



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



普通高等教育“十二五”规划教材

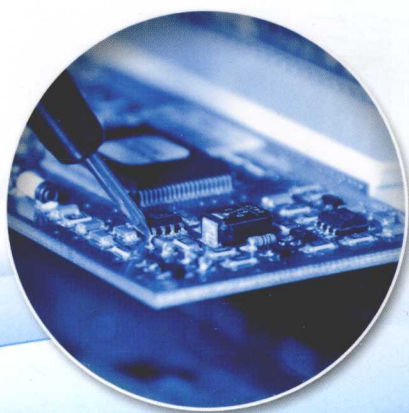
电子技术

(非电类)

Electrotechnology

第3版

荣雅君 © 主编



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
普通高等教育“十二五”规划教材

电子技术

(非电类)

第3版

主 编 荣雅君

副主编 杨丽君

参 编 杨秋霞 王云静 董 杰



机械工业出版社

本书作者对高等院校电工电子系列课程内容和课程体系进行了研究和实践,针对普通高等院校非电类专业特点,编写了“电子技术”教材。本书被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书主要包括:绪论、半导体器件、放大电路基础、集成运算放大器、放大电路中的反馈、直流稳压电源、逻辑门电路及组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、电子技术仿真软件 EWB 及其应用等,主要适用于机械设计、机械制造、机械电子工程、汽车与交通等机械工程学科的各个专业方向,也适用于材料、化工、过程装备等其他非电类专业,同时也是上述学科及其他相关学科工程技术人员很好的实用参考书。

本书配有免费电子课件,欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册、下载。

图书在版编目(CIP)数据

电子技术:非电类/荣雅君主编. —3版. —北京:机械工业出版社, 2015.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-49400-3

I. ①电… II. ①荣… III. ①电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第033680号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:贡克勤 责任编辑:贡克勤 徐凡

版式设计:赵颖喆 责任校对:张晓蓉

封面设计:张静 责任印制:李洋

三河市国英印务有限公司印刷

2015年5月第3版第1次印刷

184mm×260mm·19.5印张·480千字

标准书号:ISBN 978-7-111-49400-3

定价:39.50元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88379833

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-88379649

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

封面无防伪标均为盗版

金书网:www.golden-book.com

前言

在现代化机械设计与制造中,机器的品质与性能几乎无一例外地与电气电子学相关。机械学与电子学贯通交叉的程度往往代表着机械工程师的设计水平。与以往不同,当今的机械工程师对电子学或电工学掌握的程度,已经不再是仅仅停留在能够使用某些专用电气设备,或泛泛地了解一些电子学一般常识的水平上了。一个优秀的机械工程师必须具备这样的条件:不仅能够向电气工程师提出具体的可实现的电气设计技术指标,而且也能够自行设计出基本满足工程需要的电气图。为了获得这样的综合素质,就需要有一本能够完成这种任务的电子学教科书,本书的编写就是以此为宗旨的。

对于许多机械设计者来说,学习电子学似乎存在着一些难题:电,手摸不到,眼着不着,耳听不见,难以理解等。事实上确有一些教科书存在理论过深、解说太浅的毛病。本书在此方面做了大胆的尝试。为了扫除学习障碍,书中尽量避免深奥的理论论述,力求使用浅显易懂的科普语言形象地解说重要的基本电路原理,使学习者在定性地了解电子电路原理的基础上,能够深入地加以定量地研究,并且于机械设计中灵活地使用现成的电子器件。本书为设计者提供了简单易学的电子电路仿真软件 EWB 的详细应用说明,为设计电路提供了强有力的基础实践手段。本书共分 9 章,主要内容包括半导体器件、放大电路基础、集成运算放大器、放大电路中的反馈、直流稳压电源、逻辑门电路及组合逻辑电路、触发器和时序逻辑电路、电子技术仿真软件 EWB 及其应用等。为便于自学和工程应用,各章选择了一些电子电路的应用实例,每章后均附有相应的习题,并附有部分习题参考答案。以使读者加深对教材内容的理解。书中加*的内容可以根据实际需要删减。

本书的第 1、2、3、9 章由荣雅君老师编写,第 4、7 章由杨丽君老师编写,第 5 章由杨秋霞老师编写,第 6 章由董杰老师编写,第 8 章由王云静老师编写。殷桂梁、王珺、杨秋霞老师参加了电子课件的制作工作。全书由荣雅君任主编,完成统稿,杨丽君任副主编。在本书的编写过程中,得到了燕山大学电力工程系全体同仁的帮助,也得到兄弟院校同行的大力支持,在此表示衷心的感谢。由于编者水平有限,缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编者

目 录

前言

第1章 绪论..... 1

1.1 电子技术的发展史 1

1.1.1 电子管阶段 1

1.1.2 晶体管阶段 2

1.1.3 集成电路阶段 3

1.2 电子系统 5

1.3 信号 6

1.3.1 模拟信号 6

1.3.2 数字信号 6

1.3.3 电子电路 6

1.4 课程的学习方法 7

第2章 半导体器件 8

2.1 半导体二极管 8

2.1.1 半导体的导电特性 8

2.1.2 PN结 10

2.1.3 半导体二极管 12

2.1.4 特殊二极管 18

2.2 晶体管 21

2.2.1 基本结构 21

2.2.2 电流放大原理 22

2.2.3 晶体管的伏安特性曲线 23

2.2.4 主要参数 25

2.2.5 晶体管电极的判别 27

2.2.6 场效应晶体管简介 28

2.3 晶闸管 33

2.3.1 基本结构 33

2.3.2 工作原理 33

2.3.3 伏安特性 34

2.3.4 主要参数 35

习题 37

第3章 放大电路基础..... 42

3.1 放大电路的组态及其性能指标 42

3.1.1 放大电路的基本概念 42

3.1.2 放大电路的组态 43

3.1.3 放大电路的性能指标 43

3.2 共射极放大电路 45

3.2.1 电路的组成及各元件的作用 45

3.2.2 电路的静态与动态 46

3.2.3 放大电路的静态分析 47

3.2.4 放大电路的动态分析 49

3.3 共集电极放大电路 54

3.3.1 共集电极放大电路的组成 54

3.3.2 共集电极放大电路分析 55

3.3.3 共集电极电路的应用 58

3.4 多级放大电路 59

3.4.1 多级放大电路的级间耦合方式 59

3.4.2 阻容耦合多级放大电路的分析 59

3.4.3 直接耦合放大电路及

其存在的问题 63

3.5 差分放大电路 66

3.5.1 典型差分放大电路的工作原理 66

3.5.2 差分放大电路的输入输出方式 70

3.6 功率放大电路 73

3.6.1 功率放大电路的特点和要求 74

3.6.2 功率放大电路提高效率的途径 74

3.6.3 乙类互补对称功率放大电路 75

3.6.4 甲乙类互补对称功率放大电路 76

3.7 放大电路的频率特性 77

3.8 晶体管应用举例 79

习题 82

第4章 集成运算放大器 88

4.1 集成运算放大器的组成及参数 88

4.1.1 集成运算放大器电路的组成 88

4.1.2 集成运算放大器的引脚与符号 89

4.1.3 集成运算放大器的主要参数 90

4.1.4 理想集成运放的技术

指标及符号 91

4.1.5 集成运算放大器的电压传输特性和

分析依据 92

4.2 模拟信号运算电路 94

4.2.1 比例运算电路 94

4.2.2 加法运算电路 96

4.2.3 减法运算电路 98

4.2.4 积分运算电路	100	6.5.2 串联型集成稳压电路	162
4.2.5 微分运算电路	102	6.5.3 W78 × × 系列三端固定式集成 稳压电路	164
4.3 电压比较电路	104	习题	166
4.3.1 单门限电压比较电路	105	第7章 逻辑门电路及组合逻辑电路 ..	170
4.3.2 双门限电压比较电路	108	7.1 数字信号和常用数制	170
*4.4 信号产生电路	110	7.1.1 数字信号和脉冲信号	170
4.4.1 方波产生电路	110	7.1.2 常用数制	171
4.4.2 矩形波发生器	112	7.1.3 逻辑电平	172
*4.4.3 三角波发生电路	112	7.2 逻辑代数及逻辑门电路	173
*4.4.4 锯齿波产生电路	114	7.2.1 逻辑代数及逻辑函数	173
*4.5 集成运放的应用	115	7.2.2 逻辑运算及逻辑门	173
4.5.1 集成运放类型的选择	115	7.3 逻辑代数运算及逻辑函数化简	181
4.5.2 集成运算放大电路的设计举例 ..	117	7.3.1 基本运算法则	181
4.5.3 模拟集成电路应用实例	119	7.3.2 基本定律	181
习题	122	7.3.3 逻辑函数的化简	182
第5章 放大电路中的反馈	127	*7.4 集成逻辑门电路的参数及使用	186
5.1 反馈的基本概念及判断方法	127	7.4.1 TTL 门电路与 CMOS 门电路	187
5.1.1 放大电路中的反馈	127	7.4.2 集成门电路的使用	188
5.1.2 反馈极性的判断	128	7.5 组合逻辑电路	190
5.1.3 直流反馈与交流反馈的判断	129	7.5.1 组合电路的分析	190
5.2 负反馈放大电路的组态	130	7.5.2 组合电路的设计	192
5.2.1 交流负反馈的组态	130	7.5.3 常用的组合电路	194
5.2.2 交流负反馈组态的判断	130	习题	201
5.3 负反馈对放大电路性能的影响	136	第8章 触发器和时序逻辑电路	207
5.3.1 负反馈放大电路的框图及 一般表达式	136	8.1 RS 触发器	207
5.3.2 负反馈对放大电路性能的影响 ..	137	8.1.1 基本 RS 触发器	207
5.4 正弦波振荡电路	141	8.1.2 同步 RS 触发器	208
5.4.1 自激振荡的条件	141	8.2 JK 触发器	209
5.4.2 振荡的建立及其稳定	143	8.3 D 触发器	212
5.4.3 RC 正弦波振荡电路	143	8.4 T、T' 触发器及各种触发器逻辑功能的 相互转换	214
习题	146	8.4.1 T 触发器和 T' 触发器	214
第6章 直流稳压电源	151	8.4.2 触发器逻辑功能的转换	214
6.1 概述	151	8.5 时序逻辑电路	216
6.2 单相桥式整流电路	152	8.5.1 寄存器	216
6.3 单相晶闸管可控整流电路	154	8.5.2 计数器	222
6.3.1 单相半波可控整流电路	154	8.6 555 时基电路及其应用	232
6.3.2 单相半控桥式整流电路	156	8.6.1 555 定时器芯片简介	232
6.4 滤波电路	158	8.6.2 CC7555 组成的单稳态触发器	233
6.4.1 电容滤波电路	158	8.6.3 CC7555 组成的多谐振荡器	234
6.4.2 RCTI 形滤波电路	161	8.6.4 应用举例	235
6.5 直流稳压电源	161	习题	237
6.5.1 稳压二极管稳压电路	161		

* 第9章 电子技术仿真软件 EWB

及其应用 245

9.1 EWB 概述 245

9.2 EWB5.0 的基本界面 246

9.2.1 EWB5.0 的主要窗口 246

9.2.2 EWB5.0 的工具条 247

9.3 EWB5.0 的元器件库和仪器仪表库 249

9.3.1 EWB5.0 的元器件库 249

9.3.2 EWB5.0 的仪器仪表库 257

9.4 EWB5.0 的菜单 265

9.5 EWB5.0 的电路分析方法 268

9.5.1 分析参数的设置 268

9.5.2 EWB5.0 的分析方法 272

9.6 EWB 5.0 电路图的绘制 279

9.7 EWB 5.0 电路仿真设计实例 283

9.7.1 模拟电路的仿真 283

9.7.2 数字电路的仿真 284

部分习题参考答案 286

附录 292

附录 A 半导体分立器件型号命名方法 292

附录 B 常用半导体器件的参数 294

附录 C 集成电路型号命名 299

附录 D 国内外部分集成运算放大器

同类产品型号对照表 300

附录 E 几种国产集成运算放大器参数

规范表 301

附录 F 音频功率器件 D810 电路主要技术

指标的典型值 302

附录 G 三端式集成稳压器性能参数 302

附录 H 功率场控器件的主要参数 303

参考文献 304

第1章 绪 论

电子科学技术的飞速发展,把人类带进了一个奇妙的电的世界。它使整个科学技术插上了翅膀,有力地加快了世界前进的步伐。就像离不开水和空气一样,人们在生活和工作中已经离不开电。目前,世界已进入信息化时代,大量的电子电路、电子系统被应用于电力、通信、控制、测量、计算机等领域,都已经达到令人鼓舞的先进水平,给人类的发展带来了深远影响,电子制造业已经成为当今世界最具有发展前途的产业。本章主要内容是回顾电子技术的发展历程,使读者了解电子技术对人类的影响,了解课程的研究对象及主要内容,并简要介绍该课程的学习方法。

1.1 电子技术的发展史

19世纪中后期,著名的科学家麦克斯韦、赫兹和汤姆生相继发现了电磁波和电子,使得科学技术领域出现了一个极具生命力的新兴分支——电子技术。

电子技术的发展是与电子器件的发展紧密结合的,随着电子元器件的不断更新换代,现代电子技术的发展可分为电子管阶段和晶体管阶段,而晶体管阶段又可分为分立元件阶段和集成电路(小规模集成电路、大规模集成电路、超大特大规模集成电路)阶段。

1.1.1 电子管阶段

19世纪中后期和20世纪初期,麦克斯韦预言了电磁波的存在,赫兹用实验证实了电磁波的存在,汤姆生用实验找出了电子。1904年,世界上第一只电子管在英国物理学家弗莱明的手下诞生了。

电子管是一种在气密性封闭容器(一般为玻璃管)中产生电流传导,利用电场对真空中电子流的作用以获得信号放大或振荡的电子器件(见图1-1)。电子管早期应用于电视机、收音机、扩音机等电子产品中,近年来逐渐被晶体管和集成电路所取代,但目前在一些高保真音响器材中,仍然使用电子管作为音频功率放大器件,图1-2为豪华版现代电子管功率放大器。



图1-1 真空电子管

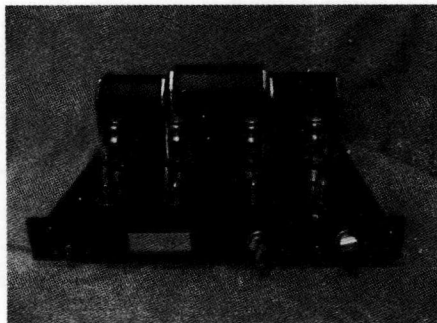


图1-2 现代电子管功放

在 20 世纪前期,电子管电路在军事、通信、交通等社会领域中独领风骚。1915 年阿诺德和朗缪尔研制出高真空电子管;1920 年美国建成了世界上第一座无线电台,定时广播娱乐节目;1925 年,英国人贝尔德发明了电视机;1946 年,在美国诞生了第一台电子管电子计算机,取名为 ENIAC,如图 1-3 所示。这台计算机使用了 18800 个电子管,占地 170m^2 、重达 30t、耗电 140kW、价格 40 多万美元。



图 1-3 第一台电子管计算机 ENIAC

由于它采用电子线路来执行算术运算、逻辑运算和存储信息,从而大大提高了运算速度。

ENIAC 每秒可进行 5000 次加法和减法运算,把计算一条弹道的时间缩短为 30s。它最初被专门用于弹道运算,后来经过多次改进而成为能进行各种科学计算的通用电子计算机,从 1946 年 2 月交付使用,到 1955 年 10 月最后切断电源,ENIAC 服役长达 9 年。

1.1.2 晶体管阶段

1947 年,贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉顿在研究半导体材料锗的表面态过程中,“偶然”地发现了“晶体管效应”,并发明了第一个点接触型晶体管,其各种性能显然远远超过了真空玻璃管,但性能不稳定。晶体管的诞生标志了一个新时代的开始,晶体管的发展速度日新月异,它使电子技术有了根本性的技术突破。1948 年年初,肖克莱提出了结型管理论,并于 1950 年成功地创造出结型晶体管。与点接触型晶体管相比,结型晶体管具有结构简单、性能好、可靠性高等优点,特别适合于大批量生产,很快得到广泛应用。1953 年研制出表面势垒晶体管,1955 年日本生产了第一台晶体管收音机,如图 1-4 所示。图 1-5 为国产红旗 703 三波段七管晶体管收音机;1954 年贝尔实验室研制太阳能电池和单晶硅;1955 年研制出扩散基区晶体管;1959 年 12 月第一台晶体管计算机——IBM7090 由美国国际商业机器公司制造成功,这就是第二代计算机——晶体管计算机,如图 1-6 所示。与第一代电子管计算机相比,晶体管计算机体积小、耗电少、成本低、逻辑功能强、使用方便、可靠

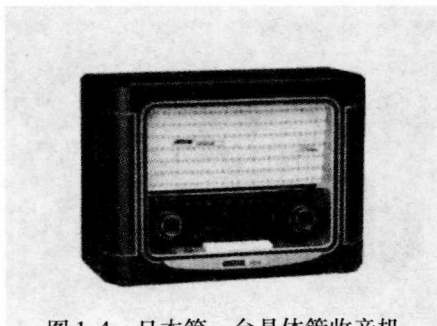


图 1-4 日本第一台晶体管收音机



图 1-5 国产红旗 703 三波段七管晶体管收音机

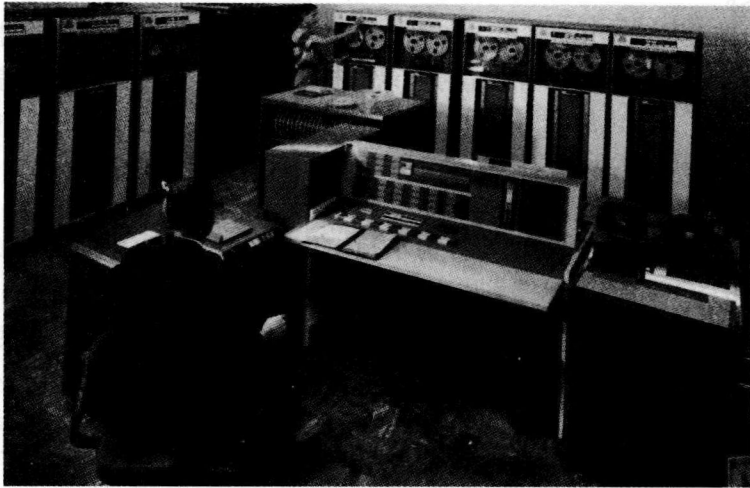


图 1-6 第一台晶体管计算机——IBM7090

性高。1957 年前苏联采用晶体管自动控制设备，发射第一颗人造地球卫星，晶体管也使电视接收技术更加成熟实用；1958 年美国研制出第一块集成电路。至此，半导体技术的发展由分立元件时代步入集成电路时代，这一发展趋势是始料未及的。

Intel 于 2011 年 5 月 6 日宣布研制成功了 3D 三维晶体管，如图 1-7 所示。相比于 32nm（3D 三维晶体管 22nm）平面晶体管可带来最多 37% 的性能提升，而且同等性能下的功耗减少一半，这意味着它们更加适合用于小型掌上设备。3-DTri-Gate 使用一个薄得不可思议的三维硅鳍片取代了传统二维晶体管上的平面栅极。由于这些硅鳍片都是垂直的，晶体管可以更加紧密地靠在一起，从而大大提高了晶体管密度。

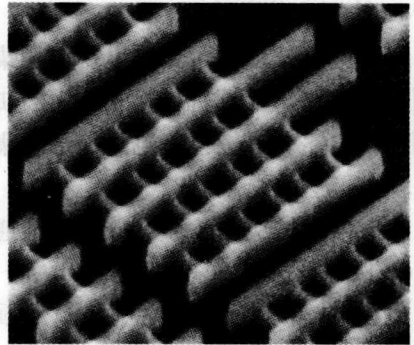


图 1-7 3D 三维晶体管

1.1.3 集成电路阶段

1958 年美国得克萨斯公司的杰克·基尔比发明了世界上第一块集成电路，他因集成电路的发明，于 2000 年获诺贝尔物理学奖。集成电路（integrated circuit, IC）是一种微型电子器件或部件。它是采用一定的工艺，把一个电路中所需的晶体管、二极管、电阻、电容和电感等元器件及布线互连在一起，制作在一块半导体单晶片（例如硅或砷化镓）或绝缘基片上，然后封装在一个管壳内，能完成特定功能或者系统功能的电路集合。集成电路使得整个电路的体积大大缩小，引出线和焊接点的数目也大为减少，从而使电子元器件向着微小型化、低功耗和高可靠性方面迈进了一大步。

按不同标准，集成电路有以下几种分类：

1. 按功能结构分类

集成电路按其功能、结构的不同，可以分为模拟集成电路、数字集成电路和数/模混合

集成电路三大类。

模拟集成电路又称线性电路，用来产生、放大和处理各种模拟信号（指幅度随时间变化的信号，例如半导体收音机的音频信号、录放机的磁带信号等），其输入信号和输出信号成比例关系。而数字集成电路用来产生、放大和处理各种数字信号（指在时间上和幅度上离散取值的信号，例如 VCD、DVD 播放的音频信号和视频信号）。

2. 按集成度高低分类

集成电路按集成度高低的不同可分为小规模集成电路（Small Scale Integrated circuits, SSI, 集成度为 $10^1 \sim 10^2$ ）、中规模集成电路 MSI（Medium Scale Integrated circuits, 集成度为 $10^2 \sim 10^3$ ）、大规模集成电路（Large Scale Integrated circuits, LSI, 集成度为 $10^3 \sim 10^5$ ）、超大规模集成电路（Very Large Scale Integrated circuits, VLSI, 集成度为 $10^5 \sim 10^7$ ）、特大规模集成电路（Ultra Large Scale Integrated circuits, ULSI, 集成度为 $10^7 \sim 10^9$ ）和巨大规模集成电路（Giga Scale Integration, GSI, 集成度为 $10^9 \sim 10^{11}$ ）。

3. 按导电类型不同分类

集成电路按导电类型可分为双极型集成电路和单极型集成电路，它们都是数字集成电路。

双极型集成电路的制作工艺复杂，功耗较大，代表集成电路有 TTL、ECL、HTL、LST-TL、STTL 等类型。单极型集成电路的制作工艺简单，功耗也较低，易于制成大规模集成电路，代表集成电路有 CMOS、NMOS、PMOS 等类型。

4. 按用途分类

集成电路按用途可分为电视机用集成电路、音响用集成电路、影碟机用集成电路、录像机用集成电路、计算机（微机）用集成电路、电子琴用集成电路、通信用集成电路、照相机用集成电路、遥控集成电路、语言集成电路、报警器用集成电路及各种专用集成电路。

5. 按应用领域分类

集成电路按应用领域可分为标准通用集成电路和专用集成电路。

6. 按外形分类

集成电路按外形可分为圆形（金属外壳晶体管封装型，一般适合于大功率）、扁平型（稳定性好、体积小）、双列直插型和贴片式，如图 1-8 所示为各种封装形式的集成电路。

如图 1-9 所示，它是第一台由集成电路实现的第三代电子计算机，它使计算机的功能、体积、速度、成本都有了重大突破。由于计算机的心脏都集成在一块小小的硅片上，使得电子计算机发生了深刻的变化，这标志着大规模集成电路时代的到来。

可见，电子管的发展为晶体管的发明提供了技术手段，而晶体管的发明又成为集成电路发展的基础与前提；集成电路的发展推动了电子计算机的发展，而电子计算机的发展又反过来推动了集成电路的发展，从而形成了良性发展循环。

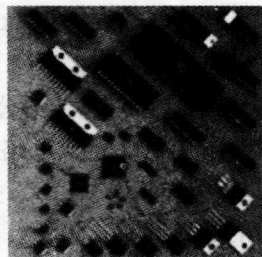


图 1-8 不同封装形式的集成电路

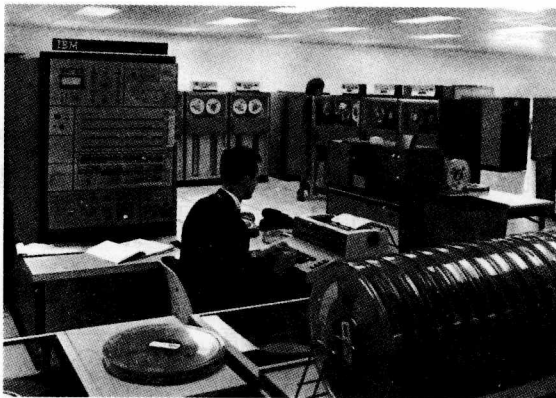


图 1-9 集成电路计算机

1.2 电子系统

所谓电子系统，通常是指由若干相互连接、相互作用的基本电路单元组成的具有特定功能的电路整体。如图 1-10 所示为计算机控制系统框图。该系统由计算机、信号变换电路、被控对象（执行器）、传感器和变送器等环节组成。这些环节在整个系统中是相互依存、相互作用的统一体，缺少哪一部分都不能完成控制功能。因此，它们是计算机控制系统的基本单元，称为子系统。



图 1-10 计算机控制系统框图

电子系统的种类繁多，如通信系统、自动控制系统、计算机系统等。但一个完善而复杂的电子系统往往是由多个子系统所构成。电子系统的规模可大可小，例如单独考虑一台计算机时，计算机本身自成一个较复杂的系统，它由微处理器、存储器、输入/输出接口电路、外围设备等几个子系统构成，其框图如图 1-11 所示。然而，当考虑图 1-10 所示的计算机控制系统时，计算机就变成了这个系统的子系统。需要强调的是，

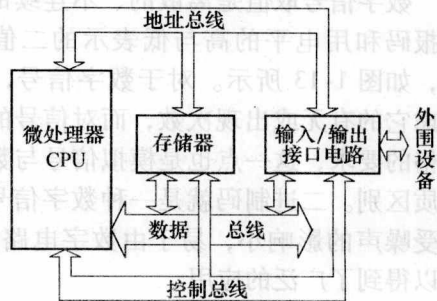


图 1-11 计算机系统框图

由于大规模集成电路和模拟-数字混合集成电路的大量出现，在单个芯片上可能集成许多种不同类型的电路，从而自成一个系统；电子系统设计者往往把这种芯片作为子系统，然后根据其外特性实现其与一些电路或芯片的互连，从而形成更为复杂和完善的电子系统。

1.3 信号

电子技术主要是把电子运动产生的电流和电磁波等物理量作为一种信息来进行传输和处理的,而携带信息的载体,就称之为信号,例如电压变量和电流变量,这些信号都是时间的函数。

电子系统中的信号,通常可分为模拟信号和数字信号两大类。

1.3.1 模拟信号

所谓模拟信号,是指“模拟”物理量的变化(如声音、温度等的变化)所得出的电流或电压信号,这种信号在时间上和幅度上均具有连续性,在一定动态范围内可能取任意值。常见的几种模拟信号如图 1-12 所示。如压力、温度及转速等物理量都是时间连续、数值连续的变量,而且通过相应的传感器都可转换为模拟信号并在电子系统中传输;例如,在录音机的录音电路中,人们通过驻极传声器把声音高低强弱的变化转换成相应的电压的变化,从而得到可被电子系统所使用的电压信号;在有些家庭影院的放音电子系统中,人们通过功率放大电路把反映声音变化规律的电流信号送到扬声器,驱动其发出清晰、保真、洪亮的声音。

对于模拟信号,我们不但要研究它的有无、大小,而且要研究它对时间的变化规律。模拟信号又可分为周期信号和非周期信号。周期信号是每隔一定的时间 T ,按照同一规律重复变化的信号,如正弦信号;非周期信号是指不按一定规律作重复变化的信号,如温度变化信号。

1.3.2 数字信号

数字信号取值是离散的、不连续的信号,如电报码和用电平的高与低表示的二值逻辑信号等,如图 1-13 所示。对于数字信号,我们只能考虑它的有无或出现次数,而对信号的大小并无严格的要求,这一点也是模拟信号与数字信号的本质区别。二进制码就是一种数字信号。二进制码受噪声的影响小,易于由数字电路进行处理,所以得到了广泛的应用。

1.3.3 电子电路

按照所处理信号形式的不同,通常可将电子电路分为模拟电路和数字电路两大类。用于传递和处理模拟信号电子电路称为模拟电路;对数字信号进行传递、处理的电子电路称为数字电路。

模拟电路通常注重的是信号的放大、信噪比、工作频率等问题。常见的有放大器电路、

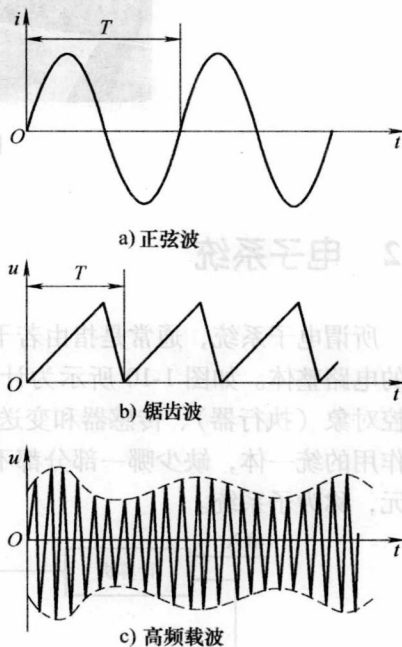


图 1-12 几种常见的模拟信号

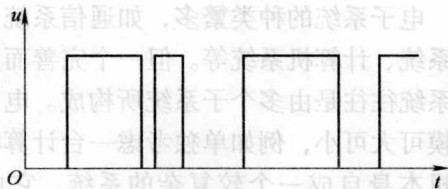


图 1-13 数字信号

滤波电路、变压电路等。如收音机、电视机、电话机、变压器等电路。

数字电路被广泛地应用于数字电子计算机、数字通信系统、数字式仪表、数字控制装置及工业逻辑系统等领域,能够实现对数字信号的传输、逻辑运算、计数、寄存、显示及脉冲信号的产生和转换等功能。

模拟电路和数字电路的结合越来越广泛,在技术上正趋向于把模拟信号数字化,以获取更好的效果,如数码相机、数码电视机等。

1.4 课程的学习方法

首先树立正确的学习目的,端正学习态度。以求实、创新的精神投入到学习中。选用本教材的大部分是非电类专业的学生或工程技术人员,对电学、电子学的知识了解不多。因此,对学习中的几个环节提出几点注意事项,仅供参考。

(1) 在校大学生应以课堂教学为主,这是获得知识最快、最有效和最便捷的手段。要求学生务必认真听课,主动学习。学习时要抓住主要的物理概念、基本的分析方法、工作原理和计算方法;要知其然,还要知其所以然,能够举一反三;要注意各部分内容之间的联系,前后是如何衔接的;应注重理解,而不是死记硬背,能够灵活地运用各种分析方法去解决问题;应重点掌握元器件的外部特性和应用背景,从电路的整体上去分析其工作原理、电路特征和注意事项,而不是孤立的看待某一具体元件。认真对待每节后的思考题,所提问题均为本节的基本概念和基本的注意事项。

(2) 电子技术是技术基础课程,除了要认真听课、看书外,认真做习题也是学习和掌握知识的重要途径,通过独立完成习题的解答,能够培养发现问题、分析问题和解决问题的能力。本书各章的习题基本上是按顺序编排的,学习到那部分内容,即可完成相应的习题。做题前要注意审题,首先要读懂题目,并知道该用哪方面的理论去指导解题。图要画得清晰,标明各变量的参考方向,结果要标明单位。

(3) 电子技术是理论和实际并重的技术,实验是必不可少的实践性教学环节,通过实验验证和巩固所学理论知识,培养严谨的科学态度和实际动手能力。要求实验前要做好充分准备,做好预习,事先了解实验步骤;实验中要积极主动,勤于思考,多动手,并注意安全;学会正确使用常用的电子仪器、测量仪表及电子元件等;能够正确的连接电路和读取数据,在出现读数错误时能够找出错误所在;通过验证性实验,培养设计简单实验的能力;实验后应注意整理实验数据、表格、曲线和误差分析,认真撰写实验报告。

(4) 在学习过程中,注意培养发现问题和解决问题的能力,要勇于创新,能够根据已有的知识提出或设计出新颖的实用电子电路,并付诸实践。

本书从理论与实际相结合的角度出发,以典型电路为例,阐述模拟电子电路和数字电子电路的基本工作原理和分析方法,通过例题使读者对理论知识的运用有一个更深的理解。给出典型的模拟集成电路的应用实例;对数字电路中常用的集成电路芯片的功能作了简单介绍,并分析了数字电子系统的典型应用。

本书从理论与实际相结合的角度出发,以典型电路为例,阐述了模拟电子电路和数字电子电路的基本工作原理和分析方法,通过例题使读者对理论知识的运用有一个更深的理解,并给出典型的模拟集成电路的应用实例,对数字电路中常用的集成电路芯片的功能作了简单介绍并分析了数字电子系统的典型应用。

第2章 半导体器件

本章提要：半导体二极管和晶体管是常用的半导体器件。它们的基本结构、工作原理、特性曲线和主要参数是学习电子技术和分析电子电路的基础。PN结是构成各种半导体器件的基础。因此，本章重点讨论以下几个问题：

- 1) 半导体的导电特性。
- 2) PN结的形成及其导电特性。
- 3) 半导体二极管的工作原理及其特性曲线、主要参数及应用。
- 4) 特殊二极管。
- 5) 晶体管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。

作为了解的内容，介绍：

- 1) 场效应晶体管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数。
- 2) 晶闸管的结构、工作原理、特性曲线和主要参数及应用。

学习的重点是半导体器件的工作原理、特性曲线、主要参数及其应用。

2.1 半导体二极管

2.1.1 半导体的导电特性

1. 半导体的特点

自然界的物质按照导电能力可以分为导体、半导体和绝缘体三类。电阻率小于 $10^{-6}\Omega\cdot\text{m}$ 的物质称为导体，如常见的金、银、铜、铝等金属，是良好的导体。电阻率大于 $10^{10}\Omega\cdot\text{m}$ 的物质，几乎不导电，称为绝缘体，它们很难导电，如塑料、橡胶、陶瓷等。将导电能力介于导体和绝缘体之间，电阻率为 $10^{-4}\sim 10^7\Omega\cdot\text{m}$ 的物质，称为半导体，常用的半导体材料有锗、硅和砷化镓等。

半导体之所以被用来制造电子元器件，不是在于它的导电能力处于导体和绝缘体之间，而是它的导电能力在外界某种因素作用下会发生显著的变化。这种特点主要表现为：

1) 半导体的导电率可以因加入杂质而发生显著的变化。例如在纯硅中掺入百万分之一的硼（杂质，称掺杂）后，其电阻率从大约 $2\times 10^3\Omega\cdot\text{m}$ 减小到约 $4\times 10^{-3}\Omega\cdot\text{m}$ ，导电能力增加了数十万倍，各种半导体器件的制作，正是利用了掺杂以改变和控制半导体的导电率。

2) 温度的变化也会使半导体的导电能力发生显著的变化，如钴、锰、镍等的氧化物，在环境温度增高时，它们的导电能力要增强很多。人们利用这种热敏效应制作出了热敏元件。但另一方面，热敏效应会使半导体元器件的热稳定性下降。

3) 光照不仅可以改变半导体的电导率，而且可以产生电动势，这就是半导体的光电效应。利用光电效应可以制成光电晶体管、光耦合器和光电池等。

2. 本征半导体

没有杂质而且晶体结构完整的半导体，称为本征半导体。

(1) 硅和锗晶体的共价键结构

在实际应用中，必须将半导体提炼成单晶体，使其原子整齐地排列成晶体结构。

由原子理论得知，当原子的最外层有 8 个电子时才处于稳定状态。硅和锗都是四价元素，每个原子只有 4 个最外层电子，称为价电子，因此在组成单晶时，每个原子都要从四周相邻原子取得 4 个价电子，以组成稳定状态。这样，每两个原子都共用一对价电子，形成共有电子对，这种结构称为共价键结构。图 2-1 为单晶硅中的共价键结构示意图。

(2) 半导体中的两种载流子——自由电子和空穴

共价键内的两个电子称为束缚电子。在温度为绝对零度和无外界其他因素激发时，价电子全部束缚在共价键内，原子处于稳定状态。但是共价键中的电子不像绝缘体中的价电子被束缚得那样紧，当有外部激发，如温度逐渐升高或在一定强度的光照下，本征硅或锗中的一些价电子获得了足够的能量，挣脱共价键的束缚而成为自由电子。同时，在原来的共价键位置上留下相当于带有一个电子电量的正电荷的空位，称为空穴（将载有电荷的粒子——自由电子和空穴称为载流子）。这种现象，叫做本征激发。在本征激发中，带负电的自由电子和带正电的空穴总是成对出现的，所以称为自由电子—空穴对，如图 2-2 所示。空穴又很容易被附近从另一共价键挣脱出来的电子填充，于是电子与空穴又成对消失，叫做复合。本征激发和复合总是同时存在、同时进行的，这是半导体内部进行的一对矛盾运动，在温度一定的情况下，本征激发和复合达到动态平衡，在整块半导体内，自由电子和空穴的数目保持一定。温度越高，载流子数目越多，导电性能也就越好。所以，温度对半导体器件性能的影响很大。

若为本征半导体加电场，则有空穴的原子会吸引相邻原子中的价电子，填补这个空穴。

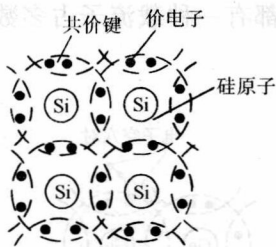


图 2-1 单晶硅中的共价键结构

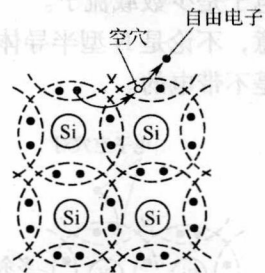


图 2-2 半导体中的自由电子—空穴对

同时，在失去了一个价电子的相邻原子的共价键中又出现了一个新的空穴，它也可以由相邻原子中的价电子来递补，而在该原子中又会出现一个空穴。如此继续下去，就好像空穴在运动。而空穴运动的方向与价电子运动的方向相反，因此空穴运动相当于正电荷的运动。

自由电子和空穴都是运载电流的粒子，统称为载流子。因此，当半导体两端加上外电压时，半导体中将出现两部分电流：一是自由电子作定向运动所形成的电子电流；二是仍被原子核束缚的价电子（注意，不是自由电子）递补空穴所形成的空穴电流。在半导体中，同时存在着电子导电和空穴导电，这是半导体导电方式的最大特点，也是半导体和金属导体在导电原理上的本质差别。以后将自由电子移动形成的导电现象简称电子导电，而将价电子填补空穴形成电流的导电现象称为空穴导电。

3. 杂质半导体

掺入杂质的半导体称作杂质半导体。根据掺入杂质性质的不同,可分为电子型(N型)半导体和空穴型(P型)半导体。

(1) N型半导体

在本征半导体中掺入少量的五价元素,使每一个五价元素取代一个四价元素在晶体中的位置,可以形成N型半导体。如在硅或锗的晶体中掺入磷(或其他五价元素)。磷原子的最外层有五个价电子。由于掺入硅晶体的磷原子数比硅原子数少得多,因此整个晶体结构基本上不变。磷原子参加共价键结构只需4个价电子,多余的第五个价电子很容易挣脱磷原子核的束缚而成为自由电子(见图2-3)。于是半导体中的自由电子数目大量增加,自由电子导电成为这种半导体的主要导电方式,故称其为电子型半导体或N型半导体。例如在室温27℃时,每立方厘米纯净的硅晶体中约有自由电子或空穴 1.5×10^{10} 个,掺杂后成为N型半导体,其自由电子数目可增加几十万倍。由于自由电子增多而增加了复合的机会,空穴数目便减少到每立方厘米 2.3×10^5 个以下。故在N型半导体中,自由电子是多数载流子,有时也称多子,空穴是少数载流子有时也称少子。

(2) P型半导体

在本征半导体中掺入少量三价元素,可以形成P型半导体,常用于掺杂的三价元素有硼、铝和镓。如图2-4为在锗晶体中掺入硼元素的结构示意图。每个硼原子只有3个价电子,故在构成共价键结构时,将因缺少一个电子而产生一个空位。邻近锗原子的价电子,在接受较小能量的条件下,就可以过来填补这个空位,而在该相邻原子中便出现一个空穴(见图2-4)。每一个硼原子都能提供一个空穴,于是在半导体中就形成了大量空穴。这种以空穴导电作为主要导电方式的半导体称为空穴半导体或P型半导体,其中空穴是多数载流子,自由电子是少数载流子。

应注意,不论是N型半导体还是P型半导体,虽然都有一种载流子占多数,但是整个晶体仍然是不带电的。

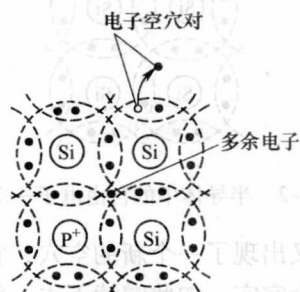


图 2-3 N型半导体结构示意图

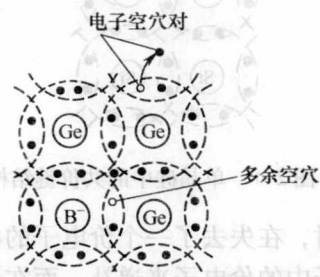


图 2-4 P型半导体结构示意图

2.1.2 PN结

1. PN结的形成

通过一定的工艺,在一块晶体内部掺杂成P型和N型半导体。由于P型半导体(P区)中的空穴浓度高于N型半导体(N区),而N区的自由电子的浓度高于P区,这样在交界面的两侧,出现了载流子的“浓度差”。在这种浓度差的作用下,P区的多数载流子空穴、N