

SET PAIR ANALYSIS BASED
COUPLING METHODS AND
APPLICATIONS

集对分析耦合方法 与应用

汪明武 金菊良 周玉良 著



科学出版社

集对分析耦合方法与应用

Set Pair Analysis Based Coupling Methods
and Applications

汪明武 金菊良 周玉良 著

国家“十一五”科技重大专项(项目编号:2009ZX07106-001)

国家自然科学基金项目(项目编号:41172274; 51079037; 71273081;
51109052; 51309004)

安徽省杰出青年科技基金项目(项目编号:08040106830)

北 京

内 容 简 介

本书是作者多年来在集对分析理论和与其他不确定性分析理论耦合探索方面的研究成果及工程应用成果总结,反映了集对分析理论耦合方法研究现状和新进展。书中详细阐述了集对分析理论耦合方法理论基础和优势,探讨了应用多元联系数、联系隶属度、联系期望和集对势与广义模糊集、粗糙集、随机模拟、区间数、可拓学、熵理论、多属性决策理论、组合预测理论及智能理论等相耦合的不确定性分析方法,并提出了复杂动态集对分析方法集。作者对提出的每一种耦合方法,均结合工程应用阐述了基本原理、实现过程,并与其他方法进行了对比分析研究。

本书可供系统科学、管理科学与工程、土木工程、水利工程、农业工程、资源与环境科学、大气科学、地理科学、可持续发展科学和复杂性科学等学科的科研、管理和工程技术人员阅读,也可作为高等院校相关专业的教师、研究生和高年级本科生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

集对分析耦合方法与应用/汪明武,金菊良,周玉良著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-039511-5

I. ①集… II. ①汪…②金…③周… III. ①集论 IV. ①O144

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 318351 号

责任编辑:童安齐 / 责任校对:王万红

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双青印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年1月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2014年1月第一次印刷 印张:12 1/2

字数:237 000

定价:65.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换<双青>)

销售部电话 010-62136131 编辑部电话 010-62137026(BA08)

版权所有,侵权必究

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

序

随着社会和自然环境受诸多因素的影响,而不断发生错综复杂的变化,人类面临的不确定性问题日趋复杂和突出,不确定性分析方法越来越受到人们的高度关注。虽然依据概率统计理论、模糊集理论、粗糙集理论和灰色理论等单一不确定性分析理论可解决特定条件和形式下的不确定性问题,而面对交叉、交融和动态的不确定性问题,这些分析理论往往存在各自的局限性。显然,针对现实中存在的大量复杂动态不确定性问题,开展耦合分析方法的创新研究,具有重要的理论意义和实用价值。

集对分析耦合方法是一种基于集对分析理论和耦合原理而建立的一种不确定性分析崭新方法,它依据辩证对立统一哲学理念和普遍联系原理对不确定性问题进行宏观、微观多尺度的整体分析,并应用联系数、联系隶属度进行定量表征事物间的相互联系、相互作用及演化态势,为分析复杂不确定性问题提供了一条新颖的探索途径。

《集对分析耦合方法与应用》一书是作者长期以来在集对分析理论、耦合途径探讨及工程应用方面研究成果的系统总结。该书系统阐述了集对分析理论的新内涵、新原理和新进展,以及与其他不确定性分析理论的耦合原理、特点和优势,并在此基础上提出了集对分析耦合方法集。该书反映了集对分析及其耦合方法的新成果、新进展,拓广了集对分析理论与应用范围,开创了复杂动态不确定性问题研究的新途径,初步形成了颇具特色的集对分析耦合分析方法,不仅在理论方面进行了深入的探索,而且密切联系实际应用,具有创新性、前沿性、可操作性和实用性等显著特点,是一种本不可多得的佳作。

《集对分析耦合方法与应用》的问世,对促进复杂动态不确定性问题研究与方法的创新,同时对科学处理当前诸多不确定性难题,无疑都具有非常重要的意义。

丁 晶

2013年12月8日于四川大学

前 言

不确定性问题是人类认识和改造世界始终面临的机遇与挑战,其具有动态可变性,在某种条件或某个层次上体现出不确定性,而在条件或层次不同下可转化为确定性,呈现出多层次、多尺度和多样性等复杂特点,随着社会和工程活动的加快和加大,人们迫切需求解决复杂不确定问题的科学理论和方法,以实现安全和谐、科学决策和风险控制目标,故开展不确定性方法研究已成为相关学科近年来亟待解决的重要课题。

不确定性问题表现形式的多样化和复杂性及人类认识的局限性与思维的模糊性,导致应用单一的不确定性分析方法很难描述所有不确定问题,从而使耦合方法成为解决复杂动态不确定问题的有效途径,因耦合方法可充分发挥不同不确定性方法的优势,可相互取长补短,可最大可能满足复杂不确定问题的研究需求。然而,不同不确定分析方法的思想观念、理论方法和技术路线并不一致,加上随着社会发展,人们对不确定性分析方法的科学性和实用性提出了更高要求。因此,如何找到可包容与交融其他不确定分析方法已成为相关学科的研究热点,本书就是以此为目标,依据集对分析理论和新进展,探讨集对分析与其他先进不确定分析理论的耦合方法,并实际应用于工程实践,以进一步促进不确定性分析方法的研究、发展富有特色的集对分析理论,为复杂动态不确定性问题提供新的思路 and 参考。

不确定性分析理论与方法研究至今已取得了长足的进步,但针对不确定性开展交叉和耦合研究并不多见,综合集成创新的系统不确定性分析方法则更少。集对分析理论是一种新兴的不确定性分析理论,目前尚未有与其他不确定性分析理论耦合方法的系统论述和其最新研究成果的著作,作者结合多年来主持完成的、多项相关的国家“十一五”科技重大专项、国家自然科学基金项目及其他科研项目、科研报告和国内外发表相关的学术论文,写成此书。本书凝聚了作者多年来在不确定性问题分析方面的最新研究成果,也反映了集对分析理论的发展趋

势;首次对集对分析理论与其他方法的耦合研究做系统、全面、深入的总结,针对不同形式不确定性问题特点,创造性地提出了相应的学术见解和实用耦合分析方法,如针对风险问题和动态不确定性问题采用联系隶属度、联系期望、三角模糊数随机模拟、粗集集对势和经验模态分解等方法,为研究复杂不确定问题提供了新的方法。希望本书的出版能够起到抛砖引玉的作用,为不确定性问题研究提供参考,为后继研究起到一些引导作用。

本书内容涉及不确定问题的评价、决策和预测等方面。全书共分七章,具体撰写分工为:第一章由汪明武和金菊良负责撰写;第二章由汪明武和金菊良负责撰写;第三章由汪明武、金菊良和周玉良负责撰写;第四章由汪明武负责撰写;第五章由汪明武和金菊良负责撰写;第六章由金菊良、周玉良和汪明武负责撰写;第七章由汪明武和金菊良负责撰写。

本书的研究成果得到了国家“十一五”科技重大专项“水体污染控制与治理”(项目编号:2009ZX07106-001)、国家自然科学基金项目(项目编号:41172274;51079037;71273081;51109052和51309004)及安徽省杰出青年科技基金项目(项目编号:08040106830)等资助,谨表谢忱!

不确定性分析研究是一个正在迅速发展的、实践性强的领域。集对分析耦合方法为不确定性问题分析提供了新思路和新途径,但其发展时间短,一些理念和思路还存在争议,尚需深入开展研究和完善;无论在理论和方法,还是在应用实践,均有诸多深入研究的广阔空间。面对不确定问题本身的复杂性和人类认识的有限性,作者深知,以上粗浅认知与进展是微不足道的,谨以此书,与同行们共勉。由于作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请读者批评指正。

作 者

2013年9月于合肥

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 研究现状	2
1.2.1 不确定性分析理论研究现状	2
1.2.2 集对分析理论研究与应用现状	6
1.3 本书的目的与内容	12
第二章 集对分析方法的理论基础	13
2.1 集对分析理论的哲学基础	13
2.2 集对与同异反关系	14
2.2.1 集合	14
2.2.2 集对	15
2.2.3 同异反关系	15
2.3 联系度与联系数	16
2.3.1 基本概念	16
2.3.2 联系数特点	17
2.3.3 联系数与其他不确定函数关系	18
2.3.4 集对分析	18
2.4 集对势与偏联系数	19
2.4.1 集对势	19
2.4.2 偏联系数	20
2.5 联系隶属度与联系概率	21
2.5.1 联系隶属度	21
2.5.2 联系概率	22
2.6 联系数运算	23
2.7 集对分析建模方法论	24
2.7.1 基于集对分析建模优点	24
2.7.2 基于集对分析理论的不确定性分析方法论	25
2.8 小结	25

第三章 集对分析与广义模糊集理论耦合方法与应用	27
3.1 模糊集理论	27
3.1.1 引言	27
3.1.2 模糊集理论简介	27
3.2 集对分析与模糊集耦合方法	28
3.2.1 集对分析与模糊集关系	28
3.2.2 模糊联系度	28
3.2.3 集对分析与模糊集耦合方法	29
3.3 集对分析与三角模糊集耦合方法	31
3.3.1 三角模糊数与 α -截集	31
3.3.2 集对分析与三角模糊集耦合方法	33
3.3.3 集对分析与三角模糊数 α -截集耦合方法	35
3.4 集对分析与可变模糊集耦合方法	38
3.4.1 可变模糊集	38
3.4.2 集对分析与可变模糊集耦合方法	39
3.5 集对分析与 Vague 集耦合方法	40
3.5.1 Vague 集简介	41
3.5.2 Vague 集与集对的关系	41
3.5.3 集对分析与 Vague 集耦合方法	41
3.6 应用实例	43
3.6.1 基于模糊联系度的岩爆预测模型	43
3.6.2 基于集对分析与三角模糊数耦合的土壤重金属污染评价模型	45
3.6.3 基于集对分析和三角模糊数 α -截集耦合的城市涝灾等级评价模型	47
3.6.4 基于集对分析和可变模糊集耦合的岩爆综合预测模型	52
3.6.5 基于集对分析与 Vague 集耦合的膨胀土胀缩性评价模型	53
3.7 小结	56
第四章 集对分析与粗糙集理论耦合方法与应用	57
4.1 概述	57
4.1.1 粗糙集理论发展概况	57
4.1.2 粗糙集理论与其他不确定分析理论的关系	57
4.2 上、下近似集与属性约简	58
4.3 基于粗糙集的集对联系度表达	60
4.3.1 基于粗糙集表达的集对同异反关系	60
4.2.2 粗糙集集对联系度	61
4.4 集对分析与粗糙集耦合方法	61

4.4.1 基于粗糙集的联系隶属度评价模型	61
4.4.2 基于粗集集对势的评价模型	64
4.5 应用实例	65
4.5.1 基于粗糙集的联系隶属度评价模型应用	65
4.5.2 粗集集对势评价模型的应用	69
4.6 小结	72
第五章 集对分析与随机模拟耦合方法与应用	73
5.1 概述	73
5.1.1 引言	73
5.1.2 Monte Carlo 随机模拟概况	74
5.1.3 Monte Carlo 模拟基本原理	74
5.2 集对分析和随机模拟理论耦合的风险评价方法	76
5.2.1 基本原理与分析流程	76
5.2.2 变量的三角模糊数表达	77
5.2.3 基于同异反结构的多元联系数表达	78
5.2.4 基于 Monte Carlo 模拟的差异度系数计算模型	79
5.2.5 风险评价模型	79
5.3 应用实例	80
5.3.1 在路面性能风险评价中的应用	80
5.3.2 在隧道瓦斯突出风险评价中的应用	83
5.3.3 在自然灾害系统风险评价中的应用	86
5.4 小结	91
第六章 集对分析与动态分析耦合方法与应用	92
6.1 概述	92
6.2 集对分析与动态分析耦合方法	92
6.2.1 基于经验模态分解的集对分析动态分析方法	92
6.2.2 基于近邻估计的联系数回归分析方法	95
6.2.3 基于集对分析的自组织预测方法	97
6.2.4 基于集对权的马尔可夫链动态预测方法	100
6.2.5 基于集对相似性测度的动态聚类分析方法	103
6.2.6 基于变权的动态集对分析方法	106
6.3 应用实例	108
6.3.1 基于经验模态分解和集对分析的粮食单产波动影响分析	108
6.3.2 基于近邻估计的动态联系数回归模型在年径流预测中的应用	114
6.3.3 基于集对分析的自组织预测模型在年径流动态分析中的应用	117

6.3.4	基于集对马尔可夫链的年径流分布特征动态分析	121
6.3.5	基于集对聚类分析方法的能源消费量的动态预测	125
6.3.6	基于变权的砂土液化动态集对分析模型	129
6.4	小结	132
第七章	集对分析与其他广义不确定性理论耦合方法与应用	133
7.1	集对分析与其他不确定性分析理论耦合基础	133
7.2	集对分析与熵理论耦合方法与应用	134
7.2.1	熵理论简述	134
7.2.2	基于熵理论的集对分析方法	135
7.2.3	应用实例	136
7.3	集对分析与区间数理论耦合方法与应用	138
7.3.1	区间数理论综述	138
7.3.2	集对分析与区间数耦合的评价方法	139
7.3.3	应用实例	144
7.4	集对分析与多属性决策理论耦合方法与应用	146
7.4.1	多属性决策理论概述	147
7.4.2	基于多属性广义集对联系度的决策模型	148
7.4.3	实证分析	150
7.5	集对分析与可拓学耦合方法与应用	152
7.5.1	可拓学综述	152
7.5.2	可拓集合与集对同异反	153
7.5.3	集对分析与可拓学耦合方法	154
7.5.4	应用实例	157
7.6	基于集对分析的组合预测评价方法与应用	160
7.6.1	组合预测理论简介	161
7.6.2	基于集对分析的组合预测评价模型	161
7.6.3	应用实例	163
7.7	集对分析与神经网络耦合方法与应用	166
7.7.1	神经网络理论简介	166
7.7.2	集对分析与神经网络耦合方法	168
7.7.3	应用实例	172
7.8	小结	178
参考文献		179

第一章 绪 论

不确定性(uncertainty)问题是指研究对象系统状况不能确知的各类问题,它是普遍存在于系统科学、管理科学和工程技术等众多学科研究领域中的一类客观现象,但其表现形式复杂多样,主要表现为随机性、模糊性、灰色性、未确知性和混沌等形式,且常相互交叉或融合出现。随着社会经济和城市化的快速发展,在全球变化环境下,不确定性问题日益复杂和突出,为确保工程、社会经济活动安全与决策合理,开展富有学科特色和满足社会发展需求的不确定性分析方法研究显得十分必要和迫切,并已成为不确定性系统研究的根本问题和国内外相关学科研究的重要前沿。

1.1 概 述

不确定是相对确定而言的,确定和不确定是一对矛盾统一体。确定性是指事物本身和发展中呈现出的有规律的、必然的、清晰的和精确的属性,而不确定性则是指无序的、或然的、模糊的和近似的属性(王清印等,2001)。可见,不确定性在质与量上的含义或界限模糊,这是由于物质运动、事物间的差异和主观认识达不到客观要求所导致,它们多不能用精确数学描述。随着大自然的演化,以及经济和社会的发展,系统的复杂性和不确定性日趋增加和突出,且分析问题已从简单的随机不确定性问题发展为概念和边界模糊性的、或形态和结构自相似的、或灰色信息量的、或信息未确知性的、或矛盾的等多重信息交叉和耦合的复杂不确定性问题,对不确定性分析理论提出了更高的要求。然而,不确定分析方法的发展水平却远落后于时代发展和工程需求,传统的不确定性分析方法已远不能满足上面复杂不确定性问题提出的要求,为此许多学者基于不同出发点和目的,提出针对模糊、随机、中介和信息不完全所致的不确定性系统理论和方法,取得了有益的成果,促进了不确定性分析理论的发展,但它们在统一数学描述确定和不确定性及转化方面尚存在困难。实际上,确定与不确定是揭示与反映事物相互依存与联系的辩证统一关系,它们存在本质区别,但在一定条件下又可相互转化。为了客观地描述确定和不确定系统,以及更好地解决实际不确定性问题,探讨统一的确定和不确定环境下的耦合分析方法,显然具有深远的理论意义和广阔的应用前景。

1.2 研究现状

1.2.1 不确定性分析理论研究现状

不确定性概念源于 James Mill 于 1836 年发表的《政治经济学是否有用》一文中提到的“不可避免的是,如果经济学家要与不确定性打交道,就必须理解人类行为实际面临的不确定性,人类必定要受到信息接收与计算能力的限制。”(王清印等,2001)。可见,人类对事物的辨识过程,是主体和客体相互作用的结果,而信息交融必然出现不确定性。

不确定问题研究是随着人类社会发展而发展的,国外的研究开始于 16 世纪 Cirolamo Cardano 对随机性的讨论,中国《易经》中也充满了这种思想。随着系统科学的发展,人们对不确定性问题认识的不断深入,不确定性系统已发展到了高级阶段。人们为了满足发展的需要、客观和准确地反映不确定性问题,提出了各种不确定性分析方法,主要有概率论与数理统计理论、模糊数学、灰色系统理论、可拓理论、粗糙集理论、未确知数学、区间数理论、分形与混沌分析、属性识别理论、计算智能和集对分析等,在此将它们统称为广义不确定性分析理论,下面分别阐述它们的研究现状。

1. 概率和随机统计理论

1657 年 Huygens 研究发现在相同条件下每次试验或观察之前无法预知确切的结果,并出版了著作 *Tractatus de Ratiociniis in Ludo Aleae*,此种不确定性是随机性,描述的是“非此即彼”现象,其特征函数的取值为 $\{0, 1\}$,现已发展为研究偶然现象规律的数学分支—概率论与数理统计。目前研究随机不确定性的方法主要有数理统计方法、随机模拟方法、贝叶斯理论方法和随机过程方法等。

2. 模糊数学理论

不确定性分析理论研究直到 1965 年再次进入新时期,美国学者扎德(L. A. Zadeh)将论域中以映射表示的普通集合的特征函数发展为隶属函数,并创建了模糊集合(fuzzy set)和模糊数学理论,模糊集的信息值为 $[0, 1]$,描述了客观事物的差异在中介过渡时呈现的“亦此亦彼”性,模糊数学理论着重研究“认知不确定性”问题,解决由于评定事物的标准或事物本身的定义没有明确的“边界”而构成的不确定性问题。模糊数学基于隶属函数将不确定性加以量化,转化为确定性,并利用传统的数学方法进行分析处理,目前已发展为涉及面最广的不确定性系统分析理论。陈守煜(2005)认为模糊集突破了传统数学思维,但它仍是以静态模糊集合概

念去描述动态可变的模糊现象和事物,存在理论缺陷,并提出了基于可变模糊集合为基础的不确定性分析方法,推动了不确定性分析理论的发展。近期,Liu(2007)结合概率论和模糊数学,定义了混合变量,建立了机会理论和不确定规划理论。

3. 粗糙集理论

为处理不确定性和含糊性知识,波兰逻辑学家帕拉克(Z. Pawlak)于1982年首次提出了粗糙集(rough set,又称粗集)理论,将那些无法确认的个体都归属于边界线区域,定义边界线区域为上近似集和下近似集之差集(Pawlak, 1982, 1998),并认为知识即是将对象进行分类的能力,假定起初对全域里的元素具有必要的信息或知识,通过这些知识能够将其划分到不同的类别,而当两个元素具有相同的信息时,则认为它们是不可区分的一种等价关系。粗集理论根据所获得的已有知识分析与处理不完备的信息,通过知识约简发现数据中隐含的、潜在有用的规律,具有无需提供相关数据集外的任何先验信息,就可找出其内部数据的关联关系和特征的优点,并用严格的数学公式描述问题,更具有客观性。目前此理论得到国内外各领域的广泛关注和应用。

4. 灰色系统理论

现实不确定性问题往往信息不完全。邓聚龙于1982年创建的灰色系统(grey system)理论则为解决此类问题提供了新思路,该理论定义“信息不完全,关系不分明”的系统为灰色系统(刘思峰等,2010),把部分信息已知、部分信息未知的信息称为灰色信息(grey information)。灰色系统是以小样本、贫信息不确定性系统为研究对象,主要通过对部分已知信息的生成、开发和提取有价值的信息,实现对系统运行规律的正确描述和有效控制。灰色系统理论是现代不确定性理论中一个新领域,经过20多年的发展,现已基本建立起相应的学科结构体系,并广泛应用于众多领域,并都取得了良好的社会和经济效益。

5. 可拓学理论

事物随着环境、条件和时间的变化而变化,而经典数学是抽象出事物的量与形来研究数量关系和空间的形式,但众多研究表明,解决矛盾问题时,形式化方法仅能考虑事物的量变,很难考虑论域中事物本身及其性质的可变性,从而使得很多矛盾问题无法用经典数学方法去解决。为解决现实世界中的矛盾问题——不相容问题,蔡文于1983年发表了《可拓集合和不相容问题》论文,为创建物元和可拓学理论奠定了基础,经过30年的发展,物元和可拓理论已发展为系统科学、思维科学和数学交叉的边缘学科——可拓学(extenics)(蔡文,1983,2000)。可拓学提出了物元和可拓集合两个重要概念,物元是以事物、特征及事物关于该特征的量值所组成

的三元组,一个事物可具有众多的特征元,从而可把客观世界看成一个物元世界,把处理客观世界中的矛盾问题变成处理物元之间的矛盾问题。物元具有内部结构的可变性,因而物元变换为解决矛盾问题而进行的平行性、整体性和变通性的思维活动提供了可行的工具,也更贴切地描述客观事物变化的过程。可拓集合的概念是在经典集合和模糊集合的基础上发展起来的,用 $(-\infty, +\infty)$ 中的数来描述事物具有某种性质的程度,并描述了事物“是”与“非”的相互转化(蔡文,1983,1999)。利用可拓集合可以对不同领域中“不行变行”、“不是变是”、“不知变可知”的过程进行形式化描述、推理与变换,从而得到解决矛盾问题的策略的定性部分和定量部分。可拓学理论使人们既能利用物元的可拓性来解决矛盾问题,也使人们可以按照一定的程序进行创新,去制定解决问题的方案,并可利用物元变换的传导性去预防事物变化可能引起的副作用。可拓学现已成功应用于经济、管理、决策和过程控制等学科,为不确定性分析问题研究开辟了新方法。

6. 未确知数学

工程不确定性问题通常具有不确定性、不完整性,而获取的数据具有不精确性、不一致性,总体呈现未确知性,应用经典数学方法已不能满足实际问题的要求。为了适应工程设计的需要,中国工程院院士王光远先生于1990年提出了未确知信息(unascertained information)的概念(王光远,1990)。未确知信息是有别于随机信息、模糊信息和灰信息的一种不确定信息,是指由于决策者所掌握的证据尚不足以确定事物的真实状态和数量关系,从而带来的纯主观认识上的不确定性信息。随后刘开第等在理论上建立了未确知数学(刘开第等,1999),并提出了盲信息、未确知测度概念,初步形成了未确知数学的理论体系,为研究不确定性系统建立了一种新的理论及方法。盲信息则是表达同时包含灰性、模糊性、未确知性和随机性等几种不确定信息的较为复杂的未确知信息。构建的未确知隶属函数可满足测量准则的测量结果,且运算等同于通常集合的基数运算,弥补和修正了模糊集的不足和缺陷。现已广泛应用于结构软设计理论、广义可靠性理论、结构维修理论和专家系统理论等领域。

此外,不确定分析理论还有区间数理论(Sengupta and Pal,2000)、云理论(李德毅和杜鹁,2005)、多属性决策理论(Hwang and Yoon,1981)、广义智能评价方法(金菊良和魏一鸣,2008)、混沌和分形及突变等理论,在此不再一一叙述。

7. 不确定性理论间的区别及联系

当今主要的不确定性分析理论的特点与区别见表1.1。由表1.1可知,各种不确定性分析理论的研究对象和描述不确定性的函数不同,但它们主要还是对普通的Cantor集合理论的改进和推广,分别刻画了不同形式的单种不确定性,如模

模糊数学理论刻画了模糊性,粗糙集理论描述了不精确性,灰色系统理论刻画了灰性,未确知数学理论刻画了未确知性,可拓学理论则刻画了事物的不可相容性等。客观事物及其过程均不同程度地存在着不确定性,但不确定性蕴含在客观表现及其主观识别之中,人们对其认识也表现出认知水平和描述方法的差异,促使人们创立了不同的不确定性分析理论。表 1.1 中的不确定性分析理论都是研究不确定性系统问题的重要方法,由于研究角度和研究方法的不同,它们的应用范围和优点也是明显有区别的。

表 1.1 不确定性理论间的区别及联系

方法	描述事物的性质及刻画方法	数据	集合及量化	函 数	先验知识
随机理论	随机性相容问题 概率	大量统计及 调查数据	Cantor 集 $\{0,1\}$	概率密度函数	参考
模糊数学	概念分界的模糊性 隶属度	部分统计数据	模糊集 $[0,1]$	隶属函数	参考
粗糙集理论	对象间不可分辨性 上、下近似集	客观信息	粗糙集 $[0,1]$	近似算子	不参考
灰色系统理论	少数据、部分信息已知 灰数测度	部分调查数据	灰集 $[0,1]$	白化函数	不参考
可拓学	对象间矛盾性 物元分析	大量统计或 调查数据	可拓集 $(-\infty, \infty)$	关联函数	不参考
未确知数学	交叉和融合的不确定性	实测数据	未确知集 $[0, \alpha]$	盲数、未确知数	参考
区间数理论	基于集值统计理论,在取大 取小运算中充分考虑中间值	无特殊要求	区间 $[0,1]$	区间矩阵	仅参考
属性数学	从思维角度给出属性集合, 并构建数学属性测度空间	无特殊要求	属性集 $[0,1]$	测度区间矩阵	不参考
集对分析	确定与不确定性统一描述 集对分析	无特殊要求	集对 $[-1,1]$	联系数	参考

综上所述,前面介绍的不确定性分析理论均有各自的特点和优势及缺陷,它们分别从随机性、模糊性、未确知性、矛盾性和灰色性等角度出发,分析不确定现象间的相互关系,并用不同含义的定量指标表示相关程度。经典集合论的产生为信息的处理提供了可行的途径,但也产生了认识和逻辑上的悖论;粗糙集理论是基于可利用信息的客观分析方法,但它忽视了可利用信息的模糊性和可能存在的统计信息;模糊集虽然解决了认识的模糊不确定性这一客观性,但其隶属函数多数是凭经验给出的,使认识在对立中确定化,导致忽略了主体认知水平的缺陷,且是用隶属

度总体上反映对象间的模糊关系;随机理论的概率值是基于人们的经验和知识(主观概率)或事件在大量的重复实验中实验结果的相对频率(客观概率)来表达的,因而带有明显的主观性,是从总体上反映了研究对象间的关系;灰色系统分析方法则用灰关联度来总体上反映对象间的灰色关系,但在表达对象间的关系时集中体现在一个定量指标上。可见,这些不确定性分析方法主要是从总体上反映研究对象间的关系,可能导致漏失重要的关系结构,它们一般只适用于特定的随机性、模糊性、灰色性等不确定性关系分析,尚不适用于多种类型及其耦合的不确定性关系的分析,且它们往往只分析不确定性现象的静态特征,而不关注不确定性现象的动态特征以及驱动这些动态特征变化的物理机制,它们也不考虑不确定性信息与确定性信息的联系与转化。为克服上述不足,我国学者赵克勤于对立统一观点原创性地提出了一种新的不确定性分析方法——集对分析(set pair analysis, SPA),成功地把确定和不确定的辩证思维转换成可计算的数学模型(赵克勤, 2000)。集对分析理论将不确定性与确定性作为一个对立统一体加以研究,并提出用联系数来描述确定性与不确定性在系统中的相互联系、相互影响和相互制约和相互转化的辩证关系,该方法丰富了当今系统不确定性分析理论,还为各领域中不确定问题分析提供了具有广泛启发意义的新思路。下面就集对分析理论的研究进展及应用状况作进一步分析和阐述。

1.2.2 集对分析理论研究与应用现状

集对分析理论是中国学者赵克勤研究员于1989年提出的一种新颖的确定和不确定系统分析理论,该理论基于哲学中的对立统一、认识层次的相对性和普遍联系的原理,通过同异反完整有效刻画确定不确定系统的对立统一关系,并以联系数来描述系统中确定和不确定性的相互联系、相互影响与相互制约与相互转化的关系,实现整体和局部全面的辩证分析和数学处理,为统一处理确定和不确定性关系提供了新思路,且为随机性、模糊性、未确知性和不可分辨性等多重不确定性融合提供了统一的描述和处理方法,该理论已在工程界、管理及医学等领域得到广泛应用,并取得很好效果。集对分析理论是一门新学科,其理论体系还有待完善,经过二十几年的发展,已取得了长足的发展,下面按其应用领域分别展开阐述。

1. 在水利学科方面的应用及进展

水利学科面临的不确定问题往往是处于复杂的开放系统和人类活动加快过程中,具有一定确定性、随机性和模糊性等不确定性(金菊良和丁晶, 2002; 金菊良和魏一鸣, 2008; 宋松柏等, 2012; 王栋等, 2012),而集对分析理论为水利学科中不确定性问题研究提供了新途径,并在其学科中得到了广泛应用,取得了一些研究成果和进展,特别是在水文学水资源中的应用方面出版了相关著作(王文圣等, 2010),

丰富了水文水资源学的研究内容,补充、完善和改进了传统的水文水资源分析计算、预测、评价及决策方法,主要的研究进展如下:丁晶、金菊良和王文圣结合该学科特点和应用要求,将集对分析引入水文水资源学科,初步建立了水文水资源不确定性分析的集对分析新途径。李凡修等(2000)建立了湖泊水质富营养化评价的集对分析法,并将该法运用于青海湖、武汉东湖、杭州西湖、安徽巢湖和昆明滇池的富营养化状况评价。冯利华等(2004)根据集对分析的原理和方法,对水资源变化趋势的预测进行了研究,利用前期的预测因子进行计算,使得集对分析具有预测功能,并通过反复调整预测因子各区段的分界值,使水资源要素计算等级和实际等级的历史拟合率达到最大,该模型方法是对水资源变化趋势预测研究的一种新尝试。王栋等(2004)将集对分析应用于水环境评价领域,建立了基于集对分析的水体营养化评级一级模型和基于集对分析-模糊集合论的水体营养化评价二级模型。张薇薇等(2008)将模糊联系度应用于区域地下水资源承载力综合评价中,取得较好的结果。金菊良等(2008b, 2012a)建立了基于联系数的流域水安全评价模型,实现既可测度流域水安全整体状态的高低程度,又可识别影响流域水安全状态的重要指标和重要子系统,并在巢湖流域水安全评价中得到了成功的应用。金菊良等(2009)基于集对分析提出了水资源变化趋势的相似预测模型,并应用于年径流预测中,取得了较好的预测结果。近年来,集对分析在水文水资源不确定性分析中的应用研究日益深入,取得了丰硕的研究成果。

2. 在土木及地学方面的应用及进展

土木及地学问题涉及大量的确定信息、未知信息和不确定信息。随着城市化和工业化的加快,人类活动呈现出空间扩展性和时间瞬时性的特点,工程活动具有资金投入规模大、施工周期长、不可预见风险因素多和对社会环境影响大等特点,如何解决重大工程与发展相协调及灾害风险控制的难题已成为当今社会和经济可持续发展的一个重要的战略课题。然而,目前国内外已有的工程活动多是依赖于专家调研与预报,缺乏系统理论指导和技术支撑,难以对工程建设提供有效的科学指导,已很难适应复杂的城市工程需求,以往人们应用灰色系统、专家系统、突变理论和模糊数学方法等方法来解决此难题,它们促进了城市工程安全问题的评价及分析,但它们存在难以描述工程安全问题中的确定性和不确定性的统一问题。而集对分析理论可克服这缺陷,并能有效地刻画确定不确定系统的对立统一关系,符合自然辩证法和人类思维方式,为城市工程安全问题的系统分析提供了新途径。龚士良(1998)把 SPA 用于上海市地面沉降的控制研究;王国强等(2004)应用集对分析理论推导了适合于多元回归分析的联系度公式,并建立了天气预报多元回归集对分析模型,实际应用结果表明该模型较传统模型明显地提高了天气预报准确率。王广月等(2003)、汪菁等(2006)、秦植海等(2010)将集对分析理论和层次分析