

高等院校信息科学系列教材

信息工程概论

徐宗本 柳重堪 主编



科学出版社

高等院校信息科学系列教材

信息工程概论

徐宗本 柳重堪 主编

科学出版社

2002

ic, 196
'ysics

8

): 75-

'rocess

, Lon

. IEE

11 •

内 容 简 介

本书是为全国普通高等院校“信息与计算科学”专业本科生编写的专用教材,主要从“大学科”角度阐述当代信息工程的若干代表性领域、相关基本问题、基本模型与基本方法. 主要内容包括:绪论、通信系统原理、非平稳信号时频分析、图像压缩、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. 各章末均配有思考题与习题,可供学生选做.

本书除可作为“信息与计算科学”专业本科生教材使用外,也可供数学系、计算机科学系、物理系、信息工程类、管理工程类各专业教师与研究生参考.

图书在版编目(CIP)数据

信息工程概论/徐宗本,柳重堪主编. —北京:科学出版社,2002
(高等院校信息科学系列教材)
ISBN 7-03-008695-3

I. 信… II. ①徐… ②柳… III. 信息-工程-高等学校-教材 N.G2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 061547 号

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>

新 蕾 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)

2002年8月第一次印刷 印张:19 3/4

印数:1—5 000 字数:380 000

定价:27.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈路通〉)

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关于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年教材编写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本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,每本教材都配有习题或思考题,同时对内容也作了结构化安排,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,是和她的努力分不开的.

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.在此衷心希望采用该系列用书的教师、学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

2002年3月

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用教材,主要从“大学科”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。

为什么要给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明这一点,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的理解与体会。第三,也是最为重要的,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学科的交叉,关注现实世界,特别是当代高新科技对于数学研究与发展的推动作用(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,自觉成为“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。

本书也是一本探索性教材。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)的著述在国内外尚难以见到。之所以缺少这种“大学科”式的著述其实是自然的:对于编著者而言,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和使用价值。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”著作却是非常重要的,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《信息工程概论》,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、基本模型、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”,展现数学的技术性。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可应用性。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。书中各章的编著者如下:

第1章:焦李成

第2章:郭定辉 任品毅

第3章:张苗生

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、6、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、计算机科学系、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	9
1.1.3 信息科学方法论	17
1.2 信息技术与数学	19
1.2.1 信息技术的定义和范围	19
1.2.2 信息技术体系的层次关系	22
1.2.3 信息技术与数学	24
第2章 通信系统原理	26
2.1 引论	26
2.1.1 通信系统的一般概念	26
2.1.2 通信系统的质量指标	27
2.2 模拟信号的调制和数字通信	28
2.2.1 模拟信号的幅度调制与解调	28
2.2.2 非线性调制与解调	34
2.2.3 模拟信号的脉冲编码调制	36
2.2.4 复用技术及其应用	47
2.3 数字通信技术	48
2.3.1 数字信号的基带传输	48
2.3.2 数字基带信号的频谱特性	52
2.3.3 无码间串扰的基带传输波形	55
2.3.4 无码间串扰基带传输系统的抗噪声性能	57
2.4 数字信号的频带传输	59
2.4.1 二进制数字调制	59
2.4.2 二进制数字调制的抗噪性能	63
2.5 评述与展望	68
习题	69
第3章 非平稳信号分析:时频分析	72
3.1 引论	72

3.1.1	时频分析的意义	72
3.1.2	信号的时频表示	74
3.1.3	时频基函数与测不准原理	76
3.2	短时傅里叶变换	78
3.2.1	短时傅里叶变换的定义与性质	78
3.2.2	短时傅里叶变换的时间分辨率与频率分辨率	80
3.2.3	离散短时傅里叶变换	81
3.3	Gabor 展开	82
3.3.1	连续 Gabor 展开	83
3.3.2	离散 Gabor 展开	85
3.4	Wigner-Ville 分布	87
3.4.1	连续时间信号的 Wigner-Ville 分布	88
3.4.2	Wigner-Ville 分布的变型及解析信号的 Wigner-Ville 分布	92
3.4.3	离散 Wigner-Ville 分布	95
3.5	小波分析	96
3.5.1	连续小波变换	97
3.5.2	小波框架	100
3.5.3	多分辨分析	105
3.6	评述与展望	114
	习题	116
第 4 章	图像压缩	118
4.1	图像压缩编码概述	118
4.1.1	图像的数字表示与压缩编码	118
4.1.2	图像压缩编码的分类	120
4.1.3	图像质量评价	122
4.2	图像变换编码	124
4.2.1	K-L 变换	124
4.2.2	离散余弦变换(DCT)	126
4.2.3	JPEG 标准	128
4.3	小波变换图像编码	135
4.3.1	二维多分辨分析	135
4.3.2	基于小波变换的子带系数分类编码	140
4.4	分形图像压缩编码	142
4.4.1	分形	142
4.4.2	分形图像空间	143

4.4.3 迭代函数系统	144
4.4.4 灰度图像的分形编解码原理	148
4.4.5 分形图像压缩编码方法举例	150
4.5 评述与展望	153
习题	154
第5章 模式识别	156
5.1 模式识别概论	156
5.1.1 模式识别问题	156
5.1.2 模式识别系统	157
5.1.3 模式识别方法	158
5.2 统计模式识别方法	158
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	178
5.3 模糊模式识别方法	183
5.3.1 模糊集与模糊关系	183
5.3.2 基于模糊等价关系的分类	186
5.3.3 基于模糊相似关系的分类	187
5.4 评述与展望	189
习题	190
第6章 自动控制与系统辨识	192
6.1 绪 论	192
6.1.1 自动控制问题	192
6.1.2 自动控制系统的构成	193
6.2 自动控制系统的基本模型与基本问题	196
6.2.1 自动控制系统的数学模型	196
6.2.2 自动控制系统的基本问题	198
6.2.3 自动控制系统的分析与综合	201
6.3 控制系统稳定性、能控性与能观性的判定	204
6.3.1 稳定性判据	204
6.3.2 能控性判据	211
6.3.3 能观性判据	214
6.4 最优控制	215
6.5 系统辨识	218

6.5.1 基本问题	218
6.5.2 线性离散定常系统的参数估计	220
6.5.3 线性离散定常系统的结构辨识	223
6.6 评述与展望	225
习题	227
第7章 信息加密与安全	230
7.1 信息加密/解密的基本原理	230
7.1.1 信息安全的基本问题	230
7.1.2 密码体制	231
7.1.3 完善保密性	233
7.1.4 密码体制的安全性	235
7.2 信息加密的数学基础	236
7.2.1 群、环和域	236
7.2.2 模 n 的剩余类环 Z_n	238
7.2.3 有限域 $GF(p^n)$	239
7.3 序列密码	243
7.3.1 序列密码的工作方式	244
7.3.2 伪随机序列	246
7.3.3 线性反馈移位寄存器序列	247
7.3.4 B-M 算法、线性复杂度与密钥流发生器	250
7.4 分组密码	251
7.4.1 分组密码的工作原理	251
7.4.2 DES 算法	253
7.4.3 AES 算法	256
7.4.4 分组密码的安全性	261
7.5 公钥密码	262
7.5.1 公钥密码的主要思想	262
7.5.2 RSA 算法	264
7.5.3 椭圆曲线密码	265
7.6 评述与展望	269
习题	270
第8章 数据挖掘与数据库中的知识发现	272
8.1 数据挖掘问题	272
8.1.1 知识发现与知识工程	273
8.1.2 数据挖掘的核心问题	276

• x •

8.1.3 意义及困难	278
8.2 数据挖掘的统计学方法	279
8.2.1 聚类分析	279
8.2.2 分类与回归分析	282
8.2.3 探索性数据分析	286
8.3 数据挖掘的机器学习方法	289
8.3.1 神经网络方法	289
8.3.2 决策树方法	292
8.3.3 模糊系统方法	296
8.4 评述与展望	298
习题	300
参考文献	301

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

什么是信息?“信息”一词在我国由来已久.据《辞海》记载,我国南唐诗人李中有诗云:“梦断美人沉信息,目穿长路依楼台”,可见信息泛指音讯和消息.在近代,信息一词又被用作英语中“information”的译名,“information”在英语中来自词根“inform(通知)”,乃指被告知的事实或知识.“information”在牛津英文字典里给出的解释是“某人被通知或告知的内容、情报、消息”.

信息科学的历史,是人类认识和利用信息的历史.在近代以前(更具体地说是19世纪以前),信息科学一直处在原始和经验的状态.而人类真正自觉地认识信息问题并开始触及到信息的本质,则是20世纪40年代后期的事情.其中,理论上最主要的标志是香农(Shannon)的论文《通信的数学理论》^[1]和维纳(Wiener)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,关于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,人类才开始进入自觉认识和高水平地利用信息的阶段.

由于信息与人类的生存休戚相关,因而人类自觉不自觉地不断同信息打交道,不断地利用信息来为自己的生存和发展服务.因此,在近代历史以前,虽然人类在理论上对信息还没有什么深入的理解和认识,但是对信息的利用却从来也没有停止过.只是那时的利用水平比较低,常常是不自觉的,而且基本上是依靠人类信息器官(包括收集信息的感觉器官、传递信息的神经系统和处理信息的大脑)的天赋功能来进行的.即便如此,在人类漫长的历史上,人类还是创造了不少的方法来利用各种各样的信息.例如,为了更好地表达信息,人类创造了语言;为了记录信息,创造了文字;为了储存信息,创造了纸张和印刷术;为了传递信息,创造了烽火通信;为了记忆和处理(如运算)信息,创造了算盘;为了在有雾的天气里提取关于方向的信息,人类发明了指南针;此外,远在两千多年前,我国古代的军事将领就能够利用“虎符”一类方法来隐蔽和识别信息;人们还能用浑天仪等来检测时间信息等等.可见,无论在信息的表达、存储、记忆,还是在信息的传递、处理、隐蔽、识别方面,人类都有过不少的创造,它们是人类信息器官功能的最初、最原始的延长,也可以说是信息技术的最原始的萌芽.特别是语言、文字和印刷术的创造,可以认为

是古代的几次信息革命。

进入近代,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。现代社会的信息技术如电话、电视、计算机等,全都依赖于电和电子技术的发展和应用。而近代和现代社会的大规模生产和社会斗争则促进了现代信息科学技术的发展。尤其是第二次世界大战,世界上所有的大国几乎都全力以赴地投入了战争,投入了这场世界范围旷日持久的人力、物力、财力和科学技术的全面的、生死的竞争和较量。可以想象,战争的双方为了掌握主动、赢得胜利,除了要具有丰富的物质和强大的能量,还必须能够最有效地利用信息。正因为这样,通信技术、火炮自动控制技术以及计算机技术就在战争中迅速发展起来。现代信息技术和信息科学的主要奠基人数学家香农和维纳以及冯·诺依曼(Von Neumann)等当时就分别在通信、控制和计算机领域工作。他们在战时的工作,终于在战后不久开花结果。第一台现代电子计算机、信息论和控制论分别于1946年和1948年公诸于世。

这一时期,人类在信息的认识方面取得了重大的进展。电报电话的发明,使人们懂得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、时间和幅度这样一些基本的参数,电信号正是通过这些参数(任何一个或它们的组合)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:

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

其中, S 是字母表的字母数目, n 是每个消息所含的字母数目(这里假定各个消息等长)。哈特莱的这个思想和结果,对后来香农的工作有直接的影响。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推广到更有意义的情形。香农指出^[1]：“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,系统必须设计得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,香农完成了认识上的两点重要的突破:第一,他认识到通信工程与信息语义无关;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,并且证明了这样一个结论: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, 它们满足如下两个条件:

$$0 \leq p_i \leq 1 \quad i = 1, \dots, N$$

和

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

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

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

在这种条件下, I 与 H 在数值上相等, 但概念上两者是不同的, 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.

在上述这个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. 特别有意义的是, 利用这些结果, 他还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辩证关系, 建立起一些重要的性能界限, 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. 这样, 人类就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, 初步认识和把握了信息及其传递的规律.

由于信息问题本身具有极为普遍的意义, 而香农解决问题的方法又如此新颖精巧, 所得到的结果又是如此富有启发, 因此, 他的文章一旦发表, 就“如一枚重磅炸弹的爆炸, 震撼了科学界”(皮尔斯(Pierce), 1973)^[3]. 人们感到, 信息论的成就使人耳目一新, 改变了科学界的想像, 给许多学科带来了新的希望. 于是人们试图把信息论的概念和方法用于解决各自面临的种种难题, 诸如组织化、语义学、听觉、神经生理学、心理学等, 信息论的冲击波便迅速地扩展到各个学科, 人们尽可能从广泛的意义上理解和解释信息论. 从信息论产生至 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. 比如, 1955 年 9 月在伦敦举行的第三届信息论国际会议, 议题包括解剖学、动物保健学、人类学、计算机、经济学、电子学、语言学、数学、神经精神学、神经生理学、哲学、语音学、物理学、政治理论、心理学和统计学等等. 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. 他在 1956 年曾经这样写道^[4]: “近几年来, 信息论简直成了最时髦的学科. 它本来只是通信工程师的一种技术工具, 但现在无论在普通杂志还是科学刊物上都占据了重要的地位. 这一方面是因为

它与计算机、控制论以及自动化这样一些新兴学科关系密切,同时也因为它本身的题材新颖.结果,它已是名过其实.许多不同学科的同事们,或者因慕其名,或者希望寻求科学分析的新途径,都把信息论引进各自的领域.总之,现在,信息论已经是名声在外.这种声誉固然使我们本学科的人感到愉快和兴奋,但也孕育着一种危险.诚然,在理解和探讨通信问题的本质方面,信息论是一种有力的工具,而且它的重要意义还将继续与日俱增.但它却肯定不是通信工作者的万灵药.而对于其他人,则更是如此.要知道,一次就能揭开全部自然奥秘这种事是罕见的.否则,人们一旦认识到仅仅用几个像信息、熵、冗余度这样一些动人的字眼并不能解决全部问题的时候,就会灰心失望,而那种人为的繁荣就会在一夜之中崩溃.”

事实上,香农比谁都明白,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:“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,决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.确实,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50年代中期以后,这类活动就已经逐渐冷落下来.正如斯莱皮恩(D. Slepian)所说^[5],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,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);另一方面,欣钦(1957)、法捷耶夫(1957)以及费因斯坦(Feinstein, 1958)等人在数学上对香农理论、特别是对概率熵公式惟一性和公理化结构进行了更严格的论证.此后,又有许多人,如瑞尼(Renyi, 1960)、德洛克齐(Daroczy, 1971)、有本卓(Arimoto, 1971)、柯莫各洛夫(Kolmogorov, 1956)、波斯纳(Posner, 1967)、阿克泽尔(Aczel, 1975)等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 熵这样一些新的概念和公式,去补充和完善香农的熵公式.这一期间,在编码译码、调制解调和检测理论方面做了大量的工作,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.

可是,就在这个消化与理解的时期,人们开始比较清醒地注意到,信息非必然具有概率的性质.在许多场合,由于“试验”不能重复进行,不存在统计意义下的概率,于是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信息.可见,信息并不以概率的存在与否为转移.这说明,存在着“非概率

信息”。香农的熵公式无法度量这种非概率信息,因为熵公式是概率的泛函数。这个矛盾,促使人们认真研究非概率信息的度量方法。结果,在60年代中后期到70年代,先后提出了无概率信息(英瞭登(Ingarden),1962)、定性信息(戈廷根(Gottinger),1975)、偶发信息(钟义信,1981)、模糊信息(德·卢卡(DeLuca),1972)、相对性信息(杰马里尔(Jumarie),1975)等一系列新的概念和方法。与此同时,原先被香农审慎地加以排除的语义信息和语用信息问题,也重新引起人们的注意。相应地,各种语义信息和语用信息的描述和度量方法也先后出现。虽然,这些新的概念和方法总的来说还不成熟,但是都在某种程度上和某种意义上开阔了人们的视野,启发了新的思路,激起了新的希望。近来,用信息的观点来重新理解物理学、用信息的方法来解释生物学和化学以及心理学、生理学、管理学、社会学的尝试,也在扎扎实实地进行着。除了在信息度量和信息传递方面取得了巨大进展以外,信息处理、信息提取和信息识别等领域的研究工作也取得了长足的进展。

总之,到目前为止,人们对于信息的认识已经前进了一大步。无论对于信息的本质,对信息的度量方法,还是对信息的运动变化的一般规律,包括信息的转换、存储、记录、传递、提取、检测、识别和处理的规律,都有了一定的理解和把握。现阶段的信息论研究,正处于狭义信息论向广义信息论转变的时期,对信息的认识正处于由局部向全局转变的时期。一方面,人们不断完善原有的概率信息理论;另一方面,人们也对广义信息论的基本问题进行了深入的探讨。毫无疑问,随着信息理论和其他有关学科研究工作的进展,我们将能够在更高的水平上阐明人类自身是如何通过信息感受器官来接收和提取信息,如何通过复杂的信息传递器官来传递信息,如何通过信息处理器官来处理信息、形成判断进而产生和输出指令信息的深刻的机制和原理,从而为有效地延长和扩展人类的信息功能作出具有伟大意义的贡献。

关于信息利用的问题,我们将主要考察利用信息来进行控制和组织最优系统这两方面的情况。

对于一切活的机体,特别是对于人类本身来说,控制和信息是不可分割的,也就是说,要实现有效的控制,就必须有足够的信息。反之亦然,人们获得信息,往往是为了实现某种控制。因此,控制问题的发展历史和信息问题一样,都可以追溯到远古的时代,只是由于当时人类社会的生产力水平低下,那种社会生产实践的深度和广度对人的信息控制能力的要求不高,人类仅仅凭借天赋的信息与控制能力就足以与大自然周旋,因此,延长信息与控制功能的需要没有成为矛盾的焦点,从而使信息与控制科学的问世推迟到现代。

控制论这门学科是在第二次世界大战期间才开始发展的。它的基本理论是由维纳在他的名著《控制论:关于在动物和机器中控制和通信的科学》一书中奠定的。这部控制论的奠基性著作和香农的信息论的开创性著作《通信的数学理论》在同一年(1948)问世,这不是偶然的。事实上,他们两人在各自创立信息论和控制论的前后,都在几乎同样的领域内工作:维纳活跃在自动控制、通信、计算机和生物学领