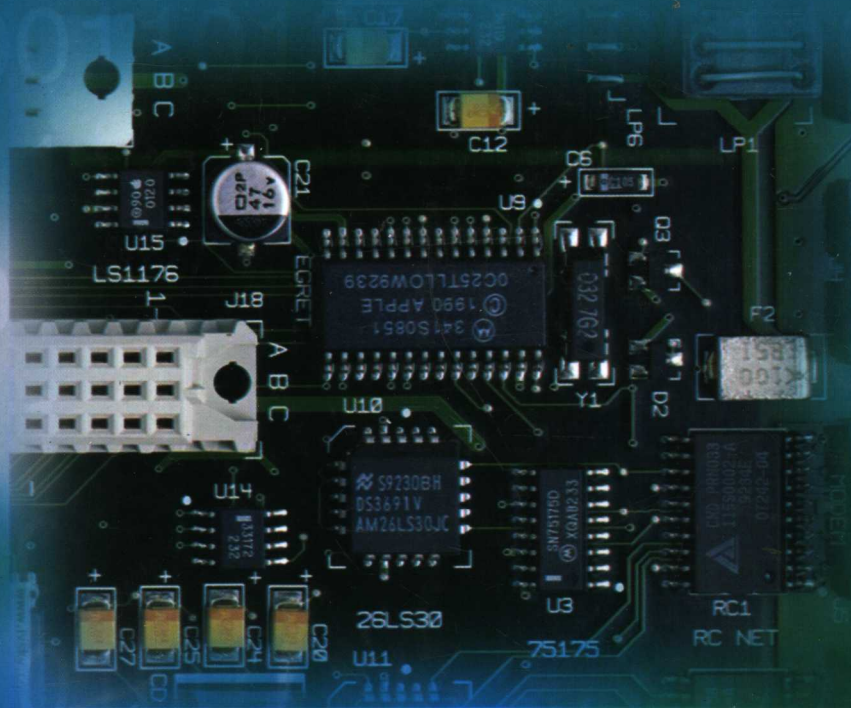


# DSP单片机原理及 嵌入式系统应用

向明尚 刘延军 张振宇 韩玉祥 顾洪博 编著



哈尔滨地图出版社

# DSP 单片机原理及嵌入式系统应用

## DSP DANPIANJI YUANLI JI QIANRUSHI XITONG YINGYONG

向明尚 刘延军 张振宇 韩玉祥 顾洪博 编著

哈尔滨地图出版社  
·哈尔滨·

图书在版编目(CIP)数据

DSP 单片机原理及嵌入式系统应用/向明尚等编著.

哈尔滨:哈尔滨地图出版社,2006.6

ISBN 7-80717-395-5

I .D... II .向... III .单片微型计算机-系统设计  
IV .TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 071661 号

哈尔滨地图出版社出版发行

(地址:哈尔滨市南岗区测绘路 2 号 邮编:150086)

哈尔滨庆大印刷厂印刷

开本:787 mm×1 092 mm 1/16 印张:17.125 字数:400 千字

2006 年 6 月第 1 版 2006 年 6 月第 1 次印刷

印数:1~500 定价:30.00 元

# 前 言

数字信号处理器 DSP (Digital Signal Processor) 是针对数字信号处理需要而设计的一种可编程的单片机,是现代电子技术、计算机技术和信号处理技术相结合的产物。当今 DSP 的应用几乎遍及整个电子领域,在自动化控制、信号处理、数据采集、图像处理、现代通信系统等领域尤其表现出不可替代的优势。数字信号处理技术是数字化的核心技术,数字信号处理器的采用大大加速了数字化的进程。可编程 DSP 单片机的开发与应用是当前电子信息领域的热点。

TI (德州仪器) 的 C6000 系列 DSP 平台提供了一个软件可兼容的定点与浮点 DSP 系列,该系列使高性能系统的开发者可以选择最适合他们特殊用途的器件。该平台包括了目前最好的 DSP 系列,使用户可以突破性能上的障碍,在成本效率方面达到新水平并实现低能耗。C62X 和新型的 C64X 系列定点 DSP 一代拥有可升级至 1.1GHz 的时钟,用它驱动的有线和无线宽带网络及数字化成像装置将打破现存的速度记录。C67X 浮点 DSP 一代可提供一系列高性能浮点处理器,使诸如专业和家用音响、工业自动化、语音识别、高端图形与成像等对成本敏感领域的创新成为可能。

CCS (Code Composer Studio) 代码调试器是 DSP 芯片集成开发环境,由 TI 公司 1999 年推出,集成了 C6000 代码产生工具、软件模拟器、实时数据交换软件、实时分析和数据可视化等软件。在 CCS 环境下,开发者可以对软件进行编辑、编译、调试、代码性能测试等工作。

随着嵌入式设备与 Internet 的广泛结合,手机、PDA、路由器和调制解调器等复杂的高端应用对嵌入式处理器的性能提出了更高的要求。自从 20 世纪 70 年代初出现嵌入式系统的概念以来,嵌入式系统以其高性能、低功耗等特点高速发展。当时的嵌入式系统很多都不采用操作系统,它们只是为了实现某个控制功能,使用简单的循环控制来对外界的控制请求进行处理。20 世纪 90 年代后,嵌入式系统设计从以嵌入式微处理器/DSP 为核心的“集成电路”级设计,逐渐转向“集成系统”级设计,并提出了片上系统 SoC (System on a Chip) 的基本概念。目前,嵌入式系统已进入以 SoC 为核心的设计阶段,并开始逐步实用化和规范化。SoC 为高性能嵌入式系统开发提供了功能丰富的硬件平台,也为实时嵌入式操作系统的广泛使用提供了硬件基础。嵌入式微处理器具有体积小、重量轻、成本低和可靠性高的优点,是嵌入式系统的核心。目前比较有影响的 32 位嵌入式处理器有 TI 公司的 TMS320C6000, Compaq 公司的 Alpha, HP 公司的 PARISC, IBM 公司的 Power PC, MIPS 公司的 MIPS 和 Sun 公司的 Sparc 等。而 TI 公司的 TMS320C6000 是目前在 DSP 应用领域具有高性能、低功耗和低成本等显著优点。

本书第一部分详细介绍了 TMS320C6000 系列 DSP 单片机的原理、体系结构、汇编语言、代码调试器 (CCS) 以及 DSP 应用程序的编写、优化和调试等内容;第二部分详细介绍了嵌入式系统的基本概念,嵌入式系统的软件设计、硬件设计等。全书共分七章,第一章:概述,介绍了数字信号处理以及数字信号处理单片机的基本概念;第二章:

TMS320C6000 系列单片机的体系结构,介绍了 C6000 的 CPU 结构、流水线及中断的相关内容;第三章: TMS320C6000 的汇编指令集,介绍了 C62XX, C67XX 和 C64XX 的汇编指令;第四章: 线性汇编语言及 CCS,介绍了线性汇编程序的结构、CCS 功能及软件的开发流程;第五章: TMS320C6000 的软件编程及代码优化,介绍了 CCS 的编译器和优化器以及代码优化的方法;第六章: 嵌入式系统开发基础,介绍了嵌入式系统的基本概念、嵌入式系统的组成结构、嵌入式系统硬件设计、嵌入式系统的发展趋势等;第七章: 嵌入式系统软件、嵌入式系统开发流程、嵌入式操作系统、嵌入式应用软件的开发等。

本书的第一章、第二章及附录由大庆石油学院向明尚编写;第三章由刘延军编写;第四章、第五章由大庆市人民警察学校张振宇编写;第六章、第七章由大庆石油学院韩玉祥和顾洪博共同编写。

由于时间仓促和编者学识有限,书中难免有疏忽和错误之处,敬请广大读者批评指正。

编者

2006年6月

# 目 录

第 1 章 概 述.....	1
1.1 数字信号处理基础.....	1
1.2 实时数字信号处理系统.....	6
1.3 DSPs 芯片.....	9
第 2 章 TIC6000 体系结构.....	15
2.1 TMS320C6000 系列概述.....	15
2.2 C6000 系列 CPU 的结构.....	17
2.3 流水线.....	26
2.4 中断.....	36
第 3 章 TMS320C6000 的汇编指令集.....	45
3.1 TMS320C6000 公共指令集概述.....	45
3.2 寻址方式及 Load/Store 类指令.....	52
3.3 C6000 公共指令集.....	57
3.4 TMS320C67x 浮点运算指令.....	69
3.5 TMS320C64x 扩展的定点运算指令.....	79
第 4 章 线性汇编语言及开发环境.....	94
4.1 线性汇编语言简介.....	94
4.2 软件开发流程和开发工具.....	97
4.3 集成开发环境 Code Composer Studio.....	109
第 5 章 TMS320C6000 的软件编程及代码优化.....	137
5.1 概述.....	137
5.2 TMS320C6000 的 C 语言编程及优化.....	139
5.3 通过线性汇编优化汇编代码.....	144
第 6 章 嵌入式系统开发基础.....	174
6.1 嵌入式系统的基本概念.....	174
6.2 嵌入式系统的组成结构.....	179
6.3 嵌入式系统的硬件组成.....	184
第 7 章 嵌入式系统软件.....	190
7.1 嵌入式系统的开发流程.....	190
7.2 嵌入式应用软件开发.....	194
7.3 嵌入式操作系统.....	203
参考文献.....	267

# 第 1 章 概 述

## 1.1 数字信号处理基础

数字信号处理 (DSP, digital signal processing) 是从 20 世纪 60 年代以来, 随着信息学科和计算机学科的高速发展而迅速发展起来的一门新兴学科。它的重要性日益在各个领域的应用中表现出来。

简而言之, 数字信号处理是把信号用数字或符号表示成序列, 通过计算机或通用 (专用) 信号处理设备, 用数字的数值计算方法处理 (例如滤波、变换、压缩、增强、估计、识别等), 以达到提取有用信息的目的。

### 1.1.1 信号、系统和信号处理

#### 1. 信号

信号是信息的物理表现形式, 或者说是传递信息的函数, 而信息则是信号的具体内容。例如, 交通红绿灯是信号, 它传递的信息是: 红——停止, 绿——通行。根据载体的不同, 信号可以是电的、磁的、声的、光的、机械的、热的等各种信号。

同一种信号, 例如电信号, 又可以从不同角度进行分类。

#### (1) 一维信号、二维信号、矢量信号

信号的变量可以是时间, 也可以是频率、空间或其他的物理量。若信号是一个变量 (例如时间) 的函数, 则称为一维信号; 若信号是两个变量 (例如空间坐标  $x, y$ ) 的函数, 则称为二维信号; 推而广之, 若信号是多个 (例如  $M$  个,  $M \geq 2$ ) 变量的函数, 则称为多维 ( $M$  维) 信号。若将信号表示成  $M$  维的矢量, 如:

$$x = [x_1(n), x_2(n), \dots, x_M(n)]^T$$

(式中  $T$  为转置,  $n$  为时间变量), 则称  $x$  是一个  $M$  维的矢量信号。

本书只讨论一维信号。

#### (2) 周期信号和非周期信号

若信号满足  $x(t) = x(t + kT)$ ,  $k$  为整数; 或  $x(n) = x(n + kN)$ ,  $N$  为正整数,  $k, n + kN$  为任意整数, 则  $x(t)$  和  $x(n)$  都是周期信号, 周期分别为  $T$  和  $N$ ; 否则就是非周期信号。

#### (3) 确定信号和随机信号

若信号在任意时刻的取值能精确确定, 则称它为确定信号; 若信号在任意时刻的取值不能精确确定, 或者说取值是随机的, 则称为随机信号。

#### (4) 能量信号和功率信号

若信号能量  $E$  有限, 则称为能量信号; 若信号功率  $P$  有限, 则称为功率信号。

信号能量  $E$  可表示为

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt$$

信号功率  $P$  可表示为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)|^2 dt$$

周期信号及随机信号一定是功率信号, 而非周期的绝对可积(和)信号一定是能量信号。

#### (5) 连续时间信号、离散时间信号和数字信号

变量的取值方式有离散和连续两种。若变量(一般都看成时间)是连续的, 则称为连续时间信号; 若变量是离散数值, 则称为离散时间信号。信号的幅值取值方式又分为连续与离散两种方式(幅值的离散称之为量化), 因此, 组合起来应该有以下四种情况:

①连续时间信号: 时间是连续的, 幅值可以是连续的, 也可以是离散(量化)的。

②模拟信号: 时间是连续的, 幅值是连续的, 这是上一种信号的特例。

③离散时间信号(或称序列): 时间是离散的, 幅值是连续的。

④数字信号: 时间是离散的, 幅值是量化的。由于幅值是量化的, 故数字信号可用一序列的数来表示, 而每个数又可表示为二进制码形式。

## 2. 系统

系统定义为处理(或变换)信号的物理设备。或者进一步说, 凡是能将信号加以变换以达到人们要求的各种设备都成为系统。因为系统是完成某种运算(操作)的, 因而我们还可把软件编程也看成是一种系统的实现方法。

按所处理的信号种类的不同可将系统分为四类:

(1)模拟系统: 处理模拟信号, 系统输入、输出均为连续时间、连续幅度的模拟信号。

(2)连续时间系统: 处理连续时间信号, 系统输入、输出均为连续时间信号。

(3)离散时间系统: 处理离散时间信号——序列, 系统输入、输出均为离散时间信号。

(4)数字系统: 处理数字信号, 系统输入、输出均为数字信号。

系统可以分为线性的或非线性的、时(移)不变的或时(移)变的等。

## 3. 信号处理

信号处理是研究用系统对含有信息的信号进行处理(变换), 以获得人们所希望的信号, 从而达到提取信息、便于利用的一门学科。信号处理的内容包括滤波、变换、检测、谱分析、估计、压缩、识别等一系列的加工处理。

因为多数科学和工程中遇到的是模拟信号, 所以以前都是研究模拟信号处理的理论和实践。但是模拟信号处理难以做到高精度, 受环境影响较大, 可靠性差, 且有不灵活等缺点或不足。随着大规模集成电路以及数字计算机的飞速发展, 加之从 20 世纪 60 年代末以来数字信号处理理论和技术的成熟与完善, 用数字方法来处理信号, 即数字信号



处理,已逐渐取代模拟信号处理。

随着信息时代、数字世界的到来,数字信号处理已成为一门极其重要的学科和技术领域。

### 1.1.2 数字信号处理的学科概貌

自从1965年库利和图基在《计算数学》上发表了“用机器计算复序列傅立叶级数的一种算法”,即“快速傅立叶变换算法”以来,数字信号处理这一学科蓬勃发展,逐渐形成了一整套较为完整的学科领域和理论体系。

数字信号处理学科包含有:

- (1) 离散时间线性时不变系统分析。
- (2) 离散时间信号时域和频域分析、离散傅立叶变换(DFT)理论。
- (3) 信号的采集,包括A/D, D/A技术,抽样,量化噪声理论等。
- (4) 数字滤波技术。
- (5) 谱分析与快速傅立叶变换(FFT),快速卷积与相关算法。
- (6) 自适应信号处理。
- (7) 估计理论,包括功率谱估计及相关函数估计等。
- (8) 信号的压缩,包括语音信号与图像信号的压缩。
- (9) 信号的建模,包括AR, MA, ARMA, CAPON, PRONY等各种模型。
- (10) 其他特殊算法(同态处理、抽取与内插、信号重建等)。
- (11) 数字信号处理的实现。
- (12) 数字信号处理的应用。

以上(1)、(2)、(3)三点是理论和技术分析的基础,是最基本的部分。

### 1.1.3 数字信号处理的特点

数字信号处理系统具有以下一些明显的优点:

#### (1) 精度高

模拟网络的精度由元器件决定,模拟元器件的精度很难达到 $10^{-3}$ 以上,而数字系统只要14位字长就可达到 $10^{-1}$ 的精度。在高精度的系统中,有时只能采用数字系统。由于数字信号可无损地存储在磁盘和光盘上,因而可随时传送,可在远端脱机处理。另外,时间可倒置、压缩或扩张处理。还可以进行同态处理(模拟系统则不能)。

#### (2) 灵活性强

数字系统的性能主要由乘法器的系数决定,而系统是存放在系数存储器中的,因而只需改变存储器中的系数就可得到不同的系统,比改变模拟系统方便得多。另外,由于工艺水平的提高,集成度越来越高,而且可运用的频率也越来越高。

### (3) 可靠性强

因为数字系统只有两个信号电平“0”和“1”，因而受周围环境的温度及噪声的影响较小。而模拟系统的各元器件都有一定的温度系数，且电平是连续变化的，易受温度、噪声、电磁感应等的影响。数字系统如采用大规模集成电路，其可靠性就更高。

### (4) 容易大规模集成

由于数字部件具有高度规范性，便于大规模集成、大规模生产，而对电路参数要求不严，故产品成品率高。尤其是对于低频信号，例如地震波分析需要过滤几赫兹到几十赫兹信号，用模拟网络处理，电感器、电容器的数值、体积和重量都非常大，性能也不能达到要求，而数字信号处理系统在这个频率却非常优越。

### (5) 时分复用

时分复用就是利用数字信号处理器同时处理几个通道的信号。由于某一路信号的相邻两抽样值之间存在着很大的空隙时间，因而可在同步器的控制下，在空隙时间中送入其他路的信号，而各路信号则利用同一个信号处理器，后者在同步器的控制下，算完一路信号后再算另一路信号。处理器的运算速度越高，能处理的信道数目也就越多。

### (6) 可获得高性能指标

例如对信号进行频谱分析，模拟频谱仪在频率端只能分析到 10Hz 以上的频率，且难以做到高分辨率（足够窄的带宽）；但在数字谱分析中，以能做到  $10^{-3}$ Hz 的谱分析。又如，有限长冲激响应数字滤波器可实现准确的线性相位特性，这在模拟系统中是很难达到的。

### (7) 二维与多维处理

利用庞大的存储单元可以存储一帧或数帧图像信号，实现二维甚至多维信号的处理，包括二维或多维滤波、二维或多维谱分析等。

## 1.1.4 数字信号处理的应用

由于数字信号处理的突出优点，使得它在通信、语音、雷达、地震测报、声纳、遥感、生物医学、电视、仪器中得到愈来愈广泛的应用。

### (1) 滤波与变换

包括数字滤波/卷积、相关、快速傅立叶变换 (FFT)、希尔伯特 (Hilbert) 变换、自适应滤波、加窗法等。

### (2) 通信

包括自适应差分脉码调制、自适应脉码调制、脉码调制、差分脉码调制、增量调制、自适应均衡、纠错、数字公用交换、信道复用、移动电话、调制解调器、数据或数字信号的加密、破译密码、扩频技术、通信制式的转换、卫星通信、TDMA/FDMA/CDMA 等各种通信制式、回波对消、IP 电话、软件无线电等。

### (3) 语音、语言

包括语言邮件、语音声码器、语音压缩、数字录音系统、语音识别、语音合成、语音增强、文本语音变换、神经网络等。

#### (4) 图像、图形

包括图像压缩、图像增强、图像复原、图像重建、图像变换、图像分割与描绘、模式识别、计算机视觉、固态处理、电子地图、电子出版、动画等。

#### (5) 消费电子

包括数字音频、数字电视、音乐综合器、电子玩具和游戏、CD/VCD/DVD 播放机、数字留言/应答机、汽车电子装置等。

#### (6) 仪器

包括频谱分析仪、函数发生器、地震信号处理器、瞬态分析仪、锁相环、模式匹配等。

#### (7) 工业控制与自动化

包括机器人控制、激光打印机控制、伺服控制、自动机、电力线监视器、计算机辅助制造、引擎控制、自适应驾驶控制等。

#### (8) 医疗

包括健康助理、病人监视、超声仪器、诊断工具、CT 扫描、核磁共振、助听器等。

#### (9) 军事

包括雷达处理、声呐处理、导航、射频调制解调器、全球定位系统 (GPS)、侦察卫星、航空航天测试、自适应波束形成、阵列天线信号处理等。

另外, 数字信号处理将在数字汇聚 (digital convergence)、远程会议系统 (teleconference systems)、融合网络 (fusion net)、数字图书馆 (cyberary)、图书与文本合一的信息检索业务、多媒体通信及个人信息终端等领域有广阔的发展前景。

### 1.1.5 数字信号处理发展趋势

未来的 10 年, 全球 DSP 产品将向着高性能、低功耗、加强融合和扩展多种应用的发展趋势发展, DSP 芯片将越来越多地渗透到各种电子产品中, 成为各种电子产品, 尤其是通信类电子产品的技术核心。

互联网是继计算机时代后新的全球经济增长点, 也是 DSP 潜在的应用领域。而手机、PDA、MP3 播放机及手提电脑等则是设备个性化的典型代表。这些设备的发展水平取决于 DSP 的发展。在新的形势下, DSP 面临的要求是处理其器速度更高、性能更多更加全面、功耗更低、存储器用量更少。所以 DSP 技术会有以下一些发展趋势。

#### (1) DSP 的内核结构将进一步改善

多通道结构和单指令多重数据 (SIMD)、甚长指令字 (VLIW) 等技术将在新的高性能处理器中占主导地位, 如 TI 公司的 TMS320C6xxx、AD 公司的 ADSP-2116x 等。

#### (2) DSP 和微处理器的融合

低成本的微处理器 (MPU) 是一种执行智能定向控制任务的通用处理器, 它能很好地执行智能控制任务, 但对数字信号的处理能力很差。而 DSP 的功能正好相反。在许多应用中均需要同时具有智能控制和数字信号处理两种功能, 因此, 将 DSP 和微处理器结合

起来，用单一芯片的处理器实现这两种功能，将具有很好的发展趋势。

### (3) DSP 和 SOC 的融合

SOC (System On Chip) 是指把一个系统集成在一块芯片上。这个系统包括 DSP 和系统接口软件等。

### (4) 实时操作系统 RTOS 与 DSP 的结合

随着 DSP 处理能力的增强，芯片结构越来越复杂，甚至有些芯片在其片内集成了多个芯核，使得软件的规模越来越大，往往需要运行多个任务，各任务间的通信、同步等问题就变得非常突出，因此，对 DSP 应用提供 RTOS 的支持已成为必然的结果。

### (5) DSP 的并行处理结构

为了提高 DSP 芯片的运算速度，各厂商纷纷在 DSP 芯片中引入并行机制，主要分为片内并行和片间并行。

## 1.2 实时数字信号处理系统

### 1.2.1 实时数字信号处理的概念

信号处理的实质是对信号进行变换，目的是获取信号中包含的有用信息，并用更直观的方式进行表达。数字信号处理就是用数字的方法对信号进行变换来获取有用信息，如离散傅立叶变换 (DFT) 就是最常用的 DSP 算法。这里介绍的实时信号处理就是实时数字信号处理。

实时指的是系统必须在有限的时间内对外部输入信号完成指定的处理，即信号处理的速度必须大于等于输入信号更新的速度 (常见信号的典型数据率如图 1-1 所示)，而且从信号输入到处理后输出的延迟必须足够小，如一个制导系统的输出延迟就要求在几毫秒。

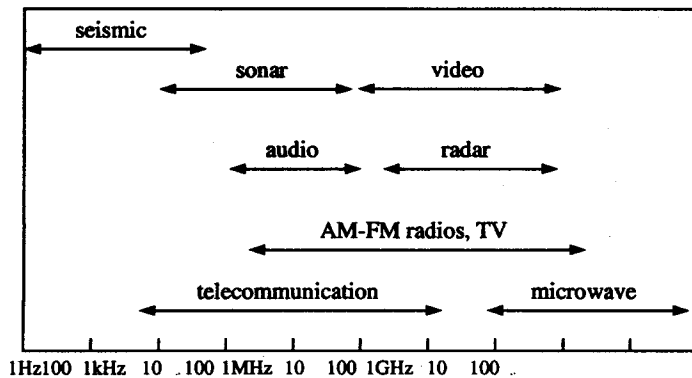


图 1-1 常见信号的典型数据率

从图 1-1 可以看到,不同类型的信号所要求的实时信号处理速度相差很大。如对一个音频信号,假设用 40kHz 时钟采样,样本数据字长 16 bit,则该信号的输入数据率就是 80 KB/s,它对实时处理速度的要求是大于等于 80 KB/s。对于一个每帧数据字长  $512 \times 512 \times 16\text{bit}$ 、传输速率为 30 帧/秒的图像信号,其输入数据率是 15MB/s,因而它对实时处理速度的要求是大于等于 15MB/s。由此可知,对实时信号处理速度的要求与原始模拟信号带宽以及数据格式(字长、维数)等因素是密切相关的。

目前单片 DSPs 的处理能力已达到每秒 48 亿条指令(4800MIPS)和每秒 10 亿次浮点操作(1GFLPOS)的水平,使实时信号处理的应用空间越来越广阔。

### 1.2.2 实时 DSP 系统的构成

实时信号处理系统所要求处理的信号多为自然信号,因此,首先需要通过传感器将自然信号转换为电信号。另外,要对自然界的信号进行数字处理,就必须通过 A/D 子系统将其转换为数字形式。DSP 子系统对数字信号处理完后,有时还需要通过 D/A 子系统把处理后的数字信号重新转换为模拟信号。图 1-2 是一个完整的实时 DSP 系统框图,其中,DSP 子系统是整个系统的核心。下面主要介绍 DSP 子系统的实现和构成。

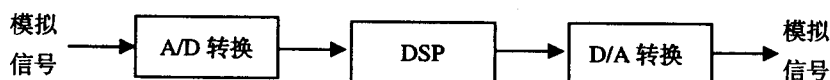


图 1-2 实时 DSP 系统

### 1.2.3 DSP 子系统

在当前技术条件下,DSP 子系统一般有 6 种实现方法:

- (1) 在通用计算机上用软件实现。
- (2) 在通用计算机系统中加入专用的加速处理模块。
- (3) 利用通用单片机(用于数字控制等不太复杂的数字信号处理,如 Intel 的 MCS51 系列)。
- (4) 利用通用可编程 DSPs 芯片。
- (5) 利用专用 DSPs 芯片。
- (6) 利用基于通用 DSPs 内核的 ASIC(Application Specific Integrated Circuits, 专用集成电路)。

在用量较大的通信、硬盘控制等领域,一些 DSPs 厂商提供了一种基于通用 DSPs 内核的 ASIC 设计和生产服务,即用户可以在通用 DSPs 的 CPU 基础上选用所需要的外设接口和存储器等资源,并在片内固化所需软件。

上述方法中，第一种方法的缺点是速度相对较慢，不适合于实时 DSP，一般只用于 DSP 算法模拟；第二种方法不适合于嵌入式应用，而且和第五种方法一样具有专用性较强的特点，应用受到很大限制；第三种方法不适合于以乘加运算为主的运算密集型 DSP 算法；第四种方法通用可编程 DSPs 芯片，由于其可编程性和强大的处理能力，在实时 DSP 领域居于主导地位。另外，在批量应用中，基于通用 DSPs 核的 ASIC 由于其较好的系统性价比在近几年得到了广泛应用。

#### 1.2.4 以通用 DSPs 为核心的实时 DSP 子系统

基于 DSPs 的 DSP 子系统一般由控制器(其控制功能可由通用微处理器或 DSPs 实现)、DSPs、数据传输网、存储器和输入/输出接口构成。其结构如图 1-3 所示。

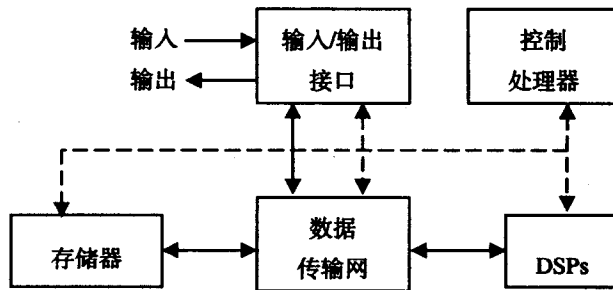


图 1-3 基于 DSPs 的 DSP 子系统结构

##### (1) 控制处理器

完成系统控制功能，包括主机命令解释、数据传输控制和数据输入/输出等控制功能。控制处理器可以使 DSPs 专注于高速实时 DSP 算法的实现。根据具体的系统不同，控制处理器可以用通用微处理器或 DSPs 独立实现，也可以放在图 1-3 中的 DSPs 内实现。

##### (2) DSPs

完成实时信号处理算法。

##### (3) 数据传输网

实现各个模块之间的互连，以传输数据。对于模块之间有大量数据传输的高速 DSP 系统设计，数据传输网的设计是一个关键的环节，它很可能成为系统的瓶颈。

##### (4) 存储器

支持数据存储。它的主要参数指标有存储器容量、存储器字长、访问速度、对特殊寻址方式的支持和存储器管理控制能力。

##### (5) 输入/输出接口

用于输入待处理的数据或输出处理结果。输入/输出接口的主要参数有接口带宽、缓冲存储能力、数据字长、接口所支持的输入输出个数。

上述 DSP 子系统，对具体应用来说其复杂程度会有很大的差异。其硬件平台可能是以单个 DSPs 为核心的一个板卡，也可能是围绕多个 DSPs 组成的一个分布式 DSP 系统。

同时由于所选用的 DSPs 速度不同, 以及软件 DSP 算法等方面的差异, 其设计和实现难度也千差万别。

## 1.3 DSPs 芯片

### 1.3.1 DSPs 芯片概述

#### 1. DSPs 芯片的出现和发展

在 DSPs 出现之前, 实时信号处理一般是在通用处理器 (8086 和 80286 等) 中完成的。随着集成电路制造工艺的不断提高, 20 世纪 70 年代末出现了专门的可编程数字信号处理器, 简称 DSPs。第一代 DSPs 以 AMD2900、NEC7720 和 TMS32010 为代表, 其中 TI 公司的 TMS32010 第一次使用了哈佛总线性结构和硬件乘法器。

由于开发工具的问题, 最初的 DSPs 开发非常困难, 要设计并实现一个基于 DSPs 的系统是一个专业性很强的工作。美国的 TI 公司给 DSPs 引入了许多通用计算机微处理器的特点, 并为其产品开发了汇编语言和 C 语言代码产生工具以及各种软硬件调试工具, 使得 DSPs 的开发难度大大降低, 并且在 20 世纪 80 年代末和 90 年代初进入了快速发展的时期。现在 TI 公司的 DSPs 包括了定点、浮点和多处理器 3 个类型的产品, 每个类型又有不同性能和价格的具体系列可以供用户选择。

#### 2. DSPs 芯片的分类

为了适应数字信号处理各种各样的实际应用, DSP 厂商生产出多种类型和档次的 DSP 芯片, 在众多的 DSP 芯片中, 可以按照下列 3 种方式进行分类。

##### (1) 按数据格式分类

按照所支持的数据类型不同, DSPs 分为定点产品和浮点产品 2 大类。

定点 DSPs 进行算术操作时, 使用的是小数点位置固定的有符号数或无符号数。浮点 DSPs 进行算术操作时, 使用的是带有指数的小数, 小数点的位置随着具体数据的不同进行浮动。

定点器件在硬件结构上比浮点器件简单, 具有价格低和速度快的特点, 因而应用得最多; 而浮点器件的优点是精度高, 不需要进行定标和考虑有限字长效应, 但是其成本和功耗相对较高, 速度较慢, 适合于对数据动态范围和精度要求高的特殊应用。

##### (2) 按基本特性分类

按照 DSP 芯片的工作时钟和指令类型的不同, 可分为静态 DSP 芯片和一致性 DSP 芯片。如果 DSP 芯片在某时钟频率范围内的任何频率上都能正常工作, 除计算速度有变化外, 没有性能的下降, 这类芯片一般称为静态 DSP 芯片。如果有两种或两种以上的 DSP 芯片, 它们的指令集或相应的机器代码及引脚结构相互兼容, 这类 DSP 芯片称为一致性 DSP 芯片。

##### (3) 按用途分类

按照 DSP 芯片的用途, 可以将 DSP 芯片分为通用型芯片和专用型芯片两大类。通用型 DSP 芯片一般是指可以用指令编成的 DSP, 适合于普通的 DSP 应用, 具有可编成性和强大的处理能力, 可以完成复杂的数字信号处理的算法。专用型 DSP 芯片是为特定 DSP 运算而设计的, 通常只针对某一种应用, 相应的算法由内部硬件电路实现, 主要用于要求信号处理速度极快的特殊场合。

另外, 各个 DSPs 厂家还根据 DSPs 的 CPU 结构和性能, 把自己的产品划分了不同系列。如 TI 公司的定点系列 DSPs 有 C20x、C24x、C5x、C54x 和 C62xx; 浮点系列 DSPs 有 C3x、C4x 和 C67xx。不同系列 DSPs 的 CPU 结构有所不同, 性能和价格也有很大差异。

同一系列 DSPs 产品中, 各个不同型号的 DSPs 在 CPU 结构上基本相同, 不同之处只在于 DSPs 片内存储器和外设接口的配置不同。如 TI 公司的 C5x 系列中的 C50 和 C52, 它们的 CPU 结构完全相同, 不同之处在于 C50 的片内 ROM 为 2K 字, 片内 RAM 为 10K 字, 具体标准串口和 TDM 串口各 1 个; 而 C52 的片内 ROM 为 4K 字, 片内 RAM 为 1K 字, 只有 1 个标准串口。由于同一系列不同型号产品具有丰富多样的外设接口和存储器配置, 因此可以在不同的应用场合最大程度地减少 DSPs 的外围器件, 缩小电路板面积, 从而提高系统性价比。

### 3. DSPs 的代码兼容问题

代码兼容, 是指某种 DSPs 产品开发的代码可以在不加修改或只作很小修改的情况下在其他 DSPs 上执行, 称为完全兼容或部分兼容。不同厂商在生产自己的 DSPs 产品时, 所采用的代码兼容策略是不一样的。有的 DSPs 厂商还尽量保持不同系列 DSPs 产品之间的兼容性, 如 TI 公司的定点系列 DSPs 的 C1x、C2x 和 C5x 之间是向下兼容的, C1x 和 C2x 的代码可以不加修改地在 C5x 上运行。另外, TI 的 C6000 的定点系列 C62xx 的代码可以不加修改地在浮点系列 C67xx 上运行。

除了代码兼容之外, 还有管脚兼容。如 TI 的 C62xx 与 C67xx 的某些芯片之间就保持了管脚兼容, 使系统设计更加灵活。

## 1.3.2 DSPs 芯片的特点

下面介绍 DSPs 与数字信号处理功能相适应的特点。

### 1. 功能特点

数字信号处理任务通常需要完成大量的实时计算, 如在 DSP 中常用的 FIR 滤波和 FFT 算法。数字信号处理中的数据操作具有高度重复的特点, 特别是乘加操作  $Y=A*B+C$  在滤波、卷积和 FFT 等常见 DSP 算法中用得最多。DSPs 在很大程度上就是针对上述运算特点设计的。与通用微处理器相比, DSPs 在寻址和计算能力等方面作了扩充和增强。在相同的时钟频率和芯片集成度下, DSPs 完成 FFT 算法的速度比通用微处理器快 2~3 个数量级 (如对于 1024 点的 FFT 算法, 时钟相同, 集成度相仿的 IBM PC/AT-386 和 TMS320C30, 运算时间分别为 0.3s 和 1.5ms。速度相差 200 倍)。



## 2. 结构特点

DSPs 的结构特点在很大程度上体现了 DSP 算法的需求。下面介绍 DSPs 在结构上的一些特点。

### (1) 算术单元

#### ① 硬件乘法器

由于 DSPs 的功能特点,乘法操作是 DSPs 的一个主要任务。而在通用微处理器内通过微程序实现的乘法操作,以提高乘法速度。硬件乘法器是 DSPs 区别于通用微处理器的一个重要标志。

#### ② 多功能单元

为了进一步提高速度,可以在 CPU 内设置多个并行操作的功能单元(ALU、乘法器和地址产生器等)。如 C6000 的 CPU 的内部有 8 个功能单元,包括 2 个乘法器和 6 个 ALU。这 8 个功能单元最多可以在 1 个周期内同时执行 8 条指令。由于多功能单元的并行操作使 DSPs 在相同时间内能够完成更多的操作,因而提高了程序的执行速度。

针对乘加运算,多数 DSPs 的乘法器和 ALU 都支持在 1 个周期内完成 1 次乘法和 1 次加法操作。另外,很多定点 DSPs 还支持在不增加操作时间的前提下多操作数或操作结果的任意位移位。

另外, DSP 的算法特点还可以使现代 DSPs 采用指令比较整齐划一的精简指令集(RISC),有利于 DSP 结构的简化和成本的降低。

### (2) 总线结构

通用微处理器是为计算机设计的。基于成本上的考虑,传统的微处理通常采用冯·诺曼总线结构:统一的程序和数据空间,共享的程序和数据总线。由于总线的限制,微处理器执行指令时,取指令和存取操作数共享内部总线,因而程序指令只能串行执行。

对于面向数据密集型算法的 DSPs 而言,冯·诺曼总线结构使系统性能受到很大限制,因此 DSPs 采用了程序总线 and 数据总线分离的哈佛总线结构,这样 DSPs 就能够同时取指令和取操作数了。而且很多 DSPs 甚至有 2 套或 2 套以上的内部数据总线,这种总线结构称为修正哈佛结构。对于乘法或加法等运算,1 条指令要从存储器中取 2 个操作数,如果采用多套数据总线就可以同时取得 2 个操作数,因此提高了效率。

C6000 系列 DSPs 则采用了新的 VILW(甚长指令)结构,片内提供了 8 个独立的运算单元、256 位的程序总线、2 套 32 位数据总线和 1 套 32 位的 DMA 专用总线。灵活的总线结构大大缓解了数据瓶颈对系统性能的限制。

### (3) 专用寻址单元

DSPs 面向的是数据密集型应用,随着频繁的数据访问,数据地址计算时间也线性增长。如果不在地址计算上作特殊的考虑,有时计算地址比实际的算术操作时间还长。例如,8086 做一次加法需要 3 个时钟周期,但是计算一次地址却需要 5~12 个时钟周期。因此,DSPs 通常都有支持地址计算的算术单元——地址产生器。地址产生器与 ALU 并行工作,因此地址计算不再额外占用 CPU 时间。由于有些算法通常需要一次从存储器中取 2 个操作数,所示 DSPs 内的地址产生器一般也有 2 个。