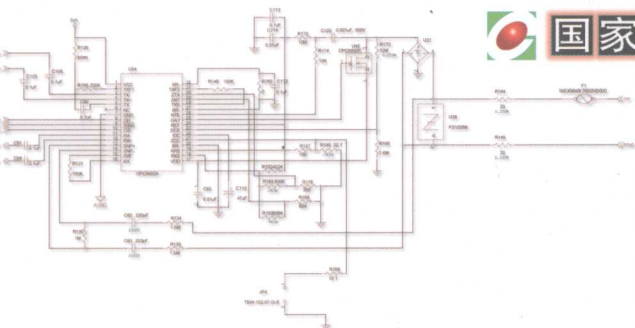
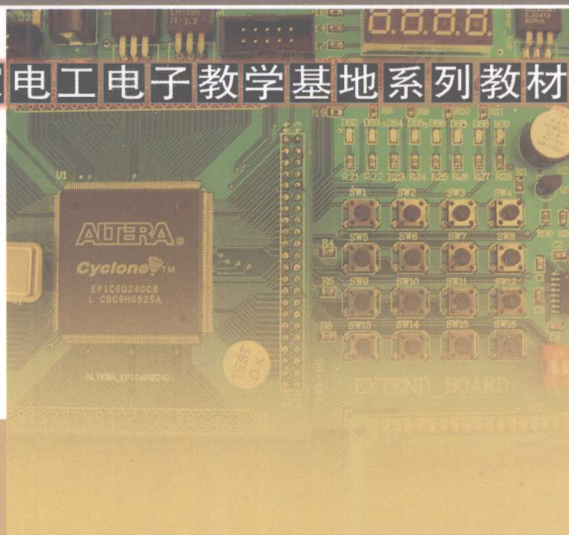




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



国家电工电子教学基地系列教材



DSP技术及其应用

◎ 高海林 钱满义 编著

◎ 陈后金 主审



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家电工电子教学基地系列教材

DSP 技术及其应用

高海林 钱满义 编著
陈后金 主审

清华大学出版社
北京交通大学出版社
·北京·

内 容 简 介

本书以 TI 公司的 TMS320VC5402 DSP 为基础,详细论述了 DSP 硬件设计和软件开发的重点和难点内容,特别是如何使用 C 语言编写 DSP 的应用程序。本书共分 10 章,第 1~3 章介绍了 DSP 的发展、原理结构及片上外设;第 4~5 章介绍了 5402 DSK 板和 DSP 硬件电路的设计;第 6~7 章介绍了 DSP 的 C 语言编程和 CCS 集成开发环境的使用;第 8 章介绍了 GEL 语言及其在 DSP 调试中的作用;第 9 章为实验篇,以 5402 DSK 为基础,针对 5402 DSP 的片上外设,设计了一些典型的实验,对每个实验的原理进行了详细的分析,每个实验都给出了 C 语言的参考源程序,而且都调试通过;第 10 章给出了 3 个 DSP 综合应用设计实例,分别从软件和硬件角度出发对 DSP 应用开发的典型过程做了详细的描述。

本书可作为高等院校工科电子类专业本科生的 DSP 系统学习教材,也可供从事 DSP 技术开发的工程技术人员和高等学校的教师阅读参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

DSP 技术及其应用 / 高海林, 钱满义编著. —北京: 清华大学出版社; 北京交通大学出版社, 2009.7

(国家电工电子教学基地系列教材)

ISBN 978-7-81123-690-3

I. D… II. ① 高… ② 钱… III. ① 数字信号-信号处理-高等学校-教材 ② 数字信号-微处理器-高等学校-教材 IV. TN911.72 TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 099562 号

责任编辑: 韩 乐

出版发行: 清华大学出版社 邮编: 100084 电话: 010-62776969

北京交通大学出版社 邮编: 100044 电话: 010-51686414

印刷者: 北京东光印刷厂

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×230 印张: 28.25 字数: 633 千字

版 次: 2009 年 7 月第 1 版 2009 年 7 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978-7-81123-690-3/TN·66

印 数: 1~4 000 册 定价: 43.00 元

本书如有质量问题, 请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评, 我们表示欢迎和感谢。

投诉电话: 010-51686043, 51686008; 传真: 010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

国家电工电子教学基地系列教材

编审委员会成员名单

主 任 谈振辉

副主任 张思东 赵乐沅 孙雨耕

委 员 (以姓氏笔画为序)

王化深	卢先河	刘京南	朱定华	沈嗣昌
严国萍	杜普选	李金平	李哲英	张有根
张传生	张晓冬	陈后金	邹家驲	郑光信
屈 波	侯建军	贾怀义	徐国治	徐佩霞
廖桂生	薛 质	戴瑜兴		

总 序

当今信息科学技术日新月异,以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才,促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高,都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来,国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践,探索了各课程的认知规律,确定了科学的教育思想,理顺了课程体系,更新了课程内容,融合了现代教学方法,取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果,在借鉴国内外同类有影响教材的基础上,决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色:

- ◆在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体。
- ◆在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一。
- ◆在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出,详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力。
- ◆在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高了学习效率和效果。

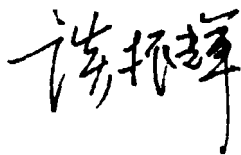
本系列教材包括:

《基础电路分析》、《现代电路分析》、《电路分析学习指导及习题精解》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《信号与系统学习指导及习题精解》、《DSP技术及其应用》、《模拟电子技术》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信息处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现

代电子线路》(上、下册)、《电工技术》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北京交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持,在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助,在此表示衷心的感谢。

北京交通大学
国家电工电子教学基地系列教材
编审委员会主任

A stylized, handwritten signature in black ink, likely belonging to the reviewer or editor mentioned in the text.

2009 年 6 月

前 言

近年来,以数字信号处理理论为基础的数字信号处理技术获得了迅猛的发展,数字信号处理器(DSP)在军事、工业自动控制、医疗设备、家电等很多领域都得到了广泛的应用。

德州仪器(TI)公司的TMS320系列数字信号处理器品种齐全,技术先进,在全球市场占有超过半数的份额,并且与国内的许多大学建立了DSP联合实验室,各实验室得到了TI公司技术资料和实验设备的大力支持,这也是我们选择5000系列DSP作为教学平台的主要原因。

经过几年艰苦的教学和实践的摸索,把近年来积累的DSP教学经验加以总结,形成了一套适合学生学习使用的完整的教学资料。

本书共有10章,可分为4个部分。第1~3章为理论部分,详细介绍了DSP的发展、原理结构、片上外设;第4~5章为硬件设计部分,介绍了5402 DSK板和DSP硬件电路的设计;第6~8章为软件设计部分,介绍了DSP的C语言编程、CCS集成开发环境的使用及GEL语言在DSP开发中的应用;第9~10章为实验部分,第9章使用C语言设计了7个实验,并给出了经过了调试C语言的源程序,第10章结合数字信号处理中最常见的应用给出了3个具体的实例,包括双音多频信号的产生和检测、DSP与液晶显示器的接口及其程序设计及bootloader设计,给出了C语言源代码,并进行了较为详细的说明。针对目前大学课时不断压缩的情况,使用C语言学习DSP编程不失为一种有效的数字信号处理技术的教学方法。

本教材由高海林和钱满义合作编写。其中高海林编写了第3、4、5、6、8章及第9章实验一至实验五、第10章10.1节和附录;钱满义编写了第1、2、7章及第9章实验六、实验七、第10章10.2节和10.3节。

本教材由北京交通大学陈后金教授主审,陈后金教授认真审阅了全部文稿,并提出了中肯的意见,在此向陈后金教授表示衷心的感谢。

在本教材的编写过程中,得到了TI公司和合众达公司的支持和帮助,在此表示感谢。在实验过程中,单振宇、高天虹、栾庆文、惠怀志等同学做了大量工作,在此一并感谢。

由于时间仓促,加上作者水平有限,不当和错误之处在所难免,肯请广大读者批评指正。

编 者

2009年7月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 数字信号处理概述	1
1.2 数字信号处理器的特点	3
1.3 DSP 芯片的现状和发展	5
1.3.1 DSP 基本概况	5
1.3.2 TMS320 系列 DSP 发展概况	7
1.3.3 其他厂商的 DSP	9
第 2 章 TMS320C5000 DSP 的结构及其基本原理	11
2.1 TMS320C54x 数字信号处理器	11
2.2 TMS320C54x 的主要特性	12
2.3 TMS320C54x 结构组成	13
2.3.1 总线结构	13
2.3.2 流水线操作	14
2.4 存储器	15
2.4.1 程序存储器	18
2.4.2 数据存储器	20
2.4.3 I/O 存储器	21
2.5 存储器映像寄存器	21
2.6 片上外设	23
2.7 寻址模式	25
2.8 TMS320C55x DSP 基本指标和性能	27
2.9 小结	30
第 3 章 TMS320C54x 的片上外设	31
3.1 通用 I/O 引脚	31
3.2 定时器	31
3.3 时钟发生器	34
3.4 HPI 主机接口	37
3.4.1 HPI 的连接	38
3.4.2 HPI-8 的操作	40

3.4.3	HPI-8 数据线作为通用 I/O	43
3.5	多通道缓冲串行口	44
3.5.1	多通道缓冲串行口概述	44
3.5.2	McBSP 控制寄存器	46
3.5.3	McBSP 数据发送和接收过程	51
3.5.4	可编程移位时钟和帧同步	55
3.5.5	μ 律/A 律的压扩硬件处理	58
3.5.6	多通道操作	59
3.5.7	SPI 操作	61
3.5.8	McBSP 引脚作为通用 I/O	63
3.6	直接存储器访问 (DMA) 控制器	63
3.6.1	DMA 寄存器的寻址	63
3.6.2	DMA 寄存器的设置	65
3.7	软件可编程的等待状态发生器	71
3.8	分区转换逻辑	73
3.9	外部总线接口	75
3.9.1	外部总线接口信号	75
3.9.2	外部总线接口定时	76
第 4 章	SEED-VC5402 DSK 实验板	81
4.1	DSK 简介	81
4.2	硬件概况	83
4.2.1	TMS320VC5402 DSP	83
4.2.2	外部数据存储器	83
4.2.3	外部程序存储器	84
4.2.4	I/O 空间存储器	86
4.2.5	DSP HPI 接口	86
4.2.6	麦克风和耳机接口	86
4.2.7	并行口功能描述	87
4.2.8	JTAG 仿真	88
4.2.9	JTAG 插座	88
4.2.10	存储器扩展接口	89
4.2.11	外设扩展接口	89
4.2.12	用户选项	90
4.2.13	DSK 中断	90
4.2.14	DSK 连接器	90

4.2.15 DSK 控制寄存器	93
4.3 软件概况	95
4.3.1 主机工具概况	95
4.3.2 DSP 应用程序加载工具概况	96
4.3.3 Flash 工具概况	97
4.3.4 板复位工具	97
4.3.5 板控制工具概况	97
4.3.6 主机 API 概况	98
4.3.7 板卡库概述	100
4.4 DSK 板主要硬件电路	101
4.4.1 SMC34C60 并行接口	101
4.4.2 74ACT8990 测试总线控制器 (TBC)	102
4.4.3 74CBT3257 复用/解复用器	104
4.4.4 TPS73HD318 双路输出的低压差稳压器	105
4.4.5 CY2071A 可编程时钟发生器	105
4.4.6 CY37064VP100 高性能 CPLD 芯片	106
4.4.7 CY7C1021 静态 RAM	108
4.4.8 SST39VF400A 4M 位 Flash 存储器	108
4.4.9 74LVTH16245 3.3 V 16 位总线收发器	108
4.4.10 模拟信号输入/输出接口	109
4.4.11 子板接口总线	109
第 5 章 DSP 系统的硬件设计	111
5.1 DSP 系统基本硬件电路的设计	111
5.1.1 电源电路	111
5.1.2 时钟电路	113
5.1.3 复位电路	115
5.1.4 JTAG 仿真接口	116
5.1.5 3.3V 和 5V 混合逻辑电路设计	116
5.2 DSP 系统的存储器接口设计	117
5.2.1 程序存储器的扩展	117
5.2.2 静态数据存储器的扩展	120
5.2.3 DSP 与慢速器件的接口设计	123
5.3 DSP 系统模数接口电路的设计	126
5.3.1 TLC320AD50C 概述	126
5.3.2 AD50 的内部结构及引脚	127

5.3.3	AD50 模拟输入与输出电路设计	130
5.3.4	AD50 与 DSP 的接口电路设计	132
5.3.5	AD50 内部的寄存器	133
5.3.6	AD50 的帧同步定时	135
5.3.7	AD50 与 DSP 的串行通信	138
5.3.8	AD50 的编程	143
5.4	DSP 系统异步通信接口电路的设计	145
5.5	HPI 接口电路的设计	148
5.5.1	HPI 与主机的接口	148
5.5.2	HPI-8 与 PC 的接口	149
5.5.3	HPI 与 51 单片机的接口	151
5.6	DSP 系统的自举设计	155
5.6.1	自举的概念	155
5.6.2	HPI 自举模式	161
5.6.3	串行 EEPROM 自举模式	162
5.6.4	并行自举模式	164
5.6.5	标准串行口自举模式	165
5.6.6	I/O 自举模式	167
5.6.7	自举表的生成	169
第 6 章	DSP 系统的软件设计	171
6.1	DSP 系统软件设计的一般过程	171
6.2	使用 C 语言设计 DSP 程序的特点	173
6.2.1	DSP 的 C 语言编程与通用 C 语言编程的区别	173
6.2.2	C 语言的数据结构	173
6.2.3	存储器映像寄存器 (MMR) 的定义和访问	177
6.2.4	DSP 数据空间的访问	179
6.2.5	DSP I/O 空间的访问	180
6.3	CCS 中与 C54xx 相关的库函数和头文件	182
6.3.1	运行时支持库 rts.lib 及其头文件	182
6.3.2	板卡库 drv5402.lib、dsk5402.lib 及其头文件	183
6.3.3	DSPLIB 通用信号处理程序函数库及其头文件	184
6.4	cmd 链接命令文件	186
6.4.1	cmd 文件的内容及编写方法	186
6.4.2	DSP 的 C 语言中段的定义	190
6.5	C 程序的结构及组成	192

6.6 C 语言的中断编程	193
6.6.1 5402 DSP 中断寄存器的结构	193
6.6.2 5402 DSP 中断的初始化方法	194
6.6.3 中断服务程序的编程及注意事项	195
6.6.4 中断向量表的编写	199
6.6.5 中断向量地址的修改方法	201
6.6.6 一般中断服务程序的编写方法	203
6.7 C54x 的混合编程	204
6.7.1 C 和汇编模块的接口	204
6.7.2 C 程序中访问汇编程序变量	205
6.7.3 C 程序中直接嵌入汇编语句	206
第 7 章 集成开发环境 CCS 的使用	207
7.1 CCS 的主要功能	207
7.1.1 CCS 代码产生工具	209
7.1.2 CCS 代码调试工具	210
7.2 CCS 软件的安装与设置	212
7.3 CCS 菜单	214
7.3.1 菜单	214
7.3.2 工具栏	220
7.4 SEED-VC5402DSK 安装与配置	224
7.5 SEED- XDS510 仿真器安装与配置	225
7.6 利用 CCS 开发 DSP 应用程序	227
7.6.1 一个简单 DSP 程序的设计与调试	227
7.6.2 一个 DSP 与计算机数据文件双向读写程序的设计与调试	235
第 8 章 通用扩展语言 GEL	245
8.1 GEL 语言简介	245
8.2 GEL 函数的定义	246
8.3 GEL 函数的参数	247
8.4 GEL 函数的调用	248
8.5 GEL 函数的加载和卸载	249
8.6 将 GEL 函数添加到 GEL 菜单中	251
8.7 访问输出窗口	254
8.8 启动 CCS 时自动执行 GEL 函数	254
8.9 查看表达式的值	255
8.10 内嵌的 GEL 函数	255

8.11 GEL 语言的应用	266
第 9 章 DSP 实验指导	275
实验一 5402 DSK 板的初始化编程实验	275
实验二 定时器与数字 I/O 实验	286
实验三 定时器中断模式实验	295
实验四 信号发生器实验	305
实验五 编译码器及多通道缓冲串行口实验	316
实验六 利用 DSP 实现信号实时滤波	334
实验七 利用 DSP 实现信号频谱动态分析	354
第 10 章 DSP 综合设计应用实例	360
10.1 双音多频信号的产生与检测	360
10.2 DSP 与液晶显示器的接口及其程序设计	378
10.2.1 DSP 与液晶显示器接口的硬件设计	378
10.2.2 DSP 与液晶显示器接口的软件设计	383
10.2.3 LCD 程序代码及分析	394
10.2.4 DSP 驱动 LCD 的显示效果	413
10.3 bootloader 程序设计	414
10.3.1 bootloader 简介	414
10.3.2 在线 bootloader	414
10.3.3 并行口 bootloader 模式的实现	415
10.3.4 SST39VF400 芯片简介	419
10.3.5 程序设计	423
附录 A TMS320VC5402 DSP 的引脚图	428
附录 B TMS320VC5402 的引脚功能	429
附录 C SEED-VC5402 DSK 电路原理图	433

第1章 概述

1.1 数字信号处理概述

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 是 20 世纪 60 年代前后发展起来并广泛应用于许多领域的学科。20 世纪 70 年代以来, 随着大规模集成电路 (LSI) 和超大规模集成电路 (VLSI) 及微处理器技术的迅猛发展, 数字信号处理的理论和技术得到长足发展, 使其在数字通信、雷达、遥感、声纳、语音合成、图像处理、测量与控制、多媒体技术、生物工程及机器人等各个领域都得到广泛的应用。

图 1-1 是利用数字信号处理系统实现模拟信号分析与处理的简化框图。此系统先将模拟信号变换为数字信号, 经数字信号处理后, 再变换成模拟信号输出。模拟信号 $x(t)$ 首先经过抗混叠滤波器, 然后经 A/D 转换器变成数字信号 $x[k]$ 。数字信号处理器对 $x[k]$ 进行处理, 得到的输出信号 $y[k]$ 仍是数字信号, $y[k]$ 经 D/A 转换器变成模拟信号, 再经低通滤波器, 最后输出平滑的模拟信号 $y(t)$ 。

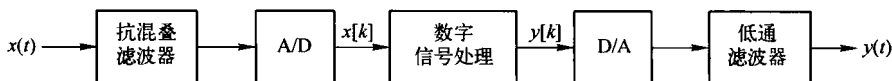


图 1-1 利用数字系统实现模拟信号的分析与处理框图

1. 什么是 DSP

广义地理解, DSP 为数字信号处理, 即信号的分析 and 处理。通常此类的处理过程需要大量的数学运算。狭义地理解, DSP 为数字信号处理器 (Digital Signal Processor, 或者 DSP), 是专门用来做数字信号处理的处理器。本书所说的 DSP 技术, 是指利用通用 DSP 处理器或基于 DSP 核的专用器件, 实现数字信号处理的方法与技术, 完成数字信号处理的任务。

自从 20 世纪 70 年代微处理器诞生以来, 信号处理技术就沿着以计算机为代表的通用 CPU、以单片机为代表的微控制器 MCU 和 DSP 处理器这三个方向发展。这三类微处理器在发展过程中, 在技术上相互借鉴, 同时又有各自的特点和应用领域。

DSP 技术的发展得益于以下两个方面。

① 数字信号处理的理论和方法在近年得到迅速发展。以离散傅里叶变换和小波分析为代表的信号频谱分析、声音与图像处理技术、多媒体技术等的发展, 为各种实时处理的应用提

供了理论与算法上的基础。

② 微电子科学与技术的进步,使得数字信号处理的实现得到技术上的保障。随着大规模集成电路的发展,DSP 处理器的性能也在迅速地提高。工艺水平、性能大幅度提高,功耗、体积和成本却大幅度下降。

2. 数字信号处理的优点

虽然模拟信号处理在特定条件下是不可缺少的,但相比模拟信号处理,数字信号处理有许多明显的优越性。

(1) 灵活性高

当模拟系统的功能改变,或元件参数需要调整时,则必须重新进行系统设计,然后重新装配和调试。对于以 DSP 处理器为核心的数字处理系统而言,硬件平台可以不改变,只通过改变软件设计来调整和执行各种各样的数字信号处理任务。

(2) 稳定性好

模拟电路中的电容、电阻、电感和运算放大器等器件都会随环境的改变而改变,导致模拟系统的性能也发生改变。数字系统的稳定性好,受时间和环境的影响小。

(3) 抗干扰能力强

信号在传输和处理过程中,容易受到噪声等干扰。数字系统抗干扰性能大大优于模拟信号。以 0 和 1 所表征的数字信号也会受到噪声的干扰,但只要能正确地识别 0 和 1,并将其再生,则可以完全消除噪声的影响。如果是模拟系统,输入受到相同的干扰,输出会发生很大的变化。

(4) 易于大规模集成

随着微电子技术的发展,工艺水平的提高,芯片集成度越来越高,数字系统可以实现大规模集成,便于小型化。如导弹的小型化,早期防空导弹由地面指挥中心引导导弹打击飞行目标,指挥中心易于暴露而成为打击对象,随着电子器件的集成度提高,现在多数防空导弹都把指挥中心直接放在导弹上,导弹发射后自行引导打击目标,实现所谓“打了不管”,导弹打击精度得到提高,地面安全得到保障。

3. 数字信号处理的方法

数字信号处理可以通过软件、硬件或软硬件结合的方法来实现,具体有以下几种。

(1) 利用通用 PC 实现软件处理

在 PC 上利用高级语言编写信号处理程序,或利用 Matlab 进行信号处理。主要应用在不需实时性操作的场合,如教学和仿真研究等。

(2) 利用专用芯片进行硬件实现

利用 FPGA 等可编程逻辑阵列开发 ASIC 芯片,来实现数字算法。其优点是实时性好,易于集成等。

(3) 利用通用可编程 DSP 芯片进行软硬件实现

DSP 芯片由于改进的哈佛结构, 允许并行地进行指令和数据处理; DSP 芯片内部有硬件乘法器, 使乘法变得简单; 采用流水线操作使得同一机器周期完成多个操作。DSP 芯片优点是实时性好, 灵活性大, 广泛应用于军事、民用消费等领域。

(4) 片上系统 (SoC)

DSP 处理器从传统的通用型处理器中分离出更多的直接面向特定应用对象的 SoC (System on Chip), 如 DSP+ARM 的双核 SoC 器件。以 TI 公司 (Texas Instrument) 为例, 为了开辟手机芯片市场, TI 专门成立了平行于 DSP 组的无线芯片组, 下设 OMAP 分部, 专门为手机开发处理器, 如面向第 3 代无线通信终端的双核 SoC 器件 OMAP1510。其他 SoC 器件如面向数码相机的 DM270, 面向专业音频设备的 DA610, 面向媒体处理的 DM642 等。

本书主要讨论数字信号处理的软硬件实现法, 即利用通用 DSP 芯片, 通过配置硬件和进行软件编程, 实现所要求的数字信号处理任务。

1.2 数字信号处理器的特点

数字信号处理器是专门用来进行数字信号处理, 其特点是按照数字信号处理的算法结构与特点来设计, 因而其运算速度快, 编程方便, 擅长实现数字信号处理。在数字信号处理的算法中, 卷积运算、相关运算、变换运算、级数运算等运算大约占各种处理算法的 70% 以上。因此针对这些算法特点, DSP 在结构和寻址模式等方面采用了相应的解决办法, 见表 1-1 所示。

表 1-1 算法基本特点及 DSP 相应解决办法

算法的基本特点	DSP 主要解决办法
加法和乘法, 并进行多次连加和连乘	使用硬件乘法器、和乘加单元 (MAC), 单周期实现乘或乘加运算
在运算过程中需要连续、频繁地对数据进行存取访问	采用改进的哈佛结构, 处理单元与存储器之间采用多条总线连接
在运算中对数据的访问不是随机的, 而是按照固定模式的有确定性地访问	采用专门的数据寻址单元, 提供灵活高效的数据寻址模式
在运算过程中大量出现循环操作	“零开销”的循环指令处理

DSP 芯片不同于一般微处理单元, DSP 芯片的特点决定了其适合于数字信号的实时处理。下面简要介绍 DSP 芯片的特点。

1. 哈佛结构

早期的微处理器内部大多采用冯·诺伊曼 (Von-Neumann) 结构, 其片内程序空间和数据空间混合使用, 取指令和取操作数都是通过一条总线分时进行。当进行高速运算时, 不但不能同时取指令和取操作数, 而且还会造成传输通道上的瓶颈现象。而 DSP 内部采用的是程序空间和数据空间分开的哈佛 (Havard) 结构, 允许同时取指令 (来自程序存储器) 和取操

作数（来自数据存储器）。为了进一步提高信号处理的效率，采用在哈佛结构的基础上又加以改善，使程序代码和数据存储空间之间可以进行数据的传送，即改进的哈佛结构。

2. 多总线结构

DSP 芯片内部采用多总线结构，可以在一个机器周期内多次访问程序空间和数据空间。例如，TMS320C54x 内部有 P、C、D、E 等 8 条总线，每条总线又分为数据总线和地址总线，可以在一个机器周期内从程序存储空间取 1 条指令、从数据存储器中读 2 条操作数和向数据存储器中写 1 个操作数，大大提高了 DSP 的运行速度。

3. 流水线结构

DSP 执行一条指令，需要通过取指、译码、取操作数和执行等几个阶段。在 DSP 中，采用流水线结构，在程序的运行过程中这几个阶段可以重叠。在执行本条指令的同时，还依次完成了后面的指令的取操作数、译码和取指，指令周期降低到最小值。利用这种流水线结构，加上执行重复操作，可以在单个指令周期内完成乘加运算。

4. 多处理单元

DSP 内部一般都包括多个处理单元，如算术逻辑单元（ALU），辅助寄存器运算单元（ARAU）、累加器（ACC）及硬件乘法器（MUL）等。它们可以在一个指令周期同时进行运算。例如，当执行依次乘法和累加的同时，辅助寄存器单元已经完成了下一个地址的寻址工作，为下一次乘法和累加运算做好了准备。因此，DSP 在进行连续的乘加运算时，每一次乘加运算都是单周期完成的。DSP 这种多处理单元结构，特别适用于 FIR 和 IIR 滤波器。此外，DSP 多处理单元结构还可以将一些特殊的算法，例如 FFT 的倒位寻址和取模运算等，在芯片内部用硬件实现，从而提高运行速度。

5. 特殊的 DSP 指令

在 DSP 的指令中，设计了一些特殊的 DSP 指令以更好地满足数字信号处理的需要。例如，TMS320C54x 中的 FIRS 和 LMS 指令，专门用于系数对称的 FIR 滤波器和 LMS 算法。

6. 指令周期短

早期的 DSP 指令周期约 400ns，采用 4 μ m NMOS 制造工艺，其运算速度为 5MIPS（Millions of Instructions Per Second）。随着集成电路工艺的发展，DSP 广泛地采用亚微米 CMOS 制造工艺，其运行速度越来越快。例如 TMS320C54x 运行速度可达 100MIPS，TMS320C6203 时钟 300MHz，运行速度可达 2400MIPS，而 TMS320C6416 时钟频率超过 1GHz，运行速度可达 8000MIPS。

7. 运算精度高

早期的 DSP 字长为 8 位，后来逐步提高到 16 位、24 位、32 位、40 位。为了防止溢出，累加器长达 40 位。此外，浮点型 DSP 则提供了更大的数据表达的动态范围。