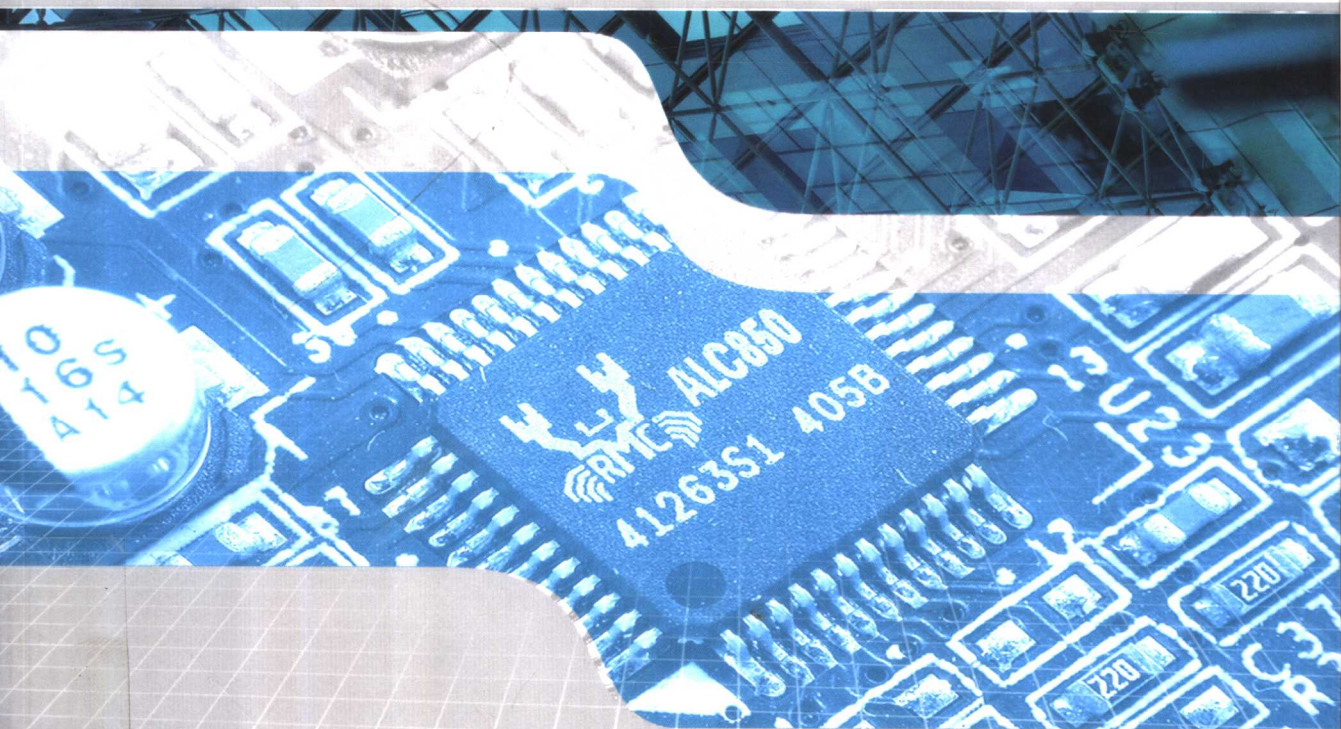
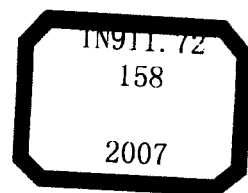


DSP

系统的VLSI设计

李哲英 编著





DSP 系统的 VLSI 设计

李哲英 编著

机械工业出版社 /

本书比较详细地讨论了数字信号处理算法专用集成电路设计方法,介绍了集成电路的基本设计概念、逻辑电路的设计方法、算法分析技术、信号流图(DFG)分析方法,以及与数字信号处理算法设计相关的 A/D 和 D/A 转换电路分析技术。同时,讨论了 IP 软核应用的验证和分析方法,以及用 FPGA 实现数字信号处理专用集成电路的基本分析方法和设计技术。最后,对使用 DSP 设计专用 DSP 系统的方法进行了专门的讨论。本书中的硬件描述全部采用 Verilog HDL,仿真平台使用的是 ModelSim。本书不仅可以作为相关专业 DSP 系统 VLSI 设计技术课程的教材,同时也可作为工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

DSP 系统的 VLSI 设计/李哲英编著. —北京:机械工业出版社, 2006.12
ISBN 978-7-111-20478-7

I. D... II. 李... III. 超大规模集成电路—数字信号—信号处理
IV. TN47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 146184 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:张俊红 责任编辑:顾 谦 版式设计:霍永明

责任校对:申春香 封面设计:陈 沛 责任印制:李 妍

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2007 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·19.25 印张·471 千字

0001—4000 册

定价:30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379768

封面无防伪标均为盗版

前 言

从技术上看,任何集成电路或电子系统,都是某种信号处理系统模型的物理实现。这种物理实现的特点是对信号进行处理,即输入和输出都是电压信号。也就是说,集成电路是一种系统实现技术,就是用电子元器件实现信号处理的物理系统。由此可知,数字信号处理专用器件的设计,就是用集成电路设计方法实现算法模型。

一般情况下,由于数字信号处理算法的复杂性,往往直接使用全定制的 DSP 器件(例如全定制 TSM320 系列 DSP)实现一个 DSP 系统。这种方法的技术特点是在专用处理器硬件支持下用软件实现 DSP 系统。全定制 DSP 器件的技术优点是使用者无须了解集成电路设计的方法和技术,仅根据算法要求用编程方法即可完成设计。但这种设计方法也存在不足,例如处理速度由软件执行速度所决定,程序的时间优化受硬件条件限制,又如,在某些场合下,无法实现器件功能的完全应用。因此,许多场合下,希望能够不使用全定制的 DSP 专用处理器来实现数字信号处理。

目前,利用集成电路技术完成数字信号处理算法设计的技术有两种:一种是 ASIC(用户定制)技术;另一种是专用集成电路技术。ASIC 算法实现技术往往使用 FPGA/CPLD 半定制器件,这种方法具有设计速度快的优点,但也存在设计的电路结构和工作速度受半定制器件电路结构限制等缺点。专用集成电路技术是根据算法和相应的设计规范,利用集成电路设计技术完成算法全定制集成电路的设计,其优点是电路结构和工作速度等全部由设计者决定,电路结构紧凑、功率损耗低。其缺点是设计过程比较复杂,不过这个缺点可以通过使用 IP(Intellectual Properties,知识产权)加以克服,IP 技术已经成功地在工业中得到了应用。

随着集成电路设计和制造技术,特别是 SoC 技术的发展,数字信号处理算法的实现技术正在向以 VLSI 为基本技术的 SoC 器件方向发展。以 VLSI 技术为基础的设计技术,已经成为一些数字信号处理系统设计的主流技术。

对于集成电路设计专业,数字信号处理专用器件设计技术是一个非常重要的专用技术。学生在校期间应当学习并掌握必要的数字信号处理的 VLSI 设计技术。正是基于这种考虑,作者在 2001 年制定的北京交通大学电子信息工程学院电子工程系的培养计划中,DSP 算法的 VLSI 设计技术已确定为一门专业技术课程“DSP 系统的 VLSI 设计技术”,且制定了相应的教学大纲。本书正是自 2003 年以来在 3 届本科教学实践的基础上,通过对讲义加工整理而完成的。

本书的编写目的是提供一个基本技术框架,提供有关数字信号处理算法 VLSI 实现技术的基本应用方法。本书内容包括两个方面:一个方面是算法 VLSI 设计的基本分析和设计技术;另一个方面则是与此相关的集成电路设计方法与技术。

本书绪论中,针对数字信号处理算法 VLSI 实现技术,介绍了与数字信号处理 VLSI 设计相关的基本概念。

作为集成电路设计方法的介绍,第1章和第2章分别介绍了集成电路设计的基本技术和基本逻辑电路的设计方法,这两章提供了数字信号处理算法 VLSI 设计中必要的电路技术。对于集成电路设计专业的学生来说,如果学习过集成电路设计基础课程,这两章可以作为阅读资料,不必进行课堂教学。

第3章重点讨论了数字信号处理算法 VLSI 设计中的算法分析方法,第4章专门讨论了数据流图分析技术,这两章共同构成了算法 VLSI 设计中的算法分析基础,也是数字信号处理算法 VLSI 设计的基本分析技术之一。第4章的主要内容是作者在进行有关数字信号处理算法硬件实现技术研究的总结和成果。这两章是 DSP 系统集成电路设计的重要基础,提供了有关算法的分析和仿真技术,是基于计算的 DSP 系统结构设计的基本方法。

第5章讨论了算法的 FPGA 实现设计方法。第6章对 IP 核的应用技术进行了介绍,重点讨论了有关 IP 软核仿真验证的问题。这两章提供了 ASIC 设计的内容,同时也是相关课程重点学习的部分。

第7章结合 DSP 系统设计,对有关 A/D 和 D/A 转换电路的参数和结构问题进行了讨论,提出了有关参数的选择和判别分析方法。第7章的大部分内容,是作者从数字信号处理集成电路设计研究工作的总结。与其他数字电路或微机接口课程不同,本书讨论的是如何选择 A/D 和 D/A 转换电路的技术参数以及结构选择与判别方法,提供了有关转换时间、字节长度和结构选择的基本方法,以及如何对输入信号进行限制。之所以要讨论这些,是因为 A/D 和 D/A 转换电路是 DSP 系统,特别是专用集成电路的一个重要组成部分。如果不结合算法和处理电路,有一些 A/D、D/A 转换以及算法处理的重要参数将无法理解,这些内容也是本书与其他教科书相关部分重要的区别所在。

第8章对使用 DSP 处理器设计数字信号处理算法实现系统的基本方法进行了讨论。本书中所有 IP 软核全部使用 Verilog HDL 编写,因此本书的附录提供了有关 Verilog HDL 的参考内容。

本书可以作为“数字信号处理算法 VLSI 设计”课程的教材,大约需要 48 课时。在教学过程中,要特别注意要求学生进行实际练习,并把仿真工具作为基本教学与学习的工具。本书涉及的 EDA 工具包括 ModelSim (用于逻辑分析与仿真)、Microwind (用于版图设计与电路仿真)、MultiSim (用于电路仿真与设计),以及 Lake Pro (用于版图设计与仿真)。一般情况下,选择 FPGA/CPLD 厂家提供的教学软件即可。

需要指出的是,为保持某些仿真图及电路图的原样,书中部分图形符号和文字符号并未按国家标准做统一处理,这点希望广大读者能注意。

北京交通大学骆丽教授和刘元盛工程师对本书的编写提供了宝贵意见,并参与了部分章节的编写工作。北京交通大学电子工程系硕士研究生马敏洁、陈婷婷、韩玺、秦勇、刘志明、李博、李争、李月梅等同学对本书的 Verilog HDL 程序进行了仿真验证,并提供了相关的版图设计和仿真。同时,北京联合大学信息学院的王毓银教授、鲍泓教授、李金平教授以及北京交通大学电子工程系其他教师,都对本书的编写提供了宝贵意见和大力支持,在此一并致谢。

由于作者水平有限,本书中一定存在不少缺陷和不足,作者真诚地希望读者不吝赐教。

李哲英

2006 年 10 月

目 录

前言

绪论 1

0.1 数字信号处理 1

0.2 DSPS 的组成 4

0.3 用 VLSI 实现数字信号处理系统的 基本概念 8

本章小结 10

思考题与练习题 10

第 1 章 VLSI 基础知识 12

1.1 集成电路的设计流程 12

1.1.1 集成电路设计的基本概念 13

1.1.2 集成电路的设计流程 18

1.2 电路设计基本方法 18

1.2.1 电路系统设计的基本概念 19

1.2.2 电路设计规范 22

1.2.3 电路综合 24

1.3 版图设计基本方法 25

1.3.1 版图的基本概念 26

1.3.2 版图文件 28

1.3.3 版图基本结构 30

1.3.4 版图设计的基本方法 31

1.4 基本工艺概念 34

1.4.1 集成电路工艺概述 34

1.4.2 工艺技术对设计的要求 36

本章小结 36

思考题与练习题 37

第 2 章 基本数字电路模块 39

2.1 数字集成电路的图形描述 39

2.1.1 电路原理图 39

2.1.2 棒图 40

2.2 数字电路基本模块 42

2.2.1 基本逻辑门电路模块 42

2.2.2 组合逻辑电路设计方法 47

2.2.3 触发器逻辑电路模块 50

2.2.4 时钟电路 51

2.2.5 多米诺逻辑电路 52

2.3 加法器 53

2.3.1 基本加法器 53

2.3.2 超前进位加法器 54

2.4 乘法器 55

2.4.1 基本数字乘法器 56

2.4.2 串行乘法器 57

2.4.3 并行乘法器 57

本章小结 58

思考题与练习题 58

第 3 章 数字信号处理算法分析 60

3.1 算法分解的基础理论 60

3.1.1 算法的基本概念 60

3.1.2 基本算法分析 62

3.1.3 算法的分解与合成 68

3.2 流水线处理 70

3.2.1 流水线处理的基本概念 70

3.2.2 卷积流水线 77

3.2.3 FIR 数字滤波器的流水线 78

3.3 并行处理 78

3.3.1 并行处理的基本概念 79

3.3.2 并行 FIR 滤波器 82

3.3.3 卷积算法的并行流水线 83

本章小结 84

思考题与练习题 85

第 4 章 DFG 分析方法 87

4.1 DFG 的基本概念与算法特征 87

4.1.1 DFG 的基本概念 87

4.1.2 DFG 与算法特征 91

4.2 DFG 分析方法 95

4.2.1 DFG 建模的基本方法 95

4.2.2 DFG 的算法分析概念 103

4.2.3 比特流的 DFG 108

4.2.4 SFG-DFG 转换 109

4.3 迭代分析应用 110

4.3.1 算法时间特性分析 110

4.3.2 算法实时性 113

4.3.3 多速率迭代边界分析 115

4.4 算法的 DFG 分析 117

4.4.1 卷积算法分析	117	7.1.3 信号带宽估计	208
4.4.2 IIR 算法分析	119	7.1.4 噪声分析	209
本章小结	120	7.1.5 A/D 电路与 D/A 电路选择	210
思考题与练习题	121	7.2 A/D 转换电路的设计概念	215
第 5 章 FPGA 数字信号处理系统	124	7.2.1 A/D 转换电路的基本原理	215
5.1 FPGA/CPLD 的基本特征	125	7.2.2 A/D 转换的主要技术指标	218
5.1.1 可编程逻辑器件概述	125	7.2.3 基本采样—保持电路	219
5.1.2 FPGA/CPLD 的应用特征	126	7.3 常用 A/D 转换电路结构	222
5.1.3 可编程结构原理	127	7.3.1 并行 A/D 转换电路	222
5.1.4 CPLD 器件的基本结构	131	7.3.2 串行 A/D 转换器	224
5.1.5 基本应用技术	136	7.4 D/A 转换器	226
5.2 基于 FPGA/CPLD 的 DSP 系统	141	7.4.1 D/A 转换原理	226
5.2.1 系统设计基本方法	141	7.4.2 D/A 转换电路的基本参数	229
5.2.2 应用开发系统	151	7.4.3 典型的 D/A 转换电路	231
5.3 基本运算模块	160	本章小结	235
5.3.1 时钟分频电路	161	思考题与练习题	235
5.3.2 多路选择器	162	第 8 章 DSP 处理器的应用	238
5.3.3 数据比较器	164	8.1 DSP 处理器分析	238
5.3.4 串行加法器	166	8.1.1 DSP 处理器概述	238
5.3.5 超前进位加法器	170	8.1.2 DSP 处理器的寄存器与存储器	245
5.3.6 乘—加器	171	8.1.3 外部设备	247
5.3.7 并—串和串—并转换电路	174	8.1.4 DSP 处理器的指令系统	253
本章小结	180	8.1.5 TMS320C5402 处理器基本特征	255
思考题与练习题	180	8.2 DSP 处理器的滤波器设计	257
第 6 章 IP 软核验证	182	8.2.1 FIR 滤波器优化	257
6.1 IP 核验证的基本概念	182	8.2.2 直接型 FIR 滤波器设计	260
6.1.1 专用器件设计中的验证问题	182	8.2.3 对称型 FIR 滤波器设计	261
6.1.2 验证的基本概念	185	8.3 DSP 处理器算法分析	264
6.2 仿真验证	191	8.3.1 算法分析的基本内容	264
6.2.1 仿真的基本概念	191	8.3.2 算法分析的基本方法	267
6.2.2 逻辑仿真验证的基本原理	194	本章小结	269
6.2.3 仿真的验证能力	197	思考题与练习题	269
6.3 可复用 IP 软核测试	198	附录 A Verilog HDL 练习	271
6.3.1 IP 软核测试的基本概念	199	A.1 组合逻辑设计	271
6.3.2 测试平台设计	200	A.1.1 数据比较器	271
6.3.3 验证文件	201	A.1.2 用 always 块实现较复杂的组合逻辑电路	272
本章小结	202	A.2 时序逻辑电路	274
思考题与练习题	202	A.2.1 1/2 分频器	274
第 7 章 A/D 与 D/A 电路	204	A.2.2 利用条件语句实现较复杂的时序逻辑电路	275
7.1 A/D 与 D/A 的基本概念	204	A.2.3 时序逻辑的阻塞赋值与非阻塞赋值	277
7.1.1 A/D 与 D/A 基本模型	204		
7.1.2 模拟信号的离散化和量化	206		

A.3 含有函数和任务的仿真分析	279	A.4.1 利用有限状态机进行复杂时序 逻辑的设计	284
A.3.1 使用函数 Verilog HDL 模块 仿真	279	A.4.2 状态机嵌套层次结构仿真	287
A.3.2 Verilog HDL 中使用任务 (task) 时的仿真	281	A.4.3 模块调用实现自顶向下的 设计	292
A.4 复杂数字逻辑系统仿真分析	284	参考文献	297

绪 论

数字信号处理 (Digital Signal Processing, DSP) 理论与技术, 是一种利用数字方法实现各种系统的基本理论与技术。现代数字信号处理技术与计算机技术和数字集成电路技术 (包括微处理器技术、专用集成电路技术等) 的出现、发展紧密相连。

现代数字信号处理技术为现代科学研究和工程系统的实现与应用, 提供了相当灵活的运算基础。特别是 DSP (Digital Signal Processor, 数字信号处理器, 有时也指数字信号处理) 的出现, 以及随着集成电路技术发展而出现的各种数字系统集成电路设计技术 (例如可编程数字逻辑器件中 FPGA/CPLD、片上系统 (SoC) 以及各种专用集成电路设计技术) 的出现, 更是为用数字电路方法实现工程系统提供了坚实的技术基础。因此, 现代电子系统, 特别是智能电子系统几乎无一例外地采用了数字技术。这就是 DSP 技术成为工程实际基本技术之一的重要原因。

随着数字化技术及其应用领域的不断发展与扩大, 数字信号处理已经成为当前电子技术和 IT 领域中的一个核心技术。DSP 技术已经成为 21 世纪初, 各种新技术的一个共同基础。

与 DSP 技术关系密切的是集成电路设计与制造技术。同时, DSP 技术的应用也对集成电路设计与制造技术提出了新的要求。在 DSP 系统的设计与实现技术中, 集成电路设计与制造是一个基本支撑技术, 由于 DSP 系统日趋复杂, 对速度和处理精度要求越来越高, 近年来 DSP 系统的设计与实现技术正在向着专用集成电路化的方向发展, 掌握集成电路设计技术是 DSP 系统设计人员必备的一项重要工程素质。

0.1 数字信号处理

根据信号与系统的基本理论, 设系统的输入是 X , 系统的输出是 Y , 则

$$Y = F(X) \quad (0-1)$$

式中, $F()$ 代表的是某种数学运算, 例如算术运算、代数运算、积分运算、逻辑运算、卷积运算等。

由此可知, 任何一个系统都可以被看成是一个数学计算系统, 其功能是对各种输入信号 (或信息) 进行数学处理, 再把处理结果输出给其他系统。

目前, 在各种工业技术中, 最容易实现各种信号处理所需计算功能的技术, 就是电子技术。利用电子技术提供的元器件, 可以十分方便地形成具有不同运算功能的电子电路。在工程实际中, 信号处理的方法有两大类: 一类是模拟信号处理 (ASP) 技术; 另一类是数字信号处理技术 (DSP)。与模拟信号处理技术相比较, 数字信号处理技术具有许多优点, 例如系统精度易于控制、参数稳定、易于实现各种运算和智能化、系统可靠性高等。

模拟信号处理方法的优点是实时性好, 而缺点则是系统复杂、易受干扰等。特别是到目前为止, 利用模拟信号处理方法实现的系统一般来说是一个固定系统, 也就是说系统的结构和参数是固定的, 无法在运行当中适应变化的要求和条件, 难以实现智能化。

从数学上看,信号的处理(甚至系统的实现)就是一个运算系统,所以不管采用什么样的方法,只要满足了运算要求、实现了运算结构,就可以认为是完成了系统的要求,DSP技术就是直接用计算方法实现信号处理系统的。但是从直观的理解上可以看出,数字信号处理系统的能力要比ASP系统强大得多,也灵活得多。

1. 数字信号与算法的基本概念 在科学研究和工程技术领域中,用数字序列描述的信号叫做数字信号,对数字信号的处理就是根据需要对数字信号进行相应的计算。

在自然界中,几乎所有的信号都是模拟信号,即不是以数字序列方式给出的信号。为了能够应用数字计算的方式对信号进行处理,电子技术提供了一种把模拟信号转换为数字信号以及把数字信号转换成模拟信号的电路技术,就是A/D转换电路和D/A转换电路技术。任何模拟信号经过A/D转换后可以变为相应的数据时间序列,同样,任何数字信号也可以经过D/A转换后形成相应的模拟信号。由此可知,通过A/D转换电路,可以实现对任何模拟信号的转换,进而可以使用数字信号处理的方式对其进行处理。

算法是对数字信号处理方法的描述。由于数字信号具有可计算性,所以数字信号处理系统由各种相应的计算结构组成,通过这些计算完成对信号的处理。在数学上,各种不同的计算表现为不同域或坐标下的算子,因此,算法就是算子的有序组合。

必须指出,算法不是算子的简单组合,而是有序组合。所谓有序是指各种算子运算之间的连接具有特定的顺序,而组合则是指各种算子结合的方式。对于算法中的算子来说,可以有几种不同的方式实现,例如使用计算机、微处理器系统或者是直接用集成电路技术设计专用器件。这就对算法的组合方式提出了要求,即算法中算子的组合不仅与计算关系有关,也与实现技术有关。例如使用PC实现数字信号处理,可用计算机语言(如C、C++等)实现数字信号处理系统,这时如果需要乘法算子,则可以直接利用语言提供的算术运算实现,但如果使用CPLD实现,则必须对算法和乘法算子的应用进行分析,以便确定如何减少乘法的使用次数和乘法操作的个数,这是因为建立硬件乘法电路需要动用大量的资源,而CPLD的尺寸(等效逻辑门和触发器的个数)是有限的,很可能无法满足算法对乘法器的要求。

由于系统的本质是数学运算,各种科学研究和工程应用系统都可以用数学模型来描述,数学模型是算法设计的基础,算法的任务是实现描述系统的数学模型。从理论上讲,任何工程系统都可用能够完成计算处理的数字逻辑电路技术实现。

以算法为核心设计而成的数字系统叫做数字信号处理系统,数字信号处理系统的结构必须满足算法要求,算法及其实现技术是数字信号处理理论与应用技术的主要内容。实际上,基于算法的系统设计正在逐步成为计算机应用系统设计的基本方法。

2. 基本研究内容 数字信号处理的基本内容十分广泛,包括模拟信号处理功能的数字实现(例如滤波器等处理电路)、复杂的数学处理、智能化系统的实现以及灵活多样处理方法的实现等。

数字信号处理的基本内容包括信号处理理论、信号处理方法和信号处理系统实现技术。

(1) 信号处理理论。由于信号来自不同的信号源,各种信号源具有不同的性质,使得信号具有十分复杂的物理特征和数学特征,因此,信号处理是一个十分复杂的问题。对于不同性质的信号,必须采用不同的处理方法才能达到处理目的,这就要求信号处理理论必须能够对信号的基本性质、基本特征进行研究,同时还必须提供信号性质和特征的分析方法。信号处理基本理论研究结果,构成了算法设计的理论基础。信号处理理论不仅提供了算法设计的

基础,同时也是各种算法实现技术的理论基础。算法实现技术必须符合算法的设计要求,必须满足算法对数字信号处理的要求。所以,在设计算法实现系统时,必须充分考虑算法的理论基础,以此确定算法的特殊要求,并寻找相应的处理技术。

信号处理理论的另一个作用就是对算法功能和结构进行研究。由于性质和特征不同,不同信号的处理算法具有很强的特殊性,这些特殊性不仅表现在算子特征上,还表现在算法对实现技术的要求上。因此,如何根据算法特殊性以及数字电路技术的特征,构建合理的算法结构,是信号处理理论必须研究的一个重要内容。

(2) 信号处理方法。数字信号处理方法大致可分为经典信号处理方法、现代信号处理方法和数字计算技术3个方面。

经典信号处理方法提供了经典信号处理内容的分析理论与信号处理系统结构,包括积分变换和状态方程、经典数字滤波、确定性信号的特征识别以及经典的非线性系统等。

现代信号处理方法包括变参数系统的实现、时-频域处理技术、信号和信息提取技术等。现代数字信号处理技术十分重视人工智能理论和技术研究与应用。实际上,数字信号处理技术已经成为现代智能理论应用的基本实现技术,而现代数字信号处理方法的基础之一,就是人工智能理论与技术。可以说,脱离了人工智能理论与技术,就没有现代数字信号处理技术,而没有现代数字信号处理技术,就没有现代人工智能系统的应用。

数字计算技术是现代工程技术的基础之一,包括基本数学模型的建立和计算方法。传统信号处理技术是建立在数学模型基础之上的技术,但算法比较简单。而现代数字信号处理则完全取决于问题的数学描述和算法。从技术上说,数字信号处理是指用数字计算的方法对信号进行处理。在工程实际中,无论是用计算机软件进行数字信号处理,还是用数字电路直接进行数字信号处理,实质上都是集成电路的一种应用。因此,数字信号处理技术的基础之一就是数字逻辑电路技术。

3. 数字信号处理基本理论与方法 在工程实际中,要想明确地了解应用系统,就必须用科学研究和工程技术的语言对应用系统进行描述,这种描述的结果就是应用系统的行为特性模型,也就是应用系统的数学模型。数学模型代表了应用系统中不同信号或变量之间的关系规律,可以用来分析应用系统的行为和特性,同时也指出了实现应用系统的方法。

从数学的角度看,数学模型所指出的就是输入信号与输出信号之间的运算关系,系统的行为就是对输入信号进行运算,再把运算结果输出。因此,任何工程系统都可以被看作是计算系统,可以使用数字逻辑电路的方法实现工程应用系统。

数字信号处理的理论包括系统建模基础与方法、算法设计与模型实现、可计算系统与不可计算系统分析等。

数字信号处理的方法是指根据系统设计需要,建立相应的算法并利用相应的电子技术实现这种算法。

4. 数字信号处理中的两个基本技术概念 在数字信号处理系统中,时间的概念十分重要。采用数字电路处理方法对模拟信号进行转换时,以下两个基本技术概念是十分有用并且是十分重要的。

(1) 采样定理。采样定理的应用目的是用来确定模拟信号转换成数字信号时的转换速率,也就是说,用来确定每秒钟取多少个数据才能保证数字信号处理的正确性和精度。

采样定理:设连续时间信号 $x(t)$ 的最高频率为 Ω ,采样速率为 f_s ,当 $f_s > 2\Omega$ 时,可

以在时域内完全恢复 $x(t)$ 。

采样定理不仅是进行模拟—数字转换时必须遵守的一个重要原则，同时也是具有实时处理能力的 DSP 系统的基本限制条件之一。当要求必须随着输入信号的输入完成信号处理时（例如实时数字滤波器），要求数字信号处理系统必须具有实时性，即能够在两个采样点之间的时间内，完成所需要的数字信号处理工作，并输出处理结果。在这种情况下，要求对算法和算法实现结构进行适当设计，以满足时间要求。

(2) 信号带宽估计。根据现代信息理论和工程应用技术可知，信号的作用是驮载信息，例如通信系统中的编码信号、调制信号等。除工程信号外，为了满足分析和研究的需要，科学研究和工程实际中经常会涉及到许多自然信号的处理。自然信号处理的目的是提取相关的信息，例如通过对人体生命信号（血压信号、体温信号、心电信号等）的分析做出相应判断等。

由此可知，信号是信息的载体，在处理信号时必须保证对信号驮载的信息没有影响或仅有极小的影响。这就需要在信号处理前，特别是在对模拟信号进行 A/D 转换时，确定信号所具有的最高频率或最大频率范围，以便根据采样定理设计 A/D 转换电路的转换速率。这就是信号带宽的估计。

在工程实际中，判断某个自然信号的最高频率是比较困难的，一般是根据经验进行判断。但对于工程系统产生的信号，则可以根据系统对信号的要求决定信号应有的最高工作频率。

必须注意，信号带宽的估计是数字信号处理系统设计和分析中的一项重要基础工作，没有信号带宽的估计，就没有 A/D 和 D/A 转换电路和实时系统设计的依据，同时也无法判断系统算法结构是否能满足设计要求。

本书的所有算法分析和设计，都认为信号带宽已知。有关信号带宽的估计方法请参考相关的书籍。

0.2 DSPS 的组成

从算法的角度看，数字信号处理系统（DSPS）具有很强的特殊性，无论是从结构还是从形成方式上看，各种不同的数字信号处理系统之间都存在着巨大差异。从组成原理上看，各种数字信号处理系统的组成又基本相同。

1. DSPS 的基本组成 DSPS 的基本结构取决于算法，同时也与所采用的硬件技术有关。从系统功能的角度看，数字信号处理系统一般包括信号输入、信号输出、信号转换、信号处理以及数据管理等部分。

DSPS 的一般组成结构如图 0-1 所示。

图 0-1 中，点划线框部分不属于数字信号处理系统的基本结构。图中基本部分的功能说明如下：

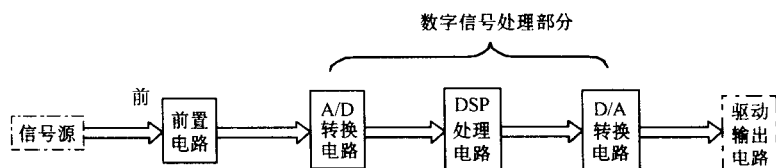


图 0-1 DSPS 的基本组成结构

前置电路——对输入模拟信号进行相应的预处理，例如放大、滤波、偏置调整等。

A/D 转换电路——把模拟信号转换为数字信号（数据序列），A/D 转换电路的输出数据就是数字信号处理系统的输入信号。

D/A 转换电路——把数字信号（数字序列）转换为时间连续的模拟信号，以满足应用领域的需要，例如语音处理系统等。

DSP 处理电路——这是实现数字信号处理算法的核心部分，可以是软件系统，也可以是硬件系统。

2. 算法结构 数字计算技术包括两方面问题：一个方面是算法问题；另一个方面是算法的实现问题。算法实现问题，属于数字计算技术所要解决的问题。因此，数字信号处理系统的算法结构也包括两个部分：一个是计算结构；另一个是实现结构。

计算技术要解决的问题包括算法实现、计算精度、计算稳定度。一个算法往往会因为计算技术使用不当而成为非健壮算法（容易出现计算错误或计算失败），也往往因为计算技术不合适，而成为不能使用的算法（无法满足实时性要求或无法完成计算任务等）。例如，使用不同的计算精度和数字计算方法，可以避免计算溢出，也可以引起溢出。再例如，由于使用的计算技术过于复杂或庞大，就会引起比较大的时间延迟，从而不能满足系统实时性要求等等。

在数字信号处理技术中，根据上一节的讨论可知，数字信号处理就是用计算的方法实现一个系统。由于数字信号是数据的序列，同时，数字信号处理只能使用数字电路，因此要实现数字信号处理系统，只能依靠离散数值运算，例如卷积计算、数值积分等，这就必然会涉及到大量的乘法或除法运算。在数字计算系统中，要实现乘法和除法运算的电路比较复杂，同时所需要的时间也比较长，这必然会大大地增加运算时间，这是数字信号处理系统所不希望的。正是这个原因，数字信号处理系统的设计中必须对算法进行仔细的研究和分析，以便找出性能优良的计算技术。

除处理计算技术外，如何实现一个算法或计算技术的系统结构，是数字信号处理系统的另外一个重要问题。由于可以用来实现同一个算法的数字系统可能有多种，例如微处理器系统、DSP 器件系统、专用集成电路系统等，因此提出了一个十分重要的问题，用哪一种方法是最合适的选择？所以，在数字信号处理系统的设计时，必须对所面对的具体问题进行认真分析，才能找到最适合的方法，从而设计出比较合理的 DSP 系统。

本书的主要内容是讨论数字信号处理的集成电路设计技术，因此对其他几种实现技术不进行讨论。

3. DSPS 的基本实现技术 以下对几种 DSPS 设计实现技术进行简要的介绍，以便能使读者对用集成电路技术实现 DSPS 有一个更深刻的认识。

(1) PC 系统。作为数字信号处理实现技术，PC 的最大优势就是系统资源丰富，其中包括硬件和软件资源，它可以使用各种编程技术和应用软件。例如使用 PC 进行语音处理就相当方便，不需要开发任何硬件系统，仅需利用 PC 的多媒体设备、驱动软件，就能进行系统开发。所以，自 20 世纪 80 年代以来，有相当多的应用系统都是以 PC 为基本系统开发完成的。以 PC 为核心的 DSP 系统的基本结构如图 0-2 所示。

使用 PC 完成 DSP 系统的缺点是系统体积比较大，同时，由于 PC 的固有特征（微处理器系统、PCI 总线、操作系统引起延迟等），使得 PC 在数字信号处理的应用方面受到一定限制。

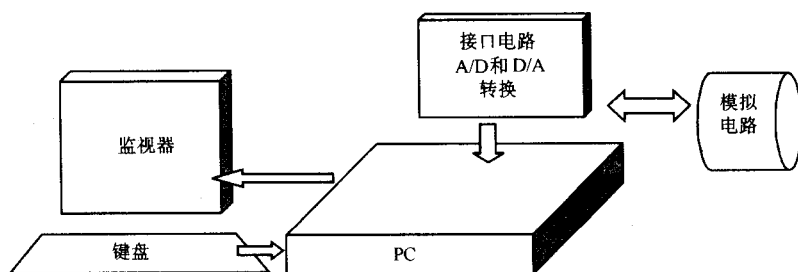


图 0-2 以 PC 为核心的 DSP 系统结构

(2) 单片机。单片机是一种具有 CPU 和各种不同外部电路的微处理器。从结构上看，单片机与微处理器的重要区别在于，单片机的系统管理资源没有微处理器丰富，但却具有多种用户电路。因此，如果系统不需要复杂的管理，就可以充分利用单片机的电路集成特性，把系统体积压缩到最小。例如，32 位的单片机 68302，虽然存储器和总线管理能力不如微处理器，但由于片内提供了各种通信电路和 6 个 DMA（直接存储器访问）管理部件，使系统的数据通信处理能力十分强大。

总的来说，用单片机可以实现各种数字信号处理系统。但如果系统复杂、实时性要求强，则单片机就显得能力不足了。因此，在比较简单的系统中，可以使用单片机作为数字信号处理器，而需要进行复杂计算时（例如实现 DVD 解码），就必须使用微处理器或 DSP 器件。

应用单片机实现数字信号处理系统的硬件结构如图 0-3 所示。图中点划线部分表示可能电路已经包括在单片机内部而不需要外加的电路。例如 MC68HC05/08 和 TMS430 系列单片机中就包含相应的 RAM 和 A/D 转换电路。

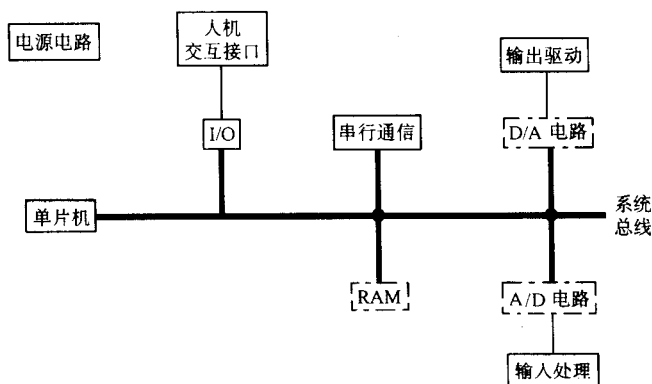


图 0-3 以单片机组成的 DSP 系统结构示意图

实际上，任何单片机组成的系统，都可以被看作是一个数字信号处理系统，因为系统的功能是由单片机完成的，系统已经成为一个数字信号处理系统。

(3) DSP 处理器。从系统管理的角度看，微处理器具有强大的优势。从系统简单、易于开发的角度看，提供了相应用户电路的单片机，则具有良好的实用性。但如果需要实现复杂数学计算或需要进行高速数学处理的数字信号处理系统（例如语音识别、图像实时处理、多媒体处理等），则使用 DSP 处理器具有更大的优势。例如目前迅速发展的软件无线电技

术、移动通信技术和多媒体技术，就是 DSP 处理器信号处理能力的最好证明。应用 DSP 组成的 DSP 系统结构如图 0-4 所示。

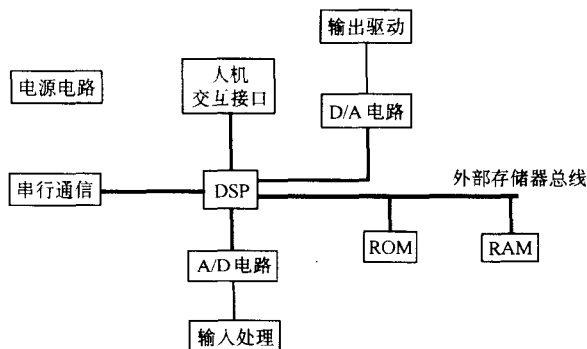


图 0-4 DSP 组成的 DSP 系统结构示意图

为了提高 DSP 处理器的数字处理速度，除了在总线上采用哈佛结构外还不够，还必须对处理器中采用比较特殊的算术运算单元才能满足数字信号处理的要求。根据上述分析可知，如果能提供乘法器，使得完成一个乘法指令与完成一个加法指令或数据传送指令所需要的时间相同，则可以极大地提高程序执行速度。为此，在 DSP 器件中一般都增加了一个或数个硬件乘法—累加器（MAC），这样就可以在一个指令周期中完成一次乘法和一次累加计算，从而使数字信号处理速度大大提高。乘法—累加器（MAC）结构如图 0-5 所示。

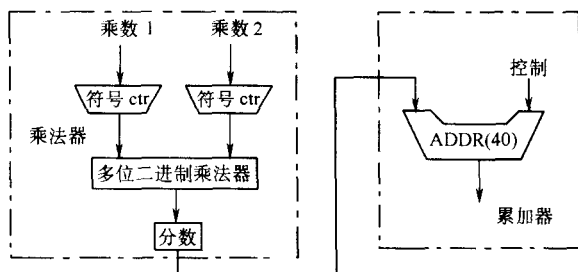


图 0-5 乘法—累加器（MAC）结构示意图

（4）VLSI 实现。使用 PC、微处理器、单片机和 DSP 实现数字信号处理系统的一个共同问题，就是系统的实时性问题。无论是冯·诺依曼系统结构，还是哈佛结构，都没有脱离串行计算的范围。因此，使用这些技术实现数字信号处理系统时，都不可避免地遇到对复杂系统处理速度的限制，这主要是因为系统的形成是通过软件对硬件的控制完成，而串行系统的软件执行速度无法与并行系统相比拟。

为了克服软件执行的串行缺陷，近年来出现了使用硬件实现数字信号处理的技术。所谓使用硬件电路实现数字信号处理系统，就是通过数字逻辑电路直接形成数字信号处理系统，而不是通过使用 CPU 为核心的器件实现数字信号处理系统。这种技术就是目前正以极高速发展的 VLSI 数字信号处理技术。DSP 的 VLSI 实现赋予了数字信号处理技术更快的速度和数据处理能力。不过，由于 DSP 系统的复杂性，DSP 的 VLSI 实现目前还无法实现与 DSP 相匹敌的系统。

随着计算技术和微电子技术的发展，SoC 已经成为电子技术应用的重要发展方向，并带

动了 VLSI 技术实现 DSP 系统的迅速发展。

(5) DSP 系统所需要的外部设备电路。所谓外部设备,是指既不属于总线、又不属于 CPU 的功能电路。例如定时/计数器电路、串行通信接口电路、PLL 电路(锁相环电路)、直接存储器访问控制电路(DMA 电路)、A/D 和 D/A 转换电路等。

DSP 器件中加入外部设备电路的目的很简单,就是为了提供 DSP 器件的系统功能,使系统能在最大程度上实现集成。例如配有相应 A/D 和 D/A 转换电路的 DSP 器件,就可以直接应用于语音处理系统或其他模拟信号处理系统,并且使电路在最大限度集成的基础上,保证或提高系统的技术性能指标。

由于外部设备电路的种类很多,每一种外部设备电路都针对某种特殊的应用目标,所以,不同的 DSP 器件所具有的外设电路也不同。大多数 DSP 器件中一般都有定时/计数器电路、串行通信接口电路,而 PLL 电路、DMA 电路、A/D 和 D/A 转换电路等则是根据 DSP 器件的应用领域加以配置。

0.3 用 VLSI 实现数字信号处理系统的基本概念

利用集成电路设计技术直接设计数字信号处理系统是一个重要的技术,之所以重要,是因为这种技术代表了高速数字信号处理系统的一个重要的发展方向,特别是随着可编程逻辑器件 FPGA/CPLD 技术和深亚微米集成电路制造技术的发展,数字信号系统的集成电路设计技术正以极高的速度发展。

用集成电路技术设计数字信号处理系统的最大优势就是这种设计方法可以充分利用各种不同的 IP 模块完成设计工作,从而极大地提高了设计可靠性,并有效地缩短了设计周期。同时,这种 DSP 系统设计技术还具有安全性高、运行速度快等优点。

1. DSP 系统的 VLSI 设计目标 数字信号处理系统的设计目标,是以最佳的速度和技术指标实现复杂的数学运算。因此,数字信号处理系统集成电路设计的目标,就是充分利用硬件电路直接完成数字信号处理所具有的高速度优势,形成高性能的全硬件数字信号处理系统,特别是在某些重要的信息处理系统中,全硬件的信息处理在安全性方面具有更大的优势。

(1) 提高系统工作速度。从数字电路的本质可以知道,数字电路构成各种直接计算电路的最大优势,就是实现了高速度的计算系统,从而满足了数字信号处理算法对速度的要求。

目前数字信号处理系统,可以用微处理器、DSP 处理器为核心的处理器系统来实现。这两种实现技术的优势是,使用通用结构器件实现满足特殊要求的计算系统。无论是使用冯·诺依曼结构还是哈佛结构,这两种数字信号处理系统的一个共同特点,就是利用软件和相应的计算逻辑电路完成信号处理所需要的信号处理计算。因此,这两种系统具有的特点是在满足通用性的条件下,通过不同的程序控制计算电路,实现相应的数字信号处理系统。因此,这种软件控制下的数字信号处理系统没有脱离软件计算系统的本质。而软件计算系统的特点就是软件的执行是串行方式,要实现并行处理具有一定的困难,在满足灵活性要求的同时,限制了数字信号处理的速度。

用集成电路技术设计数字信号处理系统的几个重要特征,是可以实现所需要的并行计算机制,特别是在一定的条件下,还可以实现与模拟信号相类似的并行计算结构,从而极大地

提高了系统的处理速度。当然,这种设计技术的特点是系统灵活性或通用性基本丧失。从系统设计方法学的观点看,这种方法不具备通用性,同时也在价格方面不具备竞争优势。

随着集成电路技术,特别是IP核技术(将在以后章节中详细介绍)以及可编程逻辑器件技术的发展,这种缺陷正在逐渐地减弱并消失。IP核技术提供了通用模块复用方法,把通用器件的通用性优势通过通用模块的方式在集成电路设计技术中再现,从而使得硬件电路设计具有某种通用性。而可编程逻辑器件技术的发展,则提供了十分重要的小批量、低价格的系统实现技术。

(2) 优化电路结构。集成电路设计的一个重要内容,就是对电路结构进行优化。集成电路优化的目标是实现速度、结构、功耗的整体优化。速度是指数字信号处理电路的工作速度,结构则是专用器件的电路结构,而功耗则是指器件全速工作时的功率损耗。这三个方面是设计数字信号处理专用电路时必须认真对待的问题。

速度优化的目的是选择合适的运行速度,使得电路在满足处理速度要求的同时,尽量降低系统结构的复杂性,并且在选择时系统具有最小的功率损耗。

实际上,减低系统结构的复杂性以及选择满足要求的最低处理速度,都是降低功率损耗的方法。因此,在设计数字信号处理系统专用集成电路时,应当特别注意这三者的优化。

在满足数字信号处理速度要求的同时,兼顾系统结构简化和降低功率损耗,是数字信号处理系统硬件电路设计的主要目标之一。用集成电路技术所设计的数字信号处理系统,在系统设计制造后就成为了一个专用集成电路,这种集成电路的特点是可以实现最少冗余电路。

另一方面,为实现并行处理提高处理速度,一般会造成电路规模增加,这就形成了处理速度和结构之间的矛盾。为了达到最佳处理速度和最小冗余电路的目的,就必须充分考虑两者之间的关系。

2. 基本分析方法 数字信号处理系统的集成电路实现技术中,系统分析和设计方法与以CPU为核心的数字信号处理系统的设计方法基本相同,仍然需要对算法进行分析和设计,然后设计相应的系统结构,并通过调试加以实现。尽管如此,在具体技术中,两种不同的设计技术之间还是存在着相当大的差别,这种差别主要体现在算法分析与结构设计方法和概念之间的不同。

(1) 算法分析。在集成电路设计技术中,算法分析的目标是建立满足处理速度要求、同时具有最小结构的硬件电路系统结构,这与使用DSP处理器或微处理器系统对算法的优化有很大的差别。在DSP处理器和微处理器系统中,算法优化以保证速度和减少存储器需求为基本目标,算法优化的目的是保证速度,优化软件和存储器需求。而在集成电路设计技术中,算法优化则是以保证速度为核心,建立硬件电路的基本结构,所以,算法优化的目的是保证速度、降低电路规模。

(2) 结构设计。集成电路技术中的结构设计,以实现算法为目标,也就是通过数字电路结构完成算法的运算结构。这种电路的特点是不需要根据指令执行运算,而是由硬件在信号的传输过程中直接完成运算。所以,集成电路设计技术中的结构设计完全以算法结构为核心,以数字电路为目标。在DSP处理器和微处理器系统设计数字信号处理系统时,由于计算系统固定,因此,结构设计的目标是实现算法软件结构,通过软件结构实现数字信号处理系统的核心算法。

3. 核心技术 用集成电路技术实现数字信号处理系统的核心技术包括算法分析、计算