

DSP工程技术应用系列



DSP

算法设计与系统方案

周霖 主编

李枫 潘娜 编著



国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

DSP 工程技术应用系列

DSP 算法设计与系统方案

周霖 主编
李枫 潘娜 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

DSP 算法设计与系统方案/周霖主编. —北京:国防工业出版社,2004.7

(DSP 工程技术应用系列)

ISBN 7-118-03502-5

I .D... II .周... III .数字信号—信号处理—算法设计 IV .TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 049693 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17 421 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—4000 册 定价:32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

数字信号处理 (Digital Signal Processing, 简称 DSP) 是一门涉及许多学科而又广泛应用于许多领域的新兴学科。20 世纪 60 年代以来, 随着计算机和信息技术的飞速发展, 数字信号处理技术应运而生并得到迅速发展。在过去的 20 多年里, 数字信号处理已经在许多领域得到极为广泛的应用。

信号的数字化处理包括两个步骤, 一个是信号在时间上的离散化, 即采样; 另一个是幅度上的离散化, 即分层。数字化之后的信号, 将全部变为 01 序列, 这就使得信息的采集、存储、传输、复制、加工异常方便。所以信号的数字化处理推动了各应用领域的发展, 并成为这些领域的最重要的技术支撑。反过来, 各应用部门对数字信号处理的新要求又促使信号处理理论与技术的发展, 包括分层的压扩技术, 采样和抽取技术, 数字滤波理论, 快速傅里叶变换 (FFT), 数字图像处理, 模式识别, 专家系统, 宽带通信网络, 多媒体技术等。数字信号处理技术的这种高速发展和对其他领域的广泛渗透无疑得益于 20 世纪 70 年代以来微电子技术的发展。1971 年英特尔公司推出了第一个微处理芯片, 其功能大体上和世界上第一台电子计算机相当。此后, 微处理芯片的发展就异常迅速, 它基本上遵从所谓的摩尔定律, 即微处理芯片每隔 18 个月性能提高 1 倍, 价格降低到原来的 1/2。

计算机、超大规模集成电路和数字信号处理的飞速发展, 使人类步入信息社会。和计算机一样, 数字信息处理的理论从 20 世纪 60 年代崛起以来, 到 20 世纪 80 年代数字信息处理器产生, 数字信息处理器 (DSP) 的发展也是迅猛异常。它改变了信号处理的面貌。今天数字信号处理器已广泛应用在各个领域, 也渗透到我们的生活中, 正改变我们的生活方式, 数字音响、数字广播、数字视频产品、会议电视等的产生必将代替模拟产品, 数字信号处理器起了十分关键的作用。

在通信、电视、雷达和各种消费电子产品方面应用的软件和算法非常丰富, 例如, 信源编码 (压缩) 和解码、信道编码和解码, 信号的调制与解调、噪声对消、信号加密与解密、电机的自动控制和各类信号的分析等。成体系的理论, 包括离散线性系统理论、离散和快速变换理论、数字滤波理论、信号检测理论、量化效应和误差理论、非线性谱估计理论以及小波变换理论等。

自 20 世纪 80 年代初, DSP 芯片诞生以来, DSP 芯片在短短 20 多年的时间里得到了飞速发展。随着 DSP 芯片性能价格比和开发手段的不断提高, DSP 芯片已经在通信与信息系统、信号处理、自动控制、雷达、军事、航天、医疗、家用电器等许多领域得到广泛的应用。

本书本着实用的目的, 介绍了 DSP 在算法和各种系统的设计方案, 全书共 9 章。第 1 章, 概述了 DSP 芯片的性能和使用情况; 第 2 章, 介绍了各种滤波器算法的设计和实现, 包括 FIR 滤波器算法设计、IIR 滤波器算法设计、FFT 算法设计、自适应滤波算法; 第 3 章到第 9 章, 介绍了各种实际系统的设计方案, 包括小波分析与变换、变频矢量控制、神经网络、雷达信号处理、语音信号处理、图像信号处理、生物医学信号处理等系统。这几章在内容上先介绍

每个系统的基础知识,在此基础上,介绍基于 DSP 的系统设计方案,结合实际例子,让读者对这一系统的设计方案有具体的了解。其中,第 3 章介绍小波分析设计与系统方案,介绍了基础的小波理论和 DSP 在小波变换中的应用。第 4 章介绍变频矢量控制系统设计,包括变频矢量控制的基础知识和基于 DSP 的变频控制系统的设计。第 5 章介绍神经网络系统设计,包括神经网络简介和基于 DSP 的神经网络系统设计。第 6 章介绍雷达信号处理系统设计,包括雷达系统简介和基于 DSP 的雷达信号处理系统的设计。第 7 章介绍语音信号处理系统设计,包括语音信号处理简介和基于 DSP 的语音信号处理系统设计。第 8 章介绍图像信号处理系统设计。第 9 章介绍生物医学信号处理系统设计,包括生物医学信号处理简介、生物医学信号处理系统设计与应用。

本书在编写上注重 DSP 在实际系统中的设计与使用,希望读者首先看一些详细介绍 DSP 结构和指令系统方面的书,再来阅读本书将会起到知识升华的作用。

由于作者水平有限,编写时间仓促,书中错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者
2004.7

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 数字信号处理概论	1
1.2 DSP 在数字信号处理中的应用	3
1.2.1 DSP 芯片简介	3
1.2.2 DSP 系统的构成	7
1.2.3 DSP 系统的设计过程	7
1.2.4 DSP 的接口介绍	8
1.2.5 相关芯片的选择	11
第 2 章 滤波器算法设计	15
2.1 FIR 滤波器算法设计	15
2.1.1 基础知识	15
2.1.2 FIR 滤波器在 C31 上的实现	16
2.1.3 窄带滤波器	19
2.1.4 低通滤波器的多级实现原理	20
2.1.5 用 DSP 芯片实现多抽样率低通 FIR 滤波器	20
2.1.6 FIR 滤波器的定点 DSP 实现	21
2.1.7 FIR 滤波器的浮点 DSP 实现	23
2.2 IIR 滤波器算法设计	25
2.2.1 基础知识	25
2.2.2 IIR 滤波器设计实现	25
2.2.3 IIR 滤波器的定点 DSP 实现	28
2.2.4 IIR 滤波器的浮点 DSP 实现	30
2.3 FFT 算法设计	33
2.3.1 快速傅里叶变换 FFT	33
2.3.2 FFT 算法的 Fortran 语言实现	35
2.3.3 FFT 算法的 C 语言实现	36
2.3.4 FFT 的定点 DSP 实现	37
2.3.5 FFT 的浮点 DSP 实现	41
2.4 自适应滤波算法	49
2.4.1 自适应滤波概述	49
2.4.2 自适应滤波器的定点 DSP 实现	50
2.4.3 自适应滤波器的浮点 DSP 实现	53
第 3 章 小波分析设计与系统方案	56

3.1	小波分析简介.....	56
3.1.1	小波理论概述.....	56
3.1.2	预备知识.....	56
3.1.3	小波变换的定义.....	58
3.1.4	小波变换的时频局部化分析.....	60
3.1.5	小波变换的多分辨分析与 Mallat 算法.....	61
3.1.6	基于小波变换的信号奇异性检测理论.....	63
3.2	DSP 在小波变换中的应用.....	66
3.2.1	基于 DSP 的小波信号处理系统设计.....	66
3.2.2	快速小波变换在 DSP 中的实现方法.....	70
3.2.3	DWMT 系统在 TMS320C80 上的实现.....	76
3.2.4	基于 DSP 的小波算法的实现.....	81
3.2.5	小波零树图像编码算法在 DSP 上的实时实现.....	84
3.2.6	实时应用软件的小波技术.....	87
3.2.7	并行 DSP 小波图像压缩的实现.....	89
第 4 章	变频矢量控制系统设计.....	92
4.1	变频矢量控制的基础知识.....	92
4.1.1	变频矢量控制简介.....	92
4.1.2	交—交变频调速传动的应用.....	93
4.1.3	变频调速及控制技术的发展.....	94
4.1.4	现代交流电机控制的现状与展望.....	96
4.2	基于 DSP 的变频控制系统设计.....	100
4.2.1	非线性解耦控制交流变频调速系统.....	100
4.2.2	无速度反馈矢量控制变频调速系统.....	104
4.2.3	基于 DSP 的交流伺服系统.....	108
4.2.4	基于 DSP 的高性能矢量控制系统.....	110
第 5 章	神经网络系统设计.....	113
5.1	神经网络简介.....	113
5.1.1	神经网络简介.....	113
5.1.2	神经网络的类型.....	114
5.1.3	几种常用的神经网络.....	117
5.2	基于 DSP 的神经网络系统设计.....	123
5.2.1	基于神经网络的一种快速 SVPWM 算法.....	123
5.2.2	基于 DSP 的模糊神经网络控制器.....	125
5.2.3	基于神经元控制的直流调速系统的 DSP 实现.....	130
5.2.4	基于 DSP 的神经网络计算机的设计.....	134
5.2.5	基于 DSP 的神经网络伺服控制器设计.....	136
第 6 章	雷达信号处理系统设计.....	140
6.1	雷达系统概论.....	140
6.1.1	雷达原理.....	140

6.1.2	雷达系统的基本组成.....	140
6.1.3	发展史.....	141
6.1.4	雷达方程.....	142
6.1.5	雷达的主要功能.....	142
6.1.6	几种探地雷达的对比研究.....	143
6.1.7	近程反巡航导弹雷达技术.....	144
6.1.8	雷达伺服控制技术的新发展.....	149
6.1.9	雷达信号处理中通用 DSP 的设计.....	151
6.2	基于 DSP 的雷达信号处理系统设计.....	156
6.2.1	基于 FPGA 和 DSP 的雷达信号处理系统的设计.....	156
6.2.2	可扩展机载 SAR 信号处理机设计.....	159
6.2.3	基于 TMS320C6701 的警戒雷达信号处理机的设计.....	164
6.2.4	双 DSP 实现气象雷达信号处理.....	168
6.2.5	基于 DSP 的雷达信号处理系统设计.....	172
6.2.6	基于 DSP 的雷达信号实时处理系统.....	175
6.2.7	基于 DSP 的雷达信号采集处理系统.....	178
第 7 章	语音信号处理系统设计.....	182
7.1	语音信号处理简介.....	182
7.1.1	语音信号处理基础.....	182
7.1.2	语音信号处理技术.....	185
7.2	基于 DSP 的语音信号处理系统设计.....	189
7.2.1	基于 DSP 的通用实时音频处理系统.....	189
7.2.2	以 CS-ACELP 算法为核心的数字语音记录设备.....	193
7.2.3	基于 DSP 技术的多路语音实时采集与压缩处理系统.....	197
7.2.4	数字录音系统的设计.....	201
7.2.5	用 DSP 技术开发语音识别系统.....	204
第 8 章	图像信号处理系统设计.....	209
8.1	图像处理的概况.....	209
8.1.1	图像处理概述.....	209
8.1.2	DSP 在图像处理中的应用概论.....	211
8.2	图像处理的基础知识.....	217
8.3	基于 DSP 的图像信号处理系统设计.....	223
8.3.1	TMS320C80 用于数字图像处理.....	223
8.3.2	基于 DSP 的视频信号实时采集与处理系统.....	225
8.3.3	用 DSP 实现图像的直接捕获与显示.....	228
8.3.4	基于可重构技术的实时图像处理机结构.....	233
8.3.5	微光电视图像预处理方法的硬件实现.....	237
第 9 章	生物医学信号处理系统设计.....	241
9.1	生物医学信号处理的基础.....	241
9.1.1	生物医学信号处理简介.....	241

9.1.2 常用的处理技术	242
9.1.3 匹配滤波器	243
9.2 生物医学信号处理系统设计与应用	245
9.2.1 基于数字信号处理技术的新型心电图自动分析系统	245
9.2.2 医学超声动态图像实时通信系统	251
附录 1 8 位 μ 律/16 位线性互换的 C 语言子程序	257
附录 2 μ 律到线性变换表	259
附录 3 缩写词的英文对照	260
参考文献	262

第1章 概 论

1.1 数字信号处理概论

数字信号处理的理论与技术已日趋成熟，数字信号处理的应用几乎涵盖了国民经济和国防建设的所有领域，包括雷达、航天、声呐、通信、海洋高技术、微电子、计算机、人工智能、消费电子等。

信号的数字化处理包括两个步骤：一个是信号在时间上的离散化，即采样；另一个是幅度上的离散化，即分层。数字化之后的信号，将全部变为 01 序列，这就使得信息的采集、存储、传输、复制、加工异常方便，所以信号的数字化处理推动了各应用领域的发展，并成为这些领域的最重要的技术支撑。反过来，各应用部门对数字信号处理的新要求又促使信号处理理论与技术的发展，包括分层的压扩技术、采样和抽取技术、数字滤波理论、快速傅里叶变换、数字图像处理、模式识别、专家系统、宽带通信网络、多媒体技术等。数字信号处理技术的这种高速发展和对其他领域的广泛渗透无疑得益于 20 世纪 70 年代以来微电子技术的发展。1971 年英特尔（Intel）公司推出了第一个微处理芯片 4001，其功能大体上和世界上第一台电子计算机 ENIAC 相当。此后，微处理芯片的发展就异常迅速，它基本上遵从所谓的摩尔定律，这就是微处理芯片每隔 18 个月性能提高 1 倍，价格降低到原来的 1/2。

数字信号处理技术的这种进步，是我们每一个人在日常生活中都可以感觉得到的，同时它还对世界上某些局部地区的战争产生了深远的影响。它使得原来意义上的“前方”与“后方”的概念发生了变化，使“信息战”的概念起到了主导作用。全球范围内的通信系统可以使美国五角大楼直接指挥某一局部战役的行动，甚至是精确制导的巡航导弹的打击目标。数字化浪潮正在席卷全球，数字化信息处理技术正在使人类生活质量提到空前高的水平。我国从事数字信号处理理论与应用研究的科技人员已在这一空前活跃的领域做出了令人瞩目的成绩。其中特别突出的例子是“曙光 1000”并行计算机、合成孔径雷达、数字式声呐、程控交换机等。

数字信号处理技术的发展经历了 3 个阶段：

20 世纪 70 年代模 P 是基于数字滤波和快速傅里叶变换的经典数字信号处理，其系统由分立的小规模集成电路组成，或在通用计算机上编程来实现信号处理功能，当时受到计算机速度和存储量的限制，一般只能脱机处理，主要在医疗电子、生物电子、应用地球物理等低频信号处理方面获得应用。

20 世纪 80 年代模 P 有了快速发展，理论和技术进入到以快速傅里叶变换为主体的现代信号处理阶段，出现了有可编程能力的通用数字信号处理芯片，例如美国德州仪器公司（Texas Instruments，简称 TI 公司）的 TMS32010 芯片，在全世界推广应用，在雷达、语音、通信、地震等领域获得应用，但芯片价格较贵，还不能进入消费领域应用。

20 世纪 90 年代模 P 的飞速发展十分惊人，理论和技术发展到以非线性谱估计为代表的

更先进的信号处理阶段，能够用高速的数字信号处理技术提取更深层的信息，硬件采用更高速的 CPU 能实时地完成巨大的计算量。

数字信号处理（DSP）以数字计算的方法对信号进行处理，具有处理速度快、灵活、精确、抗干扰能力强、体积小等优点。模 P 由硬件、算法和理论等基础支撑着它的发展和应⤵用。硬件是指用 VLSI（超大规模集成电路）实现的通用和专用芯片，目前许多芯片的运算速度已超过几千万次/s，最高达到 16 亿次/s，价格也大幅度降低。在通信、电视、雷达和各种消费电子产品方面应用的软件和算法非常丰富，例如，信源编码（压缩）和解码、信道编码和解码、信号的调制与解调、噪声对消、信号加密与解密、电机的自动控制和各类信号的分析等。成体系的理论，包括离散线性系统理论、离散和快速变换理论、数字滤波理论、信号检测理论、量化效应和误差理论、非线性谱估计理论以及小波变换理论等。

数字信号处理与模拟信号处理相比，具有以下优点：

- (1) 信号处理的动态范围大，有比模拟信号大 30dB 的动态范围，因而有更高的精度。
- (2) 数字信号处理仅受量化误差和有限字长的影响，处理过程不产生其他噪声，具有更高的信噪比。
- (3) 具有高度灵活性，能够快速处理、缓存和重组数据，可以时分多用、并行处理，还可以灵活地改变系统参量和工作方式，实现可编程处理。
- (4) 具有极好的重现性、可靠性和预见性。
- (5) 算法具有直接的可实现性。
- (6) 可以对白噪声、电平干扰和多径干扰进行相应的最佳化处理。

以上优势是数字信号处理技术在各领域中得到广泛应用的重要保证。

数字信号处理以信号系统的一般理论为基础，在理论体系上发展专门适合于离散时间（或者空间）上的信号分析原理和方法，在实践上发展适合于计算机处理的器件和设备，在应用上建立针对不同信号的模型和计算方法。数字信号处理的基础理论是在针对确定信号的讨论发展起来的，但是其应用几乎无一例外地涉及随机信号的分析，从这个意义上说，统计信号处理是数字信号处理的应用表现。因此，数字信号处理的理论体系大体可以归纳为三个层次的结构，如表 1-1 所列。这个结构更低层的基础是数学，更上层的是具体的应用。

表 1-1 数字信号处理的理论体系

统计信号处理		信息论
离散时间（空间） 信号分析基本理论	数理统计 概率论 随机过程	
信号与系统		

事实上，统计信号处理的大多数原理并不直接来源于离散时间（空间）系统的分析，而是来源于对一般时间（空间）序列的研究。然而上面这样的层次对于我们利用计算机为工具来解决问题是有用的。譬如，编写的数字信号处理程序基本上就是由数理统计和数值计算、信号处理工具、信息处理工具以及它们所支持的统计信号处理工具库所构成的。

上面的不同层次,有不同的关键问题。信号与系统的理论基础讨论的核心问题就是变换域上表示信号的问题。香农(C.E.Shannon)的抽样定理被工程师们公认为影响这个世界的最重要的公式之一(根据一项非正式的调查显示,抽样定理列于该调查所排列的10个最重要公式中。注意,第一位是牛顿第二定律,第二位是万有引力定律,第五位是Maxwell方程组,抽样定理列第八位,却足以说明它的重要性)。抽样定理惟一地提供了这样的可能性:能够用有限的离散的計算手段来研究连续发生的信号。

离散信号分析的理论一方面把连续时间的信号分析的方法和原理引进到离散系统的领域,比如 z -变换、离散时间傅里叶变换(DTFT)、离散傅里叶变换(DFT)以及根据模拟滤波器按照一定准则设计数字滤波器的方法;另一方面独立发展关于离散系统和信号分析的专门的理论和方法,比如滤波器的算法设计、量化的理论、有限字长的效应。这些理论的发展有一个共同的特点,就是适应数字计算机解决信号处理的问题。离散信号和系统的理论不仅仅解决现实世界中连续系统的问题,也开辟了解决本身就具有离散特征的系统的问题,比如,雷达天线阵列的方向图问题,本身就是空间离散傅里叶(Fourier)变换的问题。

现实问题中的信号一般都不是确定的,而是随机的。统计信号处理引进随机过程和数理统计的成果,并且运用信号处理的基本原理,建立模型和参数估计的理论,并且同信息论关于信源和信道及其相互关系的理论结合在一起,用于解决特定系统、特定模型的问题。模型决定算法,而算法决定实现。可以这样来归纳工程师们在数字信号处理领域所取得的成就:

理论—模型—算法—工程实现—应用

最终解决问题的一定是可以运行的代码或者设备。

1.2 DSP 在数字信号处理中的应用

1.2.1 DSP 芯片简介

1. 什么是 DSP 芯片

DSP 芯片,也称数字信号处理器,是一种具有特殊结构的微处理器。DSP 芯片的内部采用程序和数据分开的哈佛结构,具有专门的硬件乘法器,广泛采用流水线操作,提供特殊的 DSP 指令,可以用来快速地实现各种数字信号处理算法。根据数字信号处理的要求,DSP 芯片一般具有以下特点:

- (1) 在一个指令周期内可完成一次乘法和一次加法。
- (2) 程序和数据空间分开,可以同时访问指令和数据。
- (3) 芯片内具有快速 RAM,通常可通过独立的数据总线在两块中同时访问。
- (4) 具有低开销或无开销循环及跳转的硬件支持。
- (5) 快速的中断处理和硬件 I/O 支持。
- (6) 具有在单周期内操作的多个硬件地址产生器。
- (7) 可以并行执行多个操作。
- (8) 支持流水线操作,使取指、译码和执行等操作可以重叠执行。

与通用微处理器相比,DSP 芯片的其他通用功能相对较弱些。

2. DSP 芯片的发展

世界上第一个单片 DSP 芯片是 1978 年 AMI 公司宣布的 S2811,1979 年美国 Intel 公司发

布的商用可编程期间 2920 是 DSP 芯片的一个主要里程碑。这两种芯片内部都没有现代 DSP 芯片所必须的单周期芯片。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。第一个采用 CMOS 工艺生产浮点 DSP 芯片的是日本的 Hitachi 公司, 它于 1982 年推出了浮点 DSP 芯片。1983 年, 日本的 Fujitsu 公司推出的 MB8764, 其指令周期为 120ns, 且具有双内部总线, 从而处理的吞吐量发生了一个大的飞跃。而第一个高性能的浮点 DSP 芯片应是 AT&T 公司于 1984 年推出的 DSP32。在这么多的 DSP 芯片种类中, 最成功的是美国 TI 公司的一系列产品。该公司在 1982 年成功推出启迪一代 DSP 芯片 TMS32010 及其系列产品 TMS32011、TMS32C10/C14/C15/C16/C17 等, 之后相继推出了第二代 DSP 芯片 TMS32020、TMS320C25/C26/C28, 第三代 DSP 芯片 TMS32C30/C31/C32, 第四代 DSP 芯片 TMS32C40/C44, 第五代 DSP 芯片 TMS32C50/C51/C52/C53 以及集多个 DSP 于一体的高性能 DSP 芯片 TMS32C80/C82 等。自 1980 年以来, DSP 芯片得到了突飞猛进的发展, DSP 芯片的应用越来越广泛。从运算速度来看, MAC (一次乘法和一次加法) 时间已经从 20 世纪 80 年代初的 400ns (如 TMS32010) 降低到 40ns (如 TMS32C40), 处理能力提高了 10 多倍。DSP 芯片内部关键的乘法器部件从 1980 年的占模区的 40% 左右下降到 5% 以下, 芯片内 RAM 增加一个数量级以上。从制造工艺来看, 1980 年采用 $4\mu\text{m}$ 的 N 沟道 MOS 工艺, 而现在则普遍采用亚微米 CMOS 工艺。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, 引脚数量的增加, 意味着结构灵活性的增加。此外, DSP 芯片的发展, 使 DSP 系统的成本、体积、重量和功耗都有很大程度的下降。

3. DSP 芯片的分类

DSP 的芯片可以按照以下 3 种方式进行分类。

1) 按基础特性分类

这是根据 DSP 芯片的工作时钟和指令类型来分类的。如果 DSP 芯片在某时钟频率范围内的任何频率上能正常工作, 除计算速度有变化外, 没有性能的下降, 这类 DSP 芯片一般称为静态 DSP 芯片。

如果有两种或两种以上的 DSP 芯片, 它们的指令集和相应的机器代码机管脚结构相互兼容, 则这类 DSP 芯片称为一致性的 DSP 芯片。

2) 按数据格式分类

这是根据 DSP 芯片工作的数据格式来分类的。数据以定点格式工作的 DSP 芯片称为定点 DSP 芯片。以浮点格式工作的称为 DSP 芯片。不同的浮点 DSP 芯片所采用的浮点格式不完全一样, 有的 DSP 芯片采用自定义的浮点格式, 有的 DSP 芯片则采用 IEEE 的标准浮点格式。

3) 按用途分类

按照 DSP 芯片的用途来分类, 可分为通用型 DSP 芯片和专用型的 DSP 芯片。通用型 DSP 芯片适合普通的 DSP 应用, 如 TI 公司的一系列 DSP 芯片。专用型 DSP 芯片是为特定的 DSP 运算而设计, 更适合特殊的运算, 如数字滤波、卷积和 FFT 等。

4. DSP 芯片的选择

在设计 DSP 应用系统过程中, 选择 DSP 芯片是非常重要的一个环节。只有选定了 DSP 芯片才能进一步设计外围电路集系统的其他电路。总的来说, DSP 芯片的选择应根据实际的应用系统需要而确定。一般来说, 选择 DSP 芯片时考虑如下诸多因素。

(1) DSP 芯片的运算速度。运算速度是 DSP 芯片的一个最重要的性能指标, 也是选择 DSP 芯片时所需要考虑的一个主要因素。DSP 芯片的运算速度可以用以下几种性能指标来衡量:

- ① 指令周期：即执行一条指令所需要的时间，通常以 ns 为单位。
- ② MAC 时间：即一次乘法加上一次加法的时间。
- ③ FFT 执行时间：即运行一个 N 点 FFT 程序所需的时间。
- ④ MIPS：即每秒执行百万条指令。
- ⑤ MOPS：即每秒执行百万次操作。
- ⑥ MFLOPS：即每秒执行百万次浮点操作。
- ⑦ BOPS：即每秒执行十亿次操作。
- (2) DSP 芯片的价格。根据一个价格实际的应用情况，确定一个价格适中的 DSP 芯片。
- (3) DSP 芯片的硬件资源。
- (4) DSP 芯片的开发工具。
- (5) DSP 芯片的功耗。
- (6) 其他的因素。如封装的形式、质量标准、生命周期等。

DSP 应用系统的运算量是确定选用处理能力多大的 DSP 芯片的基础。那么如何确定 DSP 系统的运算量以选择 DSP 芯片呢？

(1) 按样点处理。按样点处理就是 DSP 算法对每一个输入样点循环一次。例如：一个采用 LMS 算法的 256 抽头的自适应 FIR 滤波器，假定每个抽头的计算需要 3 个 MAC 周期，则 256 抽头计算需要 $256 \times 3 = 768$ 个 MAC 周期。如果采样频率为 8kHz，即样点之间的间隔为 $125 \mu\text{s}$ 的时间，DSP 芯片的 MAC 周期为 $200 \mu\text{s}$ ，则 768 个周期需要 $153.6 \mu\text{s}$ 的时间，显然无法实时处理，需要选用速度更快的芯片。

(2) 按帧处理。有些数字信号处理算法不是每个输入样点循环一次，而是每隔一定的时间间隔（通常称为帧）循环一次。所以选择 DSP 芯片应该比较一帧内 DSP 芯片的处理能力和 DSP 算法的运算量。假设 DSP 芯片的指令周期为 P (ns)，一帧的时间为 $\Delta\tau$ (ns)，则该 DSP 芯片在一帧内所提供的最大运算量为 $\Delta\tau/P$ 条指令。

5. DSP 芯片的基本结构

DSP 芯片的基本结构包括：

- ① 哈佛结构；
- ② 流水线操作；
- ③ 专用的硬件乘法器；
- ④ 特殊的 DSP 指令；
- ⑤ 快速的指令周期。

1) 哈佛结构

哈佛结构的主要特点是将程序和数据存储在不同的存储空间中，即程序存储器和数据存储器是两个相互独立的存储器，每个存储器独立编址，独立访问。与两个存储器相对应的是系统中设置了程序总线 and 数据总线，从而使数据的吞吐率提高了 1 倍。由于程序和存储器在两个分开的空间中，因此取指和执行能完全重叠。

2) 流水线操作

与哈佛结构相关，DSP 芯片广泛采用流水线以减少指令执行的时间，从而增强了处理器的处理能力。处理器可以并行处理 2 条~4 条指令，每条指令处于流水线的不同阶段。以下示出一个三级流水线操作的例子：

CLLOUT1

取指	N	N-1	N-2
译码	N-1	N	N-2
执行	N-2	N-1	N

3) 专用的硬件乘法器

乘法速度越快, DSP 处理器的性能越高。由于具有专用的应用乘法器, 乘法可在一个指令周期内完成。

4) 特殊的 DSP 指令

DSP 芯片是采用特殊的指令。

5) 快速的指令周期

哈佛结构、流水线操作、专用的硬件乘法器、特殊的 DSP 指令再加上集成电路的优化设计可使 DSP 芯片的指令周期在 200ns 以下。

6. DSP 系统的特点

数字信号处理系统是以数字信号处理为基础, 因此具有数字处理的全部特点:

(1) 接口方便。DSP 系统与其他以现代数字技术为基础的系统或设备都是相互兼容, 这样的系统接口实现某种功能要比模拟系统与这些系统接口要容易得多。

(2) 编程方便。DSP 系统中的可编程 DSP 芯片可使设计人员在开发过程中灵活方便地对软件进行修改和升级。

(3) 稳定性好。DSP 系统以数字处理为基础, 受环境温度以及噪声的影响较小, 可靠性高。

(4) 精度高。16 位数字系统可以达到的精度。

(5) 可重复性好。模拟系统的性能受元器件参数性能变化比较大, 而数字系统基本上不受影响, 因此数字系统便于测试、调试和大规模生产。

(6) 集成方便。DSP 系统中的数字部件有高度的规范性, 便于大规模集成。

7. DSP 芯片的应用

自从 DSP 芯片诞生以来, DSP 芯片得到了飞速的发展。DSP 芯片高速发展, 一方面得益于集成电路的发展; 另一方面也得益于巨大的市场。在短短的 10 多年时间, DSP 芯片已经在信号处理、通信、雷达等许多领域得到广泛的应用。目前, DSP 芯片的价格也越来越低, 性能价格比日益提高, 具有巨大的应用潜力。DSP 芯片的应用主要有:

(1) 信号处理。如数字滤波、自适应滤波、快速傅里叶变换、相关运算、频谱分析、卷积等。

(2) 通信。如调制解调器、自适应均衡、数据加密、数据压缩、回波抵消、多路复用、传真、扩频通信、纠错编码、波形产生等。

(3) 语音。如语音编码、语音合成、语音识别、语音增强、说话人辨认、说话人确认、语音邮件、语音储存等。

(4) 图像/图形。如二维和三维图形处理、图像压缩与传输、图像增强、动画、机器人视觉等。

(5) 军事。如保密通信、雷达处理、声呐处理、导航等。

(6) 仪器仪表。如频谱分析、函数发生、锁相环、地震处理等。

(7) 自动控制。如引擎控制、测控、自动驾驶、机器人控制、磁盘控制。

(8) 医疗。如助听、超声设备、诊断工具、病人监护等。

(9) 家用电器。如高保真音响、音乐合成、音调控制、玩具与游戏、数字电话/电视等。

1.2.2 DSP 系统的构成

图 1-1 所示为一个典型的 DSP 系统。图中的输入信号可以有各种各样的形式。例如，它可以是麦克风输出的语音信号或是电话线来的已调数据信号，可以是编码后在数字链路上传输或存储在计算机里的摄像机图像信号等。

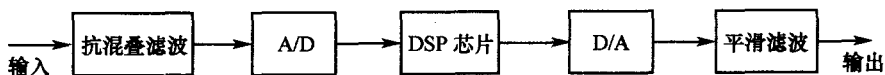


图 1-1 典型的 DSP 系统

输入信号首先进行带限滤波和抽样，然后进行 A / D (Analog to Digital) 转换，将信号转换成数字比特流。根据奈奎斯特 (Nyquist) 抽样定理，为保证信息不丢失，抽样频率至少必须是输入带限信号最高频率的 2 倍。

DSP 芯片的输入是 A/D 转换后得到的以抽样形式表示的数字信号，DSP 芯片对输入的数字信号进行某种形式的处理，如进行一系列的乘累加操作 (MAC)。数字处理是 DSP 的关键，这与其他系统 (如电话交换系统) 有很大的不同，在交换系统中，处理器的作用是进行路由选择，它并不对输入数据进行修改。因此，虽然两者都是实时系统，但两者的实时约束条件却有很大的不同。最后，经过处理后的数字样值再经 D/A (Digital to Analog) 转换，转换为模拟样值，之后再进行内插和平滑滤波就可得到连续的模拟波形。

必须指出的是，上面给出的 DSP 系统模型是一个典型模型，但并不是所有的 DSP 系统都必须具有模型中的所有部件。如语音识别系统在输出端并不是连续的波形，而是识别结果，如数字、文字等，有些输入信号本身就是数字信号，如 CD (Compact Disk)，因此就不必进行 A/D 转换了。

1.2.3 DSP 系统的设计过程

图 1-2 所示为 DSP 系统的设计流程。

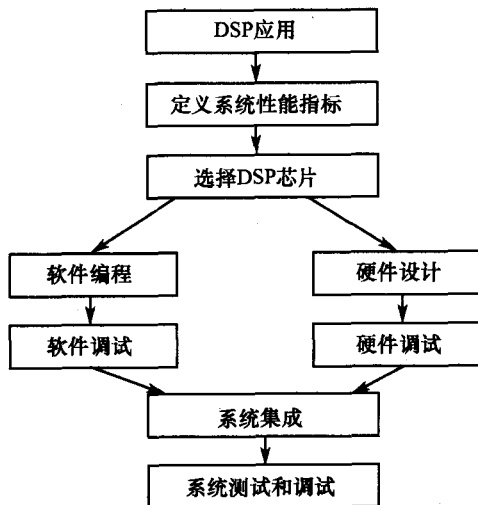


图 1-2 DSP 系统的设计流程

在设计 DSP 系统之前,首先必须根据应用系统的目标确定系统的性能指标、信号处理的要求,通常可用数据流程图、数学运算序列、正式的符号或自然语言来描述。

第二步是根据系统的要求进行高级语言的模拟。一般来说,为了实现系统的最终目标,需要对输入的信号进行适当的处理,而处理方法的不同会导致不同的系统性能,要得到最佳的系统性能,就必须在这一步确定最佳的处理方法,即数字信号处理的算法(Algorithm),因此这一步也称算法模拟阶段。例如,语音压缩编码算法就是要在确定的压缩比条件下,获得最佳的合成语音。算法模拟所用的输入数据是实际信号经采集而获得的,通常以计算机文件的形式存储为数据文件。如语音压缩编码算法模拟时所用的语音信号就是实际采集而获得并存储为计算机文件形式的语音数据文件。有些算法模拟时所用的输入数据并不一定是实际采集的信号数据,只要能够验证算法的可行性,输入假设的数据也是可以的。

在完成第二步之后,接下来就可以设计实时 DSP 系统,实时 DSP 系统的设计包括硬件设计和软件设计两个方面。硬件设计首先要根据系统运算量的大小、对运算精度的要求、系统成本限制以及体积、功耗等要求选择合适的 DSP 芯片。然后设计 DSP 芯片的外围电路及其他电路。软件设计和编程主要根据系统要求和所选的 DSP 芯片编写相应的 DSP 汇编程序,若系统运算量不大且有高级语言编译器支持,也可用高级语言(如 C 语言)编程。由于现有的高级语言编译器的效率还比不上手工编写汇编语言的效率,因此在实际应用系统中,常常采用高级语言和汇编语言的混合编程方法,即在算法运算量大的地方,用手工编写的方法编写汇编语言,而运算量不大的地方则采用高级语言。采用这种方法,既可缩短软件开发的周期,提高程序的可读性和可移植性,又能满足系统实时运算的要求。

DSP 硬件和软件设计完成后,就需要进行硬件和软件的调试。软件的调试一般借助于 DSP 开发工具,如软件模拟器、DSP 开发系统或仿真器等。调试 DSP 算法时一般采用比较实时结果与模拟结果的方法,如果实时程序和模拟程序的输入相同,则两者的输出应该一致。应用系统的其他软件可以根据实际情况进行调试。硬件调试一般采用硬件仿真器进行调试,如果没有相应的硬件仿真器,且硬件系统不是十分复杂,也可以借助于一般的工具进行调试。

系统的软件和硬件分别调试完成后,就可以将软件脱离开发系统而直接应用系统上运行。当然,DSP 系统的开发,特别是软件开发是一个需要反复进行的过程,虽然通过算法模拟基本上可以知道实时系统的性能,但实际上模拟环境不可能做到与实时系统环境完全一致,而且将模拟算法移植到实时系统时必须考虑算法是否能够实时运行的问题。如果算法运算量太大不能在硬件上实时运行,则必须重新修改或简化算法。

1.2.4 DSP 的接口介绍

随着数字信号处理在各种应用中(从高级消费类产品到高规格军事系统)变得更加普遍,DSP 成为电子设备设计人员在软件和硬件开发领域必须学习的新技能。

所有现代的定点和浮点 DSP 引擎都具有一个串行接口或并行存储器接口。并行数据总线宽度等于 DSP 的内部字长,对于大多数的定点处理器,其字长通常为 16 位。然而,在某些 DSP 家族中,其字长为 24 位,在音频处理应用中需要采用这种特高的分辨率。

浮点处理的数据总线宽度为 32 位或更宽。串行接口可全双工同步操作,而输入和输出数据以位方式串行格式进行操作。每次传送的最大位数通常等于处理器的内部数据总线宽度,但通常可通过编程以适于接口各种不同的外设。一般意义上,变换器可以认为是 DSP 处理器的“存储器寻址”外设。可以读或写表示变换值的数据。