

红外探测报警器的制作与调试



项目概述

红外报警器主要由光学系统、热释电红外传感器、信号滤波和放大、信号处理和报警电路等几部分组成,其结构框图如图 3-1 所示。图中,光学系统中所采用的菲涅尔透镜可以将人体辐射的红外线聚焦到热释电红外探测元上,同时产生交替变化的红外辐射高灵敏区和盲区,以适应热释电探测元要求信号不断变化的特性;热释电红外传感器是报警器设计中的核心器件,它可以把人体的红外信号转换为电信号,供信号处理部分使用;信号处理主要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。

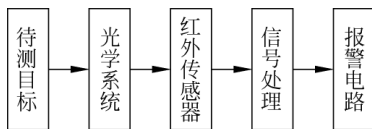


图 3-1 红外探测报警器的结构框图

本项目通过对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、输入电阻和电压比较器的门限电压。



技能目标

- (1) 学会独立查阅二极管、三极管、红外线传感器等元器件的资料。
- (2) 掌握差分放大电路的技术指标测试与集成运放运算电路的实现。
- (3) 理解差模放大倍数、共模放大倍数的测试方法。
- (4) 掌握红外探测报警器电路中重要元器件的选择及参数测试。

- (5) 能针对电路特点,采取有效措施来提高共模抑制比。
- (6) 熟练掌握红外探测报警器的安装、调试与检测。
- (7) 能对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

【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,一般多采用多级放大电路,以达到较高的放大倍数。在多级放大电路中,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。对于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,就是放大器前级输出端与后级输入端以及放大器与信号源或负载直接连接起来,或者经电阻等能通过直流的元件连接起来。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。在集成电路中要制作耦合电容和电感元件相当困难,因此集成电路的内部电路都采用直接耦合方式。实际上,直接耦合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,直接耦合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、后级的电位配合问题,二是零点漂移问题。

(1) 前、后级的电位配合问题

图 3-2 所示是一个直接耦合方式的放大电路,可以看出 VT_1 的集电极和 VT_2 的基极是同电位的。由于 VT_2 发射结压降 U_{BE2} 很小,所以 VT_1 的集电极电位一定很低,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、后级电位不能合理配合,应设法改进。

(2) 零点漂移问题

若将图 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,电压表的指针应该停留在某个数值不变,此值称为放大器输出端电压

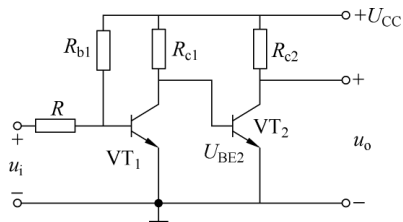


图 3-2 简单的直接耦合电路

的起始值。但实际上,它会离开起始值,出现忽大忽小、忽快忽慢的不规则摆动。

直流放大器在输入信号为零时,输出电压偏离其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而变化。一般情况下,温度的变化是主要原因。

放大器级数越多,输出端零点偏移越严重。但衡量零漂的大小,需要将放大器输出的零漂电压折算到输入端再进行比较。当漂移电压的大小可以和需要放大的有效信号相比拟时,无法分辨是有用信号电压还是漂移电压,即有用信号淹没在漂移信号之中,造成直耦放大器不能正常工作,所以抑制零漂对直耦放大器来说是个突出的问题。减小零漂的主要措施有:采用高稳定度的稳压电源;采用高质量的电阻、晶体管;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能有效抑制零漂的方法。

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,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

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,外接电阻也完全对称相等,两边各元件的温度特性也都一样,因此两边电路是完全对称的。输入信号从两管的基极输入,输出信号从两管的集电极之间输出。 R_e 为差分放大电路的公共发射极电阻,用来抑制零点漂移并决定晶体管的静态工作点电流。 R_c 为集电极负载电阻。

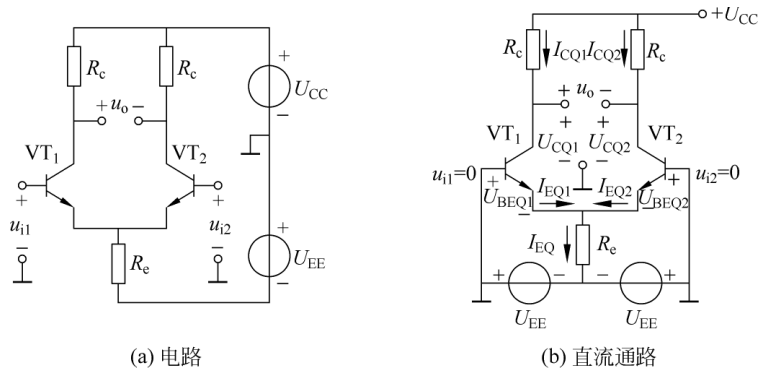


图 3-3 基本差分放大器

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:

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

所以

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

因此,两管的集电极电流均为:

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

两管集电极对地电压为:

$$U_{CQ1} = U_{CC} - I_{CQ1}R_c, \quad U_{CQ2} = U_{CC} - I_{CQ2}R_c \quad (3-4)$$

可见,静态时,两管集电极之间的输出电压为零,即

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

(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,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

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

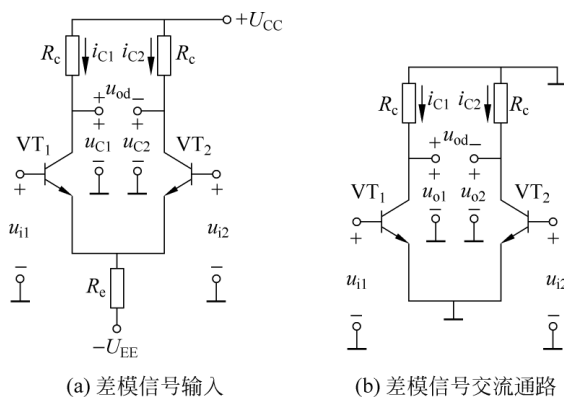


图 3-4 差模信号输入的差分放大电路

u_{i1} 使 VT_1 管产生集电极增量电流 i_{c1} , u_{i2} 使 VT_2 管产生集电极增量电流 i_{c2} 。由于差分电路的对称特性, 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 管的集电极电流分别为

$$i_{C1} = I_{CQ1} + i_{c1}, \quad i_{C2} = I_{CQ2} + i_{c2} = I_{CQ1} - i_{c1} \quad (3-6)$$

此时,两管的集电极电压分别为:

$$\left. \begin{aligned} u_{C1} &= U_{CC} - i_{C1}R_c = U_{CC} - (I_{CQ1} + i_{c1})R_c = U_{CQ1} - i_{c1}R_c = U_{CQ1} + u_{o1} \\ u_{C2} &= U_{CQ2} - i_{c2}R_c = U_{CQ2} + u_{o2} \end{aligned} \right\} \quad (3-7)$$

式中, $u_{o1} = -i_{c1}R_c$, $u_{o2} = -i_{c2}R_c$, 分别为 VT_1 和 VT_2 管集电极的增量电压, 而且 $u_{o2} = -u_{o1}$ 。这样,两管集电极之间的差模输出电压 u_{od} 为:

$$u_{od} = u_{C1} - u_{C2} = u_{o1} - u_{o2} = 2u_{o1} \quad (3-8)$$

当电源波动或温度变化时,会引起两管集电极电流变化。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”。由此画出差模信号交流通路如图 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

$$A_{ud} = \frac{u_{o1} - u_{o2}}{u_{i1} - u_{i2}} = \frac{2u_{o1}}{2u_{i1}} = \frac{u_{o1}}{u_{i1}} = A_{ud1} \quad (3-10)$$

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} 等于单管的差模电压放大倍数 A_{ud1} 。由图 3-4(b)不难知道

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

若在图 3-4(a)所示电路中,两个集电极之间接负载电阻 R_L , VT_1 和 VT_2 管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 $R'_L = R_c // (R_L/2)$ 。这时,差模电压放大倍数变为:

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

从差分放大电路的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 R_{id} 。由图 3-4(b)可得:

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

差分放大电路中,两管的集电极之间对差模信号所呈现的等效电阻称为差模输出电阻 R_o ,由图 3-4(b)可得:

$$R_o \approx 2R_c \quad (3-14)$$

【例 3-1】 在图 3-3(a)所示差分放大电路中,已知 $U_{CC} = U_{EE} = 12V$, $R_c = 10k\Omega$, $R_e = 20k\Omega$, 晶体管 $\beta = 80$, $r_{bb'} = 200\Omega$, $U_{BEQ} = 0.6V$, 两个输出端之间外接负载电阻 $20k\Omega$ 。试求:

① 静态工作点。

② A_{ud} 、 R_{id} 和 R_o 。

解: ① 求静态工作点

$$I_{CQ1} = I_{CQ2} = \frac{U_{EE} - U_{BEQ}}{2R_e} = \frac{12 - 0.6}{2 \times 20} = 0.285(mA)$$

$$U_{CQ1} = U_{CQ2} = U_{CC} - I_{CQ1}R_c = 12 - 0.285 \times 10 = 9.15(V)$$

② 求 A_{ud} 、 R_{id} 和 R_o

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

$$A_{ud} = -\frac{\beta R'_L}{r_{be}} = -\frac{80 \times \frac{10 \times 10}{10 + 10}}{7.59} = -52.7$$

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

$$R_o = 2R_c = 2 \times 10 = 20(\text{k}\Omega)$$

② 共模输入与共模抑制比。在差分放大电路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。如图 3-5(a)所示,此时 $u_{i1} = u_{i2} = u_{ic}$ 。在共模信号的作用下, VT_1 和 VT_2 管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 对每个晶体管的共模信号有 $2R_e$ 的负反馈效果,由此得到图 3-5(b)所示共模信号交流通路。

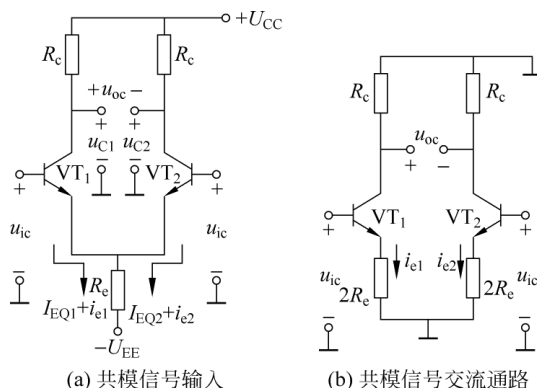


图 3-5 共模信号输入的差分放大电路

由于差分放大电路中两管的电路对称,对于共模输入信号来说,两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做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管基极的相同的外界干扰信号也都可以看做是共模输入信号而被抑制。

实际应用中,差分放大电路的两个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。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} 这一指标来表示,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

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \quad (3-17)$$

若用分贝作为单位,则为

$$K_{\text{CMR}}(\text{dB}) = 20\lg \left| \frac{A_{\text{ud}}}{A_{\text{uc}}} \right| \quad (3-18)$$

K_{CMR} 值越大,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 $A_{\text{ud}} = -50$, $A_{\text{uc}} = -0.05$, 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:

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

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

共模输入电压:

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

由此可见,当用共模和差模信号表示两个输入电压时,有

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

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

② 求输出电压。

差模输出电压 u_{od} :

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

共模输出电压 u_{oc} :

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

在差模和共模信号同时存在的情况下,对于线性放大电路来说,可以利用叠加定理来求总的输出电压 u_o ,即

$$u_o = A_{\text{ud}} u_{\text{id}} + A_{\text{uc}} u_{\text{ic}} = -1 - 0.05 = -1.05(\text{V}) \quad (3-19)$$

共模抑制比 K_{CMR} 等于

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

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。

由于只从 VT_1 管的集电极输出,所以输出电压只有双端输出的一半,即差模电压放大倍数为

$$A_{\text{ud1}} = \frac{1}{2} A_{\text{ud}} = -\frac{1}{2} \frac{\beta R_c}{r_{\text{be}}} \quad (3-20)$$

如果从 VT_2 管的集电极输出,仅是 u_o 的相位与前者相反,差

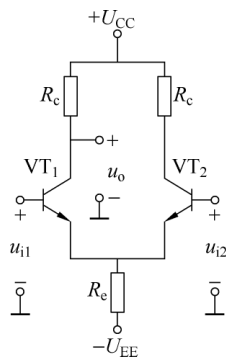


图 3-6 双端输入、单端输出差分放大电路

模电压放大倍数的表达式去掉“-”号即可。

差模输入电阻为：

$$R_{id} = 2r_{be} \quad (3-21)$$

差模输出电阻为：

$$R_o \approx R_c \quad (3-22)$$

(3) 单端输入、双端输出差分放大电路如图 3-7 所示。

差模电压放大倍数、差模输入电阻和输出电阻的表达式同双端输入的一样。

(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)所示电路的差模电压放大倍数的表达式同式(3-20),即

$$A_{ud1} = \frac{1}{2}A_{ud} = -\frac{1}{2} \times \frac{\beta R_c}{r_{be}} \quad (3-23)$$

式中的“-”号表示输出电压与输入电压反相。

图 3-8(b)所示电路的差模电压放大倍数的表达式为：

$$A_{ud2} = \frac{1}{2}A_{ud} = \frac{1}{2} \times \frac{\beta R_c}{r_{be}} \quad (3-24)$$

式中无“-”号,表示输出电压与输入电压同相。

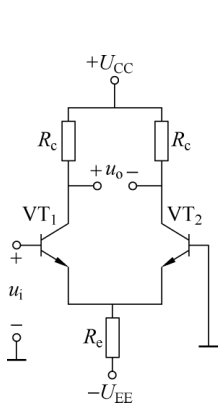


图 3-7 单端输入、双端输出差分放大电路

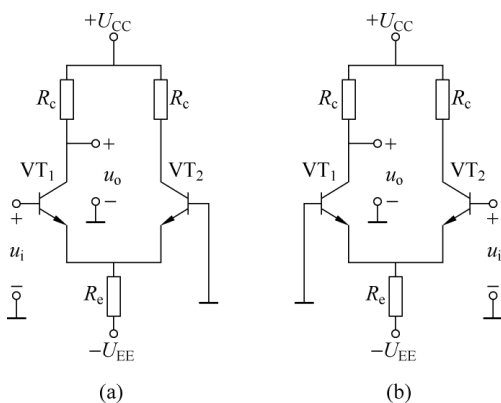


图 3-8 单端输入、单端输出差分放大电路

差模输入电阻为：

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

差模输出电阻为：

$$R_o \approx R_c \quad (3-26)$$

以上电路都未接负载电阻。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_c 变为 R'_L ,且 $R'_L = R_c // (R_L/2)$ 。

比较四种不同的输入、输出方式的差分放大电路可以看出,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;其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,可根据是否需要地对平衡输入(出)及对地不平衡输入(出)来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 差分放大器的测试

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、实训器材

直流稳压电源(两台)、万用表、实验线路板。

三、实训步骤

差分放大实验电路如图 3-9 所示。

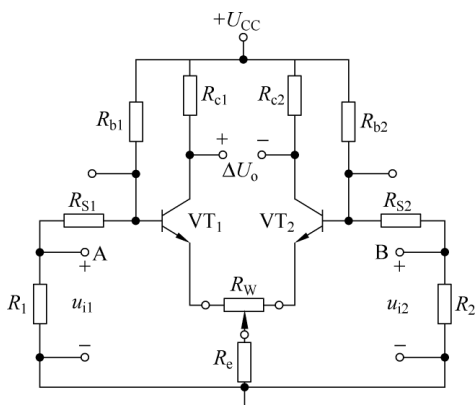


图 3-9 差分放大实验电路

1. 测量静态工作点

- (1) 将 u_{i1} 和 u_{i2} 短路接地(⊥)。
 - (2) 将 +12V 电源加到 U_{CC} 与 ⊥ 之间。
 - (3) 调节 R_w 使 $\Delta U_o = 0V$, 此后 R_w 不再变动, 以保证电路的对称性。
- 从万用表 20V 直流电压挡开始调节, 减小到 2V 挡。
- (4) 测量各有关点对地的电压, 记入表 3-1 中。

表 3-1 差分放大器静态测试

测量项目	U_{CQ1}	U_{CQ2}	U_{BQ1}	U_{BQ2}	U_{EQ}
测量值/V					

2. 测量差模电压增益

- (1) 在 u_{i1} 和 u_{i2} 上分别加上 +0.05V 和 -0.05V 直流电压, 即 $\Delta U_{ID} = \pm 0.05V$ (将直流稳压电源的两组输出串联, 并调节最右边的旋钮, 使输出 0.1V, 接到板上 A、B 两点间, 先“A 正 B 负”, 注意将该电源串联后的公共端接地)。

(2) 分别测量此时的 U_{C1} 、 U_{C2} (单端对地输出电压) 和 ΔU_{OD} (双端输出电压)。

(3) 计算: $\Delta U_{OD1} = U_{C1} - U_{CQ1}$, $\Delta U_{OD2} = U_{C2} - U_{CQ2}$, $A_{UD1} = \frac{\Delta U_{OD1}}{\Delta U_{ID1}}$, $A_{UD2} = \frac{\Delta U_{OD2}}{\Delta U_{ID2}}$,

$$A_{UD} = \frac{\Delta U_{OD}}{\Delta U_{ID}}。$$

(4) 将加在 u_{i1} 和 u_{i2} 上的电压改变极性(A 负 B 正), 大小不变, 重复步骤(2)、(3)。

(5) 将以上数据一一填入表 3-2 中。

表 3-2 差分放大器测量差模电压增益

输 入	单 端 输 出				双端输出	差模电压增益		
	U_{C1} (测量值)	ΔU_{OD1} (计算值)	U_{C2} (测量值)	ΔU_{OD2} (计算值)	ΔU_{OD} (测量值)	A_{UD1}	A_{UD2}	A_{UD}
$U_{ID1} = +0.05V$ $U_{ID2} = -0.05V$								
$U_{ID1} = -0.05V$ $U_{ID2} = +0.05V$								

3. 测量共模电压增益

(1) 将 u_{i1} 和 u_{i2} 并接(即 A、B 两点短接), 然后加入 $+0.1V$ 直流电压至 u_{i1} 两端, 即 $\Delta U_{IC} = +0.1V$ 。

(2) 测量此时的 U_{C1} 、 U_{C2} 和 ΔU_{OC} , 填入表 3-3 中。

(3) 计算 $\Delta U_{OC1} = U_{C1} - U_{CQ1}$, $\Delta U_{OC2} = U_{C2} - U_{CQ2}$, $A_{UC1} = \frac{\Delta U_{OC1}}{\Delta U_{IC}}$, $A_{UC2} = \frac{\Delta U_{OC2}}{\Delta U_{IC}}$,

$$A_{UC} = \frac{\Delta U_{OC}}{\Delta U_{IC}}。$$

表 3-3 差分放大器测量共模电压增益

输 入	单 端 输 出				双端输出	共模电压增益		
	U_{C1} (测量值)	ΔU_{OC1} (计算值)	U_{C2} (测量值)	ΔU_{OC2} (计算值)	ΔU_{OC} (测量值)	A_{UC1}	A_{UC2}	A_{UC}
$\Delta U_{IC} = +0.1V$								

4. 计算

计算上述单端、双端输出各种情况下的共模抑制比, 将结果填入表 3-4 中。

表 3-4 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 $