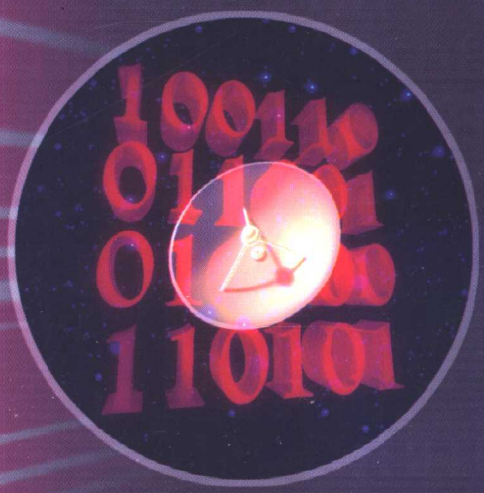
普通高等教育“十五”国家级规划教材

信息论与编码



仇佩亮 编著

高等教育出版社

普通高等教育“十五”国家级规划教材

信息论与编码

仇佩亮　编著

高等教育出版社

内容提要

本书是“十五”国家级规划教材。信息论和编码是研究信息传输和信息处理过程中一般规律和具体实现的一门应用科学，是现代信息科学和技术工程的基础理论。本书是在吸取了国内外经典教材的优点，结合作者教学经验的基础上编写而成。本书写得深入浅出，既保持理论的完整性、系统性，又概念清楚、易读好懂，同时介绍了信息论的新发展。教材主要介绍Shannon信息理论和相关的编码技术。内容包括如下11章：绪论、熵和互信息、离散无记忆信源的无损编码、信道、信道容量及信道编码定理、率失真理论和保真度准则下的信源编码、受限系统和受限系统编码、线性分组纠错编码、循环码、卷积码、Turbo码与迭代译码、多用户信息论与多用户编码。

本书适合作为高等院校电子信息类专业的高年级本科生和研究生教材，对于从事信息科学和技术领域工作和研究的人员也极具参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

信息论与编码/仇佩亮编著. —北京：高等教育出版社，2003.12

ISBN 7-04-013047-5

Ⅰ.信… Ⅱ.仇… Ⅲ.①信息论-高等学校-教材②编码理论-高等学校-教材 Ⅳ.O157.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第095841号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社　　址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网　　址	http://www.hep.edu.cn
总　　机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经　　销	新华书店北京发行所		
印　　刷	高等教育出版社印刷厂		
开　　本	787×960　1/16	版　　次	2003年12月第1版
印　　张	32.5	印　　次	2003年12月第1次印刷
字　　数	610 000	定　　价	40.10元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

前　言

信息论与编码理论是50多年前由美国科学家C.E.Shannon、R.W. Hamming等人创立的。它以Shannon的不朽名著《通信的数学理论》为里程碑。几十年来许多优秀的学者、工程师共同努力推动了信息论与编码的理论和实践的发展，现在信息论与编码理论已成为信息科学的基础理论，也成为20世纪后半叶数字化革命的主要理论和技术支柱。

国外的一流学校在20世纪50年代末就开始设立信息论与编码课程，目前国内各高等院校的电子信息类专业本科生、研究生也都已把信息论与编码作为一门重要的专业基础理论课。由于信息论与编码的许多思想和方法已广泛地渗透到许多领域，它的许多研究成果也具有普遍意义，因此信息论与编码在许多领域，如在计算机、系统科学、统计学、物理学、生物学、经济学甚至社会学中都获得了成功的应用。信息论与编码理论对于从事这些相关领域工作和学习的人员来说也极具参考价值。

本书在作者多年教学经验和研究实践的基础上编写而成，由于信息论与编码本身既是一门工程科学，同时又是一门应用数学，因此作为教材必须既保持论述的科学性、严谨性，又要求深入浅出、通俗易懂，能为工程师所理解。本书中对于抽象的概念辅以必要的例子予以说明，对于复杂的证明则着重讲清证明思路而忽略繁琐的细节。本书所要求的数学基础是初等的，只要具有概率论、随机过程、线性代数和离散数学中的初等知识就足够了，但也要求读者具有一定的抽象思维能力。对于像Shannon理论中的精华——典型列理论和随机编码方法必须要慢慢地咀嚼、细细地品味才能体会它的真谛。

信息论与编码是一门应用科学，它最基本的应用背景是通信。著名的通信理论家Viterbi说过，如果把现代通信技术比喻成飞船，则晶体管是它的引擎而信息论是它的方向盘。在本书中突出了信息论和编码的应用，特别强调在通信中的应用。这样理论与应用结合，有助于读者了解产生理论和解决问题的实际背景，也提高了工科学生的学习兴趣。

信息论与编码是一门不断发展的学科，虽然信息论与编码中许多新理论、新概念可以追溯到Shannon原著，但是对它们深刻的理解、生动的应用和美妙的理论化则是后来许多学者发展的，许多成果也是Shannon本人始料不及的。因此

本书除了对于信息论与编码的基本内容进行全面的介绍外，还对目前信息论与编码中某些研究热点进行了介绍，如关于受限系统和受限系统编码、多用户信息论与多用户编码、Turbo 码与迭代译码算法等。

本书分为 11 章，除第 1 章绪论外，第 2 章介绍信息量的定义和性质，第 3 章介绍离散信源的无损压缩编码，第 4 章介绍信道、信道容量和信道编码定理，第 5 章介绍失真受到限制的信源压缩编码问题，第 6 章介绍受限系统和受限系统编码，第 7 章介绍线性分组纠错编码，第 8 章介绍循环码，第 9 章介绍卷积码，第 10 章介绍 Turbo 码与迭代译码算法，第 11 章介绍多用户信息论与多用户编码。除了第 6、第 10、第 11 章以外的绝大多数内容适合于本科教学，其中带有 * 号的章节适合于研究生或具有一定基础的读者进一步深入学习。

几十年来国内外有不少信息论与编码方面的优秀教科书和专著，作者在编写本书过程中得益于以前对于这些著作的学习，此外，在编写本书过程中还参阅了许多文献、资料，在此作者对于这些著作的作者深表谢意。

作者要特别感谢清华大学朱雪龙教授，他非常仔细地审阅了本书全部内容并提出许多宝贵意见，对提高本书的质量起了重要的作用。作者也要感谢浙江大学朱华飞博士、张朝阳博士和谢磊博士，他们在信息论与编码课程教学中试用了本书的部分内容，为本书提出很好的改进意见。最后要感谢作者的妻子陈邦媛教授，她不仅关心作者的生活，承担起全部家务，为作者创造了一个安宁的写作环境，而且对于本书内容的组织安排、深浅分寸的掌握提出许多建设性意见，没有她的支持本书是不可能完成的。

限于作者的水平，本书中不妥和谬误之处难免，恳请读者批评指正。

仇佩亮

2003 年 7 月于杭州浙江大学求是村

策划编辑　张培东
责任编辑　关　旭
封面设计　李卫青
版式设计　王艳红
责任校对　胡晓琪
责任印制　韩　刚

郑重声明

目　录

第1章
绪论

信息论是应用近代概率统计方法来研究信息传输、交换、存储和处理的一门学科，也是源于通信实践发展起来的一门新兴应用科学。

信息是系统传输、交换、存储和处理的对象，信息载荷在语言、文字、数据、图像等消息之中。在信息论中，信息和消息是紧密相联的两个不同概念。同样一个消息，比如一张当日的报纸，对于不同的人从中可获得的信息是不一样的；同样的天气预报"明天有雨"，对于干旱地区和雨量充沛地区来说其信息含量也不一样。一张纸写上几个字成为一封家信，对于收信者是家书抵万金，但对旁人可能是废纸一张。因此信息是一种奇妙的东西，它是有别于物质和能量的一种存在。信息的本质和它的科学定义是当前科学界，乃至哲学界热衷研究的课题。信息的重要性是毋庸置疑的。控制论创始人维纳说过："要有效地生活，就要有足够多的信息"。目前社会上流行一些提法，如"信息、材料、能源是现代科学的三大支柱"、"信息、物质、能量是构成一切系统的三大要素"……这些提法充分说明了人们对信息重要性的认识。

信息的度量是信息论研究的基本问题。从目前的研究来看，要对通常意义下的信息给出一个统一的度量是困难的。存在许多种关于信息度量的定义，但至今最为成功，也是最为普及的信息度量是由信息论创始人香农(Shannon)在他的光辉著作《通信的数学理论》[17]中提出的，是建立在概率模型上的信息度量。他把信息定义为"用来消除不确定性的东西"。既然信息与不确定性相联系，因此用概率的某种函数来描述不确定性是自然的，所以香农用

$$I(A) = -\log P(A)$$

来度量事件 A 的发生所提供的信息，其中 $P(A)$ 为事件 A 的概率。这个定义与人们的直觉经验相吻合。如果一个随机试验有 N 个可能结果或者说一个随机消息有 N 个可能值，若它们出现的概率分别为 $p_1, p_2, \cdots, p_N$，则这些事件的自信息的平均值

$$H = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log p_i$$

作为这个随机试验或随机消息所提供的平均信息也是合理的。H 也称为熵，这是借助于统计物理学中的一个名词。事实上熵作为信息的代名词也是由 20 世纪伟大的数学家、物理学家冯·诺依曼向香农建议的。在物理学中熵是描述系统的不规则性或不确定性程度的一个物理量。

信息论所研究的通信系统基本模型如图 1.1.1 所示。

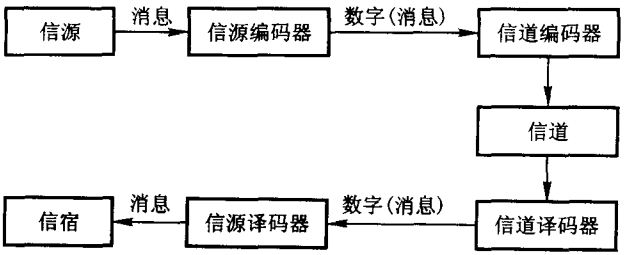


图 1.1.1 通信系统的基本模型

信源是产生消息(或消息序列)的源。消息通常由符号序列或时间函数组成。消息取值服从一定的统计规律，所以信源的数学模型可以是一个离散的随机序列或连续的随机过程。

信源编码器把信源产生的消息变换成数字序列。对无损信源编码来说，信源编码器的目的是在保证能从其输出数字序列中无错误地恢复出输入消息序列的前提下，减少输出数字序列的速率，也就是保证在不失真的条件下对输入消息序列进行压缩。在允许失真的情况下，信源编码的目的是对给定信源，在保证消息平均失真不超过某给定允许值 D 的条件下，尽量减少输出数字序列的速率。

信道在实际通信系统中是指传输信号的媒介或通道，如架空明线、电缆、电离层、人造卫星等。在信息论的模型中也把发送端和接收端的调制、解调器等归入信道，并把系统中各部分的噪声和干扰都归入信道中。在信道的输入、输出模型中，根据噪声和干扰的统计特性，用输入、输出的条件概率(或称转移概率)来描述信道特性。

信道编码器把信源编码输出的数字序列变换成适合于信道传输的，由信道入口符号组成的序列。信道编码器的最主要作用是要对其输出序列提供保护，以抵抗信道噪声和干扰。

信道译码器和信源译码器分别是信道编码和信源编码的反变换，信宿是消息的接收者，即消息的归宿。

信息论解决了通信中的两个基本问题。首先对于信源编码，信息论回答了“达到不失真信源压缩编码的极限(最低)编码速率是多少?”这一问题。香农的答复是这个极限速率等于该信源的熵 H。事实上香农认为每个随机过程，不管是音乐、语言、图像，都有一个固有的复杂性，该随机过程不能被无失真地压缩到