



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

INFORMATION SCIENCE

# 信息工程概论

(第二版)

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,张苗生主编.—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>

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建设和发展的基本问题.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苗生主持,参加修订工作的有徐宗本、张苗生、刘峰、任品毅、阮小娥,全书经徐宗本和张苗生修改、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         |
| <b>第3章 时频分析 .....</b>               | <b>67</b>  |
| 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 多分辨率分析 .....                  | 97         |
| 3.6 评述与展望 .....                     | 107        |
| 习题 .....                            | 109        |
| 参考文献 .....                          | 110        |
| <b>第4章 数字图像处理概述 .....</b>           | <b>111</b> |
| 4.1 数字图像的基本概念 .....                 | 111        |
| 4.1.1 模拟图像的数字化的 .....               | 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        |
| <b>第 5 章 模式识别 .....</b>   | <b>155</b> |
| 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        |
| <b>第6章 自动控制与系统辨识 .....</b>    | <b>194</b> |
| 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        |
| <b>第7章 信息加密与信息安全 .....</b>    | <b>236</b> |
| 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        |
| <b>第 8 章 数据挖掘与数据库中的知识发现 .....</b> | <b>281</b> |
| 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》<sup>[2]</sup>.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]<sup>[3]</sup>,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<sup>[4]</sup>:“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<sup>[5]</sup>,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、 $\alpha$ -熵、 $\beta$ -熵、 $R$ -熵、 $\epsilon$ -熵、 $\epsilon$ - $\delta$ -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

信息.这说明了“非概率信息”的存在,而香农的熵公式无法度量这种非概率信息.这一现象促使了人们对非概率信息度量方法的研究.20世纪60年代中后期到70年代,无概率信息、定性信息、偶发信息、模糊信息、相对性信息等一系列新的概念和方法先后被提出.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.发展到今天,人们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,至今为止,人们对于信息的认识已经取得了很大的进步.无论对信息本质,信息度量方法,还是对信息的运动变化的一般规律,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.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通过各种器官接收信息、提取信息,传递信息,处理信息,并形成判断进而产生和输出指令信息的深层机制和原理,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.

接下来,我们将介绍信息科学发展史上另一个理论上的最重要标志——控制论的历史发展情况.

对于人类本身或一切活的机体来说,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.换句话说,人们获取信息的目的,往往是为了实现某种控制.因此,与信息问题一样,控制问题的发展历史也可以追溯到远古时代.

控制论这门学科的真正发展起始于第二次世界大战期间,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与香农的信息论的开创性著作《通信的数学理论》在同一年(1948年)问世,这绝不是偶然的.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、计算机和生物学领域,香农则在自动机、博弈、布尔逻辑、计算机、学习机和通信等方面发表了许多出色的论文.

控制论以吉布斯(J. W. Gibbs)的统计观念作为思维的基础.因此,它与信息论一样,从一问世起就与传统科学观念——拉普拉斯决定论——向着截然相反的方向发展.正如维纳自己后来所回忆的那样:“当我开始写《控制论》的时候,我发现说明我的观点的主要困难在于:对于当时传统的思想来说,统计信息和统计控制理论的概念不但是新奇的,也许甚至是对传统思想本身的一种冲击.”

除了这种基于统计观念的科学方法论之外,控制论在技术理论方面则是对反馈理论的直接继承和发展.最早的反馈系统的研究可以追溯到一百多年前麦克斯韦关于调速器的文章.重要的是,维纳等人发现,目的性的行为可以借助于有反馈

的控制系统来实现.这样,通过反馈就把目的性行为这种生物所特有的概念赋予了无生命的机器,从而突破了生命体和非生命体的界限.

统计方法和反馈理论是控制论最重要的理论支柱.如果说统计方法是控制论与信息论所共有的,那么反馈理论特别是反馈机制在生物体和非生物体中的类比则是控制论特有的贡献.

在控制论的理论基础上,维纳利用帕斯卡(B. Pascal)、莱布尼兹(G. W. Leibniz)、图灵(A. Turing)和冯·诺依曼等科学家对数理逻辑、自动机和电子计算机的贡献作为实现控制论系统的手段.值得注意的是,计算机并不是作为一种普通的工程演算手段,而是以“推动思维过程的机械化”的作用成为控制论学科的重要组成部分.

当然,为了说明控制论的历史渊源,还必须指出生理学和心理学所起的作用.有机体内的反馈机制、神经传导的元二性质、神经元突触的符号机制以及感知机制等,对于理解生物的控制和通信奥秘以及将这些机制移植到非生物的机器或者反过来用有关机器中的某些理论来诊断和修复生物体的控制和通信功能,都是富有启发的.所有这些关于生物学和心理学现象的发现,都为控制论的创立准备了条件.

尽管许多古典传统学科的专家们向这门新科学投以怀疑的目光,控制论却迅速地取得了令他们瞠目的进展.正如维纳在《控制论》第二版的序言中所指出的<sup>[6]</sup>:“现在,这些概念已经成为通信工程师和自动控制设计师手中如此熟悉的工具,以致我现在主要担心的是本书是否会被认为已经陈旧和平庸……,因此,控制论学者应当继续走向新的领域.”

从第二版《控制论》的内容可以看到,对非线性反馈系统的研究逐渐取代了简单的线性系统的研究;为了适应非线性系统研究的需要,提出了黑箱和白箱的概念和方法;与此相联系,第二版《控制论》还包含了自适应、自学习和自繁殖系统的机制.可以认为,这些内容构成了控制论发展第二阶段的主要特征.如果把这些内容加以概括,就形成了人工智能或机器智能的理论基础.

在控制论提出之后的一段时间内,关于控制论的研究得到了充分的扩展,分别出现了工程控制论、生物控制论、经济控制论和社会控制论等这样一些十分活跃的分支.而所有这些分支所处理的对象,往往又都是大规模的系统,于是又推动了大(规模)系统控制理论的研究.

系统论的早期发展是与生物学联系在一起的.在生物学的发展史上,流行过一种机械决定论.这种理论把生物问题简化为物理化学问题,纯粹用物理和化学的原因来解释生物的生理现象和心理过程,并且认为一种原因只能产生一种特定的结果,而一种结果也只能来自一个原因.20世纪30年代中期,奥地利生物学家贝特兰菲(L. Von Bertalanffy)指出了机械论的错误观点.他认为机械化论的错误主要有两个方面:第一是简单相加的观点,即把有机体分解为要素之后,只用要素的机

械相加来说明有机体的属性;第二是被动反映的观点,即认为有机体只有受到刺激才会作出反应,否则就静止不动.贝特兰菲不同意这样的观点,认为它们不能反映、也不能解释生物学的实际问题.他提出了一些新的见解和观点,其中主要包括:第一,一切有机体都是有机的整体,于是,“复杂现象大于因果链的孤立属性的简单的总和.解释这些现象不仅要通过它们的组成因素,而且要考虑到这些因素(也叫要素)之间的联系的总和”;第二,任何活的系统都是与环境发生不断的物质交换和能量交换的系统,因此,不仅要从系统本身来解释这些系统的行为,还必须从生物体与环境之间的相互作用的过程来解释生命的本质;第三,各种有机体都是按照严格的等级结构组织起来的,生物系统是分层次的.大约在20世纪40年代中期,贝特兰菲把他的这些观点归纳成为《一般系统理论》,1968年出版了专著《一般系统理论:基础、发展和应用》<sup>[7]</sup>,总结了一般系统论的概念、方法和应用.

应当指出,贝特兰菲创立的系统论是类比型的系统论.他从理论生物学的角度,运用类比同构方法,建立了开放系统的一般理论和模型,指出了生命现象具有组织性、有序性和目的性.但是,他没有能够对目的性、有序性这类问题做出满意的分析.一般系统论虽然来源于理论生物学,但是,它的这些原则是普遍适用的.

与一般系统论形成差不多在同一时期,在工程技术领域也孕育着一门新的技术理论,它后来定名为系统工程.这种理论把对象作为某种系统来考虑,建立并发展了一种用来组织各种系统的规划、研究、设计、制造、试验、使用和改进的具有普遍意义的科学方法.系统工程方法,要求具有明确预定的系统目标和系统功能,要求系统各要素之间、各要素与系统整体之间,以及系统与环境之间相互协调,使系统的整体性能达到最优.系统工程的数学基础是运筹学,主要包括规划理论、决策理论、排队理论、网络理论、博弈理论等许多分支.

到了20世纪70年代,系统论的思想获得了新的补充和重大的发展,这就是比利时物理学家普里高津(I. Prigogine)等人提出的耗散结构(dissipative structure)理论和德国科学家赫尔曼·哈肯(Hermann Haken)提出的协同学(synergetics)理论<sup>[8,9]</sup>.这两种理论都着眼于研究系统如何由无序状态转化为有序状态,探讨这种转化的条件、可能性、规律性和应用的机制,从而触及了系统论最本质、最重要、也最有普遍意义的问题.

耗散结构理论认为,一个封闭的平衡系统,按照热力学第二定律,总是要趋于最大熵状态,即最无序状态.为了摆脱这种稳定的无序状态(也叫平衡态),只有设法把系统改造成为开放系统,并且通过与外界环境进行物质和能量的交换,使系统进入远离平衡态的不可逆非平衡过程.这样,才有可能出现某种机会,导出新的稳定的有序结构.所以,系统的开放是摆脱稳定无序状态的条件,而非平衡则是导出新的有序结构的希望,非平衡是有序之源.

协同学的研究表明,在一定的条件下,系统原来所处的稳定平衡位置可以变成

为非稳定的.然后,在非稳定状态的基础上,由于涨落的作用,系统有可能过渡到一个新的更有序的稳定平衡位置,从而实现系统的自组织过程,完成无序到有序的转变.

耗散结构和协同学这两方面的研究者们所提出的问题无疑是具有非常重要意义的.事实上,系统由无序转化为有序的问题是一切系统理论的核心问题.耗散结构学说和协同学理论所给出的解答是系统理论发展过程中的新的里程碑.不过,也需要指出,这两种理论仅仅讨论了开放系统与外部环境之间物质和能量的交换在系统由无序向有序转变过程中的作用,没有指出信息(负熵)在其中所扮演的重要角色,多少有点令人遗憾.

信息科学的崛起是自然科学发展历史上一次伟大的革命.传统的自然科学观一直是以物质和能量为中心,没有信息的观念,这是科学不成熟的表现.正像人有了身体和力量,但是还没有智慧和灵魂.现在,信息观念的建立,与物质和能量三足鼎立,形成了一个完整的、均衡的科学结构,标志着科学开始进入它的成熟时期.信息科学所引起的革命,将是科学史上一场最深刻、最重要的革命,它将彻底地改变科学的面貌,因而也将改变整个社会的面貌.这一点已经被目前迅速发展的网络技术、通信技术和生物信息学所证明.

### 1.1.2 信息科学的概念、特征与描述

目前,人类社会已经进入信息时代,信息已成为决定生产力、竞争力的一种取之不尽,用之不竭的战略资源,信息产业已成为支撑全球经济的最主要产业之一,人们对于信息科学的研究也随之不断地进步和发展.本节讨论信息的概念、特征与描述等信息科学的基础内容.

#### 1. 信息的概念

什么是信息?要人们用一句话来概括信息,给信息下一个科学的定义,却不那么容易,但随着人们对信息研究的深入,人们对信息的认识也在逐步加深.

目前,哲学家和科学家普遍认为,物质、能量和信息是物质世界的三大支柱,是人类科学史上最重要的三个基本概念.物质的概念出现得最早,讨论、研究的也最充分.19世纪初才出现“能量”一词.20世纪上半叶,爱因斯坦发现了物质与能量的关系: $E=CM^2$  ( $E$  是能量,  $M$  是质量,  $C$  是光速),揭示了它们的本质.

对于信息,人们认识得比较晚.20世纪50年代,随着通信技术和控制理论的发展,才正式出现了信息的概念.随着信息化社会的发展,关于信息的研究也越来越深入,但关于信息的概念至今没有形成统一的认识.

信息论之父香农在他的著名论文《通信的数学理论》中对信息的定义是:信息是对事物运动状态或存在方式的不确定性的描述.也就是说,通信过程是一种不确

定性的消除过程.如果原来的不确定性消除得越多,获得的信息也就越多;如果原来的不确定性全部消除,就获得全部的信息;如果原来的不确定性都没消除,就没有获得任何信息,这个定义是迄今为止对信息的比较权威的定义.

控制论的创始人维纳对信息所下的定义是:信息是人们在适应外部世界并且使这种适应反作用于世界的过程中,同外部世界进行交换的内容的名称.

信息是一个不断变化和发展的概念,不同学科领域的学者对信息都有不同的理解.我们对信息的理解是:信息是事物运动状态和特征的反映.

## 2. 信息的特征和分类

可以说,如果只有物质和能量而没有信息,是不能构成人类社会的.并且,社会越发展,人们对信息的依赖性就越大.正确认识信息的特征并对信息进行合理的分类是从事信息科学研究的前提.

### (1) 信息的特征

信息与物质和能量相比,它具有许多独有的特征,归纳起来,主要体现在以下几个方面.

1) 信息的客观性.信息来源于物质,并且通过物质进行传递.所以,信息是客观存在的,一切事物都在不断产生、提供和传递信息.

2) 信息的依附性.信息不能离开载体而独立存在.各种信息必须借助于文字、图像、胶片、磁带、声波和光波等物质形态的载体才能够表现出来,才能为人们的听、视、味、嗅、触觉所感知,并加以识别和利用.从某种意义上说,没有信息载体,也就没有信息本身.

3) 信息的可传递性.信息可以通过语言、表情、动作、书籍、光盘、通信和计算机网络等进行传递.信息的可传递性表现在空间和时间两个方面,信息在空间上的传递称为通信,而信息在时间上的传递称为信息存储.信息必须能够传递,如果不能传递,其存在就失去了意义.

4) 信息的共享性.信息能够在空间和时间中传递,所以它也能够为人类所共享.信息的共享性使信息易于扩散,得到比物质更广泛的开发和利用.由于信息可共享,当信息从传送者转移到接受者时,传递者并不会因此失去信息.这一点信息是与物质和能量最主要的区别之一.

5) 信息的时效性.信息的时效性是指信息的效能依赖于时间.时间的延误会导致信息的使用价值降低,甚至完全消失.例如,在竞争激烈的信息产业领域,对信息的获取与利用领先或落后几天,甚至几个小时,都有可能使一个企业成就辉煌或面临破产.

6) 信息的可变换性.信息的存在形式是可以变换的,它可以从一种形态转变为另一种形态.例如,物质信息可转换为语言、文字、数据、图像等形式,也可以转换

为计算机语言和电信号等,同样一条信息可以用多种不同的载体来表示。

7) 信息的可加工性:客观世界存在的信息是大量的、多种多样的,人们对信息的需求往往具有一定的选择性,为了更好地开发和利用信息,需要对大量的信息用科学的方法进行筛选,使其精炼浓缩,排除无用信息,选取自己所需要的信息。

## (2) 信息的分类

信息的分类有很多不同的准则和方法。

1) 从信息的性质分类:语法信息、语义信息、语用信息。

2) 从观察的过程来分类:实在信息、先验信息、实得信息。

3) 从信息的地位来分类:客观信息(包括观察对象的初始信息,经过观察者干预之后的效果信息、环境信息等)、主观信息(包括决策信息、指令信息、控制信息、目标信息等)。

4) 从信息的作用来分类:有用信息、无用信息、干扰信息。

5) 从信息的逻辑意义来分类:真实信息、虚假信息、不定信息。

6) 从信息的传递方向来分类:前馈信息、反馈信息。

7) 从信息的生成领域来分类:宇宙信息、自然信息、社会信息、思维信息等。

8) 从信息的应用部门来分类:工业信息、农业信息、军事信息、政治信息、科技信息、文化信息、经济信息、市场信息、管理信息等。

9) 从信息源的性质来分类:语音信息、图像信息、文字信息、数据信息、计算信息等。

10) 从信息的载体性质来分类:电子信息、光学信息、生物信息等。

11) 从携带信息的信号的形式来分类:连续信息、离散信息、半连续信息等。

在所有分类的方法中,最重要的是按信息性质的分类,即信息可以划分为语法信息、语义信息和语用信息三种基本层次,其中,最基本、最抽象的层次是语法信息,它是迄今为止在理论上研究得最多的层次。

按照基本定义,语法信息是事物运动的状态和方式的外在形式,根据事物运动的状态和方式在形式上的不同,语法信息还可以作如下的分类:①事物运动的状态可以是有限状态或无限状态,与此相对应,就有有限状态语法信息和无限状态语法信息之分;②事物运动的状态可以是连续的,也可以是离散的,于是又有连续状态语法信息与离散状态语法信息之分;③事物运动的状态还可能是明晰的,或者是模糊的,这样,又有状态明晰的语法信息与状态模糊的语法信息之分。

事物运动的方式(即状态改变的方式)可分为随机型方式、半随机型方式和确定型方式三类,它们分别对应于概率型信息、偶发型信息和确定型信息三种基本的信息形式。随机型运动方式是指各状态是完全按照概率规则或统计规律出现的;半随机型运动方式是指:事物各个状态的出现是不可预测的,但是由于这类试验往往只进行一次或若干次,而不能大量重复,因此不能用概率统计的规则来描述对于这

类试验所提供的信息;确定的运动方式是指其各种状态的出现规则能用经典数学公式来描述,这种方式的未知因素通常表现在初始条件和环境影响(约束条件)方面。

在实际的研究工作中,由于连续信息通常可以实现离散化,因此研究离散型信息是主要的。另外,状态无限的情形往往可以通过状态有限的情形来逼近,于是,研究状态有限的情形是更为基本的。这样,最基本的语法信息形式就只有六种,即明晰型概率信息、明晰型偶发信息、明晰型确定型信息、模糊型概率信息、模糊型偶发信息以及模糊型确定信息。由于通常所说的模糊信息是指模糊型确定信息,因而真正最基本的语法信息只有四种,即离散有限明晰状态的概率型信息、离散有限明晰状态的偶发型信息、离散有限明晰状态的确定型信息、离散有限模糊状态的确定型信息。我们分别把它们简称为概率信息、偶发信息、确定信息以及模糊信息。

### 1.1.3 信息科学方法论

信息科学方法论具有相对独立和相对完整的体系结构,它包含三个基本方法和两个基本法则:

- 1) 信息分析方法(认识复杂事物的方法);
- 2) 信息综合方法(综合复杂系统的方法);
- 3) 信息进化方法(变革复杂系统的方法);
- 4) 物质、能量、信息三位一体准则;
- 5) 结构功能行为辩证相依准则。

所谓信息分析方法是指对复杂事物(不管是自然系统还是人工系统)工作机制的认识,不能仅仅局限于物质和能量,更重要的是要从信息的观点出发来进行分析,抓住事物运动的状态和方式(它的内部结构的状态和方式)以及与外部联系的状态和方式(即信息),把事物的运动过程(即工作过程)看作是一个信息过程,并弄清这个信息过程包含的各个环节以及这些环节之间的逻辑关联和数量关系,从而建立一个能够反映该事物工作过程的信息模型。

所谓信息综合方法,就是在构造复杂的人工系统(通过模拟和仿真)的时候,首先要从信息的观点出发,构造出能够满足用户的功能要求的信息模型;然后,再应用现有的物质、能量和技术手段来实现这个模型,并用试验来检验这个模型系统。

所谓信息进化方法就是在变革、改善或优化一个高级复杂系统时,首先要从信息的观点出发,利用信息技术的手段和方法获得该系统当前的运动状态及其变化方式的形式(语法信息)、内容(语义信息)和效用(语用信息),从中判断该系统当前的“优度”,将它与目标优度相比较,找出两者之间的“差距”,并进一步得出改变系统当前状态、缩小差距、达到目标优度的策略信息,然后按照策略信息的引导,通过控制作用改变该系统的状态,使它逐步逼近目标,完成系统进化的过程。

两个准则是信息科学方法论的有机组成部分,是应用信息方法(信息分析方法、信息综合方法和信息进化方法的简称)求解复杂问题时必须遵循的基本原则。

信息方法强调用信息观点和方法来分析、综合和变革高级复杂系统,解决了传统方法论所难以解决的高级复杂事物的问题,它是一个巨大的进步。另一方面,物质、能量、信息三位一体准则表明,任何信息过程都需要物质和能量的支持,任何现实的复杂系统都是物质、能量、信息的有机综合体。因此,在处理复杂问题时,必须从信息方法开始,最终则要落实到物质、能量、信息的综合体上来。

## 1.2 信息技术

### 1.2.1 信息技术的定义和基本内容

#### (1) 信息技术的定义

关于信息技术的定义,同信息的定义一样,从不同的角度会有不同的描述。一般来讲,信息技术是用于扩展人类信息器官功能的一种技术。具体地讲,信息技术主要包括:信息的获取技术、信息的传输技术、信息的处理技术和信息的应用技术。

人的信息器官主要包含以下四大类<sup>[10]</sup>:

1) 感觉器官。感觉器官的主要功能是获取信息。它包括视觉器官、听觉器官、嗅觉器官、味觉器官和触觉器官。

2) 神经器官。神经器官的主要功能是传递信息。它包括导入神经网络、导出神经网络,以及中间传导神经网络等。通过导入神经网络将感觉器官获得的信息传送给思维器官,通过导出神经网络把思维器官加工出来的信息传送给各种效应器官或内部其他器官。

3) 思维器官。思维器官的主要功能是加工和再生信息。它包括记忆系统、联想系统、分析系统、推理系统和决策系统等。实际上它担负着存储信息、检索信息、加工信息和再生信息的复杂任务。

4) 效应器官。效应器官的主要功能是使用信息。它包括操作器官(手)、行走器官(脚)和语言器官(口)等。通过操作器官和行走器官来执行大脑发出的命令(信息),通过语言器官来表达大脑产生的意志(信息),从而使这些信息产生实际的效用。

#### (2) 信息技术的基本内容

信息技术的基本内容包括感测技术、通信技术、智能技术及控制技术等四大基本技术,它们大体上相当于人们的感觉器官、神经系统、思维器官和效应器官。

1) 感测技术。感测技术包括信息识别、信息提取、信息检测等技术,它们是人类感觉器官功能的扩展和延长。

2) 通信技术.通信技术的功能是实现信息快速、可靠、安全的转移,它们是人类神经器官功能的扩展和延长.

3) 智能技术.智能技术包括计算机硬件技术、软件技术、人工智能技术、计算智能和机器学习等,它们是人类思维器官功能的扩展和延长.

4) 控制技术.控制技术的功能是根据输入的指令信息(决策信息)对外部事物的运动状态和方式实施干预,它们是人类效应器官功能的扩展和延长.

通过上述四大基本技术可以衍生出各种各样具体的信息技术形式.例如,广播和电视是通信技术的逻辑分解的产物;雷达是感测技术与通信技术的产物;管理信息系统是感测技术、通信技术、智能技术和控制技术相结合的产物;生产过程自动化系统则是感测技术、智能技术与控制技术一体化的产物等.

### 1.2.2 信息技术体系的层次关系

信息技术的体系包括如下四个基本的层次:基础技术层次、支撑技术层次、主体技术层次和应用技术层次<sup>[10]</sup>.

若把信息技术的整个体系比喻为一株参天大树,那么它的基础技术层次便是大树扎根的土壤,它的支撑技术层次便是大树发达旺盛的根系,它的主体技术层次是大树强劲的躯干,而它的应用技术层次是大树的枝叶和花果.肥沃的土壤、发达的根系、粗壮的躯干,这一切都是造就枝繁叶茂、果实累累的必要条件.信息技术这四个层次的关系与此极为相似.

#### 1. 信息技术的基础技术

这主要是指新材料技术和新能量技术(不仅是新能源技术,还有新的能量转换和控制技术等).信息技术的进步,归根结底来源于材料和能量技术的进步.例如,电子信息技术的进步,由真空管时代向晶体管、集成电路、超大规模集成电路时代的迈进,归根结底是由于锗、硅半导体材料,金属氧化物半导体材料,砷化镓材料等的开发和利用;激光信息技术的出现,有赖于各种激光材料的开发和激光能量的利用等.因此,开发新材料、掌握新的能量技术,是发展和改善信息技术的最基本的途径.

#### 2. 信息技术的支撑技术

这主要是指机械技术、电子技术、微电子技术、激光技术和生物技术等.所有的信息技术都要通过这些技术手段来具体地实现.用机械技术实现的信息技术称为机械信息技术,如手摇计算机等;用电子或微电子技术手段实现的信息技术称为电子信息技术的,如电信、电子计算机等;用激光技术手段实现的信息技术称为激光信息技术的,如激光传导纤维通信、激光控制、激光遥感、激光计算机等;用生物技术手段实现的信息技术称为生物信息技术的,如生物传感器和生物计算机等.

### 3. 信息技术的主体技术

信息技术的主体技术就是它的四大基本技术,即感测技术、通信技术、智能技术和控制技术。

### 4. 信息技术的应用技术

这是指针对各种实用的目的,由信息技术的四大基本技术繁衍出的各种各样的具体技术群类,包括信息技术在工业、农业、国防、交通运输、科学研究、文化教育、商业贸易、医疗卫生、体育运动、文学艺术、行政管理、社会服务、家庭劳动等各个领域中的应用。

## 1.2.3 信息技术与数学

尽管信息技术的表现形式多种多样,但公认数学是信息技术的理论基础,特别是许多高新技术领域,数学本身也常常构成技术的核心部分。

### 1. 数学提供信息的表示原理与方法

信息技术是以信息的表示、储存、传输与加工为基础的,数学不仅可以方便地表示点、线、面、体等几何要素,描述关系、推理、模糊性、不确定性等复杂知识,还可以刻画和表达复杂信息系统及其信息处理过程,信息的表示通常可以概括为信息的编码技术,它的核心基础则是几何学、代数学、拓扑学与模型论等数学理论。

### 2. 数学提供信息处理与分析的基础

要使以各种原始数据形式出现的信息变得有使用价值,要从浩瀚的繁杂数据中“挖掘”出知识,要将海量的信息以尽可能快的速度向世界各地传播,都需要以信息的分析(纯化、识别、分解/重构、特征提取、知识发现、信息压缩等)为基础。对于雷达、地震、电磁波等信号的分析,其核心方法是 Fourier 分析、小波分析,或一般 Hilbert 空间中的正交分解分析;对于图像、声音、文体等信息的压缩传输,其核心方法是离散余弦变换、小波变换与分形变换;对于海量数据挖掘与知识发现,其核心方法则是数据分析与统计技术。所以,毫不夸张地说,信息分析的核心是数学。它不仅依赖于调和分析、函数表示论、统计学、Hilbert 空间理论等经典数学理论,而且更依赖于小波分析、随机分析、分析几何、函数的稀疏表示、计算智能、统计学习理论等近代数学理论与方法。

### 3. 数学提供信息加密/解密的基础

随着信息技术,特别是 Internet/Intranet 技术的广泛采用,信息加密/解密技

术已成为涉及国家安全、社会活动、经济活动信息化的重大基础技术.这一技术的核心基础是密码学.可以说,没有密码学就没有信息安全技术,而密码学涉及近世代数、数论、概率论、信息论等广泛的数学分支.

#### 4. 数学提供信息处理的算法基础

现代的信息处理是以计算机为工具的,计算机的研制与发展(特别是新型计算机模型的开发)以数理逻辑为基础,而计算机的应用则以算法为基础.无论是信息获取、分析,还是信息加工、应用,都必须开发合适的计算机算法以完成相应的计算任务.这些计算任务(或者说信息处理任务)既包括逻辑推演、函数计算、统计分析等相对简单的计算,也更多地包括非线性偏微分方程求解(如地震信号分析、地球物理反演等)、复杂目标函数优化(如生物信息处理、蛋白质结构分析等)与海量数据处理(特别像气象数据、遥感数据、生物数据等的分析)等极其复杂且高难度的计算.而解决这些问题则是科学计算(计算数学)的基本任务.

#### 5. 数学也提供信息技术应用的模型化基础

计算机处理信息,或者更一般地说,任何信息技术的工程应用都是以对应用对象和系统的数学建模为基础的.数学模型(微分/差分方程模型、最优化模型、控制模型、计算模型、随机分析模型等)不仅能提供对应用对象的形式化、标准化、数量化的描述,而且常常有助于抓住问题的本质,对问题对象的规律性提供理论上的预测,从而对信息技术的应用与发展提供指导.例如,基于电磁波对于不同介质折射与反射原理的数学建模可产生新型的遥感信息获取技术;基于对分子结构描述的不同建模可产生新型的药物设计原理与方法;基于对社会、经济系统、工业过程的不同建模可导致新的控制与管理策略等.

本书正是基于以上观察,试图以几个典型的信息工程领域为例,具体展示数学在其中所扮演的重要角色.很明显,所选择的领域和问题是极其有限的,它们并不能全面地反映数学在整个信息工程中的重要地位.

### 参 考 文 献

- [1] Shannon C E. The mathematical theory of communication. Bell System Techn. J., 1948, 27: 379~423, 632~656.
- [2] Wiener N. Cybernetics and Society. Houghton Mifflin Company, 1950.
- [3] Pierce J R. The early days of information theory. IEEE Trans Information Theory, 1973, 19(1): 3~8.
- [4] Shannon C E. The bandwagon. IEEE Trans Information Theory, 1956, 2(1): 50~53.
- [5] Slepian D. Information theory in fifties. IEEE Trans Information Theory, 1973, 19(2): 145~148.
- [6] Wiener N. Cybernetics. The 2nd Edition. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1961.
- [7] Bertalanffy V. General System Theory: Foundation, Development and Applications. New York: George

- 
- Braziller Inc., 1968.
- [8] Haken H. Synergetics: An Introduction to Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry, and Biology. The 3rd Edition. Berlin: Springer-Verlag, 1983.
- [9] Nicolis G, Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1979.
- [10] 钟义信. 信息科学原理. 北京: 北京邮电大学出版社, 1996.

# 第 2 章 通信系统原理

本章主要介绍通信系统的基本原理,内容涉及模拟通信和数字通信的一般模型和概念,着重介绍越来越受到现代通信技术所重视的数字通信的内容.在 2.1 节中,介绍通信技术的一般概念.在此基础上,2.2 节介绍模拟信号的调制和模拟信号数字化技术.2.3 节简要介绍脉冲调制的基本原理.2.4 节介绍数字通信的基本模型.2.5 节简要介绍几种重要的现代通信技术并做出展望.

## 2.1 引 论

### 2.1.1 通信系统的一般概念

通信系统是将信息从发信者传输到收信者的系统,它的组成如图 2.1 所示.其中,信源是需要传输的消息来源,如语言、文字、图像、数据等.信源的作用是把信源的消息转换为电信号,例如通电话时,把语言转换为话音信号.信源输出的信号是以它的某个特征参量(如幅度、频率、相位等)的变化来表示消息的.按照信号特征参量的取值方式不同,可以将信号分为两类:模拟信号与数字信号.模拟信号的特征参量与消息相对应而连续取值,数字信号的特征参量是离散取值的.直接由原始消息转换得到的电信号的频率都是比较低的,而且最高频率和最低频率的比值很大,可以远大于 1,这种信号称为基带信号.模拟基带信号和数字基带信号通常都要经过调制形成已调载波信号(或称为频带信号)以适应信道的传输特性,调制原理如图 2.2 所示.在短距离的有线传输场合,也使用基带传输的方式.

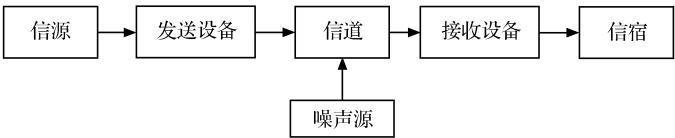


图 2.1 通信系统原理框图

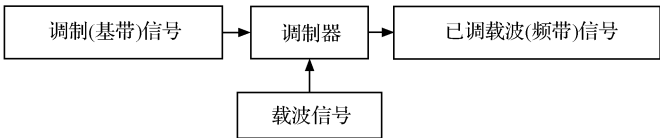


图 2.2 调制原理