

学 号：	0122109361304
------	---------------

武汉理工大学

课 程 设 计

题 目	2 声道音频功率放大器的设计与实现
学 院	信息工程学院
专 业	电子信息工程
班 级	电信 2106
姓 名	陈锦丰
指导教师	李新友

2022 年 12 月 30 日

课程设计任务书

学生姓名： 陈锦丰 专业班级： 电信 2106

指导老师： 李新友 工作单位： 信息工程学院

题 目： 2 声道音频功率放大器的设计与实现

初始条件：

音源为手机 3.5mm 耳机接口、扬声器的性能参数为 $8\ \Omega$ /15W、主要元器件如分立元件、集成运放、集成功放、集成三端稳压电源等，可在仿真软件元件库范围内选用，其性能参数和引脚排列请利用网络查阅数据手册，元件库里没有的，组合现有元件模拟其特性。

要求完成的主要任务：

1. 设计任务

本课程设计以实现 2 声道音频功率放大为基本任务；根据技术指标与已有条件完成 理论设计、器件选型与电路设计；选择应用软件进行仿真验证；制作并调测实物电路。

2. 设计要求

- 1) 依据已知条件划分功能模块，论证并合理选择设计方案，画出**原理框图**；
- 2) 确定实现各个功能模块之单元电路的具体实现方案，依据电路主要性能指标进行**元、器件选型**，计算相关参数，画出**单元电路原理图**；
- 3) 针对电路的主要功能与性能指标，设计**实验方案**，并借助仿真软件对电路进行分析与调测；
- 4) 画**总体电路原理图**，列元、器件清单并按相关规范完成课程设计报告书。

3. 主要功能与性能指标：

额定输出功率 $P_o = 2 \times 15W$ （失真度小于 1%）；频率响应 20Hz~20kHz；整机效率大于 50%

时间安排：

2022 年 11 月 20 日集中，作课设具体实施计划与报告书格式的要求说明；

2022 年 12 月 25 日之前确定设计方案；

2022 年 12 月 26 日至 2022 年 12 月 30 日验收仿真、实物、报告并答辩。

指导教师签名： 年 月 日

系主任（或责任教师）签名： 年 月 日

摘 要

本次模拟电子技术基础课程设计题目为 2 声道音频功率放大器的设计与实现，简称为双通道音频功放。音频放大主要是将微弱的声音源通过滤波后，进行信号放大，最后通过功率放大输出驱动扬声器工作，使其音质更接近现场演奏、演唱的效果。

此次设计中主要分为前置放大器、带通滤波电路和音频放大器三个模块，并且采用 Multisim 软件对电路进行仿真，前置放大器又分为一级放大和二级放大，与带通滤波电路一样，共同使用 NE5532 运算放大器作为核心，通过外加双 15V 电源，在功率放大之前达到指定要求。而功率放大器采用 LM1875 集成模块进行放大。将这几个电路组合起来，便构成了一个简便的音频功率放大电路，从而达到课程任务所需要的音频放大的要求。

音频功率放大器主要应用于音响、电视机、MP3 等电子设备使音质更加接近现场演奏、演唱的效果，具有很大的现实意义。

关键词：NE5532、LM1875、前置放大器、带通滤波电路、功率放大器

Abstract

The design topic of this basic course of analog electronic technology is the design and implementation of 2-channel audio power amplifier, referred to as double-channel audio power amplifier. Audio amplification is mainly the weak sound source through filtering, signal amplification, and finally through power amplification output drive speaker work, so that its sound quality is closer to the effect of live performance, singing.

This design is mainly divided into preamplifier, bandpass filter circuit and audio amplifier three modules, and the use of Multisim software to simulate the circuit, the preamplifier is divided into one level amplifier and two level amplifier, and the bandpass filter circuit, the common use of NE5532 operational amplifier as the core, through the external double 15V power supply, Reach specified requirements before power amplification. The power amplifier is amplified by LM1875 integrated module. The combination of these circuits will constitute a simple audio power amplifier circuit, so as to meet the requirements of the course task audio amplification.

Audio power amplifier is mainly used in audio, TV, MP3 and other electronic equipment to make the sound quality more close to the effect of live performance, singing, has great practical significance.

Keywords: NE5532, LM1875, preamplifier, bandpass filter circuit, power amplifier

目录

1 绪论	6
1.1 设计概述.....	6
1.2 主要技术指标.....	6
1.3 设计意义.....	6
2 主要元器件选择.....	7
2.1 NE5532.....	7
2.2 LM1875.....	8
3 方案设计与论述.....	9
3.1 模块电路说明.....	9
3.1.1 前置放大电路.....	9
3.1.2 带通滤波电路.....	9
3.1.3 功率放大电路.....	10
3.2 原理图.....	10
3.3 前置放大电路设计.....	10
3.1.1 方案一：利用 NE5532 直接进行输入与放大.....	10
3.1.2 方案二：引入负反馈稳定 NE5532 工作性能.....	12
3.1.3 方案三：引入两级放大电路提高电压增益.....	13
3.4 带通滤波电路设计.....	15
3.5 功率放大电路设计.....	17
3.5.1 音量调节电路设计.....	17
3.5.2 主功率放大电路设计.....	17
4 电路参数计算.....	19
4.1 前置放大电路计算.....	19
4.2 带通滤波电路部分.....	20
4.3 功率放大电路部分.....	22
5 完整仿真电路.....	24
5.1 单通道完整仿真电路.....	24
5.2 双通道完整仿真电路.....	25
6 测试数据.....	26
6.1 音频放大波形测试.....	26
6.2 频率响应测试.....	27
6.3 输出功率测试.....	28
6.4 总谐波失真率测试.....	29
7 总结	30
参考文献.....	31
附录一：元件清单.....	32

1 绪论

1.1 设计概述

功率放大器简称功放，是音响系统中最基本的设备，是各类音响器材中最大的一个家族，起作用主要是将音源器材输入的较微弱信号进行放大后，产生足够大的电流去推动扬声器进行声音的重放。

随着社会不断的发展，音响设备系统已经步入了人们的家庭，尤其是数字技术的广泛发展，使音响装置产生了巨大的影响，音响装置中主要构成部分是功率放大电路，其作用是把来自音源或者前级放大器的信号进行放大，产生足够的电流驱使扬声器发声。伴随着人们消费水平和生活质量的不断提高，对音频功率放大器的要求也有了相对更高的标准。因此，设计一个高效率、高品质的功率放大器使其音质更接近现场演奏、演唱的效果，具有很大的现实意义。

电路设计中，利用双 15V 电源供电，采用 NE5532、LM1875 等运算放大器为主要核心设计一款可供使用的双声道音频功率放大器，实现声音高品质放大的。

1.2 主要技术指标

- (1) 额定输出功率单通道达到 15W
- (2) 失真度小于 1%
- (3) 频率响应 20Hz-20kHz
- (4) 整机效率大于 50%

1.3 设计意义

通过本次课程设计，可以将所学的电子技术知识运用到实际上，更锻炼了动手能力和工程实际思维，了解功率放大器内部电路工作原理，掌握其外围电路的设计与主要性能参数的测试方法，初步掌握了电子线路的设计、调试与改进方法。

2 主要元器件选择

2.1 NE5532

NE5532/NE5532A 是一种高性能低噪声双运算放大器（双运放）集成电路。与很多标准运放（如 1458）相似，但它具有更好的噪声性能、优良的输出驱动能力及相当高的小信号带宽、电源电压范围大等特点。因此很适合应用在高品质和专业音响设备、仪器、控制电路及电话通道放大器。

用作音频放大时音色温暖，保真度高，在上世纪九十年代初的音响界被发烧友们誉为“运放之皇”，至今仍是很多音响发烧友手中必备的运放之一。

电路主要技术参数为：

- （1） 小信号带宽：10MHz
- （2） 输出驱动能力：600 Ω ，10V 有效值
- （3） 输入噪声电压：5nV/Hz（典型值）
- （4） 直流电压增益：50000
- （5） 交流电压增益：2200-10000
- （6） 功率带宽：140kHz
- （7） 转换速率：9V/us
- （8） 电源电压范围： $\pm 3\text{V}-\pm 20\text{V}$

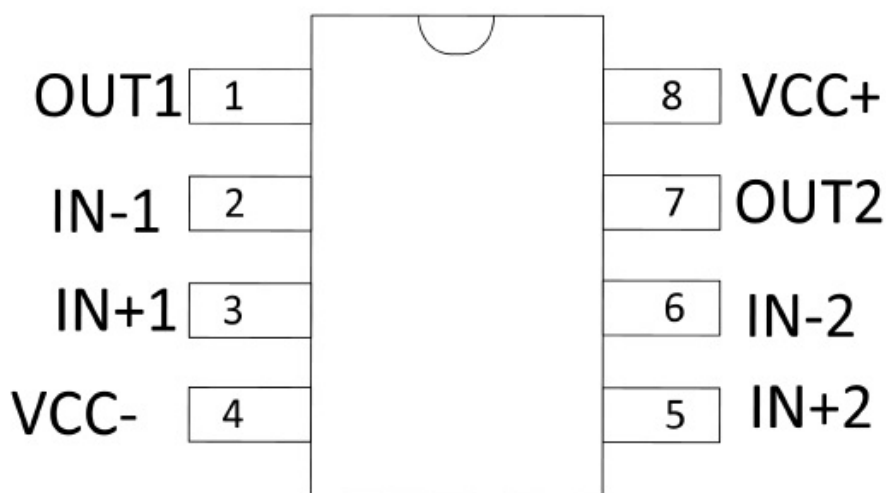


图 2.1 NE5532 引脚图

2.2 LM1875

LM1875 是一款功率放大集成块. 它在使用中只需要很少的外围电路元件, 而且有完善的过载保护功能。lm1875 采用 TO-220-5 五针脚封装, 一针脚为信号同相输入, 二针脚为信号反相输入, 三针脚负电源-V_{ee} (单电源接地 GND), 五针脚电源+V_{cc} 输入, 四针脚为信号输出。

LM1875 形如一只中功率管, 体积小巧, 外围电路简单, 且输出功率较大。该集成电路内部设有过载、过热及感性负载反向电势安全工作保护。它同时还具有失真低、工作稳定可靠、外围电路元件少、功率带宽宽、电流负载能力大等优点, 该电路有较高的性能价格比, 非常适合组装高保真音响设备、收录机、立体声唱机及家庭音乐中心之用。除此之外, 该电路还可用于桥式放大器、伺服放大器及仪表系统等。

电路主要技术参数为:

- (1) 电源电压范围: $\pm 20\text{--}\pm 60\text{V}$
- (2) 输出功率: 25W (THD=1%)
- (3) 总谐波失真: 0.015% (20W, 1kHz)
- (4) 增益带宽积: 5.5MHz ($f_0=20\text{kHz}$)
- (5) 功率带宽: 70kHz
- (6) 转换速率: 9V/ μs
- (7) 工作温度: 0-70℃

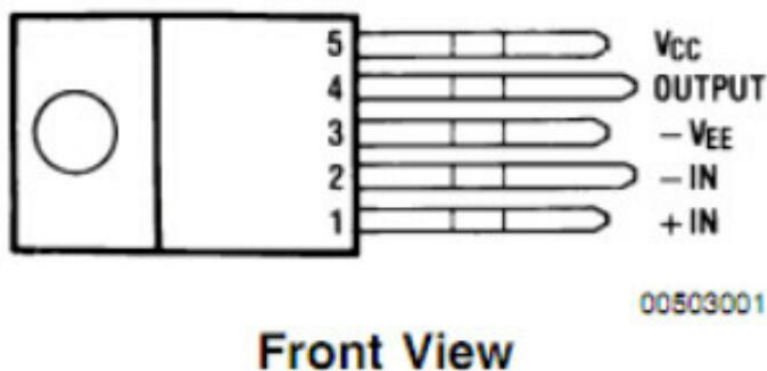


图 1.2 LM1875 引脚图

3 方案设计与论述

3.1 模块电路说明

3.1.1 前置放大电路

音频功率放大器的作用是将声音源输入的信号进行放大，然后输出驱动扬声器。由于功放在进行输入信号功率放大时需要对信号的电压和电流分别进行放大，只有这样才能使得输出功率足够大，才可以驱动扬声器发声。这样在功放电路中对输入信号电压的放大就是由前置放大电路来完成的，当前置放大电路将电压放大后，把这个大的信号电压加到后一级（输出级）放大电路的信号输入端，就可以从输出级放大电路中获得更大的输出电流，这样将放大的电压电流同时加到扬声器上，就可以获得大功率的声音信号了。

如果没有前置电路，自然不会产生足够大的输出电压，没有这个大电压输入后级电路输出电流自然就不会被放的足够大，即输出功率不够，这将直接导致输出功率太小而无法驱动扬声器，虽然有输入信号但是扬声器却没有声音发出来。所以设计前置放大电路主要实现对小信号的放大，前置放大电路的输出即为功率放大电路的输入。

3.1.2 带通滤波电路

由于人耳可以接受到的自然界声音频率范围为 20Hz-20kHz，所以实际音频功率放大器需要以此为指标进行考虑，及将其作为整体电路的频率响应进行设计。

而滤波器是一种能够通过期望频率的信号而衰减其他频率信号的部件，它可以分为有源滤波器和无源滤波器两大类。而有源滤波器相较于无源滤波器的优点有高输入阻抗和低输出阻抗，因此输入与输出之间具有良好的隔离性能，便于级联。此外，有源滤波器体积小、重量轻、成本低且稳定性好，方便调试和应用。此次根据实际设计要求，确定需要设计一个有源带通滤波电路，又因为此电路只起到频率筛选的作用，不希望其提供额外增益，所以舍弃传统的无限增益多路反馈带通滤波器，选择二阶压控型（VCVS）带通滤波器进行设计。

3.1.3 功率放大电路

功率放大电路是一种以输出较大功率为目的的放大电路。它一般直接驱动负载，带载能力要强。功率放大电路通常作为多级放大电路的输出级。通过与其他电路模块练级，同时放大输入的电压与电流，达到功率放大的目的，同时得益于集成放大块的优良性能，可以得到极低的总谐波失真率（THD）。

3.2 原理图

由上述前置放大电路、带通滤波电路、功率放大电路并加上简易的音量大小调节电路组合而成，可以得到一个完整的音频功率放大器，并且对于此声音源功率放大来说，单通道与双通道的本质原理是相同的，所以下面均以单通道音频功率放大器的电路来进行方案设计、展开、说明与仿真，但最终将仍会呈现双通道音频功率放大器的全貌，其中两个通道的电路原理均为相同。

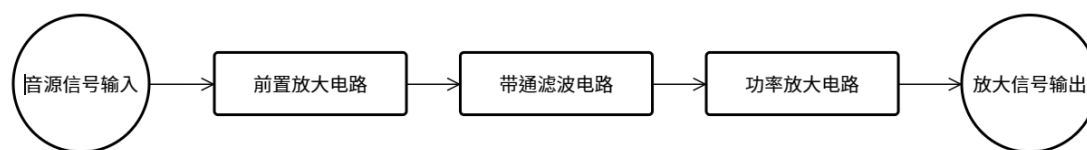


图 2.1 音频功率放大器流程图

3.3 前置放大电路设计

3.1.1 方案一：利用 NE5532 直接进行输入与放大

该方案输入采用一个 NE5532 运算放大器，通过交流双 15V 供电，音频信号（由交流电压源模拟产生）直接由运放同相端输入，构成如图 4.1 所示电路。且由 NE5532 性能参数可知，交流电压理论增益可以达到 $A_r = 2200$ ，此时输入输出波形关系如图 4.2 所示，有图可读出电压增益近似为 2000。

但是，通过 NE5532 直接进行输入与放大虽然可以获得极高倍数的交流电压增益，且此电路方案的主要优势是结构简单、成本低；但其缺点也比较明显：其

输入阻抗太低，且共模抑制也比较低，无法抑制零点漂移问题，线性误差较为严重，对于噪声等无法起到很好的抗干扰作用等。因此虽然电路元器件耗材少、交流电压增益大，但仍舍去此方案、不予考虑。

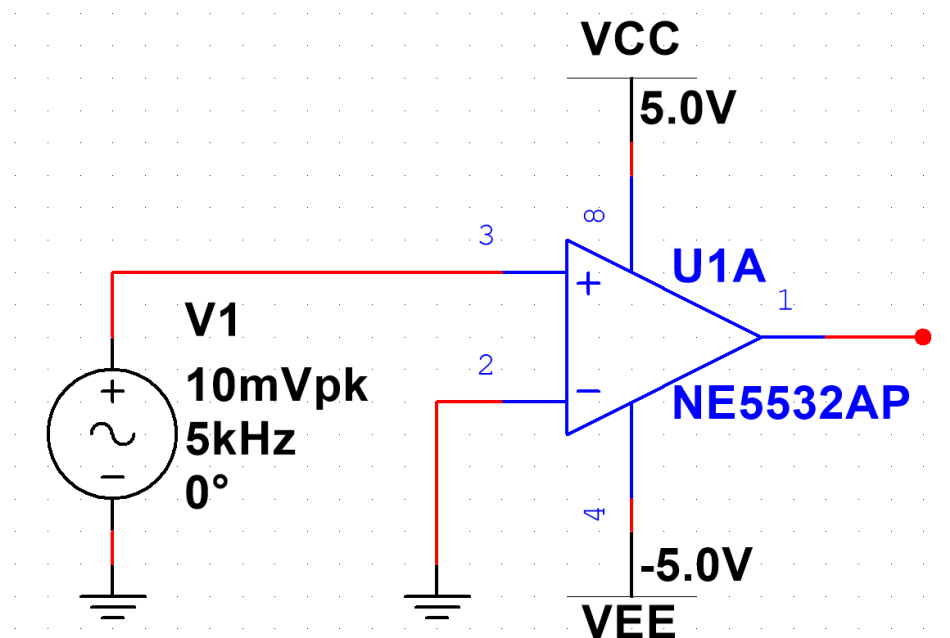


图 3.2 NE5532 直接输入输出电路

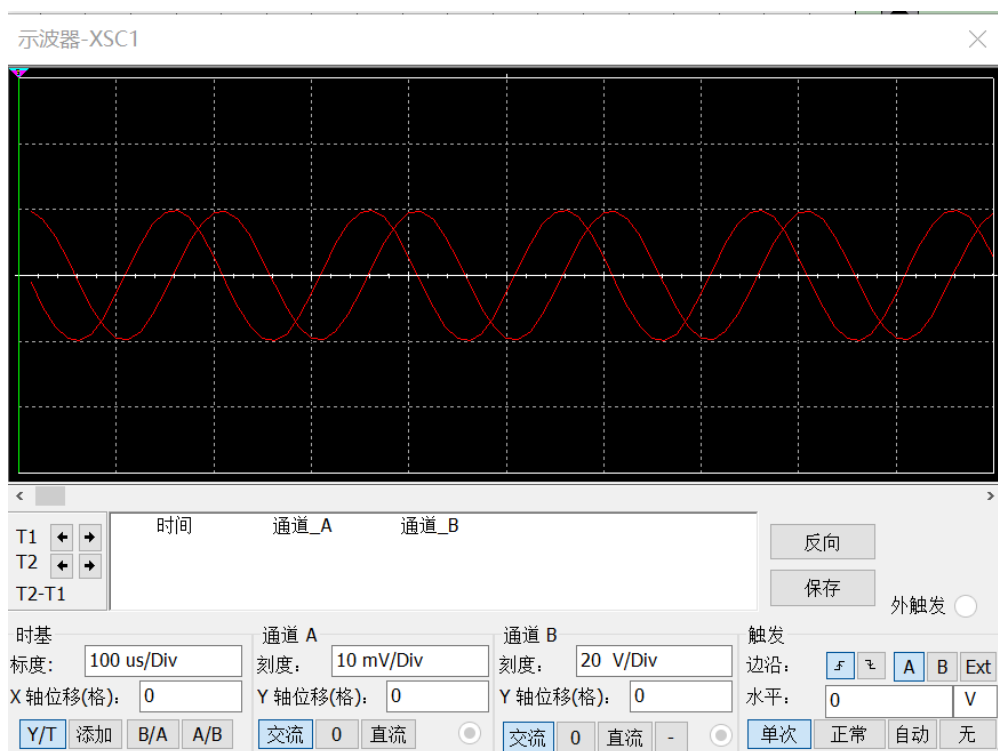


图 3.3 方案一输入输出波形图

3.1.2 方案二：引入负反馈稳定 NE5532 工作性能

此时如果通过在输入端通过引入一个隔直电容稳定工作，保证电路交流小信号（声音源）正常放大，通过引入 R_1 分压，减小实际电路声音源（交流电压源模拟）内阻的影响，通过引入 R_2 、 R_3 构成电压串联负反馈电路，构成如图 5.1 所示电路，提高电路的共模抑制比、有效抑制零点漂移问题，同时对于噪声起到了良好的抗干扰作用。

但由于稳定放大电路工作性能是以牺牲一定的交流电压增益为基础，引入反馈电路后电压增益严重下降，仿真输入输出波形如图 5.2 所示，且由公式计算（后文给出）下降后增益为 $A_f = 10$ ，仅为引入反馈前的百分之一，远远低于实际所需要的电压增益，所以虽然此电路方案工作性能优良，但仍需引入第二级放大电路来提高电压增益指标。

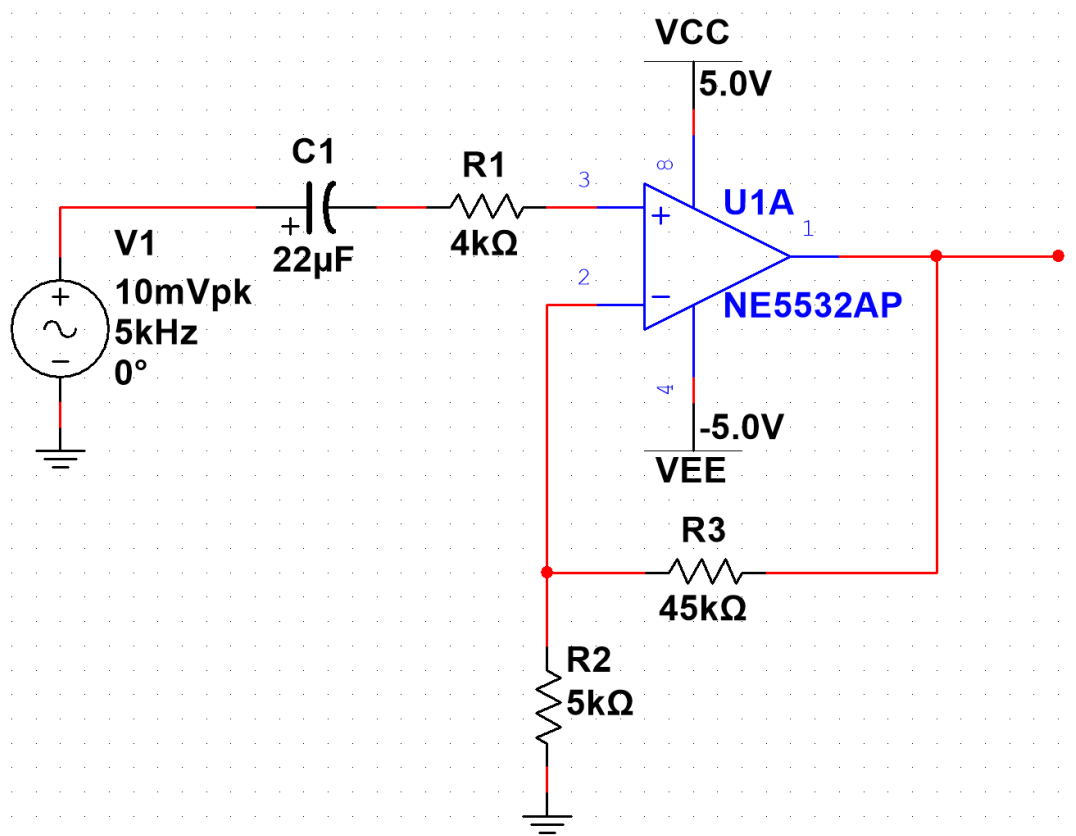


图 3.4 引入负反馈的 NE5532 放大电路

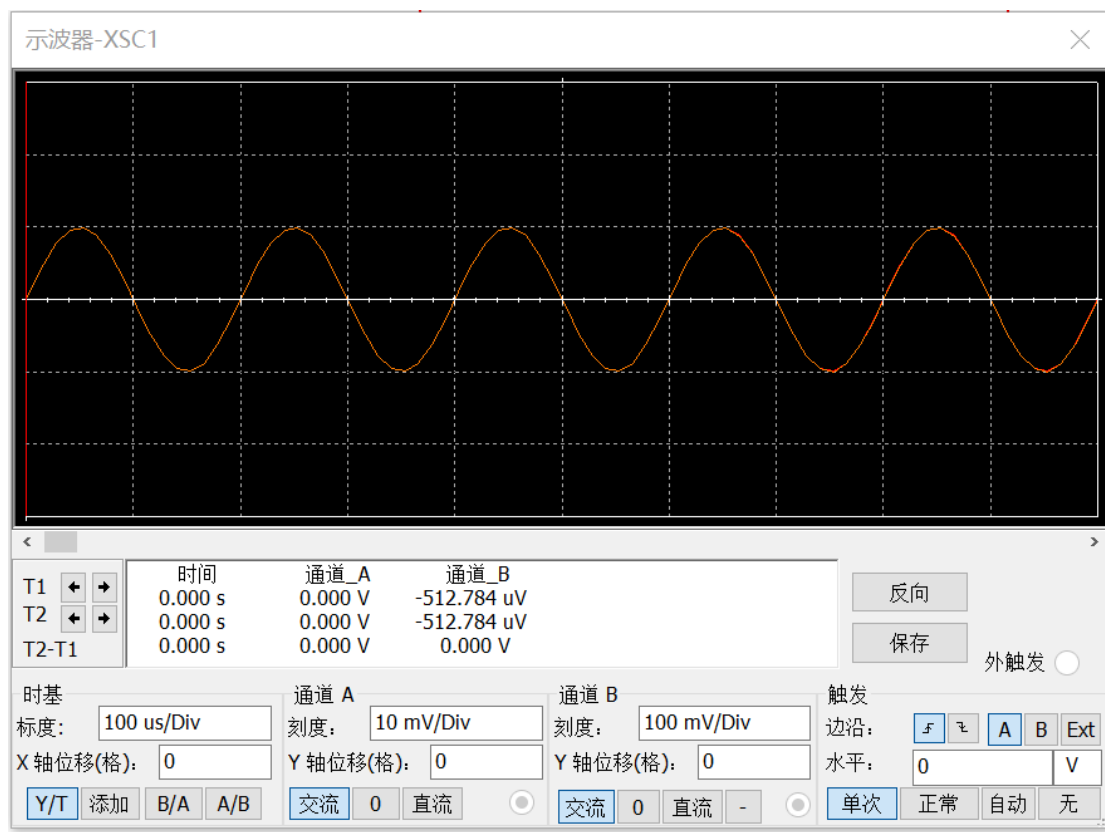


图 3.5 方案二输入输出（重叠）波形图

3.1.3 方案三：引入两级放大电路提高电压增益

通过构建两级放大电路，既能达到稳定、性能良好的工作指标，又保证了合适大小的增益与输出信号幅值。两级放大电路如图 6.1 所示，其中第二级电压增益为 $A_r = 10$ ，两级结合后，整体前置放大电路交流电压增益近似达到 100，同时在后续电路中引入功率放大电路的同时，也进一步提高了电压增益，其中输入输出波形如图 6.2 所示。

通过两级放大电路作为前置放大器，为模拟声音源的复杂性提供了很好的适应度，对于赋值多变的声源适应能力强，通过前置放大可以很好的与后级功率放大器的灵敏度相匹配，防止出现失真与输出功率不足的情况。其中放大后信号源达到了 1V 左右，为日常良好的功率放大模块输入电压值。

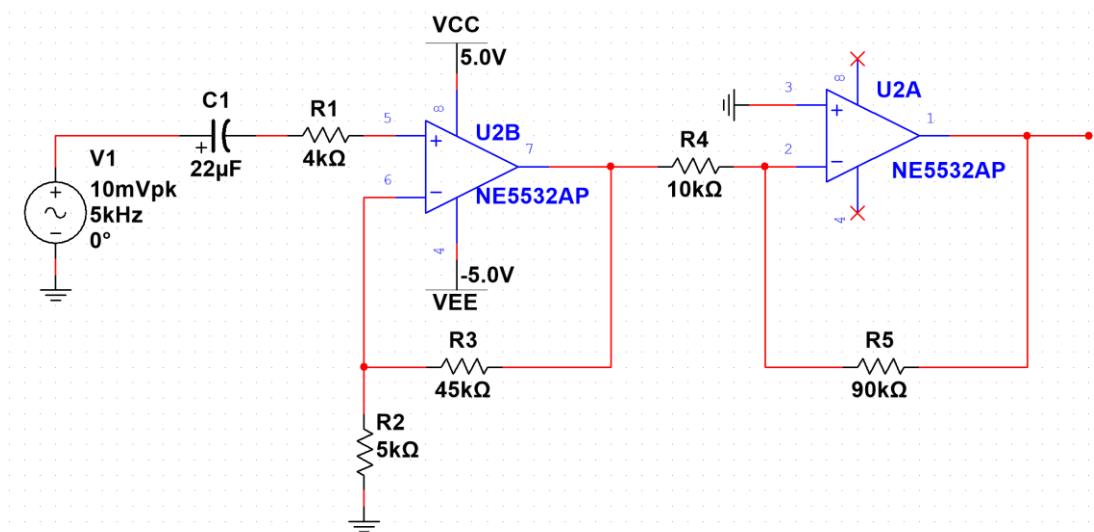


图 3.6 NE5532 构成两级放大电路

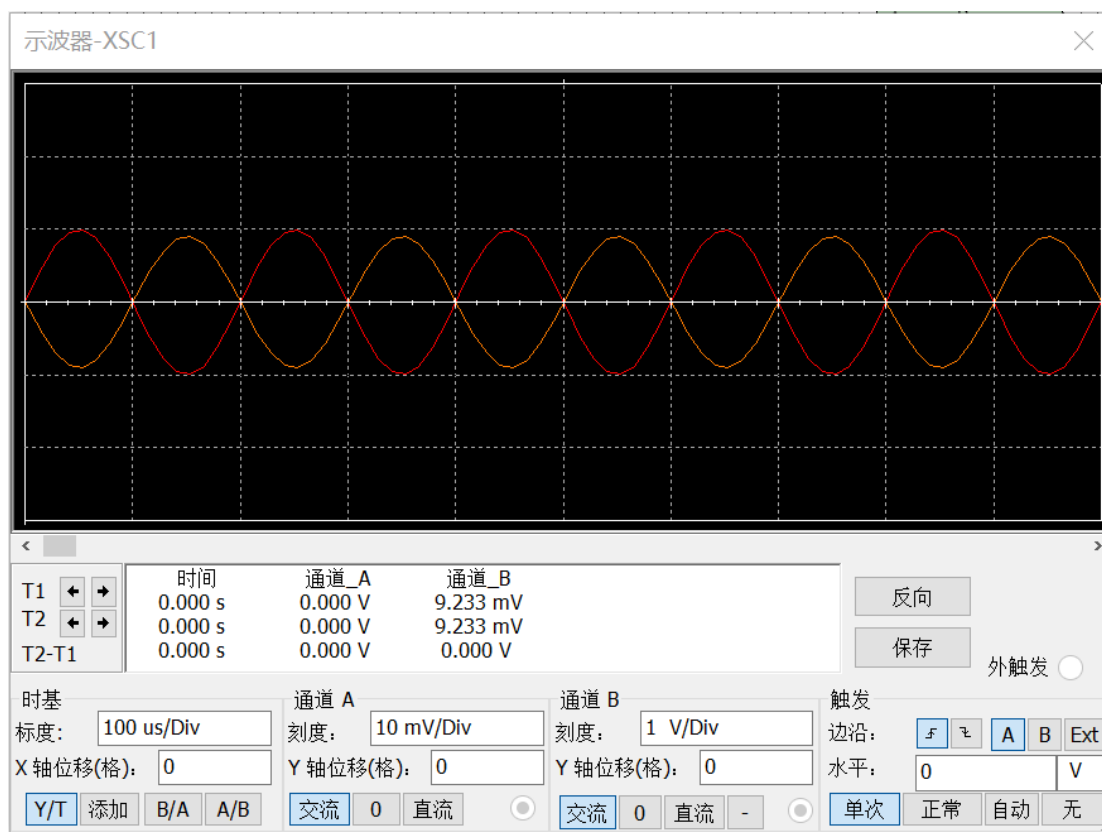


图 3.7 方案三输入输出波形图

3.4 带通滤波电路设计

为达到指定要求的频率响应范围 20Hz-20kHz（人耳所能听到的声音频率范围），在电路中引入二阶压控型（VCVS）有源带通滤波器，其本质是通过一阶低通滤波与一阶高通滤波电路串行级联，且使低通滤波电路的截止角频率 ω_H 大于高通滤波电路的截止角频率 ω_L ，如此则可以在 ω_L - ω_H 之间形成一个通带，而其他频率范围为阻带，从而构成一个二阶有源带通滤波电路以实现基本要求，并仍然通过 NE5532 引入负反馈，稳定电路工作性能，抑制零点漂移问题，对噪声起到抗干扰作用，其中 R8、R9 和 R10 构成两路反馈，其中电路图如图 7.1 所示。

又因为这部分带通滤波电路主要是为了频率响应服务，且对于后续功率放大电路来说，其也具有一定的放大上限，所以在此处带通滤波过程中，并不打算将增益功能加入进来，所以维持理论电压增益最小值即 $A_f = 2$ （计算公式在后文给出），整体电路搭建完成后，其频谱特性曲线如图 7.2 所示，其中在 3dB 处衰减频率（即下限截止频率和上限截止频率）如图 7.3 和图 7.4 所示，满足任务书要求的 20Hz-20kHz 频率响应范围。

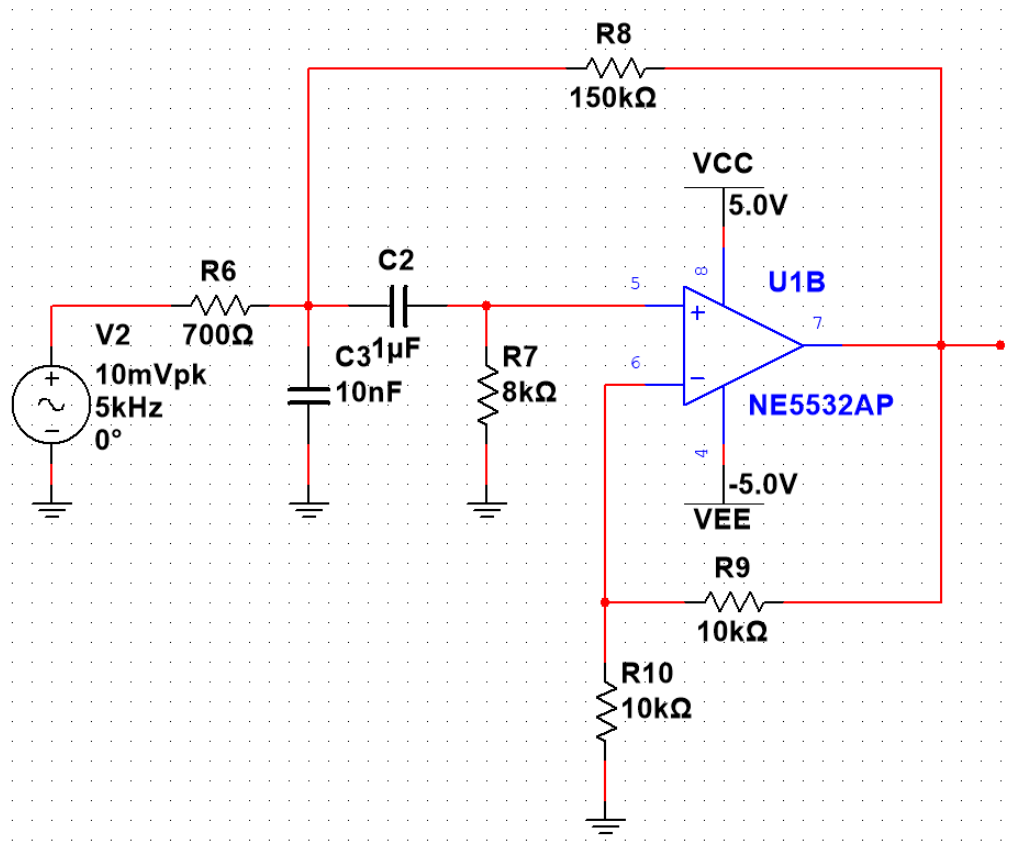


图 3.8 二阶 VCVS 有源带通滤波电路

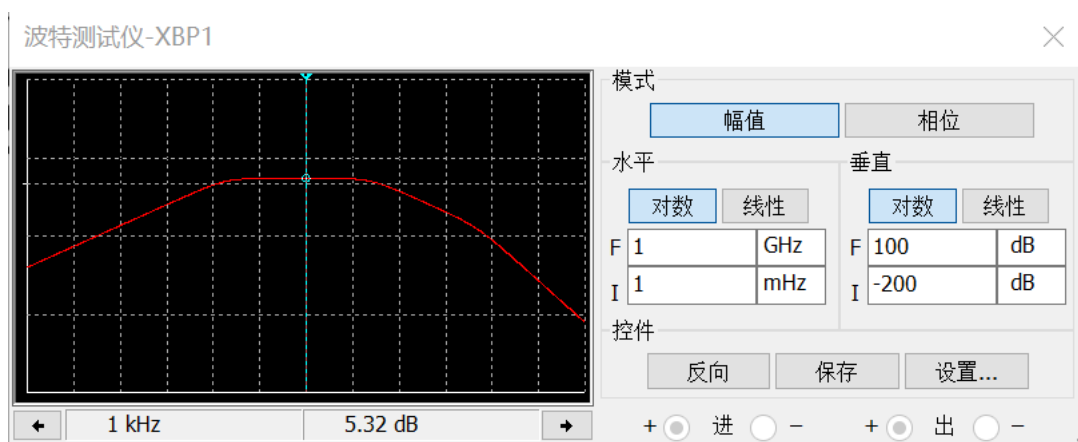


图 3.9 频谱图中心频率与增益情况

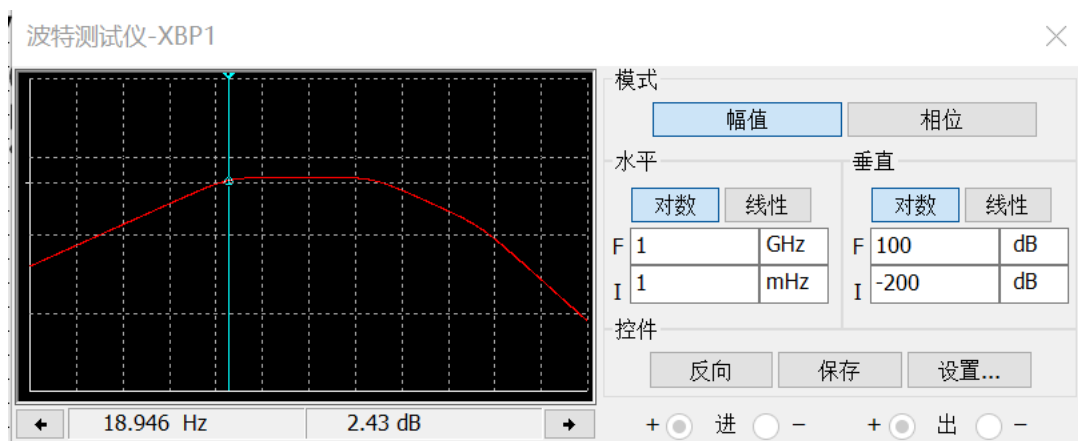


图 3.10 下限截止频率与增益情况

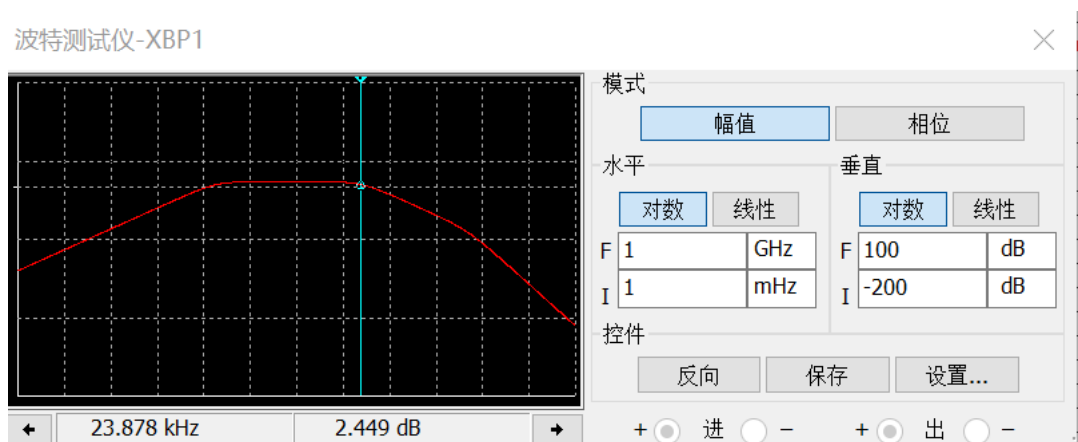


图 3.11 上限截止频率与增益情况

3.5 功率放大电路设计

3.5.1 音量调节电路设计

通过一个电阻与一个滑动变阻器串联，如图 8.1 所示，并简单通过改变滑动变阻器阻值，达到不同程度分压的目的，使输入功率放大电路部分的电压幅值有所不同，实现所谓的音量控制与调节作用，同时也更可以控制电路的功率输出，调节失真度的大小以达到指定要求范围内。

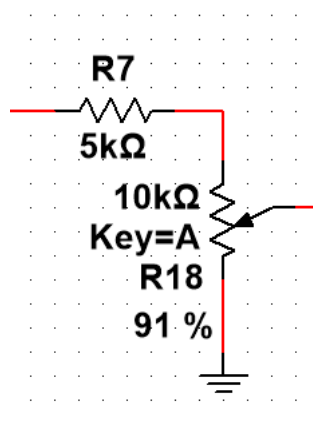


图 3.12 音量调节电路

3.5.2 主功率放大电路设计

通过查阅 LM1875 官方数据手册可知，其给出的功率放大电路完整外围电路设计如图 9.1 所示，参考其电路进行整合设计，得出此次功率放大电路完整设计。

其中，通过在带通滤波电路与功率放大电路之间引入一个隔直电容 C4 与电阻 R19，本质上是组成一个类高通滤波电路，从而可以消除后级的 LM1875 直流电位对前级音量调节电路的影响，同时也起到隔直通交的目的，仅仅时前级初步放大的声音源（交流信号）通过。而功率电路放大参数主要 R20 与 R21 的比值决定，其放大增益计算于后文给出，同时，引入电容 C5 主要用于稳定 LM1875 的第 4 脚直流零电位的漂移，但是对于放大音质具有一定的影响，而电容 C6 与电阻 R22 组成 RC 滞后补偿支路，其作用是用来消除极间多个增益造成的自激振荡（零-极点对消），达到稳定电路工作的目的，而引入两路 1N4007 二极管主要是对集

成块 LM1875 起到一定保护作用，因为实际运用中，喇叭是感性负载，断电瞬间会产生很大的感应电动势，所以需要二极管进行反向导通保护。整体电路如图 9.2 所示。

同时，本放大器的后级负载由任务设计书给出，为 $8\ \Omega$ 的扬声器，在 Multisim 仿真中用同 $8\ \Omega$ 电阻代替。

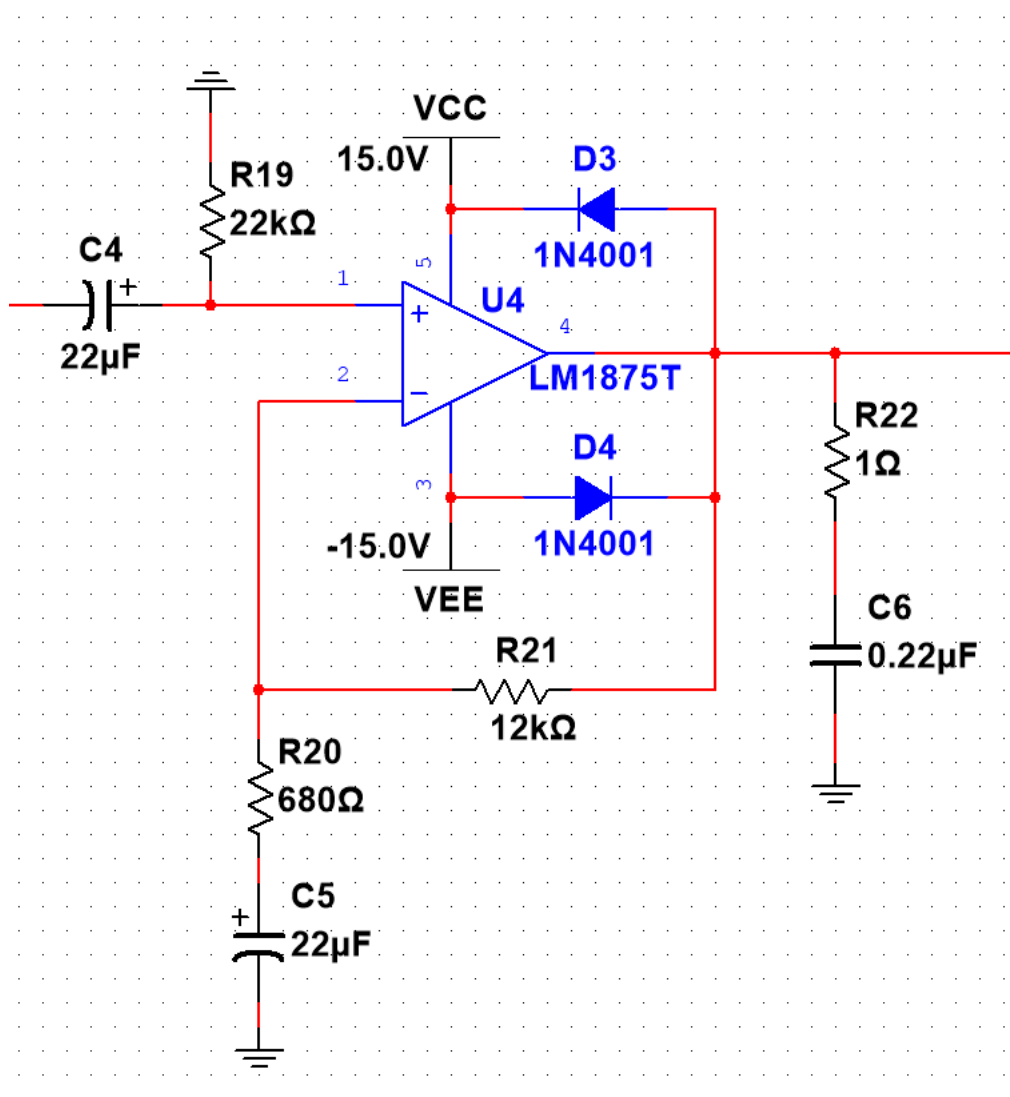


图 3.13 功率放大电路

4 电路参数计算

4.1 前置放大电路计算

如图 10.1 所示，由于隔直电容一般取值应满足：

$$C \geq \frac{1}{2fR} \quad (1)$$

所以根据此电路参数：声音源频率 $f=5\text{kHz}$ 、负载扬声器电阻 $R=8\ \Omega$ ，代入（1）式计算可得： $C \geq 12.5\mu\text{F}$ ，又因为尽可能保证电路稳定工作，所以此处前置放大电路取隔直电容 $C_1=22\mu\text{F}$ 。

又因为电阻 R_{12} 主要用于分压，传递声音源信号，所以只需要比实际声音源器件内阻大得多便可，此处取 $R_{12}=4\text{k}\ \Omega$ 。

而由理想运放有虚短与虚断特性可知，针对第一级放大电路，有关系式：

$$\frac{0 - V_n}{R_{13}} = \frac{V_n - V_o}{R_{14}} \quad (2)$$

且又因为：

$$V_i = V_p = V_n = V_o \quad (3)$$

联立（2）式与（3）式可以解得如下关系：

第一级放大电路闭环电压增益 $A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_{14}}{R_{13}}$ ，所以选取 $R_{13}=5\text{k}\ \Omega$ 、 $R_{14}=45\text{k}\ \Omega$ ，则第一级放大电路闭环电压增益近似为 $A_{v1} \approx 10$ 。

第二级放大电路同理（2）式与（3）式可得如下关系：

第二级放大电路闭环电压增益 $A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_{16}}{R_{15}}$ ，所以选取 $R_{15}=10\text{k}\ \Omega$ 、 $R_{16}=90\text{k}\ \Omega$ ，则第二级放大电路闭环电压增益近似为 $A_{v2} \approx 10$ 。

由连级放大电路总电压增益计算公式：

$$A_v = A_{v1} \times A_{v2} \quad (4)$$

可得两级放大电路级联，前置放大电路总增益为 $A_v \approx 100$ 。至此，整体电路搭建如图 10.1 所示。

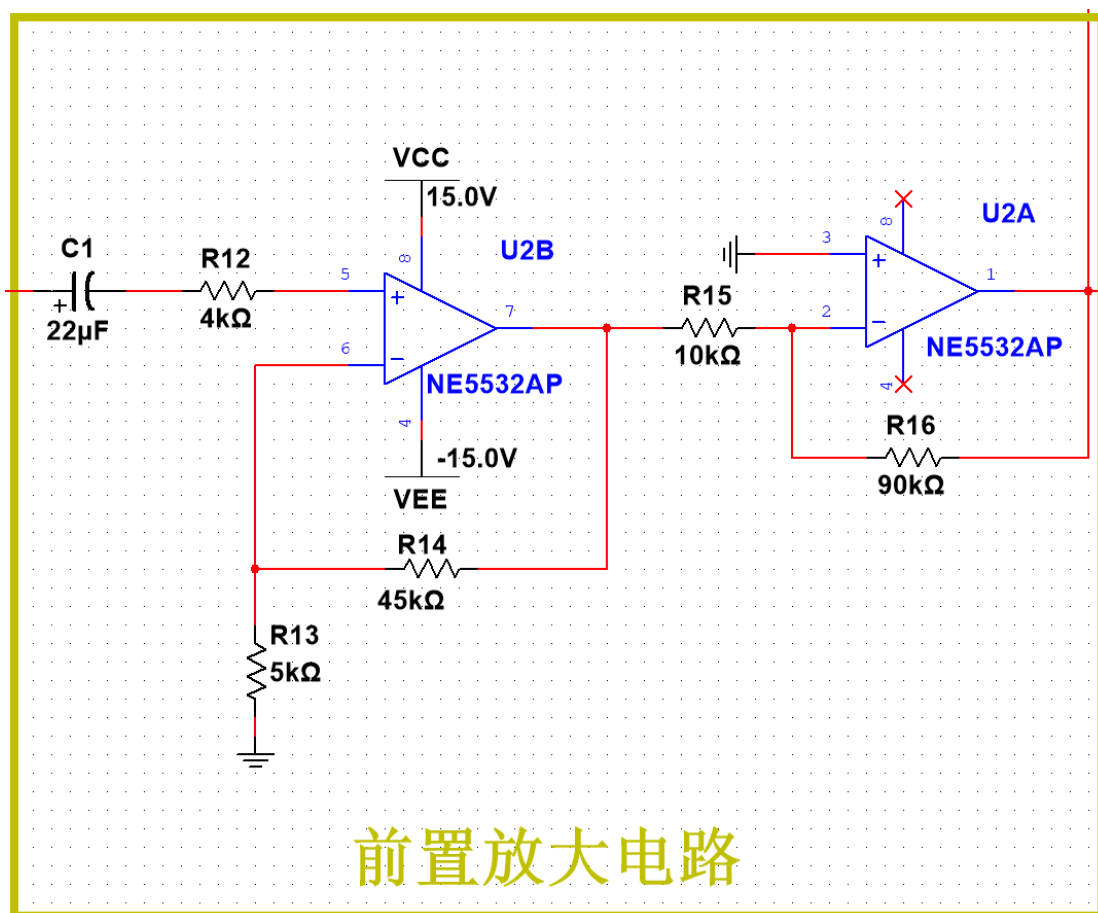


图 4.1 前置放大电路

4.2 带通滤波电路部分

设计二阶 VCVS 有源带通滤波电路，本质上是将一个一阶低通滤波电路与一个一阶高通滤波电路串行级联，如图 10.2 所示。

首先通过查表法，由表 2.1 确定出一阶低通滤波器 and 一阶高通滤波器在要求的截止频率下对应的电容元件阻值：

 表 4.1 截止频率与 C 的对应关系 ($A_p=1-10$)

f_p (Hz)	C (uF)	f_p (Hz)	C (pF)
1 - 10	20 - 1	$10^3 - 10^4$	$10^4 - 10^5$
10 - 10^2	1 - 0.1	$10^4 - 10^5$	$10^3 - 10^2$
$10^2 - 10^3$	0.1 - 0.01	$10^5 - 10^6$	$10^2 - 10$

由表 2.1 可以查得，当下限截止频率为 20Hz 时，C 可以选取 1uF；当上限截止频率为 20kHz 时，C 可以选取 10nF，此次电路选用这两个容值。

查阅相关论文可知，对于二阶 VCVS 有源带通滤波电路，当电路如图 10.2 所示时，有如下关系式：

$$B = \frac{1}{C_2 R_2} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1-u}{R_3} \right) + \frac{1}{C_3 R_4} \quad (5)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{C_2 C_3 R_4} \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) \quad (6)$$

$$G = \frac{u}{C_2 R_2} \frac{1}{B} \quad (7)$$

式中，G 为增益，取 18 左右，B 为带宽，应大于题目要求的 20kHz， ω 为中心角频率，计算可得大约为 10kHz，且其中：

$$u = 1 + \frac{R_{21}}{R_{20}} \quad (8)$$

同时由低通滤波器与高通滤波器特性知截止频率关系有：

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \quad (9)$$

所以结合之前所选的电容 $C_2=10\text{nF}$ 、 $C_3=1\mu\text{F}$ ，同时联立 (5)、(6)、(7)、(8)、(9) 式与已知的 G、 ω 可得：

$$R_2 \approx 795.77 \Omega、R_3 \approx 7957.76 \text{k} \Omega、R_3 \approx 151.81 \text{k} \Omega、R_5/R_4 \approx 1$$

并且在实际调试过程中，发现通频带与理论值有实际误差，需要通过适当将 R_2 减小、 R_4 增大、 R_3 减小来预留误差范围，所以最后元器件取值为：

$$R_2 = 700 \Omega、R_3 = 8 \text{k} \Omega、R_3 = 150 \text{k} \Omega、R_4 = 10 \text{k} \Omega、R_5 = 10 \text{k} \Omega$$

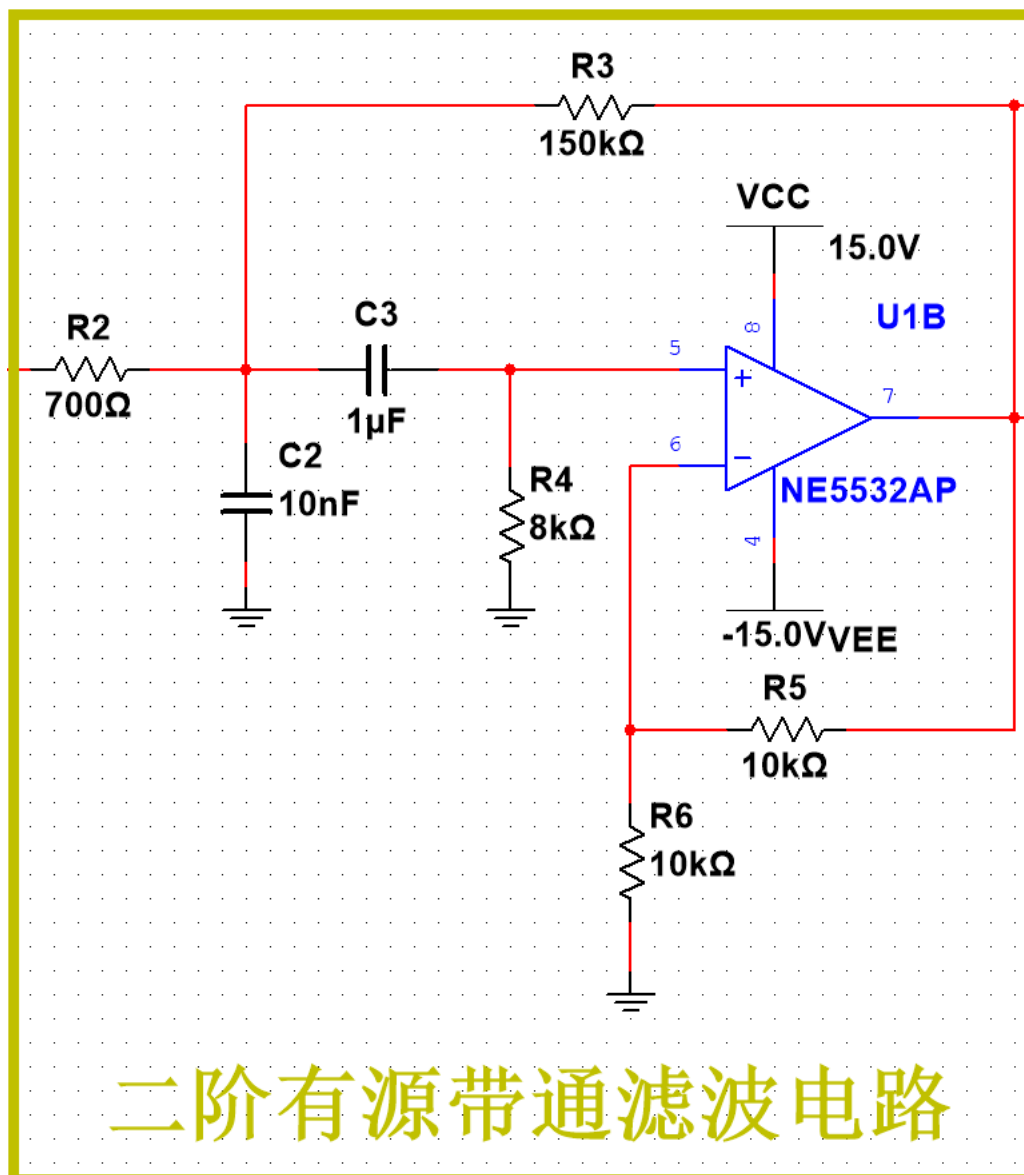


图 4.2 二阶有源带通滤波电路

4.3 功率放大电路部分

由图 9.1 可知，除了影响相关功率增益参数的元件外，其他元件参数基本可以参照官方给出的外围电路进行设定，最终电路如图 10.3 所示，此时有：

$$C4 = 22\mu\text{F}、R19 = 22\text{k}\Omega、C5 = 22\mu\text{F}、R22 = 1\Omega、C6 = 0.22\mu\text{F}$$

对于功率放大电路来说，由理想运放的虚短、虚断特性知：

$$\frac{0 - V_n}{R_{20}} = \frac{V_n - V_o}{R_{21}} \quad (10)$$

$$V_i = V_p = V_n = V_o \quad (11)$$

联立（10）式与（11）式可以解得：

功率放大电路增益为 $A_v = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_{21}}{R_{20}}$ ，又因为考虑到 LM1875 的输出特性，在调试过程中发现增益设置过大，会同时出现饱和失真与截止失真，所以在反复调试后，发现最佳增益为 $A_v \approx 18$ ，此时取：

$$R_{21} = 12\text{k}\Omega, R_{20} = 680\Omega。$$

由此可得，电路的总电压增益为 $A_v = 100 \times 18 = 1800$ ，又因为调音电路作用，假设滑动变阻器调节有效阻值占比为 k ，则实际电路增益为：

$$A_v = 1800 \times k \quad (12)$$

此时若调音电路取 $k=0.91$ ，可得增益约为 1638，分贝换算为 64.28dB。

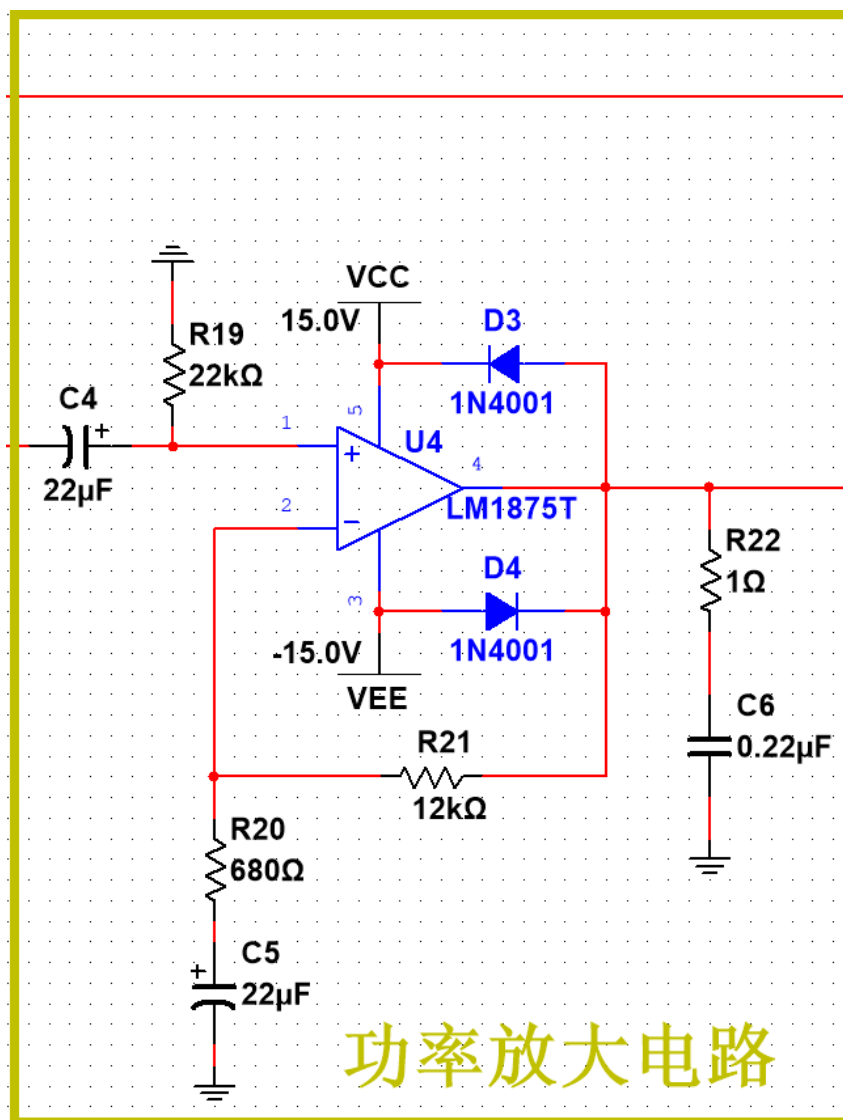


图 4.3 功率放大电路

5 完整仿真电路

5.1 单通道完整仿真电路

以上文元件搭建完整电路，由前置放大电路（分有一级放大和二级放大）、带通滤波电路、功率放大电路（含音量调节电路）组成，如图 11.1 所示。

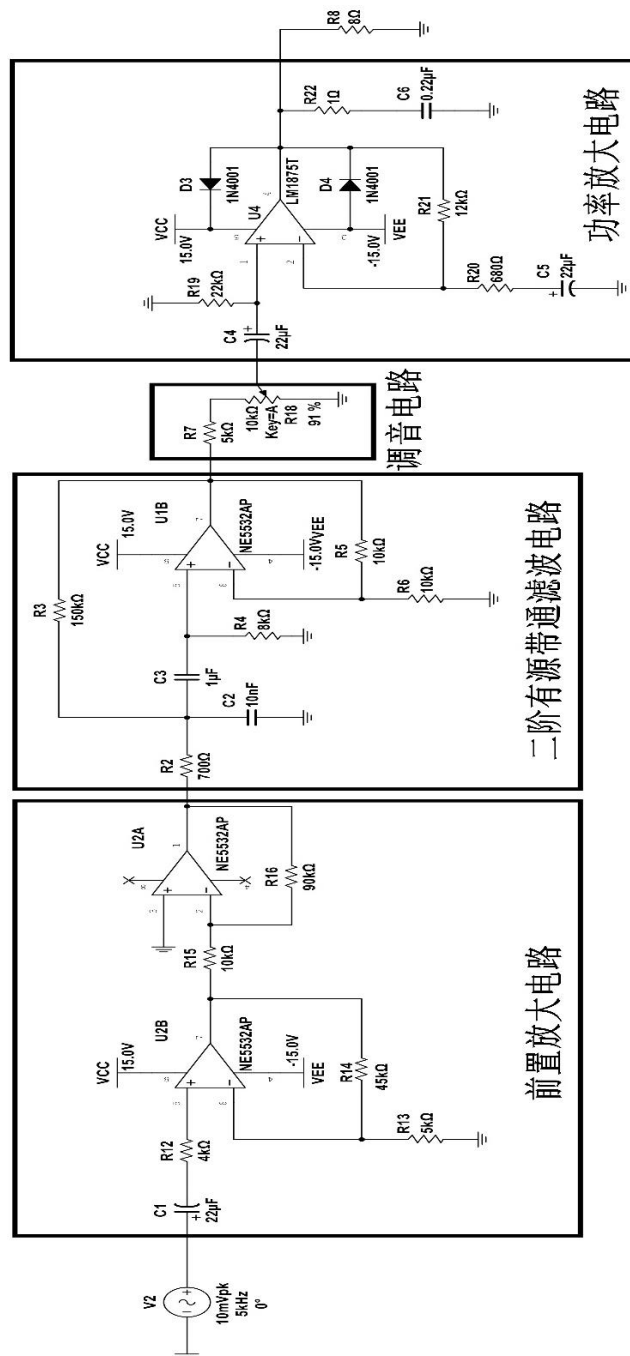


图 5.1 单通道完整仿真电路

5.2 双通道完整仿真电路

从手机传来的音源信号（交流信号源模拟）分两路通过左右两个完全一样的通道，达到双通道音频功率放大的效果，如图 11.2 所示。

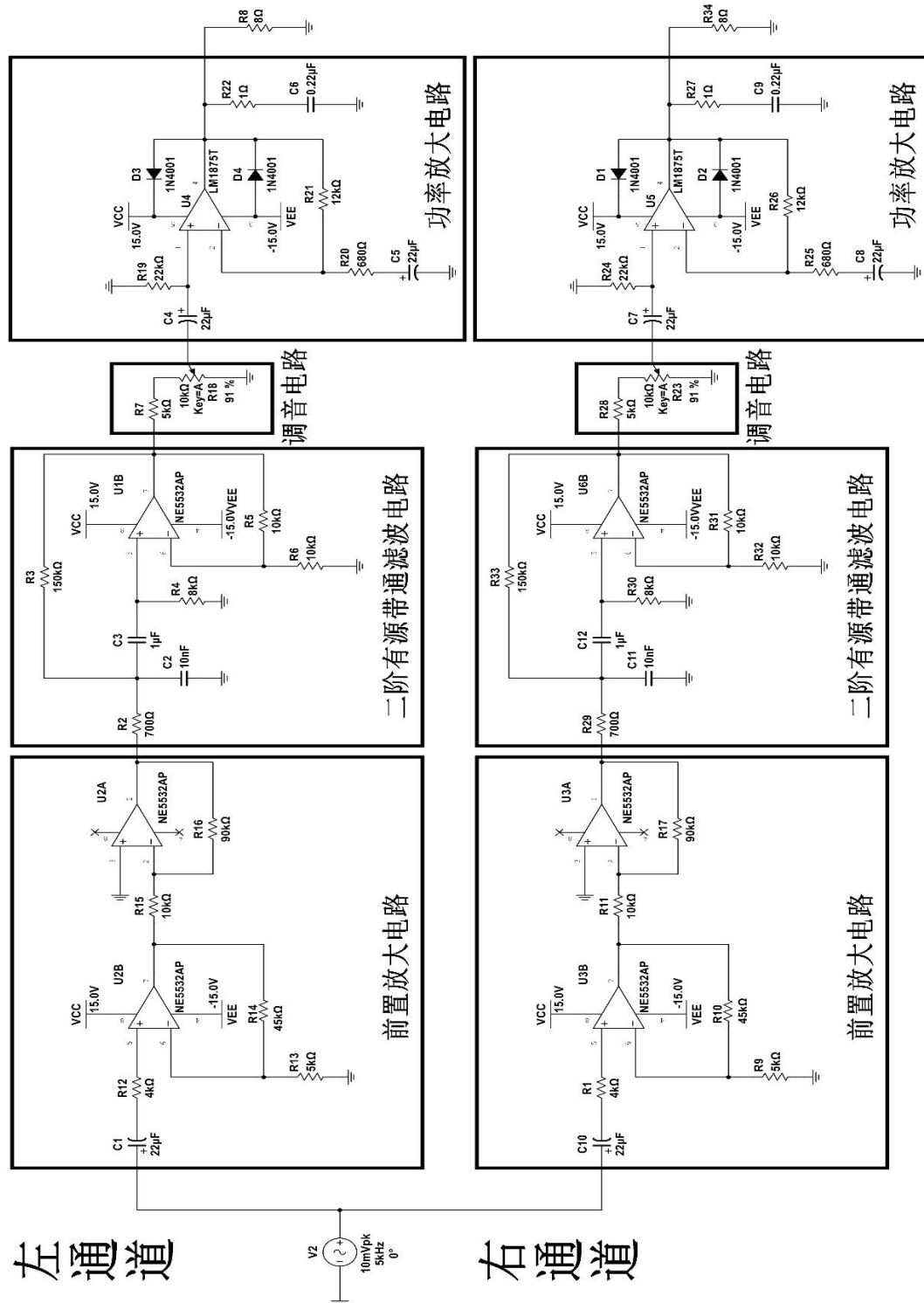


图 5.2 双通道完整仿真电路

6 测试数据

6.1 音频放大波形测试

如图 12.1 所示，红色波形为模拟声音源信号（幅值为 10mV），橙色波形为输出音量信号（幅值约为 16V），增益大约为 1600，与上文公式计算得出的增益 1638 相似，理论与实际误差不大。

同时，测量整个放大电路的电压增益，由前文计算可得用分贝形式表达大约为 64.28dB，实际仿真频谱图如图 12.2 所示，可以读出此时中心频率增益约为 64.108dB，理论与实际相差不大，功率放大要求成功实现。

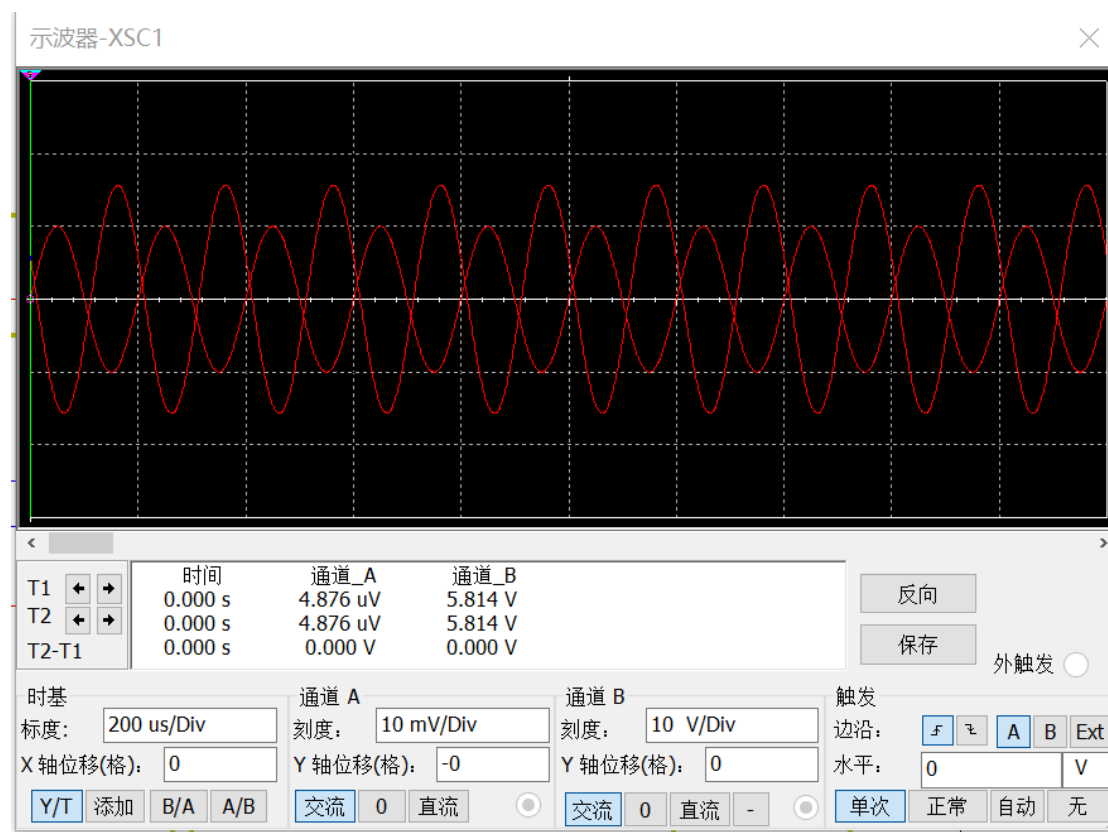


图 6.1 音频放大波形

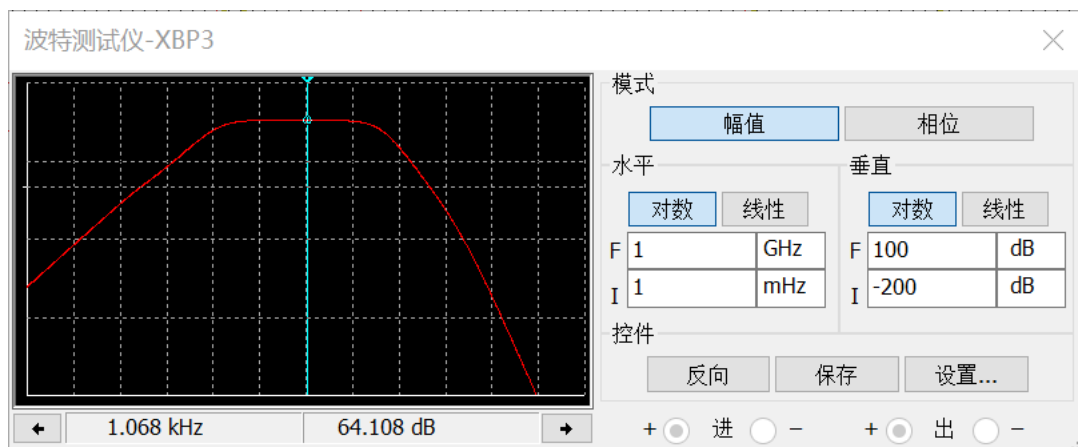


图 6.2 整个电路中心频率及其增益

6.2 频率响应测试

如图 12.3 所示, 在带通滤波器两端, 正常工作时, 增益为 5.32dB。

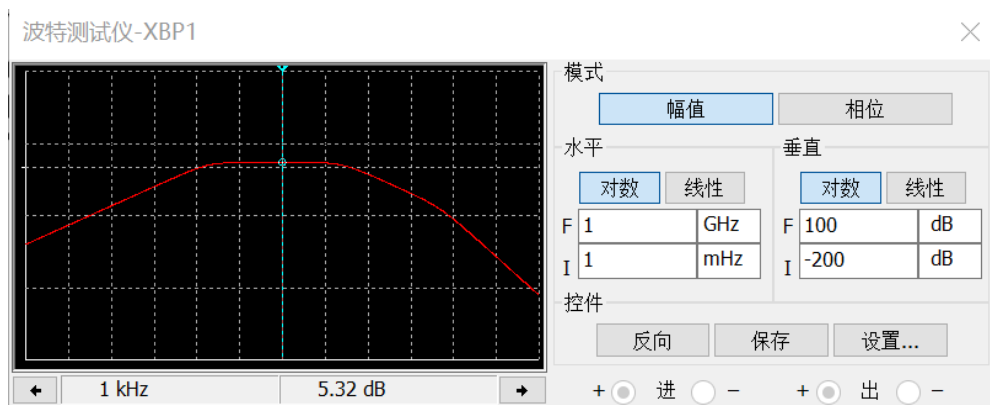


图 6.3 中心频率及其增益

当下降 3dB 时, 在下限截止频率处有如图 12.4 所示:

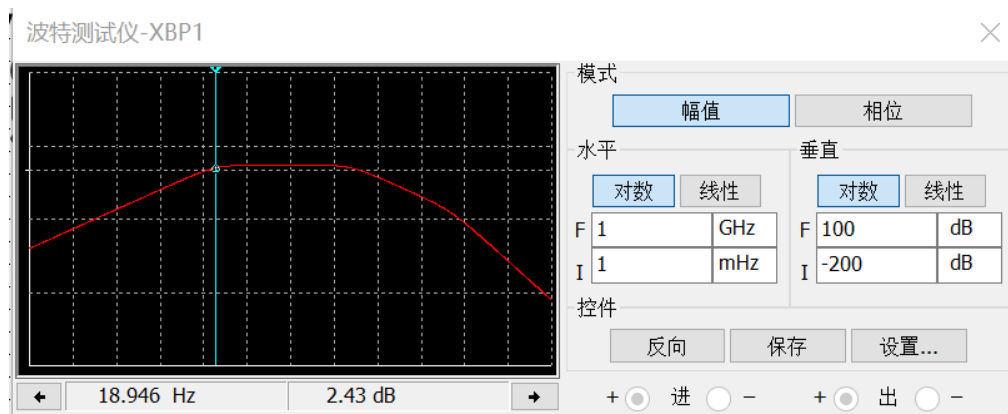


图 6.4 下限频率及其增益

当下降 3dB 时，在上限截止频率处有如图 12.5 所示：

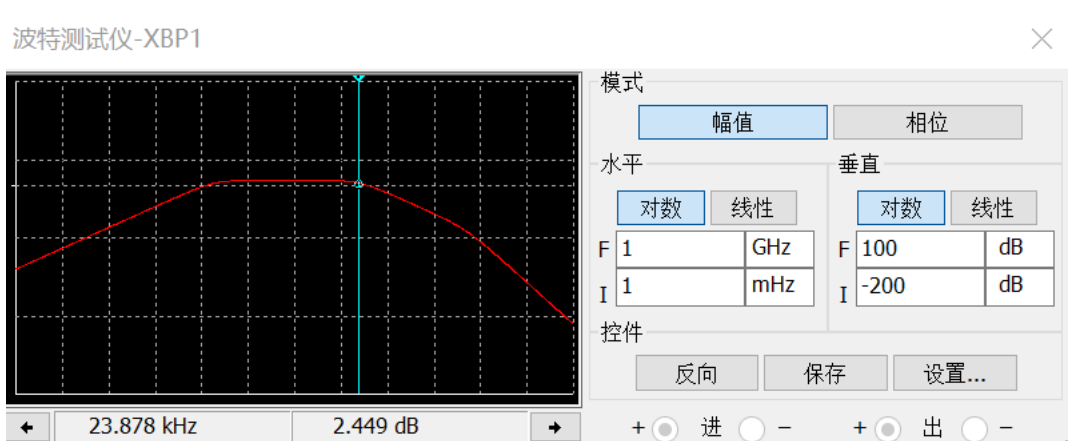


图 6.5 上限频率及其增益

由图 12.4 和图 12.5 可以读出，当下降 3dB 时，下限截止频率大约为 18.946dB，比任务要求的 20dB 还小；上限截止频率大约为 23.878kHz，比任务要求的 20kHz 还大，所以通频带包含 20Hz-20kHz，频率响应要求成功实现。

6.3 输出功率测试

在负载输出端连接瓦特计，可以读出单个通道输出功率如图 12.6 所示，当 $k=0.91$ 时，读数为 15.294W，近似为 15W，同时两个通道一起输出，总输出功率为 $P_0 = 2 \times 15W$ ，与任务书要求近似，且由于音量调节电路存在，此双通道音频功率放大器输出功率为可调节，输出功率要求成功实现。



图 6.6 单通道输出功率

6.4 总谐波失真率测试

通过在负载处连接一个失真分析仪，控件选择为 THD，可以由图 2.7 读出单通道总谐波失真仅为 0.071%，远远小于任务书要求的 1%，总谐波失真率要求成功实现。

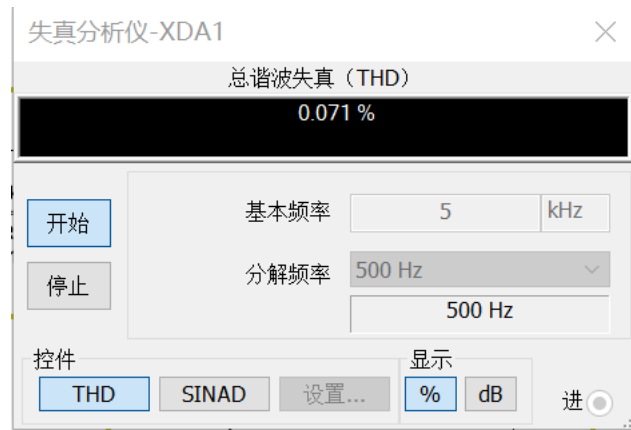


图 6.7 单通道总谐波失真率

7 总结

通过近半个月的努力，我终于完成了本次课程设计，通过本次设计，我不仅对于仿真软件 Multisim 有了更加全面的实践经验，还对于运算放大、带通滤波、功率放大这三个章节的知识有了更加全面细致的理解与认知。通过实际的动手实践和操作，我学到了很多书本之外的知识，相较于一开始动手时的朦朦胧胧，一些概念、一些联系也逐渐清晰了起来。

通过模拟电子技术基础课程设计的实际锻炼，全面调动了我的各方面能力，不仅仅要对书本里的知识反复体会、反复运用，熟练掌握基本原理和基本分析方法，还要对一些不熟悉的元件性能、工程实际问题、电路应用等问题会有探索、解答的能力。这使我更加明白将书本知识与工程实际需要结合起来、实现知识向技能转化的重要性。在这次课程设计中，我所需要完成的是制作一个双通道的音频功率放大器，其中遇到了很多难以解决的问题，但同时也学到了很多知识、巩固了很多概念、加深了很多的理解，掌握了前置放大电路对于音频放大的重要性、学会了制作二阶有源带通滤波电路、掌握了功率放大器电路的设计与制作，掌握了 NE5532、LM1875 等等集成芯片、运算放大器的原理及其作用，并将其很好的运用在本次设计中，实现了相对应的性能指标。通过这次课程设计，我也对一些专业相关的软件有了更深层次的了解，特别是全程使用的 Multisim，其中对于更多的如瓦特计、失真分析仪等仿真仪器都是第一次接触，但也让我逐渐的深入了解与掌握。

参考文献

- [1] 姜雪菲. 基于 Multisim 的音频功率放大电路设计[J]. 青岛大学学报(工程技术版), 2022, 第 37 卷(4):68-72.
- [2] 廖涵章. 低电压高功率音频功率放大器的设计与实现[D]. 湘潭大学, 2019.
- [3] 张石磊. 音频功率放大器设计与实现[D]. 湖南大学, 2018.
- [4] 康华光, 张林. 电子技术基础模拟部分[M]. 7 版. 北京: 高等教育出版社. 2021. 6.
- [5] 沈平, 李懂锋. 一种微弱电信号低噪声前置放大电路[P]. 中国专利: CN217445324U, 2022. 09. 16.
- [6] 谢自美. 电子线路设计·实验·测试[M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社. 2006.
- [7] 陈文渊, 沈斌坚. 二阶模拟带通滤波器的仿真和实现[J]. 声学与电子工程, 2010, (3):47-49.
- [8] 熊俊俏, 戴璐平, 刘海英. 无限增益多路反馈带通滤波器的研究[J]. 电气电子教学学报, 2013, (3):84-86.

附录一：元件清单

表 1.1 仿真电路元件清单

元器件名称	单通道所需元件数量	双通道所需元件数量
NE5532 运算放大器	3	6
LM1875 功率放大集成块	1	2
22uF 有极性电容	3	6
0.22uF 无极性电容	1	2
1uF 无极性电容	1	2
10nF 无极性电容	1	2
4k Ω 电阻	1	2
5k Ω 电阻	2	4
1 Ω 电阻	1	2
45k Ω 电阻	1	2
10k Ω 电阻	3	6
90k Ω 电阻	1	2
700 Ω 电阻	1	2
8k Ω 电阻	1	4
150k Ω 电阻	1	2
12k Ω 电阻	1	2
22k Ω 电阻	1	2
10k Ω 滑动变阻器	1	2
1N4001 二极管	2	4

注：

1. 仿真中关于手机声音源输入使用 Multisim 软件中的交流信号源进行仿真，取 0.1mV 模拟声音源音量大小，5kHz 模拟声音源频率。
2. 仿真中输出扬声器使用同等阻值的 8 Ω 电阻代替（元件清单中未列出）

本科生课程设计成绩评定表

姓 名	陈锦丰	性 别	男
专业、班级	电子信息工程 电信 2106 班		
课程设计题目：2 声道音频功率放大器的设计与实现			
课程设计答辩或质疑记录：（不少于 3 个问题） 1) 电路 1600 倍左右的增益如何实现的？ 答：首先在前置放大电路，通过两级放大，一共放大 100 倍，在功率的放大电路，继续放大大约 18 倍，总放大倍数为 1800 左右，又因为调音电路的存在，总放大倍数需要乘以一个系数，最终放大倍数为 1638 左右。 2) 功率放大电路的 C5 元件的作用？ 答：引入电容 C5 主要用于稳定 LM1875 的第 4 脚直流零电位的漂移，但是对于放大音质具有一定的影响。 3) 功率放大电路的 R22 和 C6 元件的作用？ 答：电容 C6 与电阻 R22 组成 RC 滞后补偿支路，其作用是用来消除极间多个增益造成的自激振荡（零-极点对消），达到稳定电路工作的目的。			
评 定 项 目	评 价 内 容	评分成绩	
1. 方案设计（30 分）	方案合理，参数计算准确		
2. 元器件选择及仿真（10 分）	元器件选择合理，仿真效果达到设计要求		
3. 电路调试及运行（20 分）	电路运行正常，能解决调试中出现的问题		
4. 设计报告（10 分）	格式规范，结构合理、文理通顺，掌握报告撰写		
5. 答辩情况（30 分）	表述思路及能力		
总 分			
最终评定成绩（以优、良、中、及格、不及格评定）			

指导教师签字：_____

2023 年 1 月 日