

胡剑凌 徐 盛 编著

数字信号处理系统的 应用和设计



上海交通大学出版社

本书得到上海市研究生教育专项经费资助

数字信号处理系统的 应用和设计

胡剑凌 徐 盛 编著

上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书主要介绍了数字信号处理器(DSP)系统的概念和 design 方法。书中在介绍了 DSP 发展历史和系统结构后,以美国德州仪器公司(TI)的 TMS320C54x 系列 DSP 为例详细介绍了 DSP 的硬件结构、软件开发技术和片上外围设备的使用方法,书中还给出了 DSP 与各种外围设备接口的设计方法。本书同时对 DSP 软件编制的规范作了介绍,并从系统角度讨论了 DSP 系统的设计流程。为扩充知识面,书中还对目前普遍使用的其它类型的 DSP 以及 ARM 处理器在数字信号处理中的应用作了介绍。

本书可作为信息与信号处理、通信与信息系统等专业的研究生教材,也适用于电力、水下声学、医学和自动控制等专业研究生的选修课程,同时也可供从事数字信号处理的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理系统的应用和设计 / 胡剑凌, 徐盛编著.
上海: 上海交通大学出版社, 2003
上海研究生教学用书
ISBN 7-313-03305-2

I. 数... II. ①胡...②徐... III. 数字信号—信号
处理—研究生—教学参考资料 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第010147号

数字信号处理系统的应用和设计

胡剑凌 徐 盛 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路877号 邮政编码200030)

电话:64071208 出版人:张天蔚

常熟市文化印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:21.75 字数:421千字

2003年3月第1版 2003年3月第1次印刷

印数:1-2050

ISBN 7-313-03305-2/TN·094 定价:30.00元

版权所有 侵权必究

前 言

数字信号处理技术是 20 世纪后半期发展最为迅速的一门学科,它不仅在理论上给人们提供了利用计算机等工具从事离散时间信号处理的观念和方法,而且还带动了综合数字信号处理技术和微电子技术的数字信号处理器的产生和发展。作为一类专门为数字信号处理设计的器件,数字信号处理器(Digital Signal Processor,简称 DSP)在军事、通信、工业控制、医学等很多领域都得到了广泛使用,对开展 DSP 技术的教学有着重要的意义。

上海交通大学电子工程系从 1990 年面向研究生开设“数字信号处理系统的设计与实践”课程,至今已有十几年了。这段时间里,承担该课程教学的老师们以 DSP 的技术手册为基础,渐渐地将自己在教学和科研中的一些心得体会融入其中,形成了一套完整的教学讲义,使用效果良好。为配合 DSP 教学的深入开展和本校 DSP 开放实验室的建立,特地将教学资料整理,为研究生编撰了《数字信号处理系统的应用和设计》和《数字信号处理器开发实践》两本教材。两本教材的侧重点不同,前者主要针对教学,系统地介绍 DSP 技术及其系统设计的方法,而后者侧重于实验,围绕 TMS320C5402 DSK (DSP Starter Kit, 是 DSP 初学者开发工具的简称)着重介绍 DSP 软件设计和程序调试的方法,希望这两本书能为在学习和工作中涉及到 DSP 的读者提供帮助。

本书共分为四个部分。第一部分为第 1、2 章,主要介绍 DSP 技术的发展、DSP 系统的组成、DSP 的应用以及数字信号处理器的硬件结构和软件特征,并简要介绍了数字信号处理器的发展历史。第二部分为第 3~5 章,主要结合 TI 公司的 TMS320C54x 系列,介绍 DSP 的硬件结构和软件编程基础,内容包括 DSP 的存储器结构、总线结构、CPU 结构、数据寻址方式、程序寻址方式、DSP 的流水线结构和 DSP 的片上外设,以及汇编指令集、开发工具、软件编制和软件优化,其中针对数字信号处理的定点算法设计作了详细介绍。第三部分为第 6~8 章,主要介绍 DSP 系统设计,内容包括 DSP 与各种外围设备的接口、DSP 编程规范、DSP 自举等。第四部分为第 9、10 章,主要介绍包括 Agere 公司、TI 公司和 ADI 公司的其它各种类型 DSP 芯片,并且对 ARM 处理器在数字信号处理中的应用作介绍。

本书的编撰特别注意 DSP 概念和设计方法的介绍,尽量避免成为使用手册的中译本。希望通过该教材反映出数字信号处理系统设计的关键环节和实践中的常用方法与调试手段。它不仅可以作为研究生教学讲义,也可以面向高年级本科生,作为“微机原理”课的延伸,它同样适用于研究人员和工程技术人员自学。根据

作者的经验,本书内容的授课需要 54 学时左右(包括实验),学习者应预修过“信号与系统”、“数字信号处理”、“数字电路”等相关课程(或具备相当的背景)。

在教材的编撰过程中,一直受到电子工程系领导的关心和帮助,且本书的出版得到了上海市研究生教育专项经费的大力资助,在此对他们表示感谢。另外,对于长期从事该课程教学工作的陈健、刘兴钊、陈亚骏、王重纬、杨敏、潘亚涛、李力利、张玫、耿相铭等老师表示感谢,他们在课程教学中建设性的工作对本书帮助很大。同时也向梁天明、何兵、沈雷等同学表示感谢,他们帮助完成了本书中的绘图和程序整理工作。最后,向 Agere 公司的周贞宏博士、ARM 公司的谭军博士表示感谢,感谢他们对作者长期的帮助。

本书的第 4、7 章由徐盛编写,其余部分由胡剑凌编写。

限于作者的水平,不妥和错误之处在所难免,恳请读者批评和指正。

作者 胡剑凌

2002 年 9 月于上海交通大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字信号处理技术的发展	1
1.2 数字信号处理系统简介	3
1.2.1 基本的数字信号处理系统	4
1.2.2 典型的数字信号处理系统	5
1.3 DSP 的应用	6
1.4 本章小结	6
第 2 章 数字信号处理器基础	7
2.1 数字信号处理器的硬件结构	7
2.1.1 总线结构	7
2.1.2 存储器配置	9
2.1.3 CPU 结构	10
2.1.4 片上外设	11
2.2 数字信号处理器的软件特征	12
2.2.1 复杂指令集(CISC)	12
2.2.2 精简指令集(RISC)	14
2.2.3 DSP 指令及编程	15
2.3 数字信号处理器的发展	16
2.3.1 DSP 的历史	16
2.3.2 DSP 性能和发展趋势	19
2.4 本章小结	20
第 3 章 数字信号处理器系统结构	21
3.1 DSP 的总体结构	21
3.1.1 总线结构	21
3.1.2 存储器的组织	23

3.1.3 中央处理单元 (CPU)	24
3.1.4 片上外设	24
3.2 DSP 的存储器结构	25
3.2.1 存储器空间	25
3.2.2 程序空间	27
3.2.3 数据存储器	28
3.2.4 I/O 空间	29
3.2.5 程序和数据安全保护	29
3.3 中央处理单元 (CPU)	30
3.3.1 CPU 状态和控制寄存器	30
3.3.2 算术逻辑单元 (ALU)	35
3.3.3 累加器	37
3.3.4 桶形移位器	37
3.3.5 乘加器	39
3.3.6 比较选择和存储单元 (CSSU)	41
3.3.7 指数编码器	42
3.4 DSP 的数据寻址方式	43
3.4.1 立即寻址	43
3.4.2 绝对寻址	44
3.4.3 累加器寻址	45
3.4.4 直接寻址	45
3.4.5 间接寻址	46
3.4.6 存储器映射寄存器寻址	51
3.4.7 堆栈寻址	52
3.5 DSP 的程序寻址方式	53
3.5.1 程序地址的产生	53
3.5.2 跳转	55
3.5.3 调用	56
3.5.4 返回	57
3.5.5 条件操作	58
3.5.6 单指令的重复执行	60
3.5.7 指令块的重复执行	60
3.5.8 硬件复位	61

3.5.9	中断.....	62
3.5.10	省电模式.....	65
3.6	流水线.....	67
3.6.1	流水线工作原理.....	68
3.6.2	典型的指令与流水线.....	70
3.7	本章小结.....	77
第4章	TMS320C54x 编程基础.....	78
4.1	TMS320C54x 汇编指令集.....	78
4.1.1	指令系统的符号与缩写.....	78
4.1.2	指令的分类.....	82
4.1.3	单指令的重复执行.....	90
4.2	软件开发工具.....	92
4.2.1	DSP 代码的组织结构.....	94
4.2.2	编译器.....	98
4.2.3	连接器.....	99
4.2.4	归档器.....	100
4.2.5	代码转换器.....	101
4.3	DSP 定点算法设计.....	102
4.3.1	数据的表示形式.....	102
4.3.2	数据的定标方法.....	104
4.3.3	定点算法设计实例.....	107
4.4	简单 DSP 程序设计.....	109
4.5	DSP 汇编程序的优化.....	115
4.5.1	合理选择汇编指令.....	115
4.5.2	循环结构的嵌套和延迟选项的使用.....	118
4.5.3	双寻址语句和并行语句.....	119
4.5.4	特殊语句的运用.....	121
4.5.5	循环缓存的利用.....	122
4.6	本章小结.....	123
第5章	TMS320C54x 的片上外围设备.....	124
5.1	通用 I/O 引脚.....	124

5.2	定时器	125
5.3	时钟产生逻辑	127
5.4	多通道缓冲串行口 McBSP	130
5.4.1	McBSP 的结构	130
5.4.2	McBSP 的控制寄存器	133
5.4.3	McBSP 数据发送和接收	138
5.4.4	μ -LAW/A-LAW 的压扩硬件处理	141
5.4.5	可编程移位时钟和帧同步	142
5.4.6	多通道操作	145
5.4.7	SPI 操作	147
5.4.8	McBSP 管脚作为通用 I/O 脚	149
5.5	直接存储器访问 DMA	149
5.5.1	DMA 寄存器的寻址	149
5.5.2	寄存器设置	151
5.6	主机接口 HPI	157
5.6.1	HPI-8 的连接	158
5.6.2	HPI-8 的操作	160
5.6.3	HPI-8 数据线作为通用 I/O	164
5.7	外部总线	165
5.7.1	外部总线接口	165
5.7.2	外部总线控制	166
5.7.3	外部总线时序举例	169
5.8	本章小结	170
第 6 章	DSP 与外围设备的接口	172
6.1	DSP 与 ADC、DAC 的接口	172
6.1.1	TLC320AD50C 芯片及其与 DSP 的接口	173
6.1.2	CS5331A 芯片及其与 DSP 的接口	184
6.1.3	McBSP 和 DMA 的结合	186
6.2	DSP 与外部存储器的接口	191
6.2.1	DSP 与 EEPROM 的接口	192
6.2.2	DSP 与 FlashROM 的接口	197
6.2.3	DSP 与 SRAM 的接口	202

6.2.4	DSP 与 FIFO 的接口	204
6.3	DSP 与串口通信的接口	211
6.3.1	DSP 与 RS232 的接口	212
6.3.2	DSP 与 USB 的接口	213
6.4	DSP 与 PCI 总线的接口	220
6.4.1	PCI 总线协议简介	220
6.4.2	PCI2040 接口芯片介绍	221
6.4.3	PCI2040 与 DSP 的接口	226
6.5	本章小结	227
第 7 章	DSP 软件设计	228
7.1	汇编和高级语言的混合编程	228
7.1.1	混合编程的变量和函数命名规则	228
7.1.2	混合编程函数调用规则	229
7.1.3	混合编程中堆栈的使用	231
7.1.4	混合编程的文件同构	234
7.2	XDAIS 介绍	235
7.2.1	XDAIS 的基本概念	235
7.2.2	XDAIS 编程规范	237
7.3	常见的算法实现	245
7.3.1	除法的实现	245
7.3.2	扩展精度的实现	246
7.3.3	函数的产生	248
7.3.4	FIR 滤波器的实现	250
7.3.5	IIR 滤波器的实现	253
7.3.6	FFT 的实现	254
7.4	本章小结	258
第 8 章	DSP 系统设计	259
8.1	DSP 系统的电源、复位和时钟电路	259
8.1.1	DSP 系统的电源	259
8.1.2	DSP 系统的复位和监控电路	261
8.1.3	DSP 系统的时钟电路	265

8.2 DSP 系统的自举	266
8.2.1 概述	266
8.2.2 HPI 自举方式	271
8.2.3 串行 EEPROM 自举	272
8.2.4 并行自举	273
8.2.5 标准串行自举	275
8.2.6 I/O 自举	277
8.2.7 自举表的生成	278
8.3 DSP 系统设计	279
8.3.1 系统设计概述	279
8.3.2 设计举例	282
8.3.3 DSP 资源的利用	285
8.4 本章小结	285
第 9 章 其他类型 DSP 介绍	287
9.1 Agere 公司的 DSP1600 系列	287
9.1.1 DSP1600 概述	287
9.1.2 DSP1600 的特点	290
9.2 基于超长指令字结构的 DSP TMS320C6000 系列	294
9.2.1 TMS320C6000 系列概述	294
9.2.2 TMS320C6200 的 CPU 结构	295
9.2.3 TMS320C6200 的软件特点	297
9.3 多处理器的 DSP StarPro	302
9.3.1 StarPro 概述	303
9.3.2 StarPro 的整体结构	303
9.3.3 StarPro 汇编代码示例	306
9.4 ADI 公司的 ADSP2100 系列	307
9.5 本章小结	308
第 10 章 ARM 架构在数字信号处理中的应用	309
10.1 ARM 处理器概述	309
10.1.1 ARM 处理器系列	309
10.1.2 ARM 指令集版本	311

10.1.3	ARM 开发工具.....	312
10.2	ARM 处理器系统结构.....	313
10.2.1	3 级流水线 ARM 结构.....	313
10.2.2	5 级流水线 ARM 结构.....	314
10.2.3	寄存器组织.....	315
10.3	ARM 汇编语言编程.....	318
10.3.1	数据处理指令.....	318
10.3.2	数据传送指令.....	320
10.3.3	控制流指令.....	322
10.3.4	一个简单的汇编语言程序.....	325
10.4	ARM 在数字信号处理中的应用.....	325
10.4.1	DSP 与实时操作系统 RTOS.....	326
10.4.2	Tri-Core 结构的 DSP.....	327
10.4.3	TI 的 OMAP.....	328
10.5	本章小结.....	330
附录 英文缩略语对照表.....		331
参考文献.....		333

第 1 章 绪论

数字信号处理起源于 17 和 18 世纪数学的一个学科,今天它已广泛地深入到通信、遥感、地震测量、石油勘探、生物医学以及海洋学等各个科学技术领域中,并成为一种重要的现代化工具。数字信号处理主要研究用数字或符号序列表示信号和处理这些序列。与模拟信号处理相比,数字信号处理具有灵活性强、精度高、处理成本低以及对环境没有特殊要求等优点。它不仅能实现模拟处理的大部分功能,而且还能完成模拟处理由于成本、可靠性等原因而无法具体实现的功能。同时随着信息技术、大规模集成电路和计算机的飞速发展,数字信号处理理论以及数字信号处理实现手段取得了长足的发展,从而使数字信号处理发展成为一门崭新而独立的学科。

1.1 数字信号处理技术的发展

信号处理有着悠久的历史,在各个不同的领域,如生物医学工程、仪器设备、海洋学、遥感、声学、声纳、雷达、地震学、语音通信、数据通信和核子科学等都充分显示了它的重要性。在某些应用中我们希望提取信号的某些特征,用以分析信号、识别信号或者压缩信号。如在语音识别应用中,我们需要提取语音信号的基音信息、声道参数等,以达到识别语音或识别讲话者的目的。而在语音压缩应用中,我们希望提取出语音信号的声道特征和激励特征,并利用合成分析等算法达到压缩信号的目的。另外,在某些应用中我们可能希望对信号进行增强处理,剔除或者减弱混在信号中的噪声或干扰。如在通信应用中,信号在信道传输过程中经常会受到信道噪声、多径衰弱等影响,为了提高接收质量,就需要使用信号处理技术来去掉或减弱这些干扰。

信号处理从分析的角度来看主要分为时域分析和频域分析两类。在时域中信号表示为幅度沿时间变化的关系,而在频域中信号表示为幅度沿频率变化的关系,图 1-1 给出了信号时频域表示之间的关系。图 1-1(c)给出了信号时域表示的一个例子,该信号由两个不同频率的谐波沿时间轴逐点相加得到,图 1-1(b)给出了这个信号的频域表示,图中的两个脉冲表示该信号包含两个频率成分,同时脉冲的幅值表征了谐波分量的能量大小。将两者综合起来,可得到图 1-1(a)所示的时间、频率和幅度关系示意图。时域和频域是对信号的两种表示方法,它们从不同角度表示了信号的重要特征,我们可以根据不同应用情况和不同需要来灵活选择,而

它们之间的关系由经典的傅里叶变换和傅里叶反变换联系起来。

信号处理最基本的手段是滤波和谱分析。滤波一般在时域进行，它的算法包括低通滤波、高通滤波、带通滤波和带阻滤波，其作用是去除信号中一些不需要的频率成分或者提取出信号中一些需要的频率成分，实现手段包括有限脉冲响应(FIR)滤波和无限脉冲响应(IIR)滤波。而谱分析一般在频域进行，以提取出信号的频率特征。

在早期，信号处理算法一般在模拟设备上实现。由于模拟实现的可靠性、灵活性差，而且对于某些复杂的算法实现起来困难，另外，在某些应用如地球物理数据处理中，往往需要把数据先记录在磁带上，然后在大型数字计算机上进行处理。另外在 20 世纪 50 年代还出现了用计算机作信号处理的另一种方法。由于计算机速度快又灵活，因而人们往往在用模拟器件实现信号处理系统之前，先在计算机上进行模拟，以确定方案的可行性。这些都是用数字方法进行信号处理的雏形。由于受当时信号处理算法和处理器能力的限制，这些早期的数字信号处理一般都是非实时的。

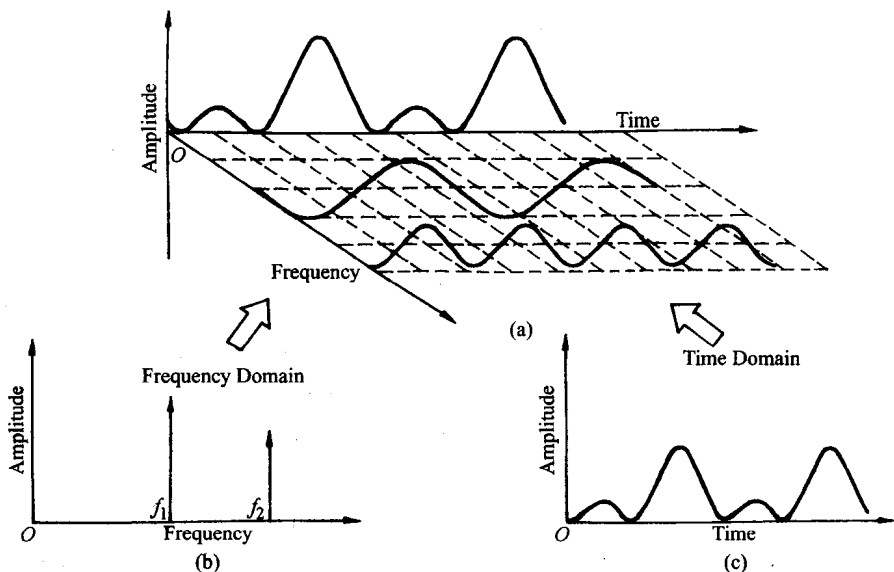


图 1-1 信号时频域关系图

现实世界中的信号一般都是模拟的，为了用数字方法对信号进行处理，首先要对信号进行数字化。奈奎斯特 (Nyquist) 采样理论给出了对模拟信号进行数字化，并用数字化后的信号无失真地恢复出原始模拟信号的条件，即采样频率必须大于等于模拟信号所包含的最高频率的两倍以上，正是奈奎斯特采样理论奠定了数字信号处理的基础。信号经过数字化后，信号的表现形式和一些特征发生了变

化,简单地套用原来的模拟信号处理算法已难以满足需要,因而对新的数字信号处理算法的研究成为了热点。

在 20 世纪 60 和 70 年代,数字信号处理技术以理论研究为主,在这期间,各国研究人员尝试和建立了许多巧妙的信号处理算法,一些算法已不单是简单地利用数字计算机的灵活性,而是以前从未在模拟系统中实现过。其中 1965 年发现的计算傅里叶变换的快速算法-快速傅里叶变换(FFT)是最重要也是最具代表性的算法之一。快速傅里叶变换在离散时域上直接计算离散时域信号或序列的傅里叶变换,把传统的计算傅里叶变换的计算量减少了几个数量级,从而为数字信号处理的实时实现提供了可能。同时快速傅里叶变换提供了一套在离散时域上精确成立的特性和数学关系,它已经不单纯是连续时域傅里叶变换的近似了。它的重要作用是促使人们利用时域离散数学方法建立许多数字信号处理的概念和算法,在离散时域和频域上形成一套严格的关系式,从而使数字信号处理作为一门新的学科出现在世人面前并为世人所接受。在理论研究获得进展的同时也出现了多本数字信号处理方面的著作,其中美国科学家 A.V.Oppenheim 和 R.W.Schafer 共同撰写的《Digital Signal Processing》是数字信号处理历史上一本里程碑式的经典著作。

数字信号处理技术的发展速度惊人,在短短几十年间,以经典的傅里叶频谱分析为基础,相继出现了自适应信号处理、现代谱估计、时频分析、多维信号处理等很多分支,近几年更出现了小波分析,所有的这一切使数字信号处理技术研究的对象从早期的确定性信号拓展到平稳随机信号、非平稳随机信号、时变信号和非高斯信号等,几乎覆盖了现实生活的每一个角落。同时数字信号处理也因此成为一门具有完整体系的交叉学科。

数字信号处理理论的渐渐成熟,使之越来越多地被应用到各个领域。在使用的过程中,传统的处理器因其结构上的限制,愈来愈显得力不从心,从而在 20 世纪 80 年代出现了专门为数字信号处理设计的电子器件,其中以数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)最引人注目。随着微电子技术的突飞猛进, DSP 的更新步伐也越来越快,其使用已扩展到军事、工业、通信等诸多领域,成为现代化技术的重要组成部分。

1.2 数字信号处理系统简介

根据信号处理系统的构成、处理能力以及计算问题到硬件结构映射方法的不同,将现代信号处理系统分为三大类:

(1) 指令集结构(ISA)系统。在由各种微处理器、DSP 处理器、单片机或其它专用指令集处理器等组成的信号处理系统中,都需要通过系统中的处理器所提供

的指令系统（或微代码）来描述各种算法，并在指令部件的控制下完成对各种可计算问题的求解。在这类系统中，由于 DSP 处理器采用改进的哈佛（Harvard）总线结构，内部配有专用的硬件乘法器、累加器，以流水线方式工作，具有良好的并行特性，并有专门设计的适于数字信号处理的指令系统，因而使 DSP 处理器成为现代数字信号处理系统中最重要也是最常用的处理单元。

(2) 硬连线结构系统。主要是指由专用集成电路(ASIC)构成的系统，其基本特征是功能固定、通常用于完成特定的算法，这种系统适合于实现功能固定和数据结构明确的计算问题。不足之处主要在于：设计周期长、成本高，且没有可编程性，可扩展性差。

(3) 可重构系统。基本特征是系统中有一个或多个可重构器件(如 FPGA)，可重构处理器之间或可重构处理器与 ISA 结构处理器之间通过互连结构构成一个完整的计算系统

本书将要介绍的数字信号处理系统主要是以 DSP 处理器为核心的指令集结构系统。

1.2.1 基本的数字信号处理系统

一个基本的数字信号处理系统的框图如图 1-2 所示。

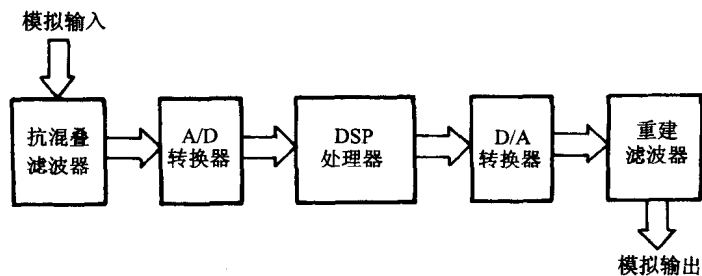


图 1-2 基本数字信号处理系统

图 1-2 中输入为模拟信号，它可以是电信号、声音信号、物理信号、化学信号等经过传感器和放大器等器件得到的一定幅值的电信号。在送给 DSP 处理器进行处理之前，这些模拟电信号需首先经过抗混叠滤波器和 A/D（模拟/数字）转换器。其中抗混叠滤波器一般是低通滤波器，也可以是带通滤波器，其作用是滤除模拟信号中不需要的频率分量，使得经过抗混叠滤波器后的信号变为带限信号，从而保证后面模数转换时满足奈奎斯特采样定理。A/D 转换器的作用是对输入的带限信号进行离散化，包括时间离散化和幅值离散化，即采样、量化。

DSP 处理器的任务是将 A/D 转换器送来的数字信号按照一定的算法进行处理，如滤波、傅里叶变换、模型参数提取、频谱分析等等。根据处理任务的要求，

DSP 处理器可以由一个 DSP 芯片及外部总线构成,也可以由多个 DSP 芯片构成。信号经 DSP 处理器处理后,可以数字方式输出,如果期望输出是数字信号,则数字信号处理系统可以不包括图 1-2 中的最后两个模块,如果系统最后需要模拟输出,则 DSP 处理器将处理后的数字信号送给其后的 D/A(数字/模拟)转换器。经 D/A 转换后的信号含有许多高频成分,为此需在其后接一个重建滤波器以对信号进行平滑。

1.2.2 典型的数字信号处理系统

图 1-2 所示的数字信号处理系统仅包含了一些最基本的模块,在实际的信号处理中,往往还需要附加其他的功能模块,如存储器、人机界面、逻辑控制等,图 1-3 给出了一个典型数字信号处理系统的框图。

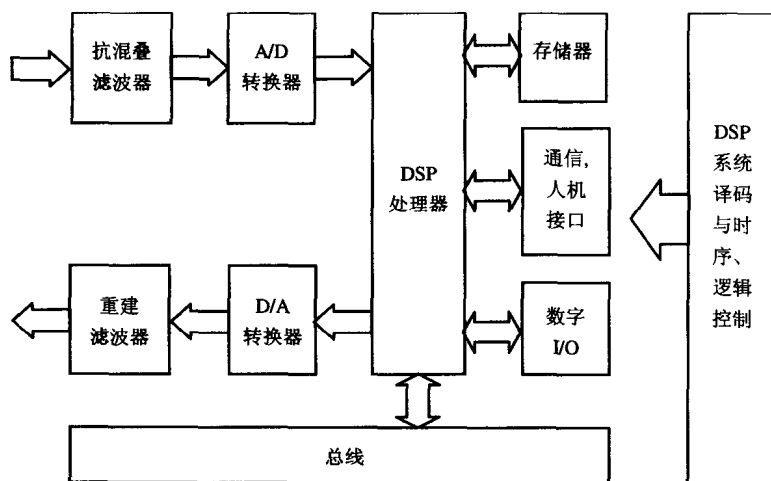


图 1-3 典型数字信号处理系统

图 1-3 中存储器可以是 RAM 或 ROM,用来存放 DSP 处理器所需的程序、表格或者临时数据等。通信包括串行通信和并行通信,人机接口可以有键盘、显示设备等,根据具体的应用情况,它们可以通过专用的驱动器与 DSP 处理器相连,也可以直接与 DSP 处理器相连。数字 I/O 用来提供需要的数字信息。DSP 系统译码与时序、逻辑控制用来保证数字信号处理系统根据用户的期望来工作,它包括地址译码、产生片选信号、读写逻辑控制等,它可以由逻辑门电路来实现,也可以选用可编程逻辑门阵列来实现,如 CPLD 等。在许多应用中,数字信号处理系统往往以计算机或工控机的插卡形式出现,因此需要有 DSP 处理器与总线(PCI、ISA、VXI 等)之间的接口。