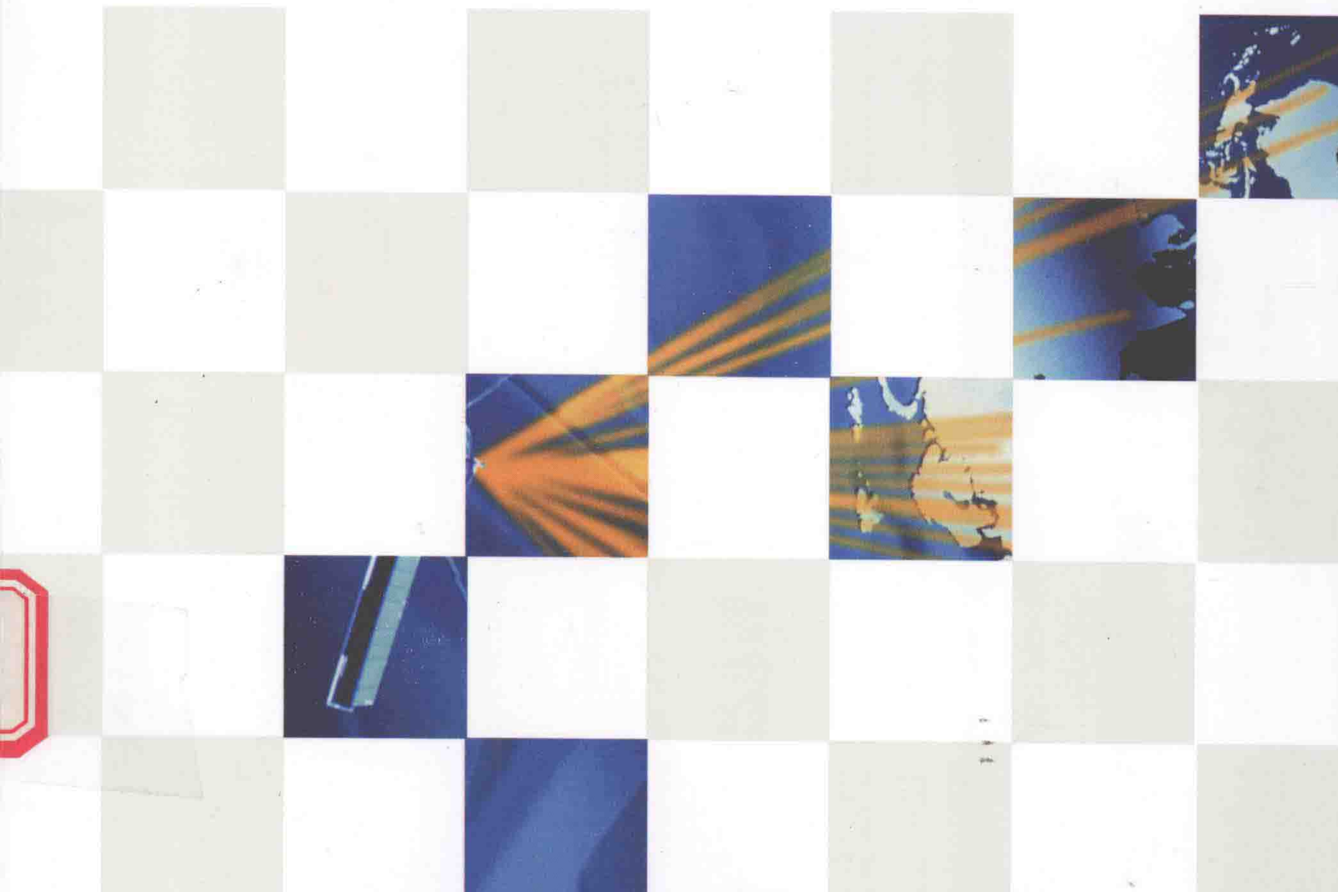
高等学校教材

现代通信原理

第三版

罗新民　薛少丽　田　琛　张　莹　编



高等教育出版社

第 1 章

绪　论

1.1　通信技术的发展和展望

物质、能量和信息是构成社会的三大基本要素。当前,人类社会已步入了“信息社会”,一场信息化革命的风暴正席卷全球。这是继农业革命、工业革命之后的又一次改变人类社会进程的伟大革命。在信息社会,人们无需再像以前那样将主要的时间和精力用于物质、能源的开发和利用上,而是以更多的精力与信息打交道。信息社会的最主要特征是,信息已成为一种重要的社会资源。信息社会与工业社会、农业社会的最大差异在于信息已成为人类生存及社会进步的重要推动力。信息的开发和利用已成为社会生产力发展的重要标志。

现代通信系统起着信息传输和交换的作用,在信息社会中更显示出它的重要性,通信系统可视为信息社会的生命线。通信技术的发展代表着人类社会的文明和进步,因此从事通信方面工作的技术人员应该了解通信技术的过去和现在,并能预测未来的发展趋势。

自人类存在以来,在生存斗争中总要进行思想交流和消息的传递。远古时代的人类用表情和动作进行信息交换,这是人类最原始的通信。在漫长的生活中,人类创造了语言和文字,进而用语言和文字(书信)进行消息的传递。

在电信号出现之前,人们还创造了许多消息的传递方式,如古代的烽火台、金鼓、旌旗、航行用的信号灯等。这些方式可以在较远的距离之间及时地完成消息的传递。

自从 1800 年伏打(Volta)发明电源以来,人们就试图用电技术进行通信。1837 年,莫尔斯(Morse)发明了利用电信号的通信方式——有线电报。这种通信方式利用导线中电流的有、无来代表传号和空号,并利用传号和空号的长短编码来传递信息。电报的发明为人类利用电技术进行通信的历史揭开了第一页。当电磁感应现象被发现后,贝尔(A. G. Bell)于 1876 年利用电磁感应的原理发明了电话机。由于电话直接利用导线上电流的强弱来传送语

音信号,因而使通信技术的发展又前进了一大步,这种通信方式一直保留到现在。但这种有线通信系统要花费很大的代价建造线路,在有些情况下甚至是难以实现的。

1864 年麦克斯韦(Maxwell)预言了电磁波辐射的存在,1887 年赫兹(Hertz)通过实验证实了这一预言,这为现代无线电通信技术提供了理论根据。无线电波可以在大气媒质中传播,不需要价格昂贵的线路投资,因而这一理论的创立大大推动了无线电通信技术的发展。

在实践中,人们发现正弦波信号易于产生和控制,所以在 20 世纪初期就出现了用高频正弦波作为载波的幅度调制方式,这就是 1918 年出现的调幅(AM)技术。AM 通信方式的出现,揭开了通信技术发展的新篇章。AM 通信方式使点对点通信发展到点对面的通信(如广播),它促进了人类社会文化交流、宣传教育的发展,深刻地影响着人们的生活。

采用调幅方式传送信号容易受到噪声干扰,使信号失真,影响通信质量。为了提高抗干扰能力,1936 年人们发明了调频(FM)技术,FM 不仅提高了通信系统的抗干扰能力,而且大大推动了移动通信技术的发展。AM 和 FM 方式的应用标志着模拟通信时代的到来。

数字通信不仅能实现人与人、人与机器、机器与机器之间的通信和数据交换功能,而且具有比模拟通信系统更好的性能。1928 年奈奎斯特(Nyquist)提出了著名的抽样定理,1937 年瑞维斯(A. H. Reeves)发明了 PCM(脉冲编码调制)通信技术,这些都为数字通信系统的发展奠定了坚实的理论基础。但由于器件的限制,数字通信技术当时并未实现,直到晶体管出现后,1950 年贝尔实验室才生产出了第一台实用的 PCM 数字通信设备。

随着通信容量的增加,通信范围的扩大,1945 年英国物理学家克拉克(A. C. Clarke)提出了卫星通信的设想。1958 年人类发射了第一颗通信卫星,1962 年发射的同步通信卫星,为国际间大容量通信奠定了基础。

1960—1970 年间出现了光纤通信,光纤通信容量大,可靠性高。目前我国的光纤通信正处于推广和应用阶段。

20 世纪 70 年代出现的计算机通信网络,使数据通信得到迅速发展。今天,互联网已遍布了全球的每个角落。自 20 世纪 80 年代初开始,全数字化的综合业务数字网(ISDN)就成为通信界关注的焦点,ISDN 是一个服务于语音和数据通信业务的综合网络。1980 年发达国家就开通了 ISDN 实验网,1984 年原 CCITT[国际电话电报咨询委员会 ,ITU - T(国际电信联盟电信标准部)的前身。1993 年,ITU(国际电信联盟)进行改组,将 CCITT 改名为 ITU - T。]就提出了 ISDN 的功能、网络结构、接口及网络互连等方面的 I 系列建议,以后 ISDN 技术得到了迅速的发展。

20 世纪 90 年代,通信网络和信息化基础建设得到极大的发展,新的通信技术不断涌现,如同步数字序列(SDH)、异步传输模式(ATM)、第三代移动通信技术(3G)、IP 网络、蓝牙、WLAN、WiMax 及第四代移动通信技术 LTE - A 等。预计到本世纪中期,人类将进入通信的理想境界——个人通信网络(PCN)时代。个人通信是指任何人 (Whoever)能在任何时间 (Whenever)、任何地点 (Wherever), 以任意方式 (Whatever) 与任何他人 (Whomever) 进行所谓的“5W”通信的理想方式。

纵观通信技术的发展历程,可以看出通信技术经历了点到点的通信,再到多点之间的信息传输和交换,最后进入网络时代的发展过程。通信技术来源于社会经济发展的需求,反过来通信技术的发展又推动了社会的进步。同时还应当注意到,通信技术的发展离不开通信理论的指导。新的通信理论的出现,必然会带来通信技术的飞跃。当然,新技术的出现也将

推动理论的进一步发展。

1.2 信息、信息量与信道容量公式

1.2.1 消息、信号与信息

消息(message)是通信系统传输的对象。消息具有各种不同的形式和内容,如语音、图像、文字、数据及气象中的温度、天气等都是消息。消息由信源产生,并需要通过不同的传感器转换为电信号(简称为信号),才能在通信系统中传输。因此,信号(signal)是消息的运载工具,是消息的载体。

代表消息的信号,按其取值方式的不同,可以分为两类:一类为模拟信号,如由语音转换来的音频信号及由图像转换来的视频信号等,其电压和电流值是随时间连续变化的,因而模拟信号又称为连续信号;另一类为数字信号,如代表文字的编码及计算机输出的数据信号等,其电压和电流值仅取有限个离散值,因而数字信号又称为离散信号。模拟信号和数字信号最关键的区别是看信号取值是否离散,而不是看时间是否离散。模拟信号在时间上可以是离散的,数字信号在时间上也可以是连续的。

模拟信号和数字信号具有一个共同特点:信号取值随时间在随机地变化,这种随机变化具有不确定性,人们无法预测,这种“不可预测”的变化就是消息中包含的本质内容,称为信息(information)。因而通信的目的是传输消息中包含的信息。信息是一个含义广泛、抽象的概念。各种随机变化的消息都会有一定量的信息,如社会科学中的经济信息、生活信息,科研中的地震信息、气象信息等。

1.2.2 信息量

消息中包含的信息的大小用信息量来度量。消息中所含的信息量大小与消息发生的概率有密切关系。从直观上来说,一件事发生的概率越小,越使人们感到意外和惊奇,则这件事包含的信息量就越大。例如,如果有两条消息说:“今年的应届本科毕业生找工作比去年更难一些”及“今年的应届本科毕业生可以自愿攻读硕士学位,不需统考”,则后一条消息给大家带来的信息量更大些,因为这件事出现的概率很小。若消息出现的概率接近0,则此消息含有的信息量就趋于无穷大。当一个消息发生的概率为1时,即为必然的事件,则消息所含的信息量为0。由以上分析可以看出,消息中包含的信息量与消息出现的概率的倒数成比例。此外,同时获得多个消息时,得到的信息量应该是每条消息包含的信息量之和。

信息论中定义消息包含的信息量为消息出现概率的倒数的对数,即

$$I=\log_a\left(\frac{1}{P}\right)=-\log_a P \tag{1-2-1}$$

式中,I 为消息包含的信息量,P 为消息出现的概率,a 为对数的底。a 取值不同,信息量的单位不同。当 a 为2时,信息量的单位为bit(比特);当 a 为10时,单位为Hartley(哈特莱);当 a 为e时,单位为nat(奈特)。一般情况下,都以bit为信息量的单位,即取 $a=2$。例如,当消息出现的概率为 $P=1/2$ 时,此消息包含的信息量为1 bit。若有 M 个独立等概出现的消息,每个消息出现的概率为 $1/M$,则消息的信息量为

$$I=\log_2\left(\frac{1}{P}\right)=\log_2 1\bigg/\frac{1}{M}=\log_2 M(\text{bit}) \tag{1-2-2}$$

从工程的角度也可以对信息量进行定义。所谓从工程的角度,就是用传输消息时所需的最少的二进制脉冲的数目来衡量消息中包含信息量的大小。因此,信息量在工程上的定义是指传输该消息时所需的最少的二进制脉冲数。当有两个互相独立且等概出现的消息要传输时,要区别这两种消息,最少需要 1 位二进制脉冲,因此该消息出现带来的信息量为 1 bit。若要传输 4 个独立等概的消息之一,则至少需 2 位二进制脉冲,因此,消息具有 2 个比特的信息量。若有 M 个独立等概的消息之一要传送,且满足 $M=2^k(k=1,2,3,\cdots)$ 时,此消息需用 k 个二进制脉冲传递,即此消息包含的信息量为 k bit。实际上,该消息的信息量为

$$I=\log_2 M=\log_2 2^k=k\ (\text{bit}) \tag{1-2-3}$$

由上可以看出,工程上定义的信息量与直观定义的信息量是一致的。

以上讨论了离散消息的信息量。抽样定理说明,一个频带受限的连续信号,可用每秒一定数目的离散抽样脉冲值代替。这些离散的脉冲抽样值,可用二进制的脉冲序列表示。可见以上给出的信息量定义,同样也适用于连续消息。

1.2.3 平均信息量

一般来说,信源可以产生多个独立的消息(或符号),每个消息发生的概率可能并不相等,所以每个消息的信息量也不相同。这种情况下,通常考虑每个消息(或符号)所含信息量的统计平均值,称为信源的平均信息量。

信源的平均信息量的计算是由每个消息的信息量按概率加权求和得到的。如一个信源由 A、B、C 三种符号组成,出现 A 的概率为 $P(\text{A})$;出现 B 的概率为 $P(\text{B})$;出现 C 的概率为 $P(\text{C})$,则信源的平均信息量为

$$\bar{I}=-[P(\text{A})\log_2 P(\text{A})+P(\text{B})\log_2 P(\text{B})+P(\text{C})\log_2 P(\text{C})] \tag{1-2-4}$$

更一般地说,在由 n 个独立的符号 $x_1,x_2,\cdots,x_n$ 所构成的信源中,每个符号出现的概率分别为 $P(x_1),P(x_2),\cdots,P(x_n)$,且 $\sum_{i=1}^{n}P(x_i)=1$,则此信源的平均信息量为

$$H(x)=-\sum_{i=1}^{n}P(x_i)\log_2 P(x_i)\quad(\text{bit/符号}) \tag{1-2-5}$$

式中,$H(x)$ 为信源的平均信息量。由于 $H(x)$ 的定义与统计热力学中熵的定义相似,所以称 $H(x)$ 为信源的熵(Entropy),其单位为 bit/符号。

例 1.1 某信源的符号集由 A、B、C、D 和 E 组成,设每一个符号独立出现,出现的概率分别为 1/4、1/8、1/8、3/16 和 5/16。试求该信源的平均信息量。

解:信源的平均信息量即为信源的熵,由式(1-2-5)得

$$\begin{aligned}H(x)&=-\sum_{i=1}^{n}P(x_i)\log_2 P(x_i)\\&=-\left[\frac{1}{4}\log_2\frac{1}{4}+\frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8}+\frac{1}{8}\log_2\frac{1}{8}+\frac{3}{16}\log_2\frac{3}{16}+\frac{5}{16}\log_2\frac{5}{16}\right]\\&=2.23\quad\text{bit/符号}\end{aligned}$$

如果信源中各符号的出现是统计相关的,则式(1-2-5)就不再适用了,这时必须用条件

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

概率来计算信源的平均信息量。如果只考虑前后相邻的两个符号的统计相关特性，则前一个符号为 x_i、后一个符号为 x_j 的条件平均信息量为

$$
\begin{aligned}
H(x_j \mid x_i) &= \sum_{i=1}^{n} P(x_i) \sum_{j=1}^{n} [-P(x_j \mid x_i) \log_2 P(x_j \mid x_i)] \\
&= -\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} [P(x_i) P(x_j \mid x_i) \log_2 P(x_j \mid x_i)] \qquad (1\text{-}2\text{-}6)
\end{aligned}
$$

式中，$H(x_j \mid x_i)$ 为信源的条件平均信息量，$P(x_j \mid x_i)$ 为前一个符号为 x_i、后一个符号为 x_j 的条件概率。条件平均信息量也称为条件信源熵。

例 1.2 某离散信源由 A、B 两种符号组成，其转移概率矩阵为

$$
\begin{bmatrix} P(\mathrm{A} \mid \mathrm{A}) & P(\mathrm{A} \mid \mathrm{B}) \\ P(\mathrm{B} \mid \mathrm{A}) & P(\mathrm{B} \mid \mathrm{B}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 \\ 0.2 & 0.9 \end{bmatrix}
$$

且已知 $P(\mathrm{A}) = 1/4$，$P(\mathrm{B}) = 3/4$。试求该信源的平均信息量。

解：由式(1-2-6)，可得该信源的条件平均信息量为

$$
\begin{aligned}
H(x_j \mid x_i) &= -\sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{2} [P(x_i) P(x_j \mid x_i) \log_2 P(x_j \mid x_i)] \\
&= -P(\mathrm{A})[P(\mathrm{A} \mid \mathrm{A}) \log_2 P(\mathrm{A} \mid \mathrm{A}) + P(\mathrm{B} \mid \mathrm{A}) \log_2 P(\mathrm{B} \mid \mathrm{A})] \\
&\quad - P(\mathrm{B})[P(\mathrm{A} \mid \mathrm{B}) \log_2 P(\mathrm{A} \mid \mathrm{B}) + P(\mathrm{B} \mid \mathrm{B}) \log_2 P(\mathrm{B} \mid \mathrm{B})] \\
&= 0.532 \quad \text{bit/符号}
\end{aligned}
$$

当 A、B 两个符号独立出现时，信源的平均信息量为

$$
\begin{aligned}
H(x) &= -\sum_{i=1}^{2} P(x_i) \log_2 P(x_i) \\
&= -\frac{1}{4} \log_2 \frac{1}{4} - \frac{3}{4} \log_2 \frac{3}{4} \\
&= 0.81 \quad \text{bit/符号}
\end{aligned}
$$

这一结果说明，符号间统计独立时的信源熵大于符号间统计相关时的信源熵。也就是说，符号间的统计相关性将使信源的平均信息量减小。

由式(1-2-5)可以看出，若信源中各符号的出现独立并且等概时，即每个符号独立出现，出现概率为 $P = 1/n$，则这时 $H(x)$ 将具有最大值，为

$$
H(x) = -\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{n} \log_2 \frac{1}{n} = \log_2 n \qquad (1\text{-}2\text{-}7)
$$

这个结论是容易理解的，当各符号等概出现时，哪一个符号将发生是最难预测的，即不确定性最大，所以平均信息量也最大。

以上介绍的是产生离散的、相互独立消息的离散信源平均信息量的定义和计算方法。对连续信源的平均信息量，可采用概率密度函数的加权积分来计算。若连续消息出现的概率密度为 $f(x)$，则定义连续消息的相对熵（平均信息量）为

$$
H(x) = -\int_{-\infty}^{\infty} f(x) \log_e f(x) \, \mathrm{d}x \qquad (1\text{-}2\text{-}8)
$$

限于篇幅，这里不再进一步讨论。

1.3 通信系统模型

1.3.1 通信系统一般模型

通信的目的是传输消息中包含的信息。由于消息具有许多不同的类型及不同的传输方式,因而产生了种类繁多的通信系统。为了分析信息传输的实质,可以把各类通信系统共性的及基本的组成概括为一个一般模型。不管何种通信系统,信息总是由发送端,通过信道,传输到接收端的。因此,通信系统可用如图 1-3-1所示的模型来描述。

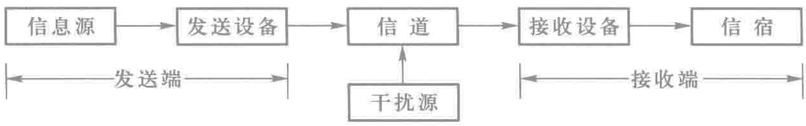


图 1-3-1 通信系统一般模型

图 1-3-1 所示的通信系统模型中,包括 5 个主要组成部分:信息源、发送设备、信道、接收设备和信宿。

信息源,简称为信源,是发出消息的设备,它把原始的消息转换为电信号。原始消息有各种类型,如语音、图像、数据、文字、图片等。这些消息由各类传感器变为可在通信系统中传输的信号。由信源产生的信号所占用的频带称为基本频带,通常具有较低的频谱分量,称这种信号为基带信号。基带信号的能量或功率集中在零频附近。

发送设备把信源输出的电信号转换为适合于信道传输的信号形式。如对音频信号来说,既可直接沿导线传输,也可将其调制到高频载波上,通过无线方式在自由空间中传输,这种转换都由发送设备完成。发送设备包括编码、调制及电平转换等部件。

由发送设备输出的信号进入信道进行传输。所谓信道是指传输信号的媒质。媒质可以是有线的,也可以是无线的。有线的媒质有双绞线、电缆、波导、光纤等。无线的媒质包括各个频段的电磁波,如:长波、中波、短波、微波及光波等。表 1-3-1 中列出了常用的无线电波的波段划分及主要的应用情况。信号在信道的传输过程中,不可避免地会受到噪声的干扰。信道的特性和干扰是影响信号传输质量的关键因素之一。

表 1-3-1 通信频段划分及其应用

频率范围	符号	名 称	波 长	应 用
30 ~ 300 Hz	ELF	极低频	10^4 ~ 10^3 km	海底通信、电报
0.3 ~ 3 kHz	VF	音频	10^3 ~ 10^2 km	数据终端、有线通信
3 ~ 30 kHz	VLF	甚低频	10^2 ~ 10 km	导航、电话、电报、时标
30 ~ 300 kHz	LF	低频	10 ~ 1 km	导航、电力线通信、信标
0.3 ~ 3 MHz	MF	中频	10^3 ~ 10^2 m	广播、业余无线电、移动通信
3 ~ 30 MHz	HF	高频	10^2 ~ 10 m	国际定点通信、军用通信、广播、业余无线电
30 ~ 300 MHz	VHF	甚高频	10 ~ 1 m	电视、调频广播、移动通信、导航、空中交通管制

频率范围	符号	名　称	波　长	应　用
0.3～3 GHz	UHF	特高频	10^2～10 cm	电视、雷达、遥控遥测、点对点通信、移动通信
3～30 GHz	SHF	超高频	10～1 cm	卫星和空间通信、微波接力、雷达
30～300 GHz	EHF	极高频	10～1 mm	射电天文、雷达、微波接力
10^5～10^7 GHz		紫外、红外、可见光	3×10^{-3}～3×10^{-5} mm	光通信

信号经过信道的传输到达接收端。接收设备的作用是发送设备的逆变换。它包括解调器、解码器等,它把接收的信号恢复为原始的信号,送到信宿。

信宿是信息到达的目的地,信息通过接收终端把信号还原为原始的消息,或执行某个动作,或进行显示。

由于信源和信宿位于通信系统的两端,故又称为终端设备。

另外还有一种不同类型的通信系统,如雷达、声呐及地震法勘探等测量系统。此类系统的模型如图 1-3-2 所示。

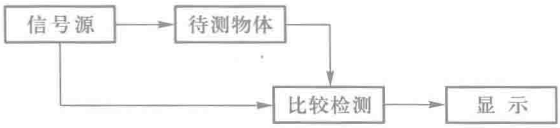


图 1-3-2　测量系统模型

这类系统模型主要由 4 个部分组成:信号源、待测物体(中介体)、信号检测(比较)部分和接收终端(显示)。这类系统中信号源发出的信号是已知的,系统主要测量信号经过中介体后的变化,从而判断中介体的特性。

1.3.2　通信系统的分类

各种通信系统由于使用的波段、传输的信号、调制方式等不同,故种类繁多。为进一步了解各类通信系统的特点,可按以下不同角度,将通信系统进行分类。

(1) 按消息的传输媒质划分,即按传输信道的不同,可分为两大类:一类是信号沿导线传输的通信系统,称为有线通信系统;另一类是信号通过自由空间传播的通信系统,称为无线通信系统。无线通信系统根据使用的波段不同又分为长波通信、中波通信、短波通信及微波通信系统等。

(2) 按消息和信号的特点,即按传送消息的物理特征分类,可分为电话通信、电报通信、图像通信和数据通信等系统。电话通信和数据通信是目前最普及、发展最快的通信网络。

(3) 按传输信号的特征分类,可分为两大类,即模拟通信和数字通信系统。在模拟通信系统中,传输信号的参数取值是随时间连续变化的模拟信号,如音频信号和视频信号等。传输中要求信号的波形失真尽量小。在数字通信系统中传输的信号是离散取值的数字信号。数字通信系统具有抗干扰性能好、便于计算机处理、易于加密和功耗低等优点,因此应用越来越广泛。

(4) 按调制方式,即按载波参数的变化不同,可分为三类:调幅(AM)、调频(FM)和调相(PM)通信系统。对数字通信系统来说,又称为幅移键控(ASK)、频移键控(FSK)和相移键控(PSK)通信系统。有时,信源输出的信号不需要调制,而直接进行传输,这类系统称为基带传输系统。相应地,把包含调制和解调过程的通信系统称为载波传输系统。

(5) 按消息传输的方式来划分,可分为单工通信、半双工通信和全双工通信系统。

单工通信系统中,消息只能单方向传输,如图1-3-3(a)所示。广播、无线寻呼和遥控系统就属于单工通信系统。

半双工通信系统中,通信的两端都可以发送和接收,但不能同时进行。即系统中要么A端发B端收,要么B端发A端收,如图1-3-3(b)所示。对讲机就是典型的半双工通信系统。

全双工通信系统中,通信的双方(两端)可同时发送和接收消息,即消息可同时在两个方向上传递,如图1-3-3(c)所示。电话就是典型的全双工通信系统。

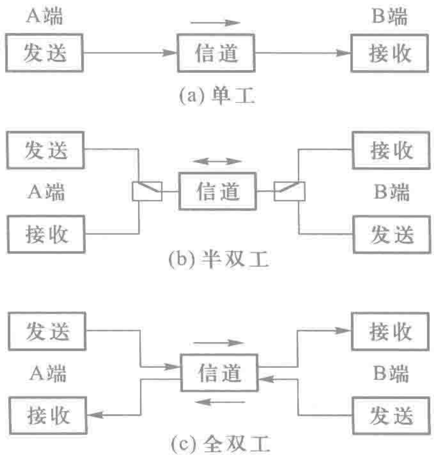


图1-3-3 通信方式示意图

(6) 按信道复用方式划分,可分为频分复用(FDM)、时分复用(TDM)、码分复用(CDM)及波分复用(WDM)等通信系统。通常模拟通信系统中采用频分复用方式,数字通信系统中采用时分复用方式,移动通信和卫星通信中采用码分复用方式,而光纤通信系统中常用波分复用方式。

1.3.3 模拟通信系统与数字通信系统

前面提到,通信系统中传输的信号可分为两类:模拟信号和数字信号。通常把传输模拟信号的通信系统称为模拟通信系统;而传输数字信号的通信系统称为数字通信系统 。模拟通信系统的模型如图1-3-4所示,此模型与图1-3-1类似,仅有的差别是把图1-3-1中的发送部分具体化为调制器,接收部分具体化为解调器。

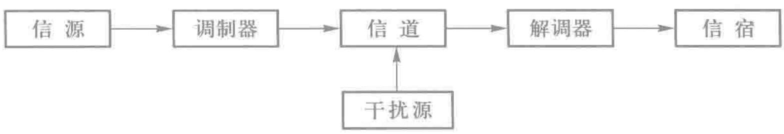


图1-3-4 模拟通信系统模型

数字通信系统的模型如图1-3-5所示。它可在一般模型的基础上具体化为7个部分。包括信源、编码器、调制器、信道、解调器、解码器及信宿。

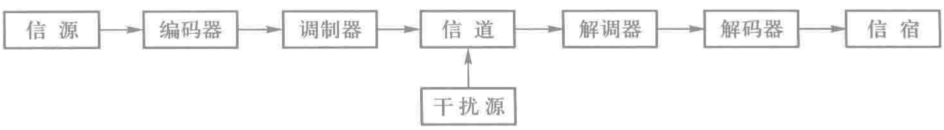


图1-3-5 数字通信系统模型

在数字通信系统中，编码分为信源编码和信道编码。信源编码的作用是将信源输出的信号变成精练的、无多余度的码元，目的在于提高通信的有效性。信道编码，也称为抗干扰编码或纠错编码，是通过人为地加入多余度，使信号在一定的干扰条件下，具有检测或纠正错码的能力，目的是提高通信的可靠性。另外编码部分还包括对数字信号的“加扰”和加密功能。解码是编码的逆过程。

图 1-3-4 和图 1-3-5 中调制器的作用是进行频谱变换，它将信源或编码器送来的基带信号变换为已调信号，以适合信道的传输。调制的过程还可以达到信道复用及提高传输质量的目的。解调是调制的逆变换，是将已调信号变换为基带信号的过程。

数字通信系统中为了保证正确地接收数字码元，还必须保证收发两端的同步，即步调一致。这主要由“码元同步”和“帧同步”来保证。

数字通信系统具有以下特点：① 抗干扰能力强，可靠性好；② 体积小，功耗低，易于集成；③ 便于进行各种数字信号处理；④ 有利于实现综合业务传输；⑤ 便于加密；⑥ 数字信号带宽比模拟信号宽。数字通信方式近 30 年来得到迅速发展，并成为未来通信技术的发展方向。

1.4 通信系统的主要性能指标

对通信系统进行综合评价或设计通信系统时，往往涉及许多性能指标，如系统的可靠性、有效性、适应性、经济性、标准性及使用维修的方便性等。这些指标从各方面衡量了通信系统的质量。但从信息传输的观点来看，通信的有效性和可靠性是系统最主要的性能指标。所谓通信的有效性是指系统传输的效率或信息传输的速率，即系统在单位时间、单位频带上传输信息量的多少，是描述系统传输信息的“速度” 指标。而通信的可靠性，则是指系统传输信息的准确程度或可靠程度，是描述系统传输信息的“质量”指标。在通信系统中，有效性和可靠性是互相制约的，相互矛盾的，可相互转化的。若要提高可靠性，可能引起有效性的下降；若使有效性提高，则可能引起可靠性的下降。因此实际系统中，只能在满足某一个指标要求的情况下，去尽量提高另一个指标。

1.4.1 有效性

在模拟通信系统中，通信的有效性常用信息传输时所用的带宽 B 来衡量。传输同样的信息，占用带宽增加，则有效性变低。若能利用同一带宽传送多路信号，则有效性就高。

在数字通信系统中，通信的有效性常用码元传输速率、信息传输速率以及系统频带利用率等来衡量。

码元传输速率又称码元速率或传码率，用 R_B 表示，它是指单位时间（每秒）内系统传输的码元符号的数目，单位为 Baud（波特）。例如，若系统每秒传送1 200个码元符号，则码元传输速率为 1 200 Baud。码元符号可以是二进制，也可以是多进制（M 进制）的，例如，$M=4$，8，…。

信息传输速率又称为信息速率或传信率，用 R_b 表示，它是指单位时间（每秒）内系统传送的信息量的多少，单位为 bit/s（比特每秒），简记为 b/s 或 bps。例如，若系统每秒传送的信息量为 2 400 bit，则信息传输速率 $R_b=2\ 400$ b/s。

码元速率 R_B 与信息速率 R_b 的关系是明显的。当码元符号为二进制时，每个码元符号包含的信息量就是一个比特，这时码元速率等于信息速率。

当码元符号采用 M 进制（一般 $M=2^k, k=1,2,\cdots$ 为正整数，即 M 为 2 的整数幂）时，每个码元符号包含的信息量为 $\log_2 M$ bit，这时有

$$R_b = R_B \log_2 M \tag{1-4-1}$$

或

$$R_B = \frac{R_b}{\log_2 M} \tag{1-4-2}$$

例如，若系统的码元速率为 1 200 Baud，当码元符号为二进制时，系统的信息速率是 1 200 b/s；当码元符号为四进制时，系统的信息速率是 2 400 b/s；当码元符号为八进制时，则系统的信息速率为 3 600 b/s。

有时为了进一步描述系统传输信息的效率，还定义系统频带利用率 ρ，系统频带利用率是指信息传输速率 R_b 与系统带宽 B 的比值，即 $\rho = R_b/B$，ρ 的单位是 b/s/Hz（比特每秒每赫兹），它表示单位频带上信息的传输速率。例如，若系统的信息传输速率 R_b 为 3 600 b/s，系统带宽 $B=3.6$ kHz，则 $\rho = R_b/B = 1$ b/s/Hz。系统频带利用率越高，则系统的传输效率越高。

1.4.2 可靠性

在模拟通信系统中，通信的可靠性是用接收端输出的信噪比 S/N 来衡量的，即接收端输出信号的平均功率 S 与噪声的平均功率 N 之比。信噪比不仅能衡量输出信号的失真程度，而且能衡量噪声对信号干扰的大小。输出信噪比大，说明信号的传输质量好，即系统的抗噪声能力强，可靠性高。

在数字通信系统中，描述通信可靠性的主要指标是误码率和误信率。

误码率是指接收端错误接收的码元数目与传输的总码元数目的比值，它表明系统传错码元的概率，常用 P_e 表示，即

$$P_e = \frac{\text{错误接收码元数}}{\text{传输码元总数}} \tag{1-4-3}$$

误信率，又称误比特率（BER，Bit Error Rate），是指码元的信息量在传输过程中被丢失的概率，常用 P_b 表示，即

$$P_b = \frac{\text{传错的比特数}}{\text{传输的比特总数}} \tag{1-4-4}$$

在二进制传输系统中，误码率 P_e 与误信率 P_b 是相等的。而在多进制（M 进制）传输系统中，可以证明，误信率 P_b 与误码率 P_e 的关系为

$$P_b = \frac{M}{2(M-1)} P_e \tag{1-4-5}$$

在设计通信系统时，总希望有效性和可靠性都很高，但实际系统中这两个性能指标是相互制约、相互矛盾的。不同的系统对于可靠性和有效性的要求是有所不同的，所以在设计通信系统时，对两种性能的不同要求要合理安排，相互兼顾。通信系统涉及的其他性能指标不是本教材的主要内容，这里就不再讨论了。

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

1.5 香农信道容量公式

信源的信息通过信道传递到接收端。在给定的信道条件下，信道传递信息的能力有多大呢？为了说明这个问题，信息论中定义了信道容量的概念。信道容量是指信道所能传输的最大信息速率，即

$$C = \max R \tag{1-5-1}$$

式中，C 为信道容量，R 为信息传输速率。在离散信道中，信源发出的离散消息（符号）通过信道传送到接收端。信道中的信息传输速率与信源的平均信息量、符号发送的速率以及信道中的干扰有关。由于信道中存在干扰，传递的信息会丢失，接收到的信息量会减少。

在无干扰信道中，信道会无丢失地传递信源发出的所有信息。此时，信道的信息传输速率为

$$R = rH(x) \tag{1-5-2}$$

式中，$H(x)$ 为信源的平均信息量，r 为信源每秒发送的符号个数。若信道中存在干扰，即有扰信道，这时接收端收到的每个符号的平均信息量应是信源的平均信息量减去信道传送中所丢失的信息量，即

$$H_R(x) = H(x) - H(x|y) \tag{1-5-3}$$

式中，$H_R(x)$ 为接收到一个符号的平均信息量；

$H(x)$ 为信源发送每个符号的平均信息量；

$H(x|y)$ 为发送一个符号时，在有扰信道中丢失的平均信息量。

若信道传送符号的速率为 r（符号数/s），则有扰信道中的信息传输速率为

$$R = r[H(x) - H(x|y)] \tag{1-5-4}$$

式中的 $H(x|y)$ 与信道的统计特性有关。

根据信道容量的定义，离散信道的信道容量应为

$$C = \max R = \max\{r[H(x) - H(x|y)]\} \tag{1-5-5}$$

对于连续信道来说，假设信道中存在加性高斯白色噪声（AWGN，Additive White Gaussian Noise），噪声功率为 N（W），信道的带宽为 B（Hz），信号的平均功率为 S（W），则信道容量为

$$C = B\log_2(1 + S/N) \tag{1-5-6}$$

上式就是著名的香农（Shannon）公式。

这里不严格证明香农公式，仅从工程的角度说明公式的正确性。在有扰连续信道中，每传送一个符号，需要一定幅度的脉冲。如果传送 M 种符号，则需用 M 种不同幅度的脉冲。若符号出现是等概的，则传送每种幅度的脉冲代表传送了 $\log_2 M$ bit 的信息量。为了提高传送脉冲的信息量，希望增加 M。但在传输信号功率受限的情况下，M 的增大会使各脉冲取值之间的量化分层间隔减小。当脉冲之间的间隔小到一定程度时，由于信道中噪声的干扰，接收端将难以分辨出发送的到底是哪一种幅度的脉冲，从而无法获得信息。若信道中白色噪声的功率为 N，则噪声的均方根电压值为 $\sqrt{N}$（设负载为 1 Ω）。为使脉冲的幅度分层数（或量化取值数）最多且能使接收端可分辨，则脉冲取值的最小间隔应大于或等于噪声的均方根电压值 $\sqrt{N}$。若信号的平均功率为 S，则接收端的总功率为 $S+N$，这时接收端信号的最大分层数为

$$M=\sqrt{S+N}/\sqrt{N}=(1+S/N)^{\frac{1}{2}} \tag{1-5-7}$$

设每种幅度出现的概率相等，则每种幅度的出现带来的信息量为

$$H(x)=\log_2 M=\log_2(1+S/N)^{\frac{1}{2}} \tag{1-5-8}$$

当信道带宽为 B 时，可以证明，信道中每秒最多可传送 $2B$ 个脉冲，即脉冲传输的最高速率 $r_{\max}=2B$。根据式(1-5-1)及式(1-5-2)，连续信道的信道容量为

$$C=2B\log_2(1+S/N)^{\frac{1}{2}}=B\log_2(1+S/N) \tag{1-5-9}$$

式中，S/N 为信噪比，$N=n_0B$，n_0 为噪声的单边功率谱密度。由式(1-5-9)看到，信道容量取决于 3 个要素，即带宽 B、信号功率 S 及噪声的功率谱密度 n_0。

由式(1-5-9)可见，当增加信道带宽 B、增加信号功率 S 或减小噪声功率 N 时，可使信道容量增大。但 S 不可能无限增加，在有扰信道中，由于噪声的功率谱密度 n_0 不等于 0，因此可适当调节带宽来增加信道容量。但是，应当注意，随着带宽 B 的增加，会使噪声功率 $N=n_0B$ 增加，从而使信道的容量减小。可以证明，带宽增大时，信道容量趋近于某一极限值。由式(1-5-9)有

$$\begin{aligned}\lim_{B\to\infty}C&=\lim_{B\to\infty}B\cdot\frac{n_0}{S}\cdot\frac{S}{n_0}\cdot\log_2\left(1+\frac{S}{n_0B}\right)\\&=\lim_{B\to\infty}\frac{n_0B}{S}\cdot\log_2\left(1+\frac{S}{n_0B}\right)\cdot\frac{S}{n_0}\end{aligned} \tag{1-5-10}$$

利用公式

$$\lim_{x\to\infty}x\log_2\left(1+\frac{1}{x}\right)=\log_2 e=1.44$$

则式(1-5-10)变为

$$\lim_{B\to\infty}C=\lim_{B\to\infty}\frac{S}{n_0}\log_2 e=1.44\,\frac{S}{n_0} \tag{1-5-11}$$

上式表明，在 S/n_0 一定时，信道带宽虽取无限大值，但信道容量仍是有限的。这是因为 $B\to\infty$ 时，$N=n_0B$ 也趋于无穷大。

香农公式在通信原理中是一个极其有用的公式，它把通信系统追求的两大重要指标：有效性和可靠性结合了起来，使之既可以互相制约，又可以互相转换。香农公式虽然没有给出系统的具体实现方法，但它却在理论上阐明了这种互相转换关系的极限形式，给人们指出了努力的方向。香农公式对通信系统的设计和新的通信技术的出现有着重要的理论指导意义。

例 1.3　设一幅彩色图片由 3×10^6 个像素组成，每个像素有 16 个亮度等级，并假设每个亮度等级等概率出现。现将该幅彩色图片在一信噪比为 30 dB 的信道中传输，要求 3 分钟传完，试计算所需的信道带宽。

解：由于每个像素等概率出现 16 个亮度等级，故每个像素包含的信息量为 $\log_2 16=4$ bit。

一幅彩色图片包含的总信息量为

$$I=3\times10^6\times\log_2 16\ \text{bit}=1.2\times10^7\ \text{bit}$$

要求 3 分钟传完该图片，故信道的信息传输速率为

$$R=(1.2\times10^7)/(3\times60)\ \text{b/s}\approx6.67\times10^4\ \text{b/s}$$

因为信息传输速率 R 必须小于或等于信道容量 C，取 $C=R=6.67\times10^4$ b/s。又知信道中的信噪比为 30 dB，即 $S/N=1\ 000$，所以由式(1-5-9)，得到所需的信道带宽为

$$B=C/\log_2(1+S/N)=(6.67\times10^4)/\log_2(1+1\ 000)\ \text{Hz}\approx6.67\times10^3\ \text{Hz}$$

习　　题

1-1　英文字母中 e 出现的概率为 0.105，c 出现的概率为 0.023，j 出现的概率为 0.001。试分别计算它们的信息量。

1-2　有一组 12 个符号组成的消息，每个符号平均有四种电平，设四种电平发生的概率相等，试求这一组消息所包含的信息量。若每秒传输 10 组消息，则一分钟传输多少信息量？

1-3　消息序列是由 4 种符号 0、1、2、3 组成的，四种符号出现的概率分别为 3/8、1/4、1/4、1/8，而且每个符号的出现都是相互独立的，求下列 58 个符号组成的消息序列“2 0 1 0 2 0 1 3 0 3 2 1 3 0 0 1 2 0 3 2 1 0 1 0 0 3 2 1 0 1 0 0 2 3 1 0 2 0 0 2 0 1 0 3 1 2 0 3 2 1 0 0 1 2 0 2 1 0”的信息量和每个符号的平均信息量。

1-4　某气象员用明码报告气象状态，有四种可能的消息：晴、云、雨、雾。若每个消息是等概率的，则发送每个消息所需的最少二进制脉冲数是多少？若该 4 个消息出现的概率不等，且分别为 1/4、1/8、1/8、1/2，试计算每个消息的平均信息量。

1-5　设数字信源发送 −1.0 V 和 0.0 V 电平的概率均为 0.15，发送 +3.0 V 和 +4.0 V 电平的概率均为 0.35，试计算该信源的平均信息量。

1-6　对二进制信源，试证明当发送二进制码元 **1** 的概率和发送二进制码元 **0** 的概率相同时，信源熵最大，并求最大的信源熵。

1-7　一个由字母 A、B、C、D 组成的信源，对传输的每一个字母用二进制脉冲编码：**00** 代表 A，**01** 代表 B，**10** 代表 C，**11** 代表 D。又知每个二进制脉冲的宽度为 5 ms。

① 不同字母等概率出现时，试计算传输的平均信息速率以及传输的符号速率；

② 若各字母出现的概率分别为：$P_A=1/5$，$P_B=1/4$，$P_C=1/4$，$P_D=3/10$，试计算平均信息传输速率。

1-8　设数字键盘上有数字 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9，发送任一数字的概率都相同。试问应以多快的速率发送数字，才能达到 2 b/s 的信息速率？

1-9　① 假设计算机的终端键盘上有 110 个字符，每个字符用二进制码元来表示。问每个字符需要用几位二进制码元来表示？

② 在一条带宽为 300 Hz、信噪比(SNR)为 20 dB 的电话线路上，能以多快的速度(字符/秒)发送字符？

③ 如果以相同的概率发送每个字符，试求每个字符包含的信息量。

1-10　什么是模拟通信？什么是数字通信？数字通信系统有哪些主要优点？你对今后“数字通信系统将取代模拟通信系统”有什么看法？

1-11　数字通信系统模型中各主要组成部分的功能是什么？

1-12　由信道容量公式 $C=B\log_2\left(1+\dfrac{S}{N}\right)$，讨论 C 与 B 和 $\dfrac{S}{N}$ 之间的关系，并证明：当 $B\to\infty$ 时，信息传输速率达到信道容量极限，即 $R=C$ 时，码元能量与噪声功率谱密度之比为 $\dfrac{E_b}{n_0}\approx-1.6$ dB(分贝)是极限最小信噪比。

1-13　一个平均功率受限制的理想信道，带宽为 1 MHz，受高斯白噪声干扰，信噪比为 10(倍)，试求：

① 信道容量；

② 若信噪比降为5(倍)，在信道容量相同时的信道带宽；

③ 若带宽降到0.5 MHz，保持相同信道容量时的信噪比。

1-14 具有1 MHz带宽的高斯信道，若信号功率与噪声的功率谱密度之比为$\frac{S}{n_0}=10^6$ Hz，试计算信道容量。

1-15 一个系统传输四组脉冲，每个脉冲宽度为1 ms，高度分别为：0、1 V、2 V和3 V，且等概率出现。每4个脉冲之后紧跟一个宽度为1 ms的－1 V脉冲(即不带信息的同步脉冲)把各组脉冲分开。试计算系统传输信息的平均速率。

1-16 设一数字传输系统传输二进制码元，码元速率为2 400 Baud，试求该系统的信息传输速率。若该系统改为传输十六进制码元，码元速率为2 400 Baud，该系统的信息传输速率又为多少？

1-17 一个多进制数字通信系统每隔0.8 ms向信道发送16种可能取的电平值中的一个。试问：

① 每个电平值所对应的比特数是多少？

② 符号率(波特)为多少？

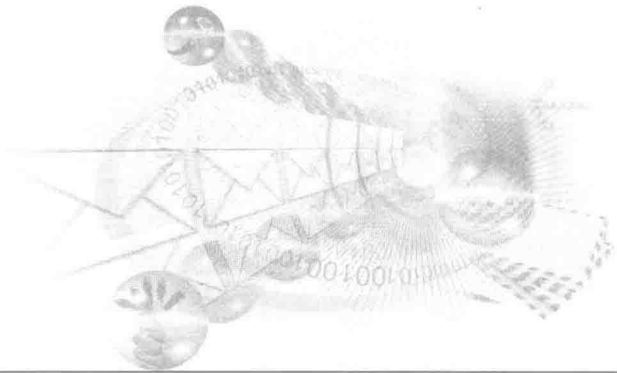
③ 比特率为多少？

1-18 计算机终端通过电话信道传输数据，设该终端输出128个符号，各符号相互独立，等概出现。已知电话信道带宽为3.4 kHz，信道输出信噪比为20 dB。试求：

① 信道容量；

② 无误传输的最高符号速率。

1-19 某通信系统的接收机收到的信号功率为－134 dBm，接收到的噪声功率谱密度为－164 dBm/Hz，系统带宽为2 000 Hz，求系统无错误信息传送的最大速率。



第 2 章

确定信号分析

信号是由消息转换而成的,它代表消息,同样携带了信息。信息的传输和处理是通过信号来进行的,所以对信号进行分析是研究信息传输和处理的基础。信号分析是从不同的角度、不同的侧面来揭示信号的本质,以便对信号进行传输和处理。

确定信号是指随时间的变化为确定函数的信号。确定信号的变化规律是已知的,所以并不携带信息,只有随机变化的信号才携带信息。但是,如果是几个确定信号随机出现,则构成了一种随机信号。确定信号的傅里叶分析方法(频谱分析法)已在前续课程中较详细地讨论过。确定信号的分析是随机信号分析的基础。本章将在前续课程中对确定信号分析的基础上,为理解通信系统中一些新概念,对确定信号的正交展开、相关函数与功率谱(广义频谱分析法)以及信号复数化分析方法和时域希尔伯特变换等重要概念进行讨论,以便为后面的随机信号分析和通信系统的性能分析打下基础。

2.1 信号的正交展开与频谱分析

2.1.1 信号的正交展开

若某信号 $x(t)$ 在区间 (t_0, t_0+T) 内是分段连续的,则 $x(t)$ 可以用该区间内的正交函数系 $\{u_k(t)\} = \{u_0(t), u_1(t), \cdots\}$ 中的各分量来表示,这就是信号的正交展开。所谓正交函数系是指 $\{u_k(t)\}$ 在 (t_0, t_0+T) 上满足下式

$$\int_{t_0}^{t_0+T} u_k(t) u_l(t) \mathrm{d}t = \begin{cases} C \neq 0 & \text{当 } k = l \\ 0 & \text{当 } k \neq l \end{cases} \tag{2-1-1}$$

式中,若 $C=1$,则称 $\{u_k(t)\}$ 为标准正交函数系。

$x(t)$用正交函数系$\{u_k(t)\}$可展开为

$$x(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k u_k(t) \tag{2-1-2}$$

式中，$u_k(t)$是正交函数系$\{u_k(t)\}$中序号为k的函数，a_k是$x(t)$在$\{u_k(t)\}$上展开的特征值或称为展开系数，即$x(t)$在分量$u_k(t)$上的投影的大小。可见，正交展开就是把$x(t)$用在正交函数系各分量上的投影来描述。

利用式(2-1-1)和(2-1-2)，可以容易地求出系数a_k。将式(2-1-2)两边乘以$u_l(t)$，并在区间(t_0, t_0+T)内积分，得

$$\int_{t_0}^{t_0+T} x(t) u_l(t)\,\mathrm{d}t = \int_{t_0}^{t_0+T} \sum_{k=0}^{\infty} a_k u_k(t) u_l(t)\,\mathrm{d}t = \begin{cases} a_k C & 当\ k = l \\ 0 & 当\ k \neq l \end{cases} \tag{2-1-3}$$

所以

$$a_k = \frac{1}{C}\int_{t_0}^{t_0+T} x(t) u_k(t)\,\mathrm{d}t \tag{2-1-4}$$

$C=1$时，

$$a_k = \int_{t_0}^{t_0+T} x(t) u_k(t)\,\mathrm{d}t \tag{2-1-5}$$

当对$x(t)$的展开式(2-1-2)取有限项时，会带来一定的误差。若取$k=N$个有限项，则截断展开式$\hat{x}_N(t)$为

$$\hat{x}_N(t) = \sum_{k=0}^{N} a_k u_k(t) \tag{2-1-6}$$

这时$x(t)$与$\hat{x}_N(t)$的均方误差Q为

$$Q = \int_{t_0}^{t_0+T} [x(t) - \hat{x}_N(t)]^2\,\mathrm{d}t \tag{2-1-7}$$

显然，恒有$Q \geqslant 0$。

设$\{u_k(t)\}$为标准正交函数系，则

$$\begin{aligned} Q &= \int_{t_0}^{t_0+T} \left[x(t) - \sum_{k=0}^{N} a_k u_k(t)\right]^2 \mathrm{d}t \\ &= \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t)\,\mathrm{d}t - 2\sum_{k=0}^{N} a_k^2 + \sum_{k=0}^{N} a_k^2 \\ &= \int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t)\,\mathrm{d}t - \sum_{k=0}^{N} a_k^2 \geqslant 0 \end{aligned} \tag{2-1-8}$$

因而

$$\int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t)\,\mathrm{d}t \geqslant \sum_{k=0}^{N} a_k^2 \tag{2-1-9}$$

以上不等式对任何标准正交函数系都成立，称为贝塞尔(Bessel)不等式。这说明任何函数$x(t)$的正交展开式中的系数的平方和总是收敛的。显然随着N值的增加，$\sum_{k=0}^{N} a_k^2$是单调增大的。如果N取足够大时，可以使$\sum_{k=0}^{N} a_k^2$任意逼近于$\int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t)\,\mathrm{d}t$，那么应有

$$\int_{t_0}^{t_0+T} x^2(t)\,\mathrm{d}t = \sum_{k=0}^{\infty} a_k^2 \tag{2-1-10}$$

在这种情况下，$\{u_k(t)\}$是完备的正交函数系，这时不需要其他不属于$\{u_k(t)\}$的函数来补充参加$x(t)$的精确展开。

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com