



普通高等教育“十三五”规划教材
电子信息科学与工程类专业 规划教材

MATLAB

应用与实验教程

(第3版)

◆ 贺超英 编著

Electronic Information
Science and Engineering



 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>

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材



“十三五”江苏省高等学校重点教材
(编号: 2016-2-016)

数字电路与系统

■ 李文渊 主 编
■ 李文渊 高 翔 编
安 良 陈立全



高等教育出版社·北京

内容简介

本书是教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会推荐教材。

本书是东南大学信息学院、吴健雄学院等的教师在多年教学的基础上,结合科研工作中的体会编写的。

本书与东南大学《电路与电子线路基础》(电路、电子线路两部分)、《信号与线性系统》教材内容相衔接,构成完整的电路基础理论课程。教材编写中不仅注重基本概念和基本方法,而且注重基本理论和实际应用相结合。本书介绍了用于数字系统设计的硬件描述语言、综合和仿真方法,以便读者能够很快适应数字系统设计的工作环境。

全书分为15章,按照数字逻辑基础,组合逻辑电路的分析与设计,组合逻辑电路模块,时序逻辑电路的分析与设计,时序逻辑电路模块,半导体存储器,可编程逻辑器件,数模、模数转换电路,数字系统设计和硬件描述语言及逻辑设计的顺序,对数字电路与系统进行了全面的介绍,注重电路的描述方法,详细说明了数字电路的分析方法和设计方法,并介绍了数字系统的设计方法。

本书可作为普通高等学校电子信息类、电气类和自动化类专业本科生“数字电子技术”“数字逻辑电路”课程的教材,也可作为相关领域工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电路与系统/李文渊主编;李文渊等编. --

北京:高等教育出版社,2017.5

ISBN 978-7-04-047279-0

I. ①数… II. ①李… III. ①数字电路-系统设计-高等学校-教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第024753号

策划编辑 吴陈滨
插图绘制 杜晓丹

责任编辑 张江漫
责任校对 刘娟娟

封面设计 赵阳
责任印制 刘思涵

版式设计 马敬茹

出版发行 高等教育出版社
社址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
印刷 国防工业出版社印刷厂
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 28
字数 680千字
购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598
网址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版次 2017年5月第1版
印次 2017年5月第1次印刷
定价 41.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物料号 47279-00

序

自1999年以来,我国高等教育的规模发生了历史性变化,开始进入大众化的发展阶段。高等院校从生源基础知识水平、课程设置、教学目的到培养目标都趋于多元化,原有教材类型较少的现状已经难以满足不同类型高等院校培养不同类型人才的需求。而在本科教育中,基础课程建设是保证和提高教学质量的关键。为此,教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会与高等教育出版社合作,以教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新制定的《电子电气基础课程教学基本要求》、电子信息科学类与电气信息类各教学指导分委员会最新制定的专业规范以及《全国工程教育专业认证标准(试行)》为依据,共同组织制订了“电子信息科学类与电气信息类专业平台课程教材规划”。

这套规划教材的制订和编写遵循了以下几点原则:

1. 尊重历史,将高等教育出版社经过半个多世纪的积淀所形成的名家名作、精品教材纳入规划。这些教材经过数十年的教学实践检验,具有很好的教学适用性。此次规划将依据新的《电子电气基础课程教学基本要求》以及电气信息学科领域的最新发展,对教材内容进行修订。

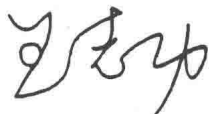
2. 突出分类指导,突出不同类型院校工程教育的特点。大众化教育阶段,不同类型院校的人才培养目标定位不同,应当根据不同类型院校学生的特点组织编写与之相适应的教材。鼓励有编写基础的一般院校和应用型本科院校经过2~3年的探索实践,形成适用于本层次教学的教材。

3. 理论知识与实际应用相结合。提倡在教材编写中把理论知识与在实际生产和生活中的应用紧密结合,着重培养学生的工程实践能力和创新能力,以适应社会对工程人才教育的要求。

4. 数字化的多媒体资源与纸质教材内容相结合。在教育部“加快教育信息化进程”的倡导下,提倡利用多样化、立体化的信息技术手段(如动画、视频等),将课程教学内容展现给学习者,以加深他们对知识的理解,达到更好的教学效果。

教材建设是一项长期、艰巨的工程。我们将本着成熟一批出版一批的指导思想,把这项工作扎实持续地推进下去,为电子信息科学类与电气信息类专业基础课程建设一批基础扎实、教学适用性强、体现时代气息的规划教材,为提高高等教育教学质量,深化高等教育教学改革做出应有的贡献。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会主任委员



2010年12月

前 言

东南大学试点开设“计算机结构与逻辑设计”课程已经 30 多年,作为电类专业的公共技术基础平台课程也已经 20 年,取得了很多经验和成果。

2007 年开始,东南大学每年选拔部分优秀高中毕业生组建“高等理工实验班”,尝试新的人才培养模式。电子信息学科是东南大学的优势学科,学校在“高等理工实验班”实施了电子信息基础课程的教学改革,并设置了“数字逻辑基础”课程。

我们经过几年的教学实践,在教学团队总结经验,并与学生交流教学内容的基础上,编写了《数字电路与系统》教材,并在信息工程专业进行教学试验,对课程内容进行了调整充实。

“数字电路与系统”是电类各专业一门重要的专业基础课程,尤其是电子信息类、电气类和自动化类专业,它为进一步学习相关专业课程,如“数字信号处理”“大规模数字集成电路设计”“微机原理”“微机接口与技术”等准备必要的基本知识,也是“通信原理”“电子技术”“自动控制原理”“数字信号处理”乃至“电力电子技术”等专业课程的基础。本书在内容编排方面,希望教学内容适应电子技术的发展,为学生在就业后能够尽快适应科研工作奠定基础,这也是编写本教材的目的之一。

“数字电路与系统”课程与“电路基础”、“电子电路基础”、“信号与系统”、“电磁场与电磁波”、“计算机组织与结构”、“微机系统与接口”等课程构成了电子信息专业基础课。我们将“数字电路与系统”课程内容与“电子电路基础”等课程内容进行了分工,相关电路、晶体管等内容归于“电子电路基础”,因此本课程尽可能少地涉及电平等具体电参数。

对于本课程的内容,国内众多高校做过很多有益的探索研究。我们的教学团队在多年的教学科研工作中,对教学内容也做了多次的调整,以适应电子技术的发展。首先是电子设计自动化(EDA),使得电路的设计能够在计算机上完成。这要求学生能够使用 EDA 工具设计电路,在计算机上利用仿真软件对设计的电路仿真,进一步虚拟测试和调试电路。现有很多的软件,如 Quartus II、ModelSim、SPICE,更专业的如 Synopsys 和 Cadence,这些软件可以完成电路(硬件描述语言、网表乃至电原理图)的综合、仿真等,进一步可采用 FPGA 验证或者制作专用芯片。FPGA 和 CPLD 的发展,对数字电路课程的内容也提出了新的要求,用硬件描述语言 VHDL 或者 Verilog HDL,可以用 FPGA 或者 CPLD 实现数字电路,因此,在教学中我们加强了 CPLD 和 FPGA 的相关内容以及硬件描述语言的教学。

本书是为高等学校电子信息类、电气类、自动化类等相关专业编写的教材。全书分为 15 章。第 1 章首先介绍信号、数字信号与模拟信号、数字系统与计算机的相关概念,为讲述数字电路与系统奠定理论基础;第 2 章介绍数制和码制,这也是数字系统与计算机中信息的表示形式;第 3 章讲述布尔代数的基本知识和逻辑函数,以及逻辑函数的表示方法;第 4 章介绍集成逻辑电路基础,说明数字信号在电路中的实现,同时,介绍一些常用的逻辑器件;第 5 章、第 6 章介绍组合逻辑

辑电路与常用的组合逻辑模块,说明组合逻辑电路的分析方法和设计方法,以及常用的组合逻辑电路模块应用;第7~9章介绍触发器、时序逻辑电路的特点、时序逻辑电路的描述方法和分析方法、同步时序逻辑电路的设计方法等,并介绍计算机和数字系统中常用的时序逻辑电路模块,包括寄存器、移位寄存器、计数器、序列信号发生器等,以及这些器件的应用;第10章介绍计算机系统中使用的半导体存储器,主要包括随机存取存储器和只读存储器,并介绍RAM和ROM的基本单元构成、电路结构与工作原理、存储器容量的扩展;第11章可编程逻辑器件主要介绍可编程阵列逻辑(PAL)、通用阵列逻辑(GAL)、复杂可编程逻辑器件(CPLD)以及现场可编程门阵列(FPGA)等几种可编程逻辑器件;第12章介绍数字与模拟之间的接口器件、数模转换器和模数转换器的工作原理、实现方法;第13章介绍数字系统的设计,采用算法状态机(algorithmic state machine, ASM)图作为常用的设计工具,自上而下的设计方法,并列举简单的实例说明数字系统的设计过程和实现方法;第14~15章介绍硬件描述语言与数字系统的语言描述、逻辑综合、仿真实现等,从而为数字系统的EDA方法实现奠定基础。

教学中,我们设计64学时的课程教学,安排本课程在电子电路基础课程之前,与电路基础在时间上并行教学。课程只涉及逻辑电路、逻辑电平的高低,因此第4章的内容在电子电路基础中讲授。如果作为数字电路基础课程,可安排48学时,不讲授第4、10、13、14、15章的内容。如果安排在模拟电子线路之后教学,第4章的内容可适当讲解。

本书的编写,考虑了不同高校和专业对内容的不同要求,因此,在使用过程中,可按照相应的要求进行调整。例如,针对不考虑采用中小规模器件设计电路的专业,逻辑函数的化简可以弱化。采用可编程逻辑阵列器件、FPGA或者CPLD等大规模集成器件设计电路时,所采用的器件中包含了足够的逻辑门,资源足够多,因此不需要化简。而采用小规模门电路设计电路,或者设计专用集成电路时,减少门的数量就意味着降低成本,因此逻辑函数的化简才有意义。

在教学中,我们还对下列内容做了相应的调整,供参考:

(1) 触发器。由于半导体主流工艺是CMOS工艺,大多采用的是主从结构的边沿D触发器,如果从集成电路的角度,仅仅讲述CMOS触发器就足够了。但是为了照顾到采用触发器等中规模器件设计电路,那么讲解基本R-S触发器、钟控锁存器和边沿D触发器,就可以满足应用。

(2) 中规模集成逻辑电路。以前应用得比较多,需要花较多的时间讲解,但是目前中规模集成电路的应用在减少,因此可以适当压缩课时。

(3) 时序逻辑电路。在经典的内容中需要详细讲解同步时序逻辑电路的设计方法,实际上,在工作中很少使用这种方法设计时序电路。很多教材经典的例题“序列检测器的设计”除了为了讲述设计方法,几乎没有具体的设计会采用这种方法。多数情况下,我们可以借鉴现成的电路,将其用到自己的电路中,而且往往采用硬件描述语言的方法实现设计。

我们需要更加注重基本概念和基本方法,这是本课程乃至后续课程的基础。

(4) 我们在对经典数字电路课程某些内容弱化的同时,需要将新的技术内容充实到课程中,其中,比较重要的一个内容是硬件描述语言VHDL或者Verilog HDL。使用硬件描述语言设计数字电路与系统的方法,是目前数字电路设计的基本方法。这要求课程介绍如何用硬件描述语言编写数字电路与系统,如何综合得到网表,进一步变成硬件。

(5) 对于数字系统的设计,我们常常讲解的是采用ASM图的方法设计控制器,很多例题采用的是交通信号灯的设计。事实上,真正的交通信号灯不是这样做的。ASM图的设计方法虽然

有其合理性,但是并不是万能的。

(6) 采用自顶向下(top-down)的设计方法设计数字系统,无论是控制器设计,还是采用硬件描述语言设计,都是很重要的方法。在某些情况下,还可以采用自底向上的设计方法。

(7) 使用本教材教学,我们配合开设了实验教学,将理论教学与实验教学相结合,由理论课教师同时指导安排实验。实验教学验证理论教学的内容,并与理论教学相配合。

(8) 实验仪器采用东南大学自行设计的口袋实验室,每位学生一个。口袋实验室通过 USB 接口与计算机相连,完成电源、信号发生器、万用表、示波器、逻辑分析仪等功能;这样,学生可以在任何有电源的地方做实验,但最终实验的考核需要在实验室进行。使学生除了会仿真之外,也会使用示波器、万用表、电源、信号发生器、逻辑分析仪等实验仪器。

本书由李文渊主编并统稿,安良编写了第 1、10、11 章,李文渊编写了第 2、4、5、6、7、8、9 章,高翔编写了第 3、12、13 章,陈立全编写了第 14、15 章。

在本书的编写过程中,王志功教授对本书的内容编排、课程的体系结构给予悉心指导和大力帮助,孟桥教授对教材的内容给予很多有益的指导和建议,胡庆生教授对 14、15 章的内容进行了审核,东南大学教务处、信息科学与工程学院、吴健雄学院给予大力的支持,在此表示衷心的感谢。

感谢教育部电子电气基础课程教学指导分委员会对本书编写的关心和大力支持,感谢高等教育出版社为本书出版所做的大量工作。

国家精品课程负责人北京交通大学侯建军教授精心审阅了全书,提出了许多宝贵的意见和有益的建议,谨在此表示衷心的感谢!

在本书编写过程中,还得到了黄清、仲雪飞、杨兰兰老师的热情帮助,在此一并致谢。

虽然本书从 2012 年开始,经历了 6 轮教学实践,对书中的内容、文字做了多次修改,但限于作者水平,教材的内容、课程设计以及文字都有待进一步完善,敬请专家和读者提出宝贵意见。编者邮箱为: lwy555@seu.edu.cn。

李文渊

2016 年 6 月于南京

目 录

第 1 章 绪论	1	2.5.4 检错码和纠错码	33
1.1 模拟信号与数字信号	1	本章小结	35
1.2 数字脉冲信号	2	习题	36
1.3 模拟电路与数字电路	4	第 3 章 逻辑函数及其简化	38
1.4 数字系统简介	5	3.1 基本逻辑运算	38
1.4.1 电子计算机	5	3.1.1 逻辑代数的二值逻辑	38
1.4.2 数字信号处理器	6	3.1.2 逻辑非和非运算	39
本章小结	6	3.1.3 逻辑乘和与运算	40
习题	7	3.1.4 逻辑加和或运算	42
第 2 章 数制与码制	8	3.1.5 逻辑运算的优先级	43
2.1 数制	8	3.2 复合逻辑运算	44
2.1.1 十进制	8	3.2.1 与非门	44
2.1.2 R 进制	9	3.2.2 或非门	44
2.1.3 二进制	9	3.2.3 异或门	45
2.1.4 八进制和十六进制	9	3.2.4 同或门	45
2.2 算术运算	10	3.2.5 其他复合门	46
2.2.1 二进制数的算术运算	12	3.3 逻辑代数的基本定律	47
2.2.2 八进制数的算术运算	14	3.3.1 逻辑等式的证明	47
2.2.3 十六进制数的算术运算	16	3.3.2 常用的基本定理	48
2.3 数制之间的转换	18	3.3.3 逻辑运算的完备集	48
2.3.1 R 进制转换为十进制	19	3.4 逻辑代数的基本规则	49
2.3.2 十进制转换为二进制	19	3.4.1 代换规则	49
2.3.3 二进制数与八进制数、十六进 制数之间的相互转换	20	3.4.2 对偶规则	49
3.4.3 反演规则	51	3.5 逻辑代数的常用公式	52
2.4 计算机中数的表示方法	22	3.5.1 并项公式	52
2.4.1 原码及其运算	22	3.5.2 消冗余因子公式	52
2.4.2 补码及其运算	23	3.5.3 消冗余项公式	53
2.4.3 反码及其运算	27	3.6 逻辑函数及其描述方法	53
2.5 计算机中的码	28	3.6.1 逻辑函数表达式	53
2.5.1 码的概念	28	3.6.2 逻辑图	54
2.5.2 数值编码	28	3.6.3 真值表	55
2.5.3 字符码和其他码	29	3.6.4 卡诺图	55

3.6.5 标准表达式	56	本章小结	119
3.7 逻辑函数的简化	59	习题	119
3.7.1 逻辑简化的意义和标准	59	第6章 常用的组合逻辑功能器件	123
3.7.2 公式法简化	59	6.1 编码器	123
3.7.3 卡诺图法简化	60	6.1.1 4线-2线编码器	123
本章小结	65	6.1.2 优先编码器	124
习题	65	6.1.3 集成编码器	125
第4章 集成逻辑电路基础	69	6.2 译码器	128
4.1 晶体管的开关特性	69	6.2.1 二进制译码器	128
4.1.1 PN结	69	6.2.2 二-十进制译码器	133
4.1.2 二极管的开关特性	71	6.2.3 显示译码器	134
4.1.3 BJT的开关特性	73	6.3 数据选择器	137
4.1.4 MOSFET的开关特性	75	6.3.1 双4选1数据选择器	137
4.1.5 MOS模拟开关	79	6.3.2 8选1数据选择器	138
4.2 逻辑门电路	80	6.4 数据分配器	143
4.2.1 三种基本逻辑门	81	6.5 数值比较器	144
4.2.2 复合型逻辑门	81	6.6 奇偶校验位产生与校验电路	149
4.3 晶体管-晶体管逻辑电路	82	6.6.1 奇偶校验位	149
4.3.1 简单的门电路	82	6.6.2 奇偶校验电路和校验位产生	150
4.3.2 TTL门	84	电路	150
4.3.3 TTL门的主要参数	86	6.6.3 中规模集成奇偶校验电路	150
4.3.4 改进的TTL门	89	74280	150
4.4 CMOS逻辑电路	92	6.7 算术运算电路	152
4.4.1 CMOS反相器	93	6.7.1 1位二进制加法器	152
4.4.2 CMOS逻辑门	94	6.7.2 逐位进位的全加器	153
4.4.3 CMOS三态门	96	6.7.3 超前进位的4位二进制全	154
4.5 其他常用的门电路	97	加器74283	154
4.5.1 BI-CMOS门	97	6.7.4 减法运算	157
4.5.2 超高速CMOS电路	99	6.7.5 补码的加、减法共用电路	158
本章小结	100	6.7.6 用加法器设计组合逻辑	160
习题	101	电路	160
第5章 组合逻辑电路的分析与设计	103	6.8 算术逻辑单元ALU	162
5.1 组合逻辑电路的特点	103	6.8.1 1位算术逻辑单元	162
5.2 组合逻辑电路的分析	104	6.8.2 中规模集成算术逻辑单元	168
5.3 组合逻辑电路的最小化设计	108	本章小结	170
5.4 组合逻辑电路的竞争和险象	112	习题	170
5.4.1 功能险象的判断方法	114	第7章 触发器	176
5.4.2 逻辑险象的判断方法	115	7.1 锁存器	177
5.4.3 险象的消除方法	117	7.1.1 锁存器的原理	177
		7.1.2 锁存器的描述方法	180

7.1.3 锁存器的特点	180	8.5.1 同步时序逻辑电路的设计	217
7.1.4 锁存器的应用	181	8.5.2 简单异步时序逻辑电路的 设计	228
7.2 带有控制端的锁存器	181	本章小结	230
7.2.1 门控 $R-S$ 锁存器	182	习题	230
7.2.2 门控 D 锁存器	183	第9章 常用的时序逻辑电路模块	239
7.2.3 门控 $J-K$ 锁存器	185	9.1 寄存器和移位寄存器	239
7.2.4 门控 T 锁存器	186	9.1.1 寄存器	239
7.3 主从触发器	187	9.1.2 移位寄存器	240
7.3.1 主从 $R-S$ 触发器	187	9.2 计数器	254
7.3.2 主从 $J-K$ 触发器	188	9.2.1 二进制计数器	254
7.4 边沿触发器	189	9.2.2 十进制计数器	263
7.4.1 边沿 D 触发器	190	9.3 集成计数器的应用	266
7.4.2 传输延迟 $J-K$ 触发器	191	9.3.1 计数器的级联	266
7.5 CMOS 触发器	193	9.3.2 使用单个计数电路构成任意 进制计数器(模值小于单个计 数器模值)	267
7.5.1 CMOS 传输门构成的锁存器 ..	193	9.3.3 构成分频器	269
7.5.2 CMOS 传输门构成的主从结 构 D 触发器	194	9.3.4 构成脉冲节拍	270
7.6 集成触发器	195	9.4 序列信号发生器	270
7.7 触发器类型之间的相互转换 ..	196	9.4.1 给定序列信号设计电路	271
7.7.1 通过比较状态转移方程的方 法进行转换	196	9.4.2 已知序列长度设计序列信号 发生器	275
7.7.2 利用触发器状态转移真值表 进行转换	197	本章小结	277
本章小结	198	习题	278
习题	198	第10章 半导体存储器	284
第8章 时序逻辑电路的分析与设计	204	10.1 存储器的基本概念	284
8.1 时序逻辑电路的基本结构与 方程描述	205	10.1.1 存储器的地址和容量	284
8.2 时序逻辑电路的描述方法	206	10.1.2 存储器的基本操作	286
8.2.1 状态转移方程	207	10.1.3 RAM 和 ROM 比较	288
8.2.2 时序逻辑电路的状态转移真 值表	207	10.2 RAM 的电路结构与工作 原理	288
8.2.3 时序逻辑电路的状态 转换图	208	10.2.1 RAM 的基本结构	288
8.2.4 时序逻辑电路的时序图(工 作波形图)	209	10.2.2 静态随机存取存储器 (SRAM)	289
8.3 同步时序逻辑电路的分析 方法	209	10.2.3 动态随机存取存储器 (DRAM)	292
8.4 异步时序逻辑电路的分析	214	10.3 DDR SDRAM 和 QDR SRAM 简介	296
8.5 时序逻辑电路的设计	217	10.3.1 DDR SDRAM	297

10.3.2 QDR SRAM	297	11.6.3 Stratix II 系列 FPGA 的 LAB	330
10.4 ROM 的电路结构与应用	298	11.6.4 Stratix II 系列 FPGA 的互连 资源	333
10.4.1 ROM 的结构与读、写方式	298	11.6.5 Stratix II 系列 FPGA 的输入/ 输出模块	333
10.4.2 PROM 及其发展	300	11.6.6 Stratix II 系列 FPGA 的 DSP 模块	333
10.5 存储器容量扩展	302	11.6.7 Stratix II 系列 FPGA 编程 简介	335
10.5.1 位扩展(字长扩展)	303	本章小结	337
10.5.2 字扩展	304	习题	337
10.5.3 字位扩展	305	第 12 章 数模与模数转换	343
本章小结	306	12.1 数模转换的基本原理	344
习题	306	12.2 常用的数模转换方案	346
第 11 章 可编程逻辑器件	309	12.2.1 开关树译码方案	346
11.1 可编程逻辑器件的基本结构 和电路表示方法	310	12.2.2 权电阻网络译码方案	347
11.1.1 PLD 的基本结构	310	12.2.3 权电流译码方案	348
11.1.2 PLD 电路的表示方法	310	12.2.4 权电容译码方案	349
11.2 可编程逻辑阵列 PLA	311	12.3 数模转换的主要技术指标	350
11.3 可编程阵列逻辑 PAL	312	12.3.1 分辨率	350
11.3.1 基本的 PAL 电路—— PAL16L8	312	12.3.2 转换精确度	351
11.3.2 带触发器输出的 PAL 电 路——PAL16R8	314	12.3.3 转换速度	352
11.4 通用阵列逻辑 GAL	317	12.4 集成 DAC 的工作原理 及应用	352
11.4.1 GAL 器件的基本结构	317	12.4.1 双缓冲 8 位 DAC; DAC0832	352
11.4.2 输出逻辑宏单元 OLMC	319	12.4.2 DAC0832 与数据总线接口 方式	354
11.4.3 GAL 器件的结构控制字	320	12.4.3 双极性数模转换方案	355
11.5 复杂可编程逻辑器件 CPLD	321	12.5 模数转换的基本原理	358
11.5.1 MAX7000 器件的功能块	322	12.5.1 采样定理	358
11.5.2 MAX7000 器件的宏单元	323	12.5.2 模数转换过程	359
11.5.3 MAX7000 器件的乘积项分 配器	325	12.5.3 量化误差	360
11.5.4 MAX7000 器件的可编程内 部连接矩阵	325	12.6 几种常见的模数转换方案	361
11.5.5 MAX7000 器件的输入/ 输出块	326	12.6.1 并行比较型 ADC	361
11.5.6 MAX7000 系列器件编程 简介	327	12.6.2 分级并行比较型 ADC	363
11.6 现场可编程门阵列 FPGA	328	12.6.3 逐次逼近型 ADC	363
11.6.1 FPGA 的基本结构	328	12.6.4 双积分型 ADC	365
11.6.2 可编程逻辑块(CLB)结构	328	12.7 模数转换的技术指标	367

12.7.1	分辨率	367	14.1.1	Verilog HDL 简介	388
12.7.2	转换精度	367	14.1.2	程序结构	389
12.7.3	转换速度	368	14.2	Verilog HDL 基本语法	390
12.8	集成 ADC 及其应用	368	14.2.1	基本程序结构	390
12.8.1	逐次比较型 8 位 ADC; ADC0804	368	14.2.2	语法	390
12.8.2	集成 ADC: ADC0804 的应用	369	14.2.3	模块的主要描述方式	395
	本章小结	371	14.3	Verilog HDL 描述逻辑电路 实例	397
	习题	371	14.3.1	组合逻辑电路的 Verilog HDL 语言描述	398
第 13 章	数字系统设计	373	14.3.2	时序逻辑电路模块的 Verilog HDL 语言描述	404
13.1	数字系统的基本概念	373		本章小结	406
13.2	算法状态机	374		习题	406
13.3	逐次逼近型转换器数字系统 设计	375	第 15 章	基于 HDL 的系统设计	408
13.3.1	系统功能分析	376	15.1	基于 HDL 的设计方法	408
13.3.2	控制器的设计	378	15.2	Quartus II 软件的介绍	409
13.4	交通信号灯控制指挥系统 设计	379	15.3	Verilog HDL 的综合与仿真	411
13.4.1	系统功能分析	379	15.3.1	Verilog HDL 的综合过程	411
13.4.2	系统逻辑划分	380	15.3.2	Verilog HDL 的仿真	414
13.4.3	控制器的设计	381	15.4	设计实例	419
13.4.4	处理器的设计	383	15.5	数字控制器的 Verilog HDL 实现	423
	本章小结	385		本章小结	429
	习题	386		习题	429
第 14 章	硬件描述语言与设计	388		参考文献	430
14.1	硬件描述语言 Verilog HDL 简介	388			

第 1 章

绪 论

数字电子技术的诞生和发展与电子计算机技术的发展密不可分。在数字电子技术诞生的初期,其应用主要局限于电子计算机系统。如今,数字电子技术进入到国民经济的各个行业中。除了计算机以外,电视、通信系统、雷达、导航、医疗器械、工业控制及形形色色的消费电子产品,都广泛采用了数字电路系统。几十年来,从早期的电子管,经历了晶体管、小规模集成电路,到现在的大规模、超大规模集成电路,数字电路系统的集成度不断提高,性能持续提升,便携式计算机、智能移动电话、平板电脑、数码相机这些数字产品已经成为人们生活不可缺少的一部分。本章主要介绍数字电路系统的基本概念、典型数字系统的基本结构和工作方式。

1.1 模拟信号与数字信号

自然界中大多数物理量都是模拟(analog)量,它们的共同点是在一定范围内有着随时间连续变化的数值,例如语音、温度、大气压等。人们对自然界的物理量进行感知时,通常采用的方法是使用一定形式的传感器(或换能器)将待感知的物理量转换为电信号,如果得到的电信号在时间和幅度上也都是连续的,这样的信号称为模拟信号。例如,图 1.1 所示某地 7 小时的气压就是一个模拟信号,其在时间和数值上都是连续的,数值的变化范围在 964 百帕至 968 百帕之间。

自然界中除了模拟量外,还有另外一些物理量在幅度上是离散的。某一个时间点上,它们的幅度只是有限集合中的某一个取值。这样的物理量称为数字(digital)量。相应地,把表征数字量的信号称为数字信号。例如,原子内部的电子数、人的心率都只能是正整数。除了自然界的数字信号,人们也能人为地制造出数字信号。例如上述的大气压曲线,假如每隔半小时使用气压表对大气压进行测量,并用一组数字代码对测量值进行表示,就可以得到如图 1.2 所示的数字化的大气压信号。

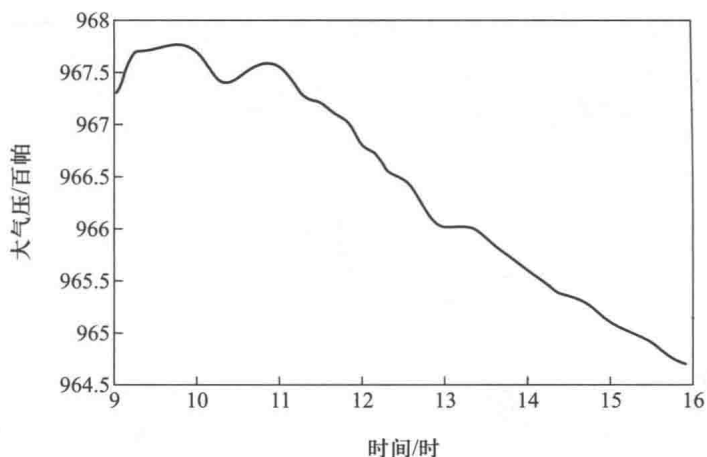


图 1.1 某地的大气压

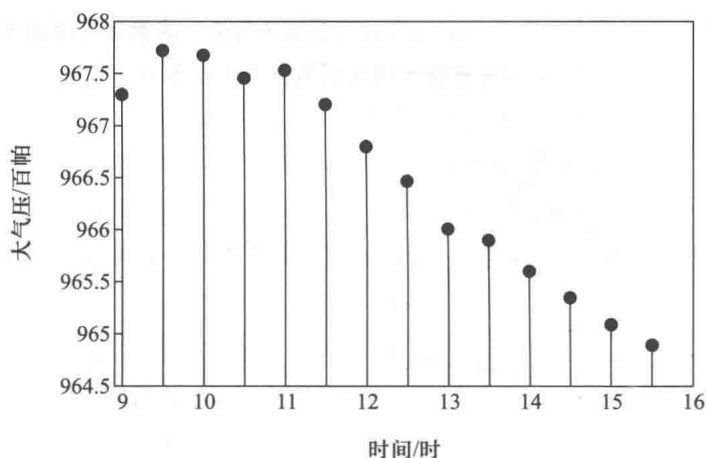


图 1.2 某地的大气压采样值

1.2 数字脉冲信号

如果从示波器上观察数字信号的波形,它是由交替出现的高电平和低电平组成的。图 1.3(a)所示为单个正向脉冲,它表示信号由低电平上升为高电平,稳定一段时间后,再由高电平下降为低电平;图 1.3(b)所示为单个负向脉冲,它表示信号由高电平下降为低电平,稳定一段时间后,再由低电平上升为高电平。因此,数字信号的波形也可以看作由一系列的脉冲信号组成。

图 1.3 所示的理想脉冲信号有前沿和后沿两个边沿。对于正向脉冲来说,脉冲前沿称为“上升沿”,后沿称为“下降沿”。图 1.3 所示的脉冲信号在上升沿和下降沿处,高低电平的转换是不需要时间的,因此称为“理想脉冲”。但是,在实际电路中这样的理想脉冲是不存在的。图 1.4 所示为非理想脉冲信号,图中的过冲、振荡是由分布式电感和电容造成的。

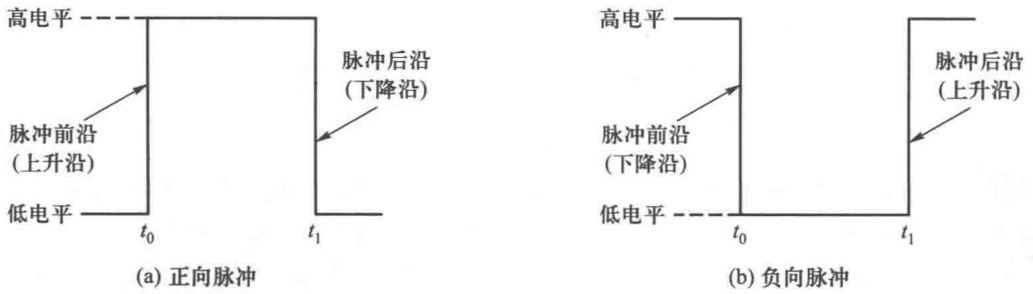


图 1.3 理想脉冲信号

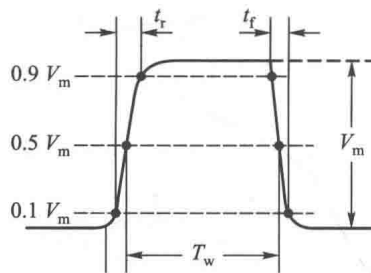


图 1.4 非理想脉冲信号

这里给出关于数字脉冲参数的几个定义。如图 1.4 所示,一个脉冲从低电平转换为高电平的时间称为上升时间 t_r ,与之对应,一个脉冲从高电平转换为低电平的时间称为下降时间 t_f 。在实际电路中,设高电平幅度为 V_m ,一般把上升沿从 $10\% V_m$ 上升到 $90\% V_m$ 所需要的时间定义为 t_r ,把下降沿从 $90\% V_m$ 下降到 $10\% V_m$ 所需要的时间定义为 t_f 。从脉冲前沿到达 $50\% V_m$ 起,到脉冲后沿到达 $50\% V_m$ 为止的时间定义为脉冲宽度。

绝大部分数字系统中的数字波形是由周期或者非周期的脉冲序列构成的。所谓周期脉冲序列是指序列中某个脉冲波形以一固定的时间间隔 T 重复出现, T 也称为脉冲信号的周期,频率 f 表示单位时间内脉冲重复的次数;非周期的脉冲序列中的各个脉冲宽度、脉冲之间的间隔都是随机的。这两类脉冲序列如图 1.5 所示。

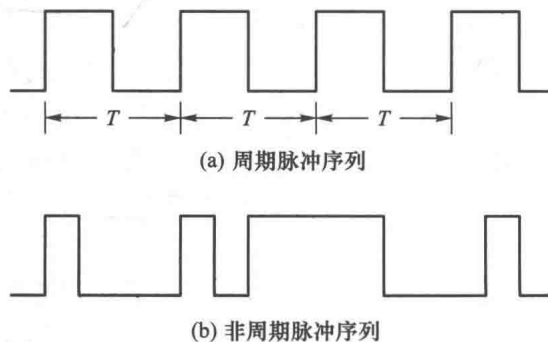


图 1.5 周期脉冲序列和非周期脉冲序列

关于脉冲的另一个重要参数是占空比,通常用脉冲宽度和脉冲周期的比值来表示。

1.3 模拟电路与数字电路

模拟电路中的各个环节均处理的是模拟信号。典型的模拟电路有信号调理电路(包括信号滤波、放大等电路)、功率放大电路、振荡电路、稳压电路等。图 1.6 所示为常见的公共广播系统的示意图,这是一个典型的模拟电路系统。播音员的说话声音是模拟信号,麦克风将说话声转换为电压模拟信号(也称为音频信号),音频信号经过功率放大器放大后,变成幅度更大的音频信号,该信号驱动扬声器后成为音量更大的声音,达到了广播的目的。这个过程中,麦克风、功率放大器以及扬声器均为模拟电路,它们的输入和输出信号都是模拟信号。

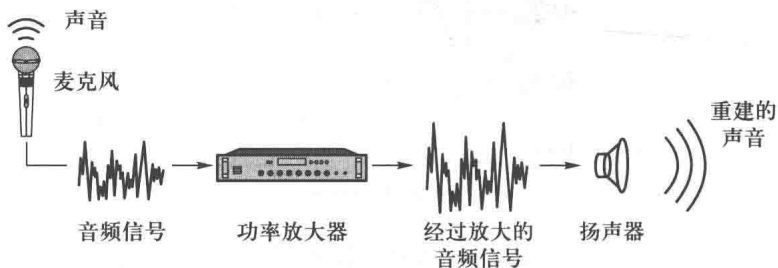


图 1.6 公共广播系统示意图

图 1.6 所示的公共广播系统有一个缺点,那就是声音经过麦克风转换后得到的模拟电信号通常是比较微弱的,很容易受到电压不稳定、元器件之间的耦合和非线性等因素的干扰,可靠性较差。因此,由全模拟电路构成的系统现在已经很少看到了。此外,由于模拟电路的功耗较大、数值计算能力较弱等原因,数字电路便应运而生。

与模拟电路相对应,数字电路处理的是各种数字信号。数字信号通常都是用数码的形式给出的,这组数码不仅可以表示数值的大小,也可以表示不同的事物或事物的状态。在数字电路中,数码的不同可用电平的高低来表示。只要在处理过程中,不发生电平之间的混淆,就能够保证处理结果的正确性,因此数字电路具有良好的抗干扰性能。与模拟电路相比,数字电路还具有集成度高、功耗低、计算能力强、易于存储等优点。

数字电路的发展与模拟电路一样经历了由电子管、晶体管到集成电路等几个时代,但其发展比模拟电路发展得更快。从 20 世纪 60 年代开始,数字集成器件以双极型工艺制成了小规模逻辑器件,随后发展到中规模逻辑器件;70 年代末,微处理器的出现使数字集成电路的性能产生质的飞跃。数字集成器件所用的材料以硅材料为主,在高速电路中,也使用化合物半导体材料,例如砷化镓等。

数字电路的研究内容包括数字脉冲电路和数字逻辑电路。前者主要研究脉冲的产生、变换和测量;后者主要研究用数字信号完成对数字量进行算术运算和逻辑运算。本书主要介绍数字逻辑电路的分析和设计方法。

1.4 数字系统简介

数字系统没有严格、统一的定义。一般认为,数字系统是一个能对数字信号进行加工、传递和存储的实体,它由实现各种功能的数字逻辑电路相互连接而成。数字系统一般有控制器和处理器。本节将以电子计算机和数字信号处理器(digital signal processor,DSP)为例,介绍数字系统的基本结构。

1.4.1 电子计算机

电子计算机是最为典型的数字系统,数字技术的发展推动了计算机技术的进步,而计算机技术的进步也促进了数字技术的前进。1946年2月,第一台电子计算机ENIAC在美国宾夕法尼亚大学问世,这台计算机是以电子管为基本元件的,共使用了18 000多个电子管,每秒进行5 000次加法运算,功耗高达150 kW。随着数字电子技术的发展,电子计算机的集成度不断提高,经历了晶体管计算机、集成电路计算机、大规模和超大规模集成电路计算机等发展阶段,目前的计算机微处理器集成了数十亿个晶体管,每秒可完成约 10^{11} 次浮点数运算。

电子计算机问世后的70年来,虽然其性能有了巨大的发展,但计算机的基本结构并没很大的变化,这就是著名的冯·诺依曼体系结构。根据冯·诺依曼体系结构构成的计算机,必须具有五大功能:(1)把需要的程序和数据送至计算机中;(2)必须具有长期记忆程序、数据、中间结果及最终运算结果的能力;(3)能够完成各种算术、逻辑运算和数据传送等数据加工处理的能力;(4)能够根据需要控制程序走向,并能根据指令控制机器的各部件协调操作;(5)能够按照要求将处理结果输出给用户。为了完成上述的功能,计算机必须具备五大基本组成部件,包括:输入数据和程序的输入设备、记忆程序和数据的存储器、完成数据加工处理的运算器、控制程序执行的控制器、输出处理结果的输出设备。冯·诺依曼计算机的基本结构如图1.7所示。

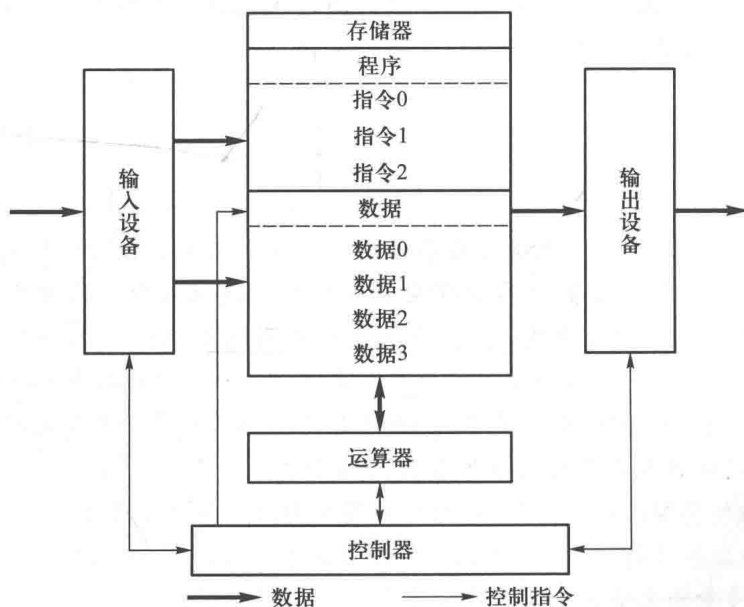


图 1.7 冯·诺依曼计算机的基本结构