



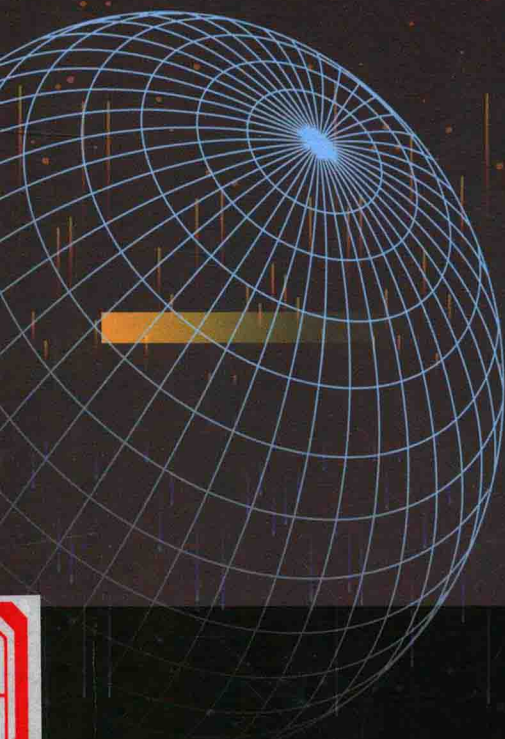
普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
“十三五”江苏省高等学校重点教材

高等学校电子信息类精品教材

# 模拟电路与数字电路

(第4版)

◆ 寇戈 蒋立平 编著



中国工信出版集团



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
“十三五”江苏省高等学校重点教材  
高等学校电子信息类精品教材

# 模拟电路与数字电路

(第4版)

寇戈 蒋立平 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,2009年普通高等教育国家精品教材,2013年入选“十二五”江苏省高等学校重点教材(编号2013-1-094),2017年入选“十三五”江苏省高等学校重点教材(编号2017-1-070)。

本书主要介绍模拟电路和数字电路相关基本概念和基本计算,全书内容分为五个部分,共14章。第一部分为第1章绪论,介绍电子电路相关基本概念;第二部分为模拟电路,包括第2~7章,内容为:半导体器件基础、放大电路基础、放大电路中的反馈、集成运算放大器、正弦波振荡电路和直流稳压电源;第三部分为数字电路,包括第8~13章,内容为:数字逻辑基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路引论、时序逻辑电路的分析与设计、存储器和可编程逻辑器件及脉冲信号的产生与整形;第四部分是第14章,内容为电子电路应用举例;第五部分为附录A~F,内容包括:半导体分立元件和集成电路型号命名方法、半导体器件产品说明书举例、电子电路教学常用EDA软件简介、集成电路基础知识、常见电子电路术语中英文对照和部分习题参考答案。

本书注重基本概念、基本原理与基本计算的介绍,力求叙述简明扼要,通俗易懂,图形符号均采用了新国标,可以作为高等学校非电类各专业、电气信息类计算机专业及其他相近专业的电子技术基础教材,也可供有关工程技术人员参考。

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

模拟电路与数字电路/寇戈,蒋立平编著. —4版. —北京:电子工业出版社,2019.8

ISBN 978-7-121-36594-2

I. ①模… II. ①寇… ②蒋… III. ①模拟电路-高等学校-教材 ②数字电路-高等学校-教材  
IV. ①TN710.4 ②TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第096801号

责任编辑:韩同平

印 刷:三河市良远印务有限公司

装 订:三河市良远印务有限公司

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:787×1092 1/16 印张:24.75 字数:792千字

版 次:2004年8月第1版

2019年8月第4版

印 次:2019年8月第1次印刷

定 价:69.90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, 88258888。

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。

本书咨询联系方式:88254525, hantp@phei.com.cn。

# 第4版前言

本教材第1~3版分别于2004年、2008年和2015年出版。

本教材自出版以来的15年间,承蒙广大高校师生的支持与厚爱,先后被国内数十所大学选作教材,在高等学校课程教学和人才培养中持续发挥着积极作用,获得了广泛的肯定和认可。本教材2006年入选教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材,2009年获评教育部国家精品教材。2013年和2017年分别入选“十二五”和“十三五”江苏省高等学校重点教材。

编者在深感欣慰的同时,更感到强烈的责任——每一次修订唯有尽心尽力,更加一丝不苟,才能不负读者的信任!

每次修订,最常被问到的问题就是和前面版本的区别。编者认为,教材的作用应该主要是作为教学参考书,因此修订的目的就是使教材更加适合教与学。如何发挥教材的这一作用,是编者每次修订的“初心”。此次对第3版教材的修订,仍遵循这种思路。第4版在保持教材基本框架不变的前提下,既保持了前三版“针对非电类专业,定位准确,注重基础,详略得当,适合教学”的特点,又在内容方面做了一些新的拓展:

1. 补充了电子技术最新进展,更新了相关数据,将从“互联网+”进入到“人工智能+”时代的最新电子技术发展前沿呈现于读者面前。

2. 进一步理清相关基础概念,增加线性电子线路和非线性电子线路,低频电子线路和高频电子线路等章节。

3. 比较详尽地对差分放大电路相关参数、整流电路进行了比较分析;增加电感滤波内容及各种滤波电路的比较;稳压电路部分增加了例题,便于读者对此类问题深入理解,增加感性认识。

4. 增加了第14章电子电路应用举例。

5. 组合电路和时序电路部分进行了适当调整,更侧重于数字电路的分析方法和设计方法的介绍。

6. 根据大规模集成电路的发展趋势,对可编程逻辑器件内容进行了必要精简,增加了CPLD和FPGA内容。

7. 随着可编程逻辑器件的普遍应用,将数字电路各章节基于Multisim的仿真改为基于可编程逻辑器件开发软件Quartus II仿真。在附录C中增加Quartus II软件使用介绍,使读者通过学习能直接利用开发软件和可编程逻辑器件进行数字系统设计。

8. 习题参考解答部分一般仅保留答案,略去了详尽过程。教材所有习题的详尽解答可参见本教材配套用书《模拟电路与数字电路学习指导与考研辅导》(电子工业出版社,ISBN:978-7-121-31576-3)。

本教材具有以下几个方面的特点:

- 注重反映电子技术最新成果,使学生能够接触到学科前沿。
- 结合电子电路实例,综合运用模拟电路与数字电路相关知识,便于读者理论联系实际,学以致用。例如,第14章的3个简单应用电路,以读者学完前面基础知识可以看懂电路为前提,即是模拟电路与数字电路的综合应用。
- 每节后配有思考题,可通过扫描二维码查看参考答案,便于读者及时掌握所学内容,检验学习效果。

- 注重知识的归纳与梳理,使读者掌握规律,更好地理解基本概念和基本计算。例如,通过表格比较各种差分放大电路、整流电路和滤波电路的结构和特点等。
- 部分例题给出仿真过程,方便读者掌握现代电路分析设计工具。
- 附录内容全面,可以拓宽视野,供不同读者多方位使用。

本教材建议学时数为 60~100 学时(编者所在南京理工大学使用该教材的课程总学分为 5 学分,总学时 80 学时,模拟电路和数字电路各 40 学时,可供参考)。不同学校、不同专业方向可根据需求选择教学内容。另外,书中注有“\*”处是选讲内容,可根据具体学时数进行取舍。

本书绪论、模拟电路部分、第 14 章和习题参考答案由寇戈负责修订,数字电路部分由蒋立平负责修订,寇戈负责全书的统稿工作。在第 4 版即将付梓出版之际,需要感谢对此版成书给予支持的各位——南京理工大学教务处的领导和老师、电子工程与光电技术学院的领导和同事们,还有使用此书的老师和同学们,以及在此书修订过程中给出很好建议的编辑和热心读者,谢谢大家!

第 1 版出书时,我们还处于 2G 时代。现在第 4 版即将问世时,5G 已经进入了我们的生活。电子技术在飞速发展,与之紧密相关的模拟电路和数字电路也在不断发展。虽然已历经四次出版,但是教材的改变是否更加适合教与学,还有待于实践的检验。编者在饱含期冀的同时亦有一丝忐忑!衷心希望听到来自老师和同学们的反馈,使教材更加完善。有任何建议及意见,欢迎联系我们。邮箱:mdandsd@2008.sina.com

编著者  
于南京理工大学

本书结构	第一部分	{	第 1 章	绪论
	第二部分	{	第 2 章	半导体器件基础
			第 3 章	放大电路基础
			第 4 章	放大电路中的反馈
			第 5 章	集成运算放大器
			第 6 章	正弦波振荡电路
			第 7 章	直流稳压电源
	第三部分	{	第 8 章	数字逻辑基础
			第 9 章	组合逻辑电路
			第 10 章	时序逻辑电路引论
			第 11 章	时序逻辑电路的分析与设计
			第 12 章	存储器和可编程逻辑器件
	第四部分	{	第 13 章	脉冲信号的产生与整形
			第 14 章	电子电路应用举例
	第五部分	{	附录 A	半导体分立元件和集成电路型号命名方法
附录 B			半导体器件产品说明书举例	
附录 C			电子电路教学常用 EDA 软件简介	
附录 D			集成电路基础知识	
附录 E			常见电子电路术语中英文对照	
附录 F			部分习题参考答案	

# 目 录

## 第一部分

<b>第1章 绪论</b> .....	(1)	1.3.2 与电子技术相关的研究热点	··· (10)
1.1 电子技术相关基本概念	····· (1)	1.4 电路模型	····· (12)
1.2 与人们生活相关的电子技术及 产品	····· (8)	1.5 电子电路的特点及研究 方法	····· (13)
1.3 电子技术的发展历史及其研究 热点	····· (9)	1.6 学习本课程的目的及方法	····· (13)
1.3.1 电子技术的发展历史	····· (9)	本章小结	····· (14)

## 第二部分 模拟电路

<b>第2章 半导体器件基础</b> .....	(15)	2.4.2 场效应管的工作原理	····· (35)
2.1 半导体的基本知识	····· (15)	2.4.3 场效应管的特性曲线	····· (36)
2.1.1 本征半导体	····· (15)	2.4.4 场效应管的符号表示及主要 参数	····· (37)
2.1.2 杂质半导体	····· (16)	2.4.5 各种场效应管比较	····· (38)
2.1.3 PN结及其单向导电性	····· (17)	本章小结	····· (39)
2.2 晶体二极管	····· (19)	习题	····· (40)
2.2.1 晶体二极管的结构、符号、 类型	····· (19)	<b>第3章 放大电路基础</b> .....	(43)
2.2.2 晶体二极管的伏安特性与 等效电路	····· (20)	3.1 放大电路的基本概念	····· (43)
2.2.3 晶体二极管的主要参数	····· (22)	3.2 共发射极放大电路	····· (44)
2.2.4 晶体二极管的温度特性	····· (22)	3.2.1 共发射极组态基本放大电路的 构成	····· (44)
2.2.5 晶体二极管的应用	····· (22)	3.2.2 共发射极组态基本放大电路的 工作原理	····· (44)
2.2.6 稳压管	····· (26)	3.3 放大电路的分析方法	····· (45)
2.3 晶体三极管	····· (26)	3.3.1 静态和动态	····· (45)
2.3.1 晶体三极管的结构、符号、 类型及应用	····· (27)	3.3.2 直流通路和交流通路	····· (45)
2.3.2 晶体三极管的电流分配及 放大作用	····· (27)	3.3.3 放大电路的静态分析	····· (46)
2.3.3 晶体三极管的输入特性与输出 特性	····· (30)	3.3.4 放大电路的动态分析——图解 分析法	····· (47)
2.3.4 晶体三极管的主要参数	····· (32)	3.3.5 放大电路的动态分析——小信号 模型法	····· (52)
2.4 场效应管	····· (34)	3.4 用H参数小信号模型分析 共发射极基本放大电路	····· (55)
2.4.1 场效应管的结构、类型	····· (34)		

3.4.1 求电压增益 .....	(55)	和动态分析 .....	(111)
3.4.2 求输入电阻和输出电阻 .....	(56)	5.1.3 偏置电路 .....	(122)
3.5 稳定静态工作点的放大 电路 .....	(58)	5.1.4 功率放大电路 .....	(124)
3.5.1 温度对工作点的影响 .....	(58)	5.2 集成运算放大器 .....	(128)
3.5.2 分压式偏置电路 .....	(59)	5.2.1 集成运算放大器的符号 .....	(128)
3.6 共集电极电路和共基极 电路 .....	(65)	5.2.2 集成运算放大器的主要 参数 .....	(128)
3.6.1 共集电极放大电路(射极 输出器) .....	(65)	5.2.3 理想运算放大器的特性 .....	(129)
3.6.2 共基极放大电路 .....	(67)	5.3 集成运算放大器的基本运算 电路 .....	(132)
*3.6.3 三种组态的 H 参数分析 .....	(68)	5.3.1 求和运算电路 .....	(132)
3.6.4 三种基本组态放大电路的 比较 .....	(68)	5.3.2 减法运算电路 .....	(133)
3.7 放大电路的频率响应 .....	(70)	5.3.3 积分电路和微分电路 .....	(135)
3.7.1 幅频特性和相频特性 .....	(70)	*5.3.4 对数电路和指数电路 .....	(137)
3.7.2 波特图 .....	(70)	5.4 集成运算放大器的非线性 应用 .....	(138)
3.7.3 共发射极放大电路的频率 特性 .....	(71)	5.4.1 电压比较器 .....	(138)
3.8 场效应管放大电路 .....	(72)	*5.4.2 非正弦波产生电路 .....	(140)
3.8.1 FET 放大电路的静态分析 .....	(72)	本章小结 .....	(143)
3.8.2 FET 放大电路的小信号模型 分析法 .....	(74)	习题 .....	(144)
*3.8.3 FET 三种组态的比较 .....	(74)	<b>第 6 章 正弦波振荡电路</b> .....	(147)
3.9 多级放大电路 .....	(78)	6.1 正弦波振荡电路的基本 原理 .....	(147)
3.9.1 多级放大电路概述 .....	(78)	6.2 正弦波振荡电路的组成、分类 和分析方法 .....	(149)
3.9.2 多级放大电路的分析 .....	(79)	6.3 RC 振荡电路 .....	(150)
3.10 放大电路的主要性能指标 .....	(85)	6.3.1 文氏桥式振荡电路 .....	(150)
本章小结 .....	(87)	6.3.2 RC 移相式振荡电路 .....	(152)
习题 .....	(88)	6.3.3 双 T 式振荡电路 .....	(153)
<b>第 4 章 放大电路中的反馈</b> .....	(92)	6.4 LC 振荡电路 .....	(153)
4.1 反馈的基本概念 .....	(92)	*6.5 石英晶体振荡电路 .....	(156)
4.2 反馈的分类 .....	(93)	本章小结 .....	(158)
4.3 负反馈放大电路的增益 .....	(96)	习题 .....	(158)
4.4 负反馈对放大电路性能的 改善 .....	(101)	<b>第 7 章 直流稳压电源</b> .....	(161)
本章小结 .....	(104)	7.1 直流稳压电源的基本组成 .....	(161)
习题 .....	(104)	7.2 整流电路 .....	(162)
<b>第 5 章 集成运算放大器</b> .....	(107)	7.2.1 半波整流电路 .....	(162)
5.1 集成运算放大器的构成 .....	(107)	7.2.2 单相全波整流电路 .....	(163)
5.1.1 差分式放大电路 .....	(107)	7.2.3 桥式全波整流电路 .....	(164)
5.1.2 差分式放大电路的静态分析		7.2.4 整流电路的比较 .....	(165)
		7.3 滤波电路 .....	(167)
		7.3.1 电容滤波 .....	(167)

7.3.2 电感滤波 .....	(169)	7.4.2 晶体管串联型稳压电路 .....	(173)
7.3.3 其他滤波电路 .....	(170)	*7.4.3 晶体管开关型稳压电路 .....	(174)
7.3.4 常见滤波电路的比较 .....	(171)	7.4.4 集成稳压电路 .....	(176)
7.4 稳压电路 .....	(172)	本章小结 .....	(177)
7.4.1 稳压管稳压电路 .....	(172)	习题 .....	(177)

### 第三部分 数字电路

<b>第8章 数字逻辑基础</b> .....	(179)	10.3.2 门控RS锁存器 .....	(251)
8.1 数制与BCD码 .....	(180)	10.3.3 D锁存器 .....	(252)
8.1.1 常用数制 .....	(180)	10.4 触发器 .....	(253)
8.1.2 几种简单的编码 .....	(187)	10.4.1 主从触发器 .....	(253)
8.2 逻辑代数基础 .....	(189)	10.4.2 边沿触发器 .....	(255)
8.2.1 基本逻辑运算 .....	(190)	10.4.3 集成触发器 .....	(258)
8.2.2 复合逻辑运算 .....	(191)	*10.5 触发器的脉冲工作特性 .....	(259)
8.2.3 逻辑电平与正、负逻辑 .....	(193)	10.6 触发器逻辑功能的转换 .....	(259)
8.2.4 基本定律和规则 .....	(193)	10.6.1 代数法 .....	(260)
8.2.5 逻辑函数的标准形式 .....	(197)	10.6.2 图表法 .....	(261)
8.2.6 逻辑函数的化简 .....	(203)	10.7 触发器应用举例 .....	(262)
本章小结 .....	(214)	本章小结 .....	(264)
习题 .....	(215)	习题 .....	(264)
<b>第9章 组合逻辑电路</b> .....	(217)	<b>第11章 时序逻辑电路的分析与设计</b> .....	(267)
9.1 由基本逻辑门构成的组合电路 的分析和设计 .....	(217)	11.1 MSI构成的时序逻辑电路 .....	(268)
9.1.1 组合电路的一般分析方法 .....	(217)	11.1.1 寄存器和移位寄存器 .....	(268)
9.1.2 组合电路的一般设计方法 .....	(218)	11.1.2 计数器 .....	(272)
9.2 MSI构成的组合逻辑电路 .....	(220)	11.1.3 移位寄存器型计数器 .....	(285)
9.2.1 编码器 .....	(220)	11.1.4 序列信号发生器 .....	(290)
9.2.2 译码器 .....	(224)	11.2 同步时序逻辑电路的分析 方法 .....	(292)
9.2.3 数据选择器 .....	(232)	11.3 同步时序逻辑电路的设计 方法 .....	(294)
9.2.4 加法器 .....	(237)	本章小结 .....	(300)
9.2.5 数值比较器 .....	(241)	习题 .....	(301)
本章小结 .....	(243)	* <b>第12章 存储器 and 可编程逻辑 器件</b> .....	(304)
习题 .....	(244)	12.1 概述 .....	(304)
<b>第10章 时序逻辑电路引论</b> .....	(246)	12.2 存储器 .....	(306)
10.1 时序逻辑电路的基本 概念 .....	(246)	12.2.1 只读存储器(ROM) .....	(306)
10.1.1 时序逻辑电路的结构模型 .....	(246)	12.2.2 随机存取存储器(RAM) .....	(310)
10.1.2 状态表和状态图 .....	(247)	12.3 可编程逻辑器件(PLD) .....	(312)
10.2 存储器件 .....	(248)	12.3.1 可编程阵列逻辑(PAL) .....	(313)
10.3 锁存器 .....	(249)		
10.3.1 RS锁存器 .....	(249)		

12.3.2 通用阵列逻辑(GAL) .....	(318)	13.3.1 用555定时器构成的单稳态 触发器 .....	(332)
12.3.3 复杂可编程逻辑器件(CPLD) ..	(322)	13.3.2 用施密特触发器构成的单稳态 触发器 .....	(333)
12.3.4 现场可编程门阵列(FPGA) ..	(323)	13.3.3 集成单稳态触发器 .....	(334)
12.3.5 PLD的开发过程 .....	(325)	13.3.4 单稳态触发器的应用 .....	(334)
本章小结 .....	(327)	13.4 多谐振荡器 .....	(336)
习题 .....	(327)	13.4.1 用555定时器构成的多谐 振荡器 .....	(336)
<b>第13章 脉冲信号的产生与整形</b> ..	<b>(328)</b>	13.4.2 用施密特触发器构成的多谐 振荡器 .....	(338)
13.1 555集成定时器 .....	(328)	13.4.3 石英晶体多谐振荡器 .....	(339)
13.2 施密特触发器 .....	(330)	本章小结 .....	(339)
13.2.1 用555定时器构成的施密特 触发器 .....	(330)	习题 .....	(340)
13.2.2 集成施密特触发器 .....	(331)		
13.2.3 施密特触发器的应用 .....	(331)		
13.3 单稳态触发器 .....	(332)		

#### 第四部分

*第14章 电子电路应用举例 .....	(342)	14.3 抢答器电路 .....	(343)
14.1 液位控制电路 .....	(342)	本章小结 .....	(344)
14.2 倒车警示电路 .....	(343)	习题 .....	(344)

#### 第五部分 附 录

附录A 半导体分立元件和集成电路 型号命名方法 .....	(345)	附录C 电子电路教学常用EDA软件 简介 .....	(356)
附录B 半导体器件产品说明书 举例 .....	(348)	C.1 几种常用的EDA软件 .....	(356)
B.1 二极管(1N4148)技术指标及 参数 .....	(348)	C.2 Multisim 仿真软件 .....	(357)
B.2 三极管(2N4124)技术指标及 参数 .....	(350)	C.3 Quartus II 软件使用简介 .....	(363)
B.3 场效应管(2N7002)技术指标及 参数 .....	(353)	附录D 集成电路基础知识 .....	(364)
		附录E 常见电子电路术语中英文 对照 .....	(365)
		附录F 部分习题参考答案 .....	(369)
		参考文献 .....	(386)

# 第一部分

## 第1章 绪 论

本章学习目标:

- 了解电子技术在科技领域所处地位及应用范围。
- 了解电子技术有关名词、术语、基本概念及电子技术发展历史,掌握电子系统的基本组成。
- 掌握电子电路的特点和分析方法,明确本课程的学习任务,为学好这门课程奠定基础。

电子技术已渗透到工业、农业、科技和国防等各个领域,宇宙航行、人造卫星、通信、广播电视、电子计算机、自动控制、电子医疗设备以及我们的日常生活都离不开电子技术。20世纪下半叶迅速发展起来的激光、光纤、光盘存储等技术及其与电子技术结合形成的光电子技术已经成为信息社会的重要技术基础。特别是世界进入信息时代的21世纪后,作为信息技术发展基础之一的电子技术必将随着微电子技术、光电子技术和其他高技术的进步而飞速发展,应用领域将更加广泛,给人类带来全新的工作方式和生活方式。

本章主要介绍电子技术的一些基本概念和电子系统的基本组成,简要介绍电子电路的特点和分析方法,为学好这门课程奠定基础。

### 1.1 电子技术相关基本概念

本节简要介绍电子技术的研究内容,以及模拟信号与数字信号,模拟电路与数字电路,分立元件电路与集成电路,A/D与D/A转换电路,电子系统,电子设备与电气设备,微电子技术 with 光电子技术等相关基本概念。

#### 1. 电子技术

电子技术是研究电子器件、电子电路及其应用的科学技术。

电子器件用来实现信号的产生、放大、调制及探测等功能,常见的电子器件有电子管、晶体管和集成电路等。

电子电路是组成电子设备的基本单元,由电阻、电容、电感等电子元件和电子器件构成,具有某种特定功能。

#### 2. 模拟信号与数字信号

信号是信息的载体。在人们周围的环境中,存在着电、声、光、磁、力等各种形式的信号。电子技术所处理的对象是载有信息的电信号。目前对于电信号的处理技术已经比较成熟。但是,在通信、测量、自动控制以及日常生活等各个领域也会遇到非电信号的处理问题,在实际中经常需要把待处理的非电信号先变成电信号,经过处理后再还原成非电信号。

在电子技术中遇到的电信号按其不同特点可分为两大类,即模拟信号和数字信号。

在时间上和幅值上均是连续的信号叫做模拟信号。此类信号的特点是,在一定动态范围内幅值可取任意值。许多物理量,例如声音、压力、温度等均可通过相应的传感器转换为时间连续、数值连续的电压或电流。图 1.1 所示为一随时间变化的模拟电压信号波形。

与模拟信号相对应,时间和幅值均离散(不连续)的信号叫做数字信号。数字信号的特点是幅值只可以取有限个值。图 1.2 所示为一常见的、应用最广的二进制数字信号波形。

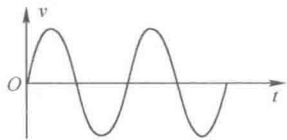


图 1.1 模拟电压信号波形

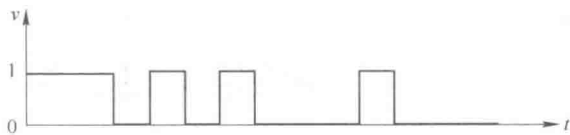


图 1.2 二进制数字信号波形

同一个物理量,既可以采用模拟信号进行表征,也可以采用数字信号进行表征。例如,传统的录音磁带是以模拟形式记录声音信息的,而 CD 光盘(compact laser disk)则是以数字形式记录声音信息的。

### 3. 模拟电路与数字电路

模拟信号和数字信号的特点不同,处理这两种信号的方法和电路也不同。一般地,电子电路可分为模拟电路和数字电路两大类。

处理模拟信号电子电路称为模拟电路。模拟电路研究的重点是信号在处理过程中的波形变化以及器件和电路对信号波形的影响,主要采用电路分析的方法。

处理数字信号电子电路称为数字电路。数字电路着重研究各种电路的输入和输出之间的逻辑关系,分析时常利用逻辑代数、真值表、卡诺图和状态转换图等方法。

模拟电路和数字电路的分析方法有很大的差别,这是由模拟信号和数字信号的不同特点决定的。由于电子电路分为模拟电路和数字电路两部分,通常电子技术也被人们分为模拟电子技术和数字电子技术。但是这两种技术并不是孤立的,在许多情况下往往是模拟和数字两种技术并用的。

但是,随着电子技术的不断发展,数字电路的应用愈来愈广泛,在很多领域取代了模拟电路。其主要原因是:①数字电路更易采用各种算法进行编程,使其应用更加灵活;②数字电路可以提供更高的工作速度;③采用数字电路,数字信息的范围可以更宽,表示精度可以更高;④数字电路可以采用嵌入式纠错系统;⑤数字电路比模拟电路更易做到微型化,等等。

图 1.3 所示为模拟电路和数字电路在一定噪声干扰下的输出信号。图 1.3(a)中的模拟信号

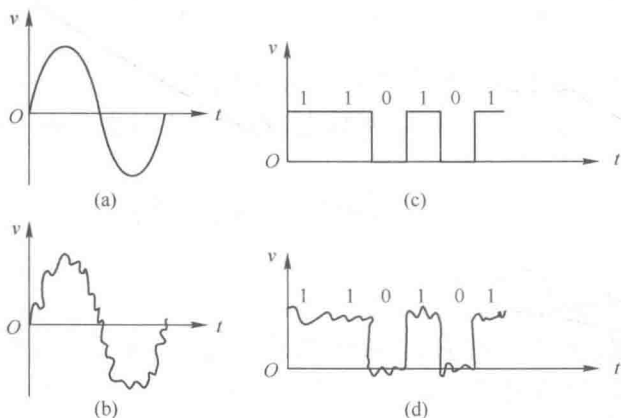


图 1.3 模拟电路和数字电路在一定噪声干扰下的输出信号

由于其所有幅值均为有效值,难以对原始信号进行精确还原,受到噪声干扰的信号如图 1.3(b)所示;而图 1.3(c)中的数字信号由于其特定的幅值,其噪声可以完全去除,如图 1.3(d)所示。由此可以很直观地看出数字电路的抗干扰能力优于模拟电路。

尽管人类已经进入数字时代,但是认为模拟技术已经停滞与过时的想法似乎有些片面。一方面,随着数字技术的进步,对高精度、高速度、高频率、低功耗模拟产品的需求越来越大,模拟产品正沿着继续提高性能的方向前进;另一方面,与数字技术结合的混合信号器件则将是模拟产品的另一个主要发展方向。很多的现代电子系统都包含模拟电路与数字电路两种电路,其性能较之单纯由模拟电路或数字电路构成的系统,更为优越。因此,数字化浪潮也给模拟技术带来了更为广泛的发展空间,可以预计未来的电路系统将是模拟电路与数字电路共存的。

#### 4. 分立元件电路与集成电路

分立元件电路是将单个的电子元器件连接起来组成的电路。如果用分立元件实现功能复杂的电路或系统,势必造成元器件数目众多,体积、重量和功耗都将增大,而且可靠性也较差。

集成电路是采用一定的制造工艺将所有元器件都制作在一小块硅片上形成的电路。其优点是成本低、体积小、重量轻、功耗低、可靠性高,且便于维修。集成电路的应用范围很广,发展非常迅速。

在模拟电路和数字电路中,虽然都在大量使用集成电路器件,很多场合分立元件电路已经被集成电路所取代,但在这两种不同的电路中,集成电路器件的使用呈现不同的特点。在数字电路中,分立元件电路几乎被淘汰;而在模拟电路中,由于信号形状的多样性,功率要求的多样性,以及集成电路制造技术等原因,无法在集成电路内部实现大阻值电阻、大容量的电容器和电感、变压器等元件,因此在模拟电路的大功率、超高频等领域中,分立元件电路仍有一席之地。

常见的模拟集成电路有集成运算放大器、集成功率放大器、模拟乘法器、锁相环、混频器和检波电路等;常见的数字集成电路有门电路、触发器、编码器、译码器、计数器、运算电路、数据选择器、寄存器和存储器等。

本书第二部分首先通过分立元件电路介绍电路的一些基本概念和基本原理,然后引入典型的集成电路——集成运算放大器,使读者了解集成电路的特点和应用。第三部分的数字器件则主要涉及集成电路。

#### 5. 线性电路和非线性电路

我们知道,电路元器件分为线性元器件和非线性元器件。如果电路参数不随外加电压或电流变化,则此类元器件是线性元器件;反之则为非线性元器件。根据电路中是否包含非线性元器件可以把电路分为线性电路和非线性电路。线性电路可以采用叠加原理来分析,但是非线性电路需要采用小信号模型法、图解法等进行分析研究。

其实,上述分类的目的主要是为了研究方便。从本质上来讲,由于电路元器件或多或少会随着外加电压或电流变化,因此严格来说所有电子元器件都是非线性元器件,也就是说所有电子线路都是非线性电路。可以说,线性是相对的,而非线性是绝对的。

非线性元器件往往具有复杂的物理特性。例如,实际的晶体二极管不仅其伏安关系呈现非线性电阻的特点,电容特性也因 PN 结的势垒电容和扩散电容形成非线性电容效应,用数学语言描述显得颇为困难。虽然如此,由于使用条件不同,各电子元器件表现出的非线性程度可以不尽相同。比如说,双极结型晶体管在足够小的输入信号作用下,在一定范围内可以呈现很好的线性

特性,这样就可以采用线性电路的研究方法进行研究,使问题简化。本书中由非线性器件(BJT和FET)构成的放大电路就采用了非线性器件线性化处理的工程近似方法,作为线性电路进行研究的。

## 6. 低频电路与高频电路

电子线路经常被划分为低频电子线路与高频电子线路,简称低频电路和高频电路,那么所谓的“低频”和“高频”,其界定的依据是什么呢?哪个频率是作为划分标准的分界频率呢?

实际上,并不存在一个这样非常明确的分界频率,因此低频电路和高频电路之间很难明确通过某一频率值进行界定。只是在习惯上,模拟电子线路研究的电路是工作在较低的频率范围,一般是基于声(音)频(频率范围约为20~20000Hz)的电路,基本上属于低频电子线路范畴,此时器件的频率参数经常可以不予考虑。

一般地,按照无线电波的波段规定划分,高频是指3~30MHz的频率范围。实际上,在电子技术中,高于数十千赫兹频率的振荡信号有一些共同的特性,因此习惯上把这种频率范围的信号简单地称为高频信号,而研究该频率范围信号产生、放大及变换等的电路称为高频电路。广义上来讲,只要电路尺寸比工作波长小很多,可用集中参数来分析电路,相应信号可用电路来实现,都可认为属于高频范围。射频电子线路研究的正是这部分内容。

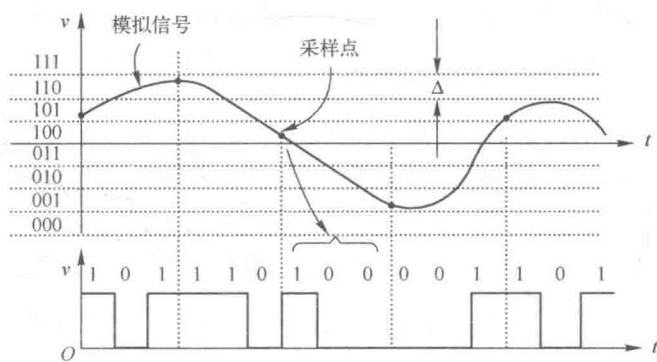
还有一种常用的划分方法,按使用器件内部电抗分量在电路中所产生影响的大小来区分。当器件内部等效电抗对电路的工作特性不产生显著影响时,为低频电路;否则为高频电路。本教材所研究的低频电路就是指频率足够低,可以忽略寄生电容、分布电容、分布电感等对电路产生的影响。

需要注意的是,当研究某个电子设备或系统时,即使同一个电路也会分出低频、中频和高频范围。因此低频电路和高频电路所说的频率范围,只是一个相对的概念。

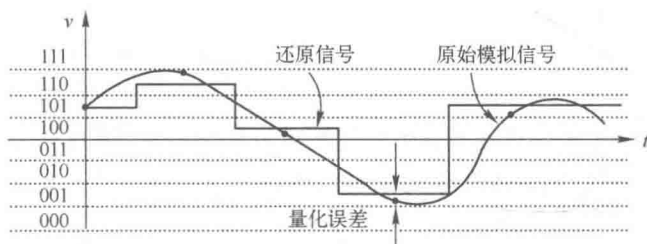
## 7. A/D和D/A转换电路

随着数字技术,特别是信息技术的飞速发展及普及,在现代控制、通信及检测等领域,为了提高系统的性能指标,对信号的处理广泛采用了数字技术。由于人类生活在一个连续变化的模拟世界里,系统的实际对象往往都是一些模拟量(如温度、压力、位移、图像等),要使计算机或数字仪表能识别、处理这些信号,各种模拟信号必须通过模数转换电路转换成数字信号;而经计算机分析、处理后输出的数字量也往往需要将其转换为相应的模拟信号,并经过适当的调整与放大之后,才能成为人类能够感知的声音与图像等信息。这样,就需要一种能在模拟信号与数字信号之间起桥梁作用的电路——模数转换电路和数模转换电路。

将模拟信号转换成数字信号的电路,称为模数转换器(Analog to Digital Converter,简称A/D转换器或ADC);将数字信号转换为模拟信号的电路称为数模转换器(Digital to Analog Converter,简称D/A转换器或DAC)。A/D和D/A转换电路已成为信息系统中不可缺少的接口电路。图1.4所示为模拟信号与数字信号转换的示意图。图1.4(a)所示为模拟信号转换为数字信号,首先模拟信号被周期性地采样,然后对每个采样点进行编码(通常采用二进制编码),这样就可以采用数字形式表示一个量;图1.4(b)所示为数字信号转换为模拟信号,精确地恢复模拟量数值几乎是不可能的,因为某一个范围内的数值均会采用相同的编码。因此,D/A转换器只能得到与原来模拟信号近似的还原信号,二者之间一定会存在量化误差,该误差可以通过提高DAC的位数(二进制数码的位数),即增多电压等级的方法降低(每个电压等级对应的电压数值越小,理论上可以体现出精度越高)。



(a) 模拟信号转换为数字信号



(b) 数字信号转换为模拟信号

图 1.4 模拟信号与数字信号转换的示意图

## 8. 电子系统

电子系统是指由相互作用的基本电路和器件构成的能够完成某种特定功能的电路整体。

图 1.5 所示为常见的扩音系统,是一个典型的模拟信号处理系统。先用传声器(话筒)将声波的机械振动转化为电信号,经声频放大器对电信号进行放大,再由扬声器(喇叭)将电信号还原成声音,这样就可以获得提高的音量。

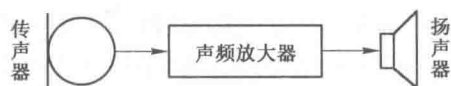


图 1.5 扩音系统

图 1.6 所示为一个用于流动细胞分析的激光血球计数系统,是一个较为简单的数字处理系统的例子。通过一定的方法,可以使血球排列成单行进入计数通道,当激光光束通过血球时,其散射光照射到硅光电池上,由光的强弱变化产生电脉冲信号,然后由数字信号处理电路进行计数,再通过数字显示器显示出来,同时由记录设备记录数据。电源的作用是为信号处理、显示、记录电路提供电能,使其正常工作。

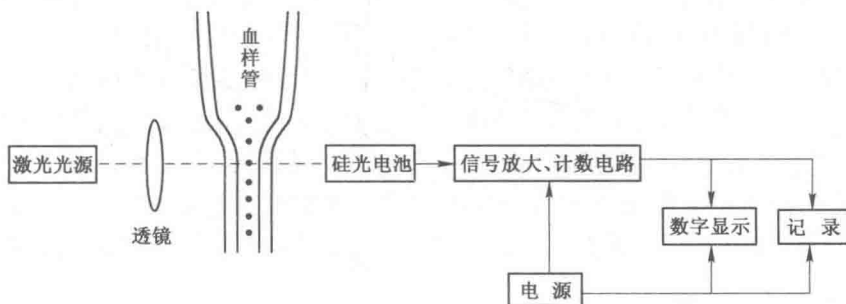


图 1.6 激光血球计数系统方框图

广播通信系统主要由如图 1.7 所示的两大模块构成：

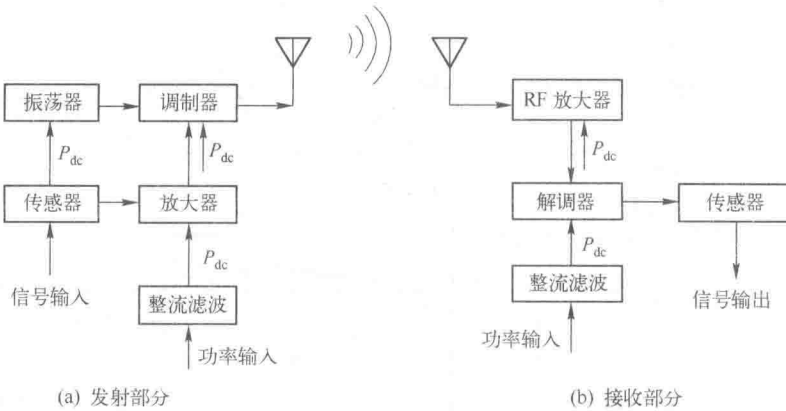


图 1.7 广播通信系统方框图

(1) 信号的发射。首先用话筒把声音信号转换成音频电信号,通过调制器把音频电信号加载到高频电磁波上(通常调制级也兼有放大作用),最后通过天线把载有音频电信号的电磁波发射出去。

(2) 信号的接收。先利用处在电磁波传播范围里的天线接收电磁波,再利用收音机调谐器选出所需某一频率的电磁波。但是把调谐器选出来的频率很高的电信号直接送到耳机,不能使耳机发出声音,因此还需要从高频电信号中取出音频信号,解调放大后,送到扬声器里,把音频电信号转换成声音,这样就能听到收音机里的节目了。注意系统的各电路部分均需要整流滤波得到的直流能量  $P_{dc}$ 。

图 1.5 和图 1.6 是电子技术中处理信号的两种常见模式:一种是纯模拟方式;一种是纯数字方式。对于比较复杂的系统(如图 1.7 所示)一般需采用模拟-数字混合方式。不论采用哪种方式,其电子系统大致可由四个部分组成,即传感器、信号处理电路、再生器和电源,如图 1.8 所示。

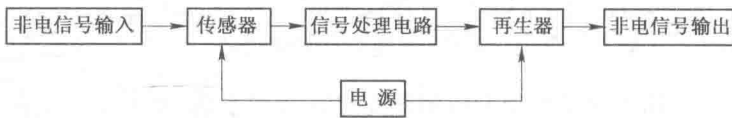


图 1.8 电子系统的基本组成方框图

如果需要处理的信号为电信号,则可以省去传感器。若在输出端不需要还原成非电信号,则可省去再生器。

有的电子系统是非常复杂的,包含许多不同的功能电路。特别是集成电路飞速发展的今天,集成度越来越高,功能越来越多,在单个芯片上可能集成多种不同类型的电路,从而自成一个系统,外围电路却越来越简单。因此对于有些电路的内部结构及工作原理,没有必要搞得非常清楚,应用中关注的是系统的整个信号处理过程及外部特性,这一点对于正确使用电子系统是非常重要的。

许多实际的电子系统不是孤立地存在的,必须与其他的系统(例如机械系统、光学系统、图像处理系统、自动控制系统等)相互配合,才能构成完整的实用设备或仪器。因此在设计电子系统时,就要考虑到各系统的协调关系,采用合理的接口,保证被连接的两部分电路之间信号的通畅和各自处于正常工作状态。

## 9. 电子设备与电气设备

“电子”和“电气”两个概念经常出现在一起,如何进行区分呢?实际上,二者在概念上没有

非常严格的定义来进行划分。有时人们以“弱电”和“强电”来进行区分(弱电一般是用来进行信号处理的,电压和电流都很小;而强电则是用来驱动大功率的电力设备的),有时会以是否包含有源器件进行界定。这里我们举一个常见的墙壁开关的例子进行两个概念的理解。普通的墙壁开关属于电气设备,通过开关的闭合和断开来控制灯的亮和灭。有时候,我们需要调光开关满足人们在不同情况下对灯光亮度的不同需求,调光开关可以直接代替墙壁开关来进行灯光亮度的控制,只不过在灯的亮灭两种状态之间有很大的亮度改变范围以输出不同强度的光,这里调光开关是一个简单的电子设备,它是通过有源器件来控制电流的。

## 10. 微电子技术和光电子技术

有的时候,除了电子技术,我们也经常会遇到“微电子技术”和“光电子技术”等概念,同样“硅谷”(代表微电子信息产业)和“光谷”(代表光电子信息产业)这样的字眼也不断见诸报端,此处简单解释说明一下。

### (1) 微电子技术(Microelectronics)

微电子技术是电子技术中发展极为迅速的一个前沿分支学科,主要研究在半导体上制作微型电路及系统,其核心是集成电路技术。当前,人类赖以生存与发展的信息技术的重要基础就是微电子技术。

根据国家统计局数据显示,2018年1~12月我国集成电路产量累计1739.5亿块,较去年同期增长9.7%,该年度中国集成电路产业销售额6531.4亿元,同比增长20.69%。而在2013年,对应的数据是,集成电路产量867.1亿块,同比增长10.4%,该年度中国集成电路产业销售额2508.51亿元,同比增长16.2%。数据的背后是微电子技术的飞速发展及其对社会方方面面极大的影响。可以说,微电子技术是当今信息社会和时代的核心竞争力,该技术产业的发展规模和水平已成为衡量一个国家综合实力的重要标志。特别地,微电子技术在军事领域中有重要的应用,它的出现改变了传统战争的模式,并且导致了新式武器以及新兵种的出现。

现阶段微电子技术主要有三个发展方向:第一,增大晶圆尺寸,减小特征尺寸,从而在芯片上集成更多数目的晶体管,提高芯片的集成度。第二,从目前的3G( $10^9$ )逐步发展到3T( $10^{12}$ ),即存储容量由G位发展到T位、集成电路器件的速度由GHz发展到THz、数据传输速率由Gbps(bits per second,每秒位)发展到Tbps。集成电路将发展成为片上系统,系统的速度和可靠性可以大大提高,价格也会大幅度下降,这将成为微电子领域的一场革命。第三,可编程器件取代专用集成电路(ASIC, Application Specific Integrated Circuit),并且微电子技术与其他领域相结合将产生新产业和新学科。

### (2) 光电子技术(Optoelectronics)

光电子技术是电子技术同光学相结合的产物,包括激光技术、光纤通信技术、远程传感技术、医学诊断技术和光学信息技术等,可以认为是“利用光技术的电子技术”,它可以实现电子技术无法实现的一些功能。具体地,光电子技术以光的电子学效应基本理论和应用原理为研究对象,通过研究红外光、可见光、紫外光、X射线直至 $\gamma$ 射线波段范围内光与物质的相互作用,实现光信号与电信号或二者能量的相互转换,是电子技术在光频波段的延续与发展。

虽然微电子技术迅猛发展,但是在实现超高速、超大容量、超低功耗等方面遭遇了发展瓶颈。作为信息和能量载体的光电子,在光显示和光存储等方面,对经济建设、国家安全及整个社会发展起着至关重要的作用。这里列举几个简单的数据:光纤通信目前只是利用了从 $1.2\mu\text{m}$ 到 $1.7\mu\text{m}$ 的波段范围,而仅仅这部分能够传输的信息量就可达到75Tbps;光波频率比微波频率大约高 $10^5$ 倍,它的带宽与通信容量大致也可提高 $10^5$ 倍。通常一个微波通道上可以通上千路电话或者传输一个彩色电视节目,而在一个光波频段上可以通上亿路电话或者10万个电视节目,也就是说,理论上在一个光波通道上,可供一亿人同时打电话。并且光子间互不干涉,可以并行