

多频率可调增益放大器

赵文亮*

1 摘要

本文基于 RLC 带通滤波电路进行逐步的拓展、改进，并使用运算放大器进行多路频率可调的放大电路的整合，实现了多频率可调增益放大器的设计和仿真，进而完成了实际电路的焊接和调试，并以实际的音频信号作为测试输入，得到了较好的音频处理效果。

关键词: 增益可调；带通滤波；信号处理

2 引言

在信号处理中，滤波是一个尤其重要的概念，大部分关于信号处理的问题都与滤波技术相关。常见的滤波器有高通、低通、带通等类型。从原理上来讲，滤波器的实质是一个信号放大器，这种放大器在不同频率的增益不同，从而可以将通频带内频率的信号分量保留。本文将基于多个带通滤波器，设计出具有多个通频带的增益可调的放大器。基于这样的放大器可以很容易实现多种滤波器。例如，将高频带通滤波器的增益调节得较大而低频的增益调节得较小，即可实现高通滤波；把其中某些带通滤波器增益调节得较大而另一些带通滤波器的增益调节的较小，即可实现多路的带通滤波器。

多频率可调增益放大器具有功能丰富、可调性好、便于拓展等优点，在信号处理中可以有很多的应用，例如可以实现音频处理中用于调节音频信号中各频率电信号分量的均衡器的功能。本文将从电路原理出发，自下而上地分析多频率可调增益放大器的构成，并使用 Multisim 进行仿真实验。最后完成了实际电路的焊接和调试，并使用一段音频作为输入来检验效果，验证了电路的正确性和实用性。

3 工作原理

3.1 简单 RLC 带通滤波器

RLC 带通滤波器利用了谐振现象，如图 1 所示。使用频域模型分析可得

$$\dot{U}_O = \frac{\dot{U}_I R}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\dot{U}_I R}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad (1)$$

设 \dot{A}_u 为放大倍数。可以得到 \dot{A}_u 的幅频特性曲线如图 2 所示。并有

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2)$$

其中 ω_0 为通频带的中心频率，在 $\omega = \omega_0$ 时， \dot{A}_u 最大。

* 自 64, 2016011452, zhaowl16@mails.tsinghua.edu.cn

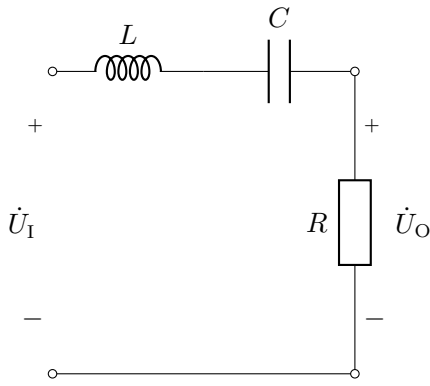
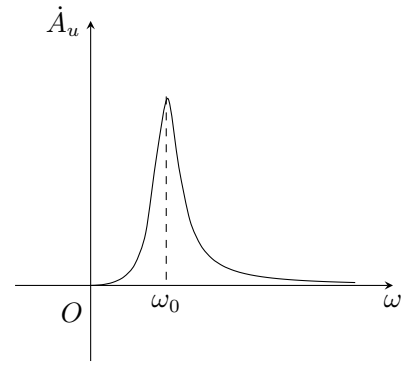


图 1: 简单 RLC 带通滤波器

图 2: RLC 带通滤波器 \dot{A}_u 幅频特性

3.2 模拟电感

由于电感线圈体积较大，不易在电路中集成，我使用了基于电容和运放的模拟电感电路，如图 3 所示。

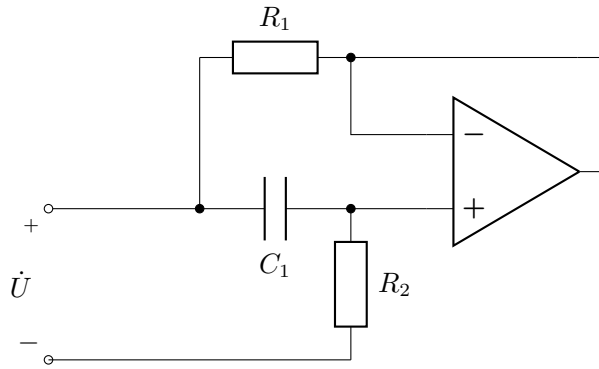


图 3: 模拟电感原理图

$$\dot{I} = \frac{\dot{U} \cdot \frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{1}{j\omega C_1} + R_2} + \frac{\dot{U}}{\frac{1}{j\omega C_1} + R_2} = \dot{U} \cdot \frac{1 + \frac{1}{j\omega C_1}}{\frac{1}{j\omega C_1} + R_2}$$

则有输入阻抗

$$\begin{aligned} \dot{X} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} &= \frac{R_2 + \frac{1}{j\omega C_1}}{1 + \frac{1}{j\omega C_1 R_1}} \\ &= R_1 + j\omega C_1 R_1 R_2 + \frac{\omega^2 C_1^2 R_1^2 R_2 - j\omega C_1 R_1^2}{j\omega C_1 + 1} \\ &\triangleq R_1 + j\omega L + \delta \end{aligned} \quad (3)$$

由于每一个带通滤波器都有一个设计好的中心频率，总可以调节电容 C_1 使得 ωC_1 足够小，即可保证余项 δ 足够小。从而图 3 所示的电路可以近似为电阻 R_1 与电感 $L = C_1 R_1 R_2$ 的串联。

3.3 单频可调增益放大电路

单频可调增益放大电路如图 4 所示。其中电位器 R 的左半部分和右半部分的阻值分别为 r_1 和 r_2 ，且有

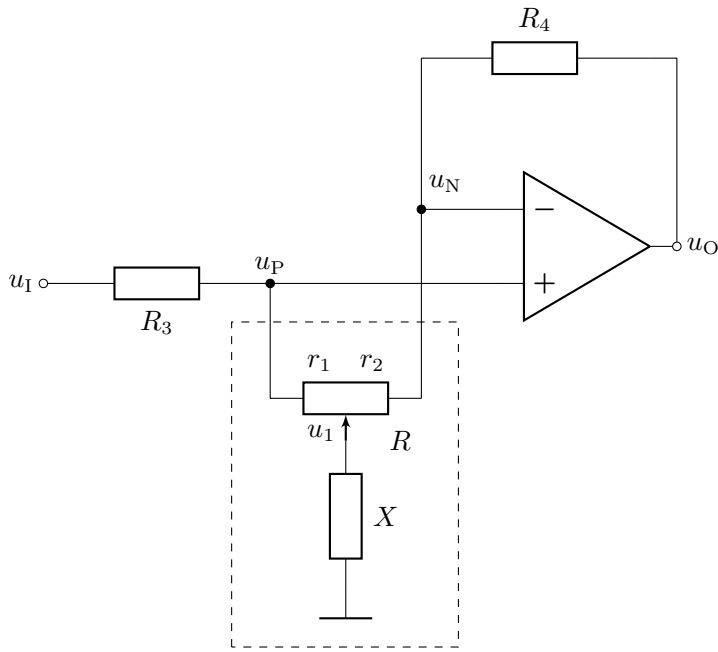


图 4: 单频可调增益放大电路原理图

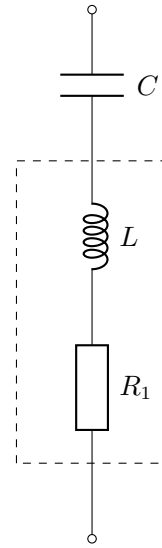


图 5: \$X\$ 展开图

$$r_1 + r_2 = R \quad (4)$$

\$X\$ 为图 3 所示的模拟电感与一个电容 \$C\$ 的串联, 如图 5 所示。虚线框中的部分即为 3.2 节中的模拟电感。则有

$$X = j\omega L + \frac{1}{j\omega C} + R_1 \quad (5)$$

下面将分析对图 4 的放大倍数进行分析。

在图 4 中, 由节点电压方程:

$$u_1 \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \frac{1}{X} \right) = \frac{u_P}{r_1} + \frac{u_N}{r_2}$$

由虚短, 有

$$u_P = u_N$$

化简, 并利用式 (4) 可得

$$u_1 = \frac{RX}{r_1 r_2 + RX} \cdot u_P \quad (6)$$

由虚断和分压关系, 不难得出

$$\frac{u_I - u_P}{R_3} = \frac{u_P}{r_1}$$

将 \$u_1\$ 代入, 解得

$$u_I = \left(\frac{1}{R_3} + \frac{r_2}{r_1 r_2 + RX} \right) u_P \quad (7)$$

同理有

$$u_O = \left(\frac{1}{R_4} + \frac{r_1}{r_1 r_2 + RX} \right) u_P \quad (8)$$

则

$$A_u = \frac{u_O}{u_I} = \frac{\frac{1}{R_4} + \frac{r_1}{r_1 r_2 + RX}}{\frac{1}{R_3} + \frac{r_2}{r_1 r_2 + RX}} \quad (9)$$

实际中为了方便,可取 $R_3 = R_4 = R$ 。由于 $|X|$ 随 ω 的增加先减小后增大,则不难得出,当 $r_1 < r_2$ 时, $A_u < 1$, 且随 ω 的增加先减小后增大; $r_1 > r_2$ 时, $A_u > 1$, 且随 ω 的增加先增大后减小。 $r_1 = r_2$ 时恒有 $A_u = 1$ 。可见在频率上确实具有选通的作用。

另一方面,考虑电位器滑动端的变化。将取 $R_3 = R_4 = R$ 代入表达式 (9), 可以改写为

$$A_u = \frac{2r_1R - r_1^2 + RX}{R^2 - r_1^2 + RX} \quad (10)$$

固定 X , 分析 A_u 随 r_1 的变化。不难得到当 r_1 增大时, 分子部分的模会增大, 分母部分的模会减小, 则 $|A_u|$ 会增大。这说明了调节电位器确实可以起到调节增益的作用。

3.4 多频可调增益放大器

图 4 中的虚线框内部分的电路可以看成是一个带通滤波模块,其通频带中心频率取决于 X 的电路中电容、虚拟电感的取值。只需在图 4 的运放两输入端并联多个这样的模块,并根据设定的中心频率来调节 C, R_1, C_1, R_2 的取值,即可实现多频可调增益放大器。

4 电路仿真

使用 Multisim 进行电路仿真。完整的电路图如图 6 所示,其中包括 5 个单频可调增益放大模块,其中心频率分别约为 100Hz, 325Hz, 1kHz, 3.2kHz, 10kHz。为了增强输出电压的稳定性,我在输入端后接了一个电压跟随器。

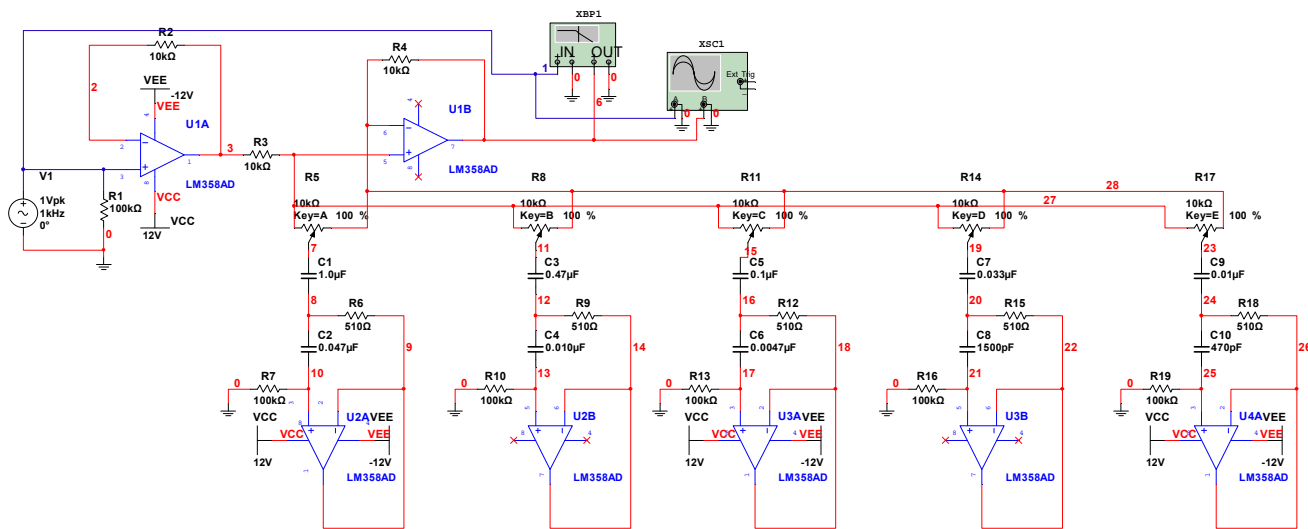
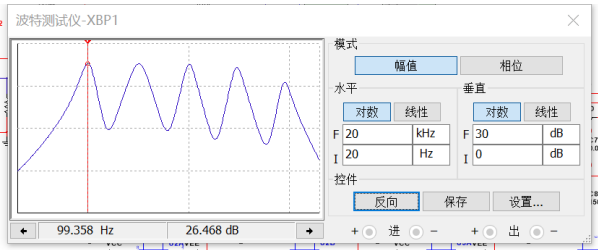
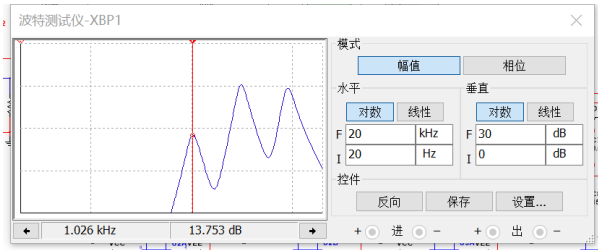


图 6: 仿真电路图

使用波特测试仪观察频率响应,如图 7 所示。通过调节每个单频带通滤波器的增益,可以改变整个电路的幅频特性。图 7a 将五路增益调节到最大,得到了一个宽通频带的带通滤波器;图 7b 将较低的两个频率增益调节到最小,而将较高的三个频率的增益调节到最大,得到了高通滤波器;图 7c 与图 7b 正好相反,得到了低通滤波器;图 7d 将 100Hz、1kHz、10kHz 的频率增益调节到最大,而另两个频率的增益调节到最小,得到了多路带通滤波器。



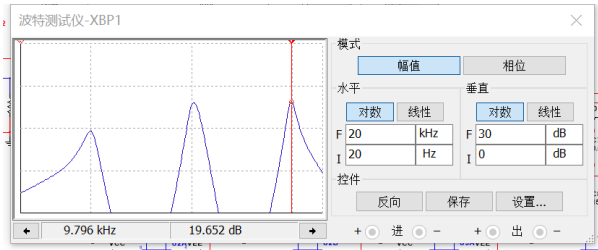
(a) 宽通频带的带通滤波器



(b) 高通滤波器



(c) 低通滤波器



(d) 三路带通滤波器

图 7: 幅频特性随多路增益调节的变化

需要指出的是，上述所示的幅频特性与理想的高通、低通、带通有所差别，事实上可以通过细致调节各路增益大小、调节元件参数来调节品质因数、增加中心频率取值等方式使得使得幅频特性的曲线更加平滑。

5 硬件实验

我在实验板上焊接了实际电路，电路板如图 8 所示。

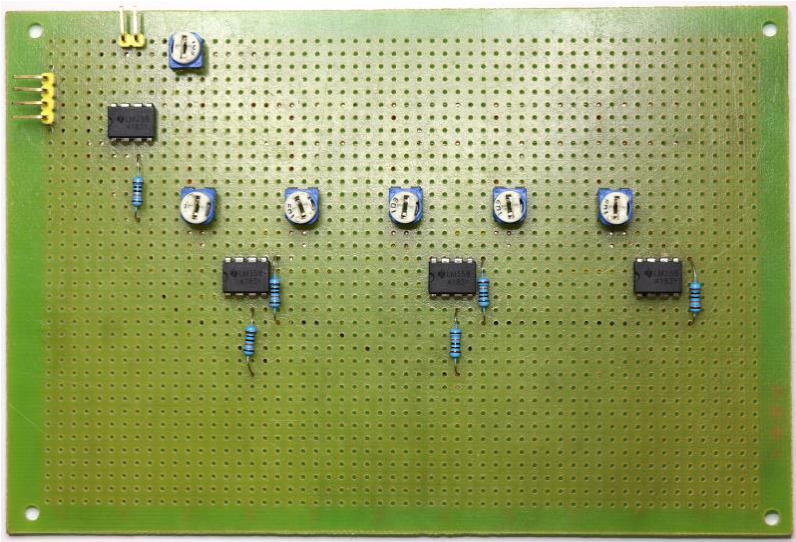
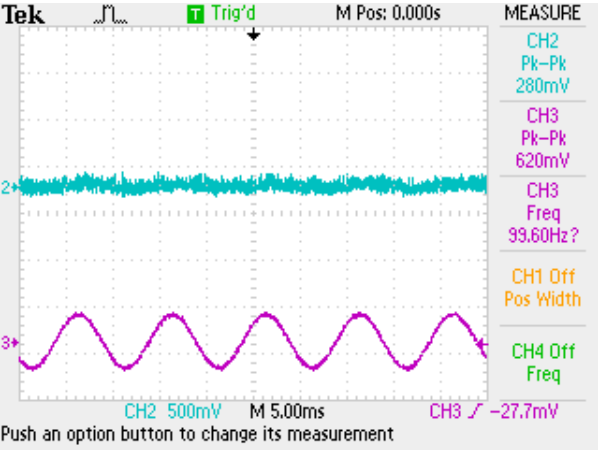


图 8: 电路板正面图

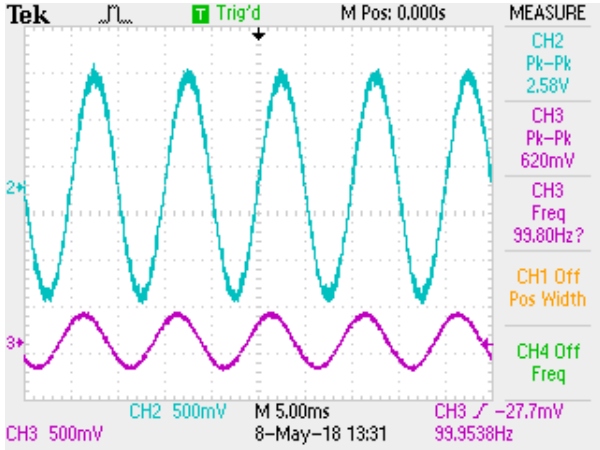
其中运放采用直插的 LM358，部分电阻使用直插元件，另一部分电阻和电容均采用了贴片封装的元件焊接在实验板的背面。电路板上预留了电源、信号源输入、输出等接口。

5.1 正弦波测试

首先使用函数信号发生器来产生各个中心频率对应的正弦波，并与频率相对应的电位器的阻值，观察输出信号赋值的变化。图 9~13 显示了不同频率下较低增益和较高增益的输入输出波形。可见电路可以成功实现多频率的增益可调。

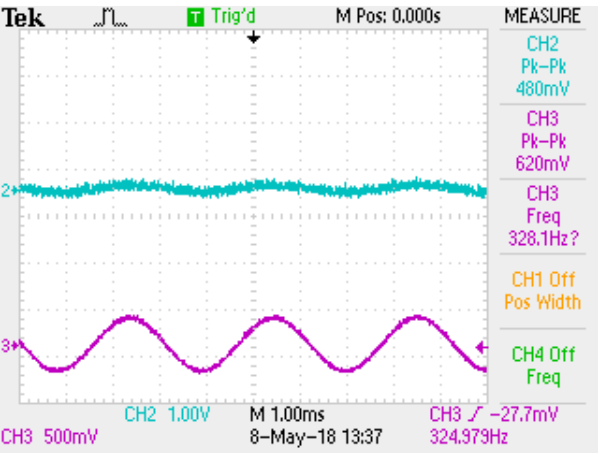


(a) 较低增益

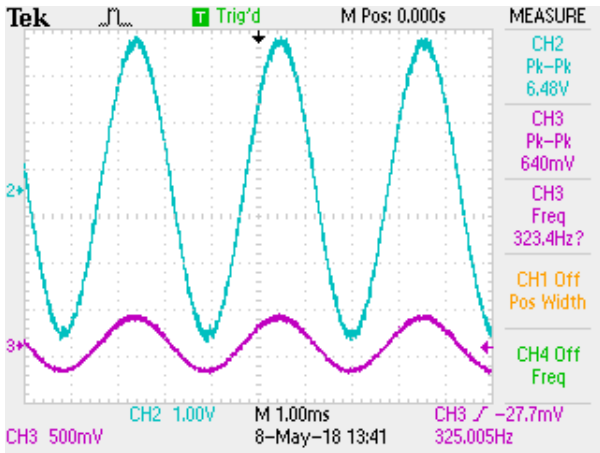


(b) 较高增益

图 9: $f = 100\text{Hz}$ 实验波形

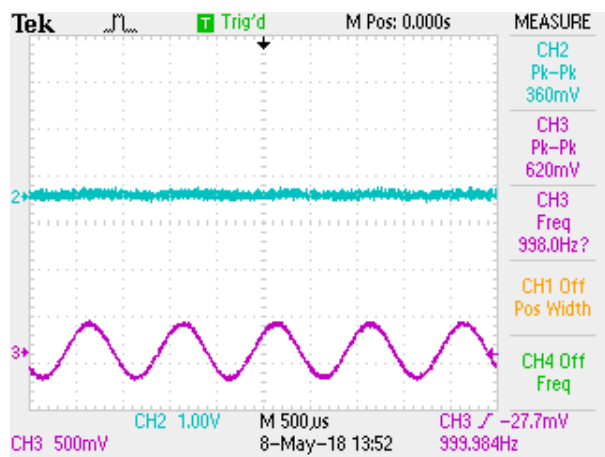


(a) 较低增益

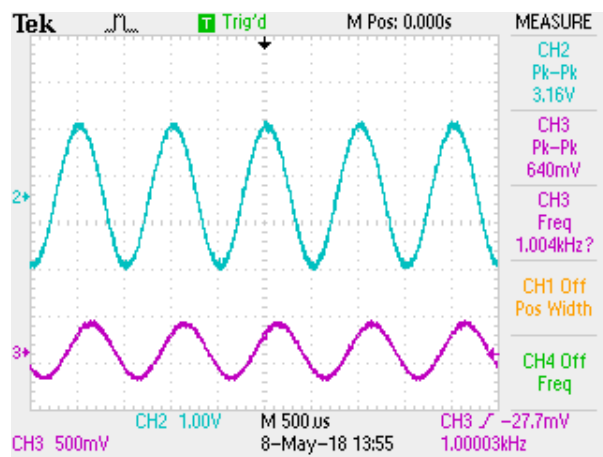


(b) 较高增益

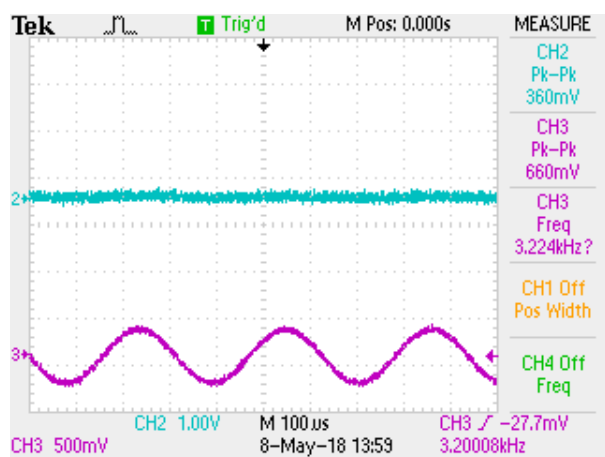
图 10: $f = 325\text{Hz}$ 实验波形



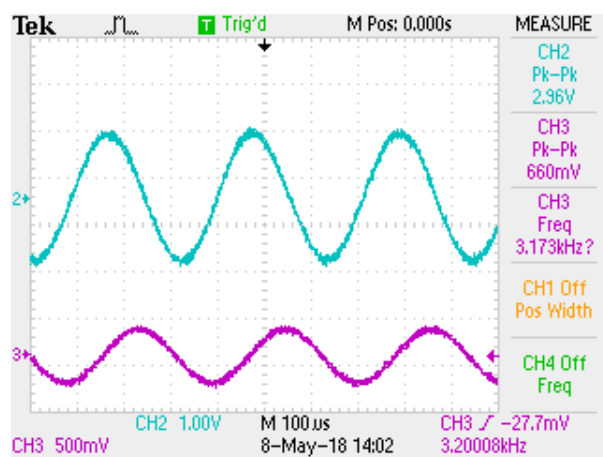
(a) 较低增益



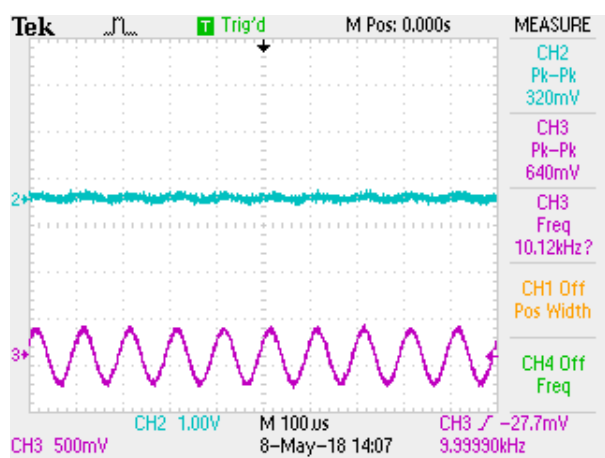
(b) 较高增益

图 11: $f = 1\text{kHz}$ 实验波形

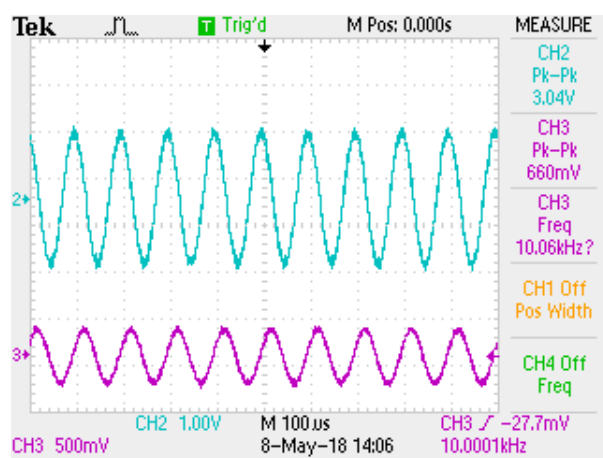
(a) 较低增益



(b) 较高增益

图 12: $f = 3.2\text{kHz}$ 实验波形

(a) 较低增益



(b) 较高增益

图 13: $f = 10\text{kHz}$ 实验波形

5.2 音频测试

进一步地，我使用实际的音频信号作为输入，并将输出信号接到扬声器上¹。通过实际输出的音频来验证电路功能的正确性。我以 Maksim 的克罗地亚狂想曲为例进行实验，原始音频如文件克罗地亚狂想曲.mp3所示。通过音频线将音乐的电信号输入到电路板上，即可通过扬声器听到处理后的声音。我测试了两种情况下的处理效果，并使用手机进行了录音²。

5.2.1 高频增强

将高频部分的增益调高，低频部分增益调低，即可增强音乐中的高频部分。文件高频增强.mp3是输出的结果，可见高音部分明显变得响亮，主旋律更加突出。

5.2.2 低频增强

将低频部分的增益调高，高频部分增益调低，即可增强音乐中的低频部分。文件低频增强.mp3是输出的结果，可以发现低音的旋律更加明显，而且有些许失真。这是因为我使用的扬声器的额定电压较小，由此可见确实可以实现低频增强的效果。

6 结语

本文实现了多频率可调增益放大器的一种设计，进而通过仿真和硬件实验成功验证了可行性，并将其用于实际的音频处理中，取得了较好的效果。这种放大器便于调节各频率的增益，并可以通过增加中心频率的取点，扩展成更为精密的放大器，从而可在信号处理等多个领域上发挥重要作用。

参考文献

- [1] Chapter 4: Op Amp applications - Advanced topics [Analog Devices Wiki].<https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/text/chapter-4>
- [2] LM358 Datasheet (PDF) - Motorola, Inc.<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/3067/MOTOROLA/LM358.html>

¹ 本节中的音频文件可在本目录内找到，也可以访问<https://github.com/thu-jw/Croatian-Rhapsody>

² 由于录音时周围环境噪声较大，加之手机的话筒有时会与扬声器之间有刮碰，可能会有些许杂音

A 索引

插图

1	简单 RLC 带通滤波器	2
2	RLC 带通滤波器 \dot{A}_u 幅频特性	2
3	模拟电感原理图	2
4	单频可调增益放大电路原理图	3
5	X 展开图	3
6	仿真电路图	4
7	幅频特性随多路增益调节的变化	5
8	电路板正面图	5
9	$f = 100\text{Hz}$ 实验波形	6
10	$f = 325\text{Hz}$ 实验波形	6
11	$f = 1\text{kHz}$ 实验波形	7
12	$f = 3.2\text{kHz}$ 实验波形	7
13	$f = 10\text{kHz}$ 实验波形	7

B 实验中遇到的问题解决方法

本次实验的理论性和操作性都非常强。理论方面，模拟电感、带通滤波器等的推导比较复杂，需要综合利用电路求解中的各种方法。实验方面，遇到的问题主要有以下几点：

1. 硬件实验中第一个困难应该是难以寻找到合适的电子元件，尤其是多种类型的电阻电容。一开始我试图寻找直插元件，但是只找到了部分；由于贴片元件的种类较为齐全，我后来改为使用贴片元件。
2. 我使用的贴片电阻电容的封装均为 0603 或 0402，这就给焊接带来了一定的困难。同时，为了增强电路的稳定性，我选择在实验板上焊接而不是在面包板上搭接，这就为走线增加了难度。经过几次练习，我逐渐掌握了在实验板上走线的技巧，实验也越来越顺利。
3. 电路焊接完毕之后，进行第一次测试，果然遭遇失败。我接入一个正弦波，从头检查电路发现电路最前端的电压跟随器的输出就不正确。我首先怀疑没有成功引入负反馈，于是我手动将第一个运放的输出接到反相输入端，电压跟随器的输出就正确了。于是我将反馈电阻取下来检测，发现这个电阻已经断路。更换了电阻后，问题迎刃而解。
4. 进行多频率的增益调节时，我发现有三路频率表现得很不错，而另外两路的增益随着电位器的调节几乎不变。我马上想到这很可能是由于电容的容值选择错误，而这会影响带通滤波器中心频率的位置。事实上，由于贴片元件较小，很可能出现这样的错误。我将电容取下来更换之后，成功解决了问题。