

· 科学论坛 ·

建筑与基础设施全寿命周期智能化的研究 现状及关键科学问题*

杨 静¹ 李大鹏^{1**} 岳清瑞² 曾 滨³ 刘晓刚³ 樊健生⁴

1. 国家自然科学基金委员会 工程与材料科学部, 北京 100085
2. 北京科技大学 城镇化与城市安全研究院, 北京 100083
3. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088
4. 清华大学 土木工程系, 北京 100084

[摘要] 第266期双清论坛“建筑与基础设施全寿命周期智能化前沿理论与方法”围绕土木工程智能化的研究现状、发展趋势及面临的挑战进行了深入研讨,与会专家一致认为:加强工程科学与信息科学的交叉融合,对于促进建筑与基础设施全寿命周期智能化转型升级,促进工程运维管理体系创新以及大数据分析人工智能技术新突破均具有重要意义,是国际土木工程领域的最新前沿之一。论坛主要从以下4个方面,凝练了建筑与基础设施全寿命周期智能化的关键科学问题和主要研究内容:(1) 智能设计、智能材料与智能结构;(2) 智能建造;(3) 智能诊治和运维;(4) 全寿命周期数据与智能管控平台。通过人工智能等新一代信息技术与土木工程学科的深度交叉融合,建筑与基础设施全寿命周期智能化的研究必将助推我国土木工程向绿色化、长寿化、智能化发展,全面提升土木工程建造运维品质,并推动经济社会的高质量、可持续发展。

[关键词] 建筑与基础设施;全寿命周期;智能设计与智能结构;智能建造;智能诊治与运维;智能管控平台

2020年11月6~7日,第266期双清论坛“建筑与基础设施全寿命周期智能化前沿理论与方法”在北京召开,论坛由国家自然科学基金委员会(以下简称“自然科学基金委”)工程与材料科学部、信息科学部、管理科学部和政策局共同主办,中冶建筑研究总院有限公司承办。论坛主席由中冶建筑研究总院有限公司岳清瑞院士、清华大学聂建国院士和华中科技大学丁烈云院士共同担任。来自国内土木工程、信息科学、工程管理等多个学科领域的近30所高校与科研院所的40余位专家学者,以及工程与材料科学部、信息科学部、管理科学部和政策局的相关人员参加了本次论坛。论坛期间,与会专家围绕“建筑与基础设施全寿命周期智能化前沿理论与方法”主题,讨论了智能设计与智能材料和结构、智能建造、智能诊断和运维、智能化数据与平台等领域的关键基础



李大鹏 博士,研究员。现任国家自然科学基金委员会工程与材料科学部工程科学五处处长,主要从事科学基金管理工作。主要研究领域:市政工程与环境工程。曾获国家科技进步奖二等奖。



杨静 博士,研究员。现任国家自然科学基金委员会工程与材料科学部工程科学三处环境工程项目主任,主要从事科学基金管理工作,围绕科学基金资助项目管理、学科发展战略规划和政策研究有较好积累。主要研究领域:结构工程。曾获中国煤炭工业科学技术奖二等奖。

科学问题和国内外研究现状,分析和凝练了建筑与

收稿日期:2021-04-18;修回日期:2021-05-21

* 本文根据第266期“双清论坛”的研讨整理。

**通信作者,Email: lidp@nsfc.gov.cn

基础设施全寿命周期智能化发展的总体思路和主要研究方向,提出今后 5~10 年的重点研究内容和亟待解决的关键科学问题。

1 建筑与基础设施智能化发展背景

从劳动力数量、财富总量、资源消耗量等角度看,土木工程都是全球范围内的最大行业之一。但长久以来,我国建筑业与基础设施建设的生产率在所有第二产业中都处于较低水平,同时传统的劳动密集型产业在安全、成本、质量和资源能源消耗等方面也存在很多劣势^[1]。当今时代人类正面临着资源耗竭和生态环境恶化的严峻挑战,我国在快速城市化的发展过程中资源瓶颈危机已经日益凸显。目前,从粗放式大拆大建到精细化建造、运维和功能提升的理念变革,已经成为当前我国城市可持续发展面临的重大挑战和战略需求^[2]。随着我国劳动力价格的不断增加,传统建筑业的人口红利将不再延续,土木工程行业亟待转型升级。因此,大力推行新型建筑工业化和智能建造,实现建筑业绿色、高质量、可持续发展具有重要且迫切的现实意义^[3]。

改革开放 40 余年来,我国城市建设高速发展,建筑与基础设施保有量不断攀升,目前已进入新建与维护并重的阶段,并且将逐渐过渡到以存量为主的发展阶段^[4]。虽然我国城镇化和基础设施建设成绩举世瞩目^[5,6],但在以往高速建设发展的过程中,受技术力量不足、建设周期过快、监管不到位、运营管理不足等因素影响,城市建筑与基础设施普遍存在不同程度的安全风险;随着时间的推移基础设施性能仍将持续劣化,安全性和使用功能不足的问题将日益凸显^[7,8]。

在由大规模建设向精细化建造、运维与提升转型的背景下,我国城市发展理念也在逐渐转型升级。伴随着生活水平的提升,更加宜居、便捷、安全的城市生活已成为人民的新追求。党的十九大报告指出,“我国社会的主要矛盾已经转化为人民日益增长的美好生活需要和不平衡不充分的发展之间的矛盾”。城市建筑和基础设施承载着为人民提供良好生活环境和良好公共服务的功能,其品质直接影响到人民群众能否获得“美好生活”的幸福感。当前我国已进入新型城镇化时代^[9],但城市建筑与基础设施在综合功能、运行效率、使用品质、治理和管理手段等方面依然存在诸多问题。随着城市规模的持续扩大,受制于技术水平和管理体系不足,城市建筑与基础设施的运维面临的一系列矛盾日益突出。地

震、台风、暴雨、火灾等灾害给城市带来的损失日益严重,交通拥堵、环境污染等问题给城市运行效率和人民生活带来的困扰日益加剧,近期爆发的新型冠状病毒肺炎等恶性传染病疫给人民生命安全带来的威胁和对城市应急管理能力提出的挑战也日益突出,现有城市运维管理体系与政府管理部门为满足人民对美好生活向往所需要提供的服务之间的矛盾日益凸显。因而,加快建设高效、便捷的城市建筑与基础设施智能化诊断和运维技术体系与管理平台的需求十分迫切,这对于保障城市高品质、可持续发展具有重要战略意义。

当前,以物联网、大数据、云计算、人工智能、机器人等为代表的自动化、信息化、智能化技术快速发展,为解决上述问题和挑战带来了新的契机^[10-12]。在信息化和智能化发展的大背景下,智能化也必将成为土木工程未来发展的重要方向。通过将传统建筑与土木工程技术和智能设备、机器人等装备以及物联网、5G、大数据、云计算、人工智能等先进技术进行深度交叉融合,将带来建筑与基础设施全寿命周期智能化革命,并在经济、社会、自然等方面产生积极的影响,大幅提高劳动生产率,全面提升建造运维品质,显著增强建筑与基础设施的安全性和韧性,促进人与自然和谐共生及资源持续高效利用,实现土木工程的“可持续、高品质、绿色化和智能化”。

总体而言,建筑与基础设施全寿命周期智能化是指在规划设计、建造、服役运维、拆除和资源化利用全寿命周期内,实现智能化基础信息感知、性态分析和识别、性能评价、预测和控制。实现建筑与基础设施性态信息可感知、真实性态可评价、未来性能可预测、性能可控制和提升是土木工程行业未来发展的需求,是适应新时代建筑与基础设施建造、运维、拆除和资源再利用全寿命周期智能化理念的重大变革,也是跨越式提升土木工程行业智能化水平的必由选择。当前,我国建筑与基础设施智能化发展方兴未艾。因此,深入总结我国建筑与基础设施全寿命周期智能化发展的现状和面临的挑战,分析未来发展的总体思路、主要研究方向,凝练亟待解决的关键科学问题,对于推进建筑业智能化转型升级,实现建筑与基础设施绿色化、长寿化、智能化和推动经济社会可持续发展具有十分重大的深远意义。本文将主要针对全寿命周期内的设计、建造、服役运维这几个关键环节进行分析研究。

2 研究现状、成果与挑战

2.1 智能设计、智能材料与智能结构

以人为本、绿色发展和高质量发展已经成为建筑业转型升级的新理念,推进以人为核心的新型城镇化已经成为建筑业发展的新目标。在工业 4.0 加速发展的大背景下,未来针对用户需求的个性化建筑产品业态可能诞生,而智能设计则成为应对个性化、多样化需求的关键。智能设计的实现需要新一代信息技术、人工智能技术和土木工程的物理内涵深度交叉融合,以智能化技术代替人类完成复杂设计工作。

传统人工设计是人的主观决策思维过程,依赖人的智能搜索可行目标,基于人的观察和认知进行迭代,在确定的建筑造型约束基础上改变设计参数,寻求最佳的性能结果。早期的智能化设计更多是人工辅助的自动化建筑设计,基于专家经验或传统机器学习模型,完成混凝土板等简单构件设计。

近期参数化的生成式设计是一种基于生成规则和拓扑优化理论^[13, 14],自动寻求最佳性能结果和布置形式的智能设计方法。生成规则包括物理方法、数值方法或图形语言法等,拓扑优化方法包括模拟退火算法、遗传算法、蒙特卡洛搜索树算法等基于启发式搜索的算法,通过设置强度、刚度、稳定性、场地等约束条件,实现结构重量、美观性、施工便捷性等目标函数的最优解。但是,基于拓扑优化的生成式设计方法效率较低,只能实现设计场景和结构形式较为简单的智能化设计,难以应对真实建筑与基础设施智能化设计所需要的复杂约束条件下的多目标、多任务优化需求。

深度学习和基于拓扑优化的生成式设计的融合可能是智能设计未来发展方向之一^[15-17]。通过知识图谱构建、深度学习、强化学习等给予计算机归纳推理和认知推理能力,综合海量信息与人类知识建立起计算机强大的感知能力和灵活学习能力,是近期的发展趋势之一。当前,机器学习已具备从数据中学习、推理和决策的能力,但如何刻画建筑设计的本质需求,让计算机理解人的设计内核,仍然是人工智能方法面临的巨大挑战。

总体上,当前建筑和基础设施智能设计的发展尚处于初级阶段,人机协同的智能化和拓扑优化已具备一定基础,亟需突破人机高度协同的智能化设计理论与方法以及多任务、多目标的智能优化理论。但更进一步,智能设计如何使机器完全智能化地实

现人的需求,输出建筑与结构,实现美学与力学融合,还面临诸多挑战,包括:(1)“形—力耦合”的高效智能设计生形算法;(2)融入工程逻辑的多目标优化和解空间高效搜索优化算法;(3)基于知识图谱构建策略的建筑美观性数学模型,力学、美学融合的智能设计方法和模型。

全生命周期设计—建造—运维新理念的实现基础是具备智能化特征与能力的新型高性能结构体系,因此也对智能材料和智能结构体系的发展提出了新要求。智能结构的基本特征是自感知、自决策、自适应、自修复,应具备自主感知和自主调整控制能力。其中,自感知可以通过智能材料或感知装备实现。当前智能材料的发展包括压电材料、形状记忆材料、光导纤维、电(磁)流变液、磁致伸缩材料和智能高分子材料等,但如何集成和输出感知信号依然面临巨大困难。并且,在结构体系层面,具备自主控制能力的结构尚不成熟,智能结构体系的服役全过程工作机理、自主控制理论和设计理论也有待深入研究。总体上,智能材料与智能结构目前基础薄弱,智能材料的感知理论和技术及智能结构的理论体系有待建立。

2.2 智能建造

智能建造是在新一轮科技革命大背景下,智能技术与工程建造系统融合形成的工程建造新模式,即利用现代信息和智能技术,通过规范化建模、全要素感知、网络化分享、可视化认知、普适性计算、智能化决策,以及人机智能共融,实现数字链驱动下的工程项目设计、构配件制造、现场安装、以及运维服务的一体化协同,进而促进工程价值链提升和产业变革,其目标是为用户提供以人为本、绿色高质量的智能化工程产品与服务。

在构配件生产制造阶段,目前已经实现了信息化技术的广泛应用,并大幅度提升了自动化水平和生产效率,如混凝土构件的钢筋自动化加工、3D 打印构件、机器人焊接和简单钢构件的自动化生产等^[18-21]。在构配件质量验收阶段,也发展了基于数字图像等方法的自动化产品缺陷检测技术。但是,这距离真正的智能建造尚远。其根源是,目前的建筑结构体系和建造工艺流程并不适合智能建造技术的应用,实现智能建造还需要首先推动新型工业化建筑结构体系的革新。

在现场安装阶段,智能化技术和建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)的融合已经初步实现了物料和构配件的进场调度、进场检验、简

单的安装质量复核等工作^[22]。并且,在智慧工地和安全管理方面,也实现了初步的智能化建造安全管理和预警,如现场人工作业、机械设备等要素的安全预警^[23, 24],但仍局限于简单的应用场景,真实复杂工地场景的动态识别理论和安全预警方法还有待深入研究。

智能建造是人工智能、工程科学技术和建造装备的高度融合,其关键和难点是安装现场智能化,基础科学问题包括泛在感知、现场智能实时解析、人机环结构共融的控制决策理论。具体而言,泛在感知需要实现动态场景的全要素信息感知、多源异构传感的组网和融合,面临的挑战包括:(1) 复杂环境下传感网络自适应调控机理;(2) 多源异构传感器及传输网络的柔性组网技术、融合感知方法;(3) 不完备信息条件下空间的感知与表征方法。智能实时解析需要实现海量异构数据实时解析、计算分析、决策,面临的挑战包括:(1) 多元异构数据的融合挖掘;(2) 基于深度学习的复杂场景安全风险识别与灾变演化预测;(3) 数理融合驱动的智能分析方法。人机环结构共融的控制决策理论面临的挑战包括:(1) 复杂工地场景下人机协同控制方法;(2) 智能化工程机械作业控制决策方法;(3) 质量动态评估和作业优化调控理论与算法。

2.3 智能诊治与运维

当前,如何保障海量建筑和基础设施高效服役运营成为行业亟需解决的关键问题^[25],传统以人工为主的工程诊治和运维技术面临巨大瓶颈,因而建筑和基础设施智能化诊治和运维技术需求日益迫切^[26, 27]。

智能诊治和运维从技术流程可以分为信息感知、分析识别、评价、预测与控制四个主要环节,面临的场景既包括建筑、桥梁、公路、铁路等各类基础设施的主体结构与配套功能性附属构件,也包括复杂的环境、人流、物流等各种要素。目前,信息化技术在诊治和运维领域已经得到广泛应用,并且实现了简单场景下的智能化诊治和运维,如基于三维扫描的隧道结构变形识别预警^[28]、基于视觉模型的地下结构渗漏识别预警^[29]、基于无人机的桥梁裂缝等健康状态识别^[30-33]、基于深度学习和视觉模型的滑坡隐患识别预警^[34]、基于三维重建的钢结构变形识别系统^[35]、基于计算机视觉的位移振动监测和模态参数识别^[36, 37]等。但是,如何让机器代替专家认知建筑与基础设施性能,并对其性能做出评价、预测与控制仍然是核心瓶颈,如基础设施综合安全性能评价、

灾害性能评估等。

在信息感知方面,目前的研究基础相对较好,已取得系列创新成果,并在大型工程结构中实现了应用,推动了智能诊治和运维技术的发展。例如,各类光电感知装备、新型感知材料、感知数据传输装备等。但是,当前的感知理论与方法只解决了部分场景的性态感知问题,要实现建筑与基础设施各类性态和环境要素的全息感知,面临着海量多源、异构、不完备数据多维度全息感知的技术挑战,还需要进一步完善相应要素的感知理论、方法及设备。并且,从经济性角度考量,如何进行感知设备的优化配置,如何解决感知信息不完备问题,也需要进一步研究。

在智能性态识别方面,需要通过感知信息对建筑与基础设施的功能性指标实现智能分析和识别。当前基于视觉模型的智能识别发展较快^[38, 39],但在识别效率和精度方面也还有待进一步提升,高效识别算法还需进一步完善。并且,结构的物理、力学等各类复杂性态的专业化识别理论和方法,很多还不成熟甚至是空白,智能识别技术的实现任重而道远。面临的挑战包括:(1) 基于大数据、数据分析与挖掘、深度学习、数理融合等理论的智能认知模型和识别方法;(2) 基于多源数据协同感知和数据推理的不完备缺失信息的结构性态推演和动态感知方法。

在智能性能评价方面,需要通过基础设施性态感知和识别数据,对其服役性能和安全风险做出评价。目前已经实现了部分性能指标的智能化评价^[40, 41]。基于大数据分析和专家经验等方法,已经可以实现桥梁结构、空间结构的内力、变形、振动特性等性能的智能评价。但是,建筑和基础设施的性能指标类型很多,其他很多性能指标的智能评价方法仍然有待建立。并且,综合考虑各类性能指标耦合影响的建筑与基础设施综合服役状态智能化评价理论体系仍有待发展。同时,单纯基于大数据和专家经验的智能评价方法,仅是简单的知识和数据耦合驱动的智能评价方法的应用,还有很大的局限性。未来,如何进一步深化基于大数据分析的数据特征与经验知识耦合驱动的智能性能评价方法^[42],发展数据分析挖掘和智能模型分析耦合驱动的数理模型融合智能化性能评价方法,建立信息不完备条件下考虑局部特征和物理约束的基于机器学习技术的智能评估新方法,都是面临的重大挑战。

在智能化性态演变和未来性能预测方面,需要基于信息感知、识别和评价结果,考虑全寿命周期服役性能时变演化历程,对基础设施的服役性能进行

预测与控制,这方面目前研究很少。面临的挑战包括:(1)考虑不确定性因素,基于数据挖掘、认知推理、知识融合或数理模型融合的性态指标演变和服役性能预测理论与方法;(2)建筑与基础设施智能维护与性能提升理论与方法。

2.4 全寿命周期数据与智能管控平台

在大数据、超级计算和人工智能快速发展的背景下,建筑技术的发展日新月异。大数据、人工智能等技术的发展为建筑与基础设施的智能化服役性态识别和性能评价预测提供了新手段。同时,建筑和基础设施智能化也对大数据和人工智能理论与方法提出了新需求。

大数据技术自2011年以来快速发展,社会治理需求牵引了大数据分析和大数据智能的蓬勃发展,并在网络空间开源情报分析、金融风险监测、全源导航定位等领域实现了应用。然而,近年来大数据分析和大数据智能已面临缺少新的增长点的困境,亟需再思考、再起航。目前基于数据驱动的和超级计算支撑的大数据人工智能已经面临发展瓶颈,在行业应用需求和行业大数据之间存在鸿沟,亟需大数据分析方面的技术新突破。

建筑与基础设施全寿命周期运行数据具有海量、多源异构、不完备、数据有效性不明确、关联性不一致等特征,对数据的管理、数据与模型融合、数据分析和挖掘等带来挑战^[43],包括:全寿命期数字孪生模型和智能化建模;多源异构数据的融合和数据管理标准;基于问题与场景的多源异构数据动态关联与一致性表达方法;跨域数据关联方法;数据不确定性和有效性识别方法;数据轻量化处理方法;基于多源数据协同的缺失数据推演方法;高维数据时空关联方法;数据挖掘、知识组织抽取和认知推理方法;数据安全和共享方法。

同时,当前行业大数据中“数据孤岛”现象依然突出,行业应用需求和行业大数据之间存在鸿沟,建筑和基础设施智能化也对大数据分析技术的突破提出了新需求,包括:面向建筑和基础设施数据分析需求的基于人机互耦的新型计算智能方法;数据和知识混合驱动的大数据分析新方法。

数字化和智能化技术给基础设施运维管理体系带来变革的同时,也对重构基础设施管理理论和体系带来新的挑战,具体包括:智能运维管理体系的基础理论、管理模式;运营管理领域性知识图谱构建及推理方法;大数据驱动的运维管理资源优化配置与协同决策方法;多元信息集成的重大基础设施工程

全生命周期决策优化方法;复杂基础设施系统自控设备集群智能协同控制决策方法。

3 重点研究内容

本次双清论坛与会专家经过深入研讨,凝练了未来5~10年里建筑与基础设施全寿命周期智能化四个研究方向的主要研究内容。

3.1 智能设计、智能材料与智能结构

智能设计的知识体系、基本理论和方法;智能材料与结构一体化设计理论;智能结构工作机理与设计理论。

3.2 智能建造

适应于智能建造的建筑与基础设施技术体系;建筑与基础设施构件智能制造的理论与方法;建筑与基础设施智能安装和施工的理论与方法;工程造价智能化管理和决策理论。

3.3 智能诊治和运维

性能智能感知理论与方法;性能智能分析决策理论与方法;性能智能评价与演变预测理论与方法;智能维护与性能提升理论与方法。

3.4 全寿命周期数据与智能管控平台

全寿命期数字孪生模型和智能化建模;多源异构数据融合、表达、分析理论与数据标准;数据挖掘、知识抽取和认知推理方法;数据库、知识库和算法库及平台构建方法;智能运维管理体系的基础理论、管理模式。

4 关键科学问题

针对以上研究内容,凝练出以下三个关键科学问题:(1)人机高度协同的智能设计方法与多任务多目标智能优化理论;(2)面向复杂场景的智能感知、智能解析与智能决策理论;(3)数据与物理模型融合的全寿命智能化性能评价与调控理论。

5 结论与展望

建筑和基础设施智能化对于推动我国建筑业转型升级,实现绿色、高质量和可持续发展具有十分重大的战略意义。未来5~10年,将通过用于生成式设计的机器学习、多目标多任务智能优化理论、智能材料、智能结构原理与机制、泛在全息感知、数据高效传输、多源异构数据融合、跨域数据关联、不完备数据推演、数据知识挖掘和认知推理、数据-知识耦合驱动的大数据分析方法、数据-物理模型耦合的人工智能算法等土木工程智能化基础理论与方法方面

的重大发展,改变土木工程建设从理念、设计、建造到运维、消纳各个方面的运作方式,实现面向建筑与基础设施全寿命周期各环节多场景的智能化应用,从而推进以人为核心的新型城镇化建设,提升中国建造全球竞争力。

参 考 文 献

- [1] 聂建国. 我国结构工程的未来——高性能结构工程. 土木工程学报, 2016, 49(9): 1—8.
- [2] “中国工程科技 2035 发展战略研究”项目组. 中国工程科技 2035 发展战略·土木、水利与建筑领域报告. 北京: 科学出版社, 2019.
- [3] 住房和城乡建设部, 国家发展改革委, 科技部, 等. 关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见. (2020-07-03)/[2021-05-21]. http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/202007/t20200728_246537.html.
- [4] 周加来, 周慧. 新时代中国城镇化发展的七大转变. 重庆大学学报(社会科学版), 2018, 24(6): 15—21.
- [5] 本刊综合. 交通运输“十三五”成绩单出炉. 中国公路, 2020(22): 18—20.
- [6] 王蒙徽. “十三五”时期住房和城乡建设事业发展成就显著. 中国勘察设计, 2020(12): 16—18.
- [7] 朱利明, 钱思沁, 陈沁宇, 等. 在役桥梁垮塌风险评估及预防策略. 南京工业大学学报(自然科学版), 2020, 42(3): 20—26.
- [8] 彭卫兵, 沈佳栋, 唐翔, 等. 近期典型桥梁事故回顾、分析与启示. 中国公路学报, 2019, 32(12): 132—144.
- [9] 陈明星, 叶超, 陆大道, 等. 中国特色新型城镇化理论内涵的认知与建构. 地理学报, 2019, 74(4): 633—647.
- [10] 陶慕轩, 聂建国, 樊健生, 等. 中国土木结构工程科技 2035 发展趋势与路径研究. 中国工程科学, 2017, 19(1): 73—79.
- [11] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程. 土木工程学报, 2019, 52(5): 1—11.
- [12] 丁烈云, 徐捷, 覃亚伟. 建筑 3D 打印数字建造技术研究应用综述. 土木工程与管理学报, 2015, 32(3): 1—10.
- [13] 刘鹏远, 李东风, 张俊良, 等. 主次结构巨型支撑的多目标拓扑优化方法. 地震工程与工程振动, 2020, 40(6): 149—157.
- [14] 高文俊, 吕西林. 拓扑优化在结构工程中的应用. 结构工程师, 2020, 36(6): 232—241.
- [15] 余光鑫. 基于强化学习的地下车库生成式设计研究. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [16] 周一一, 夏聪, 沈炜, 等. 基于应变能最小准则的行人天桥的拓扑优化设计和研究. 钢结构, 2019, 34(1): 56—59.
- [17] 尚二超. 基于拓扑优化的结构形态创构研究. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [18] 汶浩, 刘子金, 朱云超, 等. PC 墙板钢筋骨架自动化加工方法研究. 建筑机械化, 2019, 40(9): 27—29.
- [19] 何凡, 李丙涛, 付佰勇. 3D 打印技术及其在公路桥梁中的应用探讨. 公路, 2019, 64(2): 105—109.
- [20] 李清. 3D 打印在建筑业的应用研究. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [21] 张迪, 马德志, 宋晓峰, 等. 机器人焊接技术在钢结构行业的应用. 焊接, 2019(7): 15—20+65—66.
- [22] 刘天成, 程潜, 刘高, 等. 基于 BIM 平台的平塘特大桥结构健康监测信息融合技术研究. 公路, 2019, 64(9): 18—22.
- [23] 雷素素, 李建华, 段先军, 等. 北京大兴国际机场智慧工地集成平台开发与实践. 施工技术, 2019, 48(14): 26—29.
- [24] 李霞, 李娜, 张益宁, 等. GIS 与物联网技术在智慧工地建设中的应用. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(1): 159—161.
- [25] Bao Y, Chen Z, Wei S, et al. The state of the art of data science and engineering in structural health monitoring. Engineering, 2019, 5(2): 234—242.
- [26] Spencer BF, Manuel ER, Kurata N. Smart sensing technology: opportunities and challenges. Structural Control and Health Monitoring, 2004, 11(4): 349—368.
- [27] Li H, Ou J, Zhang X, et al. Research and practice of health monitoring for long-span bridges in the mainland of China. Smart Structures & Systems, 2015, 15(3): 555—576.
- [28] 张帆. 基于激光扫描的隧道管片结构变形数据处理及可视化分析方法. 现代隧道技术, 2018, 55(S2): 1065—1072.
- [29] 黄宏伟, 李庆桐. 基于深度学习的盾构隧道渗漏水病害图像识别. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(12): 2861—2871.
- [30] Liu YF, Nie X, Fan JS, et al. Image-based crack assessment of bridge piers using unmanned aerial vehicles and three-dimensional scene reconstruction. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2020, 35(5): 511—529.
- [31] Reagan D, Sabato A, Niezrecki C. Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges. Structural Health Monitoring, 2018, 17(5): 1056—1072.
- [32] Sankarasrinivasan S, Balasubramanian E, Karthik K, et al. Health monitoring of civil structures with integrated UAV and image processing system. Procedia Computer Science, 2015, 54: 508—515.
- [33] Yoon H, Hoskerc V, Park JW, et al. Cross-correlation-based structural system identification using unmanned aerial vehicles. Sensors, 2017, 17(9): 2075.
- [34] 巨袁臻, 许强, 金时超, 等. 使用深度学习方法实现黄土滑坡自动识别. 武汉大学学报(信息科学版), 2020, 45(11): 1747—1755.
- [35] Liu YF, Liu XG, Fan JS, et al. Refined safety assessment of steel grid structures with crooked tubular members. Automation in Construction, 2019, 99: 249—264.
- [36] Martins LL, Rebordão JM, Ribeiro AS. Conception and development of an optical methodology applied to long-distance measurement of suspension bridges dynamic displacement. Journal of Physics: Conference Series, 2013, 459: 012055.
- [37] Yang Y, Dorn C, Mancini T, et al. Blind identification of full-field vibration modes from video measurements with phase-based video motion magnification. Mechanical Systems and Signal Processing, 2017, 85: 567—590.

- [38] Liu Y, Cho S, Jr BS, et al. Automated assessment of cracks on concrete surfaces using adaptive digital image processing. *Smart Structures & Systems*, 2014, 14(4): 719—741.
- [39] 刘宇飞, 樊健生, 孔思宇, 等. 多视角几何三维重建法识别工程结构缺损与变形. *工程力学*, 2020, 37(9): 103—111.
- [40] 单伽程, 张寒青, 宫楠. 基于监测数据的结构地震损伤追踪与量化评估方法. *工程力学*, 2021, 38(1): 164—173.
- [41] 黄侨, 任远, 许翔, 等. 大跨径缆索承重桥梁状态评估的研究现状与发展. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(9): 1—9.
- [42] 孙利民, 尚志强, 夏焯. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望. *中国公路学报*, 2019, 32(11): 1—20.
- [43] 杜明芳. 基于数字孪生的智慧建筑系统集成研究. *土木工程信息技术*, 2020, 12(6): 44—48.

Key Scientific Issues and State-of-art in Whole-lifecycle Intelligentization of Buildings and Infrastructures

Yang Jing¹ Li Dapeng^{1*} Yue Qingrui² Zeng Bin³ Liu Xiaogang³ Fan Jiansheng⁴

1. *Department of Engineering and Material Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085*

2. *Institute of Urbanization and Urban Security, Beijing University of Science and Technology, Beijing 10083*

3. *China Metallurgical Construction Research Institute Co., Ltd., Beijing 100088*

4. *Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084*

Abstract The 266th Shuangqing Forum sponsored by National Natural Science Foundation of China with title “Frontier Theory and Methods of Whole-lifecycle Intelligentization of Buildings and Infrastructures” was conducted for in-depth discussions on the current research status, development trends and challenges faced by civil engineering intelligentization. The experts attending this meeting agreed that: strengthening the integration between engineering science and information science is of great significance for promoting the intelligent transformation and upgrading of the whole lifecycle of buildings and infrastructure, strengthening the innovation of engineering operation and maintenance of management system, and promoting new breakthroughs in big data analysis and artificial intelligence technology. It is one of the latest international civil engineering frontiers. The forum mainly condensed the key scientific issues and main research contents of the whole-lifecycle intelligentization of buildings and infrastructures from the following four aspects: (1) intelligent design, intelligent materials and intelligent structural systems; (2) intelligent construction; (3) intelligent diagnosis, treatment, operation and maintenance; (4) lifecycle data and intelligent management and control platform. Through the in-depth interdisciplinary integration between new-generation information technology such as artificial intelligence and civil engineering disciplines, the research on the whole-lifecycle intelligentization of buildings and infrastructures will surely promote the development of China’s civil engineering towards green, longevity and intelligence, comprehensively improve the quality of building, operation and maintenance, and help the high-quality and sustainable development of China’s economy and society.

Keywords buildings and infrastructure; whole life cycle; intelligent design and intelligent structures; intelligent construction; intelligent diagnosis, treatment, operation and maintenance; intelligent management and control platform

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: lidp@nsfc.gov.cn