



XINXI LILUN YU
BIANYIMA JISHU

信息理论 与编译码技术

刘立柱 王刚 丁志鸿 ◎ 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TN911.2/64

2013

TN911.2/64
2013

TN911.2/64
2013

信息理论与编译码技术

刘立柱 王刚 丁志鸿 编著

北方工业大学图书馆



C00348201

北方工业大学图书馆



C00348201

北方工业大学图书馆



C00348201

· 北京 ·

内 容 简 介

本书论述了信息、信息系统和智能系统的概念与特性,信源和信道的分类,阐述了信源产生冗余的根源,分析了去除冗余的一般方法,重点论述了信源熵函数、信道容量代价函数和速率失真函数及其特性,给出了相应的信源编码、信道编码和信源—信道编码四个定理。

本书阐述了数据、传真、语音等各种媒体信源编码原理和信道编码原理,重点是无失真信源编译码理论与技术;提出了信源码的纠错译码原理与技术;探讨了智能信息处理和译码技术融合的抗误码译码新技术。

本书具有独特的板块体系结构,并致力于理论与技术深度融合,编码技术与译码技术的统一,目的是使读者清晰可见信息理论既与编码密切相关、也与信息传输系统密不可分,是指导编码和信息系统理论与技术发展的强大武器。本书具有探索性与创新性,其中信源码的纠错译码技术,具有很强的探索性,把智能信息处理与译码技术融合,开辟了一个新的研究方向。

本书可供信息技术(通信、电子信息、测控、计算机)领域科研和工程技术人员学习参考,同时也可作为高等学校电子信息类或相关专业本科生、研究生的专业基础课或专业课教材。

图书在版编目(CIP)数据

信息理论与编译码技术/刘立柱,王刚,丁志鸿编著. —
北京:国防工业出版社,2013.8

ISBN 978-7-118-08867-0

I. ①信... II. ①刘... ②王... ③丁... III. ①信息论 ②信源编码—编码技术 IV. ①TN911.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 180028 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数 472 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 52.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前言

1948年C. E. Shannon(香农)发表的“通信的数学理论”,创立了信息论。香农信息论一般称为信息论基础。在发展历程中,从最初的、解决通信中的有效性和可靠性,发展成为信息系统的有效性、可靠性、保密性和经济性四维度课题;从广度的角度看,从最初单一概率信息,发展成概率的、偶发的、模糊的、语法的、语义的和语用的多维信息。目前,信息论已发展成为信息科学。随着社会信息化进程的推进,信息理论与编译码技术是信息科学中最基础和最活跃的发展领域,广泛应用于信息技术之中,同时,信息的概念遍及当今社会的各个领域。

在信息化时代,经济全球化趋势明显,社会信息化进程加快,国家之间的竞争更加激烈,其核心是人才的竞争、技术的竞争。竞争,促使信息交互向着网络化、信息处理智能化、信息开发利用大众化方向发展,促使教育从全民教育向全人教育的方向发展。

社会信息化需要网络的大发展:互联网(Internet),把单台计算机连接在一起,称为第一个里程碑;万维网(WWW),即Web超媒体网络,把一个个网页连接起来,称为第二个里程碑;网格则是利用计算机网络,把地理上分布式的计算资源、存储资源、软件资源、信息资源等连成一个整体,为用户提供一体化的信息服务,实现网络上所有资源的全面连通、全面共享,消除了“信息孤岛”和“资源孤岛”,称为第三个里程碑。2008年,IBM首席执行官彭明盛首次提出“智慧的地球”这一概念。认为,IT产业下一阶段的任务是,把感应器嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、大坝、油气管道等各种物体中,并且被普遍连接,形成所谓的“物联网”,可称为第四个里程碑。应该指出,在网络发展过程中,需要大量的信息处理技术作为支撑,需要更高水平的信息处理技术,这个需求,促使信息处理向智能化方向发展。

社会信息化需要信息资源的深度开发和充分利用。把新一代IT技术充分运用在各行各业之中,人们将充分利用各种媒体信息,人类社会将进入后信息化时代。所谓媒体信息,包括声音、文字、传真、图像、视频、数据、多媒体等。信息处理,包括媒体数据的采集、存储、处理、压缩、传输、显示或播放等。

网络的发展水平,信息资源的开发和利用水平决定了信息化社会的发展水平,一个国家网络的发展、信息资源开发和利用的竞争优势,是在国际竞争中立于不败之地的法宝。竞争优势的取得,关键是人才的竞争、智力的优势。这就说明,国家教育从大众教育向“全人教育”发展的客观需求。所谓“全人教育”,坚持以人为本,更加注重“综合素质教育”。即培养“专业素质”、“文化素质”、“信息素质”较高,创新能力较强,具有“国际视野”的智能水平较高的人。何谓智能?获取信息、处理信息、利用信息解决问题的能力就是智能。正因为如此,作者一直想写一本适应社会信息化发展需求、顺应全人教育教学改革趋势、使读者学会信息理论并能应用于信息技术实践的书,此书最好的冠名就是《信息理论与编译码技术》。

本书是在《概率与模糊信息论及其应用》(2004年)和《无失真信源编码纠错译码理论与技术》(2008年)的基础上,归纳整理了我的博士研究生和硕士研究生们的研究成果编写而成。在编写中,我们追求的目标如下:

(1) 信息理论与编码技术紧密结合的板块体系。以基本概念(第1章、第2.4节、第3.1节)为第一板块,信源熵函数和信源编码理论与技术(第2~9章)为第二板块,信道特性分析和信道编码(第10~12章)为第三板块,限失真编码理论与技术和系统优化(第13~16章)为第四板块,最后是第五板块——智能译码技术。目的是解决学习信息论不知如何应用,做技术创新如何寻求理论支撑的难题。

(2) 理论与技术的深度融合。在板块体系结构的基础上,把理论与实现技术密切结合,既阐述编码原理,又论述编码的实现技术;既讨论译码理论,又探讨译码技术;既论述信道传输能力,又讨论在信息系统设计中的应用。其目的还是使读者真正提高分析问题、解决问题的能力。

(3) 探索与创新的具体实践。信息理论包括经典的香农信息论,探索性与创新性使其在深度和广度上都得到了发展,体现在信源冗余、编码冗余、去除冗余的技术分析及压缩系统分析方面;同时本书在论述了各种媒体压缩码算法基础上,重点讨论了译码算法与技术,信源码的纠错译码技术,具有很强的探索性。本书针对多种信源编码,较深入地论述了纠错译码算法和技术;把智能信息处理与译码技术融合所提出的抗误码译码技术,具有显著创新性。由此可见,需求激发技术创新,技术创新需要理论支撑。

本书共17章,由刘立柱总体构思、统审定稿。王刚审阅全书,并执笔第7、8、9章;第4、5、6、17章及14.2节、14.3节由丁志鸿执笔;第2、13章及14.1节由海洁执笔,第3章由陈杨执笔,第10、11章由张军执笔,第12、15、16章由杜海龙执笔。

需要指出的是,在编写过程中,得到了解放军信息工程大学信息工程学院领导和同事们鼓励,以及有关项目的支持,得到了项仕标教授的鼓励,以及西亚斯国际学院“电子信息工程省级特色专业建设”项目的支持,本书内容包括孙正安、张沛、刘伟华、朱文文、何鑫、牛小立等多名研究生作出的贡献,在《概率与模糊信息论及其应用》和《无失真信源编码纠错译码理论与技术》中所列参考文献,在本书中未再列出。在此,一并表示深切的谢意。

由于时间仓促,水平有限,存在不妥甚至错误之处,敬请广大读者批评指正。

编著者

2013年7月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 信息的概念与分类	1
1.1.1 信源的描述与分类	1
1.1.2 信道的描述与分类	2
1.2 信息论及其应用	5
1.2.1 香农信息论与模糊 信息论	5
1.2.2 香农信息论与编码	5
1.3 智能系统与信息技术智能化	7
1.3.1 智能与智能系统	7
1.3.2 信息技术智能化	8
第 2 章 信源特性分析	9
2.1 离散信源的熵	9
2.1.1 信源熵的定义	9
2.1.2 信源熵的特性分析	10
2.2 微分熵和随机矢量的熵	12
2.2.1 连续信源的熵	12
2.2.2 n 次扩展信源	13
2.2.3 随机矢量的熵	13
2.3 联合熵与条件熵	15
2.3.1 联合熵	15
2.3.2 条件熵	15
2.4 信源的冗余度分析	16
2.4.1 信源冗余分析	16
2.4.2 信源冗余度的计算	17
第 3 章 逼近码长下限的理论与技术	23
3.1 去相关分析	23
3.1.1 预测去相关	23
3.1.2 域变换去相关	23
3.1.3 并元处理去相关	27
3.1.4 字典索引去相关	27
3.2 无失真信源编码	32
3.2.1 无失真信源编码概念	32

3.2.2 编码举例	33
3.3 定长编码分析	34
3.3.1 无失真信源编码定理	34
3.3.2 中文电报系统编码分析	37
3.4 变长编码分析	39
3.4.1 变长编码概念	39
3.4.2 变长编码定理	40
3.5 变长码的编码方法	44
3.5.1 霍夫曼码	44
3.5.2 Shannon - Fano 码	48
3.5.3 Huffman - shannon - Fano(HSF 码)	49
第 4 章 MH 码分析与编译码技术	53
4.1 MH 码编译码分析	53
4.1.1 改进霍夫曼编码	53
4.1.2 码字的构成方法	57
4.2 MH 码编码技术	58
4.2.1 编码原理	58
4.2.2 编码技术	60
4.3 MH 码快速译码技术	63
4.3.1 MH 码译码	63
4.3.2 快速译码算法	65
4.4 MH 码纠错译码技术	67
4.4.1 误码分类	67
4.4.2 MH 码误码发现技术	67
4.4.3 基于再编码的 MH 码纠 错译码算法	69
4.4.4 基于多游程补偿的 MH 码纠 错译码算法	71
4.4.5 性能测试与结果分析	75
第 5 章 MR 码分析与编译码技术	77
5.1 MR 码编码原理与技术	77
5.1.1 MR 码编码规则	77
5.1.2 传输码流格式	81

5.1.3	MR 码的编码实现技术	81	7.3.3	最低分辨层典型预测	117
5.2	MR 码译码原理与技术	83	7.4	实用 JBIG 码编译码技术	117
5.2.1	MR 码译码原理与技术	83	7.4.1	编码处理	117
5.2.2	MR 码译码技术	84	7.4.2	编译码流程图	118
5.3	基于比特翻转的 MR 码纠错译码技术	85	7.5	基于自动综合判决准则的纠错译码技术	122
5.3.1	MR 码误码发现技术	85	7.5.1	算法描述	123
5.3.2	基于比特反转的 MR 码纠错译码算法	86	7.5.2	综合判决准则	124
5.3.3	基于错线密度检测的 MR 码自适应纠错译码算法	88	7.5.3	纠错算法性能测试	124
5.3.4	性能分析	90	第 8 章	文本压缩码分析与译码技术	126
第 6 章	MMR 码分析与编译码技术	91	8.1	LZ 77 算法的改进算法	126
6.1	MMR 码编译码原理与技术	91	8.1.1	LZSS 算法	126
6.1.1	编码规则	91	8.1.2	LZSS 算法实用化	126
6.1.2	传真编码的控制功能	92	8.2	LZW 算法	127
6.1.3	编译码技术	92	8.2.1	LZW 算法分析	127
6.2	MMR 码纠错译码技术	93	8.2.2	特例分析	129
6.2.1	MMR 码误码发现技术	93	8.3	PKZIP 压缩编码原理分析	130
6.2.2	MMR 码重同步技术研究	94	8.3.1	PKZIP 压缩编码原理	130
6.2.3	基于单比特反转的 MMR 码纠错译码算法	94	8.3.2	PKZIP 压缩编码举例	131
6.2.4	基于误码多线搜索的 MMR 码纠错译码算法	95	8.4	PKZIP 文件格式分析	132
6.2.5	性能测试与结果分析	99	8.4.1	ZIP 压缩文件的结构分析	132
第 7 章	二进制算术码分析与编译码技术	102	8.4.2	压缩方式分析	133
7.1	JBIG 码编码原理	102	8.5	基于遍历检验准则的 PKZIP 码的纠错译码技术	133
7.1.1	研究背景	102	8.5.1	ZIP 压缩中所采用的压缩算法分析	133
7.1.2	JBIG 码理论基础	102	8.5.2	Deflate1 压缩算法	135
7.1.3	编码算法	104	8.5.3	Ddflate2 压缩算法	136
7.2	JBIG 码译码原理	106	8.5.4	遍历树匹配参数区纠错算法设计	139
7.2.1	算术码译码算法	106	8.6	基于复相关的 PKZIP 码的纠错译码技术	141
7.2.2	二进制算术编码的改进	107	8.6.1	基于复相关性的数据区纠错译码算法设计	141
7.3	JBIG 码的数据流格式分析	112	8.6.2	压缩数据区纠错译码算法流程图	142
7.3.1	JBIG 参数与数据格式	112	第 9 章	JBIG2 码分析与译码技术	144
7.3.2	浮点标记字段	116	9.1	JBIG2 编码分析	144
			9.1.1	JBIG2 编码目标	144

9.1.2	JBIG2 码编码原理	144	11.4.2	编码描述	181
9.2	JBIG2 码解码原理	146	11.4.3	信道编码定理证明	183
9.2.1	解码概述	146	第 12 章	信道编码	187
9.2.2	过程的详细描述	147	12.1	信道编码的概念	187
9.3	JBIG2 的文件格式	149	12.1.1	信道编码基本思想	187
9.3.1	比特流组织方式	149	12.1.2	信道编码的分类	187
9.3.2	JBIG2 编码比特流分析	150	12.2	线性分组码	187
9.4	JBIG2 纠错译码技术	152	12.2.1	线性分组码的基本概念	188
9.4.1	纠错译码算法背景	152	12.2.2	线性分组码的特性分析	191
9.4.2	纠错译码算法简介	152	12.3	线性分组码的译码方法	191
第 10 章	信道与信息传输分析	153	12.3.1	标准阵列译码表	191
10.1	条件熵与 Fano 不等式	153	12.3.2	伴随式纠错译码	192
10.1.1	条件熵	153	12.3.3	监督矩阵与最小距离的关系	194
10.1.2	Fano 不等式	155	12.4	循环码	194
10.2	互信息函数	156	12.4.1	循环码的基本概念	195
10.2.1	互信息函数定义	156	12.4.2	循环码的性质及其应用	196
10.2.2	互信息函数特性分析	157	12.5	卷积码与 Turbo 码	197
10.3	数据处理定理	160	12.5.1	卷积码的概念	197
10.3.1	数据处理定理定义	160	12.5.2	Turbo 码	197
10.3.2	数据处理定理的应用	162	第 13 章	限失真条件下信源编码	200
10.4	随机矢量之间的互信息	164	13.1	速率失真函数	200
10.4.1	信道扩展	164	13.1.1	速率失真函数研究背景	200
10.4.2	随机矢量之间的互信息	164	13.1.2	离散无记忆信源的速率失真函数	201
10.4.3	连续随机变量之间的互信息	168	13.1.3	速率失真函数特性分析	203
第 11 章	信道的信息传输能力分析	169	13.1.4	对称信源的速率失真函数	210
11.1	信道容量	169	13.2	高斯信源的 $R(\delta)$ 函数	211
11.1.1	信道容量定义	169	13.2.1	高斯信源的 $R(\delta)$	211
11.1.2	对称信道的容量	170	13.2.2	高斯信源 $R(\delta)$ 特性分析	213
11.2	DMC 的容量代价函数	171	13.3	信源编码定理	214
11.2.1	容量代价函数定义	171	13.3.1	数据压缩系统描述	214
11.2.2	容量代价函数特性分析	172	13.3.2	限失真条件下信源编码定理	216
11.3	高斯信道的容量代价函数	177			
11.3.1	高斯信道的描述	177			
11.3.2	高斯信道的容量代价函数	178			
11.4	信道编码定理	180			
11.4.1	通信系统模型	180			

第 14 章 限失真信源编码技术	220	第 16 章 信息系统优化设计	252
14.1 矢量量化与 $R(\delta)$	220	16.1 图像变换编码系统优化设计	252
14.1.1 矢量量化原理	220	16.1.1 变换编码举例	252
14.1.2 设计举例	223	16.1.2 正交变换编码的性能分析	252
14.2 JPEG 码分析与译码技术	223	16.1.3 主观评定	254
14.2.1 JPEG 码编码规则分析	223	16.2 接入网优化设计	255
14.2.2 JPEG 编码流分析	226	16.2.1 接入网研究背景	255
14.2.3 JPEG 码译码技术	228	16.2.2 关键技术分析	256
14.3 JPEG-2000 码分析与译码技术	230	16.3 扩展频谱通信的理论基石	260
14.3.1 JPEG-2000 编码规则分析	230	16.3.1 扩展频谱通信	260
14.3.2 JPEG-2000 码关键技术分析	232	16.3.2 扩展频谱通信技术	261
14.3.3 针对高权重比特域突发错误的纠错译码算法	235	16.4 通信系统优化设计	262
14.3.4 试验结果与分析	237	16.4.1 通信系统优化指标	262
第 15 章 语音压缩编码	240	16.4.2 通信系统优化设计举例	264
15.1 基本概念	240	第 17 章 信源码智能译码技术	266
15.1.1 语音压缩编码分类	240	17.1 研究背景	266
15.1.2 衡量语音编码性能的主要指标	241	17.1.1 视频编码技术发展	266
15.1.3 提高语音编码质量的途径	241	17.1.2 MPEG-2 中三类图像的编码方法分析	267
15.2 语音预测编码	241	17.1.3 抗误码技术的现实需求	270
15.2.1 预测编码	241	17.2 信源码抗误码译码新理论与新技术	270
15.2.2 预测编码性能分析	243	17.2.1 信源码抗误码译码新机制	270
15.3 语音变换编码	244	17.2.2 视频信源码抗误码译码新技术	271
15.3.1 语音变换编码原理分析	244	17.2.3 试验结果	276
15.3.2 解码器设计	247	17.3 MH 码抗误码融合新技术	277
15.3.3 G.722.1 帧的数据包结构	248	17.3.1 基于假设检验的纠错译码算法	277
15.4 参数编码	248	17.3.2 误码补偿新机制	277
15.4.1 基本概念	248	17.3.3 抗误码融合技术	279
15.4.2 CELP 编码原理分析	249	17.3.4 试验结果	279
15.5 语音编码中的统计编码	251	参考文献	280

第1章 概 论

1.1 信息的概念与分类

信息论的创始人香农(Shannon)研究了通信系统,在1948年发表了“通信的数学理论”一文,对信息给出了定量的规定,从而开辟了对信息的了解和研究。香农用概率方法给出了信源和信道的数学模型,通信系统模型如图1.1所示。

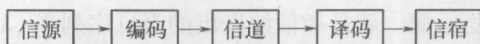


图1.1 通信系统模型

所谓信源,就是任何一类在某个地方产生在另一个地方感兴趣消息的设备。例如,一本书、一张布告,以及舞蹈、音乐等,都导致了多种多样的信息表现形式,它们本身就是信息源。

1.1.1 信源的描述与分类

为了深入研究对信源符号的处理、编码等问题,首先讨论各种信源的描述,即信源的数学模型,进一步研究信源的数字特征和物理特性。例如,掷一颗均匀骰子,每掷一次出现哪个点数是不可预测的,也就是说是随机的。因此,该试验可用随机变量 X 表示试验结果,其值域 $R = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$,每个数值出现的概率为 $p_i = 1/6 (i = 1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 。该试验信源的数学模型由概率空间 $[R, P]$ 表示,即

$$[R, P] = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \\ p_1 & p_2 & p_3 & p_4 & p_5 & p_6 \end{bmatrix}$$

需要指出的是,我们以后所研究的随机变量,随机序列以及随机过程都可作为信源的统计模型。

(1) 离散信源。离散信源就是随机变量的值域 R 为一离散集合 P 。记 X 的值域 $R = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$,要充分描述 X ,需要给出集合 R 中各个元素的概率量度 $p(x_i)$ 。一般的 X 的值域 R 和集合 P 的概率分布称为概率空间,并简记为 $[R, P]$,即

$$[R, P] = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_n \\ p(x_1) & p(x_2) & \dots & p(x_n) \end{bmatrix} \quad \left(\sum p(x_i) = 1 \right)$$

(2) 连续信源。即出现的消息数是无限的或不可数的。可用连续性随机变量来描述,其数学模型为

$$[R, P] = \begin{bmatrix} R \\ p(x) \end{bmatrix} \quad \left(\int p(x) dx = 1 \right)$$

式中: $R = (a, b)$ 、 $P = (-\infty, \infty)$; $p(x)$ 为连续随机变量 X 的概率密度函数。

应该指出的是,实际上,信源发出的不一定都是一个一个的信源符号,而是一系列的信源符号,更为一般的是时间的函数 $X(t)$,通过抽样可得到时间上离散的诸个随机变量,可用随机序列表示,即

$$X_1, X_2, \dots, X_N, \text{ 或 } X_1, X_2, \dots, X_h, \dots (h = 1, 2, \dots, N)$$

若 $X = (X_1, X_2, \dots, X_N)$, 当 X_h 的值域 $R = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 那么

$$\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_N) \in R^N$$

$$p(\mathbf{x}) = p(x_1, x_2, \dots, x_N) = p(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_N = x_N)$$

可见 X 的取值有 n^N 种, 若对每一种 X 的取值 $\mathbf{x}$ 规定了概率量度, 也就充分描述了随机矢量 X 。

(3) 无记忆信源与有记忆信源。当 X_h 相互独立时, 且有同样的概率密度函数, 则有 $p(\mathbf{x}) = \prod_{h=1}^N p(x_h)$, 与此相对应的信源称为无记忆信源; 反之, 就是有关联的, 与此相对应的信源称为有记忆信源。该信源的描述相对比较困难, 因此在实际问题中往往限制记忆的长度, 即 X_h 的概率密度仅仅与它前面的一个 (X_{h-1}) 或 M 个 ($X_{h-1}, X_{h-2}, \dots, X_{h-M}$) 有关, 当只与 X_{h-1} 有关时, 则称为马尔柯夫链性质, 这样的信源就是有记忆的信源。

(4) 平稳性信源与非平稳信源。就是指信源发出的消息序列 $X_1, X_2, \dots, X_h, \dots$ 具有下列特性:

① 信源在 $t = h$ 时刻发出什么符号与信源在 $t = h$ 时刻随机变量 X_h 取 x_h 符号的概率分布 $p(x)$ 有关。一般情况下, 在 $t = i$ 时的 $p(x_i) \neq p(x_h)$ 。

② 信源在 $t = h$ 时刻发出什么符号与信源在 $t = h$ 时刻以前发出的符号有关, 即与 $p(x_h/x_{h-1}, x_{h-2}, \dots)$ 有关。一般情况下, $p(x_h/x_{h-1}, x_{h-2}, \dots)$ 为时间 t 的函数, 即

$$p(x_h/x_{h-1}, x_{h-2}, \dots) \neq p(x_i/x_{i-1}, x_{i-2}, \dots)$$

这样的信源称为非平稳信源。而把满足

$$p(x_i) = p(x_h) \text{ 和 } p(x_h/x_{h-1}, x_{h-2}, \dots) = p(x_i/x_{i-1}, x_{i-2}, \dots)$$

的信源称为平稳信源, 它的统计特性与时间的起点无关。平稳信源发出的符号序列中, 不同符号组的联合概率应满足

$$\begin{cases} p(x_h, x_{h+1}) = p(x_h)p(x_{h+1} | x_h) \\ p(x_h, x_{h+1}, x_{h+2}) = p(x_h)p(x_{h+1} | x_h)p(x_{h+2} | x_h, x_{h+1}) \\ \vdots \\ p(x_h, x_{h+1}, \dots, x_{h+N}) = p(x_h)p(x_{h+1} | x_h) \cdots p(x_{h+N} | x_h, x_{h+1}, \dots, x_{h+N-1}) \\ \vdots \end{cases}$$

且有

$$\begin{aligned} p(x_{h+N} | x_{h+N-1}, \dots, x_h) &= p(x_{i+N} | x_{i+N-1}, \dots, x_i) \\ &= p(x_N | x_{N-1}, \dots, x_1) \end{aligned}$$

(5) 随机过程信源。即信源输出可用随机过程来描述。此时, 随机变量 $X(t)$ 是时间 t 的函数, $t \in T$, $T = \mathbf{R}$ 或 $T = (a, b) \in \mathbf{R}$, $\mathbf{R}$ 为实数集。比较简单的过程有限时、限频过程。所谓限时过程, 就是随机过程 $X(t)$, $t \in (a, b)$; 限频过程, 是指 $X(t)$ 具有频谱函数 $H(f)$, 也就是满足

$$H(f) = 0, |f| > F$$

这两种过程都可以展开成傅里叶级数, 当然展开式系数之间一般还是线性相关的。对于限时随机过程也可以进行 K-L 变换, 此时的展开式系数之间是相互独立或线性无关。

1.1.2 信道的描述与分类

信道是指用于传输信息的任何一类物理媒介, 或者说是载荷着信息的信号所通过的通道 (途径)。它的作用是传输信息和存储信息, 它是以信号特别是电信号的形式载荷信息的, 如一条电缆、

一束光等。

要规定一个信道,一是必须规定信道所容许的输入信号;二是要确定输入与输出之间的统计依赖关系。这种依赖关系一般不是确定的函数关系,而是统计依赖关系,可用条件概率来描述。信道的输入信号就是信源的输出符号,前面已经进行了讨论,而信道也可分为离散与连续、平稳与非平稳、有记忆与无记忆的。

应该指出,这里的信道是广义的,凡是讨论信息流路径中某一段的信号统计依赖关系,都可把这一段路径看作为信道来讨论。例如,纠错编码器的输入和输出之间统计依赖关系,纠错编码器被看作为编码信道。因此,信道按照输入和输出信号的取值,可分为离散信道、连续信道、数字信道、半数字信道以及半连续信道。

信道的输入与输出之间的统计依赖关系可用条件转移概率进行描述,其输入为 $X(x \in A)$,那么, $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)(x \in A_n)$; 输出为 $Y(y \in B)$, 而 $Y = (Y_1, Y_2, \dots, Y_n)(y \in B_n)$ 。 x 与 y 之间的转移概率可用矩阵表示,即

$$[p(y|x)] = Q$$

若 $[p(y|x)] = \prod_i p(y_i|x_i)$, 则该信道就是无记忆的; 否则就是有记忆的。若 $[p(y|x)] = \{0, 1\}$, 则该信道称为无干扰或无噪声信道; 反之, 就是有噪声的。

对一个信道而言, 当输入与输出都不是单个的, 则称为多用户信道(如多路复用信道)或多输出信道(如广播信道)。多用户信道的最大传信率不是一个数值, 而是一个数值集合, 即容量区域。

信道的描述形式: 线图表示法和方框图表示法。信道的线图表示如图 1.2 所示。

方框图表示法, 如离散无记忆信道(DMC), 其输入为 $\{0, 1, 2, \dots, r-1\}$, 其输出为 $\{0, 1, 2, \dots, s-1\}$, 该信道的方框图表示如图 1.3 所示。

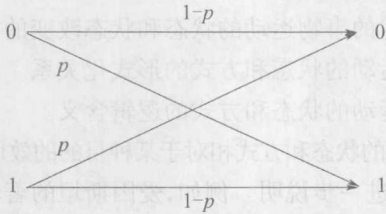


图 1.2 信道的线图表示

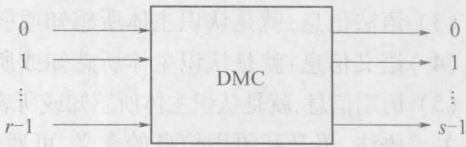


图 1.3 信道的方框图表示

编码实际上就是用符号来表示信息, 或者说是用适合于信道传输的符号来表示信源输出的符号; 而译码是编码的逆变换。

1948 年, 香农在“通信的数学理论”论文中提出了“通信的基本问题是在某一点(终端—信宿)准确地或近似地再现从另一点(信息源)选择的消息。”这句话提出了两类问题: 第一类问题是, 从信源中如何选择消息? 第二类问题是, 如何把已选用的消息可靠地传出去? 也就是说, 既要解决传输的有效性, 也要解决传输的可靠性问题。由此可见, 对信源而言核心问题是它包含的信息到底有多少? 这就是信源熵函数问题; 而信道的核心问题是它最多能传送多少信息? 这就是信道的容量问题, 在一定的限制条件下, 就是容量—代价函数问题; 如何编码才能使信息源的信息被充分表示、信道容量才能被充分利用, 这些编译码方法是否存在? 这是编码定理所解答的问题; 在牺牲一定的保真度的条件下, 具有更大压缩比的编译码方法是否存在? 或者说压缩与失真如何折中? 这就是速率失真函数问题。总之, 香农信息论是研究通信系统的可靠性、有效性和低成本问题, 是寻求系统优化的基本理论。

在 20 世纪后期, 以信息作为主要研究对象、以信息的运动规律为主要研究内容、以现代科学方

法论为主要研究方法、以扩展人的信息功能(尤其是其中的智力功能)为主要研究目标的一门科学诞生了,称为信息科学。它所研究的运动规律包括信息产生规律、信息提取规律、信息再生规律、信息施效规律。利用信息科学方法论研究在机器上复现主体的提取信息的功能、传递信息的功能、处理信息的功能、再生信息的功能、施用信息的功能,尤其是这些功能的综合即智力功能,就是信息科学的研究目标。

目前,信息科学的研究的重点:揭示利用信息来描述系统和优化系统的方法和原理;寻求通过加工信息来生成智能的机制和途径。

能够扩展人的信息器官功能的技术群,称为信息技术。它包括:感测技术——感觉器官功能延伸;通信技术——传导神经功能延伸;计算机技术——思维器官功能延伸;控制技术——效应器官功能延伸。应该指出,通信技术和计算机技术是信息技术的核心,感测技术和控制技术的核心与外部世界的接口,信息技术四基元是一个完整的体系。因此,可以说信息技术是指遥感遥测、通信、计算机、控制等技术的整体。

何谓信息?有人说,“信息就是消息”、“通信的内容就是信息”。这些说法不够严谨,信息与消息是有区别的,信息是消息或消息传输的概括,消息是信息的具体化。信息必须具有“能消除某些知识的不肯定性”的性质,就是说能改变人们的知识状态,使从无知变为有知、从不肯定变为肯定。广义信息是指人类感官所能感知(直接的或间接的)的一切有意义的东西,例如,电话、电视、雷达、声纳可以给我们传来信息。意大利学者 G. Longo 在 1975 年出版的《信息论:新的趋势与未决问题》一书序言中,称“信息是反映事物的形式、关系和差别的东西,它包含在事物的差异之中,而不在事物本身。”我国已故电子学家冯秉铨先生也赞同“信息就是差异”的理解;钟义信教授在他的《信息科学原理》一书中对信息进行了精辟的阐述。

下面给出钟义信教授关于信息的论述:

- (1) 本体论层次的信息:就是事物运动的状态和状态改变的方式。
- (2) 认识论层次的信息:就是认识主体所感知或所表述的事物运动的状态和状态改变的方式。
- (3) 语法信息:就是认识主体所感知或所表述的事物运动的状态和方式的形式化关系。
- (4) 语义信息:就是认识主体所感知或所表述的事物运动的状态和方式的逻辑含义。
- (5) 语用信息:就是认识主体所感知或所表述的事物运动的状态和方式相对于某种目的的效用。

关于语法、语义和语用信息的含义,可通过一个例子来进一步说明。例如,爱因斯坦的著名的物理学公式 $E = mc^2$, 给出了能量与质量之间转换关系的信息。从语法信息的角度看,这个公式规定了 E 、 m 、 c 和数字 2 的一种排列方式,再没看到该式之前我们不知道哪几个字母、哪个数字会出现,也不知道它们以何种方式排列,具有一定的不确定性。而在观察到该公式时,它们得知了它们的“存在状态和方式”,消除了先前的不确定性而获得了语法信息。然而,若不知道这些字母、数字和它们的排列方式有何含义,可以说我们并不知该公式的语义何在。当得知 E 代表能量、 m 代表质量、 c 代表光速、2 代表平方关系时,才知道了这个公式的含义,消除了先前的语义不确定性而获得了语义信息。对于观察者是否有价值?那要看是做什么工作的,如对搞核能开发的而言,他根据这一公式就可以通过改变原子核的质量状态而获得巨大的原子核能。

另一个例子:香农著名的限带限功率高斯信道容量公式 $C = W \log \left(1 + \frac{P}{NW} \right)$, 当我们知道了 W 为信道带宽、 P 为信号功率、 N 为噪声功率谱密度以后,也就是知道了该公式的逻辑含义。才由此得知当信道容量一定时,带宽与信噪比可以互换,由此发展了扩频通信技术。这个公式对通信科技工作者而言,显然是非常重要的。扩频通信技术是通信领域中一个发展迅速的技术分支,扩频通信是一种信号隐藏传输技术,即是把信号淹没在噪声之中,在军事通信中占有重要的位置。这个公式没有给

出具体的实施方案,而是指明了一个方向,这就是科学理论的意义所在。

应该指出,语法信息仅涉及“事物运动的状态和状态改变的方式”,是最基本的层次。大家知道,在语言学里只考虑“词与词的结合方式”的研究称为语法学。在此我们把只考虑“状态和状态改变的方式”这一层次的信息称为语法信息。同理,借用语言学中的语义学这个术语把只考虑“状态和状态改变的方式的含义”这一层次的信息称为语义信息。借用语言学中的语用学术语,而把只考虑“状态和状态改变的方式的含义的效用”这一层次的信息称为语用信息。

目前,大家所研究的是一些基本信息,如语用信息、语义信息、概率信息、偶发信息、确定型信息和模糊信息。

在语法信息中,根据运动状态和方式的不同可细分为概率信息、偶发信息、确定型信息和模糊信息。概率信息与运动状态是完全按照概率规则和统计规律出现相联系;偶发信息则是指各状态的出现是随机的而不是确定性的,但是由于这类试验只能进行若干次而不可能大量重复,不能用概率统计规则来描述,因此这类试验所提供的信息称为偶发信息。确定型的运动方式是指其各状态的出现规则能用经典数学公式来描述,而未知因素表现在初始条件和环境影响方面,与这类运动方式相对应的信息称为确定型信息。

1.2 信息论及其应用

1.2.1 香农信息论与模糊信息论

在信息科学发展历程中,模糊信息理论是目前有发展潜力值得注意的一个方向,它与香农信息论既有着本质的区别,又有类似的理论体系,先介绍几个基本概念。

1. 模糊信息

我们首先承认由于存在模糊性,就必然存在着某种不确定性。例如,在传真通信中,一张本来黑白分明的传真图像,由于某种原因变得模糊不清了,对于那些半白半黑的灰度色调究竟应算作白还是黑呢?这就产生了不确定性,而为了消除这种不确定性就需要信息。因此,就把与事物的模糊性相联系的信息称为模糊信息。也可以说,模糊信息是以模糊状态显现出的一种表现形式。

2. 模糊信息论

模糊信息论是研究模糊信息的本质、模糊信息的度量、模糊信息的处理、模糊模式识别、模糊检测、模糊决策、模糊信息优化处理等领域的理论;研究模糊现象的数学工具是模糊数学;研究的目标是构筑智能系统;应用领域为信息技术的四大领域,即通信、计算机、控制和感测技术领域。

应该指出,模糊性与随机性是存在本质区别的。随机性是对事件的发生与否而言的,由于条件不充分,事件可能发生也可能不发生,即事件的发生存在一定的概率,但事物本身的含义是明确的。例如,抛掷硬币,国徽朝上与否无法确定,是随机的,但国徽含义是明确的。我们可以通过多次抛掷得出国徽朝上的概率,研究随机性的工具为统计数学。香农信息论以通信问题为背景,所追求的目标是通信系统的有效性和可靠性。模糊性是指事件本身的含义就是不明确的,但事件发生与否是明确的。例如,“老张的病不轻”,老张有病是确定的,但老张病重到何种程度却是不明确的。研究模糊现象的数学工具是模糊数学;模糊信息论以信息技术领域为背景,所追求的目标是信息系统的智能化或智能化水平的提高。可见模糊信息论与香农信息论同属于语法信息的研究领域,但有着不同的研究对象、不同的研究工具、不同的研究内容、不同的应用环境和不同的研究目标。

1.2.2 香农信息论与编码

香农信息论,研究的主要目标是信息传输的有效性和可靠性。信息传输的有效性,即将信源产

生的信号(或数据),在传输前删除信号中的冗余成分,这就是信源编码或称为数据压缩。能去除信源中冗余成分的所有技术,常常称为压缩编码技术。信息传输的可靠性,即如何抗御信道噪声或干扰影响,防止传输的码元符号的变形,造成接收端判决时的误判。在送往信道前,需要采用收发双方共知规律的添加冗余码元,接收方可利用添加的冗余码元,发现传输错误或纠正传输错误,这种技术措施就是信道编码或纠错编码。

1. 信源编码

信源编码可按照媒体分类,简述如下。

1) 语音压缩编码

(1) 波形编码,是应用最早的语音编码方法。例如,脉冲编码调制(PCM),在 G. 711 建议中,规定了 A 律或 μ 律两种规格。

(2) 参数编码。根据语音信号产生的数学模型,提取语音信号特征参数,再对参数进行编码。在接收端,首先恢复特征参数,再结合数学模型,恢复语音。主要目标是使重建语音保持尽可能高的可懂度,重建波形同原始语音信号的波形可能会有较大的差异。如线性预测(LPC)编码类,其编码速率为 1.2 ~ 2.4kb/s,对环境噪声敏感。

(3) 混合编码。将波形编码与参数编码相结合,在 1.2 ~ 2.4kb/s 速率上能够得到高质量的合成语音。

2) 传真压缩编码

传真通信中采用的压缩编码主要有面对二值图像的 MH 码、MR 码、MMR 码、JBIG 码、JBIG2 码,面对灰度图像或彩色图像的 MMR 码、JBIG 码、JBIG2 码和 JPEG 码。

3) 图像压缩编码

主要有 JPEG 码、JBIG2 和 JPEG -2000 码,在不同图像文件格式中出现的还有游程编码等。

4) 数据压缩编码

主要有字典压缩编码:LZ 77 码、LZ 78 码、LZW 码、deflate 码,以及 ZIP、RAR、PDF 等桌面压缩系统。

5) 视频压缩编码

在视频压缩编码中,有两个系列:即 MPEG - 1、MPEG - 2、MPEG - 4 和 H. 261、H. 263、H. 263 +、H. 26 +、H. 264 标准中,压缩中的最后算法,均采用了变长编码(霍夫曼(Huffman)编码)。

2. 信道编码

信道编码(channel coding),为了与信道的统计特性相匹配,主要是提高通信的可靠性,在信源编码以后,按规律加入新的监督码元,以实现纠正传输错误的编码。换言之,通过信道编码器和译码器实现的用于提高信道可靠性的理论和方法。分两类问题:一是信道编码定理,从理论上解决编译码器的存在性问题,也就是解决信道能传送的最大信息率的可能性和超过这个最大值时的传输问题;二是构造性的编码方法以及这些方法能达到的性能界限。

从策略的角度看,增加人为冗余码元方法是多种多样的。根据加入规则将信道编码分为两种类型:一种是加入冗余码元与信息码元分组呈线性规律,即线性关系,这类信道编码称为线性码;另一种是加入冗余码元既与本信息码元分组有关,同时也与前面的信息码元分组有关,这种编码称为卷积码。近年来,又结合信息处理技术发展了 Turbo 码,进一步提高了信道编码性能。

1.3 智能系统与信息技术智能化

1.3.1 智能与智能系统

目前,社会信息化进程是社会发展的趋势,社会各领域也都需要信息,发展趋势可概括为数字化、网络化、智能化、可视化。

智能化、信息科学与技术的发展,使人们有能力在机器上复现人(主体)的那些信息过程的机制。一方面导致大量高级智能信息系统的问世;另一方面也孕育着智能科学与技术的诞生,有的专家断言在21世纪的技术变革中,信息技术发展方向将是智能化。

为了阐述智能与知识的关系,我们首先说明何谓智能?我国出版的《辞海》中是这样描述的:“智能是人认识客观事物并运用知识解决实际问题的能力,集中表现在反映客观事物深刻、正确、完全程度上和应用知识解决实际问题的速度和质量上,往往通过观察、记忆、想象、思考、判断等表现出来”。福格尔(Fogel)等人提出:“智能是一种有目的以某种好的方法使用某个有用信息的能力。”我国钟义信教授对智能的定义:智能,即是获取信息、处理信息、利用信息的能力。刘增良博士则把智能表述为:智能,就是能获取存储知识并运用知识解决实际问题的能力。至此,不难看出,知识是智能行为的基础,智能是一种能力,是一种学习能力、思维能力、分析问题和解决问题的能力、认识世界和改造世界的能力。应该指出,智能是一种“动态”行为,特别是一种“思维”行为,是一种知识和经验的综合运用过程,可以说“思维”是智能行为的核心。直感和灵感也是一种思维活动,它与逻辑思维、形象思维不同的是,速度上的差异,直感和灵感来的迅速。至此我们可以说,知识是智能的基础,智能是知识的提升物,是对知识加工、变换和利用的产物。

通过上述分析,我们认为一个智能系统应具有合理的物理结构、完善的知识系统、健全的思维机制。一个智能系统的功能主要是一种“信息加工”功能,其智力即“信息加工”的速度和能力。

我们也可以认为一个智能系统就是可实现一种信息“映射”,可将智能系统分为两类。

第一类,即系统的输出和输入信息之间不在保持固定不变的简单对应,而是在一定的“知识平面”内“线性”可变,这类系统在运用固有特性和本能进行信息处理时,有一定的灵活性和适应性,是一类“适应性”系统,可称为适应性智能系统,也称为低级智能系统。

第二类,即智能系统,具备了以主观能动性为特征的有意识的自学习和创造功能。具有灵活运用其本身固有的特性和本能的“能力”,也就是说本身也不是相对稳定的了。这类系统可称为意识型能动性智能系统,也称为高级智能系统。

应该指出的是,第一,智能系统必须具有“适应能力”,即智能体对外部信息不但具有感知能力,还具备经过“思维”灵活作出“适应性”反映的能力;第二,智能系统具有“学习能力”,否则它就无法“获取”作为信息处理基础的“知识”、也无法改进其“思维能力”。正因为如此,一个智能系统,当且仅当具有“学习功能”和“思维功能”时才可称为智能系统。

L. A. Zadeh 教授在接受1989年本田奖仪式上的讲话时说:“……我认为模糊理论今后在两个领域取得较大进展:一个是熟练技术者替代系统,这种系统将人无意识进行的操作由机器替代,如日本仙台市营地铁的自动驾驶系统;另一个是替代专家的专家系统,如山一证卷公司的股票交易系统及医疗诊断系统。”为使专家头脑中所进行的思考与决策实现自动化,模糊理论将起重要作用。当然,模糊理论并不能解决所有各种问题,但是只要不回避现实中的不确定事物并加以认真对待,就有可能大大提高在不确定(模糊)环境中进行智慧思考与决策的人及机器的能力。

1990年6月,日本明治大学信息科学中心所长、工学博士向殿政南教授,曾从事模糊理论、多值

逻辑和安全技术的研究工作,在趣谈“模糊”时指出:要想发展智能工业,必须能输入模糊信息,特别是人类知识大多使用语言表达的,不能不使用模糊理论。

1.3.2 信息技术智能化

综上所述,自从1965年美国L. A. Zadeh教授提出“模糊集”理论之后,模糊数学得到了迅速的发展。模糊信息理论、模糊控制理论、模糊计算机理论等也有多年的发展历程,同时信息科学的普及与发展,人工智能理论的发展,神经网络、专家系统的发展,其目标都是为了发展智能工业。在21世纪,信息技术的发展必将对智能科学与技术提出更高的要求,因此,我们对“智能科学与技术”应给予足够的重视。关于智能科学与技术,目前应包括模糊信息处理理论,人工智能理论,模式识别,模糊逻辑与智能控制,神经网络,专家系统等研究领域。

IT技术,即计算机技术、通信技术、感测技术和控制技术,以及以IT为基础的综合技术——信息网络技术,必将向深度和广度发展。发展历程:计算机网络——互联网——网格——物联网。计算机网络把一台台计算机连了起来;互联网把计算机网实现了互联;万维网把一个个网页连了起来;网格则是一个个应用的互连、互通。网格可以说是构筑在互联网上的一组新技术,它使人们可以动态地共享分布在网不同地方的各种资源,如大型计算机、数据库、应用、服务等,是互联网发展的第三个里程碑。

奥巴马就任美国总统后,与美国工商业领袖举行了一次“圆桌会议”,IBM公司首席执行官彭明盛首次提出“智慧的地球”这一概念,建议新政府投资新一代的智慧型基础设施,阐明其短期和长期效益。奥巴马对此给予了积极的回应:“经济刺激资金将会投入到宽待网络等新兴技术中去,毫无疑问,这就是美国在21世纪保持和夺回竞争优势的方式。”

该战略认为,IT产业下一阶段的任务是把新一代IT充分运用在各行各业之中。具体地说,就是把感应器嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、油气管道等各种物体中,并且被普遍连接,形成所谓的物联网,然后将物联网与现有的互联网整合起来,实现人类社会与物理系统的整合。在这个整合的网络当中,存在能力超级强大的中心计算机群,能够对整合网络内的人员、机器、设备和基础设施实施实时的管理和控制。在此基础上,人类可以以更加精细和动态的方式管理生产和生活,达到“智慧”状态,提高资源利用率和生产力水平,改善人与自然间的关系。

在今后的信息技术领域,可称为智能信息技术,对信息的加工和处理将由集中型向分布型转变,也就是说智能技术将渗透到传输、控制、计算、感测等领域。