

Research on lightweight and environmental performance of mechanical structure under the concept of green manufacturing

Rui Yang Yangkuan Wang Junjie Xu

Qingdao Guolin Technology Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong, 266000, China

Abstract

Under the impetus of green manufacturing concepts, mechanical structure design is evolving towards dual optimization in terms of lightweighting and environmental performance. Lightweighting not only effectively reduces product weight and enhances energy efficiency but also significantly decreases material consumption and environmental pollution. By optimizing structural forms, selecting high-performance green materials, and implementing modular integrated design, resource utilization can be maximized while minimizing pollution emissions. At the same time, improving environmental performance requires embedding an ecological assessment system throughout the product's entire lifecycle to achieve comprehensive green management from source control to end-of-pipe treatment.

Keywords

green manufacturing; mechanical structure; lightweight design; environmental performance; ecological protection

绿色制造理念下的机械结构轻量化与环保性能研究

杨瑞 王仰宽 徐俊杰

青岛国林科技集团股份有限公司, 中国·山东 青岛 266000

摘要

在绿色制造理念的推动下, 机械结构设计正向轻量化与环保性能双重优化方向发展。轻量化不仅能够有效降低产品自重, 提升能效水平, 还能显著减少材料消耗与环境污染负荷。通过优化结构形态、选用高性能绿色材料及实施模块化集成设计, 可实现资源利用率的最大化与污染排放的最小化。与此同时, 环保性能的提升则要求在产品全生命周期中嵌入生态评估体系, 以实现从源头控制到末端治理的全流程绿色管控。

关键词

绿色制造; 机械结构; 轻量化设计; 环保性能; 生态保护

1 引言

随着全球生态环境问题的加剧和“双碳”战略目标的推进, 制造业面临从高能耗高污染向绿色高效转型的紧迫任务。作为制造体系中的关键构成, 机械结构的绿色化升级已成为推动节能减排与生态保护的核心环节。在绿色制造理念指导下, 机械结构轻量化不仅体现了材料节约与能效提升的技术趋势, 更成为实现环境友好型产品设计的有效手段。同时, 环保性能的构建也不仅局限于排放控制, 而是延伸至全生命周期的生态安全管理。本文基于绿色制造的理论基础, 聚焦机械结构设计中的轻量化创新与环保性能协同机制, 深入探讨其在生态系统保护与可持续发展目标中的价值。

2 绿色制造理念的内涵与生态导向

绿色制造作为工业可持续发展的核心理念, 其产生与演化根植于资源枯竭与环境污染问题日益严峻的时代背景。从清洁生产到循环经济, 再到现代绿色智能制造, 其内涵不断拓展, 已不再局限于节能减排层面, 而是向着构建低碳、无害、高效的生态制造体系演进。该理念强调从设计源头出发, 贯穿材料选用、制造工艺、使用维护与报废处理等全过程, 实现人与自然和谐共处的制造活动方式。绿色制造强调全过程的能耗控制与污染物减排, 要求在设计阶段实现结构功能与资源节约的平衡, 在制造阶段采用清洁加工工艺减少废气、废水、废渣的生成^[1]。

3 机械结构轻量化的技术路径与材料策略

3.1 基于生态性能评估的材料选型原则

在机械结构设计中, 材料选择对资源消耗与环境影响具有决定性作用。绿色制造要求材料不仅具备良好的力学性能和工艺适应性, 更需具备生态环境友好特征。材料生态性

【作者简介】杨瑞(1995-), 男, 中国山东乐陵人, 本科, 工程师, 从事臭氧技术研究。

能评估主要包括资源可再生性、生产过程碳排放、生命周期毒性以及可回收率等维度。选型过程中应综合考虑材料在使用阶段的能效表现及其报废阶段的再利用潜力，确保全生命周期内的环境负荷最小。

3.2 轻量化设计中的结构拓扑优化与功能集成

轻量化设计技术是实现绿色制造目标的核心路径之一，结构拓扑优化作为其重要手段，能够在满足力学性能前提下精简冗余材料配置，显著降低结构质量。通过算法控制的拓扑演化，可生成复杂但高效的几何形态，兼顾强度、刚度与材料分布的合理性。功能集成设计进一步推动结构简约化与组件一体化，减少装配环节和能耗输入，实现结构功能的多元复合。

3.3 可再生与可降解材料在机械结构中的应用探索

随着可持续发展要求的提升，可再生材料与可降解材料在机械制造中的应用受到高度关注。天然纤维复合材料、生物基聚合物与可降解金属材料等具备来源丰富、加工可行与生态友好等优势，逐渐成为机械结构轻量化的替代材料选项。这类材料在设计与制造阶段具有较强适应性，可在保证力学性能的基础上实现对生态系统影响的有效控制。同时，其在废弃后的降解或回收特性，有助于解决制造过程中固废累积问题，提升系统闭环运行效率，图1为面向循环经济的绿色制造工艺流程^[2]。

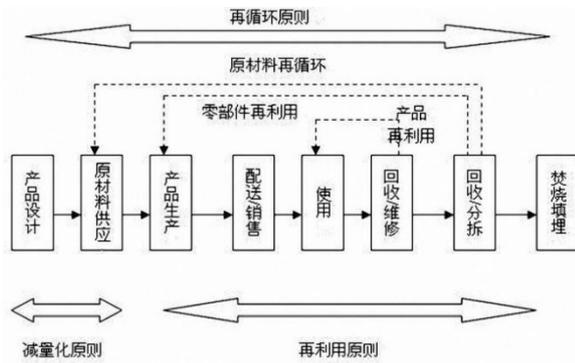


图1 面向循环经济的绿色制造工艺流程

4 轻量化设计对环保性能的协同增益效应

4.1 机械结构减重对能源消耗与碳排放的控制作用

机械结构减重作为提升绿色制造效能的核心手段，直接影响整个制造与使用阶段的能源消耗水平。通过优化结构设计、选用高强度轻质材料，实现单位功能所需材料的最小配置，可有效降低加工所需能源与设备运转负载。在运输、装配与运行环节中，结构质量的减轻显著提升能效比，减少过程中的燃料消耗与电力支出。碳排放作为衡量制造过程环保绩效的重要指标，受材料冶炼、加工能耗及运输耗能等多环节叠加影响，结构减重可从源头压缩碳排放量，在制造与

应用的全过程中起到节能减排的协同控制作用。

4.2 污染物源头削减与绿色制造过程中的排放治理

在绿色制造体系中，污染物控制不仅限于末端治理，更强调从设计与工艺源头进行主动干预。通过轻量化设计减少材料使用量与加工复杂度，可在生产环节降低废水、废气与固废的产生量，减轻污染物处理负荷。结构优化所带来的热处理、切削加工与涂装环节的工艺简化，能够直接减少有害物质的挥发与排放。同时，绿色制造工艺与减重设计协同推进，为排放治理提供系统基础，通过清洁能源替代、低污染辅材使用与过程控制技术的应用，实现对污染源的全过程约束，从而保障制造活动对生态环境影响的最低化。

4.3 构建低环境负荷的全生命周期绿色结构模型

轻量化设计不仅仅是减轻机械产品的物理质量，更是构建全生命周期低环境负荷体系的基础。结构设计初期考虑回收性、可拆解性及材料生态特征，有助于降低制造阶段的环境代价与报废阶段的再利用难度。产品使用期的能效表现因质量降低而得到优化，延长了服役寿命与维保周期，减少资源与能源的重复投入。生命周期评估方法可对结构在设计、生产、使用及回收各阶段的环境影响进行量化评价，推动绿色设计从局部向系统转化。通过数据模型支撑下的闭环控制，实现对机械产品环境绩效的全过程优化，构建出可复制、可推广的绿色结构标准体系^[3]。

5 生态环境保护视角下的绿色制造评估体系分析

5.1 生态环境友好型机械产品的多维度评价指标

绿色制造背景下的机械产品评估应突破单一能效或成本指标限制，构建涵盖环境、安全与资源多个维度的综合评价体系。生态环境友好型指标体系包括碳排放量、资源利用率、有害物质控制水平、可回收性比率与环境风险等级等核心要素，通过量化标准实现对设计、制造与使用全过程的环境绩效监控。不同指标之间具有相互制衡与协同效应，应依据产品类型、应用场景及生态约束灵活组合，提升评价体系的适应性与导向性。多维度指标协同作用不仅有助于实现对绿色目标的精准引导，还为政策制定与产业监管提供科学依据。

5.2 基于LCA（生命周期评估）的绿色制造绩效测量

生命周期评估作为系统化的环境影响分析工具，能够对机械产品从原材料开采、制造、运输、使用到报废处理的全过程进行环境负荷量化。LCA方法将每一阶段的能源消耗、排放物种类及资源占用等数据进行综合处理，形成涵盖碳足迹、水足迹、污染物排放等指标的环境绩效图谱。绿色制造绩效测量依托LCA分析可识别高负荷环节，明确改进路径，从源头优化设计与工艺。这一方法具备结构清晰、可比性强的优势，为绿色制造技术实施提供量化评判基础，也

可作为产品绿色认证与生态标签评估的重要支撑工具。

5.3 机械设计生态影响的数字化建模与反馈机制

构建基于生态影响的数字化建模体系可实现对机械设计方案环境性能的动态预测与反馈调控。借助数字孪生、参数建模与多维环境数据库,设计过程可实时呈现结构调整对能源消耗、污染物释放与资源占用等指标的影响,提升决策透明度与反应速度。模型输出结果通过多维评价算法转化为直观的环境风险等级或改进建议,形成闭环反馈链条。该机制不仅提升绿色制造过程的智能化水平,也促进设计团队在多目标约束下的综合优化能力,为生态系统兼容性更强的机械产品开发提供数字基础^[4]。

6 绿色制造支撑下的生态适应型技术创新机制

6.1 生态约束下的绿色机械系统创新路径

生态约束日益成为机械制造技术革新的关键驱动,推动绿色系统创新路径由被动响应向主动嵌入演变。在结构设计方面,创新路径强调材料节约与功能集成协同推进,通过柔性化与模块化设计降低资源浪费。在工艺层面,绿色制造鼓励采用低能耗、低污染、高效率的新型工艺技术,兼顾制造精度与生态性能。系统层面强化跨学科融合,构建生态适应性强的机械产品架构体系,提升全链条的绿色协同水平。创新路径不仅着眼于产品本身,还拓展至制造系统整体的生态适应性与环境兼容性,形成生态导向下的技术集群突破,图2为绿色制造体系结构分析。



图2 绿色制造体系结构分析

6.2 基于循环经济的结构再设计与资源闭环利用

循环经济理念要求机械产品具备可拆解性、可再制造性与可回收性,结构再设计成为资源闭环利用的前提条件。

在结构再设计过程中,应融入标准化组件、模块化接口与低损拆装结构,减少报废后资源的无序流失。同时,针对废旧材料与零部件的性能恢复设计要求也需前置纳入原始设计方案,提升可再制造效率。资源闭环利用体系应与绿色供应链联动,构建“制造—使用—回收—再制造”闭环模式,提升资源循环利用的频率与效率。在该基础上,可有效缓解生态压力,实现机械制造对自然资源系统的低干预与高协同。

6.3 推进绿色技术转化与生态系统协同优化发展

绿色制造技术的持续发展依赖于成果转化能力与生态适应性的动态匹配,通过产学研协作推动绿色技术快速转化为可用成果。在转化路径中,应强化生态效益评估机制,确保技术应用不产生新的环境负担。生态系统协同优化要求制造活动与生态环境形成共生关系,即在技术应用的同时促进生态系统稳定性增强。通过建设绿色制造示范平台、推广环保型机械标准化产品、实施绿色设计强制性政策等手段,提升绿色技术普及率。技术转化不再仅以产业指标为导向,而是与区域生态保护目标紧密联动,实现技术进步与环境质量同步提升。

7 结语

绿色制造理念的深入实施为机械结构轻量化与环保性能提升提供了系统路径。在实现资源节约、能效优化与污染控制的过程中,轻量化设计与生态材料应用展现出强大的协同效能。通过构建多维度评价体系与全生命周期环境控制机制,绿色制造不仅推动了机械工程技术的可持续发展,也为生态环境保护注入了新动能。未来应持续强化设计理念的生态导向、制造过程的绿色转化以及技术创新的系统耦合,构建高效、清洁、循环的制造生态体系,助力工业与自然的协调共生。

参考文献

- [1] 金宗耀,秦健.物资绿色低碳供应链的可持续发展路径探讨[J].中国物流与采购,2025(05):71-72.
- [2] 潘珊珊.绿色可持续发展以生物降解材料为基础的光学镜架设计与制造[J].中国战略新兴产业,2025(05):87-89.
- [3] 吴志权.基于绿色制造理念的皮革制品生产企业发展对策研究[J].现代工业经济和信息化,2025,15(01):25-27+78.
- [4] 黄建国.环保政策趋严背景下水泥制造企业的绿色发展战略与经济可行性分析[J].张江科技评论,2024(12):129-131.