

电子信息类创新系列教材

模拟功放电路设计与制作

主 编：贺贵腾

副主编：乔瑞杰 李良钰 唐池连

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社

模拟功放电路设计与制作

主 编 贺贵腾

副主编 乔瑞杰 李良钰 唐池连

天津出版传媒集团

 天津科学技术出版社


图书在版编目（CIP）数据

模拟功放电路设计与制作 / 贺贵腾主编. —天津：
天津科学技术出版社，2018.6
ISBN 978-7-5576-5521-1

I. ①模… II. ①贺… III. ①音频放大器—电子电路—
电路设计②音频放大器—电子电路—制作 IV.
①TN722

中国版本图书馆CIP数据核字（2018）第160766号

责任编辑：李荔薇
责任印制：王莹

天津出版传媒集团 出版
天津科学技术出版社

出版人：蔡颢
天津市西康路35号 邮编300051
电话（022）23332390
网址：www.tjkjcb.com.cn
新华书店经销
天津午阳印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9 字数 215 000
2018年6月第1版第1次印刷
定价：39.00元

编写说明

本书是根据《高等职业学校专业教学标准》编写的，用于电子信息类专业《模拟功放电路设计与制作》课程的教学。

本书紧紧围绕职业教育的特点，注重“做中学、做中教”，重视理论实践一体化教学，采用项目驱动、任务引领、实践导向的职业教育课程构建模式。全书共有两个教学项目：分立元件模拟功放设计与制作，TDA2040 功放电路设计与制作。每个教学项目以原理图设计，PCB 板设计与制作，电路装配，静态检测，性能指标测试，相关理论知识为任务主线，以经典的音频功放电路为实例，引导学生通过制作活动，掌握制作音频功率放大器过程中的基础理论知识，培养学生的电子产品装配能力、电路 PCB 设计能力和电子产品调试与测试能力，这三种能力也是电子产品生产企业的基本岗位能力。根据教育部 16 号文件中“大力推行工学结合，突出实践能力培养，改革人才培养方案”的精神，本着“为家电、音响和灯具三大电类主导产业培养产品设计开发、生产制造、技术管理的技能型人才”的专业基本定位，对电子信息技术专业的人才培养方案、课程体系和课程标准进行了较大的改革。根据三大电类主导产业所对应岗位的技能要求，开设了《模拟功放电路设计与制作》这门专业核心课。本教材在课程体系和课程标准改革的驱动下逐渐完善。

本书由中山职业技术学院贺贵腾、李良钰、唐池连老师，中山市中等专业学校乔瑞杰老师合作编写。

本书可以作为高职高专、中专学校、技工学校、职业培训学校的电子类专业的音响技术课程教材，也可作为初级音响爱好者及音响发烧友的参考用书。

由于编者的水平有限，教材中的错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2017 年 7 月

目 录

| | |
|--|-----|
| 项目一 分立元件模拟功放设计与制作 | 1 |
| 任务 1 分立元件模拟功放典型电路分析 | 1 |
| 任务 2 分立元件模拟功放原理图及 PCB 图设计与制作 | 9 |
| 任务 3 分立元件模拟功放 PCB 板的制作 | 27 |
| 任务 4 分立元件模拟功放 PCB 板的装配 | 36 |
| 任务 5 分立元件模拟功放电路检测 | 42 |
| 任务 6 分立元件模拟功放电路通电前的测试 | 46 |
| 任务 7 分立元件模拟功放电路的静态检测 | 49 |
| 任务 8 分立元件模拟功放性能指标的测试 | 53 |
| 任务 9 基本理论知识 | 59 |
| 项目二 TDA2040 功放电路设计与制作 | 80 |
| 任务 1 TDA2040 功放电路分析 | 80 |
| 任务 2 TDA2040 功放电路原理图及 PCB 图设计与制作 | 87 |
| 任务 3 TDA2040 功放电路元器件清单与检测 | 100 |
| 任务 4 TDA2040 功放电路 PCB 板的装配 | 102 |
| 任务 5 TDA2040 功放电路检测 | 104 |
| 任务 6 TDA2040 功放电路故障的检修训练 | 107 |
| 任务 7 TDA2040 功放电路通电前的测试 | 113 |
| 任务 8 TDA2040 功放电路通电后的测试 | 118 |
| 任务 9 TDA2040 功放电路关键点波形测量训练 | 120 |
| 任务 10 TDA2040 功放电路性能指标测试训练 | 121 |
| 参考文献 | 137 |

项目一 分立元件模拟功放设计与制作

任务 1 分立元件模拟功放典型电路分析

一、任务要求

- ①熟悉三极管的基本特性和使用方法。
- ②掌握三极管等关键元件的测试方法。
- ③熟悉 OTL 功放和 OCL 功放的基本工作原理和电路形式。
- ④熟悉组成分立元件模拟功放电路的单元电路和各单元电路的工作原理。
- ⑤熟悉分立元件模拟功放电路的工作原理。

二、典型电路原理图

典型单声道功放电路原理图如图 1-1-1 所示：

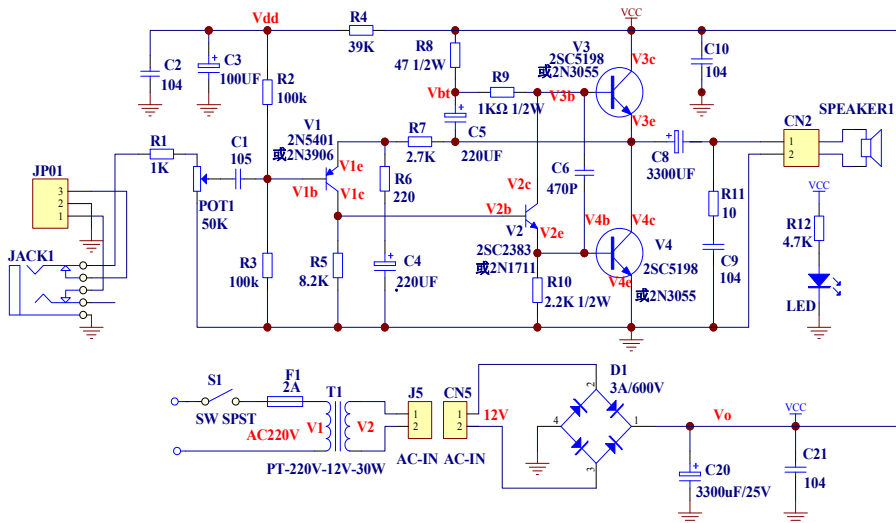


图 1-1-1 单声道功放电路原理图

三、单元电路说明

(1) 交流 220VAC 降压电路：T1 为电源变压器，它的作用是将 220VAC 交流电转换为 12VAC 的交流电；CN5 为变压器输入端子。

(2) 整流滤波电路：D1 为整流桥，将交流电转换为脉动直流电，C20、C21 和 C10 为滤波电容，C20 为电解电容，是大电容，可以滤除 100Hz 的交流纹波，但由于大电容在制造时是卷绕的，存在着电感，对高频噪声滤除不了；C21、C10 为瓷片电容，可以滤除高频噪声。

(3) 音频信号输入电路：JP01 为音频输入端子；JACK1 为耳机插座，当音频输入

线插头插入耳机插座时，耳机插座内部的开关将从 JP01 输入的音频信号断开；当没有音频输入线插头插入耳机插座时，耳机插座内部的开关将从 JP01 输入的音频信号送入功放电路。

(4) 音量调节电路：POT1 为音量调节电位器。

(5) 隔直耦合电容：C1 为独石电容，用于阻隔直流，通音频信号。独石电容具有高频损耗小，抗脉动能力强等特点。

(6) 前置放大电路：由 PNP 型三极管 V1 组成典型的共发射极放大电路，对输入的音频信号进行电压放大，R5 为集电极电阻，将电流变化转化为电压变化；三极管 V1 的发射极电源电压取自功放电路的中点电压 V4c。R2、R3 为 V1 的基极偏置电阻，使 V1 的基极电压为 Vdd 电压的一半；Vdd 是 VCC 电源电压通过 R4 降压得到，C2 和 C3 为滤波电容。

(7) 电压串联负反馈电路：R6、R7 将输出的一部分反馈到 V1 的发射极，组成电压串联负反馈，C4 只允许交流信号通过，隔离了偏置电流。

由于引入了深度的电压串联负反馈，根据深负反馈放大电路的特点，可知闭环电压放大倍数近似等于反馈系数的倒数，即：

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} \approx \frac{1}{F} = \frac{R6 + R7}{R6} = 1 + \frac{R7}{R6} = 1 + \frac{2.7K}{0.22K} \approx 13.3$$

(8) 倒相电路：V2 为倒相电路，将 V1 输出的音频信号通过 V2 分解成二路信号，即从 V2 的发射极输出一路，并加到 V4 的基极，驱动 V4；从 V2 的集电极输出一路，并加到 V3 的基极，驱动 V3。这二路信号的幅度基本相等，极性相反。R10 是 V2 的发射极电阻，为 V4 提供约 0.7V 的基极偏置电压。

(9) 自举升压电路：R8、C5 和 R9 构成自举升压电路，通过对 C5 的充电，在输入音频信号幅度比较大的瞬间，由于 C5 两端的电压不能突变，使 V3 基极电压被提升，以提高音频功放的动态范围。

(10) 阻容降压电路：R4、C2、C3 构成阻容降压电路，为前置放大电路 V1 提供基极偏置电压。

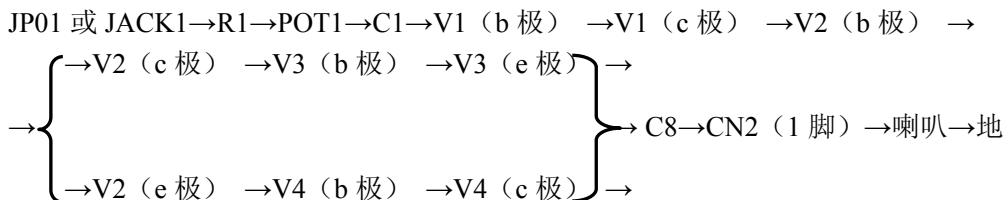
(11) 抗干扰电路：由 C6 组成抗干扰电路，用于消除尖脉冲干扰。

(12) 茹贝尔电路：由 R11 和 C9 组成茹贝尔电路，用于保护扬声器和功放三极管 V3 和 V4。

(13) 电源指示电路：R12 和 LED。

(14) OTL 电路：由 V2、V3、V4 和 C8 组成一个典型的 OTL 电路。

四、信号流程



五、元器件清单

见表 1-1-1。

表 1-1-1 元器件清单

| 序号 | 元器件名称 | 型号/规格/封装 | 单台数量 | |
|----|----------|-----------------------------------|------|-----------------|
| 1 | 电阻 | 10Ω, 1/6W | 1 | R11 |
| 2 | 电阻 | 220Ω, 1/6W | 1 | R6 |
| 3 | 电阻 | 1kΩ, 1/6W | 1 | R1 |
| 4 | 电阻 | 2.7kΩ, 1/6W | 1 | R7 |
| 5 | 电阻 | 4.7kΩ, 1/6W | 1 | R12 |
| 6 | 电阻 | 8.2kΩ, 1/6W | 1 | R5 |
| 7 | 电阻 | 39kΩ, 1/6W | 1 | R4 |
| 8 | 电阻 | 100kΩ, 1/6W | 2 | R2、R3 |
| 9 | 电阻 | 47Ω, 1/2W | 1 | R8 |
| 10 | 电阻 | 1k, 1/2W | 1 | R9 |
| 11 | 电阻 | 2.2k, 1/2W | 1 | R10 |
| 12 | 瓷片电容 | 470P, 50V | 2 | C6、Ca |
| 13 | 瓷片电容 | 104, 50V | 4 | C2、C9、C10、C21 |
| 14 | 独石电容 | 105 | 2 | C1、C1a |
| 15 | 电解电容 | 100μF/50V | 1 | C3 |
| 16 | 电解电容 | 1000μF/50V | 1 | C7 |
| 17 | 电解电容 | 3300μF/50V | 2 | C8、C20 |
| 18 | 发光二极管 | 红色 | 1 | LED |
| 19 | 三极管 | 2N5401, TO-92 | 1 | V1 |
| 20 | 三极管 | 2SC2383, TO-92L | 1 | V2 |
| 21 | 三极管 | 2SC5198, TO-3P | 2 | V3、V4 |
| 22 | 整流桥堆 | 3A/600V | 1 | D1 |
| 23 | 双联电位器 | 100k | 1 | POT1 |
| 24 | 插座 | 2Pin, 间距 5.02mm | 4 | CN2、CN3、CN4、CN5 |
| 25 | 插座 | 3Pin, 间距 5.02mm | 1 | JP01 |
| 26 | 音频插座 | 立体声, 5 脚音频插座 | 2 | JACK1 |
| 27 | 音频线 | 双插头, 长度: 1200mm | 1 | |
| 28 | 变压器 | 单 15V, 30W | 1 | T1 |
| 29 | 保险丝 | 1.5 | 1 | F1 |
| 30 | 电源开关 | | 1 | S1 |
| 31 | 双护套电源线 | 长度 1.6M, 导线 2×0.75mm ² | 1 | |
| 32 | 黑色多股铜芯导线 | 根数线径: 19×0.10mm | 1 卷 | |
| 33 | 红色多股铜芯导线 | 根数线径: 19×0.10mm | 1 卷 | |
| 34 | 螺丝 | φ3×12mm | 2 | |
| 35 | 螺母 | φ3 | 2 | |
| 36 | 自攻螺丝 | φ3×12mm, 十字头 | 4 | |
| 37 | 自攻螺丝 | φ4×12mm, 十字头 | 4 | |

六、主要单元电路原理分析

1. OTL 电路原理分析

(1) 基本的 OTL 电路: 基本的 OTL 电路如 1-1-2 图所示, 图中 V3 和 V4 都为 NPN 型管, 它们的特性基本相同, 也就是说, 两个三极管的参数基本相同, 即两个三极管的

放大倍数、饱和压降、漏电流、耐压等基本相同。在静态时（即没有音频信号输入时），由于 V3 和 V4 特性对称，中点电压（D 点电压）约为 $V_{CC}/2$ 。

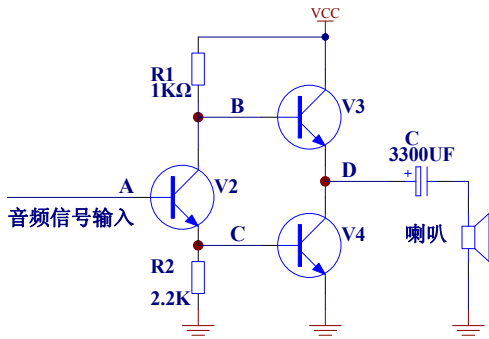


图 1-1-2 基本的 OTL 电路原理图

这个电路的设计思想是：音频信号通过 V2 产生幅度相等，极性相反两路信号，在音频信号的正半周期间，V4 三极管导通，V3 三极管截止；在音频信号的负半周期间，V4 三极管截止，V3 三极管导通。

(2) 工作原理：在图 1-1-3 图中，在静态时，即没有信号输入时，B 点的电压略高于 D 点的电压，V3 处于微导通状态，C 点的电压略高于 E 点的电压，V4 也处于微导通状态。二个三极管只要加一个正电压在基极，三极管就导通，加一个负电压就截止。

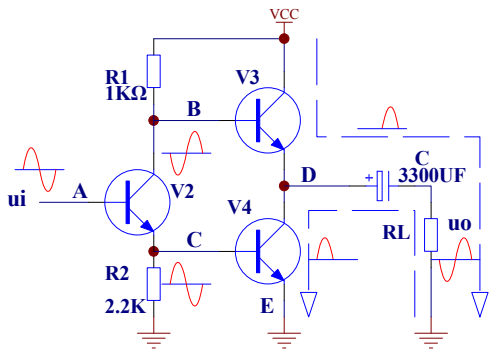


图 1-1-3 OTL 电路工作原理分析图

如 1-1-3 图所示，音频信号经过 V2 后，分开成二路信号，一路从发射极输出，一路从集电极输出，这两路信号要求幅度相等，极性相反。幅度相等可由调整 R1 和 R2 的阻值实现。

在音频信号的正半周，从 V2 的集电极输出到达 V3 的基极，就变为负半周，V3 三极管就截止；从 V2 发射极输出到达 V4 的基极，还是正半周，V4 三极管就导通，并对正半周进行电流放大。在音频信号的负半周，从 V2 集电极输出到达 V3 的基极，就变为正半周，V3 三极管就导通，对音频信号的负半周进行电流放大；从 V2 发射极输出到达 V4 的基极，还是负半周，V4 三极管就截止。所以，在音频信号的正半周，V3 三极管截止，V4 三极管导通；在音频信号的负半周，V4 三极管截止，V3 三极管导通。

如图 1-1-4 所示，在音频信号的正半周期间，V3 三极管截止，V4 三极管导通。V4 的集电极电流如如图 1-1-4 (a) 中虚线所示，这时电容 C 上所存储的电能为 V4 导通的电源，如图 1-1-4 (b) 所示。

以电源 C 的负极作为 V4 的地，如图 1-1-4 (c) 和 1-1-4 (d) 所示。所以，从图 1-1-4 (d) 可以看出，V4 和 RL 组成的电路为射极输出电路，所以， $u_o \approx u_i$ 。

在音频信号的负半周期间，V3 三极管导通，V4 三极管截止，如图 1-1-5 中虚线所示，电源 VCC 通过 V3 对电容 C 进行充电。由于电容 C 非常大，对音频信号可以视为短路，所以，V3 和 RL 组成的电路为射极输出电路， $u_o \approx u_i$ 。

从上面的分析可知，OTL 电路是由二个射极输出电路组成，输出电压跟随输入电压，电压没有放大，只有电流放大。

电容 C 在电路中有两个作用，一是音频信号的耦合输出电容，二是作为 V4 导通时的电源。因为在 V3 导通期间，电源 VCC 对电容 C 进行充电，存储能量，在 V4 导通期间，电容 C 通过 V4 进行放电，作为 V4 的电源。所以，电容 C 的容量一般要求较大。

由于一般情况下功率放大电路的负载电流很大，电容容量常选为几千微法，且为电解电容。电容容量愈大，电路低频特性将愈好。但是，当电容容量增大到一定程度时，电解电容不再是纯电容，而存在漏阻和电感效应，使得低频特性不会明显改善。

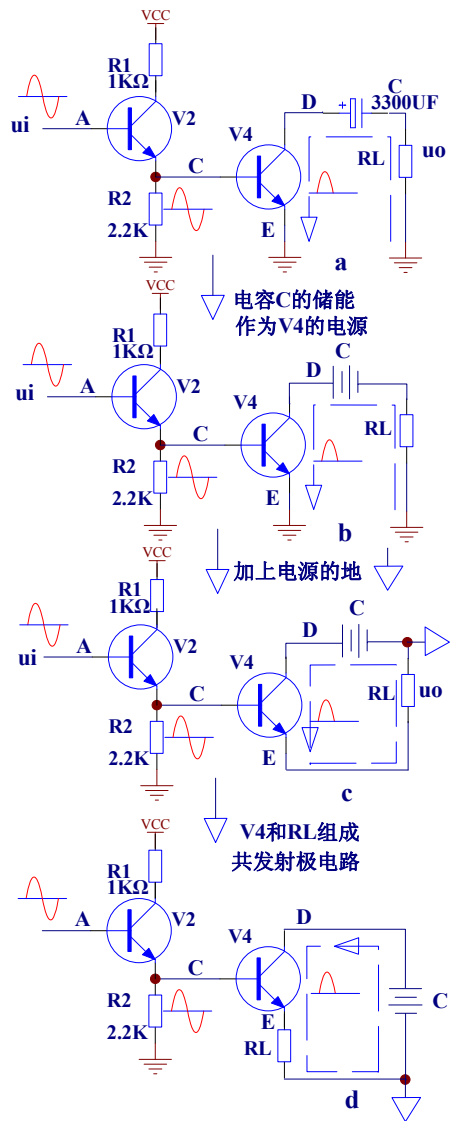


图 1-1-4 音频信号正半周期间原理分析图

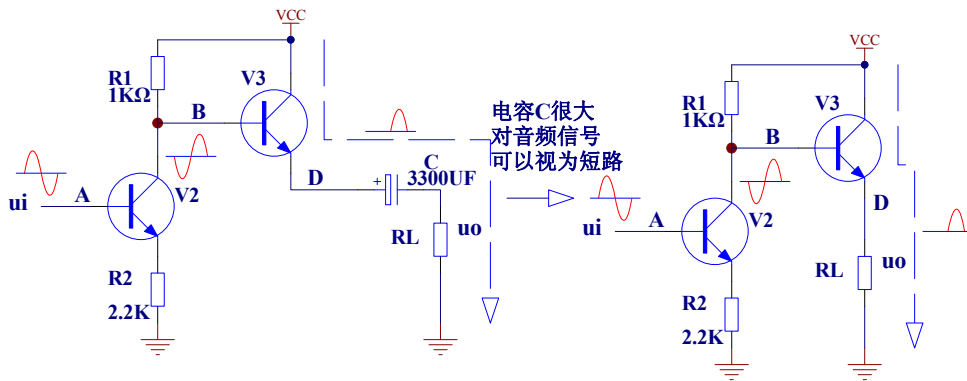


图 1-1-5 音频信号负半周期间原理分析图

(3) 实际的 OTL 电路：将 OTL 功放电路选用大功率三极管 2SC5198 或 2N3055，将倒相电路选用中功率三极管 2SC2383 或 2N1711，并增加一个由 R8、C5 和 R9 组成的自举升压电路，一个抗干扰电路 C6，以及茹贝尔电路 R11 和 C9，就变成一个实际的 OTL 电路，如图 1-1-6 所示。

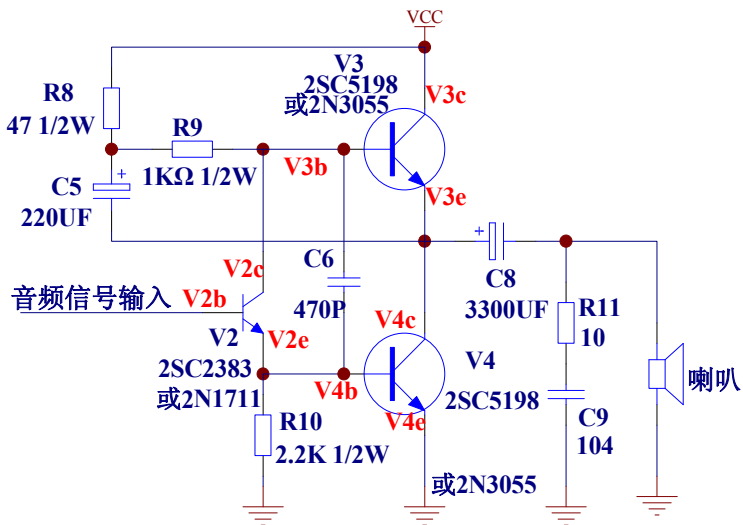


图 1-1-6 实际的 OTL 电路

2. 前置放大电路原理分析

(1) 实际的前置放大电路。

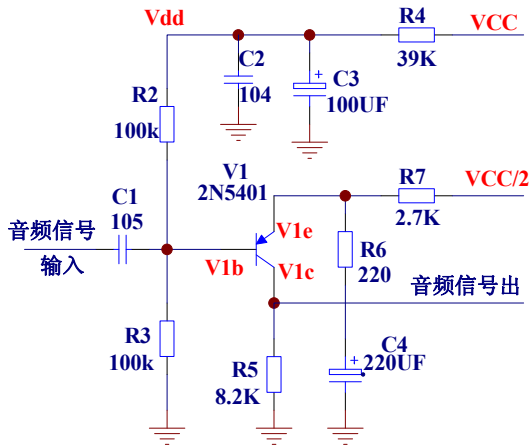


图 1-1-7 实际的 OTL 电路

实际的前置放大电路如图 1-1-7 所示。实际上是由一个基本的共发射极放大电路变形而来，如图 1-1-8 所示。基本的共射极放大电路在模拟电子技术课程中已学过，其工作原理分析这里不再重复。

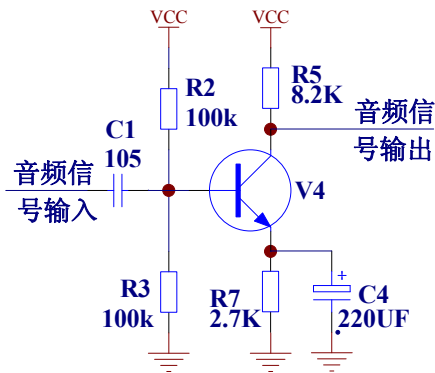


图 1-1-8 基本的共发射极放大电路

(2) 采用 PNP 型三极管的基本的共发射极电路。在图 1-1-7 中，放大电路是采用 NPN 三极管。将图 1-1-7 中的 NPN 三极管改为 PNP 三极管，基本的共发射极电路就变成将图 1-1-9 (a) 所示。根据交流等效原理，电容 C4 可以不接电源，可以接地，如图 1-1-9 (b) 所示，所以，图 1-1-9 (a) 和图 1-1-9 (b) 是完全等效。

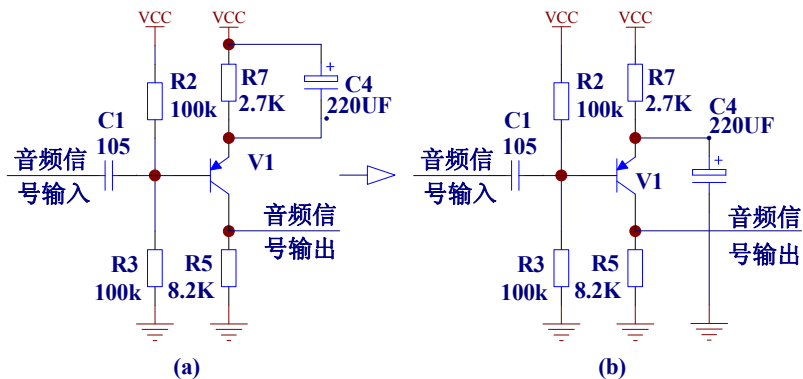


图 1-1-9 采用 PNP 型三极管的基本的共发射极电路

(3) 改变供电电源的 PNP 型三极管共发射极电路。改变供电电源的 PNP 型三极管共发射极电路如图 1-1-10 所示，放大电路的基极电源为 V_{dd} ，而 V_{dd} 是由 V_{CC} 经过由 R_4 、 C_2 和 C_3 组成的阻容降压电路降压后得到的， V_{dd} 约比 V_{CC} 低 2V 左右，这时为了提高共发射极电路的信噪比。放大电路的集电极电源取自 OTL 功放电路的中点电压，约为 $V_{CC}/2$ 。

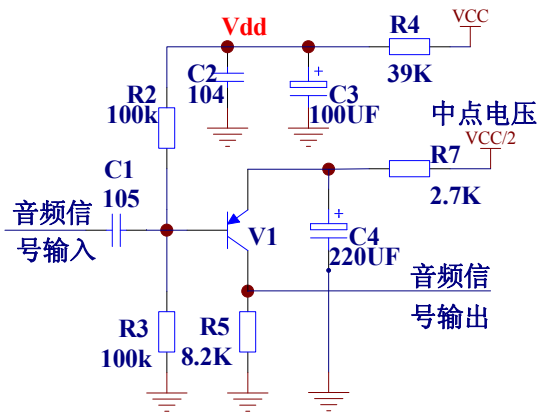


图 1-1-10 改变供电电源的 PNP 型三极管共发射极电路

(4) 增加电压串联负反馈电路。在电路中增加一个电阻 R_6 就与 R_7 构成电压串联负反馈电路。放大电路引入电压负反馈后，能够使输出电压稳定。任何外界因素引起输出电压不稳时，输出电压的变化将通过反馈网络立即回送到放大电路的输入端，并与原输入信号进行比较，得出与前一变化相反的有效输入信号，从而使输出电压的变化量得到削弱，输出电压便趋于稳定。电压串联负反馈电路已在模拟电子技术课程已有详细讲述。

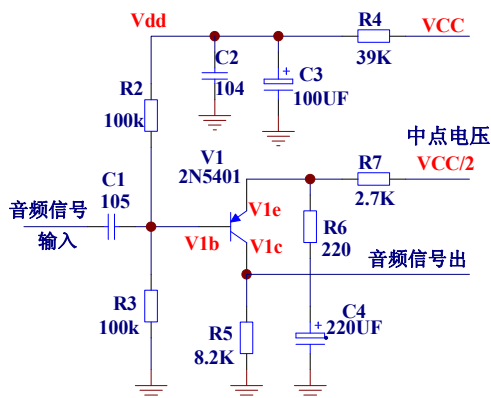


图 1-1-11 实际的 OTL 电路

任务 2 分立元件模拟功放原理图及 PCB 图设计与制作

一、任务要求

- ①能完成分立元件模拟功放电路原理图库的制作和原理图的绘制。
- ②能根据实物完成分立元件模拟功放电路所有元器件封装的制作。
- ③熟悉功放 PCB 板设计的基本要求和技巧。
- ④熟悉功放 PCB 地线铺设的一般技巧和注意事项。
- ⑤能完成 PCB 图的设计。

二、单面 PCB 图设计的基本步

第一步：安装并打开 DXP 软件。

第二步：以自己的“学号最后 2 位+姓名”建立一个文件夹，以自己的“学号最后 2 位+姓名”建立一个工程，例如，01 陈嘉伟.PRJPCB，其中包括四个文件：原理图元件符号文件、原理图文件、元件封装文件、PCB 图文件，例如：01 陈嘉伟.SchLib、01 陈嘉伟.SchDoc、01 陈嘉伟.PcbLib、01 陈嘉伟.PCBDOC。

第三步：绘制元件符号。在绘制分立元件模拟功放原理图时，大部分元件符号可用 DXP 软件自带的元件符号，部分元件符号要自己绘制，所以，打开原理图元件符号文件，绘制分立元件模拟功放原理图所需要的元件符号。

第四步：打开原理图文件，绘制分立元件模拟功放原理图(例如：01 陈嘉伟.SchLib)。

第五步：打开元器件封装文件，绘制分立元件模拟功放元件封装。

第六步、输入元件封装。在分立元件模拟功放原理图中，将所有元器件的封装名输入，并且保证元器件封装只有一个所需要的元器件封装，其他多余的封装全部删除。

第七步：打开 PCB 文件，在“KeepOutLayer”层绘制分立晶体管功放的板框。

第八步：将原理图中的元件封装自动装入 PCB 文件中。打开原理图文件，单击“Design”→单击“Update PCB Document ×××××”，即可。

第九步：PCB 图的自动布局。打开 PCB 文件，单击“Tool”→单击“Component

2.PCB 板尺寸要求

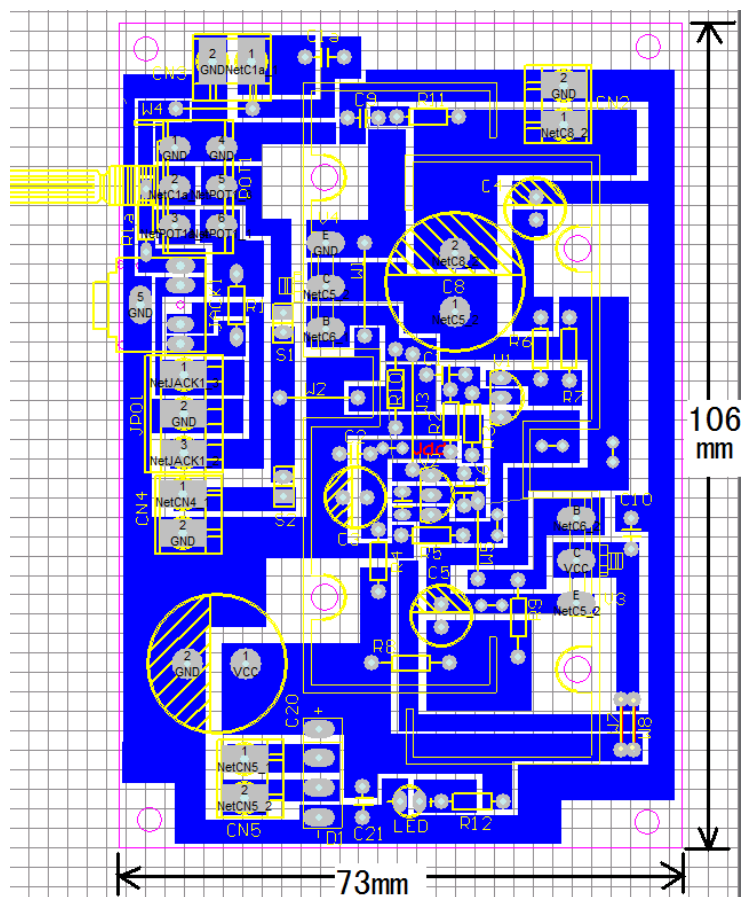


图 1-2-2 PCB 板尺寸要求

四、元器件封装要求

1.散热器组件 V3 和 V4（共有 2 个），如图 1-2-3 所示（孔直径为 1.5mm）。

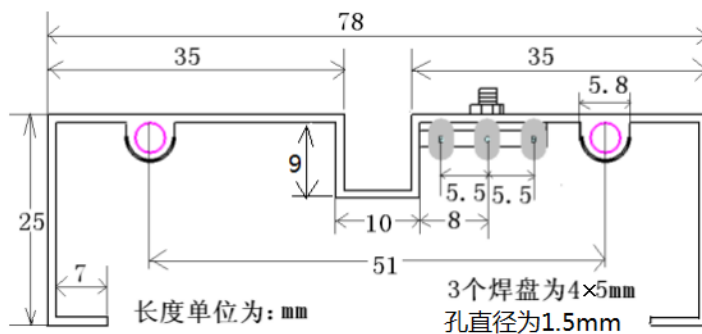


图 1-2-3 散热器组件封装

2.电位器 POT1（共有 1 个），如图 1-2-4 所示（单位为：mm）。

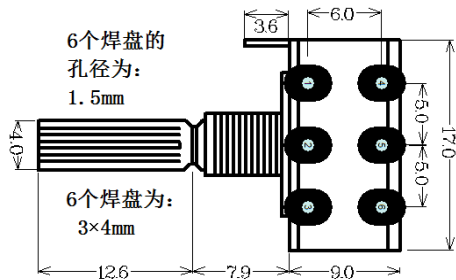


图 1-2-4 电位器封装

3.耳机插座 Jck1 (共有 1 个), 如图 1-2-5 所示 (单位为: mm)。

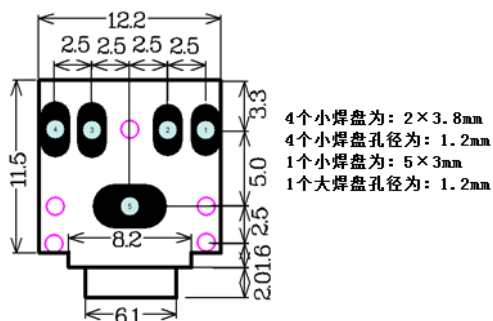


图 1-2-5 耳机插座封装

4.整流桥堆 D1 (共有 1 个), 如图 1-2-6 所示 (单位为: mm)。

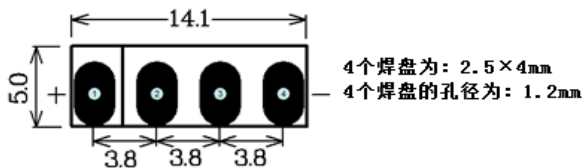


图 1-2-6 电位器封装

5.滤波大电解电容 C8 和 C20 (共有 2 个), 如图 1-2-7 所示 (单位为: mm)。

6.小电解电容 (共有 3 个), 如图 1-2-8 所示 (单位为: mm)。

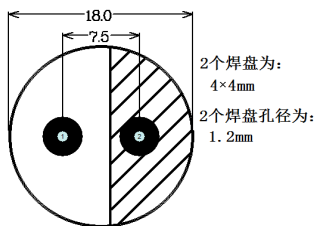


图 1-2-7 滤波大电解电容封装

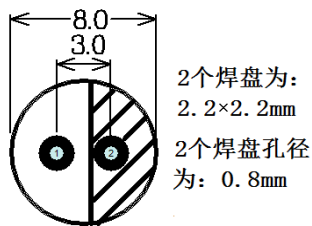


图 1-2-8 小电解电容封装