

实验二 晶体管共射极单管放大器

一、实验目的

- 1、学会放大器静态工作点的调试方法，分析静态工作点对放大器性能的影响。
- 2、掌握放大器电压放大倍数、输入电阻、输出电阻及最大不失真输出电压的测试方法。

- 3、熟悉常用电子仪器及模拟电路实验设备的使用。

二、实验原理

图 2-1 为电阻分压式工作点稳定单管放大器实验电路图。它的偏置电路采用 R_{B1} 和 R_{B2} 组成的分压电路，并在发射极中接有电阻 R_E ，以稳定放大器的静态工作点。当在放大器的输入端加入输入信号 u_i 后，在放大器的输出端便可得到一个与 u_i 相位相反，幅值被放大的输出信号 u_o ，从而实现了电压放大。

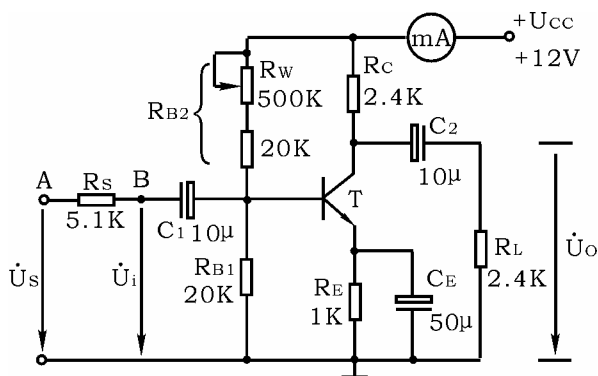


图 2-1 共射极单管放大器实验电路

在图 2-1 电路中，当流过偏置电阻 R_{B1} 和 R_{B2} 的电流远大于晶体管 T 的基极电流 I_B 时（一般 5~10 倍），则它的静态工作点可用下式估算

$$U_B \approx \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

$$I_E \approx \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx I_C$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C (R_C + R_E)$$

电压放大倍数

$$A_v = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}}$$

输入电阻

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$$

输出电阻

$$R_o \approx R_C$$

由于电子器件性能的分散性比较大，因此在设计和制作晶体管放大电路时，离不开测量和调试技术。在设计前应测量所用元器件的参数，为电路设计提供必要的依据，在完成设计和装配以后，还必须测量和调试放大器的静态工作点和各项性能指标。一个优质放大器，必定是理论设计与实验调整相结合的产物。因此，除了学习放大器的理论知识和设计方法外，还必须掌握必要的测量和调试技术。

放大器的测量和调试一般包括：放大器静态工作点的测量与调试，消除干扰与自激振荡及放大器各项动态参数的测量与调试等。

1、 放大器静态工作点的测量与调试

1) 静态工作点的测量

测量放大器的静态工作点，应在输入信号 $u_i=0$ 的情况下进行，即将放大器输入端与地端短接，然后选用量程合适的直流毫安表和直流电压表，分别测量晶体管的集电极电流 I_C 以及各电极对地的电位 U_B 、 U_C 和 U_E 。一般实验中，为了避免断开集电极，所以采用测量电压 U_E 或 U_C ，然后算出 I_C 的方法，例如，只要测出 U_E ，即可用

$$I_C \approx I_E = \frac{U_E}{R_E} \quad \text{算出 } I_C \text{ (也可根据 } I_C = \frac{U_{CC} - U_C}{R_C} \text{, 由 } U_C \text{ 确定 } I_C \text{),}$$

同时也能算出 $U_{BE} = U_B - U_E$ ， $U_{CE} = U_C - U_E$ 。

为了减小误差，提高测量精度，应选用内阻较高的直流电压表。

2) 静态工作点的调试

放大器静态工作点的调试是指对管子集电极电流 I_C (或 U_{CE}) 的调整与测试。

静态工作点是否合适，对放大器的性能和输出波形都有很大影响。如工作点偏高，放大器在加入交流信号以后易产生饱和失真，此时 u_o 的负半周将被削底，如图 2-2(a) 所示；如工作点偏低则易产生截止失真，即 u_o 的正半周被缩顶（一般截止失真不如饱和失真明显），如图 2-2(b) 所示。这些情况都不符合不失真

放大的要求。所以在选定工作点以后还必须进行动态调试，即在放大器的输入端加入一定的输入电压 u_i ，检查输出电压 u_o 的大小和波形是否满足要求。如不满足，则应调节静态工作点的位置。

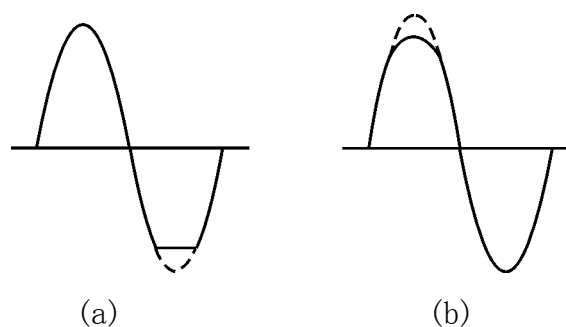


图 2-2 静态工作点对 u_o 波形失真的影响

改变电路参数 U_{CC} 、 R_C 、 R_B (R_{B1} 、 R_{B2}) 都会引起静态工作点的变化，如图 2-3 所示。但通常多采用调节偏置电阻 R_{B2} 的方法来改变静态工作点，如减小 R_{B2} ，则可使静态工作点提高等。

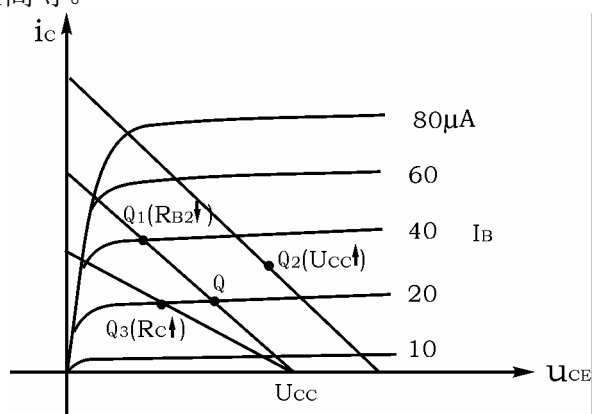


图 2-3 电路参数对静态工作点的影响

最后还要说明的是，上面所说的工作点“偏高”或“偏低”不是绝对的，应该是相对信号的幅度而言，如输入信号幅度很小，即使工作点较高或较低也不一定会出现失真。所以确切地说，产生波形失真是信号幅度与静态工作点设置配合不当所致。如需满足较大信号幅度的要求，静态工作点最好尽量靠近交流负载线的中点。

2、放大器动态指标测试

放大器动态指标包括电压放大倍数、输入电阻、输出电阻、最大不失真输出

电压（动态范围）和通频带等。

1) 电压放大倍数 A_V 的测量

调整放大器到合适的静态工作点，然后加入输入电压 u_i ，在输出电压 u_o 不失真的情况下，用交流毫伏表测出 u_i 和 u_o 的有效值 U_i 和 U_o ，则

$$A_V = \frac{U_o}{U_i}$$

2) 输入电阻 R_i 的测量

为了测量放大器的输入电阻，按图 2-4 电路在被测放大器的输入端与信号源之间串入一已知电阻 R ，在放大器正常工作的情况下，用交流毫伏表测出 U_S 和 U_i ，则根据输入电阻的定义可得

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{\frac{U_R}{R}} = \frac{U_i}{U_S - U_i} R$$

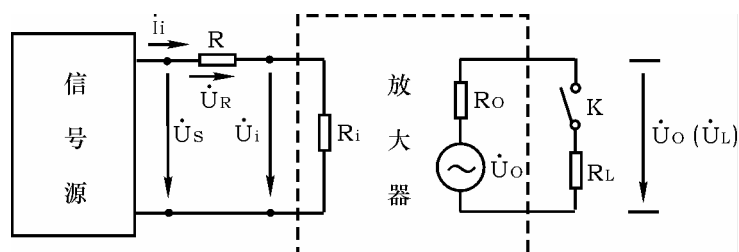


图 2-4 输入、输出电阻测量电路

测量时应注意下列几点：

① 由于电阻 R 两端没有电路公共接地点，所以测量 R 两端电压 U_R 时必须分别测出 U_S 和 U_i ，然后按 $U_R = U_S - U_i$ 求出 U_R 值。

② 电阻 R 的值不宜取得过大或过小，以免产生较大的测量误差，通常取 R 与 R_i 为同一数量级为好，本实验可取 $R = 1 \sim 2K \Omega$ 。

3) 输出电阻 R_o 的测量

按图 2-4 电路，在放大器正常工作条件下，测出输出端不接负载 R_L 的输出电压 U_o 和接入负载后的输出电压 U_L ，根据

$$U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o$$

即可求出

$$R_0 = \left(\frac{U_0}{U_L} - 1 \right) R_L$$

在测试中应注意，必须保持 R_L 接入前后输入信号的大小不变。

4) 最大不失真输出电压 U_{OPP} 的测量（最大动态范围）

如上所述，为了得到最大动态范围，应将静态工作点调在交流负载线的中点。为此在放大器正常工作情况下，逐步增大输入信号的幅度，并同时调节 R_w （改变静态工作点），用示波器观察 u_0 ，当输出波形同时出现削底和缩顶现象（如图 2—5）时，说明静态工作点已调在交流负载线的中点。然后反复调整输入信号，使波形输出幅度最大，且无明显失真时，用交流毫伏表测出 U_0 （有效值），则动态范围等于 $2\sqrt{2}U_0$ 。或用示波器直接读出 U_{OPP} 来。

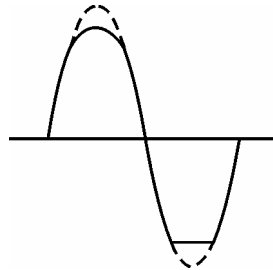


图 2—5 静态工作点正常，输入信号太大引起的失真

5) 放大器幅频特性的测量

放大器的幅频特性是指放大器的电压放大倍数 A_U 与输入信号频率 f 之间的关系曲线。单管阻容耦合放大电路的幅频特性曲线如图 2—6 所示， A_{um} 为中频电压放大倍数，通常规定电压放大倍数随频率变化下降到中频放大倍数的 $1/\sqrt{2}$ 倍，即 $0.707A_{um}$ 所对应的频率分别称为下限频率 f_L 和上限频率 f_H ，则通频带 $f_{BW} = f_H - f_L$ 。

放大器的幅率特性就是测量不同频率信号时的电压放大倍数 A_U 。为此，可采用前述测 A_U 的方法，每改变一个信号频率，测量其相应的电压放大倍数，测量时应注意取点要恰当，在低频段与高频段应多测几点，在中频段可以少测几点。此外，在改变频率时，要保持输入信号的幅度不变，且输出波形不得失真。

6) 干扰和自激振荡的消除

参考实验附录

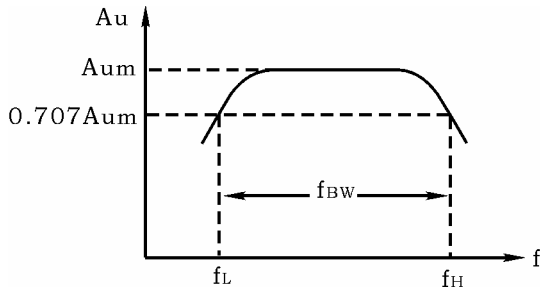


图 2-6 幅频特性曲线

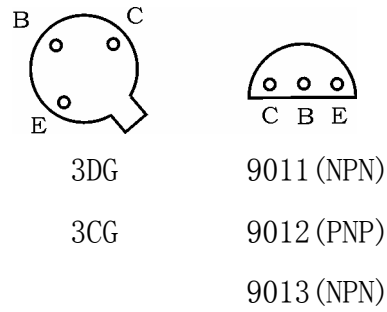


图 2-7 晶体三极管管脚排列

三、实验设备与器件

- | | |
|-------------|-----------|
| 1、+12V 直流电源 | 2、函数信号发生器 |
| 3、双踪示波器 | 4、交流毫伏表 |
| 5、直流电压表 | 6、直流毫安表 |
| 7、频率计 | 8、万用电表 |
- 9、晶体三极管 3DG6×1 ($\beta = 50 \sim 100$) 或 9011×1 (管脚排列如图 2-7 所示)

电阻器、电容器若干

四、实验内容

实验电路如图 2-1 所示。各电子仪器可按实验一中图 1-1 所示方式连接，为防止干扰，各仪器的公共端必须连在一起，同时信号源、交流毫伏表和示波器的引线应采用专用电缆线或屏蔽线，如使用屏蔽线，则屏蔽线的外包金属网应接在公共接地端上。

1、调试静态工作点

接通直流电源前，先将 R_w 调至最大，函数信号发生器输出旋钮旋至零。接通 +12V 电源、调节 R_w ，使 $I_c = 2.0\text{mA}$ (即 $U_E = 2.0\text{V}$)，用直流电压表测量 U_B 、 U_E 、 U_C 及用万用电表测量 R_{B2} 值。记入表 2-1。

表 2-1 $I_c = 2\text{mA}$

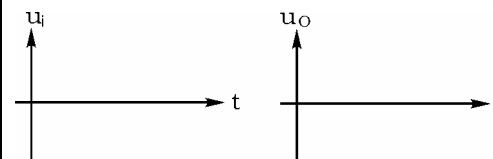
测量值				计算值		
U_B (V)	U_E (V)	U_C (V)	R_{B2} (K Ω)	U_{BE} (V)	U_{CE} (V)	I_C (mA)

--	--	--	--	--	--	--

2、测量电压放大倍数

在放大器输入端加入频率为 1KHz 的正弦信号 u_s ，调节函数信号发生器的输出旋钮使放大器输入电压 $U_i \approx 10\text{mV}$ ，同时用示波器观察放大器输出电压 u_o 波形，在波形不失真的条件下用交流毫伏表测量下述三种情况下的 U_o 值，并用双踪示波器观察 u_o 和 u_i 的相位关系，记入表 2-2。

表 2-2 $I_c = 2.0\text{mA}$ $U_i =$ mV

R_c (K Ω)	R_L (K Ω)	U_o (V)	A_v	观察记录一组 u_o 和 u_i 波形
2.4	∞			
1.2	∞			
2.4	2.4			

3、观察静态工作点对电压放大倍数的影响

置 $R_c = 2.4\text{K}\Omega$ ， $R_L = \infty$ ， U_i 适量，调节 R_w ，用示波器监视输出电压波形，在 u_o 不失真的条件下，测量数组 I_c 和 U_o 值，记入表 2-3。

表 2-3 $R_c = 2.4\text{K}\Omega$ $R_L = \infty$ $U_i =$ mV

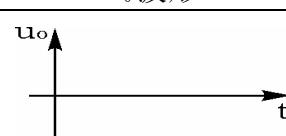
I_c (mA)			2.0		
U_o (V)					
A_v					


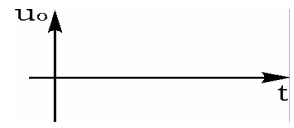
测量 I_c 时，要先将信号源输出旋钮旋至零（即使 $U_i = 0$ ）。

4、观察静态工作点对输出波形失真的影响

置 $R_c = 2.4\text{K}\Omega$ ， $R_L = 2.4\text{K}\Omega$ ， $u_i = 0$ ，调节 R_w 使 $I_c = 2.0\text{mA}$ ，测出 U_{CE} 值，再逐步加大输入信号，使输出电压 u_o 足够大但不失真。然后保持输入信号不变，分别增大和减小 R_w ，使波形出现失真，绘出 u_o 的波形，并测出失真情况下的 I_c 和 U_{CE} 值，记入表 2-4 中。每次测 I_c 和 U_{CE} 值时都要将信号源的输出旋钮旋至零。

表 2-4 $R_c = 2.4\text{K}\Omega$ $R_L = \infty$ $U_i =$ mV

I_c (mA)	U_{CE} (V)	u_o 波形	失真情况	管子工作状态
				

2.0			
			

5、测量最大不失真输出电压

置 $R_c=2.4K\Omega$, $R_L=2.4K\Omega$, 按照实验原理 2.4) 中所述方法, 同时调节输入信号的幅度和电位器 R_W , 用示波器和交流毫伏表测量 U_{OPP} 及 U_0 值, 记入表 2-5。

表 2-5 $R_c=2.4K$ $R_L=2.4K$

I_c (mA)	U_{im} (mV)	U_{om} (V)	U_{OPP} (V)

*6、测量输入电阻和输出电阻

置 $R_c=2.4K\Omega$, $R_L=2.4K\Omega$, $I_c=2.0mA$ 。输入 $f=1KHz$ 的正弦信号, 在输出电压 u_o 不失真的情况下, 用交流毫伏表测出 U_s , U_i 和 U_L 记入表 2-6。

保持 U_s 不变, 断开 R_L , 测量输出电压 U_0 , 记入表 2-6。

表 2-6 $I_c=2mA$ $R_c=2.4K\Omega$ $R_L=2.4K\Omega$

U_s (mv)	U_i (mv)	R_i (K Ω)		U_L (V)	U_0 (V)	R_o (K Ω)	
		测量值	计算值			测量值	计算值

*7、测量幅频特性曲线

取 $I_c=2.0mA$, $R_c=2.4K\Omega$, $R_L=2.4K\Omega$ 。保持输入信号 u_i 的幅度不变, 改变信号源频率 f , 逐点测出相应的输出电压 U_0 , 记入表 2-7。

表 2-7 $U_i=$ mV

	f_1	f_0	f_n
f (KHz)			
U_0 (V)			

$A_v = U_o / U_i$

为了信号源频率 f 取值合适, 可先粗测一下, 找出中频范围, 然后再仔细读数。

说明: 本实验内容较多, 其中 6、7 可作为选作内容。

五、实验总结

1、列表整理测量结果, 并把实测的静态工作点、电压放大倍数、输入电阻、输出电阻之值与理论计算值比较 (取一组数据进行比较), 分析产生误差原因。

2、总结 R_c , R_L 及静态工作点对放大器电压放大倍数、输入电阻、输出电阻的影响。

3、讨论静态工作点变化对放大器输出波形的影响。

4、分析讨论在调试过程中出现的问题。

六、预习要求

1、阅读教材中有关单管放大电路的内容并估算实验电路的性能指标。

假设: 3DG6 的 $\beta = 100$, $R_{B1} = 20K \Omega$, $R_{B2} = 60K \Omega$, $R_c = 2.4K \Omega$, $R_L = 2.4K \Omega$ 。

估算放大器的静态工作点, 电压放大倍数 A_v , 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o

2、阅读实验附录中有关放大器干扰和自激振荡消除内容。

3、能否用直流电压表直接测量晶体管的 U_{BE} ? 为什么实验中要采用测 U_B 、 U_E , 再间接算出 U_{BE} 的方法?

4、怎样测量 R_{B2} 阻值?

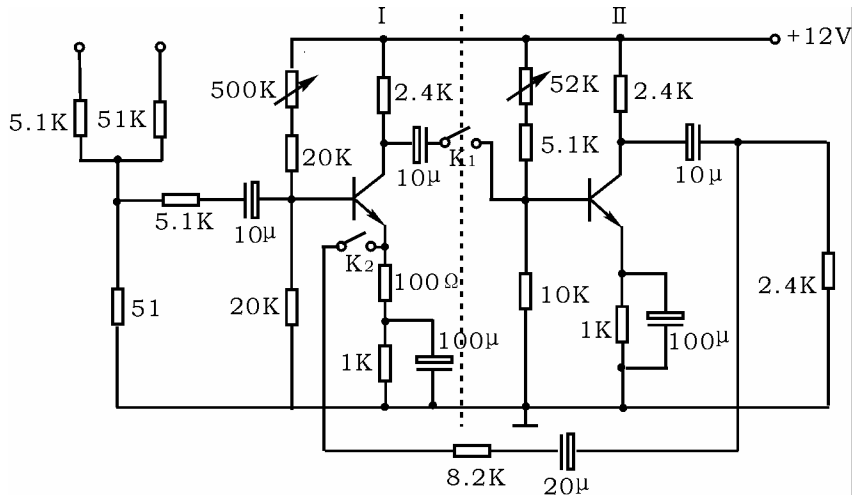
5、当调节偏置电阻 R_{B2} , 使放大器输出波形出现饱和或截止失真时, 晶体管的管压降 U_{CE} 怎样变化?

6、改变静态工作点对放大器的输入电阻 R_i 有否影响? 改变外接电阻 R_L 对输出电阻 R_o 有否影响?

7、在测试 A_v , R_i 和 R_o 时怎样选择输入信号的大小和频率? 为什么信号频率一般选 1KHz, 而不选 100KHz 或更高?

8、测试中, 如果将函数信号发生器、交流毫伏表、示波器中任一仪器的二个测试端子接线换位 (即各仪器的接地端不再连在一起), 将会出现什么问题?

注: 附图 2-1 所示为共射极单管放大器与带有负反馈的两级放大器共用实验模块。如将 K_1 、 K_2 断开, 则前级 (I) 为典型电阻分压式单管放大器; 如将 K_1 、 K_2 接通, 则前级 (I) 与后级 (II) 接通, 组成带有电压串联负反馈两级放大器。



附图 2-1

实验三 场效应管放大器

一、实验目的

- 1、了解结型场效应管的性能和特点
- 2、进一步熟悉放大器动态参数的测试方法

二、实验原理

场效应管是一种电压控制型器件。按结构可分为结型和绝缘栅型两种类型。由于场效应管栅源之间处于绝缘或反向偏置，所以输入电阻很高（一般可达上百兆欧）又由于场效应管是一种多数载流子控制器件，因此热稳定性好，抗辐射能力强，噪声系数小。加之制造工艺较简单，便于大规模集成，因此得到越来越广泛的应用。

1、结型场效应管的特性和参数

场效应管的特性主要有输出特性和转移特性。图 3-1 所示为 N 沟道结

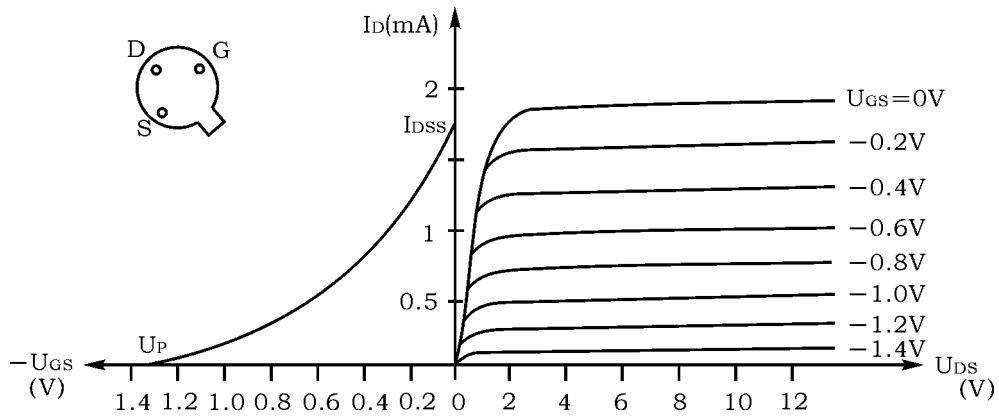


图 3-1 3DJ6F 的输出特性和转移特性曲线

型场效应管 3DJ6F 的输出特性和转移特性曲线。其直流参数主要有饱和漏极电流 I_{DSS} ，夹断电压 U_P 等；交流参数主要有低频跨导

$$g_m = \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{常数}}$$

表 3-1 列出了 3DJ6F 的典型参数值及测试条件。

表 3-1

参数名称	饱和漏极电流 I_{DSS} (mA)	夹断电压 U_P (V)	跨 导 g_m ($\mu\text{A}/\text{V}$)
测试条件	$U_{DS} = 10\text{V}$ $U_{GS} = 0\text{V}$	$U_{DS} = 10\text{V}$ $I_{DS} = 50\mu\text{A}$	$U_{DS} = 10\text{V}$ $I_{DS} = 3\text{mA}$ $f = 1\text{KHz}$
参数值	1~3.5	$< -9 $	> 100

2、场效应管放大器性能分析

图 3-2 为结型场效应管组成的共源级放大电路。其静态工作点

$$U_{GS} = U_G - U_S = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD} - I_D R_S$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P} \right)^2$$

中频电压放大倍数 $A_v = -g_m R_L' = -g_m R_D // R_L$

输入电阻 $R_i = R_G + R_{g1} // R_{g2}$

输出电阻 $R_o \approx R_D$

式中跨导 g_m 可由特性曲线用作图法求得，或用公式

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{U_p} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_p}\right)$$

计算。但要注意，计算时 U_{GS} 要用静态工作点处之数值。

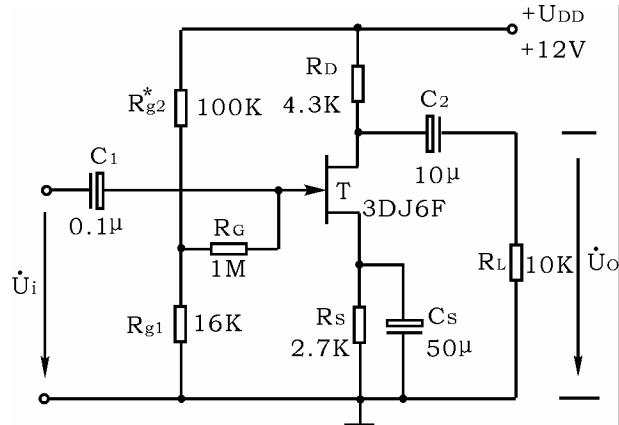


图 3-2 结型场效应管共源级放大器

3、输入电阻的测量方法

场效应管放大器的静态工作点、电压放大倍数和输出电阻的测量方法，与实验二中晶体管放大器的测量方法相同。其输入电阻的测量，从原理上讲，也可采用实验二中所述方法，但由于场效应管的 R_i 比较大，如直接测输入电压 U_s 和 U_i ，则限于测量仪器的输入电阻有限，必然会带来较大的误差。因此为了减小误差，常利用被测放大器的隔离作用，通过测量输出电压 U_o 来计算输入电阻。测量电路如图 3-3 所示。

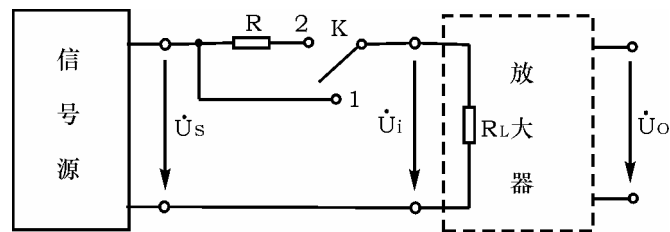


图 3-3 输入电阻测量电路

在放大器的输入端串入电阻 R ，把开关 K 掷向位置 1（即使 $R=0$ ），测量放大器的输出电压 $U_{o1} = A_v U_s$ ；保持 U_s 不变，再把 K 掷向 2（即接入 R ），测量放大器的输出电压 U_{o2} 。由于两次测量中 A_v 和 U_s 保持不变，故

$$U_{02} = A_v U_i = \frac{R_i}{R + R_i} U_s A_v \quad \text{由此可以求出}$$

$$R_i = \frac{U_{02}}{U_{01} - U_{02}} R$$

式中 R 和 R_i 不要相差太大，本实验可取 $R = 100 \sim 200K \Omega$ 。

三、实验设备与器件

- | | |
|-------------|------------------|
| 1、+12V 直流电源 | 2、函数信号发生器 |
| 3、双踪示波器 | 4、交流毫伏表 |
| 5、直流电压表 | 6、结型场效应管 3DJ6F×1 |
- 电阻器、电容器若干。

四、实验内容

1、静态工作点的测量和调整

- 1) 接图 3-2 连接电路，令 $u_i = 0$ ，接通 +12V 电源，用直流电压表测量 U_G 、 U_S 和 U_D 。检查静态工作点是否在特性曲线放大区的中间部分。如合适则把结果记入表 3-2。
- 2) 若不合适，则适当调整 R_{g2} 和 R_S ，调好后，再测量 U_G 、 U_S 和 U_D 记入表 3-2。

表 3-2

测量值						计算值		
U_G (V)	U_S (V)	U_D (V)	U_{DS} (V)	U_{GS} (V)	I_D (mA)	U_{DS} (V)	U_{GS} (V)	I_D (mA)

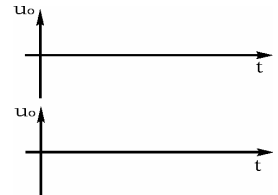
2、电压放大倍数 A_v 、输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 的测量

1) A_v 和 R_o 的测量

在放大器的输入端加入 $f = 1KHz$ 的正弦信号 U_i ($\approx 50 \sim 100mV$)，并用示波器监视输出电压 u_o 的波形。在输出电压 u_o 没有失真的条件下，用交流毫伏表分别测量 $R_L = \infty$ 和 $R_L = 10K \Omega$ 时的输出电压 U_o (注意：保持 U_i 幅值不变)，记入表 3-3。

表 3-3

测 量 值	计 算 值	u_i 和 u_o 波形

	U_i (V)	U_o (V)	A_v	R_o (K Ω)	A_v	R_o (K Ω)	
$R_L = \infty$							
$R_L = 10K$							

用示波器同时观察 u_i 和 u_o 的波形，描绘出来并分析它们的相位关系。

2) R_i 的测量

按图 3-3 改接实验电路，选择合适大小的输入电压 U_s (约 50-100mV)，将开关 K 掷向“1”，测出 $R=0$ 时的输出电压 U_{01} ，然后将开关掷向“2”，(接入 R)，保持 U_s 不变，再测出 U_{02} ，根据公式

$$R_i = \frac{U_{02}}{U_{01} - U_{02}} R \quad \text{求出 } R_i, \text{ 记入表 3-4。}$$

表 3-4

测 量 值			计 算 值
U_{01} (V)	U_{02} (V)	R_i (K Ω)	R_i (K Ω)

五、实验总结

- 1、整理实验数据，将测得的 A_v 、 R_i 、 R_o 和理论计算值进行比较。
- 2、把场效应管放大器与晶体管放大器进行比较，总结场效应管放大器的特点。
- 3、分析测试中的问题，总结实验收获。

六、预习要求

- 1、复习有关场效应管部分内容，并分别用图解法与计算法估算管子的静态工作点(根据实验电路参数)，求出工作点处的跨导 g_m 。
- 2、场效应管放大器输入回路的电容 C_i 为什么可以取得小一些(可以取 $C_i=0.1 \mu F$)?
- 3、在测量场效应管静态工作电压 U_{GS} 时，能否用直流电压表直接并在 G、S 两端测量? 为什么?
- 4、为什么测量场效应管输入电阻时要用测量输出电压的方法?

实验四 负反馈放大器

一、实验目的

加深理解放大电路中引入负反馈的方法和负反馈对放大器各项性能指标的影响。

二、实验原理

负反馈在电子电路中有着非常广泛的应用,虽然它使放大器的放大倍数降低,但能在多方面改善放大器的动态指标,如稳定放大倍数,改变输入、输出电阻,减小非线性失真和展宽通频带等。因此,几乎所有的实用放大器都带有负反馈。

负反馈放大器有四种组态,即电压串联,电压并联,电流串联,电流并联。本实验以电压串联负反馈为例,分析负反馈对放大器各项性能指标的影响。

1、图 4-1 为带有负反馈的两级阻容耦合放大电路,在电路中通过 R_f 把输出电压 u_o 引回到输入端,加在晶体管 T_1 的发射极上,在发射极电阻 R_{E1} 上形成反馈电压 u_f 。根据反馈的判断法可知,它属于电压串联负反馈。

主要性能指标如下

1) 闭环电压放大倍数

$$A_{Vf} = \frac{A_V}{1 + A_V F_V}$$

其中 $A_V = U_o / U_i$ — 基本放大器(无反馈)的电压放大倍数,即开环电压放大倍数。

$1 + A_V F_V$ — 反馈深度,它的大小决定了负反馈对放大器性能改善的程度。

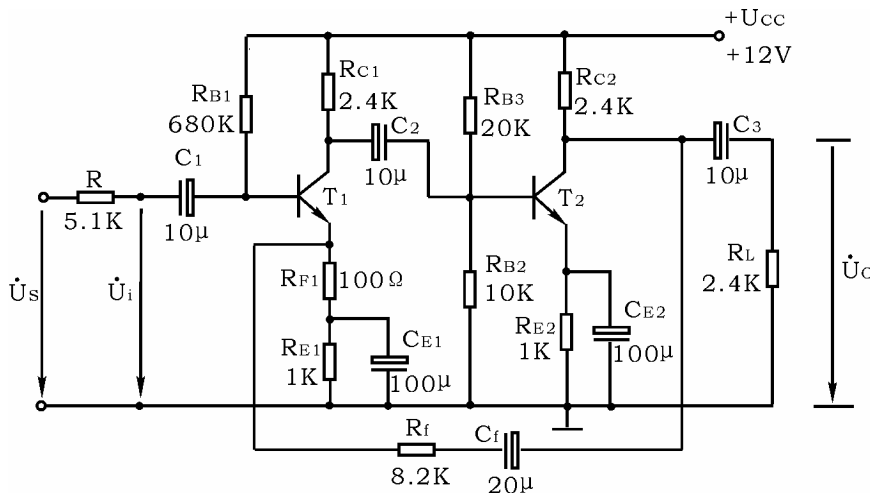


图 4-1 带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放大器

2) 反馈系数

$$F_V = \frac{R_{F1}}{R_f + R_{F1}}$$

3) 输入电阻

$$R_{if} = (1 + A_v F_V) R_i$$

R_i — 基本放大器的输入电阻

4) 输出电阻

$$R_{of} = \frac{R_0}{1 + A_{v0} F_V}$$

R_0 — 基本放大器的输出电阻

A_{v0} — 基本放大器 $R_L = \infty$ 时的电压放大倍数

2、本实验还需要测量基本放大器的动态参数，怎样实现无反馈而得到基本放大器呢？不能简单地断开反馈支路，而是要去掉反馈作用，但又要把反馈网络的影响（负载效应）考虑到基本放大器中去。为此：

1) 在画基本放大器的输入回路时，因为是电压负反馈，所以可将负反馈放大器的输出端交流短路，即令 $u_0 = 0$ ，此时 R_f 相当于并联在 R_{F1} 上。

2) 在画基本放大器的输出回路时，由于输入端是串联负反馈，因此需将反馈放大器的输入端（ T_1 管的射极）开路，此时 $(R_f + R_{F1})$ 相当于并接在输出端。可近似认为 R_f 并接在输出端。

根据上述规律，就可得到所要求的如图 4-2 所示的基本放大器。

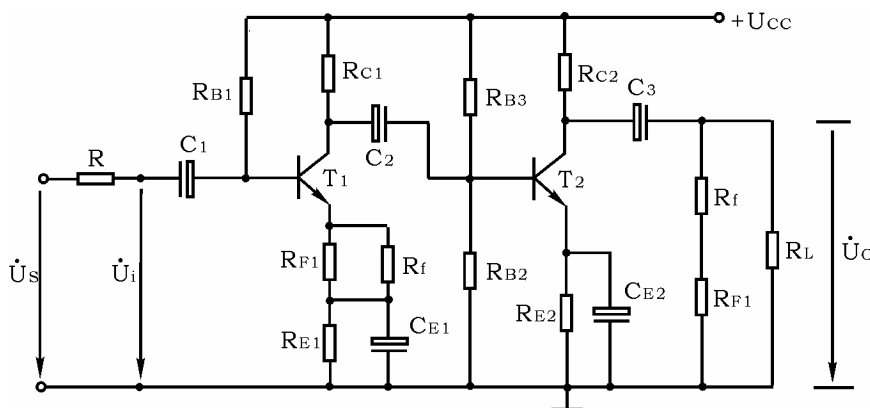


图 4-2 基本放大器

三、实验设备与器件

- 1、 +12V 直流电源
- 2、 函数信号发生器
- 3、 双踪示波器
- 4、 频率计
- 5、 交流毫伏表
- 6、 直流电压表
- 7、 晶体三极管 3DG6 \times 2 ($\beta = 50 \sim 100$) 或 9011 \times 2
电阻器、电容器若干。

四、实验内容

1、 测量静态工作点

按图 4-1 连接实验电路，取 $U_{CC} = +12V$ ， $U_i = 0$ ，用直流电压表分别测量第一级、第二级的静态工作点，记入表 4-1。

表 4-1

	U_B (V)	U_E (V)	U_C (V)	I_C (mA)
第一级				
第二级				

2、测试基本放大器的各项性能指标

将实验电路按图 4-2 改接，即把 R_f 断开后分别并在 R_{F1} 和 R_L 上，其它连线不动。

1) 测量中频电压放大倍数 A_v ，输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

① 以 $f = 1KHZ$ ， U_s 约 5mV 正弦信号输入放大器，用示波器监视输出波形 u_o ，在 u_o 不失真的情况下，用交流毫伏表测量 U_s 、 U_i 、 U_L ，记入表 4-2。

表 4-2

基本放大器	U_s (mv)	U_i (mv)	U_L (V)	U_o (V)	A_v	R_i (K Ω)	R_o (K Ω)
负反馈放大器	U_s (mv)	U_i (mv)	U_L (V)	U_o (V)	A_{vf}	R_{if} (K Ω)	R_{of} (K Ω)

--	--	--	--	--	--	--	--

②保持 U_s 不变，断开负载电阻 R_L （注意， R_f 不要断开），测量空载时的输出电压 U_o ，记入表 4-2。

2) 测量通频带

接上 R_L ，保持 1) 中的 U_s 不变，然后增加和减小输入信号的频率，找出上、下限频率 f_h 和 f_l ，记入表 4-3。

3、测试负反馈放大器的各项性能指标

将实验电路恢复为图 4-1 的负反馈放大电路。适当加大 U_s （约 10mV），在输出波形不失真的条件下，测量负反馈放大器的 A_{vf} 、 R_{if} 和 R_{of} ，记入表 4-2；测量 f_{hf} 和 f_{lf} ，记入表 4-3。

表 4-3

基本放大器	f_L (KHz)	f_H (KHz)	Δf (KHz)
负反馈放大器	f_{Lf} (KHz)	f_{Hf} (KHz)	Δf_f (KHz)

*4、观察负反馈对非线性失真的改善

1) 实验电路改接成基本放大器形式，在输入端加入 $f=1\text{KHz}$ 的正弦信号，输出端接示波器，逐渐增大输入信号的幅度，使输出波形开始出现失真，记下此时的波形和输出电压的幅度。

2) 再将实验电路改接成负反馈放大器形式，增大输入信号幅度，使输出电压幅度的大小与 1) 相同，比较有负反馈时，输出波形的变化。

五、实验总结

1、将基本放大器和负反馈放大器动态参数的实测值和理论估算值列表进行比较。

2、根据实验结果，总结电压串联负反馈对放大器性能的影响。

六、预习要求

1、复习教材中有关负反馈放大器的内容。

2、按实验电路 4-1 估算放大器的静态工作点（取 $\beta_1 = \beta_2 = 100$ ）。

3、怎样把负反馈放大器改接成基本放大器？为什么要把 R_f 并接在输入和输出端？

4、估算基本放大器的 A_v 、 R_i 和 R_o ；估算负反馈放大器的 A_{vf} 、 R_{if} 和 R_{of} ，并估算它们之间的关系。

5、如按深负反馈估算，则闭环电压放大倍数 $A_{vf} = ?$ 和测量值是否一致？为什么？

6、如输入信号存在失真，能否用负反馈来改善？

7、怎样判断放大器是否存在自激振荡？如何进行消振？

注：如果实验装置上有放大器的固定实验模块，则可参考实验二附图 2-1 进行实验。

实验五 射极跟随器

一、实验目的

- 1、掌握射极跟随器的特性及测试方法
- 2、进一步学习放大器各项参数测试方法

二、实验原理

射极跟随器的原理图如图 5-1 所示。它是一个电压串联负反馈放大电路，它具有输入电阻高，输出电阻低，电压放大倍数接近于 1，输出电压能够在较大范围内跟随输入电压作线性变化以及输入、输出信号同相等特点。

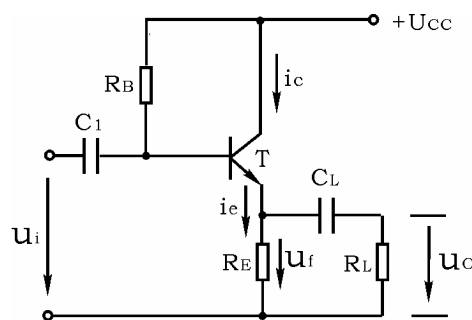


图 5-1 射极跟随器

射极跟随器的输出取自发射极，故称其为射极输出器。

1、输入电阻 R_i

图 5-1 电路

$$R_i = r_{be} + (1 + \beta) R_E$$

如考虑偏置电阻 R_B 和负载 R_L 的影响，则

$$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) (R_E // R_L)]$$

由上式可知射极跟随器的输入电阻 R_i 比共射极单管放大器的输入电阻 $R_i = R_B // r_{be}$ 要高得多，但由于偏置电阻 R_B 的分流作用，输入电阻难以进一步提高。

输入电阻的测试方法同单管放大器，实验线路如图 5-2 所示。

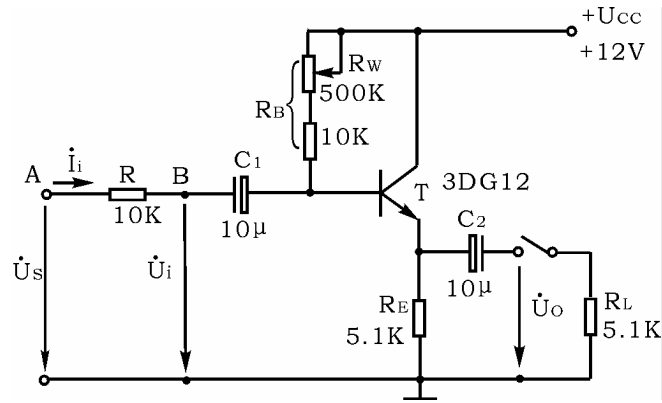


图 5-2 射极跟随器实验电路

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R$$

即只要测得 A、B 两点的对地电位即可计算出 R_i 。

2、输出电阻 R_o

图 5-1 电路

$$R_o = \frac{r_{be}}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be}}{\beta}$$

如考虑信号源内阻 R_s ，则

$$R_o = \frac{r_{be} + (R_s // R_B)}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be} + (R_s // R_B)}{\beta}$$

由上式可知射极跟随器的输出电阻 R_o 比共射极单管放大器的输出电阻 $R_o \approx R_c$ 低得多。三极管的 β 愈高，输出电阻愈小。

输出电阻 R_o 的测试方法亦同单管放大器，即先测出空载输出电压 U_o ，再测接入负载 R_L 后的输出电压 U_L ，根据

$$U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o$$

即可求出 R_o

$$R_o = \left(\frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L$$

3、电压放大倍数

图 5-1 电路

$$A_v = \frac{(1 + \beta) (R_E // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta) (R_E // R_L)} \leq 1$$

上式说明射极跟随器的电压放大倍数小于近于 1，且为正值。这是深度电压负反馈的结果。但它的射极电流仍比基流大 $(1 + \beta)$ 倍，所以它具有一定的电流

和功率放大作用。

4、电压跟随范围

电压跟随范围是指射极跟随器输出电压 u_o 跟随输入电压 u_i 作线性变化的区域。当 u_i 超过一定范围时， u_o 便不能跟随 u_i 作线性变化，即 u_o 波形产生了失真。为了使输出电压 u_o 正、负半周对称，并充分利用电压跟随范围，静态工作点应选在交流负载线中点，测量时可直接用示波器读取 u_o 的峰峰值，即电压跟随范围；或用交流毫伏表读取 u_o 的有效值，则电压跟随范围

$$U_{OP-P} = 2\sqrt{2} U_o$$

三、实验设备与器件

- 1、+12V 直流电源
- 2、函数信号发生器
- 3、双踪示波器
- 4、交流毫伏表
- 5、直流电压表
- 6、频率计
- 7、3DG12×1 ($\beta = 50 \sim 100$) 或 9013

电阻器、电容器若干。

四、实验内容

按图 5-2 组接电路

1、静态工作点的调整

接通 +12V 直流电源，在 B 点加入 $f=1\text{KHz}$ 正弦信号 u_i ，输出端用示波器监视输出波形，反复调整 R_w 及信号源的输出幅度，使在示波器的屏幕上得到一个最大不失真输出波形，然后置 $u_i=0$ ，用直流电压表测量晶体管各电极对地电位，将测得数据记入表 5-1。

表 5-1

U_E (V)	U_B (V)	U_C (V)	I_E (mA)

在下面整个测试过程中应保持 R_w 值不变（即保持静工作点 I_E 不变）。

2、测量电压放大倍数 A_v

接入负载 $R_L=1\text{K}\Omega$ ，在 B 点加 $f=1\text{KHz}$ 正弦信号 u_i ，调节输入信号幅度，用示波器观察输出波形 u_o ，在输出最大不失真情况下，用交流毫伏表测 U_i 、 U_L 值。

记入表 5-2。

表 5-2

U_i (V)	U_L (V)	A_V

3、测量输出电阻 R_o

接上负载 $R_L=1K$ ，在 B 点加 $f=1KHz$ 正弦信号 u_i ，用示波器监视输出波形，测空载输出电压 U_o ，有负载时输出电压 U_L ，记入表 5-3。

表 5-3

U_o (V)	U_L (V)	R_o (K Ω)

4、测量输入电阻 R_i

在 A 点加 $f=1KHz$ 的正弦信号 u_s ，用示波器监视输出波形，用交流毫伏表分别测出 A、B 点对地的电位 U_s 、 U_i ，记入表 5-4。

表 5-4

U_s (V)	U_i (V)	R_i (K Ω)

5、测试跟随特性

接入负载 $R_L=1K\Omega$ ，在 B 点加入 $f=1KHz$ 正弦信号 u_i ，逐渐增大信号 u_i 幅度，用示波器监视输出波形直至输出波形达最大不失真，测量对应的 U_L 值，记入表 5-5。

表 5-5

U_i (V)	
U_L (V)	

6、测试频率响应特性

保持输入信号 u_i 幅度不变，改变信号源频率，用示波器监视输出波形，用交流毫伏表测量不同频率下的输出电压 U_L 值，记入表 5-6。

表 5-6

f (KHz)	
U_L (V)	

五、预习要求

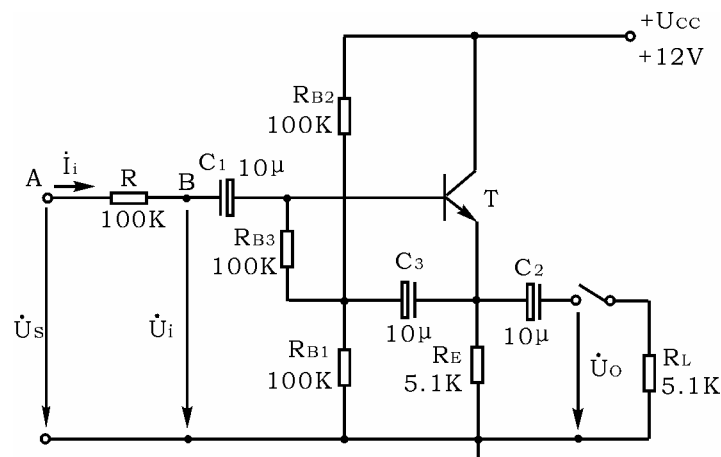
- 1、复习射极跟随器的工作原理。
- 2、根据图 5-2 的元件参数值估算静态工作点，并画出交、直流负载线。

六、实验报告

- 1、整理实验数据，并画出曲线 $U_L = f(U_i)$ 及 $U_L = f(f)$ 曲线。
- 2、分析射极跟随器的性能和特点。

附：采用自举电路的射极跟随器

在一些电子测量仪器中，为了减轻仪器对信号源所取用的电流，以提高测量精度，通常采用附图 5-1 所示带有自举电路的射极跟随器，以提高偏置电路的等效电阻，从而保证射极跟随器有足够高的输入电阻。



附图 5-1 有自举电路的射极跟随器

实验六 差动放大器

一、实验目的

- 1、加深对差动放大器性能及特点的理解
- 2、学习差动放大器主要性能指标的测试方法

二、实验原理

图 6-1 是差动放大器的基本结构。它由两个元件参数相同的基本共射放大电路组成。当开关 K 拨向左边时，构成典型的差动放大器。调零电位器 R_P 用来调节 T_1 、 T_2 管的静态工作点，使得输入信号 $U_i=0$ 时，双端输出电压 $U_o=0$ 。 R_E 为两管共用的发射极电阻，它对差模信号无负反馈作用，因而不影响差模电压放大倍数，但对共模信号有较强的负反馈作用，故可以有效地抑制零漂，稳定静态工作点。

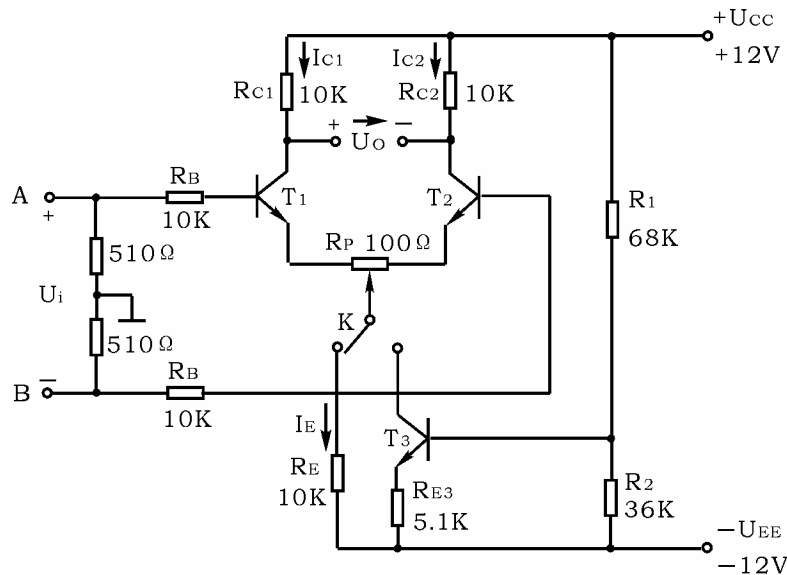


图 6-1 差动放大器实验电路

当开关 K 拨向右边时，构成具有恒流源的差动放大器。它用晶体管恒流源代替发射极电阻 R_E ，可以进一步提高差动放大器抑制共模信号的能力。

1、静态工作点的估算

典型电路

$$I_E \approx \frac{|U_{EE}| - U_{BE}}{R_E} \quad (\text{认为 } U_{B1} = U_{B2} \approx 0)$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_E$$

恒流源电路

$$I_{C3} \approx I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} (U_{CC} + |U_{EE}|) - U_{BE}}{R_{E3}}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_{C3}$$

2、差模电压放大倍数和共模电压放大倍数

当差动放大器的射极电阻 R_E 足够大，或采用恒流源电路时，差模电压放大倍数 A_d 由输出端方式决定，而与输入方式无关。

双端输出： $R_E = \infty$ ， R_p 在中心位置时，

$$A_d = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} = - \frac{\beta R_c}{R_B + r_{be} + \frac{1}{2}(1 + \beta) R_p}$$

单端输出

$$A_{d1} = \frac{\Delta U_{C1}}{\Delta U_i} = \frac{1}{2} A_d$$

$$A_{d2} = \frac{\Delta U_{C2}}{\Delta U_i} = - \frac{1}{2} A_d$$

当输入共模信号时，若为单端输出，则有

$$A_{C1} = A_{C2} = \frac{\Delta U_{C1}}{\Delta U_i} = \frac{-\beta R_c}{R_B + r_{be} + (1 + \beta) \left(\frac{1}{2} R_p + 2R_E\right)} \approx - \frac{R_c}{2R_E}$$

若为双端输出，在理想情况下

$$A_c = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} = 0$$

实际上由于元件不可能完全对称，因此 A_c 也不会绝对等于零。

3、共模抑制比 CMRR

为了表征差动放大器对有用信号（差模信号）的放大作用和对共模信号的抑制能力，通常用一个综合指标来衡量，即共模抑制比

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{或} \quad \text{CMRR} = 20 \text{Log} \left| \frac{A_d}{A_c} \right| (\text{dB})$$

差动放大器的输入信号可采用直流信号也可采用交流信号。本实验由函数信号发生器提供频率 $f=1\text{KHZ}$ 的正弦信号作为输入信号。

三、实验设备与器件

- 1、 $\pm 12\text{V}$ 直流电源
- 2、函数信号发生器
- 3、双踪示波器
- 4、交流毫伏表
- 5、直流电压表
- 6、晶体三极管 3DG6 $\times 3$ ，要求 T_1 、 T_2 管特性参数一致。
(或 9011 $\times 3$)。

电阻器、电容器若干。

四、实验内容

1、典型差动放大器性能测试

按图 6-1 连接实验电路，开关 K 拨向左边构成典型差动放大器。

1) 测量静态工作点

① 调节放大器零点

信号源不接入。将放大器输入端 A、B 与地短接，接通 $\pm 12\text{V}$ 直流电源，用直流电压表测量输出电压 U_0 ，调节调零电位器 R_p ，使 $U_0=0$ 。调节要仔细，力求准确。

② 测量静态工作点

零点调好以后，用直流电压表测量 T_1 、 T_2 管各电极电位及射极电阻 R_E 两端电压 U_{RE} ，记入表 6-1。

表 6-1

测量值	U_{C1} (V)	U_{B1} (V)	U_{E1} (V)	U_{C2} (V)	U_{B2} (V)	U_{E2} (V)	U_{RE} (V)
计算值	I_C (mA)		I_B (mA)		U_{CE} (V)		

2) 测量差模电压放大倍数

断开直流电源，将函数信号发生器的输出端接放大器输入 A 端，地端接放大器输入 B 端构成单端输入方式，调节输入信号为频率 $f=1\text{KHz}$ 的正弦信号，并使

输出旋钮旋至零，用示波器监视输出端（集电极 C_1 或 C_2 与地之间）。

接通 $\pm 12V$ 直流电源，逐渐增大输入电压 U_i （约 $100mV$ ），在输出波形无失真的情况下，用交流毫伏表测 U_i , U_{C1} , U_{C2} ，记入表 6-2 中，并观察 u_i , u_{C1} , u_{C2} 之间的相位关系及 U_{RE} 随 U_i 改变而变化的情况。

3) 测量共模电压放大倍数

将放大器 A、B 短接，信号源接 A 端与地之间，构成共模输入方式，调节输入信号 $f=1kHz$ ， $U_i=1V$ ，在输出电压无失真的情况下，测量 U_{C1} , U_{C2} 之值记入表 6-2，并观察 u_i , u_{C1} , u_{C2} 之间的相位关系及 U_{RE} 随 U_i 改变而变化的情况。

表 6-2

	典型差动放大电路		具有恒流源差动放大电路	
	单端输入	共模输入	单端输入	共模输入
U_i	100mV	1V	100mV	1V
$U_{C1}(V)$				
$U_{C2}(V)$				
$A_{d1} = \frac{U_{C1}}{U_i}$		/		/
$A_d = \frac{U_0}{U_i}$		/		/
$A_{C1} = \frac{U_{C1}}{U_i}$	/		/	
$A_C = \frac{U_0}{U_i}$	/		/	
$CMRR = \left \frac{A_{d1}}{A_{C1}} \right $				

2、具有恒流源的差动放大电路性能测试

将图 6-1 电路中开关 K 拨向右边，构成具有恒流源的差动放大电路。重复内容 1-2)、1-3) 的要求，记入表 6-2。

五、实验总结

1、整理实验数据，列表比较实验结果和理论估算值，分析误差原因。

1) 静态工作点和差模电压放大倍数。

2) 典型差动放大电路单端输出时的 CMRR 实测值与理论值比较

3) 典型差动放大电路单端输出时 CMRR 的实测值与具有恒流源的差动放大器 CMRR 实测值比较。

2、比较 u_{i1} 、 u_{c1} 和 u_{c2} 之间的相位关系。

3、根据实验结果，总结电阻 R_e 和恒流源的作用。

六、预习要求

1、根据实验电路参数，估算典型差动放大器和具有恒流源的差动放大器的静态工作点及差模电压放大倍数（取 $\beta_1 = \beta_2 = 100$ ）。

2、测量静态工作点时，放大器输入端 A、B 与地应如何连接？

3、实验中怎样获得双端和单端输入差模信号？怎样获得共模信号？画出 A、B 端与信号源之间的连接图。

4、怎样进行静态调零点？用什么仪表测 U_o ？

5、怎样用交流毫伏表测双端输出电压 U_o ？

实验七 集成运算放大器指标测试

一、实验目的

- 1、掌握运算放大器主要指标的测试方法。
- 2、通过对运算放大器 $\mu A741$ 指标的测试，了解集成运算放大器组件的主要参数的定义和表示方法。

二、实验原理

集成运算放大器是一种线性集成电路，和其它半导体器件一样，它是用一些性能指标来衡量其质量的优劣。为了正确使用集成运放，就必须了解它的主要参数指标。集成运放组件的各项指标通常是由专用仪器进行测试的，这里介绍的是一种简易测试方法。

本实验采用的集成运放型号为 $\mu A741$ （或 F007），引脚排列如图 7-1 所示，它是八脚双列直插式组件，②脚和③脚为反相和同相输入端，⑥脚为输出端，⑦脚和④脚为正、负电源端，①脚和⑤脚为失调调零端，①⑤脚之间可接入一只几十 $K\Omega$ 的电位器并将滑动触头接到负电源端。⑧脚为空脚。

1、 $\mu A741$ 主要指标测试

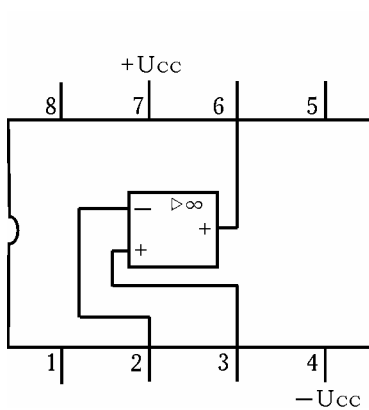


图 7-1 $\mu A741$ 管脚图

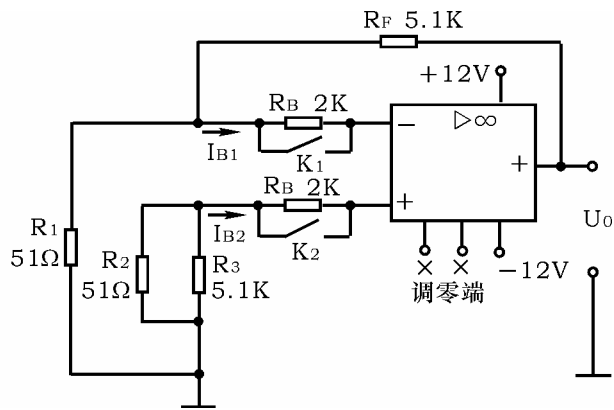


图 7-2 U_{os} 、 I_{os} 测试电路

1) 输入失调电压 U_{os}

理想运放组件，当输入信号为零时，其输出也为零。但是即使是最优质的集成组件，由于运放内部差动输入级参数的不完全对称，输出电压往往不为零。这种零输入时输出不为零的现象称为集成运放的失调。

输入失调电压 U_{os} 是指输入信号为零时，输出端出现的电压折算到同相输入

端的数值。

失调电压测试电路如图 7-2 所示。闭合开关 K_1 及 K_2 ，使电阻 R_B 短接，测量此时的输出电压 U_{01} 即为输出失调电压，则输入失调电压

$$U_{OS} = \frac{R_1}{R_1 + R_F} U_{01}$$

实际测出的 U_{01} 可能为正，也可能为负，一般在 $1 \sim 5\text{mV}$ ，对于高质量的运放 U_{OS} 在 1mV 以下。

测试中应注意：a、将运放调零端开路。

b、要求电阻 R_1 和 R_2 ， R_3 和 R_F 的参数严格对称。

2) 输入失调电流 I_{OS}

输入失调电流 I_{OS} 是指当输入信号为零时，运放的两个输入端的基极偏置电流之差，

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

输入失调电流的大小反映了运放内部差动输入级两个晶体管 β 的失配度，由于 I_{B1} ， I_{B2} 本身的数值已很小（微安级），因此它们的差值通常不是直接测量的，测试电路如图 7-2 所示，测试分两步进行

a、闭合开关 K_1 及 K_2 ，在低输入电阻下，测出输出电压 U_{01} ，如前所述，这是由输入失调电压 U_{OS} 所引起的输出电压。

b、断开 K_1 及 K_2 ，两个输入电阻 R_B 接入，由于 R_B 阻值较大，流经它们的输入电流的差异，将变成输入电压的差异，因此，也会影响输出电压的大小，可见测出两个电阻 R_B 接入时的输出电压 U_{02} ，若从中扣除输入失调电压 U_{OS} 的影响，则输入失调电流 I_{OS} 为

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}| = |U_{02} - U_{01}| \frac{R_1}{R_1 + R_F} \frac{1}{R_B}$$

一般， I_{OS} 约为几十~几百 nA (10^{-9}A)，高质量运放 I_{OS} 低于 1nA 。

测试中应注意：a、将运放调零端开路。

b、两输入端电阻 R_B 必须精确配对。

3) 开环差模放大倍数 A_{ud}

集成运放在没有外部反馈时的直流差模放大倍数称为开环差模电压放大倍数，用 A_{ud} 表示。它定义为开环输出电压 U_0 与两个差分输入端之间所加信号电压 U_{id} 之比

$$A_{ud} = \frac{U_0}{U_{id}}$$

按定义 A_{ud} 应是信号频率为零时的直流放大倍数，但为了测试方便，通常采用低频（几十赫芝以下）正弦交流信号进行测量。由于集成运放的开环电压放大倍数很高，难以直接进行测量，故一般采用闭环测量方法。 A_{ud} 的测试方法很多，现采用交、直流同时闭环的测试方法，如图 7-3 所示。

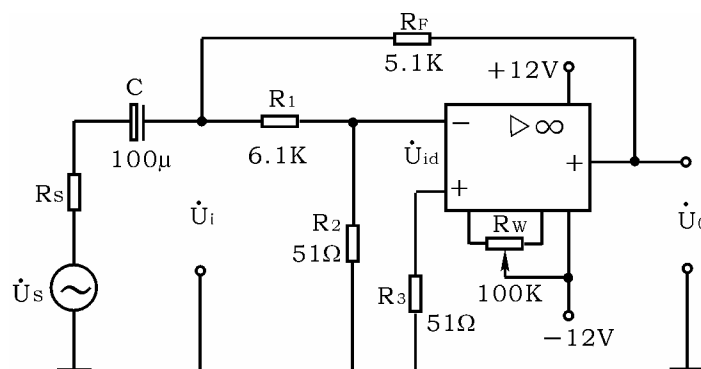


图 7-3 A_{ud} 测试电路

被测运放一方面通过 R_F 、 R_1 、 R_2 完成直流闭环，以抑制输出电压漂移，另一方面通过 R_F 和 R_S 实现交流闭环，外加信号 u_s 经 R_1 、 R_2 分压，使 u_{id} 足够小，以保证运放工作在线性区，同相输入端电阻 R_3 应与反相输入端电阻 R_2 相匹配，以减小输入偏置电流的影响，电容 C 为隔直电容。被测运放的开环电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{U_o}{U_{id}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{U_o}{U_i}$$

通常低增益运放 A_{ud} 约为 60~70db，中增益运放约为 80db，高增益在 100db 以上，可达 120~140db。

测试中应注意：a、测试前电路应首先消振及调零。

b、被测运放要工作在线性区。

c、输入信号频率应较低，一般用 50~100HZ，输出信号幅度应较小，且无明显失真。

4) 共模抑制比 CMRR

集成运放的差模电压放大倍数 A_d 与共模电压放大倍数 A_c 之比称为共模抑制比

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{或} \quad CMRR = 201g \left| \frac{A_d}{A_c} \right| (\text{db})$$

共模抑制比在应用中是一个很重要的参数，理想运放对输入的共模信号其输出为零，但在实际的集成运放中，其输出不可能没有共模信号的成分，输出端共模信号愈小，说明电路对称性愈好，也就是说运放对共模干扰信号的抑制能力愈强，即 CMRR 愈大。CMRR 的测试电路如图 7-4 所示。

集成运放工作在闭环状态下的差模电压放大倍数为

$$A_d = -\frac{R_F}{R_1}$$

当接入共模输入信号 U_{ic} 时，测得 U_{oc} ，则共模电压放大倍数为

$$A_c = \frac{U_{oc}}{U_{ic}}$$

得共模抑制比

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{R_F U_{ic}}{R_1 U_{oc}}$$

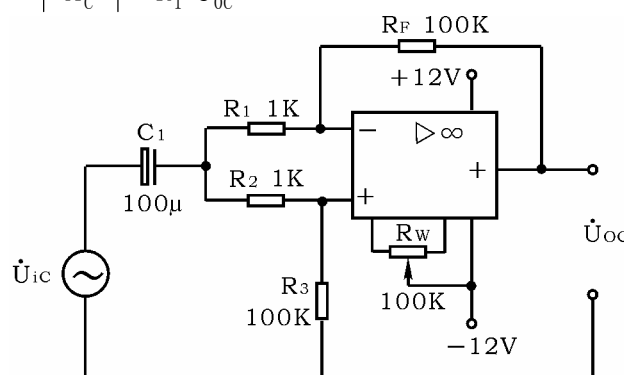


图 7-4 CMRR 测试电路

测试中应注意：a、消振与调零

b、 R_1 与 R_2 、 R_3 与 R_F 之间阻值严格对称

c、输入信号 U_{ic} 幅度必须小于集成运放的最大共模输入电压范围 U_{icm}

5) 共模输入电压范围 U_{icm}

集成运放所能承受的最大共模电压称为共模输入电压范围，超出这个范围，运放的 CMRR 会大大下降，输出波形产生失真，有些运放还会出现“自锁”现象以及永久性的损坏。

U_{icm} 的测试电路如图 7-5 所示。

被测运放接成电压跟随器形式，输出端接示波器，观察最大不失真输出波形，

从而确定 U_{icm} 值。

6) 输出电压最大动态范围 U_{OPP}

集成运放的动态范围与电源电压、外接负载及信号源频率有关。测试电路如图 7-6 所示。

改变 u_s 幅度，观察 u_o 削顶失真开始时刻，从而确定 u_o 的不失真范围，这就是运放在某一定电源电压下可能输出的电压峰峰值 U_{OPP} 。

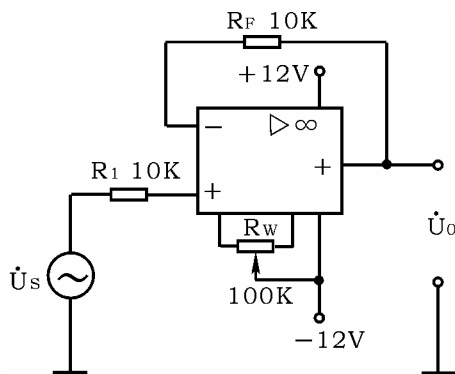


图 7-5 U_{icm} 测试电路

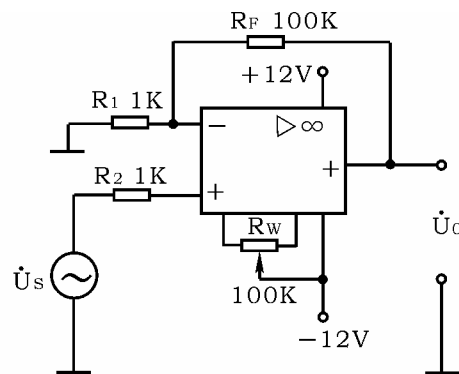


图 7-6 U_{OPP} 测试电路

2、集成运放在使用时应考虑的一些问题

1) 输入信号选用交、直流量均可，但在选取信号的频率和幅度时，应考虑运放的频响特性和输出幅度的限制。

2) 调零。为提高运算精度，在运算前，应首先对直流输出电位进行调零，即保证输入为零时，输出也为零。当运放有外接调零端子时，可按组件要求接入调零电位器 R_w ，调零时，将输入端接地，调零端接入电位器 R_w ，用直流电压表测量输出电压 U_o ，细心调节 R_w ，使 U_o 为零（即失调电压为零）。如运放没有调零端子，若要调零，可按图 7-7 所示电路进行调零。

一个运放如不能调零，大致有如下原因：① 组件正常，接线有错误。② 组件正常，但负反馈不够强 (R_F / R_1 太大)，为此可将 R_F 短路，观察是否能调零。③ 组件正常，但由于它所允许的共模输入电压太低，可能出现自锁现象，因而不能调零。为此可将电源断开后，再重新接通，如能恢复正常，则属于这种情况。④ 组件正常，但电路有自激现象，应进行消振。⑤ 组件内部损坏，应更换好的集成块。

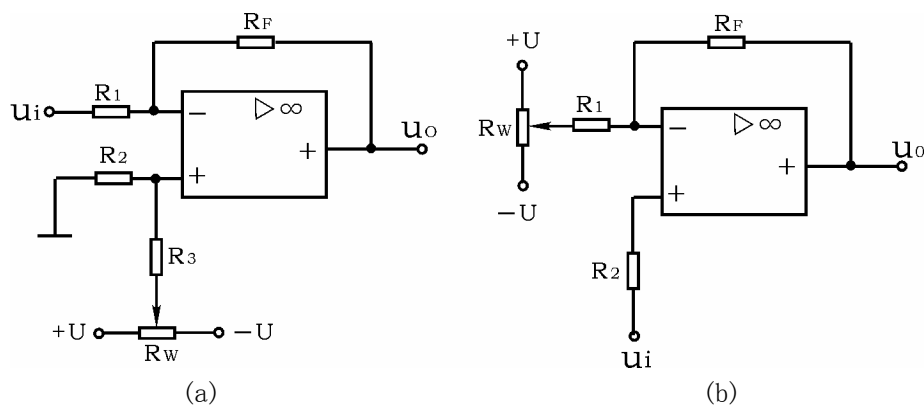


图 7-7 调零电路

3) 消振。一个集成运放自激时，表现为即使输入信号为零，亦会有输出，使各种运算功能无法实现，严重时还会损坏器件。在实验中，可用示波器监视输出波形。为消除运放的自激，常采用如下措施

①若运放有相位补偿端子，可利用外接 RC 补偿电路，产品手册中有补偿电路及元件参数提供。②电路布线、元、器件布局应尽量减少分布电容。③在正、负电源进线与地之间接上几十 μF 的电解电容和 $0.01\sim 0.1\ \mu\text{F}$ 的陶瓷电容相并联以减小电源引线的影响。

注：自激消除方法请参考实验附录。

三、实验设备与器件

- | | |
|--------------------------|-------------------------------------|
| 1、 $\pm 12\text{V}$ 直流电源 | 4、交流毫伏表 |
| 2、函数信号发生器 | 5、直流电压表 |
| 3、双踪示波器 | 6、集成运算放大器 $\mu\text{A}741 \times 1$ |
| | 电阻器、电容器若干 |

四、实验内容

实验前看清运放管脚排列及电源电压极性及数值，切忌正、负电源接反。

1、测量输入失调电压 U_{0s}

按图 7-2 连接实验电路，闭合开关 K_1 、 K_2 ，用直流电压表测量输出端电压 U_{01} ，并计算 U_{0s} 。记入表 7-1。

2. 测量输入失调电流 I_{0s}

实验电路如图 7-2，打开开关 K_1 、 K_2 ，用直流电压表测量 U_{02} ，并计算 I_{0s} 。记入表 7-1。

表 7-1

U _{OS} (mV)		I _{OS} (nA)		A _{ud} (db)		CMRR (db)	
实测值	典型值	实测值	典型值	实测值	典型值	实测值	典型值
	2~10		50~100		100~106		80~86

3、测量开环差模电压放大倍数 A_{ud}

按图 7-3 连接实验电路，运放输入端加频率 100Hz，大小约 30~50mV 正弦信号，用示波器监视输出波形。用交流毫伏表测量 U_o 和 U_i，并计算 A_{ud}。记入表 7-1。

4、测量共模抑制比 CMRR

按图 7-4 连接实验电路，运放输入端加 f=100Hz，U_{ic}=1~2V 正弦信号，监视输出波形。测量 U_{oc} 和 U_{ic}，计算 A_c 及 CMRR。记入表 7-1。

5、测量共模输入电压范围 U_{icm} 及输出电压最大动态范围 U_{opp}。

自拟实验步骤及方法。

五、实验总结

- 1、将所测得的数据与典型值进行比较。
- 2、对实验结果及实验中碰到的问题进行分析、讨论。

六、预习要求

- 1、查阅 μ A741 典型指标数据及管脚功能。
- 2、测量输入失调参数时，为什么运放反相及同相输入端的电阻要精选，以保证严格对称。
- 3、测量输入失调参数时，为什么要将运放调零端开路，而在进行其它测试时，则要求对输出电压进行调零。
- 4、测试信号的频率选取的原则是什么？

实验八 集成运算放大器的基本应用(I)

— 模拟运算电路 —

一、实验目的

1、研究由集成运算放大器组成的比例、加法、减法和积分等基本运算电路的功能。

2、了解运算放大器在实际应用时应考虑的一些问题。

二、实验原理

集成运算放大器是一种具有高电压放大倍数的直接耦合多级放大电路。当外部接入不同的线性或非线性元器件组成输入和负反馈电路时，可以灵活地实现各种特定的函数关系。在线性应用方面，可组成比例、加法、减法、积分、微分、对数等模拟运算电路。

理想运算放大器特性

在大多数情况下，将运放视为理想运放，就是将运放的各项技术指标理想化，满足下列条件的运算放大器称为理想运放。

开环电压增益 $A_{ud}=\infty$

输入阻抗 $r_i=\infty$

输出阻抗 $r_o=0$

带宽 $f_{BW}=\infty$

失调与漂移均为零等。

理想运放在线性应用时的两个重要特性：

(1) 输出电压 U_0 与输入电压之间满足关系式

$$U_0 = A_{ud} (U_+ - U_-)$$

由于 $A_{ud}=\infty$ ，而 U_0 为有限值，因此， $U_+ - U_- \approx 0$ 。即 $U_+ \approx U_-$ ，称为“虚短”。

(2) 由于 $r_i=\infty$ ，故流进运放两个输入端的电流可视为零，即 $I_{IB}=0$ ，称为“虚断”。这说明运放对其前级吸取电流极小。

上述两个特性是分析理想运放应用电路的基本原则，可简化运放电路的计算。

基本运算电路

1) 反相比例运算电路

电路如图 8-1 所示。对于理想运放，该电路的输出电压与输入电压之间的

$$U_0 = -\frac{R_F}{R_1} U_i$$

关系为

为了减小输入级偏置电流引起的运算误差，在同相输入端应接入平衡电阻 $R_2 = R_1 // R_F$ 。

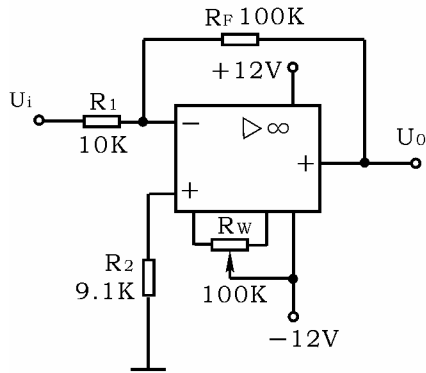


图 8-1 反相比例运算电路

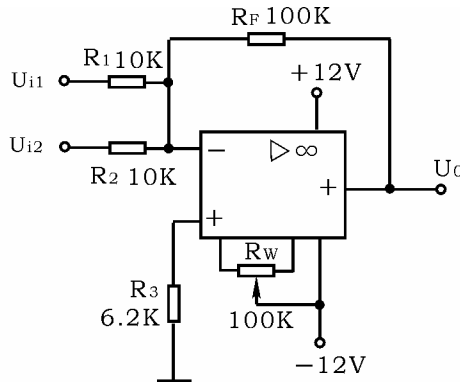


图 8-2 反相加法运算电路

2) 反相加法电路

电路如图 8-2 所示，输出电压与输入电压之间的关系为

$$U_0 = -\left(\frac{R_F}{R_1}U_{i1} + \frac{R_F}{R_2}U_{i2}\right)$$

$$R_3 = R_1 // R_2 // R_F$$

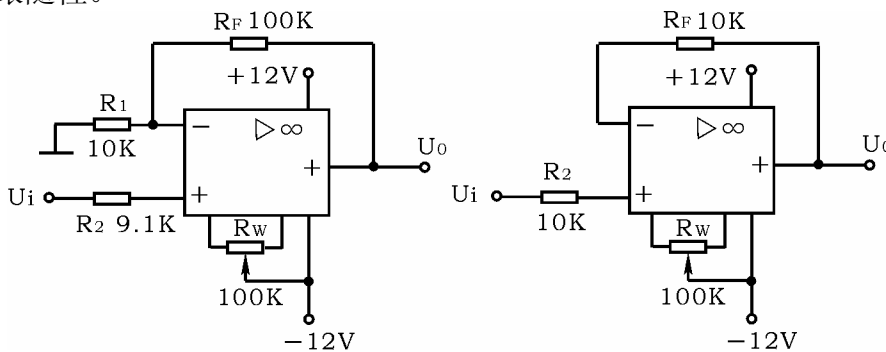
3) 同相比例运算电路

图 8-3(a) 是同相比例运算电路，它的输出电压与输入电压之间的关系为

$$U_0 = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right)U_i$$

$$R_2 = R_1 // R_F$$

当 $R_1 \rightarrow \infty$ 时， $U_0 = U_i$ ，即得到如图 8-3(b) 所示的电压跟随器。图中 $R_2 = R_F$ ，用以减小漂移和起保护作用。一般 R_F 取 $10K\Omega$ ， R_F 太小起不到保护作用，太大则影响跟随性。



(a) 同相比例运算电路

(b) 电压跟随器

图 8-3 同相比例运算电路

4) 差动放大电路（减法器）

对于图 8-4 所示的减法运算电路，当 $R_1=R_2$, $R_3=R_F$ 时，有如下关系式

$$U_o = \frac{R_F}{R_1}(U_{i2} - U_{i1})$$

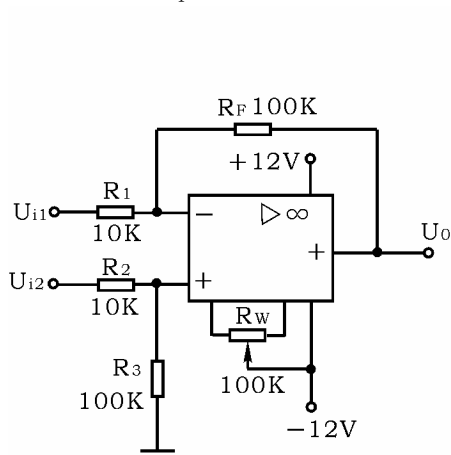
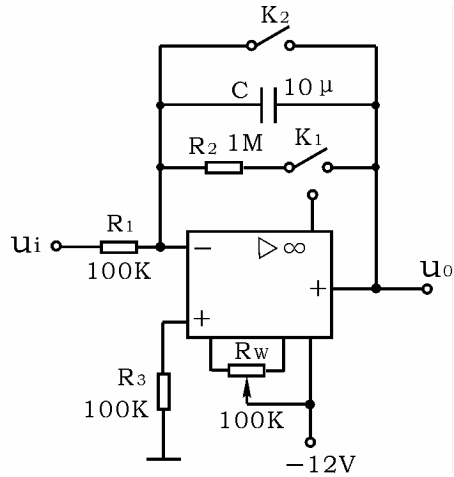


图 8-4 减法运算电路图



8-5 积分运算电路

5) 积分运算电路

反相积分电路如图 8-5 所示。在理想化条件下，输出电压 u_o 等于

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t u_i dt + u_c(o)$$

式中 $u_c(o)$ 是 $t=0$ 时刻电容 C 两端的电压值，即初始值。

如果 $u_i(t)$ 是幅值为 E 的阶跃电压，并设 $u_c(o)=0$ ，则

$$u_o(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t E dt = -\frac{E}{R_1 C} t$$

即输出电压 $u_o(t)$ 随时间增长而线性下降。显然 RC 的数值越大，达到给定的 U_o 值所需的时间就越长。积分输出电压所能达到的最大值受集成运放最大输出范围的限值。

在进行积分运算之前，首先应对运放调零。为了便于调节，将图中 K_1 闭合，即通过电阻 R_2 的负反馈作用帮助实现调零。但在完成调零后，应将 K_1 打开，以免因 R_2 的接入造成积分误差。 K_2 的设置一方面为积分电容放电提供通路，同时可实现积分电容初始电压 $u_c(o)=0$ ，另一方面，可控制积分起始点，即在加入信号 u_i 后，只要 K_2 一打开，电容就将被恒流充电，电路也就开始进行积分运算。

三、实验设备与器件

- 1、±12V 直流电源
- 2、函数信号发生器

3、交流毫伏表 4、直流电压表

5、集成运算放大器 $\mu A741 \times 1$

电阻器、电容器若干。

四、实验内容

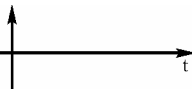
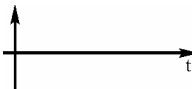
实验前要看清运放组件各管脚的位置；切忌正、负电源极性接反和输出端短路，否则将会损坏集成块。

1、反相比例运算电路

1) 按图 8-1 连接实验电路，接通 $\pm 12V$ 电源，输入端对地短路，进行调零和消振。

2) 输入 $f=100Hz$ ， $U_i=0.5V$ 的正弦交流信号，测量相应的 U_o ，并用示波器观察 u_o 和 u_i 的相位关系，记入表 8-1。

表 8-1 $U_i=0.5V$ ， $f=100Hz$

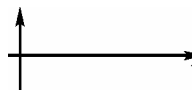
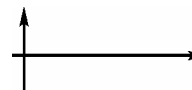
U_i (V)	U_o (V)	u_i 波形	u_o 波形	A_v	
				实测值	计算值
					

2、同相比例运算电路

1) 按图 8-3(a) 连接实验电路。实验步骤同内容 1，将结果记入表 8-2。

2) 将图 8-3(a) 中的 R_1 断开，得图 8-3(b) 电路重复内容 1)。

表 8-2 $U_i=0.5V$ $f=100Hz$

U_i (V)	U_o (V)	u_i 波形	u_o 波形	A_v	
				实测值	计算值
					

3、反相加法运算电路

1) 按图 8-2 连接实验电路。调零和消振。

2) 输入信号采用直流信号，图 8-6 所示电路为简易直流信号源，由实验者自行完成。实验时要注意选择合适的直流信号幅度以确保集成运放工作在线性区。用直流电压表测量输入电压 U_{i1} 、 U_{i2} 及输出电压 U_o ，记入表 8-3。

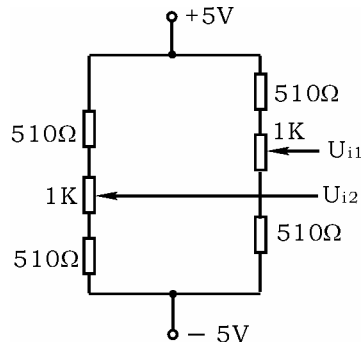


图 8-6 简易可调直流信号源

表 8-3

U_{i1} (V)					
U_{i2} (V)					
U_0 (V)					

4、减法运算电路

- 1) 按图 8-4 连接实验电路。调零和消振。
- 2) 采用直流输入信号，实验步骤同内容 3，记入表 8-4。

表 8-4

U_{i1} (V)					
U_{i2} (V)					
U_0 (V)					

5、积分运算电路

实验电路如图 8-5 所示。

- 1) 打开 K_2 ，闭合 K_1 ，对运放输出进行调零。
- 2) 调零完成后，再打开 K_1 ，闭合 K_2 ，使 $u_c(o) = 0$ 。
- 3) 预先调好直流输入电压 $U_i = 0.5V$ ，接入实验电路，再打开 K_2 ，然后用直流电压表测量输出电压 U_0 ，每隔 5 秒读一次 U_0 ，记入表 8-5，直到 U_0 不继续明显增大为止。

表 8-5

t (s)	0	5	10	15	20	25	30
U_0 (V)								

五、实验总结

- 1、整理实验数据，画出波形图（注意波形间的相位关系）。
- 2、将理论计算结果和实测数据相比较，分析产生误差的原因。
- 3、分析讨论实验中出现的现象和问题。

六、预习要求

1、复习集成运放线性应用部分内容，并根据实验电路参数计算各电路输出电压的理论值。

2、在反相加法器中，如 U_{i1} 和 U_{i2} 均采用直流信号，并选定 $U_{i2} = -1V$ ，当考虑到运算放大器的最大输出幅度 ($\pm 12V$) 时， $|U_{i1}|$ 的大小不应超过多少伏？

3、在积分电路中，如 $R_1 = 100K\Omega$ ， $C = 4.7\mu F$ ，求时间常数。

假设 $U_i = 0.5V$ ，问要使输出电压 U_o 达到 $5V$ ，需多长时间（设 $u_c(0) = 0$ ）？

4、为了不损坏集成块，实验中应注意什么问题？

实验九 集成运算放大器的基本应用（II）

— 有源滤波器 —

一、实验目的

1、熟悉用运放、电阻和电容组成有源低通滤波、高通滤波和带通、带阻滤波器。

2、学会测量有源滤波器的幅频特性。

二、实验原理

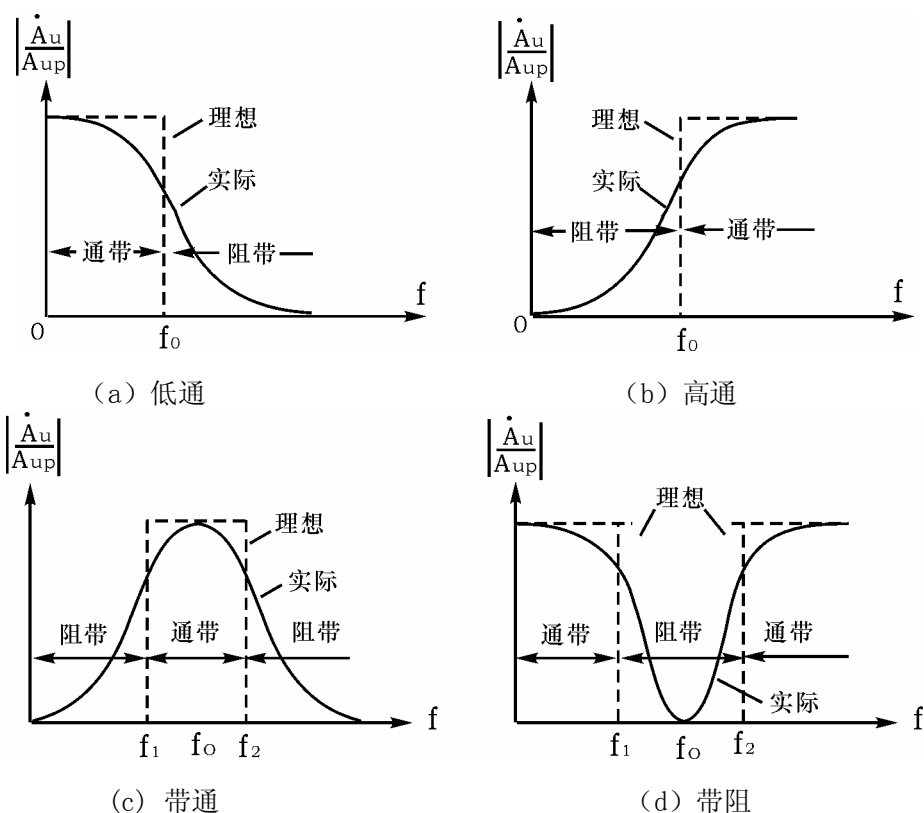


图 9-1 四种滤波电路的幅频特性示意图

由 RC 元件与运算放大器组成的滤波器称为 RC 有源滤波器，其功能是让一定频率范围内的信号通过，抑制或急剧衰减此频率范围以外的信号。可用在信息处理、数据传输、抑制干扰等方面，但因受运算放大器频带限制，这类滤波器主要用于低频范围。根据对频率范围的选择不同，可分为低通(LPF)、高通(HPF)、带通(BPF)与带阻(BEF)等四种滤波器，它们的幅频特性如图 9-1 所示。

具有理想幅频特性的滤波器是很难实现的，只能用实际的幅频特性去逼近理

想的。一般来说，滤波器的幅频特性越好，其相频特性越差，反之亦然。滤波器的阶数越高，幅频特性衰减的速率越快，但 RC 网络的节数越多，元件参数计算越繁琐，电路调试越困难。任何高阶滤波器均可以用较低的二阶 RC 有滤波器级联实现。

1、低通滤波器 (LPF)

低通滤波器是用来通过低频信号衰减或抑制高频信号。

如图 9-2 (a) 所示，为典型的二阶有源低通滤波器。它由两级 RC 滤波环节与同相比例运算电路组成，其中第一级电容 C 接至输出端，引入适量的正反馈，以改善幅频特性。

图 9-2 (b) 为二阶低通滤波器幅频特性曲线。

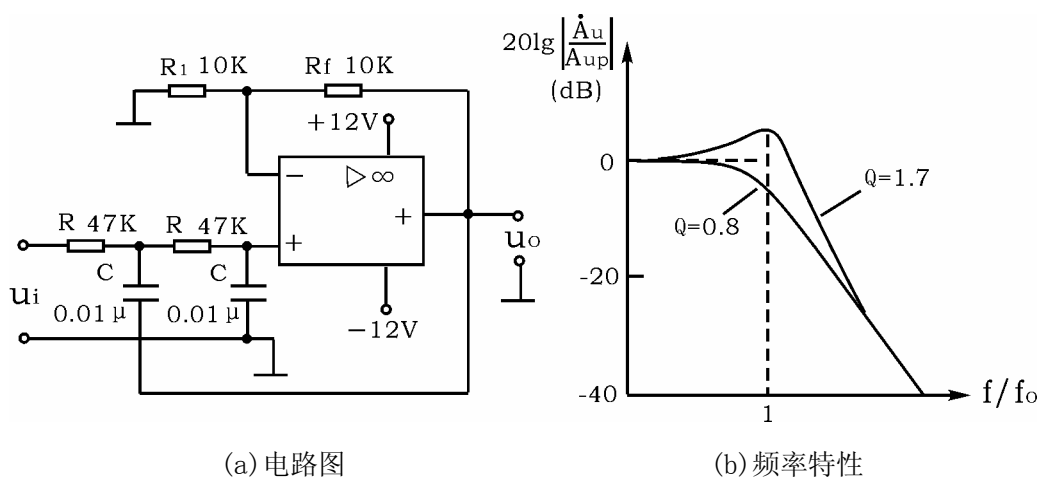


图 9-2 二阶低通滤波器

电路性能参数

$$A_{up} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad \text{二阶低通滤波器的通带增益}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{截止频率，它是二阶低通滤波器通带与阻带的界限频率。}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{up}} \quad \text{品质因数，它的大小影响低通滤波器在截止频率处幅频特性的形状。}$$

2、高通滤波器 (HPF)

与低通滤波器相反，高通滤波器用来通过高频信号，衰减或抑制低频信号。

只要将图 9-2 低通滤波电路中起滤波作用的电阻、电容互换，即可变成二

阶有源高通滤波器，如图 9-3(a) 所示。高通滤波器性能与低通滤波器相反，其频率响应和低通滤波器是“镜像”关系，仿照 LPH 分析方法，不难求得 HPF 的幅频特性。

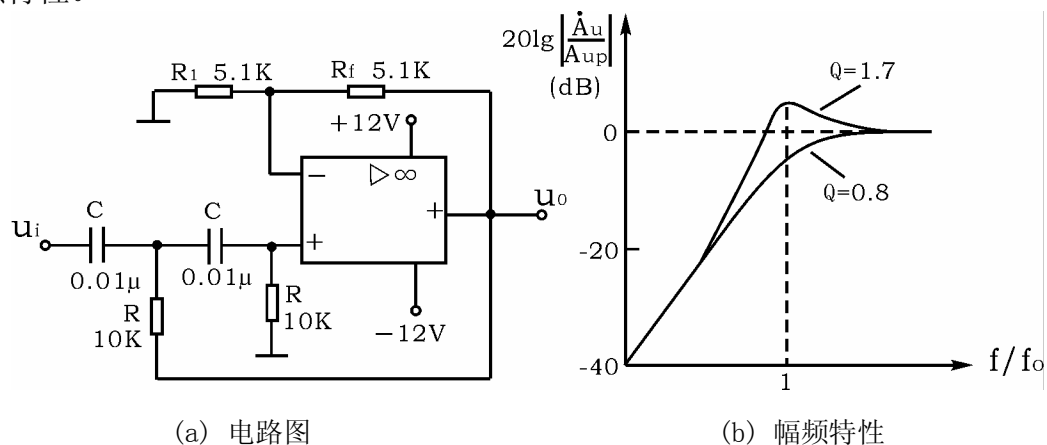


图 9-3 二阶高通滤波器

电路性能参数 A_{up} 、 f_0 、 Q 各量的函义同二阶低通滤波器。

图 9-3 (b) 为二阶高通滤波器的幅频特性曲线，可见，它与二阶低通滤波器的幅频特性曲线有“镜像”关系。

3、带通滤波器 (BPF)

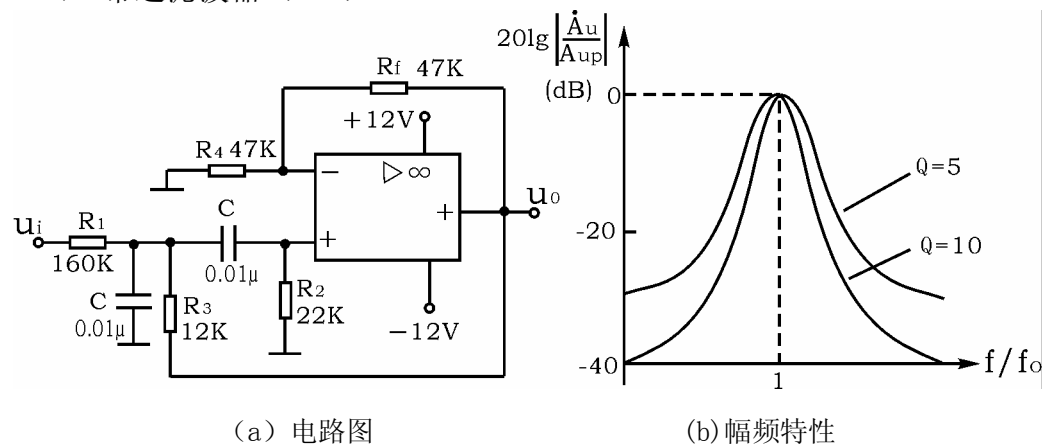


图 9-4 二阶带通滤波器

这种滤波器的作用是只允许在某一个通频带范围内的信号通过，而比通频带下限频率低和比上限频率高的信号均加以衰减或抑制。

典型的带通滤波器可以从二阶低通滤波器中将其中一级改成高通而成。如图 9-4 (a) 所示。

电路性能参数

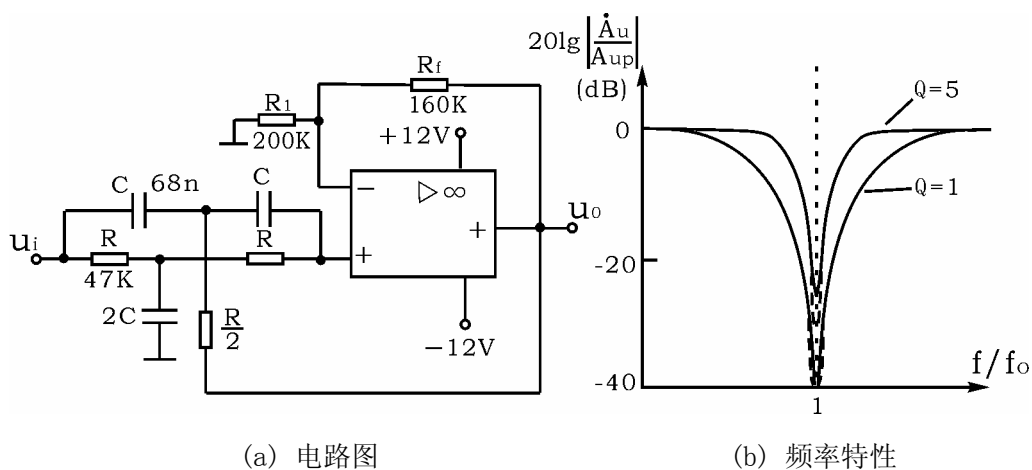
通带增益	$A_{up} = \frac{R_4 + R_f}{R_4 R_1 C B}$
中心频率	$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_2 C^2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right)}$
通带宽度	$B = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} - \frac{R_f}{R_3 R_4} \right)$
选择性	$Q = \frac{\omega_0}{B}$

此电路的优点是改变 R_f 和 R_4 的比例就可改变频宽而不影响中心频率。

4、带阻滤波器 (BEF)

如图 9-5 (a) 所示, 这种电路的性能和带通滤波器相反, 即在规定的频带内, 信号不能通过 (或受到很大衰减或抑制), 而在其余频率范围, 信号则能顺利通过。

在双 T 网络后加一级同相比例运算电路就构成了基本的二阶有源 BEF。



(a) 电路图

(b) 频率特性

图 9-5 二阶带阻滤波器

电路性能参数

通带增益	$A_{up} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$
中心频率	$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$
带阻宽度	$B = 2(2 - A_{up}) f_0$
选择性	$Q = \frac{1}{2(2 - A_{up})}$

三、实验设备与器件

- 1、 ±12V 直流电源
- 2、 函数信号发生器
- 3、 双踪示波器
- 4、 交流毫伏表
- 5、 频率计
- 6、 $\mu A741 \times 1$
电阻器、电容器若干。

四、实验内容

1、二阶低通滤波器

实验电路如图 9-2(a)

(1) 粗测：接通 ±12V 电源。 u_i 接函数信号发生器，令其输出为 $U_i=1V$ 的正弦波信号，在滤波器截止频率附近改变输入信号频率，用示波器或交流毫伏表观察输出电压幅度的变化是否具备低通特性，如不具备，应排除电路故障。

(2) 在输出波形不失真的条件下，选取适当幅度的正弦输入信号，在维持输入信号幅度不变的情况下，逐点改变输入信号频率。测量输出电压，记入表 9-1 中，描绘频率特性曲线。

表 9-1

f (Hz)	
U_0 (v)	

2、二阶高通滤波器

实验电路如图 9-3(a)

(1) 粗测：输入 $U_i=1V$ 正弦波信号，在滤波器截止频率附近改变输入信号频率，观察电路是否具备高通特性。

(2) 测绘高通滤波器的幅频特性曲线，记入表 9-2。

表 9-2

f (Hz)	
U_0 (v)	

3、带通滤波器

实验电路如图 9-4(a)，测量其频率特性。记入表 9-3。

- (1) 实测电路的中心频率 f_0
- (2) 以实测中心频率为中心，测绘电路的幅频特性

表 9-3

f (Hz)	
U ₀ (v)	

4、带阻滤波器

实验电路如图 9-5(a) 所示。

- (1) 实测电路的中心频率 f_0
- (2) 测绘电路的幅频特性，记入表 9-4。

表 9-4

f (Hz)	
U ₀ (v)	

五、实验总结

- 1、整理实验数据，画出各电路实测的幅频特性。
- 2、根据实验曲线，计算截止频率、中心频率，带宽及品质因数。
- 3、总结有源滤波电路的特性。

六、预习要求

- 1、复习教材有关滤波器内容
- 2、分析图 9-2，9-3，9-4，9-5 所示电路，写出它们的增益特性表达式
- 3、计算图 9-2，9-3 的截止频率，9-4，9-5 的中心频率
- 4、画出上述四种电路的幅频特性曲线

实验十 集成运算放大器的基本应用（III）

— 电压比较器 —

一、实验目的

- 1、掌握电压比较器的电路构成及特点
- 2、学会测试比较器的方法

二、实验原理

电压比较器是集成运放非线性应用电路，它将一个模拟量电压信号和一个参考电压相比较，在二者幅度相等的附近，输出电压将产生跃变，相应输出高电平或低电平。比较器可以组成非正弦波形变换电路及应用于模拟与数字信号转换等领域。

图 10-1 所示为一最简单的电压比较器， U_R 为参考电压，加在运放的同相输入端，输入电压 u_i 加在反相输入端。

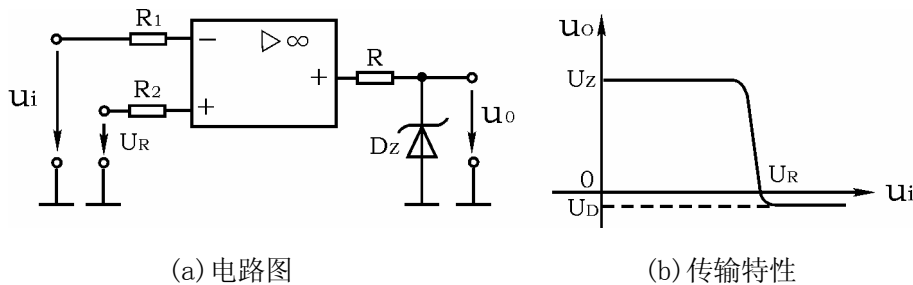


图 10-1 电压比较器

当 $u_i < U_R$ 时，运放输出高电平，稳压管 D_z 反向稳压工作。输出端电位被其箝位在稳压管的稳定电压 U_z ，即 $u_o = U_z$

当 $u_i > U_R$ 时，运放输出低电平， D_z 正向导通，输出电压等于稳压管的正向压降 U_D ，即 $u_o = -U_D$

因此，以 U_R 为界，当输入电压 u_i 变化时，输出端反映出两种状态。高电位和低电位。

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。图 11-1 (b) 为 (a) 图比较器的传输特性。

常用的电压比较器有过零比较器、具有滞回特性的过零比较器、双限比较器（又称窗口比较器）等。

1、过零比较器

电路如图 10-2 所示为加限幅电路的过零比较器， D_z 为限幅稳压管。信号从运放的反相输入端输入，参考电压为零，从同相端输入。当 $U_i > 0$ 时，输出 $U_o = -(U_z + U_D)$ ，当 $U_i < 0$ 时， $U_o = +(U_z + U_D)$ 。其电压传输特性如图 10-2 (b) 所示。

过零比较器结构简单，灵敏度高，但抗干扰能力差。

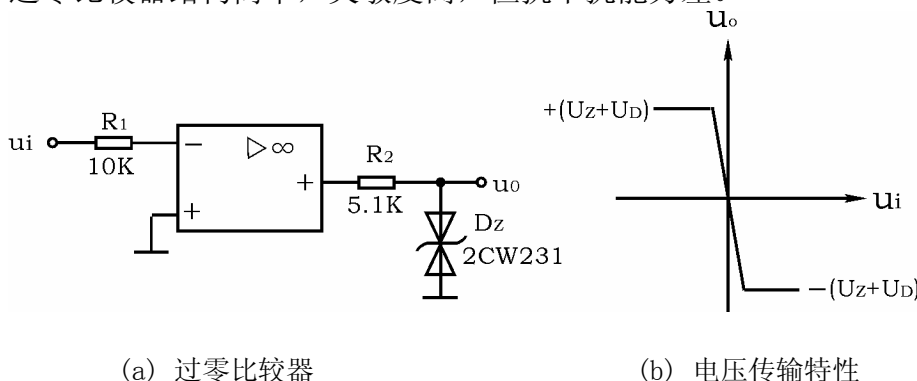


图 10-2 过零比较器

2、滞回比较器

图 10-3 为具有滞回特性的过零比较器

过零比较器在实际工作时，如果 u_i 恰好在过零值附近，则由于零点漂移的存在， u_o 将不断由一个极限值转换到另一个极限值，这在控制系统中，对执行机构将是很不利的。为此，就需要输出特性具有滞回现象。如图 10-3 所示，从输出端引一个电阻分压正反馈支路到同相输入端，若 u_o 改变状态， Σ 点也随

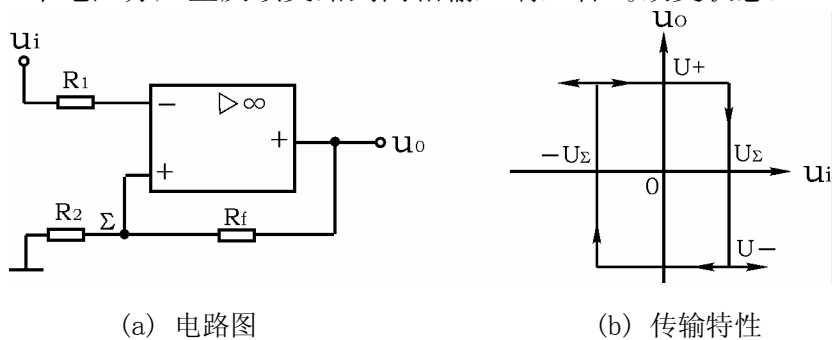


图 10-3 滞回比较器

着改变电位，使过零点离开原来位置。当 u_o 为正（记作 U_+ ）
$$U_{\Sigma} = \frac{R_2}{R_f + R_2} U_+$$
，则当 $u_i > U_{\Sigma}$ 后， u_o 即由正变负（记作 U_- ），此时 U_{Σ} 变为 $-U_{\Sigma}$ 。故只有当 u_i 下降到 $-U_{\Sigma}$ 以下，才能使 u_o 再度回升到 U_+ ，于是出现图 10-3 (b) 中所示的滞回特性。 $-U_{\Sigma}$ 与 U_{Σ} 的差别称为回差。改变 R_2 的数值可以改变回差的大小。

3、窗口（双限）比较器

简单的比较器仅能鉴别输入电压 u_i 比参考电压 U_R 高或低的情况，窗口比较电路是由两个简单比较器组成，如图 10-4 所示，它能指示出 u_i 值是否处于 U_R^+ 和 U_R^- 之间。如 $U_R^- < u_i < U_R^+$ ，窗口比较器的输出电压 U_0 等于运放的正饱和输出电压 ($+U_{Omax}$)，如果 $u_i < U_R^-$ 或 $u_i > U_R^+$ ，则输出电压 U_0 等于运放的负饱和输出电压 ($-U_{Omax}$)。

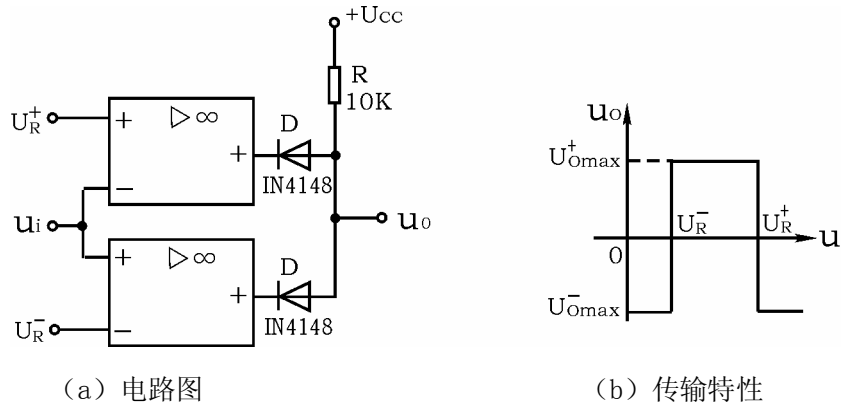


图 10-4 由两个简单比较器组成的窗口比较器

三、实验设备与器件

- | | |
|--------------------------|------------------------------|
| 1、 ±12V 直流电源 | 4、 直流电压表 |
| 2、 函数信号发生器 | 5、 交流毫伏表 |
| 3、 双踪示波器 | 6、 运算放大器 $\mu A741 \times 2$ |
| 7、 稳压管 2CW231 $\times 1$ | 8、 二极管 4148 $\times 2$ |
- 电阻器等

四、实验内容

1、 过零比较器

实验电路如图 10-2 所示

- (1) 接通 $\pm 12V$ 电源。
- (2) 测量 u_i 悬空时的 U_0 值。
- (3) u_i 输入 500Hz、幅值为 2V 的正弦信号，观察 $u_i \rightarrow u_0$ 波形并记录。
- (4) 改变 u_i 幅值，测量传输特性曲线。

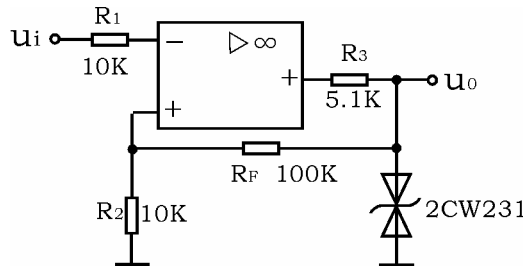


图 10-5 反相滞回比较器

2、反相滞回比较器

实验电路如图 10-5 所示

(1) 按图接线， u_i 接 +5V 可调直流电源，测出 u_o 由 $+U_{omcx} \rightarrow -U_{omcx}$ 时 u_i 的临界值。

(2) 同上，测出 u_o 由 $-U_{omcx} \rightarrow +U_{omcx}$ 时 u_i 的临界值。

(3) u_i 接 500Hz，峰值为 2V 的正弦信号，观察并记录 $u_i \rightarrow u_o$ 波形。

(4) 将分压支路 100K 电阻改为 200K，重复上述实验，测定传输特性。

3、同相滞回比较器

实验线路如图 10-6 所示

(1) 参照 2，自拟实验步骤及方法

(2) 将结果与 2 进行比较

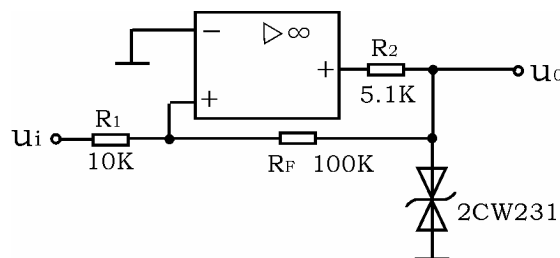


图 10-6 同相滞回比较器

4、窗口比较器

参照图 10-4 自拟实验步骤和方法测定其传输特性。

五、实验总结

1、整理实验数据，绘制各类比较器的传输特性曲线

2、总结几种比较器的特点，阐明它们的应用。

六、预习要求

- 1、复习教材有关比较器的内容
- 2、画出各类比较器的传输特性曲线。
- 3、若要将图 10-4 窗口比较器的电压传输曲线高、低电平对调，应如何改动比较器电路。

实验十一 集成运算放大器的基本应用 (IV)

— 波形发生器 —

一、实验目的

- 1、学习用集成运放构成正弦波、方波和三角波发生器。
- 2、学习波形发生器的调整和主要性能指标的测试方法。

二、实验原理

由集成运放构成的正弦波、方波和三角波发生器有多种形式,本实验选用最常用的,线路比较简单的几种电路加以分析。

1、RC 桥式正弦波振荡器 (文氏电桥振荡器)

图 11-1 为 RC 桥式正弦波振荡器。其中 RC 串、并联电路构成正反馈支路,同时兼作选频网络, R_1 、 R_2 、 R_w 及二极管等元件构成负反馈和稳幅环节。调节电位器 R_w , 可以改变负反馈深度, 以满足振荡的振幅条件和改善波形。利用两个反向并联二极管 D_1 、 D_2 正向电阻的非线性特性来实现稳幅。 D_1 、 D_2 采用硅管 (温度稳定性好), 且要求特性匹配, 才能保证输出波形正、负半周对称。 R_3 的接入是为了削弱二极管非线性的影响, 以改善波形失真。

电路的振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

起振的幅值条件

$$\frac{R_f}{R_1} \geq 2$$

式中 $R_f = R_w + R_2 + (R_3 // r_D)$, r_D — 二极管正向导通电阻。

调整反馈电阻 R_f (调 R_w), 使电路起振, 且波形失真最小。如不能起振, 则说明负反馈太强, 应适当加大 R_f 。如波形失真严重, 则应适当减小 R_f 。

改变选频网络的参数 C 或 R, 即可调节振荡频率。一般采用改变电容 C 作频率量程切换, 而调节 R 作量程内的频率细调。

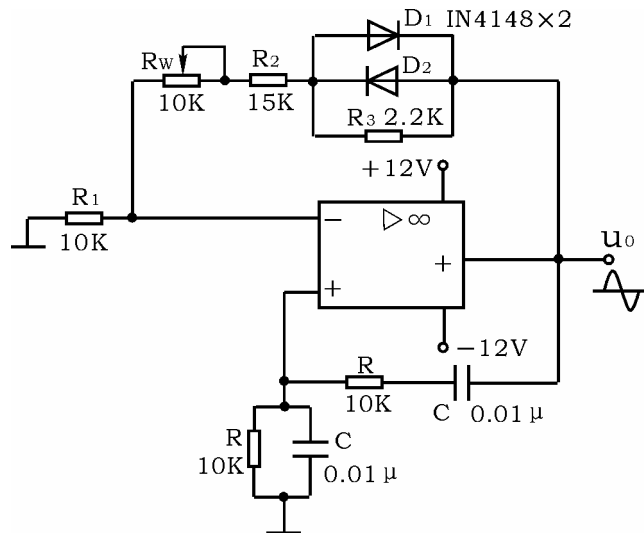


图 11-1 RC 桥式正弦波振荡器

2、方波发生器

由集成运放构成的方波发生器和三角波发生器，一般均包括比较器和 RC 积分器两大部分。图 11-2 所示为由滞回比较器及简单 RC 积分电路组成的方波—三角波发生器。它的特点是线路简单，但三角波的线性度较差。主要用于产生方波，或对三角波要求不高的场合。

$$f_o = \frac{1}{2R_f C_f \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)} \quad \text{电路振荡频率}$$

$$\text{式中 } R_1 = R_1' + R_w' \quad R_2 = R_2' + R_w''$$

$$\text{方波输出幅值} \quad U_{om} = \pm U_z$$

$$U_{cm} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_z \quad \text{三角波输出幅值}$$

调节电位器 R_w (即改变 R_2 / R_1)，可以改变振荡频率，但三角波的幅值也随之变化。如要互不影响，则可通过改变 R_f (或 C_f) 来实现振荡频率的调节。

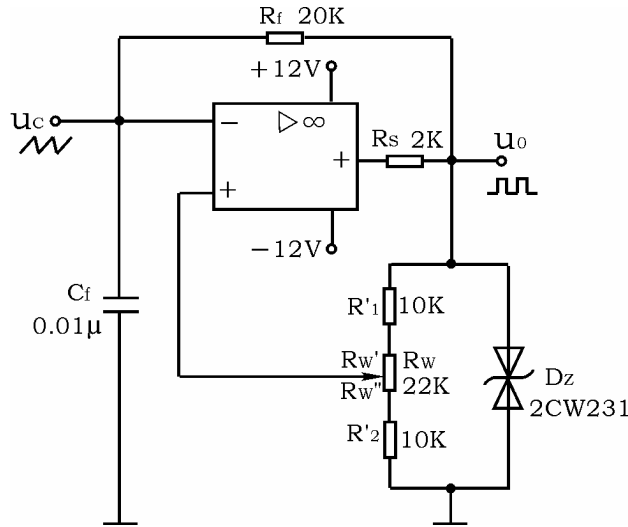


图 11-2 方波发生器

3、三角波和方波发生器

如把滞回比较器和积分器首尾相接形成正反馈闭环系统，如图 11-3 所示，则比较器 A_1 输出的方波经积分器 A_2 积分可得到三角波，三角波又触发比较器自动翻转形成方波，这样即可构成三角波、方波发生器。图 11-4 为方波、三角波发生器输出波形图。由于采用运放组成的积分电路，因此可实现恒流充电，使三角波线性大大改善。

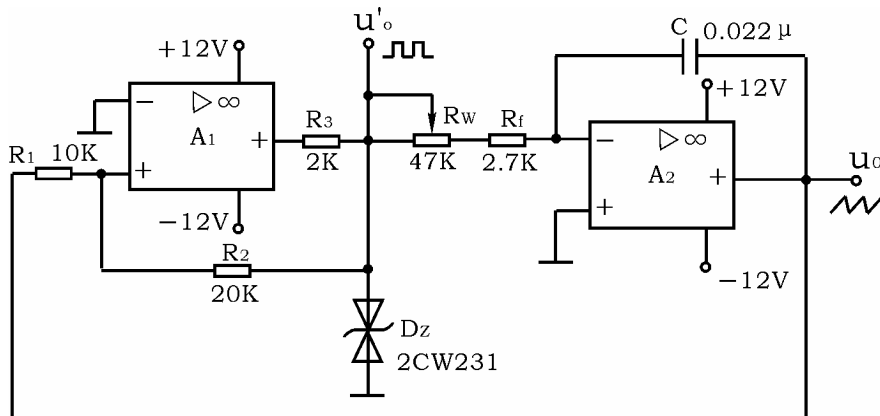


图 11-3 三角波、方波发生器

电路振荡频率 $f_0 = \frac{R_2}{4R_1(R_f + R_w)C_f}$

方波幅值 $U'_{om} = \pm U_z$

三角波幅值 $U_{om} = \frac{R_1}{R_2} U_z$

调节 R_w 可以改变振荡频率，改变比值 $\frac{R_1}{R_2}$ 可调节三角波的幅值。

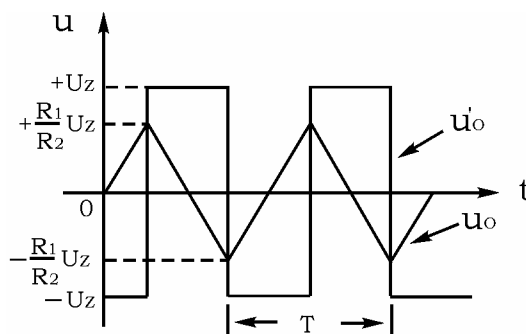


图 11-4 方波、三角波发生器输出波形图

三、实验设备与器件

- | | |
|-------------------------------|-------------------------|
| 1、±12V 直流电源 | 2、双踪示波器 |
| 3、交流毫伏表 | 4、频率计 |
| 5、集成运算放大器 $\mu A741 \times 2$ | 6、二极管 IN4148 $\times 2$ |
| 7、稳压管 2CW231 $\times 1$ | 电阻器、电容器若干。 |

四、实验内容

1、RC 桥式正弦波振荡器

按图 11-1 连接实验电路。

1) 接通 ±12V 电源，调节电位器 R_w ，使输出波形从无到有，从正弦波到出现失真。描绘 u_o 的波形，记下临界起振、正弦波输出及失真情况下的 R_w 值，分析负反馈强弱对起振条件及输出波形的影响。

2) 调节电位器 R_w ，使输出电压 u_o 幅值最大且不失真，用交流毫伏表分别测量输出电压 U_o 、反馈电压 U_+ 和 U_- ，分析研究振荡的幅值条件。

3) 用示波器或频率计测量振荡频率 f_o ，然后在选频网络的两个电阻 R 上并联同一阻值电阻，观察记录振荡频率的变化情况，并与理论值进行比较。

4) 断开二极管 D_1 、 D_2 ，重复 2) 的内容，将测试结果与 2) 进行比较，分析 D_1 、 D_2 的稳幅作用。

*5) RC 串并联网路幅频特性观察

将 RC 串并联网路与运放断开，由函数信号发生器注入 3V 左右正弦信号，并用双踪示波器同时观察 RC 串并联网路输入、输出波形。保持输入幅值 (3V)

不变，从低到高改变频率，当信号源达某一频率时，RC 串并联网络输出将达最大值（约 1V），且输入、输出同相位。此时的信号源频率

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

2、方波发生器

按图 11-2 连接实验电路。

1) 将电位器 R_w 调至中心位置，用双踪示波器观察并描绘方波 u_0 及三角波 u_c 的波形（注意对应关系），测量其幅值及频率，记录之。

2) 改变 R_w 动点的位置，观察 u_0 、 u_c 幅值及频率变化情况。把动点调至最上端和最下端，测出频率范围，记录之。

3) 将 R_w 恢复至中心位置，将一只稳压管短接，观察 u_0 波形，分析 D_z 的限幅作用。

3、三角波和方波发生器

按图 11-3 连接实验电路。

1) 将电位器 R_w 调至合适位置，用双踪示波器观察并描绘三角波输出 u_0 及方波输出 u_0' ，测其幅值、频率及 R_w 值，记录之。

2) 改变 R_w 的位置，观察对 u_0 、 u_0' 幅值及频率的影响。

3) 改变 R_1 (或 R_2)，观察对 u_0 、 u_0' 幅值及频率的影响。

五、实验总结

1、正弦波发生器

1) 列表整理实验数据，画出波形，把实测频率与理论值进行比较

2) 根据实验分析 RC 振荡器的振幅条件

3) 讨论二极管 D_1 、 D_2 的稳幅作用。

2、方波发生器

1) 列表整理实验数据，在同一座标纸上，按比例画出方波和三角波的波形图（标出时间和电压幅值）。

2) 分析 R_w 变化时，对 u_0 波形的幅值及频率的影响。

3) 讨论 D_z 的限幅作用。

3、三角波和方波发生器

1) 整理实验数据，把实测频率与理论值进行比较。

2) 在同一坐标纸上，按比例画出三角波及方波的波形，并标明时间和电压

幅值。

- 3) 分析电路参数变化 (R_1 , R_2 和 R_w) 对输出波形频率及幅值的影响。

六、预习要求

- 1、 复习有关 RC 正弦波振荡器、三角波及方波发生器的工作原理，并估算图 11-1、11-2、11-3 电路的振荡频率。

- 2、 设计实验表格

- 3、 为什么在 RC 正弦波振荡电路中要引入负反馈支路？为什么要增加二极管 D_1 和 D_2 ？它们是怎样稳幅的？

- 4、 电路参数变化对图 11-2、11-3 产生的方波和三角波频率及电压幅值有什么影响？（或者：怎样改变图 11-2、11-3 电路中方波及三角波的频率及幅值？）

- 5、 在波形发生器各电路中，“相位补偿”和“调零”是否需要？为什么？

- 6、 怎样测量非正弦波电压的幅值？

实验十二 RC 正弦波振荡器

一、实验目的

- 1、进一步学习 RC 正弦波振荡器的组成及其振荡条件
- 2、学会测量、调试振荡器

二、实验原理

从结构上看,正弦波振荡器是没有输入信号的,带选频网络的正反馈放大器。若用 R、C 元件组成选频网络,就称为 RC 振荡器,一般用来产生 1Hz~1MHz 的低频信号。

1、RC 移相振荡器

电路型式如图 12-1 所示,选择 $R \gg R_i$ 。

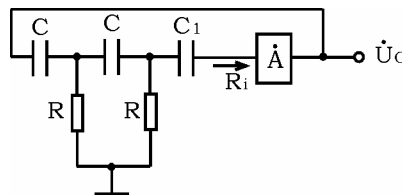


图 12-1 RC 移相振荡器原理图

振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}}$

起振条件 放大器 A 的电压放大倍数 $|\dot{A}| > 29$

电路特点 简便,但选频作用差,振幅不稳,频率调节不便,一般用于频率固定且稳定性要求不高的场合。

频率范围 几赫~数十千赫。

2、RC 串并网络(文氏桥)振荡器

电路型式如图 12-2 所示。

振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

起振条件 $|\dot{A}| > 3$

电路特点 可方便地连续改变振荡频率,便于加负反馈稳幅,容易得到良好的振荡波形。

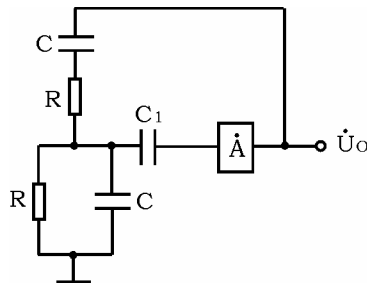


图 12-2 RC 串并网络振荡器原理图

3、双 T 选频网络振荡器

电路型式如图 12-3 所示。

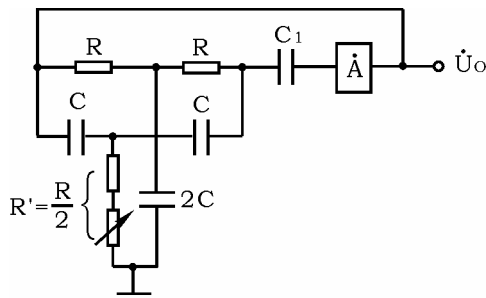


图 12-3 双 T 选频网络振荡器原理图

振荡频率 $f_0 = \frac{1}{5RC}$

起振条件 $R' < \frac{R}{2} \quad |\dot{A}\dot{F}| > 1$

电路特点 选频特性好，调频困难，适于产生单一频率的振荡。

注：本实验采用两级共射极分立元件放大器组成 RC 正弦波振荡器。

三、实验设备与器件

- | | |
|-------------|--------------------|
| 1、+12V 直流电源 | 2、函数信号发生器 |
| 3、双踪示波器 | 4、频率计 |
| 5、直流电压表 | 6、3DG12×2 或 9013×2 |
- 电阻、电容、电位器等

四、实验内容

1、RC 串并联选频网络振荡器

(1) 按图 12-4 组接线路

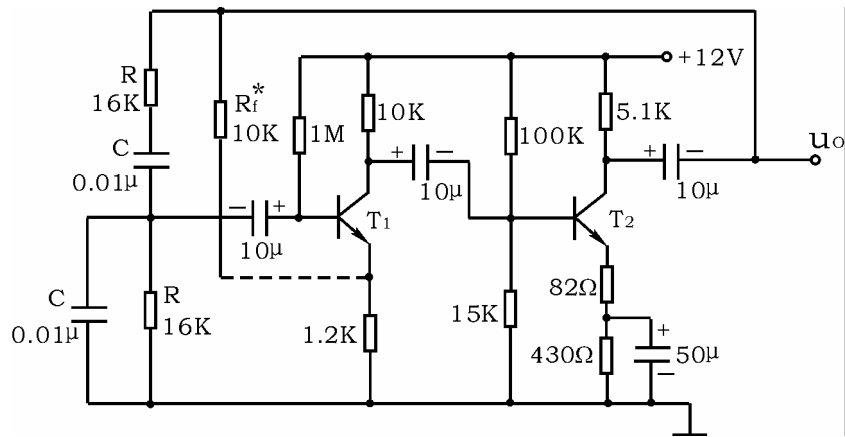


图 12—4 RC 串并联选频网络振荡器

- (2) 断开 RC 串并联网路，测量放大器静态工作及电压放大倍数。
- (3) 接通 RC 串并联网路，并使电路起振，用示波器观测输出电压 u_o 波形，调节 R_f 使获得满意的正弦信号，记录波形及其参数。
- (4) 测量振荡频率，并与计算值进行比较。
- (5) 改变 R 或 C 值，观察振荡频率变化情况。
- (6) RC 串并联网路幅频特性的观察

将 RC 串并联网路与放大器断开，用函数信号发生器的正弦信号注入 RC 串并联网路，保持输入信号的幅度不变（约 3V），频率由低到高变化，RC 串并联网路输出幅值将随之变化，当信号源达某一频率时，RC 串并联网路的输出将达最大值（约 1V 左右）。且输入、输出同相位，此时信号源频率为

$$f = f_o = \frac{1}{2\pi RC}$$

2、双 T 选频网络振荡器

- (1) 按图 12—5 组接线路
- (2) 断开双 T 网络，调试 T_1 管静态工作点，使 U_{C1} 为 6~7V。
- (3) 接入双 T 网络，用示波器观察输出波形。若不起振，调节 R_{W1} ，使电路起振。
- (4) 测量电路振荡频率，并与计算值比较。

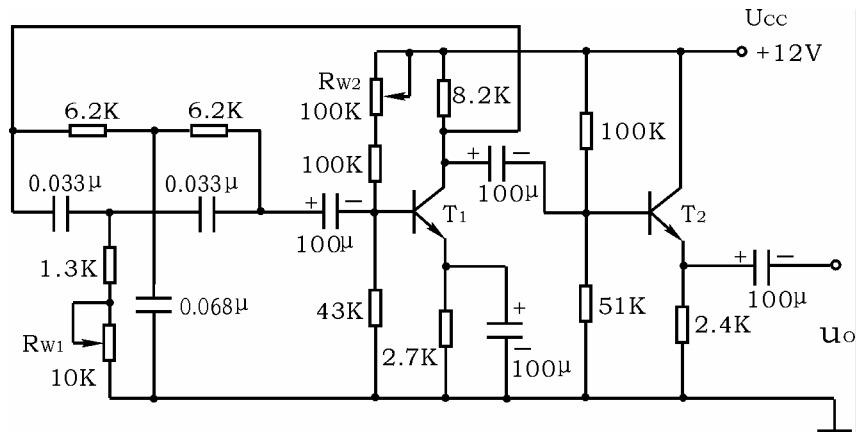


图 12-5 双 T 网络 RC 正弦波振荡器

* 3、RC 移相式振荡器的组装与调试

- (1) 按图 12-6 组接线路
- (2) 断开 RC 移相电路，调整放大器的静态工作点，测量放大器电压放大倍数。
- (3) 接通 RC 移相电路，调节 R_{b2} 使电路起振，并使输出波形幅度最大，用示波器观测输出电压 u_o 波形，同时用频率计和示波器测量振荡频率，并与理论值比较。

* 参数自选，时间不够可不作。

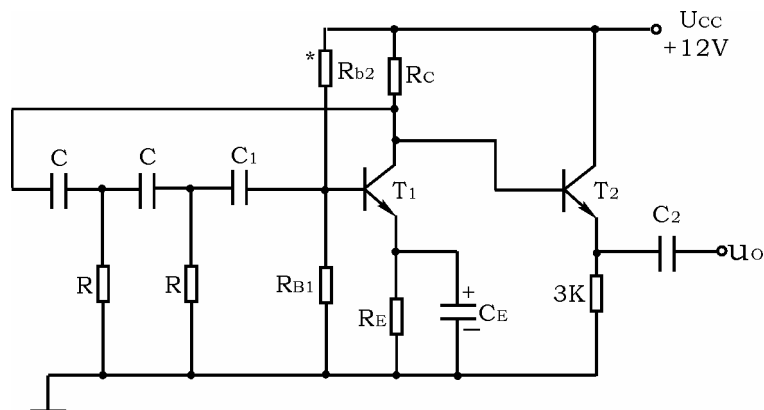


图 12-6 RC 移相式振荡器

五、实验总结

- 1、由给定电路参数计算振荡频率，并与实测值比较，分析误差产生的原因。
- 2、总结三类 RC 振荡器的特点。

六、预习要求

- 1、复习教材有关三种类型 RC 振荡器的结构与工作原理。
- 2、计算三种实验电路的振荡频率。
- 3、如何用示波器来测量振荡电路的振荡频率。

实验十三 LC 正弦波振荡器

一、实验目的

- 1、掌握变压器反馈式 LC 正弦波振荡器的调整和测试方法
- 2、研究电路参数对 LC 振荡器起振条件及输出波形的影响

二、实验原理

LC 正弦波振荡器是用 L、C 元件组成选频网络的振荡器，一般用来产生 1MHz 以上的高频正弦信号。根据 LC 调谐回路的不同连接方式，LC 正弦波振荡器又可分为变压器反馈式（或称互感耦合式）、电感三点式和电容三点式三种。图 13-1 为变压器反馈式 LC 正弦波振荡器的实验电路。其中晶体三极管 T_1 组成共射放大电路，变压器 T_r 的原绕组 L_1 （振荡线圈）与电容 C 组成调谐回路，它既做为放大器的负载，又起选频作用，副绕组 L_2 为反馈线圈， L_3 为输出线圈。

该电路是靠变压器原、副绕组同名端的正确连接（如图中所示），来满足自激振荡的相位条件，即满足正反馈条件。在实际调试中可以通过把振荡线圈 L_1 或反馈线圈 L_2 的首、末端对调，来改变反馈的极性。而振幅条件的满足，一是靠合理选择电路参数，使放大器建立合适的静态工作点，其次是改变线圈 L_2 的匝数，或它与 L_1 之间的耦合程度，以得到足够强的反馈量。稳幅作用是利用晶体管的非线性来实现的。由于 LC 并联谐振回路具有良好的选频作用，因此输出电压波形一般失真不大。

振荡器的振荡频率由谐振回路的电感和电容决定

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

式中 L 为并联谐振回路的等效电感（即考虑其它绕组的影响）。

振荡器的输出端增加一级射极跟随器，用以提高电路的带负载能力。

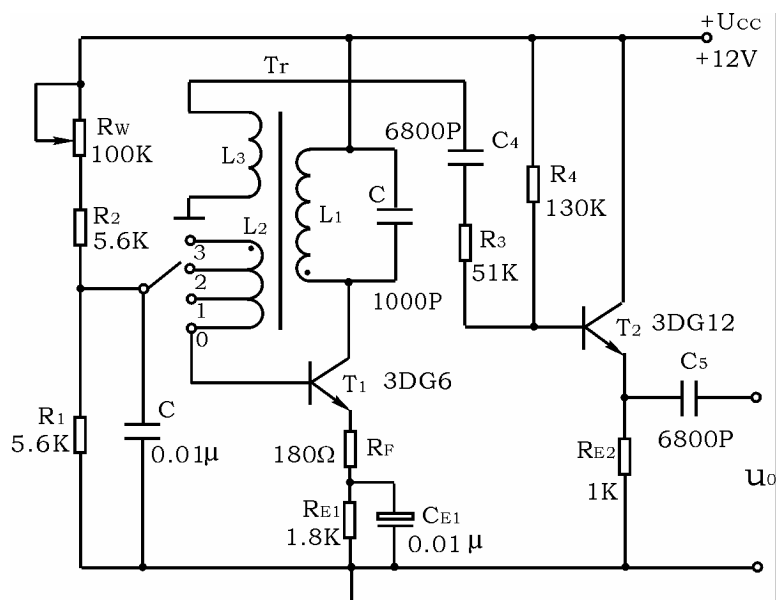


图 13-1 LC 正弦波振荡器实验电路

三、实验设备与器件

- | | |
|-------------------------|---------|
| 1、+12V 直流电源 | 2、双踪示波器 |
| 3、交流毫伏表 | 4、直流电压表 |
| 5、频率计 | 6、振荡线圈 |
| 7、晶体三极管 3DG6×1 (9011×1) | |
| 3DG12×1 (9013×1) | |

电阻器、电容器若干。

四、实验内容

按图 13-1 连接实验电路。电位器 R_w 置最大位置，振荡电路的输出端接示波器。

1、静态工作点的调整

1) 接通 $U_{cc} = +12$ 电源，调节电位器 R_w ，使输出端得到不失真的正弦波形，如不起振，可改变 L_2 的首末端位置，使之起振。

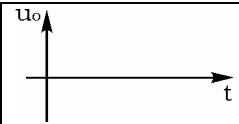
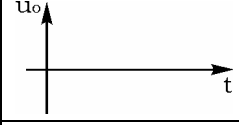
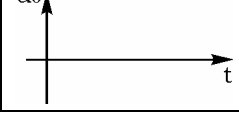
测量两管的静态工作点及正弦波的有效值 U_0 ，记入表 13-1。

2) 把 R_w 调小，观察输出波形的变化。测量有关数据，记入表 13-1。

3) 调大 R_w ，使振荡波形刚刚消失，测量有关数据，记入表 13-1。

表 13-1

	U_B (V)	U_E (V)	U_C (V)	I_C (mA)	U_0 (V)	u_0 波形

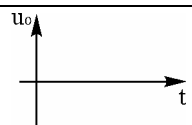
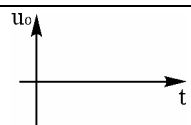
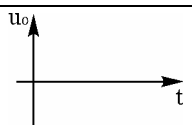
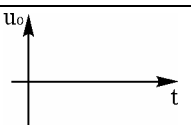
R _w 居中	T ₁					
	T ₂					
R _w 小	T ₁					
	T ₂					
R _w 大	T ₁					
	T ₂					

根据以上三组数据，分析静态工作点对电路起振、输出波形幅度和失真的影响。

2、观察反馈量大小对输出波形的影响

置反馈线圈 L₂ 于位置 “0”（无反馈）、“1”（反馈量不足）、“2”（反馈量合适）、“3”（反馈量过强）时测量相应的输出电压波形，记入表 13-2。

表 13-2

L ₂ 位置	“0”	“1”	“2”	“3”
u _o 波形				

3、验证相位条件

改变线圈 L₂ 的首、末端位置，观察停振现象；

恢复 L₂ 的正反馈接法，改变 L₁ 的首末端位置，观察停振现象。

4、测量振荡频率

调节 R_w 使电路正常起振，同时用示波器和频率计测量以下两种情况下的振荡频率 f₀，记入表 13-3。

谐振回路电容 1) C=1000Pf。

2) C=100Pf 。

表 13-3

C (pf)	1000	100
f (KHz)		

5、观察谐振回路 Q 值对电路工作的影响

谐振回路两端并入 $R=5.1\text{K}\Omega$ 的电阻，观察 R 并入前后振荡波形的变化情况。

五、实验总结

1、整理实验数据，并分析讨论：

- 1) LC 正弦波振荡器的相位条件和幅值条件。
- 2) 电路参数对 LC 振荡器起振条件及输出波形的影响。

2、讨论实验中发现的问题及解决办法。

六、预习要求

1、复习教材中有关 LC 振荡器内容。

2、LC 振荡器是怎样进行稳幅的？在不影响起振的条件下，晶体管的集电极电流是大一些好，还是小一些好？

1、为什么可以用测量停振和起振两种情况下晶体管的 U_{BE} 变化，来判断振荡器是否起振？