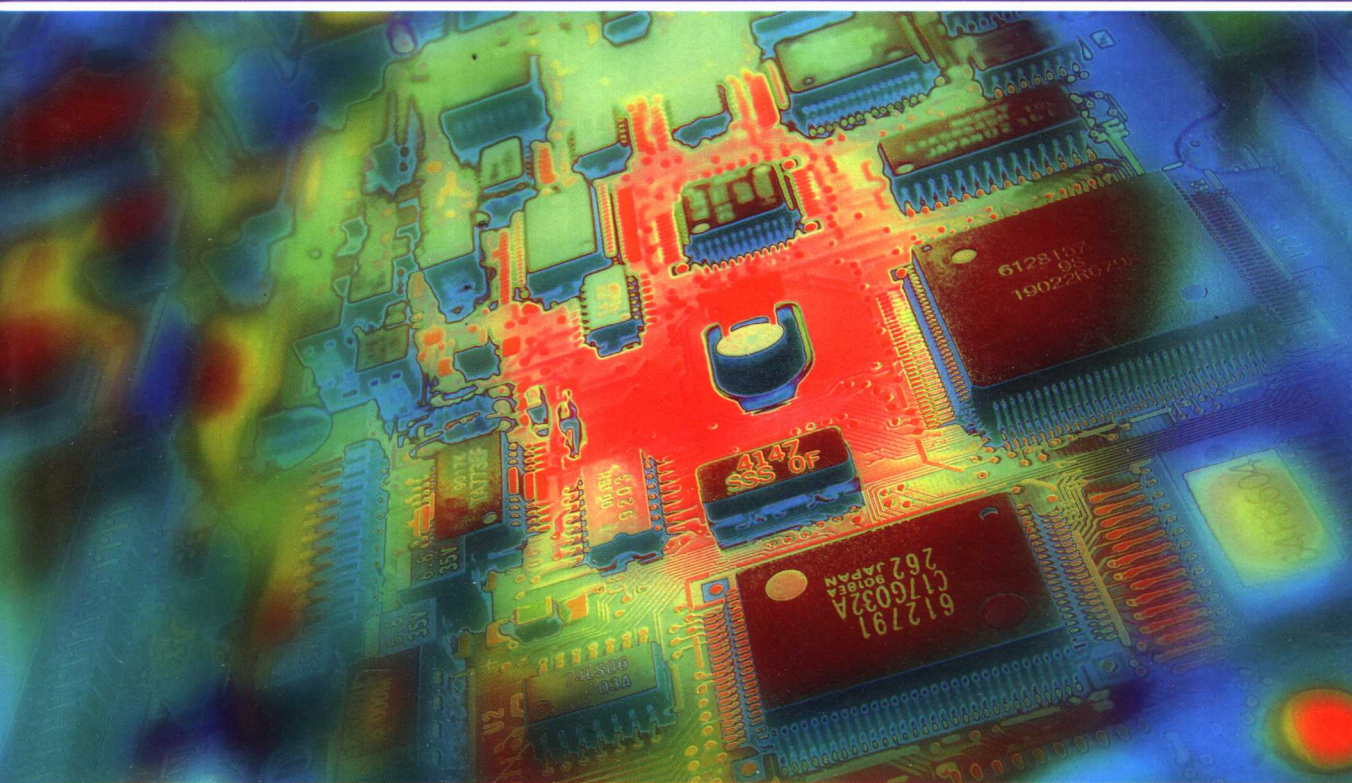


DSP

控制器实用教程

牛小兵 许爱德 王丹 编著



DSP 控制器实用教程

牛小兵 许爱德 王丹 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要以 TMS320LF2407A 为参考,介绍了美国得州仪器 TI 公司的 LF240xA 系列 DSP 芯片应用开发的知识体系,包括 DSP 的基本知识、硬件概况、汇编语言程序设计及 C 语言程序设计、开发环境、内部功能模块及应用等。编写时以应用为主线,注重对背景知识的介绍,并针对重点给出了一定的实例及复习思考题。书末还给出了附录,列举了一些初学者常犯的错误。书中提供的绝大部分程序均已在实验目标板上调试通过。

本书可作为大学自动控制及电气专业本科生和研究生“数字信号处理器原理及应用”课程的教材,也可作为数字信号处理器应用开发人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

DSP 控制器实用教程/牛小兵,许爱德,王丹编著.

北京:国防工业出版社,2007.1

ISBN 7-118-04817-8

I. D... II. ①牛...②许...③王... III. 可编程
程序控制器—教材 IV. TP332.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 121318 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 20 字数 464 千字

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)技术是一门涉及许多学科而又应用于许多领域的技术。自 20 世纪 80 年代以来,随着微电子技术的发展,DSP 芯片应用越来越广泛,已涉及到通信、话音、图像、生物医学、雷达、军事、工业测量和控制等众多领域,而且普及程度不断扩大和加深。DSP 由原来的“贵族”技术日益走向“平民”化,越来越多的人在研究和使用的这一技术。近几年来,DSP 技术在国内成为热门话题之一,国内高等院校都纷纷开设了相应的课程,DSP 相关的书籍也十分热销。在发达国家高等院校,近年来的博士和硕士论文中也经常可见 DSP 的影子。

DSP 从高速的信号处理扩展到传统的单片机控制领域。DSP 芯片的最大厂商无疑是美国的得州仪器公司(TI),其产品 TMS320 家庭主要分 C2000、C5000、C6000 等三大平台,其中 C2000 平台主要面向控制领域,该平台中的 LF2407A 是目前销量最大、性价比最高的主力型号。性能最高是 C28xx 系列。然而在最近几年的面向自动化和电气专业讲授 C2000(主要是 2407A)课程时,无论老师还是学生都遇到一些麻烦。主要原因是 DSP 毕竟属于较新的知识,许多技术资料还没有完全中国化,对其在教学方面的研究还不够。学生学习较困难,原因有多方面,如 DSP 芯片型号多、功能强大、软硬件设置灵活、配置较多、学生背景知识包括计算机和数学乃至工程方面的知识不足等。其中重要的一个原因是适合教学或自学的书籍较少:不少书籍过于技术手册化,对外文资料翻译不准确乃至错误,面向教学的总结加工不足,知识体系也不够全面。写一本面向电气控制和自动化领域、适合教学和自学的基础而实用的 DSP 书籍,这是编写本书的主要目的。

幻想用一本书来解决 DSP 学习中所有问题是不现实的,本书的目的是能让读者迅速地进入到 DSP 世界来,对 DSP 有一定的了解,具有从初级到高级应用 DSP 芯片进行应用编程的能力。有了这个基础后,读者就有能力和信心通过查阅相应的技术资料来解决实际开发应用遇到的问题。对于初学者来说,即使是对同一系列,讲述过多的型号只会增加其学习难度。因此,在大多数情况下,本书只是针对目前最典型、销量最大的 TMS320LF2407A DSP 芯片而言。掌握了这个型号后,根据需要采用同系列其他型号的 DSP 芯片进行应用开发也是很容易的事情。鉴于篇幅所限,也基于目前市场上 DSP 的目标板丰富、LF2407A 单片系统 SOC 的特点、用户在硬件设计方面的工作量可能较少等方面的考虑,本书对有关硬件方面的问题讲述较少,主要立足于应用和编程——这其实也是 DSP 技术的一个特点。

DSP 只是提供了解决实际问题的一种手段、工具,至于如何应用它,则需工程师们在各自的专业领域内各显神通各自发挥了。有了本书的基础,再加之学会使用 TI 公司开发环境的帮助,读者就完全具备 DSP 的应用开发能力。书后的附录还列出了初学者常易

犯的错误,建议读者遇到问题时翻阅一下,则能有所裨益。

本书比较全面和系统地介绍了 DSP 应用开发的问题。全书共分为 9 章,第 1 章介绍了 DSP 的基本概念及 Q 格式;第 2 章介绍 LF2407A 的硬件基本情况;第 3 章讲述 DSP 的汇编语言设计;第 4 章介绍中断系统;第 5 章讲述 C 语言程序设计问题。第 6 章~第 9 章分别讲述了 LF2407A 片内外设的各个模块(数字通用 I/O、事件管理器、A/D 转换器、串行通信)。由于篇幅所限,本书没有讲述 DSP 的 CAN 控制器部分,读者在掌握本书的基础上,了解一些 CAN 的知识,再在 DSP 的 CAN 进行应用编程应是较简单的事情。本书从实用出发,舍弃了一般读者可能用不到的细节问题,避免繁冗。在对 DSP 的片内外设的介绍时,不仅介绍 TI 的外设本身,还注重介绍其基本知识,使之更适合初学者。本书编写过程中对 TI 公司技术资料进行了精心翻译和整理,在力求准确可靠的基础上,注意克服对英文技术说明书翻译时易产生的晦涩难懂的通病,使之更适合中国人的汉语习惯。

牛小兵编写第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 5 章和第 9 章,许爱德编写第 6 章~第 8 章,王丹教授编写第 3 章。编写过程中得到樊印海教授的帮助,他审阅了全书并提出不少宝贵意见。研究生彭周华、王鑫鑫为文字录入做了部分工作。在编写过程中还得到 TI 中国工程师的帮助,在此向他们表示感谢。全书由牛小兵负责统稿。

虽然本书的初衷是为初学者准备的,但作者除了参考 TI 公司的诸多技术资料外,也翻阅过国内诸多类似书籍,注意吸取它们的优点。因此即使已经入门的读者,阅读本书肯定有不少收获。本书的读者应具有微机原理、C 语言等基础知识。

作者努力地想编好这本书,为防止错误花费了大量心血。由于水平和时间所限,失误在所难免,敬请广大读者不吝赐教,以便更好地为大家服务。作者 E-mail: emtf@new-mail.dlmu.edu.cn.。

编著者

2006 年 8 月

于大连海事大学

目 录

第 1 章 基本知识	1
1.1 DSP 芯片的历史	1
1.2 DSP 芯片特点及应用	2
1.3 TI 公司的 DSP 家族	4
1.4 数的定标及 Q 格式运算	5
思考题	8
第 2 章 TMS320LF2407A 的硬件资源	9
2.1 芯片概览	9
2.2 引脚功能	10
2.3 LF2407A 的 CPU 功能模块	16
2.4 存储器与 I/O 空间	25
2.5 系统配置	32
2.6 时钟和低功耗模式	34
2.7 看门狗(WD)定时器	36
思考题	40
第 3 章 汇编程序设计	42
3.1 寻址方式	42
3.2 指令系统	46
3.3 COFF 文件格式	99
3.4 汇编语言语法及伪指令	110
3.5 集成开发环境	120
3.6 汇编程序应用实例	125
思考题	129
第 4 章 中断结构	130
4.1 LF240x 的中断源	130
4.2 中断层次	133
4.3 LF2407A 的中断优先级和中断向量表	134
4.4 外设中断扩展控制器	134
4.5 中断管理寄存器	136
4.6 DSP 中断响应流程	140
4.7 中断服务程序的软件结构及示例	142

思考题.....	144
第5章 C语言程序设计	145
5.1 C语言的编程步骤	145
5.2 C语言下的CMD文件	146
5.3 LF240x的C语言	148
5.4 C语言和汇编语言的混合编程	152
5.5 C语言运行环境和支持库	158
思考题.....	162
第6章 数字I/O端口	163
6.1 数字I/O端口概述	163
6.2 数字I/O端口寄存器	163
6.3 数字I/O端口的配置	171
6.4 数字I/O端口应用实例	173
第7章 事件管理器模块(EV)	176
7.1 事件管理器模块概述	176
7.2 通用定时器	197
7.3 比较单元	214
7.4 捕获单元	232
7.5 正交编码脉冲电路	239
7.6 事件管理器应用实例	242
第8章 模数转换(ADC)模块	252
8.1 ADC模块概述	252
8.2 ADC模块的寄存器	253
8.3 自动排序器的工作原理	264
8.4 ADC时钟预定标	273
8.5 ADC时钟周期	273
8.6 ADC应用举例	274
第9章 串行通信模块SCI和SPI	277
9.1 串行通信的基本知识	277
9.2 串行通信接口SCI	279
9.3 串行外设接口SPI	298
附录	313
参考文献	314

第1章 基本知识

1.1 DSP 芯片的历史

电子计算机是上世纪人类最伟大的发明之一。自从 1946 年第一台电子计算机诞生以来,计算机的发展日新月异。短短几十年间,已由电子管数字计算机发展到今天的超大规模集成电路计算机。计算机一方面朝着高速、智能化的超级巨型机方向发展,另一方面也朝着微型机的方向发展。

微型计算机发展使得计算机日益普及,许多原先只能是少数专门人才才有机会接触的计算机技术变得不再神秘,它已应用到我们当今世界的各个方面,充斥着我们的日常生活。随着微电子技术的发展,当今微型计算机技术的发展也形成了多个分支,其中数字信号处理器是其中的重要分支之一。

数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)是具有特殊结构,能快速进行数字信号处理运算的微处理器。实现快速数字信号处理的途径有很多种,如在通用微型机上用软件或加速卡、用 FPGA 等可编程阵列、DSP 芯片等,它们有各自的优缺点。DSP 芯片的出现使得数字信号处理从理论研究走到广泛的实际应用上来,并且推动了新的理论和应用领域的发展。DSP 芯片的诞生和发展对近 20 多年来通信、计算机、控制、测量等领域的技术发展起到了十分重要的作用。

世界上第一个单片微型 DSP 芯片是 1978 年 AMI 公司发布的 S2811,1979 年 Intel 公司发布的商用 2920 是 DSP 芯片的一个主要里程碑。但这两种 DSP 芯片都没有现代 DSP 芯片所必需的单周期乘法器。1980 年,日本 NEC 公司推出的 μ PD7720 是第一个具有乘法器的商用 DSP 芯片。而此后由美国得州仪器公司推出的一系列 DSP 芯片则是最成功的 DSP 芯片,它们占据了目前 DSP 芯片市场约半壁江山。同时代,世界上其他多家大公司也纷纷推出了自己的 DSP 芯片。由于集成电路技术的发展和巨大的市场需求,目前 DSP 芯片的价格越来越低,性价比越来越高,具有巨大的应用潜力。

DSP 芯片技术的发展,也有不同方向的分支,如有专作 FFT 运算、专作卷积运算的专用 DSP 芯片,也有通用可编程的 DSP 芯片。在面向控制领域,除了较强大数据处理功能的 CPU 内核外,通常还在通用 DSP 芯片上集成了众多的外部设备电路,如 AD 转换器、各种功能模块等,以适应 SOC(System On Chip)的需要。目前 DSP 芯片正朝着更快速度、更低功耗、更强功能等方向发展。

应该指出的是,DSP 有两种意思,有时它指数字信号处理技术(Digital Signal Processing),有时指数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)芯片。读者根据上下文,应能明白其具体含义。本书中,大多数情况下,它代表后者。另外,本书主要讨论 TI 公司 TMS320 家族的通用 DSP 芯片。

1.2 DSP 芯片特点及应用

DSP 与 CPU 一起被世界公认为芯片工业的两大核心技术。DSP 区别于一般通用微处理器或单片机,是因为它根据数字信号处理的要求,采用了特殊的软硬件结构。TMS320 系列 DSP 芯片一般具有以下主要特点。

(1) 哈佛结构。哈佛结构的主要特点是将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,每个存储器独立编址,独立访问。与两个存储器相对应的是系统中设置了程序总线和数据总线,因此取指和指令的执行能完全重叠运行,从而使数据的吞吐率提高了 1 倍。相比而言,大多数通用 CPU 所采用的程序和数据存储空间统一的冯·诺依曼结构,将程序和数据存储在同一存储器中,统一编址,依靠指令计数器提供的地址来区分是指令还是数据。取指令和取数据都访问同一存储器,数据吞吐率低。

为了进一步提高运行速度和灵活性,TMS320 系列 DSP 芯片在基本哈佛结构的上作了改进(称之为增强型哈佛结构):一是允许数据存放在程序存储器中,并被算术运算指令直接使用,增强了芯片的灵活性;二是指令存储在高速缓冲器(Cache)中,当执行此指令时,不需要再从存储器中读取指令,节约了一个指令周期的时间。

由图 1.1 可见,DSP 内部是多总线结构,其中地址总线分为三条总线:

- 程序读地址总线(PAB),提供读程序的地址;
- 数据读地址总线(DRAB),提供读数据存储器的地址;
- 数据写地址总线(DWAB),提供写数据存储器的地址。

内部数据总线也对应分为三条总线:

- 程序读数据总线(PRDB),将指令代码中的立即数以及表信息传送到 CPU;

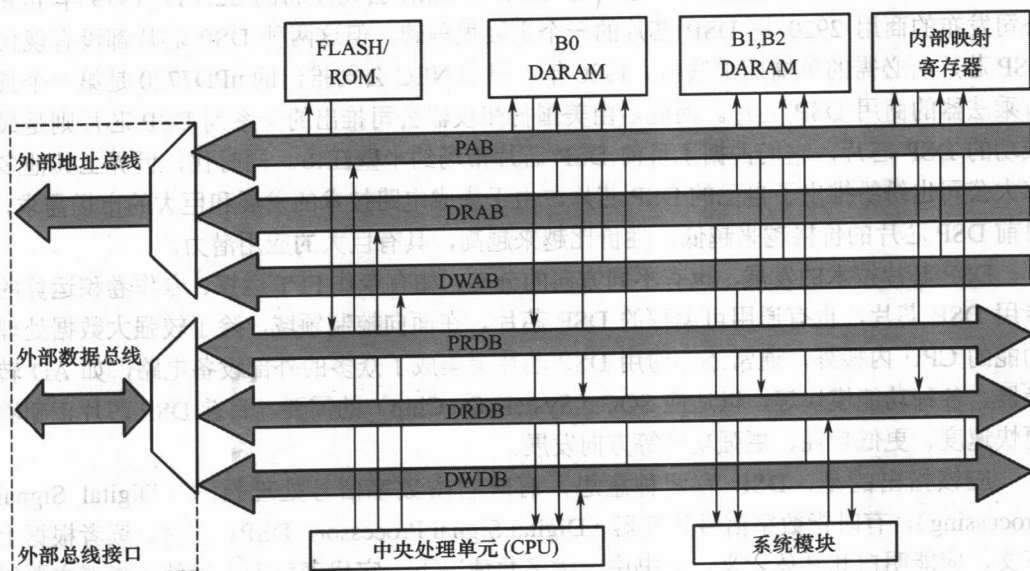


图1.1 DSP内部总线结构图

- 数据读数据总线 (DRDB), 将数据存储器的数据传送到 CPU;
- 数据写数据总线 (DWDB), 将处理后的数据传送到数据存储器或程序存储器。

DSP 内部的总线结构, 是其具有高速数据处理能力的保证之一。而其外部仍采用单一的数据/地址总线。

(2) 流水线操作。流水线与哈佛结构相关。DSP 芯片广泛采用流水线, 处理器可以并行处理 (2~4) 条指令, 这样可以减少指令执行的时间, 从而增强了处理器的处理能力。在某一时刻, 这些指令处于流水线的不同阶段。TMS320LF2407A 的 DSP 指令操作可分成四个阶段: 取指令 (P)、指令译码 (T)、取操作数 (D) 和执行指令 (E)。由于 DSP 控制器采用了多总线结构, 这将允许 CPU 同时进行程序指令和存储数据的访问, 因而在其内部可以实现四级逻辑流水线, 如图 1.2 所示。在某一时刻, 第一条流水线上在做取指令操作时, 第二条流水线可同时进行上一条指令的指令译码的操作, 第三条流水线可同时进行再上一条指令的取操作数的操作, 第四条流水线可同时进行再再上一条指令的执行指令的操作。由于这四种操作在同一时刻是分别使用内部的 6 条总线, 因此不会发生冲突, 就像多辆车在多条道的高速公路上行驶一样, 从而实现了一种并行处理的机制。如果程序是顺序执行的, 就相当于这些指令的执行只需一个周期。

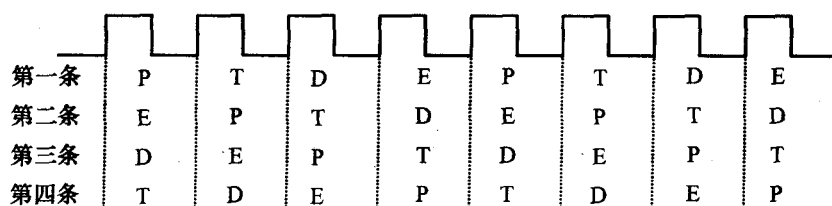


图1.2 四级逻辑流水线

当然, 对于转移、调用和返回指令, 它们会使流水线断开, 因而它们的执行周期要长一些。四级流水对于用户来讲是透明的, 一般情况下不必管它。需特别注意的是, 如果前一条指令执行之前, 后一条指令会修改它使用的资源, 这时就会导致错误的结果。这种情况通常会发生在一些特殊的指令上, 如 NORM 等。因此编程时应注意避免这种情况。在后面讲述汇编指令时, 如果可能发生这种情形时会特别指出。

(3) 专用的硬件乘法器。乘法速度越快, 处理器的性能就越高。DSP 由于具有专用的硬件乘法器, 使得乘法可在一个指令周期内完成, 这比一般的处理器速度快得多。

(4) 特殊的 DSP 指令。DSP 芯片具有特别的适合于数据运算处理的指令, 这一点在学习后面的汇编指令时会体会到。

(5) 快速的指令周期。

(6) 低功耗。随着 DSP 芯片性能的不不断提高和价格的不断下降, DSP 的应用领域几乎遍布了整个电子领域。目前它广泛应用于网络、高速调制解调器、通信、语音识别、消费电子、汽车、磁盘驱动、运动控制系统、数控机床、机器人、工业过程控制和测量、机电一体化、雷达、声呐、生物工程、航空航天、医疗仪器等等诸多领域, 而且应用的广度和深度不断扩大。

1.3 TI 公司的 DSP 家族

目前, TI 公司的 DSP 芯片主要可分为三大主流系列:

(1) TMS320C5000 系列, 包括定点的 C54x、C55x 等, 该系列主要用于便携式无线终端系统的产品, 其提供性能、外围设备、小封装和电源效率的优化组合, 适合便携式上网、语音处理及对功耗有严格要求的地方。

(2) TMS320C6000 系列, 包括定点 C62x、C64x 和浮点的 C67x 等, 该系列性能卓越, 适合宽带网络、影像、雷达等处理应用。

(3) TMS320C2000 系列, 包括 16 位的 C20x、C24x (如 C/F240)、C24xx (如 LF2402、LF2407A 等) 和 32 位的 C28xx (如 LF2812) 等, 该系列主要用于数字控制系统, 其中 C28xx 性能最高, 其 CPU 频率可达 150MHz, 指令周期只有 6.67ns。

C2000 定位于控制领域, 并为此做了优化配置, 集成了大量片内外设, 如 I/O、SCI、SPI、CAN、A/D、PWM 等等, 适合逆变器、电动机、机器人、数控机床、电力等应用。这样 C2000 既能作为高速的微控制器 (MCU) 来控制对象, 也能作为 DSP 来完成高速数字信号处理, DSP 的高性能与通用微控制器的方便性紧密结合在一起, 所以 C2000 也常称为 DSP 控制器。

目前, C24xx 系列芯片中, 根据芯片内是否带 FLASH, 其产品分为 C 和 F 两类, 如 C240 和 F240, F 表示该器件带 FLASH/ROM, 而 C 表示 CMOS 工艺的 ROM, 表示该器件只有 ROM 程序存储器。如果前面有 L, 则表示低功耗电压, 如使用 3.3V 电压。表 1-1 是 C24xx 系列芯片列表。

表1-1 C24xx系列芯片

器件	处理速度 (兆指令/s)	RAM /W	FLASH/ROM /kW	电压 /V	定时器	SPI	SCI	PWM	CAN	A/D 通道/ 转换时间/ μ s	I/O 引脚
LF2407A	40	2.5K	32	3.3	4	Y	Y	16	Y	16/0.375	41
LF2406A	40	2.5K	32	3.3	4	Y	Y	16	Y	16/0.375	41
LF2403A	40	1K	16	3.3	2	Y	Y	8	Y	8/0.375	21
LF2402A	40	1K	8	3.3	2	-	Y	8	-	8/0.375	21
LF2401A	40	1K	8	3.3	2	-	Y	7	-	5/0.5	13
LC2406A	40	2.5K	32	3.3	4	Y	Y	16	Y	16/0.375	41
LC2403A	40	1.5K	16	3.3	4	Y	Y	16	-	16/0.375	41
LC2402A	40	544	6	3.3	2	-	Y	8	-	8/0.425	21
LC2401A	40	1K	8	3.3	2	-	Y	7	-	5/0.5	32
F243	20	544	8	5	2	Y	Y	8	Y	8/0.9	26
F241	20	544	8	5	2	Y	Y	8	-	8/0.9	26
C242	20	544	4	5	2	-	Y	8	-	8/0.9	26
F240	20	544	16	5	3	Y	Y	12	-	16/6.1	28

更多更详细的芯片资料可参考 TI 公司的相关文献或到公司网站 www.ti.com 上查找。应该指出的是,目前 LF2407A 是主流芯片,本书在绝大多数情况下是针对它而言的,不再做特别说明。读者如果掌握了 LF2407A,就能很轻松的学习 C24xx 系列其他芯片进行开发。因为它们的内核是相同的 (C2xx),开发流程和工具相同,只是存储器和外设的配置不同。

LF2407A 在自动化及电动机、电力控制领域应用广泛。LF2407A 芯片具有 32B 字的 FLASH ROM,当用户的程序完成后即可将其固化在片内,使 LF2407A 成为一个控制器。这也是本书称为《DSP 控制器实用教程》的原因。

1.4 数的定标及 Q 格式运算

C2000 系列是定点 DSP 芯片,其操作数一般采用整型形式表示,不能直接处理小数。然而实际运算中很多情况下会涉及到小数,此时解决的办法有三种:一是采用高级语言如 C 语言编程,将数据定义为 float 类型;二是采用数的定标的方法,在汇编语言层次,以整数的形式来处理小数;三是直接在汇编语言的层次进行实现浮点运算,将浮点数表示成标准的浮点格式,如单精度的浮点数可表示成 32 位的 IEEE 标准格式(当然用户也可用其他的浮点格式甚至自己定义自己的浮点格式),然后利用定点 DSP CPU 的算术、逻辑、移位运算等指令,按浮点的特点和要求进行编程运算。第一种方法固然使用方便,程序员不必了解定点芯片进行浮点运算的具体细节,但效率低运算速度慢。第二种方法在对运算速度要求较严格的地方,更具实际意义。因此必须掌握数的定标方法。第三种方法似乎没有太大的优势,对程序员而言比较费时费力,除非要求运算速度快而数据的范围又特别大时才采用它。

所谓数的定标,就是由程序员来确定小数点处于一个数中的哪一位。程序员编程时必须知道参与操作数据的小数点的位置固定在何处,然后根据运算的要求,对小数点进行必要的对齐、移位等操作。

通过设定小数点在 16 位数中的不同位置,就可以表示不同大小和不同精度的小数了。数的定标有 Q 表示法和 S 表示法两种,两者有一一对应的关系。实际中 Q 格式应用得更多些。如果一个 16 位的二进制数,从高位到低位,表示为 $D_{15}D_{14}\dots D_3D_2D_1D_0$,假定小数点位于 D_0 的右侧,则此种格式为 Q0;当把小数点定位于 D_{15} 右侧时,则为 Q15 格式。表 1-2 列出了一个 16 位数的 16 种 Q 格式、S 格式及它们所表示的十进制数值范围。

表 1-2 Q 格式、S 格式表示及数值范围

Q 格式	S 格式	无符号数时对应的十进制范围	有符号数时对应的十进制范围
Q15	S0.15	$0 \leq X \leq 1.9999695$	$-1 \leq X \leq 0.9999695$
Q14	S1.14	$0 \leq X \leq 2.9999390$	$-2 \leq X \leq 1.9999390$
Q13	S2.13	$0 \leq X \leq 7.9998779$	$-4 \leq X \leq 3.9998779$
Q12	S3.12	$0 \leq X \leq 15.9997559$	$-8 \leq X \leq 7.9997559$
Q11	S4.11	$0 \leq X \leq 31.9995117$	$-16 \leq X \leq 15.9995117$

(续)

Q 格式	S 格式	无符号数时对应的十进制范围	有符号数时对应的十进制范围
Q10	S5.10	$0 \leq X \leq 63.9990234$	$-32 \leq X \leq 31.9990234$
Q9	S6.9	$0 \leq X \leq 127.9980469$	$-64 \leq X \leq 63.9980469$
Q8	S7.8	$0 \leq X \leq 255.9960938$	$-128 \leq X \leq 127.9960938$
Q7	S8.7	$0 \leq X \leq 511.9921875$	$-256 \leq X \leq 255.9921875$
Q6	S9.6	$0 \leq X \leq 1023.9804375$	$-512 \leq X \leq 511.9804375$
Q5	S10.5	$0 \leq X \leq 2047.96875$	$-1024 \leq X \leq 1023.96875$
Q4	S11.4	$0 \leq X \leq 4095.9375$	$-2048 \leq X \leq 2047.9375$
Q3	S12.3	$0 \leq X \leq 8091.875$	$-4096 \leq X \leq 4095.875$
Q2	S13.2	$0 \leq X \leq 16383.75$	$-8192 \leq X \leq 8191.75$
Q1	S14.1	$0 \leq X \leq 32767.5$	$-16384 \leq X \leq 16383.5$
Q0	S15.0	$0 \leq X \leq 65535$	$-32768 \leq X \leq 32767$

表 1-2 中, 实际上对于无符号数还有 Q16 格式, 它表示的范围是 $0 \sim 0.9999847$ 。

从表 1-2 可以看出, 同样一个 16 位数, 若小数点设定的位置不同, 它所表示的数也就不同。例如:

十六进制数 $2000h = 8192$, 用 Q0 表示;

十六进制数 $2000h = 0.010,0000,0000,0000B = 0.25$, 用 Q15 表示;

十六进制数 $2000h = 0010.0000,0000,0000B = 2.000$, 用 Q12 表示;

对于 DSP 芯片来说, 不同 Q 格式的处理方法是完全相同的。

从表 1-2 还可以看出, 不同的 Q 格式所表示的数不仅范围不同, 而且精度也不相同。Q 越大, 数值范围越小, 但精度越高; 相反, Q 越小, 数值范围越大, 但精度就越低。例如, Q0 格式表示的数值范围是 $-32768 \sim +32767$, 其精度为 1, 而 Q15 的数值范围为 $-1 \sim 0.9999695$, 精度为 $1/32768 = 0.00003051$ 。因此, 对定点数而言, 数值范围与精度是一对矛盾, 一个变量想能够表示比较大的数值范围, 必须以牺牲精度为代价; 而想提高精度, 则数的表示范就相应地减小。在实际的应用中, 如果想在能满足变量变化范围时尽量提高精度, 则必须确定适当的 Q 值。假设变量的绝对值的最大值为 max, 则应该按如下方法确定 Q 值:

取一个数 n, 使它满足

$$2^{n-1} < \max < 2^n$$

则取

$$Q = 15 - n$$

因为

$$2^{-Q} = 2^{-15} \times 2^n = 2^{-(15-n)}$$

至于 max 的值, 可根据具体对象或用理论分析的方法, 或用统计的方法来确定。

实际应用时, 往往 Q15 格式用得较多, 因为有符号时它是纯小数, 统一用 Q15 格式, 它们间做乘法用不会溢出, 运算时不再进行小数点对齐等, 而且一般情况下精度足够。变量的范围较大时, 可通过预先设定一个系数的办法解决。当然, 如果需更大的表示范

围和精度, 还可用 32 位数, 读者可以自行确定此时 32 位定点数从 Q31~Q0 对应的表示范围。例如, 对于 32 位数, Q15 的表示范围是-65536~65535.9999695。

16 位数的定点运算有溢出问题, 当运算的结果超出所对应的 Q 格式所能表示的范围时 (或说 16 位的表示范围), 就会发生溢出。例如, 16 位数 Q15 格式表示的范围是-1~0.9999695, 因此,

$0.5+0.625=4000h+5000h=9000h=-0.125$; 溢出, 结果错误

$-0.5+0.625=C000h+5000h=1000h=0.125$; 未溢出, 结果正确

用户应时刻注意溢出的问题, 否则会造成结果错误或导致运算精度严重恶化。如果程序员事先能了解到这种情况, 且要保证运算精度, 则必须保持 32 位的结果。TI 公司 DSP 芯片内对此设有专门的溢出保护功能, 当发生溢出且用户设定溢出保护功能有效时, 累加器 ACC 中运算结果根据具体情况为最大 (7FFFFFFFh) 或最小饱和值 (80000000h), 而不是错误的结果, 具体设定见后续章节。

如果读者对此部分还不太理解, 则可参考补码及其运算的相关知识, 可在《微机原理》之类的书籍中看到。

实际应用中的浮点数, 在定点 DSP 中采用前述第二种办法进行运算时, 首先必须将其转换成 Q 格式。浮点数与定点数的转换关系可表示如下:

浮点数 (x) 转换为定点数 (x_q): $x_q = (\text{int}) \ x * 2^Q$

定点数 (x_q) 转换为浮点数 (x): $x = (\text{float}) \ x_q * 2^{-Q}$

int 和 float 分别表示取整和变成浮点运算。例如, 浮点数 $x=0.5$, 定标 $Q=15$, 则定点数 $x_q = (\text{int}) \ 0.5 * 2^{15} = 0.5 * 32768 = 16384 = 4000h$ 。反之, 一个用 Q15 表示的定点数 16384, 其浮点数为 $16384 \div 32768 = 0.5$ 。

上面主要是解决定点 Q 格式表示的问题, 定点是如何运算的呢? 其实很简单, 加减法时要保证小数点对齐, 即 Q 格式中定标值 Q 一致, 这通过汇编指令中的移位指令或者直接通过设定 DSP 芯片内的定标器来实现, 可见后续章节。如果是做乘法, 则 Q 值相加。

1.4.1 定点加法和减法

将浮点加法/减法转化为定点加法/减法时最重要的一点就是必须保证两个操作数的 Q 值一样。若两者不一样, 则在做加法/减法运算前先进行小数点的调整。为保证运算精度, 需使 Q 值较小的数的 Q 值调整为与另一个数的 Q 值一样大。此外, 在做加法/减法运算时, 必须注意结果可能会超过 16 位表示范围 (溢出)。如果加/减法的结果超出 16 位的表示范围, 则必须保留 32 位的结果, 以保证运算的精度。下面用 C 语言模拟定点运算的过程。了解它的原理, 以后用汇编语言进行定点编程运算就不会感到困难。

例 1-1 定点加法

设 $x=0.5$, $y=3.1$, $z=x+y$, $Q_x=15$, $Q_y=13$, $Q_z=13$, 则有

$x = (0.5 \times 2^{15}) = 16384;$

$y = (\text{int}) (3.1 \times 2^{13}) = 25395;$

$\text{tempy} = 25395 << 2 = 101580;$ 左移 2 位

$\text{tempz} = x + \text{tempy} = 16384 + 101580 = 117964;$

$z = (\text{int}) \text{tempz} >> 2 = 29491;$

因此,

$$z=29491/(2^{13}) \approx 3.6$$

例 1-2 定点减法

x y 的情况同上例, $Q_z=13$, 求 $z=x-y$

$$x=16384; y=25395;$$

$$\text{tempy}=25395 \ll 2=101580;$$

$$\text{tempz}=x-\text{tempy}=16384-101580=-85196;$$

因此,

$$z=(\text{float})(-85196 \gg 2)/8192=-2.6;$$

若有兴趣,也可以在二进制数下进行运算,结果是一样的。应注意的是如果有符号数,进行右移移位时应用算术移位而不是逻辑移位。

1.4.2 定点乘法和除法

设 x 的定标值为 Q_x , y 的定标值为 Q_y , 乘积 z 的定标值为 Q_z , 商为 $t=x/y$, 商的定标值为 Q_t , 则

$$z=(x \times y) \gg (Q_x + Q_y - Q_z)$$

$$t=(x \ll (Q_t - Q_x + Q_y)) / y$$

读者可自写几个数进行行验算。

当对 Q 格式及运算有了充分的认识和理解后,如果需要则可到 TI 公司的网站下载 Q 格式数学库 `qmath.lib`, 它包含了一般定点运算常用的函数, 如正弦、倒数等, 这样就不必自己再用汇编语言编程, 其运算速度比 C 语言中的相应的浮点运算快得多。

思考题

1. DSP 芯片的结构特点?
2. 对应于十进制, Q_{15} 格式能精确到小数点后几位?
3. 用补码和 Q 格式完成下列运算 (精度自行确定):
 $0.375+1.2$, 3.4×2.6 , -2.6×23.5 , $12.6-65.8$
4. 哈佛结构的优点是什么, 为什么 DSP 要采用哈佛结构?
5. 上网 (www.ti.com) 查看 TI 公司 DSP 芯片的分类及型号。

第2章 TMS320LF2407A 的硬件资源

2.1 芯片概览

TMS320LF2407A DSP 是为了满足控制应用而设计的, 它把一个高性能 16 位的 DSP 内核和片内外设集成在一个芯片上, 体现了 SOC 的技术发展趋势。其处理速度为 40 兆指令/s, 为诸多领域提供了先进的数字解决方案。DSP 芯片内含有丰富的硬件资源, 大大减少了用户硬件设计方面的工作, 使得用户的主要精力放在编程上, 实现电子设计的软件化。

该 DSP 芯片有如下性能和特点:

- 由于采用了高性能的静态 CMOS 制造技术, 因此该 DSP 具有低功耗和高速度的特点。工作电压 3.3V, 有四种低功耗工作方式。单指令周期最短为 25ns (40MHz), 最高运算速度可达 40 兆指令/s, 四级指令执行流水线。低功耗有利于电池供电的应用场合, 而高速度非常适用于电动机的实时控制。
- 由于采用了 TMS320C2xx DSP CPU 的内核, 保证了与 TMS320C24x 系列 DSP 的代码兼容性, 允许设计者从其他通用 TMS320 定点 DSP 上移植程序, 降低了软件投资, 缩短了开发周期。
- 片内集成了 32K 字的 Flash 程序存储器、2K 字的单口 RAM、544 字的双口 RAM, 因而使该芯片很方便地进行产品开发。可编程的密码保护能够充分地维护用户的知识产权。
- 提供外扩展 64K 字程序存储器、64K 字数据存储器、64K 字 I/O 端口的能力。
- 两个专用于电动机控制的事件管理器 (EV), 每一个都包含: 两个 16 位通用定时器; 8 个 16 位脉宽调制 (PWM) 输出通道; 一个能够快速封锁输出的外部引脚 $\overline{\text{PDPINT}}_x$ (其状态可从 COMCON_x 寄存器获得); 可防止上下桥臂直通的可编程死区功能; 三个捕捉单元; 一个增量式光电位置编码器接口。
- 可编程看门狗定时器, 保证程序运行的安全性。
- 16 通道 10 位 A/D 转换器, 具有可编程自动排序功能, 四个启动 A/D 转换的触发源, 最快 A/D 转换时间为 500ns。
- 控制器局域网 (CAN) 2.0B 模块。
- 串行接口 SPI 和 SCI 模块。
- 基于锁相环的时钟发生器 (PLL)。
- 41 个通用 I/O 引脚。
- 32 位累加器和 32 位中央算术逻辑单元 (CALU); 16 位 $\times$ 16 位并行乘法器, 可实现单指令周期的乘法运算; 五个外部中断。
- 1149.11-1990 IEEE 标准的 JTAG 仿真接口。
- 很宽的工作温度范围, 普通级: $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$; 特殊级: $-40^{\circ}\text{C} \sim 125^{\circ}\text{C}$ 。

2.2 引脚功能

TMS320 LF2407A DSP 共有 144 个引脚，采用 PGE 封装。图 2.1 是其引脚按功能表示的结构图，其中许多引脚是复用的，用户将来可根据需要进行设置。

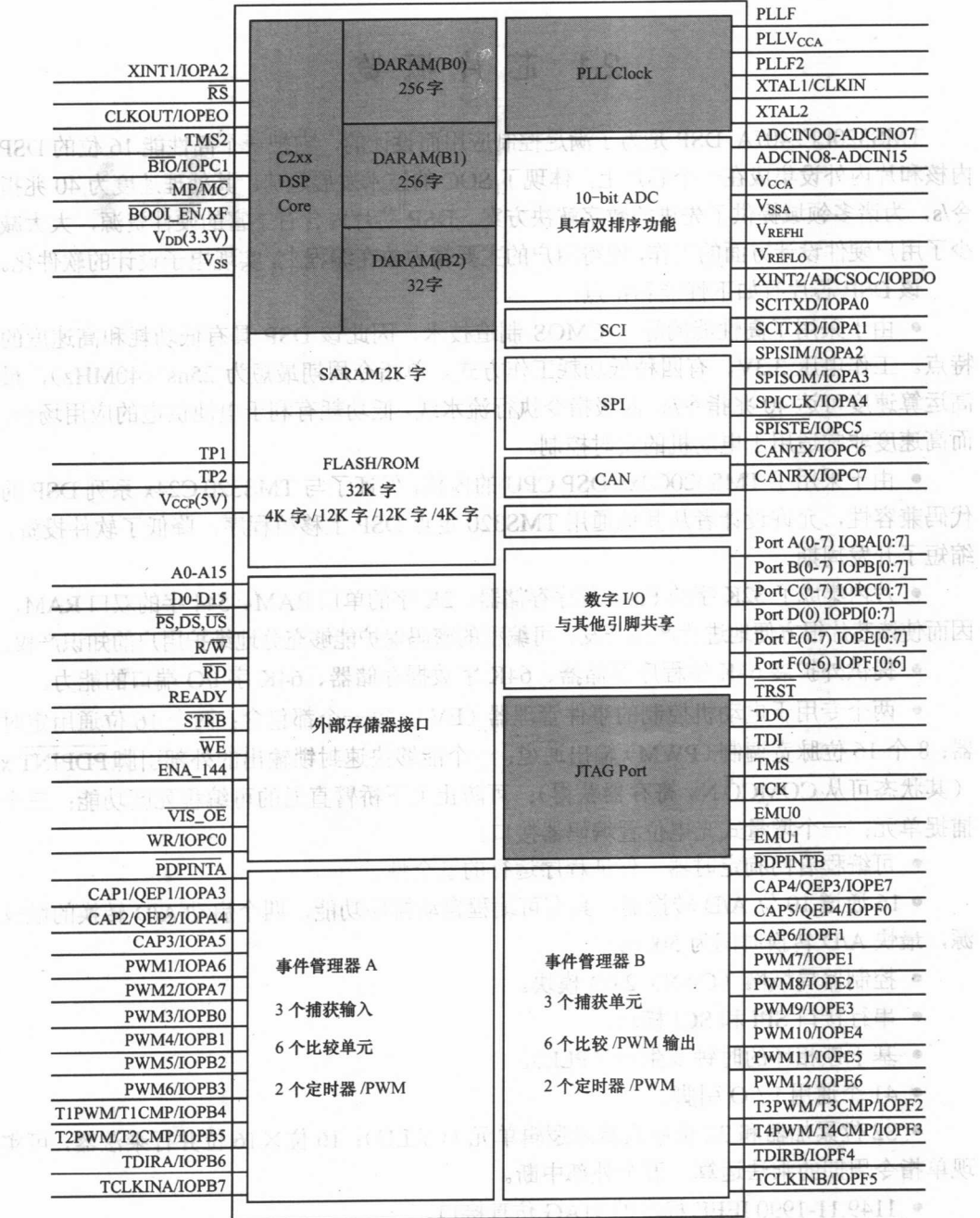


图 2.1 TMS320LF2407A 功能结构