



# FPGA/CPLD

## 应用设计200例 (上册)

主 编 张洪润 张亚凡  
副主编 孙 悦 邓洪敏  
金美华

实用工程技术丛书

# FPGA/CPLD 应用设计 200 例 (上册)

主 编 张洪润 张亚凡  
副主编 孙 悦 邓洪敏 金美华

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书是《实用工程技术丛书》之一,是应广大科学研究人员、工程技术人员的迫切需求,参照国内外 1 000 余项 FPGA/CPLD 应用设计成果,从实用角度出发编写的。其特点是所编内容新颖、齐全,分类规范,使用方便、快捷,是一本具有实用性、启发性、信息性的综合工具书。

全书分上、下两册。上册主要介绍 FPGA/CPLD 可编程控制器在网络通信、仪器仪表、工业控制、遥感遥测、汽车工业、航天军工及家用电器等领域的典型应用设计实例;下册主要介绍产品设计开发技巧、方法与秘诀,常用设计、开发工具及软件特性,常用芯片的结构特点等内容。全书共计典型应用设计实例 287 个。

本书适用于科学研究人员、工程技术人员、维护修理人员及大专院校师生。

## 图书在版编目(CIP)数据

FPGA/CPLD 应用设计 200 例. 上册/张洪润,张亚凡主编. —北京:北京航空航天大学出版社,2009. 1

(实用工程技术丛书)

ISBN 978-7-81124-315-4

I. F… II. ①张…②张… III. 可编程序逻辑器件  
IV. TP332.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 059644 号

©2009,北京航空航天大学出版社,版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式或手段复制本书内容。

侵权必究。

## FPGA/CPLD 应用设计 200 例(上册)

主 编 张洪润 张亚凡

副主编 孙 悦 邓洪敏 金美华

责任编辑 刘晓明

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:787×1 092 1/16 印张:42 字数:1 075 千字

2009 年 1 月第 1 版 2009 年 1 月第 1 次印刷 印数:4 000 册

ISBN 978-7-81124-315-4 定价:72.00 元

# 《实用工程技术丛书》编委会

主 编 张洪润

副主编 傅瑾新 吕 泉 张亚凡 刘秀英

## 编 委

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 张洪润 | 傅瑾新 | 吕 泉 | 张亚凡 | 周肇飞 | 林大全 |
| 曾兼权 | 李德宽 | 吉世印 | 肖戈达 | 刘国衡 | 王广照 |
| 金伟萍 | 林焦贤 | 傅松如 | 蓝清华 | 周立锋 | 赵荣生 |
| 金有仙 | 张洪凯 | 傅琅新 | 傅琲新 | 傅伟新 | 龙太昌 |
| 易佑华 | 文登明 | 杨指南 | 张洪载 | 程新路 | 张 宇 |
| 吴国仪 | 吴守辉 | 孙 悦 | 王恩宏 | 张洪南 | 张素华 |
| 傅 强 | 隋福金 | 隋 毅 | 傅泊如 | 傅 涛 | 范述和 |
| 刘秀英 | 马平安 | 马 昊 | 王 川 | 田维北 | 陈德斌 |
| 李正光 | 李正路 | 张 红 | 程雅荣 | 袁 平 | 梁德富 |
| 高开俊 | 盛余康 | 汪明义 | 冉 鸣 | 王德超 | 张晓东 |
| 胡淑群 | 吴佳惠 | 邓洪敏 | 毛光灿 | 金美华 |     |

# 序 言

随着科学技术的不断发展,世界正面临一场规模宏大的新工业革命(又称信息革命)。特别是我国加入 WTO(世界贸易组织)后,各行各业也都正经历着深刻的变革,此种形势下人们对信息资源的需求就显得尤其迫切。而在信息技术领域被誉为“电子技术的五官”的传感器技术和被称为“电子技术的脑”的计算机技术,又是信息采集和处理两个关键环节的基本技术,所以显得尤其重要。

目前,电子技术、传感技术、计算机技术(包括单片机、计算机技术)已成为 21 世纪最常用、最基础、最实用的技术,而在我国信息技术领域,传感器和单片机应用技术担任了重要角色。从某种意义上来说,这也是衡量一个国家科学技术进步的一个基准。放眼现阶段信息技术类工具书市场,能满足广大科技人员迫切需要的工程技术类书籍相当缺乏,并且很多已有书籍也很难谈得上系统、全面与实用兼具,而这恰恰是广大科研与工程技术人员最迫切需要的。

为此,我们特地组织了大量有丰富教学经验与科研经验的专家、教授,参照国内外 1000 余项研究成果、数千种传感器及应用技术,基于“能够解决科研难题、实际工程问题”的思想,耗时 13 年精心编写了一套《实用工程技术丛书》,希望能够为广大信息技术类从业人员提供一套全面、实用、权威的专业丛书。

目前该丛书包括以下 5 本:

- 《传感器技术大全》;
- 《传感器应用电路 200 例》;
- 《单片机应用设计 200 例》;
- 《传感器应用设计 300 例》;
- 《FPGA/CPLD 应用设计 200 例》。

《传感器技术大全》一书,是根据现代电子技术、信息技术、计算机技术发展的最新趋势以及广大科学研究人员、工程技术人员的迫切需要,参考国内外 1 000 余项传感器及其技术成果,从实用角度出发编写的具有实用性、启发性、信息性的大型工具书。书中介绍了传感器常用术语、材料、信号分析、精确评定和检验标定方法,以及光电、光纤、光栅、CCD、红外、颜色、激光、码盘、压电、压磁、压阻、电化学、生物、气敏、湿敏、热敏、核辐射、陀螺、超声、电容、电感、变压器、同步器、逆电、霍尔、磁敏、磁栅、涡流、谐振、电位器、电阻应变、半导体、新型特种传感器等数百种实物外形、特性、工作原理、选用方法和使用技巧。本书适用于各个领域从事自动控制的选件人员以及科研、生产、设计、开发、计算机应用、管理、维修等部门的有关工程技术人员,也可作为高等院校师生的教学参考书。

《传感器应用电路 200 例》一书,在参照了国内外 1 000 余种现代传感器电路的基础上,为使用方便,从实用角度归纳为传感器常用电桥电路(15 种)、放大电路(20 种)、功率驱动电路、二极管及相敏电路、调制解调电路、检波器电路、限幅器电路、继电器电路、可控硅开关电路、电源电路(10 种)、滤波器电路(10 种)、信号转换电路(10 种)、专用集成电路(10 种)、接口电路

(18种)、抗干扰电路(20种)、特种信号检测电路(10种)、非线性化电路(18种)以及其他电路等200余例。本书特别适合于科学研究人员、工程技术人员在工程设计开发时选择、使用。

《单片机应用设计200例》一书,也参照了国内外1000余项研究成果,基于使用方便与实用的思想,归纳为单片机在网络通信、家用电器、工业控制、仪器仪表方面的应用设计实例,以及单片机程序设计技巧、产品开发技巧与秘诀等240余个实例。本书特别适合于科学研究人员、工程技术人员、维护修理人员以及大专院校师生在设计、开发、应用单片机以解决现代科研和生产中的许多实际问题时参考、借鉴。

《传感器应用设计300例》一书,主要介绍了近300个传感器的应用实例,以及传感器在机器人、飞行器、遥感技术、汽车工业、过程工业控制、信息系统、环境污染和公害检测、医学领域、节能系统中的应用;为方便使用,还介绍了传感器与计算机的接口、传感器选用指南(含传感器型号、性能参数、生产厂家)以及厂商名录。本书特别适合于科学研究人员、工程技术人员、维护修理人员以及大专院校师生在设计、开发、应用传感器,解决现代科研和生产中的许多实际问题时参考、借鉴。

《FPGA/CPLD应用设计200例》一书,是应广大科学研究人员、工程技术人员迫切需求,参照国内外1000余项FPGA/CPLD应用设计成果,从实用角度出发编写的。其特点是所编内容新颖、齐全,分类规范,使用方便、快捷,是一本具有实用性、启发性、信息性的综合工具书。其内容包括FPGA/CPLD可编程控制器在网络通信、仪器仪表、工业控制、遥感遥测、汽车工业、航天军工、家用电器等领域的典型应用设计实例,以及产品设计开发技巧、方法与秘诀,常用设计、开发工具及软件特性,常用芯片的结构特点等。全书共计典型应用设计实例287个,可供科学研究人员、工程技术人员、维护修理人员及大专院校师生在解决现代科研和生产中的许多实际问题时参考、借鉴。

本套《实用工程技术丛书》具有以下特点:

- 内容新颖,分类规范,使用方便、快捷;
- 结构严谨,系统全面,语言精炼;
- 深入浅出,通俗易懂,图文并茂,注重理论与实践的紧密结合;
- 详尽介绍了其他书籍中涉及不到的技术细节、技术关键,实用性强。

鉴于此,本套丛书的应用范围相当广泛,不仅可供科学研究人员、工程技术人员在解决现代生产和科研中的实际问题时参考与借鉴,还可以作为维护修理人员以及大专院校高年级本科生、研究生、再教育培训班中相关专业(电子技术、电子信息、仪器仪表、应用物理、机械制造、测控计量、工业自动化、自动控制、生物医学、微电子、机电一体化和计算机应用等专业)的教学参考书,同时也可以充当信息技术爱好者自学时的重要工具书。

本套丛书在编写过程中,得到了众多高等院校、科学研究单位、厂矿企业和公司的鼎力支持;特别是北京航空航天大学出版社,对本套图书的出版给予了大力支持和帮助,我们借此一并表示最衷心的感谢!

鉴于本套丛书涉及的知识面相当广,而编者水平有限,书中难免存在不足和失误之处,敬请广大读者批评、斧正。

《实用工程技术丛书》编委会

2007年12月

# 前言

---

21 世纪,电子技术迅猛发展,高新技术日新月异。传统的设计方法正逐步退出历史舞台,取而代之的是基于 EDA 技术的芯片设计技术,它正在成为电子系统设计的主流。大规模可编程器件现场可编程门阵列 FPGA(Field Programmable Gate Array)和复杂可编程逻辑器件 CPLD(Complex Programmable Logic Device)是当今应用最广泛的两类可编程专用集成电路(ASIC)。其性能好、可靠性高、容量大、体积小、微功耗、速度快、使用灵活、设计周期短、开发成本低,静态可重复编程、动态在系统重构、硬件功能可以像软件一样通过编程来修改,极大地提高了电子系统设计的灵活性和通用性。电子工程师和科学研究人员利用该类器件可以在办公室或实验室设计出所需要的专用集成电路,大大缩短产品的研发周期和降低成本。近年来,可编程逻辑器件的开发生产和销售规模以惊人的速度增长,且广泛地应用于航空航天、网络通信、军用雷达、仪器仪表、工业控制、医用 CT、家用电器、手机和计算机等各个领域。它的广泛应用,使传统的设计方法正在进行一场巨大的变革。

随着 FPGA/CPLD 的空前发展和广泛应用,人们渴望掌握这方面的知识,特别是掌握应用设计方面知识的要求愈来愈迫切。虽然目前已有不少 FPGA、CPLD 方面的书籍,但系统、全面地介绍 FPGA/CPLD 应用设计方面的书籍比较少见。为此,我们组织了多名在教学、科研、生产实践方面有丰富经验的教授、专家,适应现代电子技术、信息技术、计算机技术的最新发展趋势,根据广大科学研究人员、工程技术人员、维护修理人员和高等院校师生的要求,参照国内外 1 000 余项应用设计成果以及大量文献资料,从实用角度出发,编写了这本《FPGA/CPLD 应用设计 200 例》。

全书共 4 篇,分上、下册。上册包括 1 篇。第 1 篇介绍 FPGA/CPLD 在快速傅里叶变换、数字式存储示波器、汽车灯控、数字钟、信号发生器、秒表、密码锁、电压表、交通灯控制、无线电通信、频率计、流水灯、步进电机、抢答器、电压检测、序列检测、异步通信、键盘、倍频、分频、门电路、译码器、计数器、放大器、滤波器、比较器、移位寄存器、环形编码器、乘法器、加法器、ADC、DAC、3DES、洗衣机、电梯控制、音乐演奏、电子游戏、光通信、雷达、遥测和全球定位收发通信等 122 个典型应用设计实例。下册包括 3 篇。第 2 篇介绍 FPGA/CPLD 产品设计、开发中常遇到的一些特殊问题。主要内容有选件、方案确立、系统设计、开发系统(实验板)、EDA 技术、低功耗设计、重构、多级逻辑、程序综合、消除毛刺、阻塞赋值、信号分

类、同步、状态机、存储器、比较器、选择器、总线、滤波器、门电路、时序逻辑、组合逻辑、译码器、优化、扩展变换、调用、调试、仿真、下载、配置以及应用设计经验(23点)等107个实际问题的处理技巧与方法。第3篇介绍FPGA/CPLD常用工具及软件的特点、使用方法与技巧。主要内容有FPGA开发环境、EDA设计工具、实验、平台、输入管理软件、逻辑综合软件、仿真软件、Verilog HDL语言、VHDL语言以及常用电路描述技巧(29种)等40余个实例。第4篇介绍FPGA/CPLD常用芯片的结构原理、特性参数、使用方法及注意事项。主要内容包括Xilinx系列CPLD、Altera系列CPLD、FPGA器件、ispXPGA器件、ispXPLD器件、ispGDS器件、ispGDX/V器件、ispLSI系列以及FPGA/CPLD器件的配置、编程与通用下载等18个实例(即产品品类特点)。全书共计287个实例供读者参考、借鉴。

本书内容新颖、全面,分类规范,使用方便、快捷,融实用性、启发性、信息性于一体,除可供科学研究人员、工程技术人员在设计开发解决现代生产和科研中的许多实际问题时参考、借鉴外,还可作为维护修理人员的参考用书,也可作为相关专业的大学本科高年级学生、研究生、再教育培训班等的辅助教材或信息技术爱好者的自学用书。

在本书编写过程中,曾得到美国人工智能学会(AAAI)成员、中国人工智能学会理事、四川大学刘国衡教授,原成都科技大学副校长、中国高等院校校办产业协会副理事长、四川省生产力促进会副秘书长、西南地区高校应用物理协会主任、近代光学专家李德宽教授,应用物理系唐臻宇、耿海翔老师,以及众多高等院校、科学研究单位、厂矿企业、集团公司等的大力支持和帮助,特别是北京航空航天大学出版社的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

本书由张洪润、张亚凡任主编,孙悦、邓洪敏、金美华任副主编,并负责全书的统稿和审校。参加编写的人员有:张洪润、邓洪敏、张亚凡、傅瑾新、金美华、李德宽、林大全、刘国衡、傅松如、蓝清华、文登明、龙太昌、杨指南、刘秀英、陈晨、马昊、傅昱强、吕泉、隋福金、隋毅、田维北、孙悦、金伟萍、吴佳惠、张晓东、胡淑群、张恒汝、易涛、刘艳、张洪凯和程雅荣等。

由于编者的水平和经验有限,书中难免存在不足和差错之处,敬请广大读者批评指正。

主编 张洪润

2008年1月

# 上册

## 第 1 篇 FPGA/CPLD 典型应用设计实例

|      |                                 |     |
|------|---------------------------------|-----|
| 1.1  | FFT(快速傅里叶变换)的 FPGA 设计与实现 .....  | 2   |
| 1.2  | 数字式存储示波器 .....                  | 8   |
| 1.3  | 汽车尾灯控制电路设计 .....                | 23  |
| 1.4  | 数字钟电路设计 .....                   | 33  |
| 1.5  | 数字调制(FSK)信号发生器 .....            | 42  |
| 1.6  | 电子数字闹钟 .....                    | 45  |
| 1.7  | 函数发生器设计 .....                   | 52  |
| 1.8  | 伪随机序列发生器 .....                  | 55  |
| 1.9  | 多功能点阵牌电路设计 .....                | 57  |
| 1.10 | 光通信 PDH 的标准伪随机图案发生器设计 .....     | 62  |
| 1.11 | 数字秒表 .....                      | 81  |
| 1.12 | 电子密码锁 .....                     | 89  |
| 1.13 | 数字电压表 .....                     | 95  |
| 1.14 | 自动交通控制系统 .....                  | 101 |
| 1.15 | 交通信号灯控制器 .....                  | 109 |
| 1.16 | 交通控制灯逻辑电路系统设计 .....             | 114 |
| 1.17 | 十字路口交通管理信号灯系统设计 .....           | 118 |
| 1.18 | 交通灯控制程序设计 .....                 | 122 |
| 1.19 | 交通灯电路设计 .....                   | 127 |
| 1.20 | 无线通信中的全数字调制器设计 .....            | 132 |
| 1.21 | 无线通信中的全数字解调器设计 .....            | 154 |
| 1.22 | 采用 VHDL 语言设计的数字频率计 .....        | 175 |
| 1.23 | 数字显示频率计 .....                   | 179 |
| 1.24 | 简易数字频率计设计 .....                 | 185 |
| 1.25 | 4 位数字频率计 .....                  | 192 |
| 1.26 | 采用 Verilog HDL 语言设计的频率计 .....   | 198 |
| 1.27 | 简易频率计电路设计 .....                 | 202 |
| 1.28 | 简易频率计设计 .....                   | 207 |
| 1.29 | 电子数字钟 .....                     | 212 |
| 1.30 | 采用 Verilog HDL 语言设计的电子数字钟 ..... | 217 |
| 1.31 | 采用 VHDL 语言设计的电子数字钟 .....        | 222 |
| 1.32 | 电子时钟电路设计 .....                  | 227 |
| 1.33 | 计时器 .....                       | 230 |
| 1.34 | 波形发生器电路设计 .....                 | 236 |
| 1.35 | LED 数码管动态显示设计 .....             | 242 |

|      |                                   |     |
|------|-----------------------------------|-----|
| 1.36 | 流水灯电路设计                           | 244 |
| 1.37 | 直流步进电机控制电路设计                      | 249 |
| 1.38 | ADC 电压测量电路设计                      | 252 |
| 1.39 | 简易电子钟设计                           | 256 |
| 1.40 | 数字抢答器                             | 259 |
| 1.41 | 序列检测器                             | 262 |
| 1.42 | UART 通用异步串行口设计                    | 267 |
| 1.43 | 简易周期信号测试仪                         | 290 |
| 1.44 | 序列信号发生器                           | 293 |
| 1.45 | 通信、雷达和遥测用序列检测器的设计                 | 296 |
| 1.46 | 数字密码锁                             | 300 |
| 1.47 | 伪随机序列信号发生器设计                      | 302 |
| 1.48 | FIFO 存储器的 VHDL 描述                 | 304 |
| 1.49 | 采用 Verilog HDL 语言设计的 UART 通用异步收发器 | 306 |
| 1.50 | 倍频电路                              | 319 |
| 1.51 | 双向数据转换器                           | 323 |
| 1.52 | 键盘电路                              | 325 |
| 1.53 | 数码 LED 显示器                        | 329 |
| 1.54 | 多位加法器电路                           | 338 |
| 1.55 | 6 位数码管动态扫描及译码电路                   | 340 |
| 1.56 | 非 2 的幂次分频电路                       | 343 |
| 1.57 | 非整数分频电路                           | 354 |
| 1.58 | 常用电路的 VHDL 描述                     | 357 |
| 1.59 | 同步一百进制计数器的设计                      | 359 |
| 1.60 | 门电路设计                             | 362 |
| 1.61 | 时序电路设计                            | 365 |
| 1.62 | 组合逻辑电路设计                          | 369 |
| 1.63 | 频率合成技术——基于 FPGA 的直接数字合成器(DDS)设计   | 374 |
| 1.64 | 串行通信 MAX232 接口电路设计                | 382 |
| 1.65 | 2 的幂次分频电路                         | 391 |
| 1.66 | 环形计数器与扭环形计数器                      | 395 |
| 1.67 | 8 位可逆计数器和三角波发生器                   | 398 |
| 1.68 | 并/串转换器                            | 401 |
| 1.69 | 4 选 1 数据选择器                       | 404 |
| 1.70 | 4 位二进制数/8421BCD 码                 | 406 |
| 1.71 | 移位寄存器设计                           | 408 |
| 1.72 | 三进制计数器设计                          | 411 |
| 1.73 | 移位型控制器的设计与实现                      | 413 |
| 1.74 | 存储器接口电路设计                         | 416 |
| 1.75 | 4 位加法器设计                          | 418 |

|       |                                      |     |
|-------|--------------------------------------|-----|
| 1.76  | 乘法器设计                                | 420 |
| 1.77  | 译码器设计                                | 422 |
| 1.78  | 可变模计数器设计                             | 425 |
| 1.79  | 整数增益放大器设计与测试                         | 428 |
| 1.80  | 滤波器的设计与测试                            | 430 |
| 1.81  | 比较器的设计与测试                            | 432 |
| 1.82  | 带阻有源滤波器设计                            | 433 |
| 1.83  | 线性反馈移位寄存器 LFSR 的 FPGA 设计与实现          | 435 |
| 1.84  | 线性分析、循环码编码译码器的 FPGA 设计与实现            | 441 |
| 1.85  | 数据传输与 I/O 接口标准                       | 447 |
| 1.86  | 异步收发器                                | 450 |
| 1.87  | 有限脉冲响应(FIR)数字滤波器的 FPGA 设计与实现         | 456 |
| 1.88  | 逐次逼近型 ADC                            | 462 |
| 1.89  | 乘法器的 FPGA 设计与实现                      | 466 |
| 1.90  | 总线仲裁电路的设计                            | 471 |
| 1.91  | ALU(算术逻辑部件)设计                        | 475 |
| 1.92  | 脉冲分配器设计                              | 478 |
| 1.93  | 二进制码/格雷码的转换                          | 480 |
| 1.94  | 直接序列扩频通信系统设计                         | 485 |
| 1.95  | 并/串转换模块设计                            | 515 |
| 1.96  | 移位相加模块设计                             | 517 |
| 1.97  | 时延环节模块设计                             | 519 |
| 1.98  | 多波形发生器设计                             | 521 |
| 1.99  | 三位乘法器设计                              | 523 |
| 1.100 | 小信号测量系统                              | 525 |
| 1.101 | 单片电路设计                               | 532 |
| 1.102 | 简易数字锁                                | 537 |
| 1.103 | 交通灯控制器                               | 541 |
| 1.104 | 闪烁灯和流水灯设计与仿真                         | 546 |
| 1.105 | 3DES 算法的 FPGA 实现及其在 3DES-PCI 安全卡中的应用 | 550 |
| 1.106 | 边界扫描测试                               | 578 |
| 1.107 | 交通信号灯                                | 595 |
| 1.108 | 交通灯监视电路设计                            | 598 |
| 1.109 | 汉字显示                                 | 600 |
| 1.110 | 汉字显示电路设计                             | 603 |
| 1.111 | 洗衣机控制电路设计                            | 606 |
| 1.112 | 篮球 30 s 可控计时器设计                      | 613 |
| 1.113 | 悦耳的音响设计                              | 615 |
| 1.114 | 乐曲演奏电路设计                             | 620 |
| 1.115 | 多音阶电子琴电路设计                           | 626 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 1.116 | 《友谊地久天长》乐曲演奏电路设计 ..... | 629 |
| 1.117 | 软件无线电内插滤波器设计 .....     | 634 |
| 1.118 | 量程自动转换的数字式频率计 .....    | 647 |
| 1.119 | 游戏电路设计 .....           | 648 |
| 1.120 | 全自动电梯控制电路 .....        | 650 |
| 1.121 | 8位二进制乘法电路 .....        | 651 |
| 1.122 | 自动售邮票机 .....           | 653 |
|       | 参考文献 .....             | 655 |

## 下 册

### 第2篇 FPGA/CPLD 产品设计、开发技巧与秘诀

|      |                                  |     |
|------|----------------------------------|-----|
| 2.1  | 如何根据项目选择器件 .....                 | 2   |
| 2.2  | 可编程器件的选择原则 .....                 | 3   |
| 2.3  | 确定初步方案的方法与技巧 .....               | 6   |
| 2.4  | 基于可编程逻辑器件的数字系统的设计流程 .....        | 9   |
| 2.5  | 掌握常用 FPGA/CPLD .....             | 11  |
| 2.6  | EDA 技术的基本设计方法 .....              | 16  |
| 2.7  | 数字系统设计中的低功耗设计方法 .....            | 19  |
| 2.8  | 动态可编程重构技术 .....                  | 21  |
| 2.9  | 多级逻辑的设计技巧 .....                  | 25  |
| 2.10 | Verilog HDL 设计方法与技巧 .....        | 29  |
| 2.11 | FPGA 设计的稳定性探讨 .....              | 41  |
| 2.12 | 同步电路设计技巧 .....                   | 50  |
| 2.13 | 图形设计法的实用技术 .....                 | 58  |
| 2.14 | 状态机设计技巧 .....                    | 64  |
| 2.15 | 存储器的 VHDL 实现方法与技巧 .....          | 94  |
| 2.16 | 存储器设计典型实例 .....                  | 103 |
| 2.17 | 只读存储器 .....                      | 109 |
| 2.18 | 比较器 .....                        | 111 |
| 2.19 | 多路选择器 .....                      | 113 |
| 2.20 | 三态总线 .....                       | 116 |
| 2.21 | m 序列的产生和性质 .....                 | 117 |
| 2.22 | 对具体某一信号的连续存储 .....               | 120 |
| 2.23 | 典型的时序逻辑电路分析与描述 .....             | 121 |
| 2.24 | 用 Verilog HDL 的时序逻辑电路设计 .....    | 131 |
| 2.25 | 时序逻辑电路的设计方法与技巧 .....             | 136 |
| 2.26 | FPGA/CPLD 的设计和优化 .....           | 151 |
| 2.27 | CPLD 典型器件 ispPAC20 的扩展应用技巧 ..... | 166 |

|      |                                           |     |
|------|-------------------------------------------|-----|
| 2.28 | CPLD 典型器件 ispPAC 的基本应用技巧 .....            | 173 |
| 2.29 | Verilog HDL 设计组合逻辑电路技巧 .....              | 188 |
| 2.30 | VHDL 设计组合逻辑电路技巧 .....                     | 193 |
| 2.31 | LED 七段译码器的分析与设计 .....                     | 198 |
| 2.32 | 电路的仿真技巧 .....                             | 200 |
| 2.33 | 宏器件及其调用 .....                             | 213 |
| 2.34 | ispPAC 的增益调整方法 .....                      | 215 |
| 2.35 | 数字系统的描述方法 .....                           | 219 |
| 2.36 | FPGA 系统设计与调试技巧 .....                      | 224 |
| 2.37 | 典型的下载/配置方式 .....                          | 239 |
| 2.38 | Xilinx 器件的下载 .....                        | 259 |
| 2.39 | ByteBlaster 并口下载电缆 .....                  | 265 |
| 2.40 | 单个 FLEX 系列器件的 PS 配置(下载电缆连接与下载操作) .....    | 268 |
| 2.41 | 多个 FLEX 器件的 PS 配置(下载电路连接与下载操作) .....      | 270 |
| 2.42 | 单个 MAX 器件的 JTAG 方式编程(POF 文件连接与编程) .....   | 271 |
| 2.43 | 单个 FLEX 器件的 JTAG 方式配置(SOF 文件连接与编程) .....  | 272 |
| 2.44 | 多个 MAX/FLEX 器件的 JTAG 方式编程/配置(连接与编程) ..... | 273 |
| 2.45 | 主动串行与被动串行配置模式 .....                       | 274 |
| 2.46 | 门禁系统设计技巧 .....                            | 279 |
| 2.47 | 两种实际应用的计数器电路设计 .....                      | 282 |
| 2.48 | 常用触发器及其应用设计技巧 .....                       | 285 |
| 2.49 | 加法器设计 .....                               | 294 |
| 2.50 | ispPAC 的接口电路设计 .....                      | 297 |
| 2.51 | 编程接口和编程——ISP 方式和 JTAG 方式 .....            | 301 |
| 2.52 | 利用 Verilog HDL 设计状态机的技巧 .....             | 304 |
| 2.53 | 系统级层次式设计 .....                            | 310 |
| 2.54 | 边界扫描测试技术 .....                            | 311 |
| 2.55 | 在系统下载电缆与评估板 .....                         | 314 |
| 2.56 | 用 CPLD 和单片机设计电子系统 .....                   | 316 |
| 2.57 | 怎样优化程序 .....                              | 318 |
| 2.58 | 怎样才能避免潜在的危险 .....                         | 327 |
| 2.59 | 毛刺的产生及其消除技巧 .....                         | 330 |
| 2.60 | 计数器设计与 FPGA 资源 .....                      | 332 |
| 2.61 | 组合逻辑电路的竞争冒险及其消除技巧 .....                   | 333 |
| 2.62 | 选择器设计和 FPGA 资源 .....                      | 338 |
| 2.63 | 基于 FPGA/CPLD 应用设计的 23 点经验总结 .....         | 339 |

### 第 3 篇 FPGA/CPLD 常用工具及软件特性

|     |                     |     |
|-----|---------------------|-----|
| 3.1 | 常用的 FPGA 开发工具 ..... | 348 |
| 3.2 | 常用 EDA 设计工具 .....   | 351 |

|                                      |                                          |     |
|--------------------------------------|------------------------------------------|-----|
| 3.3                                  | FPGA/CPLD 数字逻辑实验平台 .....                 | 355 |
| 3.4                                  | 软件资源 .....                               | 357 |
| 3.5                                  | 典型常用的 Verilog HDL 语言(应用设计举例) .....       | 360 |
| 3.6                                  | Verilog HDL 的一般结构 .....                  | 400 |
| 3.7                                  | 19 种常用电路的 Verilog HDL 描述 .....           | 406 |
| 3.8                                  | 典型常用的 VHDL 语言(应用设计举例) .....              | 467 |
| 3.9                                  | 10 种常用电路的 VHDL 描述 .....                  | 486 |
| <br><b>第 4 篇 FPGA/CPLD 常用芯片结构及特点</b> |                                          |     |
| 4.1                                  | FPGA 和 CPLD 的结构性能对照 .....                | 498 |
| 4.2                                  | FPGA/CPLD 的基本结构和原理 .....                 | 500 |
| 4.3                                  | Xilinx 系列 CPLD .....                     | 515 |
| 4.4                                  | Altera 系列 CPLD .....                     | 522 |
| 4.5                                  | 现场可编程系统芯片 FPSC .....                     | 529 |
| 4.6                                  | 无限可重构可编程门阵列 ispXPGA .....                | 535 |
| 4.7                                  | ispXPLD 器件 .....                         | 538 |
| 4.8                                  | 在系统可编程通用数字开关 ispGDS 和互连器件 ispGDX/V ..... | 541 |
| 4.9                                  | 在系统可编程模拟器件的原理 .....                      | 546 |
| 4.10                                 | 各种在系统可编程模拟器件的结构 .....                    | 552 |
| 4.11                                 | ispLSI 系列器件的性能参数 .....                   | 560 |
| 4.12                                 | ispLSI 系列器件的主要技术特性 .....                 | 562 |
| 4.13                                 | ispLSI 系列器件的编程方法 .....                   | 564 |
| 4.14                                 | 成熟器件与新型器件 .....                          | 570 |
| 4.15                                 | FPGA/CPLD 器件的编程 .....                    | 571 |
| <br>                                 |                                          |     |
| 附录 1                                 | 现场可编程逻辑器件主流产品一览 .....                    | 591 |
| 附录 2                                 | 各种器件的下载电路(在系统可编程 ispJTAG™ 芯片设计指导) .....  | 604 |
| 附录 3                                 | Lattice 系统宏(器件库) .....                   | 608 |
| 附录 4                                 | 国内外常用二进制逻辑元件图形符号对照表 .....                | 628 |
| 附录 5                                 | 世界著名的 FPGA 厂商及商标符号 .....                 | 630 |
| 附录 6                                 | 实验开发板电路原理图 .....                         | 632 |
| 附录 7                                 | 常用 FPGA 的端口资源 .....                      | 636 |
| 附录 8                                 | 两种 CPLD 实验仪器面板图及电路图 .....                | 641 |
| 附录 9                                 | CPLD 主要器件引脚图 .....                       | 647 |
| 附录 10                                | 缩略语词汇表 .....                             | 655 |
| 参考文献                                 | .....                                    | 658 |

# 第 1 篇    FPGA/CPLD

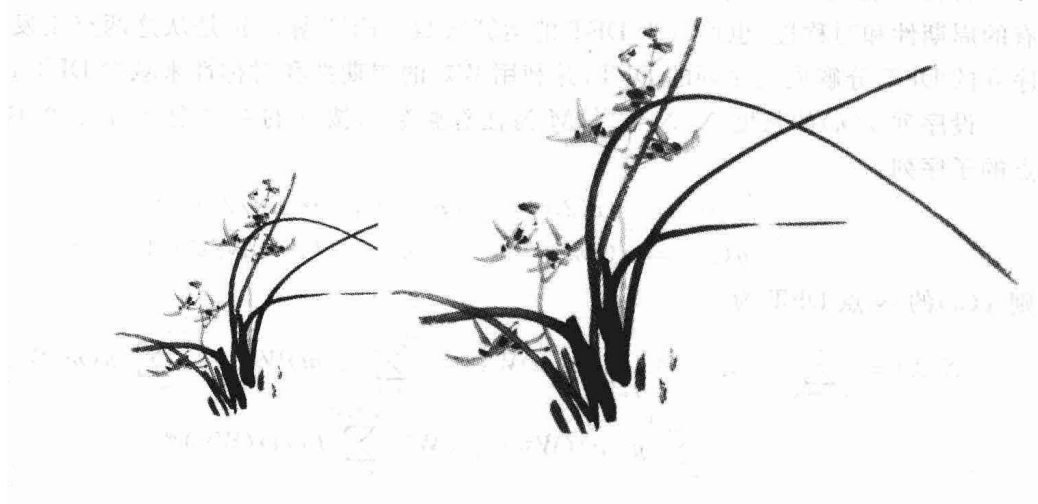
## 典型应用设计实例

- 图 形
- 程 序
- 设计技巧
- 方 法

---

本篇介绍 FPGA/CPLD 在快速傅里叶变换、数字式存储示波器、汽车灯控、数字钟、信号发生器、秒表、密码锁、电压表、交通灯控制、无线电通信、频率计、流水灯、步进电机、抢答器、电压检测、序列检测、异步通信、键盘、倍频、分频、门电路、译码器、计数器、放大器、滤波器、比较器、移位寄存器、环形编码器、乘法器、加法器、ADC、DAC、3DES、洗衣机、电梯控制、音乐演奏、电子游戏、光通信、雷达、遥测和全球定位收发通信等 122 个典型设计实例中的应用,供读者借鉴、参考。

---



# 1. 1

## FFT(快速傅里叶变换)的 FPGA 设计与实现

在信号分析和信号处理领域,离散傅里叶变换(DFT)是一种重要的运算。但由于直接计算 DFT 的计算量与变换区间长度  $N$  的平方成正比,当  $N$  较大时,计算量太大,因此实际系统中大量使用的是快速傅里叶变换(FFT)。FFT 是实现 DFT 的一种快速方法。它的算法形式很多,但基本上可以分成两大类:时间抽取 FFT 和频率抽取 FFT。下面主要以时间抽取 FFT 为例说明利用 VHDL 实现 FFT 的方法。

### 1.1.1 FFT 的原理

#### 1. 算法原理

长度为  $N$  的有限序列  $x(n)$  的 DFT 为

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{kn} \quad (k = 0, 1, \dots, N-1)$$

其中

$$W_N^{kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$$

若将  $N$  点的 DFT 分解为几个较短的 DFT,可使乘法数减少;同时利用旋转因子  $W_N^{kn}$  具有的周期性和对称性,也可减少 DFT 的运算次数。FFT 算法正是从这两点出发,不断地把长序列的 DFT 分解成短序列的 DFT,并利用  $W_N^{kn}$  的周期性和对称性来减少 DFT 运算次数的。

设序列  $x(n)$  的长度  $N(N=2^M, M$  为任意整数),按  $n$  的奇偶把  $x(n)$  分解成为两个  $N/2$  点的子序列:

$$g(m) = x(2m) \quad (m = 0, 1, \dots, N/2 - 1)$$

$$h(m) = x(2m+1) \quad (m = 0, 1, \dots, N/2 - 1)$$

则  $x(n)$  的  $N$  点 DFT 为

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{n=\text{偶数}} x(n) W_N^{kn} + \sum_{n=\text{奇数}} x(n) W_N^{kn} = \sum_{m=0}^{(N/2)-1} g(m) W_N^{2mk} + \sum_{m=0}^{(N/2)-1} h(m) W_N^{(2m+1)k} = \\ &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} g(m) (W_N^2)^{mk} + W_N^k \sum_{m=0}^{(N/2)-1} h(m) (W_N^2)^{mk} \end{aligned}$$

由于

$$W_N^{2mk} = e^{-j\frac{2\pi}{N/2}mk} = e^{-j\frac{2\pi}{N}mk} = W_{N/2}^{mk}$$

所以

$$X(k) = \sum_{m=0}^{(N/2)-1} g(m)W_{N/2}^{mk} + W_N^k \sum_{m=0}^{(N/2)-1} h(m)W_{N/2}^{mk} = G(k) + W_N^k H(k) \quad (k = 0, 1, \dots, N-1)$$

其中,  $G(k)$  和  $H(k)$  分别为  $g(m)$  和  $h(m)$  的  $N/2$  点 DFT, 表达式如下:

$$G(k) = \sum_{m=0}^{(N/2)-1} g(m)W_{N/2}^{mk} = \text{DFT}[g(m)]$$

$$H(k) = \sum_{m=0}^{(N/2)-1} h(m)W_{N/2}^{mk} = \text{DFT}[h(m)]$$

由于式中  $G(k)$ ,  $H(k)$  均以  $N/2$  为周期, 考虑到对称性, 有  $W_N^{k+N/2} = -W_N^k$ ,  $X(k)$  就可表达为

$$X(k) = G(k) + W_N^k H(k) \quad (k = 0, 1, \dots, N/2 - 1) \quad (1-1)$$

$$X(k + N/2) = G(k) - W_N^k H(k) \quad (k = 0, 1, \dots, N/2 - 1) \quad (1-2)$$

这样就将  $N$  点的 DFT 分解为两个  $N/2$  点的 DFT 以及上面两式的运算, 这种运算可用如图 1-1 所示的流图表示, 称为蝶形运算符号。

按照这种分解运算的思想, 将  $G(k)$  和  $H(k)$  继续向下分解, 直到最后变为一组 2 点 DFT 运算的组合。这样, 一个 8 点的 FFT 就可完全采用蝶形运算来完成, 如图 1-2 所示。

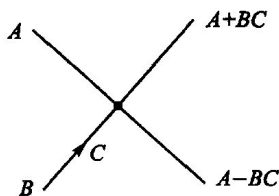


图 1-1 蝶形运算符号

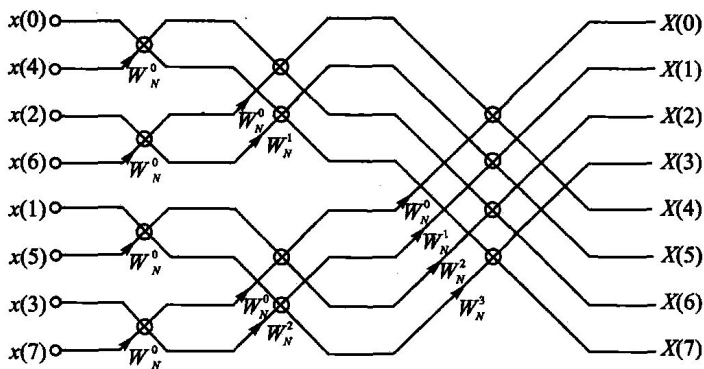


图 1-2 8点FFT蝶形运算示意图

## 2. 电路构成原理

由以上分析可知, FFT 算法中最核心的是蝶形运算单元。因此要实现 FFT 算法电路, 首先要设计蝶形运算单元模块, 然后通过利用蝶形模块来实现 FFT。下面介绍蝶形运算单元的电路构成原理。

### (1) 蝶形模块的 I/O 端口

在蝶形运算单元中, 有

$$W_N^{kn} = \cos \frac{2\pi}{N}kn + j \sin \frac{2\pi}{N}kn \quad (1-3)$$

即图 1-1 中的  $C$  为复数, 且它的实部和虚部均为小数。而在 FPGA 的设计中, 由于输入、输出均为固定数目的引脚, 操作数一般采用整数数来表示, 所以必须首先通过数的定标, 用整形