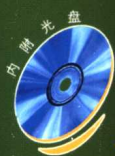


DSP

控制器原理 及其在运动控制系统中的 应用

韩安太 刘峙飞 黄 海 编著



光盘内容

- ◇ 本书完整的源程序代码
- ◇ DSP 控制器集成开发环境——ccstudio 测试版
- ◇ 完整的 TMS320C24x 系列 DSP 控制器技术文档
- ◇ 一些有用的示例参考程序，如 FFT、ADC 驱动等



清华大学出版社

DSP 控制器原理及其 在运动控制系统中的应用

韩安太 刘峙飞 黄 海 编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

为了满足高性能运动控制系统的开发需要,结合工程上的实际应用,本书介绍了数字信号处理器的发展概况和美国德州仪器(TI)等公司生产的DSP芯片的特点,以及运动控制系统的发展概况,并对现有的系统实现方法作了对比;在此基础上,详细介绍了TI公司生产的TMS320x24x系列DSP控制器的芯片结构、功能外设、指令系统、集成开发环境和系统开发、调试工具等内容;通过对无刷直流电动机控制器、交流伺服电动机控制器等实现方案的设计思路和程序代码的翔实介绍,对利用x24x系列DSP控制器进行系统开发过程中出现的主要问题及其解决办法进行了总结。

本书面向工业领域中从事电动机驱动、机器人、控制和电力电子技术的科研及工程技术人员,也可作为高等院校电力电子、自动控制、电气工程等专业的高年级本科生和硕士研究生的教学参考书。

版权所有,翻印必究。

本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。

书 名: DSP 控制器原理及其在运动控制系统中的应用

作 者: 韩安太 刘峙飞 黄 海 编著

出 版 者: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客户服务: 010-62776969

责任编辑: 朱英彪

封面设计: 秦 铭

版式设计: 俞小红

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×260 印张: 28.75 字数: 664 千字

版 次: 2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-89494-103-4

印 数: 1~5000

定 价: 46.00 元(附光盘 1 张)

前 言

一个多世纪以来,电动机作为最主要的机电能量转换装置,其应用范围已遍及国民经济的各个领域和人们的日常生活。过去,电动机的调速控制一般采用模拟法,随着计算机、微电子技术的发展以及新型电力电子功率器件的不断涌现,电动机的控制策略也发生了深刻的变化。传统的模拟控制方法已逐渐被以微控制器为核心的数字控制方法所取代。变频技术和脉宽调制技术已成为电动机控制的主流技术。

在那些对电动机控制系统的性能要求较高的场合(如数控机床、工业缝纫机、雕刻机、磁盘驱动器、打印机、传真机等设备中,要求电动机实现精确定位),以 MCS-51 为代表的单片机已难以满足系统要求。为了适应时代的发展,现有的电动机控制系统也在朝着高精度、高性能、网络化、信息化、系统芯片化的方向不断前进。

为了满足电动机控制系统的发展需要,20 世纪 90 年代末,美国德州仪器(TI)公司推出了 TMS320x24x 系列数字信号处理器(DSP),该系列 DSP 芯片专为实现高精度、高性能、功能多样化的单片电动机控制系统或运动控制系统而设计,所以又被称为 TMS320x24x 系列 DSP 控制器。它将 TI 公司的高性能 16 位 DSP 核 C2xLP 和丰富的功能外设电路集成在单个芯片上,为设计小体积、低功耗、高可靠性、高性能的电动机控制系统提供了方便,同时也使系统的整体成本大大降低。自问世以来,该系列 DSP 芯片已在家用电器、智能仪表、机电一体化系统、顺序控制、计算机外围设备等方面得到了广泛的应用,充分显示了其强大的生命力和广阔的发展前景。

由于 TMS320x24x 系列 DSP 控制器在国内还属于一种新产品,与此相关的中文资料较缺乏,使得人们在获取这方面知识的过程中遇到了不少困难,从而阻碍了这项新技术的普及与应用。为了帮助那些在经济建设第一线工作的电动机控制系统设计人员迅速掌握这种新型的 DSP 控制器,并在实际工作中使用它们,作者在近几年从事电动机控制系统开发和研究的基础上,编写了这本关于 TMS320x24x 系列 DSP 控制器的原理及工程应用的参考书。

本书首先介绍了数字信号处理器的发展概况和 TI 等公司生产的 DSP 芯片的特点,同时介绍了以电动机为核心的运动控制系统的发展概况,并对现有的系统实现方法作了对比;在此基础上,着重介绍了 TI 公司生产的 TMS320x24x 系列 DSP 控制器的芯片结构、功能外设、指令系统、集成开发环境和系统开发、调试工具等内容;在掌握了 DSP 控制器工作原理的基础上,通过列举大量翔实的应用例子,以较大的篇幅讨论了在系统设计中怎样应用 x24x 系列 DSP 控制器;对于书中提到的全部应用例子,都提供了完整的系统设计思路和程序代码,这些程序在相应的软件开发环境和硬件平台上调试通过,运行结果正确。

本书共分 10 章,其中第 1、4、5、6、8 章由韩安太编写,第 2、7 章由刘峙飞编写,第 3、9、10 章由黄海编写。全书由韩安太统编,王树青教授审阅。

在本书的编写过程中,作者参考了 TI 公司及其第三方公司提供的大量技术文档以及国内一些优秀的电动机控制方面的资料,在此谨向这些资料的作者表示诚挚的谢意。

本书是作者近几年利用 x24x 系列 DSP 控制器进行电动机控制系统开发工作的总结。由于工作繁忙,应该说本书的创作过程是艰难的,能够以目前的形式与读者见面,很大程度上要归功于浙江工业大学自动化系的俞立教授和清华大学出版社朱英彪编辑的长期鼓励与支持;另外,也非常感谢刘龙、范兴刚、徐胜平、陈敦昆等同志在本书的资料整理阶段所做的大量工作和给予的合理建议;在此,向他们表示诚挚的谢意。

希望本书能够对读者的学习有所帮助,也希望有助于 DSP 控制器的推广和普及。由于作者的水平有限,再加上技术发展速度较快,书中肯定存在很多不足之处,真诚希望广大读者批评指正。

编 者

2003 年 8 月

于浙江大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 DSP 芯片概述	2
1.2 TI 公司的 DSP 芯片	11
1.3 其他公司的 DSP 芯片	24
1.4 运动控制概述	27
1.5 几种运动控制系统实现方法的比较	28
1.6 TMS320x24x 系列 DSP 控制器概述	32
1.7 小结	38
第 2 章 DSP 控制器的内核	40
2.1 x24x 系列 DSP 控制器概述	40
2.2 中央处理单元	41
2.3 系统配置和中断服务	55
2.4 存储器	76
第 3 章 DSP 控制器的片上外设	90
3.1 片内锁相环 (PLL)	90
3.2 数字 I/O 端口	100
3.3 模拟数字转换器	103
3.4 串行通信接口	110
3.5 串行外设接口	126
3.6 看门狗/实时中断模块	142
3.7 CAN 控制器模块	150
第 4 章 事件管理器	175
4.1 概述	175
4.2 通用定时器	180
4.3 比较单元	195
4.4 捕获单元	213
4.5 正交编码脉冲电路	218
4.6 事件管理器模块的中断	220
第 5 章 x24x 系列 DSP 控制器的指令系统和系统开发工具介绍	228
5.1 程序地址的产生	228
5.2 程序跳转和子程序调用的执行	232

5.3	单指令重复操作	236
5.4	寻址方式	236
5.5	汇编语言指令	243
5.6	软件开发工具	254
5.7	代码调试工具	266
第 6 章	DSP 应用系统的设计与开发过程	271
6.1	DSP 控制系统的结构	271
6.2	基于 x24x 系列 DSP 控制器的系统设计与开发	274
6.3	开发工具的选择	279
第 7 章	DSP 的简单应用举例	281
7.1	PID 控制	281
7.2	控制带串行端口的正弦波形发生器	287
7.3	用 SPI 实现点对点通信	291
7.4	用 CAN 模块建立现场总线系统	300
7.5	利用 PWM 通道实现 D/A 转换	314
7.6	配置 TMS320F240 DSP 的数字 I/O	323
7.7	复位源的确定	325
7.8	运动控制系统中的卡尔曼滤波器设计	328
第 8 章	无刷直流电动机调速系统的 DSP 解决方案	334
8.1	直流无刷电动机的基本组成和工作原理	335
8.2	直流无刷电动机速度控制的 DSP 解决方案	347
8.3	具有位置传感器的直流无刷电动机速度控制系统的实现	358
8.4	无位置传感器的直流无刷电动机速度控制系统的实现	364
第 9 章	永磁同步电动机的 DSP 解决方案	371
9.1	同步电动机调速系统简介	372
9.2	矢量控制概述	377
9.3	永磁同步电动机的矢量控制模型与调速原理	381
9.4	永磁同步电动机调速控制系统的 DSP 解决方案	388
9.5	带位置传感器的 PMSM 调速控制系统的实现	397
第 10 章	异步交流感应电动机的 DSP 解决方案	416
10.1	异步交流感应电动机调速系统简介	417
10.2	异步交流电动机的数学模型及其 FOC 矢量控制原理	426
10.3	异步交流电动机调速控制系统的 DSP 解决方案	437
10.4	异步交流电动机调速控制系统的实现	445
参考文献		453

第 1 章 绪 论

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 或者说对信号的数字处理 (包括对信号进行采集、变换、滤波、估计、压缩及识别等), 是一门涉及许多学科而又广泛应用于许多领域的新兴学科。20 世纪 60 年代以来, 随着计算机、大规模集成电路 (LSI) 和超大规模集成电路 (VLSI) 以及微处理器等技术的进步, 数字信号处理技术应运而生并得到迅速的发展。在过去近 40 年的时间里, 数字信号处理已在各个领域得到了极为广泛的应用。

事实上, 数字信号处理是围绕数字信号处理的理论、实现和应用等几个方面发展起来的。数字信号处理在理论上的发展推动了数字信号处理应用的发展; 反之, 数字信号处理的应用又促进了数字信号处理理论的提高; 而数字信号处理的实现则是理论和应用之间的桥梁。

数字信号处理的理论基础涉及广泛。例如, 数学领域的微积分、概率统计、复变函数、线性代数、泛函分析、随机过程、数值分析等都是数字信号处理的基本分析工具。同时, 它与网络理论、信号与系统、控制论、通信理论、故障诊断等也密切相关。近年来, 一些新兴的学科如人工智能、模式识别、神经网络、最优控制、模糊控制、故障理论等都与数字信号处理密不可分。可以说, 数字信号处理是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。

数字信号处理技术已广泛应用于数字通信、雷达、遥感、语音合成、图像处理、电动机及运动控制、测量与数字控制、高清晰度电视、数字音响、多媒体技术、生物医学工程及机器人控制等领域。随着科学技术的发展和数字时代的到来, 其研究范围和应用领域还在不断地发展和扩大。

目前, 数字信号处理的实现方法一般有以下几种:

- (1) 在通用计算机 (如 PC 机) 上用高级语言编程实现。
- (2) 在通用计算机系统中加上专用的加速处理机实现。
- (3) 用通用微处理器或单片机实现。
- (4) 用专用 DSP 芯片实现。
- (5) 用通用可编程 DSP 芯片实现。

在上述几种实现方法中, 第 (1) 种方法的缺点是速度较慢, 一般用于数字信号处理算法的模拟; 第 (2) 种和第 (4) 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数字信号处理算法; 只有第 (5) 种方法才为数字信号处理的应用打开了新局面。

典型的数字信号处理系统如图 1.1 所示。其中, 输入信号可以是语音、电流、电压、温度等模拟信号; 输入信号经模拟数字信号转换 (A/D) 以后, 送入数字信号处理部分进

行处理，此数字信号处理的实现可采用以上任意一种方法；最后，经过处理的信号经数字模拟转换（D/A）、内插、平滑、滤波等处理后输出模拟信号。

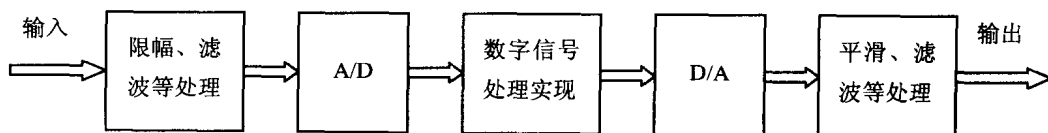


图 1.1 典型的数字信号处理系统原理框图

应该注意的是，不是所有的数字信号处理系统都具有如图 1.1 所示的结构，如有些系统只需输出数字信号，就不需要 D/A 变换了；有些系统的输入信号就是数字信号，也就不需要 A/D 变换了；对于纯数字系统来说，只需要上述的数字信号处理实现部分即可。

在数字信号处理系统中，虽然可选用任何一种数字信号处理实现方法，但由于数字信号处理算法一般较复杂，且系统对处理的实时性要求较高，因此，直到 20 世纪 70 年代末世界上第一片单片可编程 DSP 芯片诞生之前，数字信号处理的研究主要集中在理论和算法模拟方面，真正实用的数字信号处理系统并不多见。DSP 芯片的问世弥补了这个不足，从此，数字信号处理的理论研究结果被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近 20 年来的通信、计算机、控制等领域的技术发展起到了十分重要的作用。

作为本书的基础知识部分，本章首先对 DSP 芯片的发展历史、现状、特点、应用领域以及性能评价指标等作了详细介绍；在读者对 DSP 芯片有了一定了解后，重点讨论美国德州仪器（TI）公司的 TMS320 系列数字信号处理器产品的结构、特点，同时也对其他公司的 DSP 芯片进行介绍；然后，对以电动机为核心的运动控制系统（除非特别说明，本书中提到的“运动控制系统”都是指该类以电动机为核心的电动机控制系统）的发展和现状进行回顾，并比较了当前几种运动控制系统实现方法的优缺点；最后，得出了使用 TI 公司的 TMS320x24x 系列 DSP 控制器组成运动控制系统是运动控制系统实现方式的发展潮流这一结论。

1.1 DSP 芯片概述

DSP 芯片，也称数字信号处理器，是一种特别适合于数字信号处理运算的微处理器，其主要应用是实时快速实现各种数字信号处理算法。

根据数字信号处理的要求，DSP 芯片一般具有如下特点：

- （1）在一个指令周期内可完成一次乘法和一次加法运算。
- （2）程序和数据存储空间分开，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进行访问。
- （4）具有低开销或无开销执行循环及跳转操作的硬件支持。
- （5）快速的中断处理和硬件 I/O 支持。

- (6) 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, 不同操作阶段可以重叠执行。

自 1982 年美国德州仪器 (TI) 公司推出通用可编程 DSP 芯片以来, DSP 技术取得了突飞猛进的发展。在 DSP 技术与 DSP 芯片的相互推动下, 在计算机与微电子技术飞速发展的基础上, DSP 芯片性能已得到了极大的提高。作为实现数字信号处理的硬件核心, DSP 的应用领域取得了不断的拓展。DSP 芯片已深入到我们的工作与生活中, 无论是在计算机外设、通信、工业控制、航空航天、精密仪器, 还是在家用电器, 如 CD 机、变频空调器、MP3 播放器、数码相机等设备中, 都有 DSP 芯片的身影。

本节主要介绍 DSP 芯片的发展历史、DSP 芯片的特点、DSP 芯片的现状和发展方向、DSP 芯片的划分、DSP 芯片的性能评价指标等内容。

1.1.1 DSP 芯片的产生和发展

随着集成电路制造工艺、微电子等技术的不断提高, AMI 公司于 1978 年发布了世界上第一个单片 DSP 芯片 S2811; 1979 年, 美国 Intel 公司发布了商用可编程器件 2920, 这两种芯片就是最早期的 DSP 处理器。但是, 这两种芯片内部都没有现代 DSP 芯片必须具有的单周期硬件乘法器, 其性能和结构与现代 DSP 芯片相比具有较大的差距。

1980 年, 日本 NEC 公司推出的 μ PD7720 是第一个具有片上硬件乘法器的商用 DSP 芯片; 1981 年, 美国的贝尔实验室推出了同样具有片内硬件乘法器和存储器、16 位字长的 DSP 芯片 DSPI。

此后, 各个公司如 TI、AD、MOTOROLA 和 AT&T 等都相继推出了自己的产品。在这些不同种类的 DSP 芯片中, 最成功的当数美国德州仪器公司 (Texas Instruments, TI) 推出的一系列产品。TI 公司在 1982 年成功推出了其第一代 DSP 芯片 TMS32010, 这是 DSP 应用历史上的一个里程碑, 从此, DSP 芯片开始得到真正的广泛应用。在 TMS32010 在市场上大获成功的基础上, TI 公司陆续推出了其 TMS320 系列 DSP 芯片。由于 TMS320 系列 DSP 芯片具有价格低廉、简单易用、功能强大等特点, 所以逐渐成为目前最有影响、最为成功的 DSP 系列处理器。

TI 公司的主要产品包括第一代 DSP 芯片——TMS32010、TMS32011、TMS320C10/C14/C15/C16/C17 等, 第二代 DSP 芯片——TMS32020、TMS320C25/C26/C28 等, 第三代 DSP 芯片——TMS320C30/C31/C32/C33 等, 第四代 DSP 芯片——TMS320C40/C44 等, 第五代 DSP 芯片——TMS320C50/C51/C52/C53 等, 以及集多个 DSP 核于一体的高性能 DSP 芯片 TMS320C80/C82 等。为了适应市场需要, TI 公司又陆续推出了它的三大系列产品:

- (1) 面向数字控制、运动控制的 TMS320C2000 系列, 主要包括 TMS320C24x/F24x、TMS320LC240x/LF240x、TMS320LC240xA/LF240xA、TMS320F28xx 等。
- (2) 面向低功耗、手持设备、无线终端应用的 TMS320C5000 系列, 主要包括 TMS320C54x、TMS320C54xx、TMS320C55x 等。

(3) 面向高性能、多功能、复杂应用领域的 TMS320C6000 系列, 主要包括 TMS320C62xx、TMS320C64xx、TMS320C67xx 等。

如今, 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 公司也成为世界上最大的 DSP 芯片供应商, 其 DSP 市场份额约占全世界的 50%。

第一个采用 CMOS 工艺生产浮点 DSP 芯片的是日本的 Hitachi 公司, 它于 1980 年推出了浮点 DSP 芯片; 1983 年, 日本 Fujitsu 公司推出了 MB8764, 其指令周期为 120ns, 且具有双内部总线, 从而使处理吞吐量发生了一个大的飞跃。而第一个高性能浮点 DSP 芯片是 AT&T 公司于 1984 年推出的 DSP32。

与 TI 公司相比, Motorola 公司在推出 DSP 芯片方面起步较晚。1986 年, 该公司推出了定点 DSP 处理器 MC56001; 1990 年, 又推出了与 IEEE 浮点格式兼容的浮点 DSP 芯片 MC96002。

美国模拟器件公司 (Analog Devices, AD) 在 DSP 芯片市场上也占有一定的份额, 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、ASDP2111/2115、ADSP2126/2162/2164、ADSP2127/2181 等, 浮点 DSP 芯片有 ADSP21000/21020、ADSP21060/21062 等。

从 DSP 芯片出现到现在的 20 多年时间里, 已有 20~30 家厂商推出了上百种型号的产品。除了 TI 公司的 TMS320 系列 DSP 芯片外, 其他有代表性并获得广泛应用的 DSP 系列芯片主要有 Motorola 公司的 MC56/96 系列、AD 公司的 ADSP21 系列等。

在 DSP 芯片的制造获得迅速发展的同时, 其性能和制造工艺也在不断提高。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 400ns(如 TMS32010)降低到 50ns 以下(如 TMS320C24x/C24xx、TMS320C54X/C55x、TMS320C62x/67x 等), 处理能力则提高了几十倍, 同时片内存储器数量增加了一个数量级以上。从制造工艺看, 1980 年制造的 DSP 芯片一般采用 $4\mu\text{m}$ 的 N 沟道 MOS (NMOS) 工艺, 而现在则普遍采用深亚微米 CMOS 工艺, 达到 $0.08\mu\text{m}$ 。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, 需要设计的外围电路越来越少。此外, DSP 芯片的发展使 DSP 系统的成本、体积、重量和功耗都有了很大程度的下降。

1.1.2 DSP 芯片的现状和发展方向

自第一个 DSP 芯片(20 世纪 70 年代末 AMI 公司的 S2811)诞生以来, 经过 30 多年的不断技术创新, DSP 芯片的发展取得了长足进步, 主要表现在以下几个方面:

- (1) 制造工艺。目前的 DSP 芯片一般采用深亚微米 CMOS 工艺制造, 在不断降低功耗的同时, 单片上集成了更多的功能电路; 另外, 引脚数目不断增加, 使芯片的灵活性得到提高。
- (2) 存储器容量。目前, DSP 芯片的片内存储器具有多种类型, 如 ROM、Flash EEPROM、DARAM、SARAM 等。从存储单元的数量上来看, 片内的数据和程

序存储器可达到上百千字；另外，芯片对片外程序和数据存储器的寻址能力也大大增强，最高可达 320G 位。

- (3) 内部结构。目前，DSP 芯片内部广泛采用多总线、多处理单元和多级流水线结构，加上完善的接口功能，使 DSP 的系统功能、数据处理能力以及与外部设备的通信能力大大增强。
- (4) 处理速度。经过 30 多年的发展，DSP 芯片的指令周期已从最初的 400ns 减少到目前的小于 10ns，芯片的运行速度提高到 4000MIPS（百万条指令每秒）以上。
- (5) 运算精度。现在，主流 DSP 芯片的字长一般为 16 位、24 位、32 位，片内累加器等单元的长度也增加到了 32 位、40 位，这些措施都为减少系统的运算误差奠定了物质基础。
- (6) 开发工具。早期的 DSP 芯片由于开发工具的缺乏很难普及，20 世纪 90 年代以后推出的 DSP 芯片，一般都配备有较为完善的软件和硬件开发工具，这些都为 DSP 系统的开发应用提供了很大方便。

事实上，随着计算机技术、微电子技术和超大规模集成电路的制造工艺等技术的不断发展，以及 DSP 芯片应用的不断深入，可以预见将来的 DSP 芯片还将以更快的速度发展，其发展趋势可概括为：

- (1) 首先在生产工艺上，大量采用 $1\mu\text{m}$ 以下的 CMOS 制造工艺，使芯片的集成度更高、功耗更低，从而使高频、高速的 DSP 芯片得到更大的发展。
- (2) 高速、高性能 DSP 芯片的研制将以 RISC（精简指令系统计算机）结构和单片并行计算机结构为主导，以完成并行处理系统操作。
- (3) 专用 DSP 芯片（如 MPEG4、MP3 等处理芯片）将得到较大的发展。
- (4) 模拟/数字混合式 DSP 芯片（集 A/D、D/A、滤波、数字信号处理等功能）将有较大的发展，应用领域会有进一步扩大。
- (5) 在系统高度集成化的基础上，发展以 DSP 核为核心的 SOC（片上系统）芯片将是 DSP 发展的主要方向。
- (6) 提供更完善的开发环境，特别是开发效率更高的、优化的 C 编译器或其他高级语言编译器以及代数式指令系统，缩短开发周期。

1.1.3 DSP 芯片的特点

现代 DSP 芯片作为可编程超大规模集成电路（VLSI）器件，通过可下载的软件或内部硬件来实现复杂的数字信号处理功能。DSP 芯片除具备普通微处理器的高速运算和控制功能外，针对高数据传输速率、数值运算密集的实时数字信号处理操作，在处理器结构、指令系统和指令流程设计等方面都做了较大的改进。其主要特点如下：

1. 采用哈佛结构或改进的哈佛结构

早期的微处理器内部大多采用 Von-Neumann 结构，其片内程序空间和数据空间合在一起，将指令、数据、地址存储在同一存储器中，统一编址，依靠指令计数器提供的地址对

指令、数据、地址信息进行区分。这种将程序和数据存储在同一个存储空间中的思想简化了系统的结构,但是,由于取指令和取操作数据要访问同一存储空间,使用同一总线,指令和数据分时读写,因此在高速运算时,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。

现代的 DSP 芯片内部一般采用哈佛结构或改进的哈佛结构,这是一种不同于 Von-Neumann 结构的并行体系结构。哈佛结构的最大特点是计算机具有独立的数据存储空间和程序存储空间,即将数据和程序分别存储在不同的存储器中,每个存储器单独编址、独立访问。相应地,系统中有独立的数据总线和程序总线,这样就允许 CPU 同时执行取指令(来自程序存储器)和取数据(来自数据存储器)操作,从而提高了数据吞吐率,提高了系统运算速度。不过与 Von-Neumann 结构相比,这种结构要复杂一些。

较早的 DSP 芯片采用了程序存储器和数据存储器分离的基本哈佛结构。这样,一条指令的读取可以与前一条指令、操作数的读取同时进行,但这种基本的哈佛结构无法实现对多个数据存储器的访问操作,无法实现单指令周期的多操作数指令。

为了进一步提高 CPU 的运行速度和芯片的灵活性,在较新的 DSP 芯片中常采用改进的哈佛结构。改进的方案有以下 3 种:

- (1) 允许数据存放在程序存储器中,并可被算术指令直接使用。但这样会造成指令和数据不能同时读取,多操作数指令的执行需要两个存储器访问周期时间。
- (2) 将指令存储在高速缓存中,当执行此指令时,不需要再从程序/数据存储器中读取指令,节省了一个指令周期的时间。
- (3) 改进存储器块的结构,允许在一个存储周期内同时读取指令和两个操作数,具有更高的访问能力。

与哈佛结构相配合,许多 DSP 芯片的内部采用多总线结构,这样从另一个方面保证了在一个机器周期内对程序空间和数据存储空间的多次访问。

2. 专用的硬件乘法器

从数字信号处理的理论研究可知,在数字信号处理算法中,数量最多的运算类型是乘法和加法运算。在通用的微处理器中,乘法一般由软件实现,需要多个指令周期来完成,这样就限制了数字信号处理算法的执行速度。在 DSP 芯片中,一般都有专用的硬件乘法器(一个或多个),使得一次或多次乘法运算可以在一个单指令周期内完成,从而极大提高了 DSP 芯片的运算性能和运算速度。

3. 多个功能单元

为了进一步提高速度,现代 DSP 芯片内部设置了多个并行操作的功能单元(如算术逻辑单元、乘法器、地址产生器等)。由于多个功能单元的并行操作,使 DSP 芯片在相同时间内可完成更多的操作,因而提高了程序的执行速度。针对乘法和加法运算,多数 DSP 芯片的乘法器和算术逻辑单元都支持在一个周期内同时完成一次乘法和一次加法运算;另外,很多定点 DSP 芯片还支持在不附加操作时间的前提下对操作数和操作结果的任意移位。

4. 专用寻址单元

DSP 芯片面向的是数据密集型应用场合,伴随着频繁的数据访问次数,数据地址的计

算时间也线性增长。如果不在地址计算上做特殊考虑,有时计算地址的时间比实际的算术操作时间还长。例如,8086 做一次加法需要 3 个周期,而计算一次地址却需要 5~12 个周期。因此,现代 DSP 芯片内一般都有支持地址运算的算术单元——地址产生器。地址产生器与算术逻辑单元并行工作,因此,地址的计算不再额外占用 CPU 的计算时间。

DSP 芯片的地址产生器一般都支持直接寻址、间接寻址等多种寻址方式,有些还支持位反寻址和循环寻址。

5. 指令系统的流水线操作

DSP 芯片执行一条指令通常需要经过取指、译码、取操作数和执行等几个阶段。为了提高芯片的计算速度,现代的 DSP 芯片普遍采用流水线结构。也就是说,将一个任务分解为若干个子任务,在任务的连续执行过程中,这些子任务可相互重叠进行。DSP 指令系统的流水线操作与其哈佛结构和内部的多总线结构相配合,增加了 CPU 的处理能力,把指令周期减到最小值。

在流水线操作中,DSP 芯片可同时并行处理 2~4 条指令,每条指令处于其执行过程中的不同状态。

6. 片内存储器

由于 DSP 芯片面对的是数据密集型应用,因此,存储器的访问速度对处理器的性能影响很大。现代微处理器内部一般都集成了高速缓存(Cache),但是片内一般不设存储程序的 ROM 和存储数据的 RAM,这是因为通用微处理器的程序一般都很大,片内存储器不会给处理器性能带来明显的改善。

DSP 算法的特点是需要大量的重复运算,其程序一般都比较短小,存放在片内可以减少指令的传输时间,并有效缓解芯片外部总线接口的压力。除了片内程序存储器外,DSP 芯片一般还集成了片内数据存储器,用于存放参数和数据。

片内存储器虽然不可能具有很大的容量,但是由于不存在访问外部存储器所带来的总线竞争和速度不匹配等问题,因此访问速度很快,可以多个存储器块并行访问,缓解 DSP 芯片的数据瓶颈,充分利用芯片强大的处理能力。

7. 特殊的指令集

为了更好地满足数字信号处理应用的需要,在 DSP 芯片的指令系统中设计了一些特殊的 DSP 指令,以充分发挥 DSP 算法及各系列芯片的特殊设计功能。

8. 快速的指令周期

与传统的微处理器和微控制器相比,DSP 芯片快速的指令周期是一个明显特征与优势。改进的哈佛结构、专用硬件乘法单元、流水线操作、多个功能单元的并行处理、特殊的指令系统,再配合现在集成电路的优化设计工艺,从而可使现代 DSP 芯片的单指令周期下降到 50ns 以下。

9. 强大的片内硬件配置

为了实现 SOC,现代 DSP 芯片内部除了 DSP 核以外,一般还集成了一些其他功能外设,如通用串行口、主机接口(HPI)、事件管理器模块、DMA 控制器、CAN 总线控制模块、软件等待状态发生器、锁相环电路、模拟数字转换模块以及实现在片仿真符合

IEEE 1149.1 标准的 JTAG 测试仿真口等；另外，许多 DSP 芯片可工作于低功耗模式（或称为节电模式），使系统功耗进一步降低。

1.1.4 DSP 芯片的分类

经过 30 多年的发展，目前市场上已有上百种 DSP 芯片。这些 DSP 芯片可以按照如下方式进行分类：

1. 按照 DSP 芯片所支持的数据类型不同可分为定点和浮点 DSP 芯片

定点 DSP 芯片在进行算术运算时，使用的是小数点位置固定的有符号数或无符号数。定点器件在硬件结构上比浮点器件简单，具有价格低、速度快等特点，但是受字长的限制，其运算精度低、动态范围小。定点 DSP 芯片主要有 TI 公司的 TMS320C1x/C2x/C5x/C2xx/C24x/C24xx/C28x/C54x/C55x/C62x/C64x、Motorola 公司的 MC56000 系列、AD 公司的 ADSP21xx 系列等。

浮点 DSP 芯片在进行算术运算时，使用的则是带有指数的小数，小数点的位置随着具体数据的不同进行浮动。浮点器件的优点是动态范围大、运算精度高、不需要进行定标和考虑有限字长效应，在性能要求高的实时信号处理场合中有着广泛的应用。但是，浮点芯片的成本高、功耗大、速度较慢。浮点 DSP 芯片主要有 TI 公司的 TMS320C3x/C4x/C8x/C67x、Motorola 公司的 MC96000 系列、AD 公司的 ADSP21xx 系列等。

定点 DSP 芯片和浮点 DSP 芯片都有广泛的市场。定点 DSP 芯片虽然具有精度低等缺点，但是它价格低、运算速度快；浮点 DSP 芯片则主要用于那些高性能、对数据动态范围和精度要求较高的应用场合。

2. 按照 DSP 芯片的用途不同可分为通用和专用 DSP 芯片

通用 DSP 芯片适用于普通的数字信号处理运算。TI 公司的 TMS320 系列、AD 公司的 ADSP21xx 系列、Motorola 公司的 MC96000 系列等都是通用的 DSP 芯片。

专用 DSP 芯片是为某些特殊的数字信号处理运算而专门设计的，更适合特殊的运算，如数字滤波、卷积和 FFT 等。Motorola 公司的 DSP56200、Zoran 公司的 ZR34881、Inmos 公司的 IMSA100 等就属于专用型 DSP 芯片。

3. 其他分类方法

除了上述的定点/浮点、通用/专用 DSP 芯片划分办法之外，还有一些其他的划分办法。例如，各个厂家还根据 DSP 芯片的 CPU 结构和性能，把自己的产品划分为不同系列，如 TI 公司的 TMS320C2000/C5000/C6000/C3000/C4000 系列等。不同系列 DSP 芯片的 CPU 结构不同，性能和价格也会有很大的差异。同一系列 DSP 芯片一般具有多种不同的型号，其片内存储器、外设配置等各不相同，从而可满足不同的应用场合。

1.1.5 DSP 芯片的性能评价指标

各个 DSP 芯片制造商所生产的 DSP 芯片在结构上差别很大，数据传输能力也相差很大。在用户设计自己的系统时，所面对的一个重要问题就是 DSP 芯片的选型，而这种选择

必须建立在一定的性能评价上。

选择 DSP 芯片时,首先要考虑 DSP 芯片的运算速度是否可满足系统大运算量的要求。因此,衡量 DSP 芯片性能的评价指标主要集中在芯片的运算速度上,用于评价芯片运算速度的指标主要有:

- (1) MIPS, 百万条指令/秒。定点 DSP 芯片运算速度的衡量指标,应该注意的是,厂家提供的该指标一般是指峰值指标,因此,系统设计时应留有一定的裕量。
- (2) 指令周期,即执行一条指令所需的时间,通常以 ns (纳秒) 为单位,如 TMS320LC549-80 在主频为 80MHz 时的指令周期为 12.5ns。
- (3) MOPS, 百万次操作/秒。这里的操作除了包括 CPU 操作外,还包括地址的计算、DMA 访问、数据传输、I/O 操作等。MOPS 可以对 DSP 芯片的性能进行综合描述。
- (4) MFLOPS, 百万次浮点操作/秒。浮点操作包括浮点乘法、加法、减法、存储等操作。MFLOPS 是表征浮点 DSP 芯片性能的重要指标。应该注意的是,厂家提供的该指标一般是指峰值指标,因此,系统设计时应留有一定的裕量。
- (5) MAC 时间,执行一次乘法和加法运算所花费的时间;大多数 DSP 芯片可以在一个指令周期内完成一次 MAC 运算;
- (6) FFT/FIR 执行时间,运行一个 N 点 FFT 或 N 点 FIR 程序的运算时间。由于 FFT 运算/FIR 运算是数字信号处理中的一个典型算法,因此,该指标可作为衡量芯片性能的综合指标。

除了上述的速度评价指标外,DSP 芯片的数据传输能力对 DSP 芯片的综合性能、处理能力等都有明显影响,衡量芯片数据传输能力的评价指标主要是 Mb/s (百万位/秒)。通常指某个总线或 I/O 口的带宽,它是对总线或 I/O 口数据吞吐量的量度。

1.1.6 DSP 芯片的选择

设计 DSP 应用系统,选择 DSP 芯片是非常重要的一个环节。只有选定了 DSP 芯片,才能进一步设计其外围电路及系统的其他电路。总的来说,DSP 芯片的选择应根据应用系统的实际需要而确定。随着应用场合和设计目标的不同,选择 DSP 芯片的侧重点也各不相同。

一般来说,在选择芯片时应考虑以下因素:

- (1) 运算速度。当数字信号处理算法确定以后,其运算量和完成时间也就大体确定了,由此可以估算 DSP 芯片运算速度的下限。在选择 DSP 芯片时,各个芯片运算速度的衡量可参考 1.1.5 节中提出的各种性能指标。
- (2) 运算精度。一般情况下,浮点 DSP 芯片的运算精度要高于定点 DSP 芯片的运算精度,但是功耗和价格也随之上升。一般定点 DSP 芯片的字长为 16 位、24 位或 32 位,浮点芯片的字长为 32 位。累加器一般都为 32 位或 40 位。虽然适当的设计算法可以提高、保证运算精度,但是会相应增加程序的复杂度和运算量。所以,运算精度要求是一个折衷问题。

- (3) 片内硬件资源。通过对算法程序和应用目标的仔细分析可以大体判定对 DSP 芯片片内资源的要求。几个重要的考虑因素是片内 RAM 和 ROM 的数量、可否外扩存储器、总线接口/中断/串行口等是否够用、是否具有 A/D 转换等。用户可参考芯片制造商推荐的 DSP 芯片典型应用来考虑此项要求。
- (4) 功耗。一般来说, 个人数字产品、便携设备和户外设备等对功耗有特殊要求, 因此这也是一个该考虑的问题。
- (5) 开发调试工具。完善、方便的开发工具和相关支持软件是开发大型、复杂 DSP 系统的必备条件, 对缩短产品的开发周期有重要作用。
- (6) 价格。包括 DSP 芯片价格和开发工具的价格。如果采用价格昂贵的 DSP 芯片, 即使性能再高, 其应用范围也肯定会受到一定的限制。因此, 要根据实际系统的应用情况, 确定一个价格适中的 DSP 芯片。当然, 由于 DSP 芯片发展迅速, 芯片的价格往往下降较快, 在开发阶段选用某种价格稍贵的 DSP 芯片, 等到系统开发完毕, 其价格可能已经下降一半甚至更多。
- (7) 其他。包括 DSP 芯片的封装形式、供货周期、生命周期等。

在上述因素中, 一般而言, 定点 DSP 芯片的价格比较便宜, 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, 且 C 语言编程调试方便, 但价格稍贵, 功耗也较大。

1.1.7 DSP 芯片的应用领域

从美国德州仪器 (TI) 公司推出通用可编程 DSP 芯片以来, 随着 DSP 芯片性能的不断价格和价格的大幅度下降以及数字化产品、Internet 和计算机的迅速普及, DSP 芯片的应用几乎遍及了整个电子领域。

目前, DSP 芯片广泛应用于网络和互联网、高速调制解调器、无线通信、语音识别、音频、视频和影像产品、汽车、磁盘驱动器、机器人、运动控制、数控机床、工业控制和测量、机电一体化、雷达、声纳、地震检测、生物医学工程、航空航天、电力系统、故障检测、自动化仪器等, 可以说, 涉及 DSP 芯片的应用已遍及全球。

DSP 芯片常见的应用领域如表 1.1 所示。

表 1.1 DSP 芯片的典型应用领域

应用领域	说 明
汽车	自适应行驶控制、防滑自动控制、蜂窝电话、数字收音机、引擎控制、全球定位、导航、震动分析、语音命令等
消费类产品	数字收音机、数字电视机、教育类玩具、音乐合成器、动力玩具、雷达检测器、固态应答机、传呼机、手机、MP3 播放器、CD 机、门禁系统、计算机加速卡、扫描仪、多媒体处理等
控制	磁盘驱动控制、引擎控制、激光打印机控制、喷绘机控制、马达控制、机器人控制、高精度伺服控制、数控机床等