

Optimization and performance analysis of forklift mast structure based on lightweight design

Hao Liu

Baoji Heli Forklift Co., Ltd., Baoji, Shaanxi, 721001, China

Abstract

This study addresses the lightweight design requirements for forklift mast structures, conducting in-depth research on structural optimization methods and performance evaluation. Through detailed analysis of existing mast configurations combined with advanced finite element analysis techniques and optimization algorithms, a series of practical lightweight design solutions are proposed. While ensuring compliance with fundamental performance criteria including strength, stiffness, and stability, the research achieves significant weight reduction, thereby enhancing overall operational efficiency and energy utilization. The study comprehensively considers load conditions under various working scenarios, implementing refined design and optimization of critical components. Experimental validation confirms the effectiveness and reliability of the optimized solutions. The results demonstrate marked improvements in comprehensive performance after lightweight design implementation, providing valuable references for energy conservation, consumption reduction, and technological innovation in the forklift industry.

Keywords

forklift mast; lightweight design; structural optimization; performance analysis; finite element analysis

基于轻量化设计的叉车门架结构优化与性能分析

刘浩

宝鸡合力叉车有限公司, 中国 · 陕西 宝鸡 721001

摘要

本文针对叉车门架的轻量化设计需求, 深入探讨了其结构优化方法与性能表现。通过对叉车门架现有结构的详细分析, 结合先进的有限元分析技术与优化算法, 提出了一系列切实可行的轻量化设计方案。在确保叉车门架满足强度、刚度及稳定性等基本性能要求的前提下, 显著降低了门架的重量, 提高了叉车的整体作业效率与能源利用率。研究过程中充分考虑了不同工况下门架的受力情况, 对关键部件进行了精细化设计与优化, 并通过实验验证了优化方案的有效性与可靠性。最终结果表明, 经轻量化设计后的叉车门架在综合性能上有了明显提升, 为叉车行业的节能降耗与技术创新提供了重要参考依据。

关键词

叉车门架; 轻量化设计; 结构优化; 性能分析; 有限元分析

1 引言

在现代物流与工业生产领域, 叉车作为一种重要的物料搬运设备, 发挥着不可或缺的作用。叉车门架作为叉车的关键组成部分, 直接承担着货物的升降与搬运任务, 其性能优劣直接影响到叉车的整体工作效率、安全性以及能源消耗。随着市场竞争的日益激烈以及对节能环保要求的不断提高, 叉车的轻量化设计已成为行业发展的重要趋势之一。通过减轻叉车门架的重量, 不仅可以降低叉车的制造成本与运营能耗, 还能有效提高叉车的机动性与灵活性, 从而更好地满足复杂多变的作业环境需求。然而, 叉车门架在实现轻量化的过程中, 必须兼顾其结构强度、刚度和稳定性等多方面

的性能指标, 以确保在各种工况下都能安全可靠地运行。因此, 深入研究基于轻量化设计的叉车门架结构优化与性能分析具有极为重要的理论意义与实际应用价值。

2 叉车门架结构特点与工作原理

2.1 叉车门架的结构组成

叉车门架作为叉车执行货物装卸与搬运任务的核心部件, 其结构组成精巧且合理。通常, 它由内门架、外门架、货叉架、滚轮链条以及液压油缸等多个关键部件构成。内门架与外门架相互嵌套, 这种独特的设计为门架的伸缩运动提供了基础。二者通过滚轮实现相对滑动, 滚轮的存在极大地减少了滑动过程中的摩擦力, 使得内门架能够顺畅地在外门架内移动。货叉架安装在内门架上, 它直接承载着货物, 其结构设计需充分考虑货物的尺寸、重量以及装卸的便利性。液压油缸是门架升降的动力源泉, 其一端稳固地连接在外门

【作者简介】刘浩 (1987-), 男, 中国陕西咸阳人, 本科, 工程师, 从事机械设计制造及其自动化研究。

架上,另一端则与内门架相连。当液压油缸工作时,能够产生强大的推力或拉力,驱动内门架进行升降运动。这种结构设计赋予了叉车在一定高度范围内灵活作业的能力,无论是仓库的高层货架还是地面的货物堆放区,叉车都能轻松应对,高效地完成货物的装卸与搬运任务,极大地提高了物流作业的效率。

2.2 叉车门架的工作原理

叉车门架的工作原理基于液压传动与机械结构的协同作用。当叉车执行起升作业时,液压系统启动,液压油缸的活塞杆缓缓伸出。这一动作产生强大的推力,推动内门架沿着外门架向上做直线运动。随着内门架的上升,安装在其上的货叉架及货物也随之升高,从而实现货物的起升。反之,当需要将货物下降时,液压系统控制液压油缸回油。此时,内门架在自身重力以及货物重力的共同作用下,沿着外门架平稳下滑,货物也随之降低高度。在整个工作过程中,门架各部件承受着极为复杂的载荷作用。除了货物的直接重量外,还有货物起升或下降过程中产生的惯性力,以及叉车行驶或转向时产生的侧向力等。这些复杂的载荷对门架的结构强度、刚度和稳定性提出了严苛的要求,只有确保门架在这些载荷作用下依然保持稳定可靠,才能保障叉车作业的安全与高效。

3 叉车门架轻量化设计的重要性与挑战

3.1 轻量化设计的重要性

在叉车设计与制造领域,轻量化设计的重要性日益凸显,其对于叉车整体性能的提升及成本的优化有着不可忽视的作用。从能源利用角度来看,叉车门架重量在整车中占比较大,减轻门架重量可有效降低叉车自重。自重的降低直接带来行驶与起升作业时能耗的减少,对于以蓄电池为动力源的电动叉车而言,这一改变意义非凡。它能够显著延长电动叉车的续航里程,让叉车在单次充电后完成更多作业任务,同时降低了能源成本,减少了频繁充电带来的时间与经济损耗。在机动性方面,较轻的门架使叉车性能得到全方位提升。加速更迅速,制动更灵敏,转向也更为灵活。在狭窄工作空间或频繁启停的作业环境中,叉车能够更加敏捷地响应操作指令,快速准确地完成各项动作,这不仅提高了作业效率,还大大降低了事故发生的可能性,保障了作业安全。此外,轻量化设计在保证门架性能的前提下减少了材料使用量,直接降低了原材料采购成本。而且在加工制造、运输安装等后续环节,也能节省相应费用,综合成本得以降低,从而提高了叉车产品在市场上的竞争力,为企业赢得更多市场份额。

3.2 轻量化设计面临的挑战

在叉车门架的轻量化设计进程中,面临着诸多棘手挑战。结构强度与刚度的平衡是首要难题。轻量化设计旨在减轻门架重量,但绝不能以牺牲结构强度与刚度为代价。门架需承受各种复杂工况下的载荷,若强度或刚度不足,就会发

生变形、断裂等失效情况,严重影响叉车安全与正常使用。所以,设计时必须精确计算和评估不同受力下门架的应力分布与变形状况,依据计算结果合理挑选材料,并不断优化结构参数,力求找到强度与刚度的最佳平衡点,这无疑对设计人员的专业素养和计算能力提出了极高要求。稳定性问题也不容小觑。当叉车门架举升较高货物时,侧向力容易使其失稳,在叉车转弯或路面不平整等特殊工况下,这种考验更为严峻。轻量化设计可能会改变门架原有的力学特性,进一步影响其稳定性。加工工艺与成本控制同样充满挑战。新型轻量化材料和复杂结构形式往往会给加工工艺带来麻烦,增加制造难度与成本。像高强度铝合金材料焊接,特殊设备和人才缺一不可;异形结构加工则依赖精密模具与设备,这些都阻碍了轻量化设计的顺利实施。

4 叉车门架结构优化方法

4.1 基于有限元分析的拓扑优化

有限元分析为叉车门架轻量化设计提供了强大的工具。借助专业软件对门架进行精细建模与仿真分析,将其结构细分为众多细小单元网格,精准模拟实际工况,施加相应载荷与边界条件。拓扑优化算法在此过程中发挥关键作用,它在既定设计空间内探寻最优材料分布。通过去除冗余材料、保留关键承力结构,实现门架轻量化。在优化时,可设定不同目标函数,如最小化结构质量以减轻重量,或最大化结构刚度以增强抗变形能力。设计人员需依据具体设计要求,对这些目标函数进行权衡调整,确保在满足门架各项性能指标的前提下,达成轻量化目标,提升叉车整体性能与经济性。

4.2 截面形状优化

叉车门架主要承力构件的截面形状优化是达成轻量化目标的关键环节。内外门架的立柱、横梁等部件作为核心承力部分,其截面几何参数的改变对门架性能影响显著。宽度、高度、壁厚以及形状类型的调整,会引发结构强度、刚度和稳定性的相应变化。以横梁为例,当承受较大弯曲载荷时,工字形截面展现出独特优势。其特殊的结构形式使得材料在截面上的分布更合理,能有效抵抗弯曲变形,在相同材料用量下,抗弯能力明显优于其他截面形式。而对于主要承受轴向压力的立柱,适当减小壁厚并优化截面形状,可调整立柱的惯性矩,从而提高其稳定性。在设计过程中,要综合考虑多方面因素。需在确保门架强度、刚度和稳定性等性能要求达标的基础上,通过精确计算和模拟分析,精心挑选最佳截面形状与尺寸参数。如此,才能在减轻门架重量的同时,切实保障门架的可靠性与安全性,提升叉车整体性能与经济效益。

4.3 材料选择与替换

选用高强度、低密度新型材料是叉车门架轻量化的重要途径。传统叉车门架多采用普通碳素结构钢,虽强度与韧性良好,但密度大。随着材料科学发展,高性能铝合金、镁

合金及复合材料逐渐应用于门架制造。这些材料比强度与比刚度高,能在保证性能的同时显著减轻重量。然而,材料替换需综合考量多方面因素。铝合金焊接性能相对较差,需采用特殊焊接工艺或连接方式;复合材料成本高且回收处理困难,限制了其大规模应用。因此,在选择材料时,要全面评估材料的加工工艺性、成本以及与其他部件的兼容性,确保材料替换既能实现轻量化目标,又具有经济可行性与技术可靠性。

5 叉车门架性能分析与验证

5.1 静力学分析

对优化后的叉车门架开展静力学分析是评估其性能的基础且关键步骤。借助有限元分析软件,精准模拟门架在最大起升高度、额定起重量等典型工况下的受力状况。通过复杂的计算,能够清晰呈现门架各部位的应力大小与分布云图。将这些应力数据与材料的许用应力进行细致对比,可直观判断门架是否满足强度要求。若某些部位应力接近或超过许用应力,则表明该区域存在强度风险。同时,对门架的变形情况展开深入分析,涵盖整体变形量与局部变形量。刚度是衡量门架性能的重要指标,若变形量过大,会影响叉车的作业精度与稳定性。若发现应力集中或变形超标部位,需针对性地进一步优化结构设计,如调整构件形状、增加加强筋等,或合理调整材料参数,如更换更高强度材料,直至门架的强度与刚度均满足性能要求,为叉车的安全可靠运行提供保障。

5.2 动力学分析

叉车在实际作业中,动态载荷无处不在,如启动、制动时的惯性力以及振动等,这使得对优化后门架进行动力学分析极为必要。通过建立精确的门架动力学模型,并输入相应的激励信号,能够深入分析门架在不同频率与幅值激励下的响应特性。固有频率反映了门架自身的振动特性,振型展示了门架在不同振动模式下的形态,而动应力则体现了动态载荷对门架的作用效果。这些分析结果有助于预测门架在动态工况下可能出现的共振现象与疲劳破坏风险。例如,若发现门架在特定频率下易发生共振,可采取调整结构参数,如改变构件尺寸、质量分布等,或增加阻尼装置,如安装减震器等措施,避开共振区,显著提高门架的动态稳定性,确保叉车在复杂动态环境下依然能够稳定作业。

5.3 实验验证

理论分析与仿真结果虽具有重要指导意义,但实验验证

是确保优化后叉车门架性能可靠的最后一道关键防线。搭建与实际工作环境高度相似的实验平台,模拟叉车门架的真实工况条件,对其进行加载测试与全面性能检测。通过高精度测量设备,获取门架在不同载荷作用下的应力应变数据、变形量以及振动特性等关键参数,并与有限元分析结果进行严格对比验证。若两者偏差在合理范围内,则证明理论分析与仿真具有较高准确性。同时,仔细观察门架在长时间连续工作后的磨损情况、疲劳裂纹萌生与扩展情况等,全面评估其可靠性与耐久性。只有经过严格实验验证合格的轻量化叉车门架,才能放心投入批量生产与实际应用,为物流等行业的高效运行提供坚实支撑。

6 结语

本文通过对叉车门架结构优化与性能分析的研究,深入探讨了基于轻量化设计理念下叉车门架的多种优化方法及其性能表现。从叉车门架的结构特点与工作原理出发,分析了轻量化设计的重要性与面临的挑战,并详细介绍了基于有限元分析的拓扑优化、截面形状优化以及材料选择与替换等结构优化方法。在此基础上,对优化后的叉车门架进行了全面的静力学分析、动力学分析以及实验验证,确保其在满足强度、刚度、稳定性等性能要求的前提下实现了有效的轻量化。研究表明,合理的轻量化设计不仅能够降低叉车门架的重量,提高叉车的能源利用率与机动性,还能保证门架在各种复杂工况下安全可靠地运行。然而,叉车门架的轻量化设计是一个涉及多学科知识、多因素考量的综合性系统工程,在未来的研究与实践中仍需要不断探索创新,进一步完善优化设计与性能评价体系,以适应不断发展的市场需求与技术进步要求,为推动叉车行业的可持续发展做出更大贡献。

参考文献

- [1] 殷建刚,叶建锋,龙玲,等.基于拓扑优化的间隔棒机器人机架多工况轻量化设计[J].振动与冲击,2025,44(14):198-206.
- [2] 汪存喜,梅标,杨永泰.基于尺寸和自由形状联合优化技术的叉车货架轻量化设计[J].现代制造工程,2023,(10):86-93.
- [3] 徐进壮,汪伟,王汝佳.叉车门架仿真分析与拓扑优化[J].装备制造,2023,(03):6-12.
- [4] 王润泽,姜建建,黄志来,等.基于精确有限元模型的叉车外门架轻量化设计[J].青岛理工大学学报,2022,43(03):144-150.
- [5] 符永映.基于SolidWorks二级自由提升叉车门架的设计[J].装备制造技术,2022,(05):76-79.