

Lightweight design and mechanical performance verification of key components for heavy machinery based on topology optimization

Tao Liu

Shaoguan Hydraulic Parts Factory Co., Ltd., Shaoguan, Guangdong, 512029, China

Abstract

As engineering equipment advances toward high efficiency, intelligence, and green development, lightweight design of critical components in heavy machinery has become a crucial approach to enhance energy efficiency and structural performance. Topological optimization, as an advanced structural design methodology, can minimize material redundancy while ensuring mechanical performance, achieving efficient resource utilization. This study establishes a lightweight design process centered on topology optimization for load-bearing components in heavy machinery, encompassing stress analysis, multi-condition simulation, finite element analysis, and multi-objective optimization. Typical components were selected for topological optimization, with prototype fabrication combining 3D printing and traditional manufacturing techniques. Mechanical performance verification was conducted through static, fatigue, and fracture tests. Results demonstrate an average weight reduction of 18% with significantly improved load-bearing capacity and safety margins, fully meeting the practical requirements for high-performance, low-energy consumption equipment. This research provides theoretical and practical references for structural optimization and engineering applications in large-scale equipment manufacturing.

Keywords

topology optimization; heavy machinery; component lightweighting; mechanical performance verification; finite element analysis

基于拓扑优化的重型机械关键零部件轻量化设计与力学性能验证

刘焘

韶关液压件厂有限公司, 中国 · 广东 韶关 512029

摘要

随着工程装备向高效、智能和绿色方向迈进, 重型机械关键零部件的轻量化设计已成为提升能效和结构性能的重要途径。拓扑优化作为先进结构设计方法, 能够在保证力学性能的前提下, 最大限度减少材料冗余, 实现高效利用。本文针对重型机械承载部件, 建立了以拓扑优化为核心的轻量化设计流程, 涵盖受力分析、多工况仿真、有限元分析与多目标优化。选取典型零部件实施拓扑优化, 并结合3D打印和传统制造工艺进行样件制备, 进一步通过静力、疲劳与断裂性能实验实现力学性能验证。结果表明, 优化设计平均减重18%, 承载能力与安全裕度显著提升, 充分满足高性能与低能耗装备的实际需求。本研究为大型装备制造的结构优化与工程应用提供了理论与实践参考。

关键词

拓扑优化; 重型机械; 零部件轻量化; 力学性能验证; 有限元分析

1 引言

全球装备制造业正经历新一轮技术革新, 绿色低碳、智能高效逐步成为重型机械发展的主旋律。零部件轻量化不仅关乎能耗与环保, 更直接影响机械装备的运行安全和经济效益。传统轻量化路径侧重于材料替代与结构形状简化, 存在结构刚度与强度下降、性能提升有限等局限。拓扑优化技

术以材料分布为设计对象, 打破常规“由经验到设计”的思路, 实现结构与性能的高度耦合, 推动了零部件设计范式的转变。

当前, 重型机械关键零部件多处于复杂载荷与苛刻环境下工作, 需兼顾高承载、高疲劳寿命与制造工艺性等多元目标。实际工程中, 单一性能导向的优化往往难以兼顾多工况需求, 导致优化结果与工程应用脱节。如何将拓扑优化与实际工程需求深度融合, 建立面向力学性能验证的全流程轻量化设计体系, 成为亟需突破的关键问题。

【作者简介】刘焘(1990-), 男, 中国广东韶关人, 本科, 助理工程师, 从事机械设计制造及其自动化研究。

2 拓扑优化理论与重型机械零部件设计需求

2.1 拓扑优化方法概述

拓扑优化作为结构优化设计的重要分支，其本质是在给定约束和目标函数下，寻求材料在设计域内的最优分布，以获得最大结构性能。常用算法包括密度法、水平集法和进化结构优化法等。密度法基于连续体力学思想，通过对每个单元赋予设计变量（如密度）并在全域范围内优化，具有实现简单、计算效率高等优势。水平集法则以界面演化为基础，适用于复杂边界变化问题。近年来，结合多目标、多物理场的复合型拓扑优化不断拓展其应用范围。

在重型机械零部件设计中，拓扑优化能在结构初步设计阶段有效去除非必要材料，实现重量与性能平衡。通过集成载荷工况、制造约束及失效准则，形成可工程落地的优化模型，是推动理论向工程应用转化的关键。

2.2 重型机械关键零部件设计特点

重型机械如挖掘机、起重机、矿用卡车等，其核心零部件普遍承受高幅度交变载荷与多源冲击，应对疲劳、断裂等多种失效模式。零部件形状复杂、截面多变，对重量、空间、装配工艺均有严格要求。

设计过程中不仅要关注结构的极限承载能力，还需考虑工作寿命、刚度响应、抗冲击和工艺可制造性。传统经验设计手段往往难以兼顾多目标约束，存在性能冗余或资源浪费问题。以拓扑优化为代表的智能设计方法为结构性能突破提供了新途径。

2.3 力学性能与轻量化的协同需求

在推进轻量化进程时，力学性能的保障是基础。若一味削减质量而忽视刚度、强度与疲劳寿命，将直接危及装备运行安全。

当前工程实践表明，采用拓扑优化实现轻量化的同时，必须结合力学仿真与实验验证，全面评估优化结构在静载、动载及极端工况下的安全裕度。轻量化与力学性能协同提升，已成为高端制造领域结构设计的核心目标。

3 基于拓扑优化的零部件轻量化设计流程

3.1 结构建模与边界条件分析

在拓扑优化轻量化设计过程中，科学的结构建模是确保优化结果可行性与工程适用性的关键基础。对于重型机械常见的支架、连接板、主梁等典型承载部件，首先需准确采集实际服役工况下的载荷、约束及环境参数，通过三维CAD技术建立详细的几何模型，并在有限元前处理中融合材料属性、结构特征与实际装配条件，实现几何与物理信息的高效整合。在此基础上，必须充分考虑多种典型工况，包括静载、动载、振动冲击与多点约束等，确保边界条件设定精准反映真实工作环境。材料特性方面，详细输入弹性模量、屈服强度、密度和疲劳极限等参数，以保证结构响应的物理可靠性。规范的建模与严谨的边界条件设定不仅为后续拓扑

优化提供了坚实的数据支撑，也为力学性能仿真与实验验证奠定了基础，提升了结构优化成果的工程可实施性。

3.2 拓扑优化目标函数与约束设定

拓扑优化的核心在于目标函数与约束条件的科学设定，直接影响最终结构的性能表现及制造可行性。重型机械零部件的优化设计通常围绕质量最小化、刚度最大化、多目标加权等目标展开。实际应用中，常将轻量化与最大位移、最大应力等约束相结合，建立多约束、多目标优化模型，兼顾结构轻质化与力学性能需求。在此过程中，除传统的力学性能指标外，制造工艺相关的约束同样不可或缺。例如，对最小壁厚、孔洞尺寸、结构无支撑悬挑等工艺性参数进行设定，避免优化结果在制造或装配过程中出现不可实现的问题。多目标与多约束的协同建模，有助于保障结构在各项指标间取得平衡，提高工程落地性，推动理论成果向实际生产应用转化，为装备制造行业的高质量发展提供强有力的技术支撑。

3.3 多工况与多物理场协同优化

重型机械关键零部件在实际服役过程中面临多种载荷的叠加及复杂环境影响，如交变载荷、温度梯度、冲击和腐蚀等。拓扑优化过程中，需综合考虑多种工况同步作用下的结构响应，进行多工况约束下的优化求解，确保结构在极端环境与复杂载荷作用下仍具备优良的可靠性和安全裕度。此外，部分核心零部件涉及热-力-电-磁等多物理场耦合，单一物理场分析难以全面评估其服役性能，需借助多物理场耦合仿真手段，实现全方位的性能预测和评估。多工况与多物理场协同优化不仅提升了优化结果的工程适用性和结构安全性，也为关键零部件在高端装备、极端工况等领域的应用提供了坚实保障，有效推动了结构设计方法由单一目标向多元复合型转变，拓展了结构优化的工程应用边界。

4 有限元分析与力学性能仿真验证

4.1 有限元仿真流程与评价指标

在拓扑优化后对重型机械关键零部件进行有限元分析，已成为工程实践中力学性能验证的重要手段。有限元仿真流程以三维建模为基础，结合结构实际工作环境，依次完成网格划分、材料属性赋值、载荷和边界条件设定、数值求解与后处理分析。科学合理的网格划分能够平衡计算精度与效率，为捕捉细微应力集中及变形细节提供保障。材料参数选取需反映实际零部件材料的弹性、塑性、断裂及疲劳性能，确保仿真结果的物理真实性。在加载与约束环节，应全面覆盖实际服役工况，包括静载、冲击、热载及多场耦合等复杂情况。后处理阶段，常以最大应力、最大位移、载荷路径、局部失稳等为核心评价指标，既可量化结构安全性，又能检验刚度响应。通过对比原始与优化结构的仿真结果，能够直观分析轻量化带来的质量削减、刚度提升与安全裕度变化，为后续样件制造与实验验证提供理论支持和决策依据。

4.2 极限承载能力与疲劳寿命评估

极限承载能力与疲劳寿命是拓扑优化零部件工程应用

的核心评价维度。有限元仿真不仅能够评估结构在极限工况下的承载能力,还能预测其长期服役下的疲劳寿命。通过施加静载荷和交变载荷,结合材料的屈服极限、断裂韧性及疲劳极限等参数,系统分析结构的极限强度和损伤演化过程。疲劳寿命评估过程中,采用矿山规则、应力寿命法等理论,基于应力分布场和循环加载曲线,对结构的疲劳寿命进行定量预测。研究发现,拓扑优化后的零部件能够有效缓解应力集中,提升整体疲劳性能,部分典型结构在循环载荷作用下寿命提升明显,安全风险降低。通过多载荷、多循环工况的协同仿真,为优化设计在极端环境下的可靠性提供有力保障,为后续的样件实验与工程应用奠定坚实基础。

4.3 断裂性能与局部强化设计

针对重型机械高载荷工况下零部件的断裂失效风险,断裂性能分析及局部强化设计显得尤为关键。有限元断裂分析以微观裂纹萌生与扩展为理论基础,能够在结构早期识别出潜在失效区域。通过模拟应力集中点和应变能累积区,结合局部结构细化与材料梯度分布等措施,优化零部件的抗断裂能力。局部强化常采用过渡圆角、加厚关键区域或选用高韧性材料等策略,有效延缓裂纹的扩展速度,提高整体结构的安全裕度。仿真结果显示,优化结构在高应力区域的断裂韧性大幅提升,关键薄弱部位的失效概率显著降低。断裂分析不仅服务于整体结构性能的提升,更为关键部位的设计优化与制造提供理论依据,有助于实现零部件在全寿命周期内的高可靠性运行,切实保障重型机械装备在复杂工况下的安全与稳定。

5 样件制造与实验性能验证

5.1 样件制造工艺路径

拓扑优化生成的重型机械零部件结构通常具备高度复杂的几何形态,传统切削工艺难以高效、精确地实现此类自由曲面结构。增材制造(3D打印)技术,尤其是选择性激光熔化(SLM)和电子束熔化(EBM),为复杂零部件的快速成型提供了有力支撑。这类技术能够在材料利用率与结构完整性之间实现平衡,使得创新设计能够高还原度地落地实施。对于批量较大、尺寸超出增材制造能力的零部件,则需灵活选用铸造、锻造与精密加工等传统工艺,或将增材制造与减材加工组合,以兼顾制造效率和性能需求。在样件制备过程中,需重点关注尺寸精度、表面粗糙度和内部致密性等质量控制指标。只有通过规范的工艺参数设置与严格的过程管控,才能确保后续力学性能实验的科学有效,为结构优化设计的工程化应用提供坚实基础。

5.2 静力学与疲劳性能实验

完成样件制造后,系统的静力学与疲劳性能实验成为检验拓扑优化设计工程可行性的关键环节。实验通常采用万能材料试验机对零部件进行静载荷下的承载力、刚度和变形

响应测试,同时通过疲劳试验机模拟服役周期内的交变载荷环境,评估样件的疲劳寿命和损伤演化规律。整个测试过程需严格按照国家或行业标准执行,确保实验数据的准确性和可比性。在测试过程中,详细记录载荷与变形曲线、破坏前的警戒特征及最终失效状态,并对样件的极限承载力与传统设计方案进行对比。大量实验结果表明,基于拓扑优化的结构在保证力学性能的前提下,质量显著降低,结构的承载能力提升明显,部分典型零部件在工况下的承载极限提升超过15%,疲劳寿命提升20%-30%,充分证实了轻量化与力学性能的协同增益效果。

5.3 断裂与失效模式分析

为全面理解拓扑优化样件在极端工况下的力学行为和失效机理,需开展断裂与失效模式的多维度分析。通过对断口进行金相观察和电子显微镜扫描,可以揭示材料内部的微观结构变化和断裂起源。结合声发射监测技术,可以实时捕捉裂纹扩展与损伤累积过程,形成对零部件从初始加载到最终失效全过程的动态追踪。实验数据与有限元仿真结果相结合,有助于溯源优化结构在实际工况下的失效位置与主控机理。失效分析发现,优化结构中应力集中得到有效缓解,局部强化区表现出更强的抗裂与延展性能。但在高循环载荷或复杂多轴工况下,部分薄弱环节依然存在早期损伤萌生的风险。相关分析不仅为后续材料选择和结构细化优化提供理论依据,也促进了从设计、制造到验证全流程的质量闭环,确保重型机械关键零部件在实际应用中的可靠性与安全性。

6 结语

拓扑优化推动了重型机械零部件轻量化设计的理论创新和工程实践,显著提升了结构减重与力学性能。本文系统梳理了基于拓扑优化的建模、仿真、制造与实验验证流程,实证优化结构的性能优势。多工况、多物理场协同优化及3D打印等先进制造手段的应用,进一步拓展了结构创新边界。未来,结合人工智能、材料科学与智能制造技术,拓扑优化将在更多重型机械领域实现深入应用,并推动装备制造业智能化、绿色化转型,为工业高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 王卫东,王雪,余小琴,等.基于拓扑优化算法的嵌合可伸缩玻璃栈桥重型旋转舞台设计[J].机械研究与应用,2022,35(03):74-78.
- [2] 闫占辉,李中帅.SSWZ330重型联轴器的渐进结构拓扑优化设计[J].机床与液压,2020,48(22):91-94.
- [3] 黄自豪,陈劲杰,田绍兴.利用拓扑优化法解决设计优化问题[J].通信电源技术,2015,32(05):128-130.
- [4] 晏少亚.曲轴复合车床随动刀架动平衡及关键部件拓扑优化[D].武汉理工大学,2016.
- [5] 扶志刚,姜永正,朱升硕.重型轧机联轴器圆角应力集中引流拓扑优化[J].轧钢,2022,39(03):78-84.