

数字信号处理

杨毅明

Digital Signal Processing



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

数字信号处理

杨毅明 编著



机械工业出版社

本书采用新颖的形式系统地介绍了数字信号处理的概念、用途、理论和实现方法,编写力求理论紧扣实际、论述有据、逻辑连贯,应用内容涉及广泛、形象生动。

全书共分10章:第1章介绍数字信号处理的基本概念。第2、3章介绍数字信号处理的时域和频域基础理论。第4、5章介绍实际信号处理的理论,如信号转换、 z 变换、离散傅里叶变换等,以及提高计算效率的方法。第6~8章介绍数字滤波的原理和数字滤波器的设计。第9、10章介绍实际的数字系统和数字信号处理的实现。

本书各章后的习题和附录中的实验内容大多与实际应用紧密相关,书后列出术语索引供读者查找。作者还为书中习题和实验编写了详细的参考解答,方便用书教师授课和学生自学;书中的计算机仿真图均配有 MATLAB 源程序,提供扩展和创新的平台,这些内容的电子文件将置于出版社教育服务网(www.cmpedu.com)内本书主题页面上,供读者和用书教师下载。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/杨毅明编著. —北京:机械工业出版社,2011.11
ISBN 978-7-111-34262-5

I. ①数… II. ①杨… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 241277 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:闫晓宇 责任编辑:闫晓宇 版式设计:霍永明

责任校对:陈延翔 封面设计:赵颖喆 责任印制:乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2012 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 23.25 印张 · 577 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-34262-5

定价:48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务 网络服务

社服务中心:(010) 88361066

销售一部:(010) 68326294

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

门户网:<http://www.cmpbook.com>

教材网:<http://www.cmpedu.com>

封面无防伪标均为盗版

前 言

今天，超大规模集成电路技术的飞速发展，使得数字技术越来越广泛地应用于各种产品，使得数字信号处理在现代科技中的地位越来越重要。在这个背景下，笔者历时7年，以71份国内外参考资料为素材，顺应社会对应用型人才的需要，并考虑今天大学生的学习兴趣和知识接受特点，综合自己多年讲授“数字信号处理”课程的经验，编写了本书。

本书力求将深奥理论变为科普知识，按照我国读者的认知方式和文化习惯来编写，并力求通俗、易懂和实用。在介绍高科技的同时，更期望可以培养读者选择优秀方法的能力，启迪智慧和心灵，让读者通过学习高科技理论的过程，看到世界顶尖的科学家解决问题所采用的方法，学会解决问题的科学策略，学会学习的方法和开发创新的能力。

为了防止数字信号处理的概念被众多数学公式的推导所淹没，本书将讲清概念放在第一位，深入浅出，数学工具的使用和数学推导过程的介绍力求均衡，既不过于简化内容，又不拘泥于数学细节，让读者快速了解数字信号处理的要领。

为了把数字信号处理中难学的抽象理论转化成有益的学习工具，为了减少繁琐的数学计算工作，为了提高数字信号处理的趣味，为了使数字信号处理更加形象生动，为了提高读者的实践和创新能力，本书大量采用 MATLAB 软件作为辅助工具。当然，即便读者之前没有学习过 MATLAB 软件的使用，也同样可以在阅读本书时一边轻松地学习数字信号处理，一边轻松地应用 MATLAB，而不必把它当做一门新课来学。

本书内容除第1章进行全面介绍之外，其余章节的知识结构，按照认知规律，可以分为“了解”、“参与”和“应用”3个阶段。了解阶段由第2~6章组成，它从我们熟悉的时间角度到具有本质意义的频率角度，介绍描述数字信号处理的基本方法和基本理论，从理论到应用的观点出发介绍适合计算机处理信号的理论，从提高计算机计算速度和节约计算机资源的角度介绍计算方法，从频率的角度介绍处理信号的本质。这种安排为的是循序渐进，让读者从熟悉的道理过渡到生疏的理论，学习和适应抽象的理论。参与阶段由第7、8章组成，它从常见的滤波器入手介绍数字信号处理的设计，教给读者应用数字信号处理的技巧。应用阶段由第9、10章组成，它从实际情况出发，介绍实现数字信号处理的基本方法，给数字信号处理的知识做一个总结。

耳听为虚，眼见为实，动手才真。本书还提供了5个数字信号处理的小试验，它们是为本书量身定做的应用实例。通过实验，你可以真切感受数字信号处理的应用魅力。书中计算机制作的插图的程序像一片可以耕耘的天地，你可以通过模仿和变通，培养和开拓自己的创新能力。

对授课教师的建议

本书课时安排建议如下：第1章，介绍数字信号处理的概念与应用，从15个领域介绍

各种应用的基本方法,建议讲2课时,部分内容让学生自学。第2章,介绍从时域观察信号的方法、信号之间的关系,并引出从时域观察系统的方法和在时域处理信号的方法,建议讲8课时。第3章,介绍从频域观察信号的方法,以正弦波为信号的基本成分,给出4类信号的正弦分析,并引出从频域观察系统的方法,建议讲8课时。第4章,介绍怎样合理地转换模拟信号和数字信号,怎样简化系统的频谱分析,怎样用计算机进行频谱分析,建议讲10课时。第5章,介绍提高信号处理的效率,着重介绍时域抽取和频域抽取两种方法,并给出它们的应用,建议讲6课时。第6章,介绍数字滤波的概念、技术指标和研究方法,并从信号流动的角度对数字滤波器分类,建议讲2课时,部分内容让学生自学。第7章,介绍无限脉冲响应滤波器的设计,从间接设计法、直接设计法、低通模型的变换等3个方面进行介绍,建议用8课时,重点讲模拟滤波器的设计和数字滤波器的间接设计,具体设计让学生自己实践。第8章,介绍有限脉冲响应滤波器的设计,以频谱表示法和线性相位为基础,介绍时域设计法、频域设计法和最优化设计法,建议用8课时,重点讲原理,具体的设计操作让学生自己实践。第9章,介绍实际数字系统的多采样率概念和意义,重点在整数倍降低采样率和整数倍提高采样率两个方面,建议讲4课时。第10章,介绍实现数字信号处理的基本方法,主要是如何提高数字信号处理器的计算速度、怎样合理地用数字表示信号、怎样对付计算时出现的误差,并给出3个应用实例。建议讲4课时。

如果学时不够的话,第9章和第10章可让学生自学。书后附录中的5个实验是针对教材所阐述的理论安排的,它们只是数字信号处理应用的引子,希望学生能以此为基础,设计出更有趣的数字信号处理应用实例。

在编写过程中,笔者遵循通俗、易懂和实用的原则,以及“数字信号处理”课程注重信号本质和讲求信号处理实效的科学精神。本书的编写,有幸得到北京工商大学计算机与信息工程学院陈天华教授,华侨大学信息科学与工程学院冯桂教授、戴声奎副教授、陈东华博士等的指正,以及广西大学物理科学与工程技术学院阳兆祥教授的指导。在此,感谢他们为规范和完善本教材所作的贡献。另外,感谢MATLAB这个强大的软件工具,为本书提供了扩展和创新的平台。最后,感谢家人对我全力的支持与帮助。

书中漏误之处,望广大读者不吝赐教。

杨毅明

目 录

前言

第 1 章 数字信号处理的概念	1
1.1 什么叫数字信号处理	1
1.1.1 数字信号的概念	1
1.1.2 数字信号处理的来历	5
1.1.3 数字信号处理系统的结构	6
1.1.4 数字信号处理的特点	6
1.2 数字信号处理有什么用	8
1.2.1 信号为什么要处理	8
1.2.2 数字信号处理的应用领域	9
1.2.3 数字信号处理的应用前景	25
1.3 怎样用数字信号处理	25
1.3.1 用数字代表事物的特征	26
1.3.2 用数字信号描述事物的变化	26
1.3.3 用数学公式表示信号的关系	27
1.3.4 找出最佳的处理方法	28
1.3.5 用计算机处理数字信号	29
1.3.6 应用数字信号处理的关键	29
1.4 练习题	30
第 2 章 时域的信号与系统	31
2.1 时域的信号	31
2.1.1 语言描述	32
2.1.2 表格描述	33
2.1.3 公式描述	33
2.1.4 波形描述	36
2.2 信号之间的关系	38
2.2.1 相关系数	38
2.2.2 相关函数	43
2.2.3 自相关函数	44
2.2.4 互相关函数	47
2.3 时域的系统	52

2.3.1 符号描述	52
2.3.2 单位脉冲响应	53
2.3.3 差分方程	57
2.3.4 图形描述	59
2.4 信号处理的方法	60
2.4.1 比较两个信号	60
2.4.2 合理运用数学公式	61
2.4.3 数学公式的算法	62
2.5 时域分析法的特点	64
2.6 练习题	65
第3章 频域的信号与系统	68
3.1 频域的信号	69
3.1.1 正弦波的表达方法和特点	69
3.1.2 信号的正弦波成分	70
3.1.3 其他形式的信号成分	78
3.2 各类信号的频域分析	81
3.2.1 信号的正弦变换	81
3.2.2 四类信号的正弦变换	82
3.3 正弦变换的物理意义	85
3.3.1 序列的正弦变换	85
3.3.2 函数的正弦变换	86
3.3.3 正弦变换的总结	88
3.4 傅里叶变换	89
3.4.1 傅里叶变换的体系	89
3.4.2 傅里叶变换与正弦变换的区别	90
3.4.3 数字角频率的低频与高频	92
3.4.4 频谱的对称性	96
3.5 频域的系统	101
3.5.1 系统的频率特性	101
3.5.2 频率响应的物理意义	102
3.5.3 不失真系统的条件	103
3.6 频域分析法的特点	105
3.7 练习题	107
第4章 数字处理的技巧	109
4.1 信号的转换	109
4.1.1 模拟信号变成数字信号	109
4.1.2 数字信号变成模拟信号	110
4.2 信号转换遵循的定理	111
4.2.1 模拟信号到数字信号	111
4.2.2 数字信号到模拟信号	120

4.3 频谱分析的推广	126
4.3.1 z 变换的定义与性质	126
4.3.2 系统的 z 变换	129
4.3.3 零极点的用途	131
4.3.4 z 变换的应用	134
4.4 离散傅里叶级数的演绎	134
4.4.1 离散傅里叶变换	135
4.4.2 离散傅里叶变换的性质	135
4.4.3 离散傅里叶变换的关系	141
4.4.4 离散傅里叶变换的意义与用途	146
4.5 练习题	152
第 5 章 信号处理的效率	155
5.1 直接计算离散傅里叶变换的代价	155
5.1.1 直接计算频谱的代价	155
5.1.2 直接计算卷积的代价	156
5.2 离散傅里叶变换计算效率的提高	157
5.3 时域抽取的快速算法	158
5.3.1 时域抽取法的原理	159
5.3.2 时域抽取法的应用	160
5.3.3 时域抽取法的运算量	162
5.4 频域抽取的快速算法	163
5.4.1 频域抽取法的原理	163
5.4.2 频域抽取法的应用	165
5.4.3 频域抽取法的运算量	166
5.4.4 两种快速算法的相似之处	166
5.5 离散傅里叶反变换的快速算法	167
5.5.1 仿效快速傅里叶变换	167
5.5.2 取旋转因子的复共轭	168
5.5.3 取频谱的复共轭	169
5.6 实数序列的快速傅里叶变换	169
5.6.1 直接运用	169
5.6.2 合二为一	170
5.6.3 一分为二	170
5.7 快速傅里叶变换的应用	171
5.7.1 提高信号分析的计算速度	171
5.7.2 提高线性卷积的计算速度	173
5.7.3 提高相关函数的计算速度	178
5.8 练习题	181
第 6 章 数字滤波的原理	183
6.1 数字滤波器的概念	183

6.2 数字滤波器的指标	185
6.3 数字滤波器的研究方法	186
6.3.1 数字滤波器的表示	186
6.3.2 信号流图与系统函数	191
6.3.3 信号流图的转置	193
6.4 数字滤波器的分类	194
6.5 数字滤波器的结构	196
6.5.1 无限脉冲响应滤波器的结构	196
6.5.2 有限脉冲响应滤波器的结构	201
6.6 数字滤波器的应用	204
6.7 练习题	207
第7章 无限脉冲响应滤波器的设计	209
7.1 模拟滤波器的设计	209
7.1.1 模拟滤波器的描述方法	209
7.1.2 巴特沃斯滤波器的设计	211
7.1.3 切比雪夫滤波器的设计	214
7.2 间接设计数字滤波器	222
7.2.1 脉冲响应不变法	222
7.2.2 双线性变换法	227
7.3 直接设计数字滤波器	230
7.3.1 零极点设计法	230
7.3.2 最小误差设计法	234
7.4 低通滤波器的变换	237
7.4.1 模拟频率域的频率变换	238
7.4.2 数字频率域的频率变换	242
7.5 无限脉冲响应滤波器的应用	244
7.5.1 数字图形均衡器	244
7.5.2 数字控制器	245
7.5.3 数据通信的时钟恢复	246
7.6 练习题	248
第8章 有限脉冲响应滤波器的设计	250
8.1 系统频谱的本质	250
8.1.1 系统频谱的含意	251
8.1.2 系统的延时	252
8.2 有限脉冲响应滤波器的频谱	256
8.2.1 有限脉冲响应滤波器的频谱表示法	256
8.2.2 实现线性相位的方法	257
8.2.3 线性相位滤波器的幅度特性	259
8.3 在时域设计滤波器	260
8.3.1 截取一段序列	261

8.3.2 截断序列的后果	263
8.4 在频域设计滤波器	269
8.4.1 设计单位脉冲响应	269
8.4.2 设计系统函数	272
8.5 最优化设计	274
8.5.1 最小化最大误差的原理	274
8.5.2 最小化最大误差的设计方法	276
8.5.3 设计方法的演绎	280
8.6 无限和有限脉冲响应滤波器的区别	287
8.6.1 滤波器的性能	287
8.6.2 设计方法的特点	288
8.7 练习题	289
第9章 多采样率的系统	291
9.1 多采样率的概念	291
9.2 整数倍降低采样率	292
9.2.1 抽取前后的频谱	293
9.2.2 防止抽取的失真	298
9.2.3 抽取的用途	302
9.3 整数倍提高采样率	304
9.3.1 内插前后的频谱	305
9.3.2 防止内插的失真	306
9.3.3 内插的用途	310
9.4 非整数倍改变采样率	314
9.5 练习题	316
第10章 数字信号处理的实现	319
10.1 实现数字信号处理的方法	319
10.2 数字信号处理器的速度	320
10.2.1 处理器的结构	321
10.2.2 处理器的流水线机制	322
10.2.3 乘法加法器	324
10.3 数字信号处理器的数字表示	325
10.3.1 定点数	325
10.3.2 浮点数	327
10.3.3 数字的动态范围和精度	328
10.4 信号处理的误差	329
10.4.1 模-数转换的误差	329
10.4.2 数字运算的误差	330
10.4.3 数-模转换的误差	333
10.5 数字信号处理的应用实例	334
10.5.1 简单的实例	335

10.5.2 较复杂的实例 336

10.5.3 复杂的实例 338

10.6 练习题 342

附录 信号处理的实验 344

实验1 测量人耳辨别回声的最小时间 344

实验2 观察一句话的频谱特点 344

实验3 双音多频的通信 344

实验4 滤除心电图信号中的电网干扰 346

实验5 软件无线电的通信 347

索引 350

参考文献 360

第1章

数字信号处理的概念

简单地说, 数字信号处理就是用数值计算的方式对信号进行处理的理论和技术, 它的英文原名叫 digital signal processing, 简称 DSP。另外, DSP 也是 digital signal processor 的简称, 即数字信号处理器, 它是一种专用集成电路芯片, 只有一枚硬币那么大。有时, 人们也将 DSP 看做是一门应用技术, 称为“DSP 技术与应用”。

1.1 什么叫数字信号处理

数字信号处理这个概念由“数字”、“信号”和“处理”三个词组成, 下面由这三个词的一般含义和专业含义入手, 介绍数字信号处理的整体概念。

1.1.1 数字信号的概念

信号(signal)是指那些代表一定意义的现象, 比如声音、动作、旗语、标志、光线等, 它们可以用来传递人们要表达的事情。这个概念是人们在生活中对信号的认识。从广泛的意义来看, 信号是指事物运动变化的表现形式, 它代表事物运动变化的特征。

在电子学中, 信号就是指电流或电压, 它们是由传感器将事物的变化转变为与这些变化有对应关系的电量; 传感器也叫变换器、换能器或探测器。在化学中, 信号是指物质的比例、物质变化的条件、物质的分子结构等, 是人们通过观察、测量和记录所得到的反映物质性质的数据。在地理学中, 信号是指反映地形面貌, 如形状、距离、高度, 以及矿产资源分布, 大气压力、湿度等的的数据。在经济学中, 信号是人类生产和生活状况的统计, 如工农业生产的产量和增长量, 货币的分布、流向和流量等, 这些数据反映社会的经济状况和经济发展的规律, 依此能够预测社会可持续发展的时间。在医学中, 信号是指人体生理变化的指标, 如体温、血压、身体新陈代谢的速度和组织结构等。在语言学中, 信号是作家创作的结果, 如文字的排列、文字的数量、文章的篇数和书籍的发行量等。

在所有的信号中, 电信号是最常见的, 因为它能由机器或电路处理。人们一般喜欢把信号转变成电的形式, 这样做方便信号传输、存储, 还有利于机器处理和控制在。这是人类文明的重要特征, 人类善于将机器能做的事尽量让机器做, 使自己有更多的时间和精力去做其他

的事情。

从信号的表现来看,信号有连续的和不连续的。例如,温度计上指示温度的红色线段,当时间从某一时刻连续地过渡到另一时刻,红色线段的端点始终随着温度连续地从面板上某个刻度过渡到另一个刻度,红色端点指示的是温度信号。这种时间是连续的 and 物理量也是连续的信号称为连续信号或模拟信号(analog signal)。若用坐标来描述温度的变化,那么横坐标的时间是连续变量,纵坐标的温度也是连续变量,温度随时间变化的坐标图是一条连续的曲线。

如果在早上、中午、晚上和半夜四个时刻观察温度的变化,其他时间不观察温度,这种方法观察的温度信号的时间是不连续的、物理量是连续的;这种时间是离散的和物理量是连续的信号称为离散时间信号(discrete-time signal),简称离散信号。若是在一天的四个时刻观测温度,并用笔和纸记录温度的变化,这种方法记录的温度信号的时间和温度都是不连续的或离散的;这种时间和物理量都是离散的信号叫做数字信号(digital signal)。温度计上的信号是连续信号,实际记录的信号是数字信号,原因是人的观测时间和能力有限、记录数字的长度不可能很长或精度不可能很高,而且也没必要。

观察一年的温度变化时,可以用温度是连续信号的方式,也可以用温度是数字信号的方式。请读者自己想想,用温度是连续信号的方式,有没有必要?麻烦不麻烦?一般来说,长时间观察温度这种变化缓慢的物理量,用数字信号的方式就足够了,况且一年当中温度的变化范围不大。

信号无处不在。通过对事物的运动变化现象的观察、采集、测量、记录等可以获得信号。获得信号的方法主要有三种:人工观测、特殊装置和传感器。

人工观测是通过人眼观看将物理量用数字的形式保存下来。例如,考试成绩的评定、商品交易的记录、河水水位的测量记录、空气质量的检测记录、食品成分的分析记录等。

特殊装置是利用材料的物理性能制作的设备,它能连续地表现物理量的变化。例如,温度计、风向仪、指南针、水银血压表、气压表、电阻表等。

传感器是将被测物理量或化学量转换成与之对应的电量的电路或器件。例如,传声器(俗称麦克风、话筒)、热电偶、电视摄像头、光敏二极管、压电陶瓷等。

当然,还有其他的方法可以获得信号。但是,不管采用什么方法,为了让计算机能够完成信号处理的工作,被处理的信号必须是数字信号。所以,需要数值计算的时候,模拟信号都要转变成数字信号。

数字(digit)在一般人的概念中和习惯中是由0~9组成的数,用数字来表示的信号只能表示信号在不同时刻的大小。例如对图1.1所示的电压信号 $v(t)$,若用数字表示这个信号的话,它只能是时间 t 的一个个时刻所对应的一组电压 $v(t)$ 的数值。当然,时刻之间的间隔越

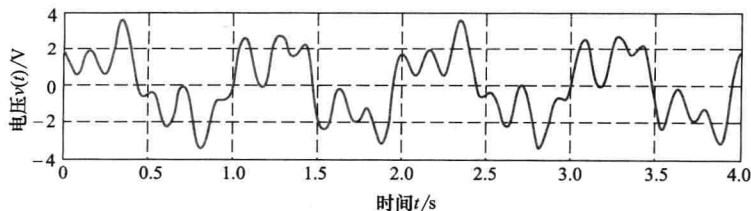


图 1.1 电压信号的波形

密, 数字所表示的电压变化就越接近真实情况; 还有, 表示信号大小的数字的位数越多, 数字与 $v(t)$ 的真实值就越接近。

实际应用中, 时间间隔越密和数字位数越多并不一定是件好事。要求生活中任何事情都完全真实再现是不可能的, 也是没意义的。

用电路的方式来表示数字信号时, 常见的有十进制的方法和二进制的方法。十进制 (decimal) 的方法要求电路有 10 种状态对应 10 个基本的数字符号, 这对电压、电流等的大小划分十分苛刻, 而且电路很难判断这种电压或电流是否受到干扰, 也很难抵抗这种电压或电流受到的干扰。二进制 (binary) 的方法要求电路有两种状态对应两个基本的数字符号, 这只需要将电压、电流等的大小划分为高和 low 两种状态, 电路很容易判断这种电压或电流是否受到干扰, 也容易消除这种电压或电流受到的干扰。所以, 用机器或用电路的方式来表示信号或者处理信号, 跟人在这方面的习惯是不同的。例如, 计算机的数据、命令和工作过程都是由 0 和 1 组成, 它们可以是电压的高低电平、磁带上的正反磁场、光碟面的凹凸状态等。符号 0 和 1 代表两种相反的状态, 外界和内部的各种不稳定因素的影响只要不超过两种状态的中间界限, 是不容易改变二进制数字的。

二进制数字信号的指标中经常用比特 (bit) 来描述信号数值的位数或长度。严格地讲, 数字信号处理学科中所讲的信号都是用二进制表示的。为了方便理解和观看, 人们在理论学习和研究中还是用熟悉的十进制表示法, 因此在学习数字信号处理的理论时, 暂时不考虑数字信号与真实信号之间的数值差距, 也不考虑运算带来的误差, 而是把数字信号看成离散信号。

处理 (process) 是指人们为了某种目的, 用工具对事物进行一系列操作, 改变事物的位置、形状、性质和功能。铁匠为了改变铁块的硬度和韧性, 把烧红的铁块投入水中或油中, 这是热处理。秘书对校长的信件所述的事情进行安排或解决, 称为处理信件或信件处理。商店便宜卖掉不想要的商品称为处理商品。人们清除家里不要的纸箱、纸张和瓶子叫做处理废物。处理信号也称信号处理, 如收集信号、分析信号、消除没用的信号、改变信号的形式、传输信号、辨别信号的身份、确定信号的传输时间、显示信号、存储信号等。

有些信号处理的速度是要求按照信号的实际变化时间进行, 这种信号处理称为实时 (real time) 信号处理, 它对机器的速度要求较高。

数字信号处理也就是信号的数字处理, 它的专业含义是用计算机对二进制数表示的具有物理、社会、医学、经济等实际含义的信号, 进行一系列的数学计算操作, 实现人们的要求。数字信号处理是外来词, 它的英文原名是 digital signal processing, 直接翻译成中文就是数字信号处理, 说起来也比较顺口。数字信号处理是这么一门学科, 它介绍怎样用数字表示信号, 怎样用数学描述信号处理, 怎么处理信号最快、最经济和最安全。

例如有一个电压信号

$$v(t) = 2\sin(2\pi t) + \sin(6\pi t + 1) + \sin(11\pi t + 2) \quad (1.1)$$

它的波形如图 1.1 所示, 需要将它存储在磁带上。存储的方法有多种: 第一种是直接将它存储在磁带上; 第二种是间隔一个时间测量它一次再将测量结果存在磁带上; 第三种是将间隔测量的信号变成二进制数再存在磁带上; 第四种是将该信号的基本成分计算出来再保存在磁带上。前三种方法比较简单, 但不属于数字信号处理; 第四种方法比较复杂, 因为人们或机器不可能知道收到的信号具有什么特征, 要用科学的方法才能知道信号的基本成分。选

择信号的基本成分通常是根据人们的需要来决定的，其准则是基本成分的数量尽可能地少、并且能解决实际问题。例如式(1.1)的电压信号，将其基本成分看做是正弦波是比较合适的，因为每个正弦波只需要幅度、频率和初始相位三个参数就可以表示。第四种方法需要数字计算，所以它属于数字信号处理。它只要9个数字就可以将一个较长时间的信号保存下来，可以极大地节省存储材料磁带。在需要恢复这个信号 $v(t)$ 时，只要将存储的数据做与存储前的相反的运算，就可以恢复原来的信号。

又例如，作者有一张磁悬浮列车车厢的照片，如图1.2所示，由于保存不慎，照片受潮发霉，图像受到损坏，如图1.3所示，作者非常希望恢复照片的原样。修复这张照片的办法有多种：第一种是手工用钢笔对它修复；第二种是用毛笔模仿原始照片画一张；第三种是重新拍照一次；第四种是把照片看成是由许多小点组成的，把每个点的浓淡变成数字信号并对这些点信号做某种处理，构成一幅新的图画。前三种办法比较简单，有耐心就基本可以做到，但效果并不很好，它们不属于数字信号处理。第四种办法比较复杂，因为一幅图像是由点组成的，一幅图像的点有非常之多，需要计算机才能完成处理，属于数字信号处理。第四种办法还可以再分成几种子方法，比方说：

①把原来图像的每一点与其周边的点按它们的数值大小由小到大排列，然后取它们的中间值作为一个新的点，这样可以构成一幅新的图像；②把原来图像的每一点与其周边的点的数值平均，然后取平均值构成一幅新的图像；③把原来图像的每一点与其周边的点的数值中的最大值和最小值去掉，然后取它们的平均值构成一幅新的图像。图1.4是采用中间值的处理方法修复的照片，它的每个点都是对图1.3取中间值的结果，运算量巨大；虽然修复后的照片与原来的照片相比没那么清晰，但它的效果比手工修复的要好。

通用计算机(general-purpose computer)，如台式计算机和笔记本计算机，它们可以精确地进行数字信号处理，但它们体积大、价格贵、耗电量大等缺点限制了它们在小型设备中的



图 1.2 磁悬浮列车车厢的原始照片



图 1.3 原始照片受潮发霉



图 1.4 用中间值的方法修复受潮发霉的照片

应用。针对数字信号处理的特点制作一种专用计算机,并把它做成一小片集成电路,就得到现在常说的 DSP 芯片。DSP 芯片比通用计算机的体积小、功耗低、价格便宜,便宜的每片约 5 美元,容易植入需要进行稳定、复杂和智能化工作的信号处理器。

1.1.2 数字信号处理的来历

早期处理信号的方法是把物理信号转换成电信号,用电子管电路或电子电路,即真空电子管、晶体管、电阻、电容等组成的电路,对电信号做有线传递、无线发射、放大、信号产生、滤波、调制、检波、变频、比较等加工处理。这里被处理的信号的特点是,信号任何时刻都有一个电压值或电流值对应物理量的大小,即信号在连续时间和连续电量上都有意义。这种信号称为连续信号或模拟信号,处理连续信号的机器(一般称电路)叫模拟电路。

随着需要处理的信号的增加和对信号处理要求的提高,如物理状态的判断、电话通路的转换、人的身份识别、机器的自动化控制、数据的保存、数据的提取等,模拟电路已经不能胜任这种工作。在这种情况下,数字电路应运而生。数字电路是一种开关电路,每个开关只有导通和截止两种状态。从数字电路的工作过程来看,输入输出体现一种因果关系,好像数字电路能对输入信号做逻辑判断一样,所以数字电路也叫逻辑电路。数字电路是由用晶体管、电阻和电容做成的逻辑门组成的,逻辑门有与门、或门、非门、与非门、或非门等。数字电路最基本的信号处理是对信号做数字比较、逻辑判断、加减乘除运算、编码译码、移位、数据选择、存储、信号产生、分频、开关控制、计数、码组变换等。

数字电路处理的信号可以是连续时间信号(continuous-time signal),它的时间连续但幅度不连续,信号的大小用 0 和 1 两种基本状态组成的二进制数表示。数字电路处理的信号也可以是时间离散和幅度离散的数字信号。这些信号许多是从模拟信号转换过来的,它们一般是变化较慢的物理量,如炼钢炉的温度、空气的压力、温室的湿度、汽车的速度、货物的重量、水库的水位、植物的高度等,对它们的测量没必要连续进行。一般数字电路对这些物理量判断后做出相应的控制,这种处理速度也没必要像电波速度那么快,在数字电路刚诞生的年代也不可能有很快速度的数字电路。

计算机和集成电路技术的发展增加了信号处理的种类,也让人们对信号处理提出更高的要求。例如,不改变电路的结构就可以改变电路的功能,用计算机代替模拟电路的工作,提高机器的性能而不淘汰机器本身,把语音转换成文字,提高电视通信的信号质量,无损伤地测量人体微血管中红细胞的运动速度,不拆机地检查机器的好坏等。这些处理信号的要求往往要用复杂的数学公式才能表达,而且这些信号的处理速度往往也要求很快,侧重逻辑判断的数字电路是难以胜任这种要求和速度的。数字信号处理电路正是为这些高要求和高速度而设计的专门电路,也叫数字信号处理器芯片、数字信号处理器、DSP 芯片或 DSP。

DSP 可以用专门的数字电路根据数字信号处理的数学公式或数字信号处理的原理图组装得到,也可以做成可执行程序的数字集成电路。当然通用计算机也可以完成数字信号处理的工作,特别是在学习和实验阶段,使用通用计算机做数字信号处理既简单又方便。但是在应用阶段,通用计算机就不合适了,因为它的体积相对一块芯片来说太大,成本太高,耗电也太多。用通用计算机来做便携式机器更不可能,比如汽车防撞雷达、导弹、地质勘探仪、电吉他、手机、数码相机等。所以数字信号处理器一般是指专门做数字计算的、计算速度很快

的芯片，它擅长的是计算。数字信号处理器的处理速度很快，可以快速处理数字信号，也可以快速地处理模拟信号；处理模拟信号时应先将模拟信号变换成数字信号，待信号数字处理完毕再转换回模拟信号。

1.1.3 数字信号处理系统的结构

大部分信号的最初形态是人们常见的事物形态，为了测量和处理它们，常用传感器把它们的特征转换成电信号，等到这些电信号处理完后再把它们转变为人类能看见、能听见或能利用的形态。所以数字信号处理的全部过程或数字信号处理系统一般由七个单元组成，如图 1.5 所示，其中数字信号处理单元是必需的，其他单元可以根据实际需要取舍。

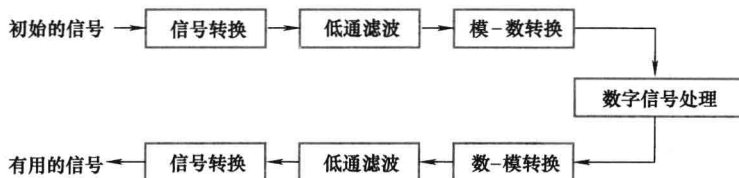


图 1.5 数字信号处理系统

例如机密房间的保安门锁系统，进入该房间的人必须先说一句话，让保安门锁系统处理说话人的语音信号。如果保安门锁系统采用数字信号处理系统，则它的第 1 单元是信号转换，用传声器把声音信号转换成电信号。第 2 单元是低通滤波，它用电阻电容电路滤掉语音信号中没用的高频成分，防止采样信号时出现失真。第 3 单元是模-数转换，它对滤波后的信号采样，并将采样信号变换成二进制的数字信号。第 4 单元是数字信号处理，它把输入的语音数字信号与以前记录的语音数字信号进行比较，确认来访者是否有资格进入机密房间，如果有资格则打开房门和致欢迎词；如果没有资格则不开房门和致提醒词。控制房门的电路由数字信号处理器输出的信号直接启动，不需要系统的后面三个单元。欢迎词和提醒词语音信号由数字信号处理器的存储器提供，它们是事先存储的二进制信号，送往第 5 单元。第 5 单元是数-模转换，它将数字信号变成模拟信号。由于数字信号是时间离散、幅度也离散的，在时间的各个采样间隔点上，恢复的模拟信号幅度存在跳变，与自然的语音信号有一定的差别；也就是说，数-模转换得到的模拟信号存在许多没用的高频成分。第 6 单元是低通滤波，它的职责是完善数-模转换，使恢复的模拟信号的变化更加流畅。第 7 单元是信号转换，它用功率放大器和扬声器将电信号变为声音。

值得说明的是：在保安门锁系统中，产生语音是不需要前面三个单元的；第 4 单元的数字信号处理把输入的语音数字信号与以前录下的语音数字信号进行比较，比较的方法有很多种，这就是“数字信号处理”这门理论研究的内容。

1.1.4 数字信号处理的特点

数字信号处理在发达国家从 1980 年开始成为了热门学科。随着计算机的普及，数字信号处理学科也快速在我国高校建立，1985 年北京广播学院（现中国传媒大学）通信和电子类专业将它设为研究生的必修课，后来不少国内重点高校无线电专业相继把它列为本科生的必