

# 基于差分粒子群算法的 铝合金模板多目标智能配模方法

郑莲琼<sup>1,2</sup>, 邱明锋<sup>1</sup>, 李国宏<sup>1</sup>

(1. 福建理工大学土木工程学院, 福建福州 350118;

2. 福州市绿色建造与建筑工业化行业技术创新中心, 福建福州 350118)

**摘要:** 为提高铝合金模板设计效率, 解决人工设计铝合金模板存在的模板数量、种类、非标构件多造成的加工成本高、力学整体性差等问题, 建立了铝合金模板两阶段多目标约束配模优化方法。基于BIM技术提取配模混凝土构件信息, 以铝合金模板使用数量和使用种类最少为目标, 建立了对应的多目标优化数学模型; 使用差分粒子群算法求解, 并将最优解在BIM模型中自动配模。该智能优化方法应用于铝合金模板设计, 与人工配模设计方案对比, 智能配模方案中模板数量减少了19.2%, 模板种类减少了37.5%, 配模优化效果良好, 证明了算法运用于铝合金模板配模优化中的可行性及有效性。

**关键词:** 铝合金模板; 多目标优化; 智能配模; 差分粒子群算法

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)04-0307-08

## Multi-objective intelligent matching method for aluminum alloy formwork based on differential particle swarm optimization algorithm

ZHENG Lianqiong<sup>1,2</sup>, QIU Mingfeng<sup>1</sup>, LI Guohong<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fuzhou Technology Innovation Center of Green Construction and Building Industrialization, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** A two-stage multi-objective constrained optimization method of aluminum alloy formwork matching was proposed to enhance design efficiency and address the issues of high processing costs and poor mechanical integrity that are often associated with manual design which tends to result in a significant number of templates, various types, and numerous non-standard components. Concrete components information was extracted for formwork matching by BIM technology, a corresponding multi-objective optimization mathematical model was established with the goal of minimizing both the quantity and the variety of aluminum alloy formwork used; differential particle swarm optimization algorithm was used for solving, and then the optimal solution was automatically matched in the BIM model. This intelligent optimization method is applied to aluminum alloy formwork design. Compared with manual design, it reduces formwork quantity by 19.2% and variety by 37.5%, showcasing favorable results and confirming the algorithm's feasibility and effectiveness in optimizing aluminum alloy formwork.

**Keywords:** aluminum alloy formwork; multi-objective optimization; intelligent formwork matching; differential particle swarm optimization algorithm

铝合金模板属于工厂定型化产品, 在施工现场不易调整修改, 需要提前配模设计。传统的人工配模设计存在配模时间长, 难以对模板种类、数

量和异型模板进行优化, 主体结构设计变更后配模方案不易修改等问题, 因此, 有必要开展以参数化和智能化为主的铝合金模板智能设计研究。

收稿日期: 2024-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578152); 福建省住房和城乡建设厅科技研究开发计划项目(2022-K-286)

第一作者简介: 郑莲琼(1982—), 女, 福建福清人, 教授, 博士, 研究方向: 现代施工技术与信息化。

张新等<sup>[1]</sup>对铝合金模板的优化设计进行研究,提出了铝合金模板加肋构造与尺寸参数等优化建议。王昌辉<sup>[2]</sup>研发了一套铝合金模板配模的优化设计系统,实现墙、梁、板的快速配模。申月军<sup>[3]</sup>基于 BIM 技术开发了一套工具集,通过 Excel 在 BIM 模型上创建铝合金模板构件族库,实现了与 Midas Gen 的交互。

有关模板整体智能配模的优化研究方面。连立川等<sup>[4]</sup>对钢筋下料问题构建下料优化模型并求解;刘刚等<sup>[5]</sup>利用改进粒子群算法对核心筒建筑的长宽比、窗墙比等设计要素优化改进;何威等<sup>[6]</sup>将 BIM 与遗传算法结合取得对施工阶段工期-成本的优化;Wang J 等<sup>[7]</sup>将 BIM 同算法结合,较好地解决塔吊最优位置供应点问题;谢存仁等<sup>[8]</sup>通过遗传算法对施工进度预期优化。但针对铝合金模板的多目标智能优化配模研究尚少见报道,其优化数学模型的建立与求解不能直接套用其他研究成果,为此,本文建立铝合金模板配模多目标优化的数学模型,采用差分粒子群算法进行模型求解,并基于 BIM 技术实现从拟配模混凝土结构模型中提取配模混凝土构件信息,进行配模优化后,将最优配模方案铝合金模板面板和铝梁布置到 BIM 模型中,用于指导模板安装,相关方法得到了工程案例的验证。

## 1 铝合金模板参数化面板布置方法

铝合金模板的设计应尽可能采用单块整体模板,避免在局部使用直接连接的方式,以满足铝合金模板在局部的抗弯能力的要求。因此,智能配模深化设计以“铝梁-模板-铝梁”的配模方式为基础开展研究。

实际工程配模过程中,除矩形标准区域配模,也常因结构形式差异、结构设计需要等原因,建筑边界及拐弯处易出现非矩形区域(如图 1),无法用矩形的标准铝合金规格型号进行配模。常用的处理办法有铝合金模板与胶合板模板结合应用,如图 1(b),非 50 mm 模数区域应用胶合板模板进行补充;或根据非标区域尺寸定制异形铝合金模板,如图 1(c)。

将结构平面非矩形区域尽可能转化为矩形标准区域:通过图 2(a),在拐角处放置铝梁作为排列起点或终点以避免产生非矩形配模区域;通过图 2(b),在拐角处使用小规格铝模将其分割以避

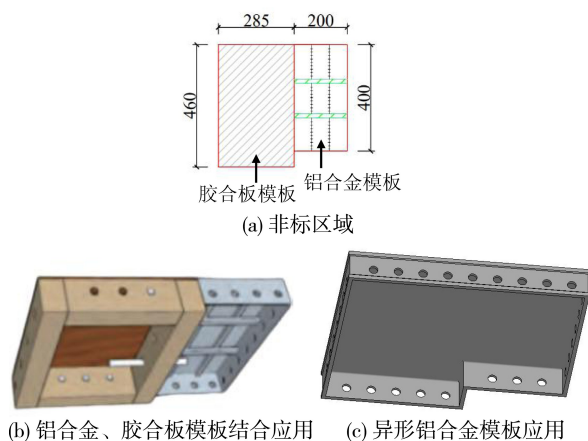


图 1 铝合金模板非标区域常规做法示意图  
(单位:mm)

Fig.1 Schematic diagram of normal practice in non-standard areas of aluminum alloy formwork (unit: mm)

免异形铝模的产生。对于非 50 mm 模数区域,采用非标准尺寸阴角模板进行消化或设置异形铝合金模板,针对该情况,对配模区域建立包络矩形,将配模问题标准化后进行全局范围内的优化求解,而后输出配模区域内弯折点纵横坐标供异形模板或阴角模板开模。

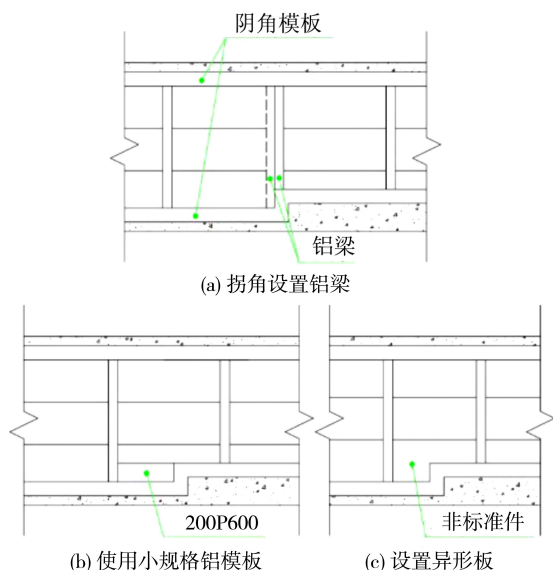


图 2 非标准区域处理办法(单位:mm)

Fig.2 Design method of non-standard areas (unit: mm)

铝合金模板配模方法依照两阶段处理。第一阶段提取长度方向分区或包络矩形分区尺寸,用  $L_j$  表示第  $j$  个长度方向分区或包络矩形分区长度,  $j=1, \dots, m_L$ , 共计  $m_L$  个长度分区;用  $l_i$  表示一个长度分区内第  $i$  种规格模板尺寸,  $i=1, \dots, n_L$ , 共计  $n_L$  种长度规格。

第二阶段获取宽度方向分区或包络矩形分区尺寸。用  $W_j$  表示第  $j$  个宽度方向分区长度,  $j=1, \dots, m_w$ , 共计  $m_w$  个宽度分区; 用  $w_i$  表示一个宽度分区内第  $i$  种规格模板尺寸,  $i=1, \dots, n_w$ , 共计  $n_w$  种宽度规格;  $L_v$  表示铝梁宽度。

模板优化问题转化为在计算长度集合、宽度集合中依次寻找模板长度规格与宽度规格较优组合, 以满足楼面模板铺满配模区域, 模板数量及种类最少的目标。标记如图3所示。

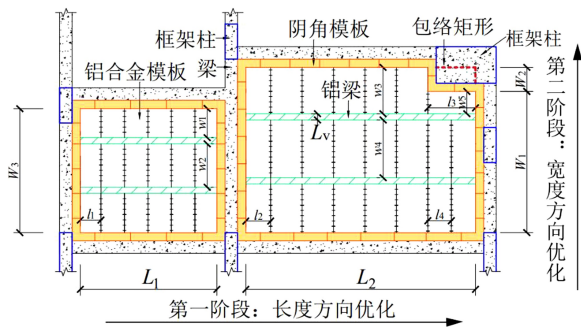


图3 铝合金模板两阶段配模方法示意图

Fig.3 Schematic diagram of two-stage matching method for aluminum alloy formwork

## 2 铝合金模板配模多目标优化

### 2.1 数学模型的建立

#### 2.2.1 目标函数确定

大尺寸模板可以减少模板数量, 提高安装效率, 便于现场管理, 整体性高, 有利于提高混凝土结构施工质量, 因此, 在铝合金模板设计中应尽量使用较大规格的模板。模板数量  $S_1(x)$  作为目标函数应尽可能少, 其函数表达式为:

$$S_1(x) = \min \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n x_{ji} \quad (1)$$

式中, 当优化长度方向时,  $m=m_L, n=n_L$ ; 当优化宽度方向时,  $m=m_w, n=n_w$ ; 以上变量单位均为“个”。

在铝合金模板设计中, 还应尽可能减少模板种类  $S_2(x)$ , 以避免多种规格模板带来的管理和使用混乱, 降低异型模板带来的开模费用, 实现模板配模的经济性, 该目标的函数表达式为:

$$S_2(x) = \min \sum_{i=1}^n c_i \quad (2)$$

$$c_i \in \{0, 1\}$$

式中, 当优化长度方向时,  $n=n_L$ ; 当优化宽度方向

时,  $n=n_w$ ;  $c_i$  值为 0 或 1, 当第  $i$  种模板使用时,  $c_i$  为 1, 未使用即为 0。

定义  $f_1(x)$  为单个长度(宽度)分区内对应的模板数量最少的目标函数, 其表达式为:

$$f_1(x) = \min \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

式中, 当优化长度方向时,  $n=n_L$ ; 当优化宽度方向时,  $n=n_w$ ,  $x_i$  为单个分区中使用的第  $i$  种规格模板的数量。

定义  $f_2(x)$  为单个长度(宽度)分区内对应的模板种类最少的目标函数, 其表达式为:

$$f_2(x) = \min \sum_{i=1}^n c_i \quad (4)$$

式中, 当优化长度方向时,  $n=n_L$ ; 当优化宽度方向时,  $n=n_w$ 。

定义  $F(x)$  对两个目标函数除以各自最大值进行无量纲化处理修正, 即标准化修正, 再辅以线性加权, 得到标准化的评价函数:

$$F(x) = \begin{cases} \omega_1 \frac{f_1(x)}{L_i/L_{\min}} + \omega_2 \frac{f_2(x)}{n_L} \\ \omega_1 \frac{f_1(x)}{W_i/W_{\min}} + \omega_2 \frac{f_2(x)}{n_w} \\ \sum_{i=1}^2 \omega_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $L_{\min}$  为单块铝合金模板的最小长度规格,  $W_{\min}$  为单块铝合金模板的最小宽度规格,  $F(x)$  作为数量较少和种类较少两个目标的聚合函数, 其计算结果越小代表求出的解越优。

#### 2.2.2 约束函数表达

在以上目标尽可能小的情况下, 铝合金模板配置要满足计算长度(宽度)集合中不同尺寸达到满铺。定义  $S_3(x)$  为约束函数, 其表达式为:

$$S_3(x) = \begin{cases} \min \sum_{j=1}^{m_L} \left| L_j + L_v - \sum_{i=1}^{n_L} (l_i + L_v) x_{ji} \right| \\ \min \sum_{j=1}^{m_w} \left| W_j - \sum_{i=1}^{n_w} w_i x_{ji} \right| \end{cases} \quad (6)$$

同样的, 将约束条件  $S_3(x)$  拆分成单个分区内的约束函数表达如下:

$$g_1(x) = L_i - \sum_{i=1}^{n_L} (l_i + L_v) x_i \quad (7)$$

$$g_2(x) = W_i - \sum_{i=1}^{n_w} w_i x_i \quad (8)$$

在长度方向寻求最优解的过程中,会出现以下 4 种情况:

#### (1) 配模区域满配

当所需排列尺寸使用标准模板满铺时,因为约束函数是板件尺寸与铝梁叠加计算,最后一块板件尺寸无需叠加,因而还需要扣减一个铝梁宽度  $L_v$ ,即  $g_1(x) = -L_v$ ,令约束违反度  $G_1(x) = -1$  判断,如图 4 所示。

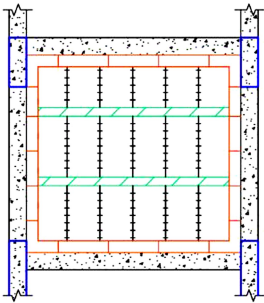


图 4 铝合金模板满配示意图

Fig.4 Schematic diagram of aluminum alloy formwork full matching

#### (2) 配模区域存在横向排列区域

当所需排列尺寸无法使用标准模板满铺时,可将标准模板转置排列,即允许存在横向排列区域。记  $a$ 、 $b$  分别为最小、最大平面模板宽度规格,当  $a \leq g_1(x) \leq b$ ,表示剩余未布置横向排列区域在  $a$  至  $b$  范围内。在未布置横向排列区域配置标准宽度模板,令约束违反度  $G_1(x) = 0$  判断,如图 5 所示。

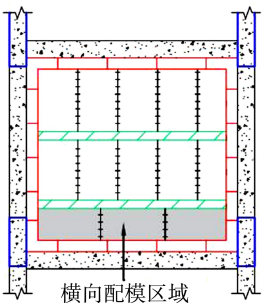


图 5 模板横向排列示意图

Fig.5 Schematic diagram of longitudinal arrangement of aluminum alloy formwork

#### (3) 未布置区域过大

当所需排列尺寸无法使用标准模板满铺时,且未布置区域又超过最大平面模板宽度规格  $b$  时,即  $g_1(x) > b$ 。令  $G_1(x) = g_1(x) - b$ ,最后通过可行性法则淘汰。

#### (4) 未布置区域过小

当所需排列尺寸无法使用标准模板满铺,且未布置区域又小于最小平面模板宽度规格  $a$  时,即  $g_1(x) < a$ 。令  $G_1(x) = a - g_1(x)$ ,最后通过可行性法则淘汰。

综上,长度方向约束违反度函数  $G_1(x)$  由单个分区内的约束函数作为判定条件表达如下:

$$G_1(x) = \begin{cases} -1, & g_1(x) = -L_v \\ 0, & a \leq g_1(x) \leq b \\ g_1(x) - b, & g_1(x) > b \\ a - g_1(x), & g_1(x) < a \text{ 且 } g_1(x) \neq -L_v \end{cases} \quad (9)$$

长度方向满足条件的情况下,宽度方向必须满配,即只有单个分区约束条件  $g_2(x)$  为 0 时可行。宽度方向约束违反度函数  $G_2(x)$  采用式(10)作为判定条件。

$$G_2(x) = |g_2(x)| \quad (10)$$

## 2.2 数学模型的求解

基于标准粒子群算法和标准差分算法,在此基础上改进粒子群算法并利用选择策略,结合两种算法的各自优点且弥补两种算法的不足,最后引入自适应机制提高整体运行效率,基于差分粒子群算法的铝合金模板配模流程如图 6 所示。

#### (1) 初始化粒子

设定  $N$  为粒子数,代表搜索初期有  $N$  个配模方案。设定初始位置和初始速度,位置向量和速度向量分别用  $X_i^t = (x_{i,1}^t, x_{i,2}^t, \dots, x_{i,D}^t)$  和  $V_i^t = (v_{i,1}^t, v_{i,2}^t, \dots, v_{i,D}^t)$  表示,个体最优向量用  $p_b$  表示,全局最优向量用  $g_b$  表示。设定粒子  $x$  第  $i$  个标准模板长度、宽度方向搜索空间大小分别为  $[0, (L+L_v)/(L_i+L_v)]$ 、 $[0, (W/W_i)]$ 。

#### (2) 选择策略更新

通过式(11)选择不同策略更新粒子位置。

$$SP_C = \frac{1}{1 + \exp(1 - (t_{\max}/t + 1)^\tau)} \quad (11)$$

式中,  $\tau$  为常数,取值 1.5 或 2;  $t$  为迭代次数;  $t_{\max}$  为最大迭代次数。  $SP_C$  使得算法在迭代初期尽可能选择粒子群算法以发挥其快速收敛的优势,在迭代后期增加使用差分算法的概率保持种群多样性的同时,减少陷入局部最优解的概率。定义  $r$  为  $[0, 1]$  内的随机数。

当  $r \leq SP_C$  时,使用式(12)更新粒子速度信

息,使用式(13)更新粒子位置信息。

$$v_{i,j}^{t+1} = r_1 \times (p_{i,j}^t - x_{i,j}^t) + r_2 \times (g_{bi,j}^t - x_{i,j}^t) \quad (12)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1} \quad (13)$$

当  $r > SP_G$  时,通过式(14)对原始向量  $X_i^t = (x_{i,1}^t, x_{i,2}^t, \dots, x_{i,D}^t)$  进行变异,生成变异向量  $V_i^t = (v_{i,1}^t, v_{i,2}^t, \dots, v_{i,D}^t)$ 。

$$v_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + F(x_{i,2,j}^t - x_{i,3,j}^t) \quad (14)$$

式中,  $F$  为取值范围在 0.5~2.0 之间的缩放因子常数。

在对粒子变异后,可以有效地跳出局部最优解,再通过式(15)交叉产生试验向量  $U_i^t = (u_{i,1}^t, u_{i,2}^t, \dots, u_{i,D}^t)$ ,选择具有较好适应度的个体进入下一代。

$$u_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} v_{i,j}^{t+1}, & r \leq CR \text{ or } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,j}^t, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $CR$  为交叉概率常数;  $j_{\text{rand}}$  为  $[1, D]$  范围内的随机整数。

### (3) Deb 可行性法则更新

Deb 可行性法则是约束违反度在可行解的范围内,选取粒子适应度值最高的方案,来更新粒子的个体最优向量  $p_b$  与全局最优向量  $g_b$ 。最后通过可行性法则淘汰不可行解。

式(5)作为新粒子的适应度值,约束违反度函数分为长度方向  $G_1(x)$ 、宽度方向  $G_2(x)$ 。

### (4) 终止条件

算法由两个终止条件控制,尽可能地减少资源占用以提高整体求解速度。如果迭代次数  $t$  达到最大迭代次数  $T$ ,或是停滞代数  $S$  达到最大停滞代数  $S_{\text{max}}$ ,将中止计算。由于最大迭代次数在铝合模板配模中不固定,使用式(16)自适应更新最大迭代次数,动态地终止算法:

$$T = \min \{ t + S_{\text{max}} - S, T \} \quad (16)$$

## 3 工程案例析

### 3.1 单一方向配模优化验证

工程整体的配模优化方案由单个配模分区的配模方案搜索组成,因此先以单个配模分区的第一、第二阶段进行试算,测试差分粒子群算法在配模优化问题的适用性。

以某工程标准层一个房间楼板为例,其计算长度为 5 600 mm,宽度为 3 200 mm。标准模板与配套模板长度规格有 1 200, 1 150, 1 100, ..., 500 (以 50 为模数变化,单位:mm) 共 15 种,宽度规格

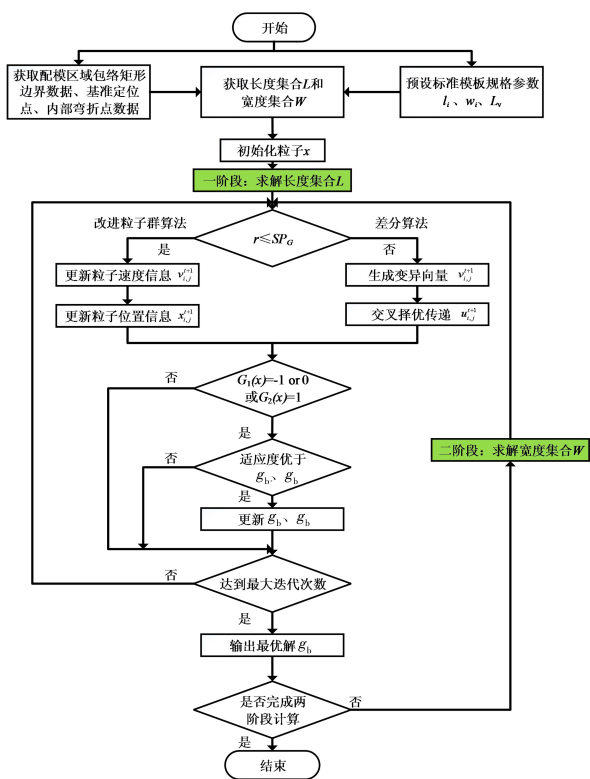


图 6 改进的自适应差分粒子群算法流程

Fig.6 Flowchart of improved adaptive differential particle swarm optimization algorithm

有 600, 450, 400, 350, ..., 50 (单位:mm) 共 10 种。为对比分析智能算法的性能,考虑尽可能使用大规格模板以减少模板数量和使用种类两个优化目标,人工搜索得到长度方向配模最优解列于表 1,其中,配模方案 1 为尽可能使用最大长度规格模板的组合,配模方案 2 为仅次于最大长度规格模板的组合,配模方案 6 为存在横向排列的方案中的理想方案。算法初始值设定为:初始化粒子数量  $N = 50$ ,算法最大迭代次数  $T = 100$ ,缩放因子  $F = 0.5$ ,交叉概率  $CR = 0.8$ ,最大停滞代数  $S_{\text{max}} = 20$ ,常数  $\tau = 1.5$ 。使用差分算法、粒子群算法、差分粒子群算法对长度方向优化分别进行 10 000 次求解,其中理想方案在差分算法、粒子群算法、差分粒子群算法各出现 1 675、22、3 568 次;其他方案分别出现 8 325、9 978、6 432 次,满足约束违反度方案出现 10 000、83、9 988 次。其余结果列于表 1。同理,在宽度方向优化分别进行 10 000 次求解,其中理想方案在差分算法、粒子群算法、差分粒子群算法各出现 42、1 543、9 352 次;其他方案分别出现 9 958、8 457、648 次,满足约束违反

度方案出现 10 000、2 049、9 987 次。其余结果列于表 2。

表 1 长度方向算法优化求解结果比较

Tab.1 Comparison of optimization results of algorithms along the length direction

配模方案	长度/mm							规格数量	配模种类	评价函数值	差分总数	粒子群总数	差分粒子群总数
	1 200	1 150	1 100	1 050	1 000	800	600						
1	3	0	0	0	0	2	0	5	2	0.471 1	500	0	324
2	0	4	0	0	0	0	1	5	2	0.471 1	206	1	535
3	0	0	4	0	0	1	0	5	2	0.471 1	312	0	825
4	0	0	4	0	0	1	0	5	2	0.471 1	267	0	685
5	0	0	2	0	3	0	0	5	2	0.471 1	390	14	269
6	4	0	0	0	0	0	0	4	1	0.368 9	0	7	930

表 2 宽度方向算法优化求解结果比较

Tab.2 Comparison of optimization results of algorithms along the width direction

配模方案	宽度/mm					规格数量	配模种类	评价函数值	差分总数	粒子群总数	差分粒子群总数
	600	450	400	350	200						
1	4	0	2	0	0	6	2	0.115 0	9	3	659 3
2	5	0	0	0	1	6	2	0.115 0	1	1	676
3	0	0	8	0	0	8	1	0.120 0	8	413	156 4
4	2	0	5	0	0	7	2	0.127 5	8	405	123
5	3	0	0	4	0	7	2	0.127 5	4	375	351
6	0	4	0	4	0	8	2	0.140 0	12	346	45

为更好地评测差分粒子群算法在配模优化问题上的表现,添加配模可行率和理想配模率两个指标进行评估。配模可行率为算法求解结果中满足约束反度限制的所有可行解出现的概率,即可行解数与总方案数的比值。理想配模率为算法在多次求解过程中出现理想配模方案的概率,即理想方案数与总方案数的比值,如表 1 中,标准差分算法一万次的运算结果中,理想方案出现次数为 1 675 次,其理想配模率为 16.75%。图 7、图 8 分别为 3 种算法对长度分区与宽度分区的优化求解结果对比情况,图中 DE 表示差分算法,PSO 表示粒子群算法,DEPSO 表示差分粒子群。

由图 7、图 8 可看出,对于铝合金模板配模优化问题,差分粒子群算法在长度、宽度配模优化的最终求解结果中,评价函数均值均低于粒子群算法和差分算法,意味着求解的平均模板个数与种类个

数均低于其他两种算法。在配模可行率上,差分粒子群算法相较于差分算法损失了较少的配模可行率,远大于标准粒子群算法,但在理想配模率上,均远高于其余二者算法,表明算法求解结果质量好,且陷入局部最优解的概率较低。综合来看,差分粒子群算法在铝合金模板的配模优化问题上,损失极少的配模可行率,带来了评价函数均值与理想配模率的极大提升,说明差分粒子群算法在铝合金配模优化问题上展现出良好的适配性。

### 3.2 整体配模优化验证

该工程项目主体为框剪结构,采用铝合金模板施工,坐落于福建省福清市,人工配模 CAD 图纸如图 9 (a) 所示,对称部分配模使用了 48 种共 297 块铝合金模板,包括 300PY1100-1、300PY700-1 两种异形非标准铝合金模板各一块。工程施工实际模板应用方案统计如表 3 所示。

表 3 工程案例施工应用方案人工配模结果

Tab.3 Artificial formwork matching results of engineering case construction application schemes

宽度规格/mm	长度规格/mm															
	-P1 700	-P1 500	-P1 100	-P900	-P850	-P800	-P750	-P700	-P650	-P600	-P550	-P500	-P450	-P400	-P300	-P200
450P-	1	1	119	10	5	17	2	24	16	15	2	4	0	0	0	0
400P-	0	0	11	0	1	2	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
350P-	0	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
300P-	0	0	4	1	0	0	0	3	0	1	1	13	0	0	0	0
250P-	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
200P-	0	0	4	1	0	0	1	3	1	0	1	1	0	0	0	0
150P-	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100P-	0	0	8	0	0	1	0	2	1	2	0	0	0	1	1	1

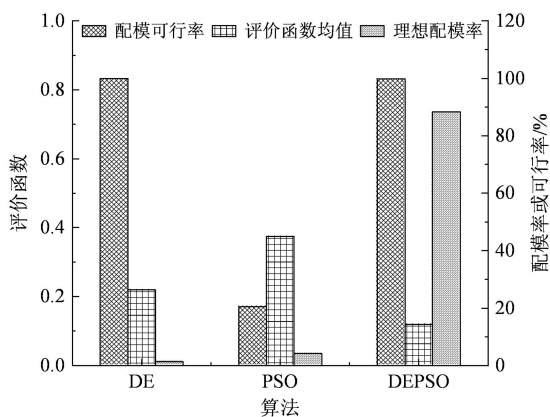


图 7 3 种算法在长度方向的结果比较

Fig.7 Comparison of results of three algorithms in the length direction

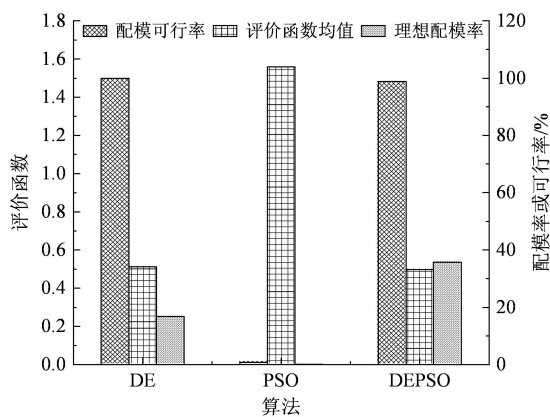


图 8 3 种算法在宽度方向的结果比较

Fig.8 Comparison of results of three algorithms in the width direction

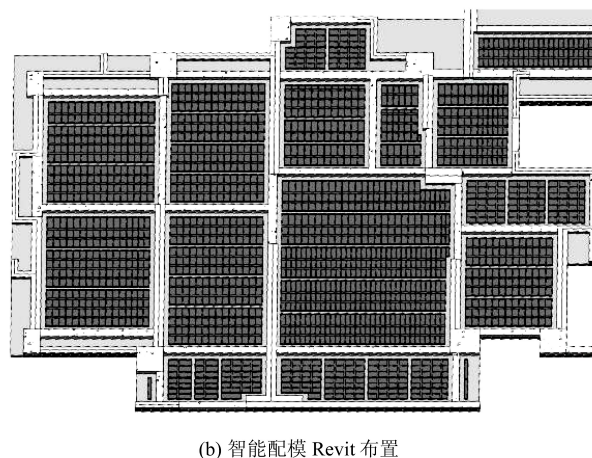
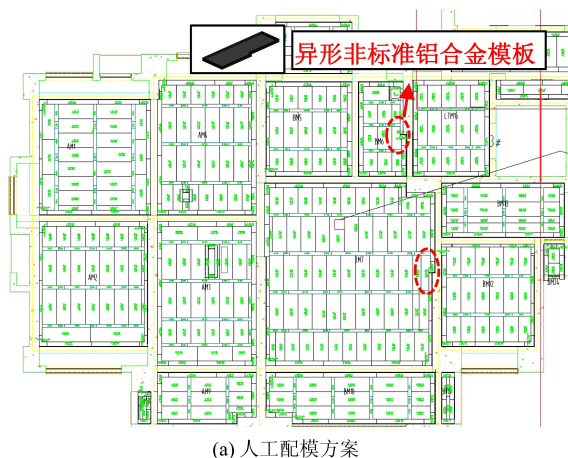


图 9 配模对比示意图

Fig.9 Matching comparison between intelligent and manual methods

开发了 Revit 数据接口,通过 Revit“模型线”的功能绘制边界后,使用 GetEdgesAsCurveLoops 方法获取所有配模区域包络矩形边界数据,确定各包络

矩形长度、宽度及基准定位点、内部弯折点等数据,输入模板尺寸长度、宽度规格信息,根据包络矩形长度计算集合  $L$ 、宽度计算集合  $W$  以及模板长度规

格、宽度规格,计算配模组合形成配模序列,结果如表 4 所示。可以看出,优化算法求解结果共使用 30 种 240 块铝合金模板,与人工配模方案相比较,增加宽度 600 mm 和长度 1 200 mm 的模板规格,但总体方案减少了 18 个种类 57 块模板,种类减少了 37.5%,数量减少 19.2%,并且未采用非标准构件模板,经济效益优于原工程方案。

在完成二阶段优化后,根据最优解自动创建包含模板布置方向、长度参数、宽度参数、模板纵肋数量等信息的铝合金模板参数化族,利用面引用(Reference)、定位点等位置信息,将创建好的铝合金模板族从混凝土楼板包络线依次自下而上,从左至右布置到混凝土楼板底面。最终配模区域与 Revit 配模如图 9(b) 所示。

表 4 工程案例智能配模优化结果

Tab.4 Optimization results of intelligent formwork matching in engineering cases

宽度规格/mm	长度规格/mm												
	-P1 200	-P1 150	-P1 100	-P1 050	-P1 000	-P950	-P900	-P850	-P700	-P650	-P400	-P300	-P200
600P-	23	1	4	4	16	0	42	0	17	0	0	0	0
450P-	0	0	0	0	33	14	4	0	4	0	0	0	0
400P-	6	2	4	1	0	2	13	0	4	0	0	0	0
350P-	17	0	4	2	7	0	0	1	6	0	0	0	0
250P-	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
200P-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
100P-	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	2	1

## 4 结论

1) 分阶段配模方法可以有效降低铝合金模板配模问题的求解难度,避免产生指数爆炸的问题;分阶段的处理办法还可以有效降低直角边界异型非标准模板的产生。

2) 标准差分算法与粒子群算法可以有效结

合,且适用于配模组合优化问题,相比使用单一算法,求解性能更强。

3) 与实际工程案例相比,智能配模方案中使用模板数量减少 19.2%,模板种类减少 37.5%,证明差分粒子群算法在配模组合优化问题上具有良好的实用性。

## 参考文献:

- [1] 张新,张冠,魏双利.剪力墙结构住宅铝合金模板优化设计研究[J].山东建筑大学学报,2021,36(3):16-24.
- [2] 王昌辉.减量化驱动下基于 BIM 的铝模板设计优化[D].济南:山东建筑大学,2021.
- [3] 申月军.基于 BIM 的铝模板设计建造一体化技术研究[D].济南:山东建筑大学,2020.
- [4] 连立川,张鹏程,刘燕妮.基于 BIM 体系的钢筋优化下料初探[J].土木工程信息,2016,8(4):69-72.
- [5] 刘刚,孙佳琦,董伟星.改进粒子群优化算法在建筑能耗优化中的参数设置[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2021,54(1):82-90.
- [6] 何威,史一超.基于 BIM-遗传算法的建筑施工工期多目标优化设计[J].土木工程与管理学报,2019,36(4):89-95.
- [7] WANG J, ZHANG X D, SHOU W C, et al. A BIM-based approach for automated tower crane layout planning[J]. Automation in Construction, 2015, 59:168-178.
- [8] 谢存仁,徐峰,阮敏浩.基于 BIM 与遗传算法的建筑工程施工进度多目标优化研究[J].工程管理学报,2021,35(3):117-122.

(责任编辑:陈雯)