

人工智能在土木工程创新应用

张德洋, 李政依, 贾明, 杜海龙

云南大学建筑与规划学院, 云南 昆明

收稿日期: 2024年7月22日; 录用日期: 2024年8月13日; 发布日期: 2024年8月26日

摘要

土木工程广泛应用于结构设计、施工建设等方面。现代科技迅速发展, 人工智能化水平提高, 扩展了土木工程的相关领域研究。本文通过分析相关研究成果以及人工智能在土木工程中具有代表性的创新应用, 包括智能规划、智能设计、智能养维护等, 阐述了人工智能为土木工程带来的变革和发展机遇, 对土木工程的智能化发展方向进行展望。

关键词

人工智能, 土木工程, 创新应用

Innovative Application of Artificial Intelligence in Civil Engineering

Deyang Zhang, Zhengyi Li, Ming Jia, Hailong Du

School of Architecture and Planning, Yunnan University, Kunming Yunnan

Received: Jul. 22nd, 2024; accepted: Aug. 13th, 2024; published: Aug. 26th, 2024

Abstract

Civil engineering is widely used in structural design, construction and other aspects. With the rapid development of modern science and technology, the level of artificial intelligence has been improved, and the research in related fields of civil engineering has been expanded. By analyzing the relevant research results and the representative innovative applications of artificial intelligence in civil engineering, including intelligent planning, intelligent design, intelligent maintenance, etc., this paper expounds the changes and development opportunities brought by artificial intelligence to civil engineering, and looks forward to the intelligent development direction of civil engineering.

Keywords

Artificial Intelligence, Civil Engineering, Innovative Applications

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着科技发展,人工智能逐渐成为诸多领域实现变革的重要驱动力。在传统且重要的土木工程研究领域中,人工智能的引入带来了前所未有的创新性变革。土木工程立足于社会基础设施建设,如道路、桥梁、隧道、房屋等,对国家经济发展和人民生活质量的提高有着深远影响。然而,传统的土木工程在实际应用过程中,面对日益复杂且不确定性增加的工程需求、质量要求和环境条件时,往往暴露出一定的局限性。

人工智能的出现为突破这些障碍提供了新方法与新思路。因其具有强大的数据运算、分析、处理能力,从而能够从大量繁琐的数据中挖掘信息、评价风险,继而为优化工程决策方案提供科学依据。通过机器学习和深度学习,人工智能可以对结构的力学性能、稳定性等进行较为精确的模拟计算和评估预测,施工效率和质量也由此得到提高。推广人工智能的深入研究可实现对土木工程全生命周期的智能化管理。

在此背景下,深入研究人工智能在土木工程上的创新应用具有重要的理论指导意义和实际实用价值。它不仅有助于推动土木工程领域的技术进步和产业升级,更有望为构建更加智能、高效、可持续的未来土木工程体系奠定基础。

2. 人工智能在土木工程中的主要应用领域

2.1. 智能规划

在这个过程中,博弈模型(CityGo)和城市智能模拟平台(CIM)成为了重要的研究工具,例如,宁波城市树的概念,就是这一探索的结晶,它展现了人工智能如何助力城市规划的科学性和前瞻性[1]。

Chen 等[2]人则利用地理信息系统(GIS)技术,构建了精细的空间数据模型,通过分层管理的方式,提升了城市规划系统的可操作性和用户体验。这种技术不仅让规划者能够更直观地理解城市空间结构,也为城市规划的决策提供了有力的数据支持。

对于城市地下空间这一宝贵而有限的资源,精确的需求预测更是至关重要,实际应用过程必须要有依据。对于规划者和政策制定者来说,了解模型推荐的具体措施背后的逻辑十分必要。这需要我们借助先进的数据分析技术,结合城市发展的实际情况和未来趋势,进行科学合理的预测和规划[3]。

2.2. 智能设计

城市规划,作为城市发展的蓝图与指南,其核心在于规范城市发展轨迹、研究城市空间布局、并精心部署建设任务[4]。一个科学合理的城市规划,无疑是城市秩序井然、持续繁荣的基石。而今,人工智能技术的融入,正引领着城市规划领域的一场深刻变革[5]。城市规划涉及大量个人信息、地理数据和城市基础设施信息等敏感数据和社会公共利益。因此在利用人工智能进行数据分析和预测时,要确保数据的安全性和隐私保护,同时确保人工智能在这一领域的应用符合伦理准则和社会价值观。相关工作单位

必须采取严格的数据保护措施，以防止数据泄露和滥用。此外 AI 技术引入对社会公正性的影响，也是需要认真考虑的问题。

吴志强[6]教授在这一领域做出了杰出贡献，他结合具体规划项目，构建了先进的城市智能模型，以人工智能为辅助工具，实现了对城市空间的精准布局。他提出的“流”与“形”交互迭代的城市规划新思想，更是为城市规划工作提供了新的视角与思路。

甘惟[7]等学者则聚焦于长三角城市群落的智能模型研究，见图 1 所示，通过模拟推演各城市在区域基础设施、生态资源、土地利用及产业分工等领域的竞争合作关系，揭示了城市群未来的发展趋势与路径。这一研究成果不仅为区域一体化发展提供了有力支持，也为其他城市群的规划工作提供了宝贵借鉴。

此外，林博等[8]学者还建立了城市规划案例数据库，利用机器学习和深度学习技术，对城市布局进行智能规划。他们以温州中央绿轴为例，成功验证了这一方法的可行性与有效性。这一创新实践不仅丰富了城市规划的技术手段，也为城市规划的智能化、精准化发展开辟了新的道路。

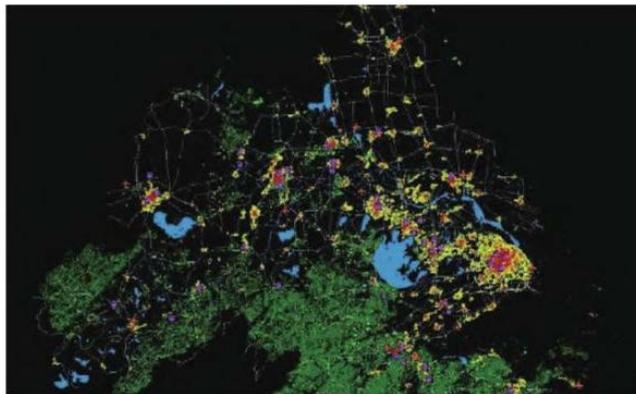


Figure 1. Intelligent model of Yangtze River Delta community
图 1. 长三角群落的智能模型

2.3. 智能养维护

智能维护(Intelligent Maintenance)作为一种前沿的维护策略，其核心在于运用智能监测设备对远程建筑或设施进行持续、不间断的健康状态数据采集，随后将这些数据实时传输至先进的数据处理智能系统。该系统基于复杂的算法与模型，对海量数据进行深度分析，从而精准识别潜在故障、预测维护需求，并自动生成维护指令与详尽的数据分析报告[9]。这一过程不仅实现了维护作业的智能调度与决策，还显著提升了维护工作的效率与准确性。

近年来，随着计算机视觉与大数据技术的飞速发展，智能维护领域的研究呈现出视觉驱动与数据驱动两大并行的趋势。这两种研究路径的深度融合与相互促进，极大地推动了智能维护技术的创新与发展，使得维护作业更加智能化、精准化、高效化。未来，随着人工智能、物联网等技术的不断成熟与应用，智能维护将在更多领域展现出其巨大的潜力与价值。当智能系统利用复杂的算法和模型进行数据分析和修正时，其结果往往非常依赖于算法的内部运作机制。在维护和监测过程中，工程师和利益相关者需要了解 AI 系统是如何得出所需的结论或建议的。如果 AI 系统无法提供合理的解释或推算过程，那么其应用可能会受到限制且存在安全隐患[10]。

智能维护系统的维持依赖于大量实时数据采集和传输，技术人员需考虑潜在的数据泄露、黑客攻击或未经授权的访问风险。有效的数据加密、访问控制和安全协议成为了保护系统免受这些威胁侵害的重要措施。

2.3.1. 视觉驱动的智能养维护

无人机(UAV), 作为无线遥控或程序驱动的高科技飞行器, 其卓越的灵活性与空中悬停能力, 加之搭载的高清摄像技术, 为土木工程领域带来了革命性的变革。在不影响既有建筑结构日常运营的前提下, 无人机能够迅速且高效地执行检测任务, 极大地优化了建筑结构的健康监测流程、评估手段及后续维护策略的制定[11]。

Khan 等学者[12]的研究创新性地采用了装备非接触式多光谱成像系统的无人机, 针对桥梁表面的裂缝问题进行了深入的健康监测探索。他们指出, 该系统不仅能够精准揭示导致桥面开裂的根本原因, 还能全面、细致地记录裂缝的具体位置, 为桥梁维护提供了宝贵的数据支持。

Reagan 等研究者[13]则提出了一种创新性的桥梁健康监测方案, 该方案巧妙地将无人机技术与三维数字图像处理技术相结合, 实现了对现役混凝土桥梁的非接触式监测。通过对两座桥梁的长期监测实践, 他们验证了该方案在捕捉桥梁几何变化(精度达到 10~5 米量级)方面的卓越准确性, 为桥梁结构的实时状态评估提供了科学依据。

Kim 等学者[14]则聚焦于混凝土桥梁的裂缝识别问题, 他们利用商用无人机搭载高分辨率视觉传感器, 结合深度学习算法, 开展了一系列研究。该研究成功实现了对桥梁结构表面裂缝的自动检测、裂缝宽度与长度的精确计算。通过在某民用桥梁上的实际应用案例, 他们充分证明了基于无人机的桥梁检测方法在裂缝识别与量化方面的有效性与可靠性, 如图 2 所示。

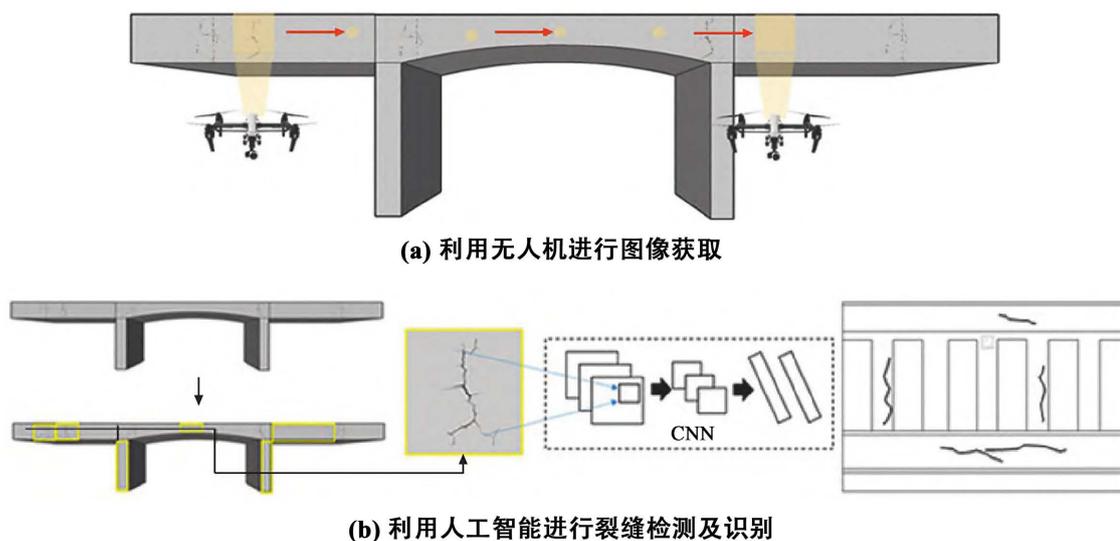


Figure 2. Crack identification based on UAV

图 2. 基于 UAV 的裂纹识别

2.3.2. 数据驱动的智能养维护

谢晓凯等学者[15]在应对大跨度空间结构长期应力监测中常见的数据缺失挑战时, 巧妙地运用了 BP 神经网络构建了相关性模型。这一模型如同一位智能的数据修复师, 能够有效地重建并修复缺失的数据片段, 如图 3 所示。

针对结构损伤识别领域中的复杂不确定性问题, 包括主成分分析的不稳定性、建模误差及测量误差等, Padil 等研究者[16]提出了一种创新的非概率 BP 神经网络方法。该方法通过压缩频响数据作为输入, 不仅显著提升了训练效率, 还进一步增强了损伤识别的精确度, 为结构健康监测提供了更为可靠的技术支持。

在探讨智能养维护技术时,GA-BP 神经网络(即遗传算法优化的 BP 神经网络)也展现出了其独特的优势。Na 等学者[17]针对结构健康监测数据稀缺导致的损伤识别误差问题,开展了基于遗传算法的剪力结构损伤识别研究。该研究在动态特性数据有限且结构刚度参数存在不确定性的情况下,利用结构柔性矩阵推导损伤程度和位置,实现了高效的损伤评估。

Li 等研究者[18]则将目光聚焦于车辆通过桥梁时的动态响应,特别是垂直加速度的变化。他们采用遗传算法,以这些初始响应数据为基础,进行了损伤识别与定位的研究。模拟结果显示,即便在路面粗糙度及噪声干扰等复杂环境下,该方法仍能有效识别连续梁桥的损伤情况,为桥梁的安全监测与维护提供了有力支持。

毛云霄等学者[19]同样利用遗传算法,在桥梁结构多目标损伤识别领域取得了显著成果。他们认为,GA 算法以其高效的优化能力,能够准确识别桥梁在不同损伤状态下的特征,尤其是在桥梁跨中及 3/4 跨位置,识别结果更为精确。这一发现为桥梁结构的精准维护与保养提供了重要的参考依据。

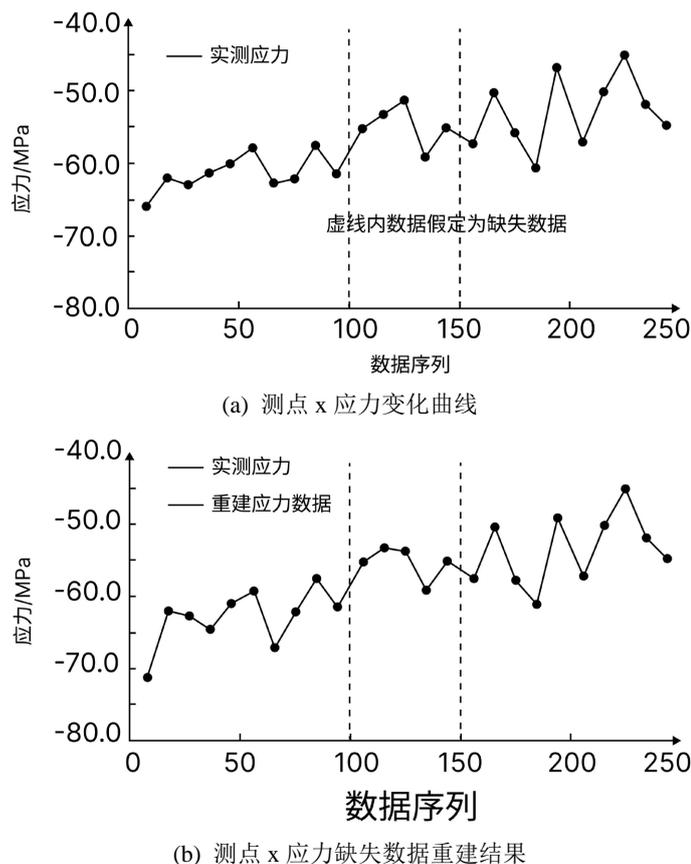


Figure 3. Reconstruction of missing data using BP neural network
图 3. 利用 BP 神经网络重建缺失数据

3. 人工智能在土木工程中的应用研究趋势

人工智能技术在土木工程领域的探索与应用正逐步拓宽其边界,为建筑设计、施工建造及结构维护等领域注入了前所未有的活力与创新思维。在施工质量管理方面,应用人工智能技术可实现智能化的施工质量检测。通过监控土木工程施工过程,能显著提升整体施工质量。例如利用人工智能技术可以实时检测混凝土浇筑过程中的温度变化和应力情况。在施工安全管理方面,人工智能技术的运用能够全面识

别施工中潜在的安全风险，并有效检验和执行安全防护措施。例检测施工人员在施工过程中是否疲劳作业，一旦发现不安全的施工行为，智能建造系统会自动预警[20]。然而，在实际工程实践中，受限于生产成本、技术成熟度及人力资源配置等多重因素，人工智能的全面渗透尚需时日。为了更清晰地洞察这一领域的研究现状与热点趋势，我们借助 CiteSpace 文献分析工具，对中国知网(CNKI)中的人工智能与土木工程相关文献进行了深度挖掘与可视化呈现。

在共性参数框架下，通过设定关键词控制面板的阈值参数为 13，有效过滤了低频关键词，聚焦于核心议题，构建出关键词共现网络图(如图 4 所示)。高频关键词统计(表 1)直观展示了“人工智能”“物联网”“BIM (建筑信息模型)”“机器人”及“智能家居”等关键词的高频出现，它们不仅是当前研究的热点，也预示着土木工程领域智能化转型的方向。但值得注意的是，这些高频词虽具代表性，却未必全面反映近年的最新动态，需结合关键词共现网络图(图 5)及中心性统计(表 2)进行综合分析。

图 5 揭示了土木工程领域人工智能研究的多维图景，研究焦点围绕“人工智能”这一核心，向“深度学习”“BIM”“机器人”“决策系统”及“建筑设计”等多个方向发散，展现出研究议题的广泛性与深度。特别地，“深度学习”“神经网络”“云计算”及“物联网”等智能技术相关关键词紧密相连，高频次与高中心性并存，凸显了它们在推动土木工程向高效、智能、可持续发展方向迈进中的关键作用。

考虑到研究主题的动态演变，我们还需关注关键词共现网络中的时间维度。自 2015 年以来，“云计算”“信息化”“大数据”“机器学习”及“深度学习”等关键词持续受到关注，成为近年来土木工程智能化研究的焦点领域，反映出该领域紧跟时代步伐，不断探索新技术、新方法以应对行业挑战的决心与成果。

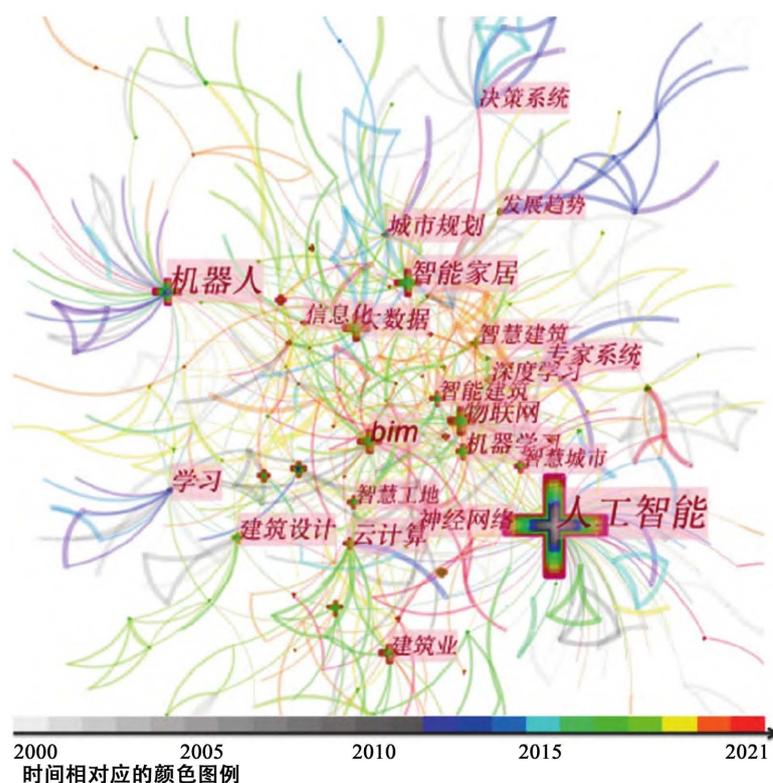


Figure 4. Keyword co-occurrence network
图 4. 关键词共现网络

Table 1. High-frequency keywords statistics
表 1. 高频关键词统计

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	智慧建筑	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			

Table 2. Keywords centrality statistics
表 2. 关键词中心性统计

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	智慧建筑	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			

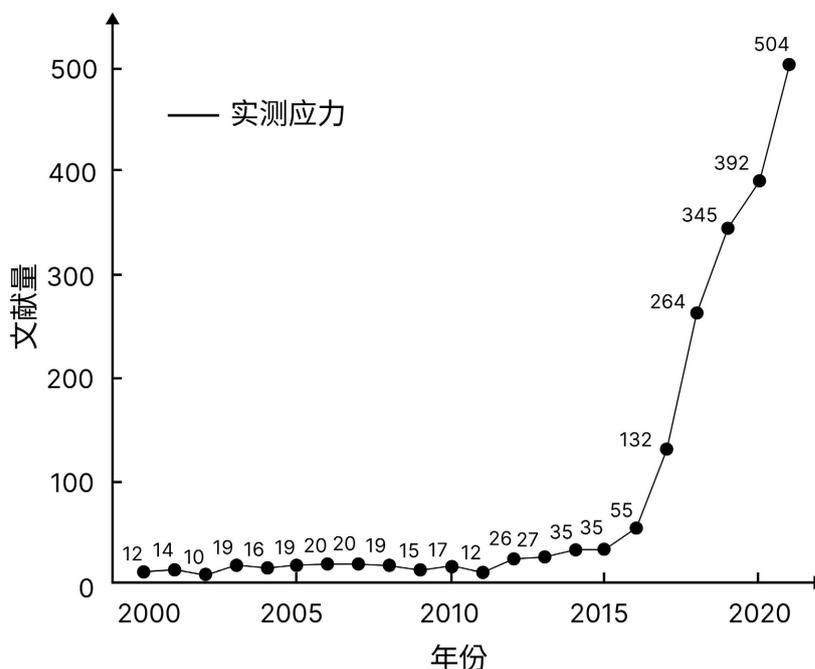


Figure 5. Annual articles on artificial intelligence in civil engineering
图 5. 人工智能在土木工程领域的年发文量

人工智能在土木工程领域的研究正呈现出多元化、深层次的发展态势，不仅涵盖了传统建筑设计与施工管理的智能化升级，还深入探索了新兴技术在行业应用中的无限可能。未来，随着技术的不断进步与成本的逐步降低，人工智能有望在土木工程领域实现更广泛、更深入的融合应用，引领行业迈向更加智慧、绿色的未来[21]。

4. 人工智能在土木行业应用展望

1) 促进人工智能在土木工程各方向的均衡探索：当前，人工智能在土木工程领域的多个分支如智能设计(如拓扑优化)、智能建造(如 BIM、3D 打印技术)以及智能养护维护(如无人机监测、神经网络应用)等方面均展现出巨大潜力。然而，各领域的发展步伐并不一致。为此，我们应积极拓展人工智能在土木工程各研究方向的应用边界，鼓励跨学科合作，平衡发展，确保各方向都能享受到人工智能带来的技术红利。

2) 深化土木工程领域的智能化研究层次：基于当前研究趋势，神经网络、大数据分析及深度学习等已成为智能化研究的前沿阵地。在施工阶段，模拟施工过程是确保施工安全的关键方法；在运维阶段，通过计算分析模型处理结构健康监测与检测数据，为结构的加固或消纳提供了反馈和指导[22]。为了进一步提升智能化水平，我们需要勇于探索更高阶的智能技术，如高级智能算法、智能科学家系统的构建以及强化学习等。这些技术的突破将为土木工程领域带来前所未有的创新动力，推动行业向更高层次的智能化迈进。

3) 拓宽人工智能在土木工程中的应用场景与服务对象：尽管中国政府在推动人工智能产业发展方面不遗余力，但在土木工程领域的实际应用中，智能化程度仍显不足。为了加速人工智能技术的转化落地，我们应积极寻求将科研成果与实际工程项目相结合的有效途径，扩展人工智能的应用场景，包括但不限于基础设施建设、城市更新改造、灾害预警与防治等多个领域。未来工作的重点包括研究结构健康状态的全域感知新原理和技术，推动新材料与技术于在低碳和新老融合升级方面的应用，构建智慧安全的土木

工程基础设施,并最终建立土木工程智慧运维智能体及相关科学理论[23]。同时,要关注不同用户群体的需求,定制化开发智能服务解决方案,提高人工智能技术的普及率和应用价值,从而实现土木工程领域的高效、智能、可持续发展目标。

5. 结论

在深入剖析智能设计、智能规划及智能养维护三大领域的研究现状后,通过 CiteSpace 可视化软件的助力,我们得以洞悉人工智能在土木工程领域的研究动态与未来趋势,并得出以下结论:

1) 基础研究领域智能化初显,但潜力待挖掘:人工智能已悄然渗透至土木工程的基础研究之中,然而,其整体智能化水平尚处于初级阶段,实际应用场景亦受到一定限制。为了加速这一领域的智能化进程,未来的研究应当紧密围绕大数据、深度学习及强化学习等前沿技术,通过技术融合与创新,为土木工程的基础研究注入更强的智能动力,推动其向更高层次的智能化发展迈进。

2) 智能化研究分布不均,全生命周期智能化成新焦点:当前,智能设计、智能规划及智能养维护等领域虽均有所涉猎,但智能化发展的步伐并不一致,各阶段的研究往往聚焦于特定方面或问题。鉴于此,未来的研究应着眼于土木工程全生命周期的智能化发展,从设计、规划到养维护,全方位提升各阶段的智能化水平。这不仅能够促进各阶段之间的无缝衔接与高效协同,还能显著提升土木工程项目的整体效能与可持续性。

参考文献

- [1] 孙振宇, 谯斓, 王孟佳. 人工智能驱动下土木工程行业发展的机遇与挑战[J]. 科技风, 2024(13): 1-3.
- [2] Chen, Z., Chen, R. and Chen, S. (2021) Intelligent Management Information System of Urban Planning Based on GIS. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **40**, 6007-6016. <https://doi.org/10.3233/jifs-189440>
- [3] Carmody, J. and Sterling, R. (1983) *Underground Building Design: Commercial and Institutional Structures*. Web, New York.
- [4] Oliveira, V. and Pinho, P. (2010) Evaluation in Urban Planning: Advances and Prospects. *Journal of Planning Literature*, **24**, 343-361. <https://doi.org/10.1177/0885412210364589>
- [5] 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.
- [6] 吴志强. 人工智能辅助城市规划[J]. 时代建筑, 2018(1): 6-11.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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, 2020, 42(1): 70-80.
- [11] 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, 2021, 43(1): 268-279.
- [12] Khan, F., Ellenberg, A., Mazzotti, M., Kontsos, A., Moon, F., Pradhan, A., *et al.* (2015) Investigation on Bridge Assessment Using Unmanned Aerial Systems. *Structures Congress 2015*, Portland, 23-25 April 2015, 404-413. <https://doi.org/10.1061/9780784479117.035>
- [13] Reagan, D., Sabato, A. and Niezrecki, C. (2017) Feasibility of Using Digital Image Correlation for Unmanned Aerial Vehicle Structural Health Monitoring of Bridges. *Structural Health Monitoring*, **17**, 1056-1072. <https://doi.org/10.1177/1475921717735326>
- [14] Kim, I., Jeon, H., Baek, S., Hong, W. and Jung, H. (2018) Application of Crack Identification Techniques for an Aging Concrete Bridge Inspection Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Sensors*, **18**, Article No. 1881. <https://doi.org/10.3390/s18061881>
- [15] 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.
- [16] Padil, K.H., Bakhary, N., Abdulkareem, M., Li, J. and Hao, H. (2020) Non-Probabilistic Method to Consider Uncertainties in Frequency Response Function for Vibration-Based Damage Detection Using Artificial Neural Network. *Journal of Sound and Vibration*, **467**, Article ID: 115069. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2019.115069>
- [17] Na, C., Kim, S. and Kwak, H. (2011) Structural Damage Evaluation Using Genetic Algorithm. *Journal of Sound and Vibration*, **330**, 2772-2783. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2011.01.007>
- [18] Li, Z. and Au, F.T.K. (2015) Damage Detection of Bridges Using Response of Vehicle Considering Road Surface Roughness. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, **15**, Article ID: 1450057. <https://doi.org/10.1142/s0219455414500576>
- [19] 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.
- [20] 杜润泽. 智能建造在土木工程施工中的应用[C]//华教创新(北京)文化传媒有限公司. 教学改革成果交流暨专业发展战略研讨会论文集(基础教育). 北京: 中国环球文化出版社, 2021: 6.
- [21] 刘红波, 张帆, 陈志华, 等. 人工智能在土木工程领域的应用研究现状及展望[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2024, 46(1): 14-32.
- [22] 樊健生, 王琛, 宋凌寒. 土木工程智能计算分析研究进展与应用[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 1-22.
- [23] 徐阳, 金晓威, 李惠. 土木工程智能科学与技术研究现状及展望[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(9): 23-35.