

· 科学论坛 ·

大数据与人工智能时代下 复杂系统管理研究的若干关键科学问题^{*}

高自友¹ 郭 雷² 刘中民³ 王红卫⁴ 盛昭瀚⁵ 曾大军^{6**}
刘作仪⁷ 霍 红⁷ 李大庆⁸ 彭一杰⁹ 郑晓龙^{6**}

1. 北京交通大学, 北京 100044
2. 中国科学院 数学与系统科学研究院, 北京 100190
3. 中国科学院 大连化学物理研究所, 大连 116023
4. 华中科技大学, 武汉 430074
5. 南京大学, 南京 210023
6. 中国科学院自动化研究所, 北京 100190
7. 国家自然科学基金委员会 管理科学部, 北京 100085
8. 北京航空航天大学, 北京 100191
9. 北京大学, 北京 100871

[摘要] 当前,世界正在进入大数据与人工智能时代,复杂系统已呈现出人一机一网跨尺度耦合与互融互通的新形态。新形态下的复杂系统管理,既要传统管理理论和方法进行突破创新,更要充分借助先进的技术手段对其进行赋能。本文面向大数据和人工智能时代下复杂系统管理的国家重大需求,阐述了当前复杂系统管理研究存在的重大机遇与挑战,分析了当前复杂系统管理研究的研究现状并指出了未来的发展趋势,在此基础上,进一步凝练了未来 5~10 年该领域的发展目标、拟开展的重大关键科学问题及其资助重点。

[关键词] 复杂系统管理;涌现与演化;系统调控;系统方法论;大数据与人工智能



曾大军 中国科学院自动化研究所研究员、复杂系统管理与控制国家重点实验室副主任。国家杰出青年科学基金获得者,IEEE、AAAS Fellow,现任 ACM TMIS 主编,国家自然科学基金委员会“大数据驱动的管理与决策研究”重大研究计划指导专家组成员,曾任 IEEE 智能交通系统学会主席、INFORMS 人工智能分会主席、人工智能主流刊物 *IEEE Intelligent Systems* 主编。主持多项由国家自然科学基金委员会、科技部资助的大型科研项目,发表论文 300 余篇。



郑晓龙 中国科学院自动化研究所研究员,中国科学院特聘核心岗位研究员。国家杰出青年科学基金获得者,已主持国家自然科学基金委员会、科技部等国家相关项目 20 余项,发表学术论文 130 余篇,获省部级科技奖励 5 项,担任 40 多个国际知

名学术会议执行主席或程序委员会委员、多个国内外知名学术期刊副主编或编委、多个国家一级学会专委会副主任委员及总干事等职务。



高自友 北京交通大学教授。校学术委员会副主任,轨道交通控制与安全国家重点实验室学术委员会常务副主任,交通系统科学与工程研究院院长,兼任中国管理科学与工程学会理事长等。先后获国家自然科学奖二等奖、教育部自然科学奖一等奖、科技进步奖一等奖及其他省部级科技奖励多项;授权国家发明专利 20 余项;在国内外著名期刊 *Operations Research*、*Nature Communications*、*Transportation Science* 以及《中国科学》《科学通报》等上发表多篇高水平学术论文。

从 20 世纪 30 年代开始,人们逐渐认识到我们

收稿日期:2022-08-26;修回日期:2023-04-06

* 本文根据第 287 期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email: dajun.zeng@ia.ac.cn; xiaolong.zheng@ia.ac.cn

本论文受到科技创新 2030—“新一代人工智能”重大项目(2020AAA0108401)的资助。

处在复杂系统的世界之中,我们对于复杂世界的认知仅为冰山一角^[1-3]。相对于简单系统,复杂系统并非等于其各组成部分的简单线性叠加,其通常具有不确定性、非线性、适应性、涌现性、演化性、开放性和自组织临界性等特性,使得其难以用传统的线性科学理论进行理解和认知^[4, 5]。因此,世界各地的一些研究人员开始思考并探索新的道路^[6-8]。20世纪70年代,自然科学家尝试从不同的角度来描述复杂系统的这些特征,进而提出了一系列理论与方法,如:信息熵、分数维、随机复杂性、复杂适应系统、混沌边缘等。这类研究的基本思路主要是通过定量的方式来刻画系统的复杂性,沿袭量化、形式化范式,对传统还原论进行修正,以应对系统本质属性由系统性到复杂性的演变。在20世纪80年代,钱学森等^[9-11]创建了系统学并于1990年提出了开放的复杂巨系统的概念,其中社会系统被钱学森称作特殊复杂巨系统,并认为复杂性问题实际上是开放复杂巨系统的动力学特征问题。

进入21世纪以来,对复杂系统的研究在欧美等国家引起高度重视。西方国家的主要发达经济体先后推出了相关的发展蓝图与研究计划。欧盟委员会全球性科技开发计划多处涉及复杂系统研究工作,例如:在第七框架计划中探索复杂金融经济系统的动态规律,在第八框架计划中研发新的分析和预测疾病在复杂社会系统中的传播以及可能产生的影响等^[12]。2019年,法国国家科研中心将多尺度相互作用、复杂系统、个体和集体行为研究等将作为优先发展领域的研究主题之一^①。2021年9月,美国国家科学基金会宣布成立6个新的科学技术中心,推进人工智能、微生物、可编程工厂等领域的复杂性研究^②。

尽管复杂系统的研究已有近百年的历程,但学术界针对复杂系统的定义和界定仍然存在诸多的争议。我国学者成思危和钱学森等的观点具有一定借鉴意义。成思危^[13]认为:复杂系统最本质的特征是其组元具有某种程度的智能,即具有了解其所处的环境,预测其变化,并按预定目标采取行动的能力。钱学森^[9, 14]认为:系统是由相互作用和相互依赖的若干组成部分结合成的具有特定功能的有机整体,系统科学是一个独立于自然科学、社会科学等科学的独立门类。复杂系统管理旨在利用系统科学理论解决复杂系统的动力学建模、分析与决策等问题。

在应用实践上,复杂系统管理主要面向不同场景下重大现实需求,解决社会经济和重大工程系统中的复杂整体性问题;在理论探索上,复杂系统管理体现了物理复杂性、系统复杂性与管理复杂性的完整性与融通性^[15]。

当前,我国正面临百年未有之大变局,如何发展复杂系统管理理论和方法并将其应用于我国关键领域的管理实践之中是紧迫且必须解决的问题。党的十九届五中全会提出:坚持系统观念是“十四五”时期经济社会发展必须遵循的原则之一,这在党的中央全会和党的重要文件中尚属第一次。习近平总书记多次强调:必须把防系统性风险摆在突出位置,力争不出现重大风险或在出现重大风险时扛得住、过得去。

在此背景下,为更好地促进该方向的跨学科交叉研究,2021年5月26—27日,国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)第287期双清论坛“复杂系统与管理”在北京成功举办。本次论坛由自然科学基金委管理科学部、信息科学部、数理科学部、化学科学部、交叉科学部和政策局联合主办。论坛主席由中国科学院数学与系统科学研究院郭雷院士、中国科学院大连化学物理研究所刘中民院士、北京交通大学高自友教授共同担任。自然科学基金委副主任侯增谦院士、管理科学部主任丁烈云院士、刘作仪副主任出席并致辞,相关科学部、职能局有关同志、中国科学院自动化研究所、中国科学院数学与系统科学研究院、清华大学、北京大学等30余位高校和研究机构代表参加了此次论坛。与会专家针对复杂系统管理的研究现状、研究热点与趋势、未来科研规划与布局等开展了深入研讨,并对未来5~10年自然科学基金委应该如何支持复杂系统管理研究、如何在顶层设计和队伍组织等方面发挥更大作用、如何促使我国科学家把握这次重大机遇提出了具体建议。

1 复杂系统管理研究面临的重大机遇与挑战

当前,世界正在进入以数字化、网络化和智能化为显著特点的发展新时期,互联网和人工智能技术已经全面渗透到社会经济和工程技术等各个领域^[16]。一方面,大数据和人工智能时代的复杂社会

① <http://www.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/antoine-petit-la-recherche-francaise-besoin-dargent-et-de-simplifications-0>

② https://www.nsf.gov/news/special_reports/announcements/090921.jsp

系统管理面临着诸多的新发风险,如:信息茧房效应愈发显著、社交媒体过度依赖、青少年网络沉迷、跨区域和跨文化冲突、用户群体和个人隐私泄露等。这些新发风险与公众的社会活动、地区的经济发展、自然环境的承载力及技术系统革新等诸多因素关联交织在一起,呈现出较强的耦合性和级联性,导致系统中的局部风险经过多级链条的传导扩散到整个系统,进而演化成系统性和极端性的社会事件。例如:新冠疫情持续对人类社会造成威胁^[17-19],虚假消息和深度伪造内容严重干扰了人们的认知^[20-22],暴力冲突以及以种族主义和性别歧视等结构性不平等层出不穷^[23, 24],给社会带来了诸多隐患,世界进入复杂多变的动荡变革期^[25, 26]。上述风险的边界划定和特征提取尚在不断探索之中,经典的管理科学理论与方法难以应对。

另一方面,随着工程技术的不断进步,现有工程系统的规模越来越大、越来越复杂^[27],使得过去由中央控制模式逐渐向扁平化、去中心化的模式发展。随着智能装备的出现与广泛应用,自组织的复杂工程系统也逐渐成为现实。上述复杂工程系统的边界往往是模糊和不清晰的,内部要素通常有着诸多迄今为止未知的关联和耦合关系。这些系统的动态演化过程,由于受到诸多因素的影响,通常难以准确刻画,内在演化机理难以解析清晰,导致了人们对这类问题的认知往往存在模糊性和滞后性。一旦操作不当,这些复杂工程系统中的复合风险将会演化成重大的系统性风险,造成无法估计的重大损失。在面对复合风险时,我们需要变得更加积极主动、敏捷灵活,才能有效管理这些复杂系统^[15, 26]。

在当前的新形式和新特点下,复杂系统管理既是一种宏观战略决策,更是一种微观操作实践运用,既要针对传统管理理论和方法进行突破创新,更要充分借助先进的技术手段进一步赋能。近年来,信息技术的快速发展和广泛应用,大数据和新一代人工智能技术的涌现,为科学认识和有效调控现实世界中各类不确定性复杂系统的结构、运行与功能之间关系,提供了前所未有的工具和手段^[28],为复杂系统管理研究与实践提供了新的视角、理论范式和技术手段。

近年来,美国、英国、澳大利亚等发达国家纷纷出台相关政策,投入大量的科研经费,设立多种类型的科研项目,探索大数据、人工智能和数字孪生等新型技术与复杂系统管理进行深度融合,开展数字化和智能化复杂系统管理研究与应用。我国应以开展

社会治理现代化和工程现代化建设评估为抓手,以复杂社会治理和重大工程管理的重大需求为牵引,以管理科学理论与方法以及人工智能、大数据和数字孪生等信息技术为利器,组织领域专家和学者深入讨论“复杂系统管理”中存在的科学问题,尽快启动以“复杂系统管理”为主题的重大研究计划,研究复杂系统管理的新理论、新方法和新技术,探索具有中国特色和反映时代特征的复杂系统管理新模式和新范式,增强复杂系统的预见性、准确性、高效性,防范和化解我国社会和工程领域面临的重大风险,尤其是新发风险,激发国家治理整体效能,促进我国社会全面协调可持续发展。

本次论坛与会的专家学者围绕“复杂系统与管理”主题进行报告或发言。在大会报告阶段,刘中院士、刘继忠研究员、高自友教授、孙向红研究员和王红卫教授分别以:催化和洁净能源领域的复杂系统、深空探测复杂系统管理实践、城市交通系统管理中的一些问题与讨论、复杂系统管理的心理学视角、复杂系统及其管理研究的初步认识等主题介绍了各自领域相关复杂系统研究的最新进展,并指出了其潜在的技术挑战。除了大会报告外,论坛还安排了3场分组讨论和1场集中研讨,分别就复杂系统涌现与演化规律、复杂系统调控机制、基于系统方法论的复杂系统管理等三个方面进行了研讨。与会专家对复杂系统管理的理论与方法进行了充分讨论,探讨了复杂系统管理的研究现状、发展趋势及面临的挑战等内容,并结合我国在复杂系统与管理的发展现状和理论基础,分析和凝练了该领域亟需关注和解决的基础科学问题。

2 复杂系统管理的研究现状与发展趋势

当前复杂系统管理研究涉及内容较多,归纳起来主要包括:复杂系统涌现与演化规律探索、复杂系统调控机制研究以及基于系统方法论的复杂系统管理等三个方面(如图1所示)。本部分将重点阐述这三个方面的研究现状与发展趋势。

2.1 复杂系统涌现与演化规律

信息—物理—社会高度耦合的复杂系统是以网络通讯、超级计算、大数据、人工智能等技术为基础,以结构化和非结构信息的感知、监测、收集、传输、分析、融合和利用为特征,以人在回路为突出特点。复杂系统的风险涌现与演化,对经济形态、生活模式、政治—法律结构、工程系统管理造成了重大影响,具体表现为:人的决策与智能算法的高度融合^[29]、技

术指标与价值指标的密切关联、算法规制与社会规范的合为一体。一方面,复杂系统呈现新特征和新特点,亟待进一步认知和理解;另一方面,新形式和新情景下的复杂系统涌现与演化规律需要进一步探索。

2.1.1 复杂社会系统涌现与演化

复杂社会系统具有异质性、非理性与反身性等特点。(1) 异质性:个体与群体结构异质性导致了微观结构与宏观现象的内在因果关系模糊^[30]; (2) 非理性:由于信息不对成和认知盲从等因素的影响,个体和群体行为极易受到外界信息的影响而变得非理性^[31, 32]; (3) 反身性:由于社会系统中存在认知与行为的交互影响^[33],从而导致了多因素的深度耦合以及多变量的动态级联^[34, 35]。

传统的社会系统研究方法依赖于模型假设或线性建模。而真实社会系统中,组元的相互作用是动态博弈的非线性关系。由于社会系统中人具有强大的学习和适应能力,可随时对事物或环境的运行进行反馈、调整和改造,再叠加虚假信息 and 隐藏行为等不确定因素的影响,使得社会系统中组元间的非线性交互关系变得极其复杂^[16]。如何阐明新形态下的复杂社会系统结构、行为、环境涌现与演化的一般规律,传统社会系统研究的理论和方法难以应对。因此,我们需要从系统结构、系统行为和系统演化等多个角度,探索关联衔接微观机理与宏观现象的介尺度科学原理与方法^[36],揭示个体到整体的内在规律,加强对复杂社会系统中结构异质性、自组织涌现行为的刻画,通过对网络结构和交互特征等多个角度进行深度解析,刻画出各组元间动态博弈行为及其内在影响因素。与此同时,我们需要利用因果推理和认知归因等方法对个体和群体之间的非理性行为进行客观描述,通过对现象的分析找出个体和群

体行为的关键影响因素,通过多因素关系解耦与多变量的动力学建模等方式进一步探索复杂社会系统的演化规律和内在的动力学机理。

2.1.2 复杂工程系统涌现与演化

新环境下的复杂工程系统呈现出诸多新特点和新特征,主要表现在三个方面:(1) 边界模糊、要素复杂:如何界定大型复杂工程系统的边界和状态并刻画其内在关键影响因素至关重要。(2) 多层次、跨场景:如何开展复杂工程系统的多层次、全景式分析以及跨尺度行为的体系化解析等面临挑战。(3) 风险级联、不确定性增加:面对复杂工程系统风险涌现和不确定性增大的场景,如何探索系统性风险内在涌现机理与分维度降解方法是亟需解决的关键科学问题之一。

面对新环境下的复杂工程系统存在边界模糊、跨尺度耦合、系统性风险增多等新特点和新特征,现有方法难以准确刻画微观结构与宏观涌现行为的内在机理及其关联关系。因此,首先需要科学界定复杂工程系统的状态和边界,研究复杂工程系统的关键影响因素,运用介科学理论与方法探索单元尺度与系统尺度之间的内在关联^[37]。其次,需要构建多层次复杂工程系统模型,探索复杂工程系统的跨尺度行为及其内在的体系化结构,基于此,解析其内在的系统性风险。最后,需要针对复杂工程系统的系统性风险及其涌现机理,探索系统性风险涌现解析模型以及系统性风险的分维度降解方法。

2.1.3 复杂人机/人网系统涌现与演化

随着大数据和人工智能等技术的快速发展,人机协同和人网混合的程度愈发深入,由此产生的人机协同和人网混合的复杂系统与传统的复杂社会系统和复杂工程系统存在着诸多差异。人机混合系统使得信息—物理—社会系统的高度融合,形成物理域—信息域—认知域以及时间尺度和空间尺度的深度耦合与交互影响。如何对这种高度耦合的复杂人机系统进行深入认知与理解,构建面向复杂人机系统的动力学模型,揭示复杂人机系统的涌现与演化规律,是当前需要重点解决的关键科学问题之一。

复杂人机系统涉及人机交互影响、信息—物理—社会环境的深度融合以及人机涌现行为等。传统意义上的面对复杂社会经济系统和复杂工程系统的研究方法难以凑效。如何认知和理解复杂人机系统的涌现与演化规律并深度解析其内在的系统性风险,存在较大的技术挑战^[38-40]。因此,我们亟需开展复杂人机系统(例如:商业、工业、军事和医疗等诸多

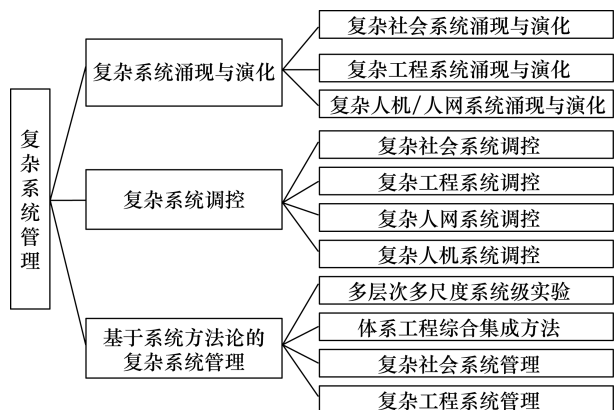


图1 复杂系统管理的主要研究内容

人机协同场景)的实证研究,分析人机协同环境下人类对机器行为产生的关键作用以及人机交互环境下机器对人类行为产生的潜在影响^[41],构建复杂人机系统的演化动力学模型,探索人机协同行为学及其介尺度解析方法^[36],揭示复杂人机系统的涌现与演化规律。在此基础上,我们需要搭建基于人机协同的决策框架,保证异质决策主体有效参与群体决策过程,并充分利用脑机融合相关技术,探索人机混合增强智能技术与人类决策经验的深度融合策略。

2.2 复杂系统调控

科技革命激发了“信息—物理—社会”高度耦合的新形态,由此形成了信息—物理—社会这一新型复杂系统,其具有三个主要特点:(1)人的决策和智能算法的高度融合,(2)技术指标和价值指标的密切关联,(3)算法规制与社会规范的合为一体。在信息—物理—社会复杂系统下,空间秩序的失衡和传播将引发交叉放大、级联循环的相互影响,从而导致系统性风险涌现。因此,我们需要针对人机融合环境下复杂系统中的调控机制进行研究。

本次会议围绕复杂系统调控机制的研究目标和科学问题,深入研讨了社会系统和工程系统的调控范式以及人一机—网的协同决策和治理规范等。与会专家经过充分讨论认为:新形态下复杂系统调控的关键科学问题主要包括三个方面:(1)复杂社会系统调控,(2)复杂工程系统调控,(3)复杂人网系统调控,(4)复杂人机系统调控。由于现有针对复杂工程系统调控的文献较多^[37, 42, 43],在此不再赘述。因此,本文重点阐述复杂人网系统调控、复杂人机系统调控和复杂社会系统调控三个系统的研究现状和发展趋势。

2.2.1 复杂社会系统调控

物理—信息—人类三维空间下的秩序合理有序,规范约束动态平衡。社会系统中个体和群体的多元化、自组织性、不确定性等导致了系统的复杂性。现有复杂社会系统调控研究的挑战性主要体现在三个方面:(1)复杂社会系统调控机理不明、难以解释;(2)复杂社会系统调控力度难把握、难达精准;(3)复杂社会系统行为体的交互性、主动性不足。

目前不同领域的学者分别侧重于从计算建模的角度和理论分析的角度开展了一些研究工作,但总体来说,两者之间缺乏跨学科交互。以人为中心的复杂社会系统调控机制,社会科学和计算科学的交叉融合和定性定量的交互验证以及相互促进是关键

研究工作,其内在科学问题可归纳为三个方面:(1)揭示乱序与失序诱因以及内生与外生秩序的形成过程,(2)构建动态互动与良序组织的行为模型,(3)设计兼具有效性与良好用户体验的调控机制。

2.2.2 复杂人网系统调控

复杂人网系统早期的调控主要集中在单层小规模网络,而在信息—物理—社会这样的多层次体系架构、多尺度耦合结构的网络中进行多层次调控与群体智能决策是现在亟待解决的研究问题。

复杂人网系统的网络结构、容限与人因不确定性使得传统的调控方法难以凑效。当前复杂人网系统调控中面临的技术挑战可归纳三个方面:(1)难刻画:多层强耦合的复杂人网系统,其时空特征难以刻画。(2)难平衡:网络容限及时间制约,与人类需求的时空多样性之间难以平衡。(3)难完善:人因不确定与网络多约束,使得人网和谐运行机制难以完善。针对上述技术挑战,我们亟需开展的关键科学问题可总结为三个方面:(1)基于时空耦合大数据的复杂人网系统需求分析与预测;(2)基于容限—需求匹配的多层级调控机制;(3)面向复杂人网系统的不确定多约束群体智能决策理论。

2.2.3 复杂人机系统调控

复杂人机系统具有规模庞大、关联性强、动态性强等一系列传统特征。近年来,以 ChatGPT、AlphaGo 和无人驾驶汽车为典型代表的机器智能技术不断发展,机器的自主决策性能不断提升,在特定条件下具有超越人的智力表现。智能机器作为新主体的出现,不再仅仅作为“工具”^[41, 44],导致了人机系统出现新的变化,主要体现在两个方面:(1)人机混合,(2)人机关系复杂。

传统的研究工作主要从人机协同的角度,关注复杂人机系统的绩效,对人工智能的治理和人机交互与融合等方面的关注较少。人机调控系统中的关键科学问题主要包括三个方面:(1)明确复杂人机系统的调控目标:复杂人机系统的调控目标是系统演化过程中的人机关系及其状态的最优化。我们需要从传统绩效角度出发,将人机系统的安全、人机系统和谐和人机系统的可持续发展视为调控目标。(2)探索复杂人机系统的耦合机制:人工智能时代的复杂人机系统具有规模庞大、关联性强、深度耦合等特点。当前的研究工作针对复杂人机系统的耦合机制尤其是动态耦合机制尚存在诸多的认知盲区,我们需要运用大数据和人工智能技术以及动力学建模方法,深入探索复杂人机系统的耦合机制。

(3) 探索复杂人机系统的调控策略:随着人工智能技术的发展,机器的介入程序将愈发深入,其对人类产生的影响也将愈来愈大,人机混合、人机协同将占据主导地位。传统的以人为中心或者以机器为中心的研究方法将难以凑效。因此,我们需要研究以人机关系为中心的调控策略,以更好地调控复杂人机系统。

2.3 基于系统方法论的复杂系统管理

随着大数据和人工智能技术的应用与普及,复杂系统呈现出诸多新特点和新特征,主要体现在四个方面:(1) 环境开放、边界模糊;(2) 跨场景、多层次、多尺度;(3) 复杂异构、多域协同;(4) 人机融合、虚实互动等。传统方法聚焦小规模微观个体的线性建模或者宏观战略的定性分析,缺乏针对大规模复杂系统的整体性和非线性建模与计算,因此对复杂系统管理的支撑有限。我们需要针对复杂系统新特点和新特征,研究新的科学认知范式与管理理论和方法。本次会议重点围绕基于系统方法论的复杂系统管理相关科学问题和研究目标,探讨了如何构建复杂系统统一认知框架,开展多层次多尺度系统级实验以及体系工程综合集成方法研究,研讨了如何运用大数据、人工智能技术以及系统科学理论,对复杂社会系统和复杂工程系统进行管理等。

2.3.1 多层次多尺度系统级实验

复杂系统的多层次、多尺度系统级实验关系国计民生,是国家核心竞争力,也是立足于国家重大战略需求、紧密结合我国新型复杂系统管理的实践。多层次、多尺度系统级实验作为重大系统建设与管理的核心技术支撑,能够提高国家的科学管理能力,具有重要的研究意义。

在多层次、多尺度系统级实验方面,我们继续开展的研究工作主要包括六个方面:(1) 研究如何将系统风险量化为微观个体属性、介观局部特征和宏观平稳状态;(2) 提出识别复杂系统薄弱环节的方法,从整体性上实现风险评估与分析;(3) 对系统的隐状态空间和系统主体异质性等刻画;(4) 研究基于元知识的跨领域复杂环境计算;(5) 研究多智能体交互学习,并对组织行为动态模型构建;(6) 研究不同风险情景下的决策智能、迁移学习和动态推演,以提高应对和处置系统新发风险的能力,并提高风险的动态预警和一体化管控能力。

2.3.2 体系工程综合集成方法

体系工程是由现有或新开发系统组成的混合系统的能力进行设计、规划、开发、组织和集成的过程,

其整合了多种技术与非技术因素来满足体系能力的需求。在新一代信息技术环境下,构建具有中国特色的体系结构框架和基于体系工程的复杂系统管理理论方法,改造传统的体系需求、设计、集成、管理、优化、评估方法,更加有效地支撑智能复杂系统建模与分析、设计与优化、规划与博弈、评估与管理,具有重要的研究意义。

体系工程综合集成方法主要是利用人工智能算法、大数据和知识图谱等新理论、新技术,实现人机融合和协同的智能化管理,其主要开展的研究工作包括四个方面:(1) 研究基于元数据及元模型和知识网络的体系结构框架设计理论方法;(2) 提出人机融合的体系复杂性与演化机理和研究范式;(3) 设计体系需求工程智能加速理论方法;(4) 研究体系智能化建模与仿真理论方法和体系博弈的智能优化与决策理论方法。

2.3.3 复杂社会系统管理

复杂社会系统具有开放性、不确定性、自我组织性、自我痊愈性和多样性等特点。当前的复杂社会系统管理面临的关键挑战主要体现在三个方面:(1) 数字技术带来的技术颠覆:数字技术的飞速发展,给社会治理带来了新的挑战,如何使复杂社会系统治理适应数字技术带来的改变,使数字技术和社会之间形成相互构建的关系,是需要重点研究的科学问题。(2) 数字技术带来治理格局的改变:数字技术作为社会因素触发了社会结构的变迁,新基建下复杂社会系统的基础构成要素也发生了根本的改变,带来了一系列新问题,如数据中心化造成的垄断,人机协同、人机共生环境下的劳动就业问题等,而传统的管理方法尚不足以应对新的治理格局。(3) 社会系统可持续发展的要求:在复杂社会系统治理中,如何不仅仅简单地协调利益、目标和信息,而是进行超模块化、超结构化地协调,是值得重点攻克的关键科学问题。

针对上述复杂社会系统管理面临的挑战,我们亟需在以下四个方面开展创新性的研究工作:(1) 研究面向“国家、城市、社区”的多层次的社会管理体系;(2) 研究面向多个场景的社会管理方法,如社会治安、福利保障、教育、医疗、公共危机管理等;(3) 探索复杂社会系统中的数据隐私保护和算法公平等方法;(4) 研究社会技术系统的模块化和因果关系理论;(5) 根据复杂社会系统管理的数据智能和数据治理问题,探索并形成新的管理方法论。

2.3.4 复杂工程系统管理

新一代信息技术使得传统的静态机械工程体

系演变成了人机混合的动态智能体系,由此产生的新一代复杂工程系统具有高熵、多源、异构的特点。面向新一代复杂工程系统,现有的工程系统管理方法存在诸多不足,主要体现在三个方面:(1)现有的建模仿真方法无法体现体系涌现的特征;(2)新一代人机融合的复杂系统缺乏相应的系统集成理论与方法;(3)难以刻画新一代复杂工程系统隐状态、识别出其内在的新发风险,并快速制定响应策略。

针对上述技术挑战,我们需要探索面向新一代工程系统的管理方法,开展相应的关键科学研究工作,主要包括:(1)研究智能加速、建模与仿真、博弈的智能优化与决策理论方法;(2)构建数字环境下、人机交互下体系博弈对抗智能决策方法;(3)形成人机融合的新型智能复杂系统系统集成理论与方法;(4)探索针对自组织、自适应特征的智能体系风险评估方法;(5)提出强对抗、高动态环境中体系博弈对抗智能决策方法;(6)探索人机融合的体系复杂性、演化机理和研究范式等。

3 未来 5~10 年复杂系统管理发展目标及资助重点

3.1 发展目标

如前所述,大数据和人工智能情景下,我们已经从信息时代开始迈入智能时代,复杂系统管理的认知范式发生了一系列转变,为复杂系统管理带来重大挑战,急需基于大数据和人工智能技术以及系统科学理论,建立新型的复杂系统决策范式,采用更加主动、全面的视角,面向未来可能发生的场景和情境进行积极的预测,并将这些前瞻性分析应用于复杂系统态势监测、机理分析、管理策略制定与评估全过程,提升我国复杂系统管理水平,切实解决国家重大

战略需求。

复杂系统与管理涉及诸多学科知识和技术,需要管理科学、心理学、数学、物理与计算机科学等多学科的深度交叉融合,需要聚焦于面向高度复杂和高度不确定的应用场景,例如,非传统社会安全、金融科技监管、航空航天、政务服务和区域发展等,充分体现复杂系统管理的优势。近年来,科技部已部署“科技创新 2030—新一代人工智能重大项目”,围绕开展大数据和人工智能技术在复杂系统感知与理解方面的探索,国家自然科学基金委员会也部署了多个创新群体项目和重大项目探索新技术与管理等多学科交叉融合和前瞻性理论创新。这些项目的前期研究成果将为复杂系统管理研究奠定理论基础。在未来 5~10 年,我们需要进一步建立复杂系统管理学科理论体系,凝练学科内涵、发展目标、核心科学问题、关键技术问题和典型应用场景,夯实学科理论基础和创新方法,培养复杂系统管理方向人才,以应对大数据和人工智能情景下复杂系统管理的人才需求和技术需求。

3.2 资助重点

本次双清论坛与会专家经过深入研讨,凝练了复杂系统与管理重大关键科学问题,并建议未来 5~10 年应着重围绕以下领域(如表 1 所示),通过多学科交叉开展原创性研究。

3.2.1 新兴复杂系统涌现与演化机理研究

当前,我们已经处于人工智能时代,网络通讯、超级计算、大数据、人工智能等技术广泛应用于人们工作和生活的方方面面。新形态下的复杂系统已不再是传统意义上的单一模态的复杂系统。我们需要对新形态下复杂系统的特征和特点进行深入认知和理解,并对其涌现与演化规律进行进一步探索。

因此,我们建议资助重点为:(1)新形态下的复

表 1 建议开展的研究领域及资助重点

研究领域	资助重点
新兴复杂系统涌现与演化机理研究	新形态下的复杂社会系统涌现与演化规律研究 新环境下的复杂工程系统涌现与演化规律研究 人-机-网环境下的复杂系统涌现与演化规律研究
新一代复杂系统的调控机制研究	复杂人网系统调控与群体决策研究 复杂人机系统调控研究 复杂社会系统调控研究
基于系统方法论的复杂系统管理方法	基于系统方法论的复杂社会系统管理研究 基于系统方法论的复杂工程系统管理研究 多层次、多尺度系统级实验与社会计算研究 体系工程系统集成方法研究

杂社会系统涌现与演化规律研究:加强对复杂社会系统中结构异质性、自组织涌现行为的刻画,探索各主体之间动态博弈行为及其内在影响因素,构建社会动力学模型和介尺度分析体系,揭示新形态下的复杂社会系统的涌现与演化规律。(2)新环境下的复杂工程系统涌现与演化规律研究:解析复杂工程系统的关键影响因素,利用介科学理论和方法,构建多层次复杂工程系统模型和系统性风险涌现解析模型,并探索系统性风险的分维度降解方法。(3)人一机一网环境下的复杂系统涌现与演化规律研究:分析人一机一网环境下人类对机器行为产生的关键作用以及人一机一网交互环境下机器对人类行为产生的潜在影响,揭示人一机一网环境下的复杂系统涌现与演化规律,并探索网络环境下人机混合增强智能技术与人类决策经验的深度融合策略。

3.2.2 新一代复杂系统的调控机制研究

人机协同情景下的新一代复杂系统,信息—物理—社会空间的交互映射和高度融合,空间秩序的失衡和传播将引发交叉放大,级联循环的相互作用,从而导致系统性风险涌现和行为异化,调控难度加大。传统的系统调控机理和调控策略存在较大的不确定性,难以满足新形态下复杂系统的调控目标。我们需要探索新一代复杂系统的调控机制,研究新型调控手段和策略。

因此,我们建议资助重点为:(1)复杂人网系统调控与群体决策研究:开展基于时空耦合大数据的复杂人网系统需求分析与预测研究,探索基于容限—需求匹配的多层级调控机制,构建面向复杂人网系统的不确定多约束群体智能决策理论。(2)复杂人机系统调控研究:以大数据、人工智能和动力学建模方法,深入探索复杂人机系统的耦合机制,研究以人机关系为中心的调控方法、策略与成效,以更好地调控复杂人机系统。(3)复杂社会系统调控研究:研究乱序与失序诱因以及内生与外生秩序的形成机理,构建动态互动与良序组织的行为模型,探索兼具有效性与良好用户体验的调控机制。

3.2.3 基于系统方法论的复杂系统管理方法

随着大数据和人工智能技术的应用与普及,复杂系统呈现出诸多新特点和新特征。现有复杂系统管理研究工作强调数据驱动和事后解释,重点关注数据挖掘和量化分析等方面的技术能力。由于系统面临的环境不确定、信息不完整的问题,新形态下复杂系统的内部各要素之间的非线性关联难以辨别,其外在动态演化的方向难以捉摸,这对非线性建模

技术和分析方法提出了更高的要求。基于系统方法论的复杂系统管理方法能够实现主动预测和新发风险降维与分解,并在特定的场景下,对系统组元行为分析推理、影响评估和归因溯源。

因此,我们建议资助重点为:(1)基于系统方法论的复杂社会系统管理研究:构建面向“国家、城市、社区”的多层次、多场景的社会管理体系,探索复杂社会系统中的数据隐私保护和网络平台监管等方法,研究社会技术系统的模块化和因果关系理论。(2)基于系统方法论的复杂工程系统管理研究:构建数字环境下、人机融合的新型智能复杂系统系统集成理论与方法,探索针对自组织、自适应特征的智能体系风险评估方法,研究强对抗、高动态环境中体系博弈对抗智能决策方法和研究范式等。(3)多层次、多尺度系统级实验与社会计算研究:融合经典的建模方法和人工智能技术,研究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方法等,增强数据处理能力和模型的拟合程度^[12],研究非线性条件下系统由非平衡态通向平衡态的演化路径,基于多尺度分析研究系统的整体演进方向和稳态模式^[45],研究系统的隐状态空间和系统主体异质性等刻画方法,探索基于元知识的跨领域复杂环境计算策略,构建基于多智能体交互学习的组织行为动态模型,实现多层次、多尺度系统级实验与社会计算。(4)体系工程系统集成方法研究:研究基于元数据及元模型和知识网络的体系结构框架设计理论方法,提出人机融合的体系复杂性与演化机理和研究范式,设计体系需求工程智能加速理论方法,探索研究体系智能化建模与仿真实论方法和体系博弈的智能优化与决策理论方法。

4 结 语

大数据与人工智能时代下的复杂系统管理旨在采用更加主动、更加全面的视角,面向未来可能发生的复杂场景和情境,进行系统化的分析、建模、推理、预测与决策。面向高度复杂和高度不确定的应用场景,以系统方法论、大数据和人工智能等为核心技术支撑的复杂系统与管理,正处于萌芽阶段,属于国际前沿交叉领域,相关研究亟待布局推进,我们需要管理科学、心理学、数学、物理与计算机科学等多学科的深度交叉融合,需要聚焦于典型应用场景,例如,非传统社会安全、金融科技监管、航空航天、政务服务和社区区域发展等。未来,我们需要进一步凝练研究方

向,规划和推进跨学科攻关团队的培养,深入开展复杂系统管理基础理论研究,促进复杂系统管理相关科技成果的应用与推广。

参 考 文 献

- [1] Simon HA. The architecture of complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 1962, 106 (6): 467—482.
- [2] Goldenfeld N, Kadanoff LP. Simple lessons from complexity. *Science*, 1999, 284(5411): 87—89.
- [3] Comin CH, Peron T, Silva FN, et al. Complex systems: features, similarity and connectivity. *Physics Reports*, 2020, 861: 1—41.
- [4] Gerber S, Pospisil L, Navandar M, et al. Low-cost scalable discretization, prediction, and feature selection for complex systems. *Science Advances*, 2020, 6(5): eaaw0961.
- [5] Thompson B, van Opheusden B, Sumers T, et al. Complex cognitive algorithms preserved by selective social learning in experimental populations. *Science*, 2022, 376 (6588): 95—98.
- [6] 成思危. 复杂科学与系统工程. *管理科学学报*, 1999, 2(2): 1—7.
- [7] Newman MEJ. Complex systems: a survey. *American Journal of Physics*, 2011, 79(8): 800—810.
- [8] Hmelo CE, Holton DL, Kolodner JL. Designing to learn about complex systems. *Journal of the Learning Sciences*, 2000, 9(3): 247—298.
- [9] 钱学森, 于景元, 戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论. *自然杂志*, 1990(1): 3—10+64.
- [10] 于景元. 系统科学和系统工程的发展与应用. *科学决策*, 2017(12): 1—18.
- [11] 于景元. 从系统思想到系统实践的创新——钱学森系统研究的成就和贡献. *系统工程理论与实践*, 2016, 36(12): 2993—3002.
- [12] 汪寿阳, 胡毅, 熊熊, 等. 复杂系统管理理论与方法研究. *管理科学学报*, 2021, 24(8): 1—9.
- [13] 成思危. 复杂科学与管理. *中国科学院院刊*, 1999, 14(3): 175—183.
- [14] 于景元. 钱学森系统科学思想和系统科学体系. *科学决策*, 2014(12): 1—22.
- [15] 盛昭瀚, 于景元. 复杂系统管理: 一个具有中国特色的管理学新领域. *管理世界*, 2022, 38(3): 200—211.
- [16] 杨晓光, 高自友, 盛昭瀚, 等. 复杂系统管理是中国特色管理学体系的重要组成部分. *管理世界*, 2022, 38(10): 1—24.
- [17] Kim E, Shepherd ME, Clinton JD. The effect of big-city news on rural America during the COVID-19 pandemic. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(36): 22009—22014.
- [18] Schmelz K, Bowles S. Overcoming COVID-19 vaccination resistance when alternative policies affect the dynamics of conformism, social norms, and crowding out. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(25): e2104912118.
- [19] Johnson MD, Lavner JA, Muise A, et al. Women and men are the barometers of relationships; testing the predictive power of women's and men's relationship satisfaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(33): e2209460119.
- [20] Loomba S, de Figueiredo A, Piatek SJ, et al. Measuring the impact of COVID-19 vaccine misinformation on vaccination intent in the UK and USA. *Nature Human Behaviour*, 2021, 5(3): 337—348.
- [21] Pennycook G, Epstein Z, Mosleh M, et al. Shifting attention to accuracy can reduce misinformation online. *Nature*, 2021, 592(7855): 590—595.
- [22] Yeo SK, McKasy M. Emotion and humor as misinformation antidotes. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(15): e2002484118.
- [23] de Marchi S. The complexity of polarization. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(17): e2115019119.
- [24] Garcia D, Mitike Kassa Y, Cuevas A, et al. Analyzing gender inequality through large-scale Facebook advertising data. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(27): 6958—6963.
- [25] Zheng XL, Zeng D, Wang FY. Social balance in signed networks. *Information Systems Frontiers*, 2015, 17(5): 1077—1095.
- [26] Kruczkiewicz A, Klopp J, Fisher J, et al. Compound risks and complex emergencies require new approaches to preparedness. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(19): e2106795118.
- [27] Ottino JM. Engineering complex systems. *Nature*, 2004, 427(6973): 399.
- [28] 郭雷. 不确定性动态系统的估计、控制与博弈. *中国科学: 信息科学*, 2020, 50(9): 1327—1344.
- [29] Zhang Z, Zheng XL, Zeng DD. A framework for diversifying recommendation lists by user interest expansion. *Knowledge-Based Systems*, 2016, 105: 83—95.
- [30] Seymour RG, Kypraios T, O'Neill PD. Bayesian nonparametric inference for heterogeneously mixing infectious disease models. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(10): e2118425119.
- [31] Zheng XL, Zhong YG, Zeng D, et al. Social influence and spread dynamics in social networks. *Frontiers of Computer Science*, 2012, 6(5): 611—620.
- [32] He SK, Zheng XL, Zeng D, et al. Exploring entrainment patterns of human emotion in social media. *PLoS One*, 2016, 11(3): e0150630.
- [33] Dong GG, Wang F, Shekhtman LM, et al. Optimal resilience of modular interacting networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(22): e1922831118.
- [34] Zhou F, Xu X, Trajceviski G, et al. A survey of information cascade analysis. *ACM Computing Surveys*, 2022, 54(2): 1—36.

- [35] Buldyrev SV, Parshani R, Paul G, et al. Catastrophic cascade of failures in interdependent networks. *Nature*, 2010, 464(7291): 1025—1028.
- [36] 叶艳玲, 李静海. 介科学: 探索介尺度共性原理. *中国科技术语*, 2017, 19(5): 69.
- [37] 李静海, 胡英, 袁权. 探索介尺度科学: 从新角度审视老问题. *中国科学: 化学*, 2014, 44(3): 277—281.
- [38] Binz M, Schulz E. Using cognitive psychology to understand GPT-3. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(6): e2218523120.
- [39] Yuan LY, Gao XF, Zheng ZL, et al. *In situ* bidirectional human-robot value alignment. *Science Robotics*, 2022, 7(68): eabm4183.
- [40] Steyvers M, Tejada H, Kerrigan G, et al. Bayesian modeling of human-AI complementarity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2022, 119(11): e2111547119.
- [41] Rahwan I, Cebrian M, Obradovich N, et al. Machine behaviour. *Nature*, 2019, 568(7753): 477—486.
- [42] 潘薇, 杨少柒, 谢秀娟, 等. 全国产氨液化器的性能调控优化研究及其工程化应用. *科学通报*, 2022, 67(33): 4009—4016.
- [43] Zhang J, Pan BB, Li YG. Modulating electrochemical CO₂ reduction at interfaces. *Science Bulletin*, 2022, 67(18): 1844—1848.
- [44] Köbis N, Bonnefon JF, Rahwan I. Bad machines corrupt good morals. *Nature Human Behaviour*, 2021, 5(6): 679—685.
- [45] 郑志明, 吕金虎, 韦卫. 精准智能理论: 面向复杂动态对象的人工智能. *中国科学: 信息科学*, 2021, 51(4): 678—690.

Some Key Scientific Issues of Complex System Management Research in the Era of Big Data and Artificial Intelligence

Ziyou Gao¹ Lei Guo² Zhongmin Liu³ Hongwei Wang⁴ Zhaohan Sheng⁵ Dajun Zeng^{6*}
 Zuoyi Liu⁷ Hong Huo⁷ Daqing Li⁸ Yijie Peng⁹ Xiaolong Zheng^{6*}

1. *Beijing Jiaotong University, Beijing 100044*

2. *Academy of Mathematics and Systems Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

3. *Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023*

4. *Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074*

5. *Nanjing University, Nanjing 210023*

6. *Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190*

7. *Department of Management Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

8. *Beihang University, Beijing 100191*

9. *Peking University, Beijing 100871*

Abstract In the past few years, we are entering the era of big data and artificial intelligence, and complex systems have shown new features of cross-scale coupling and interoperability among humans, machines and the internet of things. For these new complex systems management, we should not only develop new theories and methods, but also fully enable them with new and advanced technologies. To face the major national needs for complex system management in the era of big data and artificial intelligence, this paper presents the major opportunities and challenges in the current research on complex system management, analyzes the current research status and points out the future development trends regarding this emerging field. Furthermore, we refine the development goals, major key scientific issues and funding priorities in this field in the next 5~10 years.

Keywords complex system management; emergence and evolution; systematic controlling; systematic methodology; big data and artificial intelligence

(责任编辑 姜钧译)

* Corresponding Authors, Email: dajun.zeng@ia.ac.cn; xiaolong.zheng@ia.ac.cn