

浙江大学实验报告

专业： 生物医学工程
姓名： _____
学号： _____
日期： 2025.5.20;5.27
地点： 东三-211

课程名称： 电路与电子技术实验 II 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： 模电综合实验 同组学生姓名： _____

一、实验目的和要求

- 1.理解并掌握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.学习电子电路的综合调试方法并掌握一定的技术。
- 4.通过 OrCAD 仿真来分析理论数据和实际数据之间的关系。

其中涉及要求如下：

- 1.负载电阻： $R_L=8\Omega$
- 2.额定功率： $P_o=8W$
- 3.带宽： $f_{BW}\geq 50Hz\sim 15kHz$
- 4.失真度： $\gamma<1\%$
- 5.音调控制：低音（100Hz）大于 $\pm 12dB$ ，高音（10kHz）大于 $\pm 12dB$
- 6.输入阻抗： $R_i\geq 100k\Omega$
- 7.整机效率： $\eta\geq 50\%$

二、实验内容和原理

（一）实验内容

1. 静态调试

通过静态测试，检查电路静态下的零输入与零输出

2. 动态调试

测量整个音频功率放大电路中各级的放大倍数以及整机的放大倍数

3. 空载测量整机指标

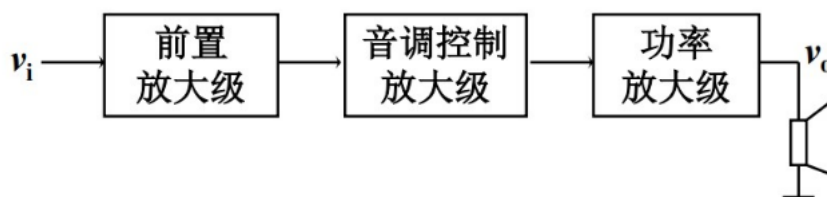
4. 加载测量整机指标

5. 听音试验

音频功率放大电路的听音应用

（二）实验原理

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（如图所示）。

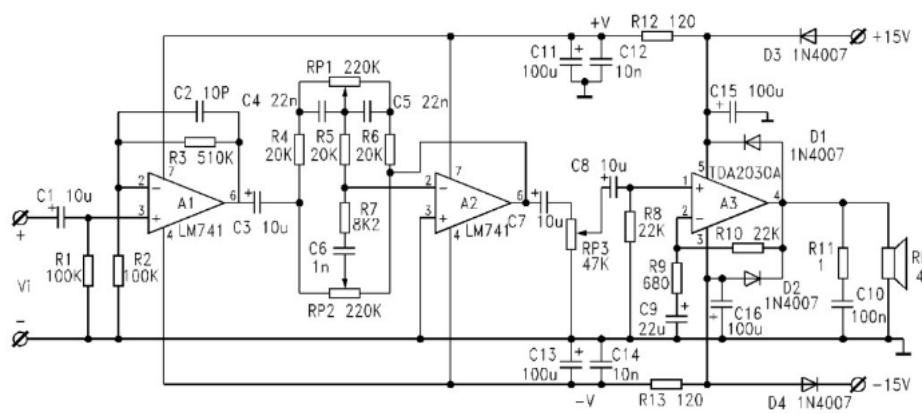


作为音响系统中的放大设备，它接受的信号源有多种形式，通常有话筒输出、唱机输出、录音输出和调谐器输出。它们的输出信号差异很大，因此，音频功放电路中设置前置放大级以适应不同信号源的输入。

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。

扩音机的整机电路如下图所示，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（如下图所示）。



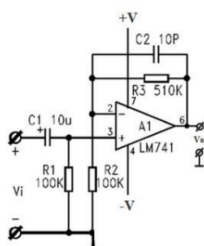
其中整个电路按照功能模块可以被分为前置电路、功放电路、退耦电路、电源保护、音调电路、音量调节、电路负载等几个部分。

1. 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（如下图所示）。

理想闭环电压放大倍数为： $A_{vf} = 1 + \frac{R_3}{R_2}$

输入电阻为： $R_{if} = R_1$ ；输出电阻为： $R_{of} = 0$ 。

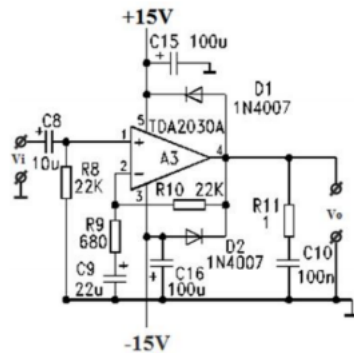


2. 功率放大级

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 脚塑料封装结构。其中 1 脚为同相输入端；2 脚为反相输入端；3 脚为负电源；4 脚为输出端；5 脚为正电源。

功放级电路中，电容 C15、C16 用作电源滤波。D1 和 D2 为防止输出端的瞬时过电压损坏芯片的保护二极管。R11、C10 为输出端校正网络以补偿感性负载，其作用是把扬声器的电感性负载补偿接近纯电阻性，避免自激和过电压。

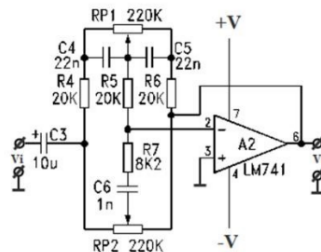
下图中通过 R10、R9、C9 引入了深度交直流电压串联负反馈。由于接入 C9，直流反馈系数 $F'=1$ 。对于交流信号而言，因为 C9 足够大，在通频带内可视为短路，所以交流反馈系数由 R10、R9 确定。因而该电路的电压增益为： $\dot{A}_{v3} = 1 + \frac{R_{10}}{R_9}$



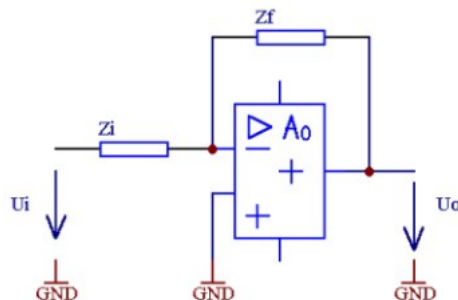
3. 音调控制电路

实验电路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（如下图所示）。

C4、C5 在高频区视为短路；C6、R7 支路在低频区视为开路。图中 $R_4=R_5=R_6=R=20k$ ； $C_4=C_5 \gg C_6$ ； $RP1=RP2 \approx 9R$ 。电路的电压增益为： $\dot{A}_{vf} = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{Z_f}{Z_i}$



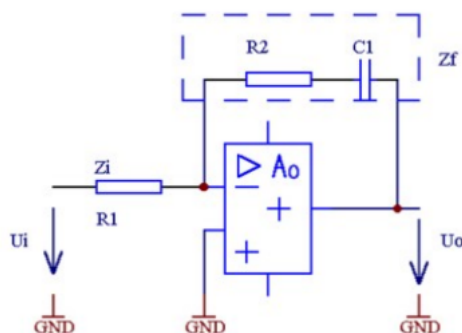
下图是这种音调控制电路的方框图，它实际上是一种电压并联型负反馈电路，图中 Z_f 代表反馈回路总阻抗； Z_i 代表输入回路的总阻抗。电路的电压增益： $\dot{A}_{vf} = \frac{U_o}{U_i} = -\frac{Z_f}{Z_i}$



只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网络通常有下图所示四种形式。

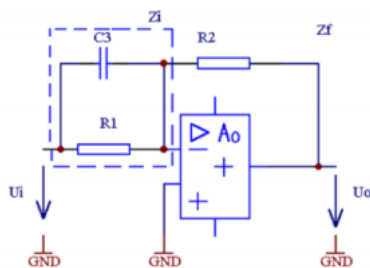
①音调控制低音提升

下图中若 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，随频率降低， $|Z_f|$ 增大，所以 $A_{vf} = \frac{|Z_f|}{R_1}$ 提高，从而得到低音提升。

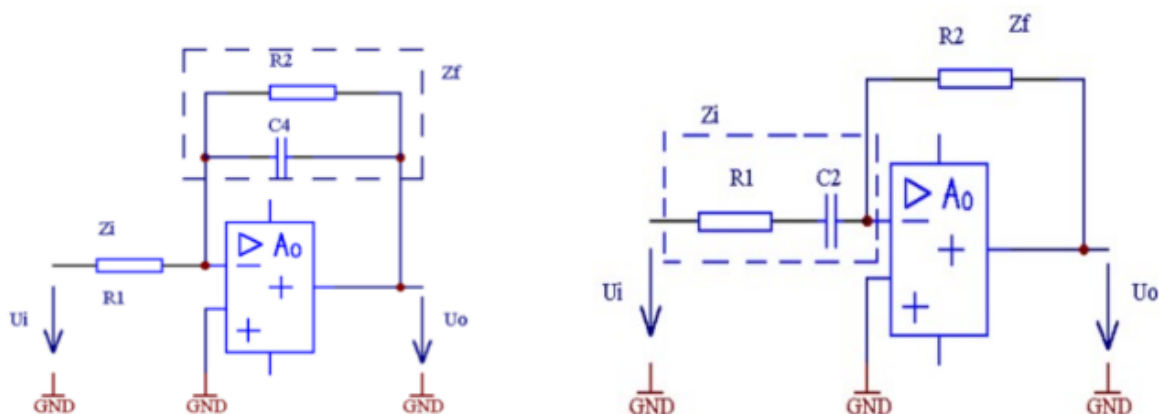


②音调控制高音提升

下图中若 C_3 取值较小，只有在频率高频时起作用，则当信号频率在高频区且随频率升高， $|Z_f|$ 减小，所以 $A_{vf} = \frac{R_2}{|Z_f|}$ 提高，从而得到高音提升。

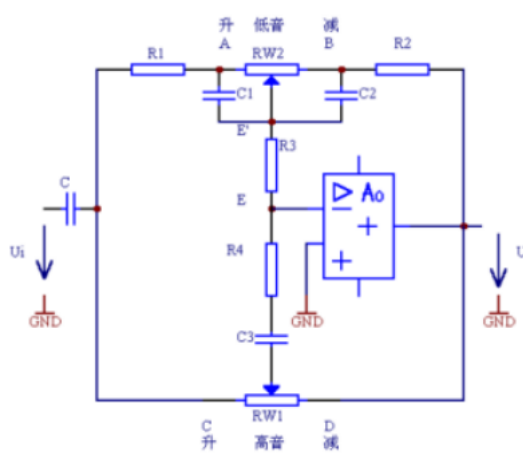


③音调控制高音衰减、音调控制低音衰减



同理可以分析上图分别可以作为高音和低音衰减。

如果将这四种电路形式组合起来，即可得到下图所示的反馈型音调控制电路。



先假设 $R_1=R_2=R_3=R$; $C_1=C_2 \gg C_3$; $R_{w1}=R_{w2} \approx 9R$

①信号在低频区

在低频区，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：

$$|A_{VA}| = \frac{R_2 + R_{w2}}{R_1}$$

按照实际电路参数 $R_1=R_2=R_3=20k\Omega$, $R_{w1}=R_{w2}=150k\Omega$, $C_1=C_2=0.022\mu F$, 可得

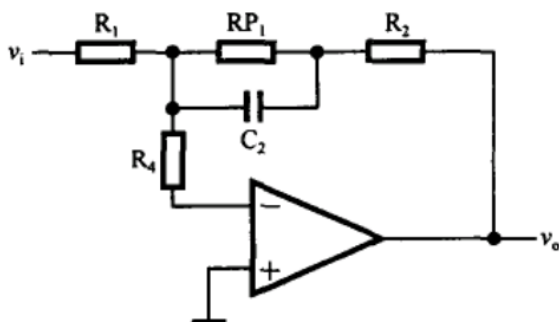
$$|A_{VA}| \approx 8.5 \approx 18.6\text{dB}$$

$$\text{低频转折频率: } f_{L1} = \frac{1}{2\pi R_{w2} C_2} = 48\text{Hz}, f_{L2} = \frac{R_2 + R_{w2}}{2\pi R_{w2} C_2} = 410\text{Hz}$$

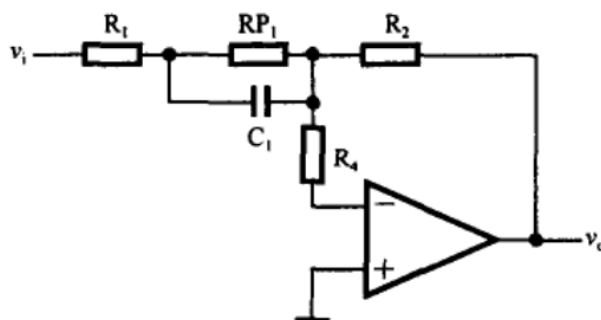
以同样方式可以说明在 R_{w2} 滑动到 B 点时，低音的最大衰减量：

$$|A_{VA}| \approx 0.118 \approx -18.6\text{dB}$$

$$\text{低频转折频率: } f'_{L1} = f_{L1} = 48\text{Hz}; f'_{L2} = f_{L2} = 410\text{Hz}$$



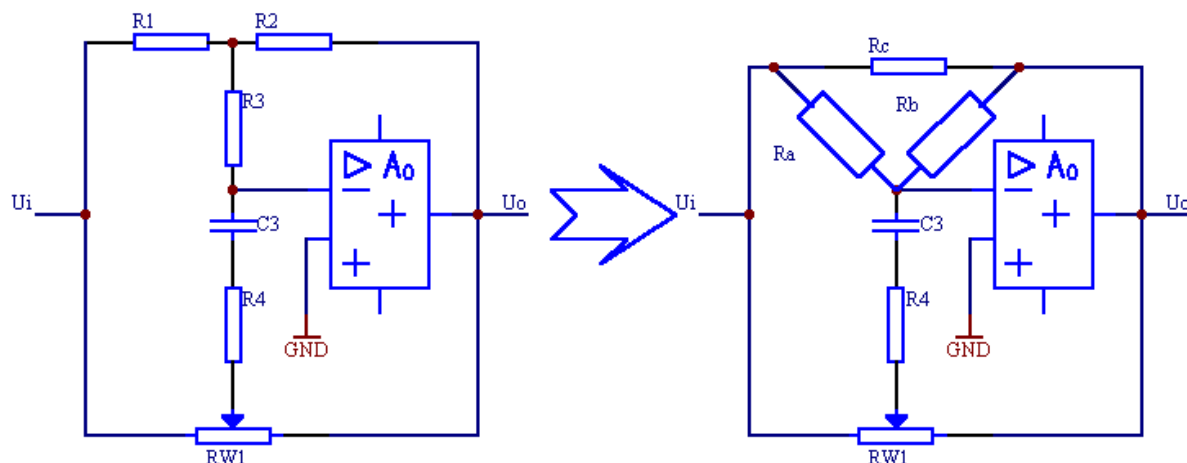
低频提升等效电路



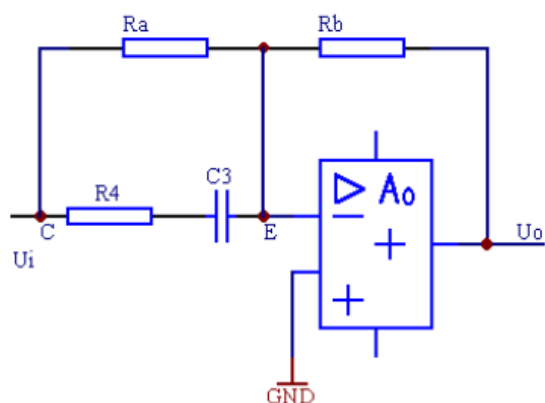
低频衰减等效电路

②信号在高频区

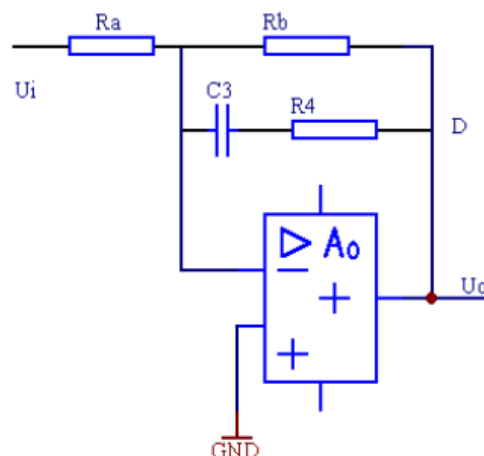
在高频区，因为 C_1 和 C_2 较大，对高频可视为短路，而 C_3 较小，故 C_3 、 R_4 支路已起作用，其等效电路可画成如下图所示形式（Y- Δ 变换），其中 $R_a=R_b=R_c=3R$ （设 $R_1=R_2=R_3=R$ ）。



设前级输出电阻很小（如小于 500Ω ），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，可分别画出如下图(a)和图(b)所示的等效电路（因 R_{w1} 的数值很大，可视为开路）。



图(a)



图(b)

图（a）显然具有高音提升作用，其最大提升量为：

$$|A_{VC}| = \frac{R_b}{R_a // R_4} = \frac{R_4 + 3R}{R_4}$$

按电路实际参数 $R=20k\Omega$ ， $R_4=8.2k\Omega$ ， $C_3=1000\text{pF}$ ，所以 $|A_{vC}| \approx 8.3$ （约 18dB）

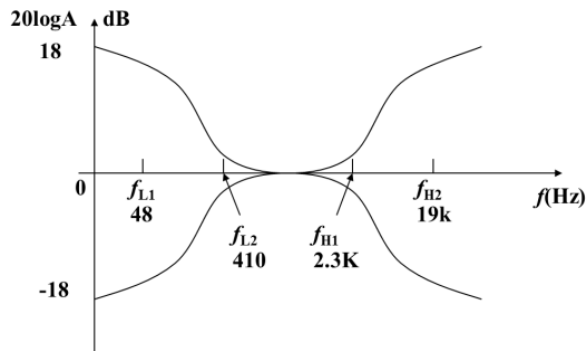
图（b）为高音衰减电路，其衰减量为：

$$|A_{VD}| = \frac{R_a // R_4}{R_b} = \frac{R_4}{R_4 + 3R}$$

按电路实际参数得 $|A_{VD}| \approx 0.12$ （约 -18dB）

高频转折频率： $f_{H1} = \frac{1}{2\pi(R_a + R_4)C_3} = 2.3\text{kHz}$ ， $f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_4 C_3} = 19\text{kHz}$

若将音调控制电路高低音提升和衰减曲线画在一起，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 $|A_{vf}| = 1$ ；当 $f < f_{L1}(48\text{Hz})$ 时低音控制范围为 $\pm 18\text{dB}$ ，当 $f > f_{H2}(19\text{kHz})$ 时高音控制范围也为 $\pm 18\text{dB}$ 。

4. 仿真部分

电源部分仿真图、前置级仿真图、音调控制级仿真图和功率放大级仿真电路图如下

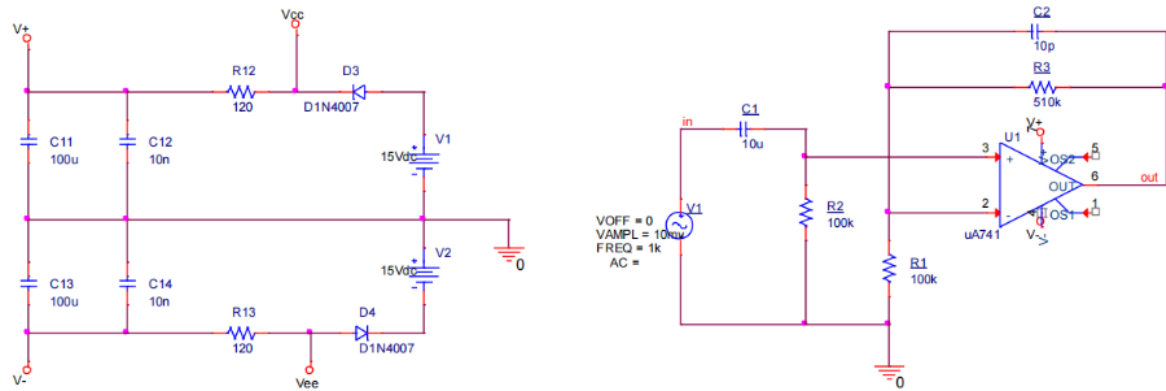


图 1：电源部分和前置级仿真电路图

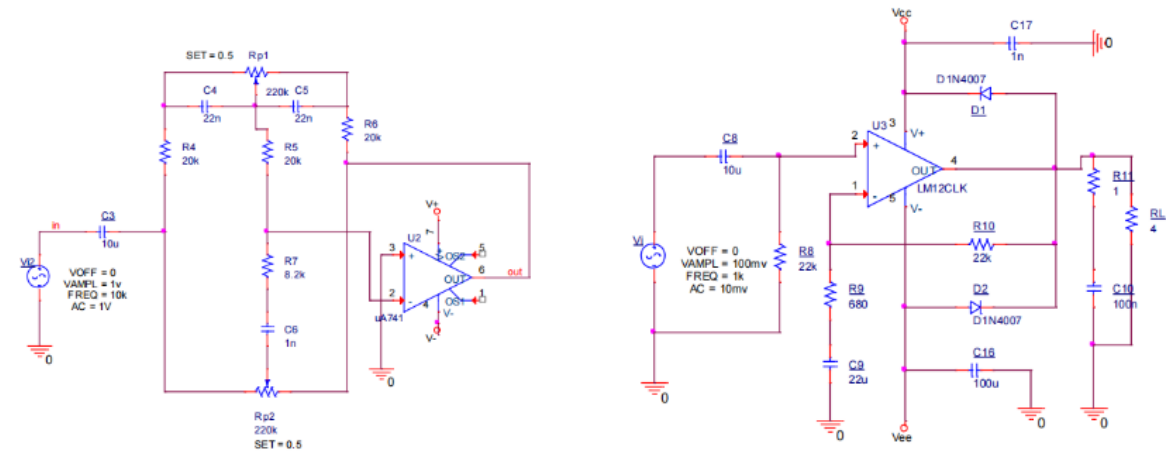


图 2：音调控制级和功率放大级仿真电路图

对电源部分和前置级进行 bias 扫描得到的静态数据图如下所示：

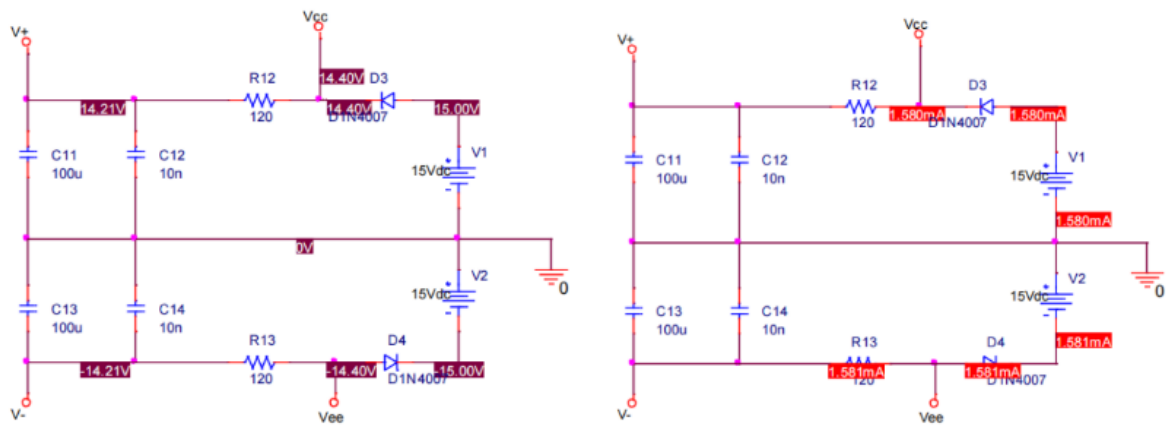


图 3：电源部分静态电压和电流数据

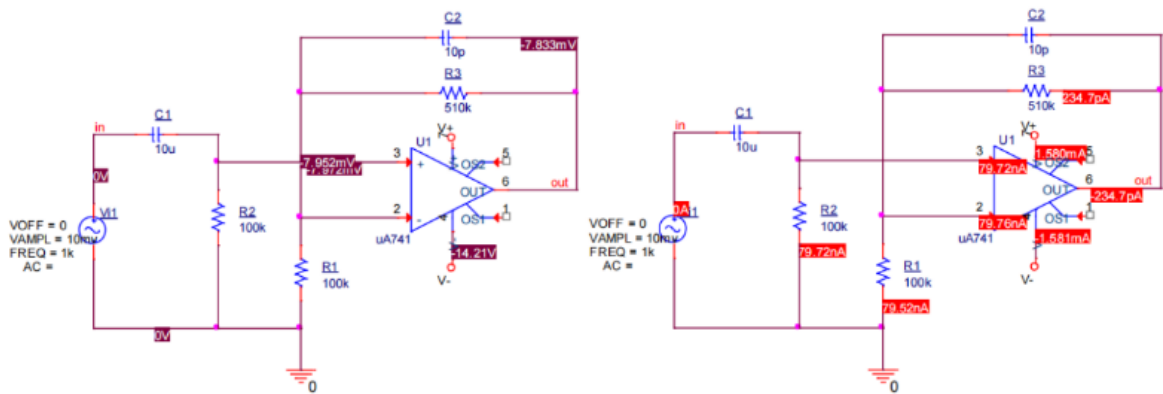


图 4：前置级部分静态电压和电流数据

前置级

对前置级进行 tran 扫描获得的 V(in)和 V(out)仿真输出结果如下图所示

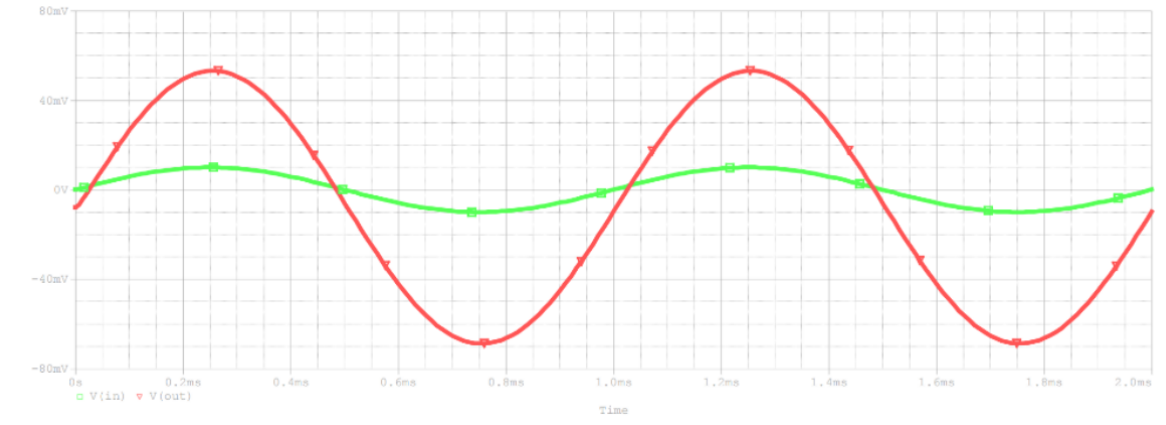


图 5：前置级时域扫描输入输出电压图

对前置级电路进行电压放大倍数的频率扫描时的仿真结果图如下图所示。

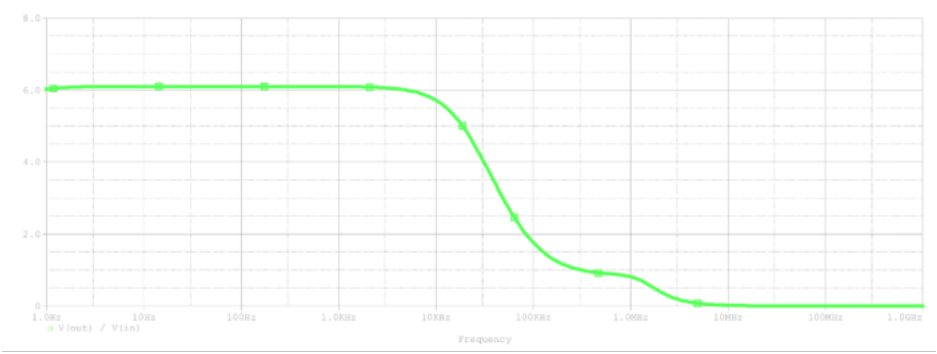


图 6：前置级电压放大倍数的频率扫描图

C1=1μF时前置级电压放大倍数的频率扫描图的仿真结果如下图所示

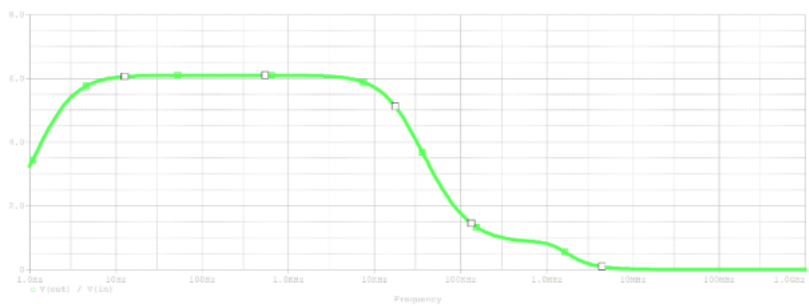


图 7：C1=1uF 时前置级电压放大倍数的频率扫描图

电压放大倍数曲线如下图所示

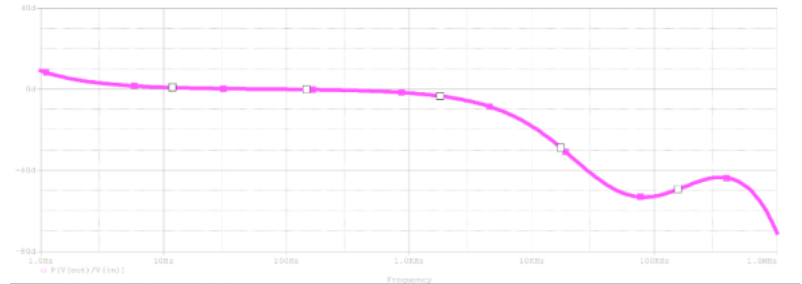


图 8：电压放大倍数曲线仿真图

音调控制级

对音调控制级电路进行静态扫描得到的电压和电流仿真图如下：

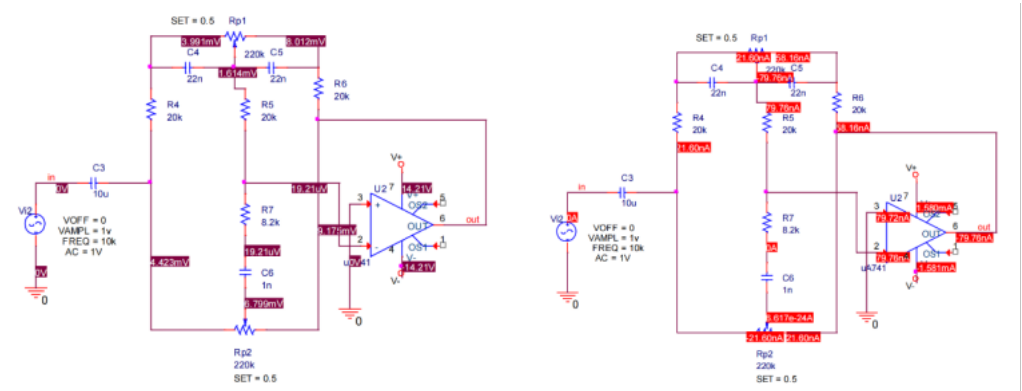


图 9：音调控制级静态工作电压图与静态工作电流图

下图 10-图 13 分别为高音提升/衰减的 AC 扫描/tran 扫描和低音提升/衰减的 AC 扫描/tran 扫描仿真图

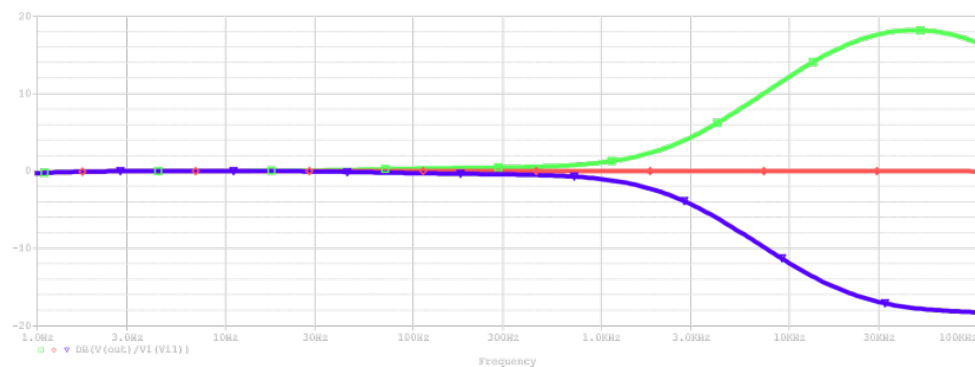


图 10：高音提升/衰减的 AC 扫描

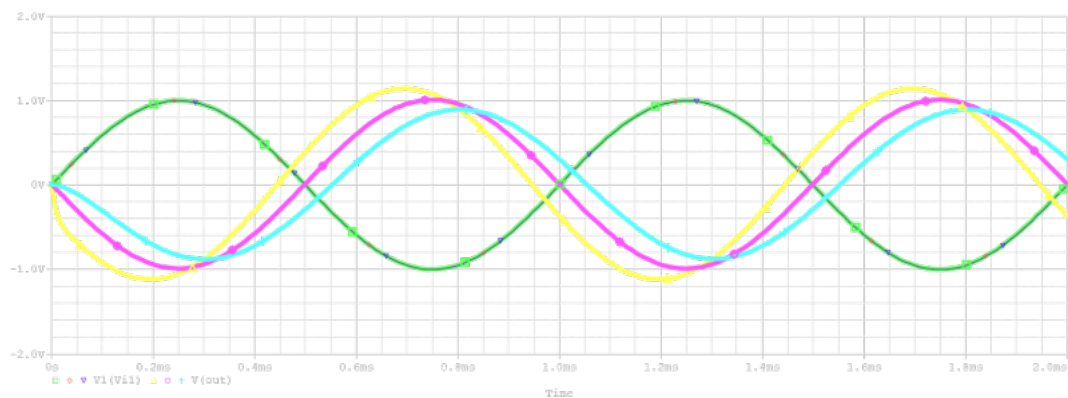


图 11：高音提升/衰减的 tran 扫描

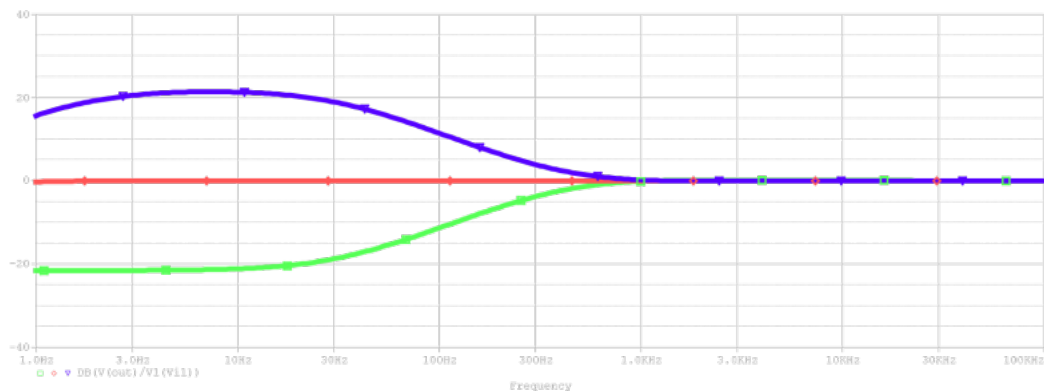


图 12：音低音提升/衰减的 AC 扫描

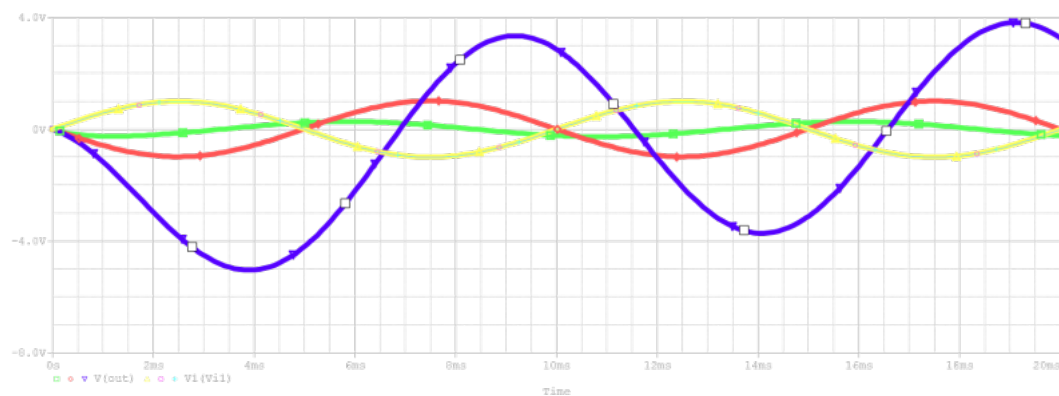


图 13：低音提升/衰减的 tran 扫描

功率放大级

下图为功率放大级 tran 扫描仿真结果：

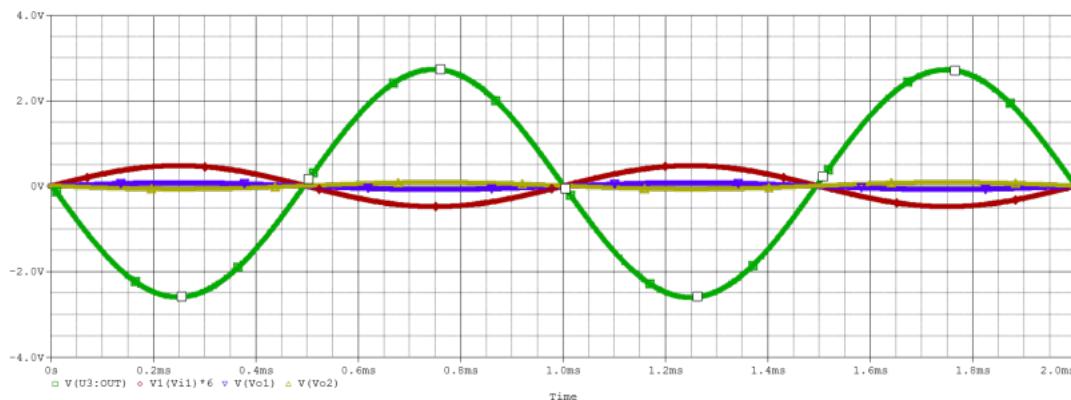


图 14：功率放大级 tran 扫描

整机测试

下图是整机 bias 扫描仿真结果：

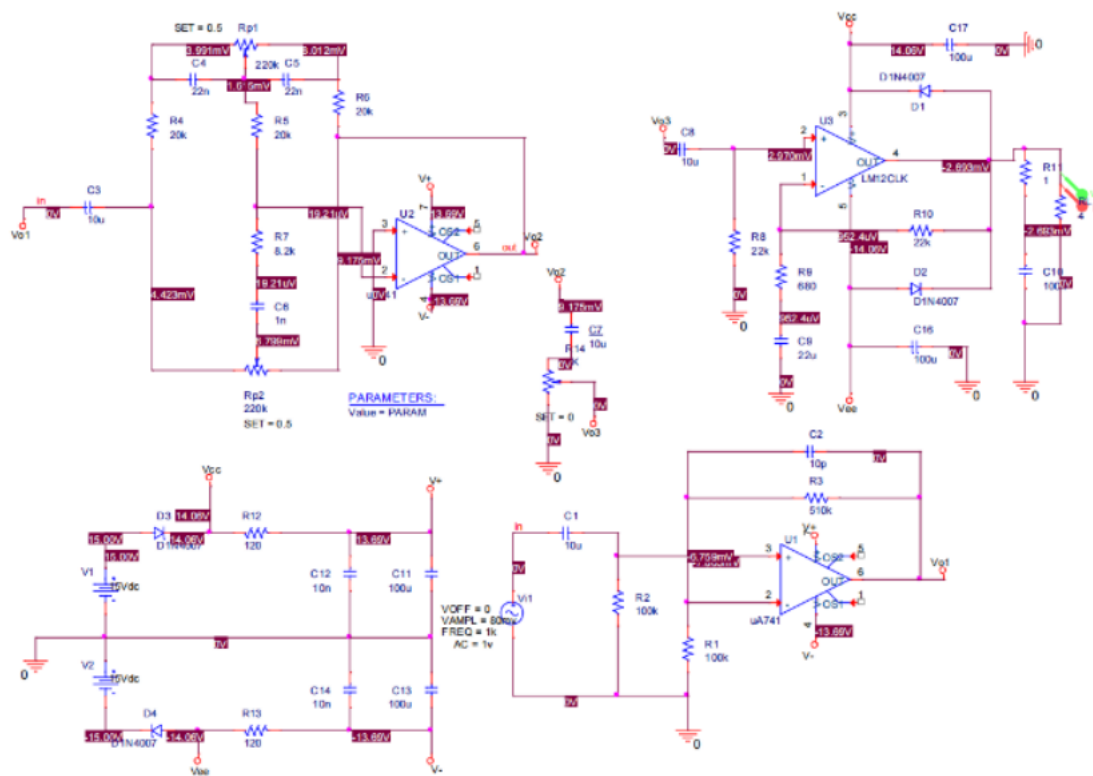


图 15：整机 bias 扫描

下图 16-图 18 分别是整机 tran 扫描、幅频特性曲线和相频特性曲线扫描结果：

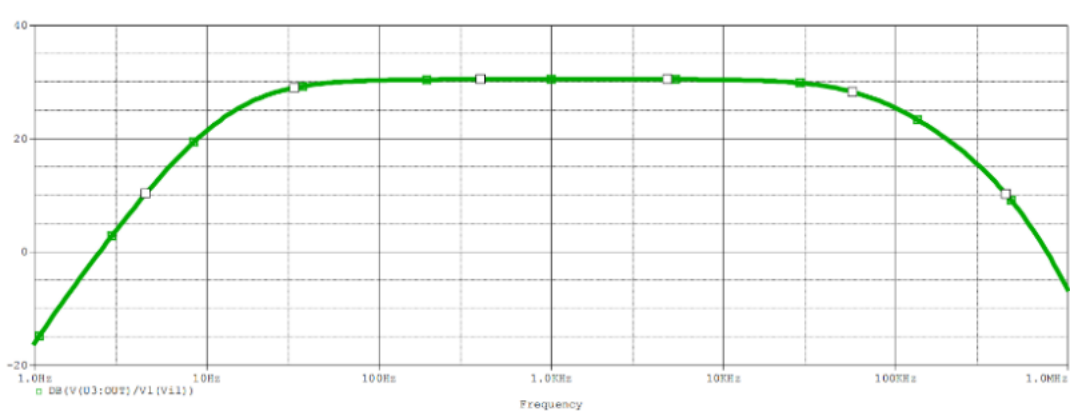


图 16：整机 tran 扫描

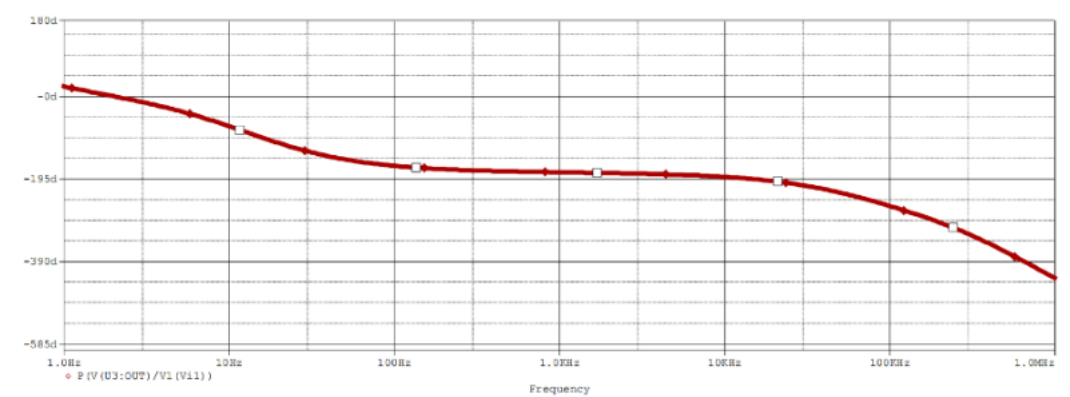


图 17：整机幅频特性曲线

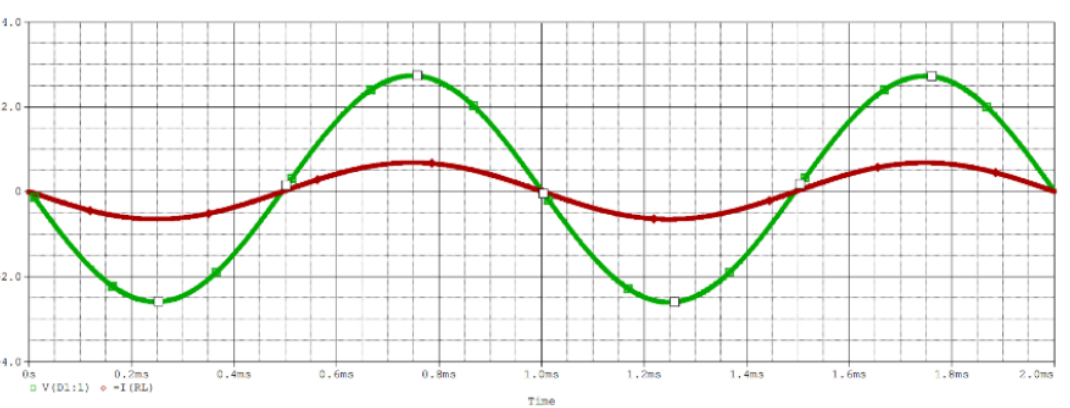


图 18：整机相频特性曲线

三、主要仪器设备

示波器、信号发生器、稳压电源、空电路板、电烙铁等工具、 $\mu A741$ 、电阻电容元件等。

四、操作方法和实验步骤

1. 静态调试

- ①对照原理图，检查电路的正确性。
- ②加电源，注意观察（电源电流大小，有无冒烟）。
- ③静态测试：将输入接地，测试各级电路的静态工作点。要求零输入时零输出。
- ④记录实验数据并与仿真值进行比较。

2. 动态调试

- ①输入信号频率为 1kHz 的正弦波。
- ②用示波器检查各级电路的输出，验证电路功能。
- ③分别调节音调控制电位器 RP1 和 RP2，检查输出幅度如何变化。
- ④调节音量电位器 RP3，检查输出幅度是否变化。
- 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，用示波器测量主要节点的电压幅度，记录到表格中。

3. 空载测量整机指标

- ①整机电压增益 A_v 在音量电位器 RP3 置于最大位置、音调控制电位器置于中心位置时的整机电压放大倍数。
 - 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最大输出功率 P_{omax} 当接负载时，由 V_{omax} 计算出 P_{omax} （空载不测）。
 - ④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 V_{imax} 。要求 $V_{imax} < 100mV$ 。
 - ⑤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。
 - ⑥频率响应特性 f_L 和 f_H 电压放大倍数下降到中频段时的 0.707 倍时，所对应的频率。（上下限频率的测量类似于共射放大电路。先在中频段（如：1kHz）使输出电压达到合适的幅度，然后保持输入信号幅度不变时，调节频率，使输出电压幅度达到中频段的 0.707 倍。）
 - ⑦高低音控制特性 分别测量 $f=100Hz$ 时的低音净提升量、低音净衰减量， $f=10kHz$ 时的高音净提升量、高音净衰减量。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，即：

$$20 \log \frac{A_{vA}}{A_v} = 20 \log \frac{V_{oA}}{V_o} \qquad 20 \log \frac{A_{vB}}{A_v} = 20 \log \frac{V_{oB}}{V_o}$$

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）即：

$$20 \log \frac{A_{vC}}{A_v} = 20 \log \frac{V_{oC}}{V_o} \qquad 20 \log \frac{A_{vD}}{A_v} = 20 \log \frac{V_{oD}}{V_o}$$

4. 载测量整机指标

在输出端接上额定负载（ 8Ω 功率电阻），重测整机各项指标，并与空载时测量值比较。

5. 听音试验

- ①试听前将音调电位器 RP1 和 RP2 置于中间位置，音量电位器置于最小位置。
- ②收音机选台，声音大小合适。
- ③电路板连电源，输入连收音机，输出连音箱。
- ④打开电源，调节 RP3 使音量大小合适，感觉喇叭发音情况。
- ⑤分别调节音量至最小和最大，感觉喇叭发音情况。
- ⑥音量调至适中，逐一改变音调电位器 RP1 和 RP2，感觉高低音提升衰减效果。

五、实验数据记录和处理

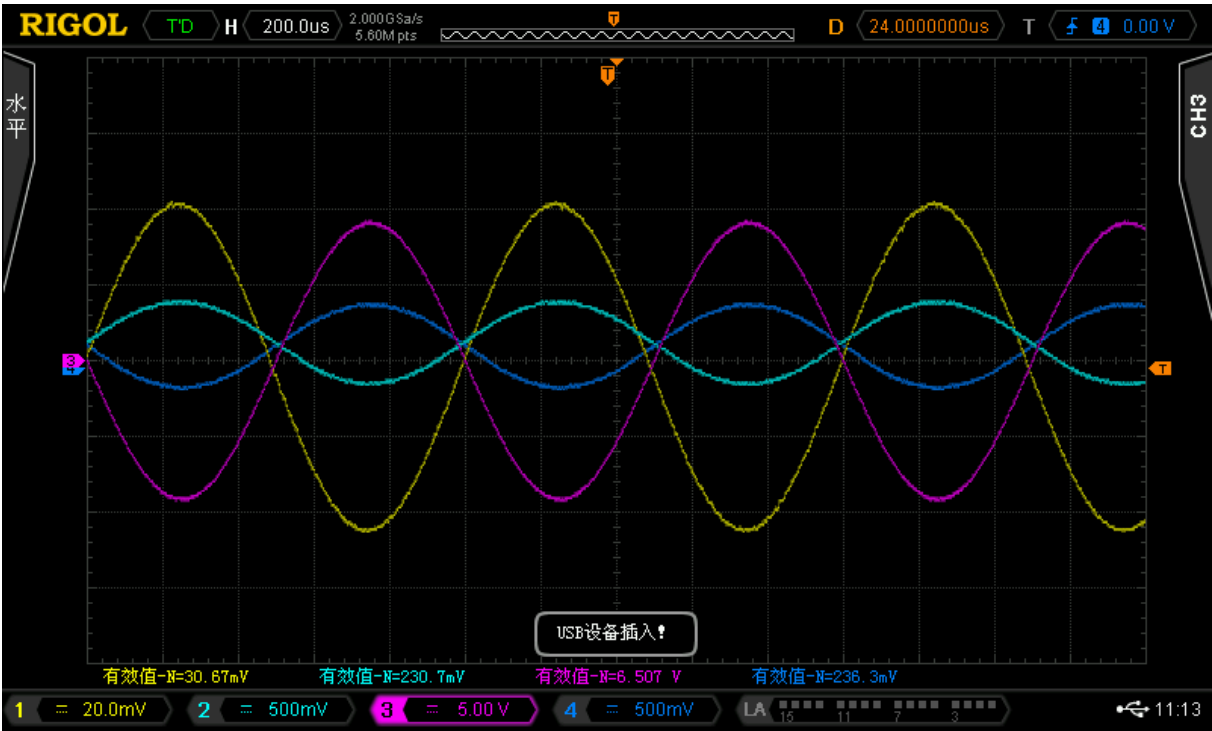
1. 静态调试

静态电压	V _{O1}	V _{O2}	V _{O3}
实测值	9.886mV	4.166mV	1.180mV

2. 动态测试

节点电压	实测值	放大倍数	实测值
V _i =V _{i1}	31.36mV	前置放大级 A _{v1}	6.25
V _{o1} =V _{i2}	196.1mV	音调调控级 A _{v2}	-1.02
V _{o2} =V _{i3}	199.1mV	功率放大级 A _{v3}	33.77
V _{o3} =V _o	6.723V	整机 A _v	-214.38

示波器波形如图：



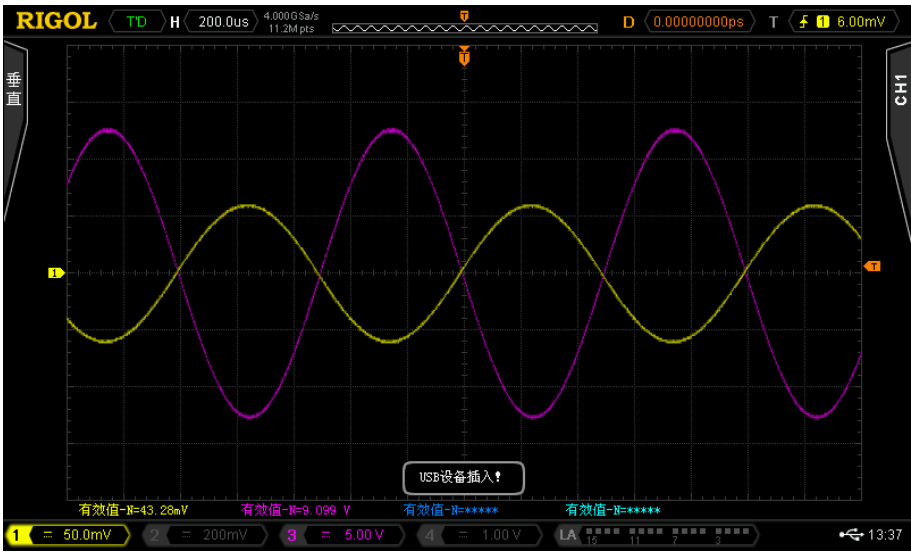
3. 空载测量整机指标

整机电压增益 A_v	-214.38	最大不失真输出电压 V_{omax}	9.099V
输入灵敏度 V_{imax}	43.28mV	噪声电压 V_N	15.73mV
下限截止频率 f_L	12.2Hz	上限截止频率 f_H	22.3kHz

注：表中有关电压的数值所用的都是有效值表示

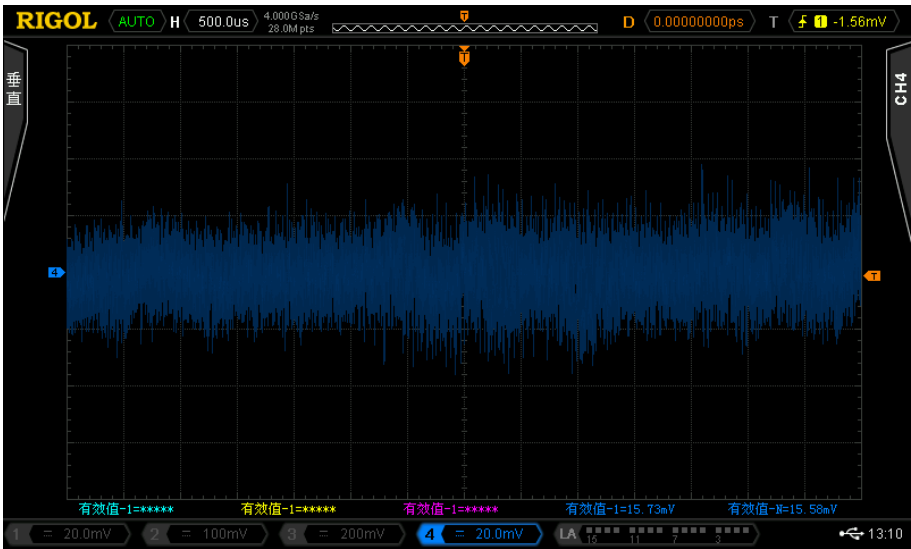
(1) 测量最大不失真输出 V_{omax} 和输入灵敏度 V_{imax}

示波器波形图如下：



可读出 $V_{omax} = 9.099V$, $V_{imax} = 43.28mV$

(2) 测量噪声电压 V_N

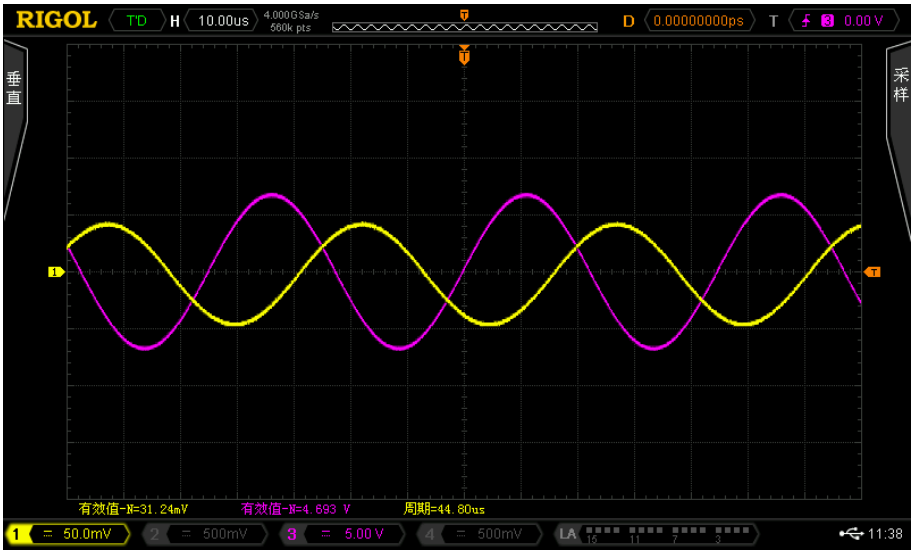


可读出 $V_N = 15.73mV$

(3) 频率响应特性测量

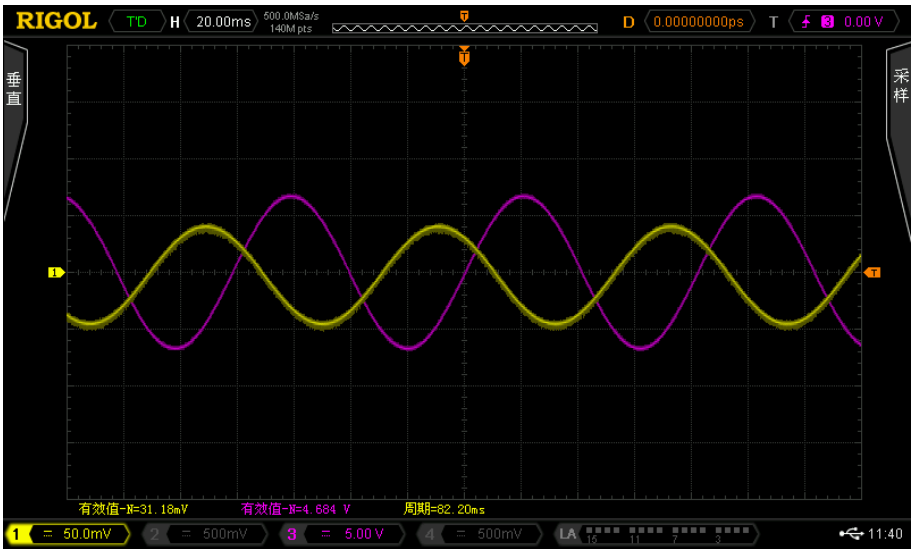
为了保持输入电压大小相等，实验过程中会适当调节信号发生器的幅度。

①达到上限频率时的信号源设置和示波器显示图如下



$f_H = 22.3\text{kHz}$

②达到下限频率时的信号源设置和示波器显示图如下



$f_L = 12.2\text{Hz}$

(4) 高低音控制特性

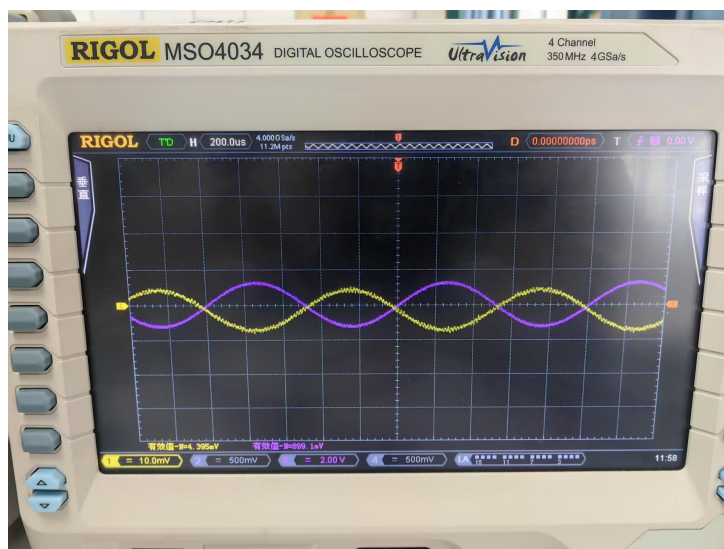
f=100Hz 时

V_o	V_{oA}	V_{oB}	低音净提升量	低音净衰减量
899.1mV	3.59V	242mV	12.03dB	-11.39dB

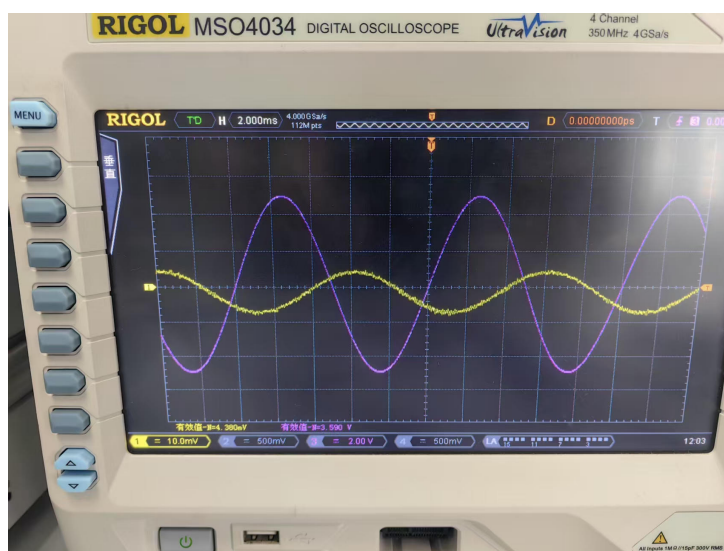
低音净提升量： $20\lg\frac{A_{vA}}{A_v} = 20\lg\frac{V_{oA}}{V_o} = 12.03\text{dB}$

低音净衰减量： $20\lg\frac{A_{vB}}{A_v} = 20\lg\frac{V_{oB}}{V_o} = -11.39\text{dB}$

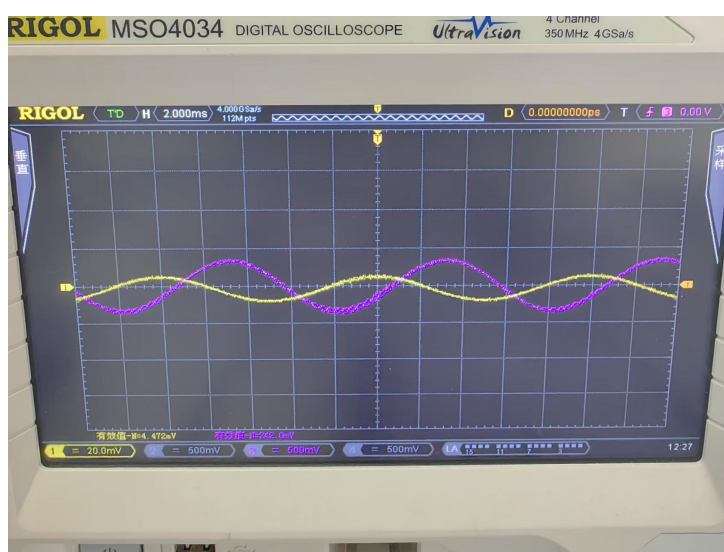
初始 V_O ：



低音提升示波器：



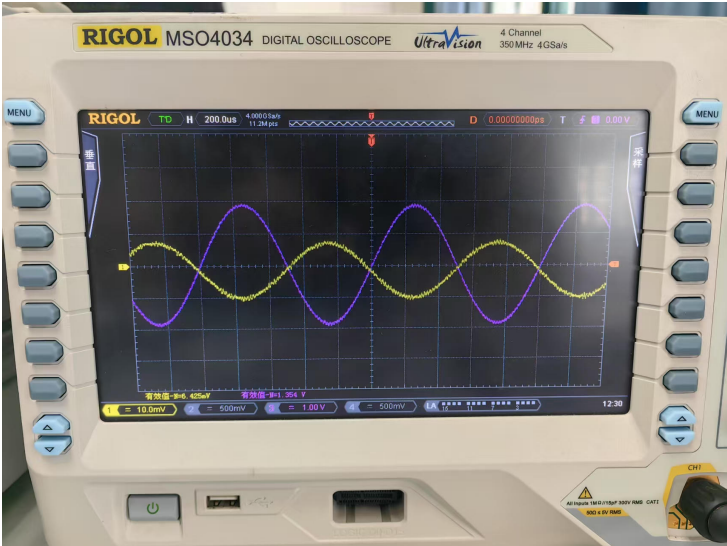
低音衰减示波器：



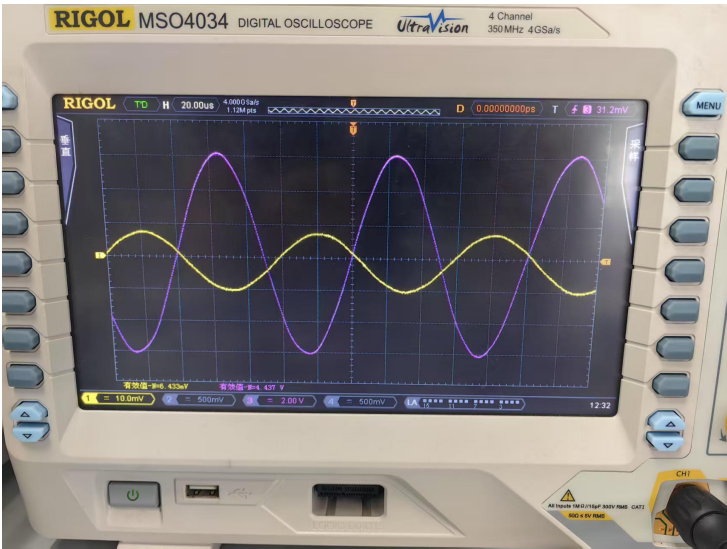
f=10kHz 时

V _o	V _{oc}	V _{OD}	高音净提升量	高音净衰减量
1.35V	4.437V	366.4mV	10.34dB	-11.33dB

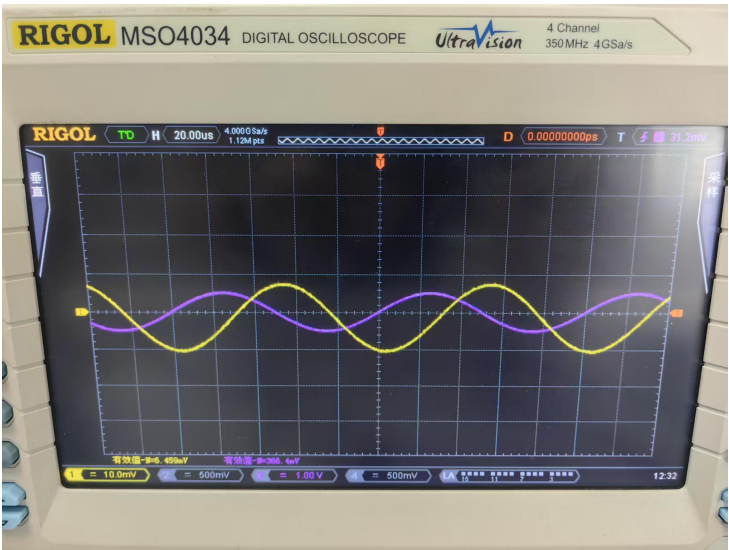
低音净提升量： $20\lg\frac{A_{vc}}{A_v}=20\lg\frac{V_{oc}}{V_o}=10.34\text{dB}$
低音净衰减量： $20\lg\frac{A_{vc}}{A_v}=20\lg\frac{V_{oc}}{V_o}=-11.33\text{dB}$
初始V_O:



高音提升示波器:



高音衰减示波器：



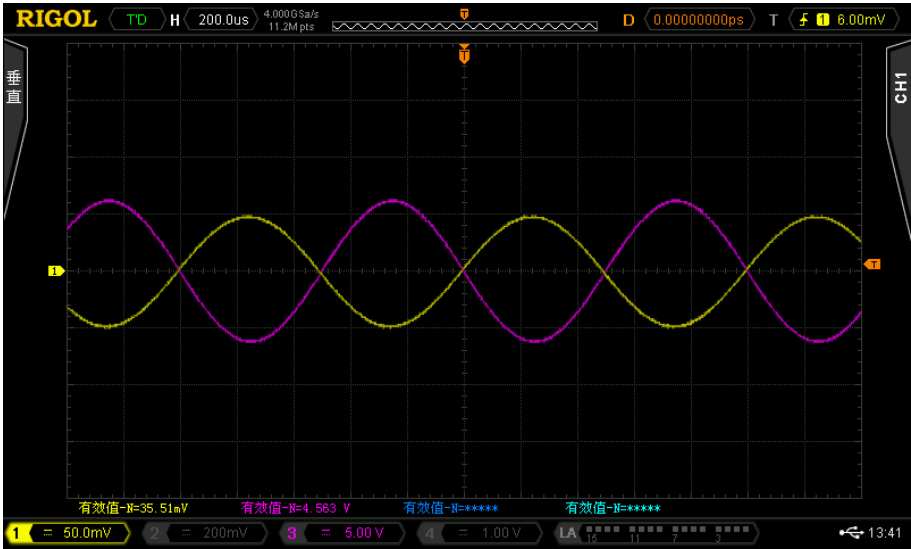
4. 带载测量整机指标

加上 8Ω负载后测量相关指标，需增加测量最大输出功率 P_{omax} 和效率 η

整机电压增益 A_v	-128.5	最大不失真输出电压 V_{omax}	7.764V
输入灵敏度 V_{imax}	60.94mV	噪声电压 V_N	11.01mV
下限截止频率 f_L	13.9Hz	上限截止频率 f_H	22kHz
最大输出功率	7.53W	输入功率	13.83W
效率	54.4%		

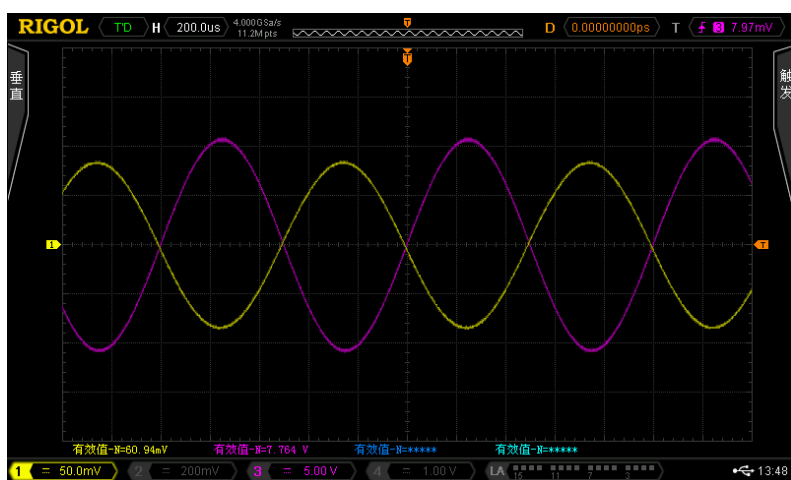
(1) 测量整机放大倍数、最大不失真输出 V_{omax} 、输入灵敏度 V_{imax} 、最大输出功率 P_{omax} 效率 η

测量整机放大倍数的示波器波形如下：



$$A_v = -\frac{V_o}{V_i} = -128.5$$

测量最大不失真输出电压示波器波形图如下：



可读出 $V_{omax} = 7.764V$, $V_{imax} = 60.94mV$

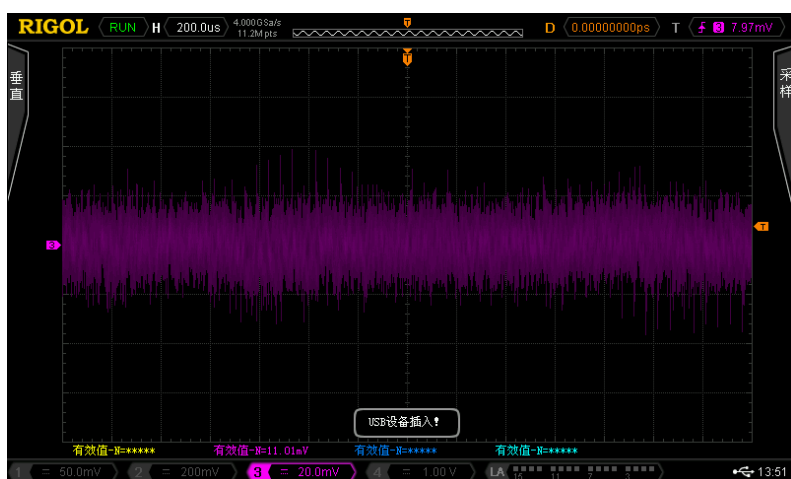
从而 $P_{omax} = \frac{V_{omax}^2}{R_L} = 7.53W$

电源的输出功率如下：



所以效率 $\eta = \frac{7.53W}{6.92W + 6.91W} = 54.4\% > 50\%$ ，符合要求

(2) 测量噪声电压 V_N

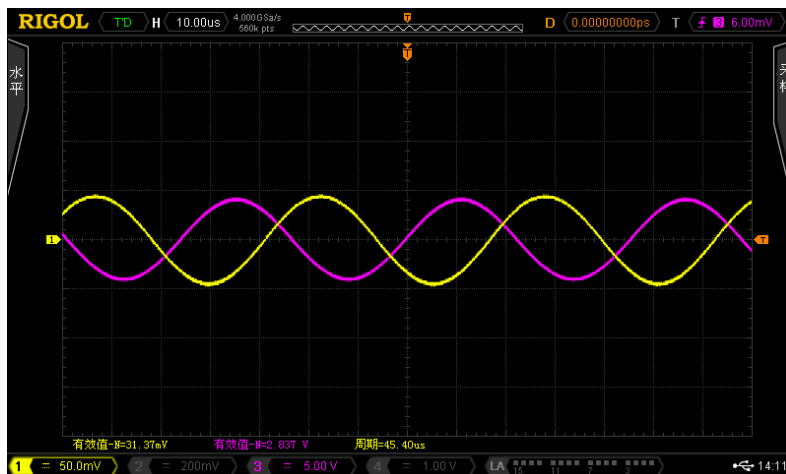


可读出 $V_N = 11.01\text{mV}$

(3) 频率响应特性测量

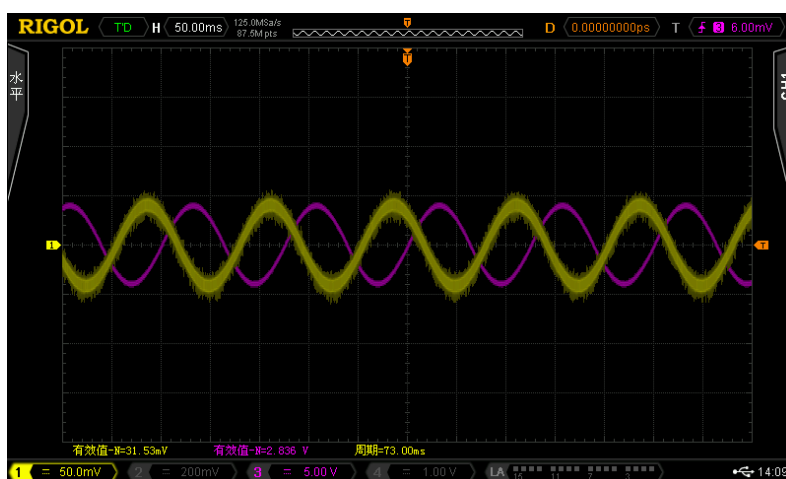
为了保持输入电压大小相等，实验过程中会适当调节信号发生器的幅度。

①达到上限频率时的信号源设置和示波器显示图如下



$$f_H = 22\text{kHz}$$

②达到下限频率时的信号源设置和示波器显示图如下



$$f_L = 13.9\text{Hz}$$

(4) 高低音控制特性

 $f=100\text{Hz}$ 时

V_O	V_{OA}	V_{OB}	低音净提升量	低音净衰减量
1.08V	4.353V	0.268V	12.11dB	-12.10dB

低音提升示波器：



低音衰减示波器：



f=10kHz 时

V _o	V _{oc}	V _{OD}	高音净提升量	高音净衰减量
1.08V	3.495V	0.281V	10.20dB	-11.69dB

高音提升示波器：



高音衰减示波器：



六、实验结果与分析

1. 静态测试

理论上三级电路的静态输出电压都是 0，实测皆为毫伏级别，近似为 0，符合要求。仿真时各级输出电压也均为毫伏级别。

2. 动态测试

前置放大级，理论增益和仿真值 $A_v = 1 + \frac{510k}{100k} = 6.1$ ，实测 6.25，误差在 2.46%，考虑到电阻阻值存在一定的误差，可以认为符合要求。

音调调控级，中频理论增益和仿真值 $A_{v0} = -1$ ，实测-1.02，误差较小，可以认为符合要求。

功率放大级，理论增益和仿真值 $A_{v0} = 1 + \frac{22k}{680} = 33.35$ ，实测 33.77，误差较小，考虑到电路中的电容并非真正工作在理想状态，且电阻阻值存在一定误差，可以认为符合要求。

其中前置放大级 A_{v1} 与理论值的误差为 $E_1 = 2.46\%$ ；音调控制 A_{v2} 与理论值的误差为 $E_2 = 0.02\%$ ；功率放大级 A_{v3} 与理论值的误差为 $E_3 = 1.26\%$ ，总体误差较小，实验结果较好。

微小误差的产生原因还和示波器精度等有关，在读数时，示波器的示数会有微量的上下浮动，会产生误差。

3. 空载测量整机指标

空载理论整机电压增益为 $6.1 \times (-1) \times 33.66 = -203.45$ ，实测-214.38，有一定误差，可能是焊接情况和电阻本身误差造成的，可以认为符合要求。

最大不失真输出电压理论值应该略小于 15V，大约在 12V 左右，实测为 9.099V，有一定差距，但考虑到测量时对失真的判断标准是主观的，所以也可以认为符合要求。

对于输入灵敏度，由于是通过最大不失真电压计算得到，与其同理，43.28mV 小于 100mV，可以认为符合要求。

噪声电压仅有 15.74mV，很小，表明音频功率放大电路的抗干扰能力强。

通频带宽 12.2Hz—22.3kHz，满足 50Hz—15kHz 的要求。上下限频率和实测值和仿真值都有一定差距，上限频率尤甚。分析其原因因为下限频率主要受耦合电容、旁路电容等大电容影响，而上限频率主要受结电容等小电容影响，而示波器存在输入电容，属于小电容，于是它会拉低整个电路的上限频率，使得实测出的上限频率远低于仿真值。

高低音的衰减和增益都保持在 $\pm 12\text{dB}$ 左右，可以认为符合要求。低于 12dB 的误差可能是电路布线的分部电容和电感导致的。

4. 加载测量整机指标

带载理论整机电压增益为 $6.1 \times (-1) \times 33.66 = -203.45$ ，实测 128.5，虽然误差较大，考虑到负载具有较大电流，可以认为符合要求。最大不失真输出电压实测为 7.764V，与理论值有一定差距，但考虑到测量时对失真的判断标准是主观的，且负载具有较大电流，所以也可以认为符合要求。

对于输入灵敏度，由于是通过最大不失真电压计算得到，与其同理，60.94mV 小于 100mV，可以认为符合要求。

噪声电压 11.01mV 左右，较小，表明带载后电路的抗干扰能力依然很强。

通频带宽 13.9Hz—22kHz，满足 50Hz—15kHz 的要求，就下限频率而言，无论是仿真还是实测，有无负载对实验结果影响都不大。但是，上限频率相差较大。总体上，有负载时的通频带要更窄。通频带与理论值相比差别较为明显，但这是由于实际实验时各种噪声和温漂引起的，在实验误差范围之内。

对于最大输出功率，由于是通过最大不失真电压计算得到，与其同理，7.52W 小于 8W，可以认为符合要求。

对于效率 $\eta = 54.4\% > 50\%$ ，符合实验的要求，音频功率放大电路有理想的效率。

高低音的衰减和增益都保持在 $\pm 12\text{dB}$ 左右，可以认为符合要求。高音部分提升和衰减的增益与 $\pm 12\text{dB}$ 有一定差距，误差可能是电路布线的分部电容和电感导致的，且负载上有较大电流。

5. 听音试验

整机调试完毕后连接在了实验室音箱上，以音乐播放器作为输入成功播放并放大了音乐，并且观察到了 RP1 对低音的影响，RP2 对高音的影响，RP3 对整体音量的影响。

七、讨论与心得

（一）思考题

1.整理本次实验数据，将实测值与理论估算值相比较并加以分析。

详细分析见实验报告正文中的实验结果与分析模块。与理论值相比，实测得到的电路的电压放大倍数和通频带宽度都较小，其中上下限频率与理论值的差别较大；个人认为出现误差的一个很大因素是由于该电路是由手工焊接而制成的，各个点之间可能都存在一些误差，而且实际操作时，也需要考虑到很多的环境因素、导线老化、其他电路设备之间存在的误差和缺陷。

其中前置放大级 A_{v1} 与理论值的误差为 $E_1 = 2.46\%$ ；音调控制 A_{v2} 与理论值的误差为 $E_2 = 0.02\%$ ；功率放大级 A_{v3} 与理论值的误差为 $E_3 = 1.26\%$ ，总体误差较小，实验结果较好。

总的来说，实验验证了音频放大电路的功能和各种参数原理，指标和参数总体符合理论值，在误差范围之内。误差主要来自焊接情况、接线情况等问题，以及信号源、电压源、示波器等电路设备本身存在的误差以及环境和噪声引起的误差等等。

2.分析实验中出现的异常现象。

在用示波器显示输出电压时，发现无法正常显示，最后发现是Rp3没有开启导致的。

在测量整机指标时，一开始输出信号特别不稳定，最后发现是地线的影响，把所有地线接到一起后就正常了。

在测量高低音衰减提升量时，发现改变频率后输出电压波形失真了，发现是没有调整好合适的输入电压造成的。

3.引起噪声、自激、失真现象的原因是什么？

电源供电的稳定性和质量直接影响放大器的性能，电源纹波和噪声会叠加到信号上，周围环境中的电磁场可能会通过电感耦合或电容耦合方式引入噪声。各种元器件如电阻、半导体器件本身在工作时会产生本底噪声。

电路参数选择和设计不当、电源引入的噪声没有充分滤波，会在放大器的供电端产生振荡。电路中的寄生电容和寄生电感会在某些频率下形成谐振，导致自激振荡。不合理的电路板布局和布线可能导致信号耦合，形成反馈环路，引发自激。

放大电路的非线性元件会导致信号失真。当输入信号过大，超过放大器的线性工作范围时，放大器会进入饱和或截止状态，导致输出信号被削波。频率响应不平坦或相位响应非线性会导致信号的相位失真。放大器在高频或低频下增益下降，导致频率响应不平坦，引起频率响应失真。

4.在音频功率放大电路实验中，扩音机的整机电路按其构成可分为前置放大级、音调控制级和功率输出级三部分。

5.在 OrCAD 软件中仿真中，常用 AC Sweep、DC Sweep、Transient 对电路扫描分析，简述三种扫描方式用于分析什么参数？请以扩音机放大电路为例说明。

AC Sweep 用于分析动态参数，DC Sweep 用于分析静态参数，Transient 用于分析时域过程。如在对前置级的电压放大倍数在不同频率下进行扫描时，就要用到 AC Sweep；在对音调控制级进行波形观察时，就要用到 Transient 扫描方式等等。

6.音频功放电路中各个电位器的作用分别是什么？

RP1 电位器控制低音增益，RP2 电位器控制高音增益，RP3 电位器控制音量

7.各级电路放大倍数的理论值分别是多少？

前置放大级 6.1，音调调控级-1，功率输出级 33.35

8.C1、C2 作用？分别是什么电容？使用时注意事项。

电容 C1 是耦合电容，用于连通起交流回路，阻断直流信号；电容 C2 的作用是避免电路发生自激振荡；C1 是电解电容，使用时时需要注意不要把正负极接错，否则可能发生爆炸危险。

9.静态时输出端有电压什么原因，怎样处理？

可能由以下问题导致的：电路中的耦合电容损坏、电路接线不正确、焊接过程出现错误导致虚焊等情况、电源或信号源的设置出现问题等等。应该首先检查信号源与电源设置是否出现了问题，再检查电路的接线是否正确，若还无法解决，则要将电路板从电路中取下，用万用表进行逐点排查是否是焊接出现了问题。

当然事实上静态时输出端有可能存在毫安级别的电流，这属于电路本身所处环境带来的噪声或温漂，是没有问题的。

10.放大倍数出现异常，应该怎样检查？如何改正？

首先检查信号源和电源设置是否正确，再检查电路的接线和信号源、示波器的连接是否正确，再检查示波器的探头比是否不是 1:1，若以上都正确，则可能是电路板本身的焊接存在问题，需要将电路板从电路中取下，用万用表对可疑结点进行逐点排查，在必要时进行重新焊接。

11.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？）

①测输入灵敏度：用示波器测量，将电位器打到放大倍数最大的点，音量调控电位器处于中间状态，调整输入信号源的电压大小，同时观察示波器上输出电压的波形，当波形刚好出现失真时，用示波器观察输入电压的有效值，该值即为音频功放电路的输入灵敏度。

②测噪声电压：用示波器测量，在输入端不接任何信号源并将正负输入端缠绕绞接在一起，将电位器调至放大倍数最大的位置，音量调控电位器处于中间状态，在示波器上调整测量输出电压为“有效值”，因为噪声电压可能不为正弦波，所以用有效值代替来表示噪声的大小。

12.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）

首先将 RP1、RP2 调至中间位置，调节输入信号 $f=1\text{kHz}$ ，使输出电压为最大输出电压的 10%（0.5V）左右，测得 V_o ，将 RP2 调至 C 端，测出 V_{oc} ，则电路高音净提升量为（单位分贝）：

$$20 \lg \frac{A_{vc}}{A_v} = 20 \lg \frac{V_{oc}}{V_o}$$

13.电子电路调试应遵循哪些基本原则？

①在开始调试前要确定调试的目标目标，应明确电路的目标功能和性能参数，然后逐步检验每个功能和参数是否达到要求。

②同时需要了解电路，在进行调试之前应熟悉电路原理图，熟悉电路的构成和工作原理，包括信号的传输、元件之间的关系等。

③要选择好用于调试的设备，根据电路的实际情况，准备好相应的测试设备和测试工具，如万用表、示波器、信号源等。

④要分步调试，通常情况下，要逐步地、系统地检验每个部分的功能和参数，以确保电路正常工作，不至于调试到后面忘了前面。

⑤在调试过程中及时记录数据，以便后续分析和比较。

⑥最后对调试的数据和电路进行分析，找出问题所在并加以针对性的解决；若无法找出问题，则需要再对电路、设备、接线、焊接状况等条件进行检查，若有必要则进行下一次调试。

(二)心得

整体实验做下来这应该是最具有完成度和成就感的一个实验。实验难度很高。首先这次电路板子所有的布局和焊接都是我们自己完成的，这也是我第一次花这么长时间设计和焊接一个电路。在整个过程中，我的焊接技术日渐熟练，从原来对着电烙铁和焊锡丝不知所措，甚至有一次手也不小心被烫到了，到后面焊错了之后已经能做到不慌张，熟练地使用电烙铁和吸锡器来拆焊。同时自己也积攒了一些心得和经验。原理图和电路板的布局很重要，焊接时最好能先焊导线再焊元器件，最好从左到右来焊，防止焊接时焊点之间相互连接，焊完后可以及时用万用表检查是否虚焊。然而由于一开始焊接不够熟练，张治沁老师指出我给锡太多，这样的情况其实是容易造成虚焊的，经过本次实验后，我将会吸取教训，在下次再次焊接时减少给锡量，尽量焊出更完美的焊点。

在做实验的测量过程感受也是非常深的，除了放大倍数、输入输出电阻等之前就了解的指标，还详细了解了第二级音调控制级的低音提升、低音衰减、高音提升和高音衰减的功能。同时听音试验时直观的将音频放大，同时可以自己调节音量和高低音衰减量，让我深刻体会到了自己焊接制作的音频功率放大电路在实际中的应用。在带载指标的测量中，我还了解到了带载和不带载对电路性能的影响，对此有了更直观和深刻的体会。在测量参数时，需要多次用到实验室的电源、函数信号发生器、示波器，第一次实验所做的仪器使用在不断地巩固，我也从最初地不太会使用这些仪器到现在地能熟练操作这些仪器并测量电路地一些基本的参数了。

在第一次课时由于操作不熟练，只测完了空载的相关参数。对于高低音衰减如何操作也不大了解，最后的输出波形容易失真。后面仔细阅读了 ppt 和相关资料后，我在周五上午便能较为熟练地去测带载情况下的相关参数。需要注意的是，带载时由于负载电流较大，所以需要较快地测量，如果测不完中间需要休息。我还帮助实验室别的没有得到理想波形的同学检查了板子，并告知测量时需要注意的事项。

此外，本次实验同样延续了前几次实验的特点，综合了理论、仿真和实践。每一个环节在模电实验中都是必不可少的。理论分析和仿真固然重要，但仍然要和实验相结合才能更深刻理解数据为何而来，以及产生误差的原因是什么。

张治沁老师上课时说，这个实验是很“带感”的，我做下来也确实如此。首先电路板的焊接就花费了我很多时间和心血，我在夏五周周一-周五几乎每天有空就到 107 焊接，因为我每次回来就会发现自己板子有些焊点不够完美，导线露出太多等问题，于是便不断地优化自己地板子。同时，课上的测量的很多参数也让我对我自己焊接的这个音频功率放大电路有了很深刻的体会，我的理论知识、焊接实践能力、电工电子学实验调试能力都得到了很大提升。

本次实验我学会了很多，收获也很大，是一次比较印象深刻且成功的实验。再次感谢在我实验过程中向我提供帮助的张治沁老师，还有其他热心的同学！