

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202203004



预制构件生产-运输-装配一体化的建造调度优化

秦旋, 朱倩影, 韩家玄

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为研究预制构件生产-运输-装配一体化的建造调度优化问题, 构建装配式构件全过程的多目标调度优化模型. 优化模型将预制构件 3 个阶段的优化作为一个扩展的生产车间调度优化, 并采用改进的双种群遗传算法对模型进行求解. 结果表明: 改进的双种群遗传算法能够显著提高遗传算法的搜索效率; 优化模型能够有效地减少总完工时间和并行机器的总机器成本.

关键词: 预制构件; 生产-运输-装配; 调度优化; 双种群遗传算法

中图分类号: TU 756; TU 723

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2023)03-0366-08

Construction Scheduling Optimization of Production-Transportation-Assembly Integration of Prefabricated Components

QIN Xuan, ZHU Qianying, HAN Jiaxuan

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to study the construction scheduling optimization problem of production-transportation-assembly integration of prefabricated components, a multi-objective scheduling optimization model of the whole process fabricated components is constructed. Taking the three-stage optimization of prefabricated components as an extended workshop scheduling optimization, the optimization model is solved by the improved double population genetic algorithm. The results show that the improved double population genetic algorithm can significantly increase the search efficiency of genetic algorithm. The optimization model can effectively reduce the total completion time and the total machine cost of parallel machines.

Keywords: prefabricated component; production-transport-assembly; scheduling optimization; double population genetic algorithm

传统建筑业在施工过程中会产生大量建筑垃圾、噪音和扬尘等污染物, 这与我国低碳环保的发展理念相悖, 亟待向绿色建筑方向转变^[1]. 在此背景下, 装配式建筑得到大力推广和发展. 目前, 预制构件的生产、运输与装配 3 个阶段的管理在很大程度上仍依赖于过往经验, 缺乏联动机制^[2], 存在调度不合理、运作效率低、成本居高不下等问题^[3]. 因此, 从预制构件生产-运输-装配一体化建造出发, 优化预制构件全阶段调度, 对推动我国装配式建筑发展具有重要意义.

收稿日期: 2022-03-29

通信作者: 秦旋(1969-), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事资源环境模型与系统模拟的研究. E-mail: hdwq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFB0503500)

我国装配式建筑起步较晚,只有少数学者将预制构件生产、运输与装配 3 个阶段作为一个整体过程进行全阶段优化研究. Anvari 等^[4]首次将预制构件全阶段的优化问题作为扩展型柔性作业车间调度(REFJSS)问题,并采用多目标遗传算法解决 REFJSS 问题,从而最小化最大完工时间和项目总成本,以及最大化安全性. Khalili 等^[5]在整个建设周期范围内解决预制构件的调度问题,将预制构件的生产、运输与装配 3 个阶段作为一个完整过程,建立预制构件模块单元调度模型,并采用混合整数线性规划(MILP)求解该模型.

目前,对于预制构件调度优化问题,大部分学者根据流水车间调度理论进行建模^[6-8],并采用启发式算法求解该模型. 基于此,本文研究预制构件生产-运输-装配一体化的建造调度优化.

1 全阶段调度优化模型

1.1 预制构件全阶段工作流程

装配式建筑预制构件的生产阶段与运输阶段都属于预制构件的供应链范畴,将生产与运输阶段合并成一个扩展的生产过程. 预制构件生产-运输-装配 9 道工序流程,如图 1 所示.

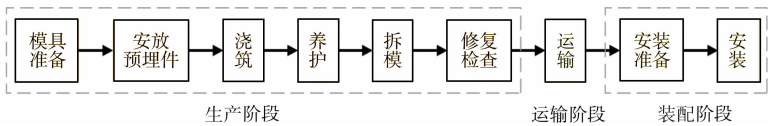


图 1 预制构件生产-运输-装配 9 道工序流程

Fig. 1 9 working procedures flow of production-transport-assembly of prefabricated components

1.2 混合流水车间调度问题

混合流水车间调度问题(HFSP)在流水车间调度问题(FSP)的基础上进行扩展^[9],FSP 工件的每道工序仅对应着一台固定的加工机器,而 HFSP 工件的所有或部分工序对应着多台并行机器^[10]. 由于 HFSP 工件某道工序对应的若干台并行机器的属性是完全相同的,因此,每个并行机器加工该道工序所耗费的时间也是一样的.

HFSP 需要满足以下 4 个假设条件:

- 1) 所有工件的各道工序都可以在对应的任意一台并行机器上加工;
- 2) 同一加工阶段对应的所有并行机器都是相同的;
- 3) 某一时刻,一道工序只能在一台并行机器上加工且不能中断;
- 4) 某一时刻,一台并行机器只能加工一道工序.

混合流水车间调度问题的加工流程,如图 2 所示. 图 2 中: ϵ_k 表示第 k 个工序所对应的并行机器的数量. $E = \{\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_k\}$ 表示混合流水车间调度问题中各工序上并行机器的数量组合. 显然,当 $\epsilon_k = 1$ 时, HFSP 即转化为 FSP. 与 FSP 类似, HFSP 的优化目标通常为最小化最大完工时间.

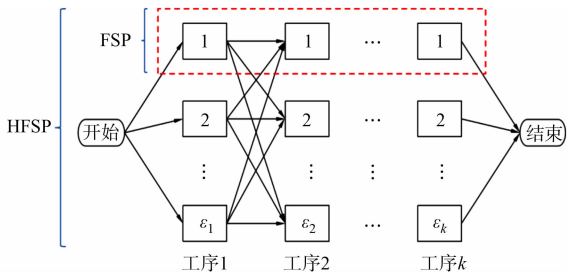


图 2 混合流水车间调度问题的加工流程

Fig. 2 Processing flow of hybrid flowshop scheduling problem

1.3 预制构件全阶段调度优化模型

Chan 等^[11]认为预制构件的生产阶段调度问题本质上是属于 FSP. 将预制构件的生产-运输-装配全阶段等效成一个扩展型的生产阶段,因此,预制构件的全阶段调度问题也可以等效成 HFSP.

1.3.1 基本模型 1) 参数设置. 预制构件全阶段调度的 9 道工序对应 HFSP 工件的工序($N_k, k=1, 2, \dots, 9$);预制构件全阶段调度的单个或单批预制构件对应 HFSP 工件,把单个或单批预制构件称为一个作业($J_i, i=1, 2, \dots, n$);与 HFSP 类似,预制构件全阶段调度的每道工序也对应多台并行机器(机械设备与人工资源的组合),设 $j_{k,m}$ 为工序 N_k 的各并行机器的编号, $k=1, 2, \dots, 9$; t_{P,J_i,N_k} 为作业 J_i 在工序 N_k 上的加工处理时间; $t_{P,J_i,N_k,j_{k,m}}$ 为作业 J_i 在工序 N_k 上的第 $j_{k,m}$ 个机器上的加工处理时间,对于 $\forall j_{k,m}$,

$t_{j_k,m} \equiv t_{p,j_i,N_k,j_k,m}; t_{c,j_i,N_k}$ 为作业 J_i 在工序 N_k 上的完工时间; $t_{c,max}$ 为所有作业中的最大完工时间.

2) 基本约束条件. 引入 0-1 决策变量 $X_{J_i,N_k,j_k,m}$, 有

$$X_{J_i,N_k,j_k,m} = \begin{cases} 1, & \text{如果作业 } J_i \text{ 在 } N_k \text{ 工序上第 } j_{k,m} \text{ 个机器上加工,} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \tag{1}$$

由于一台并行机器在某一时刻只能加工一道工序, 因此有

$$\sum_{i=1}^n X_{J_i,N_k,j_k,m} = 1. \tag{2}$$

同样地, 一道工序某一时刻只能在一台并行机器上加工, 因此有

$$\sum_{j_{k,m}=1}^{\epsilon_k} X_{J_i,N_k,j_k,m} = 1. \tag{3}$$

各个加工阶段的机器按照相同的加工顺序加工所有 FSP 工件, 而 HFSP 工件每道工序都存在若干并行机器, 各道工序上不同工件的加工顺序是不相同的, 因此, 不考虑各个作业之间的顺序约束, 仅考虑同一作业内工序之间的顺序约束, 即某工序开始时间不得早于其前面工序的结束时间, 有

$$t_{c,j_i,N_k} \geq t_{c,j_i,N_{k-1}} + t_{p,j_i,N_k}. \tag{4}$$

在工序 N_9 (安装工序) 上, 不同的作业满足一定的安装顺序, 某一作业的安装开始时间不得早于其前面作业的安装结束时间, 由此可得到工序 N_9 上作业执行顺序的约束条件为

$$t_{c,j_i,N_9} \geq t_{c,j_{i-1},N_k} + t_{p,j_{i-1},N_k}. \tag{5}$$

最后, 由于各个工序阶段对应的并行机器数量并不是充足的 (通常会远低于作业的数量), 因此, 假设第 k 个工序 N_k 对应的并行机器的数量上限. 特别地, 在工序 N_4 (养护工序) 上, 通常所有作业是可以并行加工的, 因此, 需考虑养护工序阶段具有足够多的机器.

3) 目标函数. 设函数 $f_1(\mathbf{E})$ 表示作业的最优调度排序方案对应的最短完工时间, 即

$$f_1(\mathbf{E}) = \min(\max(t_{c,j_i,N_9})). \tag{6}$$

设函数 $f_2(\mathbf{E})$ 表示在给定某一种并行机器数量组合 \mathbf{E} 时, 全部并行机器所产生的总成本为

$$f_2(\mathbf{E}) = \mathbf{U}\mathbf{E}^T. \tag{7}$$

式(7)中: $\mathbf{U} = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_9)^T$.

特别地, 工序 N_4 的机器几乎不产生成本, 因此, 令 $\mu_4 = 0$, 函数 $f_2(\mathbf{E})$ 可进一步表示为

$$f_2(\mathbf{E}) = \mu_1 \epsilon_1 + \mu_2 \epsilon_2 + \dots + \mu_9 \epsilon_9 = \sum_{k=1}^9 \mu_k \epsilon_k. \tag{8}$$

全阶段调度模型的最终目标是实现双目标优化, 即求解出一种机器数量组合 \mathbf{E} 和一种调度排序方案使得函数 $f_1(\mathbf{E})$ 和函数 $f_2(\mathbf{E})$ 同时达到最小化. 双目标优化问题取值为 $\min(f_1(x), f_2(x)), x \in \Omega, x$ 表示问题的可行解, Ω 表示可行解的集合.

1.3.2 双目标优化与熵权法 由于函数 $f_1(x)$ 和函数 $f_2(x)$ 分别表示时间和成本, 量纲不统一, 需要将两个函数的值进行统一量纲处理. 采用 min-max 线性归一化方法将两个函数的原始值映射到 $[0, 1]$ 区间内, 由于函数 $f_1(x)$ 和函数 $f_2(x)$ 均为成本型函数 (函数值越小双目标优化问题越优), 相应的归一化函数为

$$F_i(x) = \frac{\max\{f_i(x)\} - f_i(x)}{\max\{f_i(x)\} - \min\{f_i(x)\}}, \quad i = 1, 2. \tag{9}$$

式(9)中: 归一化后的函数 $F_1(x)$ 和 $F_2(x)$ 相当于函数 $f_1(x)$ 和函数 $f_2(x)$ 的评价指标, 函数 $F_1(x)$ 和函数 $F_2(x)$ 值越大, 双目标优化问题越优.

优化模型采用线性加权和法将双目标优化问题转化成单目标优化问题. 转化后的单目标优化问题的数学表达式为

$$\max F(x) = w_1 F_1(x) + w_2 F_2(x), \quad x \in \Omega. \tag{10}$$

式(10)中: 归一化后的函数 $F(x)$ 为所有可行解的评价函数 (最终的目的是找到函数 $F(x)$ 最大的解); w_1 和 w_2 分别为函数 $F_1(x)$ 和函数 $F_2(x)$ 对应的权重, 也分别为函数 $f_1(x)$ 和函数 $f_2(x)$ 的权重, $w_1, w_2 > 0, w_1 + w_2 = 1$, 且权重通过熵权法确定^[11-12].

2 改进的双种群遗传算法

遗传算法是一种典型的元启发式算法,通过优胜劣汰的方式选择优化问题的最优解或近似最优解^[12-13],是一种高效、并行、随机的全局搜索寻优方法.在求解较为复杂的组合优化问题时,相对一些常规的优化算法,遗传算法能够快速获得较好的优化结果^[14-15].

FSP 作为典型的非确定性多项式(NP-hard)问题,应用遗传算法求解具有非常好的效果^[16-18].预制构件全阶段调度模型是基于 HFSP 进行建模的,因此,遗传算法也适用于最优调度排序方案的求解.为了提升求解的准确性与效率,对遗传算法做一些改进.改进的遗传算法流程图,如图 3 所示.图 3 中: n 为迭代次数.

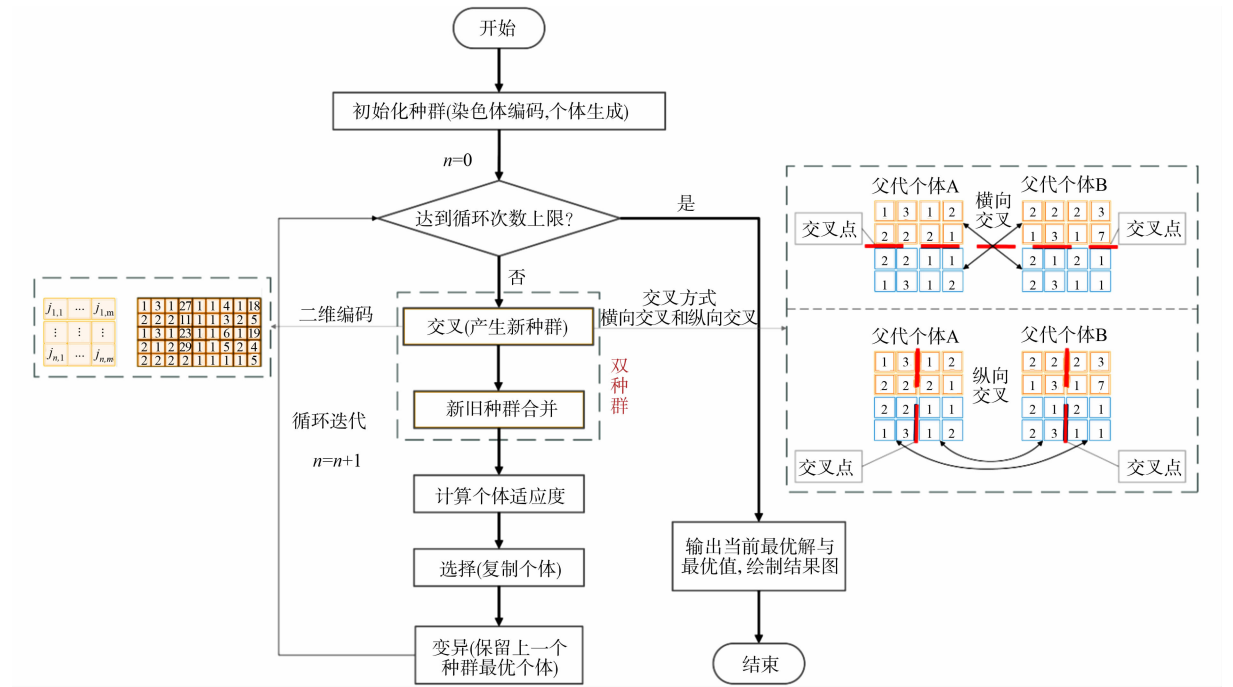


图 3 改进的遗传算法流程图
Fig. 3 Flow chart of improved genetic algorithm

由图 3 可知:在改进的遗传算法流程的循环体中,交叉操作放在适应度计算步骤之前,也就是每代种群在计算适应度之前都要经历一次交叉操作,而这个交叉操作会产生一个和原种群同样规模的新种群(或称子代种群);新种群与旧种群合并,形成一个双种群,对双种群的全部个体适应度进行计算、选择和变异等;双种群的进化方式能显著提高遗传算法的搜索效率(这是改进后的遗传算法的最大特点),除了设置双种群,也改进了算法的编码方式和交叉方式.

3 仿真案例分析

3.1 案例背景

将某装配式建筑的某两个标准层(2F,3F)涉及的预制构件类型和尺寸划分成 12 个作业,为了贴合实际工程情况,各个作业在安装阶段都要满足一定的安装顺序(如 2F 构件要先于 3F 构件安装).所有构件的养护都采用蒸汽养护方式,并且假设养护窑的数量足够多,能够满足当前所有构件同时进行养护.构件运输采用相同的专业车辆,每辆车一次只能运送一个作业的构件,构件采用塔吊结合安装班组(假设安装班组只有一个)进行安装.作业的其他各道工序有若干个相同且独立的机器设备或人工班组,或二者的组合.各作业在 9 道工序上的预计加工处理时间,如表 1 所示.

规定工序 N_9 的并行机器的数量上限为 1,工序 N_7 (运输工序)的并行机器数量上限为 6,工序 N_4 并行机器数量为 L (L 是一个足够大的数,且恒有 $L > 12$),其他工序的并行机器数量上限为 3,则并行机器的数量上限组合 $E = [3, 3, 3, L, 3, 3, 6, 3, 1]$. 假设 N_1 至 N_9 各道工序上每台机器的成本已知,令 $U =$

[5.0,7.0,10.0,0,5.0,6.0,0.5,5.0,15.0]为各道工序上总机器成本组合,其中,成本为无量纲.

表 1 各作业在 9 道工序上的预计加工处理时间

Tab. 1 Estimated processing time of each operation in 9 working procedures

作业序号	构件类型	并行机器数量	$t_{P,J_i,N_k}/h$								
			N_1	N_2	N_3	N_4	N_5	N_6	N_7	N_8	N_9
J ₁	2F 预制墙板 1	2	3.2	4.0	2.4	12.0	2.0	1.0	2.5	1.2	2.5
J ₂	2F 预制墙板 2	4	4.4	4.2	2.8	12.0	2.4	1.4	2.5	1.6	3.4
J ₃	2F 预制墙板 3	2	3.6	4.6	2.4	12.0	2.1	1.5	2.5	1.5	3.0
J ₄	2F 预制叠合板 1	4	3.3	6.4	2.6	12.0	2.0	1.2	2.2	0.8	1.5
J ₅	2F 预制叠合板 2	3	2.8	4.8	2.0	12.0	1.6	1.0	2.2	0.6	1.1
J ₆	2F 预制楼梯	2	3.5	4.2	2.2	12.0	1.8	1.2	2.5	0.5	1.0
J ₇	3F 预制墙板 1	2	3.2	4.0	2.4	12.0	2.0	1.0	2.5	1.2	2.5
J ₈	3F 预制墙板 2	4	4.4	4.2	2.8	12.0	2.4	1.4	2.5	1.6	3.4
J ₉	3F 预制墙板 3	2	3.6	4.6	2.4	12.0	2.1	1.5	2.5	1.5	3.0
J ₁₀	3F 预制叠合板 1	4	3.3	6.4	2.6	12.0	2.0	1.2	2.2	0.8	1.5
J ₁₁	3F 预制叠合板 2	3	2.8	4.8	2.0	12.0	1.6	1.0	2.2	0.6	1.1
J ₁₂	3F 预制楼梯	2	3.5	4.2	2.2	12.0	1.8	1.2	2.5	0.5	1.0

3.2 全阶段调度优化问题的求解

3.2.1 最优调度排序方案的求解 采用 MATLAB 软件进行编程,采用改进的双种群遗传算法求解仿真案例的最优作业调度排序方案.除了已知的加工时间矩阵和机器数量组合 E 之外,其他参数的设置如下:最大迭代次数为 100;种群规模为 80;变异概率为 0.95;情况 1~情况 3 的并行机器数量组合分别为 $E_1=[1,1,1,L,1,1,1,1,1]$, $E_2=[2,2,2,L,2,2,2,2,1]$, $E_3=[3,3,3,L,3,3,6,3,1]$.令 $L=50$,得到各代最优个体适应度曲线和最优作业调度排序方案甘特图,分别如图 4,5 所示.图 4,5 中: $t_{C,min}$ 为适应度(最短完工时间).

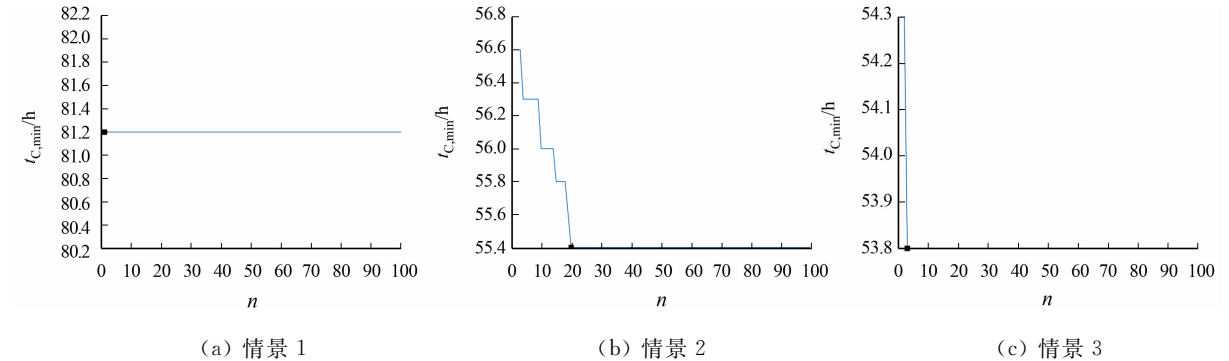


图 4 各代最优个体适应度曲线

Fig. 4 Curves of optimal individual fitness for each generation

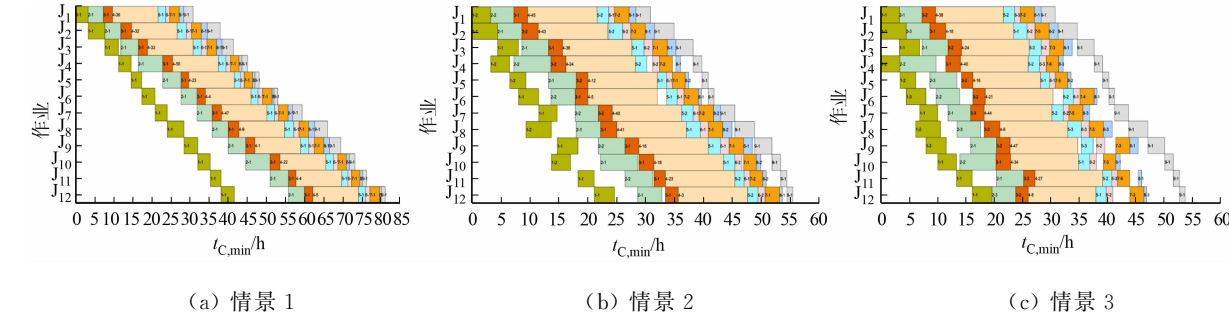


图 5 最优作业调度排序方案甘特图

Fig. 5 Optimal job scheduling and sorting scheme gantt chart

由图 4 可知:情景 1 在第 1 次迭代时就已经得到最小适应度(81.2 h),此后的迭代都收敛于相应的最优值;情景 2 在第 20 次迭代时得到最小适应度(55.4 h),此后的循环迭代中每代种群中的最优值都

为该值;情景 3 在第 3 次迭代时就收敛到了最小适应度(53.8 h),此后的迭代最优值都为该值。

由图 5 可知:情景 1 的各道工序(除工序 N_4 外)的并行机器数量都设为 1,在这种特殊的机器数量组合下,各作业的调度顺序呈现很强的规律性,同时,这种情况下最优完工时间在所有不同组合情况中是最长的,该调度方案也可作为其他情况的对照方案;相比于情景 1,情景 2 的并行机器数量扩大了一倍,相应的最短完工时间也大大缩短了 25.8 h,且最优调度方案是不固定的,可存在多个最优解,没有明显的规律性,在工序 N_9 上的作业加工顺序都严格满足相应约束条件;相比于情景 2,情景 3 的并行机器的数量虽然增加了不少,但最短完工时间缩短了 1.4 h,这说明当并行机器的数量足够多时,继续增加并行机器带来的时间收益会越来越小;在规定的机器数量上限以内,存在一个或多个机器数量组合的临界点,同时,也存在某种机器数量组合能使最短完工时间和总机器成本都最小化。

3.2.2 双目标优化问题的求解 双目标优化问题的目的是寻找一种或多种并行机器的数量组合,最大化获取“时间+成本”的综合收益,即最小化最短完工时间和总机器成本。首先,需要确定并行机器数量组合的种类数量,为了精简求解范围,假设工序 N_7, N_8, N_9 的并行机器数量是固定的,分别为 6,3,1,令工序 N_4 的并行机器数量 $L=50$ 。因此,并行机器数量组合的种类与剩下 5 道工序的机器数量取值有关,并且该 5 道工序的机器数量上限皆为 3,则并行机器数量组合共有 $3^5=243$ 种(按 1 至 243 的顺序对并行机器的所有数量组合进行编号)。

根据已知的总机器成本组合 $U=[5.0, 7.0, 10.0, 0, 5.0, 6.0, 0.5, 5.0, 15.0]$ 及并行机器数量组合 $E=[a, b, c, 50, d, e, 6, 3, 1](a, b, c, d, e=1, 2, 3)$,采用 MATLAB 软件进行编程,求解每种机器数量组合下的函数 $f_1(x)$ 和函数 $f_2(x)$,最终得到 243 对值。最短完工时间函数和总机器成本函数的散点图,如图 6 所示。

由图 6 可知:离散点在纵轴上分层明显,表明在某一固定总成本下,不同的机器数量组合带来的时间收益可能会大相径庭;几乎每一个函数 $f_1(x)$ 的值都对对应着许多个函数 $f_2(x)$ 的值,并且函数 $f_2(x)$ 的值跨度较大,这表明在时间目标固定时,可以通过改变并行机器数量组合降低成本;越靠近左下角的离散点越优。

利用 min-max 公式,对所求的 243 对值进行归一化处理,得到相应的评价因子指标函数 $F(x)$ 值($F_1(x)$ 值, $F_2(x)$ 值)。根据 $F(x)$ 值,利用熵权法,采用 MATLAB 软件进行编程,求解得到的 $F_1(x)$ 指标权重为 $w_1=0.832$, $F_2(x)$ 指标权重为 $w_2=0.168$,指标权重 w_1, w_2 也是双目标优化中目标函数 $f_1(x)$ 和 $f_2(x)$ 的权重。

最短完工时间函数,总机器成本函数与评价因子指标函数三维散点图,如图 7 所示。由图 7 可知:越靠近左上角的离散点越优。根据权重值 w_1, w_2 及函数 $F_1(x), F_2(x)$ 值,利用线性加权和公式 $F(x)=w_1 F_1(x)+w_2 F_2(x)$,最终可以求得评价因子指标函数 $F(x)$ 值。

243 种机器数量组合与相应评价因子指标函数二维散点图,如图 8 所示。由图 8 可知:越靠上的点(函数 $F(x)$ 值越大),其对应的并行机器数量组合越优。

评价因子指标函数对应的主要指标值,如表 2 所示。由表 2 可知:并行机器数量组合 $E=[2, 3, 2, 50, 1, 1, 6, 3, 1]$ 的评价因子指标函数 $F(x)$ 的值最大,也是双目标优化问题的最优解,函数 $f_1(x)$ 的值为

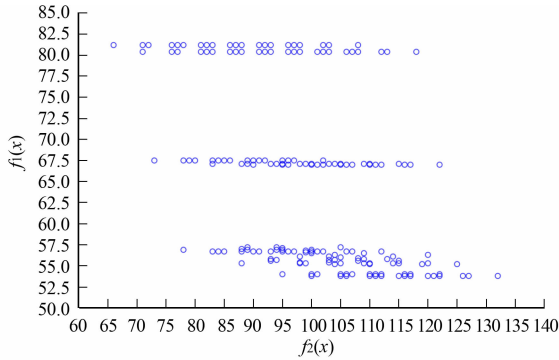


图 6 最短完工时间函数和总机器成本函数的散点图

Fig. 6 Scatter plot of minimum completion time function and total machine cost function

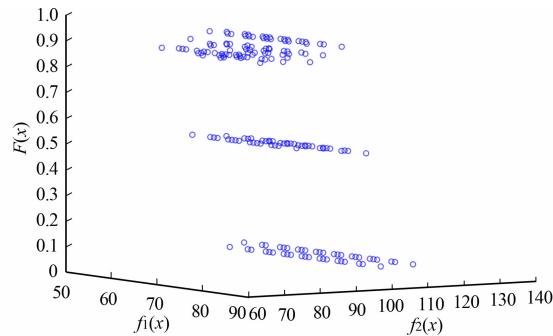


图 7 最短完工时间函数和总机器成本函数与评价因子指标函数三维散点图

Fig. 7 3D scatter plot of minimum completion time function, total machine cost function and evaluation factor index function

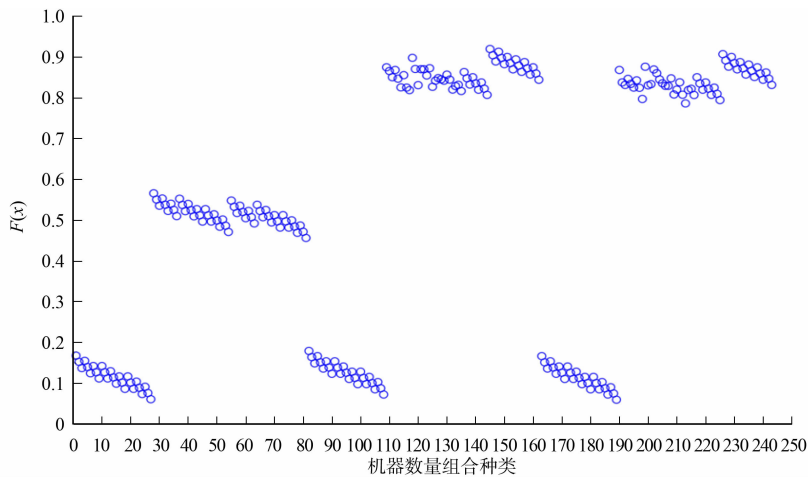


图 8 243 种机器数量组合与相应评价因子指标函数二维散点图

Fig. 8 2D scatter plot of of 243 kinds of machine quantity combination and corresponding evaluation factor index function

表 2 评价因子指标函数对应的主要指标值

Tab. 2 Main index values corresponding to evaluation factor index function

E	$f_1(x)$	$f_2(x)$	$F_1(x)$	$F_2(x)$	$F(x)$
[2,3,2,50,1,1,6,3,1]	54.0	95	0.992 7	0.560 6	0.920 1
[2,3,2,50,2,1,6,3,1]	53.8	100	1.000 0	0.484 8	0.913 4
[3,3,2,50,1,1,6,3,1]	54.0	100	0.992 7	0.484 8	0.907 4
[2,3,2,50,1,2,6,3,1]	54.0	101	0.992 7	0.469 7	0.904 8
[2,3,2,50,3,1,6,3,1]	53.8	105	1.000 0	0.409 1	0.900 7
[3,3,2,50,2,1,6,3,1]	53.8	105	1.000 0	0.409 1	0.900 7

54,函数 $f_2(x)$ 值为 95.

最优机器数量组合下的最优调度方案甘特图,如图 9 所示.

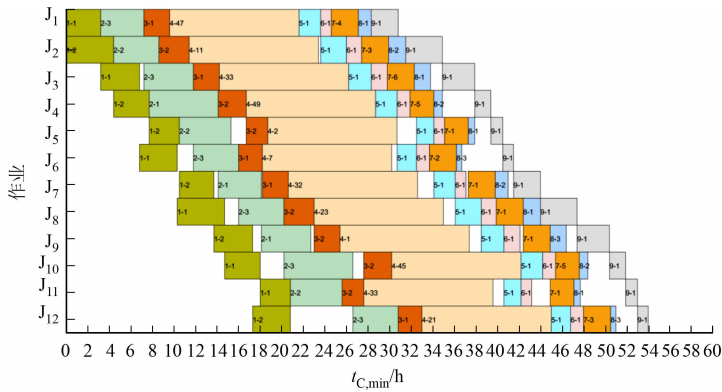


图 9 最优机器数量组合下的最优调度方案甘特图

Fig. 9 Gantt chart of optimal scheduling scheme under optimal machine number combination

4 结论

根据装配式建筑的整个建造过程,分析研究预制构件在生产、运输与装配阶段的具体工作流程,对各个阶段的工作流程进行简化,将预制构件全阶段的工作流程简化为 9 道工序.将预制构件调度优化作为一个扩展型的生产车间调度优化问题.在 HFSP 理论的基础上,对预制构件全阶段调度问题进行建模,对完工时间和并行机器的总机器成本进行优化.采用改进的遗传算法对模型求解,改进后的遗传算法更符合模型要求,并提高了搜索最优解的效率.

对预制构件生产-运输-装配全阶段调度进行优化,打破以往研究中只考虑某一个阶段的局限性,促

进装配式建筑更加经济化、合理化、科学化。但也存在一些不足,如模型的约束多是基于多种理想化的假设,没有充分考虑实际工程情况,以及在模型多目标优化时没有优化其他成本。

参考文献:

- [1] 王朝静.波动干扰下装配式住宅预制构件生产调度优化研究[D].上海:上海交通大学,2018.
- [2] LI Zhengdao, SHEN G Q, XUE Xiaolong. Critical review of the research on the management of prefabricated construction[J]. Habitat International, 2014, 43: 240-249. DOI: 10. 1016/j. habitatint. 2014. 04. 001.
- [3] 王广明, 武振. 装配式混凝土建筑增量成本分析及对策研究[J]. 建筑经济, 2017, 38(1): 15-21. DOI: 10. 14181/j. cnki. 1002-851x. 201701015.
- [4] ANVARI B, ANGELOUDIS P, OCHIENG W Y. A multi-objective GA-based optimisation for holistic manufacturing, transportation and assembly of precast construction[J]. Automation in Construction, 2016, 71(2): 226-241. DOI: 10. 1016/j. autcon. 2016. 08. 007.
- [5] KHALILI A, CHUA D K. Integrated prefabrication configuration and component grouping for resource optimization of precast production[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2014, 140(2): 4013052(1-12).
- [6] 房子涵. 基于 SOS 算法的装配式建筑预制构件生产调度优化研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2019.
- [7] WANG Zhaojing, HU Hao. Improved precast production-scheduling model considering the whole supply chain[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(4): 1-12. DOI: 10. 1061/(ASCE)CP. 1943-5487. 0000667.
- [8] 孔刘林. 基于生产-运输-装配一体化建造方式的建模研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [9] 李俊青, 李文涵, 陶昕瑞, 等. 时间约束混合流水车间调度问题综述[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(11): 2273-2290. DOI: 10. 7641/CTA. 2020. 00077.
- [10] 李颖俐, 李新宇, 高亮. 混合流水车间调度问题研究综述[J]. 中国机械工程, 2020, 31(23): 2798-2813, 2828. DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-132X. 2020. 23. 004.
- [11] CHAN W T, HAO Hu. Production scheduling for precast plants using a flow shop sequencing model[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2002, 16(3): 165-174.
- [12] 王兰化, 张莺. 层次分析-熵值定权法在城市建设用地适宜性评价中的应用[J]. 地质调查与研究, 2011, 34(4): 305-312. DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-4135. 2011. 04. 009.
- [13] 边霞, 米良. 遗传算法理论及其应用研究进展[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(7): 2425-2429, 2434. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3695. 2010. 07. 006.
- [14] 罗钦平. 遗传算法的改进及其在结构优化中的应用研究[D]. 太原: 中北大学, 2012.
- [15] 何珍珍. 基于遗传算法的企业配送路径问题研究[J]. 物流工程与管理, 2013(11): 96-97. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-4993. 2013. 11. 040.
- [16] 顾蕾. 求解静态流水车间调度的改进遗传算法[J]. 电子技术与软件工程, 2019(15): 118-119.
- [17] 程月明, 牛占文, 刘超超. 装配式建造模式中混凝土预制构件调度优化[J]. 工业工程与管理, 2020, 25(4): 50-58. DOI: 10. 19495/j. cnki. 1007-5429. 2020. 04. 007.
- [18] 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. DOI: 10. 13196/j. cims. 2021. 08. 008.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)