电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业

信息论与编码基础

唐朝京　雷菁　编著

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY　http://www.phei.com.cn

电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业

信息论与编码基础

唐朝京　雷　菁　编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内 容 简 介

本书以香农信息论为基础，系统地介绍了通信系统中两大编码理论。重点阐述了香农信息论的基本理论、信源压缩编码及信道编码的原理与具体方法，力图将信息理论及编码理论与实际应用紧密结合。

全书共分 7 章，其中包括：信息的概念与测度，离散信源、离散信道，信源压缩编码基础，信道编码基本理论，线性分组码和常用纠错码及其应用。

本书文字通俗，概念清晰，重点突出，在内容上既有必要的数学分析，又强调物理概念的理解及直观图示。本书可作为通信工程及信息类专业的高年级本科生教材，也可作为其他专业学生及通信科技工作者的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

信息论与编码基础/唐朝京，雷菁编著. —北京：电子工业出版社，2010.2
(电子信息与电气学科规划教材·电子信息科学与工程类专业)
ISBN 978-7-121-10251-6

Ⅰ. 信… Ⅱ. ①唐…②雷… Ⅲ. ①信息论②信源编码—编码理论③信道编码—编码理论 Ⅳ. TN911.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 010279 号

责任编辑：陈晓莉
印　　刷：
装　　订：北京京师印务有限公司
出版发行：电子工业出版社
　　北京市海淀区万寿路 173 信箱　邮编 100036
开　　本：787×1092　1/16　印张：15　字数：384 千字
印　　次：2010 年 2 月第 1 次印刷
印　　数：4000 册　定价：24.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系。联系及邮购电话：(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010)88258888。

前　言

我们正处于一个通信与信息技术飞速发展的时代，对于通信工作者来说，这是个极好的机遇。经过一百多年的不断创新和进步，通信技术已取得了极其辉煌的成就，建立在宽带通信网络基础上的综合有线、无线多媒体通信系统及各种信息应用系统将构成未来信息社会的基本内涵，将为国民经济及社会生活全面信息化提供最重要的保证。

通信技术的发展得益于通信理论的正确指导和通信关键工程技术的不断突破。从理论的角度来看，通信的两大基本问题是信息传输的可靠性和有效性。自从美国科学家C. E. Shannon于1948年创立信息论以来，经过众多通信科技工作者的努力，信息论和编码理论的研究取得了丰硕的成果。在信息的度量、信息传输特性、纠错编码与压缩编码性能极限等理论问题及各种纠错编码和信源压缩编码方法、信息传输容量的研究方面，都取得了重大突破，有力地促进了通信科技的不断发展。Shannon信息论为人们指出了实现有效而可靠通信的基本方向和理论极限，它对实际通信系统的设计产生了深刻的影响，通信工程人员在信息论方面的基础将对其事业的发展发挥重要作用。

距离作者在国防科技大学出版社出版《信息论与编码基础》一书已有6年，这期间本书被多次重印。为适应信息技术发展的新形势，应广大师生的要求，作者结合这些年本书在教学中的使用情况和科研体会，重新编写了本书。在教材内容上充实了信息理论特别是编码技术发展的新成果和应用。书中包括香农信息论的基本内容及主要结论；压缩编码的基本原理；纠错原理、方法及其在现代通信系统中的应用等章节。内容涵盖了通信中有关信息处理的基本原理和方法。在编写过程中我们强调基本原理的理解，取材注意循序渐进、难度适中，并注重理论对实际应用的指导作用，在写法上力求条理清楚，逻辑性强，每章的习题包括基础部分和综合扩展部分。因此，本书适宜于作为通信工程及信息类专业的高年级本科生教材，也可作为其他专业学生及通信科技人员的参考书。

全书共分7章，前4章由唐朝京编写，后3章由雷菁编写，她还参与了第四章的增补工作。本书在编写过程中得到了湖南大学易波副教授、国防科技大学黄英、陈明霜以及信息论课程组老师的帮助，还有多名研究生参与了文字校对工作。在出版过程中得到了电子工业出版社的大力支持，在此一并表示衷心的感谢！

限于作者视野及学术水平，书中谬误疏漏之处实所难免，恳请读者批评指正。

编　者

2009年10月于长沙

目　录

试读结束：需要全本请在线购买：　www.ertongbook.com

第1章 绪 论

信息论是人们在长期通信工程的实践中，由通信技术与概率论、随机过程和数理统计相结合逐步发展起来的一门新兴科学。信息论的奠基人一般公认为是美国科学家香农(C. E. Shannon)，他于 1948 年发表的著名论文《通信的数学理论》("A Mathematical Theory of Communication")为信息论的诞生和发展奠定了理论基础。在香农信息论的指导下，为提高通信系统信息传输的有效性和可靠性，使系统达到最优化，人们在信源编码、信道编码以及保密编码等领域进行了卓有成效的研究，取得了丰硕的成果。近几十年来，随着信息理论的迅猛发展和信息概念的不断深化，信息论所涉及的内容早已超越了通信工程的范畴，它已渗透到许多学科，日益得到众多领域的科学工作者的重视。

本章首先引出信息的概念，然后讨论了信息论的研究对象、目的和内容，并分析了信息论对信源编码和信道编码研究的指导意义，最后简要回顾了信息论与编码的发展历史。

1.1 信 息 概 念

1.1.1 信息的概念及其内涵

我们正生活在由工业社会向信息社会过渡的重要历史转折时期，有关信息的新名词、新术语层出不穷，信息产业在社会经济中所占份额越来越大，信息基础设施建设与发展速度之快成了我们这个社会的重要特征之一，物质、能源、信息构成了现代社会生存发展的三大基本支柱。那么，如此神通广大、无处不在、无所不能的信息究竟是什么呢?

可以说，我们周围的世界充满了信息。报纸、电台、电视台每天都在向我们发送着大量的信息；通过电话、传真及电子邮件，人们可以自由地交流信息；通过报纸、书刊、电子出版物及因特网等媒介，人们可以有选择地获取信息，但以上所述还远不能概括信息的全部含义。四季交替透露的是自然界的信息，牛顿定律揭示的是物体运动内在规律的信息，信息含义之广几乎可以涵盖整个宇宙，且内容庞杂，层次混叠，不易理清。目前国内外关于信息的各种定义已达近百种，原因就在于此。那么，作为一个科学名词，如何来定义信息呢?

从最本质的意义上说，信息是人们对客观事物运动规律及其存在状态的认识结果。小到一条简单的消息，大到关于宇宙的基本定律都是信息，它们无不是人们对客观事物变化规律或存在方式的认识和描述。

信息的价值在于它为人们能动地改造外部世界提供了可能。信息所揭示的事物运动规律为人们运用这些规律提供了可能，而信息所描述的事物状态也为人们推动事物向着

有利的方向发展提供了可能。人们掌握的资源和能量越多，面对同样的信息能用以改造世界的可能性也越大。今天我们所掌握的物质力量比过去增大了不知多少倍，因此，信息对于当今社会发展和人们生活的重要性较之几百年前、几十年前甚至十几年前都是不可同日而语的，这是信息社会的一个重要特征。

信息运动的一般过程包括信息获取、信息传播和信息利用三个阶段。信息在这三个阶段分别表现为语义信息、语法信息和语用信息等不同的形态。

信息获取就是利用各种手段获知事物的运动规律和现存状态，也就是获取信息的语义形态，即语义信息。信息获取的基本手段包括科学研究、调查采访及利用各种传感器等。大量科学定律和重要结论是通过科学研究和实验、利用归纳演绎等科学方法得出的；而新闻报道是通过新闻采访、调查分析、综合整理得到的；还有大量信息是利用各种专用传感器获取的，如水位计可测定水位，温度计可计量温度，摄像机可摄取视频图像等，这些都是获知事物客观状态的有效手段。信息获取过程中还必须克服随机性（“可能是什么”）和模糊性（“好像是什么”），为此原始信息获取后往往要进行相应的信息处理过程，以使语义信息凸现出来。

信息传播是指利用各种传播工具使每一条信息能为更多的人所了解，相应地，也是使每一个人能获知更多的信息。从古代的烽火报警到现代的信息高速公路，其目标都是借助于传播过程使每个接收者获得尽可能多的语义信息。而语义信息本身是不宜直接传输的，我们往往是通过抽象出的某些适于传输的最基本特征（即语法信息）使其得到传递。若将语义信息比作一栋楼房，那么我们可将它分解为图纸、材料、施工技术等语法信息，然后将这些语法信息传送到另一个地方重新组织起来，即可恢复原先的语义信息——楼房。信息传输过程主要克服的是随机性因素，因此，传输过程中的语法信息应是指表示信息的各种符号出现的随机性，以及前后符号之间的统计关联性。这种分析方法是与传输信道的噪声效果相匹配的，这也正是香农信息理论取得成功的重要原因之一。

信息利用是信息获取和信息传播的根本目的，它以恢复的语义信息为基础，结合接收者所处的特定环境，“取我所需，为我所用”，具有明显的相对性，表现了信息的语用形态，即语用信息。语用信息的这种相对性往往使信息概念表现得主观随意、不易捉摸。如甲、乙二人由于不同的知识结构和社会阅历，他们读同一本书所获取的有用信息可能差别甚大。然而信息利用是信息运动过程的最重要环节，正是对信息的广泛利用，才推动了世界日新月异的发展变化。

信息是承载在各种具体信号上的。以各种声、光、电参量表示的信号可承载语法信息。但需注意，信息与信号在本质上是有根本区别的，信号仅仅是外壳，信息则是内核，两者互相依存，但属于不同的层次。

信息与消息也不完全相同。消息描述了事物的特征和状态，因此，它与语义信息有相近之处，但它与语法信息明显不同，与语用信息也不能等价。消息是信息的感觉媒体，而信号又是消息的具体表现形式。

1.1.2 香农信息定义

1948年，香农在《贝尔系统技术》杂志上发表了名为《通信的数学理论》的著名论文。在这篇论文中，香农用概率测度和数理统计的方法系统地研究了通信的基本问题，给出了信息的定量表示，并得出了带有普遍意义的重要结论，由此奠定了现代信息论的基础。

香农针对通信的特点，主要研究信息传递过程中的语法信息。香农信息反映的是事物的不确定性。

设 q 元信源 X 的概率空间为

$$\begin{bmatrix} X \\ P(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1, & a_2, & \cdots, & a_q \\ P(a_1), & P(a_2), & \cdots, & P(a_q) \end{bmatrix}$$

则 X 中符号 a_i 的香农信息定义为

$$I(a_i) = \log \frac{1}{P(a_i)} \tag{1-1}$$

式中，$I(a_i)$称为 a_i 的自信息。由式(1-1)可知：a_i 出现的先验概率 $P(a_i)$越大，其自信息 $I(a_i)$越小；反之，a_i 出现的先验概率越小，其自信息 $I(a_i)$越大。因此自信息 $I(a_i)$描述的是随机事件 a_i 出现的先验不确定性。$I(a_i)$与 $P(a_i)$的关系如图 1-1 所示。

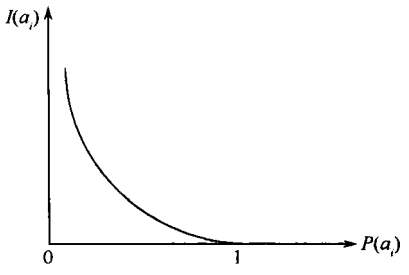

图 1-1 a_i 的自信息与其先验概率的关系

将 a_i 送上信道后，由于信道中存在干扰，假设接收端收到的符号为 b_j，b_j 可能与 a_i 相同，也可能不同，则条件概率 $P(a_i|b_j)$反映了接收端收到符号 b_j 而发送端发送为 a_i 的概率，称之为后验概率。那么，接收端收到 b_j 后，对发送端是否发送了 a_i 尚存的不确定性应为 $\log \frac{1}{P(a_i|b_j)}$，于是，接收者在收到符号 b_j 后消除的不确定性应为 a_i 的先验不确定性减去收到 b_j 后尚存的关于 a_i 的不确定性，即

$$\log \frac{1}{P(a_i)} - \log \frac{1}{P(a_i|b_j)} = \log \frac{P(a_i|b_j)}{P(a_i)} \triangleq I(a_i;b_j) \tag{1-2}$$

$I(a_i;b_j)$定义为发送 a_i 与接收 b_j 之间的互信息。

如果信道没有干扰，则后验概率 $P(a_i|b_j)$必为 1，即 b_j 必等于 a_i，此时尚存在的不确定性 $\log \frac{1}{P(a_i|b_j)} = 0$，由此可得互信息 $I(a_i;b_j) = I(a_i)$，显然，这样定义的香农信息是合理的。但需要注意的是：香农信息仅考虑了信息的语法形态，而不涉及语义信息和语用信息，它以事物的不确定性作为信息定义，非常便于利用数学工具进行定量研究，这是香农信息论取得成功的关键。

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com

1.2 信息论研究的基本问题和主要内容

1.2.1 信息论研究的基本问题

香农信息论所研究的通信系统基本模型如图 1-2 所示。

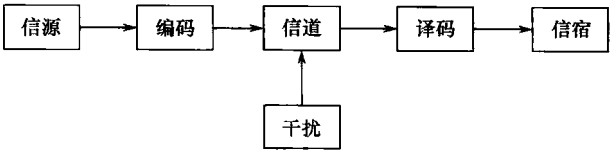

图 1-2 通信系统模型

这个模型主要包括以下 5 个部分：

(1) 信源

信源是信息的发源地，是信息运动的出发点。信源消息有多种形式，可以是离散的或连续的，也可以是时间序列，它们分别可用离散型随机变量、连续型随机变量及随机过程等数学模型表示。

(2) 编码

编码是对消息符号进行编码处理的过程。编码包括信源编码、保密编码、信道编码三大类，其中，信源编码是对信源输出的消息进行适当的变换和处理，以尽可能提高信息传输的效率，而信道编码是为了提高信息传输的可靠性而对信息进行的变换和处理。香农信息论分别用几个重要的定理给出了编码的理论性能极限，几十年来鼓舞着一批又一批通信理论工作者为达到这些极限而殚精竭虑、苦苦求索，从而推动了编码技术研究的空前繁荣。

(3) 信道

信道是信息的传递媒介。实际的信道有明线、电缆、波导、光纤、无线电波传播空间等。信息的传输不可避免地会引入噪声和干扰，为了分析方便，通常把系统所有其他部分的干扰和噪声都等效地折合成信道干扰，这些干扰被看成是一个噪声源产生的，并叠加于所传输的信号上。这样，信道的输出是已经叠加了干扰的信号。由于干扰和噪声均具有随机性，所以信道的特性同样可以用概率模型来描述，而噪声源的统计特性又是划分信道类型的主要依据。

(4) 译码

译码是把信道输出的编码信号进行反变换，以尽可能准确地恢复原始的信源符号。与编码器相对应的译码器也有信源译码器和信道译码器之分。

(5) 信宿

信宿即信息传输的目的地。

香农信息论在解决了信息的度量问题之后，主要致力于研究如何提高图 1-2 所示的通信系统中信息传输的可靠性和有效性。香农编码定理是信源编码和信道编码理论研究的重要指导方针。

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。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该固有复杂性之下，这个固有复杂性就等于该随机过程的熵。信息论对通信解决的第二个问题是关于信道编码方面的。它回答了“无差错传输信息的临界传输速率是多少?”这一问题。在香农以前，人们都认为增加信道的信息传输速率总要引起错误概率的增加，认为要使错误概率为零，则传输速率只能为零。但香农却出人意料地证明，只要信息传输速率小于信道容量，传输的错误概率可以任意地小，反过来如果超过信道容量，则传输错误是不可避免的。

1.2.2 信息论研究的主要内容

信息论研究的内容大致包括以下几个方面：

● 通信统计理论的研究

主要研究利用统计数学工具来分析信息和信息传输的统计规律，其具体内容有信息的度量，如信息速率、熵以及信道的传输能力——信道容量。

● 信源统计特性的研究

主要包括：文字、字母的统计特性；语音的参数分析和统计特性；图片及活动图像的统计特性；其他信源的统计特性。

● 收信者接收器官的研究

主要包括：人的听觉和视觉器官的特性，人的大脑感受和记忆能力的模拟。这些问题的研究与生物学、生理学、心理学的研究密切相关。

● 编码理论与技术的研究

主要包括：信源编码——用来提高信息传输效率，主要是针对信源的统计特性进行编码，所以有时也称为有效性编码；信道编码——用来提高信息传输的可靠性，主要是针对信道统计特性进行编码。

● 提高信息传输效率的研究

主要包括：功率的减少、频带的压缩以及传输时间的缩短，即快速传输问题。

● 抗干扰理论与技术的研究

主要包括：各种调制体制的抗干扰特性与理想接收机的实践。

● 噪声中信号检测理论与技术的研究

主要包括信号检测的最佳准则和信号最佳检测的实践。

由上述的讨论可以看出，信息论的研究内容极为广泛，是一门新兴的边缘学科。目前，关于信息论研究的内容，一般有以下三种理解：

(1) 狭义信息论

以客观概率信息为研究对象，从通信的信息传输问题中总结和开拓出来的理论。主要研究信息的度量、信道容量以及信源和信道编码理论等问题。这部分内容是信息论的基础理论，又称香农基本理论。

(2) 一般信息论

主要是研究信息传输和处理问题。除了香农理论以外，还包括噪声理论、信号滤波和预测、统计检测与估计理论、调制理论以及信息处理理论等。后一部分内容的主要贡献者是维纳(N. Wiener)和柯尔莫哥洛夫(A. N. Kolmogorv)等人。

维纳和香农等人都是为了使消息传送和接收最优化，运用概率论和统计数学的方法来研究如何准确地或近似地再现消息的问题，但他们之间有一个重要的区别。

维纳研究的重点是在接收端，研究消息在传输过程中受到某些因素(如噪声、非线性失真等)干扰后，在接收端怎样把它恢复、再现。在此基础上，创立了最佳线性滤波理论(维纳滤波器)、统计检测与估计理论、噪声理论等。

而香农研究的对象则是从信源到信宿之间的全过程，是收、发两端联合最优化问题，其重点是编码。香农指出，只要在传输前后对消息进行适当的编码和译码，就能保证在干扰存在时，最佳地传送消息和准确或近似地再现消息。为此发展了信息度量理论、信道容量理论和编码理论等。

(3) 广义信息论

广义信息论是一门综合性的新兴学科，它不仅包含上述两方面的内容，而且还包括所有与信息有关的自然和科学领域，如心理学、遗传学、模式识别、计算机翻译、神经生理学、语言学、语义学等有关信息的问题。概括起来，凡是能够用广义通信系统模型描述的过程或系统，都能用信息基本理论来研究。

综上所述，信息论是一门应用概率论、随机过程、数理统计和高等代数的方法来研究信息传输、提取和处理系统中一般规律的科学；其主要目的是提高信息系统的可靠性、有效性、保密性和认证性，以便达到系统最优化；它的主要内容(或分支)包括香农理论、编码理论、维纳理论、检测和估计理论、信号设计和处理理论、调制理论、随机噪声理论和密码理论等。

1.3 信息理论的发展及其在通信系统中的作用

1.3.1 信息理论的形成及与其他学科的交叉发展

信息论从诞生到今天已有60多年了,现已成为一门独立的理论科学。而编码理论与技术研究也有50多年历史了,并从刚开始时作为信息论的一个组成部分逐步发展成为比较完善的独立体系。回顾它们的发展历史,我们可以清楚地看到理论是如何在实践中经过抽象、概括、提高而逐步形成和发展的。

信息论与编码理论是在长期的通信工程实践和理论研究的基础上发展起来的。一百多年来,物理学中的电磁理论以及后来的电子学理论一旦取得某些突破,很快就会促进电信系统的创造发明或改进。例如,当法拉第于1820—1830年期间发现电磁感应定律后不久,莫尔斯就建立起人类第一套电报系统(1832—1835)。1876年贝尔又发明了电话系统,人类由此进入了非常方便的语音通信时代。1864年麦克斯韦预言了电磁波的存在,1888年赫兹用实验证明了这一预言,接着英国的马可尼和俄国的波波夫就发明了无线电通信。1907年福雷斯特发明了能把电信号进行放大的三极管,之后很快就出现了远距离无线电通信系统。20世纪20年代大功率超高频电子管发明以后,人们很快就建立起了电视系统(1925—1927)。电子在电磁场运动过程中能量相互交换的规律被人们认识后,就出现了微波电子管。接着,在20世纪30年代末和40年代初,微波通信、雷达等系统就迅速发展起来。20世纪60年代发明的激光技术及70年代初光纤传输技术的突破,使人类进入了光纤通信的新时代,光纤通信由于带宽极宽、损耗小、成本低等显著优点,已成为信息高速公路的主干道。

随着工程技术的发展,有关理论问题的研究也在逐步深入。1832年莫尔斯在电报系统中就使用了高效率的编码方法,这对后来香农编码理论的产生具有很大的启发。1885年凯尔文研究了一条电缆的极限传信率问题。1924年奈奎斯特和屈夫缪勒分别独立地指出,如果以一个确定的速度来传输电报信号就需要一定的带宽,并证明了信号传输速率与信道带宽成正比。1928年哈特莱发展了奈奎斯特的工作,并定义信息量等于可能消息数的对数,他们的工作对后来香农的思想有很大影响。1939年达德利发明了声码器,并提出:通信所需要的带宽至少应与所传送消息的带宽相同。达德利和莫尔斯都是研究信源编码的先驱。

但是直到20世纪30年代末,理论研究的一个主要不足之处是将通信看做是一个确定性的过程,这与实际情况是不相符合的。20世纪40年代初,维纳(N. Wiener)在研究防空火炮的控制问题时,将随机过程和数理统计的观点引入通信和控制系统中,揭示了信息传输的统计本质,并对信息系统中的随机过程进行谱分析,这就使通信理论研究产生了质的飞跃。1948年香农发表了著名的论文《通信的数学理论》,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，得出了无失真信源编码定理和有噪环境下的信道编码定理，由此奠定了现代信息论的基础。1959 年香农又发表了《保真度准则下的离散信源编码定理》，以后发展成为信息率失真理论。这一理论是信源编码的核心问题，至今仍是信息论的研究课题。1961 年，香农的论文《双路通信信道》开拓了多用户信息论的研究。随着卫星通信和通信网络技术的发展，多用户信息理论的研究异常活跃，成为当前信息论研究的重要课题之一。

香农信息论源于通信实践，它在通信领域的成功应用使得香农理论被称为通信的数学理论。而香农理论的思想、方法，甚至某些结论已渗透到其他学科中。

● 统计数学。

香农理论本身就是一种数学理论，它与随机过程中 Ergodic(各态历经)理论有密切关系。香农编码定理的基本核心——渐近等同分割原理(AEP)，实际上就是某种形式的大数定律。因此利用熵、互信息等概念来研究 Ergodic 系统是非常有效的。另外，用相对熵作为随机分布之间的距离，在假设检验中、大偏离理论中均有很好的应用。利用相对熵可以有效估计差错概率指数。

● 计算机科学(Kolmogorov 复杂度)。

Kolmogorov、Chaitin 和 Solomonoff 指出，一组数据串的复杂度可以定义为计算该数据串所需的最短二进制程序的长度，因此，复杂度就是最小描述长度。利用这种方式定义的复杂度是通用的，即与具体的计算机无关，该定义具有相当重要的意义。Kolmogorov 复杂度的定义为复杂度的理论奠定了基础。更令人惊奇的是，如果序列服从熵为 H 的分布，那么该序列的 Kolmogorov 复杂度 K 近似等于 H。所以，信息论与 Kolmogorov 复杂度二者有着非常紧密的联系。一般的看法认为，Kolmogorov 复杂度比香农熵更为基础。它不仅是数据压缩的临界值，而且也可以导出逻辑上一致的推理过程。

● 物理学(热力学)。

熵与热力学第二定律都诞生于统计力学。对于孤立系统，熵永远增加。热力学第二定律的贡献之一就是促使我们抛弃了存在永动机的幻想。

● 哲学和科学方法论。

最大熵准则或最大信息原则是许多科学研究中常用的准则，实践证明这个准则是有效的、合理的。信息论赋予最大熵准则以明确的内涵。最大熵准则和最小描述长度准则都是一种科学的方法论，在信息论中可找到它们的联系。这给予相信“最简单的解释是最好的”信条的人们一个科学的佐证。

另外，信息论的思想和方法还在经济、生物等方面获得应用，已产生了“信息经济学”、“信息生物学”等边缘学科。因此，人们深信信息论的学习有助于对其他学科的研究，同时其他相关学科的研究也会促进信息论的发展。比如量子力学理论与经典信息论的结合已产生了目前发展迅速、前途不可限量的量子信息论、量子编码理论和量子计算理论等。完全可以相信这些理论是属于 21 世纪的工程科学理论，它们将对 21 世纪新科技产生巨大

的推动作用。

1.3.2 编码技术的发展及其在通信系统中的作用

信息传输的可靠性是所有通信系统努力追求的首要目标。要实现高可靠性的传输，可采取如增大发射功率、增加信道带宽、提高天线增益等传统方法，但这些方法往往难度较大，有些场合甚至无法实现。而香农信息论指出：对信息序列进行适当的编码后同样可以提高信道传输的可靠性，这种编码即是信道编码(亦称纠错码)。可以说，信道编码是在香农信道编码定理的指导下发展起来的，并逐步成熟，在各种现代通信系统中发挥着重要作用。早在20世纪50年代初，汉明(R. W. Hamming)提出了重要的线性分组码——汉明码后，人们把代数方法引入到纠错码的研究，形成了代数编码理论。1957年普兰奇(Prange)提出了循环码，在随后的十多年里，纠错码理论研究主要是围绕着循环码进行的，取得了许多重要成果。由于循环码具有性能优良、编译码简单、易于实现等特点，因此，目前在实际差错控制系统中所使用的线性分组码几乎都是循环码。1959年由霍昆格姆(Hocquenghem)、1960年由博斯(Bose)和查德胡里(Chaudhari)各自分别提出了BCH码，这是一种可纠正多个随机错误的码，是迄今为止所发现的最好的线性分组码之一。1955年埃莱亚斯(Elias)提出了不同于分组码的卷积码，接着沃曾克拉夫特(Wozencraft)提出了卷积码的序列译码。1967年维特比(Viterbi)提出了卷积码的最大似然译码法——Viterbi译码法，这种译码方法效率高、速度快、译码较简单，目前得到了极为广泛的应用。1966年福尼(Forney)提出级联码概念，用两次或更多次编码的方法组合成很长的分组码，以获得性能优良的码，尽可能接近香农限。如20世纪80年代采用的一种以码长 $n=255$ 的RS码为外码、以约束长度为7，码率为1/2的卷积码为内码的级联码，且内码采用Viterbi译码，即具有非常好的性能，在 10^{-5} 误码率条件下，所需信噪比仅为0.2dB。

20世纪70年代是纠错码得到广泛应用的年代。美国在20世纪70年代初发射的“旅行者”号宇宙飞船中成功地应用了纠错码技术，使宇宙飞船在30亿公里的遥远距离外向地面传回了天王星、海王星的天文图片，导致了一系列天文学新发现，从而使所有通信工作者大为振奋。20世纪80年代初以来，戈帕(Goppa)等人从几何观点出发，利用代数曲线构造了一类代数几何码。目前代数几何码的研究方兴未艾。20世纪80年代，纠错码技术开始渗透到许多领域，并取得了很大的收获。如纠错与调制技术相结合产生的TCM(trellis code modulation)技术，已作为国际通信标准技术而推广使用。

1993年C. Berrou提出的Turbo码，其编码通过对一组信息序列进行交织后产生两组或两组以上校验序列而形成整个码字，译码采用软输入软输出的迭代译码算法。在采用64500bit交织、18次迭代时，1/2码率的Turbo码的性能距香农限仅0.7dB。随着Turbo码的应用，1995年Mackey和Neal重新发现低密度奇偶校验码(LDPC：low densi-

试读结束：需要全本请在线购买： www.ertongbook.com