



21st CENTURY

实用规划教材

21世纪全国应用型本科

电子通信系列

实用规划教材



信号与系统

主 编 华 容 隋晓红



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材

信号与系统

主 编 华 容 隋晓红
副主编 田小平 李秀平
洪 梅
主 审 俞金寿



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书为《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》之一。

本书深入浅出而又全面系统地介绍了连续与离散信号及系统分析的基本理论和方法,并加强了离散系统和数字信号处理的基础知识和应用介绍。全书共 9 章,其内容包括:信号与系统的基本概念,连续时间信号和离散时间信号的时域分析,连续时间系统的时域分析,离散时间系统的时域分析,连续时间信号与系统的频域分析,连续时间系统的复频域分析,离散傅里叶变换与离散系统的频域分析,Z 变换、离散时间系统的 Z 域分析,系统的状态变量分析。在每章都配备了一些 MATLAB 例程,通过形象、直观的计算机模拟与仿真实现,加深学生对信号与系统基本原理、方法及应用的理 解。并且在每章末都配有习题,培养学生主动获取知识和应用理论独立解决实际问题的能力。

本书构思新颖、实用性强,内容简明扼要,叙述深入浅出,并尽量体现工程背景,克服冗长的数学推导。

本书可作为电子信息工程、通信工程、信息工程、自动化控制工程和计算机等学科和专业的本科生教材,也可作为相关领域工程技术人员的科技参考书。

图书在版编目(CIP)数据

信号与系统/华容, 隋晓红主编. —北京: 北京大学出版社, 2006.8

(21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材)

ISBN 7-301-10761-7

I. 信… II. ①华… ②隋… III. 信号系统—高等学校—教材 IV. TN911.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 057959 号

书 名: 信号与系统

著作责任者: 华 容 隋晓红 主编

策 划 编 辑: 徐 凡

责 任 编 辑: 翟 源

标 准 书 号: ISBN 7-301-10761-7/TN · 0033

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.com>

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: 北京宏伟双华印刷有限公司

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 23.75 印张 550 千字

2006 年 8 月第 1 版 2006 年 8 月第 1 次印刷

定 价: 33.00 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

《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》

专家编审委员会

主 任 殷瑞祥

顾 问 宋铁成

副主任 (按拼音顺序排名)

曹茂永 陈殿仁 李白萍 王霓虹

魏立峰 袁德成 周立求

委 员 (按拼音顺序排名)

曹继华 郭 勇 黄联芬 蒋兴华 蒋 中

刘化君 聂 翔 王宝兴 吴舒辞 阎 毅

杨 雷 姚胜兴 张立毅 张雪英 张宗念

赵明富 周开利

丛书总序

随着招生规模迅速扩大,我国高等教育已经从“精英教育”转化为“大众教育”,全面素质教育必须在教育模式、教学手段等各个环节进行深入改革,以适应大众化教育的新形势。面对社会对高等教育人才的需求结构变化,自上个世纪 90 年代以来,全国范围内出现了一大批以培养应用型人才为主要目标的应用型本科院校,很大程度上弥补了我国高等教育人才培养规格单一的缺陷。

但是,作为教学体系中重要信息载体的教材建设并没有能够及时跟上高等学校人才培养规格目标的变化,相当长一段时间以来,应用型本科院校仍只能借用长期存在的精英教育模式下研究型教学所使用的教材体系,出现了人才培养目标与教材体系的不协调,影响着应用型本科院校人才培养的质量,因此,认真研究应用型本科教育教学的特点,建立适合其发展需要的教材新体系越来越成为摆在广大应用型本科院校教师面前的迫切任务。

2005 年 4 月北京大学出版社在南京工程学院组织召开《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》编写研讨会,会议邀请了全国知名学科专家、工业企业工程技术人员和部分应用型本科院校骨干教师共 70 余人,研究制定电子信息类应用型本科专业基础课程和主干专业课程体系,并遴选了各教材的编写组成人员,落实制定教材编写大纲。

2005 年 8 月在北京召开了《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》审定会,广泛征求了用人单位对应用型本科毕业生的知识能力需求和应用型本科院校教学一线教师的意见,对各本教材主编提出的编写大纲进行了认真细致的审核和修改,在会上确定了 32 本教材的编写大纲,为这套系列教材的质量奠定了基础。

经过各位主编、副主编和参编教师的努力,在北京大学出版社和各参编学校领导的关心和支持下,经过北大出版社编辑们的辛苦工作,我们这套系列教材终于在 2006 年与读者见面了。

《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》涵盖了电子信息、通信等专业的基础课程和主干专业课程,同时还包括其他非电类专业的电工电子基础课程。

电工电子与信息技术越来越渗透到社会的各行各业,知识和技术更新迅速,要求应用型本科院校在人才培养过程中,必须紧密结合现行工业企业技术现状。因此,教材内容必须能够将技术的最新发展和当今应用状况及时反映进来。

参加系列教材编写的作者主要是来自全国各地应用型本科院校的第一线教师和部分工业企业工程技术人员,他们都具有多年从事应用型本科教学的经验,非常熟悉应用型本科教育教学的现状、目标,同时还熟悉工业企业的技术现状和人才知识能力需求。本系列教材明确定位于“应用型人才培养”目标,具有以下特点:

(1) **强调大基础:**针对应用型本科教学对象特点和电子信息学科知识结构,调整理顺了课程之间的关系,避免了内容的重复,将众多电子、电气类专业基础课程整合在一个统

一的大平台上,有利于教学过程的实施。

(2) **突出应用性:**教材内容编排上力求尽可能把科学技术发展的新成果吸收进来、把工业企业的实际应用情况反映到教材中,教材中的例题和习题尽量选用具有实际工程背景的问题,避免空洞。

(3) **坚持科学发展观:**教材内容组织从可持续发展的观念出发,根据课程特点,力求反映学科现代新理论、新技术、新材料、新工艺。

(4) **教学资源齐全:**与纸质教材相配套,同时编制配套的电子教案、数字化素材、网络课程等多种媒体形式的教学资源,方便教师 and 学生的教学组织实施。

衷心感谢本套系列教材的各位编著者,没有他们在教学第一线的教改和工程第一线的辛勤实践,要出版如此规模的系列实用教材是不可能的。同时感谢北京大学出版社为我们广大编著者提供了广阔的平台,为我们进一步提高本专业领域的教学质量和教学水平提供了很好的条件。

我们真诚希望使用本系列教材的教师和学生,不吝指正,随时给我们提出宝贵的意见,以期进一步对本系列教材进行修订、完善。

《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》

专家编审委员会

2006 年 4 月

前 言

随着信息科学技术的迅速发展,信号与系统的概念和分析方法已渗透并应用于许多各种不同领域和学科中。信号与系统已是高等院校现代信息学科以及相关学科的基础主干课程。

《信号与系统》是针对通信和电子信息类应用型本科人才培养体系特色而编写的教材。根据《21 世纪全国应用型本科电子通信系列实用规划教材》专家编委员会于 2005 年 8 月 15 日~17 日在北京召开的审纲会的精神,教材力争体现“淡化理论推导和数学运算、加强实例和功能应用”的理念,以高等教育的培养目标为依据,注重教材的科学性、实用性、通用性,尽量满足同类专业院校的需求。教材注意处理好传统内容与现代内容结合的关系,大力补充新知识、新技术、新成果和新应用。

本教材体现两个特色:一是突出信息,二是强调应用。教材精讲理论,重讲实现,突出应用举例,加强仿真,做到:定义、公式、性质、例子、仿真结果相统一。在基本内容上,削枝强干、突出重点;基础理论着重基本概念;以工程应用为目的,理论联系实际,增加实用性和应用性,其基本点在应用型本科。

信号与系统的核心内容是用系统理论的基本概念和方法研究信号的描述、获取、产生、分解、变换、运算、传输、再现、辨识的基本原理,需要扎实的高等数学、工程数学和电路分析知识基础,理论性和实践性都很强。本着面向未来、把握定位和学时尺度,结合国内外教材和教学改革的实践成果,适应应用型本科人才培养的教学基本要求,在教材体系上力求体现如下创新:

(1) 体系更新。建立以信号与系统、数字信号处理的基本核心体系。在以前的教材内容基础上重构和重组,而非重建。本教材的内容组成的顺序、比例要更加优化,避免遗漏,并注意与“自动控制原理”的内容不必要的重复。章节安排总体上按先时域后变换域,先连续后离散,先信号分析后系统分析的方式进行论述。由时域分析法和三大变换分析法架构了信号与系统、数字信号处理的基本核心体系。而把状态空间分析、随机信号与系统的分析、滤波器理论等部分内容分散到其他相关课程中,以突出重点,而不过于追求内容体系的完整和全面。

(2) 在教材内容的组织方面,一是突出系统处理信号的时域变换和运算功能。即系统的时域变换:数乘、倒相、平移、反转和尺度展缩五种简单处理,系统的时域运算:微分、积分运算,两个以上信号的加法、乘法和卷积五种高级处理。加强时域分析中这十种变换和运算的系统框图模型,使得 FT、LT、ZT 三大变换性质的讨论,数学定理的介绍、推论不再枯燥、乏味。二是强调两个重点:系统的单位冲激响应和卷积运算。

(3) 增加应用性和实用性内容。信号与系统学科理论性很强,较为抽象。为此教材在教学内容上加强了与计算机辅助教学手段相结合。MATLAB 是国际流行的计算机仿真软件,也是信号与系统的优秀教学辅助工具,本教材每一章都安排利用 MATLAB 进行相关内容的分析与求解,给出了很多信号与系统分析的实际应用例子,并安排了 MATLAB 习题。使学生能完成数值计算、信号分析的可视化仿真调试,通过可视化测试结果使学生能

实际动手设计、调试、分析，提高教学效果和学习效率，培养学生主动获取知识和应用理论独立解决实际问题的能力。

参加本书编写工作的有上海应用技术学院华容、黑龙江科技学院隋晓红、北京石油化工学院田小平、东莞理工学院李秀平以及南京工程学院洪梅。由华容任第一主编、隋晓红任第二主编、田小平任第一副主编、李秀平任第二副主编。本书第 3 章和第 7 章由田小平编写，第 4 章和第 8 章以及附录 A 由隋晓红编写，第 5 章由李秀平编写，第 6 章由洪梅编写，其余各章节以及附录 B 由华容编写。全书由华容负责制订编写大纲、组稿和统稿等工作。

华东理工大学博士生导师俞金寿教授在百忙之中对全书进行了认真的审阅，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中错误和不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2006 年 8 月于上海应用技术学院

目 录

第 1 章 信号与系统的基本概念 1	
1.1 信号的描述及分类 1	
1.1.1 信号的定义与描述..... 1	
1.1.2 信号的分类和特性..... 1	
1.2 系统的描述及分类 6	
1.2.1 系统的数学模型..... 6	
1.2.2 系统的分类..... 7	
1.2.3 系统联结..... 13	
1.3 信号与系统分析的基本内容 与方法..... 13	
1.4 习题 15	
第 2 章 连续时间信号和离散时间 信号及时域分析 18	
2.1 连续时间信号的时域描述 18	
2.1.1 普通信号..... 18	
2.1.2 奇异信号..... 21	
2.2 离散时间信号的时域描述 27	
2.2.1 离散时间信号的表示..... 27	
2.2.2 基本离散序列..... 28	
2.3 连续信号的基本运算 32	
2.4 离散时间信号的基本运算 37	
2.5 确定信号的时域分解 39	
2.6 MATLAB 语言及其信号处理..... 43	
2.6.1 MATLAB 信号工具箱 使用简介..... 43	
2.6.2 连续信号的 MATLAB 表示..... 44	
2.6.3 离散信号的 MATLAB 表示..... 46	
2.6.4 信号基本运算的 MATLAB 实现..... 47	
2.7 习题 50	
第 3 章 连续时间系统的时域分析 56	
3.1 线性时不变系统的描述及特点 56	
3.1.1 连续时间系统的数学描述 56	
3.1.2 线性时不变系统 58	
3.2 连续时间线性时不变系统的响应 60	
3.2.1 经典时域分析方法 60	
3.2.2 系统的零输入响应 64	
3.2.3 系统的零状态响应 66	
3.3 连续系统的冲激响应和阶跃响应 66	
3.3.1 单位冲激响应和单位 阶跃响应 66	
3.3.2 LTI 系统的冲激响应和 阶跃响应 67	
3.4 卷积积分 70	
3.4.1 卷积的计算 70	
3.4.2 卷积的性质 73	
3.4.3 与奇异信号的卷积 75	
3.4.4 卷积的性质在求解卷积 运算中的应用 76	
3.5 冲激响应表示的系统特性 77	
3.5.1 级联系统的冲激响应 77	
3.5.2 并联系统的冲激响应 77	
3.5.3 因果系统 78	
3.5.4 稳定系统 79	
3.6 利用 MATLAB 进行连续时间 系统的时域分析..... 80	
3.6.1 连续时间系统零状态响应 的求解 80	
3.6.2 连续时间系统冲激响应和 阶跃响应的求解 81	
3.7 习题 82	
第 4 章 离散时间系统的时域分析 85	
4.1 LTI 离散时间系统的数学模型及其 求解方法..... 85	
4.1.1 LTI 离散系统 85	

4.1.2 LTI 离散系统的数学模型 ——差分方程.....	87	5.2.2 周期矩形脉冲信号的 频谱分析	133
4.2 离散时间系统的响应	89	5.3 非周期信号的频谱分析—— 傅里叶变换.....	137
4.2.1 线性差分方程的求解方法.....	89	5.3.1 傅里叶变换	137
4.2.2 经典法求解差分方程.....	90	5.3.2 傅里叶变换的性质	143
4.2.3 LTI 离散时间系统的 零输入响应.....	92	5.3.3 傅里叶逆变换	150
4.2.4 离散时间系统的零状态 响应.....	95	5.4 周期信号的傅里叶变换	152
4.3 离散序列卷积(和).....	100	5.4.1 虚指数信号	152
4.3.1 卷积的运算.....	100	5.4.2 正弦和余弦信号	153
4.3.2 卷积的性质.....	103	5.4.3 普通周期信号	153
4.4 离散时间系统的响应与系统特性	103	5.4.4 单位冲激序列	153
4.4.1 系统完全响应的时域 求解方法.....	103	5.5 连续时间 LTI 系统的频域分析	154
4.4.2 系统完全响应分解.....	104	5.5.1 连续系统响应的频域表示	155
4.4.3 冲激响应表示的系统特性.....	106	5.5.2 无失真传输	157
4.5 利用 MATLAB 进行离散系统 的时域分析.....	108	5.5.3 理想滤波器	159
4.5.1 离散时间系统零状态响应 的求解.....	108	5.6 信号的抽样与恢复	164
4.5.2 离散时间系统单位脉冲 响应的求解.....	110	5.6.1 信号的抽样	165
4.5.3 离散卷积的计算.....	113	5.6.2 抽样定理	166
4.6 习题	114	5.6.3 信号的恢复	169
第 5 章 连续时间信号与系统的 频域分析.....	119	5.7 连续时间信号与系统频域 分析的 MATLAB 实现.....	171
5.1 周期信号的频谱分析—— 傅里叶级数.....	119	5.7.1 信号傅里叶变换的 MATLAB 实现.....	171
5.1.1 三角形形式的傅里叶级数.....	119	5.7.2 系统频率特性分析的 MATLAB 实现.....	172
5.1.2 指数形式的傅里叶级数.....	123	5.7.3 系统频域响应的 MATLAB 实现.....	173
5.1.3 周期信号的对称性与 傅里叶系数的关系.....	126	5.8 习题	174
5.1.4 傅里叶级数的基本性质.....	128	第 6 章 连续时间系统的复频域分析	179
5.2 周期信号的频谱分析	130	6.1 拉普拉斯变换的定义、收敛域	179
5.2.1 周期信号频谱的 基本概念.....	131	6.1.1 从傅里叶变换到拉普 拉斯变换	179
		6.1.2 拉普拉斯变换的收敛域	181
		6.1.3 常用信号的拉普拉斯变换	182
		6.2 拉普拉斯变换的基本性质	184
		6.3 拉普拉斯反变换	192

6.3.1 部分分式展开法.....	192	7.3.4 离散时间与离散频率	234
6.3.2 围线积分法(留数法).....	196	7.4 从离散傅里叶级数到离散傅里叶	
6.4 连续时间系统的复频域分析	198	变换.....	235
6.4.1 微分方程的复频域求解.....	198	7.4.1 离散时间傅里叶级数(DFS)	
6.4.2 电路的复频域模型及其解.....	200	及其系数	235
6.5 连续时间系统函数和系统特性	202	7.4.2 从离散时间傅里叶级数	
6.5.1 系统函数.....	203	(DFS)到离散傅里叶	
6.5.2 系统函数的零极点分布.....	204	变换(DFT)	236
6.5.3 系统函数的零、极点分布		7.4.3 离散傅里叶变换(DFT)与	
决定系统 $h(t)$ 的时域特性.....	205	频率抽样的关系	240
6.5.4 系统函数的零极点分布与系统频		7.5 离散傅里叶变换的性质	241
率响应特性的关系.....	206	7.6 离散系统的频域分析	251
6.5.5 线性系统的稳定性.....	210	7.7 离散信号与系统频域分析的	
6.6 用 MATLAB 进行连续系统的		MATLAB 实现.....	252
复频域分析.....	212	7.7.1 周期信号频域分析的	
6.6.1 MATLAB 实现 $F(s)$ 的		MATLAB 实现.....	252
部分分式展开.....	212	7.7.2 非周期信号频域分析的	
6.6.2 $H(s)$ 的零极点与系统		MATLAB 实现.....	254
特性的 MATLAB 计算.....	214	7.7.3 离散系统频域分析的	
6.6.3 用 MATLAB 计算拉普		MATLAB 实现.....	255
拉斯正反变换.....	217	7.7.4 对部分例题的 MATLAB	
6.7 习题	218	实现	256
MATLAB 习题.....	222	7.8 习题	259
第 7 章 离散傅里叶变换与离散		第 8 章 Z 变换、离散时间系统的	
系统的频域分析.....	223	Z 域分析.....	261
7.1 离散时间序列的傅里叶		8.1 Z 变换的定义、常用序列的	
变换(DTFT).....	223	Z 变换	261
7.1.1 定义、收敛条件.....	223	8.1.1 Z 变换的定义	261
7.1.2 基本性质.....	224	8.1.2 常用序列的 Z 变换	262
7.2 离散时间系统的频率响应特性	228	8.2 Z 变换的收敛域	266
7.2.1 离散时间系统的频域分析.....	228	8.3 逆 Z 变换	270
7.2.2 离散时间系统的频响特性		8.4 Z 变换的基本性质	277
的意义.....	228	8.5 离散时间 LTI 系统的 Z 域分析	287
7.2.3 频响特性的几何确定法.....	229	8.5.1 利用 Z 变换求解差分方程	287
7.3 傅里叶变换的离散性与周期性	231	8.5.2 Z 域与 S 域的关系	290
7.3.1 连续时间与连续频率.....	232	8.5.3 $H(z)$ 与离散系统的	
7.3.2 连续时间与离散频率.....	233	频率响应	291
7.3.3 离散时间与连续频率.....	233	8.6 数字滤波器的一般概念	292

8.6.1 数字滤波器原理.....	292	9.4 离散系统的状态方程	328
8.6.2 数字滤波器的结构.....	295	9.4.1 离散系统状态方程的 一般形式	328
8.7 利用 MATLAB 进行离散系统的 Z 域分析	300	9.4.2 离散系统状态方程的建立	329
8.7.1 部分分式展开式的 MATLAB 实现.....	300	9.4.3 离散系统状态方程的解	331
8.7.2 利用 MATLAB 计算 $H(z)$ 的零极点与系统特性.....	300	9.5 MATLAB 在系统状态变量分析中 的应用.....	334
8.7.3 利用 MATLAB 计算 Z 正变换和 Z 逆变换	303	9.5.1 系统微分方程到状态方程 的转换	334
8.8 习题	304	9.5.2 系统状态方程系统函数 矩阵 $H(s)$ 的计算	335
第 9 章 系统的状态变量分析	309	9.5.3 用 MATLAB 求解连续时间 系统的状态方程	336
9.1 状态与状态空间	309	9.5.4 用 MATLAB 求解离散时间 系统的状态方程	337
9.2 连续时间系统状态方程的建立	311	9.6 习题	338
9.2.1 连续时间系统状态方程的 一般形式.....	311	附录 A 序列的 Z 变换表.....	343
9.2.2 由电路图建立状态方程.....	312	附录 B MATLAB 部分命令名称	345
9.2.3 由微分方程建立 状态方程.....	315	部分习题答案	350
9.2.4 由系统模拟方框图建立 状态方程.....	316	参考文献	366
9.3 连续时间系统状态方程的求解	322		
9.3.1 状态方程的复频域解.....	322		
9.3.2 状态方程的时域解.....	326		

第1章 信号与系统的基本概念

教学提示：本章介绍了信号与系统的基本概念及信号与系统的分类与特性，重点讨论了线性系统与时不变系统的特性，并以此为基础介绍了信号与系统分析的基本内容和方法。

教学要求：使学生了解信号与系统的基本概念。熟练掌握信号与系统的定义、分类以及特性。了解信号与系统分析的基本内容与方法。重点是系统的线性时不变因果特性。

1.1 信号的描述及分类

1.1.1 信号的定义与描述

信号(signal)的概念广泛地出现在各个领域，它以各种各样的形式表现且携带着特定的信息。古战场曾以击鼓鸣金传达前进或撤退的命令，更以烽火作为信号传递敌人进犯的紧急情况。近代，信号的利用更是涉及力、热、声、光、电等诸多方面。就其基本含义而言，信号是用来传递某种消息或信息的物理形式。在通信技术中，通常把语言、文字、图像或数据等统称为消息(message)，信号是消息的表现形式或运载工具，而消息则是信号的具体内容，消息蕴涵于信号之中。与信号密切相关的更广义的概念是信息(information)。一般而言，信息是指从客观世界获得的新知识或者对客观事物发出的新要求，它是变化的，不可预知的。在消息中含有一定数量的信息。但是，信息的传递、变换、储存和提取必须借助于一定形式的信号来完成。信号的具体形式是某种物理量，如光信号、电信号、声信号等。所谓电信号通常是指随时间变化的电压和电流，也可以是电荷或磁通以及电磁波等。在可以作为信号的诸多物理量中，电信号是应用最广的物理量。电信号易于产生与控制，传送速率快，也容易实现与非电量的相互转换。

信号一般可表示为一个或多个变量的函数。例如，锅炉的温度可表示为温度随时间变化的函数；语音信号可表示为声压随时间变化的函数；一张黑白图片可表示为灰度随二维空间变量变化的函数。

因此，本课程主要讨论电信号。电信号通常是随时间变化的电压或电流(电荷或磁通)，由于信号是随时间而变化的，在数学上常用时间 t 的函数 $f(t)$ 来表示，因此，“信号”与“函数”这两个名词常交替使用。

1.1.2 信号的分类和特性

信号的分类方法很多，可以从不同的角度对信号进行分类。在信号与系统分析中，根据信号和自变量的特性，信号可以分为连续时间信号与离散时间信号、确定信号与随机信号、周期信号与非周期信号、能量信号与功率信号等。

1. 连续时间信号与离散时间信号

按照函数时间取值的连续性划分, 信号可分为连续时间信号和离散时间信号两类。

对连续时间定义域内的任意值(除若干不连续点之外), 都可以给出确定的函数值, 该信号称为连续时间信号, 简称连续信号(continuous signal), 通常用 $f(t)$ 或 $x(t)$ 表示。幅值是连续的连续信号, 又称为模拟信号(analog signal), 连续信号的幅值也可以是离散的。例如, 图 1.1(a)与(b)分别表示一个模拟信号和一个具有离散幅值的连续信号。离散时间信号的时间定义域是离散的, 简称为离散信号(discrete signal), 它只在某些不连续的指定时刻具有函数值, 而在其他时刻没有定义的信号。一般情况下, 离散信号取均匀时间间隔, 其定义域为一个整数集。数字信号(digital signal)属于离散信号, 但其幅值则被限定为某些离散值。离散信号用 $f(nt)$ 或 $x(nt)$ [简写 $f(n)$ 或 $x(n)$] 的形式表示, 有的用 $f(k)$ 或 $x(k)$ 来表示, 式中 n 、 k 为整数, 表示序号, 因此离散信号也称为序列。图 1.2 描绘的都是离散时间信号, 其中图 1.2(b)为数字信号。

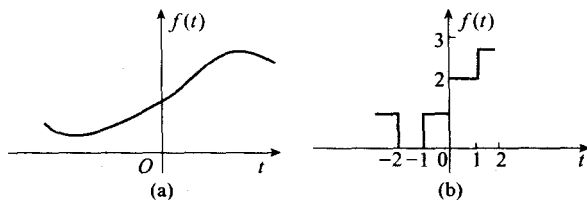


图 1.1 连续时间信号

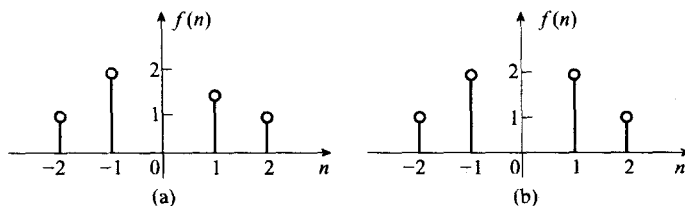


图 1.2 离散时间信号

显然, 模拟信号是连续信号, 而连续信号不一定是模拟信号。同理, 数字信号是离散信号, 而离散信号不一定是数字信号。

2. 确定信号与随机信号

按照时间函数的确定性划分, 信号可分为确定信号和随机信号两类。

可用明确的数学关系式描述的信号称为确定信号(determinate signal), 对于指定的某一时刻, 信号有确定的值。确定信号又可分为周期信号和非周期信号。例如, 正弦信号、指数信号、阶跃信号以及准周期信号和瞬变非周期信号等。图 1.3(a)所示的正弦信号就是确定信号的一个例子。不能用明确的数学关系式描述的信号, 也就是不可预知的信号称为随机信号(random signal)。随机信号在其定义域内的任意时刻没有确定的函数值。图 1.3(b)所示的混有噪声的正弦信号就是随机信号的一个例子, 它无法以确定的时间函数来描述, 也无法根据过去的记录准确地预测未来的情况, 而只能用概率统计的方法进行描述。

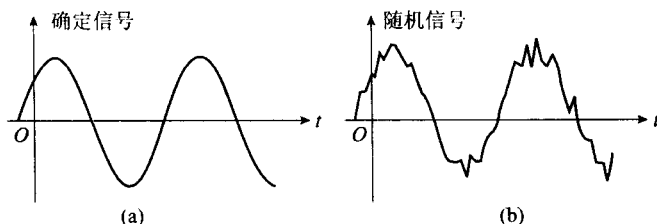


图 1.3 确定信号与随机信号波形

实际传输的信号几乎都具有不可预知的不确定性,因而都是随机信号。例如,通信系统中传输的信号带有不确定性,接收者在收到所传送的消息之前,对信号源所发出的消息是不知道的,否则,接收者就不可能由它得知任何新的信息,也就失去了通信的意义。另外,信号在传输过程中难免要受到各种干扰和噪声的影响,使信号失真,所以,一般的通信信号都是随机信号。但是,在一定条件下,随机信号也表现出某些确定性。通常把在较长时间内比较确定的随机信号,近似地看成确定信号,使分析简化,便于工程上的应用。本课程只讨论确定信号的分析,它也是研究随机信号特性的重要基础,而对随机信号的分析是后续课程的任务。

3. 周期信号与非周期信号

按信号(函数)的周期性划分,确定信号可分为周期信号和非周期信号。

每隔一定时间 T , 周而复始且无始无终的信号称为周期信号(periodic signal)。设周期(period)为 T , $f(t)$ 表示某一周期函数,则周期信号可表示为

$$f(t) = f(t + mT) \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (1-1)$$

把能使上式成立的最小正值 T 称为 $f(t)$ 的基波周期 T_0 。

同样离散周期信号也可表示为

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

其中正整数 N 称为周期。把能使上式成立的最小正整数 N 称为 $f(n)$ 的基波周期 N_0 。

周期信号定义域虽然在 $(-\infty, \infty)$ 区间, 但一个周期的波形就可以完整地、准确地示出了其随时间变化的信息特性参数: 振幅、频率、初相角、数字角频率、数字周期等, 如图 1.4 所示。

不满足式(1-1)或者式(1-2)的信号称为非周期信号(aperiodic signal)。由于非周期信号的幅值在时间上不具有周而复始变化的特性, 故它不具有周期。不难看出, 也可把非周期信号看作为一个周期 T 趋于无穷大时的周期信号。

对于离散的周期余弦序列(或正弦序列)

$$\begin{aligned} f(n) &= \cos \Omega_0 n = \cos(\Omega_0 n + 2m\pi) \\ &= \cos[\Omega_0 (n + m2\pi/\Omega_0)] \\ &= \cos[\Omega_0 (n + mN)] \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \end{aligned}$$

式中, Ω_0 为余弦序列的数字角频率。

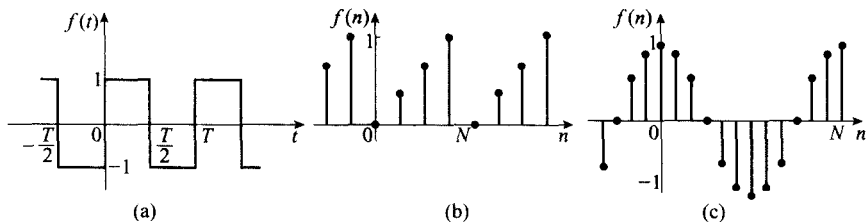


图 1.4 周期信号

由上式可见, 仅当 $2\pi = \Omega_0$ 为整数时, 余弦序列才具有周期 $N = 2\pi / \Omega_0$ 。图 1.4(c)画出了数字角频率 $\Omega_0 = \pi/6$, 数字周期 $N = 12$ 的情形, 它经过 12 个序号数循环一次。应当注意的是, 当 $2\pi = \Omega_0$ 为无理数时, 该序列不具有周期性。

由电路理论的谐波分析可以知道, 谐波信号的和(谐波合成)仍然是一个周期信号。这是因为谐波的频率为基波频率的整数倍, 谐波的定义本身就隐含着它们周期的公倍数, 谐波合成信号的周期是它们周期的最小公倍数。可见, 如果几个周期信号的周期不存在公倍数, 则它们的和将是非周期信号。例如, 周期信号 $\cos 2t$ 的周期 $T_1 = \pi$, $\sin \pi t$ 的周期 $T_2 = 2$, 这里 T_1 是无理数, T_1 与 T_2 间不存在公倍数, 所以, $f(t) = \cos 2t + \sin \pi t$ 是非周期信号。

【例 1-1】判断离散余弦信号 $f(n) = \cos(\Omega_0 n)$ 是否为周期信号。

解: 由周期信号的定义, 如果 $\cos \Omega_0(n + N) = \cos(\Omega_0 n)$, 则 $f(n)$ 是周期信号。因为

$$\cos \Omega_0(n + N) = \cos(\Omega_0 n + \Omega_0 N)$$

若为周期信号, 应满足

$$\Omega_0 N = m2\pi \quad m = \text{正整数}$$

或

$$\frac{\Omega_0}{2\pi} = \frac{m}{N} = \text{有理数}$$

因此, 只有在 $\Omega_0/2\pi$ 为有理数时, $f(n) = \cos(\Omega_0 n)$ 才是一个周期信号。

4. 能量信号与功率信号

按时间函数的可积性划分, 信号还可以分为能量信号、功率信号和非功非能信号。

可以从能量的观点来研究信号。信号可看作是随时间变化的电压或电流, 如把信号 $f(t)$ 看作为加在 1Ω 电阻上的电流, 则其瞬时功率为 $|f(t)|^2$, 在时间间隔 $-T/2 \leq t \leq T/2$ 内所消耗的能量为

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

而在上述时间间隔 $-T/2 \leq t \leq T/2$ 内的平均功率为

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

对于离散时间信号 $f(n)$, 其能量 E 与平均功率 P 的定义分别为

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

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

上述式子中, 被积函数都是 $f(t)$ 或 $f(n)$ 的绝对值平方, 所以信号能量 E 和信号功率 P 都是非负实数。

若信号函数平方可积, 则 E 为有限值, 根据式(1-4), 能量信号的平均功率为零, 即 $0 < E < \infty$, $P = 0$, 则该信号称为能量有限信号, 简称能量信号(energy signal)。客观存在的信号大多是持续时间有限的能量信号。

另一种情况, 若信号 $f(t)$ 的 E 趋于无穷(相当于 1Ω 电阻消耗的能量), 而 P (相当于平均功率)为不等于零的有限值, 即 $E \rightarrow \infty$, $0 < P < \infty$, 则该信号称为功率有限信号, 简称功率信号(power signal)。一个幅度有限的周期信号或随机信号能量无限, 但功率有限, 则为功率信号。所以, 直流信号与周期信号都是功率信号。

一个信号可以既不是能量信号, 也不是功率信号, 如单位斜坡信号就是一个例子。但一个信号不可能同时既是能量信号又是功率信号。一般来说, 非周期信号可能会是能量信号, 也可能会是功率信号, 或者是既非能量信号又非功率信号。属于能量信号的非周期信号称为脉冲信号, 它在有限时间范围内有一定的数值; 而当 $t \rightarrow \infty$ 时, 数值为 0, 如图 1.5 所示。属于功率信号的非周期信号是 $|t| \rightarrow \infty$ 时仍然为有限值的一类信号, 如图 1.6 所示。

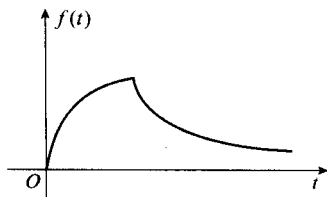


图 1.5 非周期能量信号

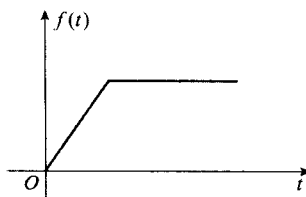


图 1.6 非周期功率信号

【例 1-2】如图 1.7 所示信号, 判断其是否为能量信号或功率信号。

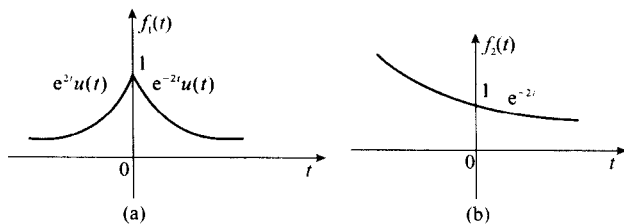


图 1.7 例 1-2 题图

解: 图 1.7(a)所示信号 $f_1(t) = e^{-2|t|}$

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-T}^T (e^{-2|t|})^2 dt = \int_{-\infty}^0 e^{4t} dt + \int_0^{+\infty} e^{-4t} dt = 2 \int_0^{+\infty} e^{-4t} dt = \frac{1}{2}$$

$$P = 0$$

所以, 该信号为能量信号。

对于图 1.7(b)所示信号 $f_2(t) = e^{-2t}$, 则有