



Principles and Application of TMS320C54x DSP

TMS320C54x DSP 原理及应用 (第二版)

乔瑞萍 崔涛 胡宇平 编著



西安电子科技大学出版社
XIDIAN UNIVERSITY PRESS

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 DSP 的汇编语言程序设计方法,并且对 C 语言与汇编语言的接口、各种开发工具和最新的集成环境 CCS v4.x(Code Composer Studio v4)软件的使用方法进行了详细的描述,最后给出了应用实例。

本书的特点是注重教学内容的组织,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,也可作为 MCU 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 / 乔瑞萍, 崔涛, 胡宇平编著. —2 版.

—西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.2

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2708 - 3

I. T… II. ①乔… ②崔… ③胡… III. ①数字信号处理 ②数字信号—微处理器

IV. ①TN911.72 ②TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 255352 号

策 划 臧延新

责任编辑 王 斌 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

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印 刷 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2012 年 2 月第 2 版 2012 年 2 月第 9 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 17.5

字 数 412 千字

印 数 26 001~29 000 册

定 价 30.00 元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 2708 - 3/TP · 0634

XDUP 3000002 - 9

*** 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

随着高性能 DSP 芯片和各种开发工具不断地推陈出新,很多学校的本科教学培养计划也作了相应调整,在“DSP 技术与应用”专业课程基础上,又增加了“DSP 应用专题实验”集中实践环节,这就促使作者对本书进行修订。

本书第一版自 2005 年 2 月以来先后印刷了 8 次,共 26 000 册,许多高校将其作为 DSP 教材使用,同时也对本书提供了大量反馈信息并希望再版,在此深表感谢。

在第二版中,作者保留了第一版由浅入深、循序渐进的特点,对全书进行了修改和补充,重点修改了第 3 章,改写了第 7 章。“DSP 技术与应用”是一门实践性很强的课程,要求学生不仅会用 TMS320C54x 软件仿真器(Simulator)来调试 TMS320C54x 的汇编程序,还应该能在 TI 公司提供的最新 DSP 开发工具 CCSv4 集成开发环境下,熟练上机以实际问题。为此,本书第 4 章提供了一些应用程序,这些程序在汇编语言环境下已通过上机调试。第 7 章给出在 TI 公司最新赠送的 TMS320VC5505 EVM 板卡上运行 CCSv4 的一些示例的使用方法,帮助学生尽快入门,培养学生亲自动手的能力,激发其学习兴趣,促进其开拓思维并学以致用。这些工程示例和指令课件可在本社网站免费下载。

在本书修订过程中,西安电子科技大学出版社的臧延新副社长对本书的编写给予了热情支持和积极推进,在此表示最诚挚的感谢。

由于编著者水平有限,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

编著者
2011 年 9 月

第一版前言

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 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
3.1.3 程序转移地址寻址方式	40
3.2 TMS320C54x 的指令系统	41
3.2.1 指令系统概述	41

3.2.2 指令系统分类	45
第4章 TMS320C54x 汇编语言程序设计	80
4.1 TMS320C54x 汇编语言的基本概念	80
4.1.1 TMS320C54x 汇编语句的组成	80
4.1.2 TMS320C54x 汇编语言中的常数、字符串、符号与表达式	81
4.1.3 TMS320C54x 伪指令	83
4.1.4 TMS320C54x 宏命令	88
4.2 TMS320C54x 汇编语言程序设计的基本方法	89
4.2.1 TMS320C54x 汇编语言源程序的完整结构	90
4.2.2 顺序结构程序	90
4.2.3 分支结构程序	91
4.2.4 循环结构程序	91
4.2.5 子程序结构	92
4.3 TMS320C54x 汇编语言程序的编辑、汇编与链接过程	96
4.4 汇编器	98
4.4.1 COFF 文件的一般概念	99
4.4.2 汇编器对段的处理	100
4.5 链接器	102
4.5.1 链接器对段的处理	103
4.5.2 链接器命令文件	104
4.5.3 程序重定位	109
4.6 Simulator 的使用方法	110
4.6.1 软件仿真器概述	110
4.6.2 仿真命令	112
4.6.3 仿真器初始化命令文件	114
4.6.4 仿真外部中断	115
4.7 汇编程序举例	116
第5章 TMS320C54x 的引脚功能、流水线结构和外部总线结构	137
5.1 TMS320C54x 的引脚和信号说明	137
5.2 流水线结构	139
5.3 外部总线结构	141
5.3.1 外部总线接口信号	142
5.3.2 外部总线控制性能	142
5.3.3 外部总线接口时序图	145
第6章 TMS320C54x 片内外设	148
6.1 时钟发生器	148
6.1.1 时钟电路	148
6.1.2 时钟模块编程	149
6.1.3 低功耗(节电)模式	151
6.2 中断系统	152

6.2.1 中断结构	152
6.2.2 中断流程	155
6.2.3 中断编程	157
6.3 定时器	159
6.3.1 定时器结构	159
6.3.2 定时器编程	160
6.4 主机接口	161
6.4.1 HPI 结构及其工作方式	162
6.4.2 HPI 接口设计	162
6.4.3 HPI 控制寄存器	164
6.5 串行口	165
6.5.1 串行口概述	165
6.5.2 串行口的组成框图	165
6.5.3 串行口编程	166
第 7 章 CCS 开发工具及应用	169
7.1 CCS 概述	169
7.1.1 CCS 的发展	169
7.1.2 代码生成工具	170
7.1.3 CCS 集成开发环境	172
7.1.4 DSP/BIOS 插件	173
7.1.5 硬件仿真和实时数据交换	176
7.1.6 CCS 小结	178
7.2 CCSv4 的安装及窗口	178
7.2.1 CCSv4 的安装	178
7.2.2 初次运行 CCSv4	180
7.2.3 CCSv4 的窗口、主菜单和工具条	182
7.2.4 CCSv4 较 CCS 早期版本的改进	185
7.3 CCSv4 的基本使用方法	186
7.3.1 创建一个新的工程(Project)	186
7.3.2 工程的管理与设置	188
7.3.3 编译和运行程序	190
7.3.4 导入 CCS 早期版本的工程	193
7.3.5 使用断点和观察窗口	194
7.3.6 为断点配置数据文件和使用图形显示工具	197
7.3.7 GEL 文件的使用	198
7.4 TMS320VC5505EVM 简介	199
7.4.1 5505EVM 概述	199
7.4.2 5505EVM 的软硬件资源	200
7.4.3 使用 5505EVM 的音频处理示例	202
7.4.4 示例小结	208

第 8 章 DSP 芯片应用 209

8.1 引言 209

8.2 DSP 芯片 C 语言开发简介 209

8.2.1 TMS320C54x C/C++编译器支持的数据类型..... 209

8.2.2 C 语言的数据访问方法..... 210

8.2.3 C 语言和汇编语言的混合编程方法..... 212

8.2.4 中断函数 213

8.2.5 存储器模式 214

8.2.6 其他注意事项 216

8.3 模/数接口设计 217

8.3.1 TLC320AD50 及其接口 218

8.3.2 模/数接口的硬件电路设计 219

8.3.3 模/数接口的软件设计 220

8.4 存储器接口设计 227

8.4.1 TMS320C5409 的存储器接口..... 227

8.4.2 Flash 擦写..... 231

8.4.3 Bootload 设计..... 234

8.5 G.726 语音编解码系统 238

8.5.1 G.726 算法简介 239

8.5.2 系统构成 241

8.5.3 系统软硬件设计 242

8.5.4 系统调试 243

8.6 语音实时变速系统 244

8.6.1 语音变速算法简介 245

8.6.2 系统构成 247

8.6.3 系统软硬件设计 247

8.6.4 系统调试 250

附录 252

附录 1 TMS320 系列 DSP 的命名方法..... 252

附录 2 TMS320C54x 引脚信号说明..... 253

附录 3 TMS320C54x DSP 的中断向量和中断优先级 258

附录 4 TMS320C54x 片内存储器映像外围电路寄存器..... 265

参考文献..... 270

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 20 世纪 60 年代发展起来的,广泛应用于许多领域的新兴学科。它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。数字信号处理以许多经典的理论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(如模式识别、神经网络等)的基础。数字信号处理的实现在理论和应用之间架起了一座桥梁。

图 1-1 所示为一个典型的数字信号处理系统。

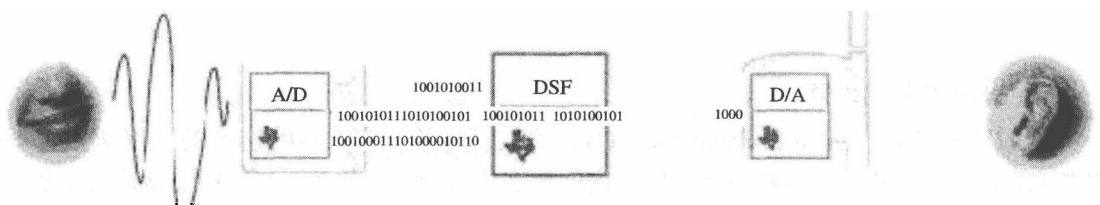


图 1-1 数字信号处理系统

数字信号处理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,数字信号处理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,抽样频率必须至少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,即将输入的模拟信号(Analog Signal,在时域中时间和幅值连续变化的信号)按一定的时间间隔进行采样,并将采样值进行量化,得到相应的数字信号(Digital Signal,时间和幅值均为离散的信号)。数字信号处理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，主要用于实时快速地完成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(Real-time)处理，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，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，存储容量比单片机大得多。DSP 采用的是改进的哈佛(Harvard)结构，并广泛采用流水线技术，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 变换精度比单片机的高。

DSP 芯片内有多条数据、地址和控制总线，具有丰富的片内存储器(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 转换器和通用 I/O 口等)。另外，它还有特殊指令：MAC(连乘加指令，可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，以避免破坏流水线)，特殊寻址方式：位倒序寻址(实现 FFT 快速倒序)和循环寻址，特殊片内外设：软件插等待电路(便于与慢速设备接口)、数字锁相电路 PLL(有利于系统稳定)。

1.2 DSP 芯片概述

1. DSP 芯片的发展

美国德州仪器(Texas Instruments, TI)公司成功地推出了 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系列，其结构非常适合于进行实时信号处理。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 μm 的 NMOS 工艺，而其他几种则采用 1.8 μm 的 CMOS 工艺。这些芯片的典型工作频率为 20 MHz，它们代表了 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，是一个性价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 275 MOPS 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，主要应用于无线通信系统中。该芯片的内部结构与 TMS320C5x 不同，因而其指令系统与 TMS320C5x 和 TMS320C2x 的是互不兼容的。

第六代 DSP 芯片的典型代表是 TMS320C62x/C67x/C64x/C674x 等，目前速度最快达 1.5 GHz。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，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 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，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。TI 公司于 2005 年 9 月 8 日宣布推出首款基于达芬奇(DaVinci)技术的产品，以简化数字视频创新。DaVinci DM6446 与 OMAP3530 是 TI 公司推出的两款 ARM + DSP 异构双核架构平台。DaVinci 主要面向数字音/视频和图像处理，OMAP 主要面向移动通信和便携设备。

图 1-2 给出了 TMS320 系列 DSP 的发展示意图。

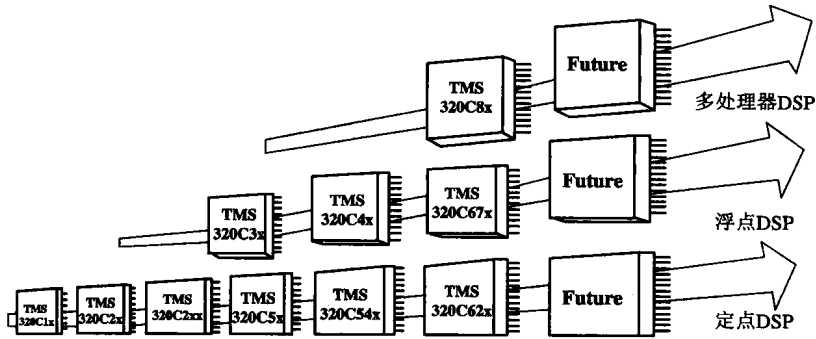


图 1-2 TMS320 系列 DSP 发展示意图

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，特别适合于电视会议等多媒体应用。

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 TMS320 系列器件的系统成本低，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，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和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	数字控制
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	电 机 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/电机驱动	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，为用户提供了广泛的选择，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 电话和 MP3 等。

TMS320C6000 系列 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 整型数据格式为 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。假定一个整数的字长为 n，则其取值范围为 $-2^{n-1} \sim 2^{n-1} - 1$ 。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 $0100\,1011\text{B} = 4\,\text{BH} = 2^6 + 2^3 + 2^1 + 2^0 = 64 + 8 + 2 + 1 = 75$

负整数 $1111\,1101\text{B} = \text{FDH} = -3$

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.xxxxxxxxxxxxxxx，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 $0101\,0000\text{B} = 2^{-1} + 2^{-3} = 0.5 + 0.125 = 0.625$

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

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

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

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 Q 表示法及其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。当 DSP 的字长一定时, 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 Sxxxxxxxxxxxxxxxx。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 Sxxxxxxxxxxxxxxxx。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.xxxxxxxxxxxxxxxxx。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 是在程序设计中最为常用的格式。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 Sxxxxxxxxxxxxxxxx.xxxxxxxxxxxxxxxxx。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, 应选择合适的数据格式。例如, 对于 Q.15 格式, 其数据范围为 $(-1, 1)$, 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): $x_q = (\text{int})x \times 2^Q$ 。
- 定点数(x_q)转换为十进制数真值(x): $x = (\text{float})x_q \times 2^{-Q}$ 。

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 $\lfloor \cdot \rfloor$ 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`, 不能写成 `32768*0.707`。32768 表明是 Q.15 格式。

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, 再将整数转换成相应的 $Q_{m.n}$ 格式。

例如, 设 $y = -0.125$, 将 y 表示成 Q.15 及 Q3.12 格式。则解决方法有: 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 -0.125 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, 当然, 最后的结果也为 Q3.12 格式。根据运算结果的动态范围, 可直接将数据右移, 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, 即整数相乘的结果仍为整数, 小数相乘的结果仍为小数。

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。如果两个数的动态范围不同, 可将动态范围小的数调整为与另一个数的动态范围一样大, 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 $y \times 2^{15} = 0.125 \times 2^{15} = 1000\text{H}$ 。

由于 Q3.12 格式与 Q.15 格式的整数位相差 3 位，因此将 y 的 Q.15 格式表示的十六进制码 1000H 右移 3 位；由于 1000H 为正数，因此将整数部分补零，得到用 Q3.12 格式表示的 0.125 为 0200H。将 4200H 加上 0200H 得到 4400H，该数的格式为 Q3.12， $x + y = 4.25$ 。

【例 4】 若 x 为正数，y 为负数， $x = 5.625$ ， $y = -0.625$ ，求 $x + y$ 。

解： $x = 5.625$ ，采用 Q3.12 格式表示的十六进制码为 5A00H；

$y = -0.625$ ，采用 Q.15 格式表示的十六进制码为 B000H。

将 y 表示为 Q3.12 格式时，将它右移 3 位，因为是负数，所以整数部分符号位扩展后的结果为 F600H。将 F600H 加到 5A00H 上，结果为 5000H， $x + y$ 的 Q3.12 格式的值等于 5。

【例 5】 若 x、y 为负数， $x = -1.625$ ， $y = -0.125$ ，求 $x + y$ 。

解： $x = -1.625$ ，采用 Q3.12 格式表示的十六进制码为 E600H；

$y = -0.125$ ，采用 Q.15 格式表示的十六进制码为 F000H。

将 y 表示为 Q3.12 格式后，其十六进制码为 FE00H。将 FE00H 加到 E600H 上，结果为 E400H， $x + y$ 的 Q3.12 格式的值等于 -1.75。

【例 6】 若 x 为负数，y 为正数， $x = -4.025$ ， $y = 0.425$ ，求 $x + y$ 。

解： $x = -4.025$ ，采用 Q3.12 格式表示的十六进制码为 BF9AH；

$y = 0.425$ ，采用 Q.15 格式表示的十六进制码为 3666H。

将 y 表示为 Q3.12 格式后，其十六进制码为 06CCH。将 06CCH 加到 BF9AH 上，结果为 C666H， $x + y$ 的 Q3.12 格式的值等于 -3.6，结果正确。

说明：定点数的减法可以通过将减数变补，转换为加法进行运算。

2. 两个定点数的乘法

两个 16 位定点数的乘法分以下几种情况。

1) 纯小数乘以纯小数(数据用 Q.15 表示)

$$\begin{array}{r}
 \text{Q.15} \times \text{Q.15} = \text{Q.30} \\
 \text{Sxxxxxxxxxxxxxxxx} ; \text{Q.15} \\
 \times \quad \text{Syyyyyyyyyyyyyyyy} ; \text{Q.15} \\
 \hline
 \text{SSzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzzz} ; \text{Q.30}
 \end{array}$$

两个 Q.15 的小数相乘后得到一个 Q.30 的小数，即有两个符号位，造成错误结果。一般情况下，相乘后得到的双精度数不必全部保留，而只需保留 16 位单精度数。由于相乘后得到的高 16 位不满足 15 位的小数精度(因为高两位均为符号位)，因此为了达到 15 位精度，可将乘积左移 1 位，去掉冗余符号位。

【例 7】 $0.5 \times 0.5 = 0.25$ 。

$$\begin{array}{r}
 0.1000000000000000 ; \text{Q.15} \\
 \times \quad 0.1000000000000000 ; \text{Q.15} \\
 \hline
 00.010000000000000000000000000000 = 0.25 ; \text{Q.30}
 \end{array}$$

2) 整数乘整数(数据用 Q15.0 表示)

$$\text{Q15.0} \times \text{Q15.0} = \text{Q30.0}$$

【例 8】 $12 \times (-5) = -60$ 。

$$\begin{array}{r}
 0000000000001100 \quad (12) \quad ; \quad Q15.0 \\
 \times \quad 111111111111011 \quad (-5) \quad ; \quad Q15.0 \\
 \hline
 11111111111111111111000100 \quad (-60) \quad ; \quad Q30.0
 \end{array}$$

3) 混合表示法

两个 16 位整数相乘，乘积总是“向左增长”，积为 32 位，难于进行后续的递推运算；两个小数相乘，乘积总是“向右增长”，且存储高 16 位乘积，用较少资源来保存结果(这是 DSP 芯片采用小数乘法的原因)，用于递推运算。

许多情况下，运算过程中为了既满足数值的动态范围，又保证一定的精度，就必须采用 Q15.0 与 Q.15 之间的 Q 表示法，即混合表示。例如，数值 1.0125 显然用 Q.15 格式无法表示，而若用 Q15.0 格式表示，则最接近的数是 1，精度无法保证。因此，数 1.0125 最佳的表示法是 Q1.14 格式。

【例 9】 $1.5 \times 0.75 = 1.125$ 。

$$\begin{array}{r}
 01.10000000000000 \quad (1.5) \quad ; \quad Q1.14 \\
 \times \quad 00.11000000000000 \quad (0.75) \quad ; \quad Q1.14 \\
 \hline
 0001.00100000000000000000000000 = 1.125 \quad ; \quad Q2.13
 \end{array}$$

由于 Q1.14 的最大值不大于 2，因此 2 个 Q1.14 数相乘得到的乘积不大于 4。

一般情况下，若一个数的整数位为 i 位，小数位为 j 位，而另一个数的整数位为 m 位，小数位为 n 位，则这两个数的乘积为 (i + m) 位整数位和 (j + n) 位小数位。这个乘积的最高 16 位可能的精度为 (i + m) 位整数位和 (15 - i - m) 位小数位。

但是，若事先了解数的动态范围，就可以增加数的精度。例如，程序员了解到上述乘积不会大于 1.8，就可以用 Q1.14 格式表示乘积，而不是理论上的最佳表示法 Q2.13 格式。

3. 两个定点数的除法

在通用 DSP 芯片中，一般不提供单周期的除法指令，为此必须采用除法子程序来实现。二进制除法是乘法的逆运算。乘法包括一系列的移位和加法，而除法可分解为一系列的减法和移位。下面说明除法的实现过程。

设累加器为 8 位，且除法运算为 91 除以 4。除的过程就是除数逐步移位并与被除数比较的过程。在这个过程中，每一步都进行减法运算，如果够减，则将 1 插入商中，否则补 0。

除法一般用有规律的减法去做，如：

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{r}
 10100 \\
 0100 \overline{) 01011011} \\
 \underline{0100} \\
 \text{右移 3 位 } 110 \\
 \swarrow 100 \\
 \underline{101} \\
 100 \\
 \underline{11}
 \end{array}
 \end{array}$$

商 22

被除数 91

除数 4

被除数位置不动

商位置不动

除数右移

余 3