

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.05.011

灰色系统理论的发展及其在自然科学和工程技术领域的广泛应用

刘思峰

(南京航空航天大学灰色系统研究所,南京 211106)

摘要: 基于中国知网(China national knowledge internet, CNKI)和 ISI Web of Science 数据库,对灰色系统理论近 40 年来的成果进行检索和梳理。在中国知网数据库中输入灰色系统、灰数和序列算子等 10 个词组,共查到文献 22.7 万多篇。进入 21 世纪之后,中国知网数据库收录的灰色系统论文呈快速增长趋势。自 2008 年起每年收录的论文超过 1 万篇,2014 年起突破 1.5 万篇。灰色系统方法和模型被广泛应用于物理、化学和生物等自然科学各学科领域以及交通、电力、机械等工程技术领域,取得大量具有重要价值的成果。从承担国家重要科技计划的项目组和中国双一流高校发表的大量应用灰色系统方法和模型的文献可以看出,灰色系统理论在推动中国科技进步、创新发展及高层次人才培养过程中发挥了重要作用。

关键词: 灰色系统理论;发展;自然科学;工程技术;学科领域;深度应用;中国知网;科学网

中图分类号: C931 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2022)05-0851-16

Development of Grey System Theory and Its Wide Application in Natural Science and Engineering Technology

LIU Sifeng

(Institute for Grey System Studies, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: This paper searches and combs the achievements of grey system theory in the past nearly 40 years based on databases of China national knowledge internet (CNKI) and ISI Web of Science. More than 227 thousands literatures were found by inputting 10 phrases such as grey system-grey number and sequence operator etc. in CNKI. After entering the 21st century, the number of grey system papers included in CNKI database is increasing rapidly. Since 2008, more than 10 thousands papers have been included per year, and more than 15 thousands papers have been included per year since 2014. The grey system method and model are widely used in natural science fields such as physics, chemistry, and biology, as well as engineering technology fields such as transportation, electric power and machinery, and a large number of valuable results have been achieved. From the large number of documents applying the grey system method and model, which are published by the project team undertaking important national science and technology plans and the double

基金项目: 国家重大人才计划长期项目(YQR20024);欧盟居里夫人国际人才计划项目(629051);国家自然科学基金(72071111);国家科技部科技创新引智基地项目(G2021181014L);中央高校基本科研业务费专项基金原创探索项目(ILA220721A22)。

收稿日期: 2022-08-03; **修订日期:** 2022-09-09

作者简介: 刘思峰,男,工学博士,南京航空航天大学特聘教授、博士生导师,研究领域为灰色系统理论及复杂装备研制管理。现任南京航空航天大学灰色系统研究所所长,兼任灰色系统与不确定性分析国际联合会主席、系统与控制世界组织荣誉会士和中国优选法统筹法与经济数学研究会副监事长等。以第一完成人获省部级科技成果一等奖 7 项、国家级教学成果二等奖 1 项;被评为国家有突出贡献的中青年专家和国家“万人计划”教学名师等。

通信作者: 刘思峰, E-mail: sfliu@nuaa.edu.cn。

引用格式: 刘思峰. 灰色系统理论的发展及其在自然科学和工程技术领域的广泛应用[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(5): 851-866. LIU Sifeng. Development of grey system theory and its wide application in natural science and engineering technology[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(5): 851-866.

first-class universities in China, it can be seen that the grey system theory plays an important role in promoting China's scientific and technological progress, innovation and development, and high-level talent training.

Key words: grey system theory; development; natural science; engineering technology; subject and field; deep application; China national knowledge internet(CNKI); web of science(WoS)

1982年,华中工学院(现华中科技大学)邓聚龙教授开创性论文的发表^[1],标志着灰色系统理论新学说的问世。灰色系统理论以“部分信息已知,部分信息未知”的“贫信息”不确定性系统为研究对象,主要通过对“部分”已知信息的挖掘,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,从而使人们能够运用数学模型实现“贫信息”不确定性系统的分析、评价、预测、决策和优化控制。现实世界中普遍存在的“贫信息”不确定性系统,为灰色系统理论提供了丰富的研究资源和广阔的发展空间。

1985年,国防工业出版社出版了邓聚龙教授的第一本灰色系统专著——《灰色系统(社会·经济)》^[2]。同年,当时的华中工学院出版社推出了邓聚龙教授的《灰色控制系统》^[3]。这两本著作将灰色系统理论这门新学说的框架结构完整地展示在世人面前。

40年来,经过几代人的不懈努力,灰色系统理论在邓聚龙教授原创思想和理论框架的基础上取得了长足的发展^[4]。如关于灰信息表征与运算,定义了灰信息的“核”和灰度^[5],基于“核”和灰度构建了灰数的简化形式,提出了一般灰数概念和灰数“和”“差”运算灰度合成公理^[6]。其揭示了复杂系统要素之间接近性、相似性和高维关联规则,定义了多种积分元,提出了灰色绝对关联度、相对关联度、综合关联度^[7]、相似关联度、接近关联度^[8]和三维关联度^[9]等系列关联分析新模型,建立了新型灰色关联分析模型体系。2022年初,经过40年的不懈探索,终于突破逆向序列关联分析难题,提出了多种负灰色关联分析模型^[10];提出了原始差分GM(1,1)模型、均值差分GM(1,1)模型^[11]、离散灰色模型^[12]、分数阶灰色模型^[13]和自记忆模型^[14-15]等系列原创概念与模型,构建了新的灰信息预测模型技术方法体系;提出了基于混合可能度函数的灰色评估模型^[16-18]、多目标加权智能灰靶决策模型^[19]和基于聚核权向量组的两阶段灰色决策模型^[20]。此外,关于序列算子和多种强化和弱化缓冲算子的构造及其性质研究^[21-28]、灰色投入产出模型^[29-30]、灰色博弈模型^[31-32]、GM(1,1, β)模型^[33]、GM(1,1, ρ)模型^[34]、派生GM(1,1)幂模型^[35]、广义累加模型^[36]、随机振荡序列预测模型^[37]、微粒群建模方

法^[38]、新信息离散模型^[39]、广义灰色 Verhulst 模型^[40]、区间灰数关联分析模型^[41-42]、基于DEA的模糊多属性灰色关联分析^[43]、灰色多目标线性规划^[44]、灰色非线性时序组合模型^[45]、灰关联熵分析方法^[46]、灰色控制系统^[47-50]和序列算子频谱分析方法^[51-53]等方面,均取得了系统性创新研究成果。

贫信息系统建模、分析的强大需求为灰色系统理论注入了蓬勃生机。自1982年问世之后,经过几代人近40年的辛勤耕耘和精心呵护,灰色系统理论这棵科学园地中的幼苗日益成长,一门中国原创学说已以其强大的生命力自立于科学之林,一步一步登上国际学术舞台。

1 灰色系统理论快速发展

作为一门中国原创学说,灰色系统理论的快速发展得益于实际应用需求的强力推动。

进入信息时代,各个领域的人们开始深切地认识到数据分析方法已成为每个人不可或缺的技能。正像埋藏在沙海中的黄金,人们希望了解、掌控的规律和特性被纷乱繁杂、信息密度和价值极低的数据信息深深地掩盖,迫切需要行之有效的科学方法。顺应时代需求,灰色系统理论应运而生。正像任何一种新生事物一样,一门新学说的成长过程自然也充满艰辛和曲折,不可避免地受到一些非议和质疑。而人类社会实践对贫信息数据分析方法的渴求形成了强大的原动力,使灰色系统理论在质疑声中仍能吸引各领域大批有识之士的积极关注。

在中文和英文学术论文数据库中,均能检索到大量灰色系统理论及应用研究论文。

因ISI Web of Science 数据库主题词检索结果中会包含较多非灰色系统论文,故按文章标题中包含的英文词组 Grey number, Grey data 和 Sequence operator 等进行检索,所得结果如表1所示。

在中国知网数据库中输入灰色系统、灰数、序列算子、灰色关联分析、灰色聚类、灰色模型、GM(1,1)、灰色预测、灰色决策和灰色控制等10个灰色系统相关词组进行并行检索。结果表明,从1982年至2020年,中国知网数据库共收录精确包含上述词组的文献230 874篇,其中期刊论文120 972篇,会议论文4 950篇,图书231种,成果79项,报纸文章

表 1 ISI Web of Science 数据库中标题包含灰色系统相关词组的论文数

Table 1 Number of papers in ISI Web of Science database with grey system related phrases in the title

标题词	Grey number	Grey data	Sequence operator	Grey relation	Grey incidence
论文数	425	681	662	3 374	406
标题词	Grey analysis	Grey cluster	Grey clustering	Grey evaluation	Grey model
论文数	4 976	774	557	1 972	5 374
标题词	GM(1,1)	Grey prediction	Grey forecast	Grey decision	Grey control
论文数	892	1 956	1 420	877	1 429

40 篇,学位论文 103 605 篇,其中博士学位论文 14 161 篇,硕士学位论文 89 444 篇。1982—2000 年以

及 2001—2020 年各年度中国知网数据库收录包含上述词组的文献和成果数详见表 2。

表 2 1982—2020 年中国知网数据库收录包含灰色系统相关词组的文献和成果数

Table 2 Number of documents and achievements containing relevant phrases of grey system included in CNKI database from 1982 to 2020 万篇

年份	1982—2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
论文数	1.53	0.19	0.24	0.29	0.42	0.54	0.72
年份	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
论文数	0.88	1.01	1.07	1.19	1.26	1.39	1.42
年份	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
论文数	1.51	1.47	1.58	1.61	1.61	1.58	1.59

从表 2 可以看出,自 1982 年至 2000 年的 18 年间,中国知网数据库收录的灰色系统论文共 1.5 万多篇,与近几年一年内收录的论文相当。进入 21 世纪之后,中国知网数据库收录的灰色系统论文呈快速增长趋势。2001 年收录论文 1 856 篇,到 2004 年,收录论文数已达 4 151 篇,翻了一番多,2007 年在 2004 年的基础上又翻一番,达到 8 821 篇。自 2008 年起每年收录的论文超过 1 万篇,2014 年起

突破 1.5 万篇。

在中国知网数据库收录的文献中,标注国家科技重大专项、国家重点基础研究发展规划(973)、国家高技术研究发展计划(863)或国家科技支撑计划等国家重要科技计划项目的文献 1 637 篇,详见表 3。表 3 中的数据表明,灰色系统理论在推动我国科技进步和创新过程中发挥了重要作用,这一点得到了中国科学院赵淳生院士的充分肯定^[54]。

表 3 国家重要科技计划项目组在中国知网发表应用灰色系统模型和方法的论文数

Table 3 Number of papers applying grey system models and methods in CNKI published by the project team of national important science and technology plans

项目类别	国家科技重大专项	国家重点基础研究发展规划(973)	国家高技术研究发展计划(863)
论文数	220	278	333
项目类别	国家重点研发计划	国家科技支撑计划	国家自然科学基金重点和重大项目
论文数	565	187	54

由中国知网数据库收录的文献可以发现,中国所有双一流高校和双一流学科建设高校均有大量灰色系统论文被中国知网数据库收录。被收录论文数位于前 20 的高校被中国知网数据库收录的期刊论文和硕士、博士学位论文数详见表 4,其中期刊论文与学位论文数量大体相当。表 4 中的数据充分表明,灰色系统理论在中国高层次人才培养过程中发挥了重要作用。

在大数据时代,基于小数据挖掘的灰色系统理论异军突起,成为人们从海量数据中萃取有价值信息的有效工具。近 40 年来,灰色系统方法和模型在社会科学、自然科学和工程技术众多领域的广泛

应用,引发了各领域的创新和进步。

灰色系统理论在创立初期的快速发展很大程度上得益于其在经济管理领域的成功应用,即 20 世纪 80 年代全国各地普遍开展农业区划和制定经济发展战略规划迫切需求的强力推动。经济体制改革和统计体系的调整直接影响到经济数据的完整性和连续性,互不衔接的数据为当时的规划编制人员出了一道大难题。如何基于小样本、贫信息数据完成系统分析、建模任务,据以获得具有较高可信度的预测结果,支持各级政府科学决策?以小样本、贫信息数据建模、分析为特色的灰色系统理论恰逢其会。当时,从中央到地方的许多政府部门尝

表4 被中国知网收录的应用灰色系统模型和方法的文献数量位于前20的高校

Table 4 The top 20 universities of literatures applying grey system models and methods in CNKI

学校名称	华北电力大学	长安大学	西南交通大学	武汉理工大学	中南大学
论文数	4 018	2 995	2 970	2 704	2 684
学校名称	北京交通大学	南京航空航天大学	吉林大学	重庆大学	天津大学
论文数	2 644	2 531	2 526	2 505	2 427
学校名称	华中科技大学	湖南大学	河海大学	浙江大学	大连理工大学
论文数	2 016	1 998	1 987	1 910	1 857
学校名称	合肥工业大学	中国矿业大学	大连海事大学	西安建筑科技大学	哈尔滨工业大学
论文数	1 782	1 762	1 759	1 740	1 697

试运用灰色系统方法和模型分析经济数据,编制发展规划。邓聚龙教授主持完成了河北省易县和湖北省老河口市发展规划的研究和编制。笔者也曾主持和参与完成国家发改委、国家科技部和中国科协多项重点招标项目及河南省、江苏省、南京市和郑州市中原区、三门峡市湖滨区、长葛市、武陟县等地发展规划研究,数据分析主要采用灰色系统方法和模型^[55]。

中国工程院杨善林院士、陈晓红院士、立陶宛科学院Zavadskas院士及其团队运用灰色系统模型和方法成功解决了管理实践中的许多重大难题,取得了系列研究成果^[56-58]。

罗马尼亚的Scarlat和Delcea等运用灰色系统理论的方法和模型研究经济系统控制问题,取得了一系列成果^[59-60],出版了罗马尼亚文研究专著。

李桥兴、王学萌等关于灰色投入产出分析模型及其应用问题的研究^[61-62]、方志耕等关于灰色博弈理论及其经济应用的研究^[31,63],都是产生了较大影响的应用成果。

2 灰色系统理论在自然科学领域中的深度应用

在中国知网数据库中分别输入物理、化学、生物、地质、水文、作物和医学等主题词,查询以物理、化学等为主题且精确包含“灰色系统”词组的文献,所得结果如表5所示。

表5 自然科学各学科领域精确包含“灰色系统”词组的文章数

Table 5 Number of articles containing the phrase “grey system” in various disciplines of natural science

学科	物理	化学	生物	地质	水文	作物	医学
论文数	1 793	2 621	3 313	7 280	2 688	2 562	504

灰色系统理论应用于物理、化学、生物、地质、水文、作物和医学等领域,取得了大量具有重要价值的研究成果。

2.1 物理学领域

陈蕾等运用灰色关联分析模型研究基于ASD地物光谱仪的两种天空光测量方法——标准灰板反演测量法和直接测量法,明确了不同方法适用的情景^[64]。王月等运用应用灰色关联聚类分析方法研究宇宙射线 μ 子成像,提高了物质区分效率^[65]。

韩力等运用灰色关联分析模型研究了强夯填土地基的地球物理特征,通过分析面波波速、电阻率与土体干密度、含税率等地球物理特征参数的关联度对强夯质量、效果进行了评价^[66]。

Evans应用灰色系统模型对英国钢材强度进行研究,同时提出了一种广义灰色Verhulst模型参数估计的新方法^[40]。

Shi等基于灰色模型对AP1000核电堆型非能动余热排出进行可靠性分析^[67];王勤等运用灰色关联分析方法研究电弧信号焊接过程的最佳参数^[68],取得了具有重要价值的成果。

2.2 化学领域

Kasemsiri等运用田口方法和灰色关联分析模型对木薯淀粉、油棕榈纤维、壳聚糖和棕榈油合成的可生物降解泡沫复合材料进行优化^[69];刘耀鑫等运用灰色关联分析及预测模型研究高温固硫物相硫酸钙生成反应^[70]。

Gupta等应用灰色关联度分析方法对混杂填料拉挤玻璃纤维复合材料力学性能进行多响应优化^[71]。

Jena等应用田口灰色关联分析法优化Zn1-xFexO纳米颗粒光催化降解甲基橙的参数^[72]。

2.3 生物学领域

张富丽等运用灰色关联分析模型研究了Bt抗虫棉秸秆还田对土壤养分特征的影响,认为秸秆还田是转Bt基因植物秸秆无害化处理的理想方式^[73];Yang等运用灰色关联分析模型研究了水稻营养期色素含量与标准差植被指数^[74]。

罗钦等运用灰色关联分析模型研究了秀珍菇辐射新品种子实体中微量元素含量与铅含量的关系,为选育铅含量更低的秀珍菇品种提供了科学

依据^[75]。

郭瑞林对作物灰色育种学进行了深入研究,培育了多个农作物新品种^[76]。

Jin等基于高光谱数据运用灰色关联分析和偏最小二乘法对冬小麦叶片含水量进行估算^[77];Wei等运用灰色关联度分析法评价藏青稞品质^[78],取得了具有重要价值的成果。

2.4 地质与地球科学领域

赵鹏大院士等构建了矿产资源定量预测理论与方法体系,提出了“地质异常”“地质体数学特征”“三联式”定量成矿预测、非传统矿产资源研究、新概念、新内容及研究方法,在新疆北山地区发现铜镍硫化物远景成矿带2条,在东准噶尔发现金矿带1条^[79]。

高玮和冯夏庭院士关于岩土工程(包括滑坡)的安全性分析、评估、开挖与控制措施设计优化、实时监测等方面的研究^[80]、李晓红院士等关于隧道及地下工程围岩稳定性及可靠性分析的极限位移判别研究^[81],均取得了具有重大价值的成果。

彭放等建立了基于灰色规划聚类分析的盖层定量评价新方法,并运用该方法对琼东南盆地3个主要勘探区4套泥岩共12种盖层对象进行了评价,结论与勘探结果相吻合^[82];梁冰等通过建立多指标灰关联度优选模型,对评价指标值为区间灰数的复杂地质参数特征研究区的勘探开发潜力进行了优选排序^[83];陈荣环等运用灰色系统理论研究测井、钻井取心、试油及有关地质资料,通过匹配、拟合和提取参数,以统计分析特征值及其准确率、分辨率研究划分地层岩性、物性和含油性,为油田勘探开发提供了地质依据^[84];王云云等运用灰关联分析方法对姚家岭锌金多金属矿床进行了科学预测^[85]。

方晓彤等运用多维灰色评估模型预测煤与瓦斯突出风险,为矿井安全生产提供了依据^[86];Zeng等基于弱化缓冲算子和无偏灰色模型对中国页岩气产量进行预测^[87];Kose和Tasci基于多变量灰色预测模型和回归模型对大地形变进行了预测^[88]。

2.5 水文与水资源领域

夏军院士等关于灰色系统水文学的研究^[89]、吴中如院士等关于水工结构及大坝安全监测方面的研究^[90]和Hipel院士等关于水资源利用的研究^[91],均取得了一系列重要成果;林跃忠等依据三峡现场边坡的测试数据,建立了边坡岩体变形的灰色预测模型,绘出了边坡变形的拟合和预测曲线,为边坡岩体变形的预测提供了可靠保证和理论依据^[92]。

Hao等不仅采用灰色系统模型对喀斯特流域水文过程进行分析和预测,获得了较高精度,还采

用分段灰色模型研究了人为活动对喀斯特流域水文过程的影响^[93]。

Peng等研究了灰色预测模型与DDDP相结合的梯级水库调度优化算法^[94];Mahmod等在水文地质资料有限的情况下,运用修正灰色模型对埃及哈尔加绿洲努比亚砂岩地区地下水流动进行分析^[95]。

2.6 医学领域

灰色系统方法和模型技术被广泛应用于疾病预测与控制、卫生管理评价、智能诊断系统构建、药物疗效评价和医学图像处理等现代医学领域,取得了可喜的成就,形成了灰色系统理论中灰色医学研究分支领域^[96]。

汕头大学医学院院长、博士生导师谭学瑞教授及其课题组在多项国家自然科学基金和广东省自然科学基金资助下,对临床试验的灰关联方法学进行了系统研究。他们提出的遍历性灰关联空间理论、灰色医学关联因子的极性分析理论与方法、多层次灰色医学关联的公理体系和灰关联方法对比模型等临床试验新方法,被应用于心血管内科学、消化内科学、神经内科学和传染病学等多个临床医学学科,取得了显著成效^[97]。

魏航等运用灰色系统理论建立了中药色谱指纹图谱模式识别模型,56批次不同品种化橘红药材样品的高效液相色谱分析结果表明,该模型对药材中化学成分的种类与含量十分接近的毛橘红不同栽培品种的识别率超过92.85%^[98]。

Icer等基于灰色关联分析对脂肪肝超声图像定量分级,得到了科学诊断结果^[99];Lai等将基于灰色关联分析的无监督单链聚类法应用于细胞外电生理记录的棘波自动分选^[100];Gupta等基于直方图修正灰色关联分析的乳腺图像保亮度对比度增强和质量分割方法^[101],均取得了良好的效果。

3 灰色系统理论在工程技术领域中的深入应用

在中国知网数据库中查询以交通、电力和机械等为主题且精确包含“灰色系统”词组的文献,所得结果如表6所示。

灰色系统理论应用于交通、电力和机械等工程技术学科领域,取得了数以千、万计的研究成果。其中,电力、计算机和材料科学领域论文均超过5 000篇,交通运输领域超过1万篇,信息科学领域超过2万篇,环境科学领域接近3万篇。

表6 工程技术各学科领域精确包含“灰色系统”词组的文章数
Table 6 Number of articles containing the phrase “grey system” accurately in various disciplines of engineering technology

学科领域	交通	电力	机械	动力	航空	建筑	计算机
论文数	10 626	5 924	2 964	2 358	1 538	4 930	6 109
学科领域	电子	信息	石油	化工	材料	水利	环境
论文数	2 310	24 545	2 932	1 121	7 465	1 678	29 069

3.1 交通运输领域

刘秋妍等综合运用灰色聚类 and 粗糙集模型对频率受限的铁路数字移动通信系统规划方案进行优化,提高了电平和干扰矩阵估计的精确度^[102];高凡等按照列车运行目标设计适应度灰数,构建了基于灰色遗传的高速列车速度控制器模型^[103];陆小红和王长林研究了基于预测型灰色控制的列车自动运行速度控制器建模与仿真问题^[104];Chirwa等基于英国和美国的数据,运用GM(1,1)模型估算车祸风险^[105];米根锁等以模糊故障诊断法、遗传算法和灰色系统理论3种诊断方法的诊断结果为基础,构造最优组合模型,对25 Hz相敏轨道电路进行故障诊断^[106]。

Twala将人工神经网络、分类与回归树、K-近邻方法、线性判别分析方法、朴素贝叶斯分类器、准优算法和支持向量机方法与灰关联分类器算法得到的模拟结果进行对比后发现,灰关联分类器算法最适合南非Gauteng省道路交通事故数据的建模和分析^[107]。

3.2 电力工程领域

孙才新院士团队开展了关于高电压绝缘和故障诊断技术研究领域的研究^[108-110];黄新波和李立焜院士课题组开展了关于电网工程、直流输电和交直流并联电网运行技术的研究^[111]。

Liao等关于电力变压器油溶气体含量的分析^[112];Yang等根据风电机组齿轮箱的润滑油温度和铁元素含量等实测数据,引入多源信息,对传统灰色系统模型进行改进,预测风电机组齿轮箱磨损趋势,为齿轮箱维护和更换决策提供了科学依据^[113]。

Ossowski和Korzybski运用灰色系统模型开展模拟电路故障诊断^[114];蒋维基于灰色粗糙集理论对风电机组传动链故障进行诊断^[115];Dejamkhooy等开展了关于非平稳电压波动建模与预测的研究^[116]。

3.3 机械工程领域

贾振元院士团队开展了关于高端装备高性能零部件控形控性机械加工理论、技术与装备的研

究^[117];方辉和谭建荣院士团队开展了关于机械设计及理论、计算机辅助设计与图形学、数字化设计与制造等领域的研究^[118];廖健和何琳院士团队开展了关于潜艇降噪技术领域的研究^[119];Cempel运用灰色预测模型对机械振动状态进行监测^[120];王旭亮和聂宏运用灰色系统模型预测机件疲劳寿命,大幅度降低了预测误差^[121];张雪元等运用GM(1,1)模型研究机器人情感状态变化规律,实现了情感机器人交互系统^[122];李桐等运用灰色预测模型测算疲劳裂纹扩展速率^[123]。

张杰院士等运用灰色关联分析模型对二齿差摆动活齿传动故障进行分析,为提高二齿差摆动活齿传动系统的可靠性提供了科学依据^[124];夏新涛等运用灰色关联分析模型研究滚动轴承加工质量与振动的关系,发现结构尺寸误差参数是对轴承振动影响较大的因素^[125];谢延敏等通过对各因子与目标序列的灰色关联度进行方差分析,获得了影响方盒件稳健性各因子的最佳参数^[126]。

Prakash等基于田口方法和灰色关联分析模型开展了石粉增强铝基复合材料车削多目标优化研究^[127];Loganathan等运用灰色关联分析模型对AA6061合金渐进成形输入参数进行优化^[128];Pagar和Gawande运用灰色关联分析方法对金属膨胀波纹管径向挠度应力进行参数化设计分析^[129];Sharma等运用田口和灰色关联分析方法研究了GFRP齿轮精度和表面粗糙度^[130];Khan等运用灰色关联分析方法对干、湿、低温下车削钛基合金进行多目标优化^[131]。

3.4 航空航天领域

王衍洋和曹义华采用灰色神经网络的方法,建立了中国民航运行风险的非线性在线预测模型^[132];杨天社等运用灰色系统模型对航天器故障进行预测,获得了较高的精度^[133-134]。

解建喜等运用灰色关联分析模型解决了飞机顶层设计方案优选决策问题^[135];章程等基于灰色关联分析模型研究飞机客制化方案^[136];肖军和章玮玮综合运用灰色关联分析和故障树方法研究靶机坠毁故障,为诊断靶机坠毁故障原因,控制故障的发生以及改进系统可靠性提供了理论依据^[137]。

余锋杰等将灰色聚类决策方法应用于飞机大部件自动化对接装配系统,提高了系统稳定性,降低了设备故障风险,同时控制了维修费用^[138];张峰等运用灰色聚类评估模型对舰载机系统进行安全评估,对预先发现系统安全隐患,预防和降低事故发生起到了积极作用^[139]。

3.5 智能控制领域

王耀南院士团队发展了关于智能控制理论与

机器人系统、图像识别理论与机器视觉应用、先进制造装备智能化控制技术、电力电气行业重大工程综合自动化控制系统的研究^[140];中南大学粉末冶金国家重点实验室刘业翔院士及其课题组运用灰色系统方法和模型研究铝电解过程控制问题,取得多项成果^[141]。

田建艳等建立了加热炉钢坯温度灰色预报模型,提出了钢坯温度控制方法^[142];王伟等针对具有强非线性、大时滞、多扰动特点的焦炉火道温度控制问题,提出一种基于组合灰色预测模型的改进模糊专家控制方法^[143];张广立等结合传统反馈控制方法和灰色预测控制,设计了自调节灰色预测控制器,仿真结果表明,新型控制器具有更为优良的动态性能和鲁棒性^[144]。

乔桂玲等针对深海行走机构在海底复杂作业环境下行走呈现出随机性、非线性和时变性,难以建立精确数学模型等特点,提出了灰色预测——模糊PID控制方法,实现了对深海行走机构的有效控制^[145];朱坚民等提出的基于灰色关联补偿控制的气动位置伺服控制系统研究,有效改善了传统控制方法对于气动位置伺服控制系统的跟踪精度^[146]。

3.6 武器装备研制与运用领域

崔建鹏等运用多目标灰色决策模型研究了地空导弹武器系统选型问题^[147];李新其等构建了导弹核武器最佳配置的灰色规划模型,为导弹核武器的订购、存贮、阵地配置及作战运用提供了理论依据^[148]。

韩晓明等运用灰色聚类模型对防空反导导弹战斗部研制方案进行综合评估^[149];姚军勃和胡伟文根据超视距地波雷达的特点和作战任务,应用灰色评估模型对其作战效能进行评估^[150]。

林加剑等运用灰色关联分析方法求解影响爆炸成型弹丸(Explosively formed projectile, EFP)速度的主要因素,得到了对EFP的药型罩和装药结构设计具有重要参考价值的结果^[151];赵国钢等运用灰色关联分析法建立了舰艇反导作战中来袭导弹威胁评估模型,为舰艇指控系统适时进行目标威胁判断提供了决策依据^[152];刘以安等开展了关于雷达目标跟踪的研究^[153]。

4 结 论

从1982年创立至今,灰色系统理论已经历40年的成长过程。适逢中华民族伟大复兴和创新型国家建设的大好时机,面对百年未有之大变局,立足中华文化沃土,积极投身民族复兴和创新型国家建设大业,为世界贡献新知,是每一位中华儿女的

历史使命,也是灰色系统理论研究领域同仁的职责所在。

按照科学发展规律,一门新学说需要经过几代人的持续耕耘,历经几十年、上百年乃至数百年方能臻于完善。灰色系统理论在40年的时间内已初步建立起一门新学说相对完善的体系结构,并被广泛应用于解决社会科学、自然科学和工程技术领域的实际问题,在中国和世界上众多国家取得了大量应用成果^[54,154],一门中国原创学说稳步登上国际学术舞台。

灰色系统理论作为一门新学说,依然存在许多有待解决的问题,需要进一步深入研究。如近年来刚开始起步的序列算子频谱分析方法,尚有待进一步深化;基于核与灰度的灰数运算法则,已有关于灰数和、差运算的灰度合成公理,而关于灰数积、商运算的灰度合成公理,仍需要继续探索;此外,关于不同类型缓冲算子适用的情形、关于灰色预测模型的选择与检验标准、关于灰色聚类评估模型和多种贫信息决策模型适用范围及其可信度评价,以及灰色系统模型在社会科学、自然科学和工程技术各领域中的应用创新,都有大量艰苦细致的工作需要完成^[155-156]。诚望广大同仁继续在从事灰色系统理论研究园地不懈耕耘,虚心接受并认真对待各种批评和建议,不断探索、不断发掘新的生长点,使中国学者原创的灰色系统理论不断发扬光大。

参考文献:

- [1] DENG J L. Control problems of grey systems[J]. Systems & Control Letters, 1982, 1(5): 288-294.
- [2] 邓聚龙. 灰色系统(社会·经济)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1985.
DENG Julong. Grey system (social and economic) [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1985.
- [3] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉: 华中工学院出版社, 1985.
DENG Julong. Grey control system[M]. Wuhan: Huazhong Institute of Technology Press, 1985.
- [4] 刘思峰, 陶勇, 唐伟, 等. 中国原创灰色系统理论的创新、发展与国际传播[J]. 南京航空航天大学学报(社会科学版), 2022(4): 1-10.
LIU Sifeng, TAO Yong, TANG Wei, et al. Innovation, development and international communication of Chinese original grey system theory[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Social Science Edition), 2022(4): 1-10.
- [5] 刘思峰, 林益. 灰数的一种公理化定义[J]. 中国工程科学, 2004, 6(8): 91-94.
LIU Sifeng, LIN Yi. An axiomatic definition of grey scale[J]. Chinese Engineering Science, 2004, 6(8):

- 91-94.
- [6] LIU Sifeng, FANG Zhigeng, YANG Yingjie, et al. General grey numbers and its operations[J]. Grey Systems: Theory and Application, 2012, 2(3): 341-349.
- [7] LIU Sifeng. Generalized degree of grey incidence [M]//Information and Systems. Dalian: DMU Publishing House, 1992: 113-116.
- [8] 刘思峰, 谢乃明, FORREST J. 基于相似性和接近性视角的新型灰色关联分析模型[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(5): 881-887.
LIU Sifeng, XIE Naiming, FORREST J. On new models of grey incidence analysis based on visual angle of similarity and nearness[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2010, 30(5): 881-887.
- [9] 张可, 刘思峰. 灰色关联聚类在面板数据中的扩展及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(7): 1253-1259.
ZHANG Ke, LIU Sifeng. Extended clusters of grey incidences for panel data and its application[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2010, 30(7): 1253-1259.
- [10] LIU S F. Negative grey relational model and measurement of the reverse incentive effect of fields medal[J]. Grey Systems: Theory and Application, 2022. DOI: 10.1108/GS-10-2021-0148.
- [11] 刘思峰, 曾波, 刘解放, 等. GM(1,1)模型的几种基本形式及其适用范围研究[J]. 系统工程与电子技术, 2014, 36(3): 501-508.
LIU Sifeng, ZENG Bo, LIU Jiefang, et al. Several basic models of GM(1, 1) and their applicable bound [J]. Systems Engineering and Electronics, 2014, 36(3): 501-508.
- [12] 谢乃明, 刘思峰. 离散GM(1,1)模型与灰色预测模型建模机理[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(1): 93-99.
XIE Naiming, LIU Sifeng. Discrete GM(1, 1) and mechanism of grey forecasting model[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2005, 25(1): 93-99.
- [13] WU L F, LIU S F, YAO L G, et al. Grey system model with the fractional order accumulation[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2013, 18(7): 1775-1785.
- [14] 陈向东, 夏军, 徐倩. 灰色微分动态模型的自忆预报模式[J]. 中国科学 E 辑: 技术科学, 2009, 39(2): 341-350.
CHEN Xiangdong, XIA Jun, XU Qian. Self memorizing prediction mode of grey differential dynamic model[J]. Science in China Part E: Technical Science, 2009, 39(2): 341-350.
- [15] GUO X J, LIU S F, WU L F, et al. A multi-variable grey model with a self-memory component and its application on engineering prediction[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2015, 42: 82-93.
- [16] 刘思峰, 朱永达. 区域经济评估指标与三角隶属函数评估模型[J]. 农业工程学报, 1993, 9(2): 8-13.
LIU Sifeng, ZHU Yongda. Study on triangular model and indexes in synthetic evaluation of regional economy [J]. Transactions of the CSAE, 1993, 9(2): 8-13.
- [17] 刘思峰, 谢乃明. 基于改进三角白化权函数的灰评估新方法[J]. 系统工程学报, 2011, 26(2): 244-250.
LIU Sifeng, XIE Naiming. A new grey evaluation method based on reformative triangular whitenization weight function[J]. Journal of Systems Engineering, 2011, 26(2): 244-250.
- [18] 刘思峰, 方志耕, 杨英杰. 两阶段灰色综合测度决策模型与三角白化权函数的改进[J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1232-1238.
LIU Sifeng, FANG Zhigeng, YANG Yingjie. Two stages decision model with grey synthetic measure and a betterment of triangular whitenization weight function [J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1232-1238.
- [19] 刘思峰, 袁文峰, 盛克勤. 一种新型多目标智能加权灰靶决策模型[J]. 控制与决策, 2010, 25(8): 1059-1163.
LIU Sifeng, YUAN Wenfeng, SHENG Keqin. Multi-attribute intelligent grey target decision model[J]. Control and Decision, 2010, 25(8): 1059-1163.
- [20] 刘思峰, 张红阳, 杨英杰. “最大值准则”决策悖论及其求解模型[J]. 系统工程理论与实践, 2018, 38(7): 1830-1835.
LIU Sifeng, ZHANG Hongyang, YANG Yingjie. On paradox of rule of maximum value and its solution[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2018, 38(7): 1830-1835.
- [21] LIU Sifeng. The three axioms of buffer operator and their application[J]. The Journal of Grey System, 1991, 3(1): 39-48.
- [22] 党耀国, 刘思峰, 刘斌, 等. 关于弱化缓冲算子的研究[J]. 中国管理科学, 2004, 12(2): 108-111.
DANG Yaoguo, LIU Sifeng, LIU Bin, et al. Study on the buffer weakening operator[J]. Chinese Journal of Management Science, 2004, 12(2): 108-111.
- [23] 吴正朋, 刘思峰, 米传民, 等. 基于反向累积法的弱化缓冲算子序列研究[J]. 中国管理科学, 2009, 17(3): 136-141.
WU Zhengpeng, LIU Sifeng, MI Chuanmin, et al. Study on the sequence of weakening buffer operators based on back cumulative-sum method[J]. Chinese Journal of Management Science, 2009, 17(3): 136-141.
- [24] 崔杰, 党耀国. 基于一类新的强化缓冲算子的GM(1, 1)预测精度研究[J]. 控制与决策, 2009, 24(1):

- 44-48.
CUI Jie, DANG Yaoguo. Research of precision of prediction of GM(1,1) based on a kind of novel strengthening buffer operators[J]. Control and Decision, 2009, 24(1): 44-48.
- [25] 崔立志,刘思峰,吴正朋.新的强化缓冲算子的构造及其应用[J].系统工程理论与实践, 2010, 30(3): 484-489.
CUI Lizhi, LIU Sifeng, WU Zhengpeng. New strengthening buffer operators and their applications [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2010, 30(3): 484-489.
- [26] 关叶青,刘思峰.线性缓冲算子矩阵及其应用研究[J].高校应用数学学报,2008,23(3): 357-362.
GUAN Yeqing, LIU Sifeng. Matrix of linear buffer operators and their applications[J]. Applied Mathematics A Journal of Chinese Universities, 2008, 23(3): 357-362.
- [27] 李雪梅,党耀国,王正新.调和变权缓冲算子及其作用强度比较[J].系统工程理论与实践, 2012,32(11): 2486-2492.
LI Xuemei, DANG Yaoguo, WANG Zhengxin. Harmonic buffer operators with variable weights and effect strength comparison[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012,32(11): 2486-2492.
- [28] WEI Yong, KONG Xinhai, HU Dahong. A kind of universal constructor method for buffer operators [J]. Grey Systems: Theory and Application, 2011, 1(2): 178-185.
- [29] LI Q X, LIU S F. The foundation of the grey matrix and the grey input-output analysis[J]. Applied Mathematical Modelling, 2008, 32: 267-291.
- [30] LI Q X, LIU S F, LIN Y. Grey enterprise input-output analysis[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2012, 236(7): 1862-1875.
- [31] 方志耕,刘思峰.基于纯策略的灰矩阵博弈模型研究(I)—标准灰矩阵博弈模型构建[J].东南大学学报(自然科学版), 2003, 33(6): 796-800.
FANG Zhigeng, LIU Sifeng. Study on grey matrix game based on pure strategy (I): Building on normal grey matrix game [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2003, 33(6): 796-800.
- [32] FANG Zhigeng, LIU Sifeng, SHI Hongxing, et al. Grey game theory and its applications in economic decision-making[J]. New York: Taylor & Francis Group, 2010.
- [33] 李希灿,袁征,张广波,等. GM(1,1, β)灰微分方程的若干性质[J].系统工程理论与实践, 2014, 34(5): 1249-1255.
LI Xican, YUAN Zheng, ZHANG Guangbo, et al. Some properties of grey differential equation GM(1,1, β) [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014,34(5): 1249-1255.
- [34] 钱吴永,党耀国,刘思峰.含时间幂次项的灰色 GM(1,1, t^r)模型及其应用[J].系统工程理论与实践, 2012,32(10): 2247-2252.
QIAN Wuyong, DANG Yaoguo, LIU Sifeng. Grey GM(1,1, t^r) model with time power and its application [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012,32(10): 2247-2252.
- [35] 王正新. GM(1,1)幂模型的派生模型[J].系统工程理论与实践, 2013,33(11): 2894-2902.
WANG Zhengxin. Models derived from GM(1,1) power model [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2013,33(11): 2894-2902.
- [36] 肖新平,刘军,郭欢.广义累加灰色预测控制模型的性质及优化[J].系统工程理论与实践, 2014, 34(6): 1547-1556.
XIAO Xiping, LIU Jun, GUO Huan. Properties and optimization of generalized accumulation grey model [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(6): 1547-1556.
- [37] 曾波,刘思峰.基于振幅压缩的随机振荡序列预测模型[J].系统工程理论与实践, 2012, 32(11): 2493-2497.
ZENG Bo, LIU Sifeng. Prediction model of stochastic oscillation sequence based on amplitude compression [J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012, 32(11): 2493-2497.
- [38] 张岐山.提高灰色 GM(1,1)模型精度的微粒群方法[J].中国管理科学, 2007, 15(5): 126-129.
ZHANG Qishan. Improving the precision of GM(1,1) model by using particle swarm optimization [J]. Chinese Journal of Management Science, 2007, 15(5): 126-129.
- [39] 姚天祥,刘思峰,谢乃明.新信息离散 GM(1,1)模型及其特性研究[J].系统工程学报, 2010, 25(2): 164-170.
YAO Tianxiang, LIU Sifeng, XIE Naiming. Study on the properties of new information discrete GM(1,1) model [J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(2): 164-170.
- [40] EVANS M. An alternative approach to estimating the parameters of a generalised grey Verhulst model: An application to steel intensity of use in the UK [J]. Expert Systems with Applications, 2014, 41(4): 1236-1244.
- [41] OLSON D L, ZHANG J J, WU D S. The method of grey related analysis to multiple attribute decision making problems with interval numbers [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2005, 42(9/10): 991-998.
- [42] WU D S, DASH O, DAVID L. Fuzzy multiattribute

- grey related analysis using DEA [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2010, 60 (1) : 166-174.
- [43] 刘卫锋. 广义区间灰数关联度模型[J]. *郑州大学学报(理学版)*, 2013, 45(2) : 41-44, 89.
LIU Weifeng. A generalized incidence degree model of interval grey numbers[J]. *Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition)*, 2013, 45(2) : 41-44, 89.
- [44] 郭欢, 肖新平, JEFFREY F. 灰色二层多目标线性规划问题及其解法[J]. *控制与决策*, 2014, 29(7) : 1193-1198.
GUO Huan, XIAO Xinping, JEFFREY F. Problem of grey bilevel multi-objective linear programming and its algorithm[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(7) : 1193-1198.
- [45] 郭海庆, 吴中如, 杨杰. 堆石坝变形监测的灰色非线性时序组合模型[J]. *河海大学学报*, 2001, 29(6) : 51-55.
GUO Haiqing, WU Zhongru, YANG Jie. A new combined model for rock-fill dam deformation monitoring[J]. *Journal of Hohai University*, 2001, 29(6) : 51-55.
- [46] 张歧山, 郭喜江, 邓聚龙. 灰关联熵分析方法[J]. *系统工程理论与实践*, 1996, 16(8) : 7-11.
ZHANG Qishan, GUO Xijiang, DENG Julong. Grey relation entropy method of grey relation analysis[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 1996, 16(8) : 7-11.
- [47] ZHOU C S, DENG J L. The stability of grey linear system[J]. *International Journal of Control*, 1986, 43(1) : 313-320.
- [48] ZHOU C S, DENG J L. Stability analysis of grey discrete-time systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1989, 34(2) : 173-175.
- [49] 苏春华, 刘思峰. 灰色随机线性时滞系统的渐近稳定性[J]. *控制与决策*, 2008, 23(5) : 571-574.
SU Chunhua, LIU Sifeng. Asymptotic stability of grey stochastic linear delay systems[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(5) : 571-574.
- [50] 苏春华, 刘思峰. 一类区间随机分布时滞系统的p阶矩指数稳定性[J]. *应用数学*, 2009, 22(2) : 413-420.
SU Chunhua, LIU Sifeng. p-moment exponential stability for a class of interval stochastic distributed delay systems[J]. *Mathematica Applicata*, 2009, 22(2) : 413-420.
- [51] LIN C H, SONG Z Y, LIU S F. Study on mechanism and filter efficacy of AGO/IAGO in the frequency domain[J]. *Grey Systems: Theory and Application*, 2021, 11(1) : 1-21.
- [52] LIN C H, WANG Y, LIU S F. On spectrum analysis of different weakening buffer operators[J]. *Journal of Grey System*, 2019, 31(4) : 111-121.
- [53] LIU S F, LIN C H, TAO L Y. et al. On spectral analysis and new research directions in grey system theory[J]. *Journal of Grey System*, 2020, 32(1) : 108-117.
- [54] ZHAO C S. Book reviews: Preface to the 7th edition of grey system theory and its applications[J]. *The Journal of Grey System*, 2015, 27(1) : 127-129.
- [55] 刘思峰, 杨岭. 区域经济评估、预警与调控[M]. 郑州: 河南人民出版社, 1994.
LIU Sifeng, YANG Ling. Regional economic evaluation, early warning and regulation[M]. Zhengzhou: People's Publishing House of Henan, 1994.
- [56] 许广繁, 杨善林. 灰色理论在有杆抽油井故障诊断中的应用[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(10) : 1265-1268.
XU Guangfan, YANG Shanlin. Application of grey theory in fault diagnosis of rod-pumped wells[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2013, 36(10) : 1265-1268.
- [57] 陈晓红. 数字经济时代的技术融合与应用创新趋势分析[J]. *社会科学家*, 2018(8) : 8-23.
CHEN Xiaohong. Analysis on the trend of technology integration and application innovation in the era of digital economy[J]. *Social Scientist*, 2018(8) : 8-23.
- [58] JAHAN A, ZAVADSKAS E K. ELECTRE-IDAT for design decision-making problems with interval data and target-based criteria[J]. *Soft Computing*, 2019, 23: 129-143.
- [59] DELCEA C, SCARLAT E, LIVIU-ADRIAN C. Grey relational analysis of the financial sector in Europe[J]. *The Journal of Grey System*, 2013, 25(4) : 19-30.
- [60] SCARLAT E, DELCEA C. Complete analysis of bankruptcy syndrome using grey systems theory[J]. *Grey Systems: Theory and Application*, 2011, 1(1) : 19-32.
- [61] 李桥兴. 灰色运算基础与灰色投入产出分析[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
LI Qiaoxing. Grey operation basis and grey input-output analysis[M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [62] 王学萌, 郭常莲, 李晋陵. 中国经济灰色投入产出分析—基于对全国投入产出表的实证研究[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
WANG Xueming, GUO Changlian, LI Jinling. Grey input-output analysis of China's economy—based on the empirical study of the national input-output table [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [63] 方志耕, 刘思峰, 施红星, 等. 灰色博弈理论及其经济应用研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
FANG Zhigeng, LIU Sifeng, SHI Hongxing, et al.

- Grey game theory and its applications in economics research[M]. Beijing: Higher Education Press, 2016.
- [64] 陈蕾,秦雁,邓孺孺,等.基于ASD地物光谱仪的两种天空光测量方法比较分析[J].热带地理,2011,31(2):182-186.
- CHEN Lei, QIN Yan, DENG Ruru, et al. Comparative analysis of the two common methods for skylight measurement based on the ASD spectroradiometer[J]. Tropical Geography, 2011, 31(2): 182-186.
- [65] 王月,陈宗海,王红艳,等.灰色关联聚类在宇宙射线 μ 子成像中的应用[J].核电子学与探测技术,2011,31(8):871-873.
- WANG Yue, CHEN Zonghai, WANG Hongyan, et al. Application of gray relational cluster method in muon tomography[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2011, 31(8): 871-873.
- [66] 韩力,帅海乐,葛枝华,等.强夯填土地基的地球物理特征研究[J].低温建筑技术,2020,42(1):124-127.
- HAN Li, SHUAI Haile, GE Zhihua, et al. Study on geophysical characteristics of dynamic compaction fill foundation[J]. Low Temperature Building Technology, 2020, 42(1): 124-127.
- [67] SHI Q, TAO Z, SHAHZAD M A. Reliability analysis on passive residual heat removal of AP1000 based on grey model[J]. ATW-International Journal For Nuclear Power, 2017, 62(6): 408-417.
- [68] 王勤,匡立中,曾申波.基于电弧信号的焊接过程最优参数的灰关联分析[J].电焊机,2010,40(3):75-78.
- WANG Qin, KUANG Lizhong, ZENG Shenbo. Grey relational analysis of optimal parameters of welding process based on arc signal[J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(3): 75-78.
- [69] KASEMSIRI P, DULSANG N, PONGSA U, et al. Optimization of biodegradable foam composites from cassava starch, oil palm fiber, chitosan and palm oil using Taguchi method and grey relational analysis[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2017, 25(2): 378-390.
- [70] 刘耀鑫,杨天华,李润东,等.高温固硫物相硫酸铝酸钙生成反应灰色关联分析及预测模型[J].热力发电,2007(6):37-40.
- LIU Yaixin, YANG Tianhua, LI Rundong, et al. Grey correlation analysis and prediction model for formation reaction of high-temperature sulphur-fixing phase sulphocalciumaluminat[J]. Thermal Power Generation, 2007(6): 37-40.
- [71] GUPTA A, VAISHYA R, KHAN K L A, et al. Multi-response optimization of the mechanical properties of pultruded glass fiber composite using optimized hybrid filler composition by the gray relation grade analysis[J]. Materials Research Express, 2019, 6(12): 125322.
- [72] JENA M, MANJUNATHA C, SHIVARAJ B W. Optimization of parameters for maximizing photocatalytic behaviour of Zn1-xFexO nanoparticles for methyl orange degradation using Taguchi and grey relational analysis approach[J]. Materials Today Chemistry, 2019, 12: 187-199.
- [73] 张富丽,尹全,王东,等.Bt抗虫棉秸秆还田对土壤养分特征的影响[J].生物安全学报,2020,29(1):69-77.
- ZHANG Fuli, YIN Quan, WANG Dong, et al. Effects of Bt insect resistant cotton straw returning on soil nutrient characteristics[J]. Journal of Biosafety, 2020, 29(1): 69-77.
- [74] YANG Z W, HSU M H, CHEN J C. Grey relational analysis of pigment levels and the normalized difference vegetation index during the vegetative phase of paddy rice[J]. The Journal of Grey System, 2012, 24(3): 275-284.
- [75] 罗钦,江枝和,肖淑霞,等.秀珍菇辐射新品种子实体中微量元素含量与铅含量的灰色关联分析[J].山地农业生物学报,2015,34(4):18-21.
- LUO Qin, JIANG Zhihe, XIAO Shuxia, et al. Grey correlation analysis of trace element content and lead content in new irradiated seeds of Pleurotus ostreatus[J]. Journal of Mountain Agricultural Biology, 2015, 34(4): 18-21.
- [76] 郭瑞林.作物灰色育种学[M].北京:中国农业科技出版社,1995.
- GUO Ruilin. Crop grey breeding[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1995.
- [77] JIN X, XU X, SONG X. Estimation of leaf water content in winter wheat using grey relational analysis-partial least squares modeling with hyperspectral data[J]. Agronomy Journal, 2013, 105(5): 1385-1392.
- [78] WEI N, ZHANG T L. Quality evaluation of tibetan highland barley by grey relational grade analysis[J]. Bangladesh Journal of Botany, 2019, 48(3): 817-826.
- [79] 赵鹏大,夏庆霖.中国学者在数学地质学科发展中的成就与贡献[J].地球科学-中国地质大学学报,2009,34(2):225-231.
- ZHAO Pengda, XIA Qinglin. Chinese scholars achievements and contributions to the development of mathematical geosciences [J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2009, 34(2): 225-231.
- [80] 高玮,冯夏庭.基于灰色—进化神经网络的滑坡变形预测研究[J].岩土力学,2004,25(4):514-517.
- GAO Wei, FENG Xiating. Study on landslide defor-

- mation prediction based on grey evolutionary neural network[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(4): 514-517.
- [81] 李晓红,王宏图,贾剑青,等.隧道及地下工程围岩稳定性及可靠性分析的极限位移判别[J]. *岩土力学*, 2005, 25(6): 850-854.
- LI Xiaohong, WANG Hongtu, JIA Jianqing, et al. Ultimate displacement discrimination of stability and reliability analysis of surrounding rocks of tunnel and underground engineering[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 25(6): 850-854.
- [82] 彭放,吴国平,方敏.灰色规划聚类及其在油气盖层评价中的应用[J]. *湖南科技大学学报*, 2005, 20(2): 5-10.
- PENG Fang, WU Guoping, FANG Min. Grey programming cluster and application in evaluation of oil and gas cap layer[J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology*, 2005, 20(2): 5-10.
- [83] 梁冰,代媛媛,陈天宇,等.复杂地质条件页岩气勘探开发区块灰关联度优选[J]. *煤炭学报*, 2014, 39(3): 524-530.
- LIANG Bing, DAI Yuanyuan, CHEN Tianyu, et al. Grey correlation optimization for shale gas exploration and development areas of complicated geological parameter features[J]. *Journal of China Coal Society*, 2014, 39(3): 524-530.
- [84] 陈荣环,宋子齐,康立明.灰色系统在新疆克拉玛依油田七中区储层评价中的应用[J]. *内蒙古石油化工*, 2005(7): 110-113.
- CHEN Ronghuan, SONG Ziqi, KANG Liming. Application of grey system in reservoir evaluation of the seventh middle area of Karamay Oilfield, Xinjiang[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2005(7): 110-113.
- [85] 王云云,周涛发,张明明,等.灰关联分析在姚家岭锌金多金属矿床预测中的应用[J]. *合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2013, 36(10): 1236-1241.
- WANG Yunyun, ZHOU Taofa, ZHANG Mingming, et al. Application of grey relational analysis in Yaojialing Zn-Au polymetallic deposit prediction[J]. *Journal of Hefei University of Technology*, 2013, 36(10): 1236-1241.
- [86] 方晓彤,陈宇,李绍泉.多维灰色评估方法在煤与瓦斯突出预测中的应用[J]. *工业安全与环保*, 2012, 38(12): 81-83.
- FANG Xiaotong, CHEN Yu, LI Shaoquan. Application of multidimensional grey evaluation methods in coal and gas outburst prediction[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2012, 38(12): 81-83.
- [87] ZENG B, DUAN H M, BAI Y, et al. Forecasting the output of shale gas in China using an unbiased grey model and weakening buffer operator[J]. *Energy*, 2018, 151(5): 238-249.
- [88] KOSE E, TASCI L. Geodetic deformation forecasting based on multi-variable grey prediction model and regression model[J]. *Grey Systems: Theory and Application*, 2019, 9(4): 464-471.
- [89] 夏军,赵红英.灰色人工神经网络模型及其在径流短期预报中的应用[J]. *系统工程理论与实践*, 1996, 16(11): 82-90.
- XIA Jun, ZHAO Hongying. Grey artificial neural network model and its application in short-term runoff prediction[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 1996, 16(11): 82-90.
- [90] 吴中如,徐波,顾冲时,等.大坝服役状态的综合评判方法[J]. *中国科学:技术科学*, 2012, 42(11): 1243-1254.
- WU Zhongru, XU Bo, GU Chongshi, et al. On comprehensive evaluation methods of the service condition of the dam[J]. *China Science: Technological Sciences*, 2012, 42(11): 1243-1254.
- [91] WANG Z X, HIPEL K W, WANG Q. et al. An optimized NGBM(1,1) model for forecasting the qualified discharge rate of industrial wastewater in China[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2011, 35: 5524-5532.
- [92] 林跃忠,王铁成,王来,等.三峡工程高边坡的稳定性分析[J]. *天津大学学报*, 2005, 38(10): 936-940.
- LIN Yuezhong, WANG Tiecheng, WANG Lai, et al. Stability analysis of high excavated slope in Three Gorges Project[J]. *Journal of Tianjin University*, 2005, 38(10): 936-940.
- [93] HAO Yonghong, CAO Bibo, CHEN Xiang, et al. A piecewise grey system model for study the effects of anthropogenic activities on karst hydrological processes [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(5): 1207-1220.
- [94] PENG Y, ZHANG X, XU W. et al. An optimal algorithm for cascaded reservoir operation by combining the grey forecasting model with DDDP[J]. *Water Science & Technology Water Supply*, 2018, 18(1): 142-150.
- [95] MAHMOD W E, WATANABE K. Modified grey model and its application to groundwater flow analysis with limited hydrogeological data: A case study of the Nubian Sandstone, Kharga Oasis, Egypt[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(2): 1063-1081.
- [96] 张利萍,郑彦玲,张学良,等.灰色系统理论在现代医学中的应用概述[J]. *数理医药学杂志*, 2015, 28(3): 430-434.
- ZHANG Liping, ZHENG Yanling, ZHANG Xue-

- liang, et al. Application of grey system theory in modern medicine[J]. *Journal of Mathematical Medicine*, 2015, 28(3): 430-434.
- [97] 谭学瑞, 邓聚龙, 任师颜, 等. 临床试验的灰关联方法学研究[Z]. 国家科技成果, 2011.
- TAN Xuerui, DENG Julong, REN Shiyan, et al. Study on grey correlation methodology of clinical trials[Z]. *National Scientific and Technological Achievements*, 2011.
- [98] 魏航, 林励, 张元, 等. 灰色系统理论在中药色谱指纹图谱模式识别中应用研究[J]. *色谱*, 2013, 31(2): 127-132.
- WEI Hang, LIN Li, ZHANG Yuan, et al. Research on the application of grey system theory in the pattern recognition for chromatographic fingerprints of traditional Chinese medicine[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2013, 31(2): 127-132.
- [99] ICER S, COSKUN A, IKIZCELI T. Quantitative grading using grey relational analysis on ultrasonographic images of a fatty liver[J]. *Journal of Medical Systems*, 2012, 36(4): 2521-2528.
- [100] LAI Hsinyi, CHEN Youyin, LIN Shenghuang, et al. Automatic spike sorting for extracellular electrophysiological recording using unsupervised single linkage clustering based on grey relational analysis[J]. *Journal of Neural Engineering*, 2011, 8(3): 036003.
- [101] GUPTA B, TIWARI M. A tool supported approach for brightness preserving contrast enhancement and mass segmentation of mammogram images using histogram modified grey relational analysis[J]. *Multidimensional Systems and Signal Processing*, 2017, 28(4): 1549-1567.
- [102] 刘秋妍, 钟章队, 艾渤. 基于粗糙集灰色聚类理论的 GSM-R 系统频率规划研究[J]. *铁道学报*, 2010, 32(5): 53-58.
- LIU Qiuyan, ZHONG Zhangdui, AI Bo. Research on frequency planning of GSM-R system based on grey cluster theory with rough set[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2010, 32(5): 53-58.
- [103] 高凡, 张友鹏, 高平. 基于灰色遗传的高速列车速度控制器模型研究[J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(5): 1272-1275.
- GAO Fan, ZHANG Youpeng, GAO Ping. Research on speed controller model for high-speed train based on grey genetic algorithm[J]. *Computer Measurement & Control*, 2012, 20(5): 1272-1275.
- [104] 陆小红, 王长林. 基于预测型灰色控制的列车自动运行速度控制器建模与仿真[J]. *城市轨道交通研究*, 2013, 16(2): 62-65.
- LU Xiaohong, WANG Changlin. Simulation on ATO speed controller based on grey prediction control[J]. *City Track Traffic Development Research*, 2013, 16(2): 62-65.
- [105] CHIRWA E C, MINGZHI M. Application of grey model GM(1, 1) to vehicle fatality risk estimation[J]. *Technological Forecasting and Social Change*, 2006, 73(5): 588-605.
- [106] 米根锁, 杨润霞, 梁利. 基于组合模型的轨道电路复杂故障诊断方法研究[J]. *铁道学报*, 2014, 36(10): 65-69.
- MI Gensuo, YANG Runxia, LIANG Li. Research on the method of diagnosis of complex fault in track circuit based on combined model[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2014, 36(10): 65-69.
- [107] TWALA B. Extracting grey relational systems from incomplete road traffic accidents data: The case of Gauteng Province in South Africa[J]. *Expert Systems*, 2014, 31(3): 220-231.
- [108] 孙才新, 毕为民, 周濂, 等. 灰色预测参数模型新模式及其在电气绝缘故障预测中的应用[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(5): 797-802.
- SUN Caixin, BI Weimin, ZHOU Quan, et al. New gray prediction parameter model and its application in electrical insulation fault prediction[J]. *Control Theory & Application*, 2003, 20(5): 797-802.
- [109] 孙才新, 李俭, 郑海平, 等. 基于灰色面积关联度分析的电力变压器绝缘故障诊断方法[J]. *电网技术*, 2002, 26(7): 24-29.
- SUN Caixin, LI Jian, ZHENG Haiping, et al. A new method of faulty insulation diagnosis in power transformer based on degree of area incidence analysis[J]. *Power System Technology*, 2002, 26(7): 24-29.
- [110] 孙才新. 输变电设备状态在线监测与诊断技术现状和前景[J]. *中国电力*, 2005, 38(2): 1-7.
- SUN Caixin. Present situation and prospect of online monitoring and diagnosis technology of the state of power transmission and transformation equipment[J]. *China Power*, 2005, 38(2): 1-7.
- [111] 黄新波, 欧阳丽莎, 王娅娜, 等. 输电线路覆冰关键影响因素分析[J]. *高电压技术*, 2011, 37(7): 1677-1682.
- HUANG Xinbo, OUYANG Lisha, WANG Yana, et al. Analysis on key influencing factors of transmission line icing[J]. *High Voltage Technology*, 2011, 37(7): 1677-1682.
- [112] LIAO R J, YANG J P, GRZYBOWSKI S, et al. Forecasting dissolved gases content in power transformer oil based on weakening buffer operator and least square support vector machine-Markov[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2012, 6(2): 142-151.
- [113] YANG Xiaoyu, FANG Zhigeng, YANG Yingjie. A

- novel multi-information fusion grey model and its application in wear trend prediction of wind turbines[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 71: 543-557.
- [114] OSSOWSKI M, KORZYBSKI M. Data mining based algorithm for analog circuits fault diagnosis[J]. *Przeegląd Elektrotechniczny*, 2013, 89(2a): 285-287.
- [115] 蒋维. 基于灰色粗糙集理论的风电机组传动链智能故障诊断方法[J]. *电网与清洁能源*, 2012, 28(12): 79-83.
- JIANG Wei. An intelligent diagnosis method based on grey rough set theory for wind turbine driving chain [J]. *Power System and Clean Energy*, 2012, 28(12): 79-83.
- [116] DEJAMKHOY A, DASTFAN A, AHMADY-FARD A. Modeling and forecasting nonstationary voltage fluctuation based on grey system theory[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(3): 1212-1219.
- [117] 贾振元, 马建伟, 王福吉, 等. 多零件几何要素影响下的装配产品特性预测方法[J]. *机械工程学报*, 2009, 45(7): 168-173.
- JIA Zhenyuan, MA Jianwei, WANG Fuji, et al. Prediction method of assembly product characteristics under the influence of multi part geometric elements[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 45(7): 168-173.
- [118] 方辉, 谭建荣, 殷国富, 等. 基于灰理论的质量屋用户需求分析方法研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2009, 15(3): 576-584, 591.
- FANG Hui, TAN Jianrong, YIN Guofu, et al. Research on user demand analysis method of house of quality based on grey theory[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2009, 15(3): 576-584, 591.
- [119] 廖健, 何琳, 吕志强, 等. 船用操舵装置系统架构方案的综合评价方法研究[J]. *机床与液压*, 2017, 45(7): 59-63.
- LIAO Jian, HE Lin, LV Zhiqiang, et al. Study on the comprehensive evaluation of system architecture schemes for the steering gear for ships[J]. *Machine Tools and Hydraulics*, 2017, 45(7): 59-63.
- [120] CEMPEL C. Decomposition of the symptom observation matrix and grey forecasting in vibration condition monitoring of machines[J]. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 2008, 18(4): 569-579.
- [121] 王旭亮, 聂宏. 基于灰色系统GM(1, 1)模型的疲劳寿命预测方法[J]. *南京航空航天大学学报*, 2008, 40(6): 845-848.
- WANG Xuliang, NIE Hong. Prediction method for fatigue life based on grey system model GM(1, 1)[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2008, 40(6): 845-848.
- [122] 张雪元, 王志良, 永井正武. 机器人情感交互模型研究[J]. *计算机工程*, 2006, 32(24): 6-12.
- ZHANG Xueyuan, WANG Zhiliang, NAGAI M. Research on affective interaction models of robot[J]. *Computer Engineering*, 2006, 32(24): 6-12.
- [123] 李桐, 任明法, 陈浩然. 基于灰色系统理论的疲劳裂纹扩展速率计算方法[J]. *机械强度*, 2010, 32(3): 472-475.
- LI Tong, REN Mingfa, CHEN Haoran. Fatigue crack growth rate calculation method based on gray theory[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2010, 32(3): 472-475.
- [124] 张杰, 梁尚明, 周荣亮, 等. 基于灰色关联的二齿差摆动活齿传动故障树分析[J]. *机械设计与制造*, 2012, 6: 183-185.
- ZHANG Jie, LIANG Shangming, ZHOU Rongliang, et al. Fault tree analysis of two teeth difference swing movable teeth transmission based on grey correlation[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2012, 6: 183-185.
- [125] 夏新涛, 王中宇, 常洪. 滚动轴承加工质量与振动的灰色关联度[J]. *航空动力学报*, 2005, 20(2): 250-254.
- XIA Xintao, WANG Zhongyu, CHANG Hong. Degree of grey incidence for the quality of processing and vibration of rolling bearing[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2005, 20(2): 250-254.
- [126] 谢延敏, 于沪平, 陈军. 基于灰色系统理论的方盒件拉深稳健设计[J]. *机械工程学报*, 2007, 43(3): 54-59.
- XIE Yanmin, YU Huping, CHEN Jun. Application of grey theory in deep drawing robust design Chinese [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(3): 54-59.
- [127] PRAKASH K S, GOPAL P M, KARTHIK S. Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis in turning of Rock dust reinforced Aluminum MMC[J]. *Measurement*, 2020, 157: 107664.
- [128] LOGANATHAN D, KUMAR S S, RAMADOSS R. Grey relational analysis-based optimization of input parameters of incremental forming process applied to the AA6061 alloy[J]. *Transactions of Fapena*, 2020, 44(1): 93-104.
- [129] PAGAR N D, GAWANDE S H. Parametric design analysis of meridional deflection stresses in metal expansion bellows using gray relational grade[J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2020, 42(5): 256.
- [130] SHARMA A, AGGARWAL M L, SINGH L. Inves-

- tigation of GFRP gear accuracy and surface roughness using Taguchi and grey relational analysis[J]. Journal of Advanced Manufacturing Systems, 2020, 19(1): 147-165.
- [131] KHAN M A, JAFFERY S H I, KHAN M, et al. Multi-objective optimization of turning titanium-based alloy Ti-6Al-4V under dry, wet, and cryogenic conditions using gray relational analysis (GRA)[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(9/10): 3897-3911.
- [132] 王衍洋, 曹义华. 航空运行风险的灰色神经网络模型[J]. 航空动力学报, 2010, 25(5): 1036-1042.
WANG Yanyang, CAO Yihua. Gray neural network model of aviation safety risk[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(5): 1036-1042.
- [133] 杨天社, 杨萍, 董小社, 等. 基于灰色系统理论的航天器故障状态预测方法[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(9): 1284-1285, 1307.
YANG Tianshe, YANG Ping, DONG Xiaoshe, et al. Method for predicting fault status of satellite based on gray system theory[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(9): 1284-1285, 1307.
- [134] 李培华, 杨海龙, 孙伶俐, 等. 灰预测与时间序列模型在航天器故障预测中的应用[J]. 计算机测量与控制, 2011, 19(1): 111-113.
LI Peihua, YANG Hailong, SUN Lingli, et al. Application of gray prediction and time series model in spacecraft prognostic[J]. Computer Measurement & Control, 2011, 19(1): 111-113.
- [135] 解建喜, 宋笔锋, 刘东霞. 飞机顶层设计方案优选决策的灰色关联分析法[J]. 系统工程学报, 2004, 19(4): 350-354.
XIE Jianxi, SONG Bifeng, LIU Dongxia. Gray correlation analysis method for scheme selection decision of aircraft top-layer design[J]. Journal of Systems Engineering, 2004, 19(4): 350-354.
- [136] 章程, 丁松滨, 王兵. 基于灰色关联分析的飞机客制化模型研究[J]. 交通信息与安全, 2014, 32(4): 131-136.
ZHANG Cheng, DING Songbin, WANG Bing. Research on aircraft customization model based on grey correlation analysis[J]. Traffic Information and Safety, 2014, 32(4): 131-136.
- [137] 肖军, 章玮玮. 灰关联度分析法在靶机坠毁故障诊断中的应用[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(9): 112-115.
XIAO Jun, ZHANG Weiwei. Grey incidence analysis applied to fault diagnosis of drone crash[J]. Journal of Sichuan Ordnance Engineering, 2009, 30(9): 112-115.
- [138] 余锋杰, 柯映林, 应征. 飞机自动化对接装配系统的故障维修决策[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(9): 1823-1830.
YU Fengjie, KE Yinglin, YING Zheng. Decision of fault repair in aircraft assembly system of automated docking[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2009, 15(9): 1823-1830.
- [139] 张峰, 汪鹏为, 肖支荣, 等. 灰色理论在舰载机系统安全评估中的应用[J]. 飞机设计, 2010, 30(3): 56-61.
ZHANG Feng, WANG Pengwei, XIAO Zhirong, et al. Application of grey theory in safety evaluation of carrier aircraft system[J]. Aircraft Design, 2010, 30(3): 56-61.
- [140] 鄂加强, 王耀南, 梅焱, 等. 铜精炼过程能耗模糊自适应权重组合预测模型及其应用[J]. 矿冶, 2005, 14(3): 46-48.
E Jiaqiang, WANG Yaonan, MEI Chi, et al. Fuzzy adaptive variable weight combination prediction model for energy consumption in copper refining process and its application[J]. Mining and Metallurgy, 2005, 14(3): 46-48.
- [141] 刘业翔, 陈湘涛, 张更容, 等. 铝电解控制中灰关联规则挖掘算法的应用[J]. 中国有色金属学报, 2004, 14(3): 494-498.
LIU Yexiang, CHEN Xiangtao, ZHANG Gengrong, et al. Application of mining algorithm based on gray association rule in aluminum electrolysis control[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(3): 494-498.
- [142] 田建艳, 鲁毅. 加热炉钢坯温度灰色预报模型的研究[J]. 东北大学学报, 2007, 28(S1): 6-10.
TIAN Jianyan, LU Yi. Research on grey prediction model of the slab temperature in heating furnace[J]. Journal of Northeast University, 2007, 28(S1): 6-10.
- [143] 王伟, 吴敏, 曹卫华, 等. 基于组合灰色预测模型的焦炉火道温度模糊专家控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(2): 185-190.
WANG Wei, WU Min, CAO Weihua, et al. Fuzzy-expert control based on combination grey prediction model for flue temperature in coke oven[J]. Control and Decision, 2010, 25(2): 185-190.
- [144] 张广立, 付莹, 杨汝清. 一种新型自调节灰色预测控制器[J]. 控制与决策, 2004, 19(2): 212-215.
ZHANG Guangli, FU Ying, YANG Ruqing. Novel self-adjustable grey prediction controller[J]. Control and Decision, 2004, 19(2): 212-215.
- [145] 乔桂玲, 张文明, 薛山. 深海行走机构灰色预测-模糊PID速度控制[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1550-1553.
QIAO Guiling, ZHANG Wenming, XUE Shan. Speed control based on fuzzy PID control with grey prediction in the deep sea stepping system[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(11): 1550-1553.
- [146] 朱坚民, 雷静桃, 黄之文, 等. 基于灰色关联补偿控制

- 的气动位置伺服控制系统[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 159-167.
- ZHU Jianmin, LEI Jingtao, HUANG Zhiwen, et al. Pneumatic position servo control system based on grey correlation compensation control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 159-167.
- [147] 崔建鹏, 辛永平, 刘肖健. 基于多目标灰色决策的地空导弹选型研究[J]. 战术导弹技术, 2012(1): 7-10.
- CUI Jianpeng, XIN Yongping, LIU Xiaojian. Research on type selection of surface to air missile based on multi-objective grey decision[J]. Tactical Missile Technology, 2012(1): 7-10.
- [148] 李新其, 谭守林, 唐保国. 基于灰色决策原理的导弹核武器最佳配置模型[J]. 火力与指挥控制, 2007, 32(2): 42-47.
- LI Xinqi, TAN Shoulin, TANG Baoguo. The optimal collocation model of missile nuke based on the grey decision theory [J]. Fire Control and Command Control, 2007, 32(2): 42-47.
- [149] 韩晓明, 南海阳, 陈俊杰, 等. 防空反导导弹战斗部研制方案灰色聚类综合评价[J]. 空军工程大学学报, 2014, 15(1): 29-33.
- HAN Xiaoming, NAN Haiyang, CHEN Junjie, et al. Grey cluster model used to evaluate the development scheme of warhead in antimissile missile of air defense [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2014, 15(1): 29-33.
- [150] 姚军勃, 胡伟文. 超视距地波雷达作战效能的灰色评估[J]. 武器装备自动化, 2008, 27(4): 12-14.
- YAO Junbo, HU Weiwen. Gray evaluation of operational efficiency of OTH ground-wave radar[J]. Armament Automation, 2008, 27(4): 12-14.
- [151] 林加剑, 任辉启, 沈兆武. 应用灰色系统理论研究爆炸成型弹丸速度的影响因素[J]. 弹箭与制导学报, 2009, 29(3): 112-116.
- LIN Jiajian, REN Huiqi, SHEN Zhaowu. Study on primary influence factors for application of grey system theory to velocity of explosive forming projectile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2009, 29(3): 112-116.
- [152] 赵国钢, 孙永侃, 徐永杰, 等. 水面舰艇反导作战中威胁评估的灰色决策分析[J]. 战术导弹技术, 2007(3): 32-35.
- ZHAO Guogang, SUN Yongkan, XU Yongjie, et al. Grey decision analysis of threat estimation in anti-missile combat of surface warship [J]. Tactical Missile Technology, 2007(3): 32-35.
- [153] 刘以安, 陈松灿, 张明俊, 等. 缓冲算子及数据融合技术在目标跟踪中的应用[J]. 应用科学学报, 2006, 24(2): 154-158.
- LIU Yian, CHEN Songcan, ZHANG Mingjun, et al. Application buffer operator and data fusion in target tracking [J]. Journal of Applied Sciences, 2006, 24(2): 154-158.
- [154] ZAVADSKAS E K. Book reviews: Grey data analysis methods, models and applications [J]. The Journal of Grey System, 2017, 29(3): 123-127.
- [155] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用 [M]. 第9版. 北京: 科学出版社, 2021.
- LIU Sifeng. Grey systems theory and its applications [M]. 9th ed. Beijing: Science Press, 2021.
- [156] LIU Sifeng, YANG Yingjie, JEFFREY F. Grey systems analysis [M]. Singapore: Springer-Verlag, 2022.

(编辑:王静)