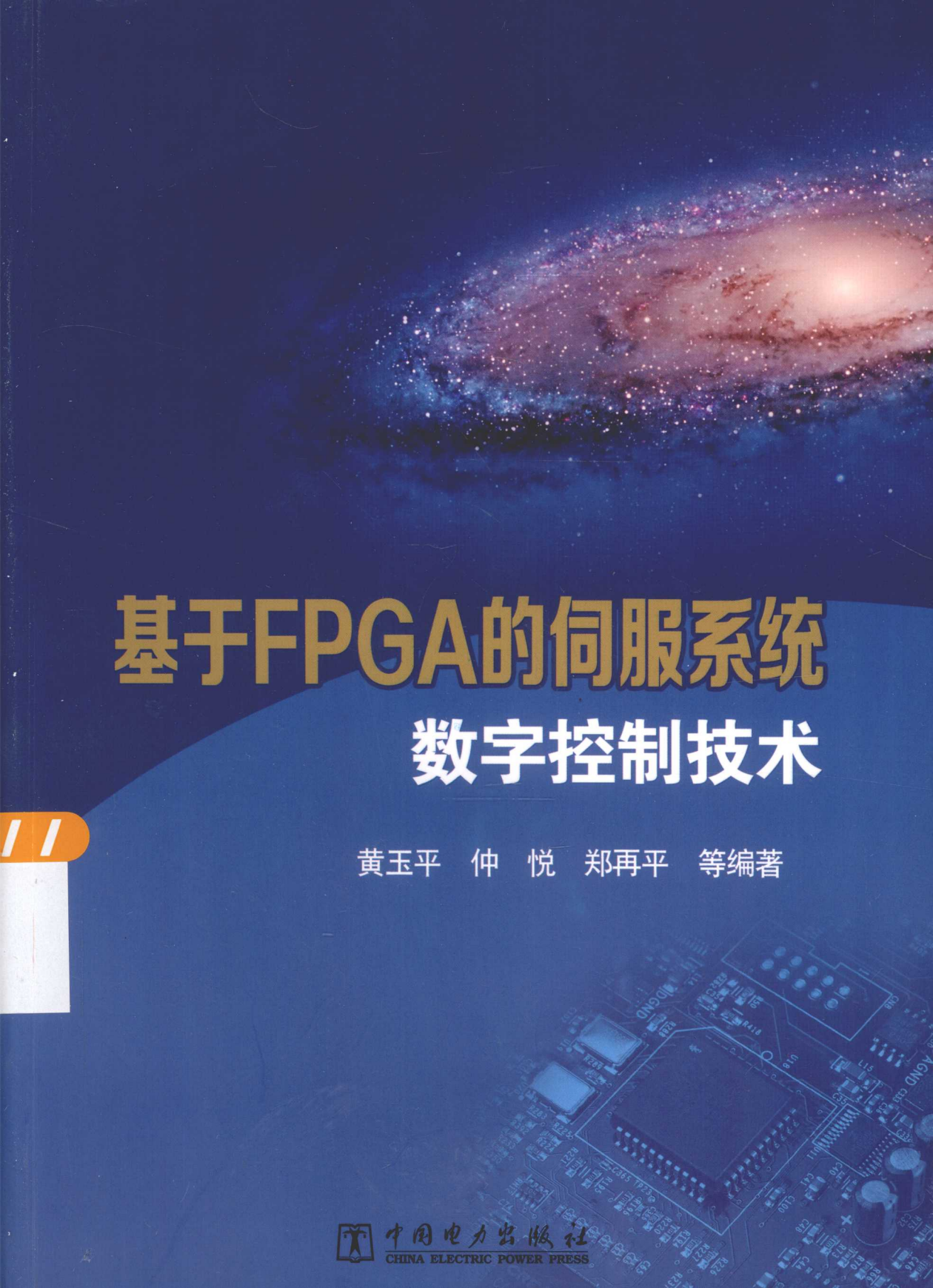


The background of the cover is a deep blue space scene featuring a vibrant, multi-colored galaxy (likely the Milky Way) stretching across the upper right portion. The galaxy's core is bright and glowing with orange and red hues, surrounded by dense clouds of stars and interstellar dust. The lower portion of the cover transitions into a dark blue gradient, where a faint, high-contrast image of a printed circuit board (PCB) is visible, showing various electronic components like chips, capacitors, and traces.

基于FPGA的伺服系统 数字控制技术

黄玉平 仲 悦 郑再平 等编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

基于FPGA的伺服系统 数字控制技术

黄玉平 仲 悦 郑再平 等编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书全面阐述了 FPGA 在电动机控制系统中的应用技术, 本书共分为 10 章, 主要内容包括典型 FPGA 分类、使用、代表产品、结构原理、开发工具、设计流程、硬件描述语言、软件开发环境、数据通信模块、数字信号处理基础、数据采集技术; 在此基础上介绍 FPGA 电动机控制技术、容错技术及测试方法、在工程领域的应用等。

本书包含了大量的源程序代码, 读者可以根据需要直接采用。本书适合从事电动机控制及伺服系统研发的工程师参考, 也可供大专院校相关专业的学生学习使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

基于 FPGA 的伺服系统数字控制技术/黄玉平等编著. —北京:
中国电力出版社, 2015. 9

ISBN 978-7-5123-7781-3

I. ①基… II. ①黄… III. ①伺服系统-数字控制-研究
IV. ①TP275

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 103402 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 9 月第一版 2015 年 9 月北京第一次印刷

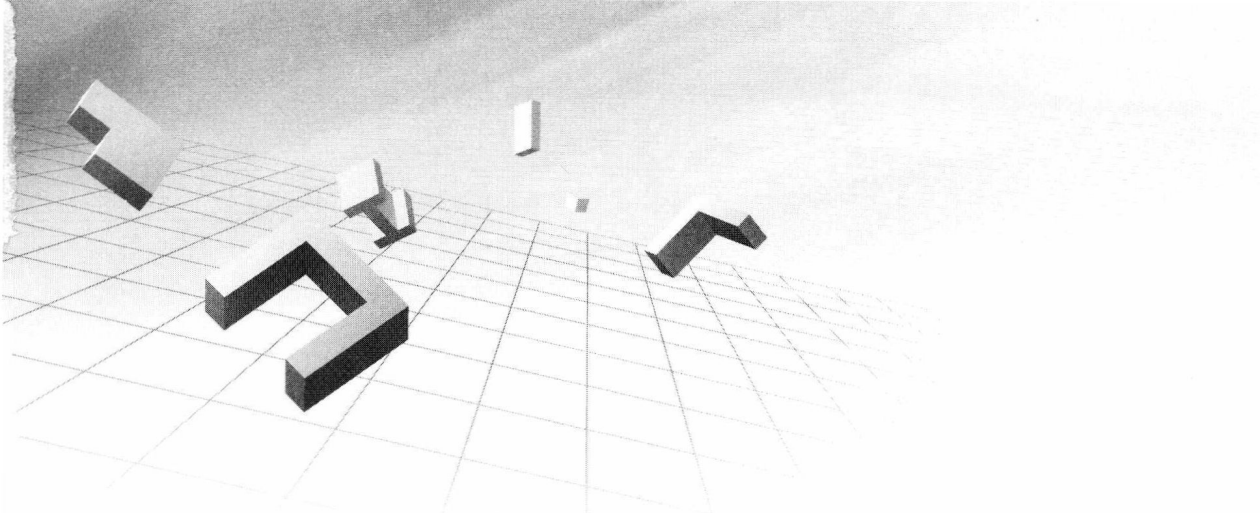
710 毫米×1000 毫米 16 开本 29.75 印张 550 千字

印数 0001—2000 册 定价 59.80 元

敬 告 读 者

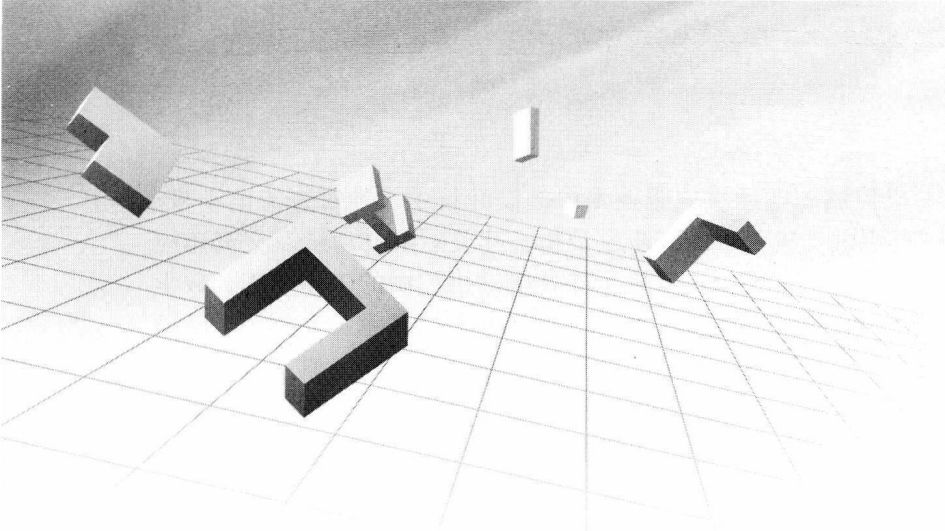
本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



编 委 会 名 单

黄玉平 仲 悦 郑再平 郑继贵 李建明
王春明 卢二宝 魏思维 李 林 韩继文
任丽平 闫海媛 姜 涛 朱 俊 周海平



前 言

现代高性能机电伺服系统是一种复杂的数字控制系统,需要具备强大的数据通信、信号采集与处理能力,能运行先进的伺服控制算法,能完成复杂的系统状态管理。FPGA 具有速度快、规模大、设计模块化的诸多优点,设计人员不仅对其内容可重复编程,还可以对其 I/O 口重复配置,使得系统设计变得更加简单方便、灵活快速,非常适用于数字化机电伺服控制系统。

本书比较全面地阐述了 FPGA 在电动机控制系统中的应用技术。本书共分 10 章,第 1 章介绍了可编程逻辑器件的发展历史与分类,归纳了 FPGA 产品型号及各公司推出的 FPGA 系列情况,分析了 FPGA 数字控制技术的发展概况与趋势,概述了在机电伺服系统中应用 FPGA 的设计要点及设计流程。第 2 章介绍了 FPGA 几种常规的结构工艺,分析了 FPGA 的硬件结构及其工作原理,对比了 FPGA 与当前应用广泛的 CPLD、DSP 及 ARM 的应用特点,展现了现有 FPGA 的开发工具和开发环境,提出了通用 FPGA 设计流程和设计方法。第 3 章在前章节 FPGA 开发环境论述的基础上,针对 FPGA 各种硬件描述语言进行说明,详细论述了 VHDL 和 Verilog HDL 硬件描述语言的结构特点与使用方法。第 4 章介绍了 FPGA 具体的开发环境,包括最为常用的最新版本 ISE、MAX+PLUS II 和 Quartus II 软件使用情况,讲述了各种软件的使用特点、安装流程及使用方法。第 5 章主要针对机电伺服系统中数字通信的 FPGA 设计方法进行详细论述,包括 RS232 串行数据通信协议、实现方案及利用 FPGA 各个数字模块的设计方法、I²C 串行数据通信 FPGA 具体实施方案和建模过程、CAN 总线通信协议及 FPGA 实现方法、USB 接口固件开发和软件驱动实施流程、SPI 通信特点及 FPGA 具体实现、1553B 总线及分布式光纤数据通信特点及 FPGA 具体实施例程。第 6 章就 FPGA 设计的基础知识进行论述,主要分析 FPGA 的最小管理系统电路设计,包括引脚、电源、存储器、定时器等,讲述了 FPGA 加法和乘法器几种设计思想,设计了滤波器和 FFT 数字处理方法。第 7 章论述了 FPGA 在模拟信号采样中的应用,分析数据采样基本指标和工作原理,举例说明了基于 FPGA 的 AD 采样方案及具体设计方法。第 8 章主要论

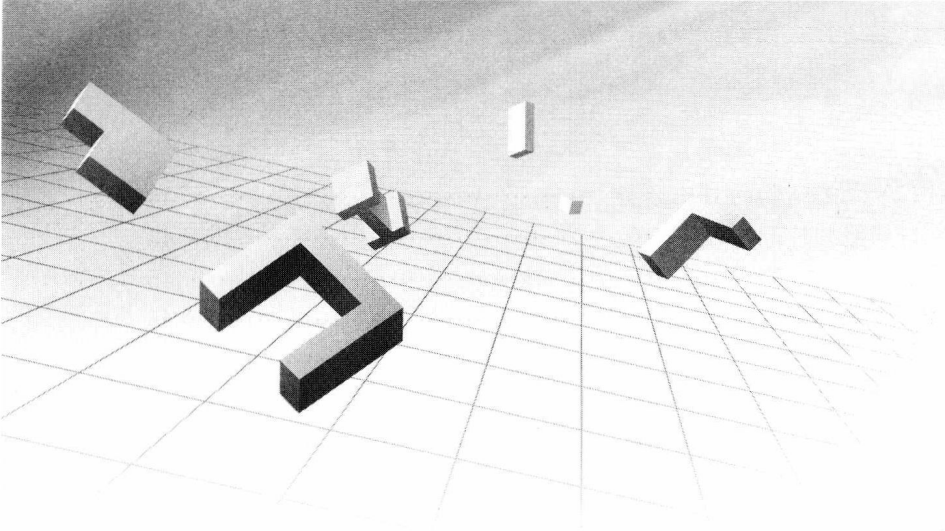
述了 FPGA 在电动机控制和电动机伺服技术中的设计技术, 针对直流电动机、步进电动机、无刷直流电动机、永磁同步电动机、开关磁阻电动机及交流感应电动机, 利用 FPGA 实现数字控制, 分析了各种电动机控制的工作原理、数学模型及控制方法。第 9 章分析了 FPGA 的容错技术和测试技术, 介绍了 FPGA 常见的故障类型和故障测试方法、FPGA 功能模块的测试技术, 概述了 FPGA 动态可重构容错技术理念及发展情况。第 10 章就国内外相关 FPGA 应用文献进行总结, 分析了 FPGA 在各行业中的应用情况。

全书由北京精密机电控制设备研究所组织编写。他们充分发挥了航天数字机电伺服专业的技术优势和电力电子技术优势, 组织长期专业从事伺服系统总体设计、电气系统设计、电路与软件设计等众多专业技术人员, 在充分讨论、分析、总结及全面深化的基础上, 从数字控制系统中各单元部件到 FPGA 方案设计, 进行逐层次论述, 由研究所各技术组讨论后定稿。

在本书的编写过程中, 得到了中国航天科技集团公司、中国运载火箭技术研究院本部、北京精密机电控制设备研究所专家的帮助, 哈尔滨工业大学吴红星教授等同行专家对本书提出了宝贵意见, 在此一并表示感谢。

由于编者水平有限, 书中如有不妥之处, 敬请读者批评指正。

编者

An abstract graphic featuring several 3D geometric shapes, including L-shapes and rectangles, arranged on a perspective grid that recedes into the distance. The shapes are rendered in a light gray color with soft shadows.

目 录

前 言

第 1 章 概论	1
1.1 可编程逻辑器件概述	1
1.1.1 可编程逻辑器件简介	2
1.1.2 可编程逻辑器件的发展历史	2
1.1.3 可编程逻辑器件与设计软件	7
1.2 FPGA 分类与使用	8
1.2.1 FPGA 的分类	9
1.2.2 FPGA 的使用	14
1.3 FPGA 供应商及代表产品	16
1.3.1 Xilinx 公司的代表产品	17
1.3.2 Altera 公司的代表产品	20
1.3.3 Actel 公司的代表产品	22
1.3.4 其他产品	25
1.4 FPGA 技术的发展与趋势	25
1.5 机电伺服系统 FPGA 应用特点和设计要求	33
第 2 章 FPGA 设计基础	35
2.1 FPGA 的原理与结构	35
2.1.1 FPGA 的原理	35
2.1.2 FPGA 的结构	36
2.1.3 软核、硬核以及固核的概念	40
2.2 FPGA 的工艺结构	40
2.2.1 基于 SRAM 结构的 FPGA	41
2.2.2 基于反熔丝结构的 FPGA	42
2.2.3 基于 Flash 结构的 FPGA	44

2.2.4	FPGA 工艺结构的对比分析	44
2.3	FPGA 与其他芯片的比较	45
2.3.1	FPGA 与 CPLD	45
2.3.2	FPGA 与 DSP	46
2.3.3	FPGA 与 ARM	48
2.4	FPGA 常用开发工具	48
2.4.1	集成开发环境	49
2.4.2	仿真工具	54
2.4.3	综合工具	56
2.4.4	调试与加载	56
2.5	FPGA 的基本设计技术	57
2.5.1	设计流程	57
2.5.2	设计方法	60
2.6	IP 核及开发流程	62
2.6.1	IP 设计的四大阶段	62
2.6.2	IP 验证的主要过程	63
2.6.3	IP 的规格定义	64
2.6.4	IP 集成	65
2.6.5	IP 集成的一般考虑	65
2.6.6	IP 模块的评估与选择	66
第 3 章	FPGA 硬件描述语言	67
3.1	VHDL 语言基本结构	67
3.1.1	VHDL 的历史与特点	68
3.1.2	VHDL 相关申明方法	69
3.1.3	结构体的描述方法	70
3.1.4	程序包与程序包体	72
3.1.5	VHDL 的程序库	73
3.2	VHDL 语言的数据类型与运算	75
3.2.1	VHDL 语言的数据对象	75
3.2.2	VHDL 语言的数据类型	77
3.2.3	VHDL 语言的运算	78
3.3	VHDL 语言的预定义属性	79
3.3.1	VHDL 的预定义数据类型	79
3.3.2	IEEE 预定义标准逻辑位与矢量	80
3.4	Verilog HDL 语言基本结构	81
3.4.1	Verilog HDL 的历史与特点	81

3.4.2	Verilog HDL 相关声明方法	82
3.4.3	结构体的描述方法	82
3.5	Verilog HDL 语言的数据类型与运算	83
3.5.1	标志符	83
3.5.2	数据类型	83
3.5.3	模块端口	85
3.5.4	常量集合	85
3.5.5	运算符和表达式	87
3.6	Verilog HDL 语言描述	91
3.6.1	门级建模形式	91
3.6.2	数据流建模形式	91
3.6.3	行为建模形式	92
第 4 章	FPGA 软件开发环境	100
4.1	ISE 开发软件	101
4.1.1	ISE 软件简介	101
4.1.2	ISE 系统要求与安装	101
4.1.3	ISE 软件的使用方法	104
4.2	Quartus II 设计开发软件	113
4.2.1	Quartus II 软件简介	113
4.2.2	Quartus II 系统要求与安装	113
4.2.3	Quartus II 软件的使用方法	114
4.3	MAX+PLUSII 开发软件	121
4.3.1	MAX+PLUSII 软件简介	121
4.3.2	MAX+PLUSII 系统要求与安装	122
4.3.3	MAX+PLUSII 软件的使用方法	122
第 5 章	基于 FPGA 数据通信模块的实现	131
5.1	RS232 串口数据通信	131
5.1.1	RS232 通信概况	132
5.1.2	RS232 通信协议及实现方案	132
5.1.3	信号检测模块的实现	134
5.1.4	波特率发生器模块	136
5.1.5	移位寄存器模块	137
5.1.6	计数器模块	140
5.1.7	奇偶校验模块	142
5.1.8	测试平台的编写和仿真	144
5.2	I ² C 数据通信	145

5.2.1	I ² C 总线概况	145
5.2.2	I ² C 协议具体 FPGA 实现	149
5.2.3	程序的仿真与测试	164
5.3	CAN 总线数据通信	164
5.3.1	CAN 总线协议概述	164
5.3.2	CAN 总线控制器程序框架	167
5.3.3	CAN 总线控制器的 FPGA 实现	167
5.3.4	CRC 检验码的 FPGA 实现	168
5.4	USB 接口控制器	170
5.4.1	USB 接口简介	170
5.4.2	USB 体系结构	171
5.4.3	USB 固件开发	173
5.4.4	USB 驱动和软件开发	174
5.5	SPI 数据通信	175
5.5.1	SPI 数据通信概述	176
5.5.2	SPI 数据通信特点	176
5.5.3	SPI 协议具体 FPGA 实现	177
5.6	1553B 总线数据通信	181
5.6.1	1553B 总线协议概述	181
5.6.2	1553B 总线优点	187
5.6.3	1553B 总线系统的 FPGA 实现	188
5.7	光纤总线通信	196
5.7.1	光纤通信协议框架设计	197
5.7.2	通信协议的实现	198
5.7.3	光纤总线通信的 FPGA 设计	203
5.7.4	通信协议仿真	212
第 6 章	FPGA 中的数字信号处理基础	214
6.1	FPGA 最小系统	214
6.1.1	FPGA 管脚设计	214
6.1.2	FPGA 存储器设计	217
6.1.3	FPGA 开关、按键电路设计	220
6.1.4	FPGA 电源及复位电路设计	221
6.1.5	FPGA 时间及定时器电路设计	222
6.2	二进制加法和乘法器设计	223
6.2.1	数的表示方法	223
6.2.2	流水线加法器	224

6.2.3	流水线乘法器	227
6.3	基于 FPGA 数字滤波器设计	234
6.3.1	数字滤波器分类及工作原理	235
6.3.2	FIR 滤波器设计与实现	236
6.3.3	IIR 滤波器设计与实现	241
6.4	基于 FPGA 傅立叶变换器设计	246
6.4.1	FFT 算法基本原理	246
6.4.2	FFT 模块设计	253
6.4.3	输出缓冲器设计	260
第 7 章	基于 FPGA 的数据采集技术	262
7.1	数据采集的基本概念	262
7.1.1	数据采集的研究现状与发展	264
7.1.2	数据采集系统主要性能指标	266
7.1.3	采样定理	267
7.2	A/D 转换原理及模块	269
7.3	基于 FPGA 的多路数据采集系统设计	271
7.3.1	多通道选择开关设计	271
7.3.2	A/D 转换电路(AD7862)	271
7.3.3	基于 FPGA 控制的多通道选择模块	273
7.3.4	基于 FPGA 的 A/D 控制模块	274
7.4	基于 FPGA 的同步数据采集设计	275
7.4.1	A/D 转换电路(AD7656)	275
7.4.2	FPGA 控制功能模块	275
7.4.3	功能实现	277
第 8 章	FPGA 伺服电动机控制技术	280
8.1	FPGA 在直流电动机中的应用	280
8.1.1	直流电动机的工作原理	281
8.1.2	直流电动机 PWM 调速原理	282
8.1.3	FPGA 在直流电动机调速系统中的应用	284
8.1.4	FPGA 在直流电动机位置控制系统中的应用	290
8.2	FPGA 在步进电动机控制器中的应用	293
8.2.1	步进电动机工作原理	293
8.2.2	FPGA 在步进电动机联动控制方案中的应用	295
8.2.3	步进电动机细分技术	301
8.2.4	细分驱动模块 FPGA 实现	304
8.3	FPGA 在无刷直流电动机中的应用	306

8.3.1	无刷直流电动机驱动系统的基本结构	306
8.3.2	无刷直流电动机驱动系统的工作原理	310
8.3.3	无刷直流电动机的数学模型	311
8.3.4	基于 FPGA 的无刷直流调速系统	313
8.4	FPGA 在无位置传感器的无刷直流电动机应用	321
8.4.1	反电动势过零法数学模型的建立	321
8.4.2	三段式无传感器运行算法设计	324
8.5	FPGA 在交流永磁同步电动机中的应用	330
8.5.1	永磁同步电动机工作原理	330
8.5.2	永磁同步电动机矢量控制原理	333
8.5.3	FPGA 在交流永磁同步电动机控制器中的设计与实现	338
8.6	FPGA 在交流感应电动机中的应用	351
8.6.1	交流感应电动机工作原理	351
8.6.2	交流感应电动机的矢量控制系统	353
8.6.3	交流感应电动机模糊矢量控制原理	356
8.6.4	基于 FPGA 的感应电动机模糊控制系统	360
8.7	FPGA 在开关磁阻电动机中的应用	367
8.7.1	开关磁阻电动机的结构及其工作原理	367
8.7.2	开关磁阻电动机驱动系统控制方式	371
8.7.3	基于 FPGA 的开关磁阻电动机位置检测算法研究	373
8.7.4	基于 FPGA 的开关磁阻电动机无传感器控制系统	375
第 9 章	FPGA 容错技术及测试方法	381
9.1	FPGA 典型故障类型	381
9.1.1	容错技术概述	381
9.1.2	常见的 FPGA 故障模型	384
9.1.3	典型的 FPGA 故障检测方法	387
9.2	可编程逻辑功能模块的测试设计	389
9.2.1	查找表(LUT)的测试	389
9.2.2	进位逻辑模块的测试	390
9.2.3	函数发生器 RAM 模式的测试	391
9.3	可编程互连资源的测试	393
9.3.1	互连资源内建自测试概述	393
9.3.2	构建内建自测试子模块	397
9.3.3	通用布线资源测试的实现	398
9.3.4	互连资源的诊断方法	406
9.4	FPGA 动态可重构容错技术	410

9.4.1	可重构技术的基本原理	410
9.4.2	动态重构设计方法	413
9.4.3	基于FPGA的局部动态可重构技术	415
第10章	FPGA在工程领域的应用	421
10.1	FPGA技术的基本应用	421
10.1.1	FPGA技术在数字中频处理中的应用	421
10.1.2	FPGA中植入嵌入式系统处理器	422
10.1.3	基于FPGA的DSP系统设计	422
10.1.4	FPGA技术在单片机中的应用	423
10.1.5	FPGA在人工神经网络领域的实现研究	423
10.2	FPGA在航天领域的应用	425
10.2.1	国外FPGA航天技术研究现状	425
10.2.2	FPGA在航天伺服系统中的应用	427
10.2.3	航天应用FPGA的可靠性设计	428
10.3	FPGA在军事领域的应用	430
10.3.1	FPGA攻击原理分析	430
10.3.2	FPGA加密保护技术	431
10.3.3	军用龙芯计算机系统板的FPGA加密方法	431
10.3.4	基于FPGA在防空导弹发射机构测试技术	433
10.3.5	FPGA在坦克炮控系统中的应用	435
10.3.6	基于FPGA的导弹制导站系统设计	436
10.4	FPGA在工业领域的应用研究	440
10.4.1	FPGA在水下领域的应用	440
10.4.2	FPGA在矿山领域的应用	444
10.5	FPGA在民用领域(医疗设备)中的应用	445
10.5.1	FPGA在心电设备中的应用	445
10.5.2	FPGA在超声设备中的应用	447
10.5.3	FPGA在电子内窥镜中的应用	448
参考文献		450

现代高性能机电伺服系统需要具备强大的数据通信、信号采集与处理能力,能运行先进的伺服控制算法,能完成复杂的系统状态管理。现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)器件是完成上述功能、实现机电伺服系统数字控制的可选途径之一。根据系统的复杂程度和性能要求的不同, FPGA既可以单独使用,也可与微程序控制器(Microprogrammed Control Unit, MCU)、数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)等配合使用。随着微电子技术飞速发展, FPGA本身的设计、工艺水平不断提高,器件规模越来越大,功能越来越强,使得电子系统设计变得更加简单方便、灵活快速。因此,掌握 FPGA 器件和相应的设计技术已经成为从事电子系统设计的工程师和科研人员的一项重要技能和手段。

1.1 可编程逻辑器件概述

数字控制系统中,总要用到各种集成电路。集成电路可以分为通用集成电路和专用集成电路两大类。例如,常见的小规模数字集成电路 74、CC4000、74HC 系列和常用的大容量动态存储器等都属于通用集成电路,它们的特点是逻辑功能比较简单,并且在使用过程中固定不变。这些集成电路在组成复杂的电子系统中经常用到,具有很强的通用性。

通常,采用芯片厂商提供的中、小规模集成电路可以组成任何复杂的电子系统。但为了减小系统电路的体积、质量、功耗和提高可靠性,设计人员经常会把设计的系统直接做成一片大规模或超大规模集成电路。这种为某种专用用途设计的集成电路就称为专用集成电路,通常也称为 ASIC(Application Specific Integrated Circuit)。例如,微处理器就是一种常见的专用集成电路,它只是在某一类计算机中可以使用。可以看出,这类集成电路的通用性比较差,而且设计和制造它们的成本较高、周期较长。

为了满足人们日益增长的对大规模、超大规模专用集成电路的需求,同时又要兼顾研制成本、开发周期的要求,通用可编程器件迅速在电子设计领域发展起来。

1.1.1 可编程逻辑器件简介

通用可编程逻辑器件, 通常也称为 PLD, 即 Programmable Logic Device。这里, PLD 虽然是作为一种通用集成电路来进行生产的, 但是它的逻辑功能是由设计人员根据系统设计的具体要求通过相应的器件编程来实现的。另外, 由于 PLD 的集成度很高, 因此它可以满足大多数数字系统设计的需要。可见, 设计人员通过相应的器件编程就可以把设计的系统集成在一片 PLD 上, 而不再需要由厂商来设计和制造相应的专用集成电路了, 这样便解决了专用集成电路的专用性、成本较高以及开发周期较长的主要矛盾。可编程逻辑器件和相应的设计技术体现在三个主要方面: ①可编程逻辑器件的芯片技术; ②适用于可编程逻辑器件的硬件编程技术, 即 VHDL 技术和 Verilog 技术; ③可编程逻辑器件设计的 EDA 开发工具, 它主要用来进行可编程逻辑器件应用的具体实现。

可编程逻辑器件的优点为: ①集成度高, 可以替代多至几千块通用 IC 芯片; ②极大减少了电路面积, 降低功耗, 提高可靠性; ③具有完善先进的开发工具; ④提供高级语言、图形等设计方法, 十分灵活, 可通过仿真工具来验证设计的正确性。

可编程逻辑器件根据编程方式分为两类: ①一次性编程 (One Time Programmable, OTP) 器件; ②可多次编程器件。OTP 器件只允许对器件编程一次, 编程后不能修改, 其优点是集成度高、工作频率和可靠性高、抗干扰性强; 可多次编程器件的优点是可多次修改设计, 特别适合于系统样机的研制。可编程逻辑器件的编程信息均存储在可编程元件中。根据各种可编程元件的结构及编程方式, 可编程逻辑器件通常又可以分为四类: ①采用一次性编程的熔丝或反熔丝元件的可编程器件; ②采用紫外线擦除、电可编程元件, 即采用 EPROM、UVC MOS 工艺结构的可编程器件; ③采用电擦除、电可编程元件。其中一种是 E²PROM, 即采用 E²CMOS 工艺结构的可编程器件, 另一种是采用快闪存储单元 (Flash Memory) 结构的可编程器件; ④基于静态存储器 SRAM 结构的可编程器件。以上四类器件中第一类属于一次性编程器件, 第二~四类属于可多次编程器件。

1.1.2 可编程逻辑器件的发展历史

可编程逻辑器件从 20 世纪 70 年代发展到现在, 已形成了许多类型的产品, 其结构、工艺、集成度、速度和性能等都在不断改进和提高。最早出现的可编程逻辑器件是 1970 年制成的 PROM, 它由全译码的与阵列和可编程的或阵列组成。由于阵列规模大、速度低, 因此它的主要用途还是作为存储器。20 世纪 70 年代中期出现了可编程逻辑阵列 (Programmable Logic Array, PLA) 器件, 它由可编程的与阵列和可编程的或阵列组成, 虽然其阵列规模大为减少, 提高了

(1) PROM 和 FPLA。可编程只读存储器 (PROM)，包含了由不可编程的“与”阵列和可编程的“或”阵列两部分。如图 1-2 给出了基本的 PROM 结构示意图。

“与”阵列采用全译码，意味着对某一组特定的输入 I_0 、 I_1 …… I_n ，只能产生一个唯一的乘积项，即 $Q_i = \sum I_n$ ，因为是全译码，这一阵列的大小为 2^n (n 为乘积项数)，从而导致巨大的体积，并且价格也比较昂贵。

由于巨大的阵列，PROM 的速度要比其他的逻辑器件慢，主要的原因是巨大的阵列开关时间所致，只有一些较小的 PROM 较快。但实际上大多数的逻辑功能不需所有的组合便可得到，故许多输入的译码是无效的或是不可能使用到的。

另外，PROM 基本用途是作为存储器使用，如显示查寻、软件的固化等。

现场可编程的逻辑阵列 (FPLA) 是在 1970 年研制成功的。它提供了对逻辑功能更有效的实现方法，图 1-3 是基本的 FPLA 结构。与 PROM 类似，它也是两个部分——AND 和 OR 阵列，但 FPLA 采用两个阵列均可编程的方法，“与”阵列不是全译码，而乘积项可以连接到一个或多个“或”门上，它提供了一个较小且较快的阵列。由于两个均可编程，所以使设计工作变得容易得多，但对于 FPLA 来说，存在两个缺点：①可编程的阵列为两个，相对来说比较复杂一些；②支持 FPLA 开发的软件有一定的难度。

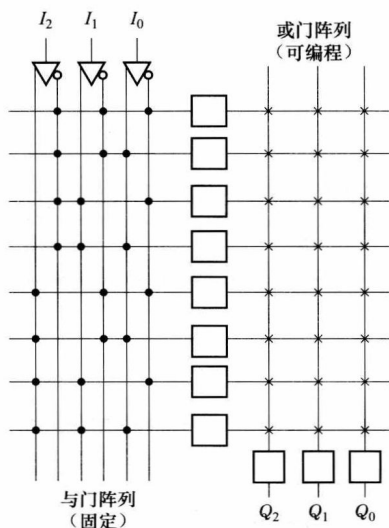


图 1-2 基本 PROM 结构

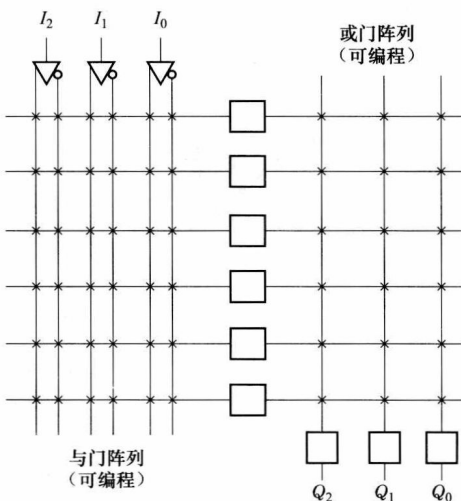


图 1-3 基本的 FPLA 结构

(2) PAL。PLA (Programmable Logic Arrays) 同时具有可编程的“与”逻辑和“或”逻辑阵列结构。如图 1-4 所示的典型结构，采用反熔丝编程方式，集成密度较低，只能完成相对简单的组合逻辑功能，进行一次性编程。为实现时序逻辑，MMI 公司开发出 PAL (Programmable Array Logic)。PAL 具有可