

面向 **21** 世纪高等学校电子信息类教材

数字系统设计 与PLD应用技术

● 蒋璇 臧春华 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

面向 21 世纪高等学校电子信息类教材

数字系统设计与 PLD 应用技术

蒋 璇 臧春华 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书阐述数字系统设计方法和可编程逻辑器件 PLD 的应用技术。引导读者从一般的数字功能电路设计转向数字系统设计;从传统的非定制通用集成电路的应用转向用户半定制的 PLD 的应用;从单纯的硬件设计转向硬件软件高度渗透的设计方法。从而了解数字技术的新发展、新思路、新器件,拓宽软硬件设计的知识面,提高设计能力。本书是编者在汇总了近几年从事数字系统设计和 PLD 应用技术教学及科研成果的基础上编写的,取材丰富,概念清晰,既有较高的起点和概括,也有很好的实用和参考价值。书中软硬件结合恰当,有一定的前沿性和新颖性。全书文字流畅,图、文、表紧密配合,可读性强。

本书共 7 章,每章之后均有丰富的习题供读者选做。书末有附录,简明介绍各种 HDPLD 典型器件和一种典型软件开发系统,供读者和设计者参考。

本书可作为高等学校电子信息类、电气信息类、计算机类各专业的教科书,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。

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。

图书在版编目(CIP)数据

数字系统设计与 PLD 应用技术/蒋璇,臧春华编著 北京:电子工业出版社,2001.1

面向 21 世纪高等学校电子信息类教材

ISBN 7-5053-6165-1

I. 数... II. ①蒋... ②臧... III. ①数字系统-系统设计-高等学校-教材②可编程序控制器-高等学校-教材 IV. TP271

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 85871 号

丛 书 名: 面向 21 世纪高等学校电子信息类教材

书 名: 数字系统设计与 PLD 应用技术

编 著 者: 蒋 璇 臧春华

责任编辑: 陈晓明

特约编辑: 高文勇

排版制作: 电子工业出版社计算机排版室

印 刷 者: 北京四季青印刷厂

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

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.25 字数: 492.8 千字

版 次: 2001 年 1 月第 1 版 2001 年 1 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-5053-6165-1
TP·3305

印 数: 5 000 册 定价: 25.00 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

目前,高校正处于教改时期,新的专业目录已出台,从 1999 年秋季开始,各院校开始按新的专业设置进行招生。这样,原来的教材体系结构就很难适应当前调整后的专业需要,因而需要对教材进行相应的改革。为了适应当前教材改革与教材建设的需要,1996 年教育部正式启动了“面向 21 世纪高等工程教育教学内容和课程体系改革计划”,许多高等院校经数年的研究与实践,取得了许多重要成果。

为了配合全国各类高校电子信息类专业的教学改革与课程建设,推进高校电子信息类专业新教材的出版工作,在有关专家的倡议和有关部门的大力支持下,组织成立了全国高等学校电子信息类教材编委会;组织参加教育部组织的“电气信息类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究和实践”和“电工电子系列课程教学内容和课程体系改革的研究与实践”两项课题的若干著名大学和其他高校的有关教师,讨论怎样尽快落实和实施面向 21 世纪的新教材的编写与出版工作,制定了新的教材出版规划。参加教材编写和编审的学校有:东南大学、北京邮电大学、西安电子科技大学、中国科技大学、华中理工大学、上海交通大学、西安交通大学、南京航空航天大学、天津大学、解放军信息工程大学等。

编委会一致认为,规划教材应该能够反映当前教学改革的需要,要有特色和一定的前瞻性。规划的教材由个人申报或各校推荐,经编委会认真评审,最后由出版社审定出版。这批规划教材都是教学改革力度大、有创新精神、有特色风格的教材和质量高、可读性好、可教性好的优秀教材,可满足各类高等学校 21 世纪初电子信息类专业及相关专业的教学需要。

限于我们的水平和经验,这批教材在编审、出版工作中还可能存在不少缺点和不足,希望使用本教材的教师、同学和其他广大读者提出批评和建议,以使教材质量不断提高,共同为建设电子信息类专业面向 21 世纪的新教材而努力。

全国高等学校电子信息类教材编委会
电子工业出版社

面向 21 世纪高等学校电子信息类教材编审委员成员名单

主任委员:林金桐

副主任委员:傅丰林 邹家骅 赵尔沅 沈永朝

委 员:林金桐 赵尔沅 乐光新 白中英

邹家骅 沈永朝 刘京南 沈嗣昌

傅丰林 廖桂生 史小卫 李建东

张传生 殷勤业 徐国治 徐佩霞

严国萍 朱定华 王 殊 邓建国

前 言

本书是“数字电路与逻辑设计”专业基础课后续必修或选修课程的教材,主要阐述数字系统设计方法和 PLD 应用技术,目的是引导学生和读者从功能电路设计转向系统设计;由传统的通用集成电路的应用转向可编程逻辑器件的应用;从硬件设计转向硬件软件高度渗透的设计,从而拓宽数字技术知识面和设计能力。

现今 VLSI 技术发展迅速,采用专用集成电路 ASIC 实现系统已成趋势。作为 ASIC 的一个重要分支——PLD,它在数字系统研制阶段或小批量生产中有着设计灵活、修改快捷、使用方便、研制周期短和成本较低等优越性,是一种有现实意义的系统设计途径。大部分高等院校均把 PLD 纳入相关课程的教学计划,为此探讨较好的设计方法和应用技术有其必要性和实用性。对于广大正在探讨和应用 PLD 的电子设计人员和其他科技工作者也有很好的参考价值。

随着 PLD 技术的进展和软件开发系统的日益完善,设计人员的主要任务已成为:如何把由文字说明的系统功能转换为逻辑描述(即算法),进而采用一定的描述工具(算法流程图、VHDL 语言等)建立系统描述模型,并选择适当的 PLD 器件、采用相应的软件开发系统来实现待设计系统。本书正是致力于上述内容的讨论,力求提高读者的系统逻辑设计和工程设计能力。

本书分为数字系统设计和 PLD 应用技术两大部分,全书共有 7 章。

第 1 章介绍数字系统基本模型、基本结构和设计步骤,重点介绍了系统设计的基本方法。还介绍了数字系统描述的一种最常用的工具——算法流程图。

第 2 章讨论系统的算法设计和算法结构。在介绍若干种算法设计方法时,既借鉴软件设计中的算法推导方法,又详述硬件设计中算法设计的特征。本章还详细讨论了组成系统的两大部分:数据处理单元和控制单元的设计和采用通用集成电路的实现方法。

第 3 章简明介绍数字系统描述工具——VHDL 语言的基本概念、语法特征和应用实例。使读者对 VHDL 有大致的了解。

第 4 章阐述 PLD 原理和应用。主要内容为简单 PLD(SPLD)的原理、组成和应用,包括 PROM、PLA、PAL 和 GAL 等。本章之末给出采用 GAL 实现系统的实例。

在第 4 章的基础上,第 5 章介绍了高密度 PLD(HDPLD)及其应用。给出了 HDPLD 分类方法,详述了 HDPLD 的组成,包括阵列扩展型 CPLD、单元型 CPLD、SRAM 型 FPGA 和多路开关型 FPGA 等。还介绍了 HDPLD 的主要编程技术:isp、icr 和 Antifuse 技术等。对于各种软件开发系统进行了综述,期盼给读者较全面的 HDPLD 应用知识。

第 6 章给出了 7 个采用 HDPLD 设计数字系统的实例,这些实例由简到繁、由易到难,均来自于科研,并在教学实践中得到成功应用,有很好的参考价值。

本书的最后一章——第 7 章简明介绍全定制集成电路设计技术,作为引导广大读者了解全定制 ASIC 设计的入门知识。

本书各章有大量实例和习题,可供读者实践和思考。附录 I 提供 PLD 主要生产商的最新典型器件的介绍,包括 Lattice、ALTERA、XILINX 和 Actel 公司的各种 CPLD 和 FPGA 产品。附录 II 是典型软件开发系统 MAX + PLUS II 的简明介绍,为读者了解软件开发系统提供方便。

编者在撰写本书时,力求内容充实,重点突出,尤其注重引导初学者尽快入门,通过由浅入深、循序渐进的阐述;理论、习题与实例的紧密结合,使读者获得基本技术和技能的训练。

本书是高等院校电子类、计算机类和相关专业的本科教学的教材或参考书,也可作为研究生相关教学的参考书,同时也适用于广大的电子设计人员和科技工作者。

本书由蒋璇任主编。蒋璇、臧春华共同完成。其中第1、2、4、5章由蒋璇编写,第3、7章由臧春华编写,第6章由蒋璇、臧春华编写。

本书承西安电子科技大学傅丰林教授和北京邮电大学赵尔沅教授审阅,并提出了许多宝贵的修改意见,在此表示衷心的感谢。

在编写本书过程中,得到了南京航空航天大学许多老师和同学的支持和帮助。国家教委电子线路教学指导小组成员、南航沈嗣昌教授自始至终全力支持,具体帮助,对全书内容不仅给予关键性的指导,而且提出了详尽的修改意见。研究生范渊、董乔忠、周小林、戎舟、李岳衡、李明等同学参加课题研究和实验,范渊和董乔忠同学还协助绘图和整理资料;曹蓉琛、钱梅雪、石烽、余慧敏等同志均给予大力协助,在此表示最诚挚的谢意。

在成书过程中,还获得 Lattice、ALTERA、XILINX 和 Actel 等公司有关机构的热情支持,在此一并表示感谢。

由于编者水平所限,书中的疏漏和错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

于南京航空航天大学

2000年9月

目 录

第1章 数字系统设计方法	(1)
1.1 绪言	(1)
1.1.1 数字系统的基本概念	(1)
1.1.2 数字系统的基本模型	(3)
1.1.3 数字系统的基本结构	(7)
1.2 数字系统设计的一般步骤	(8)
1.2.1 引例	(8)
1.2.2 数字系统设计的基本步骤	(10)
1.2.3 多级系统及其结构	(13)
1.3 数字系统设计方法论	(15)
1.3.1 自上而下的设计方法	(15)
1.3.2 自下而上的设计方法	(16)
1.3.3 自关键部件开始设计	(17)
1.3.4 系统信息流驱动设计	(17)
1.4 数字系统的描述方法之一——算法流程图	(19)
1.4.1 算法流程图的符号与规则	(20)
1.4.2 设计举例	(21)
习题1	(23)
第2章 数字系统的算法设计和硬件实现	(28)
2.1 算法设计	(28)
2.1.1 算法设计综述	(28)
2.1.2 跟踪法	(29)
2.1.3 归纳法	(31)
2.1.4 划分法	(34)
2.1.5 解析法	(36)
2.1.6 综合法	(37)
2.2 算法结构	(42)
2.2.1 顺序算法结构	(42)
2.2.2 并行算法结构	(42)
2.2.3 流水线操作算法结构	(45)
2.3 系统硬件实现概述	(46)
2.4 数据处理单元的设计	(47)
2.4.1 器件选择	(47)

2.4.2	数据处理单元设计的基本步骤	(48)
2.4.3	数据处理单元设计实例	(48)
2.5	控制单元的设计	(53)
2.5.1	系统控制方式	(54)
2.5.2	控制器的基本结构和系统同步	(56)
2.5.3	算法状态机图(ASM 图)	(58)
2.5.4	控制器的硬件逻辑设计方法	(61)
习题 2		(72)
第 3 章	硬件描述语言 VHDL	(78)
3.1	概述	(78)
3.2	VHDL 基本结构	(79)
3.2.1	实体说明	(79)
3.2.2	结构体	(80)
3.3	数据对象、类型及运算符	(83)
3.3.1	对象类别与定义	(83)
3.3.2	数据类型	(83)
3.3.3	常数的表示	(85)
3.3.4	运算符	(85)
3.4	顺序语句	(86)
3.4.1	变量与信号赋值语句	(86)
3.4.2	IF 语句	(86)
3.4.3	CASE 语句	(87)
3.4.4	LOOP 语句	(87)
3.5	并行语句	(88)
3.5.1	并行信号赋值语句	(89)
3.5.2	进程语句	(90)
3.5.3	断言语句	(91)
3.5.4	生成语句	(93)
3.6	子程序	(94)
3.6.1	函数定义与引用	(94)
3.6.2	过程定义与引用	(95)
3.6.3	子程序重载	(96)
3.7	程序包与设计库	(97)
3.7.1	程序包	(97)
3.7.2	设计库	(98)
3.8	元件配置	(99)
3.8.1	体内配置指定	(99)
3.8.2	体外配置说明	(100)
3.8.3	直接例化	(101)
3.8.4	顶层元件配置	(101)

3.9 VHDL 描述实例	(102)
3.9.1 组合逻辑电路描述	(102)
3.9.2 时序逻辑电路描述	(103)
3.9.3 状态机的描述	(106)
3.9.4 多谐振荡器的描述	(107)
习题3	(107)
第4章 可编程逻辑器件 PLD 原理和应用	(109)
4.1 PLD 概述	(109)
4.2 简单 PLD 原理	(111)
4.2.1 PLD 的基本组成	(111)
4.2.2 PLD 的编程	(111)
4.2.3 阵列结构	(112)
4.2.4 PLD 中阵列的表示方法	(113)
4.3 SPLD 组成和应用	(115)
4.3.1 只读存储器 ROM	(115)
4.3.2 可编程逻辑阵列 PLA	(119)
4.3.3 可编程阵列逻辑 PAL	(121)
4.3.4 通用阵列逻辑 GAL	(125)
4.3.5 输出逻辑宏单元 OLMC	(126)
4.3.6 OLMC 的输出结构	(128)
4.3.7 GAL 应用举例	(130)
4.4 采用 SPLD 设计数字系统	(136)
4.4.1 采用 SPLD 实现系统的步骤	(136)
4.4.2 设计举例	(136)
4.4.3 采用 SPLD 设计系统的讨论	(139)
习题4	(140)
第5章 高密度 PLD 及其应用	(147)
5.1 HDPLD 概述	(147)
5.1.1 HDPLD 的分类	(147)
5.1.2 典型 HDPLD 器件系列	(148)
5.2 HDPLD 组成	(148)
5.2.1 阵列扩展型 HDPLD	(148)
5.2.2 单元型 CPLD	(159)
5.2.3 现场可编程门阵列 FPGA	(166)
5.2.4 多路开关型 FPGA	(171)
5.3 HDPLD 编程技术	(175)
5.3.1 isp 编程技术(in-system programmability)	(175)
5.3.2 icr 编程技术(in-circuit reconfiguration)	(176)
5.3.3 反熔丝(Antifuse)编程技术	(179)
5.4 HDPLD 软件开发系统综述	(180)

5.4.1 软件开发系统的基本工作流程	(180)
5.4.2 软件开发系统的库函数	(182)
习题 5	(182)
第 6 章 采用 HDPLD 设计数字系统实例	(186)
6.1 高速并行乘法器的设计	(186)
6.1.1 算法设计和结构选择	(186)
6.1.2 器件选择	(186)
6.1.3 设计输入	(186)
6.1.4 芯片引脚定义	(187)
6.1.5 逻辑仿真	(188)
6.1.6 目标文件产生和器件下载	(189)
6.2 十字路口交通管理器的设计	(189)
6.2.1 交通管理器的功能	(189)
6.2.2 系统算法设计	(190)
6.2.3 设计输入	(191)
6.3 FIFO(先进先出堆栈)的设计	(194)
6.3.1 FIFO 的功能	(194)
6.3.2 算法设计和逻辑框图	(195)
6.3.3 数据处理单元和控制器的设计	(197)
6.3.4 设计输入	(199)
6.4 九九乘法表系统的设计	(200)
6.4.1 系统功能和技术指标	(200)
6.4.2 算法设计	(201)
6.4.3 数据处理单元的实现	(201)
6.4.4 设计输入	(202)
6.4.5 系统的功能仿真	(208)
6.5 数据采集和反馈控制系统的设计	(210)
6.5.1 系统设计要求	(210)
6.5.2 设计输入	(211)
6.6 FIR 有限冲激响应滤波器的设计	(214)
6.6.1 FIR 结构简介	(215)
6.6.2 设计方案和算法结构	(216)
6.6.3 模块组成	(218)
6.6.4 FIR 滤波器的扩展应用	(220)
6.6.5 设计输入	(222)
6.6.6 设计验证	(224)
6.7 可编程脉冲延时系统的设计	(227)
6.7.1 系统功能和技术指标	(227)
6.7.2 系统设计计算	(229)
6.7.3 设计输入和实现	(231)

习题 6	(238)
第 7 章 全定制集成电路设计技术简介	(240)
7.1 集成电路制造工艺与全定制电路设计	(240)
7.1.1 集成电路制造工艺简介	(240)
7.1.2 全定制电路设计过程	(245)
7.1.3 深亚微米电路设计	(246)
7.2 全定制集成电路设计的 EDA 技术	(247)
7.2.1 设计输入	(248)
7.2.2 设计综合	(248)
7.2.3 设计验证	(250)
7.2.4 版图编辑	(252)
7.2.5 版图验证	(252)
附录	(254)
附录 A HDPLD 典型器件介绍	(254)
A1 器件封装型式说明	(254)
A2 LATTICE 公司典型器件(阵列扩展型 CPLD, isp 编程技术)	(255)
A3 ALTERA 公司典型器件(单元型 CPLD, FPGA, icr 编程技术)	(257)
A4 XILINX 公司典型产品(单元型 FPGA、CPLD, icr 编程技术或 isp 编程技术)	(260)
A5 Actel 公司典型器件(多路开关型 FPGA 反熔丝编程技术)	(262)
附录 B 典型软件开发系统 MAX + PLUS II 简介	(264)
B1 概述	(264)
B2 MAX + PLUS II 的设计过程	(265)
B3 逻辑设计的输入方法	(270)
B4 设计项目的编译	(279)
B5 设计项目的模拟仿真	(286)
B6 定时分析	(289)
B7 器件编程	(291)
参考文献	(295)

第1章 数字系统设计方法

当前,数字技术已渗透到科研、生产和人们日常生活的各个领域。随着数字集成技术和电子设计自动化(Electronic Design Automation,EDA)技术的迅速发展,数字系统设计的理论和方法也在相应地变化和发展。

数字系统的实现方法经历了由SSI、MSI、LSI到VLSI的过程;数字器件经历了由通用集成电路到专用集成电路(Application Specific Integrated Circuits,ASIC)的变化过程。ASIC又分为用户全定制和用户半定制两类,前者把系统直接制造于一个芯片之中;后者是设计者自己、或请制造厂商利用提供的各种工具,把系统构造于半成品中。可编程逻辑器件(Programmable Logic Device,PLD)是半定制ASIC中的重要分支,设计者可在现场对芯片编程,从而实现所需系统。

尽管实现数字系统的方法和器件多种多样,但基本概念、基本理论是设计师必须掌握的,为此,本章首先讨论数字系统的基本概念、基本模型和基本结构,然后讨论数字系统设计的一般步骤和各种方法,并结合讨论给出若干设计实例。

1.1 绪言

1.1.1 数字系统的基本概念

数字系统是对数字信息进行存储、传输、处理的电子系统。可用图1-1来描述,其中输入量X和输出量Z均为数字量。

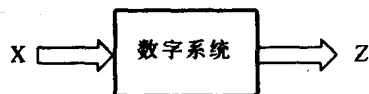


图 1-1 数字系统示意图

数字系统可以是一个独立的实用装置,例如一块数字表,一个数字钟,一台数字频率计,甚至是一台大型数字计算机等;也可以是一个具有特定性能的逻辑部件,例如频率计中的测试板,数字电压表中的主控板,计算机中的内存板等。但不论它们的复杂程度如何,规模大小怎样,就其实质而言仍是逻辑问题,即对数字量的存储、传输和处理。就其组成而言都是由许多能够进行各种逻辑操作的功能部件组成的。这类功能部件,可以是SSI逻辑门,也可以是各种MSI,LSI逻辑功能电路,甚至可以是相当复杂的CPU芯片。正是由于各功能部件之间的有机配合,协调工作,才使数字系统成为统一的数字信息处理机体。

组成数字系统的各个功能部件的作用往往比较单一,总要配置一个控制部件来统一指挥,使它们按一定程序有规则地各司其职,实现整个系统的复杂功能。此外,某些功能部件本身也是一个具有“小”控制部件的、担负局部任务的“小”系统,常称作子系统。由若干子系统合并组成“大”系统时,也必须有一个总的控制部件来统一协调和管理各子系统的工作。因此,往往用

有没有控制部件作为区分数字系统和逻辑功能部件的重要标志。

与数字系统相对应的是模拟系统,如图 1-2 所示。其输入量 A 和输出量 B 均为模拟量,它是一个对模拟信号进行变换和处理的电子系统。

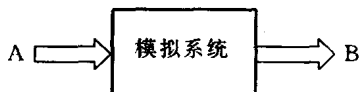


图 1-2 模拟系统示意图

与模拟系统相比,数字系统具有如下特点:

(1) 稳定性。数字系统所加工和处理的对象是具有离散电平(具体地说仅有高、低电平)的数字量,用来构成系统的电子元器件仅需对这种只有高、低电平的信号进行判别和变换,从而能以较低的元件质量(元件参数的漂移、参数准确度、对电源电压等因素的敏感性等)获得较高的工作稳定性,即能以较低的硬件开销来获取较高的性能。

(2) 精确性。在数字系统中,可以用增加并行数据的位数或串行数据的长度来达到数据处理和传输的精确度。

(3) 可靠性。在数字系统中,可采用检错、纠错和编码等信息冗余技术,利用多机并行工作等硬件冗余技术来提高系统的可靠性。

(4) 模块化。由于数字系统中用电平的高低来表示信息,因此可以把任何复杂的信息处理分解为大量的基本算术运算和逻辑操作。按一定规律完成这些操作,就可以实现预定的逻辑功能,因而可以用许多通用的模块来构成系统,从而使系统的设计、试制、生产、调试和维护都十分方便。

在现实生活中,许多物理量都是模拟量,如压力、温度、流量、还有文字、图像、音乐等。但考虑到数字系统具有上述许多优点,因此人们正在或已经把很多本应由模拟系统完成的信息处理任务改由数字系统来完成。例如,电视技术是一种传统的模拟系统,目前也在向数字电视过渡。新一代数字电视技术将比现有的经典的电视系统具有更优良的性能和更低廉的生产成本。

把模拟物理量的处理改由数字系统来完成的方法如图 1-3 所示。通过 A/D 转换器将各种模拟信号转换为数字信号,直接送入数字系统进行处理和存储,D/A 转换器又将数字系统输出的信息再转换为模拟信号。

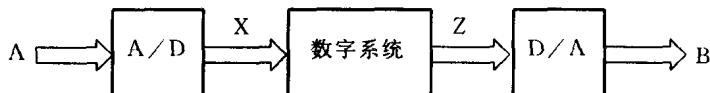


图 1-3 典型的模拟信息数字化处理系统

数字系统的开发和应用方兴未艾,掌握数字系统的设计技术和知识是电子技术工作者的重要任务,本书将详细介绍数字系统逻辑设计方法及基本步骤;数字系统设计和描述工具;系统数据处理单元和控制单元的设计,还将详细讨论 PLD 及其在数字系统设计中的应用技术,期望通过实例和习题,把数字系统设计的基本理论、基本方法和设计课题紧密结合,以求提高读者设计数字系统的能力。

数字系统设计人员从事的工作可以分为三种:

- (1) 选用通用集成电路芯片构成系统。
- (2) 应用可编程逻辑器件实现数字系统。
- (3) 设计专用集成电路(单片系统)。

随着 LSI、VLSI、MLSI 集成技术和 EDA 技术的飞速发展,系统设计师的工作越来越向后两种转移,使得系统设计工作具有硬件设计和软件设计高度渗透,CAD、CAE、CAT、CAM 等融合一体的特征。本书从内容选择到文字叙述都是以此为目标安排的,但也考虑到我国的具体情况,对基础性的设计工作也进行简明介绍。

1.1.2 数字系统的基本模型

为便于分析和设计数字系统,有必要选择适当的模型对系统进行描述。数字系统的动态模型和算法模型是两种基本的有效模型。

1. 数字系统动态模型

采用传统的数字电路描述方法建立的系统模型称为数字系统的动态模型。具体地说,用状态转换图、状态转换表、状态方程组、输出方程组、时序图、真值表、卡诺图等描述工具可以建立数字系统的动态模型。

某数字系统 DS 的示意图如图 1-4(a)所示。该系统输入为 X,输出为 Z,它们都是时间的函数,时钟信号为 CP,各信号相互关系如图 1-4(b)所示。

图 1-4(b)显示,该系统属于同步时序系统的范畴,输出函数仅在同步时钟 CP 所规定的离散时刻(这里响应 CP 的上升沿)才能发生变化。因此,连续时间变量被取值为 0,1,2,3,……的整数时间变量所代替。输入、输出也只能取得对应时间变量的有限数目的离散值。

上述同步系统,在时刻 t 的输出 Z(t)不仅是当前输入 X(t)的函数,而且是过去的 X(0)、X(1)、……、X(t-1)的函数,通常可用状态变量 S(t)来记录并表示 X 过去的有效输入,该状态变量也是时间的函数。现在,系统可以用两个方程来统一描述:

$$Z(t) = F_1[X(t), S(t)] \quad (1-1)$$

$$S(t+1) = F_2[X(t), S(t)] \quad (1-2)$$

式(1-1)称为输出函数方程,式(1-2)称为状态转换方程,又称次态方程。

分析图 1-4(b),可得出时钟 CP、输入 X 序列、相应的 Z 输出序列如下:

CP	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
X	1	0	0	1	1	1	0	1	1	
Z	0	1	0	1	0	0	1	1	0	

根据“数字电路”课程中的同步时序电路分析方法,不难得到该系统的状态转换图和状态转换表如图 1-5(a)、(b)所示。其中状态 S₀表示系统收到过一个 0,而状态 S₁表示收到过一个 1。

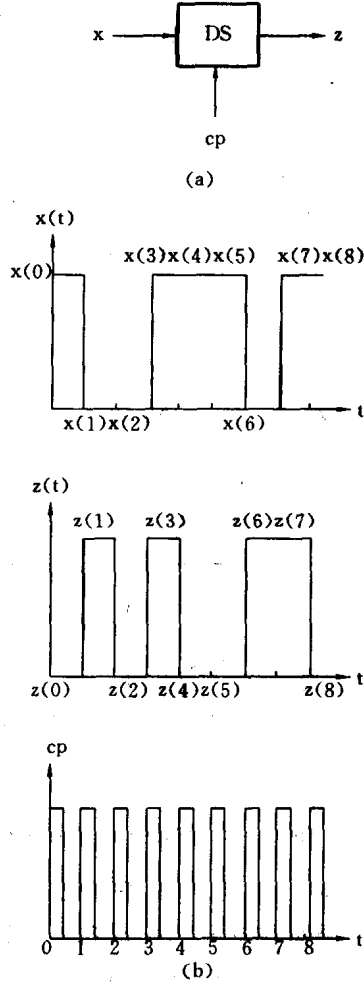


图 1-4 某数字系统示意图和输入 X、输出 Z 及时钟 CP 波形图

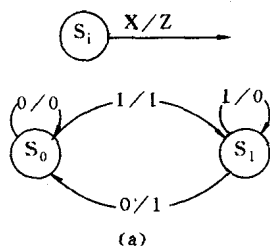
按照图 1-4(b)给定的 X 序列又可以得到 X(t)、S(t)和 Z(t)的相对关系如下所示：

X(t)	1	0	0	1	1	1	0	1	1	
S(t)	S ₁	S ₀	S ₀	S ₁	S ₁	S ₁	S ₀	S ₁	S ₁	
Z(t)	0	1	0	1	0	0	1	1	0	

由此不难归纳出它是一个检测串行输入 X 的系统,当 X 发生变化时,输出 Z 为 1,否则 Z 为 0,即

$$Z(t) = \begin{cases} 1 & \text{若 } X(t-1) \text{ 到 } X(t) \text{ 发生 } 0 \rightarrow 1 \text{ 或 } 1 \rightarrow 0 \text{ 变化} \\ 0 & \text{其余情况} \end{cases}$$

至此,只要用二进制矢量对状态信息 S(t)和输入信息 X(t)进行编码,采用常规的时序电路设计方法,系统设计就不难实现。



现态 S(t)	当前输入X(t)	
	0	1
S ₀	S ₀ / 0	S ₁ / 1
S ₁	S ₀ / 1	S ₁ / 0

(b)

次态S(t+1)/输出Z(t)

式(1-1)和式(1-2),以及图 1-5(a)、(b)所示状态转换图和状态转换表都完整地描述了该数字系统的动态过程,即为动态模型。

从动态模型中,可以观察出该系统是一个检测串行输入序列 X 有否变化的序列检测系统。

对于组合系统而言,当前的输出 Z(t)仅决定于当前的输入 X(t),与过去的 X(0)、X(1)、.....、X(t-1)无关,故系统只有一个状态,无状态转换可言,为此,仅用输出函数方程描述,记作:

$$Z(t) = F[X(t)]$$

且可将时间参数 t 省略,从而有:

$$Z = F(X) \quad (1-3)$$

则输出方程、真值表、卡诺图等就是建立组合系统动态模型的工具。

图 1-5 状态转换图和状态转换表

例 1.1 试导出举重比赛裁判控制系统的动态模型。

举重比赛有三位裁判,一位是主裁判 A,另两位是副裁判 B 和 C,运动员一次举重是否成功,由裁判员各自按动面前的按钮决定,只有两人以上,且其中必须有主裁判判定为成功时,表示成功的指示灯 L 才会亮。

显然,这是个组合系统,可能用如图 1-6 所示的卡诺图和表 1-1 所示的真值表或方程(1-4)来描述,这些就是该组合系统的动态模型。

表 1-1 裁判控制系统真值表

A	B	C	L
0	0	0	0
0	0	1	0
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	0
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	1

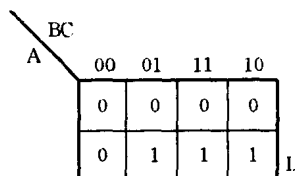


图 1-6 裁判控制系统卡诺图

$$L = AB + AC \quad (1-4)$$

例 1.2 某系统 S 有两个串行输入端 X_1 和 X_0 ，它们的输入取值为 00(表示 0)、01(表示 1) 和 10(表示 2)。还有一个取值为 0、1 的串行输出端 Z。该输出函数定义为：

$$Z(t) = \begin{cases} 1 & \text{若输入序列 } X_1X_0 \text{ 有偶数个 2、且有奇数个 1 时;} \\ 0 & \text{其余情况。} \end{cases}$$

试建立该系统的动态模型。

根据题意，该系统应用 4 个状态：

S_0 ——系统收到过奇数个 1 和奇数个 2

S_1 ——系统收到过偶数个 1 和奇数个 2

S_2 ——系统收到过奇数个 1 和偶数个 2

S_3 ——系统收到过偶数个 1 和偶数个 2

系统的状态转换表和状态转换图如图 1-7(a)、(b)所示。这就是该系统的动态模型。

鉴于数字系统的动态模型在经典的“数字电路与逻辑设计”等课程中已有详细讨论，这里仅作了简要的回顾。

2. 数字系统的算法模型

设计数字系统的传统方法是建立在系统动态模型的基础上的，即用真值表、卡诺图、状态转换图、状态转换表、时序图、状态方程和输出函数方程来建立系统模型。显然，对于较复杂的数字系统，因其输入变量数、输出函数数和状态数的急剧增加，而使传统的分析设计方法难以适用，甚至根本无法进行。为此，数字技术人员现今普遍采用系统算法模型来描述和设计数字系统。本书将采用这一模型。

系统算法模型的基本思想是：将系统实现的功能看作是应完成的某种运算。若运算太复杂，可把它分解成一系列子运算(子功能)。如果子运算还较复杂，可以继续分解，直到分解为一系列简单运算。然后按一定的规律，顺序地或并行地进行这些简单的基本运算，从而，实现原来复杂系统的功能。算法就是对这种有规律、有序分解的一种描述。事实证明，任何一个系统都可以用算法模型来进行描述。

系统的算法模型通常具有两大特征：

- (1) 含有若干子运算，这些子运算实现对欲处理数据或信息的传输、存储或加工处理。
- (2) 具有相应的控制序列，控制子运算按一定的规律有序地进行。

例 1.3 试给出图 1-5 所示序列检测系统的算法模型。

根据题意，实现该系统功能应有两个存储单元 R_1 和 R_2 ，分别存放输入信号 X 在 $(t-1)$ 和 t 时刻的数据，系统还应有一个比较器 COM，用以对 $X(t-1)$ 和 $X(t)$ 的数值进行比较，按比较结果的不同使 Z 输出不同的值：

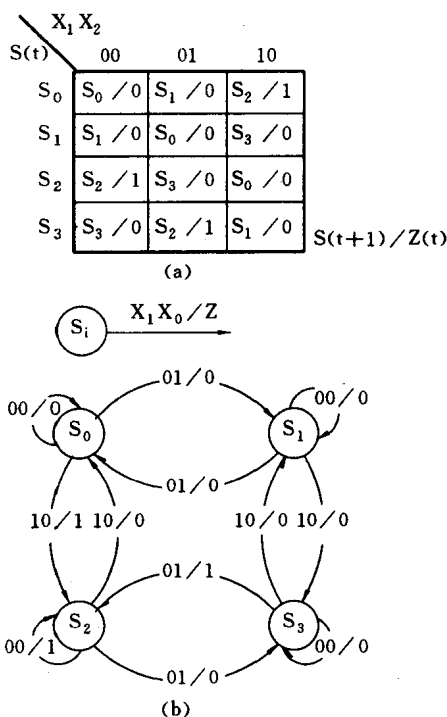


图 1-7 某系统动态模型(状态转换表和状态转换图)