

高等学校电子信息类专业  
“十二五”规划教材

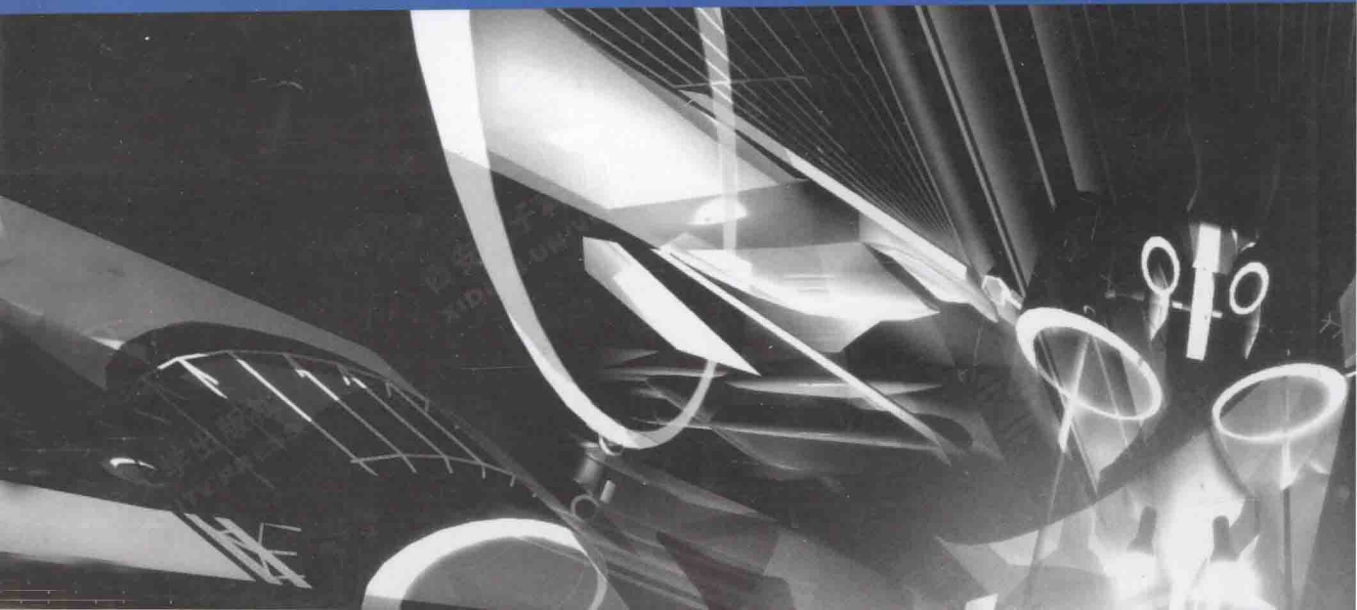
**ELECTRONIC**  
INFORMATION SPECIALTY

# 信号、系统分析与控制

( MATLAB版 )

刘国良 编著

 西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>



高等学校电子信息类专业“十二五”规划教材

# 信号、系统分析与控制

(MATLAB 版)

刘国良 编著

西安电子科技大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍信号分析、系统分析和系统控制的基本原理及应用,并使用MATLAB工具进行仿真实验。本书重点突出,构思新颖,实践性强,内容叙述清楚、深入浅出、详略得当,着重于突出基础性、系统性、实用性和先进性,并注重理论与实践结合,以及知识运用能力与创新意识的培养。

本书可作为本科通信与电子信息类、自控与计算机等专业的基础课教材,也可以作为专科学校相关专业的教材。

## 图书在版编目(CIP)数据

信号、系统分析与控制: MATLAB版 / 刘国良编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2013. 11

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3110 - 3

I. ①信… II. ①刘… III. ①Matlab 软件—应用—信号系统 ②Matlab 软件—应用—自动控制理论 IV. ①TN911.6 ②TP13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 255820 号

策划编辑 云立实

责任编辑 郭雨薇

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2013年11月第1版 2013年11月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 22

字 数 523千字

印 数 1~3000册

定 价 38.00元

ISBN 978 - 7 - 5606 - 3110 - 3/TN

**XDUP 3402001 - 1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。



# 前 言

“信号与系统”是通信与电子信息类、自控与计算机等专业的核心基础课，其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。

本书从概念上可以分为信号分析、系统分析和系统控制三部分，它们之间是密切相关的。本书全面系统地论述了信号、系统分析与系统控制的基本理论、基本分析方法以及 MATLAB 的仿真应用。全书内容包括：信号与系统的基本知识、信号的时域分析、信号的时域运算与变换、连续信号的频域分析、离散信号的频域分析、快速傅立叶变换(FFT)、连续系统的时域和频域分析、离散系统的时域和频域分析、系统函数的零极点分析、LTI 控制系统分析、系统稳定性分析、线性系统的校正等。

本书具有以下特点：

(1) 将专业知识与 MATLAB 有机结合，力求使学生在在学习信号与系统分析的基本理论和方法的同时，深入掌握 MATLAB 工具的使用，通过将大量繁杂的数学运算用计算机实现，使学生掌握并提高分析问题、解决问题的能力。

(2) 从经典到现代逐步演绎，例如从信号的时域、频域分析到  $S$  域、 $Z$  域的分析，从常见的连续周期信号到离散非周期信号的分析，逐步演绎到使用 FFT 算法实现用计算机进行现代化的信号分析和处理。

(3) 以实际应用为目的，不仅讨论了 FFT 理论的内容和发展过程，而且详细介绍了用 FFT 实现各种应用的方法。

(4) 信号分析与系统分析分开讨论，概念清楚，思路清晰。

(5) 线性控制系统是线性系统中较典型、较复杂，而且是应用较广泛的系统之一，本书直接以线性控制系统为对象，讨论系统分析和处理的知识。

本书各章均附有相应的上机练习题，供读者在学习完各章内容后进行上机实践。

本书的顺利出版得到了西安电子科技大学出版社的大力支持，以及云立实编辑的热情帮助，在此表示衷心感谢！

由于本书内容涉及面广且有一定深度，加上作者的水平有限，不足之处在所难免，敬请广大读者和同行批评指正。

作者 E-mail: MRLGL@163.com。

刘国良  
2013 年 5 月

## 目 录

第 1 章 信号与系统的基本知识 .....	( 1 )	1.7.5 输出反馈连接与 feedback() 函数 .....	( 26 )
1.1 信号分析概述 .....	( 1 )	练习与思考 .....	( 29 )
1.1.1 信号、消息和信息 .....	( 1 )	<b>第 2 章 信号的时域分析</b> .....	( 31 )
1.1.2 信号的描述与分类 .....	( 2 )	2.1 连续周期信号及其分析 .....	( 31 )
1.1.3 信号分析 .....	( 5 )	2.1.1 连续周期信号 .....	( 31 )
1.2 系统的概论 .....	( 6 )	2.1.2 连续周期信号的时域分析 .....	( 33 )
1.2.1 系统的分类与描述 .....	( 6 )	2.2 连续非周期信号 .....	( 35 )
1.2.2 系统分析 .....	( 7 )	2.2.1 非周期方波信号 .....	( 35 )
1.2.3 系统控制 .....	( 8 )	2.2.2 非周期三角波 .....	( 35 )
1.3 线性、时不变系统 .....	( 9 )	2.2.3 抽样信号 .....	( 36 )
1.3.1 线性系统 .....	( 9 )	2.2.4 单边实指数信号 .....	( 37 )
1.3.2 时不变(或移不变)性 .....	( 10 )	2.2.5 复指数信号 .....	( 37 )
1.3.3 线性时不变(或移不变)系统 .....	( 11 )	2.3 奇异信号与连续非周期信号的 .....	( 38 )
1.3.4 线性时不变系统的性质 .....	( 11 )	时域分析 .....	( 38 )
1.4 因果稳定系统 .....	( 12 )	2.3.1 单位阶跃信号与单位斜坡信号 .....	( 38 )
1.4.1 因果系统 .....	( 12 )	2.3.2 单位冲激信号 .....	( 41 )
1.4.2 稳定系统 .....	( 12 )	2.3.3 冲激偶 .....	( 43 )
1.4.3 因果稳定系统 .....	( 12 )	2.3.4 奇异信号之间的关系 .....	( 44 )
1.5 线性时不变系统的分析方法 .....	( 13 )	2.3.5 非周期信号的时域分析 .....	( 44 )
1.5.1 线性时不变系统分析的意义 .....	( 13 )	2.4 离散时间信号 .....	( 45 )
1.5.2 系统分析的外部法 .....	( 13 )	2.4.1 序列 .....	( 45 )
1.5.3 系统分析的内部法 .....	( 14 )	2.4.2 常见的离散信号 .....	( 47 )
1.6 LTI 系统模型 .....	( 14 )	2.5 信号的 <del>能量和功率</del> .....	( 53 )
1.6.1 传递函数模型 .....	( 14 )	2.5.1 能量信号和功率信号 .....	( 53 )
1.6.2 零极点增益与部分分式模型 .....	( 15 )	2.5.2 连续周期信号的功率谱 .....	( 54 )
1.6.3 状态空间模型 .....	( 16 )	2.5.3 连续非周期信号的功率谱 .....	( 55 )
1.6.4 模型的转换 .....	( 17 )	2.5.4 离散信号的能量与功率 .....	( 55 )
1.6.5 minreal() 函数与最小实现系统 .....	( 20 )	练习与思考 .....	( 56 )
1.7 LTI 系统的连接 .....	( 21 )	<b>第 3 章 信号的时域运算与变换</b> .....	( 58 )
1.7.1 系统串联连接与 series() 函数 .....	( 21 )	3.1 连续信号的尺度变换 .....	( 58 )
1.7.2 系统并联连接与 parallel() 函数 .....	( 22 )	3.1.1 连续信号的数乘与幅度变换 .....	( 58 )
1.7.3 系统增广联接与 append() 函数 .....	( 23 )	3.1.2 连续信号的时间尺度变换 .....	( 58 )
1.7.4 闭环系统与输出反馈系统的连接 .....	( 25 )	3.2 序列的尺度变换 .....	( 59 )
		3.2.1 序列的数乘与幅度变换 .....	( 59 )
		3.2.2 序列的抽取与插值(时间 .....	( 60 )
		尺度变换) .....	( 60 )
		3.3 信号的时域变换 .....	( 61 )
		3.3.1 信号的时移 .....	( 61 )

3.3.2 信号的反褶 .....	(62)	5.1 离散信号的 Z 域分析 .....	(122)
3.3.3 信号的倒相 .....	(62)	5.1.1 Z 变换的定义 .....	(122)
3.4 信号的基本运算 .....	(64)	5.1.2 Z 逆变换 .....	(124)
3.4.1 信号的加(减)运算 .....	(64)	5.2 离散傅立叶变换(DTFT) .....	(126)
3.4.2 信号的相乘 .....	(64)	5.2.1 序列傅立叶变换(DTFT)的定义 .....	(126)
3.4.3 连续信号的微分与积分 .....	(66)	5.2.2 离散信号 DTFT 与连续信号 CTFT 的比较 .....	(126)
3.4.4 离散信号的差分与累加求和 .....	(69)	5.2.3 MATLAB 计算 DTFT .....	(127)
3.5 信号的卷积 .....	(70)	5.3 周期序列的离散傅立叶级数(DFS) .....	(129)
3.5.1 连续信号的卷积 .....	(71)	5.3.1 周期序列的离散傅立叶级数(DFS)的定义 .....	(129)
3.5.2 线性离散卷积 .....	(74)	5.3.2 复指数序列的性质 .....	(130)
练习与思考 .....	(79)	5.3.3 DFS 的性质 .....	(130)
<b>第 4 章 连续信号的频域分析</b> .....	(81)	5.3.4 周期信号的频谱 .....	(131)
4.1 连续周期信号的频域分析 .....	(81)	5.3.5 MATLAB 计算 DFS .....	(132)
4.1.1 频谱的概念 .....	(81)	5.3.6 周期卷积 .....	(134)
4.1.2 典型连续周期信号的傅立叶级数 .....	(82)	5.4 离散傅立叶变换 DFT .....	(137)
4.1.3 连续周期信号的频谱分析 .....	(85)	5.4.1 计算机进行信号处理的问题 .....	(137)
4.2 连续非周期信号的频域分析 .....	(87)	5.4.2 DFT 的定义 .....	(139)
4.2.1 从傅立叶级数到傅立叶变换 .....	(87)	5.4.3 DFT 的性质 .....	(143)
4.2.2 傅立叶变换对与频谱密度函数 .....	(88)	5.4.4 DFT 的实现 .....	(144)
4.2.3 傅立叶变换的性质 .....	(91)	5.5 循环移位与循环卷积 .....	(145)
4.2.4 几种典型非周期信号的频域分析 .....	(93)	5.5.1 循环移位 .....	(145)
4.3 连续信号的复频域分析 .....	(96)	5.5.2 循环卷积 .....	(146)
4.3.1 拉普拉斯变换 .....	(96)	5.5.3 循环卷积的计算 .....	(146)
4.3.2 常见信号的拉普拉斯变换 .....	(98)	5.6 循环卷积、周期卷积与线性卷积比较 .....	(151)
4.3.3 拉普拉斯反变换 .....	(99)	5.6.1 用途 .....	(151)
4.3.4 拉普拉斯变换的性质 .....	(102)	5.6.2 对序列长度的要求 .....	(151)
4.4 连续信号的调制与解调 .....	(104)	5.6.3 移位方法 .....	(151)
4.4.1 信号的调幅 .....	(105)	5.6.4 卷积结果比较 .....	(151)
4.4.2 调幅波的解调 .....	(109)	练习与思考 .....	(152)
4.4.3 连续信号的调频、调相与解调 .....	(111)	<b>第 6 章 快速傅立叶变换(FFT)</b> .....	(154)
4.4.4 调制函数 modulate()和解调函数 demod() .....	(112)	6.1 FFT 的概念 .....	(154)
4.5 连续信号的采样 .....	(114)	6.1.1 各种离散傅立叶变换总结 .....	(154)
4.5.1 信号的采样 .....	(114)	6.1.2 DFT 的快速算法——FFT .....	(155)
4.5.2 时域采样与 Nyquist 采样定理 .....	(116)	6.1.3 旋转因子的特点 .....	(155)
4.5.3 信号恢复与理想低通滤波器 .....	(117)	6.2 FFT 的基 2 算法 .....	(155)
练习与思考 .....	(119)	6.2.1 减少运算量的分析 .....	(155)
<b>第 5 章 离散信号的频域分析</b> .....	(122)	6.2.2 FFT“基 2”—时域抽取算法 .....	(156)
		6.2.3 DIT-FFT 算法与直接计算 DFT 运算量的比较 .....	(158)
		6.2.4 DIT-FFT 的运算规律 .....	(158)

6.2.5	DIT-IFFT 的运算规律	(159)	7.5.4	拉普拉斯变换求解微分方程	(192)
6.2.6	频率抽取法	(160)		练习与思考	(195)
6.3	MATLAB 实现 FFT 的相关常用函数	(160)	<b>第 8 章</b>	<b>离散系统的时域和频域分析</b>	(199)
6.3.1	fft(x)和 ifft(X)	(160)	8.1	离散时间系统的时域响应	(199)
6.3.2	fftshift()和 ifftshift()	(161)	8.1.1	离散系统数学模型的建立	(199)
6.4	用 FFT 进行信号分析	(162)	8.1.2	离散系统的零状态响应	(201)
6.4.1	用 FFT 计算圆周卷积	(162)	8.1.3	离散系统的冲激响应和阶跃响应	(202)
6.4.2	用 FFT 求周期卷积	(163)	8.1.4	差分方程的迭代解法	(204)
6.4.3	用 FFT 计算线性卷积	(163)	8.2	差分方程的 Z 域解法与离散系统函数	(206)
6.4.4	用 FFT 进行频谱分析	(163)	8.2.1	离散系统差分方程的 Z 域解法	(206)
	练习与思考	(165)	8.2.2	离散系统函数	(208)
<b>第 7 章</b>	<b>连续系统的时域和频域分析</b>	(167)	8.3	系统函数的转换	(209)
7.1	线性系统信号分析	(167)	8.3.1	连续系统函数转换为离散系统函数	(209)
7.1.1	信号作用于 LTI 系统的响应	(167)	8.3.2	离散系统函数转换为连续系统函数	(209)
7.1.2	无失真传输	(168)	8.4	离散系统频域分析	(210)
7.1.3	理想低通滤波器	(169)	8.4.1	离散系统的频率响应	(210)
7.2	连续系统的时域响应	(170)	8.4.2	离散系统输出的频域计算	(211)
7.2.1	LTI 系统的数学模型与微分方程	(170)	8.5	FFT 实现系统的分析	(212)
7.2.2	微分方程的经典解与连续系统的完全响应	(171)	8.5.1	用 FFT 进行离散系统的分析	(212)
7.2.3	连续系统的零输入、零状态响应	(173)	8.5.2	用 FFT 进行连续系统的分析	(214)
7.2.4	LTI 系统的单位冲激响应与 impulse()函数	(176)		练习与思考	(218)
7.2.5	连续系统的单位阶跃响应与 step()函数	(177)	<b>第 9 章</b>	<b>系统函数的零极点分析</b>	(220)
7.3	连续系统的系统函数	(179)	9.1	系统零极点的概念及求解	(220)
7.3.1	连续系统的系统函数的定义	(179)	9.1.1	系统的零极点	(220)
7.3.2	tf()函数求系统函数	(180)	9.1.2	求系统的零极点	(222)
7.3.3	lsim()函数与微分方程的零状态解	(181)	9.1.3	绘制系统的零极点图	(222)
7.4	连续系统的频域分析法	(182)	9.2	系统的零极点分布与时域特性	(224)
7.4.1	频率响应 $H(j\omega)$ 与频域分析法的定义	(182)	9.2.1	连续系统的零极点分布与时域特性	(224)
7.4.2	连续系统频域分析的方法	(183)	9.2.2	离散系统的零极点分布与时域特性	(226)
7.4.3	低通滤波电路的幅频特性	(184)	9.3	系统的零极点分布与频域特性	(227)
7.5	连续系统的复频域分析法	(185)	9.3.1	连续系统的零极点分布与频域特性	(227)
7.5.1	常见电路和元器件的复频域模型	(185)	9.3.2	离散系统的零极点分布与频域特性	(229)
7.5.2	系统复频域模型	(187)	9.4	系统函数与零、极点转换	(230)
7.5.3	基于 MATLAB 的电路分析	(190)	9.4.1	零、极点转换为系统函数	(230)

9.4.2 系统函数转换为零、极点	(230)	11.3.1 穿越频率、剪切频率、截止频率 与交界频率	(273)
练习与思考	(231)	11.3.2 增益裕量、相位裕量与系统 稳定性	(273)
<b>第10章 LTI 控制系统分析</b>	(233)	11.3.3 系统稳定的 Nyquist 判据	(275)
10.1 经典分析法基础	(233)	11.3.4 用插值法寻找临界增益	(277)
10.1.1 典型的输入信号	(233)	11.3.5 最小相位系统稳定的 bode 图 判据与 margin() 函数	(279)
10.1.2 动态过程和稳态过程	(234)	练习与思考	(281)
10.1.3 求线性系统的稳态值、峰值、 峰值时间、误差面积和最大超 调量	(235)	<b>第12章 线性系统的校正</b>	(283)
10.2 线性控制系统的时域响应	(236)	12.1 相位校正的原理	(283)
10.2.1 一阶 LTI 系统的单位阶跃响应、 单位脉冲响应	(237)	12.1.1 系统校正的概念	(283)
10.2.2 二阶系统的时域响应	(239)	12.1.2 设计方法	(284)
10.3 线性控制系统的频域分析	(244)	12.1.3 频域的串联校正原理	(285)
10.3.1 对数频率特性图与 bode() 函数	(244)	12.1.4 控制系统的性能指标分析	(285)
10.3.2 幅相频率特性图与 nyquist() 函数	(246)	12.2 相位滞后无源校正网络	(289)
10.3.3 其他常用频域分析函数	(248)	12.2.1 相位滞后无源校正的原理	(289)
10.4 控制系统的根轨迹分析	(249)	12.2.2 相位滞后校正器的设计	(291)
10.4.1 根轨迹图绘制与 rlocus() 函数	(250)	12.3 相位超前无源校正网络	(295)
10.4.2 rlocfind() 函数	(252)	12.3.1 相位超前校正的原理和方法	(295)
10.4.3 根轨迹中开环增益与系统的 性能	(253)	12.3.2 相位超前校正器的设计	(297)
练习与思考	(254)	12.4 相位“滞后-超前”无源校正网络	(304)
<b>第11章 系统稳定性分析</b>	(256)	12.4.1 相位“滞后-超前”校正器的 原理	(305)
11.1 零极点分布与 LTI 系统的 稳定性	(256)	12.4.2 “滞后-超前”校正器的设计	(307)
11.1.1 连续系统的稳定性条件	(256)	12.5 控制系统的基本环节	(311)
11.1.2 离散系统的稳定性条件	(260)	12.5.1 比例环节	(311)
11.1.3 控制系统的稳定性	(261)	12.5.2 惯性环节	(313)
11.1.4 最小相位系统	(263)	12.5.3 积分环节与比例积分环节	(314)
11.1.5 开环零、极点对系统的影响	(264)	12.5.4 比例微分(PD)环节	(315)
11.2 特征根与时域稳定性分析	(264)	12.5.5 PID 环节	(317)
11.2.1 特征根与系统的稳定性	(265)	练习与思考	(318)
11.2.2 间接判别(工程方法)与劳斯 (Routh)判据	(266)	附录1 连续傅立叶变换性质及其对偶 关系表	(320)
11.2.3 直接求根法确定系统的 稳定性	(268)	附录2 几种典型波形的傅立叶变换表	(321)
11.2.4 根轨迹中开环增益与 稳定性	(269)	附录3 几种常用信号的连续傅立叶变换对 及其对偶关系表	(324)
11.3 频域稳定性分析与 Nyquist 判据	(272)	附录4 拉普拉斯变换的基本性质	(326)
		附录5 常用函数的拉氏变换和 Z 变换表	(327)
		附录6 部分练习题参考答案	(328)
		参考文献	(344)



# 第1章 信号与系统的基本知识

本章概述信号与系统的基本概念，要求重点掌握不同信号的特点，线性时不变系统的性质、特点和系统的连接。

## 1.1 信号分析概述

### 1.1.1 信号、消息和信息

信号(signal)可以描述广泛的物理现象。我们生活在一个信息社会里，在我们身边信号无处不在。如随时可以听到的语音信号，随时可看到的视频、图像信号，伴随着生命始终的心电、脑电信号以及心音、脉搏、血压、呼吸等众多的生理信号。

消息(message)是通过某种方式传递的声音、图像、文字、符号等。

信号是消息的载体，是反映消息的各种物理量，是系统直接进行加工、变换和处理的对象。消息通过信号表现出来。

从广义上讲，信号是随时间变化的某种物理量。它包含光信号、声信号和电信号等。例如，古代人利用点燃烽火台而产生的滚滚狼烟，向远方军队传递敌人入侵的消息，这属于光信号；当我们说话时，声波传递到他人的耳朵，使他人了解我们的意图，这属于声信号；太空中的各种无线电波、四通八达的电话网中的电流等，都可以用来向远方表达各种消息，这属于电信号。人们通过对光、声或电信号进行接收，才知道对方要表达的消息。

信息(information)是信息论中的一个术语。通过各种消息的传递，人们可获取各种不同的信息。因此，通俗地说，“信息”是具有新内容、新知识的“消息”。为了有效地传播和利用信息，常常需要将信息转换成便于传输和处理的信号。在本书中对“信息”和“消息”两词不予以严格区分。

事实上，信息处理方法已经成为现代一种科学的思维方法，那就是把系统复杂过程抽象为一个信息获取、传输、加工和处理的有目的的运动，从而揭示出系统复杂过程规律的方法。它的优点在于可以不对事物的结构进行解剖性的分析，而是从整体出发研究系统与环境之间的信息输入和输出的关系，通过对信息流程的综合考察，获得系统的整体性认识。

总之，信号是多种多样的，但不管是何种信号，它都是消息的载体，是消息的一种表现形式。

在电子信息系统中，可以使“信号”的一个或多个特征量发生变化，用以代表“信息”的物理量。

### 1.1.2 信号的描述与分类

信号的分类方法有很多,可以从不同的研究、分析角度进行分类,如信号可按数学关系、取值特征、能量功率、处理分析方法、信号所具有的时间函数特性、取值是否为实数等进行分类。

信号是信息的一种物理体现,它一般是随时间或位置变化的物理量。信号有两种描述方式,分别是数学描述和波形描述。

(1) 数学描述:使用具体的数学表达式,把信号描述为一个或若干个函数或序列的形式。在信号分析中,物理的“信号”与数学的“函数”两词常相互通用。

(2) 波形描述:按照函数自变量的变化关系,把信号的波形画出来。

信号按物理属性可分为电信号和非电信号。电信号通常指随时间变化的电压或电流,电信号和非电信号之间可以相互转换。本书只讨论电信号。

#### 1. 连续信号和离散信号

##### 1) 连续信号与模拟信号

(1) 连续信号。连续时间信号简称为连续信号,这里的“连续”指函数的定义域连续,即自变量(一般是时间  $t$ )是连续的,而函数的值域(信号幅值)可为连续的,也可为不连续的。

根据实数的性质,连续信号指定义在实数域的信号,其自变量(时间  $t$ )的取值连续,时间参数的连续性意味着信号的幅度值在时间的任意点均有定义。例如,对于单边指数信号、矩形波信号,时间  $t$  是连续的,而函数的幅度值在某点是间断的,如图 1-1-1(a)、(b)所示。

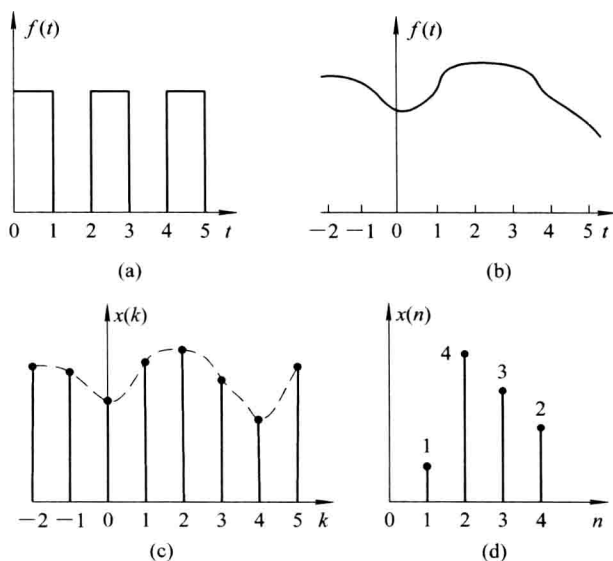


图 1-1-1 连续信号和离散信号

连续信号通常用  $f(t)$  表示。在观测过程的连续时间  $t$  的有效范围内,信号  $f(t)$  有确定的值。但允许在其时间定义域上存在有限个间断点。

(2) 模拟信号。如果连续信号在任意时刻的取值都是连续的, 即信号的幅值和时间  $t$  均连续, 则称为“模拟信号”。

2) 离散信号与数字信号

(1) 离散信号。信号仅在规定的离散时刻有定义。

离散信号是只在一系列离散的时间点  $k(k=0, \pm 1, \pm 2, \dots)$  上才有确定值的信号, 而在其他的时间上无意义, 因此它在时间上是不连续的序列, 通常以  $x(k)$  表示。

(2) 数字信号。时间上和幅度上都取离散值的信号称为数字信号。

数字信号通常以  $x(n)$  表示, 如图 1-1-1(c)、(d) 所示。

2. 周期性信号和非周期性信号

连续信号和离散信号都可分为周期性信号(也称周期信号)和非周期性信号(也称非周期信号)。

1) 周期性信号

一个连续时间信号若在  $(-\infty \sim +\infty)$  区间内, 以  $T$  为周期, 周而复始地重复再现, 则称为连续周期信号, 如图 1-1-2(b) 所示。其表达式为

$$f(t) = f(t+T) = f(t+2T) = \dots = f(t+nT), \quad t \in (-\infty, +\infty) \quad (1.1.1)$$

同样地, 离散信号也可分为离散周期性信号和离散非周期性信号。离散周期性信号如图 1-1-2(d) 所示。

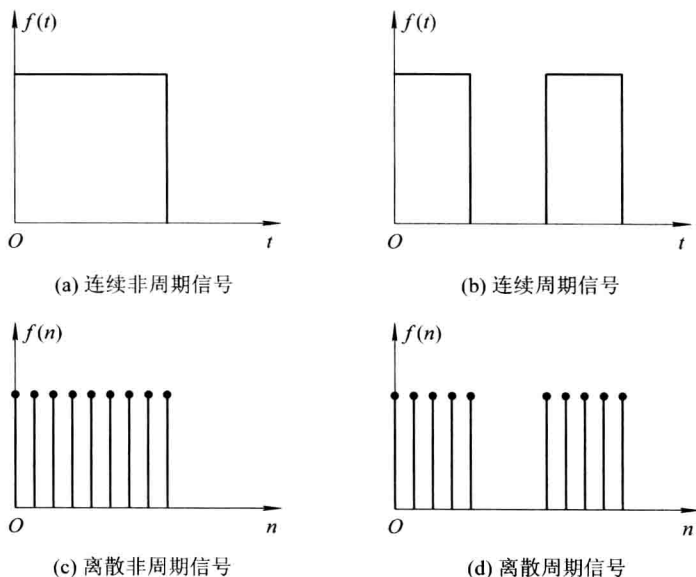


图 1-1-2 连续信号和离散信号、周期性信号和非周期性信号

离散周期信号  $f(n)$  满足:

$$f(n) = f(n+N) = f(n+2N) = \dots = f(n+mN) \quad m=0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots \quad (1.1.2)$$

满足上述关系的最小  $T$ (或整数  $N$ ) 称为该信号的“周期”。

对于两个周期分别为  $T_1$  和  $T_2$  的周期信号  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$ , 若其周期之比  $K = \frac{T_1}{T_2}$  为有理

数, 则其和信号  $f_1(t) + f_2(t)$  仍然是周期信号, 该和信号的周期为  $T_1$  和  $T_2$  的最小公倍数。通常可用下面的简单方法确定其周期:

若  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{k_1}{k_2}$ , 则周期  $T$ (或  $N$ )  $= k_1 T_2 = k_2 T_1$ 。

2) 非周期性信号

一个连续时间信号若在  $(-\infty \sim +\infty)$  区间内, 不会周而复始地重复再现, 即不满足(1.1.1)式, 则称为连续非周期信号, 如图 1-1-2(a)所示。

离散非周期性信号如图 1-1-2(c)所示。

**例 1-1-1** 判断下列信号是否为周期信号。

(1)  $f_1(t) = \sin(2t) + \cos(3t)$ ;

(2)  $f_2(t) = \sin(\pi t) + \cos(2t)$ 。

**解** (1)  $\sin(2t)$  是周期信号, 其角频率和周期分别为

$$\Omega_1 = 2(\text{rad/s}), \quad T_1 = \frac{2\pi}{\Omega_1} = \pi$$

$\cos(3t)$  也是周期信号, 其角频率和周期分别为

$$\Omega_2 = 3(\text{rad/s}), \quad T_2 = \frac{2\pi}{\Omega_2} = \frac{2}{3}\pi$$

由于  $K = \frac{T_1}{T_2} = \frac{3}{2}$  为有理数, 故  $f_1(t) = \sin(2t) + \cos(3t)$  为周期信号, 其周期为  $T_1$  和  $T_2$  的最小公倍数  $2\pi(2T_1$  或  $3T_2)$ 。

(2)  $\cos(2t)$  和  $\sin(\pi t)$  的周期分别为  $T_1 = \frac{2\pi}{\Omega_1} = \pi$ ,  $T_2 = \frac{2\pi}{\Omega_2} = 2$ , 由于  $K = \frac{T_1}{T_2} = \frac{\pi}{2}$  为无理数, 故  $f_2(t) = \sin(\pi t) + \cos(2t)$  为非周期信号。

**例 1-1-2** 判断下列序列是否为周期信号。

(1)  $f_1(n) = \sin\left(\frac{3n\pi}{4}\right) + \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right)$ 。

(2)  $f_2(n) = \sin(2n)$ 。

**解** (1)  $\sin\left(\frac{3n\pi}{4}\right)$  和  $\cos\left(\frac{n\pi}{2}\right)$  的角频率分别为  $\omega_1 = \frac{3\pi}{4}$ ,  $\omega_2 = \frac{\pi}{2}$ 。

由于  $T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{8}{3}$ ,  $T_2 = \frac{2\pi}{\omega_2} = 4$  为有理数, 所以它们的周期分别为  $N_1 = 8$ ,  $N_2 = 4$ , 故  $f_1(n) = \sin\left(\frac{3n\pi}{4}\right) + \cos\left(\frac{n\pi}{2}\right)$  为周期序列。

其周期为  $N_1$  和  $N_2$  的最小公倍数 8, 即由  $\frac{T_1}{T_2} = \frac{2}{3}$ , 得  $N = 3T_1 = 2T_2 = 8$ 。

(2)  $\sin(2n)$  的角频率为  $\omega_1 = 2$ 。由于  $T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \pi$  为无理数, 故  $f_2(n) = \sin(2n)$  为非周期序列。

由上面例子可得出以下结论:

(1) 连续正弦信号一定是周期信号, 而正弦序列不一定是周期序列。

(2) 两个连续周期信号之和不一定是周期信号, 而两个周期序列之和一定是周期

序列。

### 3. 确定性信号和非确定性信号

信号还可以分为确定性信号和非确定性信号(又称随机信号)。

所谓“确定性信号”，就是其每个时间点上的值可以用某个数学表达式或图表唯一地确定的信号，如图 1-1-1、图 1-1-2 所示的各种信号。

所谓“随机信号”，就是不能用一个明确的数学关系式精确地描述，因而也不能准确预测任意时刻的精确值的信号，即信号在任意时刻的取值都具有不确定性，只可能知道它的统计特性(如在某时刻取某一数值的概率)，这样的信号是不确定性信号，或称为随机信号。

电子系统中的起伏热噪声、雷电干扰信号就是两种典型的随机信号。

另外，信号还可以分为能量信号和功率信号、时域信号和频域信号、时限信号和频限信号、实信号和复信号、一维信号与多维信号、因果信号与反因果信号、左边信号与右边信号等。

#### 1.1.3 信号分析

通过研究信号的描述、运算、特性以及信号发生某些变化时其特性的相应变化，来揭示信号自身的时域特性、频域特性等，称为信号分析。

连续时间信号的分析通常可分为时域分析法、频域分析法和复频域分析法。

信号分析的主要途径是研究信号的分解，即将信号分解为某些基本信号的线性组合，通过对这些基本信号单元在时域和频域特性的分析来达到了解信号特性的目的。信号的分解可以在时域、频域或变换域中进行，因此信号分析的方法可分为时域方法、频域方法和变换域方法。

用不同的时间函数描述具有不同形态信号波的形成是信号的时频分析，也称为波形分析。信号的时域分析是将连续时间信号表示为单位冲激信号  $\delta(t)$  的加权积分，而将离散时间信号表示为单位脉冲信号  $\delta(k)$  的加权和，这就产生了时域中的卷积积分运算与卷积和运算。

连续时间信号的时域分析，主要使用微分方程；离散时间信号的时域分析，主要依靠差分方程等，在 MATLAB 中使用 Z 变换可以把差分方程转化为简单的代数方程，从而使其求解过程大大简化。

信号的频域分析是将连续时间(或离散时间)信号表示为复指数信号  $e^{j\Omega t}$  (或  $e^{j\Omega k}$ ) 的加权积分(或加权和)形式，这就引出了傅立叶分析的理论和方法，同时产生了信号频谱的概念。用频率函数来描述或表征任意信号的方法，称为信号的频率分析、频谱分析或傅立叶分析，这种分析信号的方法称为频域分析法。

信号的变换域分析则是将连续时间(或离散时间)信号表示为复指数信号  $e^{st}$ ，掌握求解  $s$  的 ( $s = \sigma + j\omega$ ) 加权积分(或加权和)、拉普拉斯变换与 Z 变换的理论和方法。用复频率函数来描述或表征任意信号的方法，称为信号的复频率分析或拉普拉斯分析，这种分析信号的方法称为复频域分析法。

## 1.2 系统的概论

① 广义地说,系统是由若干相互作用和相互依赖的事物组合而成的具有特定功能的整体,例如,通信系统、自控系统、计算机网络系统、电力系统等。通常将施加于系统的作用称为系统的输入激励,而将要求系统完成的功能称为系统的输出响应。

② 从实际应用的角度来说,各种变化着的信号从来就不是孤立存在的,信号的产生、传输、变换和处理总是需要一定的物理装置,这样的物理装置常称为系统。换言之,信号需要在一定的系统中产生、传输、变换和处理,这样才能完成一定的功能。

### 1.2.1 系统的分类与描述

#### 1. 系统的分类

(1) 根据处理信号的形式不同,系统可分为 3 种:

① 连续系统:各子系统的输入、输出信号均为连续信号(模拟信号)的系统称为连续系统。连续时间系统的数学模型是微分方程式,如果微分方程的系数为常数,则为定常系统(时不变系统);如果系数随时间而变化,则为时变系统。

② 离散系统:各子系统的输入、输出信号均为离散信号(数字信号),这些信号为脉冲序列或数码形式,则称该系统为离散系统。离散时间系统的数学模型是差分方程式。

离散时间系统在数学上的意义是将输入序列  $x(n)$  映射成输出序列  $y(n)$  的唯一变换或运算。这种映射是广义的,实际上对应一种具体的处理,例如变换或滤波。

③ 混合系统:系统中有的子系统输入、输出信号为连续信号(模拟信号),也有的子系统输入、输出信号为离散信号(数字信号),则该系统为混合系统。

(2) 根据系统的性质,系统可分为线性系统与非线性系统、时变系统与时不变系统,本书只讨论线性时不变系统。

(3) 动态系统与即时系统:若系统在任一时刻的响应不仅与该时刻的激励有关,而且与它过去的历史状况有关,则称为“动态系统”或“记忆系统”。含有记忆元件(电容、电感等)的系统是动态系统,否则称为“即时”系统或“无记忆系统”。

(4) 根据系统的输入和输出数量,系统分为单输入单输出系统(SISO, Single-Input-Single-Output)与多输入多输出系统(MIMO, Multiple-Input-Multiple-Output)。

系统还可以分为因果系统与非因果系统、确定系统与不确定系统、稳定系统与不稳定系统等。

#### 2. 系统的描述

系统可用数学模型和方框图来表示。

一个系统可以用一个矩形方框图简单地表示,方框图左边为输入  $x(t)$ ,右边为系统的输出  $y(t)$ ,方框表示联系输入和输出的其他部分,是系统的主体。

连续系统可以用一些具有输入输出关系的简单基本单元(子系统)的组合来表示。这些基本单元有加法器、数乘器(放大器)、积分器,如图 1-2-1 所示。

系统的组合连接方式有串联、并联及混合连接。

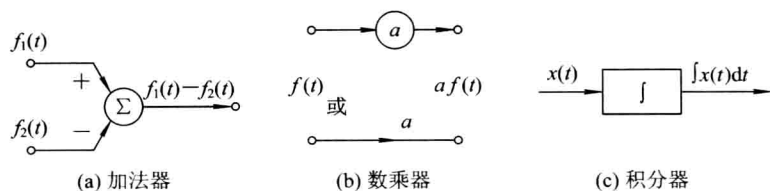


图 1-2-1 连续系统的加法器、乘法器和积分器

离散系统对应的基本单元有加法器、数乘器(放大器)、移位器,如图 1-2-2 所示。

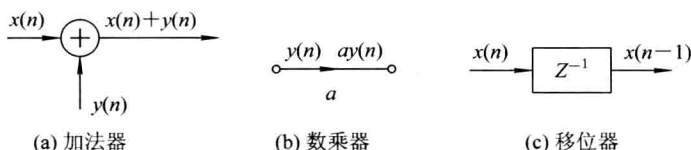


图 1-2-2 离散系统的加法器、乘法器和移位(延迟)器

### 1.2.2 系统分析

目前系统分析方法已经成为一种科学的基本分析方法,系统分析方法就是把研究对象置于系统中进行考察,发现其合理的结构,找出其运动的规律,把握其与外部环境间的联系,确定最优化控制方案的方法。

在由电子线路组成的线性系统中,系统分析问题即在已知系统结构和参数,以及已知外部输入(系统激励)的情况下,对系统运动进行定性分析(如可控性、稳定性等)和定量运动规律分析(如系统运动轨迹、系统的性能品质指标等)的探讨。系统分析可在时域、频域或变换域进行。

信号的传输和处理,要由许多不同功能的单元组织起来的一个复合系统来完成。图 1-2-3 所示为系统的示意图,系统可以看做一个黑匣子,系统分析可从系统的端部出发,研究在不同信号的激励下,经过系统的处理、运算后,所得输出的特性,而不考虑黑匣子内部的变量关系。 $T[\cdot]$ 表示这种处理或运算关系,即

$$y(t) = T[x(t)] \quad \text{或} \quad y(n) = T[x(n)] \quad (1.2.1)$$

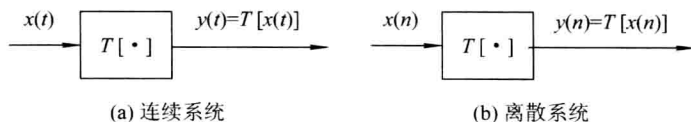


图 1-2-3 系统示意图

符号“ $T[\cdot]$ ”表示系统的映射或处理,可以把  $T[\cdot]$  简称为系统。

对  $T[\cdot]$  加以各种约束,可定义出各类连续、离散时间系统,例如线性系统、非时变(时不变)系统、因果系统和稳定系统。系统中最重要、最常用的是线性、时不变系统 LTI (在离散域中称为移不变 LSI)。可使用常系数线性微分方程(或差分方程)描述该系统的输入、输出特性。

系统分析对于研究系统的性质、系统对信号的传输和处理能力,以及系统设计有重要意义。LTI(LSI)系统各种分析方法的理论基础是信号的分解特性与系统的线性、时不变特性,其出发点是:激励信号可以分解为若干基本信号单元的线性组合;系统对激励所产生的零状态响应是系统对各基本信号单元分别激励下响应的叠加。

在本书中介绍的系统分析内容如下:

(1) 建立描述系统的数学模型,即在时域建立微分方程或差分方程,在频域建立傅立叶、拉普拉斯或  $Z$  变换方程。

从系统模型所关心的变量上可将 LTI(LSI)系统的分析方法分为输入—输出法与状态变量法两大类。本书主要介绍输入—输出法。

从信号分解的角度又可将 LTI 系统的分析方法分为时域分析法(卷积积分、卷积和、算子法)、频域分析法(傅立叶分析)与变换域分析法(拉普拉斯变换法、 $Z$  变换法)等。

(2) 求系统的冲激响应,以系统的冲激响应代表系统的特性。

系统分析的主要任务是分析系统对指定激励所产生的响应。其分析过程主要包括建立系统模型,根据模型建立系统的方程,求解出系统的响应,必要时对解得的结果给出物理解释。系统分析是系统综合与系统诊断的基础。本书仅限于对 LTI(LSI)系统分析的研究。

(3) 研究系统函数,包括系统函数的建立、零极点分布等。

描述系统特点的是系统函数,也称为转移函数、传递函数或网络函数。由于系统函数只取决于系统本身的特性,而与系统的输入无关,所以连续信号的系统函数  $H(s)$  和离散信号的系统函数  $H(z)$  在系统分析中具有重要意义。

(4) 研究系统的稳定性。不论是一般的 LTI 系统,或者是 LTI 自动控制系统,任何有意义的系统都必须是稳定的。利用系统函数的零极点分布、Bode 图、Nyquist() 函数、系统的根轨迹分析等方法判断系统的稳定性,也是系统分析的主要内容之一。

(5) 研究系统的校正。通过对系统的分析,提出系统的校正方案。

### 1.2.3 系统控制

系统控制就是通过控制系统改变系统内任何感兴趣、可变化的量,使被控制对象按照所希望的方式趋于和保持某种需要的理想稳定状态。

LTI 自动控制系统是 LTI 系统的一种,大多数是闭环的反馈系统。

#### 1. 控制系统的分类

控制系统有如下两种分类方法。

##### 1) 按控制原理分类

按控制原理的不同,自动控制系统分为开环控制系统和闭环控制系统。

(1) 开环控制系统:在开环控制系统中,系统输出只受输入的控制,控制精度和抑制干扰的特性都比较差。开环控制系统中,基于时序进行逻辑控制的称为顺序控制系统,它由顺序控制装置、检测元件、执行机构和被控工业对象组成。开环控制系统主要应用于机械、化工、物料装卸运输等过程的控制以及机械手和生产自动线。

(2) 闭环控制系统:闭环控制系统是建立在反馈原理基础之上的,利用输出量同



期望值的偏差对系统进行控制,可获得比较好的控制性能。闭环控制系统又称反馈控制系统。

## 2) 按给定信号分类

按给定信号分类,自动控制系统可分为恒值控制系统、随动控制系统和程序控制系统。

(1) 恒值控制系统:给定信号值不变,要求系统输出量以一定的精度接近给定希望值的系统。如生产过程中的温度、压力、流量、液位高度、电动机转速等自动控制系统属于恒值系统。

(2) 随动控制系统:给定信号值按未知时间函数变化,要求输出跟随给定信号值的变化,如跟随卫星的雷达天线系统。

(3) 程序控制系统:给定信号值按一定的时间函数变化,如程控机床。

## 2. 控制系统的分析

控制系统的分析包括对动态性能和稳态性能的分析,可以运用时域分析法、根轨迹法、频域分析法以及状态空间分析法对系统进行分析。

MATLAB 提供了功能强大的控制系统工具箱,如鲁棒控制工具箱、神经网络工具箱等,结合 SIMULINK 仿真环境,可方便地对各种控制系统进行分析与校正设计。

# 1.3 线性、时不变系统

## 1.3.1 线性系统

线性系统满足齐次性(比例性)和叠加性,因此在线性系统中对信号的处理可应用叠加定理。

在线性连续系统中,若对两个激励

$$y_1(t) = T[x_1(t)] \quad \text{和} \quad y_2(t) = T[x_2(t)]$$

有

$$\begin{aligned} T[ax_1(t) + bx_2(t)] &= aT[x_1(t)] + bT[x_2(t)] \\ &= ay_1(t) + by_2(t) \end{aligned} \quad (1.3.1)$$

式中  $a$ 、 $b$  为任意常数,则称该系统满足叠加性和齐次性。不满足式(1.3.1)的系统为非线性系统。

另外,线性系统具有“零输入产生零输出”的特性,由此可以判断一个系统是否为线性系统。

从描述系统的方程也可以判断一个系统是否为线性系统。以线性代数方程或线性微积分方程描述的系统是线性系统。例如:

$$\frac{dx(t)}{dt} + 5x(t) = y(t)$$

同样在离散线性系统中,满足叠加性和比例性(或齐次性)的系统为线性系统,否则为非线性系统。