



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

信号与系统

李云红 主 编



特色鲜明且内容完整
例题丰富且技巧精湛
测试题及其答案锦上添花



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

信号与系统

主 编 李云红
参 编 顾梅花 孟繁杰 廉继红
薛 谦 陈锦妮



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书是根据国家教委颁布的高等工业学校《信号与系统课程教学基本要求》，结合普通高等学校的实际情况，在作者多年教学实践的基础上编写而成的。全书共6章，主要内容包括信号与系统的基本概念，系统的时域分析，傅里叶变换与系统的频域分析，连续时间系统的复频域分析，系统函数，系统的状态变量分析，每章末均设置了习题。

本书可作为高等院校电子信息、通信工程、自动化、计算机、信息工程、信号检测、电气工程及其自动化等专业本科生信号与系统课程的教材，也可供其他相关专业学生和工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/李云红主编. —北京:北京大学出版社, 2012.5

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-20340-8

I. ①信… II. ①李… 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 032377 号

书 名: 信号与系统

著作责任者: 李云红 主编

策 划 编 辑: 程志强

责 任 编 辑: 程志强

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-20340-8/TN · 0084

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京鑫海金澳胶印有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787 毫米 × 1092 毫米 16 开本 14.75 印张 342 千字

2012 年 5 月第 1 版 2012 年 5 月第 1 次印刷

定 价: 29.00 元

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

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

“信号与系统”是电子信息、通信工程、计算机、自动化、信息工程等专业重要的技术基础课之一，它主要研究信号与系统分析的基本理论和方法，在教学计划中起着承前启后的作用。它以工程数学和电路分析为基础，以系统对信号的响应为主线，介绍信号与系统分析相关的理论、原理、方法等方面的知识，为学生学习后续课程（如数字信号处理、通信原理、数字通信、自动控制等）打下良好的理论基础，同时也是学生合理知识结构中的重要组成部分，在智力发展、能力和素质培养方面均起着非常重要的作用。

近些年来，信息技术在各学科领域的应用更加广泛，本学科领域的理论和实践发展迅速，但就大学本科“信号与系统”课程而言，其基本内容和范围大体相对稳定。随着当前信息和通信技术的发展，为了适应当前学科发展的需要和教学内容改革的要求，作者编写了本书。同时，在教学实践中征求和听取了教师和学生对本书的意见，认为基本满足当前的教学需要。本书按照 56 学时授课，这里给出参考学时数：第 1 章 6 学时，第 2 章 14 学时，第 3 章 16 学时，第 4 章 12 学时，第 5 章 4 学时，第 6 章 4 学时。

为配合教师教学、帮助学生学习、提高学习兴趣，本书首先从课程位置、选用教材、课程特点、学习方法、参考书目等方面对课程做了总体介绍。对信号的分析采用先连续后离散、先周期后非周期、先时域后变换域的顺序，以对偶和类比的方式逐章展开，完全并行地讲述了连续时间和离散时间信号与系统的一系列基本概念、理论和方法，以及它们在通信、信号处理等领域中的主要应用，最后还讲述了数字信号处理和系统的状态变量描述的基本概念和方法，形成了一个“系统分析和综合”与“信号分析和处理”两方面知识并重的、较为完整的、具有鲜明特色的信号与系统课程内容体系。各章均有足够数量的精选例题，兼顾基本练习和解题的分析技巧，章末配有数量丰富的习题，供学生练习使用。

本书由李云红主编和统稿，第 1、4、5 章部分内容由李云红编写，第 2 章由顾梅花编写，第 3 章由孟繁杰编写，第 6 章部分内容由薛谦编写，廉继红编写了第 5 章的部分内容，陈锦妮编写了第 6 章的部分内容，李子琳、伊欣、王瑞华、梁高鸣、李尧、闫志轩参加了书中部分图形的绘制工作。本书的编写参考了大量的书籍、文献，在此对这些书籍、文献的作者表示真诚的感谢！本书的编写得到了西安工程大学、西安电子科技大学的大力支持，作者在此表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 12 月

北京大学出版社本科计算机系列实用规划教材

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
1	7-301-10511-5	离散数学	段禅伦	28	42	7-301-14504-3	C++面向对象与 Visual C++程序设计案例教程	黄贤英	35
2	7-301-10457-X	线性代数	陈付贵	20	43	7-301-14506-7	Photoshop CS3 案例教程	李建芳	34
3	7-301-10510-X	概率论与数理统计	陈荣江	26	44	7-301-14510-4	C++程序设计基础案例教程	于永彦	33
4	7-301-10503-0	Visual Basic 程序设计	闵联营	22	45	7-301-14942-3	ASP .NET 网络应用案例教程(C#.NET 版)	张登辉	33
5	7-301-10456-9	多媒体技术及其应用	张正兰	30	46	7-301-12377-5	计算机硬件技术基础	石 磊	26
6	7-301-10466-8	C++程序设计	刘天印	33	47	7-301-15208-9	计算机组成原理	娄国焕	24
7	7-301-10467-5	C++程序设计实验指导与习题解答	李 兰	20	48	7-301-15463-2	网页设计与制作案例教程	房爱莲	36
8	7-301-10505-4	Visual C++程序设计教程与上机指导	高志伟	25	49	7-301-04852-8	线性代数	姚喜妍	22
9	7-301-10462-0	XML 实用教程	丁跃潮	26	50	7-301-15461-8	计算机网络技术	陈代武	33
10	7-301-10463-7	计算机网络系统集成	斯桃枝	22	51	7-301-15697-1	计算机辅助设计二次开发案例教程	谢安俊	26
11	7-301-10465-1	单片机原理及应用教程	范立南	30	52	7-301-15740-4	Visual C# 程序开发案例教程	韩朝阳	30
12	7-5038-4421-3	ASP.NET 网络编程实用教程(C#版)	崔良海	31	53	7-301-16597-3	Visual C++程序设计实用案例教程	于永彦	32
13	7-5038-4427-2	C 语言程序设计	赵建锋	25	54	7-301-16850-9	Java 程序设计案例教程	胡巧多	32
14	7-5038-4420-5	Delphi 程序设计基础教程	张世明	37	55	7-301-16842-4	数据库原理与应用(SQL Server 版)	毛一梅	36
15	7-5038-4417-5	SQL Server 数据库设计与应用	姜 力	31	56	7-301-16910-0	计算机网络技术基础与应用	马秀峰	33
16	7-5038-4424-9	大学计算机基础	贾丽娟	34	57	7-301-15063-4	计算机网络基础与应用	刘远生	32
17	7-5038-4430-0	计算机科学与技术导论	王昆仑	30	58	7-301-15250-8	汇编语言程序设计	张光长	28
18	7-5038-4418-3	计算机网络应用实例教程	魏 峰	25	59	7-301-15064-1	网络安全技术	骆耀祖	30
19	7-5038-4415-9	面向对象程序设计	冷英男	28	60	7-301-15584-4	数据结构与算法	佟伟光	32
20	7-5038-4429-4	软件工程	赵春刚	22	61	7-301-17087-8	操作系统实用教程	范立南	36
21	7-5038-4431-0	数据结构(C++版)	秦 锋	28	62	7-301-16631-4	Visual Basic 2008 程序设计教程	隋晓红	34
22	7-5038-4423-2	微机应用基础	吕晓燕	33	63	7-301-17537-8	C 语言基础案例教程	汪新民	31
23	7-5038-4426-4	微型计算机原理与接口技术	刘彦文	26	64	7-301-17397-8	C++程序设计基础教程	郝亚辉	30
24	7-5038-4425-6	办公自动化教程	钱 俊	30	65	7-301-17578-1	图论算法理论、实现及应用	王桂平	54
25	7-5038-4419-1	Java 语言程序设计实用教程	董迎红	33	66	7-301-17964-2	PHP 动态网页设计与制作案例教程	房爱莲	42
26	7-5038-4428-0	计算机图形技术	龚声蓉	28	67	7-301-18514-8	多媒体开发与编程	于永彦	35
27	7-301-11501-5	计算机软件技术基础	高 巍	25	68	7-301-18538-4	实用计算方法	徐亚平	24
28	7-301-11500-8	计算机组装与维护实用教程	崔明远	33	69	7-301-18539-1	Visual FoxPro 数据库设计案例教程	谭红杨	35
29	7-301-12174-0	Visual FoxPro 实用教程	马秀峰	29	70	7-301-19313-6	Java 程序设计案例教程与实训	董迎红	45
30	7-301-11500-8	管理信息系统实用教程	杨月江	27	71	7-301-19389-1	Visual FoxPro 实用教程与上机指导(第2版)	马秀峰	40
31	7-301-11445-2	Photoshop CS 实用教程	张 瑾	28	72	7-301-19435-5	计算方法	尹景本	28
32	7-301-12378-2	ASP.NET 课程设计指导	潘志红	35	73	7-301-19388-4	Java 程序设计教程	张剑飞	35
33	7-301-12394-2	C#.NET 课程设计指导	龚自霞	32	74	7-301-19386-0	计算机图形技术(第2版)	许承东	44
34	7-301-13259-3	Visual Basic .NET 课程设计指导	潘志红	30	75	7-301-15689-6	Photoshop CS5 案例教程(第2版)	李建芳	39
35	7-301-12371-3	网络工程实用教程	汪新民	34	76	7-301-18395-3	概率论与数理统计	姚喜妍	29
36	7-301-14132-8	J2EE 课程设计指导	王立丰	32	77	7-301-19980-0	3ds Max 2011 案例教程	李建芳	44
37	7-301-13585-3	计算机专业英语	张 勇	30	78	7-301-20052-0	数据结构与算法应用实践教程	李文书	36
38	7-301-13684-3	单片机原理及应用	王新颖	25	79	7-301-12375-1	汇编语言程序设计	张宝剑	36
39	7-301-14505-0	Visual C++程序设计案例教程	张荣梅	30	80	7-301-20523-5	Visual C++程序设计教程与上机指导(第2版)	牛江川	40
40	7-301-14259-2	多媒体技术应用案例教程	李 建	30	81	7-301-20630-0	C#程序开发案例教程	李挥剑	39
41	7-301-14503-6	ASP .NET 动态网页设计案例教程(Visual Basic .NET 版)	江 红	35					

北京大学出版社电气信息类教材书目(已出版)

欢迎选订

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
1	7-301-10759-1	DSP 技术及应用	吴冬梅	26	38	7-5038-4400-3	工厂供电	王玉华	34
2	7-301-10760-7	单片机原理与应用技术	魏立峰	25	39	7-5038-4410-2	控制系统仿真	郑恩让	26
3	7-301-10765-2	电工学	蒋 中	29	40	7-5038-4398-3	数字电子技术	李 元	27
4	7-301-19183-5	电工与电子技术(上册)(第2版)	吴舒辞	30	41	7-5038-4412-6	现代控制理论	刘永信	22
5	7-301-19229-0	电工与电子技术(下册)(第2版)	徐卓农	32	42	7-5038-4401-0	自动化仪表	齐志才	27
6	7-301-10699-0	电子工艺实习	周春阳	19	43	7-5038-4408-9	自动化专业英语	李国厚	32
7	7-301-10744-7	电子工艺学教程	张立毅	32	44	7-5038-4406-5	集散控制系统	刘翠玲	25
8	7-301-10915-6	电子线路 CAD	吕建平	34	45	7-301-19174-3	传感器基础(第2版)	赵玉刚	30
9	7-301-10764-1	数据通信技术教程	吴延海	29	46	7-5038-4396-9	自动控制原理	潘 丰	32
10	7-301-18784-5	数字信号处理(第2版)	阎 毅	32	47	7-301-10512-2	现代控制理论基础(国家级十一五规划教材)	侯媛彬	20
11	7-301-18889-7	现代交换技术(第2版)	姚 军	36	48	7-301-11151-2	电路基础学习指导与典型题解	公茂法	32
12	7-301-10761-4	信号与系统	华 容	33	49	7-301-12326-3	过程控制与自动化仪表	张井岗	36
13	7-301-10762-5	信息与通信工程专业英语	韩定定	24	50	7-301-12327-0	计算机控制系统	徐文尚	28
14	7-301-10757-7	自动控制原理	袁德成	29	51	7-5038-4414-0	微机原理及接口技术	赵志诚	38
15	7-301-16520-1	高频电子线路(第2版)	宋树祥	35	52	7-301-10465-1	单片机原理及应用教程	范立南	30
16	7-301-11507-7	微机原理与接口技术	陈光军	34	53	7-5038-4426-4	微型计算机原理与接口技术	刘彦文	26
17	7-301-11442-1	MATLAB 基础及其应用教程	周开利	24	54	7-301-12562-5	嵌入式基础实践教程	杨 刚	30
18	7-301-11508-4	计算机网络	郭银景	31	55	7-301-12530-4	嵌入式 ARM 系统原理与实例开发	杨宗德	25
19	7-301-12178-8	通信原理	隋晓红	32	56	7-301-13676-8	单片机原理与应用及 C51 程序设计	唐 颖	30
20	7-301-12175-7	电子系统综合设计	郭 勇	25	57	7-301-13577-8	电力电子技术及应用	张润和	38
21	7-301-11503-9	EDA 技术基础	赵明富	22	58	7-301-12393-5	电磁场与电磁波	王善进	25
22	7-301-12176-4	数字图像处理	曹茂永	23	59	7-301-12179-5	电路分析	王艳红	38
23	7-301-12177-1	现代通信系统	李白萍	27	60	7-301-12380-5	电子测量与传感技术	杨 雷	35
24	7-301-12340-9	模拟电子技术	陆秀令	28	61	7-301-14461-9	高电压技术	马永翔	28
25	7-301-13121-3	模拟电子技术实验教程	谭海曙	24	62	7-301-14472-5	生物医学数据分析及其 MATLAB 实现	尚志刚	25
26	7-301-11502-2	移动通信	郭俊强	22	63	7-301-14460-2	电力系统分析	曹 娜	35
27	7-301-11504-6	数字电子技术	梅开乡	30	64	7-301-14459-6	DSP 技术与应用基础	俞一彪	34
28	7-301-18860-6	运筹学(第2版)	吴亚丽	28	65	7-301-14994-2	综合布线系统基础教程	吴达金	24
29	7-5038-4407-2	传感器与检测技术	祝诗平	30	66	7-301-15168-6	信号处理 MATLAB 实验教程	李 杰	20
30	7-5038-4413-3	单片机原理及应用	刘 刚	24	67	7-301-15440-3	电工电子实验教程	魏 伟	26
31	7-5038-4409-6	电机与拖动	杨天明	27	68	7-301-15445-8	检测与控制实验教程	魏 伟	24
32	7-5038-4411-9	电力电子技术	樊立萍	25	69	7-301-04595-4	电路与模拟电子技术	张绪光	35
33	7-5038-4399-0	电力市场原理与实践	邹 斌	24	70	7-301-15458-8	信号、系统与控制理论(上、下册)	邱德润	70
34	7-5038-4405-8	电力系统继电保护	马永翔	27	71	7-301-15786-2	通信网的信令系统	张云麟	24
35	7-5038-4397-6	电力系统自动化	孟祥忠	25	72	7-301-16493-8	发电厂变电所电气部分	马永翔	35
36	7-5038-4404-1	电气控制技术	韩顺杰	22	73	7-301-16076-3	数字信号处理	王震宇	32
37	7-5038-4403-4	电器与 PLC 控制技术	陈志新	38	74	7-301-16931-5	微机原理及接口技术	肖洪兵	32

序号	标准书号	书 名	主 编	定价	序号	标准书号	书 名	主 编	定价
75	7-301-16932-2	数字电子技术	刘金华	30	91	7-301-18260-4	控制电机与特种电机及其控制系统	孙冠群	42
76	7-301-16933-9	自动控制原理	丁 红	32	92	7-301-18493-6	电工技术	张 莉	26
77	7-301-17540-8	单片机原理及应用教程	周广兴	40	93	7-301-18496-7	现代电子系统设计教程	宋晓梅	36
78	7-301-17614-6	微机原理及接口技术实验指导书	李干林	22	94	7-301-18672-5	太阳能电池原理与应用	靳瑞敏	25
79	7-301-12379-9	光纤通信	卢志茂	28	95	7-301-18314-4	通信电子线路及仿真设计	王鲜芳	29
80	7-301-17382-4	离散信息论基础	范九伦	25	96	7-301-19175-0	单片机原理与接口技术	李 升	46
81	7-301-17677-1	新能源与分布式发电技术	朱永强	32	97	7-301-19320-4	移动通信	刘维超	39
82	7-301-17683-2	光纤通信	李丽君	26	98	7-301-19447-8	电气信息类专业英语	缪志农	40
83	7-301-17700-6	模拟电子技术	张绪光	36	99	7-301-19451-5	嵌入式系统设计及应用	邢吉生	44
84	7-301-17318-3	ARM 嵌入式系统基础与开发教程	丁文龙	36	100	7-301-19452-2	电子信息类专业 MATLAB 实验教程	李明明	42
85	7-301-17797-6	PLC 原理及应用	缪志农	26	101	7-301-16914-8	物理光学理论与应用	宋贵才	32
86	7-301-17986-4	数字信号处理	王玉德	32	102	7-301-16598-0	综合布线系统管理教程	吴达金	39
87	7-301-18131-7	集散控制系统	周荣富	36	103	7-301-20394-1	物联网基础与应用	李蔚田	44
88	7-301-18285-7	电子线路 CAD	周荣富	41	104	7-301-20339-2	数字图像处理	李云红	36
89	7-301-16739-7	MATLAB 基础及应用	李国朝	39	105	7-301-20340-8	信号与系统	李云红	29
90	7-301-18352-6	信息论与编码	隋晓红	24					

请登录 www.pup6.cn 免费下载本系列教材的电子书(PDF 版)、电子课件和相关教学资源。

欢迎免费索取样书, 并欢迎到北京大学出版社来出版您的著作, 可在 www.pup6.cn 在线申请样书和进行选题登记, 也可下载相关表格填写后发到我们的邮箱, 我们将及时与您取得联系并做好全方位的服务。

联系方式: 010-62750667, pup6_czq@163.com, szheng_pup6@163.com, linzhangbo@126.com, 欢迎来电来信咨询。

目 录

第 1 章 信号与系统的基本概念	1	2.4.3 LTI 离散系统的零输入 响应	45
1.1 序言	2	2.4.4 LTI 离散系统的零状态 响应	46
1.2 信号的概念	2	2.5 离散系统的单位序列响应	47
1.2.1 信号的定义	2	2.6 序列卷积和	51
1.2.2 信号的分类	3	2.6.1 卷积和的定义	51
1.2.3 有关信号的术语	6	2.6.2 卷积和的图解	52
1.3 基本连续时间信号及其时域特性	7	2.6.3 卷积和的列表法	54
1.4 信号的时域变换	11	2.6.4 卷积和的性质	55
1.5 信号的时域运算	11	本章小结	56
1.6 信号的时域分解	12	习题二	56
1.7 系统的概念	13	第 3 章 傅里叶变换与系统的频域分析 ...	61
1.8 线性时不变系统的性质	15	3.1 信号在正交函数集中的分解	62
1.9 线性系统的分析	18	3.1.1 正交函数集	62
本章小结	19	3.1.2 信号的正交分解	63
习题一	19	3.2 周期信号的傅里叶级数	65
第 2 章 系统的时域分析	21	3.2.1 三角形形式的傅里叶级数	65
2.1 LTI 连续系统的响应	22	3.2.2 波形的对称性与谐波 特性	67
2.1.1 经典时域分析方法	22	3.2.3 指数形式的傅里叶级数	72
2.1.2 关于 0_- 和 0_+ 值	25	3.2.4 周期信号的平均功率	74
2.1.3 LTI 连续系统的零输入 响应	27	3.3 周期信号的频谱	75
2.1.4 LTI 连续系统的零状态 响应	28	3.3.1 周期信号频谱简介	75
2.1.5 LTI 连续系统的 全响应	30	3.3.2 周期矩形脉冲信号的 频谱	78
2.2 连续系统的冲激响应	32	3.4 非周期信号的频谱	80
2.3 卷积积分	35	3.4.1 傅里叶变换	80
2.3.1 卷积积分的定义	35	3.4.2 典型非周期信号的傅里叶 变换	82
2.3.2 卷积积分的图解	37	3.5 傅里叶变换的性质	88
2.3.3 卷积积分的性质	39	3.5.1 线性	88
2.4 LTI 离散系统的响应	43	3.5.2 奇偶虚实性	88
2.4.1 迭代法	43		
2.4.2 经典法	44		



3.5.3 对称性	90	4.1.3 单边拉普拉斯变换	133
3.5.4 尺度变换特性	92	4.2 拉普拉斯变换的性质	135
3.5.5 时移特性	93	4.2.1 线性	135
3.5.6 频移特性	95	4.2.2 尺度变换	135
3.5.7 卷积定理	96	4.2.3 时移特性	136
3.5.8 时域微分和积分	99	4.2.4 复频域平移特性	136
3.5.9 频域微分和积分	101	4.2.5 时域微分、积分特性	137
3.5.10 相关定理	102	4.2.6 卷积定理	139
3.6 能量谱与功率谱	103	4.2.7 复频域微分和积分特性	139
3.6.1 能量谱	104	4.2.8 初值定理和终值定理	140
3.6.2 功率谱	105	4.3 拉普拉斯逆变换	142
3.7 周期信号的傅里叶变换	106	4.3.1 查表法	142
3.7.1 正、余弦函数的傅里叶 变换	107	4.3.2 部分分式展开法	142
3.7.2 一般周期信号的傅里叶 变换	107	4.4 复频域分析	146
3.7.3 傅里叶系数与傅里叶 变换的关系	109	4.4.1 微分方程的变换解	146
3.8 LTI 系统的频域分析	109	4.4.2 系统函数	148
3.8.1 频率响应	109	4.4.3 系统 s 域框图	150
3.8.2 非周期信号激励下系统的 响应	110	4.4.4 电路 s 域模型	151
3.8.3 周期信号激励下系统的 响应	112	4.4.5 拉普拉斯变换和傅里叶 变换	155
3.8.4 无失真传输	114	习题四	156
3.8.5 理想低通滤波器	115	第 5 章 系统函数	158
3.9 取样定理	120	5.1 系统函数及其特性	159
3.9.1 信号的取样	120	5.1.1 系统函数	159
3.9.2 时域取样定理	122	5.1.2 系统的零点和极点	159
3.9.3 频域取样定理	123	5.2 系统函数与时域、频域之间的 关系	161
本章小结	123	5.2.1 系统函数与时域的关系	161
习题三	123	5.2.2 系统函数与频域的关系	162
第 4 章 连续时间系统的复频域分析	129	5.3 系统的稳定性和因果性	165
4.1 拉普拉斯变换	130	5.3.1 系统的稳定性	165
4.1.1 拉普拉斯变换介绍	130	5.3.2 系统的因果性	166
4.1.2 拉普拉斯变换存在的条件 和收敛域	131	5.4 信号流图与系统结构的实现	167
		5.4.1 信号流图	167
		5.4.2 系统结构的实现	170
		本章小结	173
		习题五	174

第 6 章 系统的状态变量分析	176	6.3.2 系统函数矩阵 $H(s)$ 与系统	
6.1 状态变量与状态方程	177	稳定性的判断	188
6.1.1 状态与状态变量的概念 ...	177	6.3.3 用时域法求解状态方程 ...	190
6.1.2 状态方程和输出方程	178	本章小结	194
6.2 连续系统状态方程的建立	179	习题六	194
6.2.1 由电路图直接建立状态		测试题 A	197
方程	180	测试题 A 答案	200
6.2.2 由输入-输出方程建立状态		测试题 B	204
方程	183	测试题 B 答案	207
6.2.3 由状态方程列输入-输出		附录 A 常用英汉术语对照	211
方程	186	附录 B 部分习题参考答案	219
6.3 连续系统状态方程的求解	187	参考文献	224
6.3.1 用拉普拉斯变换法求解			
状态方程	187		

第1章

信号与系统的基本概念

本章首先介绍了信号与系统的概念及它们的分类方法，同时讨论了线性时不变(Linear Time-Invariant, LTI)系统的特性；介绍了 LTI 系统的描述方法和分析方法；深入研究了在 LTI 系统分析中占有十分重要地位的阶跃函数、冲激函数，以及它们的特性。



教学要求

了解信号与系统的分类；掌握信号的运算方法；深入研究阶跃函数、冲激函数及其特性。



重点与难点

1. 信号的描述与运算

- (1) 信号的分类。
- (2) 信号的运算(难点是对信号进行平移、反转和尺度变换的综合运算)。
- (3) 冲激函数和阶跃函数。

2. 系统的描述与性质

- (1) 系统的分类。
- (2) 线性、时不变、因果系统的定义及判别方法。
- (3) 用仿真框图表示系统或由框图写出该系统方程。

1.1 序 言

信号与系统的概念已经深入到人们的生活和社会的各个方面。手机、电视机、通信网、计算机网等已成为人们常用的工具和设备，这些工具和设备都可以看成是系统，而各种设备传送的语音、音乐、图像、文字等都可以看成是信号。

那么，什么是信号？什么是系统？为什么将这两个概念连在一起？信号是信息的一种表示方式，通过信号传递信息。信号的概念与系统的概念是紧密相连的。信号在系统中按一定的规律运动、变化，系统在输入信号的驱动下对它进行“加工”、“处理”并发送输出信号，如图 1.1 所示。输入信号常称为激励，输出信号常称为响应。

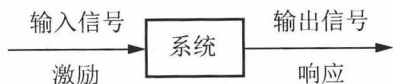


图 1.1 信号与系统

1.2 信号的概念

信号常可以表示为时间函数(或序列)，该函数的图像称为信号的波形。在讨论信号的有关问题时，“信号”与“函数(或序列)”两个词常互相混用，不予区分。

1.2.1 信号的定义

信息(Information)是人类感官所能感知的一切反映客观事物运动状态、特征及其变化的东西。它们是抽象的，只能借助一定的物理方式予以表达。

消息(Message)是信息的物理表达方式，诸如语言、文字、图像、数据或者事先约定的符号等。消息中都包含一定的信息。

消息一般难以高效、可靠地进行远距离传输，为此需要将它们转换为随时间和空间变化的某种物理量，这就是信号(Signal)。因此，信号是消息的表现形式和运载工具，消息是信号的内容。

信号对人们来说并不陌生。例如，上课的铃声——声信号，表示该上课了；十字路口的红绿灯——光信号，指挥交通；电视机天线接收的电视信息——电信号；广告牌上的文字、图像信号；等等。

信号可以是多种多样的，若信号表现为电压、电流、电荷、磁链或空间电磁波时，则称为电信号。电信号因其易于存储、传输、处理和再现，且非电信号又极易转换为电信号，因而电信号是现代技术中应用最广的信号。

为了对信号进行分析和研究，必须建立信号的数学模型，以使用数学语言对信号进行描述，这就是信号的数学表达式，即信号的函数形式。

本课程只讨论电信号。就集总参数电系统而言，电信号是只随时间变化的单变量信号 $u(t)$ 和 $i(t)$ ，它们随时间变化的函数曲线称为信号的波形，它是信号的图形表示。



1.2.2 信号的分类

1. 确定信号和随机信号(按信号随时间的变化规律分类)

确定信号中的信号是自变量的确定函数, 在任意给定时刻或位置, 信号都具有确定的数值及分布, 信号所含信息不同体现在其分布值随时间或空间的变化规律上。随机信号中的信号不能用自变量的确定函数去描述; 自变量给定时, 信号值具有不可预知的不确定性, 只能通过大量试验或以统计数学为工具去获取在给定自变量下信号为某一数值的概率(信号的统计特性)。

2. 连续时间信号和离散时间信号(按信号自变量的定义域分类)

连续时间信号中信号的自变量取值是连续的。也就是说, 信号自变量(时间)的定义域是连续的, 除若干不连续的点外, 信号都有确定值与自变量对应。图 1.2 (a) 中的信号

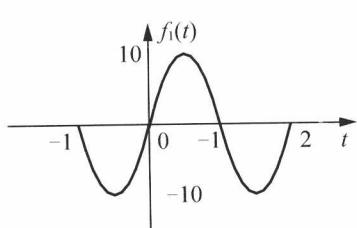
$$f_1(t) = 10\sin(\omega t), \quad -\infty < t < \infty \quad (1-1)$$

其定义域 $(-\infty, \infty)$ 和值域 $[-10, 10]$ 都是连续的。图 1.2 (b) 中的信号

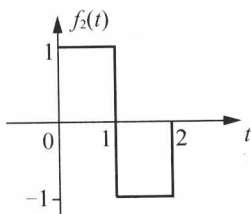
$$f_2(t) = \begin{cases} 0, & t < -1 \\ 1, & -1 < t < 1 \\ -1, & 1 < t < 3 \\ 0, & t > 3 \end{cases} \quad (1-2)$$

其定义域 $(-\infty, \infty)$ 是连续的, 但其函数值只取 -1 、 0 、 1 三个离散数值。

而离散时间信号中的信号的自变量取值是离散的。就是说, 信号只在自变量的离散瞬间才有定义。这里“离散”指信号的定义域——时间(或其他量)是离散的, 它只取某些规定的值。所以, 信号自变量的定义域是不连续的。图 1.3 所示为离散时间序列。



(a) 值域连续



(b) 值域不连续

图 1.2 连续时间信号

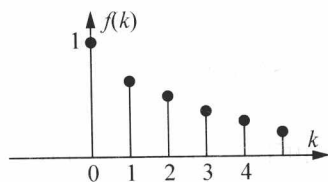


图 1.3 离散时间信号

$$f(k) = \begin{cases} 0, & k < 0 \\ e^{-\alpha k}, & k \geq 0, \alpha > 0 \end{cases} \quad (1-3)$$

对于不同的 α , 其值域 $[0, 1]$ 是连续的。

3. 周期信号和非周期信号(按信号变化的重复性分类)

周期信号是信号随自变量连续变化且重复某一变化规律的信号, 即定义在 $(-\infty, \infty)$ 区间, 每隔一定时间 T (或整数 N), 按相同规律重复变化的信号, 如图 1.4 所示。

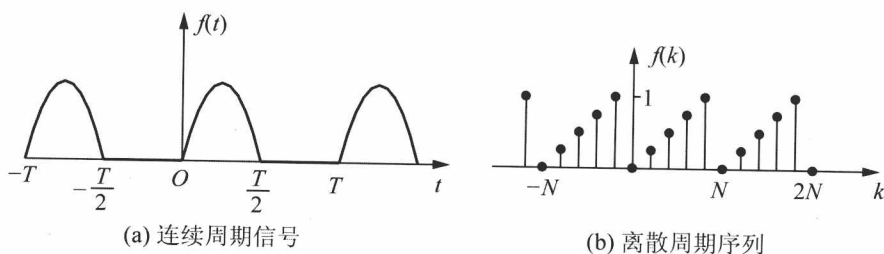


图 1.4 周期信号

连续周期信号 $f(t)$ 满足

$$f(t) = f(t + nT) \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-4)$$

离散周期信号 $f(k)$ 满足

$$f(k) = f(k + mN) \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-5)$$

使式(1-3)成立的最小 T 值称为信号 $f(t)$ 的周期, 使式(1-4)成立的最小 N 值称为信号 $f(k)$ 的周期。不具有周期性的信号称为非周期信号, 周期信号的特点如下。

- (1) 无始无终, 定义域为 $(-\infty, +\infty)$
- (2) 变化规律具有周期性, 各周期内的信号波形完全相同。
- (3) 周期比为整数比的周期信号之和仍是周期信号, 其周期是子信号周期的公倍数。

例 1.1 判断下列信号是否为周期信号, 若是, 确定其周期。

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

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

分析

两个周期信号 $x(t)$, $y(t)$ 的周期分别为 T_1 和 T_2 , 若其周期之比 T_1/T_2 为有理数, 则其和信号 $x(t) + y(t)$ 仍然是周期信号, 其周期为 T_1 和 T_2 的最小公倍数。

解

(1) $\sin 2t$ 是周期信号, 其角频率和周期分别为

$$\omega_1 = 2 \text{ rad/s}, \quad T_1 = 2\pi/\omega_1 = \pi \text{ s}$$

$\cos 3t$ 是周期信号, 其角频率和周期分别为

$$\omega_2 = 3 \text{ rad/s}, \quad T_2 = 2\pi/\omega_2 = (2\pi/3) \text{ s}$$

由于 $T_1/T_2 = 3/2$ 为有理数, 故 $f_1(t)$ 为周期信号, 其周期为 T_1 和 T_2 的最小公倍数 2π 。

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

例 1.2 判断正弦序列 $f(k) = \sin(\beta k)$ 是否为周期信号, 若是, 确定其周期。

解

$$\begin{aligned} f(k) &= \sin(\beta k) = \sin(\beta k + 2m\pi), \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \\ &= \sin\left[\beta\left(k + m \frac{2\pi}{\beta}\right)\right] = \sin[\beta(k + mN)] \end{aligned}$$

式中 β 称为数字角频率, 单位: rad。由上式可见:



仅当 $2\pi/\beta$ 为整数时, 正弦序列才具有周期 $N=2\pi/\beta$ 。

当 $2\pi/\beta$ 为有理数时, 正弦序列仍为具有周期性, 但其周期为 $N=M(2\pi/\beta)$, M 取使 N 为整数的最小整数。

当 $2\pi/\beta$ 为无理数时, 正弦序列为非周期序列。

例 1.3 判断下列序列是否为周期信号, 若是, 确定其周期。

$$(1) f_1(k) = \sin(3\pi k/4) + \cos(0.5\pi k)$$

$$(2) f_2(k) = \sin(2k)$$

解

(1) $\sin(3\pi k/4)$ 和 $\cos(0.5\pi k)$ 的数字角频率分别为 $\beta_1=3\pi/4\text{rad}$, $\beta_2=0.5\pi\text{rad}$

由于 $2\pi/\beta_1=8/3$, $2\pi/\beta_2=4$ 为有理数, 故它们的周期分别为 $N_1=8$, $N_2=4$, 故 $f_1(k)$ 为周期序列, 其周期为 N_1 和 N_2 的最小公倍数 8。

(2) $\sin(2k)$ 的数字角频率为 $\beta_1=2\text{rad}$; 由于 $2\pi/\beta_1=\pi$ 为无理数, 故 $f_2(k)=\sin(2k)$ 为非周期序列。

由上面几例可看出:

(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) 两连续周期信号之和不一定是周期信号, 而两周期序列之和一定是周期序列。

4. 能量信号和功率信号(按信号的能量和功率特点分类)

能量信号的总能量为有限值, 而平均功率为零。功率信号的平均功率为有限值, 而总能量无穷大, 并且信号自变量(时间)的定义域为 $(-\infty, +\infty)$ 。

信号能量定义为在区间 $(-\infty, +\infty)$ 中的信号 $f(t)$ 的能量, 用 E 表示, 即

$$E = \lim_{a \rightarrow \infty} \int_{-a}^a |f(t)|^2 dt \quad (1-6)$$

信号功率定义为在区间 $(-\infty, +\infty)$ 中信号 $f(t)$ 的平均功率, 用 P 表示, 即

$$P = \lim_{a \rightarrow \infty} \frac{1}{2a} \int_{-a}^a |f(t)|^2 dt \quad (1-7)$$

若信号 $f(t)$ 的能量有界(即 $0 < E < \infty$, 这时 $P=0$), 则称其为能量有限信号, 简称为能量信号。若信号 $f(t)$ 的功率有界(即 $0 < P < \infty$, 这时 $E=\infty$), 则称其为功率有限信号, 简称功率信号。

一般规律

(1) 一般周期信号为功率信号。

(2) 时限信号(仅在有限时间区间不为零的非周期信号)为能量信号。

(3) 还有一些非周期信号, 也是非能量信号。如 $\epsilon(t)$ 是功率信号; 而 $t\epsilon(t)$ 、 e^t 为非功率非能量信号; $\delta(t)$ 是无定义的非功率非能量信号。

5. 实信号和复信号(按信号的值域性质分类)

在任意时刻的取值均为实数, 物理上可以实现的信号都是实信号。连续信号的复指数信号可表示为

$$f(t) = e^{st}, \quad -\infty < t < \infty \quad (1-8)$$

式中, 复变量 $s = \sigma + j\omega$, σ 是 s 的实部, 记为 $\text{Re}[s]$, ω 是 s 的虚部, 记为 $\text{Im}[s]$ 。根据欧拉公式, 上式可展开为

$$f(t) = e^{(\sigma + j\omega)t} = e^{\sigma t} \cos(\omega t) + je^{\sigma t} \sin(\omega t) \quad (1-9)$$

可见, 一个复指数信号可分解为实、虚两部分, 即

$$\text{Re}[f(t)] = e^{\sigma t} \cos(\omega t) \quad (1-10)$$

$$\text{Im}[f(t)] = e^{\sigma t} \sin(\omega t) \quad (1-11)$$

两者均为实信号, 而且是频率相同、振幅随时间变化的正(余)弦振荡。

函数值为复数的信号称为复信号。复信号的值域为复数, 物理上不能实现, 常用于理论分析。离散时间的复指数序列可表示为

$$f(k) = e^{(a + j\beta)k} = e^{ak} e^{j\beta k} \quad (1-12)$$

令 $a = e^{\sigma}$, 上式可展开为

$$f(k) = a^k \cos(\beta k) + ja^k \sin(\beta k) \quad (1-13)$$

其实部、虚部分别为

$$\text{Re}[f(k)] = a^k \cos(\beta k) \quad (1-14)$$

和

$$\text{Im}[f(k)] = a^k \sin(\beta k) \quad (1-15)$$

可见, 复指数序列的实部和虚部均为幅值随 k 变化的正(余)弦序列。

1.2.3 有关信号的术语

按照信号存在的时间区间还可进行如下分类。

1. 有时限信号和无时限信号

若信号 $f(t)$ 在有限时间区间 $t_1 < t < t_2$ 内 $f(t) \neq 0$, 此区间外 $f(t) = 0$, 即称为有时限信号, 否则称为无时限信号。

2. 有始信号和有终信号

若信号 $f(t)$ 在 $t < t_1$ 时 $f(t) = 0$; $t > t_1$ 时 $f(t) \neq 0$, 则称为有始信号, $t = t_1$ 为有始信号 $f(t)$ 的起始时刻。

若信号 $f(t)$ 在 $t < t_2$ 时 $f(t) \neq 0$; $t > t_2$ 时 $f(t) = 0$, 则称为有终信号, $t = t_2$ 为有终信号 $f(t)$ 的终止时刻。

3. 因果信号和反因果信号

如果信号 $f(t)$ 在 $t < 0$ 时 $f(t) = 0$; $t > 0$ 时 $f(t) \neq 0$, 则称为因果信号。显然, 因果信号是有始信号的特例, 可表示为 $f(t)\epsilon(t)$ 。

如果信号 $f(t)$ 在 $t < 0$ 时 $f(t) \neq 0$; $t > 0$ 时 $f(t) = 0$, 则称为反因果信号。显然, 反因果信号是有终信号的特例, 可表示为 $f(t)\epsilon(-t)$ 。



1.3 基本连续时间信号及其时域特性

信号的时域特性是指信号的波形、出现时间的先后、持续时间之长短、变化的快慢和幅度、重复周期的大小等,它包含了信号中的信息内容。本节给出基本连续信号的函数表达式、波形图及其时域性质。

1. 直流(常量)信号

$$f(t) = A \quad -\infty < t < \infty \quad (1-16)$$

2. 正弦信号

$$f(t) = A \cos(\omega t + \psi) \quad -\infty < t < \infty \quad (1-17)$$

式(1-15)中,振幅 A 、角频率 ω 和初相 ψ 均为实常数。正弦信号有以下特点。

- (1) 正弦信号是无时限信号。
- (2) 正弦信号是周期信号,周期 $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 。
- (3) 正弦信号微分或积分的结果仍为同频正弦信号。
- (4) 正弦信号满足二阶微分方程 $f''(t) + \omega^2 f(t) = 0$ 。

3. 单位阶跃信号

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (1-18)$$

称为发生幅度为 1 的阶跃,如图 1.5 所示。

其值域只有 0、1 两个数值。单位阶跃信号的起始作用可使任意非因果信号 $f(t)$ 变为因果信号 $f(t)\varepsilon(t)$ 。

4. 单位门信号

单位门信号如图 1.6 所示。

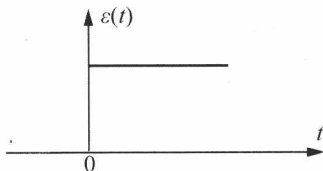


图 1.5 单位阶跃信号

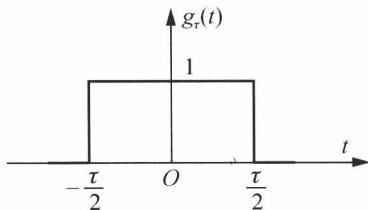


图 1.6 单位门信号

$$g_{\tau}(t) = \begin{cases} 1, & |t| \leq \frac{\tau}{2} \\ 0, & |t| > \frac{\tau}{2} \end{cases} \quad (1-19)$$