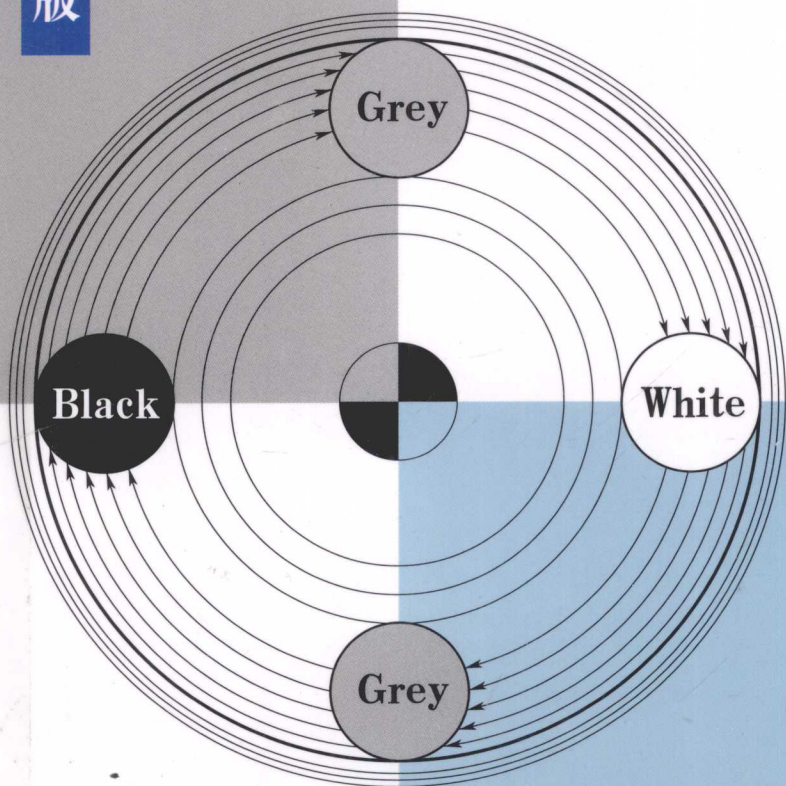


系统评估、预测、决策与优化研究论丛

灰色系统理论及其应用

第五版

刘思峰 党耀国 等 著
方志耕 谢乃明



科学出版社
www.sciencep.com

系统评估、预测、决策与优化研究论丛

灰色系统理论及其应用

(第五版)

刘思峰 党耀国 等 著
方志耕 谢乃明

国家自然科学基金

国家社会科学基金重点项目

国家软科学基金重点项目

国家教育部高等学校博士学科点专项科研基金

资助项目

江苏省高等学校优秀科技创新团队科研基金

南京航空航天大学研究生培养规划基金

南京航空航天大学科学发展研究中心重点工程

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书全面、系统地论述了灰色系统的基本理论、基本方法和应用技术,是作者长期从事灰色系统理论探索、实际应用和教学工作的结晶,同时还吸收了国内外同行近年来取得的理论和应用研究新成果,向读者展示灰色系统理论这一新学科的概念及其前沿发展动态。

全书共 16 章,包括灰色系统的概念与基本原理、灰色序列算子、灰色关联分析、灰色聚类评估、灰色预测模型、灰色组合模型、灰色决策模型、灰色规划、灰色投入产出、灰色博弈模型和灰色控制系统等内容,并附有灰色系统建模软件包。其中基于核和灰度的灰代数系统、缓冲算子、灰数测度公理、灰色绝对关联度、灰色相对关联度、灰色综合关联度、灰色相似关联度、灰色接近关联度、定权灰色聚类评估和基于三角白化权函数的灰评估新方法、离散灰色模型、多目标智能灰靶决策模型以及灰色经济计量学模型(G-E)、灰色生产函数模型(G-C-D)、灰色投入产出模型(G-I-O)、灰色马尔可夫模型(G-M)和灰色博弈模型(G-G)等系作者首次提出。

本书适合用作高等学校理、工、农、医、天、地、生及经济、管理类各专业大学生和研究生的教材,亦可供科研机构、企事业单位和政府部门的科研人员、技术工作者、管理干部以及系统分析、市场预测、金融决策、资产评估、企业策划人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

灰色系统理论及其应用/刘思峰等著.—5版.—北京:科学出版社,2010.5
(系统评估、预测、决策与优化研究论丛)

ISBN 978-7-03-027392-5

I. 灰… II. ①刘… III. 灰色系统理论-高等学校-教材 IV. N941.5

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第078223号

责任编辑:林建房 阳/责任校对:郑金红

责任印制:张克忠/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>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

1991年2月第一版 开本:B5(720×1000)

1999年6月第二版 印张:27 1/2

2004年11月第三版 字数:554 000

2008年12月第四版 2010年5月第十一次印刷

2010年5月第五版 印数:23 501—26 500

定价:56.00元(含光盘)

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

总序

序一 (英文)

序一 (中译文)

序二

前言

第 1 章 灰色系统的概念与基本原理	1
1.1 灰色系统理论的产生与发展动态	1
1.2 灰色系统的概念与基本原理	11
1.3 灰数及其运算	15
1.4 灰数白化与灰度	22
1.5 灰数灰度的一种公理化定义	25
第 2 章 灰色方程与灰色矩阵	29
2.1 灰色代数方程与灰色微分方程	29
2.2 灰色矩阵及其运算	29
2.3 几种特殊的灰色矩阵	32
2.4 灰色矩阵的奇异性	33
2.5 灰色特征值与灰色特征向量	35
第 3 章 序列算子与灰色序列生成	37
3.1 引言	37
3.2 冲击扰动系统与序列算子	38
3.3 均值生成算子	50
3.4 序列的光滑性	51
3.5 级比生成算子	54
3.6 累加生成算子与累减生成算子	55
3.7 累加生成的灰指数律	58
第 4 章 灰色关联分析	62
4.1 灰色关联因素与关联算子集	63
4.2 距离空间	65
4.3 灰色关联公理与灰色关联度	68
4.4 广义灰色关联度	73

4.5	基于相似性和接近性视角的灰色关联度模型	85
4.6	关联序	89
4.7	优势分析	90
4.8	应用实例	96
第5章	灰色聚类评估	105
5.1	灰色关联聚类	105
5.2	灰色变权聚类	108
5.3	灰色定权聚类	113
5.4	基于三角白化权函数的灰色评估模型	118
5.5	灰色评估系数向量的熵	130
5.6	应用实例	133
第6章	GM(1,1)模型	146
6.1	GM(1,1)模型的基本形式	146
6.2	GM(1,1)模型的扩展形式	149
6.3	残差 GM(1,1)模型	157
6.4	GM(1,1)模型群	162
6.5	GM(1,1)模型的适用范围	166
第7章	GM(r,h)模型	169
7.1	GM(1,N)模型	169
7.2	GM(0,N)模型	172
7.3	GM(2,1)模型和 Verhulst 模型	173
7.4	GM(r,h)模型	179
第8章	离散灰色预测模型	182
8.1	离散灰色模型	182
8.2	离散灰色模型的拓展与优化	187
8.3	近似非齐次指数增长离散灰色模型	193
8.4	多变量离散灰色模型	195
第9章	灰色组合模型	198
9.1	灰色经济计量学模型	198
9.2	灰色线性回归组合模型	205
9.3	灰色生产函数模型	208
9.4	灰色人工神经网络模型	211
9.5	灰色马尔可夫模型	213
9.6	灰色粗糙组合模型	216

第 10 章 灰色系统预测	226
10.1 引言	226
10.2 数列预测	228
10.3 区间预测	230
10.4 灰色灾变预测	236
10.5 波形预测	242
10.6 系统预测	247
第 11 章 灰色决策模型	251
11.1 灰色决策基本概念	251
11.2 灰靶决策	253
11.3 灰色关联决策	256
11.4 灰色发展决策	265
11.5 灰色聚类决策	268
11.6 单目标化局势决策	271
11.7 多目标智能加权灰靶决策模型	275
第 12 章 灰色规划	279
12.1 灰参数线性规划	280
12.2 灰色预测型线性规划	282
12.3 灰色漂移型线性规划	285
12.4 灰色 0-1 规划	294
12.5 灰色多目标规划	299
12.6 灰色非线性规划	301
12.7 灰色动态规划	307
第 13 章 灰色投入产出	316
13.1 灰色投入产出的基本概念	316
13.2 灰色感应度系数与影响力系数	318
13.3 灰色投入产出优化模型	321
13.4 灰色动态投入产出模型	322
13.5 应用实例	325
第 14 章 灰色博弈模型	329
14.1 基于有限理性和有限知识的双寡头战略定产博弈模型	329
14.2 一种新的局势顺推归纳法模型	343
14.3 产业集聚的灰色进化博弈链模型及其稳定性	349
第 15 章 灰色控制系统	355
15.1 灰色系统的可控性和可观测性	356

15.2	灰色系统的传递函数	359
15.3	灰色系统的鲁棒稳定性	364
15.4	几种典型的灰色控制	372
第 16 章	灰色系统建模软件简介	381
16.1	软件的主要特点	382
16.2	软件的模块构成	383
16.3	软件应用与操作指南	383
参考文献		395
名词术语中英文对照		411

第 1 章 灰色系统的概念与基本原理

1.1 灰色系统理论的产生与发展动态

1.1.1 灰色系统理论产生的科学背景

现代科学技术在高度分化的基础上高度综合的大趋势,导致了具有方法论意义的系统科学学科群的出现。系统科学揭示了事物之间更为深刻、更具本质性的内在联系,大大促进了科学技术的整体化进程,许多科学领域中长期难以解决的复杂问题随着系统科学新学科的出现迎刃而解,人们对自然界和客观事物演化规律的认识也由于系统科学新学科的出现而逐步深化。20 世纪 40 年代末期诞生的系统论、信息论、控制论,产生于 60 年代末、70 年代初的耗散结构理论、协同学、突变论、分形理论以及 70 年代中后期相继出现的超循环理论、动力系统理论、泛系理论等都是具有横向性、交叉性的系统科学新学科。

在系统研究中,由于内外扰动的存在和认识水平的局限,人们得到的信息往往带有某种不确定性。随着科学技术的发展和人类社会的进步,人们对各类系统不确定性的认识逐步深化,对不确定性系统的研究也日益深入。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的不断涌现形成一大景观,如扎德(Zadeh)于 60 年代创立的模糊数学、邓聚龙于 80 年代创立的灰色系统理论、帕夫拉克(Pawlak)于 80 年代创立的粗糙集理论(rough sets theory)和王光远于 90 年代创立的未确知数学等,都是不确定性系统研究的重要成果。这些成果从不同角度、不同侧面论述了描述和处理各类不确定性信息的理论和方法。

中国学者邓聚龙在 1982 年创立的灰色系统理论,是一种研究少数据、贫信息不确定性问题的新方法。灰色系统理论以“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,主要通过“部分”已知信息的生成、开发,提取有价值的信息,实现对系统运行行为、演化规律的正确描述和有效监控。现实世界中,“小样本”、“贫信息”不确定性系统的普遍存在决定了灰色系统理论具有十分广泛的应用领域。

1.1.2 灰色系统理论的产生与发展动态

1982 年,北荷兰出版公司出版的《系统与控制通讯》(*Systems & Control Letters*)杂志刊载了我国学者邓聚龙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);同年,《华中工学院学报》刊载了邓聚龙

的第一篇中文灰色系统论文“灰色控制系统”。这两篇开创性论文的公开发表,标志着灰色系统理论这一新兴横断学科经过其创始人邓聚龙多年卓有成效的努力,开始问世。这个新理论刚一诞生就受到了国内外学术界和广大实际工作者的积极关注,不少著名学者和专家给予了充分肯定和大力支持,许多中青年学者纷纷加入灰色系统理论研究行列,以极大的热情开展理论探索及在不同领域中的应用研究工作。尤其是它在众多科学领域中的成功应用,赢得了国际学术界的肯定和关注。目前,美国、英国、德国、日本、澳大利亚、加拿大、奥地利、俄罗斯、土耳其、荷兰、伊朗等国及我国港澳台地区等已有许多知名学者从事灰色系统的研究和应用。1989年在英国创办的英文版国际学术刊物《灰色系统学报》(*The Journal of Grey System*)已成为《英国科学文摘》(SA)、《美国数学评论》(MR)和《科学引文索引》(SCI)等重要国际文摘机构的核心期刊;1997年在台湾创办的中文版学术刊物《灰色系统学刊》于2004年改为英文版,刊名为*Journal of Grey System*。2010年2月9日,英国著名期刊出版集团Emerald董事会通过决议,支持南京航空航天大学灰色系统研究所创办新的国际期刊*Grey Systems: Theory and Applications*,聘请刘思峰教授担任该刊创刊主编。全世界有数千种学术期刊接受、刊登灰色系统论文,美国计算机学会会刊、台湾《模糊数学通讯》、系统与控制国际杂志*Kybernetes*(SCI源期刊)出版了灰色系统专辑。

国内外许多著名大学都开设了灰色系统理论课程。在南京航空航天大学,不仅硕士和博士研究生开设了灰色系统理论课程,灰色系统理论还作为全校各专业的公共选修课受到同学们的欢迎。华中科技大学、南京航空航天大学、武汉理工大学、福州大学和中国台湾的多所大学招收、培养灰色系统专业方向的博士研究生,世界各国高等学校共计有上万名硕士、博士研究生运用灰色系统的思想方法开展科学研究,撰写学位论文。

国内外许多出版机构,如科学出版社、国防工业出版社、华中科技大学出版社、江苏科学技术出版社、山东人民出版社、科学技术文献出版社、台湾全华科技图书出版社、台湾高立图书有限公司、日本理工出版社、美国IIGSS学术出版社和Taylor & Francis出版集团、德国Springer-Verlag出版公司……出版灰色系统学术著作100余种。一批新兴边缘学科,如灰色水文学、灰色地质学、灰色育种学、灰色医学、区域经济灰色系统分析……应运而生。国家及各省、市科学基金积极资助灰色系统研究,每年都有一大批灰色系统理论或应用研究项目获得各类基金资助。据统计,全国各地有200多项灰色系统成果获得国家或省部级奖励。2002年,我国灰色系统学者获系统与控制世界组织奖。

据不完全统计,SCI, EI, ISTP, SA, MR, MA等国际权威性检索机构收录我国学者的灰色系统论著超过10000次。据中国科学引文数据库(CSCD)发布的信息(《中国科学时报》,1997年11月26日),华中科技大学邓聚龙的灰色系统理论被

引用次数连续多年居全国第一。

1993年,中华人民共和国科学技术部编撰出版的《中国科学技术蓝皮书(第8号)》把灰色系统理论作为中国学者创立的软科学新方法加以肯定。2008年,中国科学技术协会组织编撰的《学科发展研究系列报告(2007~2008)》把灰色系统理论作为我国管理科学与工程学科的创新性成果之一重点介绍。

2006年,灰色系统理论及应用学术会议得到中国高等科学技术中心(李政道任中心主任,周光召、路甬祥任副主任)资助在北京成功召开。2008年,第16届全国灰色系统学术会议再次得到中国高等科学技术中心资助。

许多重要国际会议,如不确定性系统建模国际会议、系统预测控制国际会议、国际一般系统研究会年会、系统与控制世界组织年会、IEEE系统、人与控制国际会议、计算机与工业工程国际会议……把灰色系统理论列为讨论专题。例如,2002年3月在美国匹兹堡召开的系统与控制世界组织(WOSC)12届年会和国际一般系统研究会(IIGSS)4届年会联合大会共为灰色系统理论安排了6场专题会议;2003年8月在爱尔兰利默瑞克召开的第32届计算机与工业工程国际会议为灰色系统理论安排了4场专题会议;2004年10月在荷兰海牙召开的IEEE系统、人与控制国际会议,2005年3月在美国亚利桑那召开的IEEE网络、感知、控制国际会议,2005年7月在斯洛文尼亚马里波尔召开的系统与控制世界组织第13届年会,2005年10月在美国夏威夷召开的IEEE系统、人与控制国际会议,2006年10月在中国台湾召开的IEEE系统、人与控制国际会议,2007年10月在加拿大蒙特利尔召开的IEEE系统、人与控制国际会议,2008年9月在波兰弗罗茨瓦夫召开的系统与控制世界组织第14届年会,2008年10月在新加坡召开的IEEE系统、人与控制国际会议和2009年10月在美国圣·安东尼奥召开的IEEE系统、人与控制国际会议等都安排了灰色系统专题会议。灰色系统理论成为许多重要国际会议关注、讨论的热点,对于世界系统科学界同行进一步了解灰色系统理论无疑会起到积极作用。

2007年11月18~20日,首届IEEE灰色系统与智能服务国际会议(2007 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, IEEE GSIS)在南京隆重召开,出席这次会议的有来自世界及全国各地的学者近300人。这次会议经IEEE总部批准并主办,由中国国家自然科学基金委员会、南京航空航天大学、中国(双法)灰色系统专业委员会协办,并由南京航空航天大学经济与管理学院和灰色系统研究所具体承办。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主任、南京航空航天大学经济与管理学院院长兼灰色系统研究所所长刘思峰担任本届大会主席。这次会议共收到来自中国、美国、英国、日本、南非、俄罗斯、土耳其、马来西亚、伊朗、中国台湾、中国香港等17个国家和地区学者的投稿1019篇,根据大会预定规模和专家审稿意见,最后录用论文332篇。

根据与会代表的提议,大会国际程序委员会和组织委员会联席会议决定授予邓聚龙灰色系统理论创始人奖,授予南京航空航天大学经济与管理学院大会组织突出贡献奖。这次会议共评出大会优秀论文 5 篇,其中,一等奖 1 篇、二等奖 2 篇、三等奖 2 篇,南京航空航天大学灰色系统研究所博士研究生谢乃明荣获一等奖。大会名誉主席、美国工程院院士、IEEE 原执行主席 James Tien 为邓聚龙颁发了证书,国际服务科学研究会创始主席 Robin Qiu 为南京航空航天大学经济与管理学院颁发了证书,灰色系统理论创始人邓聚龙为论文获奖者颁发了证书。

与会代表普遍认为,这次会议内容丰富、组织有序,大会报告和专题报告水平高,展示了灰色系统理论和服务科学的最新研究进展和应用成果,对于促进国际合作交流,推动中国及世界各国在灰色系统理论和服务科学领域的学术研究具有重大意义。根据会议决议,IEEE 灰色系统与智能服务国际会议以后每两年举办一次,来自美国、英国、中国台湾、土耳其、南非和日本的学者都明确表示希望有机会承办 IEEE GSIS。

2008 年初,IEEE 灰色系统委员会正式成立。依托 IEEE 这样一个全球性的学术平台,灰色系统理论将会被国内外更多的学者所认识。

2009 年 11 月 10 日~12 日,第二届 IEEE 灰色系统与智能服务国际会议再次在南京召开。这次会议共收到来自中国、美国、英国、荷兰、罗马尼亚、乌克兰、马来西亚、波兰、加拿大、中国台湾、中国香港等 16 个国家和地区学者的投稿 1054 篇,最后决定录用论文 351 篇。会议决定,第三届 IEEE 灰色系统与智能服务国际会议将于 2011 年 9 月 15 日~18 日与系统与控制世界组织第十五届年会联合召开,仍由南京航空航天大学承办。

目前,第一届和第二届 IEEE 灰色系统与智能服务国际会议录用的论文已全部被 EI Compendex 收录。

1.1.3 不确定性系统的特征与科学的简单性原则

信息不完全、不准确是不确定性系统的基本特征。系统演化的动态特性、人类认识能力的局限性和经济、技术条件的制约,导致不确定性系统的普遍存在。

1. 信息不完全

信息不完全是不确定性系统的基本特征之一。信息不完全是绝对的,信息完全则是相对的。人们以其有限的认识能力观测无限的时空,不可能得到所谓的“完全信息”。概率统计中的“大样本”实际上表达了人们对不完全的容忍程度。通常情况下,样本量超过 30 即可被视为“大样本”,但有时候即使收集到数千甚至几个样本也未必能找到潜在的统计规律。

2. 数据不准确

不确定性系统的另外一个基本特征是数据不准确。不准确与不精确的涵义基本相同,表达的都是与实际数值存在误差或偏差。从不准确产生的本质来划分,又可以分为概念型、层次型和预测型三类。

(1) 概念型。概念型不准确源于人们对某种事物、观念或意愿的表达,如人们通常所说的“大”、“小”、“多”、“少”、“高”、“低”、“胖”、“瘦”、“好”、“差”以及“年轻”、“漂亮”、“一堆”、“一片”、“一群”等,都是没有明确标准的不准确概念,难以用准确的数据表达。又如,一位获得了 MBA 学位的求职者,希望年薪不低于 15 万元;某工厂希望废品率不超过 0.1%,表达的都是不精确意愿。

(2) 层次型。由研究或观测的层次改变形成的数据不准确。有的数据从系统的高层次,即宏观层次、整体层次或认识的概括层次上看是准确的,而到更低的层次上,即到系统的微观层次、分部层次或认识的深化层次就不准确了。例如,一个人的身高,以厘米或毫米为单位度量可以得到准确的结果,若要求精确到 10^{-10} 米则很难准确度量。

(3) 预测型(估计型)。由于难以完全把握系统的演化规律,人们对未来的预测往往不准确。例如,预计 2010 年某地区国内生产总值将超过 100 亿元人民币;估计 2010 年年末某储蓄所居民储蓄存款余额可能为 7000 万~9000 万元人民币;预计未来几年内南京地区 10 月份最高气温不超过 30°C 等。这些都是预测型不确定数。统计学中通常采用抽样调查数据对总体进行估计,因此,很多统计数据都是不准确的。事实上,无论采取什么样的办法,人们也很难获得绝对准确的预测(估计)结果。定计划、作决策往往要参考不完全准确的预测(估计)数据。

3. 科学的简单性原则

在科学发展史上,简单性几乎是所有科学家的共同信仰。早在公元前 6 世纪,自然哲学家们在认识物质世界方面就有一个共同的愿望:把物质世界归结为几个共同的简单元素。古希腊的数学家和哲学家毕达哥拉斯(Pythagoras)在公元前 500 年前后提出四元素(土、水、火、气)学说,认为物质是由简单的四元素构成。我国古代也有五行说,认为万事万物的根本是五样东西,即水、火、木、金、土。这是科学史上最朴素、最原始的简单性思想。

科学的简单性原则源于人类在认识自然过程中的简单性思想,随着自然科学的不断成熟,简单性成为人类认识世界的基础,也是科学研究的指导原则。《周易·系辞上》说:“易则易知,简则易从,易知则有亲,易从则有功。”

牛顿的力学定律以简单的形式统一了宏观的运动现象。在《自然哲学的数学原理》中,牛顿指出:“自然界不做无用之事,只要少做一点就成了,多做了却是无

用；因为自然喜欢简单化，而不爱用什么多余的原因以夸耀自己。”在相对论时代，爱因斯坦提出了检验理论的两个标准：“外部的证实”和“内在的完备”，即“逻辑简单性”。他认为，从科学理论反映自然界的和谐与秩序的角度看，真的科学理论一定是符合简单性原则的。

19世纪70年代，安培、韦伯、莱曼、格拉斯曼和麦克斯韦等从不同的假设出发，相继建立了解释电磁现象的理论。由于麦克斯韦的理论最符合简单性原则，因此广为流传。又如，著名的开普勒行星运动第三定律 $T^2 = D^3$ ，形式上也十分简洁。

按照协同学的支配原理，可以通过消去描述系统演化进程的高维非线性微分方程中的快弛豫变量，将原来的高维方程转化为低维的序参量演化方程。由于序参量支配着系统在临界点附近的动力学特性，通过求解序参量演化方程，即可得到系统的时间结构、空间结构或时空结构，进而实现对系统运行行为的有效控制。

科学模型的简单性主要依赖于模型表征形式的简洁和对系统次要因素的删减来实现。在经济学领域，用基尼系数描述居民收入差距的方法和运用 Cobb-Douglas 生产函数测度技术进步在经济增长中贡献份额的方法，都是基于对实际系统的简化而提出来的。莫迪里亚尼 (Modigliani) 用来描述平均消费倾向 (average propensity to consume, APC) 的模型

$$\frac{C_i}{y_i} = a + b \frac{y_0}{y_i}, \quad a > 0, b > 0$$

菲利普斯 (Phillips) 用来描述通货膨胀率 $\frac{\Delta p}{p}$ 与失业率 x 之间关系的曲线

$$\frac{\Delta p}{p} = a + b \frac{1}{x}$$

以及著名的资本性资产评价模型 (capital asset pricing model, CAPM)

$$E[r_i] = r_f + \beta_i (E[r_m] - r_f)$$

实质上稍作变换都可以化为最简单的一元线性回归模型。

4. 精细化模型遭遇不精确

在信息不完全、数据不准确的情况下追求精细化模型的道路走不通。对此，在两千多年前老子就有十分精辟的论述：“夷、希、微不可致诘。”模糊数学创始人扎德 (Zadeh) 的互克性原理对此也有明确表述：“当系统的复杂性日益增长时，我们作出系统特性的精确而有意义的描述能力将相应降低，直至达到这样一个阈值，一旦超过它，精确性与有意义性将变成两个互相排斥的特性。”互克性原理揭示了片面追求精细化将导致认识结果的可行性和有意义性的降低，精细化模型不是处理复杂事物的有效手段。

1994年，岳建平和华锡生采用某大型水利枢纽工程大坝变形、渗流数据，分别

建立了理论上更为精细的统计回归模型和相对粗略的灰色模型。结果表明,灰色模型的拟合效果优于统计回归模型。对比两种模型预报值与实际观测数据之间的误差,发现相对粗略的灰色模型的预测精度普遍高于统计回归模型,详见表 1.1.1。

表 1.1.1 统计模型与灰色模型预测误差比较

序号	类型	平均误差	
		统计模型	灰色模型
1	水平位移	0.862	0.809
2	水平位移	0.446	0.232
3	垂直位移	1.024	1.029
4	垂直位移	0.465	0.449
5	测压孔水位	6.297	3.842
6	测压孔水位	0.204	0.023

2001年,郭海庆等根据某大型黏土斜墙堆石坝竖向位移观测数据,分别建立统计回归模型和灰色时序组合模型,并比较两种模型模拟值、预报值与实际观测数据,发现灰色组合模型拟合效果明显优于统计模型。

李晓斌等采用模糊预测函数对阳极焙烧燃油供给温度进行动态跟踪和精确控制,控制效果明显优于传统的PID控制方法。

孙才新及其研究团队分别采用灰色关联分析、灰色聚类 and 新型灰色预测模型等对电力变压器绝缘故障进行诊断、预测,大量的研究表明,这些相对粗略的方法和模型更为有效、可行。

1.1.4 几种不确定性方法的比较

概率统计、模糊数学和灰色系统理论是三种最常用的不确定性系统研究方法,其研究对象都具有某种不确定性,这是三者的共同点。正是研究对象在不确定性上的区别,派生出三种各具特色的不确定性学科。

概率统计研究的是“随机不确定”现象,着重于考察“随机不确定”现象的历史统计规律,考察具有多种可能发生的结果的“随机不确定”现象中每一种结果发生的可能性大小,其出发点是大样本,并要求对象服从某种典型分布。

模糊数学着重研究“认知不确定”问题,其研究对象具有“内涵明确、外延不明确”的特点。例如,“年轻人”就是一个模糊概念。因为每一个人都十分清楚“年轻人”的内涵,但是要让你划定一个确切的范围,在这个范围之内的是年轻人,范围之外的都不是年轻人,则很难办到。因为年轻人这个概念外延不明确,对于这类内涵明确,外延不明确的“认知不确定”问题,模糊数学主要是凭经验借助于隶属函数进

行处理。

灰色系统理论着重研究概率统计、模糊数学所难以解决的“小样本”、“贫信息”不确定性问题,并依据信息覆盖,通过序列算子的作用探索事物运动的现实规律,其特点是“少数据建模”。与模糊数学不同的是,灰色系统理论着重研究“外延明确,内涵不明确”的对象。例如,到 2050 年,中国要将总人口控制在 15 亿~16 亿,这“15 亿~16 亿”就是一个灰概念,其外延是很清楚的,但如果要进一步问到底是 15 亿~16 亿的哪个具体数值,则不清楚。

综上所述,可以把三者之间的区别归纳如表 1.1.2 所示。

表 1.1.2 三种不确定性方法的比较

项 目	灰色系统	概率统计	模糊数学
研究对象	贫信息不确定	随机不确定	认知不确定
基础集合	灰色朦胧集	康托尔集	模糊集
方法依据	信息覆盖	映射	映射
途径手段	灰序列算子	频率统计	截集
数据要求	任意分布	典型分布	隶属度可知
侧重	内涵	内涵	外延
目标	现实规律	历史统计规律	认知表达
特色	小样本	大样本	凭经验

1.1.5 方兴未艾的不确定性系统研究

模糊数学、灰色系统理论和粗糙集理论是目前最为活跃的不确定性系统理论。从 ISI 数据库和 EI Compendex 数据库检索结果可以看出,以“fuzzy set”,“grey system”,“rough set”为主题词的论文迅速增加(表 1.1.3)。

表 1.1.3 ISI 和 EI Compendex 数据库检索结果

主题词	fuzzy set	grey system	rough set
ISI 数据库论文数(2004~2008)	5947	1517	2637
EI Compendex 论文数(1990~2008)	52988	4027	9280

从中文学术期刊数据库(CNKI)检索结果可以看出,1990~2008 年,以“模糊数学”、“灰色系统”和“粗糙集”为主题词的论文均呈现出持续增长趋势(表 1.1.4~表 1.1.6)。

表 1.1.4 “模糊数学”检索结果

时间	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
论文数	345	373	401	346	543	575	574	551	514	530
时间	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	小计
论文数	605	583	598	714	720	799	908	1006	933	11618

表 1.1.5 “灰色系统”检索结果

时间	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
论文数	149	181	195	203	517	477	481	483	448	456
时间	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	小计
论文数	418	435	512	556	550	576	652	730	762	8781

表 1.1.6 “粗糙集”检索结果

时间	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
论文数	0	0	0	0	0	0	1	1	9	19
时间	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	小计
论文数	50	102	142	267	412	553	710	779	919	3964

不确定性系统(模糊、灰色、粗糙)理论的研究内容可以分为以下三个方面:

- (1) 不确定性系统理论的数学基础研究;
- (2) 不确定性系统模型与算法研究,包括各种不确定性系统模型以及不确定性系统模型与其他方法和模型的杂合模型与算法;
- (3) 不确定性系统理论在自然科学及社会科学各领域中的广泛应用。

目前,不确定性系统(模糊、灰色、粗糙)理论已被广泛应用于自然科学、社会科学、工程技术的各个领域,如航空、航天、民航、信息、冶金、机械、石油、化工、电力、电子、轻工、能源、交通、医疗、卫生、农业、林业、地理、水文、地震、气象、环保、建筑、行为科学、管理科学、法学、教育、军事科学等,取得了显著的社会效益和经济效益。

不确定性系统(模糊、灰色、粗糙)理论的研究和应用均十分活跃,我国学者在相关领域进行了较为深入的研究,取得了有价值的成果。但国内外的研究均存在以应用研究为主,理论、方法创新不足的现象,尤其是对各种不确定性系统理论之间的区别和联系关注不够,融合各种传统和新兴不确定性系统理论和方法进行综合创新的成果不多,这在一定程度上影响了不确定性系统(模糊、灰色、粗糙)理论的发展。

事实上,各种传统和新兴不确定性系统理论和方法本来就“你中有我,我中有你”,很难截然分割。面对人类社会各类不确定性问题,不同的不确定性系统理论和方法各有侧重,互为补充,并不相互排斥。许多复杂多变的不确定性问题的研究已远非

某一种单一的不确定性理论所能解决,而需要多种经典理论与不确定性系统理论和方法的交叉与融合。促进并加强这种交叉、交流与融合是科学发展的必然要求。

1.1.6 灰色系统理论在横断学科群中的地位

人们对客观事物的认识和视角不同,划分学科体系的方式也不相同。17世纪,培根基于科学分类应与人类的记忆能力、想象能力、判断能力相对应的认识,主张把科学划分为历史、诗歌与艺术、哲学三大门类。后来,圣西门和黑格尔分别提出按形而上学和唯心主义观点划分学科的思路。19世纪后期,恩格斯提出按照物质运动的不同形式及其固有次序划分学科,建立了科学的体系结构,为学科分类奠定了坚实的科学基础。

在我国,人们通常把科学划分为文、理两大门类或按自然科学、数学、社会科学三大领域进行分类。对于基础类学科,则习惯于按照数、理、化、天、地、生六大门类进行划分。钱学森则主张将整个科学技术体系划分为自然科学、社会科学、系统科学、思维科学、人体科学、数学科学等六大科学领域,每一科学领域又分为基础科学、技术科学、工程技术三个不同的层次。

在这里,把学科划分建立在科学问题分类的基础之上,首先按照复杂性和不确定性对科学问题进行分类,然后根据各类科学问题的性质指出与之相应的具有方法论意义的横向交叉学科,从而明确了灰色系统理论在横断学科群中的地位。

用方框(Ω)表示世界上所有事物的集合,以圆 A, B, C, D 分别表示简单事物、复杂事物、确定性事物、不确定性事物的集合,于是得到科学问题分类的四环图(图 1.1.1),标出解决各类问题的科学方法,即得到横断学科分类四环图(图 1.1.2)。

对照图 1.1.1 和图 1.1.2 可以看出,作为解决不确定性半复杂问题的科学方

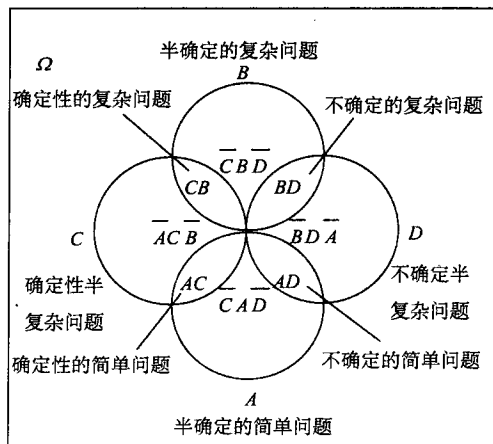


图 1.1.1 科学问题分类的四环图