

基于灰狼优化算法的装配式预制构件 生产调度优化研究

常春光,陈佳鑫

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要:合理优化预制构件的生产调度是降低装配式生产成本的一种方式。在考虑到构件生产资源约束的前提下,建立了装配式预制构件生产调度优化模型,设计了求解该模型的改进离散灰狼优化算法(Improve Grey Wolf Optimization, IGWO)并带入实际案例进行了测试。将改进后的离散灰狼算法、Palmer启发式算法和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)结果进行了对比,结果表明:改进后的离散灰狼算法优于Palmer法和遗传算法,且在合理安排调度后能够提升预制构件的生产效率。

关键词:装配式建筑;预制构件;生产调度优化;灰狼优化算法

中图分类号:F407.9;TU756

文献标志码:A

装配式建筑是将预制的部品部件投入工厂进行批量生产,再运输至建筑场地进行现场装配的建筑,它具有绿色节能、资源节约、高效低耗和施工方便等显著优点。但当前中国装配式建筑发展缓慢,限制其发展的主要原因为生产成本过高,而构件生产调度不佳、各环节协调配合不完善等问题是导致生产成本过高的主要原因。在此背景下,合理排产与优化预制构件生产调度具有重大的现实意义。

许多国内外学者围绕构件生产调度问题进行了研究。Chan W T等^[1]设计了流水车间排序模型(FFSM)并使用遗传算法进行了求解。Ko C H等^[2]考虑到构件生产的实际情况与各工序之间的缓冲区约束,构建了多目标预制件生产调度模型(MOPPSM)。Li S H A等^[3]从供应链角度出发,建立了以生产成本为优化目标的模型并采用遗传算法和分

支定界法对模型进行了求解。Wang Z等^[4]将生产工序分为9个过程,并划分为白天、晚上及全天运输3种情况进行排产。刘猛等^[5]运用混合整数线性规划(MILP)算法求解调度优化模型,提高了预制工厂的生产效率。王茹等^[6]综合考虑了预制构件模具数量和蒸汽养护的数量约束,采用遗传粒子群混合算法对模型进行了求解。于森等^[7]结合生产实际情况,分析了构件生产过程中产生的紧急插单现象对生产的影响,构建了装配式预制构件生产重调度模型,并运用多目标差分进化算法对模型进行了求解。秦旋等^[8]在工人、模具和生产线等资源约束下,提出了一种新颖的多目标混合共生生物搜索算法。常春光等^[9]提出了以实现最大流程时间和惩罚成本最小为目标的生产-运输分批协同调度模型,并自行设计了多目标离散灰狼算法对该模型进行了求解。以上研究大多以最

小化最大完工时间和最小化惩罚成本为优化目标,并在很大程度上考虑了实际生产会遇到的资源约束,生产调度优化模型实用性较强。

在以往研究中,学者们在求解模型时,往往倾向于运用遗传算法和粒子群算法等较为经典、成熟的群智能算法^[10-11],而对于改进、优化群智能优化算法的研究较少。基于此,本研究构建了以最小化最大完工时间为目标,以劳动力、工艺、缓冲区和工期限制为约束条件的装配式预制构件生产调度优化模型。同时,基于基础灰狼优化算法,设计出了适用于解决构件生产调度优化问题的改进离

散灰狼优化算法(Improve Grey Wolf Optimization, IGWO),并对模型进行求解。以此寻求合理的调度顺序,确保在达成最小化最大完工时间的目标前提下顺利交货。

一、预制构件生产调度问题描述

在装配式建筑预制构件的生产过程中,预制构件的生产车间和传统制造业的流水生产车间类似,构件成品均是在流水线上经过不同的生产工序加工而成。

流水式预制构件生产车间的工艺流程可大致分为以下6道工序,其具体内容如表1所示。

表1 预制构件生产工序流程

次序	工序名称	工序内容
1	模具清理与组装	修整合格后对模具进行清理、刷脱模剂,划线定位、安装包含预制构件模具的底模和侧模
2	钢筋及预埋件安装	钢筋绑扎、预埋件安装及固定
3	混凝土浇筑	浇筑前检查部件是否合格,进行浇筑、振捣、表面抹平处理
4	蒸汽养护	送入养护窖、试块试压是否合格
5	模板拆卸	遵循“先装后拆、后装先拆”原则
6	质量检测及补修	检查预制构件的代码与尺寸是否正确,对构件进行质量检测,对不合格构件进行补修

在预制构件的生产过程中,每道工序设置一个工作站点进行流水作业,即进行单条流水线作业。各预制构件在各自工作站点上的生产程序相同,但由于在其各自工作站点的工作时间不同,所以需要对其生产构件的生产顺序进行合理排产,使其根据排列顺序进入流水线进行作业并完成生产。

混凝土浇筑工序属于不可间断工序,若工人在当日正常工作时间加上允许的加班时间内无法完成浇筑工作,那么就必须在混凝土浇筑工序推迟到下一个工作日进行;蒸汽养护工序是一道并行而非相继的工序,它不会占据人力资源,浇筑完毕后,在空间许可的条件下,可以在同一时间内对不同的构件进行养护;其他工序为可中断工序,当天完成不了的工作可以在第二天继续完成。故在具体生产调度中应充分考虑到劳动力限制,以便合理安排工人的作业时间。

装配式预制构件生产具有其自身的工艺特点,即浇筑工序完成并静停一段时间后方可进行蒸汽养护工序。故在具体生产调度中还需充分考虑到工艺约束。

在生产构件的流水线上存在缓冲区空间,即两道工序之间可以暂时放置半成品构件的区域。生产过程中,假设工序之间的缓冲区为 B_k ,构件 j 要进入工序 k 进行作业,则必须确保 j 在 $k-1$ 道工序已加工完成,且要看构件 $j-B_k$ 是否离开了工序 k ,若构件 $j-B_k$ 还未离开工序 k ,则需要停止整个生产并进行等待。故合理排产,避免构件生产时间因缓冲区等待而浪费是十分重要的。

二、预制构件生产调度模型构建

1. 参数与变量的设定

预制构件生产调度优化模型相关参数如表2所示。

表2 预制构件生产调度模型参数及含义

参数	含义	参数	含义
n	构件总数	D_1	$D_1 = 24(D + 1)$
m	工序总数	H_w	日常正常工作时间
j	构件编号, $j = 1, 2, 3, \dots, n$	H_A	加班时间
k	工序编号, $k = 1, 2, 3, \dots, m$	H_N	日常非正常工作时间
(j, k)	预制构件 j 的第 k 道工序	T	累计完工时间
K_0	工序编号为 1, 2, 5, 6 的集合	d_j	预制构件 j 的交货期
K_1	工序编号为 3 的集合	D	个体与猎物间的距离向量
K_2	工序编号为 4 的集合	t	迭代次数
$C(j, k)$	预制构件 j 的第 k 道工序加工完成时间	t_{max}	种群的最大迭代次数
$S(j, k)$	预制构件 j 的第 k 道工序开始加工时间	X	灰狼位置向量
$P(j, k)$	预制构件 j 的第 k 道工序加工持续时间	X_p	猎物位置向量
$E(j, k)$	预制构件 j 的第 k 道工序结束时间	A, C	协同系数向量
B_k	缓冲区大小	r_1, r_2	随机向量
D	工作日, $D = integer(T/24)$	a	收敛因子
D_0	$D_0 = 24D$	X_{ik}	位置元素(0 ~ 1 之间的随机数)

2. 模型的建立

为合理排产,以最小化最大完工时间为目标建立的装配式建筑预制构件生产调度优化模型步骤如下:

$$E(j, k) = \max[C(j - 1, k), C(j, k - 1)] + P(j, k) \quad (j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

$$C(j, k) = \begin{cases} E(j, k), & \text{if } E(j, k) \leq D_0 + H_w \\ E + H_N, & \text{if } E(j, k) > D_0 + H_w \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n; k \in K_0) \quad (3)$$

$$C(j, k) = \begin{cases} E(j, k), & \text{if } E(j, k) \leq D_0 + H_w + H_A \\ D_1 + P(j, k - 1), & \text{if } E(j, k) > D_0 + H_w + H_A \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n; k \in K_1) \quad (4)$$

$$C(j, k) = \begin{cases} D_1, & \text{if } (D_0 + H_w) < E(j, k - 1) < D_1 \\ E(j, k - 1), & \text{if } E(j, k - 1) \leq D_0 + H_w \text{ or } E(j, k - 1) \geq D_1 \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n; k \in K_2) \quad (5)$$

$$S(j, k_2) = E(j, k_1) \quad (j = 1, 2, \dots, n; k_1 \in K_1; k_2 \in K_2) \quad (6)$$

$$C(j, k) \geq S(j - B_k, k + 1) \quad (j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (7)$$

$$C(j, k) \leq d_j \quad (j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (8)$$

其中,式(1)为目标函数,表示最小化所有构件按生产顺序完成6道工序所需的最大完工时间;式(2)表示第 j 个构件的第 k 道工序的结束时间是第 $j - 1$ 个构件在第 k 道工序的完成时间与第 j 个构件在第 $k - 1$ 道工

首先确定目标函数

$$\min T = \max_{j=1}^n C(j, k) \quad (1)$$

其次设定约束条件,如式(2) ~ 式(8)

序的完成时间两者的最大值加上该构件工序的加工时间;式(3)表示在劳动力约束条件下,第1道、第2道、第5道及第6道工序的完成时间;式(4)表示在劳动力约束条件下,混凝土浇筑工序的完成时间;式(5)表示在劳动力约束条件下,蒸汽养护工序的完成时间;式(6)表示按照构件生产特点进行时间约束,即在混凝土浇筑工序结束后必须马上进行蒸汽养护工序;式(7)表示构件生产过程中存在缓冲区,即构件 j 在第 k 道工序的离开时间必须大于等于构件 $j - B_k$ 在第 $k + 1$

道工序的开始时间;式(8)表示构件生产要在交货期内完成,即预制构件 j 的完工时间需小于等于构件 j 的交货期。

三、基于灰狼优化算法的预制构件生产调度模型求解

灰狼优化算法(Grey Wolf Optimization, GWO)是由澳大利亚格里菲斯大学学者Mirjalili等人受灰狼捕食行为启发所提出的一种新型群智能优化算法。与其他算法相比,它的优势是易操作、收敛性强、容易实现及能够在局部寻优与全局搜索之间实现平衡等^[12],因此被广泛应用于复杂问题的求解。本研究在灰狼优化算法的基础上,设计了随机键编码机制,将连续编码转换成离散编码并结合了遗传算法中的交叉和变异操作提高离散灰狼算法的全局搜索能力,能对预制构件生产调度模型进行求解。为与改进后的灰狼优化算法进行区分,本研究将灰狼优化算法称为基础灰狼优化算法。

1. 基础灰狼优化算法概述

灰狼群体内有着严格的等级制度,根据社会等级,按照权力由大到小分为 α 、 β 、 δ 和 ω (见图1)。灰狼群通常由一小部分头狼带领一群灰狼向猎物方向前进,即灰狼群会在 α 的带领下进行集体狩猎。灰狼群的捕食分为包围、狩猎和攻击猎物3个步骤。

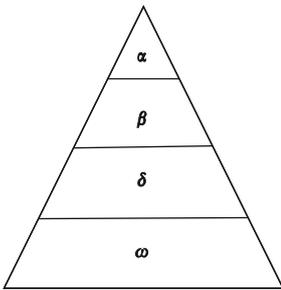


图1 灰狼的社会等级

在基础灰狼优化算法中,假设猎物的位置是由搜索空间中的最佳解决方案提供,则可以用该解决方案去寻找更好的解决方案,不断迭代优化,最终得到最优解决方案。令 α 为最优解, β 为优解, δ 为次优解, ω 为剩下的候选解,在狩猎过程中由 α 、 β 和 δ 引导,优

先找到并保存这3个个体的位置,然后围绕该区域进行搜索,通过不断迭代最终达到捕食猎物的目的,即找到最好的解决方案。

式(9)~式(13)表示灰狼群体包围猎物的过程,其数学模型描述为

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (9)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (10)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (11)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (12)$$

$$\vec{a} = 2 - t \cdot \left(\frac{2}{t_{\max}} \right) \quad (13)$$

其中,式(13)表示收敛因子 a 随迭代次数从2线性减小到0。

式(14)~式(16)表示灰狼的狩猎过程,其数学模型描述为

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t)| \\ \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}(t)| \\ \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}(t)| \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha(t) - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha \\ \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta(t) - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta \\ \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta(t) - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \end{cases} \quad (15)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (16)$$

式中: X_α 、 X_β 和 X_δ 分别为 α 、 β 和 δ 当前的位置; C_1 、 C_2 和 C_3 是随机向量; X_1 、 X_2 和 X_3 分别为 α 、 β 和 δ 更新后的位置。

其中,式(14)表示 α 、 β 和 δ 与其他个体间的距离,式(15)表示狼群中 ω 个体距离 α 、 β 和 δ 的步长和朝向方向,式(16)表示 ω 的最终位置。

虽然基础灰狼优化算法在解决调度问题方面有一定的优势,但它还存在两方面的不足:其一,基础灰狼算法的全局搜索能力不稳定,容易陷入局部最优困境;其二,基础灰狼优化算法起初是为了解决连续问题而提出的,但装配式预制构件生产调度问题是离散型问题,因而不能直接使用基础灰狼优化算法解决该问题。故需对基础灰狼优化算法以上两点不足进行改进,使其更适于解决预制构件生产调度问题。

2. 改进灰狼优化算法步骤

(1) 编码

采用基于构件的编码方式进行编码,即编码的序列为加工构件顺序的序列。编码的长度为工序数量与构件数量的乘积,将构件进行连续编号,再将构件的编号排列为一个完整的编码序列。

采用基于随机键编码的最大顺序值规则(Largest Order Value, LOV),可以实现灰狼位置坐标由连续数值到离散数值的转换^[13]。随机键编码的最大顺序值规则具体如下:首先对位置元素 X_{ik} 赋予 $[0, 1]$ 之间的随机数,

表 3 LOV 解码过程示例

k	X_{ik}	φ_{ik}	$\pi_{i,k}$	k	X_{ik}	φ_{ik}	$\pi_{i,k}$
1	0.16	10	2	6	0.60	5	4
2	0.79	1	10	7	0.26	8	3
3	0.31	7	9	8	0.65	4	7
4	0.53	6	8	9	0.69	3	5
5	0.17	9	6	10	0.75	2	1

(2) 解码

解码过程即生成具体调度方案的过程。在解码过程中,需初始化各构件的开始时间和结束时间,在调度过程中更新时间矩阵。需要注意的是,各构件在每道工序加工过程中的开始时间取决于上道工序的完成时间与该工序上个构件完成时间的最大值,养护工序的开始时间等于浇筑工序的结束时间。在生成具体调度方案时还需注意劳动力约束、工艺约束和缓冲区约束,即以式(3)~式(7)进行计算机判断。最终根据具体调度方案更新所有构件生产的调度时间进度表。

(3) 种群初始化

根据编码方式可知,每一个解(灰狼)都是一个预制构件生产调度序列。randperm 函数可以随机打乱一个数字序列,为提高程序运行效率,采用随机生成的方法进行种群初始化,使用 randperm 函数生成一组不重复的随机整数数据,以此表示构件的生产加工顺序。

(4) 适应度函数

适应度函数的确定取决于模型的目标函数,适应度值是某种环境条件下个体存活和

其次按照非升序排列得到中间序列 φ_{ik} ,最后计算得到构件的加工顺序($\pi_{i,\varphi_{ik}} = k$)^[14]。当 $k = 1$ 时,其位置元素 X_{i1} 值为 0.16,按非升序排列得到 $\varphi_{i1} = 10, \pi_{i,\varphi_{i1}} = 1 = \pi_{i,10}$;当 $k = 2$ 时,其位置元素 X_{i2} 值为 0.79,按非升序排列得到 $\varphi_{i2} = 10, \pi_{i,\varphi_{i2}} = 2 = \pi_{i,10}$;当 $k = 3$ 时,其位置元素 X_{i3} 值为 0.31,按非升序排列得到 $\varphi_{i3} = 7, \pi_{i,\varphi_{i3}} = 3 = \pi_{i,7}$,具体示例如表 3 所示。以此类推,最终得到的构件实际加工顺序为构件 2、构件 10、构件 9、构件 8、构件 6、构件 4、构件 3、构件 7、构件 5 和构件 1。

生殖的概率。本研究模型的目标为最小化最大完工时间,最大完工时间越小则其适应度值越大,所以将模型中的目标函数(式(1))的倒数设置为种群的适应度函数,根据解的适应度值大小将排名前三的个体定义为 α 、 β 和 δ 。

(5) 头狼选择机制

基础灰狼优化算法中一个重要的步骤是选择适应度值排名前三的个体作为头狼。这种选择操作既能减少有效解的损失,又能提高高性能个体被保留下来的概率,进而提高全局收敛性和求解效率^[15]。本研究使用轮盘赌策略来选出适应度最高的 α 狼、 β 狼和 δ 狼。

(6) 交叉和变异操作

由于基础灰狼优化算法在进化过程中,仅以个体适应度最优的 3 个解为依据完成个体位置的更新,所以该算法容易陷入局部最优困境。因此,对基础灰狼优化算法进行改进,将遗传算法的交叉和变异操作与基础灰狼优化算法相结合,以此提高灰狼优化算法的全局搜索能力。在具体优化调度操作中,对最优个体采用两点交叉操作与逆序变异操作。

(7) 个体位置更新

基础灰狼优化算法在灰狼群进化更新过程中,采用精英保留策略,将适应度最优个体(α 、 β 和 δ)直接保留到下一代。然后以基础灰狼优化算法的基本原理为依据,采用跟踪、包围和攻击猎物的方式更新灰狼的位置信息,从而进行整个种群的个体位置更新。

(8) 具体步骤

改进后的灰狼优化算法的具体步骤如下:

①设置参数,将种群大小设为 wolf、最大迭代次数设为 maxiter、自变量维度设为 dim;

②随机初始化种群;

③进行 GWO 算法搜索,计算种群适应度值,采用轮盘赌策略确定适应度排名前三的个体及其位置,即确定 α 狼、 β 狼和 δ 狼;

④对最优个体按一定概率进行交叉和变异操作,再根据适应度值由大到小更新 α 狼、 β 狼和 δ 狼;

⑤根据最优个体的信息更新种群的个体信息;

⑥根据更新后的种群个体信息,重新计算个体适应度,若更新后的个体适应度优于原始个体,则其成为新的 α 狼、 β 狼和 δ 狼,

继续循环执行搜索操作;

⑦若原始个体始终优于更新后的个体或达到最大迭代次数,则结束搜索操作,输出最优解。

四、案例分析

以沈阳某装配式建筑项目生产车间内一条生产流水线上的某个生产批次为实例,对其进行生产优化调度。该批次以生产某一户型所需预制构件为单位,共需生产 10 个装配式预制混凝土构件。

1. 案例基本数据

案例预制构件生产调度模型相关数据如表 4 所示,其中, M1 为模具清理与组装; M2 为钢筋及预埋件安装; M3 为混凝土浇筑; M4 为蒸汽养护; M5 为模板拆卸; M6 为质量检测及补修。由于同一构件的生产时间不可能完全相同,所以本研究所采用的预制构件各工序的加工时间与交付时间都是通过多次实地调研与访谈相关工作人员记录的平均时间综合所得。同时,根据企业生产构件的实际情况,设置每个工作日的正常工作时间为 8 h,非正常工作时间为 16 h,每天的加班时间不超过 4 h;相邻工位之间的缓冲区空间为 1。

表 4 生产调度模型相关数据

构件序号	工序生产时间/h						交货期/h
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	
1	0.9	2.1	1.6	14.0	1.7	0.9	45.0
2	0.7	1.9	1.1	14.0	1.2	0.8	56.0
3	0.8	1.5	0.7	14.0	0.5	1.6	55.0
4	0.4	0.8	1.3	14.0	1.0	1.2	38.0
5	0.6	1.2	1.5	14.0	1.6	0.9	54.0
6	0.8	1.0	0.9	14.0	0.8	1.1	40.0
7	0.7	0.9	2.0	14.0	1.9	2.0	51.0
8	0.8	0.8	1.5	14.0	1.7	1.4	49.0
9	0.4	1.6	1.4	14.0	2.0	1.3	52.0
10	0.5	1.1	1.1	14.0	1.5	0.8	55.0

2. 改进灰狼优化算法求解模型分析

使用 MATLAB R2018b 软件和改进后的灰狼优化算法对预制构件生产调度模型进行仿真试验。在试验中,根据所得结果及相关文献,最终设置灰狼种群规模 wolf 为 50,最大迭代次数 maxiter 为 50,交叉概率(cross

probability) 为 0.6,变异概率(mutation probability)为 0.8。测试得到的调度甘特图如图 2 所示,可知该调度的最大完工时间为 54.7 h,构件的生产顺序为构件 6、构件 4、构件 7、构件 1、构件 8、构件 9、构件 3、构件 5、构件 10、构件 2。

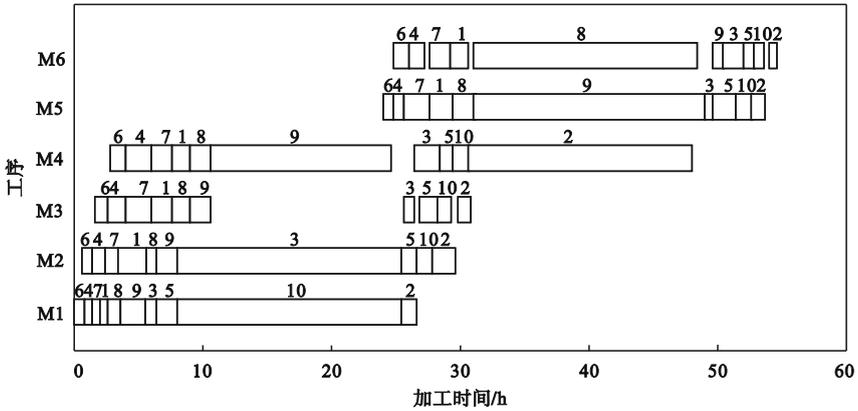


图 2 调度甘特图

该算法的收敛效果如图 3 所示,其中横坐标表示迭代次数,纵坐标表示最大完工时间。根据迭代曲线可以发现,使用 IGWO 算法求解的收敛性较好,可以用来解决该类问题。

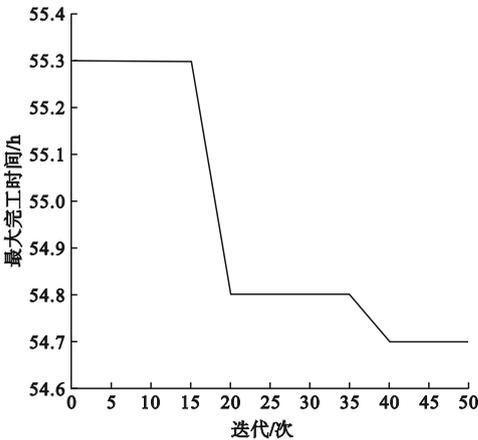


图 3 收敛曲线

3. 与 Palmer 启发式算法和遗传算法结果的对比

为了进一步检验 IGWO 算法的求解效率,拟采用 Palmer 启发式算法(以下简称“Palmer 算法”)和遗传算法(Genetic Algorithm, GA)与其进行对比分析,通过实例分析来检验 IGWO 算法求解单目标预制构件生产调度优化模型的效率。

试验结果中,IGWO 算法得到了最小的完工时间 54.7 h,比 GA 算法的完工时间少了 0.1 h,比 Palmer 算法少了 0.3 h(见表 5)。试验表明,IGWO 算法是可行且有效的,更适用于装配式预制构件生产调度优化模型。

表 5 试验结果比较

算法	生产排序	完工时间/h
Palmer	构件 7—9—8—4—10—5—3—6—2—1	55.0
GA	构件 4—1—8—5—6—10—3—7—9—2	54.8
IGWO	构件 6—4—7—1—8—9—3—5—10—2	54.7

五、结 语

针对装配式预制构件生产调度效率低、成本高的问题,充分考虑到了实际生产过程中的工艺限制、劳动力限制、缓冲区限制和工期限制这 4 个约束条件,构建了以最小化最大完工时间为目标的装配式预制构件生产调度优化模型,设计了适用于装配式预制构件生产调度优化的 IGWO 算法来求解该模型,并通过实际案例证实了 IGWO 算法优于 Palmer 算法和 GA 算法。

进一步研究时,在预制构件生产调度模型建立方面,可以增加质量和碳排放等较难量化的指标作为优化目标,根据实际生产情况增加更多的资源约束条件,以此构建更符合实际情况的多目标优化模型;在预制构件生产调度模型求解方面,可以通过对求解模型的优化算法进行改进,以此提升全局搜索能力和局部搜索能力,从而设计出整体性能更好、收敛能力更强、求解速度更快的算法模型。

参考文献:

[1] CHAN W T, HU H. Production scheduling for precast plants using a flow shop sequencing model [J]. Journal of computing in civil

- engineering, 2002, 16(3): 165 - 174.
- [2] KO C H, WANG S F. Precast production scheduling using multiobjective genetic algorithms [J]. Expert systems with applications, 2011, 38 (7): 8293 - 8302.
- [3] LI S H A, TSERNG H P, YIN S Y L, et al. A production modeling with genetic algorithms for a stationary pre - cast supply chain [J]. Expert systems with applications, 2010, 37 (12): 8406 - 8416.
- [4] WANG Z, HU H. Improved precast production-scheduling model considering the whole supply chain [J]. Journal of computing in civil engineering, 2017, 31(4): 04017013.
- [5] 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.
- [6] 王茹, 班丹梅, 王月, 等. 考虑资源约束的预制混凝土构件生产调度问题研究 [J]. 制造业自动化, 2020, 42(12): 63 - 67.
- [7] 于淼, 赵洁, 焦红超. 基于多目标差分进化算法的预制构件生产重调度研究 [J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2021, 23(6): 589 - 595.
- [8] 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.
- [9] 常春光, 代宾宾. 预制构件生产 - 运输分批协同调度双目标优化 [J]. 工业工程与管理, 2023, 28(4): 82 - 93.
- [10] 李佳铭, 袁竞峰, 张华. 预制构件工厂供应链管理问题剖析与对策研究 [J]. 建筑经济, 2021, 42(11): 90 - 94.
- [11] 王红春, 郭循帆, 刘帅. 基于前景理论: TOPSIS 的装配式建筑 PC 构件供应商选择 [J]. 建筑经济, 2021, 42(9): 100 - 104.
- [12] 姚远远, 叶春明. 求解作业车间调度问题的改进混合灰狼优化算法 [J]. 计算机应用研究, 2018, 35(5): 1310 - 1314.
- [13] 姜天华. 混合灰狼优化算法求解柔性作业车间调度问题 [J]. 控制与决策, 2018, 33(3): 503 - 508.
- [14] 夏霖辉, 吴瑶, 周学良, 等. 考虑运输时间的分布式置换流水车间调度灰狼优化算法 [J]. 湖北汽车工业学院学报, 2022, 36(4): 68 - 72.
- [15] 王凌. 车间调度及其遗传算法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.

Research on Production Scheduling Optimization of Prefabricated Components Based on Grey Wolf Optimization Algorithm

CHANG Chunguang, CHEN Jiaxin

(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

Abstract: Reasonable arrangement of production scheduling of prefabricated components can reduce the production cost of prefabricated buildings. Under the precondition of considering the constraint of component production resources, the production scheduling optimization model of prefabricated components is established. Then, an improved discrete Grey Wolf optimization algorithm, IGWO, is designed to solve the model. Finally, it is tested in a real case, and the improved discrete gray Wolf algorithm, heuristic algorithm Palmer method and genetic algorithm are compared. The results show that the improved discrete Grey Wolf algorithm is superior to Palmer method and genetic algorithm, and can improve the production efficiency of prefabricated components after reasonable scheduling.

Key words: assembly building; prefabricated components; production scheduling optimization; Grey Wolf optimization algorithm

(责任编辑:徐聿聪 英文审校:林 昊)