

物联网工程技术及其应用系列规划教材



通信技术实用教程

谢 慧 袁志民 廖 巍 编 著

教材预览、申请样书



地址: pup6book



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

物联网工程技术及其应用系列规划教材

通信技术实用教程

谢 慧 袁志民 廖 巍 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书共分 10 章,以现代通信技术为背景,全面、系统地论述了通信的基本理论,包括信号、信道、调制解调技术、信源编码、数字信号特征、同步技术、扩频技术等。在内容安排上,既全面论述了通信的基本理论,又深入分析了现代通信系统,包括无线通信、光纤通信等系统的原理和架构。每章后面都有相应习题,帮助读者理解、提示该章节重点难点,供读者参考。

本书的特点是概念准确、内容丰富、图文并茂、深入浅出,可以帮助读者系统掌握通信技术及其发展方向。本书可作为普通高校通信、网络、信息、计算机等专业本科教材,也可作为相关专业研究生教学参考用书,对于从事通信工程的专业技术人员也有一定的学术参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

通信技术实用教程/谢慧,袁志民,廖巍编著. —北京:北京大学出版社,2015.7
(物联网工程技术及其应用系列规划教材)

ISBN 978-7-301-25386-1

I. ①通… II. ①谢…②袁…③廖… III. ①通信技术—高等学校—教材 IV. ①TN91

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 018008 号

书 名	通信技术实用教程
著作责任者	谢 慧 袁志民 廖 巍 编著
责任编辑	郑 双
标准书号	ISBN 978-7-301-25386-1
出版发行	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 新浪微博:@北京大学出版社
电子信箱	pup_6@163.com
电 话	邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667
印刷者	三河市北燕印装有限公司
经 销 者	新华书店
	787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.75 印张 407 千字
	2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷
定 价	36.00 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 电子信箱:fd@pup.pku.edu.cn

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话:010-62756370

前 言

随着信息化时代的到来,通信技术迅猛发展,日新月异。人类生活、工作、学习、娱乐等众多方面发生了巨大的进步与变化,而这其中许多进步都要归功于通信技术方面的革命。作为社会发展的积极推动力,通信技术已经渗透到全球的各个角落,促进了全人类经济与文化的发展,直接改变了人们的生活面貌,极大提升了人们的生活质量。移动和宽带技术让人们感受到丰富多彩的通信体验;互联网实现了不同国家和不同地区间人们的“亲密接触”,这一切都显示出了通信技术的勃勃生机。通信技术的基本原理和常见应用已成为高校通信、网络、信息、计算机等专业学生所应了解和掌握的专业基础。

本书按照教学大纲要求,根据编者长期的教学与实践经验编写,是一本系统全面介绍通信技术、从基础知识到实际应用均有涉猎的教材。为满足不同层面不同领域读者的阅读需要,本书从第8章开始,各章节具有一定的独立性,读者可以通读,亦可选取特定章节进行阅读学习。

本书在结构安排上,从信号与系统的基本概念入手,进而介绍通信的基本概念与原理,最后引申到其在各领域内的具体应用。本书采用循序渐进,由浅入深的编写思路,在强调基础知识重要性的同时,又注重技术的实用性与新颖性,不仅能够使读者对通信技术的体系结构及发展趋势有较为全面的理解与把握,更能培养读者的发散思维,强化理论联系实际的意识。

本书以信号和通信原理为主线,分设10章内容,详细介绍信号的概念、信号通过LTI系统的时频域分析、模拟通信模型、数字通信模型、模拟调制技术、模拟信号的数字化传输、现代数字调制技术、卫星通信技术、光纤通信技术等的基本原理。读者通过对本书的学习,可掌握在工程技术岗位任职和未来发展中所需的专业基础知识。

本书由海军工程大学谢慧、袁志民、廖巍编著,具体分工为:第1~4、8、9章由谢慧编写,第5~7章由袁志民编写,第10章由廖巍编写。张志明、严承华、王甲生等参与了部分编写工作,并认真校对了书稿,提出了宝贵的修改意见与建议。感谢李静、李杰、王孟、杨建利4名研究生在文稿的录入和校改中付出的辛勤劳动。感谢在本书编写过程中,给予悉心指导和帮助的信息安全系的领导以及秦艳琳、朱婷婷等老师。

由于本书覆盖面广,编者水平有限,书中难免存在一些不足之处,恳请读者批评指正。

编者

2014年12月

目 录

第 1 章 信号与系统概述	1
1.1 引言	3
1.2 信号的描述与分类	4
1.2.1 信号的描述	4
1.2.2 信号的分类	5
1.3 系统的描述与分类	7
1.3.1 系统的描述	7
1.3.2 系统的分类	8
1.4 典型信号	11
1.4.1 典型连续时间信号	11
1.4.2 典型离散时间信号	18
1.5 信号的基本运算	21
1.5.1 信号的加减、相乘与卷积	22
1.5.2 信号的平移、反折与展缩	23
1.5.3 连续信号的微分与积分	24
1.5.4 离散信号的差分与累加	25
小结	26
习题	28
第 2 章 信号通过 LTI 系统的时域分析	29
2.1 LTI 连续时间系统的时域描述	31
2.2 LTI 离散时间系统的时域描述	32
2.3 LTI 连续系统的经典时域分析法	33
2.3.1 系统的微分方程及其求解	33
2.3.2 零输入响应与零状态响应	37
2.3.3 单位冲激响应和单位阶跃响应	40
2.4 LTI 离散系统的经典时域分析法	43
2.4.1 差分方程及其求解	43
2.4.2 零输入响应与零状态响应	46
2.4.3 单位序列响应与单位阶跃序列响应	48
2.5 卷积积分的计算	49
2.5.1 卷积的计算	50
2.5.2 卷积的性质	52
2.5.3 奇异信号的卷积	55
小结	56
习题	57
第 3 章 信号通过 LTI 系统的频域分析	58
3.1 周期信号的傅里叶级数	60
3.1.1 三角函数型傅里叶级数	60
3.1.2 指数型傅里叶级数	62
3.2 周期信号的频谱	63
3.2.1 周期信号频谱的概念及特点	63
3.2.2 周期信号的功率谱	65
3.3 连续非周期信号的频谱——傅里叶变换	65
3.3.1 傅里叶变换的定义	65
3.3.2 典型非周期信号的频谱	67
3.3.3 傅里叶变换的性质	72
3.4 连续信号通过 LTI 系统的频域分析	81
3.4.1 基本信号激励下 LTI 系统的频域分析	81
3.4.2 周期信号激励下 LTI 系统的频域分析	83
3.4.3 非周期信号激励下 LTI 系统的频域分析	84
3.5 离散信号的频域分析	85

3.5.1 周期序列的离散时间傅里叶级数 (DTFS)	85
3.5.2 非周期序列的离散时间傅里叶级数 (DTFT)	86
3.5.3 离散傅里叶变换 (DFT)	87

小结	91
----------	----

习题	93
----------	----

第4章 通信导论 94

4.1 通信系统的组成	95
4.1.1 通信系统的一般模型	96
4.1.2 模拟通信模型和数字通信模型	96

4.2 通信系统的分类及通信方式	100
4.2.1 通信系统分类	100
4.2.2 通信方式	103

4.3 通信的发展史和发展趋势	104
4.3.1 通信的发展史	104
4.3.2 国内外通信系统的现状	105

小结	106
----------	-----

习题	107
----------	-----

第5章 通信的基本概念和原理 109

5.1 信息论与编码基础	110
5.1.1 信息及其度量	110
5.1.2 离散信息源的熵	111
5.1.3 通信系统的性能指标	113

5.2 信道与噪声	115
5.2.1 信道	115
5.2.2 信道容量	122

5.3 编码基础	123
5.3.1 纠错编码的概念	123
5.3.2 纠错编码的几种方法	125

5.4 信道复用与多址技术	135
5.4.1 频分复用	136
5.4.2 时分复用	137
5.4.3 码分复用	139
5.4.4 多址技术	142

小结	145
----------	-----

习题	145
----------	-----

第6章 模拟信号的调制技术 146

6.1 线性调制技术	147
6.1.1 振幅调制 (AM)	149
6.1.2 双边带调制 (DSB)	150
6.1.3 单边带调制 (SSB)	151
6.1.4 残留边带调制 (VSB)	152

6.2 非线性调制技术	154
6.2.1 调频技术	155
6.2.2 调相技术	158
6.2.3 非线性调制信号的产生与解调	160

小结	165
----------	-----

习题	167
----------	-----

第7章 数字通信技术 168

7.1 模拟信号的数字传输	170
7.1.1 模拟信号的抽样	170
7.1.2 抽样信号的量化	175
7.1.3 抽样信号的 PCM 编码	179

7.2 数字基带传输技术	181
7.2.1 数字基带信号的常用码型	181
7.2.2 数字基带传输系统性能	184

7.3 数字频带传输技术	187
7.3.1 二进制振幅键控 (2ASK)	187
7.3.2 二进制频移键控 (2FSK)	190
7.3.3 二进制相移键控 (2PSK)	194
7.3.4 二进制差分相移键控 (2DPSK)	197

小结	200
----------	-----

习题	201
----------	-----

第8章 卫星通信系统 203

8.1 卫星通信概述	205
------------------	-----

8.1.1 卫星通信的定义及特点	205	9.3.1 光孤子通信	240
8.1.2 卫星通信系统的组成	207	9.3.2 相干光通信	242
8.1.3 卫星通信的工作频段	209	9.3.3 全光通信网	243
8.2 卫星通信的关键技术	210	9.3.4 超长波红外光纤通信	243
8.2.1 卫星通信体制概述	210	小结	244
8.2.2 卫星通信中的调制技术	214	习题	244
8.3 卫星通信系统	219	第10章 短波通信系统	245
8.3.1 移动卫星通信系统	219	10.1 短波通信概述	247
8.3.2 VSAT 卫星通信系统	221	10.1.1 短波传播的方式	247
小结	223	10.1.2 短波在电离层中的传播特性	249
习题	224	10.1.3 短波天线	253
第9章 光纤通信系统	225	10.2 短波信道技术	255
9.1 光纤概述	227	10.2.1 短波自适应通信技术	255
9.1.1 光纤通信发展简史	227	10.2.2 短波扩跳频通信技术	259
9.1.2 光纤的结构	229	10.3 短波通信网技术	265
9.1.3 光纤的基本特性	231	10.3.1 短波通信网拓扑结构	265
9.2 光纤传输设备	232	10.3.2 短波自组网路由协议	266
9.2.1 光发送机	232	小结	268
9.2.2 光接收机	235	习题	269
9.2.3 光中继器	236	参考文献	270
9.3 光纤通信新技术	240		

第1章

信号与系统概述

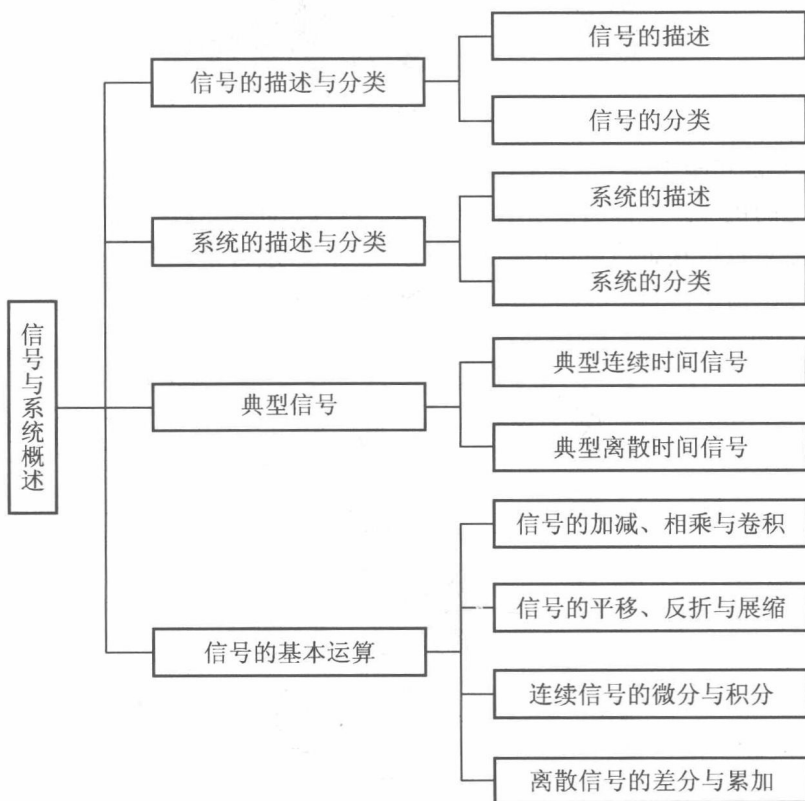


学习目标

- (1) 了解信号与系统的概念和常见的分类方法。
- (2) 熟悉典型信号的定义、波形及性质。
- (3) 掌握信号的基本运算。



本章知识结构



信号与系统与每一个人都是息息相关的,而且随着科技的发展,信号与系统在各领域的重要性日益突出。

案例一:视频会议系统

视频会议系统如图 1 所示。视频会议使不同地方的人“坐”在了一起,不管他们之间是 10 分钟的步程还是 10 小时的飞机行程,它能够使人们像在同一房间一样交流思想、交换信息,人们不用在等信件、传真或者快递中度过工作时间,极大地提高了工作效率,同时可以减少旅行、住宿花费,节省传统会议中的各项开支。



图 1 视频会议

案例二:常见的机电系统

生活中常见的机电系统如图 2 所示,如电梯、电磁炉、冰箱、洗衣机、吸尘器等,这些机电系统中的传感器对各种状态信息(如温度、速度、时间等)进行精确而可靠的自动检测,并将其转换成可用输出信号,然后系统做出相关控制决策。



图 2 家用电器

案例三:雷达、声呐系统

雷达、声呐系统如图 3 所示。雷达将电磁能量以定向方式发射至空中,并接收空间物体



所反射的电波,可以计算出该物体的方向、高度及速度,并且可以探测物体的形状。声呐是利用水中声波进行探测、定位和通信的电子设备。声呐系统用于对水下目标进行探测、分类、定位和跟踪,进行水下通信和导航。

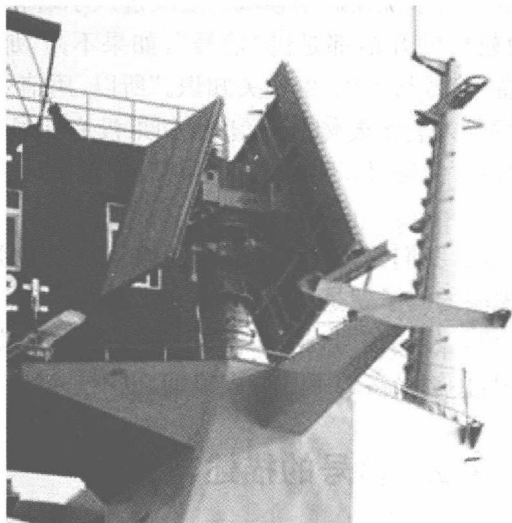


图 3 舰载雷达

1.1 引言

我们身边存在着各种信息,如起床铃声、天气预报、交通指示、饮食温度等,人类通过信息来认识和改造世界。信号是信息的表现形式,可体现信息的具体内容,如光信号、电信号、声信号等。信号作为信息的载体,使得信息便于存储、传输和处理。

信号的产生、存储、传输和处理,需要一定的物理装置,这样的物理装置常称为系统,如光纤通信系统、卫星定位系统等。信号与系统是紧密关联的,系统没有信号的输入输出就没有存在的意义,信号也只有经过系统的加工、变换、发送、接收等相关处理才能有实用价值和意义。信号与系统可抽象地用图 1-1 表示。



图 1-1 系统的框图模型

人类通信的历史,也是信号与系统的发展史。早期的烽火狼烟、击鼓鸣金、灯塔旗语等方式可以迅速有效地传递信息,但这样的通信系统不能传输事先没有约定的未知信号。后来的信鸽、驿站等手段虽然在信息容量上有明显提高,但直到电的介入才使得通信发生革命性的突破。1837 年美国人摩尔斯在华盛顿和巴尔的摩试拍有线电报获得成功,1876 年美国人贝尔发明电话,1877 年美国人爱迪生发明留声机,1887 年德国人赫兹用实验验证了电磁波的存在,1889 年意大利人马可尼在英法两国间试拍无线电成功,1901 年跨大西洋电缆铺设成功,1915 年巴黎与华盛顿长距离无线电通信成功,1950 年美国纽约与芝加哥微波通信

成功,1962年美国通信卫星与欧洲通信获得成功,1980年美国发射第一颗全数字网络通信卫星。20世纪末,高速计算机技术、全球卫星定位技术、数字信号处理技术和光纤通信系统的发展,推动了远距离大容量信息传输技术和复杂信号处理技术的发展,最终推动了国际互联网络系统的发展,标志着信号与系统在通信领域的发展进入了崭新的时代。

几乎所有与通信相关的教材的开篇都是讲“信号”,如果不是,那么一定会在前言中注明——“本书的读者应当具备‘信号与系统’的相关知识。”所以,用信号作通信技术的课程的敲门砖是很自然的,信号承载了人们所要传递的信息,如果没有信号要传递,那么还要通信系统干什么呢?因此人们常说,“无信号,不系统”,如果都没有信号要传递,那么再先进的通信系统也就失去了它的意义。

什么是信号?什么是系统?我们要传递的信息就是信号。比方说,“飞鸽传书”,鸽子腿上绑着的书信就是信号,这识路的鸽子就是通信系统;再比方说,“烽火连三月”,烽火台上燃起的熊熊狼烟代表的就是有敌入侵的信号,这一站接一站的烽火台就是古代战争通信系统。当然,在我们现代通信中,传输最多的不是烽火狼烟,也不是鸿雁传书,而是电磁信号。

1.2 信号的描述与分类

1.2.1 信号的描述

信号定义为传达某种物理现象特性信息的函数,自变量可以是时间、位置、频率或其他形式变量。

描述信号的基本方式是图形成数学表达式,而数学表达式利用两种方法描述信号的特性:时间特性法(时域特性法)和频率特性法(频域特性法)。不同的信号在于它们有不同的时域特性和频域特性。

电信号是随时间变化而变化的,可表示为以时间 t 为自变量的函数 $f(t)$,可描绘成随时间 t 变化的波形图。信号出现的时间、在某一时刻的大小、信号持续的时间长短、信号的重复周期以及变化快慢等都可以从波形图上反映出来,信号的这一特性称为信号的时域特性。如斜坡信号 $r(t)$ 的数学表达式为

$$r(t) = \begin{cases} t & (t \geq 0) \\ 0 & (t < 0) \end{cases} \quad (1.2-1)$$

斜坡信号的波形图如图 1-2 所示。

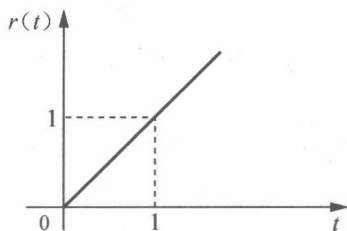


图 1-2 斜坡信号



同时,信号又可以分解为不同频率的正弦分量之和,正弦分量的振幅、主要频率以及相位之间存在一定的关系,称为信号的频域特性,可用频率 f 或角频率 ω 为自变量的数学函数来表征,例如 $F(j\omega)$ 、 $Y(j\omega)$ 、 $\varphi(j\omega)$ 等。

有时为了分析复杂的信号,还用正交变换以及其他方式来描述信号。

1.2.2 信号的分类

信号的分类方法很多,可以从不同的角度对信号进行分类。

1. 连续时间信号与离散时间信号

按照信号在时间轴上取值是否连续,信号可分为连续时间信号与离散时间信号。

对于信号 $f(t)$,若其自变量 t 是连续变化的,则信号 $f(t)$ 称为连续时间信号(简称连续信号)。如心电图与脑电图、高压线中的电流,广播电台的无线电波等都是常见的连续时间信号。连续信号的幅值可以是连续的,为任何实数,如图 1-3(a)所示。也可以是离散的,只能取有限个规定的数值,如图 1-3(b)所示。对于时间和幅值都是连续的信号,称为模拟信号。

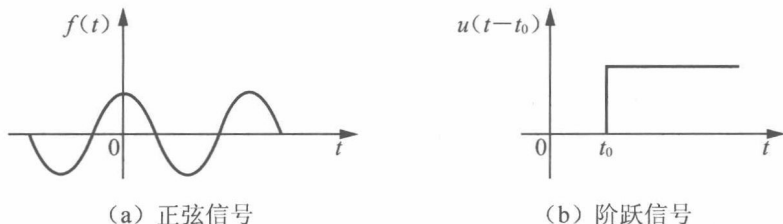


图 1-3 连续时间信号

如果 t 是一个离散变量,即信号 $f(t)$ 只在离散时间点上才有定义,则称为离散时间信号 $f(k)$ 。如数字计算机、股票市场指数等。如果离散信号的幅值是连续的,即幅值可取任何实数,则称为抽样信号,如图 1-4(a)所示。如果幅值是离散的,即只能取某些规定的数值,则称为数字信号,如图 1-4(b)所示。

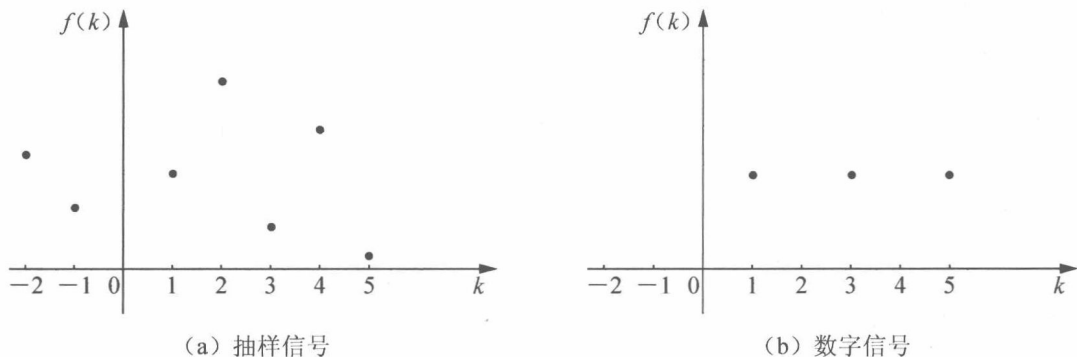


图 1-4 离散时间信号

2. 确定信号与随机信号

按照信号的确定性划分,信号可分为确定信号与随机信号。

确定信号是可以用一个确定的数学表达式来表示的信号。确定信号的特点是变化规律可知,例如电路中的正弦信号、马路上的交通信号等,其任意时刻的值是确定的(包括可预知未来的任意时刻)。

随机信号(不确定信号)与之相反,它不是时间的确定函数,如无线电台的设备振动干扰。当给定某一时间值时,随机信号函数值并不确定。但随机信号具有统计特性,可以通过统计方法来表征,预测在某一时刻取某个值的概率。

由于受噪声和干扰的影响,通信系统中传输的实际信号具有不确定性。但实际信号与确定信号有相近的特性,通常可以将实际信号看成是由确定信号组成。确定信号作为一种近似的、理想化了的信号,能够使问题分析大为简化,它不仅广泛应用于系统分析与设计中,也是研究随机信号的基础。确定信号的研究具有重要意义,是十分必要的。

3. 周期信号与非周期信号

根据信号的周期性,信号可分为周期信号与非周期信号。

周期信号是每隔一个固定的时间间隔重复变化的信号。连续周期信号与离散周期信号的数学表示分别为

$$f(t) = f(t + nT) \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \cdots; -\infty < t < +\infty) \quad (1.2-2)$$

$$f(k) = f(k + nN) \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \cdots; -\infty < k < +\infty, k \text{ 取整数}) \quad (1.2-3)$$

满足以上两式的最小正数 T 、 N 分别称为周期信号的基本(基波)周期,通常简称周期。

严格数学意义上的周期信号,是无始无终地重复着某一变化规律的信号。当然,这样的信号实际上是不存在的,所谓的周期信号只是在较长时间内按照某一规律重复变化的信号。非周期信号的幅值在时间上不具有周而复始变化的特性,它不具有周期值,或者周期值看作无穷大。

4. 能量信号与功率信号

根据信号的可积性,信号可分为能量信号与功率信号。

如果把信号 $f(t)$ 看作是随时间变化的电压或电流,则当信号 $f(t)$ 通过 1Ω 的电阻时,信号在时间间隔 $(-\frac{T}{2}, \frac{T}{2})$ 内所消耗的能量为

$$E = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |f(t)|^2 dt \quad (1.2-4)$$

平均功率为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} |f(t)|^2 dt \quad (1.2-5)$$

对于离散时间信号 $f(k)$,其能量与功率的定义分别为

$$E = \lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{k=-N}^N |f(k)|^2 \quad (1.2-6)$$

$$P = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{2N+1} \sum_{k=-N}^N |f(k)|^2 \quad (1.2-7)$$

若信号的能量为非零的有限值,功率为零,即 $0 < E < \infty, P = 0$,则该信号为能量有限信



号,简称能量信号;若信号的能量为无限值,功率为非零的有限值,即 $E \rightarrow \infty, 0 < P < \infty$,则该信号为功率有限信号,简称功率信号。若信号的能量和功率均为无穷大,则为非功非能信号。

一般地,连续的直流信号、周期信号和单位阶跃信号是功率信号,只讨论它们的功率;时限脉冲信号、单边指数衰减信号等是能量信号,只从能量的角度去考察。值得注意的是一个信号不可能既是能量信号又是功率信号,但却有少数信号既不是能量信号也不是功率信号,如 $t^n (t > 0)$ 及指数增长信号。

5. 奇信号与偶信号

对于连续信号 $f(t)$ 或离散信号 $f(k)$, 如果其波形图关于纵坐标轴(时间原点)对称,即满足

$$f(t) = f(-t)$$

或

$$f(k) = f(-k)$$

则称该信号 $f(t)$ 或 $f(k)$ 为偶信号。

同理,对于信号 $f(t)$ 或 $f(k)$, 如果其波形图关于坐标原点对称(时间原点反对称),即满足

$$f(t) = -f(-t)$$

或

$$f(k) = -f(-k)$$

则称该信号 $f(t)$ 或 $f(k)$ 为奇信号。

凡不具有上述奇偶特性的信号,均称为非奇非偶信号。

6. 时限信号与无时限信号

根据信号时间域的定义范围,信号可分为时限信号与无时限信号。

时限信号为在时间域内有始有终的信号,即在时间区域 (t_1, t_2) 外的值为零。无时限信号为时间域无始无终的信号,如 $f(t) = e^{-t}$ 。

若信号在 $t > t_0$ 不等于零, $t < t_0$ 为零,称为有始信号(又称右边信号)。如果 $t_0 = 0$,则称为因果信号,因果信号常以 $f(t) = g(t)u(t)$ 形式出现,其中 $u(t)$ 为单位阶跃信号。

若信号在 $t < t_0$ 不等于零, $t > t_0$ 为零,称为有终信号(又称左边信号)。如果 $t_0 = 0$,则称为反因果信号,反因果信号是因果信号的反折,常以 $f(t) = g(t)u(-t)$ 形式出现。

除上述介绍的几种信号分类外,还有实信号和复信号、一维信号和多维信号等分类方法。

1.3 系统的描述与分类

1.3.1 系统的描述

系统是由若干个相互作用和相互依赖的事物组成的具有特定功能的整体,如计算机系

统、通信系统和高压传输系统等。电系统是由各种具体电路组成,产生电信号,并对信号进行变换、转化、运算和传输等,系统中的信号分为输入信号(激励)和输出信号(响应)。

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反映出来的,不同的系统具有不同的特性。研究和分析一个系统,首先要建立描述该系统基本特性的数学模型,然后用数学方法进行求解,并对所得的结果做出物理解释,赋予物理意义。图 1-5 为一般通信系统模型。

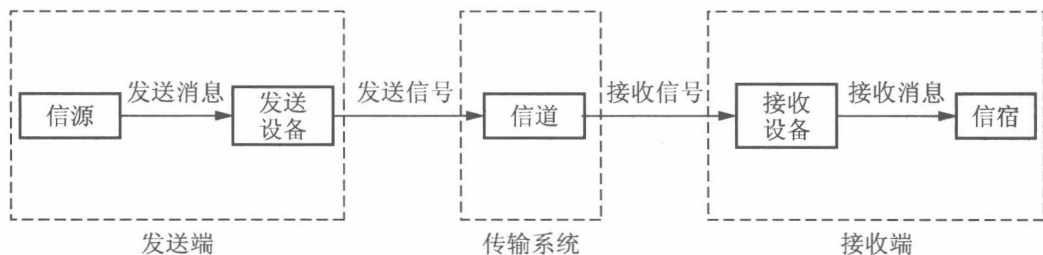


图 1-5 一般通信系统模型

不同类型的系统,其系统分析的过程是一样的,但系统的数学模型不同,因而其分析方法也不同。线性时不变系统的分析是最基础、最重要的系统分析方法,其他方法大多是在该方法的基础上引申来的。

1.3.2 系统的分类

系统可按多种方法进行分类。从系统所处理信号的不同分为连续时间系统、离散时间系统和混合系统,也可从系统本身的特性来分为线性与非线性系统、时变与时不变系统、即时和动态系统、因果和非因果系统、可逆和不可逆系统、稳定和不稳定系统等。

1. 连续时间系统与离散时间系统

连续时间系统与离散时间系统是根据它们所传输和处理的信号的性质而定的。如果系统的输入 $f(t)$ 和输出 $y(t)$ 都是连续时间信号,且其内部也未转换为离散时间信号,则称此系统为连续时间系统,简称连续系统,用符号 $h(t)$ 表示。如果系统的输入 $f(k)$ 和输出 $y(k)$ 都是离散时间信号,则称此系统为离散时间系统,简称离散系统,用符号 $h(k)$ 表示。如果一个系统内既出现连续信号又出现离散信号,这种系统称为混合系统。RLC 电路是连续时间系统,而数字计算机就是一个典型的离散时间系统。在实际工作中,离散系统常常与连续系统联合运用,数字通信系统和用计算机来进行控制的自动控制系统等都属此类。

连续时间系统的数学模型是微分方程,而离散时间系统则用差分方程描述。

2. 线性系统与非线性系统

线性系统是指具有线性特性的系统。线性特性包括齐次性与叠加性。

齐次性也称比例性或均匀特性,当系统的输入 $f(t)$ 增加 k 倍时,其输出响应 $y(t)$ 也随之增加 k 倍, k 为任意常数,即

若

$$f(t) \rightarrow y(t)$$



则

$$kf(t) \rightarrow ky(t)$$

叠加性也称可加性,当若干个输入信号同时作用于系统时,其输出响应等于每个输入信号单独作用于系统产生的输出响应的叠加,即

若

$$f_1(t) \rightarrow y_1(t), f_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则

$$f_1(t) + f_2(t) \rightarrow y_1(t) + y_2(t)$$

同时具有齐次性与叠加性,即为线性特性,可表示为

若

$$f_1(t) \rightarrow y_1(t), f_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则

$$k_1 f_1(t) + k_2 f_2(t) \rightarrow k_1 y_1(t) + k_2 y_2(t)$$

式中: k_1, k_2 为任意常数。

同样,判断一个离散时间系统是否为线性系统也是看其是否满足齐次性和叠加性。不具有线性特性的系统称为非线性系统。线性系统的数学模型是线性微分方程或线性差分方程。

3. 时变系统与时不变系统

系统根据其中是否包含有随时间变化参数的元件而分为时不变系统和时变系统。如果系统的参数与时间无关,或者系统的输出仅取决于输入而与输入的时间无关,这样的系统称为时不变系统,否则为时变系统。时不变系统又称非时变系统或定常系统。时不变系统满足时不变特性,即如果输入信号在时间轴上平移,那么输出信号也作相应的平移,如图 1-6 所示。

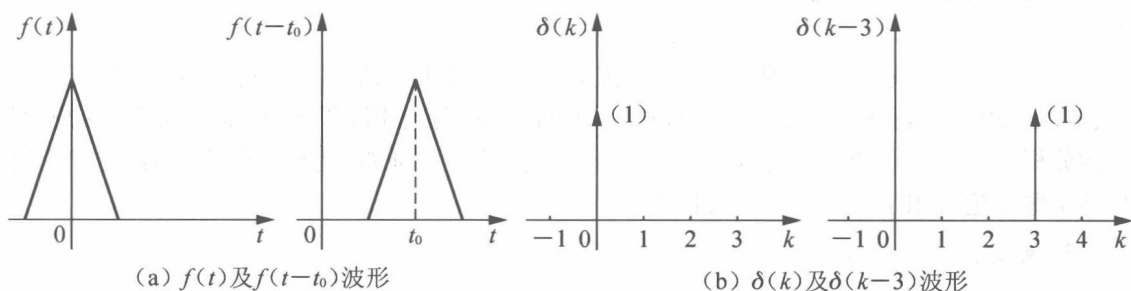


图 1-6 时不变特性

连续系统,若 $f(t) \rightarrow y(t)$, 则

$$f(t-t_0) \rightarrow y(t-t_0)$$

离散系统,若 $f(k) \rightarrow y(k)$, 则

$$f(k-k_0) \rightarrow y(k-k_0)$$

时不变系统是由定常参数的元件构成的,例如,通常的电阻、电容元件的参数 R, C 等均视为时不变的。时变系统中包含有时变元件,这些元件的某些参数是时间的函数。例如,变



容元器件的电容量就是受某种外界因素控制而随时间变化的。时变系统的参数随时间而变化,所以它的性质也随时间而变化。

系统是否线性 and 是否时变是两个互不相关的独立概念,线性系统可以是时不变的或者是时变的,非线性系统也可以是时不变的或者时变的。既满足线性又满足时不变特性的系统称为线性时不变系统(简称 LTI 系统)。LTI 系统的特性用符号表示如下。

连续系统,若

$$f_1(t) \rightarrow y_1(t), f_2(t) \rightarrow y_2(t)$$

则

$$k_1 f_1(t-t_0) + k_2 f_2(t-t_0) \rightarrow k_1 y_1(t-t_0) + k_2 y_2(t-t_0)$$

同理,离散系统也可以使用与此类似的表达式。

4. 即时系统与动态系统

如果系统在某一时刻的输出响应 $y(t)$ 或 $y(k)$ 的值仅取决于输入 $f(t)$ 或 $f(k)$ 在该时刻的值,而与此时刻前的输入信号历史无关,则称为即时系统(或瞬时无记忆系统)。全部由无记忆元件组成的系统是即时系统,如纯电阻系统。即时系统用代数方程来描述,此类系统无记忆性。

如果系统在某一时刻的输出响应的值不仅取决于该时刻输入,而且还与之前系统的工作状态有关,则称为动态系统(或记忆系统),如含有电容、电感、磁芯、寄存器的系统。动态系统用微分方程或差分方程来描述。

5. 因果系统与非因果系统

对于实际的物理系统,输入信号是产生输出信号的原因,响应是激励引起的结果。像这种响应不出现在激励之前的系统,称为因果系统或物理可实现系统。也就是说,因果系统在任何时刻的输出响应与未来的输入信号无关,而只与当前或以前时刻的输入有关,系统所具有的这种特性称为因果性。不具有因果特性的系统称为非因果系统(或物理不可实现系统)。

一切可实现的系统均为因果系统,非因果系统在物理系统中是不可实现的,但在气象学、地球物理学、语音信号处理、股市分析等领域都可能遇到非因果系统,非因果系统的模型性能分析对于因果系统的研究具有重要的理论研究价值。例如,理想低通滤波器,其理论研究的某些结论可用于实际低通滤波器之中。

6. 可逆系统与不可逆系统

可逆系统是指系统在不同输入信号作用下产生不同的输出响应信号,反之为不可逆系统。

对于每个可逆系统都存在一个“逆系统”,当原系统与此逆系统级联组合后,输出信号就是原系统的输入。可逆系统由于其输入和响应间存在一一对应关系,如果系统的响应已知,则可通过一个逆映射来求出原来的输入信号,这个逆映射便是原系统的逆系统,如图 1-7 所示。

可逆系统的概念在信号传输与处理技术领域中得到广泛的应用。例如在通信系统中,为满足某些要求,可将待传输信号进行特定的加工(如编码),在接收信号之后仍要恢复原信