

工程机械智能化改装技术的应用效果及成本效益评估

李跃恒

天津滨海概念人力信息科技有限公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ME.2025120012

摘要 : 为盘活存量设备、推动工程机械行业转型升级, 智能化改装技术成为关键路径。本文系统阐述了工程机械智能化改装的核心技术体系, 明确了其在不改变主体结构前提下, 通过集成智能感知、嵌入式控制、数据通信、人机交互与算法支撑等模块, 赋予传统设备自主作业与远程管理能力的内涵。在此基础上, 构建了涵盖作业效率、安全性能、能耗水平、运维管理及作业质量五个维度的应用效果评估指标体系, 并结合案例进行了定性与定量分析。工程机械智能化改装技术具有显著的应用效果和良好的成本效益, 是推动行业实现高效、安全、绿色发展的有效手段。

关键词 : 工程机械; 智能化改装; 应用效果; 成本效益评估

Evaluation of the Application Effect and Cost-Benefit of Intelligent Retrofitting Technology for Construction Machinery

Li Yueheng

Tianjin Binhai Concept Human Resources Information Technology Co., Ltd., Tianjin 300450

Abstract : To revitalize existing equipment and drive the transformation and upgrading of the construction machinery industry, intelligent retrofitting technology has emerged as a crucial pathway. This paper systematically elaborates on the core technological framework of intelligent retrofitting for construction machinery, clarifying its essence of endowing traditional equipment with autonomous operation and remote management capabilities through the integration of modules such as intelligent sensing, embedded control, data communication, human-machine interaction, and algorithmic support, without altering the main structure. On this basis, an evaluation index system for application effects is constructed, encompassing five dimensions: operational efficiency, safety performance, energy consumption level, operation and maintenance management, and operational quality. Qualitative and quantitative analyses are conducted using case studies. The intelligent retrofitting technology for construction machinery demonstrates significant application effects and favorable cost-effectiveness, serving as an effective means to promote efficient, safe, and green development in the industry.

Keywords : construction machinery; intelligent retrofitting; application effects; cost-effectiveness evaluation

引言

在役存量设备中仍有大量传统工程机械存在技术水平落后、能耗高、依赖人工经验、安全风险大等问题, 难以满足现代精细化、绿色化施工的要求。全面淘汰并替换为新型智能设备成本高昂, 且会造成巨大的资源浪费。因此通过对现有设备进行智能化改装, 以较低成本和较短周期盘活存量资产, 使其具备自主感知、精准控制和远程管理的能力, 已成为推动工程机械行业转型升级的重要途径。基于此, 本文旨在系统性地构建工程机械智能化改装的技术体系, 深入剖析其核心技术模块与典型改装方案。在此基础上, 建立一套科学的应用效果评估指标体系, 并结合实际案例进行定性与定量分析, 量化其带来的综合效益。研究期望能为工程机械智能化改装的推广应用提供理论支撑和实践指导, 从而有效推动行业向更高效、更安全、更绿色的方向发展。

一、工程机械智能化改装核心技术体系

(一) 智能化改装的定义与内涵

机械工程发展建设, 不仅能够对整个的社会生产力做出一定贡献, 还可以为我们的物质生活做出一定改变。随着人们对机械

化工程发展的逐渐重视, 因此在机械工程开展过程中一定要广泛应用智能化技术^[1]。工程机械智能化改装是在不改变设备核心结构的前提下, 通过加装智能传感、控制系统和通信模块, 使传统工程机械具备自主感知、精准控制和远程监控等功能^[2]。这种技术改造以较低成本和较短周期, 盘活存量设备, 提升其作业效

率、安全性和管理水平，对推动行业绿色低碳转型具有重要意义。

(二) 关键改装技术模块

工程机械智能化改装的核心在于各关键技术模块的协同配合，主要包括智能感知模块、嵌入式控制模块、数据通信与传输模块、人机交互模块以及算法支撑模块五大核心部分^[3]。智能感知模块由姿态、压力等多种传感器及 GPS/北斗双模定位、IMU 惯性导航设备（可达厘米级定位精度）组成，负责采集设备位置、姿态、作业载荷及环境等数据；嵌入式控制模块以嵌入式微处理器、PLC 为核心并搭配专用控制软件，可处理感知数据并生成控制指令，实现对设备动力与执行系统的精准控制，比如挖掘机的自动精准挖掘作业；数据通信与传输模块依托 5G、IoT、蓝牙、WiFi 等技术，实现设备与远程监控平台、设备与设备间的实时数据交互，支撑远程管理与多设备协同作业；人机交互模块包含触控显示屏、语音交互设备及电液比例控制手柄，作为操作人员与设备的信息交互桥梁，可实现作业状态查看、语音控制及精准便捷操作；算法支撑模块则提供路径规划、作业姿态优化、故障诊断、能耗优化等核心算法，为设备智能决策提供关键技术保障。

(三) 典型工程机械的改装方案

不同工程机械智能化改装方案因作业场景与需求差异各具特色，挖掘机改装聚焦精准挖掘、自动平地、远程操控功能，需加装 GPS/北斗高精度定位、IMU 惯性导航等多类传感器，升级嵌入式控制模块与电液比例控制系统并集成挖掘路径规划、自动平地等算法，搭配 5G/WiFi 通信模块实现数据交互，同时优化人机交互，改装后可实现自动平地、精准修坡等功能，有效提升作业效率与质量，降低操作人员劳动强度与安全风险^[4]。装载机以自动称重、精准装卸、路径优化为核心目标，通过加装重量、GPS、姿态等传感器采集作业数据，升级嵌入式控制模块并集成相关算法，加装远程通信模块实现数据传输与监控，优化电液比例控制操作手柄提升精准性，能自动完成物料称重记录、精准装卸，还可规划最优作业路径，提升效率并降低能耗^[5]。压路机改装聚焦智能压实、厚度监测、作业质量追溯，加装压实度、平整度、GPS、速度等传感器采集关键数据，升级嵌入式控制模块并集成压实度优化、作业轨迹记录等算法，搭配 5G 通信模块实现数据实时上传，配备触控显示屏方便查看作业数据与设备状态。

二、智能化改装的应用效果评估

(一) 评估指标体系构建

为评估工程机械智能化改装效果，构建包含五个维度的指标体系。作业效率维度通过单位时间作业量、作业循环时间和设备利用率，综合衡量设备的生产力与可用性^[6]。安全性能维度以事故发生率、故障预警准确率及人员安全保障水平，评估改装对降低风险和提升防护能力的作用。能耗水平维度聚焦于单位作业量能耗和平均能耗降低率，直接反映节能成效。运维管理维度则通过平均故障间隔时间、平均维修时间和运维成本降低率，评价设备可靠性与维保效率的提升^[7]。作业质量维度借助作业精度合格率和作业质量返工率，检验智能化改装对工程质量的改善效果。

(二) 应用效果定性分析

设备智能化改装具有多维度核心优势，作业自主性层面，可依托智能算法实现自主作业，减少对操作人员经验的依赖，规避人为失误，提升作业稳定性与一致性，降低人员培训成本；安全保障方面，通过加装智能监控与预警系统实时监测设备状态及作业环境，搭配远程操控功能，让操作人员远离危险场景，大幅降低安全风险；管理精细化维度，能实时采集、传输并分析作业数据，助力管理人员通过远程平台精准掌握设备作业状态、作业量及能耗等信息，实现精细化管理，为企业决策提供大数据支撑；绿色低碳领域，通过优化作业流程与能耗控制算法，有效降低设备能耗与污染物排放，契合“双碳”目标要求。

(三) 应用效果定量分析

某建筑工程企业 10 台传统挖掘机智能化改装项目成效显著，改装后作业效率大幅提升，单位时间作业量从 80 立方米/小时提升至 100 立方米/小时，作业循环时间从 45 秒/次缩短至 36 秒/次，设备利用率从 70% 提升至 85%，核心原因是智能系统有效减少了无效作业、操作失误及故障停机时间^[8]。能耗水平同步降低，单位作业量能耗从 0.8 升/立方米降至 0.64 升/立方米，按每台年均作业 10 万立方米、燃油价格 7 元/升计算，10 台挖掘机每年共节省燃油费用 112 万元。运维管理也得到优化，改装后平均故障间隔时间从 1000 小时延长至 1500 小时，平均维修时间从 8 小时缩短至 4 小时，单台年度运维成本从 15 万元降至 10.5 万元，10 台每年可节省运维成本 45 万元^[9]。作业质量同样实现质的飞跃，作业精度合格率从 85% 提升至 98%，作业质量返工率从 12% 降至 3%，仅修坡作业一项每年就可节省返工成本 48 万元。

三、智能化改装的成本效益评估

(一) 成本构成分析

工程机械智能化改装成本主要包括直接、间接与隐性三部分，其中直接成本作为核心构成，涵盖硬件采购、软件开发与集成及安装调试费用，硬件采购涉及智能传感器、控制器等设备（如挖掘机改装约 8–15 万元），软件开发集成费用因采用成熟方案或定制开发存在较大差异，安装调试费用一般占直接成本的 10%–15%；间接成本为改装过程中的辅助性费用，包含人员培训、技术咨询费用，以及设备改装期间（通常 3–7 天）无法正常作业导致的停机损失；隐性成本则是改装后长期使用中的潜在支出，主要有软件升级、智能硬件维护与更换，以及数据安全维护相关费用。

(二) 效益构成分析

工程机械智能化改装的效益主要体现在直接经济效益、间接经济效益与社会生态效益三个方面^[10]。直接经济效益指智能化改装后直接带来的经济收益，是企业最关注的效益指标，主要包括作业效率提升收益、能耗降低收益、运维成本节约收益、作业质量提升收益。间接经济效益指智能化改装间接带来的经济收益，主要包括人员成本节约收益、管理效率提升收益、设备寿命延长收益。人员成本节约收益指因设备智能化水平提升，减少操作人

员需求或降低人员培训成本带来的收益，例如远程操控智能设备可实现一人多机操作，减少操作人员数量；管理效率提升收益指通过精细化管理降低企业管理成本，提升管理效率带来的间接收益；设备寿命延长收益指因智能化改装后设备运行更加稳定，故障减少，延长了设备使用寿命，降低了设备更新换代成本。社会效益指智能化改装对社会发展与生态环境带来的积极影响，主要包括安全事故减少效益、节能减排效益、行业技术进步效益。安全事故减少效益指因设备安全性能提升，降低人员伤亡与财产损失带来的社会效益；节能减排效益指因设备能耗降低，减少污染物排放，对生态环境保护带来的效益；行业技术进步效益指智能化改装推动工程机械行业技术升级与产业转型，提升行业整体智能化水平带来的长远效益。

（三）成本效益评估模型与方法

为科学评估工程机械智能化改装的成本效益，采用静态与动态评估法相结合的模型。静态评估适用于短期，不考虑资金时间价值，主要通过投资回收期 ($P_t = \text{总改装成本 } C / \text{年均净收益 } R$) 和投资收益率 ($ROI = \text{年均净收益 } R / \text{总改装成本 } C \times 100\%$) 来衡量，回收期越短、收益率越高，表明项目短期盈利能力强，投资效益越好。动态评估适用于长期，考虑资金时间价值，核心指标包括净现值 (NPV)、内部收益率 (IRR) 和成本效益比 (BCR)。净现值 ($NPV = \sum (\text{第 } t \text{ 年净现金流量 } CF_t / (1 + \text{基准收益率 } i)^t) - \text{总改装成本 } C$) 若大于或等于零，表明项目经济可行；内部收益率 (IRR) 是使 NPV 为零的折现率，若大于或等于基准收益率，则项目效益达标；成本效益比 ($BCR = \text{总收益现值 } PV / \text{总成本现值 } CV$) 若大于或等于 1，则说明收益大于成本。例如某项目静态评估回收期为 3 年，ROI 为 33.3%；另一项目动态评估 NPV 为 32.5 万元 (≥ 0)，IRR 为 15.2% ($\geq 10\%$)，均证明其经济可行性。

（四）综合评估与敏感性分析

对工程机械智能化改装项目的综合评估，需融合经济、技术与社会生态效益三方面，以判断其整体可行性。经济上，通过投资回收期、净现值等指标衡量盈利能力；技术上，通过作业效率、安全性能等指标检验实用性；社会生态上，则关注其节能减排与提升公共安全的贡献。综合评估结果分为可行、基本可行与不可行三等，分别对应大力推广、选择性实施与暂缓实施的策略。为确保决策稳健，需进行敏感性分析，识别影响效益的关键不确定因素。以某挖掘机改装项目为例，分析显示，年均净收益的波动对项目效益影响最大，其次是总改装成本，而基准收益率的影响相对较小。因此，企业在推进此类项目时，核心策略应是聚焦于提升设备的年均净收益，并严格控制改装总成本，从而保障投资回报。

四、结束语

工程机械智能化改装技术作为盘活存量资产、推动行业转型升级的关键路径，其应用价值与经济可行性已得到充分验证。本文系统构建了涵盖智能感知、控制、通信、交互与算法的核心技术体系，并结合挖掘机、装载机、压路机等典型设备提出了具体改装方案，为技术实践提供了清晰的蓝图。通过构建多维度的应用效果评估指标体系，并结合案例进行定量分析，本文证实了智能化改装在提升作业效率、降低能耗、优化运维管理和保障作业质量方面的显著成效。工程机械智能化改装不仅是技术层面的革新，更是推动整个建筑与工程行业实现数字化、绿色化转型的战略支点。

参考文献

- [1] 柳童喜.工程机械智能化探究 [J].中国机械,2019(12):26-27.
- [2] 吴国祥,李玉河,吴卫国.工程机械智能化改造 [J].中国工程机械学报,2005,3(3):376-378.DOI:10.3969/j.issn.1672-5581.2005.03.029.
- [3] 周馥隆.工程机械智能化 [J].工程机械与维修,2015(10):4-4.DOI:10.3969/j.issn.1006-2114.2015.10.001.
- [4] 孙岳.工程机械智能化发展趋势研究 [J].内燃机与配件,2019(18):226-227.DOI:10.3969/j.issn.1674-957X.2019.18.119.
- [5] 陆亮,吴军凯,孙宁,等.智能建造——工程机械智能化 [J].液压与气动,2022,46(6):1-9.DOI:10.11832/j.issn.1000-4858.2022.06.001.
- [6] 石刚,井元伟,徐皓冬,等.工程机械智能化控制系统的研究 [J].仪器仪表学报,2006,27(23):1931-1933,1936.DOI:10.3321/j.issn:0254-3087.2006.z3.063.
- [7] 王国庆,刘洁,张宗涛,等.工程机械智能化控制器研究 [J].筑路机械与施工机械化,2008,25(3):73-75.DOI:10.3969/j.issn.1000-033X.2008.03.035.
- [8] 邵振臣,杨云杰.工程机械智能化发展现状及趋势 [J].机械设计与制造工程,2016,45(8):16-18.DOI:10.3969/j.issn.2095-509X.2016.08.003.
- [9] 吴国祥,李玉河.工程机械智能化与信息化发展概况 [J].工程机械,2013,44(1):2-7.DOI:10.3969/j.issn.1000-1212.2013.01.002.
- [10] 曹振超,杨少涵,王栋梁,等.工程机械智能化方面的研究 [J].军民两用技术与产品,2016(14):239.DOI:10.3969/j.issn.1009-8119.2016.14.232.