



普通高等教育“十三五”规划教材




电子信息类精品教材

# 信号与系统

(第5版)

*Signals and Systems (Fifth Edition)*

• 钱玲 谷亚林 王海青 编著

 中国工信出版集团

 电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY  
<http://www.phei.com.cn>

内容简介

普通高等教育“十三五”规划教材  
电子信息类精品教材

# 信号与系统

(第5版)

钱玲 谷亚林 王海青 编著

电子工业出版社

Publish

Industry

## 内 容 简 介

本书系统论述了确定性信号与线性时不变系统的基本概念、基本理论与分析方法。从时域分析到变换域分析、从信号到系统、从连续到离散，从输入输出分析到状态变量分析，共包括9章内容。第1章引言，介绍信号与系统的基本概念及应用领域，第2、3章介绍连续时间信号与系统的时域分析，第4章介绍离散时间信号与系统的时域分析，第5、6章介绍连续时间信号与系统的变换域（傅里叶变换和拉普拉斯变换）分析，第7章介绍傅里叶变换的应用，第8章介绍离散时间信号与系统的变换域（傅里叶变换和 $z$ 变换）分析，第9章介绍连续时间系统与离散时间系统的状态变量分析。每章最后介绍了与该章内容相关的MATLAB的内容，并给出本章关键知识点概要。书中每节都有对应知识点习题，每章最后还有综合习题，书后附有参考答案。本教材一些补充内容可以扫描二维码进行拓展学习。

本书叙述通俗易懂、条理清晰，可作为高等院校通信工程、电子信息工程、自动控制及计算机等专业的信号与系统课程的教材，也可供有关科技人员参考。

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/钱玲,谷亚林,王海青编著. —5版. —北京:电子工业出版社,2017.7

电子信息类精品教材

ISBN 978-7-121-31470-4

I. ①信… II. ①钱… ②谷… ③王… III. ①信号系统—高等学校—教材 IV. ①TN911.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第085059号

责任编辑:韩同平 特约编辑:李佩乾 李宪强 宋 薇

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订: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

开 本:787×1092 1/16 印张:19.75 字数:632千字

版 次:2008年6月第1版

2017年7月第5版

印 次:2017年7月第1次印刷

定 价:49.90元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:88254113。

## 第5版前言

信号与系统是通信和电子信息类专业的核心基础课，其中的概念和分析方法广泛应用于通信、自动控制、信号与信息处理、电路与系统等领域。本课程主要研究确定性信号（非随机信号）经线性时不变系统传输与处理的基本理论。本课程涉及的先修数学内容包括微分方程、差分方程、级数、复变函数、线性代数、积分变换等。

南京理工大学“信号与系统”课程于2008年被评为江苏省精品课程，本书是该课程的配套教材。

本书第5版，是在第4版教材的基础上，根据作者近几年的实际教学体会，结合广大读者的反馈意见和建议，并参考了近几年的国内外优秀教材，修订而成的，从而使本教材不断适应学科的发展，教材体系更加具有合理性和科学性。

与第4版教材相比，第5版教材在教学目的、教学要求及大部分教学内容等方面基本相同，但在某些内容、结构安排等方面做了如下修订：

(1) 内容的组织有了较大调整。第4版中，教材内容次序是先连续后离散，先信号后系统，在连续与离散部分再先讲时域后讲变换域（包括频域、复频域）；在第5版中，教材内容次序调整为先时域后变换域，先信号后系统，在时域与变换域部分先讲连续后讲离散。这样调整的目的是更加便于学生理解与接受。

(2) 删除了第4版中6.2节的模拟滤波器设计，而将该部分内容放在“数字信号处理”课程讲授，使模拟滤波器设计与数字滤波器设计一起介绍，从而具有知识的连贯性。增加了频域采样和复用知识点的介绍，更好地适应学科的发展。

(3) 在每章结束的时候，增加了该章关键知识点的总结，便于学生更好地掌握和复习本章的内容。

(4) 补充内容的二维码扫描的应用。受教材篇幅的限制，有些知识点的补充、有些例题的其他解法没有在教材中列出，但读者可以扫描相应位置的二维码看到电子版内容，更好地丰富教材的内容，扩大学生的知识面。

(5) 纠正了教材中的一些错误及不足之处，使内容表述更加精炼，更加具有可读性。

(6) 对部分例题和习题做了调整与修改。

本书总体特点如下：

(1) 内容结构合理。本教材内容按照时域、频域和复频域的次序安排；在不同的域中，按照先连续后离散安排章节；在各章节中，将信号与系统分开来叙述，采用先信号分析再系统分析的方法，这样使得信号与系统的脉络更加清晰。考虑到人们对时域更加具有直观体验，所以在第5版中，我们将先讲时域，便于读者能很快理解信号与系统。

(2) 关键知识点总结。每门课程都有自己的重要知识点，认真归纳、总结和梳理这些知识点是学好该课程的重要环节之一。在第5版教材中，我们在每章的最后增加了该章关键知识点概要，使得本书不但可以作为学生每章复习的参考，而且也可用于本课程期末考试、以及研究生入学考试的总复习，不增加本书篇幅、以及学生购书成本的情况下，实现了“一书多能”的效果。

(3) 规范了教材中的某些符号，与后续课程保持一致。针对目前国内相关教材和国外教材的不同译本，存在着符号使用上的混乱现象，我们觉得有必要用科学的一致的方式，将这些符

号给予清晰,并统一起来,这样就方便了大家的使用。例如:

① 关于周期信号与非周期信号,本书中将周期信号用  $\tilde{f}(t)$  来表示,而非周期信号仍用  $f(t)$  来表示,这样从符号上就能清楚地区分周期信号与非周期信号。

② 将连续角频率的符号定义为  $\Omega$ ,而数字频率的符号定义为  $\omega$ ,与后续课程“数字信号处理”的教材保持一致。

(4) 将习题进行了合理分解,每节后安排适量与本节知识点相关的基本习题,方便强化相关知识点的训练,便于师生的同步课程学习;每章后设计一些综合题,通过综合题的训练可以更好地融会贯通相关理论与方法,便于学生的期末复习、研究生入学考试备考,实现“一书多能”的效果。

由于不同的学校和不同的专业“信号与系统”课程学时数不尽一致,一般课堂讲授的学时为 32~64 学时。因此,教师可根据实际学时数,选择不同的章节来进行授课。

与本教材相配套的电子课件、MATLAB 的程序与部分习题答案,可以登录电子工业出版社的华信教育资源网 [www.hxedu.com.cn](http://www.hxedu.com.cn) 免费下载。

本教材由钱玲统稿。其中第 1, 6, 7 章及全部的 MATLAB 内容由钱玲执笔,第 4, 8, 9 章由谷亚林执笔,第 2, 3, 5 章由王海青执笔。本书请徐天成老师审稿,徐老师也是前 4 版教材的统稿,为本教材的出版和建设付出了大量的辛劳,在此向徐老师表示特别感谢。作者所在教研室的各位同仁对本书提出了许多宝贵意见,在此表示诚挚的谢意。

编著者

(作者的 E-Mail: [qianling@mail.njust.edu.cn](mailto:qianling@mail.njust.edu.cn))

# 目 录

第1章 引言	(1)
第2章 连续时间信号的时域分析	(5)
2.1 信号的分类	(5)
2.2 常用的连续时间信号	(6)
2.3 奇异信号	(8)
2.3.1 单位斜变信号	(8)
2.3.2 单位阶跃信号	(8)
2.3.3 单位冲激信号	(9)
2.3.4 冲激偶信号	(12)
2.4 信号的运算	(13)
2.4.1 信号的基本运算	(13)
2.4.2 信号的卷积运算	(16)
2.5 连续信号的分解	(22)
2.6 MATLAB 的操作界面及连续信号的表示	(24)
关键知识点概要	(27)
综合习题	(30)
第3章 连续时间系统的时域分析	(32)
3.1 系统的数学模型及其分类	(32)
3.2 系统的性质	(34)
3.3 线性时不变系统的微分方程表示及其经典求解	(37)
3.3.1 线性时不变系统分析方法概述	(37)
3.3.2 线性时不变系统数学模型的建立	(38)
3.3.3 微分方程的经典求解	(39)
3.3.4 初始条件的确定	(41)
3.4 零输入响应与零状态响应	(45)
3.5 冲激响应与阶跃响应	(47)
3.6 线性时不变系统的卷积积分分析	(49)
3.7 用 MATLAB 对连续时间系统的时域分析	(51)
关键知识点概要	(53)
综合习题	(56)
第4章 离散时间信号与系统的时域分析	(58)
4.1 离散时间信号——序列	(58)
4.1.1 离散时间信号的表示	(58)
4.1.2 典型序列	(59)
4.1.3 序列的运算	(61)
4.2 离散时间系统	(65)
4.2.1 离散时间系统及其性质	(65)

4.2.2	线性常系数差分方程	(67)
4.2.3	线性常系数差分方程的经典解法	(69)
4.3	线性时不变(LTI)离散时间系统的单位样值响应	(73)
4.3.1	零输入响应与零状态响应	(73)
4.3.2	单位样值响应	(74)
4.3.3	LTI离散时间系统的卷积和分析	(75)
4.3.4	LTI离散时间系统的因果性和稳定性	(77)
4.4	用MATLAB产生和实现离散时间信号和系统	(78)
	关键知识点概要	(80)
	综合习题	(82)
<b>第5章</b>	<b>连续时间信号的变换域分析</b>	<b>(84)</b>
5.1	周期信号的频谱分析——傅里叶级数	(84)
5.1.1	傅里叶级数的三角形式	(84)
5.1.2	傅里叶级数的复指数形式	(85)
5.1.3	周期信号的频谱及其特点	(86)
5.1.4	具有对称性的周期信号的频谱	(88)
5.1.5	吉布斯现象	(91)
5.2	常用周期信号的频谱	(93)
5.2.1	周期矩形脉冲信号	(93)
5.2.2	周期锯齿脉冲信号	(96)
5.2.3	周期三角脉冲信号	(96)
5.2.4	周期半波余弦信号	(96)
5.2.5	周期全波余弦信号	(97)
5.3	非周期信号的频谱——傅里叶变换	(98)
5.4	典型非周期信号的频谱	(100)
5.5	傅里叶变换的基本性质	(104)
5.6	周期信号的傅里叶变换	(118)
5.7	拉普拉斯变换	(122)
5.7.1	从傅里叶变换到拉普拉斯变换	(122)
5.7.2	拉普拉斯变换的收敛域	(123)
5.7.3	典型信号的拉普拉斯变换	(125)
5.8	拉普拉斯变换的基本性质	(126)
5.9	拉普拉斯逆变换	(134)
5.9.1	部分分式展开法	(135)
5.9.2	留数法	(137)
5.10	连续信号的频域与复频域的MATLAB分析	(138)
	关键知识点概要	(141)
	综合习题	(146)
<b>第6章</b>	<b>连续时间系统的变换域分析</b>	<b>(148)</b>
6.1	系统响应的拉氏变换求解	(148)
6.1.1	微分方程的拉氏变换求解	(148)
6.1.2	s域的元件模型	(151)

6.2	系统函数与冲激响应	(155)
6.3	零、极点分布与时域响应特性	(158)
6.3.1	零点与极点的概念	(158)
6.3.2	零、极点分布与时域响应特性	(159)
6.3.3	自由响应与强迫响应、暂态响应与稳态响应	(162)
6.4	零、极点分布与系统频率响应特性的关系	(165)
6.4.1	频率响应特性的定义	(165)
6.4.2	频响特性的矢量作图法	(166)
6.5	典型系统的频响特性	(168)
6.6	全通系统和最小相位系统	(174)
6.7	系统模拟及信号流程图	(177)
6.7.1	系统的框图	(177)
6.7.2	信号流程图	(178)
6.7.3	系统模拟	(180)
6.8	系统的稳定性	(186)
6.9	MATLAB 在连续系统变换域分析中的应用	(189)
	关键知识点概要	(192)
	综合习题	(194)
<b>第 7 章</b>	<b>傅里叶变换的应用</b>	(196)
7.1	信号的传输与滤波	(196)
7.1.1	无失真传输	(196)
7.1.2	理想滤波器	(197)
7.2	信号的采样	(202)
7.2.1	信号采样的概念	(202)
7.2.2	采样信号的傅里叶变换	(203)
7.2.3	时域采样定理	(205)
7.2.4	从采样信号恢复连续信号	(207)
7.3	调制与解调	(211)
7.3.1	调制的概念及分类	(211)
7.3.2	调幅信号的傅里叶变换	(212)
7.3.3	解调的概念	(215)
7.4	信号的频域采样与复用	(218)
7.4.1	信号的频域采样	(218)
7.4.2	频分复用与时分复用	(220)
7.5	MATLAB 在信息处理与通信中的应用	(221)
	关键知识点概要	(223)
	综合习题	(224)
<b>第 8 章</b>	<b>离散时间信号与系统的变换域分析</b>	(227)
8.1	序列的 $z$ 变换及其收敛域	(227)
8.1.1	$z$ 变换的定义	(227)
8.1.2	$z$ 变换的收敛域	(228)
8.1.3	典型序列的 $z$ 变换	(230)



8.1.4	$s$ 平面到 $z$ 平面的映射	(231)
8.2	$z$ 逆变换	(233)
8.3	$z$ 变换的基本性质	(236)
8.3.1	线性	(236)
8.3.2	时移性	(236)
8.3.3	$z$ 域微分	(238)
8.3.4	序列指数加权	(239)
8.3.5	序列反褶	(240)
8.3.6	卷积定理	(240)
8.3.7	初值和终值定理	(241)
8.3.8	帕斯瓦尔定理	(242)
8.4	序列的傅里叶变换	(242)
8.5	LTI 离散时间系统的系统函数	(245)
8.5.1	系统函数与单位样值响应	(246)
8.5.2	系统函数与线性常系数差分方程	(247)
8.5.3	系统函数与系统的因果性	(248)
8.5.4	系统函数与系统的稳定性	(249)
8.6	LTI 离散时间系统的频响特性	(251)
8.6.1	频响特性的定义	(251)
8.6.2	频响特性与系统函数的零、极点矢量作图	(252)
8.7	数字滤波器的一般概念	(256)
8.7.1	数字滤波器原理	(257)
8.7.2	数字滤波器结构框图及信号流程图	(258)
8.8	用 MATLAB 在变换域分析和实现离散时间信号和系统	(262)
	关键知识点概要	(264)
	综合习题	(268)
<b>第 9 章</b>	<b>系统的状态变量分析法</b>	<b>(270)</b>
9.1	系统的状态变量和状态方程	(270)
9.2	连续时间系统状态方程的建立	(273)
9.2.1	系统状态方程的直接编写	(273)
9.2.2	系统状态方程的间接编写	(274)
9.3	连续时间系统状态方程的求解	(278)
9.4	离散时间系统状态方程的建立	(282)
9.4.1	根据给定系统的差分方程确定状态方程	(282)
9.4.2	根据给定系统的框图或流程图建立状态方程	(283)
9.5	离散时间系统状态方程的求解	(284)
9.6	由状态方程判断系统的稳定性	(287)
9.7	系统的状态变量分析法的 MATLAB 实现	(289)
	关键知识点概要	(291)
	综合习题	(292)
	习题答案	(294)

# 第1章 引言

“信号与系统”的理论和分析方法、潜在的和实际的应用范围不断地在扩大着，几乎渗透到各个科学技术领域之中。那么，什么是信号 (signal)？什么是系统 (system) 呢？为什么要把信号与系统这两个概念联系在一起呢？这是首先必须弄清楚的问题。

## 1. 信号的定义及应用

“信号”来源于拉丁文“*signum* (记号)”一词，其含义甚广。“信号”这一术语不仅出现于科学技术领域之中，而且在日常生活之中每时每刻几乎都与信号打交道，人们对信号并不陌生。上课的铃声就是一种信号，火车、船舶的汽笛声，汽车的喇叭声也都是一种信号，这些都是声信号。道路交叉路口和铁路轨道旁设置的红绿灯光是一种信号，发射信号弹的闪烁亮光也是一种信号，这些都是光信号。收音机和电视机天线从天空中接收到的电磁波是一种信号，它们每一级电路的输入、输出电压 (voltage) 或电流 (current) 也是信号，这都是电信号。除此之外，还有电视机和计算机显示器屏幕上的图像文字信号，交警指挥的手势信号，军舰使用的旗语信号，等等。所有这些五花八门的信号，虽然它们的物理表现形式各不相同，但是它们却存在两个共同特点：无论是声信号、光信号、电信号，还是其他形式的信号，其本身都是一种变化着的物理量，或者说是一种物理体现，这个特点是显而易见的。而另一个特点则表现为，信号都包含有一定意义，也就是说，信号是载有信息 (information) 的。例如上课的铃声信号，表示上课时间到了的信息；雷达荧光屏上的光点信号，表示有飞机出现的信息；生物细胞中 DNA 的结构图案信号，表示了一定的遗传信息等。因此我们可以说，信号就是用于描述、记录或传输信息的任何对象的物理状态随时间的变化过程。简单而言，信号就是载有一定信息的一种变化着的物理量。信号是信息的表现形式，信息则是信号的具体内容。

自古以来，人们就在不断地寻求各种方法，将信息转化为信号，以实现信息的传输、记忆与处理。我国古代利用烽火台的狼烟报警，希腊人利用火炬位置表示字母符号，就是利用光信号进行信息传递的早期范例。击鼓鸣金报送时刻或传达命令，是利用声信号进行信息传递的例证。以后出现了信鸽、驿站和旗语等传送信息的各种方法。然而，这些方法无论在距离、速度还是在有效性与可靠性方面，都没有得到较满意的解决。19 世纪初叶之后，人们开始研究如何利用电信号进行信息的传送，使人类在信息传输、记忆与处理等诸多方面取得了显著的进步和满意的效果。1837 年，莫尔斯 (F. B. Morse) 发明了电报，使用点、划、空适当组合的代码表示字母和数字，这种代码称为莫尔斯电码。1876 年，贝尔 (A. G. Bell) 发明了电话，直接将语音变换成电信号沿导线传递。19 世纪末，赫兹 (H. Hertz)、波波夫 (A. C. Попов)、马可尼 (G. Marconi) 等人研究用电磁波传送无线电信号问题。1901 年，马可尼成功地实现了横跨大西洋的长距离无线电通信 (即信息传输)。从此，传输电信号的通信方式得到了广泛的应用与迅速发展。现在，电话、无线电广播、电视、网路等利用电信号的通信方式，已成为我们日常生活中不可缺少的内容和手段，不仅实现了遍绕地球的全球电信号通信，而且实现了太阳系范围的电信号通信。还要指出，电信号与许多种非电信号之间可以比较方便地进行相互转换。实际应用中常常将各种物理量，如声波动、光强度、机械运动的位移或速度等转换成电信号，以利于远距离的信息传输，经传输后在接收端再将电信号还原成原始的消息。

本书中只研究电信号的各种特性和分析方法。所谓电信号（以后简称为信号），一般指载有信息的随时间而变化的电压或电流，也可以是电容上的电荷、线圈中的磁通及空间中的电磁波等电量。信号特性可以从两个方面来描述：一是时间特性，亦称为时域特性；二是频率特性，亦称为频域特性。信号是随时间而变化的电量，那么描述信号的数学表达式则是时间的函数。绘出函数的图像称为信号的波形。波形表现出信号的时间特性，如信号出现的时间先后，持续时间的长短，重复周期的大小，以及随时间变化的快慢等。信号的另一个特性是，任一信号总可以分解为许多不同频率的正弦分量，表现出信号具有一定的频率特性。例如，各频率的正弦分量之间相对大小、主要频率分量占有的范围即频带宽度等。信号的形式有所不同，就在于它们有各自的时间特性和频率特性。信号的时间特性与频率特性之间具有一定的相互对应关系。

## 2. 信号处理的概念

所谓信号处理可以理解为对信号进行某种加工或变换。加工或变换的目的在于削弱信号中多余的成分，滤除混杂的噪声和干扰；或者将信号变换成容易分析与识别的形式，便于估计或选择它的特征参量。近年来数字电子计算机的迅猛发展与广泛应用，更大大促进了信号处理的研究，使得信号处理的应用遍及许多科学技术领域。例如，月球探测器发来的电视信号可能被淹没在噪声之中，而利用信号处理技术就可以使有用的信号增强，在地球上得到清晰的图像。资源勘探、地震测量及核试验监测中所得到的数据分析也需要利用信号处理技术。信号处理还可以应用于心电图、脑电图的分析，语音或图像识别，以及各种类型的数据通信等。信号传输与信号处理既有着密切的联系，又是相对独立的学科体系。但它们共同的理论基础是信号分析与系统分析。信号与系统分析的理论研究将服务于解决信号传输与信号处理方面的理论与实际问题。

## 3. 系统的定义及应用

近代，人们在研究自然界、社会和思维规律时，普遍地引用系统的概念、理论和方法。从一般意义上来说，所谓系统是指一个由若干个相互联系、相互作用的单元（事物）组合而成的具有某种特定功能的整体。系统可以是太阳系、生态系统和动物神经组织等自然系统；也可以是计算机网、交通运输网和电力系统等人工系统。系统可以是生物系统、化学系统、政治体制系统和经济结构等非物理系统。本书只讨论无线电电子学领域中的电系统。

在无线电电子学领域中，常常利用通信系统、控制和计算机系统等进行信号的传输与处理。信号的传输与处理，要由许多不同功能的单元组合而成的一个复杂系统来完成。从广义上来说，一切信息的传输过程都可以认为是通信。一切完成信息传输任务的系统统称为信息传输系统，亦可称为通信系统，电话、电视、雷达、导航、网路等系统均属之。以电视系统来说，它所要传输的信息包含在配有声音的画面之中，传输这些画面时，先要借助电视摄像机把画面的光线色彩转换成图像信号，并利用话筒把声音转换成伴音信号，这些就是电视要传输的带有信号的原始信号。然后把这些信号送入电视发射机，它能够产生一种反映上述信号变化的便于传播的射频电视信号。最后，由天线将这个射频电视信号转换为电磁波发射出去，在空间传播。电视接收者用接收天线截获一小部分电磁波能量，将它转换成射频信号送入电视接收机。接收机的作用正好和发射机相反，它能将送入的射频电视信号恢复出原有的图像信号和伴音信号，并把这两种信号分别送到显像管和喇叭，使接收者能看到传输的图像，并听到配有的伴音。这个信息传输过程，可以用图 1-1 所示的方框图表示。这个方框图也表示了一般通信系统的组成。图中，信源是产生载有信息之消息（语言、文字、图像或数据等）的设备或人，输入转换器把消息转换为信号，如摄像管、话筒等，发射机是把输入转换器输出的信号转换成便于

传输的另一种形式信号的装置。信道是指信号传输的通道，在有线电话中它是一对导线，在利用电磁波传播的无线电通信中它可以是空间、卫星通信中的人造卫星，也可以是波导或同轴电缆，在光通信中，它则是光导纤维。接收机用来接收信道传来的信号，并把它转换为能适宜于输出转换器工作的装置。从广义而言，发射机和接收机也可以看成是信道，因此也称它为信道机。输出转换器是将接收机输出的信号转换为消息的装置，如显像管、喇叭等。转换器完成从一种形式的能量转换为另一种形式的能量这一工作。信宿是接收消息的装置或人。不同的通信系统可以有不同的信源和不同的信道。



图 1-1 通信系统的组成

构成系统的单元可小可大，可简可繁。如果将通信系统、控制系统、计算机系统与指挥系统共同组合而成一个繁杂的整体，可以构成一个宇宙航行的综合系统。一只电阻和一只电容可以构成具有一定微分或积分功能的简单系统。通常，无线电电子学领域中系统的主要部件包括大量的、多种类的电路。电路亦称为网络。当研究一般性的抽象规律时往往用网络一词，而讨论一些指定的具体问题时常称之为电路。

#### 4. 信号与系统的关系

信号与系统有着十分密切的联系。离开了信号，系统将失去意义。信号必定是由系统产生、发送、传输与接收，离开系统没有孤立存在的信号；系统的重要功能就是对信号进行加工、变换与处理，没有信号的系统就没有存在的意义。也就是说，要产生信号，要对信号进行传输、处理、存储或转化，必定需要一定的物理装置，这种物理装置就是系统。从系统的功能来看，系统就是一个转换器，它总是对某个特定的输入信号  $x(t)$  变换成另一个输出信号  $y(t)$ 。为了方便地表示不同的系统，把输入输出信号之间的关系写成如下的函数形式

$$y(t) = T[x(t)] \quad (1-1)$$

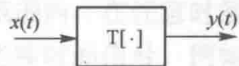


图 1-2 系统的方框图

式中， $x(t)$  亦可称为激励； $y(t)$  亦可称为响应； $T[\cdot]$  可以看成是一种算子，不同系统对应不同算子。这样，系统可用图 1-2 所示的方框图表示。这里表示的是单输入单输出系统。复杂系统可以是多个输入多个输出的。系统的功能和特性，就是通过由怎样的激励产生怎样的响应来体现的。不同的系统具有各种不同的特性。

近年来，随着计算机技术应用的迅速发展，系统仿真技术的日益进步，使系统的研究和信号的研究已经进一步融合起来了。本书不但将信号与系统这两个概念联系在一起，而且将信号分析与系统分析并重讨论。

#### 5. 信号与系统的应用

信号与系统的基本概念、基本分析方法已经渗透到了信息与通信工程、电路与系统、集成电路工程、生物医学工程、物理电子学、导航雷达、制导与控制、电磁场与微波技术、水声工程、电气工程、动力工程、航空工程、环境工程、物联网、股市分析、人口统计等领域。

虽然在上述的工程应用领域所出现的信号与系统的物理性质不同，但都有两个基本特征：其一，作为一个或几个独立的信号都包含了一定的物理现象的信息；其二，系统可以对给定的信号产生响应或产生另外的信号，或者产生其他希望的特性。应用信号与系统的基本理论和基

本方法，可以通过选择特定的系统激励信号，或者利用不同子系统组合工作，来达到改变或控制系统的性能的目的。

在通信领域，信号与系统理论可以实现信号的传输、滤波、调制、复用等技术；在机电系统，可以实现系统控制、变换、减小误差等技术；在控制领域，可以保证系统稳定性，提高响应的快速性；在生物医学领域，可以更好地描述系统，使该类系统能实现计算机分析与仿真；在物联网领域，可以将分布在世界不同地方的人与物链接起来，达到异地操控、程控启动、信息交流的目的。总之，信号与系统理论的应用已经深入我们生活和工作的许多领域，成为不可或缺的理论基础。



本书主要介绍信号与系统理论的基本概念、基本定理和基本分析方法。全书共分五章。第一章介绍信号与系统的概念，包括信号的分类、系统的分类、信号与系统的表示方法、信号与系统的运算等。第二章介绍傅里叶变换，包括傅里叶变换的定义、性质、应用等。第三章介绍拉普拉斯变换，包括拉普拉斯变换的定义、性质、应用等。第四章介绍离散时间傅里叶变换，包括离散时间傅里叶变换的定义、性质、应用等。第五章介绍离散时间傅里叶变换的应用，包括离散时间傅里叶变换的滤波、调制、解调等应用。本书可作为高等院校电子信息类、计算机类、通信类、自动化类等专业的教材，也可供从事相关工作的工程技术人员参考。

## 第2章 连续时间信号的时域分析

信号是传递信息的工具，它的基本形式是随时间变化的电流或电压信号，通常情况下，可以用数学函数公式表示，也可以用它的函数图像即信号波形来表示。为了讨论方便，本书中常常把信号与函数两个术语视为同义词。本章讨论了信号的分类与基本运算，介绍了几种典型连续时间信号和奇异信号，即连续时间信号的时域分析。连续时间信号的变换域分析将在第5章详细分析。

### 2.1 信号的分类

信号的形式多种多样，因此其种类也很多，从不同角度可以有不同分类方法。

#### (1) 确定性信号和随机信号

按分布性质不同，信号可以区分为确定性信号 (deterministic signal) 和随机信号 (random signal)。对于给定的某一时刻，有确定的函数值与之对应，这种信号称为确定性信号或规则信号。例如，正弦信号就是确定性信号。然而，实际传输的信号往往具有不可预知的不确定性，这种信号称为随机信号或不确定信号。语音信号就是一种随机信号，空中传来的噪声、电路元件中的热噪声电流等都是随机信号。随机信号在每一确定时刻上的取值难于确定，只能通过大量实验数据，利用概率论和随机过程的数学方法进行研究。本书只讨论确定性信号。

#### (2) 连续时间信号和离散时间信号

按函数自变量取值是否具有连续性，信号可以区分为连续时间信号 (continuous time signal) 和离散时间信号 (discrete time signal)。如果对于所讨论的时间范围内，在任意时刻点上 (除若干不连续点外) 函数都有确定的值与之对应，这种信号就称为连续时间信号。例如，图 2.1-1(a) 所示的正弦信号是典型的连续信号，图 2.1-1(b) 所示的信号在  $t_1$  处的  $f(t)$  值发生跳变，但它仍是连续时间信号。而离散时间信号，在时间上是离散的，它只在某些时间的离散点上给定函数值，在其他时间上都没有定义。图 2.1-2 所示的信号，就是离散时间信号。

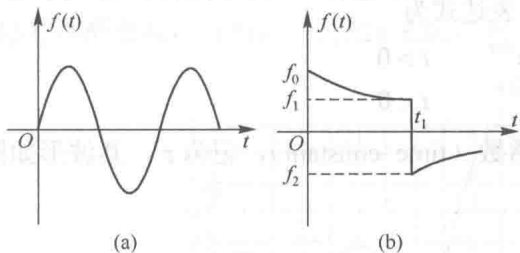


图 2.1-1 连续时间信号

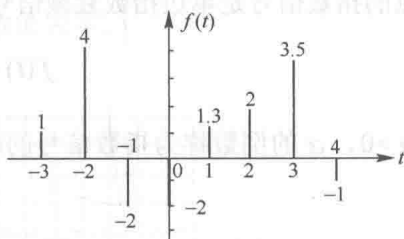


图 2.1-2 离散时间信号

#### (3) 周期信号和非周期信号

按函数是否具有周期性，信号可以区分为周期信号 (periodic signal) 和非周期信号 (nonperiodic (aperiodic) signal)。如果对所有的  $t \in (-\infty, \infty)$ ，存在一个最小的正常数  $T$ ，使得

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.1-1)$$

就称  $f(t)$  是以  $T$  为周期的周期信号，否则就称为非周期信号。周期信号就是依一定时间间隔  $T$

周而复始，而且是无始无终的。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。非周期信号在时间上不具有周而复始的特性。若令周期信号的周期  $T$  趋于无限大，则成为非周期信号。

#### (4) 因果信号和非因果信号

按函数存在的区域，信号可以分为因果信号 (causal signal) 和非因果信号 (noncausal signal)。将  $t \geq 0$  接入系统的信号 (即在  $t < 0$  时为零的信号)，称为因果信号。反之，若  $t < 0$  时不等于零的信号，则称为非因果信号。

#### (5) 一维信号和多维信号

按函数自变量数目不同，信号可以分为一维信号 (one-dimensional signal) 和多维信号 (multi-dimensional signal)。若信号表示为时间  $t$  的函数，则这种信号是一维信号。一维信号的这种时间函数关系可以用数学表达式、波形图、数据表等方式来表达。 $\sin t, e^{-t}$  等具体函数表达式可以表示信号，亦可用  $f(t), x(t)$  等抽象的函数表达式表示信号。

对于一个函数，它的定义域是很重要的。用时间函数来表示的信号，其定义域就是信号存在的时间范围。例如， $\cos t (-\infty < t < \infty)$  和  $\cos t (t \geq 0)$  就是两个不同的信号，因为它们的时间范围不相同。为方便起见，凡时间范围为  $-\infty < t < \infty$  的，可以省略不写。也就是说，凡没有特别标明时间范围时，都认为  $t \in (-\infty, \infty)$ 。对应一维信号，还有二维信号、三维信号等多维信号。电视图像信号是典型的三维信号  $f(x, y, t)$ ，即它是平面空间  $x, y$  和时间  $t$  的三维函数。多维信号可以采用扫描等措施变换成一维信号。本书只讨论表示为时间函数的一维信号。

## 2.2 常用的连续时间信号

### 1. 实指数信号

在信号与系统分析中，指数信号 (exponential signal) 是重要的基本信号之一，它的表达式为

$$f(t) = Ae^{\alpha t} \quad (2.2-1)$$

式中， $\alpha$  是实数。若  $\alpha > 0$ ，则信号将随时间增大而增长，且  $\alpha$  越大，增长速度越快。若  $\alpha < 0$ ，则信号随时间增大而衰减，且  $|\alpha|$  越大，衰减速度越快。当  $\alpha = 0$  时，信号  $f(t) = A$ ，为一常数，称为直流信号。指数信号的波形如图 2.2-1 所示。

常见的指数信号是单边指数衰减信号，其表达式为

$$f(t) = \begin{cases} Ae^{-\alpha t} & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.2-2)$$

式中， $\alpha > 0$ 。 $\alpha$  的倒数称为指数信号的时间常数 (time constant)，记为  $\tau$ ，其波形如图 2.2-2 所示。

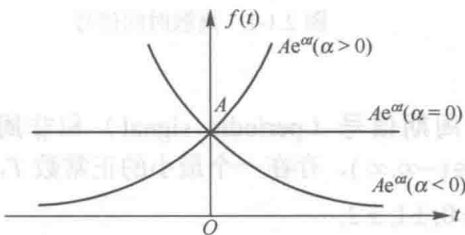


图 2.2-1 指数信号

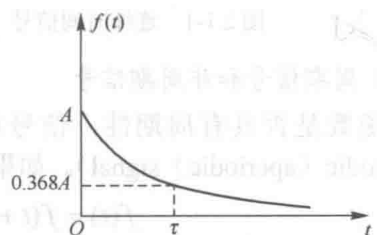


图 2.2-2 单边指数衰减信号

## 2. 正弦信号

正弦信号 (sine signal) 与余弦信号 (cosine signal), 两者只是在相位上相差  $\pi/2$ , 可以统称为正弦信号。其一般形式为

$$f(t) = A \sin(\Omega t + \theta) \quad (2.2-3)$$

式中,  $A$  为振幅 (amplitude),  $\Omega$  是角频率 (angular frequency),  $\theta$  为初相位 (initial phase)。上述三个量是正弦信号的三要素。它的波形如图 2.2-3 所示。

正弦信号是周期信号, 其周期 (period)  $T$  与频率 (frequency)  $f$  及角频率  $\Omega$  之间的关系为  $T = 1/f = 2\pi/\Omega$ 。

在信号与系统分析中, 经常要遇到单边指数衰减的正弦信号, 波形如图 2.2-4 所示。其表达式为

$$f(t) = \begin{cases} Ae^{-\alpha t} \sin \Omega t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.2-4)$$

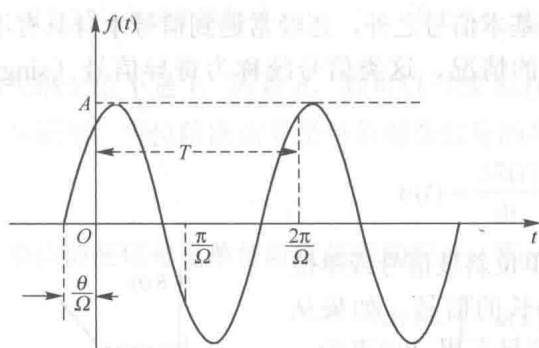


图 2.2-3 正弦信号

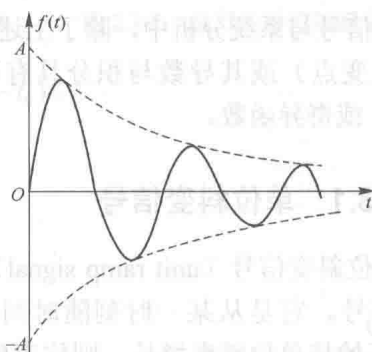


图 2.2-4 指数衰减的正弦信号

## 3. 抽样函数

抽样函数 (sampling function) 定义为  $\sin t$  与  $t$  之比, 表达式为

$$\text{Sa}(t) = \frac{\sin t}{t} \quad (2.2-5)$$

抽样函数的波形如图 2.2-5 所示。由图可知,  $\text{Sa}(t)$  是偶函数 (even function), 在  $t$  的正、负两方向振幅都逐渐衰减, 且当  $t = \pm\pi, \pm 2\pi, \pm 3\pi, \dots$  时, 函数值为零。

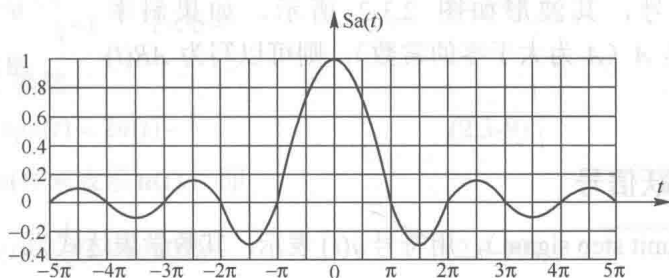


图 2.2-5 抽样函数

$\text{Sa}(t)$  函数具有如下性质

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{Sa}(t) dt = \pi \quad (2.2-6)$$



## 4. 复指数信号

将实指数信号的指数因子换成复数, 则称为复指数信号(complex exponential signal), 其表达式为

$$f(t) = Ae^{st} \quad (2.2-7)$$

式中,  $s$  称为复频率(complex frequency), 它可以表示成  $s = \sigma + j\Omega$ ,  $\sigma$  为复指数  $s$  的实部(real part),  $\Omega$  为虚部(imaginary part)。借助欧拉公式, 可将式(2.2-7)展开成如下形式

$$f(t) = Ae^{st} = Ae^{(\sigma + j\Omega)t} = Ae^{\sigma t} \cos \Omega t + jAe^{\sigma t} \sin \Omega t \quad (2.2-8)$$

上式表明, 一个复指数信号可分解为实部与虚部两部分。其中, 实部为余弦信号, 虚部为正弦信号。指数因子的实部  $\sigma$  表征了正弦与余弦的振幅随时间变化的情况。若  $\sigma > 0$ , 则正弦、余弦信号是增幅振荡; 若  $\sigma < 0$ , 则为衰减振荡。指数因子的虚部  $\Omega$  则表示正弦和余弦信号的角频率。

## 2.3 奇异信号

在信号与系统分析中, 除了上述几种常用基本信号之外, 还经常遇到信号本身具有不连续点(跳变点)或其导数与积分具有不连续点的情况, 这类信号统称为奇异信号(singularity signal)或奇异函数。

### 2.3.1 单位斜变信号

单位斜变信号(unit ramp signal)也称为单位斜坡信号或单位斜升信号。它是从某一时刻随时间正比例增长的信号。如果从  $t=0$  开始按单位斜率增长, 则称为单位斜变信号, 用  $R(t)$  表示, 其数学表达式为

$$R(t) = \begin{cases} t & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.3-1)$$

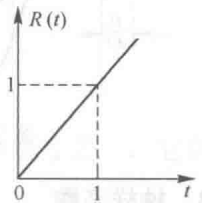


图 2.3-1 单位斜变信号

其波形如图 2.3-1 所示。

如果起始点移至  $t_0$ , 则应写为

$$R(t-t_0) = \begin{cases} t-t_0 & t \geq t_0 \\ 0 & t < t_0 \end{cases} \quad (2.3-2)$$

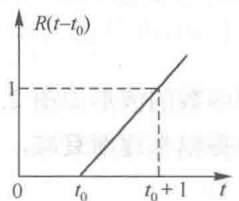


图 2.3-2 延时的单位斜变信号

这是延时的斜变信号, 其波形如图 2.3-2 所示。如果斜率(slope)不是 1, 而是  $A$  ( $A$  为大于零的常数), 则可以写为  $AR(t)$  或  $AR(t-t_0)$ 。

### 2.3.2 单位阶跃信号

单位阶跃信号(unit step signal), 用符号  $u(t)$  表示, 其数学表达式为

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.3-3)$$

波形如图 2.3-3 所示。在跳变点  $t=0$  处, 函数值未定义。

单位阶跃信号的物理实现如图 2.3-4 所示的电路, 假设开关  $S$ 、直流电源  $E$  及电容  $C$  均为