



手把手教你学系列丛书

陈泰红 刘亚侠 潘铁文 © 编著

手把手

教你学DSP

——基于TMS320C55x (第2版)



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



手把手教你学系列丛书

T129.11:72

432-2

手把手教你学 DSP ——基于 TMS320C55x (第 2 版)

陈泰红 刘亚侠 潘铁文 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以 TMS320C55x 系列高性能低功耗 DSP 为主,主要介绍了以数字信号处理器(DSP)为核心的实时数字信号处理器的硬件结构和片内外设,论述了 eXpress 算法标准软件,尤其是 CCS 的使用;详细说明了 DSP 与外围接口电路的设计以及最小系统的设计,给出了 DSP 相关软件编程和开发调试;还介绍了 MATLAB 在数字信号处理中的应用和 DSP/BIOS 的基础知识。在介绍功能模块的基础上,列出了相应的实战项目开发实例,并讲述了 DSP+FPGA 复杂系统的设计。相比第 1 版,本书增加了 3D16 光立方的设计与制作、OMAP 简介和医疗电子医用等内容。本书提供的所有电路全部可实现,所有程序在设计的实验板上均已调试通过。

本书配套资料包括:书中程序源代码、开发板电路图源文件以及常用网站地址,读者可以到北航出版社网站(www.buaapress.com.cn)的“下载专区”免费下载。

本书可以作为本科生和研究生学习 DSP 的教材,也可以作为职业学校学生、DSP 开发人员、广大电子制作爱好者的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

手把手教你学 DSP: 基于 TMS320C55x / 陈泰红, 刘亚侠, 潘铁文编著. -- 2 版. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016.1

ISBN 978-7-5124-1975-9

I. ①手… II. ①陈… ②刘… ③潘… III. ①数字信号处理②数字信号—微处理器—高等学校—教材 IV.

①TN911.72②TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 298239 号

版权所有,侵权必究。

手把手教你学 DSP——基于 TMS320C55x(第 2 版)

陈泰红 刘亚侠 潘铁文 编著

责任编辑 孙兴芳

*

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(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

北京泽宇印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:30 字数:639 千字

2016 年 1 月第 2 版 2016 年 1 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-1975-9 定价:69.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

序

送给勤奋的探索者

有幸接到作者的邀请,要我为他的新书写序,奈何这几个月来一直沉溺于凡尘俗务,竟不得一块完整时间能静下心来完成这篇序,实在令我自己汗颜。

人其实都是如此,有一种惯性和惰性存在。处于一种工作状态时间长了,对于这个状态就习惯了,了解得多,做起来也比较轻松了,所以就懒得再去改变,因为换一种工作状态又要去熟悉和努力,这就是惯性和惰性。但人处于一种状态久了,就容易固步自封,磨灭心志,而时间就这样在浑浑噩噩中虚度了。对于有志向的年轻人来讲,正确的工作方法就是过一段时间停下来看一下,把自己过去这一阶段的工作总结一下,看看自己的方向是否有错误、有偏差。方向性的错误要及时调整,小的偏差则进行微调,这样才能保证自己在走向成功的路上尽量少走弯路。而方向的确定,就需要我们做一个勤奋的探索者,不断地实践,不断地尝试,分析得失,分析自己的优点和缺点,从而找到一条最适合自己的路。

很高兴看到作者就是这样一个勤奋的探索者。作者从大学二年级开始做项目,经历研究生阶段,一直到现在工作,这些项目的开发让作者积累了丰富的实践经验,从而使得这本书更具有实战指导性,而不仅仅是枯燥的理论和文字。

TMS320C55x DSP 是德州仪器(TI)C5000 DSP 系列里的新一代产品,C55x 对 C54x 有很好的继承性,与 C54x 源代码兼容,使用户代码有很好的可移植性,从而可以减少用户在软件上的重复投资。DSP 对于一般

学习者而言,门槛显得稍微有点高,市面上关于 DSP 的书籍也不像单片机和 ARM 那么多,现在比较多的书籍还是基于早期的 TMS320C5402 DSP,而 DSP 的发展日新月异,新的工艺催生了更多功能更强大的 DSP 芯片,书籍配套显得有点跟不上发展。此书的出版可以填补这样一个缺失,使学习者多了一个实用的参考书。

作者曾主持了专门针对 TMS320VC5509A 的开发板 Easy5509 的开发工作,对于此系列芯片的开发和应用非常熟悉。本书的内容涵盖了硬件设计、软件设计、CCS 开发环境、常用算法、DSP/BIOS、工程实施等内容,并且基于 Easy5509 开发板有详尽的实验指导,可以说非常实用,是一本不可多得的 DSP 入门书籍。

勤奋,是成功者的必然态度;探索,是实践经验的积累手段。宝剑锋从磨砺出,梅花香自苦寒来。让我们做一个勤奋的探索者,在自我不断修正的过程中实现自我的价值,达到自我的成功。

开发板之家站长 涛行九天
21IC 知名版主

第2版前言

笔者读本科的时候,幸运地加入了学院科协以及学校创新实验室,接触电子设计比同级的同学较早一些。在学校里一直跟着导师做创新设计,毕业后一直从事军品和工控项目研发工作,如今从事物联网/智能硬件的开发工作。行业虽有跨度,但手艺不变,一直从事一线的电路设计研发工作。

刚开始学习 DSP 时也经历了一些痛苦的过程,书店里的书琳琅满目,但翻译资料比较多,指导入门实践的相对较少,很多书籍不能深入到工程实践中去。即使一些名气比较大的开发板公司,也只是简单地把一些例程交给用户,而没有把学习的方法、学习中一些注意的问题明明白白地说清楚,而 TI 的数据手册则更是让人晕头转向。回想自己学习电子电路的时候,幸运地得到高年级的学长热心的指点;回想刚开始学单片机的时候,关于单片机的一些书籍也比较丰富,我认为比较好的有平凡老师的《平凡单片机教程》、肖洪兵老师的《跟我学用单片机》等一些比较贴近实际的入门书籍。电子技术是一门实践性很强的科目,如果只是停留在理论上而没有深入实践,就没有深刻的印象,当然在做项目的时候也不会正确地应用。鉴于此,笔者根据自己在做项目中经常使用的一些资料制作了 Easy5509 开发板,并结合自己的研发经验编写了这本书。笔者现在从事智能硬件的开发,可穿戴设备已经不再是科幻,这种设备正在进入快速发展期,并成为移动互联网新浪潮。希望有一天能从产品设计的角度来讲一下这些时代新宠。

本书以 TMS320C55x 系列高性能低功耗 DSP 为主,主要介绍了以数字信号处理器(DSP)为核心的实时数字信号处理器的硬件结构和片内外设,论述了 eXpress 算法标准软件尤其是 CCS 的使用,详细说明了 DSP

与外围接口电路的设计以及最小系统的设计,给出了 DSP 相关软件编程和开发调试,还介绍了 MATLAB 在数字信号处理中的应用和 DSP/BIOS 的基础知识。在介绍功能模块的基础上,列出了相应的实战项目开发实例,并讲述了 DSP+FPGA 复杂系统的设计,第 2 版中增加了 3D16 光立方的设计与制作、OMAP 简介、医疗电子应用等内容。本书提供的所有电路全部可实现,所有程序在设计的实验板上均已调试通过。

笔者希望通过这本书,能让更多的初学者比较快地入门,也希望能对研发的同行们提供一些借鉴和参考。笔者精选了一些例程和工程实践项目,由浅入深,希望通过这种循序渐进的方式让更多的人受益,让 DSP 开发不再是一件痛苦的事。

在使用本书的时候,笔者建议读者要有一块自己的开发板,在本书配套资料中有所有与本书相关的程序以及开发板电路图,希望能在开发板上做一下试验,建立一个感性的认识,让学习 DSP 不再枯燥。笔者建议使用开发板之家(www.study-kit.com)提供的 Easy5509 开发板,因为本书中实例设计得以完成,此开发板功不可没。此外,TI 公司提供的参考文档是开发 DSP 必须要读的,这些文档在 CCS 安装目录里提供。面对繁杂的 TI 文档,笔者在书中论述了阅读方法和顺序,敬请读者浏览。

笔者在此推荐一个好的学习 TI DSP 的论坛:www.deyisupport.com,TI 的工程师会不定时在线解答;也有英文论坛,建议去 <http://e2e.ti.com/>,这是 TI 的大本营。学习 DSP 要会提问题,但是最基本的查找 datasheet 还是要自己解决。

感谢北京服装学院的刘亚侠老师和哈尔滨工程大学的潘铁文老师尽心尽力对本书做的修改工作。参加本书编写工作的有史厚兰、陈关龄、杨才远、杭欢欢、陈帅、吕会杰、陈静源、陈凯、何艳、陈萌萌同志,他们为本书提供了大量资料,进行了大量实验,编写验证了各个应用程序等,在此表示感谢。

本书成书过程中还得到北京航空航天大学出版社策划编辑人员的大力支持,没有他们的帮助,完成本书是不可想象的工作;在这里还要感谢所有与出版此书相关的工作人员,他们参与了编辑、校对和录入工作。感谢无名网友在网络上提供的资料,因诸多资料无法考证作者来源,如出版中涉及著作权,请联系笔者。

本书可以作为本科生和研究生学习 DSP 的教材,也可作为职业学校学生、DSP 开发人员、广大电子制作爱好者的参考书。本书配套资料包

括:书中程序源代码、开发板电路图源文件以及常用网站地址,读者可以免费索取。

由于笔者水平有限,难免会出现一些疏漏,敬请谅解,有兴趣的朋友可发送邮件到 ahong007@yeah.net 与笔者进行交流;也可发送邮件到 xdhydc5@sina.com 与本书策划编辑进行交流。

陈泰红

2015年11月于北京

目 录

| | |
|-------------------------|----|
| 第 1 章 绪 论 | 1 |
| 1.1 数字信号处理器简介 | 1 |
| 1.2 数字信号处理器的发展 | 2 |
| 1.3 DSP 处理器的性能指标及选择 | 3 |
| 1.4 DSP 系统的开发 | 5 |
| 1.4.1 DSP 系统设计开发流程 | 5 |
| 1.4.2 DSP 系统软硬件开发工具 | 5 |
| 第 2 章 TMS320C55x 的硬件结构 | 7 |
| 2.1 C55x DSP 简介 | 7 |
| 2.2 C55x 的总体结构 | 7 |
| 2.2.1 CPU 内核 | 7 |
| 2.2.2 C55x 存储空间 | 9 |
| 2.2.3 C55x 片内外设 | 9 |
| 2.2.4 C55x 低功耗特性 | 11 |
| 2.3 C55x 的封装和引脚功能 | 12 |
| 2.3.1 引脚信号定义与描述 | 14 |
| 2.3.2 存储空间与引脚设置 | 17 |
| 2.4 中断和复位操作 | 18 |
| 2.4.1 中 断 | 18 |
| 2.4.2 中断向量与优先级 | 19 |
| 2.4.3 不可屏蔽中断 | 21 |
| 2.4.4 外部中断使用举例 | 21 |
| 第 3 章 eXpressDSP 算法标准软件 | 23 |
| 3.1 CCS 集成开发环境 | 23 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 3.2 | 实时操作系统内核 DSP/BIOS | 24 |
| 3.3 | CSL 概述 | 28 |
| 3.3.1 | CSL 体系结构 | 29 |
| 3.3.2 | CSL 命名规则 | 30 |
| 3.3.3 | 通用 CSL 函数 | 31 |
| 3.3.4 | CSL 宏 | 32 |
| 3.3.5 | CSL 调用 | 34 |
| 3.4 | XDAIS 算法标准 | 34 |
| 3.5 | eXpressDSP 参考框架 | 35 |
| 3.5.1 | RF3 简述 | 36 |
| 3.5.2 | RF5 简述 | 37 |
| 3.6 | TI 官方文档资源介绍 | 41 |
| 第 4 章 | CCS 集成开发环境 | 43 |
| 4.1 | 开发与工具与开发步骤 | 43 |
| 4.1.1 | 代码的开发方法 | 43 |
| 4.1.2 | 开发工具 | 44 |
| 4.1.3 | 开发步骤 | 44 |
| 4.2 | CCS 简介 | 45 |
| 4.2.1 | CCS 版本支持 | 45 |
| 4.2.2 | CCS 基本功能 | 45 |
| 4.3 | CCS3.3 软件的安装与 USB 仿真驱动设置 | 46 |
| 4.3.1 | CCS 文件的安装 | 46 |
| 4.3.2 | CCS 文件的简单说明 | 46 |
| 4.3.3 | 目标板与驱动的安装设置 | 47 |
| 4.4 | CCS 集成开发环境 | 50 |
| 4.4.1 | CCS 集成开发环境概述 | 50 |
| 4.4.2 | DSP 程序的仿真模式 | 50 |
| 4.4.3 | CCS 菜单详解 | 51 |
| 4.5 | 建立 DSP 工程文件 | 53 |
| 4.5.1 | 创建、打开和关闭工程 | 53 |
| 4.5.2 | 编辑、编译和执行程序 | 55 |
| 4.5.3 | 调试工具 | 59 |
| 4.6 | CCS 开发中的一些问题 | 63 |
| 4.6.1 | DSP 型号和 CCS 版本之间的关系 | 63 |
| 4.6.2 | run 和 animate 的区别 | 64 |
| 4.6.3 | Probe Point 和 Break Points 的区别和联系 | 64 |

| | | |
|-------------------------------------|----------------|-----------|
| 4.6.4 | CCS 文件数据的格式 | 65 |
| 4.6.5 | CCS 调试中的一些小技巧 | 66 |
| 4.7 | 第一个实验：驱动一个 LED | 68 |
| 第 5 章 TMS320C55x 的片内外设、接口及应用 | | 74 |
| 5.1 | 时钟发生器 | 74 |
| 5.1.1 | 时钟发生器概况 | 74 |
| 5.1.2 | 时钟工作模式 | 75 |
| 5.1.3 | CLKOUT 输出 | 76 |
| 5.1.4 | 使用方法与举例 | 76 |
| 5.2 | 通用定时器 | 77 |
| 5.2.1 | 定时器概述 | 77 |
| 5.2.2 | 工作原理 | 79 |
| 5.2.3 | 定时器应用实例 | 80 |
| 5.2.4 | 通用定时器的调试 | 81 |
| 5.3 | 通用 I/O 口 | 81 |
| 5.3.1 | GPIO 概述 | 81 |
| 5.3.2 | GPIO 使用举例 | 82 |
| 5.4 | 外部存储器接口 | 82 |
| 5.4.1 | EMIF 存储器概述 | 82 |
| 5.4.2 | 对存储器的考虑 | 84 |
| 5.4.3 | 存储器接口设计 | 85 |
| 5.4.4 | EMIF 中的控制寄存器 | 89 |
| 5.4.5 | 使用举例 | 90 |
| 5.5 | 多通道缓冲串口 | 92 |
| 5.5.1 | McBSP 概述 | 92 |
| 5.5.2 | McBSP 组成框图 | 93 |
| 5.5.3 | 采样率发生器 | 94 |
| 5.5.4 | 多通道模式选择 | 95 |
| 5.5.5 | 异常处理 | 96 |
| 5.5.6 | McBSP 寄存器 | 98 |
| 5.5.7 | McBSP 使用举例 | 102 |
| 5.6 | 模/数转换器 | 104 |
| 5.6.1 | ADC 的结构和时序 | 104 |
| 5.6.2 | ADC 的寄存器 | 105 |
| 5.6.3 | ADC 实例 | 107 |
| 5.7 | 看门狗定时器 | 108 |

| | | |
|--------------|--------------------------|------------|
| 5.7.1 | 看门狗定时器概述 | 108 |
| 5.7.2 | 看门狗定时器的配置 | 109 |
| 5.7.3 | 看门狗定时器的寄存器 | 110 |
| 5.7.4 | 看门狗应用举例 | 111 |
| 5.8 | I ² C 模块 | 112 |
| 5.8.1 | I ² C 模块工作原理 | 113 |
| 5.8.2 | I ² C 寄存器 | 116 |
| 5.8.3 | I ² C 程序使用举例 | 117 |
| 5.9 | USB 模块 | 119 |
| 5.9.1 | USB 协议简介 | 119 |
| 5.9.2 | VC5509A USB 的硬件资源 | 119 |
| 5.9.3 | USB 时钟发生器 | 122 |
| 5.9.4 | VC5509A USB 的总线连接与中断 | 122 |
| 5.9.5 | USB CSL 模块简介 | 124 |
| 5.9.6 | USB 模块的编程实现 | 125 |
| 第 6 章 | DSP 系统的硬件设计 | 128 |
| 6.1 | DSP 电源的选择与设计 | 129 |
| 6.1.1 | 电源加电顺序 | 131 |
| 6.1.2 | 电源检测与复位 | 132 |
| 6.1.3 | 复位电路设计 | 132 |
| 6.2 | JTAG 接口设计 | 133 |
| 6.3 | 时钟电路的设计 | 135 |
| 6.3.1 | 时钟电路的分类 | 136 |
| 6.3.2 | 时钟电路选择原则 | 137 |
| 6.3.3 | C55x 时钟电路的调试 | 137 |
| 6.4 | 总线隔离与驱动的器件选择 | 137 |
| 6.5 | Flash 自举引导设计 | 138 |
| 6.5.1 | 自举引导模式的配置 | 138 |
| 6.5.2 | 引导表 | 139 |
| 6.5.3 | EMIF 模式引导 | 140 |
| 6.5.4 | I ² C 模式引导 | 140 |
| 6.6 | DSP 多机通信接口选择与设计 | 141 |
| 6.6.1 | 通过双口 RAM(或双向 FIFO)桥接 | 141 |
| 6.6.2 | 通过主机接口实现通信 | 142 |
| 6.6.3 | 通过 GPIO 实现通信 | 142 |
| 6.6.4 | 通过 I ² C 实现通信 | 143 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 6.6.5 通信方式的优缺点 | 143 |
| 6.7 应用系统的低功耗设计 | 144 |
| 6.7.1 合理选择 DSP 器件 | 144 |
| 6.7.2 让 DSP 以适当的速度运行 | 144 |
| 6.7.3 在软件设计中降低功耗 | 144 |
| 6.7.4 存储器类型对功耗的影响 | 145 |
| 6.7.5 正确处理外围电路 | 145 |
| 第 7 章 DSP 软件程序设计 | 146 |
| 7.1 DSP 软件开发流程 | 146 |
| 7.1.1 软件开发流程 | 146 |
| 7.1.2 DSP 程序的基本组成 | 148 |
| 7.1.3 VC5509A 的工作流程 | 149 |
| 7.1.4 DSP C 语言简介 | 149 |
| 7.1.5 DSP C 语言关键字 | 151 |
| 7.1.6 动态分配内存 | 152 |
| 7.2 汇编伪指令 | 152 |
| 7.2.1 汇编伪指令概述 | 153 |
| 7.2.2 C 程序在 DSP 中的定位 | 156 |
| 7.3 CMD 文件的编写 | 157 |
| 7.4 混合编程 | 162 |
| 7.5 GEL 文件 | 165 |
| 7.5.1 GEL 语法概述 | 166 |
| 7.5.2 存储器映射 | 167 |
| 7.5.3 详解 C5509.gel 文件 | 168 |
| 7.6 归档器的使用 | 170 |
| 7.7 反汇编的实现 | 171 |
| 第 8 章 软件开发进阶 | 175 |
| 8.1 Big Endian 和 Little Endian | 175 |
| 8.2 程序的优化 | 176 |
| 8.2.1 获得最佳性能的代码开发流程 | 177 |
| 8.2.2 工程层的优化 | 179 |
| 8.2.3 算法的改变 | 180 |
| 8.2.4 数据内存的优化 | 181 |
| 8.2.5 提高流水线的效率 | 181 |
| 8.3 程序的编程素养 | 182 |
| 8.3.1 程序注释 | 183 |

| | | |
|---------------|---------------------------|------------|
| 8.3.2 | 函 数 | 186 |
| 8.3.3 | 变 量 | 187 |
| 8.3.4 | 其他编程规范 | 188 |
| 8.4 | 数字信号处理库 | 188 |
| 8.4.1 | DSPLIB 的调用 | 189 |
| 8.4.2 | DSPLIB 函数 | 190 |
| 8.5 | 图像/视频算法库 | 191 |
| 8.5.1 | 图像/视频算法库概述 | 191 |
| 8.5.2 | 图像/视频处理库的安装与使用 | 191 |
| 8.5.3 | 图像处理 API 接口 | 192 |
| 第 9 章 | DSP 最小系统电路详解 | 195 |
| 9.1 | 供电电路 | 195 |
| 9.2 | 时钟振荡电路 | 196 |
| 9.3 | 蜂鸣器控制电路 | 197 |
| 9.4 | 外扩存储 SDRAM 电路 | 197 |
| 9.5 | DSP bootloader 模式电路 | 198 |
| 9.6 | SD 卡接口电路 | 200 |
| 9.7 | 音频控制电路 | 200 |
| 9.8 | USB 控制电路 | 202 |
| 第 10 章 | 硬件电路的设计与调试 | 203 |
| 10.1 | 完整的硬件开发流程 | 203 |
| 10.1.1 | 原理图设计 | 205 |
| 10.1.2 | PCB 设计注意事项 | 206 |
| 10.1.3 | 总线等效交换 | 207 |
| 10.1.4 | 硬件调试前电路板的常规检查 | 207 |
| 10.1.5 | 调试中常见问题的解决步骤 | 208 |
| 10.1.6 | JTAG 连接错误的常用解决办法 | 208 |
| 10.2 | 遇到问题时的常用解决办法 | 209 |
| 10.3 | CCS 调试中常见错误信息 | 209 |
| 10.4 | 电路的抗干扰设计 | 212 |
| 10.4.1 | 干扰的来源与结果 | 212 |
| 10.4.2 | 系统电源干扰设计 | 213 |
| 10.4.3 | 硬件抗干扰设计 | 213 |
| 第 11 章 | 软件实验详解 | 214 |
| 11.1 | SPI bootloader 实验 | 214 |
| 11.1.1 | EEPROM 的读/写 | 216 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 11.1.2 DSP bootloader 烧写步骤 | 218 |
| 11.2 USB 自举实验 | 220 |
| 11.3 音频 CODEC 实验 | 224 |
| 11.4 SD 卡读/写实验 | 228 |
| 11.4.1 SD 卡简介 | 228 |
| 11.4.2 SD 卡读/写的实现 | 230 |
| 11.5 SDRAM 读/写实验 | 233 |
| 11.5.1 SDRAM 简述 | 233 |
| 11.5.2 配置 EMIF 访问 SDRAM | 234 |
| 11.5.3 SDRAM 的配置与初始化 | 234 |
| 11.5.4 SDRAM 的刷新 | 236 |
| 11.5.5 SDRAM 的读/写操作 | 236 |
| 11.6 12864 图形液晶显示实验 | 239 |
| 11.6.1 简介与型号选型 | 239 |
| 11.6.2 电路接口 | 240 |
| 11.6.3 底层驱动函数 | 241 |
| 第 12 章 数字信号处理算法与实践 | 242 |
| 12.1 基于 MATLAB 的 DSP 调试方法 | 243 |
| 12.1.1 定点数的定标 | 244 |
| 12.1.2 误差问题 | 245 |
| 12.2 CCSLink | 245 |
| 12.2.1 CCSLink 简介 | 246 |
| 12.2.2 对象的建立 | 248 |
| 12.3 FDATool | 248 |
| 12.3.1 FDATool 的设置 | 249 |
| 12.3.2 CCS 中滤波器的设计 | 250 |
| 12.4 FIR 滤波器的设计 | 250 |
| 12.4.1 使用 FDATool | 251 |
| 12.4.2 利用 MATLAB 产生噪声信号用于滤波器测试 | 253 |
| 12.4.3 在 CCS 中编写 FIR 滤波器程序 | 254 |
| 12.4.4 滤波器仿真测试 | 254 |
| 12.5 快速傅里叶变换(FFT)的 DSP 实现 | 256 |
| 12.6 数字滤波器的 DSP 实现 | 259 |
| 12.6.1 FIR 滤波器与 IIR 滤波器的比较 | 259 |
| 12.6.2 FIR 滤波器的设计方法 | 260 |
| 12.6.3 IIR 滤波器的设计方法 | 263 |

| | | |
|---------------|-----------------------------|------------|
| 12.7 | FIRLMS 滤波器 | 265 |
| 12.8 | 数字图像处理 | 267 |
| 12.8.1 | 图像与 CCS 数据的转换 | 268 |
| 12.8.2 | CCS 读取 BMP 文件 | 268 |
| 第 13 章 | DSP/BIOS 实践与应用 | 271 |
| 13.1 | 操作系统与 DSP/BIOS 基础 | 271 |
| 13.1.1 | 操作系统简介 | 271 |
| 13.1.2 | DSP/BIOS 简介 | 272 |
| 13.1.3 | DSP/BIOS 组成 | 273 |
| 13.1.4 | DSP/BIOS 内核 | 275 |
| 13.1.5 | DSP/BIOS 启动过程 | 277 |
| 13.2 | DSP/BIOS 的配置 | 278 |
| 13.2.1 | 建立 DSP/BIOS 配置文件 | 279 |
| 13.2.2 | 全局属性设置 | 281 |
| 13.2.3 | MEM 设置 | 283 |
| 13.2.4 | CLK 设置 | 284 |
| 13.2.5 | Synchronization 设置 | 284 |
| 13.2.6 | Input/Output 设置 | 285 |
| 13.3 | HWI 模块的使用 | 286 |
| 13.4 | SWI 模块的使用 | 287 |
| 13.4.1 | SWI 概述 | 287 |
| 13.4.2 | SWI 设置 | 288 |
| 13.4.3 | API 函数接口说明 | 289 |
| 13.4.4 | SWI 举例说明 | 290 |
| 13.5 | TSK 模块的使用 | 291 |
| 13.5.1 | TSK 模块概述 | 291 |
| 13.5.2 | TSK 模块的设置 | 291 |
| 13.5.3 | TSK 模块的接口函数 | 293 |
| 13.5.4 | TSK 使用举例 | 296 |
| 13.5.5 | 阻塞和中断的区别和联系 | 298 |
| 13.6 | SEM 模块的使用 | 298 |
| 13.6.1 | SEM 模块概述 | 298 |
| 13.6.2 | SEM 的接口函数 | 298 |
| 13.6.3 | SEM 举例说明 | 299 |
| 13.7 | MBX 模块的使用 | 304 |
| 13.7.1 | Mailbox 的接口函数说明 | 304 |

| | |
|--------------------------------------|------------|
| 13.7.2 使用举例 | 305 |
| 13.8 其他常用模块的使用 | 309 |
| 13.8.1 LOG 模块 | 309 |
| 13.8.2 LCK 模块 | 313 |
| 13.8.3 PRD 模块 | 313 |
| 13.8.4 QUE 模块 | 315 |
| 13.9 DSP/BIOS 实时监测与软件优化 | 316 |
| 13.9.1 DSP/BIOS 实时监测 | 316 |
| 13.9.2 DSP/BIOS 软件优化 | 318 |
| 第 14 章 工程项目实践与应用 | 321 |
| 14.1 基于 BIOS 的实时数据采集和处理 | 321 |
| 14.1.1 任务的划分 | 321 |
| 14.1.2 软件实现 | 322 |
| 14.2 DSP 与网络数据传输 | 325 |
| 14.2.1 常用网络芯片简介 | 325 |
| 14.2.2 开源网络协议的移植 | 329 |
| 14.2.3 TCP/IP 协议代码的实现 | 331 |
| 14.3 Telnet 协议 | 332 |
| 14.3.1 Telnet 协议简介 | 332 |
| 14.3.2 Telnet 的实现 | 334 |
| 14.3.3 Telnet 协议代码的实现 | 334 |
| 14.4 TFTP 协议 | 335 |
| 14.4.1 TFTP 协议简介 | 335 |
| 14.4.2 TFTP 的实现 | 338 |
| 14.5 SD 卡与文件系统 | 341 |
| 14.5.1 解读 FAT32 文件系统 | 341 |
| 14.5.2 文件系统的移植 | 350 |
| 14.6 3D16 光立方的设计与制作 | 355 |
| 14.6.1 3D16 光立方硬件设计方案 | 356 |
| 14.6.2 软件系统设计 | 358 |
| 第 15 章 DSP+FPGA 复杂系统的设计 | 360 |
| 15.1 FPGA 与 DSP 的结构特点 | 360 |
| 15.1.1 DSP 的结构特点 | 360 |
| 15.1.2 FPGA 的结构特点 | 361 |
| 15.1.3 DSP 和 FPGA 的性能比较 | 361 |
| 15.1.4 DSP+FPGA 系统的设计 | 363 |