



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

DSP应用丛书

DSP芯片的原理 与开发应用 (第4版)

张雄伟 曹铁勇 陈 亮 杨吉斌 等编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

DSP 芯片的原理与开发应用 (第4版)

张雄伟 曹铁勇 陈亮 杨吉斌 吴其前 等编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书由浅入深、全面系统地介绍了 DSP 芯片的基本原理、开发和应用。首先介绍了 DSP 芯片的基本结构和特征,以及定点和浮点 DSP 处理的运算基础;其次介绍了 DSP 芯片的开发工具,重点介绍了目前广泛应用的 CCS 集成开发环境及其使用方法;接着,介绍了基于 C 语言和汇编语言的开发方法以及 DSP 芯片的存储资源管理,较为详细地介绍了 DSP 系统的软硬件设计方法;最后,通过三个应用实例介绍了定点和浮点 DSP 芯片的系统开发过程,并介绍了数字滤波器和 FFT 等常用数字信号处理算法的 DSP 实现。

本书的目的是使读者了解 DSP 芯片的基本原理和常用 DSP 芯片的应用,熟悉 DSP 芯片开发工具及使用方法,掌握 DSP 系统的软硬件设计和应用系统开发方法,具备从事 DSP 芯片软硬件设计和系统开发的能力。

本书的特点是:结构清晰、内容全面、举例丰富、实用性强,可作为电子信息类学科的研究生和相关专业高年级大学生的教材,也可作为 DSP 芯片应用人员的培训教材,对于从事 DSP 芯片开发应用的科技人员和高校教师也具较高的参考价值。

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

DSP 芯片的原理与开发应用 / 张雄伟, 曹铁勇, 陈亮等编著. —4 版. —北京: 电子工业出版社, 2009.3

(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-121-07381-6

I. D... II. ①张...②曹...③陈... III. 数字信号—信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 140268 号

责任编辑: 高买花 特约编辑: 陈宁辉

印 刷: 北京冶金大业印刷有限公司

装 订: 三河市万和装订厂

出版发行: 电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 26.5 字数: 678 千字

版 次: 2009 年 3 月第 4 版 2009 年 3 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 49.80 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 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

第4版说明

本书第1版(1997年)、第2版(2000年)和第3版(2003年)深得广大读者的厚爱,受到了广泛的欢迎,广大DSP开发人员将本书作为DSP应用开发的重要参考书,很多开设DSP芯片原理与应用的高校将本书作为教材。2001年,本书第2版获得全国优秀畅销书奖。2006年,本书被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。2007年,本书作者被评为电子工业出版社优秀作者。对于广大读者对本书的热情支持,作者表示深深的谢意。

自本书第2版、第3版出版发行以来,又有许多高性能的DSP芯片和开发工具出现,很多高校也相继开设DSP芯片应用的课程。因此,在重新出版本书时,作者根据DSP芯片的发展,特别是为了便于利用本书实施课程教学,对本书的结构和内容作了较大程度的修订和补充,调整修改了有关章节的内容,补充完善了附录内容。

希望读者在使用本书的过程中提出宝贵的建议和意见,以便在今后的修订过程中参考。

本书得到解放军理工大学精品教材立项资助

本书得到江苏省“333 高层次人才培养工程”资助

前言

DSP 芯片,也称数字信号处理器,是一种具有特殊结构的微处理器。DSP 芯片的内部采用程序和数据分开的哈佛结构,具有专门的硬件乘法器,广泛采用流水线操作,提供特殊的 DSP 指令,可以用来快速实现各种数字信号处理算法。

自 20 世纪 80 年代初 DSP 芯片诞生以来,DSP 芯片在近 30 年时间里得到了飞速的发展,DSP 芯片的性能价格比不断提高,开发手段越来越完善,应用越来越普及。DSP 芯片已经在通信与电子系统、信号与信息处理、自动控制、雷达、军事、航空航天、医疗、家用电器等许多领域得到广泛的应用。

DSP 芯片可分为通用型和专用型两大类。通用型 DSP 芯片是一种软件可编程的 DSP 芯片,适用于各种 DSP 应用场合。专用型 DSP 芯片则将 DSP 处理的算法集成到 DSP 芯片内部,一般适用于某些专用的场合。本书主要讨论通用型的可编程 DSP 芯片。

目前,DSP 芯片的主要供应商包括美国的德州仪器公司(TI)、AD 公司、AT&T 公司和 Motorola 公司等。其中,TI 公司的 DSP 芯片占世界 DSP 芯片市场近 50%,在国内也被广泛地采用。因此,本书主要以 TI 公司的 DSP 芯片为例进行介绍。

本书共 14 章,可分为 5 个部分。

第一部分是 DSP 芯片基础,包括第 1、2、3 章。第 1 章概述 DSP 芯片的发展、分类、选择和应用;第 2 章介绍 DSP 芯片的基本结构和 TI 等公司的 DSP 芯片的主要特征;第 3 章介绍 DSP 的数值运算基础,包括定点 DSP 处理中的定标、定点和浮点 DSP 处理的有关问题。

第二部分是软件开发基础,包括第 4、5 章。第 4 章比较详细地介绍 TI 公司推出的集成开发环境——CCS 的基本原理和使用方法;第 5 章介绍用 C 语言开发 DSP 芯片的方法。

第三部分是 DSP 芯片的资源管理和汇编语言开发,包括第 6、7、8 章。第 6 章介绍 DSP 芯片的存储资源管理,重点介绍广泛采用的公共目标文件格式(COFF)和编程方法;第 7 章重点介绍 TMS320C5000 系列芯片的汇编语言指令和寻址方式;第 8 章介绍基于 C 语言和汇编语言混合编程的 DSP 软件开发。

第四部分是 DSP 系统的硬件设计,包括第 9、10、11 章。第 9 章介绍 DSP 芯片的片内集成外设的开发方法;第 10 章介绍 DSP 脱机系统的设计;第 11 章介绍 DSP 系统的硬件设计方法。

第五部分是系统设计与应用实例,包括第 12、13、14 章。第 12 章以 TMS320C203、TMS320C31、TMS320VC5409 型芯片为例介绍 3 个应用系统的设计方法及开发过程;第 13 章介绍数字滤波器的 DSP 实现,包括 FIR、IIR 和自适应滤波器的定点和浮点 DSP 实现方法;

第 14 章介绍 FFT 的定点和浮点 DSP 实现。

本书由张雄伟主编，并对全书进行统稿。第 1、3 章由张雄伟编写；第 2、8 章由曹铁勇、张雄伟编写；第 4 章由吴其前、徐光辉编写；第 5、9 章由杨吉斌编写；第 6 章由张雄伟、邹霞编写；第 7 章由陈亮编写；第 10 章由曹铁勇、陈亮编写；第 11 章由杨吉斌、张雄伟编写；第 12 章由张雄伟、贾冲编写；第 13、14 章和附录由张雄伟、陈亮、李莉编写。在本书的编写过程中，许晔峰、徐志军、王金明、黄忠虎等提出了十分有益的建议，在此向他们表示衷心的感谢。

由于水平所限，书中错误之处在所难免，恳请广大读者给予批评指正。

编 著 者

2008 年 10 月于解放军理工大学

目 录

第 1 章 概述	(1)	2.7 TI 定点 DSP 芯片	(24)
1.1 引言	(1)	2.7.1 早期的定点 DSP 芯片	(24)
1.2 DSP 系统	(2)	2.7.2 TMS320C2000 系列	(31)
1.2.1 DSP 系统的基本构成	(2)	2.7.3 TMS320C5000 系列	(32)
1.2.2 DSP 系统的特点	(2)	2.7.4 TMS320C62x/C64x 系列	(35)
1.2.3 DSP 系统的设计	(3)	2.8 TI 浮点 DSP 芯片	(36)
1.2.4 DSP 系统的开发	(4)	2.8.1 TMS320C3x	(36)
1.3 DSP 芯片	(5)	2.8.2 TMS320C67x	(39)
1.3.1 DSP 芯片的定义	(5)	2.9 其他 DSP 芯片简介	(39)
1.3.2 DSP 芯片的特点	(5)	2.9.1 AD 公司的 DSP 芯片	(39)
1.3.3 DSP 芯片的发展	(6)	2.9.2 AT&T 公司 DSP 芯片	(41)
1.3.4 TI 公司的 DSP 芯片	(7)	2.9.3 Motorola 公司 DSP 芯片	(41)
1.3.5 DSP 芯片的分类	(8)	2.10 小结	(42)
1.3.6 DSP 芯片的选择	(9)	2.11 习题与思考题	(42)
1.3.7 DSP 系统的运算量	(10)	第 3 章 DSP 的数值运算基础	(43)
1.3.8 DSP 芯片的应用	(11)	3.1 引言	(43)
1.4 小结	(12)	3.2 定点的基本概念	(43)
1.5 习题与思考题	(12)	3.2.1 数的定标	(43)
第 2 章 DSP 芯片的基本结构和特征	(13)	3.2.2 数的转换	(44)
2.1 引言	(13)	3.2.3 溢出保护	(45)
2.2 DSP 芯片的基本结构	(13)	3.2.4 符号扩展	(46)
2.3 中央处理单元 (CPU)	(14)	3.2.5 舍入与截尾	(46)
2.3.1 算术逻辑单元 (ALU)	(14)	3.3 定点运算实现的基本原理	(47)
2.3.2 累加器	(15)	3.3.1 加法/减法运算的 C 语言	(47)
2.3.3 桶形移位寄存器	(16)	定点模拟	(47)
2.3.4 乘累加单元	(16)	3.3.2 乘法运算的 C 语言定点	(49)
2.3.5 寻址单元	(18)	模拟	(49)
2.4 总线结构和流水线	(18)	3.3.3 除法运算的 C 语言定点	(50)
2.5 片内存储器	(20)	模拟	(50)
2.6 集成外设	(22)	3.3.4 程序变量的 Q 值确定	(50)
2.6.1 通用 I/O 接口	(22)	3.3.5 浮点至定点变换的 C	(51)
2.6.2 定时器	(22)	程序举例	(51)
2.6.3 主机接口 (HPI)	(22)	3.4 DSP 定点算术运算实现的	(53)
2.6.4 串行口	(23)	基本原理	(53)
2.6.5 软件可编程等待状态	(24)	3.4.1 定点乘法	(53)
产生器	(24)	3.4.2 定点加法	(55)

3.4.3 定点除法	(55)	6.2.1 片内存储器	(123)
3.5 非线性运算定点实现方法	(57)	6.2.2 外部扩展存储器	(124)
3.5.1 级数展开法	(57)	6.3 存储区的组织	(124)
3.5.2 查表法	(58)	6.3.1 程序空间	(124)
3.5.3 混合法	(59)	6.3.2 数据空间	(125)
3.6 浮点数的表示格式	(61)	6.3.3 I/O 空间	(126)
3.6.1 IEEE 浮点数格式	(61)	6.3.4 存储器映射寄存器	(126)
3.6.2 TMS320C3x 浮点数格式	(62)	6.3.5 TMS320VC5416 的存储资源	(126)
3.7 基本的浮点运算	(64)	6.4 DSP 芯片中的代码存储结构	(128)
3.7.1 浮点乘法和加减法	(64)	6.4.1 块	(128)
3.7.2 浮点除法	(64)	6.4.2 汇编器对块的处理	(129)
3.8 非线性浮点运算的快速实现	(65)	6.4.3 链接器对块的处理	(130)
3.9 小结	(67)	6.4.4 程序重定位	(131)
3.10 习题与思考题	(67)	6.4.5 COFF 文件中的符号	(132)
第4章 DSP 芯片的开发环境	(68)	6.4.6 COFF 格式编程示例	(133)
4.1 引言	(68)	6.5 存储区分配示例	(134)
4.2 软件开发	(68)	6.5.1 TMS320C2xx 链接命令文件示例	(134)
4.3 软件开发环境	(70)	6.5.2 TMS320VC5416 链接命令文件示例	(135)
4.3.1 CCS 安装与设置	(70)	6.6 小结	(136)
4.3.2 CCS 基本环境	(74)	6.7 习题与思考题	(136)
4.3.3 CCS 工程开发实例	(88)	第7章 TMS320C5000 DSP 芯片的汇编语言	(137)
4.3.4 DSP/BIOS	(99)	7.1 汇编语言源程序格式	(137)
4.4 硬件开发	(101)	7.2 汇编源程序中常见符号和伪指令	(138)
4.5 硬件开发环境	(102)	7.3 汇编指令系统	(141)
4.6 小结	(103)	7.4 寻址方式	(185)
4.7 习题与思考题	(103)	7.4.1 数据寻址	(185)
第5章 基于C语言的DSP芯片开发	(104)	7.4.2 程序寻址	(194)
5.1 引言	(104)	7.5 小结	(196)
5.2 CCS 支持的C语言	(104)	7.6 习题与思考题	(196)
5.2.1 变量和常数	(105)	第8章 基于C和汇编语言混合编程的DSP芯片开发	(197)
5.2.2 函数	(110)	8.1 引言	(197)
5.2.3 预处理	(113)	8.2 基于C和汇编语言的混合编程方法	(197)
5.3 C语言程序代码的优化	(113)	8.2.1 独立的C和汇编模块接口	(197)
5.3.1 C语言程序代码编译分析	(113)		
5.3.2 C语言程序的优化方法	(118)		
5.4 小结	(122)		
5.5 习题与思考题	(122)		
第6章 DSP 芯片的存储资源管理	(123)		
6.1 引言	(123)		
6.2 DSP 芯片的存储器	(123)		

8.2.2 从 C 程序中访问汇编 程序变量	(200)	9.6 基于 CSL 的外设开发	(258)
8.2.3 在汇编程序中访问 C 程序变量	(201)	9.6.1 CSL 概述	(259)
8.2.4 在 C 程序中直接嵌入 汇编语句	(202)	9.6.2 CSL 程序开发	(259)
8.2.5 修改 C 编译器的输出	(204)	9.7 小结	(264)
8.3 基于 C 和汇编语言的混合 编程举例	(205)	9.8 习题与思考题	(264)
8.3.1 TMS320C3x/C4x 混合 编程举例	(205)	第 10 章 DSP 脱机系统设计	(265)
8.3.2 TMS320C2x/C5x 混合 编程举例	(206)	10.1 引言	(265)
8.3.3 TMS320C54x 混合编程 举例	(207)	10.2 DSP 芯片的初始化	(265)
8.4 DSP 代码的优化	(207)	10.2.1 寄存器初始化	(265)
8.4.1 C 代码的优化	(208)	10.2.2 中断矢量表初始化	(268)
8.4.2 汇编代码的优化	(211)	10.2.3 串行口初始化	(270)
8.5 小结	(218)	10.3 DSP 系统的 BOOT 设计	(274)
8.6 习题与思考题	(218)	10.3.1 TMS320C50 的 BOOT 设计	(274)
第 9 章 DSP 芯片集成外设的开发	(219)	10.3.2 TMS320C54x 的 BOOT 设计	(276)
9.1 引言	(219)	10.3.3 TMS320C55x 的 BOOT 设计	(282)
9.2 中断	(220)	10.3.4 TMS320C6x 的 BOOT 设计	(285)
9.2.1 概述	(220)	10.4 小结	(286)
9.2.2 DSP 中断资源	(224)	10.5 习题与思考题	(287)
9.2.3 DSP 中断程序实现	(226)	第 11 章 DSP 硬件系统设计	(288)
9.3 DMA	(227)	11.1 引言	(288)
9.3.1 DMA 数据传输模式	(228)	11.2 DSP 系统的基本硬件设计	(288)
9.3.2 DSP 的 DMA 控制	(228)	11.2.1 电源电路	(288)
9.3.3 DSP 的 DMA 配置举例	(232)	11.2.2 复位电路	(290)
9.4 时序模块	(234)	11.2.3 引脚的电平转换与处理	(291)
9.4.1 PLL 模块	(234)	11.2.4 硬件系统的可靠性 设计	(294)
9.4.2 定时模块	(236)	11.3 DSP 典型硬件系统举例	(297)
9.4.3 等待状态发生器	(238)	11.3.1 外部存储器接口设计	(297)
9.5 接口模块	(240)	11.3.2 模数接口电路的设计	(305)
9.5.1 概述	(240)	11.3.3 通信接口的设计	(309)
9.5.2 多通道缓冲串行口	(241)	11.3.4 主从式系统的设计	(311)
9.5.3 主机接口 (HPI)	(248)	11.4 小结	(320)
9.5.4 外部存储器接 口 (EMIF)	(253)	11.5 习题与思考题	(320)
9.5.5 通用 I/O 口	(258)	第 12 章 DSP 芯片应用系统开发 实例	(321)
		12.1 引言	(321)
		12.2 一个基于 TMS320C203 DSP	

应用系统的开发	(321)	13.3.3 IIR 滤波器的浮点 DSP	(354)
12.2.1 系统简介	(321)	实现	(354)
12.2.2 系统硬件设计	(322)	13.4 自适应滤波器的 DSP 实现	(357)
12.2.3 系统软件设计	(324)	13.4.1 自适应滤波器的基本	(357)
12.2.4 硬件调试	(325)	原理	(357)
12.2.5 软件调试	(327)	13.4.2 自适应滤波器的 TMS320C2xx	(358)
12.2.6 独立系统实现	(327)	定点实现	(358)
12.3 一个基于 TMS320C31 DSP	(328)	13.4.3 自适应滤波器的 TMS320C54x	(360)
系统的开发	(328)	定点实现	(360)
12.3.1 系统简介	(328)	13.4.4 自适应滤波器的 TMS320C3x	(364)
12.3.2 系统构成	(328)	浮点实现	(364)
12.3.3 系统软硬件设计	(329)	13.5 小结	(365)
12.3.4 软硬件调试	(331)	13.6 习题与思考题	(365)
12.3.5 独立系统实现	(333)	第 14 章 FFT 算法的 DSP 实现	(366)
12.4 一个基于 TMS320VC5409 DSP	(334)	14.1 引言	(366)
应用系统的开发	(334)	14.2 FFT 的基本原理	(366)
12.4.1 G.729A 及系统简介	(334)	14.2.1 DFT 的基本原理	(366)
12.4.2 系统构成	(335)	14.2.2 FFT 算法的导出	(367)
12.4.3 系统软硬件设计	(336)	14.3 FFT 算法的 C 语言实现	(371)
12.4.4 系统调试	(337)	14.4 FFT 的定点 DSP 实现	(373)
12.4.5 独立系统形成	(338)	14.4.1 运算溢出及避免方法	(373)
12.5 小结	(340)	14.4.2 FFT 的 TMS320C2xx	(374)
12.6 习题与思考题	(340)	实现	(374)
第 13 章 数字滤波器算法的 DSP 实现	(341)	14.4.3 FFT 的 TMS320C54x	(379)
13.1 引言	(341)	实现	(379)
13.2 FIR 滤波器的 DSP 实现	(341)	14.5 FFT 的浮点 DSP 实现	(385)
13.2.1 FIR 滤波器的基本原理	(341)	14.6 小结	(392)
和设计方法	(341)	14.7 习题与思考题	(392)
13.2.2 FIR 滤波器的定点 DSP	(344)	附录 A TMS320C54X 指令集	(393)
实现	(344)	附录 B TI 格式文件转化为二进制	(400)
13.2.3 FIR 滤波器的浮点 DSP	(347)	文件	(400)
实现	(347)	附录 C 8 位 μ 律/16 位线性互换的	(404)
13.3 IIR 滤波器的 DSP 实现	(349)	C 语言程序	(404)
13.3.1 IIR 滤波器的基本原理和	(349)	附录 D μ 律到线性变换表	(406)
设计方法	(349)	附录 E 缩写词的英文对照	(407)
13.3.2 IIR 滤波器的定点 DSP	(352)	参考文献	(410)
实现	(352)		

第1章 概 述

1.1 引 言

数字信号处理(DSP)是一门涉及多种学科且又广泛应用于许多领域的学科。20世纪60年代以来,随着信息技术的飞速发展,DSP技术应运而生并得到迅速的发展。目前,DSP技术已经在通信、自动控制、航空航天、军事、仪器仪表、家用电器等众多领域里得到越来越广泛的应用,DSP已经来到了我们每个人的身边。

DSP是指利用计算机、微处理器或专用处理设备,以数字形式对信号进行的采集、变换、滤波、估值、增强、压缩、识别等处理。

DSP是围绕着DSP的理论、实现和应用等几个方面发展起来的。DSP在理论上的发展推动了DSP应用的发展;反过来,越来越广泛的DSP应用又促进了DSP理论的发展;DSP的实现则是理论和应用之间的桥梁。

DSP以众多学科的理论为基础,它所涉及的范围极其广泛。例如,数学领域的微积分、概率统计、随机过程、数值分析等都是DSP的基本工具,与网络理论、信号与系统、控制论、通信理论、故障诊断等也密切相关。一些新兴的学科,如人工智能、模式识别、神经网络等,都是与DSP密不可分。因此可以说,DSP把许多经典的理论体系作为自己的理论基础,同时又使自己成为一系列新兴学科的理论基础。

DSP的实现一般有以下几种方法:

- (1) 在通用的计算机(如PC)上用软件(如C语言)实现。
- (2) 在通用计算机系统中加上专用的加速处理机实现。
- (3) 用通用的单片机(如MCS-51、MSP430系列等)实现。
- (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DSP的软件和硬件资源,可用于复杂的DSP算法。
- (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,用通用DSP芯片很难实现,例如专用于FFT、数字滤波、卷积、相关等算法的DSP芯片,这种芯片将相应的信号处理算法在芯片内部用硬件实现,无需进行编程。

在上述几种方法中,第1种方法的优点是实现方便,但缺点是速度较慢,一般可用于DSP算法的模拟与仿真;第2种方法需要在计算机上增加专用处理板,实现比较复杂,也不便于系统的脱机运行;第3种方法只适用于实现简单的DSP算法,可用于一些不太复杂的DSP应用领域;第5种方法专用性强,仅适用于特定的算法,应用受到比较大的限制;而第4种方法,由于DSP芯片的软硬件资源丰富,开发也比较方便,为DSP的应用打开了新的局面。

虽然DSP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,DSP的理论还得不到广泛的应用。直到20世纪80年代初世界上第一片单片可编程DSP芯片的诞生,才将理论研究成果广泛应用到低成本的实际系统中,并且推动了新的理论和应用领域的发展。

可以毫不夸张地说, DSP 芯片的诞生及发展对最近二十多年来自动控制、通信、计算机应用等领域的发展起到十分重要的作用。

学习掌握 DSP 芯片的开发应用对于实现各种 DSP 的应用系统具有十分重要的实际意义。

1.2 DSP 系统

1.2.1 DSP 系统的基本构成

图 1-1 示出了一个典型的 DSP 系统。图中, 输入信号可以有各种各样的形式, 例如, 可以是麦克风采集的语音信号, 也可以是编码后在数字链路上的传输信号或存储在计算机里的摄像机图像信号等。



图 1-1 典型的 DSP 系统

一般地, 输入信号首先进行带限滤波和抽样, 然后进行模/数 (A/D) 变换将信号转换成数字比特流。根据奈奎斯特抽样定理, 对低通模拟信号, 为保持信息的不丢失, 抽样频率至少必须是输入带限信号最高频率的 2 倍。

DSP 芯片的输入是 A/D 变换后得到的时间离散的数字信号, 根据系统要求, DSP 芯片对输入信号按照特定的算法进行处理, 这是 DSP 系统的关键。最后, 处理后的数字样值再经数/模 (D/A) 变换转换为模拟样值, 之后再再进行平滑滤波就可得到连续的模拟波形。

需要指出的是, 上面给出的 DSP 应用系统只是一个典型的模型系统, 并不是所有的 DSP 应用系统都必须包括模型系统中的各个部分。例如, 语音识别系统在输出端并不是连续的波形, 而是识别结果, 如文字、数字、标点符号等。有些输入信号本身就是数字信号, 如 CD 信号, 因此就不必进行 A/D 变换了。

1.2.2 DSP 系统的特点

DSP 系统以数字信号处理为基础, 因此具有数字处理的全部优点:

- (1) 接口方便。DSP 应用系统与其他以现代数字技术为基础的系统或设备都是相互兼容的。与这样的系统接口以实现某种功能要比模拟系统与这些系统接口要容易得多。
- (2) 编程方便。DSP 应用系统中的可编程 DSP 芯片可使设计人员在开发过程中灵活方便地对软件进行修改和升级。
- (3) 稳定性好。DSP 应用系统以数字处理为基础, 受环境温度以及噪声的影响较小, 可靠性高。
- (4) 精度高。16 位数字系统可以达到 10^{-5} 的精度 ($1/2^{15}$)。
- (5) 可重复性好。模拟系统的性能受元器件参数性能变化比较大, 而数字系统基本不受影响, 因此数字系统便于调试、测试和大规模生产。

(6) 集成方便。DSP 应用系统中的数字部件有高度的规范性，便于大规模集成。当然，数字信号处理也存在一定的缺点。例如，对于简单的信号处理任务，若采用 DSP 则可能会使成本增加；DSP 系统中的高速时钟可能带来高频干扰和电磁泄漏等问题。

DSP 应用系统的突出优点已经使之在工业控制、通信、语音、图像、雷达、生物医学、仪器仪表等许多领域得到越来越多的应用。



1.2.3 DSP 系统的设计

图 1-2 是 DSP 应用系统设计的一般流程。

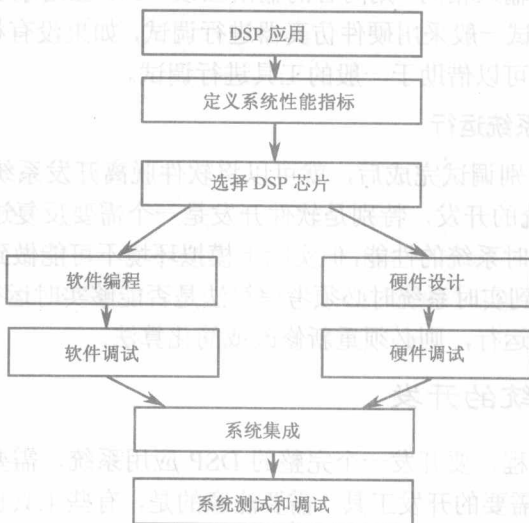


图 1-2 DSP 应用系统设计的一般流程

1. 定义系统性能指标

在设计 DSP 系统之前，首先必须根据应用系统的目标确定系统的性能指标、信号处理的要求。通常可用数据流程图、数学运算序列、正式的符号或自然语言来描述。

2. 采用高级语言进行性能模拟

一般来说，为了实现系统的最终目标，需要对输入的信号进行适当的处理，而处理方法的不同会导致不同的系统性能。要得到最佳的系统性能必须在这一步确定最佳的处理方法，即数字信号处理的算法，因此这一步也称算法模拟或仿真阶段。例如，语音编码算法就是要在确定的压缩比条件下，获得最佳的合成语音。算法模拟所用的输入数据是实际采集信号，通常以计算机文件的形式存储为数据文件。有些算法模拟时所用的输入数据并不一定要是实际采集的信号数据，只要能够验证算法的可行性，输入假设的数据也是可以的。

3. 设计实时 DSP 应用系统

实时 DSP 应用系统的设计包括硬件设计和软件设计两个方面。硬件设计首先要根据系统运算量的大小、对运算精度的要求、系统成本限制以及体积、功耗等要求选择合适的 DSP 芯片。然后，设计 DSP 芯片的外围电路及其他电路。软件设计和编程主要根据系统要求和所选的 DSP 芯片编写相应的 DSP 程序，可以采用汇编语言，也可以用高级语言（如 C 语言）编程。当然由

于高级语言并不是完全针对数字信号处理应用设计的，而基于芯片结构设计的汇编语言在实现代码时的效率更高，因此在实际应用系统中常常采用高级语言和汇编语言的混合编程方法，即首先利用高级语言进行编程，然后针对算法运算量大的地方，利用手工的方式进行优化。采用这种方法，既可缩短软件开发的周期，提高程序的可读性和可移植性，又能满足系统实时运算的要求。

4. 借助开发工具进行软硬件调试

软件的调试一般借助于 DSP 开发工具，如软件模拟器（Simulator）、DSP 开发系统或仿真器（Emulator）等。调试 DSP 算法时，一般采用将实时结果与模拟结果进行比较的方法，如果实时程序和模拟程序的输入相同，则两者的输出应该一致。应用系统的其他软件可以根据实际情况进行调试。硬件调试一般采用硬件仿真器进行调试，如果没有相应的硬件仿真器，且硬件系统不是十分复杂，也可以借助于一般的工具进行调试。

5. 系统集成与独立系统运行

系统的软件和硬件分别调试完成后，就可以将软件脱离开发系统而直接在实际应用系统上运行。当然，DSP 应用系统的开发，特别是软件开发是一个需要反复进行的过程，虽然通过算法模拟基本上可以知道实时系统的性能，但实际上模拟环境不可能做到与实时系统环境完全一致，而且将模拟算法移植到实时系统时必须考虑算法是否能够实时运行的问题。如果算法运算量太大不能在硬件上实时运行，则必须重新修改或简化算法。



1.2.4 DSP 系统的开发

根据图 1-2 的设计流程，要开发一个完整的 DSP 应用系统，需要借助于诸多软硬件开发工具，表 1-1 列出了可能需要的开发工具。需要注意的是，有些工具也不一定是必备的，如逻辑分析仪。有些工具则是可选的，如算法模拟时可以用 C 语言，也可以用 MATLAB 语言，或者先进行 MATLAB 模拟，再进行 C 语言模拟，还可以用其他程序语言。在采用美国得克萨斯仪器公司（Texas Instruments, TI）的 DSP 芯片进行系统开发时，一般需采用 CCS（Code Composer Studio）工具软件，这是一个集成开发环境，包括了编辑、编译、汇编、链接、软件模拟、调试等几乎所有需要的软件。此外，如果 DSP 应用系统中还有其他微处理器（如 MCS-51 系列单片机），当然还必须要有相应的开发工具支持。

表 1-1 DSP 应用系统开发工具支持

开发步骤	开发内容	开发工具支持	
		硬件支持	软件支持
1	算法模拟	计算机	C 语言、MATLAB 语言等
2	DSP 软件编程	计算机	编辑器（如 Edit、Ultraedit 等）
3	DSP 软件调试	计算机、DSP 仿真器等	DSP 代码生成工具（包括 C 编译器、汇编器、链接器等）、DSP 软件模拟器 Simulator、CCS 等
4	DSP 硬件设计	计算机	电路设计软件（如 Protel 99 等）、其他相关软件（如 EDA 软件等）
5	DSP 硬件调试	计算机、DSP 仿真器、示波器、信号发生器、逻辑分析仪等	相关支持软件
6	系统集成	计算机、DSP 仿真器、编程器、示波器、信号发生器、逻辑分析仪等	相关支持软件

1.3 DSP 芯片

1.3.1 DSP 芯片的定义

DSP 芯片,即数字信号处理芯片(也称数字信号处理器),是一种特别适合于进行 DSP 的微处理器,其主要应用是实时快速地实现各种 DSP 算法。根据 DSP 的要求,DSP 芯片一般具有如下一些优点:

- (1) 在一个指令周期内一般至少可完成一次乘法和一次加法;
- (2) 程序空间和数据空间分开,可以同时访问指令和数据;
- (3) 片内具有快速 RAM,通常可通过独立的数据总线在两块中同时访问;
- (4) 具有低开销或无开销循环及跳转的硬件支持;
- (5) 快速的中断处理和硬件 I/O 支持;
- (6) 具有在单周期内操作的多个硬件地址产生器;
- (7) 可以并行执行多个操作;
- (8) 支持流水线操作,使取指、译码和执行等操作可以并行执行。

与通用微处理器相比,早期推出的 DSP 芯片的其他通用功能相对较弱些。但是,近些年来新推出的 DSP 芯片已经将通用微处理器的一些功能集成在芯片中,有的甚至将 DSP 核和 ARM 核集成在一个芯片中(如 OMAP),DSP 芯片已经可以实现普通微处理器的功能。目前市场上推出的智能手机,大多是基于 OMAP 平台实现的。

1.3.2 DSP 芯片的特点

为了快速实现 DSP 运算,DSP 芯片一般都采用特殊的软硬件结构和指令系统。下面以美国 TI 公司的 TMS320 系列为例介绍 DSP 芯片的主要特点。

TMS320 系列 DSP 芯片的主要特点包括:(1)采用哈佛结构实现内部总线;(2)采用流水线操作方式实现指令操作;(3)乘法采用专用的硬件乘法器实现;(4)具有高效的 DSP 指令。这些特点使得 DSP 芯片可以实现快速的 DSP 运算,并使大部分运算(例如乘累加操作)能够在 1 个指令周期内完成。由于 TMS320 DSP 芯片是软件可编程器件,因此具有通用微处理器方便灵活的特点。

1. 哈佛结构

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 数据总线两条总线,从而使数据的吞吐率提高了一倍。

2. 流水线操作

与哈佛结构相关,DSP 芯片广泛采用流水线以减少指令执行时间,从而增强了处理器的处理能力。采用流水线操作,处理器可以并行处理多条指令,每条指令处于流水线上的不同阶段。

3. 专用的硬件乘法器

乘法是 DSP 的重要组成部分。例如,在一般形式的 FIR 滤波器中,对每个滤波器抽头,必须做一次乘法和一次加法。乘法速度越快,DSP 芯片的性能就越高。在早期的通用微处理器中,乘法指令由一系列加法来实现,故需许多个指令周期来完成。相比而言,DSP 芯片的特征就是有一个专用的硬件乘法器。在 TMS320 系列中,由于具有专用的硬件乘法器,乘法可在一个指令周期内完成。从最早的 TMS32010 实现 FIR 的每个抽头算法可以看出,滤波器每个抽头需要一条乘法指令 MPY:

LT ; 装乘数到 T 寄存器

DMOV ; 在存储器中移动数据以实现延迟

MPY ; 相乘

APAC ; 将乘法结果加到 ACC 中

其他三条指令用来将乘数装入到乘法器电路(LT)、移动数据(DMOV)以及将乘法结果(存在乘积寄存器 P 中)加到 ACC 中(APAC)。因此,若采用 256 抽头的 FIR 滤波器,这四条指令必须重复执行 256 次,且 256 次乘法必须在一个抽样间隔内完成。在典型的通用微处理器中,每个抽头需要 30~40 个指令周期,而 TMS32010 只需 4 条指令。如果采用特殊的 DSP 指令或采用 TMS320C54x 等新一代的 DSP 芯片,可进一步降低 FIR 抽头的计算时间。

4. 高效的 DSP 指令

DSP 芯片的另一个特征是采用高效的指令。例如,在数字信号处理中,延迟操作非常重要,在 TMS32010 中这个延迟就是由 DMOV 来实现,它完成数据移位功能。TMS32010 中的另一个高效指令是 LTD,它在一个指令周期内完成 LT、DMOV 和 APAC 三条指令。LTD 和 MPY 指令可以将 FIR 滤波器抽头计算从 4 条降为 2 条。在第二代处理器中,如 TMS320C25,增加了一些更高效的指令,即 RPT (RPTK) 和 MACD 指令,采用这些高效指令,可以进一步将每个抽头的运算时间从 2 条降为 1 条:

RPTK 255 ; 重复执行下条指令 256 次

MACD ; 可完成 LT、DMOV、MPY 及 APAC 指令功能

哈佛结构、流水线操作、专用的硬件乘法器、高效的 DSP 指令再加上集成电路的优化设计可使 DSP 芯片的指令周期在 200 ns 以下。TMS320 系列 DSP 芯片的指令周期已经从第一代的 400 ns 降低至现在的 20 ns 以下。快速的指令执行时间使得 DSP 芯片能够实时实现许多 DSP 应用。



1.3.3 DSP 芯片的发展

世界上第一片单片 DSP 芯片应当是 1978 年 AMI 公司宣布的 S2811,1979 年美国 Intel 公司宣布的商用可编程器件 2920 是 DSP 芯片的一个主要里程碑。但这两种芯片内部都没有现代 DSP 芯片所必须具有的单周期乘法器。1980 年,日本 NEC 公司推出的 μ PD7720 是第一片具有乘法器的商用 DSP 芯片。

在这之后,最成功的 DSP 芯片当数美国 TI 公司的一系列产品。TI 公司在 1982 年成功推出其第一代 DSP 芯片 TMS32010 及其系列产品 TMS32011、TMS320C10/C14/C15/C16/C17 等,之后相继推出了第二代 DSP 芯片 TMS32020、TMS320C25/C26/C28,第三代 DSP 芯片 TMS320C30/C31/C32,第四代 DSP 芯片 TMS320C40/C44,第五代 DSP 芯片 TMS320C5x/C54x,

第二代 DSP 芯片的改进型 TMS320C2xx, 集多片 DSP 芯片于一体的高性能 DSP 芯片 TMS320C8x 以及目前速度最快的第六代 DSP 芯片 TMS320C62x/C64x/C67x 等。

第一片采用 CMOS 工艺生产浮点 DSP 芯片的是日本的 Hitachi 公司, 该公司于 1982 年推出了浮点 DSP 芯片。1983 年, 日本 Fujitsu 公司推出的 MB8764, 其指令周期为 120 ns, 且具有双内部总线, 从而使处理的吞吐量发生了一个大的飞跃。而第一片高性能的浮点 DSP 芯片应是 AT&T 公司于 1984 年推出的 DSP32。

与其他公司相比, Motorola 公司在推出 DSP 芯片方面相对较晚。1986 年, 该公司推出了定点处理器 MC56001。1990 年, 推出了与 IEEE 浮点格式兼容的浮点 DSP 芯片 MC96002。

美国模拟器件公司 (Analog Devices, 简称 AD 公司) 在 DSP 芯片市场上也占有较大的份额, 相继推出了一系列具有自己特点的 DSP 芯片, 其定点 DSP 芯片有 ADSP2101/2103/2105、ADSP2111/2115、ADSP2161/2162/2164 以、ADSP2171/2181 等, 浮点 DSP 芯片有 ADSP21000/21020、ADSP21060/21062 等。

自 1980 年以来, DSP 芯片得到了突飞猛进的发展, DSP 芯片的应用越来越广泛。从运算速度来看, MAC (一次乘法和一次加法) 时间已经从 20 世纪 80 年代初的 400 ns (如 TMS32010) 降低到 10 ns 以下 (如 TMS320C54x/C55x、TMS320C62x/67x/C64x 等), 处理能力提高了几十倍, 甚至上百倍, DSP 芯片片内 RAM 数量增加一个数量级以上。从制造工艺来看, 1980 年采用 4 μm 的 N 沟道 MOS (NMOS) 工艺, 而现在则普遍采用亚微米 CMOS 工艺。DSP 芯片的引脚数量从 1980 年的最多 64 个增加到现在的 200 个以上, 引脚数量的增加, 意味着结构灵活性的增加, 如外部存储器的扩展和处理器间的通信等。芯片封装也从开始的 DIP 封装变成现在的 BGA 封装。此外, DSP 芯片的发展, 使 DSP 应用系统的成本、体积、重量和功耗都有很大程度的下降。表 1-2 是 TI 公司 DSP 芯片 1982 年、1992 年、1999 年、2002 年的典型值发展比较表。

表 1-2 TI DSP 芯片发展比较表 (典型值)

年份	1982	1992	1999	2002
制造工艺	4 μm NMOS	0.8 μm CMOS	0.3 μm CMOS	<0.18 μm CMOS
MIPS	5 MIPS	40 MIPS	100 MIPS	160 MIPS
MHz	20 MHz	80 MHz	100 MHz	160 MHz
内部 RAM	144 字	1 K 字	32 K 字	64 K 字
内部 ROM	1.5 K 字	4 K 字	16 K 字	32 K 字
价格	\$150.00	\$15.00	\$5.00~\$25.00	\$5.00~\$25.00
功耗	250 mW/MIPS	12.5 mW/MIPS	0.45 mW/MIPS	0.05 mW/MIPS

1.3.4 TI 公司的 DSP 芯片

目前, TI 公司的一系列 DSP 产品已经成为当今世界上最有影响的 DSP 芯片。TI 公司已经成为世界上最大的 DSP 芯片供应商, 其 DSP 市场占全世界份额的近 50%。

TI 公司常用的 DSP 芯片, 可以归纳为三大系列, 即

- TMS320C2000 系列: 包括 TMS320C2xx/C24x/C28x 等;
- TMS320C5000 系列: 包括 TMS320C54x/C55x/OMAP 等;
- TMS320C6000 系列: 包括 TMS320C62x/C67x/C64x 等。

此外, 还有浮点芯片 TMS320C3x 系列, 其典型芯片是 TMS320VC33。