

重卡轻量化设计对结构强度与长期使用质量的影响评估

贾 萌 马嘉诚 田引娟 范文斌 李庆歌
陕西重型汽车有限公司 陕西西安 710200

摘要: 在全球能源危机加剧、环保法规日趋严格以及物流运输成本持续攀升的背景下, 重型卡车(以下简称“重卡”)轻量化已成为行业发展的核心战略方向。轻量化不仅能显著降低燃油消耗与碳排放, 还能提升有效载荷能力, 增强市场竞争力。然而, 过度或不当的轻量化可能对车辆的结构强度和长期使用质量构成潜在威胁, 进而影响行车安全与全生命周期成本。本文深入分析了轻量化对车架、悬架、驾驶室等关键承载部件结构强度的影响机制; 并通过疲劳寿命、耐腐蚀性、维修便利性及可靠性等维度, 全面评估其对长期使用质量的综合效应。研究指出, 科学合理的轻量化设计需在减重目标与结构性能之间取得动态平衡, 依赖多学科协同仿真、全生命周期验证及智能监测技术支撑。最后, 本文提出面向未来的轻量化发展建议, 旨在为重卡行业的可持续高质量发展提供理论参考与实践指导。

关键词: 重型卡车; 轻量化; 结构强度; 疲劳寿命; 长期使用质量; 多目标优化

引言

重型卡车作为国民经济的重要运输载体, 在物流、工程建设、能源运输等领域发挥着不可替代的作用。据统计, 全球重卡年均行驶里程可达20万公里以上, 其燃油消耗占商用车总能耗的70%以上。国际能源署(IEA)数据显示, 车辆整备质量每减轻10%, 燃油经济性可提升约6%~8%。同时, 《巴黎协定》及各国“双碳”目标推动下, 欧盟、中国等主要经济体相继出台更为严苛的商用车CO₂排放标准(如欧盟2025年CO₂排放限值为1.5g/t·km), 迫使整车制造商加速推进轻量化进程。然而, 轻量化并非简单的“减重”操作。重卡长期运行于复杂恶劣工况——频繁启停、高负载、颠簸路面、极端气候等, 对其结构强度、刚度及耐久性提出极高要求。若仅追求减重而忽视力学性能保障, 可能导致车架开裂、悬架失效、连接件松动等结构性故障, 不仅危及行车安全, 还将大幅增加后期维护成本, 缩短整车使用寿命, 最终抵消轻量化带来的经济效益。因此, 如何在确保结构强度与长期使用可靠性的前提下实现有效减重, 成为当前重卡研发的核心挑战。

一、轻量化对结构强度的影响机制

(一) 正向效应: 材料性能提升补偿几何削弱

轻量化并不必然导致结构强度下降。事实上, 当采用更高强度等级的材料替代传统钢材时, 即使几何尺寸

有所缩减, 其整体承载能力仍可能得到维持甚至提升。例如, 将屈服强度为345MPa的Q345钢替换为700MPa级别的700L高强钢, 在保持相同安全系数的前提下, 板厚可减少近40%, 而极限承载力基本持平。这种“以强补薄”的策略, 本质上是通过材料本征性能的跃升来补偿因减重带来的截面削弱, 从而在不牺牲结构安全性的基础上实现有效减重^[1]。尤其在静态或准静态载荷工况下, 此类材料替代方案已被大量工程实践所验证, 成为当前重卡轻量化的主流技术路线之一。

(二) 负向风险: 刚度下降与应力集中

然而, 轻量化过程也可能引入结构性风险, 其中最为突出的是刚度下降与应力集中问题。根据材料力学原理, 梁的弯曲刚度与其弹性模量和截面惯性矩成正比。当为减重而减薄板厚或缩小截面尺寸时, 截面惯性矩会显著降低, 进而导致整体刚度下降。对于采用铝合金的轻量化车架而言, 这一问题尤为严峻, 因为其弹性模量(约70GPa)仅为钢材(约210GPa)的三分之一, 即便几何尺寸相同, 其刚度也远低于钢制结构。刚度不足易引发车辆在行驶过程中的过度振动、操控稳定性变差, 甚至影响传动系统与悬架的正常工作。此外, 在结构优化过程中形成的孔洞、变截面过渡区、焊缝末端等几何不连续部位, 极易成为应力集中源。在重卡长期承受的随机交变载荷作用下, 这些高应力区域往往率先萌生疲劳裂纹, 成为结构失效的起点。已有工程案例显示, 某

轻量化车架因横梁开孔位置设计不当,在台架疲劳试验中提前出现裂纹,后经局部补强与圆角优化才得以解决。这表明,轻量化设计必须高度重视几何细节对局部应力场的影响。

(三) 关键部件强度表现

不同关键部件对轻量化的敏感性存在差异,需针对性评估。车架作为整车的承载基体,其弯曲与扭转刚度直接决定了悬架系统的运动特性与驾驶平顺性。轻量化设计必须确保在满载工况下各部位弯曲应力低于材料许用应力,同时在空载转弯或坏路行驶时,整车扭转角不超过设计阈值,以维持操控稳定性。悬架系统则长期承受高频冲击载荷,其钢板弹簧、空气弹簧支架等部件若在减重后未同步提升疲劳强度,极易发生簧片断裂或支架焊缝开裂等故障。驾驶室作为乘员保护的关键结构,还需满足ECER29等碰撞安全法规。铝合金驾驶室虽轻,但其吸能特性与钢材存在本质差异,必须重新设计溃缩区与乘员舱的刚性匹配关系,以确保碰撞过程中既能有效吸收能量,又能维持生存空间完整。综上所述,轻量化必须建立在精确的多工况载荷谱分析与强度校核基础上,避免“为轻而轻”的片面追求。

二、轻量化对长期使用质量的影响评估

(一) 疲劳寿命衰减风险

重卡在实际运营中长期暴露于随机振动与冲击载荷环境中,疲劳失效是其最主要的失效模式之一。轻量化结构由于材料用量减少或几何刚度降低,往往在相同工况下承受更高的应力幅值,从而加速疲劳损伤累积。尤其值得注意的是,高强钢虽然静态强度显著提升,但其疲劳强度的增幅远小于静强度,通常仅提高20%至30%,且对表面缺陷、残余应力等更为敏感。铝合金在低周高应变工况下(如频繁通过坑洼路面)表现出较差的塑性累积能力,其疲劳寿命往往显著低于同等设计的钢结构^[2]。已有实际运营案例表明,某品牌轻量化牵引车在山区高频率颠簸线路上运行两年后,车架纵梁与横梁连接处集中出现多起疲劳裂纹,返厂加固后问题方得缓解。根本原因在于设计阶段未充分考虑该线路特有的高幅值、高频率载荷谱,导致疲劳安全裕度不足。因此,轻量化设计必须依托实测道路载荷数据,开展基于nCode或FE-SAFE等工具的精细化疲劳仿真,并预留足够的安全裕度,以保障整车在整个设计寿命期内的结构完整性。

(二) 耐腐蚀性与环境适应性

材料体系的变更直接影响整车的耐腐蚀性能与环境

适应能力。铝合金因其表面自然形成的致密氧化膜,在潮湿、盐雾等腐蚀环境中表现出优异的耐蚀性,特别适用于沿海或高湿地区运营的车辆。相比之下,高强钢由于含有更多合金元素,其焊接热影响区在电化学作用下更易发生点蚀或缝隙腐蚀,必须依赖达克罗涂层、阴极电泳等高级防护工艺予以弥补。更为复杂的是混合材料结构所带来的电偶腐蚀风险。当钢与铝直接接触并在潮湿环境中形成电解质通路时,会构成原电池,导致电位较负的铝加速腐蚀。为规避此问题,工程实践中常采用绝缘垫片、密封胶或表面转化膜等隔离措施,但这又增加了工艺复杂性与成本。因此,轻量化方案在材料选择阶段就必须统筹考虑服役环境、防腐工艺与长期维护需求,避免因短期减重而埋下长期腐蚀隐患。

(三) 可维护性与维修成本

轻量化结构在提升性能的同时,也可能对用户端的可维护性带来挑战。为追求结构效率,轻量化设计常采用一体化成型或高度集成的模块化方案,辅以自冲铆接、结构胶接等新型连接工艺。这些技术虽能提升刚度与减重效果,但一旦部件受损,往往难以在现场进行快速修复。例如,铝合金部件因焊接难度大,损伤后通常需整体更换而非局部修补;复合材料覆盖件一旦破裂,修复工艺复杂且成本高昂;而高度集成的子系统若某一零件失效,可能需更换整个模块,而非仅替换单个故障件^[3]。这种“高集成、低可修”的特性在专业维修网络健全的城市地区尚可接受,但在偏远或维修资源匮乏的区域,则可能显著延长车辆停驶时间,增加用户运营成本。因此,轻量化设计需在性能优化与维修便利性之间寻求平衡,尤其应针对目标市场的维修能力进行差异化设计。

(四) 全生命周期成本(LCC)权衡

轻量化对用户价值的最终体现,需通过全生命周期成本(LCC)进行综合评估。LCC涵盖购置成本、使用成本(燃油、维保)及残值三大组成部分。尽管轻量化方案通常导致初始购车成本上升(源于高强钢、铝合金等材料溢价),但其带来的节油效益与增加载重能力可有效摊薄成本。以一辆年行驶20万公里的6×4牵引车为例,若整备质量减轻500kg,按百公里节油2升计算,年均可节省燃油约1500升;以当前油价7元/升计,年节省燃油费用达1.05万元。同时,有效载重增加500kg,在吨公里运价0.3元的市场环境下,年均可增收2至3万元。若轻量化带来的成本增量为3万元,则投资回收期约为2.8年。然而,这一经济性优势的前提是轻量化结构具备

可靠的长期使用质量。若因设计不当导致故障率上升、维修频次增加或二手车残值率下降（用户普遍担忧轻量化车辆的耐久性），则LCC优势将大打折扣。因此，轻量化必须通过严格的耐久验证与市场反馈闭环，确保其在全生命周期内真正实现“减重增效”。

三、多目标协同优化与验证体系构建

（一）多学科设计优化（MDO）

实现“减重不减质”的轻量化目标，必须摒弃单一学科视角，转向多学科协同优化（MDO）。该方法将结构力学、疲劳分析、NVH（噪声、振动与声振粗糙度）、制造工艺约束等多个学科模型集成于统一优化框架中，以整车或子系统质量最小化为目标函数，同时将强度安全系数、疲劳寿命里程、扭转刚度阈值等关键性能指标设为约束条件。通过遗传算法、粒子群优化或响应面法等智能优化策略，在庞大的设计空间中搜索帕累托最优解集，从而获得在重量、性能与成本之间达到最佳平衡的设计方案。这种系统性方法有效避免了传统“试错式”设计中可能出现的局部最优陷阱，为轻量化提供了科学决策支持。

（二）数字孪生与虚拟验证

随着数字技术的发展，构建高保真度的数字孪生体已成为轻量化验证的重要手段。通过集成实测道路载荷谱、材料非线性本构模型、连接界面接触行为等多源数据，可在虚拟环境中开展道路模拟（VPG）、虚拟台架试验乃至虚拟碰撞测试，提前暴露潜在的结构薄弱环节。这种“虚拟先行、实物验证”的模式不仅大幅缩短了开发周期，降低了物理样车试制与试验成本，还提高了设计一次成功率^[4]。更重要的是，数字孪生体可随实车运行数据不断迭代更新，实现从设计阶段到使用阶段的全链条性能追踪与预测。

（三）实车道路试验与大数据监测

尽管虚拟验证日益成熟，实车道路试验仍是检验轻量化结构可靠性的最终标准。必须在高原、高温、高寒、坏路等典型极限工况下开展长里程耐久试验，以验证其在真实复杂环境中的表现。与此同时，借助车联网与车

载传感器技术，可对数万辆已投入运营的轻量化重卡进行实时应力、振动及故障数据采集。通过对这些海量运维数据的挖掘与分析，可建立轻量化结构的健康状态评估模型，识别早期失效征兆，优化后续设计参数。这种“设计—验证—反馈—优化”的闭环机制，使得轻量化技术能够持续迭代进化，真正实现从实验室走向市场的稳健落地。

结语

本文研究表明：材料替代与结构优化是轻量化的核心路径，但必须基于精确的载荷分析与多物理场仿真，避免盲目减重；轻量化可能带来刚度下降、应力集中、疲劳寿命缩短等风险，需通过局部加强、工艺改进与材料匹配予以补偿；长期使用质量受疲劳性能、耐腐蚀性、可维护性等多因素影响，轻量化方案应进行全生命周期成本评估，确保用户综合收益；未来轻量化需走向智能化与系统化，依托数字孪生、AI优化算法与大数据运维，实现性能、安全、经济性的动态平衡。展望未来，随着超高强钢（1500MPa以上）、低成本碳纤维、智能自修复材料的发展，以及一体化压铸、增材制造等新工艺成熟，重卡轻量化将进入“高性能轻质化”新阶段。同时，行业应加快制定轻量化结构的设计规范、测试标准与维修指南，推动技术成果安全、高效地转化为产品竞争力，助力重卡产业绿色低碳转型与高质量发展。

参考文献

- [1] 千慧. 基于Hyperworks的重卡气室支架结构优化设计研究[J]. 中国设备工程, 2021, (24): 105-106.
- [2] 邹腾, 贾楠. 白车身纵梁轻量化设计方法[J]. 重型汽车, 2024, (03): 15-16.
- [3] 周友明, 程一明, 李骏, 等. 基于铝合金材料应用的重卡车架设计及轻量化[J]. 机械工程师, 2021, (05): 91-93+96.
- [4] 闫小楼, 邱阳, 李有利. 重卡驱动桥的轻量化设计及应用研究[J]. 机械传动, 2023, 47(06): 148-152.