



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
电子信息科学与工程类专业

信息论

——基础理论与应用

(第二版)

● 傅祖芸 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息科学与工程类专业

信 息 论

——基础理论与应用

(第二版)

傅祖芸 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地论述了香农信息论基本理论及某些应用问题,基本覆盖了信息论的各个方面的内容。内容包括:信息的定义和度量;各类离散信源和连续信源的信息熵;有记忆、无记忆、离散和连续信道的信道容量;香农信息论的三个基本定理:无失真信源编码定理、限失真信源编码定理和信道编码定理;网络信息理论及保密系统的信息理论。本书还介绍了无失真数据压缩(即无失真信源编码)的实用的编码算法与方法,以及信道纠错编码的基本内容和分析方法。本书最后还简要地介绍了信息论与热力学、光学、统计学、生物学和医学等其他学科交叉结合的应用内容。

本书深入浅出、概念清晰、内容丰富、系统性和可读性强,并具有实际应用价值。本书可作为高等院校信息工程、通信工程、雷达、计算机、电子学、信息与计算科学等相关专业的本科生、研究生的信息论课程教材或教学参考书,也可供数学、物理、生物学、系统科学、管理科学等专业研究生及从事信息科学理论、技术、方法研究的科研工作者和工程技术人员参考。

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:基础理论与应用/傅祖芸编著. —2版. —北京:电子工业出版社,2007.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 电子信息科学与工程专业

ISBN 978-7-121-04273-7

I. 信… II. 傅… III. 信息论—高等学校—教材 IV. TN911.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 058874 号

责任编辑:陈晓莉 特邀编辑:李双庆

印 刷:北京季蜂印刷有限公司

装 订:三河市鹏成印业有限公司

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

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:33.5 字数:858 千字

印 次:2007 年 5 月第 1 次印刷

印 数:7000 册 定价:38.00 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。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

前 言

人类社会的生存和发展无时无刻都离不开信息的获取、传递、处理、再生、控制和利用。

信息论正是一门把信息作为研究对象,以揭示信息的本质特性和规律为基础,应用概率论、随机过程和数理统计等方法来研究信息的存储、传输、处理、控制和利用等一般规律的科学。它主要研究如何提高信息系统的可靠性、有效性、保密性和认证性,以使信息系统最优化。

自从1948年香农发表了《通信的数学理论》一文,宣告了信息论作为一门独立的、全新的学科成立。自此以后,信息理论本身得到不断地发展和深化,尤其是在信息理论的指导下,信息技术也获得飞快发展。这又使信息的研究冲破了香农狭义信息的范畴,几乎渗透到自然科学与社会科学的所有领域,从而形成了一门具有划时代意义的新兴学科——信息科学。近年来,逐渐形成和发展起来的光学信息论、量子信息论、生物信息论或生物信息学都是信息科学的重要分支和发展的重要领域。

尤其近七八年来,当人类迈入21世纪——高度信息化时代以来,移动通信、互联网通信、多媒体技术、计算机技术、空间技术等信息技术出现了超越人们想像的、前所未有的发展速度。在这些领域中,只要涉及信息的存储、传输和处理就要用到香农信息理论——无失真通信的传输速率极限(即香农极限)、无失真和限失真信源编码理论(即数据压缩原理)和信道编码理论(即纠错编码理论)等。甚至人们娱乐生活中如数字激光影碟机、数码相机、数字家庭音像系统、网络游戏等都普遍采用了纠错码技术和数据压缩技术。所以,现在人们对于信息的概念、信息论的基本理论已不再感到陌生、抽象深奥和难以理解与掌握。同时也越来越意识到学习和掌握信息理论的重要。

在这种形势下,各高校的热门专业“信息工程专业”得到快速发展,专业的知识结构也作了相应调整,都先后将《信息论与编码》及有关课程列为本科生、研究生必修的专业基础课。与此同时,全国几百所高校先后在理学院(或数学系)内新增设了“信息与计算科学专业”,也将《信息论与编码》作为此专业的必修基础课。甚至,在物理学、光学、声学,以及生物专业的研究生中也增设或选修有关信息论的课程。

为满足广大读者的需要,作者在几十年的教学实践和科研工作的积累,以及在1986年、1989年编写出版的《信息论基础》^[30]一书基础上,于2001年编写出版了《信息论——基础理论与应用》^[33]一书。经过数年的使用,根据读者的意见,现将一些章节作适当的调整和修改,并增加了一章有关信道纠错编码的内容,以期能适应不同专业的需求。

本书主要是系统地介绍香农(Shannon)信息论和编码理论及它的应用。全书注重基本概念、基本定理和基本分析方法的论述,并结合实例建立概念和数学模型,给出详细的、必要的数学推演过程和证明。一般来说,在重要定理的证明前后都会描述定理和结论的物理意义或实

用意义及证明的思路,然后通过严密推理和巧妙证明进一步说明定理和结论的完美。以期望做到物理概念清晰,逻辑性、系统性强,数学结构严谨完整又避免纯数学的枯燥乏味。在内容的编排上,力求由浅入深、循序渐进,合理地安排章节。全书力图做到既有实际应用背景,又有清晰的数学思想和严密推理。

全书共有 12 章。

第 1、2、3、4 章是全书的基础。首先阐述信息的概念,引出香农关于信息的定义和测度。在这基础上讨论各类离散信源、连续和波形信源的信息测度——信息熵,以及各类离散信道、连续和波形信道的信息传输率和信道容量。

第 5、6、7 章主要论述香农信息论的三个基本定理——离散信源的无失真编码定理、有噪信道编码定理及限失真信源编码定理,此部分内容是香农信息论的核心部分。

第 8 章集中介绍了若干常用的无失真信源编码方法,以阐明香农无失真信源编码定理的应用与意义。

第 9 章论述了信道纠错编码的基本内容及一些主要的纠错编码如线性分组码、循环码和卷积码。该章从有噪信道编码定理出发,在读者已具有的工程数学基础上给出纠错编码的基本概念,然后讨论各种纠错码的编、译码算法。避免了从近世代数理论角度进行讨论,减小了学习的难度。有了这章的学习基础就可对纠错码理论进行深入的研究。

第 10 章讨论网络信息论(又称为多用户信息理论),比较全面地介绍了各种网络信道的信源和信道编码定理。这一章在本书中占用了一定的篇幅,主要因为实际的各种信息传输系统、信息流通系统都是复杂的信息流通网。另外,多用户信息理论也是由香农首先给出的,并且目前还存在着许多有待研究和解决的理论问题。所以,随着网络通信技术的发展和普及,网络信息理论显得更为重要。

第 11 章简要地介绍香农用信息论的观点对信息保密问题的论述。正是香农的论述把信息保密安全问题的研究引入到科学研究的轨道,使保密学迅速发展成为一个独立的分支。

第 12 章简要地探讨一些信息论与热力学、光学、统计学、生物、医学等学科的关系和应用。使读者了解信息论与其他学科交叉结合的发展前景。

第 1 章至第 7 章是本书的主体,学好了这几章就掌握了信息论的主要理论和内容。为帮助读者学习和掌握,每章结尾给出一小结,以公式形式列出该章的主要内容。并且各章配有大量习题。为避免读者对本书所用符号产生混淆,还将主要所用符号统一列表说明,以供参阅。书后的附录,为读者提供了所需的一些数学基础知识。同时为配合本书的学习和解题,作者已编写并由电子工业出版社出版了两本学习辅导、习题详解和精选题解的姊妹篇^{[31][32]},可供读者学习使用。

全书引入了弱 ϵ 典型序列,几个重要定理都采用此统一的分析方法进行证明,使定理证明简洁明了,而且又使单用户信息理论和网络信息理论中定理的证明方法达成一致。但这些章节均标以“*”号出现。书中标有“*”号的章节和小字体部分均属于严格的数学证明或加深、

加宽的内容。各高校、各专业可根据学时的多少或学生的知识程度适当取舍,只讲授主要基本内容,省略“*”章节和小字体部分。省略后并不影响全书的系统性、逻辑性和可读性。所以,本书可作为信息工程、通信工程技术和计算机专业本科生和研究生的教材,也可作为其他有关专业所需的教材。

本书第8章字典码一节由赵建中老师协助编写。孙建京、路而红、彭一凡等老师阅读了书稿部分章节并提出许多中肯的修改意见。刘泉、陈立、赵黎明、施燕琼、许晓东等同志参与了审稿、绘图、习题录入等大量工作,在此一并表示衷心的感谢。

在本书编写修改过程中,参阅了国内外一些经典著作,均列于参考书目中,在此谨向作者表示深切谢意。

电子工业出版社陈晓莉编辑对本书的修改再版做了大量的工作,并提出了许多宝贵意见,使本书作为“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”顺利出版,在此也深表感谢。

书中难免有不妥和错误之处,殷切希望广大读者予以批评指正。

作 者
2007年2月

所用符号及编写说明

为便于读者学习本书,现将书中所用符号及缩写在此列表说明。

1. 规范的数学用符

\mathbf{R}	实数集
\mathbf{Z}	整数集
\mathbf{N}	自然数集;非负整数集
$[a, b]$	实数集中由 a 到 b 的闭区间
$(a, b]$	实数集中由 a 到 b (含于内)的右闭左开区间
$[a, b)$	实数集中由 a (含于内)到 b 的左闭右开区间
$\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$	诸元素 a_1, a_2, \dots, a_n 构成的集
$x \in A$	元素 x 属于集 A
$x \notin A$	元素 x 不属于集 A
\emptyset	空集
$\ Z\ $	集 Z 的元素个数
\cup, \cap	并集和交集
$\log a$	a 的对数(任意为底)
$\log_r a$	以 r 为底的 a 的对数
$\lg a$	以 10 为底的 a 的对数
$\ln a$	以 e 为底的 a 的对数
$\binom{n}{r}$ 或 C_n^r	二项式系数
\approx	近似等号
\equiv	同余号
$\mathbf{A} = [a_{ij}]$	元素为 a_{ij} 的矩阵, i 为行数, j 为列数
\mathbf{A}^T	矩阵 \mathbf{A} 的转置矩阵
\mathbf{I}	单位矩阵
\mathbf{A}^{-1}	\mathbf{A} 的逆矩阵
$\det \mathbf{A}$ 或 $ \mathbf{A} $	矩阵 \mathbf{A} 的行列式
$\text{tr} \mathbf{A}$	矩阵 \mathbf{A} 的迹
$\mathbf{\Lambda}$	对角矩阵
$E[X]$	随机变量 X 的均值
$D[X]$	随机变量 X 的方差
$P(X)$	随机变量 X 的概率分布
$P(x)$ 或 $P(a_i)$	随机变量 X 取 x 值或 X 取 a_i 值的概率

$P(y x)$ 或 $P(b_j a_i)$	已知随机变量 X 取 x 值(或取 a_i 值)时随机变量 Y 取 y 值(或 b_j 值)的条件概率
$P(xy)$ 或 $P(a_i b_j)$	随机变量 X 取 x 值(或取 a_i 值),随机变量 Y 取 y 值(或取 b_j 值)的联合概率
\mathbf{X}	N 维随机矢量, $\mathbf{X}=(X_1 X_2 \cdots X_N)$
$P(\mathbf{X})$	N 维随机矢量的联合概率分布
$P(\mathbf{x})=P(x_1 x_2 \cdots x_N)$	随机矢量 \mathbf{X} 取 \mathbf{x} 值的概率
$P(\mathbf{xy})$	随机矢量的联合概率
$P(y x)$ 、 $P(x y)$	随机矢量的条件概率
$p(x)$	连续随机变量 X 的一维概率密度函数
$p(\mathbf{x})=p(x_1 x_2 \cdots x_N)$	平稳随机过程的 N 维概率密度函数
$p(xy)$	两连续随机变量 X 与 Y 的联合概率密度函数
$p(y x)$ 、 $p(x y)$	两连续随机变量之间的条件概率密度函数
$p(\mathbf{y} \mathbf{x})$ 、 $p(\mathbf{x} \mathbf{y})$	两连续随机矢量(序列)之间的条件概率密度函数
min	极小值
max	极大值
sup	上确界
Inf	下确界
$\lfloor x \rfloor$	不大于 x 的最大正数 $i \leq x$
$\lceil x \rceil$	天花板函数,不小于 x 的最小正整数 $i \geq x$
$(x)^+$	取 x 的正整数,即 $=x(x > 0)$, $=0(x < 0)$
$\lfloor x \rfloor_l$	取 x 数的 l 位使小于等于 x 的数
$J(\cdot)$	多重积分变量变换中的雅可比行列式
$ x $	取 x 的绝对值
\oplus	模二和运算
GF(2)	二元域
$\mathbf{0}$	零矢量
mod q	以 q 为模运算
\exists	存在量词

2. 本教材使用的自定义的符号和缩写

自定义符号	物理含义
X	信源输出的消息(符号)
A_i : $\{a_1, a_2, \cdots, a_q\}$	信道输入端的输入变量(输入符号)
$\mathbf{P}=(p_1, p_2, \cdots, p_q)$	信源的样本空间,即信源的消息(符号)集,消息(符号)数为 q
$I(a_i)$	概率矢量,表示离散信源的概率分布
$H(X)$	消息(符号) a_i 的自信息
$H_r(X)$	信源 X 的平均自信息(信息熵)
	以 r 为底的信源 X 的信息熵

$H(\mathbf{P})$	熵函数
$H(XY)$	信源 X 和 Y 的联合熵
$H(Y X)$	在已知信源 X 条件下信源 Y 的条件熵
$H_n(p_1, p_2, \dots, p_n)$	n 个符号在某概率分布下的熵函数
X^N	N 次扩展信源
$H(X^N)$	N 次扩展信源的信息熵
$H_N(\mathbf{X})$	平均符号熵
$H(X_N X_1 X_2 \dots X_{N-1})$	已知前面 $N-1$ 个符号后面出现一个符号的条件熵
H_∞	极限熵、离散平稳信源的熵率
S	马尔可夫信源所处的状态变量
$E = \{E_1, E_2, \dots, E_J\}$	马尔可夫信源的状态取值集
$Q(E_i)$	时齐、遍历马尔可夫信源的状态极限概率
H_{m+1}	时齐、遍历的 m 阶马尔可夫信源熵
η	信源熵的相对率
γ	信源剩余度
$H_w(X)$	加权熵
Y	信道输出端的输出变量
$A = \{a_1, \dots, a_r\}$	离散信道输入符号集
$B = \{b_1, \dots, b_s\}$	离散信道输出符号集
$P(y x), P(y x)$	离散信道的传递概率(转移概率)
BSC	二元对称信道
BEC	二元删除信道
$P(a_i)$	输入符号的先验概率
$P(b_j)$	输出符号的概率
$P(b_j a_i) = p_{ij}$	前向概率即信道传递概率
$P(a_i b_j)$	后向概率, 又称后验概率
\mathbf{P}	信道的传递矩阵
$I(X; Y)$	平均互信息
$H(X Y)$	信道疑义度
$H(Y X)$	噪声熵
$I(X; Y Z)$	平均条件互信息
$I(X; YZ)$	随机变量 X 与联合矢量 YZ 之间的平均互信息
R	信道信息传输率
R_t	信道信息传输速率
C	信道容量
$\alpha_k = (a_{k_1} a_{k_2} \dots a_{k_N})$	离散无记忆扩展信道的输入符号
$\beta_h = (b_{h_1} b_{h_2} \dots b_{h_N})$	离散无记忆扩展信道的输出符号
π	扩展信道的传递矩阵
$\pi_{kh} = P(\beta_h \alpha_k)$	扩展信道的传递概率
$I(\mathbf{X}; \mathbf{Y})$	离散信道输入和输出随机序列(矢量)之间的平均互信息

C^N	N 次扩展信道的信道容量
$C_{1,2,\dots,N}$	N 个独立并联信道的信道容量
$C_{\#}(I, II, \dots, n)$	n 个串接信道的信道容量
$\{x(t)\}$	随机过程
$x_i(t)$	随机过程的样本函数
$h(X)$	连续信源 X 的差熵(又称微分熵或相对熵)
$h(XY)$	两连续变量 X, Y 的联合差熵
$h(X) = h(X_1 X_2 \dots X_N)$	N 维连续平稳信源的差熵
$h(X_2 X_1)$	两连续变量 X_1 和 X_2 之间的条件差熵
$h(X_N X_1 \dots X_{N-1})$	N 维条件差熵
C	N 维高斯信源的协方差矩阵
P 或 P_s	连续信源输出信号的平均功率
$ A $	变换矩阵 A 的行列式的绝对值
\bar{P}	熵功率
$N(\omega)$	噪声功率谱密度, ω 为频率
F	频带宽度(带宽)或上限频率
$R(\tau)$	自相关函数
$h(x(t))$	随机波形信源的差熵
$I(x(t); y(t))$	波形信道的平均互信息
P_n	噪声功率
W	信道的频带宽度
$N(\omega)$ 或 $N(f)$	噪声功率谱密度, 其中 $f = \frac{\omega}{2\pi}$
$S(f)$	信号的功率谱密度
P_{s_i}, P_{s_o}	输入, 输出的信号功率
C_t	单位时间的信道容量
dB	分贝
S	信源
S^N	信源 S 的 N 次扩展信源
$s_i (i=1, \dots, q)$	信源的符号
$X = \{x_1, \dots, x_r\}$	码符号集, x_i 为码符号(或称码元), r 为集中码元个数
W_i	码符号序列, 码字
C	码字的集合称码(或称码书)
l_i	码字长度, 简称码长
$G_{\epsilon N}$	N 次扩展信源中 ϵ 典型序列集
$\bar{G}_{\epsilon N}$	N 次扩展信源中非 ϵ 典型序列集
R'	编码后信源的信息传输率
η	编码效率
\bar{L}	码的平均码长
R	编码后信道的信息传输率(又称码率)

R_t	单位时间的码率,单位为比特/秒
\bar{L}_N	对扩展信源编码的平均码长
$D(P \parallel q)$	两概率分布 $P(s)$ 和 $q(s)$ 之间的相对熵
P_E	平均错误概率
\bar{P}_E	平均正确概率
$P_e^{(i)}$	某输入符号 a_i 传输所引起的错误概率
$D(\alpha_i, \beta_j)$ 或 $D(C_i, C_j)$	两码字之间的汉明距离
C_i	码 C 中的码字
D_{ij}	码字汉明距离的简记
(x, y)	n 长的序列对
$G_{en}(X)$	n 次扩展信源 X^n 中 x 的典型序列集
$G_{en}(Y)$	Y^n 中 y 的典型序列集
$G_{en}(XY)$	序列对 (x, y) 的联合典型序列集
$G_{en}(X y)$ 或 $G_{en}(Y x)$	给定 ϵ 典型序列 y (或 x) 条件下, 与 y (或 x) 构成联合 ϵ 典型序列对的所有 x (或 y) 序列的集合
E_i	构成联合典型序列的事件
E_i^C	不构成联合典型序列的事件
W	M 个 n 长码字的集合
$P_{e\omega}$	消息 ω 发送, 产生的错误概率
U	试验信道的输入信源(输入变量)
V	试验信道输出端的接收变量
u_i	信源 U 所取符号
v_j	接收变量 V 所取符号
$d(u_i, v_j)$	单个符号的失真度(又称失真函数)
\bar{D} 或 $E[d]$	信源平均失真度
D	失真矩阵
U	信源输出的符号序列(试验信道的输入矢量)
V	接收端的符号序列(试验信道的接收矢量)
α_i 或 u	U 的取值
β_j 或 v	V 的取值
$d(u, v) = d(\alpha_i, \beta_j)$	信源序列的失真度
$\bar{D}(N)$	N 维信源序列的平均失真度
\bar{D}_N	信源单个符号的平均失真度
D	允许的失真
B_D	D 失真许可的试验信道集
$R(D)$	信源的信息率失真函数, 简称率失真函数
$R_N(D)$	N 维信源序列的率失真函数
D_{\min}	最小平均失真度
D_{\max}	最大平均失真度

S	参量, 信息率失真函数 $R(D)$ 的斜率
$d(\theta) = d(u-v)$	连续信源的差值失真
$g_s(\theta)$	以 S 为参量差值失真的概率密度函数
$G_{\epsilon}^{(d)}(u, v)$	失真 ϵ 典型序列集
$\bar{d}(C)$	码 C 的平均失真度(对所有码书统计平均)
$S_i (i=1, 2, \dots)$	从信源 S 所得的第 i 个缩减信源
$\bar{L}(C)$	码 C 的平均码长
$F(a_k)$	符号 a_k 的累积分布函数
$\bar{F}(a_k)$	修正的累积分布函数
$L(0), L(1)$	符号“0”或“1”的游程长度
S_c	字符串所处位置的标志符
H_W, H_B	分别为白游程长度、黑游程长度信源的信息熵
$F(s)$	序列 s 的累积分布函数
$A(s)$	信源序列 s 对应的区间宽度
L_c	LZ 码的复杂度
$C(n)$	LZ 编码时将信源符号序列分成 n 段
$m = (m_{k-1}, m_{k-2}, \dots, m_0)$	k 长的信息组
$C = (c_{n-1} c_{n-2} \dots c_1 c_0)$	码字或称码组、码矢
m_i	信息元
c_i	码元
n	码长
r	增加的校验元个数
(n, k)	线性分组码
(n, k_0, L)	卷积码
L	约束长度, 与前 L 段信息元有关
$W(C)$	码字 C 的汉明重量(又称汉明势)
$E = (e_{n-1} e_{n-2} \dots e_1 e_0)$	错误图样
$R = (r_{n-1} r_{n-2} \dots r_1 r_0)$	接收序列
E_e	发生 e 位随机错误的错误图样
H	一致校验矩阵
h_i	一致校验矩阵中的列矢量
G	生成矩阵
g_i	生成矩阵中的行矢量
C^\perp	线性分组码的对偶码
S	伴随式(校正子)
D	接收序列划分的子集
C_H	指二元汉明(Hamming)码
$H_{(n, k)}$	(n, k) 分组码的一致校验矩阵
$H_{r \times n}$	分组码的 $r \times n$ 阶的校验矩阵

$C(x)$	码字 C 的码多项式
$g(x)$	循环码的生成多项式
$m(x)$	信息多项式
$r(x)$	校验元多项式
$h(x)$	校验多项式
$h^*(x)$	校验多项式的反多项式
$R(x)$	接收多项式
$E(x)$	错误图样多项式
$S(x)$	伴随式
D	移位寄存器
M^t	t 时刻送入的信息组
M^{t-i}	t 时刻前 i 时刻送入的信息组
C^t	t 时刻输出的码字
G_∞	卷积码的生成矩阵
g_∞	基本生成矩阵
G^l	生成子矩阵
g_{ij}^l	约束长度内第 l 个信息组中第 i 位信息元 对输出码字中第 j 位码元的校验关系
S_t	t 时刻编码器的状态
$G_{en}(XYZ)$	n 长序列对 (x, y, z) 的联合 ϵ 典型序列集
s	信源输出的序列, 保密编码时称明文
\hat{s}	接收端译码输出的估计序列
$M = \{1, \dots, 2^{NR_1}\}$	编码输出的消息集(整数集)
$\omega \in M$ 或 $i \in M$	消息集 M 中的某消息(某整数 i)
(R_1, R_2)	可达速率对
$x_1(i)$	第 1 编码器对消息 $i \in M_1$ 编码后的码字
$x_2(j)$	第 2 编码器对消息 $j \in M_2$ 编码后的码字
$c = (c_1 c_2 \dots c_n)$	密文
C^n	密文空间
k_e	加密的密钥
k_d	解密的密钥
S^L	消息空间(明文空间)
B^r	密钥空间
C^n	密文空间
E_{k_e}	在密钥 k_e 控制下加密变换
D_{k_d}	在解密密钥 k_d 控制下解密变换
D_L	L 长明文序列的剩余度
δ_L	平均每个字母的剩余度
n_0	唯一解距离
T	温度

Q	热量
P	压强
S	热力学熵
Ω	系统的微观状态几率
N_{DOF}	光场的总自由度数
N_T	时间自由度数
N_S	空间自由度数
N_C	颜色自由度数
N_Ψ	偏振自由度数
Ω	成像系统的空间圆频率
W	成像系统的空间频率
I	光场信息量
$O(x_i)$	物体的光强度分布
$I(y_i)$	像面上的光强度
D_1	一阶偏离指标
D_2	二阶偏离指标
$D(X)$	离散量
$D(X+Y)$	和的离散量
$\Delta(X, Y)$	离散增量或称相似性信息系数

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信息的概念	1
1.2 信息论研究的对象、目的和内容	9
1.3 信息论发展简史与信息科学	13
第 2 章 离散信源及其信息测度	18
2.1 信源的数学模型及分类	18
2.2 离散信源的信息熵	23
2.2.1 自信息	23
2.2.2 信息熵	27
2.3 信息熵的基本性质	30
* 2.4 信息熵的唯一性定理	37
2.5 离散无记忆的扩展信源	41
2.6 离散平稳信源	43
2.6.1 离散平稳信源的数学定义	43
2.6.2 二维离散平稳信源及其信息熵	44
2.6.3 离散平稳信源的极限熵	48
2.7 马尔可夫信源	52
2.7.1 马尔可夫信源和 m 阶马尔可夫信源的定义	52
2.7.2 马尔可夫信源和 m 阶马尔可夫信源的信息熵	56
2.8 信源剩余度与自然语言的熵	63
* 2.9 意义信息和加权熵	68
小结	72
习题	73
第 3 章 离散信道及其信道容量	77
3.1 信道的数学模型及分类	77
3.1.1 信道的分类	77
3.1.2 离散信道的数学模型	78
3.1.3 单符号离散信道的数学模型	81
3.2 平均互信息及平均条件互信息	84
3.2.1 信道疑义度	84
3.2.2 平均互信息	85
3.2.3 平均条件互信息	88
3.3 平均互信息的特性	91
3.4 信道容量及其一般计算方法	94
3.4.1 离散无噪信道的信道容量	95

3.4.2	对称离散信道的信道容量	97
3.4.3	准对称信道的信道容量	100
3.4.4	一般离散信道的信道容量	102
* 3.5	信道容量的迭代算法	108
3.5.1	信道容量的迭代算法	108
3.5.2	信道容量迭代算法的收敛性	114
3.6	离散无记忆扩展信道及其信道容量	116
3.7	独立并联信道及其信道容量	122
3.8	串联信道的互信息和数据处理定理	122
3.9	信源与信道的匹配	131
小结	133
习题	134
第4章	波形信源和波形信道	139
4.1	波形信源的统计特性和离散化	139
4.2	连续信源和波形信源的信息测度	141
4.2.1	连续信源的差熵	141
4.2.2	连续平稳信源和波形信源的差熵	144
4.2.3	两种特殊连续信源的差熵	145
4.3	连续信源熵的性质及最大差熵定理	147
4.3.1	差熵的性质	147
4.3.2	具有最大差熵的连续信源	149
4.4	连续信源熵的变换	152
4.4.1	坐标变换后概率密度函数的变化	152
4.4.2	坐标变换后差熵的变化	154
4.5	熵功率	155
4.6	连续信道和波形信道的分类	157
4.6.1	按信道输入和输出的统计特性分类	157
4.6.2	按噪声的统计特性分类	158
4.6.3	按噪声对信号的作用功能分类	161
4.7	连续信道和波形信道的信息传输率	162
4.7.1	基本连续信道的平均互信息	162
4.7.2	多维连续信道的平均互信息	163
4.7.3	波形信道的信息传输率	164
4.7.4	连续信道平均互信息的特性	164
4.8	连续信道和波形信道的信道容量	168
4.8.1	单符号高斯加性信道	169
4.8.2	单符号非高斯加性信道	170
4.8.3	多维无记忆高斯加性连续信道	171
* 4.8.4	多维有记忆高斯加性连续信道	175
4.8.5	限带高斯白噪声加性波形信道	177