

模拟电子技术实验指导书

(电子信息类)

电子信息学院实验中心汇编

目 录

实 验 名 称	页 码
实验一 单管放大电路	3
实验二 运算放大器应用电路及测试	9
实验三 多级放大器与负反馈放大器	17
实验四 前置放大器的设计与应用	23
实验五 信号产生与转换电路设计	29
实验六 集成直流稳压电源的设计	38
实验七 音响放大器综合设计实验	44

实验一 单管放大电路（8 学时）

一、实验目的

- 1 了解晶体管及相关器件的基本特性；
- 2 熟悉常用仪器的使用方法；
- 3 掌握放大电路的主要指标和测试方法；
- 4 掌握放大电路指标与电路参数的相互关系。

二、实验仪器及器件

设备条件：万用表，示波器，函数发生器，直流稳压电源

实验器材

表 2.1

器材名称	晶体管	电容	电位器	电阻					导线
型号/参数	9013	10uF	10K	100	2K	5.1K	10K	100K	
数量	1	3	1	2	2	1	1	1	若干

三、预习要求

- 1 什么是静态工作点，如何测量静态工作点，如何调节静态工作点；
- 2 电路放大倍数的定义和测量方法；
- 3 输入电阻、输出电阻的测量方法；
- 4 最大不失真输出电压的测量方法；
- 5 实验电路器件布局。

四、实验原理

基本放大电路有共射极、共基极、共集电极三种构成方式，本次实验采用共射极放大电路,如图 1.1 所示。三极管是一个电流控制电流源器件（即 $I_C = \beta I_B$ ），通过合理设置静态工作点，实现对交流电压信号的放大。放大电路的主要参数有电压放大倍数 A_v 、输入电阻 r_i 、输出电阻 r_o 。

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta R'_L}{r_{be}} \dots\dots\dots(1)$$

$$r_i = r_{be} \parallel R_b \dots\dots\dots(2)$$

$$r_o = R_C \dots\dots\dots(3)$$

式（1）中： $R'_L = R_C \parallel R_L$ ， $R_b = R_2 + (R_1 // R_{w1})$ ， R_C 为集电极电阻， R_L 为负载电阻。

$$r_{be} = 300 + (1 + \beta) \frac{26}{I_E} \dots\dots\dots(4)$$

由式 (1) (2) (4) 可以看出: $I_B \uparrow \rightarrow I_E \uparrow \rightarrow r_{be} \downarrow \rightarrow r_i \downarrow \rightarrow A_v \uparrow$

由式 (1) (3) 可以看出: $R_C \uparrow \rightarrow r_o \uparrow \rightarrow A_v \uparrow$

在负载开路($R_L = \infty$)时: $R'_L = R_C = r_o$, 忽略偏置电路对输入电流的影响 $r_i = r_{be}$ 式

(1) 可以写成: $A_v = \frac{-\beta r_o}{r_i}$

上式表明电路放大倍数 A_v 与输出电阻 r_o 成正比, 与输入电阻 r_i 成反比。

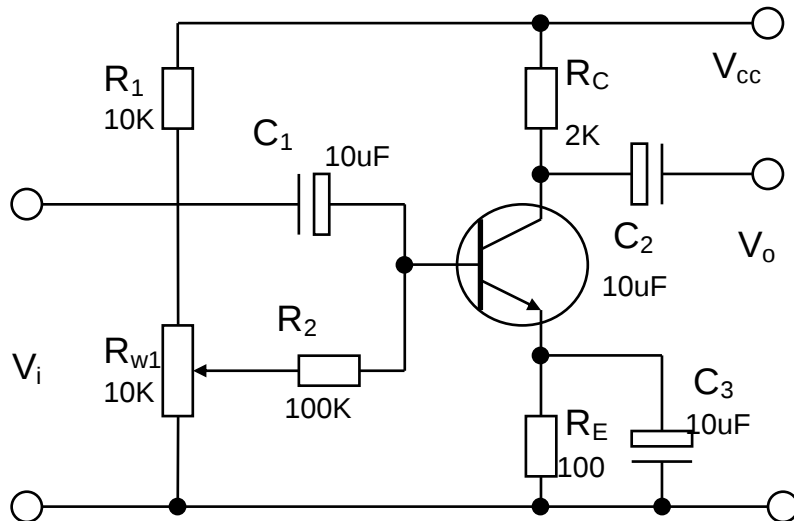


图 1.1 单管放大器共射极电路

五、实验内容

5.1 静态工作点的设置

1 什么是静态工作点

静态工作点是指在电路输入信号为零时, 电路中各支路电流和各节点的电压值。通常直流负载线与交流负载线的交点 Q 所对应的参数 I_{BQ} 、 I_{CQ} 、 V_{CEQ} 是主要观测对象, 如图 1.2 所示, 在电路调试过程中, 电路参数确定以后, 对工作点起决定作用的是 I_B , 测量比较方便的是 V_{CE} , 通过调节 R_{W1} 改变电流 I_B , 通过测量 V_{CE} 判断工作点是否合适。

2 静态工作点的设置原则

在有负载的情况下, 输入信号的变化使工作点沿交流负载线变化, 从图 1.2 中 V_{CE} 的变化规律可以看出: 在不考虑三极管的饱和压降时, V_{CE} 向减小方向的变化幅度为 V_{CEQ} , 向增大方向的变化幅度为 $I_{CQ} \times R'_L$, 要获得最大的不失真输出幅度则:

$$V_{CEQ} = I_{CQ} \times R'_L$$

由于 V_{CEQ} 和 I_{CQ} 满足直流负载线方程 $V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ} \times R_C$ 代入上式得:

$$V_{CEQ} = V_{CC} \times R_L / (R_C + 2R_L)$$

上式表明: 当 $R_L = R_C$ 时: $V_{CEQ} = V_{CC}/3$ 是获得电压最大不失真输出幅度。

当无负载时 ($R_L = \infty$): $V_{CEQ} = V_{CC}/2$ 是获得电压最大不失真输出幅度。

在电压输出幅度满足不失真的要求的条件下, 减小 I_{CQ} 可以适当提高输入电阻, 电

压放大倍数随之减小，反之，增大 I_{CQ} 可以适当增大电压放大倍数，输入电阻随之减小。

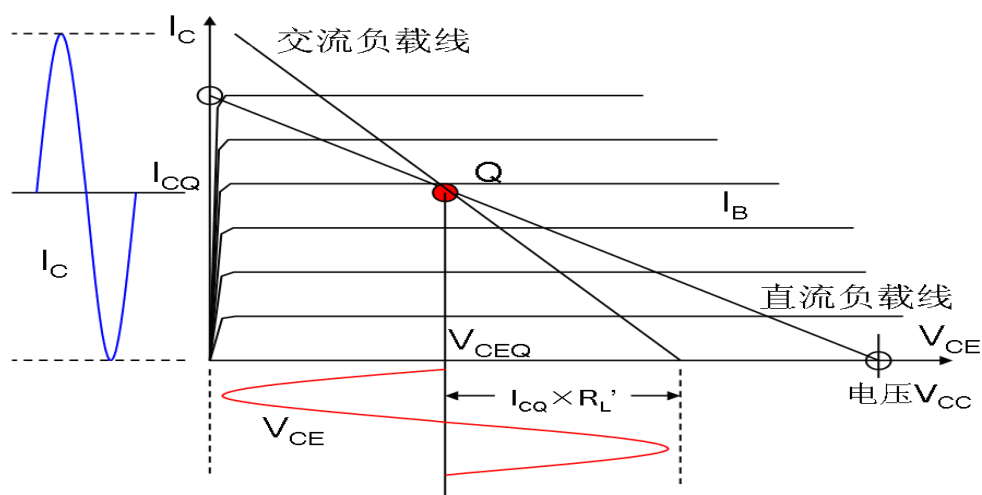


图 1.2 静态工作点示意图

3 静态工作点的测量

用万用表可以测量直流电压，用示波器同样可以测量直流电压。万用表，有效位数多，测量精度高，示波器可以同时测量直流电压和交流电压，比万用表方便，能够满足测量精度要求。测量方法是：

- (1) 将示波器的输入端短路，调整垂直旋钮，将扫描轨迹设置在合适的位置，作为零电压线；
- (2) 将示波器探头接入被测点（**注意**地线必需先连接好），记录扫描轨迹的偏移距离，读取示波器的垂直灵敏度；
- (3) 计算被测电压，比如：示波器的垂直灵敏度为每格 1 伏，垂直偏转为 3 格则：
直流电压 = 垂直灵敏度 × 偏转格数 = 3 伏。

工作点调试和测量过程

- (1) 按图 1.3 所示连接电路。
- (2) 调节直流电源输出 12 伏电压，关闭电源输出开关。
- (3) 连接实验电路到直流电源，打开电源输出开关。
- (4) 调节位器 R_{w1} ，观察电压 V_{CE} 的变化范围，记录最大值和最小值，最后使 V_{CE} 保持在你认为合适的位置并记录值的大小，将测量结果填如表 5.1。

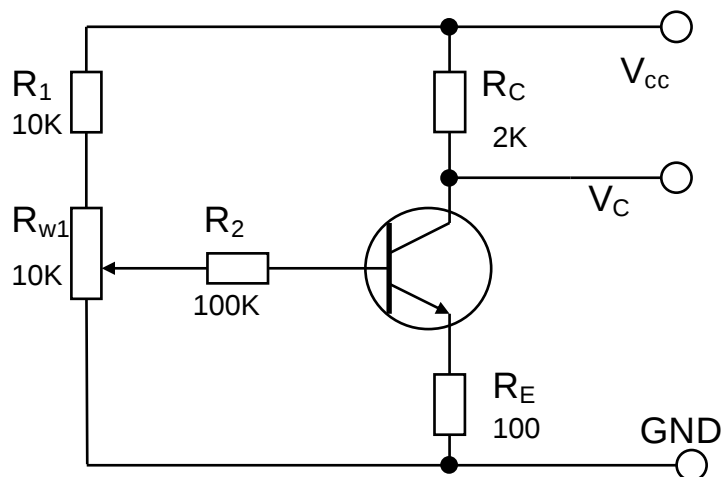


图 1.3 单管放大器直流电路

表 5.1 静态工作点测量（电源电压=12V）

	最大值	V_{CEQ}	最小值
集电极电压 V_{CE}			
集电极电路 I_C （计算）			

分析说明：该电路能够正常工作的输出电压范围

5.2 电压放大倍数测量

交流放大电路如图 1.4 所示，电路中 C_1 为输入耦合电容， C_2 为输出耦合电容， C_3 为交流旁路电容。在工作点调整好后，关闭电源，调节信号源输出频率为 1KHz，输出幅度为 100mV 的正弦波，通过 R_s 连接到放大电路输入端。

根据电压放大倍数的定义 $A_v=V_o/V_i$ V_o 放大电路输出电压幅度， V_i 放大电路输入电压幅度。

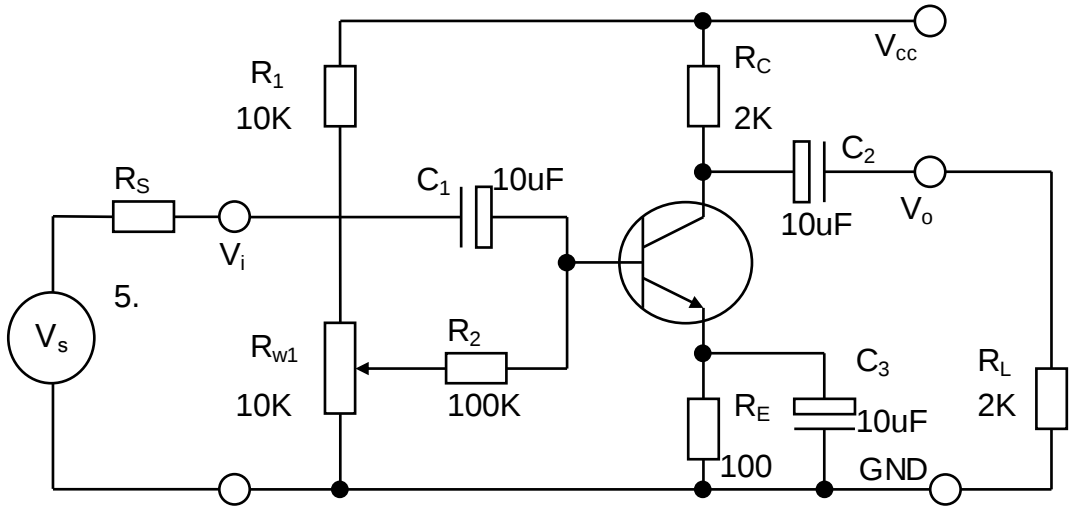


图 1.4 单管放大器动态测试电路

- (1) 调节输入信号幅度，观测输出信号 V_{ce} 的幅度变化，保持输出不失真。
- (2) 按表 5.2 的测试条件修改电路结构，同时测量并记录输入信号 V_s 、 V_i 的幅值和输出信号 V_o 、 V_c 的幅值，比较 V_s 和 V_o 的相位关系。
- (3) 用示波器同时测量 V_c 和 V_o ，比较两者的差别。
- (4) 计算电路的放大倍数，说明电容 C_E 对放大倍数的影响。

表 5.2 放大倍数测量（ $V_s=$ ）

测试条件	电压 12 伏（无电容 C_E ）		电压 12 伏（有电容 C_E ）	
	R_L 开路	$R_L=2K$	R_L 开路	$R_L=2K$
输入电压幅度				
输出电压幅度				
放大倍数				

分析说明：电容对放大倍数的影响。

5.3 输入电阻与输出电阻的测量

1 测量原理

电阻的测量采用串联分压法，测量原理电路如图 1.5 所示。

在测量输入电阻时，将放大电路的输入端串接一个电阻 R_S ，把放大电路的输入电阻看成是 r_i ， R_S 为已知，测量电压 V_1 和电压 V_2 ，计算出输入电阻 r_i ：

$$(V_1 - V_2) : R_S = V_2 : r_i$$

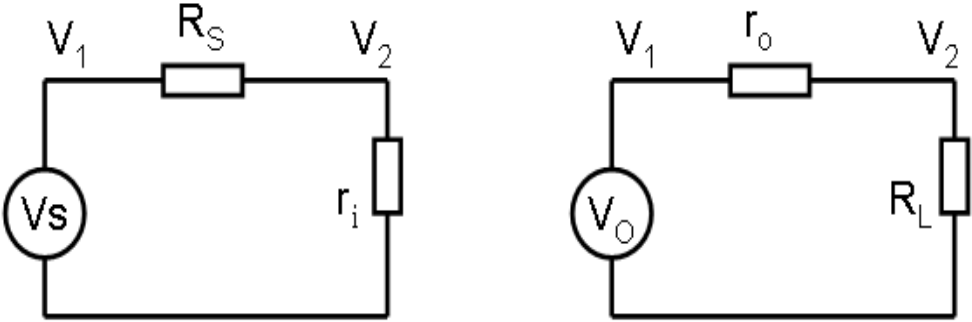
则 $r_i = R_S \times V_2 / (V_1 - V_2)$

在测量输出电阻时，将放大电路的输出端串接一个电阻 R_L ， r_o 与 R_L 构成串联电路，当 R_L 开路时，在 V_2 测量端测得电压 V_1 ， R_L 接入时测出电压 V_2 ， R_L 为已知，计算出输出电阻 r_o ：

$$(V_1 - V_2) : r_o = V_2 : R_L$$

则 $r_o = R_L \times (V_1 - V_2) / V_2$

另一种测量操作方法是 将 R_S （或 R_L ）用电位器（可变电阻）替代，调节电位器使 $V_2 = 0.5V_1$ 则 $r_i = R_S$ （或 $r_o = R_L$ ），用万用表测量电位器值就是被测参数。



(a) 输入电阻测量原理电路

(b) 输出电阻测量原理电路

图 1.5 输入电阻与输出电阻测量原理

2 测量步骤

测量放大电路的输入电阻

- (1) 通过理论计算，选择合适的 R_S 的值，调节信号幅度使放大电路的输出不失真；
- (2) 测量 V_1 和 V_2 的幅值填入表 5.3A 中；分别测量有发射极旁路电容和无发射极旁路电容时的输入电阻值，通过计算说明发射极旁路电容对输入电阻的影响。

表 5.3A 输入电阻测量

测量对象	测量条件	R_S	V_1	V_2	r_i
输入电阻	有射极旁路电容				
输入电阻	无射极旁路电容				

分析说明：发射极旁路电容对输入电阻的影响。

测量放大电路的输出电阻

- (1) 通过理论计算，选择合适的 R_L 的值，调节输入信号幅度保证输出不失真。
- (2) 在 R_L 开路时，测量电压输出幅度 V_1 ，填入表 5.3B；
- (3) 在 $R_L = 2K$ 时，再次测量电压输出幅度 V_2 ，填入表 5.3B.
- (4) 计算等效输出电阻 r_o 。

表 5.3B 输出电阻测量

测量对象	测量条件	R_L	V_1	V_2	r_o
输出电阻	有射极旁路电容				
输出电阻	无射极旁路电容				

分析说明：发射极电容对输出电阻的影响。验证表 5.2 中有负载电阻的放大倍数和无负载电阻的放大倍数是否满足： $A_{VL}=A_{VO} \times r_o/(r_o+R_L)$

5.4 最大不失真输出电压测量

(1) 断开负载电阻 R_L ，按表 5.4 测试条件修改电路结构。

(2) 增大输入信号，观察输出信号波形变化，当出现饱和失真或截止失真时，再次调节工作点，使饱和失真和截止失真同时出现，饱和失真和截止失真出现之前的最大电压输出幅度为最大不失真输出幅度。

(3) 连接负载电阻 R_L ，再次测量最大不失真输出幅度。

表 5.4 最大不失真输出电压（ R_L 开路）

测试条件	$V_{CC}=12$ 伏		$V_{CC}=10$ 伏	$V_{CC}=8$ 伏
	无电容 C_E	有电容 C_E	有电容 C_E	有电容 C_E
最大输出电压 V_{Omax}				

分析说明：电源电压与不失真幅度的关系。

六、扩展实验内容

1 在无射极旁路电容 C_3 的条件下，测量发射极电阻为 50 欧姆、100 欧姆时的放大电路特性参数，研究射极电阻对 A_v 、 r_i 、 r_o 的影响。

2 在有射极旁路电容 C_3 的条件下，测量 V_{CEQ} 等于 4 伏、6 伏、9 伏时的放大电路特性参数，研究工作点对 A_v 、 r_i 、 r_o 的影响。

七、思考题

1. 静态工作点对输入电阻和放大倍数有影响吗？说明理由。
2. 放大电路的最大不失真输出电压幅度和电路的 V_{CC} 有关吗？
3. 电路参数保持不变，提高 V_{CC} 放大倍数将如何变化？

实验二 运算放大器应用电路及测试 (6 学时)

一、实验目的

1. 了解集成运放的使用方法；
2. 熟悉集成运放的双电源和单电源供电方法；
3. 掌握集成运放构成各种运算电路的原理和测试方法。

二、实验仪器及器件

1. 双踪示波器；
2. 直流稳压电源；
3. 函数信号发生器；
4. 数字电路实验箱或实验电路板；
5. 数字万用表；
6. 集成电路芯片 $\mu A741$ 2 块、瓷片电容 $0.01\mu F$ 2 个、电阻 $10k$ 10 个、 $20k$ 5 个、 $30k$ 2 个、 $50k$ 2 个、 $100k$ 2 个、 $5.1k$ 1 个、 $3.3k$ 1 个、 $680k$ 1 个， $10k$ 电位器 3 个。

三、预习要求

1. 熟悉集成电路芯片 $\mu A741$ 的引脚图及功能；
2. 掌握集成运放的工作特点；
3. 掌握各种运算电路的形式及工作原理。

四、实验原理

(1) 集成运放简介

集成电路运算放大器（简称集成运放或运放）是一个集成的高增益直接耦合放大器，通过外接反馈网络可构成各种运算放大电路和其它应用电路。集成运放 $\mu A741$ 的电路符号及引脚图如图 1 所示。

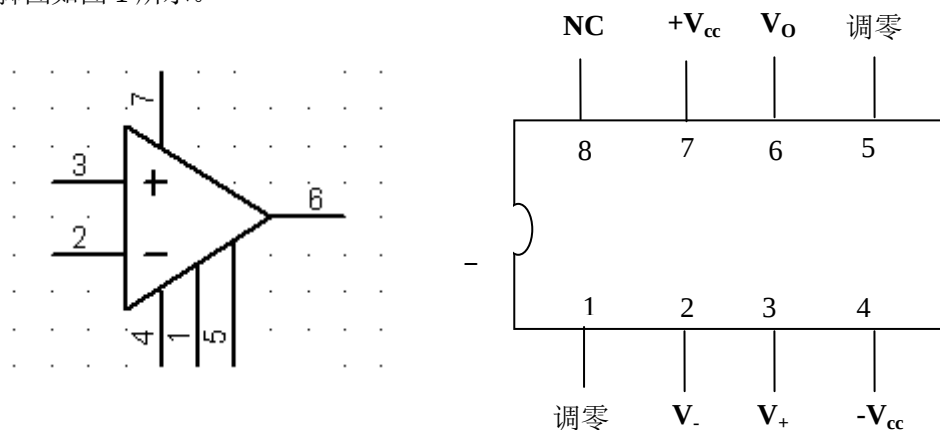


图 1 $\mu A741$ 电路符号及引脚图

任何一个集成运放都有两个输入端，一个输出端以及正、负电源端，有的品种还有补偿端和调零端等。

(a) 电源端：通常由正、负双电源供电，典型电源电压为 $\pm 15V$ 、 $\pm 12V$ 等。如： $\mu A741$ 的 7 脚和 4 脚。

(b) 输出端：只有一个输出端。在输出端和地（正、负电源公共端）之间获得输出电压。如： $\mu A741$ 的 6 脚。最大输出电压受运放所接电源的电压大小限制，一般比电源电压低 $1\sim 2V$ ；输出电压的正负也受电源极性的限制；在允许输出电流条件下，负载变化时输出电压

几乎不变。这表明集成运放的输出电阻很小，带负载能力较强。

(c) 输入端：分别为同相输入端和反相输入端。如：uA741 的 3 脚和 2 脚。输入端有两个参数需要注意：最大差模输入电压 $V_{id\max}$ 和最大共模输入电压 $V_{ic\max}$ 。

两输入端电位差称为“差模输入电压” V_{id} ： $V_{id} = V_+ - V_-$ 。

两输入端电位的平均值，称为“共模输入电压” V_{ic} ：

$$V_{ic} = \frac{V_+ + V_-}{2}$$

任何一个集成运放，允许承受的 $V_{id\max}$ 和 $V_{ic\max}$ 都有一定限制。

两输入端的输入电流 i_+ 和 i_- 很小，通常小于 $1\mu A$ ，所以集成运放的输入电阻很大。

(2) 理想集成运放的特点

在各种应用电路中，集成运放可能工作在线性区或非线性区：一般情况下，当集成运放外接负反馈时，工作在线性区；当集成运放处于开环或外接正反馈时，工作在线性区。

在分析各种应用电路时，往往认为集成运放是理想的，即具有以下的理想参数：输入电阻为无穷大、输出电阻为 0、共模抑制比为无穷大及开环电压放大倍数为无穷大。

理想集成运放工作在线性区时的特点为：

$$V_+ = V_- ;$$

$$i_+ = 0、i_- = 0$$

分别称为“虚短”和“虚断”。它们是分析理想集成运放线性应用电路的两个基本出发点。

当理想运放工作在线性区时，“虚短”不再成立，但“虚断”仍然成立。此时当

$$V_+ > V_- \text{ 时, } V_o = +V_{om};$$

$$V_+ < V_- \text{ 时, } V_o = -V_{om};$$

(3) 集成运放的单电源供电问题

在集成运放的部分应用电路中，出于某种需要，有时要求单电源供电。双电源供电与单电源供电两者之间有何区别？

当集成运放采取双电源供电时，输入、输出电压的电位参考点是正、负电源的公共端 C，如图 2 (a) 所示。如果把负电源端作为电位参考点，并使 C 点悬空，则电路成为图 2 (b)，这时的供电形式就变为单电源供电。可见，双电源供电与单电源供电的实质是电位参考点的不同。

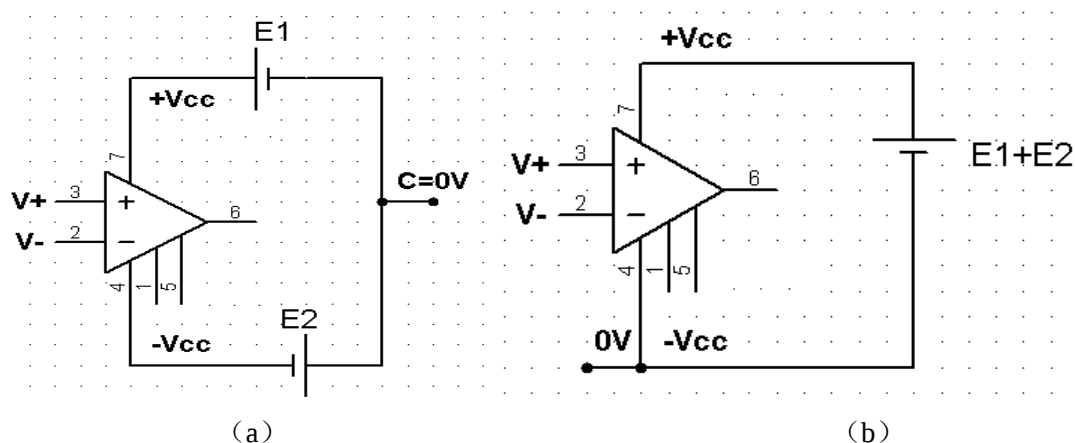


图2 单电源供电

由于电位基准发生了变化，因此集成运放的允许工作条件也将相应改变。为了说明方便，假设±12V双电源供电时集成运放的共模输入电压范围为-10~7V、输出电压范围为-11~+11V。则当24V单电源供电时，共模输入电压范围变为2~19V、输出电压范围变为1~23V。鉴于这种情况，需要给集成运放的同相、反相输入端提供合适的直流偏置电压，使输入端的电位进入共模输入电压范围内。从而保证集成运放的正常工作。

为了获得最大的动态范围，通常将同相、反相输入端电位设置为 $\frac{1}{2}V_{CC}$ ，最简单的方法是通过两个等值电阻分压，一个单电源供电的反相交流放大电路如图3所示。

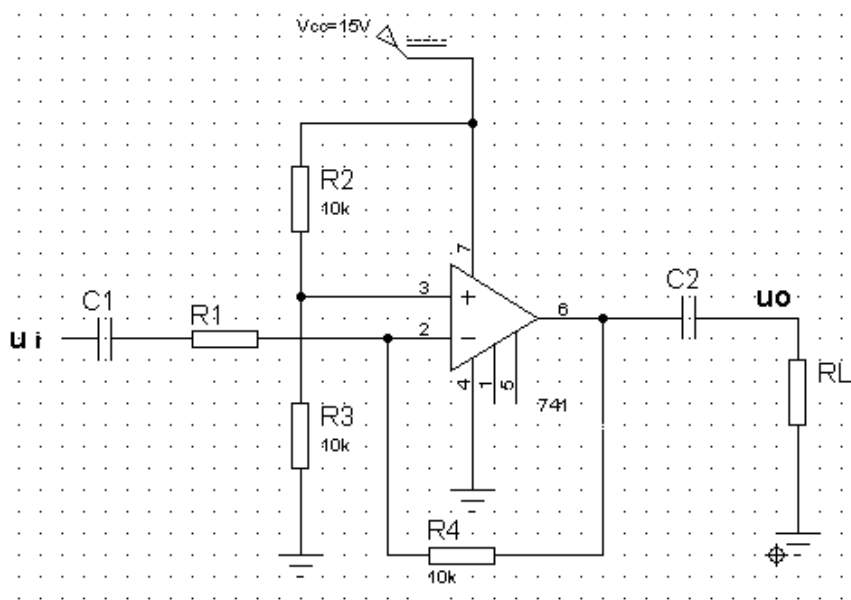


图3 单电源供电的反相交流放大电路

静态时该电路的输出电压为 $\frac{1}{2}V_{CC}$ 。当输入交流正弦信号时，电路的交流电压放大倍数的表达式与双电源供电时的表达式相同。

(4) 集成运放的主要参数

集成运放的主要参数有：输入失调电压、输入失调电流、开环差模电压放大倍数、共模抑制比、输入电阻、输出电阻、增益—带宽积、转换速率和最大共模输入电压。其中最重要的是增益—带宽积、转换速率和最大共模输入电压三个参数，在应用集成运放时应特别注意。

(5) 反相比例运算电路

电路如图4所示，图中 R_2 称为平衡电阻，取 $R_2=R_1//R_F$ 。利用“虚短”和“虚断”的特点可求得其闭环电压放大倍数为：

$$A_{vf} = -\frac{R_F}{R_1}$$

在上述电路中，外接电阻最好在1k~100k范围内选择，电压放大倍数限定在100内，以

保证电压放大倍数的稳定性。

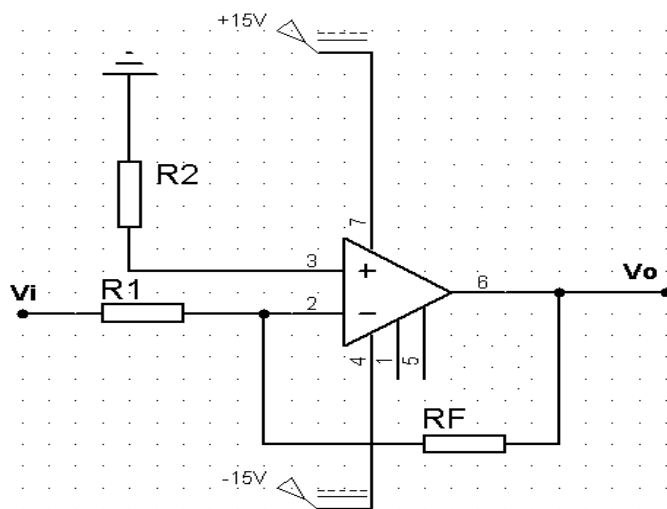


图4 反比例运算电路

(6) 同相比例运算电路

电路如图5所示，取 $R_2 = R_1 // R_F$ 。利用“虚短”和“虚断”的特点可求得其闭环电压放大

倍数为：
$$A_{vf} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

上述电路中，集成运放的同相输入端和反相输入端电压均为输入电压，故同相比例运算电路的共模输入电压即为输入电压。因此要求输入电压的大小不能超过集成运放的最大共模输入电压范围。

当取 R_1 为无穷大时， A_{vf} 为 1，此时称为“电压跟随器”，是同相比例运算电路的特例。

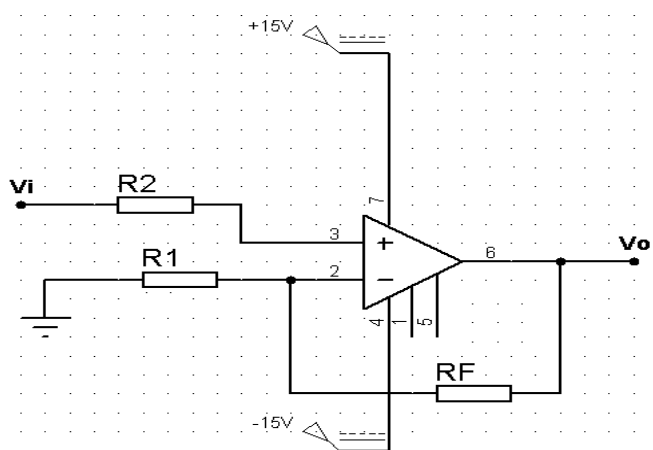


图5 同相比例运算电路

(7) 反相加法运算电路

电路如图6所示，利用“虚短”和“虚断”的特点可求得其闭环电压放大倍数为：

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

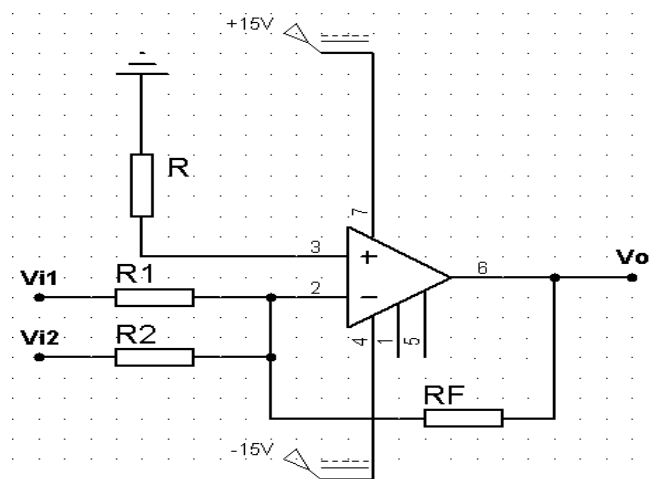


图 6 反相加法运算电路

(8) 同相加法运算电路

电路如图 7 所示，取 $R // R_F = R_1 // R_2 // R_3$ 。利用叠加定理及“虚短”和“虚断”的特点可求

得其闭环电压放大倍数为：
$$V_o = R_F \left(\frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} \right)$$

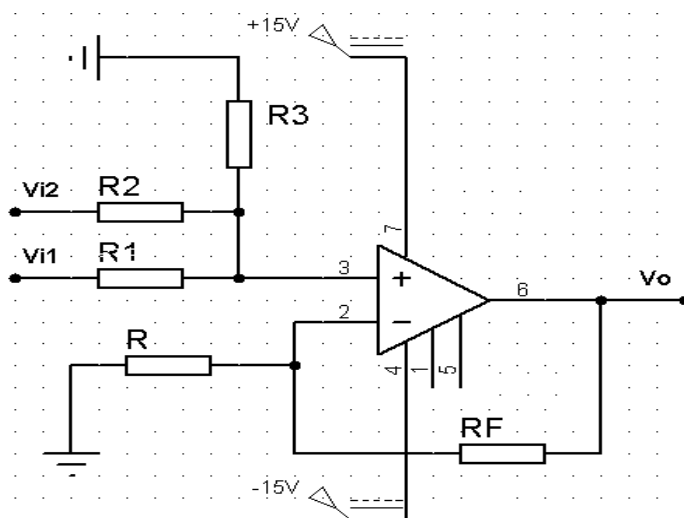


图 7 同相加法运算电路

(9) 减法运算电路

电路如图 8 所示，取 $R_1 = R_2 = R$ ， $R_3 = R_F$ ，利用前面电路的结论可求得其输出端电压为：

$$V_o = \frac{R_F}{R} (V_{i2} - V_{i1})$$

此电路的外围元件在选择时有一定的要求，为了减少误差，所用元件必须对称。除了要求电阻值严格匹配外，对运放要求有较高的共模抑制比，否则将会产生较大的运算误差。

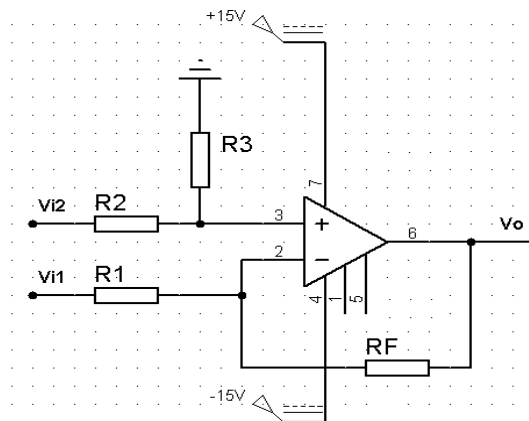
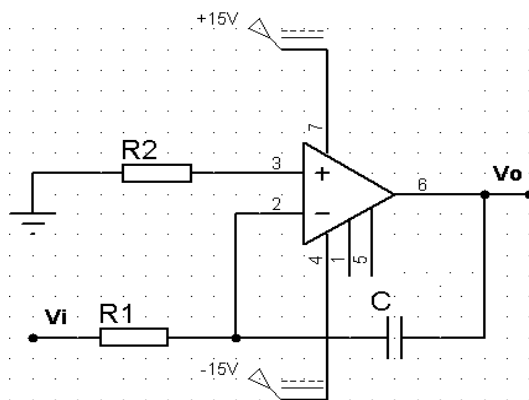


图8 减法运算电路

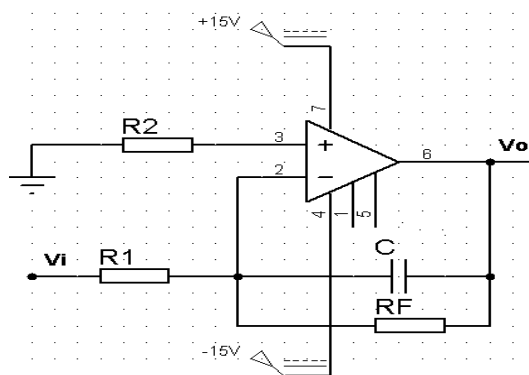
(10) 积分运算电路

电路如图9(a)所示，其输出端电压为：

$$V_o = -\frac{1}{R_1 C} \int_{t_0}^t V_i dt + V_o(t_0)$$



(a)



(b)

图9 积分运算电路

实用的积分电路还需考虑非理想运放带来的问题，如：反相积分器在静态时，运放实际处于开环状态（电容不通直流），运放的失调和漂移可能造成输出饱和而无法再对输入信号积分。因此在实用电路中，往往在电容上并联一个大电阻 R_F ，如图9(b)所示，可以适当降低运放的开环增益，避免运放饱和。但该电阻不能破坏原来的积分关系，为此容抗应

该小于电阻 R_F ，即

$$\frac{1}{\omega C} \ll R_F, \quad \text{故被积分信号的频率应满足: } f \gg \frac{1}{2\pi R_F C}。$$

五、基础实验内容及要求

1. 反相比例运算电路

(1) 直流反相比例放大

按图 4 接好实验电路，取 $R_1=5.1k$ ， $R_2=3.3k$ ， $R_F=10k$ ，根据表 1 要求输入直流信号，测量相应的输出电压及电压放大倍数，记录并分析实验结果。

表 1

输入电压	实测输出电压	实测电压放大倍数	理论电压放大倍数
1.4V			
-1.0V			
5V			

(2) 交流反相比例放大

保持上述实验电路不变，根据表 2 要求输入不同的正弦交流信号，测量相应的输出电压幅度及波形，记录并分析实验结果。

表 2

表

输入电压	实测输出电压	实测电压放大倍数	理论电压放大倍数
$0.5\cos 2000\pi t$			
$4\cos 2000\pi t$			

2. 反相比例运算电路幅频特性的测试（选做）

保持上述实验电路不变，输入正弦交流信号，改变信号频率，测量不同频率情况下的输出电压，确定上限频率 f_H ，(逐步增加信号频率，电压放大倍数下降 3dB 时的频率)，并记录 10 组以上数据，用坐标纸画出幅频特性曲线。

3. 同相比例运算电路

(1) 按图 5 接好实验电路，实验内容与反相比例运算电路完全相同（幅频特性测试除外）。

(2) 去掉电阻 R_1 ，测量此时电路是否实现了“电压跟随器”的功能。

4. 加法运算电路

(1) 反相加法运算电路

按图 6 接好实验电路，取 $R_1=R_2=10k$ ， $R_F=100k$ ， $R=10k$ ，根据表 3 要求同时加入两个输入信号，用示波器测量相应的输出电压幅值及输出波形，记录并分析实验结果。

表 3

输入电压 V_{i1}	输入电压 V_{i2}	实测输出电压	输出波形
+0.7V	-1.0V		
+0.7V	$2\cos 2000\pi t$		

(2) 同相加法运算电路

按图 7 接好实验电路，取 $R_1=10k$ ， $R_2=R_3=20k$ ， $R=R_F=10k$ ，实验内容与反相加法运算电路完全相同。

5. 减法运算电路

按图 8 接好实验电路，取 $R_1=R_2=R=10k$ ， $R_3=R_F=20k$ ，完成表 4 的实验内容。

表 4

输入电压 V_{i1}	输入电压 V_{i2}	实测输出电压	输出波形
+0.7V	-1.0V		
+0.7V	$2\cos 2000\pi t$		

6. 积分运算电路

按图 9 (b) 接好实验电路，取 $R_2=30k$ ， $R_F=680k$ ，输入信号为周期 0.5ms、峰—峰值 2V 的方波，根据表 5 要求测量输入、输出波形，定量画出输入、输出波形并分析实验结果。

表 5

R_1	C	输出波形
100k	0.01 μ F	
50k	0.01 μ F	
10k	0.01 μ F	

六、扩展实验内容及要求

1. 将部分实验电路改为单电源供电后完成规定实验内容。
2. 采用集成运放 LM324 和单电源供电，设计一音频放大与混合前置放大电路。将幅度为 10mV 左右的音频信号和 100mV 左右的音乐信号进行混合实现卡拉 OK 功能。画出设计框图和电路原理图，并用 Proteus 进行软件仿真和实际电路测试。

七、思考题

1. 通过实验分析反相放大电路和同相放大电路的异同。
2. 在实验电路中如何用万用表粗查集成运放的好坏？
3. 实验发现，输出电压达到一定值后不再随 R_F 的增大而增大，且输出交流波形限幅，试说明其原因。

实验三 多级放大器与负反馈放大器 (10 学时)

一、实验目的

1. 掌握多级放大器放大倍数与各级放大倍数的关系
2. 学习在放大电路中引入负反馈的方法
3. 通过实验测试掌握负反馈对放大器动态特性的影响

二、实验仪器及器件

1. 实验仪器
直流稳压电源、函数发生器、数字示波器、万用表

2. 实验器件

表 3.1 实验器件

器件名称	型号参数	数量	安装位置
晶体管	9013	2	T1, T2
电阻	100Ω	3	R1, RE21, RW2+
	1kΩ	1	RW2*
	2kΩ	6	RC1, RE1, RC2, RE22, RL, RW2*
	3.3kΩ	1	RB22
	10kΩ	1	RB21
	20kΩ	1	RW2*
	33kΩ	1	RS
	680kΩ	1	RB1
电位器	1MΩ	1	RW1
电解电容	10μ F	3	C1, C2, C3
	47μ F	2	CE1, CE2
合计		23	
备注： 1. 电位器RW2分别用20kΩ、2kΩ、1kΩ 替换实验			
2. 备用电阻100Ω (RW2+) 用于将电位器RW2左端接地			

三、预习要求

1. 复习教材中有关多级放大器及负反馈放大器的内容。
2. 假设实验中调整 RW1 使 $I_{CQ1}=1.0\text{mA}$ ，估算电路图 1 放大器的静态工作点数据 ($\beta \approx 200$, $r_{bb} \approx 300\Omega$, $U_{BE} \approx 0.7\text{V}$) 填入表 3.2。
3. 计算开环时两级放大电路的放大倍数、输入电阻、输出电阻填入表 3.4
4. 按深度负反馈估算负反馈放大电路的闭环电压放大倍数 A_{uuf} ，填入表 3.6, RW2 分别取 $1\text{k}\Omega$, $2\text{k}\Omega$ 。

四、实验原理

1. 多级放大器

多级放大器的放大倍数

$$A_{un} = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdots A_{un}$$

但要注意多级放大器级联时，后级放大器是前级放大器的负载，计算时要将后级的输入电阻当成前级的负载电阻。

多级放大器的输入电阻就是第一级放大器的输入电阻，而输出电阻就是最后一级的输出电阻。即：

$$R_i = R_{i1} \quad R_o = R_{on}$$

2. 负反馈放大器

1) 负反馈类型及判定

根据输出端反馈信号的取样方式的不同和输入端信号的叠加方式的不同：负反馈可分为四种基本的组态：电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈、电流并联负反馈。

判断反馈放大器的类型主要抓住三个基本要素：

(1) 反馈的极性，即正反馈还是负反馈，可用瞬时极性法判断，反馈使净输入减小为负反馈，使净输入增强为正反馈；

(2) 电压反馈还是电流反馈，决定于反馈信号在输出端的取出方式；

(3) 串联反馈还是并联反馈，决定于反馈信号与输入信号的叠加方式，以电压方式叠加为串联反馈，以电流方式叠加为并联反馈。

2) 负反馈对放大电路性能的影响

负反馈虽然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参数，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频带等。

负反馈使放大器的放大倍数下降

$$\text{闭环放大倍数: } A_f = \frac{A}{1+AF}$$

式中 A 是开环放大倍数， F 是反馈系数， $1+AF$ 称为反馈深度。注意式中 A 、 F 、 A_f 根据反馈类型的不同，其物理意义不同，量纲亦不同。

负反馈提高放大电路的稳定性

$$\frac{dA_f}{A_f} = \frac{1}{1+AF} \cdot \frac{dA}{A}$$

式中 (dA_f/A_f) 是闭环放大倍数的相对变化量， (dA/A) 是开环放大倍数的相对变化量。

串联负反馈使输入电阻增加: $R_{if} = (1+AF)R_i$

并联负反馈使输入电阻减小: $R_{if} = \frac{R_i}{1+AF}$

电压负反馈使输出电阻减小: $R_{of} = \frac{R_o}{1+AF}$

电流负反馈使输出电阻增大: $R_{of} = (1+AF) \cdot R_o$

负反馈使上限截止频率提高: $f_{Hf} = (1+AF) \cdot f_H$

使下限截止频率下降: $f_{Lf} = f_L / (1+AF)$ ，从而展宽频带

负反馈还可以减小放大器的非线性失真

3) 深度负反馈电路放大倍数的计算:

深度负反馈时, $|1 + AF| \gg 1$, 所以闭环放大倍数 $A_f \approx \frac{1}{F}$

注意式中 A 、 F 、 A_f 根据反馈类型的不同, 其物理意义不同, 量纲亦不同。

对于电压串联负反馈, A 、 F 、 A_f 都是电压之比, 所以其闭环电压放大倍数为:

$$A_{uuf} \approx \frac{1}{F_{uu}}$$

3. 实验电路

本次实验以两级阻容的带电压串联负反馈放大电路为例, 分析多级放大电路以及引入负反馈后对电路性能的影响, 电路参看图 1

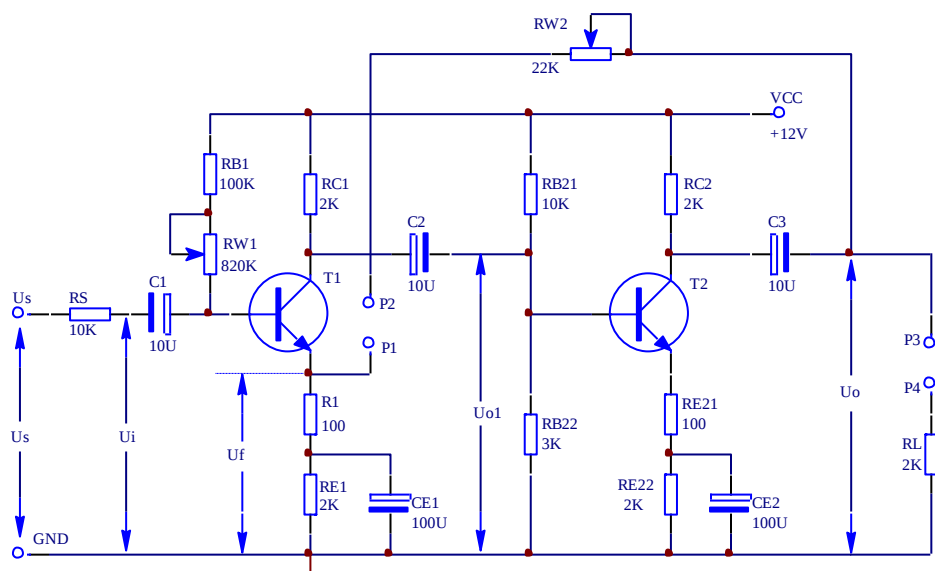


图 1 多级放大与电压串联负反馈电路

RW2 的 P2 端用 100Ω 电阻连接到地时, 电路处于开环状态 (切断反馈信号, 但保留反馈回路的负载作用), 各级的动态参数如下:

第二级放大器:

$$R_{i2} = R_{B21} // R_{B22} // (r_{be2} + (1 + \beta)R_{E21})$$

$$R_{O2} \approx R_{C2} // RW2 \approx R_{C2}$$

$$A_{u2} = - \frac{\beta(R_{C2} // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta)R_{E21}}$$

第一级放大器:

$$R_{i1} = (R_{B1} + RW1) // (r_{be1} + (1 + \beta)R_1) \approx r_{be1} + (1 + \beta)R_1$$

$$R_{O1} \approx R_{C1}$$

$$A_{u1} = - \frac{\beta(R_{C1} // R_{i2})}{r_{be1} + (1 + \beta)R_1}$$

电路构成的两级放大器, 其参数为:

$$R_i = R_{i1}$$

$$R_o = R_{O2} \approx R_{C2}$$

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2}$$

RW2 的 P2 端与 P1 接通（断开开环时的接地电阻 100Ω ），RW2 引入电压串联负反馈，电路分析如下：

$$\text{反馈系数: } F_{uu} = \frac{U_f}{U_o} \approx \frac{R_1}{R_1 + RW2}$$

闭环电压放大倍数 A_{uuf} 的估算：

$$A_{uuf} = \frac{U_o}{U_i} = \frac{A_u}{1 + A_u \cdot F_{uu}}$$

深度负反馈时，闭环电压放大倍数 A_{uuf} 估算：

$$A_{uuf} \approx \frac{1}{F_{uu}} \approx 1 + \frac{RW2}{R_1}$$

闭环输入电阻 R_{if} ：

$$R_{if} = R_i (1 + A_u F_{uu})$$

闭环输出电阻 R_{of} ：

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_u F_{uu}}$$

式中： R_i —开环输入电阻； R_o —开环输出电阻

A_u —带负载 R_L 时的开环电压放大倍数

五、基础实验内容

1. 静态工作点调整与测量：

接通 12V 电源，调节 RW1，使 I_{CQ1} 为 1 mA（即使 T1 管发射极电压为 1V），将各级静态工作点记入表 3.2。

表 3.2 静态工作点

	计算值		测量值				
	$I_{CQ}(\text{mA})$	$U_{CEQ}(\text{V})$	$I_{CQ}(\text{mA})$	$U_{BQ}(\text{V})$	$U_{EQ}(\text{V})$	$U_{CQ}(\text{V})$	$U_{CEQ}(\text{V})$
第一级	1.0						
第二级							

2. 开环参数的测量

将电路开环（RW2 选 $20\text{k}\Omega$ 电阻，P2 端用 100Ω 电阻连接到地），接通负载（接通 P3、P4），使电路工作在开环、带负载工作状态。

参照实验一中晶体管单管放大器实验中介绍的方法，测量开环情况下，电路的中频电压放大倍数 A_{uu} ，输入电阻 R_i ，输出电阻 R_o 。

- 1) 以 $f = 1\text{KHz}$ ， $U_s = 20\text{mV}$ 的正弦信号（实际信号幅度可根据实际情况选取，方便测量即可）输入放大器，负载 R_L 接通，用示波器监视输出波形 U_o ，在 U_o 不失真的情况下，用数字示波器测量开环情况下 U_s 、 U_i 、 U_{o1} 、 U_o ，记入表 3.3。
- 2) 断开负载 R_L ，在输出不失真的情况下，测量空载时的 U_o' ，记入表 3.3。

表 3.3 参数测量数据（ $R_{W2}=20\text{k}\Omega$ ）

	$U_s(\text{mV})$	$U_i(\text{mV})$	$U_{o1}(\text{V})$	$U_o(\text{V})$	$U_o'(\text{V})$
开环					
闭环					

根据实测值，计算电压放大倍数及输入电阻、输出电阻，填入表 3.4

表中：

$$A_{u1} = \frac{U_{o1}}{U_i} \quad A_{u2} = \frac{U_o}{U_{o1}} \quad A_{uu} = \frac{U_o}{U_i}$$

$$R_i = \frac{U_i}{U_s - U_i} R_s \quad R_o = \frac{U_o' - U_o}{U_o} R_L$$

表 3.4 放大器动态参数计算（ $R_{W2}=20\text{k}\Omega$ ）

	理论值					实测值				
动态参数	A_{u1}	A_{u2}	A_{uu}	$R_i(\text{K})$	$R_o(\text{K})$	A_{u1}	A_{u2}	A_{uu}	$R_i(\text{K})$	$R_o(\text{K})$
开环										
闭环										
反馈深度										

*3) 测量通频带

R_{W2} 断开，在带负载且输出不失真的情况下，保持输出电压 U_o 的值不变，改变信号发生器的输出频率，找出开环情况下的上、下限频率 f_L 和 f_H ，记入表 3.5 中。

表 3.5 通频带测量

	f_L (KHz)	f_H (KHz)	f_{BW} (KHz)
开环放大器			
负反馈放大器			
反馈深度			

注：打*的项目为选做

3. 测量负反馈放大器的各项性能指标：

将 R_{W2} （ $=20\text{ k}\Omega$ ）的 P2 端与 P1 接通（断开开环时的接地电阻 100Ω ），使 R_{W2} 引入负反馈，适当加大输入信号 U_s （约 50mV ，实际信号幅度可根据实际情况选取，方便测

量即可), 在输出波形不失真的情况下, 参照开环参数的测量方法, 测试闭环参数记入表 3.3 和表 3.5 中, 如果 f_{HF} 的值大于 1MHz, 超过低频信号发生器的输出频率范围, 则记为 $\geq 1\text{MHz}$ 。按照同样的办法计算 A_{uuf} 、 R_{if} 、 R_{of} , 根据实验结果, 计算电路参数填入表 3.4

4. 观察负反馈对非线性失真的改善:

以下测试应保持 R_L 不变。

- 1) 将 RW2 断开, 在开环的情况下, 输入端加入 1KHz 的正弦信号, 输出端接示波器。逐渐增大输入信号的幅度, 使输出信号出现失真, 记下此时的输出波形和输出电压幅度。
- 2) RW2 接通, 在闭环的情况下, 增大输入信号的幅度, 使输出电压的幅度与上面记录的幅度相同, 记录输出波形, 比较有负反馈时输出电压波形的变化。

5. 深度负反馈

将 RW2 换成 1 k Ω , 2 k Ω , 分别测量闭环放大倍数, 与估算结果比较。

RW2=2 k Ω , 将电路中 RE21 短路, 再测量一次闭环放大倍数, 与估算结果比较。

表 3.6 深度负反馈

	A_{uf} 估算值	$U_i(\text{mV})$	$U_o(\text{V})$	A_{uf} 实测结果
1 k Ω				
2 k Ω				
2 k Ω (RE21 短路)				

六、扩展实验内容

考虑到晶体管的输入电阻比较小, 为进一步增大放大电路的输入电阻, 考虑将在第一级采用场效应管, 选定场效应管信号为 K30A, 请设计相应的电路, 并测试相关参数。

七、思考题

1. 实验数据分析: 表 3.4 中, 多级放大器的放大倍数与理论计算值相符吗? 分析可能的误差原因
2. 实验数据分析: 表 3.4 中, 反馈深度 $|1+AF|$ 等于多少? 试分析输入电阻、输出电阻、电压放大倍数的开环参数与闭环参数的关系是否与理论相符, 分析可能的误差原因
- *3. 实验数据分析: 表 3.5 中闭环带宽与开环带宽是否与理论相符, 分析可能的误差原因
4. 实验数据分析: 表 3.6 中, 深度负反馈的实测结果与估算值是否相符, 分析可能的误差原因, 表 3.6 最后一行的实测值与估算值的差别为何比第二行的小。
5. 如果输入信号存在失真, 能否用负反馈改善?

实验四 前置放大器的设计与应用 (8 学时)

一、实验目的

1. 理解前置放大器的相关概念，理解差模信号与共模信号，了解当前最新的一些前置放大器 IC 的类别及主要指标和特性，学习前置放大器的设计技巧。
2. 实际进行差分信号产生、测试；用单运放构成仪表放大器，并进行性能测试；
3. 实际进行典型前置放大器的设计、测试与应用。
4. 了解阻抗匹配、偏置电路设计及共模信号抑制的常用方法。

二、实验仪器及器件

1. 实验所需设备

序号	名 称	型号/规格	数 量
1	数字式万用表	UT58A	1 块
2	20MHz 双通道数字示波器	TDS1002	1 台
3	函数信号发生器	TFG3150	1 台
4	双通道稳压电源	SG1731	1 台

2. 实验所需元器件

序号	名 称	型号	数量	序号	名 称	型号	数量
1	运算放大器	LM324	1 片	12	电位器	1K	1
2	运算放大器	OP07 或 uA741	4 片	13	电位器	2K	2
				14	电位器	10K	7
3	仪表放大器	AD623	1 片	15	瓷片电容	0.01uF	4
4	电阻	50	1	16	瓷片电容	0.1uF	2
5	电阻	1K	1	17	电解电容	1uF	1
6	电阻	2K	4	18	电解电容	10uF	2
7	电阻	5.1K	3	19	二极管	1N4148	2
8	电阻	10K	8	20	稳压二极管	3.3V	2
9	电阻	20K	4	21	单排针	6pin	1
10	电阻	100K	4	22	短接帽	2.5"	2
11	电阻	1M	2	23	小喇叭		1

三、预习要求

1. 根据提供的附件材料理解与前置放大器相关的一些概念，复习函数信号发生器、数字示波器等仪器的使用方法。理解文氏电桥振荡电路原理。
2. 学会阅读 IC 的英文数据手册，理解运放各主要指标特性的含义。

3. 复习运放进行线性放大的相关理论知识,能对输入电阻、输出电阻、共模抑制比 CMRR 及增益进行计算。主要相关概念及公式如下:

差模信号是两个输入电压之差: $v_{id}=v_{i1}-v_{i2}$

共模信号是两个输入电压的算术平均值: $v_{ic}=(v_{i1}+v_{i2})/2$

差模电压增益: $AVD=v_{od}/v_{id}=v_{od}/(v_{i1}-v_{i2})$

共模电压增益: $AVC=v_{oc}/v_{ic}=2*v_{oc}/(v_{i1}+v_{i2})$

根据线性放大电路叠加原理求出总的输出电压: $v_o=AVDv_{id}+AVCv_{ic}$

共模抑制比: $KCMR=|AVD/AVC|$

共模抑制比用分贝数 (dB) 表示: $KCMR=20\lg |AVD/AVC| \text{ dB}$

四、实验原理

通过传感器输入的信号,一般信号幅度很小(毫伏甚至微伏量级),且常常伴随有较大的噪声。对于这样的信号,第一步通常是采用仪表放大器先将小信号放大。这个放大的最主要目的不是增益,而是提高电路的信噪比;同时仪表放大器电路能够分辨的输入信号越小越好,动态范围越宽越好。仪表放大器电路性能的优劣直接影响到智能仪表仪器能够检测的输入信号范围。

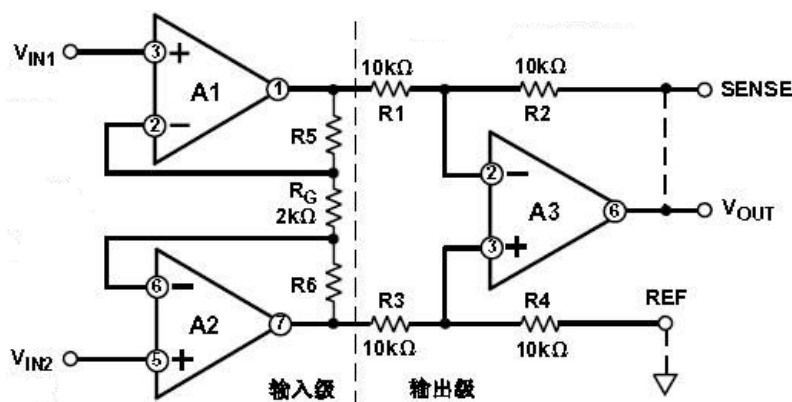


图 1 典型三运放仪表放大器电路

仪表放大器电路的典型结构如图 1 所示。它主要由两级差分放大器电路构成。其中,运放 A1、A2 为同相差分输入方式,同相输入可以大幅度提高电路的输入阻抗,减小电路对微弱输入信号的衰减;差分输入可以使电路只对差模信号放大,而对共模输入信号只起跟随作用,使得送到后级的差模信号与共模信号的幅值之比(即共模抑制比 CMRR)得到提高。这样在以运放 A3 为核心部件组成的差分放大电路中,在 CMRR 要求不变情况下,可明显降低对电阻 R1 和 R3, R2 和 R4 的精度匹配要求,从而使仪表放大器电路比简单的差分放大电路具有更好的共模抑制能力。在 $R5=R6$, $R1=R3$, $R2=R4$ 的条件下,图 1 电路的增益为: $G=(1+2R5/Rg)(R2/R1)$ 。由公式可见,电路增益的调节可以通过改变 Rg 阻值实现。

运放作为模拟电路的主要器件之一,能处理双极性或单极性信号:双极性就是信号在变化的过程中要经过“零”点,单极性不过“零”点,只在一边变化。在供电方式上有单电源和双电源两种,双电源供电运放的输入可以是在正负电源之间的双极性信号,而单电源供电的运放的输入信号只能是 0~供电电压之内的单极性信号,其输出亦然。双电源供电的运放电路,可以有较大的动态范围;单电源供电的运放,可以节约一路电源。单电源供电的运放

的输出是不能达到 0V 的，对接近 0V 的信号放大时误差很大，且容易引入干扰；而双电源供电的稳定性比单电源的要好。单电源供电对运放的指标要求要高一些，一般需要用轨对轨 (R-R)，运放的价格一般会贵点。单电源用 V⁺, GND，一般还需生成一个与 GND 不同的模拟地 AGND，因此放大电路的构成形式上有所不同，往往用单电源的电路较用双电源的要稍复杂一些，以达到同样的目的。随着器件水平的提高，有越来越多的用单电源供电代替双电源供电的应用，这是一个趋势。

差分信号就是幅度相同、相位相差 180° 的两信号。运放处理的是这对信号的差值，它们的共模信号则被抑制掉。这信号的共模电压可以处于运放输入信号范围内的任何电压。差分信号会具有两倍单端信号的摆幅。伪差分信号与差分信号类似，伪差分信号也是一对信号，但它的参考端或负端是一个直流电平，用来去除正端信号中的直流成分。伪差分信号与差分信号在减小地环流和噪声方面是非常相似的，不同的是差分输入模式下，负端输入是随时间变化的，而在伪差分模式下，负端输入是一个不变的直流参考。差分信号的主要好处是：能够很容易地识别小信号；一个干扰源几乎相同程度地影响差分信号对的每一端，而有用的只是差值信号，因此对外部电磁干扰 (EMI) 是高度免疫的；在一个单电源系统，能够比较好的精确地处理双极性信号。

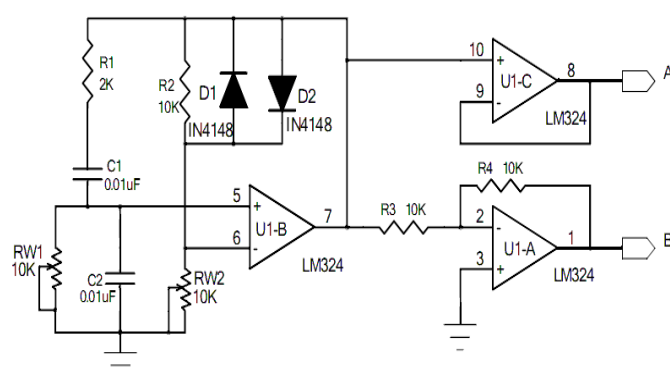


图 2 电路产生差分信号

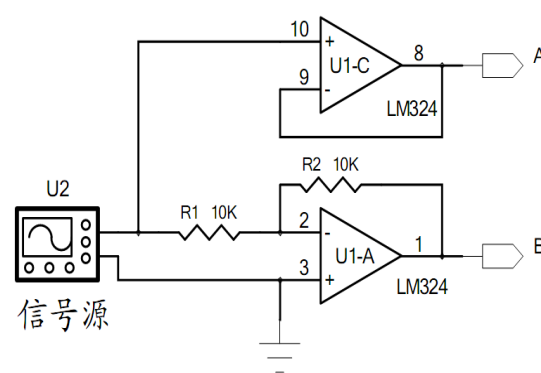


图 3 信号源产生差分信号

五、基础实验内容

1. 理解差分信号、伪差分信号、单极性信号、双极性信号的概念，并熟悉每种信号的优缺点。构建如下图 2 差分信号产生电路，同时测量 A、B 点对地波形、AB 两点间的波形，记录波形并描述特点 (LM324 供电电压 $\pm 5V$)。记录 RW1 和 RW2 的作用 (调节使正弦波形失真度最小)。也可以如图 3 所示将信号源的输出信号接好后进行测量。

图 2 差分信号产生电路

图 3 差分信号测试电路

2. 分立运放构成典型仪表放大器电路的测试，理解共模信号与差模信号，测试共模与差模放大倍数，计算共模抑制比；掌握调零、调满度方法；理解单端输入与差分输入方式进行放大电路设计。(利用三个常用的运放 OP07 或 uA741 组成仪表放大器进行测试。电路图如图 4，该仪表放大器可以用于电桥、电子秤、温度等缓慢变化信号的前端放大。)

(1) 输出调零：J1 连接 2-3；J2 连接 2-3，调整 RW1，使输入直接接地，调整 RW4 使输出 (OUT 端对地电压) 为零。

(2) 单端输入：J2 连接 1-2，让 U2 的同相输入端接地；J1 连接 2-3，U1 的同相输入端

电压即可通过 RW1 来调节。用万用表测试 U1 输入信号（RW1 两端电压）及输出信号电压（OUT 端对地电压）。此种方式可用于作一般单端信号放大。

表 1 单端输入信号测试

组数	单端输入电压(mv)	输出电压(mv)	增益
1			
2			
3			

(3) 共模信号双端输入：J1 连接 2-3，J2 连接 2-3，U1 和 U2 的同相输入端电压即可通过 RW1 来调节。调整 RW1，用万用表测试每个输入信号（RW1 两端电压）及输出信号电压。说明对共模信号的放大效果。

(4) 差模信号双端输入：将 J2 连接 2-3，J1 连接 1-2；此时 U1 输入信号为 RW2 两端电压，U2 输入电压为 RW1 两端电压，对仪表放大器而言既有共模输入信号，也有差模信号，分别记录多组 U1、U2 的输入电压和输出信号电压（OUT 端对地电压）。

表 2 差模输入测试

组数	RW2 两端电压 v_{i1}	RW1 两端电压 v_{i2}	输出电压 $v_o=v_{od}+v_{oc}$	差模输入 $v_{id}=v_{i1}-v_{i2}$	差模增益 $AVD=v_{od}/v_{id}$
1					
2					
3					

(5) 根据表 2 测试的数据计算并分析该仪表放大器的共模与差模放大倍数、共模抑制比。

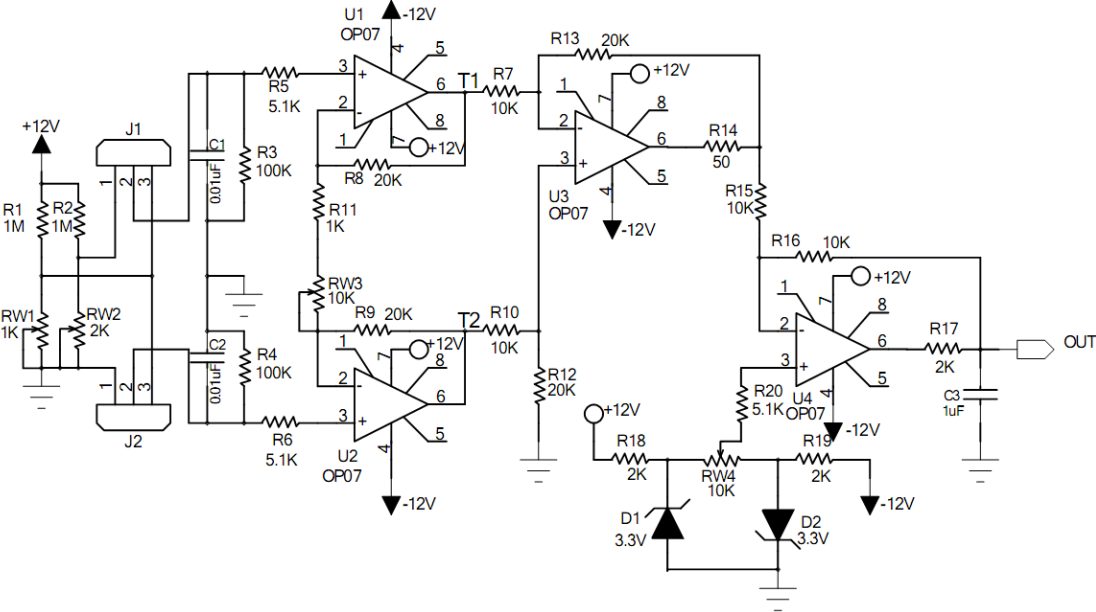


图 4 分立运放构成典型仪表放大器电路

(6) 从信号源输出 2KHz, 0.1Vpp~0.2Vpp 的正弦信号，同时接在 J1、J2 的第 2 脚上，信号源的地和电路的地连接，不用电容 C3，用示波器测试输出信号波形，说明对交流共模信号的放大作用。

(7) 交流差模信号放大：将图 2 或图 3 中的 A、B 端分别接在 J1、J2 的第 2 脚上(将 A、B 端的差分信号输入到放大器)，不用电容 C3，信号源输出 2KHz, 0.1Vpp 的正弦信号。通

过测量输入差分信号(使用示波器 CH1-CH2 功能测量)和输出信号波形, 计算本电路的差模增益(忽略共模信号的影响)。

(8) 分析 RW3 和 RW4 的作用。

六、扩展实验内容

1. 利用专用仪表放大器 AD623 放大 10KHz 的差分信号。(注意 VCC+和 VSS-之间的电压差不能大于 10V。理解单电源供电、双电源供电、单极性输出、双极性输出方式、增益改变及输出偏置调整。)

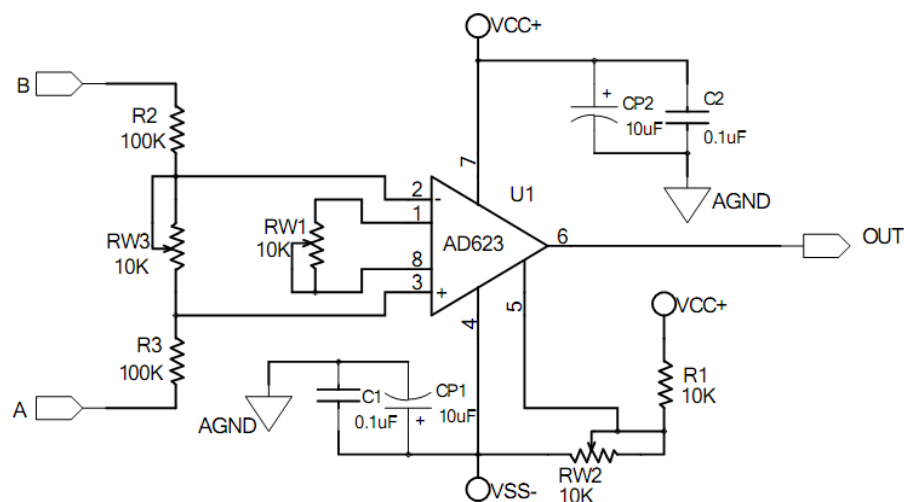


图 5 专用仪表放大器 AD623 应用电路

图 5 中的 A、B 端子指的是图 2 中差分信号输出端 A、B。将此信号用 2 个 100K 电阻和一个 10K 电位器分压后作为 AD623 的输入信号。

(1) 双电源供电: VCC+接+5V, VSS-接-5V。将图 2、3 中产生的差分信号经分压网络后接信号输入端 IN+、IN-。

(2) 调节 RW1 和 RW2, 记录现象。在波形无失真时用示波器测量输入、输出电压, 计算增益。

(3) 单电源供电: VCC+接+5V, VSS-接地。

(4) 调节 RW1 和 RW2, 记录现象。在波形无失真时用示波器测量输入、输出电压, 计算增益。

(5) 分析如何实现输入阻抗匹配及输出阻抗匹配。

2. 利用专用仪表放大器 AD623 作语音前置放大。电路图如下图 6 所示, 在 AD623 的输入端 2、3 脚接上一个小喇叭或小耳机, 其它外围器件如图 5 应用电路, 对着喇叭说话, 用示波器测量 6 脚 OUT 的波形。调节 RW1 及 RW2, 记录波形如何变化。另外可在 OUT 端及 AGND 端接上喇叭, 可以听声音效果。

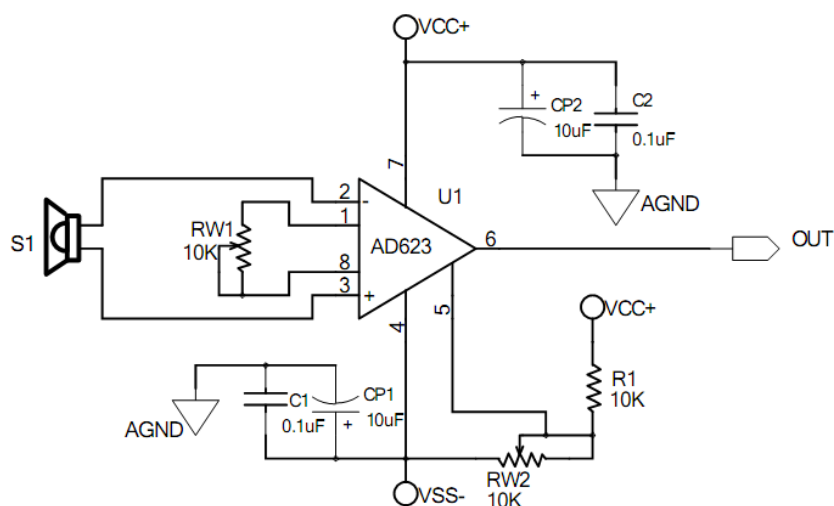


图6 专用仪表放大器 AD623 作语音前置放大电路

3. 对于电容式话筒，比如驻极体话筒，利用 AD623 设计一个语音前置放大电路。

七、思考题

1. 总结实验过程中的调试过程。
2. 前置放大器应用总结、分析：
3. 主要分析如下内容：单端输入、双端输入、差分输入、双电源工作、单电源工作、输入耦合、阻容元件匹配、提高信噪比及共模抑制比的方法等。
4. 总结实验的收获、体会及遇到的问题。

八、实验电路的制作及调试注意事项

1. 注意供电电源的范围，注意正负电源一定要共地线。
2. 差分信号产生时要配合调试 RW1 和 RW2，最开始将两电位器调节在中间阻值(5K Ω)时波形容易出来，选择 5KHz 不失真波形送到 AD623 进行放大。
3. 分立运放构成典型仪表放大器电路中元器件较多，特别要注意各处电阻不要连错。要学会多用万用表检测各点的电压来判断故障所在。可以只连接 U1、U2、U3 三个运放进行实验，不连 U4 这个运放及其外围器件，改为使用 U3 的输出作为最后的输出来测试。
4. 示波器测量 AD623 的输出时是相对 AGND 进行。
4. 图 4 中的 C1、C2、D1、D2 可以不连接；图 5、图 6 中的 C1、C2、CP1、CP2 为滤波电容，可不接。

实验五 信号产生与转换电路设计 (8 学时)

一、 实验目的

1. 掌握正弦波振荡电路的基本工作原理；
2. 掌握RC正弦波振荡电路的基本设计、调试和分析方法；
3. 掌握迟滞比较器、积分器的工作原理；
4. 掌握方波、三角波发生器的基本设计、调试和分析方法；
5. 学会设计正弦波产生电路和方波、三角波转换电路。

二、 实验说明

1. 该设计实验采用方案设计、软件仿真和电路安装与调试三步走，以提高学生的综合设计与实践动手能力。

2. 该设计实验的实施采取课内外结合的方式。具体实施步骤如下：

第一阶段：实验方案设计。在模拟电子技术课程的“波形的发生与变换电路”理论教学之前布置实验的设计与要求，学生边学习理论课程，边思考，逐步完成方案设计，电路的参数计算，仿真电路的制作。该阶段任务要求在课外完成。

第二阶段：电路仿真验证。要求学生根据自己设计的电路到实验室进行仿真、调试、测试，以验证电路是否达到设计要求，在此基础上完善电路设计，记录仿真结果。该阶段任务要求在课内完成，时间为2个课时。

第三阶段：电路的安装、调试与测试。对第二阶段的仿真完善后设计电路进行实际的安装、调试与测试，实验验证设计的电路，记录测量结果。该阶段任务要求在课内完成，时间为6个课时。

三、 实验元器件

集成运算放大器、二极管、稳压管、电位器、常用电阻和电容。

参考器件列表：

序号	名称	型号	数量	序号	名称	型号	数量
1	运算放大器	uA741	3片	12	电阻	33K	1
2	双联可调电位器	20K	1	13	电阻	51K	1
3	稳压二极管	6.2V	2	14	瓷片电容	3.3nF(332)	1
4	二极管	IN4148	2	15	瓷片电容	33nF(333)	1
5	电位器	2.2K	1	16	瓷片电容	0.1uF(104)	3
6	电位器	10K	3	17	电阻	150k	1
7	电阻	10	2	18	电阻	1.2k	2
8	电阻	51	1	19			
9	电阻	1K	1	20			
10	电阻	2K	3	21			
11	电阻	10K	4	22			

实验五 信号产生与转换电路设计

一、任务与要求

1. 设计任务

设计一个能产生正弦波、方波和三角波的简易函数发生器，该发生器的输出频率可调，幅值可调。输出的信号波形完整不失真，输出阻抗不大于 100 欧

2. 设计要求

- (1) 输出波形：正弦波、方波和三角波。
- (2) 输出频率：700HZ--3KHZ 可调。
- (3) 输出峰峰值：正弦波 $U_{pp} \geq 5V$ ，方波 $U_{pp} \geq 12V$ ，三角波 $U_{pp} \geq 1V$ 。
- (4) 输出阻抗*不大于 100 Ω 。
- (5) 矩形波占空比*可调范围：10~90%。

说明：带（*）的指标要求为扩展内容。

二、电路设计参考方案

分析以上设计任务可知，该设计可以有多种实现方案，下面给出三种电路结构供参考。
参考方案一

该方案一（图 1）特点是：先产生正弦波，而后比较器产生方波；再通过积分器或其它电路产生三角波；最后通过幅值控制和功率放大电路输出信号。此电路的正弦波发生器的设计要求频率连续可调，方波输出要有限幅环节，积分电路的时间参数选择很重要，保证电路不出现积分饱和和失真。

正弦波产生电路有 RC、LC、石英晶体振荡器等，其中，RC、LC 振荡器的频率易于调节，频率覆盖范围较宽，前者往往应用于低频、后者往往应用于高频，但二者的频率稳定度均较差；石英晶体振荡器频率稳定度较高，但频率基本不可调节。

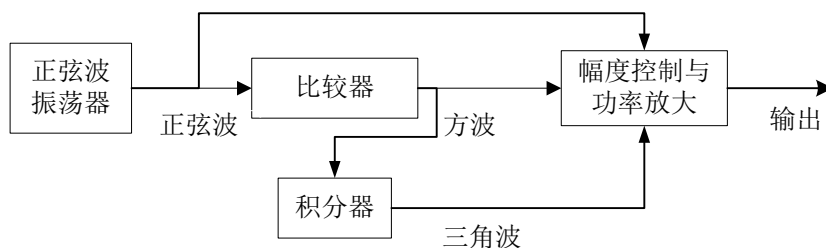


图 1 简易函数发生器参考方案一

参考方案二

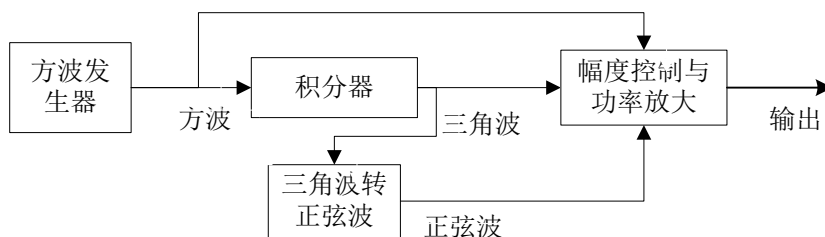


图 2 简易函数发生器参考方案二

方案二见图 2，其特点是：先产生方波，而后通过积分器或其它电路产生三角波，再用三角波转正弦波电路转换为正弦波，有源产生正弦波；最后通过幅值控制和功率放大电路输

出信号。此电路的方波发生器的设计要求频率连续可调，输出要有限幅环节，积分电路的时间参数选择保证电路不出现积分饱和和失真。

三角波转正弦波电路有滤波法，折线近似法，其中，滤波法原理简单，但要求滤波器截止频率需要随三角波的基波频率的变化而变化；折线近似法原理简单，可以对任意频率三角波进行转换，但要求三角波幅度恒定，对电阻转换网络精度要求较高，正弦波的失真度较大。
参考方案三

方案3见图3，特点是以数字式的频率控制与波形控制模块为核心，控制存储在波形表中的数字化波形采样值的读出间隔，然后通过数模转换将数字化波形转换为模拟的波形；通过滤波器滤除高频分量，可以获得任意的波形（正弦波、方波、三角波等）；最后通过幅值控制和功率放大电路输出信号。此方案的频率控制模块实现频率可调，波形控制模块用于选择选择输出波形，输出频率的间隔取决于控制字的长度和振荡器的频率。该方案是数字化的简易任意波形发生器的方案，除了必须微处理器等硬件之外，还需要编写软件程序来控制函数发生器的工作过程。

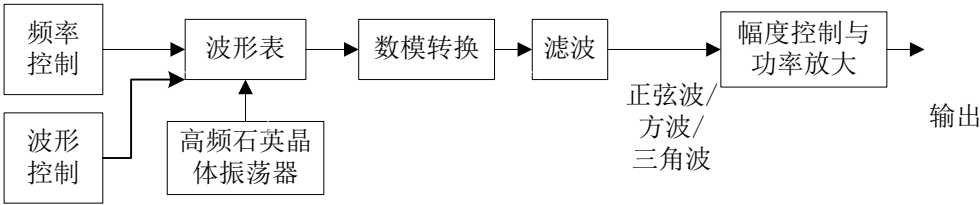
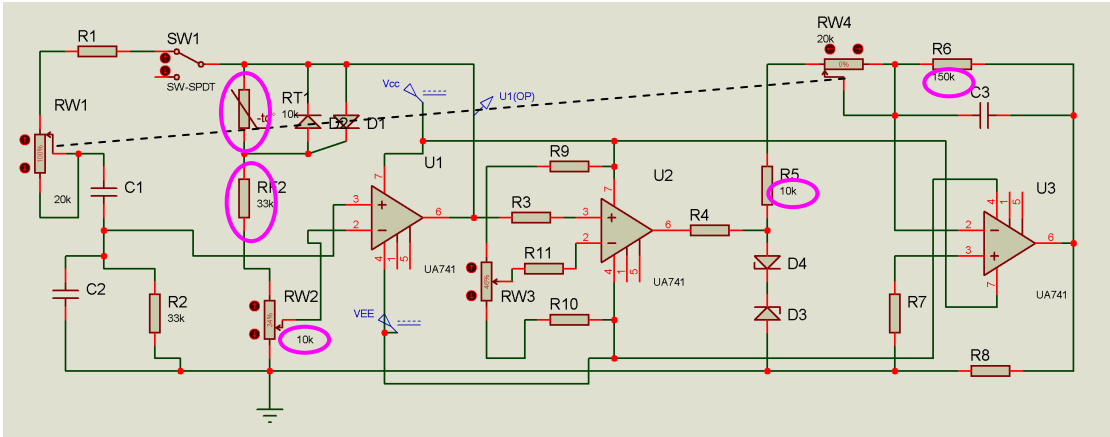


图3 简易函数发生器参考方案三

在这三个方案中，可以将信号的产生与变换电路分为两个不同功能的电路，其中一部分为产生频率可变、幅度一定不失真的信号源电路，另一部分为对不失真信号进行幅度控制和提高信号源带负载能力的功率放大电路。本设计主要针对第一部分展开，第二部分作为扩展内容可参照小信号放大与功率放大器设计完成。

三、电路参考设计

设计包含三部分，即RC桥式正弦波振荡电路部分、方波变换电路部分和三角波变换电路部分。其参考电路如图4所示。



荡频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{(R_{w1} + R_1 + r_o)R_2C_1C_2}} \quad (1)$$

式中, r_o 为运放uA741的输出电阻(约为 75Ω), 改变 R_{w1} 即可改变振荡频率。电路起振的幅值条件是 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$, 其中,

$$|\dot{A}| = 1 + \frac{R_{T1} + R_{F2}}{R_{w2}} \quad (2)$$

$$|\dot{F}| = \frac{1}{1 + \frac{R_{w1} + R_1 + r_o}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}} \quad (3)$$

当调节 R_{w1} 改变振荡频率时, 反馈系数 $|\dot{F}|$ 也随之改变, 可能破坏起振条件, 需要相应地调整 R_f 或 R_{w2} 以满足起振条件。若要在较宽范围内调节振荡频率时无需调整放大器的增益, 则需要降低 R_{w1} 的变化对 $|\dot{F}|$ 的影响, 故选频网络参数选择应满足如下条件:

$$(1) \frac{C_2}{C_1} \square \frac{R_{w1} + R_1 + r_o}{R_2} + 1$$

$$(2) \frac{R_{w1} + R_1 + r_o}{R_2} < 1$$

具体如下: $\frac{C_2}{C_1} = 10$, 则无论如何改变 R_{w1} , $|\dot{F}| \approx \frac{1}{11}$, 电路振荡条件比较恒定, 只

需保证 $|\dot{A}|$ 大约大于11即可。则振荡频率为 f_H , f_L 为

$$f_H = \frac{1}{2\pi C_1 \sqrt{10(R_1 + r_o)R_2}}, \quad f_L = \frac{1}{2\pi C_1 \sqrt{10(R_{w1} + R_1 + r_o)R_2}} \approx \frac{1}{2\pi C_1 \sqrt{10R_{w1}R_2}}$$

当 $f_L=700\text{Hz}$ 时, 若取 $R_{w1}=20\text{k}\Omega$ 的电位器, $R_2=33\text{k}\Omega$, 则有

$$C_1 \approx \frac{1}{2\pi f_L \sqrt{10R_{w1}R_2}} = 2.8\text{nF}, \quad \text{取 } C_1 = 3.3\text{nF}, \text{ 则 } C_2 = 33\text{nF}。$$

当 $f_H=3\text{kHz}$ 时, $R_1 + r_o = \frac{1}{10R_2(2\pi f_H C_1)^2} \approx 780\Omega$, R_1 取一个约 220Ω 的电阻(实际测

试中, f_H 若达不到要求可以适当减小 R_1)。

对于放大环节, 为保证 $|\dot{A}|$ 大约大于11, 并且在调节频率时 $|\dot{F}|$ 的变化范围为0.085~0.091, 变化率为5.6%。若取 R_{T1} 为 $10\text{k}\Omega$ (或选用负温系数的热敏电阻), R_{w2} , 与 R_{F2}

和D1、D2一起构成稳幅环节，则 $|\dot{A}|$ 的变化范围为11.68~11.01，变化率为5.9%。若选择 $R_{F2}=220\Omega$ ，则

$$R_{w2} = \frac{R_{T1} + R_{F2}}{11.68} = 0.98k\Omega，\text{为调节增益便于起振，选择一个}2k\Omega\text{的电位器。}$$

为防止振荡频率变化时引起第三级积分电路输出波形出现饱和输出， R_{w1} 和积分电路中的电位器 R_{w4} 一起采用一个双联可调的20k Ω 电位器。

2. 正弦波-方波变换电路参考设计

电路的第二部分为正弦波-方波变换电路，可采用一个单门限比较器完成。由于第一部分输出的正弦波为均值为0的交流信号，若门限参考电压 $V_{ref}=0$ ，则可以获得输出方波（波形占空比为50%）；若为了获得输出占空比连续可调的矩形波，则可用可变电位器 R_{w3} 对正负12V的电源分压获可变参考电压 V_{ref} 。若uA741在 ± 12 电源电压下的正弦波输出的饱和输出幅度 $V_{om}=10V$ ，则在占空比为10%~90%可调范围内串联的电阻 R_9 、 R_{10} 应满足如下关系：

$$\frac{R_{w3}/2}{R_{w3}/2 + R_9} = \frac{V_{om} \cos(\frac{2\pi}{T} \times 0.05T)}{V_{CC}} \quad (4)$$

若取 R_{w3} 为10k Ω 的可变电位器，则 $R_9=1.3k\Omega$ ，选择 $R_9=R_{10}=1.2k\Omega$ 的电阻。若平衡电阻 R_3 取2.2k Ω ，则 R_{11} 取1k Ω 。

若要求输出矩形波的峰峰值 $\geq 12V$ ，可采用串接稳定电压为+6.2V的稳压管（IN4375A）进行稳压和限幅。为保证稳压管正常工作，比较器的输出端要接限流电阻 R_4 。该电阻需根据稳压管和uA741的电流参数 I_Z 、 I_{OS} （ $\approx 25mA$ ），要求 $I_Z < I_{OS}$ 确定，一般为几百欧姆。

$$R_4 = \frac{V_{om} - V_Z}{I_Z} = \frac{10 - 6.2}{0.02} = 190\Omega，\text{取值}200\Omega。$$

3. 方波-三角波变换电路参考设计

电路的第三部分为方波-三角波变换电路，该电路由一积分电路构成。理想情况下（如图5所示，假设 $R_6 \gg Z_{C3}$ ），在积分输出波形稳定且不失真时，若输入波形的周期为 T_0 ，则输出波形的峰峰值 v_{opp} 与输入波形的峰峰值 v_{ipp} 满足关系：

$$v_{opp} = \frac{v_{ipp} \times T_0}{4(R_5 + R_{w4})C} \quad (5)$$

当 R_{w1} 减小时， f_0 升高， T_0 减小。为防止电路对任意周期方波信号积分饱和并且维持稳定输出幅度， R_{w4} 也需随 R_{w1} 的减小而减小。由于周期变比为 $T_{0max}/T_{0min}=4.3$ ，则积分电路的时间常数也应该具有相同的变比，这里取 $\tau_{max}/\tau_{min}=10$ ，则

$$R_5 = 2.22k\Omega，\text{取值}2.2k\Omega。$$

为使三角波线性度较好，通常要求 $\tau > (3 \sim 5)T_0/4$ ，由 $T_{0min}=0.33ms$ 得

$$C_3 = (3 \sim 5)T_{0min} / R_5 = (3 \sim 5)0.0379nF$$

由 $v_{opp} \geq 1V$ 可得, $C_3 \leq \frac{v_{ipp} T_{0min}}{4R_5 v_{opp}} = 0.23\mu F$, 因此取 $C_3=100nF$ 。

为了克服积分电路的直流漂移, 在电容 C_3 上并联电阻 R_6 , R_6 的取值要远远大于当前频率下 C_3 上的容抗, 这里可取 $R_6 = 50k\Omega$ 。为进一步控制输出波形不饱和, 在积分电路的输出端接一个 $2k\Omega$ 左右的负载 R_8 , 以给电容提供泄放回路。

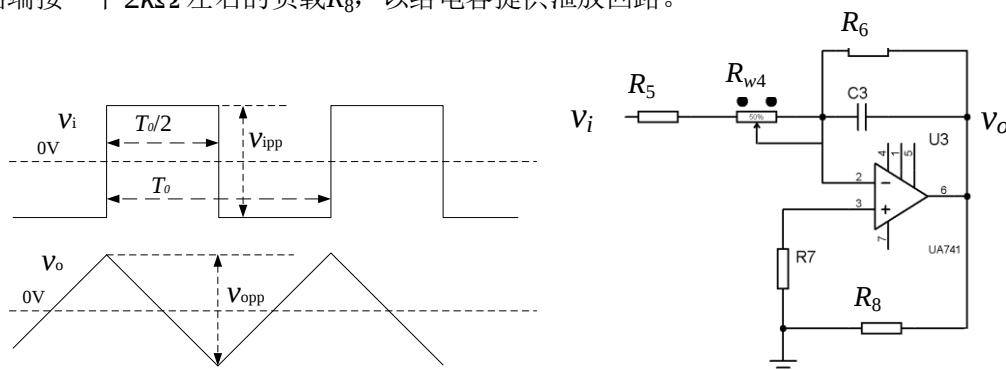


图5 方波转三角波原理图

四、 实验测试内容

1、 参考下图6设计RC正弦波振荡电路, 图中 R_{w1} 采用 $20k\Omega$ 的双联可调电位器, R 取 10Ω 左右, 电容 C 可取 $0.1\mu F$, R_1 取 $1k\Omega$, R_2 取 $10k\Omega$, R_{w2} 取 $10k\Omega$ 电位器。

(1) D_1 、 D_2 不接入电路, 在 R_{w1} 不调动的情况下, 调节 R_{w2} 使电路起振, 用示波器观察振荡输出波形并绘出该波形, 分析波形的特点。

(2) 将 D_1 、 D_2 接入电路, 观察振荡输出波形的变化, 调节 R_{w1} , 测试振荡输出波形的峰值和频率范围填入表1

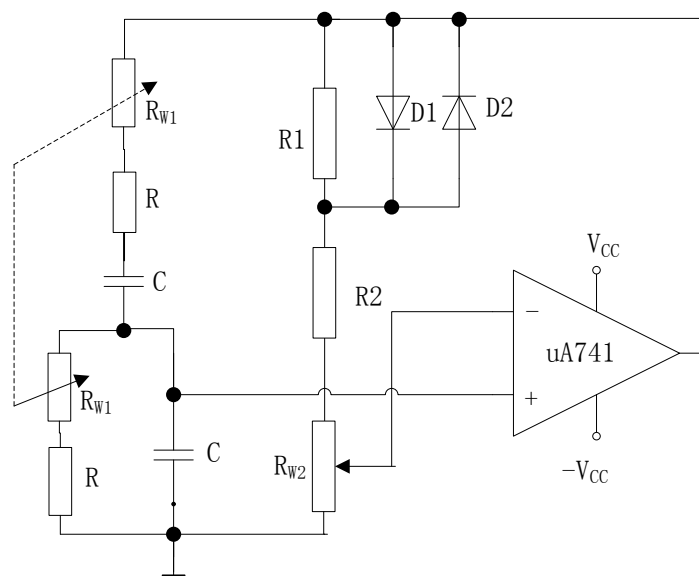


图6

表 1

	R_{w1} 调至最小	R_{w1} 调至中间某个值	R_{w1} 调至最大
f (HZ)			
幅度 V_{opp} (V)			
波形			

2、修改图6中的元件参数，即将 R_{w1} 、C串联电路中的C改为3.3nF，将 R_{w1} 、C并联电路中的 R_{w1} 改为33K Ω 的固定电阻，C改为33nF，调节 R_{w2} 使电路有振荡波形输出，用示波器观察 R_{w1} 、C不等时正弦波振荡的输出波形，测量输出波形的频率和峰峰值填入表2

表 2

	R_{w1} 调至最小	R_{w1} 调至中间某个值	R_{w1} 调至最大
f (HZ)			
幅度 V_{opp} (V)			
波形			

注意：在调节 R_{w1} 改变输出波形频率时，电路若不起振，则需重新调节 R_{w2} 使电路有振荡波形输出。

3、参考图 4 搭建电路，正弦波振荡电路的参数保持实验内容 2 中的参数不变， R_{w1} 和 R_{w4} 采用双联可调电位器。

(1) 将第二级运放（即正弦波转换为方波电路）的门限电压固定为 0V，调节正弦波振荡电路的增益控制电位器 R_{w2} ，使得电路稳定起振，在低频端选定一个输出幅值，而后逐步调高输出频率，用频率计或示波器测试正弦波振荡电路产生的正弦波频率范围及其输出幅度（ V_{opp} ），以及对应频率的方波变换电路、三角波变换电路的输出幅度，并且用示波器观察输出波形，将测量结果填入表 3。

(2) 在观测方波变换电路输出波形时，用示波器测量方波的上升沿时间（ t_r ）与下降沿（ t_d ）的时间（测量示意图如图 7 所示），将测量值填入表 4，记录示波器观测到的各级输出波形。

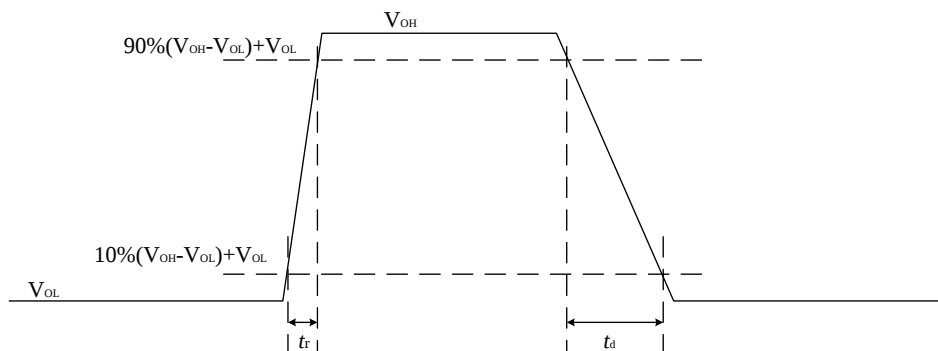


图 7 脉冲波形的上升沿与下降沿测量示意图

注意：1. f_{oH} 达不到设计要求可以更换适当的电阻 R_1 ；
2. 输出幅值一旦选定，在调节输出测试频率点过程中，不能再动！

3. 三角波转换的积分电路中，若波形线性度不好可适当增加 R_5

表 3

	最低频率 $f_{oL} =$		中心频率 $f_{oM} =$		最高频率 $f_{oH} =$	
	幅度 (V_{opp})	波形	幅度 (V_{opp})	波形	幅度 (V_{opp})	波形
正弦波						
方波						
三角波						

表 4 方波的上升沿与下降沿测试数据记录表

最低频率 $f_{oL} =$		中心频率 $f_{oM} =$		最高频率 $f_{oH} =$	
t_r (us)	t_d (us)	t_r (us)	t_d (us)	t_r (us)	t_d (us)

(3) *扩展实验测试内容：将方波变换电路改进为占空比可调电路，调节正弦波产生电路的频率为 1kHz，调节占空比可调旋钮，测试矩形波电路的占空比调节范围。（测试记录表格自拟）。

五、 电路安装及调试方法

1. 电路布局

在多孔电路实验板上装配电路时，首先应熟悉其结构。确认哪些孔眼是连通的，并在实验板上的合理安排好电源正、负引出线（孔）。

电路布局时应安排好各个集成块的位置，以方便连线为原则。电路与外接仪器的连接端、测试端要布置合理，便于操作。可调元件应放置在合适的位置以方便调节。

2. 安装与调试

电路安装前，要先检测电阻、电容的大小，根据设计的电路，正确连接元器件。

电路安装完成后，要用万用表检测电源极性连接是否正确，元器件之间的连接是否可靠。

根据设计要求调节电压源的电压至规定值，一切正常后才能给待测电路通电调试。

实验调试过程中，最好采用按功能模块分别调试的分块调试方法，首先调试正弦波振荡电路是否产生符合要求的正弦波，然后在正弦波信号的作用下调试方波变换电路，检查是否产生符合要求的矩形波，最后调试三角波变换电路，检查波形幅度是否达到设计要求。

六、 设计、仿真及实验问题研究

1. 影响正弦波起振的关键因素是什么？说明 D_1 、 D_2 的作用。
2. 三角波的输出幅度是否可以超过方波的幅度？如果正负电源电压不等，输出波形如何？实验证明之。
3. 调节矩形波占空比时，观察矩形波波形是否会消失？若波形消失，分析其原因。
4. 若 R_{w1} 、 R_{w4} 不用双联电位器，则调节频率时，三角波输出会发生什么变化，为什么？

七、 设计报告要求

1. 设计的任务和要求。
2. 方案设计和比较，说明所选方案的理由。
3. 电路各部分原理分析、元器件选择和参数计算。
4. 测试结果及分析：

- (1) 实测输出频率范围，分析设计值和实测值误差的来源。
- (2) 根据表 3 对应频率的高、中、低三点，分别正弦波、方波、三角波的实测输出电压的峰峰值，分析输出电压幅值随频率变化的原因。据此简要画出各波形产生电路的幅频特性。
- (3) 画出示波器观测到的各级输出波形，并进行分析；若波形有失真，讨论失真产生的原因和消除的方法。

5、总结与建议

总结所设计中存在的问题，提出改进的设想；完成本设计后的收获、体会和建议。

6、参考文献

实验六 集成直流稳压电源的设计

(8 学时)

一、实验目的

1. 了解集成稳压器的特性和使用方法。
2. 掌握集成稳压器主要性能指标的测试方法。
3. 学会集成稳压器的设计方法。

实验仪器及器件

序号	名 称	型号/规格	数 量
1	面包板	BDCL	1 块
2	数字式万用表	UT58	1 块
3	数字存储示波器	TDS 1002	1 台
4	三端集成稳压器	LM317	1 只
5	变压器 (实验室提供)	220V/20V×2、12V	1 只
6	整流二极管	1A, 500V	9 只
7	电容器	470μ F, 100μ F, 0.01μ F	各 2 只
8	电位器	1K , 5K	各 1 只
9	负载电阻	100Ω /2W	2 只
10	三极管	TIP41	1 只
11	电阻器	120, 150 , 220, 360 , 560	各一只
12	*稳压二极管	1.25V	1 只

三、预习要求

1. 预习直流稳压电源电路的组成及工作原理。
2. 完成电路参数设计，画出正确、完整的实验电路。
3. 理解、领会和明确实验内容，写出待测试参数型号和公式，列出测量数据表格。
4. 根据设计任务和要求，写出设计步骤，计算出元器件的参数，列出测量数据表格。

四、实验原理

稳压电路是直流稳压电源的核心。因为整流滤波后的电压虽然已是直流电压，但它还是随输入电网的波动而变化，是一种电压值不稳定的直流电压，而且纹波系数也较大，所以必须加入稳压电路才能输出稳定的直流电压。LM317 是可调三端正电压稳压器，在输出电压范围为 1.2V-37V，能够提供 1.5A 电流。本实验也采用集成稳压器进行稳压。

LM317 是三端浮动稳压器，工作时 LM317 建立并保持输出与调节端之间 1.25V 的标称参考电压 (V_{ref}) 这一参考电压由 R_1 (见图 1) 转换编程电流(IPROG)，该恒定电流经 R_2 到地。稳压输出电压由下式给出： $V_{out}=V_{ref}(1+R_2/R_1)+I_{Adj}R_2$

因为调节端的电流 (I_{Adj}) 小于 100μ A 才能保持恒定。为达到这一点，所以静态工作电流都返回到输出端。这样需要最小负载电流，如果负载电流小于最小值，输出电压会上升。因为 LM317 是浮动稳压器，所以只有电路两端电压差对性能是重要的，工作在对地呈高电压也就成为可能。

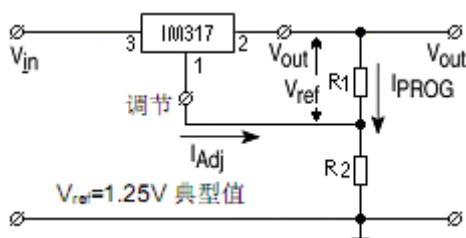


图 2

五、基础实验内容（4 学时）

5.1 电源变压器参数测量

电源变压器的作用是将来自电网的 220V 交流电压 u_1 变换为整流电路所需要的交流电压 u_2 。

实验室给定变压器参数测量：测量结果填入表 1 中。

表 1 变压器的测量（交流电压档测量）

原边电压 (V)	副边①-② (V)	副边②-③ (V)	副边①-③ (V)	副边④-⑤ (V)

表中①②③为变压器的副边绕组其中②为中心抽头，④-⑤为变压器的另一组副边绕组。

5.2 整流和滤波电路的参数测量（以图 2 为例）

在稳压电源中，一般用四个整流二极管组成桥式整流电路，整流电路的作用是将交流电压 u_2 变换成脉动的直流电压 V_1 。滤波电路一般由电容组成，其作用是把脉动直流电压 V_1 中的大部分纹波加以滤除，以得到较平滑的直流电压 V_1 。

改变电容观测和测量 V_1 。计算整流系数 $K=V_1/u_2$ ，将相应的结果填入表 2 中（测量时变压器副边接①-②）

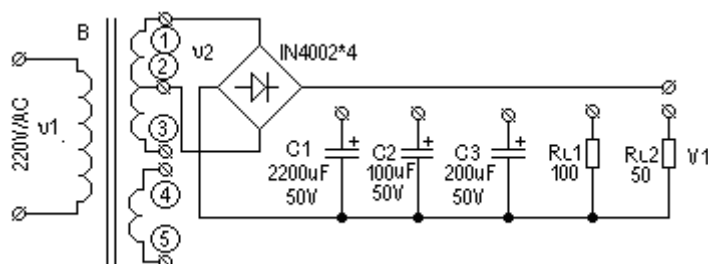


图 2

表 2

电容值	100μ	470μ	2200μ	100μ	470μ	2200μ
负载值	100Ω	100Ω	100Ω	50Ω	50Ω	50Ω
电压值 u_2						
电压值 V_1						
整流系数 k						
波形						

5.3 三端稳压器各项性能指标的测试（以图 3 为例）

输入电压 u_2 受负载和温度发生变化到影响而发生波动时，滤波电路输出的直流电压 V_1 会随着变化。因此，为了维持输出电压 V_1 稳定不变，需要对电压进行稳压。稳压电路的作用是在外界因素（电网电压、负载、环境温度）发生变化时，能使输出直流电压不受影响，而维持稳定的电压输出。稳压电路一般采用集成稳压器和一些外围元件所组成。采用集成稳压器设计的稳压电源具有性能稳定、结构简单等优点。

三端可调式集成稳压器的引脚及其应用电路见附录图 5。

5.3.1. 输出电压与最大输出电流的测试（以 LM317 为例）,测量时以 5V 为准。

测试电路如图所示。一般情况下，稳压器正常工作时，其输出取 $I_o=0.1A$ ，可算出 $R_L=100\Omega$ ，工作时 R_L 上消耗的功率为： $P_L=U_o I_o=5\times 0.1=0.5w$ 故 R_L 取额定功率为 1W，阻值为 100Ω 。

测试 I_{omax} 时，因为实验室没有大功率的负载，（大功率负载在大电流的情况下，受温度影响，负载电阻值会发生变化）。改用三极管 Q_1 和电位器 R_{V2} 组成的电流负载，直到 V_o 的值下降 5%，此时流经 R_L 的电流就是 I_{omax} ，记下 I_{omax} 后，要马上调大 R_L 的值，以减小稳压器的功耗。测量结果填入表 3 中。

注意输出负载的调节，用两块数字万用表监视调试，当电压下降 5%时，记下此时的电压和电流（ I_{omax} ）,马上改变 R_v 使输出电压回到 5V.

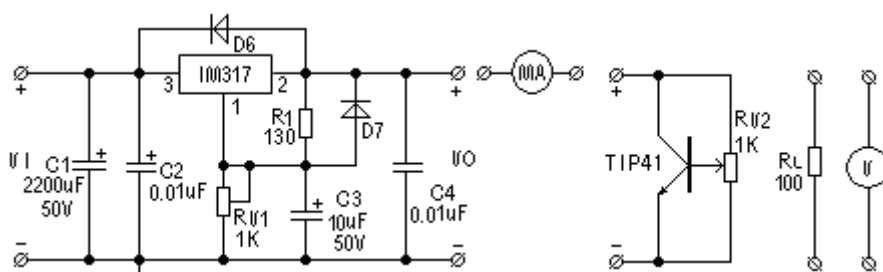


图 3

表 3

	$R_L(\Omega)$	$I(mA)$
5V	100	
4.95V		

5.3.2. 电压调节范围的测量

调节电位器 R_{V1} ，分别测量 V_{omin} 和 V_{omax} 的值，验证 $V_o=1.25\times (1+R_w/R_1)$ 将测量的结果填入表 4 中。

	V_{omin}	V_{omax}
测量电压值 (V)		
计算电压值 (V)		

5.3.3. 稳压系数的测量(调节输出电压为 5V 时)

按图所示连接电路，在 $u_1=220V$ 时，测出稳压电源的输出电压 V_o ，应改变电源电压上升和下降 10%，分别测量稳压电源的输出电压 V_o ， $R_L=100\Omega$ 。在实验室调节交流不太方便时,可采用变压器的次级变换的方法,如①②脚电压为 18V,测量一次,记下 V_{O1} .再更换到③①脚测量一次 V_{O2} ，将测量的结果填入表 5 中。则稳压系数为：

$$S_V=(\Delta V_O/V_O)/(\Delta u_1/u_1)$$

表 5

变压器次级位置	$u_1(V)$	$U_0(V)$	计算 S_V
①②			
③①			

5.3.4. 输出内阻的测量(调节输出电压为 5V 时)

按图 5 所示连接电路，保持稳压电源的输入电压不变，在不接负载 R_L 时测出开路电压 V_{o1} ，此时 $I_{o1}=0$ ，然后接上负载 R_L ，测出输出电压 V_{o2} 和输出电流 I_{o2} ，测量结果填入表 6 中。则输出电阻为：

$$R_O=-(V_{O1}-V_{O2})/(I_{O1}-I_{O2})=(V_{O1}-V_{O2})/I_{O2}$$

表 6

	$R_L = \infty$	$R_L = 100\Omega$
输出电压 $U_0(V)$		
输出电流 $I_0(mA)$		
计算 $R_0(\Omega)$		

5.3.5 纹波电压的测量(调节输出电压为 5V 时)

用示波器观察 V_0 的纹波峰峰值, (此时 Y 通道输入信号采用交流耦合 AC), 测量 V_{op-p} 的值 (约几 mV)。

六、稳压电源电路设计实验

6.1 设计要求

①性能指标要求:

$V_0 = 0V \sim +9V (\pm 0.1)$, $I_{omax} = 100mA$, $\Delta V_{op-p} \leq 5mV$, $S_v \leq 3 \times 10^{-3}$ 。

②要求选用 LM317 三端可调集成稳压器。

③要求调节电位器, 从开始到终点时。电压应从 0-9V, 误差 $\leq 5\%$ 。

6.2 设计步骤

6.2.1 方案论证

根据稳压电源的输出电压 V_0 、输出电流 I_0 、输出纹波电压 ΔV_{op-p} 等性能指标要求, 正确地确定出变压器、集成稳压器、整流二极管和滤波电路中所用元器件的性能参数, 从而合理的选择这些器件及电路形式。设计参考图 4 所示。

6.2.2 选择集成稳压器, 确定电路形式

集成稳压器选用 CW317, 其输出电压范围为: $V_0 = 1.2 \sim 37V$, 最大输出电流 I_{omax} 为 1.5A。所确定的稳压电源电路如图 4 所示。

图 4 中, 取 $C_1 = 0.01\mu F$, $C_2 = 10\mu F$, $C_0 = 1\mu F$, $R_1 = 200\Omega$, $R_W = 2k\Omega$, 二极管用 1N4001
在图 2 电路中, R_1 和 R_v 组成输出电压调节电路, 输出电压 $V_0 \approx 1.25 (1 + R_v/R_1)$,
 R_1 取 $120 \sim 240\Omega$, 流过 R_1 的电流为 $5 \sim 10mA$ 。取 $R_1 = 120\Omega$, 则由 $V_0 = 1.25 (1 + R_v/R_1)$,
可求得: , , 故取 为 的精密线绕电位器。

6.2.3 选择电源变压器

变压器的选择实验室已给定, 条件满足设计要求。

6.2.4 整流二极管和滤波电容的计算

确定整流二极管的正向平均电流 I_D 、整流二极管的最大反向电压 U_{RM} 和滤波电容的电容值和耐压值。根据所确定的参数, 选择整流二极管和滤波电容。

整流二极管选 1N4001, 其极限参数为 $U_{RM} \geq 50V$, 而 $\sqrt{2}U_2 = 9.1V$,

滤波电容 C 可由纹波电压 ΔV_{opp} 和稳压系数 S_v 来确定。

因为 $S_v = (\Delta V_0/V_0) / (\Delta U_1/U_1)$, 而 $U_0 = 9V$, $V_2 = 18V$, $\Delta V_{op-p} = 5mV$, $S_v = 5 \times 10^{-3}$

所以 $\Delta U_1 = \Delta U_{op-p} U_1 / U_0 S_v$

滤波电容为 $C = I_{Ct} / \Delta U_1 = I_{omax} / \Delta U_1 = 3333\mu F$, 电容 C 的耐压应大于 $\sqrt{2}U_2 > 9.1V$ 。

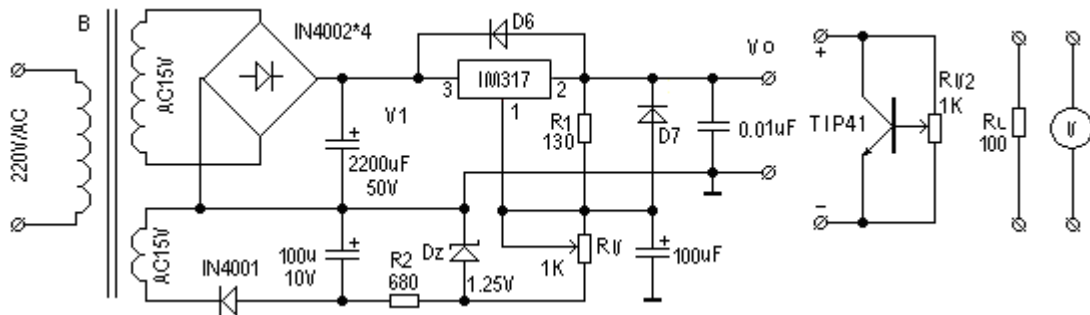


图 4

6.2.5.稳压电路设计举例：根据设计性能指标要求

电路采用三端集成稳压器电路方案，电路原理图如图 5 所示。其中 IC 为三端集成稳压器。故有：

$$V_o = V_{32}(1 + R_2/R_1) = 1.25(1 + R_v/R_1)$$

其最低输出电压为 1.25V。而图 3 所示电路则可以使电压从 0V 开始调整。该电路和 317 基本应用电路的不同之处是增加了一组负压辅助电源。稳压管 Dz 正极对地电压为一 1.25V (也可用二极管串接而成)，调压电位器 RV 的下端没有接在地端，而是接在稳压管正极，稳压电源的输出电压仍然从三端稳压器的输出端与地之间获得。这样当 RV 的阻值调到零时，R1 上的 1.25V 电压刚好和 Dz 上的 -1.25V 相抵消，从而使输出电压为 0V。该电路可以从 0V 起调，输出电压可达 9V。

根据 $V_o = 1.25(1 + R_v/R_1)$ 和给定的可调电阻值，计算 R1 的值。

6.3 电路设计、仿真和安装

电路的设计、仿真和安装在课外外完成，电路测试在课内进行。

6.4 电路测量

根据测量要求，设计测量的表格，将测量结果填入表中，要满足设计要求。

七、实验报告要求

1. 设计题目和技术指标要求。
2. 写出设计步骤和电路中各参数的计算结果。
3. 画出标有元件值的电路图。
4. 记录性能指标的测试过程。
5. 整理实验数据，并与理论值进行比较。分析误差原因。

八、注意事项

1. 实验时要对各个功能模块电路进行单个测试，需要时可设计一些临时电路用于调试。
2. 测试电路时，必须要保证接法正确，才能打开电源，以防元器件烧坏。
3. 注意 LM317 芯片的输入输出管脚和桥式整流电路中二极管的极性，不应反接。
4. 按照原理图联接时必须要保证可靠接地。

九、实验总结

1. 通过实际测试该电路形式和选择的设计参数能满足设计指标的要求。
2. 稳压电源的输出内阻和稳压系数是稳压电源的关键指标，设计时应考虑指标的要求。
3. 设计中如何减小纹波电压。
4. 对所测结果进行全面分析，总结桥式整流、电容滤波电路的特点。
5. 根据所测数据，计算稳压电路的稳压系数 S 和输出电阻 R0，并进行分析。
6. 分析讨论实验中出现的故障及其排除方法。

十、附录

9.1 固定式三端稳压器的引脚图及典型应用电路

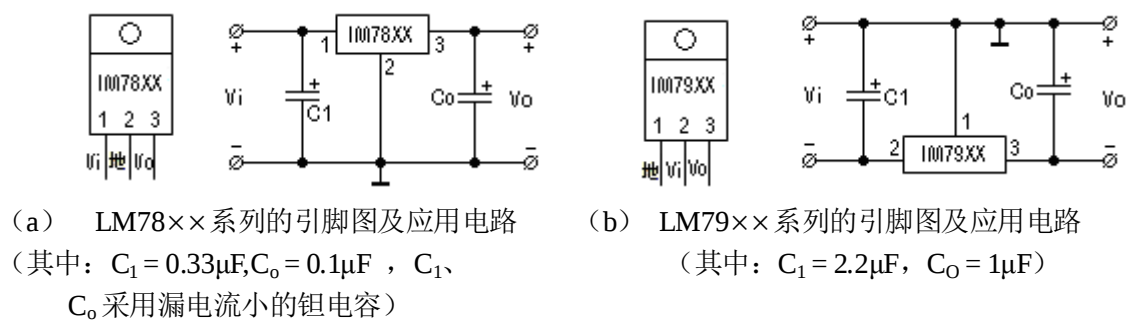


图5 固定式三端稳压器的引脚图与应用电路

说明: 稳压器输入端的电容 C_1 用来进一步消除纹波, 此外, 输出端的电容 C_o 与 C_1 起到了频率补偿的作用, 能防止自激振荡, 从而使电路稳定工作。

9.2 可调式三端稳压器的引脚图及其典型应用电路

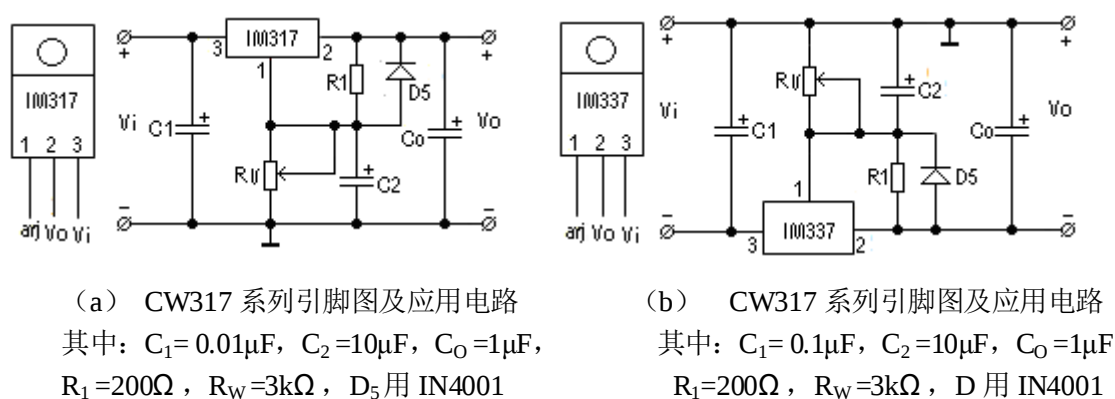


图6 可调三端式集成稳压器

在图 5(a)中, R_1 与 R_w 组成输出电压调节电路, 输出电压 $V_o \approx 1.25 (1 + R_v / R_1)$, R_1 的值为 $120 \sim 240\Omega$, 流经 R_1 的泄放电流为 $5 \sim 10\text{mA}$. R_v 为精密可调电位器。电容 C_1 可以进一步消除纹波, 电容 C_1 与 C_o 还能起到相位补偿作用, 以防止电路产生自激振荡。电容 C_2 与 R_w 并联组成滤波电路, 电位器 R_v 两端的纹波电压通过电容 C_2 旁路掉, 以减小输出电压中的纹波。二极管 D_5 的作用是防止输出端与地短路时, 因电容 C_2 上的电压太大而损坏稳压器。

实验七 音响放大器综合设计实验

(16 学时)

一、实验目的

1. 掌握运用电路仿真软件进行模拟电路辅助设计的方法;
2. 掌握用运放与功率管设计音频功率放大电路的方法;
3. 掌握典型音频功率放大电路的安装、调试与参数测试的方法。
4. 学习音调控制电路的设计、调试与测试方法。
5. 尝试混响延时电路设计与调试。

二、实验说明

1. 该设计实验采用电路设计软件仿真、单元电路安装调试和音响总装调试与性能参数测试分三步进行,以提高学生的综合设计与实践动手能力。

2. 音响放大电路设计前应复习相关理论知识并了解相关实验测试技术;

1) 话筒信号放大(前置放大电路)的设计与测试部分:

通用运放的基本应用与话筒信号的输入阻抗匹配;

学习专用仪表运放在小信号前置放大电路的应用。

2) 功率放大器的设计部分在两中实用设计方案可选(重点)

①采用通用运放驱动功率管的功率放大器的设计、调试与测试;

②采用运放驱动集成功放电路的功率放大器设计、调试与测试。

3) 音调控制电路的设计、调试与性能测试部分(选作部分)

音响音调控制电路的设计与计算测试方法;

音响音调控制电路的测试方法。

4) 音响放大电路综合设计实验(扩展内容): 数字混响延时电路的应用。

1. 音响放大器综合设计实验安排:

第一阶段: 音响放大电路设计与软件仿真。

相关电路理论复习、音响放大电路设计方案选择及音响放大电路的电路理论设计在课外完成。设计音响放大电路的Proteus仿真调试与测试,必须有相关的电路图及数据图表。时间为4学时。

第二阶段: 分单元电路进行调试与测试并验收。

话筒信号放大电路与混放电路、功放电路为基本要求。音调控制电路与专用前置放大电路设计与测试为选作部分。一般在课前要接好电路板,在实验课堂做调试测试,实验时间为8学时。

第三阶段: 音响放大电路的总装调试与性能参数测试并验收。

对通过测试的单元电路进行总装、调试与测试,实验验证设计的电路,记录测量结果。该阶段任务要求在课内完成,时间为4学时。

课外完成规范的设计实验报告。

音响放大器综合设计实验

一、综合设计任务与要求

1. 综合设计任务

用给定元器件设计一个能对外接收高阻话筒信号、能进行音调控制调节、能对外接 8Ω 扬声器输出功率达 $1W$ 的音响放大器。

2. 设计音响放大器性能要求

1) 输出功率: $P_{OM} \geq 1W$ 扬声器阻抗 $Z_L = 8\Omega$ 采用单电源电压 $V_{CC} = 15V$ 。

2) 输入阻抗 $R_i > 20k\Omega$

*3) 音响频率响应: $f_L = 40Hz$ 、 $f_H = 15KHz$ 。

*4) 音调控制特性: $1kHz: A_{uf} = 0dB$;

$40Hz$ 与 $15kHz: A_{uL} = A_{uH} \approx \pm 20dB$ 。

说明: 带(*)的指标要求为选作内容。

二、可供实验元器件

音响放大电路设计实验供应元器件如表-1

表-1 音响电路实验可供(可选)元器件列表

序号	名 称	型号	数量	序号	名 称	型号	数量
可供元件清单				可供元件清单			
1	运算放大器	UA741	4 片	8	电解电容	470 uF	1 支
		或 LM324	1 片			10 uF	7 支
2	大功率管	TIP41	1 支			9	瓷片电容
		TIP42	1 支	0.022	2 支		
3	三极管	9012	1 支	2200P	2 支		
		9013	1 支		0.1uF		
4	二极管	1N4007	2 支	（可选）元器件清单			
5	电位器	100K	1 支	10	集成功放	TDA2003	1 块
		10K	1 支			或 LM380	1 块
		1 K	1 支	11	仪表运放	AD623	1 块
6	大电阻	10Ω/2W	1 支	12	电阻	略	若干
7	电阻	100K	4 支	13	电容	略	若干
		51K	1 支	音响放大电路测试元器件			
		20K	1 支	14	高阻话筒		1 支
		2K	3 支	21	MP3		4 支
		10K	3 支	22	扬声器	2W/8Ω	1 支

音响放大电路设计实验供应元器件的分类说明:

①必做实验部分可供元器件：通用集成运算放大器、三极管、大功率管、二极管、电位器、常用电阻和电容。

②选作实验部分选供元器件：音响集成功放模块、仪表专用集成运算放大器等。选供元器件必须将设计电路与选供元件清单，交指导老师审查签字方可领取。

③音响测试元器件为调试与测试公用器件，以实验教室为单位配置。

三、综合设计实验流程与电路设计参考方案

1. 一般电路实验综合设计流程 如图-1：

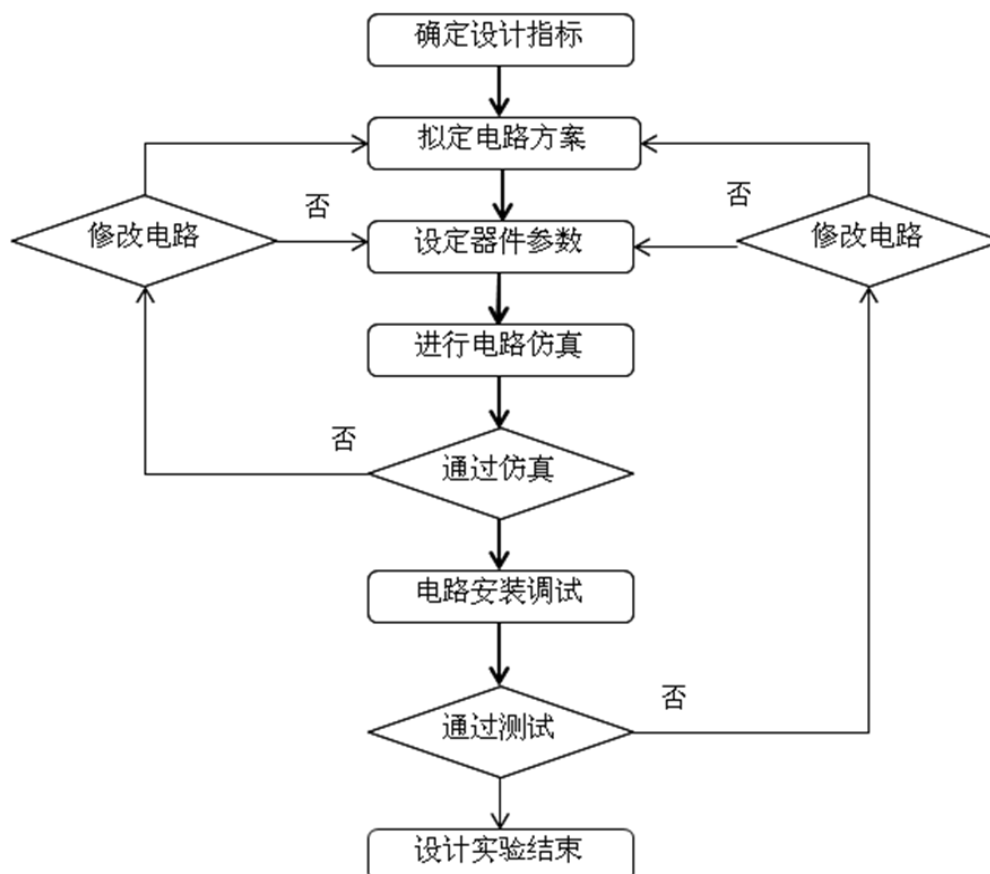
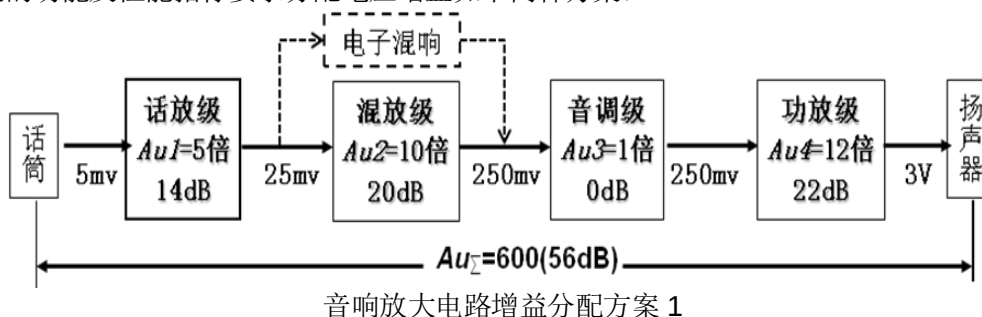


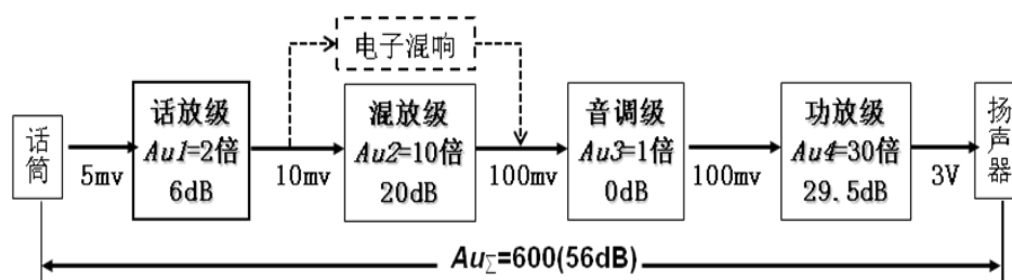
图-1 音响电路设计实验流程图

2. 音响放大器各级增益的分配

根据设计实验要求，音响放大整机电路可分为话放与混放级、音调控制级与功放级。根据各级的功能及性能指标要求分配电压增益如下两种方案：



音响放大电路增益分配方案 1 的特点是：各级增益大体均分，话放级增益 5dB 较小，主要任务解决输入信号的阻抗匹配。音调控制级主要任务是音调调节，虽然在电位器居中时增益为零，但在增益衰减调节时为-20dB；在增益提升调节时为 20dB。由于普通运放的上限频率较低，增益较高则上限频率更低，因此采用运放驱动大功率管电路可采用此增益分配。



音响放大电路增益分配方案 2

音响放大电路增益分配方案 2 的特点是：功放级电压增益较大，比较适用于集成功放电路及采用三极管驱动大功率管的功放电路。

3. 音响放大电路输入输出的阻抗匹配

高阻话筒的输出电阻较高，为了使电路的输入阻抗匹配，话放电路宜采用阻抗较高同相输入电路。

同理，因为音响的负载是 8Ω 的扬声器，在采用单电源时电源在 12—15V，要求电路的输出电阻足够小，使音响能输出要求的功率。

四、音响设计参考单元电路分析

音响放大电路设计主要包含：功放电路、话筒信号放大与混放电路、音调控制电路三大部分。设计实验重点是功放电路部分。虽然现在有性能极好的音响集成功放电路模块，但是设计采用普通运放驱动大功率管的功放电路

1. 采用通用运放前置放大电路

由于话筒的输出信号一般只有 5mV 左右，而输出阻抗达到 20kΩ (亦有低输出阻抗的话筒如 20Ω，200Ω 等)，所以话音放大器的作用是不失真地放大声电信号(最高频率达到 20kHz)。其输入阻抗应远大于话筒的输出阻抗，可采用输入阻抗较大的同相放大器。一般输入电路采用同相输入在实际应用中的自激噪声较大可在此运放的输出端与方向输入端间接入一各个 0.01μF 的电容器来消除自激。

采用通用运放 UA741 的话音放大与前置放大参考电路如图-2 所示。

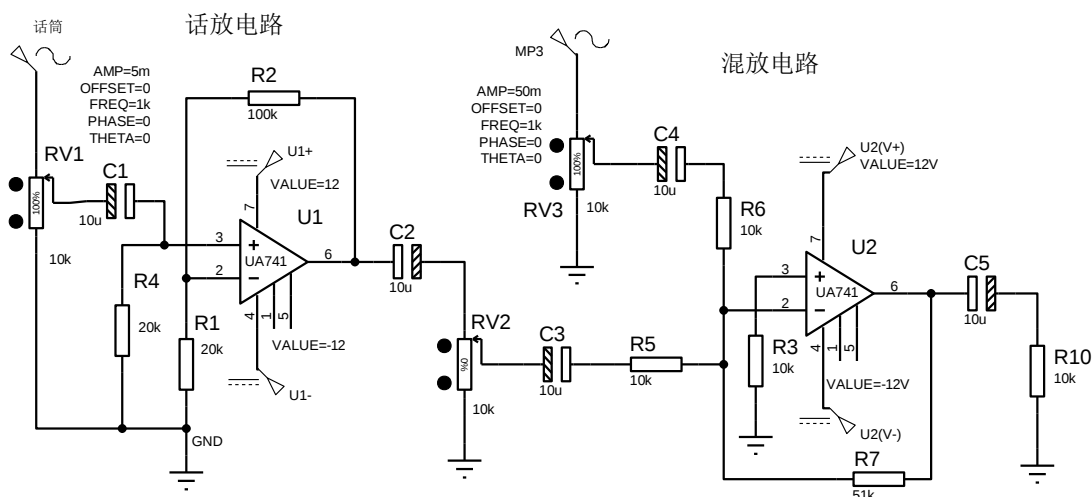


图-2 采用通用运放 741 的话放与混放电路图

音响放大电路采用单电源比双电源电路要简单，运放的单电源接法只不过是输入输出电压的参考点由双电源的接地的零电位，改变为单电源电压 V_{CC} 的 $1/2$ 而已。事实上不仅 LM324 可采用单电源，UA741 同样可采用单电源接法，图-3 就是图-2 运放 741 的话放与混放都采用单电源的电路图。

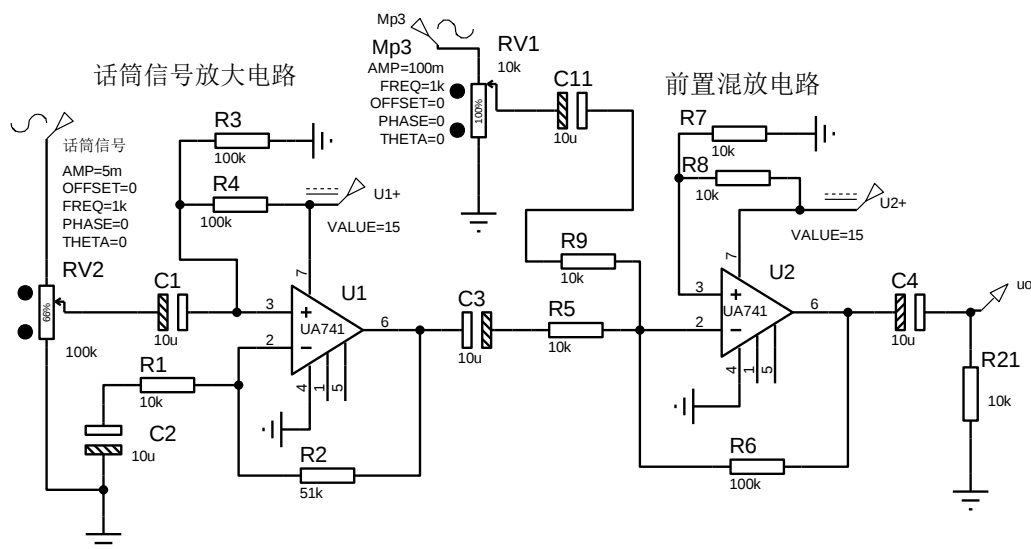


图-3 用单电源供电的通用运放 741 前置放大电路图

2. 采用专用集成运放的话放电路（可选做）

典型的仪表集成运放 AD632 用双电源电压： $+2.5 \sim +5V$ ，一般用单电源电压可取 $10V$ ，但其双电源性能也好，电路增益设置简单，用仅用一个电阻就可设置电路增益值，在输出端负载电阻应大于 $10K$ 时，输出稳定，作话筒信号放大性能良好。图-4 是采用双电源的低阻话筒信号放大电路。

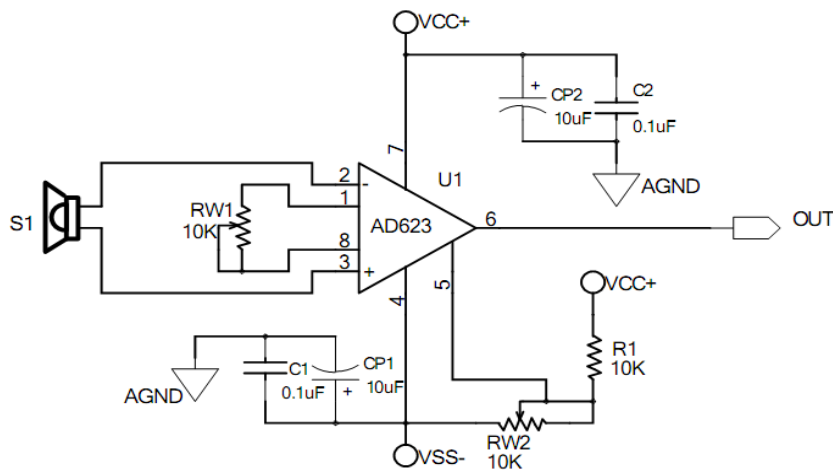


图-4 用 AD623 的话音放大电路图

AD623 采用单电源供电时，要特别注意调偏置电压，，信号输入可采用桥式电路，信号输出最好采用电容耦合输出。

2. 采用运放驱动大功率管的 OTL 功放电路

功率放大器(简称功放)的作用是给音响放大器的负载 R_L (扬声器) 提供一定的输出功率。当负载一定时，希望输出的功率尽可能大，输出信号的非线性失真尽可能地小，效率尽可能高。

功放的常见形式 OTL 功放电路、OCL 功放电路、BTL 平衡桥式功放电路，还有立体声功放电路。

采用单电源的运放驱动功率管的功放电路如图-5。其中，运放为驱动级，晶体管 Q1-Q4 组成复合式晶体管互补对称电路。

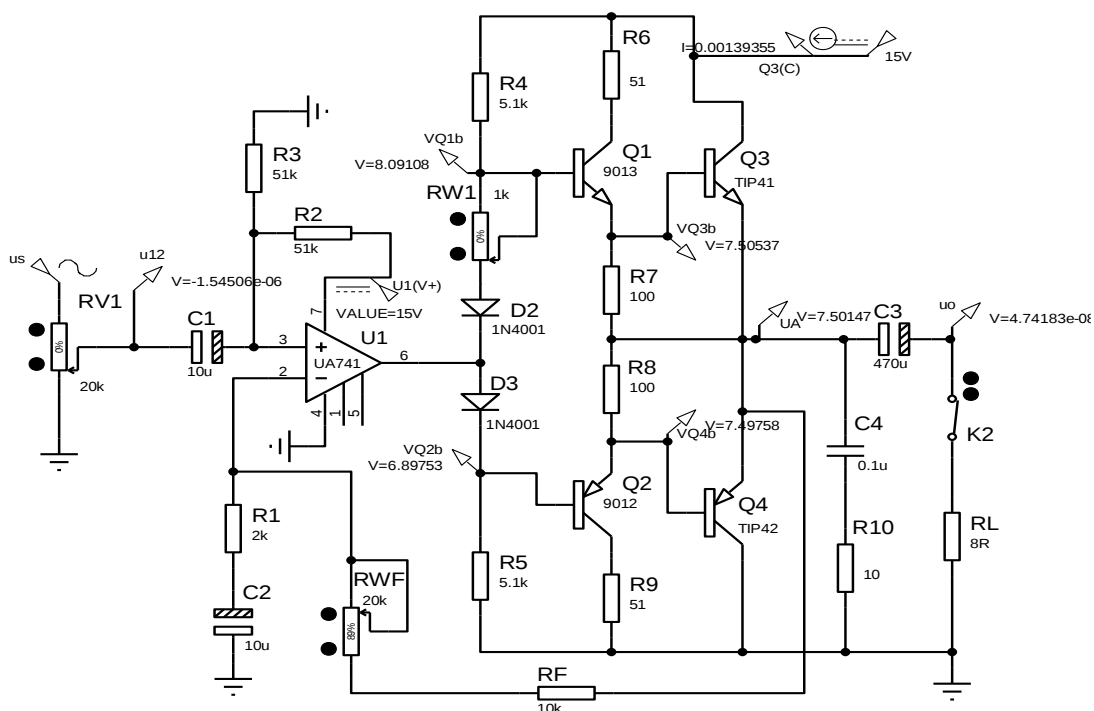


图-5 单电源供电运放驱动功率管的OTL电路

1) 功放电路的工作原理

三极管 Q1、Q3 为同类型的 NPN 管，复合管则仍为 NPN 管，Q2、Q4 为同类型的 PNP 管，复合管则仍为 PNP 管。（需要说明的是如果 Q2 或 Q4 的管型与 Q1 或 Q3 不同，则其所组成的复合管的导电极性由第一支三极管的类型决定）。

R4、R5 及 RW2 及二极管 D1、D2 组成两对复合管的基极偏置电路，静态电流：

$$I_0 = (V_{CC} - 2V_D) / (R_4 + R_5 + RW_2).$$

V_D 为二极管的正向压降，为减小静态功耗并克服交越失真，静态时，Q1、Q2 应工作在微导通状态，

电路的这种状态为甲乙（AB）类状态，选用二极管的材料类型注意要与三极管的类型一致（例如同为硅材料）RW2 是微调电位器电阻不要太大。满足下列关系：

$$V_{Q1B} - V_{Q2B} = V_{D1} + V_{D2} + V_{RW2}.$$

R7、R8 用于减少复合管的穿透电流，提高电路稳定性，一般取一百至几百欧姆。R6、R9 为平衡电阻，可使 Q1、Q2 的输出对称，一般取几十至几百欧姆。（为了改善功放的性能，可在复合功率管的输出管脚支路上对称串联反馈电阻，负反馈电阻值一般取 1 欧姆至 2 欧姆）。

R13、C3 为消振电路，有利于消除电感性扬声器易引起的高频自激，改善功放的高频特性。

C4=470uF 输出耦合电容，功放的下限频率由此确定：

$$f_L = 1 / (2\pi * Z_L * C)$$

2) 功放驱动电路的设置与计算：

功放驱动运放主要完成电压放大任务，采用自举式同相交流电压放大器。C1 输入耦合电容，C2 是自举电容，有隔直的作用。

RF 与 R_{WF} 组成反馈电路，与 R1 共同确定运算电路的比例系数，功放的电压增益为：

$$A_u = 1 + (R_F + R_{WF}) / R_1.$$

3) 功放静态工作点的设置

功放电路参数完全对称，静态时功放的对称中点（输出端）的电压 V_O ，在单电源供电时应为 V_{CC} 的 1/2，这就是交流零点。Q1、Q2 的基极电压，应分别大致为交流零点加加减二极管的正向压降 V_D 。由于采用单电源，运放 U1 的参考电压由 R2、R3 组成分压电路取自单电源。（在双电源供电时，输出端对地电压 $V_O = 0$ ）。

功放电路的静态电流由 I_0 决定， I_0 过小会有交越失真， I_0 过大则会使功放的效率下降，一般可取 $I_0 = 2mA - 3mA$ 。

3. 采用集成功放的参考电路

典型的武端集成功放 TDA200X 系列，性能良好，功能齐全，外接元件少，并附有各种保护和消噪声电路。

典型 TDA2003 的单功放应用电路如图-6

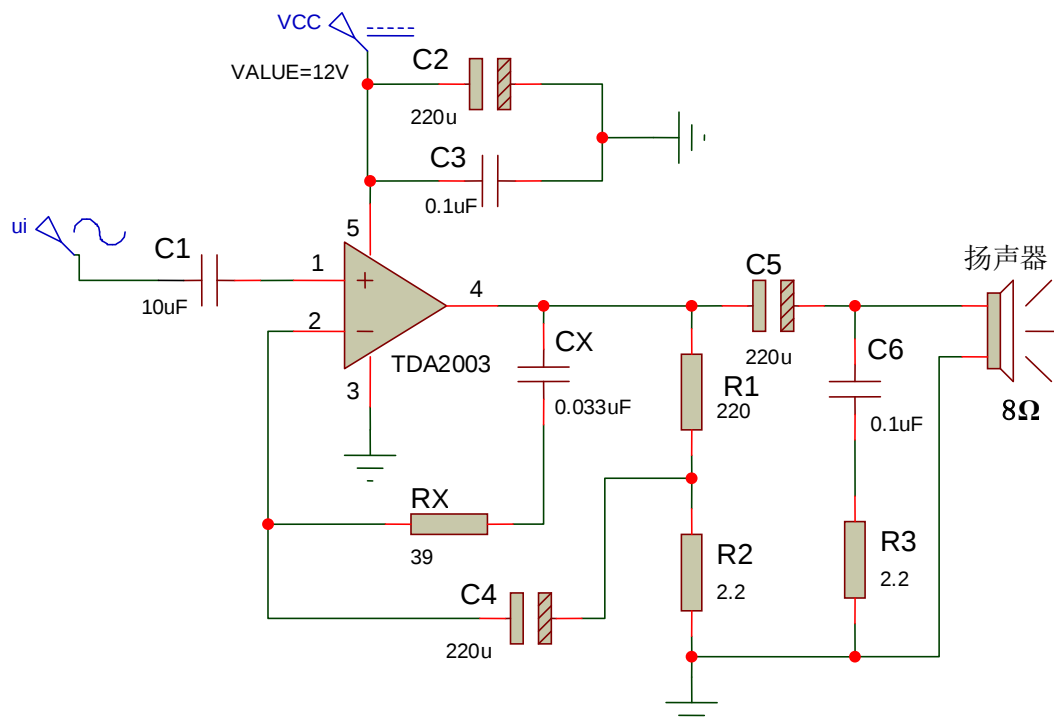


图-6 单集成功放TDA应用电路图

电路中的补偿支路中的电阻取 $R_X=20R_2$ ，电容取 $C_X=1/(2\pi R_1 f_c)$ 。

*当然，用两个集成功放TDA2003，可以接成BTL桥式功放电路。

4. 音调控制电路

音响放大器的主要特性体现在音调控制电路上，这也是其与通用放大器的区别。音调控制主要是控制预调音响放大器的幅频特性。以下典型的音调控制电路如图-7 为例来说明：

以 $f_o=1\text{kHz}$ 为音响的中音频率，设其增益为 0 dB；

f_{L1} 低音转折频率（截止频率），其增益为 ± 17 dB；

f_{L2} 低音频区中音转折频率，其增益为 ± 3 dB；

f_{H1} 高频区中音转折频率，其增益为 ± 3 dB；

f_{H2} 高音转折频率（截止频率），其增益为 ± 17 dB。

可见音调控制电路只对低音频与高频的增益进行提升或衰减，因此，音调控制电路可由低通滤波器与高通滤波器组成。

典型音调控制电路如图-7：图中 RP1 为低音控制电位器，其滑动端向左调向音调电路输入端为低音提升，向右调相向输出端为低音衰减。

RP2 为高音控制电位器，其滑动端向左调向音调电路输入端为高音提升，向右调相向输出端为高音衰减。

高音、低音控制电位器 RP1 与 RP2 均置中端，则音调电路的增益为 0dB ($A_u=1$)。

音调控制电路由低通滤波器与高通滤波器构成。

在图-7 的电路中，由于 $C_1=C_2=0.033\mu\text{F} \gg C_3=C_4=3300\text{pF}$ ，当 $f < f_o$ ，在中音、低音频区， $f < f_o$ ， C_3 与 C_4 可视为开路，电路可作为低通滤波器。

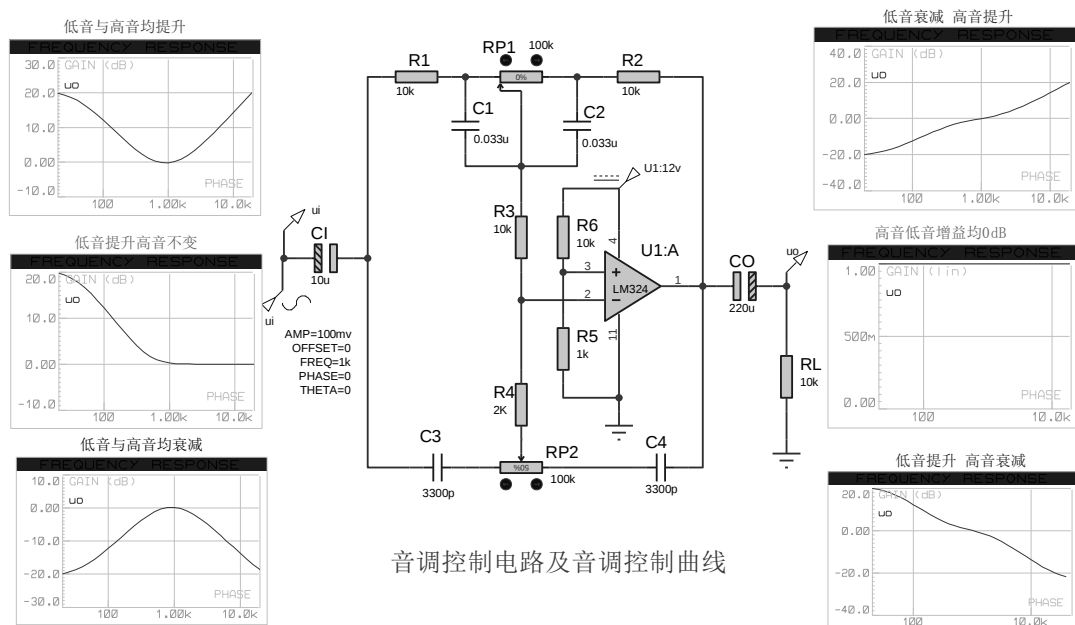


图-7 音调控制电路及音调控制特性曲线图

当低音音调电位器向左调向输入端时，为低音增益提升；

当低音音调电位器向右调向输出端时，为低音增益衰减，如图-8 所示。

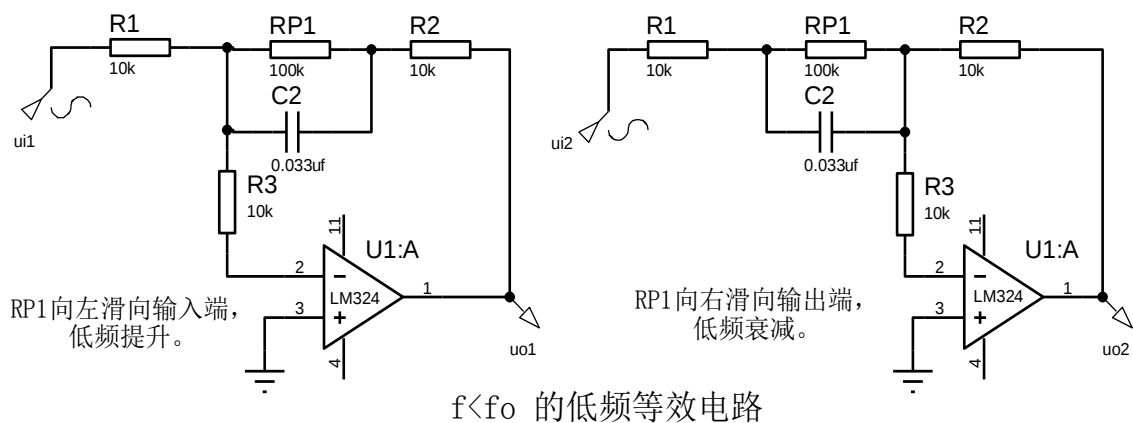


图-8 低音音调控制等效电路图

同理，当 $f > f_o$ ，在中音、高频区，将 C_1 、 C_2 视为短路， R_1 与 R_1 、 R_2 组成星形连接，将其转换成三角形连接后的电路如图-9 所示电路，可视为作为高通滤波器。

$f > f_o$ ， C_1 与 C_2 可视为短路，等效电路简化为图-9 (A)。

对电路作星角变换 $R_a = R_b = R_c = 3R_1 = 30k$ ，等效电路二次简化为图-9 (B)。

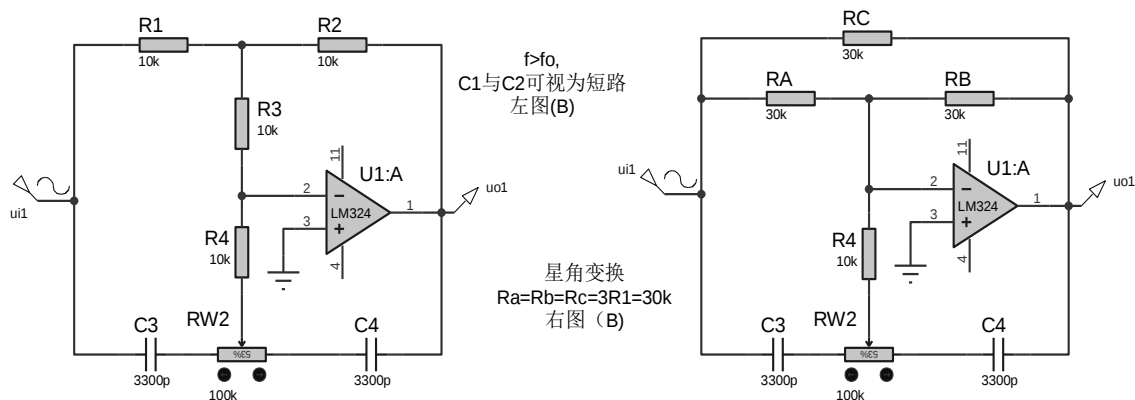


图-9 高音音调控制等效电路图

当高音音调电位器向左调向输入端时，为高音增益提升；

当高音音调电位器向右调向输出端时，为高音增益衰减，如图-9 所示。

五、电路安装、调试与测试

1. 电路布局与接线规则

在面包电路实验板上安装电路时，首先应熟悉其结构。确认哪些孔眼是连通的，防止发生短路的事件。

①电路布局时应安排好中心元器件（例如：集成块大功率管）的位置，分单元电路安装，可调元件应放置在合适的位置以方便调节。电路与外接仪器的连接端、测试端要布置合理，便于操作。

②要充分利用面包板内部的连线，尽量减少不必要的接线。要合理利用导线的不同颜色区分连线的功能。例如：红色线接电源正极、黑色线接地、绿色线接电路的直流回路线、黄色线接交流回路线、蓝色线接负电源负极等。这样检查电路时就清晰明了。

2. 音响电路的安装

电路安装前，要先检测电阻、电容的大小，根据设计的电路，正确连接元器件。

电路安装完成后，要用万用表检测电源极性连接是否正确，元器件之间的连接是否可靠。根据设计要求调节电压源的电压至规定值，一切正常后才能给待测电路通电调试。

实验调试过程中，最好采用按功能模块分别调试的分块调试方法，首先调试正弦波振荡电路是否产生符合要求的正弦波，然后在正弦波信号的作用下调试方波变换电路，检查是否产生符合要求的矩形波，最后调试三角波变换电路，检查波形幅度是否达到设计要求。

3. 音响电路的调试

①调试前先对电路作直观检查。

②静态调试：静态调试时输入端接地，用万用表输出端对地直流电压，音响的话放、混放及音调电路均采用单电源运放，其静态输入输出端直流电压均为 $V_o = V_{cc}/2$ 。单电源的 OTL 功放的输出端也为 $V_o = V_{cc}/2$ 。

运放驱动复合管功放电路静态直流电流应该很小， I_o 为几毫安。如果电流过大，应先检查三极管管脚是否接错？其次检查二极管是否接烦？最后检查复合管的基极偏置电位器是否调得过大？

③动态检查：在输入端接入规定的信号，用示波器观测各级输出电压大小及 波形。如果实测值与要求值相差过大，则应检查电路连接是否正确，检查元件参数是否满足要求。

④怎样消除电路级联后可能产生的自激：

各级电流都要流经电源内阻，内阻压降对某一级可能形成正反馈，应接 RC 去耦滤波电路。 R 一般取几十欧姆， C 一般用几百微法大电容与 $0.1\mu\text{F}$ 小电容相并联。

功放级输出信号较大，对前级容易产生影响，引起自激；集成块内部电路多极点引起的正反馈易产生高频自激现象；电感性扬声器也容易引起自激，通常可以采用接入 RC 电路均可消除自激。

4. 音响放大器的性能与参数测试

音响放大器的主要技术指标：

a) 音响的额定功率：音响放大器输出失真度小于某定值时的最大功率：

$$P_O = V_o^2 / R_L$$

b) 频率响应：放大器的电压增益相对中频 (1kHz) 的电压增益下降 3dB 时 ($u_o' = 0.707u_o$)，对应的高音频/低音频频率 (f_H/f_L)。记录频率特性测量数据，作出频率特性曲线。

c) 输入阻抗：分别测量话放级输入阻抗与 MP3 输入阻抗。

d) 输入灵敏度：音响放大器输出额定功率时的输入电压有效值，测量方法可参考测量额定功率 P_O 时，测量输入信号电压的方法。

e) 噪声电压：在输入电压 $u_i = 0$ 且输入端接地时，用毫伏表或示波器采用交流耦合方式测量输出电压 u_o 值。

f) 整机效率：指音响输出额定功率 P_O 比输入电源功率 P_c ，

$$\text{即： } \eta = (P_O / P_c) \%$$

其中 P_O ：输出额定功率； P_c ：输出额定功率时的输入电源功率。

音响放大器的主要参数测试

①话放电路与混放电路的测试：

先将前置放大电路的输入端接地，测量电路的静态电压电流，然后将信号源输出的频率 $f = 1\text{kHz}$ 电压 $u_{opp} = 50\text{mV}$ 正弦信号接入输入端，测量前置放大电路的电压增益。填入表-1 中。

表-1 前置放大电路测试表

VCC	静态值		动态测试		
	V_O / V	I_O / mA	u_i	u_o	A_u

②运放驱动的复合晶体管功率放大电路的性能测量：

功放电路输入端接入 1kHz 信号电压，调节复合管基极偏置电压的电位器，消除输出交越失真，然后将功放电路输入端接地，测量运放驱动的 OTL 功放电路的运放及各晶体管各级静态电压与电路电流，记录在表-3 中；

保持已调好的功放的工作点不变，再次接入 1kHz 输入信号，逐步提高信号电压，并调节电位器 R_f ，使输出为最大不失真电压，测量功放输出电压 u_o 及功放负载时输入电流 I_{om} ，记录在表-2 中

表- 2 功放电路的测试数据表 $f = 1\text{kHz}$

静态测量 $u_i = 0$	动态测量	负载测量 $R_L = 10\Omega$

I_o mA	U_{b1} /V	U_{b2} /V	U_{e1} /V	U_{e2} /V	U_o /V	U_i /V	U_o /V	Au	V_{cc} /V	I_{om} mA	U_o /V	P_{om} /W	P_c /W	η

③选作1：音响的频率响应的测量：放大器的电压增益相对中频(1kHz)的电压增益下降3dB时($U_o' = 0.707U_o$)，对应的高音频/低音频频率(f_h/f_L)。记录频率特性测量数据如表-2，作出频率特性曲线。

④选作2 音调电路性能及音调控制特性的测量：

音调控制特性及其测量方法：

1) 输入信号 U_i ($=100\text{mV}$) 从音调控制级输入端的耦合电容加入，输出信号 U_o 从输出端的耦合电容引出。先测 1kHz 处的电压增益 A_o ，(设定指标为 $A_o=0\text{dB}$)。再分别测低频特性和高频特性。

2) 测量低频音调特性：将高音电位器居中，将低音电位器 RP_1 滑臂分别置于最左端和最右端，改变信号频率从 20Hz 至 1kHz 记下对应的电压增益。

3) 测量高频音调特性：则将高音电位器居中，将 RP_2 的滑臂分别置于最左端和最右端，频率从 1kHz 至 30kHz 变化，记下对应的电压增益。

最后绘制音调控制特性曲线，并标注与 f_{L1} 、 f_x 、 f_{L2} 、 f_o (1kHz)、 f_{H1} 、 f_{Hx} 、 f_{H2} 等频率对应的电压增益。

音调控制特性的测量按 6.2 所述测量步骤进行并将测量数据记录在表-3 中。

表-3 音调控制特性测量数据表 $U_i=100\text{mV}$

测量频率点		f_{L1}	f_{L2}	f_o	f_{H2}	f_{H1}
调输入频率/hz		30		1k		10k
低频提升 高频衰减	音调电位器	低音调向输入端		中端	高音调向输出端	
	U_o/V		140mV	100mV	71mV	
	A_u/dB		3	0	-3	
低频衰减 高频提升	音调电位器	低音调向输出端		中端	高音调向输入端	
	U_o/V		71mV	100mV	140mV	
	A_u/dB		-3	0	3	

依据表-3 的音调控制特性测量数据，作出本音响放大器的音调控制特性曲线。

5. 功放电路的复合管中的功率管是否必须用 TIP41、TIP42 各一个？能否用两个 TIP41 或两个 TIP42？为什么？。
6. 功放电路中二极管 D_1 、 D_2 的作用是什么？应该选用硅管还是锗管？
7. 普通集成运放 UA741 在单电源供电接法中应注意哪些问题？
8. 音响放大电路的自激啸叫是主要产生在哪些环节的？因怎样消除？
7. 设计的任务和要求。

- 8、方案设计和比较，说明所选方案的理由。
- 9、电路各部分原理分析、元器件选择和参数计算。
- 10、测试结果及分析：
- 11、总结与建议

总结所设计中存在的问题，提出改进的设想；完成本设计后的收获、体会和建议。

附：关于音响功率的几种不同标示法的说明：

- 1) 额定功率(RMS: 正弦波均方根)标示法: 美国联邦贸易委员会于1974年规定了功率的定标标准在20~20000Hz范围内谐波失真>1%时测得的有效功率。
- 2) 音乐输出功率(MPO)，不失真音乐输出功率(Music Power Outpur)的缩写，它是指功放电路工作于音乐信号时的输出功率，也就是输出失真度不超过规定值的条件下，功放对音乐信号的瞬间最大输出功率。音乐输出功率为额定输出功率的2倍。
- 3) 峰值音乐输出功率(PMPO)失真 它是最大音乐输出功率，是功放电路的另一个动态指标，若不考虑失真度功放电路可输出的最大音乐功率就是峰值音乐输出功率。（很多音响器材标示的就是峰值音乐功率啊！）

通常峰值音乐输出功率大于音乐输出功率，音乐输出功率大于最大输出功率，最大输出功率大于额定输出功率，峰值音乐输出功率是额定输出功率的5-6倍。