

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2021.08.001

复杂系统管理理论与方法研究^①

汪寿阳^{1,2,3}, 胡毅^{2,3*}, 熊熊⁴, 王曙明^{2,3}, 张维⁴

(1. 中国科学院数学与系统科学研究院, 北京 100190; 2. 中国科学院大学经济与管理学院, 北京 100190; 3. 中国科学院大数据挖掘与知识管理重点实验室, 北京 100190; 4. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072)

摘要: 随着新一代信息技术快速发展, 系统的复杂程度不断提高, 在对复杂系统管理提出挑战的同时, 也因系统内部个体间的交互和系统层面的演化易于观测, 为该领域带来了新的研究问题. 发展和扩充复杂系统管理的分析理论和方法, 有助于解决复杂系统运行中涌现的突出短板, 使复杂系统适应新形势下社会发展需求. 本文在分析国内外研究发展态势的基础上, 结合国家自然科学基金委管理科学部“十四五”规划复杂管理系统优先领域专家研讨会意见, 凝练出该领域未来值得深入探索的五个方向, 并给出每个方向的典型科学问题.

关键词: 复杂系统; 发展态势; 典型科学问题; “十四五”规划; 优先资助领域

中图分类号: C93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2021)08-0001-09

0 基本概念、科学意义与国家战略需求

尽管距离“复杂系统”这一热门且重要学科的诞生已逾半个世纪之久, 但学界对其定义莫衷一是. 究其原因, 复杂系统涉及领域甚广可能是关键所在^②. 大多数学者认为, 复杂系统由彼此关联的众多元素构成, 这些元素之间的相互作用使得系统的整体表现大于成员表现的加总^[1]. 在管理学的背景下, 小到微观的企业, 大到宏观的经济体系, 都可以看作是由大量的依据自己有限信息行事的交互个体(个人、组织、社区)形成的系统^[2-9]. 在这些系统中, 个体在缺乏统一的中央指挥, 甚至在不清楚其他个体行为如何影响自己的情况下, 交换着彼此的资源^[10]. 任何成员特性或者成员间关联的改变都可能在系统层面上“涌现”出复杂的管理现象, 值得深入思考与探究.

新一代信息技术的发展使得个体的关联更加发达和多元化, 系统的复杂程度也随之不断提高, 对复杂系统的研究、管理提出了挑战. 与此同时, 新技术的应用也令记录系统运行的大量数据成为了可能, 使得系统内部个体间的交互和系统层面的演化变得易于观测和度量. 这两个方面的新情况为管理科学带来了新的研究问题, 同时也呼唤着新的研究手段和研究范式的产生. 通过对复杂系统的管理问题进行降解、分析, 并辅之以新的数据技术、建模工具和解释框架, 不仅能够提高对复杂系统管理内涵的认识, 而且能提高处理和驾驭这类系统的能力, 为已有的管理研究提供新的视角和思路, 进一步促进管理理论体系的发展和完善^[11-16].

复杂系统贯穿于经济社会的方方面面, 其概念外延也渗透在很多的方针政策中. 习近平总书记指出: 全面深化改革是一个复杂系统工程^③, 国

① 收稿日期: 2021-03-15; 修订日期: 2021-07-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71940001; 71940007; 71988101; 72073124; 71922022).

通讯作者: 胡毅(1985—), 男, 湖北荆州人, 博士, 副教授. Email: huyi@ucas.ac.cn

② 从自然到社会, 从菌落到地球, 都可以涵盖在复杂系统的概念下.

③ 习近平, 关于《中共中央关于全面深化改革若干重大问题的决定》的说明, 2013年11月9日.

家治理体系是由众多子系统构成的复杂系统^④。党的十九届三中全会也强调,深化党和国家机构改革是一个系统工程^⑤。李克强总理答记者问时指出,城镇化是一个复杂的系统工程^⑥。2017年国务院印发的《新一代人工智能发展规划》中提出发展人工智能是一项事关全局的复杂系统工程,要实现对城市复杂系统运行的深度认知,构建复杂场景下突发事件的解决方案。2018年工业和信息化部印发的《工业互联网APP培育工程实施方案》明确提出推进复杂系统建模。复杂系统的相关概念也多次出现在中央的政策文件中,如《国家重大科技基础设施建设中长期规划》、《关于城市公立医院综合改革试点的指导意见》等。在国家重大工程上,如北斗卫星导航系统、港珠澳跨海大桥、中国天眼射电望远镜等,复杂系统管理的思想也在跨部门、跨学科、跨行业、跨地域等方面发挥着顶层设计和组织协调的作用,为重大工程的完成提供了保障。

十九大以来,中国特色社会主义进入新时代:我国社会生产力水平显著提高,但是发展不平衡不充分的一些突出问题尚未解决,比如发展质量效益不高,创新能力不强。当今世界正经历百年未有之大变局:人工智能、大数据、量子信息等新一代科技蓬勃发展,世界正迎来新一轮科技革命和产业变革;全球治理体系将深刻重塑,地缘政治冲突增加,单边主义和贸易保护主义盛行,中美关系在2020年遭遇严重挑战。作为社会、经济等复杂系统应对管理与控制挑战的方法,复杂系统管理理论还不够成熟,新技术背景下对复杂系统的结构特征、演化、分析和优化的研究还不够完善。发展和扩充复杂系统管理的分析理论和方法,有助于解决复杂系统运行中涌现的突出短板,优化复杂系统的运行效率,发挥复杂系统整体性、全局性优势,使复杂系统适应新形势下社会发展的需要,也有助于发挥新型举国体制的优势。

1 国际发展态势与我国发展优势

复杂管理系统的研究潜力巨大,应用范围广泛,实践意义丰富。因此,在国际上引发了来自业界和学界的兴趣。

从产业的角度看,复杂系统的概念兴起于美国,吸引了一批来自不同研究领域的学者的关注,并形成了不同的学派^⑦。这些学者十分注意将复杂系统的知识理论和社会经济的现实背景相结合,并催生了一系列以复杂科学方法及其在管理中的应用为基础的咨询公司(其中比较著名的有Complexity Solutions Ltd.),以及融合复杂科学知识的商业软件,比如IM(交互式管理软件),ISM(解释性结构化建模软件)等^[17]。而后,关于复杂系统的研究开始在欧洲兴盛起来,在欧盟委员会拟定的科技框架计划中,曾多次提及“复杂系统”这一概念,比如在第七框架计划(FT7)中提到要探索复杂金融经济系统的动态规律和第八框架计划(FT8,也称作Horizon 2020)中提到要发明新的工具,以分析、预测疾病在社会复杂系统中的传播以及可能产生的影响等等。

眼下,现代社会正处于从互联网时代向物联网(Internet of Things, IoT)时代迈进,从“信息化”向“智能化”转变的阶段。这一阶段的突出特点首先表现在网络内的个体越来越多,这些个体不仅包括人,还包括各式各样的传感器、感应器、定位系统以及终端设备等。为了实现对物端智能化信息的感知、识别、定位、跟踪、监控和管理,构建所有物端之间具有类人化知识学习、分析处理、自动决策和行为控制能力的智能化服务环境,这些个体间时时刻刻都在发生着信息传输和协同交互。第二个特点是数据量大,据希捷(Seagate)预测,到2025年,新增数据总量将从2018年的33ZB增加到175ZB。主要的增长动力来自娱乐平台、视频监控录像、联网设备、生产力工具和元数据,这些

④ 习近平,在全国国有企业党的建设工作会议上的讲话,2016年10月10日。

⑤ 中国共产党第十九届中央委员会第三次全体会议公报,2018年2月28日。

⑥ http://www.cnr.cn/zhongg/cnr_view/czh/zx/20130525/t20130525_512669105.shtml

⑦ 比如系统动力学学派,适应性系统学派、混沌学派等等。

数据对于信息的分析和技术的迭代至关重要.因此,发展复杂管理系统的理论研究不仅是形势所迫,更是大势所趋.

从学术研究的角度看,复杂系统是一个比较年轻的学科.20世纪中叶,科学家们意识到很多复杂的行为其实是简单个体的大规模组合中涌现出来的,这些现象无法被归入单个学科,而是需要从交叉学科的基础上加以理解.作为复杂系统的研究中心,圣塔菲研究所(the Santa Fe Institute, SFI)于1984年成立,旨在吸收来自不同领域的科学家对“科学中涌现的综合”^[18]展开探讨.之后,詹姆斯·格雷克在1987年出版了畅销书《混沌》(Chaos: Making a New Science)^[19],使复杂系统的概念走入了大众视野.在这之后,研究人员开始把复杂性理论引入包括社会学、生物学和物理学在内的众多领域,发现了很多技术-经济环境的玄奥特征,并借此修正、拓展了传统的战略规划理念,并集结成了一系列管理的著作^⑧.

与复杂管理/经济系统有关的论文在最近20年呈现着逐年递增的趋势.从2015年到2019年,平均每年发表近500篇,显示了学者对这一领域的高度关注.这些论文覆盖了生态保护^[20]、金融监管^[21]、公关处理^[22]、城市规划^[23]、灾害检测^[24]、疾病治疗^[25]、风险预警^[26]等众多领域.此外,顶级学术期刊*Science*杂志在2009年组织了题为“Complex Systems and Networks”的专辑,介绍了复杂系统和复杂网络领域内的最新进展.管理学界顶级期刊*Management Science*也在2007年出版了一期关于复杂系统的特刊,收录了10篇论文,介绍了演化网络、系统效率等理论在管理学领域的应用.

一些专攻复杂系统研究的学术团体和研究机构也在世界各地涌现出来.除了前面提到的最负盛名的圣塔菲研究所,还有美国洛斯·阿拉莫斯(Los Alamos)国家实验室的非线性研究中心、新

英格兰复杂系统研究所(New England Complex Systems Institute)等.领域内的著名会议包括由复杂系统学会(Complex Systems Society)举办的复杂系统会议^⑨(Conference on Complex Systems)、异质交互个体经济学国际研讨会(Workshop on the Economic Science with Heterogeneous Interacting Agents, WEHIA)等.

近年来,特别是在“十三五”期间,中国在人工智能、大数据、通信网络、物流网络、电子支付、大型工程等领域的迅速发展,为复杂系统管理在我国产业界的应用提供了肥沃土壤.

从产业的角度看,自2015年国务院印发《关于积极推进“互联网+”行动的指导意见》以来,中国互联网相关产业迅速发展,如社交媒体、电子商务、数字金融等,传统企业也纷纷拥抱“互联网+”行动.如今,在跨境电商、第三方支付、数字货币、快递物流、人工智能等业务规模上,中国在国际上都遥遥领先,产生了一批全球领先的企业.中国拥有4G基站544万个,占全球4G基站一半以上,覆盖99%的人口,95%以上的行政村.截至2020年6月,在5G牌照发放一周年时,中国已建成25万个5G基站,并以每周1万多个的速度继续增加.新一代的信息技术和中国的大规模国内市场,使中国各行业不仅产生了大量的复杂系统,也记录了丰盈的个体微观行为的数据.据IDC的研究报告,中国产生的数据量将在2025年超越美国^⑩.这使得中国企业有了运用复杂系统管理理论的可能性和必要性.以中国最大的二手平台闲鱼为例,其搜索引擎是一个体量巨大的复杂系统,不仅要通过搜索引擎为数十亿商品提供高效的导购引流,又要满足二手商品查询复杂、商品的库存量低、频繁上下架等特点,而复杂搜索系统的管理优化使闲鱼能够稳定高效的提供服务.在大型工程建设中,系统科学思想也得到了广泛应用,并为

⑧ 比如,《交互式管理》(Interactive Management),《第五项修炼》(The Fifth Discipline),经济中的递增回报与路径依存》(Increasing Return and Path Dependence in the Economy),《管理复杂系统——从框框外思考》(Managing Complex Systems: Thinking Outside the Box)等.

⑨ 这个会议自2004年以来,已经举办了十余次.开始时,会议名称为“欧洲复杂系统会议(European Conference on Complex Systems)”,2015年,该会正式变为一个全球化会议,探讨复杂系统领域的最新问题.

⑩ <https://www.cnbc.com/2019/02/14/china-will-create-more-data-than-the-us-by-2025-idc-report.html>

我国复杂系统管理研究提供了鲜活的案例^①。如港珠澳大桥的建设是涉及工程建设、环境保护等众多环节的复杂系统,在施工过程中不仅涌现了大桥桥面铺装工程的管理决策实践,而且为“复杂性降解”等原理提供了实践支持^[27]。再如北斗卫星系统也是一个复杂系统,其包括了微观尺度上的“降解”和宏观尺度上的“中和”,学者将其概括为“系统融合”过程,发展了综合集成管理理论和方法^[28]。

从学术研究的角度看,复杂系统管理相关研究也得到中国学者的高度重视。在 CNKI 上以“复杂系统”为主题检索,发现 2015 年~2019 年期间共有 17 304 篇论文;以“Complex systems”为主题在 WoS 上进行检索发现,中国大陆学术机构发表的与“Complex systems”有关的国际学术论文,在 2015 年~2019 年期间达到了 2 688 篇,排在同期全球各个国家和地区同类论文数量的第二位(美国以 2 958 篇名列第一)^②。同时,在此期间国内召开的主流管理科学和经济科学的系列学术会议也包括复杂系统管理专题分会场(如 2018 年和 2019 年中国管理科学学术年会分别设立能源与复杂系统管理、公共管理与复杂系统管理分会场)。国家自然科学基金管理学部在“十三五”期间,共计资助了 40 余项复杂系统/网络相关项目,这些为复杂系统管理理论产生重大突破奠定了知识、技术和数据等方面的重要基础。同时,国内也建立了多家与复杂系统相关的研究中心、实验室(如清华大学复杂系统工程研究中心、中科院复杂系统管理与控制国家重点实验室、北京航空航天大学复杂系统分析与决策实验室),对复杂系统管理基础理论及其应用开展长期专门的研究。此外,很多高校也设立了“复杂系统”方向的博士、硕士等研究生教育项目,为复杂系统管理的研究输送了大量人才。

作为企业,阿里巴巴也意识到理解复杂系统的重要性,不仅招聘对复杂系统建模有深入研究的工程师,而且与杭州师范大学合作成立阿里巴

巴复杂科学研究中心,“用复杂性思维提炼和研究信息社会的若干共性问题,力争建成复杂科学领域的全球高地”。

总体上看,大量带有复杂系统特征的公司和大型建设工程、完善的信息化基础设施以及各行各业积累的海量数据,加上前期各级资助机构投入的资金支持、学术界形成的交叉学科研究态势以及在系统科学方面所取得的成果积累,都将成为支撑我国进行复杂系统管理研究的有利条件,为我国学者在复杂系统管理研究领域提供了领先世界的机会。

2 主要研究方向及其典型科学问题

2.1 复杂管理系统的结构特征、基本性质与演化机理

学者们普遍认为,复杂系统具有多层次、多功能的结构,但这种结构并不是一成不变的,相反,其在发展过程中能够不断地学习并对自身结构进行完善或重组。同时,复杂系统是开放的,能够不断从周围汲取信息,并朝着适应环境的方向发展。现如今,由于科学技术的发展,人与人、物与物之间的关联变得更加紧密。同时,由于大国之间的博弈以及疫情等“黑天鹅”事件的发生,周遭环境中的不确定性成分不断增多。原有的复杂管理系统的结构特征、基本性质以及演化机理也可能会随之变化。因此,重新对复杂管理系统的内部交互和外在演化的规律进行探究变得十分迫切和紧要。

典型科学问题举例:复杂社会经济系统演化,复杂网络结构及其演化,时间序列的长程相关问题,网络演化的动态建模,多尺度模型的构建,信息化下认知人的个体行为及其交互与群体的行为的涌现规律,技术与管理的互动规律、高维非结构化数据的建模等^[29-33]。

2.2 复杂系统的知识和信息融合

复杂系统理论在经历了长达半个多世纪的发

① <https://news.scnu.edu.cn/25171>

② 2020 年 8 月 11 日网络查询数据。

展已经形成了一套较为完整和成熟的体系。然而,随着颠覆性创新的出现、人们生产生活方式的转变以及经济全球化程度的加深,有些“知识”可能已经不再能够描绘复杂系统的运转模式,也不再适用于指导复杂系统的管理调控。同时,数据存储技术和运算能力实现了大幅提升,数据驱动的模式构建成为了可能。因此,利用已有的知识指导新信息的获取,利用获取的新信息修正已有的知识可以帮助人们更好的理解复杂系统的运行机理,预测其演化方向。

典型科学问题举例:数据建模样本变量与常规建模领域变量间的关系,数据模型在常规模型环境下的普适性和鲁棒性,多个数据模型对常规模型的逼近过程优化,复杂管理系统中异构数据的融合技术,复杂系统知识信息数据的融合的计算实验等^[34-38]。

2.3 复杂管理系统的融合建模与分析理论

当下,国际形势风云变幻,各种创新不断涌现,管理系统面临的环境不确定、信息不完整的问题日益突出,其内部各要素之间的非线性关联更加难以辨别,其外在动态演化的方向更加难以捉摸,对建模技术和分析方法提出了更高的要求。随着信息技术的快速发展,人工智能的作用日趋多样和强大。将已有的建模方法(比如分形理论、混沌理论、模糊理论、复杂适应系统理论)和人工智能相融合,可以显著地增强数据处理能力和模型的拟合程度,继而支持对复杂系统的深入分析。

典型科学问题举例:数学规划和人工智能的协同,带资源约束的实时数据计算理论与技术,区间数据的信息不完全建模,机器学习与高维度数据建模等^[39-40]。

2.4 复杂管理系统的智能优化、仿真和调控决策

优化和调控决策是管理的重要环节,小到企业生产方案的决定,大到国家大政方针的出台,都离不开优化和决策技术的支持。管理问题越复杂,在优化和决策时需要考虑的因素也就越丰富,备选方案也就越多样,预期目标和评价标准的确定也就越困难。面对复杂化的管理系统,亟需发展新

理论以满足实践要求,并拓展和引领决策科学的国际前沿。一个可行方案是在现有的决策系统中引入人机混合的模式,将机器的运算能力和人类的智慧相结合,以适应决策问题不断复杂的需要。此外,也可以借助社会实验或者计算实验的手段对复杂管理系统进行仿真,模拟不同措施推行的结果。

典型科学问题举例:混合智能决策的可解释性问题,复杂系统的协同和资源调度的问题,新决策要素识别及测度,决策范式变迁及机理,数据标准化和质量测度理论与模型,非结构化异质数据的融合与决策分析,复杂管理系统的校准问题等^[41-44]。

2.5 宏观经济与金融复杂系统

国际政治局势的不明朗和疫情防控形势的不确定,使中国的经济发展面临着很大的困难和冲击,需要借鉴复杂系统的相关理论去指导和提振经济。此外,近些年来,金融创新(移动支付、P2P,数字货币等)层出不穷,在为资本市场注入活力的同时,也对政府的监管和投资者的甄别能力提出了更高的要求。加上中国资本市场一向以信息透明度低、投机情绪高涨、价格波动明显为特点,将复杂系统的管理思想引入到宏观政策的制定和金融风险的防控中来,可以更好地化解系统性风险,为资本市场的健康发展保驾护航。

典型科学问题举例:基于复杂网络的系统性风险的识别、预防以及应对,新冠疫情的演化和防控、基于自组织理论的经济复苏可行政策的分析,基于复杂自适应系统的疫情后国际局势演化特征等^[45-48]。

3 结束语

人工智能、大数据、量子信息等新一代信息技术与复杂系统管理相结合,在提高学者对复杂系统管理内涵的认识的同时,也能提高学者处理和驾驭这类系统的能力,为已有的管理研究提供新的视角和思路,使之能更好地解决经

济社会中的复杂管理问题. 在新的形势和背景下, 本文提出复杂管理系统的结构特征、基本性质与演化机理, 复杂系统的知识和信息融合, 复杂管理系统的融合建模与分析理论, 复杂管理系统的智能优化、仿真和调控决策, 宏观经济与金融复杂系统等五个该领域未来的主要方向, 以及相应的典型科学问题. 希望未来有更多的理论研究工作者和应用研究人员能投入到复杂系统管理领域的研究, 为建立中国复杂系统管

理学派奠定坚实的基础.

致谢: 感谢陈晓红、狄增如、杜慧滨、高自友、郭雷、霍红、李一军、梁哲、刘作仪、罗家德、吕欣、马寿峰、谭跃进、王飞跃、吴德胜、席酉民、杨列勋、杨晓光、余玉刚(依姓氏拼音排序)等各位专家参与“复杂管理系统优先领域专家研讨会”并提出宝贵意见建议, 这是本文尤其是其中第二部分关键科学问题的形成基础.

参 考 文 献:

- [1] Newman M E J. Resource letter CS-1: Complex systems[J]. American Journal of Physics, 2011, 79(8): 800–810.
- [2] 曾 嵘, 魏一鸣, 范 英, 等. 人口、资源、环境与经济协调发展系统分析[J]. 系统工程理论与实践, 2000, 20(12): 1–6.
Zeng Rong, Wei Yiming, Fan Ying, et al. The systematic analysis for harmonious development of demographics, resources, environment and economics[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2000, 20(12): 1–6. (in Chinese)
- [3] 盛昭瀚, 杜建国. 社会经济复杂系统: 方法论创新及实际应用[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(Suppl): 67–74.
Sheng Zhaohan, Du Jianguo. Social-economic complex system: Methodological innovation and applications[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2008, 28(Suppl): 67–74. (in Chinese)
- [4] 李鹏翔, 席酉民, 张萌物. 组织结构的立体多核网络模型[J]. 管理科学学报, 2004, 7(5): 1–8.
Li Pengxiang, Xi Youmin, Zhang Mengwu. Multi-core network model for organizational structure[J]. Journal of Management Sciences in China, 2004, 7(5): 1–8. (in Chinese)
- [5] Overbury R E. Features of a closed-system economy[J]. Nature, 1973, 242: 561–565.
- [6] Liu J, Dietz T, Carpenter S R, et al. Complexity of coupled human and natural systems[J]. Science, 2007, 317(5844): 1513–1516.
- [7] Perino A, Pereira H M, Navarro L M, et al. Rewilding complex ecosystemse[J]. Science, 2019, 364(6438): 351.
- [8] Bonan G B, Doney S C. Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models [J]. Science, 2018, 359(6375): 533.
- [9] Hastings A. Timescales and the management of ecological systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(51): 14568–14573.
- [10] Amaral L, Uzzi B. Complex systems: A new paradigm for the integrative study of management, physical, and technological systems[J]. Management Science, 2007, 53(7): 1033–1035.
- [11] 胡代平, 王浣尘. 基于 Agent 的宏观经济决策支持系统[J]. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1): 33–37.
Hu Daiping, Wang Wanchen. Agent-based macroeconomic decision support system[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2002, 22(1): 33–37. (in Chinese)
- [12] 贾仁安, 王翠霞, 贾晓菁. 复杂系统反馈动态复杂性分析方法系[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 28(Suppl): 102–108.
Jia Renan, Wang Cuixia, Jia Xiaoqing. Feedback dynamic complexity analysis methods for complex systems[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2008, 28(Suppl): 102–108. (in Chinese)
- [13] 张 维, 武自强, 张永杰, 等. 基于复杂金融系统视角的计算实验金融: 进展与展望[J]. 管理科学学报, 2013, 16

- (6): 85–94.
- Zhang Wei, Wu Ziqiang, Zhang Yongjie, et al. Agent-based computational finance on complex financial system perspective: Progress and prospects[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2013, 16(6): 85–94. (in Chinese)
- [14] 柴建, 寇红红. 基于 TEI@I 方法论的系统管理预测技术研究综述及展望[J]. *管理评论*, 2020, 32(7): 280–292.
- Cai Jian, Kou Honghong. Review and prospect of system management prediction technology based on TEI@I methodology[J]. *Management Review*, 2020, 32(7): 280–292. (in Chinese)
- [15] 王树斌, 卢全莹, 乔晗. 组织间知识共享、技术学习与能源企业生产绩效实证研究——基于“从定性到定量的综合集成法”分析[J]. *管理评论*, 2020, 32(12): 125–134.
- Wang Shubin, Lu Quanying, Qiao Han. An empirical research on the influence of inter-organizational knowledge sharing and technology learning on production performance of energy enterprises: Based on “Hall for work shop of meta-synthetic engineering”[J]. *Management Review*, 2020, 32(12): 125–134. (in Chinese)
- [16] Mikulak-Klucznik B, Gołębiewska P, Bayly A A, et al. Computational planning of the synthesis of complex natural products[J]. *Nature*, 2020, 588(7836): 83–88.
- [17] 成思危. 复杂科学与系统工程[J]. *管理科学学报*, 1999, 2(2): 1–7.
- Cheng Siwei. Complex science and system engineering[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 1999, 2(2): 1–7. (in Chinese)
- [18] Pines D. *Emerging Syntheses in Science*[M]. Boston: Addison-Wesley, 1988.
- [19] Gleick J, Berry M. Chaos-making a new science[J]. *Nature*, 1987, 330: 293.
- [20] Vandermeer J, Perfecto I. Hysteresis and critical transitions in a coffee agroecosystem[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2019, 116(30): 15074–15079.
- [21] Battiston S, Farmer J D, Flache A, et al. Complexity theory and financial regulation[J]. *Science*, 2016, 351(6275): 818–819.
- [22] Zhai X, Zhong D, Luo Q. Turn it around in crisis communication: An ABM approach[J]. *Annals of Tourism Research*, 2019, 79: 102807.
- [23] Gao X S, Gayah V V. An analytical framework to model uncertainty in urban network dynamics using macroscopic fundamental diagrams[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2018, 117: 660–675.
- [24] Baham C, Hirschheim R, Calderon A A, et al. An agile methodology for the disaster recovery of information systems under catastrophic scenarios[J]. *Journal of Management Information Systems*, 2017, 34(3): 633–663.
- [25] Arfi Y, Minder L, Di Primo C, et al. MIB-MIP is a mycoplasma system that captures and cleaves immunoglobulin G[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2016, 113(19): 5406–5411.
- [26] Jiang J, Huang Z G, Seager T P, et al. Predicting tipping points in mutualistic networks through dimension reduction[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(4): E639–E647.
- [27] 麦强, 盛昭瀚, 安实, 等. 重大工程管理决策复杂性及复杂性降解原理[J]. *管理科学学报*, 2019, 22(8): 17–32.
- Mai Qiang, Sheng Zhaohan, An Shi, et al. Complexity and its degradation theory of megaproject management decisions[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2019, 22(8): 17–32. (in Chinese)
- [28] 麦强, 陈学钊, 安实. 重大航天工程整体性、复杂性及系统融合: 北斗卫星工程的实践[J]. *管理世界*, 2019, (12): 190–198.
- Mai Qiang, Chen Xuechuan, An Shi. Integrity, complexity and system integration of major aerospace projects: The practice of Beidou satellite project[J]. *Management World*, 2019, (12): 190–198. (in Chinese)
- [29] 郑应平. 博弈论和社会复杂系统研究[J]. *系统工程理论与实践*, 1987, 7(4): 50–55.
- Zheng Yingping. Game theory and social complex system research[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 1987, 7

- (4): 50–55. (in Chinese)
- [30] 胡晓峰, 张 昱, 李仁见, 等. 网络化体系能力评估问题[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(5): 1317–1323.
Hu Xiaofeng, Zhang Yu, Li Renjian, et al. Capability evaluating problem of networking SoS[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2015, 35(5): 1317–1323. (in Chinese)
- [31] Errickson F C, Keller K, Collins W D, et al. Equity is more important for the social cost of methane than climate uncertainty[J]. Nature, 2021, 592(7855): 564–570.
- [32] Fujitani M, Mc Fall A, Randler C, et al. Participatory adaptive management leads to environmental learning outcomes extending beyond the sphere of science[J]. Science Advances, 2017, 3(6): e1602516.
- [33] Liu J, Mooney H, Hull V, et al. Systems integration for global sustainability[J]. Science, 2015, 347(6225): 1258832.
- [34] 陈锡康, 杨翠红. 农业复杂巨系统的特点与全国粮食产量预测研究[J]. 系统工程理论与实践, 2002, (6): 108–112.
Chen Xikang, Yang Cuihong. Characteristic of agricultural complex giant system & national grain output prediction[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2002, (6): 108–112. (in Chinese)
- [35] 许利枝, 严旭阳. 全球集装箱港口系统“四环”研究框架理论与实证研究: 基于 TEI@I 方法论[J]. 管理评论, 2020, 32(7): 17–28.
Xu Lizhi, Yan Xuyang. Theoretical and empirical research on “Four Rings” research framework of global container port system; Based on TEI@I methodology[J]. Management Review, 2020, 32(7): 17–28. (in Chinese)
- [36] Grimm V, Revilla E, Berger U, et al. Pattern-oriented modeling of agent-based complex systems: Lessons from ecology [J]. Science, 2005, 310(5750): 987–991.
- [37] Duan H, Zhou S, Jiang K, et al. Assessing China’s efforts to pursue the 1.5° C warming limit[J]. Science, 2021, 372(6540): 378–385.
- [38] Webster D G. Strengthening sustainability through data[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(44): 11118–11120.
- [39] 戴汝为, 操龙兵. 综合集成研讨厅的研制[J]. 管理科学学报, 2002, 5(3): 10–16.
Dai Ruwei, Cao Longbing. Research of hall for workshop of metasynthetic engineering[J]. Journal of Management Sciences in China, 2002, 5(3): 10–16. (in Chinese)
- [40] Escher B I, Stapleton H M, Schymanski E L. Tracking complex mixtures of chemicals in our changing environment[J]. Science, 2020, 367(6476): 388–392.
- [41] 张 超, 孔静静, 吴启迪. 基于风险应对的股票市场恢复力度量与优化[J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37(5): 1101–1112.
Zhang Chao, Kong Jingjing, Wu Qidi. Measurement and optimization of resilience of stock market according to risk response[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2017, 37(5): 1101–1112. (in Chinese)
- [42] 张卫国, 张 群, 马 勇. 中国金融市场系统复杂性的演化机理与管理研究[J]. 管理科学学报, 2017, 20(1): 75–86.
Zhang Weiguo, Zhang Qun, Ma Yong. Evolution mechanisms and management of systemic complexity in China’s financial markets[J]. Journal of Management Sciences in China, 2017, 20(1): 75–86. (in Chinese)
- [43] De Fries R, Nagendra H. Ecosystem management as a wicked problem[J]. Science, 2017, 356(6335): 265–270.
- [44] Do Yun S, Hutniczak B, Abbott J K, et al. Ecosystem-based management and the wealth of ecosystems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2017, 114(25): 6539–6544.
- [45] 汪寿阳, 敖敬宁, 乔 晗, 等. 基于知识管理的商业模式冰山理论[J]. 管理评论, 2015, 27(6): 3–10.
Wang Shouyang, Ao Jingning, Qiao Han, et al. Iceberg Theory: A new methodology for studying business model from knowledge management perspective[J]. Management Review, 2015, 27(6): 3–10. (in Chinese)
- [46] 董纪昌, 焦丹晓, 孙熙隆. 基于社会网络分析的全球跨国并购研究[J]. 管理评论, 2016, 28(10): 202–213.

- Dong Jichang, Jiao Danxiao, Sun Xilong. Analysis of cross-border mergers and acquisitions based on social network method [J]. Management Review, 2016, 28(10): 202–213. (in Chinese)
- [47] Carleton T A, Hsiang S M. Social and economic impacts of climate[J]. Science, 2016, 353(6304): aad 9837.
- [48] Yoon J, Klassert C, Selby P, et al. A coupled human-natural system analysis of freshwater security under climate and population change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(14): e2020431118.

Complex systems management: Theory and methods

WANG Shou-yang^{1, 2, 3}, HU Yi^{2, 3*}, XIONG Xiong⁴, WANG Shu-ming^{2, 3}, ZHANG Wei⁴

1. Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. School of Economics and Management, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. Key Laboratory of Big Data Mining and Knowledge Management, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
4. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract: Under the rapid development of the new generation of information technology, the complexity of the systems keeps increasing. Although this brings new challenges for the management of the complex systems, it opens doors for new research questions and ideas with opportunities, as it enables the interactions between individuals within the systems and the evolution of the systems to be observed more readily. Develop and expand the analysis theory and methods of complex system management, which will help reduce and/or mitigate the critical shortcomings that arise in operating the complex systems, and adapt the complex systems to meet the needs of social development in the new situation. Leveraging on the analysis of the-state-of-the-art as well as the domestic and global development trends of the area, and incorporating the key opinions of experts in the 14th Five-Year Plan Complex Management System Priority Fields Expert Workshop of the National Natural Science Foundation of China, this article draws five key directions in the field that are worthy of in-depth exploration in the future, and also provides typical scientific problems in each direction.

Key words: complex systems; development trend; typical scientific problems; the 14th Five-Year Plan; priority funding areas