

实验七 差动放大器

19 组 朱云沁 PB20061372 赵明宇 PB19061383

实验题目：

差动放大器

实验目的：

加深理解差动放大器的基本性能特点和应用；学习差动放大器静态工作点的设置方法、掌握差模电压增益 A_{ud} 、共模电压增益 A_{uc} 、共模抑制比 K_{CMR} 等主要技术指标的测试方法；了解基本差动放大器与具有镜像恒流源的差动放大器的性能差别。

实验原理：

1) 差动放大器的主要性能指标

差模电压增益 A_{ud} ：差动放大电路对差模输入信号的放大倍数。差模电压增益越大，放大电路的性能越好。

$$A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}}$$

共模电压增益 A_{uc} ：差动放大电路共模输入信号的放大倍数。共模电压增益越小，放大电路的性能越好。

$$A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}}$$

共模抑制比 K_{CMR} ：差模电压放大倍数与共模放大倍数之比，它表明差动放大电路对共模信号的抑制能力。

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

2) 典型差动放大电路

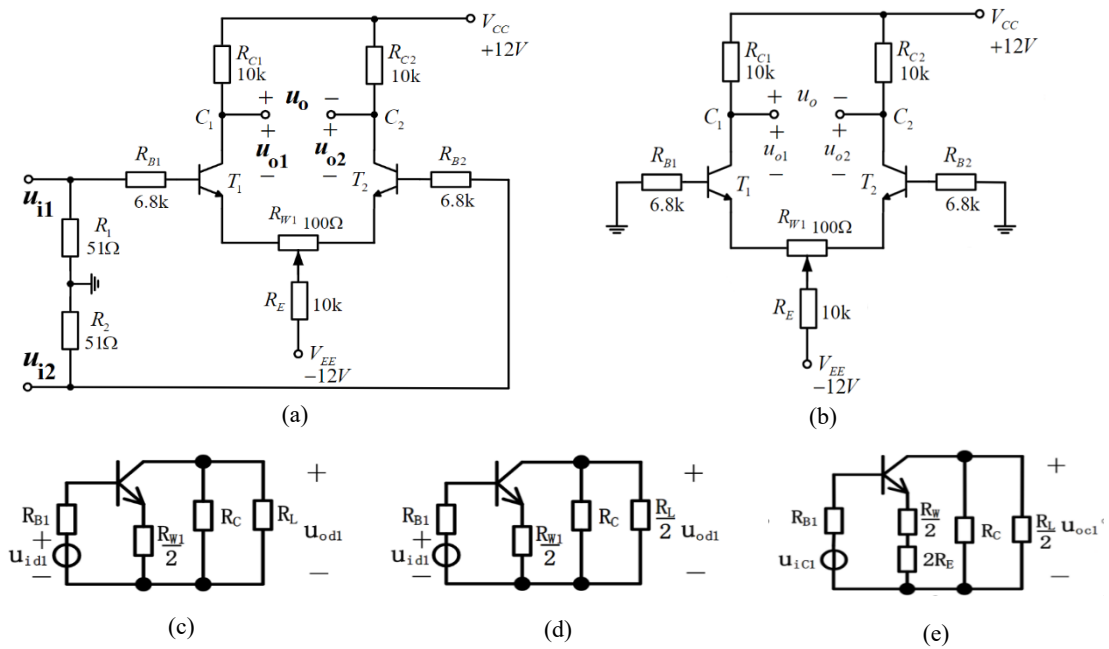


图 1 典型差动放大电路-实验原理 (a) 实验电路图；(b) 直流通路；(c) 单端输出差模半电路；
(d) 双端输出差模半电路；(e) 单端输出共模半电路

典型差动放大电路如图 1(a)所示，其中电路各参数对称，图 1(b)为其直流通路。分析得 T_1 、 T_2 静态工作点为

$$I_B = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_{B1} + 2(1 + \beta)R_E + (1 + \beta)\frac{R_{W1}}{2}}, \quad I_C = \beta I_B$$

$$U_C = V_{CC} - I_C R_C$$

$$U_{CE} = V_{CC} - V_{EE} - I_C R_C - 2I_E R_E - I_E \frac{R_{W1}}{2}$$

图 1(c)为典型差动放大电路单端输出时的差模半电路。分析可得，单端输出时差模电压增益为

$$A_{ud1} = \frac{U_{od1}}{U_{id1} - U_{id2}} = \frac{U_{od1}}{2U_{id1}} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{2[R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta)\frac{R_{W1}}{2}]}$$

图 1(d)为典型差动放大电路双端输出时的差模半电路。分析可得，双端输出时差模电压增益为

$$A_{ud} = \frac{U_{od1} - U_{od2}}{U_{id1} - U_{id2}} = \frac{2U_{od1}}{2U_{id1}} = \frac{-\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta)\frac{R_{W1}}{2}}$$

图 1(e)为典型差动放大电路单端输出时的共模半电路。分析可得，单端输出时共模电压增益为

$$A_{uc1} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic1}} = \frac{-\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta)\frac{R_{W1}}{2} + 2(1 + \beta)R_E}$$

典型差动放大电路双端输出时共模电压增益为

$$A_{uc} = \frac{U_{oc1} - U_{oc2}}{U_{ic1}} = 0$$

单端输出、双端输出时的共模抑制比分别为

$$K_{CMR1} = \left| \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} \right| \approx \frac{\beta R_E}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta)\frac{R_{W1}}{2}}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = +\infty$$

3) 具有恒流源的差动放大电路

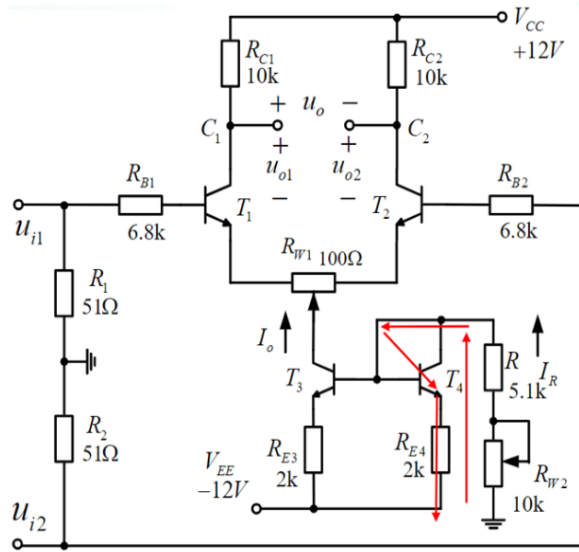


图 2 具有恒流源的差动放大电路-实验电路图

具有恒流源的差动放大电路如图 2 所示，其中电路各参数对称。分析可得，恒流源部分的输出电流为

$$I_o = -I_R = -(2I_{B4} + I_{C4}) \approx -I_{C4} = \frac{V_{EE} + V_{BE}}{R + R_{W2} + R_{E4}}$$

故差动放大部分 T_1 、 T_2 的静态工作点为

$$I_C \approx I_E = -\frac{1}{2}I_o, \quad I_B = \frac{I_C}{\beta}$$

$$U_C = V_{CC} - I_C R_C = V_{CC} + \frac{I_o R_C}{2}$$

与典型差动放大电路类比，具有恒流源的差动放大电路单端、双端输出时差模电压增益分别为

$$A_{ud1} = \frac{U_{od1}}{2U_{id1}} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{2 \left[R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2} \right]}$$

$$A_{ud} = \frac{2U_{od1}}{2U_{id1}} = \frac{-\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}}$$

记 $R'_e = r_{ce3} \left(1 + \frac{\beta R_{E3}}{r_{ce3} + R_{E3} + R_B} \right)$ ，则单端输出、双端输出时的共模电压增益分别为

$$A_{uc1} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic1}} = \frac{-\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2} + 2(1 + \beta)R'_e} \approx \frac{-R_C \parallel \frac{R_L}{2}}{2R'_e}$$

$$A_{uc} = \frac{U_{oc1} - U_{oc2}}{U_{ic1}} = 0$$

单端输出、双端输出时的共模抑制比分别为

$$K_{CMR1} = \left| \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} \right| \approx \frac{\beta R'_e}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}}$$

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = +\infty$$

实验内容：

1) 典型差动放大电路

a) 静态工作点的调节与测量

按图 1(a)正确连线，构成典型差动放大电路。不加输入信号，将输入端 u_1 、 u_{i2} 两点对地短路，调节 R_{W1} 电位器，使 $U_{C1} = U_{C2}$ 。用万用表直流档测量 T_1 、 T_2 的各极电位。结果如表 1 所示。

实验数据

对地电位	T_1			T_2		
	U_{C1}	U_{E1}	U_{B1}	U_{C2}	U_{E2}	U_{B2}
测量值	6.213V	-0.6419V	-14.86mV	6.211V	-0.6502V	-18.75mV

表 1 典型差动放大电路的静态工作点-实验数据

数据处理

根据表 1 数据，求得 T_1 、 T_2 两集电极间电压为

$$U_{C1} - U_{C2} = 6.213 - 6.211 = 0.002V$$

由 $U_{C1} - U_{C2} \approx 0$ ，知电路已基本调节对称。此外，求得 T_1 各极间电压为

$$U_{BE1} = U_{B1} - U_{E1} = -0.01486 + 0.6419 = 0.6270V$$

$$U_{CE1} = U_{C1} - U_{E1} = 6.213 + 0.6419 = 6.8549V$$

T_2 各极间电压为

$$U_{BE2} = U_{B2} - U_{E2} = -0.01875 + 0.6502 = 0.63145V$$

$$U_{CE2} = U_{C2} - U_{E2} = 6.211 + 0.6502 = 6.8612V$$

由 $U_{BE1} \approx 0.7V$ ， $U_{CE1} \gg 0.3V$ ，知 T_1 工作在放大区，同理可知 T_2 工作在放大区，符合静态工作点选取的基本要求。

另一方面，计算静态工作点的理论值。各极支路电流的理论值为

$$I_B = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_{B1} + 2(1 + \beta)R_E + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}} = \frac{12 - 0.7}{6.8 + 2 \times 161 \times 10 + 161 \times \frac{0.1}{2}} = 3.4932 \times 10^{-3}mA$$

$$I_C = \beta I_B = 160 \times 3.4932 \times 10^{-3} = 0.5589mA$$

$$I_E = (1 + \beta)I_B = 161 \times 3.4932 \times 10^{-3} = 0.5624mA$$

进而求得各极对地电压的理论值为

$$U_C = V_{CC} - I_C R_C = 12 - 0.558913 \times 10 = 6.4109V$$

$$U_E = V_{EE} + I_E \left(2R_E + \frac{R_{W1}}{2} \right) = -12 + 0.562406 \times \left(2 \times 10 + \frac{0.1}{2} \right) = -0.72375V$$

$$U_B = -I_B R_{B1} = -3.4932 \times 10^{-3} \times 6.8 = -0.0237538V = -23.7538mV$$

T_1 、 T_2 集电极对地电压的相对误差分别为

$$\left| \frac{U_{C1 \text{ 测量}} - U_{C \text{ 计算}}}{U_{C \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{6.213 - 6.4109}{6.4109} \right| \times 100\% = 3.09\%$$

$$\left| \frac{U_{C2 \text{ 测量}} - U_{C \text{ 计算}}}{U_{C \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{6.211 - 6.4109}{6.4109} \right| \times 100\% = 3.12\%$$

T_1 、 T_2 发射极对地电压的相对误差分别为

$$\left| \frac{U_{E1 \text{ 测量}} - U_{E \text{ 计算}}}{U_{E \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-0.6419 + 0.72375}{-0.72375} \right| \times 100\% = 11.31\%$$

$$\left| \frac{U_{E2 \text{ 测量}} - U_{E \text{ 计算}}}{U_{E \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-0.6502 + 0.72375}{-0.72375} \right| \times 100\% = 10.16\%$$

T_1 、 T_2 基极对地电压的相对误差分别为

$$\left| \frac{U_{B1 \text{ 测量}} - U_{B \text{ 计算}}}{U_{B \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-14.86 + 23.7538}{-23.7538} \right| \times 100\% = 37.44\%$$

$$\left| \frac{U_{B2 \text{ 测量}} - U_{B \text{ 计算}}}{U_{B \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-18.75 + 23.7538}{-23.7538} \right| \times 100\% = 21.07\%$$

误差分析

本实验测得静态工作点的各对地电压中， U_C 的相对误差控制在3%左右， U_E 的相对误差控制在10%左右，可见设置的静态工作点与理论分析吻合。

各电压均存在一定误差，其中基极电压相对误差较大， $|U_B|$ 、 $|U_C|$ 、 $|U_E|$ 的测量值均偏小，主要由理论计算过程中的近似造成。具体来说，可能的原因有：

- 理论计算时，选取的 V_{BE} 偏大，导致求得 I_B 、 I_C 、 I_E 偏小，进而 $|U_C|$ 、 $|U_E|$ 的理论值偏大。
- 理论计算时， β 标称值可能偏小，导致 I_C 、 I_E 的理论值偏小，进而 $|U_C|$ 、 $|U_E|$ 的理论值偏大。
- 理论计算时， R_{B1} 标称值可能偏大，导致 $|U_B|$ 的理论值偏大。
- V_{CC} 、 V_{EE} 、 R_E 、 R_C 、 R_{W1} 等标称值与实际值存在偏差，对理论计算造成影响。
- 理论计算时，电路参数的近似对称与电路实际情况不符。
- 导线内阻等因素对电压测量造成影响。

b) 测量差模电压放大倍数

将典型差动放大器输入端 u_{i2} 接地，从 u_{i1} 端输入频率 $f = 1kHz$ 、有效值 $U_i = 20mV$ 的正弦信号，测量差模输入 U_{id} （即 U_i ）及单端输出 U_{od1} 、 U_{od2} （即 U_{o1} 、 U_{o2} ），并用示波器测量画出单端输出电压 u_{od1} 、 u_{od2} 和 u_{od} 的波形图。结果如表2、图3所示。

实验数据

电压有效值	U_{id}	U_{od1}	U_{od2}	U_{od}
测量值	20.017mV	-764.72mV	776.43mV	-1.5349V

表2 典型差动放大电路的差模电压放大倍数-实验数据

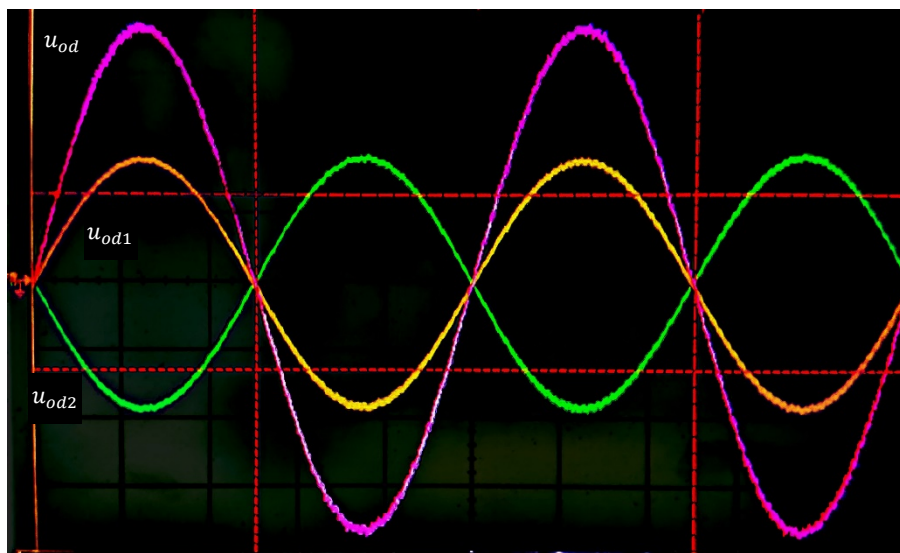


图 3 典型差动放大电路的差模电压放大倍数-示波器波形图

数据处理

根据表 2 数据，求得单端输出时，典型差动放大电路的差模放大倍数为

$$A_{ud1} = \frac{U_{od1}}{U_{id}} = \frac{-764.72}{20.017} = -38.204$$

$$A_{ud2} = \frac{U_{od2}}{-U_{id}} = \frac{776.43}{-20.017} = -38.789$$

双端输出时，典型差动放大电路的差模放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{-1534.9}{20.017} = -76.680$$

另一方面，计算差模放大倍数的理论值。对于交流小信号，基极、发射极间等效电阻为

$$r_{be} = r_{bb} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_E} = 200 + 161 \times \frac{26}{0.562406} = 7643.02 \Omega = 7.643 \text{ k}\Omega$$

进而求得单端输出时，典型差动放大电路的差模放大倍数的理论值为

$$A_{ud1} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{2 \left[R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2} \right]} = \frac{-160 \times (10 \parallel \infty)}{2 \times \left(6.8 + 7.64302 + 161 \times \frac{0.1}{2} \right)} = -35.567$$

双端输出时，典型差动放大电路的差模放大倍数的理论值为

$$A_{ud} = \frac{-\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}} = \frac{-160 \times (10 \parallel \infty)}{6.8 + 7.64302 + 161 \times \frac{0.1}{2}} = -71.133$$

单端输出时，典型差动放大电路的差模放大倍数的相对误差为

$$\left| \frac{A_{ud1 \text{ 测量}} - A_{ud1 \text{ 计算}}}{A_{ud1 \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-38.204 + 35.567}{-35.567} \right| \times 100\% = 7.41\%$$

$$\left| \frac{A_{ud2 \text{ 测量}} - A_{ud1 \text{ 计算}}}{A_{ud1 \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-38.789 + 35.567}{-35.567} \right| \times 100\% = 9.06\%$$

双端输出时，典型差动放大电路的差模放大倍数的相对误差为

$$\left| \frac{A_{ud \text{ 测量}} - A_{ud \text{ 计算}}}{A_{ud \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-76.680 + 71.133}{-71.133} \right| \times 100\% = 7.80\%$$

误差分析

本实验测得单端输出、双端输出时的差模放大倍数的相对误差均控制在 10% 以内，可见实验数据与理论分析基本吻合。

$|A_{ud1}|$ 、 $|A_{ud2}|$ 、 $|A_{ud}|$ 的测量值偏大，主要由理论计算过程中的近似造成。具体来说，可能的原因有：

- 理论计算时， I_E 计算值偏小，导致求得 r_{be} 偏大，进而 $|A_{ud1}|$ 、 $|A_{ud}|$ 的理论值偏大。
- 理论计算时，未考虑 PN 结的实际工作温度，选取的 V_T 可能偏大，导致求得 r_{be} 偏大。
- 理论计算时，选取的 r_{bb} 可能偏大，导致求得 r_{be} 偏大。
- β 、 R_{B1} 、 R_C 、 R_{W1} 等标称值与实际值存在偏差，对理论计算造成影响。
- 理论计算时，电路参数的近似对称与电路实际情况不符。
- 导线内阻、电磁波干扰、噪声干扰等因素对电压测量造成影响。

c) 测量共模电压放大倍数

将典型差动放大器输入端 u_{i1} 和 u_{i2} 两点连接在一起，从 u_{i1} 和 u_{i2} 两端输入频率 $f = 1\text{kHz}$ 、有效值 $U_i = 90\text{mV}$ 的正弦信号，测量共模输入 U_{ic} （即 U_i ）及单端输出 U_{oc1} 、 U_{oc2} （即 U_{o1} 、 U_{o2} ），并用示波器测量画出 u_{oc1} 、 u_{oc2} 和 u_{oc} 的波形图。结果如表 3、图 4 所示。

实验数据

电压有效值	U_{ic}	U_{oc1}	U_{oc2}	U_{oc}
测量值	90.33mV	-44.41mV	-43.65mV	-1.260mV

表 3 典型差动放大电路的共模电压放大倍数-实验数据

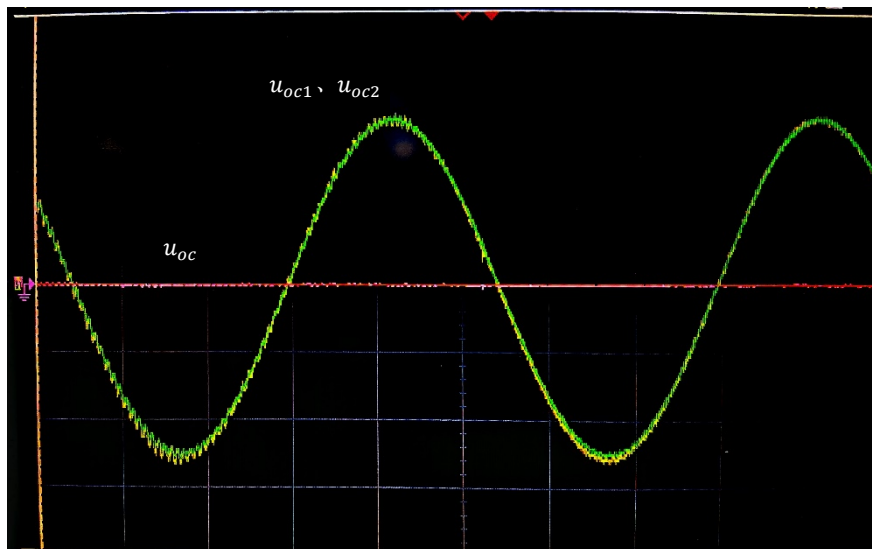


图 4 典型差动放大电路的共模电压放大倍数-示波器波形图

数据处理

根据表 3 数据，求得单端输出时，典型差动放大电路的共模放大倍数为

$$A_{uc1} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic}} = \frac{-44.41}{90.33} = -0.49164$$

$$A_{ud2} = \frac{U_{oc2}}{U_{ic}} = \frac{-43.65}{90.33} = -0.48323$$

双端输出时，典型差动放大电路的共模放大倍数为

$$A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = \frac{-1.260}{90.33} = -0.01395$$

另一方面，计算单端输出时共模放大倍数的理论值

$$A_{uc1} = \frac{-\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta)\frac{R_{W1}}{2} + 2(1 + \beta)R_E} = \frac{-160 \times (10 \parallel \infty)}{6.8 + 7.64302 + 161 \times (\frac{0.1}{2} + 2 \times 10)} = -0.49345$$

双端输出时，共模放大倍数的理论值应为

$$A_{uc} = 0$$

单端输出时，典型差动放大电路的共模放大倍数的相对误差为

$$\left| \frac{A_{uc1 \text{ 测量}} - A_{uc1 \text{ 计算}}}{A_{uc1 \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-0.49164 + 0.49345}{0.49345} \right| \times 100\% = 0.37\%$$

$$\left| \frac{A_{uc2 \text{ 测量}} - A_{uc1 \text{ 计算}}}{A_{uc1 \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-0.48323 + 0.49345}{0.49345} \right| \times 100\% = 2.07\%$$

双端输出时，有

$$A_{uc \text{ 测量}} = -0.01395 \approx 0 = A_{uc \text{ 计算}}$$

误差分析

本实验测得单端输出时的共模放大倍数的相对误差控制在 3% 以内，双端输出时的共模放大倍数近似为 0，可见实验数据较为精确，与理论分析吻合。

$|A_{uc1}|$ 、 $|A_{uc2}|$ 的测量值偏小， $|A_{uc}|$ 的测量值不等于 0，可能的原因有：

- 理论计算时， r_{be} 计算值偏大（原因参见前文），进而 $|A_{uc1}|$ 的理论值偏大。
- β 、 R_{B1} 、 R_C 、 R_{W1} 、 R_E 等标称值与实际值存在偏差，对理论计算造成影响。
- 理论计算时，电路参数的近似对称与电路实际情况不符。（实际电路中 U_{oc} 并非为 0。）
- 导线内阻、电磁波干扰、噪声干扰等因素对电压测量造成影响。（示波器读数波动，尤其是 $|U_{oc}|$ 的波动。）

d) 计算共模抑制比

数据处理

最后，计算典型差动放大电路的共模抑制比。单端输出共模抑制比的测量值为

$$K_{CMR1} = \left| \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} \right| = \left| \frac{-38.204}{-0.49164} \right| = 77.707$$

$$K_{CMR2} = \left| \frac{A_{ud2}}{A_{uc2}} \right| = \left| \frac{-38.789}{-0.48323} \right| = 80.270$$

双端输出共模抑制比的测量值为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \left| \frac{-76.680}{-0.01395} \right| = 5496.77$$

单端输出共模抑制比的理论值为

$$K_{CMR1} \approx \frac{\beta R_E}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}} = \frac{160 \times 10}{6.8 + 7.64302 + 161 \times \frac{0.1}{2}} = 71.13$$

双端输出共模抑制比的理论值为

$$K_{CMR} = +\infty$$

单端输出共模抑制比的相对误差为

$$\left| \frac{K_{CMR1 \text{ 测量}} - K_{CMR1 \text{ 计算}}}{K_{CMR1 \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{77.707 - 71.13}{71.13} \right| \times 100\% = 9.25\%$$

$$\left| \frac{K_{CMR2 \text{ 测量}} - K_{CMR1 \text{ 计算}}}{K_{CMR1 \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{80.270 - 71.13}{71.13} \right| \times 100\% = 12.85\%$$

双端输出时，有

$$K_{CMR \text{ 测量}} = 5496.77 \approx +\infty = K_{CMR \text{ 计算}}$$

误差分析

实验测得单端输出时共模抑制比的相对误差控制在 10% 左右，说明实验数据与理论分析吻合。

K_{CMR1} 存在一定误差， K_{CMR} 不等于 $+\infty$ ，主要是因为理论计算过程中存在近似。具体原因参见电压放大倍数的误差分析。

2) 具有恒流源的差动放大电路

a) 静态工作点的调节与测量

按图 2(a)正确连线, 构成具有恒流源的差动放大电路。不加输入信号, 将输入端 u_1 、 u_2 两点对地短路, 调节 R_{W1} 电位器和恒流源电路 R_{W2} 电位器, 使得 $U_{C1} = U_{C2}$ 且 $U_{R_{C1}} = 5V$, 则 $I_o = -\frac{2U_{R_{C1}}}{R_{C1}} = -1mA$ 。用万用表直流档测量 T_1 、 T_2 的各极电位。结果如表 4 所示。

实验数据

对地电位	T_1			T_2		
	U_{C1}	U_{E1}	U_{B1}	U_{C2}	U_{E2}	U_{B2}
测量值	6.833V	-0.6362V	-13.35mV	6.828V	-0.6441V	-16.63mV
$R_{W2} = 4.0624k\Omega$						

表 4 具有恒流源的差动放大电路的静态工作点-实验数据

数据处理

根据表 4 数据, 求得恒流源电路的输出电流为

$$I_o \approx -I_{C1} - I_{C2} = \frac{U_{C1} - V_{CC}}{R_{C1}} + \frac{U_{C2} - V_{CC}}{R_{C2}} = \frac{6.833 - 12}{10} + \frac{6.828 - 12}{10} = -1.0339mA$$

由 $I_o \approx -1mA$, 知恒流源部分已调节恰当。 T_1 、 T_2 两集电极间电压为

$$U_{C1} - U_{C2} = 6.833 - 6.828 = 0.005V$$

由 $U_{C1} - U_{C2} \approx 0$, 知差动放大部分已基本调节对称。 T_1 各极间电压为

$$U_{BE1} = U_{B1} - U_{E1} = -0.01335 + 0.6362 = 0.62285V$$

$$U_{CE1} = U_{C1} - U_{E1} = 6.833 + 0.6362 = 7.4692V$$

T_2 各极间电压为

$$U_{BE2} = U_{B2} - U_{E2} = -0.01663 + 0.6441 = 0.62747V$$

$$U_{CE2} = U_{C2} - U_{E2} = 6.828 + 0.6441 = 7.4721V$$

由 $U_{BE1} \approx 0.7V$, $U_{CE1} \gg 0.3V$, 知 T_1 工作在放大区, 同理可知 T_2 工作在放大区, 符合静态工作点选取的基本要求。

另一方面, 计算静态工作点的理论值。恒流源电路的输出电流的理论值为

$$I_o = \frac{V_{EE} + V_{BE}}{R + R_{W2} + R_{E4}} = \frac{-12 + 0.7}{5.1 + 4.0624 + 2} = -1.0123mA$$

进而求得 T_1 、 T_2 各极支路电流的理论值为

$$I_E = -\frac{1}{2}I_o = -\frac{1}{2} \times (-1.0123) = 0.5062mA$$

$$I_C = \frac{\beta I_E}{1 + \beta} = 0.5030mA$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} = 3.1439 \times 10^{-3}mA$$

进而求得 T_1 、 T_2 各极对地电压的理论值为

$$U_C = V_{CC} - I_C R_C = 12 - 0.50616 \times 10 = 6.9384V$$

$$U_B = -I_B R_{B1} = -3.1439 \times 10^{-3} \times 6.8 = -0.02137852V = -21.3785mV$$

$$U_E = U_B - V_{BE} = -0.02137852 - 0.7 = -0.7214V$$

恒流源电路的输出电流的相对误差为

$$\left| \frac{I_{o\text{测量}} - I_{o\text{计算}}}{I_{o\text{计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-1.0339 + 1.0123}{-1.0123} \right| \times 100\% = 2.13\%$$

T_1 、 T_2 集电极对地电压的相对误差分别为

$$\left| \frac{U_{C1\text{测量}} - U_{C1\text{计算}}}{U_{C1\text{计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{6.833 - 6.9384}{6.9384} \right| \times 100\% = 1.52\%$$

$$\left| \frac{U_{C2 \text{ 测量}} - U_{C \text{ 计算}}}{U_{C \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{6.828 - 6.9384}{6.9384} \right| \times 100\% = 1.59\%$$

T_1 、 T_2 发射极对地电压的相对误差分别为

$$\left| \frac{U_{E1 \text{ 测量}} - U_{E \text{ 计算}}}{U_{E \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-0.6362 + 0.7214}{-0.7214} \right| \times 100\% = 11.81\%$$

$$\left| \frac{U_{E2 \text{ 测量}} - U_{E \text{ 计算}}}{U_{E \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-0.6441 + 0.7214}{-0.7214} \right| \times 100\% = 10.72\%$$

T_1 、 T_2 基极对地电压的相对误差分别为

$$\left| \frac{U_{B1 \text{ 测量}} - U_{B \text{ 计算}}}{U_{B \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-13.35 + 21.3785}{-21.3785} \right| \times 100\% = 37.55\%$$

$$\left| \frac{U_{B2 \text{ 测量}} - U_{B \text{ 计算}}}{U_{B \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-16.63 + 21.3785}{-21.3785} \right| \times 100\% = 22.21\%$$

·误差分析

本实验测得恒流源电路的输出电流的相对误差控制在 2% 左右，可见恒流源部分的设置与理论分析吻合。

本实验测得差分对管静态工作点的各对地电压中， U_C 的相对误差控制在 2% 以内， U_E 的相对误差控制在 10% 左右，可见静态工作点的设置与理论分析吻合。

I_o 的测量值稍有偏大，而 T_1 、 T_2 各电压均存在一定误差，其中基极电压相对误差较大， $|U_B|$ 、 $|U_C|$ 、 $|U_E|$ 的测量值均偏小，这些误差主要由计算过程中的近似造成。具体来说，可能的原因有：

- 理论计算时，选取的 V_{BE} 偏大，导致求得 I_o 的理论值偏小， $|U_C|$ 、 $|U_E|$ 的理论值偏大。
- 理论计算时， β 标称值可能偏小，导致 I_B 的理论值偏大，进而 $|U_B|$ 、 $|U_E|$ 的理论值偏大。
- V_{CC} 、 V_{EE} 、 R_{B1} 、 R_C 、 R_{W1} 、 R 、 R_{E4} 等标称值与实际值存在偏差，对理论计算造成影响。
- 理论计算时，电路参数的近似对称与电路实际情况不符。
- 导线内阻等因素对电压测量造成影响。

b) 测量差模电压放大倍数

将具有恒流源的差动放大器输入端 u_{i2} 接地，从 u_{i1} 端输入频率 $f = 1\text{kHz}$ 、有效值 $U_i = 20\text{mV}$ 的正弦信号，测量差模输入 U_{id} （即 U_i ）及单端输出 U_{od1} 、 U_{od2} （即 U_{o1} 、 U_{o2} ），并用示波器测量画出单端输出电压 u_{od1} 、 u_{od2} 和 u_{od} 的波形图，结果如表 5、图 5 所示。

·实验数据

电压有效值	U_{id}	U_{od1}	U_{od2}	U_{od}
测量值	20.20mV	-739.6mV	742.2mV	-1.4801V

表 5 具有恒流源的差动放大电路的差模电压放大倍数-实验数据

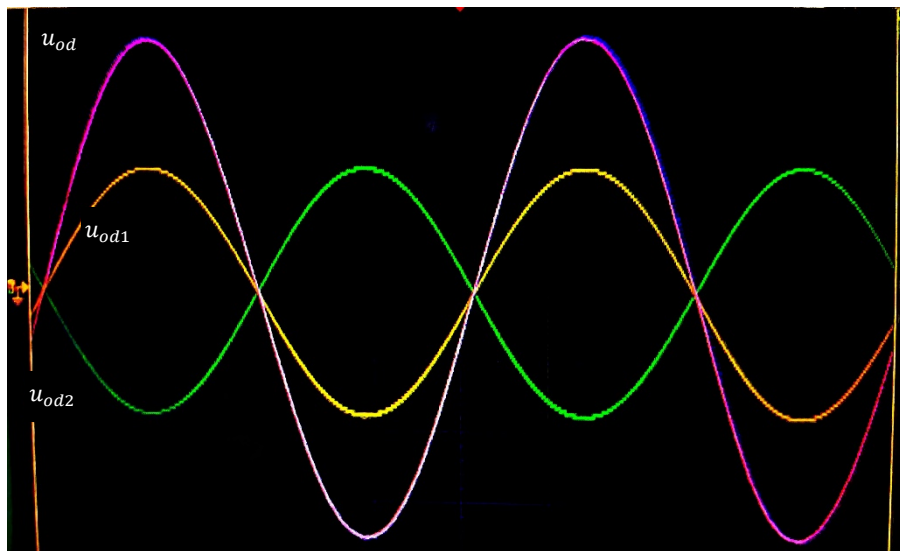


图 5 具有恒流源的差动放大电路的差模电压放大倍数-示波器波形图

数据处理

根据表 5 数据，求得单端输出时，具有恒流源的差动放大电路的差模放大倍数为

$$A_{ud1} = \frac{U_{od1}}{U_{id}} = \frac{-739.6}{20.20} = -36.614$$

$$A_{ud2} = \frac{U_{od2}}{-U_{id}} = \frac{742.2}{-20.20} = -36.743$$

双端输出时，具有恒流源的差动放大电路的差模放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{-1480.1}{20.20} = -73.272$$

另一方面，计算差模放大倍数的理论值。对于交流小信号，基极、发射极间等效电阻为

$$r_{be} = r_{bb} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_E} = 200 + 161 \times \frac{26}{0.562406} = 8675.20\Omega = 8.675k\Omega$$

进而求得单端输出时，具有恒流源的差动放大电路的差模放大倍数的理论值为

$$A_{ud1} = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{2 \left[R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2} \right]} = \frac{-160 \times (10 \parallel \infty)}{2 \times \left(6.8 + 8.67520 + 161 \times \frac{0.1}{2} \right)} = -34.006$$

双端输出时，具有恒流源的差动放大电路的差模放大倍数的理论值为

$$A_{ud} = \frac{-\beta(R_C \parallel \frac{R_L}{2})}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}} = \frac{-160 \times (10 \parallel \infty)}{6.8 + 8.67520 + 161 \times \frac{0.1}{2}} = -68.012$$

单端输出时，具有恒流源的差动放大电路的差模放大倍数的相对误差为

$$\left| \frac{A_{ud1 \text{ 测量}} - A_{ud1 \text{ 计算}}}{A_{ud1 \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-36.614 + 34.006}{-34.006} \right| \times 100\% = 7.67\%$$

$$\left| \frac{A_{ud2 \text{ 测量}} - A_{ud1 \text{ 计算}}}{A_{ud1 \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-36.743 + 34.006}{-34.006} \right| \times 100\% = 8.05\%$$

双端输出时，具有恒流源的差动放大电路的差模放大倍数的相对误差为

$$\left| \frac{A_{ud \text{ 测量}} - A_{ud \text{ 计算}}}{A_{ud \text{ 计算}}} \right| \times 100\% = \left| \frac{-73.272 + 68.012}{-68.012} \right| \times 100\% = 7.73\%$$

误差分析

本实验测得单端输出、双端输出时的差模放大倍数的相对误差均控制在 10% 以内，可见实验数据与理论分析基本吻合。

$|A_{ud1}|$ 、 $|A_{ud2}|$ 、 $|A_{ud}|$ 的测量值偏大，主要由理论计算过程中的近似造成，具体原因与典型差动放大电路情况完全相同，此处不再赘述。

c) 测量共模电压放大倍数

将具有恒流源的差动放大器输入端 u_{i1} 和 u_{i2} 两点连接在一起，从 u_{i1} 和 u_{i2} 两端输入频率 $f = 1\text{kHz}$ 、有效值 $U_i = 90\text{mV}$ 的正弦信号，测量共模输入 U_{ic} （即 U_i ）及单端输出 U_{oc1} 、 U_{oc2} （即 U_{o1} 、 U_{o2} ），并用示波器测量画出 u_{oc1} 、 u_{oc2} 和 u_{oc} 的波形图，结果如表 6、图 6 所示。

实验数据

电压有效值	U_{ic}	U_{oc1}	U_{oc2}	U_{oc}
测量值	90.7mV	-0.774mV	-1.044mV	-0.270mV

表 6 具有恒流源的差动放大电路的共模电压放大倍数-实验数据

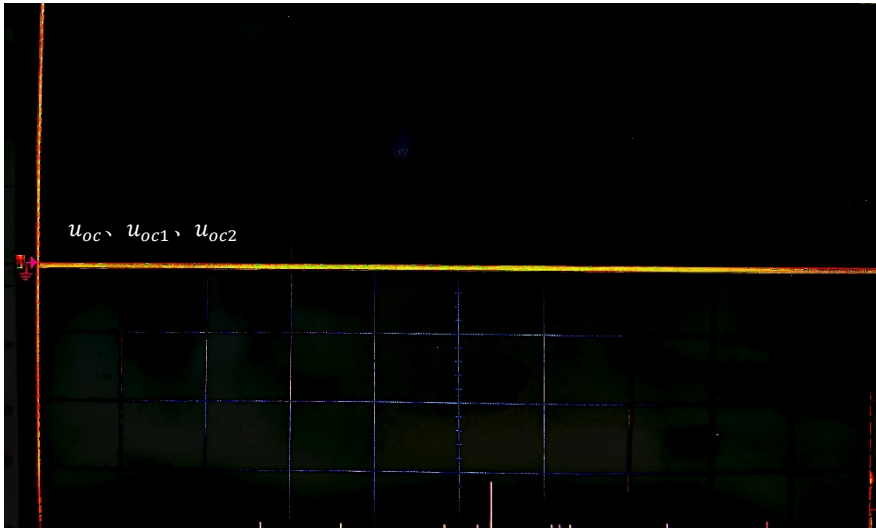


图 6 具有恒流源的差动放大电路的共模电压放大倍数-示波器波形图

数据处理

根据表 6 数据，求得单端输出时，具有恒流源的差动放大电路的共模放大倍数为

$$A_{uc1} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic}} = \frac{-0.774}{90.7} = -0.00853, \quad A_{uc2} = \frac{U_{oc2}}{U_{ic}} = \frac{-1.044}{90.7} = -0.01151$$

双端输出时，具有恒流源的差动放大电路的共模放大倍数为

$$A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = \frac{-0.270}{90.7} = -0.00298$$

另一方面，单端输出时共模放大倍数的理论值应为

$$A_{uc1} \approx \frac{-R_C \parallel \frac{R_L}{2}}{2R_e'} \approx 0$$

双端输出时，共模放大倍数的理论值应为

$$A_{uc} = 0$$

单端输出时，有

$$A_{uc1 \text{ 测量}} = -0.00853 \approx 0 \approx A_{uc1 \text{ 计算}}, \quad A_{uc2 \text{ 测量}} = -0.01151 \approx 0 \approx A_{uc2 \text{ 计算}}$$

双端输出时，有

$$A_{uc \text{ 测量}} = -0.00298 \approx 0 = A_{uc \text{ 计算}}$$

误差分析

本实验测得单端输出、双端输出时的共模放大倍数均近似为 0，可见实验数据较为精确，与理论分析吻合。

$|A_{uc1}|$ 、 $|A_{uc2}|$ 的测量值可能存在偏差， $|A_{uc}|$ 的测量值不等于 0，可能的原因有：

- i. 电路参数的近似对称与电路实际情况不符。（实际电路中 U_{oc} 并非为 0。）
- ii. 导线内阻、电磁波干扰、噪声干扰等因素对电压测量造成影响。（毫伏表读数波动。）

d) 计算共模抑制比

数据处理

最后, 计算具有恒流源的差动放大电路的共模抑制比。单端输出共模抑制比的测量值为

$$K_{CMR1} = \left| \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} \right| = \left| \frac{-36.614}{-0.00853} \right| = 4292.38, \quad K_{CMR2} = \left| \frac{A_{ud2}}{A_{uc2}} \right| = \left| \frac{-36.743}{-0.01151} \right| = 3192.27$$

双端输出共模抑制比的测量值为

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| = \left| \frac{-73.272}{-0.00298} \right| = 24587.92$$

单端输出共模抑制比的理论值为

$$K_{CMR1} \approx \frac{\beta R_e'}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}} \approx +\infty$$

双端输出共模抑制比的理论值为

$$K_{CMR} = +\infty$$

单端输出时, 有

$$K_{CMR1 \text{ 测量}} = 4292.38 \approx +\infty \approx K_{CMR1 \text{ 计算}}, \quad K_{CMR2 \text{ 测量}} = 3192.27 \approx +\infty \approx K_{CMR1 \text{ 计算}}$$

双端输出时, 有

$$K_{CMR \text{ 测量}} = 24587.92 \approx +\infty = K_{CMR \text{ 计算}}$$

误差分析

K_{CMR1} 可能存在一定偏差, K_{CMR} 不等于 $+\infty$, 主要是因为理论计算过程中存在近似, 而实际电路并非理想。具体原因参见电压放大倍数的误差分析。

思考题

1) 为什么要对差分放大器进行调零, 在实验中是否非常重要?

要使差分放大器正常工作, 原则上要求差分放大电路差模输入为零时, 差模输出也应是零。在本实验中, 差分对管 T_1 、 T_2 以及各极支路电阻的对称性保证了这一点。然而, 由于两晶体管的 β 、 r_{be} 等参数不可能恰好相等、电阻 R_C 、 R_B 等客观上并不对称, 所以实际差分放大电路差模输入为零时, 差模输出并不为零, 必须进行调零。

在实验前, 通过发射极支路的电位器 R_{W1} 弥补电路的不对称性, 使差分放大电路差模输入为零时, 差模输出近似为零, 并且能够通过对称的半电路进行理论分析, 有效地减小了实验误差, 简化了分析步骤, 可见调零在实验中十分重要。

2) 差分放大器的差模输出电压是与输入电压的差还是与输入电压的和成正比?

与输入电压的差 (即差模输入电压) 成正比。

3) 典型差动放大电路与恒流源差动放大电路在观测 u_{c1} 与 u_{c2} 的波形时, 其大小、极性及共模抑制比 K_{CMR} 有何区别? 为什么?

典型差分放大电路, 两单端输出 u_{c1} 、 u_{c2} 峰值较大, 极性相反, 共模抑制比 K_{CMR} 较小;

具有恒流源的差动放大电路, 两单端输出 u_{c1} 、 u_{c2} 测得的有效值远远小于前者, 波形近似为直线, 难以观察极性 (理论上极性相反), 共模抑制比 K_{CMR} 远远大于前者。

原因: 理论上, 恒流源具有无穷大的等效电阻, 在本实验中, $R_e' = r_{ce3} \left(1 + \frac{\beta R_{E3}}{r_{ce3} + R_{E3} + R_B} \right)$, 其中 r_{ce3} 一般为几百

千欧, 远远大于 $R_C \parallel \frac{R_L}{2}$, 因而具有恒流源的差动放大电路其单端输出共模电压增益 $A_{uc1} \approx \frac{-R_C \parallel \frac{R_L}{2}}{2R_e'}$ 极小, 共模抑制比极大; 而典型差分放大电路中, 差分对管的射极公共电阻 R_E 只能为有限值, 否则压降过大将使晶体管进入截止区 ($U_{BE} < 0.7V$), 因而单端输出共模电压增益较小。