

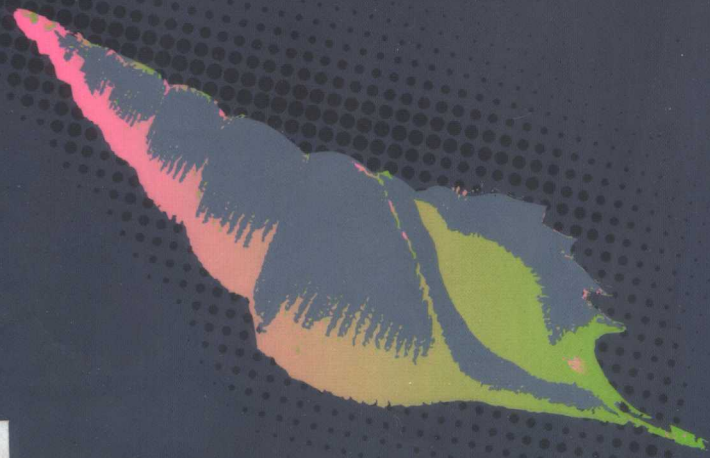
# TMS320X240x

# DSP原理


# 及应用开发指南

TMS320X240x DSP Principle  
and Application Guide

赵世廉 编著



CD-ROM  
INCLUDED

 北京航空航天大学出版社

# TMS320X240x DSP 原理及 应用开发指南

赵世廉 编著

北京航空航天大学出版社

## 内 容 简 介

本书以美国 TI 公司的 TMS320LF2407A 为典型芯片,讲述 240x DSP 系列芯片的原理结构、硬件设计和软件编程。通过一系列循序渐进的实验安排,可以使读者对 DSP 的整个开发过程有一个全面的认识和掌握,便于了解 240x 系列的硬件结构,学习 C24x DSP 编程语言、编程方法、调试方法,并参照本书所给的硬件模板和软件模板,设计出较完整的 240x DSP 应用系统。是一本系统而实用的 240x 系列 DSP 学习教程。

本书适用于进行 TI 公司 DSP 应用开发的初级和中级应用工程师,也可作为本科高年级学生、研究生学习和应用 DSP240x 系列芯片人员的教学参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

TMS320X240x DSP 原理及应用开发指南/赵世廉编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2007.7

ISBN 978-7-81124-066-5

I. T… II. 赵… 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(2007)第 092706 号

© 2007,北京航空航天大学出版社,版权所有。

未经本书出版者书面许可,任何单位和个人不得以任何形式或手段复制或传播本书及其所附光盘内容。侵权必究。

### TMS320X240x DSP 原理及应用开发指南

赵世廉 编著

责任编辑 孔祥夔 范仲祥

\*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: [bhpress@263.net](mailto:bhpress@263.net)

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:24 字数:614 千字

2007 年 7 月第 1 版 2007 年 7 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 978-7-81124-066-5 定价:38.00 元(含光盘 1 张)

# 前 言

在过去的 20 年中,电子技术已基本上实现了从模拟到数字的过渡。正值本书写作期间,2006 年 12 月 12 日,中央电视台新闻节目播出了一条很短的新闻——荷兰全国实现电视数字化。这说明,世界正朝着数字化的方向发展。在国内,数字技术和 DSP 芯片的作用及重要性已被各界认识,DSP 芯片的应用和普及已是一个基本事实。尽管如此,围绕 DSP 芯片的学习、研究和工程项目的开发,入门显得比较困难。这是为什么呢?

作者愿意在这里谈一谈自己的粗浅认识。

(1) 在 DSP 开发过程中,包含的知识点多,技术资料分布在多个文献中,内容比较分散。以 TMS320X240x 系列芯片开发为例,TI 公司提供的、也是开发人员需要阅读的技术资料如下:

① TMS320LF2407A, TMS320LF2406A, TMS320LF2403A, TMS320LF2402A, TMS320LC2406A, TMS320LC2404A, TMS320LC2402A DSP Controllers, SPRS145G——芯片手册,介绍芯片片内存储器大小、片内外设种类和引脚封装等具体信息。

② TMS320C24x DSP Controllers: CPU, System and Instruction Set, SPRU160C, 讲述了 24x DSP CPU 的结构、大系统级的设置(如系统级控制寄存器和中断的二级层次结构)和全部 84 条汇编指令详解。

③ TMS320C1x/C2x/C2xx/C5x Assembly Language Tools User's Guide, SPRU018E——汇编指令编程指导书,含汇编程序如何组织和构成及大量汇编伪指令的解释。

④ TMS320C2x/C2xx/C5x Optimizing C Compiler User's Guide, SPRU024E——C 语言编程指导书,主要讲述 C 编译器的特点、C 代码优化和链接、实时运行库 rts2xx.lib 和 C 编译器与 CCS 的接口。

⑤ TMS320LF/LC240x DSP Controllers System and Peripherals, SPRU357B, 讲述了所有片内外设的结构、设置和使用,包括 PLL、软件看门狗、I/O 口、片外存储器接口、事件管理器、ADC、SCI、SPI 和 CAN 等。

⑥ Code Composer Studio Getting Started Guide, SPRU509——CCS 集成环境介绍。

以上 6 本技术资料构成了 DSP240x 开发时所涉及的知识点的 6 大部分,每部分都讲述了开发中的一个侧面,没有重叠,缺一不可;然而,并不是每本资料都要全面阅读,但起码要阅读大部分。在每一本技术资料中,TI 公司给出了一些编程的例子,这些例子都是局部的,可看成森林中的树木。TI 公司和所有 DSP 开发业内人士都深知 DSP 入门难这一事实,因此特开发了典型的 DSP 硬件电路,并配以完整程序,称其为初学者套件 DSK(DSP Starter Kit),专为初学者入门使用。DSK 中的完整程序,就像是森林,所以使初学者看到了 DSP 软件编程的全貌。全面阅读以上 6 本技术资料,并配合 DSK,是 TI 公司提供的 DSP 开发入门解决方案,也是 DSP 入门的正确途径。

(2) 英文技术资料阅读难度大。国内工科院校本科生、研究生经过英语学习和实践后,有一定的阅读能力,部分学生能熟练阅读英文资料,达到实用目的;但是,有部分学生在英语思维方面的训练不够,常常是一边阅读英文,一边在大脑中译为中文,记下中文意思,之后再吧记下

的中文语义汇总起来,构成一个新的知识点。这样会影响阅读速度。当完全沉浸在以上五六本英文资料中并通过它获得崭新的 DSP 技术知识时,就显得十分勉强。

(3) 中文书籍有限。目前,国内讲述 TI 公司的 DSP 芯片开发方面的书,多以翻译技术资料为主,这些书籍对 DSP 技术的应用、普及起到了积极作用。由于处于国内 DSP 开发应用的初期及各种客观条件的限制,这些图书仅含有少部分的开发经验和体会,只给读者展现了树木,而没有展现森林,所以在引导初学者看到 DSP 硬件设计、软件编程和开发仿真全貌方面,显得有些欠缺。

(4) 要有单片机等嵌入式系统的开发经验。如果没有单片机等嵌入式系统的开发经验,直接进行 DSP 学习、研究和开发,则显得跨度大,难度大。

(5) 数学和应用领域的知识储备要多。一定要了解本科的电工原理、信号与系统和数字信号处理这 3 门课程的主干内容,并结合工程应用的特定领域(如电机控制),了解相关算法。

在多年的 DSP 开发实践中,作者先阅读中文书籍,后阅读英文技术资料,并以 TI 英文技术资料为主。在编程调试时,作者总是在思考软件工程中的几个模块是怎样有机地结合在一起的,什么是初学者感到困惑的,什么是开发人员应该知道的,什么是开发人员不知道的。

通过 TI 公司的 C2000、C5000 和 C6000 的学习、研究和实践,作者发现这 3 个系列的软件工程构成是相同的,都是由 cmd 文件、头文件、vector 文件和实时运行库函数组成;中断的软件结构也相同;这些模块及相互关系平时变动很小,复杂的工程都是在此基础上的扩展,这就是软件模板的来由。硬件最小系统实际上也是一个模板。在掌握了软、硬件两个模板后,再进行 DSP 开发工作,一切就变得容易起来。如果一个开发人员完全自主地了解、掌握了类似这两个模板的工作和内容,并亲手做了硬件并调试成功,那么可谓渡过了 DSP 开发的入门阶段。

本书总结、揉合了上述 6 本英文资料中除第⑤项(片内外设)以外的作为 DSP 初学者应掌握的内容,并介绍了自己的开发体会和经验。片内外设是 DSP 开发中的重要内容,由于受时间和篇幅的限制,本书只介绍了片内外设的 I/O 口和事件管理器中的定时器,而 SCI、SPI、CAN、PWM 和 ADC 等没有涉及。同样,受时间和篇幅所限,使用汇编语言采用 DFT 算法计算 220 V 交流电压有效值的实例也未能写入本书。本书具有如下特点:

- 对 DSP240x 开发全过程,从 DSP 内部结构讲起,到软件工程文件组织及代码调试,内容比较完整。读者能够从本书中看到 DSP240x 应用开发的全貌。
- 重点介绍了一个硬件模板和一个软件模板这两个模板及一个最小系统和一个典型系统这两个实例。
- 加强汇编语言的讲述。没有采用汇编指令一条条讲的机械方式,而是从不同的寻址方式讲述,使读者能较好地理解汇编语言寻址方式这一难点。

讲述汇编语言的第 6 章的后半部分和讲述 FFT 的第 11 章属于中级水平的内容。“第 2 个硬件系统”可以看作是一个小型的 DSK,希望它能对读者有所帮助。

感谢北航出版社在本书早期策划和写作过程中所给予的鼓励和支持,感谢王有绪老师在本书写作过程中所给予的鼓励。在本书写作过程中,同事张永波工程师始终以读者角度对本书内容、实例取舍等方面提出建议,并做了大量具体工作,在此深表谢意。感谢张娜、崔兵兵、刘小刚、韩瑾、刘宏乐为本书文字录入和表格所作的工作,感谢西安美术学院设计系闫贺、周稳定为本书所作的素描插图工作。

由于作者水平有限,且 DSP 是一个范围广大的技术领域,书中错误和疏漏之处在所难免,

## 前 言

欢迎广大读者通过 E-mail: zhaoshilian@sina.com 或网站 <http://www.dspedu.com>, 把意见和建议告诉作者。作者希望与各位读者交流 DSP 开发的经验和体会, 共同进步。对于想通过硬件进一步调试本书程序的读者, 也可通过上面提供的网站查询硬件邮购信息。

作 者

2007 年 3 月于西安



# 目 录

## 第 1 章 DSP 芯片基本结构与特点

1.1 DSP 简介 .....	1
1.1.1 什么是 DSP? .....	1
1.1.2 为什么要使用 DSP? .....	2
1.1.3 DSP 芯片的发展简史 .....	2
1.2 DSP 芯片基本结构 .....	3
1.2.1 DSP 算法特点 .....	3
1.2.2 实时处理 .....	4
1.2.3 DSP 芯片的结构特征 .....	5
1.2.4 DSP 与 MCU、通用处理器、FPGA 三者的比较 .....	7
1.3 TMS320 系列 DSP 产品介绍 .....	8
1.3.1 C2000 系列 .....	8
1.3.2 C5000 系列 .....	8
1.3.3 C6000 系列 .....	9

## 第 2 章 DSP2407 引脚与内部结构

2.1 DSP2407 引脚定义 .....	10
2.2 DSP2407 的内部结构 .....	18
2.2.1 DSP2407 内部包含哪些部分 .....	18
2.2.2 DSP2407 的体系结构 .....	18
2.3 CPU 结构 .....	20
2.3.1 CPU 组成框图 .....	20
2.3.2 乘法器 .....	23
2.3.3 中央算术逻辑部分 .....	23
2.3.4 辅助寄存器算术单元 .....	25
2.3.5 状态寄存器 .....	25
2.4 存储器及存储空间配置 .....	27
2.4.1 片内存储器的种类 .....	27
2.4.2 程序存储器 .....	28
2.4.3 数据存储器 .....	30
2.4.4 I/O 口 .....	31

## 第 3 章 系统配置和中断——全局控制

3.1 系统配置寄存器 .....	33
-------------------	----

3.1.1	系统控制和状态寄存器 1 .....	33
3.1.2	系统控制和状态寄存器 2 .....	34
3.2	DSP2407 中断组织和结构 .....	35
3.2.1	DSP2407 中断概述——两层结构 .....	35
3.2.2	DSP2407 内核级中断 .....	36
3.2.3	DSP2407 外设级中断 .....	38
3.2.4	中断优先级和中断向量总表 .....	39
3.2.5	假中断向量 .....	41
3.3	DSP2407 中断寄存器 .....	42
3.3.1	中断标志寄存器 .....	42
3.3.2	中断屏蔽寄存器 .....	43
3.4	外设中断向量寄存器 .....	44
3.5	外部中断控制寄存器 .....	45
3.5.1	外部中断 1 控制寄存器 .....	45
3.5.2	外部中断 2 控制寄存器 .....	46
<b>第 4 章 DSP2407 最小硬件系统设计</b>		
4.1	DSP2407 最小系统电源设计 .....	49
4.1.1	DSP2407 最小系统电源种类和要求 .....	49
4.1.2	DSP2407 最小硬件系统电源解决方案 .....	49
4.2	晶体振荡器电路 .....	50
4.2.1	PLL 滤波电路 .....	50
4.2.2	晶振电路 .....	51
4.3	JTAG 接口 .....	52
4.3.1	JTAG 标准接口 .....	52
4.3.2	仿真器与 DSP2407 最小系统的连接 .....	52
4.4	片外存储器扩展 .....	53
4.4.1	外部存储器接口 .....	53
4.4.2	DSP 仿真开发状态的特点 .....	54
4.4.3	DSP2407 最小系统外部存储器的设计 .....	55
4.5	最小系统其他引脚的处理和说明 .....	57
4.5.1	DSP 其他功能引脚的处理 .....	57
4.5.2	未用的输入/输出引脚的处理 .....	57
4.5.3	指示灯简要说明 .....	57
4.6	最小硬件系统模板 .....	58
<b>第 5 章 仿真环境建立和工程文件组织</b>		
5.1	硬件仿真开发环境的建立 .....	59
5.1.1	硬件仿真方法简介 .....	59



5.1.2	硬件仿真器连接	60
5.2	软件仿真开发环境——CCS	61
5.2.1	程序开发环境 CCS 及其建立	61
5.2.2	第 1 次启用 CCS 调试最小硬件系统	64
5.2.3	查看、修改 CPU 寄存器和数据空间内容实例	66
5.3	创建我的第 1 个工程	69
5.3.1	创建新工程	69
5.3.2	创建寄存器头文件的实例	70
5.3.3	COFF 目标文件	78
5.3.4	创建 CMD 文件的实例	79
5.3.5	创建中断向量表文件 vector.asm 实例	83
5.3.6	创建最小汇编语言软件工程模板	85
<b>第 6 章 汇编语言——DSP 的灵魂</b>		
6.1	使用汇编语言编写程序的好处	92
6.2	汇编语言初步	93
6.2.1	汇编程序格式	93
6.2.2	第 1 个具有控制功能的汇编程序	94
6.2.3	使 XF 发光二极管 LED 熄灭	96
6.3	控制 XF 引脚 LED 闪烁	97
6.3.1	如何使 XF 的 LED 交替点亮和熄灭	97
6.3.2	用外部信号标志 BIO 控制 LED	99
6.3.3	用汇编指令产生长时间延迟	101
6.4	直接寻址	104
6.4.1	直接寻址基础知识	104
6.4.2	用直接寻址方式在数据存储器与累加器之间搬移数据	106
6.4.3	直接寻址方式数据读/写实例	107
6.5	间接寻址	112
6.5.1	间接寻址方式知识准备	113
6.5.2	间接寻址的使用	113
6.5.3	间接寻址高级内容	117
6.6	常用汇编指令	120
6.6.1	汇编指令分类	120
6.6.2	常用汇编指令详解	126
<b>第 7 章 C 语言——DSP 的快捷工具</b>		
7.1	C 语言概述	194
7.2	C 编译器和 C 代码优化	195
7.2.1	C 编译器特性	195

7.2.2	Shell 程序的作用及使用	196
7.2.3	优化 C 代码	199
7.3	C 程序代码链接	200
7.3.1	C 程序代码链接概述	200
7.3.2	把运行支持库包含到工程文件中	201
7.3.3	指定初始化类型	203
7.3.4	把段分配到物理存储器中	204
7.4	创建 C 语言软件模板实例	206
7.4.1	创建 C 语言寄存器头文件实例	206
7.4.2	创建 main() 函数实例	213
7.4.3	创建 DSP2407 芯片初始化函数实例	214
7.4.4	创建假中断处理函数实例	216
7.4.5	最小 C 语言软件工程模板	216
7.4.6	_c_int0 函数的深入研究	218
7.5	TMS320LF240x 的 C 语言	221
7.5.1	数据类型	221
7.5.2	C 语言标准库函数的使用	222
7.5.3	常用 C 语言标准库函数	224
7.5.4	使用 C 语言标准库函数实例	230
7.6	C 语言和汇编语言混合编程	233
7.6.1	在 C 语言中嵌入单句汇编语言	233
7.6.2	在 C 语言中调用汇编子程序	234
7.7	C 语言中断程序	236
7.7.1	中断处理要点	236
7.7.2	中断函数	236
7.7.3	中断的嵌套	238

## 第 8 章 数字输入/输出(I/O)端口

8.1	数字 I/O 端口概述	239
8.2	数字 I/O 端口结构	240
8.3	数字 I/O 端口控制寄存器	241
8.3.1	I/O 口复用控制寄存器	241
8.3.2	I/O 口数据和方向寄存器	243
8.4	I/O 端口应用编程实例	245
8.4.1	I/O 端口输出编程实例	245
8.4.2	Map 文件的功能和使用实例	249

## 第 9 章 事件管理器

9.1	事件管理器结构和组成	252
-----	------------	-----

9.1.1	事件管理器结构 .....	252
9.1.2	事件管理器引脚 .....	255
9.1.3	事件管理器控制寄存器及其地址 .....	256
9.1.4	功率驱动保护中断 .....	258
9.2	事件管理器中断处理 .....	258
9.2.1	事件管理器中断事件的处理 .....	258
9.2.2	事件管理器中断控制寄存器 .....	262
9.3	通用定时器的工作过程 .....	271
9.3.1	通用定时器的结构和组成 .....	271
9.3.2	定时器控制寄存器 .....	277
9.3.3	通用定时器的工作模式 .....	280
9.4	通用定时器的应用实例 .....	283
9.4.1	通用定时器使用实例 .....	283
9.4.2	中断嵌套实例 .....	288
9.4.3	调用 TI 定点数学库开方函数实例 .....	294
9.4.4	自测程序代码执行时间实例 .....	296
 <b>第 10 章 A/D 转换——第 2 个硬件系统</b>		
10.1	A/D 转换芯片 AD7865 简介 .....	302
10.1.1	AD7865 简述 .....	302
10.1.2	AD7865 引脚定义 .....	303
10.2	第 2 个硬件系统的硬件和软件设计 .....	305
10.2.1	A/D 转换芯片的选择 .....	305
10.2.2	硬件设计 .....	305
10.2.3	软件设计 .....	309
10.3	220 V 电压采样实例 .....	309
10.3.1	访问 I/O 口空间 .....	310
10.3.2	220 V 电压采样实例 .....	310
10.4	220 V 电压有效值计算实例 .....	318
10.4.1	利用 DFT 算法计算 220 V 电压有效值实例 .....	318
10.4.2	利用时域算法计算 220 V 电压有效值实例 .....	326
 <b>第 11 章 快速傅里叶变换 FFT</b>		
11.1	FFT 的基本原理 .....	330
11.1.1	离散傅里叶变换 DFT .....	330
11.1.2	FFT 算法的导出 .....	331
11.2	FFT 库 .....	333
11.2.1	FFT 库简介 .....	334
11.2.2	FFT32C 计算模块介绍 .....	336

---

11.3	32 点 FFT 计算实例 .....	338
11.3.1	伪指令 #pragma 的用法 .....	339
11.3.2	32 点 FFT 计算实例 .....	339
<b>第 12 章 C2000 DSP 芯片的发展与比较</b>		
12.1	C24xx 系列芯片的发展与比较 .....	361
12.1.1	C2000 系列芯片的发展简史 .....	361
12.1.2	C24xx 系列芯片的比较 .....	361
12.2	TMS320X281x DSP 系列性能简介 .....	362
12.2.1	F/C281x 系列功能简介 .....	362
12.2.2	F/C281x 系列 DSP 的性能 .....	363
12.2.3	F/C281x 与 C240x 内核的比较 .....	365
12.2.4	C240x 汇编代码向 F/C281x 的移植 .....	365
<b>第 13 章 世界向数字化方向发展</b>		
13.1	集成电路在 TI 公司的发明 .....	367
13.2	数字技术创造未来 .....	368
<b>参考文献</b> .....		371



## {第1章}

# DSP 芯片基本结构与特点

---

处于全球 DSP 技术领先地位的德克萨斯仪器公司(Texas Instrument)位于德州东部的达拉斯城。TI 公司 1930 年成立时名为“地球物理勘探服务公司(Geophysical Service Inc)”,从事石油勘探。1951 年改名为 TI 公司,转向现代电子技术。今天,它为全球提供多个系列的 DSP 芯片,是 DSP 市场占有率最大的公司。


本书重点学习、研究 TI 公司生产的 DSP240x 芯片系列,通过设计两个 DSP2407 硬件系统及编写软件,感受 DSP240x 的功能和特点,并研究 DSP240x 系列的原理和结构,体验软硬件开发全过程。通过本书的学习和实验,使读者掌握 DSP240x 的软件模板和硬件模板,为工程应用打下一个良好的基础。

## 1.1 DSP 简介

### 1.1.1 什么是 DSP?

DSP 有两种解释:一种是 Digital Signal Processor,指的是数字信号处理器,也称数字信号处理芯片;另一种是 Digital Signal Processing,指的是数字信号处理技术。

从 20 世纪 60 年代数字信号处理理论的崛起,到 20 世纪 80 年代数字信号处理器的产生,DSP 芯片和技术飞速发展。今天,数字信号处理器已广泛应用在社会各领域,工作中常见的应用有传真机、调制/解调器、磁盘驱动器和电机控制等;而数码相机、MP3 和手机等都是日常生活中 DSP 的典型应用。我们会发现,有的人在健身中心跑步机上慢跑时,听着 MP3 中的音乐;有的人在走路时,听着 MP4 中的英语。我们高兴地看到,电子技术,包括 DSP 正在影响和改变着人们的生活方式。



本书主要讲述 TI 公司 TMS320X240x DSP 系列芯片的原理、内部结构和开发过程。其中 X 代表 LC 或 LF, 分别对应低电压 CMOS 和片内 Flash 两种芯片类型。数字信号处理芯片与数字信号处理理论、算法是密切相关的, 在某种意义上说是一个整体。因此, 本书在讨论 DSP 芯片时, 也会涉及一些数字信号处理技术的基本原理和方法。

## 1.1.2 为什么要使用 DSP?

传统的信号处理是用电阻、电容、电感、二极管和三极管这样的分立模拟元件完成的, 在模拟电路中, 不能完全消除和根除误差。鉴于此, 人们只好允许、默许一定的误差。这些误差随元件的物理特性、温度和机械振动而变化, 随时影响模拟电路的性能。而在数字信号处理中, 1、0 是以电路中的电压状态(或称逻辑电平)表示, 1 就是 1, 0 就是 0, 实时运行和数据存储时不存在误差, 而且数字电路工作起来稳定、可靠。此外, 随着 VLSI(超大规模集成)的进步、发展, 实时信号处理已发展到了新的水平, 使得原来在模拟电路中不可能的事情也成为可能, 如线性相位滤波器和自适应滤波等。

使用 DSP, 在设计和生产中, 应用系统的性能调整、改变和升级都体现在软件上, 非常容易实现。DSP 彻底根除了温度对系统的误差影响, 缩短了开发时间, 降低了成本和功耗。

作者近期用 TMS320LF2407A 开发的两个电力系统继电保护装置, 其硬件结构和电路组成基本相同, 但配以不同功能的软件, 就构成了可以完成不同功能的两种设备。这是数字系统的优点, 也是人们偏爱数字系统的原因之一。

模拟电路的第 1 个优点是不需要进行 A/D 转换, 没有 A/D 转换所需的时延; 第 2 个优点是信号的处理和加工几乎是即时的, 在这一点上, 数字电路是不可与之相比的。模拟电路在人类感观和工业控制要求的误差许可前提下, 解决大量工农业和人们日常生活中的实际问题。数字电路可以使语音、图像质量提高到一个新的高度, 并使工业控制更加容易和精确。这里给出一个粗浅的比喻, 模拟电路好似定性的处理, 而数字电路是定量的处理。对于数字系统, 一旦现实中的模拟量经 A/D 转换成数字量后, 一切处理在数量和过程上都是可控的。马克思说过这样的话: “一切分析, 当从定性过渡到定量时, 才是精确的。”

目前, 国内数字电视正在研究和普及中, 而固定电话仍是模拟的。数字电视、数字电话的实现, 将会使人们的生活更精彩。

## 1.1.3 DSP 芯片的发展简史

1979 年, 美国 Intel 公司发布了商用可编程器件 2920, 这可看作商用 DSP 芯片的开端。这一芯片内部还没有现代 DSP 芯片所必需的单周期硬件乘法器。但是, 这一 42 脚的双列直插式芯片内含了一个完整的数字信号处理器。它可与芯片外的、处于印刷电路板上的程序 EPROM、数据 RAM 及 A/D 和 D/A 转换器配合工作。它的指令集足够强大, 使其能够在当时完成一个 1200 b/s 全双工 Modem 的工作, 其中包括发送和接收的滤波工作。

DSP 芯片应用的另一个开端是 TI 公司于 1982 年发布的 TMS32010 系列芯片。之后, TI 公司相继推出了第 2 代 DSP 芯片 TMS32020 和 TMS320C25/C26/C28、第 3 代 DSP 芯片 TMS320C30/C31/C32、第 4 代 DSP 芯片 TMS320C40/C44、第 5 代 DSP 芯片

TMS320C5x/C54x, 以及目前速度最快的第 6 代 DSP 芯片 TMS320C62x/C67x/C64x 等。TI 公司将目前常用的 DSP 芯片归纳为 3 大系列, 即 TMS320C2000 系列、TMS320C5000 系列和 TMS320C6000 系列。目前, 第 1 代 DSP 芯片 TMS32010 和第 4 代 TMS320C40 已不再使用。

1980 年, 日本 NEC 公司推出的  $\mu$ PD7720 是第 1 个具有单周期硬件乘法器的商用 DSP 芯片。

第 1 个采用 CMOS 工艺生产浮点 DSP 芯片的是日本 HITACHI 公司, 它于 1982 年推出了浮点 DSP 芯片。

1983 年, 日本 FUJITSU 公司推出的 MB8764, 其指令周期为 120 ns, 且具有双内部总线, 从而使处理吞吐量产生了一个大的飞跃。

美国模拟器件公司(AD 公司)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、ADSP2111/2115、ADSP2161/2164 和 ADSP2171/2181, 浮点芯片有 ADSP21000/21010 和 ADSP21060/21062 等。

DSP 使用、开发方法发展的历史又是怎样的呢?

由于开发工具的问题, 所以最初的 DSP 开发非常困难, 要设计并实现一个基于 DSP 的系统是一个专业性很强的工作。TI 公司给 DSP 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, 直至发展为现在针对各个系列的 CCS, 使得 DSP 开发难度大大降低。DSP 开发仿真工具也已由 20 世纪 80 年代末期的 2~3 万元下降到目前的 2 000 元以下, 而 20 世纪 80 年代末期的国内普通工作人员的月工资仅为 200~400 元。正是: “旧时王谢堂前燕, 飞入寻常百姓家”, DSP 已经走下神坛, 为大众服务。

DSP 芯片的诞生, DSP 芯片的飞速发展, DSP 系统新的设计理念、集成手段、开发方法的形成和发展, 以及 TI 公司新的可工作在 1000 MHz 的 TMS320C6416 芯片和利用 64x 芯片的达芬奇视频方案, 这一切构成了一个范围广泛的研究、应用领域。我们相信, 研究、掌握、应用 DSP 技术, 将是一项重要而引人入胜的工作。

## 1.2 DSP 芯片基本结构

DSP 芯片的结构特征依赖于 DSP 芯片所要完成的任务。下面从 DSP 算法特点讲起。

### 1.2.1 DSP 算法特点

数字信号处理任务通常需要完成大量的计算, 这些计算任务尽管各异, 但可归纳为两类: 一类是用于频谱分析的 DFT; 另一类是滤波算法 FIR。表 1-1 列出了常用(或说经典)的 DSP 算法, 它几乎包含了 DSP 算法的所有种类。

不难看出, 以上算法有两个共同特点: 一是都含有系数和信号的相乘, 如  $a_k \times x(n-k)$ ; 二是都含有累加运算, 即  $\sum_{k=0}^M$ 。把具有以上两个特点的这一运算称为“乘加和”(或“乘累加”)。

表 1-1 常用 DSP 算法

算 法	公 式
有限冲激响应滤波器	$y(n) = \sum_{k=0}^M a_k x(n-k)$
无限冲激响应滤波器	$y(n) = \sum_{k=0}^M a_k x(n-k) + \sum_{k=1}^N b_k y(n-k)$
卷积	$y(n) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$
离散傅里叶变换	$X(k) = \sum_{n=0}^N x(n)\exp[-j(2\pi/N)nk]$
离散余弦变换	$F(u) = \sum_{x=0}^{N-1} c(u) \cdot f(x) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2N}u(2x+1)\right]$

在电力系统继电保护装置开发过程中,先对工频电流一个完整周波进行 32 点采样,之后采用 5 点差分滤波对输入信号进行处理,其关系式如下:

$$y(k) = y(k) - y(k-5)$$

5 点差分滤波属于表 1-1 所列算法中的“有限冲激响应滤波器”。其中,  $M=5$ ,  $a_0=1$ ,  $a_1=a_2=a_3=a_4=0$ ,  $a_5=-1$ 。通过这一运算后,剔除了输入信号中的直流分量;同时,由于滤波,使输入信号振幅缩小为原振幅的 0.94279 倍。

5 点差分滤波后,采用 DFT 计算电压和电流有效值。它正是表 1-1 所列算法中的“离散傅里叶变换(DFT)”。对于 32 点 DFT 算法,由傅里叶级数展开得到 1 次谐波系数为

$$a_1 = \frac{2}{32} \sum_{k=1}^{31} x(k) \sin\left(\frac{2\pi k}{32}\right)$$

$$b_1 = \frac{1}{32} \left[ 2x(0) + 2 \sum_{k=1}^{31} x(k) \cos\left(\frac{2\pi k}{32}\right) \right]$$

$a_1$  和  $b_1$  分别为 1 次谐波的余弦系数和正弦系数;  $a_1$  和  $b_1$  平方求和后再开方,即可得信号振幅值;再乘以 0.707,可得其有效值。

5 点差分滤波和离散傅里叶变换 DFT 是典型的 DSP 算法,它们虽然简单,但可以展示 DSP 程序完成的任务和 DSP 运算特点。

## 1.2.2 实时处理

DSP 芯片所要完成任务的第 1 个特点是需要完成大量的计算,这会涉及到算法;第 2 个特点是速度要足够快,以达到实时处理。

实时(Real-time)处理是指系统必须在有限的时间内对外部输入的信号完成指定的处理,



即信号处理的速度必须大于输入信号更新的速度；或者说，数字信号处理与信号的输入和输出保持同步。而非实时(Non Real-time)处理是指先对信号进行采样并存储，然后再对其进行处理。

如果对一个音频信号用 40 kHz 时钟进行采样，并假设采样数据为 16 位，那么这个信号的数据率就是 80 KB/s，对实时处理速度的要求则只要大于或等于 80 KB/s 即可。而对于一个  $(512 \times 512 \times 16)$  位/帧、30 帧/s 的图像信号，其数据率是 15.7 MB/s，因而对实时处理速度的要求就是大于或等于 15.7 MB/s。

下面从 DSP 的具体操作方面来考虑实时性。例如一个音频应用系统，采样率仍为 40 kHz，其对应的采样间隔为  $25 \mu\text{s}$ 。假定采用 DSP2407 芯片，主频工作在 40 MHz (CPU 一个机器周期为 25 ns)，需要 760 条指令能完成该音频系统的处理任务。由于  $25 \text{ ns} \times 760 = 19 \mu\text{s}$ ，所以在每一个采样间隔  $25 \mu\text{s}$  内都能完成一次处理任务；也就是说，完成了实时音频信号处理。这是因为等待时间满足了大于或等于 0 这个条件，如图 1-1 所示。

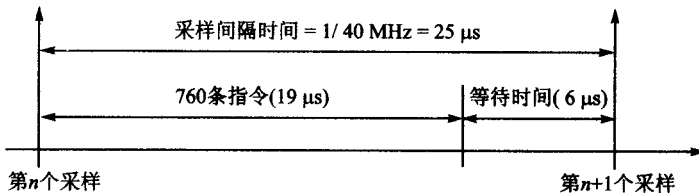


图 1-1 实时的定义

提高实时性的主要方法之一是提高 DSP 芯片主频。TI 公司的各系列芯片都在努力提高工作频率，目前，最新的 28x 系列芯片可工作在 150 MHz，常用的 64x 系列芯片可工作在 1000 MHz。高速已成为 DSP 芯片的特征之一。

目前，在极高频率的电子装置或系统中不能采用数字信号处理的原因有两个：一是 A/D 转换器的速度不能达到足够快；二是信号处理任务太复杂，达不到实时的要求。

### 1.2.3 DSP 芯片的结构特征

DSP 芯片在结构上的特征取决于工业控制的需求和 DSP 算法特点。下面以 TI 公司的 DSP 芯片为例，介绍 DSP 芯片的基本结构。

#### 1. 专用硬件乘法器

在通用微处理器中，乘法是由软件实现的。它实际上是由时钟控制的一连串的“移位-加法”操作，乘法操作往往需要 100 个左右的时钟周期。

由以上 DSP 算法特点分析可知，在数字信号处理任务中，包含有大量重复性运算的乘法和加法。因此，为提高运算速度，在 DSP 芯片中专门设计了硬件乘法器 (C6000 系列有 2 个乘法器，其他 DSP 系列有 1 个乘法器)，使得一次甚至两次乘法运算 (对 C6000 而言) 可以在一个单指令周期内完成。

硬件乘法器是 DSP 区别于通用微处理器的一个重要标志。