

装配式桥梁预制梁片生产-运输-施工协同机制

柯友煌, 尤志嘉

(福建理工大学 土木工程学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为解决装配式桥梁预制梁片供应难以协同的问题, 系统的研究了影响生产-运输-施工协同效能的关键绩效指标与变量因素, 构建了包含目标层、指标层和变量层的三级协同评价指标体系, 并采用优序图法确定评价指标体系中各项指标的权重, 明确各项因素对协同绩效的影响机制。在评价指标体系的基础上, 构建集生产-运输-施工于一体的可视化仿真平台, 并开展多情景仿真实验对评价指标体系的有效性进行验证。研究结果表明: 改善库存策略存在效益饱和点, 运输车辆配置呈现边际效益递减特征, 信息时效性与运输距离是对协同绩效影响最为显著的关键变量, 基于实验结果, 进一步提出了优化策略的优先级序列。构建的协同评价指标体系与仿真平台能够灵敏、准确地反映不同因素变化对协同绩效的作用效果, 可为装配式桥梁供应链的精细化协同管理提供参考。

关键词: 装配式桥梁; 协同; 评价指标体系; 仿真

中图分类号: U455.1

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2026)03-0233-09

Production-transportation-construction coordination mechanism of refabricated bridge beams

KE Youhuang, YOU Zhijia

(School of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: To address the challenge of coordinating the supply of prefabricated bridge beams, this study systematically investigates the key performance indicators and variable factors affecting the efficiency of production-transportation-construction synergy. A three-level collaborative evaluation indicator system, consisting of a target layer, an indicator layer and a variable layer, is constructed. The preference mapping method is employed to determine the weights of various indicators within this system, thereby elucidating the influence mechanisms of different factors on collaborative performance. Based on this evaluation indicator system, a visualized simulation platform integrating production, transportation, and construction is developed. Multi-scenario simulation experiments are then conducted to validate the effectiveness of the evaluation indicator system. Research findings indicate that improving inventory strategies exhibits a saturation point for benefits, while the configuration of transportation vehicles shows diminishing marginal returns. Furthermore, information timeliness and transportation distance are the key variables affecting collaborative performance. Based on these experimental results, a prioritized sequence of optimization strategies is proposed. The developed collaborative evaluation indicator system and simulation platform can sensitively and accurately reflect the impact of varying factors on collaborative performance, offering ideas and methods for the refined collaborative management of prefabricated bridge supply chains.

Keywords: prefabricated bridge; coordination; evaluation indicator system; simulation

收稿日期: 2025-07-04

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2022J01926); 福建省交通运输厅科技项目(SF202302)

第一作者简介: 柯友煌(2001—), 男, 福建泉州人, 硕士研究生, 研究方向: 智能建造。

通信作者: 尤志嘉(1984—), 男, 福建泉州人, 副教授, 博士, 研究方向: 智能建造、工程管理信息化。

桥梁工程因结构设计复杂、施工要求精准、施工地点地质环境多变,以及需大型设备与多工种协同作业等特点,施工难度高、安全风险大。在建造过程中应用预制生产和装配施工可提高项目效率、保证工程质量、降低安全风险、减轻环境污染^[1]。但装配式桥梁预制梁片的生产-运输-施工过程存在生产工序复杂、协同调度困难、资源分配不合理等问题,使其在技术、质量、环保等方面的优势未能充分体现^[2-3]。

目前,学者主要针对装配式桥梁预制梁片的生产、运输和施工过程中的局部环节展开研究。Yu 等^[4]建立了生产与工序转运相互作用的鲁棒调度模型,采用混合遗传-模拟退火优化算法求解,提高了生产效率和系统稳定性。王朝静等^[5]构建了基于状态感知的预制构件生产动态调度优化模型,利用 RFID (radio frequency identification, 射频识别) 监测状态感知需求,建立多工序多时段的资源动态配置规则与完成时间优化方法,实现预制构件生产的成本最小化和交付率最大化。Dan 等^[6]建立了考虑时间窗的生产与运输集成调度优化模型,设计遗传算法求解,在保证交付及时性的同时提升了运输经济性。宇琦琦^[7]针对资源-工期-成本多目标问题提出鲁棒性量化指标,开发了资源受限装配式项目施工调度多目标优化设计系统,简化了施工调度优化过程。

针对多主体协同、资源动态调度等复杂运营系统问题,虚拟仿真技术能够有效呈现数学模型和智能算法中难以量化的动态过程,并验证系统优化策略的可行性^[8]。王琳焯等^[9]提出基于层次型多智能体建模方法的云制造平台-企业协同调度仿真模型,为企业的协同调度策略进行测试和优化。陈浩^[10]通过成本-产能分析选出最优生产方案,对其进行流程优化,并运用仿真模型论证

了该优化方案在提升生产效率方面的有效性。张新伟等^[11]针对施工工艺复杂所导致的班组窝工事件频发问题,通过对施工过程进行仿真模拟,优化了班组配置,提高了资源利用率。

现有研究多侧重局部优化,较少考虑“生产-运输-施工”间的动态耦合,且多依赖数学模型,缺乏系统仿真与实证,制约了优化策略在整体工程中的应用,导致缺乏对定制化强、节拍高的装配式桥梁工程的一体化评价方法。

本文针对供应链协同难题,以预制梁片的生产-运输-施工为研究对象,构建了生产效率、库存策略、运输能力、订单波动及信息时效性为关键因素,准时交付率、订单满足率、平均库存水平及订单处理周期为核心指标的装配式桥梁生产-运输-施工协同评价指标体系,运用优序图法确定权重,基于 Anylogic 开发动态仿真平台,通过多组实验探究各因素对协同绩效的影响规律,验证了指标体系的合理性。研究成果可为优化协同管理提供量化决策依据。

1 装配式桥梁预制梁片生产-运输-施工协同多目标评价

预制梁片的生产、运输与现场装配是装配式桥梁建造的核心环节。其供应体系可视为一个由施工计划驱动的二级供应链,具有构件定制化程度高、体积质量大、工艺复杂、生产周期长的特点,因此,必须实现三个环节的紧密耦合与协同以保障及时交付。

1.1 影响因素分析

根据文献[12-15],对影响生产-运输-施工协同效能的因素进行识别与分析,主要影响因素如表 1 所示。

表 1 装配式桥梁预制梁片生产-运输-施工高效协同主要影响因素

Tab.1 Main influencing factors for efficient production-transportation-construction coordination of prefabricated bridge beams

| 节点 | 干扰因素 | 可能原因 |
|------|----------|--------------------|
| 预制梁场 | 生产效率波动 | 设备故障、工序协作冲突、技术水平波动 |
| | 构件质量不达标 | 工艺标准执行不严、质检流程疏漏 |
| | 劳动力闲置 | 工序衔接不顺畅、工种协作冲突 |
| | 库存积压成本攀升 | 库存调度策略不合理、计划变更频繁 |

表1(续)

| 节点 | 干扰因素 | 可能原因 |
|------|---------|-------------------|
| 配送物流 | 运输道路拥挤 | 交通事故、道路施工 |
| | 运输车辆故障 | 日常维护不足、超载运输 |
| | 装卸效率低 | 设备紧缺、人员技能不足、场地限制 |
| | 物流信息不透明 | GPS定位延迟、信息沟通不畅 |
| 施工现场 | 施工进度缓慢 | 极端天气、构件未及时交付、质量缺陷 |
| | 需求计划变更 | 施工计划频繁调整、设计变更 |
| | 存储空间不足 | 场地规划不合理、材料进程节拍失衡 |
| | 设备协调问题 | 多工序设备共用、调度响应迟缓 |

1.2 协同评价指标体系构建

装配式桥梁的生产-运输-施工协同是一个复杂的系统工程,需要各环节在计划、资源和信息上高度耦合。构建由总目标层、指标层和变量层组成的三级协同评价体系,可以系统评估协同效能^[16]。总目标层为协同机制的综合评价,指标层作为其量化维度反映协同特征,变量层由影响指标的关键驱动参数构成。

在预制梁片供应过程中,施工方作为客户其核心诉求是按时按量收货以保障施工连续性,预制梁场作为供应商则期望获得稳定订单并控制成本。由于施工现场存在多变量,施工计划常发生偏移,因此需要运输和生产计划能够动态调整。基于此,选取订单满足率、平均库存水平、准时交付率及订单处理周期四项指标构建指标层,从多维度量化协同效能。其中,订单满足率衡量供应链响应需求的能力,平均库存水平反映库存策略合理性与供需匹配程度,准时交付率反映各环节计划的匹配度,订单处理周期表征供应过程的响应速度和运作效率。

基于表1的影响因素分析,进一步提炼出六个可量化、可干预的自变量构成变量层。将预制梁场的“生产效率波动”和“劳动力闲置”整合为“生产效率”变量;将库存相关问题归结为“库存策略”变量;将物流环节的“运输道路拥挤”和“车辆故障”归纳为“运输车辆”与“运输距离”变量;将施工阶段的“需求计划变更”抽象为“订单波动”变量;并将贯穿全程的“信息不透明”问题提炼为“信息时效性”变量。最终,总目标层、指标层和变量层共同形成了的三级协同评价指标体

系,如图1所示。

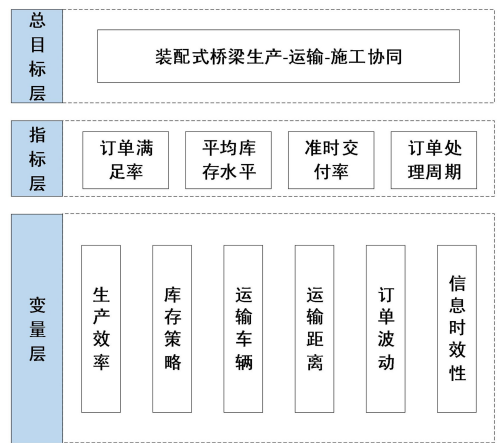


图1 装配式桥梁生产-运输-施工协同评价指标体系
Fig.1 Evaluation indicator system for production-transportation-construction coordination of prefabricated bridges

1.3 指标权重计算

装配式桥梁生产-运输-施工协同评价指标体系兼具定性与定量指标特征,实际工程数据存在样本量有限、区域适用性弱的问题,难以满足客观赋权方法对数据完整性、一致性的要求。因此,采用基于主观赋权法的优序图法确定指标权重。

(1) 建立优序图矩阵。如表2所示,建立 $n \times n$ 矩阵,其中 n 为评价指标的个数, W_{ij} 为指标 A_i 相对于指标 A_j 的影响程度。通过专家的经验对指标进行两两比较,当指标 A_i 与指标 A_j 同等重要时(含对角线元素), $W_{ij} = W_{ji} = 0.5$,当指标 A_i 的重要性大于指标 A_j 时, $W_{ij} = 1$ 且 $W_{ji} = 0$;当指标 A_i 的重要性小于指标 A_j 时, $W_{ij} = 0$ 且 $W_{ji} = 1$ 。

表 2 优序图矩阵示意图

Tab.2 Schematic diagram of priority diagram matrix

| | | | | | |
|-------|----------|----------|----------|-----|----------|
| | A_1 | A_2 | A_3 | ... | A_n |
| A_1 | W_{11} | W_{12} | W_{13} | ... | W_{1n} |
| A_2 | W_{21} | W_{22} | W_{23} | ... | W_{2n} |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| A_n | W_{n1} | W_{n2} | W_{n3} | ... | W_{nn} |

(2)计算指标优序值。将单一指标所在行的数值相加,得到的累计得分即为该指标的优序值。

(3)归一化求权重。单一指标的优序值与所有指标的优序值之和的比值,即为各指标的权重。

基于图 1 所示的装配式桥梁生产-运输-施工协同评价指标体系和表 2 所示的优序图法,设计针对指标层与变量层的专家评估问卷,并邀请 13 位行业专家进行线上评估,对每项指标的专家评分取平均值,列入专家打分评价表。指标层与变量层的判断矩阵及权重计算结果分别如表 3 和表 4 所示。由表 3 可知,“准时交付率”权重最高,表明梁片准时抵达是衡量协同管理的核心指标;“平均库存水平”权重最低,说明为保交付可容忍一定的库存成本。由表 4 可知,“信息时效性”和“运输距离”是关键驱动因素,信息效率与物理距离同等重要,是应对不确定性与实现同步运作的基础。相比之下,“订单波动”权重最小,说明系统在有效策略下具备抗需求波动能力。

表 3 指标层判断矩阵及权重计算结果

Tab.3 Judgment matrix and weight calculation results of indicator layer

| | 订单满足率 | 平均库存水平 | 准时交付率 | 订单处理周期 | 优序值 | 权重 |
|--------|-------|--------|-------|--------|------|-------|
| 订单满足率 | 0.50 | 0.87 | 0.18 | 0.73 | 2.28 | 0.285 |
| 平均库存水平 | 0.13 | 0.50 | 0.05 | 0.09 | 0.77 | 0.096 |
| 准时交付率 | 0.82 | 0.95 | 0.50 | 0.91 | 3.18 | 0.398 |
| 订单处理周期 | 0.27 | 0.91 | 0.09 | 0.50 | 1.77 | 0.221 |

表 4 变量层判断矩阵及权重计算结果

Tab.4 Judgment matrix and weight calculation results of variable layer

| | 生产效率 | 库存策略 | 运输车辆 | 运输距离 | 订单波动 | 信息时效性 | 优序值 | 权重 |
|-------|------|------|------|------|------|-------|------|-------|
| 生产效率 | 0.50 | 0.68 | 0.37 | 0.28 | 0.78 | 0.25 | 2.86 | 0.159 |
| 库存策略 | 0.32 | 0.50 | 0.25 | 0.18 | 0.65 | 0.15 | 2.08 | 0.116 |
| 运输车辆 | 0.63 | 0.75 | 0.50 | 0.35 | 0.82 | 0.32 | 3.34 | 0.186 |
| 运输距离 | 0.72 | 0.82 | 0.65 | 0.50 | 0.89 | 0.48 | 4.06 | 0.225 |
| 订单波动 | 0.22 | 0.35 | 0.18 | 0.11 | 0.50 | 0.08 | 1.44 | 0.080 |
| 信息时效性 | 0.75 | 0.85 | 0.68 | 0.52 | 0.92 | 0.50 | 4.22 | 0.234 |

权重分析结果揭示了“时间”与“信息”的主导作用,效能评价聚焦“准时交付率”,驱动因素集中于“运输距离”与“信息时效性”,反映了各因素对协同系统稳定性与效率的影响规律,为后续仿真实验设计提供了基础。

2 装配式桥梁预制梁片供应仿真平台

基于 Anylogic 软件构建装配式桥梁预制梁片供应仿真平台,模拟真实供应过程并进行量化分析。根据实际工程中预制梁片的供应过程建立仿真模型,工艺流程如图 2 所示。

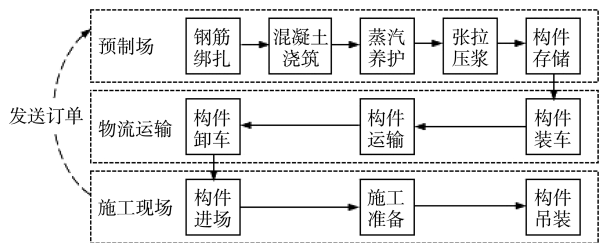


图 2 预制梁片生产-运输-施工工艺衔接

Fig.2 Production-transportation-construction integration for prefabricated bridge beams

2.1 参数设定及基本假设

界定状态变量和绩效指标是构建仿真平台并保障其有效运行的关键。状态变量是仿真过程中

用以追踪系统实时状态的动态数值,是内部模型计算的依据,如表 5 所示。绩效指标是仿真结束后,基于状态变量计算得出的综合性评价标准,用以量化评估系统的协同效果,如表 6 所示。

后,基于状态变量计算得出的综合性评价标准,用以量化评估系统的协同效果,如表 6 所示。

表 5 状态变量及其说明

Tab.5 State variables and their descriptions

| 变量名称 | 变量说明 | 变量名称 | 变量说明 |
|-----------------|-----------|-----------------|-------------|
| inProduceAmount | 正在生产的梁片数量 | orderAmount | 订单中预制梁片的数量 |
| inventory | 存梁区的构件数量 | orderReceive | 收到预制梁片数量 |
| produceAmount | 待产梁片数量 | onTimeAmount | 按时到达的预制梁片数量 |
| shortage | 货物短缺次数 | orderSendAmount | 发送订单的次数 |

表 6 绩效指标的定义与计算

Tab.6 Definition and calculation of performance indicators

| 指标名称 | 指标定义 | 对应组件的类型和名称 | 计算方式 |
|--------|--------------|---------------------|--|
| 订单满足率 | 收到订单时能够发货的比例 | 变量, orderFinishRate | $1 - \frac{\text{shortage}}{\text{orderSendAmount}}$ |
| 库存水平 | 预制梁场中构件的数量 | 变量, inventory | — |
| 准时交付率 | 预制梁片按时交付的比例 | 变量, onTimeRate | $\frac{\text{onTimeAmount}}{\text{orderReceive}}$ |
| 订单处理周期 | 发送订单到接收构件的时长 | 数据, orderCycle | $\frac{\sum_{i=1}^n \text{orderCycle}_i}{n}$ |

$\text{orderCycle}_i = \text{receive.time}_i() - \text{send.time}_i()$
 $n = \text{统计周期内的订单总数}$

基于工程实际约束与仿真目标,设定以下假设:

- (1)时间参数采用区间内随机方式生成,以体现事件的随机性与多变性。
- (2)预制梁场配有独立钢筋棚和搅拌站,原材料供应充足,不考虑因缺料停产的情况;且单片预制梁仅允许在单一生产线生产。
- (3)部分核心生产环节严格执行无中断作业,以确保关键工序的连续性。
- (4)每辆运输车辆单次仅承运单个构件,以保障运输安全和效率。
- (5)参考常规项目节拍,约束下游施工方需求:每周施工天数为 3~7 d,每日预制梁片需求量为 5 至 10 片。

2.2 设计仿真逻辑

仿真平台通过事件动态模拟预制梁片的供应过程,其供应协同决策流程如图 3 所示。

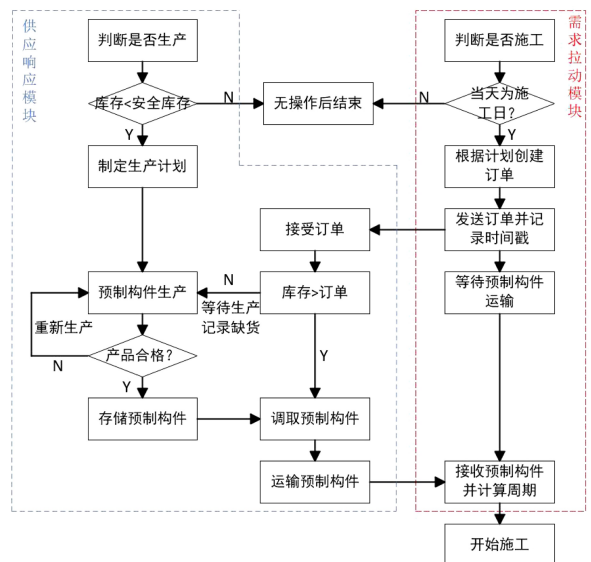


图 3 预制梁片供应协同决策流程图

Fig.3 Supply coordination decision-making flowchart for prefabricated beams

仿真逻辑分为两个核心模块：一为施工现场主导的“需求拉动”模块，该模块基于周施工计划生成构件订单，是供应过程的起点；二为预制梁场主导的“供应响应”模块，该模块以订单处理为核心，通过动态库存校验与灵活生产调度实现对需求的精准响应。“订单”作为贯穿两大模块的核心要素，有效串联信息流与实体物流。最终构建出高效协同的拉动式供应链体系。

2.3 平台构建与实现

借助 Anylogic 的多方法建模能力，通过将数据定义、核心逻辑与多智能体模型相结合，并辅以直观的可视化界面，构建集数据驱动、逻辑仿真与过程可视化于一体的装配式桥梁预制梁片供应仿

真实验平台，实现图 3 所示的协同决策流程。多智能体模型由预制梁场、货车和施工现场三个核心智能体构成，分别对应生产、运输和施工环节。核心智能体内部封装了各自的运行逻辑与交互规则，实现过程如图 4 所示。集成的预制梁场生产场景 3D 可视化交互界面如图 5 所示。

施工现场智能体每周基于约束条件生成周计划并创建订单，接收梁片后驱动现场施工作业。货车智能体收到订单后执行决策，综合评估需求与库存状态并判断是否启动运输，确定任务后执行运输流程。预制梁场智能体根据订单制定计划，当库存低于最小安全库存时创建任务，并结合产线空闲状态判断是否启动，确定启动后执行生产流程。



图 4 装配式桥梁预制梁片供应协同仿真平台逻辑架构图

Fig.4 Logical architecture of supply coordination simulation platform for prefabricated beams

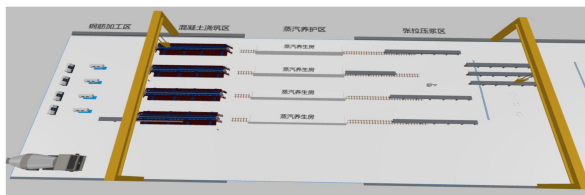


图 5 可视化仿真实验平台

Fig.5 Visual simulation experiment platform

3 仿真实验与结果分析

3.1 协同评价实验设计

采用“政永高速德化段”项目某预制梁场的实际数据(见表 7)为评价指标体系变量层的 6 个变量赋值，构建基准仿真场景。基准仿真场景的在仿真实验平台上的运行结果如图 6 所示。

表 7 实验变量说明及初始值

Tab.7 Definition of experimental variables and their baseline values

| 变量名称 | 变量定义与设置说明 | 初始值 |
|--------|---|---------|
| 生产效率 | 生产过程的各步骤设置延迟时长 | 24~28 h |
| 库存策略 | (s,S)策略,当库存低于再订货点 s 时,启动生产,将库存补充至目标库存水平 S | (10,30) |
| 运输车辆数量 | 同时可用的运输车辆总数 | 5 辆 |

表 7(续)

| 变量名称 | 变量定义与设置说明 | 初始值 |
|-------|-------------------|------------------------|
| 运输距离 | 从预制梁场到施工现场的距离 | 2.5~3 h |
| 订单波动 | 周施工计划的施工天数和预制梁片数量 | 每周施工天数:4~6 d,需求量:6~8 个 |
| 信息时效性 | 生成订单后发送至预制梁场的时间 | 1.5~2 h |

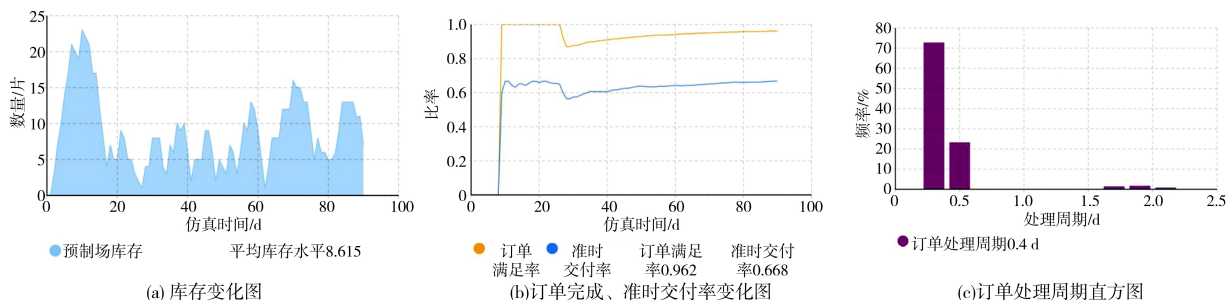


图 6 基准场景数据统计图

Fig.6 Data statistics chart of benchmark scenario

根据指标变量属性设定变动范围:离散型变量(运输车辆数、订单波动)按整数步长进行双向调整;连续型变量(生产时长、运输时长、信息时效)在波动区间内设梯度测试;管理型变量(库存策略)模拟不同的决策情境。

基于基准场景,采用控制变量法对每个变量设计 6 组不同水平,共开展 36 组独立实验。每组实验重复运行 7 次,选取订单满足率、准时交付率、平均库存水平及订单处理周期为核心指标,通过剔除极值后取均值处理数据。单次仿真设定为 90 天以覆盖完整施工周期,构件合格率设为 95%。

3.2 实验结果与分析

3.2.1 生产效率

图 7 为生产效率与各协同绩效指标的关系。

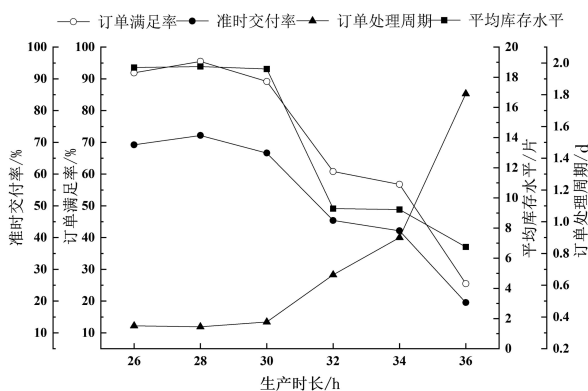


图 7 生产效率与各协同绩效指标的关系

Fig.7 Impact of production efficiency on collaborative performance indicators

以单片梁的生产时长量化生产效率,生产时长和生产效率呈负相关性,即生产时长越长,生产效率越低。如图 7 所示,随着生产时长的增加,订单处理时间上升,库存水平、订单满足率和准时交付率整体下降。生产效率在生产时间约 30 h 处为性能拐点,即生产时间低于该值时系统运行平稳,超过该值后生产能力无法满足需求,库存迅速耗尽,供应链进入失效状态。

3.2.2 库存策略

由图 8 可知,库存策略的影响可分为两个阶段:从(5,25)到(10,30)为增长期,订单满足率与准时交付率提高,订单处理周期缩短;超过(15,30)后进入饱和期,平均库存继续上升,但订单满足率趋近饱和,准时交付率与周期改善幅度有限。

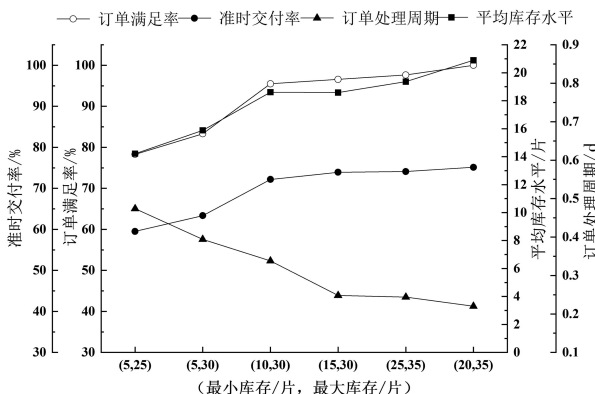


图 8 库存策略与各协同绩效指标的关系

Fig.8 Impact of inventory strategy on collaborative performance indicators

3.2.3 运输车辆数量

由图 9 可知,运输车辆增加对库存与订单满足率影响有限,对订单处理周期与准时交付率的改善呈现边际效益递减。车辆从 3 辆增至 4 辆时突破运输瓶颈,效益最显著;此后运输能力不再是主要约束,增益逐渐减弱。

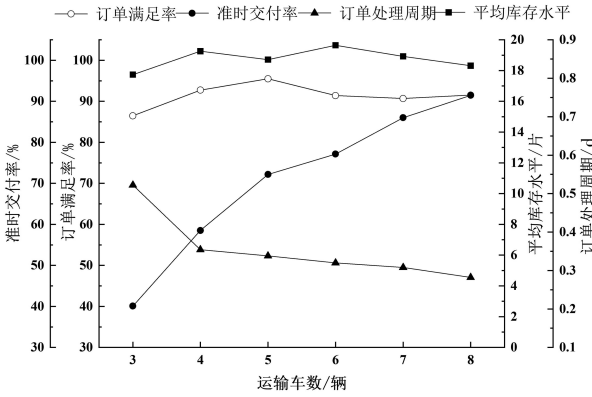


图 9 运输车辆数量与各协同绩效指标的关系

Fig.9 Impact of number of transport vehicles on collaborative performance indicators

3.2.4 运输距离

以车辆的运输时长量化运输距离,二者呈正相关。由图 10 可知,运输距离增加虽对库存水平与订单满足率影响有限,但会显著延长订单处理周期并削弱准时交付性能。当运输时长增至 6.5~7.5 h 时,准时交付率断崖式下跌至 10.68%,仅少数快速车辆可送达;若进一步增至 8.5~9.5 h,受时空约束限制,所有构件均无法按时送达,准时率彻底降为 0%。

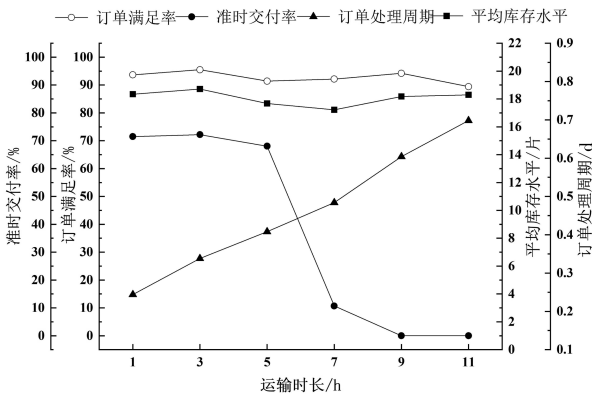


图 10 运输距离与各协同绩效指标的关系

Fig.10 Impact of transportation distance on collaborative performance indicators

3.2.5 订单波动

如图 11 所示,通过逐步扩大订单需求的随机

范围模拟需求不确定性的增加,随着订单处理周期延长,库存水平、订单满足率与准时交付率呈下降趋势。其影响模式与生产效率类似,但程度较弱,表明系统在合理调度策略下对需求波动具有一定的适应能力。

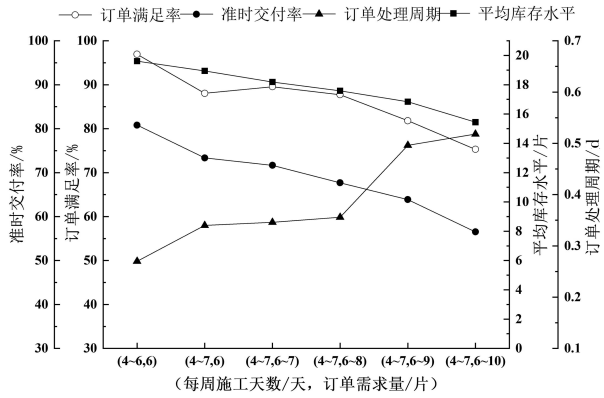


图 11 订单波动与各协同绩效指标的关系

Fig.11 Impact of order fluctuation on collaborative performance indicators

3.2.6 信息时效性

如图 12 所示,信息时效性与运输距离的影响高度相似。随着传递时间延长,库存与订单满足率无显著变化,但订单周期稳定增长。准时交付率则随信息延迟的加剧持续下降,当时长超过 6.5 h,系统准时交付能力完全失效,所有构件均无法按时送达。这表明信息时效性对供应链时间协调性能具有关键影响。

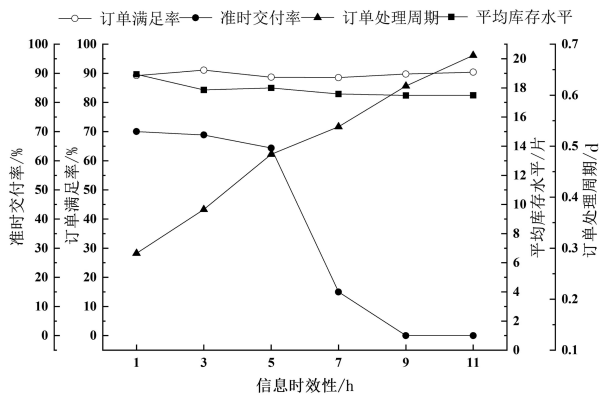


图 12 信息时效性与各协同绩效指标的关系

Fig.12 Impact of information timeliness on collaborative performance indicators

仿真实验与权重分析的结果表明,各变量对协同绩效的影响规律与指标权重设定吻合,时间因素是决定协同效率的关键。权重最高的运输距离(0.225)与信息时效性(0.234)展现出显著的

“失效阈值”:一旦延迟超过 6.5 h 临界点,准时交付率便从 80%以上急剧跌至 11%以下。同时,资源与能力类因素普遍存在“边际效益递减”和“性能拐点”:运输车辆从 3 辆增至 4 辆时性能提升最显著,此后增益逐渐减少;生产效率在单片梁生产时长低于 30 h 能有效支撑需求,一旦超过该“性能拐点”,系统将迅速陷入供不应求的困境;库存策略在参数超过(15,30)后,其效益提升也进入“饱和期”。此外,系统对外部扰动表现出“鲁棒性”,权重最低的订单波动(0.080)虽导致绩效指标平缓下降,但并未引发系统崩溃。

4 结论

1) 构建的装配式桥梁生产-运输-施工协同

评价指标体系为该领域协同性的系统评估提供了一种思路参考与方法借鉴。装配式桥梁生产-运输-施工高效协同的核心目标是实现预制梁片的精准、按时交付,而非简单的物资运抵,因此,准时交付率是衡量生产-运输-施工协同水平的首要指标。

2) 装配式桥梁预制梁片供应仿真实验结果与优序图法得出的结论一致,装配式桥梁生产-运输-施工协同的优化策略按优先级由高到低排序如下:强化信息流的实时交互、提升运输组织与运行效率、提高生产效率、改进库存策略、增强对订单波动的柔性应对。

参考文献:

- [1] 王凯,张嘉欣,任杰,等. 基于 SEM-云物元的装配式桥梁施工绿色度评价[J]. 安全与环境工程,2025,32(4):94-104,247.
- [2] 赵俊林,饶舰,程文诚,等. 基于 BIM+GIS+IoT 的装配式桥梁全过程数字建造体系研究[J]. 工程管理学报,2024,38(3):82-87.
- [3] LIU W, HAN L Y. Evolution game analysis of supply chain synergy benefits of prefabricated building projects[J]. Applied Sciences,2023,13(21):11862.
- [4] YU M, WANG L X, RUAN W X, et al. Robust optimization for precast component production scheduling considering component transfer[J]. Journal of Construction Engineering and Management,2025,151(10):04025156.
- [5] 王朝静,刘松杨,李可. 基于实时需求的预制构件生产动态调度优化研究[J]. 工业工程与管理,2025,30(2):43-53.
- [6] DAN Y R, LIU G W. Integrated scheduling optimization of production and transportation for precast component with delivery time window[J]. Engineering, Construction and Architectural Management,2024,31(8):3335-3355.
- [7] 宇琦琦. 资源受限装配式建筑项目施工调度多目标优化研究[D]. 西安:西安理工大学,2024.
- [8] CHENG S D, ZHOU X, ZHANG Y H, et al. Study on resilience factors and enhancement strategies in prefabricated building supply chains[J]. Buildings,2024,14(1):195.
- [9] 王琳煊,刘永奎,张霖,等. 基于 Anylogic 的云制造平台-企业协同调度仿真系统[J]. 系统仿真学报,2025,37(9):2225-2241.
- [10] 陈浩. 基于多方案比选的 PC 构件生产流程优化与仿真研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
- [11] 张新伟,邹贻权. 基于 AnyLogic 的装配式建筑施工模拟仿真实践[J]. 湖北工业大学学报,2023,38(6):52-55.
- [12] LIU T Y, MA L, FU H W. Exploring critical factors influencing the resilience of the prefabricated construction supply chain [J]. Buildings,2025,15(2):289.
- [13] 夏启朔,于德湖,蒋伟,等. 装配式建筑 PC 构件供应链智慧化管理研究进展[J]. 施工技术(中英文),2024,53(17):55-66.
- [14] QIAO Y N, SHI X B, REN J, et al. Synergetic order parameter identification of prefabricated building projects based on main theme analysis[J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2022,47(4):5109-5123.
- [15] 王晓刚,韩雪莹,刘昭,等. 装配式建筑设计-生产-施工协同度评估研究[J]. 铁道标准设计,2023,67(10):208-213.
- [16] 冯凌俊. 基于多智能体的装配式建筑精益供应链协同机制研究[D]. 福州:福建工程学院,2022.

(责任编辑:马晓磊)