

计算机与信息工程学院(人工智能学院)

# 课程设计报告

( 2023 — 2024 学年 第 二 学期 )

课程名称: 电子技术基础实践

班 级: 电子 2202

学 号: 202221018045

姓 名: 史经辞

指导教师: 袁建华 褚御芝 武晓光 胡方强

2023 年 6 月

**课程设计题目：**

小型复杂多级模拟电子系统的设计与装调

**目的与任务：**

- 1.学习信号逐级放大实现系统目标的原理与方法；
- 2.学习音调特性控制方法与实现原理；
- 3.了解集成功率放大器内部电路工作原理与应用；
- 4.掌握贴片电阻电容的焊接方法；
- 5.掌握音响放大器主要性能参数的测试方法；
- 6.综合运用所学知识和能力，掌握音响放大器的设计方法与小型多级电子线路系统装调技术和多级放大系统级联调试方法。

**内容和要求：**

1.功能要求：音调控制、音量控制

2.实验器材：

实验器材名称	数量
集成功率放大器 LM386	1 只
集成运放 LM324	1 只
8Ω/2W 负载电阻（代替 8Ω/2W 扬声器 1 只）	1 只
测试时采用信号发生器，实际工作时输入音源（手机或 PC 等）	1 台
电源电压+VCC=+12V	1 台

3.主要技术指标：

额定功率 $P_O > 1.2W$ ；

负载阻抗 $R_L = 8\Omega$ ；

频率响应 $f_L = 40Hz$ ， $f_H = 10kHz$ ；

输入阻抗 $\geq 1k\Omega$ ；

音调控制特性：相对 1kHz 处增益为 0dB，100Hz 和 10kHz 处有 $\pm 12dB$ 的调节范围，

$A_{VL} = A_{VH} \geq 20dB$ ；

4. 音响放大器系统设计过程与音调控制特性仿真

5. 测量内容：

(1)测量音调控制特性，并绘制音调控制特性曲线；

(2) 测量频率为 1kHz 时的输出功率 $P_O$ 及整机电压增益 $A_V$ ;

(3) 测量整机频率响应特性曲线;

6. 实际系统音效及控制效果试听

## 设计内容

### 一、系统设计

音响放大器在生活中广泛应用，可实现音频信号放大和语音音调控制等功能。本次课程设计旨在通过设计和焊接 PCB 板来构建简易音响放大器系统。该系统主要采用以下电子元件：LM324 集成运放芯片 1 片、LM386 功率放大器芯片 1 片、若干电阻电容、3 只电位器和 7 只排针。使用这些元件及若干的杜邦线连接即可实现上述功能。

### 二、硬件系统框图

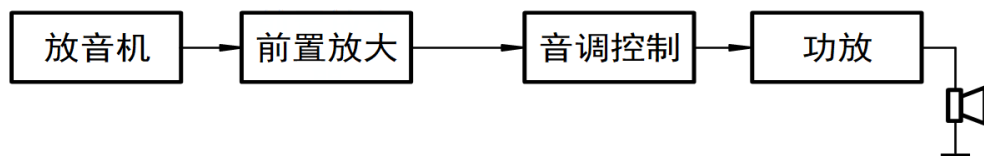


图 2-1 硬件系统框图

硬件系统框图如上图所示。可以看出，本系统主要由三部分组成，每部分的作用如下：

前置放大器：将放音机输出的音乐信号与放大。

音调控制器：主要是控制、调节音响放大器的幅频特性。

功放：给音响放大器的负载 $R_L$ (扬声器)提供一定的输出功率。

### 三、模块设计及参数计算

#### 1. 设计过程

- (1) 确定整机电路的级数
- (2) 根据各级的功能及技术指标要求分配电压增益
- (3) 分别计算各级电路参数，通常从功放级开始向前级逐级计算
- (4) 根据技术指标要求，音响放大器的输入为 50mV 时，输出功率大于 1W，则输出电压  $V_o \geq 2.8V$ 。总电压增益  $A_{V\Sigma} = \frac{V_o}{V_i} > 56$ 。



图 3-1 多级电压增益

## 2.前置放大器

前置放大器的作用是将收音机输出的音乐信号放大。原理图和仿真图如下所示：

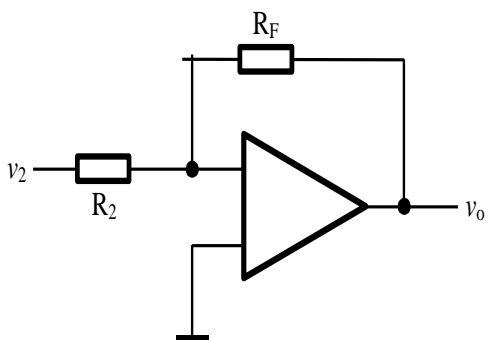


图 3-2 前置放大器原理图

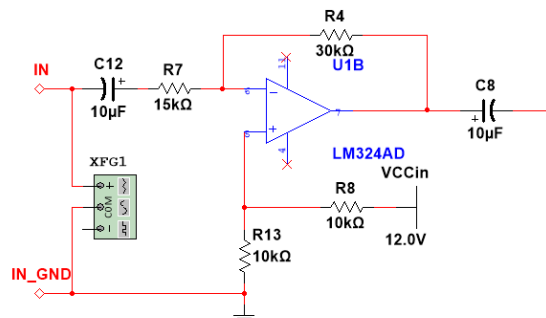


图 3-3 前置放大器仿真图

前置放大器采用反向加法器电路，根据系统设计增益分配和话音放大器、录音机输出信号情况，取  $R_4=30K$ ， $R_7=15K$ ，根据反向加法器公式：

$$v_o = -\frac{R_F}{R_2} v_2$$

计算可知放大倍数  $A_U=-2$

## 3.音调控制器

音调控制器主要用于控制、调节音响放大器的幅频特性使声音变得更好听一些。其只对低音频与高音频的增益进行提升与衰减，中音频( $f_0=1kHz$ )的增益保持 0dB 不变。因此，音调控制器的电路可由低通滤波器与高通滤波器构成。原理图如下图所示：

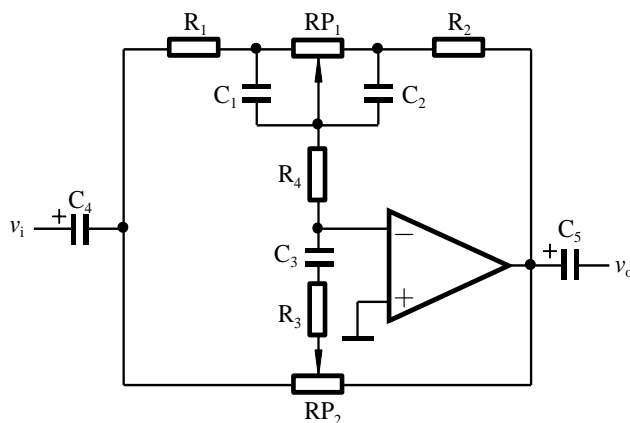


图 3-4 音调控制器原理图

设电容  $C_1 = C_2 \gg C_3$ ，在中、低音频区， $C_3$  可视为开路，作为低通滤波器；在中、高音频区， $C_1$ 、 $C_2$  可视为短路，作为高通滤波器。

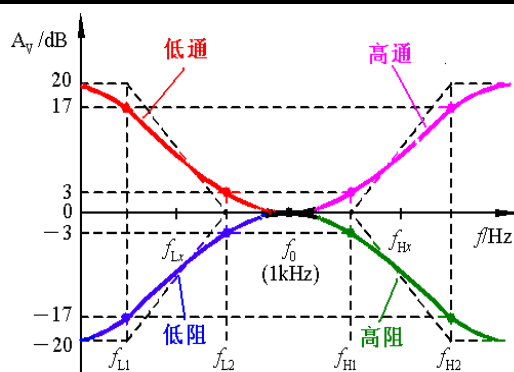


图 3-5 音调控制器的幅频特性曲线

(1) 当  $f < f_0$  时,  $C_3$  可视为开路, 该控制器可视为低通滤波器。

当  $R_{P1}$  的滑臂在最左端时, 对应于低频提升最大的情况 (即  $R_{P1}$  阻值为 0%,  $R_{P2}$  阻值为 50% 时, 低频放大), 等效电路如下图所示:

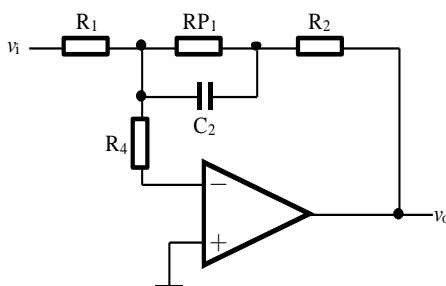


图 3-6 等效电路 1

分析表明, 上图所示电路是一个一阶有源低通滤波器, 其增益函数的表达式为:

$$\dot{A}(j\omega) = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -\frac{R_{P1} + R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + (j\omega)/\omega_2}{1 + (j\omega)/\omega_1}$$

其中,  $\omega_1 = \frac{1}{R_{P1}C_2}$ ,  $\omega_2 = \frac{R_{P1} + R_2}{R_{P1}R_2C_2}$ , 或  $f_{L1} = \frac{1}{2\pi R_{P1}C_2}$ ,  $f_{L2} = \frac{R_{P1} + R_2}{2\pi R_{P1}R_2C_2}$

(i) 当  $f < f_{L1}$  时,  $C_2$  可视为开路, 运算放大器的反向输入端视为虚地,  $R_4$  的影响可以忽略, 此时电压增益为:

$$A_{VL} = \frac{R_{P1} + R_2}{R_1}$$

(ii) 当  $f = f_{L1}$  时, 因为  $f_{L2} = 10f_{L1}$ , 带入  $\dot{A}(j\omega)$  计算式得

$$\dot{A}_{V1} = -\frac{R_{P1} + R_2}{R_1} \cdot \frac{1 + 0.1j}{1 + j}$$

$$|A_{V1}| = \frac{R_{P1} + R_2}{\sqrt{2}R_1}$$

此时，电压增益相对 $A_{VL}$ 下降了  $20\lg(\sqrt{2})dB$ ，即 3dB。

(iii) 当  $f = f_{L2}$  时，由  $\dot{A}(j\omega)$  计算式得，

$$\dot{A}_{V2} = -\frac{R_{P1} + R_2}{R_1} \cdot \frac{1+j}{1+10j}$$

$$|A_{V2}| = \frac{R_{P1} + R_2}{R_1} \cdot \frac{\sqrt{2}}{10} = 0.14A_{VL}$$

此时，电压增益相对 $A_{VL}$ 下降了 17dB。

当 $R_{P1}$ 滑臂在最右端时，对应于低频衰减最大的情况（即 $R_{P1}$ 阻值为 100%， $R_{P2}$ 阻值为 50% 时，低频衰减），等效电路如下图所示：

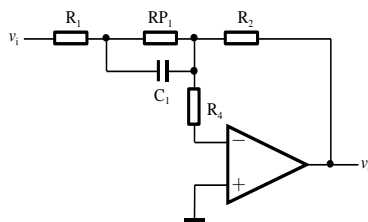


图 3-7 等效电路 2

(2) 当  $f > f_0$  时， $C_1$ 、 $C_2$  可视为短路，作为高通滤波器。音调控制器的高频等效电路如下图所示：

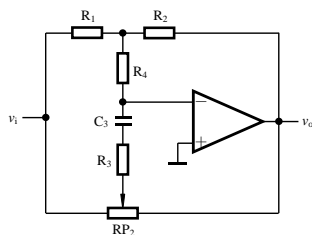


图 3-8 等效电路 3

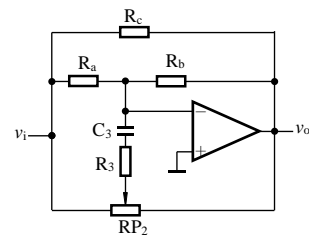


图 3-9 三角形等效电路

如图 3-5 所示， $R_4$  与  $R_1$ 、 $R_2$  组成星形连接，将其转换成三角形连接，如图 3-6 所示。其中：

$$R_a = R_1 + R_4 + \frac{R_1 R_4}{R_2}$$

$$R_b = R_2 + R_4 + \frac{R_2 R_4}{R_1}$$

$$R_c = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_4}$$

取  $R_1 = R_2 = R_4$ ，则根据转换公式，有  $R_a = R_b = R_c = 3R_1 = 3R_2 = 3R_4$ 。

①当  $R_{P2}$  的滑臂在最左端时，对应于高频提升最大的情况（即  $R_{P1}$  阻值为 50%， $R_{P2}$  阻值为 0% 时，高频放大），等效电路如下图所示：

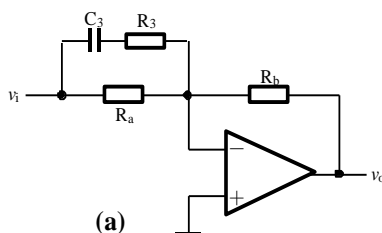


图 3-10 等效电路 4

分析表明，上图所示电路是一个一阶有源高通滤波器，其增益函数的表达式为：

$$\dot{A}(j\omega) = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = -\frac{R_b}{R_a} \cdot \frac{1 + (j\omega)/\omega_3}{1 + (j\omega)/\omega_4}$$

$$\text{其中 } \omega_3 = \frac{1}{(R_a + R_3)C_3}, \quad \omega_4 = \frac{1}{R_3 C_3}, \quad \text{或 } f_{H1} = \frac{1}{2\pi(R_a + R_3)C_3}, \quad f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_3 C_3}$$

由等效电路图推导可得：

(i) 当  $f < f_{L1}$  时， $A_{V0} = 1(0dB)$ ，（因  $R_a = R_b$ ）

(ii) 当  $f = f_{L1}$  时，电压增益  $A_{V3}$  相对于  $A_{V0}$  提升了 3dB；

(iii) 当  $f = f_{L2}$  时，电压增益  $A_{V4}$  相对于  $A_{V0}$  提升了 17dB。

②当  $R_{P2}$  滑臂在最右端时，对应于高频衰减最大的情况（即  $R_{P1}$  阻值为 50%， $R_{P2}$  阻值为 100% 时，高频衰减），等效电路如下图所示：

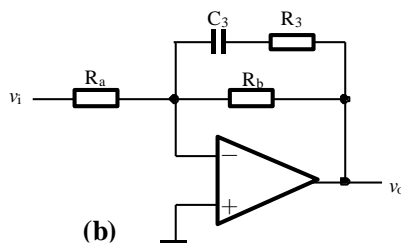


图 3-11 等效电路 5

在实际应用中，通常先提出对低频区  $f_{Lx}$  处和高频区  $f_{Hx}$  处的提升量或衰减量  $x(dB)$ ，再根



据下式求转折频率  $f_{L2}$  (或  $f_{L1}$ ) 和  $f_{H1}$  (或  $f_{H2}$ ), 即

$$f_{L2} = f_{Lx} * 2^{\frac{x}{6}}$$

$$f_{H1} = \frac{f_{Hx}}{2^{\frac{x}{6}}}$$

已知  $f_{Lx}=100\text{Hz}$ ,  $f_{Hx}=10\text{kHz}$ ,  $x=12\text{dB}$ 。得到转折频率  $f_{L2}$  及 ;

$$f_{L2} = f_{Lx} * 2^{\frac{x}{6}} = 400\text{Hz}, \quad f_{L1} = \frac{f_{L2}}{10} = 40\text{Hz};$$

$$f_{H1} = \frac{f_{Hx}}{2^{\frac{x}{6}}} = 2.5\text{kHz}, \quad f_{H2} = 10f_{H1} = 25\text{kHz}。$$

$A_{VL} = \frac{RP_{31} + R_{32}}{R_{31}} \geq 20\text{dB}$ 。其中,  $R_{31}$ 、 $R_{32}$ 、 $RP_{31}$  一般取几千欧姆至几百千欧姆。现取

$$RP_{31} = 470k, \quad R_{31} = R_{32} = 47k, \quad \text{则}$$

$$A_{VL} = \frac{RP_{31} + R_{32}}{R_{31}} = 11 (20.8\text{dB}), \quad \text{满足预期音调控制要求}$$

由式得  $C_{32} = \frac{1}{2\pi RP_{31} f_{L1}} \approx 0.008\mu\text{F}$ , 取标称值  $0.01\mu\text{F}$ , 即  $C_{31}=C_{32}=0.01\mu\text{F}$ 。

由式  $R_a = R_b = R_c = 3R_{31} = 3R_{32} = 3R_{34}$ , 有  $R_{34} = R_{31} = R_{32} = 47k$ , 则  $R_a = 3R_{34} = 141k$

由式  $A_{VH} = \frac{R_a + R_{33}}{R_{33}}$  得  $R_{33} = 15.6k\Omega$ , 取标称值  $15k\Omega$ 。

由式得  $C_{33} = \frac{1}{2\pi RP_{33} f_{H2}} = 490p\text{F}$ , 取  $C_{33}=470p\text{F}$

取  $RP_{32} = RP_{31} = 470k$ ,  $RP_{33} = 10k$ , 级间耦合与隔直电容  $C_{34} = C_{35} = 10\mu\text{F}$ 。

### 3.功率放大器

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。本系统采用 LM386 集成功率放大器, 采用厂家手册, 原理图如下图所示:

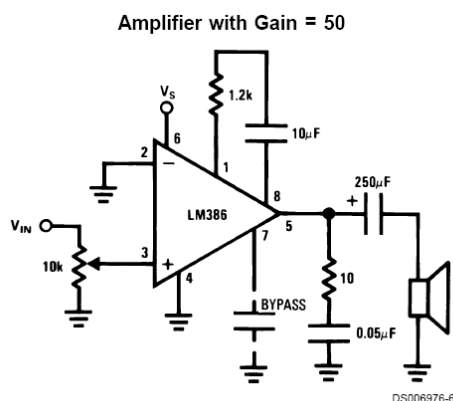


图 3-12 功率放大器原理图

## 四、系统软件仿真

结合实验原理和参考资料，利用 Multisim 仿真软件对电路进行搭建。总仿真图如下所示：

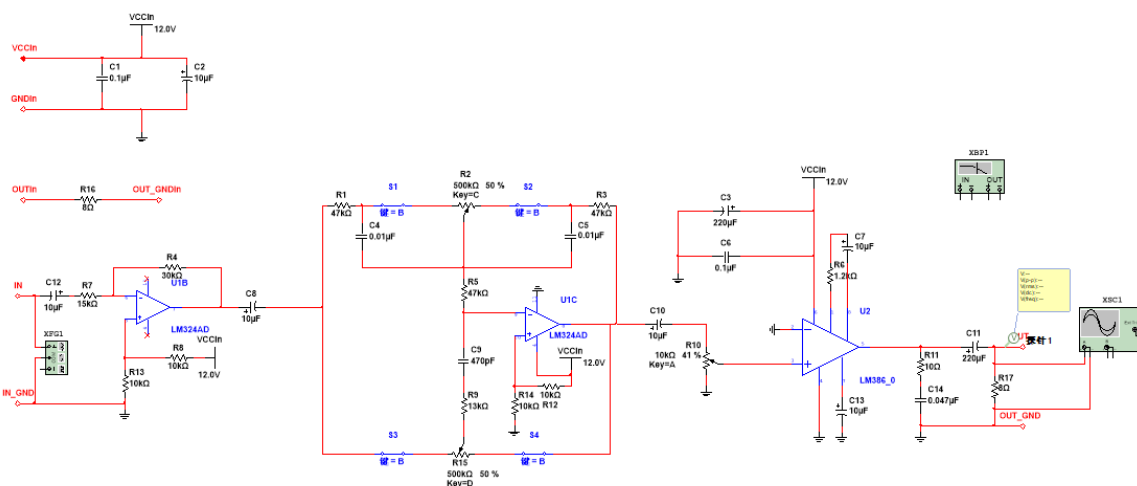


图 4-1 音频放大器系统仿真图

### 1. 音调控制特性测试

将音调控制器电位器均调整在中间位置，输入为 50mV(有效值)，1kHz 的输入信号，调整功放输入电位器，使功放输出为 1~1.2V<sub>pp</sub>，固定功放输入电位器不动。

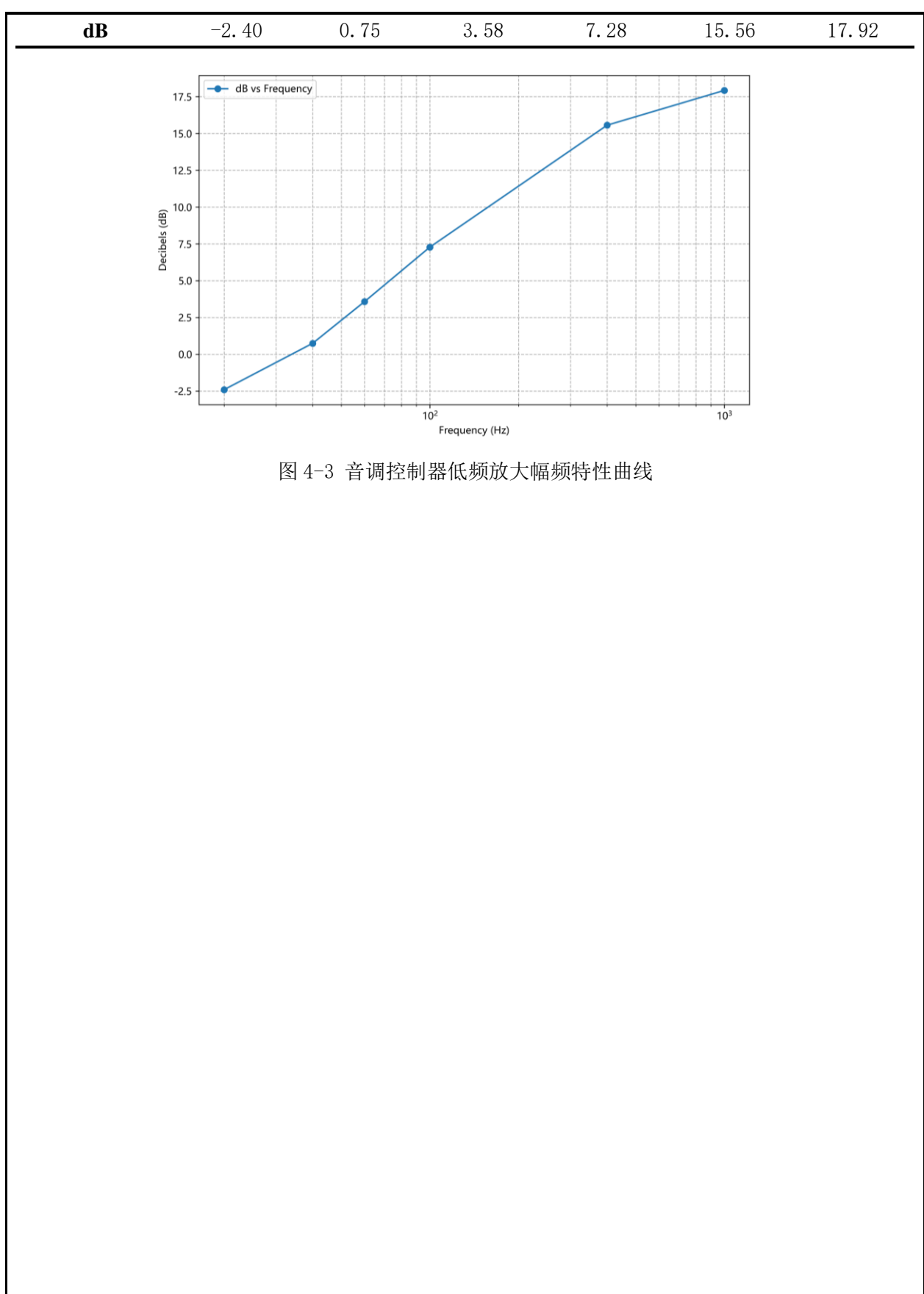
### 2. 测低频特性

将 R<sub>p2</sub> 的滑臂置于中间位置。

将 RP1 的滑臂置于最左端，频率从 20Hz 至 25kHz 变化，记下对应电压增益如下表所示：

表 4-1 音调控制器低频放大幅频数据

f/Hz	20	40	f <sub>L1</sub> 60	f <sub>Lx</sub> 100	f <sub>L2</sub> 400	f <sub>0</sub> =1K
V <sub>ip-p</sub> /mV	141	141	141	141	141	141
V <sub>Op-p</sub> /V	0.107	0.154	0.213	0.326	0.846	1.11
A <sub>v</sub>	0.759	1.09	1.51	2.31	6.00	7.87



(2) 将 RP1 的滑臂置于最右端，频率从 20Hz 至 25kHz 变化，记下对应电压增益；

表 4-2 音调控制器低频抑制幅频数据

f/Hz	20	40	f <sub>L1</sub> 60	f <sub>Lx</sub> 100	f <sub>L2</sub> 400	f <sub>0</sub> =1K
V <sub>ip-p</sub> /mV	141	141	141	141	141	141
V <sub>Op-p</sub> /V	9.30	7.36	5.60	3.72	1.37	1.12
A <sub>v</sub>	65.96	52.20	39.72	26.38	9.72	7.94
dB	36.38	34.35	32.00	28.42	19.75	17.99

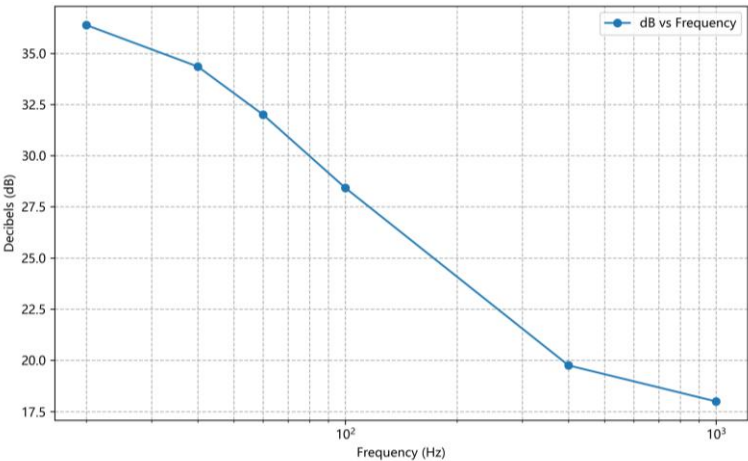


图 4-4 音调控制器低频抑制幅频特性曲线

3. 测高频特性

将 R<sub>P1</sub> 的滑臂置于中间位置。

(1) 将 R<sub>P2</sub> 的滑臂置于最左端，频率从 20Hz 至 25kHz 变化，记下对应电压增益；

表 4-3 音调控制器高频放大幅频数据

f/kHz	f <sub>0</sub> =1	f <sub>H1</sub> 2.5	f <sub>Hx</sub> 8	f <sub>H2</sub> 10	25K
V <sub>ip-p</sub> /mV	141	141	141	141	141
V <sub>Op-p</sub> /V	1.11	1.51	3.60	4.36	9.12
A <sub>v</sub>	7.87	10.71	25.53	30.92	64.68
dB	17.92	20.60	28.14	29.80	36.21

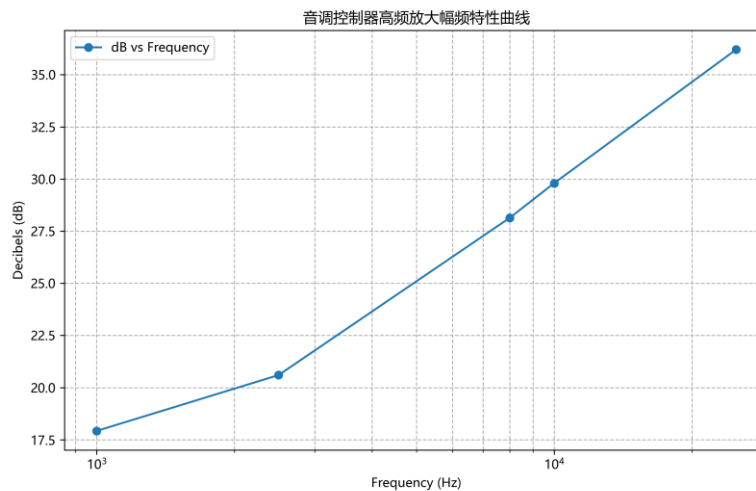


图 4-5 音调控制器高频放大幅频特性曲线

(2) 将  $R_{P2}$  的滑臂置于最右端，频率从 20Hz 至 25kHz 变化，记下对应电压增益；

表 4-4 音调控制器高频抑制幅频数据

f/kHz	$f_0=1$	$f_{H1}=2.5$	$f_{HX}=8$	$f_{H2}=10$	25
$V_{ip-p}/mV$	141	141	141	141	141
$V_{Op-p}/V$	1.13	0.634	0.264	0.220	0.117
$A_v$	8.01	4.50	1.87	1.56	0.83
dB	18.07	13.06	5.44	3.86	-1.62

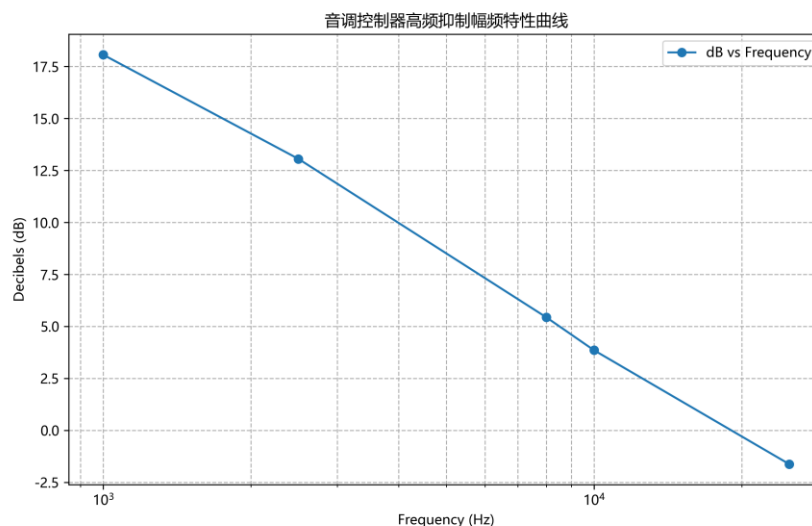


图 4-6 音调控制器高频抑制幅频特性曲线

## 4. 频率响应特性测量

- (1) 音响放大器的输入端接  $v_i$  (等于 50mV 有效值)，
- (2)  $RP1$  和  $RP2$  置于中间位置，
- (3) 调节  $RP3$  使输出电压约为最大不失真输出电压的 50%。

(4) 测量音响放大器相对于中音频  $f_0(1\text{kHz})$  的电压增益。

(5) 保持  $v_i=50\text{mV}$ （有效值）不变，使信号发生器的输出频率  $f_i$  从  $20\text{Hz}$  至  $50\text{kHz}$  变化，测出负载电阻  $R_L$  上对应的输出电压  $V_o$ ，注意测量电压增益相对于中频电压增益下降  $3\text{dB}$  时对应低音截止频率  $f_L$  和高音截止频率  $f_H$ 。

表 4-5 频率响应特性数据表

f/Hz	20	40	60	100	400	$f_0=1k$	2.5k	4k	8k	10k
$V_{ip-p}/\text{mV}$	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141
$V_{Op-p}/\text{V}$	0.703	1.45	2.03	2.69	3.51	3.62	3.65	3.66	3.65	3.65
$A_v$	4.99	1.28	14.39	19.08	24.89	25.67	25.89	26.96	25.89	25.89
$\text{dB}$	13.96	20.24	23.16	25.61	23.71	28.19	28.25	28.28	28.27	28.25

f/Hz	25k	30k	40k	50k	100k	200k	300k	400k	500k	600k
$V_{ip-p}/\text{mV}$	141	141	141	141	141	141	141	141	141	141
$V_{Op-p}/\text{V}$	3.60	3.65	3.62	3.57	3.49	3.10	2.49	2.43	1.19	0.756
$A_v$	25.53	25.89	25.67	25.32	24.75	21.99	17.66	17.23	8.44	5.36
$\text{dB}$	28.14	28.25	28.19	28.06	27.87	26.85	25.07	24.72	18.52	14.59

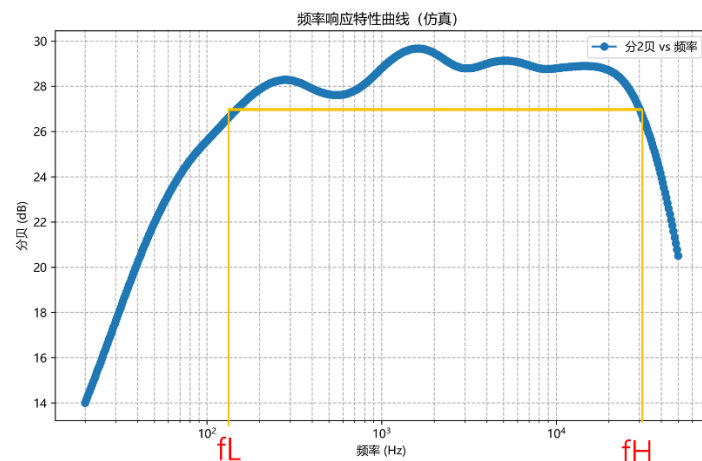


图 4-7 音调控制器频率响应特性曲线

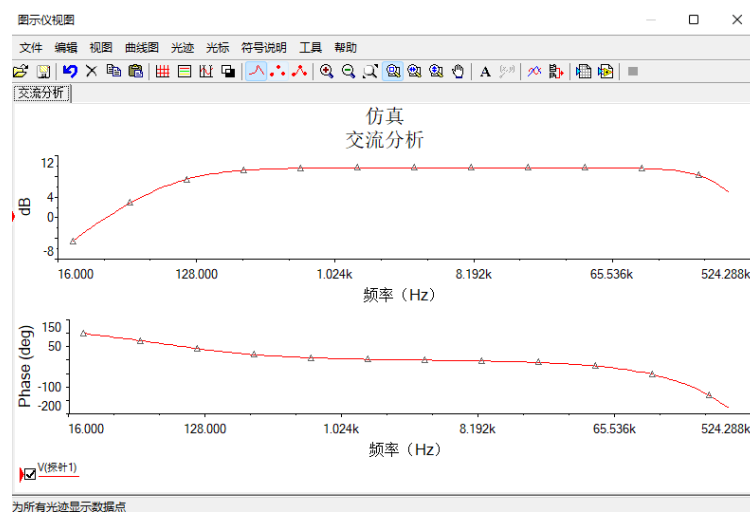


图 4-8 交流分析仿真频率特性曲线

由仿真数据可知，中频( $f_0=1\text{kHz}$ )电压增益为  $30.37\text{dB}$ ；  
中频电压增益下降  $3\text{dB}$ (约  $34.603\text{dB}$ )时对应低音频截止频率  $f_L$  和高音频截止频率  $f_H$ ：  
 $f_L \approx 100\text{Hz}$ ， $f_H = 300\text{kHz}$

## 4. 额定功率 $P_o$ 测量

- (1) 函数信号发生器的输出的频率  $f_i=1\text{kHz}$ ，电压  $V_i=50\text{mV}$ （有效值）的信号。
- (2) 功率放大器的输出端接额定负载电阻  $R_L$ (代替扬声器)。
- (3) 音调控制器的两个电位器  $R_{P1}$ 、 $R_{P2}$  置于中间位置，音量控制电位器置于最大值。
- (4) 用双踪示波器观测  $V_i$  及  $V_o$  的波形，逐渐增大输入电压  $V_i$ ，直到  $V_o$  的波形刚好不出现削波失真，此时对应的输出电压为最大输出电压，由式即可算出额定功率  $P_o$ （注意：在最大应迅速减小  $V_i$ ，否输出电压测量完成后则会因测量时间太久而损坏功率放大器）。仿真波形和电压情况如下图所示：

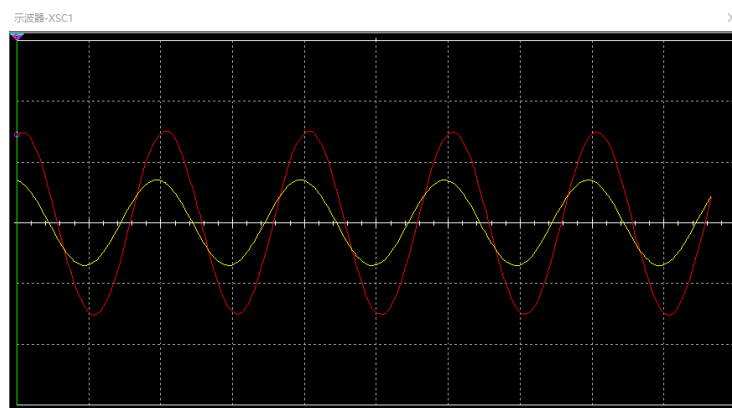


图 4-9 刚好没失真时仿真波形图

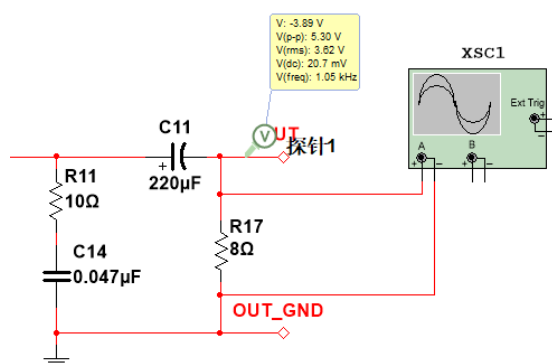


图 4-10 电压探针示意图

输出电压为最大输出电压时的  $V_i$  的振幅为  $70\text{mV}_p$ ， $V_o$  的峰峰值为  $10.23\text{V}$ ，则有效值  $V_o \approx 3.62\text{V}$ ，又负载电阻为  $8\Omega$ ，则额定功率为：

$$P_o = \frac{V_o^2}{R} = \frac{3.62^2}{8} = 1.638\text{W}$$

## 五、实物制作与测试

本课程设计的 PCB 印刷电路板使用嘉立创 EDA 设计，并通过嘉立创免费印刷 PCB 电路板，按照设计要求，音频放大器系统输入电源接口 VCCin, GNDin 为 12v 电源输入。采用引脚间距为 2.54mm 的 DIP2 封装；音频信号输入接口 IN, IN\_GND 为小信号输入接口，采用引脚间距为 2.54mm 的 DIP2 封装；音频信号输出接口 out, out\_GND 为信号输出接口，采用引脚间距为 2.54mm 的 DIP2 封装；键 S1A-S4A 为 2.54mm 间距的 DIP2，正常工作时采用跳线帽。焊接时焊接 2 脚的插针；LM324, LM386 采用 DIP 封装。焊接时先焊接 1c 插座：所有电位器均为 3296 封装，引脚间距为 2.54mm；8、所有电阻封装均为 0805；

220uF 的电容器采用插件，引脚间距为 3.5mm，电容外径为 8mm；所有 10uF 电容均采用 0805 封装。PCB 电路板焊接后的实物图如下所示：

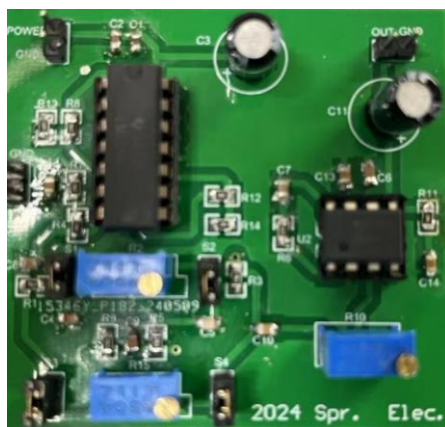


图 5-1 音频放大器系统 PCB 电路板焊接实物图

音调控制器特性曲线的仿真测量

(1)将音调控制器电位器均调整在中间位置，输入为 50mV(有效值)，1KHZ 的输入信号，调整功放输入电位器，使功放输出为 1~1.2Vpp，固定功放输入电位器不动。

(2)音调控制器低频特性的仿真测量：

将  $R_{P2}$  的滑臂置于中间位置。

1. 将  $R_{P1}$  的滑臂置于最左端，频率从 20Hz 至 1kHz 变化，记下对应电压增益；

表 5-1 音调控制器低频放大幅频特性

f/Hz	20	40	$f_{L1}60$	$f_{Lx}100$	$f_{L2}400$	1000
$V_{ip-p}/mV$	141	141	141	141	141	141
$V_{Op-p}/V$	0.108	0.130	0.163	0.315	0.630	1.16
$A_v$	0.766	0.922	1.156	2.234	4.468	8.23
dB	-2.31	-0.71	1.26	6.98	13.00	18.30



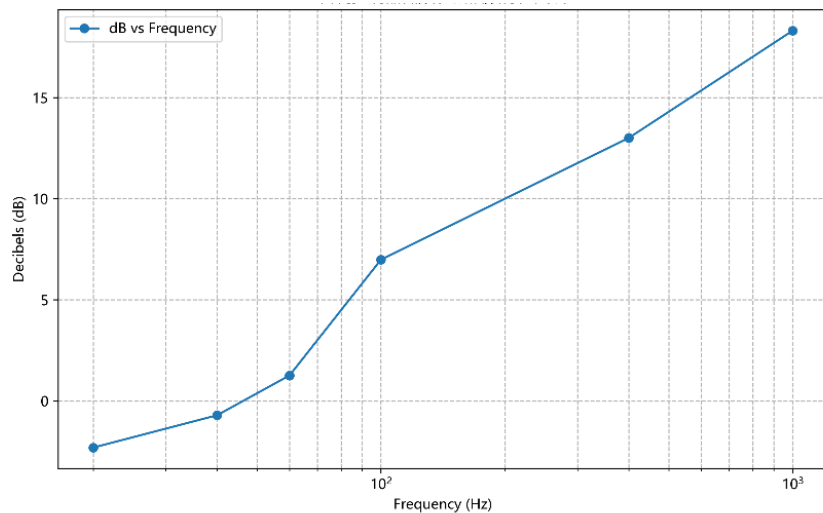


图 5-2 音调控制器低频放大幅频特性曲线

2. 将  $R_{P1}$  的滑臂置于最右端，频率从 20Hz 至 1kHz 变化，记下对应电压增益；

表 5-2 音调控制器低频抑制幅频特性

f/Hz	20	40	$f_{L1}60$	$f_{Lx}100$	$f_{L2}400$	1000
$V_{ip-p}/mV$	141	141	141	141	141	141
$V_{Op-p}/V$	6.72	5.60	4.48	3.20	1.52	1.16
$A_v$	47.66	39.72	31.77	22.70	10.78	8.23
dB	33.56	32.00	30.04	27.12	20.65	18.30

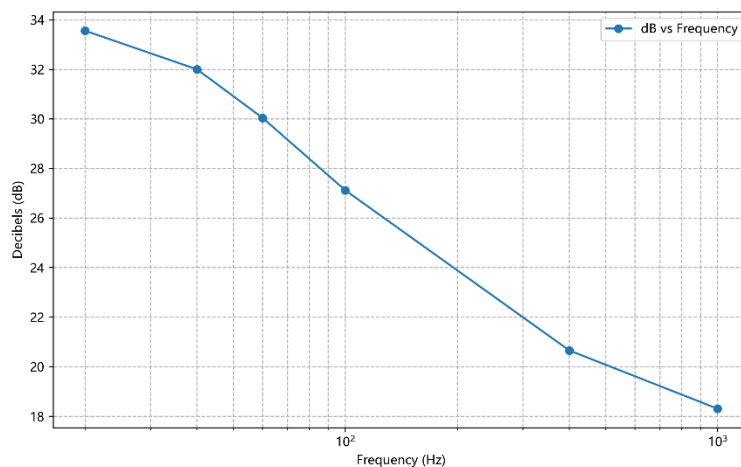


图 5-3 音调控制器低频抑制幅频特性曲线

(3)音调控制器高频特性的仿真测量：

将  $R_{P1}$  的滑臂置于中间位置。

1.将  $R_{P2}$  的滑臂置于最左端，频率从 1kHz 至 50kHz 变化，记下对应电压增益；

表 5-3 音调控制器高频放大幅频特性

f/kHz	1	$f_{H1}2.5$	$f_{Hx}8$	$f_{H2}10$	25	50
$V_{ip-p}/mV$	141	141	141	141	141	141

<b>V<sub>Op-p</sub>/V</b>	1.20	1.58	3.64	4.48	9.80	X
<b>A<sub>V</sub></b>	8.51	11.21	25.82	31.77	69.50	X
<b>dB</b>	18.60	21.00	28.24	30.03	36.84	X

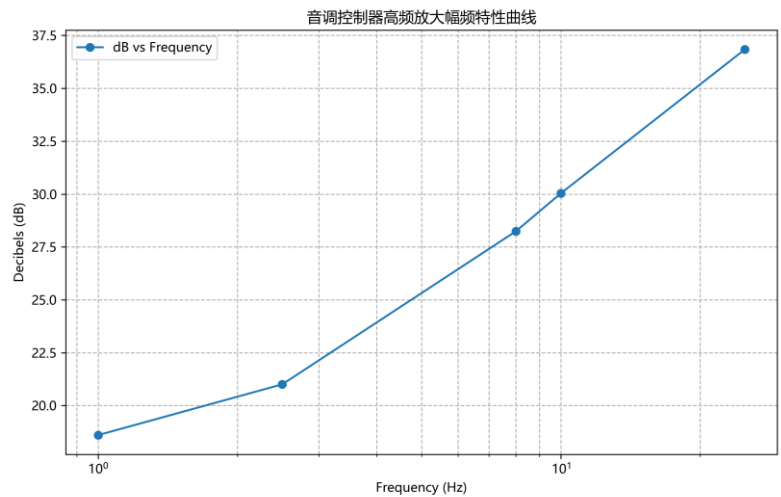


图 5-4 音调控制器高频放大幅频特性曲线

2. 将 R<sub>P2</sub> 的滑臂置于最右端，频率从 1kHz 至 50kHz 变化，记下对应电压增益；

表 5-4 音调控制器高频抑制幅频特性

<b>f/kHz</b>	<b>1</b>	<b>f<sub>H1</sub>2.5</b>	<b>f<sub>HX</sub>8</b>	<b>f<sub>H2</sub>10</b>	<b>25</b>	<b>50</b>
<b>V<sub>ip-p</sub>/mV</b>	141	141	141	141	141	141
<b>V<sub>Op-p</sub>/V</b>	1.12	0.653	0.283	0.230	0.134	X
<b>A<sub>V</sub></b>	7.94	4.63	2.01	1.63	0.95	X
<b>dB</b>	18.00	13.32	6.06	4.24	-0.45	X

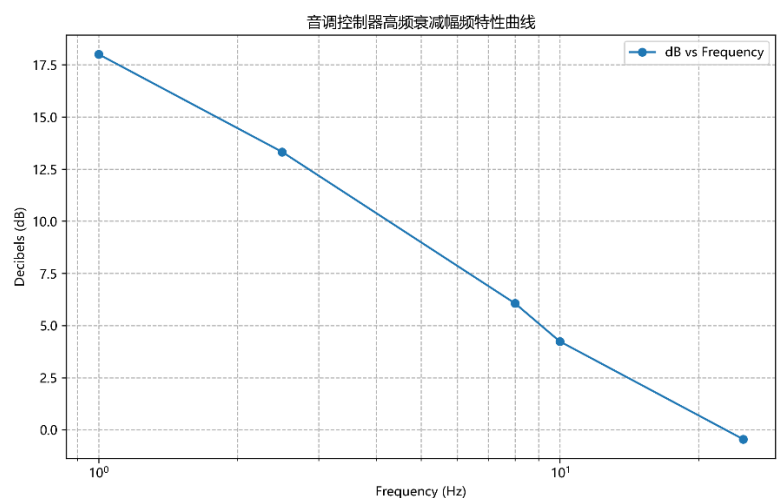


图 5-5 音调控制器高频抑制幅频特性曲线

### 3. 音频放大器系统频率响应特性的测量

表 5-5 音调控制器频率响应特性

f/Hz	20	40	60	100	400	$f_0=1k$	2.5k	4k	8k	10k
$V_{ip-p}/mV$	140	144	142	142	141	141	141	141	139	136
$V_{Op-p}/V$	0.602	1.10	1.56	2.46	4.20	3.64	3.44	3.32	3.24	3.20
$A_v$	4.3	7.6	11.0	17.3	29.8	25.8	24.4	23.5	23.3	23.5
dB	12.7	17.6	20.8	24.8	29.5	28.2	27.7	27.4	27.3	27.4
Hz	25k	30k	40k	50k	100k	200k	300k	400k	500k	600k
$V_{ip-p}/mV$	138	141	141	141	138	141	141	141	141	142
$V_{Op-p}/V$	3.24	3.16	3.12	3.04	2.88	2.44	2.16	1.68	0.88	0.44
$A_v$	23.5	22.4	22.1	21.6	20.9	17.3	15.3	11.9	6.2	3.1
dB	27.4	27.0	26.9	26.7	26.4	24.8	23.7	23.5	15.8	9.8

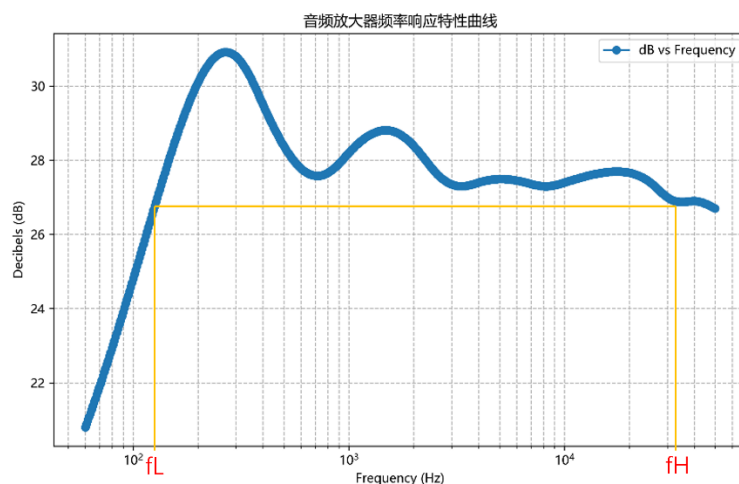


图 5-6 音调控制器频率响应特性曲线

中频电压增益下降 3dB(约 23.35dB)时对应低音截止频率  $f_L$  和高音频截止频率  $f_H$

$f_L=100Hz$ ,  $f_H=300kHz$ , 与仿真结果接近。

## 六、误差及故障分析

### 6.1 误差分析

(1)在将 PCB 电路板上电测试后发现,测量数据与仿真存在较大误差,可能的原因有:在电路仿真中,往往会使用理想化的元件模型和假设条件,然而,在实际电路中,元件会有内阻、电感、电容等非理想特性,而且存在功耗和能量损失等因素,这些都可能导致实际测量与仿真结果的差异。在实际电路中,元件参数往往会存在一定误差,例如电阻、电容的额定值与实际值的偏差,这些误差也会对电路性能造成影响。仿真中使用的信号源可能是理想的,但在实际测量中,信号源可能存在波形失真、频率漂移等问题,这些问题也会导致实际测量与仿真结果不同。

(2)在高通滤波器测试过程中当频率升高到 8kHz 即以上时出现了明显的失真,且当输入频率为 50kHz 时波形一直变换,幅值以及电压增益无法测出,相关波形如下图所示:



图 6-1 8kHz 输出波形失真



图 6-2 10kHz 输出波形失真

由图可以看出，在输入电压稳定 50mV 有效值时，随着输入频率的提高，输出波形逐渐产生了交越失真和削波失真。交越失真是由输出信号正半周和负半周不能完美对接造成的，当功放工作在乙类时，由于偏置设置不合理会造成信号在接近零点时提前截止，或严重畸变，从而导致交越失真的产生。削波失真是指输出进入了功放的非线性区，造成输入电平增大（减小）到某一值后，输出电平达到最大（最小），输出电流不再受输入电流控制，而失去放大能力。对于正弦波信号来说就会看到正半周被削顶或负半周被削底，或同时出现削顶削底。可通过调整找到 LM386 的合适的静态工作点，适当改善失真情况。

## 6.2 故障分析

在 PCB 元件焊接过程中，出现了几处明显的故障问题：

- (1) 由于嘉立创画 PCB 电路板时的 LM324 芯片封装与实际使用的 LM324 芯片封装不一致，导致 LM324 的 VCC 和 GND 位置错误，上电后便会发烫、出现烧焦气味。经老师和同学提醒后发现，LM324 有着左右两边相对称的特点，可以通过将芯片旋转 180° 后插入 IC 插座以解决这个问题。
- (2) 在焊接 500kΩ 电位器时，由于自己的疏忽大意，将 500kΩ 电位器焊接成了 10kΩ 电位器，导致可调范围减小，无法满足音响放大器的实验要求。在同学的帮助下，成功将 10kΩ 电位器拔出，并使用吸锡器将多余的锡吸出，最后成功将 500kΩ 电位器焊接到位，解决了这个硬件问题。但由于部分锡难以吸出，导致电位器无法插到最底端，在调节时会产生些许晃动，有较大的改进空间。

## 七、设计总结

本次课程设计《小型复杂多级模拟电子系统的设计与调试》已经结束。作为电子工艺实习的延伸，我们体验了从绘制 PCB 电路板到打板再到焊接元器件，最后进行调试和测量的过程。通过这次实验，我学到了很多。首先，我认识到了贴片元件，并学会了如何焊接它们。具体来说，先在一边上锡，然后用镊子将贴片移动到合适的位置，再在另一边上锡。此外，我也了解了芯片和元件的封装类型，并熟悉了不同封装实物图之间的差异。我还学会了使用万用表进行电子元件的调试，以减少虚焊等问题的发生。自己绘制并焊接的电路板上测量数据后，我更深刻地认识到了在仿真和实际操作中存在的误差。不能仅仅依赖于仿真波形来判断实际波形的结果。在实际操作中，需要考虑更多的因素。与此同时，这次实验也提醒了我存在的不足，比如观察不够仔细，没有发现 LM324 的 VCC 和 GND 接错的问题，这让我更加留心细节。

总的来说，这次实验激发了我对硬件电路的浓厚兴趣，同时也提升了我绘制 PCB 电路板和焊接的能力，进一步培养了我的耐心和细致程度，更感谢老师们的指导，让我能够及时发现问题并改正，使我收获颇多！

## 八、参考文献

- [1]电子设计 1 音响放大电路参考资料 PPT
- [2]LM324 芯片数据手册
- [3]LM386 芯片数据手册