

信息安全系列教材

信息论与编码理论

主编 彭代渊 王玲 蒋华 何明星 郭春生



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图并查编目(CIP)编目音并图

编：刘延一，编主主春霖，皇即同，半舜，领王，爵升

信息安全系列教材

信息论与编码理论

主 编 彭代渊 王 玲 蒋 华 何明星 郭春生
副主编 唐小虎 王宏霞 陈庆春 谢 静 牛宪华

第 3 册

编夏，文金黄，编编升责

出版学大又街：行发编出

(no .of

址：电至邮：并轴至址)

同公发印新金北路：编印

字千414：编字 2.71：期印 8171 5901x1095 本开

版次：2008年12月第1版



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

类门响青编并图编查已册，版向量页卷页册，页册，页知存收，并图编并编编编凡：明编编不，言编编编。类编编

图书在版编目(CIP)数据

信息论与编码理论/彭代渊,王玲,蒋华,何明星,郭春生主编. —武汉:武汉大学出版社,2008.12

信息安全系列教材

ISBN 978-7-307-06673-1

I. 信… II. ①彭… ②王… ③蒋… ④何… ⑤郭… III. ①信息论—高等学校—教材 ②信源编码—编码理论—高等学校—教材 ③信道编码—编码理论—高等学校—教材 IV. TN911.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 175985 号

主 编 郭 春 生 副 主 编 王 玲 王 晓 玲 主
审 王 玲 王 晓 玲 王 玲 王 晓 玲 王 玲 王 晓 玲

责任编辑:黄金文 夏焮元 责任校对:黄添生 版式设计:支 笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:湖北金海印务公司

开本:787×1092 1/16 印张:17.5 字数:414千字

版次:2008年12月第1版 2008年12月第1次印刷

ISBN 978-7-307-06673-1/TN·32 定价:28.00元

版权所有,不得翻印;凡购买我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请与当地图书销售部门联系调换。

信息安全系列教材

编委会

主任：张焕国，武汉大学计算机学院，教授

副主任：何大可，西南交通大学信息科学与技术学院，教授

黄继武，中山大学信息科技学院，教授

贾春福，南开大学信息技术科学学院，教授

编委：(排名不分先后)

东北

张国印，哈尔滨工程大学计算机科学与技术学院副院长，教授

姚仲敏，齐齐哈尔大学通信与电子工程学院，教授

江荣安，大连理工大学电信学院计算机系，副教授

姜学军，沈阳理工大学信息科学与工程学院，副教授

华北

王昭顺，北京科技大学计算机系副主任，副教授

李风华，北京电子科技学院研究生工作处处长，教授

李健，北京工业大学计算机学院，教授

王春东，天津理工大学计算机科学与技术学院，副教授

丁建立，中国民航大学计算机学院，教授

武金木，河北工业大学计算机科学与软件学院，教授

张常有，石家庄铁道学院计算机系，副教授

田俊峰，河北大学数学与计算机学院，教授

王新生，燕山大学计算机系，教授

杨秋翔，中北大学电子与计算机科学技术学院网络工程系主任，副教授

西南

彭代渊，西南交通大学信息科学与技术学院，教授

王 玲, 四川师范大学计算机科学学院院长, 教授

何明星, 西华大学数学与计算机学院副院长, 教授

代春艳, 重庆工商大学计算机科学与信息工程学院

陈 龙, 重庆邮电大学计算机科学与技术学院, 副教授

杨德刚, 重庆师范大学数学与计算机科学学院

黄同愿, 重庆工学院计算机学院

郑智捷, 云南大学软件学院信息安全系主任, 教授

谢晓尧, 贵州师范大学副校长, 教授

华 东

徐炜民, 上海大学计算机工程与科学学院, 教授

楚丹琪, 上海大学教务处, 副教授

孙 莉, 东华大学计算机科学与技术学院, 副教授

李继国, 河海大学计算机及信息工程学院, 副教授

张福泰, 南京师范大学数学与计算机科学学院, 教授

王 箭, 南京航空航天大学信息科学技术学院, 副教授

张书奎, 苏州大学计算机科学与技术学院, 副教授

殷新春, 扬州大学信息工程学院副院长, 教授

林柏钢, 福州大学数学与计算机科学学院, 教授

唐向宏, 杭州电子科技大学通信工程学院, 教授

侯整风, 合肥工业大学计算机学院计算机系主任, 教授

贾小珠, 青岛大学信息工程学院, 教授

郑汉垣, 福建龙岩学院数学与计算机科学学院副院长, 高级实验师

中 南

钟 珞, 武汉理工大学计算机学院院长, 教授

赵俊阁, 海军工程大学信息安全系, 副教授

王江晴, 中南民族大学计算机学院院长, 教授

宋 军, 中国地质大学(武汉)计算机学院

麦永浩, 湖北警官学院信息技术系副主任, 教授

亢保元, 中南大学数学科学与计算技术学院, 副教授

李章兵, 湖南科技大学计算机学院信息安全系主任, 副教授

唐韶华, 华南理工大学计算机科学与工程学院, 教授

杨 波，华南农业大学信息学院，教授

王晓明，暨南大学计算机科学系，教授

喻建平，深圳大学计算机系，教授

何炎祥，武汉大学计算机学院院长，教授

王丽娜，武汉大学计算机学院副院长，教授

执行编委：黄金文，武汉大学出版社计算机图书事业部主任，副编审



内 容 提 要

本书系统地讲述了信息论与编码论的基础理论与技术。其内容包括信息及信息的度量、信道及其容量、无失真信源编码、率失真理论与有失真信源编码、信道编码与信道编码定理、线性分组码、循环码、卷积码、Turbo 码等。本书还介绍了编码技术在通信工程实践中的应用。

本书内容丰富，取材经典、新颖，概念清楚，文字通俗，深入浅出，各章后面配有大量习题。可作为高等院校信息安全、通信工程、信息工程、电子工程、计算机等专业本科生的教材，也可作为相关专业科技人员的参考书。

前 言

《信息论与编码理论》是信息、通信、电子工程专业的重要基础课程。

本书系统地讲述了信息论与编码论的基础理论与技术，同时还介绍了编码技术在通信工程实践中的应用。

全书共有 10 章。第 1 章绪论，介绍了通信系统模型、信息论与编码理论的形成、发展与应用。第 2 章信息与信息的度量，介绍了信源的数学模型、离散信源的熵、连续信源的微分熵、信源的冗余度。第 3 章信道容量，介绍了信道模型、离散无记忆信道容量、连续无记忆信道的容量。第 4 章无失真信源编码，介绍了无失真信源编码的概念、变长编码定理、常用变长编码算法与应用。第 5 章信息率失真函数与有失真信源编码，介绍了信息率失真函数与平均失真的概念、限失真信源编码定理、有失真信源编码算法与应用。第 6 章信道编码概述，介绍了信道差错概率、信道编码概念、信道译码准则、码的检错与纠错能力、信道编码定理。第 7 章线性分组码，介绍了线性分组码的概念、性质、编码与译码。第 8 章循环码，介绍了循环码的概念、性质、编码与译码。第 9 章卷积码，介绍了卷积码的概念、性质、编码与译码。第 10 章 Turbo 码，介绍了 Turbo 码的编码、译码与性能。

本书内容丰富，取材经典、新颖，概念清楚，文字通俗，深入浅出，各章后面配有大量习题。适合作为高等院校信息安全、通信工程、信息工程、电子工程、计算机等专业本科生的教材。建议总学时数为 51 学时。

本教材由全国多所高校富有教学与研究经验的教师合作编写，总负责人为西南交通大学的彭代渊教授。参与编写的人员有：彭代渊（西南交通大学、教授）、王玲（四川师范大学计算机科学与技术学院、院长、教授）、蒋华（北京电子科技学院通信工程系、主任、教授）、何明星（西华大学数学与计算机学院副院长、教授）、郭春生（杭州电子科技大学通信工程学院、副教授）、唐小虎（西南交通大学、教授）、王宏霞（西南交通大学、教授）、陈庆春（西南交通大学、副教授）、谢静（北京电子科技学院通信工程系、讲师）、牛宪华（西南交通大学、博士生）。西南交通大学的研究生茹鹏、王常远、胡友情、唐召胜、王永容、周英凤、李秀英进行了资料收集与整理、并仔细阅读了部分初稿，提出了不少宝贵的修改意见。对所有参加编写与修改工作的老师和同学表示衷心感谢。本教材参考了大量的文献与书籍，在书末列出了主要参考资料，对这些资料的作者表示感谢。同时，还要感谢武汉大学的张焕国教授、武汉大学出版社的黄金文副编审对本教材编写工作的帮助和支持。

限于作者知识与水平所限，书中不妥与错误之处在所难免，殷切希望读者指正。

作 者

2008 年 10 月



目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 通信系统模型	1
1.2 信息论与编码理论的主要内容	2
1.3 信息论与编码理论的形成与发展	3
1.4 信息论与编码理论的应用	5
第 2 章 信息与信息的度量	7
2.1 信源的数学模型及分类	7
2.1.1 信源输出的消息由随机变量描述	7
2.1.2 信源输出的消息由随机矢量描述	8
2.2 离散信源的信息熵	9
2.2.1 随机事件的自信息	10
2.2.2 离散信源的熵	14
2.2.3 熵的基本性质	23
2.2.4 数据处理中信息的变化	29
2.3 离散信源序列的熵	30
2.3.1 无记忆信源序列的熵	31
2.3.2 有记忆信源序列的熵	33
2.4 连续信源的互信息和微分熵	41
2.4.1 连续信源的数学模型	41
2.4.2 连续信源的微分熵与互信息	43
2.4.3 波形信源的微分熵	48
2.4.4 微分熵的极值化	50
2.5 信源的冗余度	53
习题 2	55
第 3 章 信道容量	58
3.1 信道基本概念	58
3.1.1 信道分类	58
3.1.2 信道模型	59
3.1.3 几种无记忆信道	60
3.2 离散无记忆信道容量	62
3.2.1 信道容量的定义	63

3.2.2	DMC 容量定理	64
3.2.3	对称 DMC 容量的计算	67
3.2.4	准对称 DMC 容量的计算	69
3.2.5	一般 DMC 容量的计算方法	71
3.3	组合信道的容量	73
3.3.1	级联信道的容量	74
3.3.2	并联信道的容量	75
3.4	连续无记忆信道的容量	76
3.4.1	加性高斯噪声信道的容量	78
3.4.2	多维无记忆加性高斯噪声信道的容量	79
3.5	波形信道的容量	81
习题 3		84
第 4 章 无失真信源编码		
4.1	无失真信源编码的概念	87
4.2	等长编码	90
4.3	变长编码	94
4.3.1	变长编码的唯一可译性	95
4.3.2	Kraft 不等式	95
4.3.3	变长编码定理	97
4.4	常用的变长编码算法	99
4.4.1	仙农编码	99
4.4.2	费诺编码	100
4.4.3	霍夫曼编码	101
4.4.4	算术编码	106
4.4.5	游程编码	108
4.4.6	字典编码	110
4.5	无失真信源编码的应用	112
4.5.1	三类传真机的修正霍夫曼编码	113
4.5.2	静止图像的无失真编码	113
习题 4		120
第 5 章 信息率失真函数与有失真信源编码		
5.1	信息率失真函数	124
5.1.1	失真函数与平均失真	125
5.1.2	信息率失真函数	126
5.1.3	率失真函数的性质	127
5.2	限失真信源编码定理	131
5.3	率失真函数的计算	132
5.3.1	$R(D)$ 参量表示法求解	132



5.3.2	$R(D)$ 的迭代计算方法	134
5.4	有失真信源编码	136
5.4.1	$R(D)$ 与信息价值	136
5.4.2	数字图像压缩编码方法	140
5.4.3	数字音频信号压缩编码方法	143
习题 5		144
第 6 章 信道编码概述 146		
6.1	信道差错概率	146
6.1.1	随机差错信道	146
6.1.2	突发差错信道	147
6.2	信道编码概念	148
6.3	信道译码准则	153
6.3.1	最小错误概率译码	153
6.3.2	最大似然译码	153
6.3.3	最小汉明距离译码	156
6.4	码的检错与纠错能力	160
6.5	信道编码定理	162
习题 6		165
第 7 章 线性分组码 166		
7.1	线性分组码概念	166
7.2	线性分组码的生成矩阵	166
7.3	线性分组码的校验矩阵	170
7.4	线性分组码的最小汉明重量	171
7.5	线性分组码的译码	172
7.6	完备码	174
7.7	汉明码	175
7.8	其他线性分组码	177
7.8.1	Hadamard 码	177
7.8.2	Golay 码	177
习题 7		177
第 8 章 循环码 179		
8.1	循环码的基本概念	179
8.1.1	循环码的定义和基本性质	179
8.1.2	循环码的多项式描述	180
8.1.3	系统循环码	183
8.2	循环码的编码和译码	184
8.2.1	循环码的编码	184



8.2.2	循环码的译码	186
8.3	循环码的检错和纠错性能	190
8.3.1	循环码的检错性能	190
8.3.2	纠正突发错误性能	191
8.4	循环码的两个重要子类	192
8.4.1	BCH 码	192
8.4.2	Reed-Solomon (RS) 码	195
习题 8		197
第 9 章 卷积码		
9.1	卷积码的基本概念	199
9.2	卷积码的描述	202
9.2.1	卷积码的生成矩阵表示法	202
9.2.2	卷积码的多项式及转移函数矩阵表示法	205
9.2.3	卷积码的编码矩阵和状态流图	209
9.2.4	卷积码的网格图	211
9.3	卷积码的译码算法	214
9.3.1	卷积码的最大似然译码	215
9.3.2	二进制对称信道的硬判决维特比译码	216
9.3.3	软判决的维特比译码	223
9.3.4	维特比译码的性能限	227
9.4	卷积码的应用	229
习题 9		231
第 10 章 Turbo 码		
10.1	Turbo 编码	235
10.1.1	递归卷积编码特性	237
10.1.2	交织特性	239
10.1.3	删余与分组归零处理	243
10.2	Turbo 译码	245
10.2.1	迭代译码机制概述	245
10.2.2	基于 MAP 算法的 SISO 译码器	248
10.2.3	基于 Log-MAP 算法的 SISO 译码器	252
10.2.4	Turbo 码迭代译码算法	254
10.3	Turbo 码性能	257
10.4	小结	260
习题 10		261
参考文献		263



第1章 绪论

1948年, Claude Shannon (克劳德·香农) 在他的经典论文“A Mathematical Theory of Communication (通信的数学理论)”中写道:

“通信的基本问题就是在某一点精确或近似地再生另一点选择的信息。”
为了解决这一问题, 他在该文中提出了信息理论 (information theory) 与编码理论 (coding theory)。本书的目的就是介绍这两个理论的主要研究成果和应用技术。

在这一章中, 首先介绍通信系统模型, 然后简要介绍信息理论与编码理论的研究内容、发展历史及应用范围。

1.1 通信系统模型

信息论与编码理论的研究对象是通信系统, 研究的主要问题是通信系统中信息传输的有效性和可靠性。通信系统包含的对象很广泛, 如电报、电话、图像、计算机、导航、雷达、存储系统、生物系统等。这些系统虽然形式和用途各不相同, 但从信息传输、存储和处理的角度的来看, 具有共同的特征。所以, 可以把实际通信系统概括成如图 1-1 所示的模型。

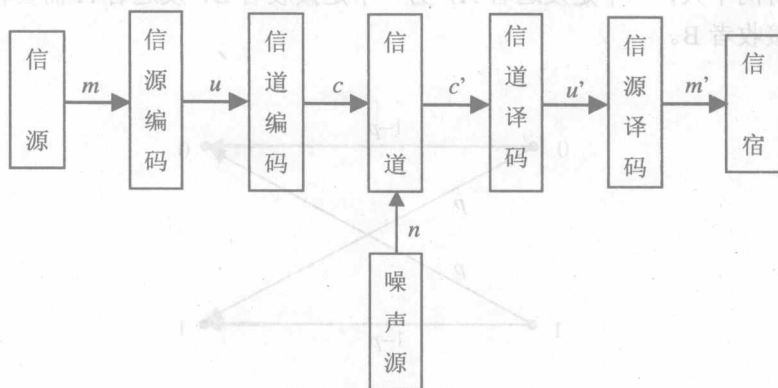


图 1-1 通信系统模型

通信系统的主要组成部分如下:

- (1) 信源。信源是消息的生成处, 它可以是人、生物、机器或其他设备。信源产生的消息需要传输到信宿方。消息可以是文字、语言、图像等。
- (2) 信源编码。信源编码器是把信源发出的消息转变成二进制 (或多进制) 符号序列, 以便于在信道上传输。为了提高通信系统传输消息的效率, 在信源编码中可以对消息进行压缩。
- (3) 信道编码。信道编码器的作用是在信源编码器输出的符号序列中增加一些多余的

符号,使之具有检错或纠错能力。

(4) 信道。信道是传输物理信号的媒介,它可以是一对导线、一条同轴电缆、一条光纤、传输电磁波的空间等。

(5) 信道译码。信道译码是信道编码的逆变换。

(6) 信源译码。信源译码是信源编码的逆变换。

(7) 信宿。信宿是消息传输的对象,即接收消息的人或机器。

图 1-1 给出的模型只适用于收发两端单向通信的情况,它只有一个信源和一个信宿,信息传输也是单向的。更一般的情况是有多个信源或信宿,即信道有多个输入或多个输出,另外信息传输也可以是双向的。例如,广播通信是一个具有一个输入、多个输出的单向通信系统;卫星通信网是一个具有多个输入、多个输出和多向传输的通信系统。只要对图 1-1 给出的基本通信系统模型进行适当修改,就可以建立网络通信系统模型。

1.2 信息论与编码理论的主要内容

为了说明信息论与编码理论的主要研究内容,下面分析一个简单的实例。假设要把信源编码器输出的二进制符号序列 u 通过信道传输给信宿方。由于信道受到噪声干扰,每个二进制符号在信道传输过程中会出错,即传输符号“0”时,信宿方接收到的符号可能是“1”;而传输符号“1”时,信宿方接收到的符号可能是“0”。这就产生了一个通信中的重要问题:信宿方接收到符号序列 u' 后,怎样判定其中的符号是否有错?如果有错,怎样纠正?

设符号 0 和 1 在信道传输过程中出错的概率相等,设为 $p < 0.5$,这样的信道称为二元对称信道(BSC, the Binary Symmetric Channel),见图 1-2。

现在假设有两个人,一个是发送者 A,另一个是接收者 B,发送者 A 需要将消息尽可能准确地传输给接收者 B。

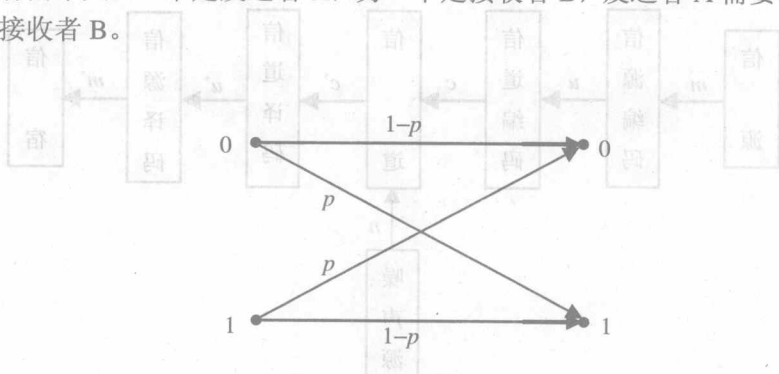


图 1-2 BSC 信道

如果发送者 A 将需要传输的每个符号直接发送一次,接收者 B 接收到任何一个符号后,都判定为发送者 A 发送的是该符号,那么这种“译码方案”出现错误的概率是 p 。

如果发送者 A 将需要传输的每个符号重复发送多次,例如三次,即传输符号 0 时,就发送符号序列 000;传输符号 1 时,就发送符号序列 111。这时接收者 B 接收到三个符号后,选择其中出现次数最多的符号,就判定为发送者 A 发送的是该符号。例如,当接收者 B 接收到 010 时,就判定为发送者 A 发送的符号是 0。假设在信道传输中每个符号是否出现错误是相互独立的,并且发送者 A 传输符号 0 和 1 的概率都为 0.5,那么这种“译码方案”出现错

误的概率是:

$$\begin{aligned} p_e &= p\{2\text{个符号出错}\} + p\{3\text{个符号出错}\} \\ &= 3p^2(1-p) + p^3 = 3p^2 - 2p^3. \end{aligned}$$

由于 $p < 0.5$, 所以 $p_e < p$ 。这就是说, 该传输方案提高了信道的可靠度, 并且 p 值越小, 信道的可靠度提高就越显著。

对于上述通信方案, 为了传输一个符号, 实际上发送了三个符号, 可见传输效率降低了。对通信系统中信息传输的有效性与可靠性进行系统研究是信息论与编码理论的重要任务。信息论与编码理论的主要研究内容可以概括如下:

(1) 信息的定义与度量。研究通信传输究竟是什么, 怎样度量。只有对传输符号所具有的本质属性作了明确定义和精确度量以后, 才能对通信的有效性与可靠性进行定量研究。

(2) 数据压缩。研究提高通信有效性的理论与技术。

(3) 通信的可靠度。研究提高通信可靠性的理论与技术。

(4) 信道的最大容量。研究信道中传输信息的有效性和可靠性之间的关系。

1.3 信息论与编码理论的形成与发展

信息论与编码理论是在长期的通信工程实践和理论研究基础上发展起来的。

电信技术发展的历史可以上溯到 19 世纪 30 年代。1832 年亨瑞(J. Henry)发明了电报和 1838 年莫尔斯(F. B. Morse)发明了电报码, 使信息获得了电气的表现形式。1876 年贝尔(A. G. Bell)发明了电话使人类语言第一次获得了电信号的形式。1895—1896 年英国的马可尼(G. Marconi)和俄国的波波夫(A. C. Popov)发明了无线电通信, 使电报和电话可以通过电波传送。1904 年福勒明(Fleming)发明了二极管, 1906 年福雷斯特(L. Forest)发明了三极管, 使电报和电话的长距离传输成为可能。可以认为电信技术在 19 世纪所面临的主要问题是获得信息的电气表现形式及如何将它们进行远距离传输。

进入 20 世纪后电信技术获得快速发展, 如何提高信道利用率的问题变得十分突出。1917 年坎贝尔(G.A.Campbell)申请了第一个关于滤波器的专利, 为频分复用信道提供了条件。1922 年卡逊(J. R. Carson)分析了振幅调制信号, 开始明确上下边带的概念。1924 年奈奎斯特(H. Nyquist)开始分析电报信号传输中脉冲速率与信道带宽的关系, 并在 1928 年建立了限带信号的采样定理。20 世纪 20 年代电信号理论的最后一个重要发展是哈特莱(R. V. Hartley)取得的, 他在 1928 年发表的论文“信息的传输”中第一次从通信的观点出发对信息量作了定义。哈特莱的工作是在奈奎斯特已取得的结果上进行的, 他的新贡献是引入了接收机在估计接收脉冲幅度时只有有限精确度的概念。按照这种观点, 接收机只能分辨有限数目的脉冲幅度。假设这个数目是 M , 则 N 个脉冲可能组成的不同序列的总数是 M^N 。哈特莱把信息量定义为 $H = M \log M$, 这样通过信道传输的信息量就与信道带宽和传输时间的积成正比。

由此可见, 在 20 世纪 30 年代以前, 通信的主要目标集中在如何使发送信号无失真地传送到接收端, 所用的研究方法是用确定性数学工具分析确定性信号。

20 世纪 30 年代以后, 随着通信技术水平的提高, 以及第二次世界大战的需要, 研究通信的噪声和抗干扰问题变得逐渐突出。1930 年维纳(N.Wiener)开始把 Fourier 分析方法全面引入到随机信号研究中来, 1936 年兰登(V. D. Landon)发表了第一篇有关噪声的论文。与此

同时,抗干扰通信方法先后出现。1936年阿姆斯特朗(E. H. Armstrong)提出了频率调制,1939年达德利(H. Dudley)发明了声码器,1939年瑞弗(H. Reeve)提出了具有强抗干扰能力的脉冲编码调制。1945年瑞斯(S. O. Rice)对噪声的研究作了全面的总结。所以,到20世纪40年代通信理论已经使用统计分析的方法,抗干扰已经取代抗失真,并成为通信研究的中心问题。在这样的背景下,香农与维纳几乎同时提出了信息的统计定义。维纳在研究防空火炮的控制问题时,将随机过程和数理统计的工具引入到通信与控制中来,1948年发表了著名的《控制论》,揭示了信息传输和处理过程的统计本质特性。1948年香农在贝尔系统技术杂志上发表了信息论奠基性论文“通信的数学理论”。在这篇论文中,他用概率和数理统计的方法系统地讨论了通信的基本问题,揭示了通信系统传输的对象就是信息,并给出了信息的科学的定量描述,同时指出通信系统的核心问题是在噪声中如何有效和可靠地传送信息,采用信道编码技术能够实现高效率和高可靠地传送信息。这是一篇关于现代信息论的开创性的权威文献,香农为信息论的创立作出了独特贡献,因而被誉为信息论的奠基人。

从20世纪50年代起,通信技术界的主要研究重心是寻找信源编码和信道编码的构造方法。香农在1948年的论文中提出了无失真信源编码定理,并给出了简单的编码方法。1952年,费诺(Fano)提出了费诺编码方法,霍夫曼(D. A. Huffman)提出了霍夫曼编码方法。霍夫曼编码已作为传真图像的压缩标准。1956年,麦克米伦(B. Mcmillan)首先证明了唯一可译变长码的克拉夫特(Kraft)不等式。1968年,埃利斯(P. Elias)提出了算术编码的基本思路,1976年,里斯桑内(J. Rissanen)改进了算术编码方法,1982年,里斯桑内和兰登(G. G. Langdon)一起进一步完善了算术编码方法,使之易于实现。算术编码已用于二值图像的压缩标准。1977年,以色列编码学家齐弗(J. Ziv)和兰佩尔(A. Lempel)提出了一种高效的通用信源编码方法,称为LZ77编码算法,1978年,他们进行了改进,推出了LZ78编码算法。1984年,威其(T. A. Welch)提出了一个改进的LZ78编码算法,称为LZW编码算法。1990年,贝尔(T. C. Bell)又对LZ编码方法进行了一系列的改进。LZ系列编码已广泛应用于文本压缩。

限失真信源编码的研究较无失真信源编码的研究落后约十年。香农在1948年的论文中已体现出应用率失真函数的思想。1959年,他在论文“保真度准则下的离散信源编码定理”中首次提出了率失真函数的概念和率失真信源编码定理。由此发展成为信息率失真编码理论。1971年,伯格(T. Berger)给出了更一般信源的率失真编码定理。率失真信源编码理论是信源编码的核心问题,是频带压缩与数据压缩的理论基础。

在面向数字信道的信道编码方面,20世纪40年代末由高莱(M. J. E. Golay)和汉明最早提出的分组编码技术已经发展成为系统的代数编码理论。许多分组码,如高莱码、Fire码、BCH码等在通信、计算机技术中获得广泛应用。1954年,埃利斯首次提出了卷积码,1967年,卷积码已在陆地移动通信、卫星通信和深空通信中获得重要应用。1993年,C. Berrou, A. Glavieux和P. Thitimajshima提出了一类新的信道编码——Turbo码。Turbo码在性能上与香农理论极限仅差0.7dB。

香农在1961年的论文“双路通信信道”开拓了网络信息论的研究。1970年以来,随着卫星通信、计算机通信网的迅速发展,网络信息理论的研究异常活跃,成为当前信息论的中心研究课题之一。艾斯惠特(R. Ahlswede)在1971年,廖(H. Liao)在1972年同时给出了多元接入信道的信道容量区。接着,沃尔夫(J. K. Wolf)和斯莱平(D. Slepian)将它推广到具有公共信息的多元接入信道中。科弗尔(T. M. Cover)和艾斯惠特在1983年分别发表文章讨论相关信源在多元接入信道的传输问题。1972年科弗尔开始了广播信道的研究。伯格曼斯(P.

Bergmans)(1973)、格拉格尔(R. G. Gallager)(1974)、科弗尔(1975)、马登(K. Marton)(1979)、伊·盖马尔(A. El Gamal)(1979)和范·德·缪伦(E. C. Van Der Meulen)(1979)等分别研究了广播信道的容量区问题。1977年范·德·缪伦开始了中继信道的研究,1979年科弗尔和伊盖马尔找到了降阶中继信道的容量区。近年来,网络信息论的研究成果非常丰富,使网络信息论的存在理论日趋完善。

1.4 信息论与编码理论的应用

信息论与编码理论自20世纪50年代产生以来,随着电子、通信与计算机的发展,其研究成果不断得到发展和应用。以下介绍一些成功的应用领域。

1. 语音信号压缩

语音信号一直是通信网中传输的主要对象。自从通信网数字化以来,压缩语音信号的编码速率就成为通信中的一个重要问题。根据信息理论的分析,语音信号所需的编码速率可以远远低于仅按奈奎斯特采样定理和量化噪声分析所决定的编码速率。几十年来的研究工作已在这方面取得巨大进展。长途电话网标准的语音编码速率已从1972年CCITT G. 711标准中的64 kbit/s降低到1992年CCITT标准中的16 kbit/s。在移动通信中,1988年欧洲GSM标准中的语音编码速率为13.2 kbit/s,而1989年美国CTIA标准中的语音编码速率为7.95 kbit/s。对语音质量要求较低的军用通信,美国NSA标准的语音编码速率在1975年时已达到2.4 kbit/s。目前,在实验室中已实现600 bit/s的低速率语音编码,特别是按音素识别与合成原理构造的声码器,其速率可低于100 bit/s,已接近信息论指出的极限。

2. 图像信号压缩

图像信号的信息量特别巨大,直接传输和存储图像信号是很困难的。经过多年研究,到20世纪80年代时图像信号压缩技术逐步达到建立标准的阶段。1989年CCITT提出电视电话/会议电视的压缩标准H. 261,其压缩比为25:1到48:1左右。1991年CCITT与ISO联合提出的“多灰度静止图像压缩编码标准”JPEG(Joint Photographic Experts Group),其压缩比为24:1。对常规电视信号的压缩,在1991年提出的国际标准MPEG-1中的平均压缩比可达到50:1。这些巨大的进展为图像信号进入通信领域以及多媒体计算机的发展创造了条件。随着全数字高清晰度电视技术的发展,1993年提出了相应的图像压缩国际标准MPEG-2。

3. 计算机文件的压缩

由于数据库的广泛使用,存储计算机文件所需的存储量问题日益突出。为了解决这个问题,在过去的20多年中,人们至少提出了20多个有效的计算机文件压缩算法。有些算法能使各种计算机文件压缩后所需的存储量只为原文件的25%~50%。

4. 模拟话路中数据传输速率的提高

20世纪50年代初,计算机开始在美国联网,当时模拟话路几乎是传输计算机数据的唯一可用信道。最早的调制解调器的速率只有300 bit/s,而信息论指出,标准带宽为4 kHz,信噪比为25 dB的话路信道的极限速率应在25 kbit/s左右。所以在以后的30多年中就开始提高速率的研究工作。1967年速率为4800 bit/s,1971年为9600 bit/s,1980年开始达到14.4 kbit/s,1985年时利用多维网格编码调制的调制器Codex2680使速率达到19.2 kbit/s,已非常接近理论极限。在话路调制解调器中获得成功的各种调制方法很快被成功推广应用到载波的高次群信道及数字微波、数字卫星信道中。