

粒计算：过去、现在与展望

苗夺谦 王国胤 刘清 编著
林早阳 姚一豫

科学出版社

北京

内 容 简 介

粒计算是近十年来计算机科学中一个非常活跃的研究领域。本书由该领域知名的国内外华人学者撰写,分别对粒计算基础理论、模型及典型应用等进行了深入的讨论。内容涉及粒计算思想与方法、高空间、相容粒度空间、覆盖、粒逻辑、粒计算的数学模型及研究方向、粗糙集及其扩展、不完备信息系统、概念格、粒计算在数据挖掘和控制中的应用等方面。

本书通过丰富的文献资料和研究成果,对粒计算的过去做了回顾,对现状做出了剖析,对未来进行了展望,充分反映出各章作者对所论述问题独到的见解。本书对粒计算的理论与应用研究具有重要的参考价值。

本书可供计算机、自动化、电子工程专业的高年级本科生、研究生、教师、研究人员与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

粒计算:过去、现在与展望/苗夺谦等编著.—北京:科学出版社,2007

ISBN 978-7-03-019570-8

I.粒… II.苗… III.人工智能—研究 IV.TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 121868 号

责任编辑:刘宝莉 周 炜 / 责任校对:朱光光
责任印制:刘士平 / 封面设计:王 浩

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2007 年 8 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2007 年 8 月第一次印刷 印张:24 1/4

印数:1—2 500 字数:470 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

前 言

近十年来粒计算 (granular computing, GrC) 一直是一个非常活跃的研究领域。它借鉴并拓展了自然科学和社会科学的很多研究成果, 并逐渐形成自己独特的理论。粒计算起源于人工智能、机器学习与数据挖掘、智能系统、粗糙集、商空间、概念格、模糊集等领域, 从更高层次上对这些结果进行综合分析, 强调对现实世界问题多视角、多层次的理解和描述, 从而得到对问题的粒结构表示。粒计算将结构化思维方式、结构化问题求解方法、结构化信息处理模式有机地结合在一起, 并导出其独特的理论、技术和工具。它的研究对自然智能、人工智能、问题求解及智能信息系统的设计与实现有着非常重要的指导意义。

中国学者在粒计算方面的研究一直处于世界领先地位。第一届 IEEE 国际粒计算大会于 2005 年在北京召开, 第二届于 2006 年在美国亚特兰大召开。从这两届大会的文献来看, 中国学者的文章占 2/3 以上, 其成果涉及粒计算的哲学、理论、方法和应用等多个方面。第一届中国粒计算研讨会将于 2007 年 8 月在山西太原召开, 这将是世界上第一个以本国学者为主的粒计算会议。《粒计算: 过去、现在与展望》将是本领域第一本由华人学者共同创作的专著。

本书总结了粒计算研究的主要结果, 详细地探讨了现阶段的研究课题, 并对未来的发展方向进行展望。本书章节顺序是根据各章内容的特点及为了方便读者阅读理解而编排的, 全书共 13 章, 大体分为三部分内容。第一部分为粒计算导论 (第 1 章至第 6 章), 主要涉及粒计算的基本概念与原理、商空间、相容空间及覆盖、粒逻辑、粒计算模型及研究方向等; 第二部分为粗糙集、概念格及其扩展 (第 7 章至第 11 章), 主要涉及几个有代表性的粒计算理论及模型, 其中包括粗糙集及其扩展、非完备信息系统、信息粒度与信息熵、概念格等; 第三部分为粒计算的应用 (第 12 章至第 13 章), 主要涉及粒计算在数据挖掘、控制中的应用。各章内容相对独立, 章节之间又紧密地连接在一起, 从基本理论入手过渡到具体的模型, 最后以实际领域的应用作为结束。更值得一提的是每个作者在总结前人成果的基础上给出了各自独到的见解。这本书既适用于理论工作者阅读, 又可以为应用人员提供参考。

本书的主要目的是进一步推动粒计算在中国的研究与发展, 特别是帮助在读硕士生、博士生及青年科研工作者进行粒计算的研究及应用。希望本书的出版能够增进学者之间的交流, 促进粒计算在中国的推广, 并为建立有中国特色的粒计算

研究贡献微薄之力。

本书是国内外华人学者共同努力的结果,感谢每一位为本书的编写和出版作出努力的人。特别感谢苗夺谦教授的博士生王睿智和姚一豫教授的博士生曾毅在本书的撰写过程中所做的大量辅助性工作。

由于时间仓促,书中不妥之处,恳请读者批评指正。

作者

2007年7月

目 录

前言

第 1 章 粒计算的艺术	1
1.1 引言	1
1.2 不同领域的相同结构和策略	3
1.3 粒与粒结构	6
1.3.1 粒	6
1.3.2 层次	7
1.3.3 分层结构	8
1.3.4 粒结构——多层次和多个分层结构的结合	8
1.4 粒计算的研究方法与方向	9
1.4.1 粒计算三角形	9
1.4.2 粒计算的三个层次	11
1.4.3 粒计算的三维描述	12
1.5 总结与展望	12
参考文献	14
第 2 章 商空间粒度分析方法	21
2.1 引言	21
2.2 商空间模型	22
2.2.1 模型的建立	22
2.2.2 商空间粒度的获得	22
2.2.3 商空间分析法	24
2.2.4 模糊商空间理论	24
2.3 商空间分析法应用的实例分析	25
2.3.1 统计启发式搜索方法	25
2.3.2 路径规划的拓扑方法	28
2.3.3 定性推理理论	29
2.3.4 商逼近与多分辨率的第二代小波分析技术	31
2.3.5 分形几何的商空间表示方法	33

2.3.6	基于商空间的机械装配规划方法	37
2.4	总结与展望	41
	参考文献	41
第3章	相容粒度空间模型及其应用研究	42
3.1	引言	42
3.2	粒度模型	43
3.2.1	基于近似和相容关系的粒度模型	43
3.2.2	层次和嵌套模型研究	46
3.3	相容粒	49
3.3.1	相容粒的定义	49
3.3.2	相容粒的转换函数	51
3.3.3	相容粒之间的关系	52
3.4	相容粒度空间模型	53
3.4.1	相容粒度空间(TG)	53
3.4.2	对象集系统(OS)	53
3.4.3	相容关系系统(TR)	54
3.4.4	嵌套相容覆盖系统(NTC)	56
3.5	相容粒度空间模型在信息分类中的应用	61
3.5.1	引言	61
3.5.2	信息分类中相容粒度空间的构建	62
3.5.3	相容粒度格	67
3.5.4	基于相容粒度空间的信息分类算法	68
3.5.5	算法分析及实验结果	72
3.6	相容粒度空间模型的其他应用	79
3.6.1	基于相容粒度空间模型的图像纹理识别	79
3.6.2	基于相容粒集的双层决策模型	80
3.7	总结与展望	81
	参考文献	81
第4章	基于覆盖的粒计算	83
4.1	引言	83
4.2	基本概念	84
4.2.1	Pawlak 粗糙集理论的主要结果	84
4.2.2	覆盖广义粗糙集的基本概念与性质	85

4.3 四类覆盖粗糙集模型	88
4.3.1 覆盖下近似运算	88
4.3.2 第一类覆盖粗糙集模型	92
4.3.3 第二类覆盖粗糙集模型	94
4.3.4 第三类覆盖粗糙集模型	96
4.3.5 第四类覆盖粗糙集模型	98
4.3.6 RH 与 CL 的相互依赖性	100
4.3.7 四类覆盖粗糙集模型之间的关系	101
4.4 初步应用	102
4.4.1 长城安全策略	103
4.4.2 林早阳模型	103
4.4.3 基于覆盖的方法	103
4.5 总结与展望	105
参考文献	106
第 5 章 Rough 逻辑公式派生的粒及其推理	112
5.1 Rough 逻辑	112
5.1.1 基本概念	112
5.1.2 Rough 逻辑公式的解释和赋值	113
5.1.3 Rough 逻辑公式的真值	114
5.1.4 Rough 逻辑公式的语义	114
5.2 Rough 逻辑公式诱导的粒运算	115
5.2.1 λ 包含运算	115
5.2.2 λ 相似运算	115
5.3 Rough 逻辑公式诱导的粒相关性质	116
5.4 Rough 逻辑公式诱导的粒推理	119
5.4.1 粒演绎推理	119
5.4.2 粒归结原理	119
5.5 Rough 逻辑公式诱导的粒应用	122
5.6 Rough 逻辑公式诱导的粒研究前景	124
参考文献	124
第 6 章 粒计算的数学模型与研究方向	127
6.1 什么是粒计算	127
6.2 范畴理论-论述的全集	129

6.3	研究的重点及方向	130
6.3.1	研究粒的基本数学结构	130
6.3.2	基本的研究方向	130
6.3.3	粒模型的例子	131
6.4	已知与接近已知的粒计算理论的范畴	132
6.4.1	粗糙集理论的三个观点	132
6.4.2	粒计算特殊模型的范畴	133
6.4.3	更深一层的粒计算模型的范畴	134
6.5	粒计算的几何/拓扑结构	135
6.6	粒计算的代数结构	136
6.6.1	二元邻域系统的粒结构	136
6.6.2	COV 的粒结构	137
6.7	新的近似理论	137
6.8	概念的结构与知识表示法	138
6.9	结论与展望	139
	参考文献	140
第 7 章	信息熵与粒计算	142
7.1	基于粗糙集理论的知识粒表示	142
7.1.1	知识粒度的定义	143
7.1.2	知识粒度、分辨度的性质	144
7.1.3	知识粒度、知识分辨度与知识熵之间的关系	145
7.2	知识粒在知识约简与决策树构造中的应用	146
7.2.1	知识粒在知识约简中的应用	146
7.2.2	知识粒在决策树构造中的应用	151
7.3	知识的粗糙性与信息熵的关系	154
7.3.1	知识粗糙性与信息熵的定义	154
7.3.2	知识粗糙性与信息熵的关系	156
7.4	知识的信息表示	160
7.4.1	完备信息系统中概念与运算的信息表示	160
7.4.2	相容决策表中概念与运算的信息表示	161
7.5	基于信息表示的知识约简	163
7.5.1	基于信息熵的信息系统知识约简	163
7.5.2	基于互信息的决策表知识约简	165

7.6	嵌套决策粒度与知识约简的关系研究	168
7.6.1	基本概念和定理	169
7.6.2	相容情形下嵌套决策粒度约简的关系分析	173
7.6.3	不相容情形下嵌套决策粒度约简的关系分析	173
7.7	总结与展望	177
7.7.1	本章总结	177
7.7.2	未来发展的展望	177
	参考文献	178
第8章	非完备信息系统的确定性与信息粒度	181
8.1	引言	181
8.2	非完备信息系统中的不确定性度量	182
8.2.1	非完备信息系统	182
8.2.2	非完备信息系统的偏序关系	184
8.2.3	信息熵	185
8.3	非完备信息系统中的信息粒度	190
8.3.1	信息粒度的公理化定义	190
8.3.2	信息粒度度量方法	190
8.4	非完备信息系统中熵与信息粒度之间的关系	199
8.5	总结与展望	200
	参考文献	201
第9章	随机粗糙集方法——信息粒度的定性与定量刻画	203
9.1	引言	203
9.2	可能性测度与模糊随机变量	204
9.2.1	模糊集与可能性分布	204
9.2.2	随机集与模糊随机变量	206
9.3	信任结构与信任测度	207
9.4	近似空间与近似算子	209
9.4.1	Pawlak 近似算子	209
9.4.2	广义近似算子	209
9.4.3	随机近似算子	210
9.4.4	随机粗糙模糊近似算子	211
9.4.5	随机模糊粗糙近似算子	212
9.4.6	t -模糊粗糙集	212

9.5	粗糙集近似与信任测度之间的关系	213
9.5.1	Pawlak 粗糙集	214
9.5.2	串行粗糙集	214
9.5.3	区间粗糙集	215
9.5.4	随机粗糙集	215
9.5.5	随机粗糙模糊集	216
9.5.6	随机模糊粗糙集	217
9.5.7	随机 tFF 模糊粗糙集	220
9.5.8	定理的证明	221
9.6	随机信息系统中的信任约简与似然约简	223
9.6.1	随机信息系统的概念	224
9.6.2	随机信息系统的知识约简	225
9.6.3	随机决策系统的知识约简	228
9.7	总结与展望	237
	参考文献	238
第 10 章	概念格约简泛化与概念粒逼近	243
10.1	基于形式背景的概念格约简	243
10.1.1	概念格理论简介	244
10.1.2	概念格属性约简的定义与性质	245
10.1.3	概念格约简判定定理	247
10.1.4	概念格约简方法	252
10.1.5	概念格的属性特征	256
10.2	基于形式背景的概念格泛化	260
10.3	基于形式背景的概念粒逼近	262
10.4	总结与展望	272
	参考文献	273
第 11 章	概念格与粒计算	275
11.1	形式概念分析基本理论	275
11.1.1	形式背景和概念	275
11.1.2	概念格及其表示	276
11.2	概念格的生成与运算	277
11.2.1	批生成算法	277
11.2.2	渐进式生成算法	278

11.2.3	概念格的并运算	279
11.2.4	概念格的合并算法	281
11.2.5	概念格交运算	283
11.2.6	概念格的运算定律	285
11.2.7	概念格的粒性质	285
11.3	概念格上的关联规则提取	286
11.3.1	基于先辈晚辈节点对的关联规则提取	286
11.3.2	基于内涵缩减的蕴含规则提取	288
11.3.3	规则的粒性质	288
11.4	模糊概念格	289
11.4.1	一种模糊概念格模型	289
11.4.2	模糊概念格的生成	290
11.4.3	模糊概念格的粒性质	292
11.4.4	模糊关联规则的提取	293
11.4.5	模糊概念格上的聚类	294
11.5	总结与展望	297
	参考文献	297
第 12 章	数据挖掘中的粒计算	299
12.1	数据挖掘概述	300
12.1.1	数据挖掘简介	300
12.1.2	数据挖掘的主要方法	301
12.1.3	数据挖掘的发展状况	301
12.1.4	数据挖掘研究中的挑战问题	303
12.2	不同应用环境下数据挖掘中的粒计算	303
12.2.1	海量数据处理中的粒计算	303
12.2.2	分布式数据处理中的粒计算	305
12.2.3	多维数据处理中的粒计算	307
12.2.4	动态数据处理中的粒计算	308
12.3	数据挖掘方法中的粒计算	308
12.3.1	广义知识挖掘	309
12.3.2	关联规则挖掘	309
12.3.3	类知识挖掘	310
12.3.4	预测型知识挖掘	314

12.3.5 特异型知识挖掘	314
12.4 粒计算数据挖掘研究中需要进一步解决的问题	315
12.4.1 粒计算数据挖掘方法的优势	315
12.4.2 有待进一步解决的关键问题	315
12.5 总结与展望	318
参考文献	319
第 13 章 粗糙控制与粒计算	324
13.1 粗糙集理论在控制领域中的应用	324
13.1.1 粗糙集理论在智能控制中的应用	324
13.1.2 几点看法	326
13.1.3 粗糙集理论的主要研究方向	328
13.1.4 粗糙模糊控制系统设计	329
13.1.5 降维多层粗模糊控制系统的设计	335
13.1.6 基于粗糙集理论的火电厂单元机组过热汽温控制	338
13.1.7 基于粗糙集理论的火电厂单元机组负荷模糊控制	341
13.1.8 基于粗糙集理论的火电厂锅炉燃烧诊断	343
13.1.9 粗糙集在倒立摆控制系统中的应用	347
13.2 粒计算在控制系统中的应用	352
13.2.1 基于粒计算的粗糙集知识约简	352
13.2.2 利用粒计算建立火电厂过热汽温系统模型	354
13.2.3 利用粒计算建立煤气加热炉模糊预测模型	358
13.3 粗糙控制和粒计算展望	364
参考文献	365
附录:粒计算中文学术文献	370

第 1 章 粒计算的艺术

1.1 引 言

粒计算是一门飞速发展的新学科。它融合了粗糙集、模糊集及人工智能等多种理论的研究成果。短短 10 年的发展已经见证了它对科学特别是计算机科学的作用和影响。诸多学者就粒计算的基本理论和方法做了大量工作,但为粒计算下一个正式的、精确的、能够广为接受的定义仍然是一件困难的事情。虽然如此,仍然可以从问题求解及实践中提取出一些通用的理论和基本要素^[1]。人们对粒计算的描述是建立在对它的直觉认识上的,粒计算是研究基于多层次粒结构的思维方式、问题求解方法、信息处理模式及其相关理论、技术和工具的学科。

在我国,粒计算的研究已引起众多学者的关注与兴趣。本章的参考文献比较全面地收录了近年在国内期刊发表的粒计算方面的文章。包括,基于商空间理论的粒计算模型^[2],模糊商空间及粒计算的商闭包空间模型^[3~6];粒计算的覆盖模型,粗糙集与粒计算的交叉问题的研究^[7,8];粒、规则与例外的关系^[9~12];粒计算的理论、模型与方法的探讨^[13~18];基于 Dempster-Shafer 理论和粗糙集的近似和知识约简^[19~22];几种基于覆盖粗糙集的粒计算模型^[23~25];粒逻辑及其归结原理^[26~30];基于关系的粒计算模型,粒化思想在图像的纹理识别上的应用^[31~34];基于相容关系的粒计算模型,粒计算在进化计算、机器学习中的应用^[35~39];使用粒计算进行知识获取的方法^[40];基于泛系理论的粒计算模型^[41~43];使用粒分析来描述、刻画粒计算的思考等。

粒计算的基本思想、原理和策略出现在不同的学科和领域里^[44~46]。本书的其他章节对粒计算的模型和方法有详细的讨论。因此,本章不讨论具体某一个理论、方法、工具或应用,而更侧重于把粒计算作为一个独立的学科进行研究。本章主要解决以下几个问题:

- (1) 为什么要研究粒计算?
- (2) 粒计算的独特性在哪里?
- (3) 对粒计算的研究应该从哪些方面着手?
- (4) 粒计算和相关学科的联系是什么?

(5) 粒计算对科学及计算机科学的贡献在哪里?

对上述问题的解答既体现了粒计算研究的必要性,又澄清了适于用粒计算进行求解的问题,继而明确了粒计算的研究方向和目标。

研究粒计算有许多原因。其一是一致性:现实世界充满了结构和层次,它们体现在各种自然系统、社会系统和人工系统之中。因此,人们对现实世界的感知、理解、解释和表示也是有结构、分层次的。Zadeh 将人类的认知能力概括为:粒化、组织和因果推理^[46]。粒化是将一个整体分割成部分,每个部分是拥有相同、相似性质的个体的集合。组织是将松散的个体联在一起,形成有着内在联系的整体。因果推理是找出原因与结果之间的必然联系。粒计算模型应该能够描述这三种能力。因而粒计算的结构和现实世界的结构、人们的思维模式及行为方式是一致的。其二是系统性:粒计算的结构提供了对所解决的问题多视角、多层次的理解、概括和操作。作为一个整体,粒计算提供的思维模式和行为方式是系统的、完整的。其三是简化性:粒计算提倡对问题进行不同层次的抽象和处理。在抽象过程中,可以只重视主要特性而忽略不相关的细节,从而达到对问题的简化。其四是灵活性:粒计算的结构允许人们在不同的时间、不同的情况下,将注意力集中在不同的层次及层与层之间的自然过渡上,缩放和转承是灵活多变的。其五是有效性:用粒计算指导的思维模式和行为方式将复杂问题分解成若干小问题。这种分而治之的方法是非常实用的,可以运用到不同的领域。其六是经济性:粒计算寻求在不同粒度上的近似解。这样的方法可以提高效率、降低成本。其七是容忍性:通过使用不同信息粒度,粒计算可以容忍不确定、不完全或有噪音的信息,从而获得具有鲁棒性的解决方案。

粒计算借助于其他学科的哲学思想和方法论,并将它们抽象成为与具体领域无关的方法和策略。它的独特性体现在用系统的、结构化的理解和方法来解决复杂问题。对复杂问题的全面理解通常是多视角的,从每一个视角着眼的理解又是多层次的。由此可以得出,粒计算的过程就是对复杂问题的求解过程。它的结果表现为一个多视角、多层次的粒结构。这个粒结构是对此复杂问题的系统且近似的描述和解答。

对粒计算的研究应该着眼于三个观点:粒计算的哲学思想观点、方法论观点及计算模式观点。从哲学思想观点考虑,粒计算试图将人类的认知方式抽象化、形式化,从而提炼出结构化的思维模式;从方法论观点考虑,粒计算着重研究系统化的方法和技术,将问题求解的过程规范为结构化的、自上而下的逐步求精过程;从计算模式观点考虑,粒计算关注于结构化的信息处理。信息处理是有层次的,其研究领域涉及抽象的信息处理、人脑中的信息处理及计算机中的信息处理。计算模式是方法论的具体表现形式。在计算机学科中,人们通常将兴趣集中在基于计算机的信息处理模型上,并将其独立出来进行分析。粒计算的三个观点可以用三角形

来表示,也可以用层次结构或三维空间模型来描述。对粒计算的研究本身也是多视角、多层次的。

对于问题(4)和(5)的解答,在1.2节详细介绍。

1.2 不同领域的相同结构和策略

粒计算的形成综合了许多学科的研究成果。为了对其有一个更深入的了解,首先考察粒计算思想及其艺术在不同学科中的体现。

概念形成及学习是人类最基本的活动之一^[47]。概念是人类知识的基本单元。通常,一个概念对应一个自然语言的单词或词组。一个概念既可能是另一个概念的子概念,同时又可能包含许多子概念。这就决定了人类的语言也需要符合分层结构,这样才能准确地描述知识;它同时也决定了人类的记忆也需要符合分层结构,这样才能准确地存储知识^[48]。人类的知识结构是一个分层结构^[49,50]。对概念的学习和知识的积累在很大程度上依赖于对概念之间内在联系的挖掘和整理。形式概念分析^[51~53]就是一个具体的描述概念层次结构的方法。

粒化及聚类是另一种对知识进行总结概括的方法。一个类可以理解为一个特定概念的实例集合,它是考虑问题的基本单元。同样,一个类既可能是另一个类的子类,同时又可能包含许多子类。聚类分析是这种思想的具体实现^[54],它通过比较对象间的相似程度,把最接近的对象归并成类,对给定的数据集进行层次的分解。具体又可分为“自底向上”和“自顶向下”两种方案。例如,在“自底向上”方案中,初始时每一个数据记录都组成一个单独的组,在接下来的迭代中,相互邻近的组合成一个组,直到所有的记录聚成一组或者某个条件满足为止。

社会网络由人和不同大小的社会群体组成。每一个群体既可能是另一个群体的子群,同时又可能包含许多子群。社会网络分析^[55,56]注重对社会结构进行分析。社会结构是人与人之间关系的一种基本的客观现象,具体表现为人与人、人与群体及群体与群体之间的联系,它可以由婚姻关系或血缘关系定义,可以用权力结构进行分析,也可能反应社会中人与人之间的某种联系(如工作关系、朋友关系等)。对社会网络的结构化分析有助于人力资源管理和信息资源管理,提高组织中的协作、知识创新和信息传播。

修辞与写作也必须注重结构且言之有序^[57~60]。词语组合成句子,句子组合成段落,段落构成整篇文章。文章的结构是由段落层次及它们之间的连接转承关系组成的。文章段落是表达一个完整的意思而相对独立的单位。划分段落的原则是要注意内容的单一性和完整性。一个或若干个段落形成一个层次,层次中的每一个段落围绕一个问题展开讨论。一篇文章的中心思想往往要分几层意思才能表达清楚。层次的安排标志着文章内容展开的步骤和次序。安排段落层次需要分清先

后主次,理清来龙去脉,使思想和观点能有步骤地展开,并连贯成为一个整体。

结构化程序的基本组成是程序模块,多个程序模块形成分层结构。结构化程序设计的特点可以概括为:分层设计、初始设计独立于具体语言、细节延后到较低层次考虑、逐层形式化、逐层验证和逐步求精。由此可以概括出结构化程序设计的核心思想:自顶向下、逐步求精。程序从最顶层开始,每一个层次逐步精细化、形式化,并对每一个层次进行验证,直到整个程序设计完毕^[61~63]。

数学证明需要遵循严谨的逻辑结构。一个结构化的数学证明可以按照自上而下的思维模式分层展开。每一层次自成体系,包含一个论点,其证明又在更低一层具体化。整个过程循序渐进,直到证明完成^[64,65]。

概念形成及学习在理论上决定了一个易于被人们理解的问题的求解方法只能是结构化的、有层次的。例如,与人类记忆有关的组块理论^[48]揭示了在写作中人们为什么会采用分层结构^[58,59]。若将文章比作一个随着时间演变的复杂系统^[60],则复杂系统的分层结构^[66]可以用于写作过程当中。另一方面,程序设计的风格又受到一般写作的影响,而结构化程序设计思想又反过来影响结构化数学证明^[64,65]。

从这些具体例子可以看出,客观世界可以用不同粒度的结构来有效描述。因此,人们对世界及实际问题的理解和解决是粒化和多层次的;知识结构是粒化和多层次的;用来交流知识的自然语言也是粒化和多层次的。基于这些认识,可以发现 Hawkins 所提出的人脑概念模型可能会对粒计算有一定指导意义^[67]。人脑的结构是由无数个神经元及其之间的联系组成的,整个人脑又分成不同区域。从概念上讲,这些区域的联系构成一个多层次的结构,信息可以有效地进行上下传递。Hawkins 用这样一个大脑皮层的分层结构建立了一个基于记忆的预测模型^[67],它可以用来解释人类的自然智能。最重要的是,大脑皮层的分层结构自然地映射了自然世界的分层结构。从这个意义上讲,基于粒化和多层次研究的粒计算是非常自然的和重要的。

作为跨学科的研究,粒计算需要综合不同研究领域的成果。例如,

- 商空间^[3~6]
- 粗糙集^[68~70]
- 模糊集^[46,71]
- 知识空间^[72]
- 因素空间^[73~75]
- 聚类分析^[54]
- 形式概念分析^[51~53]
- 自然计算(nature-inspired computing)和自主计算(autonomy-oriented computing)^[76,77]

- 计算机程序设计^[61~63,78]
- 问题求解^[79~81]
- 共同研讨(synecotics)^[82]
- 分层理论^[66,83~86]
- 一般系统理论^[66,87,88]
- 社会网络分析^[55,56]
- 人工智能^[2,67,89~91]
- 学习^[47,92~95]
- 信息处理^[44,96,97]
- 修辞与写作^[57~60]
- 研究方法论^[98,99]
- 教育学^[50,72]
- 认知科学和认知心理学^[100,101]
- 哲学及科学哲学^[49,102]

在上述具体学科和领域中,虽然结构的组成成分有着不同的名称和不同的内容,但实际上是统一的。结构是一个被广泛运用的概念。在物理学、化学、生物学、心理学、数学、美学、社会学、管理学中都有结构的具体体现。《现代汉语辞典》对“结构”的解释是:“各个组成部分的搭配和排列”。这里的“搭配和排列”不是盲目堆砌,而是有机组合。即各个部分不是彼此孤立的,而是具有密切的联系,表现为互相依赖、互相制约。任何事物都可以理解为几个部分的有机组合。从这个意义上讲,不同学科中的“结构”概念是统一的。

粒计算的理论建立在对以上各个领域的共性进行概括、总结和整理之上,形成了对问题求解的普遍适用的原理、方法和策略。在过去的若干年中,许多学者对粒计算的具体模式和方法进行了研究。同时和粒计算原理相似的研究还在不断地出现,只是在不同的领域中运用了略微不同的名词和术语。将粒计算作为一个独立的学科研究可以防止这种不必要的重复劳动。

作为一个新兴的研究领域,粒计算是一门关于问题求解的艺术。它有着两项特殊的任务:其一是从各个不同的领域中概括出它们的共性,不考虑它们低层次上的差异,从而提炼出抽象的、高层次的、综合的认识;其二是将特定领域中隐含的结构明确化,以期总结出独立于具体领域的普遍原理。

粒计算之所以新且独特,并不完全在于一组具体的方法和策略,而在于提出一个统一的框架,对这些方法和策略进行全面的理解及综合。通过对粒计算的研究,试图达到以下目标:

- 将隐式的结构显式化。
- 将不明显的原理显化。

- 将特定领域的特殊原理普遍化。
- 将下意识的行为变成有意识的行为。

通过粒结构将知识和系统合为一体。由此产生的结果是,人们能将普遍适用的粒计算哲学有意识地运用到各自面对的问题中去,从而对问题进行更有效的求解。同时,对高层次的粒结构的认识可以防止人们对相同、相似理论和方法的重复发现和发明,避免浪费精力。

1.3 粒与粒结构

粒计算研究的对象所具有的结构称为粒结构,其组成元素包括粒、层次及分层结构。本节重点介绍粒计算的基本构成,并对粒的定义进行阐述。

1.3.1 粒

基本粒并没有一个十分确切的定义。我们可以称最小的、不可或不需要再分解的粒为基本粒。Simon 列举了许多学科中的基本粒^[66]: 在物理学中,以前人们认为原子是基本粒,而核物理学家把其作为复杂系统。在天文学中,整个星球甚至整个银河系可以被视为一个基本粒。在某些生物学研究中,细胞被作为基本粒,而在另一些研究中,一个蛋白质分子被作为基本粒。

粒具有双重身份,既可以是某个整体的相对独立的一个部分,又可以被看作是由其他一些粒组成的整体。因此,每个粒具有三个属性,即内在属性、外在属性及环境属性。当粒作为一个整体时,考虑其内在属性,粒的内在属性由它所拥有的元素决定。当粒作为一个部分时,考虑其外在属性,粒能够直接被感知、被认识的原因在于其所属的外在属性。粒的环境属性是指它对动态变化的环境的应对方式,对其内在属性、外在属性的保持和调整及对外部环境的影响和回应。

粒的双重身份决定了它的内在属性通常需要强调其所包含细小个体的不同特性,通常是对它内部各个基本组成成分性质的描述,而其外在属性需要强调它作为一个整体的综合特性。Simon 曾经用一个例子解释了粒的双重身份及粒的内在属性、外在属性之间的关系^[66]。可以想象一座办公楼,这座大楼是由很多楼层组成的,每个楼层又包含了很多房间,每个房间又被分成小的办公区域。相对于整个社区环境,这座大楼是一个整体,是一个粒,它的外墙及外形设计就是它的外在属性。相对于更细小的组成成分,这座大楼是复杂的分层结构,它的内部组成和划分就是它的内在属性。从各个局部看,每个办公区域的温度、湿度、人员密度不尽相同。因而显示了粒的内在属性的多样性。从总体看,整个办公楼形成一个相对稳定、相对封闭的内环境,从而区别于外环境。

1.3.2 层次

粒存在于特定的层次中,它们是该层次上研究的主体。人们在粒计算的不同层次中研究不同类型的粒,这些粒之间是有联系的,同一层次的粒与粒之间可以是不相交的关系,也可以是交叠的关系。层次中每一个粒表述了一个特定的粒化观点。同一层次的所有粒形成了对此层次的覆盖。所有的粒化观点相互补充、相互呼应,完整表达了在这个层次上对一个问题的描述。每个层次同样具有内在属性、外在属性及环境属性。同一层次的粒的属性共同体现了本层次的特性,处在不同层次之间的粒按照序关系排列,相互连接在一起。

在描述一个具体系统或者解决一个具体问题,至少需要考虑清楚以下的问题^[83,84,103,104]:

- 层次是由什么产生的?
- 需要多少个层次?
- 为什么层次是离散的?
- 什么将层次分割开来?
- 什么将层次连接在一起?
- 层次之间如何交互?

上述问题,如果不以某一个具体的系统为背景或结合某个领域的知识,是无法给出令人满意的答案的,有些问题甚至根本无法回答。下面通过讨论抽象出层次的一些共性,为回答上述问题提供一些参考。

层次的抽象性。抽象是分层次的,对现实世界问题的理解粒度也是分层次的,不同的抽象层次可以表示不同粒度的粒化观点^[2,90,105]。

层次的约简性。层次的约简问题涉及哲学中的还原论。还原论指出,如果想要完全地理解和解释一个现象,可以首先将其简化为若干个组成部分或者更为基础的、基本的要素,通过对这些组成部分和要素的理解来获得对整体的理解^[106]。约简将处于较高层次实体的规则派生到与它邻近的处于较低层次的实体上。

层次的控制性。在很多社会系统及其分层结构中,每个层次对它的下属层次具有控制性。粒计算所研究的层次也具有控制性。较高层次控制较低层次,而较低层次受控于较高层次。

层次的细节性。细节也是粒计算的层次中很重要的概念。在信息系统的实现中,层次的细节具有非常重要的作用^[97,104]。计算机软件系统通常是在设计中加入更多的细节,采用自顶向下、逐步求精的方法进行设计和实现的。

较高层次包含较低层次,或者由较低层次组成。较高层次为较低层次提供背景和约束。较高层次一般由具有较高集成度和较高结合力的粒组成^[103]。每一个层次都存在某种程度上的独立性。任意两个层次之间的连接和交互是通过偏序关

系的传递性和桥接原理来表示和体现的。

1.3.3 分层结构

分层结构由若干个层次组成,层次间的递进反映了由表及里、由抽象到具体、由粗糙到细致、由笼统到具体的变化。这种递进是有序的,高层次会对低层次进行约束,并为低层次的描述提供背景。一个高层次的粒可以分解为若干个低层次的粒。相反,若干个低层次的粒可以组合成一个高层次的粒。低层次的粒为高层次的粒提供更详细的描述或者更多的信息。另一方面,高层次的粒将与本层次不相关的细节忽略掉,为低层次的粒提供粗粒度的描述。

需要强调的是,分层结构既是对一个问题系统的描述,同时又是近似的描述。如果说整个问题是由无数细小的部分组成,那么对它的粒、层次及分层结构的描述并不是唯一的。粒与粒的分离、层与层的递进、粒对于层的归属、层对于粒的约束都不是确定的、一成不变的。在构建一个分层结构时,既需要考虑层与层间的纵向分离和联系,又要考虑每一层中粒与粒间的横向分离和联系^[66,87]。

1.3.4 粒结构——多层次和多个分层结构的结合

在粒计算研究中强调的是全面、整体的观点,而不是局部、离散的观点。想要达到这个目标,不但要考虑一个分层结构中的多层次,还需要考虑多个分层结构。Jeffries 和 Ransford 给出社会阶层研究中多个分层结构的例子^[56]。

可以基于序关系的多种解释为一个系统构造出多个分层结构。每一种分层结构都基于对序关系的一种特定解释。每一种分层结构都表现了整个系统的一个特定方面,所以可以通过多个分层结构对系统有多角度的、更深刻的认识。在一种特定的分层结构中,层次表现的是局部的观点,它们通过桥接原理连接在一起形成全面的观点。可以在分层结构的不同层次上研究这个系统。

系统或者问题的多分层结构可能是由多个其他分层结构组合而成的,也可能是由一个分层结构分解而成的。有时候,一个层次可能是由很多小层次构成的分层结构,可以将这些小层次组合成一个分层结构,并表示在一个层次内。这种组合和分解的过程将多个分层结构连接在一起。所有的分层结构实现了对现实世界的多视角、多层次、广范围的分析 and 揭示。

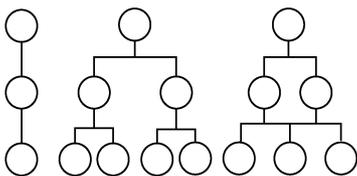


图 1.1 粒结构的形式

粒结构的形式包括:直线型、树型和网络型,如图 1.1 所示。图中的圆形表示粒;同一高度的粒形成一个层;一个多分层结构是对一个问题系统的、近似的描述。

从哲学角度来说,人们可以利用粒计算的结构来观察和解析现实世界的事与物。这

种分点分层的抽象,多层次、多角度的阐述是对事物的完整把握。在具体应用中,人们可以立足于某一个感兴趣的点、层或视角进行详尽分析;也可以在点、层或视角之间进行切换,调整和完善自己的理解。因此,粒计算成为人们解决问题的一种哲学思想和方法论。它不仅指导问题求解,而且影响着智能系统的设计与开发。

1.4 粒计算的研究方法与方向

粒计算的形成和发展积累了多种思想、模型、范式、方法论、技术及工具。作为一个有待阐释的术语,对粒计算的研究可以从不同观点着手。现有的粒计算研究可以概括为三个主要观点,即结构化思维、结构化问题求解和结构化信息处理。它们相互关联,又自成体系,形成了粒计算特有的三角形。

1.4.1 粒计算三角形

在粒计算三角形中(如图 1.2 所示),哲学思想偏重思维的结构化,方法论注重问题求解的结构化,计算模式强调信息处理的结构化。多层次粒结构把这三个观点紧密地结合在一起,形成了研究粒计算的三个观点。

1. 结构化思维

结构化思维强调了对粒计算的哲学思想的研究。思维本身既是问题求解的必经过程和必要手段,也是人脑对信息进行筛选、分类比较、整理归纳的复杂处理。结构化思维是人类智能的重要体现形式,对设计基于知识的信息系统有重要影响。

粒计算理论与一般系统理论^[66,87]有着密不可分的关系。粒计算的出现和几十年前系统理论的形成有着相同的缘由,它们都试图探索和阐述不同学科的共同结构和原理。粒计算的基本假设是:其一,所有的问题都可以视作是其内在要素之间的网络状或分层结构的关联;其二,所有的问题都有着类似的模式和特征。

粒计算将还原论和系统论两种用于现实世界中复杂问题求解的哲学观点结合在一起,形成互补。其强调分层结构在人类思维中的重要作用。还原论认为复杂系统或问题可以分解为较为简单的或更为基础的部分,每一部分还可以根据具体的问题进行进一步分解。人们可以通过对部分的认知形成对整个系统或问题的理解。也就是说,人们可以仅通过部分所具有的属性演绎出整个系统的所有属性;而系统论则通过部分之间的连通、关系和环境,将重点转移到整体^[87,88]。在系统论中,复杂系统被认为是由相互连接、彼此交互、组织严密的部分组成的有机整体。

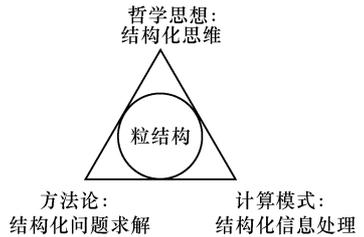


图 1.2 粒计算的三角形

虽然任何的部分并不具有整体所拥有的属性,但是整体的属性是通过部分之间的交互和关系显现出来的。

还原论和系统论在对复杂问题建模时采用的都是整体和部分的观点,但是对如何使用部分进行推理却持有不同的看法。粒计算通过两者共有的分层结构将还原论和系统论统一为问题求解的结构化思维。

2. 结构化问题求解

结构化问题求解研究粒计算的方法论。张玲和张钹^[2,6]对这个问题有系统和详细的论述。最近 Kramer 探讨了基于多层次的抽象思维和抽象技能与问题求解的关系^[107]。从粒计算三角形的角度来看,抽象思维与哲学思想有关,抽象技能与方法论有关。

粒计算不仅是一种理论,更是一种实践。粒计算的结构化思维哲学思想只有当其与具体实际问题相结合,变成人们认识世界和改造世界的方法和策略时,其价值才能真正显现出来。一方面要使粒计算的结构化思维的普遍原理为现实生活的实践服务,解决各种问题;另一方面又要使粒计算的结构化思维在实践的基础上得到丰富和发展。

问题求解需要一个逻辑化、结构化的思辨过程。具体来说,结构化的问题求解需要解决两个任务:一是构建问题的粒结构;二是在此粒结构中进行问题求解。在某些情况中,这两个任务的分界并不清晰。通常它们紧密联系在一起,需要综合考虑。

粒计算的基本任务之一:构建粒结构。一个具体问题将被分解成若干个小问题。对整个问题的理解被分解成对此问题的不同层次的具体分析。一个粒结构的构建可以运用近似分解、松散耦合的原则,采用自上而下或自下而上的方式。对粒结构的查询和操作可以是深度优先或广度优先,也可以由用户来选择。

粒计算的基本任务之二:选择聚焦点。选择聚焦点时既要有全局观念,又要有对局部问题深入研究的能力。在特定的时间,对于一个特定的粒或层次,人们应该制定切实可行的方法。每个聚焦点既相对独立,又和周围环境相互关联。应该具有对问题的抽象能力,将相关因素剥离出来,将不相关因素忽略不计。

粒计算的基本任务之三:切换聚焦点。这需要在不同分层结构、不同层次、不同粒之间实现切换及信息传递。自顶向下的方式有助于从大问题到小问题的分解,而自底向上的方式有助于从小问题到大问题的聚合。

3. 结构化信息处理

结构化信息处理注重以计算为主的问题求解。Bargiela 和 Pedrycz 在文献 [44]、[108]中对这个问题的系统和详细的描述。最近,Wing 提出了计算思维的

观点^[109],将结构化思维和结构化信息处理紧密联系在一起。她认为计算机科学家所采用的计算思维方式可以推广和应用到不同学科,这就需要不同抽象层次的思维。

基于 Marr 关于人与计算机视觉的研究^[97],结构化信息处理的两个基本要素是表示和处理。这两个要素对于整个信息处理过程来说都非常重要。这是因为表示是对问题的本质和内部结构的描述,而处理为问题的求解提供了具体的过程和方法。它们是人类进行思维和行动的基础。这两方面都既可以从语义的角度进行研究,也可以从算法的角度研究^[1,44,105,110~114]。

信息处理是问题求解的一个特例,它本身并不一定需要由计算机完成。信息处理至少可以分成抽象的、人脑中的和计算机中的信息处理三种形式。其中抽象的信息处理与粒计算哲学思想密切关联,构建对信息的粒结构分析;人脑中的信息处理遵循粒计算的普遍方法论,涉及诸如信息粒化的原则,粒、层次及分层结构的特征与表达等诸多问题;计算机信息处理强调算法及信息在计算机中的存储、计算、显示、切换和传递。

可以将粒计算这一观点的研究视作将其运用到计算机所擅长的信息处理领域的具体应用。它遵循粒计算的哲学思想和方法论,同时又发挥计算机特有的准确性、可靠性和高效性,从而有力地支持前两者。

1.4.2 粒计算的三个层次

粒计算的三个研究观点之间还存在着层次关系。其中,结构化思维作为其哲学思想指导处于最高、最抽象的层次;结构化问题求解作为方法论处于中间层次;结构化问题求解可以进一步用结构化信息处理实现,因而结构化信息处理处于阶梯层次的底部,如图 1.3 所示。这样的层次结构反映了哲学思想、方法论及计算模式的关系。如果把粒计算研究作为一个实际问题,那么它也可以从以上三个层次求解。

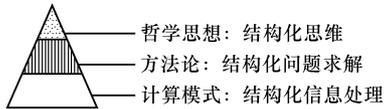


图 1.3 粒计算的三个层次

粒计算的哲学研究基于粒结构的思维方式。相关的问题包括:如何定义粒、层次及分层结构的内在属性、外在属性和环境属性;如何定义它们的关系;如何准确表述它们的关系;如何实现它们的关联和切换;如何使它们的综合功能最大化。哲学层面的研究是抽象的,同时又是方法论和计算模式的前提和保障。

粒计算的方法论致力于将粒计算哲学思想具体到问题求解的方法、技术和工具的研究和开发中去。需要考虑到粒计算方法的有效性、可靠性、准确性、简便性、计算成本和价值。对于不同的应用,还需考虑其问题的特点及限制。

粒计算的信息处理强调以计算机为主体的信息处理与以人为主体的信息处理

的差别。一方面,以计算机为主体的信息处理依靠人来制定、设计、实施和优化;另一方面,计算机的信息处理也促进方法论的研究。粒计算的哲学思想和方法论的完善为计算机的信息处理实践提供了可以依据的准绳和保障,计算机的信息处理实践反过来也会促进对粒计算哲学思想和方法论的研究,成为支持粒计算哲学思想的有力证据和改善粒计算方法论的原动力。

用层次结构描述对粒计算的研究有一个欠缺,即层次所表达的渐近关系容易使人们误认为方法论是研究粒计算的哲学思想和计算模式的桥梁,从而忽略了计算机技术的独立性和特殊性。

1.4.3 粒计算的三维描述

在信息检索中,向量空间模型将每一个文献表示为多维空间中的一个点^[115]。借助这个观点,还可以从三维空间的角度对粒计算三角形进行描述,如图 1.4 所示。哲学思想和方法论可以运用到信息处理过程中去;哲学思想和计算模式可以运用到问题求解中去;方法论和计算模式相互补充、完善。

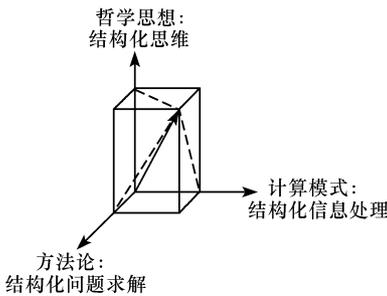


图 1.4 粒计算的三维空间描述

粒计算的三维描述有利于对现有的粒计算研究进行清晰的描述和划分。对于一个特定的研究,可以把它形象化地想象成一个向量。它在三维空间有三个投影,其长度分别标志着在相应的三个观点的贡献。这种表达方式和信息检索中用向量方法表示文献是一样的。相对粒计算三角形来说,粒计算的三维描述不仅可以对特定的研究进行定性分析,还可以进行定量分析。当然,这个量化分析并不容易实现。

1.5 总结与展望

本章尝试回答了粒计算的几个基本问题,包括粒计算的描述,粒计算的粒结构及其特点,粒计算的作用、任务和贡献及粒计算与诸多相关学科的关系。粒计算的功能是对一个特定问题作出系统的且近似的描述。它的结果表现为一个多视角、多层次的粒结构。它对科学特别是计算机科学有着重要的作用和影响。作为一个独立的学科,对粒计算的研究主要可以从它的三个观点进行,它们是结构化思维、结构化问题求解和结构化信息处理。这三个观点可以简化表述为粒计算的三角形。根据三个观点的内在联系,也可以用层次结构或三维结构来描述对粒计算的研究。

本章的最后对粒计算的发展,特别是在我国的发展,阐述一些观点。希望能借此促进粒计算的进一步发展。

(1) 在讨论老年人和年轻人的关系时,诺贝尔获奖者 Lorenz 曾经精辟地指出:老年人总是强调传统,而年轻人总是追求时尚。对于文化的发展,传统和时尚都是必需的,这正如遗传的连续性和变异性是物种延续和发展必不可少的条件。没有变异和创新,系统则成了活化石,无以为继;没有传统,新系统则成了无源之水、无本之木,成了让人们难以接受的怪物。一个健康的、持续发展的物种或文化依赖于新和旧的有机平衡^[116]。这种思想对粒计算的研究有同样的指导意义。粒计算是一个新兴学科,它既与诸多学科相关又有它的独特性,因而难免与现有学科有些冲突。这就要求在已有的理论、经验和长处与创造性的新哲学和新方法论之间寻求一个相对的平衡。一方面,需要广泛借鉴、吸收和继承诸多相关学科所长;另一方面,又不能囿于固有思维和模式,需要启用开创性思维,发扬和挖掘粒计算自身的特色。对粒计算的研究是对传统和创新的有效结合,创造出新的平衡。

(2) 本章讨论了粒计算的三个观点。应该指出的是,现有的研究对粒计算的哲学思想及方法论的考察并不深入,而主要局限在对其信息处理技术的探索,尤其是以计算机为基础的信息处理技术及其数学模型的探索。Bolton 曾指出:对于一项研究,如果不能首先正确理解和定义相关概念和范围,技术的严密性并不能避免片面的、平凡的,甚至错误的结果^[47]。虽然他的观点是就概念形成这一研究而言的,但也同样适用于粒计算研究。粒计算应该是集哲学思想、方法论、计算模型及应用为一体的研究。局限于某一方面的研究显然是不全面的。一方面,应该深入了解和探索粒计算的数学模型;另一方面,应该对这个学科有全局的理解,不能偏废任何一个观点。一个完美的数学模型是非常重要的,但是并不一定能保证对它的理解和应用是正确的。需要认真地研究数学对一个学科的整体指导作用,而不仅仅追求一个复杂且优美的数学模型。换言之,构建数学模型并不是最终目的,而是解决问题的一个必要手段。仅有数学模型是不够的,还需要清楚地认识这个数学模型在整个学科研究中所扮演的角色。关于数学在研究中的两重性,可以引用王珏的阐述:数学不是万能的,没有数学是万万不能的。

(3) 科学的发展既是一个社会过程又是一个认知过程。一个学科的研究人员构成一个科学团体,他们之间的交流将促进思想的传播,这将是学科发展的源泉^[117]。学科的发展和建设需要健康的科研和人文环境。在此环境中,研究人员可以建立自己的理论,承认、借鉴和发展他人的学术成果,交流彼此的心得体会。这样可以形成不同的、各有特色的学派。粒计算的艺术和思想可以加快对这个学科的建设。本书也可以看作是在此方面做出的努力。从粒计算的角度看,本书的每一个章节都有它自己多层次的粒结构,全书则是更高层次的描述。组合到一起,可以得到对粒计算研究的多视角、多层次的较为全面的探讨和综合论述。

本章扩充和完善了文献[118]中的观点,概括地讨论了粒计算的一些基本问题。为了使读者能对粒计算有一个森林层面的认识,没有具体对这个森林中的每一个类或每一棵树进行详细论述。因此,给出了一个较长的参考文献目录,其中某些文章并没有在正文中明确引用^[119~158],但它们和粒计算的联系非常紧密,希望能对这一缺陷有所补充。

致谢

在本章撰写过程中,从中文输入、文献整理到最终定稿,赵雁、曾毅和王睿智给予了热心帮助,在很多地方采用了他们的观点;苗夺谦教授和王国胤教授给予了很多支持,在此一并表示诚挚的谢意!

参考文献

- [1] Yao Y Y. Perspectives of granular computing // The 2005 IEEE International Conference on Granular Computing, Beijing, China, 2005, 1: 85-90.
- [2] Zhang B, Zhang L. Theory and Applications of Problem Solving. Amsterdam, North-Holland, 1992.
- [3] Yang L, Chen W L, Zhang L. A paradigm of granular computing based on quotient closure space // Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, 2006; 1430-1433.
- [4] Zhang L, Zhang B. The quotient space theory of problem solving. Fundamenta Informaticae, 2004, 59(2-3), 287-298.
- [5] 张铃, 张钹. 模糊商空间理论(模糊粒度计算方法). 软件学报, 2003, 14(4): 770-776.
- [6] 张铃, 张钹. 问题求解理论及应用——商空间粒度计算理论及应用. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [7] Ma J M, Zhang W X, Li T. A covering model of granular computing // The 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Guangzhou, China, 2005; 1625-1630.
- [8] 张文修, 姚一豫, 梁怡. 粗糙集与概念格. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.
- [9] Wang J, Zhao M, Zhao K, et al. Multilevel data summarization from information system: A "rule+exception" approach. AI Communications, 2003, 16(1): 17-39.
- [10] Yao Y Y, Wang F Y, Wang J. "Rule+exception" strategies for knowledge management and discovery // Lecture Notes in Computer Science 2642. Berlin: Springer, 2005; 69-78.
- [11] Yao Y Y, Wang F Y, Wang J, et al. Rule+exception strategies for security information analysis. IEEE Intelligent Systems, 2005, 10(5): 52-57.
- [12] 王珏, 姚一豫, 王飞跃. 基于 Reduct 的“规则+例外”学习. 计算机学报, 2005, 28(11): 1778-1789.
- [13] Wang R Z, Miao D Q, Hu G R. Discernibility matrix based algorithm for reduction of attributes // The 2006 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence and Intelligent Agent Technology (Workshops), Hong Kong, China, 2006; 477-480.
- [14] 李道国, 苗夺谦, 张红云. 粒度计算的理论、模型与方法. 复旦学报(自然科学版), 2004, 43(5): 837-841.

- [15] 李道国,苗夺谦,张红云.粒度计算的基本问题和可能解决的方案设计.计算机科学,2004,31(2):195-198.
- [16] 李道国,苗夺谦,杜伟林.粒度计算在人工神经网络中的应用.同济大学学报(自然科学版),2006,34(7):960-964.
- [17] 苗夺谦,范世栋.知识的粒度计算及其应用.系统工程理论与实践,2002,22(1):48-56.
- [18] 李道国.信息粒-计算理论-模型与应用研究.山西:山西科技出版社,2006.
- [19] Mi J S, Wu W Z, Zhang W X. Approaches to knowledge reduction based on variable precision rough set model. Information Sciences, 2004, 159(2): 255-272.
- [20] Wu W Z, Zhang M, Li H Z, et al. Knowledge reduction in random information systems via Dempster-Shafer theory of evidence. Information Sciences, 2005, 174(3-4): 143-164.
- [21] Wu W Z, Mi J S. Knowledge reduction in incomplete information systems based on Dempster-Shafer theory of evidence// Lecture Notes in Computer Science 4062. Berlin: Springer, 2006: 254-261.
- [22] Wu W Z, Leung Y, Zhang W X. On generalized rough fuzzy approximation operators. Transactions on Rough Sets, 2006, 5: 263-284.
- [23] Zhu W, Wang F Y. Relationships among three types of covering rough sets// The 2006 IEEE International Conference on Granular Computing, Atlanta, USA, 2006: 43-48.
- [24] Zhu W, Wang F Y. Covering based granular computing for conflict analysis// Lecture Notes in Computer Science 3975. Berlin: Springer, 2006: 566-571.
- [25] Zhu W. Topological approaches to covering rough sets. Information Sciences, 2007, 177(6): 1499-1508.
- [26] Lin Y, Liu Q. Formalization for granular computing based on logical formulas. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2006, 25(2): 60-65.
- [27] Liu Q, Wang Q Y. Granular logic with closeness relation $\sim\lambda$ and its reasoning// Lecture Notes in Artificial Intelligence 3641. Berlin: Springer, 2005: 709-717.
- [28] 刘清,刘群.粒及粒计算在逻辑推理中的应用.计算机研究与发展,2004,41(4):546-551.
- [29] 刘清,黄兆华.G-逻辑及其归结推理.计算机学报,2004,27(7):865-873.
- [30] 刘清,孙辉.从 Rough 集的发展前景看粒计算的研究趋势.南昌工程学院学报,2006,25(5):1-10.
- [31] Liang J Y, Shi Z Z. The information entropy, rough entropy and knowledge granulation in rough set theory. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems, 2004, 12(1): 37-46.
- [32] Liang J Y, Shi Z Z, Li D Y. The information entropy, rough entropy and knowledge granulation in incomplete information systems. International Journal of General Systems, 2006, 35(6): 641-654.
- [33] Zheng Z, Hu H, Shi Z Z. Tolerance relation based granular space// Lecture Notes in Artificial Intelligence 3641. Berlin: Springer, 2005: 682-691.
- [34] Zheng Z, Hu H, Shi Z Z. Granulation based image texture recognition// Lecture Notes in Computer Science 3066. Berlin: Springer, 2004: 659-664.
- [35] An J J, Wang G Y, Wu Y, et al. A rule generation algorithm based on granular computing// The 2005 IEEE International Conference on Granular Computing, Beijing, China, 2005: 102-107.
- [36] Gan Q, Wang G Y, Hu J. A self-learning model based on granular computing// The 2006 IEEE International Conference on Granular Computing, Atlanta, USA, 2006: 530-533.
- [37] Hu J, Wang G Y, Zhang Q, et al. Attribute reduction based on granular computing// Lecture Notes in Artificial Intelligence 4259. Berlin: Springer, 2006: 458-466.

- [38] Wang G Y, Hu F, Huang H, et al. A granular computing model based on tolerance relation. *The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications*, 2005, 12(3): 86–90.
- [39] 邓蔚, 王国胤, 吴渝. 粒计算对进化计算的一个改进. *计算机科学*, 2004, 31(10. A): 209–211, 214.
- [40] 梁吉业, 李德玉. 信息系统中的不确定性与知识获取. 北京: 科学出版社, 2005.
- [41] 刘莹. 基于泛系的粒度计算及相关模型研究[硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [42] 王晓艳. 基于泛系的粒计算与变精度粗集理论扩展研究[硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [43] 吴丽丽. 粒度计算与粗集、泛系和高空间理论的研究[硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2006.
- [44] Bargiela A, Pedrycz W. *Granular Computing: An Introduction*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- [45] Yao Y Y. Granular computing for data mining // *The SPIE Conference on Data Mining, Intrusion Detection, Information Assurance and Data Networks Security*, Kissimmee, USA, 2006: 1–12.
- [46] Zadeh L A. Towards a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 1997, 19(1): 111–127.
- [47] Bolton N. *Concept Formation*. Oxford: Pergamon Press, 1977.
- [48] Miller G A. The magical number seven, plus or minus two; Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, 1956, 63(2): 81–97.
- [49] Peikoff L. *Objectivism: The Philosophy of Ayn Rand*. New York: Dutton, 1991.
- [50] Reif F, Heller J. Knowledge structure and problem solving in physics. *Educational Psychologist*, 1982, 17(2): 102–127.
- [51] Ganter B, Wille R. *Formal Concept Analysis: Mathematical Foundations*. Berlin: Springer, 1999.
- [52] Wille R. Restructuring lattice theory: An approach based on hierarchies of concepts // *Rival I. Ordered Sets*. Dordrecht-Boston: Reidel, 1982: 445–470.
- [53] Wille R. Concept lattices and conceptual knowledge systems. *Computers Mathematics with Applications*, 1992, 23(6-9): 493–515.
- [54] Anderberg M R. *Cluster Analysis for Applications*. New York: Academic Press, 1973.
- [55] Arrow H, McGrath J E, Berdahl J L. *Small Groups as Complex Systems: Formation, Coordination, Development and Applications*. Thousand Oaks: Sage Publications, 2000.
- [56] Jeffries V, Ransford H E. *Social Stratification: A Multiple Hierarchy Approach*. Boston: Allyn and Bacon, 1980.
- [57] Flower L. *Problem-solving Strategies for Writing*. New York: Harcourt Brace Jovabovich, Inc., 1981.
- [58] Horn R E. Structured writing as a paradigm // Romiszowski A, Dills C. *Instructional Development: State of the Art*. Englewood Cliffs: Educational Technology Publications, 1998.
- [59] Minto B. *The Pyramid Principle: Logic in Writing and Thinking*. London: Prentice Hall/Financial Times, 2002.
- [60] Young R E, Becker A L, Pike K L. *Rhetoric: Discovery and Change*. New York: Harcourt Brace Jovabovich, Inc., 1970.
- [61] Dahl O J, Dijkstra E W, Hoare C A R. *Structured Programming*. New York: Academic Press, 1972.
- [62] Knuth D E. *The Art of Computer Programming*. 3rd ed. Reading: Addison-Wesley, 1997.
- [63] Ledgard H F, Gueras J F, Nagin P A. *PASCAL with Style: Programming Proverbs*. New Jersey: Hayden Book Company, 1979.
- [64] Friske M. Teaching proofs: A lesson from software engineering. *American Mathematical Monthly*, 1995,

92(2):142–144.

- [65] Leron U. Structuring mathematical proofs. *American Mathematical Monthly*, 1983, 90(3):174–185.
- [66] Simon H A. *The Sciences of the Artificial*. Cambridge: The MIT Press, 1969.
- [67] Hawkins J, Blakeslee S. *On Intelligence*. New York: Henry Holt and Company, 2004.
- [68] Pawlak Z. *Rough Sets: Theoretical Aspects of Reasoning about Data*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [69] Pawlak Z. Granularity, multi-valued logic, Bayes' theorem and rough sets // Lin T Y, Yao Y Y, Zadeh L A. *Data Mining, Rough Sets and Granular Computing*. Heidelberg: Physica-Verlag, 2002:487–498.
- [70] Pawlak Z, Skowron A. Rough sets; Some extensions. *Information Sciences*, 2007, 177(1):28–40.
- [71] Zadeh L A. Some reflections on soft computing, granular computing and their roles in the conception, design and utilization of information/intelligent systems. *Soft Computing*, 1998, 2(1):23–25.
- [72] Doignon J P, Falmagne J C. *Knowledge Spaces*. Berlin: Springer, 1999.
- [73] 李洪兴, Vincent Yan. 因素空间与模糊决策. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1994, 30(1):41–46.
- [74] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架——概念的反馈外延与因素的重合性. *系统工程学报*, 1996, 11(4):7–16.
- [75] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(续)——反馈外延的精细化与概念内涵的表达. *系统工程学报*, 1997, 12(4):30–38.
- [76] Liu J, Jin X, Tsui K C. *Autonomy Oriented Computing: From Problem Solving to Complex Systems Modeling*. Heidelberg: Kluwer Academic Publishers/Springer, 2004.
- [77] Liu J, Tsui K C. Toward nature-inspired computing. *Communications of the ACM*, 2006, 49(10):59–64.
- [78] Wirth N. Program development by stepwise refinement. *Communications of the ACM*, 1971, 14:221–227.
- [79] Ackoff R L. *The Art of Problem Solving*. New York: John Wiley & Sons, 1978.
- [80] Hodnett E. *The Art of Problem Solving: How to Improve Your Methods*. New York: Harper & Row, Publishers, 1955.
- [81] Newell A, Simon H A. *Human Problem Solving*. New Jersey: Prentice-Hall, 1972.
- [82] Gordon W J J. *Synectics: The Development of Creative Capacity*. New York: Harper and Row, 1961.
- [83] Ahl V, Allen T F H. *Hierarchy Theory: A Vision, Vocabulary and Epistemology*. New York: Columbia University Press, 1996.
- [84] Pattee H H. *Hierarchy Theory: The Challenge of Complex Systems*. New York: George Braziller, 1973.
- [85] Salthe S N. *Evolving Hierarchical Systems, Their Structure and Representation*. New York: Columbia University Press, 1985.
- [86] Whyte L L, Wilson A G, Wilson D. *Hierarchical Structures*. New York: American Elsevier Publishing Company, 1969.
- [87] Capra F. *The Web of Life*. New York: Anchor Books, 1997.
- [88] Laszlo E. *The Systems View of the World: The Natural Philosophy of the New Developments in the Science*. New York: George Brasiller, 1972.
- [89] Giunchiglia F, Walsh T A. A theory of abstraction. *Artificial Intelligence*, 1992, 57(2-3):323–390.
- [90] Hobbs J R. Granularity // *The 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Los Angeles, USA, 1985:432–435.

-
- [91] Knoblock C A. *Generating Abstraction Hierarchies: An Automated Approach to Reducing Search in Planning*. Dordrecht; Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [92] Conway C M, Christiansen M H. Sequential learning in non-human primates. *Trends in Cognitive Sciences*, 2001, 12; 539–546.
- [93] Hazzan O. Reducing abstraction level when learning abstract algebra concept. *Educational Studies in Mathematics*, 2004, 40(1); 71–90.
- [94] Poggio T, Smale S. The mathematics of learning; Dealing with data. *Notices of the AMS*, 2003, 50; 537–544.
- [95] Skowron A, Synak P. *Hierarchical information maps*// *Lecture Notes in Artificial Intelligence 3641*. Berlin; Springer, 2005; 622–631.
- [96] Klahr D, Kotovsky K. *Complex Information Processing: The Impact of Herbert A. Simon*. New Jersey; Lawrence Erlbaum Associates, 1989.
- [97] Marr D. *Vision: A Computational Investigation into Human Representation and Processing of Visual Information*. San Francisco; W. H. Freeman and Company, 1982.
- [98] Beveridge W I B. *The Art of Scientific Investigation*. New York; Vintage Books, 1967.
- [99] Martella R C, Nelson R, Marchard-Martella N E. *Research Methods; Learning to Become a Critical Research Consumer*. Boston; Allyn and Bacon, 1999.
- [100] Posner M I. *Foundations of Cognitive Science*. Cambridge; The MIT Press, 1989.
- [101] Solso R L, MacLin M K, MacLin O H. *Cognitive Psychology*. 7th ed. New York; Allyn and Bacon, 2005.
- [102] Losee J. *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*. 3rd ed. Oxford; Oxford University Press, 1993.
- [103] Allen T F. A summary of the principles of hierarchy theory// *The 2nd Annual Conference of the International Society for the Systems Sciences*, Atlanta, USA, 1998.
- [104] Foster C L. *Algorithms: Abstraction and Implementation; Levels of Detail in Cognitive Science*. London; Academic Press, 1992.
- [105] Yao Y Y. A partition model of granular computing. *Transactions on Rough Sets*, 2004, 1; 232–253.
- [106] John Dupré. *The Disorder of Things; Metaphysical Foundations of the Disunity of Science*. Cambridge; Harvard University Press, 1993.
- [107] Kramer J. Is abstraction the key to computing. *Communications of the ACM*, 2007, 50(4); 36–42.
- [108] Bargiela A, Pedrycz W. The roots of granular computing// *The 2006 IEEE International Conference on Granular Computing*, Atlanta, USA, 2006; 806–809.
- [109] Wing J M. Computational Thinking. *Communications of the ACM*, 2006, 49(3); 33–35.
- [110] Yao Y Y. Granular computing; Basic issues and possible solutions// *The 5th Joint Conference on Information Sciences*, New Jersey, USA, 2000, 1; 186–189.
- [111] Yao Y Y. Information granulation and rough set approximation. *International Journal of Intelligent Systems*, 2001, 16(1); 87–104.
- [112] Yao Y Y. Modeling data mining with granular computing// *The 25th Annual International Computer Software and Applications Conference*, Chicago, USA, 2001; 638–643.
- [113] Yao Y Y. Granular computing. *计算机科学*, 2004, 31(z2); 1–5.
- [114] Yao Y Y. Three perspectives of granular computing. *Journal of Nanchang Institute of Technology*,