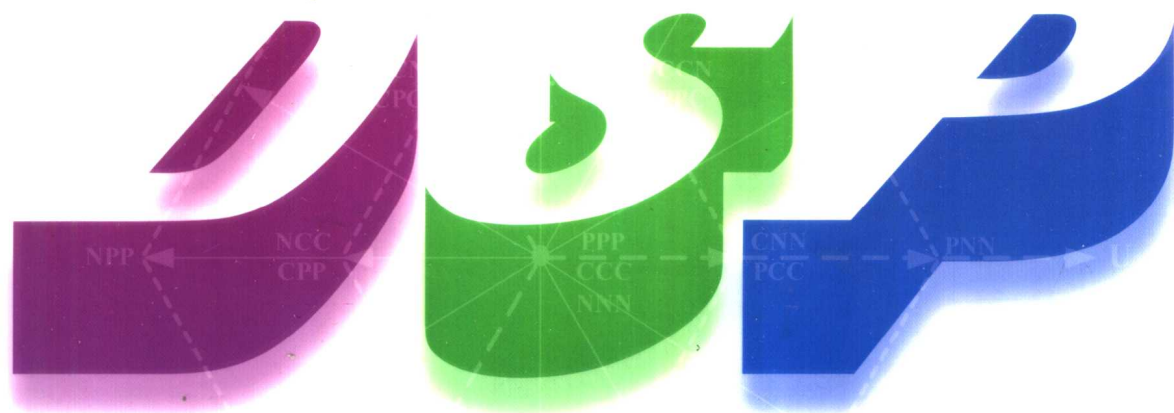


“十一五”高等院校规划教材

DSP 原理 及电机控制系统应用

冬 雷 编著



北京航空航天大学出版社

“十一五”高等院校规划教材

DSP 原理及电机控制系统应用

冬 雷 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以飞思卡尔 56F800E 内核的 DSP 为主,介绍了 DSP 与单片机混合控制芯片的体系架构和基本工作原理,并在此基础上详细介绍了基于 DSP 芯片的电机控制系统的硬件设计和软件设计的基本方法、关键步骤和实现手段。主要内容包括:56F800E 系列 DSP 内核与片内外设的结构和基本工作原理;56F800E 系列 DSP 使用与系统开发方法及软/硬件工具;异步电机、无刷直流电机、永磁同步电机和开关磁阻电机的控制原理及 DSP 控制系统的设计。

本书给出了大量实例和 DSP 软件例程供相关人员参考。书中所有程序均在实际控制中调试通过。本书紧扣实际应用的主题,实用性较强,可作为电机与电器、电气工程与自动化、电力电子与电力传动专业及其他相关专业的高年级本科生和研究生教材,也可作为工程技术人员研究、开发电机 DSP 控制系统的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

DSP 原理及电机控制系统应用/冬雷编著. — 北京:北京航空航天大学出版社, 2007. 6
ISBN 978-7-81124-003-0

I. D… II. 冬… III. ①数字信号—信号处理②电机—控制系统 IV. TN911.72 TM301.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 058387 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内容。
侵权必究。

DSP 原理及电机控制系统应用

冬 雷 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: bhpresse@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:24.5 字数:627 千字

2007 年 6 月第 1 版 2007 年 6 月第 1 次印刷 印数:5 000 册

ISBN 978-7-81124-003-0 定价:36.00 元

前言

电机控制系统的发展历史悠久,其数字化控制更使这一传统技术焕发了青春。数字信号处理器(DSP)的产生和发展,更为焕然一新的全数字化控制技术插上了翅膀,使之实现了腾飞。

本书以飞思卡尔 56F800E 为核心的 56F8300 系列 DSP 为例,在系统介绍 DSP 核心的体系架构及基本工作原理的基础上,重点对 DSP 应用技术进行了较为全面的总结,涵盖了 56F800E 为核心的 DSP 的内核、外设、软件开发环境、软件例程及硬件设计参考等诸多方面。由于 56F8300 系列 DSP 是针对电机、电源控制而设计的,所以该系列芯片许多片内外设的功能设置大大简化了电机控制系统的设计,也使得 DSP 的应用可以更加巧妙。本书详细介绍了 56F8300 系列 DSP 所独有的、针对电机控制所设计的一些模块的功能和应用方法。

目前,电机控制领域从直流逐渐向交流电机控制系统过渡。异步电机(IM)、无刷直流电机(BLDC)、永磁同步电机(PMSM)和开关磁阻电机(SRD)等,随着微电子技术、DSP 技术、电力电子技术以及新的控制理论不断发展,其性能不断提高,应用领域越来越广泛,成本也越来越低。本书在对上述电机工作原理进行了认真分析总结的基础上,结合 56F8300 系列 DSP 的特点,介绍了基于 56F8300 系列 DSP 的全数字化电机控制方法,并给出了详细设计方案和部分软件例程。

本书分为上、下篇:上篇为基础篇,包括第 1~6 章;下篇为应用篇,包括第 7~13 章。

第 1 章,概括介绍了 DSP 的特点及飞思卡尔 DSP 的发展。

第 2 章,详细介绍了 56F800E 系列 DSP 的内核结构和基本工作原理。

第 3 章,详细介绍了 56F800E 系列 DSP 丰富片内外设的工作原理及应用技巧。

第 4 章,介绍了 DSP 的软件开发平台,即 CodeWarrior IDE 和处理器专家(PE)系统。

第 5 章,介绍了 DSP 系统开发过程中非常便利的一个系统工具——“数据观察”。通过该工具可以实时观察 DSP 内部变量的数值变化。

第 6 章,从系统的角度详细介绍了如何利用 DSP 实现数字控制系统应用。其中定点 DSP 的数字定标和标么化系统是提高 DSP 利用效能的一个非常实用的技术。

第 7 章,介绍了基于 DSP 的电机控制系统的通用外围模块设计。

第 8 章,介绍了电机控制常用的 DSP 外围模块的驱动软件设计。

第 9 章,详细介绍了处理器专家(PE)所提供的电机控制应用软件模块,为系统软件开发提供了便利。

第 10~13 章,分别介绍了基于 56F8300 系列 DSP 全数字化的异步电机、无刷直流电机、永磁同步电机和开关磁阻电机的工作原理及系统软/硬件设计。

本书在编写过程中,得到了廖晓钟教授的关心和指导,在此表示诚挚的感谢。高爽、李莉对本书进行了认真的编辑、校对工作,王夕夕、傅申、王雪平、程子玲、刘震、孟博、王丽婕、杨栋、贾菲、阮浩强、杨飞、孙汶、单志林和文丽婷等也为本书的编写做了大量工作,北京航空航天大学出版社为本书出版做了大量细致工作,在此一并表示由衷的感谢。本书的完成得益于飞思卡尔公司的李秀梅工程师和刘海宁工程师的帮助,他们为作者提供了大量的技术资料和技术支持。

本书还得到了飞思卡尔公司大学计划部金功九先生的大力支持和帮助,清华大学邵贝贝教授对本书进行了仔细的审阅,并提出了大量的宝贵意见,在此表示深深的谢意。

由于作者水平有限,加之编写时间仓促,书中难免会有错误和不足之处,敬请读者批评指正。如果读者有什么疑问,请与作者联系: pemc.bit@163.com。作者希望通过大家的帮助对本书不断地完善,而且愿意通过电子邮件将本书中的源代码等资料发送给感兴趣的读者。

作 者

2007 年 5 月

于北京理工大学

目 录

上篇 基础篇

第 1 章 DSP 处理器简介

1.1 DSP 芯片的主要特点	2
1.2 电机控制对 DSP 的要求	5
1.3 飞思卡尔 DSP 简介	6
1.3.1 DSP56800 内核的特点	6
1.3.2 DSP56800E 内核的特点	8
1.3.3 电机控制用 DSP 简介	10
1.3.4 典型飞思卡尔 DSP 的引脚分布及其主要特点	15

第 2 章 DSP56800E 内核的结构

2.1 核心编程模型	25
2.2 双哈佛存储器结构	27
2.3 系统结构与外设接口	28
2.3.1 内核结构	28
2.3.2 地址总线	29
2.3.3 数据总线	30
2.3.4 数据算术逻辑单元(ALU)	30
2.3.5 地址产生单元(AGU)	31
2.3.6 程序控制器与硬件循环单元	31
2.3.7 位操作单元	32
2.3.8 增强型片内仿真单元(增强型 OnCE)	32
2.4 DSP56800E 内核之外的模块	32
2.4.1 程序存储器	33
2.4.2 数据存储器	33
2.4.3 引导存储器	33
2.4.4 外部总线接口	34
2.5 DSP56800E 数据类型	34
2.5.1 数据格式	34

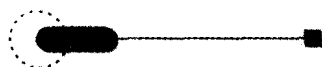
2.5.2 有符号整数	34
2.5.3 无符号整数	35
2.5.4 有符号小数	35
2.5.5 无符号小数	35

第3章 DSP56F8300 DSP 外设

3.1 模/数转换器(ADC)	36
3.1.1 简介	36
3.1.2 特点	36
3.1.3 功能简介	38
3.1.4 输入多路转换器功能	39
3.1.5 ADC 采样转换操作模式	40
3.1.6 ADC 数据处理	41
3.1.7 顺序采样与同时采样	42
3.1.8 扫描顺序	42
3.1.9 低功耗操作模式	43
3.1.10 ADC 停止操作模式	44
3.1.11 校准	45
3.1.12 引脚说明	47
3.1.13 时钟	48
3.1.14 中断	49
3.2 计算机操作正常(COP)模块	49
3.2.1 简介	49
3.2.2 特点	50
3.2.3 功能简介	50
3.2.4 定时规范	51
3.2.5 复位后的 COP	51
3.2.6 中断	51
3.2.7 等待模式操作	51
3.2.8 停止模式操作	51
3.2.9 调试模式操作	52
3.3 外部存储器接口(EMI)	52
3.3.1 简介	52
3.3.2 特点	52
3.3.3 功能简介	52
3.4 片内时钟合成模块(OCCS)	54
3.4.1 简介	54
3.4.2 特点	54
3.4.3 功能简介	55
3.4.4 晶体振荡器	59

3.4.5 张弛振荡器	59
3.4.6 锁相环(PLL)	60
3.4.7 PLL 频率锁相检测器模块	62
3.4.8 参考时钟丢失检测器	62
3.4.9 操作模式	62
3.4.10 晶体振荡器	63
3.4.11 陶瓷振荡器	63
3.4.12 外部时钟源	63
3.4.13 内部时钟源	64
3.4.14 中 断	64
3.5 Flash 存储器(FM)	64
3.5.1 简 介	64
3.5.2 特 点	65
3.5.3 工作原理	65
3.5.4 功能简介	67
3.5.5 中 断	67
3.5.6 复 位	68
3.6 FlexCAN 总线模块(FC)	68
3.6.1 简 介	68
3.6.2 特 点	69
3.6.3 功能简介	70
3.6.4 特殊执行模式	76
3.6.5 中 断	78
3.6.6 复 位	78
3.7 通用输入/输出模块(GPIO)	78
3.7.1 简 介	79
3.7.2 特 点	80
3.7.3 逻辑框图	80
3.7.4 操作模式	80
3.7.5 中 断	81
3.8 能量管理器(PS)	81
3.8.1 简 介	81
3.8.2 特 点	81
3.8.3 功能简介	82
3.9 脉宽调制模块(PWM)	84
3.9.1 简 介	84
3.9.2 特 点	84
3.9.3 功能简介	84
3.9.4 软件输出控制	98
3.9.5 PWM 发生器装载	99

3.9.6 故障保护	103
3.9.7 操作模式	105
3.9.8 引脚说明	105
3.9.9 中 断	106
3.10 正交解码器模块	106
3.10.1 简 介	107
3.10.2 特 点	107
3.10.3 功能简介	107
3.10.4 操作模式	110
3.10.5 引脚说明	110
3.10.6 中 断	111
3.11 串行通信接口模块(SCI)	111
3.11.1 简 介	111
3.11.2 特 点	111
3.11.3 功能简介	113
3.11.4 特殊工作模式	121
3.11.5 中 断	123
3.12 串行外设接口模块(SPI)	124
3.12.1 简 介	124
3.12.2 特 点	125
3.12.3 工作模式	126
3.12.4 引脚说明	128
3.12.5 传输格式	129
3.12.6 传输数据	131
3.12.7 错误产生条件	132
3.12.8 复 位	135
3.12.9 中 断	135
3.13 温度传感器模块	136
3.13.1 简 介	136
3.13.2 特 点	136
3.13.3 功能简介	137
3.13.4 工作模式	138
3.14 正交定时器模块	138
3.14.1 简 介	139
3.14.2 特 点	140
3.14.3 功能简介	140
3.14.4 工作模式	142
3.14.5 中 断	151
3.15 电压调节器	152
3.15.1 简 介	152



3.15.2 特 点	152
3.15.3 功能简介	152
3.15.4 工作模式	153
3.15.5 引脚说明	153
第 4 章 DSP 软件开发平台	
4.1 软件开发平台(IDE)简介	154
4.1.1 CodeWarrior IDE 的组成	154
4.1.2 利用 CodeWarrior IDE 的开发流程	155
4.2 处理器专家接口(PEI)简介	157
4.2.1 PE 特点	157
4.2.2 PE 代码生成	158
4.2.3 PE 嵌入豆	159
4.2.4 处理器专家窗口	160
第 5 章 数据观察	
5.1 启动数据观察	167
5.2 数据目标对话框	168
5.2.1 存储器	168
5.2.2 寄存器	169
5.2.3 变 量	169
5.2.4 HSST	170
5.2.5 图形窗口特性	170
第 6 章 标么值系统与定点数运算	
6.1 整数运算——运算符与表达式	171
6.2 小数运算——定点 DSP 的数字定标与定点小数运算原理	172
6.2.1 数字定标的基本概念	172
6.2.2 定点运算的数字定标	173
6.3 采用固定 Q15 定标的运算规则	177
6.3.1 运算规则	177
6.3.2 软件实现	179
6.4 标么化系统与数字定标	180
6.4.1 标么化系统	180
6.4.2 基于标么化系统的控制器设计	181

下篇 应用篇

第 7 章 DSP 控制系统设计

7.1 控制电路	187
----------	-----

7.1.1 DSP 最小系统	188
7.1.2 DSP 基本外围电路	190
7.2 开关电源	194
7.3 电流与电压检测	196
7.4 键盘显示	196
7.5 控制板的配置与结构	198

第 8 章 电机控制常用驱动模块实现

8.1 利用 PE 快速建立一个工程	199
8.2 GPIO 口应用	204
8.3 模/数转换器应用	208
8.3.1 顺序采样	208
8.3.2 同时采样	213
8.4 PWM 模块应用	215
8.4.1 PWM 输出控制	215
8.4.2 PWM 控制 ADC 同步采样	218
8.5 定时器应用	223
8.5.1 计数模式	223
8.5.2 定时模式	225
8.6 串行通信应用	228

第 9 章 电机控制函数库

9.1 基本函数	232
9.1.1 MCLIB_Sin	232
9.1.2 MCLIB_Cos	233
9.1.3 MCLIB_Sin2	235
9.1.4 MCLIB_Cos2	236
9.1.5 MCLIB_Tan	237
9.1.6 MCLIB_Atan	238
9.1.7 MCLIB_AtanYX	239
9.1.8 MCLIB_Asin	240
9.1.9 MCLIB_Acos	241
9.1.10 MCLIB_Sqrt	242
9.1.11 MCLIB_SetRandSeed16	244
9.1.12 MCLIB_Rand16	244
9.1.13 MCLIB_GetSetSaturationMode	245
9.1.14 MCLIB_InitAtanYXShifted	246
9.1.15 MCLIB_AtanYXShifted	247
9.2 坐标变换函数	249
9.2.1 MCLIB_ClarkTrfm	249

9.2.2	MCLIB_ClarkTrfmInv	250
9.2.3	MCLIB_ParkTrfm	251
9.2.4	MCLIB_ParkTrfmInv	253
9.3	调节器函数	254
9.3.1	MCLIB_ControllerPI	254
9.3.2	MCLIB_ControllerPI2	256
9.4	旋转变压器应用函数	258
9.4.1	MCLIB_InitTrackObsv	258
9.4.2	MCLIB_CalcTrackObsv	259
9.4.3	MCLIB_GetResPosition	264
9.4.4	MCLIB_GetResSpeed	266
9.4.5	MCLIB_GetResRevolutions	267
9.4.6	MCLIB_SetResPosition	269
9.4.7	MCLIB_SetResRevolutions	270
9.5	PWM 调制技术函数	271
9.5.1	MCLIB_SvmStd	271
9.5.2	MCLIB_SvmU0n	273
9.5.3	MCLIB_SvmU7n	275
9.5.4	MCLIB_SvmAlt	277
9.5.5	MCLIB_SvmIct	279
9.5.6	MCLIB_SvmSci	281
9.5.7	MCLIB_ElimDcBusRip	283
9.6	斜坡函数	285

第 10 章 异步电机的 DSP 控制

10.1	异步电机变压变频控制(VVVF)	287
10.1.1	异步电机变压变频控制原理	287
10.1.2	异步电机变压变频控制系统设置	288
10.1.3	软件设计	289
10.2	空间矢量 PWM 调制	291
10.2.1	空间矢量 PWM 调制基本原理	291
10.2.2	空间矢量 PWM 的数字化实现	294
10.2.3	标准空间矢量 PWM 与正弦 PWM 的对比	300
10.3	异步电机矢量控制	301
10.3.1	坐标变换	302
10.3.2	异步电机的动态数学模型	303
10.3.3	转子磁场定向的矢量控制方法	305
10.3.4	调节器设计	310
10.3.5	异步电机矢量控制的 DSP 实现方法	317
10.4	异步电机三电平 SVPWM 控制	322

10.4.1 异步电机三电平逆变器工作原理	322
10.4.2 各个基本矢量作用时间计算方法	325
10.4.3 三电平 SVPWM 控制的 DSP 实现	340

第 11 章 无刷直流电机的 DSP 控制

11.1 无刷直流电机控制原理	352
11.1.1 BLDC 电机模型	353
11.1.2 反电势检测	354
11.1.3 换相操作	355
11.1.4 启动与转子对齐	356
11.1.5 速度控制	357
11.2 无刷直流电机控制 DSP 实现方法	357
11.2.1 系统构成	357
11.2.2 启动控制	358
11.2.3 反电势过零检测与换相控制	359
11.2.4 反电势过零检测 BLDC 控制的嵌入豆	360
11.2.5 系统 DSP 实现	363

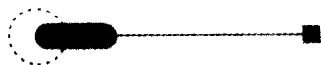
第 12 章 永磁同步电机的 DSP 控制

12.1 PMSM 电机模型	365
12.2 PMSM 矢量控制 DSP 实现方法	366
12.2.1 系统构成	366
12.2.2 软件控制简要说明	367
12.2.3 转子位置与速度检测	368
12.3 控制系统软件模块说明	370

第 13 章 开关磁阻电机的 DSP 控制

13.1 简介	372
13.2 开关磁阻电机系统组成	372
13.3 开关磁阻电机工作原理	373
13.4 开关磁阻电机的控制	374
13.4.1 电压控制	374
13.4.2 电流控制	375
13.5 转子位置检测	376
13.5.1 启动阶段 DSP 软件算法	376
13.5.2 正常换相阶段 DSP 软件算法	378
13.6 基于 DSP 的开关磁阻电机控制	379

参考文献	380
------	-----



上篇

基础篇

- 第 1 章 DSP 处理器简介
- 第 2 章 DSP56800E 内核的结构
- 第 3 章 DSP56F8300 DSP 外设
- 第 4 章 DSP 软件开发平台
- 第 5 章 数据观察
- 第 6 章 标么值系统与定点数运算

第 1 章

DSP 处理器简介

数字信号处理器 DSP(Digital Signal Processor)是指用于数字信号处理的可编程微处理器,是微电子学、数字信号处理和计算机技术这 3 门学科综合研究的成果。为了实现高速的数字信号处理以及实时地进行系统控制,DSP 芯片一般都采用了不同于通用 CPU 和 MCU 的特殊软硬件结构。

1.1 DSP 芯片的主要特点

尽管不同的 DSP 其结构不尽相同,但是在处理器结构、指令系统等方面往往有许多共同点。也就是说,通常的 DSP 芯片都包含以下特点。

1. 哈佛结构和改进的哈佛结构

传统的通用微处理器内部大多采用冯·诺依曼结构(Von Neumann Architecture),其片内程序空间和数据空间共用一个公共的存储空间和单一的地址与数据总线,将指令、数据存储在同一存储器中,并统一编址,依靠指令计数器提供的地址对指令、数据信息进行区分。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,限制了数据运算速度的提高。

为了进一步提高 DSP 的处理速度,现代的 DSP 芯片内部一般都采用哈佛结构(Harvard Architecture)或改进的哈佛结构。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。

2. 流水线技术

计算机在执行一条指令时,总要经过取指令(Fetch)、译码(Decode)、取操作数(Operand)和执行操作(Execute)等几个步骤,需要若干个机器周期才能完成。DSP 芯片广泛采用流水线技术(Pipeline),以减少指令执行时间,从而增强了处理器的处理能力。

流水线操作就是将一条指令的执行分解成多个阶段,在多条指令同时执行过程中,每个指

令的执行阶段可以相互重叠进行。

流水线技术是以哈佛结构和内部多总线结构为基础的。通常,指令重叠数也称为流水线深度,分为 2~6 级不等。

图 1-1 所示为一个 4 级流水线操作的时序图。在该流水线操作中,取指令、译码、取操作数、执行操作可以独立进行,即第 N 条指令在取指阶段时,前面一条指令($N-1$ 条指令)已经执行到了译码阶段,而 $N-2$ 条指令则执行到了取操作数阶段, $N-3$ 条指令到了执行操作阶段。也就是说,在任意给定的周期内,可能有 1~4 条不同的指令是激活的,每一条指令都处于不同的阶段。

另一方面,在执行本条指令时,下面的 3 条指令已依次完成了取操作数、译码、取指令的操作。尽管每一条指令的执行时间仍然是几个机器周期,但由于指令的流水作业,使得每条指令基本上都是单周期指令。衡量 DSP 的速度也经常以单周期指令时间为标准,其倒数就是 MIPS(兆条指令/秒)。

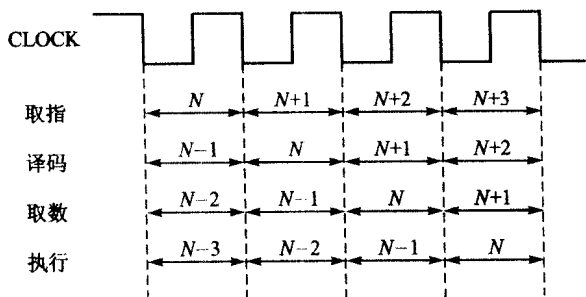


图 1-1 4 级流水线操作的时序图

3. 硬件乘法器和乘加指令 MAC

在数字信号处理的算法中,乘法和累加是基本的、大量的运算。在数字信号处理中,这一类的运算往往要占据 DSP 处理器的绝大部分处理时间。通用计算机的乘法是用软件来实现的,一次乘法往往需要许多个机器周期才能完成。为了提高 DSP 处理器的运算速度,在 DSP 内核中都集成了硬件乘法器,并且设置了 MAC(乘并且累加)一类的指令,可以在单周期内取两个操作数,相乘,并将乘积加到累加器中。整个过程仅需要一个指令周期。通常,定点 DSP 中还会设有输入移位寄存器和输出移位寄存器,以方便运算过程中的数字定标。

4. 特殊的 DSP 指令

在 DSP 中,通常都设有低开销或无开销循环与跳转的硬件支持及快速的中断处理和硬件 I/O 支持,并且设有在单周期内操作的多个硬件地址发生器。由于具有特殊的硬件支持,所以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。这些指令大多是多功能指令,即一条指令可以完成几种不同的操作,或者说一条指令具有几条指令的功能。

5. 丰富的片内外设

DSP 处理器为了自身工作的需要及与外部环境的协调配合,往往都设置了丰富的片内外设(On-Chip Peripherals)。