



工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

李卫东 李殷 游思晴 编著

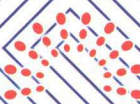
通信原理 教程

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Principle of Communication



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



高校系列



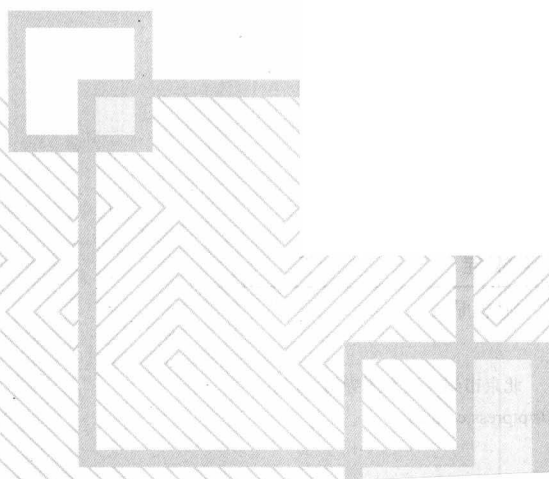
工业和信息化普通高等教育
“十二五”规划教材立项项目

李卫东 李殷 游思晴 编著

通信原理 教程

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Principle of Communication



人民邮电出版社
北京



图书在版编目 (C I P) 数据

通信原理教程 / 李卫东, 李殷, 游思晴编著. -- 北京: 人民邮电出版社, 2011.10
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-24824-4

I. ①通… II. ①李… ②李… ③游… III. ①通信理论—高等学校—教材 IV. ①TN911

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第023079号

内 容 提 要

本书阐述通信系统的基本问题, 主要包括确定信号与随机信号分析、信道特性、调制技术、信道编码, 扩频通信和通信网等内容。

本书可作为高等院校通信工程及相关专业本科生的教材, 也可作为相关的工程技术人员的参考书。

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材

通信原理教程

-
- ◆ 编 著 李卫东 李 殷 游思晴
责任编辑 蒋 亮
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17
字数: 415 千字
- 2011 年 10 月第 1 版
2011 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 978-7-115-24824-4

定价: 34.00 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

“通信原理”作为通信工程专业的专业基础课，是学习本专业的学生的一个入门引导和进一步学习其他专业课程的基础。目前主流的通信原理教材，特别注重数学推导，对学生的数学基础要求较高。随着高等教育和通信技术的发展，很多非通信工程专业以及二本三本院校的学生也会主修或者选修“通信原理”这门课程；还有从事相关专业工作的读者，需要随时查阅或参考“通信原理”的内容。这类读者的先修数学基础课程或者没有按照通信工程专业的要求进行组织，或者先修数学基础不够扎实，或者由于毕业时间较长，相关数学知识有部分遗忘。在这种情况下，读者使用传统的通信原理教材有比较大的困难。我们在教学实践中，深刻体会到了这个问题，感到非常需要一本按照这类学生需要编写的，更适合这类学生实际情况的教材。

本教材在编写过程中，着重概念和方法的阐述，避免不必要的复杂数学推导，而对于必须的推导则尽量做到详细清楚容易理解，以适应高等教育中出现的这一变化，配合非通信工程专业以及二本三本院校通信工程专业的“通信原理”课程建设。为范围更广大的读者提供学习上的帮助，为读者建立完整的概念，打下坚实的基础，培养学习和研究的兴趣，是这本教材的目标。

与现有的教材相比较，本教材具有以下几点特色。

(1) 注重物理概念的讲述，使得读者能够对通信系统的基本原理有一个更直观的了解。各种信号的变换及其性质，是通信原理课程的主要内容之一，虽然可以通过单纯的数学方法明确阐述这类问题，但是这种方法比较抽象，对读者的数学基础要求较高，也很难与具体的通信系统建立概念上的联系。通过对信号变换的物理过程的阐述，可以使得内容直观，容易理解，与通信系统的联系直接。

(2) 避免大量的和复杂的数学推导，使得学习的门槛降低，过程容易。大量和复杂的数学推导，对数学基础准备不充分的读者来说，是学习上的一个障碍。本教材充分考虑到这一问题。对于不重要的问题，采用简化的形式进行数学表述，或者就主要情况进行讨论以达到建立概念的目的；对于有多种推导方法的问题，选取简洁易懂的形式；重要的概念，数学推导不能简化的情况下，提供相关的数学知识，便于读者阅读理解。

(3) 提供必要的背景知识介绍，使得读者明确局部的概念与整个通信系统直接的联系。在我们的教学实践中，发现学生常常困惑“这个问题与具体的通信系统有何关系”，对学生的学习兴趣有很大影响。本教材通过提供足够的背景知识解决这个问题。

全书共 11 章, 内容包括绪论、确定信号、随机信号、信道、模拟调制系统、数字基带调制、数字频带调制、扩频传输系统、模拟信号的数字化、信道编码和通信网的基本知识。本书第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章和第 7 章由李卫东编写, 第 6 章、第 9 章和第 10 章由李殷编写, 第 5 章、第 8 章和第 11 章由游思晴编写, 全书由李卫东统稿。

由于编者水平有限, 书中难免存在疏漏和错误之处, 敬请广大读者批评指正!

编者
2011 年 5 月

目 录

第1章 绪论	1	3.4 平稳过程的功率谱密度	37
第2章 确定信号	5	3.4.1 功率谱密度	37
2.1 确定信号	5	3.4.2 维纳—辛钦定理	38
2.1.1 确定信号的时域表达	5	3.4.3 平稳随机过程功率谱密度的性质	40
2.1.2 确定信号的功率和能量	8	3.4.4 平稳随机过程的和	40
2.1.3 能量信号和功率信号	10	3.5 高斯过程	41
2.2 确定信号的相关函数	10	3.5.1 定义	42
2.2.1 相关函数的定义	10	3.5.2 性质	42
2.2.2 相关函数的性质	11	3.5.3 一维高斯概率密度函数	44
2.3 确定信号的能量谱密度和功率谱密度	12	3.6 白噪声与高斯白噪声	47
2.3.1 帕色瓦尔定理	12	3.6.1 白噪声	47
2.3.2 能量谱密度	13	3.6.2 高斯白噪声	47
2.3.3 功率谱密度	14	3.7 随机过程和线性系统	48
2.3.4 相关函数与能量(功率)谱密度的关系	15	3.8 窄带平稳随机过程	51
2.3.5 信号带宽	16	3.9 循环平稳随机过程	53
2.4 窄带信号	20	习题	55
习题	22	第4章 信道	56
第3章 随机信号	24	4.1 信道的基本形式	56
3.1 随机过程的特征	25	4.1.1 有线信道	56
3.1.1 全局特征	25	4.1.2 无线信道	57
3.1.2 统计平均	26	4.1.3 光纤信道	58
3.1.3 矩	26	4.1.4 水声信道	58
3.1.4 常用局部特征	27	4.1.5 存储信道	59
3.2 两个或者两个以上随机过程的联合特征	28	4.2 信道的数学模型	59
3.2.1 联合特征	29	4.2.1 加性噪声信道	59
3.2.2 独立和不相关	29	4.2.2 线性信道	59
3.3 平稳随机过程	30	4.2.3 线性时不变信道	60
3.3.1 严平稳随机过程	30	4.2.4 离散信道模型	60
3.3.2 宽平稳随机过程	31	4.2.5 统计信道模型	62
3.3.3 平稳过程的各态历经性	32	习题	64
3.3.4 平稳随机过程的性质	34	第5章 模拟调制系统	66
		5.1 引言	66
		5.2 幅度调制的原理	67

5.2.1 双边带抑制载波调幅	67	6.4 限带信道与码间干扰	117
5.2.2 具有离散大载波的双边带幅度调制	70	6.5 无码间干扰传输条件	119
5.2.3 单边带调幅	73	6.5.1 无码间干扰基带传输的奈奎斯特准则	119
5.2.4 残留边带调幅	76	6.5.2 码间串扰与基带系统带宽、码元速率的关系	121
5.3 幅度调制的抗噪声性能	77	6.5.3 升余弦滤波器	123
5.3.1 双边带抑制载波调幅的抗噪声性能	79	6.6 部分响应系统	125
5.3.2 单边带调幅的抗噪声性能	80	6.7 眼图	129
5.3.3 具有离散大载波的双边带幅度调制信号的抗噪声性能	81	6.8 时域均衡	131
5.4 角度调制	84	6.8.1 均衡基本原理	131
5.4.1 角度调制原理	84	6.8.2 横向滤波器	132
5.4.2 窄带角度调制	86	6.8.3 自适应均衡器	135
5.4.3 调频信号的产生和解调	86	习题	136
5.5 角度调制的抗噪声性能	88	第7章 数字频带调制	140
5.6 各种模拟调制系统性能比较	91	7.1 二进制数字频带幅度调制	140
5.7 频分复用	93	7.1.1 二进制数字频带幅度调制信号的特性	140
5.8 超外差接收机	93	7.1.2 数字幅度调制信号的解调	143
习题	94	7.2 二进制数字频带相位调制	151
第6章 数字基带调制	97	7.2.1 二进制数字频带相位调制信号的特性	151
6.1 调制原理	97	7.2.2 2PSK 信号的解调	152
6.1.1 数字基带信号与数字基带传输系统	97	7.3 二进制差分相位调制	157
6.1.2 数字通信中的一些基本概念	97	7.3.1 2DPSK 信号的特性	157
6.1.3 数字脉冲幅度调制信号	98	7.3.2 2DPSK 信号的解调	158
6.1.4 数字基带信号的功率谱分析	100	7.4 二进制数字频率调制	158
6.1.5 常用线路码型	103	7.4.1 二进制数字频带幅度调制信号的特性	159
6.2 低通滤波器接收机	107	7.4.2 2FSK 信号的解调	161
6.2.1 数字基带信号的接收	107	7.4.3 MSK	163
6.2.2 利用低通滤波器接收 2PAM 信号的错误概率	108	7.5 四进制相位调制	166
6.3 最佳接收机	111	7.5.1 QPSK 信号的特性	166
6.3.1 匹配滤波器	111	7.5.2 QPSK 信号的解调	168
6.3.2 利用匹配滤波器接收 2PAM 信号的错误概率	114	7.6 多进制频带幅度调制	173
6.3.3 匹配滤波最佳接收与低通滤波接收的比较	117	7.6.1 二进制数字频带相位调制信号的特性	173
		7.6.2 数字幅度调制信号的解调	174
		7.7 正交幅度调制	175

7.7.1 二进制数字频带相位调制	
信号的特性	176
7.7.2 数字幅度调制信号的解调	177
习题	177
第 8 章 扩频传输系统	182
8.1 引言	182
8.2 随机序列与伪随机序列	183
8.2.1 m 序列	183
8.2.2 Gold 码	188
8.3 正交码	189
8.3.1 瑞得麦彻码	189
8.3.2 沃尔什函数	191
8.4 伪随机码的应用	193
8.4.1 扩频通信	193
8.4.2 RAKE 接收机	198
8.4.3 通信加密	203
8.4.4 误码率的测量	203
8.4.5 数字信息序列的扰码与解扰	204
8.4.6 噪声产生器	205
8.4.7 时延测量	205
习题	206
第 9 章 模拟信号的数字化	207
9.1 模拟信号数字化的基本原理	207
9.2 抽样以及抽样定理	208
9.2.1 低通信号的采样定理	209
9.2.2 带通信号的采样定理	210
9.3 均匀量化	213
9.4 最优量化	217
9.5 对数量化	218
9.6 A 率 μ 率折线近似、PCM、复用	219
9.6.1 A 率 13 折线压扩	219
9.6.2 PCM 的编码	221
9.6.3 时分复用原理	223
习题	224
第 10 章 信道编码	226
10.1 线性分组码	227
10.1.1 基本概念	227
10.1.2 线性分组码编码方程与生成矩阵 G	229
10.1.3 线性分组码监督方程与监督矩阵 H	232
10.1.4 校正子、错误图样与译码	233
10.1.5 汉明码	236
10.2 循环码	237
10.2.1 基本概念	237
10.2.2 码多项式	237
10.2.3 循环码的生成多项式和生成矩阵	239
10.2.4 循环码的监督多项式和监督矩阵	240
10.2.5 循环码的编码方法 (系统码)	241
10.2.6 循环码的译码	242
10.3 CRC 循环冗余校验码	243
10.4 卷积码	244
10.4.1 卷积码的编码	244
10.5 卷积码的译码算法	247
10.5.1 最大似然译码	247
10.5.2 Viterbi 译码	248
习题	250
第 11 章 通信网的基本知识	252
11.1 引言	252
11.2 通信网的分类和性能要求	252
11.2.1 通信网的分类	253
11.2.2 通信网的性能指标	255
11.3 通信网中的交换	255
11.3.1 电路转接	256
11.3.2 信息转接	257
11.3.3 多址接入 (MA)	259
11.4 信令和协议	260
11.4.1 电话信令	260
11.4.2 数据网协议	261
11.5 通信网的发展	264
习题	264

19世纪,涌现出一系列电磁学方面的重大发现和发明,开创了人类历史上采用电信号通信的新时代。从此,电信号通信系统渗透到人们工作生活的方方面面,对人类社会产生了极大的影响。

在这个时期,电磁学理论有了重大发现,包括电磁感应、电磁场和麦克斯韦方程,建立了经典电磁学理论。

迈克尔·法拉第(Michael Faraday, 公元1791—公元1867),是一位英国物理学家、化学家。1831法拉第发现,一块磁铁穿过一个闭合线路时,线路内就会有电流产生,这个效应叫做电磁感应。

1837年法拉第引入了电场和磁场的概念,更新了牛顿力学“超距作用”的传统观念。1838年,他提出了电力线的概念,用来解释电和磁现象。1843年,法拉第用“冰桶实验”证明了电荷守恒定律。1852年,他又引进了磁力线的概念,为经典电磁学理论的建立奠定了基础。

1864年詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell 公元1831~公元1879)创立了经典电磁学理论。在麦克斯韦以前,人们已经对电和磁这两个领域进行了广泛的研究,获得了许多发现和实验成果,不过完整统一的理论还没有形成。

麦克斯韦给出了一组简短四元方程组,准确地描绘出电磁场的特性及其相互作用的关系。建立了完整的电磁学理论体系,揭示了光、电、磁现象的本质的统一性,完成了物理学的又一次大统一。麦克斯韦的电磁学理论预言了电磁波的存在,促使了后来无线通信的出现。

经典电磁理论是建立在前人的大量工作基础之上的,库仑、高斯、欧姆、安培、毕奥、萨伐尔、法拉第等的一系列发现和实验成果为这一理论做出了卓越的贡献。

19世纪,在经典电磁学理论创立和发展的同时,出现了采用电信号的通信系统,开创了通信的新时代。电磁学实验和理论在这一时期的重大发现,直接促进和影响了电信号通信系统的发明和发展。

19世纪中期以前的几千年来,通信技术长期停滞不前。即使是外敌入侵、边城告急,除了狼烟报警之外,最快的办法也不过是驿站快马传送文书。17世纪中期,英国海军推行了旗语,18世纪末,法国政府建立了信号机体系,这才在一定程度上解决了海陆快速传送消息的困难。

通信技术关键性的变革发生在 19 世纪中期。在这个时期，人们发明了用电信号通信的系统，包括有线电报、电话和无线电报。

1832 年秋天，美国人莫尔斯（Samuel Finley Breese Morse）乘船在大西洋上旅行的时候，听到一位医生给旅客们讲电磁铁原理，受到了很大的启发，开始研究投身于电学研究领域，致力于发明“用电通信”的设备。

经过数年的努力，莫尔斯终于试制成功了电报机。莫尔斯用一对金属导线连接位于两个不同地点的发报机和收报机，用电信号传输消息。莫尔斯还在助手的帮助下，设计出了利用“点”、“划”和“间隔”（实际上就是时间长短不一的电脉冲信号）的不同组合来表示字母、数字、标点和符号的代码系统，莫尔斯电码。

1844 年 5 月 24 日，世界上第一封电报，通过事先架设的电报线路，从华盛顿发送到了 64 公里外的巴尔的摩城，这封电报的内容是圣经中的诗句：“上帝创造了何等的奇迹”。莫尔斯发明的有线电报是人类历史上第一种电信号通信系统。第一封电报成功发送以后，有线电报很快得到了推广。

在莫尔斯电报发明后，人们开始探索用电磁信号直接传递语音。

安东尼奥·梅乌奇（Antonio Meucci, 1808-1889），1849 年，在进行电生理学研究时，偶然发现了他使用的一个金属导线连接的系统传输了语音，之后着手研究被他称之为“会说话的电报机”的装置。1855 年，梅乌奇已经建立了一个常设电话系统，可以把语音在不同的房间或者建筑物之间传输。梅乌奇是实际上的电话发明人。

当时，亚历山大·格雷厄姆·贝尔（Alexander Graham Bell, 1847-1922），也在进行电话的研究。1875 年 6 月 2 日，贝尔和他的助手在实验室中清晰地传输了语音。1876 年 3 月 3 日，贝尔的专利申请被批准。两年后的 1878 年，贝尔在美国波士顿和相距 300 多公里的纽约之间进行了首次成功的长途电话实验。1877 年，在波士顿设的第一条电话线路开通了，也就在这一年，有人第一次用电话给《波士顿环球报》发送了新闻消息，从此开始了公众使用电话的时代。

有线电报和电话发明之后不久，无线电报就出现了。1894 年，伽利尔摩·马可尼（Guglielmo Marchese Marconi, 1874.4.25-1937），了解到海因利希·赫兹几年前所做的实验，这些实验验证了麦克斯韦预言的电磁波，电磁波以光速在空中传播。马可尼很快就想到可以发明一种新的通信系统，利用电磁波向远距离发送信号并且无需架设线路。马可尼在 1895 年发明了无线电通信设备，1896 年在英国进行了 14.4 公里的通信试验成功，并取得专利。

通信技术的又一次重大进展，发生在 20 世纪 40 年代，在这个时候，克劳德·香农（Claude Elwood Shannon, 1916—2001）创立了信息论，为现代通信技术的发展奠定了基础。

1948 年香农在 Bell System Technical Journal（贝尔系统技术杂志）上发表了文章《A Mathematical Theory of Communication》，1949 年，香农又在该杂志上发表了另一论文《Communication In The Presence Of Noise》。这两篇文章阐明了通信的基本问题，给出了通信系统的模型，明确了信息的概念，提出了信息量的数学表达式，并解决了信道容量、信源统计特性、信源编码、信道编码等一系列基本技术问题。香农的这两篇文章奠定了信息论的基础。

信息论创立以后，通信技术开始了新的发展阶段。此后，卫星通信、程控数字交换机、光纤通信系统投入使用；数字网络的公用业务获得广泛应用；个人计算机和计算机局域网出现；网络体系结构国际标准陆续制定；出现了蜂窝电话系统。

通信系统发展到今天，形成了适应各种性能要求和通信环境的多种形式，涉及大量纷繁

复杂的问题。而且随着技术的发展和应用的变化,不断面对新的问题。《通信原理》是为通信工程的初学者设立的一个通信科学技术的入门课程,描述了通信系统中的一些最基本的问题和解决方法,为进一步学习奠定基础。

把消息从一个点通过介质传输到另外一个点,是所有通信系统都要完成的一个基本功能。这样的消息传输是如何进行的?通信原理是这个问题的一个初步的回答。

通常的通信系统,由各种功能的电路构成;而信息,也就是要传输的主体,由各种形式的信号携带。信号在通信系统中,由各种电路来处理,如放大、滤波、混频等。因而,信号的传输过程,涉及两个层面的问题,一个层面是信号在传输过程中,形式上的变化;另外一个层面,是这些变化如何用具体的电路来实现,即电路的具体设计问题。前者可以抽象成数学层面的问题,信号由函数表示,信号在电路中的变化可以归结为函数的映射或者运算,这一类问题,就是通信原理讨论的内容;后者则归结为电子电路的设计问题。

通信原理这门课程,讨论信息的传输原理,并不涉及具体的电路,集中关注信息在数学上的表达、特性和变化,因而从某种程度上来说,通信原理是信息传输的数学原理。

原始的消息,比如一段语音,要在通信系统里传输,首先要解决的问题就是用什么样的信号来表示消息。与此相关联的问题包括表达的效率如何,是否有失真,失真的程度等。

携带信息的信号,可能在开放的空间传输(比如一对对讲机,再比如卫星和地面站之间的通信),也可能在一段电缆上传输(比如电话机和电话交换机之间的信号传输),还可能在一段光纤上传输。不同的传输介质,有不同的特性,对信号的影响也不相同。因而,信道特性的初步研究也是通信原理讨论的问题之一。

设定传输介质的性质后,就需要考虑采用什么形式传输信号了。比如在开放空间做介质的情况下,需要高频率的电磁波携带信息,也就是说,对信号的频率范围提出的具体的要求。把表示原始信息的信号转变成适合在信道里面传输的信号,就是通信系统需要完成的功能之一,通常将这个功能称之为调制。调制后的信号传输的接收端,还需要做调制的逆变换,恢复成表达原始信息的信号形式,原始信息就是通信系统要传输的信号。这一逆变换的过程就称为解调。在通信原理课程中,我们关注的是信号的形式,以及不同的信号之间变换的数学方法。

用离散的符号或者符号序列表达信息,传输离散符号或者序列的通信系统,通常称之为数字通信系统。离散的符号(或者符号序列),称之为数字信号,这样的数字信号,是抽象的符号。在通信系统里,离散的符号需要用具体的信号来表达,这样的信号必然是时间的函数,这样的信号,习惯上也称之为数字信号,不过这种信号实际上有时间长度,有幅度,是一个具体的波形。离散符号序列及其对应的信号如图 1-1 所示。

数字通信系统中采用数字信号表达信息。对于数字信号,可以更方便地存储和运算,因而可以有更强的处理方法。其中之一就是纠错编码或者称为信道编码。纠错编码通过再增加一些冗余信息,达到发现传输中产生的错误或者纠正错误的目的。能够采用纠错编码技术,是数字通信系统的优势之一。

无论是调制还是信道编码,都可以看成是信号的变换问题,其目的是为了获取更好的性能,因而有些资料上,把调制和信道编码通常称为“编码”。

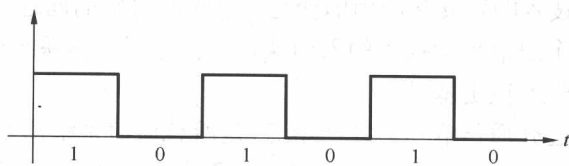


图 1-1 符号序列及其对应的信号

通信原理中大部分的内容就是“编码”，也就是各种信号的变换问题，包括信源编码、调制和信道编码。除此以外，还涉及的相关问题有：信号的特性、信道的特性、均衡、符号同步、以及部分信息论的概念等。

本书的编写，尽量避免复杂的数学推导和描述，以方便读者阅读；然而下列先修课程与通信原理高度相关，对这些课程的熟练掌握，非常有助于学习和理解本书中的内容。这些先修课程主要包括“高等数学”、“概率论与随机过程”和“信号与系统”。

通信系统的电路中，消息是用各种形式的电压、电流的波形来表达的，这些波形我们称之为信号。通常使用数学方法来描述这些信号，如正弦信号可以用时间函数 $f(t) = \sin 2\pi f_c t$ 描述，这时，时间函数 $f(t)$ 也被称为信号。

在通信系统中可以看到各种各样的信号，其中有一些信号可以用确定的时间函数来描述，我们称之为确定信号。比如正弦振荡器的输出，就可以表示为一个以时间为自变量的正弦函数。确定信号在给定的时刻，确定信号的值是确定的。

2.1 确定信号

2.1.1 确定信号的时域表达

确定信号可以表达为确定的时间函数 $f(t)$ 。

常见的确定信号有正弦信号、单位阶跃信号、方波脉冲信号、三角信号、 $\sin c$ 信号、符号函数、单位冲击信号等。

正弦信号：

$$x(t) = A \cos(2\pi f_0 t + \theta) \quad (2.1)$$

其中， A 、 f_0 和 θ 分别为正弦信号的幅度、频率和初始相角。正弦信号如图 2-1 所示。

单位阶跃信号 (Unit-Step)：

$$u(t) = \begin{cases} 1 & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

单位阶跃信号的波形如图 2-2 所示。

方波脉冲信号：

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1 & -\frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2.3)$$

方波脉冲信号的波形如图 2-3 所示。

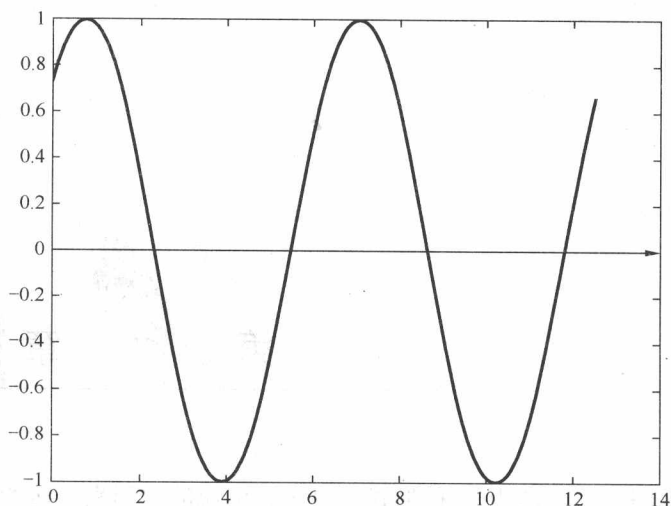


图 2-1 正弦信号

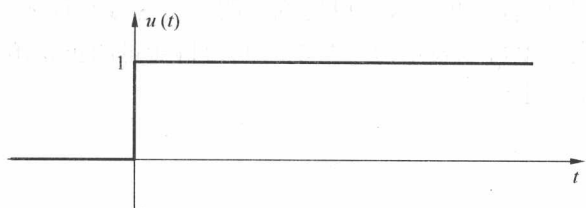


图 2-2 单位阶跃信号

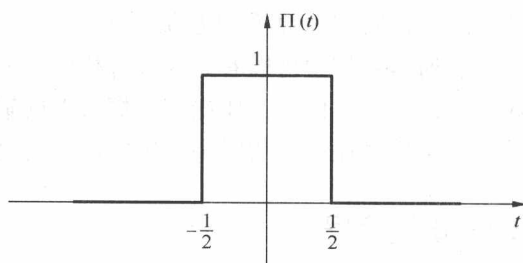


图 2-3 方波脉冲信号

三角信号:

$$\Lambda(t) = \begin{cases} t+1 & -1 \leq t \leq 0 \\ -t+1 & 0 \leq t \leq 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (2.4)$$

三角信号的波形如图 2-4 所示。

sinc 信号:

$$\text{sinc}(t) = \begin{cases} \frac{\sin(\pi t)}{\pi t} & t \neq 0 \\ 1 & t = 0 \end{cases} \quad (2.5)$$

sinc 函数也称为抽样函数, 是一个偶函数。它在 $t=0$ 时取得最大值 1, 在 t 为非零整数时, 即 $t = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$ 时, 值为零。 sinc 信号的波形如图 2-5 所示。

符号函数:

$$\text{sgn}(t) = \begin{cases} 1 & t > 0 \\ -1 & t < 0 \\ 0 & t = 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

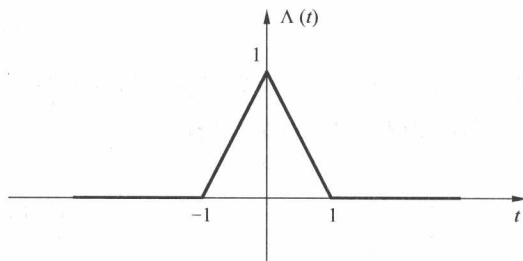


图 2-4 三角信号

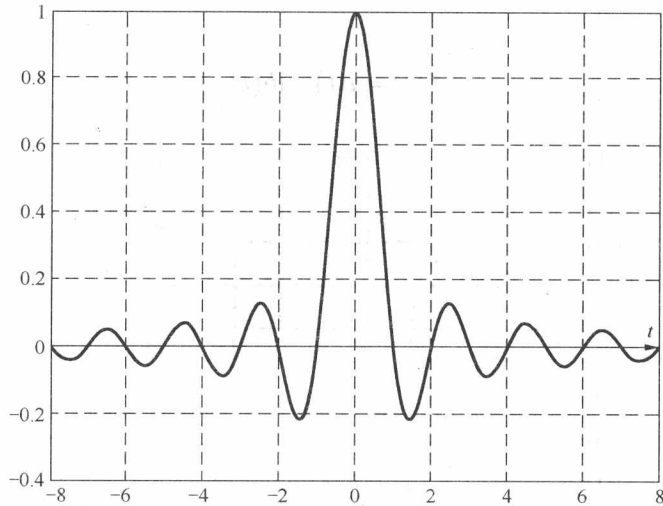


图 2-5 sinc 信号

符号函数的波形如图 2-6 所示。

单位冲击信号：

单位冲击信号 $\delta(t)$ 定义成满足下面等式的信号：

$$x(t) = x(t) * \delta(t) \quad (2.7)$$

即任意确定信号与 $\delta(t)$ 的卷积还等于它本身。

信号 $\delta(t)$ 可以看成是一个数学模型，描述持续时间趋近零，而幅度趋近无穷大的一个“冲击”。从严格的数学意义上来说，它并不是一个函数。 $\delta(t)$ 是恒等系统的冲击响应，通常用图 2-7 表示单位冲击信号。

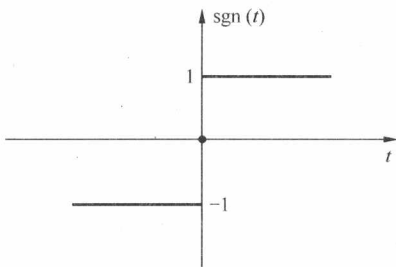


图 2-6 符号函数

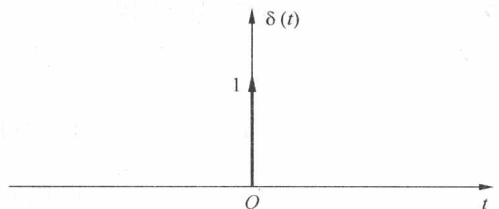


图 2-7 单位冲击信号

一种直观的解释为， $\delta(t)$ 可以看成是某种函数，如函数 $\frac{1}{\varepsilon} \Pi\left(\frac{t}{\varepsilon}\right)$ ，当 ε 趋近零时的极限。

ε 趋近零时，这个函数的宽度趋近于零，幅度趋近于无穷大，而面积保持不变。图 2-8 所示为这一趋近过程的解释。图中给出了两种函数趋近 $\delta(t)$ 的过程，这两种函数分别为方波脉冲信号 $\Pi(t)$ 和三角信号 $\Lambda(t)$ 。

确定信号可能为实信号，用实函数表示；确定信号也可能为复信号，则可以用复函数来表示，即

$$f(t) = a(t) + jb(t) \quad (2.8)$$

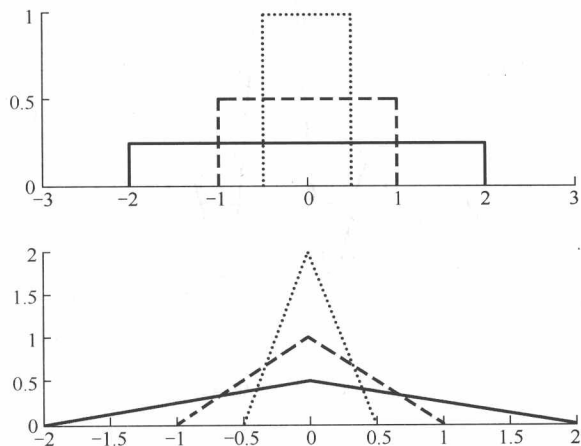


图 2-8 冲击函数的趋近

式中， $a(t)$ 为实部， $b(t)$ 为虚部，均为实函数。复信号还可以表达成极坐标的形式，即

$$f(t) = a(t)e^{j\varphi(t)} \quad (2.9)$$

式(2.9)中， $a(t)$ 为复信号的幅度， $\varphi(t)$ 为复信号的相角。例如，复指数信号 $f(t) = Ae^{j2\pi f_0 t + \theta}$ 。

例 2.1 求函数 $(t-3) \cdot \delta(t)$ 的值。

解：

$$(t-3) \cdot \delta(t) = -3\delta(t)$$

例 2.2 求积分 $\int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \delta(t-t_0) dt$ 。

解：

$$\begin{aligned} & \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \delta(t-t_0) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t_0) \delta(t-t_0) dt \\ &= \phi(t_0) \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t-t_0) dt \\ &= \phi(t_0) \end{aligned}$$

2.1.2 确定信号的功率和能量

通常，我们用确定函数 $f(t)$ 表示确定信号或者随机信号的一个实现。其对应的实际物理信号，可能是电路中某两点之间的瞬时电势差，也就是这两点之间的电压；也可能是电路中

某个电流通路中的瞬时电流强度。需要注意的是,这种信号的表示,并没有给出电压或者电流的单位。信号究竟是电流还是电压,单位是什么,在多数情况下并不影响对通信系统的分析,实际上,我们更关心信号的变化规律。

假定信号 $f(t)$ 为电压信号,单位为伏特 (V), 或者是一个电流信号,单位为安培 (A), 将信号 $f(t)$ 加载到一个 1Ω 的电阻上。

当 $f(t)$ 为电压信号时,其加载到 1Ω 的电阻上,对应的电流为 $f(t)$ 安培,此时以瓦特为单位的信号的瞬时功率为

$$P(t) = f^2(t) \quad (2.10)$$

当 $f(t)$ 为电流信号时,其加载到 1Ω 的电阻上,对应的电压为 $f(t)$ 伏特,此时信号的瞬时功率 $P(t)$ 还是可以用式 (2.10) 来表达。

给定信号 $f(t)$, 我们用式 (2.10) 定义其瞬时功率。

信号 $f(t)$ 的能量,可以通过其瞬时功率的时间积分得到,即

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} P(t) dt = \int_{-\infty}^{\infty} f^2(t) dt \quad (2.11)$$

我们还可以求信号的平均功率。若信号 $f(t)$ 的定义域为 $[-T, T]$, 则其平均功率为

$$P = \frac{E}{2T} = \frac{\int_{-T}^T f^2(t) dt}{2T} \quad (2.12)$$

当信号 $f(t)$ 的定义域为 $[-\infty, \infty]$ 时,则平均功率为

$$P = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{E}{2T} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_{-T}^T f^2(t) dt}{2T} \quad (2.13)$$

例 2.3 求信号 $x(t) = A + B \cos(2\pi f_0 t + \theta)$ 的平均功率,其中 A 和 B 为常数。

解:

$$\begin{aligned} P_x &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} [A + B \cos(2\pi f_0 t + \theta)]^2 dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} [A^2 + 2AB \cos(2\pi f_0 t + \theta) + B^2 \cos^2(2\pi f_0 t + \theta)] dt \\ &= A^2 + \frac{B^2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} [\cos^2(2\pi f_0 t + \theta)] dt \\ &= A^2 + \frac{B^2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \left[\frac{1 + \cos(4\pi f_0 t + 2\theta)}{2} \right] dt \\ &= A^2 + \frac{B^2}{2} \end{aligned}$$