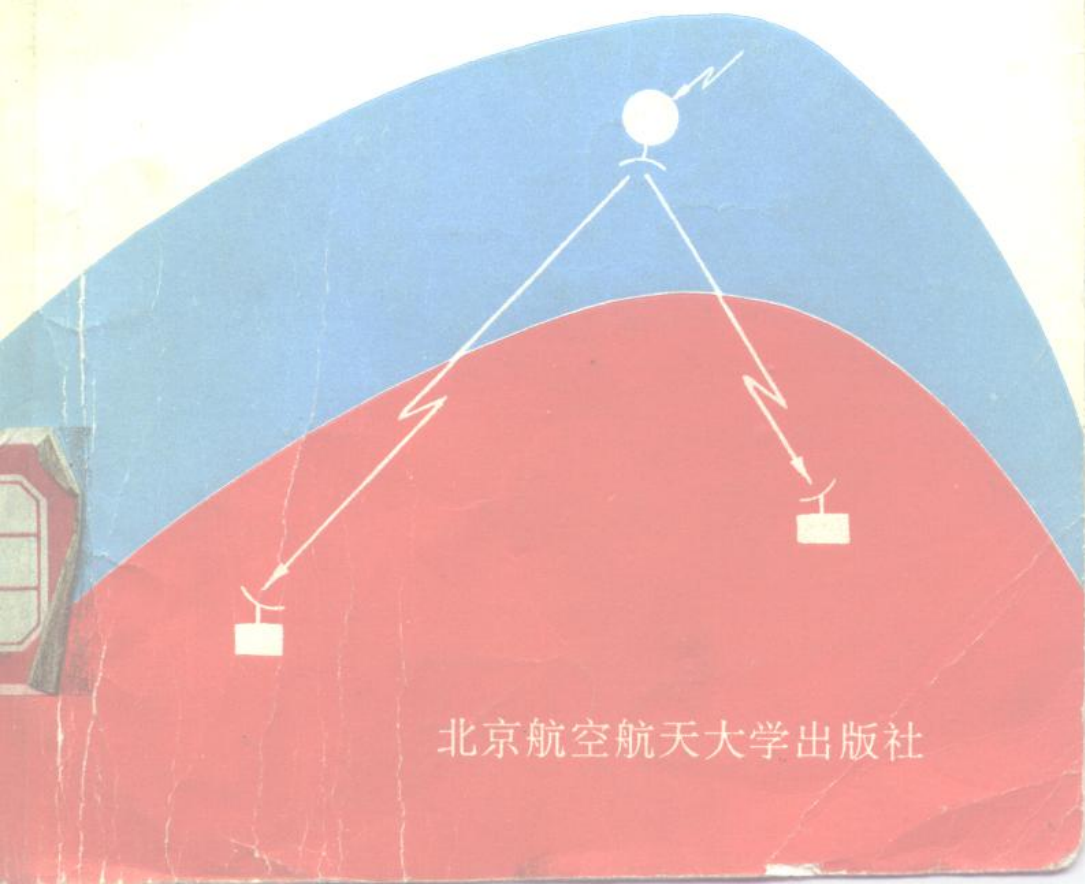


信息理论基础

周荫清 主编



北京航空航天大学出版社

75.821
352

信息理论基础

周荫清 主编

北京航空航天大学出版社

9310311

(京) 新登字166号

2088/07
内 容 简 介

本书重点介绍香农信息论的基本理论,力图将信息论和它的一些应用联系起来。全书共分十章。内容包括:信息的统计度量;离散信源和连续信源;信道与信道容量;信源与信宿之间的平均失真度以及信息率失真函数;信源编码与信道编码;最后介绍信息论在信号处理中的应用。

本书文字通俗,概念清晰,可作为理工科高等院校电子工程类有关专业的教材,亦可供从事通信、雷达、导航、生物工程、系统工程等有关专业的科技人员参考。

信息理论基础

XINXI LILUN JICHU

周荫清 主编

责任编辑 曾昭奇

北京航空航天大学出版社出版

新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销

北京密云华都印刷厂印装

*

850×1168 1/32 印张:12.25 字数:329千字

1993年7月第一版 1993年7月第一次印刷 印数:2500册

ISBN 7-81012-384-X/TN·022 定价:3.80元

前 言

信息工程的基础是信息理论，即研究信息的量度、编码和通信的科学。

信息论是20世纪中叶从通信中发展起来的理论，它是数学中的概率论与通信技术相结合的边缘学科。30多年来，信息论学科有了很大的发展并已延伸到许多领域中。人们已经认识到，在现代科学技术的高度发展过程中，学习和掌握信息理论日益成为人们的一种需要。

近年来作者为北京航空航天大学电子工程系开设了《信息工程基础》课程，同时编写了相应的教材，本书就是在此基础上编写而成的。作为教材，有意注重基本理论，基本概念和基本方法的阐述，以及能力的培养。同时在数学工具的运用上力求准确、简明、适中、尽量使读者应用较浅的数学工具能够准确、系统地认识和掌握信息理论的基本概念和分析方法。

本书可作为电子类有关专业高年级大学生和研究生教材。全书共分十章，首先介绍信息的统计度量，离散信源，离散信道和信道容量；然后介绍无失真信源编码、有噪信道编码，以及限失真信源编码。这些内容是香农信息论的核心部分。在上述基础上引出并论述了连续信源和波形信道的信息测度以及有关理论。最后介绍了纠错码和信息论方法在信号处理中的应用。

本书力图在内容编排上由浅入深、深入浅出，以最易接受的方式介绍信息理论的基本内容及其应用。为了提高分析问题和解决问题的能力，各章后面配有一些难易程度不等的习题，可根据实际需要选用。

本书第一至四章由周荫清编写，第八、九章由李春升编写，第七、十章由李景文编写，第五、六章由刘玉战编写，最后由周

荫清统编全书。

在编写过程中曾得到邵定蓉教授、李铮副教授、杨昌竹副总编的热情支持与帮助。张肇武副教授审阅了本书部分初稿，朱奋川、苗楠编写的“信息论基础”讲义对本书编写起了很好的作用，编者在此一并致谢。

限于水平，书中难免存在一些缺点和错误，殷切希望广大读者批评指正。

编 者

1992年7月5日

目 录

第一章 绪 论

§ 1.1 信息	(1)
§ 1.2 通信系统模型	(4)
§ 1.3 信息论的形成和发展	(7)

第二章 信息的统计度量

§ 2.1 自信息量和条件自信息量	(11)
§ 2.2 互信息量和条件互信息量	(14)
§ 2.3 离散集的平均自信息量	(18)
§ 2.4 离散集的平均互信息量	(43)
§ 2.5 连续随机变量的互信息和相对熵	(49)
习题	(56)

第三章 离散信源

§ 3.1 信源的数学模型及其分类	(61)
§ 3.2 离散无记忆信源	(65)
§ 3.3 离散无记忆信源的扩展信源	(69)
§ 3.4 离散平稳信源	(75)
§ 3.5 马尔可夫信源	(80)
§ 3.6 信源的相关性和剩余度	(94)
习题	(96)

第四章 离散信道及其容量

§ 4.1 信道的数学模型及其分类	(102)
-------------------	-------

§ 4.2 离散无记忆信道·····	(105)
§ 4.3 离散无记忆扩展信道·····	(118)
§ 4.4 信道的组合·····	(131)
§ 4.5 信道容量·····	(139)
习题·····	(163)

第五章 无失真信源编码

§ 5.1 编码器·····	(170)
§ 5.2 分组码·····	(173)
§ 5.3 定长码·····	(178)
§ 5.4 变长码·····	(190)
习题·····	(222)

第六章 有噪信道编码

§ 6.1 噪声信道的编码问题·····	(226)
§ 6.2 错误概率与编码方法·····	(235)
§ 6.3 有噪信道编码定理·····	(245)
§ 6.4 错误概率的上界·····	(253)
习题·····	(254)

第七章 限失真信源编码

§ 7.1 失真测度·····	(257)
§ 7.2 信息率失真函数·····	(259)
§ 7.3 限失真信源编码定理·····	(266)
§ 7.4 信息率失真函数的计算·····	(276)
习题·····	(292)

第八章 连续信源和波形信道

§ 8.1 连续消息的特征·····	(294)
--------------------	-------

§ 8.2 连续信道的信道容量.....	(306)
§ 8.3 连续信道的信道编码定理.....	(314)
§ 8.4 连续信源的信息率失真函数.....	(314)
习题.....	(320)

第九章 纠错编码

§ 9.1 纠错码的基本概念.....	(323)
§ 9.2 纠错码分类.....	(326)
§ 9.3 线性分组码.....	(329)
§ 9.4 几种重要的纠错码.....	(343)
习题.....	(353)

第十章 信息论方法在信号处理中的应用

§ 10.1 最大熵谱估计.....	(357)
§ 10.2 最小误差熵估计与卡尔曼滤波	(375)
参考书目.....	(384)

第一章 绪 论

§1.1 信 息

信息论或称为通信的数学理论，是应用近代数理统计方法研究信息的传输、存贮与处理的科学。信息是信息论中最基本、最重要的概念，是一个既复杂又抽象的概念。

信息这一概念是在人类社会互通情报的实践过程中产生的。信息概念是十分广泛的。由于信息科学比起其他学科，如物理学、数学、化学、生物学等还显得很年轻，人类对信息的认识还很不够，迄今为止，信息并没有形成一个很完整的系统的概念。不同的研究学派对信息的本质及其定义还没有形成统一的意见和认识。

信息的通俗概念 人们认为信息是一种消息。这是一种最普遍的概念，是目前社会上最流行的概念。例如，当人们收到一封电报，接到一个电话，收听了广播或看到电视以后，就说得到了信息。这个概念好像使人一听就明白，其实极不准确。确切地说，这种概念把消息当成了信息。的确，人们从接收到的电报、电话、广播和电视的消息中能获得各种信息，但是，信息和消息并不是一回事，不能等同。举例来说，有人告诉你一条消息，这条消息告诉了许多原来不知道的新内容，这条消息就很有意义，信息量就大；反之，如果这条消息告诉的是原来就已经知道的内容，那么这条消息意义就不大，信息量就小。

信息的广义概念 人们认为信息是对物质存在和运动形式的一般描述。1975年Lango提出“一旦您理解了是信息触发了行为和能，信息是含于客体间的差别中而不是客体本身中，您就意

“识到在通信中所被利用的（亦即携带信息的）实际客体是不重要的，仅仅差别关系重要。”在这里，客体是指消息，差别是指信息，差别不是客体，信息不同于消息。例如，妻子给丈夫邮寄一包衣物。那么，衣物是客体，但客体是不重要的，重要的是含于客体中的、寄去的思念和情感，这是信息。

物质、能量和信息是构成客观世界三大要素。信息是物质和能量在空间和时间中分布的不均匀程度。信息不是物质。信息是事物的表征，它表征事物的状态和运动形式。信息存在于任何事物之中，有物质的地方就有信息，信息充满着整个物质世界。

信息是一个十分抽象的概念，信息本身是看不见、摸不着的，它必须依附于一定的物质形式，如文字、声波、电磁波等。这种运载信息的物质，称为信息的载体。一切物质都有可能成为信息的载体。

概率信息 概率信息是由美国数学家香农(C. E. Shannon)提出来的，故称香农信息或狭义信息。他是从不确定性(随机性)和概率测度的角度给信息下定义的。香农从信息源具有随机性不定度出发，为信源推出一个与统计力学的熵相似的函数，称为信息熵，而这个熵就是信源的信息选择不定度的测度，从而我们可以认为信息表征信源的不定度，但它不等同于不定度，而是为了消除一定的不定度必须获得与此不定度相等的信息量。

我们可以从下面这个例子来理解概率信息的直观意义。设甲袋中有100个球，其中50个是红球，另外50个是白球；乙袋中也有100个球，其中有25个红球，25个白球，25个兰球，25个黑球。今从甲、乙口袋中各取出一个球。当被告知，从甲袋中取出的球是红球，从乙袋中取出的球也是红球时，那么这两个消息包含的信息量是不相同的。由于从甲袋中取出一个红球的概率大，不确定性小，因此信息量小；而从乙袋中取出一个红球的概率小，不确定性大，故信息量大。

至此,我们已经了解到信息不是消息,而消息也不同于信号。下面我们概括一下信息、消息和信号三者的含义及其差异。

信息 信息是一个十分抽象而又复杂的概念,它包含在消息之中,是通信系统中传送的对象。信息作为客观世界存在的第三要素,与物质、能量相比,具有一些特殊的性质。

1. **信息是无形的** 信息不同于物质和能量,它是看不见、摸不着的。信息不具有实体性。

2. **信息是可共享的** 信息是可以共享的,信息的交流,不会使交流者失去原有的信息,而且还可以获得新的信息。信息的共享是无限的,信息可以由甲传递给乙,又可以由乙传递给丙,依此类推等等。信息的共享性,给人类社会的发展起到了积极推动作用。信息扩散越快、越广,就会越加速人类社会的文明进程。但是,现实的人类社会在各方面都存在着激烈的竞争,例如军事中的电子综合战,商业活动中的市场竞争等,这些现象阻碍了信息性质的发挥。信息虽具有共享性,原占有者不会因信息传递而丢失这个信息,但占有者和获得者可以利用同一个信息进行竞争和对抗。因此,在信息的占有和传播方面,存在着斗争,以限制信息的共享,如密码、数据库保安措施等就是这种斗争中的产物。

3. **信息是无限的** 信息像物质、能量一样,对于人类也是一种资源。信息作为事物运动状态和存在状态的一般描述,和事物及它们的运动一样是永恒的、无限的。信息如海阔天空,永远在产生、更新、演变,是一种取之不尽、用之不竭的源泉。信息的无限性还表现在时空上的可扩展性。例如,今天气象台报告的气象数据所包含的信息,明天就失去价值,明天又会产生新的信息。如果将所有这些信息积累起来作为历史资料,又可成为关于气候演变的重要信息,给人类创造幸福。

4. **信息是可量度的** 信息论中最重要的问题,就是要解决信

息数量与质量的度量。信息度量应满足信息的三个基本方向：结构的、统计的和语义的。

结构理论是研究大量信息的离散构造的。它通过简单计算信息元方法、或者用大量信息简易编码所提供的组合方法对信息进行测量。

统计理论是利用熵的概念，作为统计发生概率的不确定性度量，从而得出这些或那些消息的信息量。

消息 消息是比较具体的概念，但是它不是物理的。消息是信息的载荷者。消息具有不同的形式，例如语言、文字、符号、数据、图片等，所有这些形式都是能够被人们感觉到的。构成消息的条件有二个：一是构成的消息能够被通信双方所理解；二是可以在通信中进行传递和交换。在日常生活中，从电报、电话、电视等通信系统中得到的是一些描述各种主客观事物运动状态或存在形式的具体消息。需要指出的是，同一个消息可以含有不同的信息量，而同一信息可以用不同形式的消息来载荷。

信号 信号是消息的表现形式，消息则是信号的具体内容。信号是消息的载体。信号是表示消息的物理量。一般指随时间而变化的电压或电流称为电信号。电信号与非电信号可以比较方便地互相转换。在实际应用中常常将各种物理量，如声波动、光强度、机械运动的位移或速度等，转变为电信号，以利于传输。

§1.2 通信系统模型

信息论研究的主要问题是通信系统设计中如何实现信息传输、存贮和处理的有效性和可靠性。我们将通信系统定义为信息的传输系统，例如电报、电话、图象、计算机和导航等系统。实际的通信系统虽然形式和用途各不相同，但从信息传输的角度来看，在本质上有许多共同之处，它们均可概括为如图1.1所示的基

本模型。

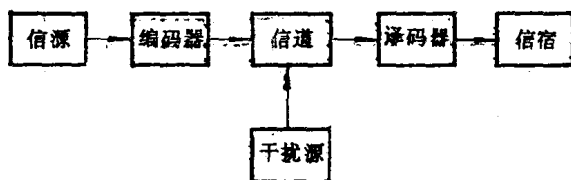


图1.1 通信系统基本模型

信源：产生消息的源。消息可以是文字、语言、图象等。它可以是离散序列，也可以是连续形式，但都是随机发生的，亦即在未收到这些消息之前不可能确切地知道它们的内容。这些消息可以用随机变量或随机过程来描述。信源研究的主要内容是消息的统计特性和信源产生信息的速率。

编码器：将信源发出的消息变换成适于信道传送的信号的设备。它包含下述三个部分：

信源编码器：在一定的准则下，信源编码器对信源输出的消息进行适当的变换和处理，其目的在于提高信息传输的效率。

纠错编码器：纠错编码器是对信源编码器的输出进行变换，用以提高对于信道干扰的抗击能力，亦即提高信息传输的可靠性。

调制器：调制器是将纠错编码器的输出变成适合于信道传输要求的信号形式。纠错编码器和调制器的组合又称为信道编码器，如图 1.2 所示。在实际系统中不一定每个编码器都含有这三个部分，有的只有其中的两个部分或一个部分组成。

信道：把载荷消息的信号从发射端传到接收端的媒质或通道，它是包括收发设备在内的物理设施。在狭义的通信系统中，实际信道有架空明线、电缆、波导、光纤、无线电波传播空间等。当然，对广义的通信系统来说，信道还可以是其他传输媒介。

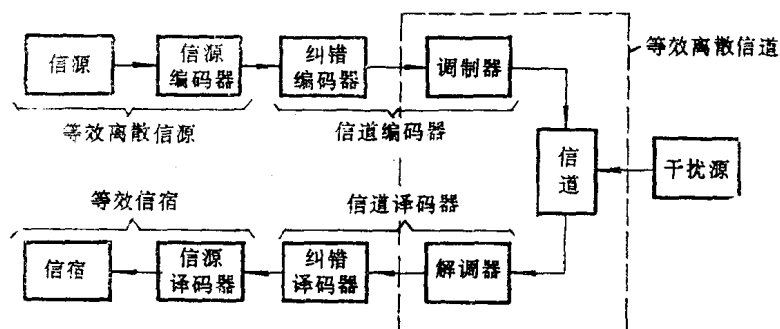


图1.2 通信系统模型

干扰源：在信道中引入噪声和干扰，这是一种等效的表达方式。为了分析方便，把在系统中其他各部分产生的噪声和干扰都等效成信道干扰，并集中作用于信道。由于噪声和干扰往往具有随机性，因此它是划分信道的重要因素，并且是决定信道传输能力的决定因素。研究信道的中心课题是它的统计特性和传输能力。

实际干扰可以分成两大类：

加性干扰：由外界引入的随机干扰，如天电干扰、设备内部噪声，它们与信道的输入信号统计无关，信道的输出是输入信号和干扰的和。

乘性干扰：信号在传播过程中由于物理条件的变化引起信号参量的随机变化而构成的干扰，此时信道的输出信号是输入信号与某些随机参量相乘的结果。

译码器：编码的逆变换。它要从受干扰的信号中最大限度地提取出有关信源输出消息的信息，并尽可能地复现信源的输出。译码器也可分为信源译码器和信道译码器。译码器的输出送给信宿。

信宿：信息传送过程中的接收者，即接收消息的人或物。

通信系统的模型不是不变的,这要视实际情况而定。图1.1和1.2给出的模型只适用于收发两端单向通信的情况,它只有一个信源和一个信宿,信息传输也是单向的。在网通信情况下,可能有很多分开的信源、信道和信宿进行信息交换。例如广播通信是一个输入、多个输出的单向传输通信,而卫星通信网则是多个输入、多个输出和多向传输的通信。要研究这些通信系统中的信息传输和处理问题,只要对两端单向通信系统模型作适当修正,引出多用户通信系统模型,并将单路通信的信息理论发展成为多用户信息理论,这是近20年来信息理论研究中的一个十分活跃的课题。

§1.3 信息论的形成和发展

香农信息论的基本任务是为设计有效而可靠的通信系统提供理论依据。

信息论是信息科学的主要理论基础之一,它是在长期通信工程实践和理论上发展起来的。信息论自诞生到现在不过40多年,这在人类的历史长河中是十分短暂的,但它的诞生和发展对科学技术的影响是相当深刻的。现在它已成为一门独立的理论学科。回顾其发展历史,我们将会认识到,在现代科学技术的高度发展过程中,学习和掌握信息理论日益成为一种必要。

通信系统对人类社会的发展有着十分重要的作用。日常生活、工农业生产、科学实践等一切都离不开信息传递和流动。电的通信系统(电信系统)已有150年的历史。它在信息论的发展过程中起到了积极推动作用。

1924年奈奎斯特(H. Nyquist)解释了信号带宽和信息率之间的关系。他指出,如果以一个确定的速率来传输电报信号,就需要一定的带宽。他将信息率和带宽联系起来了。

1928年哈特莱(R. V. Hartley)引入了非统计(等概率事件)

信息量概念。他提出信息量等于可能消息数的对数。他的工作对后来香农的思想是有影响的。

1936年阿姆斯特朗(E.H. Armstrong)提出在传输过程中增大带宽可以增强抑制干扰的能力。根据这一思想,他提出了宽频移的频率调制方法。

1936年达得利(H. Dudley)发明了声码器。他提出的概念是通信所需要的带宽至少同所要传送的消息的带宽应该一样。

40年代初期,由于军事上的需要,维纳(N. Wiener)在研究防空火炮的控制问题时,提出了“平稳时间序列的外推、内插与平滑及其工程应用”的论文。他把随机过程和数理统计的观点引入通信和控制系统中来,揭示了信息传输和处理过程的统计本质。他还利用早在30年代初他本人提出的“广义谐波分析理论”对信息系统中的随机过程进行谱分析。这就使通信系统的理论研究引起了质的飞跃,取得了突破性进展。

1948年香农在贝尔系统技术杂志上发表了两篇有关“通信的数学理论”的文章。在这两篇论文中,他用概率测度和数理统计的方法,系统地讨论了通信的基本问题,得出了几个重要的而带有普遍意义的结论,并由此奠定了现代信息论的基础。

从50年代开始,信息论在学术界引起了巨大的反响。1951年美国IRE成立了信息论组,并于1955年正式出版了信息论汇刊。在此期间,一些科学家(包括香农本人)做了大量工作,发表了许多重要文章。他们将香农已得到的数学结论作了进一步的严格论证和推广。其中,1954年范恩斯坦(A. Feinstein)的论著是有很大贡献的。1959年香农发表了“保真度准则下的离散信源编码定理”,系统地提出了信息率失真理论。这一理论是频带压缩、数据压缩的数学基础,为各种信源压缩编码的研究奠定了理论基础,一直到今天仍然是信息论领域的重要研究课题。

整个50年代,维纳理论也有很大进展。维纳的工作是从研究

处在统计平衡的时间序列开始的。维纳证明：在一定条件下，处在统计平衡的时间序列的时间平均等于集平均，基于此点，维纳提出了他的著名的滤波和预测理论。维纳理论在滤波理论中的开拓作用是无容置疑的，他在滤波方法上的创见仍然直接影响着后来的科学工作者。

50年代中期，空间技术飞速发展，要求对卫星轨道进行精确测量。为此，人们将滤波问题以微分方程表示，提出了一系列适应空间技术应用的精确算法。60年代初卡尔曼(R.E.Kalman)和布西(R.S.Bucy)提出了递推滤波算法，成功地将状态变量引入到滤波理论中来，用消息与干扰的状态空间模型代替了通常用来表示他们的协方差函数。将状态空间描述与离散时间更新联系起来，更适于计算机直接进行运算，而不是去寻求滤波器冲击响应的明确表示式。这种算法得出的是表征状态估值及其均方误差的微分方程，给出的是递推算法。这就是著名的卡尔曼滤波理论，或称为卡尔曼-布西滤波。

70年代以后，卡拉思(T.Kailath)等人发展了新息过程理论，这一理论不仅可以用来解决白高斯型检测问题和线性最小平方估计问题，而且也可以用来解决非高斯型检测和非线性最小平方估计问题。

1961年香农发表的论文“双路通信信道”开拓了多用户理论的研究。随着卫星通信、计算机通信网络的迅速发展，多用户理论的研究取得了许多突破性进展。从70年代以后，人们从经典的香农单向通信的信息论推广到多用户信息理论。多用户信息理论成为当前信息论的中心研究课题之一。

从20世纪40年代开始，信息理论与技术在人类历史长河中已经取得了长足的进展，它已形成一门综合性的新兴学科，在人们面前展视出光辉灿烂的前景。现在，信息理论与技术不仅直接应用于通信、计算机和自动控制等领域，而且还广泛渗透到生物学、