

音频仿真电路的设计

张伟

2011 级通信工程

中国海洋大学

1078984310@qq.com

董茜菱

2011 级通信工程

中国海洋大学

1372532390@qq.com

蒋延梁

2011 级通信工程

中国海洋大学

2468453765@qq.com

摘要

语音信号的频谱搬移用 Matlab 实现，鉴于 Multisim 不能直接仿真语音信号，所以用函数发生器输出波形与变换后的波形比拟。音频功率放大电路的设计。我们采用了 LM1875 集成电路作为音频功率放大电路的核心器件。而且我们还采用了低通、高通、带通滤波器这样我们可以根据个人的不同爱好对不同频段的音频信号做选择性的处理。由于滤波器和 LM1875 集成电路对直流电压大小需求不同，所以我们运用了运放电路，这样可以分配直流稳压电路产生的电压分配到滤波器和集成电路对电压不同的要求。概括的说此功率放大器由电源、前置放大器、音量控制级、功率放大器几部分构成。

关键词

前置放大器 功率放大 音频

1. Introduction

在现代音响普及中，人们因生活层次、文化习俗、音乐修养、欣赏口味的不同，令对相同电气指标的音响设备得出不同的评价。所以，就高保真度功放而言，应该达到电气指标与实际听音指标的平衡与统一。音频功率放大器是一个技术已经相当成熟的领域，几十年来，人们为之付出了不懈的努力，无论从线路技术还是元器件方面，乃至思想认识上都取得了长足的进步。

（一）早期的晶体管功放

半导体技术的进步使晶体管放大器向前迈进了一大步。自从有了晶体管，人们就开始用它制造功率放大器。

早期的放大器几乎全用锗管来制作，但由于锗管工艺上的一些原因，使得放

大器中所用的晶体管，尤其是功放管性能指标不易做得很高，例如，共发射极截止频率 f_h 的典型值为 4kHz，大电流管的耐压值一般在 30V — 40V 左右。这样，放大器的频率响应也就很狭窄，其 3dB 截止频率通常在 10kHz 左右，大大影响了音乐中高频信号的重现。再加上功放管的耐压、电流和功耗三个指标相互制约，制作较大功率的 OTL 或 OCL 放大器不易寻到三个指标都满足要求的管子，所以不得不采用变压器耦合输出。变压器的相移又使电路中加深度负反馈变得很困难，谐波失真得不到充分的抑制，因此这一时期的晶体管放大器音质是很差的。

（二）晶体管功放的发展和互调失真

随着半导体工艺的逐渐成熟，大电流、高耐压的晶体管品种日益增加，越来越多的功率放大器采用了无输出变压器的 OCL 电路或 OTL 电路。最初的大功率 PNP 管是锗管，而 NPN 管是硅管，两者的特性差别非常显著，电路的对称性很差，人们更多采用的是图二所示的准互补电路，通过小功率硅管 Q1 与一只大功率的 NPN 硅管 Q2 复合，得到一只极性与 PNP 管类似的大功率管，降低了电路因对称性差而招至的失真。

到了六十年代末，大功率的 PNP 硅管商品化的时候，互补对称电路才得到广泛的应用。元器件的进步使晶体管功率放大器的技术指标产生了质的飞跃，在主观音质评价方面，也改变了过去人们对晶体管功放的看法，无论是在厅堂扩音、电台节目制作还是家庭重放，晶体管功放都被大量地采用，首次在数量上以压倒性的优势超过了电子管功放。在商品化的晶体管扩音机中，相继出现了一些摧残夺目的名机，如 JBL 的 SA600，Marantz 互补对称电路 M0del115 等等。

尽管电子管的拥护者仍大量存在，人们毕竟能够比较公正地看待晶体管放大器了，认为晶体管机频响宽阔，层次细腻，与电子管机比较起来有一种独特的舱力，而不是简单的谁取代谁的问题。

（三）功放输入

对称和平衡是电路发展的方向对称和平衡也许是世上事物完美的标志之一。音乐讲究各声部之间的平衡与统一，美术以色彩搭配均衡、和谐为美，在服装设计中，常常采取看似不对称的设计，其实质也是为了取得视觉上的均衡。上面所说的都是艺术，对称和平衡给人一种安定、完美的感觉。有意思的是，在功率放大器中，对称和平衡也有类似的效果。最初采用对称设计的例子要算互补对称电

路了，一上一下的两只异极性晶体管作推挽输出，不仅可以免除笨重的输出变压器，而且电路的偶次谐波失真在推挽的过程中被抵消了，保真度有了很大提高。稍后，人们从运算放大器的设计中得到启迪，将左右对称的差动式电路用于功率放大器的输入级，电路的稳定性和线性都得到改善，这时的电路结构如图六所示，这一结构直至今天都还有人采用。

当今许多最先进的功率放大器采用的是共射一共基这种电路结构。随着节目的变化，音乐中包含大量瞬变、高能量的成份，要完美地重现这些细节，就要求放大器具有良好的动态响应，对晶体管配对的要求就不仅是静态的匹配，而且在动态时也要高度匹配，这无疑对元器件参数的平衡提出了更苛刻的要求。幸运的是，半导体技术的进步为我们提供了这种可能，各种各样的差分对管、晶体管阵列层出不穷，单个的晶体管一致性也得到较大提高。

新的技术飞跃往往是新材料、新理论、新方法的出现之后产生的，音频放大器同样也不会例外。在科技日新月异的年代，我们有理由期待更完美的功率放大器的出现。

2. Methods & Results

音频放大器的设计

功率放大器不仅仅是消费产品（音响）中不可缺少的设备，还广泛应用于控制系统和测量系统中。

（一）设计要求：

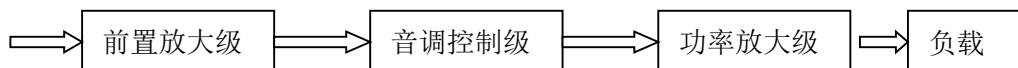
1. 输出功率：20W。
2. 负载阻抗： 8Ω 。
3. 通频带 Δf_s ：为 20HZ - 20KHZ。
4. 音调控制要求：1KHZ (0dB)，10KHZ (± 12 dB)，100HZ (± 12 dB)
5. 灵敏度：话筒输入：5mV 线路输入：0.775V。

（二）设计过程

1. 拟定总体方案：

甲类功放的主要优点就是电路简单易行，非线性失真小，适用于小功率的线性音频放大器，现在甲类功放主要用在高档功放产品中。而乙类功放与甲类功放最主要的不同点就是静态电流小，因此无信号时消耗功率小，可获

得较高的效率；但是，乙类功放在工作时，由于两只晶体管交替导通与截止，因而，在两管输出信号波形的衔接处，会产生交越失真；而且功放管在从反偏到零偏再转为正偏转换时，随着信号频率升高，输出信号就会在时间上延迟，出现所谓的开关转换失真。因此，在实际 Hi-Fi 高保真放音系统中，一般不采用乙类功放，而采用线性失真小的甲类功放或甲乙类功放。甲乙类功放是通过改变偏置的方法来减少交越失真，它将甲类功放的高保真度与乙类功放折衷，从而在一定程度上解决了上述效率高与失真大之间的矛盾。而且甲乙类功放的效率可达到 78.5%，故本次设计采用甲乙类功放。通过对设计要求和设计方案的分析，本课题觉得采用 LM1875 作为功率放大器。



图示：系统组成框图

确定各级的增益分配

放大倍数 V_s 、dB 数 0dB：一般将信号电平（0dB）即 0.775V 作为衡量放大器灵敏度的参考标准。

5mV 的 dB 数为： $20\lg(0.005/0.775) = -44dB$

因为采用的集成芯片 LM1875，其输出功率为 20W，则负载上的电压：

$$U_L = \sqrt{P_o R_L} = 12.6 \approx 13V$$

又话筒输入为 5mV，则整个电路的增益为 $20\lg(13/0.005) = 68dB$ 。考虑到音调级必要的衰减，增益为 -2dB 左右。所以取整个电路的增益为 70dB。则各级的增益如下：

- * 功放级：26dB（厂家给定的）
- * 音调控制级：-2dB。
- * 前置放大级：44dB。

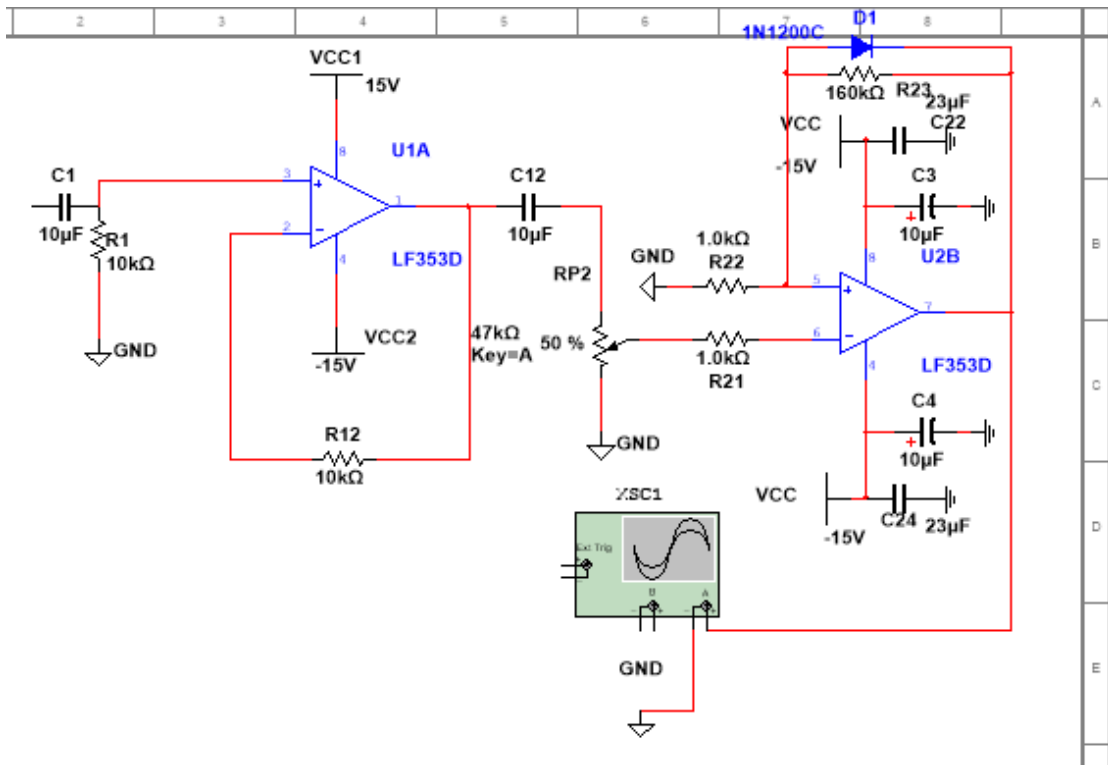
2. 单元电路的设计

(1) 前置放大级

① 电路形式的选择

由于信号远输入的信号幅度较小。不足以推动以后的功放电路。因此要用电压放大电路对信号输入的音频信号电压进行放大,对于信号源,其负载约为 $47\text{k}\Omega$,所以选用电压串联负反馈方式的同相比例放大器,它可以使输入电阻增大,输出电阻减小,且输入输出电压同相。又因为前置放大级的增益为 44dB ,即 158 倍,取 160 倍,前置放大级电路采用二级,第一级与第二级采用电容耦合方式,总的电压放大倍数为 $A_{uf}=160$,设计中选用 $A_{uf1}=1$, $A_{uf2}=160$ 。

其中第一级实际上是一个电压跟随器,它提高了带负载的能力。



图：前置放大器电路图

电路中二极管 D1 作用是：当线路输入是 0.775V 时, D1 导通,此时 LF353 (2) 也为一个电压跟随器,信号不经过放大直接到音调控制级的输入端。当输入为 5mV 时,不足以让二极管导通,此时 LF353 (2) 为放大器,信号将放大 160 倍后到音调控制级的输入端。

② 集成运放的选择

因为 $A_{uf2}=160$ ，根据通频带 $20\text{HZ} - 20\text{KHZ}$ ，其上线频率为 20KHZ ，则集成运放的放大倍数带宽积应满足下列关系：

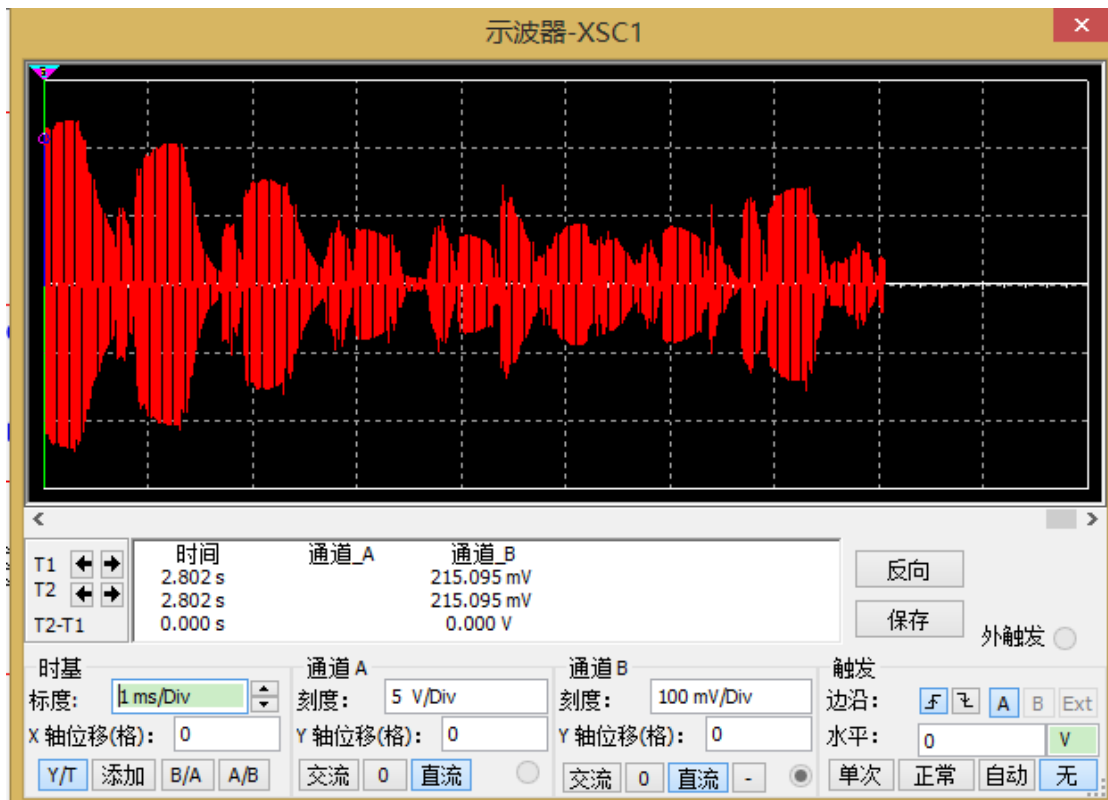
$$GB \geq A_{uf2}f_h = 180 * 20\text{KHZ} = 3.2\text{MHZ}$$

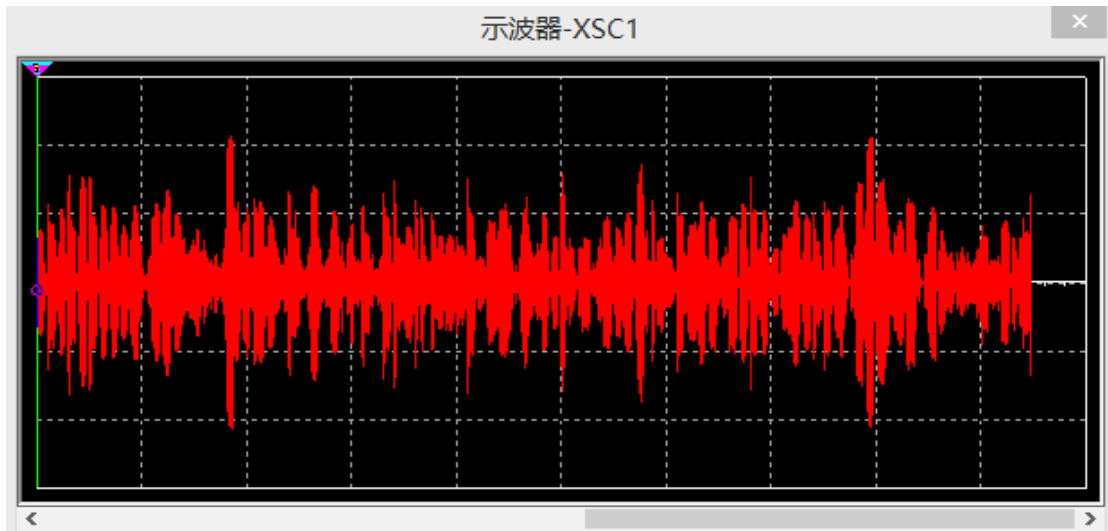
从运放的资料手册中可查 LF353 的单位放大倍数带宽 $GB=4\text{MHZ}$ ，满足要求。

③ 各元件的参数选择和计算

电路中电容 C_{11} 是用作噪声去耦合的，可以用小体积大容量的钽电容或普通电解电容，一般选为 $10\mu\text{F}$ ， R_{11} 可选用较大的电阻，取 $1\text{M}\Omega$ ，电阻 R_{12} 取 10K ，LF353 (2) 构成的是放大倍数为 160 的电压放大电路，同相交流放大电路的平衡电阻可尽量选得大一些，一般为 10K 以上，这样有利于提高放大电路的输入电阻，由于输入电阻为 47K ，故选 R_{P2} 的阻值为 47K ， R_{21} 取 1K ，耦合电容 C_{12} 为 $10\mu\text{F}$ 。由 $A_{uf2} = 1 + R_{23}/R_{22}$ 及 $R_{21} = R_{23}/R_{22}$ ， $A_{uf2}=180$ 可得 $R_{21}=R_{22}=1\text{K}$ ， $R_{23}=160\text{K}$ 。 C_{21} ， C_{22} ， C_{23} ， C_{24} ，主要用于电源旁路滤波，一般 C_{21} ， C_{23} 用电解电容，其值为 $220\mu\text{F}$ ， C_{22} ， C_{24} 用普通的电容，一般取值为 $22\mu\text{F}$ 。LF353 的电源为 $\pm 15\text{V}$ 的直流稳压电源。

仿真情况：





输出端电压：

(2) 音调控制级

音调控制器主要是控制，调节音响放大器的幅频特性，他只对低频与高频的增益进行提升与衰减，中音频的增益保持 0dB 不变。因此，音调控制器的电路可以由低通滤波器和高通滤波器构成。由运算放大器构成的音调控制器，电路调节简单，元器件少，因此，我们选用这种电路形式。

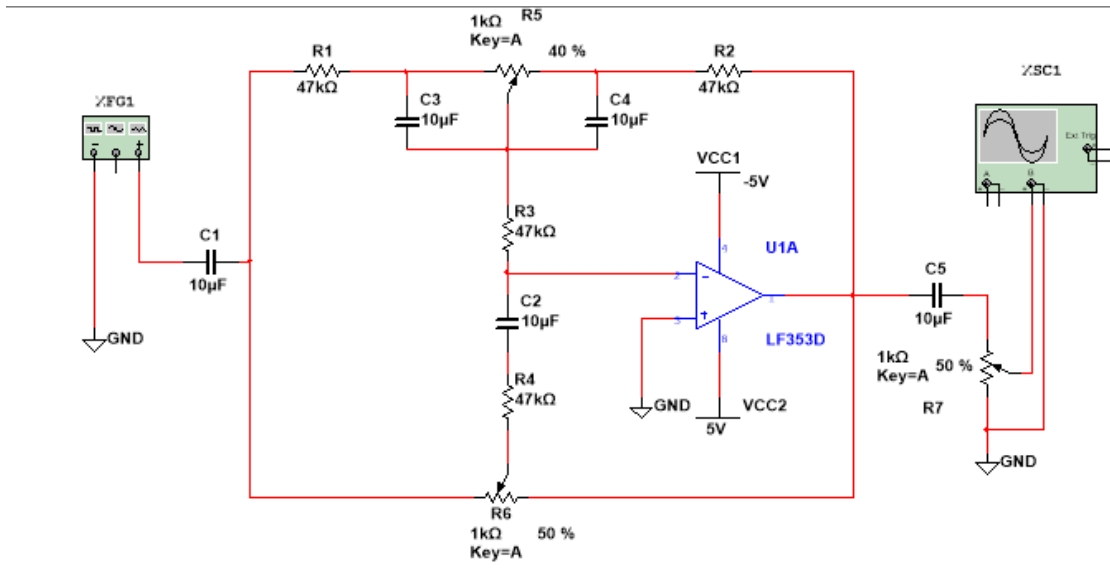


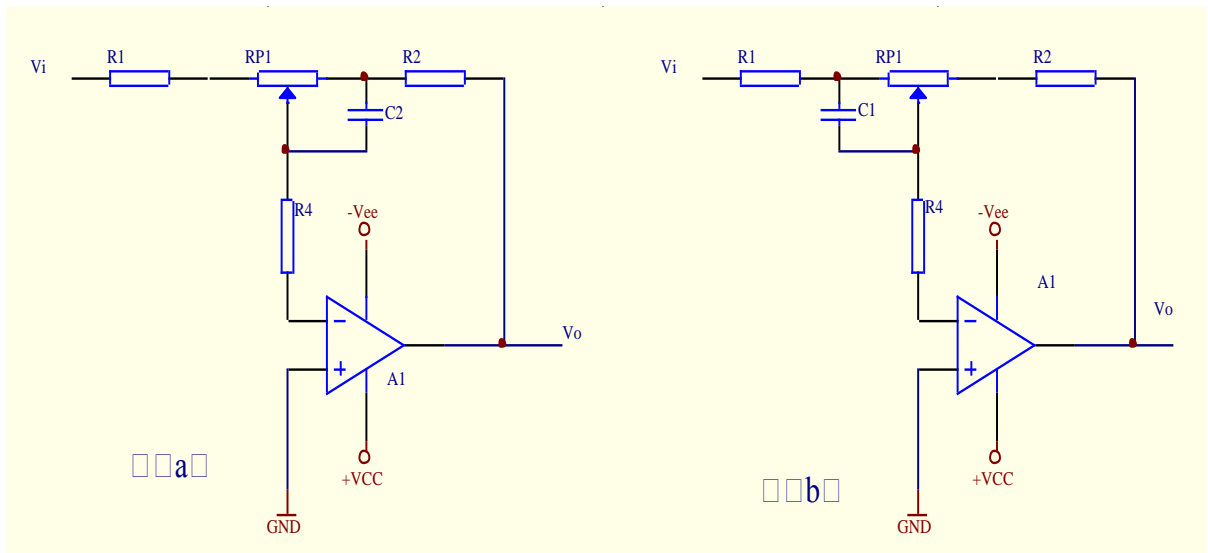
图 3 音调控制级电路图

图中，电位器 RP33 用来调节音量的大小，即为音量控制电路。设电容 $C_{31}=C_{32} \gg C_{33}$ ，在中、低音频区， C_{33} 可视为开路，在中、高音频区， C_{31} ， C_{32} 可视为短路。

工作状态及元件参数计算：

第一：低频时的情况：

低频提升与衰减，电路图如下图（a）和图（b）所示：



图：低频提升与衰减电路

增益为： $A(j\omega) = V_o/V_i = -[(R_{P31}+R_{32})/R_{31}] * [1+(j\omega)/\omega_2] / [1+(j$

$\omega) / \omega 1]$; 式中: $\omega 1=1 / (R P 3 1 * C 3 2)$,

$\omega 2=(R P 3 1+R 3 2) / (R P 3 1 * R 3 2 * C 3 2)$;

当 $f < f_{L1}$ 时, $C 3 2$ 可视为开路, 运算放大器的反向输入端视为虚地, $R 3 4$ 的影响可以忽略, 此时电压增益 $A_{V L}=(R P 3 1+R 3 2) / R 3 1$

在 $f=f_{L1}$ 时, 因为 $f_{L2}=10 f_{L1}$, 故可得 $A_{V 1}=(R P 3 1+R 3 2) / \sqrt{2} R 3 1$; 此时, 电压增益 $A_{V 1}$ 相对于 $A_{V L}$ 下降了 3dB。

在 $f=f_{L1}$ 时, 可得 $A_{V 1}=[(R P 3 1+R 3 2) / R 3 1] * (\sqrt{2} / 10) =0.14 A_{V L}$; 此时, 电压增益 $A_{V 2}$ 相对于 $A_{V L}$ 下降了 17dB。

同理可计算低频衰减。

第二: 高频提升与衰减:

高频等效电路如图所示:

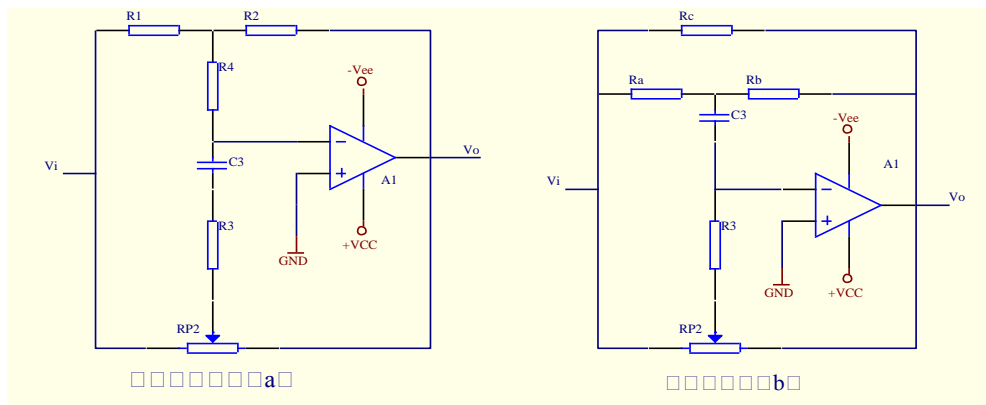


图: 高频等效电路

电阻关系式为:

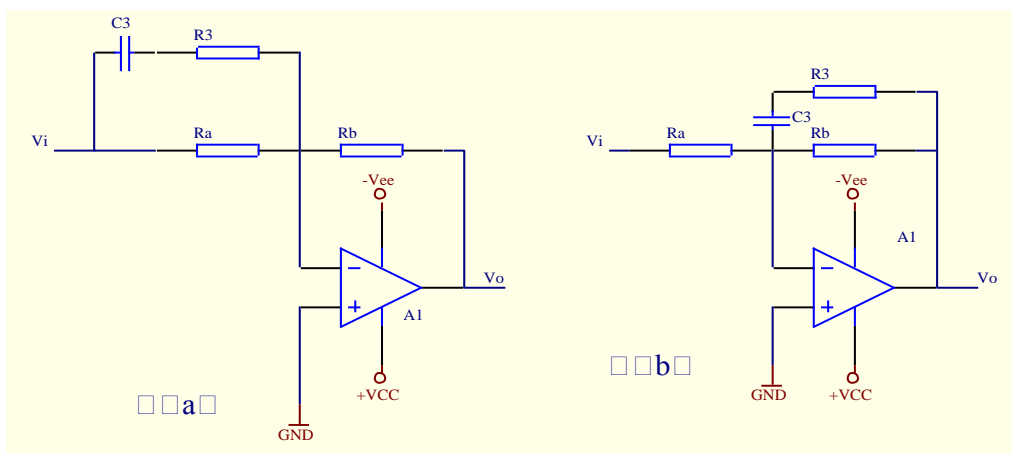
$$R_a=R 3 1+R 3 1+(\frac{R 3 1 R 3 1}{R 3 2})$$

$$R_b=R 3 4+R 3 2+(\frac{R 3 4 R 3 2}{R 3 1})$$

$$R_c=R 3 1+R 3 2+(\frac{R 3 2 R 3 1}{R 3 4})$$

若取 $R 3 1=R 3 2=R 3 4$, 则上式为: $R_a=R_b=R_c=3 R 3 2=3 R 3 4$

高频提升与衰减的等效电路如下图所示:



图：高频提升与衰减电路

增益函数表达式为： $\dot{A}(j\omega) = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_a}{R_b} * \frac{1+(j\omega)/\omega_3}{1+(j\omega)/\omega_4}$ 式中，

$$\omega_3 = 1/[(R_a + R_{33})C_{33}], \quad \omega_4 = 1/(R_{33}C_{33})$$

$f < f_{H1}$ 时， C_{33} 视为开路，电压增益 $AV_0=1$ (0dB)。在 $f=f_{H1}$ 时， $AV_3=\sqrt{2} AV_0$ 此时电压增益 AV_3 相对于 AV_0 高 3dB。

在 $f=f_{H2}$ 时， $AV_4=\sqrt{2} AV_0$ 此时电压增益 AV_4 相对于 AV_0 提高了 17dB。

当 $f > f_{H2}$ 时， C_{33} 视为短路，此时电压增益 $AV_H = (R_a + R_{33}) / R_{33}$

又已知 $f_{Lx} = 100\text{HZ}$, $f_{Hx} = 10\text{KHZ}$, $x = 12\text{dB}$ ，由计算式得：

$$f_{L2} = f_{Lx} * 2^{x/6} = 400\text{HZ}，\text{ 则 } f_{L1} = f_{L2} / 10 = 40\text{HZ}；$$

$$f_{H1} = f_{Hx} / 2^{x/6} = 2.5\text{KHZ}，\text{ 则 } f_{H2} = 10f_{H1} = 25\text{KHZ}$$

$$AV_L = (R_{P31} + R_{32}) / R_{31} \cong 20\text{dB}$$

其中， R_{31} , R_{32} , R_{P31} 不能取得太大，否则运放漂移电流的影响不可忽视。但也不能太小，否则流过它们的电流将超过运放的输出能力。通常取几千欧姆至几百千欧姆。现取 $R_{P31} = 470\text{K}\Omega$ ，则 $AV_L = (R_{P31} + R_{32}) / R_{31} = 11$ (20.8dB)

$$C_{32} = \frac{1}{2\pi R_{P31} f_{L1}} = 0.008\mu\text{F}$$

取标称值 $0.01\mu\text{F}$ ，即 $C_{31} = C_{32} = 0.01\mu\text{F}$ 取

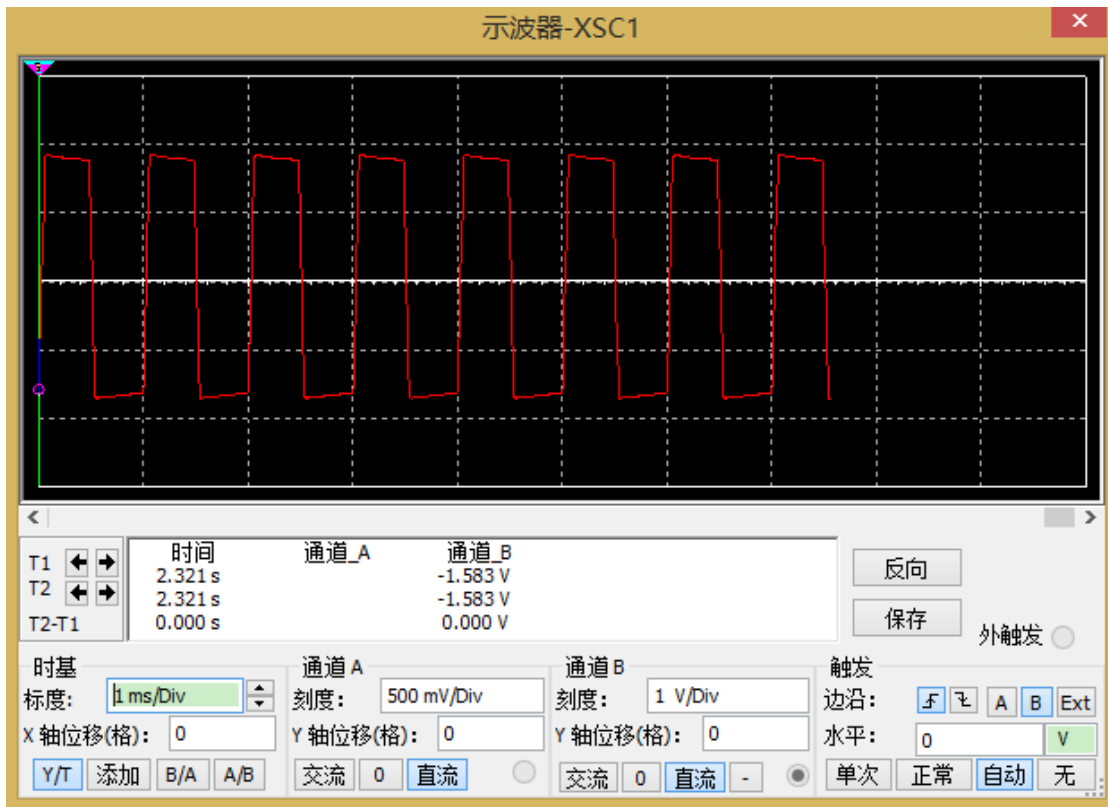
$R_{34} = R_{31} = R_{32} = 47\text{K}$ ，则

$R_a = 3R_{34} = 141K\Omega$ $R_{33} = R_a/10 = 14.1K\Omega$, 取标称值 $13K\Omega$

$C_{33} = \frac{1}{2\pi R_{33} f_{H2}} = 490PF$, 取标称值 $470PF$ 取 $RP_{32} = RP_{31} = 470K\Omega$,

$RP_{33} = 10K\Omega$, 级间耦合电容 $C_{34} = C_{35} = 10\mu F$

仿真情况:



(3) 功率放大级

电路形式的选择: 芯片选用 LM1875, 而一个 LM1875 的输出功率最大只能达到 20W, 已能满足本课题的设计要求, 故本设计采用单片 LM1875。

3. 元件参数的计算与选取

(1) 反馈网络电阻值的选取

LM1875 的增益为 26dB, 即有: $A_v = 1 + \frac{R_{403}}{R_{401}} \approx \frac{R_{403}}{R_{401}} = 20$ 所以有: $R_{403} \approx 20R_{401}$,

通常取 $R_{401} = 1K$ 左右, 则 $R_{403} = 20K$ 。

(2) 隔直电容 C_{402} , C_{403} 应满足在下限频率上 ($f_L = 20\text{HZ}$) 的容抗远小于 R_1 ,
取 $C_{402} = C_{403} = 10 \mu$ 。

电 源 旁 路 电 容 : $C_{406} = C_{408} = C_{410} = C_{412} = 220 \mu F$,
 $C_{407} = C_{409} = C_{411} = C_{413} = 22 \mu F$

LM1875 的简介

(一) LM1875 的参数简介

LM1875 采用 TO-220 封装结构, 形如一只中功率管, 体积小, 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。

LM1875 主要参数:

电压范围: 16~60V

静态电流: 50mA

输出功率: 25W

谐波失真: <0.02%, 当 $f=1\text{kHz}$, $R_L=8 \Omega$, $P_O=20\text{W}$ 时

额定增益: 26dB, 当 $f=1\text{kHz}$ 时

工作电压: $\pm 25\text{V}$

转换速率: 18V/ μS

LM1875 极限参数:

电源电压 (V_S) 60 V

输入电压 (V_{in}) $-V_{EE}-V_{CC}$ V

工作结温 (T_j) $+150 \text{ }^\circ\text{C}$

存储结温 (T_{stg}) $-65\text{--}+150 \text{ }^\circ\text{C}$

(二) LM1875 的工作原理:

LM1875 功放板由一个高低音分别控制的衰减式音调控制电路和 LM1875 放大电路以及电源供电电路三大部分组成, 音调部分采用的是高低音分别控制的衰减式音调电路, 其中的 R_{02} , R_{03} , C_{02} , C_{01} , W_{02} 组成低音控制电路; C_{03} , C_{04} , W_{03} 组成高音控制电路; R_{04} 为隔离电阻, W_{01} 为音量控制器, 调节放大器的音

量大小, C05 为隔直电容, 防止后级的 LM1875 直流电位对前级音调电路的影响。放大电路主要采用 LM1875, 由 1875, R08, R09, C06 等组成, 电路的放大倍数由 R08 与 R09 的比值决定, C06 用于稳定 LM1875 的第 4 脚直流零电位的漂移, 但是对音质有一定的影响, C07, R10 的作用是防止放大器产生低频自激。本放大器的负载阻抗为 $4 \rightarrow 16 \Omega$ 。

为了保证功放板的音质, 电源变压器的输出功率不得低于 80W, 输出电压为 $2 \times 25V$, 滤波电容采用 2 个 2200UF/25V 电解电容并联, 正负电源共用 4 个 2200UF/25V 的电容, 两个 104 的独石电容是高频滤波电容, 有利于放大器的音质。

(三) LM1875 的电路特点

LM1875 功率较 TDA2030 及 TDA2009 都为大, 电压范围为 $16 \sim 60V$ 。不失真功率为 20W (THD=0.08%), THD=1%时, 功率可达 40W (人耳对 THD<10%一下的失真没什么明显的感觉), 保护功能完善。笔者是一个不错的选择。其接法同 TDA2030 相似, 也有单双电源两种接法。

LM1875 是美国国家半导体器件公司生产的音频功放电路, 采用 V 型 5 脚单列直插式塑料封装结构。该集成电路在 $\pm 25V$ 电源电压 $R_L=4 \Omega$ 可获得 20W 的输出功率, 在 $\pm 30V$ 电源 8Ω 负载获得 30W 的功率, 内置有多种保护电路。广泛应用于汽车立体声收录音机、中功率音响设备, 具有体积小、输出功率大、失真小等特点。

电路特点:

- (1) 单列 5 脚直插塑料封装, 仅 5 只引脚。
- (2) 开环增益可达 90dB。
- (3) 极低的失真, 1kHz, 20W 时失真仅为 0.015%。
- (4) AC 和 DC 短路保护电路。
- (5) 超温保护电路。
- (6) 峰值电流高达 4A
- (7) 极宽的工作电压范围 ($16 \sim 60V$)。

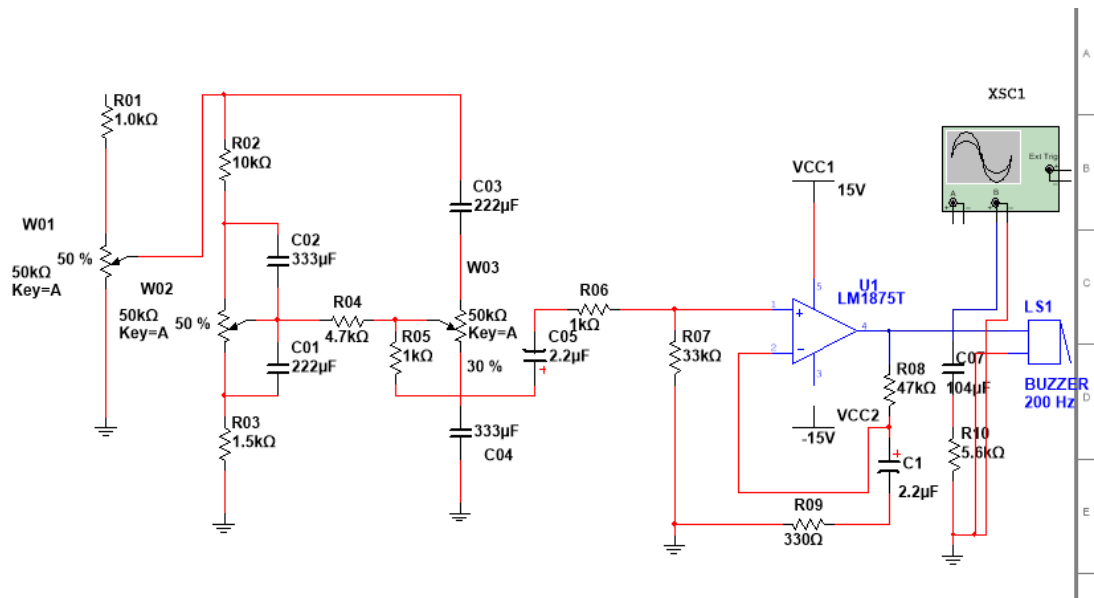
- (8) 内置输出保护二极管。
- (9) 外接元件非常少，TO-220 封装。
- (10) 输出功率大， $P_o=20W$ ($R_L=4\Omega$)。

电路设计

(一) 典型应用电路

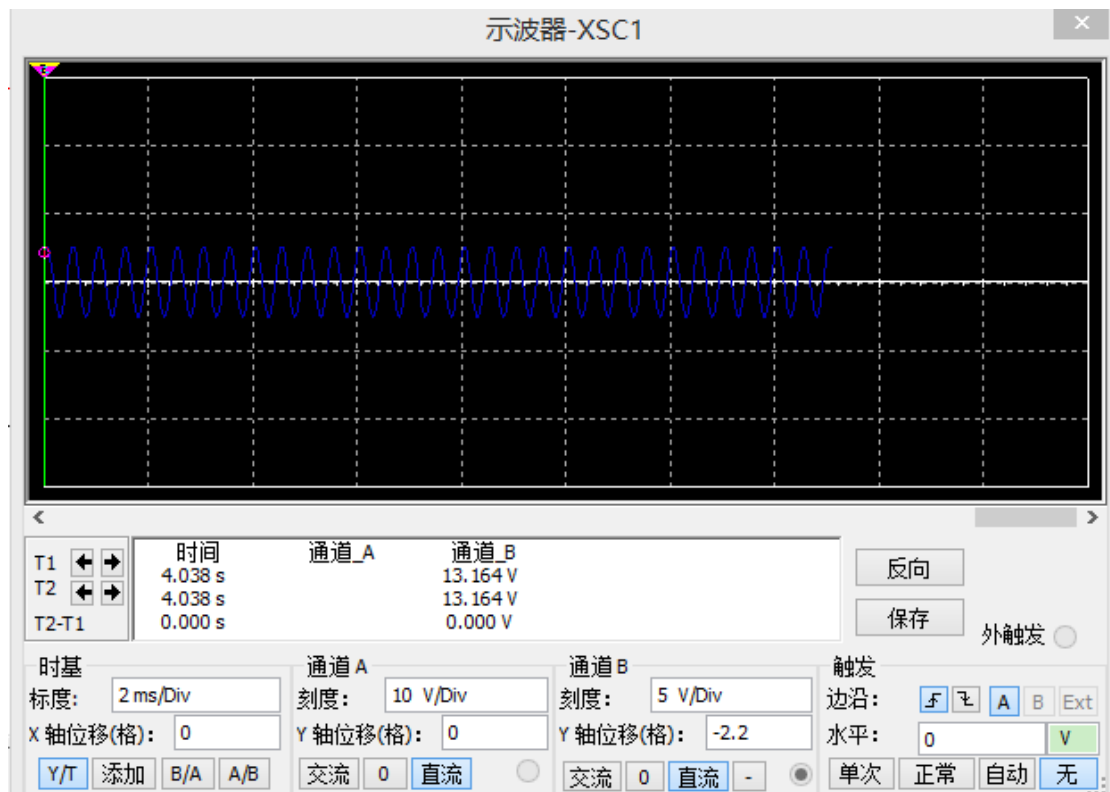
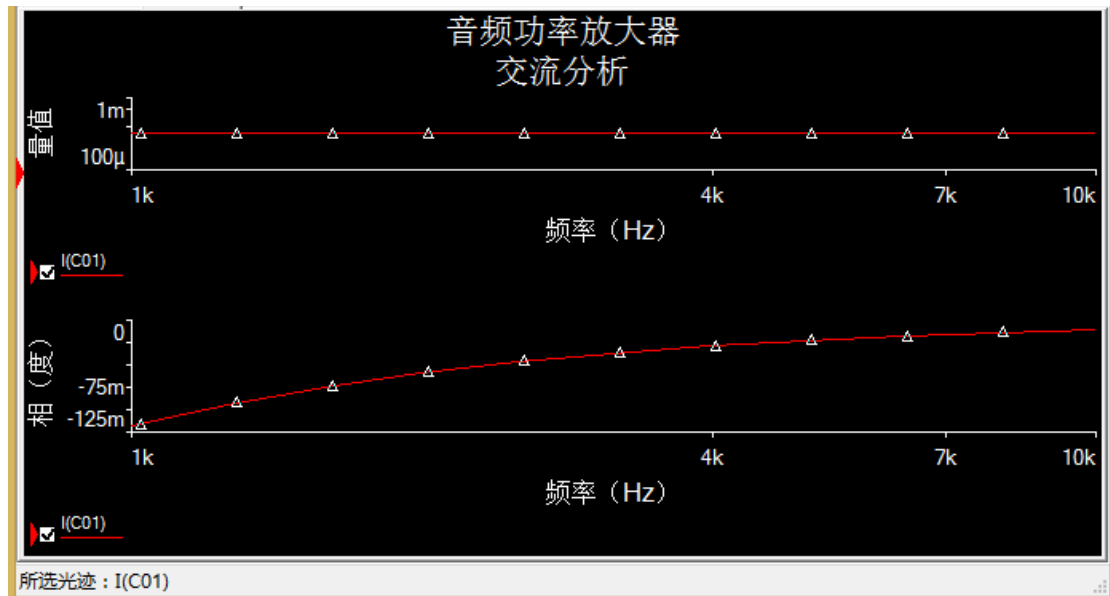
音频功率放大器的典型应用电路分为两种：一种为单电源供电，另一种为双电源供电。本课题中，我们希望能对音频放大器的音量和音频进行调节，即得到更理想更直观的设计，在此次设计中采用双电源供电的方法。

(二) 双电源音频功率放大器原理图



图：双电源音频功率放大器原理图

仿真情况：



3. Conclusion

此次项目是通信电子电路重要的一步。从最初的选择方向，准备着手到完成仿真制作与论文。其间，查找资料，与同学交流，反复修改，每一个过程都是对自己能力的一次检验和充实。通过这次实践，我了解了音频功率放大器用途及工作原理，熟悉了音频功率放大器的设计步骤，锻炼了设计实践能力，培养了自己独立设计和团队协作能力。此次项目实践是对我专业知识和专业基础知识一次

实际检验和巩固，收获很多，比如学会了查找相关资料相关标准，分析数据，提高了自己的制作能力。

但是课程项目实践过程中也暴露出自己专业基础的很多不足之处。比如缺乏综合应用专业知识的能力，对材料的不了解等等。

4. Acknowledge

本设计是在郑老师的精心指导和鼓励下完成的。郑老师深厚扎实的学识，严谨的学风和真诚谦逊的品质，使我们在这次项目过程中受益匪浅。在此，谨向陈老师表示衷心的感谢！

感谢所有支持和帮助过我的同学和老师！

此外，我还要感谢在我的论文中所有被援引过的文献的作者们，他们是我的知识之源！

最后，再次向所有给予我帮助和鼓励的同学和老师致以最诚挚的谢意！

References

- [1] 曾广兴：《现代音响技术应用》，广东科技出版社
- [2] 张 平：《关于音频功率放大器的应用》
- [3] 龚 伟：《音频放大器控制方式综述》，重庆大学学报
- [4] 华成英：《模拟电子技术基础》
- [5] 姚福安：《音频功率放大器设计》，山东大学学报
- [6] 牟小令：《高效率音频功率放大器》，西南师范大学学报
- [7] 方佩敏：《音频功率放大器》，《电子世界》
- [8] 康华光：《模拟电子技术基础》高等教育出版社.
- [9] 牟小令：《高效率音频功率放大器》，西南师范大学学报