DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2026.080
开放科学(资源服务)标识码 OSID:

面向多工序耦合与动态扰动的模块墙生产云-边协同重调度方法

张新永[1],王飞[2],左庆辉[2],刘雨欣[3a],乔文涛[3a,3b]
(1. 太行城乡建设集团有限公司,石家庄 050222; 2. 河北交投建筑科技有限公司,石家庄 050800;
3. 石家庄铁道大学 a. 土木工程学院; b. 道路与铁道工程安全保障省部共建教育部重点实验室,
石家庄 050043)

摘　要:针对模块墙预制构件生产过程中多工序耦合与动态扰动频发的问题,提出一种云-边协同调度方法。构建云端全局排产模型,并采用模拟退火算法生成基准排产方案,引入扰动严重度判定模型,实现对生产异常的量化评估与分级响应。对于小扰动,设计了由边端执行局部重排的策略以吸收扰动影响;对于超出阈值的扰动,则触发云端全局重调度,对未完成工序进行优化调整,在此基础上构建调度仿真实验,在不同扰动场景下对该方法的性能进行验证。结果表明:相较于右移重调度方法,提出的云端全局重调度能有效缩短系统总工期;在不改变关键路径的前提下,边端局部重排能维持生产节拍稳定;开发了模块墙智慧工厂调度管理平台,实现了调度方法的工程化应用。

关键词:云-边协同调度;柔性流水车间调度;扰动响应;重调度;装配式建筑生产
中图分类号:TU741.2　　**文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-10

Cloud-edge collaborative rescheduling method for module wall production under multi-process coupling and dynamic disturbances

ZHANG Xinyong[1], WANG Fei[2], ZUO Qinghui[2], LIU Yuxin[3a], QIAO Wentao[3a,3b]
(1. Taihang Urban and Rural Construction Group Co., Ltd., Shijiazhuang 050222, P. R. China; 2. Hebei Transportation Investment Construction Technology Co., Ltd., Shijiazhuang 050800, P. R. China; 3a. School of Civil Engineering; 3b. Key Laboratory of Roads and Railway Engineering Safety Control Co-founded by Province and Ministry, Ministry of Education, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, P. R. China)

Abstract: Aiming at the problems of multi-process coupling and frequent dynamic disturbances in the production process of module wall prefabricated components, this paper proposed a cloud-edge collaborative scheduling method. First, this paper constructed a cloud global scheduling model and used a simulated annealing algorithm to generate a benchmark scheduling scheme. Then, this paper introduced a disturbance severity judgment model

收稿日期:2026-05-28
基金项目:河北省杰出青年科学基金(E2022210084);河北交投建筑科技有限公司科技研发项目(2025-JZ-01)
作者简介:张新永(1975-),男,正高级工程师,主要从事交通工程研究,E-mail:709394377@qq.com。
乔文涛(通信作者),男,教授,博士生导师,E-mail:qwt@stdu.edu.cn。
Received: 2026-05-28
Foundation items: Natural Science Foundation of Hebei Province for Distinguished Young Scholars (No. E2022210084); Scientific and Technological R&D Project of Hebei Jiaotou Construction Technology Co., Ltd. (No. 2025-JZ-01)
Author brief: ZHANG Xinyong (1975-), senior engineer, main research interest: traffic engineering, E-mail: 709394377@qq.com. QIAO Wentao (corresponding author), professor, doctorial supervisor, E-mail: qwt@stdu.edu.cn.

to achieve quantitative evaluation and hierarchical response to production anomalies. For small disturbances, this paper designed a strategy in which local rearrangement is performed at the edge to absorb the disturbance impact. For disturbances exceeding the threshold, a cloud global rescheduling is triggered to optimize and adjust the unfinished processes. On this basis, this paper constructed scheduling simulation experiments to verify the performance of the proposed method under different disturbance scenarios. The results show that, compared with the right-shift rescheduling method, the cloud global rescheduling proposed in this paper effectively shortened the total project duration, while the edge local rearrangement maintained the stability of the production beat without changing the critical path. Finally, this paper developed a module wall intelligent factory scheduling management platform, realizing the engineering application of the proposed scheduling method.

Keywords: cloud-edge collaborative scheduling; flexible flow shop scheduling; disturbance response; rescheduling; prefabricated construction production

在“双碳”目标与建筑工业化转型的背景下,传统建筑业因效率低、资源消耗高等问题已难以满足高质量发展的要求,因此,以装配式建筑为代表的“工厂预制-现场装配”建造模式得到快速发展,并逐渐成为行业转型升级的重要路径[1]。随着装配式建筑的发展,预制构件生产逐渐成为影响工程质量与生产效率的关键环节。相较于传统构件,模块化构件生产涉及多类型作业与多专业工序,过程复杂,在多项目并行及资源约束条件下易产生拥堵,从而制约整体生产效率[2-3]。

针对预制构件生产调度问题,学者已开展了大量研究,主要集中在调度模型构建与优化算法设计两个方面。在单目标优化方面,Yuan等[4]和Liu等[5]分别基于协同进化算法及启发式方法,以实现工期最小化为目标完成了调度优化;在多目标优化方面,刘冠权等[6]结合遗传算法与模拟退火算法,构建了兼顾工期与成本的调度模型;赵辉[7]基于NSGA-Ⅲ算法,建立了涵盖质量、能耗、时间与成本的多目标优化模型。随着智能制造技术的发展,数字孪生、数据驱动建模及自动化决策方法逐步应用于生产调度,推动调度系统向动态化与智能化方向演进[8-9]。在工业4.0背景下,智能工厂与数据驱动决策已成为重要发展方向,为复杂生产调度提供了新的技术支撑[10]。随着云计算与信息物理系统的发展,基于云端的全局优化调度方法不断完善[11],并逐步融合实时数据采集与自适应决策机制,以实现对生产扰动的动态响应与调整[12]。在此基础上,已有研究从重调度策略与方法框架角度进行了系统梳理[13],并对动态调度问题及其多类求解方法进行了综述[14];同时,针对柔性作业车间问题的混合优化算法进一步提升了复杂调度问题的求解性能[15]。上述研究为动态调度与扰动响应机制的构建奠定了重要理论基础。

然而,现有研究多以集中式调度为主,侧重于全局优化,对生产过程中的动态扰动响应及分层调度机制考虑不足;同时,对装配式构件生产中复杂约束与动态特征的针对性建模仍不充分,导致方法在实际生产环境中的适用性有待提升。因此,在复杂动态环境下,有必要构建融合全局优化与局部响应的分层协同调度方法,并引入面向扰动的动态调整机制。笔者以超低能耗模块墙装配式建筑为研究对象,面向多产线协同与扰动频发的生产场景,构建生产调度形式化模型,对生产任务、工序顺序以及设备与人工资源之间的约束关系进行统一表征。在此基础上,引入云-边协同的分层调度机制:在云端实现全局排产优化,在边端构建面向执行层的局部重排方法,以兼顾全局优化目标与现场实时响应需求。同时,针对设备故障与人员缺位等典型扰动,构建扰动严重度判定模型,划分边端局部重排与云端重调度的触发条件,实现生产调度的分级响应与动态调整。最后,通过仿真实验与平台实现,对所提方法的有效性与工程可行性进行验证。

1 模块墙生产调度问题描述与协同排产框架构建

1.1 模块墙构造

模块墙作为装配式建筑体系中的基本功能单元,属于轻钢混凝土框架承重结构,由多肢拼合冷弯薄壁型钢混凝土组合柱、H型钢梁及预制内外叶墙板等构件组成,形成“框架-围护一体化”的模块化结构体系,如图1所示。该体系由模块化保温结构一体化预制组合墙体和预制组合楼板共同构成,轻钢混凝土框架结构是其主要承重骨架。工程中模块墙通常按3 m×3 m标准模块组织,并结合内、外叶墙厚度不应小于50 mm的构造要求进行粗略估算,单片重量约为2 t量级,特殊尺寸则依据施工图

纸预制。预制内外叶墙板内设钢丝网片，钢丝网片在墙板预制过程中预埋于板内，并通过预留孔洞穿设玻璃纤维棒，玻璃纤维棒与中间石墨聚苯板可靠连接，使内外叶墙板与保温层形成一体化构造。各类构件在工厂内预制完成，并通过螺栓连接等方式实现现场装配，体现出构件标准化、连接装配化的建造特征。该结构体系涉及多类型构件及复杂节点连接形式，对构件加工精度及装配匹配关系要求较高。构件之间通过刚性连接形成整体受力体系，围护结构与主体结构协同工作，具有构件类型多、连接关系复杂及整体协同受力等特点。上述构造特征为后续生产组织与调度建模提供了基础约束条件。

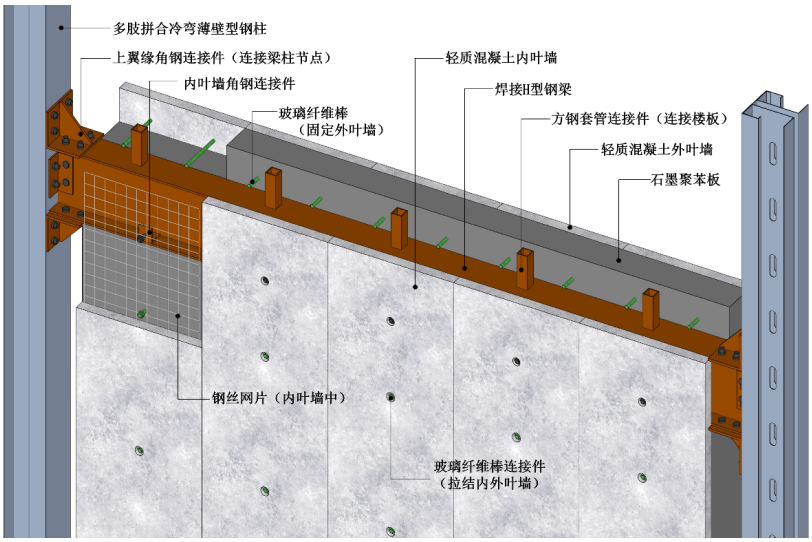


图 1　模块化的保温结构一体化预制组合墙体

Fig.1　Composition of prefabricated composite wall with integrated thermal insulation structure

1.2　模块墙生产系统特征

模块墙构件采用工厂预制与现场装配相结合的建造方式，其生产过程由钢构件加工、墙板生产及装配集成等子过程构成，整体呈现“多生产线并行加工-装配工序汇合”的离散制造特征。为直观表示各子流程之间的并行关系及装配阶段的汇合约束，构建模块墙加工流程及装配逻辑框架，如图 2 所示。

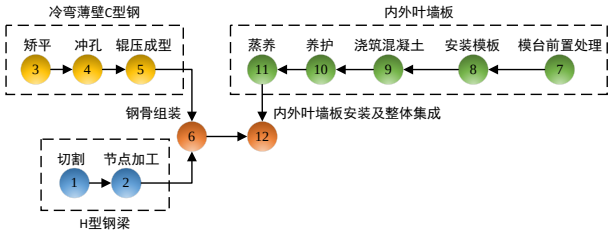


图 2　模块墙加工流程及装配逻辑框架

Fig.2　Processing flow and assembly logical framework of modular wall

生产系统同时受到设备、人工及原材料等多重资源约束，不同工序在资源占用与可中断性方面存在显著差异，其中养护等关键工序对生产节拍具有主导约束作用。在多订单并行与扰动频发的生产环境下，构件在多产线间交错流转，易引发资源竞争与局部瓶颈，使调度问题表现出多生产线协同、复杂约束耦合及动态不确定性显著等特征，对调度方法的全局优化与动态响应能力提出更高要求。

1.3　调度问题描述与建模

基于上述生产系统特征，模块墙生产调度问题可抽象为柔性流水车间调度问题（Flexible Flow Shop Scheduling Problem，FFSP）。该系统由多条并行生产线及装配工序构成，各生产任务需按照既定工艺顺序依次完成多个加工阶段，同时受到设备资源、人工配置及作业时段等多重约束。

在该调度问题中，需要确定各任务在不同工序上的加工顺序及资源分配方式，在此基础上优化系统整体性能，如降低完工时间、提高资源利用率等。然而，由于模块墙生产过程包含不可中断工序以及装配阶段同步约束，不同生产线之间的节拍匹配成为影响调度结果的关键因素。

此外，在实际生产过程中设备故障、工序延误及订单变更等扰动具有随机性与突发性，使初始排产方案在执行过程中易发生偏离。传统以集中优化为主的静态调度方法难以同时兼顾全局优化与实时响应需求，易导致频繁重调度或局部调整失效。

为实现统一建模与调度求解，以模块墙生产流程为对象进行离散化处理，将订单按照工艺流程划分为具有顺序约束的加工工序，并对生产线能力、

资源配置及加工时间等信息进行统一编码。其中，加工时间作为调度模型输入参数，依据工艺流程特征及生产过程随机性进行仿真构建，用于描述不同订单间加工节拍差异。在此基础上，建立面向多生产线协同与动态扰动响应的调度模型，为后续云端全局排产及边端动态重调度算法设计提供数据基础。模块墙生产过程中各生产线承担的工序范围及对应工艺关系如表1所示。

表1 工序编号与生产工艺对应关系

Table 1 Correspondence between process number and production technology

生产线类型	工序编号范围	典型工序
H型钢生产线	1～4	切割、节点加工
冷弯薄壁C型钢生产线	5～10	矫平、冲孔、辊压成型
混凝土墙板生产线	11～25	模台前置处理、模板安装、混凝土浇筑、养护、蒸养
组装工序	26～27	钢骨组装、内外叶墙板安装及整体集成

1.4 云-边协同生产调度机制

针对上述复杂动态调度问题，构建云-边协同的分层生产调度机制，以实现全局优化与现场动态响应能力的协同统一。该机制由云端全局调度层与边端执行调度层构成，通过分层决策与信息交互实现调度过程的协同优化，其整体结构如图3所示。

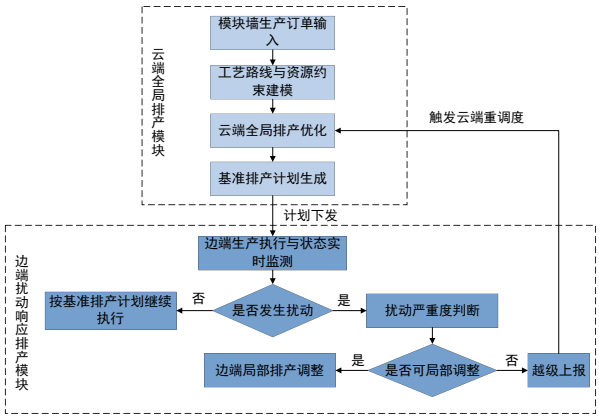


图3 云-边协同生产调度机制示意图

Fig.3 Schematic diagram of cloud-edge collaborative production scheduling mechanism

云端调度层面向全局生产系统运行，综合订单需求、工艺约束及资源配置等信息，对多生产线任务进行统一优化，生成基准排产方案，并为生产执行提供统一的时间基准与资源分配策略。

边端调度层部署于生产现场，面向生产执行过程中的动态变化，在不改变云端排产整体结构的前提下，针对设备异常、工序延误等局部扰动进行快速响应与局部调整，以降低扰动对关键路径及系统节拍的影响。

为实现两层调度的有效协同，引入基于扰动影响程度的分级决策机制：当扰动处于局部可调范围内时，由边端执行局部重排；当扰动超出边端调节能力时，则触发云端重调度。通过该机制，形成“边端快速响应-云端全局优化”的动态协同调度模式。

该调度机制在保证全局优化目标的同时提升了系统对动态扰动的适应能力，为后续调度模型构建与算法设计提供了体系基础。

2 云-边协同排产方法

2.1 云端全局排产模型与算法

1)模型参数与符号定义

为统一描述调度模型，对主要符号定义如下：设待生产模块墙的集合为$M=\{M_1,M_2\cdots M_n\}$，设某生产线的工序集合为$O=\{O_1,O_2\cdots O_n\}$。根据模块墙构成，将工序划分为4个构件族，记作$X\in\{H,C,Q,Z\}$，分别对应H型钢梁加工、冷弯薄壁C型钢加工、墙板加工及装配工序。P表示全部工序集合，P_{ij}^X表示第i个模块墙在构件类型X下的第j道。设S_{ij}^X与C_{ij}^X分别表示工序开始与完成时间，$d_{p^{(s)}}$表示可中断工序第s个加工段的加工时长，d_p表示不可中断工序p总加工时长，a_r和b_r表示第r个工作时段的开始和结束时刻。决策变量$y_{ijm}\in\{0,1\}$表示工序是否分配至设备k。S_p与C_p分别表示不可中断工序p的开始与完成时间；$S_{p^{(s)}}$和$C_{p^{(s)}}$可中断工序第s段的开始与完成时间。P_I,P_N,P_U分别表示可中断工序集合，不可中断工序集合，不可中断且可持续运行工序集合。此外，$C_{\max}$表示所有工序中的最晚完工时间。

2)优化目标与约束条件

调度优化目标可表示为

$$\begin{aligned}&\min C_{\max}\\&C_{\max}\geqslant C_p,\forall p\in P\end{aligned}\tag{1}$$

模型约束条件为

$$\sum_{Q_k\in M_j^X} y_{ijk}^X=1,\ y_{ijk}^X\in\{0,1\}\tag{2}$$

$$S_{i,j+1}^X\geqslant C_{ij}^X,\forall X,i,j=1,\ldots,J_X-1\tag{3}$$

$$S_i^{Z_2}\geqslant C_i^{Z_1},\forall i\tag{4}$$

$$S_{ij}^X\geqslant C_{jj'}^X \text{ 或 } S_{jj'}^X\geqslant C_{ij}^X\tag{5}$$

$$\begin{aligned}&\text{当}p\in P_U\text{时},\\&C_P=S_p+d_p,a_r\leqslant S_p\leqslant b_r\end{aligned}\tag{6}$$

$$\begin{aligned}&当p\in P_N时，\\&C_p=S_p+d_p,a_r\leqslant S_p\leqslant b_r\end{aligned}\tag{7}$$

$$\begin{aligned}&当p\in P_I时，\\&C_{p^{(s)}}=S_{p^{(s)}}+d_{p^{(s)}},d_{p^{(s)}}>0\\&S_{p^{(s)}}\geqslant\max\left(C_{p^{(s)}},a_r\right)\\&S_{p^{(s+1)}}=a_{(r+1)}\end{aligned}\tag{8}$$

上述约束系统刻画了模块墙生产调度过程中的主要约束关系：式(2)为工序唯一指派约束，确保每道工序仅分配至一台可选设备；式(3)描述构件内部工序的工艺顺序关系；式(4)表示装配阶段的前置依赖约束；式(5)为设备时间互斥约束，保证同一设备在任一时刻仅加工一道工序。在此基础上，结合工序加工特性，式(6)描述可持续运行的不可中断工序，其加工过程不受作业时段边界限制；式(7)为不可中断工序约束，要求工序在单一作业时段内连续完成；式(8)刻画可中断工序的分段加工机制，即加工过程在工作时段内执行、跨时段时暂停，并于下一时段继续完成。

3)云端全局排产算法

针对该问题规模大、约束复杂的特点，采用模拟退火算法进行求解。通过构建基于工序优先级序列的编码方式，如图4所示，将调度方案表示为一维序列结构，并结合启发式解码策略生成具体时间排程。

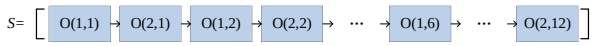


图4　基于工序序列的编码示意图

Fig.4　Schematic diagram of coding based on process sequence

在搜索过程中，通过交换与插入等邻域操作生成候选解，如图5所示，并依据Metropolis准则进行解的接受与更新，从而在全局范围内获得近优调度方案。最终，云端输出基准排产结果，为边端调度提供统一的时间基准与资源配置依据。

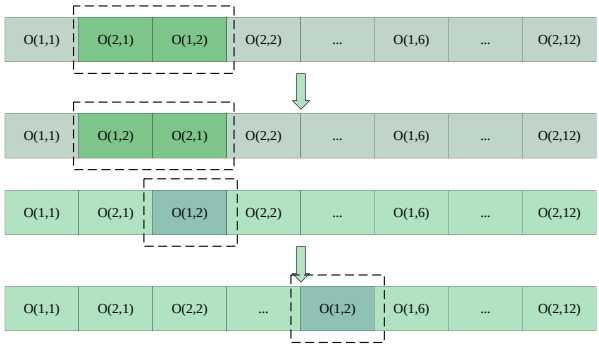


图5　交换与插入邻域示意图

Fig.5　Schematic diagram of swap and insertion neighborhood

2.2　边端扰动响应与局部调度算法

在云-边协同调度框架下，边端调度以云端基准排产方案为约束，主要面向生产现场高频扰动的快速响应。相较于云端侧重全局优化，边端调度强调在局部范围内吸收扰动影响，并尽量保持原有生产节拍结构的稳定性。因此，有必要构建扰动严重度判定机制，并设计相应的局部重排方法，以实现分级响应。

1)扰动严重度判定模型

为量化扰动对生产系统的影响程度，从时间延误与关键路径影响两个维度构建严重度评价指标。设异常持续时间为 T_e，关键路径影响量为 Δ_c，则扰动严重度 S_e 定义为

$$S_e=w_1\frac{T_e}{T_e+\tau_T}+w_2\frac{\Delta_c}{\Delta_c+\tau_c}\tag{9}$$

式中：T_e 为扰动导致工序加工时间相对于计划时间增加的持续时长，Δ_c 为扰动引起关键路径完工时间增加量。τ_T 与 τ_C 分别为时间延误与关键路径影响的尺度参数，用于对不同量纲指标进行归一化处理；w_1 和 w_2 为权重系数，满足 $w_1+w_2=1$。基于严重度指标，引入判定阈值 θ 作为分级响应依据：当 $S_e\leqslant\theta$ 时，扰动被视为局部可控扰动，由边端执行局部重排；当 $S_e>\theta$ 时，触发云端重调度。

2)边端局部重排模型与算法

在局部扰动情形下，边端调度以云端基准计划为参照，对受影响工序进行有限范围内的重排，其优化目标为最小化扰动引起的调度偏移程度

$$\min\sum\nolimits_{i,j}\left(S_{ij}^1-S_{ij}^0\right)^+\tag{10}$$

式中：S_{ij}^1 为工序 j 实际开始时间，S_{ij}^0 为云端基准计划中该工序的计划开始时间。

调度过程需满足基本约束

$$S_{ij}\geqslant S_{ij}^0\tag{11}$$

该约束保证局部重排仅通过延迟吸收扰动而不改变原计划顺序，从而维持调度结构稳定并避免资源冲突，其余约束与云端模型一致，不再展开。

在模型基础上，边端调度采用贪婪算法生成可行解。算法以受扰动工序集合为对象，在满足相关约束条件的前提下，按照“最早可执行时间优先、加工时间最短优先”的复合规则进行排序，并依次确定各工序的调度顺序。该方法无需复杂迭代过程，能够在较低计算开销下实现对局部扰动的快速响应。

3　云-边协同调度方法实验验证

3.1　实验设置

为实现模块墙智慧工厂多生产线、多资源及多

约束条件下的全局优化调度,在云端部署集中式全局排产算法,对生产任务进行统一决策与优化。该调度问题具有组合规模较大、约束条件复杂及解空间结构复杂等特点,属于典型的复杂离散优化问题。模拟退火算法在生产调度领域应用广泛,已有研究验证了其求解作业车间调度问题的有效性,在最小化总完工时间等优化目标下能够获得较优的近似全局解[16]。因此,采用模拟退火算法对云端全局排产问题进行求解。

云端与边端调度算法均在同一环境下实现,运行环境为 Python 3.8,硬件配置为 Intel Core i7 处理器、16 GB 内存。云端排产算法采用模拟退火方法实现,设置初始温度 T_0=1 000,终止温度 T_{end}=0.01,降温系数 α=0.97,马尔科夫链长度 L=200,最大迭代次数 G_{max}=10 000。相较于云端全局优化算法,边端调度采用构造式贪婪策略,无需复杂迭代过程,计算开销较低,能够满足生产现场的实时响应需求。

为保证扰动严重度模型参数具有合理的工程意义,首先对实验数据进行统计分析。在缺乏大规模历史扰动数据的条件下,以模块墙生产工艺为基础构建扰动样本数据集。依据实验算例中各工序加工时间,引入随机扰动生成 50 组扰动样本,共包含 600 道工序加工数据,用于分析模块墙生产系统加工时间分布特征,并完成严重度模型参数标定。

根据上述扰动样本数据统计结果,严重度模型参数依据工序加工时间分布特征进行设定。其中,τ_T 取加工时间均值(79.4 min),τ_C 取关键路径延误标准差(123.6 min);权重系数设为 w_1=0.6、w_2=0.4,判定阈值取 θ=0.5。在此基础上,根据扰动严重度判定结果触发不同调度策略:对于局部可控扰动,由边端执行局部重排;对于越级扰动,则触发云端全局重调度。

为评估所提出调度方法的性能,针对不同调度层级分别开展实验验证:云端重调度以总工期(Makespan)为评价指标,并与右移重调度方法进行对比;边端局部重排通过分析扰动吸收效果及其对关键路径与系统完工时间的影响,对调度方法的有效性进行验证。

3.2 云端全局排产算法性能验证

为验证云端全局排产模型及算法的有效性,以某装配式建筑工厂的实际生产场景为原型,构建包含 20 个模块墙订单(Job1-Job20)的测试数据集。各订单按照实际生产工艺划分为 27 道工序,并采用柔性作业车间调度(FJSP)标准格式组织数据,记录各工序可选设备及对应加工时间。部分数据编码形式如图 6 所示。



图 6 模块墙调度实验数据编码示意

Fig.6 Encoding format of the modular wall scheduling dataset

图 6 展示了测试数据的组织形式。其中,每一行表示一个模块墙订单,数据依次包括订单编号、各工序可选设备数量以及对应的"设备编号-加工时间"信息。该编码方式符合柔性作业车间调度问题的数据组织格式,可直接作为模拟退火算法的输入。

在实验数据基础上,采用模拟退火算法进行求解。由迭代曲线(图 7)可见,算法由初始随机解出发,通过接受劣解进行全局搜索,并随温度降低逐步收敛,目标函数值最终趋于稳定,说明该算法能够获得较优排产方案。图 8 为优化后的排产甘特图。由图 8 可见,各生产线任务衔接较为紧凑,工序等待情况得到缓解,多条生产线能够保持连续运行状态,整体生产节拍更为协调。由此可见,所提出的云端全局排产方法能够在复杂多约束条件下有效降低系统总工期,验证了模型与算法的可行性与优越性。

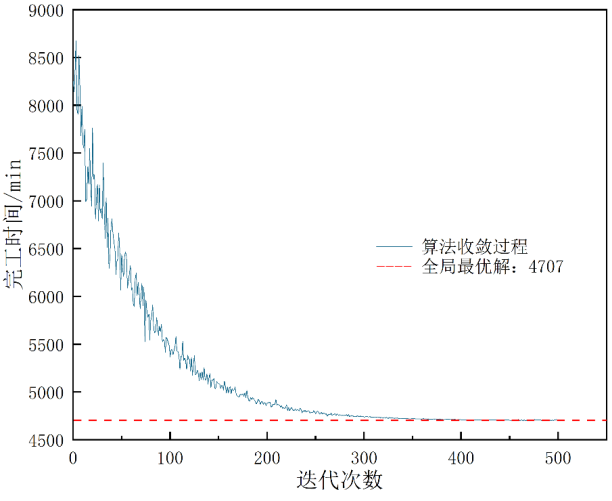


图 7 迭代曲线

Fig.7 Iteration curve

3.3 云端全局重调度实验验证

为验证云端全局重调度方法在越级扰动条件下的有效性,结合模块墙生产过程中常见异常情况,选取设备故障和人员缺位两类典型扰动场景开

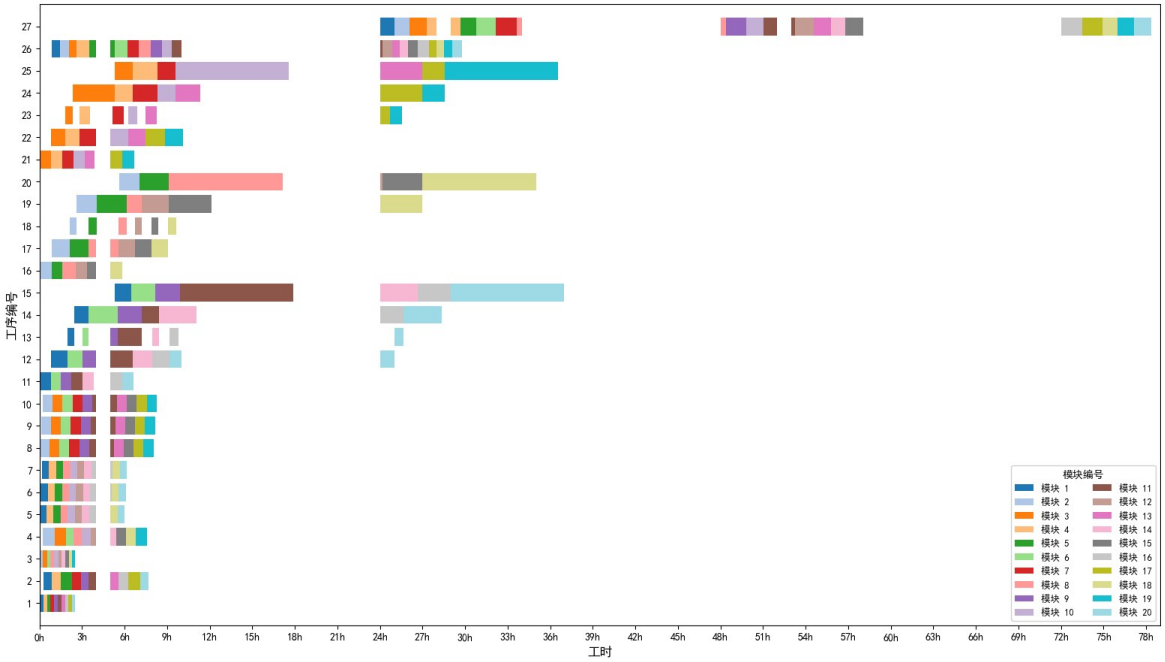


图 8　20 块模块墙云端排产计划甘特图

Fig.8　Gantt chart of cloud scheduling plan for 20 modular walls

展实验。两类扰动对应表 1 中的混凝土墙板生产线，其中设备故障设置于工序 13“混凝土浇筑”，人员缺位设置于工序 17“模板安装”。设备故障是指关键设备发生故障导致相关工序无法继续加工；人员缺位是指关键岗位操作人员临时缺岗，导致相应工序加工效率降低或暂停。两类扰动均会持续较长时间，并可能造成关键路径延长，超出边端局部调整能力，因此触发云端全局重调度。扰动发生时刻 t_d 和持续时间 Δ_t 均在前述 20 个模块墙订单、27 道工序的测试数据基础上，结合相应工序的加工节拍及生产过程进行场景设置，用于模拟设备故障和人员缺位对生产计划造成的持续性影响。具体扰动参数设定如表 2 所示。

表 2　扰动参数设定

Table 2　Setting of disturbance parameters

扰动类型	扰动工序编号	t_d/min	Δt/min
设备故障	13	147	790
人工缺位	17	150	510

在扰动发生后，依据严重度判定机制判定其已超出边端调节能力（$S_e > \theta$），从而触发云端全局重调度。重调度过程中，已完成工序保持不变，未完成工序在满足工序顺序与资源约束的前提下重新优化。

为对比不同策略性能，引入右移重调度作为对照。该方法仅对受扰动工序整体顺延，而云端完全重调度通过设备重分配与工序重排序实现全局优化。以总工期（Makespan）为评价指标，基准排产工期为 4 707 min。

设备故障场景下，右移重调度工期为 6 068 min（+1 361 min），完全重调度为 5 797 min（+1 090 min），缩短 271 min（19.9%）；人工缺位场景下，右移重调度为 5 258 min（+551 min），完全重调度为 4 896 min（+189 min），缩短 362 min（65.7%）。

结果表明，右移策略因保持原有结构导致延误累积，而完全重调度通过资源重分配与关键路径优化，有效削弱延误传播并压缩等待时间。两类场景下的重调度甘特图如图 9、图 10 所示。由此可见，所提出方法在越级扰动条件下具备良好的全局优化与恢复能力。

3.4　边端局部重排实验验证

为验证边端局部重排方法的有效性，基于云端基准排产构建非关键路径扰动场景。设工序 O(4, 1)延误 40 min 经判定满足 $S_e \leqslant \theta$，由边端执行局部调整。

在保持关键路径不变的前提下，通过局部顺序调整与顺延处理吸收扰动影响。结果如图 11 所示，系统总工期保持不变，生产节拍稳定。说明边端方法能够在不触发云端重调度的情况下有效吸收局部扰动，维持系统运行稳定性。

4　模块墙智慧工厂调度平台实现

在提出云-边协同调度方法的基础上，构建模块墙智慧工厂调度管理平台，实现排产方案生成、执行监控及动态调整功能，以验证所提方法的工程可行性。

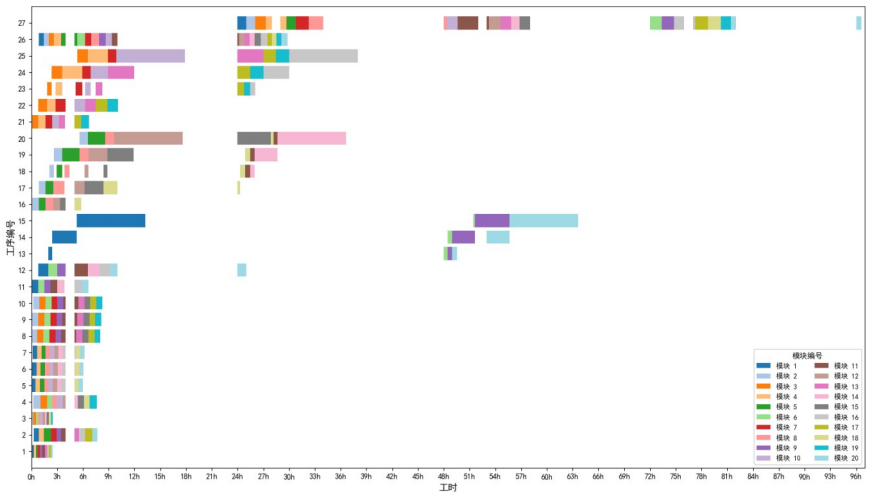


图 9 设备故障完全重调度甘特图

Fig.9 Gantt chart of complete rescheduling under equipment failure

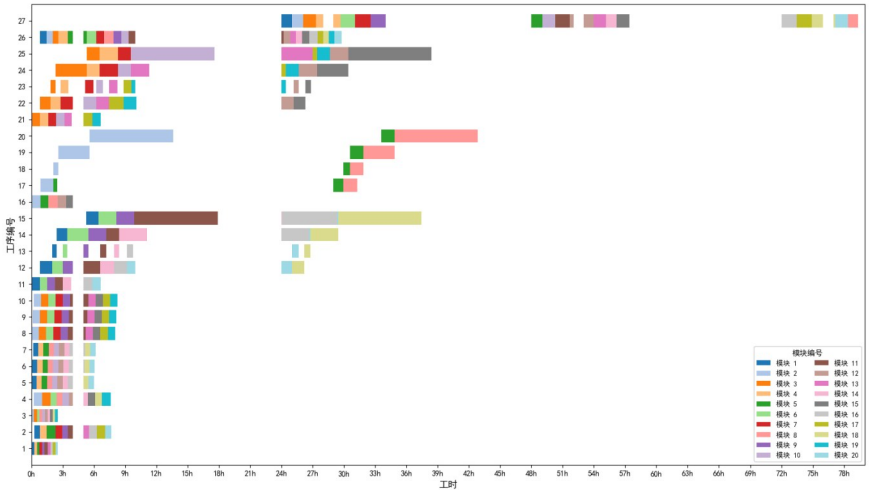


图 10 人工缺位完全重调度甘特图

Fig.10 Gantt chart of complete rescheduling under labor absence

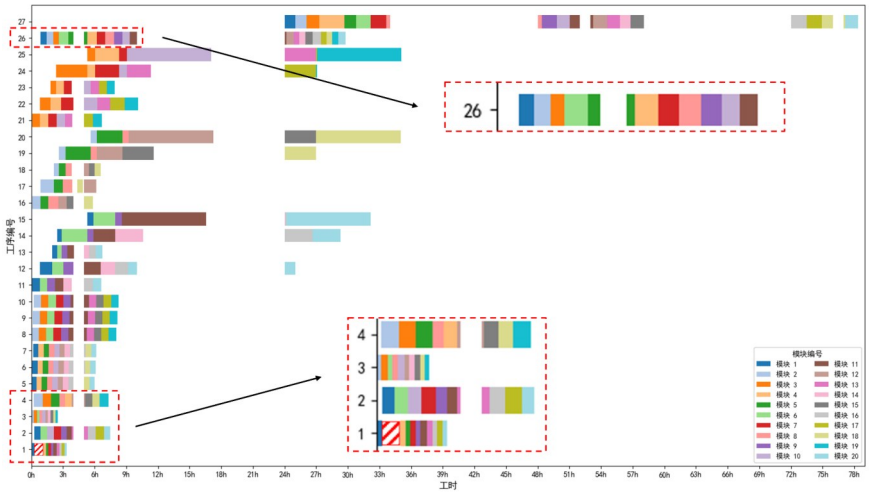


图 11 局部重排后的生产甘特图

Fig.11 Production Gantt chart after partial rearrangement

4.1 平台总体架构设计

为支撑生产调度业务,系统采用前后端分离的B/S架构,构建“数据层-业务层-应用层”3层结构。数据层基于MySQL、Redis及MinIO实现生产数据的统一存储与管理;业务层基于Spring Boot实现调度逻辑封装;应用层通过Web界面提供排产管理与调度可视化功能。系统通过标准化接口实现订单、设备与调度算法之间的数据交互,为云端排产与边

端调整提供统一数据支撑。系统的总体架构如图12所示。

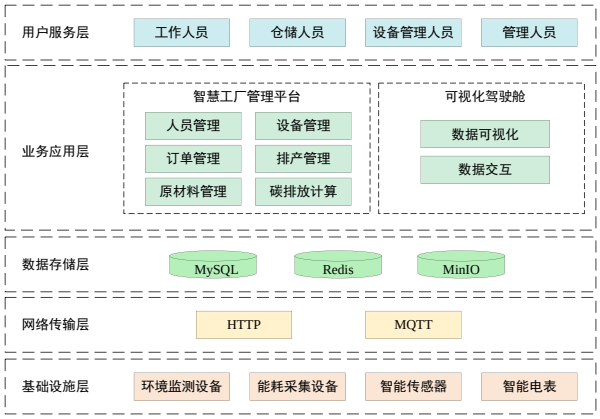


图12　模块墙智慧工厂调度平台总体架构

Fig.12　Overall architecture of modular wall smart factory scheduling platform

4.2　调度功能的实现

为验证方法的工程适用性，以某两层住宅建筑项目为原型构建模块墙生产案例。该工程共包含20个模块墙单元，模块墙主要尺寸为3 m×3 m，满足运输与现场装配要求。平台支持对扰动信息进行分类型接入：设备故障由设备传感器采集状态信息并上传至平台，系统自动识别并判定扰动；人工缺位则通过人工录入方式输入调度模块，用于触发局部重排或云端重调度。围绕云-边协同调度机制，平台实现全局排产、局部重排与重调度3类核心功能。

1）云端全局排产

根据订单需求及资源约束生成全局排产方案，并以甘特图展示工序安排及资源分配结果，如图13所示。

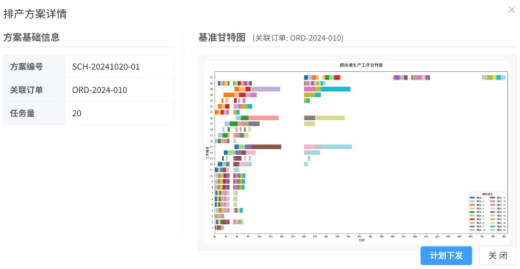


图13　云端全局排产方案查看

Fig.13　View interface of cloud global production scheduling scheme

2）边端局部重排

当扰动满足局部调整条件时，平台对受影响工序进行局部重排，调整结果如图14所示。

调整编号	关联方案编号	影响生产线	扰动类型	处理方式	自愈判定	调整时间	操作
ADJ-012	SCH-20250420-03	H1	人工缺位	工段内部调整	是	2025-06-22	重调度
ADJ-020	SCH-202401020-01	W2	设备故障	触发全局重排	否	2024-11-03	重调度

图14　边端局部重排调度结果记录表

Fig.14　Record table of edge-end partial rearrangement scheduling results

3）云端全局重调度

当扰动超出边端调整能力时，平台基于最新生产状态，对未完成工序重新进行排产，并生成新的调度方案，如图15所示。

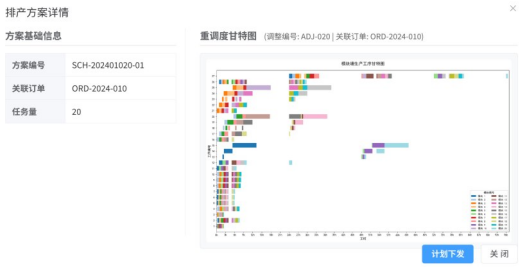


图15　云端重调度方案查看界面

Fig.15　View interface of cloud rescheduling scheme

5　结论

针对模块墙生产过程中多工序耦合与动态扰动频发的问题，提出了一种云-边协同调度方法，并构建了相应的调度模型与实现平台。主要结论如下：

1）构建了云-边协同调度方法。由云端生成全局排产方案作为生产基准，在生产执行过程中引入扰动严重度判定模型对异常进行量化评估，并据此实现分级响应：当扰动满足$S_e \leqslant \theta$时，由边端在局部范围内进行重排以吸收扰动影响；当$S_e > \theta$时，触发云端对未完成工序进行全局重调度，从而形成“全局排产-扰动判定-分级调度”的协同机制。

2）实验结果表明：在超出阈值的扰动条件下，云端全局重调度相较于右移重调度方法能够显著缩短系统总工期；在局部扰动条件下，边端局部重排可在不改变关键路径及系统完工时间的前提下有效吸收扰动影响，验证了所提方法在不同扰动场景下的有效性与稳定性。

3）开发了模块墙智慧工厂调度管理平台，实现了全局排产、局部重排与重调度功能集成，并通过系统运行验证了方法的工程可行性。

提出的云-边协同调度方法能在复杂生产环境

中实现调度优化与运行稳定性的统一,为装配式建筑构件生产调度提供了有效的技术路径。

参考文献

[1] 何威, 孟潇锋, 孔得伟. 装配式建筑在施工企业中的障碍分析[J]. 工程管理学报, 2019, 33(6): 12-17.
He W, Meng X F, Kong D W. Analysis of obstacles in prefabricated buildings in construction enterprises[J]. Journal of Engineering Management, 2019, 33(6): 12-17. (in Chinese)

[2] Nam S, Yoon J, Kim K, et al. Optimization of prefabricated components in housing modular construction[J]. Sustainability, 2020, 12(24): 10269.

[3] Lee J, Park M, Lee H S, et al. Workflow dependency approach for modular building construction manufacturing process using Dependency Structure Matrix (DSM)[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017, 21(5): 1525-1535.

[4] Yuan Y S, Zhang Q, Wang Y G. A cooperative co-evolution algorithm for fuzzy prefabricated components production scheduling[J]. Computers & Industrial Engineering, 2025, 210: 111543.

[5] Liu W L, Tao X Y, Mao C, et al. Scheduling optimization for production of prefabricated components with parallel work of serial machines[J]. Automation in Construction, 2023, 148: 104770.

[6] 刘冠权, 郭琦敏, 苏欣欣, 等. 基于改进GASA的预制构件多目标生产调度优化[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2025, 47(1): 44-49.
Liu G Q, Guo Q M, Su X X, et al. Multi-objective production scheduling optimization of prefabricated components based on improved GASA[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2025, 47(1): 44-49. (in Chinese)

[7] 赵辉. 装配式建筑混凝土预制构件绿色生产调度多目标优化研究[D]. 内蒙古 包头: 内蒙古科技大学, 2025.
Zhao H. Research on multi-objective optimization of green production scheduling for prefabricated concrete components in frefabricated buildings[D]. Baotou, Inner Mongolia: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2025. (in Chinese)

[8] Serrano-Ruiz J C, Mula J, Poler R. Smart manufacturing scheduling: a literature review[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 61: 265-287.

[9] Pang H Y, Zhen L. Production scheduling optimization for manufacturing cells in smart factory[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2025, 201: 104223.

[10] Chen B T, Wan J F, Shu L, et al. Smart factory of industry 4.0: key technologies, application case, and challenges[J]. IEEE Access, 2018, 6: 6505-6519.

[11] Guo L, He Y L, Wan C C, et al. From cloud manufacturing to cloud-edge collaborative manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2024, 90: 102790.

[12] Mourtzis D, Vlachou E. A cloud-based cyber-physical system for adaptive shop-floor scheduling and condition-based maintenance[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 47: 179-198.

[13] Vieira G E, Herrmann J W, Lin E. Rescheduling manufacturing systems: a framework of strategies, policies, and methods[J]. Journal of Scheduling, 2003, 6(1): 39-62.

[14] Ouelhadj D, Petrovic S. A survey of dynamic scheduling in manufacturing systems[J]. Journal of Scheduling, 2009, 12(4): 417-431.

[15] Li X Y, Gao L. An effective hybrid genetic algorithm and tabu search for flexible job shop scheduling problem[J]. International Journal of Production Economics, 2016, 174: 93-110.

[16] Yfantis V, Büscher S, Klanke C, et al. A two-stage simulated annealing-based scheduling algorithm for a make-and-pack production plant[J]. IFAC-Papers OnLine, 2020, 53(2): 10779-10784.

(编辑 XXX)