

DOI: 10.7672/sjgs2025170001

基于 NSGA-II 算法的木结构建筑施工 组织多目标优化研究*

于月¹, 于德湖¹, 杨淑娟², 张鑫¹

(1. 山东建筑大学土木工程学院, 山东 济南 250101; 2. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266520)

[摘要] 木结构建筑因其节能环保、预制化程度高等优势,在现代建筑中的应用增多,经过系统优化的木结构施工顺序对确保施工进度、降低施工成本和提高资源利用率至关重要。为解决木结构建筑施工组织优化问题,提出基于 NSGA-II 算法框架的木结构建筑施工多目标优化方法。在满足建筑施工逻辑和资源约束的前提下,以施工工期和工人调度成本为目标函数,建立多目标优化数学模型,优化施工顺序,并将 NSGA-II 算法及粒子群算法优化方案与原施工方案进行对比。结果表明,相比原方案,2种算法均表现出显著的优化效果,且 NSGA-II 算法优化方案较粒子群算法优化方案缩短 8.7% 的工期、降低 5.6% 的工人调度成本。经实例验证,本方法具有一定可靠性、有效性,可为木结构施工组织优化提供决策支持。

[关键词] 装配式;木结构;非支配排序遗传算法 II;多目标优化;流水施工

[中图分类号] TU721

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)17-0001-06

Multi-objective Optimization Study of Construction Organization for Timberwork Buildings Based on NSGA-II Algorithm

YU Yue¹, YU Dehu¹, YANG Shujuan², ZHANG Xin¹

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

2. College of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266520, China)

Abstract: Timberwork buildings are increasingly applied in the modern construction field, due to the advantages in energy efficiency, environmental protection, and high prefabrication levels, the systematic optimization of the construction sequence for timberwork structures is crucial for ensuring construction progress, reducing costs, and improving resource utilization. To solve the problem of optimizing the construction organization, a multi-objective optimization method based on NSGA-II algorithm is proposed. Under the constraints of construction logic and resource availability, a multi-objective mathematical model is established with project duration and worker scheduling costs as the objective functions, to optimize the construction sequence, the NSGA-II algorithm and particle swarm optimization solutions are compared with the original construction plan. The results indicate that, both algorithms demonstrate significant optimization effects compared to the original plan, with the NSGA-II optimized solution, reducing project duration by 8.7% and worker scheduling costs by 5.6% compared to the particle swarm optimization solution. Validation through practical examples shows that, this method is reliable and effective, providing decision support for optimizing timberwork construction organization.

Keywords: prefabrication; timberwork; NSGA-II; multi-objective optimization; flow construction

* 山东省重点研发计划:绿色智能建造和建筑工业化关键技术、成套装备及应用(2021CXGC011204);济南市“新高校 20 条”自主培育创新团队项目:高性能无机胶复合木结构智能建造关键技术及工程应用(202228057)

[作者简介] 于月,硕士研究生, E-mail: 991767409@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] 2025-03-18

0 引言

建筑施工是我国能源消耗、碳排放的重要领域,推动建筑行业绿色发展是我国经济社会绿色低碳转型以及实现碳减排目标的必然要求。根据 GB/T 50378—2019《绿色建筑评价标准》,绿色建筑是指

在全生命期内,节约资源、保护环境、减少污染,为人们提供健康、适用、高效的使用空间,最大限度实现人与自然和谐共生的高质量建筑。发展绿色低碳建筑材料,可显著减少能源消耗和碳排放,助力实现“碳达峰、碳中和”。我国是木种植和生产大国,近年来,随着技术进步和环保意识提升,木结构建筑的现代化、工业化受到广泛关注。2023年,我国装配式木结构建筑新增面积998万 m^2 ,同比增长54.5%。

目前对装配式建筑施工多目标优化的研究主要集中在钢结构与钢混结构中。He^[1]考虑项目经理不同决策偏好,建立时间-成本-能源消耗的多目标优化模型。Yuan^[2]对不确定影响因素下的装配式建筑施工活动逻辑,以及多个施工性能目标进行优化,如时间、成本、质量和二氧化碳排放,提出考虑多目标和多种不确定影响因素的装配式建筑施工优化方法。王星星等^[3]、李汝宁等^[4]利用遗传算法,构建机场施工方案的多目标优化模型。Bozejko等^[5]研究重叠施工调度问题,采用禁忌搜索优化算法,缩短施工时间,提高施工效率。满庆鹏等^[6]提出基于动态仿真技术的装配式建筑施工人员配置优化方法,通过仿真模型和OptQuest工具,优化工期、成本和碳排放。晋良海等^[7]结合Gupta启发式算法和潘特考夫斯基法,提出流水施工工期优化模型,实现施工段的合理排序和工期最小化目标。Hyun等^[8]基于遗传算法,建立模块化单元生产线多目标优化模型,得到相应的优化结果,为项目经理提供解决方案。常春光等^[9]建立基于麻雀搜索算法的施工安全投入优化模型。王茹等^[10]提出改进的NSGA-II算法多目标优化方法,有效减少塔式起重吊装时间、缩小吊装范围,并降低安全风险。

在施工工艺方面,钢结构柱常在运输前根据车辆长度进行切割,以确保柱长适应车辆运输要求,而不考虑其所在楼层高度,当柱运抵现场后再焊接。因此,钢结构建筑不易区分楼层作为独立施工单元。相比之下,木结构建筑常采用3层楼高的木结构柱,每3层作为一个独立的施工单元。在结构连接方面,钢结构主要采用焊接和螺栓连接,焊接要求精度高且施工复杂,人工成本较高;而木结构主要采用螺栓连接,施工要求较低,构件预制化程度高,现场拼装简便,人工成本较低。由于上述差异,2种形式的建筑在施工组织优化方面考虑内容不同。因此,现有钢结构建筑施工组织多目标优化的研究方法并不完全适用于木结构建筑。

在施工过程中,由于缺乏系统优化的施工顺

序,木结构建筑常面临工期延误、施工效率低下、增加工人调度成本的问题。针对这些问题,提出基于NSGA-II算法的木结构建筑施工顺序:输入木结构建筑施工决策变量参数→采用实数编码方式编码决策变量→产生初始化种群→计算施工进度和成本→进行交叉变异操作→产生新种群并将其合并→若满足停止条件,则输出最优的木结构建筑施工进度计划;若不满足条件,则重新计算施工进度和成本,直至实现工期和工人调度成本的综合优化。

1 流水施工优化问题

木结构建筑施工涉及多个施工单元,每个单元包含 m 个施工段,每个施工段由 n 个已知工序组成,并按特定逻辑顺序施工,其中某工序可能并行施工。在一定工序逻辑顺序约束下,通过合理安排施工顺序,以优化整个施工项目的作业时间和工人调度成本,已知条件如下:①结合木结构施工特点,将每3层作为一个施工单元;②每个施工单元包含若干施工段,且所有施工单元中的施工段数量相同;③每个施工段由多个工序组成,且工序数量已知,木结构建筑施工工序主要包含柱吊装、梁板安装及板缝浇筑、外墙板安装、楼梯间安装。其中,柱吊装是每3层一起施工,其余工序均需每层单独施工。

组织流水施工时,需要合理安排工序顺序,确保劳动力投入、材料、构配件、施工机具和设备满足施工需求,并同时满足以下约束条件:①施工单元应按楼层从下往上施工;②施工段应从左到右或从右到左施工;③工序开始后不能中断;④由于某工序存在紧前工作,因此必须在完成紧前工作后才能开始后续工序,施工单元与施工段间的施工顺序如图1所示(以2个施工单元、2个施工段为例)。

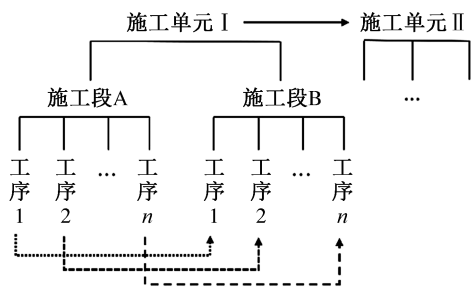


图1 施工单元与施工段间的施工顺序

Fig. 1 Construction sequence between construction units and segments

2 优化目标分析

2.1 工期计量

在工序数量和作业时间确定的前提下,流水施

工工期受交叉作业工序数量影响。交叉作业工序越多,工期越短,反之则越长。在木结构建筑施工中,所有工序全部完成所需时间为施工总工期,即最后 1 个工序的完成时间。因此,施工总工期最小化目标函数如下:

$$\min T = T_f \quad (1)$$

式中: T 表示项目总工期; T_f 表示项目最后 1 个工序的完成时间。

2.2 工人调度成本计量

进行多目标优化时,受不同工种人数最大限度约束,很难保证每天各工种人数均达到最大雇佣限度,导致部分工种闲置,从而产生闲置成本^[11]。同时,施工现场可能出现人员紧缺的情况,导致临时雇佣人员,增加成本。工人调度成本计算如下:

$$C = \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^k C_w(t) = \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^k [C_w^1(t) + C_w^2(t)] \quad (2)$$

$$C_w^1(t) = \begin{cases} c_w^1 [N_w(t) - N_w^{co}] & N_w(t) > N_w^{co} \\ 0 & N_w(t) \leq N_w^{co} \end{cases} \quad (3)$$

$$C_w^2(t) = \begin{cases} c_w^2 [N_w^{co} - N_w(t)] & N_w^{co} > N_w(t) \\ 0 & N_w^{co} \leq N_w(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: C 为工人调度成本; $C_w(t)$ 为 w 工种 t 时的调度成本; $C_w^1(t)$ 为 w 工种 t 时的临时雇佣成本; $C_w^2(t)$ 为 w 工种 t 时的窝工成本; c_w^1 为 w 工种的单人临时雇佣成本; c_w^2 为 t 时进行的所有工序所需 w 工种的总人数; $N_w(t)$ 为 w 工种每日常规雇佣人数; N_w^{co} 为 w 工种单人窝工成本; T 为项目总工期; k 为工种数量。

3 算法框架设计

NSGA-II 具备强大的多目标优化能力、有效的非支配排序机制,能够维持解集的多样性,且计算复杂度较低。因此,采用 NSGA-II 算法建立木结构的流水施工工期-工人调度成本优化模型。

3.1 编码方式和初始化种群

编码设计在遗传算法中直接影响算法搜索空间、搜索效率。针对木结构流水施工多目标优化问题,采用整体编码方式,其中每条染色体代表 1 种施工方案,基因位置表示工序排列顺序,基因值表示该工序的编号。

在种群初始化过程中,首先随机生成工序排列顺序,确保每个工序被唯一安排,然后保存满足约束条件的工序顺序方案。该随机初始化方法能够生成多样化的初始种群,为遗传算法提供丰富的初始解空间,增加找到全局最优解的可能性。

3.2 适应度计算

适应度函数是遗传算法中评估个体优劣的指标,直接影响遗传算法的搜索效率和收敛性。针对木结构建筑流水施工工期-工人调度成本优化问题,该函数需综合考虑工期和工人调度成本因素。

1) 工期目标

适应度函数需考虑每个个体的工序安排情况,即工序顺序及其所需时间。

2) 工人调度成本目标

适应度函数需综合考虑临时雇佣成本和窝工成本。临时雇佣成本为施工所需工人数超过常规雇佣人数时产生的额外成本,而窝工成本为施工所需工人数少于常规雇佣人数时产生的成本。

综上所述,可将适应度函数设计为综合工期和工人调度成本的线性组合形式,较短的工期、较低的工人调度成本值均对应较高的适应度值。其中每个目标的优先级可根据具体需求进行调整,以得到最优工期-工人调度成本优化方案。

3.3 交叉变异

1) 交叉操作

根据木结构建筑流水施工多目标优化模型,将 2 个染色体序列进行交叉,产生新个体。如图 2 所示,随机选择 2 个个体,并在某随机位置切割染色体,然后交换 2 个个体的部分染色体序列,从而生成子代个体。

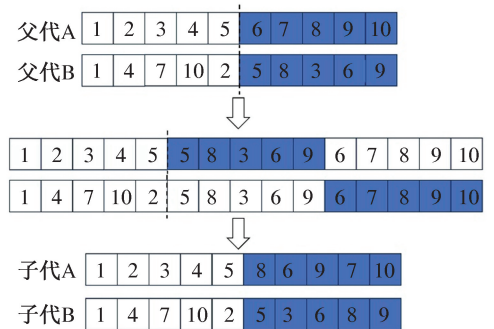


图 2 交叉过程示意

Fig. 2 Crossover process

2) 变异操作

对于木结构建筑流水施工多目标优化问题,变异操作可随机改变个体染色体序列,可以随机选择 1 个个体,随机将染色体序列中的某些基因进行变异,交换 2 个基因位置或随机改变某基因取值,从而生成新的变异个体。

4 实例仿真与分析

4.1 数据来源

某木结构办公楼共 6 层,每层有 2 个楼梯间。

将每3层视为1个施工单元,1~3层为施工单元I,4~6层为施工单元II,每个施工单元均分为3个施工段,用A,B,C进行编号。通过调研得到各工序信息,如表1,2所示。因为每层楼梯间分布在施工段A,C中,因此施工段B中没有4,7,10楼梯间安装工序。I-A, I-B工序施工顺序如图3所示,其中每个施工单元的A,C数据一致,II-A, II-B, II-C数据分别与I-A, I-B, I-C数据一致,不再赘述。

通过调研木结构建筑施工现场可知,木结构建筑施工需要控制成本,因此施工现场每天常规雇佣人数为技术工3人、安装工5人。参考《住房和城乡建设部办公厅关于开展2022年工程造价咨询统计调查的通知》,临时雇佣成本中,技术工100元/(d·人)、安装工80元/(d·人);窝工成本中,技术工60元/(d·人)、安装工40元/(d·人)。

4.2 结果与分析

本文对该办公楼进行施工多目标优化,NSGA-II算法与粒子群算法的帕累托最优解集如表3所示。

由表3可知,在相同的优化条件下,NSGA-II算法在各目标中均呈较优的优化效果:①工期目标方面,NSGA-II算法比粒子群算法优化程度高8.7%,最短工期为42d;②工人调度成本方面,NSGA-II算法比粒子群算法优化程度高5.6%,最低工人调度成本为7380元,当工期相同时,NSGA-II算法较粒子群算法降低6%~18.4%;当工人调度成本大致相同时,NSGA-II算法较粒子群算法缩短3.6%~12%。通过以上对比可以得出,在工期和工人调度成本优化效果方面,NSGA-II算法优于粒子群算法,具有更强的适用性和优势。

通过NSGA-II算法得到帕累托最优解集的过程

表1 I-A工序所需资源

Table 1 Resource required for I-A

| 工序序号 | I-A-1 | I-A-2 | I-A-3 | I-A-4 | I-A-5 | I-A-6 | I-A-7 | I-A-8 | I-A-9 | I-A-10 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 作业时间/d | 2 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| 技术工/人 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 安装工/人 | 3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 3 | 3 | 5 | 3 | 3 |

表2 I-B工序所需资源

Table 2 Resource required for I-B

| 工序序号 | I-B-1 | I-B-2 | I-B-3 | I-B-5 | I-B-6 | I-B-8 | I-B-9 |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 作业时间/d | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 |
| 技术工/人 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 安装工/人 | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 | 5 | 3 |

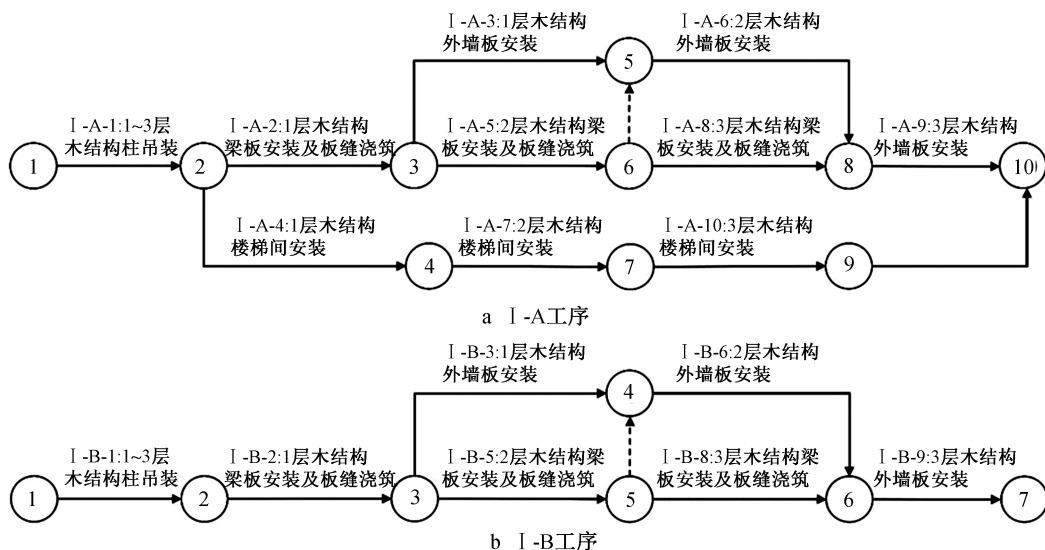


图3 不同工序施工顺序

Fig. 3 Construction sequence of different activities

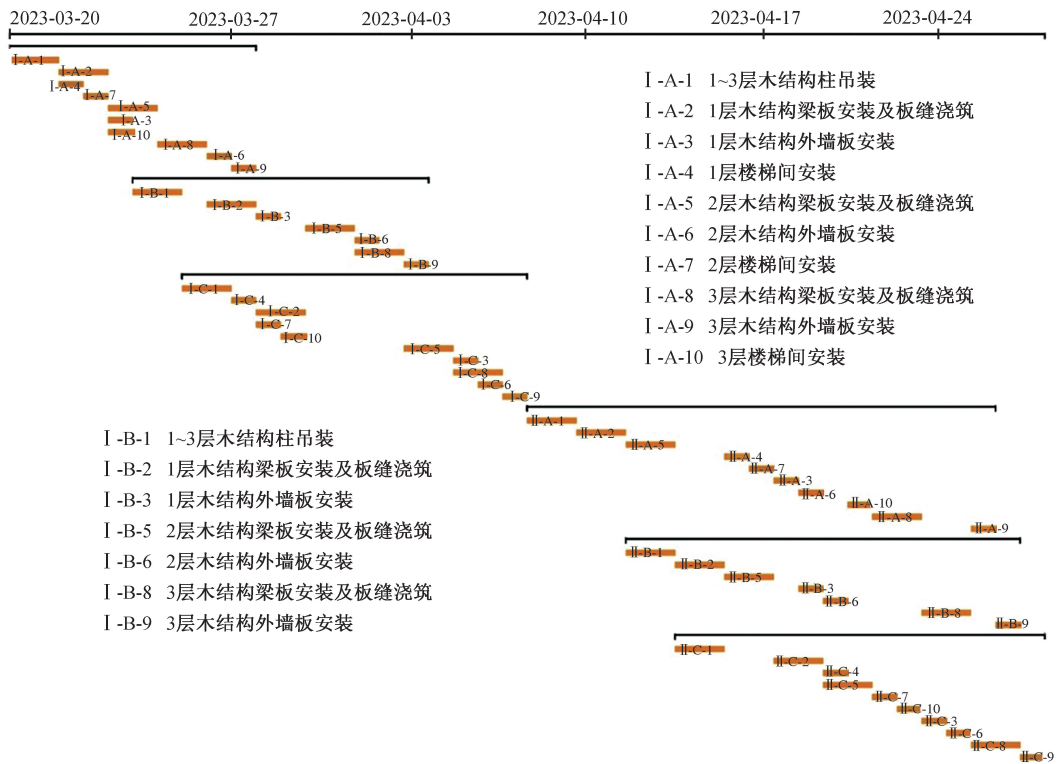


图 4 木结构办公楼施工进度横道图

Fig. 4 Gantt chart of construction schedule for timberwork office building

表 3 NSGA-II 算法与粒子群算法的帕累托最优解集
 Table 3 Pareto optimal solutions of NSGA-II algorithm and particle swarm algorithm

| 方案 | 工期/d | 工人调度成本/元 | 算法 |
|----|------|----------|---------|
| 1 | 42 | 12 420 | NSGA-II |
| 2 | 43 | 11 720 | |
| 3 | 44 | 10 780 | |
| 4 | 45 | 10 560 | |
| 5 | 46 | 10 260 | |
| 6 | 47 | 10 040 | |
| 7 | 48 | 9 660 | |
| 8 | 49 | 9 360 | |
| 9 | 50 | 9 220 | |
| 10 | 51 | 8 840 | |
| 11 | 52 | 8 620 | |
| 12 | 53 | 8 320 | |
| 13 | 54 | 8 100 | |
| 14 | 55 | 7 960 | |
| 15 | 56 | 7 660 | |
| 16 | 57 | 7 520 | |
| 17 | 58 | 7 380 | |
| 18 | 46 | 12 340 | 粒子群 |
| 19 | 47 | 11 640 | |
| 20 | 48 | 10 620 | |
| 21 | 49 | 10 480 | |
| 22 | 50 | 9 940 | |
| 23 | 51 | 9 400 | |
| 24 | 54 | 8 900 | |
| 25 | 55 | 8 840 | |
| 26 | 55 | 8 280 | |
| 27 | 60 | 7 820 | |

中,管理人员可根据实际需求选择合适的施工方案。从表中可以看出,方案 17 工期为 58d,方案 1 工期为 42d。虽然方案 1 的总工期较短,但工人调度成本相应增加;而方案 17 的工人调度成本最低,比方案 1 减少 5 040 元。综上所述,不同方案中,1 个子目标效益的提高可能导致其他子目标效益损失。因此,在实际项目中,工作人员需根据实际情况考虑多个目标的综合效益,以选择最合适的方案。方案 1 施工进度横道图如图 4 所示,将工程师根据经验所作初始方案作为原方案,方案 1 相比原方案工期缩短 4d。

5 结语

1) 综合考虑施工工期、工人调度成本对施工组织优化的影响,提出基于 NSGA-II 算法的木结构建筑施工组织多目标优化方法,得到较好的优化效果,且 NSGA-II 算法优化效果均优于粒子群算法。在满足建筑施工逻辑和资源约束的前提下,以施工工期和工人调度成本为目标函数,建立多目标优化数学模型,优化施工段施工顺序,能够有效平衡各项施工目标,确保资源合理利用、施工过程顺利。

2) 通过实际算例,证明了该多目标方法具有较好的优化效果,能够提供多个优化方案,可帮助项目管理人员在面对各种不确定情境时,能够在降低工人调度成本和缩短工期间权衡取舍。

参考文献:

- [1] HE W. Time, cost, and energy consumption analysis on construction optimization in high-rise buildings [J]. Journal of construction engineering and management, 2021, 147 (10): 04021128.
- [2] YUAN Z M. Simulation and optimization of prefabricated building construction considering multiple objectives and uncertain factors [J]. Journal of building engineering, 2024, 86: 108830.
- [3] 王星星,于竞宇,毛江峰,等.基于NSGA-II与方案优选的机场航站楼大跨度钢结构多目标优化研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2023,46(7):941-949.
WANG X X, YU J Y, MAO J F, et al. Multi-objective operation of large-span structure of airport terminal based on NSGA-II algorithm and scheme evaluation [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2023, 46 (7): 941-949.
- [4] 李汝宁,冯兴,姚仰平,等.基于改进遗传算法的机场场道施工方案多目标优化[J].北京航空航天大学学报,2024,50(12):3720-3728.
LI R N, FENG X, YAO Y P, et al. Multi-objective optimization of airport runway construction scheme based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50 (12): 3720-3728.
- [5] BOZEJKO W, HEJDUCKI Z, UCHRONSKP M, et al. Solving resource-constrained construction scheduling problems with overlaps by metaheuristic [J]. Journal of civil engineering and management, 2014, 20 (5): 649-659.
- [6] 满庆鹏,郑慕华,常远,等.基于动态仿真技术的装配式建筑施工人员配置优化:以流水施工模式为例[J].土木工程学报,2023,56(9):178-188.
MAN Q P, ZHENG M H, CHANG Y, et al. Construction worker allocation optimization of prefabricated buildings based on intelligent simulation: a case study of flow construction mode [J]. China civil engineering journal, 2023, 56 (9): 178-188.
- [7] 晋良海,谢慧云,胡瑶,等.流水施工工期优化模型及其混合算法研究[J].水利水电技术,2015,46(4):83-86.
JIN L H, XIE H Y, HU Y, et al. Study on optimization model for period of water-running construction and its hybrid algorithm [J]. Water resources and hydropower engineering, 2015, 46 (4): 83-86.
- [8] HYUN H, YOON I, LEE HS, et al. Multiobjective optimization for modular unit production lines focusing on crew allocation and production performance [J]. Automation in construction, 2021, 125: 103581.
- [9] 常春光,凌霄雪.基于麻雀搜索算法优化支持向量回归的装配式建筑施工安全投入优化[J].科学技术与工程,2023,23(35):328-334.
CHANG C G, LING X X. Optimization of safety investment in prefabricated building construction based on sparrow search algorithm optimized support vector regression [J]. Science technology and engineering, 2023, 23 (35): 328-334.
- [10] 王茹,李秘,伍志豪.基于SLP与NSGA-II的装配式建筑施工现场临时设施布置多目标优化研究[J].施工技术(中英文),2024,53(10):125-132.
WANG R, LI M, WU Z H. Research on multi-objective optimization of temporary facilities layout in assembled building construction site based on SLP and NSGA-II [J]. Construction technology, 2024, 53 (10): 125-132.
- [11] 高伟.基于资源调度费的工程项目多资源均衡优化研究 [D].青岛:中国石油大学(华东),2018.
GAO W. Study on multi-resource leveling optimization of engineering project based on resource scheduling fee [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.