

深入浅出自动化技术丛书

DSP技术 原理与应用

刘向东 编著

系统介绍DSP的总体结构 ■
全面讲解DSP系统的设计方法 ■
倾心奉献作者多年DSP技术应用经验 ■



中国电力出版社
www.infopower.com.cn

深入浅出自动化技术丛书

DSP技术

原理与应用

刘向东 编著



中国电力出版社

www.infopower.com.cn

内 容 简 介

本书系统介绍了 TMS320C2000 系列 DSP 的总体结构、CPU 及存储器映像、寻址方式、指令系统等,重点阐述了 CCS2 软件集成开发环境和汇编程序开发及 C 语言程序设计、DSP 的定点浮点运算、TMS320C2000 系列最小系统硬件设计与扩展接口设计、事件管理器及正弦波脉宽调制/电压空间矢量 PWM 控制。本书还结合 TMS320C2000 系列 DSP 的特点介绍了 TMS320C2000 系列在电机控制、伺服系统和电力系统监测与控制中的应用,对 TMS320C2000 应用过程中出现的主要问题和解决方法进行了总结。

本书内容涵盖了 TMS320C2000 系列 DSP 应用系统的设计基础知识和软硬件开发的基本内容,给出了大量 DSP 系统硬件设计的典型方案的原理图和软件代码。本书面向的读者对象主要是各领域中从事自动控制、能源变换、仪器仪表和信号处理的科研及工程技术人员,也可作为高等学校工业自动化、电力电子、自动控制、仪器仪表、电力系统自动化和通信等专业高年级本科生及硕士研究生的参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

DSP 技术原理与应用/刘向东编著. —北京:中国电力出版社, 2007.5

(深入浅出自动化技术丛书)

ISBN 978-7-5083-5370-8

I. D... II. 刘... III. 数字信号—信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 040596 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市三里河路 6 号 ~~100044~~ <http://www.cepp.com.cn>)

北京市秀成印刷厂印刷

各地新华书店经售

2007 年 5 月第一版, 2007 年 5 月北京第一次印刷

787 毫米 × 1080 毫米 1/16 开本 21.5 印张 489 千字

印数 0001—3000 册 定价 32.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

《深入浅出自动化技术丛书》

编 委 会

主任委员：吴惕华

副主任委员：潘立登

委 员：（以姓氏笔画为序）

王均术 王振臣 孙晓云 孙会琴 吕卫阳

李大字 李海滨 刘向东 刘东辉 刘朝英

何坚强 张永德 张新岭 张伟勇 姜国焕

郝 成 徐昌荣 翁维勤 黄晓华 蔡满军

薛迎成

丛书序

日新月异的自动化技术为传统产业的改造、生产水平的提高和产品更新换代注入了强大活力。微电子技术和计算机、通信、网络技术的崛起，给自动化技术架起了腾飞的双翼，成为当代发展最快、影响最大、最引人注目的高技术之一，在百花争艳的信息化舞台上独领风骚。现在，自动化技术不仅渗透于国民经济各行各业，对社会、经济、文化、军事、科技等各个领域都有着深刻的影响，而且正悄然地改变着人们的生产、工作、生活乃至思维方式。一个无处不在的、方兴未艾的自动化时代正在到来。

为了适应自动化技术蓬勃发展的需要，我们组织编写了这套丛书，旨在进一步对自动化技术的应用和推广起到积极的推动作用。本丛书主要面向从事自动化及其相关技术领域的工程技术人员和在校大学生，为他们提供应用自动化技术或解决应用领域中的疑难问题，提高自动化技术水平的参考用书，同时也是他们学习和掌握当前自动化领域涌现的新技术和新方法、知识更新、提高创新能力的良师和益友。许多非自动化专业的工程技术人员，由于工作中常遇到自动化技术问题，有着拓宽知识面，学习和了解有关自动化技术和基本要求的要求，学习本丛书定有裨益。其他凡是对自动化技术有兴趣的初学者均可将本丛书作为快捷的入门先导。

本丛书编写宗旨是面向读者、面向应用，力求突出实用性、适用性、易用性。在编写中注意不仅既要求内容丰富、覆盖面广，又要技术先进、新颖，而且在内容的组织和表述上要深入浅出、通俗易懂，便于自学，使读者不仅学了就能懂，更要学了就会用。在理论和实际二者兼顾和结合方面，以应用尤其是工程上的实际应用为重点，尽量多采用实例编写；而理论的介绍以应用为目的，注意基本概念，避免面面俱到和“全”而“深”，以“必要”和“够用”为度，尽量减少烦琐的理论推导和公式证明，力求简练实用。在把握先进技术和流行、成熟技术的关系方面，在介绍先进的新技术同时，重点是掌握现阶段的实用的流行技术。

为了保持全套丛书具有科学性、先进性、广泛性和代表性，我们聘请了不同部门和行业各具特长的自动化专家、教授组成了编审委员会。作者均有多年从事自动化专业教学、科研或工程技术工作的经历，具有较丰富的实践经验。为了打造“精品”出好书，本丛书凝聚了作者们的心血和汗水，在此我们致以诚挚的谢意。对丛中不足之处，还望广大读者批评和指正。

丛书编审委员会
2007年2月于北京

前言

DSP (Digital Signal Processor, 数字信号处理器) 自 20 世纪 80 年代诞生以来, 经过了二十多年的飞速发展, 其应用已经深入到工业控制、能源变换、通信网络、航空航天、汽车电子、数字监控、生物识别、医疗仪器及家用电器等各个领域。DSP 芯片内部程序/数据分开的哈佛结构、专门硬件乘法器以及流水线操作, 使它既具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, 特别适用于高度密集、重复运算及大数据流量的信号处理。针对嵌入式数字控制应用, DSP 极大地满足了工业界的需求, 如电力系统无功补偿与谐波抑制、数字变频电力电源设备、数字电机控制、工业自动化等; DSP 也极大地满足了消费电子的需求, 如空调、冰箱、洗衣机等。DSP 应用的快速发展为数字信息产品带来了广阔的发展空间, 并将支持通信、计算机和消费类电子产品的数字化融合; 面向群体应用, DSP 在媒体网关、视频监控、专业音响、数字广播、激光打印等应用中表现出色; 面向个人应用, DSP 在便携式数字音频和影像播放器、指纹识别和语音识别等应用中表现不俗; 在无线领域, DSP 遍及无线交换设备、基站和手持终端领域, 并涵盖从骨干基础设施到宽带入户的设备, 包括 VoIP 网关和 IP 电话、DSL 和 Cable Modem 等。

DSP 应用在经历了 2001 年由于通信产业不景气导致的短暂停滞之后, 从 2003 年起 DSP 市场迅速恢复了活力, 2003 年全球 DSP 市场销售额为 61 亿美元, 同比增长率为 24.5%, 2004 年全球 DSP 市场销售额为 79 亿美元, 同比增长率为 29.5%。2004 年全球 DSP 市场格局发生了很大的变化, 亚太市场在全球 DSP 的市场份额过半, 成为全球最重要的 DSP 市场, 而中国已成为亚太地区最有发展潜力的 DSP 市场。目前中国的 DSP 市场虽然在产品和技术上基本已与国际市场接轨, 但是 DSP 市场仍为一些国外大厂商占领, 2004 年中国 DSP 市场由 TI、Freescale、Agere、ADI 四家国外厂商所垄断。

美国德州仪器公司 (TI) 在实时信号处理领域是业界公认的市场领先者, 在 DSP 与模拟方面拥有最大的市场份额, 2000 年以来其产品占全世界市场的 44% 以上。TMS320 系列是 TI 推出的世界上最有影响的主流 DSP 产品。本书介绍的 TMS320C2000 系列是 16/32 位定点 DSP, 它的速度高达 150MIPS, 片内配置有双口数据存储器 DRAM 和 ROM/FLASH 等程序存储器, 并具有丰富的片内外围设备。目前, TMS320C2000 芯片在性能上已经远远超过一般的单片机芯片, 其价格也逐年下降, 正在逐步接近单片机的价格。鉴于其极高的性价比, TMS320C2000 广泛应用于数字电机控制、工业自动化、电力系统、能源变换和空调控制等领域。

DSP 优异的特性和极高的性价比使它的应用价值日益显现出来, 越来越受到国内高等院校和企业的高度重视。近年来, 国内许多大学已经为硕士生及本科生开设了 DSP 课程, 并建立了 DSP 实验室; 国内的许多科研单位和企业正在对 DSP 进行开发和应用研究。截止 2005 年底, TI 在 105 所大学设立了 118 个 DSP 实验室和 3 个 DSP 技术中心。从 1996 年至 2005 年

底, 超过 100,000 名学生通过所设的 DSP 技术中心及实验室, 进行了 DSP 课程的学习和培训。另外, 为加强同产业界的密切合作, TI 目前在企业中也建立有 15 个联合 DSP 实验室。目前迫切需要 DSP 应用系统设计这方面的教材、自学课本和参考书籍, 本书就是在此背景下为了使广大工程技术人员更好地进行 DSP 控制器的开发工作而编写的, 是本书作者近年来从事 DSP 控制器研发工作的总结。

本书共分为 8 章。第 1 章概述了 DSP 技术的发展现状、应用领域、发展方向以及主要 DSP 厂商和典型 DSP 产品; 第 2 章以 TMS320LF2407 和 TMS320F2812 为例介绍了 TMS320C2000 系列 DSP 的基本结构、CPU、存储器和 I/O 空间、中断系统以及 DSP 程序控制; 第 3 章介绍了 TMS320C2000 系列软件开发的 CCS2 软件集成开发环境、汇编程序设计、C 程序设计、软件工程管理和混合编程方法; 第 4 章介绍了 DSP 的浮点定点运算, 包括定点 DSP 的定标和数值处理、浮点数基本格式以及浮点定点基本运算; 第 5 章讨论了最小 DSP 硬件系统设计, 包括电源、时钟、复位、看门狗电路的设计、JTAG 仿真接口以及混合逻辑系统电平转换接口设计; 第 6 章介绍 DSP 硬件接口扩展技术, 包括存储器扩展接口设计、输入输出接口设计、数模转换接口及串行通信接口的扩展设计等, 给出一些实用接口电路; 第 7 章介绍了 TMS320C2000 系列的事件管理器以及基于事件管理器的正弦波脉宽调制和电压空间矢量 PWM 控制; 第 8 章给出了 TMS320C2000 系列的应用实例, 着重介绍了 TMS320C2000 系列在永磁同步电机调速系统、主从式天线容错伺服系统、电能质量检测、电力有源滤波器和无功补偿方面的应用。

全书由刘向东统稿, 李黎、黄毅、刘承参加了部分文字和图表的整理工作。

本书在编写过程中得到北京理工大学张宇河教授和冬雷副教授的热情帮助和鼓励, 他们对本书的编写提出了许多宝贵意见, 此外中国电力出版社编辑对本书的编写工作给予了大力支持, 在此一并表示衷心感谢。

限于作者学识, 且时间紧迫, 书中内容难免有不妥和错误之处, 恳请广大读者批评指正。

编者

2006 年 12 月

目 录

丛书序

前 言

第 1 章 绪论	1
1.1 DSP 的结构特点	1
1.2 DSP 的发展历程	3
1.3 DSP 芯片的种类及主要技术指标	4
1.4 DSP 的应用领域和发展方向	7
1.5 TI 公司 TMS320 系列 DSP	9
1.6 AD 公司的 DSP 芯片	25
1.7 AT&T 公司的 DSP 芯片	27
1.8 Motorola 公司的 DSP 芯片	28
第 2 章 TMS320C2000 系列 DSP 的基本特点及其硬件功能结构	29
2.1 TMS320C2000 系列 DSP 的基本特点	29
2.2 TMS320LF240x 芯片特点与总体结构	30
2.3 TMS320F2812 DSP 芯片特点与总体结构	75
2.4 DSP 的程序控制问题	84
2.5 寻址方式	86
第 3 章 CCS2 软件集成开发环境和 DSP 软件设计	91
3.1 CCS2 集成开发环境	91
3.2 TMS320C2000 编译器的汇编程序开发	99
3.3 TMS320LF240x C 编译器的 C 程序开发	125
3.4 DSP 的软件工程管理	132
3.5 C 语言和汇编语言的混合编程方法	134
3.6 最简单的 DSP 程序开发	134
第 4 章 DSP 系统的定点浮点运算	137
4.1 定点 DSP 的定标与数值处理	137
4.2 基本定点算术运算的实现	139
4.3 浮点数的格式	143
4.4 DSP 基本浮点运算	147

第 5 章 DSP 最小系统的硬件设计	152
5.1 DSP 系统的基本硬件设计	152
5.2 JTAG 仿真接口	160
5.3 3.3V 和 5V 混合逻辑系统电平转换接口设计	162
第 6 章 DSP 系统的扩展接口设计	165
6.1 DSP 芯片的存储器扩展接口设计	165
6.2 输入输出接口的设计	181
6.3 数模转换接口电路的设计与扩展	185
6.4 串行通信接口的设计与扩展	187
第 7 章 事件管理器及 SPWM/SVPWM 控制	209
7.1 DSP 的事件管理器	209
7.2 正弦波脉宽调制 (SPWM)	246
7.3 电压空间矢量 PWM 控制	254
第 8 章 TMS320C2000 系列应用系统设计	265
8.1 基于 DSP 的永磁同步电机矢量控制	265
8.2 基于主从式 DSP 系统的天线伺服系统容错设计	282
8.3 基于 TMS320F2812 的电能质量监测系统	290
8.4 基于 DSP 的电力有源滤波器	299
8.5 基于 TMS320LF2407 的无功补偿设计	306
参考文献	320

1

第1章 绪论

数字信号处理器 (DSP) 是一种特别适合于各种数字信号处理运算的微处理器, 也是嵌入式处理器的一种。通常, 嵌入式处理器包括微处理器、微控制器、数字信号处理器和单片机等。随着计算机和信息产业的高速发展, 特别是数字信号处理器的诞生与快速发展, 使各种数字信号处理算法得以实时实现, 使得数字信号处理学科在理论和方法上都获得了迅速发展。由于 DSP 具有丰富的硬件资源、改进的并行结构、高速数据处理能力和强大的指令系统, 它已经成为世界半导体产业中紧随微处理器与微控制器之后的又一个热点, 在通信、航空、航天、国防、工业控制、网络及家用电器等领域得到了广泛的应用。

1.1 DSP 的结构特点

DSP 是一种具有特殊结构的嵌入式微处理器, 为了达到快速数字信号处理的目的, DSP 芯片一般都具有哈佛结构的并行总线体系、流水线操作功能、快速的中断处理和硬件 I/O 支持、低开销循环及跳转的硬件支持、单周期硬件地址产生器、单周期硬件乘法器以及一套适合数字信号处理的指令集。主要结构特点如下:

(1) 采用改进型哈佛结构, 具有独立的程序总线 and 数据总线, 可同时访问指令和数据空间, 允许数据在程序存储器 and 数据存储器之间进行传输。

(2) 高度的操作并行性, 在一个指令周期内可完成多重操作, 一般能够完成一次乘法 and 一次加法 (MAC) 操作。

(3) 支持流水处理。在 DSP 处理器内, 对每条指令的操作可分为取指、译码、执行等几个阶段, 每个阶段称为一级流水。流水处理是指在某一时刻同时对若干条指令进行不同阶段的处理。TMS320 系列处理器的流水线深度为 2~6 级不等。第一代 TMS320 处理器采用 2 级流水线, 第二代采用 3 级流水线, 第三代采用 4 级流水线, 而 TMS320C54x 则采用 6 级流水线。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。图 1-1 所示为一个三级流水线操作的例子。

在三级流水线操作中, 取指、译码 and 执行操作可以独立地处理, 这可使指令执行能完全重叠。在每个指令周期内, 三个不同的指令处于激活状态, 每个指令处于不同的阶段。例如, 在第 N 个指令取指时, 前面一个即第 $N-1$ 个指令正在译码, 而第 $N-2$ 个指令则正在执行。一般说来, 流水线对用户是透明的。

(4) 片内含有专门的硬件乘法器 and 高性能的运算器及累加器, 能够在每秒钟内处理数以千万次至数亿次定点或浮点运算, 其处理速度比以往最快的 PC 微处理器还快数十倍; 为满足数字信号处理 FFT、卷积等运算的特殊要求, 多数 DSP 的指令系统中设置有循环寻址、位倒序指令 and 其他特殊指令, 使得在做这些运算时寻址、排序及计算速度都大幅度提高。

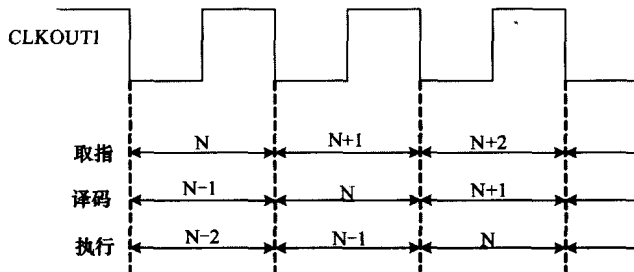


图 1-1 三级流水线操作

例如，在 TMS320 系列芯片中配置了专用的硬件乘法器，因此一条单周期指令便可完成一次乘法。如果用 TMS32010 构成 FIR 滤波器，那么完成每一级乘法/累加运算只需要执行如下 4 条指令：

- LT：加载被乘数至 T 寄存器。
- DMOV：在存储器中移动数据以实现延时。
- MPY：作乘法。
- APAC：将乘积加至 ACC。

而在典型的通用微处理器中，则需要 30~40 个指令周期。若要构成 256 级 FIR 滤波器，则上述 4 条指令就重复执行 256 次。以后将会知道，有一些特殊的 DSP 指令可以使 FIR 滤波器每级的运算时间进一步减少。

采用特殊的指令是 DSP 器件的又一个特点。在上一个例子中，DMOV（数据移动）指令起着使数据延时或移动一个采样周期的作用。这在数字信号处理中是很重要的，它与延时算子 Z^{-1} 相对应。在 TMS32010 中，另一条特殊指令是 LTD，它在一个指令周期中执行 LT、DMOV 和 APAC 三条指令：这样，完成 FIR 滤波器的一级运算只需要两条指令。在第二代 TMS320 芯片，如 TMS320C25 中，有两条更为特殊的指令（RPTK 和 MACD）使 FIR 滤波器每一级的运算时间减少到一个指令周期：

- RPTK 255：重复执行下一条指令 256（255+1）次。
- MACD：相当于执行 LT、DMOV、MPY 和 APAC 四条指令。

(5) 设置了单独的 DMA 总线及共控制器，在基本不影响数字信号处理速度的情况下，可以进行高速并行数据传送，其传送速率可以达到数百兆字节每秒。

(6) 丰富的片内存储器和灵活的寻址方式为数据处理应用提供了良好条件。DSP 面对的是数据密集型应用，对数据访问的速度和灵活性有很高的要求，同时又需要大量的数据存储空间。根据这些应用特点，DSP 片内集成了 RAM、ROM、FLASH 以及双口 RAM 等存储空间，并通过不同的片内总线访问这些空间，因此解决了总线竞争和速度匹配问题，大大提高了数据读/写访问的速度。

(7) 新型 DSP 不但具有数据处理能力，还集成了 A/D、比较器、捕捉器、PWM、串行口及看门狗等部件，为将 DSP 应用于电机控制、电力电子技术等领域提供了资源条件，并可以组成新型的 DSP 嵌入式应用系统。这种 DSP 嵌入系统不仅具有其他微处理器和单片机嵌入系

统的优点,而且还具有独特的高速数字信号处理能力。

1.2 DSP 的发展历程

DSP 技术的发展经历了 20 世纪 70 年代、80 年代和 90 年代三个主要阶段。目前已发展到第五代产品(见表 1-1)。世界上第一个单片 DSP 是 1978 年 AMI 公司宣布的 S2811,1979 年 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。这两种芯片内部都没有现代 DSP 芯片所必须有的单周期乘法器。

表 1-1 DSP 的产品

年代	1978 ~ 1983 年 (第一代)	1983 ~ 1986 年 (第二代)	1986 ~ 1990 年 (第三代)	1990 ~ 1994 年 (第四代)	1994 至今 (第五代)
结构及技术指标					
结构	VonNeumann 和 Harvard 结构	Harvard 结构	Harvard 结构	Harvard 结构	Harvard 结构
MAC 需时间	2 周期	1 周期	1 周期	1 周期	<1 周期
DMA	无	有	有	有	有
输入输出	并行	串行/定时器	多通道	多通道	多通道
指令	RISC	RISC + 事件管理器	RISC + 事件管理器 + 布尔运算	RISC + 事件管理器 + 布尔运算	RISC + 事件管理器 + 布尔运算
中断	无	有	有	有	有
乘法累加时间	>200ns	<160ns	<80ns	<35ns	<20ns
存储器设置	ROM/外扩	ROM/EPROM/外扩	RAM/ROM/EPROM/外扩	RAM/ROM/EPROM/外扩	RAM/ROM/EPROM/FLASH/外扩
存储器容量	4Kbit	64Kbit	64Kbit ~ 16Mbit	64Kbit ~ 16Mbit	64Kbit ~ 16Mbit
片内仿真	无	无	无	有	有
操作/时钟数	1/60	1/2	3	3	5
工艺	3 μ m NMOS	2 μ m CMOS	1.2 μ m CMOS	0.8 μ m CMOS	0.5 μ m BICMOS

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技术的处理速度。1982 年 TI 公司推出首枚低成本高性能的 DSP,使 DSP 技术向前跨出了意义重大的一步。20 世纪 90 年代以来,数字信号处理技术获得了惊人的发展,这体现在 DSP 的性能和指标不断提高,而价格却不断下降。从运算速度来看,MAC 时间已经从 20 世纪 80 年代初的 400ns 降低到 40ns 以下,处理能力提高了 10 多倍。DSP 芯片内部关键的乘法器部件从 1980 年的占模片区的 40% 左右下降到 5% 以下,片内 RAM 增加一个数量级以上。从制造工艺来看,1980 年采用 4 μ m 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。此外,DSP 芯

片的发展,使 DSP 系统的成本、体积、重量和功耗都有很大程度的下降。随着全球信息化和 Internet 的普及,多媒体技术得以广泛应用,尖端技术向民用领域迅速转移,数字技术大范围地进入消费类电子产品等,使 DSP 不断更新换代,价格大幅度下降,各种开发工具日臻完善,从而使它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 在 2000 年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,其增长速度比整个半导体工业快 50 倍。目前全球 DSP 市场中的主要厂商有:美国 TI 公司、Lucent、Motorola、Zilog 和 ADI 等公司。其中, TI 公司位居榜首,在全球 DSP 市场的占有率为 44%; Lucent 公司排名第二,占有率为 22.8%; Motorola 公司和 ADI 公司的占有率分别为 13.2% 和 10.2%。典型 DSP 产品的特性如表 1-2 所示。

表 1-2

典型 DSP 产品特性

型号	厂家	数据格式	数据长度/位	运行速度 (MIPS)	内部存储器 (字)			
					程序 ROM	程序 RAM	数据 ROM	数据 RAM
ADSP2186	ADI	定点	16	40	无	8K	无	8K
ADSP21060		浮点	32	33/40	无	80K	无	80K
ADSP21061		浮点	32	33/40	无	16K	无	16K
DSP1609	Lucent	定点	16	100	24K	2K	24K	2K
DSP1610		定点	16	40	512K	8K	512K	8K
DSP1620		定点	16	120	4K	32K	4K	32K
DSP56812	Motorola	定点	16	60			24K	
DSP56824		定点	16	60			32K	
μ DSP77015	NEC	定点	16	60	4K	256	2×2K	2×1K
TMS320C2000	TI	定点	16	≤40		256~4.25K		544~4.5K
TMS320C6201		浮点	8, 6, 32	1600	4~32K	16K		64K (字节)
TMS320C6701		浮点	32, 64	IGFIOPS		16K		16K

1.3 DSP 芯片的种类及主要技术指标

1.3.1 DSP 芯片的种类

DSP 芯片可以按照下列三种方式进行分类。

1. 按照数据格式分类

按照数据格式分类,可将 DSP 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 16/24 位。定点 DSP 芯片的特点是:体积小,成本较低,功耗小,对存储器的要求不高;但数值表示范围较窄,编程难度大,特别是在有混合小数运算的情况下,必须使用定点定标的方法,并要防止结果的溢出。如 TI 公司的 TMS320C1x/C2x/C5x 系列、AD 公司的 ADSP21xx 系列、ATT 公司的 DSP16/16A 及 Motorola

公司的 MC56000 等。以浮点格式工作的称为浮点 DSP 芯片, 如 TI 公司的 TMS320C3x/C4x/C8x、AD 公司的 ADSP21xxx 系列、ATT 公司的 DSP32/32C 及 Motorola 公司的 MC96002 等。浮点 DSP 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。不同浮点 DSP 芯片所采用的浮点格式不完全一样, 有的 DSP 芯片采用自定义的浮点格式, 如 TMS320C3x; 而有的 DSP 芯片则采用 IEEE 的标准浮点格式, 如 Motorola 公司的 MC96002、ZORAN 公司的 ZR35325 等。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, 更适用于大量数字信号处理运算的应用场合; 但它的硬件结构相对复杂, 功耗较大, 比定点芯片的价格高得多。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。

2. 按照芯片的用途分类

按照用途可将 DSP 分为通用型和专用型。通用型 DSP 适于普通的数字信号处理应用。目前世界上应用最广泛的通用 DSP 是 TI 公司的 TMS320 系列。专用型 DSP 是为适用于不同的数字信号处理运算或应用场合而设计的, 如数字滤波、卷积和 FFT。Motorola 公司 DSP56200、ZORAN 公司的 ZR34881、INMOS 公司的 IMSA100 等就属于专用型 DSP 芯片。Lucent 公司在网络应用方面推出了 Venus SOC modem DSP, 该芯片已在最新的 Geode WebPAD 产品中得以应用。WebPAD 产品是一个可以取代 PC 的 Web 浏览器, 用户可以通过它收发电子邮件, 与使用 PC 一样方便可靠。Agere 公司推出的 StarPro 系列 DSP 是专门供新一代 Internet 和无线网络使用的产品, 每块芯片都可以为无线交换机、远端接入服务器和 VoIP 网间接口提供大量的话路和数据通道, 并已超过同类产品 4 倍以上, 为无线基站提供的信道数量是传统 DSP 的 5 倍多。

3. 按基础特性分类

这是根据 DSP 芯片的工作时钟和指令类型来分类的。如果在某时钟频率范围内的任何时钟频率上, DSP 芯片都能正常工作, 除计算速度有变化外没有性能的下降, 这类 DSP 芯片一般称之为静态 DSP 芯片。如果有两种或两种以上的 DSP 芯片, 它们的指令集和相应的机器代码机管脚结构相互兼容, 则这类 DSP 芯片称为一致性 DSP 芯片。例如, 美国 TI 公司的 TMS320C1x 就属于这一类。

1.3.2 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, DSP 的处理能力主要有下列一些技术指标。

1. DSP 芯片的运算速度

运算速度是 DSP 芯片的一个最重要的性能指标, 也是选择 DSP 芯片时所需要考虑的一个主要因素。DSP 芯片的运算速度可以用以下几种性能指标来衡量。

(1) 指令周期: 就是执行一条指令所需的时间, 通常以 ns 为单位。如 TMS320C25 在主频为 40MHz 时的指令周期为 100ns。

(2) MAC 时间: 即一次乘法加上一次加法的时间。大部分 DSP 芯片可在一个指令周期内完成一次乘法和加法操作, 如 TMS320C25 的 MAC 时间就是 100ns。

(3) FFT 执行时间: 即运行一个 N 点 FFT 程序所需的时间。由于 FFT 运算涉及的运算在数字信号处理中很有代表性, 因此 FFT 运算时间常作为衡量 DSP 芯片运算能力的 4 个指标。

(4) MIPS: 即每秒执行百万条指令。如 TMS320C25 在时钟为 40M 时的处理能力为 10MIPS, 即每秒执行一千万条指令。TMS320C2000 系列的单周期指令执行时间为 50ns/35ns/25ns, 则其峰值处理能力为 20MIPS/28.5MIPS/40MIPS, 即每秒执行 2/2.85/4 千万条指令。TMS320C6203 在时钟为 300MHz 时的峰值性能可以达到 2400MIPS。

(5) MOPS: 即每秒执行百万次操作。操作包括 CPU 操作、地址计算、数据访问和传输、I/O 操作等。如 TM5320C6201 在时钟为 2MHz 时的峰值性能可达 2400MOPS, TMS320C40 操作能力为 275MOPS。该项指标是评价 DSP 处理能力的重要指标, TMS320C40 的运算能力为 275MOPS。

(6) MFLOPS: 即每秒执行百万次浮点操作。浮点操作包括浮点乘法、加法、减法、存储等操作。如 TMS320C30 在时钟为 33.33MHz 时的峰值性能可达 33.33MLOPS, TMS320C67xx 的峰值性能可达 1G MLOPS。该项指标是衡量 DSP 浮点处理能力的重要指标。

(7) BOPS: 即每秒执行十亿次操作。如 TMS320C80 的处理能力为 2BOPS。

(8) MBPS (百万位/秒)。该项指标用于衡量 DSP 的数据传输能力, 通常指总线或 I/O 口的带宽, 它是对总线或 I/O 口数据吞吐率的量度。如 TMS320C6000 的总线时钟为 200MHz 时, 其总线数据吞吐率为 800MB/s。

另外, 不同的 DSP 芯片具有不同的硬件资源、运算精度和功耗等技术指标。

2. DSP 芯片的硬件资源

不同的 DSP 芯片所提供的硬件资源是不相同的, 如片内 RAM、ROM 的数量, 外部可扩展程序和数据空间, 总线接口、I/O 接口等。即使是同一系列的 DSP 芯片, 如 TI 的 TMS320C5x 系列, 不同的 DSP 芯片也可以适应不同的需要。

3. DSP 芯片的运算精度

一般的定点 DSP 芯片的字长为 16 位, 如 TID 的 TMS320 系列。但有的公司的定点芯片为 24 位, 如 Motorola 公司的 MC56001 等。浮点芯片的字长一般为 32 位, 累加器为 40 位。

4. DSP 芯片的功耗

在某些 DSP 应用场合, 功耗也是一个需要特别注意的问题。如便携式的 DSP 设备、手持设备、野外应用的 DSP 设备等对功耗有特殊的要求。

除了上述因素外, 选择 DSP 芯片还应考虑到 DSP 芯片封装的形式、质量标准、供货情况、生命周期以及 DSP 芯片的开发工具等。有的 DSP 芯片可能有 DIP、PGA、PLCC、PQFP 等多种封装形式。有些 DSP 系统可能最终要求的是工业级或军用级标准, 那么在选择时就需要注意到所选的芯片是否有工业级或军用几年甚至十几年的生命周期, 需要考虑所选的 DSP 芯片供货情况如何, 是否也有同样甚至更长的生命周期, 等等。在 DSP 系统的开发过程中, 开发工具是必不可少的。如果没有开发工具的支持, 要想开发 DSP 系统几乎是不可能的。如果有功能强大的开发工具的支持, 如 C 语言支持, 则开发的时间就会大大缩短。所以, 在选择芯片的同时必须注意其开发工具的支持情况, 包括软件和硬件的开发工具。

在上述诸多因素中, 一般而言, 定点 DSP 芯片的价格较为便宜、功耗较低, 但运算精度稍低; 而浮点 DSP 芯片的优点是运算精度高、C 语言编程调试方便, 但价格稍贵, 功耗较大。

1.4 DSP 的应用领域和发展方向

1.4.1 DSP 的应用领域

自从德州仪器公司 1982 年推出通用的可编程的 DSP 芯片以来,经过 20 余年的发展,DSP 技术为数字技术带来了突破性的发展前景,其应用遍及人们日常学习、工作和生活各个方面。DSP 的高速发展得益于集成电路技术的发展和巨大的市场。随着性能的不断完善,DSP 芯片已经在信号处理、通信、雷达等许多领域得到广泛的应用,成为当今技术的一个新热点。随着生产技术和产量的激增,其成本和售价越来越低,性能价格比日益提高,它的应用范围也不断扩大了。典型应用如下:

1. 汽车——自适应行驶控制、防滑制动装置、蜂窝电话、数字收音机、伺服控制、引擎控制、全球定位、雷达检测、导航、振动分析、话音命令等。
2. 图形/图像——三维旋转、动画/数字画图、动态处理、图像压缩/传输、图像增强、模式识别、机器人视觉、工作站、桌面印刷系统等。
3. 工业——数字化控制、电力线监控、机器人、保密存取、安全检修等。
4. 仪器仪表——数字滤波、函数发生、模式匹配、锁相环、地震处理、频谱分析、瞬态分析等。
5. 消费类产品——数字收音机、数字电视、教学类玩具、音乐合成器、寻呼机、电力工具、不间断应答机等。
6. 军事——图像处理、导弹制导、导航、雷达处理、无线电调制解调器、保密通信、声纳处理、射频调制解调器等。
7. 通用场合——自适应滤波、卷积、数字滤波、快速傅立叶变换、希尔伯特变换、波形产生等。
8. 语音/语言——说话人确认、语音增强、语音识别、语音合成、语音声码器、文本/语音转换应用、语音信箱等。
9. 控制——磁盘驱动控制、激光打印机控制、电机控制、机器人控制、伺服控制等。
10. 医疗——诊断工具、胎儿监护、助听器、病人监护、整形术、超声设备等。
11. 通信——自适应脉冲编码调制译码器、自适应均衡、X.25 报文分组交换、回波抵消通道多路复用、双音多频编解码器、个人通信系统、个人数字助理、线路增音器、数字用户交换机 (PBX)、数字语音内插、扩频通信、未来终端、蜂窝电话、视频会议、数据加密等。

1.4.2 DSP 的发展方向

DSP 从 20 世纪 80 年代初发展到现在,已经历经五代,发展速度极快。20 多年来,大约有 20~30 家厂商推出了一百多种型号的产品。在众多产品中,美国 TI 公司生产的 TMS320 系列单片 DSP 以及 AD 公司生产的 ADSP-2100 系列和 ADSP-21000 系列 DSP 产品广泛应用于数字信号处理的各个领域。20 余年来,单片通用 DSP 的飞速发展主要体现在

如下四个方面。

1. 加快运行速度

大多数 DSP 内部采用流水线结构和改进的哈佛型结构。流水线结构可进行并行运算，快速完成执行过程；改进的哈佛型结构，可使分离的程序和数据空间相互传递数据。第一代 DSP 主要采用单 CPU、双总线结构。第二代 DSP 采用多 CPU、多存储体、双总线结构，提高了并行流水线处理功能。第三代 DSP 具有更加完善的多 CPU、多存储体结构，能保证中央处理器高效率地完成乘法/累加功能，而其他数据处理任务由别的处理单元并行操作完成。第四代 DSP 则是多 CPU、多存储体、多总线的高度并行流水线处理结构，大大加快了 DSP 的运行速度。单片 DSP 的指令周期早先为数百纳秒，如 TMS32010 的最长指令周期为 400ns。TMS320C25 已达到 100ns，相当于每秒执行 1000 万条指令；而 TMS320C30、C40 和 C50 则更快，其指令周期分别达到 60ns、40ns 和 35ns。ADSP-21020 和 ADSP-21060 分别为 30ns 和 25ns，与第一代 DSP 相比提高了一个数量级。

2. 增大存储容量

数字信号处理技术要求处理大量数据，特别是图像处理中要处理大量的二维数据，算法也比较复杂，这就需要大容量的程序存储空间和数据存储空间，因而片内程序存储器和数据存储器的容量不断扩大。第一代单片 DSP 的片内数据存储器和程序存储器只不过几百个单元，有的甚至没有片内 ROM。随着 CLSI 制造工艺和 $3\mu\text{m}$ 以及亚微米电路制作技术的发展，目前单片 DSP 的数据存储器和程序存储器可以达到几十 KB。如 TMS320C30 具有 $4\text{K} \times 32$ 位 ROM 和 $2\text{K} \times 32$ 位在片 RAM；TMS320C80 片内 SRAM 达到 50KB。

此外，对片外存储器的寻址能力也大大增强。以 TMS320C30 为例，外存扩展地址总线达 24 位，外存空间可扩展达 $16\text{M} \times 32$ 位；而 ADSP-21020 的外部程序和数据存储空间分别为 $16\text{M} \times 48$ 位和 $4\text{G} \times 40$ 位。

3. 扩大芯片功能

新一代单片 DSP 的接口功能愈来愈丰富，易于完成系统设计。与外部通信和同步功能的增强，使单片 DSP 具有更强的灵活控制能力。例如 TMS320C40 包括 6 个 8 位并行 I/O 口，它们直接支持处理器到处理器之间的通信，允许用户使用各种各样的多处理器系统结构。6 个片内 DMA 协处理器服务于这些并行 I/O 口，并允许在处理器 CPU 执行算法时与用户系统之间进行快速、非中断式通信，使微处理器 CPU 可以在每个机器周期内同时执行几个操作。为适应 FFT 运算，位反转寻址方式也在某些 DSP 上得到实现。

4. 提高运算精度

由于输入信号动态范围以及迭代算法可能产生的误差积累问题，对单片 DSP 的精度提出了较高的要求。因此，DSP 片内字长从 8 位增加到 16 位、24 位、32 位。然而，解决精度问题的最好办法还是采用浮点运算。目前已有多种具有浮点运算功能的单片 DSP，例如 TMS320C30、C40、ADSP-21020 等。

大多数单片 DSP 引脚为 40~305 个。主要采用 DIP、PLCC 和 PGA 三种封装形式，封装材料主要包括塑料和陶瓷两种，温度范围为 $-55^\circ\text{C} \sim 125^\circ\text{C}$ 。

单片 DSP 今后的发展趋向可概括为：

(1) 采用 $1\mu\text{m}$ 以下的 CMOS 工艺制造技术，以使集成度更高，功耗更低。砷化镓集成电