

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*

王 茹, 李 秘, 伍志豪

(西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

[摘要] 装配式建筑在现代建筑领域中越来越受关注,有效的临时设施布局对于提高装配效率和降低安全风险至关重要。针对装配式建筑临时设施布局问题,提出了一种基于改进的 NSGA-II 算法的多目标优化方法。首先建立以塔式起重机吊装时间、塔式起重机水平吊装路径长度及与密切程度相关的安全风险的多目标优化数学模型,再采用以 SLP 法与随机法结合生成初始种群的改进 NSGA-II 算法对模型进行求解。结果表明,所提出的方法能有效减少塔式起重机的吊装时间、缩小吊装范围,并降低与密切程度相关的安全风险。

[关键词] 装配式;场地布置;系统布置法;优化;吊装;风险

[中图分类号] TU721

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)10-0125-08

Multi-objective Optimization of Temporary Facilities Layout of Prefabricated Buildings Based on SLP and NSGA-II

WANG Ru, LI Mi, WU Zhihao

(School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China)

Abstract: Prefabricated buildings have attracted more and more attention in the field of modern architecture. Effective temporary facility layout is crucial to improve assembly efficiency and reduce safety risks. Aiming at the layout problem of temporary facilities in prefabricated buildings, a multi-objective optimization method based on improved NSGA-II algorithm is proposed. Firstly, a multi-objective optimization mathematical model of tower crane hoisting time, tower crane horizontal hoisting path length and safety risk related to the degree of closeness is established. Then, the improved NSGA-II algorithm, which combines SLP method and random method to generate initial population, is used to solve the model. The results show that the proposed method can effectively reduce the hoisting time of tower crane, narrow the hoisting range and reduce the safety risk related to the closeness.

Keywords: prefabricated; site layout; systematic layout planning (SLP); optimization; lifting; risks

0 引言

在建筑施工中,场地布置是施工组织中的重要一环,不当的建筑布局会造成成本增加,安全风险增大,延误工期。随着装配式建筑的大力发展,预制构件被广泛使用。预制构件尺寸大,自重,吊装困难。大量使用预制构件使塔式起重机的吊装更频繁,不当的临时设施布局会增加吊装时间,影响施工效率。同时,在移动的预制构件下工作对现场施工来说非常危险,57%的安全事故发生在预制

构件安装过程中^[1]。因此,建立一个较全面的装配式建筑场地布局模型对优化施工流程、提高效率和安全保障至关重要。

在现有的场地布置中,刘文涵^[2]借助制造业布局设计系统布置设计理论中物流分析的方法,求解施工现场临时设施之间的总物流量,利用蚁群算法提高遗传算法的初始解质量,以求解施工平面布置问题。Papadaki 等^[3]开发了一个场地布置多目标优化模型,不仅考虑到总行驶距离,还考虑到成本和安全参数。宋兴蓓^[4]运用系统布置设计法结合遗传算法优化了运输费用与设施亲密程度。徐炽乾^[5]介绍了装配式预制构件的施工工艺,运用多阶

* 国家自然科学基金(51978566)

[作者简介] 王 茹,教授,E-mail: wangru@xauat.edu.cn

[收稿日期] 2023-12-26

段决策方法布置施工场地,优化了成本。曾惜璐^[6]通过文献分析法从施工平面布置中选取重要影响因素,并对与预制构件堆场相关的因素进行筛选分类,采用 NSGA-II 算法优化了预制构件的吊装时间和吊装安全。Lu 等^[7]考虑装配式建筑预制构件大量吊装的特点,将预制构件的吊装效率融入 CSLP 研究中,通过 NSGA-II 优化了与物流强度相关的运输成本、与非物流关系相关的安全风险和吊装效率。赖文乐^[8]提出了基于 SLP-GA 的装配式建筑施工现场临时设施布置方法,优化了吊装时间。Zhang 等^[9]提出了 DPCSLP 数学模型,结合多阶段布局 and 两步优化,开发了基于粒子群优化 (PSO) 的求解算法,减少了吊装时间,证明了缩短工期的有效性。Yang 等^[10]提出自动化预制建筑 CSLP 框架,该框架利用 Dynamo 可视化编程平台在 BIM 和优化算法之间创建信息通道,运用多目标优化了时间和成本。

以上关于装配式建筑场地布置的研究多数为预制构件的吊装研究,或单目标优化研究。而施工现场需要考虑的因素很多,往往单一的目标优化不能满足施工现场的需要。本文以装配式建筑施工现场临时设施为研究对象,通过综合分析实际需求,分别构建吊装时间、吊装范围、安全风险三目标函数,采用改进 NSGA-II 多目标优化算法求解 Pareto 解集,最后根据项目经理的决策偏好选出最优场地布置方案。

1 装配式建筑施工现场多目标优化模型

1.1 模型假设条件

1)塔式起重机选址是一个复杂的需单独研究的问题,为研究方便,本文将起重机的位置设定为固定位置。

2)实际施工场地边界多数为不规则形状,地形大多凹凸不平。为了计算方便,将场地看作平面坐标系,为规则、平整的 x,y 轴组成的长方形以提高准确性。

3)临时设施设定为矩形,其质心被视为设施的

1.2 目标函数

1.2.1 塔式起重机的吊装时间

装配式建筑施工物料的流动主要是塔式起重机的吊装,提高塔式起重机的吊装效率,可节省成本,缩短工期。塔式起重机的吊装时间为将物料从临时设施堆放点吊运到物料需求点的时间,则目标函数表达为:

$$f_1 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^m T_n(x_i,y_i,x_d,y_d) \tag{1}$$

式中: T_n 为塔式起重机吊装一次所花的时间, $F(x_i,y_i)$ 为临时设施的

中心坐标, $D(x_d,y_d)$ 为拟建物物料需求点水平投影的中心坐标; n 为临时设施的数量; m 为同类临时设施的物料需求点数量。除了部分生产性临时设施有物料运输,消防设施、配电箱等临时设施没有物料运输,则不需要吊装,对应的 T_n 为 0。

塔式起重机的吊装分为垂直运动和水平运动。垂直运动为塔式起重机将物料从堆放点吊运到安装高度加上吊装安全高度的位置,然后再将物料下降到安装位置 D ;水平运动分为塔式起重机起重臂的转动和小车沿起重臂做直线水平运动,如图 1,2 所示。

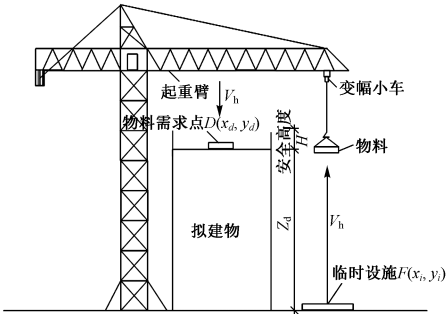


图 1 塔式起重机竖直运动

Fig. 1 Vertical movement of tower crane

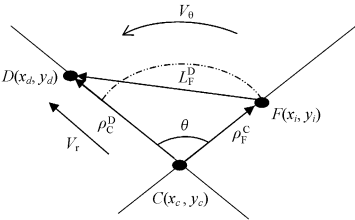


图 2 塔式起重机水平运动

Fig. 2 Horizontal movement of tower crane

Wang 等^[11]提出一种塔式起重机吊装时间和距离的计算公式:

$$T_v = 2 \times \frac{Z_d + 2H}{T_h} \tag{2}$$

$$\rho_F^C = \sqrt{(x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2} \tag{3}$$

$$\rho_C^D = \sqrt{(x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2} \tag{4}$$

$$L_F^D = \sqrt{(x_d - x_i)^2 + (y_d - y_i)^2} \tag{5}$$

$$T_\theta = \frac{1}{V_\theta} \arccos \left[\frac{(\rho_F^D)^2 + (\rho_C^D)^2 - (L_F^D)^2}{2\rho_F^C \rho_C^D} \right] \tag{6}$$

$$T_r = \frac{|\rho_F^C - \rho_C^D|}{V_r} \tag{7}$$

$$T_h = \max(T_r, T_\theta) + \alpha \times \min(T_r, T_\theta) \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \tag{8}$$

$$T_n = \max(T_h, T_v) + \beta \times \min(T_h, T_v) \quad (0 \leq \beta \leq 1) \quad (9)$$

式中: $C(x_c, y_c)$ 为塔式起重机水平投影的中心坐标; Z_d 为临时设施供应点到需求点的高度; H 为吊装安全高度; ρ_F^C 为物料供应点 F 到塔式起重机 C 的水平投影距离; ρ_C^D 为物料从塔式起重机 C 到物料需求点 D 的水平投影距离; L_F^D 为物料从供应点 F 到需求点 D 的水平投影距离; V_θ 为起重臂转角运动速度; T_θ 为水平转角运动时间; T_h 为水平运动时间; V_r 为变幅小车运动速度; T_r 为变幅小车运行时间; α 为起重机吊钩在水平面径向和切向运动的协调系数, β 为起重机在竖直方向和水平方向运动的协调系数, α, β 的取值与起重机操作人员的技术水平及场地情况有关, 一般取 $0 \sim 1$ 。当 α 取 0 时, 吊钩在水平面进行径向和切向的同步运动; 取 1 时, 进行连续运动。当 β 取 0 时, 吊钩在竖直和水平方向同步运动; 取 1 时, 进行连续运动。本文假定 $\alpha=1, \beta=1$, 起重机吊钩在竖直方向和水平方向都做连续运动。

1.2.2 起重机水平吊装路径长度

装配式建筑预制构件的体积大、自重重大, 在预制构件安装过程中, 移动的预制构件对吊装下方的施工非常危险。操作人员操作不当, 易导致预制构件的高空坠落, 临时设施布局不当, 或出现恶劣天气自然环境时, 吊装风险也会增大^[12]。所以, 在规划临时设施堆场时, 应多考虑吊装覆盖范围下的工作面和道路, 尽量让吊装的覆盖范围更小。塔式起重机在水平方向连续运动下吊装范围的目标函数表达式为:

$$f_2 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{d=1}^m \text{Dist}(x_i, y_i, x_d, y_d) \quad (10)$$

$$\text{Dist} = \text{Dist}_r + \text{Dist}_\theta \quad (11)$$

$$\text{Dist}_r = |\rho_F^C - \rho_C^D| \quad (12)$$

$$\text{Dist}_\theta = \min(\rho_F^C, \rho_C^D) \times \arccos \left[\frac{(\rho_F^D)^2 + (\rho_C^D)^2 - (L_F^D)^2}{2\rho_F^C \rho_C^D} \right] \quad (13)$$

式中: Dist 为塔式起重机的水平吊装距离, 吊装距离为塔式起重机的切向运动距离 Dist_θ 与小车水平运动距离 Dist_r 之和, 如图 3 所示。

1.2.3 与非物流密切关系程度相关的安全风险

在场地布置中, 临时设施间的物流关系与临时设施间的物料流动强度有关, 装配式建筑场地布置中, 主要是物料通过塔式起重机到拟建物的流动。除了物流关系外, 还有非物流关系, 其中非物流关系受施工物料流动、作业单位间的作业性质、工作

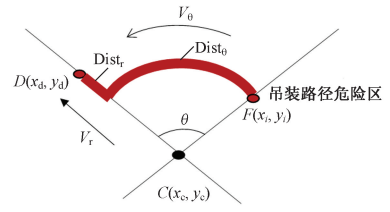


图 3 塔式起重机吊装路径危险区

Fig. 3 Tower crane hoisting path dangerous area

人员间的联系程度、噪声和烟尘等环境的影响。在密切关系中, 两个设施之间的潜在安全风险随着两个设施距离的增加而降低^[13]。与非物流密切关系程度相关的安全风险目标函数表达式为:

$$f_3 = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n S_{ij} d_{ij} \quad (14)$$

式中: S_{ij} 为两个临时设施之间的密切关系程度; d_{ij} 为两个临时设施之间的距离, 距离计算方式采用曼哈顿距离:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (15)$$

为了量化设施之间的安全密切关系, 使用 A, E, I, O, U 和 X 的评级量表对安全密切度评级进行分类。场地布置中, A, E, I, O, U 和 X 分别赋值为 243, 81, 27, 9, 3, 1^[14], 相较于车间布局中, A, E, I, O, U 和 X 取 4, 3, 2, 1, 0, -1 而言, 场地布置中的赋值更大, 这是因为施工现场距离较大, 过小的赋值不能显现设施之间物流、非物流关系强度的作用。

1.3 约束条件

1.3.1 施工现场边界约束

施工现场的边界假设为矩形, 所有临时设施须布置在施工现场范围内。为了防止施工对外界产生过大的干扰, 临时设施与边界的安全距离设定为最小值 2m, 其数学表达式为:

$$\begin{cases} x_i - 0.5l_i - p_{\min} > 0 \\ x_i + 0.5l_i + p_{\min} - L < 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} y_i - 0.5w_i - p_{\min} > 0 \\ y_i + 0.5w_i + p_{\min} - W < 0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: L 为边界的长度; W 为边界的宽度; l_i 为临时设施 F_i 的长; w_i 为临时设施 F_i 的宽; $p_{\min}$ 为离边界最小的安全距离, 临时设施超过边界的安全距离为不满足约束条件, 施工边界约束如图 4 所示。

1.3.2 临时设施重叠约束

施工临时设施间不能相互重叠布置, 每种物料都有相应的堆场。为了便于工人施工和满足防火距离要求, 须设置最小的安全距离, 根据实际要求, 本文将临时设施之间的安全距离设定为 2m。则临时设施重叠约束表达式为:

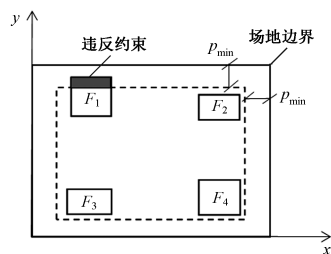


图 4 施工场地边界约束

Fig. 4 Construction site boundary constraints

$|x_i - x_j| - 0.5(l_i + l_j) - q_{\min} > 0 \quad (18)$
 $|y_i - y_j| - 0.5(w_i + w_j) - q_{\min} > 0 \quad (19)$
式中: $q_{\min}$ 为最小的安全距离。
临时设施之间 x 方向重叠约束如图 5 所示(y 方向同理)。

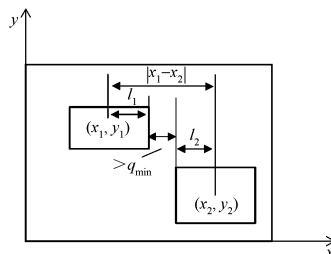


图 5 临时设施重叠约束

Fig. 5 Temporary facility overlap constraints

1.3.3 建筑固定设施约束

施工现场除了需要布置的临时设施外,还有固定的临时设施。塔式起重机布置较复杂,条件要求较高,因此先布置,为固定约束;住宅楼建筑为拟建物,也为固定约束。临时设施不能布置在固定约束里面,且应与固定设施保持至少 2m 的安全距离,则固定设施约束表达式为:

$(x_i \pm 0.5l_i, y_i \pm 0.5w_i) \pm q_{\min} \notin B \cup C \quad (20)$
式中: B 为拟建物的坐标集合区域; C 为塔式起重机的坐标集合区域。临时设施只能布置在 B, C 集合区域的安全范围外,如图 6 所示。

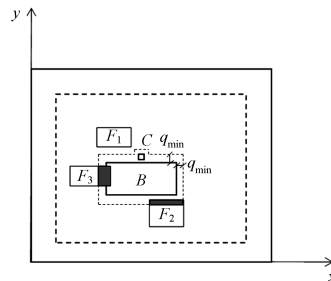


图 6 建筑固定设施约束

Fig. 6 Building fixed facilities constraints

1.3.4 塔式起重机的吊装范围约束

装配式建筑施工除了需要吊装钢筋、木料等非预制构件外,还需要吊装预制构件。根据 TC6517 型塔式起重机的吊装特性,最大吊装半径为 55m,最小吊装半径为 2.5m,则塔式起重机吊装约束表达式为:

$$R_{\min} \leq \sqrt{(x_i \pm 0.5l_i - x_c)^2 + (y_i \pm 0.5w_i - y_c)^2} \leq R_{\max} \quad (21)$$

式中: (x_c, y_c) 为塔式起重机的中心坐标,塔式起重机在吊运物料时,须覆盖临时设施的每个点,才能确保需要吊装的物料都在吊装范围内,塔式起重机吊装范围如图 7 所示。

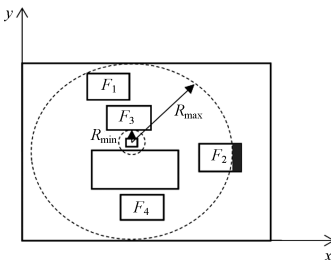


图 7 塔式起重机吊装范围

Fig. 7 Tower crane hoisting range

2 优化算法设计

2.1 改进的 NSGA-II 算法

针对本文提出的装配式建筑临时设施布局多目标优化问题,在 Deb 等^[15]提出的原始算法的基础上,设计了一个改进的 NSGA-II 来求解这个问题。

在施工现场临时设施布置中,位置关系往往较复杂,NSGA-II 算法计算量大,易过早陷入局部最优。通过组合 SLP 方法和随机方法生成初始种群,防止算法过早陷入局部最优。

2.2 染色体编码设计和适应度函数的设定

本文研究的装配式建筑临时设施布置优化问题是多目标连续优化问题。为了进行求解,需将实际问题转化为遗传算法的可求解状态,以便算法对其进行识别和搜索。对于施工场地临时设施布置问题,临时设施的长、宽和坐标已知,所有物料的供应点和需求点坐标也已知,自变量选为临时设施的中心坐标。如果采用平常的二进制编码,编码位数就会过长,且施工场地的临时设施较多,二进制编码就更复杂。所以,本文选用实数编码的方式,减少了基因位数,解决了编码复杂的问题,并以临时设施的中心坐标进行实数编码可清楚地看到临时设施的实际位置,更易进行全局遗传搜索。一条染

染色体表示一组临时设施的布置方案如图 8 所示,染色体上每个基因表示对应临时设施的坐标。

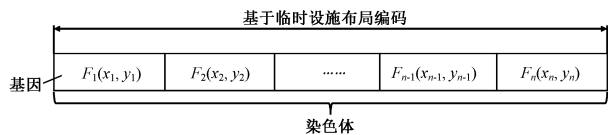


图 8 临时设施编码方式

Fig. 8 Temporary facility coding method

适应度函数是用于评价优化算法表现好坏的函数,通常用来将解决方案映射到一个数值上以评价其质量。3 个目标函数都是求最小值问题,本文直接将目标函数设定为适应度函数。

2.3 初始种群的生成

用 SLP 法和随机法共同生成算法的初始种群,保证了初始种群的多样性和有效性,防止 NSGA-II 算法过早陷入局部最优。

2.4 选择、交叉、变异操作

选择操作用于选择优良的个体进入下一代种群。NSGA-II 通过非支配排序和拥挤度排序来评估个体的优劣,然后根据非支配排序和拥挤度排序选择排名较高和较大拥挤度的个体进入下一代种群。交叉操作用于产生新的解,并引入种群中的多样性。在 NSGA-II 中,采用模拟二进制交叉进行交叉。变异操作用于引入新的解,以增加种群的多样性和搜索空间。NSGA-II 中使用多项式变异进行变异,变异操作通过在变量的取值范围内随机选择一个新的变量值来改变个体的基因特征。

2.5 算法实现

本文采用基于 SLP 法与 NSGA-II 的方法进行优化,在算法设计中,起重机的吊装时间、吊装覆盖范围和安全风险作为待优化的 3 个目标,即式(1), (10), (14) 作为 NSGA-II 的目标函数,而施工现场边界约束、临时设施重叠约束、建筑固定设施约束和吊装范围约束在优化过程中判断是否满足条件,其在每一步迭代中都作为可行解生成和评估的关键部分,即式(16)~(21),从而结合目标函数共同选择最佳的 Pareto 解集。

采用改进的 NSGA-II 算法进行寻优布置,其优点是可处理多个目标函数,同时保持种群的多样性、提高算法的寻优性能,从而得到一组代表所有可能最优解的解集。在每一代都会生成一组新的候选解,然后在满足约束条件下根据他们在各个目标函数上的表现进行排序和选择,其中包括交叉、变异、非支配排序和拥挤度距离的计算等。改进 NSGA-II 算法的临时设施布置实现流程如图 9 所

示,具体实现步骤如下。

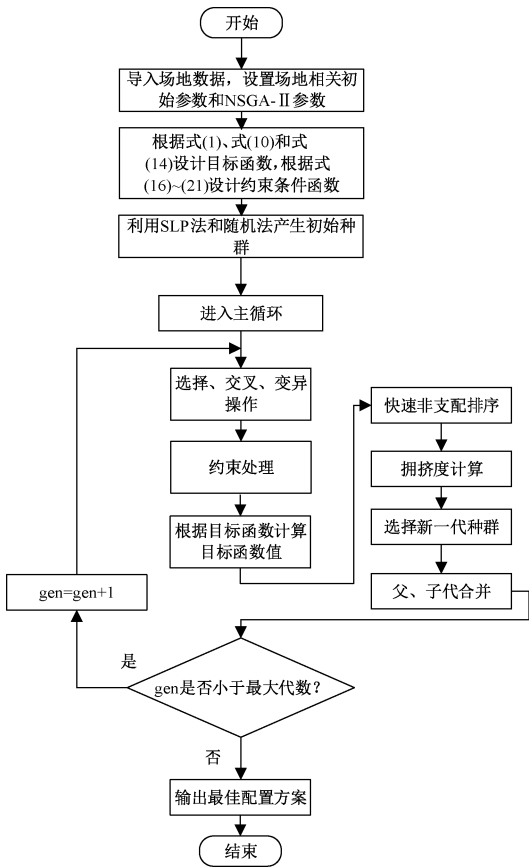


图 9 改进 NSGA-II 算法的临时设施布置实现流程

Fig. 9 The implementation flow chart of temporary facility layout based on improved NSGA-II algorithm

- 1) 步骤 1 导入场地布置数据,设置塔式起重机、拟建物等初始数值和 NSGA-II 算法相关参数。
- 2) 步骤 2 根据式(1),(10),(14)设计目标函数,根据式(16)~(21)设计约束函数。
- 3) 步骤 3 结合 SLP 法和随机法初始化种群,进行约束满足判断,选取初始种群。
- 4) 步骤 4 进入 NSGA-II 主循环,利用交叉、变异和选择操作进行更新,同时进行约束处理,根据目标函数计算得到目标函数值。
- 5) 步骤 5 合并种群,进行拥挤度计算和非支配排序,得到最佳种群。
- 6) 步骤 6 判断是否达到最大迭代次数,若是则跳出迭代,得到 Pareto 前沿解;否则跳转至 Step4 继续优化。

3 案例分析

3.1 施工场地概况

以某住宅项目施工场地临时设施布置为研究对象,该项目为 1 栋 12 层的住宅楼,装配率为 58%。建筑工地的东侧、西侧是待建用地,其他两侧是主要的施工道路。由于周围道路的交通条件限制,车

辆和机械通过西北大门进出现场。现场布局装配式建筑面积为 492.9m^2 ,长 31m ,宽 15.9m ,待建建筑物的中心坐标为 $(40.50,39.05)$ 。塔式起重机的中心坐标为 $(40.00,44.50)$,长 2m ,宽 2m 。现场布局如图 10 所示。

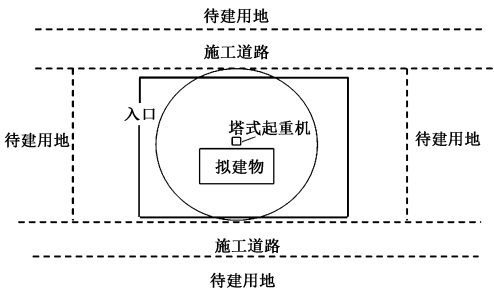


图 10 施工现场布局
Fig. 10 Construction site layout

3.2 场地布置数据

本文主要研究装配式建筑主体结构施工前的现场布置方案。主应力结构采用剪力墙结构形式,建筑物的预制部件包括外墙、内墙、叠合板、楼梯、空调板,这些部件通过扩大的现浇接缝或边缘构件连接为一个整体。

根据实际情况,施工选用 TC6517 型塔式起重机,额定起重力矩 $1\,600\text{kN}\cdot\text{m}$,最大起重能力 10t 。根据规模、形式的要求,生活区和办公区在工地外,施工现场考虑的临时设施如表 1 所示,其中空调板与叠合板堆放在一个堆场。关于物料运输方

面,作出两点假设:塔式起重机每次只能吊装一块预制构件,非预制构件每次吊装的质量不超过 1t ;每个标准层所用材料一致,不考虑木模板、钢支撑等材料的周转。以一个标准层为例,其物料需求点如表 2 所示。

表 1 临时设施类型及尺寸

Table 1 Type and size of temporary facilities			
临时设施	设施编号	设施类型	尺寸(长×宽)/m
预制剪力墙堆场	F1	生产性临时设施	12×10
预制叠合板堆场	F2		12×8
预制楼梯堆场	F3		7×4
钢筋加工区	F4		12×10
木料加工区	F5		8×8
钢支撑堆场	F6		10×8
消防设施	F7	辅助性临时设施	7×5
配电箱	F8		6×4

3.3 优化结果

本文基于改进的 NSGA-II 求解装配式建筑施工现场布置多目标优化问题,将 SLP 法得到的一部分初始种群和随机生成的部分合理种群相结合,共同组成优化算法的初始种群,如图 11 所示,初始种群较均匀。

采用改进的 NSGA-II 来求解该算例,算法优化参数如下:种群规模为 300,迭代次数为 600,交叉率为 0.8,变异率为 0.2。在三维图中生成了一系列需要权衡的 Pareto 解,如图 12 所示。从中选出 3 个解,3 种施工现场布局方案的具体优化结果如表 3 所示。

表 2 物料需求点坐标及质量

Table 2 Material demand point coordinates and weight			
临时设施供应点	物料需求点坐标 (x,y,z)		质量
	(x,y)	z	
预制剪力墙堆场 F1	$(28.10,25.50)(32.51,25.50)(35.45,25.50)(38.25,25.50)(42.75,25.50)(45.55,25.50)(48.50,25.50)(52.90,25.50)(55.50,27.01)(55.50,29.29)(25.50,27.01)(25.50,29.29)(28.10,30.80)(52.90,30.80)(50.20,33.72)(30.80,33.72)(28.10,36.00)(52.90,36.00)(55.50,37.70)(55.50,39.96)(25.50,37.70)(25.50,39.96)(28.10,41.20)(31.72,40.30)(33.85,40.30)(37.28,40.30)(40.50,40.30)(43.73,40.30)(47.15,40.30)(49.28,40.30)(53.20,41.20)(35.45,30.80)(45.60,30.80)(36.60,34.89)(44.40,34.89)$	19.05	$\leq 5.23\text{t/块}$
	$(26.37,28.15)(28.15,28.15)(29.93,28.15)(26.20,26.44)(26.20,28.15)(26.20,30.20)(38.61,26.44)(38.61,28.80)(38.61,31.03)(42.38,26.44)(42.38,28.80)(42.38,31.03)(27.80,26.44)(27.80,28.15)(27.80,30.20)(51.07,28.15)(52.89,28.15)(54.63,28.15)(55.94,33.40)(53.60,33.40)(51.42,33.40)(47.30,32.42)(47.30,34.79)(43.20,34.05)(37.80,34.05)(33.70,32.41)(33.70,34.79)(29.59,33.40)(27.40,33.40)(25.07,33.40)(26.57,26.80)(28.92,26.80)(33.95,38.10)(37.29,36.99)(37.28,39.21)(43.73,36.99)(43.73,39.21)(47.05,38.11)(52.09,38.75)(54.44,38.75)(31.72,40.80)(49.28,40.80)$	19.05	$\leq 1.73\text{t/块}$
预制楼梯堆场 F3	$(39.83,37.70)(41.18,37.70)$	19.85 21.70	$\leq 1.98\text{t/节}$
钢筋加工区 F4	$(40.50,34.05)$	19.05	12.38t
木料加工区 F5	$(40.50,34.05)$	19.05	7.68t
钢支撑堆场 F6	$(40.50,34.05)$	19.05	17.83t

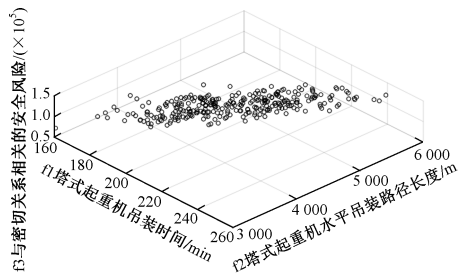


图 11 SLP 法和随机法组合生成的初始解空间分布
Fig. 11 Spatial distribution of initial solution generated by combination of SLP method and random method

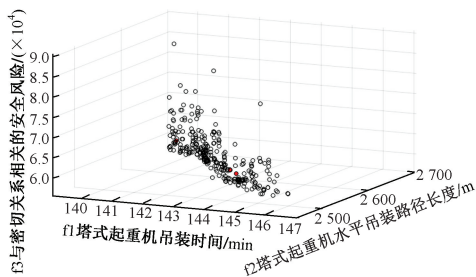


图 12 Pareto 最优解分布

Fig. 12 Pareto optimal solution distribution

由于 3 个目标函数具有较大的维度差距,因此有必要对 3 个目标函数归一化以进行比较和评估:

$$f_{ij}^* = \frac{f_{ij}}{\max(f_{ij})}, i = 1, 2, 3; j = 1, 2, 3 \quad (22)$$

式中: f_{ij} 为第 i 个施工临时设施布置方案的第 j 个目标函数值。

在实际工程项目中,项目经理通常会决定施工现场的具体平面布置图,这意味着项目经理的决策偏好对现场布局的影响具有显著性,经过对项目经理访谈,最终 f_1, f_2, f_3 的比重取 0.40, 0.35, 0.25。3 种解决方案的归一化最优结果如表 4 所示。原始方案和 3 种优化方案施工现场布局如图 13 所示。

3.4 施工现场优化方案对比

与原方案的目标值相比,每个方案均有不同程度的优化, f_1 平均优化了 14.35%, f_2 平均优化了 28.89%, f_3 平均优化了 22.90%。

由表 4 可知,方案 A3 的加权和最小,更倾向于项目经理的选择。从吊装时间、吊装范围、与密切

表 4 3 种施工方案归一化结果

Table 4 Normalization results of three construction schemes

施工现场布置方案	f_1	f_2	f_3	加权和
A1	0.974 4	1	1	0.989 8
A2	1	0.956 4	0.992 4	0.982 8
A3	0.992 7	0.977 7	0.953 2	0.977 6

关系相关的安全风险 3 个方面进行分析。吊装时间和吊装范围都与物料供应点与物料需求点间的距离有关,当物料供应点离物料需求点更近时,两者都会在一定程度上减少。方案 A1, A2, A3 的临时设施位置都有较好的优化,都有利于起重机吊装,三者的吊装时间、吊装范围差距不大。从临时设施之间的安全风险来看,3 种方案消防设施 F7 和配电箱 F8 之间距离很近,这是合理的,因为配电箱一旦引发火灾就会产生较大事故。方案 A3 的钢筋加工区 F4 与木料加工区 F5 距离近,消防设施 F7、配电箱 F8 放在两者之间更利于消防和用电操作,而方案 A1, A2 的 F4, F5 两者相距较远, F7, F8 放在两者之间,不利于消防和用电工作。施工场地的钢筋加工区 F4、木料加工区 F5 是噪声的主要来源,噪声对工作人员身体健康有害,而且还会影响施工效率。方案 A1, A2, A3 与 F4, F5 相近的吊装点都会在一定程度上受到噪声的影响,其中 A1 受到噪声影响的吊装点最多。在噪声屏的防护下,吊装点和噪声点相隔一定距离会大量降低来自噪声的影响。方案 A1, A2, A3 的吊装点都与噪声点相距一定距离,噪声的影响都会有所减小。综合运输成本、安全风险看,方案 A3 的布置更合理。

4 结语

本文提出了一个适用于装配式建筑的多目标优化模型,以优化吊装效率、吊装范围、与密切关系相关的安全风险。通过一个装配式住宅建筑工地项目来说明所提出的模型的有效性。采用 SLP 法和随机法生成初始种群,利用改进的 NSGA-II 多目标优化算法得到模型的多样性 Pareto 解。与传统的人工确定平面布置图相比,该模型更加科学地优化整个项目的施工效率、成本 and 安全性。目前文中只

表 3 原方案结果和 3 种施工现场布置方案结果及优化比例

Table 3 The results of the original scheme and the results and optimization ratios of the three construction site layout schemes

施工现场布置方案	f_1 (优化比例)	f_2 (优化比例)	f_3 (优化比例)
A1	140.15 (15.61%)	2 647.04 (27.29%)	61 203.48 (21.48%)
A2	143.83 (13.40%)	2 531.53 (30.46%)	60 737.76 (22.08%)
A3	142.78 (14.03%)	2 587.89 (28.91%)	58 341.68 (25.15%)
原方案	166.08	3 640.4	77 948.35

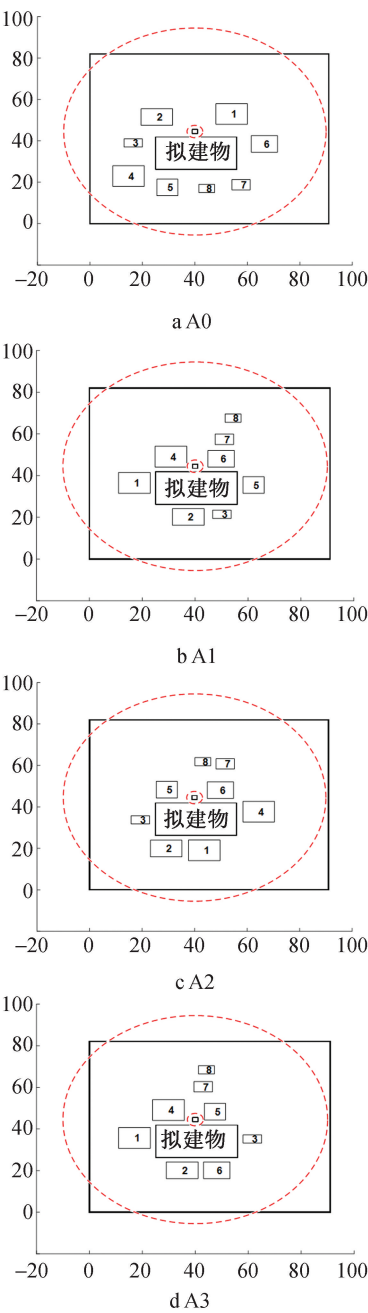


图 13 原始方案和 3 种优化

Fig. 13 The original scheme and three optimized schemes

考虑了一个标准层材料需求情况,每层楼的材料垂直吊运距离有所差异,未来可以考虑不同楼层下临时设施的布置情况。

参考文献:

[1] FARD M M, TEROUHID S A, KIBERT C J, et al. Safety concerns related to modular/prefabricated building construction [J]. International journal of injury control and safety promotion, 2017, 24(1): 10-23.

[2] 刘文涵. 基于施工现场平面布置的安全管理优化模型和算法研究[D]. 大连:东北财经大学, 2012.

LIU W H. Research on safety management optimization model and algorithm based on construction site layout[D]. Dalian: Dongbei

University of Finance and Economics, 2012.

[3] PAPADAKI I N, CHASSIAKOS A P. Multi-objective construction site layout planning using genetic algorithms [J]. Procedia engineering, 2016, 164: 20-27.

[4] 宋兴蓓. 基于 BIM 技术的施工现场动态布置研究[D]. 西安: 长安大学, 2017.

SONG X B. Research on dynamic layout of construction site based on BIM technology [D]. Xi'an: Chang'an University, 2017.

[5] 徐炽乾. 装配式建筑施工现场地布置方案研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2020.

XU C Q. Study on the layout scheme of prefabricated building construction site [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[6] 曾惜璐. 施工现场预制混凝土构件临时堆场布置多目标优化研究[D]. 重庆:重庆大学, 2020.

ZENG X L. Multi-objective optimization study on temporary storage yard layout of prefabricated concrete members in construction site [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.

[7] LU Y, ZHU Y. Integrating hoisting efficiency into construction site layout plan model for prefabricated construction [J]. Journal of construction engineering and management, 2021, 147 (10): 04021130.

[8] 赖文乐. 装配式建筑施工现场临时设施布置优化研究[D]. 重庆:重庆大学, 2021.

LAI W L. Optimization of temporary facilities layout in prefabricated building construction site [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

[9] ZHANG H, YU L. Site layout planning for prefabricated components subject to dynamic and interactive constraints [J]. Automation in construction, 2021, 126: 103693.

[10] YANG B, FANG T, LUO X, et al. A BIM-based approach to automated prefabricated building construction site layout planning [J]. KSCE journal of civil engineering, 2021, 26(4): 1-18.

[11] WANG J, ZHANG X, SHOU W, et al. A BIM-based approach for automated tower crane layout planning [J]. Automation in construction, 2015, 59: 168-178.

[12] 杨元元, 赵延龙. 基于组合赋权二维云模型的装配式建筑构件吊装施工安全风险评价[J]. 自然灾害学报, 2022, 31(3): 167-174.

YANG Y Y, ZHAO Y L. Safety risk assessment of assembly building component hoisting construction based on combined weighted two-dimensional cloud model [J]. Journal of natural disasters, 2022, 31 (3): 167-174.

[13] NING X, LAM K C. Cost-safety trade-off in unequal-area construction site layout planning [J]. Automation in construction, 2013, 32: 96-103.

[14] NING X, LAM K C, LAM M C K. Dynamic construction site layout planning using max-min ant system [J]. Automation in construction, 2010, 19(1): 55-65.

[15] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002, 6(2): 182-197.