



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校信息科学系列教材

信息工程概论

徐宗本 张茁生 主编



科学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
高等院校信息科学系列教材

信息工程概论

(第二版)

徐宗本 张茁生 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为全国高等院校“信息与计算科学”专业本科生编写的教材,主要从“大科学”角度阐述了当代信息工程的若干代表性领域、相关基本问题、基本理论、基本模型与基本方法. 主要内容包括:绪论、通信系统原理、时频分析、数字图像处理概述、模式识别、自动控制与系统辨识、信息加密与信息安全、数据挖掘与数据库中的知识发现等. 全书各章内容独立,可由教师在讲授中灵活取舍. 第2章后各章末均配有习题,可供学生选做.

本书除可作为高等院校“信息与计算科学”专业本科生教材使用外,也可供应用数学、计算机科学、物理、信息工程、管理工程类各专业的教师、研究生与高年级本科生参考.

图书在版编目(CIP)数据

信息工程概论/徐宗本,张茁生主编. —2版. —北京:科学出版社,2011
普通高等教育“十一五”国家级规划教材·高等院校信息科学系列教材
ISBN 978-7-03-030515-2

I. ①信… II. ①徐…②张… III. 信息工程-高等学校-教材
IV. ①G202

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 039228 号

责任编辑:鞠丽娜 / 责任校对:马英菊
责任印制:吕春珉 / 封面设计:三函设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

随主印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002年8月第 一 版 开本: B5 (720×1000)

2011年4月第 二 版 印张: 20 1/2

2011年4月第六次印刷 字数: 410 000

印数: 12 501—15 500

定价: 35.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62138978-8002

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

序 言

1998 年教育部进行高校专业调整时设立了“信息与计算科学”专业. 该专业的设立, 受到很多高等院校的热烈响应, 据不完全统计, 几年来已有约 280 所院校招收了该专业的本科生, 其中大部分院校计划开设信息科学方面的系列课程.

为了配合高等院校在学科专业设置上的改革与深化, 来自几十所高等院校的有关专业的部分领导和教师, 于 1999 年、2000 年召开了第一、二届“信息科学专业发展与学术研讨会”, 与会者热烈讨论并探讨了许多与信息学科的学科发展和建设的基本问题. 会议一致认为教材建设是目前最为紧迫的任务, 因此成立了教材编审协调组来组织该系列教材的编写.

2001 年教材编审协调组召集了有多位经验丰富的教师和出版社参加的教材建设会议. 会议明确了教材建设是一项长期的工作, 并决定首先编写和出版这套教材来满足近期急需. 为了保证教材的质量, 会议对每本教材的要求、内容和大纲进行了具体研讨, 并请具有多年教学经验的重点院校教授担任各教材的负责人.

为了贴近教学的实际, 每部教材都配有习题或思考题, 同时对内容也做了结构化安排, 以便教师能根据实际情况部分选讲. 本套教学用书不仅适用于教学, 也可供相关读者参考.

在教材编写和出版过程中, 作者对内容的取舍、章节的安排、结构的设计以及表达方式等方面多方听取意见, 并进行了反复修改. 在感谢作者们辛勤劳作的同时, 编委会还特别感谢科学出版社的鞠丽娜编辑, 她不辞辛劳, 在统筹印刷出版、督促进度、征求意见、组织审校等方面做了大量工作. 这套教材能在保证质量的前提下, 及时与读者见面, 和她的努力是分不开的.

从长远的教学角度考虑, 为了适应不同类型院校、不同要求的课程需要, 教材编审协调组将不断组织教材的修订、编写(译), 从而使我国信息科学教学用书做到逐步充实、完善、提高和多样化. 在此衷心希望采用本系列用书的教师、毕生和读者对书中存在的问题及时提出修改意见和建议.

高等院校信息科学系列教材编委会

第二版前言

本书自第一版出版以来,受到国内多所高校师生的欢迎,为满足读者需求,本书多次重印,并于2006年被列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书立足于从“大学科”的角度介绍当代信息工程的若干代表性领域(例如,通信技术、控制技术、时频分析与小波分析、图像处理、模式识别、人工智能等)的相关基础问题,以及它们的基本原理、基本模型和基本方法。在内容的表述上,力求概论而不泛论和细论、突出基础理论和典型方法、符合工程上的习惯,同时保持数学上的严密性。通过本书的学习,使学生对信息工程所涉及的基本内容,以及数学在其中所扮演的重要角色等有一个简明而深入的了解,从而增强学生应用数学理论解决信息工程问题的能力,为今后在相关交叉学科领域进一步地学习和研究打下了基础。

基于以上认识,以及广泛听取了相关专家和使用过本书的教师与学生的意见,我们对第一版进行了修订。第二版保持了第一版的框架结构和主要特色,同时根据信息工程相关领域的最新发展状况与趋势,增加了一些新的内容。具体的变动和调整主要有

- (1) 对第一章的内容进行了重新编写。
- (2) 重写了第2~第6章的评述与展望。
- (3) 对部分内容进行了改写,使思路更加简明,概念更加精准,更具有可读性。
- (4) 删减了一些过深的和过分强调技巧的内容,力求更加突出基本理论与方法。例如,删除了小波变换图像编码、分形图像压缩编码、Gabor展开中连续与离散双正交条件的推导等。
- (5) 增加了图像增强、图像恢复、图像分割、现代通信技术概要等。
- (6) 基本保留了第一版的习题,补充了一些新的习题,使总的习题数量和类型有所增加。
- (7) 增加了反映相关领域一些最新发展状况的参考文献。

第二版的修订由徐宗本和张茁生主持,参加修订工作的有徐宗本、张茁生、刘峰、任品毅、阮小娥,全书经徐宗本和张茁生修改、补充和定稿。

本书可作为高等院校“信息与计算科学”专业本科生的教材,也可供应用数学、计算机科学、物理、信息工程、管理工程各专业的教师、研究生和高年级本科生参考。全书各章内容独立,各院校可根据具体情况灵活取舍。本书自第2章开始各章末均配有习题和参考文献,可供学生消化和理解本章内容。

最后,衷心地感谢科学出版社鞠丽娜同志为本书的出版和编辑质量的提高所付出的不懈努力.

由于编者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正.

西安交通大学 徐宗本 张茁生

2010年12月

第一版前言

本书是为全国普通高等院校数学系“信息与计算科学”专业本科生编写的一本专业教材,主要从“大科学”角度讲述当代信息工程(信息技术)的若干代表性领域的相关基础问题,以及它们的基本原理、基本模型与基本方法。

为什么要为数学系学生开设这样一门跨学科的工程概论课程呢?这主要是基于下述考虑:第一,信息技术是时代主题.当今时代是以知识和信息为基础的信息时代.在这样的时代里,信息技术不仅是社会进步和生产力发展的主要推动力,而且已成为主导全球经济发展格局、引导社会发展进程的核心要素.自然地,数学教育、数学研究与数学人才培养应该顺应这种社会与经济总发展的总格局.第二,当代科学技术的发展呼唤全面的“科学数学化”,而高新科技的出现又已经把社会推进到了“数学技术化”或“数学工程技术”的新时代.信息技术本质上是数学技术.数学不仅能提供信息技术中信息表示与度量的方法和语言,而且能提供信息获取、变换、传输、处理与控制等技术的理论基础与实现算法.我们应该向数学系的学生透彻地阐述这一点,从而使他们对数学的本质、数学的价值与数学的作用有更深切地理解与体会.第三,也是最为重要,我们希望通过信息技术这一“数学技术化”最为典型和成功的领域的介绍,引导学生更为关注数学与其他科学的交叉,关注现实世界,特别是当代高新科技对于数学研究和发展的推动作用(注意到,我们已经有了大量的课程展示和阐述数学发展是如何由数学内部的矛盾发展与逻辑推演而推动的),从而培养学生理论联系实际,从现实中抽象和发展数学理论、运用数学理论解决国民经济建设特别是高新科技核心基础问题的意识、自觉性与能力.基于此,本书通过综合介绍信息工程的典型领域和相关的基本问题、基本理论、基本原理与基本方法,使学生对信息工程所涉及的内容,对“信息技术本质上是数学技术”等有一个简明而深入的理解,从而增强应用数学理论解决信息工程问题的能力和培养从事相关交叉学科的创新研究能力.通过本书的讲授,我们期望达到向学生“展现一片天空、传达一个观念、引导一个方向,提供一个机会”的效果.更具体些说,力求向学生展现“在诸多高科技的研究与发展中,数学不仅大有用武之地,而且常常构成它们的核心与灵魂”这样一片天空;传达“科学应该全面数学化,数学可以技术化”这样一个观念;引导学生积极投身于信息科学研究,自学成为“科学数学化、数学技术化”的追求者与实践者;最后,在这样的追求与实践中选择自己的奋斗与择业目标.从这个意义上说,本书是一本改革教材.

本书也是一本探索教材.虽然已有大量的专门论述信息工程单一领域或分支

(例如,通信技术、控制技术、信号处理、模式识别、人工智能等)的著作及教材,但从“大学科”角度综合介绍信息工程各领域(即使是有选择的主要领域)的著作在国内外尚难以见到.之所以缺乏这种“大学科”式的著述其实是自然的:对于编者而言,很难既全面、综合又深入、细致地论述信息工程所应包含的方方面面而不受行内专家挑剔;而对于从事信息工程专门领域的读者而言,阅读如此宽泛的著述又未必有更直接的参考价值.因此,对于从事信息工程的专业人员来说,有无一本信息工程的“大学科”式著作并不显得重要.然而,对于非信息工程专业研究工作者和学生而言,有这样一本“大学科”著作却是非常重要,甚至是梦寐以求的.因为,他们需要从整体上了解信息工程(信息技术)的全貌,进而,希望根据自己的兴趣与特长选择信息工程研究的切入点以及与自己专业的结合点.这一渴望对于数学系“信息与计算科学”专业的师生来说就更显得强烈.正是这种渴望促使我们组织编写了这本《信息工程论》,它既可用作数学系“信息与计算科学”专业本科生教材,又可供广泛的非信息工程专业工作者从大学科的角度了解信息工程.

本书的编写原则是:①概论而不泛论和细论.概论主要体现在:第一,在取材上力求从大学科角度全面反映信息工程的主要环节(如信息获取、信息处理、信息传输、信息加工与信息应用等);第二,在每一典型领域中突出对基本问题、基本模式、基本原理与基本方法的讲述,不泛论;强调局部的完整性,但忽略过于技术或工程化的细节;为了节省篇幅,本书略去了某些重要但在本专业其他课程中已涉足的信息工程领域(如计算机技术).②突出典型、突出基础.除对信息工程的各主要环节选择一个或多个典型领域重点讲述外,对内容的表述,在基础性与技术性上突出基础性(特别是数学基础),在分析与实现上突出分析,在经典与现代上突出现代.每个专题(即每一章)均设“评述与展望”一节,以求对所述典型领域的当前发展给出一些尽可能恰当的评注.③力求“工程上无误,数学上严密”,展现技术性.作为数学系学生的教科书,数学上的严密性是必备的,在坚持这一原则的前提下,我们力求对概念、原理、方法、模型的阐述符合工程习惯,并保持工程意义上的准确性和应用性.以上诸条可认为是本教材所力求表现的风格与特点.

参加本书编写工作的有全国六所重点大学的十多位教授或博士,他们或者是数学系的教师并取得信息工程领域的博士学位,或者是长期从事信息科学研究的数学博士或教授,应该说,均具有数学与信息工程某些专门领域的“两栖”知识结构与研究经验.本书是他们精诚合作的结果.书中各章的编者如下:

第1章:焦李成

第2章:郭定辉 任品毅

第3章:张茁生

第4章:刘峰 徐宗本

第5章:梁吉业 徐宗本

第6章:阮小娥 徐宗本

第7章:白国强

第8章:马江洪 徐宗本

另外,徐宗本负责了整个书稿的策划、大纲的制定,并修定了第2、4、5、8各章;柳重堪负责审定了第2、3、4、5各章并修定了第3和第7章;张茁生对全书的符号、格式及参考文献等进行了统一。

本书可作为数学系“信息与计算科学”专业本科生教材使用,也可供数学系、计算机系、物理系、信息工程类、管理工程类各专业的教师与研究生参考。全书各章内容独立,各院校可根据各自的教学目的灵活取舍。另外,各章末配有习题,可供学生消化和理解本章内容选做。根据我们的实践,教学中采取“精讲与泛讲结合(即根据需要有些章精讲,有些章泛讲)”、讲授与实验结合(特别可在每一章结束设置1~2个大的实验要求学生使用 Matlab 完成)、讲授与自学结合(有些章节可让学生自学,或代之以专家讲座),可取得令人满意的效果。

作为一本新的教材,本书存在的缺陷是显而易见的:无论整体选材(典型领域的选择)还是各章选材,都还需要进一步斟酌,各章内容的阐述与习题等也都还需要进一步润色与精心设计。所有这些期望能在本书的重版时予以弥补。

衷心感谢西安电子科技大学的焦李成教授在百忙中欣然为本书撰写了第1章;也非常感谢科学出版社的鞠丽娜同志为出版该书和提高本书编辑质量所付出的不懈努力。

欢迎阅读与使用本书的所有教师与同学提出宝贵意见。

西安交通大学 徐宗本

北京航空航天大学 柳重堪

2002年8月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 信息科学与信息工程	1
1.1.1 信息科学发展简史	1
1.1.2 信息科学的概念、特征与描述	7
1.1.3 信息科学方法论	10
1.2 信息技术	11
1.2.1 信息技术的定义和基本内容	11
1.2.2 信息技术体系的层次关系	12
1.2.3 信息技术与数学	13
参考文献	14
第 2 章 通信系统原理	16
2.1 引论	16
2.1.1 通信系统的一般概念	16
2.1.2 通信系统的质量指标	17
2.2 模拟信号的调制和数字化	18
2.2.1 模拟信号的幅度调制与解调	18
2.2.2 非线性调制与解调	25
2.2.3 模拟信号的数字化	27
2.2.4 复用技术及其应用	38
2.3 数字信号的基带传输	39
2.3.1 数字基带信号的时域波形	39
2.3.2 数字基带信号的频谱特性	44
2.3.3 无码间串扰的基带传输	46
2.3.4 无码间串扰基带传输系统的抗噪声性能	49
2.4 数字信号的频带传输	50
2.4.1 二进制数字调制	51
2.4.2 二进制数字调制的抗噪性能	54
2.5 评述与展望	59
2.5.1 现代通信技术概要	60
2.5.2 现代通信理论的未来	62

习题	63
参考文献	66
第3章 时频分析	67
3.1 引论	67
3.1.1 时频分析的意义	67
3.1.2 信号的时频表示	69
3.1.3 时频基函数	71
3.2 短时傅里叶变换	73
3.2.1 短时傅里叶变换的定义与性质	73
3.2.2 短时傅里叶变换的时间分辨率与频率分辨率	74
3.2.3 离散短时傅里叶变换	75
3.3 Gabor 展开	77
3.3.1 连续 Gabor 展开	77
3.3.2 离散 Gabor 展开	79
3.4 Wigner-Ville 分布	80
3.4.1 连续时间信号的 Wigner-Ville 分布	81
3.4.2 Wigner-Ville 分布的变型	85
3.4.3 离散 Wigner-Ville 分布	88
3.5 小波分析	89
3.5.1 连续小波变换	89
3.5.2 小波框架	93
3.5.3 多分辨分析	97
3.6 评述与展望	107
习题	109
参考文献	110
第4章 数字图像处理概述	111
4.1 数字图像的基本概念	111
4.1.1 模拟图像的数字化	112
4.1.2 邻域、距离	113
4.1.3 连通性	113
4.2 图像增强	114
4.2.1 直方图	115
4.2.2 基本强度变换	116
4.2.3 直方图处理技术	117
4.3 图像恢复	119

4.3.1 图像退化与恢复模型	120
4.3.2 算术均值滤波器	121
4.3.3 中值滤波器	122
4.3.4 维纳滤波	123
4.4 图像分割	126
4.4.1 边缘检测	127
4.4.2 边缘连接	132
4.4.3 阈值分割方法	132
4.5 数字图像压缩编码基础	135
4.5.1 图像压缩的必要性	135
4.5.2 图像压缩编码方法的分类	136
4.5.3 图像质量评价	137
4.6 图像变换编码	139
4.6.1 K-L 变换	139
4.6.2 离散余弦变换(DCT)	141
4.7 基本 JPEG 编解码方法	143
4.8 评述与展望	149
习题	151
参考文献	153
第 5 章 模式识别	155
5.1 模式识别概论	155
5.1.1 模式识别问题	155
5.1.2 模式识别系统	156
5.1.3 模式识别方法	157
5.2 统计模式识别方法	157
5.2.1 判别函数分类方法	158
5.2.2 Bayes 决策	165
5.2.3 密度函数的估计及其判别函数	168
5.2.4 非参数方法与近邻估计	179
5.3 模糊模式识别方法	184
5.3.1 模糊集与模糊关系	184
5.3.2 基于模糊等价关系的分类	187
5.3.3 基于模糊相似关系的分类	189
5.4 评述与展望	190
习题	191

参考文献	193
第 6 章 自动控制与系统辨识	194
6.1 引论	194
6.1.1 自动控制问题	194
6.1.2 自动控制系统的构成	195
6.2 自动控制系统的的基本模型与基本问题	198
6.2.1 自动控制系统的数学模型	198
6.2.2 自动控制系统的的基本问题	201
6.2.3 自动控制系统的分析与综合	204
6.3 控制系统稳定性、能控性与能观性的判定	207
6.3.1 稳定性判据	207
6.3.2 能控性判据	215
6.3.3 能观性判据	218
6.4 最优控制	219
6.5 系统辨识	223
6.5.1 基本问题	223
6.5.2 线性离散定常系统的参数估计	224
6.5.3 线性离散定常系统的结构辨识	227
6.6 评述与展望	230
习题	232
参考文献	235
第 7 章 信息加密与信息安全	236
7.1 信息加密/解密的基本原理	236
7.1.1 信息安全的基本问题	236
7.1.2 密码体制	237
7.1.3 完善保密性	240
7.1.4 密码体制的安全性	241
7.2 信息加密的数学基础	242
7.2.1 群、环和域	242
7.2.2 模 n 的剩余类环 Z_n	244
7.2.3 有限域 $GF(p^n)$	246
7.3 序列密码	250
7.3.1 序列密码的工作方式	251
7.3.2 伪随机序列	253
7.3.3 线性反馈移位寄存器序列	254

7.3.4 B-M算法、线性复杂度与密钥流发生器	257
7.4 分组密码	259
7.4.1 分组密码的工作原理	259
7.4.2 DES算法	261
7.4.3 AES算法	264
7.4.4 分组密码的安全性	269
7.5 公钥密码	270
7.5.1 公钥密码的主要思想	270
7.5.2 RSA算法	272
7.5.3 椭圆曲线密码	274
7.6 评述与展望	277
习题	279
参考文献	280
第8章 数据挖掘与数据库中的知识发现	281
8.1 数据挖掘问题	281
8.1.1 知识发现与知识工程	282
8.1.2 数据挖掘的核心问题	285
8.1.3 意义与困难	287
8.2 数据挖掘的统计学方法	288
8.2.1 聚类分析	289
8.2.2 分类与回归分析	292
8.2.3 探索性数据分析	297
8.3 数据挖掘的机器学习方法	299
8.3.1 神经网络方法	300
8.3.2 决策树方法	303
8.3.3 模糊系统方法	307
8.4 评述与展望	309
习题	311
参考文献	312

第 1 章 绪 论

1.1 信息科学与信息工程

1.1.1 信息科学发展简史

信息科学的历史,是人类认识和利用信息的历史.从人类诞生那天起,就没有停止过同信息打交道,自觉或不自觉地利用信息为自己的生存和发展服务.例如,为了更好地表达信息,人类创造了语言;为了记录信息,人类创造了文字;为了储存信息,发明了纸张和印刷术;为了传递信息,创造了烽火通信;为了处理信息,发明了算盘;为了获得方向信息,发明了指南针;为了隐蔽和识别信息,古代的军事将领使用了“虎符”;为了检测时间信息,发明了浑天仪等.特别是语言、文字和印刷术的创造,可以认为是人类古代历史上的几次信息革命.

近代的工业革命,特别是电的发明与应用,为信息技术的发展创造了良好的条件.近代和现代社会大规模生产的需求以及不断爆发的战争更是加快了现代信息科学技术的产生和发展.通信技术、火炮自动控制技术以及计算机等信息技术正是在第二次世界大战期间得到了飞速的发展.第二次世界大战期间,现代信息技术和信息科学的主要奠基人数学家香农(C. E. Shannon)、维纳(N. Wiener)以及约翰·冯·诺依曼(John Von Neumann)等当时就分别在通信、控制和计算机领域活跃地工作着.正是由于他们在战时的开创性工作,第一台现代电子计算机、信息论和控制论分别于战后的 1946 年和 1948 年公诸于世,从而奠定了现代信息科学技术发展的基石.

相对于漫长的古代历史,人类在近、现代时期对于信息的认识取得了重大的进展.电报、电话的发明,使人们认识到信息的载体可以进行转换.比如电话话筒就可以把携带信息的空气振动转换成电参量的变化——电信号.后来的研究表明,电信号具有频率、时间和幅度等基本的参数,电信号正是通过这些参数的变化来反映所携带的信息.此后,人们开始注意如何在数值上对信息进行度量的问题.1928 年,哈特莱(Hartley)首先指出了信息数量的大小仅与发信者在字母表中对字母的选择方式有关而与信息的语义无关.在此基础上,他导出了第一个信息度量的公式:

$$I = \log S^n = n \log S, \quad (1.1)$$

式中, S 是字母表的字母数目, n 是每个消息所含的字母数目.

从 20 世纪 40 年代后期,人类开始真正自觉地认识信息问题并开始探索信息

的本质. 最主要的理论标志是香农的论文《通信的数学理论》中指出和维纳的专著《控制论——动物和机器中的通信与控制问题》^[2]. 正因为如此, 人类认识和利用信息的历史可以粗略地以 1948 年为界来划分: 在此之前, 人类不自觉地认识和低水平地利用信息; 在此之后, 人类开始走向自觉认识和高水平地利用信息的阶段.

香农接受了哈特莱关于信息的形式化的思想, 并把他的信息度量公式进行了更有意义的推广. 香农在论文《通信的数学理论》中指出: “通信的基本问题是在消息的接收端精确地或近似地复现发送端所挑选的消息. 通常, 消息是有意义的, 也就是说, 它按某种关系与某些物质或概念的实体联系着. 通信的语义方面的问题与工程问题是没有关系的. 重要的是, 一个实际的消息总是从可能消息的集合中选择出来的. 因此, 系统必须设计成对每一种选择都能工作, 而不是只适合工作于某一种选择, 因为各种消息的选择是随机的, 设计者事先无法知道什么时候会选择什么消息来传送.” 在这里, 香农完成信息认识方面的两点重要突破: 第一, 他认识到通信工程与信息的语义无关; 第二, 通信系统所处理的信息本质上是随机的, 因此必须采用非决定论的统计方法来处理问题. 这样, 他就找到了“形式化”和“概率论”这样的工具, 并按照“信息是用来消除不定性的东西”这样一个基本观念证明了如下结论: 对于具有 N 种可能结果 $X = \{x_i, i = 1, \dots, N\}$ 的独立随机试验, 它在试验前所包含的平均不定性数量可以表示为

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \text{ (单位)}, \quad (1.2)$$

式中, p_i 是 x_i 出现的概率, 它们满足

$$\sum_{i=1}^N p_i = 1; \quad (1.3)$$

假定试验后, 结果是 X_{i_0} 出现, 即后验概率分布为

$$p_i = \begin{cases} 1, & i = i_0 \\ 0, & i \neq i_0 \end{cases} \quad i = 1, \dots, N, \quad (1.4)$$

在此情况下, 不存在后验不定性. 于是, 这个试验所提供的信息量为

$$I = H - 0 = - \sum_{i=1}^N p_i \log p_i \text{ (单位)}. \quad (1.5)$$

在这种条件下, I 与 H 在数值上相等, 但两者在概念上不同: H 是不定性, I 则是为完全消除这个不定性所需要的信息量.

在上述信息量定义的基础上, 香农还进一步导出了信息传输率的表达式、信道容量公式以及在允许一定失真条件下信源的信息率公式. 特别重要的是, 他还利用这些结果, 得到了关于信息传输的一系列重要的编码定理, 揭示了信息传输过程中数量和质量的辩证关系, 建立起了一些重要的性能上限, 从而明确了在一定条件下什么是可以做到的, 什么是不可能做到的, 指明了人们在通信工程中努力的方向.

通过香农的这些工作,人类在历史上第一次如此清晰地认识和把握了通信技术的本质,初步认识和掌握了信息及其传递的规律。

由于信息问题本身具有普遍意义,而香农解决问题的方法如此新颖、精巧,所得到的结果又极具启发性,因此,他的工作一发表,就“如一枚重磅炸弹的爆炸,震撼了科学界”[皮尔斯(J. R. Pierce),1973]^[3],信息论的冲击波迅速地扩展到各个学科领域。从信息论产生至20世纪50年代中期这段时间内,在伦敦和美国连续举行了关于信息论的一系列重要的国际讨论会,探讨和涉及的内容极为广泛,议题包括通信、控制论、计算机、数学、统计学、电子学、物理学、解剖学、动物保健学、人类学、经济学、语言学、神经精神学、神经生理学、哲学、语音学、政治理论和心理学等。这种出奇的繁荣曾经引起一些人的担心,香农自己就是其中的一个。

事实上,香农非常清楚,他所发展的信息论还只是一种狭义的理论,它排除了语义和语用的因素。因此,他告诫人们^[4]:“信息论(狭义的)的基本结果,都是针对某些非常特殊的问题的。它们未必适合像心理学、经济学以及其他一些社会科学领域。实际上,信息论的核心本质是一个数学分支,是一个严密的演绎系统。因此,透彻地理解它的数学基础及其在通信方面的应用,是在其他领域应用信息论的先决条件。我个人相信,对于上述那些领域,信息论的许多概念是有用的(实际上,有些已经显示出非常光明的前景)。但这些应用的成功,绝对不是简单地生搬硬套所能奏效的。它应当是一个不断研究不断实验的过程。”

香农的这些忠告,在20世纪50年代后半期受到了人们的重视。事实上,在那段时间,许多盲目生搬硬套的工作都先后遭受了挫折和失败。从20世纪50年代中期以后,这类活动就逐渐冷落下来。正如斯莱皮恩(D. Slepian)所说^[5],20世纪60年代不是信息论的重大创新时期,而是一个消化、理解的时期,是在已有的基础上进行重大建设的时期。在这期间,人们一方面对信息的实质进行了一些深入的研究,例如,阿什比(W. R. Ashby)曾在组合型试验中引入了变异度(variety)的概念(1965),布里渊(L. Brillouin)论证了信息就是负熵,并由此成功地驱走了向热力学第二定律挑战的麦克斯韦(Maxwell)妖;另一方面,辛钦(A. Y. Khintchine,1957)、法捷耶夫(L. D. Faddeev,1957)以及费因斯坦(C. Feinstein,1958)等人在数学上对香农理论,特别是对概率熵公式的唯一性和公理化结构进行了更严格的论证。此后,又有许多人陆续提出了诸如不完备概率空间熵、 α -熵、 β -熵、 R -熵、 ϵ -熵、 ϵ - δ -熵等一些新的概念和公式去补充和完善香农的熵公式。在这期间,人们在编码译码、调制解调和检测理论等方面取得了许多重大的进展。所有这一切成就,使香农信息论在概率信息范畴内逐渐成熟起来。

然而,就在这个消化与理解的时期,人们开始地注意到信息并非必然具有概率的性质。在许多场合中,“试验”不能重复进行,也就不存在统计意义下的概率,因而无法用概率理论来描述这类试验。但是毫无疑问,人们仍然能够从这些试验中获得