

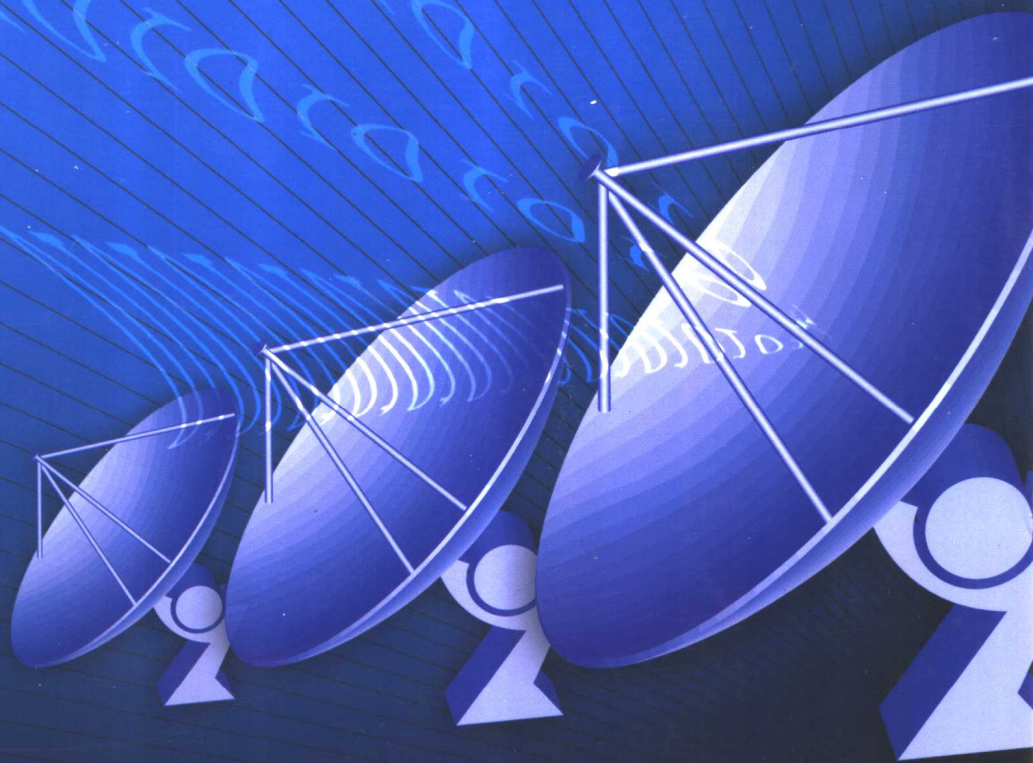


新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材

· 通信技术专业

# 信号与系统

廖继红 主编 刘俊 李新 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



中国科学技术大学  
CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

· 中国科技大学出版社 ·

# 信号与系统

第二版



中国科学技术大学出版社

ISBN 7-312-01811-1

· 新编 21 世纪高等职业教育电子信息类教材 · 通信技术专业

# 信号与系统

廖继红 主编

刘俊 李新 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书是针对高等职业教育的特点,根据教育部制定的《高职高专教育专门课课程基本要求》及高等职业教育电子信息类教材编审委员会制定的教学计划,结合多年来高职教育的实践经验编写而成的。内容包括:信号与系统、连续时间信号分析、离散时间信号分析、连续时间系统分析、离散时间系统分析及信号与系统分析的 MATLAB 实现(选学内容)。本书在结构编排上自成一体,精选了内容,加强了基础,适当淡化了理论,强调了应用。

本书可作为高职院校电子信息类相关专业“信号与系统”课程的教材,也可作为相关专业工程技术人员的自学参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

## 图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/廖继红主编. —北京:电子工业出版社, 2004.3

新编 21 世纪高等职业教育电子信息类教材·通信技术专业

ISBN 7-5053-9662-5

I. 信… II. ①廖… ②刘… ③李… 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(2004)第 008911 号

责任编辑:王沈平 特约编辑:王宝祥

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:14 字数:358.4 千字

印 次:2004 年 3 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:18.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zlls@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

## 出版说明

高等职业教育是我国高等教育的重要组成部分。其根本任务是培养和造就适应生产、建设、管理、服务第一线需要的德、智、体、美全面发展的高等技术应用型人才。近年来,高等职业教育发展迅猛,其宏观规模发生了历史性变化。为适应我国社会进步和经济发展的需要,高等职业教育的教学模式、教学方法需要不断改革,高职教材也必须与之相适应,进行重新调整与定位,突出自身的特色。为此,在国家教育部、信息产业部有关司局的支持、指导和帮助下,电子工业出版社在全国范围内筹建成立“全国高职高专教育教材建设领导小组”,下设“应用电子技术”、“机电一体化技术”、“电气自动化技术”和“通信技术”等专业的多个编委会。各专业编委会成员由电子信息战线辛勤耕耘、功绩卓著的专家、教授、高工和富有高职教学经验的一线优秀教师组成。

2002年10月,“应用电子技术”、“机电一体化技术”、“电气自动化技术”和“通信技术”等四个专业的编委会精心组织全国范围内的优秀一线教师编写了《新编21世纪高等职业教育电子信息类规划教材》60余种。这批教材的主要特点是:

1. 在编写方法上打破了以往教材过于注重“系统性”的倾向,摒弃了一些一般内容和烦琐的数学推导,采用阶跃式、有选择的编写模式,强调实践和实践属性,精炼理论,突出实用技能,内容体系更加合理;

2. 注重现实社会发展和就业需求,以培养职业岗位群的综合能力为目标,充实训练模块的内容,强化应用,有针对性地培养学生较强的职业技能;

3. 教材内容的设置有利于扩展学生的思维空间和学生的自主学习;着力于培养和提高学生的综合素质,使学生具有较强的创新能力,促进学生的个性发展;

4. 教材内容充分反映新知识、新技术、新工艺和新方法,具有超前性、先进性。

首批教材共有60余种,将于2003年8月陆续出版。所有参加教材编写的高职院校都有一个共同的愿望:希望通过教材建设领导小组、编委会和全体作者的共同努力,使这批教材在编写指导思想、编写内容和编写方法上具有新意,突出高等职业教育的特点,满足高职学生学习和就业的需要。

高等职业教育改革与教材建设是一项长期的任务,不会一蹴而就,而是要经历一个发展过程。这批高职教材的问世,还有许多不尽人意之处。随着教育的不断深化,我国经济和科学技术的不断发展,高职教材的改革与开发将长期与之相伴而行。在教育部和信息产业部的指导和帮助下,我们将一如既往地依靠本行业的专家,与科研、教学第一线的教研人员紧密联系,加强合作,与时俱进,不断开拓,逐步完善各类专业课教材、专业基础课教材、实训指导书、电子教案、电子课件及配套教材,为高等职业教育提供优质的教学资源和服务。

电子工业出版社高职高专教育教材事业部的全体成员殷切地希望全国高职高专院校的教师们能够踊跃投稿,提出选题建议,并对已出版的教材从多方面提出修改建议。除以上四个专业外,我们还设立了“计算机技术”、“电子商务”、“物流管理”、“会计类”、“金融类”、“环保类”等专业的编委会。我们衷心欢迎更多的志士仁人加入到各个编委会中来。

电子工业出版社的全体员工将竭诚为教育服务,为高等职业教育战线的广大师生服务。

全国高职高专教育教材建设领导小组  
电子工业出版社

## 参加“新编 21 世纪高等职业教育电子信息类规划教材”

### 编写的院校名单（排名不分先后）

- |              |                |
|--------------|----------------|
| 桂林工学院南宁分院    | 广州大学科技贸易技术学院   |
| 江西信息应用职业技术学院 | 湖北孝感职业技术学院     |
| 江西蓝天职业技术学院   | 江西工业工程职业技术学院   |
| 吉林电子信息职业技术学院 | 四川工程职业技术学院     |
| 保定职业技术学院     | 广东轻工职业技术学院     |
| 安徽职业技术学院     | 西安理工大学         |
| 杭州中策职业学校     | 辽宁大学高职学院       |
| 黄石高等专科学校     | 天津职业大学         |
| 天津职业技术师范学院   | 天津大学机械电子学院     |
| 福建工程学院       | 九江职业技术学院       |
| 湖北汽车工业学院     | 包头职业技术学院       |
| 广州铁路职业技术学院   | 北京轻工职业技术学院     |
| 台州职业技术学院     | 黄冈职业技术学院       |
| 重庆工业高等专科学校   | 郑州工业高等专科学校     |
| 济宁职业技术学院     | 泉州黎明职业大学       |
| 四川工商职业技术学院   | 浙江财经学院信息学院     |
| 吉林交通职业技术学院   | 南京理工大学高等职业技术学院 |
| 连云港职业技术学院    | 南京金陵科技学院       |
| 天津滨海职业技术学院   | 无锡职业技术学院       |
| 杭州职业技术学院     | 西安科技学院         |
| 重庆职业技术学院     | 西安电子科技大学       |
| 重庆工业职业技术学院   | 河北化工医药职业技术学院   |

石家庄信息工程职业学院

三峡大学职业技术学院

桂林电子工业学院高职学院

桂林工学院

南京化工职业技术学院

湛江海洋大学海滨学院

江西工业职业技术学院

江西渝州科技职业学院

柳州职业技术学院

邢台职业技术学院

漯河职业技术学院

太原电力高等专科学校

苏州工商职业技术学院

金华职业技术学院

河南职业技术师范学院

新乡师范高等专科学校

绵阳职业技术学院

成都电子机械高等专科学校

河北师范大学职业技术学院

常州轻工职业技术学院

常州机电职业技术学院

无锡商业职业技术学院

河北工业职业技术学院

天津中德职业技术学院

安徽电子信息职业技术学院

浙江工商职业技术学院

河南机电高等专科学校

深圳信息职业技术学院

河北工业职业技术学院

湖南信息职业技术学院

江西交通职业技术学院

沈阳电力高等专科学校

温州职业技术学院

温州大学

广东肇庆学院

湖南铁道职业技术学院

宁波高等专科学校

南京工业职业技术学院

浙江水利水电专科学校

成都航空职业技术学院

吉林工业职业技术学院

上海新侨职业技术学院

天津渤海职业技术学院

驻马店师范专科学校

郑州华信职业技术学院

浙江交通职业技术学院

# 前 言

信息时代的基本特征是在生产、生活等社会活动中，人们离不开对信息的获取、处理、传输和识别。信息的载体是信号，系统是对信号进行综合处理的有机总体，它可实现人们对信息的需求。

“信号与系统”这门课程的任务就是研究信号与系统理论的基本概念和基本分析方法，学习怎样建立信号与系统的数学模型，通过数学的方法进行系统响应的求解，并将数学解和物理意义进行合理地联系。它是学习信息类相关专业的必修主干课程之一。

本课程是信息类学科的专业基础课，首先，学习这门课程必须具有一定的高等数学基础和电路分析基础；此外，学好这门课程是学习通信原理、控制理论、数字信号处理、计算机网络等后续专业课程的前提。

本书针对高等职业教育的特点，根据教育部制定的《高职高专教育专门课课程基本要求》及高等职业教育电子信息类教材编审委员会制定的教学计划，结合多年来高职教育的实践经验编写而成。内容包括：信号与系统、连续时间信号分析、离散时间信号分析、连续时间系统分析、离散时间系统分析及信号与系统分析的 MATLAB 实现（选学内容）。本书在结构编排上自成一体，精选了内容，加强了基础，适当淡化了理论，强调了应用。

本书可作为高职电子信息类相关专业“信号与系统”课程的教材，也可作为相关专业工程技术人员自学参考书。

本书由廖继红担任主编和统稿工作。第 1 章和第 3 章由廖继红编写，第 2 章、第 4 章和第 5 章由刘俊编写，第 6 章由李新编写。参加了本书编写大纲讨论与部分编写工作的还有廖继旺、刘慧。

限于编者水平与经验不足，书中缺点和错误难免，恳请批评指正。

编 者

2003 年 11 月





## Contents

<b>第 1 章 信号与系统概述</b> .....	(1)
1.1 信号 .....	(1)
1.1.1 信号的描述及分类 .....	(1)
1.1.2 信号的基本运算与变换 .....	(4)
1.2 系统 .....	(7)
1.2.1 系统的数学模型及其分类 .....	(7)
1.2.2 系统的模拟 .....	(11)
1.3 信号与系统分析概述 .....	(13)
本章小结 .....	(14)
思考题和习题 1 .....	(15)
<b>第 2 章 连续时间信号分析</b> .....	(17)
2.1 连续时间信号 .....	(17)
2.1.1 常用的连续时间信号 .....	(17)
2.1.2 奇异信号 .....	(19)
2.2 卷积积分 .....	(22)
2.2.1 信号的时域分解 .....	(23)
2.2.2 卷积积分性质 .....	(24)
2.2.3 卷积积分的运算 .....	(25)
2.3 信号的正交分解与傅里叶级数 .....	(29)
2.3.1 信号的正交分解 .....	(29)
2.3.2 傅里叶级数 .....	(30)
2.3.3 周期信号的傅里叶级数正交分解 .....	(33)
2.4 信号的频谱分析 .....	(35)
2.4.1 信号的频谱 .....	(35)
2.4.2 周期信号的频谱分析 .....	(35)
2.4.3 非周期信号的频谱分析 .....	(38)
2.4.4 典型信号的频谱 .....	(39)
2.5 傅里叶变换 .....	(45)
2.5.1 奇异信号的傅里叶变换 .....	(45)
2.5.2 傅里叶变换的基本性质 .....	(45)
2.5.3 卷积定理 .....	(51)

B6705/904



2.6 拉普拉斯变换	(53)
2.6.1 从傅里叶变换到拉普拉斯变换	(53)
2.6.2 拉普拉斯变换的收敛域	(53)
2.6.3 常用信号的拉普拉斯变换	(56)
2.6.4 拉普拉斯变换的基本性质	(57)
2.6.5 卷积定理	(62)
2.7 拉普拉斯逆变换	(62)
2.7.1 部分分式展开法	(62)
2.7.2 围线积分法	(68)
本章小结	(69)
思考题和习题 2	(69)
<b>第 3 章 离散时间信号分析</b>	<b>(73)</b>
3.1 连续时间信号离散化	(73)
3.1.1 信号的取样	(73)
3.1.2 取样定理	(73)
3.2 离散时间信号的表示	(75)
3.2.1 序列	(75)
3.2.2 序列的运算	(75)
3.2.3 常用的典型序列	(78)
3.3 Z 变换	(80)
3.3.1 Z 变换的收敛域	(80)
3.3.2 Z 变换与拉普拉斯变换的关系	(81)
3.3.3 常用序列的 Z 变换	(82)
3.3.4 Z 变换的性质	(84)
3.4 Z 逆变换	(88)
3.4.1 围线积分法(留数法)	(88)
3.4.2 部分分式展开法	(89)
3.4.3 幂级数展开法(长除法)	(90)
本章小结	(90)
思考题和习题 3	(91)
<b>第 4 章 连续时间系统分析</b>	<b>(93)</b>
4.1 线性连续系统的描述及响应	(93)
4.1.1 系统的描述	(93)
4.1.2 微分方程的经典解	(95)
4.1.3 零输入响应和零状态响应	(99)
4.1.4 冲激响应和阶跃响应	(101)
4.1.5 零状态响应的卷积积分求解法	(106)
4.2 线性非时变系统的频域分析	(107)



4.2.1	系统的频率响应特性概念	(107)
4.2.2	无失真传输系统的频域分析	(109)
4.2.3	理想低通滤波器的频域分析	(110)
4.3	线性连续系统的复频域分析	(112)
4.3.1	微分方程的拉普拉斯变换求解法	(112)
4.3.2	电路的 $s$ 域模型	(114)
4.3.3	系统函数与 $s$ 域分析法	(119)
4.3.4	系统函数的零、极点与系统特性	(120)
4.3.5	系统的稳定性判断	(123)
4.3.6	信号流程图及系统的模拟	(124)
	本章小结	(126)
	思考题和习题 4	(127)
<b>第 5 章 离散时间系统分析</b>		<b>(129)</b>
5.1	离散时间系统的描述及其响应	(129)
5.1.1	离散时间系统的描述	(130)
5.1.2	线性常系数差分方程的求解方法	(133)
5.1.3	线性常系数差分方程的经典解	(134)
5.1.4	零输入响应及零状态响应	(138)
5.2	卷积和	(140)
5.2.1	卷积和的概念	(140)
5.2.2	单位响应	(142)
5.2.3	卷积和的运算	(143)
5.3	离散系统的 $z$ 域分析	(146)
5.3.1	差分方程的 $Z$ 变换求解方法	(146)
5.3.2	单位响应和系统函数	(148)
5.3.3	系统函数的零、极点与系统特性	(151)
5.3.4	数字滤波器	(153)
	本章小结	(155)
	思考题和习题 5	(155)
<b>第 6 章 信号与系统分析的 MATLAB 实现</b>		<b>(157)</b>
6.1	MATLAB 使用简介	(157)
6.1.1	MATLAB 的安装	(157)
6.1.2	MATLAB 的工作环境及简单使用	(161)
6.2	信号时域分析的 MATLAB 实现	(167)
6.2.1	信号的 MATLAB 表示	(167)
6.2.2	信号的时域运算与变换	(172)
6.3	信号频域分析的 MATLAB 实现	(176)
6.3.1	频谱分析的原理与方法	(176)

6.3.2 连续信号的频谱分析·····	(178)
6.3.3 离散信号的频谱分析·····	(181)
6.4 线性系统时域分析的 MATLAB 实现 ·····	(187)
6.4.1 连续系统时域分析的 MATLAB 实现 ·····	(187)
6.4.2 离散系统时域分析的 MATLAB 实现 ·····	(194)
6.5 线性系统变换域分析的 MATLAB 实现 ·····	(198)
6.5.1 连续系统的变换域分析·····	(199)
6.5.2 离散系统的变换域分析·····	(206)
本章小结 ·····	(211)
思考题和习题 6 ·····	(211)
<b>参考文献·····</b>	<b>(214)</b>

# 第1章 信号与系统概述



## 内容提要

本章介绍信号的基本概念及其分类、系统的基本概念及其分类，并在此基础上讨论了信号与系统的基本表示方法、基本分析方法和主要任务。

通过本章的学习，读者能够建立信号与系统的总体概念，为后续章节的学习奠定基础。

信号与系统的概念出现在极为广泛的各种领域中，和信号与系统概念有关的分析思想与分析方法在很多科学与技术领域起着重要的作用。从广义上讲，信号是信息的载体，而系统则是信号传输与处理（亦即信息传输与处理）的过程与手段。信息技术领域研究的主要内容是信息的获取、存储、传递、处理、识别与综合，其中信号与系统的概念与分析方法起着尤为重要的作用。随着信息技术的迅猛发展与日益广泛的应用，信号与系统分析的理论与技术也在不断地演变、发展与完善。

本章讨论信号与系统的基本概念和基本分析方法，着重引入信号与系统的数学描述及表示方法，为后续章节的学习奠定基础。

## 1.1 信号

信号是反映信息或消息的物理量。信号可以描述范围极为广泛的物理现象，如声、光、色、电、力、位移、温度、湿度、速度、加速度等。这些信号的性质各不相同，有些是相互关联的，有些是相互独立的。虽然信号的表现形式多种多样，但是，它们都有一个共同点，即信号所包含的信息总是寄寓于某种变化形式的波形之中。例如，实际情况下，许多物理量值都随时间而变化，若以时间为横坐标，物理量值为纵坐标，便可以得到一种随时间变化的图形，这就是我们所说的信号波形。

早期人们研究信号的目的是为了传递消息，为了使消息传送得更远、更快，人们找到了使用电信号传送消息的方法。所谓电信号，通常指随时间而变化的电压或电流，也可以是电荷、磁通或电磁波等。由于电信号使用极为广泛，而且它与非电信号的转换也极为方便，因此，本课程中将只讨论电信号。

### 1.1.1 信号的描述及分类

本课程主要讨论随时间变化的电压或电流信号。描述信号的基本方法是写出它的数学表达式，此表达式是时间  $t$  的函数  $f(t)$ 。“信号”与“函数”这两个名词在本课程中常常通

用。函数  $f(t)$  的图像即为信号的图形表示，称为信号的波形。函数表达式与波形是描述信号的两种直观方法，随着问题的深入，还将使用频谱分析或其他正交变换的方法来描述与研究信号。

以信号所具有的时间函数特性来分类，信号可以分为确定信号与随机信号、连续信号与离散信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号，等等。

### 1. 确定信号与随机信号

确定信号是指一个可以表示为确定的时间函数的信号。在函数的定义域内，指定任一时刻，信号都有确定值。例如，我们熟知的正弦信号、各种周期性脉冲信号等。

随机信号不是一个确定的时间函数，对于某一时刻，信号值并不确定，只能知道它取某一值的概率。例如，通信信道中的干扰与噪声信号，雷达的目标反射信号等。

实际处理与传输的信号从广义上看都是随机信号。例如，通信系统中传输的信号都是不确定的，否则通信就没有任何意义。但是在一定条件下，可以把在较长时间内比较确定的随机信号，近似地作为确定信号来分析，使分析简化，便于工程应用。本课程只讨论确定信号的分析，在数字信号处理等后续课程中，将以确定信号的分析为基础，根据随机信号的统计规律进一步研究随机信号的特性。

### 2. 连续信号与离散信号

按照时间函数取值的连续性和离散性可将信号划分为连续时间信号与离散时间信号，简称连续信号与离散信号。

连续信号是指在所讨论的时间段内，除有限个间断点外，其余任意时刻都有确定的函数值的信号，通常用  $f(t)$  表示，如图 1.1 所示。连续信号的幅值可以是连续的（如正弦信号），也可以是离散的（如矩形脉冲信号，信号只取某些规定值）。时间和幅值都连续的信号又称为模拟信号，在实际应用中，模拟信号与连续信号两个名词往往是通用的。

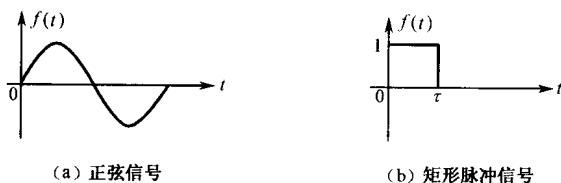


图 1.1 连续信号

离散信号在时间上是离散的，只在某些不连续的规定时刻给出函数值，而在其他时刻没有定义（不要误认为在这些时刻函数值为零）。给出函数值的离散时刻之间隔可以是均匀的，也可以是不均匀的。本书讨论均匀间隔的离散信号，通常用  $f(t_k)$  表示，简称为  $f(k)$  ( $k$  取整数，即  $k=0, \pm 1, \pm 2, \dots$ )。如果离散信号的幅值是连续的，则又可取名为抽样信号，如图 1.2 (a) 所示。若离散信号的幅值也被限定为某些离散值，这种信号又称为数字信号，如图 1.2 (b) 所示。在数字通信和计算机系统中传输和处理的就是数字信号。

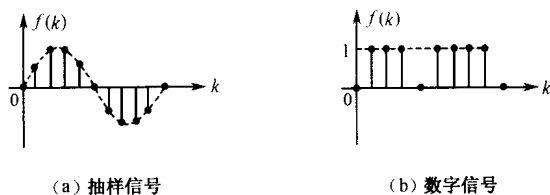


图 1.2 离散信号

### 3. 周期信号与非周期信号

所谓周期信号就是其变化规律依一定时间间隔周而复始且无始无终的信号。时间间隔的最小值称为周期信号的周期  $T$ 。周期信号的表示式可以写为

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

只要给出周期信号在任一周期内的变化过程，便可知道该信号在任意时刻的数值。

非周期信号是不具有周而复始特性的信号，实际信号大多是非周期信号。非周期信号也可以看做是周期  $T$  趋于无穷大的周期信号。

### 4. 能量信号与功率信号

如果将信号  $f(t)$  看做是随时间变化的电压或电流， $f(t)$  在  $1\Omega$  电阻上的瞬时功率为  $f^2(t)$ 。在时间区间  $(-\infty, +\infty)$  内，信号在  $1\Omega$  电阻上所消耗的总能量为

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (1-2)$$

平均功率为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T f^2(t) dt \quad (1-3)$$

若信号  $f(t)$  的能量  $E$  为有限值，平均功率  $P$  为零，则此信号称为能量有限信号，简称能量信号；若信号  $f(t)$  的能量  $E$  为无穷大，平均功率  $P$  为有限值，则此信号称为功率有限信号，简称功率信号；若信号  $f(t)$  的能量  $E$  和平均功率  $P$  均为无穷大，则此信号既非能量信号也非功率信号。

周期信号都是功率信号，而非周期信号可以是能量信号或功率信号也可以是既非能量信号也非功率信号。属于能量信号的非周期信号称为脉冲信号，它在有限时间范围内有一定的数值，而当  $t \rightarrow \infty$  时，信号  $f(t) \rightarrow 0$ ，如图 1.3 (a) 所示；属于功率信号的非周期信号是持续时间无限而幅度有限的信号，如图 1.3 (b) 所示；持续时间无限，幅度也无限的非周期信号则既非能量信号也非功率信号，如图 1.3 (c) 所示的单位斜坡信号  $f(t) = t \cdot U(t)$ 。

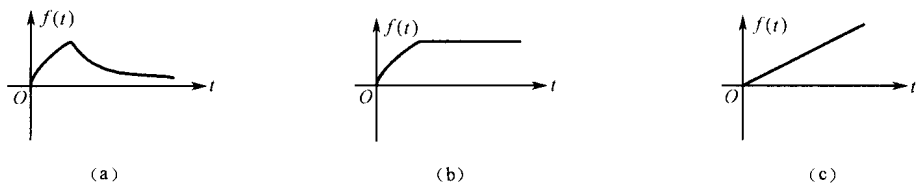


图 1.3 三种非周期信号

### 1.1.2 信号的基本运算与变换

信号在系统中传输与处理的过程就是进行信号变换与运算的过程。组成系统的功能部件通常包括加法器、乘法器、放大器、积分器、微分器和延时器等，信号通过系统各部件时，会进行相应的运算和变换。因此，掌握信号的各种基本运算及其对应的波形变化是非常重要的。

#### 1. 信号的相加与相乘

两个信号相加（相乘）可得到一个新的信号，它在任意时刻的值等于两个信号在该时刻的值之和（积）。信号的相加与相乘运算可通过信号的表达式或信号的波形进行。

信号相加与相乘的框图如图 1.4 所示。

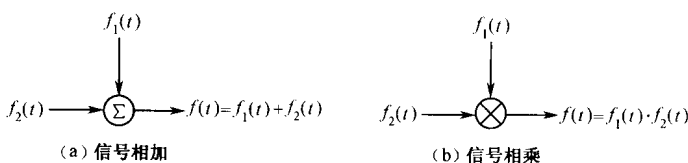


图 1.4 信号相加与相乘框图

图 1.5 所示是一个通信系统模型。在通信系统中，一个无线信道通常就可以看成是一个加法器，通信系统的收端得到的是传输信号与噪声信号的叠加。通信系统的变换器 / 反变换器在对信号进行的调制、解调及信号的取样过程中，就经常遇到两信号的相乘运算。

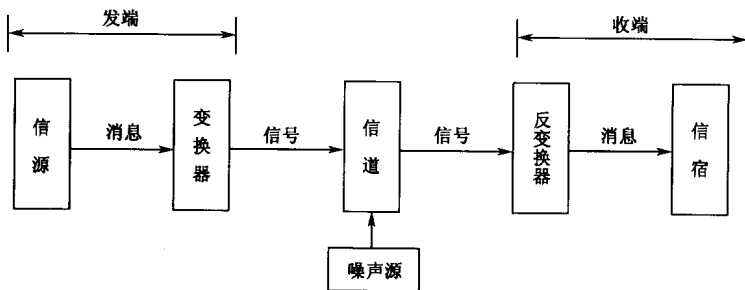


图 1.5 通信系统模型

#### 2. 信号的微分与积分

信号  $f(t)$  的微分是指  $f(t)$  对时间  $t$  的导数，记做  $f'(t)$ ，即

$$f'(t) = \frac{d}{dt} f(t) \tag{1-4}$$

从波形上看，信号的微分表示信号值随时间变化的变化率。

信号  $f(t)$  的积分是指  $f(t)$  在时间区间  $(-\infty, t)$  内的定积分，记做  $f^{(-1)}(t)$ ，即

$$f^{(-1)}(t) = \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau \tag{1-5}$$

从波形上看，信号在  $f(t)$  时刻的积分表示在时间区间  $(-\infty, t)$  内，信号  $f(t)$  与时间轴所包围的面积。

图 1.6 和图 1.7 分别示出信号微分与积分运算的例子。由这两个例子可见，信号经微分运



算后突出显示了它的变化部分，而信号经积分运算后，突变部分可变平滑。



图 1.6 信号的微分



图 1.7 信号的积分

### 3. 信号的时移

信号  $f(t)$  时移  $\pm t_0$  ( $t_0 > 0$ ), 就是将  $f(t)$  表达式中所有自变量  $t$  用  $t \pm t_0$  替换, 成为  $f(t \pm t_0)$ 。从波形上看, 时移信号  $f(t \pm t_0)$  的波形比  $f(t)$  的波形在时间上超前  $t_0$ , 即  $f(t + t_0)$  的波形是  $f(t)$  的波形沿时间轴向左移动  $t_0$ ;  $f(t - t_0)$  的波形比  $f(t)$  的波形在时间上滞后  $t_0$ , 即  $f(t - t_0)$  的波形是  $f(t)$  的波形沿时间轴向右移动  $t_0$ 。

图 1.8 表示一个正弦信号的时移。信号的时移在雷达、声纳和地震信号处理中经常遇到。

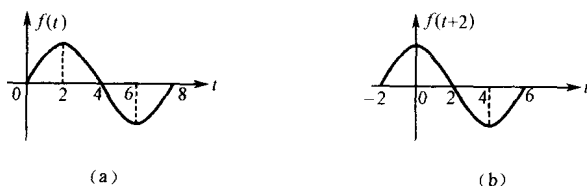


图 1.8 信号的时移

### 4. 信号的反转

信号  $f(t)$  的反转, 就是将  $f(t)$  表达式中的自变量  $t$  用  $-t$  替换, 成为  $f(-t)$ 。从波形上看, 反转信号  $f(-t)$  的波形相当于将  $f(t)$  的波形以  $t = 0$  为轴反转  $180^\circ$  得到, 即  $f(-t)$  的波形是  $f(t)$  的波形相对于纵轴的镜像。

图 1.9 示出了一个正弦信号的反转。

### 5. 信号的尺度变换

信号的尺度变换就是把信号  $f(t)$  中的自变量  $t$  用  $at$  替换, 成为  $f(at)$ 。其中  $a$  是正实系数, 称为尺度变换系数。信号  $f(at)$  的波形是  $f(t)$  波形的压缩 ( $a > 1$ ) 或扩展 ( $a < 1$ )。

图 1.10 给出了一个正弦信号波形的压缩和扩展的例子。