

ADI 处理器实用丛书

Blackfin 系列 DSP 原理与系统设计 (第 2 版)

◎ 陈 峰 编著



本书特色：

- 内容充实，包含了 Blackfin 系列 DSP 的各个方面
- 主要知识点突出，叙述内容相对完整
- 语言深入浅出，描述图文并茂



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

ADI 处理器实用丛书

Blackfin 系列 DSP 原理与系统设计

(第2版)

陈 峰 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

信号处理是近年来发展十分活跃的领域,而以高速数字信号处理器(DSP)为基础的处理技术正在迅速发展。Blackfin 系列 DSP 是 ADI 开发的高性能定点 DSP 产品,共分为五大系列数十种型号,分别面向不同种类的应用环境。它的处理器内核采用微信号体系结构,能将指令高效并行化,片内集成大容量存储器并采用二级存储器的组织方式。Blackfin 系列 DSP 的片上系统集成了大部分常见的工业总线与外设接口。Blackfin 系列 DSP 具有强大的处理能力,丰富的外设接口与极低的功耗,使其更易满足各类不同需求。

本书主要介绍了采用 Blackfin 系列 DSP 开发时所需掌握的知识与技巧,具体内容包括:Blackfin 系列芯片的性能、内部结构、外设接口、硬件开发、指令集、开发环境、软件编程与应用实例。

本书的读者对象是各领域内从事信号处理工作的科研和工程技术人员,以及信息与信号处理、通信类各专业的研究生、高年级本科生。

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,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

Blackfin 系列 DSP 原理与系统设计/陈峰编著. —2 版. —北京:电子工业出版社,2010.2
(ADI 处理器实用丛书)

ISBN 978-7-121-10218-9

I. B… II. 陈… III. 数字信号—信号处理—微处理器 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 006057 号

策划编辑:竺南直

责任编辑:雷洪勤 文字编辑:韩玉宏

印 刷:北京市李史山胶印厂

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1 092 1/16 印张:23 字数:589 千字

印 次:2010 年 2 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:39.80 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

序 言

这些年，在与电子技术领域的工程师、学者以及大学师生交流的时候，他们的聪明才智和创新能力给我留下了深刻的印象。而他们所做的设计和项目，无一不让我感觉到中国工程师队伍成长之快，和中国电子行业巨大的发展潜力。但另一方面，他们的经历和成功，也带给了我很多思考。

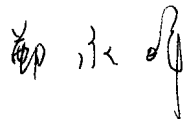
ADI 在模拟和数字信号领域中已经发展了 40 多年。在这几十年间，我们不断推动技术的创新和进步，不断提高相关领域的各类产品性能以满足客户的广泛需求，包括消费类、通信、医疗、运输和工业等方面。令人欣慰的是，至 2009 年，ADI 已经拥有遍布世界各地的 60,000 余家客户。而通过大学计划、培训、研讨会等活动所积累起来的资源更是不计其数。如何让我们的客户，让 ADI 技术产品的使用者和爱好者，真正准确、有效、快捷地掌握相关知识与设计技巧，是我们需要考虑的，也是我们为所有用户提供的非常重要的服务之一。

经过多年的运行和完善，ADI 已经拥有了一整套对中国工程师以及在校工科类学生的培养计划，如每年一届的中国大学创新设计竞赛，在高校建立的联合实验室，各类线上线下研讨会，还有在多个城市开展的高水平培训课程等等。这些计划架起了 ADI 与用户之间最直接、最有效的沟通桥梁。同时，为了使更多的电子技术领域从业者和爱好者了解数字信号处理和电子产品设计理念，我们还邀请了业内具有较深影响力的专家、学者、教授共同编写并出版一套基于 ADI 模拟和数字产品的应用技术丛书。

该丛书详细介绍了 ADI 产品在医疗电子，通信，工业仪器仪表，汽车电子等行业的应用，以理论与实际案例相结合的方式为读者们讲解了世界先进处理器的设计与使用。

丛书的出版凝聚了来自清华大学、西安电子科技大学、青岛理工大学、解放军理工大学、厦门大学、天津大学、黑龙江大学、中国科学技术大学、辽宁工业大学等多所院校老师丰富的经验和智慧。在此，感谢他们对 ADI 出版计划的大力支持。同时，也感谢电子工业出版社的竺南直博士对本丛书的出版所作出的贡献！

衷心希望能得到读者朋友的意见反馈，在你们提出的问题和建议下，我们将不断完善 ADI 丛书，不断完善 ADI 的产品和技术，与客户们一起共同开拓中国市场。



ADI 公司亚太区副总裁

前 言

信号处理是近年来发展十分活跃的领域，而以高速数字信号处理器（DSP）为基础的处理技术正在迅速发展。DSP 作为信号处理的基本硬件工具，在雷达、多媒体、通信、控制、航天和医疗等领域发挥着重要的作用。所以选择并掌握一种 DSP 芯片具有很大的现实意义。

作为国际上 DSP 芯片的主要供应商，美国模拟器件公司（简称 ADI）一直致力于开发高性价比的产品。其业务包括混合信号 DSP、通用 DSP，以及可靠数据服务、ADSL 调制解调器、GSM 手机、因特网接入、语音处理和电机控制等应用中的嵌入式 DSP。Blackfin 系列 DSP 是 ADI 开发的基于微信号体系结构的 DSP，它具有两个 MAC，集成了大量的外围设备和存储器接口，每秒运算速度最高达到 2400MMAC，非常适用于各种视频、音频、通信和控制领域。最先推出的 ADSP-BF53x 系列产品在市场上取得了很大的成功，本书的第 1 版正是以这一系列 DSP 为主要内容的。

近几年来，ADI 根据市场需求的变化，继续推出了 Blackfin 系列的其他产品，如 ADSP-BF52x, ADSP-BF536(7,8,9), ADSP-BF54x, ADSP-BF56x 等芯片族。这些芯片无论是在架构上还是在外设接口上都有了较大幅度的更新和完善。本书正是根据这一新的形势而推出的。相比于第 1 版，本书对许多内容进行了扩充和更新。例如，详细介绍了 Blackfin 系列 DSP 的新特性与新接口，并大幅调整了 Blackfin 系列 DSP 的内部结构、外部设备与产品实例等相关章节的介绍。

本书共 8 章。第 1 章介绍了 DSP 芯片的基本特点和 Blackfin 系列 DSP 的结构、基本性能指标。第 2 章详细介绍了 Blackfin 系列 DSP 的内部结构，包括内核结构、存储器组织、系统概述、程序控制器与指令流水线、中断的过程与服务、DMA 及各类应用。第 3 章介绍了 Blackfin 系列 DSP 的外部设备，包括外部总线、I/O 接口、Host DMA 接口单元、增强型并行外设接口、以太网 MAC、各类存储器接口、定时器及其使用、各种串行接口及特定芯片包含的功能接口。第 4 章介绍了 Blackfin 系列 DSP 的硬件开发，包括引导模式设定、锁相环配置、动态电源管理、处理器模式设定与基本硬件设计原则。第 5 章介绍了 Blackfin 系列 DSP 的指令集，包括数据寻址方式、指令系统特点及各类详细的指令介绍。第 6 章介绍了 Blackfin 系列 DSP 的开发环境 VisualDSP++，包括仿真器、编译器、汇编器、链接器、加载器与操作系统内核。第 7 章介绍了软件编程与优化，包括使用的编译器的具体命令与设置、代码编写时的优化技术及 VisualDSP++ 各种库的使用。第 8 章介绍了 Blackfin 系列 DSP 的软硬件应用实例，包括单片 DSP 系统设计实例、多片 DSP 系统设计实例、视频编码实例、摄像头图像处理系统实例。

在本书的编写过程中，施乐、张恩伟、汤涛和杨磊磊在收集资料、整理内容与文稿校阅方面作出了很大贡献，同时也得到了 ADI 的大力支持。作者在此向为本书的出版付出心血和劳动的人们表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，书中错误之处在所难免，恳请广大读者给与批评指正。

编著者

目 录

第 1 章 数字信号处理和 DSP	1
1.1 数字信号处理的发展	1
1.2 DSP 在数字信号处理中的应用	2
1.3 DSP 芯片的结构特点	3
1.4 Blackfin 系列 DSP	5
1.4.1 Blackfin 系列 DSP 的结构特点	5
1.4.2 ADSP-BF51x 系列芯片	7
1.4.3 ADSP-BF52x 系列芯片	8
1.4.4 ADSP-BF53x 系列芯片	9
1.4.5 ADSP-BF54x 系列芯片	10
1.4.6 ADSP-BF561 双核芯片	12
第 2 章 Blackfin 系列 DSP 的内部结构	13
2.1 内核结构	13
2.1.1 寄存器组	14
2.1.2 算术逻辑单元 (ALU)	15
2.1.3 乘法累加器 (MAC)	16
2.1.4 桶形移位器	18
2.2 存储器	19
2.2.1 存储器空间分配	19
2.2.2 内部存储器的详细介绍	21
2.3 系统概述	33
2.3.1 内部总线	33
2.3.2 内部时钟	35
2.3.3 处理器核心概述	35
2.3.4 接口	36
2.3.5 系统总线概述	40
2.4 程序控制器	44
2.4.1 概述	44
2.4.2 相关的寄存器	44
2.4.3 指令流水线	46
2.4.4 程序流的控制	47
2.5 中断	48
2.5.1 概述	48
2.5.2 系统中断过程	49
2.5.3 SIC 的寄存器	51

2.5.4	CEC 的寄存器	54
2.5.5	中断的全局禁止和使能	55
2.5.6	事件向量表	56
2.5.7	中断服务	60
2.5.8	中断的嵌套	61
2.5.9	异常处理	63
2.6	DMA	64
2.6.1	DMA 控制器	65
2.6.2	DMA 流程	66
2.6.3	DMA 寄存器	69
2.6.4	二维 DMA	71
2.6.5	DMA 性能优化	72
2.6.6	DMA 软件管理	74
2.6.7	DMA 异常中断条件	74
第 3 章	Blackfin 系列 DSP 外部设备	76
3.1	外部总线	76
3.1.1	总线概述	78
3.1.2	EBIU 仲裁	78
3.1.3	出错检测	78
3.1.4	异步存储器接口	79
3.1.5	SDRAM 控制器 (SDC)	80
3.1.6	DDR SDRAM 控制器	81
3.2	I/O 接口	83
3.2.1	GPIO 接口	83
3.2.2	键盘接口	86
3.3	Host DMA 接口单元	89
3.3.1	Host DMA 接口	89
3.3.2	HOSTDP 的工作模式	89
3.3.3	HOSTDP 的寄存器	92
3.4	增强型并行外设接口 (EPPI)	95
3.4.1	EPPI 的结构	95
3.4.2	ITU-656 介绍	96
3.4.3	EPPI 工作模式	98
3.4.4	EPPI 的特性	102
3.4.5	EPPI 寄存器	102
3.5	以太网 MAC (EMAC)	103
3.5.1	EMAC 的接口	103
3.5.2	EMAC 的配置	106
3.5.3	基本 EMAC 代码示例	108

3.5.4	EMAC 的工业特性	112
3.5.5	EMAC 寄存器	112
3.6	存储器接口	113
3.6.1	ATAPI	113
3.6.2	NAND Flash	119
3.6.3	SDH 接口	121
3.7	定时器	124
3.7.1	概述	124
3.7.2	通用定时器	125
3.7.3	内核定时器	126
3.7.4	“看门狗”定时器	127
3.8	串行接口	127
3.8.1	SPI	127
3.8.2	SPORT 接口	133
3.8.3	UART 接口	138
3.8.4	TWI	140
3.8.5	USBD 模块	144
3.9	其他接口简介	151
3.9.1	基于 LockBox 技术的安全防护	151
3.9.2	像素合成器 (PIXC)	152
3.9.3	CAN 模块	153
第 4 章	Blackfin 系列 DSP 硬件开发	156
4.1	引导 (BOOT) 程序	156
4.1.1	引导模式设定	156
4.1.2	引导过程	157
4.2	PLL 与时钟	157
4.2.1	时钟系统概述	158
4.2.2	PLL 与时钟控制	158
4.2.3	PLL 时钟的倍频因子和分频比	159
4.2.4	PLL 的 MMR	161
4.3	动态电源管理	163
4.3.1	动态电源管理控制器 (DPMC)	163
4.3.2	运行方式	163
4.3.3	运行方式的切换	165
4.3.4	外设的定时	167
4.3.5	动态电源电压控制	167
4.4	处理器内核模式设定	169
4.4.1	概述	169
4.4.2	用户模式	170

4.4.3	监控模式	171
4.4.4	仿真模式	172
4.4.5	空闲状态	173
4.4.6	复位状态	173
4.4.7	系统复位和上电设置	174
4.5	硬件设计	176
4.5.1	引脚处理	176
4.5.2	设计复用时钟引脚	178
4.5.3	中断配置和服务	179
4.5.4	信号量	179
4.5.5	PCI 仲裁	180
4.5.6	USB 设备连接	180
4.5.7	外部存储器设计	181
4.5.8	高频设计	184
第 5 章	Blackfin 系列 DSP 指令集	186
5.1	数据寻址方式	186
5.2	Blackfin 系列 DSP 指令系统特点	187
5.2.1	Blackfin 系列 DSP 内核结构与指令	187
5.2.2	Blackfin 系列 DSP 指令说明	188
5.3	程序流程控制指令	192
5.3.1	跳转指令/条件跳转指令	192
5.3.2	调用和返回指令	193
5.3.3	循环指令	193
5.4	加载和存储指令	194
5.4.1	加载指令	194
5.4.2	存储指令	195
5.5	数据转移指令	196
5.5.1	寄存器数据转移指令	196
5.5.2	扩展半个字到一个字的数据转移指令	197
5.6	栈控制指令	197
5.6.1	进栈指令	197
5.6.2	出栈指令	198
5.6.3	连接和撤销连接指令	198
5.7	逻辑运算指令	199
5.7.1	与、或、非、异或	199
5.7.2	位方式异或指令	200
5.8	移位和循环指令	202
5.8.1	算术移位指令	202
5.8.2	逻辑移位指令	203

5.8.3	加后移位指令	204
5.8.4	移位后加指令	204
5.8.5	循环移位指令	205
5.9	算术运算指令	206
5.9.1	加、减、乘、除	206
5.9.2	最大值指令和最小值指令	210
5.9.3	绝对值指令和取补指令	210
5.9.4	舍入指令	211
5.9.5	饱和指令	211
5.9.6	符号位指令	211
5.10	位操作指令	212
5.10.1	位清除指令	212
5.10.2	位置位指令	212
5.10.3	位取反指令	212
5.10.4	位测试指令	213
5.10.5	位域存放指令	213
5.10.6	位域提取指令	214
5.10.7	位复用指令	216
5.10.8	ONES 指令	216
5.11	CC 位操作指令	217
5.11.1	比较数据寄存器、指针、累加器指令	217
5.11.2	取补 CC 位指令	217
5.11.3	传输 CC 位指令	218
5.12	外部事件操作指令	218
5.12.1	空闲指令	218
5.12.2	内核同步指令	218
5.12.3	强制仿真指令	219
5.12.4	中断指令	219
5.12.5	空指令	220
5.13	Cache 控制指令	220
5.13.1	数据 Cache 预取指令	220
5.13.2	数据 Cache 刷新指令	220
5.13.3	指令 Cache 无效指令	221
5.14	视频像素操作指令	221
5.14.1	校正指令	221
5.14.2	双 16 位操作	222
5.14.3	4 个字节数操作	223
5.15	向量操作指令	227
5.15.1	加、减、乘	227

5.15.2	向量最大值指令和向量最小值指令	230
5.15.3	向量移位指令	231
5.15.4	其他指令	232
5.16	并行指令	236
第 6 章	VisualDSP++	240
6.1	VisualDSP++ 总体介绍	240
6.1.1	VisualDSP++ 简单介绍	240
6.1.2	开发环境	243
6.2	JTAG 仿真器	258
6.2.1	JTAG 连接	258
6.2.2	ICE 配置与测试	258
6.3	C/C++ 编译器	259
6.3.1	数据类型	259
6.3.2	运行时环境与运行时库	260
6.3.3	从命令行运行编译器	260
6.3.4	在 VisualDSP++ 中配置编译器	262
6.3.5	优化控制	262
6.4	汇编器	264
6.4.1	汇编器命令	264
6.4.2	汇编程序结构和语法	265
6.4.3	预处理器	267
6.5	链接器	267
6.5.1	链接过程概述	267
6.5.2	链接文件	268
6.5.3	链接器参数选择	269
6.5.4	专家链接器(EL)	271
6.6	加载器	276
6.6.1	从命令行运行加载器	276
6.6.2	在 VisualDSP++ 中配置加载器	279
6.7	操作系统内核 (VDK)	280
6.7.1	内核的作用	280
6.7.2	调度	280
6.8	VDK 的组成	281
6.8.1	线程	281
6.8.2	调度程序	282
6.8.3	中断服务程序	284
第 7 章	软件编程	286
7.1	汇编编译器	286
7.1.1	汇编概要	286

7.1.2	支持 C 语言结构的汇编器	286
7.1.3	汇编语法	287
7.2	C/C++编译器	295
7.2.1	C/C++编译器简介	295
7.2.2	数据类型存储长度	295
7.2.3	C/C++编译语言扩展	296
7.3	预处理指令	301
7.3.1	引用头文件	301
7.3.2	宏的编写	302
7.3.3	条件汇编和编译	302
7.4	C 代码优化	307
7.4.1	循环优化	307
7.4.2	内联函数优化	310
7.4.3	使用汇编语言优化	312
7.5	C 与汇编混合编程	313
7.5.1	C/C++和汇编接口命名规则	313
7.5.2	C 运行时环境下寄存器的使用	314
7.5.3	参数传递和局部堆栈存储分配——LINK 和 UNLINK 指令	314
7.5.4	在 C/C++程序中调用汇编子程序	315
7.5.5	在汇编程序中调用 C/C++函数	316
7.6	VisualDSP++ 5.0 C/C++运行时库函数介绍	317
7.7	VisualDSP++ 5.0 DSP 库函数介绍	319
7.8	VisualDSP++5.0 设备驱动库函数简单介绍	321
第 8 章	应用实例	323
8.1	应用系统设计举例	323
8.1.1	单片 DSP 系统	323
8.1.2	多片 DSP 系统	325
8.2	MPEG-4 编码系统	326
8.2.1	MPEG-4 视频压缩方法简介	326
8.2.2	DCT 和 IDCT	327
8.2.3	量化	327
8.2.4	运动估计	327
8.2.5	熵编码	328
8.3	代码示例	328
8.3.1	PADDING 算法代码的编写和优化	328
8.3.2	DCT 算法代码的编写和优化	334
8.3.3	运动矢量预测	335
8.3.4	SAD 最小搜索	341
8.4	基于 Blackfin ADSP-BF561 芯片的 CCD 摄像头图像处理	342

8.4.1	系统简介	342
8.4.2	系统功能与指标	342
8.4.3	系统概述	343
8.4.4	系统硬件设计	344
8.4.5	系统软件设计	344
8.5	基于 Blackfin ADSP-BF561 芯片的智能视频监控系统	347
8.5.1	系统简介	347
8.5.2	系统功能与指标	348
8.5.3	系统概述	348
8.5.4	系统硬件设计	349
8.5.5	系统软件设计	350

第 1 章 数字信号处理和 DSP

1.1 数字信号处理的发展

半个世纪以来，在计算机和信息技术的带动下，数字信号处理（Digital Signal Processing）技术得到迅速发展。它已经在数据处理、工业控制和数据通信等许多领域得到广泛应用。数字信号处理的主要功能是：以数字形式对信号进行采集、变换、滤波、估值、增强、压缩、识别等处理，以得到符合人们需要的信号形式。

数字信号处理亦称信号的数字处理。从信号的数字处理技术的研究史来看，可以归纳为以下几个阶段。

- (1) 信号解析手段的研究阶段。
- (2) 各种模拟信号的数字化阶段。
- (3) 信号数字处理技术本身的发展阶段。
- (4) 现代数字信号处理阶段。

前两个阶段在时间上处在 17 世纪到 18 世纪离散数学诞生到 20 世纪 60 年代之间。第 3 阶段是以 1965 年 Colley 和 Tukey 提出快速傅里叶变换（FFT）算法为标志的。这时的 DSP 技术主要用于图像处理、快速数据传输、生物医学系统等领域。第 4 阶段的时间划分并不明确，但其重要特点是新理论、新算法不断涌现，硬件处理水平极大提高，应用领域不断扩大，数字信号处理的高速实时应用成为研究的重点和热点；同时，数字信号处理的应用领域也在不断扩大。

从信号的数字处理技术的发展历程可以看出，数字信号处理是以众多学科为理论基础的一门新兴的交叉学科，其所涉及的研究范围是相当广泛的。例如，在数学领域，微积分、概率统计、随机过程、数值分析、近世代数、复变函数、线性代数、泛函分析等都是数字信号处理的分析工具；网络理论、图论、信号与系统、控制论、通信理论等均是数字信号处理的理论基础。在学科发展上，数字信号处理又是现代控制理论（包括最优控制、人工智能、模式识别、神经网络、模糊控制）、现代通信理论、故障检测和诊断理论及现代测量等学科或技术的理论基础。在算法实现上，数字信号处理技术和计算机学科及微电子技术密不可分。可以说，数字信号处理是在许多经典理论体系的基础上发展起来的，同时又业已成为一系列新兴学科的理论基础，并与它们相互交叉，相互促进。

数字信号处理理论经过 30 年的发展已经形成了比较完善的理论体系。其主要内容包括：

- (1) 信号的采集（A/D 技术、采样定理、多采样率、量化噪声分析等）；
- (2) 离散系统分析（系统的描述、系统的单位采样响应、转移函数及频率特性等）；
- (3) 离散信号的分析（时域及频域分析、多种变换技术、信号特征的描述等）；
- (4) 信号处理的快速算法（快速傅里叶变换、快速卷积与相关等）；
- (5) 信号的估值（各种估值理论、相关函数与功率谱估计）；
- (6) 信号的建模（最常用的是 AR, MA, ARMA, PRONY 等各种模型）；

(7) 滤波技术 (各种数字滤波器的设计与实现);

(8) 信号处理中的其他特殊算法 (如采样、插值、奇异值分解、反卷积、信号重建等)。

现在, 数字信号处理进入了一个新的发展时期: 在优化、自适应、高分辨率、多维多通道分析方面的理论和方法日趋系统化; 对系统的分析已不再限于理想模型, 而是考虑到各种实际因素, 研究其鲁棒性; 对性能的描述也不仅停留在定性的水平, 而是力求给出系统的统计性能评价。以前通常假设信号及其背景是高斯的、平稳的, 对信号的分析局限于它的二阶矩和傅氏谱, 对象系统也仅限于时不变的线性因果最小相位系统; 随着数字信号处理技术的不断成熟, 人们开始研究非平稳、非高斯的信号与背景噪声, 研究时变、非因果、非最小相位、非线性的系统——这些都是现代信号处理的热点问题。

数字信号处理相对于模拟信号处理有很大的优越性, 比如, 它的精度高、灵活性大、可靠性好、易于大规模集成、易于存储, 而且可以采用多种性能优良的数字信号处理方法和算法。总之, 随着基础理论的不断完善、相关学科的不断发展和微电子技术计算机的不断进步, 可以预见, 21 世纪将是数字信号处理理论与算法的大发展时期。

1.2 DSP 在数字信号处理中的应用

数字信号处理系统的实现方法一般有以下几种。

(1) 在通用计算机上用软件实现。软件可以由用户自己编写, 也可以是现成的软件包。这种方法的缺点是速度慢, 一般只能用于算法验证、仿真研究或信号的离线处理, 而不适用于实时系统。近年来发展迅速的 Matlab 软件, 几乎可以实现所有数字信号处理的仿真, 而且 Matlab 下的部分仿真程序还可以通过转化为 C 语言, 再通过 DSP 的 C 编译器直接在 DSP 硬件上运行, 这对非实时系统或准实时系统来说是很有吸引力的。

(2) 在通用计算机系统中加上专用的加速处理机 (如单片机) 实现。单片机的接口性能良好, 设计简单, 速度也比较可观; 但由于单片机普遍采用的是冯·诺依曼总线结构, 所以数据运算 (尤其是关键的乘法运算) 速度慢, 在运算量大的实时控制系统中很难有所作为。

(3) 用通用的单片机 (如 MCS-51 和 96 系列等) 实现, 这种方法只可用于一些不太复杂的数字信号处理场合, 如数字控制等。

(4) 用通用的可编程 DSP 芯片实现。与单片机相比, DSP 芯片具有更加适合于数字信号处理的优点: 普遍采用改进的哈佛总线结构, 内部有硬件乘法器、累加器, 使用流水线结构, 具有良好的并行特性, 并有专门设计的适于数字信号处理的指令系统等。DSP 芯片的这些特点为不允许延迟的实时应用领域, 如蜂窝电话、计算机驱动器等提供了一个理想的选择。可以说, DSP 芯片的问世及飞速发展, 为信号处理技术应用于工程实际提供了可能。

(5) 用专用的 DSP 芯片实现。在一些特殊的场合, 要求的信号处理速度极高, 用一般的通用 DSP 芯片也很难实现。但有一些专用芯片将常用的信号处理算法 (如 FFT、卷积、相关等) 在芯片内部用硬件实现, 不需要进行软件编程。这种方案的缺点是灵活性差, 成本高, 而且开发工具尚不完善。

综上所述, 第 1 种方法的缺点是速度较慢, 一般可用于 DSP 算法的模拟; 第 2 种和第 5 种方法专用性强, 应用受到很大的限制, 第 2 种方法也不便于系统的独立运行; 第 3 种方

法只适用于实现简单的 DSP 算法；只有第 4 种方法才使数字信号处理的应用打开了新的局面。

虽然数字信号处理的理论发展迅速，但在 20 世纪 80 年代以前，由于实现方法的限制，数字信号处理的理论还得不到广泛的应用。直到 20 世纪 70 年代末 80 年代初世界上第一片单片可编程 DSP 芯片的诞生，才使得将理论研究成果应用到低成本的实际系统中成为可能，并且由此推动了新的理论和新的应用领域的发展。可以毫不夸张地说，20 世纪 70 年代末 80 年代初 DSP 芯片的诞生及发展对近 20 年来通信、计算机、控制等领域尤其是数字信号处理技术的发展起到十分重要的作用。

DSP 芯片的高速发展，一方面得益于集成电路技术的发展，另一方面也得益于巨大的市场。目前，DSP 芯片的价格越来越低，性能价格比日益提高，具有巨大的应用潜力。DSP 芯片的应用主要有：

(1) 通用信号处理——如数字滤波、自适应滤波、快速傅里叶变换、相关运算、谱分析、卷积、模式匹配、加窗、波形产生等；

(2) 通信——如调制解调器、编/译码器、自适应均衡器、数据加密、数据压缩、回波抵消、噪声抑制、多路复用、传真、程控交换机、蜂房移动电话、数字基站、数字留言机、扩频通信、纠错编码、可视电话等；

(3) 语音——如语音编码、语音合成、语音识别、语音增强、说话人辨认、说话人确认、语音邮件、语音存储等；

(4) 图形/图像——如二维和三维图像处理、图像压缩与传输、图像增强、动画、机器人视觉等；

(5) 军事——如保密通信、雷达信号处理、声纳处理、导航、导弹制导等；

(6) 仪器仪表——如频谱分析、函数发生、锁相环、地震信号处理等；

(7) 自动控制——如引擎控制、声控、自动驾驶、机器人控制、磁盘控制等；

(8) 医疗——如助听、超声设备、诊断工具、患者监护等；

(9) 计算机与工作站——阵列处理机、计算加速卡、图形加速卡、多媒体计算机等；

(10) 家用电器——如高保真音响、音乐合成、音调控制、玩具与游戏、数字电话/电视、汽车电子装置、住宅电子安全系统等。

随着 DSP 芯片性能价格比的不断提高，可以预见 DSP 芯片将会在更多的领域内得到更为广泛的应用。

1.3 DSP 芯片的结构特点

DSP 芯片，也称数字信号处理器，是一种特别适合于进行数字信号处理运算的微处理器，主要用于实时快速实现各种数字信号处理算法。为此，DSP 芯片除了具备普通微处理器所强调的高速运算、控制功能外，还针对实时数字信号处理，在处理器结构、指令系统、指令流程上做了很大的改动。其结构特点如下。

(1) DSP 普遍采用了数据总线和程序总线分离的哈佛结构及改进的哈佛结构，比传统处理器的冯·诺依曼结构有更高的指令执行速度。哈佛结构的主要特点是将程序和数据存储在不同的存储空间中，即程序存储器和数据存储器是两个相互独立的存储器，每个存储器独立编址，独立访问。与两个存储器相对应的是系统中设置了程序总线 and 数据总线，从而使数

据的吞吐率提高了一倍。由于程序和数据存储在两个分开的空间中，因此取指和执行能完全重叠。尽管这样做的代价是系统复杂化，但半导体工业的进步已使这一结构变得容易实现。

(2) DSP 大多采用流水线技术，即每条指令都由片内多个功能单元分别完成取指、译码、取数、执行等步骤，就像经过工厂里的生产流水线上的一道道工序一样。而同时，在流水线的其他阶段又分别有其他的指令在顺序地执行着。采用指令流水线的执行方式，可以大大提高系统的执行效率，使得系统可以低延迟或“无延迟”地执行较复杂的指令。从而在不提高时钟频率的条件下减少了每条指令的执行时间，进一步增强了处理器的数据处理能力。但流水线的采用也增加了软件设计的难度，要求设计者在程序设计的过程中尽量考虑流水线的需要。

(3) 针对滤波、相关、矩阵运算等特点，DSP 大多配有独立的乘法器和加法器，使得在同一时钟周期内可以完成相乘、累加两个运算。有的 DSP 还可以同时进行加、减、乘运算，大大提高了 FFT 的蝶形运算速度。相比之下，在一般的计算机上，算术逻辑单元 (ALU) 只能完成两个操作数的加、减及其他逻辑运算，而乘法 (或除法) 则由加法和移位来实现。在这样的计算机的汇编语言中虽然有乘法指令，但在机器内部，实际上还是由加法和移位来实现的，因此它们实现乘法运算就比较慢。在数字信号处理运算中，无论是滤波器，还是 DFT 和 FFT 运算，一般的算法中都有大量的乘法运算存在。乘法运算的速度是数字信号处理实现中的一个瓶颈问题。因此，Colley 和 Tukey 将 DFT 的乘法运算量由 N^2 次降为 $\frac{N}{2} \lg N$ 次，被公认为是数字信号处理发展史上的一个转折点，并以此作为数字信号处理这一学科的开端。同样，其他各种算法的改进也将减少算法中的乘法运算次数作为一项主要的目标。在算法 (软件) 上减少乘法运算次数的同时，在硬件上，DSP 的硬件乘法器使得乘法运算可以在一个指令周期内完成。

(4) 片内有多条总线，可以同时进行取指令和多个数据存取操作，并且有辅助寄存器用于寻址，它们可以在当前访问前/后自动修改内容以指向下一个要访问的地址 (自动变址)，并且支持循环寻址和位反序寻址。

(5) 具有硬件接口逻辑和软件等待功能，使得 DSP 这种快速芯片能与 SDRAM，SRAM，Flash，FIFO 等各种慢速存储器接口。

(6) 许多 DSP 带有多个 DMA (直接存储器访问) 通道控制器，配合片内多总线结构，可以实现内存之间、内存和外设之间的整块数据传输，数据块传输速率大大提高。

(7) 配有中断处理器、定时控制器及实时时钟，可以很方便地构成一个小规模系统。

(8) 低功耗，一般为 0.5~4W，采用低功耗技术的 DSP 甚至只有 0.05W，可用电池供电，这对嵌入式系统很合适。相比之下，Pentium 和 PowerPC 等普通微处理器的功耗则一般为 20~50W。

(9) 良好的多机并行运行特性。在一定技术条件下，DSP 芯片的单机处理能力是有限的，系统的数据处理容量还是经常会超出单片 DSP 的处理能力。随着数字信号处理器 DSP 芯片的逐年广泛使用和 DSP 芯片价格的不断降低，多片 DSP 芯片的并行处理已经成为近年来的一个研究热点，并逐渐在应用中崭露头角。

(10) 丰富的外设接口。许多 DSP 都在子系列中增加了一些特定的接口，如 USB 和 PCI 等，这使得 DSP 非常适合于一些嵌入式的应用。

上面所述的各种结构特点，使得 DSP 芯片非常适合于实时数字信号处理。也正是这种