



普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

DSP技术及应用

第2版

陈金鹰 编著

免费
电子课件



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材

DSP 技术及应用

第2版

陈金鹰 编著



机械工业出版社

DSP 技术包括数字信号处理芯片技术和数字信号处理理论研究两方面的内容, 本书首先系统地介绍以 TMS320C54x 系列芯片为代表的典型 DSP 芯片的组织结构, 然后结合汇编语言来说明如何具体使用 DSP 的内部资源, 最后通过实际例子介绍如何将 DSP 芯片技术与数字信号处理理论结合起来, 用汇编语言程序实现理论研究中的算法问题。

全书共七章。第一章介绍了从模拟系统到数字系统的演进过程、DSP 技术的应用前景和 DSP 系统的一般设计原则。第二章用较多的篇幅详细地介绍 TMS320C54x 系列芯片的内部资源和结构, 这也是该系列芯片区别于其他芯片的特征所在。第三章介绍了指令系统。第四章介绍了 DSP 软件开发过程中所涉及的程序编写、汇编、链接和可执行目标文件的生成。第五章通过大量例子来解释常用指令的应用方法和技巧。第六章通过数字系统应用实例说明如何用 DSP 芯片解决数字信号处理理论中的算法问题和工程实际问题。第七章结合实验说明 DSP 集成开发软件平台 CCS 的使用方法。

本书适合通信工程、电子类、仪器类、自动化类及相关专业的大专生、本科生和研究生学习, 也可供其他相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

DSP 技术及应用/陈金鹰编著. —2 版. —北京: 机械工业出版社, 2014. 6
普通高等教育“十二五”电子信息类规划教材
ISBN 978-7-111-46359-7

I. ①D… II. ①陈… 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 (2014) 第 066519 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: 王 康 责任编辑: 王 康 卢若薇

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 杜雨霏

封面设计: 张 静 责任印制: 李 洋

北京宝昌彩色印刷有限公司印刷

2014 年 8 月第 2 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.75 印张 · 484 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-46359-7

定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203

封面无防伪标均为盗版

第2版前言

数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP), 也叫 DSP 芯片, 是一种具有特殊结构的微处理器, 是 20 世纪科学及工程具体化中最有影响力的技术之一。自 20 世纪 70 年代末第一款 DSP 芯片诞生以来, 已广泛应用于通信、医疗、家用电器、石油勘探、工业控制、军事、航空航天等领域, 并在这些应用领域中发展出很深入的 DSP 技术、特有的算法、特殊的技巧。一般而言, 数字信号处理是把通过时间与数值采样的信号, 做各种离散量化的数值处理与计算, 因此诸如快速傅里叶变换、Z 变换、卷积运算、相关运算、最小二乘法、有限脉冲响应等常用的数理分析方法, 都可以利用数字信号处理实现, 以提高系统整体的运算性能。目前建立在 DSP 技术基础上的数字系统, 可解决线性时不变系统、冲激响应系统和非线性时不变系统中所涉及的算法与控制问题。

DSP 芯片系列众多, 可归结为通用型和专用型两大类。通用型 DSP 芯片是一种软件可编程的 DSP 芯片, 适用于各种 DSP 应用场合。专用型 DSP 芯片则将 DSP 芯片采用的算法集成到 DSP 芯片内部, 一般适用于某些专用的场合。目前 DSP 芯片的主要供应商包括美国的德州仪器 (TI) 公司、AD 公司、AT&T 公司和 Motorola 公司等。世界上第一款单片 DSP 芯片是 1978 年 AMI 公司发布的 S2811, 1979 年 Intel 公司发布的商用可编程器件 2920 是 DSP 芯片诞生的一个主要标志, 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。TI 公司的第一代 TMS32010 数字信号处理器于 1982 年问世, 第二代 TMS32020 于 1985 年推出, 1986 年推出 CMOS 版本的 TMS320C25, 以后相继推出第三代 TMS320C3x 系列, 第四代 TMS320C4x 系列, 1991 年推出第五代 TMS320C5x 系列, 1997 年推出第六代 TMS320C6x 系列。TI 公司的 DSP 芯片占世界 DSP 芯片市场近 50%, 在国内也被广泛被采用。本书选取 TMS320C54x 系列芯片为介绍对象, 该系列芯片具有 DSP 的典型特征, 难度适中, 应用广泛, 性价比高, 适合初学 DSP 技术者学习。在此基础上, 读者再学其他 DSP 芯片就比较容易。

1. 本书的内容组织

全书用七章的篇幅, 从 DSP 基本概念入手, 对 TMS320C54x 系列芯片的结构和汇编语言做了深入详细的介绍, 并通过应用实例来帮助读者掌握如何将数字信号处理理论中的算法问题用 DSP 芯片和程序来加以解决, 做到学有所用。

第一章数字信号处理技术基础, 通过对模拟系统与数字系统的比较、数字信号处理器分类、数字信号处理芯片应用范围和基于 DSP 的应用系统设计方法的介绍, 讨论了 DSP 芯片技术的产生、应用和开发过程。要求读者对 DSP 的芯片种类有所了解, 能根据科研项目的不同, 合理选择适当的芯片。

第二章 DSP 芯片结构介绍, 介绍了 DSP 芯片的硬件结构, 包括 CPU 结构、总线结构、存储器分配、在片外围电路、对外接口、总线和中断、自举加载等相关问题。要求读者对 DSP 芯片的硬件结构和组成有所掌握, 以便能正确使用和发挥 DSP 芯片的技术优势。

第三章 DSP 指令系统及特点, 对 DSP 芯片的指令系统进行了介绍, 包括指令系统的寻址方式、地址的生成、流水线操作、汇编指令等。要求读者掌握 DSP 芯片汇编语言的寻址

方式、流水线操作概念,对指令系统有初步了解。

第四章 DSP 软件开发过程,介绍了 DSP 软件开发过程,包括汇编语言程序的编写方法、汇编和链接过程、C 语言和汇编语言的混合编程。要求读者对 DSP 的芯片的开发过程有所了解,掌握汇编语言程序的编写、汇编和链接方法,了解用 C 语言实现 DSP 功能时的注意事项,能读懂简单的汇编语言程序。

第五章汇编语言编程举例,介绍如何采用汇编指令实现通信系统中常见数字信号处理方法,常用算法的实现和技巧,包括四则运算、正弦和余弦信号发生器、FIR 滤波器的实现、IIR 滤波器的实现、快速傅里叶变换(FFT)的实现。要求读者掌握常用 DSP 汇编语言指令、通信系统中数字信号处理的特殊指令、延时方法和寄存器寻址运算及其他技巧。

第六章信号处理方法的硬件实现,通过信号源设计、线性时不变系统设计、信号检测系统设计、信号调制功能设计、模拟电路功能设计和梳状滤波器设计,帮助读者进一步熟悉用 DSP 芯片解决数字信号处理理论中的算法问题和工程实际问题。要求读者能用 DSP 解决简单的数字信号处理应用问题,能设计信号源、进行相关运算、卷积运算和模拟传输函数到数字传输函数的转换运算。

第七章 DSP 实验,用基本算术运算、正弦波信号发生器、FIR 数字滤波器、快速傅里叶变换的实现 4 个实验来介绍 DSP 集成开发软件平台 CCS 的使用方法。要求读者能通过实验掌握 CCS 的软件仿真方法。

2. 本书适应的课程及课时分配

本书内容适合通信工程、电子类、仪器类、自动化类及相关专业的大专生、本科生和研究生的学习,也可供其他相关专业的工程技术人员参考。其各章的学时分配为:第一章数字信号处理技术基础,理论教学 2 学时;第二章 DSP 芯片结构介绍,理论教学 10 学时;第三章 DSP 指令系统及特点,理论教学 4 学时;第四章 DSP 软件开发过程,理论教学 4 学时;第五章汇编语言编程举例,理论教学 8 学时;第六章信号处理方法的硬件实现,理论教学 4 学时;第七章 DSP 实验,每个实验安排 2 学时,共计 8 学时。

3. 第 2 版说明

本书是在 2004 年第 1 版基础上改编而成的。原第 1 版共印刷了 10 次,受到广大读者欢迎。但随着 DSP 技术的发展,有的内容需要有所更新,因此第 2 版对第一章、第六章和第七章进行了重写,对第二到第五章中个别有错的地方进行了更正。此外,尽管目前 DSP 的开发工具已发展到 CCSv5,但 CCSv2 软件占用 PC 的资源少,使用方便,更适合初学者,因此在本书的实验部分仍使用该版本。对于需要学习 TMS320C55x 系列芯片的读者,由于 TMS320C55x 与 TMS320C54x 的基本结构相似,只是资源有所增加,C54x 的程序与 C55x 兼容,学习本书将有利于学习 C55x 芯片。读者可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 下载实验配套文件和综合练习,对使用本书的教师,还提供了电子课件。

最后,感谢为本书第 1 版做出贡献的陈爱萍、韩喜春、游敏惠老师。感谢本书在编写过程中所得到的其他同行老师和出版社的帮助。特别感谢华侨大学杨毅明老师对第 2 版做出的贡献,感谢卢为、袁灿、李俐萍、李文彬、胡波、任小强、赵容、杨敏、王惟洁、牟亚南、夏藕、吴容等同学对第 2 版给予的支持。

编者
于成都理工大学

第 1 版前言

数字信号处理器(Digital Signal Processor——DSP),也叫 DSP 芯片,是一种具有特殊结构的微处理器,是 20 世纪科学及工程具体化最有影响力的技术之一。自 20 世纪 70 年代末 DSP 芯片诞生以来,在短短的 20 多年时间便得到了飞速的发展,已广泛应用于通信、医疗、影像、雷达及声呐、高保真音乐重现、石油勘探、工业控制、军事、航空航天等领域。在这些应用领域都已经发展出很深入的 DSP 技术、特有的算法、应用数学及特殊的技巧。一般而言,数字信号处理是把通过时间与数值采样的信号,做各种离散量化的数值处理与计算,因此诸如快速傅里叶变换、Z 变换、卷积运算、相关运算、最小二乘法、有限脉冲响应等常用的数理分析方法,都可以利用数字信号处理实现,以提高整体的运算性能。

DSP 芯片可分为通用型和专用型两大类。通用型 DSP 芯片是一种软件可编程的 DSP 芯片,适用于各种 DSP 应用场合。专用型 DSP 芯片则将 DSP 芯片采用的算法集成到 DSP 芯片内部,一般适用于某些专用的场合。本书主要讨论通用型 DSP 芯片。

目前 DSP 芯片的主要供应商包括美国的德州仪器(TI)公司、AD 公司、AT&T 公司和 Motorola 公司等。世界上第一个单片 DSP 芯片是 1978 年 AMI 公司发布的 S2811,1979 年 Intel 公司发布的商用可编程器件 2920 是 DSP 芯片的一个主要里程碑,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。TI 公司的第一代 DSP 芯片 TMS32010 于 1982 年问世,第二代 TMS32020 于 1985 推出,1986 年推出 CMOS 版本的 TMS320C25,以后相继推出第三代 TMS320C3x 系列,第四代 TMS320C4x 系列,1991 年推出第五代 TMS320C5x 系列。而 TMS320C8x 系列则是包含四个定点处理器与一个精简指令集处理器的多 DSP 芯片,可以应用在视频会议与虚拟环境领域。1997 年推出第六代 TMS320C6x 系列。TMS320C6x 系列采用超长指令字(VLIW)设计芯片,TMS320C62 提供 200MHz 时钟、1600MIPS(MIPS 表示每秒百万条指令)的运算速度,主要用于高档视频及多媒体产品。TMS320F24x 系列称为 DSP 控制器,它整合了 DSP 核心、快速存储器的产品及数字马达控制的外围模块,适用于三相电动机、变频器之类的高速实时工控产品。TMS320C54x 系列则适用于无线通信领域。TMS320AV7000 是针对机顶盒需求设计的 DSP 芯片。TI 公司的 DSP 芯片占世界 DSP 芯片市场近 50%,在国内也被广泛地采用。

本书通过对 TMS320C54x 系列芯片的结构和专用汇编语言的介绍,使读者了解通信技术领域相关产品,对数字信号进行处理的方法。全书共分七章,第一章理论教学 2 学时,主要介绍 DSP 技术的发展及相关知识,从一般角度讨论 DSP 芯片技术的产生、应用和开发环境。要求读者对 DSP 的芯片技术有所了解,能根据科研项目的不同,合理选择适当的芯片,了解常用的开发工具及软件和硬件仿真工具。第二章理论教学 12 学时,主要介绍 DSP 芯片的硬件结构,包括 CPU 结构、总线结构、存储器分配、在片外围电路、串行口、外部总线和中断、与存储器及外围设备和低速器件的接口、自举加载等相关问题。要求读者对 DSP 芯片的硬件结构和组成有所了解,以便能正确使用和发挥 DSP 芯片的技术优势。第三章理论教学 4 学时,本章对 DSP 芯片的汇编语言进行了介绍,包括指令系统的寻址方式、地址的

生成、流水线操作、指令系统的概述。要求读者掌握 DSP 芯片汇编语言的寻址方式、流水线操作概念，对指令系统有初步了解。第四章理论教学 4 学时，该章主要介绍了 DSP 软件开发方法与过程，包括汇编语言程序的编写方法、汇编和连接过程、DSP 的 C 语言开发编译过程、C 语言和汇编语言的混合编程、汇编语言程序设计。本章要求读者对 DSP 芯片的开发过程有所了解，掌握汇编语言程序的编写、汇编和连接方法，了解用 C 语言实现 DSP 功能时的注意事项，能读懂简单的汇编语言程序。第五章理论教学 8 学时，该章主要介绍如何应用 DSP 汇编语言实现通信系统中常见信号的数字信号处理方法、常用算法的基本实现方法和技巧。主要内容包括：基本运算的实现、信号发生器、FIR 滤波器的实现、IIR 滤波器的实现、快速傅里叶变换(FFT)的实现、信号功率谱运算的实现方法。本章要求读者了解用 DSP 汇编语言进行通信系统中数字信号处理的特殊指令、延时方法和位倒序运算及其他技巧。第六章和第七章安排 12 学时的实验，其中第六章主要介绍 DSP 的集成开发环境 (CCS)，读者可以在这个环境下完成工程定义、程序编辑、编译连接、调试和数据分析等工作环节；第七章主要通过四个实验来进一步加深对开发过程相关环节的了解。

本书由陈金鹰老师任主编，并负责全书的统稿和整理。第一章由湖南工程学院的陈爱萍老师编写；第二、三、四、五章由成都理工大学的陈金鹰老师编写，第六章由黑龙江工程学院的韩喜春老师编写；第七章由重庆邮电学院的游敏惠老师编写，王力永对第五章大部分程序进行了验证。书中难免有错误之处，请读者多提意见，以便今后改正。

本书在编写过程中得到了成都理工大学信息工程学院院长王绪本教授的大力支持和帮助，并对书中内容提出了许多宝贵意见，特此深表感谢。同时也感谢编审委员会的专家和机械工业出版社的领导对本书提出的宝贵意见与大力支持。

本书配有电子教案，欢迎选用本书作教材的老师索取，电子邮件：wbj@mail.machine.info.gov.cn。本书为精品课程“DSP 技术及应用”的配套教材，课程网址为：<http://202.115.138.28/2005/dsp/index.htm>

编者

目 录

第2版前言	
第1版前言	
第一章 数字信号处理技术基础	1
第一节 模拟系统与数字系统的比较	1
第二节 数字信号处理器分类	3
第三节 数字信号处理芯片的应用范围	8
第四节 基于DSP的应用系统设计方法	10
思考题	14
第二章 DSP芯片结构介绍	15
第一节 TMS320C54x芯片的基本性能	16
第二节 TMS320C54x芯片的CPU结构	17
第三节 TMS320C54x芯片的内部总线结构	23
第四节 TMS320C54x芯片的存储器结构	24
第五节 TMS320C54x芯片的在片外围电路	31
第六节 TMS320C54x芯片的串行口	41
第七节 TMS320C54x芯片与外设的接口	52
第八节 TMS320C54x芯片的复位与省电	61
第九节 TMS320C54x芯片的中断	65
第十节 TMS320C54x芯片的自举加载	69
第十一节 TMS320C54x芯片的引脚	73
思考题	80
第三章 DSP指令系统及其特点	82
第一节 TMS320C54x的寻址方式	82
第二节 程序地址的生成	90
第三节 流水线操作技术	96
第四节 指令系统概述	104
思考题	123
第四章 DSP软件开发过程	124
第一节 汇编语言程序的编写方法	126
第二节 汇编语言程序的汇编	132
第三节 COFF的一般概念	134
第四节 目标文件的链接	138
第五节 DSP的C语言开发方法	148
思考题	162
第五章 汇编语言编程举例	163
第一节 汇编语言基本指令的应用	163
第二节 DSP的浮点运算方法	177
第三节 DSP在信号发生器上的应用	182
第四节 用DSP实现FIR滤波器	194
第五节 用DSP实现IIR滤波器	206
第六节 用DSP实现FFT	213
思考题	225
第六章 信号处理方法的硬件实现	227
第一节 信号源设计	227
第二节 线性时不变系统设计	232
第三节 信号检测系统设计	235
第四节 信号调制功能设计	244
第五节 模拟电路功能设计	248
第六节 梳状滤波器设计	258

思考题.....	281	实验三 FIR 数字滤波器	296
第七章 DSP 实验	282	实验四 快速傅里叶变换的实现.....	303
实验一 基本算术运算.....	282	参考文献	308
实验二 正弦波信号发生器.....	289		

第一章 数字信号处理技术基础

在信息社会中，信息渗透到社会各个领域并影响人们的生活。美国著名未来学家阿尔文·托夫勒曾讲：谁掌握了信息，控制了网络，谁就将拥有整个世界。美国前陆军参谋长沙利文上将也有类似看法：信息时代的出现，将从根本上改变战争的进行方式。而美国前总统克林顿更深入地指出：今后的时代，控制世界的国家将不是靠军事，而是信息能力走在前面的国家。要实现信息化，其首要和基础的任务是对信息的数字化，更进一步就是对数字化信息的数字信号处理。数字信号处理的关键，特别是执行实时处理任务，在很大程度上需要由 DSP 器件来支撑，这使得 DSP 技术成为人们日益关注、并得到迅速发展的前沿技术。

第一节 模拟系统与数字系统的比较

一、模拟系统的问题

自然界的各种信息能够直接被人类加以利用的多是最简单和最基本的，人类在漫长的发展进程中长期不加更改地直接使用这些信息。直至 1831 年 10 月 17 日法拉第将磁转换成了电，到随后人们制造了世界上第一台电磁感应发电机为止，这种局面才有了根本性的改观。有了电，人们很快想到了将电应用于对信号的处理，于是出现了电报、电话、有线通信、无线通信、广播电视、雷达等。要实现将自然界的某些特征量（如声音、图像、温度、湿度、压力等）转变为电信号，首先需要有传感器，利用传感器将特征量转换为电信号。但通常这些从传感器输出的信号都是很微弱的，不能直接使用，于是，对这些原始电信号进行加工处理的问题就被提了出来。

为了从理论上深化对信号的认识，人们把涉及对信号进行处理的方方面面的总体内容称为信号系统。来自传感器的电信号中的电流或电压的大小是随着自然现象连续变化的，人们将这种信号称为模拟信号，对模拟信号进行处理的信号系统也相应地被称之为模拟信号系统。

对模拟信号系统的研究，涉及对信号进行处理所采用的电路、器件及特征的研究，以及对信号本身特征进行分析的理论研究，前者形成电路理论，后者形成信号与系统理论。

由许多元器件组成的电路，通常又称之为网络。因此就硬件而言，一个电路系统往往被称之为网络。一个网络通常包括有输入和输出端。如果一个网络只有一对输入和一对输出连接线，则称这样的网络为四端网络或双端口网络。如果一个网络需要被提供电能才能正常工作，称这种网络为有源网络，不需要提供电能就能工作的网络称为无源网络。利用网络作为处理载体，就可完成系统对信号的具体处理任务。

在模拟信号系统网络中，对信号进行处理主要包括对信号电平的调整和对信号频率的调制。电平调整分为对整个频带进行衰减或放大处理和对部分频率进行衰减或放大处理两类。由纯电阻构成的网络，可完成对信号整个频带的衰减，属于无源网络；理想的放大器可以完

成对整个频带的放大处理,属于有源网络。当电路中加入电感和电容后,利用其对不同频率的不同响应,可实现对部分频率的抑制,从而完成对信号的滤波和均衡。信号调制主要是利用半导体器件的非线性工作区实现两个信号的相乘运算,以产生频率的搬移。

在上述由电阻、电感、电容、放大器构成的电路中,由于这些器件的特性是不随时间而变化的,人们将这种电路特性不随时间变化而变化的系统称为时不变系统。对于一个时不变系统,当有多个独立的信号在输入端相加,经过系统后,在输出端的信号也可看作独立的相加信号,并且输出信号与输入信号成比例关系,这样的系统被称为线性时不变系统。即一个线性时不变系统应满足下面的关系:

$$\text{设有} \quad y_1(t) = T[x_1(t)] \quad \setminus \quad y_2(t) = T[x_2(t)]$$

则

$$\left. \begin{aligned} T[ax_1(t) + bx_2(t)] &= T[ax_1(t)] + T[bx_2(t)] = ay_1(t) + by_2(t) \\ T[ax(t)] &= aT[x(t)] = ay(t) \\ y(t - t_0) &= T[x(t - t_0)] \end{aligned} \right\} (1-1)$$

这里若 a 、 b 符号相同,系统完成的是信号的相加运算,若 a 、 b 符号相异,系统完成的是信号的相减运算;若 a 大于 1,系统完成的是相乘运算,若 a 小于 1,系统完成的是相除运算。由此可见,一个线性时不变系统能够完成加减乘除的四则运算。

在模拟线性时不变系统时,由于电感和电容的充放电过程,其电压和电流可呈现积分和微分特性,因此线性时不变系统还可完成微积分的某些运算。但是再复杂一些的运算,模拟线性时不变系统就很难完成了。由此得到结论 1,模拟线性时不变系统的运算能力不足。

另一方面,在网络中存在电磁辐射现象,这种电磁辐射会附加到有用信号上,造成对有用信号的串扰。当信号被调制或由于信号落入器件的非线性区域而产生谐波信号,如果频谱落入有用信号频谱范围内,就很难将其去除,造成有用信号质量的降低,甚至造成系统失效。由此得到结论 2,模拟线性时不变系统的抗干扰能力不足。

此外,由于器件内部电子的热运动,会在一定程度上形成噪声,通常这种噪声的频谱很广,会落入系统中有用信号频谱范围内,形成对有用信号的噪声干扰,这些干扰同样是很难以去掉的,强噪声还可能造成系统功率过负荷,使系统失效。由此得到结论 3,模拟线性时不变系统的抗噪声能力不足。

二、数字系统的优势

随着 1946 年美国埃克特和莫契利发明世界上第一台电子计算机 ENIAC,人们想到将数字化应用于信号处理系统,采用数字系统来对信号进行处理。要用数字系统处理信号,必须先将模拟信号转换为数字信号,处理后的数字信号还需再转换为模拟信号,并且转换过程中不能对信号的有效成分构成实质性的损伤。1924 年奈奎斯特推导出采样定理,奠定了模-数转换的基础,使人们通过包括计算机在内的数字系统来处理各种模拟信号成为可能。早期的以电子管和晶体管为基础的数字系统体积庞大、运算速度低,不利于对信号的实时处理。20 世纪 60 年代以来,随着微电子技术、信息技术和计算机技术水平的提高,以及以快速傅里叶算法为代表的算法理论方面诸多成果的取得,使数字信号处理技术进入实用化阶段。

首先,以 0、1 为代表的数字信号既适合逻辑控制,也适合逻辑运算,因此可以很好地将两者融合在一起。以 0、1 为处理对象的数字信号系统,其突出的优势在于能够完成远比

模拟系统所能承担的更为复杂的各种运算,因而极大地提高了系统对信号的处理能力。其次,数字信号处理系统具有很强的抗干扰能力,不论是噪声信号、叠加在数字信号上的各种干扰信号,只要这些干扰小于数字信号的0、1判决阈值,就可通过对0、1信号的再生恢复原有码形,从而去除噪声和干扰,并使其不能累积。此外,数字信号还可通过增加位数来提高信号的数值精度,通过时隙分配还可实现对系统的时分复用,通过编码技术可提高信号的可靠性和保密性,通过集成电路水平的提高可减小系统体积和功耗,通过对信号本身特性的分析还可挖掘对信号的利用潜力或改进系统性能。

鉴于数字信号处理系统的上述优势,使其近年来得到了迅速的发展,不仅用于线性时不变系统,更广泛应用于非线性系统和控制系统。

第二节 数字信号处理器分类

一、DSP 芯片的演进

早期的数字系统,可分为以计算机为代表的专用于完成各种运算的数字系统和以数字逻辑电路为代表的专用于控制领域的数字系统。它们的共同缺点是运算能力不足,集成度不高,实时处理能力不强。就数字系统而言,又可分为专用目的数字系统和通用目的数字系统。

由于大量实时、宽带信号使用的增加,像计算机这类体积大、运算速度相对较慢的数字系统越来越难于胜任。尤其在实时图像处理方面,希望有一种能完成高速运算、体积小、耗电少的专用集成电路芯片,以便能将其嵌入到各种设备中完成实时数字信号处理,这就引出了本书所要介绍的专用数字处理芯片(Digital Signal Processor, DSP)技术。

1978年,以美国AMI公司生产的S2811和1979年Intel公司生产的商用可编程器件2920为代表的数字信号处理芯片诞生,尽管当时这两种芯片内部都没有现代DSP芯片所必须有的单周期乘法器,但它却标志着数字信号处理芯片的生产与应用进入一个新的时期,对DSP芯片技术的影响和发展具有里程碑式的意义。

1980年,日本NEC公司推出了第一款具有乘法器的商用DSP芯片 μ PD7720。

1982年,美国德州仪器(Texas Instruments, TI)公司推出了第一代DSP芯片,TMS320010及其系列产品TMS320011、TMS320C10/C14/C15/C16/C17等,之后相继推出了第二代DSP芯片TMS320020、TMS320C25/C26/C28,第三代DSP芯片TMS320C30/C31/C32/C33,第四代DSP芯片TMS320C40/C44,第五代DSP芯片TMS320C5x/C54x,第六代DSP芯片TMS320C62x/C67x等。TI公司的系列DSP产品已经成为世界上最有影响和最具代表性的DSP芯片,其DSP市场占有率占全世界份额的近50%,TI公司已成为世界上最大的DSP芯片供应商。

1982年日本东芝公司也推出了自己的浮点DSP芯片。

1984年AT&T公司推出较早具备较高性能浮点运算性能的DSP芯片DSP32。

1986年Motorola公司推出了定点DSP MC56001,1990年推出了与IEEE浮点格式兼容的浮点DSP芯片MC96002。后来还推出了DSP53611、16位DSP56800、24位的DSP563xx和MSC8101等产品。

美国模拟器件 (Analog Devices, AD) 公司在 DSP 芯片市场上也占有较大的份额, 相继推出了一系列具有自己特点的 DSP 芯片, 其定点 DSP 芯片包括 ADSP2101/2103/2105、ADSP2111/2115、ADSP2161/2162/2163/2164、ADSP2171/2181 等, 浮点 DSP 芯片包括 ADSP21000/21020、ADSP21060/21062, 以及虎鲨 TS101、TS201S 等。

杰尔公司推出有 SC-1000 和 SC2000 系列嵌入式 DSP 内核。

实际上, 目前的 FPGA 芯片中大多含有数量众多的 DSP 核。如 Xilinx 公司推出的 Virtex-7 FPGA, 内中包含 3960 个 DSP Slice。

区别于计算机中的 CPU、单片机之类通用目的数字信号处理芯片, 目前设计的 DSP 芯片由于具有独特的结构, 可高速实现各种数字信号处理中所涉及的复杂算法。从运算速度来看, 一次乘法和一次加法 (MAC) 的时间从原来的 400ns (如 TMS32010) 减少为 10ns 以下 (如 TMS320C54x 等)。从制造工艺来看, 1980 年采用 $4\mu\text{m}$ 的 NMOS 工艺已被现在的几十纳米 CMOS 工艺所取代。DSP 芯片的引脚数量从 1980 年的最多 64 个增加到现在的几百个以上。引脚数量的增加, 意味着结构的灵活性增加, 如外部存储器的扩展和处理器间的通信等。此外, DSP 芯片技术的发展, 使 DSP 应用系统的成本、体积、重量和功耗都有很大程度的下降。

数字信号处理硬件性能的提高, 为数字信号处理的应用和推广提供了基本的保障。目前可供选择的实现数字信号处理的方法包括下面几类:

1) 在通用的个人电脑上用软件实现数字信号处理。缺点是运算速度不够快, 实时处理能力不足。

2) 用单片机实现数字信号处理。由于器件硬件资源有限, 处理能力差, 这种方法只能用于一些不太复杂和低速的数字信号处理, 如控制类应用。但这类器件的显著优点是价格便宜, 所以应用也很广。

3) 利用通用的可编程 DSP 芯片实现数字信号处理。与单片机相比, DSP 有着更适合于数字信号处理的软件和硬件资源, 适用于复杂的数字信号处理算法。

4) 用专用的 DSP 芯片实现数字信号处理。由于芯片的专用性, 这类芯片的灵活性相对差些, 价格相对较贵。

5) 在通用的计算机系统中附加加速卡实现数字信号处理。加速卡可以是通用的加速处理机, 也可以是由 DSP 开发的用户加速卡。

6) 用 FPGA 等可编程器件实现数字信号处理。这类芯片能很好地将数字信号处理与逻辑控制结合起来, 正受到越来越多的重视。

二、DSP 芯片的主要供应商的产品比较

1. TI 公司的 DSP 芯片

TI 公司常用的 DSP 芯片可以归纳为三大系列: TMS320C2000 系列 (包括 TMS320C2xx / C24x/C28x 等)、TMS320C5000 系列 (包括 TMS320C54x / C55x) 和 TMS320C6000 系列 (包括 TMS320C62x/C67x/C64x)。

(1) TMS320C2000 系列 DSP 称为 DSP 控制器, 它整合了 DSP 核心, 集成了 flash 存储器、高速 A-D 转换器以及可靠的 CAN 模块及数字马达控制的外围模块, 适用于三相电动机、变频器等高速实时工控产品等需要数字化的控制领域。

1) TMS320C24x 系列 DSP 控制器: 该系列为定点 DSP 芯片, 运算速度可达 20MIPS (MIPS 为每秒执行百万条指令) 以上, 可用于自适应控制、Kalman 滤波、状态控制等先进的控制算法。C24x 原代码与早先的 C2x 系列原代码兼容, 向上与 C5x 原代码兼容。其 CPU 包括: 一个 32 位的中心算术逻辑单元 (CALU)、一个 32 位的累加器 (ACC)。CALU 具有输入和输出数据定标移位器、一个 16×16 位乘法器、数据地址产生逻辑 (包括 8 个辅助寄存器和 1 个辅助寄存器算术单元) 和程序地址产生单元。有 6 组 16 位数据与程序总线, 即程序地址总线 (Program Address Bus, PAB)、数据读地址总线 (Data—Read Address Bus, DRAB)、数据写地址总线 (Data—Write Address Bus, DWAB)、程序读总线 (Program Read Bus, PRDB)、数据读总线 (Data Read Bus, DRDB) 和数据写总线 (Data Write Bus, DWEB)。C2x 的片内存储器有双数据访问 RAM (DARAM) 和 flash EEPROM 或工厂掩模的 ROM, 分为单独可选择的 4 个空间, 即程序存储器空间 (64K 字)、局部数据存储器空间 (32 K 字)、全局数据存储器空间 (64K 字)、输入/输出空间 (64K 字), 总共的地址范围为 224K 字, 有 4 级流水线。

2) TMS320C28x 系列 DSP 该系列与 C27x 源代码和目标代码兼容。凡为 C2xLP CPU 编写的代码, 都可以重新编译后在 C28x 上运行。而所有 C24x 和 C2xx 系列的 DSP, 其 CPU 都是 C2xLP。C28x 的 CPU 是低成本的 32 位定点处理器, 包括: 受保护的 8 级流水、独立的寄存器空间、32 位的算术逻辑单元、地址寄存器算术单元 (ARAU)、16 位桶形移位器、 32×32 位乘法器。C28x 使用 32 位的数据地址和 22 位的程序地址, 可访问 4G 字的数据空间地址和 4M 字的程序空间地址。

(2) TMS320C5000 系列 DSP 这是 16 位定点 DSP。目前使用最广泛的芯片是 TMS320C54x 系列和 TMS320C55x 系列。该系列主要用于通信领域, 如 IP 电话机和 IP 电话网关、数字式助听器、便携式声音/数据/视频产品、调制解调器、手机和移动电话基站、语音服务器、数字无线电、小型办公室和家庭办公室的语音和数据系统。

1) TMS320C54x 系列本书将以 TMS320C54x 系列为例, 详细讲解 DSP 的相关问题, 这里不作更多说明。

2) TMS320C55x 系列 C55x 是从 C54x 系列发展起来的, 并与其原代码兼容。C55x 工作在 0.9V 时, 功耗低至 0.005mW/MIPS。工作在 400MHz 时钟频率时, 可达 800 MIPS。与 120MHz 的 C54x 相比, 300 MIPS 的 C55x 性能提高 5 倍, 功耗降为 1/6, 因此非常适合个人和便携式的应用。如语音编解码、线路回声和噪声消除、调制解调、图像与声音的压缩和解压缩、语音加密和解密、语音识别和语音合成。具体表现在数码相机、手机和 Internet 应用、助听器和其他医疗设备、RAS、VOP、网关等的应用上。C55x 的 CPU 包括: 指令缓冲单元 (I 单元), 将指令从存储器送往 CPU; 程序流单元 (P 单元), 控制程序里指令的执行顺序; 地址数据流单元 (A 单元), 为访问数据空间的读和写产生地址; 数据计算单元 (D 单元), CPU 的基本部分, 它的 3 个数据读总线向 2 个 16 位的 17×17 乘法器 (MAC) 及 40 位的 ALU 馈送数据, 中间结果可以存放在 4 个 40 位的累加器中的一个里。C55x 的指令长度从 8 位到 48 位可变, 有 12 组独立的总线: 3 组 16 位数据读总线、3 组 24 位数据读地址总线、2 组 16 位数据写总线、2 组 24 位数据写地址总线、1 组 32 位程序读总线和 1 组 24 位程序读地址总线。

(3) TMS320C6000 系列 DSP 该系列采用 TI 的专利技术 VelociTI 和新的超长指令字

(VLIW) 结构设计。其中 C6201 在 200MHz 时钟频率时, 运算速度达到 1600MIPS, C64x 系列在时钟频率为 1.1GHz 时, 可达到 8800MIPS 以上, 即每秒执行约 90 亿条指令。C6000 系列已经推出了 C62x/C67x/ C64x 三个系列。其主要应用领域为:

1) 数字通信如 ADSL、FFT/IFFT、Reed-Solomon 编解码、循环回声综合滤波器、星座编解码、卷积编码、Viterbi 解码等信号处理算法的实时实现。电缆调制解调器 (Cable Modem) 是另一类重要应用, 如采样率变换、byte 到符号的变换、最小均方 (LMS) 均衡等重要算法。移动通信也是重要应用领域, 如移动电话基站、3G 基站里的收发器、智能天线、无线本地环 (WLL)、无线局域网。在这些应用中, DSP 的主要功能是完成 FFT、信道和噪声估计、信道纠错、干扰估计和检测等。

2) 图像处理如数字电视、数字照相机与摄像机、打印机、数字扫描仪、雷达/声呐和医用图像处理等。在这些应用中, DSP 主要用来进行图像压缩、图像传输、模式及光学特性识别、加密/解密和图像增强等。

C6000 系列的 CPU 包含 2 个通用寄存器组 (C62x/C67x 为 A0 ~ A15、B0 ~ B15, C64x 为 A0 ~ A31、B0 ~ B31)、8 个功能单元 (L1, L2, S1, S2, M1, M2, D1, D2)、2 个从存储器装入的通道 (LD1, LD2)、2 个存入存储器的通道 (ST1, ST2)、2 个数据地址通道 (DS1, DA2)、2 个寄存器组数据跨接通道 (1X, 2X)。CPU 里的大多数数据线支持 32 位运算, 有些支持长字 (40 位) 和双字 (64 位) 运算。C6000 系列芯片有两层 Cache 结构、可提供 2GB/s 的片外带宽的强化 DMA 控制器 (EDMA)、3 组片外总线 (2 组片外存储器接口 EMIF 和 1 组 32 位主机接口 HPI, EMIF 的最大总线速率为 133MHz)、3 个多通道缓冲串口 (McBSP)、ATM 通用测试和操作接口、通用 I/O。

(4) TI 其他的 DSP 芯片 TMS320C8x 是包含 4 个定点处理器与 1 个精简指令集处理器的多 DSP 芯片, 可应用于视频会议与虚拟环境领域; TMS320AV7000 是针对机顶盒需求设计的 DSP 芯片。TI 的 TMS320C3x、TMS320C4x 和 TMS320C8x 属于支持浮点运算的 DSP 芯片, TMS320C2x、TMS320C2xx、TMS320C5x、TMS320C54x 属于支持定点运算的 DSP 芯片, 而 TMS320C6x 支持两种运算。

2. AD 公司的 DSP 芯片

美国 AD 公司的 DSP 芯片在 DSP 芯片市场上也占有一定的份额。与 TI 公司相比, AD 公司的 DSP 芯片有自己的特点, 如系统时钟一般不经分频直接使用, 串行口带有硬件压扩, 可从 8 位 EPROM 引导程序, 可编程等待状态发生器等。

AD 公司的 DSP 芯片可分为定点 DSP 芯片和浮点 DSP 芯片。定点 DSP 芯片的程序字长为 24 位, 数据字长为 16 位。运算速度较快, 内部具有较为丰富的硬件资源, 一般具有 2 个串行口、1 个内部定时器和 3 个以上的外部中断源, 此外还提供 8 位 EPROM 程序引导方式。具有一套高效的指令集, 如无开销循环、多功能指令、条件执行等。

1) ADSP2101 的指令周期有 80ns、60ns 和 50ns 三种, 内部有 2K 字的程序 RAM 和 1K 字的数据 RAM。ADSP2103 指令周期为 100ns, 工作电压为 3.3V。ADSP2105 是 ADSP2101 的简化, 指令周期为 72ns, 内部程序 RAM 为 1K 字, 数据 RAM 为 512 字, 串行口减为 1 个。

2) ADSP216x 系列的指令周期为 50 ~ 100ns, ADSP2161/2163 内部提供了 8K 字的程序 ROM, ADSP2162/2164 内部提供了 4K 字程序 ROM, 工作电压为 3.3V, 这些芯片的内部数

据 RAM 均为 512 字。而 ADSP2165/2166 除了具有 1K 字的程序 ROM 外, 还提供 12K 字的程序 RAM 和 4K 字的数据 RAM, 其中 ADSP2166 的工作电压为 3.3V。

3) ADSP2171 的指令周期为 30ns, 速度为 33.3MIPS, 是 AD 公司芯片中运算速度最快的定点芯片之一。内部具有 2K 字的程序 RAM 和 2K 字的数据 RAM。ADSP2173 的资源与 ADSP2171 相同, 工作电压为 3.3V。

4) ADSP2181 是 ADSP 的定点 DSP 芯片中处理能力最强之一。指令周期为 30ns, 运算能力为 33.3MIPS。内部程序和数据 RAM 均为 16K 字, 共 80KB。内部具有直接存储传输接口 (BDMA), 最大可以扩展到 4KB。两个串行口都具有自动数据缓冲功能, 并且支持 DMA 传输。支持 8 位 EPROM 和通过 IDMA 方式的程序引导。如果采用基 4FFT 做 1024 点复数 FFT 运算, 运算时间仅为 1.07ms。ADSP2181 在 1 个处理器周期内可以完成的功能包括: 产生下一个程序地址、取下一个指令、进行 1 个或 2 个数据移动、更新 1 个或 2 个数据地址指针、进行 1 次数据运算。与此同时, 还可从两个串行口发送或接收数据, 通过 IDMA 或 BDMA 发送或接收数据及内部定时计数器。

5) ADSP21020、21060 和 21062 等是 AD 公司的浮点 DSP 芯片, 程序存储器为 48 位, 数据存储器为 40 位, 支持 32 位单精度和 40 位扩展精度的 IEEE 浮点格式, 内部具有 32×48 位的程序 Cache, 有 3 至 4 个外部中断源。ADSP21060 采用超级哈佛结构, 具有 4 条独立的总线 (2 条数据总线、1 条程序总线和 1 条 I/O 总线), 内部集成了大容量的 SRAM 和专用 I/O 总线支持的外设, 指令周期为 25ns。运算速度达 40MIPS 和 80MFLOPS (MFLOPS 为每秒执行百万次浮点操作), 最高达 120MFLOPS。每条指令均在 1 个周期内完成。片内具有 4M 位的 SRAM, 可灵活地进行配置, 如配置为 128K 字的数据存储器 (32 位) 和 80K 字的程序存储器 (48 位)。可寻址 4G 字的外部存储器。10 个 DMA 通道。6 个点到点连接口, 传输速率为 240MB/s。支持多处理器连接, 提供与 16/32 位微处理器的接口。外部微处理器可直接读写内部 RAM。2 个具有 μ/A 律压扩功能的同步串行口。支持可编程等待状态发生器, 可用 8 位 EPROM 或外部处理器引导程序。1024 点复数 FFT 的运算时间为 0.46ms。支持 IEEE JTAG1149.1 标准仿真接口。

3. AT&T 公司的 DSP 芯片

AT&T 是第一家推出高性能浮点 DSP 芯片的公司。AT&T 公司的 DSP 芯片包括定点和浮点两大类。定点 DSP 主要包括 DSP16、DSP16A、DSP16C、DSP1610 和 DSP1616 等。浮点 DSP 包括 DSP32、DSP32C 和 DSP3210 等。AT&T 定点 DSP 芯片的程序和数据字长均为 16 位, 有 2 个精度为 36 位的累加器, 具有 1 个深度为 15 字的指令 Cache, 支持最多 127 次的无开销循环。

1) 定点类 DSP16 的指令周期为 55ns 和 75ns, 累加器长度为 36 位, 片内具有 2K 字的程序 ROM 和 512 字的数据 RAM。DSP16A 速度最快的为 25ns 的指令周期, 片内有 12K 字的程序 ROM 和 2K 字的数据 RAM。DSP16C 的指令周期为 38.5ns 和 76.9ns, 片内存储器资源与 DSP16A 相同, 增加了片内的 Codec。此外, 还有 1 个 4 引脚的 JTAG 仿真接口。DSP1610 片内有 512 字的 ROM 和 2K 字的双口 RAM, 支持软件等待状态。DSP1610 和 DSP1616 提供了仿真接口。

2) 浮点类 DSP32C 是 DSP32 的增强型, 是性能较优的一种浮点 DSP 芯片。采用 80/100ns 的指令周期。地址和数据总线可以在单个指令周期内访问 4 次。片内具有 3 个 512 字

的 RAM 块, 或 2 个 512 字的 RAM 块加 1 个 4K 字的 ROM 块。可以寻址 4M 字的外部存储器。具有串行和并行 I/O 口接口, 串行 I/O 采用双缓冲, 支持 8/16/24/32 位串行数据传输, 微处理器可以控制 DSP32C 的 8/16 位并行口。采用专用的浮点格式, 可在单周期内与 IEEE—754 浮点格式进行转换。具有 4 个 40 位精度的累加器和 22 个通用寄存器。支持无开销循环和硬件等待状态。DSP3210 内部具有两个 1K 字的 RAM 块和 512 字的引导 ROM, 外部寻址空间达 4GB, 可用软件编程产生等待状态, 具有串行口、定时器、DMA 控制器和一个与 Motorola 和 Intel 微处理器兼容的 32 位总线接口。

4. Motorola 公司的 DSP 芯片

Motorola 公司的 DSP 芯片可分为定点、浮点和专用三种。

1) 定点 DSP 芯片主要有 MC56000、MC56001 和 MC56002。程序和数据字长为 24 位, 有 2 个精度为 36 位的累加器。DSP56001 的周期为 60ns 和 74ns 两种。片内具有 512 字的程序 RAM、512 字的数据 RAM 和 512 字的数据 ROM。三个分开的存储器空间, 每个空间均可寻址 64K 字。片内 32 字的引导程序可以从外部 EPROM 装入程序。支持 8 位异步和 8~24 位同步串行 I/O 接口。并行接口可与外部微处理器接口, 支持硬件和软件等待状态产生。MC56000 是 ROM 型的 DSP 芯片, 内部具有 2K 字的程序 ROM。MC56002 则是一个低功耗型芯片, 可在 2.0~5.5V 电压范围内工作。

2) 浮点 DSP 芯片主要有 MC96002, 采用 IEEE—754 标准浮点格式, 累加器精度达 96 位, 可支持双精度浮点数, 该芯片的指令周期为 50/60/74ns。片内有 3 个 32 位地址总线和 5 个 32 位数据总线。片内具有 1K 字的程序 RAM、1K 字的数据 RAM 和 1K 字的数据 ROM。64 字的引导 ROM 可以从外部 8 位 EPROM 引导程序。内部具有 10 个 96 位或 32 位基于寄存器的累加器。支持无开销循环及硬件和软件等待状态。具有 3 个独立的存储空间, 每个空间可寻址 4G 字。

3) MC56200 是一种基于 MC56001 的 DSP 核, 适合于自适应滤波的专用定点 DSP 芯片, 指令周期为 97.5ns, 程序字长和数据字长分别为 24 位和 16 位, 内部的程序和数据 RAM 均为 256 字, 累加器精度为 40 位。MC56156 则是一个在片内集成了过取样 Σ - Δ 话带 Codec 模-数转换器和锁相环的 DSP 芯片, 主要用于蜂窝电话等通信领域, 其指令周期为 33/50ns。

此外还有 NEC 公司的 μ PD77C25、 μ PD77220 定点 DSP 芯片和 μ PD77240 浮点 DSP 芯片等; Lucent 的 DSP1600 等, Intel 也有自己的 DSP 产品。

第三节 数字信号处理芯片的应用范围

在众多能完成数字信号处理功能的系统中, 采用 DSP 芯片来进行数字信号处理是目前最为流行的方式, 所涉及的技术包括 DSP (Digital Signal Processor) 芯片技术、DSP (Digital Signal Processing) 理论研究和算法研究, 在通常的表示中并不对这两种描述进行区分, 统称为 DSP 技术。建立在 DSP 技术基础上的数字系统, 在系统结构上可归结为线性时不变系统、冲激响应系统和非线性时不变系统三种类型。

(1) 数字线性时不变系统 对于满足式 (1-1) 的模拟线性时不变系统, 如果在系统的输入端加上模-数 (A-D) 转换电路, 在输出端加上数-模转换电路 (D-A), 就能将对模拟信号的处理转化为对以 0、1 为对象的数字信号的处理, 所构成的数字线性时不变系统如图 1-1 所示。