

基于随机活动工期的装配式项目 鲁棒性调度优化

于 淼,王港莉,赵 愈,路林翰

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要:将装配式项目的生产阶段、运输阶段和装配阶段作为一个整体进行研究,考虑了各阶段的调度性质及相互牵制特性,提出了分种类分批次的调度策略。针对随机活动工期的装配式项目调度问题,采用鲁棒性调度方法,建立了以项目鲁棒值和成本值为优化目标的生产-运输-装配一体化建造鲁棒性调度模型。依据调度性质设计了集成精英策略的非支配性遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-II, NSGA-II)并对其进行了求解。最后选取装配式项目实际案例,验证了算法的有效性并对实验结果进行了分析。研究表明,通过改变活动时差的不同分布状态,可在提高项目鲁棒性的同时保证项目成本最低。

关键词:随机活动工期;装配式项目;鲁棒性调度;双目标优化

中图分类号:TU756

文献标志码:A

引用格式:于淼,王港莉,赵愈,等.基于随机活动工期的装配式项目鲁棒性调度优化[J].沈阳建筑大学学报(社会科学版),2024,26(3):266-272.

装配式建筑整合了生产、运输和装配阶段,构建了一体化的协同建筑产业链,其能显著提高劳动效率,减少资源及能源消耗,并有效缩短建设周期,是促进建筑业工业化转型的必然途径^[1]。鉴于装配式项目各阶段具有不同的调度特性,且各阶段在建造过程中紧密相连,同时受到所处地域、利益相关方、作业环境等多种不确定因素的影响^[2],在项目执行的过程中,活动的工期将产生较强波动。预制构件的延迟交付将导致项目施工进度延迟,增加劳动力成本;预制构件过早生产则会因储存而增加管理成本^[3]。除此之外,运输过程交付等待时间延长,会影响装配式预制构件的物流配送成本^[4]。各阶段活动对整体项目调度方案的执行能产生直接或间

接影响,故强化阶段间衔接的有效管理并从宏观层面出台调度方案至关重要。

近年来,装配式项目调度研究受到了学者们的广泛关注。常春光等^[5]考虑了生产资源约束条件下的预制构件生产情况,设计了基于随机编码机制的离散灰狼优化算法并对其进行了求解。尹静等^[6]建立了生产运输协同调度模型,并应用改进的遗传算法对其进行了求解,以达到准时交付和最大流程时间最小化的目标。于淼等^[7]引入了交货时间窗概念,将生产与装配阶段相衔接,建立了一个多模式下装配式资源调度模型,并运用了布谷鸟算法进行了求解。Kong L等^[8]将装配式项目各阶段看作一个整体,以生产成本最低为目标,建立了一个涵盖生产、运输

及装配环节的单机批量调度模型。Anvari B 等^[9]以最小化时间、最小化成本及最大化安全性为目标,首次将多目标遗传算法的优化方法应用于装配式项目集成系统并进行了模型求解。目前针对装配式项目活动工期的调度研究多以确定型为主,即将活动时间作为确定的已知参数进行处理。然而,在针对不同阶段开展协同管理的过程中,装配式项目易受到不确定因素的扰动,导致活动工期偏离计划时间和调度计划的失效。

鲁棒性(Robustness)调度作为提升项目抵抗不确定性因素干扰的能力的一个重要方法,旨在得到稳定性强的项目调度方案^[10]。鲁棒性调度评价指标(Robust Measurement, RM)可以对项目调度方案抵抗不确定因素干扰的能力进行量化评判。何正文等^[11]为解决具有随机活动工期的资源约束项目鲁棒性调度问题,引入活动权重系数构建了鲁棒性指标体系,通过合理安排活动时差实现了项目进度计划鲁棒性的最大化。Lambrechts O 等^[12]基于活动计划与实际开始时间两者的偏差来衡量项目调度方案的鲁棒性大小。张静文等^[13]从活动自由时差效用函数的视角度量了调度方案的鲁棒性,并采用非支配性排序遗传算法对模型进行了求解。在以往的研究中,鲁棒性的提高往往是以增加项目成本为代价的,故对在确保装配式项目的顺畅和高效执行同时降低项目成本、提升调度方案的鲁棒性领域开展研究具有重大意义。

为此,本研究针对随机工期的装配式项目调度问题,提出了一种分种类分批次调度策略,建立了生产-运输-装配一体化建造双目标鲁棒性项目调度优化模型,并运用非支配性遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithms-II, NSGA-II)对模型进行求解。最终,通过选取实际装配式项目案例,验证了算法的有效性并对实验结果做了详细分析。

一、生产-运输-装配一体化模型

1. 问题描述

受现场装配设备和人员等资源限制的影

响,装配式项目的构件并非在同一时间进行生产,需要将构件划分批次(j)安排生产。同时受施工工艺的约束,不同种类(i)的构件在装配过程中存在先后顺序,因此需根据装配施工顺序对构件种类进行编号。在生产阶段采用多流水线安排生产,同类型的构件即使有轻微变化,也可使用同一种模具,因此根据装配阶段的周期性施工进度方案,同种构件在同一流水线分批次生产。运输阶段受构件生产批次、体积大小及形状等限制,采用分种类分批次运输,具体流程如图 1 所示。

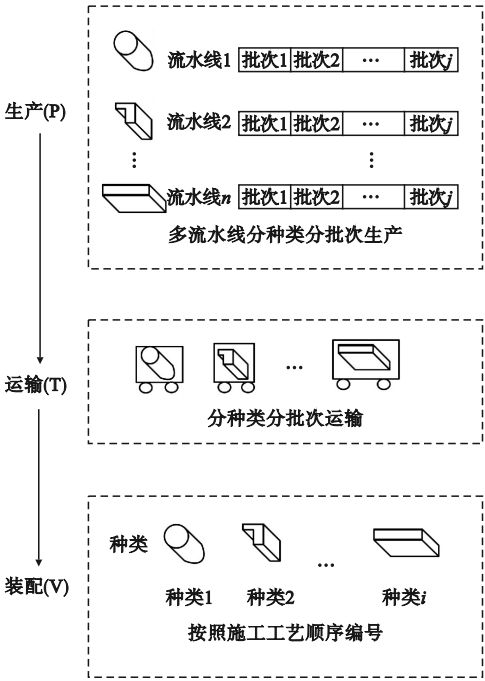


图 1 一体化建造流程示意图

2. 模型假设及参数定义

综合考虑装配式项目构件生产特征、运输批次约束、装配阶段的活动约束,做出以下假设。

- H1: 各个活动在执行过程中不间断;
- H2: 一条生产线在同一时刻只能生产一个批次;
- H3: 批次之间不存在优先关系;
- H4: 运输车辆数量和载重能够满足运输要求。

模型涉及的参数及定义如表 1 所示。

表 1 装配式项目模型参数及定义

参数	定义
i	构件种类编号, $i=1,2,\cdots,I$
j	构件批次编号, $j=1,2,\cdots,J$
k_P	生产阶段所需资源种类
k_T	运输阶段所需资源种类
k_V	装配阶段所需资源种类
d_{ij}	活动持续时间
S_{ij}	活动开始时间
f_{ij}	活动结束时间, 且 $f_{ij} = S_{ij} + d_{ij}$
f_{\max}	项目最大完工时间
R_k^{\max}	单位时间内资源的最大可用量
r_{ijk}	活动在单位时间内所需要的 k 种资源消耗量
r_{ik}	构件种类 i 在单位时间内所需要的 k 种资源消耗量
r_{jk}	构件批次 j 在单位时间内所需要的 k 种资源消耗量
D	项目最大截止工期
B_{ij}	活动的时差
$\mu(d_{ij})$	活动工期的均值
$\sigma(d_{ij})$	活动工期的方差
U_{ij}	活动的紧后活动集合
ξ_{ij}	活动的权重系数
C_k	资源 k 的单位资源成本
RM	项目的鲁棒值
TC	项目的成本值

3. 生产 - 运输 - 装配一体化建造模型

综合考虑装配式项目的特点,将生产、运输、装配各阶段的活动约束纳入考虑范围。采取分种类分批次调度策略,建立生产 - 运输 - 装配一体化建造模型的具体步骤如下。

$$\sum_{i=1}^I r_{ik_P} \leq R_{k_P}^{\max} \tag{1}$$

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J r_{ijk_T} \leq R_{k_T}^{\max} \tag{2}$$

$$S_{ij}^P + d_{ij}^P \leq S_{ij}^T \tag{3}$$

$$\max(f_{ij}^T, f_{(i-1)j}^V) \leq S_{ij}^V \tag{4}$$

$$S_{(i-1)j}^V + d_{(i-1)j}^V \leq S_{ij}^V \tag{5}$$

$$\sum_{j=1}^J r_{jk_V} \leq R_{k_V}^{\max} \tag{6}$$

$$f_{\max} \leq D \tag{7}$$

在上述模型中,式(1)表示在生产阶段的任意时刻,不同种类构件的资源需求量小于资源总量;式(2)表示在运输阶段的任意时刻,不同种类的构件在进行所有活动时所消耗的资源总和小于资源总量;式(3)表示活动运输阶段的开始时间早于该活动生产阶段的完成时间;式(4)表示装配阶段活动的开始时间早于该活动运输阶段的完成时间与装配阶段活动的完成时间;式(5)表示装配阶段活动间的工艺约束,即在同一批次中的

前一种类构件安装完成后,其他构件才能进行安装;式(6)表示装配阶段不同批次的构件在任意时刻对某一资源的需求量之和必须小于资源供应总量;式(7)表示项目必须在最大截止工期之前完成。

二、基于随机工期的装配式项目鲁棒性调度优化

1. 鲁棒性指标

在制定项目调度方案时,假设活动工期 d_{ij} 服从均值为 $\mu(d_{ij})$ 和方差为 $\sigma(d_{ij})$ 的正态分布,令活动工期 d_{ij} 等于均值 $\mu(d_{ij})$ 。然而在项目执行过程中,受不确定因素的影响,活动工期会发生变化,导致原有调度方案发生混乱。为了保证调度方案的稳定性,引入活动时差 B_{ij} 作为缓冲时间,即当某项活动发生延迟时,活动时差可减缓或避免由于活动工期变化对紧后活动产生的影响,其计算公式为

$$B_{ij} = \min \{ S_{U_{ij}} \} - [S_{ij} + \mu(d_{ij})] \tag{8}$$

当活动的工期偏离幅度不超过时差 B_{ij} 时,其后续活动 U_{ij} 就不受该偏离的影响。因此,活动间的时差越大,活动拖期对后续活动的影响越小。活动的方差 $\mu(d_{ij})$ 越大表示该活动的实际工期与均值的偏离程度越大,活动工期的波动幅度也越大。故选用活动权重系数 ξ_{ij} 表示活动工期的波动幅度,其计算公式为

$$\xi_{ij} = \sigma(d_{ij}) / \sum_{n=1}^N \sigma(d_{ij}) \tag{9}$$

当活动工期的波动幅度越大时,就需要分配更多的缓冲时间来保证后续活动不受影响。在此基础上,定义单位时差所产生的缓冲时间为活动的鲁棒性贡献,用 $\xi_{ij} B_{ij}$ 表示;将项目的总鲁棒值 RM 定义为所有活动的时差对项目调度方案鲁棒性的贡献总和,其计算公式为

$$\max RM = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \xi_{ij} B_{ij} \tag{10}$$

2. 成本函数

本研究中的项目成本主要包含两部分:活动实施过程中所消耗的资源成本和时差作

为缓冲时间所占用的资源成本。成本值 TC 的计算公式为

$$\min TC = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J C_k r_{ijk} (d_{ij} + B_{ij}) \quad (11)$$

由于生产、运输、装配阶段的作业环境及施工工艺不同,活动工期的波动幅度和资源成本也存在差异。另外,由于项目最大截止工期 D 的约束,活动时差的长短受限。因此,在调整调度方案中有时差的分布状态时,可以优先将时差分配给权重系数大的活动以提高项目的鲁棒性,同时将时差分配给资源成本小的活动以减小项目总成本。最终得到的调度方案既能最大化项目的鲁棒值,又能最小化项目成本。

三、NSGA-II 设计

Deb K 等^[14]所提出的 NSGA-II 具有快速准确的搜索性能。其中非支配排序思想使算法的复杂度下降,有效提高了算法的运行效率。精英保留策略的引入保证了种群个体的多样性,进而提高了算法的收敛率。目前 NSGA-II 已被广泛应用于解决一些工程类问题^[15]。因此,本研究对 NSGA-II 进行调整,以用于求解基于随机活动工期的装配式项目鲁棒性调度模型。

1. 编码与解码方案

在遗传算法中,染色体编码传递了重要的信息,是模型求解的关键。对于装配式项目,需要优化生产、运输和装配这3个阶段内不同批次的活动,并考虑这些阶段之间的相互影响关系。因此,本研究根据装配式项目的特性,对生产和运输阶段的种类数进行编码,对装配阶段的批次数进行编码。

按照各阶段的约束关系对生成的编码序列进行解码。其中,生产阶段 P 的顺序按照构件种类 i 之间的资源约束关系进行调整;运输阶段 T 的顺序按照活动之间的资源约束关系进行调整;装配阶段 V 的顺序则按照批次 j 之间的资源约束关系进行调整,通过这样的解码过程,确定项目整体的调度计划。

2. 非支配性排序

根据目标函数值 $\min TC$ 和鲁棒性

$\max RM$ 进行非支配等级排序,以获取不同解之间的支配关系。被支配次数越少的解非支配等级越高。例如,解被支配的次数为 0,令 $X_{\text{rank}} = 1$,以此类推得到所有个体的非支配等级。选择非支配等级小的个体作为目前为止的最优解集。同一非支配等级中的个体之间不存在支配关系,即无优劣之分。拥挤距离能保证最优解集中个体的多样性和分布均匀性。在这种情况下,采用拥挤度距离进行优选排序,保留拥挤度距离大的个体,淘汰拥挤距离小的个体,最终得到帕累托最优(Pareto Optimality)解集。

3. 精英选择策略

精英选择策略主要是将群体中的优秀个体直接保留到下一代,以维持解集的多样性并提高最优帕累托解集的搜索效率。精英保留策略选取当代优秀个体且不进行交叉和变异,以确保优秀个体不受破坏并保存到下一代中,从而保证算法收敛到全局最优。

4. 算法步骤

设定算法的初始种群、交叉概率、变异概率、种群规模、进化代数分别为 p 、 p_c 、 p_m 、 N 、 g 。NSGA-II 的步骤如下。

(1) 根据模型参数随机生成 N 个满足约束条件的初始种群 p ;

(2) 对种群中的每个个体,计算其非支配性等级 X_{rank} 并将其划分为多个子集,然后计算每个个体的拥挤距离 d ;

(3) 基于非支配性等级和拥挤距离,在初始种群中选择优异父代个体 p ,并对其进行交叉和变异操作,生成子代个体群;

(4) 采用精英选择策略,在第 t 代时,如果种群中的个体 a 优于当前最优个体,则将其保留在下一代中,循环执行步骤(2)并保留目前最优的帕累托解集。

(5) 循环步骤(2),直到达到最大迭代次数 g 为止,此时算法终止并输出最终的帕累托最优解集。

四、实例分析

1. 实例计算

选择了某装配式住宅项目作为案例,为方

便计算选择以虚数单位计量。项目数据如下:项目包含 5 种构件,每种构件有 2 个批次;各个活动的工期取正态分布的均值;生产阶段、运输阶段、装配阶段的单位资源最大可用量分

别为 $R_{kp}^{\max}=7$ 、 $R_{kT}^{\max}=3$ 、 $R_{kV}^{\max}=5$,单位资源成本分别为 $C_{kp}=250$ 、 $C_{kT}=200$ 、 $C_{kV}=300$;项目最大截止工期为 $D=36$,活动工期、方差及单位资源消耗量的具体参数如表 2 所示。

表 2 活动相关参数

构件名称	<i>i</i>	<i>j</i>	P			T			V		
			$\mu(d_{ij})$	r_{ijk}	$\sigma(d_{ij})$	$\mu(d_{ij})$	r_{ijk}	$\sigma(d_{ij})$	$\mu(d_{ij})$	r_{ijk}	$\sigma(d_{ij})$
预制外墙	1	1	7	4	3	2	2	1	4	3	2
		2	7	4	2	2	2	1	3	3	3
预制内墙	2	1	6	3	2	3	2	2	3	2	4
		2	6	3	2	3	2	2	3	2	3
叠合板	3	1	6	4	3	2	2	1	5	3	2
		2	4	4	2	2	2	1	4	3	2
预制楼梯	4	1	9	2	2	1	1	2	2	2	3
		2	8	2	2	1	1	2	2	2	3
预制阳台	5	1	8	1	3	1	1	1	1	1	2
		2	7	1	1	1	1	1	1	1	2

使用 MATLAB R2021a 软件编写 NSGA-II,设置初始种群 $p=100$ 、交叉概率 $p_c=0.8$ 、变异概率 $p_m=0.1$,求解得到各个最优调度方案的鲁棒值和成本值如表 3 所示。

表 3 最优调度方案的鲁棒值和成本值汇总

调度方案	鲁棒值	成本值/ 10^4
1	2.04	8.35
2	2.00	8.33
3	1.89	8.27
4	1.82	8.21
5	1.74	8.16
6	1.70	8.09
7	1.67	8.03
8	1.59	7.97

为直观观察鲁棒值与成本值之间的关系,依据表 3 数据拟合绘制出的帕累托最优前沿趋势如图 2 所示。

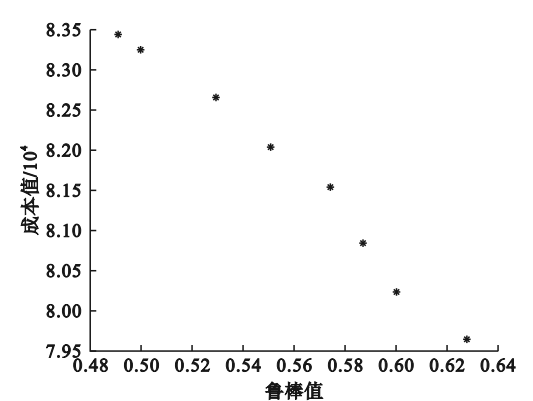


图 2 帕累托最优前沿

通过观察鲁棒值和成本值,可以发现调度方案的鲁棒值越大,项目抵抗不确定性因

素的能力越强,但也需要投入更多的成本,反之依然成立。在最大截止工期 ($D=36$) 的限制下,由于方案中缓冲时间的分布不同,导致了方案之间的鲁棒值和成本值存在一定差别。鉴于通过调整方案中时差的分配方式,可以提高项目的整体鲁棒性,或者减少项目的成本支出,因此,决策者可以根据自身实际决策需要选取合适的调度方案。

2. 敏感性分析

为分析项目最大截止工期和资源可用量对鲁棒值和成本值的影响,对模型进行敏感性分析。在保持其他参数不变的情况下,观察模型在最大截止工期和资源可用量发生变化时,帕累托最优解集中鲁棒值和成本值的变化情况。当最大截止工期 D 分别等于 36、37、38 时,对应的工期组合分别为 1、2、3,其鲁棒值和成本值的非支配解集变化情况如图 3、图 4 所示。当单位资源发生变化时,其

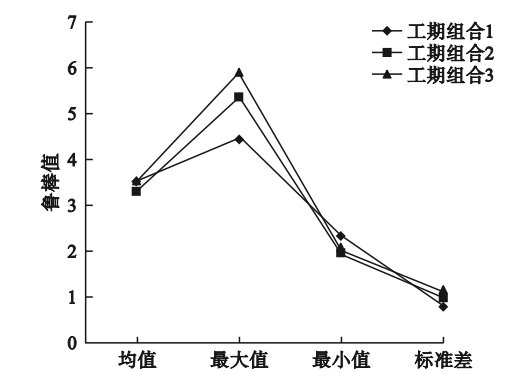


图 3 鲁棒值工期曲线

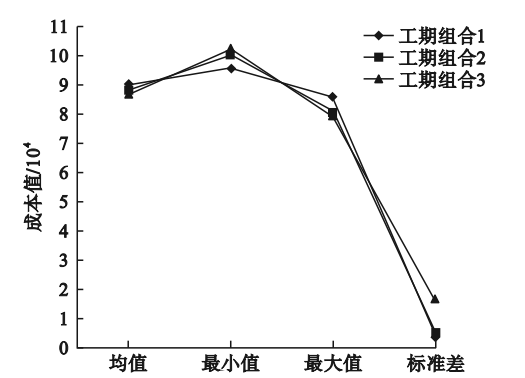


图 4 成本工期分析曲线

鲁棒值和成本值的非支配解集变化情况如图 5、图 6 所示,其中,资源组合 1 的各阶段单位资源最大可用量分别为 $R_{kp}^{\max}=7$ 、 $R_{kt}^{\max}=3$ 和 $R_{kv}^{\max}=5$;资源组合 2 和 3 在资源组合 1 的基础上每个阶段的资源最大可用量 R_k^{\max} 依次增大 1 个单位。

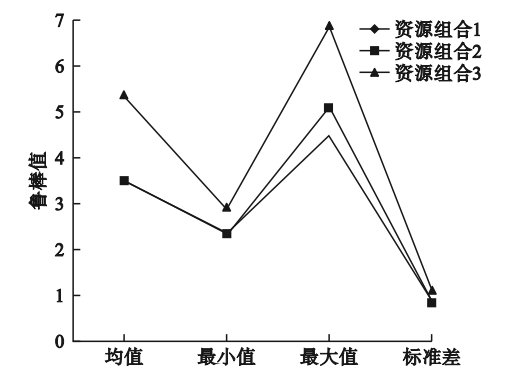


图 5 鲁棒值资源曲线

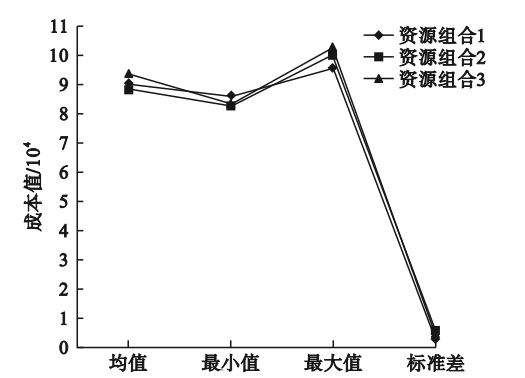


图 6 成本资源分析曲线

通过分析非支配解集鲁棒值和成本值的各项参数可以发现:当工期与资源发生变动时,鲁棒值各参数的变化较大,意味着其更加敏感,而成本值各参数的变化较小,意味着其较不敏感。由此推断:充足的资源及工期有

利于提高项目调度计划的鲁棒性。通过敏感性分析,可以更好地理解最大截止工期和资源可用量对项目鲁棒性和成本的影响,为项目决策提供参考。

五、结 语

针对装配式项目调度性质各异且在协同管理过程中易受不确定因素的干扰的问题,本研究提出了分分类分批调度策略,采用鲁棒性调度方法,在评价指标中引入了活动权重系数,量化了活动延期风险,客观地评价了调度方案的稳定性,充分发挥了装配式项目各阶段协同作业的优势。通过运用 NSGA-II 得到的帕累托最优解集,为决策者制定调度方案提供了依据。最后,通过敏感性分析进一步验证了可通过改变活动时差的不同分布状态,在提高项目鲁棒性的同时保证资源消耗成本最低,进而保证项目调度的稳定实施。

参考文献:

[1] 赵林姣,韩利红. 双碳背景下装配式立体绿化建筑的发展[J]. 绿色建筑,2023,15(1):63-65.

[2] 连静. 装配式施工项目调度多目标优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.

[3] 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.

[4] 唐小雅,崔世博,徐鹏鹏,等. 国内物流调度研究对装配式建筑构配件物流调度的启发与思考[J]. 工程管理学报,2019,33(2):25-29.

[5] 常春光,陈佳鑫. 基于灰狼优化算法的装配式预制构件生产调度优化研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2023,25(6):589-596.

[6] 尹静,孙浩,张恒熙,等. 装配式混凝土结构生产运输协同调度[J]. 科学技术与工程,2021,21(21):9029-9034.

[7] 于森,谢武,项英辉. 多模式下装配式建筑工程资源受限调度方法[J]. 科学技术与工程,2021,21(34):14749-14754.

[8] KONG L, LI H, LUO H, et al. Optimal single-machine batch scheduling for the manufacture,

- transportation and JIT assembly of precast construction with change over costs within due dates[J]. Automation in construction, 2017, 81: 34 – 43.
- [9] 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.
- [10] DEMEULEMEESTER E, HERROELEN W. Introduction to the special issue: project scheduling under uncertainty [J]. Journal of scheduling, 2007, 10(3): 151 – 152.
- [11] 何正文, 刘人境, 徐渝. 基于随机活动工期的资源约束项目鲁棒性调度优化[J]. 系统工程理论与实践, 2013, 33(3): 650 – 659.
- [12] LAMBRECHTS O, DEMEULEMEESTER E, HERROELEN W. A tabu search procedure for developing robust predictive project schedules [J]. International journal of production economics, 2008, 111(2): 493 – 508.
- [13] 张静文, 周杉, 乔传卓. 基于时差效用的双目标资源约束型鲁棒性项目调度优化[J]. 系统管理学报, 2018, 27(2): 299 – 308.
- [14] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II [J]. IEEE transactions on evolution computation, 2002, 6(2): 182 – 197.
- [15] 黄辉, 李梦想, 严永. 考虑序列设置时间的混合流水车间多目标调度研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(12): 215 – 221.

Robust Scheduling Optimization of Prefabricated Projects Based on Random Duration of Activities

YU Miao, WANG Gangli, ZHAO Yu, LU Linhan

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

Abstract: The three phases of manufacture, transportation, and assembly for assembly projects are studied as a whole, and the scheduling strategy of batch scheduling by category is proposed by considering the scheduling nature of each phase and the interlocking characteristics. Aiming at the scheduling problem of assembly project with random activity duration, a robust scheduling method is adopted to establish a robust scheduling model of integrated manufacture -transportation-assembly construction with project robustness and cost value as the optimization objectives. Based on the scheduling nature, the non-dominated genetic algorithm with elite strategy (NSGA-II) is designed to solve the problem. Finally, a real case of assembly project is selected to verify the effectiveness of the algorithm and analyze the experimental results. The results show that by changing the different distribution states of the activity time difference, the robustness of the project can be improved and the cost of resource consumption can be minimized at the same time, which provides a basis for decision makers to formulate the scheduling plan for assembly projects.

Key words: random duration of activities; prefabricated project; robust scheduling; bi-objective optimization

(责任编辑:徐聿聪 英文审校:林 昊)