

# 灰预测与决策方法

● 肖新平 毛树华 著



科学出版社

013028297

N941.5  
04

# 灰预测与决策方法

肖新平 毛树华 著



国家自然科学基金  
国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金  
国家教育部人文社会科学研究项目  
国家教育部留学回国人员科研启动基金 资助项目  
中国博士后科学基金  
武汉市软科学研究计划项目  
中央高校基本科研业务费专项基金

科学出版社

北京



北航

C1634762

N941.5  
04

01305858

## 内 容 简 介

本书重点介绍灰预测与灰决策的基本方法和应用技术,集中反映作者及其团队多年来在灰理论及其应用方面的研究积累,注重吸收国内外同行相关的最新研究成果,系统展示灰预测与决策方法的概貌及其前沿发展动态。

全书共分九章,包括灰预测与决策研究概况、灰预测与决策基础、灰关联决策、灰评估决策、灰优化决策、GM(1,1)预测模型、特殊序列灰预测模型、多维灰预测模型、灰预测与决策方法在智能交通中的应用等。内容上基本覆盖灰色系统理论的经典内容,研究方法上突出矩阵分析和以邓氏关联度为主线的新思路,应用上强调方法在工程技术和经济管理中的应用背景和应用技术等。书中绝大部分内容均为作者及其团队的研究成果。

本书适合作为高等学校理、工、农、医、天、地、生及经济、管理类各专业大学生和研究生教材,也可供管理干部、科研人员、工程技术人员、高校教师等参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

灰预测与决策方法/肖新平,毛树华著. —北京:科学出版社,2013

ISBN 978-7-03-037012-9

I. ①灰… II. ①肖… ②毛… III. ①灰色预测 ②灰色决策-决策方法  
IV. ① N941.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 045483 号

责任编辑:陈玉琢/责任校对:宋玲玲  
责任印制:钱玉芬/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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2013年3月第一版 开本:B5(720×1000)

2013年3月第一次印刷 印张:22 1/4

字数:440 000

定价:88.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

灰信息、随机信息、模糊信息和粗糙信息是已知的四种单式不确定性信息,对各种不确定性信息的数学处理是当今科学研究中的热点之一.灰理论自1982年创建以来不断取得新进展,但仍有许多问题一直在探索中,如在研究方法上缺乏统一的量化处理手段,从而难以探索不同灰色模型的建模机理、功能和适用范围等.本书重点介绍灰预测与决策的基本方法,在研究方法上突出矩阵分析和以邓氏关联度为主线的新思路,结合作者及其团队多年来在灰理论及其应用方面研究积累和国内外同行相关的最新成果,系统展示灰色系统方法的概貌及其前沿发展动态.作者的主要考虑如下:

(1) 将灰色系统基本方法划分为灰预测和灰决策两大类.灰决策包括灰关联决策、灰评估决策、灰优化决策等;灰预测包括GM(1,1)预测模型、特殊序列灰预测模型、多维灰预测模型等.

(2) 对于灰建模与预测技术,提出矩阵分析的量化处理方法.将灰生成纳入到矩阵体系中考虑,通过矩阵运算达到各种灰生成的目的,并分析各种灰预测模型在建模中的差异性和特点.这样可以探讨建模规律,并使实际预测技术及计算简化.

(3) 对于大部分灰决策技术,提出以邓氏关联度为主线的描述方法.以邓氏关联度可以描述区间关联分析、多维关联分析、矩阵关联分析、混合关联分析、时滞关联分析、灰靶决策、灰风险决策、灰随机决策和灰色群决策等.对于灰优化决策,采用边界线性规划和漂移技术进行统一处理.

(4) 淡化理论推导,突出方法使用,强调应用背景.全书淡化灰预测与决策方法的理论推导,突出方法的原理、思路和特点,强调方法的使用范围、使用背景和使用技巧.例题选择均来源于实际应用领域,其中智能交通系统是应用的重点.

(5) 尽量展现灰预测与灰决策研究的前沿发展动态.统计整理中国学术期刊网、Ei Village 数据库、ISI Web of Knowledge 数据库收录的灰色系统论文情况,列出受国家自然科学基金资助的有关灰色系统研究项目,介绍本领域国内外部分专家学者及其团队的研究成果.

本书由肖新平总体策划、主要编写和统一定稿,其中肖新平执笔了第1,3,4,6章;毛树华执笔了第7~9章,参加编写第2章;刘军编写第5章,参加编写第2章.此外,郭金海和郭欢等博士生也做了大量工作.

本书在写作和出版过程中,得到了灰色系统理论创始人和英国 *The Journal of Grey System* 杂志主编邓聚龙先生、中国优选法统筹法与经济数学研究会副理事长

兼灰色系统专业委员会理事长刘思峰教授、副理事长张岐山教授、加拿大曼尼托巴大学的 Xikui Wang 教授、英国德蒙福特大学的 Yingjie Yang 教授、科学出版社陈玉琢编辑等的热情支持和指导, 在此致以衷心的感谢!

本书出版得到了国家自然科学基金 (项目编号: 70971103、70471019)、国家教育部人文社会科学研究项目 (项目编号: 11YJC630155、12YJAZH022)、国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金 (项目编号: 20120143110001、200804970005)、国家教育部留学回国人员科研启动基金 (教外司留 [2009]1001)、中国博士后科学基金 (项目编号: 2012M521487)、武汉市软科学研究计划项目 (项目编号: 200840533301-04、201040333112-09)、中央高校基本科研业务费专项基金 (项目编号: 2010-Ia-016, 2012-Ia-034) 等项目的资助!

由于作者水平有限, 书中难免存在不足之处, 恳请读者批评指正!

肖新平 毛树华

2012年9月29日

# 目 录

## 前言

第 1 章 灰预测与决策研究概况	1
1.1 引言	1
1.2 灰色系统研究团队	3
1.3 灰色系统研究成果	7
1.3.1 灰色系统研究论文	7
1.3.2 灰色系统研究项目	9
第 2 章 灰预测与决策基础	12
2.1 灰预测数据信息	12
2.2 函数变换灰生成技术	13
2.2.1 仿射变换生成	14
2.2.2 函数变换生成	17
2.3 层次变换灰生成技术	26
2.3.1 累加生成与累减生成的矩阵表示	26
2.3.2 广义累加生成的矩阵表示	31
2.4 缓冲算子灰生成技术	35
2.4.1 弱化算子	36
2.4.2 强化算子	41
2.5 灰数与白化函数	43
2.5.1 灰数的信息覆盖	43
2.5.2 白化函数	44
2.6 基本粒子群算法	46
2.6.1 算法原理	46
2.6.2 算法流程	48
第 3 章 灰关联决策	50
3.1 点关联分析	50
3.1.1 点关联度模型	50
3.1.2 点关联度特点	53
3.1.3 应用中应注意的问题	55
3.1.4 点关联分析方法应用	55

3.2	区间关联分析	63
3.2.1	区间关联度	63
3.2.2	区间关联度应用	66
3.2.3	区间关联分析推广——多维关联分析	68
3.3	矩阵关联分析	69
3.3.1	矩阵关联度	69
3.3.2	矩阵关联度应用	72
3.4	混合序列关联分析	77
3.4.1	混合序列灰关联度	77
3.4.2	混合关联度应用	85
3.5	时滞关联分析	86
3.5.1	时滞灰关联分析	86
3.5.2	时滞灰关联分析应用	87
3.6	灰关联决策的灵敏度分析	89
3.6.1	灰关联决策原理	90
3.6.2	属性值的灵敏度分析	90
3.6.3	属性权重的灵敏度分析	91
<b>第 4 章</b>	<b>灰评估决策</b>	<b>95</b>
4.1	灰统计决策	95
4.1.1	灰统计决策方法	95
4.2	灰聚类决策	99
4.2.1	灰聚类决策	99
4.2.2	灰聚类决策改进与推广	104
4.3	灰多局势决策	106
4.3.1	灰多局势决策方法	106
4.4	灰靶决策	110
4.4.1	灰靶决策方法	110
4.5	灰风险决策	114
4.5.1	灰风险决策方法	114
4.5.2	实例分析	116
4.6	灰随机决策	117
4.6.1	灰随机决策方法	118
4.7	灰色群决策	124
4.7.1	灰色群决策方法	125

第 5 章 灰优化决策	131
5.1 灰线性规划	131
5.1.1 灰线性规划基本概念	131
5.1.2 解集之间的关系	133
5.1.3 灰线性规划解法	137
5.2 灰色多目标线性规划	144
5.3 灰二层规划	151
5.3.1 灰色二层线性规划模型	151
5.3.2 灰色二层线性规划模型解法	155
5.4 灰色混合整数线性规划	158
5.4.1 灰色混合整数线性规划	158
第 6 章 GM(1,1) 预测模型	165
6.1 GM(1,1) 模型的发展	165
6.2 GM(1,1) 模型及三种表示	166
6.2.1 GM(1,1) 模型的显示表示	166
6.2.2 GM(1,1) 模型的参数包表示	169
6.2.3 GM(1,1) 模型的矩阵表示	169
6.3 GM(1,1) 模型形式及其误差分析	172
6.3.1 GM(1,1) 模型形式	172
6.3.2 定义型与内涵型等之间的误差分析	173
6.3.3 内涵型与白化型之间的误差分析	174
6.3.4 离散型与白化型之间的误差分析	178
6.3.5 GM(1,1) 模型与指数回归模型比较	180
6.4 GM(1,1) 模型的建模条件	181
6.4.1 建模条件与建模机理	181
6.4.2 发展系数和级比的相容区与界区	182
6.4.3 GM(1,1) 建模步骤	184
6.5 GM(1,1) 模型优化方法	189
6.5.1 初始条件优化	189
6.5.2 初始点优化	191
6.5.3 病态性及其优化	195
第 7 章 特殊序列灰预测模型	202
7.1 GM(1,1, $\alpha$ ) 模型	202
7.1.1 GM(1,1, $\alpha$ ) 模型	202
7.1.2 背景值系数与 GM(1,1, $\alpha$ ) 模型参数之间的关系	204



7.1.3	GM(1,1, $\alpha$ ) 模型发展系数的性质分析	207
7.1.4	背景值系数 $\alpha$ 对 GM(1,1, $\alpha$ ) 模型相对误差的影响	208
7.1.5	实例分析	209
7.2	非等间隔序列 GM(1,1) 模型	214
7.3	含跳跃点序列 GM(1,1) 模型	221
7.3.1	含跳跃点序列及其灰生成	222
7.3.2	含跳跃点序列 GM(1,1) 模型	223
7.3.3	非等间隔含跳跃点序列 GM(1,1) 模型	226
7.4	阶段型序列 GM(1,1) 模型	233
7.4.1	等间隔阶段型序列 GM(1,1) 模型	233
7.4.2	非等间隔阶段型序列 GM(1,1) 模型	236
7.5	缓冲算子作用下灰预测模型	243
7.5.1	弱化算子作用下灰色模型	243
7.6	GM(1,1) 幂模型	247
7.6.1	GM(1,1) 幂模型	248
7.6.2	灰色 Verhulst 模型新解法	251
7.7	GM(1,1  $\tau, r$ ) 模型	253
7.8	GM(1,1  $\tan(k - \tau)p, \sin(k - \tau)p$ ) 模型	259
7.9	广义累加 GM(1,1) 模型	262
<b>第 8 章</b>	<b>多维灰预测模型</b>	<b>272</b>
8.1	GM(1, $N$ ) 模型	272
8.1.1	GM(1, $N$ ) 模型	272
8.1.2	积分变换下 GM(1, $N$ ) 模型	277
8.2	GM(0, $N$ ) 模型	281
8.3	GM(1, $N$   $\tau, r$ ) 模型	285
8.4	MGM(1, $N$ ) 模型	288
8.5	MGM(1, $N$   $\tan(k - \tau)p, \sin(k - \tau)p$ ) 模型	295
<b>第 9 章</b>	<b>灰预测与决策方法在智能交通中的应用</b>	<b>300</b>
9.1	智能交通信号灯动态优化设计方法	302
9.1.1	智能交通信号灯优化设计原理	302
9.1.2	实例分析与模拟	306
9.2	基于小波分解与重构的交通流预测方法	308
9.2.1	基本原理与方法	309
9.2.2	实例分析	310
9.3	基于振荡因子的短时交通流灰色建模与预测	313

---

9.3.1 振荡交通流的灰色建模·····	313
9.3.2 实例分析·····	316
9.4 灰色关联决策在公路网综合评价中的应用·····	318
9.4.1 公路网综合评价的灰关联决策方法·····	318
9.4.2 全国九省(市)地区公路网状况综合评价·····	320
<b>参考文献</b> ·····	<b>324</b>
<b>索引</b> ·····	<b>342</b>

# 第1章 灰预测与决策研究概况

## 1.1 引言

20 世纪后半叶, 在系统科学和系统工程领域, 各种不确定性系统理论和方法不断涌现, 灰信息、随机信息、模糊信息和粗糙信息是已知的四种单式不确定性信息, 并形成四种典型的不确定性理论, 此外还有可拓学、未确知数学、集对分析等. 这些成果从不同角度和不同侧面描述和处理各类不确定信息, 揭示复杂系统内部更为深刻和更为本质的内在规律, 极大地促进了科学技术的发展. 各种不确定性新理论和方法见表 1.1.

表 1.1 不确定性新理论与方法

理论名称	建立时间	创立者	标志性工作
模糊数学	1965 年	L.A.Zadeh	Fuzzy sets. <i>Information and Control</i>
粗糙集理论	1982 年	Z.Pawlak	Rough sets. <i>International Journal of Information &amp; Computer Science</i>
灰色系统理论	1982 年	邓聚龙	Control Problems of Grey System. <i>Systems &amp; Control Letters</i>
可拓学理论	1983 年	蔡文	可拓集合和不相容问题. 科学探索时报
集对分析	1989 年	赵克勤	集对与集对分析 —— 一个新的概念和一种新的系统分析方法. 全国系统理论会议论文
未确知数学	1990 年	王光远	论未确知信息及其数学处理. 哈尔滨建筑工程学院学报

灰色系统理论是 1982 年由我国著名学者邓聚龙教授创立, 是“以部分信息已知, 部分信息未知的小样本、贫信息”不确定性系统为研究对象的一门系统科学新学科. 主要通过对“部分”已知信息的生成和开发, 提取有价值信息, 实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控, 具有原创性科学意义, 是我国对系统科学的新贡献. 灰理论经过 30 多年发展, 已基本建立起一门新兴学科的结构体系. 其主要内容包括以灰色朦胧集为基础的理论体系, 以灰色关联空间为依托的分析体系, 以灰色序列生成为基础的方法体系, 以灰色模型 (GM) 为核心的模型体系, 以系统分析、评估、建模、预测、决策、控制和优化为主体的技术体系. 其理论基础是灰朦胧集, 方法基础是系统科学和应用数学, 实践基础是系统工程应用, 哲学基础是马克思主义认识论和实践论. 其应用领域已十分广泛, 涉及农业科学、经济管理、环境科学、医药卫生、矿业工程、教育科学、水利水电、图像信息、生命科学、控制

科学和航空航天等众多领域,取得了显著的社会效益和经济效益(刘思峰等,2008),如图 1.1 所示.

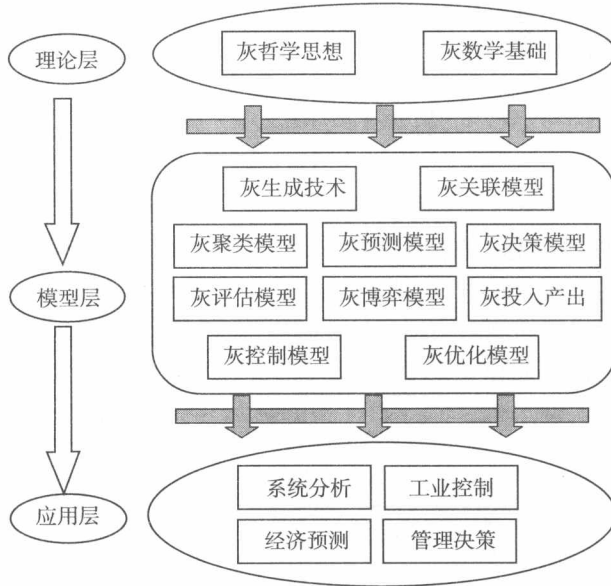


图 1.1 灰色系统三层体系结构图

灰色系统理论作为特有的灰信息处理方法, 解决实际问题中大量存在的少信息不确定性问题的系统科学新分支, 其特点是“少数据建模”, 与概率论、模糊数学、粗糙集理论等不确定性理论有着明显的区别(张岐山, 2002), 详见表 1.2.

表 1.2 几种不确定性理论的区别

项目	概率论	模糊数学	粗糙集理论	灰色系统理论
研究对象	大样本不确定	认知不确定	知识的粒度	小样本不确定
理论基础	康托集	模糊集	粗集	灰朦胧集
理论依据	概率分布	隶属度函数	等价关系	信息覆盖
处理手段	概率统计	边界取值	知识简化	灰生成
理论特点	多数据	凭经验	有限数据	少数据
理论要求	典型分布	隶属度可知	离散集合	任意分布
理论目标	历史统计规律	认知表达	知识核	现实规律
思维方式	重复试验	过度性分析	案例推理	多角度
信息准则	无限信息	经验信息	有限信息	最小信息

可见, 上述四种理论都有自身的特点和不同的应用范围, 它们之间并非特殊与一般的关系, 而是处理问题的四种不同途径. 对一个实际问题, 到底采用哪一种方法, 主要取决于系统的特征特点和系统所表现出的信息量.

## 1.2 灰色系统研究团队

灰色系统理论的迅速发展及其在众多科学领域中的成功应用,赢得了国内外学术界的充分肯定和关注.目前,中国、英国、美国、日本、澳大利亚、加拿大、奥地利、俄罗斯、印度、南非、土耳其、中国台湾、中国香港等国家、地区及国际组织有许多知名学者从事灰色系统研究和应用.例如,有日本早稻田大学 Morita, Hironabu 教授(灰色预测)、澳大利亚莫纳什大学 B. T. Kuhnell 教授(灰色诊断)、澳大利亚西澳大学 T. B. Kirk 教授(灰色模糊分析)、美国东肯塔基大学 K. W. Ng David 教授(灰色模糊比较)、美国宾州州立 SR 大学 J. Forrest 教授(灰色模型)、美国圣地亚国家实验室 G. D. Cable 教授(灰色分析)、加拿大多伦多大学 D. L. Olson 教授和 Desheng Wu 教授(灰关联决策)、印度科学院 Subhankar Karmakar 博士(灰色模糊优化模型)、南非开普敦大学 Renkuan Guo 教授(两阶段灰色模型)、英国德蒙福特大学 Yingjie Yang 博士(灰数学)、英国威尔士大学 Roland W. Lewis 教授(灰色优化模型)、土耳其阿塔图克大学 Koksal Erenturk 教授(灰预测技术)、土耳其海峽大学 Erdal Kayacan 教授(灰色 Verhulst 模型)、中国台湾中央大学吴汉雄教授(灰色评估)、温坤礼博士(灰色建模)、大溪大学黄有评教授(灰色控制)、大同大学卢鸿卿教授(灰关联分析)、成功大学林启源教授(灰色神经网络)和台湾大学吴家麟教授(灰色图像压缩)等.

国内是灰色系统研究的主战场,涌现出了一批杰出学者及其团队,为灰理论建立、发展、完善和推广作出了重要贡献.陈绵云教授是最早的研究者之一,为创建灰色系统理论贡献卓越.他研究提出了灰色动态映射理论、灰色系统稳定性判据及镇定方案、灰色经济状态模型、灰色预测控制原理、系统云理论及积分生成变换、趋势关联分析、灰色动态建模原理、SCGM(1,  $h$ ) 模型、级差格式、泛算子结构、灰色模糊系统优化决策和灰色模糊控制器等,其成果为错综复杂事物的不确定性分析、“贫”信息处理、灰色动态建模与控制奠定了新的理论基础.山西是最早研究和应用灰色系统理论的省份之一,曾举办了全国第一个灰色系统培训班,召开了第一次灰色系统与农业学术讨论会,很多灰色系统的理论成果曾在该省农村经济中获得精彩应用和理论充实.以山西农业科学研究院王学盟研究员为主体的团队在这方面做了大量创造性工作,并出版了《灰色系统模型在农业经济中的应用》、《灰色系统预测决策建模程序集》等著作.河北经贸大学的王清印教授 40 多年一直从事灰色数学基础及不确定系统理论等方面的研究,先后合作或独立建立了灰集合、泛灰集合、泛模糊集合、灰色数学、不确定性系统理论、不确定性系统预测与决策理论等,出版了《灰色系统理论的数学方法及其应用》、《灰色数学基础》、《不确定系统理论及其在预测与决策中的应用》等.中国科学院“百人计划”入选者夏军教授

于 1984 年开始积极从事水科学不确定性研究, 将灰色系统理论不断引入其科学领域, 研究了水文系统中的“灰”概念及其灰集合基础的系统分析原理、水文尺度及灰色系统分析、水文信息理论与信息度量方法、水文灰参数识别与不确定性度量、水文灰色系统模拟与预测、灰关联模式的识别与灰评估、流域水量水质统一管理 & 灰色系统方法等, 建立了独具特色的灰色系统水文学的理论体系. 中国地质大学的徐忠祥教授和吴国平教授主要是把灰色系统理论与地质找矿、油气闭圈等实践有机结合, 建立了矿床灰色预测原理和油气闭圈灰色评价等新系统分析方法, 包括矿产资源系统的灰色特性、矿床灰色预测模型、矿床灰色模式识别、矿床灰色定位预测、油气信息提取的灰色滤波法和闭圈含油气性灰色综合关联谱报评价法等. 在实际应用中通过灰关联分析划定了新疆塔里木盆地北部库车地区三个圈闭区, 提出了钻探验证孔位; 同时圈定了 4 个油气综合灰关联度异常, 预测为油气圈闭靶区. 殷伯明老师在灰色系统的普及和推广方面作出了历史性贡献. 他早年跟随邓聚龙教授学习灰色系统, 并多次去山东、福建等地担任全国性灰色系统培训班主讲教师, 利用华中理工大学出版社的工作平台, 出版了邓聚龙教授等专家的多部灰色系统专著, 为全国各地高校开设灰色系统课程及广大学者学习灰色系统创造了条件. 殷伯明老师于 1994 年调到上海浦东新区教育学院工作, 又开始从事中小学灰色系统应用研究.

刘思峰教授领衔的南京航空航天大学灰色系统研究团队, 一直致力于灰色系统理论及其应用的研究, 在灰色系统的教学、科研、推广和人才培养等方面取得了丰硕的成果, 是国内外该领域的一面旗帜. 刘思峰教授本人早年从师于邓聚龙教授, 先后提出了基于核和灰度的代数系统、缓冲算子理论 (包括强化算子和弱化算子)、灰数测度公理、广义灰色关联度 (绝对关联度、相对关联度、综合关联度、相似关联度、接近关联度等)、灰色聚类评估 (包括定权灰色聚类评估、三角白化权函数灰评估、智能灰靶决策模型)、灰色组合模型 (如灰色经济计量学模型、灰色生成函数模型、灰色投入产出模型) 等, 他还论述了灰色系统理论产生的科学背景及其作为一种新型不确定问题的科学方法与概率统计、模糊数学的主要区别, 并明确了灰色系统理论在科学体系中的地位. 由于在灰色系统理论研究中取得的创造性成果, 刘思峰教授于 2002 年获得系统与控制世界组织突出贡献奖. 同时他领衔的团队培养出了党耀国、方志耕、罗党、刘斌、朱建军、谢乃明、王正新、李桥兴、陈可嘉、姚天洋、巩在武、营利荣、曾波等一大批国内知名学者. 党耀国教授侧重于研究灰色不确定性信息背景下的预测与决策问题, 对冲击扰动系统预测、灰色不确定性预测模型、灰色不确定性决策模型等进行了深入探讨与拓展研究, 特别是在缓冲算子的构造与性质、GM 模型的优化与拓展、GM(1,1) 模型病态性分析、基于区间数的灰色不确定性决策模型与方法等方面成果丰富. 方志耕教授主要研究灰博弈问题和区间灰数的运算问题. 他运用灰色系统思想和理论解决博弈中有限知识、有限理性

和未来不确定性等因素造成的信息缺失问题,将经典博弈扩展到了灰数空间,引入基于纯策略和混合策略的灰矩阵博弈模型以及灰色双矩阵静态、动态博弈的纳什均衡分析模型,研究灰博弈解的风险问题,初步建立起灰博弈论的理论体系.罗党教授在灰决策方面研究深入,提出了不完备信息的灰关联决策方法、灰色群决策方法、灰色风险(群)决策方法、三参数区间灰数信息下决策方法及多目标灰靶决策方法、灰色属性识别聚类方法等.刘斌教授应用 Visual Basic 6.0 开发了第一套基于 Windows 视窗界面的灰色系统理论建模软件,该软件得到了广泛的好评,并成为灰色系统建模领域的首选软件.朱建军教授主要研究灰色决策和信息集结,提出了大规模群体的灰色聚类方法、三端点区间灰数判断矩阵的群决策方法、多阶段决策的灰色关联度方法、基于灰色组合预测的节能政策能源节约量测算模型等.团队年轻成员的研究也是特色鲜明,取得了一批有影响的成果,如谢乃明博士(离散灰色模型)、王正新博士(震荡序列灰建模)、李桥兴博士(灰投入产出)、陈可嘉博士(灰关联分析)、姚天详博士(灰拓扑空间)、巩在武博士(不确定性决策)、菅利荣博士(灰色系统与粗糙集杂合)、曾波博士(区间序列灰建模)等.

东南大学的王文平教授为国内灰色系统领域的首位博士,早期一直从事灰色系统研究,在灰信息处理理论与方法、灰优化决策等方面取得了许多原创性研究成果.例如,从定性定量分析方面构建了灰信息处理理论研究的基本框架,证明了灰关联度接近性公理的合理性和非对称性公理对充分利用灰信息的必要性,给出了灰效用函数存在的公理体系及交互式多目标决策过程的灰效用函数特征;发现了 GM(1,1) 模型的混沌特性,提出了灰线性规划的满意解法和灰解法、不完全信息下的多目标优化方法、一个旨在体现参与人信念和决策规则灰性的博弈分析范式、知识型企业的知识灰生成模型等.王文平教授现在主要研究企业变革管理及网络优化、产业集群与社会网络管理、可持续发展与资源配置等,研究中也用到灰理论和方法.福州大学的张岐山教授建立了灰朦胧集的差异信息理论,为灰色系统理论研究提供了一个全新的视角.他以差异信息序列为基本工具,以差异信息的熵理论为理论基础,系统深入研究灰数白化、灰色不确定推理、灰朦胧集白化、灰关联分析、灰聚类分析、灰色统计和灰模型的差异信息问题,并形成了相关的熵理论,如灰关联分析熵理论、灰聚类分析熵理论和灰模型熵理论等.汕头大学的谭学瑞教授主要从事临床试验灰关联理论与方法研究,将灰关联理论与临床试验进行有效结合,为灰色医学奠定了理论依据.在理论方面,定义了上限白化灰色关联度、下限白化灰色关联度,以及相应的上限和下限白化灰关联序,并建立灰关联序的综合检验方法;提出了包括灰色医学在内的灰色医疗认知模式、灰关联系数、灰关联度、灰关联序列、灰色的极性等概念.在应用上,通过测量 16 位高血压女性患者的无创有创收缩压多样性与血流动力学参数,通过灰色关联分析研究他们之间的关系;通过遍历性灰色关联分析研究心率收缩压与反构型高血压中血浆内皮素的动态关系和

血浆肾素活性与非构型高血压男性患者动态血压间的关系;运用极性灰色关联分析北京心血管内科治疗药物与急性冠心病住院患者病死率之间的关系;通过优势灰色关联分析研究了有关年龄、常规血压、24 小时左心房动态血压、心室结构、左心室充盈功能收缩性高血压等参数之间的关系,以此分析心脏结构功能与收缩期高血压中血压的关系。山东大学的王子亮教授对灰建模技术有深入研究,提出了灰色集关系、灰色层次关系、灰色矩阵的可信度、灰色压缩变换等概念,建立了一种时变灰色动态模型、灰色 Logistic 模型、灰色 Gompertz 模型;提出了一种新平移变换灰色建模数值算法、一种模型精度综合评价方法,即灰色趋势拟合检验等。烟台大学的宋中明教授从数学角度对灰关联空间、灰生成、灰建模及灰预测作了系列研究,讨论了灰关联空间的序结构、拓扑结构以及关联扩展空间、生成关联空间;提出了广义累加生成、广义累减生成、反向累加生成和反向累减生成等生成技术,并研究了反向累加生成空间及其构成条件;给出了区间预测及拓扑预测方法等。李峰博士的研究重点在灰技术方面,创新性地将灰色系统理论应用于图像处理。他利用残差修正模型进行图像压缩,采用 GM(1,1) 模型改进基于小波变换的图像压缩方案,将波动 UGM 模型运用于数字水印技术等,此外还提出了灰统计聚类评估方法和动态多指标区间关联评估方法。

天津师范大学的郝永红教授主要研究地下水流的数值模拟和灰色系统方法应用,将灰理论应用于水文水资源及北方岩溶地下水方面,有较大创新性。例如,建立了神头泉流量的 GM(1,1) 的周期修正模型、神头岩溶泉流量灰色动态预测模型、娘子关泉水流量灰色 GM(1,2) 时滞模型、泉域不同区域降水量与泉水流量的时滞灰色关联分析模型等。西华师范大学的魏勇教授研究重点涉及灰建模技术,如灰预测模型的分类及相应事前检验方法,提出了优化背景值和灰导数、优化背景值和初始条件、优化参数辨识方法、原始数据变换与优化灰导数相结合等具体优化建模方法。温州大学的王义闹教授对 GM(1,1) 模型的优化研究具有特色,得到了 GM(1,1) 累减还原形式及其最优初始条件,提出了逐步优化灰导数白化值、逐步优化灰导数背景值、优化 GM(1,1) 模型参数等方法。山东农业大学的李希灿教授首先研究了数乘变换对 GM(1,1) 模型参数及预测值的影响,其研究还涉及 GM(1,1) 模型建模条件和级比范围、多目标多维灰决策、多目标多维自反馈灰色模糊预测模型等。安阳工学院的郭瑞林教授将灰色系统理论与作物育种学有机结合,创立新兴边缘学科作物灰色育种学,运用该理论培育出 4 个小麦新品种,在全国累计推广面积达 3000 万亩 (1 亩  $\approx 666.7\text{m}^2$ );还相继出版了《作物灰色育种学》和《作物灰色育种电脑决策系统及其应用》等著作。武汉理工大学的熊和金教授重点研究灰色控制,提出了六种典型灰色环节模型,以及灰色脉冲响应模型、灰色 DARMA 模型、灰色 CARMA 模型、灰色预测模态控制方案、灰色 MIMO 系统的灰色快速满意控制模型和灰色线性状态调节器模型等,研究了灰色状态方程的可控性、可观性和稳定性。国内外



还有许多优秀专家和学者,他们都为灰色系统理论的发展作出了突出的贡献。

## 1.3 灰色系统研究成果

### 1.3.1 灰色系统研究论文

自 1982 年北荷兰出版公司出版的《系统与控制通讯》(*Systems & Control Letters*) 杂志刊载我国学者邓聚龙教授的第一篇灰色系统论文“灰色系统的控制问题”(The control problems of grey systems) 以来,全世界相继有数千种学术刊物接收和刊登灰色系统论文,如核心期刊: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, *Applied Mathematics and Computation*, *Mathematical and Computer Modeling*, *European Journal of Operational Research*, *Kybernetes*, *Fuzzy Sets and Systems*, *International Journal of Systems Science*, *International Journal of General Systems*, *Journal of Management and Decision Making*, *Decision Support Systems*, *Information Sciences*, *Expert Systems with Applications* 等。此外,美国计算机学会会刊、中国台湾的《模糊数学通讯》、系统与amp;控制世界组织会刊 *Kybernetes*(SCI 源期刊) 出版了灰色系统专辑。特别值得关注的是,1989 年在英国创办的英文版国际学术刊物 *The Journal of Grey System* 已成为《科学引文索引》(SCI)、《英国科学文摘》(SA)、《美国数学评论》(MR) 等重要国际文摘机构的核心期刊;1997 年中国台湾 Chinese Grey System Association 创办的中文学术期刊《灰色系统学刊》于 2004 年改为英文版 *Journal of Grey System*;2010 年英国著名 Emerald 出版集团创办了新的期刊 *Grey System: Theory and Application*, 这些杂志均专门刊登灰色系统理论及应用方面的学术论文。

据 1997 年 11 月 26 日《中国科学报》在“中国有了自己的科学引文数据库”一文中报道:1989 年至 1996 年,灰色系统理论被引用 533 次,居全国之先;2000 年 1 月 14 日《科学时报》第 4 版,中国科学引文数据库 CSCD 在“全国论文与专著被引用频次在 60 次以上的著者”中报道,邓聚龙教授的论著被引用 143 次,居全国榜首。

从 1982 年至 2012 年,在中国学术期刊网中文学术期刊数据库 (CNKI) 中以“灰色系统”为主题词进行检索和核对,共检索到论文 15164 篇。从 1982 年至 2012 年 10 月,以“灰色系统”为主题词的论文呈现出持续增长趋势,2002 年之后每年被中文学术期刊数据库 (CNKI) 收录的以“灰色系统”为主题词的论文都在 500 篇以上(表 1.3)。