

基于轻量化设计的半挂车车架结构优化与研究

秦晓于才

蒙阴县鹏程万里车辆有限公司 山东临沂 276200

摘要: 随着全球交通运输行业的快速发展,节能减排和可持续发展成为行业的重要议题。半挂车作为公路运输的主力,其车架重量直接影响燃油消耗和碳排放。因此,半挂车车架的轻量化设计不仅具有重要的经济价值,更具有深远的环保意义。本研究旨在探索结合结构优化、新材料应用和先进制造工艺的轻量化策略,以期在保证车架强度和安全性的前提下,实现重量的最小化,推动行业技术进步。

关键词: 轻量化设计;半挂车车架;结构优化

引言

在本研究中,将探讨半挂车车架轻量化设计的理论与实践,旨在通过创新设计策略和工程方法,降低车架重量的同时保证其性能和安全性。研究目标是提出一种综合考虑结构、材料、工艺和成本的优化设计方案,以期在满足行业标准和法规要求的前提下,实现更高的燃油效率和更低的碳排放。

一、轻量化设计基础

(一) 轻量化设计的基本概念

轻量化设计是在满足功能、强度、刚度和安全性等基本要求的基础上,通过优化设计,选择轻量化材料,或者运用先进的制造工艺,使其达到轻量化的设计理念。在环保要求越来越高的今天,轻量化设计已成为各行业的一种主流,特别是在交通运输行业,通过对半挂车等重型车辆的轻量化研究,不仅可以提高车辆的行驶效率,降低能耗,还可以提高车辆的使用寿命,减少碳排放,符合可持续发展的趋势。在半挂车的结构中,框架是最耐用的部分,直接关系到整车的质量和强度。通过结构拓扑优化,以及使用高强度钢材、铝合金和复合材料等新型材料,可以提高半挂车的承载能力和驾驶稳定性^[1]。此外,计算机辅助设计(CAD)和有限元分析等技术的应用,也极大地促进了半挂车的轻量化。轻量化是提高

半挂车性能,降低生产成本,促进交通运输业发展的关键手段。

(二) 车架结构设计原则

在车架结构设计中,遵循“安全、可靠、高效”的原则至关重要。这些原则要求设计者在确保半挂车车架满足承载能力、耐久性和行驶稳定性的同时,尽可能地降低其重量。例如,设计时需要充分考虑车架的受力特性,根据实际工况下的载荷分布,合理布置横梁和纵梁的分布与尺寸。

在材料选择上,传统的车架可能采用高强度钢,但现代设计可能会引入铝合金或高强度合金钢,如马氏体时效钢,这些材料的强度更高而重量更轻。同时,设计过程中需结合疲劳寿命预测模型,确保轻量化设计不会牺牲车架的耐久性。

结构优化是实现轻量化设计的关键步骤。这通常涉及运用计算机辅助工程工具进行结构拓扑优化和形状优化。通过这些方法,可以找到在满足强度和刚度要求下的最小重量设计。在考虑工艺可行性时,设计者需要与制造工程师紧密合作,确保轻量化设计能够顺利转化为生产。这可能涉及引入新的焊接技术,如激光拼焊,或者采用一体成型技术减少连接点,以降低重量并提高制造效率^[2]。同时,对工艺成本的细致分析有助于确保轻量化设计的经济合理性,避免因过度设计导致的成本增加。

二、车架结构分析

(一) 现有车架结构的评估

在进行半挂车车架轻量化设计的研究中,现有车架结构的评估是至关重要的第一步。这一阶段需要对传统车架的材料、制造工艺、结构形式以及实际使用中的性能进行全面分析。例如,会深入探讨车架的典型材料,

作者简介:

秦晓(1992.08),女,汉族,山东临沂人,本科,职称:中级工程师,研究方向:半挂车及矿车车厢自动化制造。
于才(1984.12),男,汉族,山东临沂人,专科,职称:高级工程师,研究方向:半挂车及矿车车厢自动化制造。

如高强度钢或铝合金的使用情况，对比不同材料的密度、强度和成本等参数。同时，会通过收集历史数据，分析车架在实际运营中的载荷分布模式，以确定设计中的关键受力区域。评估过程中，可能会引用或建立力学模型，如有限元模型，以模拟车架在各种工况下的应力和变形。例如，模型可能考虑车辆在满载、空载、加速、制动以及通过不平整路面时的动态载荷。通过这些模拟，可以识别出设计中的多余部分和潜在的薄弱环节，为后续的轻量化设计提供精确的改进方向。

（二）载荷与应力分析

在半挂车车架轻量化设计的研究中，载荷与应力分析是至关重要的一步。通过对车架在实际运营中可能遇到的各种载荷，如动态载荷、风阻载荷、货物重量等进行精确建模，可以确保设计的合理性。例如，根据统计数据 displays，一辆半挂车在高速公路上行驶时，可能会受到相当于其自重20%的风阻载荷，因此，设计者必须充分考虑这些动态因素对车架结构的影响^[3]。

在分析阶段，通常会采用有限元分析工具，将复杂的车架结构划分为无数个微小的元素，以计算每个元素在载荷作用下的应力和变形。通过这种方式，可以精确地找出结构的薄弱点，以及在满足强度和刚度要求的前提下，哪些部分有潜力进行轻量化设计。例如，通过模拟分析，发现某车架在连接点处的应力集中，那么就可以考虑采用更先进的连接技术或优化连接结构来减轻重量，同时保证结构的稳定性。

（三）动态性能影响因素

在半挂车车架的轻量化设计中，动态性能是一个不可忽视的关键因素。动态性能主要涉及车辆在行驶过程中的振动、稳定性以及对各种工况的响应能力。例如，车架的动态特性直接影响到车辆的舒适性、操控性和耐久性。在载荷与应力分析中，需要考虑的动态因素包括但不限于路面不平度引起的冲击载荷、转弯时的侧向力以及频繁启停造成的疲劳载荷。这些因素要求车架在保证结构强度的同时，具备良好的动态响应特性。

在设计阶段，可以采用多体动力学模型结合实测的道路数据来模拟车辆在复杂工况下的动态行为。例如，通过引入FATigue软件进行动态载荷谱分析，可以预测车架在长期使用中的疲劳损伤情况^[4]。此外，利用MATLAB/Simulink等工具建立的车辆动力学模型，可以评估车架设计对车辆整体动态性能的影响，如减振器的匹配优化，以提升行驶稳定性。

在形状优化与细节设计中，需要特别关注车架的局

部结构对动态性能的影响。比如，通过引入变截面设计，可以在保证关键部位强度的同时，降低非关键区域的质量，从而改善车辆的动态响应。同时，利用有限元分析软件（如ANSYS）进行模态分析，可以识别出车架的固有频率，避免与行驶中可能出现的激励频率产生共振，确保车辆的行驶安全。

动态性能影响因素是车架轻量化设计中的一重要考量，其要求设计者在追求轻量化的同时，必须综合运用各种分析工具和实验手段，确保设计出的车架在各种工况下都能保持良好的动态特性，实现安全、舒适和耐用性的平衡。

三、基于轻量化设计的半挂车车架结构优化措施

（一）结构拓扑优化

结构拓扑优化是轻量化设计中的关键步骤，旨在通过重新设计零部件的内部结构，以减少材料的使用量而不降低其承载能力。在半挂车车架设计中，这一步骤尤为重要，因为车架作为车辆的骨架，其重量直接影响到车辆的总质量、燃油效率以及操控性能。通过优化，可以实现车架重量的显著降低，例如，有研究显示，通过结构拓扑优化，车架的重量可以减轻20%~30%，同时保持或甚至提高结构的刚度和强度。

在实际操作中，结构拓扑优化通常结合先进的计算机辅助工程工具进行，如使用拓扑优化软件来生成初始的优化设计。这些工具能够根据预设的载荷工况和材料属性，自动调整结构内部的材料分布，形成一种连续、渐变的结构形态。例如，通过设置设计域和优化目标，软件可以生成一种“蜂窝状”或“骨架状”的结构，这种结构在保证性能的同时，最大限度地减少了材料的使用。

在车架设计中，优化后的拓扑结构需要与实际制造工艺相结合考虑。例如，优化结果可能包含许多小的、复杂的几何特征，这些在实际制造中可能是不可行的。因此，设计人员需要与工艺工程师紧密合作，将优化结果简化并转化为可制造的结构，同时确保简化过程中的结构性能损失最小。

在结构拓扑优化过程中，迭代与验证是必不可少的环节。优化结果会经过多次迭代，每次迭代都会对比前一次设计的性能改进，直到满足设计目标。同时，这些优化设计还需要通过有限元分析进行强度和刚度的验证，以确保其在实际工况下的安全性。

通过上述过程，结构拓扑优化不仅能够实现车架的轻量化，还能为后续的形状优化和材料选择提供基础。例如，优化后的结构可能揭示出某些关键区域需要更高

强度的材料，或者某些部位可以通过使用更轻质的复合材料来进一步减重。这样，设计团队可以有针对性地进行材料组合和混合设计，以实现最佳的轻量化效果和成本效益平衡。

（二）形状优化与细节设计

在半挂车车架的轻量化设计中，形状优化与细节设计是至关重要的环节。这一阶段的目标是通过精细化的结构设计，减少材料的使用量而不影响车架的承载能力和耐久性。例如，可以采用拓扑优化方法，利用计算机辅助设计软件和优化算法，根据预期的载荷分布重新塑造车架的几何形状，这样的设计可以显著减少材料的使用。

在细节设计方面，考虑车架的连接部位和局部强化区域，可以采用局部减薄或增加加强筋的策略。这些精细化处理不仅能够保证结构的强度，还能避免应力集中导致的早期疲劳失效。例如，通过在梁的端部引入圆角或倒角，可以改善应力分布，同时减少材料的使用。此外，借鉴生物结构的仿生设计，如采用蜂窝状或格栅式内部结构，可以在保持结构性能的同时实现轻量化。形状优化与细节设计是轻量化设计中的关键技术，它们结合了工程力学、材料科学和现代设计工具，旨在满足安全和性能标准的同时，最大限度地减少半挂车车架的重量，从而提高燃油效率，降低运营成本，并对环境产生更小的影响。

（三）新型材料的应用与选用策略

采用新型材料的应用与选用的方法进行半挂车结构的轻量化设计，是进行结构优化的关键。首先，应用高强低合金钢与超高强度钢。这种材料在保证结构强度和刚性的同时，还能降低结构的重量。另外，铝合金材料具有轻质、耐腐蚀、可循环使用等优点，是实现轻量化的理想选择。为进一步改善车架的力学性能，也可在车架中加入碳纤维复合材料。该材料不但重量轻，还具有较高的拉伸强度及耐疲劳性能，适合于对重量及性能有较高要求的部件使用。采用复合材料可与金属材料构成混杂结构，并可通过优化设计达到减重目的。在选材方面，应综合考虑可加工性、经济性及对环境的影响，优选出对环境友好的材料。采用Laser焊接、摩擦焊接和粘接等先进技术对其进行粘接，使其具有良好的力学性能。另外，纳米涂层、防腐蚀涂层等还可以通过对材料进行表面处理，从而延长其使用寿命，延长其抗环境侵蚀能力。因此，对新型材料的科学选用与合理运用，不仅能

够达到半挂车的轻量化目的，而且能够有效地提升半挂车的总体性能与使用寿命。

（四）车架强度与轻量化的综合优化策略

在对车架进行轻量化与强度优化的基础上，在保证强度、安全性和耐用性的前提下，对车架进行轻量化设计。首先，利用拓扑优化方法，可以在刚开始的时候，对结构进行合理的布局，从而在保证结构强度的前提下，减少冗余的材料，实现轻量化。结合有限元分析进行局部加固设计，既能在一定程度上增强高压区，又能在一定程度上减小低压区的壁厚，达到一定的优化效果。其次，采用合理的材料分布策略，在连接点、承载部件等重要构件上施加高强度材料。同时，车架还可采用轻质结构，如箱形、单面梁，改善其抗弯曲、抗剪切、增强整体刚度与强度。为了减轻因焊接而产生的自重负荷，还可以使用轻质的构造方法，例如铝合金螺钉连接或高强度粘接等。得益于精细的设计，框架钢筋的支撑和加固也可以合理布置，以提高框架的机械性能，同时保持其轻质性能。

结束语

综上所述，随着技术的不断进步和环保要求的日益严格，半挂车车架的轻量化设计将成为一个持续的研究热点。未来的轻量化设计可能会更加注重多学科的综合优化，包括结构、材料、工艺以及环境友好性等方面的综合考虑。同时，随着智能化和自动化技术的发展，设计过程中的模拟和分析将更加精确和高效，有助于快速迭代和优化设计方案。总之，半挂车车架的轻量化设计是一个复杂而重要的课题，需要不断的研究和实践来推动其发展和应用。

参考文献

- [1] 刘涛. 基于先进机械设计的轻量化汽车车身结构研究与优化[J]. 汽车维修技师, 2025(2): 115-116.
- [2] 林伟, 朱豪洋. 基于改进鼠群优化算法的起重机主梁轻量化设计[J]. 机械设计, 2024, 41(4): 131-139.
- [3] 焦国敏, 陶彦飞, 张远. 基于鲸群优化算法的铸造起重机主梁结构轻量化设计[J]. 中国工程机械学报, 2024, 22(5): 631-634+640.
- [4] 王芬芳, 杨丽华. 一种可控挖掘机机械结构的优化设计[J]. 建设机械技术与管理, 2024, 37(06): 38-41.