

高等职业技术电子信息类专业教材

模拟电子技术

主编 戴士弘 副主编 邱川弘



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

URL: <http://www.phei.com.cn>

高等职业技术电子信息类专业教材

304561

模拟电子技术

主 编 戴士弘

副主编 邱川弘

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为高等职业技术学院电子类、电气类专业电子技术课程系列教材的第2册。

全书共3篇15章。第1篇基础知识与单元电路包括:电子线路基础知识;基本放大器;多级放大器;差动放大器;功率放大器;运算放大器;反馈放大器;正弦振荡器;直流电源。第2篇基本理论与基本计算包括:电路基本理论与相关知识;直流状态的测量和计算;交流状态的测量和计算。第3篇模拟电子技术实践包括:常用器件及其应用;电子线路的理解与分析;电子产品的设计与检修。

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,翻版必究。

丛 书 名: 高等职业技术电子信息类专业教材

书 名: 模拟电子技术

主 编: 戴士弘

副 主 编: 邱川弘

责任编辑: 吕 迈

特约编辑: 郭延龄

印 刷 者: 北京天宇星印刷厂

装 订 者: 河北省涿州桃园装订厂

出版发行: 电子工业出版社 URL: <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036 教材发行部电话: 68279077

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 14.75 字数: 377 千字

版 次: 1998年11月第1版 1999年3月第2次印刷

书 号: ISBN 7-5053-4735-7
G·381

定 价: 19.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换。

若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

出版说明

高等职业技术教育是现代教育的重要组成部分。近几年随着社会经济和科学技术的发展,已从客观上提出了发展高等职业技术教育的要求。高等职业技术教育在经历了认识定位和模式创新的阶段之后,开始进入课程建构和教材编写的新阶段。

在教育部职教司教材处的直接领导和电子工业出版社的积极组织下,三所积极发展高等职业技术教育的学校——北京联合大学、上海第二工业大学和深圳职业技术学院组建了教材编写领导小组。

三校教材编写领导小组经过多次研讨,认为目前没有能满足高等职业技术教育需要的现行教材,编写符合高等职业技术教育特点的教材已迫在眉睫。三校对电子信息类专业人才培养目标、职业定位以及电子信息类的内涵等问题达成共识,并将电子信息类教材作为首批开发的选题。

我们组织编写这套教材的原则是:充分探索高等职业教学特点,力图构筑以掌握基本概念、强化实际应用为重点,以获得职业技术所需的最基本、最适用的理论知识,以利于培养学生专业实践的适应能力和应变能力的新课程体系。

编写高等职业技术教育的教材是一个新课题,经验尚不足,希望全国电子信息类高职院校的师生积极提出批评建议,共同探索我国高等职业技术教育的特点和路子,不断提高教材的质量,最终形成电子信息类专业配套的高质量教材。

三校教材编写领导小组

1998年4月

三校教材编写领导小组

组长:牛梦成

组员:高 林 姚家伦 沈耀泉 吴金生
贡文清 朱懿心 戴士弘

前 言

本书是国家教委职教司组织,为高等职业技术学院电子类、电气类(计算机、通讯、电子技术、电器、机电、自动控制、CAD/CAM等)专业编写的电子技术课程系列教材的第二册。

高等职业教育是高等教育的一个重要方面,其目标是培养具有高尚职业道德、具有大学专科或本科理论水平、具有较强操作动手能力、工作在职业现场第一线的技术人员和管理人员。他们的工作主要不是从事理论研究,也不是从事开发设计,而是把现有的规范、图纸和方案实现为产品、商品和财富。由于培养目标的差异,高等职业技术学院的教学模式与普通的理院校、工院校都有明显的差异。那就是在教学过程中特别注重学生职业岗位能力的培养、职业技能的训练,注重学生解决问题能力和自学能力的培养和训练。在把握高职教育特点时,特别要注意防止两个极端,就是“重学科体系,忽视技能”与“重操作实践,忽视理论”的倾向。前一种倾向把高等职业教育办成普通理工科的“压缩饼干”;后一种倾向则把高等职业教育办成中专、中技。

本系列教材就是力图体现上述目标的一个尝试。在近年来教学实践的基础上,我们以传统的工科课程为出发点,按照高等职业教育的培养目标进行了大幅度的改革,从专业课程设置、课程内容选材、教法、学法、实验室建设到课堂教学方式,摸索到了一套新的模式。现在我们希望把这些经验具体地体现在这套教材中。

本系列教材所反映的课程特点和教学方法特点大致有以下几方面。

(1) 内容选材与叙述体系

电子技术在当代科学技术和社会生活中占有举足轻重的地位。通信设备、计算机、家用电器、自动控制设备的开发研制都建筑在电子技术的基础上。近年来,集成电路技术的飞速发展更是全面地改变了电子工程技术的相貌,同时也改变了电子技术学科本身的相貌。集成电路的出现打破了器件、电路与系统的传统界限。集成运算放大器作为一个器件,同时又是一个复杂的电路、一个完整的系统。在实践中,它是个通用的放大器,在电子技术领域工作的人应当熟练地把它作为一个复杂器件来理解和应用。所以本教材一方面把运算放大器作为多级直接耦合放大器来加以理解,另一方面又把它列为一个器件,介绍它的整体模型和计算方法。本教材精选了传统电工理论、无线电技术和脉冲电路的部分内容,如符号法的思路、信号频域分析的思路、三极管开关电路的分析思路等。这样做首先是根据当前教学实际的需要。计算机和机电专业的学生可能不学无线电技术课程,这样就不能深入理解富利叶分析的思想 and 结果,但这个内容在模拟电子技术中又是如此重要,不得不花些篇幅简单介绍其基本思想。不与开关状态对比,三极管的放大状态也无从深入理解,所以也要花些篇幅介绍开关电路的内容。其次,更重要的原因是在学生未来的职业岗位上,所有这些知识都是以整体和综合的相貌出现的,要求学生也要综合地加以把握。

本书在注意教材实用性的同时,也十分注意内容的科学性和先进性。书中的参量矩阵图、交流负载线点斜式方程、三端稳压器的外特性模型、单元电路之间的演变关系等内容都是以前资料中所没有的。本教材特别注意用系统理论和系统工程学的思想统率教材内容。学生学习本书所学到的不应当只是零散的单元电路和局部的操作技能,而应当是系统的、普遍适用的一

套思路和分析问题的方法。

本教材十分重视学生能力的训练。从事电子技术领域工作的人除了要有基本知识和理论外,必须具有相应的实际操作能力。这里所说的能力包括本专业岗位的操作能力和自学的能力。所以,教师在讲清知识和理论的前提下,要特别注意学生上述两项能力的培养。本教材特别注意用系统的观点统率具体的专业知识,以使在学习专业知识和理论的同时能开阔眼界,从方法论的角度有所收获。教学实践证明,学生对这类启发性内容是很感兴趣的。

本教材的叙述体系力图反映初学者的认识规律,从初学者的实际水平出发,从最基本的概念和知识出发,从实际问题入手引入知识和理论。力求使学员带着实际问题,从整体到局部逐渐深入。叙述体系力求靠问题来引导,按照初学者的认识规律引导,而主要不是靠理论体系的逻辑引导。翻一下目录立刻可以发现课本叙述体系上的这个特点。

(2) 理论与实践并重;知识与技能并重

电子技术是一门操作性很强的课程。正如学习计算机知识离不开上机操作一样,学习电子技术也离不开电路与有关设备的制作、测量和调试。为此,本课程的教学过程始终贯穿着理论与实践相结合的精神。用本教材自学的学员也应尽可能为自己创造实验条件以配合理论学习。实验的作用不仅是验证理论的正确性,更重要的是作为学习的一个阶段,增加感性认识、体会抽象概念的实际含义,同时还起到训练操作技能为学员未来走上职业岗位做好技能准备的作用。本书按照初学者的认识规律安排教材内容和教学过程。课内教学(讲授、讨论、测试、分析、练习)与课外教学(焊接、简单测试、完成作业、读参考书)互相补充配合。本课程教材由主教材和实验教材两册组成。实验内容紧密配合课内进度,实验最好与讲授配合进行,并由同一组教师讲授。对于电子类、计算机类课程来说,动手操作(制作、测试、维修)是真正学好这门知识的先决条件之一。因此,不论是院校教学、学习班教学还是自学,都要千方百计创造条件动手操作,并把操作、实验与课堂教学有机地、紧密地结合起来。

(3) 教学内容双循环

第1篇(基础知识与单元电路)为学生提供学习本课程必须的感性知识并训练基本的操作技能。在第1篇中,学生接触了模拟电路的主要单元电路和基础知识内容的梗概,着重介绍了单元电路工作的物理过程和基本原理。使学生对模拟电路建立感性认识和整体印象,使用最简单的数学工具进行初步的定量计算。这是教学内容的第一循环。第2篇(基本理论与基本计算)运用前一篇的单元电路的素材进行理论的深化和较复杂的定量处理。对一般常用电子线路能列出方程组并较熟练地求解,训练学生理论概括和定量计算的能力。这是教学内容的第二循环。第3篇(模拟电子技术实践)把前两篇学到的知识和技能用于实际,在学习新知识的同时,让学员检验自己的能力(学习新领域、新知识的能力,电子产品的设计、制作与维修能力)。三篇内容前后联系,相互补充。教材内容的介绍注意前后知识的对比积累。随着课程的进展,不断对新旧知识进行比较,是积累知识的有效途径。限于篇幅,课本只能按照认识的发展规律,写出最基本的内容,无法提供一般的资料和参数。而针对具体环境的细节阐述由教师完成;详细资料则由手册提供。因此,本套教材的使用最好有教师推荐的相应的参考书和手册。

(4) 教法和学法

由于课本内容是按照初学者的认识规律安排的,所以本教材适用于各种不同的教法和学法。一般来说,一门课程的教学安排可分为宏观安排(全学期)和微观安排(一堂课)两方面。宏观安排已经体现在课本内容的裁剪和排列顺序上了。每堂课的微观安排则要求教师运用自己的教学经验,充分发挥自己的特长,寻找最适用的课堂教学法。为充分发挥教材的特色,我们推

荐使用“教—学—作”相结合的引探教学法。即按课本第1、2、3篇的顺序,按照从感性到理性,具体到抽象,从实践到理论再到实践的总顺序进行教学。另一方面,从学生的角度看,一般初学者可按本书章节顺序学习;对电子技术已有一定经验的学生可以在学习第1篇时自己参考第2篇内容自学,配合知识与操作的内容进度,提前学习理论内容,提高学习效率。由此也可以发展出第1、2篇并行的教学法。此外,本套教材对于很多教师过去习惯的理论教学与实验教学分开的普通教学法,以及以理论为主,实验为辅的教学法也同样适用。

(5) 大力加强习题

教学实践证明,一方面,课本习题对于引导学生精读课本、使学生学会自学,能起重要作用;另一方面,课本习题对系统地启发学生思考、引起学习兴趣、检验学习效果的作用远未受到应有的重视。所以,用问题和习题引路的教学方法还需要大力提倡。本教材大力充实了每章的习题,大力加强习题的覆盖面和针对性,为师生有计划地选用(和补充)习题提供了方便。同时,建议教师尽可能地补充与学员职业岗位有关的实例和题目,以引发学生的学习兴趣。如果课前能组织学生充分预习有关习题,在课上能组织学生就此进行讨论,那么与单纯的教师讲述相比,学生学习的效果会有大幅度的提高。

使用本教材的自学者在读课本时要注意用每章的习题引路。快速泛读课本之后立即看习题,带着这些问题再读课本,并仔细阅读课本中的实例来体会有关的叙述内容。努力创造条件动手作实验,积累必要的感性认识,同时阅读有关的参考书、学会查手册积累有关资料。所以说,本教材内容的安排尽可能照顾到了学生自学的特点。

为体现高等职业教育的特色,课程的考核也必须作相应的改革。我们把过去的单纯理论考核变成对操作、项目制作和理论三方面的考核。每个学员都必须单独通过三项考核才算合格。

本书另有配套的《模拟电子技术实验与习题》教材。

综上所述,本教材从学生现有水平出发,由浅入深、由实践到理论、由定性到定量的叙述方法;用问题引导、由整体到局部再到整体、理论与实际密切结合、充分发挥学生主动性的教学方法,不仅反映了高等职业教育的特点,更多的是反映了任何领域初学者认识新事物的普遍规律。所以,本教材也可供各级、各类学校和自学者参考选用。

本教材在构思和编写过程中,得到国家教委职教司牛梦成同志、华中理工大学康华光教授、上海第二工业大学郭维芹教授、北京联合大学贡文清先生、电子工业出版社应月燕同志以及深圳职业技术学院领导和有关同志的指导和帮助,特致谢意。

参加本教材编写的人员有:苏强(第2章),刘文新(第8章),梁长垠(第13章),戴士弘(其它部分及全文统稿)。参加绘图与打印工作的除上述人员外还有徐人凤,胡秋霞等。由杨宏丽和张悦负责全书稿的图、文核对。

由于时间紧迫和编者水平的限制,书中的错误和缺点在所难免。热烈欢迎读者对本书的任何批评和建议。

编 者 1998.3

于深圳职业技术学院

第 1 篇 基础知识与单元电路

第 1 章 电子线路基础知识

扩音机是应用非常广泛的一种电子设备。影剧院、会场要用扩音机,家庭影院、电脑声卡音箱、激光唱片(CD)有源音箱、便携式高音喇叭等设备的核心都是扩音机。扩音机工作的大致过程参见图 1.1,其中(b)和(c)图是逐步加细的结构框图。话筒(麦克风)把声音转换成微弱的对应变化的电信号,经电子线路放大后,变成大功率的电信号,推动扬声器(喇叭)还原为强大的声音信号。任何信息一旦转变为电信号,我们就有足够的手段对它进行处理(放大、变换、传输、存储等)。扩音机对信号的处理过程在现代电子设备中是很具代表性的。图 1.2 是一个工业控制设备的结构与功能框图。传感器把锅炉的温度信号转换为微弱的对应变化的电信号,经电子线路放大,变成大功率的电信号,推动执行机构(例如电动机)对锅炉进行控制。控制设备的功能与扩音机大不相同,但二者的结构却很相似。电子线路的主要功能是对电信号进行处理,核心功能就是微弱信号的放大。所以,学习模拟电子技术就是要学习对所有现代电子设备都有指导意义的理论、知识、相关技能和基本单元电路。首先要学习如何用元器件构成电子线路,以实现其信号处理(首先是放大)的功能。

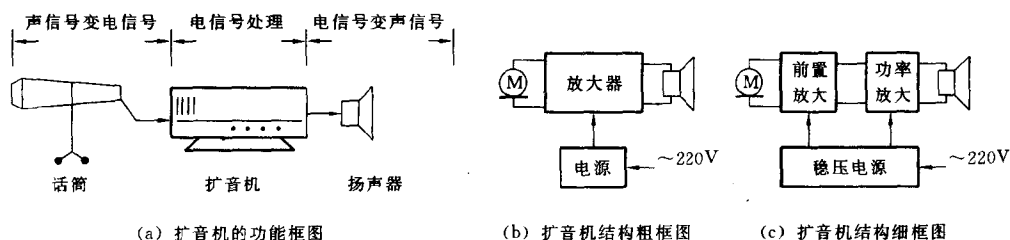
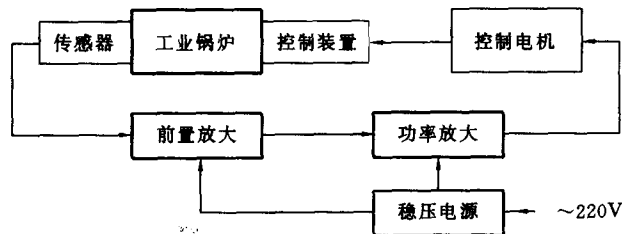


图 1.1 扩音机的功能与结构框图



扩音机也是学习模拟电子技术的一个典型电子设备,因为其中包括了模拟电子技术中主

要的单元电路。所以我们把“怎样设计和制作一台扩音机”选作学习第一篇内容的一个基本问题。随着课程的进展,我们在第1篇(1至9章)中要学习模拟电子技术中所有的基本单元电路和基础知识,并学会如何实际制作一台扩音机。

1.1 常用电子元件

常用的电子元件大致可以分成以下几类。

(1) 电阻类元件。包括固定电阻、可变电阻、电位器、导线和各种开关等。它们的特点是其上的电流、电压关系符合欧姆定律。

$$R = \frac{V}{I} \quad (1-1)$$

其中,导线是阻值近似为零的电阻;开关是可控的阻值为零与无穷大的电阻。许多实用电子、电气元件(如灯泡、扬声器的音圈等)都可以在一定条件下近似看作电阻类元件。对电阻类元件的详细分析请参见10.2.3节。

(2) 电容类元件。包括固定电容、可变电容、一般介质电容、电解电容等。它们的特点是阻止其两端电压的变化;当外电路的电压高于电容电压时,外电路对电容充电;当电容电压高于外电路电压时,电容对外电路放电。电容上的电压与所充电荷的关系满足下式:

$$C = \frac{Q}{V} \quad (1-2)$$

对电容类元件的详细分析请参见第10.2.7节。

(3) 电感类元件。包括高、低频线圈,高、低频阻流圈,高、低频变压器等。电感元件的特点是阻止通过它的电流的变化;当电流要增加时,电感产生反电动势阻止其增加,当电流要减少时,线圈中的磁场产生感生电流,阻止其减少。变压器利用互感原理工作,可以变换交流电压和电流。对电感类元件的详细分析,请参见第10.2.8节。

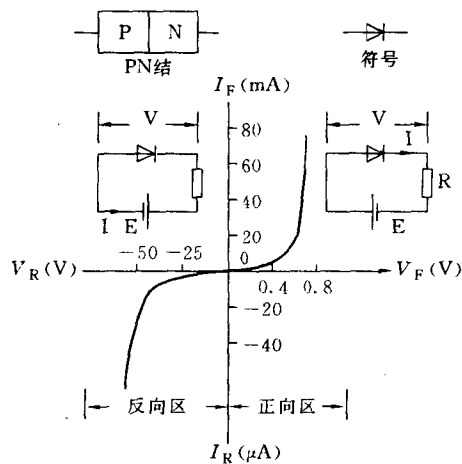


图1.3 二极管的结构、符号与特性曲线

(4) 二极管类元件。半导体二极管是利用P型和N型半导体的结合面(PN结)的独特导电性能制造的电子元件。半导体材料为元素周期表第四族的硅(Si)或锗(Ge)。从使用功能上看,二极管包括整流、检波、稳压、发光、光敏等类别。二极管最显著的特征是其单向导电性,即

对不同方向的电流产生不同的阻挡作用。整流和检波就是利用二极管的单向导电性来工作的。但稳压、发光和光敏等二极管却是利用二极管另外的特性。二极管的特性可以用它的 $u-i$ (电压—电流) 特性曲线表示 (参见图 1.3)。 $u>0$ 的部分是正向区, PN 结的状态为正向偏置, $u<0$ 的部分是反向区, PN 结的状态为反向偏置。对该特性曲线的详细分析参见第 10.2.5 节。

(5) 三极管类元件。半导体三极管包括双极型三极管和场效应三极管等类型。双极型三极管由两个半导体 PN 结 (eb 结和 cb 结) 反向串联组成 (参见图 1.4), 又包括 PNP、NPN 型, 小功率、大功率, 低频、高频等品种。三极管的最大特点是它具有对弱信号的放大能力。放大又是所有模拟、数字电路其它功能的基础。所以, 三极管自然成为整个电子技术的核心器件。在本书的第 1 篇 (1 至 9 章) 中只涉及双极型半导体三极管, 对三极管类元件的详细分析请参见第 1.5、10.2.6、13.1 及 13.3 等节内容。

(6) 电源类元件。包括常用的化学电源 (电池) 和整流稳压电源等。在模拟电子线路中, 常用到恒压源和恒流源, 它们可以由其它元件组合而成。对电源类元件的详细分析请参见第 10.2.4 节。

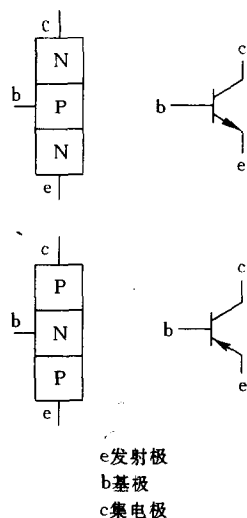


图 1.4 三极管的结构与符号

1.2 常用电子仪器与工具

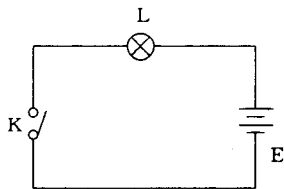
仪器把电子线路中不可感知的电压、电流效应变成可以感知的效应 (如电表的指针移动或屏幕上的波形), 把定性的感知 (有、无、大、小) 变成定量的认识 (电表的读数、波形特征的测量等)。仪器与工具构成了我们制作、检测、维修电子线路的基本环境。熟悉手中现有仪器和工具是学好本课程的前提条件之一。

模拟电子技术常用的仪器包括直流稳压源、毫伏表、信号发生器和示波器等。此外还有许多专用仪器可以使特定的工作高效进行。例如, 晶体管特性图示仪就是专门用来直观显示晶体管特性曲线的专用仪器。一些简单的专用仪器我们也可以自己动手制作。除实验室准备的大型仪器外, 每个学员还应当按照实验要求, 准备自己的常用电子工具, 其中包括万能表、电烙铁、焊锡、松香、通用焊接用电路板、螺丝刀等。

1.3 简单电路与复杂电路

一个最简单的实用电路就可以体现出电子线路构成的一般规律。它是用导线把电源 (电池)、负载 (灯泡)、控制元件 (开关) 三者联成回路构成的 (如图 1.5 所示)。一般的电子线路均由这四要素构成, 即电源、负载、控制和回路。

大家对实际电子电路中使用的电源 (恒压源、恒流源、直流源、交流源等), 负载 (电灯、喇叭, 电机等), 回路 (正常回路、开路、短路或无回路情况等) 都比较熟悉。这里特别要说一下控制元件。一个最简单的实用电路中, 至少也要有一个开关来控制通断。一般地说, 控制元件用来控制电子线路中的电压和电流。控制元件可以是开关、电阻、电容、电感或二极管, 但最重要的控制元件是三极管。原因是, 三极管是上述五类元件中唯一具有放大作用的元件。它的出现使



电路四要素：电源、负载、控制元件、回路

图 1.5 简单电路的构成

人类对电路的控制能力发生了质的飞跃。具备了放大能力，我们就可以处理极其微弱的各种信号（例如飞船从深空发回的极其微弱的电磁波信号）。所以自从三极管发明以后，整个电子技术就以它为核心蓬勃发展起来。

任一两端元件上的电压、电流和功率三者之间存在以下简单关系：

$$P=VI \quad (1-3)$$

该式把功率（能量、功）与电路中的电压、电流紧密地联系在一起。平时所说的“电力线路”与“电子线路”其实都是由上述各类元件和规则构成的。两者不同之处在于，尽管在任何一种电路中能量的转换和信息处理都同时存在，但在电力技术（也称“强电”）中我们首先关心线路中的能量转换与效率，而在电子技术（也称“弱电”）中我们首先关心线路中的信息变换关系。但事实上，在任何电路中信息与能量两种处理过程都是同时发生的，彼此不能分离，只是我们关心的要点不同而已。比如在扩音机中，我们首先关心信号的放大倍数（信息处理的参数），但还要讨论功率和效率（能量处理的参数）；在整流电源中，我们首先关心功率和效率（能量处理的参数），但也要讨论波形和放大（信息处理的参数）。

在电子技术中所说的“简单电路”不是指元件数量较少的电路而是指可以用元件的串、并联加以化简求解的电路；而“复杂电路”则是指不能用元件串、并联规则加以化简求解的电路，例如桥式电路（图 1.6）。可见，这里的“简单”与“复杂”是指的元件连接的方式，或元件之间的关系。

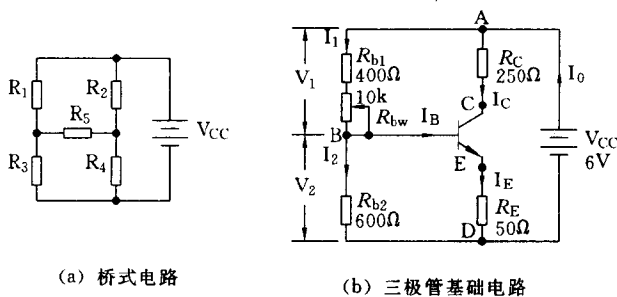


图 1.6 复杂电路

对复杂电路中电压电流进行测量的结果（参见表 1.1），呈现出明显的规律性，那就是：电路中任一节点上流入电流的总和等于流出电流的总和；任一回路中按指定方向（顺时针或逆时针）绕行一周的电压升之和等于电压降之和。即对任一节点有：

$$\sum I_i = \sum I_o \quad (1-4)$$

对任一回路循任意方向绕行一周有：

$$\sum V_u = \sum V_d \quad (1-5)$$

这就是著名的基尔霍夫两定律。这种规律是带有普遍性的(参见第 10.3 节)。这两个定律是我们计算任意简单或复杂电路的基本依据。如图 1.6(b)所示的三极管基础电路也是一个典型的复杂电路。基础电路中的电压电流关系完全符合上述两个规律。

表 1.1 三极管基础电路中的电压与电流

R_w	I_B	I_C	I_E	I_1	I_2	I_O	V_1	V_2	V_{CE}	V_{BE}	V_{CB}	V_{RC}	V_{RE}
2	0.2	10	10.2	2.2	2.0	12.2	4.8	1.2	3.0	0.7	2.3	2.5	0.5

(电阻单位: $k\Omega$ 电压单位: V 电流单位: mA)

例 1.1 实验数据表(表 1.1)是改变放大器偏流电阻值,测量相关电压、电流数据的一部分结果。取图 1.6(b)中节点 A, B, D 和回路 BACB, BEDB, ADECA 验证上述两个规律。

解:

节点 A 上,流入电流: I_O 流出电流: I_1, I_C 有 $I_O = I_1 + I_C$

节点 B 上,流入电流: I_1 流出电流: I_B, I_2 有 $I_1 = I_B + I_2$

节点 D 上,流入电流: I_E, I_2 流出电流: I_O 有 $I_O = I_E + I_2$

下面检验回路中的电压关系。在每个回路中按顺时针方向巡行。

回路 BACB 中,电压升: V_1 电压降: V_{RC}, V_{CB} 有 $V_1 = V_{RC} + V_{CB}$

回路 BEDB 中,电压升: V_2 电压降: V_{BE}, V_{RE} 有 $V_2 = V_{BE} + V_{RE}$

回路 ADECA 中,电压升: V_{RE}, V_{CE}, V_{RC} 电压降: V_{CC}

有 $V_{CC} = V_{RE} + V_{CE} + V_{RC}$

从实验数据表中我们还可以看出三极管的几种不同工作状态。

当 R_{bw} 取极大值时, $I_B \approx 0, I_C \approx 0, V_{CE} \approx V_{CC}$, 此时三极管处于截止状态。

当 R_{bw} 取极小值时, I_B 最大, $I_C \approx V_{CC} / (R_C + R_E)$ (最大), $V_{CE} \approx 0$, 此时三极管处于饱和状态。

两者中间的是三极管的放大状态(参见 1.4 节)。

1.4 信号的放大

图 1.1 所示扩音机中的话筒和扬声器可以用相同的结构实现(参见图 1.7)。线圈在环形磁铁的强磁场中,可以随振动膜一起左右运动。当声波推动振动膜运动时,线圈切割磁力线产生相应的感生电动势(电信号),这是话筒;当线圈中通以被放大的反映声音变化特点的电流时,线圈受力左右移动,将电信号转化为空气的振动(声音),这就成了扬声器(喇叭)。扩音机中的主要问题是,图 1.1 中话筒与扬声器之间的电信号是如何被放大的?

用图 1.8(a)的方式,如果次级线圈匝数多于初级线圈匝数,变压器在次级开路时可以得到提高了的信号电压,但接上负载后,喇叭上的信号功率不但没被放大,反而小于话筒的原始输出功率。这是因为总能量在传输过程中守恒,所以喇叭线圈得到的信号功率一定小于讲话人输出的声功率。声音没有被放大。但图 1.8(b)却完全不同。三极管 T 中的主要电流 I_C 是受 V_{BE} 和 I_B 的变化量控制的。输入信号的作用不是直接推动负载,而是用小的信号功率来控制三极管主回路中的大电流。扬声器中的信号功率由电源 V_{CC} 提供。在放大器件(三极管)中,只要很小的控制能量就可以使主回路中的电流 I_C 发生很大的变化。能量守恒定律仍然有效,但原

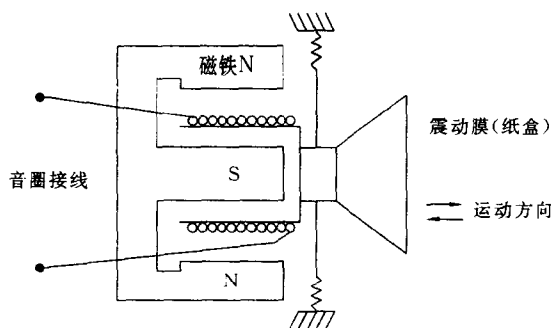


图 1.7 动圈式话筒、扬声器结构剖面示意图

始信号的功率却得到了放大。将图 1.8 中的几个图进行对比可以更好地体会信号的放大作用。用继电器或水轮机的例子作类比，可以看出，图 1.8(c) 中水轮机作的机械功，其能量是由水泵（相当于电路中的电源）提供的。能量仍然守恒，但水轮机却可以按照阀门开闭的模式转动，并拖动大功率的负载。同理，在图 1.8(d) 图中，小功率的信号输入可以带动继电器通断，控制大功率的输出。可见，理解“放大作用”的关键是理解“控制作用”。

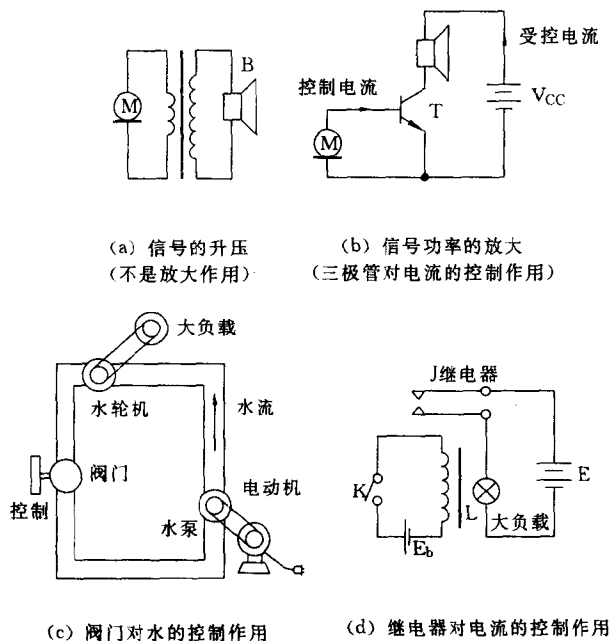


图 1.8 控制与放大

1.5 实际放大电路与三极管的工作点

电子元件的特性通常用三种方式给出：参数、公式和特性曲线。特性曲线是描述元件两个引脚之间电压—电流关系的曲线。三极管有三个脚，所以要用两个曲线加以描述，这就是三极管的输入特性曲线与输出特性曲线（参见图 1.9）。对应的产生 I_B 的回路称作输入回路，产生 I_C 的回路称作输出回路。

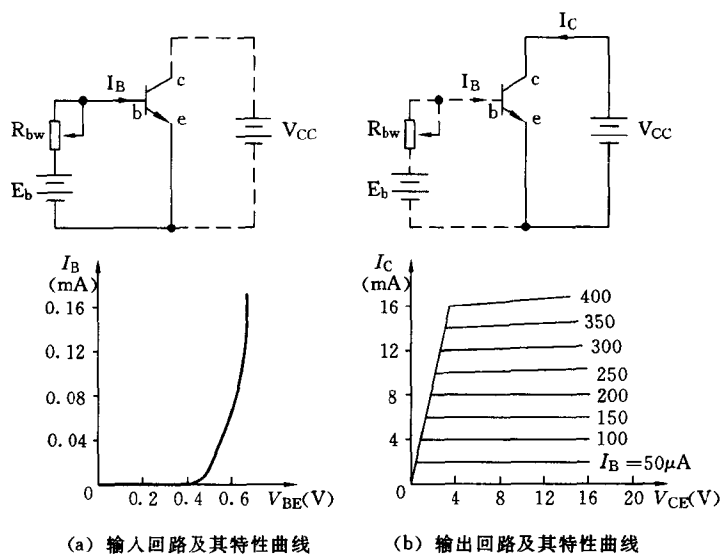


图 1.9 三极管的特性曲线

从图 1.9 上看出：

①输入特性曲线受输出回路参量 V_{CE} 影响很小，而输出特性曲线 1.9(b) 的 I_C 受输入参量 I_B 的影响极大。所以说三极管基本上是一个输入对输出产生单向控制作用的器件。输入特性曲线描写的是三极管 eb 结的特性。eb 结在放大工作时是正向偏置，所以其特性与二极管的正向特性很相似。

②在 $V_{BE}=0.7V$ 附近， V_{BE} 的变化可使 I_B 产生相应的正比变化，这就是输入特性曲线用于放大工作的线性区。在 $0 < V_{BE} < 0.5V$ 区， I_B 不能按比例地随 V_{BE} 增减变化。在 $V_{BE} < 0$ 区内（特性曲线图上未画），eb 结反向偏置（参见第 1.1 节，图 1.3），此时对应的 I_C 值更小。为使三极管截止得更好，有时使用这种状态。

③输出回路电压 V_{CE} 的变化对输出电流 I_C 基本上没有影响，显示了输出回路的恒流特性（参见第 10.2.4 节）。而输入参量 I_B 对 I_C 的影响却很大。 I_C 受 I_B 的直接控制，随之作正比例的变化。

④将输入与输出两个特性曲线联合起来看，三极管是一个按照下列因果关系动作的控制器件：

$$\Delta V_{BE} \rightarrow \Delta I_B \rightarrow \Delta I_C \quad (\Delta \text{ 表示变化量}) \quad (1-6)$$

输入特性 输出特性

⑤在输出特性曲线上，如果忽略 $I_B=0$ 时微小的 I_C 值，那么 I_B 对 I_C 的控制作用可以用下式描述：

$$I_C = \beta I_B \quad (\text{其中 } \beta \text{ 近似为一个常数}) \quad (1-7)$$

如果考虑 $I_B=0$ 时微小的 I_C 值，那么 I_B 对 I_C 的控制作用可以写作：

$$I_C = \beta I_B + I_{CEO} \quad (1-8)$$

把三极管的控制作用与一个可变电阻的控制作用相比，三极管有一系列无可比拟的优点：三极管是用电流量 (I_B) 进行控制，因而动作速度极快，同时三极管是无触点控制，因而工作极其可靠，当然，更重要的是三极管具有电阻所没有的放大作用。从特性曲线上还可以定量地看出，尽管三极管的 ce 端的电流是可控的，但与电阻相比，它完全不遵守欧姆定律（只呈现可由

I_B 控制的恒流特性)。从这里我们看出,学会分析电子器件特性曲线,对学习电子技术有多么重要。通过特性曲线我们可以分析出器件的许多重要性能,推导出反映器件特性的公式和参数。这些对于我们正确应用该器件是必不可少的。

图 1.10 是带有负载的三极管放大电路。微弱信号通过输入耦合电容 C 去影响三极管的 u_{BE} (耦合电容的作用请参见第 3 章,第 10 章),使 u_{BE} 在无信号时的值 u_{BEQ} 的基础上随信号作增减变化。于是,信号就按照式(1-6)所示的控制过程对三极管的输出回路电流 I_C 进行控制。为了使输出能按照输入的变化模式成正比例变化,无信号时 u_{BE} 的数值 V_{BEQ} 应当选在输入特性曲线的中点 Q 。有输入信号时, Δu_{BE} 和 ΔI_B 就可以以 Q 点为中心沿曲线移动,产生相应的增减变化。实际调试放大器时,由于 V_{BEQ} 的精确值难于测量,所以改用 I_{BQ} 作为测量静态工作点的依据。放大器中三极管的静态工作点是指无信号时的 I_{BQ} , I_{CQ} 和 V_{CEQ} 三个量。运用三极管特性曲线对放大器进行准确定量分析的方法请参见 12.3 节。如果工作点选取不当(如图 1.11 的 Q_1),工作点过低, i_B 不能随 u_{BE} 产生成正比的变化,于是, i_B 的变化就产生失真。反之, Q_2 的工作点过高,输入信号会使三极管电流超过允许值而损坏。一个放大器在指定条件下能够给出的最大不失真输出叫做放大器的动态工作范围,简称动态范围。为了充分利用三极管的放大能力、扩大动态范围,就需要正确选取放大器的工作点。最佳工作点应选 I_{BQ} 在输入特性曲线线性部分的中点、选 V_{CEQ} 在它自己变化范围的中点。一般说,改变 R_W 可以改变 I_{BQ} , 改变 R_L 可以改变 V_{CEQ} 的值。

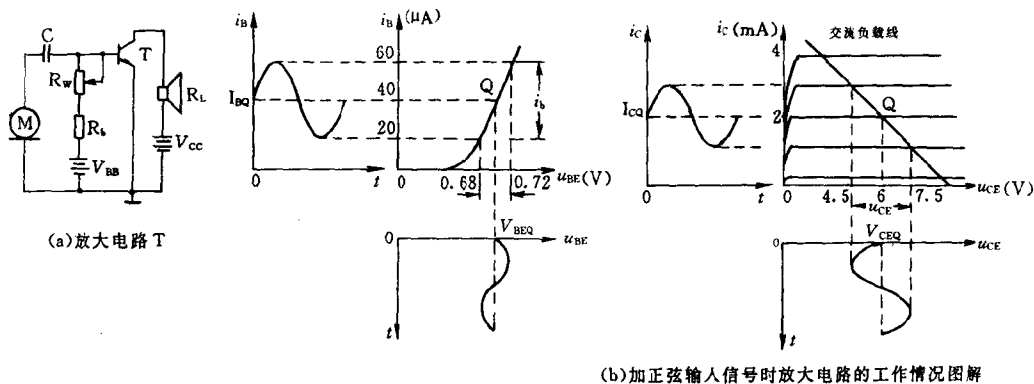


图 1.10 三极管放大电路

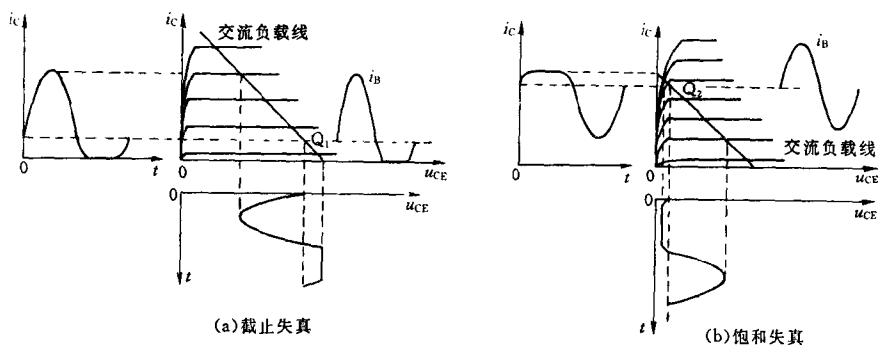


图 1.11 静态工作点对非线性失真的影响

实际的三极管放大器为了少用一组电池,通常由同一电源 V_{CC} 既提供 I_C 又提供 I_B , 如图 1.12(a) 所示。只要改变 R_B 就可以方便地调整放大器的静态工作点。运用三极管的特性曲线对它的工作状态进行定量分析的细节请参阅第 12.3 节。

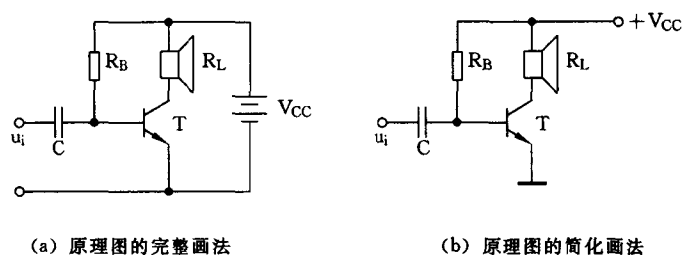


图 1.12 实用单电源供电三极管放大器

电子线路越来越复杂。为了使原理图看上去更清晰,时常采用简化画法,如图 1.12(b) 所示。简化的要点有两个:一是把全图中总的接地线取消,改用元件上的接地符号代替,二是把电源取消,改用电源接线端子代替。所以在分析简化的原理图之前,应先把它恢复为完整画法。

根据 1.3 节归纳出的任意电路中的电压、电流关系以及各种元件的特性,就可以对图 1.12 放大器进行简单的定量估算。

例 1.2 图 1.12 放大器中,设 $V_{CC}=+6V$ $V_{BEQ}=0.7V$ $R_L=100\Omega$ $R_B=14k\Omega$ $\beta=80$ 求三极管的静态工作点。

解: 放大器的输入回路如图 1.13 所示。

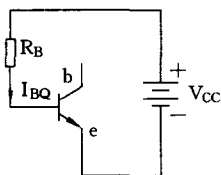


图 1.13 单电源放大器的输入回路

在这个输入回路中运用电压关系式(1-5),得到

$$V_{BEQ} + I_{BQ}R_B = V_{CC} \quad (V_{BEQ} \approx 0.7V)$$

$$\therefore I_{BQ} = (V_{CC} - V_{BEQ})/R_B = (6 - 0.7)V/14k = 0.38mA$$

$$I_{CQ} = \beta I_{BQ} = 80 \times 0.38 = 30.4mA$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_L = 6 - 30.3 \times 0.1 = 3V$$

在电子技术的数值计算中,可以用伏特、安培、欧姆系列进行运算,也可以采用伏特、毫安、千欧系列进行运算。在本例中,选用了后者。

在实际放大器中,经常使用两种相反导电极性(称为互补型)的三极管,即 NPN 型和 PNP 型,它们的控制机理和工作原理都是一样的,只是导电极性相反。前面列举的电路都是使用 NPN 型三极管,也都可以对应转换为 PNP 型三极管电路。只要把所有有极性的元件(电源、二极管、电解电容等)反转过来即可,如图 1.14 所示。所有对应支路的电流和对应节点的电压也都反过来。

注意: NPN 和 PNP 并不与硅材料和锗材料对应。两种材料均可制成 NPN 或 PNP 三极管。硅材料三极管的 e_b 结开启电压一般为 $0.7V$,锗管为 $0.3V$ 。硅材料三极管的漏电流小、温度稳定性高、成本较低,所以应用更广。三极管存在两种互补的导电类型,为我们的电路设计提