



教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材
高等学校电子信息类专业系列教材



“十二五”江苏省高等学校重点教材（编号：2015-2-074）

Information Theory Foundation and Applications

信息论基础与应用

赵生妹 编著
Zhao Shengmei



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

信息论是信息科学最成熟、最完善的一部分,它与其他学科的交叉和融合,促进了许多新兴学科的发展。本书从信息论的基本理论出发,介绍香农信息论的基本理论和方法,及其在网络信息理论和量子信息理论中的应用。全书共7章,在介绍有关信息度量的基础上,重点讨论信源与信息熵、信道与信道容量、无噪信道编码理论、含噪信道编码理论、网络信息理论和量子信息理论。

本书由浅入深、深入浅出,具有系统性、交叉性和前沿性等特点;书中联系实际通信系统,使用较多的例题和图示阐述重要的基本概念,结合 MATLAB 代码实例展现信息论的实用性;各章均附有一定量的习题,便于读者加深对概念和原理的理解。

本书可作为理工类高等院校信息工程、通信工程及相关专业的本科教材,也可供对信息科学感兴趣的各类人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

信息论基础与应用/赵生妹编著. —北京:清华大学出版社,2017

(高等学校电子信息类专业系列教材)

ISBN 978-7-302-46534-8

I. ①信… II. ①赵… III. ①信息论—高等学校—教材 IV. ①G201

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 030367 号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社总机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:三河市吉祥印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17

字 数:413千字

版 次:2017年7月第1版

印 次:2017年7月第1次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00元

产品编号:061109-01

高等学校电子信息类专业系列教材

一 顾问委员会

谈振辉	北京交通大学 (教指委高级顾问)	郁道银	天津大学 (教指委高级顾问)
廖延彪	清华大学 (特约高级顾问)	胡广书	清华大学 (特约高级顾问)
华成英	清华大学 (国家级教学名师)	于洪珍	中国矿业大学 (国家级教学名师)
彭启琮	电子科技大学 (国家级教学名师)	孙肖子	西安电子科技大学 (国家级教学名师)
邹逢兴	国防科学技术大学 (国家级教学名师)	严国萍	华中科技大学 (国家级教学名师)

二 编审委员会

主任	吕志伟	哈尔滨工业大学		
副主任	刘旭	浙江大学	王志军	北京大学
	隆克平	北京科技大学	葛宝臻	天津大学
	秦石乔	国防科学技术大学	何伟明	哈尔滨工业大学
	刘向东	浙江大学		
委员	王志华	清华大学	宋梅	北京邮电大学
	韩焱	中北大学	张雪英	太原理工大学
	殷福亮	大连理工大学	赵晓晖	吉林大学
	张朝柱	哈尔滨工程大学	刘兴钊	上海交通大学
	洪伟	东南大学	陈鹤鸣	南京邮电大学
	杨明武	合肥工业大学	袁东风	山东大学
	王忠勇	郑州大学	程文青	华中科技大学
	曾云	湖南大学	李思敏	桂林电子科技大学
	陈前斌	重庆邮电大学	张怀武	电子科技大学
	谢泉	贵州大学	卞树檀	第二炮兵工程大学
	吴瑛	解放军信息工程大学	刘纯亮	西安交通大学
	金伟其	北京理工大学	毕卫红	燕山大学
	胡秀珍	内蒙古工业大学	付跃刚	长春理工大学
	贾宏志	上海理工大学	顾济华	苏州大学
	李振华	南京理工大学	韩正甫	中国科学技术大学
	李晖	福建师范大学	何兴道	南昌航空大学
	何平安	武汉大学	张新亮	华中科技大学
	郭永彩	重庆大学	曹益平	四川大学
	刘缠牢	西安工业大学	李儒新	中科院上海光学精密机械研究所
	赵尚弘	空军工程大学	董友梅	京东方科技集团
	蒋晓瑜	装甲兵工程学院	蔡毅	中国兵器科学研究院
	仲顺安	北京理工大学	冯其波	北京交通大学
	黄翊东	清华大学	张有光	北京航空航天大学
	李勇朝	西安电子科技大学	江毅	北京理工大学
	章毓晋	清华大学	张伟刚	南开大学
	刘铁根	天津大学	宋峰	南开大学
	王艳芬	中国矿业大学	靳伟	香港理工大学
	苑立波	哈尔滨工程大学		
丛书责任编辑	盛东亮	清华大学出版社		

序

FOREWORD

我国电子信息产业销售收入总规模在 2013 年已经突破 12 万亿元,行业收入占工业总体比重已经超过 9%。电子信息产业在工业经济中的支撑作用凸显,更加促进了信息化和工业化的高层次深度融合。随着移动互联网、云计算、物联网、大数据和石墨烯等新兴产业的爆发式增长,电子信息产业的发展呈现了新的特点,电子信息产业的人才培养面临着新的挑战。

(1) 随着控制、通信、人机交互和网络互联等新兴电子信息技术不断发展,传统工业设备融合了大量最新的电子信息技术,它们一起构成了庞大而复杂的系统,派生出大量新兴的电子信息技术应用需求。这些“系统级”的应用需求,迫切要求具有系统级设计能力的电子信息技术人才。

(2) 电子信息系统设备的功能越来越复杂,系统的集成度越来越高。因此,要求未来的设计者应该具备更扎实的理论基础知识和更宽广的专业视野。未来电子信息系统的设计越来越要求软件和硬件的协同规划、协同设计和协同调试。

(3) 新兴电子信息技术的发展依赖于半导体产业的不断推动,半导体厂商为设计者提供了越来越丰富的生态资源,系统集成厂商的全方位配合又加速了这种生态资源的进一步完善。半导体厂商和系统集成厂商所建立的这种生态系统,为未来的设计者提供了更加便捷却又必须依赖的设计资源。

教育部 2012 年颁布了新版《高等学校本科专业目录》,将电子信息类专业进行了整合,为各高校建立系统化的人才培养体系,培养具有扎实理论基础和宽广专业技能的、兼顾“基础”和“系统”的高层次电子信息人才给出了指引。

传统的电子信息学科专业课程体系呈现“自底向上”的特点,这种课程体系偏重对底层元器件的分析与设计,较少涉及系统级的集成与设计。近年来,国内很多高校对电子信息类专业课程体系进行了大力度的改革,这些改革顺应时代潮流,从系统集成的角度,更加科学合理地构建了课程体系。

为了进一步提高普通高校电子信息类专业教育与教学质量,贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要(2010—2020 年)》和《教育部关于全面提高高等教育质量若干意见》(教高〔2012〕4 号)的精神,教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会开展了“高等学校电子信息类专业课程体系”的立项研究工作,并于 2014 年 5 月启动了《高等学校电子信息类专业系列教材》(教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会规划教材)的建设工作。其目的是为推进高等教育内涵式发展,提高教学水平,满足高等学校对电子信息类专业人才培养、教学改革与课程改革的需要。

本系列教材定位于高等学校电子信息类的专业课程,适用于电子信息类的电子信息工

程、电子科学与技术、通信工程、微电子科学与工程、光电信息科学与工程、信息工程及其相近专业。经过编审委员会与众多高校多次沟通,初步拟定分批次(2014—2017年)建设约100门课程教材。本系列教材将力求在保证基础的前提下,突出技术的先进性和科学的前沿性,体现创新教学和工程实践教学;将重视系统集成思想在教学中的体现,鼓励推陈出新,采用“自顶向下”的方法编写教材;将注重反映优秀的教学改革成果,推广优秀的教学经验与理念。

为了保证本系列教材的科学性、系统性及编写质量,本系列教材设立顾问委员会及编审委员会。顾问委员会由教指委高级顾问、特约高级顾问和国家级教学名师担任,编审委员会由教育部高等学校电子信息类专业教学指导委员会委员和一线教学名师组成。同时,清华大学出版社为本系列教材配置优秀的编辑团队,力求高水准出版。本系列教材的建设,不仅有众多高校教师参与,也有大量知名的电子信息类企业支持。在此,谨向参与本系列教材策划、组织、编写与出版的广大教师、企业代表及出版人员致以诚挚的感谢,并殷切希望本系列教材在我国高等学校电子信息类专业人才培养与课程体系建设中发挥切实的作用。

吕志伟 教授

前言

PREFACE

1948年,美国科学家香农(C. E. Shannon)发表了题为“通信的数学理论”的学术论文,宣告了信息论的诞生。信息论的产生和发展与通信技术、计算机技术的产生与发展密切相关,历史上大体分为早期酝酿、理论建立与发展以及理论应用与近代发展三个阶段。从信息的度量开始,信息的概念和研究范围在不断扩大和深化,并迅速渗透到其他相关学科领域。目前,信息论的应用领域从自然科学扩展到经济、管理科学甚至人文社会科学,其内涵从狭义信息论延展到如今的广义信息论,发展成为涉及面极广的信息科学。

信息论研究信息的度量问题,关注信息如何能有效地、可靠地、安全地从信源传输到信宿。香农熵是香农信息论中有关信息度量的基础,它与事件发生的概率相联系,是平均“不确定性”。在香农熵的基础上,可进一步引入联合熵、条件熵、互信息、信道容量和信息率失真函数等概念,它们可视为信息度量的其他形式。值得注意的是:虽然香农熵以概率分布构成的不确定性为度量基础,但是随着信息科学的不断发展,香农熵的理解也被日益加深和扩大,新的信息度量与新的学科分支不断出现,形成了诸如量子信息论中的冯·诺依曼熵等概念的延伸。

信息论的基础内容理论性很强。在多年教学过程中,作者观察到学生的学习难点,以及对所学知识实用性的疑惑。本书力求理论和实际相结合,确保读者在理解基本概念的基础上,了解信息论在实际通信中的应用。通过相关应用的 MATLAB 程序实例,让读者体会信息论对实际通信的理论指导。

本书共7章,第1章是绪论,阐述了什么是信息、什么是信息论,信息论的应用及成果,以及信息论的研究范畴。在整体上给出信息论的概念及其应用价值。

第2章介绍信源与信息熵,包括信息论中信源的数学描述,信息熵的定义及概念推广,涵盖联合熵、相对熵及互信息,获得离散单符号信源的熵、离散序列信源的熵及连续信源熵的计算及表示方法,并给出信息熵的 MATLAB 程序实现以及信息熵在图像分割中的应用。这一章是后续章节的基础。

第3章介绍信道与信道容量,在信道数学描述的基础上,给出信道容量的定义。在此基础上,给出了离散单符号信道、离散序列信道,以及限时限频连续信道的容量计算及表示方法,推演了香农容量计算表达式。此外,该章给出了信道容量的 MATLAB 计算实例,以及多输入多输出(MIMO)系统的容量计算实例。

第4章介绍无噪信道编码理论,包括无失真信源编码理论和限失真信源编码理论,其中无失真信源编码理论包括定长编码定理和变长编码定理,并在理论上,介绍了具体的无失真信源编码方法,包括香农码、费诺码、赫夫曼码和算术编码。本章进一步给出了限失真

和信息率失真函数的定义以及具体的限失真编码方法；同样，也给出了无失真和限失真编码方法的 MATLAB 实现实例。

第 5 章介绍含噪信道编码理论，在最佳译码准则的基础上，给出了信道编码的码空间表示，并阐述了信道编码定理，引出常见的信道编码方法，包括线性分组码、循环码和卷积码。该章也给出具体信道编码方法的 MATLAB 程序实例。

第 6 章介绍网络信息理论，针对相关信源、多址信道、多址高斯信道和广播信道，给出它们可达速率区域的定义和计算方法，包括相关信源可达速率区域、多址接入信道容量区域和广播信道的容量区域。

第 7 章介绍量子信息理论，论述香农信息理论在量子力学框架下的延伸，介绍量子信息的基本概念，包括量子比特和量子信息熵的定义。在此基础上，进一步阐述量子信源编码理论和量子信道编码理论。

本书由赵生妹编著。在编写过程中得到了南京邮电大学在校研究生施鹏、王乐、毛钱萍和张文浩等同学的大力帮助，在此对他们表示衷心的感谢。

限于编者水平有限，书中难免存在不妥或谬误之处，殷切希望读者指正。

编 者

2017 年 1 月

目录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 什么是信息	1
1.2 什么是信息论	3
1.2.1 信息论的早期酝酿	4
1.2.2 信息论的建立与发展	5
1.2.3 信息论的近期发展	6
1.3 通信系统的基本模型	7
1.4 信息论的应用及成果	8
1.5 信息论研究范畴	10
习题 1	11
第 2 章 信源与信息熵	12
2.1 预备知识	12
2.1.1 概率	12
2.1.2 古典概型	14
2.1.3 概率性质	16
2.2 信源的描述和分类	16
2.2.1 离散单符号信源	17
2.2.2 离散无记忆序列信源	18
2.2.3 离散有记忆序列信源	20
2.2.4 连续信源	20
2.3 离散单符号信源的熵与互信息	23
2.3.1 自信息量	23
2.3.2 离散单符号信源熵	25
2.3.3 信息熵的基本性质	28
2.3.4 互信息量	31
2.3.5 平均互信息量	36
2.3.6 平均互信息量的性质	39
2.4 离散序列信源的熵与互信息	46
2.4.1 离散平稳信源的序列熵和熵率	46
2.4.2 马尔可夫信源及其极限熵	50
2.5 信源的相关性和冗余度	58

2.6	连续信源的熵与互信息	61
2.6.1	连续信源的相对熵	61
2.6.2	连续信源最大熵定理	63
2.6.3	连续信源的互信息	66
2.7	熵计算及熵应用	67
2.7.1	熵计算	67
2.7.2	熵信息应用	71
	习题 2	74
第 3 章	信道与信道容量	78
3.1	信道分类和参数表示	78
3.2	离散单符号信道及其容量	83
3.2.1	信道容量定义	83
3.2.2	离散单符号无噪信道及其容量	85
3.2.3	离散单符号有噪信道及其容量	87
3.3	离散序列信道及其容量	97
3.3.1	并联信道	97
3.3.2	和信道	98
3.3.3	扩展信道	99
3.4	连续信道及其容量	100
3.4.1	时间离散信道及其容量	100
3.4.2	时间连续信道及其容量	103
3.5	信道容量计算及 MATLAB 程序实现	107
3.5.1	信道容量的 MATLAB 计算	107
3.5.2	MIMO 信道容量	110
	习题 3	117
第 4 章	无噪信道编码理论	121
4.1	信源编码的基本概念	121
4.1.1	编码的定义	121
4.1.2	码的分类	123
4.1.3	码树	124
4.2	无失真信源编码定理	126
4.2.1	典型序列和 ϵ 典型序列	126
4.2.2	无失真定长编码定理	127
4.2.3	无失真变长编码定理	130
4.3	限失真信源编码定理	133
4.3.1	失真测度	133
4.3.2	信息率失真函数 $R(D)$	135
4.3.3	离散信源和连续信源的 $R(D)$ 计算	139
4.3.4	限失真信源编码定理	142
4.4	信源编码方法	143
4.4.1	无失真信源编码方法	143

4.4.2	限失真信源编码方法	152
4.5	无噪信道编码 MATLAB 计算实现	155
4.5.1	率失真函数的 MATLAB 计算实现	155
4.5.2	编码方法的 MATLAB 实现	159
习题 4		162
第 5 章	含噪信道编码理论	166
5.1	最佳译码准则	166
5.2	信道编码基本概念	171
5.2.1	错误图样	172
5.2.2	矢量空间和码矢量	172
5.2.3	码距与纠检错能力	174
5.3	含噪离散信道编码定理	175
5.3.1	有噪信道编码定理	175
5.3.2	有噪信道编码逆定理	177
5.4	信道编码方法	178
5.4.1	线性分组码	179
5.4.2	循环码	185
5.4.3	卷积码	188
5.5	信道编码 MATLAB 计算实现	191
5.5.1	RS 码	191
5.5.2	Turbo 码	193
5.5.3	LDPC 码	196
习题 5		200
第 6 章	网络信息理论	202
6.1	相关信源及可达速率区	202
6.2	多址接入信道及其容量	207
6.2.1	离散二址接入信道及其容量	207
6.2.2	高斯加性二址接入信道及其容量区域	215
6.2.3	离散多址接入信道及其容量区域	219
6.3	广播信道及其容量	220
6.3.1	退化离散广播信道的容量界限	222
6.3.2	退化连续高斯广播信道的容量界限	225
习题 6		228
第 7 章	量子信息理论	230
7.1	量子信息基本概念	230
7.1.1	量子比特	230
7.1.2	量子信息熵	231
7.2	量子信源编码理论	235
7.3	量子信道编码理论	239
7.3.1	量子信道	239
7.3.2	量子信道容量	240

7.3.3 Holevo 信息	242
7.3.4 量子信道编码理论	244
习题 7	247
附录 习题参考答案	249
参考文献	258

随着科学技术特别是信息技术的迅猛发展,“信息”这个词逐渐被人们所熟知,并得到越来越多的应用。信息论是人们在长期通信实践活动中,将通信技术与概率论、随机过程和数理统计等学科相结合而逐步发展起来的一门新兴交叉学科,它描述信息处理、存储和传输所依赖的基本规律,以及这些规律在通信中的应用。美国科学家香农(C. E. Shannon)于1948年发表的著名论文《通信的数学理论》,奠定了信息论的理论基础。本章是绪论,阐述了信息和信息论的含义,介绍了信息论的形成与发展以及信息论的研究范畴。最后结合通信系统模型说明信息在度量基础上是如何被有效且可靠地从信源传输到信宿的。

1.1 什么是信息

当今的时代是信息时代,人们的日常生活已离不开信息,人们对信息的依赖性也越来越强。另外,有关信息的新名词和新术语层出不穷,作为一种产业,“信息”在社会、经济中所占的份额越来越大,快速的信息基础设施建设也成为这个时代的重要特征。物质、能源和信息构成了现代社会生存发展的三大基本支柱,其中信息是最基本和最重要的概念,那么什么是信息(information)呢?

当人们收到一封电报,接到一个电话,早晨从收音机里听到气象预报或看到电视里的新闻之后,人们都感到自己得到了“信息”。那么,“信息”是否就是这些电报、电话、预报或新闻呢?再如,甲乙两人同时去听某一学者的课程,由于是同一时间同一学者的课程,是否意味着甲乙两人获得了相同的“信息”?直观上,这两个问题会存在一些模糊的、不确切的答案。因为当电报、电话、预报或新闻的内容是早知道的或已了解的,在获得这些“信息”时,就会觉得没有什么意义,或者说没有带来什么信息;相反,如果电报、电话、预报或新闻的内容,不但是原来不知道的,而且是完全出乎意料的,就觉得获得了很多信息。同样,对于第二个问题,当甲乙两人的基础不同时,尽管他们听到的是同一内容,但听后所获取的新知识并不相同,或者说所得到的有用信息不一样。“信息”正是从这些原始的、含糊不清的概念中概括、提炼、提高和开拓获取的内容,它具有严格的、确切的含义和一定的数学表达,并且信息能够定量地度量。

广义上,信息是对物质存在和运动形式的一般描述。1975年,朗格提出“一旦理解了是信息触发了行为和能力,信息包含于客体间的差别中,而不是客体本身中,人们就意识到在通信中所被利用的(亦即携带信息的)实际客体物质信息是物质的普遍属性。所谓物质系统

的信息是指它所属的物理系统在同一切其他物质系统全面相互作用(或联系)的过程中,以质能和波动的形式所呈现的结构、状态和历史是不重要的,仅仅差别关系是重要的。”

物质、能量和信息是构成客观世界的三大要素。信息是物质和能量在空间和时间中分布的不均匀程度。信息是事物的表征,表征事物的状态和运动形式。在日常生活中,我们收到一封电报、接到一个电话或听到气象预报后,所得到的具体内容是对某一事务状态的描述。例如,气象预报说“晴转多云”,这是对气象状态这一事物的具体描述。电报上的报文,如“母病愈”,是对母亲身体健康情况的描述。这些都是人脑以外的客观物质世界表现出来的各种不同的运动状态。电话中说“他想去北京”,则是存在于人头脑里的思维活动,反映了人的主观世界——大脑物质的思维活动所表现出来的思维状态。

在信息社会中,“信息”这个词应用十分广泛(如报纸上和电视节目中的经济信息、商品信息和人才交流信息,等等)。迄今为止,信息还没有形成一个完整的、确切的定义。不同的研究学派对信息的本质及其定义还没有形成统一的意见和认识。综合信息的各种定义,较为一致的定义是:信息是认识主体(人、生物和机器)所感受的或所表达的事物运动的状态和运动状态变化的方式。信息具有以下特点:

① 普遍存在性,它存在于自然界,存在于人类社会,也存在于思维领域,哪里有事物,哪里就有事物的运动状态和方式;

② 信息与物质既有区别又有联系,物质是信息的载体,物质的运动是信息的源泉,但信息只是事物运动的状态和方式,信息不是物质;

③ 信息与能量既有联系又有区别,传递信息需要能量,同样如何传递能量需要信息;信息是事物运动的状态和方式,能量则是物体做功的本领,两者之间有着本质的区别;

④ 信息是事物运动的状态和方式,是认识主体感知活动所表述的事物运动和方式,人类要认识事物就必须取得信息,同样,要变革事物也必须要信息。

为了度量信息,香农给出了概率信息概念,又称香农信息或狭义信息。香农从信息源具有随机不确定性出发,为信源推出一个与统计力学熵相似的函数,称为信息熵(entropy)。其实,信息熵是表征信源平均不确定度的量,信息不等同于不确定度,而是为了消除不确定度必须获得与此不确定度相等的信息量。例如,甲袋中有100个球,其中红白球各50个。而乙袋中也有100个球,红球25个,白球25个,蓝球25个,黑球25个。从两个袋子中各取一球,若是红球,则红球所包含的信息量并不相同。对于甲袋来说,获得红球的概率为 $1/2$,因此为了准确获得是否是红球,需要获取1bit的信息;而对于乙袋来说,获得红球的概率为 $1/4$,因此为了准确获得是否是红球需要2bit的信息。由此,香农基于信息熵给出了信息的度量。香农信息就是消除不确定时所获得的信息量。

综上,信息具有以下性质:

(1) 信息是无形的。信息不同于物质和能量,它是看不见摸不着的,信息不具有实体性。

(2) 信息是可共享的。信息的交流,不会使交流者失去原有的信息,而且还可以获得新的信息。

(3) 信息是无所不在的。上至宇宙天体,下至地面矿藏,无不含有客观特征的信息;人类生存离不开信息,人的五官不停地接收信息,人的神经系统不断地传递信息,人的大脑则不停地处理、存储和利用信息。信息具有传递性。

(4) 信息是无限的。信息作为事物运动状态和存在状态的一般描述和事物及它们的运

动一样是永恒的、无限的。信息的无限性还表现在时空上的可拓展性。例如,今天气象台报告的气象数据所含有的信息,明天就失去价值,明天又会产生新的信息。如果将所有这些信息积累起来作为历史资料,又可以成为关于气候演变的重要信息依据,给人类创造幸福。

(5) 信息是可度量的。信息论中最重要的问题就是要解决信息数量与质量的度量。信息度量应满足信息的三个基本方向:结构的、统计的和语义的。信息的度量与事件发生的概率有关。概率性事件的示性函数取值为 $[0, 1]$,模糊性事件的示性函数取值为 $0 \sim 1$ 。信息也是一个物理量, $1\text{bit} = 10^{-16}\text{erg/K}$ 。

另外,信息还必须具有以下特征:

- ① 对于接收者来说,信息必须是新的知识,有别于已知的内容;
- ② 信息是一个抽象的概念,本身看不见、摸不着,它必须依附于一定的物质形式,如文字、声波和电磁波等,这种运载信息的物质称为信息载体;
- ③ 若接收者不能解释所接收的信息载体,则不存在信息;
- ④ 信息可以产生,也可以消失,同时信息可以被携带、存储及处理;
- ⑤ 信息是可以度量的。

通常,人们用文字、语音和图像等能够被感觉器官所感知的物理现象,来表述客观的物质运动和主观的思维活动状态,称此为消息(message)。消息是具体的、非物理的,可描述为语言文字、符号、数据或图片,能够被感觉到,它是信息的载体,是信息论中主要描述形式,是信息的数学层表达。因此,从电报、电话或电视获得的是消息,而电报、电话、电视等载荷的内容才是信息。在通信中,消息是指传送信息的单个符号或符号序列。这些符号包括字母、文字、数字和语言等。例如,可用符号 x_1 表示晴天, x_2 表示阴天, x_3 表示雨天。

另一个重要的概念是信号(signal)。信号是消息的物理体现,也是信息的载体。它可以是运载或携带消息的任何物理量,以达到迅速并有效地传送和交换信息的目的。目前信息传输主要使用的信号有电信号、光信号和无线电信号。信息包含在信号之中,是通信系统中传送的主要对象。

信息是信号、消息的内涵,是信号载荷的内容,是消息描述的对象。反过来,信号则是信息在物理表达上的外延,消息则是信息在数学表达上的外延。同一信息,可以采用不同形式的物理量来承载,也可以采用不同的数学描述方式。同样,同一类型的信号或消息也可以代表不同内容的信息。

例如,烽火台是古代的军事设置,从边境按一定距离一座一座直到京都,有军事情况的时候,白天举烽(狼烟),晚上举火,具有军事信息传递作用。其中,烽火台是否点燃烽(火)是信号,传送的敌情有无是信息;当然,在“烽火戏诸侯”的典故中,周幽王点燃的烽火台就不包含有无敌情的信息。当诸侯们多次被戏弄后,烽火台不再具有预报敌情的作用,导致镐京被攻破,周幽王被杀死。再如,我们可以通过手机进行信息交流,通过无线电电磁波为信号,传送的符号序列是消息,所表达的内容则是信息。

1.2 什么是信息论

在通信过程中,信息如何被度量,如何保证信息的有效传输,以及如何保证信息在有噪声的信道中可靠地传输,这些都是信息论所研究的问题。信息论研究了信息的度量问题,以

及信息是如何有效、可靠和安全地从信源传输到信宿的问题。其中信息的度量是最重要的问题, 香农首次将事物的不确定性作为信息的度量, 并在此基础上提出了信息熵的概念。

香农熵是香农信息论中信息度量的基础, 它与事件发生的概率相联系, 以“不确定性”作为度量的基础。进一步地, 可引入联合熵、条件熵、互信息、信道容量和率失真函数等概念, 它们可看作是信息度量的其他形式。值得注意的是: 香农熵虽然是以概率分布构成的不确定性为度量基础, 但是随着信息科学的不断发展, 香农熵的理解也被日益加深和扩大, 新的信息度量与新的学科分支不断出现, 出现了如量子信息论中的冯·诺依曼熵等新型熵概念的延伸。

信息论的产生和发展与通信、计算机技术的产生、发展密切相关, 信息论的历史大体可以分为早期酝酿、理论建立与发展以及理论应用与近代发展三个阶段, 下面将逐一进行介绍。

1.2.1 信息论的早期酝酿

在人类文明的早期, 就已经知道可利用信息或信息传递等手段来达到某种目的。例如, 古代的烽火台就是用烽火来传递外敌入侵的信息。但是, 大量信息的运用还是在有线、无线电通信产生以后。20 世纪初, 信息论进入了早期酝酿阶段。为了提高通信的质量与效率, 人们开始从物理和数学两个方面考虑问题。在物理上, 主要研究和改进了通信的物理手段和条件, 如不同通信方式(如有线、无线)的采用、发射与接收设备的改进、波段的选择与信噪比的提高等。在物理技术改进的同时, 人们也发现数学理论和工具的使用变得十分重要, 通信中的许多问题如果没有数学的描述就无法说明。到 20 世纪 40 年代, 信息论的一些基本问题开始形成。

1. 早期编码问题

在有线、无线电通信产生的时候, 编码技术也随之产生。早期的编码有莫尔斯(Morse)码和波多(Bodo)码等, 它们通过“点”、“划”和“空”等信号表示文字。这些码虽然原始, 但实现了从文字到通信信号的重大转变。莫尔斯码和波多码中文通信一直采用电报码方式, 先将汉字变成数字, 再用电码发送。

2. 通信的有效性和可靠性

随着通信距离的加大, 出现了信号强度的衰减与噪声干扰等问题。因此, 如何克服噪声干扰就成为通信技术中迫切需要解决的问题。为了解决该问题, 人们开始对通信中的各种因素加以分析, 结果发现频带的加宽可以提高通信效率, 而且它的作用比信号强度更为重要。同时又发现在通信技术中, 通信的数量与质量存在相互制约关系, 例如, 牺牲通信的数量可以达到提高通信质量的目的。这种概念虽然符合人们日常生活的经验(如重复多次说话的内容可让对方听得更清楚), 但是无法给出理论上的解释。直到 20 世纪 20 年代, 奈奎斯特(H. Nyquist)与哈特莱(L. Hartley)提出了解决以上问题的一系列方法, 证明了信息传递的速率与带宽成正比, 信息的度量与信号的概率分布有关以及可采用对数函数形式对信息大小进行衡量等结果, 这些研究成果的出现为香农信息论的建立奠定了基础。

3. 香农熵的其他产生途径

20 世纪 40 年代, 控制论的奠基人维纳(N. Wiener)和美国统计学家费希尔(E. Fisher)与香农同时提出信息的一种度量方式, 即信息熵的定义。由此说明, 信息论的前期酝酿已经

成熟。

4. 纠错与检错码的产生

在信息论发展的同时,纠错、检错码的概念也在逐步形成。人们发现由“点”、“划”和“空”等信号所构成的码可形成一定的结构,由这些结构可增加抗干扰能力。实际上,抗干扰就是一种有纠错能力的码。

1.2.2 信息论的建立与发展

信息论的产生以1948年香农的奠基性论文《通信的数学理论》为起点,迄今已有近70年的历史。在这近70年中,电子、通信与计算机技术的产业与市场经历了空前的、大规模的发展,信息技术产品进入千家万户,成为人们工作、学习与生活中不可缺少的组成部分。可以毫不夸张地说,信息论在这场空前的技术革命中起到了理论基础、思想先导与技术关键性的作用。现代的快速通信、多媒体与网络技术、大数据处理无不受益于信息与编码理论及其相关学科(如信号处理等)的发展,这些发展推动了信息技术的革命,也丰富了信息论的内容。

自1948年香农理论产生以后,信息论大体经历了理论的确立与发展、理论的应用与近代发展两个阶段。下面就这些阶段的主要内容与特点逐一进行介绍。

1. 香农信息论的确立期

人们把1948年到20世纪60年代这一时期称为信息论的确立期,其主要特点是对香农理论的研究和说明,包括通信系统的数学模型与基本问题的说明以及对信息量、香农熵的来源、意义与作用的讨论;还包括对通信基本问题的讨论,对信源、信道编码问题的模型、本质问题与意义的讨论,信源、信道编码的编码定理及其证明,以及信源、信道编码的实现与应用问题等。

这一阶段的主要成果是对以上问题给出了严格的数学描述与论证。从信息的度量到通信模型、从编码问题的提出到主要编码定理的证明等,都是在严格的数学推导中完成的。同时,一系列专著的完成也标志着香农信息论的确立,如A. Feinstein(1954)、R. G. Gallager(1968)和J. Wolfowitz(1978)等的重要论著,这些著作基本上完成了对香农理论的阐述,在理论上解答了通信中所提出的问题。同期,国内学者也进行了大量的、重要的研究工作,为信息论的早期发展作出了重要贡献。

在香农信息论发展的同时,代数编码理论也得到迅速发展。利用群、环、域与线性子空间理论可将码赋予一定的代数结构,这种结构可使通信信号具有纠错与检错的能力。代数码方面出现了重要经典著作,包括W. W. Peterson(1961)、R. M. Fano(1961)和Wozencraft-Reiffen(1961)等的著作。

2. 香农信息论的发展期

20世纪70年代到80年代,信息论处于理论发展时期。由于香农理论的阐明与通信技术的发展,信息论的研究范围日益扩大,这一时期发展的主要内容在率失真理论与多用户信息论(或称网络信息论)方面。1959年,香农发表“保真度准则下的离散信源编码定理”,首次提出了率失真函数及率失真信源编码定理。率失真编码理论实际上是一种在允许失真条件下的信源编码理论,该理论在20世纪80年代和90年代成为有损数据压缩技术的理论基础。另外,多用户信息论的最早思路由香农提出,在1961年,香农发表了一篇学术论文“双