

DOI: 10.7672/sjgs2024170055

装配式建筑 PC 构件供应链智慧化管理研究进展*

夏启朔¹, 于德湖², 蒋伟³, 张波⁴, 张爱军⁵, 杨位珂⁶

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266033; 2. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101;
3. 济南大学土木建筑学院, 山东 济南 250022; 4. 山东万斯达集团, 山东 济南 250014;
5. 中建科技(济南)有限公司, 山东 济南 250022; 6. 中铁十四局集团建筑工程有限公司, 山东 济南 250014)

[摘要] 在人工智能和信息化技术发展大背景下, 优化算法、大数据、物联网等技术推动预制构件供应链管理向系统化、智能化、信息化方向发展。为系统梳理人工智能和信息化技术与装配式建筑预制构件供应链管理融合发展现状, 以 Web of Science 核心合集数据库为基础, 检索并筛选出 2007—2022 年预制构件供应链管理相关领域文献, 从年载文量、权威期刊、国家或地区等方面进行文献归纳分析, 阐述人工智能和信息化技术与预制构件供应链中生产、运输、库存部分的结合应用情况。结果表明, 人工智能和信息化技术与预制构件供应链融合应用可解决多目标优化、资源配置、物流实时跟踪、场地布局规划等问题, 实现预制构件生产线的管理优化、资源合理分配, 运输过程实时管控、准时制管理、路线寻优和库存高效管理与场地布置优化, 同时针对预制构件供应链管理主要部分的不足之处给出合理建议, 以期不断促进装配式建筑预制构件供应链的高质量发展。

[关键词] 预制构件; 供应链; 人工智能; 信息化; 生产调度; 运输; 管理

[中图分类号] TU756

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)17-0055-12

Intelligent Management Research Progress of Prefabricated Building PC Component Supply Chain

XIA Qishuo¹, YU Dehu², JIANG Wei³, ZHANG Bo⁴, ZHANG Aijun⁵, YANG Weike⁶

(1. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266033, China;

2. College of Civil Engineering, Shandong Jianzhu University, Jinan, Shandong 250101, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, University of Jinan, Jinan, Shandong 250022, China;

4. Shandong One Star Technology Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China;

5. China Construction Science & Technology (Jinan) Co., Ltd., Jinan, Shandong 250022, China;

6. China Railway 14th Bureau Group Construction Engineering Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: At the background of development of artificial intelligence and information technology, technologies such as optimization algorithms, big data and Internet of Things promote the development of prefabricated component supply chain management towards systematization, intelligence, and informatization. In order to systematically review the current development status of integration of artificial intelligence and information technology with prefabricated building supply chain management, based on the web of science core database, literature related to prefabricated component supply chain management from 2007 to 2022 was searched and selected, literature review and analysis is conducted from the aspects of annual publication volume, authoritative journals, countries or regions, etc, elaborating on the combination and application of artificial intelligence and information technology in the production, transportation and inventory aspects of the prefabricated component supply chain. The results indicate that, the integration of artificial intelligence and information technology with prefabricated component supply chain can solve problems, such as multi-objective optimization, resource allocation, real-time

* 山东省重点研发计划; 重大科技创新工程(2021CXGC011204)

[作者简介] 夏启朔, 硕士研究生, E-mail: 2584843102@qq.com

[通信作者] 于德湖, 教授, 博士生导师, E-mail: yudehu@sdjzu.edu.cn

[收稿日期] 2024-05-09

logistics tracking and site layout planning, achieve management optimization of prefabricated component production lines, reasonable resource allocation, real-time control of transportation processes, just in time management, route optimization, efficient inventory management and site layout optimization and also provide reasonable suggestions for the shortcomings of the main parts of prefabricated component supply chain management, in order to continuously promote the high-quality development.

Keywords: prefabricated components; supply chain; artificial intelligence; information; production scheduling; transportation; management

0 引言

在新型建筑工业化和智慧建造快速发展的推动下,装配式建筑在国内得到广泛应用。《关于进一步加强城市规划建设管理的若干意见》中明确提出,力争 10 年左右,使装配式建筑占新建建筑的比例达 30%^[1]。相比传统现浇混凝土建筑,装配式建筑具有集约化高效生产、装配施工效率高、绿色环保可持续、大幅减少建筑隐性垃圾等优点。装配式建筑是随着新型建筑工业化不断发展产生的建筑模式,将建筑全生命周期中的某些环节转移到施工场外进行。预制构件作为装配式建筑的重要组成部分,需先在预制构件厂中进行规模化生产,其次按照交货日期或完成时间进行科学库存管理,然后根据项目施工进度计划需要,对构件进行装车配送,并进行现场吊装或暂时性储存^[2]。但实际情况中,预制构件供应链管理不当往往导致多种问题,如生产线资源配置不均衡导致提前或交付延期,运输规划不合理导致施工现场交通堵塞或拖延工期,未对施工进度进行合理预估造成预制构件短缺或积压过多等^[3]。综上所述,优化预制构件供应链管理问题是不断提高装配式建筑效益、节省整体项目成本的重要前提。

随着人工智能和信息化技术日渐成熟,预制构件供应链管理领域问题逐步实现建筑+计算机的跨界整合,为传统土建行业发展提供方向和机遇^[4]。《2016—2020 年建筑业信息化发展纲要〔2016〕183 号》^[5]提出,要着力增强大数据、智能化、云计算等信息技术集成应用能力。以建筑业为基础,通过智能算法等技术为行业赋能,充分提取各项数据的深层价值,同时整合分析行业内的各项需求和资源,逐步实现装配式建筑全生命周期信息共享和协同管理,从而达到预制供应链精益化、智慧化管理的目的。

人工智能^[6]和信息化技术结合装配式建筑预制构件供应链管理,逐步实现多领域、跨学科的综合应用。Kong 等^[7]提出基于动态规划算法的预制构件生产、运输和 JIT 装配模型,将各环节转换成本

作为优化目标,以最大化施工效率。Anvari 等^[8]基于遗传算法,针对生产、运输和装配进行多目标优化,评估预制构件从生产到装配的后续决策对时间和成本的影响。Wang 等^[9]结合遗传算法和离散事件模型,对生产加工时间和工序等待时间的不确定性进行建模分析。Abedi 等^[10]结合云计算技术和 BIM 建立面向预制构件供应链管理的云计算建筑信息模型系统管理平台,以更好地改善供应链上中下游的信息偏差,促进同步协作和信息共享。Li 等^[11]提出基于区块链和物联网-建筑信息模型(IoT-BIM)平台的新型服务导向体系结构,实现数据-信息-知识驱动模块化建筑供应链管理,旨在降低存储成本,并通过隐私和安全保护机制避免物联网网络单点故障。人工智能和信息化技术种类很多,不同技术间的优缺点及对问题的适应情况各不相同^[12-13],因此根据待解决问题的具体情况选择合适的方法是当前预制构件供应链管理与人工智能技术融合应用面临的挑战之一。

根据文献调查,当前对应用人工智能和信息化技术与预制构件供应链管理可解决问题的系统性总结仍然有限,对论文中参考文献和关键词相关性的分析较少。因此,本文首先从年载文量、研究机构、国家地区等角度对当前预制构件供应链管理问题进行文献统计分析,其次从高被引论文、关键词共现网络等方面对预制构件供应链管理行业内各分支关联性进行可视化处理。在随后的章节中,本文对预制构件生产、运输和库存管理研究重点进行系统分类,并对现有研究成果进行分析,在此基础上提出各子主题的研究现状、研究方法和不足之处。最后针对研究不足之处给出合理建议,并指出未来的研究方向。

1 数据收集和文献分析

1.1 文献数据分析

本文基于 WoS(Web of Science)数据库对预制构件供应链相关文献进行检索,确定文献分析时间跨度为 2007—2022 年,经过整理和筛选,共得到 679 篇有效文献。如图 1 所示,装配式建筑预制构

件供应链管理相关文献数量在某段时间内会暂时下降,如2010年和2015年前后,但总体仍呈上升趋势。由此可见,预制构件供应链管理等相关领域正逐渐得到研究人员的重视和关注。

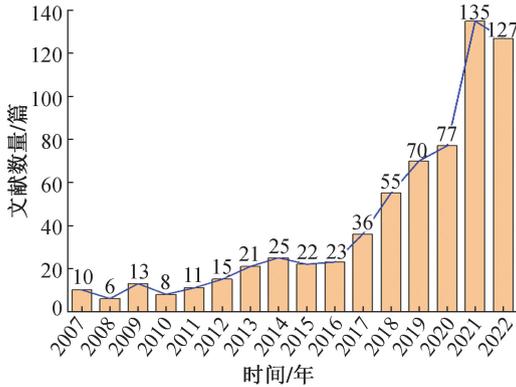


图1 2007—2022年预制构件供应链管理相关领域文献数量

Fig. 1 Number of literatures related to prefabricated component supply chain management from 2007 to 2022

从期刊来源方面分析,有效文献共来自83种期刊,涉及范围广泛,包含预制构件供应链管理、生产调度、信息化技术、人工智能应用等相关领域。统计数据显示, *Journal of cleaner production* 收录的相关文献共77篇,影响因子为11.072,刊登文章数量和影响因子均为首位,具有最高的影响力,其次是 *Sustainability* 与 *Automation in construction*,这3种期刊在供应链管理和技术创新方面占有重要地位,国际影响力较大,是该领域较权威的期刊。收录预制构件供应链管理相关文献数量排名前10的期刊如表1所示。

表1 预制构件供应链管理领域期刊统计

Table 1 Journal statistics in field of prefabricated component supply chain management

排名	期刊名称	文章数量/篇	百分比/%
1	<i>Journal of cleaner production</i>	77	11.34
2	<i>Sustainability</i>	55	8.10
3	<i>Automation in construction</i>	52	7.66
4	<i>Construction and building materials</i>	43	6.33
5	<i>Journal of construction engineering and management</i>	39	5.74
6	<i>Buildings</i>	37	5.45
7	<i>Journal of architectural engineering</i>	30	4.42
8	<i>Engineering construction and architectural management</i>	27	3.98
9	<i>Journal of building engineering</i>	20	2.95
10	<i>Energy and buildings</i>	19	2.80

从文献所属国家或地区方面分析,有效文献来自62个国家的大学或研究机构,其中文献数量排名前10的国家如表2所示。统计数据显示,预制构件供应链管理领域发表文献数量最多的为中国,其次是美国、澳大利亚、德国。中国作为世界上最大的发展中国家,经济体量庞大,建筑业作为国民经济总量中占比较大的一部分,在产业结构升级和转型过程中受研究人员深入关注。

表2 预制构件供应链管理领域研究国家统计

Table 2 National statistics in field of prefabricated component supply chain management

排名	国家	文章数量/篇	百分比/%
1	中国	206	30.34
2	美国	89	13.11
3	澳大利亚	64	9.43
4	德国	63	9.28
5	韩国	46	6.77
6	英格兰	44	6.48
7	加拿大	37	5.45
8	意大利	26	3.83
9	西班牙	24	3.53
10	巴西	20	2.95

从文献所属研究机构方面分析,有效文献来自195所研究机构。其中香港理工大学发表预制构件供应链管理相关文章最多,其次是香港大学、深圳大学、重庆大学、阿尔伯塔大学和皇家墨尔本理工大学,发表预制构件供应链管理相关文献数量排名前10的研究机构如表3所示。

表3 预制构件供应链管理领域研究机构统计

Table 3 Research institutions statistics in field of prefabricated component supply chain management

排名	研究机构	文章数量/篇
1	香港理工大学	40
2	香港大学	25
3	深圳大学	19
4	重庆大学	18
5	University of Alberta	14
6	Royal Melbourne Institute of Technology	13
7	University of Nebraska System	12
8	大连理工大学	11
9	上海交通大学	11
10	Curtin University	10

从文献作者角度分析,预制构件供应链管理相关领域文献发表数量如表4所示。

1.2 关键术语共现网络分析

基于VOSviewer软件对已发表文献的标题、摘要和关键词进行可视化共现网络分析,如图2所示,

成本,大大缩短订单完工时间。Yang 等^[19]基于遗传算法对预制构件多生产线进行建模分析,明显减少工期延误、资源浪费等情况。汪和平等^[20]基于 NSGA-III 算法建立预制构件生产调度五目标优化模型,得出五目标情况下预制构件生产的 Pareto 最优方案,并采用不同生产线数量、构件数量和模具数量组合对比不同算法性能。熊福力等^[21]以最小化拖期惩罚为优化目标,基于交替式混合果蝇-禁忌搜索算法集成优化并行生产线调度方案和资源配置方案,并通过改进算法交叉和变异策略优化资源配置方案。在需求确定的条件下对预制构件进行静态生产调度优化,忽略预制构件的需求干扰性。在实际生产过程中,往往发生机器设备故障、订单交付时间提前、紧急订单等突发事件,影响生产总进程。因此相对静态生产模型,动态生产模型通常具有更好的适应性和可行性。Ma 等^[22]综合考量预制构件各工序实际生产时间与预估生产时间的差值,以应对生产突发事件,同时基于遗传算法建立多生产线调度优化模型和约束条件,并通过实例验证模型有效性。Wang 等^[23]将生产需求变化作为动态扰动影响因素,通过改进遗传算法,建立多生产线预制构件生产的两级重调度动态规划模型,经过实例证明,该方法相比未响应需求变化的原计划,能够明显降低惩罚成本和重调度成本。王艳红等^[24]为实现生产计划与动态调度协同优化,基于闭环集成-滚动重调度策略建立计划调度滚动优化模型,经实例验证,该模型可有效处理生产过程中产生的动态变化,并做出相应调整。

2.2 现代化技术在生产管理方面的应用研究

装配式建筑预制构件具有单体规模大、精度要求高、种类数量多等特点,传统生产管理方法易出现预制构件生产过程中精度超出规定范围、生产效率低下、组织协调困难等问题。而结合现代化技术

与预制构件生产管理,可有效提高预制构件生产组织协调效率,从而促进整个供应链的信息传递效率。Kim 等^[25]基于激光扫描和 BIM,提出预制构件非接触式尺寸质量保证技术,能够准确自动评估整体预制混凝土构件关键质量标准。王强等^[26]结合 BIM+数字孪生技术与预制构件生产,实现轨道交通工程预制构件生产和施工模拟信息交互,经 AHP-模糊综合评价该方法,显著提高构件生产的综合效益。曹新颖等^[27]基于 BIM-RFID 技术建立预制构件生产质量管控模型,从构件信息、质量监督、进度控制等方面完善构件质量管理信息传导机制,提高构件生产质量管理效率。彭彩虹等^[28]设计出预制构件生产阶段的能耗清单和度量公式,结合 BIM 将其应用到建筑项目模型中,有效实现预制构件生产阶段能耗水平的监测和优化。苏世龙等^[29]通过研发智能建造机器人,一定程度上替代部分人力资源,降低企业用工成本,能够高质量完成危险、复杂的施工任务,但机器人研发涉及多领域、跨学科,当下仍存在一定技术难点。

BIM、数字孪生、RFID 等技术的应用能够对预制构件生产过程中构件信息、质量、进度进行合理控制和协调,同时预制构件厂可根据预制构件生产信息集成平台实时监测构件生产质量、进度、信息等,有利于及时发现并解决生产过程中可能出现的问题,提高生产效率,降低资源浪费和生产成本,从而增强预制供应链整体效益。预制构件生产调度优化与管理相关文献对比如表 5 所示。

2.3 现有研究存在的问题

1) 预制构件静态生产调度优化是在未生产前对已有订单种类和数量进行科学合理的编排,而对生产过程中的动态协调规划研究较少。同时由于客观条件改变,导致无法及时响应资源重分配和更新后的顺序,使数学模型存在一定局限性。

表 5 预制构件生产管理相关文献对比

Table 5 Comparison of literature on production management for prefabricated components

类型	文献	研究内容	优化目标	采用方法
生产调度优化	[6]	对生产实际加工时间的不确定性和工序等待时间建模	交货时间和生产成本多目标优化	遗传算法+离散事件模拟
	[8]	构件种类数量和设备转换时间的生产排序优化	最小化产品类别转换时间	禁忌搜索算法
	[12]	资源约束下的多生产线调度优化	最小化完工时间和惩罚成本	遗传算法
	[14]	考虑实际需求变化的两级重调度动态响应模型	最小化重调度成本和惩罚成本	遗传算法
生产运维管理	[25]	研发非接触式质量尺寸保证技术	尺寸质量保证、自动识别和测量	BIM+激光扫描
	[26]	预制构件生产管理信息集成平台	实现实体生产和虚拟施工的信息交互	BIM+数字孪生
	[28]	对预制构件生产阶段能耗进行监测和度量	实时监测并优化生产阶段能耗	BIM

2) 遗传算法等智能优化算法发展不够完善, 存在易出现过早收敛、编码解码过程较复杂等问题, 同时进化参数选择缺少科学合理的设定准则和机制, 算法训练速度较慢, 因此当前研究多采用其他智能算法改进遗传算法, 以更快更好地解决大规模计算量问题。

3) 机械设备故障、人员调整、产品质量不合格等突发情况考虑不足。研究过程中突发情况通常在假设条件中进行说明, 但工厂实际生产作业过程无法保证不发生突发情况, 因此将不确定性事件系统性纳入生产调度优化模型进行量化, 以增加模型整体鲁棒性和容错率, 是未来研究重点。

4) 不同技术间缺少集成关联性。现有智能化技术在预制构件生产环节多以解决某种特定问题为主, 在一定程度上局限技术应用潜力, 因此可将该技术应用于生产全流程, 搭建生产信息集成平台, 更大程度发挥不同技术的优点。

3 预制构件运输管理研究现状

3.1 信息化技术在物流实时跟踪方面的应用研究

近年来二维码^[30]、物联网^[31]、BIM^[32]和GIS^[33]等技术突飞猛进, 信息化集成协同管理理念与工程实际相结合的思维日趋成熟, 为预制构件实时跟踪管理发展提供坚强的技术基础。工作人员可将构件信息录入信息集成管理平台上, 使供需双方都能实现构件数据网络可视化。岳乃华等^[34]结合BIM、二维码技术信息集成平台, 阐述预制构件从设计到施工的实时跟踪原理, 验证技术实现的可行性。刘濠等^[35]结合BIM与二维码技术建立预制构件信息管理平台, 对每个构件单独编码, 实现构件数据实时共享, 解决供应链信息不对等的问题。Irizarry等^[36]将BIM技术和地理信息系统(GIS)集成到综合平台, 从而较精确实时监控供应链各环节状态以及风险预警, 保证构件准时交付。Wang等^[37]将基于RFID技术的计算机辅助自适应学习系统应用于两级预制供应链模型中, 大幅降低运营成本和交付时间, 实现预制构件供应链技术优化。Lee等^[38]开发联合IoT、BIM、GIS的数字孪生模型框架, 经过实例验证对物流风险和准时交货时间的预测精度。

共享预制构件实时状态和物流信息有助于构件供应商和施工现场减少供应链信息差, 施工现场和预制构件厂能够根据实时信息有效协调并迅速作出反应, 从而减轻或避免工地严重拥堵和重复搬运, 减少资源浪费和时间推迟, 保证施工进度合理推进。

3.2 人工智能在运输调度优化方面的应用研究

不同于传统建筑材料, 预制构件体积和自重较大, 属于大宗货物运输, 传统运输形式不满足构件运输需要。预制构件重2~5t, 车辆装载数量有限, 一批订单通常进行多车次运输。多数情况下, 预制构件供货模式分为一对一和一对多, 即1家供货商只给1个施工现场配送和同时给多个施工现场配送。Kutanoglu等^[39]基于一对一供货模式, 对库存成本和运输成本进行多目标优化。王乐媛^[40]采用改进的人工鱼群算法, 在一对多供货模式下建立预制构件运输规划模型, 以最小化运输成本、车次和等待时间。当前我国装配式建筑所用预制构件通常采用订单制的购货方式, 1个施工工地订单可能来源于多家供货商, 此问题的发展衍生出单周期离散随机和多周期长期稳定2种供应方式, 受各界学者关注。傅成红等^[41]通过离散随机需求订单问题, 将其转化为一般配送路径问题, 并采用自适应遗传算法最小化运输成本和订货期望损失。Singh等^[42]提出多产品、多周期车辆路径问题, 同时分解原问题, 通过建立混合线性整数规划模型, 使每个子问题的目标达到最优。Cordeau等^[43]将配送计划、路径规划集成到三步启发式算法混合整数线性规划模型中, 对时间、成本进行多目标优化。Nambirajan等^[44]考虑供货商上游的原材料制造商, 建立基于三阶段启发式算法的动态规划模型和路径规划问题模型, 分别对原材料制造商到中心点和中心点到各子级目的地进行建模分析, 以最小化供应链成本为目标。为更好地适应构件运输实际情况, 应尽可能考虑实际运输过程中的影响因素, 如交通拥堵问题、白天与夜间运输、道路限行情况等。熊福力等^[45]将交通拥堵影响因素考虑在内, 建立不确定性时间情况下的生产调度优化与装车方案组合优化模型, 并应用果蝇搜索算法研究拥有时变特性的组合优化问题。Wang等^[46]基于遗传算法分析预制构件在白天和夜间的运输优化问题, 夜间运输优化效果明显, 有利于保证构件按时交付, 避开车流高峰, 响应道路相关管理规定。不同方法所能解决运输相关问题对比分析如表6所示。

3.3 现有研究存在的问题

1) 在实时物流跟踪平台中, 基于某系统的构件信息数据若在其他系统上没有建立度量标准或计量属性, 则需手动输入相关数据, 使不同系统间数据表示的效率低下, 缺乏平台间的语义互操作性。同时现阶段开发的数据集成平台准确性可能在单个案例上较精确, 但如何适应普遍应用场景的问题

表 6 预制构件运输管理相关文献对比

Table 6 Comparison of literature on transportation management for prefabricated components

类型	文献	研究内容	主要功能	采用方法
物流 实时 跟踪	[34]	建立完整的预制构件 BIM 模型数据链	解决供应链管理信息孤岛问题	BIM+二维码技术
	[36]	监控、预警材料实时物流动态	降低供应链运营成本,提供合理的解决方案	BIM+GIS
	[37]	建立预制构件供应链驱动机制	减少物流时间,降低操作成本	RFID
	[38]	预测物流风险和交付时间	提高供应链各环节协同效率	BIM+GIS+IoT
运输 调度 优化	[41]	考虑配送计划的运输路径规划	最小化交付时间和运输成本	混合整数线性规划
	[42]	考虑上游原材料供货的动态规划	最小化供应链成本	整数线性规划
	[43]	考虑交通拥堵的运输动态规划	最小化提前/拖期惩罚和运输成本	果蝇优化算法
	[44]	考虑运输场景的生产、运输、存储整合规划	确保按时交付最小化总运营成本	遗传算法

还有待解决。

2) 现有运输调度优化研究较理想化。实际应用过程中,一般采用大型货车运载预制构件,其对交通影响程度在模型中考虑有限,同时直接影响模型求解的结果及优化程度。其次,未考虑大型预制构件的有关道路规定运输时间及不同时间段的运输效率和成本问题。

4 预制构件库存管理研究现状

4.1 智能算法在库存水平管理方面的应用研究

预制构件供应商为满足客户需求时间点以及保证构件在配送前达到交付强度,供应商通常在生产完成后统一存储构件,同时,施工现场为保证施工进度有序推进,避免因供应商迟交延误工期,也会存储小部分构件作为安全库存。Ko^[47]以构件供应商视角建立减少成品库存水平的框架,通过使用模糊逻辑评估时间缓冲范围,根据时间缓冲调整生产最晚结束日。Hsu 等^[48]利用稳健优化方法考虑预制构件供应链上各种不确定性和干扰因素来源,旨在以最低成本策略降低构件库存水平。Im 等^[49]通过蒙特卡罗模拟和优化技术控制库存水平,以拉式生产模式代替现有模式,大幅减少原有库存过剩和成本过高的情况。

当前库存管理模式主要分为传统库存管理模式(TMI)、供应商库存管理模式(VMI)^[50]、联合库存管理模式(JMI)^[51]、协同式库存管理模式(CPFR)^[52]。传统供应链库存管理模式缺乏信息共享能力,导致信息差逐步累积,使需求异常放大,为规避风险,各方会增加库存量,从而产生较大的库存成本^[53]。Sari^[54]通过文献调研和构建供应链管理仿真模型,对比协同式库存管理模式和供应商库存管理模式的优缺点。刘鹏飞等^[55]将现有不同库存管理机制从核心思想、优缺点、前提条件等方面进行分析对比。马佩芬^[56]系统阐述传统库存管理模式的不足以及联合管理库存可取之处,同时基于系统动力学理论分别针对2种模式建立仿真模型并

进行对比分析,以验证 JMI 相比 TMI 能有效降低牛鞭效应。包厚华^[57]将物联网和云计算技术纳入协同式供应链管理模型,实现信息实时共享,并通过实际案例验证该机制能有效降低各方库存水平。

通过以上文献归纳分析,人工智能优化算法结合库存管理问题可在技术上优化库存水平,解决库存不合理和成本偏高的情况。在业务管理方面,库存水平问题应结合生产计划同时进行研究,疏通供应链管理逻辑,从整体上进行优化。此外,上述分析的几种库存管理模式,结合人工智能和信息化技术都能在一定程度上优化库存水平,并降低牛鞭效应,但不同模式侧重的角度和流程各有差异,并不存在万能型库存管理模式,根据不同应用场景合理选择适应度高的库存管理模式仍是当前面对的挑战之一。

4.2 现代化技术在场布置规划方面的应用研究

供应链各方库存量取决于场地平面布置规划,场地布置的合理性和科学性直接影响施工效率和成本。确定布置方案通常需要考虑施工设施费用^[58]、施工场地面积^[59]、施工空间冲突^[60]、施工安全性^[61]等因素。BIM、智能优化算法等技术能够使场地布置规划趋于灵活、高效,并逐渐取代传统管理人员仅凭经验和主观感觉的决策方式。Xu 等^[62]将施工现场危险品和贵重材料运输考虑在内,分别从管理者和工作人员视角建立双层多目标决策模型,经验证,可最小化因场地布置不合理产生的总成本及场内运输成本。Abunemeh 等^[63]提出针对施工场地各部分的风险评价方法,将潜在风险因素考虑到施工平面布置模型中,旨在得出总风险最小的施工场地布置方案。Hong 等^[64]将预制构件生产环节纳入施工现场平面优化范畴,以较大幅度降低运输成本和生产成本,但由于我国装配式建筑仍处于发展初期,若将预制构件生产环节设置在施工现场,将严重影响施工进度和场内正常活动,因此国内目前应用较少。Ning 等^[65]通过改进基础的蚁群

算法,建立安全、成本和最大化相关设施间距最小化风险水平的多目标优化函数模型。

人员、机器、材料、方法、环境等因素随施工进度推进不断变化,项目从开工到竣工全过程中,施工现场通常不会保持一成不变的场地平面布置方案,因此会造成一定的空间浪费、降低施工效率。静态场地规划模式忽略了施工场地空间再利用性,未考虑不同工程阶段、不同空间的规划再分配和设施、资源等随时间改变的空间需求。某部分并不是在项目施工全流程中均被使用,在其不被使用的某个阶段,其原所占空间可被其他当前使用强度大的设施占用,以提高空间利用率。因此动态场地规划布局相比静态布局,能够根据施工进度不同阶段的确切痛点,有针对性地提供动态场地规划方案。Razavi 等^[66]建立基于遗传算法和仿真技术的现场布置模型,通过改变进度计划对施工布局进行协同优化,最小化总项目成本。杨彬等^[67]基于 BIM 对装配式建筑施工现场进行参数化建模,同时利用遗传算法,综合考虑各种影响因素,建立多目标优化模型,最后通过比选各种方案确定最佳施工场地规划。Xu 等^[68]基于模拟退火算法设计模糊不确定性环境下的离散动态设施布置规划模型,利用模糊数和逻辑表示不同设施间的关系,在最大化安全性的同时最小化成本。邹爱华等^[69]通过 BIM 建立协同规划平台,运用 Revit 和 SketchUp 软件对施工现场进行标准化动态管理。

以上文献主要针对施工场地整体规划问题建立相应优化模型,而对于场地内部设施或人员间行进距离的表示方法各不同,现有研究中对设施、障碍物间距和移动路径的表示方法多采用欧几里得距离^[70],而采用设施间实际距离的研究仍在少数,不能在一定程度上反映实际移动距离,可能会低估场内运输成本。Kumar 等^[71]结合遗传算法开发考虑设施或人员实际行进路径的 BIM 自动化框架,旨

在创建最小化行进距离的场地动态规划模型。AL Hawarneh 等^[72]使用现场区块算法,通过 Matlab 软件对人员和设施间距进行编码,建立网格布局模型,以找到最佳的动态场地布置规划,并结合实际案例证明该方案降低总布局成本,并提高安全程度的有效性。Abotaleb 等^[73]在研究中同时引入不规则形状设施的优化规则以及实际性距离度量技术,基于遗传算法对施工场地进行动态性规划建模,并与现有规划方案进行对比分析,证明该模型在实际施工场地布置中的适应性能。

文献[69-70]将设施间的实际距离作为动态规划模型中距离的量化规则,但并未将设施动态不规则性考虑在内,存在一定局限性。相比文献[69-70],文献[71]考虑设施不规则性、方向定位以及实际安全距离量化技术,能够更好适应于实际施工场地的复杂情况,但同时也导致模型中的影响因素较多,使模型在求解和运行过程中较复杂。鉴于当前将设施形状不规则性和实际安全距离统筹考虑的研究仍然较少,类似于文献[64]的相关研究,在未来会受到研究人员广泛关注。不同方法能够解决库存管理相关问题的对比分析如表 7 所示。

4.3 现有研究存在的问题

1)在场地布局优化方面,主要针对传统建筑材料和设施,通过传统建筑材料与预制构件间存在的某些相似性,将求解得到的优化方案映射到预制构件场地布局问题上,而直接研究预制构件的高水平论文较少。此外,现有研究成果主要是将预制构件在场地整体位置上进行规划布局,而对预制构件的不规则形状、尺寸、方位等考虑有限。

2)预制构件属于大宗货物,一旦库存管理失当,将严重影响工程效率和项目成本。智能优化算法的应用可在流程上解决预制构件库存水平不合理的问题,但从全产业链角度入手进行研究的成果仍较少。若想从根本上保持库存水平在稳定合理

表 7 预制构件库存管理相关文献对比

Table 7 Comparison of literature on inventory management for prefabricated components

类型	文献	研究内容	主要功能	采用方法
场地 布局 优化	[62]	考虑危险品运输的场地布局优化	最小化布局成本和潜在安全隐患	遗传算法
	[63]	基于风险预警与评价的场地布局优化	最大限度减小安全隐患	差分进化算法+GIS
	[64]	包含预制构件生产的场地布局优化	最小化供应链总成本	整数线性规划
	[65]	考虑设施安全和地理安全的场地布局优化	设施安全、地理安全和施工成本多目标优化	蚁群算法
	[66]	考虑现场布局和施工计划改变的动态优化	最小化布局总成本	遗传算法+仿真
动态规划方案	[67]	客观条件约束下的动态场地布置规划	最优布局方案	BIM+遗传算法+模糊筛选
库存水平优化	[47]	评估时间缓冲与优化生产序列	降低产品库存水平	遗传算法
	[49]	建立拉动式订单生产系统	最小化库存成本	蒙特卡罗模拟

状态,应从生产计划、施工进度、人员素质、业务管理等方面进行分析,打通产业链的整体协同性。

5 结语

1)加强预制构件生产调度和资源配置的协同优化,生产调度在于合理安排构件生产计划,缩短生产等待时间、项目完工时间,最大化机械设备生产效率。资源配置优化更侧重于构件厂的实际生产情况,须在资源充足和有限的情况下合理配置资源,使生产效率最大化。两者相结合可在更加符合工厂实际情况的前提下优化生产调度,提高生产整体效益。

2)加强预制构件供应链对动态扰动管理的研究,应致力于对供应链各环节,如生产调度、运输规划、场地布局等,进行动态优化分析,而不仅局限于进行静态优化,使其求解结果更加满足实际流程。此外,要实现供应链整体运营效率提升,还需增强供应链各环节的协同管理,从技术和业务方面促进装配式建筑高效发展。

3)构建集生产-运输-库存于一体的预制构件供应链实时管理平台,智能化、适应力强的预制构件供应链是未来研究方向的关键,对构件生产、运输、库存进行实时跟踪,针对各构件建立信息单元,使供应链各方能够获取构件实时状态,并根据不同情况及时做出调整,是需要解决的关键问题。

4)加强云计算、大数据、物联网、地理信息系统的技术集成与信息开发,将多种现代化技术集成到统一平台,建立从前端信息采集到后端数据分析和可视化的信息链条。此外,不同技术所用数据处理格式或标准各异,不同数据间的传输和共享存在困难,而 IFC 标准可在一定程度上实现数据无差别沟通和共享,保证数据转换的稳定性。同时可通过数据分析和建模,将获得的信息数据开发为基于规则的系统,提高供应链整体效益。

参考文献:

- [1] 韩同银,杜命刚,尚艳亮,等.产业化趋势下装配式建筑发展策略研究[J].铁道工程学报,2020,37(7):106-112.
HAN T Y, DU M G, SHANG Y L, et al. Research on development strategy of prefabricated construction under industrialization trend[J]. Journal of railway engineering society, 2020, 37(7): 106-112.
- [2] 王朝静.波动干扰下装配式住宅预制构件生产调度优化研究[D].上海:上海交通大学,2018.
WANG Z J. Production scheduling optimization of precast concrete components under disturbances and uncertainties in prefabricated housing projects[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018.
- [3] 代洪丽.不确定事件下装配式建筑部件生产调度研究[D].南京:东南大学,2019.
DAI H L. Research on production scheduling of prefabricated building components under uncertain events [D]. Nanjing: Southeast University, 2019.
- [4] 盖彤彤,于德湖,孙宝娣,等. BIM 与人工智能融合应用研究进展[J].建筑科学,2020,36(6):119-126.
GAI T T, YU D H, SUN B D, et al. Research progress on fusion application of BIM and artificial intelligence [J]. Building science, 2020, 36(6): 119-126.
- [5] 2016—2020 年建筑业信息化发展纲要[J].建筑安全,2017,32(1):4-7.
Outline of information technology development in construction industry from 2016 to 2020[J]. Construction safety, 2017, 32(1): 4-7.
- [6] RUSSELL S J, NORVIG P. Artificial intelligence: A modern approach[M]. New Jersey: Wiley Publishing, 1995.
- [7] KONG L L, LI H, LUO H B, et al. Optimal single-machine batch scheduling for the manufacture, transportation and JIT assembly of precast construction with changeover costs within due dates[J]. Automation in construction, 2017, 81: 34-43.
- [8] ANVARI B, ANGELOUDIS P, OCHIENG W Y. A multi-objective GA-based optimization for holistic manufacturing, transportation and assembly of precast construction [J]. Automation in construction, 2016, 71: 226-241.
- [9] WANG Z J, HU H, GONG J. Framework for modeling operational uncertainty to optimize offsite production scheduling of precast components[J]. Automation in construction, 2018, 86: 69-80.
- [10] ABEDI M, FATHI M S, MIRASA A K, et al. Integrated collaborative tools for precast supply chain management [J]. Scientia iranica, 2016, 23(2): 429-448.
- [11] LI X, LU W S, XUE F, et al. Blockchain-enabled IoT-BIM platform for supply chain management in modular construction [J]. Journal of construction engineering and management, 2022, 148(2): 04021195.
- [12] 王丽萍,任宇,邱启仓,等.多目标进化算法性能评价指标研究综述[J].计算机学报,2021,44(8):1590-1619.
WANG L P, REN Y, QIU Q C, et al. Survey on performance indicators for multi-objective evolutionary algorithms[J]. Chinese journal of computers, 2021, 44(8): 1590-1619.
- [13] JOHNSON S M. Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included[J]. Naval research logistics quarterly, 1954, 1(1): 61-68.
- [14] ARASHPOUR M, WAKEFIELD R, ABBASI B, et al. Off-site construction optimization: Sequencing multiple job classes with time constraints [J]. Automation in construction, 2016, 71: 262-270.
- [15] 刘猛,黄春.基于 MILP 算法的预制混凝土构件生产调度优化模型研究[J].工程管理学报,2018,32(6):121-126.
LIU M, HUANG C. A model for optimizing production scheduling of prefabricated concrete components based on MILP algorithm[J]. Journal of engineering , management, 2018, 32(6): 121-126.

- [16] 秦旋,房子涵,张赵鑫.考虑资源约束的预制构件多目标生产调度优化[J].计算机集成制造系统,2021,27(8):2248-2259.
QIN X, FANG Z H, ZHANG Z X. Multi-objective optimization for production scheduling of precast components considering resource constraints [J]. Computer integrated manufacturing systems, 2021, 27(8): 2248-2259.
- [17] KO C H, WANG S F. GA-based decision support systems for precast production planning [J]. Automation in construction, 2010, 19(7): 907-916.
- [18] 张瑞雪,冯雪婷,马贵仁.基于NSGA-III算法考虑碳排放的预制构件生产调度及运输优化[J].工程管理学报,2023,37(2):153-158.
ZHANG R X, FENG X T, MA G R. Production scheduling and transportation optimization of prefabricated components considering carbon emissions based on NSGA-III [J]. Journal of engineering management, 2023, 37(2): 153-158.
- [19] YANG Z T, MA Z L, WU S. Optimized flowshop scheduling of multiple production lines for precast production [J]. Automation in construction, 2016, 72: 321-329.
- [20] 汪和平,齐欣然,陈梦凯.基于NSGA-III的装配式预制构件流水车间混合生产优化研究[J].管理工程学报,2022,36(1):240-251.
WANG H P, QI X R, CHEN M K. Research on mixed production optimization of prefabricated component flow shop based on NSGA-III [J]. Journal of industrial engineering and engineering management, 2022, 36(1): 240-251.
- [21] 熊福力,张杏,曹劲松,等.预制构件并行生产线资源配置与生产调度集成优化[J].控制与决策,2022,37(9):2399-2406.
XIONG F L, ZHANG X, CAO J S, et al. Integrated resource allocation and production scheduling for parallel concrete precast production lines [J]. Control and decision, 2022, 37(9): 2399-2406.
- [22] MA Z L, YANG Z T, LIU S L, et al. Optimized rescheduling of multiple production lines for flowshop production of reinforced precast concrete components [J]. Automation in construction, 2018, 95: 86-97.
- [23] WANG Z J, HU H. Dynamic response to demand variability for precast production rescheduling with multiple lines [J]. International journal of production research, 2018, 56(16): 5386-5401.
- [24] 王艳红,于宁,蔡明,等.动态制造系统生产计划与调度协同优化[J].中国机械工程,2018,29(22):2767-2771.
WANG Y H, YU N, CAI M, et al. Collaborative optimization of dynamic manufacturing production planning and scheduling [J]. China mechanical engineering, 2018, 29(22): 2767-2771.
- [25] KIM M K, WANG Q, PARK J W, et al. Automated dimensional quality assurance of full-scale precast concrete elements using laser scanning and BIM [J]. Automation in construction, 2016, 72: 102-114.
- [26] 王强,林如,李雪来.BIM+数字孪生技术的装配式轨道交通工程预制构件生产管理应用研究[J].工程管理学报,2021,35(3):88-93.
WANG Q, LIN R, LI X L. Application of BIM+Digital twin technology in prefabricated rail transit project production management [J]. Journal of engineering management, 2021, 35(3): 88-93.
- [27] 曹新颖,鲁晓书,王钰.基于BIM-RFID的装配式建筑构件生产质量管理[J].土木工程与管理学报,2018,35(4):102-106,111.
CAO X Y, LU X S, WANG Y. Quality management of component production of prefabricated building based on BIM-RFID technology [J]. Journal of civil engineering and management, 2018, 35(4): 102-106,111.
- [28] 彭彩虹,徐照,王少哲,等.基于BIM的装配式建筑预制构件生产阶段能耗分析方法[J].工程管理学报,2022,36(1):47-52.
PENG C H, XU Z, WANG S Z, et al. BIM-based energy consumption analysis method for production stage of prefabricated components in prefabricated buildings [J]. Journal of engineering management, 2022, 36(1): 47-52.
- [29] 苏世龙,雷俊,马栓棚,等.智能建造机器人应用技术研究[J].施工技术,2019,48(22):16-18,25.
SU S L, LEI J, MA S P, et al. Research and application on technology of intelligent building robot [J]. Construction technology, 2019, 48(22): 16-18,25.
- [30] 冷平,史占宽,乔文涛,等.基于BIM的二维码技术在钢结构施工中的应用[J].施工技术,2017,46(18):93-95.
LENG P, SHI Z K, QIAO W T, et al. Application of BIM based 2D code technology in steel structure construction [J]. Construction technology, 2017, 46(18): 93-95.
- [31] XU G Y, LI M, CHEN C H, et al. Cloud asset-enabled integrated IoT platform for lean prefabricated construction [J]. Automation in construction, 2018, 93: 123-134.
- [32] 吕庆,崔维久,于德湖,等.BIM融合信息技术在智慧工地中的应用研究[J].施工技术(中英文),2021,50(20):5-11.
LÜ Q, CUI W J, YU D H, et al. Application of fusion of BIM and information technology in smart construction site [J]. Construction technology, 2021, 50(20): 5-11.
- [33] DENG Y C, GAN V J L, DAS M, et al. Integrating 4D BIM and GIS for construction supply chain management [J]. Journal of construction engineering and management, 2019, 145(4): 04019016.
- [34] 岳乃华,于德湖.基于BIM与二维码技术的装配式建筑构件追踪管理研究[J].建筑经济,2020,41(4):96-100.
YUE N H, YU D H. Research on assembly components tracking management based on BIM and two-dimensional code technology [J]. Construction economy, 2020, 41(4): 96-100.
- [35] 刘濂,洪洁茹,章梦霞,等.结合BIM与二维码技术的装配式建筑信息管理方法研究[J].施工技术,2020,49(2):110-114,118.
LIU H, HONG J R, ZHANG M X, et al. Research on management for information of prefabricated building combining BIM and QR code technology [J]. Construction technology, 2020, 49(2): 110-114,118.

- [36] IRIZARRY J, KARAN E P, JALAEI F. Integrating BIM and GIS to improve visual monitoring of construction supply chain management [J]. *Automation in construction*, 2013, 31: 241-254.
- [37] WANG Z J, HU H, ZHOU W. RFID enabled knowledge-based precast construction supply chain[J]. *Computer-aided civil and infrastructure engineering*, 2017, 32(6): 499-514.
- [38] LEE D, LEE S H. Digital twin for supply chain coordination in modular construction [J]. *Applied sciences*, 2021, 11(13): 5909.
- [39] KUTANOGLU E, LOHIYA D. Integrated inventory and transportation mode selection: A service parts logistics system [J]. *Transportation research*, 2008, 44(5): 665-683.
- [40] 王乐媛. 基于改进人工鱼群算法的 PC 构件运输车辆调度优化研究[D]. 重庆:重庆大学,2019.
WANG L Y. Research on optimization of precast concrete component transportation vehicle schedule based on improved artificial fish swarm algorithm [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [41] 傅成红,符卓. 单周期离散随机需求的库存-运输整合优化[J]. *系统工程*,2007(1):9-12.
FU C H, FU Z. Optimization of inventory-transportation integration for single cycle discrete stochastic demand [J]. *Systems engineering*, 2007(1): 9-12.
- [42] SINGH T, ARBOGAST J E, NEAGU N. An incremental approach using local-search heuristic for inventory routing problem in industrial gases [J]. *Computers & chemical engineering*, 2015, 80: 199-210.
- [43] CORDEAU J F, LAGANÀ D, MUSMANNO R, et al. A decomposition-based heuristic for the multiple-product inventory-routing problem [J]. *Computers & operations research*, 2015, 55: 153-166.
- [44] NAMBIJAJAN R, MENDOZA A, PAZHANI S, et al. CARE: Heuristics for two-stage multi-product inventory routing problems with replenishments [J]. *Computers & industrial engineering*, 2016, 97: 41-57.
- [45] 熊福力,曹劲松,张杏. 考虑交通拥塞时变特性的预制构件生产调度与装车组合集成优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2023,29(8):2761-2772.
XIONG F L, CAO J S, ZHANG X. Integrated precast production scheduling and loading combination considering time-varying characteristics of traffic congestion [J]. *Computer integrated manufacturing systems*, 2023,29(8):2761-2772.
- [46] WANG Z J, HU H. Improved precast production-scheduling model considering the whole supply chain [J]. *Journal of computing in civil engineering*, 2017, 31(4): 04017013.
- [47] KO C H. An integrated framework for reducing precast fabrication inventory [J]. *Journal of civil engineering and management*, 2010, 16(3): 418-427.
- [48] HSU P Y, AURISICCHIO M, ANGELOUDIS P. Risk-averse supply chain for modular construction projects [J]. *Automation in construction*, 2019, 106: 102898.
- [49] IM K S, HAN S H, KOO B, et al. Formulation of a pull production system for optimal inventory control of temporary rebar assembly plants [J]. *Canadian journal of civil engineering*, 2009, 36(9): 1444-1458.
- [50] 赵林度,李时伟. VMI 实现模式研究[J]. *中国管理科学*, 2000(S1): 124-130.
ZHAO L D, LI S W. Research on VMI implementation patterns [J]. *Chinese journal of management science*, 2000(S1): 124-130.
- [51] 梁志才. 供应链管理环境下的联合库存管理[J]. *科技情报开发与经济*,2005(9):120-121.
LIANG Z C. Jointly managed inventory in environment of supply chain management [J]. *Sci/tech information development & economy*, 2005(9): 120-121.
- [52] 李玉良,邵新宇,李培根,等. CPFR——供应链库存管理技术的新趋势[J]. *机械设计与制造工程*,2001(3):1-3.
LI Y L, SHAO X Y, LI P G, et al. CPFR: A new trend of collaborative supply chain inventory management [J]. *Machine design and manufacturing engineering*, 2001(3):1-3.
- [53] 王连月. 物联网环境下建筑供应链库存协同管理的研究[J]. *物流技术*,2014,33(15):380-381,388.
WANG L Y. Study on construction supply chain collaborative inventory management in IoT environment [J]. *Logistics technology*, 2014, 33(15): 380-381,388.
- [54] SARI K. On benefits of CPFR and VMI: A comparative simulation study [J]. *International journal of production economics*, 2008, 113(2): 575-586.
- [55] 刘鹏飞,谢如鹤. 基于供应链的现代库存管理方法之比较研究[J]. *商业研究*,2006(2):170-174.
LIU P F, XIE R H. Comparative study on modern inventory management approaches based on supply chain [J]. *Commercial research*, 2006(2): 170-174.
- [56] 马佩芬. 供应链视角下装配式建筑预制构件联合库存管理仿真研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2022.
MA P F. Simulation research on joint inventory management of prefabricated building components from perspective of supply chain [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2022.
- [57] 包厚华. 基于云计算和物联网的供应链库存协同管理和信息共享机制[D]. 广州:华南理工大学,2012.
BAO H H. Inventory collaborative management and information sharing mechanism of supply chain based on cloud computing and internet of things [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [58] 吴力平,冯杨,李刚. 基于层次分析法的施工现场平面布置方案评估[J]. *浙江工业大学学报*,2010,38(1):111-113,118.
WU L P, FENG Y, LI G. Evaluation of layout scheme in construction sites based on analytic hierarchy process (AHP) [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2010, 38(1): 111-113,118.
- [59] 汲红旗,周佳庆,李磊,等. 基于动态布置法的地铁车站施工场地规划布置研究[J]. *铁道科学与工程学报*,2020,17(7):1865-1873.
JI H Q, ZHOU J Q, LI L, et al. Study on programming of

- subway station construction site based on dynamic site layout planning[J]. Journal of railway science and engineering, 2020, 17(7): 1865-1873.
- [60] 王廷魁,郑娇. 基于 BIM 的施工现场动态布置方案评选[J]. 施工技术,2014,43(3):72-76.
WANG T K, ZHENG J. Dynamic construction site layout scheme selection based on BIM[J]. Construction technology, 2014, 43(3): 72-76.
- [61] 宁欣. 基于施工场地布置的工程项目价值优化研究[J]. 建筑经济,2010(2):57-60.
NING X. Research on value optimization of engineering projects based on construction site layout [J]. Construction economy, 2010(2): 57-60.
- [62] XU J P, ZHAO S W, LI Z M, et al. Bilevel construction site layout optimization based on hazardous-material transportation [J]. Journal of infrastructure systems, 2016, 22(3): 04016014.
- [63] ABUNEMEH M, EL MEOUCHE R, HIJAZE I, et al. Optimal construction site layout based on risk spatial variability [J]. Automation in construction, 2016, 70: 167-177.
- [64] HONG W K, LEE G, LEE S, et al. Algorithms for in-situ production layout of composite precast concrete members [J]. Automation in construction, 2014, 41: 50-59.
- [65] NING X, QI J Y, WU C L, et al. A tri-objective ant colony optimization based model for planning safe construction site layout [J]. Automation in construction, 2018, 89: 1-12.
- [66] RAZAVI ALAVI S R, ABOURIZK S. Site layout and construction plan optimization using an integrated genetic algorithm simulation framework[J]. Journal of computing in civil engineering, 2017, 31(4): 04017011.
- [67] 杨彬,杨春贺,肖建庄,等. 基于 BIM 的装配式建筑施工现场布置及优化技术[J]. 建筑结构,2019,49(S1):921-925.
YANG B, YANG C H, XIAO J Z, et al. Layout and optimization technology of prefabricated building construction site based on BIM[J]. Building structure, 2019, 49(S1): 921-925.
- [68] XU J P, LIU Q R, LEI X. A fuzzy multi-objective model and application for the discrete dynamic temporary facilities location planning problem [J]. Journal of civil engineering and management, 2016, 22(3): 357-372.
- [69] 邹爱华,刘亮,吴自中,等. 应用 BIM 技术动态管理标准化施工现场[J]. 建筑技术,2016,47(8):716-718.
ZOU A H, LIU L, WU Z Z, et al. BIM technique for dynamic management of standardized construction site [J]. Architecture technology, 2016, 47(8): 716-718.
- [70] LIEN L C, CHENG M Y. A hybrid swarm intelligence based particle-bee algorithm for construction site layout optimization [J]. Expert systems with applications, 2012, 39(10): 9642.
- [71] KUMAR S S, CHENG J C P. A BIM-based automated site layout planning framework for congested construction sites [J]. Automation in construction, 2015, 59: 24-37.
- [72] AL HAWARNEH A, BENDAK S, GHANIM F. Dynamic facilities planning model for large scale construction projects[J]. Automation in construction, 2019, 98: 72-89.
- [73] ABOTALEB I, NASSAR K, HOSNY O. Layout optimization of construction site facilities with dynamic freeform geometric representations [J]. Automation in construction, 2016, 66: 15-28.

(上接第14页)

- [25] 袁慎明. 预制混凝土外墙外窗防水技术[J]. 中国建筑防水, 2020(3): 34-36.
YUAN S M. Waterproofing technology for exterior window of precast concrete building [J]. China building waterproofing, 2020(3): 34-36.
- [26] 胡骏. 防水工程设计与选材的一些基本原则[J]. 中国建筑防水, 2014(22): 15-22.
HU J. Some basic principles for design and material selection of waterproofing projects [J]. China building waterproofing, 2014(22): 15-22.
- [27] 徐建月,陈宝贵,段林丽. 密封材料在建筑防水工程中的应用[J]. 新型建筑材料, 2011, 38(12): 39-41.
XU J Y, CHEN B G, DUAN L L. Application of sealing material in building waterproofing engineering [J]. New building materials, 2011, 38(12): 39-41.
- [28] 钟强,张凯,李文俊. 内浇外挂装配式建筑预制外墙接缝防水技术[J]. 施工技术, 2020, 49(S1): 1025-1028.
ZHONG Q, ZHANG K, LI W J. Waterproof technology of precast outer wall joint of internal pouring and external hanging prefabricated building [J]. Construction technology, 2020, 49(S1): 1025-1028.
- [29] 张富宾,肖建庄,丁红梅,等. 装配式混凝土结构防水技术现状与发展趋势[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(1): 1-13.
ZHANG F B, XIAO J Z, DING H M, et al. Current status and development trend of prefabricated structure waterproof technology [J]. Journal of architecture and civil engineering, 2022, 39(1): 1-13.
- [30] 陈建军,陈洋庆,龙飞. 装配式建筑外墙接缝防水密封胶相关标准解析[J]. 中国胶粘剂, 2019, 28(11): 57-62.
CHEN J J, CHEN Y Q, LONG F. Review of relevant standards of waterproof sealant for exterior wall joint of prefabricated building [J]. China adhesives, 2019, 28(11): 57-62.
- [31] 杨霞,仲小亮. 预制装配式建筑外墙防水密封胶现状及存在的问题[J]. 中国建筑防水, 2016(12): 16-18.
YANG X, ZHONG X L. Current situation and existing problems of waterproofing and sealing for prefabricated building external walls [J]. China building waterproofing, 2016(12): 16-18.
- [32] 刘盈,郑苗,王霓. 施工工艺对装配式建筑防水密封胶质量的影响研究[J]. 施工技术, 2020, 49(S2): 1012-1016.
LIU Y, ZHENG M, WANG N. Research on influence of construction technology on quality of waterproof sealing for prefabricated building [J]. Construction technology, 2020, 49(S2): 1012-1016.