151

DSP 基本理论与应用技术

李哲英　骆　丽　刘元盛　编著

A0966980

北京航空航天大学出版社

内容简介

本书是一本初学 DSP 技术的入门书籍，向读者提供有关 DSP 应用技术的基本理论和 DSP 系统的基本硬件技术，并通过提供一些基本实验帮助读者迅速学会如何设计一个 DSP 系统。书中介绍了 DSP 技术的基本理论概念和数学分析方法、DSP 器件的结构和组成以及数字信号处理系统的基本结构；突出了 DSP 应用技术基本概念和方法的介绍，侧重于通过练习达到学习 DSP 应用开发技术的目的；作为基本应用技术的内容，还介绍了有关 C54x 系列 DSP 器件使用操作和开发技术，并提供了相应的实验。

本书可作为电子、电气、信息类以及机电、生物医学工程等学科的本科生学习 DSP 课程的教材，包括实验在内大约需要 40～54 学时；也可供具有相应基础的工程技术人员学习 DSP 技术时参考。

图书在版编目(CIP)数据

DSP 基本理论与应用技术/李哲英等编著. —北京：
北京航空航天大学出版社，2002.6
ISBN 7-81077-162-0

Ⅰ. D… Ⅱ. 李… Ⅲ. ①数字信号—信号处理②数字信号—微处理器 Ⅳ. ①TN911.72②TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 006340 号

DSP 基本理论与应用技术

李哲英 骆 丽 刘元盛 编著

责任编辑 陶金福

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083) 发行部电话：010-82317024 传真：010-82328026

http://www.buaapress.com.cn

E-mail:presself@publica.bj.cninfo.net

河北省涿州市新华印刷厂印装 各地书店经销

*

开本：787 mm×1 092 mm 1/16 印张：20.5 字数：525 千字

2002 年 6 月第 1 版 2002 年 6 月第 1 次印刷 印数：5 000 册

ISBN 7-81077-162-0/TP·089 定价：32.00 元

序　言

DSP 理论和技术是目前电子技术和 IT 领域中的一个基本工程理论与核心技术。实际上，DSP 技术已经深入到了各个工业应用技术中。DSP 技术已经成为 21 世纪初，各种新技术的一个共同基础。

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

$$Y = f(X)$$

其中 $f(\cdot)$代表的是一种数学运算，例如卷积运算、数字滤波器、PID、MODEM 等。由此可知，任何一个电子系统都可以被看成是一个数学计算系统。

实现系统所代表的数学运算有两种方法，一种是用模拟电路方法实现，另一种就是用数字电路方法实现。

模拟电路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，用模拟电路方法实现的系统一般来说是一个固定系统；也就是说，系统的参数固定，难以实现智能化。

数字电路方法由于计算机技术和微处理器技术的出现，为工程系统的实现提供了相当灵活的运算基础。特别是 DSP 器件的出现，更是为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的采用了数字技术。这就是 DSP 技术成为工程实际基本技术之一的重要原因。

实际上，作为一门近代工程技术，数字信号处理是一个与模拟信号处理并行的工程技术。数字信号处理应用技术的应用领域日益广泛，其所涉及的理论和领域也越来越多。因此，数字信号处理技术具有相当强的工程应用针对性。

在数字信号处理的工程领域中，包括基本理论和应用理论，还包括应用技术。工程实际更关心的是 DSP 应用技术，所以，检验数字信号处理理论和技术的基本工程标准，就是能否在工程实际中应用先进的理论，把理论变成一种实际应用技术。由于所使用的技术与基础理论紧密相关，所以，多年来 DSP 技术一直被看成是高深的理论与技术。

正如上面所讨论的，作为工程应用技术，其理论意义体现在应用中。如果不能在工程实际中应用，再好的理论也是没有用的。所以，对于广大工程技术人员来说，DSP 技术的学习，必须以应用为目标，必须在相应的理论基础之上，应用 DSP 技术。由此可知，把 DSP 技术作为应用电子系统实现的一个基本方法来学习，才能比较快地掌握 DSP 技术。

学习 DSP 技术包括两大部分内容，一部分内容是相应的基本分析和计算理论，另一部分内容则是 DSP 系统的实现技术。

本书作为初学 DSP 技术的入门书籍，向读者提供有关 DSP 技术应用的基本理论和 DSP 系统的基本硬件技术，并通过提供一些基本实验帮助读者迅速学会如何设计一个 DSP 系统。为此，本书突出了 DSP 应用技术基本概念和方法，侧重于通过练习达到学习 DSP 应用开发技术的目的。

与单片机应用技术相比较，DSP 技术的特殊之处就在于其所担负的复杂数字计算任务。实际上，单片机系统也是一个数字信号处理系统，只不过一般 8 位单片机所具有的计算能力有限，因此在一般应用领域所涉及的计算理论比较少。

本书的内容如下：

第 1、2 和 3 章介绍了有关 DSP 技术的基本理论概念和数学分析方法，目的是建立有关数字信号处理的基本概念，学习如何分析数字信号处理系统，并为设计和使用 DSP 系统打下基础。这部分包括了有关数字信号与系统的一些概念和基本的数学变换。

第 4 章介绍了数字信号处理系统的基本结构和组成，并初步介绍了有关 DSP 器件的结构和组成。

第 5 章之后全部是有关 C54x 系列 DSP 器件使用操作和开发技术的介绍，其中第 6、7 两章还包括了有关的实验内容。

本书适合于电子、电气、信息类以及机电、生物医学工程等学科的本科生选作 DSP 教材，包括实验在内大约需要 40～54 学时。作为一本 DSP 理论与技术的入门书，本书也适合于具有相应基础的工程技术人员参考。

本书第 1、2 和 7 章由骆丽编写，第 3、4、5、6 章由李哲英编写，第 8 章和附录由刘元盛编写。此外，高海林参与编写了第 5 章的 5.2 节和第 6 章的部分内容。参与本书编写工作的还有李维敏、张宇威、李晓光等。研究生胡昕、张丹、刘海洋、胡容泉验证了全部实验内容。

最后，北京力高公司和台湾掌宇公司对本书的编写工作给予了大力支持，提供了大量的实验素材；北京航空航天大学出版社对本书的编写出版工作给予了大力支持，作者在此一并致谢。

由于编者的水平和所掌握资料有限，书中难免存在错误，希望读者批评指正。

编　者

2002.1.22

于北方交通大学

目　录

第 1 章　信号与信号处理系统

1.1　信号及信号的分类 …… 1
1.1.1　工程信号分类 …… 1
1.1.2　基本连续时间信号 …… 9
1.1.3　基本数字信号 …… 11
1.1.4　工程信号描述的基本概念 …… 14
1.2　信号处理系统的基本概念 …… 17
1.2.1　系统分析的基本概念 …… 17
1.2.2　系统及其分类 …… 18
1.3　连续时间信号处理系统的基本分析方法 …… 20
1.3.1　连续时间 LTI 系统的时域分析 …… 20
1.3.2　连续时间 LTI 系统的复频域分析 …… 24
1.3.3　连续时间信号与系统的傅里叶分析 …… 28
本章小结 …… 34
思考与练习 …… 34

第 2 章　离散信号与 LTI 系统分析的基本方法

2.1　离散时间信号处理系统的基本分析方法 …… 37
2.1.1　离散时间 LTI 系统的响应与卷积和 …… 37
2.1.2　离散时间 LTI 系统的性质 …… 40
2.1.3　用差分方程描述的系统 …… 41
2.2　离散时间 LTI 系统频域分析——Z 变换 …… 42
2.2.1　Z 变换 …… 42
2.2.2　常见序列的 Z 变换 …… 45
2.2.3　Z 变换的性质 …… 46
2.2.4　Z 反变换 …… 48
2.2.5　离散时间 LTI 系统的系统函数 …… 52
2.2.6　离散时间系统的实现方法 …… 55
2.3　离散时间信号与系统的傅里叶分析 …… 60
2.3.1　离散序列的傅氏级数 …… 60
2.3.2　离散时间傅氏变换 DTFT …… 62
2.3.3　DTFT 的性质 …… 65

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

2.3.4 离散时间 LTI 系统频率响应 …… 67
2.3.5 离散傅氏变换 …… 69
本章小结 …… 71
思考与练习 …… 72

第 3 章 数字信号处理基础

3.1 连续时间系统的离散化处理 …… 76
3.1.1 差分离散化基本方法 …… 77
3.1.2 信号的离散化方法 …… 79
3.1.3 离散系统的基本计算结构 …… 83
3.1.4 A/D 与 D/A 转换技术 …… 84
3.2 FIR 滤波器 …… 87
3.2.1 设计方法 …… 87
3.2.2 平滑滤波器 …… 90
3.2.3 窗函数 …… 91
3.3 IIR 滤波器 …… 92
3.3.1 冲激响应不变设计法 …… 93
3.3.2 双线性 Z 变换设计法 …… 94
3.4 谱分析与 FFT …… 94
3.4.1 谱分析 …… 94
3.4.2 基本算法 …… 95
思考与练习 …… 96

第 4 章 DSP 硬件系统与器件原理

4.1 DSP 系统硬件实现的基本概念 …… 98
4.1.1 DSP 硬件系统的基本结构 …… 98
4.1.2 完成计算任务的核心 …… 101
4.2 DSP 器件的结构与工作原理 …… 103
4.2.1 DSP 芯片的基本结构 …… 103
4.2.2 DSP 器件的寄存器与存储器 …… 106
4.2.3 DSP 器件的指令系统 …… 108
4.3 DSP 器件中的外部设备 …… 110
4.3.1 串行通信接口 …… 111
4.3.2 存储器直接访问控制器 DMA …… 114
4.3.3 定时器/计数器电路 …… 115
思考与练习 …… 116

第 5 章 TMS320C54x 系列 DSP 器件

5.1 TMS320C54x 系列 DSP 器件的结构 …… 117

5.1.1 C54x 系列器件的总线结构 …… 118
5.1.2 C54x 的内部寄存器 …… 121
5.1.3 C54x 器件的 CPU …… 127
5.1.4 C54x 器件的存储器结构 …… 135
5.2 C54x 器件中的外部设备电路 …… 142
5.2.1 多通道缓冲串行口 McBSP …… 142
5.2.2 存储器直接访问控制器 DMA …… 158
5.2.3 对扩展地址的寻址 …… 168
5.2.4 DMA 的内存映射 …… 168
5.2.5 C54x 器件中其他片内外设 …… 169
5.3 C54x 系列 DSP 器件的代数指令系统 …… 172
5.3.1 表示方法与规定 …… 172
5.3.2 算术运算指令 …… 174
5.3.3 逻辑运算指令 …… 178
5.3.4 程序控制指令 …… 179
5.3.5 载入和存储指令 …… 181
5.3.6 如何重复执行一条指令 …… 183
5.4 C55x 系列芯片简介 …… 185
5.4.1 C55x 技术结构设计中的指导思想 …… 186
5.4.2 C55x 器件基本特征 …… 188
5.4.3 C55x CPU 结构 …… 189
5.4.4 C55x 指令系统的特点 …… 192
5.4.5 C54x 与 C55x 的比较 …… 192
思考与练习 …… 193
第 5 章附录 C5410 器件简介 …… 194

第 6 章 DSP 器件仿真开发技术基础

6.1 DSP 仿真开发系统基本概念 …… 197
6.1.1 带有 CPU 的系统开发的基本概念 …… 198
6.1.2 DSP 应用系统对开发环境的基本要求 …… 198
6.1.3 DSP 仿真开发系统的基本结构 …… 199
6.2 XDS510 仿真开发系统的基本操作技术 …… 200
6.2.1 JTAG 的基本概念 …… 200
6.2.2 XDS510 仿真器的基本技术概念 …… 202
6.2.3 仿真器信号 …… 204
6.2.4 仿真板配置信息 …… 206
6.2.5 建立与 XDS510 之间的通信 …… 207
6.2.6 扫描未调试器件 …… 209
6.3 用 C54xDSK 学习 TMS320 开发技术 …… 210

6.3.1 DSK 系统板简介 …… 210
6.3.2 C54xDSK 系统硬件结构 …… 211
6.3.3 DSK 的存储空间分布 …… 212
6.3.4 TLC320AC01C 模拟接口芯片 …… 213
6.3.5 C54x DSK 的安装与基本应用技术 …… 215
6.3.6 CODE EXPLORER 使用操作 …… 229
第 6 章附录 使用 DSK 实验指导 …… 230

第 7 章 C54x 系统应用实验练习

7.1 MDK—01A 型 DSP 教学实验系统 …… 238
7.1.1 系统简介 …… 238
7.1.2 系统功能电路与安装 …… 239
7.1.3 VC5410 与 VC5409 的比较 …… 243
7.1.4 自检与载入程序 …… 244
7.1.5 系统调试环境 …… 244
7.2 DSP 技术基本实验 …… 252
7.2.1 常用指令操作实验 …… 252
7.2.2 采样定理及实验 …… 258
7.2.3 FIR 滤波器的设计 …… 263
7.2.4 IIR 带通滤波器的设计 …… 270
7.2.5 实信号 FFT 变换实验 …… 273
7.2.6 低频频谱分析与窗函数 …… 275
7.2.7 离散余弦变换 DCT 实验 …… 278
7.2.8 信号自相关实验 …… 280
7.2.9 A 律压缩/解压实验 …… 283
7.2.10 数字录音实验 …… 286

第 8 章 程序开发平台 Code Composer Studio

8.1 安装程序开发集成环境 …… 292
8.2 CCStudio 窗口和工具条 …… 294
8.2.1 移动窗口 …… 295
8.2.2 语境菜单 …… 295
8.2.3 标准工具条 …… 295
8.2.4 反汇编窗口“Dis - Assembly Window”的使用 …… 296
8.2.5 使用存储器窗口 …… 298
8.3 项目管理和文件编辑 …… 300
8.3.1 项目管理 …… 300
8.3.2 项目管理窗口的功能 …… 300
8.3.3 项目操作 …… 303

8.4　CPU 寄存器操作 …… 303
8.5　装载 COFF 文件 …… 305
8.6　程序运行操作 …… 306
8.7　其他有关的基本操作 …… 308
8.8　CCStudio 的使用操作练习 …… 311

附　录

附录 1　COFF 目标文件 …… 314
附录 2　MMR 一览表 …… 315

第 1 章　信号与信号处理系统

信号是信号处理系统的对象。为了实现某类信号的信号处理系统，就必须对信号有清晰的认识。因此信号分析是信号处理系统应用的基础。

信号分析与信号处理系统的基本技术内容，就是对信号和信号处理系统的行为特性进行数学描述，这种描述的根据就是信号和系统的物理基础。对于工程师来说，用数学方法描述工程信号和信号处理系统，是必须具有的基本技术素质之一。

本章将对有关信号分析和信号处理技术的基本工程概念和理论进行讨论，并通过具体的应用实例介绍信号分析和信号处理系统理论与技术的应用方法。

1.1　信号及信号的分类

物理系统输出的信号反映了该系统全部或部分行为特征，因此说信号是物理系统的表现形式。例如 RC 电路的输出信号代表了电路对输入信号的微分或积分处理行为；再例如，发电机输出的电压信号则表示了发电机转子和定子的基本物理参数。

从数学上看，信号所代表的是有关变量之间的函数关系。对于目前所知物理系统的信号，都可以表示为所观测物理量与时间 t 的函数关系；也可以把信号表示为物理量与频率 f 之间的函数关系。在信号分析中，最基本的变量就是时间和频率。

1.1.1　工程信号分类

在设计信号处理系统时，必须先了解要处理的对象——信号。

所谓信号的性质，是指信号的物理特征和数学描述特征。信号性质是决定处理系统结构和特性的重要因素。因此，工程中对信号的描述主要是对信号性质的描述。

为便于对信号进行描述，工程中根据信号的性质对信号进行分类。有了信号的分类，就可以有目的地选择信号处理方法，就能正确地确定信号处理技术或对信号进行正确分析，从而设计出工程技术所要求的信号处理系统。因此，信号分类是确定信号处理方法和技术的基本条件。

为了便于工程分析和信号处理系统的分析设计，工程中根据信号的行为特征对信号进行分类。

1.1.1.1　确定性信号与随机信号

信号是物理系统行为特性和参数性质的表现，只有对信号的行为特性完全掌握后才能设计出正确的信号处理系统。因此，信号处理系统设计的第一步就是描述信号。

如果能够用确定的数学方式描述一个信号，则可以确切地给出任何时刻的信号值，也就是可以准确地指出任何时刻信号的确切数值。这种信号在工程上叫做确定性信号。如果无法给

出信号在任意时刻的数值，则这种信号就叫做非确定性信号。

显然，确定性是信号的一个重要性质。确定性信号是指在任意给定时刻，信号值能完全确定的信号。确定性信号的模型可以用一个时间 t 或频率 f 的函数来表示。从信号处理系统设计的角度看，如果信号是确定性的，就意味着设计者已经完全掌握了信号的特征，可以有针对性地设计出符合要求的信号处理系统。

与确定性信号相反，随机信号是一种无法确定任意给定时刻信号值的信号，无法用确切的数学模型描述，只能通过统计方法来表征其一般特点。应当说，非确定性信号实际上就是一种未知信号。非确定性信号的处理是数字信号处理的重要内容之一。

例 1.1.1 某温度精确测量系统处于比较严重的电磁干扰环境中，除了有比较严重的工频(50 Hz)干扰外，还存在有数字电子设备形成的高频干扰，因此须要对温度信号进行滤波和检测处理，试分析信号的基本性质并确定信号处理的基本方法。

解：要确定信号处理的方法，就必须对信号的性质进行分析和分类，然后确定相应的处理方法。

(1) 温度信号是变化缓慢的信号(大惯性信号)，如果能确定温度信号的最大值和最小值(最高温度和最低温度)，则可以把温度信号看成是一种确定性信号(接近直流信号)。

(2) 50 Hz 工频干扰信号的频率是相对固定的，从经典滤波理论可知，可根据频率对其进行滤波处理。

(3) 数字电子设备的特点是以数字逻辑信号(脉冲信号)为电路基本信号，因此所形成的干扰具有高频性质，并具有比较宽的频率范围。

根据以上分析可知，从频率上分，温度和干扰信号之间具有比较大的频率差别，当考虑温度变化速度远低于干扰信号频率时，可以把温度和干扰信号看成是频率的确定性信号，因此可以选择经典滤波方法对测量信号进行滤波。

1.1.1.2 连续时间信号与离散时间信号

根据物理学的基本结论，自然界和工程中的任何物理系统或物理信号，总可以用时间、频率和空间坐标作为自变量。换句话说，就是可以把信号或系统看成是时间、频率或空间坐标的函数。

世间万物总是随时间在变化，如果关心变化的速度，则可以使用频率作为基本坐标；如果还关心信号或系统的空间分布关系，则还可以加入空间坐标对信号或系统进行描述。

在信号处理理论与技术中，由于信号或系统的时间或频率特征是两个基本的特征，可以确定信号的基本性质，所以，总是选择时间和频率作为基本坐标。

1. 连续信号的基本数学定义与描述方法

在工程实际中总是用物理量 x 与时间 t 或频率 f 之间的函数关系描述信号，并把时间 t 或频率 f 作为自变量，所以，信号可以写成 $x(t)$ 或 $x(f)$。

信号分析中连续信号的定义是：当信号关于自变量连续时，就叫做连续信号。

例如自变量为时间 t，信号 $x(t)$ 是 t 的连续函数，则 $x(t)$ 就叫做连续时间信号。连续时间信号的定义，就是物理学中对随时间变化的物理量的描述方法。

连续时间信号的定义和描述方法在工程中具有重要的意义。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

首先，这种数学定义和描述方法是对信号性质的描述，代表了信号的基本特征，是对信号进行分析和信号处理系统设计的基本出发点。

其次，是对信号源的一种描述，信号的数学定义不仅是信号的数学模型，也表示了形成信号的基本要素。

例 1.1.2　正弦波信号发生器输出信号描述。

解：工程中经常须要使用信号发生器，以便向电子系统提供必要的信号。对于电子系统来说，信号发生器的输出信号一般是相应的模拟电路输出的电压信号，都是连续时间信号。所以，信号发生器输出的信号是典型的连续时间信号。

对于正弦波信号发生器，其输出的正弦波是振荡和滤波电路生成的电压信号，表达为

$$y(t) = A\sin \omega t \qquad (t \geqslant 0)$$

这里限制条件 $t \geqslant 0$ 表示：

(1) 在分析信号时，只有通电后电路进入稳定状态这个表达式才有效；

(2) 在分析作为信号处理系统的输入信号时，稳定的正弦波信号在进入系统的起始时刻之后，例如信号接入开关闭合的时刻 $t=0$。

---

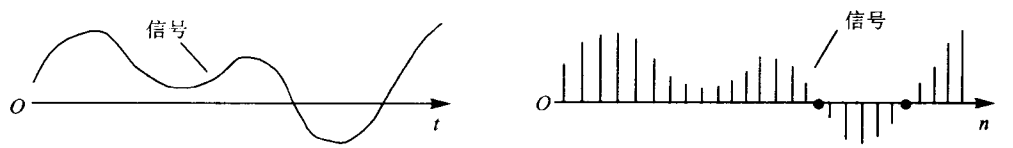
2. 离散信号的基本数学定义与描述方法

如果只是在自变量的某些点上信号才有意义，则这种信号就叫做离散信号。

必须注意，"某些点上才有意义"是说在两个点之间不存在信号，也就是说信号没有意义。

当自变量为时间 t，信号只是在某些时刻点上才有意义时，这种信号就叫做离散时间信号。离散时间信号一般用序列来表示，即 $x(n)$、$[x_n]$或 x_n等，其中 n 为整数。

图 1.1 所示为连续时间信号 $x(t)$和离散时间信号 $x(n)$。



(a) 连续时间信号　　(b) 离散时间信号

图 1.1　信号的图形表示

离散时间信号与连续时间信号相同，也代表了信号的基本物理特征。

3. 连续时间信号与离散时间信号之间的转换

从图 1.1 可以看出，如果对连续时间信号 $x(t)$在离散的时间点(不同的时刻)进行取样，则可获得离散时间信号$[x_n]$。例如，对连续时间信号 $x(t)$在 t_0、t_1、…、t_n…时刻进行取样，就可以得到

$$x(t_0),\ x(t_1),\ \cdots,\ x(t_n)\cdots$$

这些信号是 $x(t)$在 t_0、t_1、…、t_n…时刻的信号幅度值，为了处理方便，习惯上写成

$$x[0],\ x[1],\cdots,\ x[n]\cdots$$

或

$$\{x_0,\ x_1,\ \cdots,\ x_n\cdots\}$$

其中：$x_n = x(t_n)$，n 为取样点，x_n 是取样点处的信号幅度值。

对连续时间信号进行取样，可以用图 1.2 所示的系统描述，其中 S_i 是脉冲发生电路，理想情况下就是单位冲激串发生电路。

图 1.2 说明，只要把连续时间信号与单位冲激信号相乘，就可以把连续时间信号转变为离散时间信号。在工程实际中，可以有两种方法实现这种相乘功能，一个是使用采样保持电路，另一种方法是通过控制 A/D 转换电路的转换启动。有关 A/D 转换技术将在第 3 章中详细讨论。

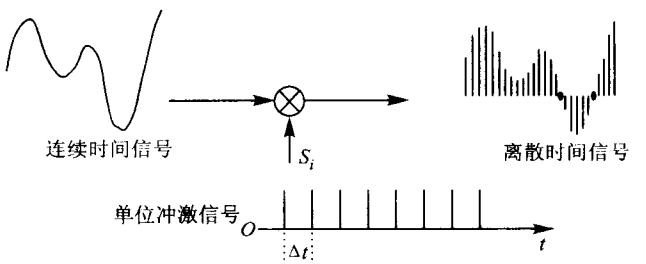


图 1.2 取样系统

对连续时间信号进行取样时，取样点之间的时间间隔常用 T_s 表示，称为取样间隔。

当取样间隔相等时叫做均匀取样。对连续时间信号进行均匀取样得到的离散时间信号可以写成

$$x_n = [x_n] = x(nT_s)$$

其中：T_s 为常数。

例 1.1.3 心电图数据的获得。

解：人体心电图信号是从人体皮肤表面接收到的心脏生理活动的电信号，反映了心脏生理活动的规律，提供了有关心脏活动的状态。随着生物医学技术的发展，计算机分析心电图已经成为生物医学的一个重要研究领域。由于计算机是数字电子设备，只能完成数字计算任务，而心电图是随时间连续变化的信号。因此，要用计算机对心电信号进行分析，就必须先把连续时间信号转换为离散时间信号，再把离散时间信号转换为相应的数字信号（数据序列）。所以，要获得能提供给计算机处理的心电信号，必须使用 A/D 转换电路。

实际上，要用计算机处理任何时间连续信号，都必须使用 A/D 转换技术，把时间连续信号转换为数字序列，也就是所谓的数字信号。

1.1.1.3 模拟信号与数字信号

把信号分为模拟信号与数字信号，是现代电子技术中的重要概念。模拟信号处理系统与数字信号处理系统具有完全不同的特性。

1. 模拟信号

在工程实际中，不是直接以数值方式给出的物理量就叫做模拟信号。

模拟信号分为连续时间模拟信号和离散时间模拟信号。例如，发电机的输出电压就是一个连续时间模拟信号；而取样电路输出的信号就是一个离散模拟信号，原因是取样电路输出的

仍然是一个电压，而不是给出电压的数据。

只有经过量化处理后的信号，才是数字信号。

2. 数字信号

由于电子技术和计算机技术的飞速发展，数字信号已经成为目前信号处理中的主要处理对象。

数字信号的定义是：用数字序列描述的信号，就叫做数字信号。

与模拟信号不同，数字信号虽然仍代表相应的物理量，但已经直接给出了具体的数值。同时，对于数字信号处理系统来说，数字信号只是一组数据，可以通过运算对其进行任何处理。这是目前模拟信号处理系统无法实现的重要功能。

值得指出的是，在数字电路中把只由高低两种逻辑电平组成的信号也叫做数字信号。显然，这里叫做数字信号的目的是要强调这种信号只能由数字电路进行处理，而不是数字信号处理中所说的数字信号。因此，数字电路中又把由高低逻辑电平组成的信号叫做数字逻辑信号。

工程中把模拟信号转换为数字信号的基本方法就是采用 A/D 转换电路。

例 1.1.4　异步电动机转速的离散时间信号。

解： 在工程实际中，经常须要测量旋转设备的转速，以便实现对设备的控制。在测量电动机转速时，可以使用脉冲编码盘技术，如图 1.3 所示。由于编码盘与电动机同轴，所以电动机每旋转一周，接收器上就能得到一个脉冲，通过定时器记录下每秒钟或每分钟内得到脉冲的个数，就可以得到电动机的转速测量值。由于使用的是脉冲计数，所以得到的就是数字信号（具体的数据）。

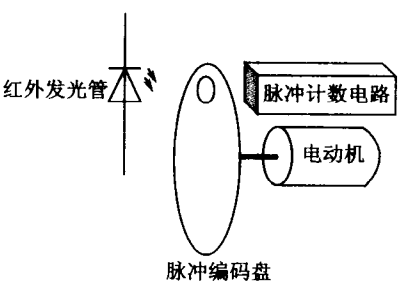


图 1.3　测量电动机转速的脉冲编码盘

（1）数字信号的公式描述法

在工程实际中，可以通过给出序列中第 n 个值的计算方法来描述一个数字信号，例如：

$$x[n]=x_n=\begin{cases}\sin(\omega n) & (n\geqslant 0)\\ 0 & (n<0)\end{cases}$$

从上式可以看出，只要给出了 n，就可以计算出 n 点的信号值。所以这种数字信号的描述还叫做“公式描述法”。

公式描述法的优点在于信号的描述十分简练，可以对其进行解析分析。但对于数字电路组成的 DSP 系统来说，则须要占用比较长的处理时间。因此，公式描述法主要用来进行数字信号处理方法的研究。

（2）数字信号的序列描述法

由于数字信号实际上就是一组有序数值，所以，可以用列出序列所有数值的方法来描述数字信号，例如

$$\{x_n\}=\{1,2,2,1,0,1,0,2\}$$
$$\uparrow$$
$$n=0$$

在上面的数字信号描述中，n 表示信号的顺序位置(也就是坐标值)，箭头所指数据的顺序位置为 $n=0$ 项。由此可以得到上述数字信号为

$$x_{-2}=1, x_{-1}=2, x_0=2, x_1=1, x_2=0, x_2=1, x_3=0, x_4=2$$

之所以用箭头指示，目的就是为了确定数字信号的起始位置。数字信号的起始位置对数字信号处理来说具有十分重要的意义，其意义就相当于连续时间信号处理中的起始时刻。

工程中为了方便起见，也可以不使用箭头，用第 1 项对应 $n=0$ 项。这样描述数字信号时，上述信号就成为

$$\{2,1,0,1,0,2\}$$

可以看出，这时无法描述 $n<0$ 的项。为此，可以采用“坐标平移”的方法。例如，在这个例子中，令 $n+2=p$，则 $n=-2$ 时，$p=0$；于是，以 p 为坐标时，上面的信号为

$$\{1,2,2,1,0,1,0,2\}$$

此外，还可以使用前面图 1.1 和图 1.2 所示的图形方法描述数字信号。

3. 能量信号与功率信号

在处理随机信号以及对确定性信号进行一些特殊处理时，往往须要用“能量”或“功率”描述。能量或功率是信号的行为特征之一。从物理学角度看，信号的能量或功率也是信号处理技术中补充必要限制条件和方程的一个重要手段。

能量或功率描述，是对信号的另一种描述方法。

(1) 能量信号的定义

任意一个连续时间信号 $x(t)$ 的能量 E 为

$$E=\int_{-\infty}^{\infty}|x(t)|^2\mathrm{d}t \tag{1.1}$$

可以看出，E 实际上也是一个信号。

这种能量的定义，表示了信号自身的一种特性。

由于 E 只是考虑了信号自身绝对值，因此叫做 $x(t)$ 的归一化能量。

(2) 功率信号的定义

从物理学可以知道，单位时间内的能量就叫做功率。因此，对于信号来说，功率就是能量的时间平均值。

在求能量时间平均值时，应注意区分周期信号和非周期信号。

对于周期信号，其平均功率 P 为

$$P=\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}|x(t)|^2\mathrm{d}t \tag{1.2}$$

对于非周期信号，平均功率 P 为

$$P=\lim_{T\to\infty}\frac{1}{T}\int_{-T/2}^{T/2}|x(t)|^2\mathrm{d}t \tag{1.3}$$

与能量信号同理，上面这两个平均功率又叫做归一化平均功率。

同样，对于任意的离散时间信号 $x[n]$，归一化能量 E 定义为

$$E=\sum_{n=-\infty}^{\infty}|x[n]|^2 \tag{1.4}$$

如果周期数字信号以 $2N$ 为周期，则其归一化平均功率 P 定义为

$$P = \frac{1}{2N+1}\sum_{n=-N}^{N} | x[n] |^2 \tag{1.5}$$

非周期数字信号的归一化平均功率 P 定义为

$$P = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{2N+1}\sum_{n=-N}^{N} | x[n] |^2 \tag{1.6}$$

通过以上的讨论和定义可知：

1）如果信号是非周期，则计算的是能量，叫做能量信号；

2）如果一个周期信号在每个周期内的能量是有限的，则该周期信号是功率信号，并且求这种信号的平均功率只须要通过一个周期来计算；

3）周期信号可以被描述为功率信号。

例 1.1.5　声音开关可以利用声音的能量确定电路的工作状态，这时就须要确定从传感器接收到的信号的能量。试分析信号能量的简单测试电路。

解：根据式(1.2)可知，如果使用模拟电路，则需要积分电路。如果使用数字信号的处理方法，则需要对数据进行 A/D 转换后的数值积分计算(可以被看成是累加计算)。

1.1.1.4　信号的数学描述方法

信号的分类为工程系统处理信号提供了基本依据和处理分析的约束条件，在明确了信号的分类后，下一个重要任务就是建立信号的描述方法。尽管信号表示的是物理量与时间、空间或频率之间的函数关系，但当信号处理方法和分析方法不同时，会有不同的数学描述形式。

1. 实数信号与复数信号

在对信号进行分析和处理中，由于须要采用频域分析理论与技术，往往须要把一个工程实际信号用复数描述，例如电路理论中对交流电的描述。必须指出，自然界和工程实际中并不存在复数信号，复数信号只是一种对信号的描述、分析处理方法。

在进行信号分析和处理中，如果一个信号 $x(t)$ 的值为实数，则把该信号称为实数信号；如果信号 $x(t)$ 的值为复数，则把该信号称为复数信号。

复数信号一般可表示为如下形式：

$$z(t) = x(t) + \mathrm{j}y(t) \tag{1.7}$$

其中：$x(t)$ 和 $y(t)$ 是实数信号，$\mathrm{j}^2 = -1$。式(1.7)中的 t 可以是连续变量，也可以是离散变量。

对于数字信号，也可以用复数方法描述。复数数字信号的描述为

$$z_n = x_n + \mathrm{j}y_n \tag{1.8}$$

其中：x_n 和 y_n 是实数信号，$\mathrm{j}^2 = -1$。

在数字信号处理中，频域运算的关系经常使用复数信号表示方法。

必须注意：

(1) 复数信号是为了处理方便而使用的一种信号数学描述形式，所描述的是信号幅度与相位，自然界中并不存在真正的复数信号。

(2) 使用复数描述信号，意味着所描述的信号是正弦信号。也就是说，只有正弦信号才能用复数描述。

2. 偶信号与奇信号

偶信号与奇信号是根据函数奇偶特性而提出的一种描述概念，奇偶概念可以用来设计有针对性的信号处理系统，例如对信号的特征识别等。

(1) 偶信号

如果信号 $x(t)$或 $x[n]$可以表示为

$$x(-t) = x(t)$$
$$x[-n] = x[n]$$

则称信号 $x(t)$或 $x[n]$为偶信号。

(2) 奇信号

如果信号 $x(t)$或 $x[n]$可以表示为

$$x(-t) = -x(t)$$
$$x[-n] = -x[n]$$

则称信号 $x(t)$或 $x[n]$为奇信号。

(3) 用奇偶信号概念分解信号

任意一个信号可以表示为偶信号与奇信号的和，即

$$x(t) = x_e(t) + x_o(t)$$
$$x[n] = x_e[n] + x_o[n]$$

其中：

$$x_e(t) = \frac{1}{2}\{x(t) + x(-t)\} \quad x(t) \text{ 的偶部分}$$

$$x_e[n] = \frac{1}{2}\{x[n] + x[-n]\} \quad x[n] \text{ 的偶部分}$$

$$x_o(t) = \frac{1}{2}\{x(t) - x(-t)\} \quad x(t) \text{ 的奇部分}$$

$$x_o[n] = \frac{1}{2}\{x[n] - x[-n]\} \quad x[n] \text{ 的奇部分}$$

注意，两个偶信号或两个奇信号的乘积是一个偶信号，而一个偶信号与一个奇信号的乘积是一个奇信号。

3. 周期信号与非周期信号

一个连续时间信号 $x(t)$，如果存在非零的正数 T，对于所有的 t，有

$$x(t+T) = x(t) \tag{1.9}$$

则该连续时间信号 $x(t)$可以称为周期为 T 的周期信号，如图 1.4 所示。

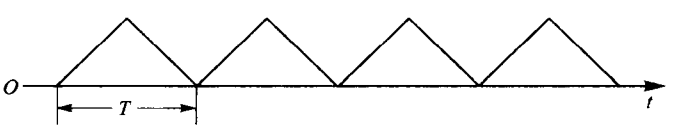


图 1.4 周期信号

注意，该定义对常数信号 $x(t)$无效(例如直流信号)。对于常数信号 $x(t)$不存在基本周期，因为 $x(t)$对任意 T 值(没有最小正值)都是周期性的。任何没有周期的连续时间信号均称为非周期信号。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com