

高等院校电子信息类“十四五”应用型人才培养新形态信息化教材

信号与系统简明教程

主 编

郭铁梁

副主编

张文祥

吕美妮

李炳槐

西南交通大学出版社
· 成 都 ·

内容简介

本教程主要讲述确定信号通过线性时不变系统的时域分析、频域分析及复频域分析,并从时域和变换域分别阐述信号与系统的描述与特性。本教程按照连续与离散并行,先信号再系统,先时域再频域的逻辑体系,对知识进行结构化与系统化安排,重点体现课程内容的简明性与专业实用性,并结合 MATLAB 实现方法解决工程实际问题。全书共 8 章,包括概述部分、信号的时域分析、系统的时域分析、信号的频域分析、系统的频域分析、信号的复频域分析、系统的复频域分析及信号与系统的 MATLAB 仿真补充练习。本书配套仿真程序源代码、课后习题并附参考解答。

本书可作为电子信息工程、通信工程、微电子科学与技术、机器人工程、自动化、光电工程、计算机工程等专业的应用型本科生“信号与系统”课程教材,也可供相关科研及工程技术人员学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统简明教程 / 郭铁梁主编. —成都: 西南交通大学出版社, 2022.10
高等院校电子信息类“十四五”应用型人才
培养新形态信息化教材
ISBN 978-7-5643-8909-3

I. ①信… II. ①郭… 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(2022)第 165480 号

高等院校电子信息类“十四五”应用型人才
培养新形态信息化教材

Xinhao yu Xitong Jianming Jiaocheng

信号与系统简明教程

主编 郭铁梁

责任编辑 梁志敏
封面设计 何东琳设计工作室

出版发行 西南交通大学出版社
(四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号
西南交通大学创新大厦 21 楼)

邮政编码 610031
发行部电话 028-87600564 028-87600533
网址 <http://www.xnjdcbs.com>
印刷 四川森林印务有限责任公司

成品尺寸 185 mm × 260 mm
印张 14.25
字数 358 千
版次 2022 年 10 月第 1 版
印次 2022 年 10 月第 1 次
定价 42.00 元
书号 ISBN 978-7-5643-8909-3

课件咨询电话: 028-81435775

图书如有印装质量问题 本社负责退换

版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562



前言

信号与系统是通信工程、电子信息工程、自动化、计算机等专业的重要专业基础课程。信号与系统主要研究确定性信号和线性时不变系统的基本概念与基本理论、信号的频谱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。本课程的先修课程包括电路、复变函数与积分变换、微积分和线性代数等，是后续进一步学习数字信号处理、通信原理、信号检测等课程的必要基础。

作为一本简明教程，本书在理论方面重点对物理意义进行讲解，不作数学意义上的广泛展开。教材删除了后续课程特别是数字信号处理要重点讲述的内容，避免不必要的重复，将有限的学时用于课程中重点内容的学习。

教材编写过程中，对体系和内容进行了科学组织，力求体系结构循序渐进，内容叙述深入浅出，使之更加符合学习的认知过程。下面从三个方面介绍本书的知识体系结构特点：第一，先进行信号分析再进行系统分析，因为信号分析是系统分析的基础，只有通过信号分析，确定信号的特征，并对其进行有效的表示，才能够正确选择和设计相应的系统，对信号进行有效处理；第二，连续与离散并

行，将连续与离散并列在同一章中，先介绍连续再介绍离散，这样可以避免连续与离散脱节，便于比较连续与离散的特点，加深其理解；第三，先进行时域分析再进行变换域分析，在深刻理解时域分析的理论和方法并了解其优缺点之后，再进行频域和复频域分析，从而发现时域分析与变换域分析的相互关系和各自的适用范围。

在工程应用方面，体现经典与现代、信号与系统的辩证关系，适当反映信息技术的新理论和新技术。特别在变换域分析中，突出 Fourier 变换、Laplace 变换及 z 变换的工程概念，锻炼学生分析问题与解决问题的能力。书中还增加了一定量的工程例题与习题，在辅助工具上注重计算仿真软件 MATLAB 的应用，除了在每一章后面有 MATLAB 实现及应用小节以外，本书的第 8 章又额外提供了

MATLAB 仿真补充练习的内容，包括如何对实际问题建立数学模型，如何用适当的数学工具对数学模型进行分析和求解等，以加强学生应用所学知识的能力。

另外，每一章后面的阅读材料也是本书的一大特色，主要包括科学家简介、相关历史背景知识介绍以及典型工程应用等，从而为达到进一步贯彻落实高校思

想政治工作的新精神和新要求，加快思想政治工作体系建立的目标，发挥本课程的作用。

全书共包括 8 章，包括概述部分、信号的时域分析、系统的时域分析、信号的频域分析、系统的频域分析、信号的复频域分析、系统的复频域分析及信号与系统的 MATLAB 仿真补充训练等。本书 1~4 章由郭铁梁编写，第 5、6 章由张文祥编写，第 7 章由吕美妮编写、第 8 章由李炳槐编写，全书由郭铁梁主编和统稿。

本书在编写过程中参考了大量相关文献资料，得到了部分文献编著者的帮助。另外，本书还得到了梧州学院相关部门以及西南交通大学出版社的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

鉴于作者水平有限，本书难免存在疏漏与欠妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2022 年 5 月于广西梧州



第 1 章 信号与系统概述	001
1.1 信号的描述与分类	001
1.2 系统的描述与分类	004
1.3 信号与系统基本内容及分析方法	009
习 题	011
第 2 章 信号的时域分析	014
2.1 连续时间信号的时域分析	014
2.2 离散时间信号的时域分析	027
2.3 MATLAB 实现及应用	034
习 题	038
第 3 章 系统的时域分析	041
3.1 连续时间系统的时域分析	041
3.2 离散时间系统的时域分析	053
3.3 MATLAB 实现及应用	067
习 题	074
第 4 章 信号的频域分析	077
4.1 连续时间周期信号的频域分析	077
4.2 连续时间非周期信号的频域分析	084
4.3 离散时间周期信号的频域分析	104
4.4 离散时间非周期信号的频域分析	106
4.5 离散时间傅里叶变换的性质	109
4.6 信号的时域抽样定理	110
4.7 MATLAB 实现及应用	113

习 题	119
第 5 章 系统的频域分析	123
5.1 连续时间系统的频域分析方法	123
5.2 离散时间系统的频域分析	132
5.3 MATLAB 实现及应用	135
习 题	138
第 6 章 信号的复频域分析	141
6.1 连续时间信号的复频域分析	141
6.2 离散时间信号的复频域分析	150
6.3 MATLAB 实现及应用	157
习 题	160
第 7 章 系统的复频域分析	163
7.1 连续时间系统的复频域分析	163
7.2 离散时间系统的复频域分析	171
7.3 MATLAB 实现及应用	175
习 题	179
第 8 章 信号与系统的 MATLAB 仿真补充练习	181
8.1 连续时间信号与系统的时域分析	181
8.2 离散时间信号与系统的时域分析	191
8.3 信号与系统的频域分析	197
8.4 信号与系统的复频域分析	205
习题答案	210
参考文献	222

数字资源目录

序号	资源名称	资源类型	页码	资源位置	序号	资源名称	资源类型	页码	资源位置
1	信号与系统概述	视频	001	第 1 章	9	系统的频域分析	视频	123	第 5 章
2	信号与系统概述	PPT	001		10	系统的频域分析	PPT	123	
3	信号的时域分析	视频	014	第 2 章	11	信号的复频域分析	视频	141	第 6 章
4	信号的时域分析	PPT	014		12	信号的复频域分析	PPT	141	
5	系统的时域分析	视频	041	第 3 章	13	系统的复频域分析	视频	163	第 7 章
6	系统的时域分析	PPT	041		14	系统的复频域分析	PPT	163	

7	信号的频域分析	视频	077	第 4 章					
8	信号的频域分析	PPT	077						

第 1 章

信号与系统概述

1.1 信号的描述与分类



视频: 信号与系统概述



PPT: 信号与系统概述

1.1.1 信号的描述与表示

人们除了使用语言或文字直接传递信息 (information) 以外, 还可利用信号 (signal) 传递信息, 人类最早使用的信号是光信号与声信号, 例如烽火狼烟、击鼓鸣金及灯塔旗语等。信号作为信息的载体, 对信息的高效可靠传输有着至关重要的作用。信号可以广义地定义为随一些参数变化的某种物理量, 根据所采用的物理量的不同, 除了光信号、声信号以外, 还有温度信号、压力信号及电信号等。在上述诸多信号中, 电信号是一种最便于产生、传递、存储、控制和处理的信号形式。许多非电信号可以通过相应的传感器转换为电信号, 这里的电信号一般用随时间变化的电压或电流表示。本书中的信号一般情况下均指仅随时间变化的一维电信号。在数学上, 信号可以表示为一个或多个变量的函数, 描述信号的基本方法是写出它的数学表达式, 对于信号来说, 此表达式是时间的函数, 绘出函数的图象称为信号的波形, 为了便于讨论, 本书中的“信号”与“函数”两个名词是通用的。除了时间函数表达式与波形这两种直观的描述方法以外, 随着学习的深入, 还需要用频谱等其他方式对信号进行分析和描述。

1.1.2 信号的分类

信号有很多种分类方法, 本书根据信号和自变量的特性, 可以从不同的角度对信号进行分类。

1. 确定信号与随机信号

按在某一时刻信号是否具有确定值来划分, 信号可分为确定信号与随机信号。确定信号是指能够用确定的时间函数表示的信号, 如图 1-1 (a) 所示的正弦信号就是典型的确定信号。随机信号又称为不确定信号, 是指无法用确定的时间函数来表达的信号。因此随机信号是不能用确定的数学关系式来描述的, 不能预测其未来的瞬时值, 任何一次观测只代表其在变动范围中可能产生的结果之一, 它不是时间的确定函数, 在定义域内的任意时刻没有确定的函数值。但是, 随机信号幅值的变化服从统计规律, 例如, 通信中的某些噪声信号就是随机信号, 如图 1-1 (b) 所示。由于随机信号的规律比较复杂, 本书重点学习和研究确定信号。

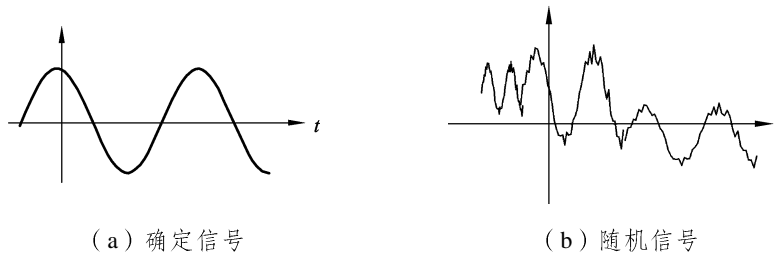


图 1-1 确定信号与随机信号

2. 连续时间信号与离散时间信号

根据信号在时间上的取值是否连续，可以将信号分为连续时间信号和离散时间信号。除个别不连续点外，如果信号在所讨论的时间段内的任意时间点都有确定的函数值，则称此类信号为连续时间信号，简称连续信号，通常以 $f(t)$ 表示，如图 1-2 (a) 所示。连续信号的幅值可以是连续的，也可以是离散的。另外，只在一系列离散的时间点上才有确定幅值，而在其他的时间点上无定义的信号就是离散时间信号，通常以 $f[k]$ 表示，如图 1-2 (b) 所示。离散时间信号在时间上是不连续的序列，因此也称离散时间信号为序列。

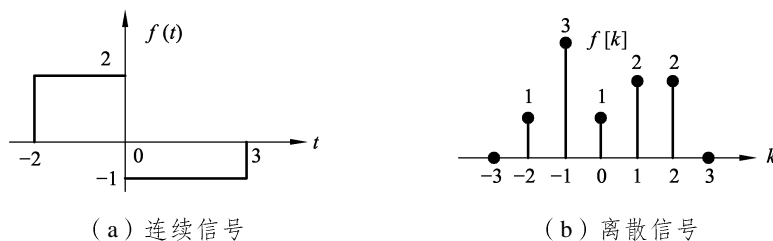


图 1-2 连续时间信号与离散时间信号

3. 周期信号与非周期信号

从是否具有周期性的角度对信号进行分类，可将信号分为周期信号与非周期信号。连续周期信号 $f(t)$ 和离散周期信号 $f[k]$ 的数学表达式分别为

$$f(t) = f(t+T), \quad -\infty < t < \infty \quad (1-1)$$

$$f[k] = f[k+N], \quad -\infty < k < \infty, \quad k \text{ 为整数} \quad (1-2)$$

满足上述关系的最小正数 T (或最小正整数 N) 称为该信号的周期，不具有周期性的信号称为非周期信号。

【例 1-1】 判断离散正弦信号 $f[k] = \sin(\omega_0 k)$ 是否为周期信号，如果是周期信号，其周期是多少？

解：根据离散周期信号的定义，如果下式成立：

$$\sin[\omega_0(k+N)] = \sin(\omega_0 k)$$

则 $f[k]$ 是周期信号，进而有下式

$$\sin[\omega_0(k+N)] = \sin(\omega_0 k + \omega_0 N)$$

要想使上式成立，则有

$$\omega_0 N = 2m\pi \quad (m \text{ 为正整数}) \quad \text{或} \quad \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{m}{N} = \text{有理数}$$

因此，只有在 $\omega_0/2\pi$ 为有理数时， $f[k] = \sin(\omega_0 k)$ 才是一个周期信号，当 m/N 为最简整数比时，正整数 N 称为 $f[k]$ 的最小正周期，这里的 ω_0 称为离散正弦信号的数字角频率。

4. 能量信号与功率信号

按连续时间信号的可积性或离散时间信号求和的有限性，信号可以分为能量信号与功率信号。判断一个信号是能量信号还是功率信号，首先需要计算其归一化能量和归一化功率。如果信号 $f(t)$ 表示的是随时间变化的电流或电压，则当信号 $f(t)$ 通过 $1\ \Omega$ 电阻时，信号在时间 $(-\infty, \infty)$ 内所消耗的能量称为归一化能量，用式 (1-3) 表示。

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

而在时间 $(-\infty, \infty)$ 内所消耗的平均功率称为归一化功率，用式 (1-4) 表示

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt \quad (1-4)$$

对于离散时间信号 $f[k]$ ，其归一化能量与归一化功率的定义分别如式 (1-5)、(1-6) 表示：

$$E = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{-N}^N |f[k]|^2 \quad (1-5)$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{-N}^N |f[k]|^2 \quad (1-6)$$

如果信号的归一化能量为非零有限值，并且其归一化功率为零，即 $0 < E < \infty$ ， $P = 0$ ，则该信号为能量信号；如果信号的归一化能量为无穷大，并且其归一化功率为非零有限值，即 $E \rightarrow \infty$ ， $0 < P < \infty$ ，则该信号为功率信号。

【例 1-2】 判断下列信号是能量信号还是功率信号。

(1) $f(t) = 2 \sin\left(3t + \frac{\pi}{3}\right)$

(2) $f(t) = 3e^{-5t}$

(3) $f[k] = (0.2)^k$ ， $k \geq 0$

解：(1) $f(t)$ 为周期信号，周期为 $T = \frac{2\pi}{3}$ ，先计算一个周期内的归一化能量

$$\begin{aligned} E_0 &= \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt = \int_{-T/2}^{T/2} 4 \sin^2\left(3t + \frac{\pi}{3}\right) dt \\ &= 4 \int_{-T/2}^{T/2} \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(3t + \frac{\pi}{3}\right)\right] dt = 2T = \frac{4\pi}{3} \end{aligned}$$

由于 $f(t)$ 有无限个周期，所以其归一化总能量为无穷大，即 $E \rightarrow \infty$ 。

再计算 $f(t)$ 的归一化功率

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

由于 $E \rightarrow \infty$, $0 < P < \infty$, 所以 $f(t)$ 是功率信号。

(2) $f(t)$ 的归一化能量与归一化功率分别为

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T/2}^{T/2} 9e^{-10t} dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[-\frac{9}{10}(e^{-5T} - e^{5T}) \right] = \infty$$

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |f(t)|^2 dt = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left[-\frac{9}{10}(e^{-5T} - e^{5T}) \right] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{9e^{5T}}{10T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{9e^{5T}}{2} = \infty$$

由于 $f(t)$ 的归一化能量为无穷大, 归一化功率也为无穷大, 因此 $f(t)$ 既不是能量信号也不是功率信号。

(3) 由式 (1-5) 和式 (1-6) 分别计算得如下两式

$$E = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=-N}^N |f[k]|^2 = \sum_{k=0}^{\infty} (0.2)^{2k} = \frac{1}{1-0.04} = 1.04$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N |f[k]|^2 = 0$$

$f[k]$ 满足 $0 < E < \infty$, $P = 0$, 因此是能量信号。

综上, 对于能量信号, 由于其能量是有限的, 其功率在无限大时间区间内的平均值一定为零, 故只能从能量的角度去研究。同样, 对于功率信号, 由于其在无限大时间区间上存在有限功率, 其能量必定为无穷大, 故只能从功率的角度去研究。应该注意的是, 一般情况下, 直流信号和周期信号都是功率信号。一个信号不可能既是能量信号又是功率信号, 还有一些信号, 可能既不是能量信号, 也不是功率信号, 如例 1-2 中第 (2) 小题所表达的指数衰减信号。

1.2 系统的描述与分类

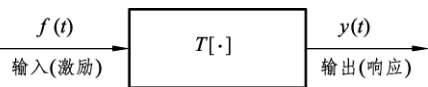
1.2.1 系统的描述与数学模型

对信号进行加工处理, 需要由系统 (system) 来完成。系统是指由若干相互关联的单元组成的具有特定功能的有机整体。从广义的角度讲, 系统的种类繁多, 如通信系统、计算机系统、生物系统、社会系统及经济系统等。本书所讨论的系统主要指狭义的电系统, 因为大多数非电系统可以用电系统来模拟或仿真, 所以在各种系统中, 电系统具有重要作用。

系统的基本作用是对输入信号进行分析、计算、变换及综合等处理工作, 以达到提取有用信息或便于利用的目的。因此, 信号与系统是相互依存的, 信号不可能离开系统而孤立存在, 系统离开信号就失去了存在的意义。通常情况下, 系统存在输入和输出, 系统的输入信号也称为激励, 输出信号也称为系统的响应。系统可以多输入, 也可以多输出, 本书仅讨论

单输入单输出系统，如图 1-3 的系统框图所示，图中 $T[\cdot]$ 表示系统对于输入信号的加工处理作用，即系统的输入输出关系可以表示为

$$y(t) = T[f(t)] \quad (1-7)$$



注意，式 (1-7) 所表达的关系不是函数关系，而是系统对输入信号的作用或变换关系。

图 1-3 单输入单输出系统框图

系统一般使用系统模型来描述，系统模型是对实际系统基本特性的一种抽象描述。根据不同的需要，可以建立和使用不同类型的系统模型。系统模型可以由物理部件组成的结构图，也可由基本单元构成的模拟框图或信号流图，还可以是由输入、输出变量组成的数学方程。通常可以采用输入输出描述法或状态空间描述法建立系统模型。输入输出描述法着眼于系统输入与输出的关系，适用于单输入单输出系统。状态空间描述法着眼于系统内部的状态变量，既可以用于单输入单输出系统，也可用于多输入多输出系统。本书重点讨论单输入单输出系统的输入输出描述法。

下面以电路系统为例说明系统模型的建立过程和不同的描述方法，图 1-4 所示的电路系统由电阻 R 、电感线圈 L 串联构成，若把电压源作为系统的输入信号 $f(t)$ ，把回路电流作为系统的输出信号 $y(t)$ ，根据电路理论可以建立如下的微分方程：

$$L \frac{dy(t)}{dt} + Ry(t) = f(t) \quad (1-8)$$

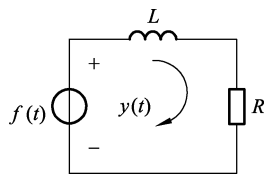


图 1-4 RL 电路系统

这就是描述该系统输入输出关系的数学模型。

系统的模型还可以用方框图或信号流图来表示，系统框图无论多么复杂，都是由三种基本单元方框图通过不同的联结方式构成的。对于处理连续时间信号的系统，由加法器、乘法器和积分器三个基本单元构成，如图 1-5 所示；对于处理离散时间信号的系统，由加法器、乘法器和单位延时器三个基本单元构成，如图 1-6 所示。

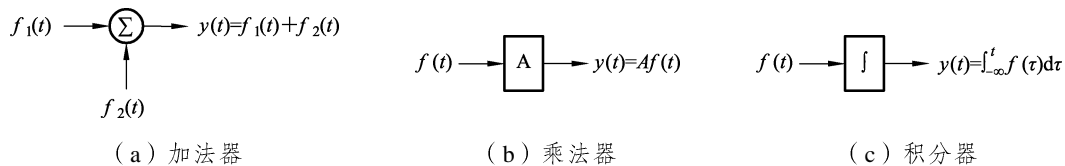


图 1-5 处理连续信号的系统基本单元方框图

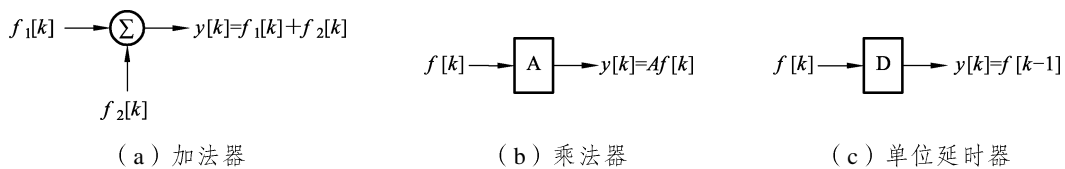


图 1-6 处理离散信号的系统基本单元方框图

式 (1-8) 所描述的电路系统可以利用加法器、乘法器和积分器进行相应的联结而得到系统框图，如图 1-7 所示。

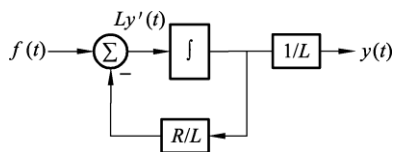


图 1-7 RL 电路系统方框图

1.2.2 系统的分类

系统的分类非常复杂，本书中主要考虑其数学模型的差异来划分不同的类型。

1. 连续时间系统与离散时间系统

如果系统的输入（激励）与输出（响应）都为连续时间信号，则这样的系统就是连续（时间）系统；如果系统的输入与输出都为离散时间信号，则该系统称为离散（时间）系统。图 1-4 所示的电路系统就是连续系统，计算机系统就是典型的离散系统。连续系统中的连续时间变量为 t ，而离散系统中的时间变量为整数 k 。描述连续系统的数学模型常用微分方程，而描述离散系统的数学模型常用差分方程。

2. 线性系统与非线性系统

线性系统指具有线性特性的系统，线性特性包括均匀性与叠加性。不满足线性特性的系统称为非线性系统。所谓均匀性是指当系统输入信号乘以某常数时，输出信号也倍乘相同的常数；而叠加性说的是当几个激励信号同时作用于系统时，总的响应等于每个激励单独作用该系统所产生的响应之和。均匀性与叠加性可用下面的数学语言进行描述。

对于连续时间系统，设系统输入为 $f(t)$ ，输出为 $y(t)$ ，如果

$$y_1(t) = T[f_1(t)], \quad y_2(t) = T[f_2(t)]$$

则系统为线性的条件为

$$\alpha y_1(t) + \beta y_2(t) = T[\alpha f_1(t) + \beta f_2(t)] \quad (1-9)$$

式 (1-9) 中， α 、 β 为非零常数。

同样，对于离散系统，设系统输入为 $f[k]$ ，输出为 $y[k]$ ，如果

$$y_1[k] = T[f_1[k]], \quad y_2[k] = T[f_2[k]]$$

则系统为线性的条件为

$$\alpha y_1[k] + \beta y_2[k] = T[\alpha f_1[k] + \beta f_2[k]] \quad (1-10)$$

式 (1-10) 中， α 、 β 为非零常数。

【例 1-3】 分别判断积分器与单位延时器是否为线性系统。

解：(1) 积分器为连续时间系统的基本组成单元之一，可利用式 (1-9) 判断其是否为线性系统。

设 $f(t) = \alpha f_1(t) + \beta f_2(t)$ ，则

$$y(t) = T[f(t)] = \int_{-\infty}^t [\alpha f_1(\tau) + \beta f_2(\tau)] d\tau$$

$$= \alpha \int_{-\infty}^t f_1(\tau) d\tau + \beta \int_{-\infty}^t f_2(\tau) d\tau = \alpha y_1(t) + \beta y_2(t)$$

因此积分器为连续时间线性系统。

(2) 差分器为离散时间系统的基本组成单元之一，可利用式(1-10)判断其是否为线性系统。

设 $f[k] = \alpha y_1[k] + \beta y_2[k]$ ，则

$$y[k] = T[f[k]] = T[\alpha f_1[k] + \beta f_2[k]] = \alpha f_1[k-1] + \beta f_2[k-1] = \alpha y_1[k] + \beta y_2[k]$$

因此差分器为离散时间线性系统。

实际上，许多系统是含有初始状态的，在判断系统是否具有线性时，同时也要考虑由系统初始状态所产生的响应（零输入响应）是否具有线性的问题，对于含有初始状态系统的线性问题的判断，本书不做详细讨论，感兴趣的读者可以参考其他教材资料。

3. 时不变系统与时变系统

对于时不变系统，由于系统参数本身不随时间改变，在零初始状态之下，系统响应与激励施加于系统的时刻无关。如图 1-8 所示，系统的时不变特性表明，当激励延迟 t_0 的时间，其输出响应也同样延迟 t_0 的时间，信号的波形形状不变，否则为时变系统。

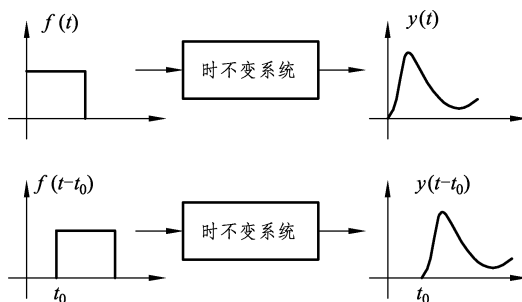


图 1-8 系统时不变特性图示

对于连续时间时不变系统，用 $y_f(t)$ 表示系统没有初始状态时的响应（零状态响应），若

$$y_f(t) = T[f(t)]$$

则

$$y_f(t-t_0) = T[f(t-t_0)]$$

同样，对于离散的时不变系统，用 $y_f[k]$ 表示系统的零状态响应，若

$$y_f[k] = T[f[k]]$$

则

$$y_f[k - k_0] = T[f[k - k_0]]$$

【例 1-4】 分别判断积分器与单位延时器是否为时不变系统。

解：(1) 由于系统的时不变特性不涉及系统的初始状态，因此在判断系统的时不变特性时，只考虑系统的零状态响应，由积分器的输入输出关系可得

$$\text{系统作用关系} \quad T[f(t)] = \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau \Rightarrow T[f(t - t_0)] = \int_{-\infty}^t f(\tau - \tau_0) d\tau = \int_{-\infty}^{t-t_0} f(\lambda) d\lambda$$

$$\text{函数关系} \quad y_f(t) = \int_{-\infty}^t f(\tau) d\tau \Rightarrow y_f(t - t_0) = \int_{-\infty}^{t-t_0} f(\tau) d\tau$$

$$\text{所以} \quad T[f(t - t_0)] = y_f(t - t_0)$$

可见，系统作用关系与函数关系相等，积分器为时不变系统。

(2) 由单位延时器的输入输出关系可得

$$\text{系统作用关系} \quad T[f[k]] = f[k - 1] \Rightarrow T[f[k - k_0]] = f[k - 1 - k_0]$$

$$\text{函数关系} \quad y_f[k] = f[k - 1] \Rightarrow y_f[k - k_0] = f[k - k_0 - 1] = f[k - k_0 - 1]$$

$$\text{所以} \quad T[f[k - k_0]] = y_f[k - k_0]$$

可见，系统作用关系与函数关系相等，延时器为时不变系统。

结合例 1-3 和例 1-4 结果可知，连续时间系统的积分器和离散时间系统的延时器，均是线性时不变 (Linear Time-Invariant, LTI) 系统。

4. 因果系统与非因果系统

如果把系统的激励视为引起响应的原因，而把响应视为激励作用于系统的结果，那么，系统在任何时刻的响应只与该时刻及该时刻之前的激励有关，而与之后的激励无关，这样的系统就是因果系统，否则，就是非因果系统。

【例 1-5】 判断下列系统的因果性。

$$(1) \quad y_f(t) = 2f(t), \quad t > 0$$

$$(2) \quad y_f(t) = 3f(t-1), \quad t > 1$$

$$(3) \quad y_f[k] = 5f[k+1], \quad k > 0$$

解：(1) 该系统的激励 $f(t)$ 与零状态响应 $y_f(t)$ 同时，故为因果系统。

(2) 该系统的零状态响应 $y_f(t)$ 不超前于输入 $f(t)$ ，故为因果系统。

(3) 该系统的零状态响应 $y_f[k]$ 超前于输入 $f[k]$ ，故为非因果系统。

5. 稳定系统与非稳定系统

如果对于任何有界的输入，系统的输出也是有界的，这样的系统就称为稳定系统，反之，如果系统对于有界的激励，系统的响应为无界的，这样的系统就称为非稳定系统。

除了以上几种系统分类方式以外，还可以按照系统的性质将它们划分为集总参数系统与分布参数系统、可逆系统与不可逆系统、记忆系统与非记忆系统，等等。在上述诸多系统中，线性时不变系统的分析具有重要意义。因为实际应用中的大部分系统属于或可近似地看作是线性时不变系统，并且线性时不变系统的分析方法已有比较完善的理论。因此，本书重点学习和讨论的系统都是线性时不变系统。

1.3 信号与系统基本内容及分析方法

1.3.1 信号与系统的基本内容

信号与系统主要包括信号分析与系统分析两部分内容，信号分析的核心内容是信号的表达，即用不同的方式将复杂信号表达为一些基本信号的线性组合，通过研究基本信号的特性来研究一般复杂信号的规律。系统分析的核心内容是系统的描述，即从不同的角度对系统进行描述，以达到对系统进行全面有效分析的目的。信号表达与系统描述是相互关联的，特别是对于系统的描述是通过信号来完成的，只有通过系统对信号的作用才能得到系统激励与响应的关系，信号与系统课程的主要内容及知识体系如图 1-9 所示。

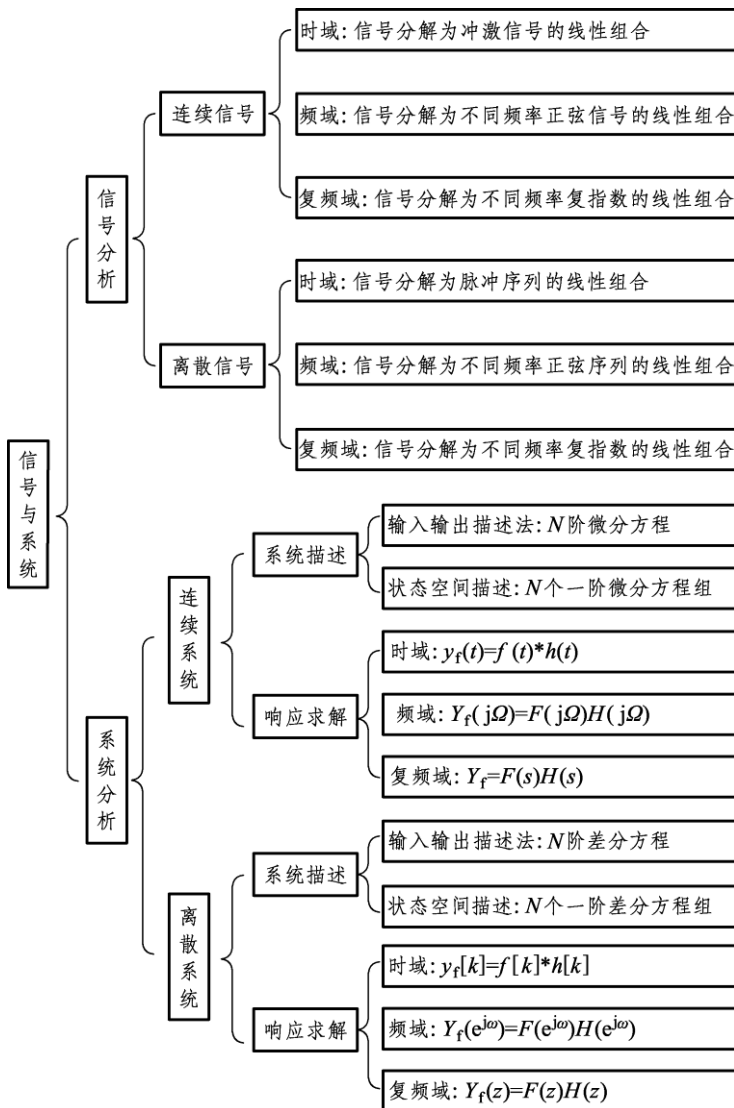


图 1-9 信号与系统知识结构图

1.3.2 信号与系统的主要分析方法

信号与系统的分析方法主要采用时域分析法、频域分析和复频域分析法。信号时域分析通过信号的分解与组合分析信号随时间变化的波形规律。系统时域分析揭示信号作用于系统的原理，给出输入、输出和系统之间的时域关系及系统的时域描述。信号频域分析的基本原理是通过傅里叶（Fourier）变换把信号分解为不同频率基本信号的叠加，观察信号所包含的各频率分量的幅值和相位，得到信号的频谱特性。系统频域分析是观察系统对不同频率激励信号的响应，得到系统的频率响应特性。信号和系统分析还有复频域分析方法：对于连续信号和系统，基于拉普拉斯（Laplace）变换，称为 s 域分析；对于离散信号和系统，基于 z 变换，称为 z 域分析。基于复频域分析，能够分析系统的频率响应特性和系统稳定性等；复频域分析也能简化系统分析，将在时域分析中需要进行的微分或差分运算简化为复频域中的代数运算。

阅读材料

人们利用信号的历史可以追溯至很久以前。我国古代利用烽火传送边疆战事，古希腊人也以火炬的位置表示字母符号。另外，人们还利用击鼓鸣金的声响报送时刻或传递战斗命令等，之后又出现了信鸽、旗语、驿站等传送消息的方法。然而，这些方法无论在消息传递的距离、速度或可靠性与有效性方面都存在严重的不足。19世纪初，人们开始研究如何利用电信号传送消息。1837年，莫尔斯（F. B. Morse）发明了电报，他用点、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，直接将声信号转变为电信号沿导线传送。19世纪末，人们又致力于研究用电磁波传送无线电信号。为实现这一理想，德国的赫兹（H. Hertz）、俄国的波波夫（A. C. Попов）、意大利的马可尼（G. Marconi）实现了电信号的无线传输。从此以后，传送电信号的通信方式得以迅速发展，无线电广播、超短波通信、广播电视、雷达及无线电导航等相继出现，并有了广泛的应用前景。如今，无线电信号的传输不仅能够飞越高山海洋，而且可以遍及全球并通向宇宙。例如，以卫星通信技术为基础的中国北斗导航系统（Beidou Navigation Satellite System, BDS）、美国全球定位系统（Global Positioning System, GPS）、俄罗斯格洛纳斯定位系统（Global Orbiting Navigation Satellite System, GLONASS）、欧洲的伽利略导航系统（Galileo Satellite Navigation System, GNS）等都可以利用无线电信号的传输，测定地球表面和周围空间任意目标的位置。而对于个人通信技术，在通信网覆盖区域内基本上可以实现与任何人、任何时间、任何地点的通信。

信号与系统的应用范围极其广泛，从某种意义上说，事物之间都是通过信号和系统相互联系、相互作用、相互依存。例如，生命体就是一个复杂的多输入多输出系统，通过感官获取外部信号，然后经过加工处理输出相应的反应或动作。随着现代信息技术的发展，信号与系统的基本理论和基本概念在电子信息等领域得到了广泛的应用，下面分别从通信、信号处理及控制三个方面对信号与系统的应用加以简单的介绍。

在通信系统中，许多信号不能直接进行传输，需要根据实际情况对信号进行适当的调制，

以提高信号的传输质量或传输效率。信号的调制有多种形式,如信号的幅度调制、频率调制和相位调制,都是基于信号与系统的基本理论。信号的正弦幅度调制可以实现频分复用,信号的脉冲幅度调制可以实现时分复用,复用技术可以极大地提高信号的传输效率,有效地利用信道资源。信号的频率调制和相位调制可以增强信号的抗干扰能力,提高其传输质量。此外,离散信号的调制还可以实现信号的加密、多媒体信号的综合传输等。由此可见,信号与系统的理论和方法在通信领域有着广泛的应用。

在信号处理领域中,信号与系统的时域分析和变换域分析理论与方法为信号处理奠定了必要的理论基础。在信号的时域分析中,信号的卷积与解卷积理论可以实现信号的恢复和信号去噪,信号相关理论可以实现信号检测和谱分析等。在信号的变换域分析中,信号的 Fourier 变换可以实现信号的频谱分析,连续信号的 Laplace 变换和离散信号的 z 变换可以实现系统的变换域描述等,信号的变换域分析拓展了信号时域分析的范畴,为信号的分析 and 处理提供了一种新的途径。信号与系统分析的理论也是现代信号处理的基础,如信号的自适应处理、时频分析及小波分析等。

在控制系统中,系统的传输特性和稳定性是描述系统的重要属性。信号与系统分析中的系统函数可以有效地描述连续时间系统与离散时间系统的传输特性和稳定性。一方面通过分析系统的系统函数,可以清楚地确定系统的时域特性、频域特性,以及系统的稳定性等;另一方面在使用系统函数分析系统特性的基础上,可以根据实际需要调整系统函数以实现所需要的系统特性,如通过分析系统函数的零极点分布,可以了解系统是否稳定,若不稳定,可以通过反馈等方法调整系统函数实现系统的稳定。系统函数在控制系统的分析与设计中有着重要的作用。

习 题

一、单项选择题

- 下列有关信号的说法错误的是 ()。
 - 信号是消息的表现形式
 - 信号都可以用一个确定的时间函数来描述
 - 声音和图像都是信号
 - 信号可以分为周期信号和非周期信号
- 按照信号自变量取值的连续性划分,信号可分为 ()。
 - 确定信号和随机信号
 - 连续时间信号和离散时间信号
 - 周期信号和非周期信号
 - 能量信号和功率信号
- 离散信号 $f[k]$ 是指 ()。
 - k 的取值是连续的, $f[k]$ 的取值是任意的
 - k 的取值是连续的, $f[k]$ 的取值是离散的
 - k 的取值是离散的, $f[k]$ 的取值是连续的
 - k 的取值是离散的, $f[k]$ 的取值是任意的
- 下列说法正确的是 ()。
 - 周期信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的和 $x(t)+y(t)$ 一定是周期信号

- B. 周期信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的周期分别为 2 和 $\sqrt{2}$ ，其和信号 $x(t) + y(t)$ 是周期信号
 C. 周期信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的周期分别为 2 和 π ，其和信号 $x(t) + y(t)$ 是周期信号
 D. 周期信号 $x(t)$ 、 $y(t)$ 的周期分别为 2 和 3，其和信号 $x(t) + y(t)$ 是周期信号
5. 周期序列 $2\cos(1.5\pi k + \pi/4)$ 的周期等于 ()。
- A. 1 B. 2 C. 3 D. 4
6. 下列说法正确的是 ()。
- A. 一般周期信号为功率信号 B. 非周期信号为能量信号
 C. e^{-t} 是功率信号 D. e^{-t} 是能量信号
7. 有界输入有界输出的系统称之为 ()。
- A. 因果系统 B. 稳定系统 C. 时不变系统 D. 线性系统
8. 已知系统的激励 $f(t)$ 与响应 $y(t)$ 的关系为 $y(t) = f(1-t)$ ，则该系统为 ()。
- A. 线性时不变系统 B. 线性时变系统
 C. 非线性时不变系统 D. 非线性时变系统
9. 已知系统的激励 $f(t)$ 与响应 $y(t)$ 的关系为 $y(t) = f^2(t)$ ，则该系统为 ()。
- A. 线性时不变系统 B. 线性时变系统
 C. 非线性时不变系统 D. 非线性时变系统
10. 已知系统响应 $y(t)$ 与激励 $f(t)$ 的关系为 $y(t) = f(t-1) - f(1-t)$ ，则该系统为 ()。
- A. 线性非时变非因果 B. 非线性非时变因果
 C. 线性时变非因果 D. 线性时变因果

二、填空题

1. 信号 $\cos 2\pi t + \sin 5\pi t$ 的周期为_____。
2. 序列 $f[k] = \cos(0.5\pi k)$ 的基本周期是_____。
3. 线性性质包含两个内容分别是_____。
4. 已知系统输出为 $y(t)$ ，输入为 $f(t)$ ， $y(t) = f(2t)$ ，则该系统为_____ (时变或非时变) 和_____ (因果或非因果) 系统。
5. 组成连续系统的三种基本单元分别是_____。

三、判断题

1. 信号是消息的表现形式，消息是信号的具体内容。()
2. 某个信号可能既不是能量信号也不是功率信号。()
3. 序列 $f[k] = \cos(\omega_0 k)$ 是周期序列，其周期为 $2\pi/\omega_0$ 。()
4. 连续时间系统是指输入是连续时间信号的系统。()
5. 线性特性中的均匀特性也称比例性或齐次性。()

四、综合题

1. 设 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 是基本周期分别为 T_1 和 T_2 的周期信号，证明 $f(t) = f_1(t) + f_2(t)$ 是周期为 T 的周期信号的条件为 $mT_1 = nT_2 = T$ ， m 、 n 为正整数。
2. 已知虚指数信号 $f(t) = e^{j\Omega_0 t}$ ，其角频率为 Ω_0 ，基本周期为 $T = 2\pi/\Omega_0$ ，如果对 $f(t)$ 以抽样间隔 T_s 进行均匀抽样得离散时间序列 $f[k] = f(kT_s) = e^{j\Omega_0 kT_s}$ ，试求出使 $f[k]$ 为周期信号的抽样间隔 T_s 。

3. 下列系统是否为线性系统，为什么？其中 $y(t)$ 、 $y[k]$ 为系统的响应， $f(t)$ 、 $f[k]$ 为系统的激励。

(1) $y(t) = \lg f(t)$

(2) $y(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau$

(3) $y(t) = 3t^2 f(t)$

(4) $y[k] = f[k]f[k-1]$

4. 下列系统是否为时不变系统，为什么？其中 $f(t)$ 、 $f[k]$ 为输入信号， $y(t)$ 、 $y[k]$ 为零状态响应。

(1) $y(t) = g(t)f(t)$

(2) $y(t) = Kf(t) + f^2(t)$

(3) $y(t) = t \cdot \cos t \cdot f(t)$

(4) $y[k] = f^2[k]$

