



**Principles and Application
of TMS320C54x DSP**

TMS320C54x DSP

原理及应用

乔瑞萍 崔涛 张芳娟 编著

*Specially Designed
for Engineers and Technicians of Electronics*



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

TMS320C54x DSP 原理及应用

Principles and Application of TMS320C54x DSP

乔瑞萍 崔 涛 张芳娟 编著

西安电子科技大学出版社

2005

内 容 简 介

本书以 TMS320C54x 系列 16 位定点 DSP 为主,介绍了数字信号处理器(DSP)芯片的 CPU、存储器、总线结构、片内资源及其汇编语言程序设计方法,并且对 C 语言与汇编的接口、各种开发工具和最新的集成开发环境 CCS 2.0(Code Composer Studio 2.0)软件的使用方法进行了详细的描述。最后,给出了应用实例。

本书的特点是注意了教学内容的组织,由浅入深、循序渐进,提供了最小系统模板设计和最新软件的同步练习。本书面向的读者是高等院校电子信息类专业的高年级本科生,本书也可作为具有 MCU 开发经验而进入从事 DSP 技术工作的研发人员的入门参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

TMS320C54x DSP 原理及应用=Principles and Application of TMS320C54x DSP / 乔瑞萍, 崔涛, 张芳娟编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.2

ISBN 7-5606-1471-X

I. T... II. ①乔... ②崔... ③张... III. 数字信号—信号处理, TMS320C54x IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 117182 号

策 划 臧延新

责任编辑 刘宇坤 臧延新

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印 刷 西安兰翔印刷厂

版 次 2005 年 2 月第 1 版 2005 年 2 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 18 875

字 数 447 千字

印 数 1~4000 册

定 价 29.00 元

ISBN 7-5606-1471-X / TP·0783

XDUP 1742001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜, 谨防盗版。

前 言

近年来,随着 DSP 技术的迅速发展,DSP 芯片的速度、性价比不断提高,并被广泛应用于控制、通信、图像处理等各个领域。美国德州仪器(简称 TI)公司在全球各应用领域主推三大 DSP 平台,其产品占据了 DSP 市场近 50%的份额。它们分别是适于控制优化的 TMS320C2000 系列、低功耗的 TMS320C5000 系列及高性能的 TMS320C6000 系列。DSP 技术已成为电子信息、通信、自动控制、仪器仪表类学生和从事相关领域研发的工程技术人员需要掌握的前沿技术。本书针对 TI 公司的 16 位定点 TMS320C54x DSP 进行了介绍,该系列 DSP 是典型的数字信号处理器之一。

目前,国内 DSP 的参考书籍主要适合广大从事 DSP 技术开发人员,而适合学生和初进入 DSP 领域人员的参考书籍很少,初学者往往需要大量阅读 TI 公司的原版英文资料。作者针对这种情况,结合多年的 DSP 教学经验编写了本书。本书按照适合于初学者的学习思路安排结构,组织内容,希望对广大学生和学习使用 DSP 者有所帮助。

全书共分 8 章。第 1 章概述 TMS320C54x 芯片结构的总框架及 DSP 的数据类型;第 2 章、第 5 章和第 6 章分别详细介绍 TMS320C54x 芯片的 CPU 结构、存储器配置、总线结构及片内外设;第 3 章、第 4 章讨论 TMS320C54x 的指令系统、汇编编程方法;第 7 章、第 8 章给出 TMS320C54x 最新开发工具的应用实例及软硬件在语音方面的应用实例。

本书由乔瑞萍主编,并编写了第 1 章、第 2 章、第 4 章~第 6 章;崔涛编写了第 7 章、第 8 章;张芳娟编写了第 3 章。附录部分由乔瑞萍和张芳娟共同编写。作者在编写本书过程中参阅了不少国内外参考书籍及 TI 公司原版资料,并得到西安交通大学张太镒教授的大力帮助,张教授认真审阅了部分文稿,在此表示衷心的感谢。在素材的录入过程中,陈一、张杰、杨玉林等研究生参与了部分工作,在此表示感谢。另外,还要特别感谢欧文对本书提出的许多宝贵建议。同时,感谢李洁的支持。

由于编者的经验和水平有限,加之 DSP 技术发展十分迅速,书中难免存在不足之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2004 年 11 月于西安交通大学

目 录

第1章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 DSP 芯片概述	2
1.3 运算基础	4
1.3.1 数据格式	4
1.3.2 定点算术运算	7
第2章 TMS320C54x 的 CPU 结构和存储器配置	11
2.1 TMS320C54x DSP 的结构	11
2.1.1 TMS320C54x DSP 的基本结构	11
2.1.2 TMS320C54x DSP 的主要特点	12
2.2 TMS320C54x 的总线结构	14
2.3 TMS320C54x 的 CPU 结构	15
2.3.1 算术逻辑运算单元	15
2.3.2 累加器	15
2.3.3 桶形移位器	16
2.3.4 乘累加器单元	16
2.3.5 比较选择存储单元	17
2.3.6 指数编码器	17
2.3.7 CPU 状态控制寄存器	17
2.3.8 寻址单元	19
2.4 TMS320C54x 存储器和 I/O 空间	19
2.4.1 存储器空间	20
2.4.2 程序存储器	23
2.4.3 数据存储器	27
2.4.4 I/O 空间	29
第3章 指令系统	30
3.1 数据寻址方式	30
3.1.1 指令的表示方法	30
3.1.2 数据寻址方式	31
3.2 TMS320C54x 的指令系统	42
3.2.1 指令系统概述	42
3.2.2 指令系统分类	46
第4章 TMS320C54x 汇编语言程序设计	82
4.1 TMS320C54x 汇编语言的基本概念	82
4.1.1 TMS320C54x 汇编语句的组成	82

4.1.2	TMS320C54x 汇编语言中的常数、字符串、符号与表达	83
4.1.3	TMS320C54x 伪指令	85
4.1.4	TMS320C54x 宏命令	90
4.2	TMS320C54x 汇编语言程序设计的基本方法	91
4.2.1	TMS320C54x 汇编语言源程序的完整结构	92
4.2.2	顺序结构程序	92
4.2.3	分支结构程序	93
4.2.4	循环结构程序	93
4.2.5	子程序结构	94
4.3	TMS320C54x 汇编语言程序的编辑、汇编与链接过程	98
4.4	汇编器	100
4.4.1	COFF 文件的一般概念	101
4.4.2	汇编器对段的处理	102
4.5	链接器	104
4.5.1	链接器对段的处理	105
4.5.2	链接器命令文件	106
4.5.3	程序重定位	111
4.6	Simulator 的使用方法	112
4.6.1	软件仿真器概述	112
4.6.2	仿真命令	114
4.6.3	仿真器初始化命令文件	116
4.6.4	仿真外部中断	117
4.7	汇编程序举例	118
第 5 章	TMS320C54x 的引脚功能、流水线结构和外部总线结构	139
5.1	TMS320C54x 的引脚和信号说明	139
5.2	流水线结构	141
5.3	外部总线结构	143
5.3.1	外部总线接口信号	144
5.3.2	外部总线控制性能	144
5.3.3	外部总线接口时序图	147
第 6 章	TMS320C54x 片内外设	150
6.1	时钟发生器	150
6.1.1	时钟电路	150
6.1.2	时钟模块编程	151
6.1.3	低功耗(节电)模式	153
6.2	中断系统	154
6.2.1	中断结构	154
6.2.2	中断流程	157
6.2.3	中断编程	159
6.3	定时器	161

6.3.1	定时器结构	161
6.3.2	定时器编程	162
6.4	主机接口	163
6.4.1	HPI 结构及其工作方式	164
6.4.2	HPI 接口设计	164
6.4.3	HPI 控制寄存器	166
6.5	串行口	167
6.5.1	串行口概述	167
6.5.2	串行口的组成框图	167
6.5.3	串行口编程	168
第 7 章	CCS 开发工具及应用	171
7.1	CCS 概述	171
7.1.1	CCS 的发展	171
7.1.2	代码生成工具	173
7.1.3	CCS 集成开发环境	174
7.1.4	DSP/BIOS 插件	175
7.1.5	硬件仿真和实时数据交换	178
7.1.6	CCS 小结	180
7.2	CCS 的安装及窗口	180
7.2.1	CCS 的安装	180
7.2.2	CCS 的文件和变量	182
7.2.3	CCS 的窗口、主菜单和工具条	183
7.2.4	TMS320C5402DSK 的配置和使用	185
7.2.5	XDS510PP 的配置和使用	190
7.3	开发一个简单的应用程序	194
7.3.1	创建一个新的工程	194
7.3.2	向一个工程里添加文件	195
7.3.3	查看源代码	196
7.3.4	编译和运行程序	197
7.3.5	修改程序设置和纠正语法错误	198
7.3.6	使用断点和观察窗口	200
7.3.7	使用观察窗口观察 structure 变量	201
7.3.8	测算源代码执行时间	201
7.4	算法和数据测试的例子	203
7.4.1	打开和查看工程	203
7.4.2	回顾源代码	204
7.4.3	为 I/O 文件增加探针	206
7.4.4	显示图形	208
7.4.5	执行程序 and 绘制图形	209
7.4.6	调节增益	210

7.4.7 GEL 文件的使用	211
7.4.8 进一步的探索	212
7.5 使用 DSP/BIOS 的语音实例 ^[21]	212
7.5.1 DSP/BIOS SWI 和 PIP 模块概述	212
7.5.2 语音实例	214
7.5.3 结论	231
第 8 章 DSP 芯片应用	232
8.1 引言	232
8.2 DSP 芯片 C 语言开发简介	232
8.2.1 TMS320C54x C/C++ 编译器支持的数据类型	232
8.2.2 C 语言的数据访问方法	233
8.2.3 C 语言和汇编语言的混合编程方法	235
8.2.4 中断函数	236
8.2.5 存储器模式	237
8.2.6 其他注意事项	239
8.3 模/数接口设计	240
8.3.1 TLC320AD50 及其接口 ^[26]	241
8.3.2 模/数接口的硬件电路设计	242
8.3.3 模/数接口的软件设计	243
8.4 存储器接口设计	250
8.4.1 TMS320C5409 的存储器接口	250
8.4.2 Flash 擦写	254
8.4.3 Bootload 设计	257
8.5 G.726 语音编解码系统	261
8.5.1 G.726 算法简介	262
8.5.2 系统构成	264
8.5.3 系统软硬件设计	265
8.5.4 系统调试	266
8.6 语音实时变速系统	267
8.6.1 语音变速算法简介	268
8.6.2 系统构成	270
8.6.3 系统软硬件设计	270
8.6.4 系统调试	273
附录	275
附录 1 TMS320 系列 DSP 的命名方法	275
附录 2 TMS320C54x 引脚信号说明	276
附录 3 TMS320C54x DSP 的中断向量和中断优先权	281
附录 4 TMS320C54x 片内存储器映像外围电路寄存器	288
参考文献	293

第 1 章

绪 论

1.1 引 言

1. 数字信号处理概述

数字信号处理,或者说对信号的数字处理,是利用计算机或专用的数字设备对数字信号进行采集、变换、滤波、估值、增强、压缩和识别等加工处理,以得到符合人们需要的信号形式并进行有效的传输与应用,它是 20 世纪 60 年代发展起来的并广泛应用于许多领域的新兴学科。数字信号处理将许多经典的理论体系作为自己的理论基础(如随机过程、信号与系统等),同时又使自己成为一系列新兴学科的基础(如模式识别、神经网络等),它所涉及的范围极其广泛。数字信号处理的实现是理论和应用之间的桥梁。

数字信号处理系统是以数字信号处理为基础的。图 1-1 所示为一个典型的 DSP 系统。



图 1-1 数字信号处理系统简化框图

DSP 系统的输入信号可以有各种各样的形式,例如:声音、图像、温度、压力等。假设我们输入的是语音信号,DSP 系统首先对语音信号进行带限滤波和抽样,根据奈奎斯特定理,抽样频率至少必须是输入带限信号最高频率的 2 倍,以防止信号频谱混叠,保证语音信息不丢失。然后进行 A/D 转换,将输入的模拟信号(Analog Signals,在时域中,时间和幅值连续变化的信号)变为数字信号(Digital Signals,对模拟信号按一定的时间间隔进行采样,并将采样值进行量化,也即时间和幅值均为离散的信号)。DSP 芯片对输入的数字信号进行某种形式的语音处理,如语音压缩等,得到输出的数字信号后再经 D/A 转换器转换为模拟信号,最后此信号经低通滤波器就可得到平滑的模拟语音信号。

2. 单片机与数字信号处理器

单片机是从 Z80 发展而来的,它将微处理器和部分外围功能(如 ROM、RAM 及外部串口等)集成在一个芯片上,组成微型计算机。数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)是功能更强大的单片机,是现代电子技术、大规模集成电路、计算机技术和数字信号处理

技术相结合的产物, 特别适合于数字信号处理运算, 主要应用于实时快速实现各种数字信号处理算法(如卷积运算、FFT、DFT、矩阵乘法等)。所谓实时处理(Real-time), 是指数字信号处理与信号的输入和输出保持同步。DSP 芯片的诞生将理论研究结果广泛应用到实际当中, 如 MP3 播放器就是一个典型的应用, 手机则是 DSP 芯片与单片机的综合应用。单片机适用于处理一些事务, 如控制键盘; DSP 芯片则适用于处理密集型的运算, 如语言压缩和解压缩、无线信道的调制与解调等。

DSP 芯片与单片机的主要区别在于数值处理和高速控制。DSP 有硬件乘法器, 存储容量大得多。DSP 采用的是改进的哈佛结构并广泛采用流水线技术, 多个控制和运算部件并行工作, 从而大大提高了运算速度。哈佛结构(Havard)是不同于传统的冯·诺依曼(Von Neuman)结构的并行体系结构, 其程序空间和数据空间是相互独立分开的, 有各自的地址与数据总线, 这就使得指令和数据的处理可以同时进行, 从而大大提高了效率。改进的哈佛结构允许数据在程序存储空间和数据存储空间之间传输, 从而大大提高了运行速度和编程的灵活性。DSP 是运算密集型的, 单片机是事务型的, 单片机的中断比 DSP 少得多。DSP 芯片的 A/D 变换比单片机的精度高。

DSP 芯片内有多条数据、地址和控制总线, 另外, 它还有特殊指令: MAC(连乘加指令, 单周期同时完成乘法和加法运算)、RPTS 和 RPTB(硬件判断循环边界条件, 避免破坏流水线); 特殊寻址方式: 位倒序寻址(实现 FFT 快速倒序)和循环寻址。DSP 芯片具有特殊片内外设, 如: 软件插等待电路(便于与慢速设备接口)、数字锁相电路 PLL(有利系统稳定)、丰富的片内存储器(如 RAM、ROM、Flash 等)以及丰富的片内外设(如定时器、异步串口、同步串口、DMA 控制器、HPI 接口、A/D 和通用 I/O 口等)。

1.2 DSP 芯片概述

1. DSP 芯片的发展

美国德州仪器公司(TI, Texas Instruments)成功地推出了 DSP 芯片的一系列产品。TMS320 是包括定点、浮点和多处理器在内的数字信号处理器(DSP)系列, 其结构非常适合于做实时信号处理。TI 公司在推出 TMS32010 之后又相继推出 TMS32011、TMS320C10/14/15/16/17 等, 其中, TMS32010 和 TMS32011 采用 $2.4\mu\text{m}$ 的 NMOS 工艺, 而其他几种则采用 $1.8\mu\text{m}$ 的 CMOS 工艺, 这些芯片的典型工作频率为 20 MHz, 它们代表 TI 的第一代 DSP 芯片。TI 公司的 TMS320 系列 DSP 产品已经成为当今世界上最有影响力的 DSP 芯片。TI 公司也已经成为世界上最大的 DSP 芯片供应商。

第二代 DSP 芯片的典型代表是 TMS32020、TMS320C25/26/28。在这些芯片中, TMS32020 是一个过渡的产品, 其指令周期为 200 ns, 与 TMS32010 相当, 而其硬件结构则与 TMS320C25 一致。在第二代 DSP 芯片中, TMS320C25 是一个典型的代表, 其他芯片都是由 TMS320C25 派生出来的。TMS320C2xx 是第二代 DSP 芯片的改进型, 其指令周期最短为 25 ns, 运算能力达 40 MIPS。

TMS320C3x 是 TI 的第三代产品, 包括 TMS320C30/31/32, 它也是第一代浮点 DSP 芯片。TMS320C31 是 TMS320C30 的简化和改进型, 它在 TMS320C30 的基础上去掉了一般用

户不常用的一些资源,降低了成本,是一个性能价格比较高的浮点处理器。TMS320C32 是 TMS320C31 的进一步简化和改进。TMS320C30 的指令周期为 50/60/74 ns; TMS320C31 的指令周期为 33/40/50/60/74 ns; TMS320C32 的指令周期则为 33/40/50 ns。

第四代 DSP 芯片的典型代表是 TMS320C40/44。TMS320C4x 系列浮点处理器是专门为实现并行处理和满足其他一些实时应用的需求而设计的,其主要性能包括 275MOPS 的惊人速度和 320 MB/s 的吞吐量。

第五代 DSP 芯片 TMS320C5x/54x 是继 TMS320C1x 和 TMS320C2x 之后的第三代定点 DSP 处理器。TMS320C5x 系列有 TMS320C50/51/52/53 等多种产品,它们的主要区别是片内 RAM、ROM 等资源的不同。TMS320C54x 是为实现低功耗、高性能而专门设计的 16 位定点 DSP 芯片,其主要应用于无线通信系统中。该芯片的内部结构与 TMS320C5x 不同,因而指令系统与 TMS320C5x 和 TMS320C2x 等是互不兼容的。

第六代 DSP 芯片 TMS320C62x/67x 等是目前速度最快的。TMS320C62x 是 TI 公司于 1997 年开发的一种新型定点 DSP 芯片。该芯片的内部结构与以往的 DSP 芯片不同,其内部集成了多个功能单元,可同时执行 8 条指令,运行速度快,指令周期为 5 ns,运算能力达 1600 MIPS。这种芯片适合于无线基站、无线 PDA、组合 Modem、GPS 导航等需要大运算能力的场合。TMS320C67x 是 TI 公司继定点 DSP 芯片 TMS320C62x 系列后开发的一种新型浮点 DSP 芯片。该芯片的内部结构在 TMS320C62x 的基础上加以改进,其内部同样集成了多个功能单元,可同时执行 8 条指令,指令周期为 6 ns,运算能力可达 1 G FLOPS。

图 1-2 给出了 TMS320 系列产品的发展示意图。

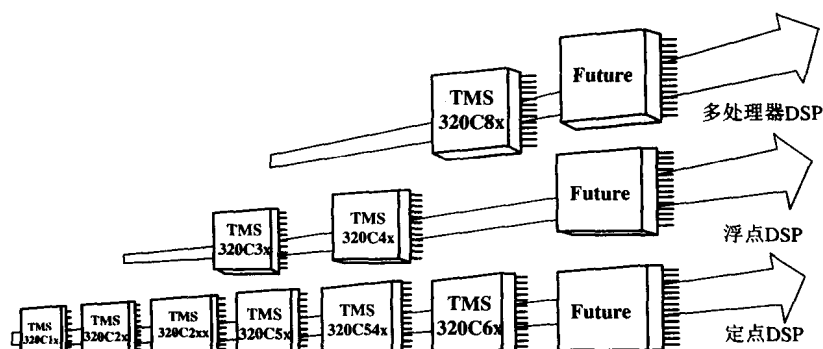


图 1-2 TMS320 系列 DSP 发展示意图

TMS320C1x、TMS320C2x、TMS320C2xx、TMS320C5x、TMS320C54x 和 TMS320C62x 为定点 DSP; TMS320C3x、TMS320C4x 和 TMS320C67x 为浮点 DSP。

TI 公司除了生产定点和浮点两类 DSP 芯片之外,还推出了集多片 DSP 芯片于一体的高性能 DSP 芯片 TMS320C8x。该芯片内部集成了 5 个微处理器,处理速度达到 20 亿次/s,与外部交换数据的速度为 400 MB/s,特别适合于会议电视等多媒体应用。

同一代 TMS320 系列 DSP 产品的 CPU 结构是相同的,但其片内存储器(包括 Cache、RAM、ROM、Flash、EPROM 等)和片内外设(包括串口、并口、主机接口、DMA、定时器等)的电路配置是不同的。因为外围电路不同,所以构成的系列也就不同。由于片内集成了存储器和外围电路,因此使 TMS320 系列器件的系统成本降低,并且节省了电路板的空间。

2. TMS320 系列的典型应用

自从 20 世纪 70 年代末第一个 DSP 芯片诞生以来, DSP 芯片取得了飞速的发展。在 20 年里, DSP 芯片已经在信号处理、音/视频、通信、消费、军事等诸多领域得到了广泛的应用。随着 DSP 芯片性价比的不断提高, 单位运算量功耗的显著降低, DSP 芯片的应用领域将会不断扩大。表 1-1 列出了 TMS320 系列 DSP 的典型应用。

表 1-1 TMS320 系列 DSP 的典型应用

音 频	视频和影像	宽带解决方案	无 线 通 信	数位控制
音/视频接收机	数码相机	802.11 无线局域网	蓝牙解决方案	数字电源
数字广播	多功能打印机	线缆解决方案	2.5 G 和 3 G 的 OMAP	• 开关电源
数字音频	网上媒体	DSL 解决方案	射频产品	• 不间断电源
网络音频	视频和影像产品	企业 IP 电话	无线芯片组	
	有线数字媒体	分组网络语音(VoIP)	无线基础设施	
	• IP 视频电话	VoIP 网关解决方案		
	• 监控系统			
	• 视频统计型多工机			
汽 车	马 达 控 制	电 话 设 备	光 网	安 全
车身系统	• HVAC	用户端电话设备	光层应用	生物识别
底盘系统	• 工业控制/马达驱动	嵌入式 Modem	实体层应用	
汽车网络信息系统	• 电源工具			
传动系统	• 打印机/影印机			
安全系统	• 大型家电			
防盗系统				

TI 作为全球 DSP 的领导者, 目前主推三个 DSP 平台: TMS320C2000、TMS320C5000 和 TMS320C6000。其中包括多个子系列, 数十种 DSP 器件, 为用户提供广泛的选择, 以满足各种不同应用的需求。

TMS320C2000 系列 DSP 主要用于代替 MCU, 应用于各种工业控制领域, 尤其是电机控制领域。

TMS320C5000 系列 DSP 是为实现低功耗、高性能而专门设计的 16 位定点 DSP 芯片, 它主要应用于通信和消费类电子产品, 如手机、数码相机、无线通信基础设备、VoIP 网关、IP 电话、MP3 等。

TMS320C6000 系列的 DSP 主要应用于高速宽带和图像处理等高端应用, 如宽带通信、3G 基站和医疗图像处理等。

1.3 运 算 基 础

1.3.1 数据格式

DSP 有定点 DSP 和浮点 DSP 两种。本书介绍的 TMS320C54x 是 16 位定点 DSP。在定点 DSP 中, 数据有两种基本的表示方法: 整数表示方法和小数表示方法。

1. 整数

DSP 芯片和所有微处理器一样，以 2 的补码形式表示有符号数。16 位定点 DSP 整型数格式为：Sxxxxxxxxxxxxxx，其中最高位 S 为符号位，0 代表正数，1 代表负数，其余位为数据位。数的范围为 $-32\,768 \sim 32\,767$ 。整数的最大取值范围取决于 DSP 的字长，字长越长，所能表示的数据范围越大，精度越高。假定一个整数字长为 n ，则其取值范围为 $-2^n \sim 2^n - 1$ 。整数的最小分辨率为 1。

【例 1】 若字长 $n=8$ ，求以下带符号整数的二进制、十六进制和十进制之间的转换。

正整数 0100 1011B=4 BH= $2^6+2^3+2^1+2^0=64+8+2+1=75$

负整数 1111 1101B=FDH=-3

在本书介绍的 TMS320C54x DSP 中，整数一般用于控制操作、地址计算和其他非信号处理的应用。

2. 小数

在 16 位定点 DSP 中，小数表示为：S.xxxxxxxxxxxxxx，最高位 S 为符号位，其他的各位采用 2 的补码表示，小数点紧接着符号位，无整数位，数的范围为 $(-1, 1)$ 。小数的最小分辨率为 2^{-15} 。

【例 2】 正小数 0101 0000B= $2^{-1}+2^{-3}=0.5+0.125=0.625$

负小数 1101 0000B= $-1+2^{-1}+2^{-3}=-1+0.5+0.125=-0.375$

对于求负小数的十进制真值，也可先求数值位的原码，即对 1101 0000B 求补，然后再求真值，即

$[1101\,0000]_{\text{补}}=1011\,0000\text{B}=- (2^{-2}+2^{-3})=-(0.25+0.125)=-0.375$

小数主要用于数字和各种信号处理算法的计算。

3. 数的定标

显然，定点表示并不意味着就一定是整数表示。在许多情况下，需要由编程来确定一个数的小数点的位置，即数的定标。定点数最常用的是 Q 表示法或 $Q_{m.n}$ 表示法。它可将整数和小数表示方法统一起来。其中， m 表示数的 2 补码的整数部分， n 表示数的 2 补码的小数部分，1 位符号位，数的总字长为 $m+n+1$ 位。表示数的整数范围为 $-2^m \sim 2^m - 1$ ，小数的最小分辨率为 2^{-n} 。表 1-2 给出了 16 种 Q 表示法及其所表示的十进制数范围。

表 1-2 Q 表示法及其表示的十进制数范围

Q 表示法	十进制数范围	Q 表示法	十进制数范围
Q0.15	$-1 \leq x \leq 0.999\,969\,5$	Q8.7	$-256 \leq x \leq 255.992\,187\,5$
Q1.14	$-2 \leq x \leq 1.999\,939\,0$	Q9.6	$-512 \leq x \leq 511.980\,437\,5$
Q2.13	$-4 \leq x \leq 3.999\,877\,9$	Q10.5	$-1024 \leq x \leq 1023.968\,75$
Q3.12	$-8 \leq x \leq 7.999\,755\,9$	Q11.4	$-2048 \leq x \leq 2047.937\,5$
Q4.11	$-16 \leq x \leq 15.999\,511\,7$	Q12.3	$-4096 \leq x \leq 4095.875$
Q5.10	$-32 \leq x \leq 31.999\,023\,4$	Q13.2	$-8192 \leq x \leq 8191.75$
Q6.9	$-64 \leq x \leq 63.998\,046\,9$	Q14.1	$-16\,384 \leq x \leq 16\,383.5$
Q7.8	$-128 \leq x \leq 127.996\,093\,8$	Q15.0	$-32\,768 \leq x \leq 32\,767$

由表 1-2 可见, 同一个 16 位数, 由于小数点设定的位置不同, 所表示的数据就不相同。但对于 DSP 芯片来说, 处理方法是完全相同的。

另外, 从表中还可以看出, 不同的 Q 表示法所表示的数值范围不同, 且精度也不同。DSP 的字长一定, 数值范围与精度是一对不可调和的矛盾, 数值范围越大, 精度就越低, 反之则相反。在实际运算中, 一定要充分考虑到这一点。下面举例说明几种常用的 Q 表示法格式。

1) Q15.0 格式

Q15.0 格式的字长为 16 位, 其每位的具体表示为: Sxxxxxxxxxxxxxxxxx。

其中, 最高位为符号位 S, 接下来的 x 为 15 位 2 补码的整数, 高位在前, 无小数位。这实际就是数的整数形式。Q15.0 格式表示数的范围为 $-2^{15} \sim 2^{15}-1$, 最小分辨率为 1。

2) Q3.12 格式

Q3.12 格式的字长为 16 位, 其每位的具体表示为: Sxxxxxxxxxxxxxxxxx。

其中, 最高位为符号位 S, 接下来的 3 位 x 为 2 补码的整数位, 高位在前, 后面的 12 位 y 为 2 补码的小数位。Q3.12 格式表示数的大致范围为 $-2^3 \sim 2^3$, 小数的最小分辨率为 2^{-12} 。

3) Q0.15(或 Q.15)格式

Q.15 格式的字长为 16 位, 其每位的具体表示为: S.xxxxxxxxxxxxxxxxxx。

其中, 最高位为符号位 S, 接下来的为 2 补码的 15 位小数位, 小数点紧接着符号位, 无整数位。Q.15 格式表示数的大致范围为 $(-1, 1)$, 小数的最小分辨率为 2^{-15} 。这实际上就是数的小数形式。对于 16 位的定点处理器 TMS320C54x 来说, Q.15 是在程序设计中常用的格式。例如, TI 公司提供的数字信号处理应用程序库 DSPLIB 就主要采用这种数据格式。

4) Q0.31(或 Q.31)格式

Q.31 格式的字长为 32 位, 需要 2 个 16 位的存储器字来表示。它实际上是 Q.15 格式的扩展表示。其每位的具体表示为: Sxxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxxx。

其中, 高 16 位的最高位为符号位 S, 接下来的为 2 补码的 31 位小数位, 小数点紧接着符号位, 无整数位。Q.31 格式表示数的大致范围为 $(-1, 1)$, 小数的最小分辨率为 2^{-31} 。

4. 定点数格式的选择

在具体应用中, 为保证在整个运算过程中数据不会溢出, 应选择合适的格式。例如, 对于 Q.15 格式, 其数据范围 $(-1, 1)$, 这样就必须保证在所有运算中, 其结果都不能超过这个范围, 否则, 芯片将结果取其极大值 -1 或 1, 而不管其真实结果为多少。为了确保不会出现溢出, 在数据参加运算前, 首先应估计数据及其结果的动态范围, 选择合适的格式对数据进行规格化。例如, 假设有 100 个 0.5 相加, 采用 Q.15 格式进行运算, 其结果将超过 1。为了保证结果正确, 可先将 0.5 规格化为 0.005 后再进行运算, 然后将所得结果反规格化。因此, 定点格式的选择实际上就是根据 $Q_{m.n}$ 表示方法来确定数据的小数点位置的。

5. 定点格式数据的转换

同一个用二进制表示的定点数, 当采用不同的 $Q_{m.n}$ 表示方法时, 其代表的十进制数是不同的。例如:

用 Q15.0 表示方法, 十六进制数 3000H=12 288;

用 Q0.15 表示方法, 十六进制数 3000H=0.375;

用 Q3.12 表示方法, 十六进制数 3000H=3。

当两个不同 Q 格式的数进行加/减运算时, 通常必须将动态范围较小的格式的数转换为动态范围较大的格式的数。十进制数真值与定点数的转换关系如下:

- 十进制数真值(x)转换为定点数(x_q): $x_q = (\text{int})x * 2^Q$
- 定点数(x_q)转换为十进制数真值(x): $x = (\text{float})x_q * 2^{-Q}$

例如, 十进制数 $x=0.5$, 定标 $Q=15$, 则定点数 $x_q = \lfloor 0.5 \times 32768 \rfloor = 16384 = 4000\text{H}$, 式中 $\lfloor \rfloor$ 表示下取整。反之, 一个用 $Q=15$ 表示的定点数 4000H, 其对应的十进制数为 $16384 \times 2^{-15} = 16384/32768 = 0.5$ 。

在 DSP 的汇编语言源程序中, 不能直接写入十进制小数, 如果要定义一个小数 0.707, 可以写成: .word 32768*707/1000; 32768 表明是 Q.15 格式, 不能写成 32768*0.707。

下面将详细说明这两种转换方法。

(1) 将十进制数表示成 $Q_{m.n}$ 格式。首先将数乘以 2^n , 变成整数, 然后再将整数转换成相应的 $Q_{m.n}$ 格式。

例: 设 $y = -0.125$, 将 y 表示成 Q.15 及 Q3.12 格式。

解: ① 先将 -0.125 乘以 2^{15} 得到 -4096, 再将 -4096 表示成 2 的补码数为 F000H, 这也就是 -0.625 的 Q.15 格式表示;

② 若要将 -0.125 表示成 Q3.12 格式, 则将 -0.125 乘以 2^{12} 得到 -512, 再将其表示成 2 的补码数为 FE00H, 这也就是 -0.125 的 Q3.12 格式表示。

(2) 将某种动态范围较小的 $Q_{m.n}$ 格式转换为动态范围较大的 $Q_{m.n}$ 格式。对于不同动态范围的数据运算, 在某些情况下会损失动态范围较小的格式的数据精度。例如, 若 $6.525 + 0.625 = 7.15$, 则 6.525 和结果 7.15 需要采用 Q3.12 格式才能保证其动态范围。若 0.625 原来用 Q.15 格式表示, 则需要先将它表示成 Q3.12 格式后再进行运算, 自然, 最后的结果也为 Q3.12 格式。根据运算结果的动态范围, 直接将数据右移, 将数据转换成结果所需的 $Q_{m.n}$ 格式, 这时原来格式的最低位将被移出, 高位则进行符号位扩展。下面分几种情况具体说明带符号数据的运算及转换过程。

1.3.2 定点算术运算

在 DSP 运算中, 根据数据的范围和精度要求, 可采用不同的 $Q_{m.n}$ 数据格式。通常, 将数据表示成纯整数 Q15 格式和纯小数 Q.15 格式, 这样便于乘法等运算, 即整数相乘结果仍为整数, 小数相乘结果仍为小数。

1. 两个定点数的加/减法

定点数的加/减法必须保证两个操作数的格式一致。如果两个数的 Q 值不同, 可将 Q 值小的数调整为与另一个数的 Q 值一样大, 但必须在保证数据精度不变的前提下。另外, 注意有符号和无符号数加/减运算的溢出问题。

【例 3】若 x 、 y 为正数, $x=4.125$, $y=0.125$, 求 $x+y$ 。

解 $x=4.125$, 采用 Q3.12 格式表示的十六进制码为 $x \times 2^{12} = 4.125 \times 2^{12} = 4200\text{H}$;

$y=0.125$, 采用 Q.15 格式表示的十六进制码为 $x \times 2^{15} = 0.125 \times 2^{15} = 1000\text{H}$ 。

