

21  
Century

21世纪高等院校电气信息类系列教材

# DSP 控制器原理与应用

## 第②版

张东亮 编著



附赠电子教案

<http://www.cmpedu.com>



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

# DSP 控制器原理与应用

第 2 版

张东亮 编著



机械工业出版社

本书以 TI 公司 TMS320C28x DSP 控制器 Piccolo 系列的 TMS320F28035 为例,介绍 DSP 控制器的结构原理、软硬件设计开发和应用。主要内容包括 DSP 技术概况、32 位 DSP 控制器结构、指令系统、软件设计开发、片内外设、应用系统设计等。

本书可以作为高等院校电气信息类相关专业高年级本科生、研究生 DSP 课程的教材或参考书,还可以供从事自动控制、仪器仪表、电气自动化、计算机、电子机械等领域的工程技术人员参考使用。

本书配有电子教案,需要的读者可登录 [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com) 免费注册,审核通过后下载。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

DSP 控制器原理与应用/张东亮编著.—2 版.—北京:机械工业出版社,2018.12

21 世纪高等院校电气信息类系列教材

ISBN 978-7-111-62873-6

I. ①D… II. ①张… III. ①数字信号处理-高等学校-教材

IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 103501 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:时 静 责任编辑:李馨馨 秦 菲

责任校对:张艳霞 责任印制:李 昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2019 年 6 月第 2 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·21.25 印张·524 千字

0001-2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-62873-6

定价:59.80 元

电话服务

客服电话:010-88361066

010-88379833

010-68326294

封底无防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

机工官博:[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

金书网:[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

机工教育服务网:[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

# 前 言

目前各种控制系统、仪器仪表、通信系统、网络设备等都以微处理器为核心。几十年来，随着大规模集成电路技术的不断发展，微处理器的性能越来越高、体积越来越小、系列越来越多。微处理器从过去单纯的中央处理单元，发展到将众多外围设备集成到片内形成单片机，由过去的 8 位机，发展到 16 位、32 位机。TMS320C28x DSP 控制器就是一种 32 位高性能微控制器（Microcontroller）系列，其中的 Piccolo 系列，是最新推出的精简型、高性能、低成本 32 位 DSP 控制器。

由于大规模集成电路技术的突破，DSP 控制器的价格已和普通单片机接近，但其性能远远超过了普通单片机。高性能的控制系统、仪器仪表、通信系统、网络设备，甚至高性能家用电器等对 DSP 控制器的需求巨大。为了实现高性能，就需要快速地完成复杂算法，这是普通单片机的瓶颈。DSP 控制器由 DSP（Digital Signal Processor，数字信号处理器）发展而来，其突出特点就是采用多组总线技术实现并行机制，有独立的加法器和乘法器以及灵活的寻址方式，从而可以非常快速地实现复杂算法。

在 DSP 领域中，美国 TI 公司的 TMS320 系列 DSP 具有较强的竞争力。1981 年 TI 推出了 TMS320 系列的第一种产品 TMS32010。现在 TMS320 系列 DSP 已有 C2000、C5000、C6000 等系列。C2000 中的 28x DSP 控制器是一种集成了大量片内外设、适用于控制的 32 位 DSP 芯片系列，也称为数字信号控制器（Digital Signal Controller，DSC），一种高性能微控制单元（Microcontroller Unit，MCU）即单片机。

本书全新改版，以 Piccolo 子系列的 DSP 控制器 TMS320F28035 为例，分别介绍 DSP 技术的概况，DSP 控制器总体结构，中央处理器与指令系统，软件开发与 C 语言编程，片内外设的结构、原理与使用方法，并给出应用系统设计实例。

本书第 1 版的典型芯片为 TMS320C28x DSP 控制器的 TMS320F2812，现改为更新更常用的 Piccolo 子系列的 TMS320F28035。二者的 CPU 都属于 C28x，软件开发是一样的，但一些片内外设有一些差别。例如，将 F2812 的事件管理器（EV），分成了 F28035 的三个外设模块 ePWM、eCAP 和 eQEP。

本书深入浅出、实例丰富、突出实用，可作为高等院校自动化、电气、电子、计算机、机械电子等专业研究生与本科生的教材，也可以供从事计算机应用、测控系统、智能仪器仪表、嵌入式系统等领域的工程技术人员参考使用。

由于篇幅所限，本书未包括控制律加速协处理器（CLA）、高分辨率脉宽调制器（HRPWM）、CAN 控制器模块、I2C 模块、引导 ROM 等内容，感兴趣的读者可以参阅本书参考文献所列的“Piccolo 系列 DSP 控制器原理与开发”等资料。

由于作者水平所限，书中难免有错漏之处，恳请读者批评指正。

联系邮箱：zhangdongliang@sdu.edu.cn。

# 目 录

## 前言

第 1 章 绪论	1
1.1 DSP 的发展与 DSP 芯片的特点	1
1.2 典型 DSP 控制器应用系统及其设计过程	2
1.3 C2000 系列 DSP 控制器	4
1.4 DSP 控制器的应用	8
1.5 数的定标与定点运算	9
1.6 思考题与习题	11
第 2 章 2803x DSP 控制器总体结构	13
2.1 2803x 引脚及其功能	13
2.2 2803x 片内硬件资源	24
2.3 代码安全模块	27
2.4 时钟与低功耗模式	32
2.5 看门狗定时器	46
2.6 32 位 CPU 定时器	48
2.7 通用输入/输出	50
2.8 片内外设寄存器	61
2.9 外设中断扩展	62
2.10 思考题与习题	73
第 3 章 C28x DSP 的 CPU 与指令系统	74
3.1 中央处理器	74
3.1.1 CPU 结构	74
3.1.2 CPU 的寄存器	78
3.2 寻址方式	85
3.2.1 寻址方式概述	85
3.2.2 直接寻址方式	87
3.2.3 堆栈寻址方式	87
3.2.4 间接寻址方式	88
3.2.5 寄存器寻址方式	93
3.2.6 数据/程序/IO 空间立即寻址方式	93
3.2.7 程序空间间接寻址方式	94
3.2.8 字节寻址方式与 32 位操作数的定位	95
3.3 C28x DSP 指令系统	96
3.4 思考题与习题	107

<b>第 4 章 DSP 软件开发与 C 语言编程</b>	108
4.1 DSP 开发与软件开发流程	108
4.2 集成开发环境 CCS	114
4.3 DSP 的 C 项目文件	118
4.3.1 公共目标文件格式 COFF	119
4.3.2 链接命令文件	121
4.4 DSP C 语言程序设计基础	126
4.4.1 数据类型	126
4.4.2 C 语言运算符与基本语句	129
4.4.3 函数	131
4.4.4 指针	131
4.4.5 编译预处理命令	132
4.4.6 C 语言与汇编语言混合编程	136
4.4.7 C28x DSP 编译器的几个关键字	137
4.5 DSP C 程序举例	138
4.6 思考题与习题	146
<b>第 5 章 模数转换器</b>	147
5.1 2803x 模数转换器的特点	147
5.2 转换启动操作原理	149
5.3 ADC 转换优先级	152
5.4 同时采样模式	155
5.5 转换结束与中断运行	155
5.6 ADC 上电顺序与 ADC 校准	156
5.7 内部与外部参考电压选择	156
5.8 ADC 寄存器	157
5.9 ADC 的 C 语言编程实例	168
5.10 思考题与习题	170
<b>第 6 章 脉宽调制模块</b>	171
6.1 ePWM 模块概述	171
6.2 时基子模块	176
6.3 计数比较子模块	180
6.4 动作限定子模块	181
6.5 死区生成子模块	187
6.6 PWM 斩波子模块	189
6.7 脱开区子模块	191
6.8 事件触发子模块	193
6.9 数字比较子模块	194
6.10 ePWM 模块的寄存器	198
6.11 ePWM 模块在功率电路中的应用	217
6.12 思考题与习题	221

第 7 章 捕获模块	222
7.1 eCAP 模块概述	222
7.2 捕获与 APWM 工作模式	223
7.3 捕获模式	224
7.4 捕获模块的寄存器	230
7.5 eCAP 模块应用	236
7.6 APWM 模式应用	239
7.7 思考题与习题	240
第 8 章 正交编码脉冲模块	241
8.1 eQEP 概述	241
8.2 正交解码单元	246
8.3 位置计数器与控制单元	248
8.4 eQEP 边沿捕获单元与 eQEP 看门狗	252
8.5 单位定时器基准与 eQEP 中断结构	254
8.6 eQEP 寄存器	255
8.7 eQEP 应用实例	263
8.8 思考题与习题	267
第 9 章 串行通信接口	268
9.1 SCI 模块概述	268
9.2 SCI 模块的结构	269
9.3 SCI 的寄存器	277
9.4 SCI 应用实例	283
9.5 思考题与习题	285
第 10 章 串行外设接口	286
10.1 SPI 模块的结构	286
10.2 SPI 的操作	288
10.3 SPI 的设置	290
10.4 SPI 的寄存器	294
10.5 SPI 应用实例	301
10.6 思考题与习题	304
第 11 章 DSP 控制器应用系统设计	305
11.1 2803x 系统硬件设计	305
11.2 基于 DSP 控制器的数字运动控制系统	308
11.3 快速傅里叶变换与 FIR 数字滤波器	316
11.3.1 快速傅里叶变换	316
11.3.2 FIR 数字滤波器	320
11.4 基于 CAN 总线的分布式温度测量系统	322
11.5 思考题与习题	331
参考文献	332

# 第 1 章 绪 论

## 本章主要内容:

- 1) DSP 的发展与 DSP 芯片的特点 (Development and Features of DSP Chips)。
- 2) 典型 DSP 控制器应用系统及其设计过程 (Typical DSP Controller Application Systems and Their Design Procedure)。
- 3) C2000 系列 DSP 控制器 (C2000 Series DSP Controllers)。
- 4) DSP 控制器的应用 (Applications of DSP Controllers)。
- 5) 数的定标与定点运算 (Number Scaling and Fixed Point Operation)。

## 1.1 DSP 的发展与 DSP 芯片的特点

数字信号处理理论与技术是一门应用广泛的学科。数字信号处理是利用计算机技术,以数字形式对信号进行采集、变换、滤波、估值、增强、压缩、识别等处理,以得到符合人们需要的信号形式。

数字信号处理器也称为 DSP 芯片,是一种适合进行数字信号处理运算的微处理器,其主要功能是实时快速实现各种数字信号处理算法及各种复杂控制算法。根据数字信号处理的要求,DSP 芯片一般具有如下主要特点。

- 1) 采用哈佛结构。程序和数据存储空间分开,采用不同的总线,可以同时访问指令和数据。
- 2) 具有专门的硬件乘法器和乘法指令。可在一个指令周期内完成一次乘法和一次加法 (Multiply and Accumulate, MAC)。
- 3) 支持流水线 (Pipeline) 操作。取指令、译码和执行等操作可以重叠执行。
- 4) 具有特殊的适合数字处理算法的 DSP 指令。例如,设置循环寻址及倒位序寻址指令,使得寻址、排序的速度大大提高,从而能方便、快速地实现 FFT 算法。
- 5) 片内具有快速 RAM。
- 6) 具有单周期操作的多个硬件地址产生器。
- 7) 快速的 interrupt 处理和硬件 I/O 支持。

世界上第一个 DSP 芯片是 1978 年 AMI 公司开发的 S2811,1979 年 Intel 公司开发的 2920 是 DSP 芯片的一个里程碑。1980 年,NEC 公司推出的  $\mu$ PD7720 是第一个具有乘法器的商用 DSP 芯片。

TI 公司在 1981 年成功推出了其第一代 DSP 芯片 TMS32010 等产品,之后相继推出了第二代 DSP 芯片 TMS32020、C25 等,第三代 DSP 芯片 C30/C31/C32,第四代 DSP 芯片 C40/C44,第五代 DSP 芯片 C5x/C54x、集多 DSP 芯片于一体的高性能 DSP 芯片 C8x 以及第六代 DSP 芯片 C62x/C67x 等。目前 TI 的 DSP 产品已经成为极具影响力的 DSP 芯片。

自 20 世纪 80 年代以来，DSP 芯片不断发展，应用越来越广泛。从运算速度来看，MAC（一次乘法和一次加法）时间已经从 400 ns（如 TMS32010）降低到 10 ns 以下（如 TMS320C54x、TMS320C62x/67x 等），处理能力提高了几十倍。片内 RAM 数量增加一个数量级以上。DSP 芯片的引脚数量从 1980 年的最多 64 个增加到现在的 200 个以上。DSP 芯片的发展使 DSP 系统的成本、体积、重量和功耗都大大下降。

DSP 芯片的重要发展方向之一是片上系统（System on a Chip, SoC）。TI C2000 系列的 TMS320F28x DSP 控制器（DSP Controller）是一种集成了大量片内外设、适用于控制领域的 32 位 DSP 芯片，被称为数字信号控制器（Digital Signal Controller, DSC），实际上是一种具有 DSP 处理能力的高性能单片机（Microcontroller, MCU）。

在 DSP 芯片向高性能、高速、低功耗方向发展的同时，数字信号处理理论也在不断发展。自适应滤波、卡尔曼滤波、同态滤波、自适应控制等理论逐步成熟和应用，各种快速算法，声音与图像的压缩编码、识别与鉴别、加密解密、调制解调、频谱分析等算法都成为研究的热点，并有长足的进步，为各种实时处理的实际应用提供了算法基础。

目前生产 DSP 芯片的公司有 TI、Motorola（代表型号 MC96002）、ADI（代表型号 AD2100）、微芯（代表型号如 dsPIC 数字信号控制器）、Lucent、NEC 等。

TI 公司 DSP 产品的市场份额约为 50%，它是最大的 DSP 芯片供应商。TI 公司应用最广泛的三大系列 DSP 芯片为 TMS320C2000 系列、TMS320C5000 系列和 TMS320C6000 系列。

TMS320C2000 系列 DSP 芯片是为控制领域优化（Control Optimized）设计的，主要是 32 位定点 DSP，包括 TMS320C28x 等子系列，片内集成了 Flash 存储器、高速 A-D 转换器、事件管理器、串行通信接口及 CAN 通信模块等，适用于数字电机控制（包括变频器、伺服系统等）、运动控制、机器人、数控机床、工业测控等需要数字化的控制领域。

TMS320C5000 系列为低功耗、低成本、高性能 DSP。主要用于无线通信和有线通信设备中，如 IP 电话、网络电话、服务器、便携式信息系统及消费类电子产品等。

TMS320C6000 系列是高性能的 DSP，具有较高的性能价格比。其中 C62x 子系列为 16 位定点 DSP，工作频率为 150~300 MHz，运行速度为 1200~2400 MIPS，具有两个乘法器，6 个算术逻辑单元，超长指令字结构，大容量的片内存储器，4 个 DMA 接口，两个多通道缓冲串口，32 位片内外设。可用于无线基站、调制解调器、网络系统、中心交换机、数字音频广播设备等。

## 1.2 典型 DSP 控制器应用系统及其设计过程

### 1. 典型 DSP 应用系统

一个典型的计算机控制系统如图 1-1 所示。它通常包括 A-D 转换器、计算机 CPU、D-A 转换器、执行机构、被控对象等组成。如果其中的计算机 CPU 为 DSP 芯片，则组成基于 DSP 的数字控制系统。

许多被控物理量为模拟量（如电压、电流、温度、压力、转速等），需要经过 A-D 转换才能通过计算机进行运算与控制，运算处理的数字量结果也经常需要通过 D-A 转换转化为模拟量，以便操纵被控制对象。

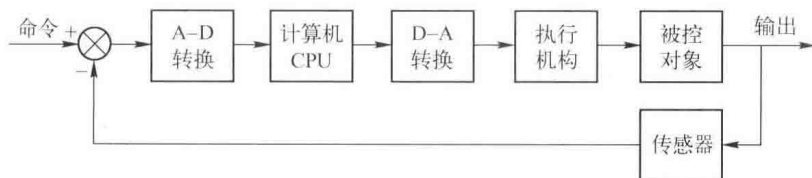


图 1-1 典型的计算机控制系统

一种广泛应用的系统是数字运动控制（Digital Motion Control, DMC）系统或数字电机控制（Digital Motor Control, DMC）系统。基于 DSP 的数字运动控制系统如图 1-2 所示，该控制系统包括以下几个部分。

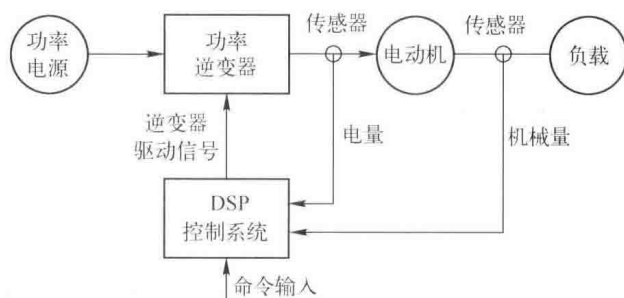


图 1-2 基于 DSP 的数字运动控制系统

1) 数据采集与处理。各种电气与机械物理量（电压、电流、位置、温度等）通过各种传感器再由 A-D 转换器、脉冲输入接口等转换为数字量。

2) 通信。通信功能完成来自高层协调主计算机或操作者的输入命令，并输出系统的各种变量。

3) 系统逻辑与控制算法等系统的核心软件。控制系统的核心硬件为 DSP 芯片。

4) 功率电路接口。根据控制软件与硬件，为功率逆变器提供所需的驱动信号。

5) 辅助功能如键盘显示、存储、监视保护、调试与诊断等。

## 2. DSP 控制器应用系统设计开发过程

DSP 控制器应用系统的设计与开发过程主要包括硬件设计、软件设计、实验调试、制作等环节。研制一个 DSP 应用系统包括确定任务、总体方案设计、硬件设计、软件设计、系统调试这几个步骤，如图 1-3 所示。

软硬件开发与调试过程中可以采用仿真器、评估板等，以加速系统开发调试。经过初步的软硬件调试，可以设计并制作印制电路板（PCB），通过进一步实验调试，完成整个应用系统，这时要把程序固化到 DSP 的程序存储器。软件开发与调试需要汇编语言或 C 语言程序的汇编、编译、调试软件，通常采用集成开发环境工具软件完成。

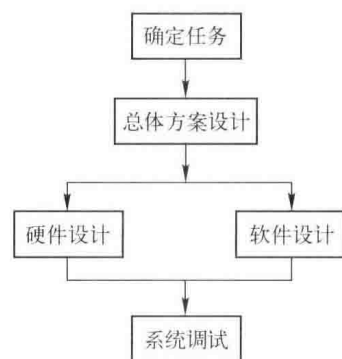


图 1-3 DSP 控制器应用系统的设计与开发过程

## 3. DSP 芯片的选择

DSP 芯片种类繁多，结构与性能差别很大。DSP 芯片按照数据格式可以分为定点芯片和浮点芯片。定点芯片按照定点数据格式进行工作，其数据长度通常为 16 位、24 位、32 位

等。定点 DSP 芯片的特点是：体积小、成本低、功耗低、对存储器的要求不高，但数值表示范围较窄，必须使用定点定标的方法，并要防止结果的溢出。浮点 DSP 芯片按照浮点数据格式进行工作，其数据长度通常为 32 位、40 位等。由于浮点数的数据表示动态范围宽，运算中不必顾及小数点的位置，因此开发较容易，但它的硬件结构相对复杂、功耗较大，且比定点 DSP 芯片的价格高。通常，浮点 DSP 芯片使用在对数据动态范围和精度要求较高的系统中。

DSP 的主要技术指标通常有 CPU 数据宽度（运算精度）、时钟频率、机器周期、运算速度等。

选择 DSP 芯片除了要考虑数据格式（定点、浮点）、数据宽度、时钟频率、机器周期、运算速度等性能指标外，还要考虑如下因素。

- 片内硬件资源，如存储器、模数转换器、事件管理器、通信接口等。
- 价格。
- 开发工具。
- 器件功耗与封装。
- 货源、生命周期等。

### 1.3 C2000 系列 DSP 控制器

C2000 系列是为控制领域优化设计的 DSP 芯片，被称为 DSP 控制器、数字信号控制器（DSC）或微控制器（MCU），由最初的 C2x、C2xx 系列发展到目前广泛应用的 C24x、C28x 两个系列。C24x 为 16 位定点 DSP，C28x 为 32 位定点 DSP。C28x 系列目前有 28x 定点系列、Piccolo 精简系列、Delfino 浮点系列和集成 ARM 的 Concerto 系列。

#### 1. C24x 系列 DSP 控制器

C24x 又包括 24x 和 240x 系列，前者为 +5 V 电源，后者为 +3.3 V 电源，时钟频率由 20 MHz 提高到 40 MHz。

DSP 控制器结构与单片机一样，由 CPU、存储器、I/O 接口、总线等组成。有的芯片包含片内 Flash 存储器，有的集成了片内 ROM。配置了完善的外围设备，包括事件管理模块（Event Manager, EV）、高速 A-D 转换模块（ADC）、串行通信接口（SCI）模块、串行外设接口（SPI）模块、中断管理系统、系统监视模块、CAN 通信模块等。其中事件管理模块含有通用定时器、比较器、PWM 发生器、捕获器，可以方便地用于数字电机控制等领域。

#### 2. C28x 系列 DSP 控制器

C28x 系列的 TMS320F281x DSP 控制器芯片的功能框图如图 1-4 所示。与 C24x DSP 控制器相比，CPU 数据宽度由 16 位提高到 32 位，时钟频率提高到 150 MHz。其片内资源与主要特性如下。

1) 高性能静态 CMOS 技术：运行速度为 150 MIPS，指令周期为 6.67 ns，低功耗（核电压 1.8 V，I/O 口电压 3.3 V），高性能的 32 位 CPU，4 MW 的程序和数据地址空间。

2) 兼容性好：C27x 目标代码兼容模式、C28x 模式及 C2xLP 源代码兼容模式。

3) 片内集成大容量存储器：最多 128 KW 的 Flash 存储器、1 KW 的 OTP 型 ROM、18 KW RAM、4 KW 的引导（Boot）ROM。

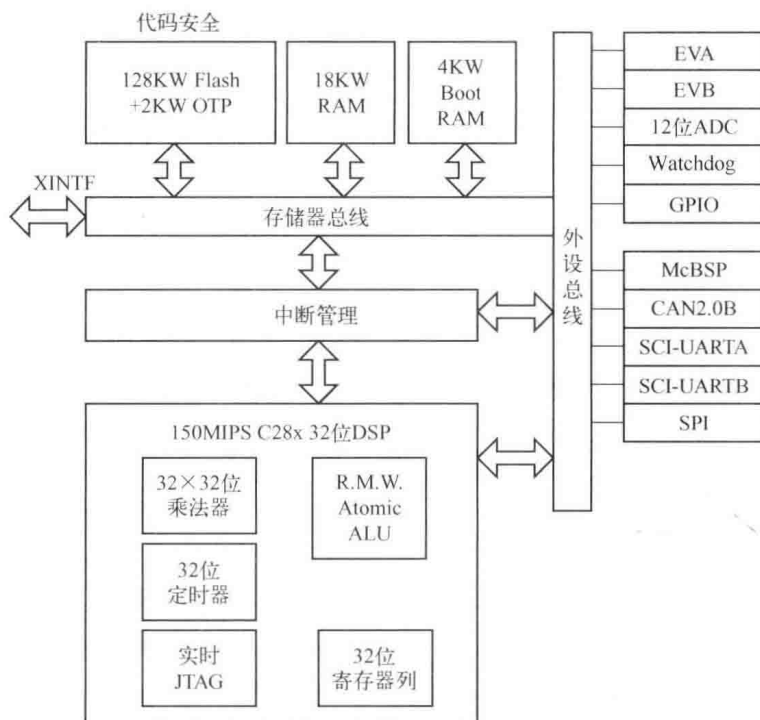


图 1-4 TMS320F281x DSP 控制器功能框图

4) 外部存储器接口 EMIF (External Memory Interface): 多达 1 MW 的外部存储器空间、可编程软件等待状态、3 个独立的片选。

5) 两个事件管理器 EVA、EVB。每个均包含两个 16 位通用定时器、8 个 PWM 通道、3 个捕获单元、QEP 接口电路。

6) 16 通道 12 位 ADC, 快速转换时间 80 ns。

7) 3 个 32 位通用 CPU 定时器 TIMER0/1/2。

8) 两个串行通信接口 SCI, 标准 UART 接口。

9) 16 位串行外设接口 SPI。

10) 多通道缓冲串行口 (McBSP)。

11) 增强型 CAN 总线接口 (eCAN)。

12) 多达 56 个通用 I/O 引脚。

13) 时钟和系统控制 (OSC、PLL、WD)。

14) 外设中断扩展功能支持 45 个外设中断。

15) 128 位安全密码, 保护软件知识产权。

16) 支持多种编程工具。

17) 具有低功耗模式。

18) 封装有 176 引脚 PGF LQFP (2812), 128 引脚 PBK LQFP (2810/2811)。

### 3. Piccolo 系列 DSP 控制器

Piccolo (精简型) 系列 DSP 包括 2802x、2803x、2806x、2807x 子系列等。

2802x Piccolo 系列 DSP 控制器具有 C28x 内核, 它采用最新的架构技术和增强型外设, 内置振荡器与看门狗, 其封装尺寸最小为 38 引脚, 它成本低, 但具有 32 位实时控制功能。

通过在诸如太阳能逆变器、白色家电设备、混合动力汽车电池和 LED 照明等应用场合采用高级算法实时控制，可以实现更高的系统效率和精度。该子系列可以广泛应用于汽车电子和数字电源等领域。

2803x DSP 是一款基于 C28x 内核和控制律加速器（Control Law Accelerator, CLA）的 Piccolo 系列双核 DSP 控制器。其性能特点如下。

1) 强大的 C28x DSP 内核。

- 高效率 32 位 CPU。
- 60 MHz 主频（指令周期 16.67 ns）。
- 单周期执行一次 32×32 或两次 16×16 乘加（MAC）操作。
- 哈佛总线结构。
- 原子操作。
- 快速中断响应与处理。
- 统一的存储器编程模式。
- 高效率 C/C++ 代码。

2) 控制律加速器（CLA）。

- 独立的、可编程的 32 位浮点协处理器。
- 运行频率与主 CPU C28x 一致，并具有独立的 8 级流水线。
- 支持断点调试。
- 支持 IEEE 单精度浮点运算：单周期浮点加、减、乘法、单周期浮点比较、取最大值、取最小值、单周期  $1/x$ 、 $1/\sqrt{x}$  估算。
- 可响应 ADC、ePWM 和 CPU 定时器 0 中断。
- 可直接访问 ePWM+HRPWM、比较器和 ADC 结果寄存器。

3) 仅需少量外围器件，系统成本低。

- 内置 1.8 V 电压调整器，实现 3.3 V 单电源供电。
- 内部集成上电复位和掉电复位功能。
- 功耗低。

4) 时钟与定时器。

- 内部集成 2 个 10 MHz RC 振荡器，精度高达 1%。
- 支持动态 PLL 倍率调节。
- 时钟丢失检测电路：若当前时钟异常则自动启用备用时钟，提高可靠性。
- 片内看门狗定时器。
- 3 个 32 位 CPU 定时器，带 16 位预分频器。

5) 外设中断扩展（PIE）模块支持所有的外设中断。

6) 丰富的片内存储器。其中，Flash：64 KW，SARAM：10 KW，OTP：1 KW，Boot ROM：8 KW。

7) 具有代码安全模块，128 位安全加密。

8) 先进的仿真特性。具有分析和断点功能，可进行硬件实时调试。

9) 串行端口外设。

- 1 个串行通信接口（SCI）模块，兼容传统的 UART。

- 双串行外设接口 (SPI) 模块。
- 1 个互联 IC 总线 (I2C) 模块。
- 局域互联网 (LIN) 控制器。
- 增强型局域网 (eCAN) 控制器。

#### 10) 增强型控制外设。

- 增强型 PWM (ePWM), 精度高达 150 ps。每一个 ePWM 模块都有独立的 16 位定时器。
- 高分辨率 PWM (HRPWM)。
- 增强型捕获单元 (eCAP)。
- 增强型正交编码器接口 (eQEP)。
- 具有多达 45 个带输入滤波功能的通用数字 I/O (GPIO) 和 6 个模拟 I/O (AIO)。

#### 11) 模拟功能。

- 3 个模拟比较器 (COMP)。
- 2 组多通道 12 位高速 ADC, 支持内部和外部基准源, 4.6 MHz 的采样速率。
- 内部集成温度传感器, 可直接与 ADC 的模拟输入通道相连。

12) 封装有 56 引脚 RSH (PQFP)、64 引脚 PAG (TQFP)、80 引脚 PIN (LQFP) 封装。

### 4. Delfino 系列数字信号控制器

2833x Delfino 系列是一款用于控制领域的高集成度、高性能的数字信号控制器 (DSC), 它基于 C28x DSP 内核同时具有一个单精度 (32 位) 浮点运算单元 (FPU)。

性能特点如下。

#### 1) 高性能静态 CMOS 技术。

- 150 MHz 时钟 (指令周期 6.67 ns)。
- 1.9 V/1.8 V 内核电压, 3.3 V I/O 电源。

#### 2) 高性能 32 位 CPU (C28x)。

#### 3) 6 通道 DMA (用于 ADC、McBSP、ePWM、XINTF 和 SARAM)。

#### 4) 16 位或 32 位外部接口 (XINTF)。最多扩展 2 MW。

#### 5) 片内存储器。其中, Flash: 256 KW, SARAM: 28 KW, OTP: 1 KW。

6) Boot ROM: 8 KW。用于软件启动方式 (通过 SCI、SPI、CAN、I2C、McBSP、XINTF、并行 I/O) 和标准数学表格。

#### 7) 时钟与系统控制。支持动态 PLL 倍率更改, 具有片内振荡器、看门狗模块。

#### 8) GPIO0~GPIO63 引脚可以连接到 8 个外部内核中断之一。

#### 9) 外设中断扩展 (PIE) 模块支持所有的外设中断。

#### 10) 具有代码安全模块, 128 位加密, 保护 Flash/OTP/RAM。

#### 11) 增强的控制外设。

- 多达 18 个 PWM 输出。
- 多达 6 个高分辨率 PWM (HRPWM), 精度高达 150ps。
- 多达 6 个捕获输入。
- 多达 2 个正交编码器接口 (QEP)。

- 多达 8 个 32 位/9 个 16 位定时器。
- 12) 3 个 32 位 CPU 定时器。
- 13) 串行外设。
  - 多达 3 个串行通信接口 (SCI) 模块。
  - 多达 2 个控制器局域网 (CAN) 模块。
  - 1 个串行外设接口 (SPI) 模块。
  - 1 个 I2C 总线模块。
  - 多达 2 个 McBSP 模块。
- 14) 16 通道 12 位 ADC 模块。具有 80 ns 转换速率、2 个采样保持器。
- 15) 具有多达 88 个带输入滤波功能的通用数字 I/O (GPIO)。
- 16) JTAG 接口。
- 17) 先进的仿真特性。具有分析和断点功能, 可进行硬件实时调试。
- 18) 封装有 176 引脚 PGF (LQFP)、179 引脚 ZHH (BGA)、176 引脚 ZJZ (PBGA) 封装。

### 5. Concerto 系列微控制器

Concerto 系列双子系统微控制器通过将 Cortex-M3 ARM 与 C28x 内核结合在一个器件上实现互联与控制。F28M35x 为该系列代表型号。

Concerto 系列应用于光伏逆变器与工业控制等领域, 在采用单片方案时仍具有通信与控制部分可以分开的优点。

Concerto 系列的性能特点如下。

1) 高性能静态 CMOS 技术。C28x (高达 150 MHz) 可用于:

- 实时控制。
- 传感、DSP 滤波与处理。
- 固件可编程 PLM 方案 (VCU)。
- 功率独立多环数字控制。
- 电机控制与功率监测。
- 工业控制外设。

2) Cortex-M3 (高达 100 MHz) 可用于:

- 主机通信: Ethernet (以太网)、USB、CAN、UART、SPI、I2C。
- 调度 (Scheduling)。
- 操作系统。

## 1.4 DSP 控制器的应用

自从 20 世纪 90 年代以来, DSP 控制器作为一种 DSP 芯片得到了飞速发展。其高速发展, 一方面得益于集成电路技术的发展, 另一方面也得益于巨大的市场。目前, DSP 控制器主要用于控制系统、仪器仪表、信号处理、通信等领域。其价格越来越低, 性价比日益提高, 具有巨大的应用潜力。主要应用领域如下。

1) 自动控制。如工业自动化、电机控制、机器人控制、伺服控制、运动控制、磁盘控

制、电力电子系统、再生能源、LED 照明、太阳能变换器、数字电源等。

- 2) 汽车控制。如发动机控制、自动驾驶、电动车辆等。
- 3) 仪器仪表。如函数发生、地震处理等。
- 4) 医疗仪器。如超声设备、诊断工具、病人监护等。
- 5) 家用电器与消费电子。如空调、冰箱、音响、玩具与游戏机等。
- 6) 信号处理。如数字滤波、自适应滤波、快速傅里叶变换、谱分析、卷积等。
- 7) 通信。如调制解调器、自适应均衡、数据压缩、传真、可视电话等。
- 8) 军事。如保密通信、雷达处理、声呐、导航、导弹制导等。

## 1.5 数的定标与定点运算

### 1. 二进制补码

DSP 中的数通常以二进制补码表示。二进制数的最高位为符号位，表示数的正负，0 表示数为正，1 则表示为负，其余的位表示数值的大小。求取负数补码的方法是其原码的符号位不变，其他位取反加 1。而正数的补码与原码一样。

**【例 1-1】**  $x=-24$ ,  $y=24$ , 写出它们的 8 位二进制补码。

$$x=-24, [x]_{\text{原}}=1001\ 1000\text{B}, [x]_{\text{补}}=1110\ 1000\text{B}=0\text{E8H}$$

$$y=24, [y]_{\text{原}}=[y]_{\text{补}}=0001\ 1000\text{B}=18\text{H}$$

可以看出，就整数而言，8 位二进制补码表示数的范围是  $-128 \sim +127$ ，16 位二进制补码表示数的范围是  $-32768 \sim +32767$ 。

为了提高精度，通常需要用多个字节表示一个数。如 8 位扩展到 16 位，16 位扩展到 32 位，就存在符号扩展问题。对于正数来说，前面全部加 0 即可。负数符号扩展，前面则需要全部加 1。

**【例 1-2】**  $x=-24$ ,  $y=24$ , 写出它们的 16 位二进制补码。

$$x=-24, [x]_{\text{原}}=1000\ 0000\ 0001\ 1000\text{B}, [x]_{\text{补}}=1111\ 1111\ 1110\ 1000\text{B}=0\text{FFFE8H}$$

$$y=24, [y]_{\text{原}}=[y]_{\text{补}}=0000\ 0000\ 0001\ 1000\text{B}=18\text{H}$$

再例如， $-1$  的 8 位、16 位、32 位二进制补码的十六进制表示分别为  $0\text{FFH}$ 、 $0\text{FFFFH}$ 、 $0\text{FFFFFFH}$ 。

### 2. 数的定标

对于 16 位定点 DSP 芯片，参与运算的数是 16 位整数。但实际情况下，数学运算过程中的数不一定是整数，例如电流值、放大倍数等。那么定点 DSP 芯片如何处理小数呢？通常由编程者确定一个数的小数点在 16 位中的哪一位，这就是数的定标。即 16 位二进制数小数点的位置不同，表示的数大小与精度就不同。

例如，同样一个十六进制数  $2000\text{H}$ ，相应的二进制数为  $0010\ 0000\ 0000\ 0000\text{B}$ 。如果认为其小数点在最后一位，称为 Q0 格式，即为纯整数，表示 8192。如果认为其小数点在最高位后面，称为 Q15 格式，即为纯小数，则表示  $0.010\ 0000\ 0000\ 0000\text{B}=0.25$ 。

数的定标有 Q 格式表示法和 S 格式表示法。表 1-1 给出了 16 位二进制数的 16 种 Q 格式表示法、S 格式表示法及其可以表示数的范围。Q 格式后面的数字表示小数的位数，如 Q2 格式表示有 2 位小数，Q15 格式表示有 15 位小数。S 格式后面的数字表示整数与小

数各自的位数，如 S2.13 格式表示有 2 位整数，13 位小数，当然在最高位还有 1 位符号位。

表 1-1 Q 格式表示、S 格式表示及数值范围

Q 格式表示	S 格式表示	表示数的范围
Q15	S0.15	-1~0.99997
Q14	S1.14	-2~1.99994
Q13	S2.13	-4~3.99878
...	...	...
Q2	S13.2	-8192~8191.75
Q1	S14.1	-16384~16383.5
Q0	S15.0	-32768~32767

从表 1-1 可以看出，不同的 Q 值所表示的数不仅范围不同，而且精度也不同。Q 值越大，数值范围越小，但精度越高；反之，Q 值越小，数值范围越大，但精度越低。例如 Q0 的数值范围是 -32768~+32767，精度为 1；Q15 的数值范围是 -1~0.99997，精度为  $1/32768=0.00003$ 。所以，对定点数而言，数值范围与精度是一对矛盾，一个变量要能够表示比较大的数值范围，必须降低精度。而要提高精度，则数的表示范围就要相应减小。

浮点数 (x) 转换为定点数 ( $x_q$ ) 的公式为

$$x_q = (\text{int})x * 2^Q$$

式中的 Q 表示定标值，(int) 表示取整。

定点数 ( $x_q$ ) 转换为浮点数 (x) 的公式为

$$x = (\text{float})x_q / 2^Q$$

式中的 (float) 表示取浮点数。

例如，浮点数  $x=0.5$ ，定标值  $Q=15$ ，则定点数  $x_q=0.5 \times 32768=16384$ 。反之，一个用  $Q=15$  表示的定点数为 16384，则其浮点数为  $x=16384/32768=0.5$ 。

### 3. 定点运算

在 DSP 的运算中多数为乘法和加法运算。通常采用全部以 Q15 格式（纯小数）或 Q0 格式（纯整数）表示。因为小数乘以小数得小数，整数乘以整数得整数。但有的情况下如动态范围和精度需要，必须使用带有整数与小数的混合表示法，如 Q10 格式有 10 位小数、5 位整数，表示的数值范围是 -32~31.999，精度为  $1/32=0.03$ 。

#### (1) 定点乘法

两个定点数相乘时，可以分为纯小数乘以纯小数、整数乘以整数及混合表示法 3 种情况。

##### 1) 纯小数乘以纯小数

Q15 乘以 Q15，结果为 Q30 格式，即有两个符号位。一般情况下相乘后得到的满精度数不必全部保留，只需要保留 16 位精度数。可以将乘积左移一位，去掉一位符号位，得到 Q15 格式的数。