



第 1 章

绪 论

本章讨论与通信有关的基本概念、术语和基础知识,为全书提供共同的基础。本章内容要点如下:

- 通信的基本概念;
- 通信系统的组成、分类和通信方式;
- 信息的度量;
- 信道及其特征;
- 信道容量;
- 通信系统的主要性能指标。

学习本章要求掌握有关概念和术语的准确含义,了解通信系统的组成、信息的度量、信道及其特征,熟练掌握香农信道容量公式揭示的信息传输过程的基本规律和性能极限以及通信系统主要性能指标的计算,熟悉本门课程研究的对象、基本任务和中心内容。

1.1 通信与通信系统

1.1.1 通信的基本含义

人类在生产、生活和社会活动中总是伴随着消息(或信息)的传递,这种传递消息(或信息)的过程叫做通信(communication)。实际上,自从有了人类,就出现了人与人之间的相互通信。在远古时代,没有发明文字和交通工具以前,人类就有了原始的通信方法,如“以物示意”、手势、语言……大约三千年以前的周朝时期,我国就开始建立了官邮,即出现了有组织的通信方法。同时还利用金鼓、旌旗、烽火等传递紧急消息。在人类开始认识和使用电能的同时,便开始利用电信号进行消息的传递,如今电信号把人类带入了信息时代。

电信就是借助“电”来传递消息的通信方式。这种通信方式具有

迅速、准确、可靠的特点,几乎不受时间、地点、距离的限制。因此,在自然科学中涉及“通信”这一术语时,通常就是指电信(telecommunication)而言。当然,因为光也是一种电磁波,因此光通信也属于电信一类。

在电信系统中,消息的传递是通过电信号来完成的。由于电信有上述一系列优点,它既可以实现实时通信,又可实现非实时通信。所谓实时通信,就是指发信方信号一产生,收信方或接收设备几乎同时(微小的传播时延可以忽略不计)能接收到信号,如电话。而非实时通信,诸如电报、录像节目、计算机成批数据传输等采用存储转发方式,传输过程中需要进行缓存、处理、等待、转发、显示或存储再现等,存在较大的时延。而在采用诸如磁带、磁盘、光盘等存储设备的系统中,还可能存储较长的时间。因此,在某种意义上可以将存储系统看成是从现在向将来传递消息的通信系统。

综上所述,可以认为“通信”就是指把消息(或信息)从一个地方和/或时间传输到另一个地方和/或时间。基于这种认识,也可以说,“通信”就是“消息传输”或“信息传输”。这种传输可以在点-点、点-多点、多点-多点之间进行。通信可以是人-人之间通信,也可以是人-机、机-机之间的通信或更复杂的系统。

总之,通信这门学科是逐步由低级到高级,由简单到复杂发展起来的。从烽火台到电报人们花费了二三千年的时间,经历了漫长的道路。自从出现了电通信以后,通信技术便获得了日新月异的发展。现代通信技术是研究传递各种消息(或信息)的学科。根据传递消息的不同,目前通信业务可分为电报、电话、传真、数据传输、计算机通信、可视电话等。从广义来说,广播、电视、雷达、导航、遥测、遥控等均可列入通信这个范畴。

1.1.2 通信系统模型

通信系统(communication system)是指完成通信这一过程的全部设备和传输媒介(transmission medium),一般可概括为如图 1.1-1 所示模型。

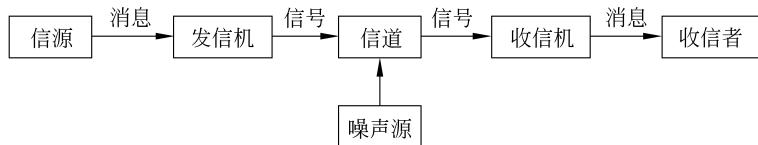


图 1.1-1 通信系统模型

其中,信源(information source)的作用是产生(形成)消息(message)。

发信机(transmitter)的作用是将消息转换为适合于在信道中传输的信号(signal)。

消息转换为数字信号一般要经过三个步骤,即变换、编码和调制。它们可以分别进行,也可以混合在一起进行。

所谓变换,简单地说就是将表达消息的非电量的变化变换为电量的变化。例如,电话就是利用送话器把声音压力的变化变换为相应的电流变化。对于这类变换设备的一般特性,通常只要求它们是线性的,即作用与响应成正比。

所谓编码(coding),是指在数字通信系统里,为了某种目的而对数字信号进行的某种变换。例如用来提高传输有效性的信源编码(source encoding),用来进行提高传输抗干

扰性的信道编码(channel coding)及用来保密的保密编码(encryption)等。进行编码的设备称为编码器(encoder)。

调制(modulation)在通信系统中主要用来变换信号。从消息变换过来的原始信号称为基带信号(baseband signal)或低通信号(low-pass signal)。其特点是频谱由零频附近开始延伸到某个通常小于几兆赫的有限值。在某些系统中,如直流电报、实线电话和有线广播等,基带信号可以直接在信道内传输,因此将这种系统称为基带传输系统。但大量的通信系统需要通过调制将基带信号变换为更适合于在信道中传输的信号形式。例如在无线通信系统中,基带信号必须变换到射频波段才能进行有效的传输。即使在有线信道,有时也需要经过调制使信号频率与信道有效传输频带相适应。因此,调制的主要作用是进行频率搬移,即将基带信号的频率范围搬移到足够高的频段,使之能在信道中传输。经过载波调制后的信号称为已调信号(modulated signal),已调信号为带通信号(band pass signal)。还有一种情况,即对基带信号的波形进行适当改变,使之与信道特性相适应。对基带信号的这种处理,也称为调制。所以广义的调制可分为带通调制(载波调制)和基带调制。与此对应,信道也可分为带通信道和基带信道。但是,多数情况下,调制往往是指带通调制。

信道(channel)在此是指将信号由发信机传输到收信机的媒介或途径(通道)。信道的种类很多,概括起来有两种:有线信道和无线信道。信道的传输性能直接影响到通信的质量。

在通信系统中,噪声(noise)来源很多,它分布在系统的各点。为了分析方便,在图 1.1-1 中将噪声源集中表示在一个方框里。

收信机(receiver)的作用与发信机相反,用来完成解调(demodulation)、解码(decoding)等任务,以将信号转换为消息。

收信者,也称信宿(destination),是消息传输的目标对象,它的作用与信源相反。信源和收信者可以是人或设备,因此,有时也被称为发终端和收终端。

图 1.1-1 所示的通信系统模型是对各种通信系统的简要概括,可以反映通信系统的共性。根据所研究的对象或关心的问题不同,还会出现一些不同形式的具体的通信系统模型(如模拟通信系统模型、数字通信系统模型等)。

1.1.3 模拟通信、数字通信和数据通信

通信系统中传输的具体对象是消息。所谓消息,是指用以载荷信息的有次序的符号序列(包括状态、字母、数字等)或连续的时间函数。消息带有需要传送给收信者的信息。通信系统中传输的消息是各式各样的,有语音、文字、符号和图像等。按照信号参量的取值方式及其与消息之间的关系,可将信号划分为两类,即模拟信号(analog signal)与数字信号(digital signal)。模拟信号是指代表消息的信号参量(幅度、频率或相位)随消息连续变化的信号。如代表消息的信号参量是幅度,则模拟信号的幅度应随消息连续变化,即幅度有无限多个可能取值。模拟信号在时间上可以连续,也可以离散。图 1.1-2 为时间连续和时间离散的模拟信号。

数字信号是指它不仅在时间上是离散的,而且在幅度取值上也是离散的(即幅值被限

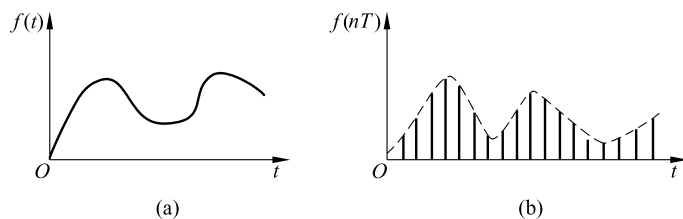


图 1.1-2 模拟信号

(a) 时间连续的模拟信号；(b) 时间离散的模拟信号

制在有限个数值之内)信号。图 1.1-3(a)所示的二进制数字信号就是以“1”和“0”两种状态的不同组合来表示不同的消息。图 1.1-3(b)也是一种数字信号的表示形式。

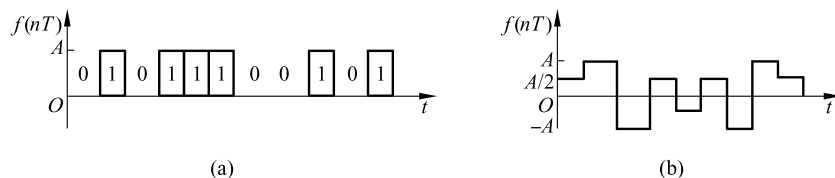


图 1.1-3 数字信号示意图

图 1.1-3 中, A 为振幅值, T 为脉冲周期。

根据通信系统中所传送的是模拟信号还是数字信号,可以把通信系统分成模拟通信系统和数字通信系统。应当指出,模拟通信(analog communication)和数字通信(digital communication)是按信道中所传送的信号差异来区分的,而不是根据信源输出的消息来划分的。在图 1.1-1 中,若信源发出的是模拟消息,经发信机变换成的电信号是随时间连续变化的模拟信号,称这种通信方式为模拟通信。若信源发出的是模拟消息,把与之对应的信号经过模/数(A/D)变换数字化处理后,以数字信号形式来传送,则称这种通信方式为数字通信。

模拟通信系统模型如图 1.1-4 所示。它是利用模拟信号来传递消息的通信系统,它可由图 1.1-1 略加演变而成。

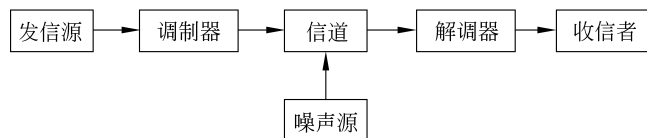


图 1.1-4 模拟通信系统模型

可见,在模拟通信系统中,发信机简化为调制器(modulator),收信机简化为解调器(demodulator),主要是强调在模拟通信中调制的重要作用。从原则上讲,调制和解调对信号的变换起着决定性作用,是保证通信质量的关键。至于放大、滤波、变频等过程都可以看作是理想线性的,并将它们合并到信道中去。

需要指出,在图 1.1-4 中,如果不设调制器和解调器,就变成基带模拟通信系统。模拟通信系统的缺点之一是在传输中模拟信号会变得越来越弱。模拟信号的衰减限制了传

输线路的长度。为了进行远距离传输,模拟传输系统中需要增设放大器,用以增强信号能量。但是,放大器同时也增强了噪声成分。若为了远距离传输而将放大器级联起来,信号失真就会越来越重,信噪比越来越恶化。因此,为了保证通信质量符合要求,最终通信距离还是受到限制,不能太远。

对于数字通信系统图 1.1-1 可以具体化为图 1.1-5。其中有些内容前面已经做过介绍,下面只对数字通信系统模型所特有的一些组成部分进行简单介绍。

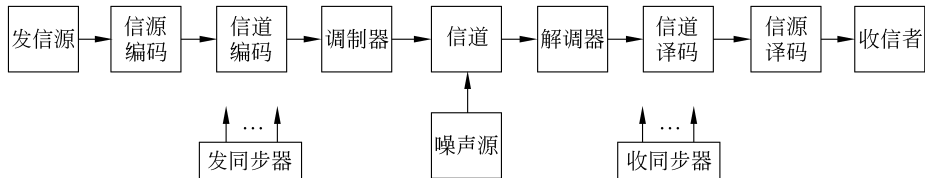


图 1.1-5 数字通信系统模型

信源编码的基本部分是压缩编码。在信源信息中可能存在某种程度的冗余信息及根据所需的质量标准,可以去除其中某些次要信息。信源编码的作用就是减少数字信号的冗余度,提高系统的有效性;通常将代表信源消息的连续信号变换为数字序列,也列入信源编码。在某些系统中,信源编码还包含加密功能,即在压缩后还进行保密编码。信源译码是信源编码的逆过程。

信道编码的功能是给信源编码器输出符号增加冗余符号,并让这些符号满足一定的数学规律,使传输具有纠错或检错能力。因为出现差错就会破坏这种数学规律,在接收端就会发现错误。为了能够自动检出错误或纠正错误,可以采用检错编码(error-detecting code)或纠错编码(error-correcting code)。信道译码是信道编码的逆过程。编码和译码合在一起称为编译码器(codec)。

同步是数字通信系统的重要组成部分,也是与模拟通信系统的主要区别之一。同步包括载波同步和时钟同步。在数字或模拟通信系统中,为了以相干或相关解调方式准确恢复原始信号,接收端提供的“本地载波”或称“相干载波”应与接收到的已调载波严格同频、同相,称为载波同步。在数字通信系统中,收、发端之间需要有共同的时间标准,以便接收端准确知道所接收数字信号中每个符号(码元)的起止时刻,从而同步地进行接收。为此,接收端必须有同步电路,从发送信号中提取码元同步信息。这种同步称为位同步(或码元同步)。同理,为了知道若干码元组成的一个码组(或码字)的起止时刻,接收端还必须提取字同步信息。这些位同步和字同步信息,可能已经包含在经过编码和调制的信号中,或者在发送端加入了独立的位同步和字同步信号。若收、发之间没有同步或失去同步,则接收端将无法正确辨认接收信号中所包含的消息。

应当指出,实际数字通信系统并非必须包括图 1.1-5 中的所有环节,如基带传输系统就不包括调制与解调环节,如图 1.1-6 所示。

图中基带信号形成器可能包括编码器、加密器以及波形变换(码型变换)等,接收滤波器也可能包括译码器、解密器等。

与模拟通信相比,数字通信具有抗干扰、抗噪声性能好,可以进行差错控制,易加密和可以适应各种通信业务等优点,已成为现代通信的主要发展方向。

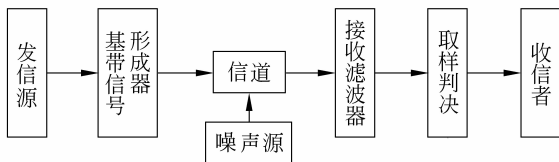


图 1.1-6 数字基带传输通信系统的组成

如上所述,模拟通信和数字通信是按信道中所传输的信号差异来区分的,而不是根据信源输出的消息来划分的。若信源本身发出的消息是数字形式的信号(电报、数据、指令等),则不管用数字传输方式还是用模拟通信方式,这种通信方式均称为数据通信(data communication)。

数据通信有三个特征:

- (1) 它是机器(计算机)对机器(终端设备)或机器(计算机)对人的通信;
- (2) 它传输和处理的是离散的数字数据,而不是连续的模拟数据;
- (3) 它的通信速度很快,可以传输和处理大量的数据。

这里反复提到“数据”一词,它的具体含义是什么呢?一般认为:数据是指描述事物的数字、字母或符号。它含有所需要的信息,适于传输、分析和处理。因此,可以简单地将数据定义为传达某种意义或信息的实体。数据可以分为数字数据和模拟数据两大类。所以数据(data)不一定是数字(digit),也可以是模拟量(如图、表等)。

综上所述可以看出,数据通信强调的是信源信号形式。随着计算机的广泛应用,现代意义上的数据通信已与计算机密不可分。数据通信是人与计算机,或计算机与计算机之间信息交换和传递的过程。

最后应该指出,虽然本节提供的都是通信系统的简化模型,但它们往往决定着通信系统的质量。本课程主要是讨论通信系统的基本原理、技术和性能,并解决通信系统中的一些共性问题。因此,本课程的讨论可以说是围绕通信系统模型进行的。

1.2 通信系统分类与通信方式

1.2.1 通信系统的分类

通信系统从不同的角度可以有不同的分类方法,分类的方法是多种多样的。下面讨论几种常见的分类。

1. 根据通信业务分类

按照通信业务特征,通信系统可以分为电话、电报、数据、图像等。它们相互之间可以是兼容的,也可以是并存的。电话通信应用最为广泛,因此发展得也最为迅速,目前的通信网大部分都是建立在电话通信系统基础之上的。尤其是电话通信有着最多的用户,其他的通信系统常常需要通过电话通信系统发展用户。

2. 根据传输信号的特征分类

根据信道传输的电信号是模拟信号还是数字信号，相应地把通信系统分为模拟通信系统和数字通信系统。

3. 根据调制方式分类

首先根据通信系统是否采用调制可将通信系统分为基带传输和频带(调制)传输两大类。基带传输如音频市话、有线广播、数字基带传输等。频带传输是对各种信号调制后传输的总称。调制方式很多,表 1.2-1 列出了一些常用调制方式及其主要用途。

表 1.2-1 常用调制方式及用途

调 制 方 式			主 要 用 途
连续波调制	线性调制	调幅(AM)	广播
		抑制载波双边带调幅(DSB)	立体声广播、模拟数据传输
		单边带调幅(SSB)	载波通信、短波无线电通信、数据传输
		残留边带调幅(VSB)	电视广播、传真、数据传输
	非线性调制	频率调制(FM)	调频广播、微波中继通信、卫星通信、数据传输
		相位调制(PM)	中间调制方式
	数字调制	振幅键控(ASK)	数据传输
		频移键控(FSK)	数据传输
		相移键控(PSK)及 DPSK、QPSK 等	数据传输、数字微波、空间通信
		其他高效数字调制 QAM、MSK 等	数字微波、空间通信
脉冲调制	脉冲模拟调制	脉幅调制(PAM)	中间调制方式、遥测
		脉宽调制(PDM,PWM)	中间调制方式
		脉位调制(PPM)	遥测、光纤传输
	脉冲数字调制	脉码调制(PCM)	市话、卫星、空间通信
		增量调制(DM)	民用、军用电话
		差分脉码调制(DPCM)	电视电话、图像编码
		其他语音编码方式 ADPCM、APC、LPC 等	中低速数字电话

4. 按复用方式分类

在同一信道上传输多路信号时要采用复用方式。常用的复用方式有频分复用

(FDM)、时分复用(TDM)、码分复用(CDM)和空分复用(SDM)等。

5. 根据传输媒介(质)分类

传输媒介(质)指的是传输系统收、发两端之间的物理路径。电信系统多利用电磁波传递电信号。电磁波传输有两种基本形式：一种是沿导体传播,称为导向的(guided)媒介；另一种是沿自由空间传播,称为非导向的(unguided)媒介,或称无线电波传播。前者称为有线通信后者称为无线通信。

表 1.2-2 列出了通信使用的频段、常用的传输媒质及主要用途。

表 1.2-2 通信波段与传输媒质

频 段	符号	名 称	波 长	主 要 用 途
30~300Hz	ELF	特低频	$10^4 \sim 10^3 \text{ km}$	海底通信、电报
0.3~3kHz	VF	音频	$10^3 \sim 10^2 \text{ km}$	数据终端、实线电话
3~30kHz	VLF	甚低频	$10^2 \sim 10 \text{ km}$	导航、电报电话、频率标准
30~300kHz	LF	低频	$10 \sim 1 \text{ km}$	导航、电力通信
0.3~3MHz	MF	中频	$10^3 \sim 10^2 \text{ m}$	广播、业余无线电通信、移动通信
3~30MHz	HF	高频	$10^2 \sim 10 \text{ m}$	国际定点通信、军用通信、广播
30~300MHz	VHF	甚高频	$10 \sim 1 \text{ m}$	电视、调频广播、移动通信
0.3~3GHz	UHF	超高频	$10^2 \sim 10 \text{ cm}$	电视、雷达、遥控遥测、点对点通信、移动通信
3~30GHz	SHF	极高频	$10 \sim 1 \text{ cm}$	卫星和空间通信、微波接力
30~300GHz	EHF	特高频	$10 \sim 1 \text{ mm}$	射电天文、科学研究、雷达、微波接力
$10^5 \sim 10^7 \text{ GHz}$		紫外、可见光、红外	$3 \times 10^{-4} \sim 3 \times 10^{-6} \text{ cm}$	光通信、激光空间传播

通信中工作频率和工作波长可互换,公式为

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

式中： λ 为工作波长； f 为工作频率； c 为电波在自由空间中的传播速度， $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

1.2.2 通信方式

前面讨论的通信系统是单向通信系统,在实际应用中,多数情况是双向通信,这时通信双方都要有发送设备和接收设备,每个方向上都有自己的传输媒质。当然通信双方也可以共用一个信道,但此时就需要在信道上按一定的方式(模式)进行传送。通常按消息传送的方向和时间的关系,可分为单工传输方式(simplex transmission mode)、半双工传

输方式(half-duplex transmission mode)和全双工传输方式(full-duplex transmission mode);按数字信号排列顺序,可分为并行传输(parallel transmission)和串行传输(serial transmission)。

1. 单工、半双工和全双工通信

单工通信就是指消息只能从一点沿一个方向传输给另一点,而不能沿反方向传输的工作方式。这种工作方式一般多用于广播、寻呼、遥测、遥控等。其传输的工作过程如图1.2-1(a)所示。

半双工通信就是指通信的两点间虽然能够在两个方向上传输消息,但在某一时刻信道中只能有一个方向的信号在传输,即不能同时进行双向传输。对通信者来说就是不能同时进行收发。这种工作方式的工作过程如图1.2-1(b)所示。一般使用同一载频工作的无线电对讲机以及咨询、检索、科学计算等数据通信的工作方式就是半双工通信方式。

全双工通信是指通信的两点间可以同时双向的传输消息的工作方式。对于通信的双方来说就像是在面对面地进行消息的传递。普通电话就是一个典型的全双工通信方式。全双工通信方式的工作过程如图1.2-1(c)所示。

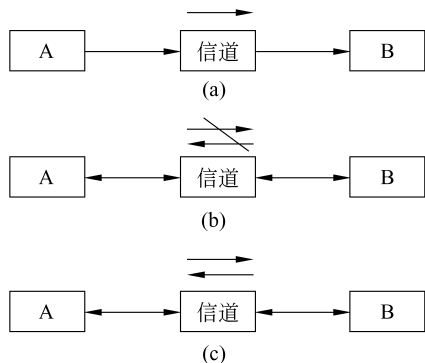


图 1.2-1 通信方式

(a)单工通信方式; (b)半双工通信方式;
(c)全双工通信方式

2. 并行传输和串行传输

对于数字通信来说,数字信号码元的排列可以是并行的,也可以是串行的。

并行传输将数字信号码元序列分割成两路以上的码元序列同时在信道中传输,如图1.2-2(a)所示。

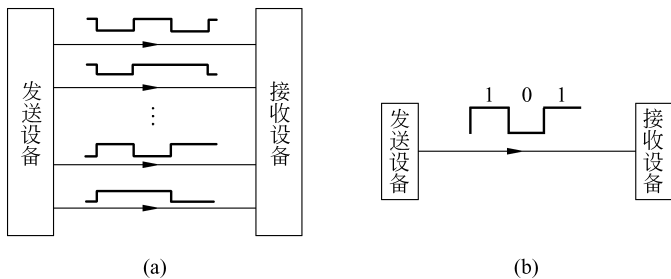


图 1.2-2 并行和串行通信方式示意图

(a)并行传输; (b)串行传输

串行传输中则将数字信号的码元序列按时间的顺序一个接一个地在信道中传输,如图1.2-2(b)所示。

并行传输的优点是节省传输时间,经常应用于近距离数字通信中或设备机内的码元

传输,但由于其占用的通路的数量随着并行路数的增加而增加,对于远距离传输来说很不经济,因此,远距离传输多采用串行的传输方式。

1.3 信息及其度量

综前所述可以看出,通信系统中传输的具体对象是消息,但是通信的最终目的在于传递信息。因此,在研究具体通信系统之前需要明确信息的含义。

在日常生活中,往往把“信息”的概念和“数据”、“情报”、“资料”、“情况”、“知识”等概念混为一谈,当然也就谈不上定量的度量了。

长期以来,信息的概念有许多种说法。据不完全统计,古今中外,关于信息的成文定义就不下 100 余种,而且这些定义之间存在许多矛盾。

科学技术上“信息”的概念,就是要把实际生活中原始的、含糊不清的概念加以提炼、概括、抽象和深化。通常把文字、语言、数据、图像等都看成是“消息”的“集合”。这些消息集合具有一定的统计特性或概率特性,因而将“信息”定义为对消息的统计特性的一种定量描述。更具体地说,当人们得到消息之前,对它的内容的了解是“不确定性”的,信息就是对这种不确定性的定量描述。

当人们得到消息后,若事前认为消息中所描述事件发生的可能性越小,就认为这个消息带给他的信息量越大。可见,信息的量值必然与消息所代表事件的随机性,或事件发生的概率有关。从这点出发,信息论利用统计学概念对信息提出了一个度量方法,把度量信息量的物理量称为信息量,也称信息。

设消息所代表的事件出现的概率为 $P(x)$,则该消息所含有的信息量 I 为

$$I = \log_a \frac{1}{P(x)} = -\log_a P(x) \quad (1.3-1)$$

式中若对数底 $a=2$,则信息量的单位为比特(bit,b);若 $a=e$,则单位为奈特(nit),1 奈特 $= \lg e \approx 1.443$ 比特;若 $a=10$,则单位为哈特莱。

上述三种度量单位中应用最广泛的单位是比特。它代表出现概率为 $1/2$ 的消息所含有的信息量。在通信系统中,当所传送的消息是两个等概的消息之一时,任一消息所含有的信息量为 1 比特。二进制数字通信系统中,经常遇到的就是这种情况。在实际场合,常把一位二进制数字称为 1 比特,而不管这两个符号的出现概率是否相等。

除了上述单个消息所含有的信息量外,实际上信源(或消息源)总是由若干个可能发生的消息所组成。设有 n 个消息,其概率分别为 $P_1(x), P_2(x), \dots, P_n(x)$,那么可以证明每一消息的平均信息量为

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i(x) \lg P_i(x) \quad (1.3-2)$$

式(1.3-2)与统计热力学中熵的定义式相类似,故在信息论中,通常称为信源的熵(entropy),其单位为 b/符号。