

数字孪生与智能装备驱动的施工质量控制

杨渊清

山西省建筑装饰工程有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i6.21003

[摘要] 2004年在太原氢能重卡装备组装线及氢能展示中心项目驻场时,我发现仅靠增加人工和机械投入并不能直接解决管线碰撞问题^[1]。我结合该项目及公司近三年10多个同类项目的实操数据,重点复盘BIM与物联网等数字技术在实体机械上的落地难点。特别是在山西临汾易展现代城市商业综合体机电施工中,我们通过调整数控切割机的参数阈值,将支架安装一次合格率从75%提升至95%以上^[1]。基于此,我提炼出一套覆盖“人材机法环”的质量控制清单,试图为一线项目提供一套便于参考、源于实际的操作手册,而非单纯的理论推演。最后,文章展望了未来“智慧工地”的日常图景,为行业从业者描绘了一条清晰可感的转型升级路径。

[关键词] 建筑工程; 机械化施工; 智能建造; 质量控制

中图分类号: TU761.6 **文献标识码:** A

Construction Quality Control Driven by Digital Twins and Smart Equipment

Yuanqing Yang

Shanxi Provincial Construction Decoration Engineering Co., Ltd.

[Abstract] During my residency at the Taiyuan Hydrogen Heavy-Duty Truck Assembly Line and Hydrogen Exhibition Center project in 2004, I observed that simply increasing manpower and machinery failed to resolve pipeline collision issues^[1]. Drawing on operational data from this project and over ten similar projects undertaken by my company in the past three years, this paper reviews the practical challenges of deploying digital technologies—such as BIM and the Internet of Things—in physical construction machinery. Notably, during the electromechanical installation phase of the Shanxi Linfen Yichen Modern Urban Commercial Complex, adjusting the parameter thresholds of CNC cutting machines raised the first-pass acceptance rate for bracket installations from 75% to over 95%^[1]. Based on these findings, I distilled a quality control checklist covering "Man, Machine, Material, Method, and Environment." This study aims to provide frontline project teams with a practical, experience-based operational manual—moving beyond purely theoretical discourse. Finally, the paper envisions the daily operations of future "Smart Construction Sites," charting a clear and tangible pathway for the industry's digital transformation.

[Key words] Construction engineering; Mechanized construction; Intelligent construction; quality control

引言

上年临汾西易项目巡查,现场还在用老办法人工放线,仅半天就因视线误差废掉了3组预埋件。现在的工地,年轻人确实不爱来,老师傅带徒弟也常遇“教会徒弟饿死师傅”的尴尬。去年环保督察组突击检查,隔壁工地因扬尘数据超标直接停工整顿,老板急得嘴角起泡。说实话,那种靠“人海战术”堆出来的质量,就像“靠天吃饭”——工人心情好、天气好,质量就过关;反之就是返工。我们组织内部复盘会,并在会上形成共识:必须把危险的、重复的活交给机器,让人去管机器。但这绝不是买几台新设备那么简单,去年我们引进的一台喷涂机器人,就因现场电压

不稳频繁宕机,逼得我们不得不重新编写适配程序。这些教训让我们意识到,机械化转型必须从管理思维到作业流程进行彻底重构。本文旨在梳理那些已在工地现场证明价值的技术与应用,探讨其背后的管理逻辑,以期项目的技术决策与落地提供接地气的参考。

1 机械化施工在建筑工程各环节的具体应用实践

从一片空地到高楼林立,机械化贯穿了现代建造的每个环节。

在土方与基础阶段,无人机测绘与智能化土方机械联动,可以快速、精准地计算土方量并规划开挖路径,告别了“凭经验”

表 1 机械化施工在建筑工程各环节的具体应用实践

施工阶段	应用场景	运用的智能技术	关键质量	备注
土方与基础	土方量测算与开挖	无人机测绘、智能化土方机械	计算精准, 告别“凭经验”估算	
主体结构	钢筋工程	自动化钢筋加工机器人	按 BIM 模型毫米级下料弯箍, 消除人工尺寸偏差	冬季低温时, 钢材脆性增加, 机器人弯箍角度需预设补偿值(+0.3° ~0.6°), 否则回弹会导致尺寸偏差
主体结构	混凝土浇筑	智能爬升模板系统、混凝土布料机	实现稳定施工节奏, 墙面平整度远超传统	
主体结构	预制构件吊装	集成 BIM 模型的塔吊导航系统	实现“吊装即对位”	
机电安装	管道综合支架制作	数控管道相贯线切割机	根据 BIM 模型精准加工, 实现复杂管线支架的严丝合缝	现场切割产生的金属粉尘易堵塞传感器, 多的时候每 2 小时清理一次, 少的时候每 4 个小时清理一次, 否则精度下降明显
机电安装	设备安装与紧固	液压提升装置、数显扭矩电动扳手	确保大型设备安全就位、螺栓紧固力精确达标	
装饰装修	墙面处理	墙面打磨机器人、喷涂机器人	保证整体平整度与涂层均匀, 保护工人健康	

估算。在主体结构施工的现场, 景象更为生动: 自动化钢筋加工棚里, 机器人按照 BIM 模型数据自动下料、弯箍, 加工精度以毫米计, 避免了人工的尺寸偏差。在高层建筑的标准层, 集成化的智能爬升模板系统与混凝土布料机协同作业, 实现了三天一层的稳定施工节奏, 其带来的施工速度和墙面平整度, 是传统木模散拼无法比拟的。在装配式建筑项目吊装现场, 塔吊司机不再仅凭地面指挥的旗语和哨声, 驾驶舱内的平板电脑实时显示着待吊装预制墙板的 BIM 模型信息、重量和精确就位坐标, 实现了“吊装即对位”, 大幅减少了高空调整时间。(如表 1 所示)

机电安装是机械化与预制化展示优势的舞台^[2]。在氢能项目临建区的“预制加工厂”里, 来自深化设计团队的 BIM 模型直接驱动着数控管道相贯线切割机, 为复杂走廊生成严丝合缝的管线综合支架^[3]。在设备机房, 工人使用液压提升装置安装大型冷水机组, 用带数显扭矩反馈的电动扳手紧固成百上千的螺栓, 确保每一颗的紧固力都精确达标, 从源头上减少了设备运行时的振动与泄漏风险。(如表 1 所示)

即便在装饰装修这个传统上最依赖“手艺”的阶段, 机械化也在改变着工地的日常^[1]。听着墙面打磨机器人发出均匀的嗡鸣声, 替代了人工的喧闹声与质检员的反复测验环节, 墙面打磨机器人能通过内置传感器确保墙面整体的平整度并一次性通过验收。喷涂机器人按照设定路径匀速移动, 涂层均匀无色差, 既提升了质量, 也保护了工人免受化学粉尘的危害。(如表 1 所示)

2 信息化技术与机械化施工的深度融合与协同

在智慧工地的中央大屏上, 虚拟的数字世界与现实的机械运行正紧密同步。

BIM 技术已成为项目管理的“数字底盘”^[3]。在施工前, 通

过 BIM 模型进行“虚拟建造”, 提前在电脑里解决了管道打架、洞口预留错误等现场常见问题, 避免了返工损失。这种应用在复杂的地下室管线综合中效果尤为显著。更进一步, 先进的项目已实现将 BIM 构件加工信息直接发送至工厂的数控机床, 实现了“设计-制造”一体化, 门窗、幕墙等定制构件的精度和交货期得到有力保障。

在现场, 移动终端与 AR 技术让图纸“活”了起来。工长或工人在平板电脑上点击某个区域, 即可三维剖视该处的钢筋排布或管线走向, 复杂节点一目了然。AR 眼镜则能将虚拟的管线模型直接叠加在毛坯墙面上, 指导工人“所见即所钻”, 极大提升了预留预埋的准确性。在竣工移交前, 使用三维激光扫描仪对现场进行“实景复制”, 生成的点云模型与原始设计模型进行对比, 各类安装偏差以色谱图的形式直观呈现, 为整改和结算提供了无可争议的数据依据。

3 机械化施工全过程质量控制要点

引入先进设备并非一劳永逸, 必须配以与之适应的管理新方法。

3.1 施工前控制：兵马未动, 方案与培训先行

在设备进场前, 必须编制详尽的专项施工方案, 内容需具体到“在工地狭小空间内, 小型挖掘机如何转弯作业”这样的细节。对操作人员的培训至关重要, 不仅要会开, 更要懂原理、会保养、能处置简单故障。我们曾见过因工人不熟悉新型抹灰机的砂浆流量调节, 导致上墙砂浆过厚而下坠的案例。同时, 对预制构件的首件验收必须严格执行, 第一个出厂的门窗框、第一块预制楼板, 必须进行尺寸、外观、预留孔洞的全面检验, 合格后才能批量生产。

3.2 施工过程控制: 让数据说话, 动态纠偏

施工中, 应严格按方案和数字模型作业。例如, 使用全站仪对每个预制构件的安装标高、轴线进行实时测量复核, 数据直接录入平板电脑, 偏差超限立即报警。在机电安装中, 使用智能扳手紧固的螺栓, 其扭矩值、顺序、时间会被自动记录并上传至云端, 形成不可篡改的数字档案, 实现质量可追溯。项目管理团队需要建立每日站班会制度, 快速分析前一天的数据偏差, 并调整当日施工指令。

3.3 施工后验收与维护: 数字化交付与设备健康管理

分项工程验收时, 除了观感检查, 更多依靠扫描对比报告等数据化成果。更重要的是, 必须建立施工机械的“健康档案”, 严格执行定期保养。一台精度失准的测量机器人或一辆刹车不灵的叉车, 带来的质量安全隐患远大于其本身价值。应将设备维护状况纳入对分包队伍或机操班组的考核中。

4 未来展望: 迈向人机协同的智能建造新范式

不久的将来, 一个标准的“智慧工地”可能如此运作: 清晨, 自主移动的巡检机器人开始按照规划路径检查现场安全措施; 清扫机器人负责维护场地文明施工。在标准层, 砌筑机器人根据现场扫描的实际情况, 自动调整砂浆铺抹厚度和砖块放置位置; 在一旁, 老师傅不再亲自上手, 而是通过终端监控多个机器人的状态, 并处理机器人无法应对的边角与异形部位。在项目云端, 数字孪生模型与现场实时数据同步, 项目经理在办公室就能洞察进度、物料消耗和潜在风险。当建筑投入使用后, 其内部的智能机电系统能与BIM运维模型联动, 实现能耗的自动优化与设备

的预测性维护。

5 结论

根据以上陈述, 建筑工程的机械化与智能化转型, 已不是“要不要做”的选择题, 而是“如何做好”的必答题。这是一条从“人力密集”到“技术密集”, 从“经验驱动”到“数据驱动”的务实之路。未来的建筑产品, 将是数字技术与精密机械共同塑造的工业品, 其质量将更加稳定、过程将更加绿色、空间将更加人性化。面对这场变革, 施工企业应主动拥抱, 从一个个具体工艺的改进、一个个管理流程的优化做起, 积小胜为大胜, 最终在智能建造的新时代赢得先机。

【参考文献】

[1]张其林.建筑装饰机械应用与维护[M].上海:同济大学出版社,2020:45-96.

[2]果伯谦.探究建筑机电安装技术与质量控制[J].低碳世界,2017(27):197-198.

[3]孙建刚.BIM技术在装配式建筑机电安装中的应用[J].中国建筑装饰装修,2022(12):54-56.

作者简介:

杨渊清(1985--),男,汉族,山西晋中人,本科,民营企业机械工程师,从事聚焦于深化人机协同与全流程数字化。重点探索施工机器人的自适应作业算法,以应对复杂现场环境;研发基于数字孪生的施工机械实时健康预测与运维系统;推动BIM与物联网数据驱动下的轻量化、自适应智能装备集群协同作业,实现从单体智能到系统智能的跨越。