

·
·
模糊理论与工程系列丛书·
·

模糊空间信息处理

■ 王新洲 史文中 王树良 编著



全国优秀出版社
武汉大学出版社

模糊理论与工程系列丛书

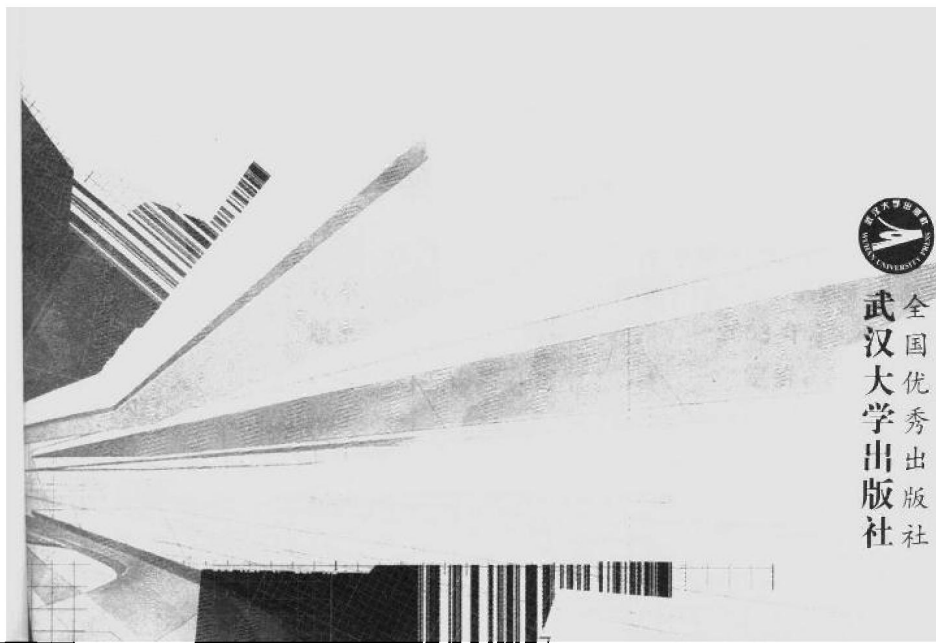
- 国家自然科学基金项目 (49574201, 49874002) 资助
- 国家高技术发展研究计划 (863计划) 项目 (2001AA135081) 资助
- 香港理工大学科学研究基金项目 (1.34.37.9709) 资助

模糊空间信息处理

王新洲 史文中 王树良 编著



全国优秀出版社
武汉大学出版社



图书在版编目(CIP)数据

模糊空间信息处理/王新洲,史文中,王树良编著. —武汉:武汉大学出版社,
2003.10

(模糊理论与工程系列丛书)

ISBN 7-307-03814-5

I. 模… II. ①王… ②史… ③王… III. 模糊信息处理 IV. O159

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 059053 号

责任编辑:李汉保 责任校对:刘欣 版式设计:支笛

出版发行:武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件:wdp4@whu.edu.cn 网址:www.wdp.whu.edu.cn)

印刷:湖北省荆州市今印印务有限公司

开本:787×980 1/16 印张:18.25 字数:312千字

版次:2003年10月第1版 2003年10月第1次印刷

ISBN 7-307-03814-5/O·278 定价:26.00元

版权所有,不得翻印;凡购我社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题者,请与当地图书销售部门联系调换。

王新洲，男，生于1954年，工学博士，武汉大学测绘学院教授、博士生导师。1994年获博士学位。现任中国测绘学会科普专业委员会副主任委员；中国系统工程学会模糊数学与模糊系统委员会理事；中国建筑学会工程勘察分会委员；湖北省测绘学会常务理事兼科普专业委员会主任；武汉模糊理论与工程学会副理事长；《武汉大学学报》（信息科学版）编辑委员会委员；《测绘工程》编辑委员会委员。出版专著两部，主编教材一本，参编教材四本，发表学术论文一百余篇。

史文中，男，博士，现任香港理工大学土地测量及地理资讯学系副教授，地球资讯科技研究中心主任。1994年获德国奥斯那布吕克大学博士学位。主要研究兴趣：GIS、遥感、虚拟现实、空间数据质量、GIS中三维及动态数据模型、GIS的设计与开发、GIS与遥感的集成、高分辨卫星影像中的特征提取等。共出版专著六部，发表学术论文二百余篇。

王树良，男，生于1975年，博士，现从事空间数据挖掘和知识发现、智能地理信息系统与空间不确定性等研究，出版学术专著两部，发表论文数篇，其中五篇被EI检索。

757.571.7

内 容 简 介

本书在简要介绍模糊集、模糊关系、模糊逻辑、模糊推理、模糊概率以及可能性等基本理论的基础上,结合现代测绘科学与技术中的模糊空间信息处理问题,重点介绍了模糊聚类、模糊模式识别、模糊神经网络、模糊综合评判、模糊决策和模糊质量管理等技术的具体应用方法。书中介绍的极大可能性估计、地学粗空间理论是作者在国家 863 计划项目资助下刚刚完成的研究成果。云模型则是作者在李德毅院士的指导下,对李院士的研究成果所作的初步和粗浅的整理。

本书是模糊理论与工程系列丛书在测绘科学与技术中的具体应用。可以作为测绘科学与技术学科的研究生教材,也可以供该学科高年级本科生、研究生、工程技术人员和广大教师使用。

前 言

空间信息和其他信息一样,都具有共同的特性——不确定性。而空间信息的不确定性理论是 GIS 界公认的极为重要也是极为困难的基础理论课题之一。虽然空间信息的不确定性理论作为重点研究课题的提出只是近年来的事,但是它对 GIS 和遥感各领域都有深远的影响,而且其他各个方面的研究工作则早已开始。如美国国家地理信息和分析中心 1988 年提出了 12 个专题进一步研究,其中第 12 个专题是关于遥感与 GIS 集成中的有关问题。而第 12 个研究专题小组又把误差问题列为 6 个研究问题中的第一位,这充分显示现阶段 GIS 与遥感研究领域,不确定性问题是最为重要的研究主题之一^[175]。

由于大量的空间信息不确定性在概念上没有明确的外延,因此具有一定的模糊性。对这些具有模糊性的空间信息的处理,最好的工具要数模糊数学。为此,测绘界的一些先驱早在 20 世纪末就试图将模糊理论与技术引入空间信息的处理,取得了一些好的成果。但在测绘界系统地介绍模糊空间信息处理的书籍还没有。随着模糊集理论在空间信息处理中的广泛应用,很有必要编辑出版模糊空间信息处理方面的书籍,供测绘界的科技工作者使用。作者在国家自然科学基金和国家高技术研究发展计划(863 计划)项目的支持下,做了一些初步工作,在编辑整理有关资料的基础上写成此书,希望起到抛砖引玉的作用。

本书结合模糊空间信息处理的实际,从应用的角度较系统地介绍了模糊空间信息处理的理论和方法。在第二章、第三章、第四章扼要介绍了模糊集与模糊关系、模糊逻辑与模糊推理、模糊概率与可能性理论等理论的基础上,重点介绍了模糊聚类与模糊模式识别、模糊综合评判与模糊决策、模糊神经网络与模糊质量控制,在模糊空间信息处理中的实际应用方法。

第八章介绍的“极大可能性估计”是作者最新的研究成果。在这一研究成果中,充分顾及了空间信息的模糊性,打破了现行参数估计领域由概率论一统天下的局面。现有的各类参数估计都是以概率论为理论基础,对含有随机误差的观测值进行处理的。极大可能性估计则完全不涉及概率与随机变量,而是以 Zadeh 教授提出的可能性理论为基础,对模糊数进行处理,即将观测值看成对称模糊数,以观测值是其对称中心的可能性达到最大为估计准则,进行参数估计,

从而得到了一个全新的参数估计类。理论和实践证明,极大可能性估计是理论严密并且非常实用的一类估计。它是和极大似然估计相并列的一类估计。当以 p 次抛物线模糊数为参照函数时,由极大可能性估计可导出现有的 p 范数估计。当 $p=1$ 时,为最小绝对值估计;当 $p=2$ 时,为最小二乘估计。

粗集是继模糊集之后由波兰学者 PAWLAK.Z. 提出来的,目的是避免模糊集的不彻底性。考虑到粗集在空间信息处理中具有很好的应用前景,在第十章介绍了我们在粗集应用方面的研究成果——地学粗空间。

为了解决随机性和模糊性共存的问题,李德毅院士提出了用语言值表示的某个定性概念与其定量表示之间的不确定性转换模型——云模型^[148],把模糊性和随机性完全集成在一起,构成定性和定量相互间的映射。作者在李德毅院士的指导下,根据自己的理解,归纳整理了云模型的基本方法,作为本书的第十一章。

由于作者水平有限,谬误之处在所难免,恳请各位不吝赐教。

作 者

2003年6月1日于武昌

模糊理论与工程系列丛书编委会

名誉主编 刘应明

名誉副主编 汪培庄 王国俊 吴从炘 何新贵
郭桂蓉 吴望名

主 编 欧阳绵

副 主 编 王新洲(常务) 胡宝清 应明生
张文修 郑崇友 任 平
罗懋康 蔡开元 陈水利
张南伦

编 委 (按姓氏拼音排序)

陈国青	陈世权	陈国权	陈图云
陈永义	程里春	曹炳元	董长清
方锦暄	黄崇福	贺仲雄	哈明虎
韩立岩	李洪兴	刘增良	刘文斌
陆余楚	汤服成	吴孟达	徐 扬
徐晓泉	邹开其		

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 空间信息技术	1
§ 1.2 模糊数学的诞生与发展	2
§ 1.3 模糊不确定性与随机不确定性	3
§ 1.4 模糊信息处理在空间信息技术中的部分应用	5
第二章 模糊集合与模糊关系	8
§ 2.1 模糊集合及其运算	8
§ 2.2 模糊矩阵	13
§ 2.3 模糊关系	15
§ 2.4 模糊关系的合成	18
§ 2.5 模糊关系方程	20
第三章 模糊逻辑与模糊推理	29
§ 3.1 二值逻辑的基本知识	29
§ 3.2 多值逻辑	31
§ 3.3 模糊逻辑	34
§ 3.4 模糊推理	39
§ 3.5 模糊逻辑与模糊推理在图像压缩中的应用	42
第四章 模糊概率与可能性理论	47
§ 4.1 模糊事件的概率	47
§ 4.2 模糊概率在矿产预测中的应用	51
§ 4.3 可能性理论简介	53
§ 4.4 可能性测度	55
第五章 模糊聚类与模糊模式识别	59

§ 5.1 模糊聚类的统计量	59
§ 5.2 模糊聚类的传递闭包法	66
§ 5.3 模糊聚类的图论法	71
§ 5.4 模糊聚类的 ISODATA 法	75
§ 5.5 模糊聚类在空间信息技术中的应用举例	79
§ 5.6 模糊模式识别	85
第六章 模糊神经网络与模糊专家系统	91
§ 6.1 人工神经元的基本模型	91
§ 6.2 几种常用的神经网络	94
§ 6.3 模糊神经元及模糊神经网络	103
§ 6.4 模糊神经网络的应用	106
§ 6.5 模糊专家系统概述	119
第七章 模糊综合评判与模糊决策	122
§ 7.1 模糊综合评判的数学模型	122
§ 7.2 模糊综合评判中几种数学模型的实质	129
§ 7.3 多层次模糊综合评判	132
§ 7.4 基于模糊集重心的模糊综合评判	143
§ 7.5 综合评判的模糊神经网络方法	145
§ 7.6 模糊决策的一般概念	149
§ 7.7 模糊贝叶斯决策	150
§ 7.8 模糊多准则决策	153
第八章 模糊数与极大可能性估计	158
§ 8.1 模糊数简介	159
§ 8.2 可能性线性规划	161
§ 8.3 极大可能性估计	167
§ 8.4 极大可能性极小模糊幅度估计	174
第九章 模糊质量控制与模糊可靠性	179
§ 9.1 质量管理中的几个基本概念	180
§ 9.2 质量的模糊属性	183
§ 9.3 模糊质量的常用统计方法	184

§ 9.4 模糊控制图	197
§ 9.5 模糊质量的抽样检验	205
§ 9.6 模糊可靠性	206
第十章 地学粗空间	211
§ 10.1 引言	211
§ 10.2 地学粗空间的概念	214
§ 10.3 粗实体	221
§ 10.4 粗关系	223
§ 10.5 粗算子	225
§ 10.6 基于向量的属性简化	228
§ 10.7 地学粗空间在地球空间信息学中的应用	230
§ 10.8 集对模型	236
第十一章 云模型	240
§ 11.1 云模型的概念	241
§ 11.2 云模型的类型	245
§ 11.3 云发生器	247
§ 11.4 虚拟云	254
§ 11.5 云变换	258
§ 11.6 基于云模型的不确定推理	260
§ 11.7 云模型在滑坡监测数据挖掘中的应用	263
参考文献	269

第一章 绪 论

§ 1.1 空间信息技术

随着社会信息化的发展,人们将接触各种各样的信息。在人类所接触到的这些信息中,空间信息占 80%。如此大量的空间信息,对人们的生活、国家的建设、社会的发展以及领土的安全等都将发挥重要的作用。空间信息不仅是资源勘察与开发、环境监测与保护、城市规划与管理、工程建设与维护、灾害监测与预报、土地管理与利用、物流管理与配送、交通管理与导航、农业生产与发展等社会可持续发展的重要信息,而且也是公共安全与现代战争的基础信息。

空间信息技术(Spatial Information Technologies)是以全球定位系统(GPS)、地理信息系统(GIS)、遥感(RS)为主要内容,并以计算机技术和通讯技术为主要技术支撑,集数据获取、分析、存贮、管理、表达、传播和应用于一体的信息技术,是最近二十多年才崛起的一门新兴技术。

空间信息的特点是多维、多源、多尺度、多分辨率和多时态。它反映了地球复杂巨大系统和地球上各种自然和社会现象的非线性特征。空间信息的来源和形式也是多种多样的,有的是通过对目标进行摄影而得到,有的是通过对实地测量而得到,有的是从 CAD 等计算机处理而得到。目前的空间信息,主要是以数字的形式存贮和提供使用。而这些数据有图形矢量形式、图像栅格形式或属性图表形式等。要使由这些不同来源的数字表达的空间信息适应信息社会的需要,必须提高人与信息社会的接口能力,提高人对信息的理解能力,使之较完整地表示概念、较迅速地传递概念,并符合人类的感知和认知过程。人类在对客观世界的认知过程中,大脑思维具有综合思维的特点。人脑在对客观世界不同层次的思维反映中,充满了错综复杂的模糊特性。

地理信息是主要的空间信息。而地理信息具有多重性、复杂性、不精确性、不确定性等特点,地理现象的信息表达普遍存在着模糊性^[70]。

遥感信息是空间信息的主要信息来源之一。遥感信息是指以光或电磁波为载体,经介质传输而由航空或航天平台所收集到的反映地球表层系统现象的空

间信息。由于地球系统的复杂性和开放性,地面信息是多维的、无限的,而通过信息传输,遥感信息是简化了的二维信息。因此,遥感信息在进行地学空间分析和过程反演的过程中具有模糊性和多解性的特点^[70]。

空间信息既然是信息,就具有信息的一系列特性。本书所要处理的主要是空间信息的不确定性。空间信息的不确定性理论是 GIS 界公认的极为重要也是极为困难的基础理论课题之一。虽然空间信息的不确定性理论作为重点研究课题的提出只是近年来的事,但是它对 GIS 和遥感各领域都有深远的影响,而且其他各个方面的研究工作则早已开始。如美国国家地理信息和分析中心 1988 年提出了 12 个专题作进一步研究,其中第 12 个专题是关于遥感与 GIS 集成中的有关问题。而第 12 研究专题小组又把误差问题列为 6 个研究问题中的第一位,这充分显示现阶段 GIS 与遥感研究领域中,不确定性问题是最为重要的研究主题之一^[75]。由于大量的空间信息的不确定性在概念上没有明确的外延,因此具有一定的模糊性。对于这些具有模糊性的空间信息的处理,最好的工具是模糊数学。为此,本书结合模糊空间信息处理,从应用的角度较系统地介绍模糊空间信息处理的理论和方法。

§ 1.2 模糊数学的诞生与发展

1965 年,美国加州大学柏克莱分校的扎德(L. A. Zadeh)教授第一次提出了“模糊集合”的概念。但在当初的十年中,除了极少数专家外,模糊理论并未受到世人的关注。1974 年,英国曼达尼(E. H. Mandani)教授率先将模糊逻辑应用到蒸汽发电机的压力和速度控制中,取得了比常规的 PID 控制更好的结果。不久,丹麦的史密斯(F. L. Smith)公司于 1980 年成功地将模糊控制应用到水泥窑的自动控制中,为模糊理论的实际应用开辟了崭新的前景^[1]。从此,模糊数学如异军突起,相关的书刊、论文如雨后春笋^[2]。目前,有关模糊理论与应用的杂志、特刊有数十种,论文数千篇。此外还有数以百计的应用实例。仅在家用电器方面,就已生产出了模糊热水器、模糊电饭锅、模糊空调器、模糊洗衣机、模糊吸尘器、模糊电冰箱、模糊微波炉、模糊摄录一体机、模糊彩色电视机、模糊空气净化器、模糊电动剃须刀,等等^[3]。

模糊数学的诞生,得益于用机器去模拟人脑的科学——人工智能。当用计算机去模拟人脑时,经典数学在很大程度上显得无能为力。比如在处理自然语言表达信息时,由于自然语言具有同一个词表达各种不同含义的特点,使得词语无须像某些精确概念所要求的那样界限分明。但语言的上下文限制又能恰好使它在一个特定的环境中只表示一种界限分明、意义清楚而非模糊的概念。人类

这种独特的信息处理方式,既高效又可靠,恰是现代电子计算机所欠缺的。现代电子计算机运算速度快,精度高,但对模糊性语言和信息处理能力甚至不及一个婴儿。例如,一个二三岁的小孩能在一堆苹果中迅速、准确地挑出最大的那个,而不需作任何度量。这一点要计算机做,却非常困难。原因是人脑的思维方式不单纯是传统的数学思维方式^[2],人类智能的一个重要特点是其思维和行动伴随着模糊性。人们用模糊的语言谈话,在模糊的环境中对事物进行判断、推理和决策,高效地传递着模糊的信息。这一切应归功于人脑对模糊性的巨大驾驭能力。人们为了探索未来的电脑智能机器人的雏形,模糊数学便应运而生了。

近年来,模糊数学不论是在理论上,还是在应用上都在迅速发展。模糊技术能在信息时代得到如此快速的发展,是由于模糊理论为信息革命提供了新的、富有魅力的数学工具和手段。模糊技术给出了一套表现自然语义的理论和方法,使自然语言能够转化成机器可以“理解”和接受的东西,提高了机器的活性。模糊技术给出了模糊逻辑和近似推理的理论和方法,用简捷的软、硬件可以使机器更“聪明”,智能化程度更高。模糊理论比一般数学理论应用面更广,除自然科学和工程技术领域外,它将为社会、经济、哲学、心理、教育、管理等人文科学提供数学描述的语言和工具,它将为有力地促进软科学的科学化、定理化研究^[4]。

模糊技术是目前世界上的高新技术之一,并位居前列。它是一门崭露头角正在茁壮成长的高新技术,还有许多问题需要发掘和探讨。模糊技术越来越引起各国科技界、工程界和企业界的高度重视,一个模糊技术“时代”即将到来^[5]。

§ 1.3 模糊不确定性与随机不确定性

事物的模糊性是指客观差异的中介过渡所引起的划分上的一种不确定性,或概念上没有明显界线所引起的一种不确定性。例如,变形观测中点的“稳定”与“不稳定”,社会生活中的“好人”与“坏人”,等等,这些概念之间没有明确的分界线。从“稳定”到“不稳定”,从“好人”到“坏人”,都是从差异的一方到差异的另一方。这中间经历了一个从量变到质变的连续过渡过程。这种现象就叫做差异的中介过渡性。这种概念上的不明确性和中介过渡性造就出划分上的不确定性,就叫做模糊性。现代信息处理中,已广泛应用模糊集合来研究这种划分上的不确定性。信息论的奠基人仙农(C. E. Shannon)曾经指出,信息的本质在于消除或减少不确定性^[6]。然而,过去把不确定性往往单纯地看成随机性。随机性确实是重要的一种不确定性,但不能把不确定性只理解为随机性。为了区分这两种性质截然不同的不确定性,我们将由随机性所引起的不确定性称为随机不确定性,而将由模糊性所引起的不确定性称为模糊不确定性。反之,我们又将有

明确定义(即概念上有明确的界线),但试验前是否出现不得而知的事件中包含的不确定性称为随机性,而将已经出现或将会出现但难以给出精确定义的事件中所包含的不确定性,称为模糊性。例如抛硬币试验,我们知道,硬币的一面是徽,另一面是字,这在定义上是非常明确的,并且徽和字在概念上具有明确的界线。但在抛币之前,是出现徽向上还是字向上是不能确定的,像这种不确定性就是随机性。对于模糊性,文献[7]举了一个很好的例子。该例子是文献[8]的研究成果,现摘录如下:有关的研究利用了“日”与“曰”一对汉字作试验变量。鉴于这对汉字有着相同的结构,因此,只要变化构成字的笔画比率,即宽与高之比,就可观测到学生们识别的变化。图 1-3-1 为一系列 l_1 与 l_2 之比的两个极端。对于不同 l_1 与 l_2 之比所构成的字体,受试者都回答是“日”或是“曰”。根据大量受试学生的回答,得到相应的确认率曲线,如图 1-3-2 所示。

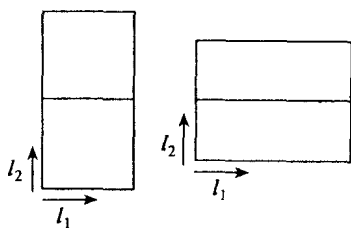


图 1-3-1

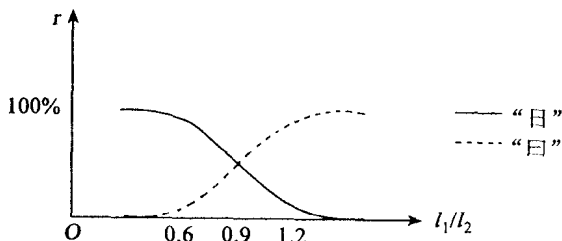


图 1-3-2

由图 1-3-2 可清楚地看到,随着笔画 l_1 与 l_2 的比率的变化,即字形由竖长方形向扁长方形变化,学生们对“日”的确认率也就随之下降,至 $l_1/l_2 \approx 0.9$ 时,出现了似“日”又似“曰”的现象。此比例再继续增大,“日”的确认率下降至零,而“曰”的确认率则越来越接近于 100%。 l_1/l_2 的比值在 0.6~1.3 之间是由量变到质变(日字向曰字变化)的中间过渡阶段。学生们识别为“日”的把握程度,也由高向低变化。这表明 l_1 与 l_2 之比由 0.6~1.3 中介过渡时,引起了似“日”又似“曰”的不确定性。像这样 l_1 与 l_2 的比值已经出现,但因难以辨认所引起的不确定性就是模糊性。

当我们像辨认汉字那样对信息的内容和意义进行理解时,随机性的影响并不明显,用概率方法去描述就有些牵强。这时就应该用模糊数学的方法来描述。类似的问题在空间信息处理中也会经常碰到。比如利用某市城市信息系统中空间分析功能分析该市繁华地区人口密度时,就存在这样的模糊不确定性。这时就不应该用概率的方法去描述,而应该用模糊数学的方法加以描述。

在实际工作或实际生活中,有些事件往往既包含随机不确定性,又包含模糊不确定性。例如“今天会下雨的可能性很大”,就既包含随机不确定性,又包含模

糊不确定性。下不下雨是随机的,具有随机不确定性;可能性很大却是模糊的,具有模糊不确定性。空间信息科学中存在大量这样的信息,我们将用模糊概率理论来处理之。

§ 1.4 模糊信息处理在空间信息技术中的部分应用

模糊信息处理在空间信息科学中的应用是近十几年来年的事。1986年,张育之,冯可君在地图杂志上开辟了“模糊数学基础知识及其在地图制图学中的应用”专栏,比较系统地介绍了模糊数学的基础知识,举例说明了模糊数学在地图制图学中的应用情况^[2]。从此,模糊数学在地图制图中得到较广泛的应用。例如1987年,邹建华研究了模糊软划分在专题制图分级中的应用。从动态聚类的角度出发,提出利用模糊软划分对制图数据进行分级^[12]。1989年何宗宜研究了模糊多层次综合评判原理及其在专题地图编绘质量评价中的应用。建立了评价专题地图编绘质量的数学模型^[13]。1991年,王家耀,冯可君,胡寿康等对模糊数学在地图制图的应用进行了评述。论述了模糊数学与地图制图学的关系,综述了模糊数学在地图制图学中应用的情况,推荐了几个能有效地用于地图制图中的模糊数学模型^[15]。1991年邹建华又将模糊多元分析应用于地图制图的分类中,提出了一种地图制图中的新的分类方法^[16]。

在拟稳平差中,模糊数学也得到了应用,成功地解决了拟稳平差中拟稳点组确定的关键问题。我们知道,在拟稳平差中首先应确定拟稳点组。传统的方法是根据各控制点的位移量及其权来选择拟稳点组。但在实际工作中,人们发现仅按各控制点的位移量及其权来选择拟稳点组往往与实际情况不符。为了很好地解决这个问题,王新洲于1986年率先将模糊聚类分析应用于形变监测网中拟稳点组的选择。由于模糊聚类分析不仅考虑了各控制点的位移量及其权,而且考虑了控制点处的土质情况、控制点的深埋程度、控制点与形变区的距离的诸多因素,从而得到比传统方法更符合实际的结果^[9]。此后,刘烈昭,欧吉坤等进一步研究了模糊聚类方法用于监测网的拟稳点选择^[10]。再后来,吴子安,卢冈又应用模糊聚类方法研究了新安江形变监测网中控制点的稳定性问题。他们将模糊聚类方法与R-S变换相结合,对新安江形变监测网中控制点的稳定性进行了分析,得出了与实际相吻合的位移场^[11]。1998年,赵耀龙,王新洲又应用模糊综合比较法选择监测网拟稳点^[34]。根据这些研究,应用模糊数学基本上解决了拟稳平差中拟稳点组的确定问题。

模糊数学在测量数据处理这一研究方向上的应用,除了确定监测网中的稳定点组以外,1993年侯立华在煤炭基金项目“模糊误差理论研究及其矿山测量

模糊数据处理”的资助下,应用可能性理论对观测误差进行了研究,得出了一些有趣的结论^[17]。1994年,Weiping Sun将模糊集合理论应用于粗差定位,提出了一种粗差定位的新方法^{[18][19]}。在此基础上,王新洲在国家自然科学基金项目“用模糊数学综合处理观测误差的理论与应用研究”(编号49574201)的资助下,对其进行了更深入的研究,提出了顾及模糊逻辑关系的稳健估计,给出了标准化残差最大程度上受粗差污染的隶属函数^{[20][22]}。郭金运等1996年直接将模糊数学引入测量平差。提出了高斯—马尔柯夫模型的模糊解算方法^[25]。而魏萌,黄维彬,蔡先梁则研究了测量平差计算的神经网络方法^[26]。1999年王新洲又在另一项国家自然科学基金项目“信息扩散原理在测量数据处理中的应用研究”(编号49874002)的资助下,提出了一种稳健性很好的参数估计新方法——信息扩散估计法。该方法首先根据给定的一组观测值估计其分布密度函数,然后再据此密度函数来估计待估参数,从而避免了估计方法选择不当的风险^[35]。

模糊数学在GIS中有着广泛的应用前景。在这一领域的应用中已取得了很多成果。20世纪90年代初,国际上就将模糊数学引入GIS,如文献[37]和文献[38]所著等。我国从20世纪90年代中期开始将模糊数学引入GIS。例如,1996年,刘文抱,李宗华介绍了GIS知识推理操作中的误差度量和传播。得出这一误差传播实质上是推理过程中模糊集合隶属函数误差指标传播的结论^[39]。随后,黄波,徐冠华,阎守邕研究了GIS中空间模糊叠加模型的设计。提出了基于模糊集合论的叠加模型^[23]。王建华,祝国瑞探讨了模糊分析学在空间信息分析中的应用,给出了模糊区域的概念及其测度方法^[24]。肖平,李德仁研究了GIS模糊栅格数据结构隶属度的解算和地理多边形边界锐度,在顾及不定性的GIS空间数据结构的基础上,引入了一种计算隶属度的方法^[33]。

在土地科学中,模糊数学也有很大的用武之地。这一领域的代表成果有:吕亮卿的模糊综合评定县级土地评查成果质量的研究。在这一成果中,给出了两种综合评判的数学模型^[14]。1997年,王新洲,王树良提出了将模糊综合评判和模糊聚类分析汇于一体的模糊综合法,并将其应用于土地定级中,得到了惟一的符合实际的定级结果^[27]。同年,王新洲,王树良又将模糊聚类分析应用于土地评价,对南宁市土地进行了模糊聚类评价,得到了较好的结果^[28]。

模糊数学在空间信息科学的其他领域也有较多的应用。例如,蓝悦明,王新洲1996年应用灰色预测研究了大坝水平变形的预测问题^[21]。1997年李崇贵,牟玉香,汤发树应用模糊矩阵探测控制网中的精度最弱点^[29]。1998年,张景雄设计了一个基于神经元网络的全模糊训练、分类和精度评估的方法,成功地对遥感影像进行了全模糊监督分类^[31]。1998年,何金平,李珍照,薛桂玉,李民研究