

可下载教学资料

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



高等学校教材
电子信息

数字信号处理

——原理与算法实现

刘明 徐洪波 宁国勤 编著

清华大学出版社



高等学校教材
电子信息

数字信号处理 ——原理与算法实现

刘明 徐洪波 宁国勤 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地讨论了数字信号处理的基本理论与概念、基本分析方法及算法的软件实现。全书共9章,第1章介绍离散时间信号与系统的基本概念;第2、第3章分别介绍离散时间信号及系统的变换域分析,即Z变换和傅里叶变换;第4、第5章讨论离散傅里叶变换和快速傅里叶变换;第6~第8章讨论数字滤波器的结构、理论及计算机辅助设计方法;第9章阐述数字信号处理实现中的有限字长效应。

本书在阐述数字信号处理基础理论的同时,介绍了各章的知识背景、主要内容和学习要求。各章节内容循序渐进,形式简洁,概念准确,并给出典型例题以强化知识点的学习;各章节还提供相应的Matlab程序,编程用的语句和程序结构由浅入深,并详尽解释新出现的语句和函数,不需要专门学习Matlab语言就能理解。读者利用给出的Matlab程序可以得到数据和图表,形象直观地认识所讨论的算法设计问题。本书各章节衔接紧密,条理清楚,系统性强,各章配有习题,便于所学知识的巩固与自学。

本书适合作为理工科通信、电子、计算机等相关专业的大学本科、专科生和研究生教材,也可作为从事相关领域的科技工作者学习掌握数字信号处理理论的参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理:原理与算法实现/刘明,徐洪波,宁国勤编著. —北京:清华大学出版社,2006.8

(高等学校教材·电子信息)

ISBN 7-302-13204-6

I. 数… II. ①刘… ②徐… ③宁… III. 数字信号—信号处理—高等学校—教材 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第064836号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社总机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:魏江江

文稿编辑:徐跃进

印刷者:北京密云胶印厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:17.5 字数:433千字

版 次:2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-13204-6/TN·333

印 数:1~4000

定 价:23.50元

编审委员会成员

高等学校教材·电子信息

- | | |
|-----|---------------|
| 王志功 | (东南大学 教授) |
| 王新龙 | (南京大学 教授) |
| 王成华 | (南京航空航天大学 教授) |
| 邓元庆 | (解放军理工大学 教授) |
| 刘景夏 | (解放军理工大学 副教授) |
| 方 勇 | (上海大学 教授) |
| 朱 杰 | (上海交通大学 教授) |
| 何 展 | (上海交通大学 教授) |
| 严国萍 | (华中科技大学 教授) |
| 刘复华 | (武汉理工大学 教授) |
| 李中年 | (武汉理工大学 教授) |
| 王成山 | (天津大学 教授) |
| 郭维廉 | (天津大学 教授) |
| 王煦法 | (中国科学技术大学 教授) |
| 郭从良 | (中国科学技术大学 教授) |
| 徐佩霞 | (中国科学技术大学 教授) |
| 赵鹤鸣 | (苏州大学 教授) |
| 刘志军 | (山东大学 教授) |
| 郑永果 | (山东科技大学 教授) |
| 朱守正 | (东北师范大学 教授) |
| 张秉权 | (沈阳工业学院 教授) |
| 张丽英 | (长春大学 教授) |
| 林 君 | (吉林大学 教授) |
| 何怡刚 | (湖南大学 教授) |
| 曾喆昭 | (长沙理工大学 教授) |
| 冯久超 | (华南理工大学 教授) |
| 冯全源 | (西南交通大学 教授) |
| 金炜东 | (西南交通大学 教授) |
| 余成波 | (重庆工学院 教授) |
| 曾凡鑫 | (重庆通信学院 教授) |

曾孝平 (重庆大学 教授)
谢显中 (重庆邮电学院 教授)
张德民 (重庆邮电学院 教授)
彭启琮 (西安电子科技大学 教授)
樊昌信 (西安电子科技大学 教授)
何明一 (西北工业大学 教授)
迟 岩 (集美大学 教授)
刘惟一 (云南大学 教授)
方建安 (东华大学 教授)

改革开放以来,特别是党的十五大以来,我国教育事业取得了举世瞩目的辉煌成就,高等教育实现了历史性的跨越,已由精英教育阶段进入国际公认的大众化教育阶段。在质量不断提高的基础上,高等教育规模取得如此快速的发展,创造了世界教育发展史上的奇迹。当前,教育工作既面临着千载难逢的良好机遇,同时也面临着前所未有的严峻挑战。社会不断增长的高等教育需求同教育供给特别是优质教育供给不足的矛盾,是现阶段教育发展面临的基本矛盾。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2001年8月,教育部下发了《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》,提出了十二条加强本科教学工作提高教学质量的措施和意见。2003年6月和2004年2月,教育部分别下发了《关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》和《教育部实施精品课程建设提高高校教学质量和人才培养质量》文件,指出“高等学校教学质量和教学改革工程”是教育部正在制订的《2003—2007年教育振兴行动计划》的重要组成部分,精品课程建设是“质量工程”的重要内容之一。教育部计划用五年时间(2003—2007年)建设1500门国家级精品课程,利用现代化的教育信息技术手段将精品课程的相关内容上网并免费开放,以实现优质教学资源共享,提高高等学校教学质量和人才培养质量。

为了深入贯彻落实教育部《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合新世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻

性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。首批推出的特色精品教材包括:

(1) 高等学校教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 高等学校教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 高等学校教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 高等学校教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 高等学校教材·信息管理与信息系统。

(6) 高等学校教材·财经管理与计算机应用。

清华大学出版社经过二十年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

E-mail:dingl@tup.tsinghua.edu.cn

前言

高等学校教材·电子信息

数字信号处理是高等院校信息和通信工程类专业的一门非常重要的专业基础课,在当今高科技领域有着极为重要的地位和广泛的用途。然而由于数字信号处理是一门理论和技术发展十分迅速、应用非常广泛的交叉和前沿性学科,有很多的算法、理论本身具有很强的抽象性。而且,由于运算量很大,数字信号处理的算法适合在高速数字集成电路或计算机上实现,对于读者来说则很难直接动手验证以得到形象化的结果。因此,在实际教学过程中,数字信号处理的基础课程一直处于教与学均两难的境地。

本书作者多年从事自动控制、图像处理以及通信工程等与数字信号处理密切相关的教学和科研工作,对教师如何讲授,读者如何学数字信号处理的基本理论、基本概念和基本算法等方面都有切身的体会。针对数字信号处理基础课教学中存在的问题,考虑到读者对数字信号处理理论与算法理解困难,作者在全书内容的取舍、章节的编排、问题的描述、例题的选用、算法的实现以及部分章节的文字编辑等方面都精心考虑并付诸于编写过程中。

本书力求将数字信号处理的基础知识系统地讲解清楚,各章节衔接紧密,每章第一节都设有引言,专门阐述本章的知识背景、主要内容和学习要求。各章节内容循序渐进,安排合理,例题典型,配有习题,方便讲授和自学。每章对重要的算法皆给出必要的案例实现程序,对第1~第3章中新出现的 Matlab 语句和函数都进行详尽解释,编程用的语句和程序结构由浅入深,读者不需要专门学习 Matlab 语言就能理解。所有 Matlab 程序都通过测试,可以直接利用案例程序在 Matlab 软件平台上实现仿真,得到的数据和图表形象直观,使读者容易入手且容易接受算法设计方法,从而增强学习兴趣与信心。

本书的主要内容分成三部分,第一部分包括第1~第5章,是数字信号处理的基础理论内容。第1章讲述离散时间信号与系统的描述方法、线性常系数差分方程以及连续时间信号的数字处理方法;第2~第4章分别讨论3种重要的数学变换工具,即Z变换、序列的傅里叶变换和离散傅里叶变换,以及用它们对离散时间信号与系统进行变换域分析的方法;第5章介绍快速傅里叶变换,它是一种重要的快速实现离散傅里叶变换的算法。第二部分包括第6~第8章,主要介绍数字滤波器的结构、理论及计算机辅助设计方法,包括IIR数字滤波器、FIR数字滤波器,并对比模拟滤波器的设计方法讨论IIR数字滤波器的设计与优化。第三部分(第9章)是数字信号处理的实现内容,讨

论了数字信号处理实现中的量化误差。为了方便读者熟悉 Matlab 程序,本书附录 A 简要地介绍了 Matlab 的使用;附录 B 也给出数字信号处理中常用的 Matlab 函数。

本书的多媒体教学课件将于本书正式出版后制作,届时连同 Matlab 源程序等教学资源一起提供给使用本教材的教学单位或个人。读者可以与出版社或作者本人直接联系。

本书第 6、第 7、第 8 章主要由徐洪波编写,第 4、第 5、第 9 章主要由宁国勤编写,绪论、第 1~第 9 章的部分内容、附录以及全书的统稿工作由刘明完成。李玲远和王敬华老师为本书提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的感谢。

由于作者水平有限和时间仓促,书中难免有疏漏之处,恳请读者批评指正。

作 者

2006 年 8 月于桂子山

绪论	1
0.1 数字信号处理系统的组成	1
0.2 数字信号处理的特点	2
0.3 数字信号处理学科的内容	3
0.4 数字信号处理的实现	4
0.5 数字信号处理系统的应用领域	5
第 1 章 离散时间信号与系统	6
1.1 引言	6
1.2 离散时间信号——序列	7
1.2.1 序列的定义及表示	7
1.2.2 序列的基本运算	7
1.2.3 几种常用序列	11
1.2.4 序列的周期性	14
1.2.5 用单位脉冲序列表示任意序列	14
1.3 离散时间系统	15
1.3.1 离散时间系统的定义及表示	15
1.3.2 线性时不变系统	15
1.3.3 单位脉冲响应与卷积和	17
1.3.4 线性时不变系统的性质	17
1.3.5 因果系统和稳定系统	18
1.4 线性常系数差分方程	21
1.4.1 离散时间系统的数学模型——差分方程	21
1.4.2 线性常系数差分方程求解	22
1.5 连续时间信号的取样	25
1.5.1 理想取样	26
1.5.2 信号恢复	27

1.6 Matlab 实现	29
1.6.1 常用序列的 Matlab 实现	29
1.6.2 序列运算的 Matlab 实现	33
1.6.3 Matlab 求解离散系统的差分方程	34
习题	35
第 2 章 序列的 Z 变换与傅里叶变换	38
2.1 引言	38
2.2 序列的 Z 变换	38
2.2.1 Z 变换及其收敛域的定义	38
2.2.2 几种序列的 Z 变换及其收敛域	39
2.2.3 逆 Z 变换	43
2.2.4 Z 变换的性质和定理	50
2.2.5 利用 Z 变换求解差分方程	55
2.3 序列的傅里叶变换	57
2.3.1 序列傅里叶变换的定义	57
2.3.2 序列傅里叶变换的性质	59
2.3.3 周期序列的傅里叶级数表示	63
2.3.4 周期序列的傅里叶变换表示	65
2.4 序列的 Z 变换与连续时间信号的拉普拉斯变换、傅里叶变换的关系	66
2.5 Matlab 实现	69
2.5.1 序列逆 Z 变换的 Matlab 实现	69
2.5.2 周期序列傅里叶级数的 Matlab 实现	70
习题	71
第 3 章 离散时间系统的变换域分析	75
3.1 引言	75
3.2 系统函数	75
3.2.1 系统函数的定义	75
3.2.2 系统的零极点对系统特性的影响	77
3.2.3 系统的因果性和稳定性	79
3.3 线性时不变系统的频率响应	80
3.3.1 频率响应的定义	81
3.3.2 频率响应的几何确定法	82
3.3.3 全通系统	85
3.3.4 最小相位系统	87
3.4 无限脉冲响应系统和有限脉冲响应系统	88

3.5	Matlab 实现	90
3.5.1	系统函数的 Matlab 计算	90
3.5.2	利用系统函数求解系统输出的 Matlab 实现	91
3.5.3	利用 Matlab 计算系统频率响应	93
	习题	94
第 4 章	离散傅里叶变换	97
4.1	引言	97
4.2	离散傅里叶变换的定义	98
4.2.1	离散傅里叶变换的定义	98
4.2.2	DFT 和 Z 变换、序列的傅里叶变换的关系	100
4.2.3	DFT 的隐含周期性	101
4.3	离散傅里叶变换的基本性质	102
4.3.1	线性性质	102
4.3.2	循环移位性质	102
4.3.3	循环卷积定理	104
4.3.4	复共轭序列的 DFT	105
4.3.5	DFT 的共轭对称性	106
4.4	频域取样	108
4.4.1	频域取样	108
4.4.2	$X(z)$ 的内插公式	110
4.5	离散傅里叶变换的应用	111
4.5.1	用 DFT 计算线性卷积	111
4.5.2	用 DFT 对连续信号进行谱分析	114
4.5.3	用 DFT 对序列进行谱分析	117
4.6	Matlab 实现	120
4.6.1	DFT 物理意义的 Matlab 实现	120
4.6.2	用 DFT 计算线性卷积的 Matlab 实现	122
4.6.3	频域取样定理的 Matlab 实现	123
4.6.4	高密度谱与高分辨率谱差异的 Matlab 实现	124
	习题	126
第 5 章	快速傅里叶变换	129
5.1	引言	129
5.2	直接计算 DFT 的问题及改进的途径	129
5.2.1	DFT 的运算量	129
5.2.2	减少运算工作量的途径	130

5.3	按时间抽取的基-2FFT 算法(库利-图基算法).....	131
5.3.1	算法原理	131
5.3.2	按时间抽取基-2FFT 算法与直接计算 DFT 运算量的比较	135
5.3.3	按时间抽取的 FFT 算法的特点	136
5.3.4	按时间抽取的 FFT 算法的其他形式流程图	138
5.4	按频率抽取的基-2FFT 算法(桑德-图基算法).....	140
5.4.1	算法原理	141
5.4.2	频率抽取法与时间抽取法的异同	143
5.5	快速傅里叶逆变换(IFFT)算法	144
5.6	N 为复合数的 FFT 算法	145
5.7	线性调频 Z 变换算法	147
5.7.1	CZT 算法原理	147
5.7.2	CZT 变换的实现步骤	149
5.7.3	运算量的估算	150
5.8	Matlab 实现	151
5.8.1	用 FFT 进行谱分析的 Matlab 实现	152
5.8.2	用 CZT 进行谱分析的 Matlab 实现	154
	习题	155
第 6 章	数字滤波器的基本结构	157
6.1	引言	157
6.2	数字滤波器的基本概念	157
6.2.1	数字滤波器的描述	157
6.2.2	数字滤波器的分类	158
6.3	无限脉冲响应滤波器的结构	160
6.3.1	直接型	160
6.3.2	正准型	160
6.3.3	级联型	161
6.3.4	并联型	162
6.4	有限脉冲响应滤波器的结构	163
6.4.1	直接型	163
6.4.2	级联型	163
6.4.3	线性相位结构	164
6.4.4	频率取样型结构	168
	习题	171
第 7 章	无限脉冲响应数字滤波器的设计	173
7.1	引言	173

7.2	数字滤波器的技术指标与设计方法	173
7.2.1	数字滤波器的技术要求	173
7.2.2	数字滤波器的设计方法	174
7.3	用模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器	175
7.3.1	模拟滤波器的设计	175
7.3.2	脉冲响应不变法	181
7.3.3	双线性变换法	183
7.3.4	设计 IIR 数字滤波器的频率变换法	185
7.4	IIR 数字滤波器的优化设计	188
7.4.1	频率最小均方误差设计	188
7.4.2	IIR 数字滤波器的时域直接设计	191
7.5	IIR 数字滤波器的 Matlab 仿真实现	193
7.5.1	IIR 数字滤波器设计	193
7.5.2	模拟滤波器到数字滤波器的转换	194
	习题	195
第 8 章	有限脉冲响应数字滤波器的设计	197
8.1	引言	197
8.2	利用窗函数法设计 FIR 滤波器	197
8.3	利用频率取样法设计 FIR 滤波器	205
8.4	FIR 数字滤波器的优化设计	207
8.5	IIR 与 FIR 数字滤波器的比较	212
8.6	FIR 数字滤波器的 Matlab 仿真实现	213
8.6.1	窗函数法设计 FIR 滤波器	213
8.6.2	FIR 滤波器的优化设计	214
	习题	215
第 9 章	数字信号处理中的有限字长效应	217
9.1	引言	217
9.2	数的表示及其运算对量化的影响	217
9.2.1	定点运算和浮点运算	217
9.2.2	负数的原码、补码、反码表示	219
9.2.3	截尾效应和舍入效应	221
9.3	输入信号的量化误差	226
9.3.1	A/D 转换器的量化效应	226
9.3.2	量化误差的统计分析	227
9.3.3	量化误差(白噪声)通过线性系统	230

9.4	数字滤波器的系数量化误差	231
9.4.1	系数量化误差对滤波器稳定性的影响	231
9.4.2	系数量化误差对系统零点和极点位置的影响	233
9.4.3	滤波器频率特性误差的估计	235
9.5	数字滤波器运算中的有限字长效应	236
9.5.1	IIR 滤波器定点运算舍入误差的统计分析	236
9.5.2	IIR 滤波器定点运算的动态范围	240
9.5.3	IIR 滤波器定点运算的零输入极限环振荡和溢出振荡	241
	习题	247
	附录 A Matlab 的使用	250
	附录 B 数字信号处理中常用的 Matlab 函数	257
	参考文献	261

绪论

数字信号处理(digital signal processing, DSP)是从 20 世纪 60 年代以来,随着信息科学和计算机科学的发展而迅速发展起来的一门新技术和新兴学科。它以众多学科为基础,不仅具有完整的学科领域和理论体系,其研究成果以各种形式影响和渗透到其他学科,同时随着科学技术的发展,其重要性日益在各个领域的应用中表现出来。

数字信号处理是把信号变换成数字或符号表示的序列,通过计算机或专用信号处理设备,用数值计算方法对信号进行滤波、变换、压缩、增强、估计及识别等处理,从而得到更符合人们要求的信号形式,以获取有用信息便于在实践中应用。

0.1 数字信号处理系统的组成

信号是信息的物理表现形式,而信息则是信号的具体内容。信号作为信息的载体,几乎涉及所有的工程技术领域。信号包括声、光、电、磁、热、力、速度及质量等方面,而且这些信号常常混合在一起,因此,需要针对信号进行检测、估计或识别等处理,以获取“感兴趣”的信息。

通过各种各样的传感器,用直接或间接的方法可以获得客观世界各种物理量的电信号,然后再进行各种必要的处理,进而获取需要的信息。采用电信号表达物理量,是因为对电信号表达的信号进行转换、传送以及后续处理都比其他方式方便得多。但绝大多数传感器获取的是模拟信号,这些信号在时间域和数值域都是连续的,不能直接进行数字处理,而进行数字处理的计算机只能接收数字信号,这就要求在对某一信号进行数字处理之前,先要将模拟信号转换为数字信号。有了数字信号,就可以运用数值运算的方便和灵活性,对信号以人们所期望的某种方式进行处理。

为了了解数字信号处理的基本组成,下面讨论模拟信号的数字化处理过程,数字信号处理系统可用图 0.1 所示的原理方框图表示。

由图 0.1 可见,系统首先把模拟信号变换成数字信号,然后用数字技术进行处理,最后

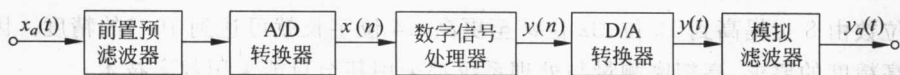


图 0.1 模拟信号数字化处理的原理方框图

再还原成模拟信号。模拟信号 $x_a(t)$ 通过前置预滤波器滤除高频成分(大于取样频率的一

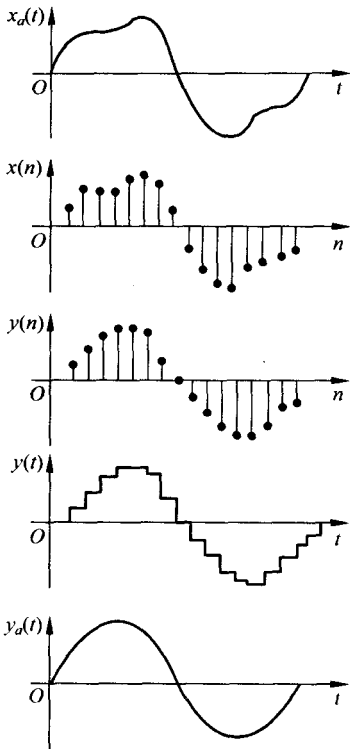


图 0.2 模拟信号数字化处理波形图

半)。随后在模数(A/D)转换器的取样器中每隔时间 T 秒(取样周期)取出一次当前输入信号的幅度,取样后得到的离散时间信号只表示离散时间点 $(0, T, 2T, \dots, nT)$ 上的信号。在模数转换器的量化器中按照量化电平,将取样信号转换成二进制数。可见,模拟信号经模数转换后在时间域和数值域都是离散的,这种信号就是数字信号 $x(n)$ 。数字序列通过数字信号处理器进行处理,得到输出数字信号 $y(n)$ 。 $y(n)$ 通过数模(D/A)转换器变换成模拟信号 $y(t)$,最后还要通过一个模拟滤波器,滤除不必要的高频成分,平滑成所需的模拟输出信号 $y_a(t)$ 。这些信号在处理过程中的波形如图 0.2 所示。

实际的系统并不一定要包括图 0.1 中所示的所有过程。如果系统只需要数字输出,则可直接以数字形式显示或打印,就不需要数模转换器和输出滤波器。另外,一些系统的输入就是数字量,因而也不需要数模转换器。如果系统的输入与输出都是数字量,这种纯数字系统只需要数字信号处理器这一核心部分即可。

0.2 数字信号处理的特点

由于数字信号处理的对象是数字信号,信号处理的方式是数值运算,因而数字信号处理与模拟信号处理相比较,具有很多优点。

1. 灵活性强

一个系统的性能主要取决于系统的某些参数,这些参数预先存放在存储器中。数字系统很容易改变这些存储的参数,这样就可以很方便地改变系统的性能,甚至得到完全不同的系统。数字系统的改变可以通过在线完成,从而实现一个系统多种用途。相比之下,改变模拟系统的参数要困难得多。

2. 精度高

模拟系统的精度由元器件决定,模拟元器件的精度很难达到 10^{-3} 以上。目前数字系统的运算位数由 8 位提高到 16 位、32 位甚至更高,14 位字长就可达到 10^{-4} 的精度。因此,为了满足高精度的要求,高精密测量与处理系统都采用甚至只能采用数字技术。