

引文格式:戴成元,梁邦勋,程可,等.基于数字孪生的装配式建筑施工过程动态调度研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(4):83-94.
DAI Chengyuan, LIANG Bangxun, CHENG Ke, et al. Study on dynamic scheduling of prefabricated building construction process based on digital twin[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(4): 83-94.

DOI:10.19815/j.jace.2022.09098

基于数字孪生的装配式建筑施工过程动态调度研究

戴成元^{1,2}, 梁邦勋², 程可², 邹敏², 刘其舟²

(1. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 土木工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要:针对装配式建筑施工过程中调度方案实施影响因素多且不能及时调整的问题,提出一种基于数字孪生的装配式建筑项目施工过程动态调度方法。首先,建立施工过程数字孪生调度框架,在此基础上,结合装配式建筑的施工特点和数字孪生模型的要求,从施工基本活动、数字孪生编码体系、工序施工时间三方面进行分析和研究,构建装配式建筑施工调度数字孪生虚体模型,并对装配式建筑调度方案生成过程进行详细描述。然后,在分析装配式建筑施工调度内容的基础上,以项目施工工期最短为调度目标,考虑施工构件工序排序和资源选择问题,构建装配式建筑施工调度模型,并设计一种双层编码的遗传算法对其求解。最后,以某装配式建筑项目结构主体为例,模拟其施工过程的调度方案在生成和出现不确定因素后的动态调度,并利用装配式施工调度平台对调度方案进行可视化。结果表明:提出的方法将动态优化调度方案服务和施工进度偏差分析等关键技术结合,实现了装配式建筑施工调度方案优化,辅助可持续和动态的施工过程决策,验证了该方法的有效性和可行性。

关键词:数字孪生;装配式建筑;动态调度;施工调度;BIM;生成服务

中图分类号:TU721

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)04-0083-12

Study on dynamic scheduling of prefabricated building construction process based on digital twin

DAI Chengyuan^{1,2}, LIANG Bangxun², CHENG Ke², ZOU Min², LIU Qizhou²

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology,

Guilin 541004, Guangxi, China; 2. School of Civil Engineering, Guilin University of Technology,

Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: Aiming at the problem that the scheduling program implementation has many influencing factors and cannot be adjusted in time during the construction process of prefabricated buildings, a dynamic scheduling method for the construction process of prefabricated building projects based on digital twin was proposed. Firstly, the construction process digital twin scheduling framework was established. On this basis, combined with the construction characteristics of prefabricated building and the requirements of the digital twin model, the basic construction activities, digital twin coding system, and process construction time were analyzed

收稿日期:2023-09-08

投稿网址:<http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家自然科学基金项目(52068013);广西自然科学基金项目(2022GXNSFAA035581);

广西建筑新能源与节能重点实验室基金项目(桂科能 22-J-21-28)

作者简介:戴成元(1974-),男,副教授,E-mail:dcy366@126.com.

and studied, the prefabricated building construction scheduling digital twin dummy model was constructed, and the process of generating the scheduling plan for prefabricated building was described in detail. Then, based on the analysis of prefabricated building construction scheduling content, taking the shortest project construction duration as the scheduling goal, and considering the construction component process sequencing and resource selection problems, the prefabricated building construction scheduling model was constructed, and a genetic algorithm with two-layer coding was designed to solve it. Finally, taking the structural body of a prefabricated building project as an example, the generation of the scheduling plan and the dynamic scheduling after the emergence of uncertainties in its construction process were simulated, and visualization of the prefabricated construction scheduling platform was used. The results show that the proposed method combines the dynamic optimization of the scheduling plan service and the key technologies such as the analysis of the construction schedule deviation, which realizes the optimization of the construction scheduling plan of the prefabricated building, assists sustainable and dynamic construction process decision-making, and verifies the effectiveness and feasibility of the method.

Key words: digital twin; prefabricated building; dynamic scheduling; construction scheduling; BIM; generating service

Author resume: DAI Chengyuan(1974-), male, associate professor, E-mail: dcy366@126.com.

0 引言

有效控制工期是管理和评估建设项目是否成功的核心因素之一^[1],而施工调度是控制工期的关键环节。有效的调度对规划和控制建设项目的施工过程至关重要^[2]。影响建设项目施工进度要素会随着施工进度发生变化,因此初始的调度方案无法满足施工信息需求,难以实现进度精细化控制,容易造成施工效率低下、资源消耗大等问题,进而影响建设项目的效益。随着建筑业信息化程度的提高、施工过程信息化管理的成熟^[3]以及智能建造闭环控制理论的提出^[4],工程施工调度技术由原本信息单一的调度方法向信息集成的综合调度方向发展。

与传统现浇式建筑相比,装配式建筑更便于利用调度技术优化建设过程。为解决装配式建筑建设成本高^[5]的问题,资源受限项目调度成为许多学者的重点研究领域。杨怡莹^[6]为解决装配式项目多空间非同步调度的难题,构建了双层规划模型对多空间装配式建筑资源受限调度问题进行求解;陈伟等^[7]以建造资源协调配置为核心,提出多维作业空间资源调度协调技术和现场装配作业空间最优线确定技术;于森等^[8]针对装配式建筑工程调度固定资源投入和工期的单一执行模式,提出了多模式下装配式建筑工程资源受限调度问题,建立了多模式资源约束模型,并设计了一种布谷鸟算法求解;连静^[9]构建了以工期、成本、资源均衡为目标的多目标权衡

优化下的装配式建筑施工调度模型,并利用 NSGA-III 求解。

早期装配式建筑的项目调度基本属于静态调度。静态调度一般基于以下假设:在调度范围内可用资源固定且一直可用;任务的属性确定^[10]。因为装配式建筑项目施工过程中的不确定因素很多,资源和任务会随施工进度发生变化,所以静态调度难以真正应用在装配式建筑的实际施工过程中。数字孪生(Digital Twin)作为践行智能制造、工业 4.0、工业互联网、智慧城市等先进理念的使能技术与手段^[11],为实现装配式建筑施工过程动态调度提供了一种新的途径和思路。

2003 年,Michael Grieves 教授在密歇根大学提出最初“数字孪生”的概念模型^[12],最早被应用在飞机的健康维护中,随后被引入到制造业中,国内外学者开始探索其在生产领域的应用。陶飞等^[13]指出数字孪生是一种集成多物理、多尺度、多学科属性,具有实时同步、真实映射、高保真度特性,能够实现物理世界与信息世界交互与融合的技术手段。赵浩然等^[14]针对数字孪生车间的实时可视化监控难题,提出一种基于实时信息的生产车间三维可视化监控方法。

近些年来,数字孪生与建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)紧密相关, Vanderhorn 等^[15]指出数字孪生与数字模型的区别,数字孪生代表感兴趣系统的单个实例,即其相应的物理孪生体,

而 BIM 是建筑物理和功能特征的数字表示^[16],可作为数字孪生的模型基础,即虚拟表示的数据模型。智能优化算法是用于解决复杂问题的方法,包括遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法等,常被用于求解数字孪生中的各种优化问题,以提供模拟、优化和预测服务。在基础建设领域,数字孪生也有一些研究与应用。葛世荣等^[17]为了提高智能化采煤工作面系统自主运行和人机交互能力,提出数字孪生智采工作面系统的概念,并融合通信技术、物联网技术和仿生智能技术搭建数字孪生远程操作平台。刘占省等^[18]提出了基于数字孪生的预应力钢结构施工安全智能化分析方法,解决了预应力钢结构施工过程中力学参数时变导致结构安全性能分析精度低的问题。谢琳琳等^[19]通过集成 BIM、物联网、大数据、人工智能算法等技术,构建基于“BIM+数字孪生”的装配式建筑项目调度智能化管理平台。韩冬辰等^[20]指出现有 BIM 体系中反映建筑物理实体的建成信息缺位是建筑“信息-物理”不交互问题的根源,构建了建筑数字孪生体(Building Digital Twin, BDT)的理论框架解决该问题。王强等^[21]将“BIM+数字孪生”技术应用于装配式城市轨道交通工程预制构件生产管理,对构件生产进行动态管理,解决生产过程中组织协调困难的问题。刘占省等^[22]提出了施工领域数字孪生框架,并从物理施工现场实体建模、数字孪生虚体建模、虚实交互关联建模的角度提出基于数字孪生的装配式施工过程空间维度建模理论。

综上所述,数字孪生能实现虚体模型和物理实体的实时交互,数据可在两者之间相互流通。施工现场虚体模型可以接收实际施工现场的实时数据,进行数据分析和调整调度方案,并将其传至施工现场。因此,可通过数字孪生实现更有效率的装配式建筑施工过程动态调度。然而,目前基于数字孪生的施工过程调度仍存在问题,一方面是缺少自主化和先见化,仍需要花费较多的人力资源支撑;另一方面,极少考虑施工现场的动态变化对调度的影响和反馈。为此,本文提出基于数字孪生的装配式建筑项目调度框架,构建装配式建筑施工过程数字孪生虚体模型,研究了基于 BIM 和遗传算法的调度方案生产方法及面向装配式建筑施工现场的动态调度方法,为实现施工现场高效调度提供了一种思路。

1 基于数字孪生的装配式建筑施工过程调度框架

作为施工生产的基础,施工调度在建筑业中起

重要作用,它能充分调用现有的各种施工资源来应对出现的各种问题,从而提高施工的质量和效率,保证施工过程持续有序进行。然而,随着智能建造时代的到来,施工调度向智能化方向发展,有更深层次的内涵。一是因为现场施工资源的多样性,相关的调度数据很多,如何准确获取施工现场的运行状态和施工资源信息,制定合理的施工调度方案是当前项目施工的难点。二是由于施工过程的复杂性,影响施工现场的因素在不断变化,使得已制定的调度方案难以顺利地完整实施;同时,影响施工现场有序施工的不确定干扰事件时常发生,如机械故障、劳动力短缺、物料不能及时到位等,这些不确定因素将会导致施工过程偏离预定的调度方案,从而影响施工效率。因此,准确掌握施工现场状态,在整体施工过程中及时制定合理和精确的施工调度方案,将不确定风险降至最低,是维持施工过程稳步进行和减少额外资源投入的关键。

在数字孪生技术的驱动下,通过传感器采集现场数据并对其潜在规律进行挖掘和关联,可以实现施工现场物理空间和信息虚拟空间的交融,满足信息时代下的新施工项目进度管理需求。因此,本文提出基于数字孪生的装配式建筑项目调度框架,以施工现场布置模型和项目施工模型作为数字孪生虚体模型的基础信息模型,建立构件编码体系,将行为模型、规则模型、物理模型关联在一起,形成完整的数字孪生虚拟施工现场模型;以现场采集的施工班组、施工机械、构件施工数据为原始数据,经数据清洗和数据处理后,形成构件施工进度数据,包括时间数据、工程量数据、效率数据,并调用调度数据模型形成新调度方案。调度方案包括构件工序施工时间安排、人员安排、机械安排,调度任务的目标是给施工工序安排施工班组和施工时间段。基于数字孪生的装配式建筑项目调度框架主要由物理施工现场、虚拟施工现场、施工现场孪生数据和服务 4 个部分组成,如图 1 所示。框架的运作如下:以施工现场孪生数据为中心,利用手持终端设备、激光扫描、计算机视觉、射频识别(RFID)等物联网技术采集物理施工现场的信息,如劳动力资源状况、机械吊装信息、施工任务信息、现场物料信息等各种现场数据,通过施工现场孪生数据中心将其传输至虚拟施工现场,虚拟施工现场根据反馈的调度信息,结合建筑信息模型生成的施工调度方案进行更新优化,并将更新生成的仿真数据传至施工现场孪生数据中心,经施工基本活动规则分解后,为物理施工现场提供服务,

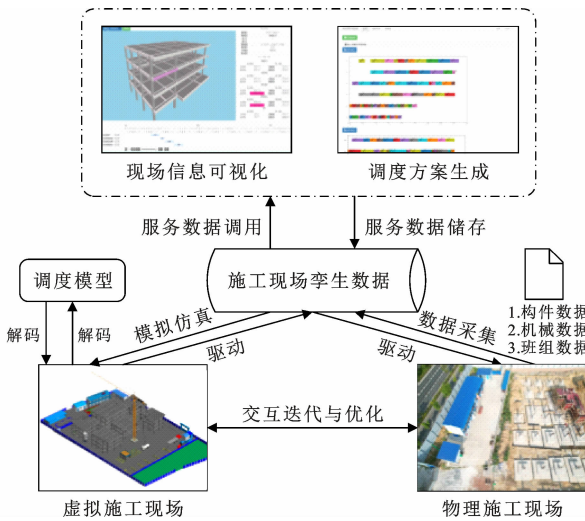


图1 基于数字孪生的装配式建筑项目调度框架

Fig. 1 Prefabricated building project scheduling framework based on digital twin

包括劳动力需求预测信息、实时施工调度方案生成、施工现场状态监控等。施工现场孪生数据为物理施工现场提供服务,通过传感器采集现场数据反馈至施工现场孪生数据中心处理,经由虚拟施工现场迭代演算后更新服务数据,形成持续且动态的装配式建筑项目调度过程。

在基于数字孪生的装配式建筑项目调度框架下,解决了项目进度管理的两点需求,一是可以准确获得施工现场中进度管理所需的各种数据,包括项目实时数据和历史记录数据,保证了施工现场各方面调度的准确性;二是可以通过施工现场孪生数据分析施工现场状态和优化施工调度方案,及时应对施工中的不确定影响。

2 基于数字孪生的装配式调度方案生成服务

数字孪生模型需要精细化和标准化,精细化需要模型既能对物理实体或系统进行准确的静态刻画和描述,又能随着时间的变化使模型的动态输出结果与实际或预期相符,而标准化则需要在模型定义、编码策略、开发流程、数据接口、通信协议、解算方法、模型服务化封装及使用等方面进行规范统一^[23]。将信息模型参数化后建立的编码体系作为数字孪生虚拟施工现场模型的核心,以装配式建筑工程中的构件工序作为最小精度事件驱动数字孪生模型,在此基础上提供现场施工状态和调度服务。为实现数字孪生虚体建模,本文从 BIM 出发,进行装配式建筑施工基本活动分解,建立装配式建筑施工过程编

码体系和施工工序持续时间计算方法,并搭建装配式调度方案生成服务。

2.1 施工活动分解

根据数字孪生建模的精细化准则,施工活动分解精度需要达到构件施工工序级别。利用工作分解结构法,将装配式建筑工程主体拆分为 7 个层次,分别为施工主体、分部工程、施工层、施工段、构件类别、单个构件、构件工序。根据分解规则,形成图 2 所示的装配式建筑项目的施工工序分解,其中 KL1、KL2 为单个构件编号。

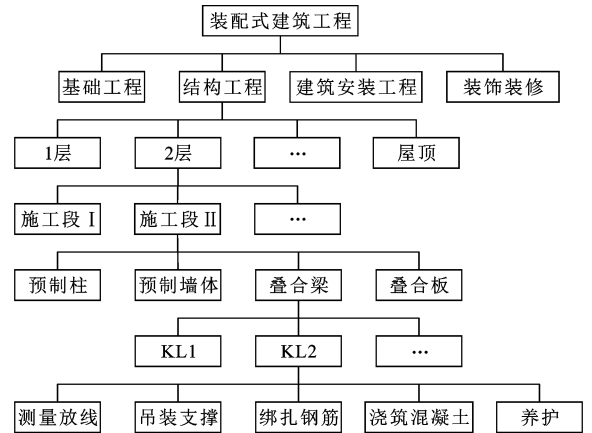


图2 施工工序分解

Fig. 2 Construction process decomposition

2.2 建立编码体系

完成施工活动分解后,需要对应建立符合数字孪生准则中标准化的编码体系。编码体系方便在计算机上进行操作和可视化,并可作为施工过程调度问题建模的基础以及连接数学模型和孪生模型的桥梁,具体的关系如图 3 所示。将施工现场作为数字孪生中的物理模型,通过物联网设备采集现场数据后将数据传至虚体模型中,虚体模型利用收集的数据为施工现场提供数字孪生服务,包括施工状态监控、生产信息统计、调度方案生成等。基于已有的施工进度计划编码体系和建立方法^[24],本文提出适合数字孪生框架的装配式施工过程虚体模型编码体系。该编码体系以 BIM 模型信息为基础,加载施工过程中的数据,数据来源为现场施工过程感知数据和数学模型优化后解码所得数据。调度问题编码体系如表 1 所示。表 1 中, ID 代表构件的唯一识别代码,可从 IFC 文件中提取获得,或从建筑信息建模软件中导出,例如 Revit 软件中的构件 ID。 P_i 代表构件工序组合编码,由 $P_1 \sim P_{13}$ 编码依次组合而成。 P_1 为构件工序所属的专业类别,与构件的专业类别相同,使用专业类别的两位大写拼音首字母

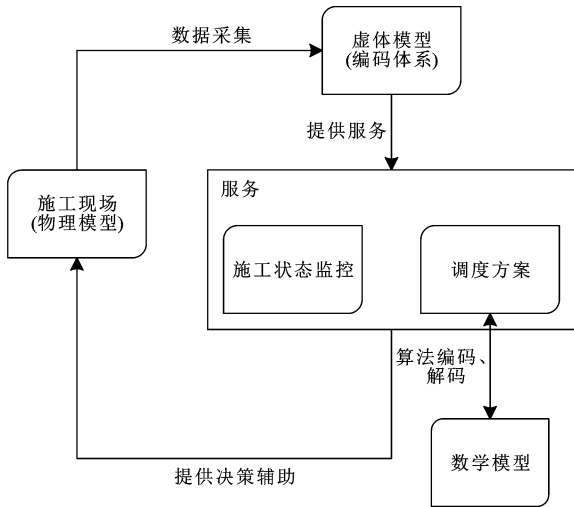


图 3 孪生模型与施工现场的关系

Fig. 3 Relationship between twin model and construction site

表 1 施工过程虚体模型编码体系

Table 1 Coding system of virtual body model in construction process

编码符号	符号含义
ID	构件识别代码
P_0	构件工序组合编码
P_1	专业类别
P_2	施工层
P_3	施工段
P_4	构件类别
P_5	构件工序
P_6	构件坐标
P_7	构件工序工程量
P_8	工序分配资源量
P_9	工序计划开始时间
P_{10}	工序计划施工持续时间
P_{11}	工序实际开始时间
P_{12}	工序实际持续时间
P_{13}	其他属性

表示,有 JC、JG、AZ、ZX 等,例如 JG 表示结构工程。 P_2 为构件工序所在的施工层,与构件所在的施工层相同,一般民用建筑以自然层为施工层,以两位数字形式表示,例如,05 代表第 5 施工层。 P_3 为所属的施工段,以“D+数字”表示,例如 D3 表示第 3 施工段。 P_4 为构件类别名称,以构件类别的英文小写字母表示,如 wall 表示预制墙、column 表示预制柱、beam 表示叠合梁、slab 表示楼板。 P_5 为构件施工的工序,例如测量放线、吊装等,以两位数字形式表示,对应构件与工序关系表,例如 01 代表该构件的第一道工序,对应预制墙体的第一道工序测量放线,

构件工序表由施工基本活动分解规则和人工输入调整所得。 P_6 为基于项目基点的坐标,以“X+数字+Y+数字+Z+数字”的形式进行表示,例如 X23.33Y32.11Z41.23 表示该构件位于项目基点的 X 向 23.33 m、Y 向 32.11 m、Z 向 41.23 m,坐标由 IFC 文件解析或建模软件导出获得。 P_7 为构件当前工序的工程量,以“V+数字+V”形式表示,例如 V3.2V 表示预制叠合板的工程量为 3.2 m³,工序工程量由建筑模型解析后,经分解规则后计算所得。 P_8 为工序投入的资源量,即人工或者机械数量,以“R+数字+R+数字+X+数字+X”形式表示,例如 R3R1X1X 表示该项工序投入的人工数量为 3,第一类机械数量为 1,工序投入的资源量为施工现场可调配的资源量。 P_9 为工序计划施工开始时间,以“N+数字+Y+数字+R+数字+S+数字+T”形式表示,“N2022Y3R2S1300T”表示 2022 年 3 月 2 号 13 时 0 分开始施工。 P_{10} 为工序计划施工持续时间,以“L+数字+L”的形式表示,例如 L8hL 表示该项工序持续进行 8 h。 P_{11} 为工序实际施工开始时间,以“SN+数字+SY+数字+SR+数字+SS+数字+ST”形式表示,“SN2022SY3SR3SS1300T”表示 2022 年 3 月 3 号 13 时 0 分为该项工序实际开始施工时间。 P_{12} 为工序施工持续时间,以“SL+数字+SL”的形式表示,例如 SL9hSL 表示该项工序时间施工持续时间为 9 h。 P_{13} 为工序的其他信息、施工要求、施工人员名单等,以“Q+三位数字+M+三位数字”的形式表示,例如 Q001M002 表示为 001 号表格中 002 段信息。

2.3 工序施工时间

一项施工工序的时间参数在进度计划中必不可少,通常进度计划中的时间进度是以天为单位,故传统的进度计划相对粗略。由于需要精确到单个构件一个施工工序的施工时间,所以要将传统的施工工期计算进行转换。在施工组织设计中,进度计划的时间一般由工程师或施工人员结合定额和工程经验计算得到。本文计算工序施工时间有 2 种方法,一是利用构件工程量结合定额库计算精确的单位工程量每人每工时^[23],二是通过负责人利用交互界面对定额库中没有的施工工序时间数据进行计算后输入。构件施工持续时间如式(1)所示。

$$t = \frac{Q}{SR} \tag{1}$$

式中: t 为构件施工工序持续时间,精确至小时; Q 为构件工序的工程量,根据 IFC 文件或软件导出后

的构件工程量转换所得; S 为施工量定额, 即单位施工人员或机械每工时可完成的工序工程量; R 为投入的资源量, 即施工班组人数或机械数量, 由施工现场提供的资源量经算法选择和施工人员确认后输入。

预制构件定额及工日工时转化如表 2 所示, 表中为定额中部分装配式建筑预制构件数据, 其工人类型为普通工人, 每人每工日按 8 h 工作制计算出工时数, 并转化为单位工人每工时的的工作量, 即为施工人员的单位施工定额。

表 2 预制构件定额及工日工时转化

Table 2 Prefabricated component quota and man-hour conversion

构件类型	工程量/ m^3	工日数/d	工时数/h	单位工人工时工作量 $S/(m^3 \cdot h^{-1})$
实心柱	10	2.802	22.416	0.446
单梁	10	3.819	30.552	0.327
叠合梁	10	4.959	39.672	0.252
整体板	10	4.902	39.672	0.252
叠合板	10	6.126	49.008	0.204

综上, 本文对施工过程的调度问题进行了初步标准化和精确化, 搭建了装配式建筑施工中的数字孪生服务——生成施工调度方案, 如图 4 所示。首先由 BIM 模型生成 IFC 模型或者由 BIM 模型直接导出所需的工程信息, 根据分解规则生成构建施工工序内容和工序工程量, 然后根据工序工程量和可选择资源投入量计算出施工工序持续时间, 最后将数据输入数学模型进行优化后, 解码得到施工调度方案。

3 装配式建筑施工调度模型建模

装配式建筑施工调度问题可看作单项目下的资源约束项目调度问题, 优化目标是找出工期最短或消耗资源量最小的调度方案。资源约束项目调度问题中的项目子活动相互关联, 且同时要满足各施工活动之间的工序约束和资源约束, 以达到管理目标最优。装配式建筑项目施工调度问题描述为: 每个施工层包含多个调度任务, 施工的构件工序与工序顺序确定, 调度的任务是给施工层的所有构件工序分配资源量和时间。调度目标是项目施工工期最短, 即完工时间最小。

通过上述分析可构建装配式建筑施工调度模型, 模型相关符号如表 3 所示。

以工期最短为优化目标, 建立的调度数学模型为

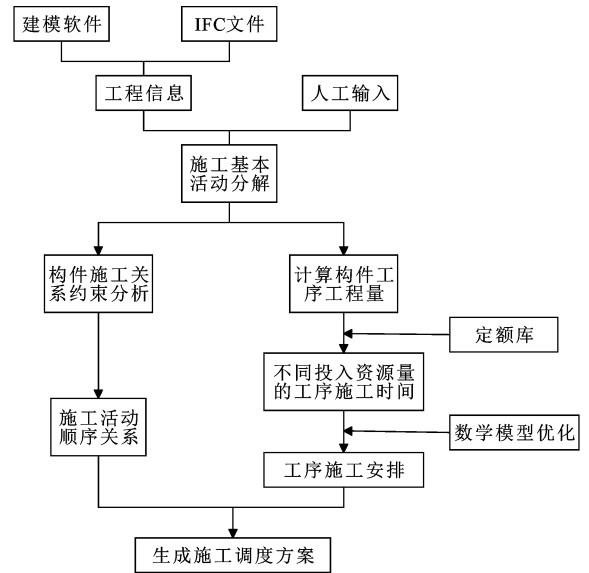


图 4 生成施工调度方案服务

Fig. 4 Generate construction scheduling scheme service

表 3 装配式建筑施工调度模型符号定义

Table 3 Symbol definition of prefabricated building construction scheduling model

编码符号	符号含义
C_{\max}	最大施工工期
J	待施工的构件集合
S	工序集合
s	构件的施工工序总数
t_{jk}	构件 j 的施工工序 k 开工时间
d_{jk}	构件 j 的施工工序 k 施工时间
r_{jkm}	构件 j 的施工工序 k 所占用的第 m 种资源量
R_m	第 m 种可利用的资源总量

$$\min(C_{\max}) \quad (2)$$

s. t.

$$t_{jk} + \sum d_{jk} \leq C_{\max} \quad \forall j \in J, k = s \quad (3)$$

$$t_{jk} + \sum d_{jk} \leq t_{j,k+1} \quad \forall j \in J, \forall k = \{1, \dots, s-1\} \quad (4)$$

$$\sum r_{jkm} \leq R_m \quad (5)$$

$$t_{jk} \geq 0 \quad \forall j \in J, \forall k \in S \quad (6)$$

调度数学模型中式(2)表示调度模型优化目标, 本文指令为最大施工工期最小; 式(3)表示所有构件的最后一道工序的完成时间均小于等于完工时间 C_{\max} ; 式(4)表示同一构件的施工工序要依序完成, 前一道工序完成后才能开始下一道工序; 式(5)表示施工活动的资源约束, 即施工进行中的所有活动资源总需求量不超过其上限 R_m ; 式(6)表示施工工序开始时间非负。

遗传算法因其鲁棒性强、收敛效果好、简单通用等特点,在生产调度中被广泛应用,它能简单和快速求解出优化方案,减少流程的运作时间,所以本文将遗传算法作为求解最优问题的优化算法。遗传算法是基于 Darwin 进化论中适者生存的原理,模拟生物进化过程的随机搜索算法,其全局搜索能力很强。遗传算法模拟自然界,通过将问题的解编码为染色体个体,利用适应函数筛选出适合的个体后形成新的种群,达到选择与进化的目的,通过适应度不断地评价种群中每个个体,找到最优个体,即最优的染色体个体,经解码后,获得问题的近似最优解。

本文研究的调度问题主要考虑施工构件工序排序问题和资源选择问题。根据调度模型的特点,染色体编码方式采用实数编码,将染色体基因分为两层,编码示意图如图 5 所示,分别是施工工序排序基因(Operation Sequence, OS)和投入资源选择基因(Resource Selection, RS),即施工班组或机械数量。在 OS 层中,基因值 x 代表对应构件 j ,从左往右排序,相同的 j 值出现的第 k 次即为该构件 j 的第 k 道工序 O_{jk} ;在 RS 层中,与 OS 层的基因值 x 对应位置的基因值 m 表示对应工序 O_{jk} 选择的投入资源 R_m 。在图 5 中圆圈的位置编码表示构件 5 的第 3 个工序,选择的投入资源为 R_7 ,其他位置的编码位置同理。在解码过程中,根据染色体基因序列依序确定构件工序的施工顺序,以及选择投入的资源,并确定工序的施工时间,即开工时间和持续时间。

	O_{51}	O_{11}	O_{41}	O_{31}	O_{21}	O_{42}	O_{22}	O_{32}	O_{32}	O_{32}	O_{22}	O_{33}	O_{23}	O_{13}	O_{43}
OS	5	1	4	3	2	4	1	3	4	2	4	3	2	1	4
	R_1	R_2	R_3	R_1	R_3	R_6	R_5	R_4	R_4	R_6	R_7	R_8	R_8	R_9	R_7
RS	1	2	3	1	3	6	5	4	4	6	7	8	8	9	7

图 5 染色体编码示意图

Fig. 5 Schematic diagram of chromosome coding

4 装配式建筑施工过程动态调度方法

基于数字孪生的装配式建筑施工过程调度框架,提出一种装配式建筑施工过程动态调度流程,如图 6 所示,利用人工或者机器等数据采集方式收集现场数据驱动相关服务,结合调度方案生成服务和进度偏差分析,实现装配式建筑施工现场的动态调度。在项目施工开始前,初始调度方案由调度方案生成服务根据与施工任务调度相关的建筑信息模型和人工输入的数据生成。在施工过程中,将实际进度信息与施工调度方案进行对比分析后根据预警规

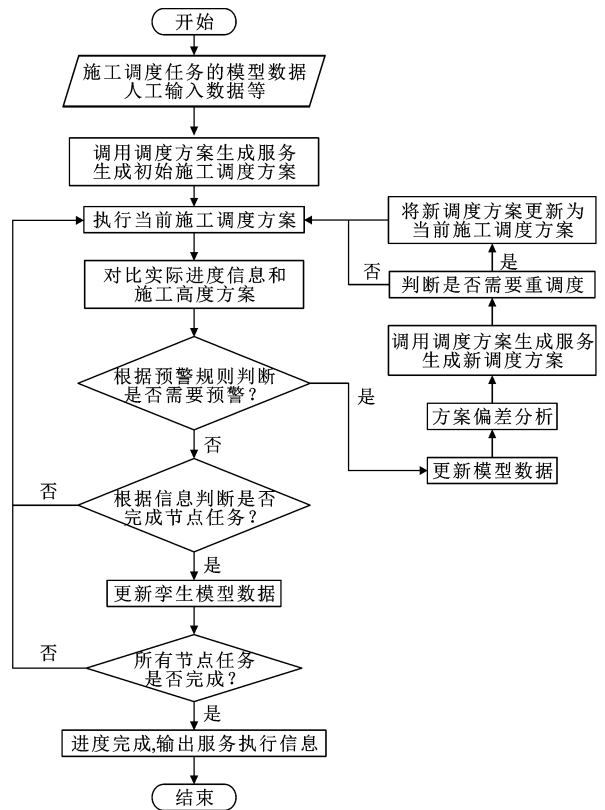


图 6 装配式建筑施工过程动态调度流程

Fig. 6 Dynamic scheduling flow of prefabricated building construction process

则判断是否需要预警,若不需要预警,则继续执行当前施工调度方案。若发生异常报警,则更新模型数据后进行施工方案偏差分析,由调度方案生成服务生成新的施工调度方案,将新调度方案呈现给施工团队判断是否需要修改调度方案,如果需要修改调度,则将新施工调度方案变更为当前施工调度方案,若不需要修改调度,则继续执行当前施工方案。不断循环直到所有节点任务完成,即项目施工过程结束。

采用遗传算法作为调度模型的优化算法,调度方案生成的算法流程如图 7 所示。首先设置算法参数,将数字孪生虚体模型中与调度相关数据作为问题的数据集,包括调度的所有构件工序和工序的时间参数,然后根据算法参数和工序数据集生成初始种群染色体,通过工序时间参数计算出种群中的各染色体最大工期时间作为适应度值,并设置适应度函数,最后循环执行优化迭代过程直到最大迭代次数。优化迭代过程中,首先按比例选择适应度高的部分个体复制,其次选择一定比例的个体进行交叉变异操作后产生新的种群,更新迭代次数,进入下一个算法优化迭代的循环。循环结束后,输出最优种

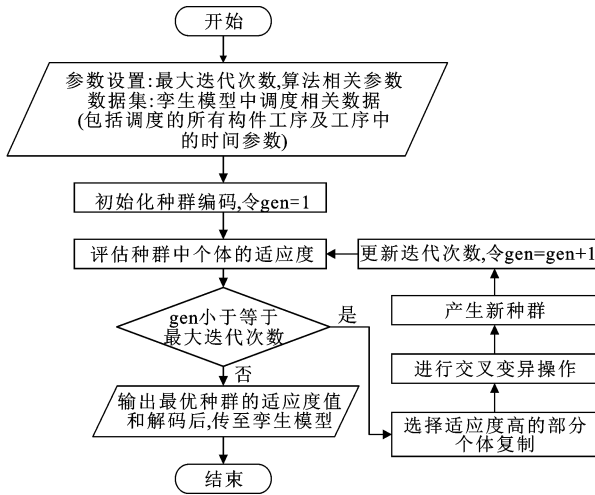


图7 优化调度方案生成服务算法流程

Fig. 7 Optimizing scheduling scheme generation service algorithm flow

群的适应度值,并对种群的最优个体进行解码,将解码内容和最小总工期时间传至数字孪生虚体模型,进行下一步的分析和可视化。

通过分析收集的数据信息,将其分为投入资源量、工程量、进度信息三大类,并与调度方案进行对比,分析出实际施工过程和计划调度方案的偏差。以实际进度信息更新为时间点,利用式(7)计算施工的效率。

$$S_a = \frac{Q_a}{R_a(T_{end} - T_{start})} \quad (7)$$

式中: S_a 为实际施工量定额,即单位施工人员或机械每工时实际完成的工序工程量; Q_a 为构件工序施工中的工程量,由施工人员或机械设备采集得到; R_a 为构件施工投入的施工班组人数和机械数量,通过施工现场统计得到; T_{end} 为构件工序施工结束时间; T_{start} 为构件施工结束时间。

通过对比实际施工效率 S_a 和调度方案效率 S ,分析施工过程的效率是否达到预定值。分析施工效率后,进一步分析计算式中的要素,得到影响施工效率的主要因素,包括进度偏差、工程量偏差、投入资源量偏差,对比调度方案的信息,判断施工中需要改进的部分。

根据施工构件划分,将施工方案偏差分析分为已完成的构件施工方案偏差分析和施工中的构件施工方案偏差分析。已完成的构件施工方案偏差分析的目的对施工现场管理要素进行评估分析,包括施工人员、施工设备和施工方法,以便为后续的施工过程提供决策辅助和数据支撑;施工中的构件施工方案偏差分析的目的是分析构件的施工工序效率,

判断现场施工的发展趋势,方便项目管理者及时发现和解决现场问题。

5 案例分析

为了验证上述装配式施工过程动态调度方法的有效性,构建了装配式建筑施工过程调度平台,并以某装配式建筑工程为例进行分析。该工程为装配式整体式框架结构,建筑面积约为1 029.6 m²,共3层。根据工程图纸,利用Autodesk Revit 2020版软件建立BIM模型,模型如图8所示,建筑包含预制柱、叠合梁、叠合板等预制构件。通过Revit软件的可视化编程插件Dynamo编程后,提取BIM模型的构件信息,部分构件信息如表4所示,经过处理后生成本次案例的施工过程调度任务,主要目的是计算其调度任务的计划时间。

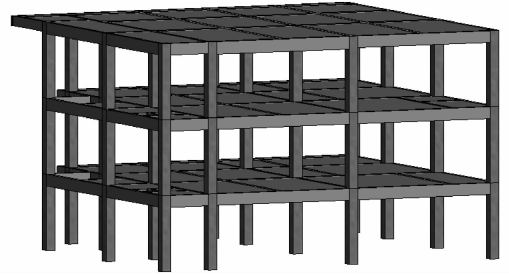


图8 结构专业 Revit 模型

Fig. 8 Structural professional Revit model

表4 部分构件信息

Table 4 Partial component information

ID	构件类别	体积/m ³	工序ID	工序
517745	结构柱	0.975	5177451	测量放线
517745	结构柱	0.975	5177452	吊装支撑
517745	结构柱	0.975	5177453	钢筋绑扎
517745	结构柱	0.975	5177454	节点浇筑
517745	结构柱	0.975	5177455	节点养护
527350	楼板	1.830	5273501	测量放线
527350	楼板	1.830	5273502	吊装支撑
527350	楼板	1.830	5273503	钢筋绑扎
527350	楼板	1.830	5273504	浇筑
527350	楼板	1.830	5273505	养护
521089	结构梁	0.756	5210891	测量放线
521089	结构梁	0.756	5210892	吊装支撑
521089	结构梁	0.756	5210893	钢筋绑扎
521089	结构梁	0.756	5210894	节点浇筑
521089	结构梁	0.756	5210895	节点养护

由施工构件信息表生成调度任务内容,调度任务的目标是给施工工序安排施工班组和施工时间段。首先根据施工基本活动逻辑关系确定施工顺序,施工楼层顺序为一、二、三层,构件施工顺序为预

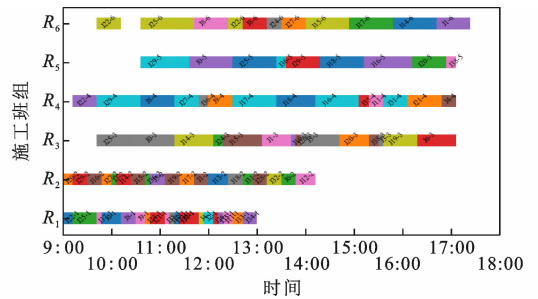
表 5 部分调度任务

Table 5 Partially scheduled task

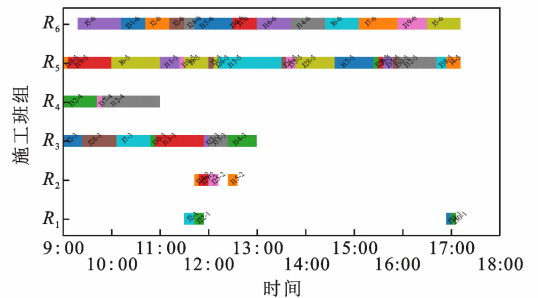
工序 ID	不同班组的施工时间/h					
	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6
5177451	0.33	0.38	0	0	0	0
5177452	0	0	0.89	1.01	0	0
5177453	0	0	0	0	1.13	1.04
5177454	0	0	0	0	0.85	0.78
5177455	0.22	0.20	0	0	0	0
5177471	0.33	0.38	0	0	0	0
5177472	0	0	0.89	1.01	0	0
5177473	0	0	0	0	1.13	1.04
5177474	0	0	0	0	0.85	0.78
5177475	0.22	0.20	0	0	0	0

制柱、叠合梁、叠合板。本项目共有 227 个构件需要安装,每个构件有 5 个工序,包括测量放线、吊装支撑、绑扎钢筋、浇筑混凝土、养护。本文采用住房和城乡建设部印发的《装配式建筑工程消耗量定额》进行计算,综合考虑施工影响因素,设定不同施工效率的施工班组,计算后得到表 5,其中 $R_1 \sim R_6$ 为工序可选择的班组,施工时间数据为 0 表示施工班组不进行该工序工作。调用调度方案生成服务,生成工序分配的班组、计划开始时间和计划结束时间,经统计和处理后得出每一层中不同类型构件的施工开始时间和施工结束时间,并经过现场调度规则调整后得到初始调度方案。图 9 为本次任务中第二层梁叠合梁第 3 天的施工调度方案横道图,每一横杠表示一道施工工序,纵轴表示工序施工的班组,横轴表示工序施工的时间段。

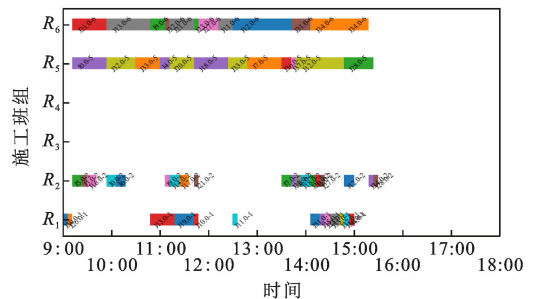
利用构建的装配式施工过程调度平台对调度方案进行可视化,界面如图 10 所示。该界面展示了施工现场的当前施工状态,点击时间按钮选择日期,查询所选日期的计划和实际施工状态。点击模型可视化窗口中的模型构件后,在界面右侧显示选中构件的构件信息和构件施工任务以及施工中是否存在异常,若异常则有红色填充警示。从图 10 中可以看到所选构件的构架编号为 JG-03-D1-beam-01,界面下方为生成的主体结构施工进度计划横道图。施工调度平台可协助施工人员掌握施工现场的施工状态,为后续工作提供辅助。点击调度操作按钮可查询当前的项目施工调度方案,如图 11 所示。图 11(a)为第二层叠合梁调度方案的详细调度列表,调度列表中包含构件的施工工序、工序施工的班组和时间段,图 11(b)为调度平台的调度方案横道图,便于对施工现场的施工人员进行工作安排。



(a) 第1天调度方案



(b) 第2天调度方案



(c) 第3天调度方案

图 9 调度方案横道图

Fig. 9 Scheduling scheme crosswalk diagram

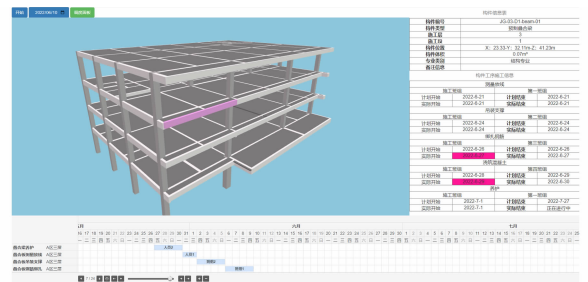


图 10 装配式施工过程调度平台

Fig. 10 Prefabricated construction process scheduling platform

在案例模拟分析过程中,输入施工实际进度信息中设定了部分构件施工中实际进度相比计划进度慢。在项目进行的第 8 天,达到了预警的阈值,触发了预警系统报警,报警信息如图 12 所示,预警主要内容为实际进度与计划进度的偏差来源,以及偏差产生的原因。在发生预警后,为了赶上计划工期,对资源投入量和班组信息进行调整,一是增加了一个

6 结语

(1)为保证施工现场调度的准确性,及时应对施工中的不确定因素,搭建了基于数字孪生的装配式建筑施工过程调度框架,通过案例分析,验证了该调度框架的可行性和有效性。

(2)根据装配式建筑施工内容建立孪生虚体模型,在此基础上研究了施工调度方案生成服务和装配式建筑施工调度模型,实现了施工调度的自动生成和优化,能够有效减少人工编制调度方案的时间成本。

(3)在数字孪生调度框架下,结合进度偏差分析和智能算法,提出装配式建筑施工过程动态调度方法,能够实现持续且动态的施工现场调度,为实现施工现场高效调度提供了新思路。后续工作将深入探究基于数字孪生的装配式施工过程动态调度理论框架,将施工现场的更多影响因素纳入数字孪生虚体模型中,研究多目标动态调度问题。

参考文献:

References:

[1] CHAN A P C, SCOTT D, LAM E W M. Framework of success criteria for design/build projects[J]. Journal of Management in Engineering, 2002, 18(3): 120-128.

[2] LUCKO G, ARAUJO L G, CATES G R. Slip chart-inspired project schedule diagramming: origins, buffers, and extension to linear schedules[J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2016, 142(5): 04015101.

[3] 戴成元, 陈链鑫, 梁邦勋, 等. 基于 BIM 的工程建造信息化管理模式研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(9): 10-14.

DAI Chengyuan, CHEN Lianxin, LIANG Bangxun, et al. Research on information management mode of engineering construction based on BIM[J]. Construction Economy, 2021, 42(9): 10-14.

[4] 樊启祥, 林 鹏, 魏鹏程, 等. 智能建造闭环控制理论[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(7): 660-670.

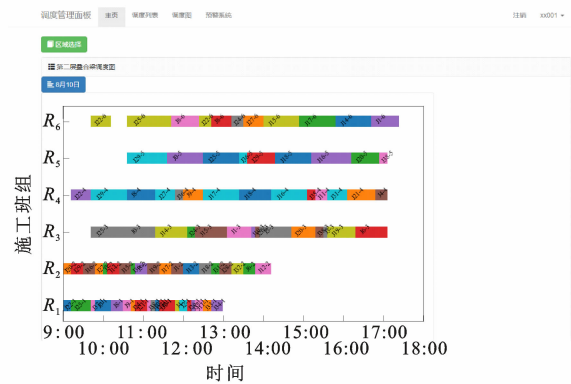
FAN Qixiang, LIN Peng, WEI Pengcheng, et al. Closed-loop control theory of intelligent construction [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(7): 660-670.

[5] 廖礼平. 绿色装配式建筑发展现状及策略[J]. 企业经济, 2019, 38(12): 139-146.

LIAO Liping. Development status and strategy of

项目编号	项目名称	构件名称	施工工序	施工班组	开始时间	结束时间	操作
S18002	KL6-200x400	S180021	预埋预埋	R2	2022-08-10 09:48:00.000	2022-08-10 09:48:00.000	删除
S18002	KL6-200x400	S180022	吊装预埋	R5	2022-08-10 10:36:00.000	2022-08-10 10:36:00.000	删除
S18002	KL6-200x400	S180023	节点预埋绑扎	R4	2022-08-10 11:36:00.000	2022-08-10 11:36:00.000	删除
S18002	KL6-200x400	S180024	节点预埋	R5	2022-08-12 09:18:00.000	2022-08-12 09:18:00.000	删除
S18002	KL6-200x400	S180025	节点预埋	R1	2022-08-10 10:00:00.000	2022-08-10 10:00:00.000	删除
S18005	KL6-200x400	S180051	吊装预埋	R2	2022-08-10 11:42:00.000	2022-08-10 11:42:00.000	删除
S18005	KL6-200x400	S180052	吊装预埋	R3	2022-08-10 13:00:00.000	2022-08-10 13:00:00.000	删除
S18005	KL6-200x400	S180053	节点预埋绑扎	R5	2022-08-10 16:42:00.000	2022-08-10 16:42:00.000	删除
S18005	KL6-200x400	S180054	节点预埋	R3	2022-08-11 12:36:00.000	2022-08-11 12:36:00.000	删除
S18005	KL6-200x400	S180055	节点预埋	R2	2022-08-12 14:18:00.000	2022-08-12 14:18:00.000	删除
S18008	KL6-200x400	S180081	吊装预埋	R3	2022-08-10 11:54:00.000	2022-08-10 11:54:00.000	删除
S18008	KL6-200x400	S180082	吊装预埋	R3	2022-08-11 09:06:00.000	2022-08-11 09:06:00.000	删除
S18008	KL6-200x400	S180083	节点预埋绑扎	R1	2022-08-11 10:48:00.000	2022-08-11 10:48:00.000	删除
S18008	KL6-200x400	S180084	节点预埋	R1	2022-08-11 11:18:00.000	2022-08-11 11:18:00.000	删除
S18008	KL6-200x400	S180085	节点预埋	R6	2022-08-11 13:36:00.000	2022-08-11 13:36:00.000	删除
S18008	KL6-200x400	S180086	节点预埋	R6	2022-08-11 15:00:00.000	2022-08-11 15:00:00.000	删除
S18001	KL6-200x300	S180011	吊装预埋	R1	2022-08-10 10:00:00.000	2022-08-10 10:00:00.000	删除
S18001	KL6-200x300	S180012	吊装预埋	R5	2022-08-10 15:30:00.000	2022-08-10 15:30:00.000	删除
S18001	KL6-200x300	S180013	节点预埋绑扎	R3	2022-08-11 12:36:00.000	2022-08-11 12:36:00.000	删除
S18001	KL6-200x300	S180014	节点预埋	R2	2022-08-11 15:36:00.000	2022-08-11 15:36:00.000	删除

(a) 施工调度方案列表



(b) 施工调度方案横道图

图 11 施工调度方案

Fig. 11 Construction scheduling scheme

项目编号	构件名称	施工工序	施工班组	计划开始时间	计划结束时间	实际开始时间	实际结束时间	操作
S18005	KL6-200x400	S180054	节点预埋	2022-08-11 12:36:00.000	2022-08-11 12:36:00.000	2022-08-12 14:09:00.000	2022-08-12 14:09:00.000	删除
S18121	KL420x200x400	S181214	节点预埋	2022-08-11 16:36:00.000	2022-08-11 16:36:00.000	18:09:00.000	18:09:00.000	删除
S18140	KL10-200x400	S181403	节点预埋	2022-08-11 15:12:00.000	2022-08-11 15:12:00.000	16:45:00.000	16:45:00.000	删除
S18033	KL540x200x400	S180334	节点预埋	2022-08-11 13:48:00.000	2022-08-11 13:48:00.000	2022-08-12 15:21:00.000	2022-08-12 15:21:00.000	删除
S18030	KL500x200x400	S180304	节点预埋	2022-08-11 13:06:00.000	2022-08-11 13:06:00.000	2022-08-12 14:39:00.000	2022-08-12 14:39:00.000	删除
S18064	KL500x200x400	S180604	节点预埋	2022-08-11 14:42:00.000	2022-08-11 14:42:00.000	16:18:00.000	16:18:00.000	删除
S18001	KL4-200x400	S180013	节点预埋	2022-08-11 13:30:00.000	2022-08-11 13:30:00.000	2022-08-12 17:03:00.000	2022-08-12 17:03:00.000	删除
S18070	Lq3-200x400	S180704	节点预埋	2022-08-11 14:18:00.000	2022-08-11 14:18:00.000	2022-08-12 14:39:00.000	2022-08-12 14:39:00.000	删除

图 12 预警面板

Fig. 12 Early warning panel

施工班组,二是对原来效率较低的施工班组进行调整,提升施工班组效率。更新资源信息后,调用调度方案生成服务生成新调度方案。新施工调度方案达到预期的施工工期要求后,更新为当前施工调度方案,并将调度方案传至施工人员中执行。在此过程中,减少了装配式建筑施工过程中方案调度的时间和计算量,可通过不断尝试不同的调度方案进行模拟分析,得出合适的调度方案。

- green prefabricated building[J]. Enterprise Economy, 2019,38(12):139-146.
- [6] 杨怡莹. 装配式建造模式下资源受限项目调度优化研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2021.
YANG Yiyang. Research on scheduling optimization of resource-constrained projects under prefabricated construction mode[D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2021.
- [7] 陈伟,秦海玲,童明德. 多维作业空间下的装配式建筑工程资源调度[J]. 土木工程学报,2017,50(3):115-122.
CHEN Wei, QIN Hailing, TONG Mingde. Resource scheduling for prefabricated building based on multi-dimensional working areas[J]. China Civil Engineering Journal,2017,50(3):115-122.
- [8] 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.
YU Miao, XIE Wu, XIANG Yinghui. Method for resource-constrained scheduling problem of prefabricated building project in multi-mode[J]. Science Technology and Engineering,2021,21(34):14749-14754.
- [9] 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.
LIAN Jing. Research on multi-objective optimization of prefabricated construction project scheduling[D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology,2020.
- [10] 曹远冲,熊辉,庄存波,等. 基于数字孪生的复杂产品离散装配车间动态调度[J]. 计算机集成制造系统,2021,27(2):557-568.
CAO Yuanchong, XIONG Hui, ZHUANG Cunbo, et al. Dynamic scheduling of complex product discrete assembly workshop based on digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2021, 27(2):557-568.
- [11] 陶飞,刘蔚然,张萌,等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(1):1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2019,25(1):1-18.
- [12] 庄存波,刘检华,熊辉,等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统,2017,23(4):753-768.
ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2017,23(4):753-768.
- [13] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(1):1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1):1-18.
- [14] 赵浩然,刘检华,熊辉,等. 面向数字孪生车间的三维可视化实时监控方法[J]. 计算机集成制造系统,2019,25(6):1432-1443.
ZHAO Haoran, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. 3D visualization real-time monitoring method for digital twin workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2019,25(6):1432-1443.
- [15] VANDERHORN E, MAHADEVAN S. Digital twin: generalization, characterization and implementation[J]. Decision Support Systems,2021,145:113524.
- [16] JIANG F, MA L, BROYD T, et al. Digital twin and its implementations in the civil engineering sector[J]. Automation in Construction,2021,130:103838.
- [17] 葛世荣,张帆,王世博,等. 数字孪生智采工作面技术架构研究[J]. 煤炭学报,2020,45(6):1925-1936.
GE Shirong, ZHANG Fan, WANG Shibao, et al. Digital twin for smart coal mining workplace: technological frame and construction[J]. Journal of China Coal Society,2020,45(6):1925-1936.
- [18] 刘占省,史国梁,焦泽栋. 基于数字孪生的预应力钢结构施工安全智能化分析方法[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(4):157-165.
LIU Zhansheng, SHI Guoliang, JIAO Zedong. Intelligent analysis method for prestressed steel structure construction safety based on digital twin[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(4):157-165.
- [19] 谢琳琳,陈雅娇. 基于BIM+数字孪生技术的装配式建筑项目调度智能化管理平台研究[J]. 建筑经济,2020,41(9):44-48.
XIE Linlin, CHEN Yajiao. Research on intelligent management platform of prefabricated building project scheduling based on BIM+digital twin technology[J]. Construction Economy,2020,41(9):44-48.
- [20] 韩冬辰,张弘,刘燕,等. 从BIM到BDT:关于建筑数字孪生体(BDT)的构想研究[J]. 建筑学报,2020(10):95-101.
HAN Dongchen, ZHANG Hong, LIU Yan, et al. From BIM to BDT: research on the conception of building digital twin[J]. Architectural Journal,2020

- (10):95-101.
- [21] 王 强,林 如,李雪来. BIM+数字孪生技术的装配式轨道交通工程预制构件生产管理应用研究[J]. 工程管理学报,2021,35(3):88-93.
WANG Qiang, LIN Ru, LI Xuelai. Application of BIM+ digital twin technology in prefabricated rail transit project production management[J]. Journal of Engineering Management,2021,35(3):88-93.
- [22] 刘占省,邢泽众,黄 春,等. 装配式建筑施工过程数字孪生建模方法[J]. 建筑结构学报,2021,42(7):213-222.
LIU Zhansheng, XING Zezhong, HUANG Chun, et al. Digital twin modeling method for construction process of assembled building[J]. Journal of Building Structures,2021,42(7):213-222.
- [23] 陶 飞,张 贺,戚庆林,等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. 计算机集成制造系统,2021,27(1):1-15.
TAO Fei, ZHANG He, QI Qinglin, et al. Theory of digital twin modeling and its application[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2021,27(1):1-15.
- [24] 郭红领,叶啸天,任琦鹏,等. 基于 BIM 和规则推理的施工进度计划自动编排[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(2):189-198.
GUO Hongling, YE Xiaotian, REN Qipeng, et al. Automatic generation of construction schedules based on BIM and rule reasoning[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2022, 62(2): 189-198.