



普通高等教育“十二五”规划教材



电子信息类精品教材

# 信号与系统 (第4版)

*Signals and Systems (Fourth Edition)*

• 徐天成 谷亚林 钱玲 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

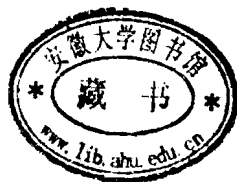
<http://www.phei.com.cn>

电子信息类精品教材

# 信号与系统

(第4版)

徐天成 谷亚林 钱玲 编著



电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 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。从信号分析到系统分析、从连续到离散、从时域到变换域、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的时域与变换域（傅里叶变换和拉普拉斯变换）分析，第4、5章介绍连续时间系统的时域与变换域分析，第6章介绍傅里叶变换的应用，第7、8章介绍离散时间信号与系统的时域与变换域分析，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。书中有较丰富的例题与习题，书后附有参考答案。

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 / 徐天成, 谷亚林, 钱玲编著. —4版. —北京: 电子工业出版社, 2012.7

电子信息类精品教材

ISBN 978-7-121-17341-7

I. ①信… II. ①徐… ②谷… ③钱… 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(2012)第125194号

责任编辑: 韩同平 特约编辑: 李佩乾

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司  
装 订:

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: 21.25 字数: 560千字

印 次: 2012年7月第1次印刷

印 数: 3000册 定价: 45.00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。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线：(010)88258888。

## 第4版前言

“信号与系统”课程主要研究确定性信号和线性时不变系统的基本概念和基本理论,包括信号的时域与频域分析,以及确定性信号经线性时不变系统传输与处理的基本分析方法。该课程是通信工程、电子信息工程、自动化及计算机等专业的一门重要的学科基础课。近几年来,这些学科的理论与实践都得到迅速的发展,分析方法也不断的更新。但是,据我们对国内外许多高等院校的调查,以及与国内外知名专家和同行的相互交流中,发现就本科生课程——信号与系统而言,其教学基本要求及教学内容上是相对稳定的,而市面上的同类教材所包含的内容、组织也大体相同,只是在结构框架、知识点排列次序以及对问题的阐述方法有所不同而已。

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。在前3版教材使用的基础上,我们根据教学反馈情况,进行了进一步的修订,从而使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3版教材相比,第4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内容的组织和选取有了一些调整 and 变化。例如:在第3版的2.4节,介绍卷积积分时只是引出了卷积积分的计算公式,而将卷积积分的计算方法放在了第4章中介绍;同样在7.1.3节,介绍卷积和时也是只介绍卷积和的计算公式,而将卷积和的计算方法放在了第8章中介绍。这样的编排存在着计算公式与计算方法脱节的现象,为了弥补这方面的不足,在第4版教材中,对这方面的内容进行了整合,将卷积积分的计算方法放在了第2章叙述,同样将卷积和的计算方法放在了第7章叙述。②纠正了第3版中的一些错误及不足之处,并修改了某些词语、语句及表述,使得语句更加精炼,更加具有可读性。③对部分例题和习题做了修改。

本书总体特点如下:

### (1) 信号部分与系统部分分开叙述

多数教材在结构上采用的是先连续、后离散,先时域、后变换域,先输入输出分析、后状态变量分析的分析方法,但不管是连续部分还是离散部分,都是将信号与系统穿插在一起分析的。而本教材虽然在大线条上也是按上述次序安排的,但在各板块中则是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。

### (2) 初步使用 MATLAB 验证信号和系统的基本理论

将计算机语言应用到“信号与系统”课程的教学中去,对课程的各知识点进行验证与仿真,大大提高了教学效率。目前,在国际流行的科技应用软件中, MATLAB 是应用最广泛的语言之一。它的特点是操作简单,人机交互性能好。基于这些原因,我们在本教材中补充了 MATLAB 在信号和系统应用方面的内容。

### (3) 突出了傅里叶变换的应用

傅里叶变换是信号处理的核心内容之一,本教材为了强调傅里叶变换应用的重要性和具体问题具体分析的科学工作态度,单独列出一章“傅里叶变换的应用”。

### (4) 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。

#### (5) 习题按知识点次序排列并按难易程度分类

首先，各章习题部分按照知识点的先后次序排列，使读者可以按照所学知识点来方便地选择相应的习题。其次，还将习题按难易程度进行分类，分为基本题、综合题和提高题三类，其中在题号前不加任何符号的为基本题，在题号前加(\*)的为综合题，在题号前加(\*\*)的为提高题，其中基本题和综合题附有参考答案，大部分提高题除了附有参考答案之外，还列出关键步骤或解题提示。

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。

本教材由徐天成统稿。其中第1, 2, 3, 4, 6章由徐天成执笔，第7~9章由谷亚林执笔，第5章及全部的MATLAB内容由钱玲执笔。本书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: [xutiancheng@mail.njust.edu.cn](mailto:xutiancheng@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 .....	(9)
2.3.3 单位冲激信号 .....	(10)
2.3.4 冲激偶信号 .....	(12)
2.4 信号的运算 .....	(13)
2.5 信号的分解 .....	(22)
2.6 MATLAB 的操作界面及连续信号的表示 .....	(25)
习题 .....	(29)
第 3 章 连续时间信号的变换域分析 .....	(33)
3.1 周期信号的频谱分析——傅里叶级数 .....	(33)
3.1.1 三角形式的傅里叶级数 .....	(33)
3.1.2 指数形式的傅里叶级数 .....	(34)
3.1.3 周期信号的频谱及其特点 .....	(35)
3.1.4 波形的对称性与谐波特性的关系 .....	(38)
3.1.5 吉布斯现象 .....	(41)
3.2 典型周期信号的频谱 .....	(42)
3.2.1 周期矩形脉冲信号 .....	(42)
3.2.2 周期锯齿脉冲信号 .....	(45)
3.2.3 周期三角脉冲信号 .....	(45)
3.2.4 周期半波余弦信号 .....	(45)
3.2.5 周期全波余弦信号 .....	(46)
3.3 非周期信号的频谱分析——傅里叶变换 .....	(46)
3.3.1 傅里叶变换及傅里叶逆变换 .....	(46)
3.3.2 傅里叶变换的物理意义——频谱和频谱密度函数 .....	(48)
3.4 典型非周期信号的频谱 .....	(49)
3.5 傅里叶变换的基本性质 .....	(54)
3.6 周期信号的傅里叶变换 .....	(68)
3.7 拉普拉斯变换 .....	(73)

3.7.1	从傅里叶变换到拉普拉斯变换 .....	(73)
3.7.2	拉普拉斯变换的收敛域 .....	(74)
3.7.3	典型信号的拉普拉斯变换 .....	(76)
3.8	拉普拉斯变换的基本性质 .....	(78)
3.9	拉普拉斯逆变换 .....	(86)
3.9.1	部分分式展开法 .....	(87)
3.9.2	留数法 .....	(90)
3.10	连续信号的频域与复频域的 MATLAB 分析 .....	(91)
	习题 .....	(93)
<b>第 4 章</b>	<b>连续时间系统的时域分析 .....</b>	<b>(99)</b>
4.1	系统模型及其分类 .....	(99)
4.2	线性时不变系统及其分析方法概述 .....	(101)
4.2.1	线性时不变系统的基本特性 .....	(101)
4.2.2	线性时不变系统分析方法概述 .....	(104)
4.3	线性时不变系统响应的经典求解 .....	(105)
4.3.1	线性时不变系统的数学模型 .....	(105)
4.3.2	微分方程的经典求解 .....	(106)
4.3.3	初始条件的确定 .....	(109)
4.4	零输入响应与零状态响应 .....	(112)
4.5	冲激响应与阶跃响应 .....	(115)
4.6	系统的卷积积分分析 .....	(116)
4.7	用 MATLAB 对连续时间系统的时域分析 .....	(118)
	习题 .....	(120)
<b>第 5 章</b>	<b>连续时间系统的变换域分析 .....</b>	<b>(124)</b>
5.1	系统响应的拉氏变换求解 .....	(124)
5.1.1	微分方程的拉氏变换求解 .....	(124)
5.1.2	$s$ 域的元件模型 .....	(127)
5.2	系统函数与冲激响应 .....	(131)
5.3	零、极点分布与时域响应特性 .....	(134)
5.3.1	零点与极点的概念 .....	(134)
5.3.2	零、极点分布与时域响应特性 .....	(135)
5.3.3	自由响应与强迫响应、暂态响应与稳态响应 .....	(138)
5.4	零、极点分布与系统频率响应特性的关系 .....	(141)
5.4.1	频率响应特性的定义 .....	(141)
5.4.2	频响特性的矢量作图法 .....	(142)
5.5	典型系统的频响特性 .....	(144)
5.6	全通系统和最小相位系统 .....	(150)
5.7	系统模拟及信号流程图 .....	(153)
5.7.1	系统的框图 .....	(153)

5.7.2	信号流图 .....	(154)
5.7.3	系统模拟 .....	(157)
5.8	系统的稳定性 .....	(162)
5.9	MATLAB 在连续系统变换域分析中的应用 .....	(166)
	习题 .....	(168)
<b>第 6 章</b>	<b>傅里叶变换的应用 .....</b>	<b>(175)</b>
6.1	信号的传输与滤波 .....	(175)
6.1.1	无失真传输 .....	(175)
6.1.2	理想滤波器 .....	(176)
6.2	模拟滤波器的基本概念与设计方法 .....	(181)
6.2.1	系统的物理可实现性 .....	(181)
6.2.2	典型模拟低通滤波器的设计方法 .....	(182)
6.2.3	频率变换 .....	(186)
6.3	信号的采样 .....	(187)
6.3.1	信号采样的概念 .....	(187)
6.3.2	采样信号的傅里叶变换 .....	(188)
6.3.3	采样定理 .....	(190)
6.3.4	从采样信号恢复连续信号 .....	(192)
6.4	调制与解调 .....	(196)
6.4.1	调制的概念及分类 .....	(196)
6.4.2	调幅信号的傅里叶变换 .....	(197)
6.4.3	解调的概念 .....	(201)
6.5	MATLAB 在信息处理与通信中的应用 .....	(203)
	习题 .....	(206)
<b>第 7 章</b>	<b>离散时间信号的时域与变换域分析 .....</b>	<b>(210)</b>
7.1	离散时间信号——序列 .....	(210)
7.1.1	离散时间信号的表示 .....	(210)
7.1.2	序列的种类 .....	(211)
7.1.3	典型序列 .....	(211)
7.1.4	序列的运算 .....	(214)
7.2	序列的 $z$ 变换 .....	(217)
7.2.1	$z$ 变换的定义 .....	(217)
7.2.2	$z$ 变换的收敛域 .....	(218)
7.2.3	常用因果序列的 $z$ 变换 .....	(222)
7.2.4	$s$ 平面到 $z$ 平面的映射 .....	(224)
7.3	$z$ 逆变换 .....	(226)
7.3.1	部分分式展开法 .....	(227)
7.3.2	围线积分法 (留数法) .....	(229)
7.3.3	幂级数展开法 (长除法) .....	(231)



7.4	$z$ 变换的基本性质 .....	(232)
7.5	序列的傅里叶变换 .....	(239)
7.6	离散信号时域与变换域分析的 MATLAB 实现 .....	(242)
	习题 .....	(244)
<b>第 8 章</b>	<b>离散时间系统的时域与变换域分析 .....</b>	<b>(248)</b>
8.1	离散时间系统与差分方程 .....	(248)
8.1.1	线性时不变离散时间系统 .....	(248)
8.1.2	线性时不变离散时间系统的数学模型 .....	(250)
8.2	常系数线性差分方程的求解 .....	(252)
8.2.1	线性常系数差分方程的时域经典法求解 .....	(253)
8.2.2	线性常系数差分方程的零输入响应与零状态响应求解 .....	(256)
8.2.3	线性常系数差分方程的 $z$ 变换法求解 .....	(258)
8.3	离散系统的单位样值响应和系统函数 .....	(260)
8.3.1	单位样值响应 .....	(260)
8.3.2	线性时不变系统的时域分析——卷积和 .....	(262)
8.3.3	系统函数 .....	(263)
8.3.4	离散系统的零极点分布与时域响应特性的关系 .....	(263)
8.3.5	系统函数和系统的因果性与稳定性 .....	(264)
8.4	离散系统的频响特性 .....	(267)
8.4.1	频响特性的定义 .....	(267)
8.4.2	频响特性的矢量几何作图法 .....	(268)
8.5	数字滤波器的原理与结构 .....	(272)
8.5.1	数字滤波器原理 .....	(272)
8.5.2	数字滤波器结构 .....	(274)
8.6	应用 MATLAB 分析离散时间系统 .....	(276)
	习题 .....	(279)
<b>第 9 章</b>	<b>系统的状态变量分析法 .....</b>	<b>(284)</b>
9.1	系统的状态变量和状态方程 .....	(284)
9.2	连续时间系统状态方程的建立 .....	(287)
9.2.1	系统状态方程的直接编写 .....	(288)
9.2.2	系统状态方程的间接编写 .....	(289)
9.3	离散时间系统状态方程的建立 .....	(293)
9.3.1	根据给定系统的差分方程确定状态方程 .....	(293)
9.3.2	根据给定系统的框图或流图建立状态方程 .....	(294)
9.4	连续时间系统状态方程的求解 .....	(295)
9.5	离散时间系统状态方程的求解 .....	(298)
9.6	由状态方程判断系统的稳定性 .....	(301)
9.7	系统的状态变量分析法的 MATLAB 实现 .....	(302)
	习题 .....	(304)

附录 A 常用非周期信号的傅里叶变换表 .....	(308)
附录 B 劳斯准则 .....	(312)
习题答案 .....	(314)
参考文献 .....	(329)

# 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类信号，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、记录或传输的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。也可以说，信号就是载有一定信息的一种物理体现。信号是信息的表现形式，信息则是信号的具体内容。人们相互问询、发布新闻、广播图像或传递数据，其目的都是要把信息借助于一定形式的信号传递出去。

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、电报、无线电广播、电视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，不仅实现了遍绕全球的全球电

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。上课电铃声(声信号)和指挥交通的红绿灯(光信号),都是由电信号控制和推动而得到的。作为声信号的语言通过话筒变换成电信号,放大之后推动扬声器又将其复原成语言信号,使之在较远处也能被听到。景物图像的光信号通过电视摄像机变成电信号,经电视发射台加工处理之后以电磁波形式辐射到空间,远处的电视接收机收到辐射的电磁波后再一次加工处理,使之在电视机屏幕上显示原景物的图像信号。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。不同的时域特性将导致不同的频域特性。这将在第3章频谱分析中详细讨论。随着问题的深入,需用正交变换的方式来描述和研究信号。

## 2. 信号处理的概念

随着信号传输理论与技术的发展,信号处理的理论与技术亦迅猛发展。所谓信号处理可以理解是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看做是通信。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、电报、电视、雷达、导航等系统均属之。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。

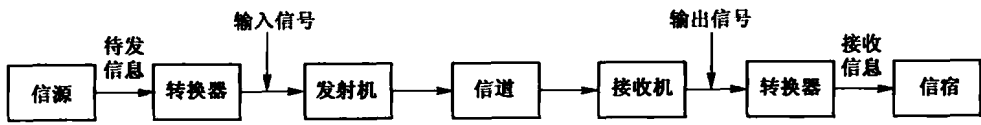


图 1-1 通信系统的组成

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. 系统、电路与网络的区别

在一定意义上，系统与电路 (circuit) 或网络 (network) 是同义词。电路和网络就是一个系统。系统所关心的是，对于给定的信号形式与传输、处理的要求，系统能否与之相匹配，系统为此而需要具有怎样的功能和特性。网络问题的着眼点在于，为实现系统的功能与特性，网络应具有怎样的结构，其各种参数如何确定。系统与网络的差异，主要体现在观察事物的着眼点或处理问题的角度方面。系统问题侧重全局，而网络问题则侧重局部。例如，仅由一个电阻和一个电容组成的简单电路，在网络分析中，注意研究其各支路、回路的电压或电流；而从系统的观点来看，可以研究它如何构成具有微分或积分功能的运算器。近年来，由于大规模集成电路技术的发展，各种极其复杂的网络系统可以直接做在一个很小的集成电

路芯片上,使得系统、网络、电路及器件之间的差别日益缩小,无须严格区分各名词之差异。本书中,系统、网络与电路等名词通用。

## 5. 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。信号是待传递消息的表现形式,是运载信息的工具;而系统则是为传输信号或对信号进行加工处理而构成的某种组合。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

$$y(t) = T[x(t)]$$

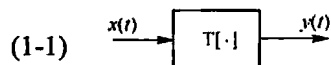


图 1-2 系统的方框图

式中,  $x(t)$  亦可称为激励;  $y(t)$  亦可称为响应;  $T[\cdot]$  可以看做是一种算子,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。

## 第 2 章 连续时间信号的时域分析

引言中指出, 信号是随时间而变化的, 它的数学表达式是时间的函数, 这是信号的基本描述方法。当然, 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。本章讨论连续时间信号的时域分析, 在第 3 章中还要研究连续时间信号的变换域分析。

### 2.1 信号的分类

信号种类很多, 从不同角度可以有不同分类方法。

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, 只能通过大量实验测出取某些值可能性的分布 (概率分布)。本书只讨论确定性信号。

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) 所示的正弦信号和图 2.1-1(b) 所示的信号都是连续时间信号。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, 而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。

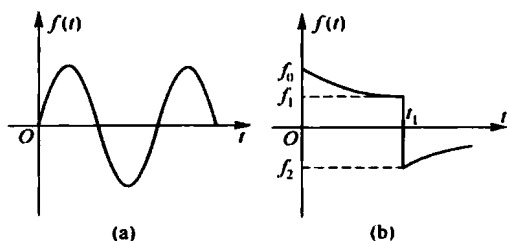


图 2.1-1 连续时间信号

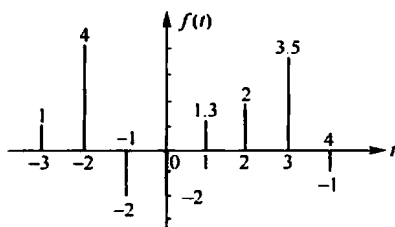


图 2.1-2 离散时间信号

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。

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。

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 常用连续时间信号

### 1. 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，信号不随时间而变化，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。

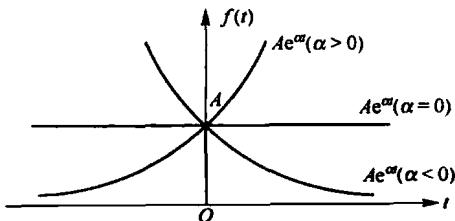


图 2.2-1 指数信号

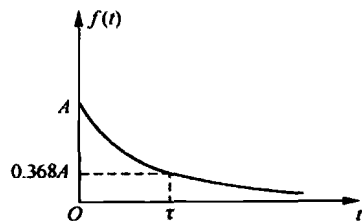


图 2.2-2 单边指数衰减信号



## 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, 其波形如图 2.2-4 所示。其表达式为

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

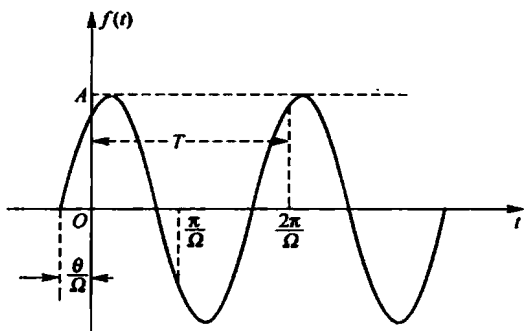


图 2.2-3 正弦信号

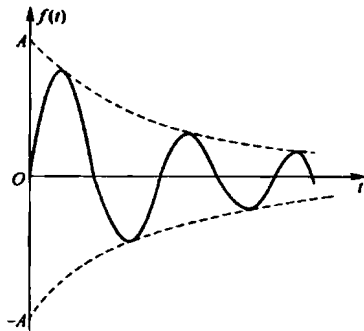


图 2.2-4 指数衰减的正弦信号

## 3. 抽样函数

抽样函数 (sampling function) 的表达式为

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

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。

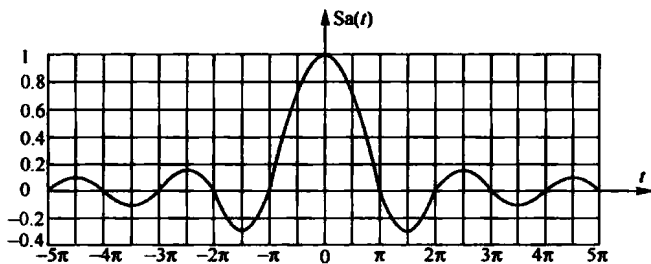


图 2.2-5 抽样函数