

项目 3

高保真耳机功放

本项目通过高保真的耳机功率放大器的制作过程,在介绍了如何解决输出功率、效率和非线性失真三者之间矛盾的基础上,重点对甲乙类互补对称功率放大电路的组成、分析计算和功率 BJT 的选择进行了阐述。有关差模信号、共模信号、差模增益、共模增益和共模抑制比等概念都是在讨论功率放大问题之前必须清楚的基本概念。

3.1 任务:高保真的耳机功率放大器的制作

3.1.1 任务概述

利用集成功放制作一个高保真的耳机功率放大器。

3.1.2 目标分解

完成高保真的耳机功率放大器制作的任务可分解为以下步骤。

- (1) 了解差模信号、共模信号、差模增益、共模增益和共模抑制比的基本概念。
- (2) 了解差分放大电路的组成以及抑制零点漂移的基本原理。
- (3) 熟练掌握甲乙类互补对称功率放大电路的组成、分析计算方法。
- (4) 完成高保真耳机功放的制作和调试。

3.1.3 主要元件与仪器的准备

- (1) 集成功率放大器;
- (2) 扬声器(喇叭);
- (3) 数字万用表;
- (4) 电位器、电阻和电容等。

3.1.4 知识准备

1. 家用功放简介

功率放大器简称功放,可以说是各类音响器材中最大的一个家族了,其作用主要是将

音源器材输入的较微弱信号进行放大后,以产生足够大的电流去推动扬声器进行声音的重放。由于考虑功率、阻抗、失真、动态以及不同的使用范围和控制调节功能,不同的功放在内部的信号处理、线路设计和生产工艺上也各不相同。

以其主要用途来说,功放可以分做两大类别,即专业功放与家用功放。在体育馆场、影剧场、歌舞厅、会议厅或其他公共场所扩声,以及录音监听等场所使用的功放,在其技术参数上往往会有一些独特的要求,这类功放通常称为专业功放。而用于家庭的 Hi-Fi 音乐欣赏,AV 系统放音,以及卡拉 OK 娱乐的功放,通常称为家用功放。

1) 按器材分类:电子管/晶体/集成电路功放

按电路所用的器材分类,功放可以分为电子管放大器、晶体管放大器和集成电路放大器。

电子管放大器(俗称“胆机”)采用电子管作为放大器,其主要优点是动态范围大、线性好、音色甜美悦耳。但电子管功放也存在两个问题,一是内阻大导致放大器阻尼系数小,影响瞬态特性,二是电子管需高压供电,离不开变压器,而变压器不仅功耗大、体积大,还会导致失真。

晶体管放大器阻尼系数可做得很高,有良好的瞬态特性,在声音的节奏感、力度上要比胆机明快、爽朗、有力;而且无需变压器,不仅节省成本,缩小体积,而且避免了由变压器所引起的失真。

最后一种是集成电路放大器,它最突出的优点是可靠性高、外围电路简单、组装方便,不足之处是电声指标(功率、频响、失真度、信噪比等)和音质皆不如前两类放大器。

2) 按功能分类:前级/后级/合并式功放

按照功能可以分为前级功放、后级功放和合并式功放。

前级功放主要作用是对信号源传输过来的节目信号进行必要的处理和电压放大后,再输出到后级功放。它就像铁路岔道一样,控制切换哪一路音源信号接入功放,哪一路音源信号与功放断开。

后级功放是进行单纯功率放大的部分,它的作用就是尽可能原原本本地放大来自于前级的信号,对后级的要求是,放大倍数尽可能高,而放大后信号的失真程度应尽可能低。除放大电路外,还设计有各种保护电路,如短路保护、过压保护、过热保护、过流保护等。这两类功放一般只在高档机采用。

合并式放大器,将前级放大器和后级放大器合并为一台功放,兼有前两者的功能,通常所说的放大器都是合并式的,应用的范围较广。一般来看,合并式功放的功率较前、后级功放小,重放的效果也比前、后级功放差,但合并式功放价钱较便宜,且使用方便,完全能够满足一般的家庭需要。

3) 按用途分类:Hi-Fi 功放/AV 功放

就功放的用途来区分,家用功放可分为 Hi-Fi 功放和 AV 功放。

Hi-Fi 是英语 High-Fidelity 的缩写,意指高度保真,即纯音乐功放,是音乐发烧友的最爱。Hi-Fi 功放的输出功率大都在 $2 \times 150\text{W}$ 以下。Hi-Fi 在设计上强调最低的信号失真,忠实地表现出音乐的场面、细节和演奏、录制的技巧等来满足人们对音乐的最佳欣赏要求。一般用于 Hi-Fi 的功放都是胆机。Hi-Fi 功放就扩声形式而言,只适用于两声道立

体声的重播。

2. 功率放大电路

大家都见过音响设备,为什么光盘检出的微弱信号,能从音箱中发出洪亮的声音呢?这里有功率放大器的作用。在选音响设备时,一般注意3个问题:声音大、省电、高保真。所以,功率放大器的功能特点有以下3个。

- ① 输出功率大。
- ② 效率高。
- ③ 不失真。

功率放大电路在多级放大电路中处于最后一级,又称输出级。其主要作用是输出足够大的功率去驱动负载,如扬声器、伺服电机、指示表头、记录器等。功率放大电路要求:输出电压和输出电流的幅度都比较大;效率高。因此,三极管工作在大电压、大电流状态,管子的损耗功率大,发热严重,必须选用大功率三极管,且要加装符合规定要求的散热装置。

图 3-1 是由 TDA2030 构成的功放电路。

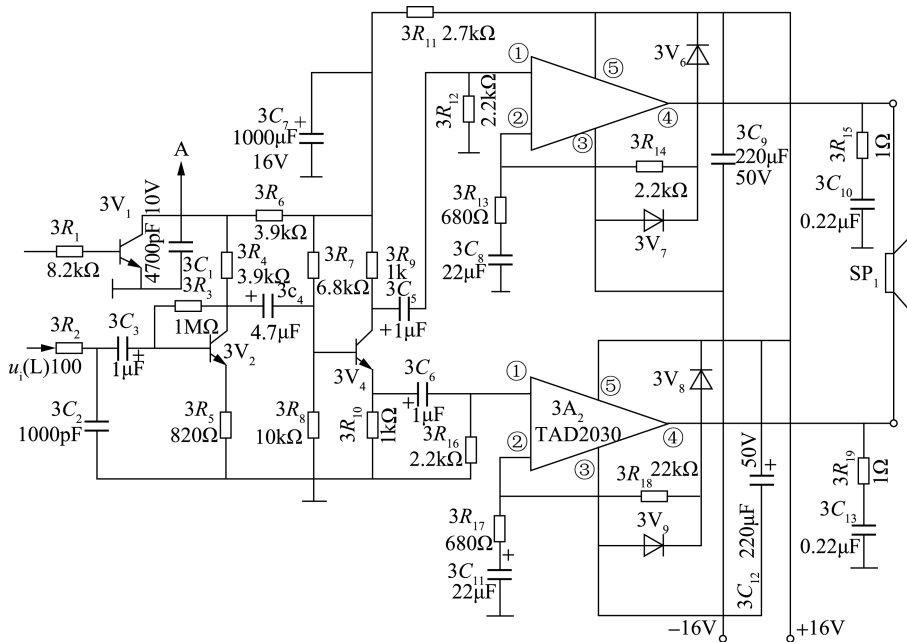


图 3-1 由 TDA2030 构成的功放电路

这里采用的 TDA2030 集成功放只有 5 只管脚,它接线简单,既可以接成 OCL 电路,又可以接成 OTL 电路,广泛应用于音响设备中。其内部设有短路保护电路,具有过热保护能力。主要参数为电源 6~18V、输出功率 9W、输入阻抗 5MΩ、电压增益 30dB、谐波失真 0.2%。

功放电路是如何工作的呢?下面还是先从分立元件构成的功放电路来研究。

1) 功率放大电路的基本构成

低频功率放大器根据静态工作点的不同,可分为甲类、乙类和甲乙类功率放大器,如图3-2所示。甲类功率放大器和乙类功率放大器最大的不同在于它们的偏置电路所提供的偏置电压不同。甲类功率放大器具有很高的偏置电压,而乙类功率放大器则是没有偏置电压的。由于这个不同,造成的后果是甲类功率放大器对声音信号放大时的失真小,声音质量较好,但对电源消耗很大,效率很低;而乙类功率放大器则正好相反,它的失真比较大,但效率很高。

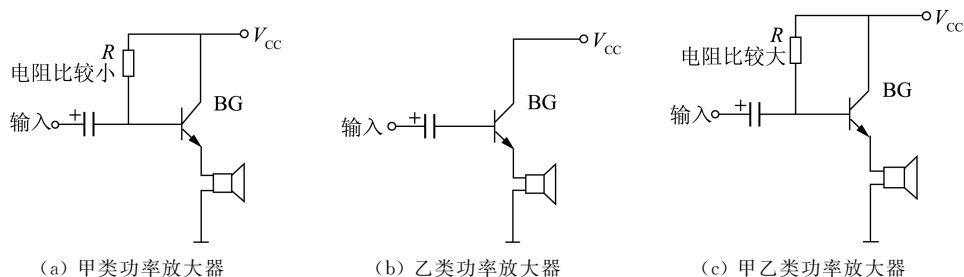
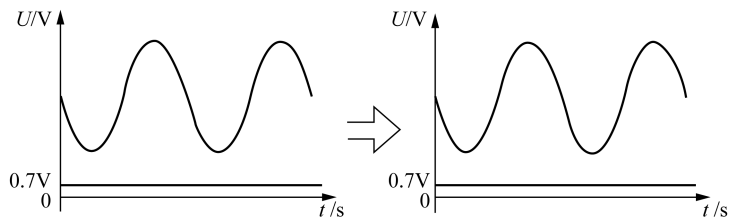
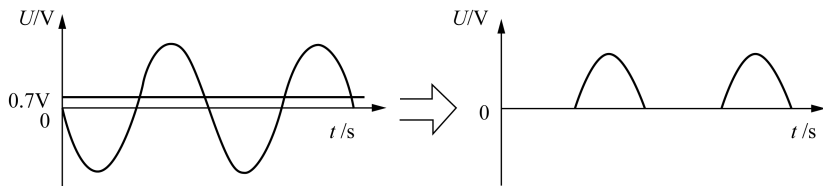


图3-2 放大器的3种分类

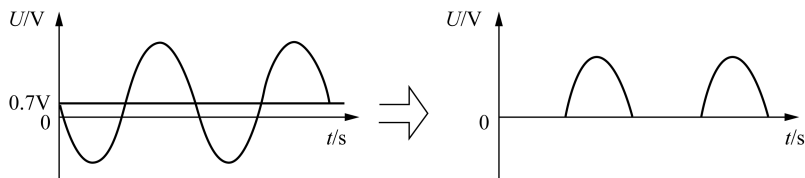
甲类放大电路的偏置比较大,将输入信号抬高到远远高于三极管的死区电压(0.7V),因此所有的信号都能通过三极管进行放大,并且失真很小,输出波形与输入波形一致,见图3-3(a)。



(a) 甲类电路的输入和输出波形



(b) 乙类电路的输入和输出波形



(c) 甲乙类电路的输入和输出波形

图3-3 放大器3种分类的波形

乙类放大电路没有偏置,输入信号的正半周仍有一部分位于三极管的死区电压(0.7V)内,于是,输入信号中只有正半周的一部分能通过三极管进行放大,失真很大,输出波形下部比较差,见图 3-3(b)。

甲乙类放大电路的偏置很小,输入信号的正半周刚好不在三极管的死区电压(0.7V)内,于是,输入信号中的正半周部分刚好都能通过三极管进行放大,输出的虽然只有一半的波形,但这一半的失真比较小,见图 3-3(c)。

为了能在提高效率的同时又兼顾到失真不太大,大多采用的是甲乙类功率放大电路,这种电路具有很小的偏置电压,使三极管处于轻微的导通状态。

甲乙类功放电路是最为常用的功率放大电路,从图 3-3 中可以看出,由于三极管的基极只具有极小的偏置,所以输入的信号中只有正极性的波形(正半周)才会被很好地放大,而负极性的波形(负半周)的大部分就不能通过三极管了,因而在三极管的输出信号中,负半周的信号就没有了,这样的电路是不能胜任放大工作的。为了解决这个问题,就得想想办法了。

如果用两个甲乙类功放电路,一个放大信号的正半周,另一个放大信号的负半周,然后再将放大后的信号合并起来,就可以拼出一个完整的信号了。但这样做的前提是必须有一个能放大正半周的甲乙类功放电路和一个能放大负半周的甲乙类功放电路,能放大正半周的电路已经有了,而将这个电路的三极管改成 PNP 管就可以成为一个能放大负半周的甲乙类功放电路了,如图 3-4(a)所示,这样的电路叫做互补对称电路。但这个 PNP 管的功放电路所使用的电源须是一个负电源,因此要将两个电路合并在一起,就必须提供一个正电源和一个负电源,而且使两个电源的中点为地,两只三极管的发射极输出的信号经喇叭接地。

这个电路的三极管偏置电路是不变的,为了更为方便地提供一个能使三极管处于微导通的电压,可以用一个二极管代替下偏置电阻 R_2 和 R_3 。如图 3-4(b)所示,二极管产生的 0.7V 的管压降正好可以使三极管的基极对发射极处于一个微导通的状态,并且二极管在导通时是不会对输入的信号带来太大的损失,这一点也比用电阻作下偏置要好。

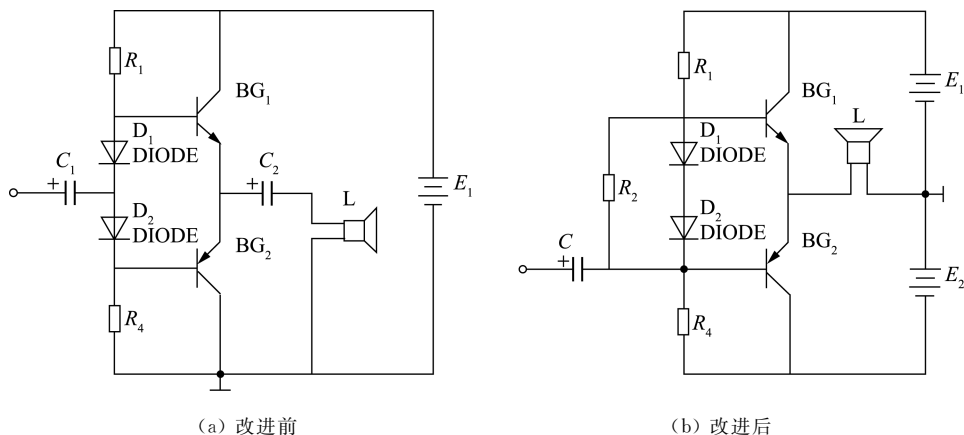


图 3-4 互补对称电路

两个下偏置电阻都是接地的,这个地方可以不接,叫悬空地,但是这样的电路会有一个很大的危险:如果这两个三极管基极间的电路出现开路,哪怕是一瞬间,就有可能将两个三极管都烧毁,因为这个电路是两个三极管共同的下偏置,只要一开路,两只三极管的基极就会全部接受从上偏置电阻过来的电流,这个电流是不会太小的,而三极管的集电极就会出现被放大的基极电流,这么一个大电流流过两只三极管的集电极(相当于用两只三极管将电源短路),三极管就会在一瞬间变成废品。因而在这类电路中,往往在这个偏置电路上有一些保护措施,如并联一个电阻等。

甲乙类功放电路是最为常用的功率放大电路,甲乙类放大电路的偏置很小,输入信号的正半周刚好不在三极管的死区电压(0.7V)内,于是输入信号中的正半周部分刚好都能通过三极管进行放大。用两个甲乙类功放电路,一个放大信号的正半周,另一个放大信号的负半周,然后再将放大后的信号合并起来,就可以拼出一个完整的信号。

2) 互补对称功率放大电路

在实用中采用的互补对称功率放大电路分 OCL 互补对称功率放大电路和 OTL 互补对称功率放大电路两种。

(1) OCL 互补对称功率放大电路。OCL 互补对称功率放大电路全称为无输出电容的互补对称功率放大电路,简称为 OCL 电路,电路如图 3-5 所示, V_2 、 V_3 是特性相同的两只对管,当其中一只损坏时要求用两只对管同时替换它们,否则将继续损坏或不能正常工作; V_1 是共发射极前置放大电路,作为 V_2 、 V_3 的推动级; V_4 、 V_5 为 V_2 、 V_3 提供接近横轴的静态工作点,使 V_2 、 V_3 处于微导通状态; R_P 为 V_2 、 V_3 的偏置电阻,同时兼作 V_1 的集电极负载电阻; $+U_{CC1}$ 、 $-U_{CC2}$ 为双电源,通常两电源电压相等,即 $U_{CC1}=U_{CC2}=U_{CC}$ 。

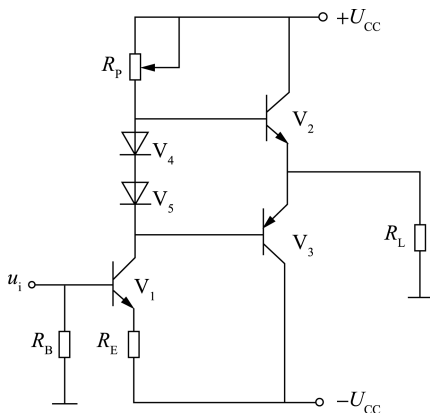


图 3-5 OCL 功率放大电路

① 静态分析。当 $u_i=0$ 时,因电路上下对称,静态发射极电位 $U_E=0$,负载电阻 R_L 中无电流通过, $u_o=0$ 。而且因三极管处于微导通状态,所以两管的 $I_B \approx 0$, $I_C \approx 0$, $|U_{CE}| = |U_{CC}|$,基本无静态功耗。

② 动态分析。为便于分析,将图 3-5 简化为图 3-6(a)所示的原理电路,且暂不考虑管子的饱和管压降 U_{CES} 和 b、e 极间导通电压 U_{BE} 。

设输入信号为正弦电压 u_i ,如图 3-6(b)所示。在 u_i 正半周, V_2 发射结承受正向电压,

V_3 发射结承受反向电压,故 V_2 导通、 V_3 截止, $+U_{CC}$ 通过 V_2 向 R_L 供电,在 R_L 上获得跟随 u_i 的正半周信号电压 u_o ,即($u_o \approx u_i$);在 u_i 负半周, V_2 承受反向电压, V_3 承受正向电压,故 V_2 截止, V_3 导通, $-U_{CC}$ 通过 V_3 向 R_L 供电,在 R_L 上获得跟随 u_i 的负半周信号电压 u_o 。这样通过两只管子轮流导通在负载 R_L 上获得了完整的正弦波信号电压,如图 3-6(c) 所示。

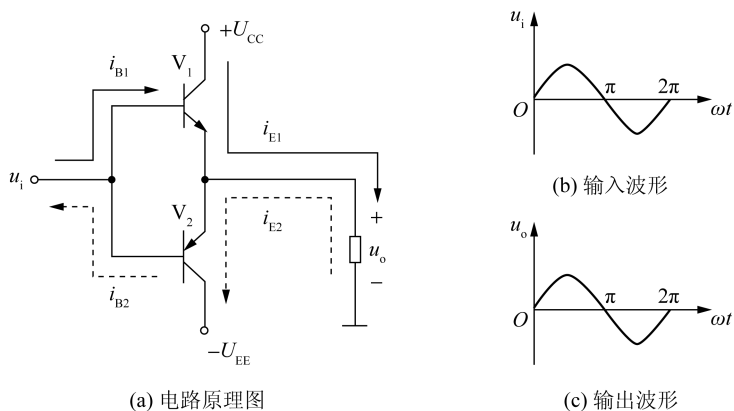


图 3-6 简化 OCL 功率放大电路

由上分析可知,输出电压 u_o 虽未被放大,但由于 $i_L = i_e = (1 + \beta) i_b$,具有电流放大作用,因此具有功率放大作用。

图 3-7 所示为两管信号电流 i_{C1} 、 i_{C2} 的波形及合成后的 u_{CE} 波形。从图中可知, $u_{CE1} = U_{CC} - u_o$, $u_{CE2} = -U_{CC} - u_o$,其中 u_o 在任一个半周期内为导通三极管的 u_{ce} ,即 $u_o = -u_{ce} = u_i$ 。通常要求功率放大电路工作在最大输出状态,输出电压幅值为 $u_{om(max)} = U_{CC} - U_{CES} \approx U_{CC}$,此时,截止管承受的最大电压为 $2U_{CC}$ 。当功率放大电路工作在非最大输出状态时,输出电压幅值为 $U_{om} = I_{om} R_L = U_{cem} = U_{im}$,其大小随输入信号幅度而变。这些参数间的关系是计算输出功率和管耗的重要依据。

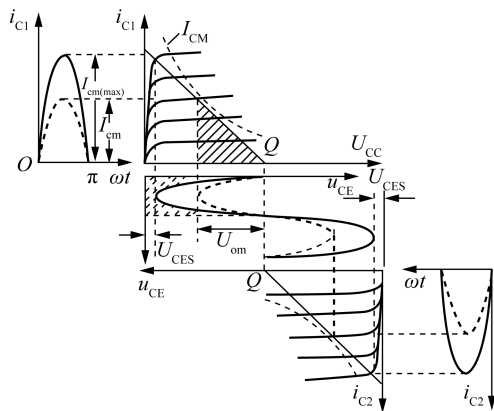


图 3-7 OCL 电路图解分析波形图

③ 参数计算。

a. 最大输出功率 P_{om} 。功率放大电路最大输出功率取决于电源电压 U_{CC} 和三极管极限参数 I_{CM} 、 P_{CM} 。在满足极限参数要求的情况下,由动态分析可知,最大的输出功率为

$$P_{om} = \frac{1}{2} I_{om} U_{om} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{CC}^2}{R_L} \quad (3-1)$$

当功率放大器工作在非最大输出状态时,输出功率为

$$P_o = \frac{1}{2} I_{om} U_{om} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{om}^2}{R_L} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{im}^2}{R_L} \quad (3-2)$$

b. 直流电源供给的功率 P_U 。在 OCL 电路中,静态时,电源无功率输出,即静态管耗为零。有信号输入时,两管轮流工作,两电源交替提供脉动电流 i_{C1} 和 i_{C2} ,因此两个直流电源提供的功率取决于这两个电流的平均值。在一个周期内电源向两个功放管提供的直流功率 P_U 为

$$P_U = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{om}}{R_L} U_{CC} \quad (3-3)$$

由式(3-3)可知,当负载一定时,直流电源提供的功率与输出电压成正比。当功率放大器工作在最大输出状态时,两个直流电源供给的总功率为

$$P_{Um} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_{CC}^2}{R_L} \quad (3-4)$$

c. 效率 η 。功率放大电路的效率 η 定义为输出功率 P_o 与直流电源供给功率 P_U 的比值,即

$$\eta = \frac{P_o}{P_U} \times 100\% \quad (3-5)$$

当功率放大电路工作在最大输出状态时,效率为

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_{Um}} = \frac{\frac{U_{CC}^2}{2R_L}}{\frac{2U_{CC}^2}{\pi R_L}} \times 100\% = \frac{\pi}{4} \times 100\% = 78.5\% \quad (3-6)$$

在实用中三极管 U_{CES} 、 U_{BE} 等是客观存在的,因此功率放大电路实际效率约为 60%。

d. 三极管管耗 P_V 。直流电源供给的功率与输出功率的差值,即为两只三极管上的管耗,所以每只管子的管耗为

$$P_V = \frac{1}{2} (P_U - P_o) \quad (3-7)$$

功率放大电路工作在最大输出状态时的管耗,并不是最大管耗,每只三极管的最大管耗约为 $0.2P_{om}$,这一点知道即可。

e. 交越失真。由于静态时 $I_B = 0$,而图 3-6 中三极管 V_2 、 V_3 的发射结存在一个“死区”,所以当输入信号为正弦波时,基极电流不是完全按正弦规律变化的电流。该电流经放大后,负载电流在正、负半周交替的地方出现了如图 3-8 所示的失真,这种失真称为交越失真。

解决交越失真的办法是为三极管 V_2 、 V_3 提供一个合适的静态工作点,使三极管处于微导通状态,如图 3-5 中的 V_4 、 V_5 。

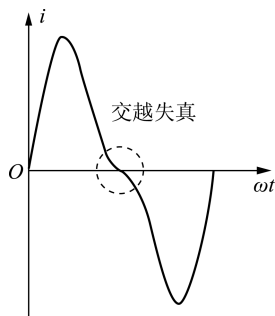


图 3-8 交越失真波形

④ OCL 电路特点。采用双电源供电方式,输出端直流电位为零,负载(如扬声器)一端接地,一端直接与放大器输出端连接,因此须设置保护电路,最大输出电压振幅为正负电源值,额定输出功率约为 $U_{CC}^2/(2R_L)$ 。

(2) OTL 互补对称功率放大电路。OTL 互补对称功率放大电路全称为无输出变压器的功率放大电路,简称为 OTL 电路,如图 3-9 所示。

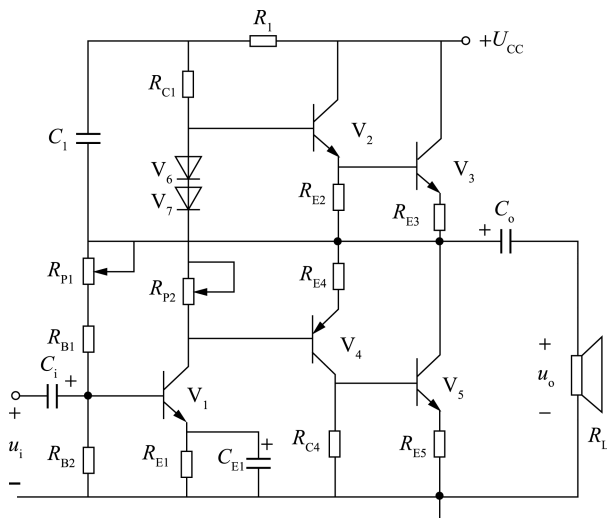


图 3-9 OTL 功率放大电路

① 各元件作用。 V_1 为共发射极前置放大级,为功放管提供推动电压; R_{P1} 、 R_{B1} 、 R_{B2} 为 V_1 的置偏电路,调节 R_{P1} 可改变 V_1 的静态工作点,同时还可使 $U_K = 1/2U_{CC}$; V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 为两只复合三极管,分别等效为 NPN 和 PNP 型。复合管的总电流放大系数为两只管子电流放大系数的乘积,连接的原则是按两管电流前后流向一致的规律连接,等效管型取决于前一只管子的管型。采用复合管可降低配对的 NPN 型和 PNP 型三极管(如 V_2 、 V_4)的要求; V_6 、 V_7 、 R_{P2} 为 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 提供合适的静态工作点,调节 R_{P2} 可以改变静态工作点; C_O 为输出耦合电容,一方面将放大后的交流信号耦合给负载 R_L ,另一方面作为 V_4 、 V_5 导通时的直流电源,因此要求容量大,稳定性高。

② 工作原理。当输入信号 u_i 为负半周时, V_1 集电极信号为正半周, V_2 、 V_3 导通, V_4 、 V_5 截止,并在信号电流流向负载 R_L 形成正半周输出的同时,向 C_O 充电,使 $U_{C_O} = 1/2U_{CC}$; 在 u_i 正半周时, V_1 集电极信号为负半周, V_2 、 V_3 截止, V_4 、 V_5 导通。此时, C_O 上的 $1/2U_{CC}$ 与 V_4 、 V_5 形成放电回路,若时间常数 $R_L C$ 远大于输入信号的半周期,则电容上电压基本不变,而流过管子和负载的电流仍由基极控制,这样在负载上将获得负半周输出信号,于是在负载上将获得完整的正弦信号输出。输出的最大幅度接近 $1/2U_{CC}$ 。

③ 参数计算。OTL 电路与 OCL 电路相比,每个功放管实际工作电源电压为 $1/2U_{CC}$,因此将式(3-1)~式(3-7)中 U_{CC} 用 $1/2U_{CC}$ 替换即得相应的参数计算公式。

【例 3-1】 在图 3-10 所示电路中,已知: $R_{B1} = 22k\Omega$, $R_{B2} = 47k\Omega$, $R_{E1} = 24\Omega$, $R_{E2} = R_{E3} = 0.5\Omega$, $R_1 = 240\Omega$, $R_P = 470\Omega$, $R_L = 8\Omega$, V_2 为 3DD01A, V_3 为 3CD10A, V_4 、 V_5 为

2CP。试求：

- a. 最大输出功率。
- b. 当负载 R_L 上的电流为 $i_L = 0.8\sin\omega t(\text{A})$ 时的输出功率和输出电压幅值。

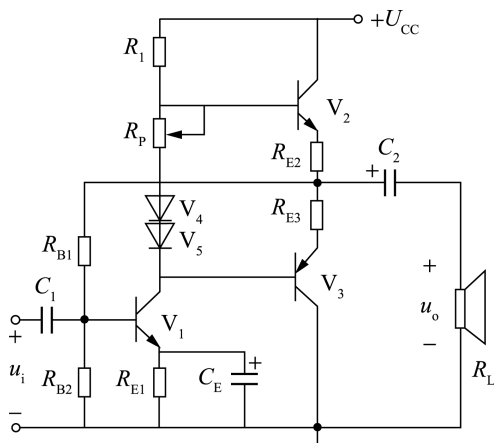


图 3-10 例 3-1 的电路图

解：

- a. 最大输出功率为

$$P_{om} = \frac{1}{2} \times \frac{\left(\frac{1}{2}U_{CC}\right)^2}{R_L} = \frac{1}{2} \times \frac{12^2}{8} = 9(\text{W})$$

- b. 输出功率为

$$P_o = \frac{1}{2} \times 0.8^2 \times 8 = 2.56(\text{W})$$

输出电压幅值为

$$U_{om} = 0.8 \times 8 = 6.4(\text{V})$$

④ OTL 电路的主要特点。采用单电源供电方式,输出端直流电压为电源电压的一半,输出端与负载之间采用大容量电容耦合,负载一端接地,最大输出电压的振幅为电源电压的一半,即 $1/2U_{CC}$,额定输出功率约为 $U_{CC}^2/(8R_L)$ 。输出端的耦合电容对频响也有一定影响。

3. 集成功率放大器

集成功率放大器是将整个功率放大电路的各种元件都制作在同一块半导体芯片上,一些容量大的电容器和功率大的电阻可以通过引出脚外接。使用集成功放后,可使整机电路简单,组装调试工作量变少,而且降低了成本,提高了整个电路的性能,所以在实际工作中得到广泛应用。

音频集成功率放大器的种类很多,有 XG 系列、SL 系列、TDA 系列等。它们的封装也有多种形式,如单列直插式、双列直插式、双列扁平式等。下面简单介绍目前收录机、音响设备中广泛应用的几种常用的音频功率放大器。

1) SL 4112

SL 4112 的外形及管脚如图 3-11 所示。该集成功放有 14 只管脚,内部设有静噪抑制电路,因而在接通电源时爆破噪声很小。它具有电源电压范围宽、降压特性良好等优点,适用于各种收录机。主要参数为电源 9V、输出功率 2.3W、输入阻抗 $20\text{k}\Omega$ 、电压增益 68dB、谐波失真 2%。

SL 4112 典型应用电路如图 3-12 所示。图中 C_1 、 C_2 主要消除高频,防止产生寄生振荡。 C_4 用于电源滤波,如用稳压电源供电, C_4 应选择大一些;如用电池供电, C_4 可适当小一些。 C_3 为自举电容,如无此电容,输出波形将出现半波削波失真,此电容选得大一些,可减小电源接通时的爆破噪声。 C_5 、 R_F 构成反馈,它决定了电路的闭环增益, R_F 增大,增益下降。 C_6 宜选用频率特性和温度特性良好的聚酯薄膜电容。

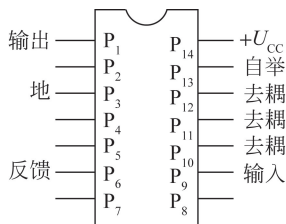


图 3-11 SL 4112 引脚图

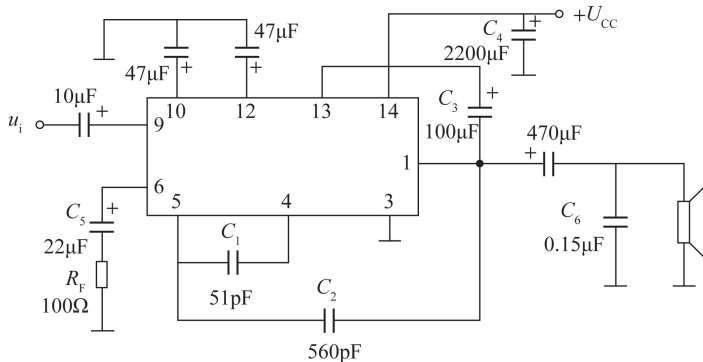


图 3-12 SL 4112 应用电路

2) 双音频集成功率放大器

双音频集成功率放大器也有多种类型和多种封装形式,下面主要以松下半导体集团生产的 LM 系列和飞利浦公司生产的 TDA 系列双音频集成功放为例,简单介绍它们的应用。

(1) BTL 电路。在集成功放的基础上,近年来发展起一种 BTL 功率放大器(又称桥接推挽式放大器),其主要特点是在同样电源电压和负载电阻条件下,它可得到比 OCL 或 OTL 电路大几倍的输出功率,其工作原理图如图 3-13 所示。

图 3-13 中,4 只功放管 $V_1 \sim V_4$ 组成桥式电路。在静态时,电桥平衡,负载 R_L 中无直流电流。在动态时,桥臂对管轮流导通。在 u_i 正半周,上正下负, V_1 、 V_4 导通, V_2 、 V_3 截止,流过负载 R_L 的电流如图中实线所示;在 u_i 负半周,上负下正, V_1 、 V_4 截止, V_2 、 V_3 导通,流过负载 R_L 的电流如图中虚线所示。忽略饱和压降,则两个半周合成后,在负载上可得到幅度为 U_{CC} 的输出信号电压。

由上分析可知,在相同电源电压下,BTL 电路中流过负载的电流与 OCL 电路相比,增大了一倍,因而它的最大输出功率为 OCL 电路的 4 倍,大大提高了输出功率。