“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材

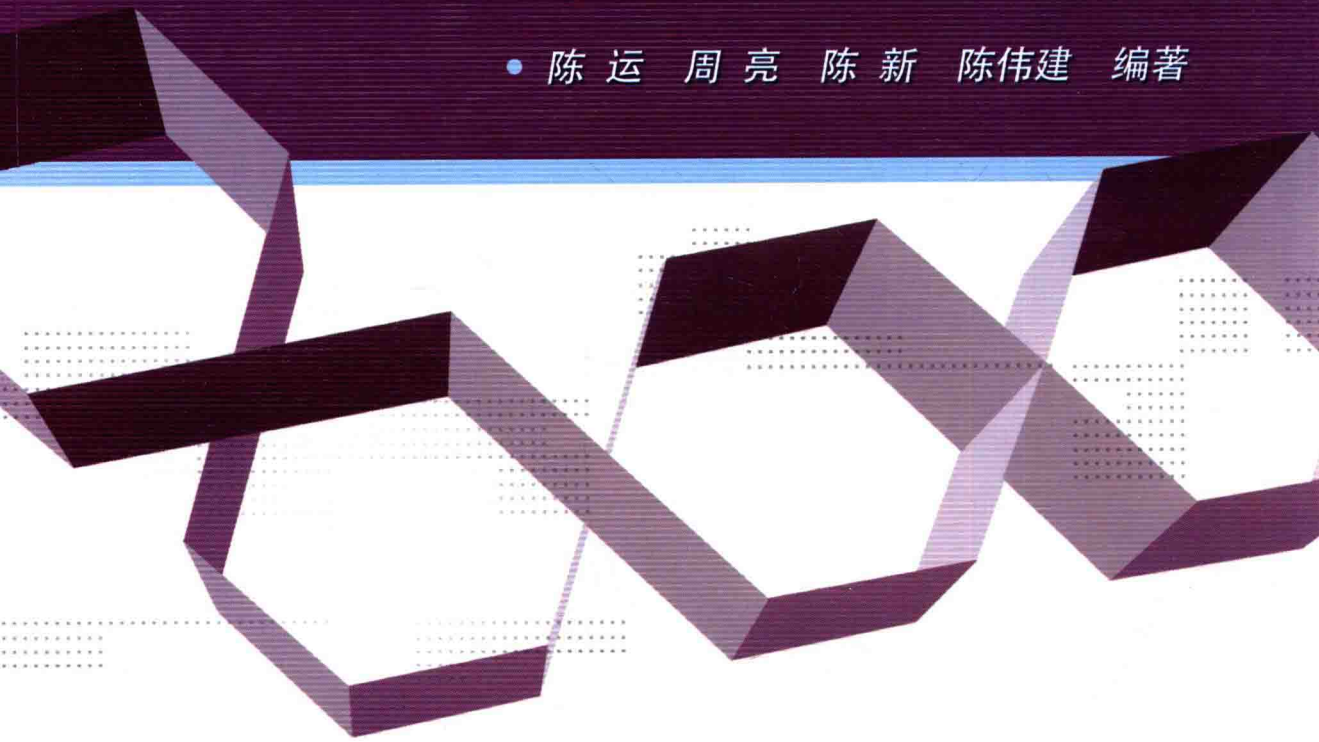
电子信息类精品教材

信息论与编码

Information Theory and Coding

（第3版）

陈运 周亮 陈新 陈伟建 编著



中国工信出版集团

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

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息类精品教材

信息论与编码

（第3版）

陈 运 周 亮 陈 新 陈伟建 编著

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

内 容 简 介

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本书系统介绍和论述了信息的基本概念；信息论的起源、发展及研究内容；香农信息论的三个基本概念：信源熵、信道容量和信息率失真函数，以及与这三个概念相对应的三个编码定理；解决通信系统有效性、可靠性和安全性的三类编码：信源编码、信道编码和安全编码——密码的基本方法，以及密码安全性与信息论的关系等内容。为了便于教学和读者自学，每章后面都附有习题。

本书不追求高深的数学理论，尽可能以通俗易懂、形象生动的语言强化物理概念的描述，特别适合于初学者。已掌握工科高等数学和工程数学的读者都能读懂本书。

本书适合作为高等院校电子信息类相关专业高年级本科生的教材，也可作为低年级研究生的教学参考书，还可供从事信息科学与技术的科研人员和工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

信息论与编码 / 陈运等编著. —3 版. —北京：电子工业出版社，2016.1
电子信息类精品教材
ISBN 978-7-121-27700-9

Ⅰ. ①信… Ⅱ. ①陈… Ⅲ. ①信息论－高等学校－教材 ②信源编码－高等学校－教材 Ⅳ. ①TN911.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 284155 号

策划编辑：韩同平
责任编辑：韩同平　　特约编辑：李佩乾
印　　刷：三河市华成印务有限公司
装　　订：三河市华成印务有限公司
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：12.5　字数：400 千字
版　　次：2002 年 8 月第 1 版
　　2016 年 1 月第 3 版
印　　次：2016 年 1 月第 1 次印刷
定　　价：35.90 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。

第 3 版前言

1948 年，美国科学家香农(C. E. Shannon)在通信理论的研究中独辟蹊径，抓住通信信号随机性的本质，提出用随机样本概率的对数度量有效通信量，并发表了题为“通信的数学理论”的划时代学术论文，从而创立了信息论。67 年，在人类历史的长河中十分短暂，但信息论对人类社会发展和科学技术进步的巨大贡献却是用语言无法形容的。它不仅奠定了电子信息科学各学科和技术领域的理论基础，也早已渗透到经济管理、语言、艺术、人文社会科学领域，其影响之深、之远、之广超乎想象，堪称 20 世纪最伟大的贡献之一。

信息论的问世催生了许多新兴的学科和技术，各学科和技术的不断交叉、融合又产生了许多新的问题，反过来促进信息科学理论的研究和深化。科技人员对信息要素的深入挖掘使得新型应用层出不穷，进一步催化了新兴技术的迅速生长：可视化技术、虚拟技术、网络技术、智能技术、3D 打印技术、可穿戴技术、边信道攻击技术、脑认知技术、物联网……以前的科幻已经或正在变成现实。所有的变化都离不开信息科学与技术。

生活在现代的人们也尽情享受着信息科学与技术的众多成果：装上“微信”软件，你可以同远在天边的亲朋好友聊天；应用移动支付产品，你可以随时随地购买任何需要的物品；有了智能家居系统，你可以远程控制电子厨房在你下班到家之前准备好美味的饭菜；接入远程医疗系统，你可以请地球对面的医疗专家为你诊病；在建立了智慧交通系统的城市，你可以更安全、更便捷地出行……显而易见，信息科学技术已与人们的工作和生活息息相关。

信息科学与技术像一株参天大树，早已枝繁叶茂，但仍在生命周期的初始，迸发出勃勃生机。这株大树利用发达的根系吸收各学科和技术的营养，在信息科学的主干中融汇，不断生发出新的技术分支，绵延不息地开花结果。例如 20 世纪末问世的边信道攻击技术，利用时间、功耗、电磁辐射等“边信息”泄露破解经过严格理论证明和实验验证为“安全”的密码算法，震惊了国际密码学界。究其原因，发现实乃信息的运动要素被挖掘并利用的结果。这些令人耳目一新的科技成果的不断涌现，展现出信息科学与技术的无穷魅力。

信息论作为信息科学与技术的理论基础，理所当然是高等学校电子信息类及相关专业的必修课。

本书第 1 版 2002 年出版，2006 年被遴选为**普通高等教育“十一五”国家级规划教材**；第 2 版 2007 年出版，2012 年被遴选为**“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材**。

本教材出版十多年来，收到来自国内数十所院校师生的电子邮件和信函，就书中的有关问题进行交流，或对本书提出建议和批评。作者在此感谢国内广大读者对本书的关注和厚爱！

没想到一本小众化的教材会有几百所学校使用，欣慰之余也感到无形的压力。早该修订的第 3 版一直没完成，实在愧对读者！

在教学实践中我们发现，先理论、后应用的板块式讲解方法与当代学生心理和认知规律有较大差别。一方面，现代学生对枯燥的数学和理论有普遍的恐惧心理，理论知识过于集中，学生难以消化，也很快会对课程失去兴趣；另一方面，理论知识和应用方法相隔较远，

往往在介绍应用方法之前，学过的理论知识已经被遗忘。为了解决该问题，我们重新构架了教材结构，变集中式讲解为分布式讲解，即围绕知识点，先介绍与该知识点相关的部分数学基础，马上用其进行理论证明和性质推导，紧接着讲解相关的应用方法。然后围绕下一个知识点重复上述三个过程直至完成所有知识点的介绍。我们称这种教学方法为“三明治”教法，在教学实践中取得了明显的效果。

这次的第 3 版教材秉承了前两版深入浅出、通俗易懂的写作传统，更正了第 2 版中的错误疏漏，为使本书更符合认知规律，参照艾宾浩斯遗忘曲线，并吸收了“三明治”教法，对书的章节按照“数学基础—概念和原理—方法”的顺序进行了大幅度改动，使知识点在各章中适当分散和平衡，同时将概念和方法相近的知识点衔接得更紧密，便于读者更轻松地掌握本书知识。此外，增加了通信系统模型的描述，对部分信源编码方法的描述方式进行了修订，对信道编码基本概念和应用方法之间的逻辑关系进行了适当梳理和重新描述并进行了内容的增删，重新编写了有关密码学的内容，着重介绍信息论与密码算法安全性之间的关联关系。

本书第 1、6、7、9 章由电子科技大学陈运教授编写；第 2、4 章由陈运和郑州轻工业学院陈新教授联合编写；第 3 章由陈新编写；第 8 章 8.1～8.2 节由陈运教授编写，8.3～8.5 节由电子科技大学陈伟建副教授编写；第 5 章 5.1 节由陈运教授编写，5.2～5.4 节由陈运在电子科技大学周亮教授第 2 版内容基础上修改。全书由陈运教授统稿。

各高校可根据所开课的专业和要求选择全部章节或部分章节进行教学，研究生层次的教学除本教材外，还可选用配套网站上的大量学习材料补充教学内容。其中第 2、3 章，4、5 章，7、8 章分别是香农信息论信源熵、信道容量和信息率失真函数三个基本概念及其对应的三种编码应用。注重应用的专业和学校可选第 1、2、3、5 章进行教学，计算机和信息安全专业的学生需要学习第 9 章内容。通信专业的学生可以全选，不关注连续信源和信道的，可以跳过第 6 章和 7.3 节及 7.4 节的内容。

为了方便教学，第 3 版配套的多媒体课件和部分习题答案或题解将随后修改，免费提供给使用本教材授课的教师，授课教师可登录华信教育资源网(www.hxedu.com.cn)注册后下载；课程网页也将随后修改。

编著者在此特别感谢陈俊副教授、万武南副教授、索望讲师、陈艾东副教授。张从玺、朱冰、刘鹤、许森等十多名研究生先后参与了第 2 版之后的课件制作，网页和网上题库开发，习题解答以及录入等相关工作，在此一并表示感谢！

由于时间和编著者的知识水平所限，书中错误疏漏之处在所难免，热忱希望广大读者批评指正。联系方式：chenyun@uestc.edu.cn

编著者

2015 年 11 月于成都

目　录

第1章 概　论

1.1 信息的概念和分类

1.1.1 信息的概念

信息的重要性如今已人所共知，那么信息究竟是什么呢？

花朵开放时的色彩是一种信息，它可以引来昆虫为其授粉；成熟的水果会产生香味，诱来动物觅食，动物食后为其传播种子，所以果香也是一种信息；药有苦味，这种信息是味觉感知的；听老师讲课可以得到许多知识，知识也是信息……可见信息处处存在，人的眼、耳、鼻、舌、身都能感知信息。

信息自古就有，但是古代社会文明程度很低，信息传递手段落后，获取信息困难，人们没有意识到信息的存在。随着人类社会的不断进步，人们才意识到信息的存在。对信息的认知程度也随着社会文明程度的提高而不断提高。然而，信息学科毕竟还是一门年轻的学科，人们对信息还没有一个全面的、系统的、准确的、一致的认识。从不同的学科、不同的角度、不同的方面、不同的层次、不同的深度，对信息有不同的认识。

信息的概念十分广泛，不同的定义有百种之多。例如，“信息是事物之间的差异”，“信息是事物联系的普遍形式”，“信息是物质和能量在时间和空间中分布的不均匀性”，“信息是物质的普遍属性”，“信息是收信者事先所不知道的报道”，“信息是用以消除随机不确定性的东西”，“信息是负熵”，“信息是作用于人类感觉器官的东西”，“信息是通信传输的内容”，“信息是加工知识的原材料”，“信息是控制的指令”，“信息就是数据”，“信息就是情报”，“信息就是知识”……

数学家认为“信息是使概率分布发生改变的东西”，哲学家认为“信息是物质成分的意识成分按完全特殊的方式融合起来的产物”……

1928 年，美国数学家哈特莱(Hartley)在《贝尔系统电话杂志》上发表了一篇题为“信息传输”的论文，把信息理解为选择通信符号的方式，并用选择的自由度来计量这种信息的大小。他认为，发信者所发出的信息，就是他在通信符号表中选择符号的具体方式。例如，从符号表中选择了这样一些符号：“I am well”，他就发出了“我平安”的信息；如果选择了“I am sick”这些符号(包括空格)，他就发出了“我病了”的信息。发信者选择的自由度越大，所能发出的信息量也就越大。此外，哈特莱还注意到，选择的具体物理内容是无关紧要的，重要的是选择的方式。也就是说，不管符号代表的意义是什么，只要符号表的符号数目一定，“字”的长度一定，那么，发信者所能发出的信息的数量就被限定了。所以他认为“信息是选择的自由度”。

时隔 20 年，另一位美国数学家香农(C. E. Shannon)在《贝尔系统电话杂志》发表了题为“通信的数学理论”的长篇论文。这篇论文以概率论为工具，深刻阐述了通信工程的一系列基本理论问题，给出了计算信源信息量和信道容量的方法和一般公式，得到了一组表征信息传递重要关系的编码定理，从而创立了信息论。但是香农并没有给出信息的确切定义，他认为“信息就是一种消息”。

后来，随着认识的进一步深化，人们把信息理解为广义通信的内容。美国数学家、控制论的主要奠基人维纳(Winner)在1950年出版的《控制论与社会》一书中写道："人通过感觉器官感知周围世界"，"我们支配环境的命令就是给环境的一种信息"，因此，"信息就是我们在适应外部世界，并把这种适应反作用于外部世界的过程中，同外部世界进行交换的内容的名称"，"接收信息和使用信息的过程，就是我们适应外界环境的偶然性的过程，也是我们在这个环境中有效地生活的过程"。在这里，维纳把人与外部环境交换信息的过程看做是一种广义的通信的过程，认为"信息是人与外界相互作用的过程中所交换的内容的名称"。

这些定义都或多或少地从某种程度上描述了信息的一些特征，但是都不够全面、系统和准确。例如，消息、信号、数据、情报和信息都是在通信系统中传送的东西，但是这些概念之间有着原则的区别。消息是信息的外壳，信息则是消息的内核。同样多的消息，所包含的信息量可能差异很大；反之，不同形式的消息可能包含同样多的信息。信号也不等同于信息，信号只是信息的载体，信息是信号所载荷的内容。至于数据，它只是记录信息的一种形式，而且不是唯一的形式，因此不能把它等同于信息本身。"情报"一词在日语中的确就是信息，但是在汉语中，情报只是一类专门的信息，是信息的一个子集。

维纳对信息的认识也不够准确。因为在人与外界相互作用的过程中，参与内容交换的不仅仅是信息，还有物质和能量。后来维纳自己也认识到"信息既不是物质又不是能量，信息就是信息"。这句话起初被人批评为唯心主义，也有人笑话维纳"说了等于没说"。但是人们后来才意识到，正是维纳揭示了信息的特质，即信息是独立于物质和能量之外存在于客观世界的第三要素。

上述定义虽然各不相同，实质内容并无太大的差异，主要差异在于侧面不同、详略不同、抽象的程度不同和概括的层次高低不同。根据不同的条件，区分不同的层次，可以给信息下不同的定义。最高的层次是最普遍的层次，也是无约束条件的层次，定义事物的信息是该事物运动的状态和状态改变的方式。我们把它叫做"本体论"层次。在这个层次上定义的信息是最广义的信息，使用范围也最广。每引入一个约束条件，定义的层次就降低一点，使用的范围就变窄一点。

例如，引入一个最有实际意义的约束条件：认识主体，即站在认识主体的立场上定义信息。这时本体论层次的信息定义就转化为认识论层次的信息定义。即信息是认识主体(生物或机器)所感知的或所表述的相应事物的运动状态及其变化方式，包括状态及其变化方式的形式、含义和效用。其中认识主体所感知的东西是外部世界向认识主体输入的信息，而认识主体所表述的东西则是其向外部世界输出的信息。

虽然认识论比本体论的层次要低一些，所定义信息的使用范围也要窄一些，但是信息概念的内涵比本体论层次要丰富得多。因为认识主体具有感觉能力、理解能力和目的性，能够感觉到事物运动状态及其变化方式的外在形式和内在含义，并能够判断其效用价值。对认识主体来说，这三者之间是相互依存、不可分割的关系。因此，在认识论层次上研究信息的时候，"事物的运动状态及其变化方式"就不再像本体论层次上那样简单了，它必须同时考虑到形式、含义和效用三个方面的因素。

事实上，认识主体只有在感知了事物运动状态及其变化的形式，理解了它的含义，判明了它的效用之后，才算真正掌握了这个事物的认识论层次信息，才能做出正确的决策。我们把同时考虑事物运动状态及其变化方式的外在形式、内在含义和效用价值的认识论层次信息称为"全信息"，而把仅仅考虑其中形式因素的部分称为"语法信息"，把考虑其中含义因素的部分称为"语义信息"，把考虑其中效用因素的部分称为"语用信息"。换句话说，认识论层次的信息是同时考虑语法信息、语义信息和语用信息的全信息。

香农信息论仅考虑了事物运动状态及其变化方式的外在形式，实际上研究的是语法信息。

从这个角度出发，可以对信息下这样的定义：信息是对事物运动状态和变化方式的表征，它存在于任何事物之中，可以被认识主体(生物或机器)获取和利用。从数学观点出发研究香农信息论，可以认为信息是对消息统计特性的一种定量描述。

信息存在于自然界，也存在于人类社会，其本质是运动和变化。可以说哪里有事物的运动和变化，哪里就会产生信息。

信息必须依附于一定的物质形式存在，这种运载信息的物质，称为信息载体。

人类交换信息的形式丰富多彩，使用的信息载体非常广泛。概括起来，有语言、文字和电磁波。语言是信息的最早载体；文字和图像使信息保存得更持久，传播范围更大；电磁波则使载荷信息的容量和速度大为提高。

信息本身既看不见，又摸不着，没有气味，没有颜色，没有形状，没有大小，没有重量……总之，它是非常抽象的东西。但信息又处处存在，呼之塞耳，示之濡目。它既区别于物质和能量，又与物质和能量有相互依赖的关系。

综合起来，信息有如下重要性质：

（1）存在的普遍性。信息的本质是事物的运动和变化，只要有事物的存在，就会有事物的运动和变化，就会产生信息。绝对静止的事物是没有的，因此，信息普遍存在。

（2）有序性。信息可以用来消除系统的不确定性，增加系统的有序性。认识论层次的信息是认识主体所感知和表述的事物运动的状态和方式。获得了信息，就可以消除认识主体对于事物运动状态和方式的不确定性。信息的这一性质对人类有特别重要的价值，要使一个系统从无序变为有序，必须从外界获取信息。

（3）相对性。对于同一个事物，不同的观察者所能获得的信息量可能不同。

（4）可度量性。信息虽然很抽象，但它是可以度量的。信息的多少用信息量表示。

（5）可扩充性。信息并非一成不变。随着时间的推移，大部分信息将得到不断的扩充。例如，人类对于宇宙的认识就是不断扩充的，人们对信息的认识也在不断地扩充。香农创立信息论之前，很少有人意识到信息的客观存在，如今人们对信息的研究已经非常广泛和深入。

（6）可存储、传输与携带性。信息依附于信息载体而存在，而任何物质都可以成为信息的载体。既然物质可以存储、传输和携带，所以信息可通过信息载体以多种形式存储、传输和携带。

（7）可压缩性。人们得到信息之后，并非原封不动拿来应用，往往要进行加工、整理、概括、归纳，使信息更加精练、可靠，从而浓缩。信息论研究的主要问题之一就是信息的压缩。

（8）可替代性。信息能替代劳力、资本、物质材料甚至时间，正确、及时、有效地利用信息，可创造更多的物质财富，开发或节约更多的能量，节省更多的时间，收到巨大的经济效益。

（9）可扩散性。信息可以在短时间内较大范围地扩散开来。如广播、电视信息，顷刻之间即传遍全球。

（10）可共享性。信息与实物不同，可以大家共享。甲传递一件东西给乙，乙得到，甲便失去。但信息持有者传递一条信息给另一个人的时候，他自己所拥有的信息并不会丧失。正像教师把知识传授给学生一样，学生掌握了知识，但教师并不会成为“白痴”。信息的这种特性对人类具有特别重要的意义。可以说没有信息的共享性就没有人类社会的发展和进步。

（11）时效性。信息以事实的存在为前提。它不是一成不变的死东西，可以随着事实的不断扩大而增值，也会随着事实的过去而衰老，从而失去本身的价值。因此，信息是有“寿命”的。

信息在信息化程度越来越高的社会中将起到越来越重要的作用，是比物质和能量更为宝贵的资源。全面掌握信息的概念，正确、及时、有效地利用信息，能够为人类创造更多的财富。

1.1.2 信息的分类

前面一节关于信息概念和性质的讨论，使我们对信息有了定性的认识。但要全面、准确地掌握信息的概念，必须对信息有定量的认识。这就要求首先能够确切地描述信息。

由前可知，信息是一种十分复杂的研究对象。要找到一种通用的方法来描述各种各样的信息以及用统一的方法来恰如其分地描述信息的方方面面，显然是非常困难的。要清楚、具体地认识信息，必须对信息进行分类。

信息分类有许多不同的准则和方法。

按照性质，信息可以分成语法信息、语义信息和语用信息。

按照地位，信息可以分成客观信息和主观信息。

按照作用，信息可以分成有用信息、无用信息和干扰信息。

按照应用部门，信息可以分成工业信息、农业信息、军事信息、政治信息、科技信息、文化信息、经济信息、市场信息和管理信息等。

按照携带信息的信号的性质，信息还可以分成连续信息、离散信息和半连续信息等。

……

我们研究信息的目的，就是要准确地把握信息的本质和特点，以便更有效地利用信息。因此，在众多的分类原则和方法中，最重要的就是按照信息性质的分类。

按照性质的不同可以把信息划分成语法信息、语义信息和语用信息三个基本类型。其中最基本也最抽象的类型是语法信息。它是迄今为止在理论上研究得最多的类型。

语法信息考虑的是事物运动状态和变化方式的外在形式。根据事物运动状态和方式在形式上的不同，语法信息还可以进一步分成有限状态和无限状态；其次，事物运动状态可能是连续的，也可能是离散的，于是，又可以分成连续状态语法信息和离散状态语法信息；再者，事物运动状态还可能是明晰的或者是模糊的，这样，又可以分成状态明晰的语法信息和状态模糊的语法信息。

当然，按照事物运动的方式，还可以把信息进一步细分为概率信息、偶发信息、确定信息和模糊信息。香农信息论主要讨论的是语法信息中的概率信息，本书也以概率信息为主要研究对象。

上述分类可以用图 1.1.1 直观地表示。

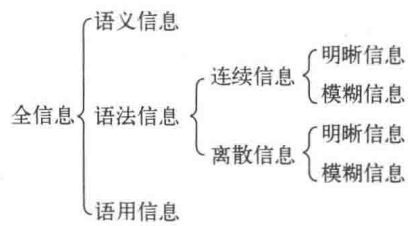


图 1.1.1 不同性质的信息分类

1.2 信息论的起源和发展

1.2.1 信息论创立的理论基础和技术条件

只要有物质运动，就有能量交换，也就存在信息。但是在先进的通信技术出现之前，尽管人们传播信息、利用信息，但并没有意识到信息的存在，认为客观世界是由物质和能量两个要素构成的。

信息是在其载体不断被发现、新的信息传输和传播手段不断发展和变革的过程中逐渐为人们所认识的。首先是语言的产生。人们用语言准确地传递感情和意图，使语言成为传递信息的重要工具，声音成为人类社会主动利用信息的最初载体。其次是文字的产生。不久又发明了纸张，人类开始用书信的方式交换信息。可视符号体系作为载体，使信息传递的准确性大为提

高。然后是印刷术的发明。它使信息能大量存储和大量流通，并显著扩大了信息的传递范围。接着是电报、电话的发明，开始了人类电信时代。电磁波做为载体，不论是载荷信息的容量、传输的距离，还是通信的时效，都有了本质的飞跃。二战期间为了解决密码分析大规模运算的时效问题，研制了全世界首台计算机。计算机的诞生使信息处理能力显著提高。

信息处理和传输手段的革命性变化为信息论的诞生穿凿了技术条件，同时，它也推动了通信理论的研究和快速发展。通信理论体系的逐步形成，为信息论的创立奠定了坚实的基础。

1.2.2 信息论的诞生和发展现状

在二元论(物质和能量是构成客观世界的二要素)世界里，人们对物-物交换、钱-物交换早就习以为常，不论哪种传递方式总是有失有得：商人售出商品得到钱，购物者花钱得到自己想要的商品。电报和电话的发明给人们带来了惊喜，也使人产生困惑：接收者有所得，发送者并无所失，这一特质与二元论世界有很大差别，那么，电话和电报到底传递了什么？人们带着这些疑问和好奇，对通信的本质问题开始了广泛而深入的探索。

1924 年，奈奎斯特(Nyquist)解释了信号带宽和信息速率之间的关系。20 世纪 30 年代，新的调制方式，如调频、调相、单边带调制、脉冲编码调制和增量调制的出现，使人们对信息能量、带宽和干扰的关系有了进一步的认识。1936 年，阿姆斯特朗(Armstrong)指出增大带宽可以使抗干扰能力加强，并根据这一思想提出了宽频移的频率调制方法。1939 年，达德利(Dudley)发明了带通声码器，指出通信所需带宽至少同待传送消息的带宽应该一样。声码器是最早的语言数据压缩系统。这一时期还诞生了无线电广播和电视广播。通信技术的进步使人们更深入地考虑问题：究竟如何定量地研究通信系统中的信息？怎样才能更有效和更可靠地传递信息？现有的各种通信体制如何改进？等等。

1928 年，哈特莱首先提出了用对数度量信息的概念。哈特莱的工作给香农很大的启示，他在 1941～1944 年对通信和密码进行深入研究，用概率论和数理统计的方法系统地讨论了通信的基本问题，得出了几个重要而带有普遍意义的结论。他阐明了通信系统传递的对象就是信息，并对信息给予科学的定量描述，提出了信息熵的概念。指出通信系统的中心问题是在噪声下如何有效而可靠地传递信息，以及实现这一目标的方法是编码，等等。这些成果 1948 年以“通信的数学理论”(A mathematical theory of communication)为题公开发表，标志着信息论的正式诞生。与此同时，维纳(Winner)在研究火控系统和人体神经系统时，提出了在干扰作用下的信息最佳滤波理论，成为信息论的一个重要分支。

20 世纪 50 年代，信息论在学术界引起了巨大反响。1951 年，美国无线电工程师协会(IRE)成立了信息论组，并于 1955 年正式出版了信息论汇刊。这一时期，包括香农本人在内的一些科学家做了大量工作，发表了许多重要文章，将香农的科学论断进一步推广，同时信道编码理论有了较大的发展。信源编码的研究落后于信道编码。1959 年，香农在发表的“保真度准则下的离散信源编码定理”(Coding theorems for a discrete source at the fidelity criterion)一文中系统地提出了信息率失真理论(rate-distortion theory)，为信源压缩编码的研究奠定了理论基础。

20 世纪 60 年代，信道编码技术有了较大发展，成为信息论的又一重要分支。它把代数方法引入到纠错码的研究中，使分组码技术达到了高峰，找到了可纠正多个错误的码，并提出了可实现的译码方法。其次是卷积码和概率译码有了重大突破，提出了序列译码和维特比(Viterbi)译码方法。

1961 年，香农的重要论文“双路通信信道”开拓了多用户信息理论的研究。

第五次变革是计算机技术与通信技术相结合，促进了网络通信的发展。宽带综合业务数字网(B-ISDN, Broad-Integrated Service Digital Network)的出现，给人们提供了除电话服务以外的多种服务，使人类社会逐渐进入了信息化时代。信息理论的研究得到进一步的发展，多用户理论的研究取得了突破性的进展。至此，香农的单用户信息论已推广到多用户信息论。20 世纪 70 年代以后，多用户信息论——即现在所说的网络信息论成为中心研究课题之一。

后来，随着通信规模的不断扩大，人们逐渐意识到信息安全是通信系统正常运行的必要条件。于是，把密码学也归类为信息论的分支。1980 年后，鉴别信息以及最小鉴别信息原理逐渐系统化，各种新兴电子信息技术的发展为信息理论的研究提供了先进的手段和工具，将编码和调制统一考虑的思想终于得到突破，出现了网格编码调制。

20 世纪 90 年代开始，互联网在全世界逐渐普及，催生了许多新的信息技术，同时也出现了许多新的问题，网络编码理论和技术受到热切关注，融合纠错编码和密码的纠错密码理论被提出。随着互联网的发展，计算机网络病毒和木马的泛滥，信息安全已是各国政府、企业、个人共同关心的问题。

人们对信息的认识越来越深入，先后提出了加权熵、动态熵等概念，建立在模糊数学基础之上的模糊信息的研究也取得了一定的进展。信息论不仅在通信、广播、电视、雷达、导航、计算机、自动控制、电子对抗等电子学领域得到了直接应用，还广泛地渗透到诸如医学、生物学、心理学、神经生理学等自然科学的各个方面，甚至渗透到语言学、美学等领域。

从 20 世纪 60 年代开始，一些社会学家在研究社会问题和社会现象时，先后提出了后工业社会和信息社会的概念，信息论开始向经济学和社会科学领域渗透。1977 年，美国经济学家马克·波拉特发表了长达九卷的《信息经济》报告，用信息论的基本概念研究经济现象和社会现象，将信息论的研究从自然科学领域正式移植到经济学和社会科学领域。另一方面，随着量子理论的发展，逐渐形成了量子信息论。信息论迅速发展成为涉及范围极广的广义信息论——即信息科学。

20 世纪末出现的边信道攻击技术，震惊了国际密码学界：经过经典密码分析技术严格分析、评估的密码算法接二连三被边信道分析技术破解。深入分析发现，信息的两个要素当中，只有状态要素得到了较为充分的利用，运动要素利用得很少。进入本世纪，对边信道攻防技术的大量研究，使信息的运动要素得到了密集的挖掘和利用。

1.2.3 信息论的未来发展趋势

互联网促进了通信技术、计算机技术、人工智能、信号与信息处理、信息材料等诸多技术的交叉和不断融合。信息论从最初的通信和自动控制的理论基础逐渐扩展为信号与信息处理、人工智能的理论基础，并迅速渗透到计算机、信息材料、生物医学……，从自然科学领域快速移植到经济管理、社会科学领域。信息技术发展的大趋势决定了信息理论的研究也必然呈现学科的交叉性和技术的融合性。例如网络编码、纠错编码与密码结合的纠错密码、信息安全主动防御技术中的语义分析、行为分析以及图形熵的结合等。

量子技术、无线移动通信技术的发展和新型材料的发现将使信息传输、计算和能耗方式发生很大改变。量子通信、量子密码的研究和技术发展推动了量子信息论的研究和发展。量子技术和信息技术以及新型材料技术的结合将促进后量子信息论的研究和发展。

本世纪之前，人们对信息的状态要素，或者说信息的静态特性，进行了大规模的挖掘和利用，促进了电子信息技术的繁荣和飞速发展。相对而言，信息的运动要素，或者说信息的动态

特性，利用得不多也不够深。20 世纪末，诞生了边信道攻击技术，这种新的技术与经典密码分析的思路迥异，它利用时间、功率消耗、电磁辐射、声音等“边信息”泄露可轻易获取密码算法密钥。这些研究结果相当令人吃惊：被分析密码算法都是经过一轮又一轮严格筛选和评估的安全算法，为何在边信道攻击面前如此脆弱？深究其原因，是忽略信息运动要素的结果。边信道攻击的研究成果，不仅开辟了密码分析的新方向，亦可移植到通信、计算机网络、信号与信息处理、人工智能等诸多领域。因此，信息运动要素的挖掘和利用，将会成为热点关注课题。

信息论自诞生到现在不到 70 年的时间，在人类科学史上是相当短暂的，但它的发展对学术界及人类社会的影响是相当广泛和深远的。信息作为一种资源，如何开发、利用、共享，是人们普遍关心的问题。

1.3 信息论的研究内容

1.3.1 通信系统模型

信息论是研究、解决通信系统的问题而逐步形成的科学概念和理论体系。要掌握信息论的基本知识，首先要了解通信系统。图 1.3.1 给出了通信系统的基本模型。

信源是消息的发生源，即信息的提供者。

信源编码是为了提高通信的有效性而发展的技术，往往通过信息压缩来实现。

加密部分的作用是在保密通信中保障通信内容不被非授权者获知。

信道编码的作用有两个：提高信源和信道的适配性和提高信息传输的可靠性。多路通信还有信号调制部分，将多个信源发出的信号搬移到不同的频段或插入不同的时隙，达到在同一条通信线路上传送多路信号的目的，提高通信效率。

信道是信息传输的通道。

信道译码、解密和信源译码分别是信道编码、加密和信源编码的反过程，使信号恢复到原始状态，然后到达通信的目的地——信宿。

图 1.3.1 通信系统基本模型

图 1.3.2 简单通信系统模型

信宿即信息的接收者。

最简单的通信系统可以只包含信源、信道、信宿三个部分。一般通信系统还包含信源编、译码和信道编、译码四个部分。保密通信系统中还包含加密和解密。现代通信系统对安全的需求，除了加密和解密，还有完整性、不可否认性等更多的需求。

1.3.2 信息论研究内容

信息论的研究对象是广义通信系统。不仅电子的、光学的、量子的信号传递系统，任何系统，只要能够抽象成通信系统模型，都可以用信息论研究，如神经传导系统、市场营销系统、质量控制系统等。关于信息论的研究内容，一般有以下三种解释。

1. 信息论基础

亦称香农信息论或狭义信息论。主要研究信息的测度、信道容量、信息率失真函数，与这三个概念相对应的是香农无失真信源编码、信道编码和限失真信源编码三个定理以及信源和信道编码。

2. 一般信息论

主要研究信息传输和处理问题。除了香农基本理论之外，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。后一部分内容以美国科学家维纳为代表。虽然维纳和香农等人都是运用概率和统计数学的方法研究准确或近似再现消息的问题，都是通信系统的最优化问题，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干扰时，在接收端如何把消息从干扰中提取出来。在此基础上，建立了最佳过滤理论(维纳滤波器)、统计检测与估计理论、噪声理论等。香农研究的对象是从信源到信宿的全过程，是收、发端联合最优化问题，重点是编码。香农定理指出：只要在传输前后对消息进行适当的编码和译码，就能保证在有干扰的情况下，最佳地传送消息，并准确或近似地再现消息。为此，发展了信息测度理论、信道容量理论和编码理论等。

随着研究的扩展和深入，香农三个编码定理逐渐扩展成三类定理。此外，用信息论的条件熵来判定密码体制的安全性也成为信息论的研究内容。

3. 广义信息论

广义信息论是一门综合性的新兴学科，至今并没有严格的定义。概括说来，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。不仅包括一般信息论的所有研究内容，还包括如医学、生物学、心理学、遗传学、神经生理学、语言学、语义学，甚至社会学和经济管理中有关信息的问题。反过来，所有研究信息的识别、控制、提取、变换、传输、处理、存储、显示、价值、作用和信息量的大小的一般规律以及实现这些原理的技术手段的工程学科，也都属于广义信息论的范畴。

总之，不管研究对象、方法、手段、适用场景是什么，信息论的研究内容总体可归类为对广义通信息系统有效性、可靠性、安全性、经济性的研究。人们研究信息论的目的，也是为了高效、可靠、安全、经济并且随心所欲地交换和利用各种各样的信息。

思考题

1.1 信息有哪些独有的性质？

1.2 信息的本质是什么？

1.3 信息的要素有哪些？

第 2 章　离散信源熵

2.1　基 本 概 念

由图 1.3.1 可见，通信系统的源头是信源。信源可以用离散信号也可以用连续信号的形式表达，还可以用半离散、半连续的形式表达，分别称为离散信源、连续信源、半离散或半连续信源。其中最容易理解的是离散信源，我们就从离散信源开始研究。我们现在已经知道信源含有信息，但是在 70 多年前，信息实在是让人捉摸不透的东西，它与物质有很大不同：既看不见又摸不着，可是又处处存在。那么，用什么方法怎样度量信息是研究通信系统首先要解决的问题，也是本章要介绍的主要知识。

信息论是在信息可以度量的前提下，研究有效地、可靠地、安全地传递信息的科学。信息的可度量性是建立信息论的基础。

信息度量的方法有：结构度量、统计度量、语义度量、语用度量、模糊度量等。最常用的方法是统计度量。它用事件统计发生概率的对数来描述事物的不确定性，得到消息的信息量，进而建立熵的概念。熵的概念是为了解决信息度量问题而提出来的、最终为大家所接受的科学概念，也是香农信息论最基本、最重要的概念。

如果甲告诉乙说：“你考上了研究生，”那么乙就得到了信息。如果丙又告诉乙同样的话，那么对乙来说，此次他只是得到了一条消息，并没有得到其他任何信息。其实乙得到信息还有一个前提条件，就是乙参加了研究生考试。如果乙根本没有参加研究生考试，也就不可能考上研究生。那么甲的话对乙来说就没有任何信息。

在这个事件当中，“考上了研究生”是对考试结果的一种描述，而考试的结果不止一种，可见乙在得到消息之前具有不确定性。在得到消息之后，只要甲没说错，乙的不确定性就消除了，也就获得了信息。如果我们把考试结果看成是事物的一种状态，把各种不同的结果看成是事物状态运动的方向，那么信息就是对事物运动状态(或它的存在方式)的不确定性的一种描述。不确定性即随机特性，可以用研究随机现象的数学工具——概率论与随机过程来描述信息。

我们再来看一下上面的例子。当乙再次被告知考上研究生的消息时，事件是完全可信的，这相当于概率为 1 的情况，这种消息不含有不确定性，因此不含有任何信息。同样，若乙根本没有参加研究生考试，那么他被告知的消息是完全不可信的，这相当于概率为 0 的情况，从理念上来说这种消息同样不应该含有任何信息。不过我们在后面的学习中将会看到，当考察随机事件的单次实验结果和平均实验结果时，得到的结论是不一样的。

从随机变量出发来研究信息，正是香农信息论的基本假说。

2.2　离散信源熵的基本概念和性质

信息是由信源发出的，在量度信息之前，首先要研究一下信源。

2.2.1 单符号离散信源的数学模型

信源发出消息，消息载荷信息，而消息又具有不确定性，所以可用随机变量或随机矢量来描述信源输出的消息，或者说用概率空间来描述信源。

一类信源输出的消息常常以一个个符号的形式出现，例如文字、字母等，这些符号的取值是有限的或可数的，这样的信源称为离散信源。有的离散信源只涉及一个随机事件，有的离散信源涉及多个随机事件，分别称为单符号离散信源和多符号离散信源，可分别用离散随机变量和随机矢量来描述。另一类输出连续消息的信源称为连续信源，可用随机过程来描述。

对于离散随机变量 X，取值于集合

$$\{a_1, a_2, \cdots, a_i, \cdots, a_n\}$$

其中 n 可以是有限正整数，也可以是可数无限大整数，即 $n \in I$(整数域)，$X \in \{a_i,\ i=1, 2, \cdots, n\}$。规定集合中各个元素的概率为 $p(a_i)$，即

$$p(a_i) = P(X = a_i)$$

其中 $P(X=a_i)$表示括号中随机事件 X 发生某一结果 a_i 的概率。单符号离散信源的数学模型可表示为

$$\begin{pmatrix} X \\ P(X) \end{pmatrix} = \begin{Bmatrix} a_1, & a_2, & \cdots, & a_i, & \cdots, & a_n \\ p(a_1), p(a_2), \cdots, p(a_i), \cdots, p(a_n) \end{Bmatrix} \tag{2.2.1}$$

其中 $p(a_i)$满足

$$0 \leqslant p(a_i) \leqslant 1, \quad \sum_{i=1}^{n} p(a_i) = 1 \tag{2.2.2}$$

式(2.2.2)表示信源的可能取值共有 n 个：$a_1, a_2, \cdots, a_i, \cdots, a_n$，每次必取其中之一。

需要注意的是，这里大写字母 X, Y, Z 等代表随机变量，指的是信源整体，带下标的小写字母，例如 a_i 代表随机事件的某一结果或信源的某个元素。两者不可混淆。

2.2.2 自信息量及其性质

在以下的讨论中常用到概率论的基本概念和性质。我们先对这些概念和性质进行简要的复习。

随机变量 X, Y 分别取值于集合$\{a_1, a_2, \cdots, a_i, \cdots, a_n\}$和$\{b_1, b_2, \cdots, b_j, \cdots, b_m\}$。$X$ 发生 a_i 和 Y 发生 b_j 的概率分别定义为 $p(a_i)$和 $p(b_j)$，它们一定满足 $0 \leqslant p(a_i),\ p(b_j) \leqslant 1$ 以及 $\sum_{i=1}^{n} p(a_i) = 1$和 $\sum_{j=1}^{m} p(b_j) = 1$。如果考察 X 和 Y 同时发生 a_i 和 b_j 的概率，则二者构成联合随机变量 XY，取值于集合 $\{a_i b_j \mid i = 1,2,\cdots,n;\ j = 1,2,\cdots,m\}$，元素 $a_i b_j$ 发生的概率称为联合概率，用 $p(a_i b_j)$表示。有时随机变量 X 和 Y 之间有一定的关联关系，一个随机变量发生某结果后，对另一个随机变量发生的结果会产生影响，这时我们用条件概率来描述两者之间的关系。如 X 发生 a_i 以后，Y 又发生 b_j 的条件概率表示为 $p(b_j/a_i)$，代表 a_i 已知的情况下，又出现 b_j 的概率。当 a_i 不同时，即使发生同样的 b_j，其条件概率也不相同，说明了 a_i 对 b_j 的影响。而 $p(b_j)$则是对 a_i 一无所知情况下 b_j 发生的概率，有时相应地称 $p(b_j)$为 b_j 的无条件概率。同理，b_j 已知的条件下 a_i 的条件概率记为 $p(a_i/b_j)$。相应地，$p(a_i)$称为 a_i 的无条件概率。例如，集合 X 表示球类活动，含有三个元素$\{a_1, a_2, a_3\}$，分别代表篮球、排球、乒乓球活动。集合 $Y = \{b_1, b_2, b_3\}$代表喜欢篮球、排球和乒乓球运动的同学。在不知道有哪种球类活动的情况下，假设三个同学参加活动的可能性