

职业教育职业培训 改革创新教材

全国高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校规划教材

电子与电气控制专业

电子技术与技能训练

叶 谦 吴荣祥 主 编

卢文升 刘 南 郭志元 副主编

廖 勇 主 审

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书根据高等职业院校、技师学院“电子与电气控制专业”的教学计划和教学大纲,以“国家职业标准”为依据,按照“以工作过程为导向”的课程改革要求,以典型任务为载体,从职业分析入手,切实贯彻“管用”、“够用”、“适用”的教学指导思想,把理论教学与技能训练很好地结合起来,并按技能层次分模块逐步加深电子技术相关内容的学习和技能操作训练。本书编入了较多新技术、新设备、新工艺的内容,还介绍了许多典型的应用案例,便于读者借鉴,以缩短学校教育与企业需求之间的差距,更好地满足企业用人需求。

本书可作为高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校、中等职业学校电子与电气相关专业的教材,也可作为企业技师培训教材和相关设备维修技术人员的自学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术与技能训练 / 叶谦, 吴荣祥主编. —北京: 电子工业出版社, 2013.3
职业教育职业培训改革创新教材 全国高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校规划教材. 电子与电气控制专业

ISBN 978-7-121-17857-3

I. ①电… II. ①叶… ②吴… III. ①电子技术—高等职业教育—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 185251 号

策划编辑: 关雅莉 杨 波

责任编辑: 郝黎明 文字编辑: 裴 杰

印 刷:

装 订:

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 12.25 字数: 313.6 千字

印 次: 2013 年 3 月第 1 次印刷

定 价: 26.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

职业教育职业培训改革创新教材

全国高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校规划教材

电子与电气控制专业 教材编写委员会

主任 委员：史术高 湖南省职业技能鉴定中心（湖南省职业技术培训研究室）

副主任委员：（排名不分先后）

尹南宁 衡阳技师学院

罗亚平 衡阳技师学院

屈美凤 衡阳技师学院

许泓泉 衡阳技师学院

唐波微 衡阳技师学院

谭 勇 衡阳技师学院

彭庆丽 衡阳技师学院

王镇宇 湘潭技师学院

黄 钧 湖南省机械工业技术学院（湖南汽车技师学院）

刘紫阳 湖南省机械工业技术学院（湖南汽车技师学院）

谢红亮 湖南省机械工业技术学院（湖南汽车技师学院）

郑生明 湖南潇湘技师学院

冯友民 湖南潇湘技师学院

何跃明 郴州技师学院

刘一兵 邵阳职业技术学院

赵维城 冷水江市高级技工学校

吴春燕 冷水江市高级技工学校

李荣华 冷水江市高级技工学校

叶 谦 湖南轻工高级技工学校

凌 云 湖南工业大学

王荣欣 河北科技大学

李乃夫 广东省轻工业技师学院（广东省轻工业高级技工学校）

黄晓华 广东省南方技师学院

廖 勇 广东省南方技师学院

王 湘 永州市纺织厂

吴荣祥 肥城市职业教育中心校

委 员：（排名不分先后）

刘 南 湖南省职业技能鉴定中心（湖南省职业技术培训研究室）

李辉耀 湖南省机械工业技术学院（湖南汽车技师学院）

陈锡文 湖南省机械工业技术学院（湖南汽车技师学院）

马果红 湖南省机械工业技术学院（湖南汽车技师学院）

王 炜 湖南工贸技师学院

罗少华	湘潭技师学院
苏石龙	湘潭技师学院
田海军	湘潭技师学院
陈铁军	湘潭技师学院
何钻明	郴州技师学院
黄先帜	郴州技师学院
刘志辉	郴州技师学院
刘建华	湖南轻工高级技工学校
伍爱平	湖南轻工高级技工学校
易新春	湖南轻工高级技工学校
蔡蔚蓝	湖南轻工高级技工学校
严 均	湖南轻工高级技工学校
石 冰	湖南轻工高级技工学校
徐金贵	冷水江市高级技工学校
刘矫健	邵阳市商业技工学校
王向东	邵阳市高级技工学校
刘石岩	邵阳市高级技工学校
何利民	湖南省煤业集团资兴矿区安全生产管理局
唐湘生	锡矿山闪星锑业有限责任公司
唐祥龙	湖南山立水电设备制造有限公司
石志勇	广东省技师学院
梁永昌	茂名市第二高级技工学校
刘坤林	茂名市第二高级技工学校
卢文升	揭阳捷和职业技术学校
李 明	湛江机电学校
刘竹明	湛江机电学校
魏林安	临洮县玉井职业中专
郭志元	古浪县黄羊川职业技术中学
王为民	广东省技师学院
徐湘和	湖南郴州技师学院
耿立迎	肥城市高级技工学校

秘 书 处：刘南、杨波、刘学清

出版说明

人才资源是国家发展、民族振兴最重要的战略资源，是国家经济社会发展的第一资源，是促进生产力发展和体现综合国力的第一要素。加强人力资源开发工作和人才队伍建设是加快我国现代化建设进程中事关全局的大事，始终是一个基础性的、全面性的、决定性的战略问题。坚持人才优先发展，加快建设人才强国对于全面实现小康社会目标、建设富强民主文明和谐的社会主义现代化国家具有决定性意义。党和国家历来高度重视人力资源开发工作，改革开放以来，尤其是进入新世纪新阶段，党中央和国务院做出了实施人才强国战略的重大决策，提出了一系列加强人力资源开发的政策措施，培养造就了各个领域的大批人才。但当前我国人才发展的总体水平同世界先进国家相比仍存在较大差距，与我国经济社会发展需要还有许多不适应。为此，《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》提出：“坚持服务发展、人才优先、以用为本、创新机制、高端引领、整体开发的指导方针，培养和造就规模宏大、结构优化、布局合理、素质优良的人才队伍，确立国家人才竞争比较优势，进入世界人才强国行列，为在本世纪中叶基本实现社会主义现代化奠定人才基础。”

职业教育培训是人力资源开发的主要途径之一，加强职业教育培训，创新人才培养模式，加快人才队伍建设是人力资源开发的重要内容，是落实人才强国战略的具体体现，是实现国家中长期人才发展规划纲要目标的根本保证。

职业资格鉴定是全面贯彻落实科学发展观，大力实施人才强国战略的重要举措，有利于促进劳动力市场建设和发展，关系到广大劳动者的切身利益，对于企业发展和社会经济进步以及全面提高劳动者素质和职工队伍的创新能力具有重要作用。职业资格鉴定也是当前我国经济社会发展，特别是就业、再就业工作的迫切要求。

国家题库的建立，对于保证职业资格鉴定工作的质量起着重要作用，是加快培养一大批数量充足、结构合理、素质优秀的技术技能型、复合技能型和知识技能型的高技能人才，为各行各业造就出千万能工巧匠的重要具体措施。但目前相当一部分职业资格鉴定题库的内容已经过时，湖南省职业技能鉴定中心（湖南省职业技术培训研究室）组织鉴定站所、院校和企业专家开发了新的题库，并经过人力资源和社会保障部职业技能鉴定中心审核，获准可以按照新的题库开展相应工种的职业资格鉴定工作。

职业教育培训教材是职业教育培训的重要资源，是体现职业教育培训特色的知识载体和

教学的基本工具，是培养和造就高技能人才的基本保证。为满足广大劳动者职业培训鉴定需要，给广大参加职业资格鉴定的人员提供帮助，我们组织参加这次国家题库开发的专家，以及长期从事职业资格鉴定工作的人员编写了这套“国家职业资格技能培训与鉴定教材”。本套丛书是与国家职业标准、国家职业资格鉴定题库相配套的。在本套丛书的编写过程中，贯彻了“围绕考点，服务考试”的原则，把编写重点放在以下几个主要方面。

第一，内容上涵盖国家职业标准对该工种的知识和技能方面的要求，确保达到相应等级技能人才的培养目标。

第二，突出考前辅导的特色，以职业资格鉴定试题作为本套丛书的编写重点，内容上紧紧围绕鉴定考核的内容，充分体现系统性和实用性。

第三，坚持“新内容”为编写的侧重点，无论是内容还是形式上都力求有所创新，使本套丛书更贴近职业资格鉴定，更好地服务于职业资格鉴定。

这是推动培训与鉴定紧密结合的大胆尝试，是促进广大劳动者深入学习、提高职业能力和综合素质、促进人才队伍建设的一项重要基础性工作，很有意义，是一件大好事。

组织开发高质量的职业培训鉴定教材，加强职业培训鉴定教材建设，为技能人才培养提供技术和智力支持，对于提高技能人才培养质量，推动职业教育培训科学发展非常重要。我们要适应新形势新任务的要求，针对职业培训鉴定工作的实际需要，统一规划，总结经验，加以完善，努力把职业培训鉴定教材建设工作做得更好，为提高劳动者素质、促进就业和经济社会发展做出积极贡献。

电子工业出版社 职业教育分社

2013年2月

前 言

本书根据高等职业院校、技师学院“电子与电气控制专业”的教学计划和教学大纲，以“国家职业标准”为依据，按照“以工作过程为导向”的课程改革要求，以典型任务为载体，从职业分析入手，切实贯彻“管用”、“够用”、“适用”的教学指导思想，把理论教学与技能训练很好地结合起来，并按技能层次分模块逐步介绍电子技术相关内容的学习和技能操作训练。本书较多地编入新技术、新设备、新工艺的内容，还介绍了许多典型的应用案例，便于读者借鉴，以缩短学校教育与企业需求之间的差距，更好地满足企业用人需求。

本书可作为高等职业院校、技师学院、技工及高级技工学校、中等职业学校电子与电气相关专业的教材，也可作为企业技师培训教材和相关设备维修技术人员的自学用书。

本书的编写符合职业学校学生的认知和技能学习规律，形式新颖，职教特色明显；在保证知识体系完备，脉络清晰，论述精准深刻的同时，尤其注重培养读者的实际动手能力和企业岗位技能的应用能力，并结合大量的工程案例和项目来使读者更进一步灵活掌握及应用相关的技能。

● 本书内容

全书共分为6个模块、19个任务，还包括4个实训项目、6个子任务，内容由浅入深，全面覆盖了电子技术的知识和相关的技能训练，主要包括模拟电子基础知识与基本电路、模拟电子应用电路、ATX开关电源的认识与拆装、足球小音箱电路的设计与制作、ZX2039型多功能防盗报警器的设计与制作、采用CXA1191M/AM/FM收音机的安装与调试、数字电路基础、数字电子应用电路、数字电路实训等内容。

● 配套教学资源

本书提供了配套的立体化教学资源，包括专业建设方案、教学指南、电子教案等必需的文件，读者可以通过华信教育资源网（www.hxedu.com.cn）下载使用或与电子工业出版社联系（E-mail: yangbo@phei.com.cn）。

● 本书主编

本书由湖南轻工高级技工学校叶谦，肥城市职业教育中心校吴荣祥主编，揭阳捷和职业技术学校卢文升、湖南省人事劳动厅鉴定中心刘南、古浪县黄羊川职业技术中学郭志元副主编，广东省南方技师学院廖勇主审，湖南轻工高级技工学校刘建华、伍爱平、易新春、蔡蔚

蓝、严均、石冰等参与编写。由于时间仓促，作者水平有限，书中错漏之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

● 特别鸣谢

特别鸣谢湖南省人力资源和社会保障厅职业技能鉴定中心、湖南省职业技术培训研究室对本书编写工作的大力支持，并同时鸣谢湖南省职业技能鉴定中心（湖南省职业技术培训研究室）史术高对本书进行了认真的审校及建议。

主 编

2012 年 8 月

电子工业出版社版权所有
盗版必究

目 录

模块一 模拟电子基础知识与基本电路（中技）	1
任务 1 半导体二极管	1
子任务 1 半导体二极管的识别与测试	1
子任务 2 半导体二极管的应用	6
任务 2 半导体三极管	12
子任务 1 半导体三极管的识别与测试	12
子任务 2 半导体三极管的三种基本放大电路	18
任务 3 多级放大器	27
任务 4 反馈电路	32
模块二 模拟电子应用电路	41
任务 1 调谐放大器	41
任务 2 振荡电路	48
任务 3 集成运算放大电路	54
任务 4 直流稳压电路	60
任务 5 可控硅电路	68
模块三 实训（技师）	74
实训项目 1 ATX 开关电源的认识与拆装	74
实训项目 2 足球小音箱电路的设计与制作	82
实训项目 3 ZX2039 型多功能防盗报警器的设计与制作	88
实训项目 4 采用 CXA1191M/AM/FM 收音机的安装与调试	95
模块四 数字电路基础	106
任务 1 数字电路基础知识	106
任务 2 逻辑门电路	113
任务 3 组合逻辑电路	118
任务 4 集成触发器	126
任务 5 时序逻辑电路	136
模块五 数字电子应用电路	139
任务 1 多谐振荡器及应用——模拟“知了”声电路的制作	139
任务 2 555 集成电路及应用	144

子任务 1 555 单稳态触发器电路及应用——延时定时器的制作	145
子任务 2 555 施密特触发器电路及应用——波形整形电路的制作	151
模块六 数字电路实训（技师）	156
任务 1 数字钟的设计与制作	156
任务 2 智力竞赛抢答器的设计与安装	165
任务 3 数字万用表的装接	177

电子工业出版社版权所有
盗版必究

模块一 模拟电子基础知识与基本电路

(中技)

任务1 半导体二极管

子任务1 半导体二极管的识别与测试



任务描述

图 1-1-1 所示为二极管，现要求对其进行以下测试。

1. 二极管好坏的判断。
2. 二极管极性的判断。

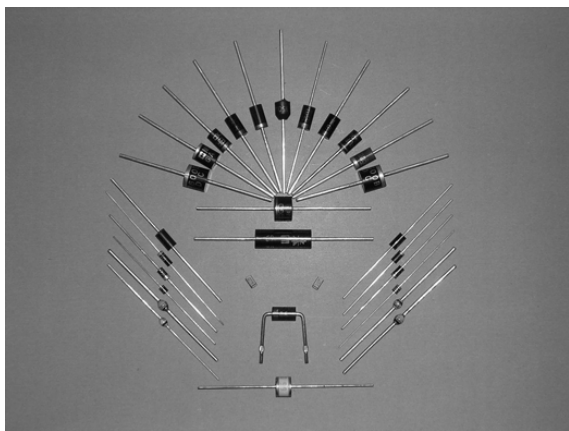


图 1-1-1 二极管外形图



学习目标

1. 了解二极管的结构。

2. 理解二极管的单向导电特性和主要参数。



任务分析

1. 二极管的结构

半导体二极管是由一个 PN 结（管芯）加上电极引线和管壳构成的。从 P 型区引出的电极称为正极；与 N 型区相连的电极为负极，其结构示意图和电路符号如图 1-1-2 所示。

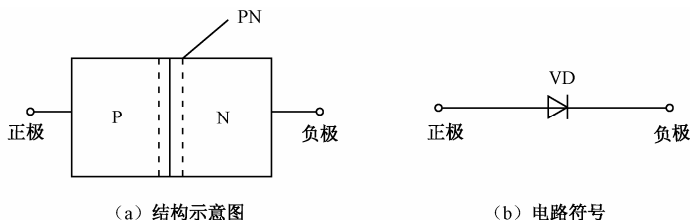


图 1-1-2 二极管的结构示意图与电路符号

二极管按结构不同分为点接触型和面接触型两类。

2. 二极管好坏的判断

用万用表测量二极管的正反向电阻，判断二极管的好坏。

3. 判断二极管的极性

要求能从标记符号判断二极管的极性，并掌握用万用表和晶体管图示仪测试二极管的步骤及方法。



完成任务/操作步骤

任务准备

一、二极管的伏安特性曲线

二极管的主要特性就是 PN 结的单向导电特性，可以用伏安特性曲线来描述，如图 1-1-3 所示。

1. 正向特性

当外加正向电压较小时，不足以克服内电场的作用，扩散运动基本不能进行，因此正向电流趋于零，则该区称为死区。

当正向电压增加到一定数值 U_{on} 时，开始出现正向电流，此时的电压称为开启电压 U_{on} （或称死区电压）。常温下，硅二极管的 $U_{on}=0.5\sim0.7V$ ；锗二极管的 $U_{on}=0.1\sim0.3V$ 。

当外加正向电压大于 U_{on} 时，正向电流成指数规律上升，近似线性上升，因此，该区称为“线性工作区”。

注意：二极管正向导通时应工作在该区。

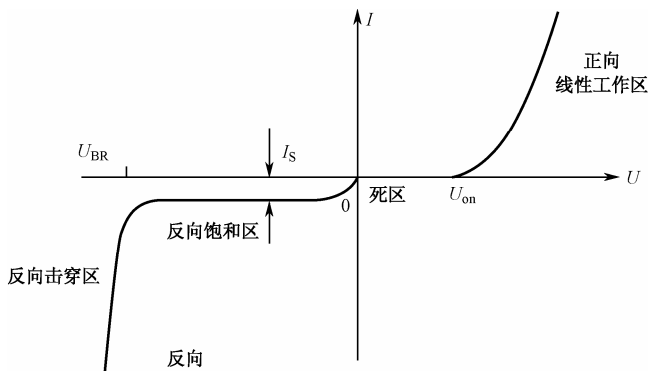


图 1-1-3 二极管的伏安特性

2. 反向特性

在反向电压作用下，没有多子做扩散运动，只有少子做漂移运动，形成很小的漂移电流，称为反向饱和电流 I_S 。

当温度一定时， I_S 表现饱和性质，因此，该区称为反向饱和区，管子基本显截止状态。硅管的 I_S 约在纳安（nA）量级；锗管约在微安（ μA ）量级。

当反向电压增加到一定数值时，反向电流 I_S 剧增，二极管反向击穿，曲线出现长尾现象，则该区称为反向击穿区，所对应的反向电压 U_{BR} 称为击穿电压。

二、二极管的主要参数

1. 最大整流电流 I_{FM}

最大整流电流是指二极管长期连续工作时，允许通过二极管的最大正向工作电流的平均值。

2. 最高反向工作电压 U_{RM}

最高反向工作电压是指二极管允许承受的反向工作电压的峰值。

3. 反向饱和电流 I_S

反向饱和电流是指管子没有击穿时的反向电流值。其值越小，说明二极管的单向导电性越好。

完成任务

三、二极管的测试

普通二极管的品种很多，例如，整流二极管、检波二极管、开关二极管等，这些管子又有锗管和硅管之分，但它们都是由一个 PN 结组成的，所以其测试方法基本上都是一样的。

1. 二极管好坏的判断

用万用表测量二极管的正反向电阻，把两支表笔分别接二极管的两个电极。

① 若测得的反向电阻很大（几百千欧以上），正向电阻很小（几千欧以下），表明二极管性能良好。

② 若测得的反向电阻和正向电阻都很小，表明二极管短路。

③ 测得的反向电阻和正向电阻都很大,表明二极管断路,已损坏。

2. 二极管极性的判断

(1) 从标记符号判断二极管的极性

观察外壳上的标记符号。通常在二极管印有色环(多为黑色或白色)的一端为负极(阴极),另一端则为正极(阳极)。

(2) 使用万用表测试普通二极管

将万用表置于 $R \times 100$ 挡或 $R \times 1k$ 挡(对于面接触型的大电流整流管可用 $R \times 1$ 挡或 $R \times 10$ 挡),把两支表笔分别接二极管的两个电极,测出二极管的电阻值,然后对换两支表笔再测量一次二极管的电阻值。若先后两次所测得的阻值差异较大,则说明被测二极管是好的(差异越大,管子的性能越好);阻值小的为二极管的正向电阻,其阻值一般在 $10k\Omega$ 以下,锗管一般在 $100 \sim 1k\Omega$,硅管在 1 千欧至几千欧。阻值大的为二极管的反向电阻,其阻值应在几百千欧以上,甚至接近无穷大。

在测试中,阻值小的那一次,黑色表笔接的电极就是二极管的正极(阳极),红色表笔接的则是二极管的负极(阴极)。

3. 使用晶体管图示仪测试普通二极管

晶体管特性图示仪是一种可直接在示波管荧光屏上观察各种晶体管的特性曲线的专用仪器。测试时只要把图示仪的旋钮及开关调整至正确的位置,通过仪器的标尺刻度可直接读出被测晶体管的各项参数;它可用来测定晶体管的共集电极、共基极、共发射极的输入特性、输出特性、转换特性、 α 、 β 参数特性;可测定各种反向饱和电流 I_{CBO} 、 I_{CEO} 、 I_{EBO} 和各种击穿电压 U_{CBO} 、 U_{CEO} 、 U_{EBO} 等。晶体管特性图示仪插孔示意图如图 1-1-4 所示。

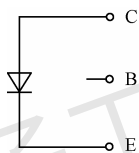


图 1-1-4 晶体管特性图示仪插孔示意图



知识链接

特殊二极管

1. 稳压二极管

稳压二极管又名齐纳二极管,简称稳压管,是一种用特殊工艺制作的面接触型硅半导体二极管,这种管子的杂质浓度比较大,容易发生击穿,其击穿时的电压基本上不随电流的变化而变化,从而达到稳压的目的。稳压管工作于反向击穿区。

(1) 稳压管的伏安特性和符号

图 1-1-5 所示为稳压管的伏安特性和符号。

(2) 稳压管的主要参数

① 稳定电压 U_Z 。它是指当稳压管中的电流为规定值时,稳压管在电路中其两端产生的

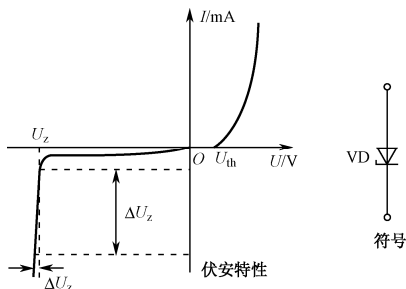


图 1-1-5 稳压管的伏安特性和符号

稳定电压值。

② 稳定电流 I_Z 。它是指稳压管工作在稳压状态时，稳压管中流过的电流，有最小稳定电流 I_{Zmin} 和最大稳定电流 I_{Zmax} 之分。

③ 耗散功率 P_M 。它是指稳压管正常工作时，管子上允许的最大耗散功率。

（3）应用稳压管应注意的问题

① 稳压管稳压时，一定要外加反向电压，以保证管子工作在反向击穿区。当外加的反向电压值大于或等于 U_Z 时，才能起到稳压作用；若外加的电压值小于 U_Z ，则稳压二极管相当于普通的二极管。

② 在稳压管稳压电路中，一定要配合限流电阻的使用，以保证稳压管中流过的电流在规定的范围之内。

2. 发光二极管

发光二极管是一种光发射器件，英文缩写是 LED。此类管子通常由镓（Ga）、砷（As）、磷（P）等元素的化合物制成，管子正向导通，当导通电流足够大时，能把电能直接转换为光能，发出光来。目前发光二极管的颜色有红、黄、橙、绿、白和蓝 6 种，所发光的颜色主要取决于制作管子的材料，例如，用砷化镓发出红光，而用磷化镓则发出绿光。其中白色发光二极管是新型产品，主要应用在手机背光灯、液晶显示器背光灯、照明等领域。

发光二极管工作时导通电压比普通二极管大，其工作电压随材料的不同而不同，一般为 1.7~2.4V。普通绿、黄、红、橙色发光二极管工作电压约为 2V；白色发光二极管的工作电压通常高于 2.4V；蓝色发光二极管的工作电压一般高于 3.3V。发光二极管的工作电流一般在 2~25mA。

发光二极管应用非常广泛，常用做各种电子设备（如仪器仪表、计算机、电视机等）的电源指示灯和信号指示灯，还可以做成七段数码显示器等。发光二极管的另一个重要用途是将电信号转为光信号。普通发光二极管的外形和符号如图 1-1-6 所示。



图 1-1-6 普通发光二极管的外形和符号

3. 光电二极管

光电二极管又称光敏二极管，它是一种光接收器件，其 PN 结工作在反向偏置状态，可以将光能转换为电能，实现光电转换。图 1-1-7 所示为光电二极管的基本电路和符号。

4. 变容二极管

图 1-1-8 所示为变容二极管的符号。此种管子是利用 PN 结的电容效应进行工作的，它工作在反向偏置状态，当外加的反偏电压变化时，其电容量也随着改变。

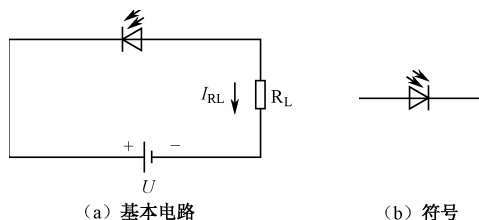


图 1-1-7 光电二极管的基本电路和符号

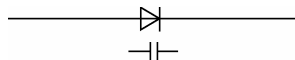


图 1-1-8 变容二极管的符号

5. 激光二极管

激光二极管是在发光二极管的 PN 结间安置一层具有光活性的半导体，构成一个光谐振腔。工作时接正向电压，可发射出激光。

激光二极管的应用非常广泛，在计算机的光盘驱动器、激光打印机中的打印头、激光唱机、激光影碟机中都有激光二极管。



思考与训练

1. 用万用表测试二极管 2AP7，判断其好坏。
2. 用万用表测试二极管 2DZ54C，判断其极性。

子任务 2 导体二极管的应用



任务描述

要求制作如图 1-1-9 所示的直流稳压电源，并简单分析电路的工作原理。

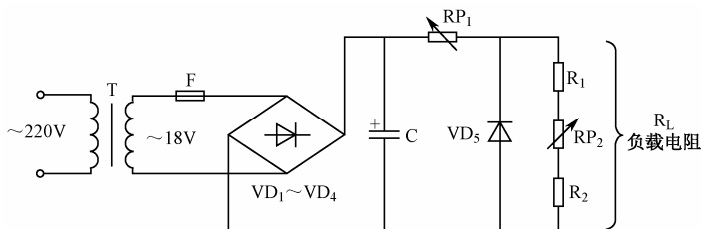


图 1-1-9 直流稳压电源原理图



学习目标

1. 掌握单相半波整流电路的组成、工作原理。
2. 掌握单相桥式整流电路的组成、工作原理。



任务分析

1. 直流稳压电源工作原理如图 1-1-9 所示，经过变压器 T 降压后的交流电经桥式全波整

流电路 $VD_1 \sim VD_4$ 变成了单方向的直流电。这种直流电含有交流成分，称为脉动的直流电，需要利用滤波电容器 C 滤除其中的交流成分，得到脉动较小的直流电。然而此时由于电网电压波动和负载变化的影响，电压值并不稳定。利用稳压二极管的稳压特性所组成的稳压电路是一种最简单的稳压电路，适用于小功率和对稳压精度要求不高的场合。该电路输出的直流电压值取决于 VD_5 的稳压值。

2. 按电路要求合理选择元件参数，并按电路图正确安装元器件。



完成任务/操作步骤

任务准备

一、单相半波整流电路的组成、工作原理

1. 电路组成

单相半波整流电路如图 1-1-10 所示，图中 T 为电源变压器，用来将市电 220V 交流电压变换为整流电路所要求的交流低电压，同时保证直流电源与市电电源有良好的隔离。

2. 工作原理

电源变压器 T 初级接交流电压 u_1 ，则在变压器 T 的次级就会产生感应电压 u_2 。当 u_2 为正半周时，整流二极管 VD 上加的是正向电压，处于导通状态，其电流 i_o 流过负载 R_L ，于是在 R_L 上产生正半周电压 u_o ；当 u_2 为负半周时，整流二极管 VD 上加的是反向电压，处于截止状态，负载 R_L 上无电流通过。当输入电压进入下一个周期时，整流电路将重复上述过程。各波形对应关系如图 1-1-11 所示。由图可见，负载 R_L 上得到的是自上而下的单向电流，实现了整流。由 u_o 的波形图可见，这种电路只利用电源电压的 u_2 的半个波，故称半波整流。

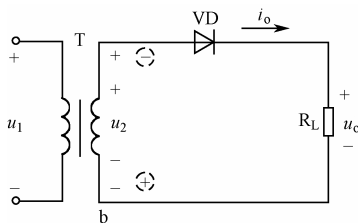


图 1-1-10 单相半波整流电路

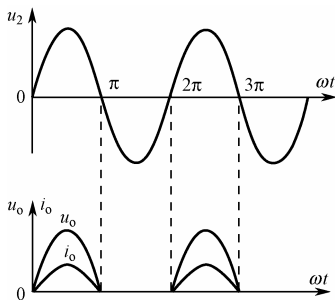


图 1-1-11 单相半波整流电路波形图

单相半波整流电路的缺点是电源利用率低且输出脉动大。

二、单相桥式整流电路的组成、工作原理

1. 电路组成

为了克服单相半波整流的缺点,常采用单相桥式整流电路,它由四个二极管接成电桥形式构成,图 1-1-12 所示为单相桥式整流电路的几种画法。

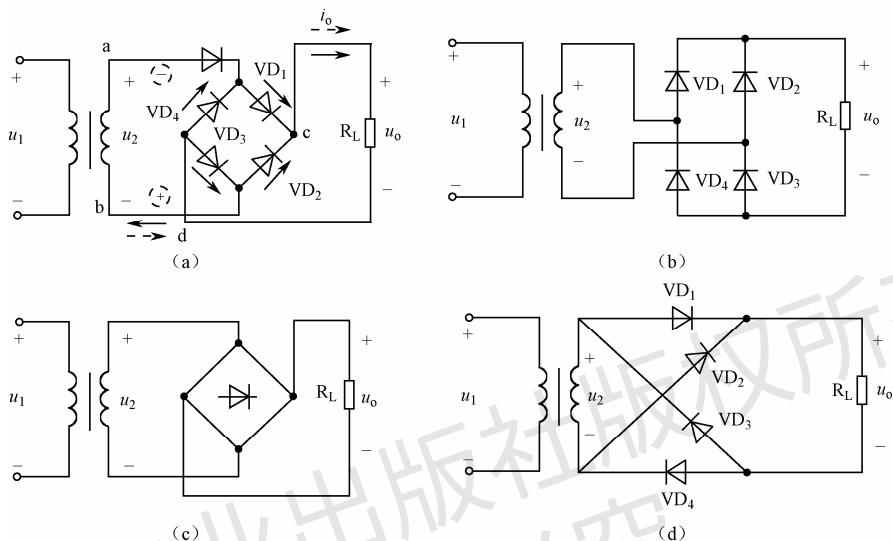


图 1-1-12 单相桥式整流电路的几种画法

2. 工作原理

当输入电压 u_1 为正半周时,整流二极管 VD_1 和 VD_3 上因加正向电压而导通, VD_2 和 VD_4 因加反向电压而截止。电流 i_o 流经 VD_1 、 R_L 和 VD_3 并在 R_L 上产生压降 u_o 。

当输入电压 u_1 为负半周时,整流二极管 VD_1 和 VD_3 因加反向电压而截止, VD_2 和 VD_4 因加正向电压而导通。电流 i_o 流经 VD_2 、 R_L 和 VD_4 并在 R_L 上产生压降 u_o 。其电流电压波形如图 1-1-13 所示。

三、并联型硅稳压管稳压电路

由于交流电网电压的变化或负载的变化,均会引起整流滤波电路输出直流电压的变化。因此,为了

使负载得到稳定的直流电压,必须在整流滤波电路后接入稳压电路。稳压电路分为并联型硅稳压管稳压电路和串联型稳压电路两种。下面主要介绍一下并联型硅稳压管稳压电路。

电路如图 1-1-14 所示,输入电压 U_1 是经过整流滤波后的电压;稳压电路的输出电压 U_o 。

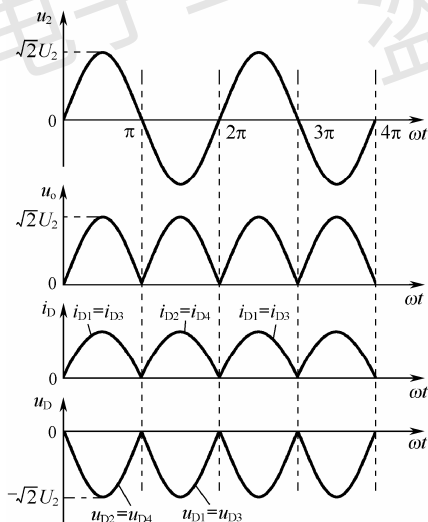


图 1-1-13 单相桥式整流电路电压电流波形

是稳压管的稳定电压 U_Z ； R 是限流电阻，由于稳压管与负载 R_L 并联，所以称为并联型稳压电路。它是利用的稳压管的反向击穿特性，如图 1-1-15 所示。当稳压管反向击穿时，若电流在 I_{Zmin} 至 I_{Zmax} 的范围内变化，则稳压管电压 U_Z 的变化值很小，其靠稳压管的电流变化，补偿负载电流变化，使输出电压稳定。

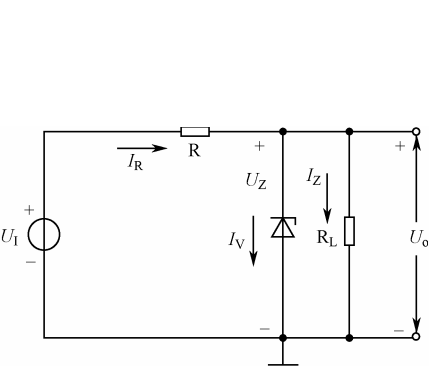


图 1-1-14 硅稳压管稳压电路图

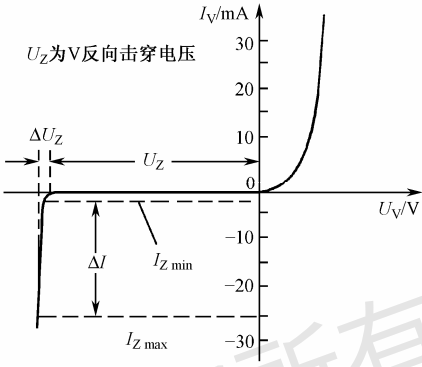


图 1-1-15 稳压管伏安特性

四、元器件选择

元器件列表 1-1-1。

表 1-1-1 元器件列表

元器件名称	代 号	元器件参数	元器件名称	代 号	元器件参数
整流二极管	VD ₁ ~VD ₄	IN4001	电阻	R ₂	510Ω
电解电容器	C	470μF/25V	熔断丝	F	0.5A
微调电位器	RP ₁	1kΩ	变压器	T	220V/180V
微调电位器	RP ₂	10kΩ	稳压二极管	VD ₅	2CW56（7~8.8V 稳压管）
电阻	R ₁	240Ω			

另外还需准备熔断器座、电源线、黑胶布、印制电路板。

完成任务

五、安装、调试与检测

- ① 按电路图正确安装元器件。
- ② 检查元器件安装正确无误后，接通电源。
- ③ 根据 ST16 示波器的使用方法，把示波器调节好。用垂直输入灵敏度步进式选择开关置“10V/div”挡，垂直被测信号输入耦合方式的转换开关置“DC”直流耦合状态。时基扫描步进式选择开关置“2ms/div”挡，触发信号极性开关置“+”。触发信号源选择开关置于“INT”。
- ④ 用示波器探头分别测量电源变压器次级、整流二极管输出端和滤波电容器两端的波

形。把测量到的波形绘制在表 1-1-2 中。

⑤ 将万用表拨到 $R \times 1k$ 挡, 校零后, 在稳压管不接入的状态下, 测量 RP_1 的阻值 (注意要在不通电的情况下测量)。调节 RP_1 , 使其阻值分别为 $1k\Omega$ 、 750Ω 、 500Ω 、 250Ω 、 0Ω ; 改变负载电阻中的 RP_2 的阻值; 用万用表直流电压挡测量输出电压 U_o 变化的情况, 把每次测量的变化数据记录在表 1-1-2 中, 并得出结论。

⑥ 将万用表拨到直流电流挡, 表棒串接在 VD_5 上方, 调节微调电位器 RP_1 的阻值, 使通过 VD_5 的电流每次分别为 $1mA$ 、 $2mA$ 、 $5mA$ 、 $10mA$ 、 $15mA$ 。然后将万用表拨到直流电压挡, 表棒测在负载电阻 R_L 两端, 改变微调电位器 RP_2 的阻值, 分别测量输出电压 U_o 变化的情况。把每次测得的数据记录在表 1-1-2 中, 得出结论后与未接入稳压二极管时进行比较, 看看有什么变化。

表 1-1-2 直流稳压电源制作技训表

画出被测 波形	变压器次级两端		滤波电容两端		负载电阻 R_L 两端	
调节 RP_1 的阻值, 分别为		1k Ω	750 Ω	500 Ω	250 Ω	0
调节 RP_2 的阻值, 记录未接 VD_5 前输出电压变化范围/V						
调节 RP_1 的阻值, 记录流过 VD_5 的电流分别为		1mA	2mA	5mA	10mA	15mA
调节 RP_2 的阻值, 记录接入 VD_5 后输出电压变化范围/V						



知识链接

1. 直流稳压电源的组成

在各种电子设备中, 直流稳压电源是必不可少的组成部分, 它是电子设备的一能量来源, 稳压电源的主要任务是将 50Hz 的电网电压转换成稳定的直流电压和电流, 从而满足负载的需要。直流稳压电源原理方框图, 如图 1-1-16 所示。

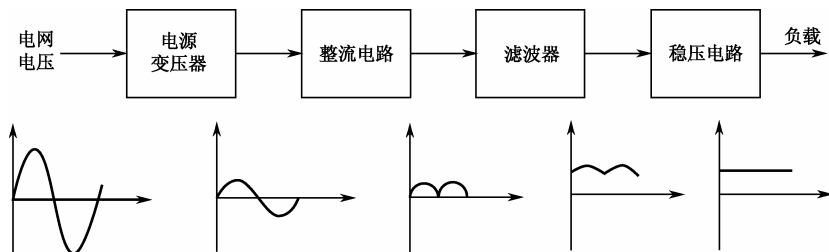


图 1-1-16 直流稳压电源原理方框图

直流稳压电源一般由变压、整流、滤波、稳压等环节组成。

变压器: 将交流电源 (220V 或 380V) 变换为符合整流电路所需要的交流电压。

整流电路: 利用单向导电性能的整流器件, 将交流电压整流成单向脉动的直流电压。

滤波电路: 滤去单向脉动直流电压中的交流成分, 保留直流分量, 尽可能供给负载平滑的直流电压。

稳压电路: 是一种自动调节电路, 在交流电源波动或负载变化时, 稳定直流输出电压。

2. 桥式整流电容滤波

图 1-1-17 所示为用四只整流二极管组成的桥式整流电容滤波电路，交流电经整流虽已变成脉动直流电，但含有较大的交流分量，为了得到平滑的直流电，在整流电路之后需接入滤波电路，把脉动直流电的交流成分滤掉。

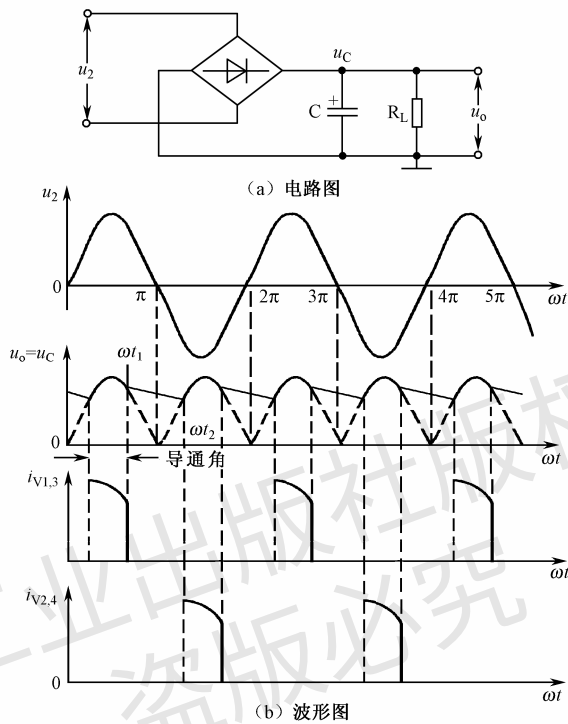


图 1-1-17 桥式整流电容滤波电路



思考与训练

制作一个如图 1-1-18 所示的全波整流电路，元器件列表见表 1-1-3，并分析其工作原理。

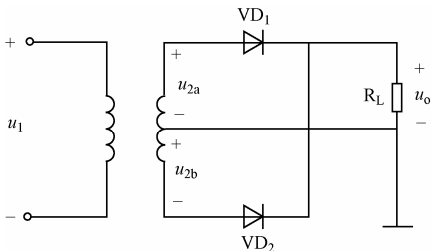


图 1-1-18 全波整流电路

表 1-1-3 元器件列表

元器件名称	代 号	元器件参数
整流二极管	VD ₁ ~VD ₂	1N4001
电阻	R _L	1kΩ
变压器	T	220V/180V

另外还需熔断器座、电源线、黑胶布、印制电路板。

任务2 半导体三极管

子任务1 半导体三极管的识别与测试



任务描述

1. 判别三极管的引脚。
 - (1) 判定基极 B 和管型;
 - (2) 判定集电极 C 和发射极 E。
2. 电流放大系数 β 的估测。
3. 锗管和硅管的判别。



学习目标

1. 掌握三极管的结构和符号。
2. 理解三极管的放大作用和电流分配关系。



任务分析

能从封装及外形上识别三极管的三个引脚，并掌握用万用表测试三极管的步骤及方法。



完成任务/操作步骤

任务准备

一、三极管的结构及符号

半导体三极管又称晶体三极管（下称三极管），一般简称晶体管或双极型晶体管。它是通过一定的制作工艺，将两个 PN 结结合在一起的器件，两个 PN 结相互作用，使三极管成为一个具有控制电流作用的半导体器件。三极管可以用来放大微弱的信号和作为无触点开关。

三极管从结构上分为 NPN 型三极管和 PNP 型三极管两种。图 1-2-1 所示为三极管的结构示意图和符号。

符号中发射极上的箭头方向，表示发射结正偏时电流的流向。

三极管制作时，通常它们的基区做得很薄（几微米到几十微米），且掺杂浓度低；发射区的杂质浓度则比较高；集电区的面积则比发射区做得大，这是三极管实现电流放大的内部条件。

三极管可以由半导体硅材料制成，称为硅三极管；也可以由锗材料制成，称为锗三极管。

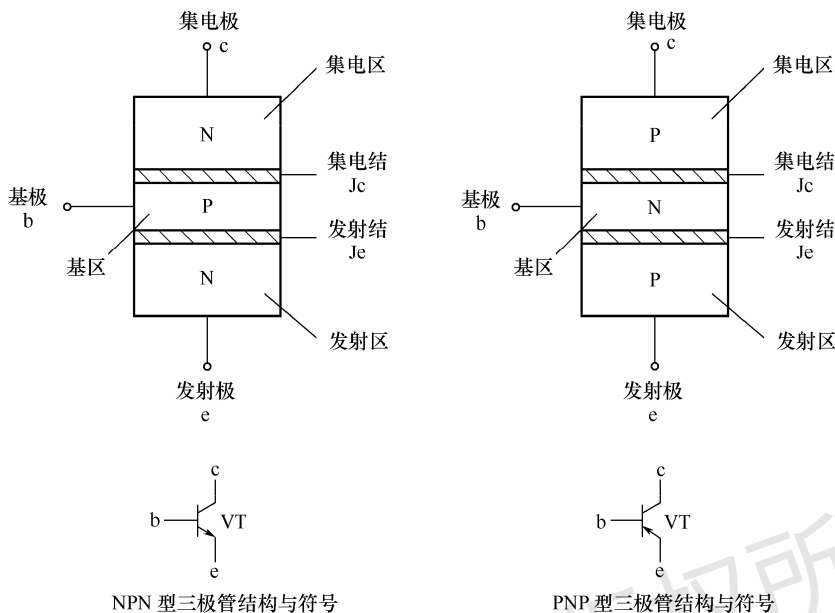


图 1-2-1 三极管的结构示意图和符号

三极管从应用角度讲，种类很多。根据工作频率可分为高频管、低频管和开关管；根据工作功率可分为大功率管、中功率管和小功率管。常见的三极管外形如图 1-2-2 所示。

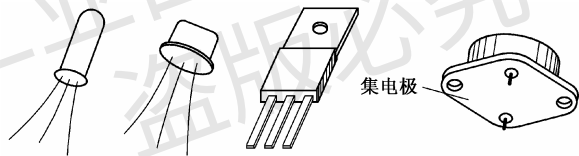


图 1-2-2 常见的三极管外形

二、三极管的电流分配原则及放大作用

- ① 要使三极管具有放大作用，发射结必须正向偏置，且集电结必须反向偏置。
- ② 一般有 $\beta > 1$ 。
- ③ 三极管的电流分配及放大关系式为

$$I_e = I_c + I_b$$
$$I_c = \beta I_b$$

三、三极管的特性曲线及主要参数

1. 三极管的特性曲线

三极管的特性曲线是指三极管的各电极电压与电流之间的关系曲线，它反映出三极管的特性。它可以用专用的图示仪进行显示，也可通过实验测量得到。以 NPN 型硅三极管为例，其常用的特性曲线有以下两种。

(1) 输入特性曲线

输入特性曲线是指一定集电极和发射极电压 U_{CE} 下, 三极管的基极电流 I_B 与发射结电压 U_{BE} 之间的关系曲线。实验测得三极管的输入特性曲线如图 1-2-3 所示。

(2) 输出特性曲线

输出特性曲线是指一定基极电流 I_B 下, 三极管的集电极电流 I_C 与集电结电压 U_{CE} 之间的关系曲线。实验测得三极管的输出特性曲线如图 1-2-4 所示。

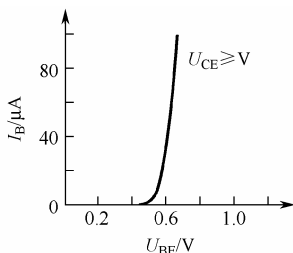


图 1-2-3 三极管的输入特性曲线

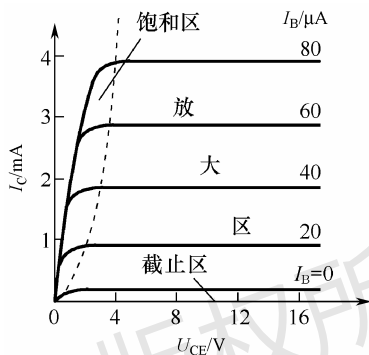


图 1-2-4 三极管的输出特性曲线

一般把三极管的输出特性分为三个工作区域, 下面分别进行介绍。

1) 截止区

三极管工作在截止状态时, 具有以下几个特点:

- ① 发射结和集电结均反向偏置。
- ② 若不计穿透电流 I_{CEO} , I_B 、 I_C 近似为 0。
- ③ 三极管的集电极和发射极之间电阻很大, 三极管相当于一个开关断开。

2) 放大区

图 1-2-4 中, 输出特性曲线近似平坦的区域称为放大区。三极管工作在放大状态时, 具有以下特点:

- ① 三极管的发射结正向偏置, 集电结反向偏置。
- ② 基极电流 I_B 微小的变化会引起集电极电流 I_C 较大的变化, 电流关系式为 $I_C = \beta I_B$ 。
- ③ 对 NPN 型三极管, 当其处于放大区时, 其三个电极的电位关系为 $U_C > U_B > U_E$ 。
- ④ 对 NPN 型硅三极管, 有发射结电压 $U_{BE} \approx 0.7V$; 对 NPN 型锗三极管, 有 $U_{BE} \approx 0.2V$ 。

3) 饱和区

三极管工作在饱和状态时具有如下特点:

- ① 三极管的发射结和集电结均正向偏置;
 - ② 三极管的电流放大能力下降, 通常有 $I_C < \beta I_B$;
 - ③ U_{CE} 的值很小, 称此时的电压 U_{CE} 为三极管的饱和压降, 用 U_{CES} 表示。一般硅三极管的 U_{CES} 约为 0.3V, 锗三极管的 U_{CES} 约为 0.1V;
 - ④ 三极管的集电极和发射极近似短接, 三极管类似于一个开关导通。
- 三极管作为开关使用时, 通常工作在截止和饱和导通状态; 作为放大元件使用时, 一般

要工作在放大状态。

完成任务

四、三极管的识别

（一）从封装及外形上识别

1. 小功率金属封装的三极管（见图 1-2-5）

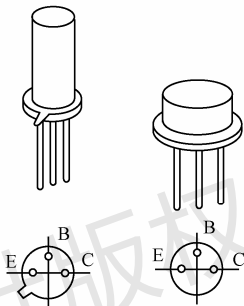


图 1-2-5 小功率金属封装的三极管

使三个引脚构成等腰三角形的顶点，从左至右依次为 E 极、B 极、C 极；或者看其金属帽底端有一个小凸起，距离这个突起最近的是 E 极，然后顺时针依次是 B 极、C 极。没有凸起的，顺时针引脚仍然依次是 E 极、B 极、C 极，如图 1-2-5 所示。

2. 中小功率塑料封装的三极管

使其平面朝向自己，三个引脚朝下放置，一般从左至右依次为 E 极、B 极、C 极。但也有的是 B 极、C 极、E 极或 C 极、E 极、B 极，如图 1-2-6 所示。

3. 大功率金属封装的三极管

其极性识别如图 1-2-7 所示，其中外壳是 C 极。

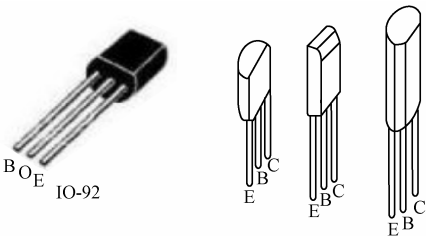


图 1-2-6 中小功率塑料封装的三极管

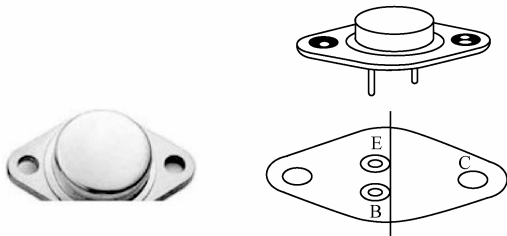


图 1-2-7 大功率金属封装的三极管

（二）用万用表测量三极管

1. 判别三极管的引脚

用万用表判别引脚的根据是，NPN 型三极管 B 极到 E 极和 B 极到 C 极均为 PN 结的正

向, 而 PNP 型三极管 B 极到 E 极和 B 极到 C 极均为 PN 结的反向。

(1) 判断三极管的 B 极

对于功率在 1W 以下的中小功率三极管, 可用万用表的 $R \times 1k$ 挡或 $R \times 100$ 挡测量, 对于功率在 1W 以上的大功率三极管, 可用万用表的 $R \times 1$ 挡或 $R \times 10$ 挡测量。

用黑表笔接触某一引脚, 红表笔分别接触另两个引脚, 如表头读数都很小, 则与黑表笔接触的那一引脚是 B 极, 同时可知此三极管为 NPN 型。若用红表笔接触某一引脚, 而黑表笔分别接触另两个引脚, 如表头读数同样都很小时, 则与红表笔接触的那一引脚是 B 极, 同时可知此三极管为 PNP 型。用上述方法既判定了三极管的 B 极, 又判定了三极管的管型。

(2) 判断三极管的 C 极和 E 极

以 NPN 型三极管为例, 确定 B 极后, 假设其余的两只脚中的一只是 C 极, 将黑表笔接到此脚上, 红表笔则接到假设的 E 极上。

用手指把假想的 C 极和已测出的 B 极捏起来 (但不要相碰), 看表针指示, 并记下此阻值的读数。然后再作相反假设, 即把原来假设为 C 极的脚假设为 E 极, 作同样的测试并记下此阻值的读数。比较两次度数的大小, 若前者阻值较小, 说明前者的假设是对的, 那么, 黑表笔接的一只脚就是 C 极, 剩下的一只脚就是 E 极。原理图如图 1-2-8 所示。

若需判别的是 PNP 型三极管, 仍用上述办法, 但必须把表笔极性对调一下。

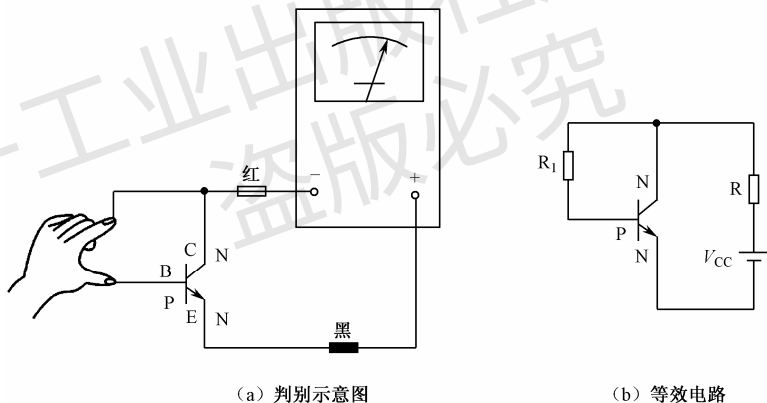


图 1-2-8 判断三极管的 C 极和 E 极的原理图

2. 电流放大系数 β 的估测

将万用表拨到相应电阻挡测量 E 极和 C 极之间的电阻, 再用手捏着 B 极和 C 极, 观察表针摆动幅度大小。摆动越大, 则 β 越大。手捏在两极之间等于给三极管提供了 B 极电流 I_B , I_B 的大小与手的潮湿程度有关。也可用一只 $50 \sim 100k\Omega$ 的电阻来代替手捏的方法进行测试。

一般的万用表具备测 β 的功能, 将三极管插入测试孔中即可从表头刻度盘上直读 β 值。若依此法来判别 E 极和 C 极也很容易, 只要将 E、C 脚对调一下, 万用表指针偏移角度较大的那一次插脚正确, 从万用表插孔旁标记即可判别出 E 极和 C 极。

3. 锗管和硅管的判别

对 PNP 型三极管可利用图 1-2-9 所示电路进行测量。如果测得电压降为 0.7V 左右, 即为硅管。如果电压降为 0.2~0.3V, 即为锗管。对 NPN 型三极管, 方法相同, 但电池和电表的

极性应与 PNP 型管相反。



知识链接

一、三极管的主要参数

三极管的参数有很多，例如，电流放大系数、反向电流、耗散功率、集电极最大电流、最大反向电压等，这些参数可以通过查半导体手册来得到。三极管的参数是正确选定三极管的重要依据，下面介绍三极管的几个主要参数。

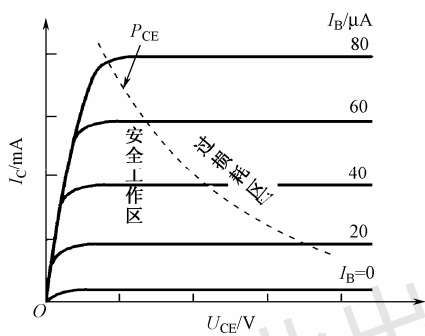


图 1-2-10 三极管的安全工作区

二、温度对三极管特性的影响

同二极管一样，三极管也是一种对温度十分敏感的器件，随温度的变化，三极管的性能参数也会改变。

图 1-2-11 和图 1-2-12 所示为三极管的特性曲线受温度的影响情况。

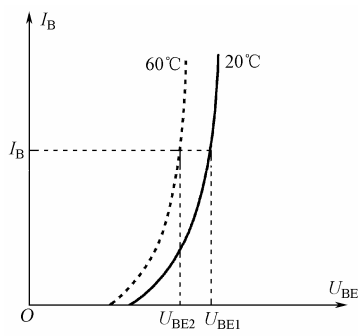


图 1-2-11 温度对三极管输入特性的影响

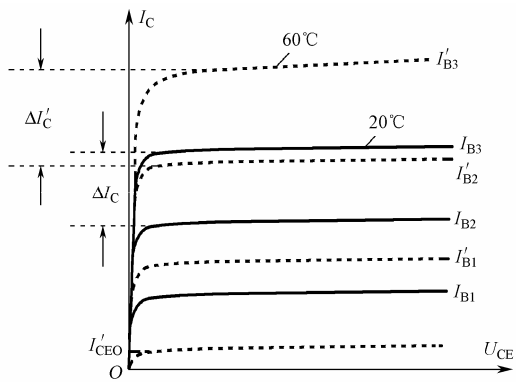


图 1-2-12 温度对三极管输出特性的影响

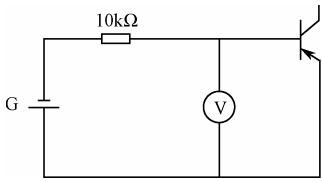


图 1-2-9 PNP 型三极管的测量电路

(1) 共发射极电流放大系数 β

它是指从基极输入信号，从集电极输出信号这种接法（共发射极）下的电流放大系数。

(2) 极间反向电流

- ① 集电极基极间的反向饱和电流 I_{CBO} 。
- ② 集电极发射极间的穿透电流 I_{CEO} 。

(3) 极限参数

- ① 集电极最大允许电流 I_{CM} 。
- ② 集电极最大允许功率损耗 P_{CM} 。
- ③ 反向击穿电压。

三极管的安全工作区如图 1-2-10 所示。



思考与训练

1. 用万用表判别三极管 3CX200B 的引脚。
2. 用万用表估测三极管 9013 的电流放大系数 β 。

子任务 2 半导体三极管的三种基本放大电路



任务描述

按照图 1-2-13 所示制作共射极分压式放大器,并能使用信号发生器输入信号,同时使用示波器检测信号。

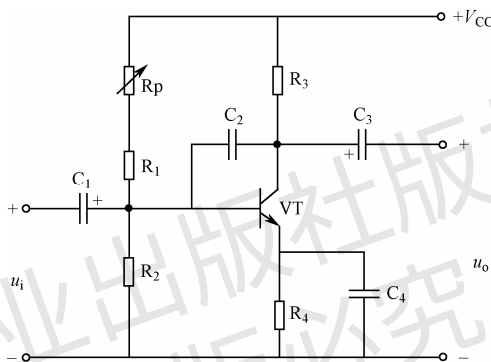


图 1-2-13 共射极分压式放大器原理图



学习目标

1. 学会元器件的识别与检测。
2. 学会示波器的使用。
3. 掌握共射极分压式偏置放大电路的组成,各元器件的作用。
4. 制作电路并完成电路功能。



任务分析

1. 按电路要求合理选择元件参数,并按电路图正确安装元器件。
2. 通过安装共射极分压式放大器,掌握其自动稳定工作点的原理。



完成任务/操作步骤

任务准备

一、三极管在放大电路中的三种连接方式

三极管有三个电极，它在组成放大电路时便有三种连接方式，即放大电路的三种组态：共发射极、共集电极和共基极组态放大电路。

图 1-2-14 所示为三极管在放大电路中的三种连接方式：图 1-2-14（a）从基极输入信号，从集电极输出信号，发射极作为输入信号和输出信号的公共端，此为共发射极（简称共射极）放大电路；图 1-2-14（b）从基极输入信号，从发射极输出信号，集电极作为输入信号和输出信号的公共端，此为共集电极放大电路；图 1-2-14（c）从发射极输入信号，从集电极输出信号，基极作为输入信号和输出信号的公共端，此为共基极放大电路。

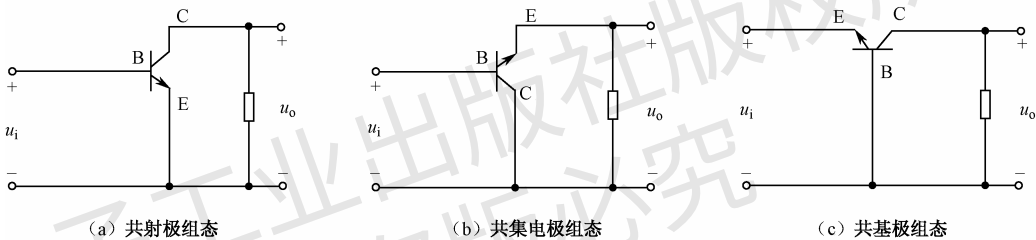


图 1-2-14 三极管在放大电路中的三种连接方式

二、基本共射极放大电路的组成和工作原理

1. 共射极放大电路

在三种组态放大电路中，共射极放大电路用得比较普遍。这里就以 NPN 共射极放大电路为例，讨论放大电路的组成、工作原理及分析方法。

图 1-2-15 所示为 NPN 型共射极放大电路的原理电路。

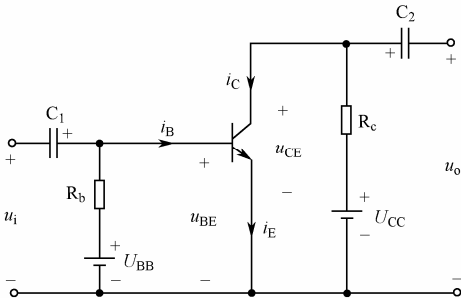


图 1-2-15 NPN 型共射极放大电路

电路中的元件有以下几个。

- ① 三极管;
- ② 隔直耦合电容 C_1 和 C_2 ;
- ③ 基极回路电源 U_{BB} 和基极偏置电阻 R_b ;
- ④ 集电极电源 U_{CC} ;
- ⑤ 集电极负载电阻 R_c 。

电流的方向:

对 NPN 型三极管基极电流 i_B 、集电极电流 i_C 流入电极为正, 发射极电流 i_E 流出电极为正, 这和 NPN 型三极管的实际电流方向相一致。

2. 电压、电流等符号的规定

放大电路中(见图 1-2-16)既有直流电源 U_{CC} , 又有交流电压 u_i , 电路中三极管各电极的电压和电流包含直流量和交流量两部分。

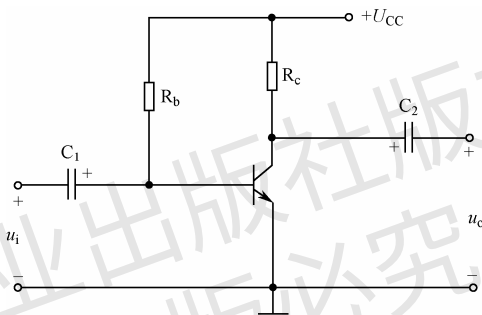


图 1-2-16 单电源共射极电路

为了方便分析, 各量的符号规定如下。

- ① 直流分量: 大写字母带大写下标。

如: I_B 、 I_C 、 I_E 、 U_{BE} 、 U_{CE}

- ② 交流分量: 小写字母带小写下标。

如: i_b 、 i_c 、 i_e 、 u_{be} 、 u_{ce}

- ③ 交直流叠加量: 小写字母带大写下标。

如: i_B 、 i_C 、 i_E 、 u_{BE} 、 u_{CE}

- ④ 交流分量的有效值: 大写字母带小写下标。

如: I_b 、 I_c 、 I_e 、 U_{be} 、 U_{ce}

3. 放大电路实现信号放大的实质

放大器放大的实质是实现小能量对大能量的控制和转换作用。根据能量守恒定律, 在这种能量的控制和转换中, 电源 U_{CC} 为输出信号提供能量。

需要特别注意的是, 信号的放大仅对交流量而言。

4. 基本放大电路的组成原则

三极管具有三个工作状态, 截止、放大和饱和。在放大电路中为实现其放大作用, 三极管必须工作在放大状态。从放大电路的工作过程可概括放大电路的组成原则为

- ① 外加电源的极性必须保证三极管的发射结正偏，集电结反偏。
- ② 输入电压 u_i 要能引起三极管的基极电流 i_B 作相应的变化。
- ③ 三极管集电极电流 i_C 的变化要尽可能地转为电压的变化输出。
- ④ 放大电路工作时，直流电源 U_{CC} 要为三极管提供合适的静态工作电流 I_{BQ} 、 I_{CQ} 和电压 U_{CEQ} ，即电路要有一个合适的静态工作点 Q ，如图 1-2-17 所示。

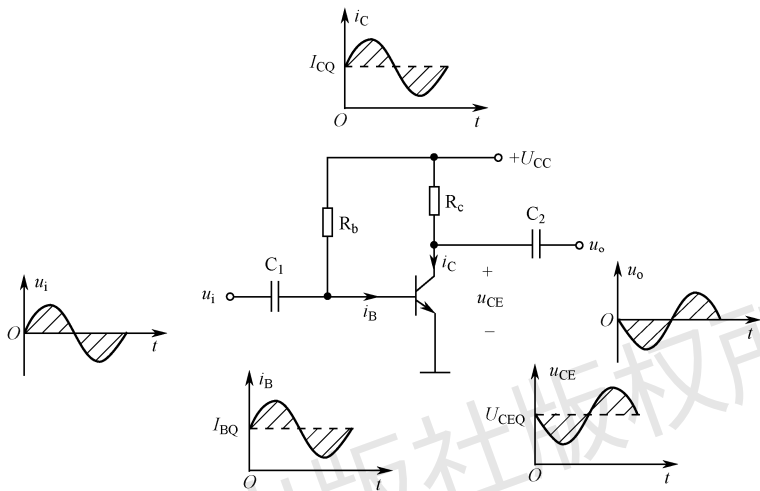


图 1-2-17 放大电路实现信号放大的工作过程

三、共射极放大电路的静态工作点

1. 直流通路

直流通路是指静态（ $u_i=0$ ）时，电路中只有直流量流过的通路。画直流通路有以下两个要点。

- ① 电容视为开路。
- ② 电感视为短路。

图 1-2-18 和图 1-2-19 所示分别为共射极放大电路及其直流通路。

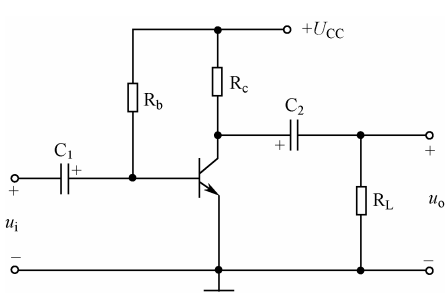


图 1-2-18 共射极放大电路

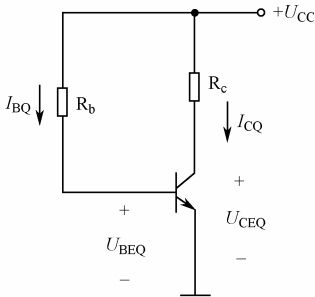


图 1-2-19 共射极放大电路的直流通路

估算电路的静态工作点 Q 时必须依据直流通路。

2. 估算法（近似算法）

静态基极电流 $I_{BQ} = U_{CC} - U_{BEQ} / R_b$

集电极电流 $I_{CQ} = \beta I_{BQ}$

集电极与射极之间的电位差 $U_{CEQ} = U_{CC} - I_{CQ} R_c$

四、共射极放大电路的动态工作情况分析

1. 交流通路

交流通路是指动态（ $u_i \neq 0$ ）时，电路中交流分量流过的通路。

画交流通路时有两个要点。

① 耦合电容视为短路。

② 直流电压源（内阻很小，忽略不计）视为短路。

图 1-2-20 所示为图 1-2-18 共射极放大电路的交流通路。

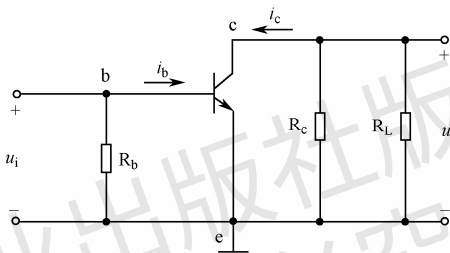


图 1-2-20 共射极放大电路的交流通路

计算动态参数 A_u 、 R_i 、 R_o 时必须依据交流通路。

2. 电压放大倍数 A_u 的估算

$$A_u = -u_o / u_i$$

负号表示输出电压 u_o 与输入电压 u_i 反相。

3. 电路的输入电阻 R_i 的估算

$$R_i = R_b // r_{be}$$

一般基极偏置电阻 $R_b \gg r_{be}$ ， $R_i \approx r_{be}$ 。

4. 电路的输出电阻 R_o 的估算

$$R_o \approx R_c$$

输出电阻 R_o 越小，放大电路的带负载能力越强。输出电阻 R_c 中不应包含负载电阻 R_L 。

五、共射极分压式放大电路

1. 工作原理

在基本放大电路中，由电源和基极偏置电阻 R_b 提供了基极电流 I_{BQ} ，若 R_b 固定，则 I_{BQ} 也就固定了，所以该电路又称固定偏置电路。这种电路的缺点是稳定性差，电路的外部因素改变后，静态工作点也随之变化。从而影响放大器的工作质量。在某些要求较高的场合，通常运用能自动稳定工作点的分压式偏置电路，如图 1-2-21（a）所示。

温度变化时，三极管的 I_{CBO} 、 β 、 U_{BEQ} 等参数将发生变化，导致工作点偏移。实验证明，

温度升高时，三极管的穿透电流 I_{CEO} 将大幅度增加，使 I_{CQ} 增大。共射极分压式偏置放大电路能使 I_{CQ} 的增大受到抑制，自动稳定静态工作点。

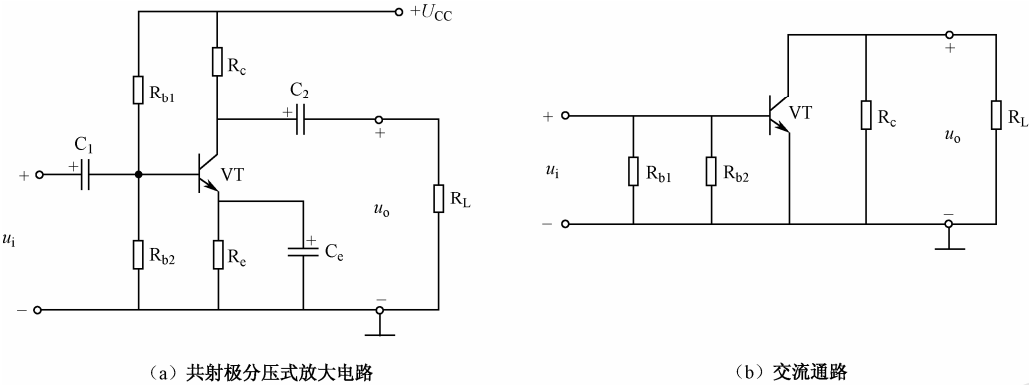


图 1-2-21 共射极分压式放大电路及其交流通路

共射极分压式偏置放大电路自动稳定静态工作点的过程如下所述。

T^0 （温度） $\uparrow$ （或 $\beta \uparrow$ ） $\rightarrow I_{CQ} \uparrow \rightarrow I_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{EQ} \uparrow \rightarrow U_{BEQ} \downarrow \rightarrow I_{BQ} \downarrow \rightarrow I_{CQ} \downarrow$ 。

1. 静态工作点的估算

$$U_{BQ}=U_{CC} \cdot R_{b2}/(R_{b1}+R_{b2})$$

$$I_{CQ}=I_{EQ}=U_{BQ}/R_e=U_{CC} \cdot R_{b2}/[(R_{b1}+R_{b2}) \cdot R_C]$$

$$I_{BQ}=I_{CQ}/\beta$$

$$U_{CEQ}=U_{CC}-I_{CQ} R_c-I_{EQ} R_e$$
$$=U_{CC}-I_{CQ}(R_c+R_e)$$

2. 电压放大倍数、输入电阻和输出电阻的估算

由图 1-2-21（b）可知，其 A_u 、 R_i 、 R_o 的估算式与固定偏置电路相同。

六、元器件选择

按表 1-2-1 选择元器件，并能对元器件进行检测。

表 1-2-1 元器件列表

元器件名称	代 号	元器件参数	元器件名称	代 号	元器件参数
电阻	R_1	10k Ω	晶体三极管	VT	9013
	R_2	5.1k Ω	电解电容	C_1 、 C_3	10 μ F/16V
	R_3	3.3 k Ω	瓷介电容	C_2	300pF
	R_4	1 k Ω	电解电容	C_4	100 μ F/16V
	R_P	100 k Ω			

完成任务

七、操作步骤

1. 按电路装配图（见图 1-2-22）正确安装各元器件。

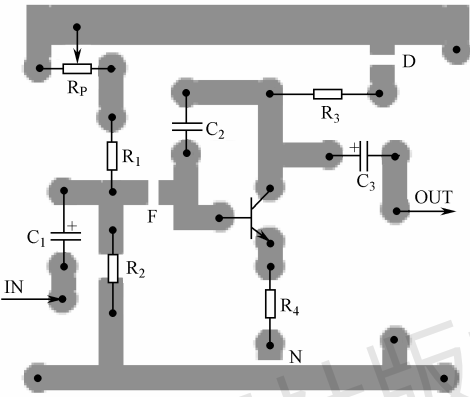


图 1-2-22 共射极分压式放大器装配图

2. 通电调试与检测

- ① 检查各元件装配无误后，用烙铁将各个断口连接好，接通电源 12V。
- ② 调整放大电路的静态工作点。调节基极上偏置电阻 RP，使 VT 发射极电压为 1.5V 左右，用万用表测量三极管各极对地直流电压值，并计算出集电极电流。数据记于表 1-2-2 中。
- ③ 测量电压放大倍数。让 XD1B 低频信号发生器输出 1000Hz、10mV 正弦信号，加至放大电路输入端，放大器输出端不接负载电阻，用毫伏表分别测出输入端和输出端的有效值，填入表 1-2-2 中，算出空载时的电压放大倍数。

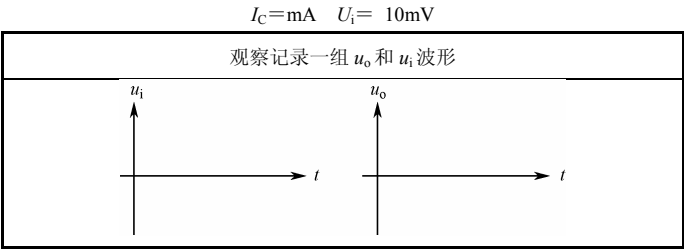
表 1-2-2 共射极分压式放大器技训表

测量三极管 VT 对地电压/V	E 极		B 极		C 极	
测量 $U_E=1.5V$ 时, I_E 、 I_C 值/mA	I_E			I_C		
根据输入信号、输出信号的大小，算出空载时的电压放大倍数						

3. 用双踪示波器观察 u_o 和 u_i 的相位关系，记入表 1-2-3 中。

得出结论： u_o 和 u_i 的相位关系是 u_o 与 u_i 反相。

表 1-2-3 u_o 和 u_i 的相位关系



知识链接

基本放大电路共有三种组态，前面讨论的放大电路均是共射极组态放大电路。另两种组态电路分别为共集电极和共基极组态电路。

一、共集电极放大电路

1. 电路组成

共集电极放大电路应用非常广泛，其电路构成如图 1-2-23 所示。其组成原则同共射极电路一样，外加电源的极性要保证放大管发射结正偏，集电结反偏，同时保证放大管有一个合适的 Q 点。

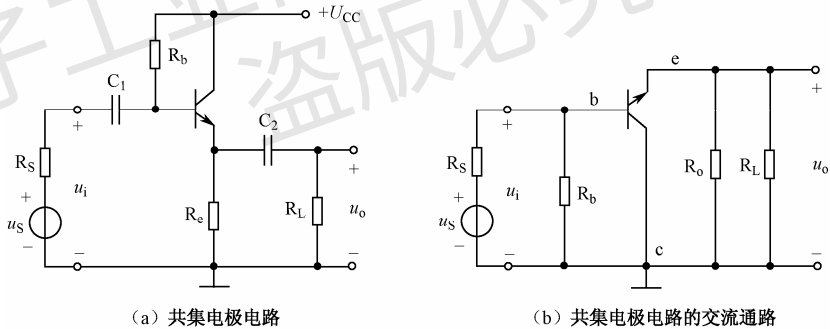


图 1-2-23 共集电极放大电路及其交流通路

交流信号 u_i 从基极 b 输入， u_o 从发射极 e 输出，集电极 c 作为输入、输出的公共端，故称为共集电极组态，此电路也称射极输出器。

2. 静电工作点 Q 的估算

$$\begin{aligned} U_{CC} &= I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + I_{EQ}R_e \\ &= I_{BQ}R_b + U_{BEQ} + (1+\beta)I_{BQ}R_e \end{aligned}$$

整理后得

$$I_{BQ} = (U_{CC} - U_{BEQ}) / [R_b + (1+\beta)R_e]$$

则

$$I_{EQ} = (1+\beta)I_{BQ}$$

$$U_{CEQ} = U_{CC} - I_{EQ}R_e$$

共集电极放大电路直流通路及其微变等效电路如图 1-2-24 所示。

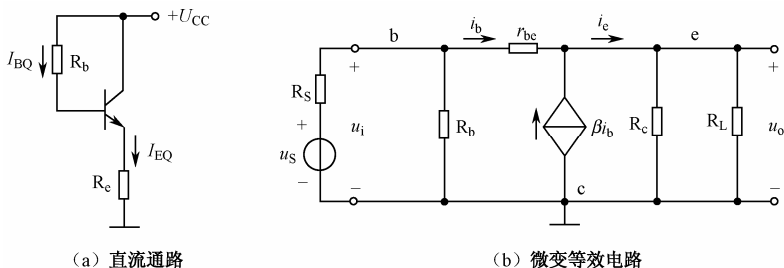


图 1-2-24 共集电极放大电路直流通路及其微变等效电路

3. 电路特点及应用场合

- ① 输出电压与输入电压同相且略小于输入电压。
- ② 共集电极电路的输出电阻很小，其带负载的能力比较强。实际应用中，射极跟随器常常用在多级放大电路的输出级，以提高整个电路的带负载能力。
- ③ 共集电极电路的输入电阻很大，输出电阻很小。实际应用中，常常用做缓冲级，以减小放大电路前后级之间的相互影响。

二、共基极放大电路

1. 电路组成

图 1-2-25 所示为共基极放大电路，图中 C_b 为基极旁路电容，其他元件同共射极放大电路。

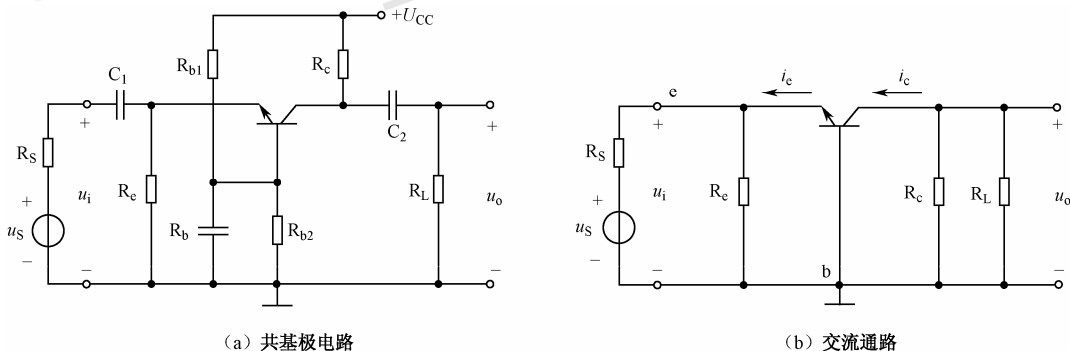


图 1-2-25 共基极放大电路及其交流通路

交流信号 u_i 从发射极 e 输入， u_o 从集电极 c 输出，基极 b 作为输入、输出的公共端，因此称为共基极组态。

2. 电路特点及应用场合

共基极电路具有电压放大作用， u_o 与 u_i 同相位。放大管输入电流为 i_e ，输出电流为 i_c ，没有电流放大作用， $i_c \approx i_e$ ，因此电路又称电流跟随器。其输入电阻很小，输出电阻很大。共基极电路的频率特性比较好，一般多用于高频放大电路。



思考与训练

画出图 1-2-25 (a) 所示的共基极放大电路的直流通路，并估算其静态工作点。

任务3 多级放大器



任务描述

要求按图 1-3-1 所示的电子助记器电路图完成电子助记器的制作。三极管 VT_1 、 VT_2 、 VT_3 、 VT_4 组成四级音频放大电路，前三级是电压负反馈放大电路，能起到稳定静态工作点的作用。BM 是微型驻极体传声器，可引出线用屏蔽线。微弱的声音，由传声器变为电信号，经过音频放大电路多级放大，最后由扬声器 BE 发出声音。使用时只要对传声器轻轻发出声音，扬声器中就能听到放大后的洪亮声音，因而有助于加强记忆。

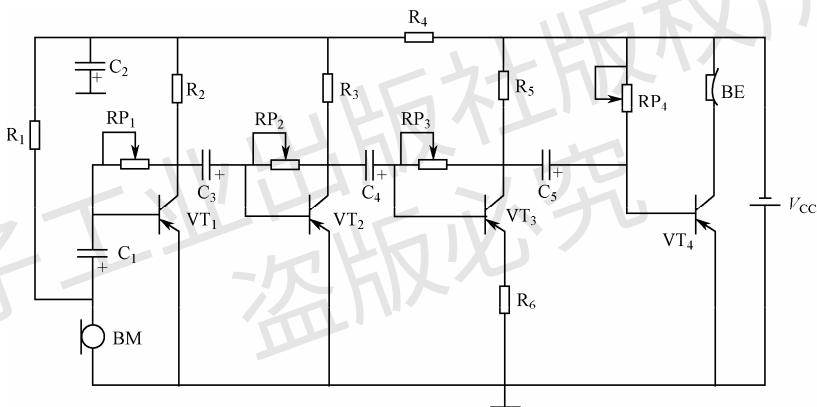


图 1-3-1 电子助记器电路图



学习目标

1. 进一步理解多级放大电路的工作原理。
2. 掌握多级放大电路中各级静态工作点的调整与测试。
3. 能根据电路图按照工艺要求正确安装、焊接元器件。
4. 掌握测试电子助记器基本性能的方法。



任务分析

1. 按电路要求合理选择元件参数，并按电路图正确安装元器件。
2. 电子助记器电路安装完毕后，对驻极体话筒讲话，由耳机能听到清脆洪亮的声音。



完成任务/操作步骤

任务准备

一、多级放大电路

实际应用中,放大电路的输入信号通常很微弱(毫伏或微伏数量级),为了使放大后的信号能够驱动负载,仅仅通过单级放大电路进行信号放大,很难达到实际要求,常常需要采用多级放大电路。采用多级放大电路可有效地提高放大电路的各种性能,例如,提高电路的电压增益、电流增益、输入电阻、带负载能力等。

多级放大电路是指两个或两个以上的单级放大电路所组成的电路。图 1-3-2 所示为多级放大电路的组成框图。通常称多级放大电路的第一级为输入级。对于输入级,一般采用输入阻抗较高的放大电路,以便从信号源获得较大的电压输入信号并对信号进行放大。中间级主要实现电压信号的放大,一般要用几级放大电路才能完成信号的放大。通常把多级放大电路的最后一级称为输出级,主要用于功率放大,以驱动负载工作。

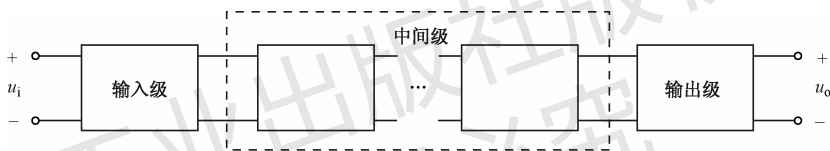


图 1-3-2 多级放大电路的组成框图

二、多级放大电路的分析

1. 多级放大电路的电压放大倍数 A_u

$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdots A_{un}$$

图 1-3-3 所示为多级放大电路的框图。

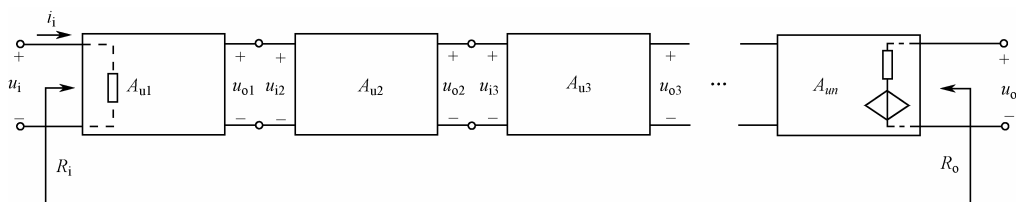


图 1-3-3 多级放大电路框图

2. 多级放大电路的输入电阻 R_i

多级放大电路的输入电阻等于从第一级放大电路的输入端所看到的等效输入电阻 R_{i1} 。

即

$$R_i = R_{i1}$$

3. 多级放大电路的输出电阻 R_o

多级放大电路的输出电阻等于从最后一级（ n 级）放大电路的输出端所看到的等效电阻

R_{on} 。
即

$$R_o=R_{on}$$

注意：求解多级放大电路的动态参数 A_u 、 R_i 、 R_o 时，一定要考虑前后级之间的相互影响。

- ① 要把后级的输入阻抗作为前级的负载电阻。
- ② 前级的开路电压作为后级的信号源电压，前级的输出阻抗作为后级的信号源阻抗。

三、元器件选择

按表 1-3-1 选择元器件

表 1-3-1 元器件列表

元器件名称	代 号	元器件参数	元器件名称	代 号	元器件参数
三极管	$VT_1\sim VT_4$	3AX31	电位器	RP_1	$51k\Omega$
电解电容	C_1	$1\mu F/16V$	电位器	RP_2	$47k\Omega$
电解电容	$C_2\sim C_5$	$100\mu F/16V$	电位器	RP_3	$33k\Omega$
电阻	R_1	$2.2k\Omega$	电位器	RP_4	$39k\Omega$
电阻	$R_2、R_3、R_5$	$1.5k\Omega$	扬声器	BE	8Ω
电阻	R_4	270Ω	电池	V_{CC}	$1.5V$

另需传声器（BM）1 个，印制电路板 1 块（ $5cm\times 10cm$ ），焊接工具 1 套（25W 电烙铁、焊锡丝、松香、细砂纸）。

完成任务

四、操作步骤

1. 用 Protel 画图

- ① 根据上述设计思路，可画出实际电路图（或直接画仿真电路图，自行画出）。
- ② 电路仿真调试在完成电路的初步设计后，再对电路进行仿真调试，观察和测量电路的性能指标并调整部分元器件参数，从而达到各项指标的要求。
- ③ PCB 图设计与生成。
 - a. 由仿真电路直接生成网络表；
 - b. 调用 Protel-PCB，并进行元器件合理布局；
 - c. 调用网络表，并自动布线；
 - d. PCB 图的人工调整；
 - e. 打印输出。

- 2. 用制板机制作 PCB
- 3. 分发元器件，识别、检测，整形、安装
- 4. 通电调试
 - ① 检查各元器件安装无误后，接通电源（可用一节 1.5V 的电池）。
 - ② 用电流表分别接在三极管 VT₄、VT₃、VT₂、VT₁ 的集电极测量其集电极电流，然后依次调整电阻 RP₄、RP₃、RP₂、RP₁ 的阻值，使它们的电流分别为 5mA、0.5mA、0.45mA、0.4 mA 左右，调整次序由后逐次向前。
 - ③ 对驻极体话筒讲话，由耳机能听到清脆洪亮的声音。
- 5. 将制作调试结果填入表 1-3-2 中

表 1-3-2 电子助记器电路制作实训表

VT ₄ 集电极电流为 5mA 时	偏流电阻 RP ₄ 的阻值=
VT ₃ 集电极电流为 0.5mA 时	偏流电阻 RP ₃ 的阻值=
VT ₂ 集电极电流为 0.45mA 时	偏流电阻 RP ₂ 的阻值=
VT ₁ 集电极电流为 0.4mA 时	偏流电阻 RP ₁ 的阻值=
整机电流/mA	



知识链接

多级放大电路的耦合方式

在多级放大电路中，各级放大电路输入和输出之间的连接方式称为耦合方式。常见的连接方式有三种：阻容耦合、直接耦合和变压器耦合。

1. 阻容耦合

阻容耦合是指各单级放大电路之间通过隔直耦合电容连接。图 1-3-4 所示为阻容耦合两级放大电路。

阻容耦合多级放大电路具有以下特点。

- ① 各级放大电路的静态工作点相互独立、互不影响，有利于放大器的设计、调试和维修。
- ② 低频特性差，不适合放大直流及缓慢变化的信号，只能传递具有一定频率的交流信号。
- ③ 输出温度漂移比较小。
- ④ 阻容耦合电路具有体积小、重量轻的优点，分立元器件电路中应用较多。但在集成电路中，不易制作大容量的电容，因此阻容耦合放大电路不便做成集成电路。

2. 直接耦合

直接耦合是指各级放大电路之间通过导线直接连接。图 1-3-5 所示为直接耦合两级放大电路。前级的输出信号 u_{o1} ，可直接作为后一级的输入信号 u_{i2} 。

直接耦合电路的特点有以下几个方面。

- ① 各级放大电路的静态工作点相互影响，不利于电路的设计、调试和维修。
- ② 频率特性好，可以放大直流、交流及缓慢变化的信号。

- ③ 输出温度存在漂移。
- ④ 电路中无大的耦合电容，便于集成化。

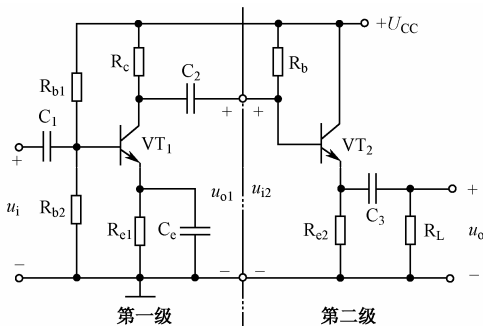


图 1-3-4 阻容耦合两级放大电路

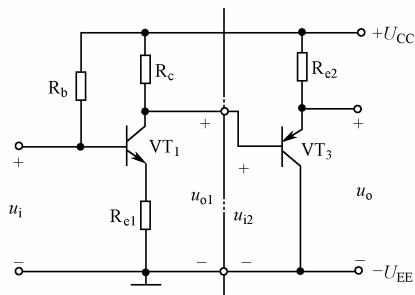


图 1-3-5 直接耦合两级放大电路

3. 变压器耦合

变压器耦合是指各级放大电路之间通过变压器耦合传递信号。图 1-3-6 所示为变压器耦合放大电路。通过变压器 T_1 把前级的输出信号 u_{o1} ，耦合传送到后级，作为后一级的输入信号 u_{i2} 。变压器 T_2 将第二级的输出信号耦合传递给负载 R_L 。

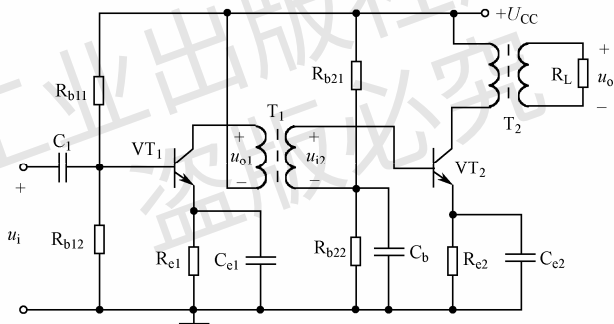


图 1-3-6 变压器耦合放大电路

变压器具有隔离直流、通交流的特性，因此变压器耦合放大电路具有如下特点。

- ① 各级的静态工作点相互独立、互不影响，有利于放大器的设计、调试和维修。
- ② 同阻容耦合一样，变压器耦合低频特性差，不适合放大直流及缓慢变化的信号，只能传递具有一定频率的交流信号。
- ③ 可以实现电压、电流和阻抗的变换，容易获得较大的输出功率。
- ④ 输出温度漂移比较小。
- ⑤ 变压器耦合电路体积和重量较大，不便于做成集成电路。



思考与训练

某多级放大电路由三级组成，各级电压放大倍数分别为 $A_{u1}=40$ 、 $A_{u2}=60$ 、 $A_{u3}=20$ 。求总电压放大倍数 A_u 和总电压增益 G_u 是多少？（提示： $G_u=20\lg A_u$ ）

任务4 反馈电路



任务描述

反馈电路在各种电子电路中都获得了普遍的应用,反馈是将放大器输出信号(电压或电流)的一部分或全部,回送到放大器输入端与输入信号进行比较(相加或相减),并用比较所得的有效输入信号去控制输出,这就是放大器的反馈过程。凡是回送到放大器输入端的反馈信号起加强输入原输入信号的,使输入信号增加的称正反馈;反之称为负反馈。按其电路结构分为电流反馈电路和电压反馈电路两种。正反馈电路多应用在电子振荡电路上,而负反馈电路则多应用在各种高低频放大电路上,因应用较广,所以在这里就负反馈电路加以论述。

按照图 1-4-1 所示制作一个负反馈放大电路。图 1-4-1 是一个两级的负反馈放大电路, R_{10} 是级间负反馈电阻。

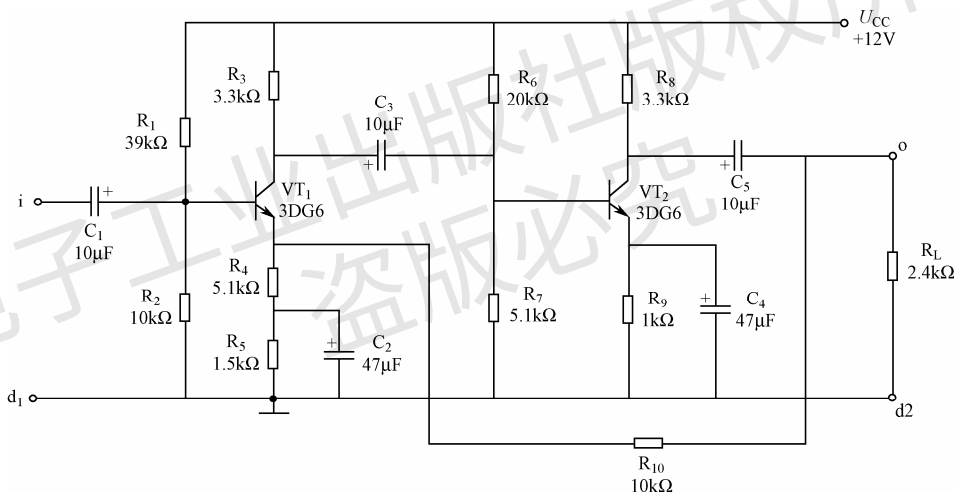


图 1-4-1 两级的负反馈放大电路



学习目标

1. 掌握反馈、负反馈的基本概念。
2. 掌握反馈电路的基本类型及判别。
3. 掌握负反馈电路的工作原理。
4. 熟练掌握负反馈电路的性能和作用。
5. 掌握实际电路的安装和调试。



任务分析

1. 按电路要求合理选择元器件参数，并按电路图正确安装元器件。
2. 通过安装图 1-4-1 所示的一个两级负反馈放大电路，掌握负反馈放大电路的性能和作用。



完成任务/操作步骤

任务准备

一、反馈的概念

1. 反馈的定义

在电子系统中，把放大电路输出量（电压或电流）的部分或全部，经过一定的电路或元件反送回到放大电路的输入端，从而牵制输出量，这种措施称为反馈。有反馈的放大电路称为反馈放大电路。

2. 反馈放大电路的一般方框图

任意一个反馈放大电路都可以表示为一个基本放大电路和反馈网络组成的闭环系统，其构成如图 1-4-2 所示。

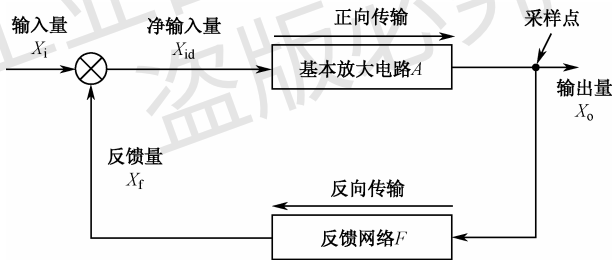


图 1-4-2 反馈放大电路的一般方框图

图中 X_i 、 X_{id} 、 X_f 、 X_o 分别表示放大电路的输入信号、净输入信号、反馈信号和输出信号，它们可以是电压量，也可以是电流。

没有引入反馈的基本放大电路称为开环电路，其中 A 表示基本放大电路的放大倍数，也称开环放大倍数。

3. 反馈元件

在反馈电路中，既与基本放大电路输入回路相连，又与输出回路相连的元件，以及与反馈支路相连且对反馈信号的大小产生影响的元件，均称为反馈元件。

二、负反馈对放大电路性能的影响

从反馈放大电路的一般表达式可知，电路中引入负反馈后其增益下降，但放大电路的其他性能会得到改善，例如，提高放大倍数的稳定性、减小非线性失真、抑制噪声干扰、扩展通频带等。

1. 提高放大倍数的稳定性

闭环放大电路增益的相对变化量是开环放大电路增益相对变化量的 $(1+AF)$ 分之一。即负反馈电路的反馈越深, 放大电路的增益也就越稳定。

前面的分析表明, 电压负反馈使输出电压稳定, 电流负反馈使输出电流稳定, 即在输入一定的情况下, 可以维持放大器增益的稳定。

2. 减小环路内的非线性失真

三极管是一个非线性元器件, 放大器在对信号进行放大时不可避免地会产生非线性失真。假设放大器的输入信号为正弦信号, 没有引入负反馈时, 开环放大器产生如图 1-4-3 (a) 所示的非线性失真, 即输出信号的正半周幅度变大, 而负半周幅度变小。

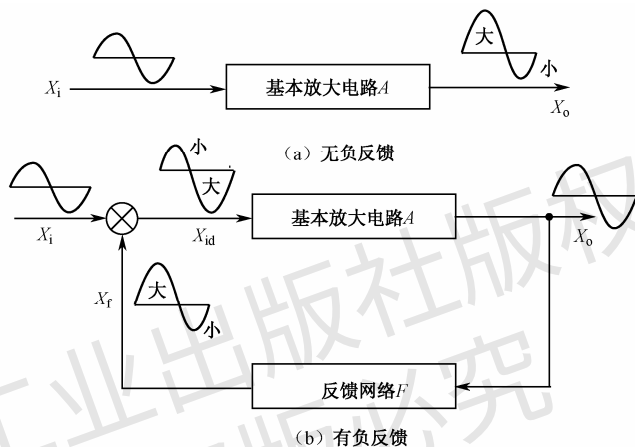


图 1-4-3 引入负反馈减小失真

现在引入负反馈, 假设反馈网络为不会引起失真的线性网络, 则反馈回的信号同输出信号的波形一样。反馈信号在输入端与输入信号相比较, 使净输入信号 $X_{id}=(X_i-X_f)$ 的波形正半周幅度变小, 而负半周幅度变大, 如图 1-4-3 (b) 所示。经基本放大电路放大后, 输出信号趋于正、负半周对称的正弦波, 从而减小了非线性失真。

注意: 引入负反馈减小的是环路内的失真。如果输入信号本身有失真, 则此时引入负反馈的作用不大。

3. 抑制环路内的噪声和干扰

在反馈环内, 放大电路本身产生的噪声和干扰信号, 可以通过负反馈进行抑制, 其原理与减小非线性失真的原理相同。但对反馈环外的噪声和干扰信号, 引入负反馈也无能为力。

4. 扩展频带

频率响应是放大电路的重要特性之一。在多级放大电路中, 级数越多, 增益越大, 频带越窄。引入负反馈后, 可有效扩展放大电路的通频带。

图 1-4-4 所示为放大器引入负反馈后通频带的变化。根据上、下限频率的定义, 从图中可见, 放大器引入负反馈以后, 其下限频率降低, 上限频率升高, 通频带变宽。

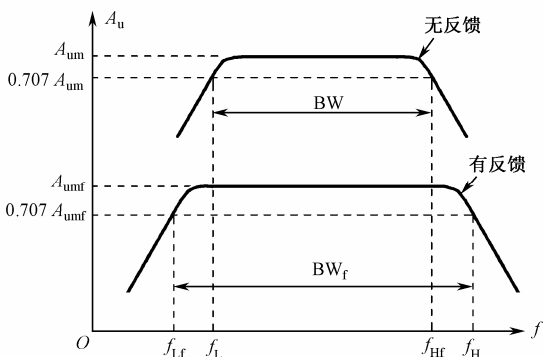


图 1-4-4 负反馈扩展频带

5. 改变输入和输出电阻

(1) 负反馈对放大电路输入电阻的影响

串联负反馈使放大电路的输入电阻增大；而并联负反馈使输入电阻减小。

(2) 负反馈对放大电路输出电阻的影响

电压负反馈使放大电路的输出电阻减小；而电流负反馈使输出电阻增大。

三、反馈的类型及其判定方法

(一) 正反馈和负反馈

按照反馈信号极性的不同进行分类，反馈可以分为正反馈和负反馈。

1. 定义

① 正反馈：引入的反馈信号 X_f 增强了外加输入信号的作用，使放大电路的净输入信号增加，导致放大电路的放大倍数提高的反馈。正反馈主要用于振荡电路、信号产生电路。

② 负反馈：引入的反馈信号 X_f 削弱了外加输入信号的作用，使放大电路的净输入信号减小，导致放大电路的放大倍数减小的反馈。引入负反馈，以改善放大电路的性能指标。

2. 判定方法

常用电压瞬时极性法判定电路中引入反馈的极性，具体方法如下所述。

① 先假设放大电路的输入信号电压处于某一瞬时极性。例如，用“+”号表示该点电压的变化是增大；用“-”号表示电压的变化是减小。

② 按照信号单向传输的方向，如图 1-4-3 (a) 中所示，同时根据各级放大电路输出电压与输入电压的相位关系，确定电路中相关各点电压的瞬时极性。

③ 根据反送到输入端的反馈电压信号的瞬时极性，确定是增强还是削弱了原来的输入信号。如果是增强，则引入的为正反馈；反之，则为负反馈。

判定反馈的极性时，一般有这样的结论：在放大电路的输入回路，输入信号电压 u_i 和反馈信号电压 u_f 相比较。当输入信号 u_i 和反馈信号 u_f 在相同端点时，如果引入的反馈信号 u_f 和输入信号 u_i 同极性，则为正反馈；若二者的极性相反，则为负反馈。当输入信号 u_i 和反馈信号 u_f 不在相同端点时，若引入的反馈信号 u_f 和输入信号 u_i 同极性，则为负反馈；若二者的

极性相反,则为正反馈。图 1-4-5 所示为反馈极性的判定方法。

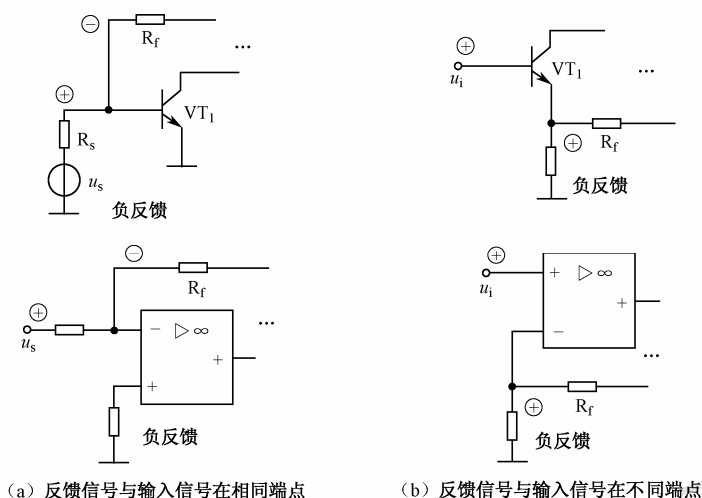


图 1-4-5 反馈极性的判定方法

如果反馈放大电路是由单级运算放大器构成的,则反馈信号送回到反相输入端时,为负反馈;反馈信号送回到同相输入端时,为正反馈。

(二) 交流反馈和直流反馈

根据反馈信号的性质进行分类,反馈可以分为交流反馈和直流反馈。

1. 定义

(1) 直流反馈

反馈信号中只包含直流成分。

(2) 交流反馈

反馈信号中只包含交流成分。

2. 判定方法

交流反馈和直流反馈的判定,可以通过画反馈放大电路的交、直流通路来完成。在直流通路中,如果反馈回路存在,即为直流反馈;在交流通路中,如果反馈回路存在,即为交流反馈;如果在直、交流通路中,反馈回路都存在,即为交、直流反馈。

(三) 电压反馈和电流反馈

1. 定义

(1) 电压反馈

反馈信号从输出电压 u_o 采样。

(2) 电流反馈

反馈信号从输出电流 i_o 采样。

2. 判定方法

① 根据定义判定方法: 令 $u_o=0$, 检查反馈信号是否存在。若不存在,则为电压反馈;否则为电流反馈。

② 一般电压反馈的采样点与输出电压在相同端点；电流反馈的采样点与输出电压在不同端点。

（四）串联反馈和并联反馈

1. 定义

① 串联反馈：反馈信号 X_f 与输入信号 X_i 在输入回路中以电压的形式相加减，即在输入回路中彼此串联。

② 并联反馈：反馈信号 X_f 与输入信号 X_i 在输入回路中以电流的形式相加减，即在输入回路中彼此并联。

2. 判定方法

如果输入信号 X_i 与反馈信号 X_f 在输入回路的不同端点，则为串联反馈；若输入信号 X_i 与反馈信号 X_f 在输入回路的相同端点，则为并联反馈。

完成任务

四、具体反馈电路、元器件选择

① 图 1-4-1 所示为一个两级负反馈放大电路，图中 R_{10} 为极间负反馈电阻。

② 按表 1-4-1 选择元器件。

表 1-4-1 元器件列表

元器件名称	代 号	元器件参数	元器件名称	代 号	元器件参数
电阻	R_1	39k Ω	晶体三极管	$VT_1、VT_2$	3DG6
	R_2	10k Ω	电解电容	$C_1、C_3、C_5$	10 μ F/16V
	R_3	3.3 k Ω	电解电容	$C_2、C_4$	47 μ F/16V
	R_4	51 Ω			
	R_5	1.5k Ω			
	R_6	20 k Ω			
	R_7	5.0 k Ω			
	R_8	3.3 k Ω			
	R_9	1k Ω			
	R_{10}	10k Ω			
	R_L	2.4 k Ω			

③ 准备 XT-18 实验台一套，万用表一块，毫伏表一块，示波器一台。

④ 电路图的绘制，用 Protel 绘制电路原理图（见图 1-4-1）。

⑤ 根据原理图绘制其印制电路板图，并生成结构表。要求合理安排元器件的位置，布线整齐且不交叉。

⑥ 按照设计任务要求和设计指标适当选择相应元器件。

⑦ 在完成电路的初步设计后，再对电路进行仿真调试，通过观察和测量电路的性能指

标调整部分元器件参数，从而达到各项指标的要求。

⑧ 用制板机制作我印制电路板。

五、电路的安装、调试

- 1. 分发元器件，识别、检测，整形、安装
- 2. 通电调试

① 将 C 单元右路稳压电源调到 12V，用红导线连接正极到负反馈放大电路的 U_{cc} ，用黑导线连接负极到负反馈放大电路的 d2 点。

② 选择函数信号发生器的正弦波输出，用红导线连接正极到负反馈放大电路的 i 点，用黑导线连接负极到负反馈放大电路的 d1 点。

③ 示波器 Y 通道输入的正极用红导线连接到负反馈放大电路的 o 点，负极用黑导线连接到负反馈放大电路的 d2 点。

3. 静态工作点的测量

去掉输入信号在 i 点的连接导线，并将 i 点用短路元器件连接到地（d1 点）。然后用万用表测量电压 U_{E1} 、 U_{BE1} 、 U_{CE1} 、 U_{E2} 、 U_{BE2} 、 U_{CE2} ，并计算 $I_{C1}(\approx U_{E1}/R_{E1})$ 、 $I_{C2}(\approx U_{E2}/R_{E2})$ 填入表 1-4-2 中。

表 1-4-2 负反馈放大电路的静态工作点

U_{E1}/V	U_{BE1}/V	U_{CE1}/V	I_{C1}/mA	U_{E2}/V	U_{BE2}/V	U_{CE2}/V	I_{C2}/mA

4. 负反馈放大电路放大倍数的测量

拆掉 i 点到地的短路元件，重将函数信号发生器的正弦输出连接到 i 点。调节函数信号发生器的频率为 1kHz，电压 $U_i=2mV$ 。拆掉电阻 R_{10} 所在的负反馈支路的连线，观察示波器的波形，保证 U_o 不失真，若失真可以适当减小 U_i 。用毫伏表测量此时的 U_i 和 U_o ，计算开环电压放大倍数 $A_u=U_o/U_i$ ，并填入表 1-4-3 中。

保持 U_i 不变，连接电阻 R_{10} 所在的负反馈支路的连线，用毫伏表测量此时的 U_o ，计算闭环电压放大倍数，并填入表 1-4-3 中。

表 1-4-3 负反馈对放大器性能的影响

测试条件	开 环	闭 环
U_i/V		
U_o/V		
A_u		

拆掉电阻 R_{10} 所在的负反馈支路的连线，观察示波器的波形，增大 U_i 使 U_o 出现明显失真。保持 U_i 不变，连接电阻 R_{10} 所在的负反馈支路的连线，从示波器上观察到波形失真减小。



知识链接

一、放大电路引入负反馈的一般原则

- ① 要稳定放大电路的静态工作点 Q ，应该引入直流负反馈。
 - ② 要改善放大电路的动态性能（如增益的稳定性、稳定输出量、减小失真、扩展频带等），应该引入交流负反馈。
 - ③ 要稳定输出电压，减小输出电阻，提高电路的带负载能力，应该引入电压负反馈。
 - ④ 要稳定输出电流，增大输出电阻，应该引入电流负反馈。
 - ⑤ 要提高电路的输入电阻，减小电路向信号源索取的电流，应该引入串联负反馈。
- 注意：**在多级放大电路中，为了达到改善放大电路性能的目的，所引入的负反馈一般为级间反馈。

二、交流负反馈放大电路的四种组态

1. 电压串联负反馈

如图 1-4-6 所示为负反馈放大电路，采样点和输出电压同端点，为电压反馈；反馈信号与输入信号在不同端点，为串联反馈。因此电路引入的反馈为电压串联负反馈。

放大电路引入电压串联负反馈后，通过自身闭环系统的调节，可使输出电压趋于稳定。

电压串联负反馈的特点：输出电压稳定，输出电阻减小，输入电阻增大，具有很强的带负载能力。

2. 电压并联负反馈

图 1-4-7 所示为由运放所构成的电路，采样点和输出电压在同端点，为电压反馈；反馈信号与输入信号在同端点，为并联反馈。因此电路引入的反馈为电压并联负反馈。

电压并联负反馈的特点：输出电压稳定，输出电阻减小，输入电阻减小。

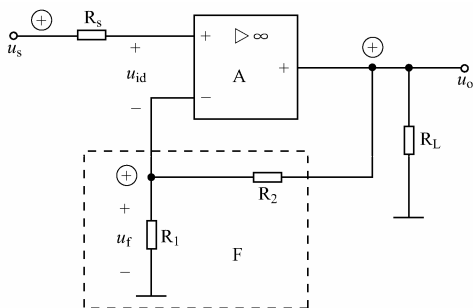


图 1-4-6 电压串联负反馈

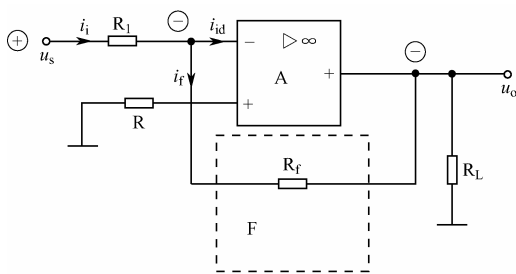


图 1-4-7 电压并联负反馈

3. 电流串联负反馈

图 1-4-8 所示电路，电路中由电阻 R_1 构成反馈网络 F 。

电流串联负反馈的特点：输出电流稳定，输出电阻增大，输入电阻增大。

4. 电流并联负反馈

如图 1-4-9 所示为由运放所构成的电路, 反馈信号与输入信号在同一端点, 为并联反馈; 输出电压 $u_o=0$ 时, 反馈信号仍然存在, 为电流反馈。因此电路引入的反馈为电流并联负反馈。

电流并联负反馈的特点: 输出电流稳定, 输出电阻增大, 输入电阻减小。

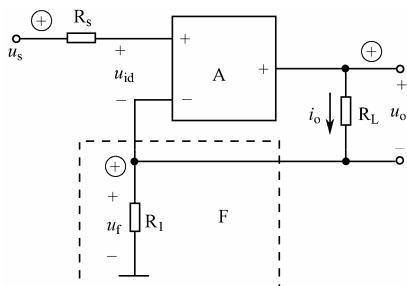


图 1-4-8 电流串联负反馈

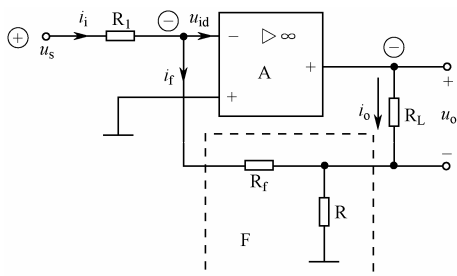


图 1-4-9 电流并联负反馈



思考与训练

图 1-4-10 所示为用于音频或视频放大的通用前置放大电路。找出其反馈元件, 并判断其反馈类型。

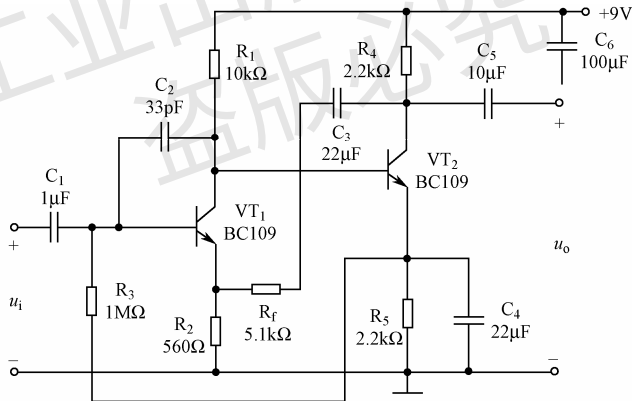


图 1-4-10 通用前置放大电路