

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.058



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



# 装配式建筑预制混凝土构件的布局优化

王淑婧<sup>1</sup>, 阮浩<sup>1</sup>, 邹贻权<sup>1</sup>, 刘苗苗<sup>2</sup>

(1. 湖北工业大学 土木建筑与环境学院, 武汉 430000; 2. 北京构力科技有限公司, 北京 100020)

**摘要:**针对预制混凝土构件生产过程中模台利用率低的问题,提出一种高效的构件布局定序和定位优化方法。充分考虑构件生产过程中模台、模具、构件布局尺寸、操作空间等实际约束限制,以构件占用模台总长度最短为目标,建立基于最低水平线排布算法的数学模型;应用改进灰狼算法确定构件排布顺序,通过构件类型、尺寸信息、模台尺寸约束、模具数量约束等对待排构件进行编码,并设置追随系数和自由系数控制灰狼算法的收敛速度和收敛范围,经过多次优化迭代得出最优布局方案。在实证分析中,使用Python编程语言对布局优化模型进行编码,最终表明该方法能在较短时间内取得较好的优化效果,模台利用率显著提高,证明了方法的有效性和可行性。

**关键词:**装配式建筑;预制混凝土构件;模台布局;灰狼算法;布局优化

中图分类号: TU741.2 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2024)01-0207-08

## Layout optimization of prefabricated concrete components in prefabricated buildings

WANG Shuqiang<sup>1</sup>, RUAN Hao<sup>1</sup>, ZOU Yiquan<sup>1</sup>, LIU Miaomiao<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan 430000, P. R. China; 2. Beijing Gouli Technology Co., Ltd., Beijing 100020, P. R. China)

**Abstract:** In order to solve the problem of low utilization rate of formwork in the production process of precast concrete components, this paper proposes an efficient component layout sequencing and positioning optimization method. Firstly, the mathematical model based on the minimum horizontal line layout algorithm is established with the objective of minimizing the total length of the mould table occupied by the components, considering the actual constraints of the mould table, mould, component layout size and operation space in the production process of the components. Secondly, for the purpose of determining the sequence of component layout, this study uses the improved grey wolf algorithm and the components to be arranged are coded through component type, size information, and constraint conditions. Via setting the coefficient and free coefficient, which can control the convergence speed and convergence range of the grey wolf algorithm, the optimal layout scheme is obtained via multiple optimization iterations. Through empirical analysis, this method can achieve better optimization effect in a short time, and the utilization rate of the mold is significantly improved, which verifies the effectiveness and feasibility of the method.

**Keywords:** prefabricated building; precast concrete components; formwork layout; gray wolf algorithm; topological optimization

收稿日期: 2022-02-28

基金项目: “科技助力经济2020”重点专项(2020ZLSH08); 湖北省教研项目(省2020464)

作者简介: 王淑婧(1981-), 女, 副教授, 主要从事建设项目信息化研究, E-mail: 418822438@qq.com。

Received: 2022-02-28

**Foundation items:** Key Projects of “Science and Technology to Promote Economy 2020”(No. 2020ZLSH08); Hubei Teaching and Research Project (No. Province 2020464)

**Author brief:** WANG Shuqiang (1981-), associate professor, main research interest: construction informatization, E-mail: 418822438@qq.com.

“十四五”期间,装配式建筑进入全面发展期,作为推进装配式建筑发展的重要主体,预制混凝土构件生产企业在整个装配式建筑产业链中所处的地位非常关键<sup>[1]</sup>。然而,当前大部分生产企业存在生产效率低下、管理过程混乱、智能化水平过低等问题,导致企业微利甚至亏损经营。为节约生产成本,企业必须改变当前生产方式,由粗放式生产向精益生产转变,其中预制构件生产布局优化是第一步。目前构件生产布局主要依靠经验,具有随意性和不科学性,为提高模台利用率并减少资源投入,研究预制构件生产定序和定位问题十分必要。

目前,关于布局优化的研究主要集中在原材料切割领域,涉及原材料切割定序和定位问题<sup>[2-8]</sup>。常用的定位算法包括:最左最下算法(BL)、下台阶算法和最低水平线算法<sup>[9-11]</sup>,其中,BL算法常导致排样左侧较高,无法充分利用空间;下台阶算法和最低水平线算法排样结果相近,但在某些情况下,下台阶算法会导致排样右侧偏高<sup>[12]</sup>。最低水平线算法通过确定最低水平线段,使所布物体尽可能放置在该线段最左最下侧,直至最低水平线段放置不下,再重新选择线段并重复操作,直至布局完成。刘少云<sup>[13]</sup>采用遗传算法与最低水平线算法排样,并将该算法应用于某激光装备企业的板材切割;姚刚等<sup>[14]</sup>在模型信息的基础上应用最低水平线算法排布构件,从而提高了混凝土预制(Precast Concrete, PC)构件生产的信息化程度和生产效率。

已有的定序智能算法有遗传算法、模拟退火算法和蚁群算法。张娜等<sup>[15]</sup>采用蚁群算法配合动态最低水平线法,分别计算矩形的排样序列和排放位置。凌晗等<sup>[16]</sup>使用改进遗传算法进行矩形件排样优化。夏以冲等<sup>[17]</sup>采用一种自适应遗传模拟退火算法,应用于矩形件优化排样问题。其中遗传算法全局搜索能力较好,但收敛速度慢,易受参数影响;蚁群算法收敛速度慢且易陷入局部优解的情况。灰狼算法是一种模拟狼群狩猎的元启发算法,算法中狼群被分为3只头狼 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 和普通狼群 $\eta$ , $\eta$ 会根据 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 的位置进行移动并更新自己的位置,每一次更新后也会根据适应值重新选出 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ,直至满足终止条件后得出最优解。徐逸凡等<sup>[18]</sup>通过灰狼算法解决带AGV的柔性作业车间调度最小化完工时间问题;麻鹰等<sup>[19]</sup>使用灰狼算法对18个影响民航维修人为差错的因子构建了评价模型。相较于遗传算法、蚁群算法等传统智能算法,灰狼算法具有更强的全局搜索能力,收敛速度快,更具有适用性。上述研究仅考虑原料使用率最大,而在预制构件生产中,应综合考虑模台、构件类型和尺寸构成、模具数

量、操作空间等复杂条件和约束。

以满足订单生产为目标,采用灰狼算法确定构件顺序,选取最低水平线排布算法确定构件在模台上的位置,充分考虑模台、构件、模具、操作空间等约束,通过不断优化确定构件布置最优方案,使模台的空间利用率最大化,减少模台数量,进一步达到减少人工投入、降低生产成本的目的。

## 1 预制混凝土构件布局问题分析

现阶段,预制混凝土构件生产方式有流水线式和固定式。流水线式生产是构件与模台一起,按一定顺序,根据不同工序在各工位顺序流转,主要生产叠合板、内外墙体等常规构件;固定式生产是在一个固定模台上完成预制构件所有工序的操作,主要生产楼梯梯段等异型构件,一些小型的作坊式生产企业仅有固定模台生产线,生产所有预制混凝土构件,生产效率低下。流水线式生产方式更符合工业化生产特征,是未来构件厂生产的主流模式。笔者基于流水式生产方式,对构件布局中存在的实际约束进行分析,为建立构件布局优化数学模型提供基础。在此问题中,存在的实际约束包括以下几个方面:

1) 模台空间限制。模台为混凝土或钢制矩形操作平台,预制构件生产过程是以模台为载体布置模具和构件,根据工序模台在不同工位顺序流转,常见尺寸为:宽3.5~4 m、长9~12 m,在生产过程中,任何模具和构件(含出筋长度)均不能超出模台范围。

2) 构件布局尺寸计算。与一般矩形原材料不同,预制混凝土构件有叠合板、梁、柱、墙体等多种类型,很多构件有外伸钢筋,构件在布局中的尺寸应为模具尺寸和构件外伸钢筋长度总和。

3) 构件摆放要求。为便于操作和质量控制,构件的各边应平行或垂直于生产模台的长和宽,构件不能重叠摆放,构件之间应预留操作空间。

4) 模具数量限制。构件生产过程中,模具为周转材料,由于成本较高、模具数量有限,每次可同时生产的某类型构件数量不应大于其模具数量。

在以上约束限制下,优化过程可以分为两部分。

### 1) 确定布局的顺序

预制构件厂主流的生产模式为按订单组合(Assemble-to-Order, 简称为ATO)生产模式,即生产方在收到来自不同施工方的订单后,根据各类订单吊装需求对订单进行重新组合,生成工厂生产计划,同一生产批次有不同类型、不同尺寸的多个构

件,然后确定构件的生产顺序。采用灰狼算法作为定序算法,灰狼算法是根据灰狼群体的捕猎行动而提出的优化算法,具有较强的局部搜索能力和全局搜索能力。主要步骤为:①初始化灰狼种群,确定狼群的初始位置;②计算各灰狼适应度,保留排名前 3 位的头狼;③更新灰狼位置;④计算适应度,并重新确定 3 只头狼;⑤重复③、④,直至达到最大迭代次数。

2)确定布局的位置

构件布局顺序确定后,通过最低水平线算法确定构件在模台上的位置。最低水平线算法的优点在于排布时更加平均,不易存在排件扎堆的情况,对于空间的利用效率更高。最低水平线算法的主要步骤为:①找到当前的最低水平线段;②在约束条件限制下,将构件置于最低水平线段上,尽可能向最左侧移动;③若最低水平线段放置不下,则转入次低级水平线段进行排布;④若所有最低线段均排布不下,则转入下一块模台。

构件生产布局问题可视为二维排布问题,即在有限的布局空间内,考虑实际约束,通过确定构件生产顺序和布局方法,使模台空间利用率最大化。

2 建立预制混凝土构件排布数学模型

根据预制构件厂实际生产条件和流水线式生产方式,模型可以描述为:以工厂生产计划为排布对象,以实际约束为前提,应用最低水平线法确定构件位置,通过不断优化得到的最优布局方案中所占模台总长度  $L_z$  最短(所占模台数量最少)。

模型的约束条件:

- 1)总布局构件数量符合订单所需数量要求;
- 2)布置构件时,构件不能超过模台所占范围;
- 3)所有构件之间不能相互重叠;
- 4)布局某类构件时,其布置数量不能超过该类构件的模具数量;
- 5)模具的各边与模台边平行,不存在倾斜布置的情况;
- 6)考虑外伸钢筋长度和构件间的操作空间。

上述约束的数学表达和基于最低水平线法的数学模型的建立过程如下:

1)确定模台坐标系和构件位置表示方法

设模台的长为  $L$ ,宽为  $W$ ,该模台左下角点为原点  $(0,0)$ ,以模台长边为  $x$  轴,模台宽边为  $y$  轴建立直角坐标系, $x_i, y_i$  为坐标系内的横纵坐标。其中, $x_i \leq L, y_i \leq W, x_i, y_i \geq 0$ 。

任意一个预制构件的位置可描述为

$$g_i = (x_{i0}, y_{i0}, x_{i1}, y_{i1}) \tag{1}$$

式中: $x_{i0}, y_{i0}$  为该构件左下角位置点的坐标值; $x_{i1}, y_{i1}$  为右上角位置点的坐标值。

按照最低水平线法的布局规则,找到最低水平线段并尽可能向其最左侧布置,可以得出  $x_{i0}, y_{i0}, x_{i1}, y_{i1}$  的坐标计算公式。

$$x_{i0}, y_{i0} = x_{left}, y_{low} \tag{2}$$

$$x_{i1} = x_{left} + l \tag{3}$$

$$y_{i1} = y_{low} + w \tag{4}$$

式中: $x_{left}$  为在最低水平线段上构件所能放置的最左侧点的横坐标值; $y_{low}$  为最低水平线段的纵坐标值; $l$  为平行于模台长边的构件长度; $w$  为平行于模台宽边的构件长度。

2)考虑出筋长度和操作空间

为保证构件有适当的钢筋伸长量占用空间和操作空间,对构件尺寸做出规定

$$l = l_{pc} + l_g + 0.5 \times l_c \tag{5}$$

$$w = w_{pc} + l_g + 0.5 \times l_c \tag{6}$$

式中: $l_{pc}$  为该构件本身平行于模台长边的长度; $w_{pc}$  为该构件本身平行于模台宽边的长度; $l_g$  为外伸钢筋长度; $l_c$  为预留操作空间长度(其中预留操作空间长度表示某构件与其左右相邻两个构件之间需要保留的长度和)。

3)确定布局方式和约束条件

为满足构件不相互重叠的要求,布置方式和约束条件如图 1 所示。

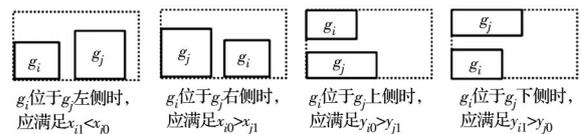


图 1 构件分布情况

Fig. 1 Component distribution

4)计算构件和模具约束关系

设布局情况为

$$B_i = (g_{i1}, g_{i2}, g_{i3} \dots g_{im}) \tag{7}$$

式中: $B_i$  为第  $i$  次的布局情况; $g_m$  为第  $i$  次布局的第  $n$  个构件。

每次布局,构件数量不能超过模具数量,因此,构件所属种类模具数  $S_m$  应大于等于该类构件在本次布局中的数量值  $S_g$ ,即  $S_m \geq S_g$ 。

5)目标函数的表达

最终优化目标为布局长度最短,其目标函数为

$$L_{B_i} = (N_i - 1) \times L + L_{L_i} \tag{8}$$

式中: $L_{Bi}$ 为第*i*次布局时的横向长度; $N_i$ 为第*i*次布局时占用模台的数量; $L_{Li}$ 为第*i*次布局时,最后一块模台所占用的横向长度。

$$L_Z = \sum_{i=1}^m L_{Bi} \quad (9)$$

式中: $L_Z$ 为本生产批次所需布局总长度之和。

6) 预制混凝土构件布局数学模型  
构建函数

$$\begin{cases} g_i = (x_{i0}, y_{i0}, x_{i1}, y_{i1}) \\ B_i = (g_{i1}, g_{i2}, g_{i3}, \dots, g_{im}) \end{cases} \quad (10)$$

在满足式(11)约束条件的情况下,通过重复计算构件坐标值(式(12)),最终得到目标函数解值(式(13))。

$$\begin{cases} x_i \leq L \\ y_i \leq W \\ x_i, y_i \geq 0 \\ x_{i1} < x_{j0}, g_i \text{ 处于构件 } g_j \text{ 左侧} \\ x_{i0} > x_{j1}, g_i \text{ 处于构件 } g_j \text{ 右侧} \\ y_{i0} > y_{j1}, g_i \text{ 处于构件 } g_j \text{ 上侧} \\ y_{i1} < y_{j0}, g_i \text{ 处于构件 } g_j \text{ 下侧} \\ m_{g_m} \geq n_{g_m} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} x_{i0}, y_{i0} = x_{\text{left}}, y_{\text{low}} \\ x_{i1} = x_{\text{left}} + l \\ y_{i1} = y_{\text{low}} + w \\ l = l_{pc} + l_g + 0.5 \times l_c \\ w = w_{pc} + l_g + 0.5 \times l_c \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} L_{Bi} = (N_i - 1) \times L + L_{Li} \\ L_Z = \sum_{i=1}^m L_{Bi} \end{cases} \quad (13)$$

### 3 基于灰狼算法和最低水平法的布局优化算法

布局优化算法的核心思想是:通过灰狼算法不断优化待排预制构件的排入顺序,再由最低水平线算法将排入序列转化成模台布局方案。整体优化过程是由多约束条件限制的寻找最优解的复杂数学问题,核心算法设计如下:

设某生产方案为

$$[x_1, x_2, x_3, \dots, x_n] \quad (14)$$

其中变量  $x_i$  为生产计划中的一个构件。

令每个生产构件  $x_i$  为

$$x_i = [T, L_s, L_l] \quad (15)$$

式中: $T$ 为构件的类型; $L_s$ 为构件的短边长度; $L_l$ 为构件的长边长度。

按规定条件和约束条件得到其一组分布情况为

$$[[b_{11}, b_{12}, \dots, b_{1n}], [b_{21}, b_{22}, \dots, b_{2n}] \dots [b_{m1}, b_{m2}, \dots, b_{mn}]]$$

式中: $b_{ij}$ 为第*i*次布局时的第*j*个构件。

定义差异数组

$$\begin{cases} 1, b_{ij}^{a||\beta||\gamma} = b_{ij} \\ 0, b_{ij}^{a||\beta||\gamma} \neq b_{ij} \end{cases} \quad (16)$$

在差异数组中,符合  $b_{ij}^{a||\beta||\gamma} \neq b_{ij}$  的部位,根据追随系数  $\epsilon$ ,将  $\epsilon$  个位置向着头狼位置进行优化,即让该部位为  $b_{ij} = b_{ij}^{a||\beta||\gamma}$ ,其中  $\epsilon$  取值范围在  $[0, 10]$  之间,数值越大,则局部搜索能力越强,但容易陷入局部最优情况。

另外,在迭代优化过程中,为使算法不陷入局部最优解的情况,设置灰狼的自由系数  $f$ ,其取值范围在  $[0, 10]$  之间,数值越大,全局搜索能力越强,但收敛速度越慢,除 3 只头狼外,位移时其他狼群自由移动的概率为

$$P_f = 0.1 \times f \quad (17)$$

算法的主要流程如图 2 所示,其详细步骤如下:

步骤 1:输入初始种群数、最大迭代次数、模台和模具的基本信息、生产计划的基本信息。

步骤 2:建立约束条件,通过式(11)的设置,实现构件摆放、模具数量限制等要求。

步骤 3:由步骤 1 键入的基本信息和步骤 2 中的约束条件,随机生成初始灰狼种群并进行编码处理,最终得到一组随机的构件初排序列。

步骤 4:使整个灰狼种群按照最低水平线法进行布局,计算整个灰狼种群的适应度,并选择排名最靠前的 3 只灰狼  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  作为整个灰狼种群的头狼,将其他狼定义为狼群  $\eta$ 。

步骤 5:狼群  $\eta$  需要按照 3 只头狼  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  的位置调整自己所处的位置, $\eta$  中每一只灰狼都会在  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  这 3 只领头狼中随机选取一只作为参照,根据差异数组判别可调节部位,并根据追随系数  $\epsilon$ 、自由系数  $f$  对每个部位做出相应调整。

步骤 6:重复步骤 4、步骤 5,直至达到最大迭代次数,得到最优解。



图 2 基于灰狼算法和最低水平线排布算法的布局优化流程图

Fig. 2 Layout optimization flow chart based on grey wolf algorithm and minimum horizontal line algorithm

### 4 案例分析

#### 4.1 项目概况

以武汉市某PC构件生产基地的一批叠合板生产任务为例,该批次叠合板需求量为87块,共有21

种尺寸类型,采用流水式生产,其构件数量、模具数量和尺寸等详细信息如表1所示。工厂配备的模台尺寸为4m×10m,叠合板为双向出筋且出筋长度均按0.15m计算,预设工人操作空间为0.6m。

表1 生产需求及构件信息

Table 1 Production requirements and component information

序号	尺寸类型	构件数量	模具数量	长/m	宽/m	序号	尺寸类型	构件数量	模具数量	长/m	宽/m
1	A	4	2	2.92	2.36	12	L	4	2	1.92	1.22
2	B	8	4	3.52	1.62	13	M	8	4	2.92	1.80
3	C	4	2	2.52	1.19	14	N	2	1	2.62	2.06
4	D	2	1	2.52	2.52	15	O	4	2	1.50	1.26
5	E	8	4	3.12	1.71	16	P	4	2	2.52	1.86
6	F	8	4	3.52	2.36	17	Q	2	1	2.42	2.42
7	G	2	1	5.92	1.92	18	R	2	1	2.92	2.42
8	H	4	2	3.31	1.32	19	S	3	2	2.32	2.12
9	I	4	2	3.42	2.00	20	T	2	1	5.52	1.92
10	J	5	3	3.42	1.22	21	U	3	2	2.17	1.02
11	K	4	2	4.32	2.62		总计	87			

#### 4.2 数据预处理

批次划分是根据模具的数量和需要生产的构件数量并本着最大化利用模具资源的原则来确定的。假设某类构件的需求量为5个,该类构件模具数为3。由于一批最多生产3个,则该构件应分2个批次进行布局操作,每个批次布局数量分别为3、2。数据的预处理使案例的布局符合实际约束限制,保证优化结果真实有效。因此由表1分析,需要将本项目分两次进行生产,第1次生产45个构件,第2次生产42个构件,构件待排信息如表2所示。

表2 待排构件信息

Table 2 Component information to be arranged

尺寸类型	第1次生	第2次生	尺寸类型	第1次生	第2次生
	产数量	产数量		产数量	产数量
A	2	2	L	2	2
B	4	4	M	4	4
C	2	2	N	1	1
D	1	1	O	2	2
E	4	4	P	2	2
F	4	4	Q	1	1
G	1	1	R	1	1
H	2	2	S	2	1
I	2	2	T	1	1
J	3	2	U	2	1
K	2	2	总计	45	42

#### 4.3 传统排布方式模拟

在实际生产过程中,工厂生产管理人员依据个人经验随机安排构件生产顺序和模台布置,在本案中,应用Python的随机处理功能,通过随机生成500组布局情况并求出其平均值作为传统生产布局

的参照值。通过计算,87块叠合板分两次生产,共占模台总长度为358.23m,占用模台数37个。

#### 4.4 基于灰狼算法的优化实现

应用Python编译工具PyCharm Community Edition,通过编码实现构件定序和定位优化算法。通过不同参数对比试验,选取收敛效果好、资源消耗低的一组参数。因此,基于最低水平线的灰狼算法相关参数设置如下:种群数为500,最大迭代次数为100,追随系数为4,自由系数为2,运行代码得出迭代过程,如图3所示。第1次生产45个构件,通过不断优化,目标函数构件所需模台总长度由162.97m降为147.84m,迭代次数为74次后趋于平稳;第2次生产42个构件,通过不断优化,目标函数构件所占模台总长度由149.50m降为139.96m,迭代次数为33次后趋于平稳。两次生产排布迭代过程变化趋势如表3、表4所示。最优构件布局方案中,87块叠合板分两次生产,共占模台总长度为287.80m,占用模台数29个。最终迭代后的构件布局情况如图4、5所示。

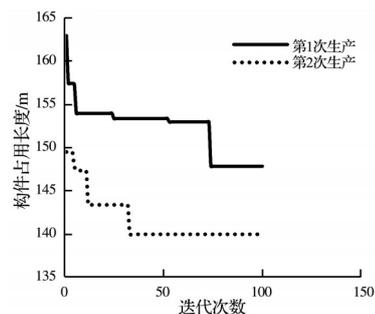


图3 构件排布优化迭代过程

Fig. 3 Iterative process of component layout optimization

表 3 第 1 次生产布局顺序优化主要迭代过程  
Table 3 Main iterative processes for first production layout sequence optimization

迭代次序	第 1 次生产优化结果/m	布局顺序
1	162.97	ECMPMCTBMSQAKJOJEHMUAKEFL BOSBFHUGIRLFBIFEDNP
2	157.44	ECMPHIBLAJOBDCFFKFQSFORAMU MEMNBJPLHEGUKBSTIE
6	153.97	JHMLEMPRECDGFFFEUBIBLHKKN AQCSBBIASMOEJPOJTUF
74	147.84	CMNJRESFQBMOLCAUDEPPBELHIF KMOFTUJFJBKGMASEIBH

表 4 第 2 次生产布局顺序优化主要迭代过程  
Table 4 The main iterative process of second layout production sequence optimization

迭代次序	第 2 次生产优化结果/m	布局顺序
1	149.50	GELFIKAEDQTFBKFAMPBMCBOSH OIEEUBJPMRNCHLM
5	147.84	GELFKMRDKIJOMHMCUBBJFOBETE PAMCQSNFHPEAFIBL
12	143.37	GELKKS RDJOBMHIFPEMNIBECBFLM AJOFQHEPB MCTFUA
33	139.96	GELFKSRDTMBOIBEHAQHEEMCPOL FJMMFKNCIPBFBAU

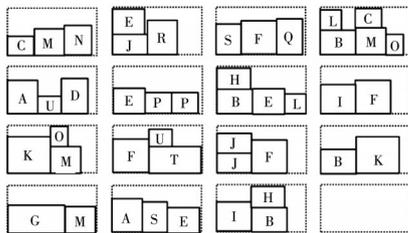


图 4 第 1 次生产 45 个构件最优布局图  
Fig. 4 Optimal layout for the first production of 45 components

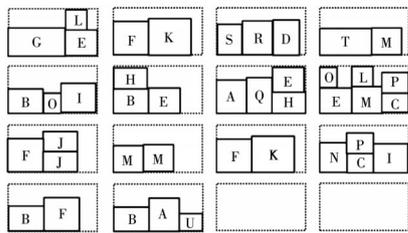


图 5 第 2 次生产 42 个构件最优布局图  
Fig. 5 Optimal layout for the second production of 42 components

4.5 基于灰狼算法的优化结果分析

由图 3 可知,基于最低水平线的灰狼算法能够有效地朝着最优解不断优化,在迭代后期,目标函数数值基本保持稳定。表 3 和表 4 能反映出各个构件

在不同排序下对目标函数的影响及最优排序方案,图 4 和图 5 能直观展示出每张模台上预制构件的布置方案。按传统人工排布方式,87 个叠合板共占用模台数 37 个,优化后占用模台数为 29 个,模台利用率提高了 21.6%。另外,模台占用数量减少后,所需操作工人的数量也相应减少,可进一步节约生产成本。

由计算过程和优化结果可知,基于最低水平线的灰狼算法能够在较短时间内得到一个明显优于传统情况的构件排序和定位方案,适用于预制混凝土构件排件布局优化。由 Python 语言完成算法设计后,生产管理人员可以便捷地通过 Excel 表格导入生产构件信息,可大大降低对个人经验的依赖程度,实现科学排序和定位。优化后的模台布置图一目了然地展示了布局方案,便于车间组织生产。

4.6 灰狼算法与其他智能优化算法的对比分析

为了更直观地体现灰狼算法在构件布局优化问题上的高效性和优越性,采用模拟退火算法(SA)和遗传算法(GA)对案例进行优化,并对其优化结果进行分析。其中,模拟退火算法参数设置情况为:初始温度 1 500 °C,温度下降速度 0.98,迭代次数 1 000 次;遗传算法参数设置情况为:种群数 500,迭代次数 100,交叉概率 0.7,变异概率 0.05。

表 5 和表 6 列出了 3 种算法的运行结果对比情况,表 7 列出了 3 种算法的性能指标对比情况。

表 5 第 1 次生产优化结果对比  
Table 5 Comparison of the first production optimization results

算法	第 1 次生产优化值/m	优化后生产布局顺序
灰狼算法 (GWO)	147.84	CMNJRESFQBMOLCAUDEPPBELHIFKMOFTUJFJBKGMASEIBH
模拟退火算法(SA)	169.39	SPBKF COBEMLHURJIGPEFEBA MCTFBOUSKLJFQNDAMIJHEM
遗传算法 (GA)	157.74	MRCAESCS EQOFLITPDAFFMI HKBFGNEUEBJMJHJMLUBBPK

表 6 第 2 次生产优化结果对比  
Table 6 Comparison of the second production optimization results

算法	第 2 次生产优化值/m	优化后生产布局顺序
灰狼算法 (GWO)	139.96	GELFKSRDTMBOIBEHAQHEEMCPOLFJMMFKNCIPBFBAU
模拟退火算法(SA)	166.94	BOJHEKDNBTMFLJGMREQHOSI CPLABMPFMIEUBFCFKEA
遗传算法 (GA)	151.95	RIPKCBEDFKBIASGOEMNQEFE MFMUHCPFBLLHTALJMJO

表 7 算法性能指标对比

Table 7 Comparison of algorithm performance indexes

算法	CPU 占用率/%	耗时/s
灰狼算法(GWO)	22.8	111.93
模拟退火算法(SA)	6.5	56.27
遗传算法(GA)	24.7	114.82

由表 5、表 6 可知,与 SA 和 GA 相比,第 1 次生产时灰狼算法的优化结果分别缩短了 21.55、9.9 m,差距分别为 12.72% 和 6.28%;而第 2 次生产时灰狼算法同样优于 SA 和 GA,差距达到 16.16% 和 7.89%。综合表 7 分析,模拟退火算法运行时资源占用和耗时很少,但优化效果一般;遗传算法资源占用和耗时多,优化结果较好;灰狼算法资源占用和耗时多,略微低于遗传算法,但优化效果更好,表明在布局问题的应用上灰狼算法更加理想和高效。

## 5 结论

与已有研究相比,建立的最低水平线数学模型更符合构件厂实际生产情况,更具适用性。在构件排布定序算法中,应用灰狼算法不断优化待排预制构件的排入顺序,再由最低水平线法将排入序列转化成模台布置图,形成最优布局方案。将灰狼算法结果与遗传算法和模拟退火算法进行综合对比发现,灰狼算法的优化效果最好。该优化方法能提高模台空间利用率,提高模具利用效率,进一步节约生产成本,且在构件生产规模越大时优化效果越显著。通过 Excel 表格将构件信息导入模型和算法中运行,即可快速计算出优化后的布局方案,具有较好的实用性。最后,通过案例分析,验证了算法可以在较短时间内得出布局结果,并使模台利用率提高 21.6%。在未来的研究中,将以此成果为基础,进一步研究流水线式生产模式下构件整体调度优化问题。

## 参考文献

[1] 周涛,周亚萍,郭宇晨. 装配式建筑产业链多维度阐释及其供应链自主可控力影响因素测评[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(4): 192-203.  
ZHOU T, ZHOU Y P, GUO Y C. Multidimensional interpretation of prefabricated construction industry chain and evaluation of influencing factors of independent controllability of supply chain [J]. Journal of Architectural Science and Engineering, 2022, 39(4): 192-203.(in Chinese)

[2] GONÇALVES J F. A hybrid genetic algorithm-heuristic for a two-dimensional orthogonal packing problem [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 183

(3): 1212-1229.

[3] BURKE E K, KENDALL G, WHITWELL G. Metaheuristic enhancements of the best-fit heuristic for the orthogonal stock cutting problem [J]. Informs Journal on Computing, 2006, 21(3):505-516.

[4] LEUNG S C H, ZHANG D F, SIM K M. A two-stage intelligent search algorithm for the two-dimensional strip packing problem [J]. European Journal of Operational Research, 2011, 215(1): 57-69.

[5] WANG Y C, CHEN L J. Two-dimensional residual-space-maximized packing [J]. Expert Systems With Applications, 2015, 42(7): 3297-3305.

[6] 许继影, 陈仕军, 郑晴. 基于两阶段排放算法的矩形件排样优化方法[J]. 计算机时代, 2020(5): 13-15, 19.  
XU J Y, CHEN S J, ZHENG Q. Optimal rectangle packing method with two-stage layout algorithm [J]. Computer Era, 2020(5): 13-15, 19. (in Chinese)

[7] 高勃, 张红艳, 赵宏军, 等. 面向智能工厂应用的启发式板材排样优化算法[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(5): 98-103.  
GAO B, ZHANG H Y, ZHAO H J, et al. A heuristic layout optimization algorithm for smart factory applications [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2020, 44(5): 98-103. (in Chinese)

[8] 孙理越. 含缺陷实木板材矩形件排样研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2021.  
SUN L Y. Study on layout of rectangular solid wood panels with defects [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2021. (in Chinese)

[9] 刘海明, 周炯, 吴析生, 等. 基于改进最低水平线方法与遗传算法的矩形件排样优化算法[J]. 图学学报, 2015, 36(4): 526-531.  
LIU H M, ZHOU J, WU X S, et al. Optimization algorithm for rectangle packing based on improved lowest horizontal line method and genetic algorithm [J]. Journal of Graphics, 2015, 36(4): 526-531. (in Chinese)

[10] 鞠云鹏, 常德功. 基于动态择优定序的矩形件优化排版算法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2020, 41(4): 112-118.  
JU Y P, CHANG D G. Optimal layout of rectangular parts based on dynamic optimum order [J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2020, 41(4): 112-118. (in Chinese)

[11] 刘玲玲, 赵果, 龚堰珏. 基于 BL-NFP 神经网络算法的二维不规则钣金零件排样[J]. 锻压技术, 2021, 46(12): 54-60.  
LIU L L, ZHAO F, GONG Y J. Layout for two-dimensional irregular sheet metal parts based on BL-NFP neural network algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46(12): 54-60. (in Chinese)

[12] 班丹梅. 装配式建筑预制混凝土构件生产优化方法研

- 究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020.
- BAN D M. Research on production optimization methods for prefabricated concrete components in prefabricated buildings [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2020. (in Chinese)
- [13] 刘少云. 基于组合包络的不规则件排样算法的研究与实现[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- LIU S Y. Research and realization of irregular-part nesting based on combination envelope [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (in Chinese)
- [14] 姚刚, 秦蔚壑, 周梦, 等. 工业化生产PC构件的BIM技术定位优化[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(2): 140-146, 166.
- YAO G, QIN W H, ZHOU M, et al. PC elements localization optimization with BIM technology in industrial production [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(2): 140-146, 166. (in Chinese)
- [15] 张娜, 赵霖, 龚堰珏, 等. 基于动态最低水平线法和蚁群算法的排样优化[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(5): 268-273.
- ZHANG N, ZHAO F, GONG Y J, et al. Layout optimization based on dynamic lowest horizontal line method and ant colony algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(5): 268-273. (in Chinese)
- [16] 凌晗, 刘楠蟠, 武照云, 等. 基于改进遗传算法的矩形件排样优化研究[J]. 现代制造技术与装备, 2017(9): 66-67, 69.
- LING H, LIU N B, WU Z Y, et al. Research on rectangular packing optimization based on improved genetic algorithm [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017(9): 66-67, 69. (in Chinese)
- [17] 夏以冲, 陈秋莲, 宋仁坤. 基于自适应遗传模拟退火算法的矩形件排样[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(22): 229-232, 245.
- XIA Y C, CHEN Q L, SONG R K. Packing of rectangles using adaptive genetic simulated annealing algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(22): 229-232, 245. (in Chinese)
- [18] 徐逸凡, 张利平, 唐秋华, 等. 求解带AGV柔性作业车间调度问题的改进灰狼算法[J]. 工业工程, 2021, 24(6): 25-33.
- XU Y F, ZHANG L P, TANG Q H, et al. An improved grey wolf optimization for solving scheduling problem of flexible job shop with AGV [J]. Industrial Engineering Journal, 2021, 24(6): 25-33. (in Chinese)
- [19] 麻鹰, 王瑞. 基于灰狼算法的民航维修人为差错评价模型[J]. 计算机技术与发展, 2022, 32(1): 30-34.
- MA Y, WANG R. Human error evaluation model of civil aviation maintenance based on gray wolf optimization [J]. Computer Technology and Development, 2022, 32(1): 30-34. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)