

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.016



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望

刘红波^{1a,1b,2}, 张帆^{1a}, 陈志华^{1a,1b}, 王龙轩^{1a}

(1. 天津大学 a. 建筑工程学院; b. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056000)

摘要: 作为新一代产业变革的核心驱动力, 人工智能是全面提高土木工程领域数字化、自动化、信息化和智能化的重要方法。为全面了解人工智能在土木工程中的发展及应用, 定性分析了人工智能的基本研究领域, 定量分析了人工智能在土木工程设计、制造、养维护阶段的研究现状, 利用 CiteSpace 可视化工具深入挖掘人工智能在土木工程中存在的问题、发展瓶颈和研究趋势, 并给出相应的解决办法及研究思路。通过文献综述发现, 土木工程领域已展开了大量人工智能研究, 但各阶段智能化发展不均衡, 实际应用也存在一定局限性, 需深入探索神经网络、大数据、深度学习等智能技术在土木工程全生命周期的交叉融合, 促进土木工程领域人工智能研究的协同发展。

关键词: 土木工程; 人工智能; 智能设计; 智能建造; 智能养维护

中图分类号: TU17; TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)01-0014-19

Applied research status and prospects of artificial intelligence in civil engineering field

LIU Hongbo^{1a,1b,2}, ZHANG Fan^{1a}, CHEN Zhihua^{1a,1b}, WANG Longxuan^{1a}

(1a. School of Civil Engineering; 1b. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety of China Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China; 2. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000, Hebei, P. R. China)

Abstract: Artificial intelligence is the core driver of the next generation of industrial change. It is an important method to comprehensively improve digitalization, automation, informatization, and intelligence in the field of civil engineering. To gain a comprehensive understanding of the development and application of artificial intelligence in civil engineering. The basic research areas of artificial intelligence are analyzed qualitatively. The current research status of artificial intelligence in civil engineering design, manufacturing, and maintenance phases is quantitatively analyzed. The CiteSpace visualization tool is used to dig deeper into the problems, development bottlenecks, and research trends of artificial intelligence in civil engineering, and give corresponding solutions and research ideas. The review of the literature found that a significant amount of artificial intelligence research has been conducted in the field of civil engineering. However the development of

收稿日期: 2021-11-12

基金项目: 河北省杰出青年基金(E2021402006)

作者简介: 刘红波(1983-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事大跨空间结构研究, E-mail: hbliu@tju.edu.cn。

陈志华(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: zhchen@tju.edu.cn。

Received: 2021-11-12

Foundation item: Hebei Province Outstanding Youth Fund (No. E2021402006)

Author brief: LIU Hongbo (1983-), professor, doctoral supervisor, main research interest: large span space structure, E-mail: hbliu@tju.edu.cn

CHEN Zhihua (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: zhchen@tju.edu.cn.

intelligence has been uneven at various stages, and there are limitations in practical applications. Therefore, it is necessary to deeply explore the cross-integration of intelligent technologies such as neural networks, big data, and deep learning in the full life cycle of civil engineering. To promote the synergistic development of artificial intelligence research in the field of civil engineering.

Keywords: civil engineering; artificial intelligence; intelligent design; intelligent construction; intelligent maintenance

人工智能(Artificial Intelligent, AI)是一门利用计算机模拟、延伸及扩展人的理论、方法及技术的综合性学科^[1],被认为是二十一世纪三大尖端技术之一,涵盖了计算机科学、符号逻辑学、仿生学、信息论、控制论等众多领域,属自然科学、社会科学、技术科学三向交叉学科^[2-3]。

自 1956 年美国达特茅斯会议(Dartmouth Conference)上提出“人工智能”的概念以来,其主要经历了 3 个发展阶段,分别是 1956—1980 年的人工智能起步阶段,1980—1990 年的专家系统盛行阶

段,2000 年至今的深度学习阶段^[4],如图 1 所示。目前,人工智能已成为各领域的研究及应用热点,中国是世界上在人工智能领域内行动最早、动作最快的国家之一,自 2015 年起,先后颁布了《中国制造 2025》《积极推进“互联网+”行动的指导意见》《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》《新一代人工智能发展规划》等政策,从各个方面详细规划了人工智能的重点发展方向,并明确指出人工智能是新一轮科技革命和产业变革的核心技术^[5]。

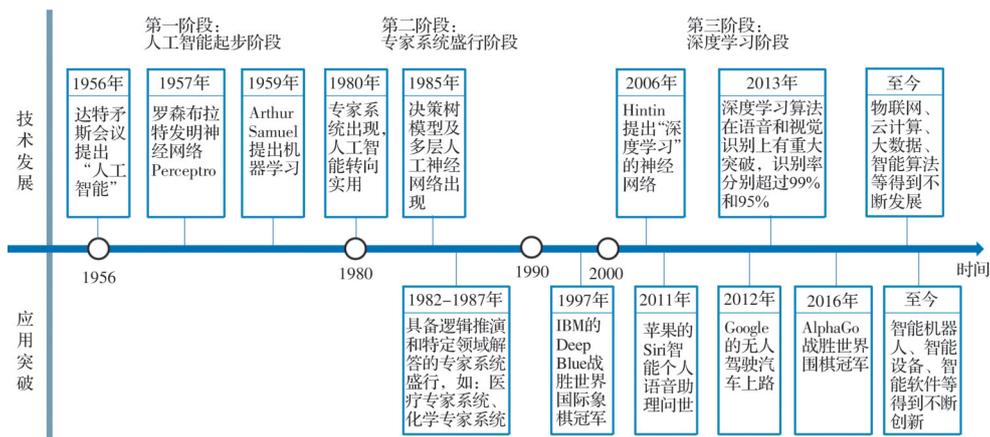


图 1 人工智能发展历程

Fig. 1 Artificial intelligence development history

建筑业是中国国民经济的重要支柱产业,随着土木工程建设项目不断增多,中国基础设施逐步完善,城镇化水平稳步提升。然而,在建筑业高速发展的同时,行业信息化水平较低、生产方式粗放、劳动生产率不高、资源消耗量大、科技创新能力不足等一系列问题愈发突出^[6]。为实现土木工程行业的高质量发展,将人工智能技术应用于土木工程设计、建造、养维护的全生命周期中,深刻变革土木工程发展,全面提升土木工程行业的数字化、自动化、信息化和智能化。

目前,人工智能技术为建筑设计、生产建造及养维护等阶段提供了新方法,在一定程度上实现了土木工程建设项目智能化^[7-8]。但人工智能技术在土木工程领域的应用还未能全面普及,随着物联网、云计算、大数据等相关科技产业的迅猛发展,将

为实现智慧、绿色、可持续的土木工程建设项目带来更多机遇和挑战。

笔者定性分析了自然语言处理、计算机视觉、语音识别及交叉领域的研究现状;定量分析了建筑设计、生产建造及养维护的智能化发展;利用 CiteSpace 可视化工具深入挖掘人工智能在土木工程中存在的问题、发展瓶颈和研究趋势,并给出相应的解决办法及研究思路,为人工智能在土木工程领域的后续研究与发展提供参考。

1 人工智能的基础研究领域

人工智能可分为自然语言处理、计算机视觉、语音识别和交叉领域 4 个基础研究领域^[9]。

1.1 自然语言处理

自然语言处理(Natural Language Processing,

NLP)是以计算机为媒介对人类特有的自然语言进行加工处理,使计算机能够像人一样“处理”和“理解”自然语言^[10]。在土木工程领域,NLP从基础性的语义相似度、依存句法分析到应用性的人机互动、报告分析等均展现了巨大的应用前景,利用NLP可将无结构化的风险信息、施工图纸信息、施工组织方案信息转化为结构化信息,从而对土木工程建设项目日常文档进行隐性知识(如危险对象、危险位置、事故原因、事故类型等)挖掘^[11-12]。

Tixier等^[13]证明了使用NLP可消除由人工信息分析产生的报告误差,利用NLP系统能自动扫描并快速分析大量非结构化报告,准确率超过95%,利用NLP系统还可从非结构化信息报告数据库中获得大量可靠的结构化数据集,从而提取新的安全信息,改善项目安全管理。王飞等^[14]梳理了深度学习驱动下自然语言处理的发展,认为深度学习推动了自然语言处理的进步,自然语言处理的进步也为深度学习提供了更为广阔的应用前景。Kim等^[15]提出了基于NLP的建筑事故案例知识管理系统,如图2所示,在该系统中,利用信息检索模型可查询与用户意图相关度达97%以上的事故案例,利用信息抽取模型可自动分析事故案例中的隐性知识,达到高效风险管理的目的。李舟军等^[16]介绍了NLP中静态及动态预训练技术,梳理了包括BERT和XLNet在内的新型预训练方法,并给出了未来的发展方向。

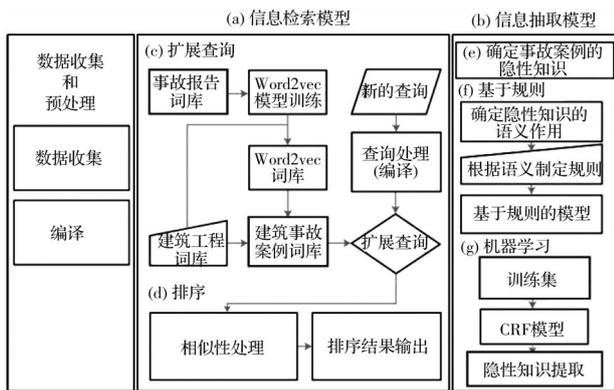


图2 建筑事故案例知识管理系统^[15]

Fig. 2 Knowledge management system for construction accident cases

综合当前研究现状来看,NLP的研究深度和应用范围仍较低,首先表现为建筑领域词库通用性差导致的文件预处理质量不高,这将对NLP过程中的文本数据分词、词性标注等程序产生不利影响;然后是信息提取规则的制定有限,即在土木工程领域中难以获得所有的项目数据(如项目合同书等),导

致难以开发用于信息提取的所有可能的规则;此外,NLP的深度学习训练模型与地方性语言有关,同一模型无法处理不同语言的文本信息,因此无法进行有效的迁移学习;最后,当前NLP多用于施工建造阶段,而在设计、养维护等阶段的应用较少,导致土木工程全生命周期文件管理的效率及质量较低。

1.2 计算机视觉

计算机视觉(Computer Vision)是以成像系统代替视觉器官作为输入传感手段,以智能算法代替人类大脑作为处理分析枢纽,从图像、视频中提取符号数字信息进行目标的识别、检测及跟踪,最终使计算机能够像人一样通过视觉来“观察”和“理解”世界^[17]。计算机视觉在土木工程领域的混凝土裂缝检测、结构损伤识别、施工现场安全监控等方面得到了大量研究,具有十分广阔的应用前景^[18]。

Zaurin等^[19]提出了利用计算机视觉进行桥梁结构的健康监测,将图像、视频结合计算机视觉技术来检测、分类和跟踪不同车辆,并利用传感数据确定桥梁结构的标准化响应。Seo等^[20]总结了基于计算机视觉的施工现场安全与健康监测方法,将以往的计算机视觉研究分为目标监测、目标跟踪及动作识别3类,并提出基于计算机视觉的安全与健康监测通用框架,如图3所示。韩晓健等^[21]采用计算机视觉技术进行混凝土表面裂缝检测研究,建立了能从图像中自动定位裂缝并获得裂缝宽度的深度卷积神经网络裂缝识别模型,识别准确率超过98%,如图4所示。Zhou等^[22]提出了基于计算机视觉技术和深度学习算法的车辆载荷非接触式自动辨识方法,建立了8 624幅车辆图像数据集并进行深度卷积神经网络(Deep Convolutional Neural Network, DCNN)训练,最后将迁移学习与ImageNet提取的通用特征相结合,在强化学习策略下的辨识度最高可达98.17%。宋燕飞等^[23]利用双目立体视觉技术及图像识别技术提出了空间网架结构的三维模型重建方法,并通过网架模型的实测试验来验证该方法的可行性。

随着并行计算、云计算、大数据、深度学习等软硬件技术的发展,计算机视觉技术得到不断提升,但现阶段仍存在许多技术挑战及应用难题。例如,计算机视觉在结构健康监测方面的研究仍处于起步阶段,如何减小由硬件因素、算法因素、环境因素等产生的误差是未来的重要研究方向,如何提高计算机视觉的应用效率和可靠性是后续的研究重点。此外,计算机视觉在检测施工人员是否佩戴安全帽

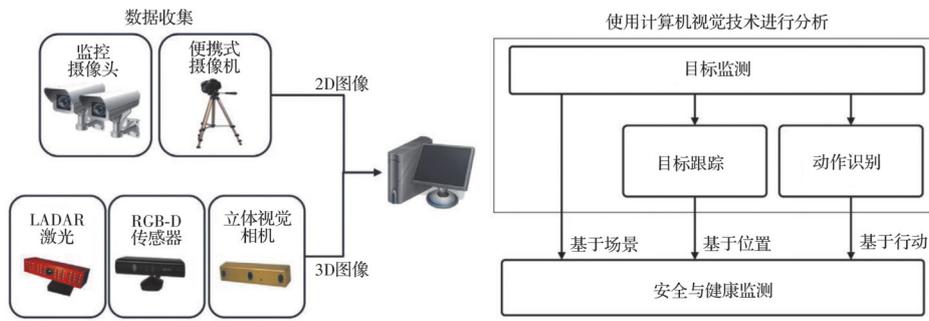


图 3 基于计算机视觉的安全与健康监测通用框架^[20]

Fig. 3 General framework for computer vision-based safety and health monitoring

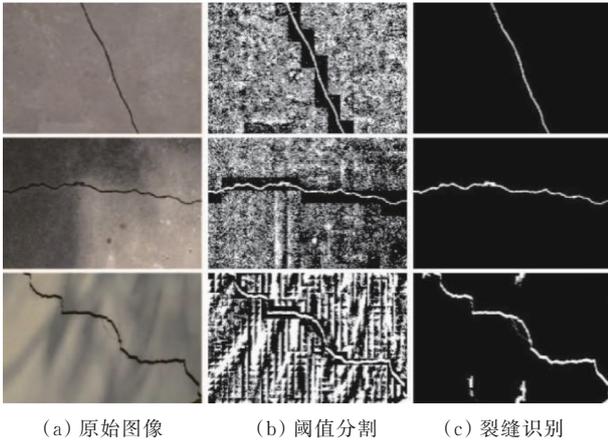


图 4 基于计算机视觉技术的混凝土表面裂缝检测^[21]

Fig. 4 Surface crack detection of concrete based on computer vision technology

上取得了较好效果,但后期应用中如何触发报警系统及人机耦合等方面有待进一步研究。

1.3 语音识别

语音识别(Speech Recognition)是指计算机将输入的语音信号进行识别理解后转换为文本输出的过程,使计算机能够像人一样具备“听觉”功能^[24]。

在建筑环境中,语音识别可用于车库开关、语音密码锁,在家居环境中,语音识别可用于家电遥感,此外,语音识别还可用于关键词检索、号码语音查询等^[25]。在未来的应用研究中,语音识别可为建筑智能安装提供帮助,如建筑路线语音导航、机器人人机交互等,还可为灾后生命体的有效识别提供协助。

在土木工程领域,目前语音识别的相关研究及应用较少,研究难点主要集中在噪声处理、鲁棒性和语音模型上。首先,在输入语音信号时,经常会出现各种不同的噪声,提高对噪声的处理是改善语音信号识别准确率的重要一环。其次,现有的语音信号识别系统对环境的依赖性普遍偏高,不同的环境会导致语音信号的识别准确率有较大差异,增强语音识别系统的鲁棒性有助于实现系统的实际应用。最后,在语音交互时,语义、语速及情绪均会影响语音的真实含义,因此,语音模型的优化也是研

究的重难点。

1.4 交叉领域

交叉领域(Interdisciplinary Fields)是指众多跨学科性的学科群体,体现了科学研究向综合性发展的趋势,具有较高的复杂性、广泛性和多样性^[26]。人工智能与土木工程的学科交叉可极大地提高基础建设项目的工程质量和工作效率,十分契合中国对土木工程行业高质量发展模式的要求,是传统土木工程行业转型升级的发展趋势^[27]。

唐和生等^[28]建立了基于人工神经网络的矩形混凝土柱屈服强度预测模型,解析了影响混凝土柱屈服性能的关键因素,并利用Garson敏感性分析证明了该模型的合理性。丁杨等^[29]以大体积混凝土浇筑过程为例,建立了混凝土水化放热内部温度预测模型,为后续养维护的监测、预测、预警提供依据。赵平等^[30]为提高古建筑修缮阶段的火灾监测水平,提出一种基于YOLO-BP神经网络的火灾监测方法,如图5所示,利用该方法监测古建筑修缮阶段火灾的准确率达93.9%。赵艳男等^[31]提出了一种基于BP神经网络的树状结构智能找形方法,利用该方法可对下层分级节点进行智能定位,从而实现树状结构的整体几何形态智能找形。

随着工业化、信息化和智能化的深度融合,传统土木工程行业面临深刻变革。全面开展智能设计、智能建造、智能养维护的技术研发与实践,加强人工智能与土木工程的学科交叉体系建设,是促进土木工程全生命周期智能化发展的关键所在。此外,在人工智能与土木工程的交叉学科体系构建中,应坚持以土木工程为主体,以人工智能为辅助,用人工智能技术来支持和促进土木工程全生命周期的智能化发展。

2 人工智能在土木工程中的研究现状

人工智能在土木工程领域的交叉研究主要体现在智能设计、智能建造和智能养维护3个方面。

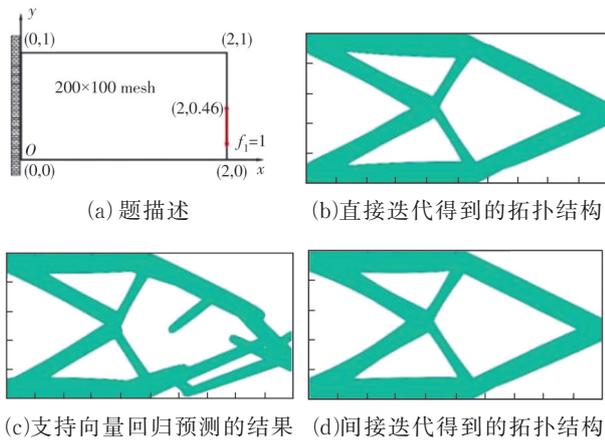


图 7 基于机器学习的拓扑优化^[43]

Fig. 7 Topology optimization based on machine learning

Swarm Optimization, PSO)相结合,形成闭环,从而使优化过程无需人工参数调整即可得到设计区域内的最优解,如图 8 所示。Qiu 等^[45]提出了一种用于点阵结构的基于 K-mean 聚类的并发拓扑优化,该方法将宏观优化区域分为若干子区域,以减少所需优化的微观结构数量。

神经网络与拓扑优化。Ulu 等^[46]将主成分分析

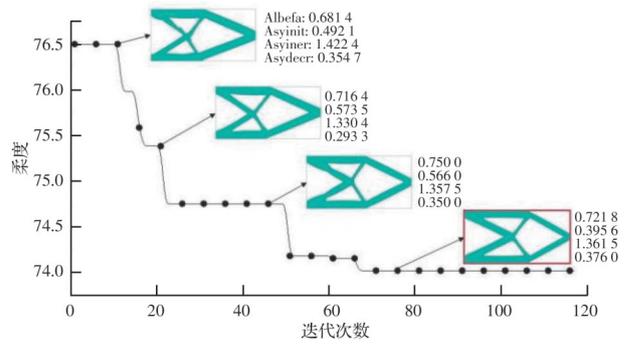


图 8 基于粒子群算法的拓扑过程^[44]

Fig. 8 The topological process based on PSO

与神经网络相结合进行结构拓扑优化研究,以一组最优拓扑构型为初始数据,进行主成分分析并将其投影到低维空间,再利用神经网络进行拓扑构型训练,从而实现拓扑结构的预测功能,如图 9 所示。White 等^[47]提出了一种基于神经网络代理模型的多尺度拓扑优化,使用高分辨率微尺度代理模型进行训练,从而预测具有微观结构的超材料等效材料属性。Deng 等^[48]提出了一种基于神经网络的拓扑优化方法,讨论了隐含层数量对模型几何特征描述能力的影响,并实现了三维拓扑构型的快速预测。

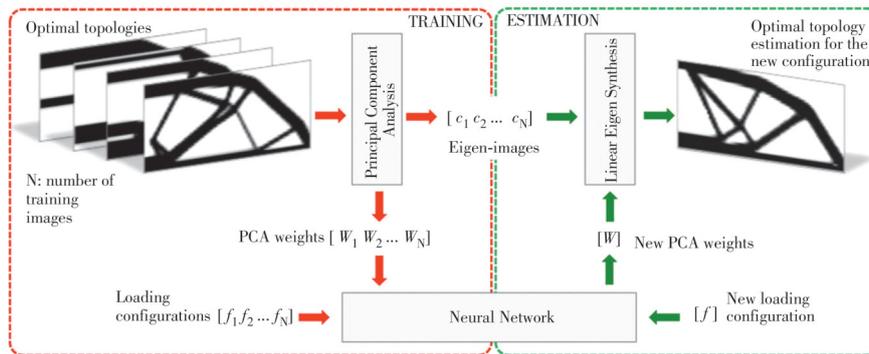


图 9 基于神经网络的拓扑结构预测^[46]

Fig. 9 Neural network-based topology prediction

深度学习与拓扑优化。Sasaki 等^[49]进行了基于深度学习的拓扑优化研究,证明了在不同工况、不同模型情况下,与传统拓扑方法相比,卷积神经网络(CNN)训练得到的优化结果在结构性能上相似,但计算成本降低了 10%~33%。Tan 等^[50]针对微结构提出了一种基于深度卷积生成对抗网络(DCGAN)和卷积神经网络(CNN)的深度学习模型,其中 DCGAN 用于生成满足几何条件的结构构型,CNN 用于预测相关力学响应。Wang 等^[51]提出了一种用于结构拓扑优化的具有较强泛化能力的深度卷积神经网络,即使在只有一个边界条件的训练数据集中,其泛化能力也能使模型以一定准确性解决具有不同边界条件的拓扑问题。Nie 等^[52]提出了基于深度学习的生成式拓扑优化模型

TopologyGAN,在未知边界条件情况下,与传统 cGAN 框架相比,TopologyGAN 框架在均方误差上降低了 3 倍,在绝对误差上降低了 2.5 倍,大幅提高了拓扑结构的预测精度,如图 10 所示。

2.2 智能建造

智能建造(Intelligent Construction)是指将信息化、自动化、智能化与工程建造过程高度融合的建造方式^[53],主要包括:施工现场智能管理、BIM、数字孪生、3D 打印和智能机器人等。

2.2.1 施工现场智能管理

传统的施工现场管理大多采用人工监察,存在效率低、排查慢、预防性差等问题,利用人工智能技术对施工现场进行智能识别、智能排查、智能报警,可有效避免各种违规行为,实现施工现场的智能管理^[54]。

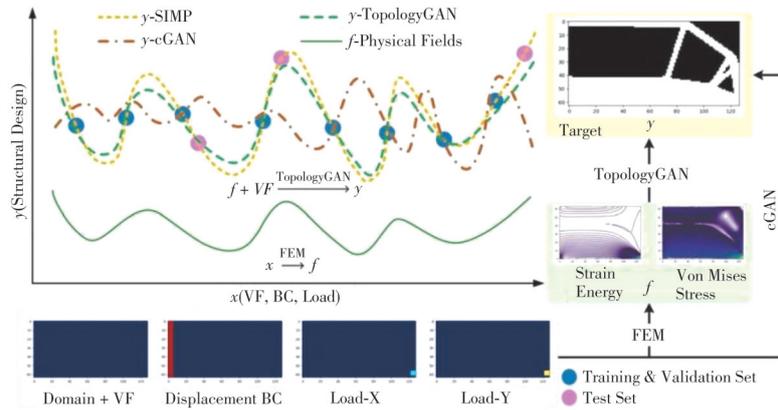


图 10 基于深度学习的 TopologyGAN 模型^[52]

Fig. 10 TopologyGAN model based on deep learning

Park 等^[55]提出了一种基于计算机视觉的施工人员安全帽佩戴检测方法,该方法首先在视频帧中识别人体和 安全帽,再进行人体和 安全帽的空间关系匹配,最后对未佩戴安全帽的施工人员发出相应警报。Yu 等^[56]提出了一种基于图像骨架的参数化方法,该方法的核心理念是姿态引导,通过将动态行

为转化为静态姿态来实现建筑工人不安全行为的实时监控。Fang 等^[57]利用深度学习技术,进行了远程监控视频中施工人员安全帽佩戴的检测识别研究,根据施工现场视觉特征,将图像分为 19 类数据集进行试验,结果表明,该方法的识别精度超过 90%,如图 11 所示。



图 11 施工人员安全帽佩戴检测实例^[57]

Fig. 11 Example of helmet wearing test for construction personnel

2.2.2 BIM

建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)是以建设项目信息数据为输入,通过整合建筑数据,实现建筑信息的共享传递,是建设项目物理设施和功能特性的数字化表达^[58]。运用 BIM 技术可有效排查图纸设计错误、降低方案优化成本、缩短施工工期、提高项目效益^[59]。

Kwon 等^[60]运用 BIM 技术、图像匹配技术及增强现实技术开发了施工缺陷管理系统,该系统中的图像匹配功能可使质量检测无需在施工现场进行,降低了施工现场的返工成本,此外,还可自动检测施工现场的尺寸误差。白庶等^[61]进行了 BIM 在装配式建筑中的应用价值分析,认为利用 BIM 技术可有效改善装配式预制件的生产流程,有助于装配式建筑向智能化、信息化方向发展。

2.2.3 数字孪生

数字孪生(Digital Twin, DT)是将现实世界中的物理模型映射到数字世界中,在虚拟的数字世界中形成与现实世界物理模型相对应的数字模型^[62]。利用数字孪生技术可实现双向的信息交流与迭代

优化,达到对现实世界物理系统的改善目的^[63]。

Tao 等^[64]提出了数字孪生车间的概念,设计了数字孪生车间的组成与运行机制,为数字孪生在生产制造环节的落地应用提供了基础理论支撑。谢琳琳等^[65]通过集成 BIM、物联网、大数据等先进信息技术,构建了基于 BIM+数字孪生技术的装配式建筑项目调度智能化管理平台,实现了物理施工系统与虚拟施工系统间的实时交互,提高了装配式建筑调度的自主性、预测性与智能性。刘占省等^[66]提出了基于数字孪生的智能建造方法框架,使用实时监测数据与理论模型进行对比,进而对物理空间的实际施工过程进行调整与修正,并以轮辐式索桁架智能张拉提升缩尺模型试验为例,进行了验证,如图 12 所示。

2.2.4 3D 打印

3D 打印(3D Printing, 3DP)是以三维模型数据为输入,将结构模型转化为虚拟代码,通过切片软件及操作系统引导 3D 打印机逐层积累材料,实现实体结构的成型。3D 打印是近年来最为热门的高新技术之一,具有无需机械加工、无需组装、设计空

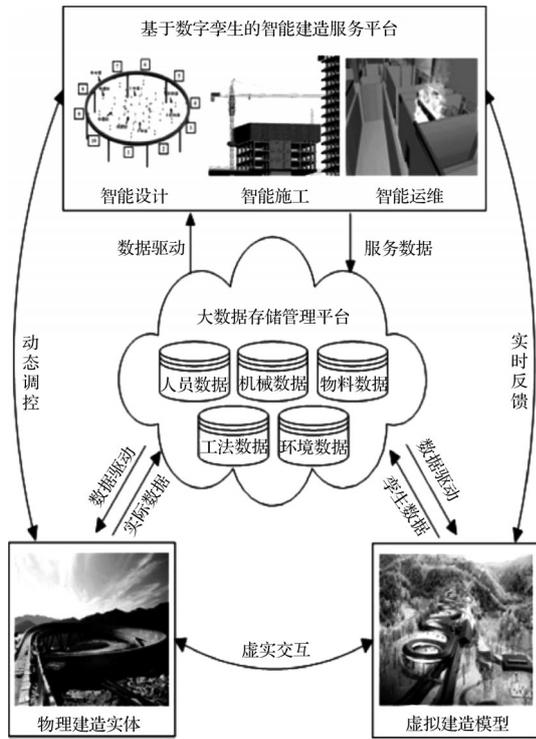


图 12 基于数字孪生的智能建造方法框架^[66]

Fig. 12 Intelligent construction method framework based on digital twins

间无限制、实体制造精确、所需物理空间低等优点,已在诸多领域得到广泛应用^[67]。

Perkins 等^[68]回顾了 3D 打印技术在建筑行业的应用状况,认为 3D 打印技术与建筑行业智能化、信息化的发展方向十分契合。丁烈云等^[69]对 3D 打印的研究现状进行了梳理归纳,以需求为导向,将 3D 打印分为两大类:一类是代替人工面向大型构件、房屋建筑物的自动化建造,另一类是面向雕塑、异形构件的个性化制造,最后指出 3D 打印技术距离应用到高层或超高层建筑的建造还有较大差距。

2.2.5 智能机器人

智能机器人(Intelligent Robot)是指按照计算机程序或施工人员指令工作,代替或协助施工人员完成施工任务的智能化机器设备。智能机器人的应用是保障施工人员安全、提升建筑工程质量的必然选择^[70]。

车平等^[71]针对钢桥梁腹板焊接形式开展了 24、40 mm 两种板厚试件的机器人自动焊接研究,并将其应用到港珠澳大桥总拼钢主梁腹板对接中,发现采用机器人自动焊接工艺后,焊缝质量及焊接效率显著提升,焊接成本明显降低。周冲等^[72]提出了一套面向预制 PC 构件生产线的智能机器人系统,该系统拥有智能物流、柔性装配、智能检测等功能,实现了构件生产的智能化。郭俊可等^[73]基于盾构施工

特点对换刀机器人的精确定位技术进行了研究,认为基于视觉导航的刀具精确定位技术可应用于机器人换刀作业,并且机器人视觉导航定位精度可达 0.5 mm,满足现场使用需求。

2.3 智能养维护

智能养维护(Intelligent Maintenance)是通过智能监测设备将远距离建筑或设施的健康数据连续不断的提供给数据处理智能系统,由智能系统发出养维护指令并提供数据分析结果^[74]。近年来,越来越多的专家学者从视觉驱动和数据驱动两方面进行智能养维护研究,极大促进了养维护阶段的智能化发展。

2.3.1 视觉驱动的智能养维护

无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)是一种利用无线遥控设备或程序控制的飞行器,具有灵活性高、可装载高清摄像机在空中悬停等优点^[75]。在土木工程领域,无人机能在不影响建筑结构正常运营情况下快速完成检测工作,极大地改善了建筑结构健康监测、评估方式及构件维护策略^[76]。

Khan 等^[77]利用装备了非接触多光谱成像系统的无人机,对桥梁表面裂缝进行健康监测研究,认为该系统在揭示引发桥面开裂原因及全面记录开裂位置等方面具有重要优势。Reagan 等^[78]提出了一种结合使用无人机和三维数字图像的非接触式桥梁健康监测方法,经过对两座现役混凝土桥梁的长期监测,验证了该方法监测结构状态的准确性,利用该方法可监测 10^{-5} 量级的桥梁几何变化。Kim 等^[79]进行了基于商用 UAV 和高分辨率视觉传感器的混凝土桥梁裂缝识别研究,利用深度学习算法检测结构表面裂缝,计算裂缝宽度和长度,并以某民用桥梁为例,证明了基于 UAV 的桥梁检测方法能有效识别及量化结构裂缝,如图 13 所示。

此外,利用检测机器人可实现对结构的近距离检测,甚至可对结构内部的健康状况进行评估。王杰等^[80]结合中国焊缝检测机器人发展现状,对近几年焊缝检测机器人的机械结构设计、检测传感器选择和导航跟踪控制 3 个方面展开详细叙述。季云峰等^[81]以斜拉索表观检测为研究对象,开发了能自动沿拉索爬升并完成斜拉索表观检测任务的智能检测机器人,该检测机器人具有小型化、快速自爬行、高质量图像采集、缺陷自动化识别等优点。

2.3.2 数据驱动的智能养维护

人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)是对人脑或自然神经系统的基本特征进行抽象模拟,由大量神经元按照不同权重进行信息传输

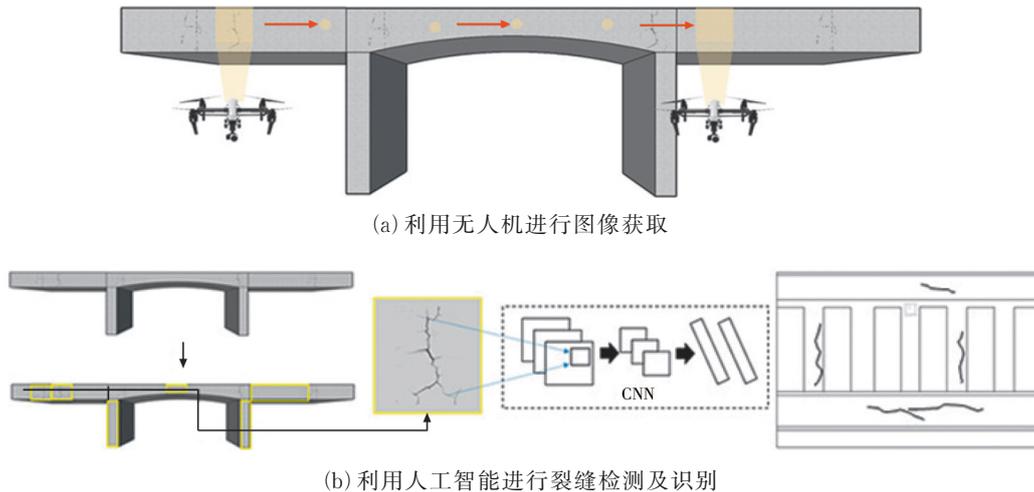
图 13 基于 UAV 的裂纹识别^[79]

Fig. 13 UAV-based crack identification

的巨型复杂网络,具有并行计算、自组织、联想记忆等优点,被广泛应用于各个领域^[82]。在土木工程领域的智能养维护中,应用神经网络可处理模糊、随机及不相容的信息,能在有噪声的情况下正确识别损伤部位,十分适合结构健康的在线监测和实时诊断^[83]。近年来,越来越多的专家学者结合 BP 神经网络、GA-BP 神经网络、PSO-BP 神经网络、卷积神经网络等进行建筑结构智能养维护研究。

BP 神经网络与智能养维护。姜绍飞等^[84]提出了将 BP 神经网络与 D-S 证据理论融合的损伤识别方法,充分地将神经网络非线性建模和 D-S 证据理论不确定性推理进行有机结合,对来自复杂结构的多源信息进行融合,进而识别损伤。Pathirage 等^[85]通过优化 BP 神经网络模型,提出一种基于自编码器的结构损伤识别框架,用于解决振动特征与结构损伤间的非线性识别问题。谢晓凯等^[86]针对大跨空间结构长期应力监测中数据缺失的问题,通过 BP 神经网络建立相关关系模型,对缺失数据进行重建修复,如图 14 所示。Padil 等^[87]针对结构损伤识别中主成分分析、建模误差和测量误差的不确定性,提出了一种非概率 BP 神经网络方法,以压缩频响数据为输入,提高了训练效率及识别精度。

GA-BP 神经网络与智能养维护。Na 等^[88]针对因结构健康监测数据不足而产生的损伤识别误差,进行了基于遗传算法的剪力结构损伤识别研究,在动态特性数据不足、结构刚度参数不准确的情况下,该研究可利用结构柔性矩阵推导结构损伤程度和损伤位置。Li 等^[89]以车辆在不同状态下通过桥梁时的垂直加速度为初始响应,采用遗传算法进行损伤识别及定位,模拟结果表明,该方法能在考虑路

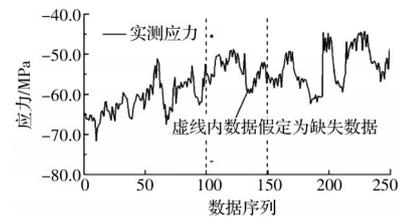
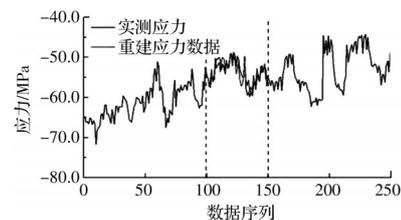
(a) 测点 x 应力变化曲线(b) 测点 x 应力缺失数据重建结果图 14 利用 BP 神经网络重建缺失数据^[86]

Fig. 14 Missing data reconstruction using BP neural network

面粗糙度和有噪声干扰的情况下对连续梁桥进行损伤识别。毛云霄等^[90]采用遗传算法实现了桥梁结构不同损伤状态的识别,认为 GA 算法能以较高效率实现桥梁多目标损伤识别,且桥梁跨中、3/4 跨的损伤识别结果较桥梁端部更为准确。

PSO-BP 神经网络与智能养维护。Mohan 等^[91]利用 PSO 算法对结构固有频率的变化进行裂纹识别研究,认为粒子群算法是一种鲁棒性强、效率高的裂缝检测算法,在裂纹数量较少的情况下,利用该方法仅使用三阶固有频率作为输入参数即可得到有效识别结果。许如锋等^[92]以连续梁桥为研究对象,提出将伪比能变化率作为损伤识别指标,用改进 PSO 算法优化 BP 神经网络的权值和阈值参数,建立了 PSO-BP 损伤预测模型。徐菁等^[93]用粒子群算

法进行体育馆健康监测系统中传感器最优布点的研究,认为该方法具有更快的收敛速度和更稳定的优化

结果,最后以西宁市体育馆双层球面网壳钢结构为例进行传感器优化布置,如图 15 所示。

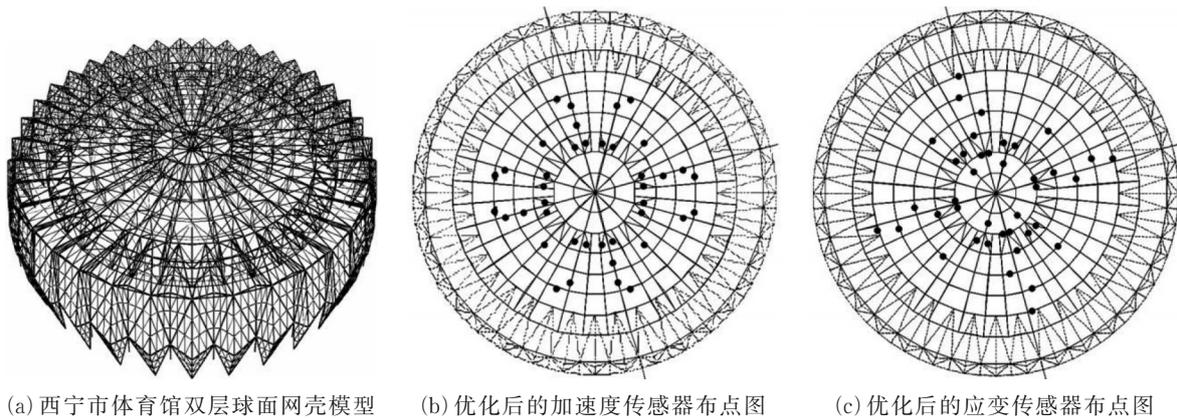


图 15 基于 PSO-BP 神经网络的传感器优化布置^[93]

Fig. 15 Optimal arrangement of sensors based on PSO-BP neural network

卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)与智能养维护。Cha 等^[94]利用深度卷积神经网络自主学习图像特征的能力,提出基于视觉的混凝土裂缝检测方法,在 256 像素×256 像素的图像上训练,该方法设计的 CNN 识别准确率为 98%,与滑动窗口技术相结合,训练后的 CNN 可扫描任何大于 256 像素×256 像素的图像,如图 16 所示。Abdeljaber 等^[95]将卷积神经网络用于钢框架结构的损伤识别中,并基于 1D-CNN 进行了 9 种损伤工况下的健康监测研究。Atha 等^[96]提出了一种基于卷积神经网络的金属表面腐蚀评估方法,讨论了颜色

空间、滑动窗口及卷积神经网络结构对腐蚀评估的影响,如图 17 所示。李雪松等^[97]以 IASC-ASCE SHM Benchmark 结构的数值模拟数据为研究对象,对 16 个测点的加速度信号进行特征的自动提取及分类,分析了 3 种特征在不同噪声情况下的识别准确率,证明卷积神经网络直接以加速度数据进行分类的有效性和稳定性。何浩祥等^[98]为解决传统损伤识别方法对桥梁局部小损伤识别能力较弱的问题,提出利用卷积神经网络对桥梁损伤进行统计模式识别,通过逐层智能学习,实现更准确的特征自动提取和分类,从而进行损伤位置和程度的精准识别。

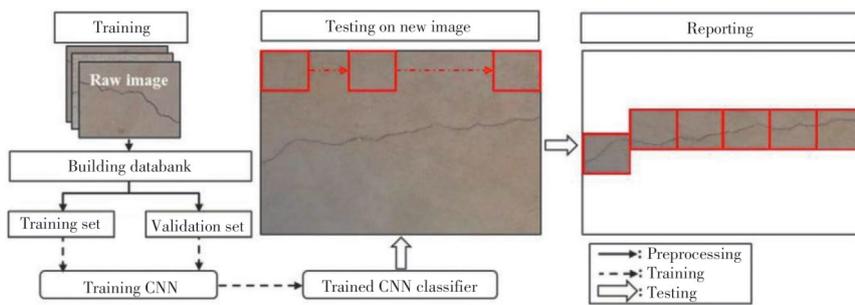


图 16 基于 CNN 的混凝土裂缝检测^[94]

Fig. 16 CNN-based concrete crack detection

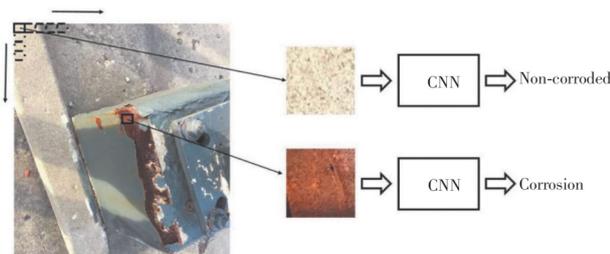


图 17 基于 CNN 的金属表面腐蚀评估^[96]

Fig. 17 CNN-based corrosion assessment of metal surfaces

3 人工智能在土木工程中的应用研究趋势

人工智能在土木工程领域有着广泛的研究与应用,为建筑设计、生产建造、结构养维护提供了新理念、新方法,而在实际建设中,考虑到生产造价、建造技术、人员配备等因素限制,人工智能在土木工程领域的应用还未能全面普及。综合考虑人工智能在土木工程领域的研究现状,利用 CiteSpace 文

献分析工具,对中国知网(CNKI)数据库刊载的人工智能与土木工程的相关文献情况及研究热点进行可视化分析。总结中国研究现状、探索目前研究热点、发现未来研究趋势,并针对存在的问题提出发展建议,为人工智能在土木工程领域的相关研究提供参考。

CiteSpace是由美国德雷塞尔大学陈超美教授于2004年开发出的一款可视化软件^[99]。该软件通过数据挖掘、文献计量、公式计算等方法对研究热点进行分析,再通过巧妙的空间布局绘制可视化图谱并建立节点关联,从而分析研究对象间的共现关系与共引关系^[100]。

数据来源于中国知网数据库,检索方式为基本检索,由于人工智能涵盖范围十分广泛,如智能设计方面的拓扑优化、智能建造方面的3D打印等。难以将所有文献尽数统计分析,因此,在检索过程中,以人工智能为主题,选择学科分类里的建筑科学与工程,共检索出相关文献3 098篇,在剔除会议报告、新闻宣传、硕博论文、图书专利等数据后,最终确定文献2 076篇,将目标文献按CiteSpace所需格式转码导出后,得到文献样本数据库。

对CiteSpace参数进行设置。为探索自2000年以来人工智能在土木工程中的研究现状,选择时间切片(Time Slicing)为2000年至2021年,时间分区长度(YearsPerSlice)为1;术语资源(Term Source)勾选标题(Title)、摘要(Abstract)、作者关键词(Author Keywords)及关键词拓展(Keywords Plus),节点类型为Keyword,连接强度算法为Cosine;剪枝算法选择具有完备性的Pathfinder算法,剪枝策略选择Pruning slice network,视觉可视化效果为静态(Cluster View-Static)。

1) 年发文量分析

年发文量代表科研成果的产出状况,是衡量人工智能在土木工程领域的研究热度与发展趋势的重要指标。如图18所示,2015年之前论文年发表量基本维持在10~30篇,而2015年之后,深度学习算法在语音和视觉识别上得到重大突破,人工智能在土木工程领域的关注度持续高涨,中国人工智能产业迅速发展,研究团队不断壮大,发表量逐年攀升。

2) 关键词频数及中心性分析

通过构建关键词共现网络,发现人工智能在土木工程领域的研究共有596个节点和928条连线,每个节点代表文献若干篇,节点越大则关键词的词频就越大,与该主题的相关性就越强,节点间的连线代表关键词间的共现关系。为更加清晰地展示

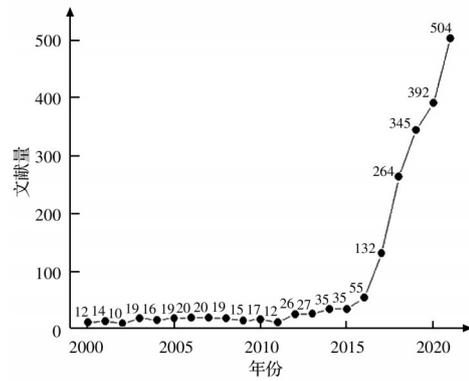


图 18 人工智能在土木工程领域的年发文量

Fig. 18 Annual publication volume of artificial intelligence in civil engineering

人工智能在土木工程领域的研究现状,在共性参数的基础上,将关键词控制面板的阈值参数设为13(阈值0为展示全部关键词),从而隐藏频数较低的关键词,最终关键词共现网络如图19所示。经CiteSpace处理后显示的高频关键词统计如表1所示,关键词中心性统计如表2所示。

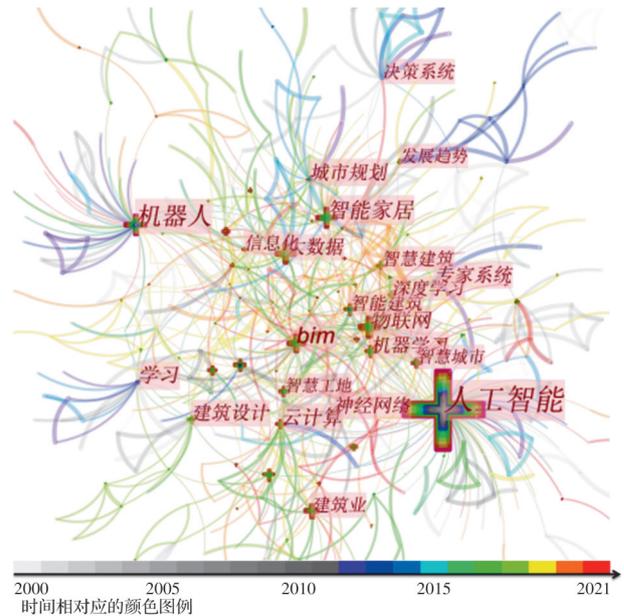


图 19 关键词共现网络

Fig. 19 Keyword co-occurrence network

关键词是对文献内容的高度概括。由表1可知,频数排名前5的关键词为人工智能、物联网、BIM、机器人、智能家居,在一定程度上代表了人工智能在土木工程领域的研究热点,但不能代表近几年的发展趋势,还需结合图18关键词共现网络及表2关键词中心性统计进行综合分析。

中心性是关键词在共现网络中“媒介”能力的体现,是关键词间信息流大小的直观展示,图18中十字形边界越大代表节点越重要,中心性越强。由表2可知,中心性排名前3的关键词为人工智能、机

表 1 高频关键词统计

Table 1 High-frequency keywords statistics

序号	关键词	频数	序号	关键词	频数
1	人工智能	674	16	信息技术	33
2	物联网	117	17	智慧建筑	32
3	BIM	97	18	工程造价	30
4	机器人	90	19	建筑设计	29
5	智能家居	90	20	神经网络	27
6	大数据	73	21	智能化	26
7	机器学习	69	22	故障诊断	25
8	建筑业	54	23	城市规划	25
9	建筑行业	51	24	学习	24
10	应用	45	25	深度学习	22
11	智慧工地	43	26	信号分析	20
12	智能建筑	40	27	室内设计	19
13	云计算	35	28	专家系统	19
14	5G	34	29	信息化	19
15	智慧城市	33			

表 2 关键词中心性统计

Table 2 Keywords centrality statistics

序号	关键词	中心性	序号	关键词	中心性
1	人工智能	0.58	16	发展趋势	0.06
2	机器人	0.21	17	智能建筑	0.05
3	BIM	0.17	18	建筑设计	0.05
4	智能家居	0.13	19	神经网络	0.05
5	云计算	0.12	20	决策系统	0.05
6	城市规划	0.11	21	智慧工地	0.04
7	物联网	0.1	22	智慧建筑	0.04
8	建筑行业	0.07	23	设计	0.04
9	学习	0.07	24	智能	0.04
10	信息化	0.07	25	应用	0.03
11	发展	0.07	26	智慧城市	0.03
12	大数据	0.06	27	深度学习	0.03
13	机器学习	0.06	28	室内设计	0.03
14	建筑业	0.06	29	智慧化	0.03
15	专家系统	0.06			

器人、BIM,其中人工智能始终贯穿土木工程智能化发展进程,中心性最高;智能机器人的研究涵盖了自然语言处理、计算机视觉、语音识别和交叉领域,在土木工程智能化发展中,智能机器人可应用于智能建造、智能养维护等方面;BIM的研究同样得到了极大关注,在建设项目全生命周期内均有应用。

由表1、表2对比可知,关键词的频数和中心性在排名上有一定差异,表明人工智能在土木工程领域的研究热点在一定程度上不太分明。其中,频数和中心性排名均靠前的关键词有人工智能、机器人、BIM,是人工智能在土木工程领域的热点主题;云计算、学习、信息化的关键词中心性较大,说明这

些关键词的中介作用十分明显,虽然频数相对较低,但其中介作用使之成为人工智能在土木工程领域发展的有效切入点。

由图18可知,中国土木工程领域的研究以人工智能为核心,围绕深度学习、BIM、机器人、决策系统、建筑设计等不同方向进行,整体上呈分散状,不局限于单一研究热点。其中与智能技术相关的关键词,如深度学习、神经网络、云计算、物联网等集中在一起,且这些关键词在表1、表2中均有较高的频数和中心性,代表这些关键词相关性较强且研究较多,是促进土木工程行业向高效、智能、可持续方向发展的关键。此外,图18的关键词共现网络是特定域中的静态表示,不能反映人工智能在土木工程领域内研究主题的变化,还应考虑关键词共现网络中的时间因素。由时间图例可知,自2015年起,云计算、信息化、大数据、机器学习、神经网络、深度学习等方向的关键词得到了持续关注,是近几年土木工程智能化的研究重点。

3) 关键词时序演进分析

利用CiteSpace中的爆破检测算法,可统计一定时期内引起专家学者普遍关注的关键词,如表3所示,是人工智能在土木工程中相关文献的突现关键词统计。关键词强度值越高,代表所考虑时间间隔内得到的关注就越多;突现关键词在一定时期内可发生变化,反映出对应时期内的研究趋势,红色横线部分是关键词突现的时间范围,据此可判定该阶段的前沿主题。根据突现关键词的起止时间,将人工智能在土木工程中的研究归纳为2000—2010年的初级阶段和2011年至今的现阶段。

人工智能在土木工程中研究的初级阶段(2000—2010年)。突现关键词的时间跨度较长,均保持在10 a左右,各个研究方向均衡发展,主要进行了专家系统、人地关系、机器学习、神经网络等初级人工智能的探索,智能化程度较低。其中,专家系统的强度值为最高的7.16,表明早期人工智能在土木工程领域的探索集中在专家系统的研究;随着人工智能技术的不断进步,机器学习、神经网络等方向逐渐被众多学者所研究,尤其是神经网络的强度值达到了6.43,在初级阶段中处于较高水平。表明后来专家学者主要进行人工神经网络的研究,促进了土木工程领域的智能化发展。

人工智能在土木工程中研究的现阶段(2011年至今)。突现关键词的变化较为显著,时间跨度基本保持在2~3 a,表明现阶段是人工智能在土木工程领域的高速发展期,每过几年就有新的智能技术得到突破,越来越多的专家学者加入到土木工程智

表3 突现关键词统计

Table 3 Emergent keywords statistics

突现词	强度	开始年份	结束年份	年份(2000—2021年)
专家系统	7.16	2000	2013	
国土空间	7.02	2000	2015	
地域功能	7.02	2000	2015	
人地关系	6.74	2000	2016	
信号分析	6.18	2000	2016	
思维特征	5.71	2000	2011	
抑霜技术	5.19	2000	2011	
建筑电气	5.18	2000	2011	
机器学习	5.05	2000	2013	
指标体系	4.67	2000	2011	
信息技术	4.04	2000	2015	
故障诊断	3.94	2000	2011	
神经网络	6.43	2001	2010	
决策系统	5.67	2002	2016	
学习	9.00	2011	2016	
机器人	8.78	2012	2016	
应用	3.75	2013	2014	
城市规划	4.41	2014	2015	
建筑行业	4.28	2016	2018	
建筑设计	3.27	2016	2019	
智能家居	6.07	2017	2018	
智慧建筑	4.39	2018	2019	
大数据	4.83	2019	2021	

能化的研究,智能化程度也越来越深。其中,学习的强度值为最高的9,表明现阶段主要进行学习相关的研究,如智能化较低的机器学习与智能化较高的深度学习;最后的突现关键词是大数据,表明现阶段研究朝着数字化、自动化、信息化、智能化的方向进行;此外,突现关键词还包含了智能家居、智慧建筑、建筑设计等不同应用方向,表明现阶段的智能化发展较为全面,各个方向均有涉及。

4 展望

运用CiteSpace软件对2000年以来中国人工智能在土木工程领域的研究成果进行文献计量和可视化分析,明确该领域的研究现状、研究热点和前沿主题,结合土木工程领域智能化发展的实际需要,对今后的发展前景做出展望。

1)重视人工智能在土木工程领域各方向的均衡发展。目前,人工智能作为促进土木工程领域向数字化、自动化、信息化和智能化发展的有效手段,得到了普遍关注与研究,如智能设计方向的拓扑优化研究,智能建造方向的BIM、3D打印研究。智能养维护方向的无人机、人工神经网络研究,但各研

究方向发展不均衡,接下来应扩展人工智能在土木工程领域的研究范围,积极探索人工智能在土木工程领域不同方向的尝试。

2)强化土木工程领域的智能化研究深度。根据前沿研究文献及上述可视化分析可知,现阶段研究主要集中在神经网络、大数据和深度学习等方向。相较于以往研究,智能化程度越来越高,接下来应深入探求更高水平的智能技术,如智能算法、智能科学家、强化学习等。

3)扩展人工智能在土木工程领域的适用情境和服务对象。产业应用是推动人工智能在土木工程领域发展的重要驱动力,为促进人工智能在土木工程领域的快速发展,近年来,中国出台了众多人工智能产业的相关政策。然而在土木工程领域,相较于智能化研究水平,智能化应用程度仍然较低,接下来,应加强人工智能在土木工程领域的实际应用,真正把科学研究应用到实际生产中,从而实现土木工程领域高效、智能、可持续发展。

4)加强跨机构、跨领域的合作研究。目前,人工智能在土木工程领域的创新研究有了一定积累,但在土木工程各研究方向的融合发展尚有所欠缺。接下来应建立土木工程各研究方向的人工智能协同创新体系,解决不同研究团队间的集成度不高、信息孤岛等问题,以人工智能技术为切入点,实现土木工程全生命周期智能化发展的最终目标。

5 结论

定性梳理了自然语言处理、计算机视觉、语音识别、交叉学科这4个人工智能基础研究领域的相关研究,定量分析了智能设计、智能建造和智能养维护的研究现状,利用CiteSpace可视化软件总结人工智能在土木工程领域的研究趋势并进行展望,得到以下结论:

1)人工智能在土木工程基础研究领域中均有应用,但整体智能化程度较低,实际应用也存在一定局限性,后续研究应结合大数据、深度学习、强化学习等智能技术,促进土木工程在基础研究领域的智能发展。

2)智能设计、智能建造、智能养维护的相关研究及应用较为广泛,但智能化发展不均衡,各阶段主要集中在某一方面或某一问题的研究,接下来应关注土木工程全生命周期的整体智能化发展,提高土木工程各阶段智能化水平。

3)现阶段人工智能技术得到极大关注,众多研究团队开展了土木工程领域智能化研究,但大多集中在某一方向的研究,各研究方向的融合发展尚有

所欠缺,接下来应打破信息壁垒,促进各研究团队间智能技术的交流合作,推进土木工程智能研究的协同发展。

参考文献

- [1] MAGANA MARTINEZ D, FERNANDEZ-RODRIGUEZ J C. Artificial intelligence applied to project success: A literature review [J]. *International Journal of Interactive Multimedia and Artificial Intelligence*, 2015, 3(5): 77-85.
- [2] WETZSTEIN G, OZCAN A, GIGAN S, et al. Inference in artificial intelligence with deep optics and photonics [J]. *Nature*, 2020, 588(7836): 39-47.
- [3] 鲍跃全, 李惠. 人工智能时代的土木工程[J]. *土木工程学报*, 2019, 52(5): 1-11.
BAO Y Q, LI H. Artificial intelligence for civil engineering [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(5): 1-11. (in Chinese)
- [4] MUTHUKRISHNAN N, MALEKI F, OVENS K, et al. Brief history of artificial intelligence [J]. *Neuroimaging Clinics of North America*, 2020, 30(4): 393-399.
- [5] 吕文晶, 陈劲, 刘进. 政策工具视角的中国人工智能产业政策量化分析[J]. *科学学研究*, 2019, 37(10): 1765-1774.
LV W J, CHEN J, LIU J. A quantitative analysis of China's Artificial Intelligence industry policy from the perspective of policy tools [J]. *Studies in Science of Science*, 2019, 37(10): 1765-1774. (in Chinese)
- [6] 罗齐鸣, 华建民, 黄乐鹏, 等. 基于知识图谱的国内外智慧建造研究可视化分析[J]. *建筑结构学报*, 2021, 42(6): 1-14.
LUO Q M, HUA J M, HUANG L P, et al. Visualization analysis of domestic and overseas intelligent construction assisted by mapping knowledge domains [J]. *Journal of Building Structures*, 2021, 42(6): 1-14. (in Chinese)
- [7] 王涛, 刘媛, 潘毅, 等. 基于改进粒子滤波算法的Bouc-Wen模型参数在线识别方法[J]. *重庆大学学报*, 2021, 44(5): 38-49.
WANG T, LIU Y, PAN Y, et al. Online parameters identification method of Bouc-Wen model based on modified particle algorithm [J]. *Journal of Chongqing University*, 2021, 44(5): 38-49. (in Chinese)
- [8] 杨阳, 李青泽, 姚刚. 预制叠合板构件智能化识别与检测方法[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2022, 44(1): 87-93.
YANG Y, LI Q Z, YAO G. Intelligent identification and detection method of prefabricated laminated slab [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2022, 44(1): 87-93. (in Chinese)
- [9] HUANG Y Q, LI J Y, FU J Y. Review on application of artificial intelligence in civil engineering [J]. *Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2019, 121(3): 845-875.
- [10] TIWARY U S, SIDDIQUI T. Natural language processing and information retrieval [M]. New York: Oxford University Press, 2008: 3-21.
- [11] 王煜, 邓晖, 李晓瑶, 等. 自然语言处理技术在建筑工程中的应用研究综述[J]. *图学学报*, 2020, 41(4): 501-511.
WANG Y, DENG H, LI X Y, et al. A review of natural language processing application in construction engineering [J]. *Journal of Graphics*, 2020, 41(4): 501-511. (in Chinese)
- [12] NEDELJKOVIĆ Đ, KOVAČEVIĆ M. Building a construction project key-phrase network from unstructured text documents [J]. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 2017, 31(6): 04017058.
- [13] TIXIER A J P, HALLOWELL M R, RAJAGOPALAN B, et al. Automated content analysis for construction safety: A natural language processing system to extract precursors and outcomes from unstructured injury reports [J]. *Automation in Construction*, 2016, 62: 45-56.
- [14] 王飞, 陈立, 易绵竹, 等. 新技术驱动的自然语言处理进展[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2018, 51(8): 669-678.
WANG F, CHEN L, YI M Z, et al. Advances in natural language processing under new technology-driven [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2018, 51(8): 669-678. (in Chinese)
- [15] KIM T, CHI S. Accident case retrieval and analyses: Using natural language processing in the construction industry [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2019, 145(3): 04019004.
- [16] 李舟军, 范宇, 吴贤杰. 面向自然语言处理的预训练技术研究综述[J]. *计算机科学*, 2020, 47(3): 162-173.
LI Z J, FAN Y, WU X J. Survey of natural language processing pre-training techniques [J]. *Computer Science*, 2020, 47(3): 162-173. (in Chinese)
- [17] 孙琦钰, 赵超强, 唐漾, 等. 基于无监督域自适应的计算机视觉任务研究进展[J]. *中国科学: 技术科学*, 2022, 52(1): 26-54.
SUN Q Y, ZHAO C Q, TANG Y, et al. A survey on unsupervised domain adaptation in computer vision tasks [J]. *Scientia Sinica (Technologica)*, 2022, 52(1): 26-54. (in Chinese)
- [18] 周颖, 张立迅, 刘彤, 等. 基于计算机视觉的结构系统识别[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(11): 17-23.
ZHOU Y, ZHANG L X, LIU T, et al. Structural system identification based on computer vision [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(11): 17-23. (in

- Chinese)
- [19] ZAURIN R, NECATI CATBAS F. Structural health monitoring using video stream, influence lines, and statistical analysis [J]. *Structural Health Monitoring*, 2011, 10(3): 309-332.
- [20] SEO J, HAN S, LEE S, et al. Computer vision techniques for construction safety and health monitoring [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(2): 239-251.
- [21] 韩晓健, 赵志成. 基于计算机视觉技术的结构表面裂缝检测方法研究 [J]. *建筑结构学报*, 2018, 39(Sup1): 418-427.
- HAN X J, ZHAO Z C. Structural surface crack detection method based on computer vision technology [J]. *Journal of Building Structures*, 2018, 39(Sup1): 418-427. (in Chinese)
- [22] ZHOU Y, PEI Y L, LI Z W, et al. Vehicle weight identification system for spatiotemporal load distribution on bridges based on non-contact machine vision technology and deep learning algorithms [J]. *Measurement*, 2020, 159: 107801.
- [23] 宋燕飞, 罗尧治, 沈雁彬, 等. 基于双目视觉与图像识别的网架结构三维重建 [J]. *空间结构*, 2020, 26(4): 28-35, 74.
- SONG Y F, LUO Y Z, SHEN Y B, et al. Three-dimensional reconstruction method of space grids based on computer vision [J]. *Spatial Structures*, 2020, 26(4): 28-35, 74. (in Chinese)
- [24] 吕钊, 吴小培, 张超. 鲁棒语音识别技术综述 [J]. *安徽大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(5): 17-24.
- LV Z, WU X P, ZHANG C. Review of robust speech recognition [J]. *Journal of Anhui University (Natural Science Edition)*, 2013, 37(5): 17-24. (in Chinese)
- [25] GUO X, SHEN Z J, ZHANG Y J, et al. Review on the application of artificial intelligence in smart homes [J]. *Smart Cities*, 2019, 2(3): 402-420.
- [26] 王国胤, 瞿中, 赵显莲. 交叉融合的“人工智能+”学科建设探索与实践 [J]. *计算机科学*, 2020, 47(4): 1-5.
- WANG G Y, QU Z, ZHAO X L. Practical exploration of discipline construction of artificial intelligence+ [J]. *Computer Science*, 2020, 47(4): 1-5. (in Chinese)
- [27] MANZOOR B, OTHMAN I, DURDYEV S, et al. Influence of artificial intelligence in civil engineering toward sustainable development-A systematic literature review [J]. *Applied System Innovation*, 2021, 4(3): 52.
- [28] 唐和生, 李大伟, 苏瑜, 等. 人工神经网络预测混凝土柱屈服性能 [J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(11): 17-24.
- TANG H S, LI D W, SU Y, et al. Prediction of the yield performance of RC columns by neural network [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2015, 42(11): 17-24. (in Chinese)
- [29] 丁杨, 周双喜, 董晶亮, 等. 人工智能方法在土木工程监测中的运用 [J]. *材料导报*, 2019, 33(Sup1): 274-277.
- DING Y, ZHOU S X, DONG J L, et al. Application comparison of artificial intelligence method in civil engineering monitoring [J]. *Materials Reports*, 2019, 33(Sup1): 274-277. (in Chinese)
- [30] 赵平, 熊倩, 张鑫, 等. 基于YOLO-BP神经网络的古建筑修缮阶段火灾监测方法 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2020, 16(12): 122-128.
- ZHAO P, XIONG Q, ZHANG X, et al. Monitoring method of fire in repair stage of ancient buildings based on YOLO-BP neural network [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2020, 16(12): 122-128. (in Chinese)
- [31] 赵艳男, 杜文凤, 王英奇, 等. 基于BP神经网络算法的树状结构智能找形研究 [J]. *建筑结构学报*, 2022, 43(4): 77-85.
- ZHAO Y N, DU W F, WANG Y Q, et al. Study on intelligent shape finding for tree-like structures based on BP neural network algorithm [J]. *Journal of Building Structures*, 2022, 43(4): 77-85. (in Chinese)
- [32] OLIVEIRA V, PINHO P. Evaluation in urban planning: Advances and prospects [J]. *Journal of Planning Literature*, 2010, 24(4): 343-361.
- [33] 麦克·巴迪, 沈尧. 城市规划与设计中的人工智能 [J]. *时代建筑*, 2018(1): 24-31.
- MICHAEL B, SHEN Y. Artificial intelligence in city planning and design [J]. *Time + Architecture*, 2018(1): 24-31. (in Chinese)
- [34] 吴志强. 人工智能辅助城市规划 [J]. *时代建筑*, 2018(1): 6-11.
- WU Z Q. Artificial intelligence assisted urban planning [J]. *Time + Architecture*, 2018(1): 6-11. (in Chinese)
- [35] 甘惟. 城市生命视角下的人工智能规划理论与模型 [J]. *规划师*, 2018, 34(11): 13-19.
- GAN W. AI planning theory and model from city life viewpoint [J]. *Planners*, 2018, 34(11): 13-19. (in Chinese)
- [36] 林博, 刁荣丹, 吴依婉. 基于人工智能的城市空间生成设计框架: 以温州市中央绿轴北延段为例 [J]. *规划师*, 2019, 35(17): 44-50.
- LIN B, DIAO R D, WU Y W. Urban space generative design based on artificial intelligence: Northern extension of central green axis, Wenzhou [J]. *Planners*, 2019, 35(17): 44-50. (in Chinese)
- [37] 张攀, 王波, 卿晓霞. 基于神经网络与专家系统的智能评估系统 [J]. *重庆建筑大学学报*, 2004, 26(1): 129-132.
- ZHANG P, WANG B, QING X X. Research and development of evaluation system based on neural network and expert system [J]. *Journal of Chongqing*

- Jianzhu University, 2004, 26(1): 129-132. (in Chinese)
- [38] LYU J, CHEN M N. Automated visual inspection expert system for multivariate statistical process control chart [J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, 36(3): 5113-5118.
- [39] 朱浮声, 李校兵, 王韶群, 等. 基坑支挡结构设计专家系统的开发与研制[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2000, 21(3): 298-300.
- ZHU F S, LI X B, WANG S Q, et al. An expert system application to the selection and design of retaining structures [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2000, 21(3): 298-300. (in Chinese)
- [40] 徐宇鸣. 多层钢结构住宅结构设计专家系统(MSR-ES) [D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- XU Y M. An expert system for structural design of multi-storey steel structure residential buildings (MSR-ES) [D]. Shenyang: Northeastern University, 2006. (in Chinese)
- [41] 张鹤志, 张棒, 谢献忠, 等. 渐进演化类拓扑优化算法的优化准则对比研究[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2020, 42(3): 73-79.
- ZHANG H Z, ZHANG B, XIE X Z, et al. Comparative study on optimization criteria of evolutionary topology optimization algorithms [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2020, 42(3): 73-79. (in Chinese)
- [42] KAVIANI S, SOHN I. Application of complex systems topologies in artificial neural networks optimization: an overview [J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 180: 115073.
- [43] LEI X, LIU C, DU Z L, et al. Machine learning-driven real-time topology optimization under moving morphable component-based framework [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2019, 86(1): 011004.
- [44] JIANG X C, WANG H, LI Y, et al. Machine learning based parameter tuning strategy for MMC based topology optimization [J]. *Advances in Engineering Software*, 2020, 149: 102841.
- [45] QIU Z, LI Q H, LIU S T, et al. Clustering-based concurrent topology optimization with macrostructure, components, and materials [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2021, 63(3): 1243-1263.
- [46] ULU E, ZHANG R S, KARA L B. A data-driven investigation and estimation of optimal topologies under variable loading configurations [J]. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering: Imaging & Visualization*, 2016, 4(2): 61-72.
- [47] WHITE D A, ARRIGHI W J, KUDO J, et al. Multiscale topology optimization using neural network surrogate models [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2019, 346: 1118-1135.
- [48] DENG H, TO A C. Topology optimization based on deep representation learning (DRL) for compliance and stress-constrained design [J]. *Computational Mechanics*, 2020, 66(2): 449-469.
- [49] SASAKI H, IGARASHI H. Topology optimization accelerated by deep learning [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2019, 55(6): 1-5.
- [50] TAN R K, ZHANG N L, YE W J. A deep learning-based method for the design of microstructural materials [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 61(4): 1417-1438.
- [51] WANG D L, XIANG C, PAN Y, et al. A deep convolutional neural network for topology optimization with perceptible generalization ability [J]. *Engineering Optimization*, 2021: 1-16.
- [52] NIE Z G, LIN T, JIANG H L, et al. TopologyGAN: Topology optimization using generative adversarial networks based on physical fields over the initial domain [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2021, 143(3): 1-18.
- [53] LUO L J, HUANG X P. Research on intelligent general aviation construction under the background of new infrastructure construction [J]. *Journal of Innovation and Social Science Research*, 2020, 7(6): 160-164.
- [54] 刘占省, 刘诗楠, 赵玉红, 等. 智能建造技术发展现状与未来趋势[J]. *建筑技术*, 2019, 50(7): 772-779.
- LIU Z S, LIU S N, ZHAO Y H, et al. Development status and future trends of intelligent construction technology [J]. *Architecture Technology*, 2019, 50(7): 772-779. (in Chinese)
- [55] PARK M W, ELSAFTY N, ZHU Z H. Hardhat-wearing detection for enhancing on-site safety of construction workers [J]. *Journal of Construction Engineering and Management*, 2015, 141(9): 04015024.
- [56] YU Y T, GUO H L, DING Q H, et al. An experimental study of real-time identification of construction workers' unsafe behaviors [J]. *Automation in Construction*, 2017, 82: 193-206.
- [57] FANG Q, LI H, LUO X C, et al. Detecting non-hardhat-use by a deep learning method from far-field surveillance videos [J]. *Automation in Construction*, 2018, 85: 1-9.
- [58] 苏阳, 毛超, 郭鹏飞. 基于深度学习三维重建技术的建筑施工进度管理自动化系统构建[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2024, 46(1): 173-181.
- SU Y, MAO C, GUO P F. Collaborative management of construction schedule based on deep learning 3D reconstruction technology[J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2024, 46(1): 173-181. (in Chinese)
- [59] 胡振中, 冷烁, 袁爽. 基于BIM和数据驱动的智能运维管理方法[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2022, 62(2):

- 199-207.
- HU Z Z, LENG S, YUAN S. BIM-based, data-driven method for intelligent operation and maintenance [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(2): 199-207. (in Chinese)
- [60] KWON O S, PARK C S, LIM C R. A defect management system for reinforced concrete work utilizing BIM, image-matching and augmented reality [J]. Automation in Construction, 2014, 46: 74-81.
- [61] 白庶, 张艳坤, 韩凤, 等. BIM技术在装配式建筑中的应用价值分析[J]. 建筑经济, 2015, 36(11): 106-109.
- BAI S, ZHANG Y K, HAN F, et al. Analysis on the application value of BIM technology in prefabricated building [J]. Construction Economy, 2015, 36(11): 106-109. (in Chinese)
- [62] TAO F, CHENG J F, QI Q L, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 94(9-12): 3563-3576.
- [63] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
- TAO F, LIU W R, LIU J H, et al. Digital twin and its potential application exploration [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18. (in Chinese)
- [64] TAO F, ZHANG M. Digital twin shop-floor: A new shop-floor paradigm towards smart manufacturing [J]. IEEE Access, 2017, 5: 20418-20427.
- [65] 谢琳琳, 陈雅娇. 基于BIM+数字孪生技术的装配式建筑项目调度智能化管理平台研究[J]. 建筑经济, 2020, 41(9): 44-48.
- XIE L L, CHEN Y J. Research on intelligent management platform of prefabricated building project scheduling based on BIM+Digital twin technology [J]. Construction Economy, 2020, 41(9): 44-48. (in Chinese)
- [66] 刘占省, 刘子圣, 孙佳佳, 等. 基于数字孪生的智能建造方法及模型试验[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(6): 26-36.
- LIU Z S, LIU Z S, SUN J J, et al. Intelligent construction methods and model experiments based on digital twins [J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(6): 26-36. (in Chinese)
- [67] 孟凡斐, 王酉钰, 李之建, 等. 基于3D打印模型试验的含结构面异形隧洞的变形破坏研究[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(1): 36-44.
- MENG F F, WANG Y Y, LI Z J, et al. Model testing research on deformation and failure of special section tunnel with structural plane based on 3D printing technique [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(1): 36-44. (in Chinese)
- [68] PERKINS I, SKITMORE M. Three-dimensional printing in the construction industry: A review [J]. International Journal of Construction Management, 2015, 15(1): 1-9.
- [69] 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[J]. 土木工程与管理学报, 2015, 32(3): 1-10.
- DING L Y, XU J, QIN Y W. Research and application review of the digital construction technology of 3D printing for construction [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2015, 32(3): 1-10. (in Chinese)
- [70] LUNDEEN K M, KAMAT V R, MENASSA C C, et al. Scene understanding for adaptive manipulation in robotized construction work [J]. Automation in Construction, 2017, 82: 16-30.
- [71] 车平, 李军平, 邹勇, 等. 港珠澳大桥组合梁钢主梁机器人自动焊试验及应用[J]. 焊接, 2017(10): 59-63, 76.
- CHE P, LI J P, ZOU Y, et al. Test and application of welding robot for composite beam steel girder of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. Welding & Joining, 2017(10): 59-63, 76. (in Chinese)
- [72] 周冲, 郑义, 黄轶群, 等. 预制PC构件生产线工业机器人系统设计[J]. 施工技术, 2020, 49(5): 80-84.
- ZHOU C, ZHENG Y, HUANG Y Q, et al. Design of industrial robot system for PC component production line [J]. Construction Technology, 2020, 49(5): 80-84. (in Chinese)
- [73] 郭俊可, 王杜娟. 基于视觉导航定位的盾构机器人换刀技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 300-307.
- GUO J K, WANG D J. Research on cutter-replacement technology for shield machine using robot based on visual navigation positioning [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 300-307. (in Chinese)
- [74] 雷鹰, 刘丽君, 郑翥鹏. 结构健康监测若干方法与技术研究进展综述[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2021, 60(3): 630-640.
- LEI Y, LIU L J, ZHENG Z P. Review on the developments of some methods and techniques in structural health monitoring [J]. Journal of Xiamen University (Natural Science), 2021, 60(3): 630-640. (in Chinese)
- [75] 潘毅, 刘扬良, 黄晨, 等. 大型铁路站房结构健康监测研究现状评述[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(1): 70-80.
- PAN Y, LIU Y L, HUANG C, et al. A review of structural health monitoring of large railway stations [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2020, 42(1): 70-80. (in Chinese)
- [76] 赵天祺, 勾红叶, 陈萱颖, 等. 桥梁信息化及智能桥梁2020年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(Sup1): 268-279.
- ZHAO T Q, GOU H Y, CHEN X Y, et al. State-of-

- the-art review of bridge informatization and intelligent bridge in 2020 [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2021, 43(Sup1): 268-279. (in Chinese)
- [77] KHAN F, ELLENBERG A, MAZZOTTI M, et al. Investigation on bridge assessment using unmanned aerial systems [C]//Structures Congress 2015. April 23-25, 2015, Portland, Oregon. Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2015: 404-413.
- [78] REAGAN D, SABATO A, NIEZRECKI C. Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges [J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, 17(5): 1056-1072.
- [79] KIM I H, JEON H, BAEK S C, et al. Application of crack identification techniques for an aging concrete bridge inspection using an unmanned aerial vehicle [J]. *Sensors*, 2018, 18(6): 1881.
- [80] 王杰, 麦志恒, 费跃农. 焊缝检测机器人的研究现状及其发展趋势[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(2): 1-3, 10. WANG J, MAI Z H, FEI Y N. Research current status and development trends of welding seam inspection robot [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(2): 1-3, 10. (in Chinese)
- [81] 季云峰, 王晓菲. 斜拉索表观检测机器人的开发[J]. *城市道桥与防洪*, 2021(7): 312-314, 29. JI Y F, WANG X F. Development of apparent detection robot for stayed cable [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2021(7): 312-314, 29. (in Chinese)
- [82] CHEN T C, LIU C L, LIN H D. Advanced artificial neural networks [J]. *Algorithms*, 2018, 11(7): 102.
- [83] 孙鸿敏, 李宏男. 土木工程结构健康监测研究进展[J]. *防灾减灾工程学报*, 2003, 23(3): 92-98. SUN H M, LI H N. State-of-the-art review of the structural health monitoring in civil engineering [J]. *Journal of Seismology*, 2003, 23(3): 92-98. (in Chinese)
- [84] 姜绍飞, 张春梅, 金子巍, 等. 基于BP神经网络和D-S证据理论的损伤识别方法[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2007, 23(1): 1-5. JIANG S F, ZHANG C M, JIN Z W, et al. Damage identification method based on back-propagation neural network and D-S evidential theory [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2007, 23(1): 1-5. (in Chinese)
- [85] PATHIRAGE C S N, LI J, LI L, et al. Structural damage identification based on autoencoder neural networks and deep learning [J]. *Engineering Structures*, 2018, 172: 13-28.
- [86] 谢晓凯, 罗尧治, 张楠, 等. 基于神经网络的大跨度空间钢结构应力实测缺失数据修复方法研究[J]. *空间结构*, 2019, 25(3): 38-44. XIE X K, LUO Y Z, ZHANG N, et al. Missing data reconstruction in stress monitoring of steel spatial structures using neural network techniques [J]. *Spatial Structures*, 2019, 25(3): 38-44. (in Chinese)
- [87] PADIL K H, BAKHARY N, ABDULKAREEM M, et al. Non-probabilistic method to consider uncertainties in frequency response function for vibration-based damage detection using artificial neural network [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2020, 467: 115069.
- [88] NA C, KIM S P, KWAK H G. Structural damage evaluation using genetic algorithm [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, 330(12): 2772-2783.
- [89] LI Z H, AU F T K. Damage detection of bridges using response of vehicle considering road surface roughness [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2015, 15(3): 1450057.
- [90] 毛云霄, 王英杰, 肖军华, 等. 基于过桥车辆响应的遗传算法桥梁损伤识别[J]. *振动测试与诊断*, 2018, 38(4): 696-703, 869. MAO Y X, WANG Y J, XIAO J H, et al. Bridge damage detection using a moving vehicle response on the bridge with genetic algorithm [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2018, 38(4): 696-703, 869. (in Chinese)
- [91] MOHAN S C, YADAV A, KUMAR-MAITI D, et al. A comparative study on crack identification of structures from the changes in natural frequencies using GA and PSO [J]. *Engineering Computations*, 2014, 31(7): 1514-1531.
- [92] 许如锋, 陈建国, 赵作周, 等. 基于应变和PSO-BP神经网络的连续梁桥损伤识别方法[J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(6): 2093-2098. XU R F, CHEN J G, ZHAO Z Z, et al. Damage identification and discrimination method for the continuous bridges based on the strain and PSO-BP neural network [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(6): 2093-2098. (in Chinese)
- [93] 徐菁, 刘斌, 董金慧, 等. 用粒子群算法选择体育馆监测系统中传感器的最优布点[J]. *空间结构*, 2019, 25(1): 40-46. XU J, LIU B, DONG J H, et al. Optimal placement of sensors for monitoring systems on a gymnasium using particle swarm optimization [J]. *Spatial Structures*, 2019, 25(1): 40-46. (in Chinese)
- [94] CHA Y J, CHOI W, BÜYÜKÖZTÜRK O. Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2017, 32(5): 361-378.
- [95] ABDELJABER O, AVCI O, KIRANYAZ M S, et al. 1-D CNNs for structural damage detection: Verification on a structural health monitoring benchmark data [J]. *Neurocomputing*, 2018, 275: 1308-1317.

- [96] ATHA D J, JAHANSHAH M R. Evaluation of deep learning approaches based on convolutional neural networks for corrosion detection [J]. *Structural Health Monitoring*, 2018, 17(5): 1110-1128.
- [97] 李雪松, 马宏伟, 林逸洲. 基于卷积神经网络的结构损伤识别[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(1): 159-167.
LI X S, MA H W, LIN Y Z. Structural damage identification based on convolution neural network [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(1): 159-167. (in Chinese)
- [98] 何浩祥, 王玮, 黄磊. 基于卷积神经网络和递归图的桥梁损伤智能识别[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2020, 28(4): 966-980.
HE H X, WANG W, HUANG L. Intelligent damage detection for bridge based on convolution neural network and recurrence plot [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2020, 28(4): 966-980. (in Chinese)
- [99] CHEN C. Searching for intellectual turning points: Progressive knowledge domain visualization [J]. *PNAS*, 2004, 101(Sup1): 5303-5310.
- [100] CHEN C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57(3): 359-377.

(编辑 王秀玲)