

装配式建筑智能建造生产线优化研究

米诗烨

北海市住房和城乡建设局 广西 北海 536000

【摘要】：装配式建筑构件生产由多品种、小批量订单驱动，钢筋加工、模台准备、布料振捣、养护及脱模等工序常因节拍失衡，造成在制品积压。现围绕生产线信息流与物流不同步问题，梳理设备、工艺和订单之间的协同机理，提出以交付稳定、质量可追溯和设备均衡为核心的优化目标。通过工序数据归一、瓶颈工位识别、数字孪生排程与动态任务安排，形成可随订单变化滚动修正的运行方案，为预制构件工厂由单机自动化转向整线协同提供参考。

【关键词】：装配式建筑；智能建造；预制构件；生产线优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.19.036

引言

预制构件工厂已经标配数控钢筋设备、自动布料机和养护窑等自动化装备，但设备自动化并不等于生产线智能化。现有管理常按单台设备利用率安排任务，忽略构件族差异及缓冲区容量，造成局部高负荷与整线低产出的矛盾。生产线优化需要以订单为牵引，把 BIM 模型、制造执行系统和现场感知数据接成连续闭环，在不虚增设备的前提下压缩等待与返工。这也是装配式建筑智能建造生产线优化研究的起点。

1 装配式建筑智能建造生产线运行现状及问题分析

1.1 工序节拍不均衡，在制品库存积压严重

装配式预制构件生产具备多品种、小批量、定制化的订单生产特征，钢筋加工、模台组装、混凝土布料振捣、窑内养护、脱模分拣等核心工序工艺时长差异显著，生产线固有节拍无法适配动态订单需求。当前预制工厂多采用固定化生产节拍排布作业计划，未针对异形构件、标准构件的工艺差异进行动态调整，养护工位等慢速工序作业时长远大于前端加工工序，形成生产线核心瓶颈工位。前端工序设备持续高速产出构件半成品，后端瓶颈工位处理能力受限，工序间缓冲区容量有限，最终造成大量在制品堆积，大幅增加构件磕碰、污染、形变的质量风险，同时占用生产线有效作业空间，降低整体生产流转效率^[1]。

1.2 信息流与物流协同脱节

现阶段预制构件生产线已实现单机设备自动化升级，数控钢筋加工设备、自动布料机、智能养护窑等自动化装备可独立完成标准化作业，但各设备、各工序数据系统相互独立，存在明显的信息孤岛问题。生产过程中 BIM 设计数据、制造执行系统排程数据、现场设备感知数据无法形成闭环流转，物料领用、工序加工、构件转运等物流作业缺乏实时数据支撑。订单变更、构件参数调整信息无法同步至各生产工位，导致物料

投放与设备作业节奏不匹配，出现物料超前投放堆积、滞后投放停工待料的问题，彻底割裂了生产线物料流转与数据管控的协同关系。

2 基于数字协同的装配式建筑生产线智能优化策略

2.1 优化目标

装配式构件生产线的目标体系可分为交付、流动、质量和资源四层。交付层关注订单按期完成率与最大拖期，流动层关注构件平均等待时间和在制品数量，质量层关注首检通过与追溯记录闭合，资源层关注瓶颈设备负荷及班组均衡。各指标不能等权处理，应先设置硬约束，再在可行方案中比较综合成本^[2]。该设置把管理意图转成排程器可识别的参数，避免班组凭经验反复改序。权重变化应保留版本记录，便于复盘排程取向。综合调度目标见式（1），用于方案计算。

$$F = w_1 T + w_2 W + w_3 C + w_4 E \quad (1)$$

式（1）中：F 为综合调度目标；T 为订单拖期量；W 为构件等待时间；C 为换模与转运成本；E 为单位构件能耗；w₁、w₂、w₃、w₄ 为依据交付风险设定的非负权重。式（1）不预设固定权重，紧急订单进入时可提高拖期量 T 的权重，能源约束收紧时再提高单位构件能耗 E 的权重；等待时间 W 和换模转运成本 C 用于区分可行方案，所有方案仍须先满足养护、质量和设备能力等硬约束。

2.2 优化方法

先依据时间戳重建构件经过各工位的实际路径，将加工时间与等待时间分开，识别制约整线的真实瓶颈。智能制造技术在装配式施工中的应用已经呈现设备联动和数据驱动方向，设备动作只有与订单、构件编码和质量状态同步，才能转化为整线效率^[3]。滚动排程不一次锁死全天任务，而是每当班次开始、关键设备停机或紧急订单进入时重算剩余任务；已进入加工的构件保持稳定，未投产任务按交期和瓶颈负荷重新排序。

2.3 生产对象及数据来源

墙板、叠合板、楼梯和异形构件在模具、钢筋复杂度、布料方式及养护时长上差异明显，同族连续生产可减少清模和参数切换，但过度成批会推迟高优先级订单。基础数据来自 BIM 深化模型和订单清单，运行数据来自制造执行系统、设备控制器、标签定位与质量终端，人工补录只保留异常原因和处置结论。预制构件智能建造应用表明，设计信息向生产端贯通后，构件编码、加工指令与检验记录才能保持对应，这是自动加工和过程追溯的前提^[4]。这些状态还应随构件流转到下一工位，并在交接时核对版本和完整性。

3 装配式建筑智能生产线优化运行效果

3.1 项目概况

本次生产线优化效果依托某 PC 构件厂实际工程项目开展验证，该厂主要生产装配式墙板、叠合板等建筑预制构件，适配多品种、小批量的住宅装配式订单生产模式。项目针对传统生产线工序节拍失衡、数据孤岛、设备负荷不均、生产管控粗放等问题，落地数字孪生排程、MES 工位级精细化管控、全工序信息流与物料流协同优化方案，实现生产线从单机自动化向整线智能化协同迭代，优化后整体生产效能、产品质量与成本管控均取得显著提升。

3.2 核心优化运行成效

本次优化通过瓶颈工位精准识别、动态节拍匹配与全局负荷均衡调控，彻底改善传统生产在制品积压、无效作业冗余、设备利用率偏低的行业痛点。依托 BIM 模型数据联动与全流程智能管控，构建构件全生命周期质量追溯体系，有效规避人工操作带来的精度偏差与质量隐患，构件加工尺寸偏差稳定控

制在亚毫米级。同时精益化排程模式大幅压缩停工待料、工序等待时长，平衡各工位作业负荷，削减无效生产能耗与管理成本，实现产能、质量、效益多维提升。优化前后核心指标对比如表 1 所示。

表 1 生产线优化前后核心生产指标对比

核心生产指标	优化前	优化后	优化成效
设备综合效率（OEE）	67.2%	88.5%	提升 21.3%
在制品积压率	27.6%	7.3%	降幅 73.5%
构件外观缺陷率	5.1%	0.4%	降幅 92.2%
单线管理人员配置	7 人	3 人	管理成本降低近 60%

由实测数据可知，优化后生产线整线协同能力大幅增强，产能释放效率显著提升，产品良品率与生产稳定性全面优化，有效解决传统预制构件生产低效、高耗、低精度的短板，为同类 PC 构件智能生产线优化提供工程实践参考。

4 结语

优化应从构件统一编码和齐套释放入手，围绕瓶颈工位组织有限缓冲，用数字孪生验证排程，再通过滚动任务安排处理插单、停机与返修。评价重点应落在交付稳定、等待压缩、质量闭环和资源冲突减少，而不是单台设备利用率。后续应用中还需持续校准标准工时、人员能力和能耗参数，使模型随工厂真实运行更新，并将生产追溯数据延伸至运输安装环节，形成设计、制造与施工贯通的智能建造链。

参考文献：

- [1] 牟德财.智慧建造技术在装配式结构建筑中的应用研究[J].砖瓦,2026,(6):97-99.
- [2] 卢显杰,高慧,魏伟.装配式建筑项目智能建造成熟度评价与模型构建方法[J].科学技术与工程,2026,26(11):4800-4812.
- [3] 瞿灿.智能制造技术在装配式建筑施工中的应用[J].住宅与房地产,2026,(11):68-70.
- [4] 姜峰.智能建造视角下装配式绿色建筑质量控制策略研究[J].石材,2026,(3):170-172.