

新
版

21世纪

高职高专系列教材

信号与系统 实用教程

◎杜庆波 主编

◎闫之烨 顾凯鸣 曹雪 等编著



提供电子教案的增值服务



21 世纪高职高专系列教材

信号与系统实用教程

杜庆波 主 编
闫之辉 顾凯鸣 曹 雪 等编著



机械工业出版社

本书从实用、够用的角度出发,介绍了信号、系统理论与网络分析及应用两大部分内容。主要介绍了信号与系统的基本概念、连续信号与系统的时域分析、离散信号的分析、双端口网络分析、网络的频率特性和滤波器等内容。

本书可作为高职高专通信、电子、自控等专业的教材;对一般电子类工程技术人员也有重要参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统实用教程/杜庆波主编. —北京:机械工业出版社, 2005.9
(21世纪高职高专系列教材)

ISBN 7-111-17118-7

I. 信... II. 杜... III. 信号系统 - 高等学校: 技术学校 - 教材
IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 089750 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: 胡毓坚 责任编辑: 李馨馨 版式设计: 张世琴

责任校对: 李秋荣 封面设计: 雷明顿 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2005 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

787mm × 1092mm $1/16$ · 16 印张 · 396 千字

0 001—5 000 册

定价: 23.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68326294

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专电子技术专业系列教材 编委会成员名单

主 任 曹建林

副 主 任 张中洲 张福强 祖 炬 董维佳
俞 宁 蒋蒙安 吕何新 伍湘彬
任德齐 华永平 吴元凯

委 员 (按姓氏笔画排序)

马 彪	邓 红	王树忠	王新新	尹立贤
白直灿	包中婷	冯满顺	华天京	吉雪峰
刘美玲	刘 涛	孙吉云	孙津平	朱晓红
李菊芳	邢树忠	陈子聪	杨元挺	张立群
张锡平	苟爱梅	姚建永	曹 毅	崔金辉
黄永定	章大钧	彭文敏	曾日波	谭克清

秘 书 长 胡毓坚

副秘书长 戴红霞

出版说明

根据《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》中提出的高等职业院校必须把培养学生动手能力、实践能力和可持续发展能力放在突出的地位,促进学生技能的培养,以及教材内容要紧密结合生产实际,并注意及时跟踪先进技术的发展等指导精神,机械工业出版社组织全国40余所院校的骨干教师,对在2001年出版的“面向21世纪高职高专系列教材”进行了修订。

在几年的教学实践中,本系列教材获得了较高的评价。因此,在修订过程中,各编委会保持了第1版教材“定位准确、注重能力、内容创新、结构合理和叙述通俗”的编写特色。同时,针对教育部提出的高等职业教育的学制将由三年逐步过渡为两年,以及强调以能力培养为主的精神,制定出了本次教材修订的原则:跟上我国信息产业飞速发展的节拍,适应信息行业相关岗位群对第一线技术应用型操作人员能力的要求,针对两年制兼顾三年制,理论以“必须、够用”为原则,增加实训的比重,并且制作了内容丰富而且实用的电子教案,实现了教材的立体化。

针对课程的不同性质,修订过程中采取了不同的处理办法。核心基础课的教材在保持扎实的理论基础的同时,增加实训和习题;实践性较强的课程强调理论与实训紧密结合;涉及实用技术的课程则在教材中引入了最新的知识、技术、工艺和方法。此外,在修订过程中,还进行了将几门课程整合在一起的尝试。所有这些都充分地体现了修订版教材求真务实、循序渐进和勇于创新的精神。在修订现有教材的同时,为了顺应高职高专教学改革的不深入,以及新技术新工艺的不断涌现和发展,机械工业出版社及教材编委会在对高职高专院校的专业设置和课程设置进行了深入的研究后,还准备出版一批适应社会发展的急需教材。

信息技术以前所未有的速度飞快地向前发展,信息技术已经成为经济发展的关键手段,作为与之相关的教材要抓住发展的机遇,找准自身的定位,形成鲜明的特色,夯实人才培养的基础。为此,担任本系列教材修订任务的教师,将努力把最新的教学实践经验融于教材的编写之中,并以可贵的探索精神推进本系列教材的更新。由于高职高专教育正在不断的发展中,加之我们的水平和经验有限,在教材的编审中难免出现问题和错误,恳请使用这套教材的师生提出宝贵的意见和建议,以利我们今后不断改进,为我国的高职高专教育事业作出积极的贡献。

机械工业出版社

前 言

在信息时代的今天,计算机、通信、自动化等系统的主要任务是对提取的信号进行变换、传输与处理,从而实现其特定的功能。信号是信息的载体,系统是信息处理的手段。信号分析与处理的理论正受到越来越多的关注。本课程是通信技术、无线电技术和自控技术等专业必修的主干基础课之一。

本书是作者针对高等职业教育的特点,结合多年的实践经验编写的一部适用于高职教育相关专业的教材。本教材立足于信号与系统的基本概念和原理,着重强调其物理概念和工程概念,在教材编排上具有重基础、精内容,先理论后实践的特点。内容包括:信号与系统、连续信号与系统的时域分析、连续信号的频域分析、离散信号与系统的分析、双端口网络分析、网络的频率特性和滤波器等。

全书共7章,前4章描述了信号与系统的基本理论,后3章则通过网络及网络函数的分析来建立实用的工程系统。这样的编排对于提高学生分析和解决问题的能力有实际意义。

为了便于自学和复习,在每章的开始都介绍了本章重点和难点。对于例题,都有详细的解答过程。

本书主要由杜庆波、闫之烨、顾凯鸣、曹雪编写,参加编写的还有姜敏敏、崔秀华、沈波。本书由南京信息职业技术学院电子信息工程系华永平副教授精心审阅。编写过程中还得到了主编所在的通信和电路教研室老师们的支持与帮助,在此表示感谢。

限于编者的水平与经验,本书中缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

目 录

出版说明

前言

第1章 信号与系统 1

1.1 信号的基本概念 1

1.2 信号的分类 2

1.2.1 确定信号与随机信号 2

1.2.2 连续时间信号与离散时间信号 2

1.2.3 周期信号与非周期信号 3

1.2.4 奇异信号 3

1.3 系统的基本知识 5

1.3.1 系统的概念及分类 5

1.3.2 系统的模拟、运算及连接 9

1.4 信号与系统分析概要 10

1.4.1 信号分析 10

1.4.2 系统分析 11

1.5 习题 11

第2章 信号与系统的时域分析 13

2.1 信号的描述 13

2.1.1 典型信号 13

2.1.2 奇异信号 15

2.2 信号的时域运算与波形变换 22

2.2.1 信号的基本运算 22

2.2.2 信号的波形变换 23

2.3 信号的时域分解 26

2.3.1 信号的直流、交流分解 26

2.3.2 信号的奇分量与偶分量 26

2.3.3 信号的脉冲分解 27

2.3.4 信号的实部分量与虚部分量 28

2.4 系统的微分方程及响应 29

2.4.1 系统的微分方程 29

2.4.2 零输入响应与零状态响应 30

2.4.3 一阶系统的零状态响应 33

2.5 连续时间系统的时域分析 35

2.5.1 连续时间系统的描述及响应 35

2.5.2 冲激响应 35

2.5.3 阶跃响应 37

2.5.4 卷积积分 38

2.6 习题 48

第3章 连续信号的频域分析 54

3.1 周期性信号的数学分析方法 54

3.1.1 正交函数集 54

3.1.2 周期信号的三角形式傅里叶级数 55

3.1.3 周期信号的复指数形式傅里叶级数 58

3.2 周期信号的频谱及特点 59

3.2.1 周期信号的频谱及特点 59

3.2.2 周期矩形脉冲信号的频谱 60

3.3 非周期信号的频谱及特点 63

3.3.1 非周期信号的傅里叶变换 63

3.3.2 常用非周期信号的频谱 64

3.3.3 傅里叶变换的性质及应用 69

3.4 取样信号与取样定理 81

3.4.1 取样信号 81

3.4.2 取样定理 83

3.5 习题 87

第4章 离散信号和系统分析 92

4.1 离散时间信号 92

4.1.1 离散时间信号 92

4.1.2 基本离散信号 93

4.1.3 序列的运算 95

4.2 离散系统时域分析 104

4.2.1 离散系统的描述 104

4.2.2 差分方程的解 107

4.2.3 离散系统的单位响应 107

4.2.4 离散系统的零输入响应 111

4.2.5 离散系统的零状态响应 112

4.2.6 离散系统的时域分析 114

4.3 离散时间信号的频域分析 117

4.3.1 序列傅里叶变换 117

4.3.2 序列傅里叶变换的性质 118

4.3.3 周期序列傅里叶级数及傅里叶

变换表示式	122	6.2 串联单调谐网络	185
4.3.4 时域离散信号的傅里叶变换 与模拟信号傅里叶变换之间的关 系	126	6.2.1 串联谐振	186
4.4 Z 变换及离散系统的变换域 分析	128	6.2.2 频率特性	191
4.4.1 Z 变换	128	6.2.3 通频带	194
4.4.2 Z 变换的性质	129	6.3 并联单调谐网络	196
4.4.3 差分方程的变换域分析	131	6.3.1 并联谐振	196
4.4.4 系统函数	136	6.3.2 频率特性	199
4.5 习题	138	6.3.3 通频带	202
第 5 章 双端口网络分析	143	6.4 双电感与双电容并联单调谐 网络	206
5.1 双端口网络的参数与方程	143	6.4.1 并联谐振	206
5.1.1 Z 方程与 Z 参数	144	6.4.2 接入系数与等效电路	210
5.1.2 Y 方程与 Y 参数	145	6.5 习题	214
5.1.3 A 方程与 A 参数	147	第 7 章 滤波器	220
5.1.4 H 方程与 H 参数	148	7.1 滤波器的基本知识	220
5.2 双端口网络的联接	150	7.1.1 滤波器的分类	221
5.2.1 串联	151	7.1.2 理想滤波器的幅频特性	221
5.2.2 并联	151	7.1.3 实际滤波器的幅频特性	222
5.2.3 级联	152	7.1.4 滤波器的传递函数	223
5.2.4 双端口网络联接有效性检 验	153	7.1.5 网络函数的归一化	223
5.3 双端口网络的等效	156	7.1.6 几种常见的模拟滤波器	224
5.3.1 双端口网络的 Z 参数等效 电路	156	7.2 信号通过线性系统不失真的 条件	225
5.3.2 双端口网络的 Y 参数等效 电路	158	7.3 理想低通滤波器的频率响应	226
5.4 双端口网络的网络函数	159	7.3.1 冲激响应	227
5.4.1 双端口网络的策动函数	160	7.3.2 阶跃响应	229
5.4.2 传输函数	162	7.4 巴特沃兹低通滤波器	231
5.5 双端口网络的实验参数与 影像参数	164	7.4.1 巴特沃兹低通滤波器的幅频 特性	231
5.5.1 双端口网络的实验参数	164	7.4.2 巴特沃兹滤波器的衰减函数	232
5.5.2 双端口网络的影像参数	166	7.4.3 由频域指标求所需巴特沃兹滤 波器的阶数	233
5.5.3 匹配级联网络	168	7.4.4 巴特沃兹滤波器的传递函数 与极点分布	234
5.6 习题	171	7.5 切比雪夫滤波器	237
第 6 章 网络的频率特性	178	7.5.1 切比雪夫多项式	237
6.1 一阶网络的频率特性	178	7.5.2 切比雪夫多项式的幅频特性	238
6.1.1 一阶低通网络	178	7.5.3 切比雪夫多项式的衰减函数	239
6.1.2 一阶高通网络	182	7.5.4 阶数的确定	239
		7.5.5 切比雪夫滤波器的传递函数 与极点分布	239

7.6 数字滤波器基础	242	方法	244
7.6.1 数字滤波器的分类	242	7.7 习题	245
7.6.2 数字滤波器的基本结构	244	参考文献	247
7.6.3 数字滤波器的一般分析、设计			

第 1 章 信号与系统

本章要点

- 信号的基本概念及相关参数
- 系统的基本概念及分类
- 线性系统的定义、性质和判断方法
- 信号与系统分析的内容

1.1 信号的基本概念

人类的社会活动离不开信息的传递，早在公元前 700 多年前，我们的祖先就知道利用烽火传递警报，用击鼓鸣金传达前进或撤退的命令。到了近代，人类社会进入到信息时代，人们可以随时从各种媒体获得各种各样的信息，这些信息日益深入地影响着人们的日常生活和活动。那么，信息究竟是什么呢？控制论的创始人维纳认为，信息是人和物体与外部世界交换内容的名称，“内容”是事物的原形，“交换”即信息载体将事物原形映射到人或其他物体的感觉器官，人们把这种映射的结果认为成所获得的“信息”。通俗地说，“信息”是指人们得到的“消息”，即原来不知道的知识。实际上，不仅人类能接受信息，其他生物也能接受信息，非生物也都受到信息的影响，只是在不同领域中，通常不称其为信息，而是称为刺激、激励或影响因素等。

信息是丰富多彩的，人们互相问候、发布新闻、广播图像音频，这些活动都传递了某种信息。而信息的具体物理形态也是千差万别的，例如：语声信息（话音或音乐）是以声压变化表示的；视觉信息是以亮度或色彩变化表示的；文字和数据信息是以字符串表示的；影响物体运动的信息是由作用于物体上的外力表示的；影响经济运行的信息则表现为投资及各个产业的统计数据。通常人们把信息的具体物理表现形式称为信号（signal），或者说，信号是传递某种信息的物理量。表现各种不同信息的信号都有一个共同点，即信号是一个或多个独立变量的函数，它一般都包含了某个或某些现象性质的信息。

信号的物理形态的不同并不影响它们所包含的信息内容，且不同物理形态的信号之间可以相互转换。例如，以声压变化表示的语声信号可以转换成以电压或电流变化表示的语声信号，甚至可以转换为一组数据表示的语声信号，即数字语声。它们仅在物理形态上不一样，但都包含了同样的语声信息。在信号的众多表现形式中，电信号因其特殊的优点被广泛应用。例如，电信号可以迅速远距离传输，并且能十分方便地被加工变换。由于电信号处理起来比较方便，在实际工程中通常把非电信号转化为电信号进行传输。基于电信号的普遍性和重要性，本书讨论的内容仅限于单一变量的电信号。

1.2 信号的分类

1.2.1 确定信号与随机信号

描述一个信号的基本方法就是写出它的数学表达式，表达式是一个时间的函数。为了方便讨论，我们把信号和函数两个名词通用，用来表达同一种事物。可以从不同的角度对信号进行分类。

按时间函数的确定性划分，信号可以分为确定信号和随机信号两类。

确定信号是指能够用确定的时间函数表达的信号。对于指定的某一时刻，可以确定一个相应的函数值。确定信号也称为规则信号，在其定义域内任意时刻都有确定的函数值。例如我们常用的正弦信号、余弦信号以及其他形状的周期信号等。

但实际中我们传输的信号由于干扰等因素，几乎都是不可预知的，这些信号不是一个确定的时间函数，我们不能用一个十分确切的时间表达式来描述它，只能通过概率统计的方法来对它进行描述，这种信号我们称之为随机信号。在通信系统中，信道的噪声就是典型的随机信号。实际的信号在传输过程中因受到各种干扰，都被理解为随机信号，理想的确定信号是不存在的。图 1-1a、b 分别表示确定信号和随机信号的波形。

确定信号与随机信号并不是彼此孤立存在的，它们之间有着十分密切的联系，在一定的条件下，随机信号可以表现出某些确定性，我们可以近似地将其作为确定信号来分析，简化分析过程，便于应用。因此，一般应先研究确定信号，然后在此基础上再根据随机信号的统计规律进一步研究随机信号的特性。本书只讨论确定信号的分析。

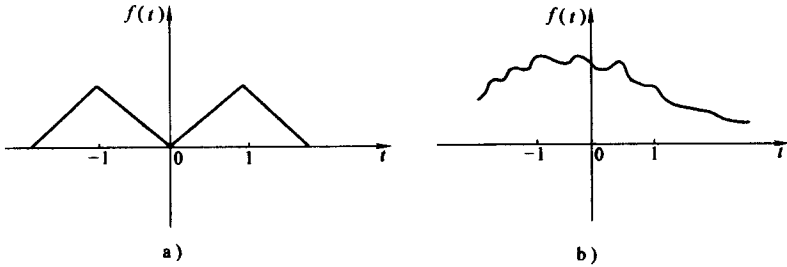


图 1-1 确定信号与随机信号的波形

1.2.2 连续时间信号与离散时间信号

信号按自变量的改变或取值方式的不同，可分成两种基本类型：连续时间信号和离散时间信号，简称连续信号和离散信号。

连续时间信号是指在信号的定义域内，任意时刻除若干个不连续点外都有确定的函数值的信号，通常用 $f(t)$ 表示。连续时间信号最明显的特点是自变量除有限个间断点外，其余是连续可变的。例如，正弦信号或图 1-2 所示的信号均为连续时间信号。连续信号的幅值可以是连续的，也可以是离散的（只取某些规定值）。

离散信号是指只在某些不连续规定的时刻有定义，而在其他时刻没有定义的信号。本书

讨论均匀间隔的离散时间信号，通常以 $f[k]$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 表示。离散时间信号最明显的特点是其定义域为离散的時刻点，如按月计利的储蓄存款就是离散信号。离散信号是定义在离散的時刻点上的，而在这些离散的時刻点之外无定义，不要误以为在这些時刻点之外定义为零。同样，离散时间信号的幅值可以是连续的，也可以是离散的，图 1-3 所示信号为幅值连续的离散时间信号。

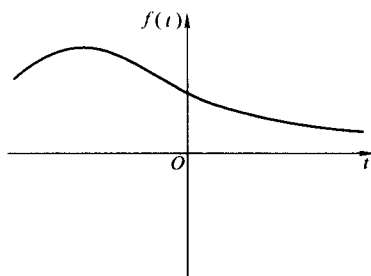


图 1-2 连续时间信号

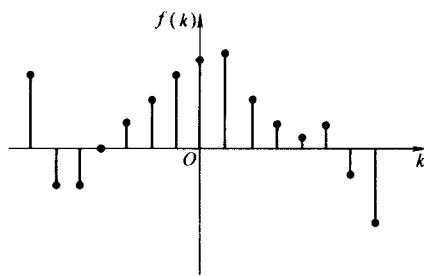


图 1-3 离散时间信号

1.2.3 周期信号与非周期信号

按信号的周期性划分，确定信号可以分为周期信号和非周期信号。

周期信号是指依一定时间间隔周而复始，且无始无终的信号，表达式可写为

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

满足此关系式的 T 的最小值称为信号的周期。只要给出此信号在任一周期内的变化过程，便可确知它在任一时刻的数值。周期信号有两个基本要素：一是重复性；二是无限性。当然，在实际工程应用中，常把在较长一段时间内重复的信号近似为周期信号来处理。

非周期信号在时间上不具有周而复始的特性。非周期信号也可以看作为周期为无穷大的周期信号。

1.2.4 奇异信号

如果信号本身有不连续点，或者其导数与积分有不连续点，这种信号称之为奇异信号。冲激信号与阶跃信号是两种最常用的奇异信号，我们将在后续章节中重点介绍。实际工程中的信号可能比较复杂，是一种或几种信号的叠加，在对这类信号进行分析时，我们无法把它归属为某种具体的信号类型，但有时可以将某种条件理想化，把这些复杂的信号用一些简单的典型信号来表示。在以后的学习中，我们可以了解到奇异信号的特性及在信号与系统分析中所起的重要作用。

除上述信号划分方式之外，还可将信号分为能量有限信号与功率有限信号，以及调制信号、载波信号和已调制信号等，在本书中我们将根据需要陆续介绍。

通过以前的学习，我们了解到信号的很多参数，我们可以定量地计算这些参数，也可以定性直观地描述这些参数。这些知识是我们分析信号和系统的基础。

1. 信号的周期

信号可以分为周期信号和非周期信号，在前面已经介绍了周期信号和非周期信号的辨别方法，即通过公式来求出一个周期信号的周期。但是这种方法一般来说是十分繁琐的，所以

对一些工程上常用的信号,例如正弦信号、余弦信号等可使用简便的方法来求取它们的周期。例如:一个幅值为 A_0 的正弦信号 $f(t) = A_0 \sin \omega t$, $f(t)$ 的周期为 $2\pi/\omega$ 。同理,对于余弦信号,它的周期也是 $2\pi/\omega$ 。实际的信号往往是两个或多个信号的叠加,判断这类包括多个不同频率分量的复合信号是否为周期信号时,需要考察各信号分量的周期是否存在公倍数,若存在,则该复合信号的周期即为此公倍数;若不存在,则该复合信号为非周期信号。

【例 1-1】 求下列信号的周期。

$$(1) f(t) = 2\sin \pi t + 3\cos 2t$$

$$(2) f(t) = \sin 2\pi t + 2\sin \frac{\pi}{2} t$$

解: (1) 此信号由两个信号合成,则 $T_1 = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\pi} = 2$; $T_2 = \frac{2\pi}{\omega} = \pi$, 由于 T_1 和 T_2 之间不存在最小公倍数,所以此和信号周期不存在。

(2) 此信号也是由两个信号合成, $T_1 = \frac{2\pi}{2\pi} = 1$, $T_2 = \frac{2\pi}{\pi/2} = 4$, T_1 与 T_2 的最小公倍数为 4, 所以此和信号的周期为 4。

有一些信号的函数表达式看起来比较复杂,我们不能直接得到周期,计算这种函数周期需要进行一定的数学公式变换。

【例 1-2】 求下列信号的周期。

$$(1) e^{j10t} \quad (2) [5\sin(8t)]^2$$

$$(3) x(t) = (a\sin 3t + b\sin 5t)^2$$

解: (1) 由欧拉公式 $e^{j\omega t} = \cos(\omega t) + j\sin(\omega t)$

$$\text{即} \quad e^{j10t} = \cos(10t) + j\sin(10t)$$

结合以上例题,得周期 $T = \frac{2\pi}{10} = \frac{\pi}{5}$

$$(2) \text{ 因为 } [5\sin(8t)]^2 = 25 \times \frac{1 - \cos(16t)}{2} = \frac{25}{2} - \frac{25}{2} \cos(16t)$$

$$\text{所以} \quad T = \frac{2\pi}{16} = \frac{\pi}{8}$$

$$\begin{aligned} (3) \text{ 展开 } x(t) &= (a\sin 3t + b\sin 5t)^2 = a^2 \sin^2 3t + b^2 \sin^2 5t + 2ab\sin 3t \sin 5t \\ &= \frac{1}{2} a^2 (1 - \cos 6t) + \frac{1}{2} b^2 (1 - \cos 10t) - ab(\cos 8t - \cos 2t) \end{aligned}$$

设 $x(t)$ 的周期为 T , 则有

$$\begin{aligned} x(t+T) &= \frac{a^2}{2} [1 - \cos 6(t+T)] + \frac{b^2}{2} [1 - \cos(10t+T)] \\ &\quad - ab\cos 8(t+T) + ab\cos 2(t+T) \end{aligned}$$

从等式右边第 1 项中得 $T = \frac{2\pi}{6} = \frac{\pi}{3}$, 第 2 项中得 $T = \frac{2\pi}{10} = \frac{\pi}{5}$, 第 3 项中得 $T = \frac{2\pi}{8} = \frac{\pi}{4}$, 第 4

项中得 $T = \frac{2\pi}{2} = \pi$ 。因此 π 为该信号的最小公共周期值, 即 $x(t)$ 的周期 $T = \pi$ 。

2. 信号的波形

信号的波形可以更直观地反应出信号各参量的变化关系, 能绘制信号本身的波形及信号

的频谱图是信号与系统课程的重要要求。由已知信号画出信号的波形，可以参照传统的数学方法，即：给出定义域内的变量，求出对应的函数值，把各函数值用平滑的曲线连接起来。这种画波形的方法很准确，但过程繁琐，尤其对复杂的信号更是如此。在信号与系统的学习过程中，我们将利用一些特殊信号，如阶跃信号等，来学习绘制信号波形的简单方法。下面例题的目的是使大家掌握简单信号波形的绘制方法，并熟悉几种常见信号的波形。

【例 1-3】 粗略绘出下列各函数式表示的信号波形。

(1) $f(t) = 2 - e^{-t}, t > 0$

(2) $f(t) = e^k, 0 \leq k \leq 3$

(3) $f(t) = (-1)^{-k}, 0 \leq k < 6$

(4) $f(t) = \frac{\sin t}{t}, -\infty < t < +\infty$

解：各信号的参考波形如图 1-4 所示。

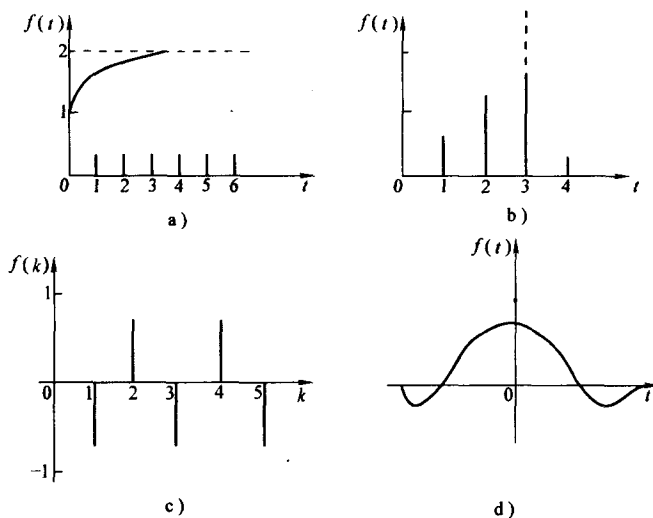


图 1-4 各信号的参考波形

a) 题(1)的参考波形 b) 题(2)的参考波形
c) 题(3)的参考波形 d) 题(4)的参考波形

1.3 系统的基本知识

1.3.1 系统的概念及分类

各种变化的信号从来就不是孤立存在的，而总是在一定的系统中传递、作用和变换。系统 (system) 这一术语被应用于众多的工程领域、甚至社会经济和文化领域，例如通信系统，导航、定位和跟踪（雷达）系统，自动化系统，计算机系统，互联网 (Internet)，信息管理系统，电力系统和电力网，交通运输系统，控制系统，机械系统，航空和宇航系统，遥测和遥感系统，软件系统，生态系统，神经系统，视觉和听觉系统，消化系统，血液循环系统，气象或天气系统，水文系统，经济预测（系统），决策系统，出版系统等。

广义地讲，系统就是由若干个相互关联又相互作用的事物组合而成的、具有某种特定功能的整体。例如：电路就是由电阻、电感、电容、开关和连接导线（有时还包括电源）组成

的一种系统，在外加电压或电流的激励下，电路内部的各个支路电流和所有元件两端的电压都将发生变化，这些电压或电流的变化称为电路的响应，在某种激励下电路所具有的响应，就是该电路系统的特定功能；电力网是十分复杂的电路系统，它由多个发电机、各种变压器、不同等级的输电线路和众多的用电负载组成，其特定功能是进行能量的输送和分配；一个发射机、传输媒质（信道）和一个接收机可以组成一个最简单的通信系统。复杂的通信系统（如通信网）则由多个收发终端、复用设备、交换机、多种传输媒质（信道）以及负责通信网运行管理的计算机（硬件和软件）等组成，它的特定功能是在任意两个终端之间进行通信，即相互传递包含信息的信号。

实际上，系统的各个不同组成部分本身就是一个系统，它们也都由元件、器件和部件组成，并有各自特定的功能。例如：相互关联和相互作用的若干物体可以构成一个动力学系统（机械系统），作用于系统中各个物体上的外力（激励）将使其中的物体发生运动，物体运动的速度或加速度就是系统的响应；自动诊断心电图的计算机程序也可看作一个系统，给其输入一组心电图数据，它就能给出诸如心跳串等参数估值；某一地区的各个产业部门及其市场、金融机构和相应的管理部门等构成了该地区的经济系统，诸如市场需求、投资、各种经济政策、各个产业的产出等各种因素，将影响经济系统的运行；另外，研究经济系统的运行规律，就可以在一些诸如作物欠收、新兴产业、金融风暴等潜在的、不能事先预见的情况出现时，更好地预测它们对本地区经济造成的影响，这就是经济预测系统；天气预报是与经济预测系统类似的系统。

系统可以小到电阻细胞，甚至基本粒子，大到人体、全球通信网，乃至整个宇宙。它们可以是自然的系统，也可以是人为的系统。但是，众多领域各不相同的系统都有一个共同点，即所有的系统总是对施加于它的信号（激励、影响因素等）作出响应，产生出另外的信号。施加于它的信号称为系统的输入信号或激励，由此产生的另外的信号称为系统的输出信号或响应。系统的功能就体现为什么样的输入信号产生怎样的输出信号。

信号、网络与系统之间有着十分密切的联系。离开了信号，网络与系统将失去意义，信号作为待传输消息的表现形式，可以看作运载消息的工具，而网络与系统则是为传递信号或对信号进行加工和处理而构成的某种组合。

图 1-5 描述的是一个典型的语音通信系统。其中电话机把声音变为模拟的电信号；交换机不仅可以把模拟信号变为数字信号，还可以使该数字信号通过交换网络送至目的信道；两个光端机互为一套调制和解调设备。在整个通信系统中，各种设备相互作用，缺一不可，它们共同完成信号转化、信号传输、信号交换等功能。

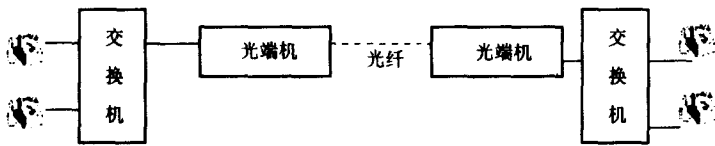


图 1-5 语音通信系统简图

系统可按多种方法进行分类。不同类型的系统其系统分析的过程是一样的，但系统的数学模型不同，因而其分析方法也就不同。在信号与系统分析中，常以系统的数学模型和基本特性分类，这样，系统可分为连续时间系统和离散时间系统；线性系统与非线性系统；时变

系统与非时变系统；因果系统与非因果系统；记忆系统与即时系统等。若系统的输入（激励）信号 $f(t)$ 和输出（响应）信号均为一个，这样的系统称为单输入-单输出系统，表示方法如图 1-6a；若系统的输入及输出信号均为多个，则称为多输入-多输出系统，表示方法如图 1-6b。尽管在实际工程中的大多数系统为多输入-多输出系统，但就方法和概念而论，单输入-单输出系统是重要的基础。本书仅讨论单输入-单输出系统。由单输入-单输出系统得到的结论，都可直接推广到多输入-多输出系统。

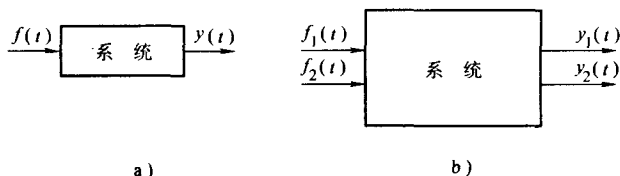


图 1-6 系统示意图

a) 单输入-单输出系统 b) 多输入-多输出系统

1. 连续时间系统和离散时间系统

如果系统的输入信号和输出信号都是连续时间信号，则系统是连续时间系统，简称连续系统；如果系统的输入信号和输出信号都是离散时间信号，则系统是离散时间系统，简称离散系统。

2. 线性系统与非线性系统

线性系统是指具有线性特性的系统，如果系统同时满足叠加性和齐次性，那么这个系统就是一个线性系统，否则就是非线性系统。一般我们论证一个系统是否线性，都要检验系统是否满足这两个特性。如果用 $f(t)$ 表示系统的输入， $y(t)$ 表示系统的输出，那么系统的线性可以这样来表达和求证：

如果 $f_1(t) \rightarrow y_1(t)$ $f_2(t) \rightarrow y_2(t)$

则叠加性表示为 $f_1(t) + f_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$

叠加性是指：如果输入 f_1 时系统的响应为 Y_1 ，输入 f_2 时系统的响应为 Y_2 ，则输入为 $f_1 + f_2$ 时系统的响应为 $Y_1 + Y_2$ 。系统的叠加性也可用图 1-7 来描述。

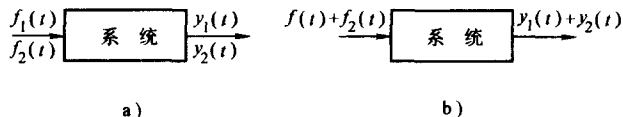


图 1-7 系统的叠加性示意图

系统的齐次性表示为

$$kf_1(t) \rightarrow ky_1(t)$$

齐次性是指：如果系统对某输入的响应为 $f(t)$ ，当输入增至 k 倍时，其响应也增至 k 倍，即： $kY(t)$ 。系统的齐次性也可用图 1-8 来描述。

将叠加性和齐次性统一写在一起，则有

$$k_1 f_1(t) + k_2 f_2(t) \rightarrow k_1 y_1(t) + k_2 y_2(t)$$

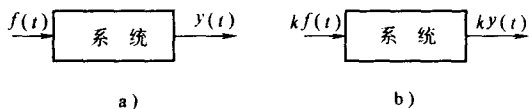


图 1-8 系统的齐次性示意图

鉴别系统是否是线性系统就可以用上面的数学模型，也可以用物理模型去判断。

【例 1-4】 在下列系统中， $e(k)$ 为激励， $y(k)$ 为响应。试判断激励与响应的关系是否为线性的。

$$y(k) = [e(k)]^2$$

解：当激励信号为 $e_1(k)$ 时，该系统的响应为 $y_1(k) = [e_1(k)]^2$

当激励信号为 $e_2(k)$ 时，该系统的响应为 $y_2(k) = [e_2(k)]^2$

当激励信号为 $[a_1 e_1(k) + a_2 e_2(k)]$ 时，该系统的响应为 $[a_1 e_1(k) + a_2 e_2(k)]^2$

显然 $[a_1 e_1(k) + a_2 e_2(k)]^2 \neq [a_1 e_1(k)]^2 + [a_2 e_2(k)]^2 = a_1 y_1(k) + a_2 y_2(k)$

根据线性系统的定义可知，该系统为非线性系统。

【例 1-5】 判断下列函数所表示的系统是否为线性系统。

$$y(t) = \int_{-\infty}^{5t} x(\tau) d\tau$$

解： $x_1(\tau) \rightarrow y_1(t) = \int_{-\infty}^{5t} x_1(\tau) d\tau$, $x_2(\tau) \rightarrow y_2(t) = \int_{-\infty}^{5t} x_2(\tau) d\tau$

$$\begin{aligned} \text{而} [a_1 x_1(\tau) + a_2 x_2(\tau)] &\rightarrow \int_{-\infty}^{5t} [a_1 x_1(\tau) + a_2 x_2(\tau)] d\tau = a_1 \int_{-\infty}^{5t} x_1(\tau) d\tau + a_2 \int_{-\infty}^{5t} x_2(\tau) d\tau \\ &= a_1 y_1(t) + a_2 y_2(t) \end{aligned}$$

所以，根据线性系统的定义，该函数所表示的系统是线性系统。

3. 时变系统与非时变系统

如果输入在时间上有一个平移，而它所对应的输出也相应地平移的话，那么这个系统就是一个非时变系统；否则就是一个时变系统。非时变系统可表示为

$$\text{如果} \quad f(t) \rightarrow y(t)$$

$$\text{那么} \quad f(t - t_0) \rightarrow y(t - t_0)$$

这样的系统就具有非时变特性。非时变特性说明了系统的特性不随时间变化而变化。严格地讲，实际中我们使用的系统都不可能是非时变系统，但若参数变换非常缓慢的话，我们近似地认为系统是非时变系统。

4. 因果系统与非因果系统

因果系统是指当且仅当输入信号激励系统时才产生输出响应的系统。因果系统在任何时刻的输出只取决于现在的输入以及过去的输入，这就是说，因果系统的输出响应不会出现在输入信号激励之前。反之，一个系统在任何时刻的输出不仅取决于现在和过去的输入，而且还与系统将来的输入有关，即不具有因果特性的系统称为非因果系统。

在实际应用中的物理系统都为因果系统，因此又称因果系统为物理可实现系统。非因果系统的概念与特性也有实际的意义，在一些以位移、距离、亮度为变量的工程系统中，以及在人口统计学、股票市场、数据处理等分析研究中有着实际的应用。

5. 记忆系统与即时系统