

DSP原理与应用

——基于TMS320F28075

马俊杰 编著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS

DSP 原理与应用

——基于 TMS320F28075

马俊杰 编著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书以 TMS320F28075 芯片的开发为主线,内容涵盖 CCS6. x 开发环境的搭建与 CMD 文件的编写、存储器的映像、复位及中断系统、系统设计、Flash 编程以及各个外设模块的功能和使用等。每部分内容均结合应用实例,并详细说明开发过程中寄存器的使用,所有代码都标注有详细的中文注释,为读者快速熟悉并掌握这款 DSP 的特点及开发方法提供便利。

本书可作为高等院校电力电子技术、自动化、电子、通信、计算机等专业学生“DSP 原理与应用”相关课程的教学用书,也可作为从事 DSP 开发人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

DSP 原理与应用:基于 TMS320F28075 / 马骏杰编著

—北京:北京航空航天大学出版社,2017.1

ISBN 978-7-5124-2324-4

I. ①D… II. ①马… III. ①数字信号处理②数字信号—微处理器 IV. ①TN911.72②TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 306901 号

版权所有,侵权必究。

DSP 原理与应用——基于 TMS320F28075

马骏杰 编著

责任编辑 董立娟

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京航空航天大学出版社 北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:emsbook@buaacm.com.cn 邮购电话:(010)82316936

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:29 字数:618 千字

2017 年 1 月第 1 版 2017 年 1 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2324-4 定价:65.00 元

前 言

TMS320F28075 采用 C28x CPU 与 CLA 的强大组合,可在混合动力汽车及电动汽车逆变驱动器、汽车雷达、太阳能逆变器、UPS 整流及逆变器、移相全桥及 LLC 数字电源等应用中提升控制任务的执行速度。此外,TMS320F28075 还可提供众多模拟与控制外设,从而实现高集成度的控制应用。F28075 是在 Delfino F2837xS 和 F2837xD 的基础上推出的,由于其性价比高,很快受到了广泛关注。

本书在 TI 数据手册的基础上,对 F28075 的功能特点进行了整理,减少冗余的文字介绍,通过归纳总结图表的方式来解释 F28075 复杂的原理及应用。此外,每部分内容均结合应用实例,所有代码都标注有详细的中文注释,为读者快速熟悉并掌握这款 MCU 提供便利。

全书共有 12 章,完全按照功能进行划分。第 1 章对比了 F28075 与目前主流 C2000 DSP 的特点;第 2 章介绍了其内部结构原理,对 C28x+FPU+TMU+CLA 的特点及应用进行了总结;第 3 章和第 4 章对系统初始化模块和 CCS6.0 进行介绍;第 5 章介绍了 GPIO 的应用,提供了大量例程,重点介绍了 X-Bar 的使用;第 6 章将复位和中断进行整合,将自系统复位直至程序进入中断的整个过程进行了归纳;第 7 章和第 8 章为模拟子系统和控制外设,综合介绍了 ADC、DAC、CMPSS、SDFM、PWM、HRPWM、CAP 等模块的应用,这两章的篇幅较大、提供的例程较多;第 9 章归纳了 CLA 的应用;第 10 章重点讲述了 Flash 的编程及下载;第 11 章为 F28075 片上通信外设的应用,每种通信均配有应用例程;第 12 章为工程应用,介绍了使用 F28075 进行的 PWM 整流器及电机驱动控制器的设计。

本书由哈尔滨理工大学马骏杰统稿,耿新、张思艳、孙轶男、李金佳老师参与编写了第 3 章、第 4 章和第 11 章部分内容。感谢王振东、王苑苑、胡明报、孙维文、邵泽健同学对书中文字及图表格式所做的大量工作,感谢李全利教授、王旭东教授、宋加升教授、高原老师、孙勋成老师、谭新建博士及赵铁老师对本书出版的大力支持,感谢 TI(深圳)工程师提出的宝贵意见,感谢出版社的支持,感谢我的父母、岳父母、妻子给我的关爱,并将此书作为周岁礼物献给宝贝“子越”:尽管未能时时陪伴,但幸运的并未错过你重要的成长瞬间。

此外,本书得到国家自然科学基金项目(51177031)、黑龙江省应用技术与开发计划项目(GA13A202)、全军军事类研究生资助课题(2015JY030)及基于

“互联网+”的《DSP 应用技术》课程建设研究与实践教学改革立项项目(编号 220160012)的资助,受到汽车电子驱动控制与系统集成教育部工程研究中心及中国人民解放军国防大学军事后勤与军事科技装备教研部的大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

作者建立了 DSP 开发者交流群(578603839),相关网站也在建设中,希望广大读者及 DSP 开发爱好者加入,共同讨论,一同进步。由于作者水平有限,本书存在不妥之处,敬请读者提出宝贵的意见和建议。

编 者

2016 年 12 月

目 录

第 1 章 概 述	1
1.1 数字信号处理的概念	1
1.1.1 模拟信号与数字信号	1
1.1.2 信号的处理方式	2
1.2 DSP 芯片的结构特点	3
1.2.1 采用哈佛总线结构	4
1.2.2 采用流水线技术	4
1.2.3 增加硬件功能单元	5
1.3 TI 公司典型 DSP 产品	6
1.3.1 TMS320 系列 DSP 分类	6
1.3.2 TMS320F28x 系列概况	7
1.3.3 F28075 的封装及引脚定义	9
第 2 章 F28075 的结构原理	11
2.1 F28075 的内部结构	11
2.1.1 F28075 的基本组成	11
2.1.2 F28075 的总线结构	13
2.2 F28075 中 CPU 基本结构	14
2.2.1 F28075 的运算执行单元	15
2.2.2 F28075 的寄存器组	17
2.2.3 F28075 的流水线操作	21
2.3 F28075 的存储器配置	23
2.3.1 内部存储器	24
2.3.2 双代码安全模块 DCSM	27
2.3.3 片上外设	35

目 录

2.4	三角数学运算单元 TMU	35
2.4.1	TMU 功能概述	35
2.4.2	TMU 指令解析	36
第 3 章	系统初始化模块	39
3.1	F28075 时钟及控制	39
3.1.1	F28075 时钟的产生	39
3.1.2	F28075 系统时钟的分配	47
3.1.3	F28075 的低功耗模式	49
3.1.4	F28075 的看门狗电路	52
3.1.5	系统初始化综合应用案例	55
3.2	F28075 的 CPU 定时器	58
3.2.1	定时器结构原理	58
3.2.2	定时器中断申请途径	59
3.2.3	定时器寄存器及位域结构体定义	59
3.2.4	定时器应用示例	64
3.3	寄存器的保护功能	65
第 4 章	编程开发环境及程序应用语言	67
4.1	软件开发及 COFF 概念	67
4.1.1	CCSv6 的安装及基本设置	67
4.1.2	CCSv6 调试环境	70
4.2	创建链接器命令文件——CMD	73
4.2.1	CMD 文件概述	73
4.2.2	存储器映射说明及程序段的放置	75
4.3	F28075 的 C 语言编程基础	77
4.3.1	F28075 的 C 语言数据类型	77
4.3.2	C 语言重要的关键字	78
4.3.3	CCS 综合应用——如何创建工程文件	79
第 5 章	F28075 的 GPIO 应用	84
5.1	GPIO 功能结构	84
5.1.1	GPIO 引脚分组及控制	84
5.1.2	GPIO 的输入限定	85
5.1.3	GPIO 寄存器	87
5.1.4	寄存器的位域结构	95

5.1.5	GPIO 特殊功能函数	97
5.2	X-Bar 原理解析	104
5.2.1	输入 X-Bar	104
5.2.2	输出 X-Bar	106
5.3	GPIO 应用例程	110
第 6 章	F28075 的复位及中断系统	116
6.1	复位及程序引导过程	116
6.1.1	F28075 的复位源	116
6.1.2	引导加载程序	116
6.1.3	复位代码流	119
6.2	中断系统的结构	120
6.2.1	F28075 中断管理机制	121
6.2.2	PIE 外设中断扩展模块	126
6.2.3	PIE 初始化及中断响应	135
6.2.4	不可屏蔽中断 NMI 原理解析	137
6.2.5	外部中断	138
6.2.6	应用实例——如何创建中断服务程序	139
第 7 章	F28075 的模拟子系统	142
7.1	数/模转换器 ADC	142
7.1.1	ADC 模块的构成	143
7.1.2	ADC 的触发及转换优先级	146
7.1.3	ADC 后续处理块	150
7.1.4	ADC 的时钟流	152
7.1.5	校准参考及有符号电压处理	153
7.1.6	ADC 相关寄存器	157
7.1.7	ADC 例程分析	166
7.2	比较器子系统 CMPSS	174
7.2.1	CMPSS 概述	174
7.2.2	CMPSS 功能原理	175
7.2.3	CMPSS 相关寄存器	176
7.2.4	CMPSS 应用例程	180
7.3	数/模转换模块 DAC	181
7.3.1	DAC 的功能原理	181
7.3.2	DAC 相关寄存器	182

目 录

7.3.3	DAC 应用例程	183
7.4	Delta - Sigma 滤波器模块 SDFM	187
第 8 章	F28075 片上控制外设	189
8.1	增强型脉宽调制模块 ePWM	189
8.1.1	ePWM 原理概述	189
8.1.2	时间基准子模块原理及应用	191
8.1.3	计数器比较子模块原理及应用	199
8.1.4	动作限定子模块原理及应用	204
8.1.5	ePWM 计算实例——如何产生对称及非对称波形	213
8.1.6	死区控制子模块原理及应用	214
8.1.7	数字比较及触发区子模块的原理及应用	219
8.1.8	事件触发子模块原理及应用	229
8.1.9	ePWM 模块应用实例	232
8.2	高分辨率增强型脉宽调制模块 HRPWM	239
8.2.1	HRPWM 的操作方式	240
8.2.2	高分辨率周期控制	242
8.2.3	HRPWM 模块的寄存器	244
8.2.4	HRPWM 应用实例	247
8.3	增强型捕获模块——eCAP	252
8.3.1	捕获操作模式及 APWM 操作模式	252
8.3.2	eCAP 模块的寄存器	255
8.3.3	eCAP 程序例程	257
第 9 章	控制率加速器 CLA 原理及应用	265
9.1	控制率加速器 CLA 概述	265
9.1.1	CLA 的功能原理	265
9.1.2	CLA 存储器及寄存器访问	267
9.2	CLA 的任务编程	268
9.2.1	什么是 CLA 的任务	268
9.2.2	CLA 的初始化	269
9.2.3	CLA 的编程语言	274
9.3	CLA 的应用实例——浮点 FIR 滤波器设计	279
第 10 章	F28075 系统设计	285
10.1	JTAG 仿真分析	285

10.2	Flash 配置及存储器性能	286
10.3	Flash 编程	290
10.3.1	Flash 编程基础	290
10.3.2	Flash 操作代码分析	292
第 11 章	F28075 片上串行通信单元	297
11.1	串行通信基本概念	297
11.2	SCI 通信模块及应用	298
11.2.1	SCI 基本数据格式	298
11.2.2	SCI 工作原理	300
11.2.3	多重处理器唤醒模式	301
11.2.4	SCI 相关寄存器	302
11.2.5	SCI 应用示例	307
11.3	SPI 通信模块及应用	311
11.3.1	SPI 数据传输原理	312
11.3.2	SPI 相关寄存器	313
11.3.3	SPI 应用实例	318
11.4	I ² C 通信模块及应用	321
11.4.1	I ² C 总线概述	321
11.4.2	I ² C 总线基本原理	322
11.4.3	I ² C 相关寄存器	325
11.4.4	I ² C 应用实例	331
11.5	CAN 通信模块及应用	332
11.5.1	CAN 通信工作原理	333
11.5.2	CAN 模块相关寄存器	336
11.5.3	CAN 应用实例	349
11.6	USB 通信模块概述	358
第 12 章	基于 F28075 的工程应用	360
12.1	电动机的数字控制	360
12.1.1	交流电动机运行原理概述	360
12.1.2	交流电动机控制原理概述	362
12.1.3	3 相电压源逆变器控制原理	365
12.1.4	电机控制器典型系统设计	376
12.1.5	永磁同步电动机直接转矩控制技术研究	378
12.2	基于 DSP 的 PWM 整流器设计	393

目 录

12.2.1	PWM 整流电路拓扑	393
12.2.2	电压型 PWM 整流器的控制方法	399
12.2.3	PWM 整流器的建模及基本特性	400
12.2.4	PWM 整流器的数字化实现方案	404
附录 A	浮点汇编指令	407
附录 B	外设时钟控制寄存器 PCLKCRn(n=0~14)位格式	434
附录 C	PIE 中断向量表存储器定位	435
附录 D	PieVectTableInit 的结构体定义	442
附录 E	正弦数据表(Q15 格式)	448
参考文献		454

第 1 章

概 述

1.1 数字信号处理的概念

数字信号处理是指采用计算机技术,将信号以数字形式表示并处理的理论和方
法。经过多年的发展,数字信号处理已经形成了非常成熟的学科体系,并取得了众多
的研究成果。数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)应用技术的迅速发展
发展,又为数字信号处理方法的完善和推广注入了新的活力。

1.1.1 模拟信号与数字信号

现实生活中存在着各种物理量,如声压、温度及电动机转速等。为了处理方便,
人们通常要将这些物理量使用传感器转换为电压或电流量。在信号处理领域里,信
号可以定义为一个随时间变化的物理量。例如,声压经过麦克风可以转换为电信号。

1. 模拟信号

在幅值上和时间上都是连续变化的信号,我们称之为模拟信号。模拟信号的特
点是幅值和时间均是连续的,在一个时间区域里的任何瞬间都存在确定的值,如图
1.1(a)所示。现实生活中的信号多为模拟信号。

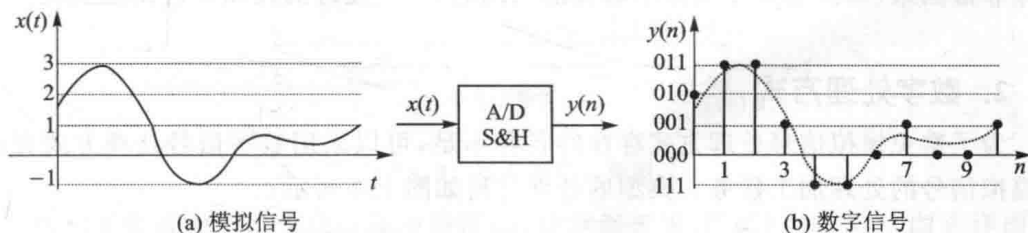


图 1.1 模拟信号到数字信号的转换

2. 数字信号

为了能够用计算机进行处理,模拟信号要经过采样保持和 A/D 转换成为数字信
号。数字信号的特点是幅值为量化的,时间是离散的,如图 1.1(b)所示。图 1.1(b)
中采用 3 位二进制数进行了幅值量化(注:幅值 111 是 -1 的补码)。

1.1.2 信号的处理方式

信号是信息的载体,信息能够反映系统的状态或特征。信号处理的目的是从信号中提取有用的信息并进行预期的各种变换(包括传输及存储)。信号处理主要任务分为两大类:信号频谱分析(提取信号的特征)和滤波器(或控制器)设计。

1. 模拟处理方式

模拟处理电路可以由分立的模拟器件构成,也可以由集成运算放大器构成。

图 1.2 为由模拟集成运算放大器构成的经典 PI 控制器的实际电路。

该电路的输入输出关系如下式:

$$y(t) = K_P x(t) + K_I \int x(t) dt \quad (1.1)$$

式中, $K_P = R_1/W_1$, $K_I = 1/(W_2 + R_3) \cdot C$, 调节 K_P 和 K_I 就可以在一定范围内改变系统的动静态性能。用模拟电路进行信号处理时,系统的精度和可靠性不理想。这是由于控制器的比例、积分和微分系数与阻容器件参数有关。一方面这些模拟器件采用的是器件的标称值(与理论值存在偏差,且参数存在分散性),另一方面模拟器件的参数会随环境温度发生变化。

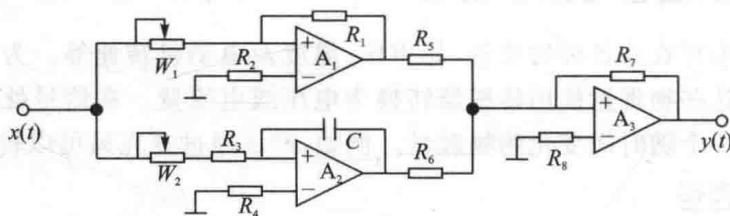


图 1.2 模拟 PI 控制器电路

用模拟电路进行信号处理时,系统的元件参数调试完成后,再想修改系统的控制规律非常困难(即控制规律调整不够灵活);同时,一些先进的控制算法无法实现。

2. 数字处理方式

为了避免模拟信号处理方式存在的各种不足,可以采用数字信号处理方式完成对模拟信号的处理加工任务。典型的处理过程如图 1.3 所示。



图 1.3 模拟信号的数字信号处理方式

模拟信号经过前置滤波器后将信号中的某一频率(采样频率的一半)分量滤除,以防止信号混叠;滤波后的信号经过采样保持和 A/D 转换得到数字信号;数字信号送到数字信号处理器进行运算处理。运算处理算法如下式:

$$y(n) = K_p[x(n) - x(n-1)] + K_i x(n) + y(n-1) \quad (1.2)$$

该公式就是PI控制器增量式控制算法的差分方程,可以用来编写数字信号处理器的控制程序。若想改变控制规律,只须执行相应的算法即可,不用修改系统硬件。

与模拟信号处理相比,数字信号处理没有受到参数变化对系统性能的影响,所以系统的控制精度和可靠性得到了提高,同时处理算法的修改和完善变得非常容易。因此,数字信号处理广泛用于语音处理、图像处理与传输、电机控制、节能电源及消费类产品等诸多领域。

3. 两种处理方式的比较

数字信号处理与模拟信号处理的特点比较如表 1.1 所列。可见,在多数情况下数字信号处理具有较大的优势,只是在信号频率较高或系统在快速性方面要求较为苛刻时模拟信号处理才应该考虑。

表 1.1 数字信号处理与模拟信号处理的特点比较表

比较内容	数字处理	模拟处理
灵活性	好,软件编程改变算法	不好,靠调整硬件实现
可靠性	高,不易受温度和干扰影响	不好,参数随温度及干扰变化
精度	高,DSP 多优于 32 位字长	不好,难以达到 10^{-3} 以上
实时性	差,算法处理需要时间	好,硬件延迟影响很少

1.2 DSP 芯片的结构特点

在对模拟信号进行采样时,相邻两个采样时刻的时间间隔称为采样周期 T_s ,其倒数称为采样率 f_s (单位:采样的点数/秒,与频率具有相同的 Hz 量纲),如图 1.4 所示。

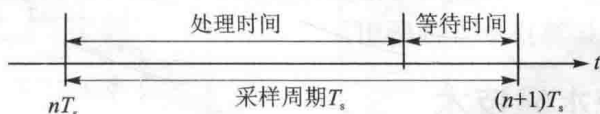


图 1.4 采样周期示意图

要想无失真地获得模拟信号的特征,采样定理要求 $T_s < 1/(2f_{\max})$,即采样周期 T_s 被限定在一定数值之内。这就要求处理器在处理时间内必须完成全部算法和控制程序。

由数字处理方式的输出公式可以看出,PI控制器的输出为有限项的乘积累加和。查阅数字信号处理的相关书籍能够发现,有限冲击响应滤波器(FIR)、无限冲击响应滤波器(IIR)及离散傅里叶变换(DFT)等许多处理算法均由下式的乘积累加形式构成:

$$y = \sum_{i=0}^{N-1} x(i) \cdot a(i) \quad (1.3)$$

数字信号处理的核心部件是数字信号处理器,它是专门针对实现数字信号处理算法而设计的芯片。芯片的结构设计必须采用各种有效的措施,从而加快执行信号处理算法的速度。

1.2.1 采用哈佛总线结构

(1) 冯·诺依曼总线结构

通常的微处理器(如 Intel 的 8086 处理器)采用冯·诺依曼总线结构,指令和数据使用同一存储器,指令和数据分时地经由同一总线(PB&DB)进行传输,如图 1.5 所示。

(2) 哈佛总线结构

DSP 采用哈佛结构,如图 1.6 所示,指令和数据都有各自的存储器和访问总线。取指令经由 PB 总线,访问数据存储器经由 DB 总线(不同时读写)。与冯·诺依曼总线结构相比,取指令和读数据(或写数据)能够同时进行,信息的吞吐能力提高了一倍。

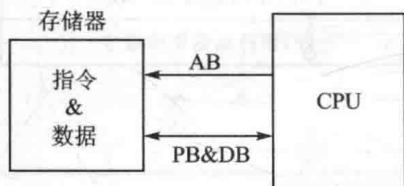


图 1.5 冯·诺依曼总线结构

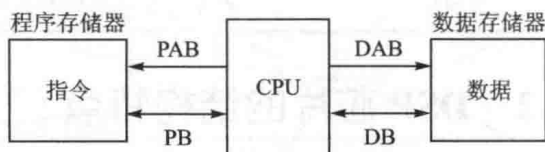


图 1.6 哈佛总线结构

为了进一步提高运行速度和数据访问的灵活性,TMS320F28x 芯片采用了改进的哈佛结构,一方面将数据读总线与数据写总线分开;另一方面还允许数据存放在程序存储器中,被算术运算指令直接使用。

1.2.2 采用流水线技术

源于流水生产线思想,DSP 内部也采用了流水线设计。在工业生产中采用流水线可以有效地提高生产效率,在 DSP 中采用流水线也非常有助于提高 DSP 的工作效率。DSP 采用了哈佛结构,为实施流水线设计提供了条件。可以把 DSP 的指令操作分成 4 个任务阶段:取指(P)、译码(D)、取数(G)和执行(E),如图 1.7 所示。

由图 1.7 可见,从第 4 个时钟周期开始,流水线就已填满,此后的指令均可认为是单周期指令。TMS320F28x 系列 DSP 将指令执行分成 8 个任务阶段:指令地址产生、取指令、指令译码、操作数地址产生、操作数寻址、取操作数、执行指令操作和结果存回。因此,该芯片采用的是 8 级流水线。当流水线填满时,它可以同时执行 8 条指

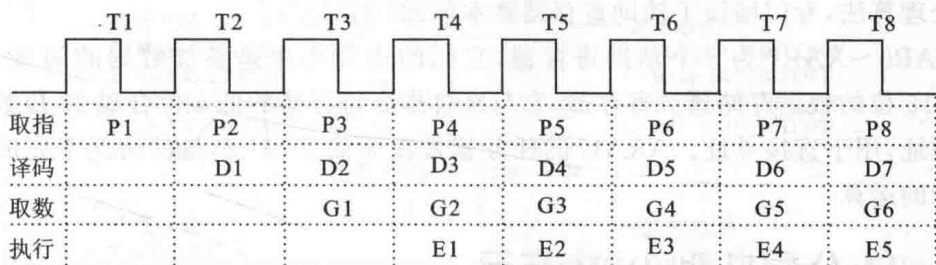


图 1.7 DSP 的 4 级流水线示意图

令,由于每条指令占用 8 个时钟周期,平均每条指令只需要一个时钟周期。

1.2.3 增加硬件功能单元

乘累加算法要求 DSP 必须有极高的速度,从而满足数字信号处理的需求。为达到这一目标,在硬件配置上,DSP 增加了一些独具特色的功能单元:

(1) 设置硬件乘法器

为了减小硬件开销,乘法运算是采用多次进行加法实现的。为了加快乘法累加运算的速度,DSP 中设置了硬件乘法器。TMS320F28x 的乘法器如图 1.8 所示。

该乘法器能够在单周期内完成 32 位 \times 32 位或双 16 位 \times 16 位的乘法。乘积寄存器 P 的内容可以直接送到累加器 ACC 进行累加。乘法和累加能并行地在一个周期内完成。

(2) 增加辅助寄存器算术单元

TMS320F28x 的辅助寄存器算术单元如图 1.9 所示。

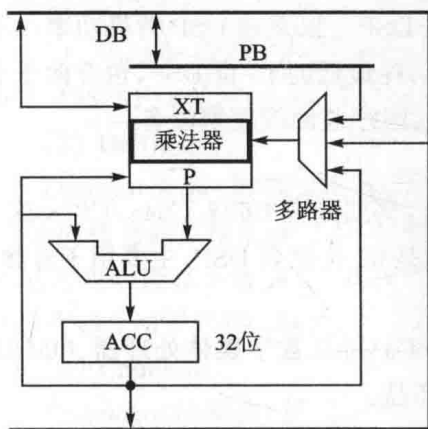


图 1.8 TMS320F28x 的乘法器

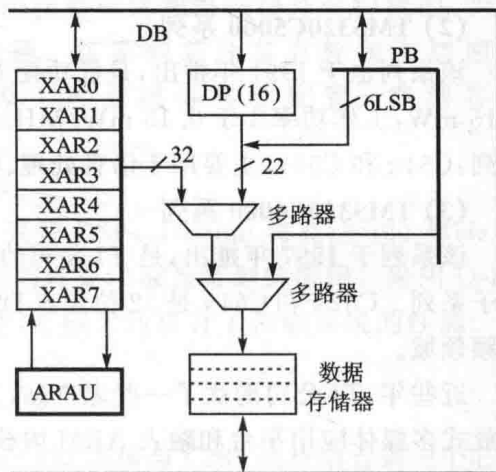


图 1.9 辅助寄存器算术单元

要访问存储器就应该先确定出存储单元的地址,对于通用计算机,存储单元地址的运算是采用算术逻辑单元(ALU)完成的。在 DSP 中,为了使 ALU 能够专心完成

数据处理算法,专门增设了辅助寄存器算术单元(ARAU)。

XAR0~XAR7为8个辅助寄存器,它们的主要作用是参加数据的间接寻址。DP是16位的数据存储器页寄存器,它与来自指令寄存器的低6位合成22位数据存储器地址,用于直接寻址。ARAU的任务就是在无需ALU参与的情况下完成存储器地址的运算。

1.3 TI公司典型DSP产品

1.3.1 TMS320系列DSP分类

TI公司自1982年推出第一代DSP芯片TMS3201x、TMS320C1x系列后,又陆续推出了上百种DSP芯片。这些芯片尽管品种繁多、功能各异,但据面向领域可以分成3大类:C2000系列(实时控制)、C5000系列(低功耗)和C6000系列(高性能)。

(1) TMS320C2000系列

该系列于1991年推出,主要包含两个子系列:C24x和C28x。C24x是16位定点DSP,C28x是32位定点DSP。但基于C28x内核又推出了浮点产品,如TMS320F28075,该系列DSP不但具有DSP内核,而且还具有丰富的用于电机控制的片上外设,从而将高速运算与实时控制融于一个芯片,成为传统单片机的理想替代品。TMS320C2000系列DSP主要用于电机控制、数字电源和再生能源、电动汽车及LED照明等领域。由于C2000系列DSP主要用于控制领域,TI公司目前将该系列DSP芯片归类为DSC(即数字信号控制器)。

(2) TMS320C5000系列

该系列也于1991年推出,是低功耗16位定点DSP。该系列DSP待机功率小于0.15 mW,工作功率小于0.15 mW/MHz,是业界功耗最低的16位DSP,包含两个子系列:C54x和C55x,主要用于语音处理、移动通信、医疗监测等便携设备。

(3) TMS320C6000系列

该系列于1997年推出,是TI公司的高端产品,早期分成C62x/C64x/C67x这3个子系列。C62x和C64x是32位定点DSP,C67x是32位浮点DSP,主要用于音频、视频领域。

近些年,TI公司淘汰了一些老产品,又推出了DaVinci数字媒体处理器、OMAP开放式多媒体应用平台和融入ARM内核的多核产品。

(4) TMS320系列命名方法

TI公司对典型的DSP产品进行了分类命名,如图1.10所示。这种分类方法对了解TI公司的典型产品配置具有一定的帮助。但要经常查看公司的网站,从中了解最新的技术进展和产品信息。