



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材  
高等学校电子信息类专业系列教材

信息与通信工程

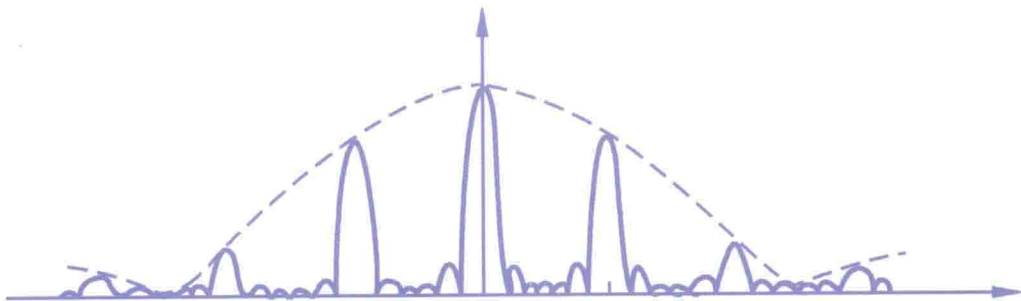
**S**ignals and Communication Systems

# 信号和通信系统

(第3版)

汪源源 朱谦 包闻亮 编著

Wang Yuanyuan Zhu Qian Bao Wenliang



清华大学出版社



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会  
高等学校电子信息类专业系列教材

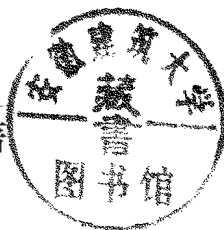
Signals and Communication Systems

# 信号和通信系统

(第3版)

汪源源 朱谦 包闻亮 编著

Wang Yuanyuan Zhu Qian Bao Wenliang



清华大学出版社

## 内 容 简 介

本书详细介绍了信号与系统及信息传输系统方面的内容,包括信号、系统与噪声的基本理论和各种通信系统的基本原理。全书共分5章,第1章介绍确定性信号分析,第2章介绍随机信号分析,第3章介绍数字通信系统,第4章介绍信号的调制传输,第5章介绍噪声对通信系统的影响。

本书可作为普通高等学校电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、光电信息科学与工程、计算机科学与技术等专业的教材,也可作为从事相关行业的科研与工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

信号和通信系统/汪源源,朱谦,包闻亮编著.—3版.—北京:清华大学出版社,2015

高等学校电子信息类专业系列教材

ISBN 978-7-302-38951-4

I. ①信… II. ①汪… ②朱… ③包… III. ①信号系统—高等学校—教材 ②通信系统—高等学校—教材 IV. ①TN911.6 ②TN914

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 005649 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:18.25 字 数:456千字

版 次:2004年2月第1版 2015年2月第3版 印 次:2015年2月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

# 高等学校电子信息类专业系列教材

## 一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

## 一 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	谢凯年	赛灵思公司
	刘铁根	天津大学	张伟刚	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	宋峰	南开大学
	苑立波	哈尔滨工程大学	靳伟	香港理工大学
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

# 序

## FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高【2012】4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类专业的专业课程,适用于电子信息类的电子信

息工程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

# 前言

FOREWORD

本书第1版经两次印刷已过了10多年,多年来复旦大学信息科学与工程学院各系、专业都采用这本教材。2007年清华大学出版社诚邀编者修改和补充,出版了第2版。这次又修订出版了第3版。

对于理工科电学类专业的学生来说,“信号与系统”是一门重要的课程。但在这门课程中,要用较少的学时全面论述信号和系统是很困难的。多年来,我们将“信号和系统”分别放在三门课程中进行讨论:第一门课程为“信号和通信系统”,主要论述连续信号和系统的频域分析,并且讲述信息传输系统;第二门课程为“自控原理”,介绍连续信号和系统的时域分析、复频域分析以及系统的状态变量分析等,并且论述自动控制系统;第三门课程为“数字信号处理”,主要讲述离散时间信号和系统分析以及数字信号处理系统。后两门课程是在前一门课程学完之后进行的,全部内容在两学期内讲完。这样做的好处是三门课程的内容均衡衔接而不重复,每门课程都能在48~64学时内完成,学生可以对信号与系统全面了解。

本书以信息传输系统为主线,讲述信号、系统与噪声等基本理论。内容编排上先讨论信号与系统频域分析的各个重要问题。在频域分析中引入广义函数的概念,使得对一类能量无限信号(如冲激函数、阶跃函数等)的傅里叶分析有了更好的数学工具。考虑学生数学基础情况,对此节标以“\*”号,教师可以根据具体情况,用极限方法引出冲激函数来讨论无限能量信号的傅里叶变换。然后介绍各种信息传输系统的基本原理。在学习基本原理的同时,加强了与实际通信系统的联系,特别对近年来应用广泛的数字通信系统,根据最近的发展修订并补充了部分内容。这对于缺乏实际系统认识的理科学生来说是很有必要的。

本书的绪论讲述信息、信号与系统之间的关系。第1章讲述连续信号和系统的频域分析理论,包括频谱分析、相关分析、信号通过线性系统等内容。第2章阐述随机信号的统计特性、典型噪声信号分析及随机信号通过线性系统等内容。第3章介绍数字通信系统的基本原理以及一些具体的数字传输系统。第4章论述模拟通信系统原理。第5章阐述噪声对各种通信系统的影响,并比较各种通信系统的性能。各章后面均附有习题,有一些习题的内容涉及具体实用系统。

本书有4个附录,介绍书中涉及的数学公式和特殊函数,供学生参考。

本书2007年第2版时,第1章和第2章由汪源源作了修改和补充,第3章由朱谦作了修改和补充,第4章和第5章由包闻亮作了补充和修改。这次第3版由汪源源、朱谦对部分内容作了修订,并由汪源源审定全稿。另外,在清华大学出版社编辑的大力支持和协助下,本书得以在较短时间内出版和发行,编者在此表示诚挚的谢意。

限于编者水平,书中难免有错误与不足之处,恳请广大读者批评指正。

编者

2015年1月于复旦大学

# 目录

## CONTENTS

<b>第 0 章 绪论</b> .....	1
0.1 信息、信号与系统 .....	1
0.2 信息与信息量 .....	1
0.3 信号的描述及分类 .....	3
0.4 系统的分类及分析方法 .....	4
0.5 信息传输系统概述 .....	5
0.5.1 信息传输系统模型 .....	6
0.5.2 数字通信系统模型 .....	7
习题 0 .....	8
<b>第 1 章 确定性信号分析</b> .....	9
1.1 周期信号的傅里叶级数表示 .....	9
1.1.1 周期信号的简谐波展开 .....	10
1.1.2 离散频谱及其性质 .....	12
1.2 连续频谱——能量型信号的频谱分析 .....	17
1.2.1 傅里叶变换 .....	17
1.2.2 连续频谱 .....	20
1.3 广义函数 .....	24
1.3.1 广义函数的基本概念 .....	24
1.3.2 广义函数的性质 .....	26
1.3.3 几个特定的广义函数 .....	28
1.4 常用的傅里叶变换 .....	31
1.5 频谱密度的性质 .....	42
1.6 能量谱与功率谱 .....	48
1.7 确定信号通过线性时不变系统 .....	50
1.7.1 系统的时间-频率表示法 .....	50
1.7.2 卷积 .....	52
1.7.3 频率域内线性系统的理论 .....	54
1.7.4 无失真传输与理想滤波器 .....	58
1.8 确定信号的相关 .....	61
1.8.1 相关系数 .....	61
1.8.2 相关函数 .....	63
1.8.3 相关函数的性质 .....	64
1.8.4 线性时不变系统与相关函数的关系 .....	66



1.9 希尔伯特变换	67
1.9.1 希尔伯特变换的基本概念	67
1.9.2 希尔伯特变换的性质	68
1.9.3 希尔伯特变换的应用	69
习题 1	73
<b>第 2 章 随机信号分析</b>	<b>83</b>
2.1 随机信号的统计分布描述	83
2.1.1 随机信号的一维分布	84
2.1.2 随机信号的二维和 $n$ 维分布	85
2.1.3 平稳随机信号	86
2.2 随机信号的平均表征	86
2.2.1 随机信号的集平均表征量	86
2.2.2 随机信号的时间平均表征量	91
2.2.3 各态历经性	92
2.2.4 随机信号的功率谱	94
2.2.5 随机信号的功率谱与自相关函数的关系	95
2.3 典型随机信号	96
2.3.1 起伏噪声	96
2.3.2 白噪声	97
2.3.3 窄带高斯噪声	99
2.3.4 正弦波加窄带高斯噪声	102
2.4 随机信号通过线性系统	106
2.4.1 输出信号的数字特征	106
2.4.2 输出与输入随机信号间的互相关	107
习题 2	108
<b>第 3 章 数字通信系统</b>	<b>112</b>
3.1 模拟信号的数字化原理	112
3.1.1 抽样定理	112
3.1.2 幅度量化	118
3.1.3 量化噪声	119
3.1.4 非均匀量化	121
3.2 脉冲幅度调制和时分多路复用	124
3.2.1 曲顶 PAM	124
3.2.2 平顶 PAM	126
3.2.3 PAM 系统的带宽与传输	127
3.2.4 时分多路复用	128
3.3 脉冲编码调制	131
3.3.1 线性 PCM 编码	132
3.3.2 非线性 PCM 编码	133
3.3.3 PCM 基群结构	136
3.4 增量调制	137
3.4.1 简单增量调制的工作原理	138
3.4.2 量化噪声和过载量化噪声	139

3.4.3	改进型增量调制	140
3.5	基带传输原理	143
3.5.1	基带信号的基本码型	144
3.5.2	基带信号的频谱特性	146
3.5.3	无码间串扰的基带信号传输	151
3.5.4	部分响应系统	158
3.5.5	信道噪声对基带信号传输的影响	161
3.6	匹配滤波器	164
3.7	纠错编码	169
3.7.1	常用的差错控制方法	169
3.7.2	纠错编码的基本原理	170
3.7.3	常用的简单编码	173
3.7.4	汉明码	173
3.7.5	循环冗余校验码	176
	习题 3	179
<b>第 4 章</b>	<b>信号的调制传输</b>	<b>186</b>
4.1	数字信号的调制	186
4.1.1	振幅键控	187
4.1.2	移频键控	189
4.1.3	移相键控	192
4.1.4	多进制数字信号的调制	196
4.2	振幅调制	199
4.2.1	双边带调制	199
4.2.2	一般的振幅调制	203
4.2.3	单边带调制	206
4.2.4	残留边带调制	209
4.3	角调制	212
4.3.1	调频波与调相波	212
4.3.2	调频信号的频谱与带宽	214
4.3.3	FM 信号的产生	219
4.3.4	FM 信号的解调	222
4.4	频分多路复用	224
4.5	码分多路复用	226
4.5.1	扩频概念及扩频系统模型	226
4.5.2	用伪随机码和 Walsh 正交函数作地址码	228
4.5.3	调制与解调	231
4.5.4	CDMA 的优点	232
	习题 4	234
<b>第 5 章</b>	<b>噪声对通信系统的影响</b>	<b>242</b>
5.1	二进制调制的误码率	242
5.1.1	噪声对相干检测二进制传输系统的影响	243
5.1.2	噪声对非相干检测二进制传输系统的影响	247
5.1.3	二进制数字调制系统的性能比较	252

5.2 调幅系统的抗噪声性能 .....	253
5.2.1 DSB系统的抗噪声性能 .....	254
5.2.2 SSB系统的抗噪声性能 .....	255
5.2.3 AM系统的抗噪声性能 .....	255
5.3 FM系统的抗噪声性能 .....	257
5.3.1 FM系统的解调增益 .....	257
5.3.2 FM系统与AM系统的输出信噪比比较 .....	259
5.3.3 FM解调中的门限效应 .....	260
5.3.4 用去加重来改进FM系统的输出信噪比 .....	261
5.4 PCM系统的抗噪声性能 .....	262
5.5 信息传输引论 .....	265
5.5.1 信道与信道容量 .....	265
5.5.2 带宽和信噪比互换 .....	267
5.5.3 实际通信系统的潜力 .....	267
习题5 .....	269
<b>附录</b> .....	274
附录A 常用数学公式 .....	274
附录B 施瓦茨不等式 .....	275
附录C 误差函数 .....	276
附录D 贝塞尔函数 .....	277
<b>参考文献</b> .....	280

## 0.1 信息、信号与系统

信息是人类社会和自然界中需要传送、交换、存储和提取的抽象内容。例如一次电话中,甲告诉乙所不知道的消息,就说甲发出了信息;而乙在电话中得知了原先不知道的消息,就说乙得到了信息。

信息存在于一切事物之中,事物的一切变化和运动都伴随着信息的交换和传送。各种各样的社会活动、无线电波的传播、计算机的运算等都是信息交换和传输的过程。信息是人类认识世界和改造世界的知识源泉。

信息是抽象的内容,为了传送和交换信息,必须通过语言、文字、图像和数据等将它表示出来。人们称表示信息的语言、文字、图像和数据等为消息。消息在许多情况下是不便于传送和交换的,例如语言就不宜远距离直接传送。为此需要用光、声、电等物理量来运载消息。人们称运载消息的光、声、电等物理量为信号。用数学式子表示时,它们就是时间或空间的函数。信号是包含(或表示)信息的时间或空间函数,记为  $S(t)$  或  $S(x)$ ,  $S(t)$ 、 $S(x)$  的表示图形称为信号波形。

信息的交换、传送、存储和提取是借助于信号的传输、存储和处理来完成的。信号是物理量,因而信号的传输、存储和处理必须借助于物理设备才能实现。这些传输、存储和处理信号的设备总称为系统。具体地说,系统是由各个不同的单元按照一定的方式组成、并能完成某种任务的整体的总称。从抽象的观点看,系统所完成的任务就是传输、存储和处理信号,以达到自然界、人类社会、生产设备按照对人类有利的规律运动的目的,所以系统的组成、特性应该由信息和信号决定。

从上述可知,信息、信号与系统是不可分割的整体。本课程以信号与系统为主线,先对连续时间信号与系统的时域、频域进行分析,然后对信息传输系统作详细的论述。之所以要讨论信息传输系统,是因为它不仅广泛存在于通信的各个业务领域(电报、电话、传真、数据传输及可视电话等),而且存在于广播、电视、雷达、控制、遥测及计算机科学等各领域。

## 0.2 信息与信息量

信息是一个社会概念。它是人类社会共享的一切知识、学问以及从客观现象中提取出来的各种消息的总和。对信息目前已有几十种定义。如维纳(N. Wiener)把信息定义为:

“信息是我们在适应外部世界并使这种适应为外部世界所感知的过程中,同外部世界交换内容的总和。”而哈脱莱(R. Hartley)的定义为:“信息是消息中不确定性的消除”。上面的信息是广义的概念,而常说的信息论则是从狭义的角度来研究信息,即主要研究与通信系统有关的信源的信息量、信道容量、噪声及编码问题。它的理论基础是从香农(C. Shannon)研究通信系统时建立并由他与韦佛(W. Weaver)于1949年发表的《通信的数学理论》中对信息引入定量的规定,从而人们开始对信息有了初步的了解。目前信息的含义已进一步发展,这一定量规定也逐渐暴露出它的局限性。不过对于无线电、电子学等技术领域来讲,香农理论仍不失为信息论的基础。

世界上任何事件的发生都是不确定的。任何信源产生的包含一定信息的符号都是随机的。若符号的出现是确定的,或者预先知道的,就无信息可言,信息的传输也就失去了意义。例如一位朋友告诉你一件事,如果你对这件事早已知道,你就对他讲的不感兴趣。如果你对这件事一无所知,而且认为这件事发生的可能性很小,那么你听到后就会感到吃惊,感觉得到了不少信息。因此关于某一事件发生的消息,其信息量和该事件发生的概率有相反的关系。如果事件是确定的(概率为1),那么它传送的信息量为零;反之,如果事件是不可能发生的(概率为0),那么该事件的发生有无穷的信息量。实际上,信息量 $I$ 是事件概率的倒数的对数函数,即

$$I \approx \log \frac{1}{P}$$

另外,人们希望有效地传输信息。从工程的观点看,一则消息中的信息量和传输此消息所需要的时间成正比。这表明传输确定性比较大(出现概率大)的消息所用的时间比传输较小概率的消息所需时间短。早在信息论研究之前,人们为了有效地传输报文,对莫尔斯电码传送英文字母符号时就有此考虑。把字母出现的概率较大的用较短的码来传送,如字母 $e$ 出现的概率是 $P=0.105$ ,用一个小点“·”来表示;字母 $t$ ( $P=0.072$ )用一个短横线“-”来表示。而概率出现较小的字母,如 $Q$ ( $P=0.001$ )用“-·-”来表示,字母 $J$ ( $P=0.0001$ )用“·---”来表示。当然早期的莫尔斯电码由于没有信息论的理论指导,有的字母的电码并不一定是恰当的。

下面来说明传送概率为 $P$ 的一个符号(或消息)所需最短时间确实和 $\log(1/P)$ 成正比。

首先,假设 $a$ 和 $b$ 是等概率的消息,它可以是“晴”和“雨”这类气象消息。现在需要传送这两个消息,可采用二进制脉冲来传送,用无脉冲代表消息 $a$ (晴),有脉冲代表消息 $b$ (雨)。这样至少需要用一个二进制脉冲来传送两个等概率消息中的任何一个,信息的单位为bit。显然,一个二进制脉冲能够传送1bit信息。

考虑有4个等概率消息的情况。如果这些消息由二进制脉冲来传送,则每条消息需要两个二进制脉冲组成一个码组。每个二进制脉冲能取两种状态,因此两个脉冲的组合构成4种不同的码组分别表示4个消息。这样就需要两个二进制脉冲来传送4个等概率消息中的任何一个,每个这样的消息占据的时间为传送两条等概率消息之一所需时间的2倍。因此它包含2倍的信息,即2bit。通常, $n$ 个等概率消息之一包含 $\log_2 n$ bit信息。至少需要 $\log_2 n$ 个二进制脉冲来传送这样一个消息。这些事件中任一个发生的概率 $P=1/n$ ,因此

$$I = \log_2 n = \log_2 \frac{1}{P} \quad (0-2-1)$$

由此讨论看出,一个信息的信息量度(以 bit 为单位)等于信息编码所需的最小二进制脉冲数目。

信息量公式中对数的底数常取为 2,单位是 bit。也有以 e 或 10 为底数的,此时信息量单位名称也就不同,但它们之间可以转换。

表面上看,上面的定义似乎很有局限性,它仅适合于离散性质的消息。但是信息论有一个重要的结论:任何形式的待传输的消息,总可以用二进制形式来表示而不失其主要内容。下面将会讨论到:对于频带有限的连续信号,可以用每秒若干个离散的抽样值来表示,而这些抽样值又可以用二进制码组来表示。由于噪声或者接收者能力有限,即抽样值的精度是有限的,所以用二进制码组表示的码组长度也是有限的。

### 0.3 信号的描述及分类

本书研究的信号主要是电信号,简称信号。信息必须借助信号才能进行传送、交换、存储和提取,所以在信息系统中信号是一个重要的客体。就信号和信息的关系而言,一方面信号是表达信息的符号,信号包含着信息;另一方面由于系统是传输、变换和处理信号的,所以系统的特性必然与信号有关。因此必须透彻地了解和研究信号的各种属性。

研究信号的理论涉及面很广,内容十分丰富。从大的方面来说,可以分为两部分:一是信号分析,研究信号的解析表示、信号有用性能的数值特征、信号的变换和处理等;二是信号综合,讨论满足系统给定的要求来设计或选择信号的最佳形式。信号分析与信号综合两个方面既有区别,又互相联系。信号分析是信号综合的基础,本书重点讨论信号分析。电信号一般是指随时间变化的电压或电流。描述信号的基本方法是写出它的时域解析表示式或绘出信号波形。除了表示式与波形两种直观的描述方法之外,还可用频谱分析或其他正交变换的方式来描述信号。

信号的形式是多种多样的。对于各种信号可以从不同的角度进行分类,且分类方式常与系统有关。

(1) 按照信号自变量  $t$  的取值特点,可将信号分成连续时间信号与离散时间信号两种。对于任意时间值(除若干不连续点之外)都可给出确定的函数值的信号称为连续时间信号,如正弦波或矩形脉冲等。在时间上离散的信号,即只在某些不连续的瞬时才给出函数值的信号称为离散时间信号。在某种条件下,连续时间信号与离散时间信号之间可以转换。

(2) 按照信号是否存在随机性的特点,可将信号分成确定信号与随机信号。如果信号仅为时间函数,且它的所有参量都确定,即对于给定的某一时刻可确定相应的函数值,这样的信号称为确定信号。而随机信号则是给定时刻后,信号的值具有不确定性。

(3) 按照信号幅度取值和自变量取值的特点,可将信号分成模拟信号与数字信号。如果信号幅度(或信号的自变量)是连续取值,就称该信号为模拟信号;而如果信号的自变量是离散的且信号的幅度只能取某个量值的整数倍,则称该信号为数字信号。

此外,根据信号能量的特点,可将信号分成能量型信号和功率型信号。能量型信号的持续时间不管有限还是无限,信号的能量总是有限的。功率型信号是持续时间无限,能量也无限,但其时间平均值是有限的信号。根据信号的重复性特点,可将信号分成周期信号与非周期信号。

本书研究信号四个方面的特性：①频谱特性，它表明信号占有的频带；②时间特性；③信息特性，它表示信号的信息含量；④能量特性，它表明信号的能量或功率。它们分别从频域、时域、信息和能量四个不同的角度对信号进行描述，有各自的意义，同时又存在密切的联系。

## 0.4 系统的分类及分析方法

信息的交换、传送、存储和提取是借助信号通过各种各样的系统(物理设备)进行的。系统完成对信号的传输、存储和处理。信号对系统的输入称为激励，信号从系统中输出称为响应。系统的输入、输出之间的关系可由系统的数学模型来给定。可以用不同的数学模型把系统划分为不同的类型。

### 1. 连续时间系统和离散时间系统

如果系统的输入、输出都定义在所有时间上，称这样的系统为连续时间系统。例如由RLC组成的系统就是连续时间系统。如果系统的输入、输出信号只在离散的瞬间取值，这种系统称为离散时间系统。

### 2. 线性系统和非线性系统

线性系统是输入、输出关系满足线性条件的系统，即若系统的输入为  $x_1(t)$  和  $x_2(t)$ ，其相应的输出为  $y_1(t)$  和  $y_2(t)$ ，则下式成立：

$$\alpha x_1(t) + \beta x_2(t) \rightarrow \alpha y_1(t) + \beta y_2(t) \quad (0-4-1)$$

其中  $\alpha$  和  $\beta$  是任意的常数，表示系统的线性性质(包括叠加性和均匀性)，这样的系统称为线性系统。线性系统可以是连续时间系统，也可以是离散时间系统。不具备上述性质的系统称为非线性系统。

### 3. 时不变系统和时变系统

参量不随时间而变化的系统称为时不变系统，参量随时间而改变的系統称为时变系统(变参系统)。对于时不变系统，若输入为  $x(t)$ ，输出为  $y(t)$ ，那么当输入延迟为  $x(t-T)$  时，输出是  $y(t-T)$ ，其中  $T$  为延迟时间。

系统是否线性和是否时不变是两个独立的概念。线性系统可以是时不变的或者是时变的。

### 4. 因果系统和非因果系统

凡是系统的响应出现在激励时刻之后的系统称为因果系统或物理可实现系统。如果系统对冲激信号  $\delta(t)$  的响应是  $h(t)$ ，那么系统为因果的充要条件对于连续时间系统是

$$h(t) = 0 \quad t < 0 \quad (0-4-2)$$

此外，根据不同的方式，系统还可分成集总参数系统和分布参数系统、即时系统和动态系统、单输入单输出系统和多输入多输出系统等。

不同的系统以不同的数学模型来描述：连续时间系统用微分方程来描述，离散时间系统用差分方程来描述；线性系统用线性方程(组)来描述，非线性系统则用非线性方程(组)来描述；时不变系统用常系数方程(微分方程和差分方程)来描述，时变系统用变系数方程来描述。

系统分析就是通过系统方程确定在激励后的输出响应。

在近代信号和系统理论中,系统分析包含两个方面的内容:一方面是研究确定信号(包括连续时间信号和离散时间信号)通过系统(包括线性系统 and 非线性系统)的分析方法;另一方面是研究随机信号通过系统的分析方法。

在建立系统模型方面,信号通过线性系统的分析方法又可分为两大类:一是输入-输出分析法;二是状态变量分析法。

输入-输出分析法着眼于系统的响应与激励的关系,而并不关心系统内部变量的情况。实际工程中大量遇到的单输入、单输出系统应用这种方法较为方便。一般来说,描述线性时不变系统输入-输出关系是常系数线性微分方程或差分方程。

状态变量分析法除了要考虑输入和输出变量之外,还要考虑系统内部变量,所以这种方法不仅揭示了激励和响应的关系,而且还揭示了系统的内部情况。这种方法对于研究多输入、多输出系统,特别是现代控制系统很方便。

需要指出的是:输入-输出法和状态变量法对系统的分析没有本质的区别,只是状态变量法把系统内部变量与激励和响应的关系鲜明地揭示出来,而在输入-输出法中这些关系是隐含在分析过程之中。这两种方法各有特点和适用范围。

从系统的求解方法来说,信号通过线性系统的分析方法又可分为时域分析法和变换域分析法两大类。

时域分析法以时间变量  $t$  或离散时间变量  $n$  作为自变量研究系统的时间响应特性。在线性系统时域分析中,卷积方法非常重要,它为分析线性系统提供了简单而有效的方法。变换域分析法是将信号与系统模型的时间变量函数变换成相应的变换域的某种变量函数。例如傅里叶变换以频率为独立变量、以频域特性为主要研究对象;而拉普拉斯变换和  $Z$  变换则着重研究系统的极点和零点分布,利用  $s$  域和  $z$  域的特性解释系统的现象和说明系统的特点(如系统的稳定性等)。变换域分析法可以将时域分析法中的微分、积分与卷积运算转化为代数运算,这对于解决实际问题有许多方便之处。

上面简述了线性系统的几种分析方法。不同类型的系统用不同的分析方法往往更为方便,但值得注意的是,各类分析方法之间存在着内在的相互联系。例如,输入-输出法和状态变量法之间、傅里叶变换和拉普拉斯变换之间、拉普拉斯变换和  $Z$  变换之间、 $Z$  变换与离散傅里叶变换之间以及时域方法与变换域方法之间并没有本质的区别,它们之间的关系可能属于同一问题的两个方面,甚至是属于在一定条件下可以统一起来的同一个问题。在信号与系统分析中,线性时不变系统分析的理论是极为重要的,因为许多实际系统常常可以近似为线性系统来分析,并且线性系统的分析已形成完整而严密的理论。本书着重讨论确定信号与随机信号通过线性时不变系统的时域与频域分析方法。

## 0.5 信息传输系统概述

一般来说,通信是由一个地方向另一个地方传送消息,或者说由一个地方向另一个地方传输信息。通信的方式多种多样,其中利用电信号来运载信息的方式称为电信,它是传输信息的最有效的方式。这是由于利用电信号几乎能够在任意的距离上迅速、有效而准确地传输信息。

通信中所传送的消息有各种不同的形式,可以用声音、图像、数据及图形等形式来表示。



例如为了传送未来天气情况的信息,可以通过广播、电视、电话和传真。根据所传送消息的不同,在目前通信业务可分为电报、电话、传真及数据传输等。从广义的通信角度来看,广播、电视、雷达、导航、遥控遥测等也属于通信的范畴。这些系统统称为信息传输系统。

### 0.5.1 信息传输系统模型

虽然不同通信系统(包括广义的通信系统)的具体设备、构造和业务功能会有所不同,但经过抽象后,都可以用图 0-5-1 所示的模型来表示。它们的基本组成包括信源、信源变换器、发信变换器、信道、受信变换器、信宿变换器和信宿等。

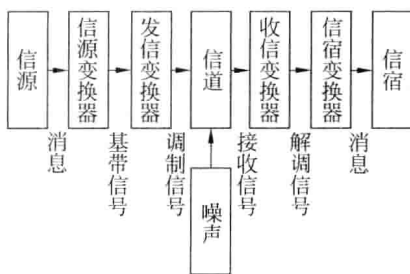


图 0-5-1 信息传输系统模型

信息源简称信源,是信息传输系统的起点。广播员讲话的声音是信源,雷达系统中目标反射电磁波,目标是信源。信源输出的是消息。消息可以包含信息的语言、文字、符号、数据等,它一般不适宜于传输,需要经过变换才能传输。

要将消息变换成为适合信道传输的物理量后才能传输,这在发送端分别由信源变换器和发信变换器来实现。

**信源变换器:** 它将消息变成电信号。这一变换主要考虑信源的特性,利用声-电、光-电等变换器来实现消息到电信号的变换,即要与消息相匹配。但这样的信号还不完全适合于传输。例如话筒的输出为低频电流,而低频电流不能有效地辐射到空间去传输。这个信号也称基带信号。

**发信变换器:** 为了使基带信号能有效地在相应的传输媒质(信道)中传输,需要通过信道变换器。如在无线电话通信中,把低频电流经过调制变换成高频电流,才能有效地通过空间传输。这个信号也称调制信号。这个变换主要使信号与信道的特性相匹配。

**信道:** 信道是指发信端到受信端之间的传输媒质。它可以是一对导线、一条同轴电缆或光纤,也可以是辐射空间的一个频带。

在接收端,由两个与发送端相对应的受信变换器及信宿变换器来实现信号的变换。

**受信变换器:** 信号经过信道,由发信端传输到受信端。为了得到它所携带的信息,受信端必须将信号恢复成消息,然后从消息中获知信息。这个变换是发信端变换的逆过程,受信变换器将调制信号变换成基带信号。这个过程通常称为解调。

**信宿变换器:** 它将基带信号变换成消息。对不同的消息相应采用不同的变换器,如电-声、电-光变换器。

信宿是信息传输系统的终端。

此外,还要考虑通信系统内外各种噪声干扰的影响。这些噪声来自发信设备、信道与收