

电子科学与技术



国防科工委『十五』规划教材

现代电子技术基础 (数字部分)

● 臧春华 郑步生 刘 方 崔晓平 编著



北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材, 电子科学与技术

现代电子技术基础

(数字部分)

臧春华 郑步生 刘 方 崔晓平 编著

北京航空航天大学出版社

北京理工大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

为适应现代数字技术的飞速发展,本书对传统教学内容进行了较大幅度的更新,进一步精简了传统的数字器件和设计方法,突出 EDA 设计技术和数字系统设计方法。全书主要包括:数制与编码;逻辑函数及其化简;组合电路分析与设计;时序电路分析与设计;数字系统设计与设计自动化;硬件描述语言 VHDL;可编程逻辑器件 CPLD/FPGA 的原理与应用;数/模与模/数转换;数字电路测试和可测性设计等。

本书可作为高等院校电子信息类、电气信息类、自动控制类和计算机类各专业的教材,也可作为相关工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代电子技术基础. 数字部分/臧春华等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.2

ISBN 7-81077-569-3

I. 现… II. 臧… III. 数字电路—电子技术
IV. TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 121959 号

现代电子技术基础(数字部分)

臧春华 郑步生 刘 方 崔晓平 编著

责任编辑 韩文礼

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

http://www.buaapress.com.cn E-mail:bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16

印张:25.25 字数:566 千字

2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷

印数:5 000 册

ISBN 7-81077-569-3 定价:30.00 元

国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任：张华祝

副主任：王泽山 陈懋章 屠森林

编 委：王 祁	王文生	王泽山	田 蔚	史仪凯
乔少杰	仲顺安	张华祝	张近乐	张耀春
杨志宏	肖锦清	苏秀华	辛玖林	陈光福
陈国平	陈懋章	庞思勤	武博祯	金鸿章
贺安之	夏人伟	徐德民	聂 宏	贾宝山
郭黎利	屠森林	崔锐捷	黄文良	葛小春



总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就;研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,



积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版200种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家、学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的100多位专家、学者,对经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审,评选出近200种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与技术、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入21世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业



走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创辉煌。

张华祝



前言

电子技术是 20 世纪发展最为迅速的领域之一。这主要得益于集成电路和计算机技术的迅速发展。这两项技术既是电子技术发展的产物,又是电子技术持续发展的推动力。集成电路和计算机技术的飞速发展,将人类社会带入信息时代。在这样的时代背景下,掌握模拟和数字电子技术是对所有电类专业学生的基本要求。

正因为模拟和数字电子技术是电类专业极其重要的专业基础课和技术基础课,2002 年国防科工委在发布重点建设教材的指南时,将《现代电子技术基础(模拟部分和数字部分)》列入选题。

《现代电子技术基础(模拟部分和数字部分)》的编写,结合了“国家工科基础课程电工电子教学基地”的建设实践,力求站在课程体系改革与整体优化的高度来组织内容,并力求使教材具有科学性、可读性和前瞻性。

我国高等学校自 20 世纪 70 年代起开设“数字电子技术”课程,至今已逾 30 年,其间集成电路工艺与计算机技术得到了飞速的发展,从而给数字电路设计的思想、方法、工具及所用器件都带来了巨大的变化。这些变化集中体现在数字系统实现方式和设计手段两个方面。

数字电路硬件设计经历了中小规模通用器件、大规模可编程逻辑器件(PLD)两个阶段,目前正进入单片集成或片上系统(SOC)时代。EDA 技术和 PLD 器件在硬件电路设计和单片系统仿真中的应用非常广泛,未来几年全定制的单片系统的设计需求将日益增多,而传统的硬件设计方法将逐步淡出。因此,在“数字电子技术”课程中进一步精简中小规模集成电路应用和传统的设计方法,突出现代数字系统设计方法和 PLD 与 EDA 应用技术,已成为必然趋势。

为适应现代数字技术的发展趋势,本书对传统教学内容进行了较大幅度的更新。主要体现在以下方面:

- ① 精简传统的设计方法,突出现代数字系统设计方法;
- ② 淡化最小化等手工设计技巧,突出 EDA 设计技术;



③ 精简中小规模集成电路,突出 PLD 器件的应用;

④ 淡化 IC 器件内部电路,突出各种实际应用。

本书主要讨论数字电路、数字系统逻辑设计的基本理论和方法。全书共分 9 章。

第 1~3 章讨论数制与编码、逻辑函数及其化简以及组合电路分析与设计方法。其中,组合电路的分析与设计将围绕 MSI 器件与模块进行。

第 4,5 章是时序电路分析与设计,除讨论同步时序电路分析与设计的基本方法外,还突出了 MSI 时序模块的应用。

第 6 章中首先介绍数字系统设计的基本方法,并剖析计算机这一典型的数字系统;然后就 EDA 技术中常用的逻辑模拟、逻辑综合以及硬件描述语言 VHDL 进行深入浅出的介绍。

第 7 章在介绍简单可编程逻辑器件的基础上,着重分析 CPLD/FPGA 的组成、原理、编程方法和性能特点,并通过实例说明它们的应用。

第 8 章介绍数/模与模/数转换的基本原理与技术、DAC 和 ADC 的主要技术指标以及器件选用方法。

第 9 章讨论数字电路测试的基本概念与基本方法,并简要介绍可测试性设计的常用技术。

本书由臧春华主编。第 1,2 章由崔晓平执笔;第 3,8 章由刘方执笔;第 4,5 章由郑步生执笔;第 6,7,9 章由臧春华执笔。

本书承蒙东南大学黄正瑾教授和解放军理工大学徐志军教授审阅。两位教授提出了许多宝贵的修改意见,在此表示深切的谢意。

由于编者水平有限,对于书中的错误和不当之处,恳请读者批评指正。

作 者

2004 年 5 月

目 录

引 言

第 1 章 数制与编码

1.1 数 制	3
1.1.1 十进制	3
1.1.2 二进制	4
1.1.3 八进制和十六进制	4
1.1.4 数制转换	5
1.1.5 二进制数的算术运算	8
1.2 编 码	10
1.2.1 二进制编码	10
1.2.2 带符号数的编码及运算	12
1.2.3 二—十进制码	15
1.2.4 字符编码	18
1.2.5 可靠性编码	20
习 题	21

第 2 章 逻辑函数及其化简

2.1 逻辑代数基础	23
2.1.1 逻辑函数的基本概念	23
2.1.2 逻辑代数的基本运算与复合运算	23
2.2 逻辑代数的基本公式和规则	29
2.2.1 基本公式	29
2.2.2 常用规则	30
2.3 逻辑函数和逻辑表达式	32
2.3.1 逻辑函数的表示方法	32
2.3.2 与或式与最小项表达式	34
2.3.3 或与式与最大项表达式	35
2.3.4 逻辑图	38
2.3.5 逻辑函数的代数法化简	40
2.4 逻辑函数的卡诺图化简	42
2.4.1 卡诺图的构成	42
2.4.2 用卡诺图表示逻辑函数	43



2.4.3 用卡诺图化简逻辑函数	46
2.4.4 未完全规定的逻辑函数及其化简	50
习 题	53

第3章 组合逻辑电路

3.1 数字集成器件简介	56
3.1.1 集成电路的主要电气指标	57
3.1.2 逻辑电路的输出结构	60
3.1.3 正逻辑和负逻辑	62
3.1.4 常用门电路及逻辑符号	63
3.2 常用组合逻辑模块	64
3.2.1 并行加法器	64
3.2.2 数值比较器	66
3.2.3 编码器	68
3.2.4 译码器	69
3.2.5 数据选择器	73
3.3 组合电路分析	77
3.4 组合电路设计	81
3.4.1 用SSI设计组合电路	82
3.4.2 用MSI设计组合电路	87
3.4.3 功能分解的设计方法	91
3.5 竞争与险象	94
3.5.1 逻辑险象及其消除方法	94
3.5.2 功能险象	96
3.5.3 险象的排除	96
习 题	97

第4章 时序电路分析

4.1 时序电路概述	104
4.2 集成触发器及其应用	105
4.2.1 基本RS触发器	106
4.2.2 时钟RS触发器	111
4.2.3 D触发器	113
4.2.4 JK触发器	118
4.2.5 T触发器	120
4.2.6 异步计数器	121
4.3 同步时序电路分析	123
4.3.1 米里型电路的分析	124
4.3.2 莫尔型电路的分析	128



4.3.3 复杂电路的功能表描述	131
4.3.4 自启动	132
4.3.5 异步信号的同步化	136
4.4 集成计数器及其应用	138
4.4.1 同步加法计数器 74163	139
4.4.2 异步加/减(可逆)计数器 74192	147
4.4.3 计数器应用实例——数字钟	151
4.5 集成移位寄存器及其应用	153
4.5.1 四位双向移位寄存器 74194	154
4.5.2 移位寄存器的应用实例——汽车尾灯控制电路	161
4.6 随机访问存储器与快闪存储器	163
4.6.1 随机访问存储器	164
4.6.2 快闪存储器	174
习 题	176
第 5 章 同步时序电路设计	
5.1 同步时序电路的建模	186
5.1.1 根据输入序列推导状态表(图)	186
5.1.2 根据输出序列推导状态表(图)	190
5.2 用触发器实现同步时序电路	191
5.3 用 MSI 时序模块设计同步时序电路	202
5.3.1 以集成计数器为核心设计同步时序电路	202
5.3.2 以多 D 触发器为核心设计同步时序电路	208
5.4 应用设计实例——铁路和公路交叉路口自动交通控制器的设计	211
习 题	218
第 6 章 数字系统设计与设计自动化	
6.1 数字系统设计初步	222
6.1.1 算法设计	223
6.1.2 数据处理单元设计	226
6.1.3 控制单元设计	228
6.2 计算机的组织结构	237
6.2.1 计算机的基本结构	237
6.2.2 简单 CPU 的有限状态机	238
6.3 数字系统设计自动化	243
6.3.1 逻辑验证与逻辑模拟	244
6.3.2 逻辑综合与优化	247
6.4 硬件描述语言 VHDL	251
6.4.1 VHDL 基本结构	252



6.4.2 数据对象、类型及运算符	256
6.4.3 顺序语句	260
6.4.4 并行语句	263
6.4.5 子程序	269
6.4.6 程序包与设计库	273
6.4.7 元件配置	275
6.4.8 VHDL 描述实例	278
习 题	285

第7章 可编程逻辑器件及其应用

7.1 PLD 的基本原理	288
7.1.1 PLD 的基本组成	289
7.1.2 PLD 内部电路的表示方法	290
7.1.3 PLD 的编程方法	291
7.2 简单可编程逻辑器件 SPLD	292
7.2.1 可编程只读存储器 PROM	292
7.2.2 可编程逻辑阵列 PLA	295
7.2.3 可编程阵列逻辑 PAL	296
7.2.4 通用阵列逻辑 GAL	299
7.3 高密度可编程逻辑器件 HDPLD	302
7.3.1 CPLD 组成与特点	302
7.3.2 FPGA 组成与特点	305
7.3.3 连线确定的 FPGA	308
7.3.4 HDPLD 编程技术	311
7.4 常用可编程逻辑器件及其开发工具	317
7.4.1 Lattice 公司的 CPLD/FPGA 与开发软件	317
7.4.2 Altera 公司的 CPLD/FPGA 及开发工具	318
7.4.3 Xilinx 公司的 CPLD/FPGA 和开发平台	319
7.5 PLD 应用举例	321
习 题	326

第8章 集成数/模和模/数转换器

8.1 集成数/模转换器(DAC)	328
8.1.1 集成 D/A 转换技术	329
8.1.2 DAC 的主要技术指标	332
8.1.3 DAC 的选用	334
8.1.4 典型集成 DAC 及其应用	334
8.2 集成模/数转换器(ADC)	337
8.2.1 A/D 转换的步骤	337



8.2.2 集成 A/D 转换技术	340
8.2.3 ADC 的主要技术指标	349
8.2.4 ADC 的选用	350
8.2.5 典型集成 ADC 及其应用	351
习 题	354
第 9 章 数字电路测试和可测性设计	
9.1 数字电路的故障检测	358
9.1.1 故障模型与测试码	358
9.1.2 组合电路的测试生成	360
9.1.3 同步时序电路的测试	364
9.2 数字电路的可测性设计	365
9.2.1 可控制性和可观察性	365
9.2.2 增加控制点与观察点的方法	367
9.2.3 扫描设计技术	371
9.3 边界扫描设计	373
9.3.1 边界扫描芯片的结构	374
9.3.2 板级边界扫描设计	377
9.3.3 系统级边界扫描结构	379
9.4 内自测试	380
9.4.1 内自测试的组成	380
9.4.2 特征分析器	381
9.4.3 内建逻辑模块观察器	383
习 题	384

参考文献

引 言

数字电路

自然界中的物理量就其变化规律的特点而言,可以分为两大类:模拟量和数字量。若某一物理量的变化在时间上或数值上都是连续的,则称该物理量为模拟量;若某一物理量的变化在时间和数值上都是离散的,也就是该物理量仅能取某一区间内的若干个特定值,是非连续变化的,则称其为数字量。

模拟量一般用模拟信号表示,而数字量一般用数字信号表示。在近代电子学中,按处理信号的不同,将电子电路分为模拟电路和数字电路两大类。所谓模拟电路是指以模拟信号为处理对象的电路,而数字电路是指以数字信号为处理对象的电路。对应这两大类电路,电子技术领域的两大分支是模拟电子技术和数字电子技术。

当然,将模拟量数字化以后,就可以用数字技术进行处理。

数字信号

数字信号通常只有两种状态,例如电平的高与低。与之相对应,数字电路中的元件也只有两种工作状态。由于逻辑量的取值非“真”即“假”,也是两种状态,因此,在数字电子技术中,人们往往借用逻辑代数作为数字电路的理论工具。为此,数字电路又称为逻辑电路,且一般用 0,1 两个符号来表示电路中信号与元件的工作状态,如用 1 表示高电平;用 0 表示低电平。

图 1 所示就是一数字信号 X 随时间的变化过程。该信号在一定的时间间隔 T 内的状态(1 或 0)表示该信号对应的电平的高低。图中,信号 X 随时间变化的顺序依次是 001001110。

图 2 所示为数字电路的框图。其中 A,B,C 是输入信号,表示外部向数字电路提供的信号;Z 是输出信号,是由数字电路向外部提供的信号。

数字元件

组成数字电路的基本元件是开关,因此又称数字电路为开关电路。数字电路获得高、低电平的示意图如图 3 所示。开关 S 的通、断是由输入信号 V_i 控制的;当 V_i 为高电平时,S 闭合,输出 V_o 是低电平;当 V_i 为低电平时,S 断开,输出 V_o 是高电平。

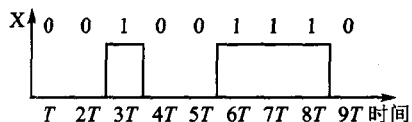


图1 数字信号

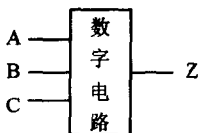


图2 数字电路的框图

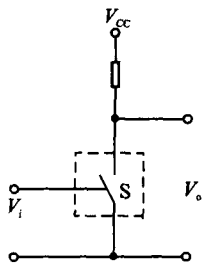


图3 开关电路

早期的开关元件由继电器组成,包含励磁线圈和常开触点或常闭触点。对于常开触点,当给励磁线圈加上工作电压时,触点由断开到闭合;对于常闭触点,当给励磁线圈加上工作电压时,触点由闭合到断开。

用于现代数字电路的开关元件已不再是继电器,而是由晶体管和场效应管等构成。在数字电路中,这种半导体器件工作在饱和区和截止区,也就是工作在开和关状态,从而获取高、低电平。

数字电路的基本单元电路是门电路,而开关是构成门电路的基本元件。把门电路集成在一片半导体芯片上就构成了数字集成电路。随着集成电路工艺的发展,数字集成器件已经经历了从小规模集成电路(Small Scale Integrated Circuit,简称SSI)、中规模集成电路(Medium Scale Integrated Circuit,简称MSI)到大规模集成电路(Large Scale Integrated Circuit,简称LSI)、超大规模集成电路(Very Large Scale Integrated Circuit,简称VLSI)的发展过程。

第 1 章 数制与编码

数字电路可以处理数字量。数字量包括数值量和非数值量。本章将讨论它们在数字电路中的表示方法。

1.1 数 制

日常生活中人们常用十进制来表示一个数的大小,而数字电路中一般采用二进制来表示数的大小。本节主要讨论常用数制的表示方法、数制之间的相互转换以及二进制数的运算方法。

数值的大小常用一组数码及其相应的进位规则来表示,这种数值的表示方法称为数制。不同的数制由不同的一组数码构成且进位规则不同。下面分别介绍常用的十进制、二进制、八进制和十六进制。

1.1.1 十进制

十进制数包括 0,1,2,3,4,5,6,7,8,9 共 10 个数符,其进位规则是“逢十进一”,并用 $(N)_{10}$ 或 $(N)_D$ 来表示。下标 D(Decimal)用来代替下标 10,表示括号内的数是十进制数。当不加下标时,也默认是十进制数。

$(789.123)_{10}$ 为一个十进制数,由三位十进制整数、三位十进制小数组成,从小数点向左依次为个位、十位和百位,对应的位号是 0 位、1 位和 2 位;从小数点向右,依次是十分位、百分位和千分位,对应的位号是 -1 位、-2 位和 -3 位。该数可表示为

$$(789.123)_{10} = 7 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 9 \times 10^0 + 1 \times 10^{-1} + 2 \times 10^{-2} + 3 \times 10^{-3}$$

其中 $10^2, 10^1, 10^0, 10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3}$ 分别是第 2,1,0,-1,-2 和 -3 位的位权,第 i 位的权为 10^i ，“10”称为十进制数的基数。每一位上的数字称为系数,显然十进制数的大小等于其每一位加权系数(系数 $\times$ 位权)之和。

可将任一由 n 位整数、 m 位小数组成的十进制数按权展开为

$$\begin{aligned}(N)_{10} &= (d_{n-1}d_{n-2}\cdots d_1d_0.d_{-1}d_{-2}\cdots d_{-m})_{10} = \\ &= d_{n-1} \times 10^{n-1} + d_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + d_1 \times 10^1 + d_0 \times 10^0 + d_{-1} \times 10^{-1} + d_{-2} \times 10^{-2} + \cdots + \\ &= d_{-m} \times 10^{-m} = \sum_{i=-m}^{n-1} d_i \times 10^i\end{aligned}\tag{1.1}$$