

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2021.08.002

混合智能管理系统理论与方法研究^①

张维¹, 曾大军^{2,3,4}, 李一军⁵, 陈伟运⁶, 王刊良⁷, 陈国青⁸, 苏竣⁹, 黄丽华¹⁰, 刘业政¹¹, 杨彦武⁶, 乔红^{12,13}, 徐杨¹⁴, 熊熊¹, 李林静^{2,3}, 郑晓龙^{2,3}, 张柱²
(1. 天津大学管理与经济学部, 天津 300072; 2. 中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 深圳人工智能与数据科学研究院(龙华), 深圳 518129; 5. 哈尔滨工业大学经济与管理学院, 哈尔滨 150001; 6. 华中科技大学管理学院, 武汉 430074; 7. 中国人民大学商学院, 北京 100872; 8. 清华大学经济管理学院, 北京 100084; 9. 清华大学公共管理学院, 北京 100084; 10. 复旦大学管理学院, 上海 200433; 11. 合肥工业大学管理学院, 合肥 230009; 12. 中国科学院自动化研究所“类脑智能研究中心”, 北京 100190; 13. 中国科学院大学计算机与控制学院, 北京 100049; 14. 电子科技大学计算机科学与工程学院, 成都 611731)

摘要: 随着人工智能技术的飞速发展及其在诸多行业中广泛和深入的应用, 人机混合智能系统逐渐涌现。以人机协同混合智能为特定管理目标的混合智能管理系统, 正处于萌芽阶段, 已逐渐受到学术界、政府部门和产业界的重视, 相关研究对实施科技强国战略具有重要意义。结合国家自然科学基金委管理科学部“十四五”规划相关领域专家的前期讨论意见, 本文凝练出该领域值得深入探索的五个研究方向, 并给出了每个方向的典型科学问题示例。

关键词: 机器行为; 人机协同; 混合智能

中图分类号: C93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2021)08-0010-08

0 基本概念、科学意义与国家战略需求

近年来, 随着人工智能的飞速发展, 及其在诸多行业中广泛和深入的应用, 人机混合智能驱动的管理系统逐渐涌现。混合智能管理系统主要是指为了实现特定的管理目标而由人和智能机器(系统)共同构成的、在数字智能技术支持下进行人机互动的智能(辅助)决策和运行的管理组织。在混合智能管理系统中, 人机互动的过程是人、数据、以及算法相互融合和相互作用的过程。有别于传统管理系统, 混合智能管理系统面临一些新的挑战, 如机器智能推理学习的弱可解释性、人与机器在表达及解决问题方面的认知异构性、人机融

合群体行为的复杂性等。对混合智能管理系统理论和方法的研究, 有助于系统认识混合智能管理系统中人类行为和机器行为的新特征和机理; 有助于深刻了解混合智能管理系统中人和机器的理性局限性、文化和伦理等因素的重要性; 有助于全面掌握混合智能管理组织的结构、功能及演化规律。在此基础上, 设计安全、稳定、高效的人机协同与合作机制, 将有利于实现面向特定管理目标和场景的混合智能驱动的管理信息系统, 从而有效提升管理活动中人与机器的互动和协作水平, 大力改善人们的生产和生活质量。

近年来, 人工智能已成为我国的国家战略, 基于人机协同的混合增强智能是当前人工智能的发展重点之一。2017年7月8日, 国务院印发并实

^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; 71621002)。

作者简介: 张维(1958—), 男, 天津人, 博士, 教授, 博士生导师。Email: weiz@tju.edu.cn

施了《新一代人工智能发展规划》,强调“必须放眼全球,把人工智能发展放在国家战略层面系统布局、主动谋划,牢牢把握人工智能发展新阶段国际竞争的战略主动,打造竞争新优势、开拓发展新空间,有效保障国家安全。”该规划明确指出“大数据驱动知识学习、跨媒体协同处理、人机协同增强智能、群体集成智能、自主智能系统成为人工智能的发展重点。”其中,混合增强智能新架构与新技术需“重点突破人机协同的感知与执行一体化模型、智能计算前移的新型传感器件、通用混合计算架构等核心技术,构建自主适应环境的混合增强智能系统、人机群组混合增强智能系统及支撑环境。”2017年12月14日,工业和信息化部发布了《促进新一代人工智能产业发展三年行动计划(2018年~2020年)》,旨在推动人工智能和实体经济深度融合,加快制造强国和网络强国建设。2018年10月31日,习近平总书记在中央政治局第九次学习会议中提出:“人工智能是新一轮科技革命和产业变革的重要驱动力量,加快发展新一代人工智能是事关我国能否抓住新一轮科技革命和产业变革机遇的战略问题。”2020年1月,科技部发布了《“新一代人工智能”重大项目2020年度第一批项目申报指南建议》,其中把“混合增强在线教育关键技术与系统研究”立为项目之一,该项目将“研究基于人机混合智能的群体化学习组织、激励、评测、辅导和优化方法,建立支撑群体化课程学习和在线实践的智能平台。”

混合智能管理系统是混合增强智能系统研究的一个重要组成部分。它的核心是将人机协同混合智能作为特定管理目标,为特定场景下进行智能化管理提供驱动力和技术支持,面向混合智能的管理信息系统是它的一个典型应用。通过对混合智能管理系统理论和方法的研究,实现基于混合智能的人机协作系统在经济管理领域的广泛应用,促进管理学与人工智能的学科交叉融合,这无疑对实施新一代人工智能国家战略具有十分重要的意义。

1 国内外研究发展态势

人工智能已经在深刻改变世界,在国家安全、智慧城市、交通出行、金融、医疗保健、司法等领域

得到日益广泛而深入的应用。人工智能及其重要组成部分混合智能,在国际上引起了从产业到政府、再到学术界的高度关注。

从产业方向看,人工智能将赋能各个传统产业,促进经济的快速发展。普华永道会计师事务所在2017年发布的研究报告指出,人工智能技术到2030年将使全球GDP增长15.7万亿美元,其中包括中国增长7万亿美元,北美增长3.7万亿美元,北欧增长1.8万亿美元。混合智能作为人工智能的重要部分也正成为国际IT大公司关注的发展方向。例如:美国Amazon公司于2005年建立的Mechanical Turk平台是一个典型混合智能管理系统,它可以利用众包(crowd sourcing)原理将某个任务分解和分配给平台上的多个劳动力并行实施。2017年7月,Google的母公司Alphabet启动了一项名为“人与人工智能(People + AI Research, 'PAIR')”的新研究计划,用于改善普通用户与人工智能的互动与协作方式。2017年8月,微软亚洲研究院常务副院长张冬梅参加中国自动化学会混合智能专业委员会成立大会暨混合增强智能学术沙龙,作大会主题报告“创新时代的微软人工智能”。2019年,Facebook研究人员制造出了一个纸牌游戏机器人,可以在一款需要团队作战的游戏Hanabi中获得高分。

从国家战略方向看,世界各国为了抓住人工智能带来的新一轮产业变革的发展机遇和抢占人工智能竞争制高点,开始争相制定该领域的国家发展战略和规划。2016年10月美国国家科技委连续发布了两个重要战略文件《为人工智能的未来做好准备》和《国家人工智能研究与发展战略规划》,将人工智能上升到了国家战略层面。2017年3月,加拿大政府发布了《泛加拿大人工智能战略》,政府计划拨款1.25亿加元支持人工智能研究及人才培养。2018年3月,法国政府公布《人工智能发展战略》,通过引导人工智能前沿技术研发,培育后备力量,促进人工智能技术向其他经济领域转化。2018年4月,英国政府发布《人工智能行业新政》,旨在推动英国成为全球人工智能领导者。2018年11月,德国联邦政府正式发布人工智能战略,计划在2025年前投入30亿欧元用于推动德国人工智能的发展。2018年4月25日,欧盟委员会提出了人工智能战略,宣布建设人工智

能需求平台. 2018年6月,日本政府发布了《未来投资战略》,重点推动物联网建设和人工智能的应用. 2019年6月,日本政府出台《人工智能战略2019》. 2019年10月21日,俄罗斯总统普京批准了2030年前俄罗斯国家人工智能发展战略. 在这些人工智能发展战略中,人机协作是其中不可或缺的重要研究内容.

从学术研究方向看,人机混合所形成技术生态系统正在对人类社会产生深远的影响^[1-3],混合智能的相关研究逐渐受到国际学者的广泛关注,这一方面需要对人机协同的机制和规律有更深入的理解,实现更加智能的系统;另一方面还需要从系统设计层面充分考虑法律规范、价值伦理和社会文化等因素,从而保证人机混合系统按照预定的目标运行,造福于人类. 在人机协同的机制和规律探索方面, Malone 等分析了五种主要的人机协同形式:层次结构、社区交互、自由市场、民主制度和生态系统,在不同的人机协同形式中,人机群体可以通过超级专业化分工和自我选择^[4]、任务分解和自动匹配^[5]、对任务间依赖性进行有效管理^[6]等机制进行有效协同. 他认为机器的主要作用是对群体的“及时互联”,随着机器智能的不断进化,人机群体在感知、记忆和学习的能力以及组合形式方面将不断优化和适应^[7]. 因此,混合智能的关键因素之一是基于人类的认知和行为规范设计有效的人机协同机制. Award 等认为混合智能系统的设计更加强调系统的激励机制、纠错机制以及防止蓄意破坏的机制^[8]. 更为直接地,研究人员在标准实验室环境中发现与简单机器人的交互可以增加人类协调性^[9],机器人可以在与人类之间的合作相媲美的水平上直接与人类合作^[10]. 随着人工智能正在成为人类社会的重要组成部分,大量人机伦理问题正在被提出和解决^[11, 12], Rahwan 等认为科学家们应该像研究人类和动物行为那样,从个体、群集与人机交互等不同层次深入研究机器人和机器群体的宏观行为规律^[1]. Peeters 等则在综合了分析人们对人工智能三种不同的视角的基础上,提出一个研究人工智能对人类社会影响的研究框架以及设计人工智能系统时需要考虑的三个设计原则^[14]. 该框架可以在人工智能具体应用、人机团队协同和社会影响等三个层面展开,不同的层面具有不同的设计目

标. 他们指出在设计人工智能系统时应该同时考虑不同层面的目标,比如在人机团队协同层面可能需要考虑对价值^[15]、隐私^[16]和安全^[17]等敏感的设计. 由于人机混合生态系统演化的复杂性^[1],很难在设计阶段保证系统完全按照预定设计目标运行, Peeters 等认为有效的人机混合系统设计需要满足可观察、可预测、可解释和可指导^[13, 18, 19]等四个原则,通过对系统整个生命周期的管理,保证人机混合智能系统满足预定的设计目标. 据不完全统计,2015年至今, *Nature* 和 *Science* 期刊上发表了21篇相关论文. *MIS Quarterly*、*European Journal of Operational Research* 以及 *International Journal of Production Research* 等管理学重要期刊上近5年发表了27篇相关论文. 在 Google Scholar 上以“hybrid intelligence”为关键词搜索2015年至今的论文,共搜到1950篇文章. 各国的科学基金组织也纷纷设立计划,资助与人机协同混合智能相关的基础研究. 例如:2018年欧盟资助了“推动面向学校教育的具有类人社交能力的直觉式人机交互”项目. 2018年英国工程与物理科学委员会(EPSRC)资助了“人机合作中的信任”项目. 2019年美国国家科学基金会资助了“基于人在决策回路中治理人工智能系统中的偏见”项目. 国际期刊或者国际会议也纷纷以混合智能为主题开展了论文交流和学术讨论. 例如:2013年,图灵奖获得者 Raj Reddy 等多位国际知名学者在 *IEEE Intelligent Systems* 期刊上撰文,围绕混合智能等展开专题讨论^[20]. 2018年6月,“The Interplay of Machines and Humans: State of the Art and a Research Agenda for Hybrid Intelligence”研讨会与26届欧洲信息系统大会 ECIS 共同在英国举办. 2020年8月,“Workshop on Hybrid Intelligence for Natural Language Processing Tasks”研讨会与欧洲人工智能大会 ECAI-2020 一起在西班牙举办.

近年来,混合智能在我国除了在国家层面受到高度关注,成为人工智能国家战略的重要组成部分之外,在产业界和学术界也正方兴未艾. 从产业的角度看,人机混合智能系统也逐渐受到产业界的关注,正成为企业发展战略的重要方向. 2016年,微软亚洲研究院开展了“HI + AI: 人机协同赋能未来”项目,认为人机协同,各展所长,才是人

类以及人工智能的未来之路. 2018年, 阿里巴巴推出“人机协同”智能服务解决方案, 开启智能服务2.0时代. 2018年3月, 美的发布“人机新世代”战略, 通过打造工业互联网, 力图让产品、机器、流程、系统等环节加载感知、认知、理解、决策能力, 人与机器将转变为更深入、更融合的协作关系. 在2018年首届中国认知计算和混合智能学术大会上, 联想集团副总裁王茜莺以“超算平台助力混合智能发展”为题作大会报告, 百度高级副总裁王海峰作大会报告“多模态深度语义理解”. 2019年1月, 美团对外展示了新一代的即时配送AI+IoT人机协同系统. 2019年12月, 腾讯举办以“人机协同, 内容共生”为主题的2019腾讯ConTech大会. 2020年5月, 云从科技与广州市政府正式签订战略合作协议, 将共建国内首个人机协同开放平台, 打造广州智慧城市智能运行中枢.

混合智能系统在国内产业界的快速发展^[21], 为该领域的研究提供了大量基础数据和真实的实践问题, 相关研究也受到了国内学者的高度重视. 在前期科学资助机构所投入资金的支持下, 学术界进行了多学科交叉的开放性探索和研究, 在工业智能控制^[22, 23]、城市规划^[24]、航空军事^[25]、医疗康复^[26]、自动驾驶^[27]、智能信息搜索^[28]、无人平台设计^[29]、服务机器人增强^[30]等领域进行了初步的探索和研究, 并且积累了部分学术成果. 混合智能在这些特定领域的潜力为新一代人工智能的研究和发展提供了重要的借鉴和新的方法, 通过将人的作用和认知模型引入人工智能系统形成混合-增强智能新形态是机器智能可行的、重要的成长模式^[31]. 郑南宁等总结了混合智能形态的两种基本形式: 人在回路的混合增强智能和基于认知计算的混合增强智能^[32]. 吴朝晖等则从嵌入式、穿戴式、植入式、非植入式的各种脑机接口的发展运用着眼, 为生物智能和机器智能的深度融合相互连接通道, 建立兼具生物(人类)智能体的环境感知、记忆、推理、学习能力和机器智能体的信息整合、搜索、计算能力的新型混合智能系统^[33]. 通过使脑机结合成为可能, 发展基于脑机结合的混合智能系统, 使得认知在更高层面上得到发展. 《中国科学: 信息科学》在2019年62卷第5期组织出版了“人及混合智能专题”, 全方位展示了人机混合智能技术在系统研发与理论创新

方面的研究现状和挑战^[21]. 从“百度学术”上简单地用论文标题中包含“混合智能”的搜索策略进行搜索, 2015年至今被CSCD和CSSCI数据库收录的公开发表中文学术论文约59篇; 以“hybrid intelligence”为关键词检索, 在Web of Science平台上发现中国大陆学术机构在2015年~2019年期间共发表1774篇国际学术论文, 排在同期全球各个国家和地区同类论文数量的第一位(美国以988篇名列第二). 近些年, 国家自然科学基金委员会(NSFC)陆续资助了一批混合智能系统方向的研究, 例如: 2017年NSFC资助了“国家安全协同应对与辅助决策理论和方法”项目、以及“多源数据融合与人机混合实验驱动的两级电力市场全景式建模与决策理论研究”项目; 2019年NSFC资助了“脑机混合智能”项目. 此外, NSFC还资助了一大批与混合智能系统相关的青年科学基金项目 and 面上项目等. 同时, 国内学者多次召开了与混合智能相关的学术会议. 例如: 2018年8月, 国家自然科学基金委员会信息科学部、中国自动化学会、以及中国认知科学学会联合主办了首届中国认知计算和混合智能学术大会. 2018年9月, 中国自动化学会混合智能专业委员会举办了首期混合增强智能前沿讲习班. 我国高校和科研院所的科研机构 and 团队也相继展开了研究, 如中国科学院、清华大学、北京大学、浙江大学、复旦大学、上海交通大学、天津大学、西安交通大学、国防科技大学、北京航空航天大学等等. 其中, 中国科学院在2015年成立了脑科学与智能技术卓越创新中心, 着力于研制基于类脑计算模型的智能机器人, 研究人机智能协同、学习和交互式智能生长的理论与方法, 构建人机协同的智能生长环境. 2017年, 众多高校、科研机构 and 企业的学者参加了中国科协新观点新学说学术沙龙“人机协同的混合增强智能”. 同时, 国内高新技术企业与学术界也展现了积极合作的良好趋势. 这些共同构成了支持我国混合智能管理系统理论和方法研究的有利条件.

2 主要研究方向及其典型科学问题

2.1 智能机器行为与人机互动机理

随着人工智能、物联网技术和普适计算的快

速发展,传统的计算系统中不断融入社会特征,形成了融合人和智能机器的混合智能管理系统。在混合智能管理系统中,人和机器两类参与者在认知和决策方面具有显著的异质性,机器之间、人机之间、及机器与决策环境之间的互动变得更具高频性、动态性和复杂性。在复杂的人机协同混合智能管理系统中,人可以创造和塑造智能机器行为。反之,机器行为同样可以影响人的行为,可能导致新的社会问题产生。混合智能管理系统在机器行为的特征及演化与人机互动机理等方面,面临一系列重要科学问题亟需研究。

典型科学问题举例:混合智能管理系统中的个体与群体机器行为特征及产生机理;集群机器行为的协同与管理;机器行为的传播和演化规律;融合社会因素的机器行为演化推演方法;混合智能管理系统中人类行为的涌现机理及其变化规律;机器行为对人类行为的影响和塑造及其心理和神经机理;人机之间行为的传导机理等。

2.2 混合智能管理决策的有限理性

在混合智能管理系统中,机器智能在提升效率和改善效果的同时,却带来了人机互动过程中机器行为的不透明性和不可解释性。基于数据驱动学习算法的智能机器容易产生有偏见和歧视的决策,从而违背人类的伦理和价值观。混合智能管理系统在数据、算法和应用等方面存在一定的理性局限性和伦理风险,如算法安全与算法可解释性、隐私保护与个人敏感信息的识别和处理、以及算法歧视与算法滥用等,面临一系列重要科学问题亟需研究。

典型科学问题举例:混合智能管理系统中算法偏见的诊断与纠偏;智能算法的审计机制及智能审计系统;混合智能管理系统中的问责机制和原则;价值原则(人权、福祉、问责、透明、公平等)的嵌入、检测与识别;混合智能管理系统的准确性与公平性权衡;混合智能管理系统的可解释性设计;人机混合系统中伦理风险的识别、评估与消减机制;混合智能管理系统中的虚假信息甄别、监测与治理等。

2.3 混合智能管理组织形态涌现

在混合智能管理系统中,“社会人+机器人”构成了新的人机混合组织形态,这使得组织与外部的边界、组织内部部门之间的边界日趋模糊。这

种新组织形态改变了管理系统中人、智能机器、组织之间的连接方式,改变了组织内部的功能结构和权力结构。混合智能管理系统的应用与发展将颠覆和重塑组织的管理对象、管理方式、管理过程以及组织的外部关系,在组织的结构、功能、有效性等方面,面临一系列重要科学问题亟需研究。

典型科学问题举例:人机混合组织形态的涌现及演化;混合智能管理系统组织的结构、职能、边界的变化;智能机器对组织层次、任务分配、权力分配的影响;混合智能管理系统的组织有效性评估;开放组织的敏捷性提升策略;人机混合组织结构的设计与迭代优化;混合智能管理系统的业务流程和管理过程优化等。

2.4 混合智能驱动的人机合作机制设计

混合智能驱动的管理系统旨在将人类智能和机器智能互相取长补短,构建人机融合共生的合作机制,形成一种新的“1+1>2”的增强型智能管理。在人机协作系统中,人、机、环境三者之间在态、势、感、知等方面相互作用和影响,推动人机混合智能管理系统的结构和功能不断发展和演化。在混合智能管理系统中,混合智能驱动的人机合作机制在人机合作参与者的特征、合作模式,影响合作的内部和外部因素等方面,面临一系列重要科学问题亟需研究。

典型科学问题举例:“人在回路中”的人机合作新模式;人机合作机制中的分工与协作;人机合作中的角色切换机制及触发条件;真实管理环境下人机合作中的正负反馈机制;混合智能管理系统中人机合作的协同演化机理;组织文化及其制度环境对人机合作的影响;机器模型的可解释性对人机合作可信度的影响等。

2.5 面向混合智能的管理信息系统

在互联网、云计算、物联网、人工智能等技术驱动和支撑的混合智能管理系统中,物物互联、人机融合、实时在线、去中心化、资源共享等特征,彻底改变了传统的数据获取和信息处理方式;媒体互动、协同创造、虚拟服务等新型应用模式,拓展了人类创造和利用信息的范围和形式。传统的管理信息系统正处在急剧变革之中,在拓展组织边界、再造组织体系、优化运营策略、服务企业客户、赋能价值创造等方面,面临一系列重要科学问题亟需研究。

典型科学问题举例: 价值创造导向的管理信息系统战略与规划; 开放域多源异构跨模态数据的获取与管理; 新一代智慧管理信息系统的体系架构设计; 开放环境下人机协同的信息系统运行机制; 新一代智慧管理信息系统的设计与迭代优化; 组织中人、信息、以及信息系统的综合治理等。

3 结束语

随着人工智能技术迅猛发展以及在越来越多的行业中前所未有的广泛深入应用, 其所固有的不透明性和复杂性以及人机交互行为的不确定性对人机混合智能系统设计及其管理提出了新的挑

战, 促使在人机合作分析与设计、算法安全、新型人机混合组织形态及其演化等关键问题上做出回应。以人机协同混合智能为特定管理目标的混合智能管理系统, 能够为特定场景的智能化应用提供驱动力和技术支持, 目前正处于萌芽阶段, 相关研究在我国正处于快速起步阶段, 需要探索和研究人机互动机理和机制、新型人机混合组织形态及其演化以及面向混合智能管理的信息系统设计等多个方面, 并聚焦混合智能管理决策有限理性、算法安全以及人类价值原则的算法嵌入。今后需进一步凝练关键科学问题, 规划和推进相关学科攻关团队的培养, 以推动混合智能管理系统理论与方法的进步, 促进混合智能研究及其落地应用不断向前健康发展。

参 考 文 献:

- [1] Rahwan I, Cebrian M, Obradovich N, et al. Machine behaviour[J]. *Nature*, 2019, 568(7753): 477–486.
- [2] Brynjolfsson E, Mitchell T. What can machine learning do? Workforce implications[J]. *Science*, 2017, 358(6370): 1530–1534.
- [3] Goldberg K. Robots and the return to collaborative intelligence[J]. *Nature Machine Intelligence*, 2019, 1(1): 2–4.
- [4] Malone T W, Laubacher R J, Johns T. The age of hyperspecialization[J]. *Harvard Business Review*, 2011, 89(7/8): 56–65.
- [5] Weld D S, Lin C H, Bragg J. Artificial intelligence and collective intelligence[J]. *Handbook of Collective Intelligence*, 2015: 89–114.
- [6] Malone T W, Crowston K, Lee J, et al. Tools for inventing organizations: Toward a handbook of organizational processes [J]. *Management Science*, 1999, 45(3): 425–443.
- [7] Malone T W. *Superminds: The Surprising Power of People and Computers Thinking Together*[M]. New York: Little Brown, 2018.
- [8] Awad E, Dsouza S, Bonnefon J F, et al. Crowdsourcing moral machines[J]. *Communications of the ACM*, 2020, 63(3): 48–55.
- [9] Shirado H, Christakis N A. Locally noisy autonomous agents improve global human coordination in network experiments[J]. *Nature*, 2017, 545(7654): 370–374.
- [10] Crandall J W, Oudah M, Tennom, et al. Cooperating with machines[J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1): 233.
- [11] Köbis N, Bonnefon J F, Rahwan I. Bad machines corrupt good morals[J]. *Nature Human Behaviour*, 2021, 5(6): 679–685.
- [12] Awad E, Dsouza S, Kim R, et al. The moral machine experiment[J]. *Nature*, 2018, 563(7729): 59–64.
- [13] Edmonds M, Gao F, Liu H, et al. A tale of two explanations: Enhancing human trust by explaining robot behavior[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(37): 4663.
- [14] Peeters M M, Van Diggelen J, Van Den Bosch K, et al. Hybrid collective intelligence in a human-AI society[J]. *AI & Society*, 2021, 36(1): 217–238.
- [15] Friedman B, Kahn P H, Borning A, et al. *Value Sensitive Design and Information Systems*[M]. Dordrecht: Springer, 2013.
- [16] Cavoukian A. *Privacy by Design: Leadership, Methods, and Results*[M]. Dordrecht: Springer, 2013.
- [17] Santos J C, Tarrit K, Mirakhorli M. A catalog of security architecture weaknesses[C]. 2017 IEEE International Conference

- on Software Architecture Workshops (ICSAW), 2017: 220–223.
- [18] Johnson M, Bradshaw J M, Feltoich P J, et al. Coactive design: Designing support for interdependence in joint activity [J]. *Journal of Human-Robot Interaction*, 2014, 3(1): 43–69.
- [19] Gunning D, Stefik M, Choi J, et al. XAI: Explainable artificial intelligence[J]. *Science Robotics*, 2019, 4(37): 7120.
- [20] Wu Z, Reddy R, Pan G, et al. The convergence of machine and biological intelligence[J]. *IEEE Intelligent Systems*, 2013, 28(5): 28–43.
- [21] 李智军, 石光明, 杨辰光, 等. 人机混合智能专题简介[J]. *中国科学: 信息科学*, 2019, 49(5): 646–648.
Li Zhijun, Shi Guangming, Yang Chenguang, et al. Special focus on human-robot hybrid intelligence[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2019, 49(5): 646–648. (in Chinese)
- [22] 柴天佑, 丁进良, 王宏, 等. 复杂工业过程运行的混合智能优化控制方法[J]. *自动化学报*, 2008, 34(5): 505–515.
Chai Tianyou, Ding Jinliang, Wang Hong, et al. Hybrid intelligent optimal control method for operation of complex industrial processes[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(5): 505–515. (in Chinese)
- [23] Zhou J, Zhou Y, Wang B, et al. Human-cyber-physical systems (HCPSs) in the context of new-generation intelligent manufacturing[J]. *Engineering*, 2019, 5(4): 624–636.
- [24] 屠李, 赵鹏军, 张超荣, 等. 面向新一代人工智能的城市规划决策系统优化[J]. *城市发展研究*, 2019, 26(1): 60–65.
Tu Li, Zhao Pengjun, Zhang Chaorong, et al. Optimization of urban planning decision system based on the new generation of artificial intelligence[J]. *Urban Development Studies*, 2019, 26(1): 60–65. (in Chinese)
- [25] 邓平煜, 裘旭益, 姚子羽. 航空军事领域的人机混合智能技术[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(10): 3–6.
Deng Pingyu, Qiu Xuyi, Yao Ziyu. Human-machine hybrid intelligence technology in military aviation field[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(10): 3–6. (in Chinese)
- [26] 李光林, 郑悦, 吴新宇, 等. 医疗康复机器人研究进展及趋势[J]. *中国科学院院刊*, 2015, 30(6): 793–802.
Li Guanglin, Zheng Yue, Wu Xinyu, et al. State of the art of medical and rehabilitation robotics and their perspective[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(6): 793–802. (in Chinese)
- [27] Li D, Liu M, Zhao F, et al. Challenges and countermeasures of interaction in autonomous vehicles[J]. *Science China: Information Sciences*, 2019, 62(050201): 1–3.
- [28] 王萌, 王靖婷, 江胤霖, 等. 人机混合的知识图谱主动搜索[J]. *计算机研究与发展*, 2020, 57(12): 2501–2513.
Wang Meng, Wang Jingting, Jiang Yinlin, et al. Hybrid human-machine active search over knowledge graph[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2020, 57(12): 2501–2513. (in Chinese)
- [29] 刘大学, 殷广川, 黄元浩. 基于人机混合智能的无人平台设计[J]. *控制与信息技术*, 2018, (6): 27–31.
Liu Daxue, Yin Guangchuan, Huang Yuanhao. Design of ground unmanned platform based on human-machine hybrid intelligence[J]. *Control and Information Technology*, 2018, (6): 27–31. (in Chinese)
- [30] 付海军, 陈世超, 林懿伦, 等. 人在回路的混合增强智能在 Sawyer 的研究与验证[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(3): 280–286.
Fu Haijun, Chen Shichao, Lin Yilun, et al. Research and validation of human-in-the-loop hybrid-augmented intelligence in Sawyer[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(3): 280–286. (in Chinese)
- [31] 郑南宁. 人工智能新时代[J]. *智能科学与技术学报*, 2019, 1(1): 1–3.
Zheng Nanning. The new era of artificial intelligence[J]. *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*, 2019, 1(1): 1–3. (in Chinese)
- [32] Zheng N N, Liu Z Y, Ren P J, et al. Hybrid-augmented intelligence: Collaboration and cognition[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2017, 18(2): 153–179.
- [33] 吴朝晖. 混合智能: 概念、模型及新进展[J]. *中国计算机学会通讯*, 2017, 13(3): 49–55.
Wu Zhaohui. Cyborg intelligence: Concepts, models and new developments[J]. *Communications of the CCF*, 2017, 13(3): 49–55. (in Chinese)

Hybrid intelligence management system research: Theory and methods

ZHANG Wei¹, ZENG Da-jun^{2, 3, 4}, LI Yi-jun⁵, CHEN Wei-yun⁶, WANG Kan-liang⁷, CHEN Guo-qing⁸, SU Jun⁹, HUANG Li-hua¹⁰, LIU Ye-zheng¹¹, YANG Yan-wu⁶, QIAO Hong^{12, 13}, XU Yang¹⁴, XIONG Xiong¹, LI Lin-jing^{2, 3}, ZHENG Xiao-long^{2, 3}, ZHANG Zhu²

1. College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4. Shenzhen Artificial Intelligence and Data Science Institute (Longhua), Shenzhen 518129, China;
5. School of Economics and Management, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
6. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
7. Business School, Renmin University of China, Beijing 100872, China;
8. School of Economics and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
9. School of Public Policy and Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
10. School of Management, Fudan University, Shanghai 200433, China;
11. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
12. Research Center for Brain-inspired Intelligence, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
13. School of Computer Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
14. School of Computer Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology, Chengdu 611731, China

Abstract: With the rapid development of artificial intelligence and its extensive and in-depth application in many industries, human-machine hybrid intelligent systems have gradually emerged. The hybrid intelligence management system, which takes human-machine collaborative hybrid intelligence as specific management goals, is in its infancy, and has gradually attracted the attention of academia, government departments, and industry. Relevant research is of great significance to the implementation of the strategy of strengthening the country through science and technology. Building on the expert panel discussions concerning the 14th Five-Year Plan of the Management Science Department of the National Natural Science Foundation of China (NSFC), this paper summarizes five promising research directions, worthy of further exploration, in the emerging field of hybrid intelligence management system. For each direction, representative scientific questions are presented, along with their implications.

Key words: machine behaviour; human-machine collaboration; hybrid intelligence