

可下载教学资料

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



高等学校教材  
电子信息

# 数字信号处理基础

张小虹 王丽娟 任姝婕 编著



清华大学出版社

高等学校教材

电子信息

# 数字信号处理基础

张小虹 王丽娟 任姝婕 编著

清华大学出版社

北京

## 内 容 提 要

本书是通信、电子信息专业《数字信号处理》课程的基本教材。全书以数字信号处理基础知识、基本理论为主线,同时引入具有强大计算功能的 MATLAB 软件,通过经典理论与现代技术的结合,将数字信号处理的知识点叙述得更加通俗易懂。

从当前学生已初步具备计算机应用基础的实际出发,本书紧密联系实际,精选了习题。通过习题和模拟实验,学生可以更有效理解、领会教学内容。

本书概念清楚,系统性强,特色鲜明。可作为电子、自动化控制、计算机科学等相关专业的教材。同时,书中给出的一些例题程序,稍作修改就可以在工程设计中加以应用,对于相关专业的工程技术人员也是一本很好的参考书。

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 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理基础/张小虹,王丽娟,任姝婕编著. —北京:清华大学出版社,2007.9

(高等学校教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-15496-9

I. 数… II. ①张… ②王… ③任… 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(2007)第 089970 号

责任编辑:梁 颖

责任校对:李建庄

责任印制:孟凡玉

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

[c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印装者: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:19.25 字 数:467 千字

版 次:2007 年 9 月第 1 版 印 次:2007 年 9 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:26.00 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:022975-01

## 编审委员会成员

### 高等学校教材·电子信息

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

重庆大学  
重庆邮电学院

西安电子科技大学

西北工业大学

集美大学

云南大学

东华大学

曾孝平 教授

谢显中 教授

张德民 教授

彭启琮 教授

樊昌信 教授

何明一 教授

迟岩 教授

刘惟一 教授

方建安 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”是教育部正在制定的《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多年的努力,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**

近年来,随着信息时代的发展,数字信号处理理论与技术日益成熟完善,数字信号处理已成为一门重要的学科与技术领域,数字信号处理的应用领域日益扩大,渗透到了许多重要学科和技术领域。在 21 世纪的教学改革中,加强素质教育,淡化专业界限,拓宽基础,促进不同专业领域知识的交叉渗透,已成为教育界的共识。数字信号处理基础知识除了是通信、电子信息、计算机科学等专业学生必须掌握的专业基础知识和必修内容外,医疗、机械等专业的学生也有了解相关知识的需求。所以,面向工科类学生开设“数字信号处理”课程便是这种改革的大趋势之一。

本书以数字信号处理基础知识、基本理论为主线,同时将具有强大计算功能的 MATLAB 软件引入本书。通过经典理论与现代技术的结合,将数字信号处理的知识点叙述得更加通俗易懂。考虑到传统教学的习惯,为了更加突出基础知识、基本概念,本书通过例题求解的方式,引入 MATLAB 这种现代计算工具,帮助读者结合实际应用,提高掌握 MATLAB 工具的兴趣和积极性。以计算机为平台,以优秀软件为工具,计算验证复杂结论,节省手工运算的时间,把主要精力用在对课程内容和基本概念的理解与巩固上,体现了时代特色,符合素质教育的要求,这也是编者的初衷。

本书从现在学生们对计算机应用基础已初步具备的实际出发,紧密联系实际,每章都精选了丰富的习题。习题和大量的模拟实验对帮助学生理解、领会教学内容,增强分析问题和解决问题的能力有明显的效果,也有利于学生对概念的深入理解和对学习状况的自我检查。

本书概念清楚,系统性强,特色鲜明,尤其是现代教学思想与工具的引入,使本书的使用范围更宽,可作为工科类各不同专业、不同层次的教材。具体实施可根据专业要求对内容进行取舍,并安排一定上机时间,建议该课教学时数 40~60 小时。本书对相关专业的工程技术人员来说也是一本有益的自学用书和实用的参考资料。

本书的第 1、2 章由王丽娟编写;任姝婕编写了第 8 章及第 1、2 章中的有关 MATLAB 部分;张小虹编写了第 3~7 章,并对全书进行了统稿。本书编写过程中还得到了山东省科学院计算中心张蔚伟,解放军理工大学理学院邓元庆、陆士元、王友军、



孙镇、许胜华、李宁、贾永兴、余远德及总参第六十三研究所张为民等同行们的大力支持和帮助,编者在此对大家的关心表示深深的谢意。

由于编者水平有限,书中不足与错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2007年6月

<b>第 1 章 时域离散信号与系统</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 时域离散信号——序列 .....	4
1.2.1 序列的描述 .....	4
1.2.2 常用典型序列 .....	5
1.2.3 序列的运算 .....	9
1.3 离散时间系统 .....	12
1.3.1 线性离散系统及其响应 .....	12
1.3.2 非时(移)变离散系统及其响应 .....	13
1.3.3 线性非时变离散系统及其响应 .....	13
1.3.4 系统稳定性 .....	14
1.3.5 系统因果性 .....	15
1.3.6 因果稳定系统 .....	15
1.4 卷积 .....	15
1.4.1 图解法 .....	16
1.4.2 表格阵法 .....	17
1.4.3 相乘对位相加法 .....	17
1.4.4 卷积的性质 .....	18
1.5 常系数线性差分方程 .....	20
1.5.1 线性非移变离散系统的数学模型 .....	20
1.5.2 递推法 .....	20
1.5.3 经典法 .....	21
1.6 数字化处理方法 .....	22
1.6.1 时域采样 .....	23
1.6.2 原信号的恢复(插值) .....	26
1.6.3 数字化处理方法 .....	27
习题 .....	29

<b>第 2 章 <math>z</math> 变换与离散系统的频域分析</b> .....	32
2.1 $z$ 变换 .....	32
2.2 $z$ 变换收敛域及典型序列 $z$ 变换 .....	33
2.2.1 $z$ 变换的收敛域 .....	33
2.2.2 典型序列的 $z$ 变换 .....	36
2.3 逆 $z$ 变换 .....	38
2.3.1 幂级数法 .....	39
2.3.2 部分分式法 .....	40
2.4 $z$ 变换的性质与定理 .....	42
2.5 $z$ 变换与拉普拉斯变换、傅里叶变换的关系 .....	48
2.6 序列的傅里叶变换及其性质 .....	50
2.6.1 序列的傅里叶变换 .....	50
2.6.2 序列傅里叶变换的性质 .....	53
2.6.3 序列傅里叶变换的对称性 .....	55
2.7 离散系统的频域分析 .....	58
2.7.1 系统函数 .....	58
2.7.2 系统函数与差分方程 .....	59
2.7.3 系统的因果稳定性 .....	60
2.7.4 $H(z)$ 的零、极点与系统频响 .....	61
习题 .....	64
<b>第 3 章 离散傅里叶变换</b> .....	68
3.1 周期序列的傅里叶级数 .....	68
3.1.1 离散傅里叶级数 .....	68
3.1.2 离散傅里叶级数的性质 .....	73
3.2 离散傅里叶变换 .....	76
3.2.1 离散傅里叶变换定义 .....	77
3.2.2 DFT 与 $z$ 变换、DTFT 的关系 .....	78
3.3 DFT 的性质 .....	79
3.4 频域采样与恢复 .....	87
3.4.1 频域采样 .....	87
3.4.2 频域恢复(频域插值) .....	88
3.5 用 DFT 计算线性卷积 .....	90
3.5.1 用循环卷积计算线性卷积的条件 .....	90
3.5.2 用循环卷积计算线性卷积的方法 .....	91
3.6 用 DFT 作频谱分析 .....	91
3.6.1 对连续信号进行频谱分析 .....	91
3.6.2 频谱分析中的几个问题 .....	92

3.6.3 DFT 参数选择 .....	95
习题 .....	97
<b>第 4 章 离散傅里叶变换的快速算法 .....</b>	<b>101</b>
4.1 DFT 运算特点 .....	101
4.2 时间抽取基 2 FFT 算法 .....	102
4.2.1 基 2 时选 FFT 运算 .....	103
4.2.2 基 2 时选 FFT 的运算规律 .....	107
4.3 基 2 频率抽取 FFT 算法 .....	111
4.3.1 基 2 频选 FFT 运算 .....	111
4.3.2 基 2 频选 FFT 的运算规律 .....	114
4.4 IFFT 及减少运算量的方法 .....	115
4.4.1 IDFT 的快速计算方法 .....	115
4.4.2 减少运算量的方法 .....	117
4.5 $N$ 为组合数的 FFT 算法 .....	119
4.5.1 $N$ 为任意组合数的 FFT 算法 .....	119
4.5.2 $N=p^M$ 的 FFT 算法 .....	121
4.6 离散余弦变换 .....	124
4.6.1 离散余弦变换的定义 .....	124
4.6.2 用 DFT 处理 DCT .....	125
4.6.3 快速余弦变换 .....	127
习题 .....	132
<b>第 5 章 数字滤波器的结构 .....</b>	<b>133</b>
5.1 离散系统的流图表示与系统分类 .....	134
5.1.1 用信号流图表示系统结构 .....	134
5.1.2 系统分类 .....	135
5.2 IIR 系统的基本结构 .....	136
5.2.1 IIR 系统的直接形式 .....	136
5.2.2 IIR 系统的级联形式 .....	138
5.2.3 IIR 系统的并联形式 .....	140
5.2.4 全通系统 .....	142
5.2.5 最小相位系统 .....	143
5.3 FIR 系统的基本结构 .....	145
5.3.1 FIR 系统的直接形式 .....	145
5.3.2 FIR 系统的级联形式 .....	145
5.3.3 线性相位 FIR 系统的结构形式 .....	146
5.3.4 FIR 系统的频率取样结构 .....	150
习题 .....	153

<b>第 6 章 IIR 数字滤波器的设计</b> .....	156
6.1 数字滤波器的基本概念 .....	156
6.1.1 选频数字滤波器 .....	156
6.1.2 数字滤波器的技术要求 .....	157
6.1.3 IIR 数字滤波器的设计方法 .....	157
6.2 模拟滤波器设计方法简介 .....	158
6.2.1 模拟滤波器的模平方函数 .....	158
6.2.2 模拟滤波器的技术要求 .....	159
6.2.3 模拟滤波器的逼近方法 .....	160
6.2.4 巴特沃思滤波器 .....	161
6.2.5 切比雪夫滤波器 .....	165
6.3 脉冲响应不变法 .....	171
6.4 双线性变换法 .....	181
6.5 原型变换法 .....	191
6.5.1 $z$ 平面变换法——数字域的频率变换 .....	191
6.5.2 $s$ 平面变换法——模拟域的频率变换 .....	197
6.5.3 模拟原型直接变换法的一般设计方法 .....	198
习题 .....	204
<b>第 7 章 FIR 数字滤波器的设计</b> .....	207
7.1 线性相位 FIR 数字滤波器的条件和特点 .....	208
7.1.1 FIR 系统的线性相位条件与线性相位特性 .....	208
7.1.2 幅度特性 .....	210
7.1.3 零点特性 .....	213
7.2 FIR 数字滤波器的窗函数设计 .....	214
7.2.1 FIR 数字滤波器的窗函数设计基本方法 .....	214
7.2.2 矩形窗 .....	216
7.2.3 其他窗 .....	219
7.3 频率取样法 .....	224
7.3.1 基本原理 .....	224
7.3.2 设计方法 .....	225
7.3.3 过渡带采样的计算机辅助设计 .....	230
7.4 简单整系数线性相位 FIR DF .....	235
7.4.1 设计原理 .....	235
7.4.2 简单整系数 FIR DF 的设计 .....	241
习题 .....	246

<b>第 8 章 MATLAB 上机实验</b> .....	249
8.1 离散系统特性实验 .....	249
8.2 离散系统频率特性实验 .....	256
8.3 IIR 滤波器设计与分析实验 .....	261
8.4 FIR 滤波器设计与分析实验 .....	271
<b>附录 习题答案</b> .....	278
<b>参考文献</b> .....	292

# 时域离散信号与系统

## 1.1 概 述

现代社会的人们每天都会与各种各样的载有信息的信号密切接触,例如电话铃声、交通红绿灯、收音机、电视机、手机收到的电磁波等,分别称为声信号、光信号、电信号。信号是各类消息的运载工具,是某种变化的物理量,本书中信号是指转载信息的函数。

各种信号可以从不同角度进行分类,按照时域连续与离散可以分为以下4种类型。

(1) 模拟信号: 在规定的连续时间内,信号的幅值可以取连续范围内的任意值,是时间连续、幅值连续的信号,如正弦、指数信号等。

(2) 时域连续信号: 在连续时间范围内定义的信号,信号的幅值可以是连续的任意值,也可以是离散(量化)的。模拟信号是连续信号的特例,本书中这2种信号通用。

(3) 时域离散信号: 在离散的时间上定义的信号,其独立(自)变量仅取离散值。其幅值可以是连续的,也可以是离散(量化)的,如理想信号就是幅值连续的信号。

(4) 数字信号: 独立(自)变量取离散的值,其幅度被量化并编码的信号。

各类信号只有经过一定的处理才能具有使用意义。信号处理就是对信号进行分析、变换、综合、识别等加工,以达到提取有用信息和便于利用的目的。如果处理的设备使用模拟部件,则处理方式为模拟信号处理(analog signal processing, ASP)。若系统中的部件使用数字电路,信号也是数字信号,这样的处理方法就是数字信号处理(digital signal processing, DSP)。如图1-1所示为电话系统采用不同形式处理示意图。

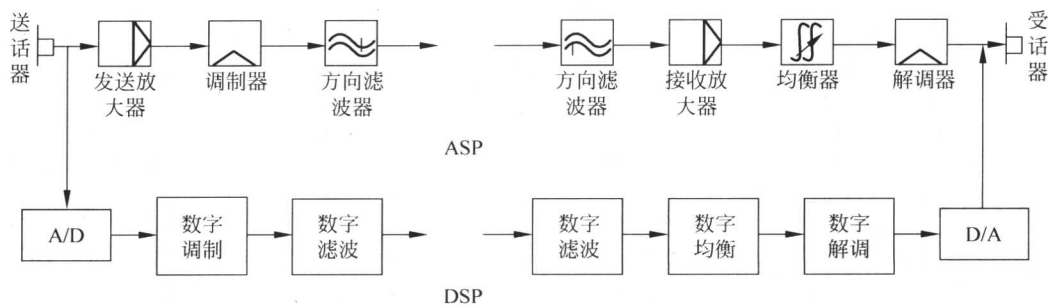


图 1-1 ASP 与 DSP 示意图

数字信号处理系统的常用功能有滤波、谱估计、数据压缩。经典的滤波是频率选择滤波。例如滤波器的输入信号为  $x(t) = s(t) + n(t)$ , 其中  $s(t)$  为有用信号,  $n(t)$  是不需要的信号(通常称为噪声), 其对应的频谱为

$$X(j\omega) = S(j\omega) + N(j\omega)$$

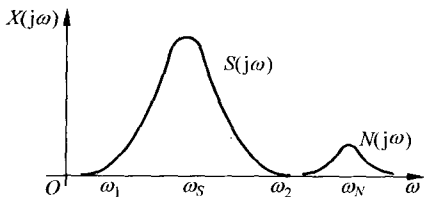


图 1-2 信号与噪声的频谱

假设信号与噪声的频谱不重叠, 如图 1-2 所示, 即  $\omega_1 \leq \omega_S \leq \omega_2$  及  $\omega_N > \omega_2$ , 则信号  $x(t)$  经过频响函数为

$$H(j\omega) = \begin{cases} 1 & \omega_1 \leq \omega \leq \omega_2 \\ 0 & \omega_1 < \omega, \omega > \omega_2 \end{cases}$$

的系统, 其输出信号的频谱及信号为  $Y(j\omega) = X(j\omega)H(j\omega) = S(j\omega) \leftrightarrow s(t)$ , 于是经系统滤波后顺利地提取出了有用信号  $s(t)$ 。

谱估计是对各种信号, 特别是对随机信号进行频谱分析。目前常用的有傅里叶分析法、相关分析法等。如果噪声是与有用信号的频谱互相交叠在一起(如随机信号上叠加的噪声), 则很难用经典的频率选择滤波器把有用信号提取出来。为此, 必须在随机过程理论基础上, 从统计观点出发, 对有用信号和噪声作统计特性的分析, 用更复杂的方法提取特定信息。这种过滤随机信号的过程实质是一种估计, 可以认为估计器也是一种滤波器。所以现在有广义(现代)滤波的概念, 即只要是通过某个系统(网络)提取出所需要的信息都可称为滤波。本书中滤波器、系统、网络这 3 个名词通用。

数据压缩是在一定条件下把原始信号所含信息进行压缩。如一幅黑白图像有 30 万个像素, 每个像素灰度等级若以 8 比特计算, 则一幅图像就会有 240 万比特数据信息。这样大的数据量显然要求处理系统具有很高的运算速度和很庞大的存储单元。为了解决这一问题, 在处理技术上要求在保证正确接收的前提下, 对原数据进行压缩。

数字信号处理系统与模拟信号处理系统在功能上有许多相似的地方, 但在处理技术和方法上却有很大区别。数字信号处理主要是利用数字技术对信号进行处理, 一般有硬件处理和软件处理 2 种方法。硬件是通用或专门计算器件、芯片; 软件是利用通用计算机编写的处理程序对信号进行处理。

例如常见的一阶 RC 低通滤波器, 其模拟电路如图 1-3 所示。由基尔霍夫电压定律(Kirchhoff's voltage law, KVL)列出电路方程为

$$Ri_c(t) + v_c(t) = x(t) \quad (1.1-1)$$

其中:  $v_c(t) = y(t)$ 。

将  $i_c(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt} = C \frac{dy(t)}{dt}$  代入(1.1-1)式, 得到

$$RC \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$$

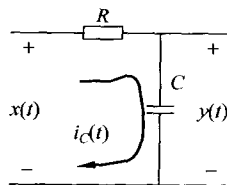


图 1-3 一阶 RC 低通滤波器

这个一阶 RC 低通滤波器的数学模型是一阶微分方程。对这样的一阶低通滤波器要用数字技术处理, 可由取样电路对时间量化, 即作如下改变:  $t \rightarrow n\Delta t$ 。其中  $\Delta t$  为取样间隔(与时钟有关); 输入信号  $x(t) \rightarrow x(n\Delta t) = x(n)$ ; 输出信号  $y(t) \rightarrow y(n\Delta t) = y(n)$ 。此时一阶线性微分方程改变为



$$RC \frac{\Delta y(n)}{\Delta t} + y(n) = x(n) \quad (1.1-2)$$

将  $\Delta y(n) = y(n) - y(n-1)$  代入(1.1-2)式,得到

$$RC \frac{y(n) - y(n-1)}{\Delta t} + y(n) = x(n)$$

整理后得

$$\begin{aligned} y(n) &= \frac{1}{1 + RC/\Delta t} x(n) + \frac{RC/\Delta t}{1 + RC/\Delta t} y(n-1) \\ &= Ax(n) + By(n-1) \end{aligned} \quad (1.1-3)$$

其中:  $A = \frac{1}{1 + RC/\Delta t}$ ,  $B = \frac{RC/\Delta t}{1 + RC/\Delta t}$ 。

当  $R, C, \Delta t$  给定时,  $A, B$  为常数, (1.1-3) 式是一阶线性差分方程。这个差分方程可用硬件实现, 如图 1-4 所示。其中各部件可用不同集成电路芯片完成, 例如常用的加法器 74LS283 是 4 位超前进位加法器, 用两片 74LS283 可以组成一个 8 位加法器。而减法器可以用加法器和一个倒相器完成。乘法运算一般通过移位相加来实现; 当字长较短时 (如 8 位), 用查表法实现乘法功能是一种简便快速的方法, 其原理是将所有可能出现的结果事先计算好, 然后存储到数据存储器 (如 EPROM 等) 中。延时器可用 D 触发器实现, 它具有数据存储功能, 并且由时钟控制, 当  $y(n)$  加到 D 触发器输入端, 一个 CLK 时钟过后,  $y(n)$  便移到输出端, 从而实现延时一个时钟周期; 同理, 若实现  $z^{-n}$ , 则将  $n$  个 D 触发器级联即可。

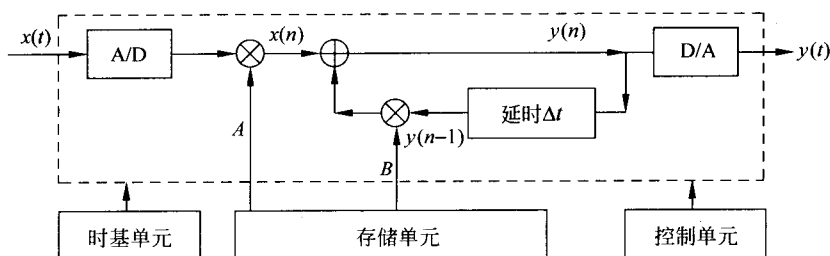


图 1-4 硬件实现一阶低通滤波器

上述电路实现加、减、乘和延时等运算, 其特点是硬件简单、速度快, 在小规模的简单数字信号处理中, 可以用它们构成系统的运算单元。但对较复杂的信号处理, 若用这种实现方法会使系统的体积增大, 调试复杂, 可靠性下降。因此在现代的数字信号处理技术中, 一般采用 DSP 芯片来实现复杂的信号处理。这样的数字信号处理系统的功能可以比拟一台小型计算机, 如美国德州仪器公司推出的 TMS320 系列芯片。

(1.1-3) 式表示的一阶差分方程也可以用软件实现。假设  $y(-1) = 0$ , 由给定  $x(n)$ , 计算 1024 时间点的  $y(n)$ 。用一个简单的程序可以完成一阶低通滤波器的计算, 其程序流程如图 1-5 所示。

数字信号处理与模拟信号处理相比有以下优点及要注意的问题。

(1) 灵活: 数字信号处理系统的性能主要由乘法器的各参数决定。如上例,  $B$  取正值为一阶低通滤波器,  $B$  取负值为高通滤波器。只要改变系统的参数  $A$  和  $B$ , 就改变系统的性能指标, 比模拟信号处理系统改变参数  $R, L$  和  $C$  方便得多, 因此对一些自适应系统尤为合适。

(2) 精度高: 更确切地说是精度可控制。因为精度取决于参数  $A$  和  $B$  的字长 (位数)。