

Research on the Operational Efficiency and Cost-effectiveness of Construction Robots in the Construction of Main Structures

Xin Liu

Qingdao Guoxin Construction Investment Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266000, China

Abstract

Currently, the construction industry is confronted with issues such as labor shortage, low efficiency in the construction of main structures, and great difficulty in cost control. Intelligent construction has become the core direction of industry transformation. However, the efficiency and cost-benefit mechanism of construction robots in this field has not yet been systematically recognized. This paper discusses the application scenarios and core technologies of construction robots in the construction of main structures. It analyzes the mechanism of improving operation efficiency from three aspects: technical characteristics, process optimization, and collaborative mechanism. It constructs a cost-benefit mechanism for dynamic cost optimization and benefit transformation, and explores the cost-benefit improvement mechanism, with the aim of providing a reference for construction enterprises to apply construction robots.

Keywords

Construction robot; Main structure construction; Work efficiency; Cost-effectiveness

建筑机器人在主体结构施工中的作业效率与成本效益研究

刘鑫

青岛国信建设投资有限公司，中国·山东 青岛 266000

摘要

当前建筑行业面临劳动力短缺、主体结构施工效率偏低及成本管控难度大等问题，智能建造成为行业转型的核心方向，但建筑机器人在该领域的效率与成本效益作用机制尚未形成系统认知。本文论述了建筑机器人在主体结构施工中的应用场景与核心技术，分别从技术特性、流程优化、协同机制三方面解析作业效率提升机理，构建成本动态优化与效益转化的成本效益机制，并探讨了成本效益的提升机制，以期为建筑企业应用建筑机器人提供参考。

关键词

建筑机器人；主体结构施工；作业效率；成本效益

1 引言

近年来，国家《“十四五”智能建造与新型建筑工业化发展规划》明确将建筑机器人列为重点推广的智能装备，要求加快其在主体结构等关键施工环节的应用；同时，建筑行业劳动力老龄化加剧，45 岁以上从业者占比持续上升，传统人工施工不仅效率低，还面临高空作业等安全风险，行业对智能化装备的需求愈发迫切。此外，BIM、激光 SLAM 导航等技术与建筑机器人的融合，为主体结构施工智能化提供了技术支撑，但当前对机器人在该领域的效率提升逻辑与成本效益机制研究不足，难以指导企业实践。因此，进行建筑机器人在主体结构施工中的作业效率与成本效益研究具有十分重要的现实意义。

【作者简介】刘鑫（1983—），女，中国山东青岛人，本科，从事工程技术研究。

2 建筑机器人在主体结构施工中的应用概述

2.1 应用场景分类

在主体结构施工中，建筑机器人的应用场景可依据主体结构核心工序划分为三大类，各类机器人精准匹配特定施工工序，明确功能定位以契合工序技术标准。混凝土施工类机器人涵盖地面整平机、收面机器人及高频振捣机器人，适配于混凝土浇筑后的收面处理及密实度控制关键工序，承担基层整平、表面压光及振捣密实任务，确保混凝土强度及表面平整度达标。钢筋作业类机器人聚焦于钢筋工程中的原材料加工及骨架绑扎关键环节，其中钢筋切割机器人负责钢筋切断、弯箍等原材料加工，绑扎机器人执行钢筋骨架的精准绑扎作业，满足钢筋工程的尺寸精度及绑扎密实度要求。模板施工类机器人服务于模板支撑体系的安装定位及加固锁定核心工序，模板安装机器人执行模板吊装对位，螺杆拉拔机器人完成模板加固后的拉拔检测，保障模板支撑体系的整体刚度及定位精度。

2.2 核心技术与装备特性

建筑机器人的技术支撑体系由硬件配置与软件系统共同构成，两者协同作用赋予设备特定作业特性以适配主体结构施工需求。硬件配置中的柔性机械臂能够根据施工部位的形状与尺寸调整作业姿态，适配主体结构中复杂构件的加工需求。3D 视觉传感器可实时捕捉施工环境信息与构件位置，为精准作业提供环境感知支持。磁吸式移动底座能稳固吸附于钢结构或混凝土表面，满足不同作业高度与场景的移动需求^[1]。软件系统中的 BIM 技术可将建筑设计数据转化为机器人可执行的作业指令，确保操作与设计标准一致，激光 SLAM 导航技术支持机器人在复杂施工现场自主定位与路径规划，避免碰撞并提升移动效率，云端工艺库则为不同施工环节提供标准化作业参数，保障操作规范性。

3 建筑机器人在主体结构施工中的作业效率提升机理

3.1 技术特性驱动的效率提升

建筑机器人在主体结构施工中，技术特性驱动效率提升的逻辑可从作业精度、持续作业能力、环境适应性三个核心维度展开分析。

第一，建筑机器人通过激光标定技术与视觉定位系统的协同作用，能够精准捕捉施工构件的位置、尺寸及安装基准信息，实现毫米级的施工精度控制，从而减少因精度偏差导致的返工操作，降低返工耗时对整体施工效率的影响。第二，依托内置的自动化控制系统与稳定的动力供给模块，无需像人工施工那样受生理疲劳、作息时间及精力集中度的限制，在保障设备运行安全与维护需求的前提下，能够实现 24 小时连续作业，大幅延长有效作业时长^[2]。第三，借助针对施工现场复杂环境设计的特殊防护结构，如防水、防尘外壳，以及适配不同作业面的全地形移动方案，能够在雨雪、大风等恶劣天气条件下保持相对稳定的作业状态，降低恶劣天气对施工进程的干扰，进一步保障施工效率的稳定性。

3.2 施工流程优化的效率增益

在主体结构施工流程优化层面，建筑机器人通过对工序衔接、资源配置、进度管控三个关键环节的优化产生效率增益，各环节优化需结合其技术功能与施工实际场景展开。

第一，建筑机器人按照预先设定的标准化作业流程执行施工操作，每道工序的操作步骤、衔接节点均有统一规范，这能显著减少因人工操作差异导致的工序切换间隙，同时配合智能调度系统可合理规划多台设备的作业时段与区域，实现多设备协同作业以避免工序重叠或等待。第二，基于 BIM 模型的任务规划功能，该功能能根据主体结构施工的整体进度与各环节工作量，精准分配机器人、辅助工具及物料的使用计划，避免出现人力过剩、设备长时间闲置或物料供应脱节的情况。第三，在作业过程中会持续采集施工进度相关数据并实时传输至管理系统，管理人员可依据这些数

据及时识别进度滞后的环节，通过调整机器人作业参数或补充任务安排实现施工进度动态调整，提前规避可能引发工期延误的问题。

3.3 协同作业机制的效率放大效应

在主体结构施工中，建筑机器人协同作业机制的效率放大效应主要通过多机器人分工配合与同智能管理系统深度融合两方面实现，二者分别从作业执行与管理调度层面强化效率提升效果。

第一，多机器人协同作业会依据主体结构施工的工序逻辑进行任务拆分，例如在钢结构施工流程中，焊接机器人专注完成构件焊接作业，安装机器人同步开展螺栓连接操作，不同机器人各司其职且同步推进，避免单一机器人承担多任务时的切换等待时间，从而形成高效作业流水线^[3]。第二，建筑机器人与智能管理系统融合时，系统能够实时获取各机器人的作业位置、进度及设备运行状态等信息，再结合整体施工计划动态调整机器人的作业安排，比如当某区域机器人完成任务后，系统可及时调度其支援其他待作业区域，减少设备闲置时长，进一步放大整体作业效率优势。

4 建筑机器人在主体结构施工中的成本效益提升机制

4.1 成本构成的动态优化路径

在建筑机器人应用于主体结构施工的成本构成动态优化中，需按初始投资成本与运营成本两大类别解析具体路径，两类成本的优化方式分别对应不同控制逻辑以实现整体成本下降。

第一，初始投资成本优化可通过申领政策补贴实现，各地针对智能建造装备的扶持政策能直接抵扣部分购置资金，采用设备租赁模式可避免一次性大额资金占用，而通过批量采购机器人及配套部件还能凭借采购规模与供应商协商议价，进一步降低单台设备的初始投入金额。第二，运营成本优化可借助多维度措施推进，用机器人替代主体结构施工中的高危岗位能减少人工薪酬支出与安全防护设备采购成本，通过能耗监测与智能调节技术降低作业过程中的能源消耗，提升维护效率可缩短设备停机维修时长并减少维护物料消耗，且机器人精准作业能减少施工材料的无效损耗，间接降低材料补充采购带来的额外运营成本。

4.2 直接效益的转化机制

在建筑机器人应用于主体结构施工的直接效益转化机制中，需从人工成本节约、材料损耗降低、工期收益提升三个核心维度展开分析，每个维度均通过机器人的特定作业能力实现经济效益的直接落地。

第一，人工成本节约的转化主要依托建筑机器人对现场作业人工的替代作用，机器人可持续承担主体结构施工中的重复作业与高强度任务，减少完成同等工作量所需的作业人员数量，进而降低企业需支付的人工薪酬、社会保险及相关费用。

关福利费用，同时避免因人工流动、请假产生的招聘与技能培训等额外成本。第二，材料损耗降低的转化借助建筑机器人的精准作业能力实现，机器人在混凝土浇筑、钢结构焊接等环节能严格依照设计参数规范操作，避免人工操作中可能出现的配料偏差、切割过量或安装失误等问题，减少施工材料的无效损耗，无需为补充损耗材料进行额外采购，直接降低项目的材料采购成本^[4]。第三，工期收益提升的转化源于建筑机器人对施工效率的提升，机器人高效作业可缩短主体结构施工的整体工期，不仅能减少项目建设期间的资金占用成本，如贷款利息、设备租赁延期费用等，还能让建筑提前达到交付条件，产生额外收益，例如商业建筑提前出租的租金收入或住宅项目提前销售的资金回笼收益。

4.3 间接效益的辐射效应

在建筑机器人应用于主体结构施工的间接效益辐射效应中，需从安全成本降低、品牌价值提升、环境效益转化三个维度解析实现机制，各维度通过机器人的技术特性与施工场景适配形成综合价值。

第一，安全成本降低的辐射效应通过建筑机器人承担高危作业实现，主体结构施工中的高空作业、焊接作业等易发生安全事故的环节由机器人替代人工后，可减少工伤事故发生概率，进而降低企业因事故产生的医疗赔付、设备损坏维修、项目停工整改等相关安全成本，同时减少对作业人员安全保障措施的额外投入。第二，品牌价值提升的辐射效应依托建筑机器人带来的智能化施工能力形成，采用机器人开展主体结构施工能体现企业在智能建造领域的技术实力，帮助企业在市场竞争中树立技术先进的品牌形象，吸引更多注重施工品质与效率的合作项目，甚至在项目合作中获得更高的议价空间与合作优先级。第三，环境效益转化的辐射效应借助建筑机器人的低碳施工模式达成，机器人作业过程中能通过精准操作减少施工废料产生，部分电动机器人还可降低传统施工设备的燃油消耗与碳排放，这种低碳施工模式契合绿色建筑政策导向，使企业有机会获取碳交易相关收益，或在政策支持下获得绿色施工项目的补贴与资质认定优势。

4.4 成本效益的评估模型与投资回收期分析

为精准测算建筑机器人在主体结构施工中的投资收益回报水平，需构建涵盖静态成本效益指标与动态财务评价指

标的成本效益评估模型，为投资决策提供量化支撑。

第一，静态指标核心包含单位面积成本节约额与现场作业人员替代率：前者基于分部分项工程成本台账，对比机器人施工与传统人工施工的单位面积直接成本差值测算；后者结合工序人工配置标准，核算机器人替代的作业人员数量占比，直观反映短期成本节约成效。第二，动态指标采用净现值（Net Present Value, NPV）与投资回报率（Return On Investment, ROI）：NPV 纳入资金时间价值系数（如基准收益率），将项目全生命周期内各期成本节约额、额外收益折算为评估基准日现值，判断项目财务可行性。ROI 通过计算初始投资总额与年均净收益的比值，量化长期投资盈利水平。第三，建筑机器人投资回收期测算需结合主体结构施工的项目体量、工序复杂度及机器人配置方案，先归集机器人购置/租赁费用、配套系统部署成本等初始投资总额，再统计运营阶段的人工成本节余、材料损耗降低额、工期缩短收益等年均净收益。

5 结语

综上所述，通过系统梳理建筑机器人在主体结构施工中的应用场景与技术体系，揭示了技术特性驱动、施工流程优化、协同机制赋能的多维度作业效率提升机理，探讨了涵盖成本动态优化、直接与间接效益转化的成本效益提升机制，进而有助于推动建筑机器人在主体结构施工中应用的不断深入。未来，可进一步探索 AI 自主决策、数字孪生技术与建筑机器人的深度融合，完善行业层面的技术标准与成本评估规范，推动建筑机器人从单点应用向多工序集成化应用发展，为建筑行业实现高质量、智能化发展提供更坚实的支撑。

参考文献

- [1] 邹子昊, 杨笑笑, 申爱君, 等. BIM+建筑机器人的智能化建筑工程方案应用探索[J]. 智能建筑与智慧城市, 2025, (08): 99-101.
- [2] 陈子龙. 基于建筑机器人协同的住宅施工全过程智能控制研究[J]. 中国住宅设施, 2025, (07): 90-92.
- [3] 赵峥, 刘通. 智能建筑机器人与装配式建筑施工的结合探析[J]. 科学技术创新, 2025, (15): 200-203.
- [4] 陈金宝, 王健. 基于人机合作背景简析建筑机器人的施工方法[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025, (14): 87-89.