

基于关键链技术的装配式鲁棒性项目调度方法

于 淼,徐 宁,马 健

(沈阳建筑大学管理学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要:装配式建筑项目相对于传统项目,其调度复杂性更高,稳定性较低。为保证装配式工程项目施工进度准时以及提高项目的鲁棒性,基于关键链技术,构建装配式集中缓冲进度计划,并且考虑了二次冲突影响;根据进度计划特点,构建鲁棒性指标进行评价,运用实证分析,验证两种缓冲进度计划优劣。结果表明:基于二次调度的装配式集中缓冲进度计划在装配式建筑工程的实施过程中稳定性更好。

关键词:装配式建筑;关键链技术;鲁棒性;集中缓冲;二次冲突

中图分类号:TU722 **文献标志码:**A

装配式建筑在实施过程中,具有生产、装配、运输3个空间并行实施的特征,相比于传统的建筑,其建造方式具有集约化、高效率、“四节一环保”的优势^[1]。但装配式建筑工程相比于传统建筑工程,其项目的调度更加的复杂,进度管理难度更高。在当下竞争激烈的市场环境中,装配式建筑项目容易受到不确定性风险因素影响,传统的进度网络技术难以应对复杂多变的环境,时常造成工期延误的局面。在面对复杂多变环境时,若装配式项目具有鲁棒性(Robust)即保障项目稳健以及抗干扰能力,则可以有效抵抗不确定性因素的干扰,保证项目准时完成。因此,对于装配式建筑工程项目鲁棒性调度计划的研究具有非常重要的意义。

装配式鲁棒性项目调度主要指装配式项目进度计划受到不确定性因素干扰时,项目可以保持稳定或者容易进行灵活调整,其本质属于资源受限项目调度问题(Resource

Constrained Project Scheduling Problem, RCPSP)的范畴。资源受限项目调度问题作为项目管理领域的一类经典问题,在装配式工程项目调度过程中,对其展开研究具有重要的作用。但是在装配式工程项目实施过程中,发现RCPSP的研究忽略了各类风险以及不确定性因素的影响,从而造成实际与计划偏离。Goldratt^[2]区别于传统进度管理方法,提出满足资源和逻辑关系约束下,项目工期最长的链路作为项目关键链的关键链方法(Critical Chain Method, CCM),在应对工程项目不确定性方面具有一定的效果。关键链技术作为一种进度管理技术,指在项目调度过程中,同时考虑工序间逻辑约束以及资源约束,其中工序间的资源约束需要考虑资源冲突即工序间对有限资源的竞争。在关键链技术中涉及到缓冲的应用,缓冲类型主要包括输入缓冲FB(Feeding Buffer)、项目缓冲PB(Project Buffer)以及资源缓冲RB

(Resource Buffer)^[3]。传统的 CCM 主要集中在调度模型的求解以及缓冲尺寸的计算两个方面。Peng 等^[4]设计差分进化算法求解关键链调度模型;刘士新等^[5]设计出一种基于启发式的关键链调度方法;Tukel 等^[6]利用资源紧度及网络复杂度求解方法,将缓冲尺寸减小;褚春超^[7]考虑资源紧度以及风险偏好等不确定性因素影响,获得缓冲尺寸将不会受到工序活动数量影响;蒋江妍等^[8]考虑信息流以及资源影响,进行缓冲尺寸计算,可以有效缩短项目工期。Bie 等^[9]研究工序活动间工期的关联性,提出一种缓冲尺寸的计算方法。近些年,一些学者在传统 CCM 的基础上,从鲁棒性的角度对 CCM 进行更深入的研究。Al-Fawzan^[10]第一个在 RCPSP 中引入鲁棒性的概念,并在资源约束条件下,研究工序之间自由时差的关联,采用时差和度量调度方案的鲁棒性;于森等^[11]针对预制构件生产重调度问题进行建模并设计求解算法,通过生产企业数据进行仿真测试,并引入评价指标进行评价,得出多目标差分进化算法优于启发式算法;Yamashita^[12]通过对资源成本最小调度问题的研究,提出度量调度方案鲁棒性采用最大遗憾值和均方差两种方式;张静文等^[13]从二次冲突困境出发,从鲁棒调度优化的角度,提出一种解决策略,保证了网络计划在实施过程中的良好稳定性;陈伟等^[14]依据装配式工程建设特点构建两种缓冲计划,并建立鲁棒性指标进行评价分析,得出两种缓冲进度计划侧重点不同各有优劣。在装配式集中缓冲进度计划中考虑二次冲突的影响,可以有效避免工序和资源冲突以及应对不确定性因素的影响,保证装配式项目进度计划的准确进行。综上所述,对考虑二次冲突的集中缓冲进度计划的研究具有重要意义。

基于此,本研究分析考虑二次冲突的集中缓冲进度计划是否具有更好的稳定性,构建装配式工程集中缓冲进度计划和基于二次调度计划的装配式工程集中缓冲进度计划,建立鲁棒性指标进行评价与分析,以获得更适配装配式建筑工程的进度计划,提高项目

计划的鲁棒性。

一、问题假设及模型构建

1. 问题假设

(1)物流空间满足生产及装配空间需求
在装配式建筑项目进行建设过程中,项目活动涉及生产、物流以及装配 3 个空间。首先,生产空间根据装配式项目需求,进行装配式建筑预制构配件的生产。其次,在生产空间结束装配式预制构配件生产后,将装配式预制构配件通过物流运输运至装配现场。最后,在装配现场将生产空间提供的装配式建筑预制构配件进行组合安装。笔者假设满足各空间之间的生产建设要求,对生产及装配空间中工序进度计划的实施展开研究。

(2)工序逻辑关系的设定

根据装配式建筑项目的活动特点,将装配式建筑项目活动工序之间的逻辑关系主要划分为四种类型,即:S-S (Start-Start)、S-F (Start-Finish)、F-S (Finish-Start)、F-F (Finish-Finish)。笔者在进行装配式鲁棒性项目调度研究过程中,主要对生产和装配空间的进度计划展开研究,因此,物流空间产生的时间不进行单独计算,而是将其与生产空间产生的时间合并计算。对于活动工序间的逻辑关系,则采用制定进度计划常用的 F-S 逻辑关系。为避免工序时间的分散,假定工序活动开始后不可停止,面对突发情况,可将其分解为多个工序活动进行。

(3)资源冲突

资源作为装配式鲁棒性项目调度研究的重要部分,需要对装配式建筑项目资源调度作出严格要求,装配式建筑项目涉及的所有活动工序的资源用量不允许超过资源限量,并规定项目中不同工序活动的矛盾冲突只存在于一个空间内,并根据装配式建设特点假定不同空间资源不存在被占有问题,而生产空间的产品可以通过资源的形式向装配空间提供,并对工序间的先后逻辑关系进行严格控制^[15]。

2. 装配式模型鲁棒性构建

基于以上假设,在资源约束下建立鲁棒

性装配式模型,如下所示:

s. t. $f_j - f_i \geq D(j), (i, j) \in E$ (1)

$\sum_{i \in A(t)} r_{ik} \leq R_k, k = 1, 2, \cdots, K$ (2)

目标函数为项目总工期最小化,式中: i, j 为项目工序的编号; $D(j)$ 为项目工序 j 的工期; f_i, f_j 分别为完成工序 i 和工序 j 的时间; k 为资源编号,总数用 K 表示; r_{ik} 为项目工序 i 在生产过程中对编号为 k 的资源需求量; R_k 为资源 k 的最大可用量,即资源限量; E 为所有项目工序活动中满足 $F-S$ 逻辑关系的工序活动组成的集合; $A(t)$ 为 t 时刻所有项目活动中正在进行的工序活动组成的集合。

二、装配式建筑工程进度计划的制定

结合关键链技术制定装配式建筑工程集中进度计划,并且在此基础上提出考虑二次冲突困境进度计划的启发式解决策略。

1. 集中缓冲进度计划的确立

缓冲作为装配式鲁棒性项目调度的关键,缓冲尺寸是否合理决定了装配式鲁棒性项目调度的准确性,对于缓冲尺寸的确定方法采用剪切粘贴法,估计出每个活动所需要的时间并剪去其中的安全时间再相加,如果是属于关键链上的活动,则取其剪下来的安全时间和值的 30% 作为项目缓冲区尺寸的大小,如果是属于非关键链上的活动,则取其和值的一半作为输入缓冲区尺寸的大小,如下所示:

$PB = 30\% \sum_{i=1}^n \Delta D_i$ (3)

$FB = 50\% \sum_{i=1}^n \Delta D_i$ (4)

式中: FB 为输入缓冲尺寸; PB 为项目缓冲的尺寸; n 为输入缓冲/项目缓冲所在非关键链/关键链上工序活动的数目; ΔD_i 为保证非关键链/关键链上活动安全时间。

2. 基于二次调度的集中缓冲进度计划的确立

基于传统关键链技术所获得的集中缓冲进度计划并未考虑插入缓冲后所带来的二次冲突。本文依据集中缓冲进度计划,考虑插入缓冲后所带来的二次冲突,构建基于二次调度的集中缓冲进度计划,提出解决二次冲

突的一种启发式解决策略^[16]:

(1)以开始时间为起点,根据时刻点发生的先后顺序依次插入 FB ;若工序活动间发生冲突,仅处理当前 FB 插入点至后续 FB 插入点之间的冲突。

(2)若插入 FB 时,引起工序活动间发生冲突(涉及关键活动以及非关键活动),此时需保证关键活动按计划进行,通过后移非关键活动解决冲突,并在相关联的 FB 中减去相应的后移量。

(3)若插入 FB 时,仅造成后续关键活动之间发生冲突,此时区别于上述情况,需要将后续关键活动的开始时间后移,并在关键链末端 FB 中减去后移关键活动的时间量;若 FB 完全消耗,关键活动继续后移,此时导致项目工期的延长。后移工序活动发生以上冲突情况,采用相应策略进行处理。

三、鲁棒性评价

通过以上分析基于二次调度的集中缓冲进度计划相对于集中缓冲进度计划更好的考虑了插入 FB 后对活动所产生的二次冲突的影响,对于进度计划的安排考虑得更全面。

由于集中缓冲调度计划不考虑插入缓冲所带来的资源冲突,因此其大致和基准调度计划 S_1 一致,而基于二次调度的集中缓冲进度计划通过采用启发式协调策略,实现两种调度计划偏离程度最小化。对于两种调度计划的区别,即是否考虑缓冲所带来的资源冲突,一个重要的体现是对于缓冲的利用程度,因此基于这一点,针对两类缓冲进度计划,提出鲁棒性指标进行评价分析,如下所示:

$$R = \frac{\sum_{m=1}^M FB_{ij}^m - \sum_{m=1}^M FB_{ij}^{m'}}{f_j'} + \frac{(f_j' - f_j)}{\sum_{j \in CC} d_j},$$
 (5)

$$(f_j' - f_j) \leq PB$$

式中: R 为进度计划所对应的鲁棒性指标; m 为输入缓冲编号, $m = 1, 2, \cdots, M, M$ 表示输入缓冲总数; f_j 为基准调度计划的项目工期; f_j' 为经过二次调度后的项目工期; FB_{ij}^m 为未进行二次调度的输入缓冲大小; $FB_{ij}^{m'}$ 为进行二次

调度以后输入缓冲的大小; d_j 为工序 j 的工期; CC 为关键链。要使项目缓冲发挥作用,基准调度计划与二次调度计划的工期差异应不大于项目缓冲 PB 。

四、案例分析

选取某一装配式建筑项目进行实证分析,该项目的构配件类型主要有 4 种,项目中涉及的工序活动有 12 个,工序 13 表示项目完成,在该项目中主要用到了两种资源,分别为 R_1 、 R_2 ,对应的资源限量为 1、3,其对应的网络计划如图 1 所示。

其中,节点内的数字表示节点编号,上方括号内第一个数字表示活动工期,第二个数字表示活动消耗资源;下方括号内第一个部分表示活动空间, A 表示生产空间, P 表示装配空间,第二个数字表示项目中构配件的种类编号。

1. 基准进度计划

针对上述装配式建筑项目,利用分支定界法进行求解,获得该项目的基准进度计划(见图 2)。在装配式建筑项目基准进度计划的基础上,以项目工期不发生变化为前提,根据资源和逻辑约束从后向前依次移动工序,直至所有工序都不能进行移动,相对于基准进度计划,位置未发生变化的工序活动(即关键活动)组成关键链,故本项目的关键链为:1-3-6-11-10-12,非关键链为:5-10、5-11、7-11、2-4-10、8、9(见图 3)。

2. 缓冲进度计划

利用上述方法获得装配式建筑项目基准进度计划后,通过式(4)、(5)计算可得 PB 取 10, $FB1$ 取 3、 $FB2$ 取 4、 $FB3$ 取 4、 $FB4$ 取 4、 $FB5$ 取 3,生成集中缓冲进度计划(见图 4)。由于装配式建筑项目基准调度计划存在多条非关键链,故在该项目中需要插入多

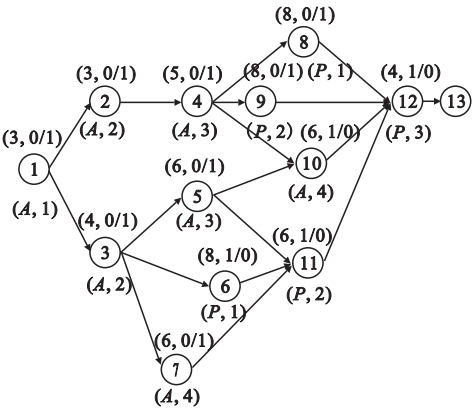


图 1 项目网络计划

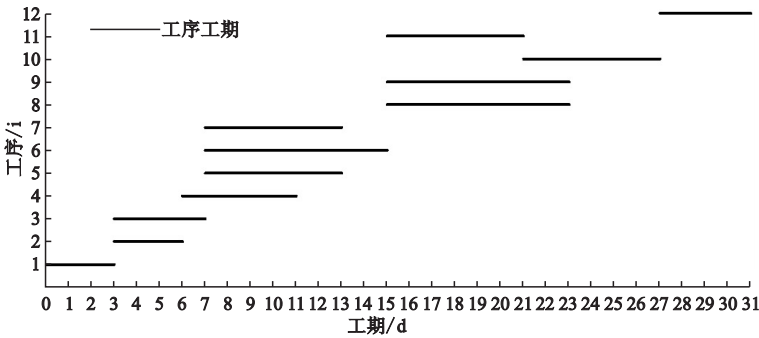


图 2 基准进度计划

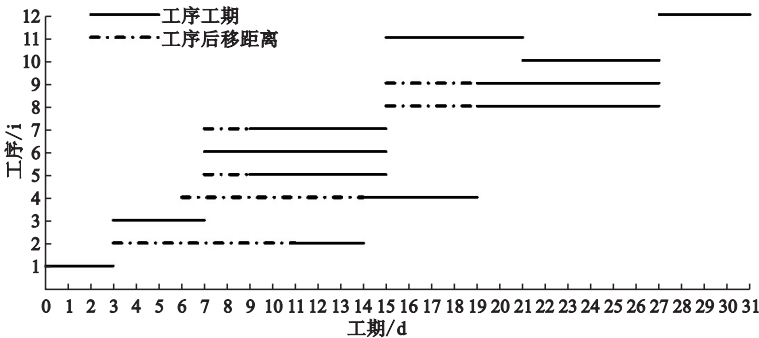


图 3 后移进度计划

个输入缓冲,因此,此时需要考虑在装配式建筑项目基准进度计划中插入多个 FB 引起的多次二次冲突情况(见图5)。其中 f_i 为装配式建筑项目中活动 i 的完成时间, ff_i 为装配式建筑项目中活动 i 本身拥有的自由时差。由图5可知,插入缓冲 $FB2$ 后,其尺寸大于非关键链所具有的自由时差,因此与后续非

关键活动8和非关键活动9产生冲突,此时发生冲突的区域为 $(f_4 + ff_4, f_4 + FB2)$,二次冲突将会影响 $FB2$ 的紧后非关键工作8和9及其紧后工作;同理,插入输入缓冲 $FB1$ 后, $FB1$ 的尺寸大小超过了其自身的自由时差的大小,因此与紧后关键工作10发生二次冲突,此时发生冲突的区域为 $(f_5 + ff_5, f_5 + FB1)$ 。

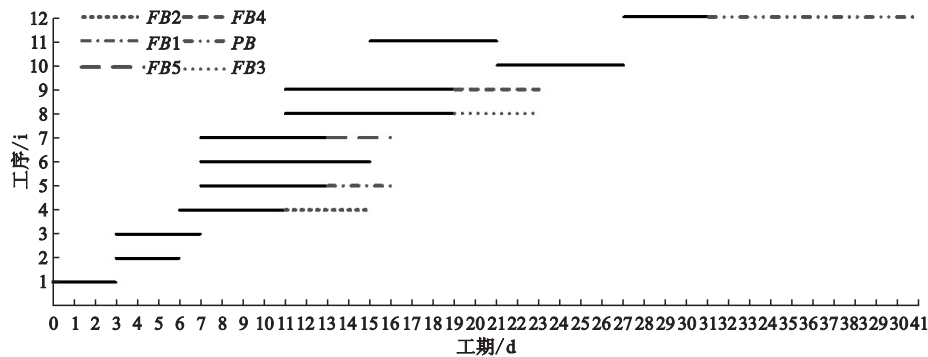


图4 集中缓冲进度

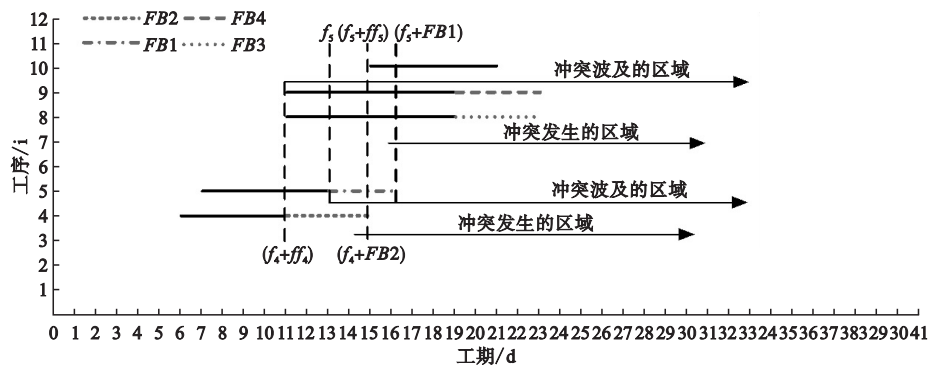


图5 插入多个 FB 引起二次冲突

针对二次冲突,运用启发式协调策略解决二次冲突带来的影响,具体步骤如下:

第一步:根据装配式建筑项目缓冲插入时刻点的大小,从小到大依次插入 FB ,判断插入缓冲的情形符合以下哪一种。

情形一:在装配式鲁棒性项目调度过程中,若插入的缓冲尺寸小于非关键工作的自由时差的大小即: $FB_i \leq ff_i$,此时不会引起装配式建筑项目中二次冲突的发生,直接转入下一步。

情形二:判断 t 时刻装配式建筑项目发生冲突的时段 $(f_i + ff_i, f_i + FB)$ 内所进行的工序活动是否满足资源限制,即 $\sum_{i \in A(t)} r_{ik} \leq R_k$, $k = 1, 2, \dots, K$ 。若满足限制条件,则插入 FB

后不会造成二次冲突,直接进入下一步。

情形三:当引起装配式建筑项目中活动之间发生二次冲突时,此时需要对装配式建筑项目中当前插入缓冲位置至下一个缓冲插入位置之间的活动进行调整,来消除由于缓冲的插入所造成的冲突。具体的调整措施为:首先,保证装配式建筑项目的关键活动按计划开始,后移装配式建筑项目中非关键活动来解决活动之间二次冲突,后移量为 $(FB - ff_i)$,在后移非关键活动过程中,若存在与后移非关键活动紧密关联的 FB 时,此时需要将缓冲尺寸减少,缓冲尺寸减少量为 $(FB - ff_i)$;若需要将关键工作后移来解决工序间二次冲突,此时需将插入缓冲后,引起工序冲突时刻点之后的所有相关活动后移。由

于 PB 主要用于吸收关键活动的拖延,因此 PB 消耗量为 $(FB - ff_i)$,若 PB 完全消耗,关键活动继续后移,此时将导致项目工期的延长。

根据分析判断出缓冲 $FB1$ 、 $FB2$ 、满足情形三。在装配式建筑项目的基准进度计划中插入 $FB2$ 后,需要将活动 8 和 9 及其后续活动整体后移,为避免移动后的活动 8 和 9 对工期产生影响,此时 $FB3$ 、 $FB4$ 、全部消耗;插入 $FB1$ 后,需要将关键活动 10 及其后续活动整体后移一个单位,由于此时关键活动后移,故需要消耗项目缓冲,消耗的大小为 1 个单位。因为 $FB3$ 、 $FB4$ 、 $FB5$ 满足情形一,故

直接转入下一步。
第二步:插入 FB 后,将 FB 进行更新,并重新确定后续工序活动的开始时间、完成时间、后续 FB 的尺寸大小以及 PB 的尺寸大小和项目的工期。 $FB3$ 、 $FB4$ 消耗后为 0, PB 消耗后为 9。

第三步:判断所有的 FB 是否都已经考虑,若没有则返回第一步;反之,则进入下一步,所有 FB 都已经考虑,故进入下一步。

第四步:输出插入 FB 后考虑二次冲突的基于二次调度的集中缓冲进度计划(见图 6)。

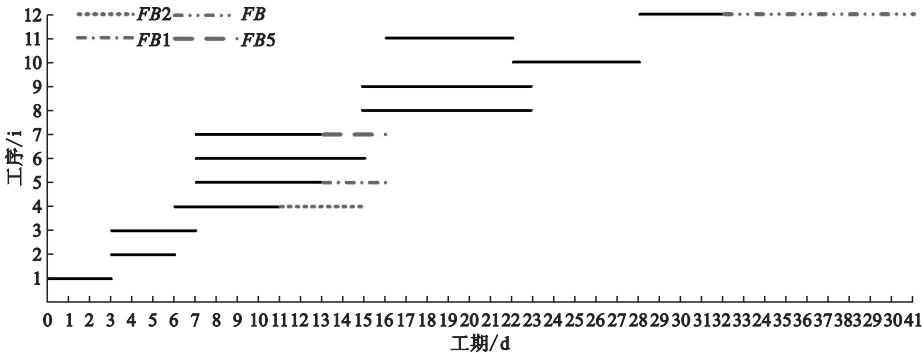


图 6 基于二次调度的集中缓冲进度计划

3. 鲁棒性指标分析

根据式(6)可以得到集中缓冲进度计划和基于二次调度的集中缓冲进度计划的鲁棒性大小分别为 0 与 0.306,基于二次调度的集中缓冲进度计划相对于集中缓冲进度计划,基于二次调度的集中缓冲进度计划对于缓冲的利用程度更高,在装配式建筑预制构配件生产以及现场的装配过程中,可以使缓冲在装配式建筑工程项目调度过程中最大限度地发挥作用,保证装配式建筑工程项目正常完成。

五、结 语

根据装配式建筑的建设特点以及关键链技术特征,构建装配式建筑工程集中缓冲进度计划,并进一步考虑关键链技术应用过程中二次冲突带来的影响,构建基于二次调度的装配式建筑工程集中缓冲进度计划;基于两类缓冲进度计划的特点,建立鲁棒性指标进行评价分析,通过实例进一步分析验证,结果表明:在装配式建筑项目中的现场装配阶

段,采用基于二次调度的装配式建筑工程集中缓冲进度计划,一方面可以避免由于未考虑二次冲突所造成的现场活动工序之间的冲突,减少不必要的损失以及对项目工期造成影响;另一方面,在装配式建筑工程的构件生产以及现场的装配过程中,可以更充分的利用缓冲,最大限度地发挥缓冲的作用,提高缓冲的利用率,以应对各类风险因素,保证工程项目正常完成。

参考文献:

[1] 陈伟,容思思. 装配式住宅项目多空间鲁棒性调度研究[J]. 建筑经济,2017,38(1):69-73.
[2] GOLDRATT E M. Critical chain [M]. Great Barrington:north river press,1997.
[3] 张静文,李若楠. 关键链项目调度方法研究评述综述与评论[J]. 控制与决策,2013(9):1281-1287.
[4] PENG W, HUANG M. A critical chain project scheduling method based on a differential

- evolution algorithm[J]. International journal of production research, 2015, 52(13): 3940 – 3949.
- [5] 刘士新,宋健海,唐加福.资源受限项目调度中缓冲区的设定方法[J].系统工程学报, 2006, 21(4): 381 – 386.
- [6] TUKEL O I, ROM W O, EKSIÖGLU S D. A investigation of buffer sizing techniques in critical chain scheduling[J]. European journal of operational research, 2006, 172(2): 401 – 416.
- [7] 褚春超.缓冲估计与关键链项目管理[J].计算机集成制造系统, 2008, 14(5): 1029 – 1035.
- [8] 蒋红妍,彭颖,谢雪海.基于信息和多资源约束的关键链缓冲区大小计算方法[J].土木工程与管理学报, 2019, 36(1): 34 – 41.
- [9] BIE L, CUI N, ZHANG X. Buffer sizing approach with dependence assumption between activities in chain scheduling[J]. International journal of production research, 2012, 50(24): 7343 – 7356.
- [10] AL-FAWZAN M, HAOUARI M. A bi-objective model for robust resource-constrained project scheduling [J]. International journal of production economics, 2005, 96(2): 175 – 187.
- [11] 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.
- [12] YAMASHITA D S, ARMENTANO V A, LAGUNA M. Robust optimization models for project scheduling with resource availability cost [J]. Journal of scheduling, 2006, 10(1): 67 – 76.
- [13] 张静文,乔传卓,刘耕涛.基于鲁棒性的关键链二次资源冲突消除策略[J].管理科学学报, 2017, 20(3): 106 – 119.
- [14] 陈伟,余杨清,周曼,等.装配式建筑进度计划缓冲及鲁棒性研究[J].建筑经济, 2018, 39(2): 33 – 39.
- [15] 陈勇强,宋莹,龚辰.基于分支定界法的多资源约束下项目进度规划[J].北京理工大学学报(社会科学版), 2009, 11(4): 41 – 45.
- [16] 张静文,刘耕涛.基于鲁棒性目标的关键链项目调度优化[J].系统工程学报, 2015, 30(2): 135 – 144.

Robustness Scheduling Method of Prefabricated Project Based on Key Chain Technology

YU Miao, XU Ning, MA Jian

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

Abstract: Compared with traditional projects, prefabricated construction projects have higher scheduling complexity and poor stability. In order to ensure the construction schedule of prefabricated projects on time and improve the robustness, the key chain technology was used to build the centralized buffer schedule and the impact of secondary conflict was considered; the robustness index was evaluated according to the characteristics of the schedule, and the advantage of both buffer schedules was verified by empirical analysis. The results show that the prefabricated centralized buffer schedule based on secondary scheduling ensures better stability in the implementation of prefabricated construction projects.

Key words: prefabricated building; key chain technology; robustness; centralized buffer; secondary conflict

(责任编辑:王丽娜 英文审校:林 昊)