



Xilinx大学计划指定教材

高等院校信息技术规划教材

FPGA数字信号处理 实现原理及方法

何 宾 编著

INFORMATION TECHNOLOGY
INFORMATION TECHNOLOGY
INFORMATION TECHNOLOGY

清华大学出版社



高等院校信息技术规划教材

FPGA数字信号处理 实现原理及方法

何 宾 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书全面而又系统地介绍了基于FPGA实现数字信号处理的原理及方法。全书包括12章和11个实验,主要内容包括数字信号处理设计导论、FPGA的硬件结构及运算功能、信号及其处理理论概述、CORDIC算法原理及实现、FIR滤波器和IIR滤波器的设计、其他常用数字滤波器的设计、重定时信号流程图、数字通信信号处理原理及实现、自适应信号处理理论基础、基于FPGA的自适应信号处理实现、信号同步原理及实现、基于AccelDSP的数字信号处理的实现和实验部分。本书参考了大量最新的设计资料,内容新颖、理论和应用并重,充分反映了基于FPGA实现数字信号处理的最新方法和技术,可以帮助读者系统地掌握这些方法和技术。

本书可作为相关专业开设FPGA数字信号处理课程的本科生和研究生教学参考书,亦可作为从事FPGA数字信号处理研究方向的相关教师、研究生和科技人员的自学参考书,也可作为Xilinx公司相关课程的培训用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

FPGA数字信号处理实现原理及方法/何宾编著. —北京:清华大学出版社,2010.3

(高等院校信息技术规划教材)

ISBN 978-7-302-21538-7

I. ①F… II. ①何… III. ①可程序逻辑器件—应用—数字信号—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(2009)第217736号

责任编辑:战晓雷 薛 阳

责任校对:梁 毅

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京市清华园胶印厂

装 订 者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:24.75 字 数:586千字

版 次:2010年3月第1版 印 次:2010年3月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:39.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:034368-01

随着数字信号处理算法的不断优化,数字信号处理器(Digital Signal Processors, DSPs)性能的不不断提高,数字信号处理技术越来越被广泛地应用在各个领域。数字信号处理技术正朝着高速高性能方向发展,因此这对数字信号处理的手段和工具也提出了更高的要求。

随着现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)制造工艺的不断改进,其集成度和性能的不不断提高,采用FPGA对数字信号进行处理越来越受到重视。与DSP相比,FPGA有着不可比拟的优势。一方面,与DSP靠程序指针来运行程序相比,FPGA执行算法的本质是靠电路并行执行的,因此在同样的时钟频率下,使用FPGA完成数字信号处理算法要比使用DSP快得多。另一方面,由于FPGA编程灵活,资源可重新配置,使得在实现数字信号处理时更加灵活,成本更低。因此,FPGA性能的不不断提高,能够满足未来复杂数字信号高速实时处理的要求。

与DSP主要靠C语言编程来实现数字信号处理算法相比,使用传统的硬件描述语言(Hardware Description Language, HDL)在FPGA上编程实现数字信号处理算法要复杂一些,但是,随着FPGA相关信号处理软件工具性能的不不断提高,未来在FPGA上实现数字信号处理算法将变得如同在DSP上使用C语言那样简单。

本书力图全面系统地介绍基于FPGA实现数字信号处理的原理及方法。通过系统介绍这些原理和方法,使读者能够系统、全面地掌握使用FPGA进行数字信号处理的方法和设计技巧。本书主要分为以下几个部分。

① 数字信号处理设计导论部分。该部分主要介绍数字信号处理技术概要,基于FPGA的数字信号处理的实现和基于DSP的数字信号处理的实现。在介绍基于FPGA的数字信号处理的实现部分,简单介绍了Xilinx的FPGA的结构和Xilinx所提供的用于数字信号处理的System Generator和AccelDSP软件工具的功能和处理流程。



② FPGA 的硬件结构及运算功能部分。该部分主要介绍 Xilinx 公司的 Virtex-II、Virtex-4 和 Virtex-5 FPGA 结构的特点和功能。在介绍 Virtex-4 结构时,详细介绍 DSP48 Slice 的结构、功能和用于数字信号处理的实现方法;在介绍 Virtex-5 结构时,详细介绍 DSP48E Slice 的结构、功能和用于数字信号处理的实现方法。在该部分也介绍了在 FPGA 中表示数字的方法。

③ 信号及其处理理论概述部分。该部分主要介绍信号的定义、信号的增益、失真及测量、噪声及处理、模拟信号及处理、数字信号及处理、通信信号的软件处理等内容。这些内容构成了信号处理的基本理论。

④ CORDIC 算法原理及实现部分。该部分主要介绍 CORDIC 算法原理。在介绍算法原理时,介绍在圆坐标系、线性坐标系和双曲线坐标系下的旋转模式和向量模式实现 CODIRC 算法的过程。在此基础上,对算法性能进行了详细讨论,最后给出了使用 System Generator 实现该算法的方法。

⑤ FIR 滤波器和 IIR 滤波器的设计部分。该部分主要介绍模拟到数字滤波器的转换、数字滤波器的种类、基本数字 FIR 滤波器的设计和数字 IIR 滤波器的设计等内容,这些内容给出设计滤波器的规则和方法。

⑥ 其他常用数字滤波器的设计部分。该部分主要介绍滑动平均滤波器的设计、积分器和微分器的设计、梳状滤波器的设计、积分器梳状滤波器的设计、中频调制信号的产生和解调、CIC 滤波器的设计等内容。该部分所介绍的滤波器也是数字滤波处理中经常用到的滤波器。

⑦ 重定时信号流图部分。该部分主要介绍信号流图的基本概念、割集重定时及规则、脉动阵列和自适应滤波器的 SFG。该部分内容是在优化滤波器设计时,经常用到的理论知识。

⑧ 数字通信信号处理原理及实现部分。该部分主要介绍信号检测理论、二进制基带数据传输、信号调制技术。该部分内容和数字通信的内容密切相关。

⑨ 自适应信号处理理论基础部分。该部分内容包括自适应信号处理技术的背景、自适应信号处理系统的结构、自适应信号处理的应用和自适应算法。

⑩ 基于 FPGA 的自适应信号处理实现部分。该部分内容包括 LMS 硬件实现结构、最小二乘解的计算、指数 RLS 算法的实现、QR-RLS 算法原理及实现。

⑪ 信号同步原理及实现部分。该部分内容包括信号的同步问题、符号定时及恢复等内容。在介绍符号定时及恢复时,重点介绍了符号定时原理、符号定时恢复、载波相位偏移及控制、帧同步的实现原理、数字下变频和数控振荡器的原理及实现和 BPSK 接收信号的同步。

⑫ 基于 AccelDSP 的数字信号处理的实现部分。该部分内容包括 AccelDSP 实现数字信号处理的设计流程和具体的实现步骤,使用 AccelDSP 软件工具将大大降低实现难度,使得在 FPGA 上实现数字信号处理算法更加容易。

⑬ 实验部分。该部分包含 11 个实验,这些实验使用了 System Generator 软件工具实现前面所介绍的理论知识,使读者掌握这些设计方法和设计技巧。

在讲授和学习本书内容时,可以根据教学时数和内容的侧重点不同,适当地将相关

章节的内容进行调整和删除。为了让读者更好地掌握相关的内容,本书给出了大量的设计实例程序。为了便于读者学习,本书配有光盘,光盘给出了本书所有完整的工程文件及示例程序。本书不仅可以作为大学信息处理相关专业高年级本科生和研究生学习 FPGA 数字信号处理课程的教学用书,也可作为从事信号处理相关领域教学和科研工作者的参考用书。

本书在编写过程中引用和参考了许多著名学者和专家的研究成果,同时也参考了 Xilinx 公司的技术文档和手册,在此向他们表示衷心的感谢。尤其要提到 Bob Stewart、Louise Crockett 两位教授,本书的完成也参考了他们提供的宝贵资料,正是由于这些宝贵资料才能使本书顺利完成,再次向他们表示衷心的感谢。在本书的编写过程中,何宾负责编写第 1~7 章,并对全书进行统稿,何军负责整理并编写第 8~11 章的内容,李颖负责整理并编写第 12 章的内容,刘静负责整理并编写实验 1~实验 6 的内容,王纲领负责整理并编写实验 7~实验 11 的内容,刘静和王纲领共同完成本书所有示例程序的验证工作。在本书的出版过程中,得到了 Xilinx 公司“大学计划”项目的大力支持与帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,编写时间仓促,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

编 者
2009 年 8 月

目录

Contents

第 1 章 数字信号处理设计导论	1
1.1 数字信号处理技术概要	1
1.1.1 数字信号处理技术的发展	1
1.1.2 数字信号处理算法的分类	3
1.1.3 数字信号处理实现方法	4
1.2 基于 FPGA 的数字信号处理实现	5
1.2.1 FPGA 的结构特点	5
1.2.2 FPGA 的公共资源	7
1.2.3 基于 FPGA 的数字信号处理流程	10
1.3 基于 DSP 的数字信号处理实现	14
1.3.1 DSP 的结构特点	14
1.3.2 DSP 的运行代码及性能	16
第 2 章 FPGA 的硬件结构及运算功能	19
2.1 Virtex-II 的内部结构及功能	19
2.1.1 Virtex-II 的逻辑资源	19
2.1.2 寄存器与流水线	21
2.1.3 Virtex-II RAM 资源	22
2.1.4 Virtex-II 嵌入式乘法器	23
2.1.5 Virtex-II 布线资源	24
2.1.6 Virtex-II I/O 模块	24
2.2 Virtex-4 的结构及功能	26
2.2.1 Virtex-4 的结构	26
2.2.2 Virtex-4 的逻辑资源	28
2.2.3 DSP48 Slice 结构及功能	31
2.2.4 基于 DSP48 Slice 的 FIR 滤波器的设计	38



2.3	Virtex-5 的结构及功能	43
2.3.1	Virtex-5 平台结构	43
2.3.2	Virtex-5 的逻辑资源	44
2.3.3	DSP48E Slice 结构及功能	48
2.3.4	基于 DSP48E 的滤波器的设计	68
2.4	基于 FPGA 的数字表示	73
2.4.1	整数的表示	73
2.4.2	非整数值的表示	75
2.4.3	浮点数定义及表示	78
第 3 章	信号及其处理理论概述	80
3.1	信号定义及分类	80
3.2	信号增益与衰减	81
3.3	信号失真及测量	81
3.3.1	放大器失真	81
3.3.2	信号谐波失真	82
3.3.3	谐波失真测量	83
3.4	噪声及其处理	83
3.4.1	噪声的定义及表示	83
3.4.2	固有噪声电平	84
3.4.3	噪声/失真链	85
3.4.4	信噪比定义及表示	85
3.4.5	信号的提取方法	86
3.5	模拟信号及处理	87
3.5.1	模拟 I/O 信号的处理	87
3.5.2	模拟通信信号处理	87
3.6	数字信号及处理	88
3.6.1	通用的输入输出 DSP 系统	88
3.6.2	信号调理	89
3.6.3	模数转换器 ADC 及量化效应	92
3.6.4	数模转换器 DAC 及信号重建	97
3.6.5	SFDR 的定义及测量	100
3.7	通信信号的软件处理	100
3.7.1	软件无线电 SR 的定义	100
3.7.2	IF 的软件无线电实现	101
3.7.3	信道化过程	102
3.7.4	基站软件无线电接收机	102
3.7.5	SR 采样技术	103

3.7.6	直接数字下变频	104
3.7.7	带通采样失败的解决	104
第 4 章	CORDIC 算法原理及实现	107
4.1	CORDIC 简介	107
4.2	CORDIC 算法原理	107
4.2.1	圆坐标系旋转	107
4.2.2	线性坐标系旋转	112
4.2.3	双曲线坐标系旋转	112
4.2.4	CORDIC 算法一般描述	113
4.3	CORDIC 算法性能分析	114
4.3.1	输出量化误差的确定	114
4.3.2	近似误差的分析	115
4.3.3	舍入误差的分析	115
4.3.4	有效位 d_{eff} 的估算	116
4.3.5	预测与仿真	116
4.4	基于 System Generator 实现 CORDIC 算法	117
4.4.1	实现 CORDIC 的循环结构	117
4.4.2	实现 CORDIC 的非循环结构	119
4.4.3	实现 CORDIC 的非循环的流水线结构	119
4.4.4	3 种实现方式的性能比较	119
第 5 章	FIR 滤波器和 IIR 滤波器的设计	122
5.1	模拟到数字滤波器的转换	122
5.1.1	微分方程的近似	122
5.1.2	双线性交换	123
5.2	数字滤波器的种类	124
5.3	基本数字 FIR 滤波器的设计	125
5.3.1	FIR 滤波器的特性	125
5.3.2	FIR 滤波器的设计规则	132
5.4	数字 IIR 滤波器的设计	135
5.4.1	IIR 滤波器的原理	135
5.4.2	IIR 滤波器的模型	135
5.4.3	IIR 滤波器的 z 域分析	136
5.4.4	IIR 滤波器的性能及稳定性	137



第 6 章 其他常用数字滤波器的设计	140
6.1 滑动平均滤波器的设计	140
6.1.1 滑动平均原理	140
6.1.2 八权值滑动平均	140
6.1.3 九权值滑动平均	142
6.1.4 滑动平均的转置结构	142
6.2 微分器和积分器的设计	143
6.2.1 微分器频谱特性	143
6.2.2 积分器频谱特性	143
6.3 梳状滤波器的设计	145
6.4 积分器梳状滤波器的设计	145
6.5 中频调制信号的产生和解调	148
6.5.1 中频调制信号的产生	148
6.5.2 中频调制信号的解调	149
6.5.3 CIC 抽取提取基带信号	150
6.5.4 CIC 滤波器的衰减及修正	152
6.6 CIC 滤波器的实现方法	153
6.7 CIC 滤波器的位宽确定	155
6.7.1 CIC 抽取滤波器的位宽确定	155
6.7.2 CIC 插入滤波器的位宽确定	157
6.8 CIC 滤波器的锐化	157
6.8.1 SCIC 滤波器的特性	157
6.8.2 ISOP 滤波器的特性	160
6.9 CIC 滤波器的递归和非递归结构	163
第 7 章 重定时信号流图	168
7.1 信号流图基本概念	168
7.1.1 信号流图关键路径	168
7.1.2 信号流图的延迟	169
7.2 割集重定时及规则	169
7.2.1 割集重定时概念	169
7.2.2 割集重定时规则 1	170
7.2.3 割集重定时规则 2	172
7.2.4 两种重定时 FIR 的 SFG	176
7.3 脉动阵列	181
7.3.1 脉动阵列简介	181

7.3.2	FIR 滤波器脉动阵列及重定时	182
7.3.3	IIR 滤波器脉动阵列及重定时	188
7.4	自适应滤波器的 SFG	191
第 8 章	数字通信信号处理原理及实现	193
8.1	信号检测理论	193
8.1.1	概率的柱状图表示	193
8.1.2	概率密度函数	194
8.2	二进制基带数据传输	196
8.2.1	脉冲整形	196
8.2.2	基带传输信号接收错误	198
8.2.3	匹配滤波器的应用	200
8.3	信号调制技术	203
8.3.1	信道与带宽	203
8.3.2	信号调制技术	204
8.3.3	数字信号的传输	221
第 9 章	自适应信号处理理论基础	223
9.1	自适应信号处理技术背景	223
9.2	自适应信号处理系统的结构	224
9.2.1	一般信号处理系统的结构	224
9.2.2	数字 FIR 滤波器的指标	224
9.2.3	自适应数字滤波器	225
9.2.4	自适应数字信号处理结构	226
9.2.5	模拟接口	227
9.2.6	自适应信号处理的不同结构	227
9.3	自适应信号处理的应用	228
9.3.1	信道识别	228
9.3.2	回波对消	229
9.3.3	声学回音消除	230
9.3.4	电线交流噪声抑制	231
9.3.5	背景噪声抑制	231
9.3.6	信道均衡	232
9.3.7	自适应谱线增强	233
9.4	自适应信号处理算法	233
9.4.1	均方误差最小化算法	234
9.4.2	LMS 算法	237

9.4.3	RLS 算法	241
9.4.4	有源噪声控制	246
第 10 章 基于 FPGA 的自适应信号处理实现		247
10.1	LMS 硬件实现结构	247
10.1.1	LMS 硬件实现结构原理	247
10.1.2	串行 LMS 结构	248
10.1.3	重定时 SLMS 结构	249
10.1.4	非规范的 LMS(NCLMS)结构	250
10.1.5	流水线 LMS 结构	251
10.1.6	超前技术	253
10.1.7	PIPLMS 结构	254
10.1.8	PIPLMSK 结构	255
10.1.9	PIPLMSI 结构	255
10.1.10	DLMS 结构	256
10.1.11	ALMS 结构	257
10.1.12	复数 LMS	257
10.1.13	RLS 和 LMS 技术的比较	259
10.2	最小二乘解的计算	260
10.2.1	最小二乘的计算原理	260
10.2.2	最小二乘法计算	261
10.2.3	递推最小二乘算法	262
10.3	指数 RLS 算法实现	263
10.3.1	指数 RLS 算法原理	263
10.3.2	指数递归最小二乘	263
10.4	QR-RLS 算法原理及实现	264
10.4.1	RLS 的 QR 分解	264
10.4.2	RLS QR 的解	265
10.4.3	QR 分解的实现	265
10.4.4	QR 算法的 FPGA 实现	266
10.4.5	QR-RLS 的三数组方法	267
第 11 章 信号同步原理及实现		269
11.1	信号的同步问题	269
11.2	信号定时及定时恢复	270
11.2.1	信号定时原理	270
11.2.2	信号定时恢复	270

11.2.3	载波相位偏移及控制	274
11.2.4	帧同步的实现原理	278
11.2.5	数字下变频	279
11.2.6	数控振荡器的原理及实现	280
11.2.7	BPSK 接收信号的同步	282
第 12 章	基于 AccelDSP 的数字信号处理的实现	285
12.1	AccelDSP 软件设计流程	285
12.1.1	AccelDSP 软件功能概述	285
12.1.2	AccelDSP 综合流程	285
12.2	基于 AccelDSP 的设计实现	289
12.2.1	设计原理	289
12.2.2	创建工程	290
12.2.3	M 代码编写	291
12.2.4	验证浮点模型	294
12.2.5	产生定点模型	295
12.2.6	验证定点模型	296
12.2.7	浮定点对比	297
12.3	RTL 模型	297
12.3.1	RTL 模型的产生	297
12.3.2	验证 RTL 模型	299
12.3.3	综合 RTL 模型	299
12.3.4	实现过程	300
12.3.5	验证门级网表	301
12.4	采用 System Generator 流程	301
实验 1	System Generator 软件工具的使用	303
1.1	实验目的	303
1.2	实验环境	303
1.3	软件使用介绍	303
1.3.1	System Generator 和 MATLAB 软件的连接	303
1.3.2	Xilinx 工具模块的功能	304
1.4	实验原理	305
1.5	实验步骤	306
1.5.1	工程中各个模块参数的设置方法及功能	306
1.5.2	工程中具体参数的设置及运行	313



实验 2 基于 DSP48X 的 FIR 的设计	316
2.1 实验目的	316
2.2 实验环境	316
2.3 实验原理	316
2.4 实验步骤	318
2.4.1 非对称滤波器的设计	318
2.4.2 对称滤波器的设计	319
2.4.3 多路复用滤波器的设计	319
2.5 实验分析	321
实验 3 CORDIC 算法的设计	322
3.1 实验目的	322
3.2 实验环境	322
3.3 实验原理	322
3.4 实验步骤	323
3.4.1 CORDIC 算法收敛性验证	323
3.4.2 CORDIC 子系统的设计	325
3.4.3 圆形坐标系的算术功能的设计	326
3.4.4 添加流水线技术的 CORDIC 体系结构的两种设计方法	327
3.4.5 向量幅值精度的研究	327
3.5 实验分析	328
实验 4 FIR 滤波器设计	330
4.1 实验目的	330
4.2 实验环境	330
4.3 实验原理	330
4.4 实验步骤	332
4.4.1 简单 FIR 滤波器的设计和比较	332
4.4.2 使用 FDATool 模块设计滤波器	334
4.4.3 XUP Virtex- II Pro 板上的音频滤波	338
4.5 实验分析	341
实验 5 CIC 滤波器的设计	342
5.1 实验目的	342
5.2 实验环境	342
5.3 实验原理	342

5.4	实验步骤	343
5.4.1	一级 CIC 滤波器的设计	343
5.4.2	多级 CIC 滤波器的设计	345
5.4.3	CIC 插值和抽取滤波器的设计	346
5.5	实验分析	347
实验 6	数字通信信号处理	348
6.1	实验目的	348
6.2	实验环境	348
6.3	实验原理	348
6.4	实验步骤	349
6.4.1	发射机的设计	349
6.4.2	脉冲形成和匹配滤波器的设计	350
6.4.3	接收机的设计	350
6.5	实验分析	351
实验 7	数字变频器的设计	352
7.1	实验目的	352
7.2	实验环境	352
7.3	实验原理	352
7.4	实验步骤	354
7.4.1	数字上变频的设计	354
7.4.2	数字下变频的设计	355
7.5	实验分析	356
实验 8	数控振荡器的设计	357
8.1	实验目的	357
8.2	实验环境	357
8.3	实验原理	357
8.4	实验步骤	358
8.5	实验分析	360
实验 9	脉冲整形滤波器的设计	361
9.1	实验目的	361
9.2	实验环境	361
9.3	实验原理	361
9.4	实验步骤	362



9.4.1	采用滤波器实现脉冲整形的设计	362
9.4.2	量化和频谱屏蔽的设计	363
9.5	实验分析	364
实验 10	自适应滤波器的设计	365
10.1	实验目的	365
10.2	实验环境	365
10.3	实验原理	365
10.4	实验步骤	366
10.4.1	标准并行自适应 LMS 滤波器的设计	366
10.4.2	非规范式 LMS 滤波器的设计	367
10.4.3	使用可配置的 LMS 音频	367
10.5	实验分析	367
实验 11	系统同步的设计	368
11.1	实验目的	368
11.2	实验环境	368
11.3	实验原理	368
11.4	实验步骤	370
11.4.1	相位锁相环的设计	370
11.4.2	载波同步的设计	371
11.5	实验分析	374
参考文献	376

数字信号处理设计导论

数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)技术广泛地应用于通信与信息系统、信号与信息处理、自动控制、雷达、军事、航空航天、医疗、家用电器等许多领域。DSP技术可以快速地对采集的信号进行量化、变换、滤波、估值、增强、压缩、识别等处理,以得到符合需要的信号形式。

本章主要介绍数字信号处理的实现方法和应用领域,在此基础上对基于现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)的数字信号处理的实现原理和方法,以及基于数字信号处理器(Digital Signal Processors, DSPs)的数字信号处理的实现原理和方法进行详细的介绍,并对这两种实现方法进行比较。本章内容是对数字信号处理实现方法的简要介绍。

1.1 数字信号处理技术概要

1.1.1 数字信号处理技术的发展

20世纪80年代,首次出现了专门用于数字信号处理的数字信号处理器(DSPs),随着半导体工艺的不断发展,DSPs的性能不断提高,价格不断降低。DSPs以其高可靠性、良好的可重复性,以及可编程性已经在消费市场和工业市场中广泛地使用。DSP处理器发展的趋势是结构多样化,集成单片化,开发工具更完善,评价体系更全面更专业。

随着FPGA制造工艺的不断发展,FPGA已经从传统的数字逻辑的设计,发展到用于进行数字信号的处理和嵌入式系统的设计。这就使得数字信号处理技术向着多元化实现的方向发展。

数字信号处理技术主要应用于以下几个方面。

1. 数字音频

在20世纪80年代,DSP系统(例如CD音频)对处理能力的要求并不高。数据主要是从CD读入,通过数模转换(DAC)输出。目前,CD音频系统与音效系统、录制功用等结合在一起,但是对处理能力的要求依然很低。