

工程机械再制造技术的工艺优化与资源循环利用效益评估

籍洪达

天津滨海概念人力信息科技有限公司, 天津 300450

DOI:10.61369/ME.2025120011

摘 要 : 为推动工程机械再制造产业的高质量与可持续发展, 本文系统研究了再制造工艺的优化路径与资源循环利用的效益评估方法。在工艺优化方面, 以“提质、增效、降本、环保”为目标, 聚焦拆解、修复、装配等关键工序, 提出以智能识别、激光熔覆、数字化装配为代表的技术升级方案, 并构建了涵盖全流程数字化管理平台、单元化生产模式及逆向物流协同的系统集成优化路径。研究成果可为工程机械再制造企业提供科学的工艺优化决策支持与量化的效益评估工具, 对促进资源高效循环利用和行业绿色转型具有重要的理论价值与实践意义。

关 键 词 : 工程机械; 再制造; 工艺优化; 资源循环利用

Process Optimization and Benefit Evaluation of Resource Recycling in Remanufacturing Technology for Construction Machinery

Ji Hongda

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

Abstract : To promote the high-quality and sustainable development of the construction machinery remanufacturing industry, this paper systematically investigates the optimization paths for remanufacturing processes and the benefit evaluation methods for resource recycling. In terms of process optimization, aiming at "improving quality, enhancing efficiency, reducing costs, and protecting the environment," the study focuses on key processes such as disassembly, repair, and assembly, proposing technological upgrading solutions represented by intelligent identification, laser cladding, and digital assembly. Furthermore, an integrated optimization path is constructed, encompassing a full-process digital management platform, a cellular production model, and reverse logistics collaboration. The research findings provide scientific decision-making support for process optimization and quantitative benefit evaluation tools for construction machinery remanufacturing enterprises, holding significant theoretical value and practical implications for promoting efficient resource recycling and the green transformation of the industry.

Keywords : construction machinery; remanufacturing; process optimization; resource recycling

引言

当前我国工程机械再制造产业虽已取得初步发展, 但在实践层面仍面临诸多挑战。一方面, 再制造工艺流程复杂, 涉及拆解、清洗、检测、修复、装配、测试等多个环节, 传统工艺依赖人工经验, 存在效率低下、质量不稳定、成本高昂等问题, 亟需系统性的优化与升级。另一方面, 对再制造资源循环利用效益的评估尚缺乏科学、统一、量化的体系。现有评估多侧重于单一的经济效益, 对环境效益和社会效益的综合考量不足, 难以全面、准确地反映再制造的综合价值, 从而影响了政府政策的精准制定、企业投资决策的科学性以及社会公众的广泛认可。

因此, 如何系统优化再制造工艺流程以实现“提质、增效、降本、环保”的核心目标, 并构建一套科学、全面的效益评估体系以量化其综合价值, 已成为制约工程机械再制造产业高质量发展的关键科学问题。基于此, 本文旨在开展工程机械再制造技术的工艺优化与资源循环利用效益评估研究。从关键工序和系统集成两个层面, 深入探讨工程机械再制造工艺的优化模型与实施路径, 并构建多目标模糊决策模型以支持方案优选; 从经济、环境、社会三个维度, 构建一套系统、可操作的效益评估指标体系; 融合层次分析法 (AHP) 与模糊综合评价法, 建立再制造效益综合评估模型, 以期为我国工程机械再制造企业 provide 理论指导和实践工具, 推动产业的绿色、高效与可持续发展。

一、工程机械再制造工艺优化模型与路径研究

（一）工艺优化的目标与约束条件

工程机械的应用涉及到水利、公路、港口、建筑、国防、电力等工程领域，而正因工程机械的应用范围广，且分布数量大，为再制造工程的发展创设良好空间^[1]。工程机械再制造工艺优化以“提质、增效、降本、环保”为核心，具包括提升再制造产品质量、提高生产效率、降低生产成本、强化环保效益。工艺优化需应对四大约束，技术约束、资源约束、成本约束、质量约束。

（二）基于关键工序的工艺优化

工程机械再制造工艺涵盖拆解、清洗、检测、修复、装配、测试等多个环节，其中拆解、修复、装配是影响再制造质量与效率的关键工序，需重点开展优化工作^[2]。拆解优化以“智能识别+无损拆解”替代人工，引入视觉识别、机器人等设备，建立零部件数字化模型与标准化流程，实现自动化精准拆解，减少二次损伤、提升效率；修复优化针对核心零部件缺陷，采用激光熔覆等先进表面修复技术及无损检测+精准修复技术，建立工艺参数数据库，保障修复质量与稳定性；装配优化引入数字化模块化装配模式，结合工业机器人与实时质量检测系统，优化工序流程，提升装配精度与效率。

（三）工艺流程的系统集成与优化

工程机械再制造工艺流程系统集成与优化以“全流程协同、信息共享、效率最大化”为核心思路，旨在打破传统工序分散、信息孤立的局面，实现各工序有机融合与高效衔接^[3]。为此需构建再制造全流程数字化管理平台，整合拆解、清洗等各工序信息资源，通过RFID标签实现零部件全生命周期追溯，同时利用大数据分析识别工艺瓶颈以提供数据支撑；在此基础上优化工序衔接流程，采用“单元化生产”模式集中布置关联工序减少物料转运成本，建立协同调度机制通过数字化平台实时共享生产进度、自动调整任务，避免工序拥堵或闲置；此外还需实现再制造工艺与逆向物流的协同优化，通过构建逆向物流信息管理系统优化回收渠道与路线，采用智能仓储技术管理废旧装备与零部件，保障零部件供应及时准确以支撑再制造顺利开展。

（四）工艺优化决策模型构建

工程机械再制造工艺优化决策属于涉及技术、经济、环境等多维度因素的多目标决策问题，本文构建的多目标模糊决策工艺优化决策模型会综合考虑各优化目标与约束条件以筛选最优方案^[4]。模型构建需确定包含质量、效率、成本、环保的决策目标体系（各目标分别聚焦对应核心指标），建立决策指标体系并通过层次分析法确定各细化指标权重以突出核心指标重要性，结合再制造工艺的不确定性，采用三角模糊数对各工艺优化方案的指标值进行模糊化处理以构建模糊决策矩阵，运用模糊综合评价法计算各方案综合评价值并选取最高者作为最优方案^[5]。同时模型设有动态调整机制，会依据再制造行业技术发展、市场需求变化及企业生产实际定期更新决策目标与指标权重，比如新修复技术出现时将其纳入备选范围并调整相关指标权重，以此保障模型的科学性与实用性。

二、再制造资源循环利用效益评估体系构建

（一）效益评估的维度与原则

工程机械再制造资源循环利用效益评估需从经济、环境、社会三个维度开展，全面量化再制造过程中资源循环利用的综合价值^[6]。经济维度聚焦直接与间接经济效益，体现企业盈利与竞争力；环境维度关注资源节约与环保贡献，反映行业绿色发展水平；社会维度评估对就业、产业升级、技术进步的影响，彰显行业社会贡献度^[7]。评估需遵循五大原则，科学性指标贴合行业特点、定义清晰、计算科学；系统性涵盖三维度核心指标，完整无遗漏重复；可操作性包含数据易获取、方法简便；动态性即随行业、技术、政策适时调整；可比性兼顾不同企业特点，便于横向对比与行业评估。

（二）经济效益评估指标体系

工程机械再制造资源循环利用经济效益评估指标体系主要包含盈利能力、成本节约、资产运营与市场竞争力四大类指标^[8]。其中盈利能力指标反映企业盈利水平与发展速度，涵盖再制造产品利润率 $[(\text{销售收入}-\text{总成本})/\text{销售收入} \times 100\%]$ 、投资回报率 $[\text{年净利润}/\text{总投资} \times 100\%]$ 和产值增长率 $[(\text{本年度产值}-\text{上年度产值})/\text{上年度产值} \times 100\%]$ ；成本节约指标聚焦再制造过程中的成本降低效果，包括原材料成本节约率 $[(\text{新品}-\text{再制造原材料成本})/\text{新品原材料成本} \times 100\%]$ 、能源成本节约率 $[(\text{新品}-\text{再制造生产能源成本})/\text{新品生产能源成本} \times 100\%]$ 以及劳动力成本节约率 $[(\text{新品}-\text{再制造生产劳动力成本})/\text{新品生产劳动力成本} \times 100\%]$ ；资产运营指标体现企业再制造资产的运营效率，涉及设备利用率 $[\text{实际运行时间}/\text{额定运行时间} \times 100\%]$ 、库存周转率 $[\text{销售成本}/\text{平均库存成本} \times 100\%]$ 和生产周期缩短率 $[(\text{新品}-\text{再制造生产周期})/\text{新品生产周期} \times 100\%]$ ；市场竞争力指标反映企业再制造业务的市场地位，包含再制造产品市场占有率 $[\text{本企业销量}/\text{行业总销量} \times 100\%]$ 、通过问卷调查与客户反馈获取的百分制客户满意度，以及结合行业评级、媒体报道和政府表彰综合评估的品牌影响力。

（三）环境效益评估指标体系

工程机械再制造资源循环利用环境效益评估指标体系主要包括资源节约指标、污染物减排指标与生态保护指标三大类^[9]。其中资源节约指标反映再制造的资源节约效果，涵盖金属与非金属资源回收率（均为再制造回收量与废旧装备对应资源总储量的比值，体现循环利用效率）、水资源与能源节约率（均通过与新品生产消耗量对比计算节约比例，反映对应资源节约成效）；污染物减排指标体现再制造的污染物排放降低效果，包括固体废物、废水、废气排放量减少率（均通过与新品生产排放量对比计算降低比例，反映对应污染控制效果）及噪声污染降低率（与新品生产噪声值对比计算降低比例，体现噪声污染控制成效）；生态保护指标反映再制造对生态环境的间接保护作用，包含土地资源节约量（新品与再制造生产所需土地面积的差值）和生态破坏减少量（通过定量与定性结合方式，评估废旧装备丢弃的生态破坏及再制造的缓解程度）。

（四）社会效益评估指标体系

工程机械再制造资源循环利用社会效益评估指标体系涵盖就业促进、产业升级、技术进步与社会贡献四大类指标^[10]。其中就业促进指标聚焦行业就业带动作用，涵盖企业直接吸纳生产、技术等岗位的直接就业岗位数、带动上下游废旧装备回收、零部件加工等领域的间接就业岗位数，以及通过（本年度就业人数 - 上年度就业人数）/ 上年度就业人数 × 100% 计算的就业增长率；产业升级指标侧重推动工程机械行业转型升级，包含再制造产值占工程机械行业总产值比例的再制造产业产值占比、以五级评分制评估全链条成熟度的产业链完善程度，以及通过龙头企业市场占有率反映市场结构与升级潜力的产业集中度；技术进步指标体现行业创新能力，涉及研发投入占企业销售收入比例的研发投入占比、反映创新成果的年度发明专利与实用新型专利申请数量，以及衡量技术转化效果的新技术生产线数量占总生产线数量比例的新技术应用率；社会贡献指标反映行业综合社会价值，包括企业年度纳税总额的税收贡献额、用于环保、扶贫等领域的公益事业投入资金与物资总额，以及通过问卷调查等方式百分制评分的社会公众认知认可程度。

三、基于 AHP/模糊综合评价的再制造效益综合评估模型

（一）评估模型的选择与构建思路

工程机械再制造资源循环利用效益评估具有多指标、多层次、模糊性的特点，单一评估方法难以满足综合需求，故需采用多方法融合模式。层次分析法（AHP）可有效确定多层次、多指标的权重，模糊综合评价法能妥善处理评估中的模糊性问题，二者融合可兼顾权重确定的科学性与模糊问题处理的准确性。评估模型的构建思路为，明确评估目标是工程机械再制造资源循环利用综合效益，基于现有效益评估指标体系建立对应层次结构模型，采用 AHP 确定各准则层与指标层指标的权重，构建模糊评价

矩阵，组织专家对各指标进行评价并将定性评价结果转化为定量数据，通过模糊综合运算得出综合评估结果并对其展开分析。

（二）基于层次分析法（AHP）的指标权重确定

基于层次分析法（AHP）确定指标权重，需构建包含目标层、准则层和指标层的递阶层次结构模型。邀请专家采用 1-9 标度法，对同一层次的各因素进行两两比较，构建判断矩阵。通过计算判断矩阵的最大特征值和对应的特征向量来确定各因素的权重，并利用一致性比例 CR 进行检验，若 CR 小于 0.1 则权重有效，否则需重新调整判断矩阵。自上而下逐层计算权重，将指标层相对于准则层的权重与准则层相对于目标层的权重相乘，得到各指标相对于总目标的综合权重。

（三）基于模糊理论的效益综合评价

基于模糊理论的效益综合评价，需设定明确的评价等级标准（如优秀、良好、中等、较差）及其量化区间。组织专家对各指标进行评级，根据评价结果构建一个反映各指标属于不同等级隶属度的模糊评价矩阵 R。将指标权重向量 W 与该矩阵进行模糊运算（ $B=W \times R$ ），逐层汇总，得到一个综合评价结果向量 B。根据最大隶属度原则从 B 向量中确定最终评价等级，并可通过对各等级赋分加权计算，得出一个用于横向比较的综合量化分数。

四、结束语

本文围绕工程机械再制造技术的工艺优化与资源循环利用效益评估两大核心问题展开了系统性研究，旨在为该产业的科学化、精细化发展提供理论支撑与实践指导。通过持续优化再制造工艺并科学评估其综合效益，我们能够有效提升工程机械再制造的质量与效率，充分彰显其在资源节约、环境保护和社会发展中的巨大价值。期待本文的研究成果能为相关企业、研究机构及政策制定者提供有益参考，共同推动我国工程机械再制造产业迈向更高质量、更可持续的未来。

参考文献

- [1] 刘洪亮. 工程机械再制造及其关键技术探究 [J]. 智能建筑与工程机械, 2022, 4(4): 60-62.
- [2] 朱军祖. 工程机械的损伤形式与再制造技术研究 [J]. 今日自动化, 2024(3): 115-117. DOI: 10.3969/j.issn.2095-6487.2024.3.jrzdh202403040.
- [3] 徐滨士. 工程机械再制造及其关键技术 [J]. 工程机械, 2009, 40(8): 1-6. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1212.2009.08.001.
- [4] 李强. 工程机械再制造协同设计与质量保障关键技术及产业化 [J]. 价值工程, 2023, 42(33): 159-161. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4311.2023.33.051.
- [5] 张弛. 工程机械再制造及其关键技术探讨 [J]. 中国机械, 2020(5): 101-102.
- [6] 杨春兰, 李跃朋, 黄大明. 基于 FCE 的工程机械零部件再制造工艺技术的选择 [J]. 工程机械, 2014, 45(10): 50-57. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1212.2014.10.012.
- [7] 崔妍妍. 工程机械再制造服务运作规划关键技术研究与应用 [D]. 湖北: 华中科技大学, 2018.
- [8] 巩喜宝. 工程机械再制造及其关键技术 [J]. 化工管理, 2018(21): 138-139. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4800.2018.21.104.
- [9] 陈国茂. 关于工程机械中的再制造技术的研究 [J]. 中国新技术新产品, 2012(24): 171. DOI: 10.3969/j.issn.1673-9957.2012.24.140.
- [10] 田国富, 张国胜, 陈宝庆, 等. 工程机械的损伤形式与再制造技术分析 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(10): 62-64. DOI: 10.3969/j.issn.1000-033X.2007.10.026.