

高等学校“十一五”规划教材

TMS320LF240x 系列
DSP 原理、开发与应用

张毅刚 赵光权 编著
孙 宁 俞 洋

哈爾濱工業大學出版社

内 容 简 介

本书介绍了美国 TI 公司 16 位定点的 TMS320LF240x 系列 DSP 芯片及其应用系统设计。TMS320LF240x 系列芯片是当前世界上集成度最高、性能最强并广泛应用于自动控制、智能仪器仪表、机电一体化、工业自动化等领域的 DSP 芯片。本书主要介绍了 TMS320LF240x 系列芯片的硬件结构、片内各外设部件、应用系统的硬件设计、仿真开发系统的使用,以及如何使用 C 语言、C 语言和汇编语言混合编写应用程序。

本教材可供自动控制、智能仪器仪表、机电一体化、工业自动化专业的硕士研究生、本科生使用,也可供从事上述领域的广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

TMS320LF240x 系列 DSP 原理、开发与应用/张毅刚等编著.

哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2006.8

ISBN 7-5603-2374-X

I . T… II . 张… III . 数字信号 - 信息处理系统

IV . TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 092459 号

策划编辑 王超龙

责任编辑 杨明蕾 唐 蕾

封面设计 卞秉利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 20.25 字数 487 千字

版 次 2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数 1~3 000 册

定 价 35.00 元

前 言

本书为高等学校“十一五”规划教材。

目前,国内许多大学已经为硕士研究生及本科生开设了有关数字信号处理器(DSP, Digital Signal Processor)应用设计的课程,国内的许多科研机构和企业已经对 DSP 进行了广泛的开发和应用研究,因此迫切需要这方面的技术人才及相应的教材和参考书。

DSP 自 20 世纪 80 年代诞生以来,在短短的时间里得到了飞速发展。由于它既有独特的高速数字信号处理功能,又具有实时性强、低功耗、高集成度等嵌入式微处理器的特点,所以被广泛地应用在通信、图像处理、工业自动化及自动控制、智能仪器仪表、机电一体化、航空、航天、网络及家用电器等各个领域,成为最有发展潜力的技术和产业之一,具有广阔的市场空间。

美国 TI(德克萨斯仪器)公司是当今世界上最大的 DSP 芯片生产厂商,其产品的世界 DSP 市场占有率达 60% 以上。TI 公司于 1982 年推出的 TMS320 系列 DSP 是目前世界上最有影响的主流 DSP 产品。本书介绍的是 TMS320 系列 DSP 的三大主流产品(TMS320C2000 家族、TMS320C5000 家族、TMS320C6000 家族)中 TMS320C2000 家族中的 TMS320LF240x 系列。

TMS320LF240x 系列是 TMS320C2000 家族中最新的、功能强大的 DSP 芯片,其中最具革命性的产品是 TMS320LF2407/LF2407A,它是目前世界上集成度最高、性能最强的用于控制领域的 DSP 芯片。

TMS320LF2407/LF2407A 芯片内集成了 32 K 字闪存、2.5 K 字 RAM、高速双 8 路或单 16 路 10 位模数转换器(ADC)、16 个脉宽调制(PWM)通道、1 个异步串行通信接口 SCI、1 个同步串行外设接口 SPI、1 个 CAN 2.0B 接口模块。本书主要以 TMS320LF2407/LF2407A 为主进行讲解。

全书共分 15 章。第 1 章对 DSP 进行了综述;第 2 章概述了 TMS320C2000 家族中的 TMS320LF240x 系列;第 3 章至第 12 章详细地介绍了 TMS320LF240x 系列的 CPU 内核、片内各外设部件;第 13 章至第 15 章分别介绍了如何进行以 TMS320LF240x 为核心的应用系统开发、硬件系统设计,以及如何使用 C 语言、C 语言和汇编语言混合进行编程。

本书可作为工科院校自动控制、智能仪器仪表、机电一体化、工业自动化专业的本科生、硕士研究生学习 DSP 课程的教材,也可供开发、使用 TMS320LF240x 系列的工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所张毅刚教授担任主编,并完成了全书的统稿工作。参加编写工作的还有赵光权、孙宁、俞洋诸位教师。此外,哈尔滨工业大学自动化测试与控制研究所刘旺、刘兆庆、马云彤、孟升卫、梁军等各位同志为程序的调试,付出了辛勤的劳动。研究生付鹏飞、郝克成和王骥为本书的插图做了大量的工作。在此,对他们一并表示衷心的感谢。

由于时间紧迫,书中疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2006 年 6 月于哈尔滨工业大学

目 录

第 1 章 数字信号处理器 (DSP) 综述	1
1.1 什么是 DSP	1
1.2 DSP 技术的发展及现状	1
1.3 DSP 的应用	3
1.4 DSP 与单片机、嵌入式微处理器的区别	4
1.5 DSP 的基本结构及主要特征	5
1.6 DSP 的分类及主要技术指标	6
1.7 如何选择 DSP	8
第 2 章 TMS320LF240x 系列 DSP 概述	10
2.1 TI 公司 TMS320 系列 DSP 简介	10
2.2 TMS320LF240x 系列 DSP 简介	12
第 3 章 TMS320LF240x 的 CPU 功能模块和时钟模块	20
3.1 CPU 功能模块	20
3.2 锁相环 (PLL) 时钟模块和低功耗模式	25
第 4 章 系统配置和中断模块	31
4.1 系统配置寄存器	31
4.2 中断优先级和中断向量表	34
4.3 外设中断扩展控制器	36
4.4 中断响应的过程	39
4.5 中断响应的等待时间	39
4.6 CPU 的中断寄存器	40
4.7 复位和无效地址检测	47
4.8 外部中断控制寄存器	48
4.9 实现可屏蔽中断的例程	49
第 5 章 存储器和 I/O 空间	54
5.1 片内存储器	54
5.2 程序存储器	55
5.3 数据存储器	56
5.4 I/O 空间	59
5.5 外部存储器接口选通信号说明	60
5.6 等待状态发生器	60
5.7 外部存储器接口	62

第 6 章	数字输入输出 I/O	64
6.1	数字 I/O 寄存器简介	64
6.2	I/O 端口复用控制寄存器	65
6.3	数据和方向控制寄存器	68
6.4	数字 I/O 端口配置实例	73
6.5	数字 I/O 的应用实例	76
第 7 章	事件管理器	81
7.1	事件管理器模块概述	81
7.2	通用定时器	87
7.3	比较单元	103
7.4	PWM 电路及 PWM 信号的产生	109
7.5	空间向量 PWM	117
7.6	捕捉单元	121
7.7	正交编码器脉冲电路	127
7.8	事件管理器中断	129
7.9	事件管理器应用举例	139
第 8 章	模数转换 (ADC) 模块	145
8.1	ADC 模块特性	145
8.2	ADC 模块概述	146
8.3	ADC 时钟预定标	154
8.4	ADC 校准	155
8.5	ADC 控制寄存器	156
8.6	ADC 转换时间	166
8.7	ADC 转换应用实例	167
第 9 章	串行通信接口 SCI	171
9.1	概述	171
9.2	可编程的数据格式	174
9.3	SCI 多处理器通信	175
9.4	SCI 通信模式	178
9.5	SCI 端口中断	180
9.6	SCI 波特率计算	181
9.7	SCI 控制寄存器	181
第 10 章	串行外设接口 SPI	191
10.1	概述	191
10.2	SPI 操作	193
10.3	SPI 控制寄存器	200
10.4	SPI 示例波形	207

10.5	SPI 应用实例	209
第 11 章	CAN 控制器模块	210
11.1	CAN 总线技术概述	210
11.2	CAN 模块介绍	211
11.3	CAN 控制器的结构和存储器映射	212
11.4	CAN 控制器应用	215
第 12 章	看门狗(WD)定时器	219
12.1	概述	219
12.2	WD 操作	220
12.3	WD 控制寄存器	222
第 13 章	TMS320LF240x 的系统开发	225
13.1	DSP 应用系统的开发过程	225
13.2	DSP 系统的仿真调试工具	227
13.3	DSP 系统开发环境	231
13.4	控制程序开发语言的选择	243
第 14 章	TMS320LF240x 硬件系统设计	245
14.1	DSP 硬件系统设计的一般步骤	245
14.2	3.3 V 和 5 V 混合逻辑系统设计	246
14.3	电源转换电路设计	247
14.4	时钟及复位电路设计	248
14.5	外部数据存储器 and 程序存储器的扩展	250
14.6	实现片选的基本方法	255
14.7	JTAG 仿真接口设计	257
14.8	总线驱动及 I/O 接口电路扩充设计	257
14.9	DSP 的串行通信接口技术	259
14.10	DSP 与 A/D、D/A 的接口	262
第 15 章	DSP 的 C 语言编程	268
15.1	DSP C 语言简介	268
15.2	DSP C 语言特性	268
15.3	DSP C 语言与汇编语言混合编程	276
15.4	运行支持函数	285
15.5	常用数字信号处理程序设计	286
15.6	闪存程序化	291
15.7	程序设计举例	294
附录 A	运行期支持库及宏列表	301
附录 B	头文件 2407C.H	306
参考文献	314

第 1 章 数字信号处理器 (DSP) 综述

1.1 什么是 DSP

DSP 是英文 Digital Signal Processor (数字信号处理器) 的缩写。DSP 是指以数字信号来处理大量信息的器件, 是一种特别适合于实现各种数字信号处理运算的微处理器, 它也是嵌入式微处理器大家庭中的一员。DSP 也可以是英文 Digital Signal Processing (数字信号处理) 的缩写。数字信号处理是 20 世纪 60 年代前后发展起来的一门新学科。在过去很长的时间里, 由于受集成电路技术和数字化器件发展水平的限制, 数字信号处理的学习和应用只限于理论概念的讲授和仿真, 所以国内人们常称其为数字信号处理, 而较少使用 DSP 一词。

20 世纪 70 年代, 随着计算机技术及大规模集成电路技术的发展, 数字信号处理的理论、方法和算法得以在数字信号处理器中大量实现, “DSP” 一词逐渐流行起来, 因此人们常用 “DSP” 来指通用的数字信号处理器, 用 “数字信号处理” 来指信号的数字化处理的理论及方法, 用 “DSP 技术” 来指和数字信号处理器有关的数字信号处理算法实现技术和理论。

由于 DSP 技术的飞速发展, 为数字信号处理的研究及应用打开了新局面, 造就了一大批新型电子产品, 推动了新的理论和应用领域的发展。由于 DSP 具有丰富的硬件资源、改进的并行结构、高速的数据处理能力和功能强大的指令系统, 它已经成为世界半导体产业中紧随微处理器与微控制器 (单片机) 之后的又一个热点, 在通信、航空、航天、机器人、工业自动化、自动控制、网络及家电等各个领域得到了广泛的应用。

1.2 DSP 技术的发展及现状

20 世纪 60 年代初期, 数字信号处理的基础理论已经比较成熟, 各种应用算法和快速实现方法成为应用研究的重点。尤其是 1965 年 Cooley 和 Tukey 发明了快速傅立叶变换算法 (FFT), 使傅立叶分析的速度提高了数百倍, 从而为数字信号处理的应用奠定了基础。但由于当时的计算机技术和数字电路技术发展水平的限制, 计算速度不高, 无法进行实时处理, 因而 FFT 的应用受到了限制。

20 世纪 70 年代后, 由于集成电路技术的发展, 使用硬件实现 FFT 和数字滤波的算法成为可能。1978 年, AMI 公司宣布第一个 DSP 问世, 但人们一般认为, 20 世纪 70 年代后期推出的 Intel2920 才是第一片具有独立结构的 DSP。

进入 20 世纪 80 年代, 随着数字信号处理技术和计算机应用范围的扩大, 迫切要求提高数字信号处理的实时处理速度, 从而推动了 DSP 的发展。1981 年, 美国德州仪器 (TI) 公司研制出了著名的 TMS320 系列的首片低成本、高性能的 DSP——TMS320C10, 使 DSP 技术向前跨出了意义重大的一步。

20 世纪 90 年代以后, 由于超大规模集成电路 (VLSI) 技术, 以及微处理器技术的迅猛发

展,数字信号处理无论在理论上还是在工程应用中,都是发展最快的学科之一,并且日趋完善和成熟。特别是 20 世纪 90 年代中期,由于 Internet 网络的迅猛发展和高清晰度数字电视的研究以及各种网络通信、多媒体技术的普及和应用,极大地刺激了数字信号处理理论,尤其是数字信号处理技术在工程上的实现和推广应用。与此同时,DSP 的性能指标不断提高,而价格却在不断下降,因此 DSP 获得了越来越广泛的应用,目前已经成为不少新兴科技,诸如通信、多媒体系统、消费电子、医用电子等飞速发展的主要推动力。

DSP 的发展经历了三个主要阶段,目前已发展到第四代、第五代产品。目前,全球 DSP 市场中的主要厂商有美国的 TI、Motorola、ADI、Zilog 等公司。其中 TI 公司位居榜首,在全球 DSP 市场的占有率约为 60% 左右。

尽管当前的 DSP 技术已达到较高的水平,但在一些实时性要求很高的场合,单片的 DSP 的处理能力还是不能满足要求。因此,多总线、多流水线和多处理器并行就成为提高系统性能的重要途径之一。许多公司注重在提高单片 DSP 性能的同时,在结构上为多处理器的并行应用提供方便。例如,TI 公司的某型号 DSP,设置了 6 个 8 bit 的通信口,既可作级联,也可作并行连接,每个口都有 DMA 能力。ADI 公司的 SHARC 系列 DSP 为满足多片互联的需要,专门设置有 LINK 链路口,可无缝连接多达 6 片 DSP,组成一定的拓扑结构的网络,这些都是专门为多处理器应用而设计的。除考虑片外 DSP 之间的连接设计外,另一种方法就是把 DSP 内核集成在一个芯片内。如 TI 公司 1995 年推出的 TMS320C80 (又称多媒体视频处理器)内有 5 个强有力、完全可编程的 DSP 处理器。

随着 DSP 的处理速度越来越快,DSP 的功耗也随之越来越大。尤其是随着 DSP 的大量使用,特别是在电池供电的便携式及嵌入式小型或微型设备中的大量使用,都迫切要求 DSP 在提高工作性能的同时,降低工作电压,减少功耗。为此,各 DSP 生产厂家积极研制并陆续推出多种低电压、低功耗芯片。例如,TI 公司的 TMS320VC5416,内核工作电压只有 1.5 V,有的 DSP 设置了多种节能等待状态。总之,低电压和低功耗已成为 DSP 的重要技术指标之一。

系统芯片的集成即 SOC (System on Chip) 技术,是下一代 DSP 产品的主要发展方向之一。芯片技术能降低电子产品成本和体积,就连当代电子学革命之父、2000 年诺贝尔物理学奖获得者、美国 TI 公司的杰克·基尔比也没有想到,他在 1959 年发明的芯片技术,会将电子产品的成本降低到了百万分之一的地步,体积缩小到令人难以置信的程度。例如,具有电视质量的无线电会议、家庭娱乐设施、电子游戏等。最近,可将 8 个 DSP 核(每个具有 1 亿个晶体管)集成到拇指大的一块芯片上。预计到 2010 年,可将 12 个 DSP 核(每个具有 5 亿个晶体管)集成到一块芯片上,这相当于将今天的笔记本电脑集成到手表大的体积内。

在 DSP 芯片向着高性能、高速、低功耗方向发展的同时,数字信号处理理论也在不断地发展。自适应滤波、卡尔曼滤波、同态滤波等理论逐步成熟和应用,各种快速算法,声音与图像的压缩编码、识别与鉴别,加密解密,调制解调,信道辨别与均衡,智能天线,频谱分析等算法都成为研究的热点,并有长足的进步,为各种实时处理的应用,提供了算法基础。

今天,随着全球信息化和 Internet 网的普及、多媒体技术的广泛应用、尖端技术向民用领域的迅速转移、数字技术大范围进入消费类电子产品等,DSP 不断更新换代,价格大幅度下降,各种开发工具日臻完善,DSP 已成为最有发展和应用前景的电子器件之一。据国际著名市场调查研究公司 Forward Concepts 发布的一份统计和预测报告显示,目前世界 DSP 产品市

场每年正以 30% 的增幅大幅度增长,其增长速度比半导体工业快 50 倍。

1.3 DSP 的应用

自从 20 世纪 70 年代末诞生以来, DSP 得到飞速发展,其价格越来越低,并已被广泛地应用在各个领域。当今,通信设备和网络、多媒体技术等是 DSP 的最大的用户。从 DSP 的一个最典型的应用——手机,可见 DSP 的应用市场之大。

DSP 的主要应用如下。

(1) 数字信号处理运算。快速傅立叶变换(FFT),卷积,数字滤波,自适应滤波,相关,模式匹配,加密等。

(2) 通信。调制解调器,自适应均衡,数据加密,数据压缩,扩频通信,纠错编码,传真,可视电话等。

(3) 网络控制及传输设备。网络功能和性能的不不断提高,如视频信箱、交互式电视等,要求更宽、更灵活的传输带宽,实时传输和处理数据的网络控制器、网络服务器和网关都需要 DSP 的支持。

(4) 语音处理。语音编码,语音合成,语音识别,语音邮件,语音存储等。

(5) 电机和机器人控制。在单片内集成多个 DSP 处理器,可采用先进的神经网络和模糊逻辑控制等人工智能算法。机器人智能的视觉、听觉和四肢的灵活运动必须有 DSP 技术支持才能实时实现。

(6) 激光打印机、扫描仪和复印机。DSP 不仅仅是控制,还有繁重的数字信号处理任务,如字符识别、图像增强、色彩调整等。

(7) 自动测试诊断设备及智能仪器仪表、虚拟仪器。现代电子系统设备中,有近 60% 的设备及资金是用于测试设备,自动测试设备集高速数据采集、传输、存储、实时处理于一体,是 DSP 的又一广阔应用领域。

(8) 图像处理。二维、三维图形处理,图像压缩、传输与增强,动画,机器人视觉,模式识别等。

(9) 军事。保密通信,雷达处理,导航,导弹制导等。如机载空-空导弹,在有限的体积内装有红外探测仪和相应的 DSP 处理部分,完成目标的自动锁定与跟踪,战斗机上的目视瞄准器和步兵头盔式微光仪,需要 DSP 完成图像的滤波与增强,智能化目标的搜索、捕获。

(10) 自动控制。机器人控制,磁盘控制,自动驾驶,声控,发动机控制等。

(11) 医疗仪器。助听,诊断工具,超声仪,CT,核磁共振等。

(12) 家用电器。数字电话,数字电视,音乐合成,音调控制,玩具与游戏,高保真音响,数字收音机,数字电视等。

(13) 汽车。防滑刹车,引擎控制,伺服控制,振动分析,安全气囊的控制器,视像地图等。一辆现代的高级轿车上,有 30 多处电子控制设备上用到了 DSP 技术。

(14) 多媒体个人数字化产品。数码相机,MP3,掌上电脑,电子辞典,数码录音笔,数码复读机等。

1.4 DSP 与单片机、嵌入式微处理器的区别

DSP、单片机以及嵌入式微处理器虽然都是嵌入式家族的一员,但 DSP 与单片机、嵌入式微处理器的最大区别是能够高速、实时地进行数字信号处理运算。数字信号处理运算的特点是乘/加及反复相乘求和(乘积累加)。为了能够快速地进行数字信号处理的运算,DSP 设置了硬件乘法/累加器,能在单个指令周期内完成乘/加运算。为满足 FFT、卷积等数字信号处理的特殊要求,目前 DSP 大多在指令系统中设置了“循环寻址”及“位倒序”寻址指令和其他特殊指令,使得寻址、排序的速度大大提高。DSP 完成 1 024 复点 FFT 的运算,需要的时间仅为微秒量级。

高速数据的传输能力是 DSP 高速实时处理的关键之一。新型的 DSP 设置了单独的 DMA 总线及其控制器,在不影响或基本不影响 DSP 处理速度的情况下,作并行的数据传送,传送速率可达每秒百兆字节。DSP 内部有流水线,它在指令并行、功能单元并行、多总线、时钟频率提高等方面不断创新和改进。因此,DSP 与单片机、嵌入式微处理器相比,在内部功能单元并行、多 DSP 核并行、速度快、功耗小方面尤为突出。

单片机也称微控制器或嵌入式控制器,它是为中、低成本控制领域而设计和开发的。单片机的位控能力强、I/O 接口种类繁多、片内外设和控制功能丰富、价格低、使用方便,但与 DSP 相比,处理速度较慢。DSP 具有的高速并行结构及指令、多总线,单片机却没有。DSP 处理的算法的复杂度和大的数据处理流量更是单片机不可企及的。

嵌入式微处理器的基础是通用计算机中的 CPU(微处理器)。嵌入式微处理器是嵌入式系统的核心。为满足嵌入式应用的特殊要求,嵌入式微处理器虽然在功能上和标准微处理器基本是一样的,但在工作温度、抗电磁干扰、可靠性等方面一般都做了各种增强。与工业控制计算机相比,嵌入式微处理器具有体积小、质量轻、成本低、可靠性高的优点,但是在电路板上必须包括 ROM、RAM、总线接口、各种外设等器件,从而降低了系统的可靠性,技术保密性也较差。在应用设计中,嵌入式微处理器及其存储器、总线、外设等安装在专门设计的一块电路板上,只保留和嵌入式应用有关的母板功能,可大幅度减小系统的体积和功耗。目前,较流行的是基于 ARM7、ARM9 系列内核的嵌入式微处理器。

嵌入式微处理器与 DSP 的一个很大区别,就是嵌入式处理器的地址线要比 DSP 的数目多,也就是说,所能扩展的存储器空间要比 DSP 的存储器空间大得多,所以可配置实时多任务操作系统(RTOS)。RTOS 是针对不同处理器优化设计的高效率、可靠性和可信性很高的实时多任务内核,它将 CPU 时间、中断、I/O、定时器等资源都包装起来,留给用户一个标准的应用程序接口(API),并根据各个任务的优先级,合理地不同任务之间分配 CPU 时间。RTOS 是嵌入式应用软件的基础和开发平台。常用的 RTOS 为 Linux(容量为几百 KB)和 VxWorks(容量为几 MB)。

由于嵌入式实时多任务操作系统具有的高度灵活性,开发者可以很容易地对它进行定制或作适当开发,来满足实际应用需要。例如,移动计算平台、信息家电(机顶盒、数字电视)、媒体手机、工业控制和商业领域(例如,智能工控设备、ATM 机等)、电子商务平台,甚至军事应用。它的吸引力是巨大的,所以,目前嵌入式微处理器的应用是继单片机、DSP 之后的又一大应用热门。但是,由于嵌入式微处理器通常不能高效地完成许多基本的数字处理

运算,例如,乘法累加、矢量旋转、三角函数等。它的体系结构对特殊类型的数据结构只能提供通用的寻址操作,而 DSP 则有专门的简捷寻址机构和辅助硬件来快速完成。所以嵌入式微处理器不适合高速、实时的数字信号处理运算,而更适合“嵌入”到系统中,完成高速的“通用”计算与复杂的控制用途。

DSP、单片机以及嵌入式微处理器三者各有所长,技术的发展使得 DSP、单片机、嵌入式微处理器相互借鉴彼此的优点,互相取长补短。现在,部分单片机内部都有硬件乘法器,单片机内部也有了 DSP 内部才有的流水线作业(但规模小些)。借鉴 PC 机的优点,DSP 内部也有了一定规模的高速缓存,吸收 Intel 的嵌入式系统芯片和系统软件的优点。有的 DSP 内部集成了高速运行的 DSP 内核及控制功能丰富的嵌入式处理器内核。例如,内部集成有 TI 公司的 C54xCPU 内核和 ARM 公司的 ARM7TDMI 内核的 DSP,既具有高速的数据处理能力,又有各种类型的外设接口和位控能力,大大拓宽了 DSP 在控制领域的应用范围。

DSP 在注重高速的同时,也在发展自己的低价位控制芯片。美国 Cygnal 公司的 C8051F020 8 位单片机,内部采用流水线结构,大部分指令的完成时间为 1 或 2 个时钟周期,峰值处理能力为 25 MIPS,片上集成有 8 通道 A/D、两路 D/A、两路电压比较器,内置温度传感器、定时器、可编程数字交叉开关和 64 个通用 I/O 口、电源监测、看门狗(WD)、多种类型的串行总线(两个 UART、SPD)等。

1.5 DSP 的基本结构及主要特征

DSP 是一种具有特殊结构的微处理器,为了达到快速进行数字信号处理的目的,DSP 的总线结构大都采用了程序和数据分开形式,并具有流水线操作的功能,单周期完成乘法的硬件乘法器以及一套适合数字信号处理运算的指令集。DSP 的基本结构及主要特征如下所述。

1. 程序和数据分开的哈佛结构

哈佛结构就是将程序和数据存储在两个不同的存储空间中,程序存储器空间和数据存储器空间分别独立编址。传统的冯·诺依曼结构是程序存储器和数据存储器共用一个公共的存储空间和单一的地址和数据总线,依靠指令计数器中提供的地址来区分是指令、数据还是地址。取指令和取数据都访问同一存储器空间,数据的吞吐率低。

在哈佛结构中,由于程序存储器和数据存储器分开,即每个存储器空间独立编址、独立访问,并具有独立的程序总线 and 数据总线,取指令和执行指令能完全重叠进行。现在的 DSP 普遍采用改进的哈佛结构,改进的哈佛结构允许数据存放在程序存储器中,并被算术指令、运算指令直接使用,增强了灵活性。指令存储在高速缓冲器(Cache)中,当执行本指令时,不需要再从存储器中读取指令,节省一个机器周期的时间。

2. 流水线操作

由于 DSP 芯片采用多组总线结构,允许 CPU 同时进行指令和数据的访问。因此,可在 DSP 内部实行指令执行的流水线操作。

执行一条指令,总要经过取指、译码、取数、执行运算,需要若干个指令周期才能完成。流水线技术是将各个步骤重叠起来进行,即第一条指令取指、译码时,第二条指令取数;第一条指令取数时,第二条指令译码,第三条指令取指,依次类推。例如,TMS320LF240x 就可以

实现 4 级流水线操作 (图 1.1)。

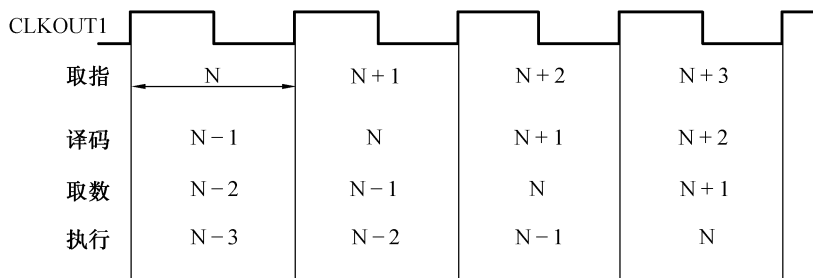


图 1.1 4 级流水线操作

3. 专门的硬件乘法器和乘加指令

在数字信号处理的算法中,大量的运算是乘法和累加,乘法和累加要占用绝大部分的处理时间。例如,数字滤波、卷积、相关、向量和矩阵运算中,有大量的乘和累加运算。个人计算机计算乘法需要多个周期用软件实现,而 DSP 设置了硬件乘法器以及乘加指令 MAC,在单周期内取两个操作数一次完成乘加运算。

4. 特殊的指令

在 DSP 的指令系统中,专为实现数字信号处理的算法而设置了特殊的特殊指令。例如,DMOV 指令,把指令的数据复制到该地址加 1 的地址中,原单元的内容不变,即数据移位,相当于数字信号处理中的延迟,例如, $x(n)$ 的延迟为 $x(n-1)$ 。另一特殊指令 LTD,在一个指令周期可完成 LT、DMOV 和 APAC 三条指令的内容。此外, DSP 大多在指令系统中设置了“循环寻址”及“位倒序寻址”指令和其他特殊指令,使得寻址、排序的速度大大提高,从而能方便、快速地实现 FFT 算法。

5. 丰富的片内存储器件和灵活的寻址方式

片内集成 Flash 和双口 RAM,通过片内总线访问这些存储空间,因此不存在总线竞争和速度匹配问题,从而大大提高了数据的读/写速度。

6. 独立的直接存储器访问 (DMA) 总线及其控制器

DSP 为 DMA 单独设置了完全独立的总线和控制器。

7. 高速的指令运行周期

采用哈佛结构、流水线操作、专用的硬件乘法器以及特殊的 DSP 指令,丰富的片内存储器件和灵活的寻址方式以及 DMA 方式, DSP 指令周期可为几十纳秒至几纳秒,甚至 1 ns 以下。

1.6 DSP 的分类及主要技术指标

1.6.1 DSP 的分类

DSP 一般按以下三种方式分类。

1. 按数据格式分

按照数据的格式来分, DSP 可分为定点芯片和浮点芯片两种。

定点 DSP 芯片按照定点的数据格式进行工作,其数据长度通常为 16 位、24 位、32 位。定点 DSP 的特点是:体积小、成本低、功耗小、对存储器的要求不高,但数值表示范围较窄,必须使用定点定标的方法,并要防止结果的溢出。

浮点 DSP 芯片按照浮点的数据格式进行工作,其数据长度通常为 32 位、40 位。由于浮点数的数据表示动态范围宽,运算中不必顾及小数点的位置,因此开发较容易,但它的硬件结构相对复杂、功耗较大,且比定点 DSP 芯片的价格高。通常,浮点 DSP 芯片使用在对数据动态范围和精度要求较高的系统中。

不同的 DSP 的浮点格式不一定完全一样,如 IEEE 的标准浮点格式(如摩托罗拉的 MC96002)、自定义的浮点格式(如 TI 公司的 TMS320C3x)。

2. 按照用途分类

DSP 按照用途可分为通用型和专用型。

通用型适用于普通的数字信号处理应用。

专用型是为了适应不同的数字信号处理运算或特定的应用场合而设计的。例如,数字卷积、数字滤波、FFT 等。

1.6.2 DSP 的主要技术指标

由于 DSP 的种类繁多,结构差别很大,不同厂商的产品指标甚至不具备可比性,因此,下述技术指标只是从不同角度描述了 DSP 的处理能力或技术性能,仅作为系统设计时的一种参考。

1. 时钟频率

对时钟频率要考虑两个方面,一是 DSP 内部工作主频,这是 DSP 的真正工作频率。一般是内部主频越高,DSP 的数据处理速度越快。另一个是 DSP 的外部时钟频率,这是 DSP 片外所加的实际时钟频率,这个时钟频率一般要经过 DSP 内部的锁相环倍频至 DSP 的内部工作主频。外部时钟频率低有利于减少外部电路间的干扰,使 PCB 布线容易,所以一般是外部时钟频率低(减少干扰),内部时钟频率高(提高处理速度)。

2. 机器周期

DSP 执行一条指令所需要的时间,通常用机器周期来衡量。DSP 的大部分指令是单周期指令,即执行时间为一个机器周期。机器周期也从一个方面反映了 DSP 的数据处理速度。

3. MIPS

目前,最通常使用的是 MIPS (Millions of Instruction Per Second),即每秒执行的百万条指令。它综合了时钟频率、DSP 并行度、机器周期等描述 DSP 处理速度的指标。由于 MIPS 与机器周期是互为倒数的关系,可从 MIPS 来计算机器周期,例如, TMS320LF2407A 的 MIPS 为 40 MIPS,其机器周期为 25 ns。

4. MOPS

MOPS (Millions of Operation Per Second),即每秒执行的百万条操作。但是操作次数并不等于指令条数,一般完成一条指令需要若干次操作。不同的 DSP 对于操作的定义不同,不同指令所需要完成的操作次数也不相同,所以 MOPS 指标只是相对于同一种 DSP 系列使用才有意义。

5. MFLOPS

MFLOPS (Millions of Float Operation Per Second), 即每秒执行的百万次浮点运算。它是衡量浮点 DSP 浮点运算能力的又一个指标, 是指浮点 DSP 内部浮点处理单元每秒钟执行浮点运算的次数。

6. MACS

MACS 是指 DSP 在 1 s 内完成乘/累加运算的次数。因为乘/累加运算是数字信号处理算法中的基本运算, 所以有的 DSP 厂商就用此指标来反映 DSP 的速度性能。但是 DSP 的应用涉及许多乘/累加运算以外的运算, 因此 MACS 并不是全面评价 DSP 性能的可靠指标。

上述的有关衡量 DSP 运算速度的指标, 均是以程序、数据都在 DSP 内部, DSP 全速运行的结果。实际上, 当程序、数据有一部分在 DSP 片外时, 尤其是存储器的速度跟不上 DSP 速度要求时, DSP 处理速度就不得不降下来。

1.7 如何选择 DSP

从本质上说, 并不存在最好的 DSP, 正确的 DSP 选择取决于具体的应用场合。没有任何 DSP 能够满足所有的, 或者大多数应用的需要。对于一种应用来说是好的选择, 对另外的应用则可能是很差的选择。

DSP 第一类应用: 采用专门的复杂算法来处理大量数据。以声纳和地震探矿为例, 其产品的产量并不大, 但算法非常复杂, 产品的设计工作量很大, 也更复杂。因此, 设计者希望使用性能最高的、最容易使用的、能支持多处理器配置的方案。

DSP 第二类应用: 大量便宜的嵌入式系统, 如手机、硬盘和光盘驱动器 (用于伺服控制) 和便携式播放器。在这些应用中, 成本和集成是极为重要的。对便携式的以电池供电的产品, 功耗也极为重要。

1. 如何选择数据格式

数据处理运算的格式分为定点格式和浮点格式。

大多数 DSP 使用定点运算, 有的 DSP 使用浮点运算。

浮点运算与定点运算相比, 灵活性和数据的动态范围都比较大, 因此, 比较容易编程。因为浮点 DSP 电路更复杂, 芯片也更大, 所以成本和功耗也就比较大。

但在很多情况下, 不需要关注数据的动态范围和精度, 可考虑使用定点 DSP。大多数批量生产的产品使用定点 DSP, 主要考虑其成本和功耗低。

程序员和算法设计者根据实际应用的要求, 通过分析和仿真来确定数据的动态范围和精度, 然后在需要的时候, 在代码中增加定标运算。

对于需要很高动态范围和精度的应用, 或在开发的容易程度比成本更重要的情况下, 浮点 DSP 就有其优势。

2. 数据宽度

所有浮点 DSP 为 32 位, 大多数定点 DSP 是 16 位, 但有的也使用 20 位、24 位、32 位数据字。

数据字的长短是影响成本的重要因素, 因为它极大地影响芯片的大小、引脚数以及 DSP 的片外存储器的大小。

3. 速度

有多种方法来衡量 DSP 的速度,最基本的是指令周期,即用 MIPS——每秒执行多少百万条指令。但问题是,不同的 DSP 在单个周期所完成的工作是大不相同的。

使用 MOPS 和 MFLOPS 要十分小心,因为不同厂商的关于“操作或运算”的概念是不同的。

其次,要注意的是,DSP 的输入时钟可能和 DSP 的指令速率一致,也可能内部时钟加倍。现在许多 DSP 是用低频的时钟来产生片上所需要的高频时钟。

4. 存储器的安排

应关注双访问存储器 (DARAM) 的单元多少、哈佛结构、高速缓存、存储空间的大小。

5. 开发的难易程度

为减少产品成本,可使用比较便宜的开发工具。

通常使用的编程语言,有 C 语言、汇编语言等。使用 C 语言编程用的较多,对实时性要求高的程序,仍用汇编语言编程,也有 C 语言和汇编语言混合编程的。

消费类产品由于成本限制,不一定要使用高性能的 DSP。

6. 支持多处理器

雷达是高数据率和大运算量的应用系统,往往需要多个 DSP,在这种情况下,DSP 间是否容易连接、连接的性能等都是重要的因素。近年推出的 DSP 大都非常注意增加专门的接口或 DMA 通道,来支持多 DSP 的运行。

7. 功耗和电源管理

在 DSP 应用中对功耗的要求是很严格的,越来越多的 DSP 用于电池供电的便携式应用(如手机、便携式播放器等),希望功耗越小越好的同时,又要求有很高的处理速度。但 DSP 的功耗与速度是成正比的,速度越高,相应的功耗越大,而相同工作电压的低速 DSP,其功耗自然较小。所以单纯用功耗来反映 DSP 的耗能指标是不全面的。每秒百万条指令功耗是综合了 DSP 速度和功率的较为全面的耗能指标。目前,许多 DSP 厂商都降低了 DSP 的供电电压,加强了电源管理功能。

8. 器件封装

决定 DSP 的价格的主要因素之一是器件封装,这是选择 DSP 要考虑的一个问题。一般一种芯片会有几种封装形式,用户可根据需要来选用,国内常采用表贴 TQFP 封装。目前新的高速 DSP 芯片均为 BGA (Ball Grid Array) 封装。BGA 封装引脚短且为球形,所以高频特性好、干扰小,但目前焊接需要专门的设备,对用户不太方便,并且焊接后用户不易检查和修改。

第 2 章 TMS320LF240x 系列 DSP 概述

在世界众多的 DSP 厂商中,美国 TI 公司是当今世界上最大的 DSP 厂商, TI 公司于 1982 年推出的 TMS320 系列 DSP 是目前世界上最有影响的主流 DSP 产品,始终占有世界 DSP 市场的较大份额 (60% 左右)。

2.1 TI 公司 TMS320 系列 DSP 简介

TI 公司的主流产品为 TMS320 系列 DSP,其体系结构是专为实时数字信号处理而设计的,已先后推出多代 DSP 产品。该系列包括:定点、浮点、多处理器 DSP。最具代表性的产品如下。

(1) 定点。TMS320C1x、TMS320C2x、TMS320C2xx、TMS320C5x、TMS320C54x、TMS320C2xx、TMS320C240x、TMS320C62xx 系列等。

(2) 浮点。TMS320C3x、TMS320C4x、TMS320C67x 系列等。

(3) 多处理器 DSP。TMS320C8x 等。

(4) 专用 DSP。AV7xxx 等。

每一系列的 DSP 中又有许多不同品种,来对应不同的应用。目前,最新发展起来的并最有应用前景的三大系列 DSP 为 TMS320C2000 系列、TMS320C5000 系列和 TMS320C6000 系列,如图 2.1 所示。它们将逐步替代老型号的产品,成为未来相当长时间内的 TI 公司的主流 DSP 产品。

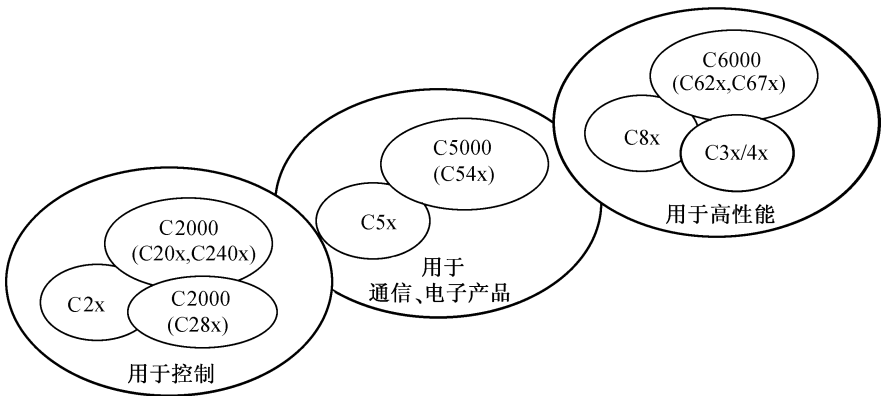


图 2.1 TMS320 的三大主流系列

TMS320C2000 系列是应用于测控领域的最佳 16 位定点 DSP。主要产品为两个子系列: C20x、C240x 以及具有更高性能的改进型 C27x 和 C28x 系列芯片。

TMS320C5000 系列是低功耗高性能的 16 位定点 DSP。主要用在无线通信和有선通信设备中,如 IP 电话、PDA、网络电话、服务器、多种便携式信息系统以及消费类电子产品等。

TMS320C6000 系列是高性能 DSP,具有最佳性能/价格比。其中, C62xx 为 16 位定点

DSP, 可用于无线基站、调制解调器、网络系统、中心局交换机、数字音频广播设备等; C67x 是 32 位浮点芯片, 可用于基站数字波束形成、图像处理、语音识别和 3D 图形等。

2.1.1 TMS320C2000 系列

该系列 DSP 将闪存、10 位 A/D、CAN (控制器局域网) 接口等各种片内外设集成在一起, 主要包括 TMS320C20x、TMS320C240x 及 TMS320C28x 等产品。

1. TMS320C20x 系列

该系列主要用于电话、数字相机、嵌入式家电设备等。

2. TMS320C240x 系列

该系列为 16 位定点 DSP, 主要用于数字电机控制、电机控制、智能仪器仪表、工业自动化、机电一体化等。典型产品 LF2407 的速度为 30 MIPS, LF2407A 的速度为 40 MIPS。有关该子系列 DSP 的详细介绍见本章 2.2 节。TMS320C240x 系列也是本书所要介绍的内容。

3. TMS320C28x 系列

该系列的 DSP 为 32 位定点, 速度可达 400 MIPS。片内集成有闪存、12 位 A/D、CAN (控制器局域网) 总线模块、SPI、SCI 等片内外设。

该系列的代表性产品为 TMS320F2812, 其主要性能指标如下。

(1) 具有高性能的 32 位 CPU, 可直接进行 32×32 位的操作, 具有改进的哈佛总线结构。

(2) 工作速度为 150 MIPS, 采用高性能的 CMOS 工艺, I/O 供电电压为 3.3 V, 内核供电电压为 3.3 V。

(3) 片内集成有 128 K 字的闪烁存储器, 18 K 字的 SRAM, 1 K 字的 OTM ROM 存储器, 4 K 字的 Boot ROM 存储器, 最大可外扩 1 M 字的外部存储器。

(4) 在 4 个 16 位定时器的基础上, 增加了 3 个 32 位 CPU 定时器。

(5) 具有与 LF2407 相同的 PWM 通道, 通用的 I/O 引脚的数量增加到 56 个。

(6) 16 通道的 12 bit 的 ADC, 采集速率 80 ns。

由于 TMS320LF2812 的高性能, 使其成为继 TMS320LF2407/TMS320LF2407A 之后, DSP 的应用设计者应重点关注的品种。

2.1.2 TMS320C5000 系列

该系列具有高性能、多种片内外设、选择多样、封装小、省电等优点, 电源可降至 0.9 V, 速度可达 600 MIPS, 适用于无线电通信、因特网等, 目前已广泛地用于数字音乐唱机、3G 电话、数字相机中。

1. TMS320C54x 系列

16 位定点, 功耗 0.32 mW/MIPS, 速度为 32 ~ 532 MIPS。

2. TMS320C55x 系列

8 ~ 48 位浮点, 功耗 0.05 mW/MIPS, 速度为 288 ~ 600 MIPS, 程序字宽度为 32 位。

2.1.3 TMS320C6000 系列

TMS320C6000 系列为高性能的 DSP, 它包括 TMS320C62x 定点系列、TMS320C64x 定点系列、TMS320C67x 浮点系列。