

嵌入式系统设计与开发系列

# DSP嵌入式系统 设计与开发指南

杨东凯 梁帆 凌桂龙 编著



中国电力出版社  
www.cepp.com.cn

嵌入式系统设计与开发系列

# DSP嵌入式系统

## 设计与开发指南

杨东凯 梁帆 凌桂龙 编著



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书分为 DSP 基础、DSP 应用基础和 DSP 系统开发实例三部分。第一部分首先介绍了 DSP 的分类、特点、发展及应用,集中介绍了 TMS320C281X 的硬件体系结构和软件指令系统。第二部分 DSP 应用基础从 TMS320C281X 开发环境、硬件最小系统及接口设计、软件接口驱动设计、基本算法设计等各方面给出实例,为系统设计打下坚实的基础。第三部分列举了四个系统级设计实例,涵盖工业控制、精密测量、智能仪器等多个领域。

本书可供高等学校电子、通信、计算机、自动控制和电力电子技术等专业的高年级本科生及研究生作为教科书或参考书,也可作为各领域中从事信号处理、控制和电力电子技术的科研及工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

DSP嵌入式系统设计与开发指南 / 杨东凯, 梁帆, 凌桂龙编著. —北京: 中国电力出版社, 2008  
(嵌入式系统设计与开发系列)  
ISBN 978-7-5083-7952-4

I. D… II. ①杨…②梁…③凌… III. 数字信号—信息处理系统—系统设计—指南 IV. TN911.72-65  
中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第150283号

责任编辑: 刘 焱  
责任校对: 崔燕菊  
责任印制: 郭华清

书 名: DSP 嵌入式系统设计与开发指南

编 著: 杨东凯 梁 帆 凌桂龙

出版发行: 中国电力出版社

地址: 北京市三里河路6号 邮政编码: 100044

电话: (010) 68362602 传真: (010) 68316497

印 刷: 北京市同江印刷厂印刷

开本尺寸: 185mm×260mm 印 张: 21.5 字 数: 539千字

书 号: ISBN 978-7-5083-7952-4

版 次: 2009年1月北京第1版

印 次: 2009年1月第1次印刷

印 数: 0001—3000册

定 价: 38.00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

# 前 言

数字信号处理器 (Digital Signal Processing, DSP) 是对信号和图像实现实时处理的一类高性能的 CPU。所谓“实时 (Real-Time) 实现”, 是指一个实际的系统能在人们的听觉、视觉或按任务要求所允许的时间范围内实现对输入信号的处理并将其输出。目前, DSP 已广泛应用于通信、家电、航空航天、工业测量、控制、生物医学工程及军事等许多需要实时实现的领域。

美国德州仪器 (Texas Instruments, TI) 公司是全球 DSP 研发和生产的领先者。自 1982 年推出第一块 DSP 芯片以来, 到 20 世纪 90 年代中期, TI 先后推出了 C10、C20、C30、C40、C50 及 C80 等 6 代 TMS320 系列的 DSP 产品。紧接着又推出了 C2000 系列、C5000 系列和 C6000 系列三大主流产品, 并推出了将 DSP 和 ARM 合为一体的 OMAP 系列。这些产品无论是在国外还是在国内都得到了广泛的应用。

TMS320LF281X 芯片作为 DSP 控制器 28X 系列的新成员, 是 TMS320C2000 平台下的一种定点 DSP 芯片。281X 芯片为 C2XX CPU 功能强大的 TMS320 系列 DSP 结构设计提供了低成本、低功耗、高性能的处理能力, 对电机的数字化控制非常有用。几种先进外设被集成到该芯片内, 以形成真正的单芯片控制器。在与现存 281X DSP 控制器芯片代码兼容的同时, 281X 芯片具有处理性能更好、外设集成度更高、程序存储器更大、A/D 转换速度更快等特点, 是电机数字化控制的升级产品。

281X 芯片包含了多种芯片, 可以提供不同容量存储器和不同外设, 以满足各种应用的要求和性能价格比。FLASH 芯片具有高达 32K 字的存储器, 为多种用途的产品提供了经济的可编程解决方案。基于 FLASH 的芯片中有 256K 字的引导 ROM 使在线编程更加方便。281X 系列芯片还包含 ROM 存储器芯片, 并与其他 FLASH 芯片引脚完全兼容。

所有 281X 芯片都至少有一个事件管理器模块, 用于电机数字化控制应用。该模块的性能包括中间和 (或) 边缘对齐的 PWM 发生器及可编程的死区控制性能, 以防止桥式驱动主电路上下桥臂短路。事件管理器模块可实现同步 A/D 转换功能, 如果带有双事件管理器就能用一个 281X DSP 控制芯片对多个电机和 (或) 逆变器进行控制。

高性能 10 位模-数转换器 (ADC) 的转换时间为 500ns, 提供多达 16 路的模拟输入, 具有自动排序功能, 使最大为 16 路的转换在同一转换期间进行而不会增加 CPU 的开销。

凡是从事过含有 CPU 的系统设计 (单片机或 DSP) 的设计人员都知道, 为了顺利地实现设计任务, 一本包括该 CPU 的结构、指令和汇编语言及开发的好的手册是必不可少的。

由于 TI 的 DSP 发展迅速, 产品更新快, 因此其手册自然也非常多。由于手册需要更新和补充, 因此, 彼此之间难免会出现重复和种类繁多的现象。使用过 TI DSP 文档的用户都感觉到, 其手册在使用上是有相当难度的。另外, TI 的 DSP 文档都是英文的, 这也给部分

工程技术人员带来一定的困难。

因此，我们本着以下两个原则编写了本书：

(1) 本文档的定位为手册。也就是说，本书的所有编者应全面了解和掌握所编译书目的所有英文文档，并了解各个文档之间的关系，在保证文档完整的基础上，选择最新的文档，并去除其中的重复内容和已经淘汰的内容。

(2) 要尽可能地按照 TI 英文文档的本意来形成中文，以保证手册的准确性。允许作者按照自己的经验有所发挥，以便于难点的理解。

本书大体上包括三个部分：一是 28 系列的 CCS、DSP/BIOS、算法标准、C 语言编译器及开发工具等；二是 CPU 结构以及指令；三是工业和实际项目中的应用。

本书除了封面署名作者外，参与图书编写的还有沈平、陈运飞、刘云、裴智、卢月、程永强、杨垒、张颖玲、汪洋、王艳艳、赵振元、李忠明、赵长峰、张文华、范晨辉、王光发、王橹、李立钢等，在此一并提出感谢。

该书的参编者有着从事 DSP 教学和科研的丰富经验，正是由于他们的大力支持，才使得本书的编写计划能够付诸实施。在此，谨向参加编写的全体老师和工作人员表示衷心的感谢！

本书的编写工作量大、时间紧，尽管编写的老师都尽了最大的努力，但也难免有不妥，甚至错误之处，编委会全体工作人员恳请广大读者给予批评指正。

编者

2008 年 8 月

# 目 录

## 前 言

第 1 章 DSP 组成原理	1
1.1 DSP 的特点与分类	1
1.1.1 DSP 的特点	1
1.1.2 DSP 的分类	5
1.2 DSP 的应用与发展	7
1.2.1 DSP 的应用	7
1.2.2 DSP 的发展方向与展望	10
1.3 DSP 体系结构原理	11
1.3.1 281XDSP 的原理结构图	11
1.3.2 281XDSP 寻址方式	12
1.3.3 281XDSP 的引脚说明	21
1.3.4 281XDSP 指令集	21
第 2 章 集成开发环境的应用	22
2.1 概述	22
2.1.1 CCS 概述	22
2.1.2 代码生成工具	23
2.2 CCS 安装与设置	24
2.2.1 硬件安装使用说明	24
2.2.2 开发软件及驱动安装说明	26
2.2.3 开发软件配置说明	27
2.3 CCS 仿真工作模式及调试操作	28
2.3.1 编辑源程序	28
2.3.2 创建应用程序	28
2.3.3 调试应用程序	29
2.3.4 DSP/BIOS 插件	29
2.3.5 硬件仿真和实时数据交换	31
2.3.6 CCS 文件和变量	32
2.4 CCS 应用程序开发	33
2.4.1 开发一个简单的应用程序	33
2.4.2 开发 DSP/BIOS 程序	40
2.4.3 算法和数据测试	45
2.4.4 程序调试	54

<b>第 3 章 DSP 应用开发硬件基础</b> .....	64
3.1 TMS320F2812 最小系统设计 .....	64
3.1.1 供电系统设计 .....	64
3.1.2 时钟与复位电路设计 .....	65
3.1.3 外部存储器电路设计 .....	68
3.1.4 JTAG 接口设计 .....	68
3.2 扩展接口设计 .....	69
3.2.1 AD/DA 接口设计 .....	69
3.2.2 SCI 接口设计 .....	87
3.2.3 SPI 接口设计 .....	103
3.2.4 事务管理器模块接口设计 .....	119
<b>第 4 章 DSP 应用开发软件基础</b> .....	169
4.1 汇编语言编程 .....	169
4.2 C 语言编程 .....	169
4.2.1 源程序的编辑 .....	170
4.2.2 源程序的编译 .....	170
4.2.3 目标文件的链接 .....	170
4.2.4 程序的仿真 .....	172
4.2.5 程序的固化 .....	172
4.2.6 运行时间支持函数及宏 .....	173
4.2.7 头文件 .....	205
4.2.8 命令文件 .....	209
4.3 C 与汇编混合编程 .....	212
4.3.1 独立编写 C 程序和汇编程序 .....	212
4.3.2 在 C 程序中直接嵌入汇编语句 .....	214
4.3.3 混合编程举例 .....	215
4.4 接口驱动程序编程 .....	216
4.4.1 AD 接口驱动 .....	216
4.4.2 SCI 接口驱动 .....	217
4.4.3 SPI 接口驱动 .....	219
4.4.4 EV 接口驱动 .....	220
4.5 算法基础 .....	222
4.5.1 FFT 算法编程 .....	222
4.5.2 FIR 滤波算法编程 .....	227
4.5.3 IIR 滤波算法编程 .....	230
4.5.4 PID 算法编程 .....	233
<b>第 5 章 DSP 系统开发实例</b> .....	235
5.1 基于 DSP 旋变信号接收装置应用实例 .....	235
5.1.1 基于 DSP 旋变信号接收装置原理 .....	235
5.1.2 旋变信号产生装置在 TMS320F2812 上的程序实现 .....	239
5.1.3 程序清单 .....	240

5.2	基于 DSP 旋变信号发送装置原理 .....	281
5.2.1	旋变信号发送装置原理 .....	281
5.2.2	旋变信号发送装置在 TMS320F2812 上的程序实现 .....	281
5.3	基于 DSP 温度控制应用实例 .....	309
5.3.1	基于 DSP 温度控制原理 .....	309
5.3.2	系统软件实现 .....	312
5.4	基于 DSP 高精度电压源应用实例 .....	315
5.4.1	基于 DSP 的高精度电压源系统概述 .....	315
5.4.2	系统 DSP 软件实现 .....	315
	附录 .....	321



## 第 1 章

# DSP 组成原理

DSP 是 Digital Signal Processing (数字信号处理) 或 Digital Signal Processor (数字信号处理器) 的缩写。DSP 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, 随着计算机和信息技术的飞速发展, 数字信号处理技术应运而生并得到迅速的发展。

在过去的二十多年时间里, 数字信号处理已经在通信等领域得到极为广泛的应用。数字信号处理可以通过软件修改处理参数, 电路采用二值逻辑。只要环境温度、电路噪声的变化不造成电路逻辑的翻转, 数字电路就可以不受影响地完成工作。比较早期的模拟信号处理方法, 数字信号处理技术具有更大的灵活性和更好的稳定性, 逐渐成为信号处理技术的主流。与单片机等开发技术类似, 在进行 DSP 开发之前, 应该明确以下几个问题:

(1) 针对开发任务的难度和性质决定是否使用 DSP?

(2) 应该选择哪个型号的 DSP 才能更加适合特定的开发任务呢?

(3) 型号选定后, 对即将使用的 DSP 很熟悉吗? 包括它的硬件结构、外设控制、指令系统、寻址方式?

为了回答上述三个问题, 本章首先介绍 DSP 技术的特点与分类, 然后针对 DSP 技术的发展历程与应用范围展开一系列讨论, 最后对 DSP 技术应用中最重要的体系结构原理和作为基石的 DSP 软件指令系统进行了详尽的介绍。

## 1.1 DSP 的特点与分类

TMS320 系列 DSP 包括定点 DSP、浮点 DSP 和多处理器 DSP (DSPs), 其结构是专门为实时的信号处理设计的。TMS320 系列 DSP 具有非常灵活的指令集, 固有的操作灵活性、高速运行的性能、创新的并行结构、成本效率高和对 C 语言的友好结构等特点。下面具体介绍通用 DSP 的特点与分类。

### 1.1.1 DSP 的特点

DSP 的特点主要表现在如下几个方面:

(1) DSP 属于修正的哈佛 (Modified Harvard) 架构, 即它具有两条内部总线: 数据总线和程序总线。

冯·诺依曼结构和 Harvard 结构是计算机总线的两种典型结构。冯·诺依曼结构的特点是将程序和数据存放在同一个存储空间。这种结构使得计算机的结构得以简化, 成为计算机

发展史上的一个重要里程碑。但由于统一编址依靠指令计数器提供的地址来区分是指令数据还是地址数据，即指令和数据通过同一总线访问统一地址空间上的存储器。因此，在对数据和程序进行分时读/写时就会出现执行速度慢，数据吞吐量低的问题，依据这一原理决定的结构显然与进行具有高度实时要求的数字信号处理的要求不相适应了。

DSP 采用的哈佛结构则是不同于冯·诺依曼结构的一种并行体系结构，其主要特点是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，每个存储器独立编制、独立访问。与之相应的是系统中设置的两条总线，即程序总线 and 数据总线，从而使数据的吞吐率提高了一倍。

在哈佛结构中，由于程序和数据存储器在两个分开的空间里，因此取指令和执行指令能完全重叠运行，大大提高了数据处理能力，非常适合于实时的数字信号处理。

为了提高运行速度和灵活性，TMS320C3X DSP 芯片在基本哈佛结构的基础上作了改进，一是允许数据存放在程序存储器中，并能被算术运算指令直接使用，增强芯片的灵活性；二是增加了高速缓冲器（Cache）。Cache 中的指令在执行时不用再从存储器中读取，节约了一个指令周期。在 TMS320C3X 系列芯片中有 64 个字的 Cache。高速缓冲器（Cache）的作用和算法可参考相关书籍，这里不予详述。

(2) DSP 指令系统是流水线操作。

所谓流水线操作，是指一个任务被分解为若干个子任务，各个任务可以在执行时相互重叠。与哈佛结构相配合，DSP 广泛采用流水线操作以减少指令执行时间，增强处理器的处理能力。

TI 公司的 TMS320C3X 芯片，就采用了四级流水线操作，其流水线结构的五个单元及相应功能如表 1-1 所示。

表 1-1 TMS320C3X 流水线结构的单元及相应功能

单元名称	功 能
取指令单元	从存储器中取指令和调整程序计数器 (PC)
译码单元	对指令字译码和产生地址
读单元	从存储器中读操作数
执行单元	从寄存器组中读操作数，执行所需的操作，将结果写入寄存器组中或存储器中 DMA 通道(DMA Channel)
DMA 通道	读和写存储器

基本指令分为四级：取指、译码、读和执行。当处理器并行处理四条指令时，各条指令处于流水线的不同单元。

在不发生流水线冲突的长时间工作情况下，具有流水线结构的处理器的执行效率约为没有流水线结构的处理器的执行效率的四倍。四级流水线操作指示图如表 1-2 所示。

表 1-2 四级流水线操作

指令周期	F	D	R	E
m-3	W	—	—	—
m-2	X	W	—	—
m-1	Y	X	W	—
m	Z	Y	X	W

续表

指令周期	F	D	R	E
m+1	—	Z	Y	X
m+2	—	—	Z	Y
m+3	—	—	—	Z

注 F—取指令；D—译码；R—读指令；E—执行。

(3) 采用专用的硬件乘法器和累加器。

在通用微处理器中算法指令需要多个指令周期，如 MCS-51 的乘法指令需要 4 个周期。相比而言，DSP 芯片的特征就是一个专用的硬件乘法器，乘法可以在一个指令周期内完成，还可以与加法并行进行，使用 MAC 指令（取数、乘法、累加）可以在单周期内完成一个乘法和加法。一般的计算机上，算术逻辑单元（ALU）只能完成两个操作数的加、减及逻辑运算，而乘法（或除法）则由加法和移位来实现，显然，这样的计算机汇编语言实现乘法运算比较慢。而在数字信号处理运算中，卷积、数字滤波、FFT、相关、矩阵等算法中都有大量的乘法运算存在，一般的算术逻辑单元是不适用的。

乘法运算是数字信号处理实现中的一个瓶颈问题，各种算法的改进也将降低算法中的乘法运算次数作为最主要的目标。例如，在一般形式的 FIR 滤波器中，乘法是重用组成部分，对每个滤波器抽头，必须做一次乘法和一次加法：

```
FIR: LDF 0.0, R0 ; R0 初始化
LDF 0.0, R1 ; R1 初始化
PRTS N-1 ; 建立重复
MPYF3 *AR0++, *AR1++ (1)%, R0 ; R0=h(N-1-i)*x[n-(N-1-i)]
ADDF3 R0, R2, R2 ; 乘/累加
ADDF3 R0, R2, R0 ; 加最后一个乘积
```

程序说明：调用上述程序时，首先要初始化 AR0、AR1、BK 三个存储器。其中 AR0 指向  $h(N-1)$ ，AR1 指向  $x[n-(N-1)]$ ，BK=N（N 为滤波器的阶数）；滤波的结果放在寄存器 R0 中。

可见，高速的乘法指令和并行操作大大提高了 DSP 处理器的性能。专用硬件乘法器可以成功地解决这一问题。TI 公司在其 6000 系列的 DSP 芯片中已经将一个硬件乘法器增加为两个，可见在数字信号处理性能方面有着越来越高的要求。

(4) 特殊的 DSP 指令。

DSP 芯片的另一特点是采用特殊的指令，这些特殊指令进一步提高了 DSP 芯片的处理能力。TMS320C3X 主要有三类特殊指令：重复方式、转移和并行指令。

1) 重复方式允许过零循环。TMS320C3X 有两条支持过零循环的指令：PRTB（重复一个程序模块）和 PRTS（重复单条指令，仅通过一次取值来减轻总线拥挤）。它们都是四周期指令，仅在第一次通过程序循环回路时产生四个周期的管理开销，以后所有通过循环回路的管理开销是零周期。但在重复方式中调整程序计数器时，三个寄存器与程序计数器的调整相联系，表 1-3 对这些寄存器进行了描述。其中 RS 指向重复操作的下一条指令地址，RE 在单指令重复操作中与 RC 功能相同。

表 1-3 重复方式寄存器

寄存器	功能
RS	重复起始地址寄存器, 持有重复程序模块的第一条指令的地址
RE	重复结束地址寄存器, 持有重复程序模块的最后一条指令的地址
RC	重复结束计数寄存器, 持有重复程序模块的最后一条指令的地址

值得注意的是单指令循环执行过程不被中断打断, 以下提供两个小程序模块, 说明重复操作如何使用:

```
LDI 9H, RC ; 重复 10 次
RPTB RPT_END ; PRT_END->RE, PC+1->RS
RPT_START...
...
RPT_END...
FPTS 9H ; 重复 10 次, PC+1->RS, RE
...
```

2) TMS320C3X 的转移能力主要包括标准转移和延迟转移。标准转移在执行转移之前是流水线变空, 这导致标准转移的执行占据四个指令周期。而延迟转移则不使流水线变空, 它保证随后的三条指令在程序计数器被转移修改前执行, 而此时延迟指令悬空, 并且禁止中断, 执行完毕这三条指令。这样, 延迟转移仅需一个周期。TMS320C3X 的延迟转移是 BcondD、BRD 和 DbcondD。

3) 由于拥有专门的硬件乘法器、多个独立的地址产生器和相互独立的程序、数据总线, 因此 TMS320C3X 具有多条不同方面的并行指令。这些并行操作指令组有高度并行操作能力, 具有如下功能: ①寄存器并行装入; ②并行算术运算; ③并行算术/逻辑运算和存储运算。

使用并行指令时要注意必须满足这些指令操作数的寻址要求, 可参看相关资料, 这里不再赘述。

值得一提的还有 TMS320C3X 提供的在片直接存储器寻址 (DMA) 控制器。DMA 控制器能够在没有 CPU 干预下执行输入/输出功能, 从而减少 CPU 对执行输入/输出功能的需要。

(5) 多种寻址方式。

为满足 FFT、卷积等运算中的寻址、排序及计算速度要求, DSP 芯片上大多包含有专门的硬件地址发生器, 并在软件上设置相应的指令以实现循环寻址 (Circular Addressing), 位倒序 (bit-reversed) 等。目前 1024 点 FFT 的时间已经小于 1ms。

(6) 独立的 DMA 总线和控制器。

有一组或多组独立的 DMA 总线, 可以与 CPU 的程序、数据总线并行工作。在不影响 CPU 工作的条件下, DMA 速度已达 800MB/s 以上。

(7) 所有 DSP 芯片都包含 JTAG (Joint Test Action Group) 标准测试接口 (IEEE 1149 标准接口), 便于对 DSP 芯片上的在线仿真和多 DSP 条件下的调试。

(8) DSP 增加了硬件循环控制, 当完成循环初始后, 实际运行中循环不再消耗指令周期, 大大提高了数字信号处理的运算速度。

(9) DSP 设置超长指令字 (VLIW) 结构, 使设计简单化, 不需要动态码再排序的硬件支持。

VLW 是指令级的并行机制，它在一个长指令中，安排了若干个操作在多个功能单元中同时被执行。VLW 结构将复杂性从硬件转移到了编译器。它的处理器依赖于指令编译的快、慢。其特点是在单个周期内，将含有多项运算操作的指令划分为多个操作，这些操作的发出与执行都采用并行方式，以提高每次执行的操作总数。

#### (10) 程序的加载引导。

DSP 芯片要执行的程序一般在 EPROM/FLASH 存储器中。但是，该存储器的访问速度较慢，虽然有一些高速 EPROM/FLASH 存储器，但价格昂贵、容量有限，而高速大容量静态 RAM 的价格又在不断下降。故采用程序的加载引导是一个性价比较高的方法。DSP 芯片在上电复位后，执行一段引导程序，用于从端口（异步串行口、I/O 口、主机接口）或外部 EPOROM/FLASH 存储器中加载程序至 DSP 芯片的高速 RAM 中运行。

除了硬件结构上比以往信号处理工具非常明显的区别以外，由于 DSP 采用数字技术替代模拟技术进行信号处理，乘法器中还有系数可辨的系数存储器从而得到不同系统组成，大规模集成电路组成的数字系统故障率比采用众多分离元件构成模拟系统的故障率低，数字部件的优点和对电路参数的较低要求以及可一套计算设备同时处理几个通道信号的特点，所以 DSP 还具有精度高、灵活性大、可靠性强、易于大规模集成以及分时复用等优点。

同时也有以下三个缺点需要在后续的 DSP 设计中予以克服。

- 工作速度慢。进行实时处理时，输入信号的一个样点的处理必须在它的取样周期内完成，可见被处理信号的频谱上限压得比较低。
- 电路规模大。进行实时处理需要 A/D 及 D/A 变换器、时钟发生器等附属电路，电路规模较大，这对简单的信号处理是不利的。
- 存在非线性和噪声。对模拟信号进行数字处理时，不可避免地要产生某些量化噪声。另外，严格地说，数字信号处理是使用非线性系统来近似线性系统的，其运算误差必将产生系统噪声，即使可以保证线性系统的稳定性，有时也会出现所谓的极限环震荡现象，在数据字长较小时表现得尤其明显，需要注意。

### 1.1.2 DSP 的分类

DSP 主要根据生产厂商不同以及每个厂商的 DSP 性能不同进行分类。目前市场上的主要 DSP 生产商包括 TI、ADI、Motorola、Lucent 和 Zilog 等，其中 TI 占有最大市场份额。作为第一片 DSP 产品 TMS32010 的生产商和 DSP 行业的领头者，TI 公司的产品包括从低端的低成本低速度 DSP 到高端大运算量的 DSP 产品。

TI 的三大主力 DSP 产品：

C2000 系列：包括 C20X、F20X、F24X、F24XX；

C5000 系列：包括 C54X、C54XX、C55X；

C6000 系列：包括 C62XX、C67XX、C64X。

TI 的其他 DSP 产品包括 C3X 系列，C2X 和 C5X 系列以及 C4X 和 C8X 系列。

目前，广泛使用的 TI 的 DSP 有三个系列：C2000，C5000 和 C6000。C3X 也有使用，而其他型号都基本淘汰。同一系列中不同型号的 DSP 一般都具有相同的 DSP 核，相同或兼容的汇编指令系统；而它们的差别仅在于片内存储器的大小，外设资源（如定时器、串口、并口等）的多少。

不同系列的 DSP 汇编指令系统不兼容,但汇编语言的语法非常相似。除了汇编语言外, TI 还为每个系列都提供了优化 C 编译器,方便用户使用 C (使用 ANSI 的标准 C) 语言进行开发,效率可以做到手工汇编的 90% 甚至更高。

(1) TMS320C2000 系列 DSP 控制器。此款 DSP 是适合于数字控制的一种 DSP 器件,全部为 16 位定点 DSP,某些型号具有片内 FLASH RAM,如 TMS320F24X、TMS320LF240X 等,在 TI 的所有 DSP 中,仅 C2000 有 FLASH。

作为控制器,它继承了除 DSP 核外的大量外设资源,如闪存、定时器、高速 A/D 转换器、WATCHDOG、PWM 发生器、高性能的 CAN 模块及数字 IO 脚等,特别是 C2000 的异步串口可以与 PC 的 UART 相连,也是 TI 所有 DSP 中唯一具有异步串口的系列,具有较高的性价比,设计工程师使用它可以降低开发难度,缩短面市时间,有效地降低开发成本。

TMS320F2810 和 TMS320F2812 是代表这一系列的两款高精度的控制用 DSP,提供比目前任何可编程 DSP 控制器高出 12 倍的运算能力。它们的运算速度高达 150MIPS,并且在片上集成了闪存。它们广泛适用于工业自动化、光传输网络和自动控制等领域。

(2) TMS320C5000 定点低功耗系列 DSP。适合于无线通信领域的一种低功耗 DSP 器件,目前的处理速度一般在 80~400MIPS。在处理速度可以高达 600MIPS,功耗可以低到 0.05MW/MIPS。C5000 系列主要分为 C54XX 和 C55XX 两个系列。

两个系列在执行代码级是兼容的,他们的汇编指令系统却不同。C5000 综合多样的外设,包括 McBPS 同步串口、HPI 并行接口、定时器、DMA 等。其中 C55XX 提供 EMIF 外部存储器扩展借口,允许用户直接使用 SDRAM、SBSRAM、SRAM、EPROM 等各种存储器。而 C54XX 没有提供 EMIF,只能直接使用静态存储器 SRAM 和 EPROM。

另外,C5000 系列一般都是用双电源供电,其 I/O 电压和核电压一般不同,而且不同型号也有差别。不过, TI 提供了全系列的 DC-DC 变换器可以解决 DSP 的电源问题。

C5000 系列一般都提供 PGE 封装,便于 PCB 板的制作,封装小且功耗低等性能优势使得它在 Internet 和无线通信市场得到了广泛的应用。C5000 DSP 核是针对个人便携设备而设计的,如音乐播放器、3G 蜂窝电话、数码相机、高速音频设备、高精度的信号和多通道应用。

(3) TMS320C6000 高性能 32 位 DSP 系列。目前处理速度为 800MIPS~2400MIPS,而且还在不断提高,特别适合于特定应用的高性能处理器,其定点 DSP 和浮点 DSP 具有软件兼容性。这一系列的 DSP 器件综合了世界上各种 DSP 器件的优势并在处理能力和电源管理方面做了很大的改进。

同 C55XX 一样,C6000 也提供 EMIF 扩展存储器接口,方便用户使用各种外部扩展存储器,如 SBSRAM、SDRAM、SRAM、EPOROM。C6000 提供的主要外设有 McBPS 同步串口、HPI 并行接口、定时器、DMA 等。

另外,在 C6000 的一些型号中还提供了 PCI 接口。新型 TMS320C64XTM 定点处理器提供了无线和宽带应用 10 倍和高级图像处理 15 倍的处理能力,功耗仅为其他单核 DSP 功耗的 1/3。这些特点都大大扩充了包括 3G 无线基站、DSLAMS (Digital Subscriber Line Access Multiplexers) 和其他网络互连设备在内的通信基础设施性能,如网络互连设备的通道密度大大增加。

TMS320C62X 定点处理器使得多通道、多功能应用在技术方面取得了突破性的进展。它

被广泛地应用于无线基站、远程数据服务、xDSL (Digital Subscriber Loop) 系统、家庭安全系统、高级图像处理、工业扫描、精密仪器和多通道电话系统。

TMS320C67X 浮点处理器在高性能应用方面具有很大的改进, 它被广泛地应用于专业音响设备、工业自动化、语音识别和高级图像处理等方面。

C6000 系列 DSP 在软件方面是完全兼容的, 它以 ExpressDSP Real-Time Software Technology 实施软件技术为支持。C6000 几乎都只提供 BGA 球形封装, 在 PCB 板制作时需要多层板, 增加了开发和调试的难度。另外, C6000 系列的功率较大, 需要仔细考虑 DSP 与系统其他部分的电力分配, 选择适当的 DC-DC 转换器。

(4) C3X 系列 DSP。C3X 系列虽然不是目前 TI 的主流产品, 但作为一个 32 位的低价位浮点 DSP, 仍然被广泛使用。C3X 系列的结构比较简单, 外设也比较少, 主要有同步串口、DMA 通道、定时器, 能用于数字 I/O 的引脚也只有两条。

TMS320VC33 是这一系列中比较经典的一款。指令周期分别为 13ns 和 17ns, 片内 RAM 为  $34K \times 32\text{bit}$ , X5 PLL 时钟产生器, 功耗低, 可进行 16 位和 32 位的整数运算以及 32 位和 40 位的浮点数运算。VC33 指令字为 32 位, 地址线为 24 位, 具有 BOOTLOADER, 一个串口, 两个 32 位定时器和 DMA, 还具有 R0~R7 共八个扩展精度寄存器。

VC33 采用双电压供电, 分别为 1.8V 的核电压以及 3.3V 的 I/O 电压。VC33 支持 JTAG 调试标准, 有四个简单、高效的预译码信号。VC33 价格大约为人民币 200 元左右, 其最高处理速度为 150MFLOPS。

## 1.2 DSP 的应用与发展

自从 20 世纪 70 年代末 80 年代初 DSP 芯片诞生以来, DSP 芯片得到了飞速的发展。DSP 芯片的高速发展, 一方面得益于集成电路技术的发展, 另一方面也得益于巨大的市场。在近 20 年时间里, DSP 芯片已经在信号处理、通信、雷达等许多领域得到广泛应用。

### 1.2.1 DSP 的应用

DSP 芯片的应用领域非常广泛, 几乎渗透到了人类社会的每一个方面。数字信号处理是应用速度最快、成果最为显著的新兴学科之一。事实上, 数字信号处理一问世, 便吸引了各个学科大量的研究开发人员, 纷纷把数字信号处理技术应用于自己的研究领域。

据不完全统计, 数字信号处理技术在以下一些领域获得了极其广泛地应用: 语音信号处理, 雷达, 声呐, 地震信息处理, 图像处理, 遥感遥测, 地质勘探, 航空航天, 电力系统, 故障检测, 自动化仪器仪表, 家用电器和多媒体技术等。DSP 已经成为 21 世纪最具发展潜力的产业。

#### 1. 通信领域的应用

在现代通信系统中使用 DSP 已是大多数通信工作者所熟知的事实, 小到调制解调器, 大到万门程控交换机, 几乎到处都能看到 DSP 的踪迹。根据美国的权威咨询公司统计, 目前可编程 DSP 在市场上的使用情况为: 通信占 56.1%, 计算机占 21.6%, 消费电子和自动控制占 10.69%, 军事/航空占 4.59%, 仪表占 3.5%, 工业控制占 3.31%, 办公自动化占 0.65%。可见 DSP 应用的广泛性, 但其主要是在通信中的应用。这是因为传统的模拟通信正向着数

字通信方向发展,而数字信号处理是数字通信的核心技术。所以,DSP及数字信号处理能在现代通信中获得广泛的应用。

由于 DSP 独特的系统体系结构、硬件密集型方案和灵活的处理指令,使其具有数字处理功能很强、运算性能强、接口方便、便于集成等优点。所以它在数字语音通信和多媒体通信等方面得到了广泛的应用。

多媒体通信是信息传输媒体具有多种形式的通信。多种形式的传输媒体包括文字、语言、图像、图形和数据等媒体。多媒体信息中绝大部分是视频数据和音频数据,而数字化的音频和视频数据量是非常庞大的。只有采用先进的压缩编码算法对其进行压缩,节省存储空间,提高通信线路的传输效率,才能使高速的多媒体通信系统成为可能。

多媒体通信要求多媒体网络终端应能快速处理信息,并具有较强的交互性。DSP 在语音编码、图像压缩与还原的语音通信中得到了成功的应用。如今的 DSP 基本能实时实现大部分已形成国际标准的语音编解码算法与协议。

移动通信中的语音压缩和调制解调器也大量采用 DSP。现代 DSP 完全有能力实现中、低速的移频键控(FSK)、相移键控(PSK)的调制与解调以及正交调幅(QAM)调制与解调等。这种基于 DSP 的软件无线电(Software Radio)是一种新的无线通信技术。

信号的数字化是实现软件无线电的先决条件。软件无线电对数字信号处理的要求极高,不仅要求数字信号处理器 DSP 具有高速的数字处理运算能力,而且还要求 DSP 具有极其高速的数字处理运算能力,数据通信接口也要大力加强。下面给出 DSP 在通信中应用的一个典型实例。

采用美国 AD 公司生产的 ADSP21060 及 ADSP2181 为核心,构成一个 PC 插卡来实现 H.324 协议中的图像以及语音压缩编码和解码,并利用外置 Modem 完成数据传输,形成一个简单的多媒体终端。美国 AT&T 公司 1996 年推出单片音频、视频信号处理器 AV4400A,采用 0.5  $\mu\text{m}$  的 CMOS 工艺,主频为 90MHz,它可以进行 H.261、MPEG-1、H.263、G.723 等标准的压缩编解码,用它可组成低速多媒体终端。

美国 8 $\times$ 8 公司推出的单片视频编解码器(LVP)可用于多媒体通信的视频编、解码;美国 C-Cube 公司的精简指令集计算机(RISC)处理器 CL4020 和 CL4040 具有 32 位数据及指令宽度,主频 600MHz,处理速度为 240MOPS(每秒百万条操作),并带有视频接口和 32 位主机。它主要用于视频、音频及通信控制方面的信号处理,支持多处理器的并行工作。

美国 TI 公司推出的 TMS320C6X 系列,其设计目的在于满足多通道通信系统,如无线通信工作基站、多通道调制解调器、电话交换机及远程接入服务器等的要求,在通信领域有广泛的应用。C6X 系列中的第一个产品 C6201 是 32 位高性能处理器,峰值运算能力可达 1600MIPS(每秒执行兆指令),芯片采用 256 位的长指令结构,执行周期为 5ns,每周期执行 8 条 32 位的指令。用它来实现离散多音调制(DMT),在距离 3km 非对称的数据用户线(ADSL)上可达到 8Mbit/s 的速率。它还可用于多通道声码器、多通道回波抵消、电缆调制解调器和蜂窝通信基站等。

### 2. 其他领域的应用

近年来,随着 DSP 芯片产品价格的不断下滑,使 DSP 能够从以往的军用领域迅速拓展到民用领域,例如应用与计算机、网络、移动电话、调制解调器和磁盘驱动器以及众多的消费电子产品。例如 DSP 芯片应用于 VoIP 网关产品。



VoIP 包括压缩语音信号并将它们通过使用 IP、基于信息包的网路以数据的形式传送。拨号连接到 VoIP 网关的可以使 Modem、传真或者语音, 处理这些呼叫的 DSP 必须快速切换操作层面。

音响产品也将是新市场的巨大应用, 例如 MP3 (MPEG1, Layer3) 播放机。DSP 算法允许将 CD 品质的录音从 Internet 下载到 PC, 然后传送到便携式播放机, 通过解压 DSP 芯片实现回放。DSP 的重要应用领域之一是声音处理。声音数字压缩技术早已获得应用, 其中以脉冲编码调制 (PCM) 的方法最普遍。但由于它只能压缩 50% 数字, 因此仍未足以应付未来计算机应用。

DSP 已经在音效应用中得到广泛采用, 而且大部分应用于音效产品的技术, 例如应用于多媒体音效卡。NEC 公司推出了控制声音区域的 DSP, 可以应用于音效卡。

当然, DSP 的用途还不仅限于上面所描述的方面, TI 公司的用户指南概括了 DSP 应用的 11 个方面, 如表 1-4 所示。

表 1-4 DSP 的典型应用

应用领域	典型应用
图形/图像	三维旋转; 模式识别; 机器人视觉; 工作站; 图像压缩/传输; 图像增强; 动画制作/数字地图
语言/语音	语音编码; 语音识别; 语音邮件传递; 语音增强; 语音合成; 文本/语音转换; 说话人确认
通用场合	数字滤波; 卷积; 相关; FFT; 希尔伯特变换; 加窗; 波形产生
仪器仪表	频谱分析; 瞬态分析; 锁相环; 函数产生; 模式匹配; 地震处理; 数字滤波
军事	导弹控制; 导航; 雷达信号处理; 声呐信号处理; 安全通信; 图像处理; 射频调制解调
医学	助听器; 诊断设备; 病人监护; 胎儿监护; 整形术; 超声设备
自动化	自适应行使控制; 防滑制动装置; 蜂窝电话; 数字收音机; 防滑刹车; 引擎控制; 振动分析; 全球定位
工业	机器人; 数码控制; 安全检修; 电力线监控
用户装置	数字电视; 数字收音机; 音乐合成器; 雷达探测器; 传呼机; 固态应答机; 玩具和游戏
控制	机器人控制; 伺服控制; 电机控制; 磁盘控制; 引擎控制; 激光打印控制
通信	回波抵消; 自适应脉冲编码调制; 数字式专用电话交换机; 线路增音器; 通道多路复用; 自适应均衡器; 数据加密; 传真; 双音多频解码器; 分散式电话; 扬声器电话; 基站; 扩频通信; 电视会议

为了便于用户根据不同的需要选择适当的 DSP, 表 1-5 列出了最新的 DSP 及其对应的主要技术指标和典型应用供用户查阅。

表 1-5 最新的 DSP 芯片及其应用

芯片	主要技术指标	典型应用
ADSP2181	指令周期: 30ns; 24×16KB 的程序存储器; 16×16KB 的数据存储器; 两路串行接口两路 DMA	语音编码; 有线调制解调器; 无线通信; 智能仪表