

# 浙江大学实验报告

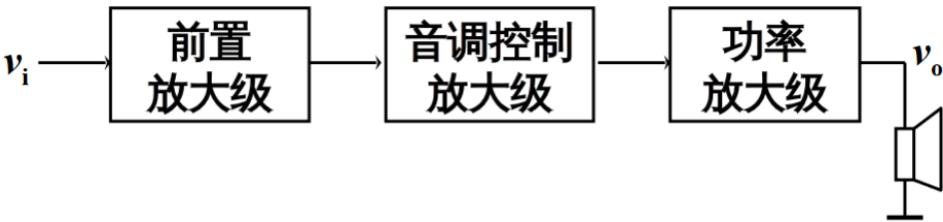
专业：\_\_\_\_\_  
姓名：\_\_\_\_\_  
学号：\_\_\_\_\_  
日期：\_\_\_\_\_  
地点：\_\_\_\_\_

课程名称： 电路与模拟电子技术实验 指导老师： 张治沁 成绩： \_\_\_\_\_  
实验名称： 音频功率放大电路 实验类型： 模拟电子电路实验

- 一、实验目的和要求
- 1.理解音频功率放大电路的工作原理。
  - 2.学习手工焊接和电路布局组装方法。
  - 3.提高电子电路的综合调试能力。
  - 4.通过 Multisim 仿真来分析理论数据和实际数据之间的关系。

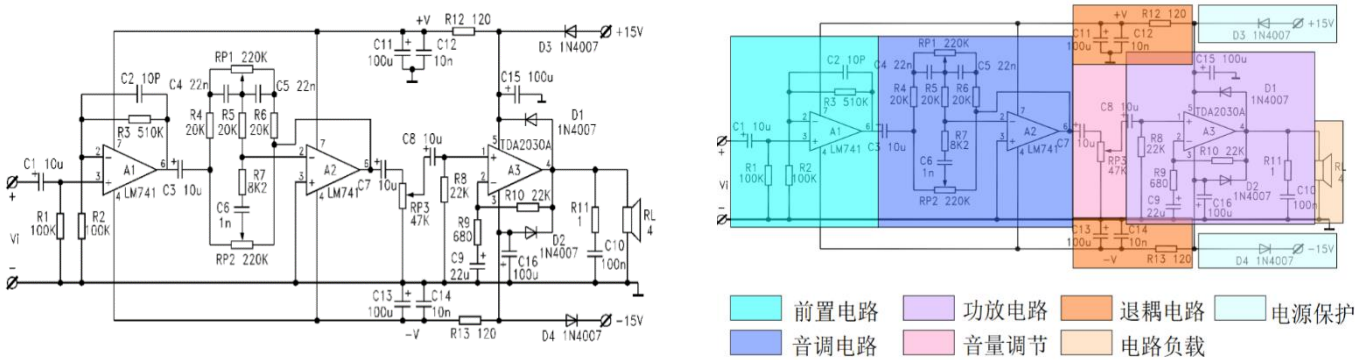
## 二、实验内容和原理

- (1) 实验原理：
- ① 音频功率放大电路，也即音响系统放大器，用于对音频信号的处理和放大。按其构成可分为前置放大级、音调控制级和功率放大级三部分。



作为音响系统中的放大设备，它接受的信号源有多种形式，通常有话筒输出、唱机输出、录音输出和调谐器输出。它们的输出信号差异很大，因此，音频功放电路中设置前置放大级以适应不同信号源的输入。为了满足听众对频响的要求和弥补扬声器系统的频率响应不足，设置了音调控制放大器，希望能对高音、低音部分的频率特性进行调节。为了充分地推动扬声器，通常音响系统中的功率放大器能输出数十瓦以上功率，而高级音响系统的功放最大输出功率可达几百瓦以上。

- ② 音频放大电路的电路图和分级的电路图如下图所示：

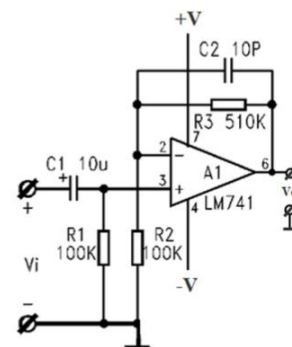


### ③ 前置放大电路：

前置放大级输入阻抗较高，输出阻抗较低。前置放大级的性能对整个音频功放电路的影响很大，为了减小噪声，前置级通常要选用低噪声的运放。由 A1 组成的前置放大电路是一个电压串联负反馈同相输入比例放大器。理想闭环电压放大倍数为：

$$A_{vf} = 1 + R_3/R_2, \text{ 输入电阻 } R_{if} = R_1, \text{ 输出电阻 } R_{of} = 0$$

（其中电容 C<sub>2</sub> 的作用是为了消除电路的自激振荡）



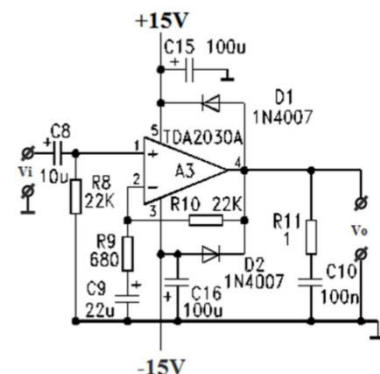
### ④ 功率放大级：

对于功率放大级，除了输出功率应满足技术指标外，还要求电路的效率、非线性失真小、输出与音箱负载相匹配，否则将会影响放音效果。集成功率放大器通常有 OTL 和 OCL 两种电路结构形式。OTL 功放的优点是只需单电源供电，缺点是输出要通过大电容与负载耦合，因此低频响应较差；OCL 功放的优点是输出与负载可直接耦合，频响特性较好，但需要用双电源供电。

本实验电路的功率放大级由集成功率器件 TDA2030A 连成 OCL 电路输出形式。TDA2030A 功率集成电路具有转换速率高，失真小，输出功率大，外围电路简单等特点，采用 5 脚塑料封装构。

右图为功率放大级的电路图，其中 C15 和 C16 的作用是滤波，D1 和 D2 是为了防止防止输出端的瞬时过电压损坏芯片的保护二极管，R11 和 C10 构成了输出端相移校正网络，其作用是把扬声器的电感性负载补偿为接近纯电阻性的负载。

R10、R9、C9 引入了深度交直流电压串联负反馈，接入 C9，直流反馈系数  $F = 1$ ，交流通路中，C9 可视为短路，所以电路负反馈系数  $A_{v3}$  为  $(1 + R_{10}/R_9)$ 。



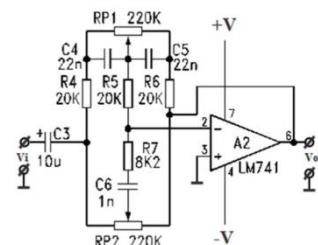
### ⑤ 音调控制电路：

音调控制放大电路的作用为实现对低音和高音的提升和衰减，以弥补扬声器等因素造成的频率响应不足。常用的音调控制电路有衰减式音调控制电路和反馈式音调控制电路两类，衰减式音调控制电路的调节范围宽，但容易产生失真，反馈式音调控制电路的调节范围小一些，但失真小，应用较广。

实验中采用由阻容网络组成的 RC 型负反馈音调控制电路。它是通过不同的负反馈网络和输入网络造成放大器闭环放大倍数随信号频率不同而改变，从而达到对音调的控制。

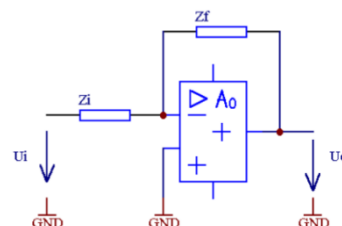
右图为反馈式音调控制电路的电路图，C4、C5 在高频区可视为短路，C6、R7 支路在低频区均视为断路。电路的电压增益  $A_{uf} = U_o/U_i = -Z_f/Z_i$

$$(R_4=R_5=R_6=R=20K\Omega \quad C_4=C_5 \gg C_6 \quad R_{P1}=R_{P2} \approx 9R)$$



### ⑥ 反馈型音调控制电路原理：

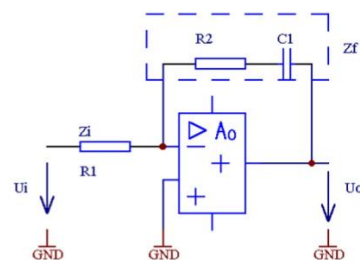
右图为音调控制电路的简化图，它实际上是一种电压并联负反馈型电路，Z<sub>f</sub> 代表反馈回路总阻抗，Z<sub>i</sub> 代表输入回路总阻抗，电路的电压增益  $A_{uf} = U_o/U_i = -Z_f/Z_i$



要合适选择并调节输入回路和反馈回路的阻容网络，就能使放大器的闭环增益随信号频率改变，从而达到音调控制的目的。组成  $Z_i$  和  $Z_f$  的 RC 网络通常有以下四种形式：

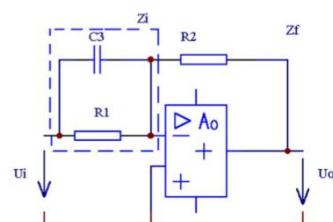
(a) 低音提升：

右图中若  $C_1$  取值较大，只有在频率很低时才起作用，则当信号频率在低频区时，随频率降低， $|Z_f|$  增大，所以  $|Z_f|/R_1$  提高，从而得到低音提升。



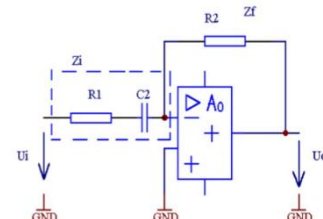
(b) 高音提升：

右图中若  $C_3$  取值较小，只有在高频区才起作用，则当信号在高频区且随频率增高， $|Z_i|$  减小，所以  $A_{uf} = R_2/|Z_i|$  增大，从而得到高音提升。



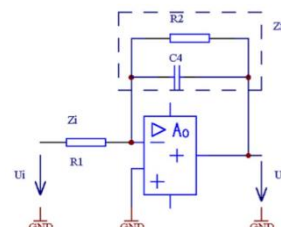
(c) 低音衰减：

右图中若  $C_2$  取值较大，只有在频率很低时才起作用，则当信号频率在低频区时，随频率降低， $|Z_i|$  增大，所以  $A_{uf} = R_2/|Z_i|$  减小，从而得到低音衰减。



(d) 高音衰减：

右图中若  $C_4$  取值较小，只有在频率很高时才起作用，则当信号频率在高频区时，随频率增加， $|Z_f|$  减小，所以  $A_{uf} = |Z_f|/R_1$  提高，从而得到高音衰减。



如果将上述四种形式组合起来，即可得到组合型反馈型音调控制电路（如右下图所示）

在实验中令  $R_1 = R_2 = R_3 = R$ ， $C_1 = C_2 \gg C_3$ ， $R_{W1} = R_{W2} \approx 9R$

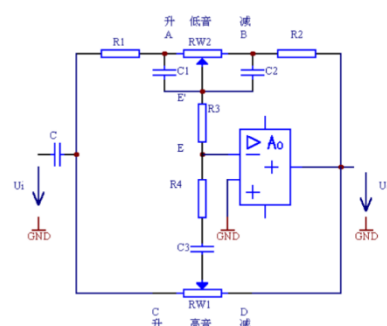
(a) 信号在低频区：

在低频区时，因为  $C_3$  很小，所以  $C_3$ 、 $R_4$  支路可视为开路，反馈网络主要由上半部分电路起作用。又因运放的开环增益很高， $V_E' \approx V_E \approx 0$ （虚地），故  $R_3$  的影响可忽略，当电位器  $R_{W2}$  的活动端移至 A 点时， $C_1$  被短路。可以得到低音最大提升量： $|A_{VA}| = (R_2 + R_{W2})/R_1$ ，按照实际电路参数可得  $|A_{VA}| \approx 8.5$ ，约为 18.6dB 转折频率  $f_{L1} = 48\text{Hz}$ ， $f_{L2} = 410\text{Hz}$ 。

以同样方式可以说明当  $R_{W2}$  滑动到 B 点时，低音的最大衰减量：

$|A_{VB}| = R_2/(R_1 + R_{W2})$ ，带入实际参数可得  $|A_{VB}| \approx 0.118$ ，约为 -18.6dB，转折频率与低音提升的转折频率相同。

(b) 信号在高频区：



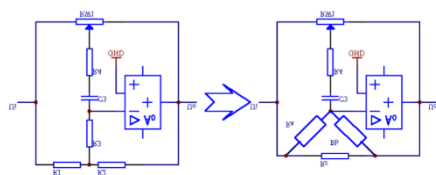


图 (a)

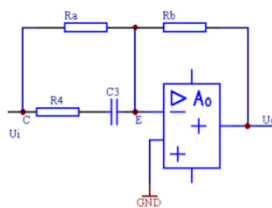


图 (b)

在高频区，因为  $C_1$  和  $C_2$  较大，对高频可视作短路，而  $C_3$  较小，故  $C_3$ 、 $R_4$  支路已起作用，其等效电路可画成如左上图所示形式（利用 Y-- $\Delta$  变化），其中  $R_a = R_b = R_c = 3R$ 。

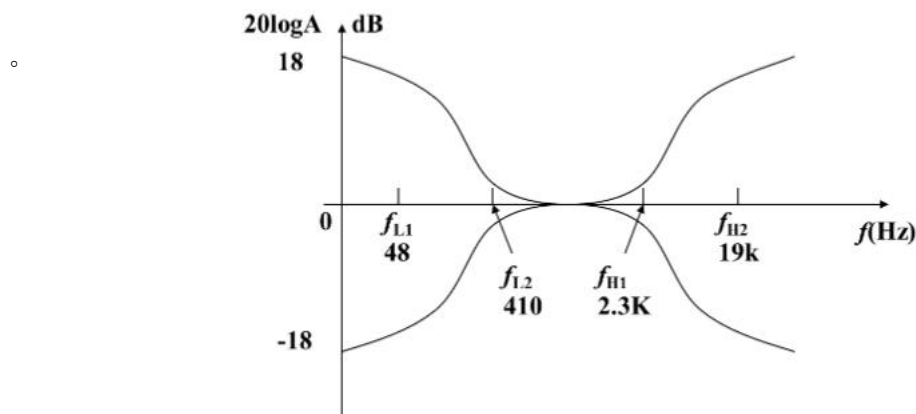
设前级输出电阻很小（如小于  $500\Omega$ ），输出电压  $V_o$  通过  $R_c$  反馈到输入端的信号被前级输出电阻所旁路，故  $R_c$  的影响可忽略（视为开路）。因此当  $R_{W1}$  滑动到 C 点或 D 点时，可分别画出如上图(a)和(b)所示的等效电路（因  $R_{W1}$  的数值很大，为简单起见，可视为开路）。

图 (a) 具有高音提升作用，其最大提升量  $|A_{VC}| = R_b / (R_a / R_4)$ ，代入实际参数可得  $|A_{VC}| \approx 8.3$ （约 18dB）

图 (b) 具有高音衰减作用，其衰减量  $|A_{VD}| = (R_b / R_4) / R_a$ ，代入实际参数可得  $|A_{VD}| \approx 0.12$ （约 -18dB）

高频转折频率  $f_{H1} = 2.3\text{KHz}$ ， $f_{H2} = 19\text{KHz}$ 。

若将音调控制电路高低音提升衰减曲线画在一起，可得到如下图所示幅频特性曲线，由图可见，音调控制级的中频电压放大倍数  $|A_{vd}| = 1$ ，当  $f < f_{L1}$ （约 48Hz）时，低音控制范围为  $\pm 18\text{dB}$ ，当  $f > f_{H2}$ （约 19KHz）时，高音控制范围为  $\pm 18\text{dB}$ 。



## (2) 实验内容：

- ①. 布线与焊接
- ②. 静态调试
- ③. 动态调试
- ④. 空载测量整机指标
- ⑤. 加载测量整机指标
- ⑥. 听音试验

## 三、实验仪器

示波器、信号发生器、稳压电源、空电路板，电烙铁等工具、 $\mu A741$ 、TDA2030A、电阻、电容等元件

## 四、操作方法和实验步骤

(1) 按照音频功率放大电路的电路原理图完成布线与焊接。

(2) 静态调试：

- ① 对照电路图，检查电路的正确性。
- ② 将输入接地，测试各级电路的静态工作点。

(3) 动态调试:

- ① 信号发生器选择频率为 1KHz、有效值为 30mV 的输入信号。
- ② 将示波器的四个通道分别连在输入端、第一级输出端、第二级输入端、第三级输出端, 观察输出信号
- ③ 分别调节音调控制电位器 RP1 和 RP2, 检查输出幅度变化。
- ④ 调节音量电位器 RP3, 检查输出幅度变化。
- ⑤ 电路功能正常后, 将音量电位器 RP3 置于最大位置, 音调控制电位器置于中心位置, 测量主要节点的电压幅度

(4) 空载测量整机指标:

- ① 整机电压增益  $A_V$  的测量: 将音量电位器  $R_{P3}$  置于最大位置, 音调控制电位器置于中心位置时测量整机放大倍数。
- ② 最大不失真输出电压  $V_{Omax}$ : 刚好不出现失真时的输出电压。
- ③ 输入灵敏度  $V_{imax}$ : 最大不失真输出电压时所对应的输入电压, 称为输入灵敏度。
- ④ 噪声电压  $V_N$ : 没有输入信号 (即将输入端对地短路) 时, 测得的输出电压有效值称为噪声电压。
- ⑤ 频率响应特性  $f_L$  和  $f_H$ : 在输入信号频率为 1KHz 时, 时输出信号达到合适的幅度, 保持输出幅度不变, 分别增大和减小输入信号频率, 使输出达到中频输出信号的 0.707 倍, 记录频率。
- ⑥ 高低音控制特性: 先将 RP1、RP2 电位器调至中间位置, 调节输入信号 ( $f=1kHz$ ), 使输出电压为最大输出电压的 10% 左右 (0.5V 左右), 测出  $V_o$ 。保持输入不变, 调节信号频率至  $f=100Hz$ 。使低音电位器 RP1 分别至两端位置 A、B, 测出  $V_{oA}$  和  $V_{oB}$ 。并由此计算出低音净提升量和低音净衰减量, 用分贝表示。

然后将低音电位器 RP1 调回到中间位置, 使高音电位器 RP2 分别调至两端位置 C、D, 测出  $V_{oC}$  和  $V_{oD}$ 。则高音净提升量和高音净衰减量为 (单位为分贝)。

(5) 带载测量整机指标:

在输出端接上额定负载 ( $8\Omega$  电阻), 重测步骤 (4) 中的整机各项指标, 并与空载时测量值比较。

(6) 听音实验:

- ① 试听前设置: 将音调电位器  $R_{P1}$  和  $R_{P2}$  调节至中间位置, 将音量电位器置于最小位置。
- ② 选择收音机和音乐: 选择适当的收音机台, 最好选择音乐, 调整声音大小至合适水平。
- ③ 连接电路板: 连接电路板至电源, 将输入连接至收音机, 将输出连接至音箱。
- ④ 开启电源, 通过调节音量电位器  $R_{P3}$  调节音量大小。
- ⑤ 分别调节音量至最小和最大。
- ⑥ 将音量调至适中水平, 逐一改变音调电位器  $R_{P1}$  和  $R_{P2}$ , 感觉高低音提升衰减效果。

## 五、实验数据记录与处理

1. 静态测量:

	$V_{O1}/mV$	$V_{O2}/mV$	$V_{O3}/mV$
实测值	-4.644	7.460	2.969
理论值	0	0	0
仿真值	0.014	0.027	0.008

2. 动态测试

节点电压/V	实测值	理论值	仿真值	放大倍数	实测值	理论值	仿真值
$V_i = V_{i1}$ (V)	32.67m	30.00m	29.69m	前置放大级 $A_{V1}$	5.907	6.1	6.06
$V_{O1} = V_{i2}$ (V)	193.0m	183.0m	179.9m	音调控制级 $A_{V2}$	1.065	1	1.008
$V_{O2} = V_{i3}$ (V)	205.6m	183.0m	181.3m	功率放大级 $A_{V3}$	31.78	33.34	33.07
$V_{O3} = V_o$ (V)	6.535	6.101	5.997	整机 $A_v$	200.1	203.4	201.9

3. 空载测量整机指标

①

	最大不失真输出电压/V	输入灵敏度 (有效值) $V_{imax}/mV$	噪声电压 /mV	整机电压增益 $A_v$	上限频率 $f_H/Hz$	下限频率 $f_L/Hz$
实测值	13.11	44.9	14.92	200.1	23.3K	23.1
理论值			0	203.4		
仿真值	12.87	42.2	0	201.9	14.7K	12.1

② 高低音控制特性

低音 ( $f=100Hz$ )

	$V_o/V$	$V_{OA}/V$	$V_{OB}/V$	净提升量/dB	净衰减量/dB
实测值	0.8	197.9m	3.252	12.2	-12.1
理论值				18.6	-18.6
仿真值	0.98	117.1m	7.966	18.2	-18.4

高音 ( $f=10KHz$ )

	$V_o/V$	$V_{OC}/V$	$V_{OD}/V$	净提升量/dB	净衰减量/dB
实测值	2.152	0.45	8.415	11.8	-13.6
理论值				18.0	-18.0
仿真值	0.74	95.3m	6.085	18.3	-17.8

#### 4. 带载（ $8\Omega$ ）测量整机指标

①

	最大不失真输出电压/V	输入灵敏度（有效值） $V_{imax}/mV$	噪声电压/ $mV$	整机电压增益 $A_v$	上限频率 $f_H/Hz$	下限频率 $f_L/Hz$
实测值	11.37	39.81	13.17	202.0	26.5K	34.6
理论值	11.30	39.59	0	201.8		
仿真值	11.28	39.74	0.12	200.7		

② 高低音控制特性

低音（100Hz）

	$V_O/V$	$V_{OA}/V$	$V_{OB}/V$	净提升量/dB	净衰减量/dB
实测值	1.146	271.9m	4.583	12.03	-12.49
理论值				18.6	-18.6
仿真值				18.1	-17.6

高音（10KHz）

	$V_O/V$	$V_{OC}/V$	$V_{OD}/V$	净提升量/dB	净衰减量/dB
实测值	1.146	269.7m	4.838	12.51	-12.57
理论值				18	-18.0
仿真值				17.7	-17.9

## 六、实验结果分析

1. 静态测量：静态测量输入为 0，理论上各级电路的输出均为 0，实际测量各级的输出电压均为十几毫伏，接近 0，说明静态偏置电路不存在问题。
2. 动态测量：





上图为输入以及三级输出的波形，黄色为输入波形，浅蓝色为第一级输出波形，紫色为第二级输出波形，深蓝色为第三级输出波形，综合波形和测量数据可以得出，第一级前置放大电路放大倍数为 5.907，且为同相放大，第二级音调控制电路放大倍数接近 1，但为反相放大，即输入输出波形相位相差  $\pi$ ，第三级功率放大电路的放大倍数为 31.78，且为同相放大。整机放大倍数基本符合理论值比理论值略小，这可能是由于实际的电路板某些电阻、电容的误差导致的。

### 3. 空载测量整机指标：

空载测出的最大不失真输出电压为 13.11V，这为后续高低音特性输出电压的调节提供了依据（即输出电压应小于最大不失真输出电压），噪声电压仅为十几毫伏，说明在交流为 0 时，基本没有小信号的干扰，上限频率和下限频率分别为 23.3KHz 和 23.1Hz，符合验收中带宽大于 50Hz~15KHz 的要求，低音净提升量和净衰减量分别为 12.2 和 -12.1，符合验收中提升和衰减量大于  $\pm 12\text{dB}$  的要求，高音净提升量和净衰减量分别为 11.8 和 -13.6，提升量距离 12dB 略有差距，而且不论低音还是高音距离理论值的  $\pm 18.6\text{dB}$  和  $\pm 18\text{dB}$  以及仿真值还有较大差距，这可能与实际电路板中电阻、电容的误差和焊接时某些焊点接触不良或实际交流电路中某些信号的干扰有关。

### 4. 带载测量整机指标：

空载测出的最大不失真输出电压为 11.37V，与理论值 11.30V 符合程度较高，说明  $8\Omega$  的负载可以在 8W 的功率下正常工作，噪声电压仅为十几毫伏，说明在交流为 0 时，基本没有小信号的干扰，上限频率和下限频率分别为 26.5KHz 和 34.6Hz，符合验收中带宽大于 50Hz~15KHz 的要求，低音净提升量和净衰减量分别为 12.03 和 -12.49，符合验收中提升和衰减量大于  $\pm 12\text{dB}$  的要求，高音净提升量和净衰减量分别为 12.51 和 -12.57，也符合验收中提升和衰减量大于  $\pm 12\text{dB}$  的要求，并且带载时的提升衰减量与不带载时接近但不论低音还是高音距离理论值的  $\pm 18.6\text{dB}$  和  $\pm 18\text{dB}$  还有较大差距，这可能与实际电路板中电阻、电容的误差和焊接时某些焊点接触不良或实际交流电路中某些信号的干扰有关。

### 5. 听音测试：

实验中发现调节音量调节器  $R_{P3}$  时，扩音器播放出来的音乐大小有明显的变化，而调节音调调节器  $R_{P1}$ 、 $R_{P2}$  时，可以发现低沉和尖锐的声音大小也分别得到了放大和缩小，说明扩音机的基本功能不存在问题。

## 七、讨论、心得

通过本次实验我掌握了焊接与布线的基本技术，了解了音频放大电路的基本原理，知道了前置放大电路、音调控制电路、功率放大电路的放大倍数理论公式的推导，也通过对空载时整机指标的测量，验证了



扩音机电路的各项指标,发现基本与理论值相符,同时,还通过听音测试验证了扩音机电路的基本功能。

此外,此次的仿真 Multisim 电路图较为复杂,仿真的过程也锻炼了我仿真的能力和水平,也让我对电路图和电路原理的理解进一步加深。

## 思考题

### 1. 分析实验中出现的异常现象

第一周做实验时,在测量空载整机指标时,低音的衰减和提升符合理论的变化,即输入频率为 100Hz 并旋动电位器  $R_{P1}$  时,输出的波形会发生变化。但在输入频率为 10KHz 旋动电位器  $R_{P2}$  时,输出的波形基本没有发生变化,起初我怀疑是电位器  $R_{P2}$  的阻值不对,但换用电位器后发现输出波形仍没有变化,后来经与电路图比较得出音调控制电路的一个电容未焊进电路,经改正后得到正常的输出波形。

### 2. 引起噪声、自激、失真现象的原因是什么?

- 噪声: 恒流电压源的波动可以经傅里叶变换后以高次谐波的形式作为噪声信号耦合进入电路  
电子元件在正常工作时会产生元件自身特有的噪声,即热噪声。  
外界也会产生干扰,如示波器和信号源的干扰。
- 自激: 自激的产生是因为发生了正反馈,可以通过减小反馈,并联电容等方式进行相位偏移。
- 失真: 输出电压超过或远低于运放的额定输出电压时会产生失真。在设计电路时应该保证输出电压在运放的工作区

### 3. 在音频放大电路中实验中,扩音机的整机电路可按其构成分为(前置放大级)、(音调控制级)、(功率放大级)三部分

### 4. 音频功放电路中各个电位器的作用分别是什么?

$R_{P1}$  控制低音提升和衰减倍率  
 $R_{P2}$  控制高音提升和衰减倍率  
 $R_{P3}$  调整整机放大倍率,可以理解为音频信号的响度

### 5. 各级电路放大倍数的理论值分别是多少(分析在实验原理部分)?

$A_{V1} = 6.1$                        $A_{V2} = -1$                        $A_{V3} = 33$

### 6. C1、C2 作用? 分别是什么电容? 使用时注意事项。

C1 是耦合电容,隔离直流电源,防止损伤电源。  
C2 是旁路电容,作用为防止自激震荡  
C1 是电解电容,不能反接,否则可能会使电容损坏。

### 7. 静态时输出端有电压什么原因, 怎样处理?

- 如果是不规则的噪声,输入线的屏蔽和地线的安装对噪声有很大影响,而且噪声很难除去,但是大小不会很大,对放大器的工作影响不大。
- 如果输出端出现直流电压,那么很可能是电路焊接有误,应按照原理图和实物图比对检查是否错焊、虚焊,极性接反等等问题。

### 8. 放大倍数出现异常, 应该怎样检查? 如何改正?

- 如果放大倍数与参考值偏差不大可以检查电位器是否置于中间位置。

- b. 一、三级是同相比例放大电路，放大倍数主要取决于电阻的阻值，对于第一级是 R2、R3，对于第三级是 R9、R10 应确保电阻焊接正确，位置也正确，可以查阅相关规则对照原理图进行检查。
- c. 一个比较好的调试方法是，将各级电路的连接暂时断开，逐级进行检查。这样可以避免前级造成的干扰。

### 9. 如何测量音频功放电路的输入灵敏度和噪声电压？（测量方法？什么仪器测？电位器位置？）

将 R1 R2 置于中间位置, R3 最大. 测输入灵敏度时,先将信号发生器的幅值调整到一个合适的大小, 逐渐提高  $V_i$  幅值, 用示波器测量  $V_o$ , 观察到波形刚开始失真时停止, 记录此时  $V_i$  的幅值  $V_{imax}$ , 即为输入灵敏度。

测量噪声电压时, 只需将  $V_i$  对地短接, 用示波器观察  $V_o$  波形, 读取自动计算的有效值即可。

### 10. 如何测量音频功放电路的高音的净提升量？（测量方法？计算表达式）

将低音电位器 RP1 调到中间位置, 使高音电位器 RP2 调至一端位置 C, 测出  $V_{oC}$ 。则高音净提升量为（单位为分贝）即：

$$20\lg \frac{A_{vC}}{A_v} = 20\lg \frac{V_{oC}}{V_o}$$

### 11. 电子电路调试应遵循哪些基本原则？

- 不论简单系统还是复杂系统，调试都是从电源开始入手的(通电后有无异味，冒烟，电源是否工作正常等)；
- 调试方法一般是先局部(单元电路)后整体，先静态后动态；
- 测试过程中不能仅凭感觉或印象，要始终借助仪器观察。使用示波器时，最好把示波器的信号输入方式置于“DC”挡，通过直流耦合方式，可同时观察被测信号的交、直流成分。

仿真：  
音频放大电路：

