



大型复杂工程智能建造与运维的管理理论和方法

王红卫¹, 钟波涛², 李永奎³, 曾赛星⁴, 袁竞峰⁵, 刘典⁶

1 华中科技大学 管理学院, 武汉 430074

2 华中科技大学 土木与水利工程学院, 武汉 430074

3 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092

4 上海交通大学 安泰经济与管理学院, 上海 200030

5 东南大学 土木工程学院, 南京 211189

6 上海大学 悉尼工商学院, 上海 201800

摘要: 大型复杂工程的复杂性挑战已经成为全球性难题, 以人工智能为代表的数字技术为应对复杂性提供了新机遇。面对智能建造与运维的新趋势, 如何实现管理智能化同步耦合并开拓新的理论和方法, 正成为一个新的重要研究领域。在介绍研究现状和发展趋势的基础上, 分析智能建造与运维的管理变革, 展望建立新情景下工程管理理论和方法面临的典型科学问题, 旨在为数字时代工程管理研究提供方向性参考, 帮助巩固“中国建造”的学术话语体系。

关键词: 大型复杂工程; 智能建造; 智能运维; 管控平台; 价值创造

中图分类号: C931

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1672-0334.2022.01.006

文章编号: 1672-0334(2022)01-0055-05

引言

大型复杂工程的复杂性挑战已经成为全球性难题, 是引发决策乐观偏好“陷阱”和普遍性超投资“绩效悖论”等关键问题的风险根源, 而不断增强的工程技术和工程管理复杂性又进一步加剧了这一挑战。以人工智能为代表的新兴技术为应对复杂性提供了新机遇。正像美国项目管理学会前主席贝格雷先生接受福布斯采访时所说, “人工智能可以弥补重大工程管理的认识鸿沟并有助于寻找全新解决方案”。然而, 人工智能、大数据和物联网等新兴技术的飞速发展给大型复杂工程建造与运维管理带来了新的挑战。

一方面, 工程实体及其建造与运维过程都将出现数字技术的深度融合嵌入, 从而引发管理对象与工程情景的重大内涵和特征变迁, 使重大工程成为工程战略与数字战略深度融合的重要场景和平台; 另一方面, 智能建造与建筑工业化的协同发展将引起决策方式、组织模式和管理流程的变革甚至产

态系统的重塑。因此, 这种全局性或根本性的变革不仅触及大型复杂工程的技术层面, 还深刻影响管理活动形态和人们的理论思维, 从而驱动管理理论和方法的变革与创新。可见, 大型复杂工程智能建造与运维已经成为工程领域的重要趋势, 在建造与运维智能化的同时, 如何实现管理智能化的同步耦合、开拓新的理论和方法正成为一个新的重要研究领域。

工程建造与运维管理重点关注建造与运维活动涉及的人-机-料-法-环五要素, 通过对五要素的监测、分析和控制, 实现高效、安全的建造过程, 交付高质量的工程产品, 提供及时、全面的运维服务。传统模式下, 工程建造以手工加机械施工为主, 工程运维属于事后被动应对, 管理决策依赖的信息需要手动获取且处于“孤岛”状态。与此不同, 智能化模式下, 物联网、云计算和人工智能等技术赋予人员、设备、工程产品一定自主性, 使主动获取信息和共享成为可能, 也因此改变了要素的交互方式和工程参

收稿日期: 2021-10-10 **修返日期:** 2021-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(71732001)

作者简介: 王红卫, 工学博士, 华中科技大学管理学院教授, 研究方向为工程管理、物流与供应链管理、公共安全与应急管理, 主持国家自然科学基金创新群体科学基金项目“管理系统工程”(71821001), E-mail: hwwang@hust.edu.cn

与者的协作方式。一方面,出现基于数字孪生的虚实映射、基于物联网与人工智能的人机共融等新交互场景;另一方面,基于服务主导逻辑的服务化、基于互联网的平台模式潜入工程建造领域,带来资源按需分配、价值共创等新交互方式。

新情景对实现工程建造与运维管理目标提出新的要求,包括:①信息获取与建模:如何从不同要素获取不同尺度的多源异构数据,并进行虚实映射的管理情景建模;②资源分配与协调:如何基于平台的网络效应进行资源按需分配,并在不同参与主体之间进行资源协调和协作,提高资源利用效率和建造过程效率;③安全风险识别与管控:如何借助新兴技术获取复杂现场的安全信息并进行智能分析,识别安全风险并进行主动管控;④运维价值共创:如何运用数字技术将工程实体使用者引入运维过程,实现需求主动识别和响应,提升运维价值。除了面向不同管理目标的科学问题,工程建造与运维的管理决策流程和方式因大数据、人工智能等技术和方法的引入发生变化,需要探索如何应用大数据和人工智能增强传统基于知识和模型的决策方法对复杂性的应对能力。

智能建造与运维已经成为工程行业转型升级的核心。2020年12月举行的中央经济工作会议明确指出:“要大力发展数字经济,加大新型基础设施投资力度”。2020年4月20日国家发展和改革委员会明确指出,新型基础设施包括信息基础设施、融合基础设施和创新基础设施3个方面。在此背景下,利用建筑工业化、数字化和智能化进行升级成为工程行业转型的重大战略。2020年8月,住房和城乡建设部等13部门联合印发了《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》,以推动建筑业高质量发展,打造“中国建造”升级版。

大型复杂工程往往是对经济、社会、环境或科技等产生重大影响的超级工程,在提升中国基础工业、制造业和新兴产业等领域的创新能力和水平,以及加快中国现代化进程方面都具有牵引作用,也是中国集中力量办大事制度优越性的重要体现。重大工程的长周期运维影响范围更广。习近平总书记在出席港珠澳大桥开通仪式上指出:“对港珠澳大桥这样的重大工程,既要高质量建设好,……,又要用好用管好大桥,为粤港澳大湾区建设发挥重要作用”。因此,新兴技术、战略决策和管理行为在大型复杂工程全生命周期的融合会推动工程全生命周期价值链的再造和增值跃迁,从而显著提升工程、企业和产业的数字化转型升级效能,进而实现工程战略和数字战略与国家重大发展战略的高度契合。

1 国内外研究现状和发展态势

利用新兴技术提升大型复杂工程建造与运维的管理水平已经成为全球的发展趋势。2017年12月麦肯锡发布报告《Reinventing construction: through a productivity revolution》,认为数字技术和先进自动化是建

造行业迈向更高生产力未来的重要途径。2018年12月英国土木工程师协会发布报告《Blockchain technology in the construction industry: digital transformation for high productivity》,认为区块链能对症下药解决工程供应链复杂等“痛点”问题。2019年5月美国土木工程师学会发布报告《Future world vision: infrastructure reimagined》,认为可视化技术、设计和建造自动化等新兴技术的进步将影响设计和建造领域,形成新的更大、更复杂的“未来场景”系统。2019年在加拿大召开的第七届重大工程管理国际论坛的主题为“人工智能、复杂性与重大工程”。2020年6月麦肯锡发布了报告《The next normal in construction》,认为高度复杂、分散、基于项目的建造过程将转变为一个更加标准化、更统一和更集成化的生产过程,价值链也将重塑。2020年9月国际项目管理学会联合普华永道发布研究报告《Impact of artificial intelligence AI on project management》,认为人工智能在项目生产力、决策和绩效提升方面具有重要价值。英国UCL大学、英国项目管理协会和奥雅纳联合发布研究报告《The future of project management》,认为虚拟团队、自动化和人机协同、数字化施工等是未来的发展趋势,并认为2045年前后智能算法将超过专家判断。美国大型工程公司Fluor与IBM Watson合作,开发新的人工智能工具,以提高重大工程的决策和实施控制能力。

伴随这种趋势,人工智能技术驱动的建造工程与管理研究迎来爆发式增长^[1],仅2020年前6个月就发表了528篇论文。研究主要围绕规划、施工和运维3个阶段的活动展开,涉及知识表达与推理、计算机视觉、自然语言处理和流程挖掘等AI方法和技术的应用^[2]。例如,基于贝叶斯网络的项目风险建模、分析和诊断^[3],基于图像的结构健康监测和施工现场监测^[4-5],基于施工安全报告的事故分析和预防^[6],以及基于BIM日志的设计流程分析^[7]等。随着区块链技术和数字孪生概念的兴起,学者们开始探索区块链在工程质量追溯^[8]和建筑工程管理^[9]上的可能性,并对基于BIM的建造数字孪生系统^[10]展开研究。此外,互联网平台的信息汇聚和共享能力也引起学者的关注,在促进工程项目电子采购^[11]和协同管理^[12]方面起重要作用。

总体而言,人工智能、区块链等数字技术在工程建造与运维领域被广泛关注,相关应用研究也如火如荼,极大地推动了建造领域的数字化转型。随着数字化转型的进一步深入,越来越多的数字技术被应用到建筑产品的全生命周期,引起管理模式和方法的变革,产生新的研究焦点。

2 中国发展基础和优势

中国是工程大国,一系列重大工程夯实了现代化强国基础,大型复杂工程的投资建设规模在全球首屈一指。在未来新发展格局下,重大工程仍会在中国经济社会发展中占据重要地位。中共中央政治局常务委员会2020年2月12日召开会议,认为“要积极

扩大内需等,加快推动建设一批重大项目”。在新型基础设施领域,初步估计投资将达40万亿人民币以上。因此,中国的大型复杂工程市场规模十分巨大,这为智能建造与运维管理提供了场景驱动和数据样本优势。

在理论发展方面,经过国家自然科学基金委员会“十三五”重大项目等基础研究的系列支撑,中国在重大工程管理理论研究领域取得了很大进步,初步构建了源于中国情景的重大工程管理基础理论和学术话语体系,发展成为国际上重要“一极”,取得了工程管理从“照着讲”到“接着讲”的阶段性成果^[13]。据中国知网统计,2014年以后重大工程管理领域发表的中文学术论文迅速增加,占中国知网上检索到的该领域全部论文的90%以上;根据Web of Science统计,2019年以后中国学者在该领域的发文数量开始超越美国,排名世界第一。中国学者在该领域正处于树立国际话语权的重要历史机遇期。

综合上述两方面,中国新型基础设施建设需求为大型复杂项目建造与运维智能化升级提供了驱动力,而中国工程管理领域的学者在重大工程领域已经具备一定话语权,为建造与运维智能化方法创新奠定了坚实基础。然而,大型复杂工程建造与运维智能化转型尚处于发展中,其面对的管理问题还没有得到很好的研究。本研究认为需要针对大型复杂工程建造与运维智能化的管理问题展开深入研究,形成有中国特色的创新理论和方法,以建立领先的学术话语权,并为大型复杂工程的可持续发展保驾护航。

3 主要研究方向和典型科学问题

以物联网、云计算、人工智能为代表的数字技术改变了信息获取、处理、传递和分析的方式,形成数据驱动的智能化管理特征,其应用将带来建造方式、组织模式和管理范式的变化。与传统手工加机械的建造方式不同,在工业化和数字技术赋能下,建造与运维过程向智能化转变,导致建造与运维活动、资源、参与者等管理对象在感知形式、交互方式和控制手段

等方面都发生改变,以前的管理逻辑不再适用,需要针对管理对象和情景的变化发掘新的管理逻辑。智能化情景下,大型复杂项目建造与运维表现出边界模糊、虚实融合、不确定加深、质量安全风险增高、运维价值突出等特征,在新的管理逻辑下,如何实现建造与运维过程的资源协调、风险管控、价值增值成为重要的管理问题。

具体而言,物理实体与数字信息的紧密融合使建造与运维的平台化运作成为可能,平台在提供资源聚集和信息共享便利性的同时,也带来资源如何配置、信息如何利用的问题,尤其是实时信息获取和共享对于不确定下的管理决策、质量安全风险管控、运维价值增值的影响重大。因此,应该在研究面向工程建造与运维的平台理论和方法基础上,分别针对数字化对不确定管理决策、质量安全风险管控、运维价值增值展开深入探究,这些研究方向之间的逻辑关系见图1。

3.1 智能建造与运维的基本管理原理

随着新技术的不断发展,智能建造将推动建筑行业向工业化、智能化和平台化演变。一方面,智能建造通过人工智能、大数据、物联网等新兴技术实现数字化设计、建造和运维,有限地模糊了复杂工程传统设计、建造和运维等多阶段的边界,突破性地变革了现有建造模式;另一方面,多维数字化建模和仿真技术重新定义了工程产品,基于物联网技术的智能工地和全产业链融合也改变了传统的工程复杂性特征。此外,工程设计和施工阶段产生的海量数据以及智能化工程装备对工程管理模式和工程模块化管理提出新的挑战。由此可见,智能建造技术对大型复杂工程管理提出新的科学技术问题,亟须相应的智能建造管理理论和方法。

典型科学问题举例:智能建造管理的基础理论和方法,智能建造的工程复杂性及其参数化特性,智能建造的工程管理模式变革和管理创新体系,智能建造和工程模块化管理,工程信息化的多尺度动态管理,智能建造系统的监测及可靠性原理,基于智能建造的工程全生命周期管理体系等。

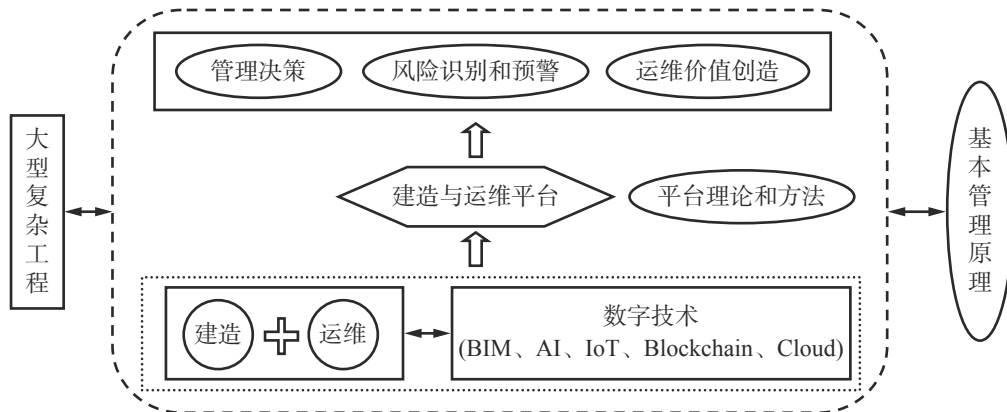


图1 研究方向逻辑关系

Figure 1 Logical Relationship of Research Directions

3.2 大型复杂工程智能建造与运维平台理论和方法

随着数字化和智能化时代的到来,工程建造领域也在发生深刻管理变革。一方面,工程建造行业正在从以工程产品为中心的项目实施向以客户需求为中心的服务提供转变;另一方面,工程建造也在实施数字生态系统支撑下的工程产品交付和商业过程数字化转型。因此,集工程建造与运维于一体的管控平台不断涌现。对于大型复杂工程,由于涉及的技术复杂、施工环境复杂且相关主体多,构建的管控平台是建立在以互联网(数据信息互联)和物联网(感知控制互联)为基础的物联网环境下,实现了与工程相关的人机物的智能互联,其本质是人工智能与物联网深度结合。这类新型管控平台给工程建造与运维的资源分配、协同运作等带来了许多科学问题。

典型科学问题举例:异构资源网络的建模和分析,异构资源网络的智能合约和工程质量安全责任追溯机制,基于物联网的协同认知方法,面向工程建造与运维的多方(公众)参与机制、信任机理和协同策略,基于知识的人机物资源协同和调度理论方法,面向人机协同的工程施工智能规划方法,人机共融的工程建造与运维的主动管理与决策的理论和方法。

3.3 大型复杂工程智能建造与运维管理决策

大型复杂工程在建造与运维中面临海量复杂异构数据的产生和获取、工程与环境耦合系统的生成和功能涌现、多参与主体行为的复杂性和动态演变等现实难题,决策者需要在深度不确定性下做出具备全局适应性的决策方案。

典型科学问题举例:大型复杂工程建造与运维全景式感知系统构建,大规模复杂异构数据规范化智能处理方法,基于人工智能分析的管理决策结果与决策要素的关联和因果关系,面向场景建模的决策方案多尺度演化机理和知识发现,虚实融合的情景智能校验方法,外部数据驱动和内部算法优化的决策方案敏感性增强方法,大型复杂工程建造与运维智能决策的人机交互机制,融合多主体行为复杂性的人工智能决策算法进化。

3.4 大型复杂工程建造与运维风险识别和预警

工程建造是一个复杂的人-机-环系统工程。施工现场环境复杂,建造过程中质量安全风险高。智能建造与运维的兴起从根本上将质量安全风险管理的被动事后把关转变为主动过程控制,智能工地质量安全风险监控旨在构建一套信息(虚拟)空间与物理(实体)空间之间的闭环复杂系统,实现施工过程的质量安全风险泛在感知、实时分析和智能控制,并为运维提供支撑。同时,建造运维一体化需要发展数据驱动的工程运维风险智能识别和预警,增强工程服务的韧性和可靠性。上述两方面需求为大型复杂工程的风险管理提出了新的挑战。

典型科学问题举例:面向工地安全的工程物联网异构网络融合理论和方法,面向风险识别的复杂工地环境下多模态异构无线感知数据的智能融合模型,数字孪生工程系统风险多维度量化评价模型和新方

法,面向多样化施工场景的工程建造安全风险预警迁移模型,大型复杂工程风险耦合机理和风险链传播机制,人机共融的工程安全多主体信任机理和不安行为多元共治机制,复杂工程系统功能恢复机理以及韧性自适应性循环机制。

3.5 大型复杂工程智能运维价值创造

随着智能建造的发展,工程运维正走向基于数字孪生的智慧运维阶段。基于工程实体+数字实体的数字孪生系统,智慧运维表现为实时智能感知工程系统的状态,基于感知的数据进行工程系统健康和性能智慧评估并智能决策。如何充分挖掘工程数据的价值为智慧运维各功能服务、支持面向运维的智能决策成为一个重要的研究问题。同时,传统运维对象由单纯工程实体转变为工程实体+感知装置+数字孪生体的三元统一体,增加了运维对象本身的复杂性;数字孪生体形成于智能建造生命周期各阶段,由不同主体贡献,作为工程系统的新呈现,其本身的运维和治理成为一个重要新问题。此外,工程运维也在向服务化发展,包括面向运维的服务和基于服务的运维。工程运维服务涌现的新形态和新模式需要理论上的探索,服务各方价值需要整合、利益需要协调,对各方服务能力和服务质量需要有针对性评价。

典型科学问题举例:工程数字孪生的价值链构建、价值分配和激励机制,工程数据资产全生命演化路径、系统动力学和治理机制,典型运维场景的数据服务价值挖掘和决策,数字孪生环境下工程健康诊断和预测性维护,工程运维增值服务新形态和新模式,工程运维服务能力和质量评价模型。

4 结束语

数字技术驱使工程建造与运维向智能化方向发展,引起了工程管理情景和范式的变革。本研究针对大型复杂工程智能建造与运维管理,在介绍研究现状和发展态势基础上,提出未来研究方向的建议,给出典型科学问题举例,为数字时代的工程管理研究提供参考。智能建造与运维管理研究尚处于起步阶段,未来仍然需要广大学者发挥远见卓识,为进一步巩固中国工程管理学术话语体系贡献力量。

致谢:

特别感谢丁荣贵、方东平、刘和福、刘炳胜、余玉刚、陈勇强、郑圣明、盛昭瀚等专家提出的宝贵意见。

参考文献:

- [1] DARKO A, CHAN A P C, ADABRE M A, et al. Artificial intelligence in the AEC industry: scientometric analysis and visualization of research activities. *Automation in Construction*, 2020, 112: 103081-1-103081-19.
- [2] PAN Y, ZHANG L M. Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: a critical review and future trends. *Automation in Construction*, 2021, 122: 103517-1-103517-

- 21.
- [3] WU X G, LIU H T, ZHANG L M, et al. A dynamic bayesian network based approach to safety decision support in tunnel construction. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015, 134: 157–168.
- [4] SPENCER B F, Jr, HOSKERE V, NARAZAKI Y. Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring. *Engineering*, 2019, 5(2): 199–222.
- [5] FANG W L, DING L Y, LOVE P E D, et al. Computer vision applications in construction safety assurance. *Automation in Construction*, 2020, 110: 103013-1–103013-10.
- [6] ZHONG B T, PAN X, LOVE P E D, et al. Hazard analysis: a deep learning and text mining framework for accident prevention. *Advanced Engineering Informatics*, 2020, 46: 101152-1–101152-12.
- [7] PAN Y, ZHANG L M. BIM log mining: learning and predicting design commands. *Automation in Construction*, 2020, 112: 103107-1–103107-15.
- [8] ZHANG Z Y, YUAN Z M, NI G D, et al. The quality traceability system for prefabricated buildings using blockchain: an integrated framework. *Frontiers of Engineering Management*, 2020, 7(4): 528–546.
- [9] LI J, GREENWOOD D, KASSEM M. Blockchain in the built environment and construction industry: a systematic review, conceptual models and practical use cases. *Automation in Construction*, 2019, 102: 288–307.
- [10] PAN Y, ZHANG L M. A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. *Automation in Construction*, 2021, 124: 103564-1–103564-15.
- [11] GRILO A, JARDIM-GONCALVES R. Cloud-marketplaces: distributed e-procurement for the AEC sector. *Advanced Engineering Informatics*, 2013, 27(2): 160–172.
- [12] XU G Y, LI M, CHEN C H, et al. Cloud asset-enabled integrated IoT platform for lean prefabricated construction. *Automation in Construction*, 2018, 93: 123–134.
- [13] 盛昭瀚, 薛小龙, 安实. 构建中国特色重大工程管理理论体系与话语体系. *管理世界*, 2019, 35(4): 2–16, 51.
SHENG Zhaohan, XUE Xiaolong, AN Shi. Constructing theoretical system and discourse system of mega infrastructure construction management with Chinese characteristics. *Journal of Management World*, 2019, 35(4): 2–16, 51.

Management Theory and Method of Intelligent Construction, Operation and Maintenance for Large-scale Complex Projects

WANG Hongwei¹, ZHONG Botao², LI Yongkui³, ZENG Saixing⁴, YUAN Jingfeng⁵, LIU Dian⁶

1 School of Management, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China

2 School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China

3 School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China

4 Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China

5 School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China

6 SILC Business School, Shanghai University, Shanghai 201800, China

Abstract: The complexity of large-scale complex projects has become a global challenge, and digital technologies represented by artificial intelligence provide new opportunities for dealing with the complexity. Facing the new trend of intelligent construction and operation and maintenance, how to realize the synchronization and coupling of management intelligence and explore new theories and methods is emerging as a new important research field. After introducing the research status and development trends, this study analyzes the management reform of intelligent construction and operation and maintenance, and outlooks the typical scientific problems faced by the establishment of engineering management theories and methods under the new scenarios. This study aims to provide a directional reference for engineering management research in the digital age and help consolidate the academic discourse system of “built in China”.

Keywords: large-scale complex projects; intelligent construction; intelligent operation and maintenance; control platform; value creation

Received Date: October 10th, 2021 **Accepted Date:** December 20th, 2021

Funded Project: Supported by the National Natural Science Foundation of China (71732001)

Biography: WANG Hongwei, doctor in engineering, is a professor in the School of Management at Huazhong University of Science & Technology. His research interests cover engineering management, logistics and supply chain management, public safety and emergency management. He is the principal investigator for the research project titled “Management systems engineering”, supported by the National Natural Science Foundation of China (71821001). E-mail: hwwang@hust.edu.cn □