对地电位，记入表3-1中（从万用表20V直流电压挡开始测量，然后减小到2V挡）。

表3-1 差分放大电路的静态测试

测量项目	V _{CQ1}	V _{CQ2}	V _{CQ3}	V _{BQ1}	V _{BQ2}	V _{BQ3}	V _{EQ1}	V _{EQ2}	V _{EQ3}
测量值									

2. 测量差模电压放大倍数

在A、B两端分别加上+0.1V和-0.1V直流电压，按表3-2要求测量并记录，由测量数据计算出单端和双端输出的差模电压放大倍数。

注意：先将直流电压源分别接在A、B两端，然后调节直流电压源使其输出电压为+0.1V和-0.1V。

表3-2 测试差模电压放大倍数

	V _{C1} (测量值)	V _{C2} (测量值)	u _o (测量值)	A _{ud1} (计算值)	A _{ud2} (计算值)	A _{ud} (计算值)
u _{i1} =+0.1V, u _{i2} =-0.1V						

3. 测量共模电压放大倍数

将u_{i1}、u_{i2}点并联，加入+0.1V直流电压至u_{i1}两端。测量此时的v_{C1}、v_{C2}和u_o，填入

表 3-3 中。

表 3-3 测试共模电压放大倍数

	V_{C1} (测量值)	V_{C2} (测量值)	u_o (测量值)	A_{uc1} (计算值)	A_{uc2} (计算值)	A_{uc} (计算值)
$u_{i1}=u_{i2}=+0.1V$						

4. 计算共模抑制比

计算上述单端、双端输出情况下的共模抑制比，填入表 3-4 中。

表 3-4 计算共模抑制比

单 端 输 出		双 端 输 出
$K_{CMR1}=\left \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}}\right $	$K_{CMR2}=\left \frac{A_{ud2}}{A_{uc2}}\right $	$K_{CMR}=\left \frac{A_{ud}}{A_{uc}}\right $

5. 单端输入差分放大电路的测试

将电路图中的 B 点接地，组成单端输入差分放大电路， A 点接直流电源（ $\pm 0.1V$ ），测量单端和双端输出电压值，并将结果填入表 3-5，计算单端和双端输出的电压放大倍数，并将其与双端输入时的单端和双端输出差模电压放大倍数进行比较。

表 3-5 测试单端输入差模电压放大倍数

	V_{C1} (测量值)	V_{C2} (测量值)	u_o (测量值)	A_{ud} (计算值)
$u_{i1}=+0.1V$				
$u_{i1}=-0.1V$				

四、实训操作

可以通过扫右侧二维码观看本实训的操作步骤。



五、仿真实验

1. 仿真电路图

仿真电路与实训电路基本一致，选用的三极管型号为 2N6515，如图 3-10 所示。

2. 操作步骤

按照前述实训步骤，在 Multisim 软件中完成电路静态工作点、差模电压放大倍数、共模电压放大倍数及单端输入时差模电压放大倍数的测试。

3. 测试结果

(1) 静态工作点的测试结果如图 3-11 所示，由于差分电路的对称性，为了清晰起见，本图中仅显示了“Q1”及“Q3”这两个三极管各极的静态电位。

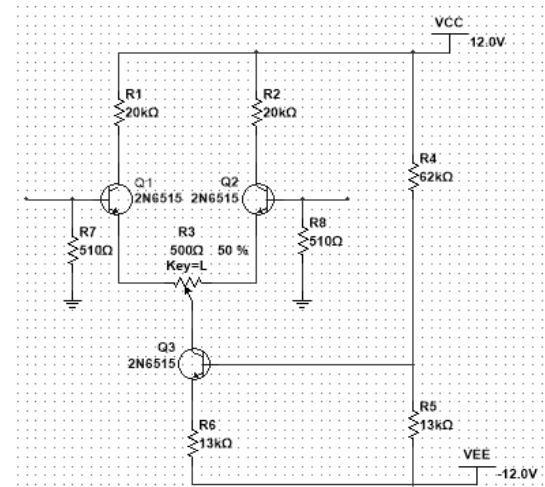


图 3-10 仿真电路图

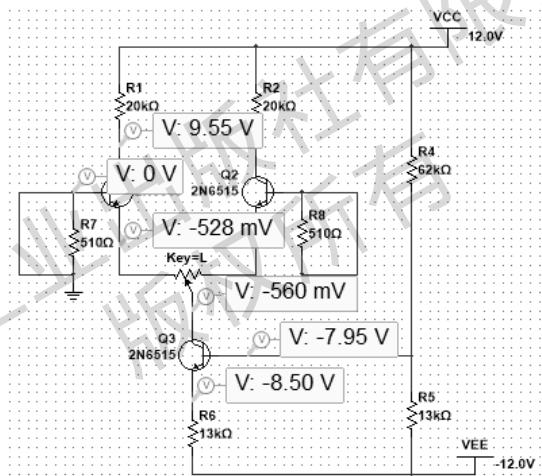


图 3-11 静态工作点的测试结果

(2) 差模电压放大倍数的测试结果如图 3-12 所示。

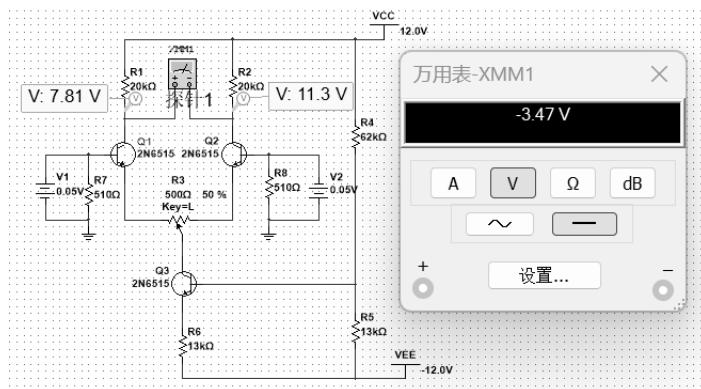


图 3-12 差模电压放大倍数的测试结果

(3) 共模电压放大倍数的测试结果如图 3-13 所示。

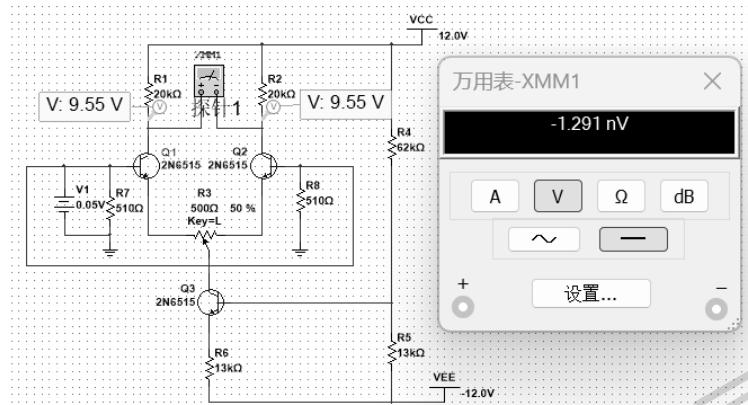


图 3-13 共模电压放大倍数的测试结果

(4) 单端输入时差模电压放大倍数的测试结果如图 3-14 所示。

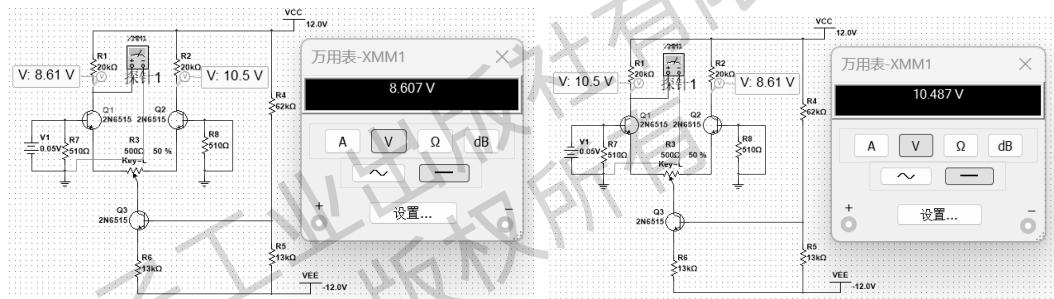


图 3-14 单端输入时差模电压放大倍数的测试结果

4. 操作视频

请扫右边的二维码观看仿真操作视频。

思考与练习

一、判断题 (对的打 “√”，错的打 “×”)

1. 所谓共模输入信号，指加在差分放大电路的两个输入端的电压之和。 ()
2. 差分放大电路有单端输出和双端输出两大类，它们的差模电压放大倍数是相等的。 ()
3. 直流放大电路是放大直流信号的，不能放大交流信号。 ()
4. 差分放大电路有 4 种接法，其差模电压放大倍数只取决于输出端的接法，与输入端的接法无关。 ()
5. 差分放大电路中的公共发射极电阻对共模信号和差模信号都存在影响，因此，这种电路是靠牺牲差模电压放大倍数换取对共模信号的抑制作用的。 ()



差分放大电路的测试
(仿真实验)

二、选择题

1. 差分放大电路比非差分直流放大电路多了一个三极管，以此为代价（ ）。
 A. 获得更高的电压放大倍数 B. 使电路放大信号时减少失真
 C. 抑制零漂
2. 差分放大电路有差模电压放大倍数 A_{ud} 和共模电压放大倍数 A_{uc} 两个参数，性能好的差分放大电路应当（ ）。
 A. A_{ud} 等于 A_{uc} B. A_{ud} 要大而 A_{uc} 要小
 C. A_{ud} 要小而 A_{uc} 要大
3. 有公共发射极电阻 R_e 的差分放大电路中，电阻 R_e 的作用是（ ）。
 A. 提高差模信号放大能力
 B. 对共模信号构成负反馈以提高抑制零漂能力
 C. 加强电路的对称性
4. 差分放大电路（不接负载时）由双端输出变为单端输出，其差模电压放大倍数（ ）。
 A. 变为原来的 2 倍 B. 变为原来的 $1/2$
 C. 保持不变

三、填空题

1. 鉴别差分放大电路性能的好坏，应同时考虑它的_____和_____。
2. 共模抑制比 K_{CMR} 等于_____之比， K_{CMR} 越大，表明_____能力越强。
3. 两个输入信号分别为 u_{i1} 和 u_{i2} ，则共模信号为_____，差模信号为_____。
 当 $u_{i1}=20mV$, $u_{i2}=10mV$ 时， $u_{id}=$ _____， $u_{ic}=$ _____。

四、分析与计算题

1. 如题图 3-1 所示，对称电路两边的参数完全相同，已知 $\beta_1=\beta_2=60$, $U_{BEQ1}=U_{BEQ2}=0.7V$, 设 $r_{be1}=r_{be2}=2.2k\Omega$, $V_{CC}=V_{EE}=12V$, $R_{c1}=R_{c2}=10k\Omega$, $R_e=6.8k\Omega$, 试求：

(1) 输入信号是差模信号还是共模信号？

(2) 差模电压放大倍数 A_{ud} 等于多少？

(3) 共模抑制比 K_{CMR} 等于多少？

2. 差分放大电路如题图 3-2 所示，若 $\beta=100$, 试求：

(1) 静态时的 V_{CQ} 。

(2) 差模电压放大倍数 A_{ud} 。

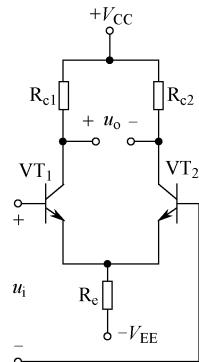
(3) 差模输入电阻阻值 R_{id} 和输出电阻阻值 R_o 。

3. 差分放大电路如题图 3-3 所示，已知三极管的 $\beta=60$, $r_{bb'}=200\Omega$, $U_{BEQ}=0.7V$ 。试求：

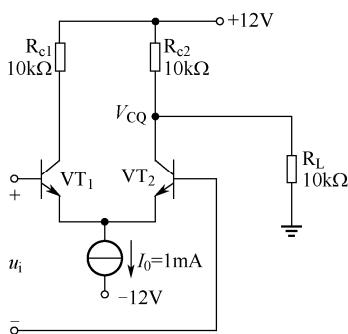
(1) 静态工作点。

(2) 差模电压放大倍数。

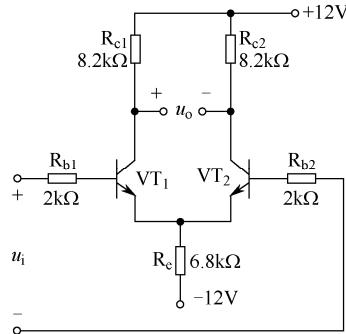
(3) 差模输入电阻阻值和输出电阻阻值。



题图 3-1



题图 3-2



题图 3-3

3.2 集成运算放大器

【学习目标】

- (1) 熟悉集成运算放大器的组成及特点。
- (2) 掌握集成运算放大器的线性应用与非线性应用的特点。
- (3) 掌握各种线性运算电路的分析方法。
- (4) 掌握电压比较器的电路结构特点、阈值电压的计算方法和电压传输特性曲线的绘制方法。

3.2.1 集成运算放大器的基础知识

集成运算放大器简称集成运放，最早应用于信号的运算。随着电子技术的发展，目前集成运放的应用几乎渗透到电子技术的各个领域，成为组成电子系统的基本功能单元。

1. 集成运放概述

运算放大器实际上就是高增益的多级直接耦合放大器，由于它最初主要用作模拟计算机的运算放大，故至今仍保留这个名字。集成运放则是利用集成工艺，将运算放大器的所有元器件集成在同一块硅片上，再封装在管壳内而制成的。

为了更好地学习集成运放的具体电路，先简单介绍集成电路中的元器件及其特点。集成电路除体积小、元器件集成度高外，还有以下特点。



(1) 所有元器件都在同一硅片上，在相同的条件下，采用相同的工艺流程制造，因而各元器件参数具有同向偏差，性能比较一致。利用这一特点，可以制造差分放大电路等对称性要求很高的电路。实际上，集成电路的输入级通常采用差分放大电路，以充分利用电路对称性，使输出的零漂得到较好的抑制。

(2) 由于电阻是由硅半导体的体电阻构成的，高阻值电阻在硅片上占用面积很大，难以制造，而三极管在硅片上所占面积较小。所以，常采用三极管代替所需要的高阻值电阻。

(3) 制造集成电路的工艺不易制造容量为几十法的电容,更难制造电感元器件。由于采用直接耦合可以减少或避免使用上述元器件,所以集成电路中基本上都采用这种耦合方式。

(4) 集成电路中需要的二极管也常用三极管的发射结代替,只要将三极管的集电极与基极短接即可。这主要是因为这样制作的“二极管”的正向压降的温度系数与同类型三极管的 U_{BE} 的温度系数非常接近,提高了温度补偿性能。

2. 集成运放的基本组成、封装及符号

1) 集成运放的基本组成

集成运放实际上是一个高增益的直接耦合放大器,其组成原理框图如图 3-15 所示,它主要由输入级、中间级、输出级和偏置电路组成。

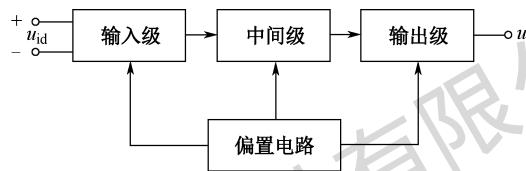


图 3-15 集成运放组成原理框图

① 输入级。输入级是提高集成运放性能的关键部分,要求其输入电阻阻值高。为了能抑制零漂和共模干扰信号,输入级都采用具有恒流源的差分放大电路,也称差分输入级。

② 中间级。中间级的主要作用是提供足够大的电压放大倍数,故也称电压放大级。为了减少前级的影响,中间级还应具有较高的输入电阻阻值。另外,中间级还应向输出级提供较大的驱动电流,并能根据需要实现单端输入、双端差分输出,或者双端差分输入、单端输出。

③ 输出级。输出级的主要作用是输出足够大的电流以满足负载的需要,同时还需要有较低的输出电阻阻值和较高的输入电阻阻值,起将放大级和负载隔离的作用。输出级一般由共集电极放大器组成,以降低输出电阻阻值,提高带负载能力。

④ 偏置电路。偏置电路的作用是为各级提供合适的工作电流,一般由各种恒流源电路组成。

此外,还有一些辅助环节,如电平移动电路、过载保护电路以及高频补偿电路等。

2) 集成运放的封装及符号

集成运放的封装形式主要有两类:金属圆帽封装和双列直插封装。如图 3-16 (a) 所示为金属圆帽封装引脚排列图。金属圆帽封装是以圆帽边缘上的凸点作为定位标志的,一般以对准定位标志的引脚为编号最大的引脚。编号以底视图顺时针方向按升序进行。如图 3-16 (b) 所示为双列直插封装引脚排列图。双列直插封装的定位标志一般是在元器件正表面上的凹坑或标志点。引脚排列以顶视图逆时针方向,从定位标志开始升序编号。

集成运放的符号如图 3-17 (a)、图 3-17 (b) 所示。在各厂产品手册中,均列有生产的集成运放各引脚功能。如图 3-17 (c) 所示为 LM741 的主要引脚,引脚 7 和引脚 4 分别接正电源和负电源,引脚 3 和引脚 2 附近的“+”“-”号分别表示同相输入端和反相输入端,引脚 6 为输出端,引脚 1 和引脚 5 外接调零电位器。在以后的讨论中,均采用如图 3-17 (a)

或图 3-17 (b) 所示的符号表示集成运放，省略电源端子以及其他功能端的表示。

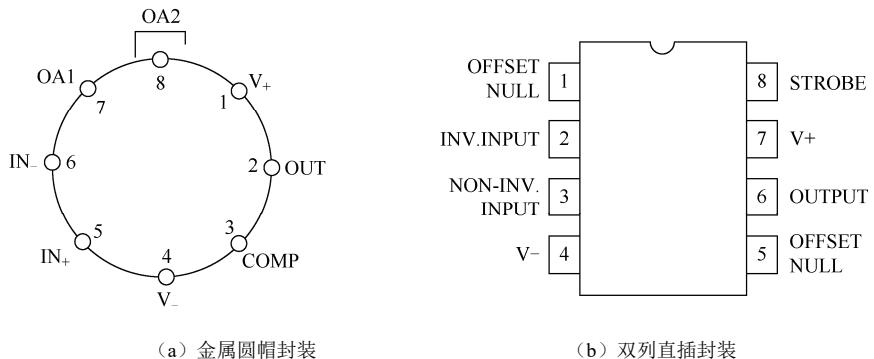


图 3-16 集成运放的两种封装

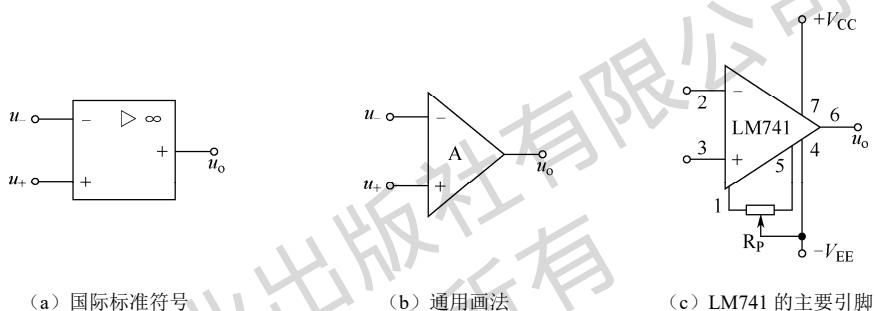


图 3-17 集成运放的符号

3. 集成运放的主要技术指标

集成运放的技术指标较多，这些指标可以帮助我们了解集成运放的性能，便于正确地选择和应用。下面介绍主要的几种技术指标。

1) 开环差模电压放大倍数 A_{uo}

A_{uo} 表示工作在线性状态的集成运放（无负反馈电路）的差模电压放大倍数。其数值较大，常用 $20\lg|A_{uo}|$ 的形式表示，单位为 dB。该数值越大，集成运放的性能越好。

2) 输入失调电压 U_{io} 及失调电压温漂 $\frac{dU_{io}}{dT}$

由于集成运放的输入级不可能做到完全对称，当输入电压为零时，输出电压并不为零。为了使输出电压为零，在输入端人为地加上一个补偿电压，即输入失调电压 U_{io} 。该电压一般在 10mV 以下。输入失调电压随温度、电源电压的变化而变化。通常将输入失调电压对温度的平均变化率称为失调电压温度漂移（失调电压温漂），用 $\frac{dU_{io}}{dT}$ 表示。这两个数值越小，集成运放的性能越好。

3) 输入失调电流 I_{io} 及失调电流温漂 $\frac{dI_{io}}{dT}$

在静态时，集成运放两个输入端的基极电流之差称为输入失调电流 I_{io} ， $I_{io}=|I_{B1}-I_{B2}|$ 。输入失调电流反映了两个三极管的参数匹配情况。输入失调电流对温度的平均变化率称为

失调电流温漂，用 $\frac{dI_{io}}{dT}$ 表示。

4) 差模输入电阻（阻值） R_{id}

R_{id} 指集成运放的两输入端之间的动态电阻阻值，习惯上称为差模输入电阻，它反映了运算放大器从信号源索取电流的大小。 R_{id} 越大越好。

5) 输出电阻（阻值） R_o

R_o 指集成运放在开环状态时，从输出端看进去的等效电阻阻值，习惯上称为输出电阻，它反映了集成运放的带负载能力。 R_o 越小，电路带负载能力越强。

6) 共模抑制比 K_{CMR}

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right|$$

它反映了集成运放对共模信号的抑制能力。 K_{CMR} 越大，集成运放的性能越好。

7) 截止频率 f_H

截止频率 f_H 指集成运放的 A_{uo} 下降 3dB 时的信号频率，又叫集成运放的 -3dB 带宽，是表征集成运放的信号频率特性的参数。

8) 转换速率 S_R

转换速率 S_R 表明集成运放对高速变化的信号的响应情况，单位为 $V/\mu s$ 。

$$S_R = \frac{du_o}{dt} \Big|_{\max}$$

4. 理想集成运放的性能指标

把具有理想参数的集成运放称为理想集成运放。它的主要特点是：

- (1) 开环差模电压放大倍数 $A_{uo} \rightarrow \infty$ 。
- (2) 差模输入电阻阻值 $R_{id} \rightarrow \infty$ 。
- (3) 输出电阻阻值 $R_o \rightarrow 0$ 。
- (4) 共模抑制比 $K_{CMR} \rightarrow \infty$ 。
- (5) 频带为无限宽，没有失调现象等。



集成运放的
传输特性

5. 集成运放的传输特性

集成运放是采用直接耦合的多级放大器，它的传输特性如图 3-18 中的曲线①所示。图中，BC 段为集成运放工作的线性区，AB 段和 CD 段为集成运放工作的非线性区（即饱和区）。由于集成运放的电压放大倍数极高。BC 段十分接近纵轴。在理想情况下，认为 BC 段与纵轴重合，所以它的理想传输特性可以由图中曲线②表示，B'C'段表示集成运放工作在线性区，AB'段和 C'D'段表示集成运放工作在非线性区。

1) 工作在线性区的集成运放

当集成运放的反相输入端和输出端有通路时（称为负反馈），如图 3-19 所示，一般情况下，可以认为集成运放工作在线性区。

由图 3-18 曲线②可知，这种情况下，理想集成运放具有两个重要特点：

① 集成运放两个输入端之间的电压通常近似为零，即 $u_{id}=u_+-u_- \approx 0$ ，若把它理想化，则有 $u_{id}=0$ ，但电路此时并没有出现短路，故称为“虚短”。由此得出：

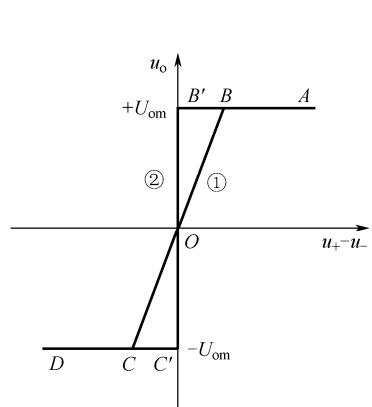


图 3-18 集成运放传输特性图

$$u_- \approx u_+$$

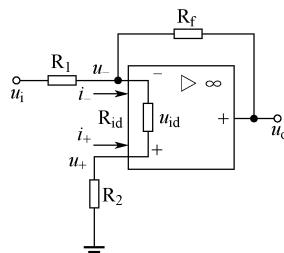


图 3-19 带有负反馈的集成运放电路

② 由于集成运放的输入电阻很高，所以流入集成运放的净输入电流近似为零，但电路此时并没有出现断路，故称为“虚断”。由此得出：

$$i_- = i_+ \approx 0 \quad (3-28)$$

式(3-28)说明，集成运放同相输入端和反相输入端的电流均近似为零。

利用“虚短”和“虚断”的概念分析工作于线性区的集成运放电路将十分简便。

2) 工作在非线性区的集成运放

集成运放处于开环状态，或其同相输入端和输出端有通路时（即引入正反馈），如图 3-20 和图 3-21 所示，集成运放工作在非线性区。此时的集成运放具有如下特点：对于理想集成运放而言，当反相输入端电压 u_- 与同相输入端电压 u_+ 不等时，输出电压是一个恒定的值，极性可正可负，即：

$$\left. \begin{array}{l} u_- > u_+, u_o = -U_{om} \\ u_- < u_+, u_o = +U_{om} \end{array} \right\} \quad (3-29)$$

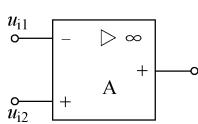


图 3-20 集成运放的开环状态

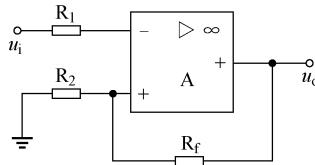


图 3-21 带有正反馈的集成运放电路

式(3-29)中， $\pm U_{om}$ 是集成运放输出的正向和负向饱和电压最大值，其工作特性如图 3-18 中 AB' 段和 $C'D'$ 段所示。

值得注意的是，工作在非线性区的集成运放的净输入电流仍然近似为零，即 $i_- = i_+ \approx 0$ ，“虚断”的概念仍然成立。

3.2.2 集成运放的线性应用

由集成运放和外接电阻、电容构成的比例、加法、减法、积分和微分运算电路称为基本运算电路。此时，集成运放工作在线性区。在分析这些电路的输出与输入的运算关系或电压放大倍数时，将集成运放看成理想元器件，因此可根据“虚短”和“虚断”的特点分



比例运算电路

析，比较简便。

1. 比例运算电路

1) 反相比例运算电路

如图3-22所示电路是反相比例运算电路。输入信号从反相输入端输入，同相输入端通过电阻接地。根据“虚短”和“虚断”的特点（即 $u_- \approx u_+$, $i_- = i_+ \approx 0$ ），可得 $u_+ = 0$ ，故 $u_- = 0$ 。这表明，当反相输入端与地等电位，但又不是真正接地（称为“虚地”）时：

$$\begin{aligned} i_i &= u_i / R_1 \\ i_f &= (u_- - u_o) / R_f = -u_o / R_f \end{aligned}$$

又因 $i_- = 0$ ，故 $i_i = i_f$ ，可得：

$$u_o = -\frac{R_f}{R_1} u_i \quad (3-30)$$

式(3-30)表明， u_o 与 u_i 成一定的比例关系，式中负号表示输出电压与输入电压的相位相反。电压放大倍数为：

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (3-31)$$

改变 R_f 和 R_1 比值，即可改变此放大倍数。

由图3-22中所示参数，可计算出：

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = -\frac{R_f}{R_1} = -\frac{100}{10} = -10$$

输出电压为：

$$u_o = -A_{uf} u_i = -10u_i$$

在图3-22中，集成运放的同相输入端接有电阻 R_2 ，称为平衡电阻。平衡电阻的作用是保证集成运放两输入端处于静态工作状态时的外接等效电阻阻值相等，即 $R_2 = R_1 // R_f$ 。

2) 同相比例运算电路

如果输入信号从同相输入端输入，而反相输入端通过电阻接地，并引入负反馈，此电路称为同相比例运算电路，如图3-23所示。

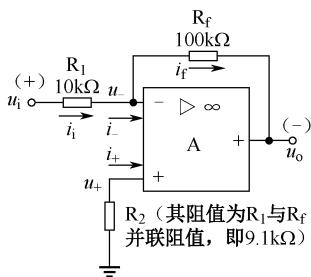


图3-22 反相比例运算电路

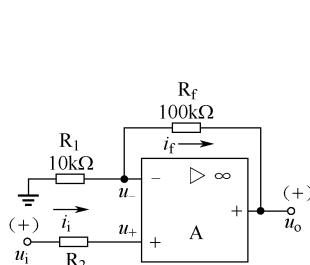


图3-23 同相比例运算电路

由虚短、虚断性质可知：

$$u_- = \frac{R_1}{R_1 + R_f} u_o = u_+ = u_i$$

即：

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_i}\right) u_i \quad (3-32)$$

则电压放大倍数为：

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (3-33)$$

式(3-32)表明，该电路与反相比例运算电路一样， u_o 与 u_i 也符合比例关系，但是输出电压与输入电压相位相同。

根据图3-23中参数可计算出：

$$A_{uf} = 1 + \frac{R_f}{R_i} = 1 + \frac{100}{10} = 11$$

$$u_o = A_{uf} u_i = 11 u_i$$

在图3-23中，若去掉 R_i ，如图3-24所示，这时：

$$u_o = u_- = u_+ = u_i$$

表明 u_o 与 u_i 大小相等，相位相同，电路起到电压跟随作用，故该电路又称电压跟随器。这种电路中 R_f 和 R_2 也可用导线取代。其电压放大倍数为：

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_i} = 1 \quad (3-34)$$

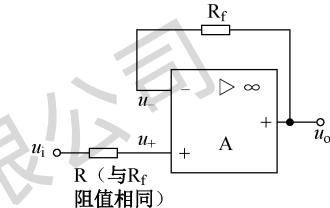


图3-24 电压跟随器

2. 加法、减法运算电路

1) 加法电路

如图3-20所示是对两个信号求和的电路，信号由反相输入端引入，同相输入端通过一个电阻接地。前面已经指出，反相比例电路的反相输入端为虚地，根据虚断和虚地概念，由图3-25电路可得：

$i_1 + i_2 = i_f$ ，即 $\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} = \frac{0 - u_o}{R_f}$ 。因此，电路的输入与输出关系为：

$$u_o = -R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right) \quad (3-35)$$

根据图3-25所示参数可计算出：

$$u_o = -R_f \left(\frac{u_{i1}}{R_1} + \frac{u_{i2}}{R_2} \right) = -100 \times \left(\frac{10}{10} + \frac{-6}{5} \right) = 20(\text{mV})$$

同时，可计算平衡电阻阻值：

$$R_3 = R_1 // R_2 // R_f \approx 3.2(\text{k}\Omega)$$

当 $R_1 = R_2 = R$ 时：

$$u_o = -\frac{R_f}{R} (u_{i1} + u_{i2}) \quad (3-36)$$

2) 减法电路

集成运放的反相输入端和同相输入端分别加入信号 u_{i1} 和 u_{i2} ，如图3-26所示。采用这种输入方式的电路称为减法电路或差分运算电路。



加、减运算电路

利用叠加定理，并根据式(3-30)和式(3-32)，得：

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)u_+ - \frac{R_f}{R_1}u_{i1}$$

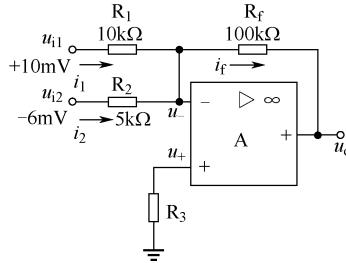


图 3-25 加法电路

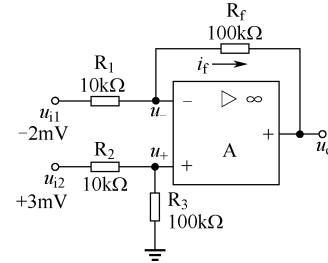


图 3-26 减法电路

式中， $u_+ = \frac{R_3}{R_2 + R_3}u_{i2}$ ，则输出电压为：

$$u_o = \frac{R_1 + R_f}{R_1} \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1} \quad (3-37)$$

若 $R_1=R_2$, $R_f=R_3$ ，可以得出输出电压为：

$$u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1}) \quad (3-38)$$

式(3-38)表明，适当选择电阻阻值，可使输出电压与两个输入电压的差值成比例，故称为减法电路。根据图3-26所示参数可计算输出电压：

$$u_o = \frac{R_f}{R_1} (u_{i2} - u_{i1}) = \frac{100}{10} \times (3 + 2) = 50(\text{mV})$$

【例 3-3】写出如图3-27所示二级运算放大电路的输入、输出关系($R_3=R_2//R_1$, $R_4=R_5//R_6$)。

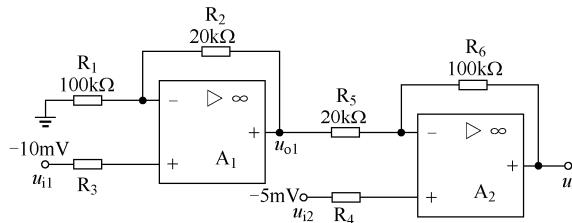


图 3-27 例 3-3 的电路

解：在图3-27中，A₁组成同相比例运算电路，故：

$$u_{o1} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)u_{i1}$$

由于理想集成运放输出电阻阻值 $R_o=0$ ，故前级输出电压 u_{o1} 即为后级输入电压。由 A₂ 组成的差分放大电路的两个输入信号分别为 u_{o1} 和 u_{i2} 。由叠加定理，输出电压 u_o 为：

$$u_o = -\frac{R_6}{R_5} u_{o1} + \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) u_{i2} = -\frac{R_6}{R_5} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) u_{i1} + \left(1 + \frac{R_6}{R_5}\right) u_{i2}$$

根据电路参数可知: $R_5 = R_2$, $R_6 = R_1$, 故 $u_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)(u_{i2} - u_{i1})$

上式表明, 如图3-27所示电路是一个减法电路。

根据图3-27所示的参数可计算出:

$$u_o = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)(u_{i2} - u_{i1}) = \left(1 + \frac{100}{20}\right) \times (-5 + 10) = 30(\text{mV})$$

3. 积分与微分电路

1) 积分电路

在集成运放中, 积分电路指能使输出电压与输入电压的积分成比例的电路形式。积分电路如图3-28所示。图中, 用 C_f 代替 R_f 构成反馈电路。

设电容器 C_f 上初始电压 $U_C(0) = 0$, 随着充电过程的进行, 电容器 C_f 两端的电压为:

$$u_c = \frac{1}{C_f} \int i_c dt$$

根据虚地和虚断的概念, 由图3-28可知:

$$i_i = \frac{u_i}{R_1} = i_c$$

故:

$$u_o = -u_c = -\frac{1}{R_1 C_f} \int u_i dt \quad (3-39)$$

式(3-39)表明, 输出电压 u_o 与输入电压 u_i 对时间 t 的积分成正比例关系, 且输出电压与输入电压相位相反。

若输入电压 u_i 是恒定的直流电压 U_i , 则有:

$$u_o = -\frac{U_i}{R_1 C_f} t \quad (3-40)$$

这时, 输出电压与积分时间成正比。因此, 即使输入电压很小, 经过一段时间后, 输出电压也会积累到一定数值。对这种特性的应用在自动调节系统和测量系统中较为多见。

积分电路可以将输入的方波信号转换成三角波信号, 如图3-29所示。

2) 微分电路

微分运算是积分运算的逆运算。在积分电路中, 将电阻 R_1 与电容 C_f 的位置对调一下, 即得微分电路, 如图3-30所示。

由图3-30可知:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{du_i}{dt}$$

$$i_f = -\frac{u_o}{R_f} = i_c$$

故:

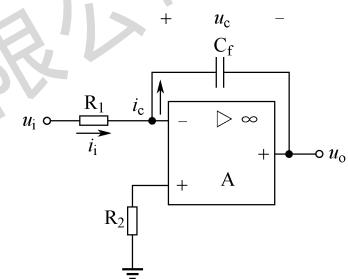


图3-28 积分电路

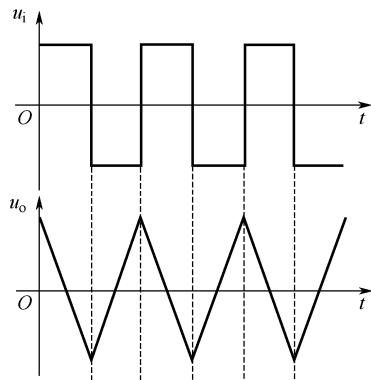


图 3-29 积分电路变换波形示意图

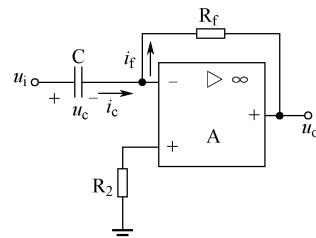


图 3-30 微分电路

$$u_o = -i_c R_f = -CR_f \frac{du_i}{dt} \quad (3-41)$$

式(3-41)表明,输出电压 u_o 正比于输入电压 u_i 对时间 t 的微分。若 u_i 是恒定的直流电压,则 $u_o=0$ 。

微分电路可以将输入的方波信号转换成尖峰波信号,如图3-31所示。

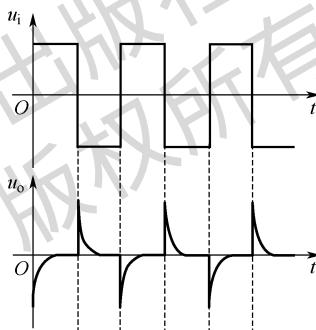


图 3-31 微分电路变换波形示意图

【例 3-4】 电路如图 3-32 所示,回答以下问题:

- ① 试写出输入输出关系式。
- ② 若 $u_i=1V$,电容器的初始电压为零,输出电压何时达到0V?

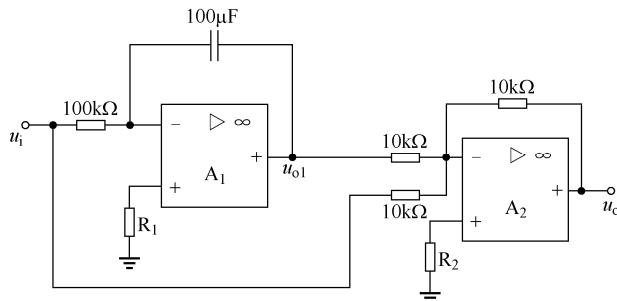


图 3-32 例 3-4 的电路

解: ① 经分析可知, A_1 组成积分电路, A_2 组成反相加法器, u_i 经积分后与 u_{o1} 进行反

相求和运算。由此可得：

$$u_{o1} = -\frac{1}{RC} \int_{t_0}^x u_i dt + u_c \Big|_{t_0=0}$$

$$u_o = -u_{o1} - u_i$$

② 设 t_1 时刻 u_o 达到 0V，因 $u_c \Big|_{t_0=0} = 0V$ ， $u_i = 1V$ 为恒定值，故有：

$$u_o = \frac{u_i}{RC} t_1 - u_i = 0$$

将图 3-30 中参数代入，得：

$$t_1 = RC = 1 \times 10^5 \times 1 \times 10^{-4} = 10(s)$$

3.2.3 集成运放的非线性应用

电压比较器是集成运放非线性应用的典型电路，集成运放用作电压比较器时，工作于开环状态，只要两端输入电压有差别（差动输入），输出端就立即饱和。为了改善输入、输出特性，常在电路中引入正反馈。电压比较器的基本功能是比较两个或多个模拟量的大小，并以输出端的高、低电平表示比较结果。它分为单限电压比较器和滞回电压比较器两类。

1. 单限电压比较器

如图 3-33 (a) 所示是简单的单限电压比较器，图中，同相输入端接基准电压（或称参考电压） U_{REF} ，被比较信号从反相输入端输入，电路处于开环状态。当 $u_i > U_{REF}$ 时，输出电压为负饱和值 $-U_{om}$ ；当 $u_i < U_{REF}$ 时，输出电压为正饱和值 $+U_{om}$ ，其传输特性如图 3-33 (b) 所示。可见，只要输入电压在基准电压 U_{REF} 处稍有变化，输出电压 u_o 就在负饱和值到正饱和值间变化。单限电压比较器的输出电压从一个电平翻转到另一个电平时对应的输入电压值称为阈值电压或门限电压，用 U_{TH} 表示。



单限电压比较器

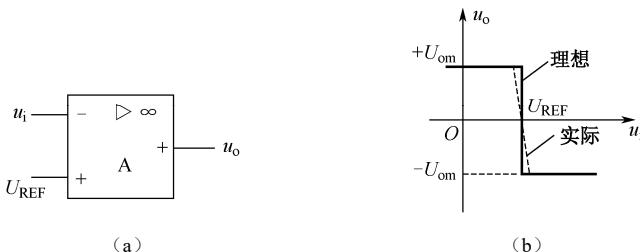


图 3-33 简单的单限电压比较器

特别地，当 $U_{REF}=0V$ ，即同相输入端接地时的电压比较器称为过零电压比较器。当过零电压比较器的输入信号为正弦波信号时，输出信号为正、负向宽度相同的方波信号，如图 3-34 所示。

单限电压比较器有两点不足：第一，当集成运放的开环放大倍数 A_{uo} 不是非常大时，其传输特性将如图 3-33 (b) 中虚线所示，电平转换部分的陡峭程度减小。例如，设 $A_{uo}=10^3$ ， $U_{om}=10V$ ，则 u_i 须比 U_{REF} 低 10mV，输出才能达到 $+U_{om}$ ； u_i 须比 U_{REF} 高 10mV 时输出才能

达到 $-U_{om}$ 。也就是说，当 $|u_i - U_{REF}| < 10mV$ 时，该电压比较器不能很好地判断 u_i 与 U_{REF} 的大小。第二，这种电压比较器抗干扰能力差，特别是输入电压处于基准电压附近时，若输入信号中混有噪声，输出电压就会随噪声在正负最大值之间来回翻转，无法稳定。

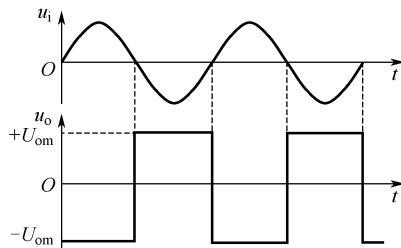


图 3-34 过零电压比较器波形图

2. 滞回电压比较器



滞回电压比较器

对于上面介绍的电压比较器，其状态翻转的门限电压是某一固定值，在实际应用时，如果输入信号存在干扰，单限电压比较器容易出现多次误翻转。解决方法是采用滞回电压比较器。

1) 电路特点

滞回电压比较器（又叫迟滞电压比较器）电路如图 3-35 (a) 所示。它是在单限电压比较器的基础上，从输出端引一个电阻分压支路到同相输入端，形成正反馈而形成的。这样，同相输入端电压 u_+ 不再是固定的，而是由输出电压和参考电压叠加而成的，因此同相输入端电压 u_+ 也有两个。

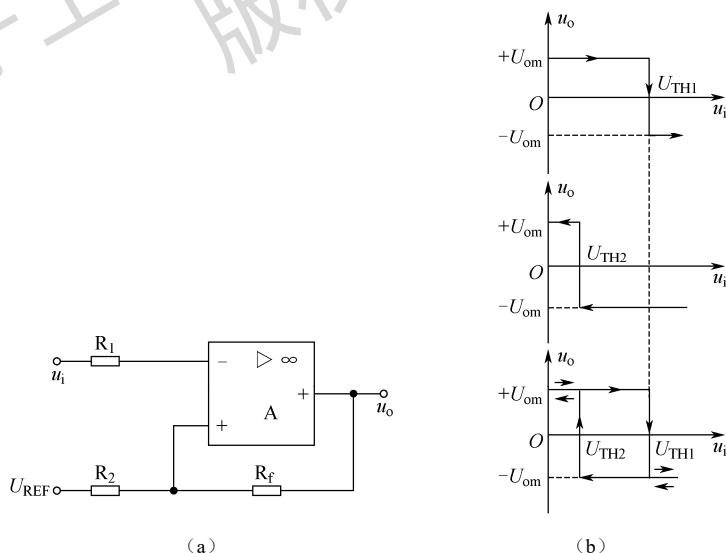


图 3-35 滞回电压比较器

当输出为正向饱和电压 $+U_{om}$ 时，将同相输入端电压称为上门限电压，用 U_{TH1} 表示，则有：

$$U_{TH1} = u_+ = U_{REF} \frac{R_f}{R_f + R_2} + U_{om} \frac{R_2}{R_f + R_2} \quad (3-42)$$

当输出为负向饱和电压 $-U_{om}$ 时, 将同相输入端电压称为下门限电压, 用 U_{TH2} 表示, 则有:

$$U_{TH2} = u_+ = U_{REF} \frac{R_f}{R_f + R_2} - U_{om} \frac{R_2}{R_f + R_2} \quad (3-43)$$

通过式(3-42)和式(3-43)可以看出, 上门限电压 U_{TH1} 比下门限电压 U_{TH2} 大。

2) 传输特性和回差电压 ΔU_{TH}

滞回电压比较器的传输特性如图3-35(b)所示。当输入信号 u_i 从零开始增加时, 电路输出为正向饱和电压 $+U_{om}$, 此时同相输入端对地电压为 U_{TH1} 。当 u_i 逐渐增加到刚超过 U_{TH1} 时, 电路输出翻转, 变为负向饱和电压 $-U_{om}$ 。这时, 同相输入端对地电压变为 U_{TH2} , 若 u_i 继续增大, 输出保持 $-U_{om}$ 不变。

若 u_i 从最大值开始下降, 当下降到上门限电压 U_{TH1} 时, 输出并不翻转, 只有下降到略小于下门限电压 U_{TH2} 时, 输出才发生翻转, 输出变为正向饱和电压 $+U_{om}$ 。

由以上分析可以看出, 该电压比较器具有滞回特性。

上门限电压 U_{TH1} 与下门限电压 U_{TH2} 之差称为回差电压, 用 ΔU_{TH} 表示, 有

$$\Delta U_{TH} = U_{TH1} - U_{TH2} = 2U_{om} \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad (3-44)$$

回差电压的存在大大提高了电路的抗干扰能力。只要干扰信号的峰值小于半个回差电压, 滞回电压比较器就不会因为干扰而误动作。

【例3-5】滞回电压比较器如图3-36所示, 试计算其门限电压 U_{TH1} 、 U_{TH2} 和回差电压 ΔU_{TH} , 画出传输特性曲线; 当 $u_i=6\sin\omega t(V)$ 时, 试画出该电路的输出电压 u_o 的波形。

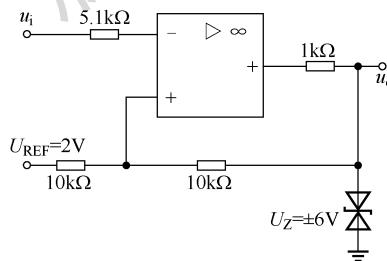


图3-36 例3-5电路图

$$\text{解: } U_{TH1} = U_{REF} \frac{R_f}{R_f + R_2} + U_Z \frac{R_2}{R_f + R_2} = 2 \times \frac{10}{10+10} + 6 \times \frac{10}{10+10} = 4(V)$$

$$U_{TH2} = U_{REF} \frac{R_f}{R_f + R_2} - U_Z \frac{R_2}{R_f + R_2} = 2 \times \frac{10}{10+10} - 6 \times \frac{10}{10+10} = -2(V)$$

$$\Delta U_{TH} = U_{TH1} - U_{TH2} = 8(V)$$

传输特性曲线如图3-37所示。

当 $u_i=6\sin\omega t(V)$ 时, 该电路的输出信号 u_o 的波形如图3-38所示。

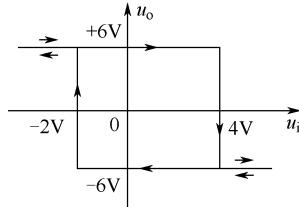


图 3-37 传输特性曲线

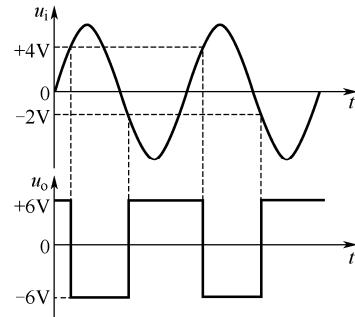


图 3-38 输出信号波形



集成运放
应用实例

3.2.4 集成运放应用实例

1. 精密整流电路

精密整流电路是一种通过运算放大器与二极管结合消除二极管管压降误差的高精度整流方案，适用于小信号处理、传感器信号调理等场景。

在如图 3-39 所示的一般半波整流电路中，我们使用二极管将交流电整流为直流电，但这种整流电路中，当输入电压 u_i 幅值小于二极管的正向导通电压时，二极管处于截止状态，输出电压 u_L 为 0。因此，这种电路不能对微弱信号整流。为了克服这个问题，引入精密整流电路。

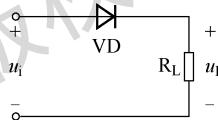
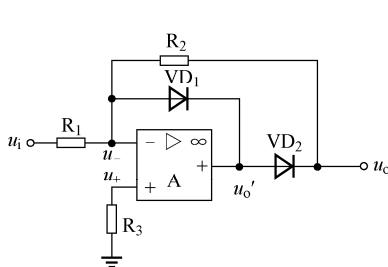
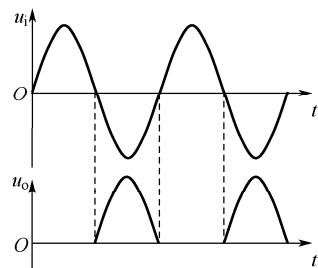


图 3-39 一般半波整流电路

图 3-40 (a) 所示为半波精密整流电路。当 $u_i > 0$ 时，运算放大器的输出 $u_o' < 0$ ，从而使 VD_1 导通， VD_2 截止， R_2 上的电流为 0，此时 $u_o = u_- = u_+ = 0$ 。当 $u_i < 0$ 时，运算放大器的输出 $u_o' > 0$ ，从而使 VD_2 导通， VD_1 截止，此时运算放大器构成反相比例运算电路， $u_o = -u_i R_2 / R_1$ 。 u_i 和 u_o 的波形如图 3-40 (b) 所示。



(a) 电路



(b) 波形

图 3-40 半波精密整流电路及其输入/输出波形

因为半波整流电路每个输入信号的周期只有半个周期有波形输出，对交流输入信号的利用率低，所以实际使用中经常要采用全波整流电路，要实现全波精密整流，只需要在半波精密整流电路的基础上增加一个求和放大器，电路如图3-41所示（ $R_3=R_4=R_5=R_6=R_7/2$ ）。

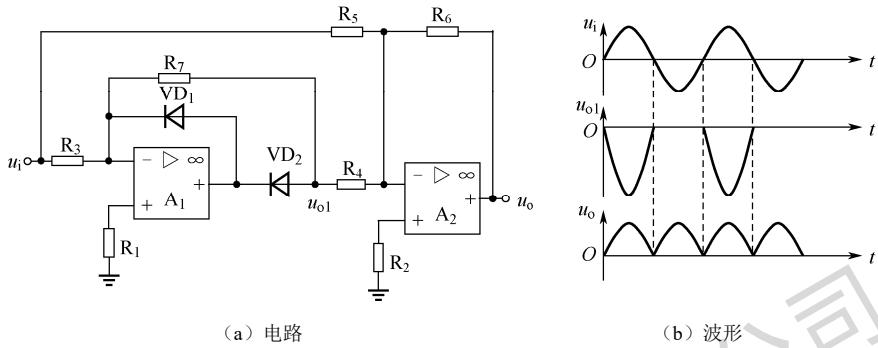


图3-41 全波精密整流电路及其输入/输出波形

在全波精密整流电路中， A_1 构成半波精密整流电路，因为反馈电阻阻值为输入电阻阻值的2倍，所以输出的半波整流波形幅度为输入信号幅度的2倍，如图3-41(b)中部所示。 A_2 构成反相加法运算电路，根据电路的运算关系可得 $u_o=-(u_i+u_{o1})$ ，所以在输出端可得全波整流后的波形，如图3-41(b)下部所示。

2. 仪用放大器

仪用放大器是一种专为提高差分增益和共模抑制比(K_{CMR})而设计的特殊放大器。它具有高输入阻抗、低输出阻抗和低噪声的特性，适合需要高精度和噪声抑制的场合，如电机控制器、医疗设备和电池测试。仪用放大器通过外部电阻设置增益，内部包含输入缓冲级和差分放大级，以抵消共模电压并提供高精度信号处理。高共模抑制比使得仪用放大器在工业过程控制、医疗监测和电池供电设备等领域得到了广泛应用。

仪用放大器典型结构主要由输入缓冲级和差分放大级组成，如图3-42所示（电阻下标相同表示阻值相同）。

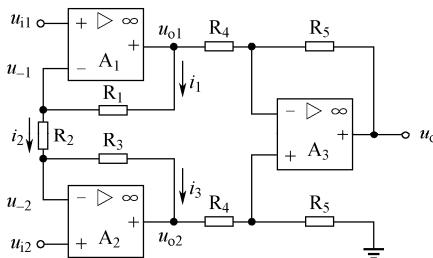


图3-42 仪用放大器典型结构

运算放大器 A_1 和 A_2 构成输入缓冲级，运放 A_3 构成差分放大级。 u_{i1} 和 u_{i2} 分别加到 A_1 和 A_2 的同相输入端，根据运算放大器“虚短”的特性分析， $u_{-1}=u_{i1}$ ， $u_{-2}=u_{i2}$ 。再根据运算放大器“虚断”的特性分析，流过电阻 R_1 、 R_2 和 R_3 的电流相等，即有 $i_1=i_2=i_3$ ，因此有

$$u_{o1}-u_{o2}=i_1R_1+i_2R_2+i_3R_3=\frac{u_{i1}-u_{i2}}{R_2}(R_1+R_2+R_3) \quad (3-45)$$

根据式(3-38)的关系,可得

$$u_o = \frac{R_5}{R_4}(u_{o2} - u_{o1}) = -\frac{R_5}{R_4} \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2} (u_{i1} - u_{i2}) \quad (3-46)$$

电路的电压放大倍数为

$$A_{uf} = \frac{u_o}{u_{i1} - u_{i2}} = -\frac{R_5}{R_4} \frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_2} \quad (3-47)$$

在仪用放大器中,通常 R_1 、 R_3 、 R_4 和 R_5 为给定值, R_2 用可变电阻代替,调节 R_2 ,即可改变电压放大倍数 A_{uf} 。

由于输入信号 u_{i1} 和 u_{i2} 都是从 A_1 和 A_2 的同相端输入的,根据电路虚断的现象可知流入电路的电流等于0,所以输入电阻阻值趋于无穷大。目前,这种仪用放大器已有多种型号的单片集成电路产品,在测量系统中应用很广。

实训 集成运放的测试

一、实训目的

通过对LM741的测试,验证:

- (1) 反相比例运算关系式。
- (2) 减法比例运算关系式。
- (3) 加法比例运算关系式。

二、主要实训器材

直流稳压电源、万用表、小型可调直流电源、实验线路板、电阻元器件板。

三、实训步骤

1. 验证反相比例运算电路

- (1) 将实验线路板和电阻元器件板连接成如图3-43所示的反相比例运算电路。
- (2) 将 $\pm 12V$ 电源接入实验线路板,先把 u_i 端接地,调节 R_P 阻值使 $u_o=0$ 。
- (3) 再输入 u_i , 测量 u_o 并将结果填入表3-6。

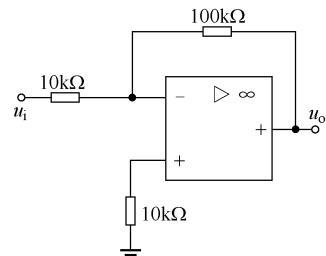


图3-43 反相比例运算电路

表3-6 验证反相比例运算电路

输入电压 u_i/mV		30	100	300	1000	3000
输出电压 u_o/mV	理论值/mV					
	实测值/mV					
	误差					

2. 验证减法比例运算电路

- (1) 将实验线路板和电阻元器件板连接成如图 3-44 所示的减法比例运算电路。
- (2) 分别输入 u_{i1} 和 u_{i2} , 测出 u_o 值, 并将数据填入表 3-7 中。

表 3-7 验证减法比例运算电路

输入电压/V	u_{i1}	1	2	0.2
	u_{i2}	0.5	1.8	-0.2
输出电压 u_o /V	理论值			
	实测值			

3. 验证加法比例运算电路

- (1) 将实验线路板和电阻元器件板连接成如图 3-45 所示的加法比例运算电路。

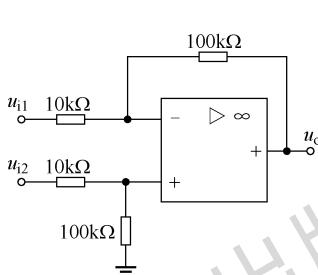


图 3-44 减法比例运算电路

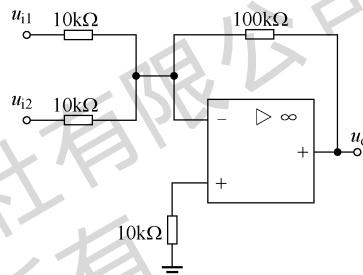


图 3-45 加法比例运算电路

- (2) 分别输入 u_{i1} 和 u_{i2} , 测出 u_o 值, 填入表 3-8。

表 3-8 验证加法比例运算电路

输入电压/V	u_{i1}	0.3	-0.3
	u_{i2}	0.2	0.2
输出电压 u_o /V	理论值		
	实测值		

四、实训操作

可以通过扫右侧二维码观看本实训的操作步骤。

五、仿真实验

1. 仿真电路图

仿真电路与实训电路基本一致, 选用的集成运放型号为 LM358P, 如图 3-46 所示。

2. 操作步骤

按照前述实训步骤, 在 Multisim 软件中完成反相比例运算电路、减法比例运算电路和加法比例运算电路的测试。



集成运算放大
电路的测试

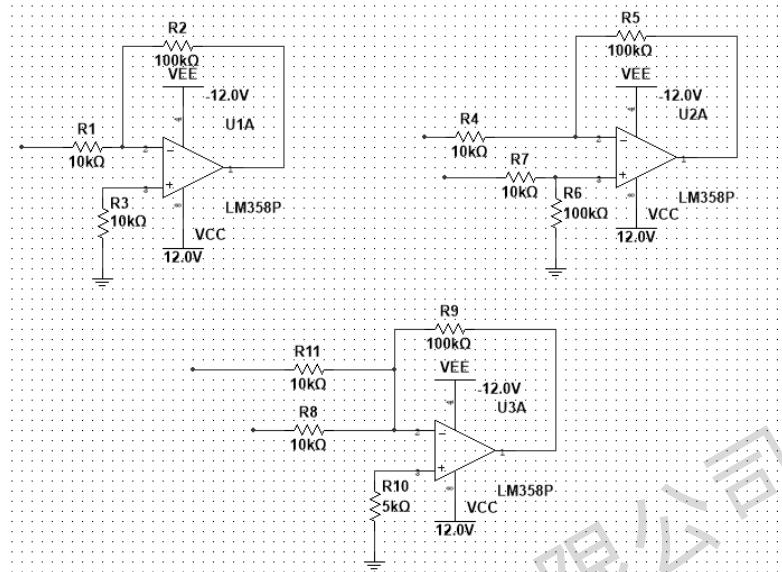


图 3-46 仿真电路图

3. 测试结果

(1) 反相比例运算电路的测试结果如图 3-47 所示。

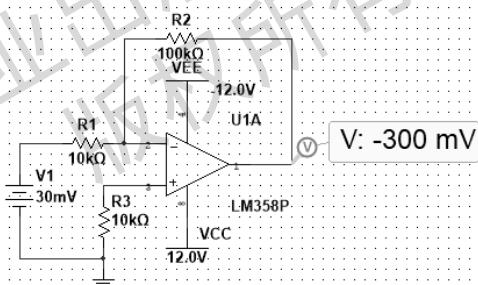


图 3-47 反相比例运算电路的测试结果

(2) 减法比例运算电路的测试结果如图 3-48 所示。

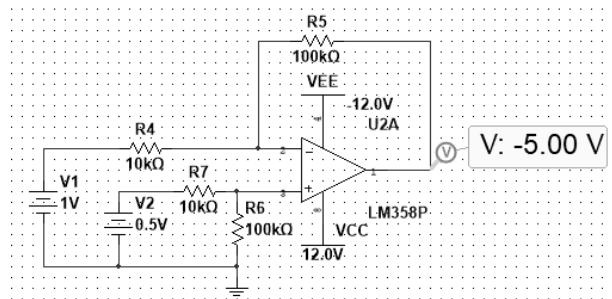


图 3-48 减法比例运算电路的测试结果

(3) 加法比例运算电路的测试结果如图 3-49 所示。

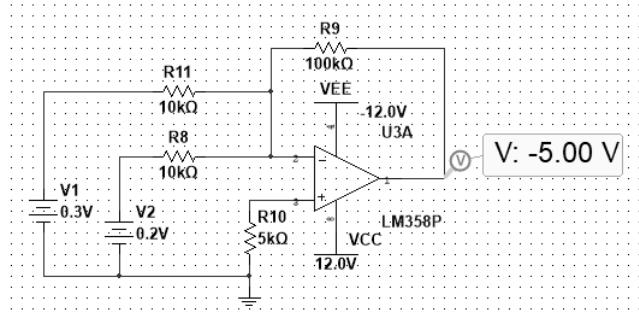


图 3-49 加法比例运算电路的测试结果

4. 操作视频

请扫右边的二维码观看仿真操作视频。



思考与练习

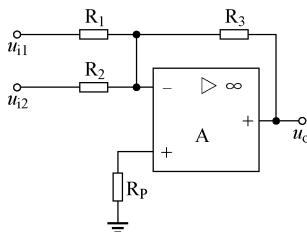
一、判断题（对的打“√”，错的打“×”）

1. 反相比例运算电路是一种电压并联负反馈放大器。 ()
2. 同相比例运算电路是一种电压串联负反馈放大器。 ()
3. 集成运放组成运算电路时，它的反相输入端均为虚地。 ()
4. 单限电压比较器比滞回电压比较器抗干扰能力强，而滞回电压比较器比单限电压比较器灵敏度高。 ()

二、选择题

1. () 比例运算电路的输入电流基本上等于流过反馈电阻的电流，而 () 比例运算电路的输入电流几乎等于零。

- | | |
|---|-----------------------|
| A. 同相 | B. 反相 |
| 2. 电路如题图 3-4 所示，当 $R_1=R_2=R_3$ 时， u_o 为 ()。 | |
| A. $-(u_{i1}+u_{i2})$ | B. $-(u_{i1}-u_{i2})$ |
| C. $+(u_{i1}+u_{i2})$ | D. $+(u_{i1}-u_{i2})$ |



题图 3-4

3. 运算放大器要进行调零，是由于 ()。

A. 温度的变化	B. 存在输入失调电压
C. 存在偏置电流	

4. 反相比例运算电路的输入电阻阻值()，同相比例运算电路的输入电阻阻值()。

A. 较大 B. 较小

C. 不确定是较大还是较小

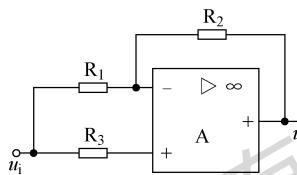
5. () 运算电路可将方波信号转换成三角波信号。

A. 微分 B. 积分 C. 比例

6. 电路如题图 3-5 所示, u_o 和 u_i 的关系为()。

A. $u_o = -u_i$ B. $u_o = u_i$

C. $u_o = -\frac{R_2}{R_1}u_i$ D. $u_o = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)u_i$



题图 3-5

三、填空题

1. 可认为理想运算放大器的开环差模电压放大倍数 A_{uo} 为_____，输入电阻阻值 R_{id} 为_____，输出电阻阻值 R_o 为_____。

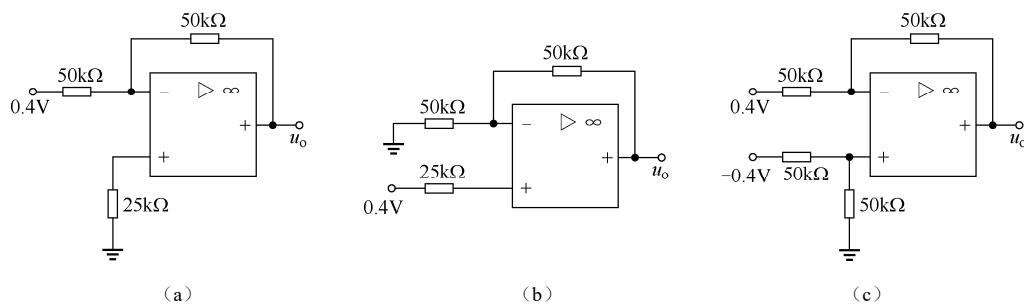
2. 当集成运放处于_____状态时，可运用_____和_____概念。

3. 集成电路把_____、_____和_____等集中在一小块硅片上，使包含许多元器件的复杂电路变成单一的元器件。

4. 由集成运放组成的电压比较器，其关键参数门限电压指使输出电压发生_____时的电压值。只有一个门限电压的电压比较器称_____比较器，具有两个门限电压的电压比较器称_____比较器或者_____。

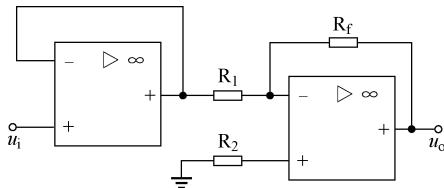
四、分析与计算题

1. 由理想集成运放构成的电路如题图 3-6 所示。试计算输出电压 u_o 的值。



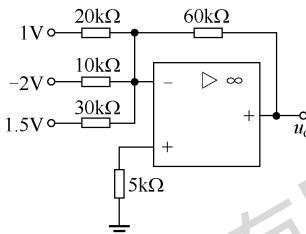
题图 3-6

2. 电路如题图 3-7 所示, 已知 $R_f=5R_1$, $u_i=10\text{mV}$, 求 u_o 的值。



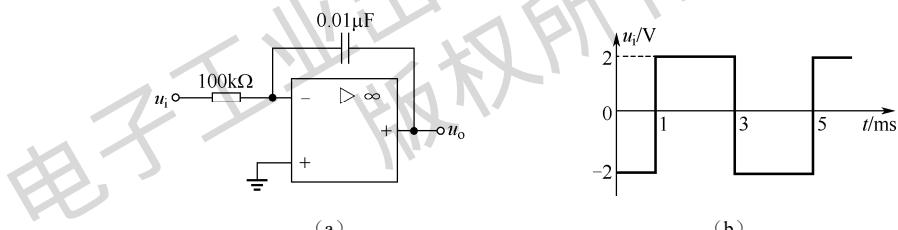
题图 3-7

3. 电路如题图 3-8 所示, 求输出电压 u_o 的值。



题图 3-8

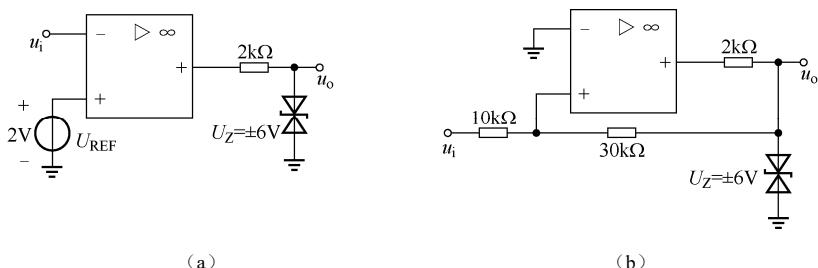
4. 积分电路如题图 3-9 (a) 所示, 输入电压波形如题图 3-9 (b) 所示, 且 $t=0$ 时, $u_c=0$, 试画出输出电压波形。



题图 3-9

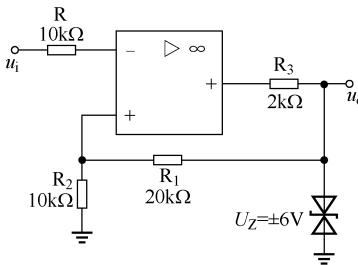
5. 如果要求运算放大电路的输出电压 $u_o=-5u_{i1}+2u_{i2}$, 已知反馈电阻阻值 $R_f=50\text{k}\Omega$, 试画出电路图并求出各电阻阻值。

6. 试画出如题图 3-10 所示各电压比较器的传输特性曲线。



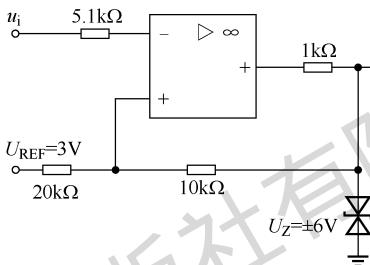
题图 3-10

7. 滞回电压比较器如题图 3-11 所示, 试画出该电路的传输特性曲线; 当输入电压 $u_i=4\sin\omega t$ 时, 画出该电路的输出电压 u_o 的波形。



题图 3-11

8. 滞回电压比较器如题图 3-12 所示，试计算其门限电压 U_{TH1} 、 U_{TH2} 和回差电压 ΔU_{TH} ，并画出传输特性曲线；当 $u_i=6\sin\omega t(V)$ 时，试画出该电路的输出电压 u_o 的波形。



题图 3-12

3.3 人体红外探测报警器

【学习目标】

- (1) 增强专业意识，培养良好的职业道德和职业习惯。
- (2) 理解人体红外探测报警器电路的组成与工作原理。
- (3) 认识人体红外探测报警器包含的元器件，掌握相关元器件的测量方法。
- (4) 熟练使用电子线路 CAD 软件绘制电路原理图。
- (5) 熟练使用电子焊接工具，完成人体红外探测报警器电路的焊接装配。
- (6) 熟练使用电子仪器仪表，完成人体红外探测报警器电路的功能检测。
- (7) 了解人体红外探测报警器电路常见故障的分析与排除方法。

如图 3-50 所示的人体红外探测报警器来源于苏州润本电子科技有限公司的智能安防系统产品中的部分电路。

热释电红外传感器是一种用于生活中防盗报警、来客告知等的传感器，其工作原理是将吸收的热量经过一系列转换，形成电压输出信号。热释电红外传感器由热电元器件和转换电路等部分组成，补偿型热释电红外传感器还带有温度补偿元器件，如图 3-51 所示为热释电红外传感器的结构。热释电红外传感器通常采用三引脚金属圆帽封装，各引脚分别为 D（内部开关二极管，接电源正极）、S（内部开关二极管，接信号端）、G（接地）。实物图如图 3-52 所示。

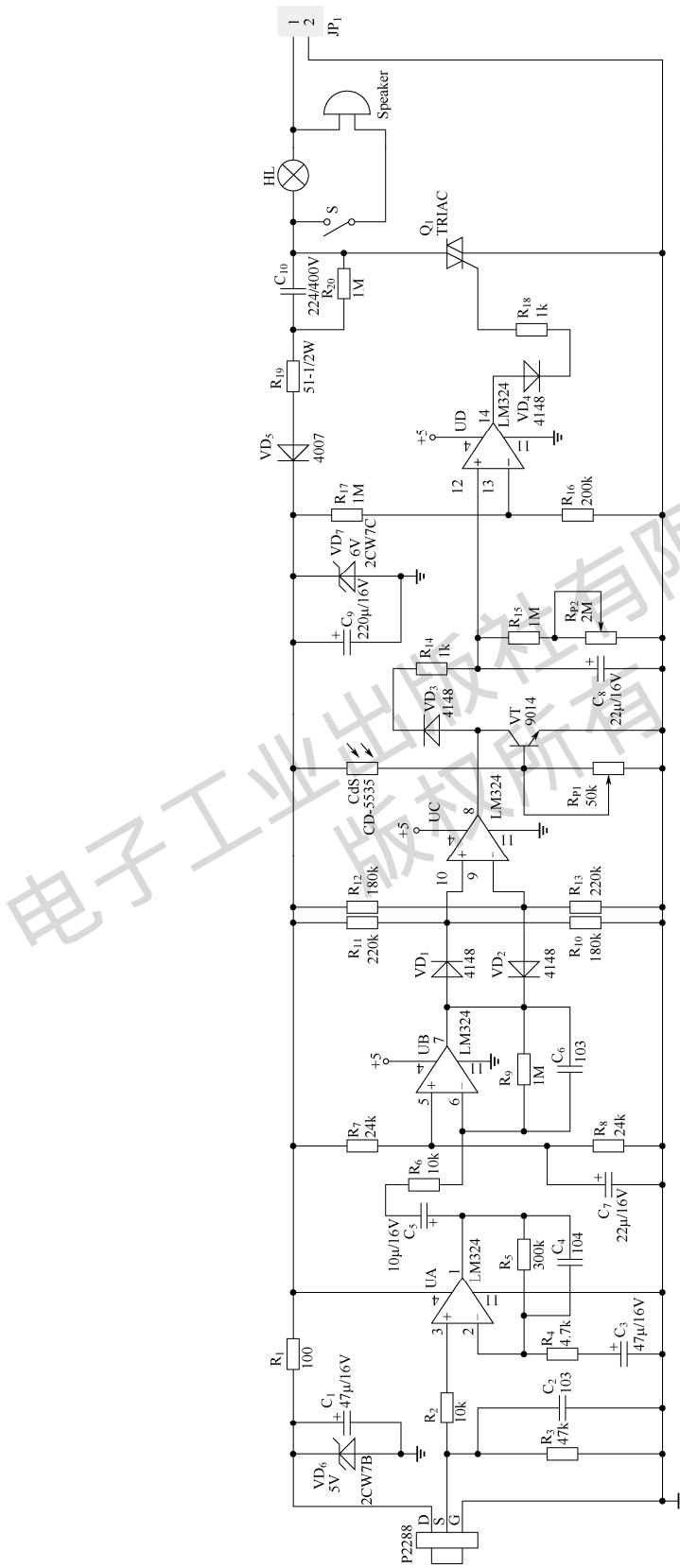


图 3-50 人体红外探测报警器电路图

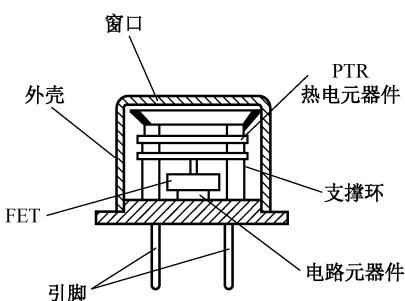


图 3-51 热释电红外传感器的结构

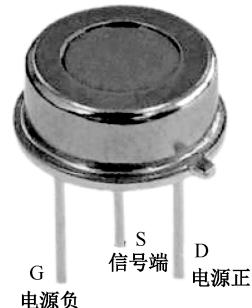


图 3-52 热释电红外传感器的实物图

人体红外探测报警器电路主要由光学系统（加装菲涅耳透镜）、热释电红外传感器、信号处理电路和报警电路等组成。其工作流程图如图 3-53 所示。



图 3-53 人体红外探测报警器的工作流程图

下面介绍一下目前较为常用的热释电红外传感器——P2288。P2288 的灵敏度很高，探测距离可达 10m 以上，其俯视角可达 86°，水平视角可达 120°。因它仅对人体释放的特定波长的红外线最敏感，搭配旁路电容后抗干扰能力较强，因而误动作概率极低。

P2288 探测到人体辐射出的红外信号时，P2288 的引脚 S 输出微弱的电信号，但此信号不能直接驱动后续电路工作，必须将其进行放大。如图 3-50 所示，信号放大电路采用两级放大的形式，微弱电信号经 UA、UB 两级放大后，从 UB 的引脚 7 输出 0.5~5.5V 的强电信号。

在如图 3-50 所示电路中，VD₁、VD₂、R₁₀~R₁₃ 及 UC 组成双门限比较器，因 P2288 感生的信号电压可正可负，故 UB 的引脚 7 输出的电压亦可正可负（对中心电压 3V 而言）。当其输出的电压达到 4.1V 以上时，通过 VD₁ 施加于 UC 的引脚 10 的电位高于引脚 9 的电位（3.3V），使 UC 的引脚 8 输出高电平；而当 UB 的引脚 7 的电压低于 2V 时，则 UC 的引脚 9 的电位将通过 VD₂ 下降至 2.7V 以下，其引脚 8 也输出高电平。

平时无信号时，由于 UC 的引脚 9 的电位（3.3V）高于引脚 10 的电位（2.7V），故引脚 8 无输出。当 P2288 接收到信号时，引脚 8 就一定输出高电平，通过 VD₃、R₁₄ 给 C₈ 充电，使 UD 的引脚 12 的电位高于引脚 13 的电位，其引脚 14 输出高电平，触发可控硅导通，点亮灯泡。

由于 C₈ 所储电能通过 R₁₅、R_{P2} 放电需时约 2 分钟，故在此 2 分钟内灯泡一直亮着。当 C₈ 上的电位低于引脚 13 的电位（1V）时，引脚 14 无输出，可控硅不再导通，灯泡自动熄灭。

在夜间入眠或家中无人时，可将开关 S 闭合，一旦有小偷潜入探测区域内，在灯泡亮的同时，扬声器也会发出警报声，起到防盗的作用。

光敏电阻 CdS 及三极管 VT 等组成光控电路，白天因光敏电阻的阻值很小（10kΩ 以下），三极管 VT 饱和导通，将 UC 的引脚 8 的电位钳位至 0.3V 左右，故无论有无感应信号，可控硅均不能导通，灯泡不能点亮；到了夜晚，因光敏电阻的阻值变大到几兆欧，三极管 VT

截止，UC的引脚8的电位不再受其钳位，一旦P2288接收到信号，引脚8就立即输出高电平，使可控硅导通，将灯泡点亮。

实训 人体红外探测报警器的装调

一、工作任务

- (1) 读懂人体红外探测报警器电路原理图。
- (2) 画出相关印制电路板的布线图。
- (3) 根据布线图制作人体红外探测报警器。
- (4) 完成人体红外探测报警器电路功能检测和故障排除。
- (5) 分小组进行分析、总结，编写项目实训报告。

二、设备与元器件

- (1) 装配工具：电烙铁、焊锡丝、钳子、起子、电路板。
- (2) 调试设备：万用表、双踪示波器。
- (3) 实训元器件：所需元器件如表3-9所示。

表3-9 人体红外探测报警器电路元器件清单

元器件	名称	规格或型号	数量	元器件	名称	规格或型号	数量
R ₁	电阻	100Ω	1	C _{7/C₈}	电解电容	22μF/16V	2
R _{2/R₆}	电阻	10kΩ	2	C ₉	电解电容	220μF/16V	1
R ₃	电阻	47kΩ	1	C ₁₀	电解电容	224μF/400V	1
R ₄	电阻	4.7kΩ	1	VD ₁ /VD ₂ /VD ₃ /VD ₄	普通二极管	IN4148	4
R ₅	电阻	300kΩ	1	VD ₅	整流二极管	IN4007	1
R _{7/R₈}	电阻	24kΩ	2	VT	三极管	9014	1
R _{9/R₁₅/R₁₇/R₂₀}	电阻	1MΩ	4	Q ₁	双向可控硅	TRIAC	1
R _{10/R₁₂}	电阻	180kΩ	2	P2288	热释电红外传感器	P2288	1
R _{11/R₁₃}	电阻	220kΩ	2	U	运算放大器	LM324	1
R _{14/R₁₈}	电阻	1kΩ	2	VD ₆ /VD ₇	稳压二极管	2CW7B/C, 5V/6V	2
R ₁₆	电阻	200kΩ	1	R _{P1/P₂}	电位器	50kΩ/2MΩ	2
R ₁₉	电阻	51-1/2W	1	CdS	光敏电阻	CD-5535	1
C _{1/C₃}	电解电容	47μF/16V	2	Speaker	电磁扬声器	Speaker	1
C _{2/C₆}	涤纶电容	10nF	2	T	电源变压器	12V/5W	1
C ₄	涤纶电容	100nF	1	S	钮子开关		1
C ₅	电解电容	10μF/16V	1	HL	灯泡	HL	1

三、元器件的检测

1. LM324的检测

1) 不在路检测

不在路检测是在待测芯片未焊入电路时进行的检测，一般情况下可用万用表测量其各引脚与接地引脚之间的正向、反向电阻值，然后将测量结果与确认完好的芯片的相关数据

进行比较。

2) 在路检测

在路检测即通过万用表检测待测芯片各引脚在集成电路中的直流电阻、对地交流/直流电压及总工作电流。这种方法克服了不在路检测需要有可代换芯片的局限性和拆卸芯片的麻烦，是检测集成电路芯片最常用和实用的方法。

2. 扬声器的检测

扬声器的检测请参考项目2中相关叙述。

3. 三极管的检测

三极管的检测请参考项目1中相关叙述。

四、电路的安装

1. 电路安装的基本步骤

- (1) 绘制元器件装配图。
- (2) 手工绘制印制电路板图、制作印制电路板。
- (3) 元器件插装与电路焊接。

2. 电路安装的工艺要求

- (1) 电路的插装、焊接要严格遵守工艺规范。
- (2) 元器件布局必须美观、整洁、合理。
- (3) 所有焊点必须光亮、圆润、无毛刺，无虚焊、错焊和漏焊。
- (4) 连接导线应正确、无交叉，走线美观、简洁。
- (5) 特别注意电解电容和二极管的极性，三极管的引脚不能接错。

五、电路的调试

(1) 在P2288前面安装菲涅耳透镜，这是由于人体的活动频率较低，不利于传感器感知，所以需要用菲涅耳透镜强化传感器接收到的信号。

(2) 电路安装无误后，接上电源进行调试，让人在传感器前方7~10m处走动，调整电路中的电阻，使电路中的报警部分正常工作即可。其他的元器件只要焊接无误，质量完好，几乎不用调试即可正常工作。

(3) 本电路静态工作电流约10mA，接通电源约1分钟后进入守候状态，只要有人进入相应区域便会报警，人离开后约1分钟，电路停止报警。

六、故障的分析与排除

1. 报警器发生误报

可能的问题：安装的位置和方式不合理。正确的安装应该满足下列要求：

- (1) 报警器离地面有一定的距离。
- (2) 报警器应远离空调、冰箱、火炉等气流、温度变化比较剧烈的地方。
- (3) 报警器报警范围内不得有隔屏、家具、大型盆景等隔离物。

(4) 报警器不要直对窗口，否则窗外的热气流和人员走动也会引起误报。

2. 放大电路有故障

(1) 首先检查有没有输入信号，若没有，则问题可能出在传感器，此时应对传感器外围电路进行故障排除。

(2) 如果输入正常，但没有信号被放大，说明集成运放可能出现故障，此时应着重检查集成运放是否损坏。

3. 扬声器输出电路有故障

可能的问题：(1) 输出功率过低，无法驱动扬声器工作，此时可提高工作电压或选用额定功率较小的扬声器；(2) 扬声器已坏。

七、编写项目报告书

项目报告书的内容包括：

- (1) 写明项目目的。
- (2) 列出项目使用仪器清单。
- (3) 画出电路图，标明元器件参数，并列出元器件清单。
- (4) 画出电路接线工艺图、印制电路板图。
- (5) 列出电路制作过程或步骤。
- (6) 写出测试结果与分析。
- (7) 写出心得体会。

八、项目评价

项目评价如表3-10所示。

表3-10 项目评价

考核项目	考核标准	配分	得分
职业素养	(1) 遵时守纪、工作积极。 (2) 团结协作。 (3) 踏实勤奋、严谨求实	10	
安全操作	(1) 遵守安全操作规程。 (2) 无安全事故发生	10	
元器件的识别与检测	(1) 能正确识别元器件。 (2) 会用万用表检测三极管、驻极体话筒和扬声器	15	
电路的安装	(1) 元器件排列整齐。 (2) 焊点符合工艺要求	25	
电路的调试	(1) 仪器仪表使用正确。 (2) 能正确判断和排除电路故障	20	
项目报告书完成情况	(1) 格式标准，内容充实。 (2) 测试结果记录与分析准确、详细	20	
合计		100	

九、项目参考

人体红外探测报警器印制电路板图如图3-54所示。

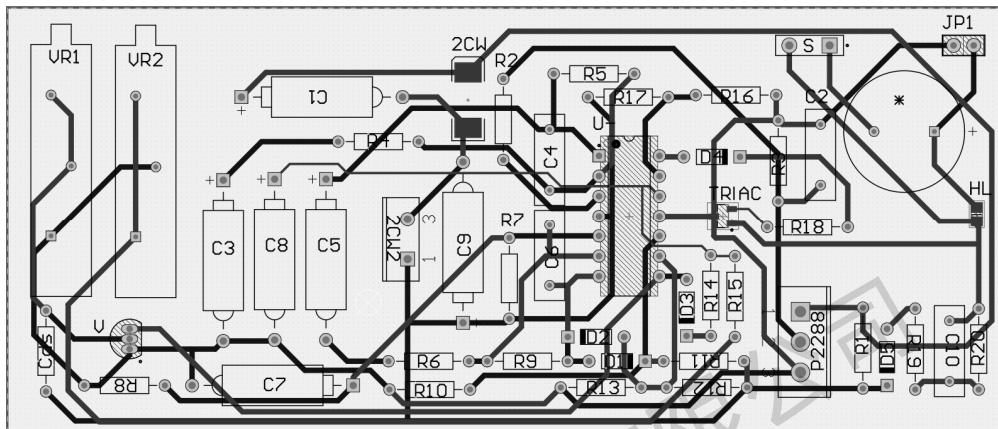


图3-54 人体红外探测报警器印制电路板图

知识链接——报警器之入侵探测器

入侵探测器是入侵报警系统中的前端装置，也是入侵报警系统的感知部分，相当于人的眼睛、鼻子、耳朵、皮肤等，可感知现场的温度、湿度、气味、能量等各种物理量的变化，并将其按照一定的规律转换成适于传输的电信号。

1. 震动式入侵探测器

震动式入侵探测器可分为机械震动入侵探测器、惯性棒震动式入侵探测器、电动震动式入侵探测器、压电晶体震动式入侵探测器、全面型震动式入侵探测器等多种类型，主要用于ATM、金库等场所。

震动式入侵探测器属于面控制型探测器，室内明装、暗装均可，通常安装于可能被入侵的墙壁、天花板、地面或保险柜上；震动式入侵探测器的安装要牢固，应紧贴安装面安装，安装面应为干燥的平面。安装于墙体上时，距地面高2~2.4m为宜，震动式入侵探测器不宜用于附近有强震动干扰源（如旋转的电机、变压器、风扇、空调）的场所，如无法避开震动源，则视干扰源震动情况，确保距离干扰源1~3m。

2. 红外入侵探测器

红外入侵探测器分为主动红外入侵探测器和被动红外入侵探测器两类。

1) 主动红外入侵探测器报警原理

主动红外入侵探测器的发射机中的红外发光二极管在电源的激发下，发出一束经过调制的红外线，此红外线经过光学系统发射出去，并被接收机接收，由接收机中的红外光传感器把红外信号转换成电信号，经过电路处理后传给报警控制器。由发射机发射出的红外线经过防范区到达接收机，构成了一条警戒线。正常情况下，接收机收到的是一个稳定的信号，当有人经过该警戒线时，红外线被遮挡，接收机收到的红外信号发生变化，提取

这一变化，经放大和适当处理，就变成了报警控制器发出的报警信号。

2) 被动红外入侵探测器报警原理

被动红外入侵探测器是一种应用比较广泛的探测器，它是靠检测物体辐射的红外线的方式进行工作的。在自然界中，任何温度高于0K的物体都可以辐射红外线，而且辐射能量的大小与物体表面温度有关。被动红外入侵探测器采用热释电红外传感器作为信号获取装置，其对红外线的感知表现在敏感单元的温度变化上，温度变化导致电信号的变化。热释电红外传感器的特定结构决定了其工作条件有两个：第一、被检测体必须是生物体，第二、被检测体必须要运动。

3. 复合入侵探测器

复合入侵探测器就是采用两种及两种以上探测技术的入侵探测器，常用的有微波和被动红外复合入侵探测器等。

微波入侵探测器以多普勒效应为工作基础。多普勒效应内容为：观测者接收到的波源辐射的波的频率因为波源和观测者的相对运动而产生变化。在微波入侵探测器中，由发射机发出高频微波，在监视空间范围内建立三维的交变电磁场。接收机与发射机安装在同一机壳内，用于接收从监视空间内反射回来的反射波，并将反射波的频率与发射波频率进行比较，进而得出是否有物体进入的判断。微波入侵探测器反应灵敏，对温度变化、气流扰动和噪声等的干扰均不敏感，发射机发出的微波能穿透墙、玻璃等物体。微波入侵探测器检测运动方向为径向运动方向，对横向运动的物体的检测能力则比较差。

综合上述分析，被动红外入侵探测器和微波入侵探测器可以互相弥补对方的缺点，二者复合而成的复合入侵探测器可以构建一个相当完善的监视空间，大大减少了监视死角。

项目小结

(1) 直接耦合放大电路存在零漂问题，需要采用差分放大电路实现对零漂的抑制。差分放大电路借助电路的对称性和公共发射极电阻的作用，可以减小零漂、抑制共模信号和进行差模放大。差分放大电路有四种接法，分别是：双端输入双端输出；双端输入单端输出；单端输入双端输出；单端输入单端输出。通常采用共模抑制比衡量差分放大电路性能的优劣，该值越大越好。

(2) 集成运放实质上是高增益的直接耦合多级放大电路。它一般由输入级、中间级、输出级和偏置电路等构成。应用中通常将集成运放特性理想化，即 $A_{uo} \rightarrow \infty$, $R_{id} \rightarrow \infty$, $R_o \rightarrow 0$, $K_{CMR} \rightarrow \infty$ ；对于理想集成运放，在线性应用中，有 $u_- \approx u_+$, $i_- = i_+ \approx 0$ ；在非线性应用中，其输出只有 $\pm V_{om}$ 两种状态。

(3) 集成运放在线性应用时可以构成比例、加法、减法、微分、积分等基本运算电路。在这些基本运算电路中必须引入负反馈，使集成运放工作在线性状态。

(4) 集成运放工作在开环或正反馈状态下时为非线性应用，如用作电压比较器。电压比较器的工作状态在输入电压达到门限电压时翻转。单门限电压比较器中，集成运放通常工作在开环状态，加上正反馈的电压比较器称为滞回电压比较器，有上、下两个门限电压。