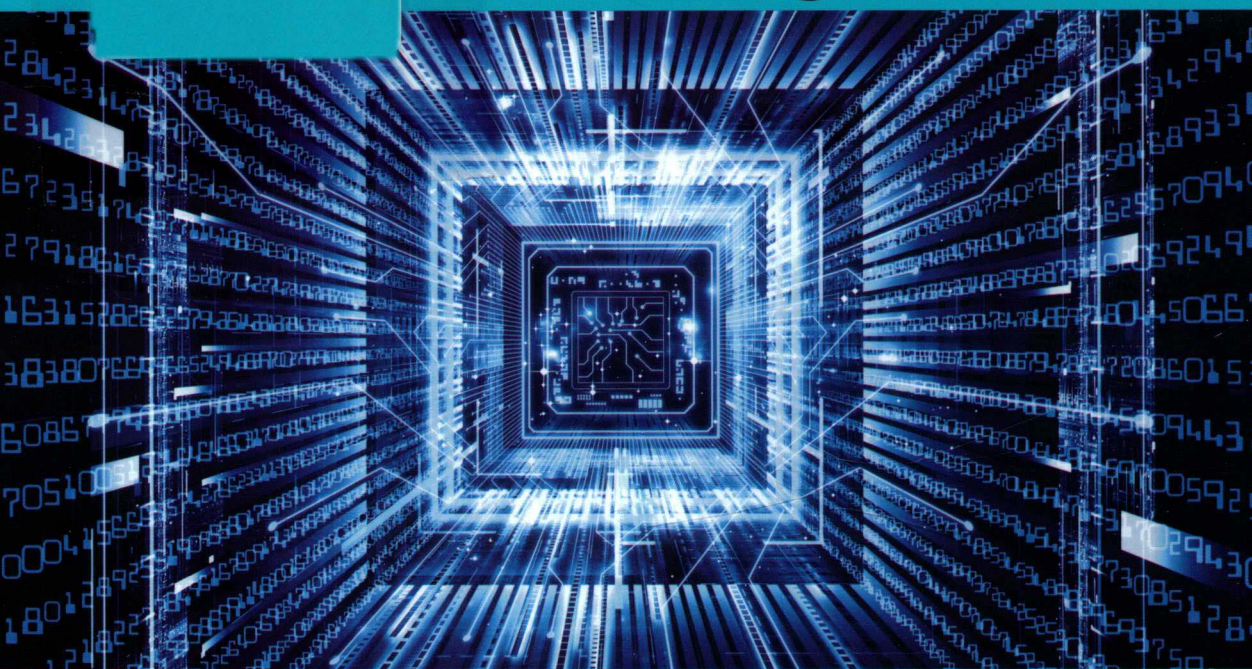


Information Theory and Coding



信息论与编码

张小飞 邵汉钦 吴启晖 徐大专 编



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

信息论与编码

张小飞 邵汉钦 吴启晖 徐大专 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书重点介绍由香农理论发展而来的信息论的基本理论,它主要应用概率论、随机过程和现代数理统计方法,来研究信息提取、传输和处理的一般规律,提高信息系统的有效性和可靠性。本书分9章,以信息熵为基本概念,以香农理论的3个基本定理为核心,系统地讲述香农信息论的基本理论,主要内容包括离散信息和连续信息的度量、离散信道和连续信道的容量、无失真信源编码定理、有噪信道编码定理、信息率失真函数、信道编码和网络信息论。本书注重概念,采用通俗的文字,联系实际,用较多的例题阐述基本概念、基本理论及实现原理。在各章的最后还附有小结和大量习题,便于读者学习,加深对概念的理解。

本书可作为高等院校电子、信息、通信、计算机、自动化及相关专业本科生和研究生的教材,也可供相关专业的科技人员参考。

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

信息论与编码/张小飞等编. —北京:电子工业出版社,2018.10

ISBN 978-7-121-35097-9

I. ①信… II. ①张… 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(2018)第217774号

策划编辑:米俊萍

责任编辑:米俊萍

特约编辑:刘广钦 刘红涛

印刷:北京七彩京通数码快印有限公司

装订:北京七彩京通数码快印有限公司

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:15.5 字数:368千字

版次:2018年10月第1版

印次:2018年10月第1次印刷

定价:58.00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)88254888,88258888。

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。

本书咨询联系方式:mijp@phei.com.cn。

前 言

1948 年克劳德·艾尔伍德·香农在《贝尔系统技术杂志》(*Bell System Technical Journal*)上连载发表了具有深远影响的论文《通信的数学原理》。1949 年,香农又在该杂志上发表了另一篇著名论文《噪声下的通信》。在这两篇论文中,香农阐明了通信的基本问题,建立了通信系统模型,提出了信息量的数学表达式,并解决了信道容量、信源统计特性、信源编码、信道编码等一系列基本技术问题。这两篇论文成为信息论的奠基性著作。当前信息产业发展很快,需要大量信息、通信、电子工程类的专业人才,而信息论是这些专业的基础,必须掌握,它可以指导理论研究和工程应用。

本书重点介绍由香农理论发展而来的信息论的基本理论,它应用概率论、随机过程和现代数理统计方法,来研究信息提取、传输和处理的一般规律,提高信息系统的有效性和可靠性。全书以信息熵为基本概念,以香农理论的 3 个基本定理为核心,系统地讲述了香农信息论的基本理论,主要内容包括离散信息和连续信息的度量、离散信道和连续信道的容量、无失真信源编码定理、有噪信道编码定理、信息率失真函数、信道编码、网络信息论等。

本书在自编教材的基础上,综合了国内外信息论教材和专著。本书于 2016 年动笔,2018 年才最终完成,写作历经了两年。本书在编写过程中,参考了大量的著作和论文,在此表示感谢。本书得到南京航空航天大学教改项目、国家自然科学基金(61371169, 61631020)、江苏省自然科学基金(BK20161489)资助。

本书由南京航空航天大学张小飞教授、南京邮电大学邵汉钦博士、南京航空航天大学徐大专教授和南京航空航天大学吴启晖教授执笔。邵汉钦博士完成了第 9 章的内容,其他内容由张小飞教授等完成。在本书编写过程中,同时还得到了时娜、杨东林、刘星麟、陈晨、黄殷杰、王方秋、李小宇、李书、张立岑等硕士研究生和博士研究生的帮助。

由于时间仓促和作者水平有限,书中不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2018 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信息的概念和特性	1
1.2 熵的概念	2
1.3 信息论的基本问题和主要内容	3
1.3.1 信息论研究的基本问题	3
1.3.2 信息论的研究内容	4
1.4 香农简介	5
1.5 本书结构	6
1.6 本章小结	7
第 2 章 数学基础	8
2.1 概率论基础	8
2.1.1 概率空间	8
2.1.2 随机变量与分布函数	10
2.1.3 多维随机变量及其分布	12
2.1.4 数字特征	16
2.1.5 大数定律及中心极限定理	19
2.2 马尔可夫链	22
2.2.1 有限状态马氏链	22
2.2.2 状态转移概率	23
2.2.3 齐次马氏链	23
2.2.4 马氏链的平稳分布	25
2.3 凸函数	26
2.4 本章小结	28
习题	28
第 3 章 信息度量	30
3.1 自信息、条件自信息和联合自信息	30

3.1.1	自信息	30
3.1.2	条件自信息	32
3.1.3	联合自信息	33
3.2	互信息和信息散度	33
3.2.1	互信息的定义	33
3.2.2	互信息的性质	34
3.2.3	条件互信息	35
3.2.4	信息散度	35
3.3	离散集合的平均信息量(熵)	37
3.3.1	信息熵	37
3.3.2	条件熵	38
3.3.3	联合熵	38
3.3.4	熵的基本性质	39
3.3.5	各类熵的关系	42
3.3.6	熵函数的唯一性	44
3.3.7	通信系统中熵的意义	44
3.4	平均互信息	46
3.4.1	平均互信息的定义	46
3.4.2	平均互信息与熵的关系	46
3.4.3	平均互信息的性质	48
3.4.4	多随机变量的互信息	53
3.5	本章小结	59
	习题	61
第4章	信源和熵	64
4.1	信源的分类与数学模型	64
4.1.1	信源的分类	64
4.1.2	信源的数学模型	64
4.2	离散信源	65
4.2.1	离散无记忆信源和熵	65
4.2.2	离散平稳信源和熵	66
4.2.3	马尔可夫信源	69

4.2.4 信源的冗余度	73
4.3 连续信源	76
4.3.1 连续信源的熵与平均互信息	76
4.3.2 连续随机变量信息散度	79
4.3.3 几种特殊分布连续信源熵	80
4.3.4 连续信源最大熵定理	83
4.3.5 熵功率	84
4.3.6 符号持续时间不同的信源的熵	85
4.4 本章小结	86
习题	88
第 5 章 信道与信道容量	91
5.1 信道的特性及其分类	91
5.1.1 信道模型	91
5.1.2 信道分类	91
5.2 离散信道及其信道容量	92
5.2.1 离散信道数学模型	92
5.2.2 离散信道的信道容量	95
5.2.3 多符号离散信道的信道容量	104
5.3 连续信道及其信道容量	106
5.3.1 加性噪声信道及其信道容量	106
5.3.2 加性高斯信道及其信道容量	108
5.3.3 加性非高斯信道及其信道容量	109
5.3.4 并联加性高斯信道	112
5.3.5 限带限功率高斯信道的信道容量	115
5.3.6 香农信道编码定理	118
5.4 本章小结	120
习题	121
第 6 章 无失真信源编码	124
6.1 信源编码简介	124
6.2 离散信源定长编码	126
6.2.1 典型序列与渐近均分特性	127

6.2.2	定长编码定理	129
6.2.3	定长码参数	130
6.3	离散信源变长编码	131
6.3.1	变长码的唯一可译性	132
6.3.2	Kraft 不等式	133
6.3.3	变长编码定理	134
6.3.4	变长码参数	136
6.4	变长编码方法	137
6.4.1	Huffman 编码	137
6.4.2	实用的信源编码方法	141
6.5	本章小结	143
	习题	144
第 7 章	限失真信源编码	147
7.1	系统模型和失真测度	148
7.1.1	系统模型	148
7.1.2	失真测度	148
7.1.3	失真函数举例说明	149
7.2	信息率失真函数	149
7.2.1	定义	149
7.2.2	信息率失真函数的性质	150
7.2.3	简单信源的信息率失真函数	153
7.3	离散信源 $R(D)$ 计算	161
7.3.1	离散信源信息率失真函数的参量表示	161
7.3.2	离散信源 $R(D)$ 求解的矢量/矩阵表示	163
7.3.3	参量 s 的意义	164
7.4	连续信源的信息率失真函数	167
7.4.1	连续信源的平均失真函数	167
7.4.2	$d(x,y)$ 只与 $x-y$ 有关的情况下率失真函数的求解	168
7.4.3	高斯信源的率失真函数	169
7.4.4	限带白色高斯信源的率失真函数	171
7.4.5	一般信源率失真函数的上限和下限	171

7.5	限失真信源编码定理	172
7.6	本章小结	173
	习题	175
第 8 章	信道编码	178
8.1	引言	178
8.2	纠错编码	182
8.3	简单编码	186
8.4	线性分组码	189
8.5	其他信道编码方式	196
8.5.1	卷积码	196
8.5.2	Turbo 码	199
8.5.3	LDPC 码	203
8.6	本章小结	206
	习题	206
第 9 章	网络信息论	208
9.1	信道模型	209
9.1.1	删除信道	209
9.1.2	无线信道	210
9.2	数字喷泉码的数学描述	210
9.2.1	数字喷泉码的定义	210
9.2.2	Tanner 图	211
9.2.3	度分布函数	212
9.3	典型的数字喷泉码	213
9.3.1	LT 码	213
9.3.2	Raptor 码	214
9.4	数字喷泉码的译码算法	216
9.4.1	删除信道中的译码算法	216
9.4.2	无线信道中的译码算法	217
9.5	数字喷泉码的性能分析方法	219
9.5.1	删除信道中的密度演化	219
9.5.2	无线信道中的密度演化	222

9.6 数字喷泉码的应用 225

9.7 网络编码基础 226

 9.7.1 引言 226

 9.7.2 最大流最小割定理 226

 9.7.3 网络编码的数学描述 227

 9.7.4 网络编码的分类及特点 228

9.8 网络编码实例：应用于蝶形网络 229

9.9 网络编码的研究现状 230

9.10 网络编码的应用 231

参考文献 232

第 1 章 绪 论

信息论是运用概率论与数理统计的方法研究信息、信息熵、通信系统、数据传输、密码学、数据压缩等问题的一门学科。克劳德·艾尔伍德·香农于 1940 年开始思考信息论问题。经过多年的努力，香农在 *Bell System Technical Journal* 上发表了具有深远影响的论文《通信的数学原理》和《噪声下的通信》。在这两篇论文中，香农阐明了通信的基本问题，建立了通信系统的模型，提出了信息量的数学表达式，并解决了信道容量、信源统计特性、信源编码、信道编码等一系列基本技术问题。

1.1 信息的概念和特性

信息科学是以信息为主要研究对象、以信息的运动规律和应用方法为主要研究内容、以计算机等技术为主要研究工具、以扩展人类的信息功能为主要目标的一门新兴的综合性学科。信息科学由信息论、计算机科学、控制论、系统工程与人工智能等学科互相渗透、互相结合而形成。“信息”使用的广泛性使得学者难以给“信息”下一个确切的定义，但是，一般来说，信息可以界定为由信息源发出的、被使用者接收和理解的各种信号。作为一个社会概念，信息可以理解为人类共享的一切知识，或社会发展过程中从客观现象中提炼出来的各种消息之和。信息并非事物本身，而是表征事物之间联系的消息、情报、指令、数据或信号^[1~5]。一切事物，包括自然界和人类社会，都在发出信息；我们每个人每时每刻都在接收信息。在人类社会，信息往往以文字、图形、语言、图像、声音、视频等形式出现^[1~12]。

信息一般具有如下特征。

- (1) 可识别、可转换。
- (2) 可传递。
- (3) 可加工处理。
- (4) 可多次利用。
- (5) 在流通中扩充。

(6) 主客体二重性。信息是物质相互作用的一种属性，涉及主客体双方；信息表征信源客体存在方式和运动状态的特性，所以，它具有客体性、绝对性；但接收者所获得的信息量和价值的大小，与信宿主体的背景有关，这体现了信息的主体性和相对性。

(7) 能动性。

(8) 可共享性。这是信息与物质和能量的主要区别。

(9) 信息的产生、存在和流通，依赖于物质和能量，没有物质和能量就没有能动作

用。信息可以控制、支配物质和能量的流动。

1.2 熵的概念

香农的一个重要贡献就是引入熵 (Entropy) 的概念, 作为不确定性度量, 他证明熵与信息内容的不确定程度有等价关系, 香农理论的重要特征是熵的概念。熵是热力学第二定律引入的概念, 可以把它理解为分子运动的混乱度。信息熵也有类似意义, 熵指的是体系的混乱程度, 它在控制论、概率论、数论、天体物理、生命科学等领域都有重要应用, 在不同的学科中还引申出了更为具体的定义, 是各领域十分重要的参量。香农第一次将熵的概念引入信息论中。

质量、能量和信息量是 3 个非常重要的量。人们很早就知道用秤或者天平计量物质的质量, 而热量和功的关系则到了 19 世纪中叶, 随着热功当量的明确和能量守恒定律的建立才逐渐清楚。“能量”一词就是它们的总称, 能量的计量通过“卡、焦耳”等新单位的出现而得到了解决。关于文字、数字、图画、声音的知识已有几千年历史了, 但是它们如何统一地计量? 这个问题直到 19 世纪末还没有被正确地提出来, 更谈不上如何去解决了。20 世纪初, 随着电报、电话、照片、电视、无线电、雷达和通信等的发展, 如何计量信号中信息量的问题被提上日程。

1928 年, 哈特利 (Harley) 考虑从 D 个彼此不同的符号中取出 N 个符号并且组成一个“词”的问题。如果各个符号出现的概率相同, 而且是完全随机选取的, 就可以得到 DN 个不同的词。从这些词中取特定的一个词就对应一个信息量 I 。哈特利建议用 $M\log D$ 这个量表示信息量, 即 $I = M\log D$ 。1949 年, 控制论的创始人维纳也研究了度量信息的问题, 还把它引向热力学第二定律。

但是就信息传输给出基本数学模型的核心人物是香农。1948 年香农长达数十页的论文《通信的数学原理》成了信息论正式诞生的里程碑。在他的通信数学模型中清楚地提出信息的度量问题, 他把哈特利的公式扩展到概率 p_i 不同的情况, 得到了著名的计算信息熵 H 的公式:

$$H = \sum_i -p_i \log p_i$$

如果上式中的对数 $\log$ 是以 2 为底的, 那么计算出来的信息熵就以比特 (bit) 为单位。今天在计算机和通信中广泛使用的字节 (Byte)、KB、MB、GB 等词都是从比特演化而来的。比特的出现标志着人类知道了如何计量信息量。香农的信息论为明确什么是信息量的概念做出了决定性的贡献。

香农在进行信息定量计算时, 明确地把信息量定义为随机不定性程度的减少。这表明了他对信息的理解: 信息是用来减少随机不定性的。

虽然香农的信息概念比以往的认识有了巨大的进步, 但仍存在局限性; 这一概念同样没有包含信息的内容和价值, 没有从根本上回答“信息是什么”的问题。

1.3 信息论的基本问题和主要内容

1.3.1 信息论研究的基本问题

香农指出,通信的基本问题是在一个点精确地或近似地恢复另一个点所选择的信息。从这个基本问题出发,对通信系统指定了3项性能指标:传输的有效性、传输的可靠性、传输的安全性。有效性是指:①信源代码应尽量短;②信息传输应尽量快,即高的传信率;③信息传送应尽量节省资源,即高的频谱利用率。可靠性是指传输差错要尽量少,对数字传输而言就是要求低的误码率。安全性是指传输的信息不能泄露给未授权人。3项性能指标所对应的3项基本技术是数据压缩、数据纠错和数据加密。

香农信息论所研究的通信系统基本模型如图1.1所示^[1~12]。

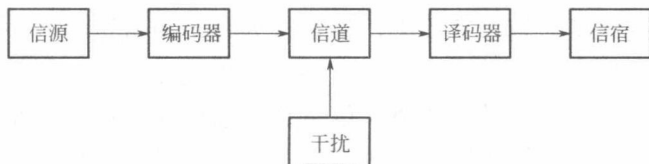


图 1.1 通信系统基本模型

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。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. 编码器

编码器对消息符号进行编码处理。编码包括信源编码、保密编码、信道编码等。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。此外,编码器还包括调制器。

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,这些干扰被看成由一个噪声源产生的,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子信道类型的主要依据。

4. 译码器

译码器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，译码器也分信源译码器和信道译码器等。

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 1.1 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。第一个问题是对于信源编码，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、语言还是图像，都有其固有的复杂性，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。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，传输的错误概率就可以任意小；反之，如果信息传输速率大于信道容量，则传输错误是不可避免的。

1.3.2 信息论的研究内容

信息论是研究信息的产生、获取、变换、传输、存储、处理识别及利用的学科。信息论还研究信道的容量、消息的编码与调制问题，以及噪声与滤波的理论等方面的内容。此外，信息论还研究语义信息、有效信息和模糊信息等方面的问题。信息论有狭义和广义之分。

狭义信息论即香农早期的研究成果，它以编码理论为中心，主要研究信息系统模型、信息的度量、信息容量、编码理论及噪声理论等。

广义信息论又称信息科学，主要研究以计算机处理为中心的信息处理的基本理论，包括评议、文字的处理、图像识别、学习理论及其各种应用。广义信息论包括狭义信息论的内容，但其研究范围却比通信领域广泛得多，是狭义信息论在各个领域的应用和推广，因此，它的规律也更一般化，适用于各个领域。

信息论的主要研究内容如下。

1. 信源和熵

信源限制为具有某一先验概率的随机过程；熵是信源平均不确定性的度量。

2. 关于无失真信源编码

无失真信源编码定理（香农第一定理）：如果编码后的信源序列信息传输速率不小于信源的熵，则可实现无失真编码，反之则不存在。例如，英文字母加空格共 27 个符号，不编码，每个符号须用 5 比特的二元符号来表示。但根据研究，其信源熵约为 1.4 比特/符号，所以，根据香农第一定理，存在某种信源编码方式，使得每个符号仅用 1.4 个二元符号就能无失真传送。

3. 关于信道容量与信息的可靠传输

有噪信道编码定理（香农第二定理）：如果信息传输速率小于信道容量，则总可找到一种编码方式，使得当编码序列足够长时传输差错任意小，反之，不存在使得差错任意小的编码。

4. 信息率失真理论（数据压缩的理论基础）

限失真信源编码定理（香农第三定理）：对任何失真测度 $D \geq 0$ ，只要码足够长，总可以找到一种编码，使得当编码后的信息传输速率大于或等于 $R(D)$ 时，码的平均失真 $d \leq D$ ，其中 $R(D)$ 称为信息率失真函数。另一种等价描述：对任何失真测度 $D \geq 0$ ，码的平均失真 $d \leq D$ ，那么编码后信息传输速率大于或等于 $R(D)$ 。所以， $R(D)$ 是满足失真准则编码的最小平均码长。

1.4 香农简介

克劳德·艾尔伍德·香农（Claude Elwood Shannon，1916 年 4 月 30 日—2001 年 2 月 24 日）是美国数学家、信息论的创始人（见图 1.2）。香农于 1916 年 4 月 30 日出生于美国密歇根州，并且是爱迪生的远亲。1936 年，香农在密歇根大学获得数学与电气工程学士学位，然后作为研究生进入麻省理工学院。

1938 年，香农在麻省理工学院获得电气工程硕士学位，硕士论文题目是 *A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits*（《继电器与开关电路的符号分析》）。当时他已经注意到电话交换电路与布尔代数之间的类似性，即把布尔代数的“真”与“假”和电路系统的“开”与“关”对应起来，并用 1 和 0 表示。于是他用布尔代数分析并优化开关电路，奠定了数字电路的理论基础。1940 年香农在麻省理工学院获得数学博士学位，而他的博士论文却是关于人类遗传学的，题目是 *An Algebra for Theoretical Genetics*（《理论遗传学的代数学》）。



图 1.2 香农的照片

在攻读学位的同时，香农还跟随温尼法·布什教授进行微分分析器的研究。这种分析器是早期的机械模拟计算机，用于获得常微分方程的数值解。1941 年，香农发表了 *Mathematical theory of the differential analyzer*（《微分分析器的数学理论》）。

1941年,香农以数学研究员的身份进入新泽西州的AT&T贝尔电话公司,并在贝尔实验室工作到1972年,从24岁到55岁,整整31年。1956年他成为麻省理工学院的访问教授,1958年成为正式教授,1978年退休。

1948年香农在*Bell System Technical Journal*上发表了*A Mathematical Theory of Communication*。该论文刚发表时,使用的是不定冠词“A”,收入论文集时改为定冠词“The”。他是美国科学院院士、美国工程院院士、英国皇家学会会员、美国哲学学会会员。他获得过许多荣誉和奖励,如1949年的Memorial奖、1955年的Stuart Ballantine奖、1962年的Kelly奖、1966年的美国国家科学奖章及IEEE电气和电子工程师学会的荣誉奖章、1978年的Jacquard奖、1983年的Fritz奖、1985年的京都奖。他接受的荣誉学位不胜枚举,不再赘述。

2001年2月24日,香农于马萨诸塞联邦病逝。著名信息论和编码学者Richard Blahut在香农塑像落成典礼上这样评价香农:“在我看来,两三百年之后,当人们回过头来看我们这个时代的时候,他们可能不会记得谁曾是美国的总统,他们也不会记得谁曾是影星或摇滚歌星,但是仍然会知晓香农的名字,学校里仍然会讲授信息论。”

1.5 本书结构

第2章介绍信息论中的一些数学基础,包括概率论基础、马尔可夫链和凸函数。

第3章介绍自信息、互信息、熵和平均互信息及它们的性质;同时介绍信息散度、条件互信息、多随机变量的平均互信息等概念和相关特性。

第4章研究信源的分类、数学模型、离散信源、连续信源及信源信息度量问题,其中包括多符号离散平稳信源、离散无记忆信源的扩展信源、离散平稳信源、马尔可夫信源和连续熵,以及连续最大熵定理等。

第5章给出信道模型,研究离散信道及其容量,以及连续信道及其容量;给出香农信道编码定理,推导著名的香农公式。

第6章研究离散无记忆信源的定长编码和变长编码问题,分析在无失真条件下编码速率和信源熵的关系,对离散平稳信源和马尔可夫信源的编码也进行了分析,还介绍了几种典型的编码方法。

第7章研究离散信源和连续信源的信息率失真函数,分析信息率失真函数的定义域和数学特性,并给出简单信源的信息率失真函数;还研究了离散信源和连续信源的参量表达,并以此为基础给出了离散信源信息率失真函数的迭代算法。本章最后研究限失真信源编码问题,以及离散无记忆信源和离散无记忆信道的限失真传输问题。

第8章主要分析了数字通信系统中纠错编码的基本原理,介绍了几种简单编码和线性分组码及其他信道编码,诸如卷积码、Turbo码、LDPC码等编译码原理,并简要分析了上述编码的编码效率和特点。

第9章给出网络信息论的概念、数学定义和适用信道模型,并对其编码方法和译码算法进行描述。

1.6 本章小结

本章介绍了信息概念、信息特性、熵的概念、信息论研究的基本问题和主要内容等，并对香农进行了简单介绍。

在本章编写过程中参考了大量文献，如文献 [1~12]，本书作者在此表示感谢。