

高空作业机械的轻量化技术研究

陈献平 何霖鹏

湖南中联重科智能高空作业机械有限公司, 湖南 长沙 410000

[摘要] 高空作业机械不仅用于建筑施工和设备维护, 还是紧急救援等任务中不可或缺的工具。其性能、稳定性和安全性在很大程度上决定了作业效率及操作人员的安全。近年来, 轻量化设计已成为高空作业机械研发的重要方向, 目标是通过减少设备重量提升作业效率、降低能耗以及运输成本。机械的轻量化不仅增强了灵活性, 还提高了其稳定性和作业性能。本文分析高空作业机械轻量化技术的原理、发展趋势及其应用, 并结合实际案例评估其对机械性能及经济效益的影响, 为未来的技术创新与应用提供理论支持。

[关键词] 高空作业; 轻量化技术; 机械

DOI: 10.33142/ec.v7i12.14555

中图分类号: TH211.6

文献标识码: A

Research on Lightweight Technology of High-altitude Operation Machinery

CHEN Xianping, HE Jipeng

Hunan Zoomlion Intelligent Access Machinery Co., Ltd., Changsha, Hunan, 410000, China

Abstract: High altitude operation machinery is not only used for construction and equipment maintenance, but also an indispensable tool in emergency rescue tasks. Its performance, stability, and safety largely determine the efficiency of operations and the safety of operators. In recent years, lightweight design has become an important direction in the research and development of high-altitude work machinery, with the goal of improving work efficiency, reducing energy consumption, and lowering transportation costs by reducing equipment weight. The lightweight of machinery not only enhances flexibility, but also improves its stability and operational performance. This article analyzes the principles, development trends, and applications of lightweight technology for aerial work machinery, and evaluates its impact on mechanical performance and economic benefits through practical cases, providing theoretical support for future technological innovation and applications.

Keywords: high-altitude operations; lightweight technology; mechanics

引言

高空作业机械广泛应用于建筑、电力及通信等领域, 特别是在高空架设、设备维护及紧急救援等任务中, 成为必不可少的工具。然而, 许多传统机械设备重量过大, 操作复杂且能耗高, 这在一定程度上限制了设备的工作效率, 增加了运营成本。为了应对这些问题, 通过应用轻质材料及优化结构设计, 可以有效减轻机械的自重, 从而提高工作效率、降低能耗, 减少运输与运营成本。尽管如此, 轻量化设计不仅仅是减轻重量, 如何在保持机械强度与稳定性的前提下优化设计, 以提升综合性能, 仍然是一个关键难题。

1 高空作业机械概述

高空作业机械, 指在高空环境中执行任务的特种设备, 被广泛应用于建筑、维修、清洁和检修等领域。近年来, 城市化建设的扩展和基础设施项目的增加, 以及对人员安全要求和工作效率提升的需求增加, 使高空作业机械的需求大幅增长。技术的进步与环保要求的提升, 使轻量化设计成为机械制造中的核心趋势。通过轻量化技术, 设备的灵活性、经济性得以提升, 能耗和材料消耗有效降低, 进而提高了工作效率。

1.1 高空作业机械的分类与特性

高空作业机械种类繁多, 通常根据作业高度、载重量、移动方式及适应环境进行分类, 主要包括剪叉式、桅柱式、曲臂式、直臂式和蜘蛛式高空作业平台。剪叉式平台以剪叉结构实现升降, 因承载能力较强, 适用于建筑工地与平坦地面; 桅柱式则采用桅柱结构, 具备更高的稳定性, 在仓库或狭小空间的场景中应用广泛; 曲臂式平台设计为跨越障碍的结构, 适用于复杂地形的作业需求; 直臂式平台则通过伸缩臂实现高空作业, 具有较强的承重能力, 常用于大型建筑及修缮作业; 而蜘蛛式平台则因其良好的地形适应性, 在崎岖或复杂地形的野外作业中表现突出^[1]。尽管在结构和功能上各类设备不尽相同, 稳定性、耐用性及便捷性却是共性需求。轻量化设计正随着对高空作业设备需求的增长与技术的发展而成为实现减重、降本的关键手段。具体如图 1 所示:

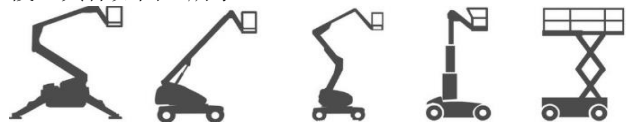


图 1 高空作业机械种类

1.2 轻量化技术的必要性

轻量化技术应用在高空作业机械的设计和制造中,核心目的为降低设备自重,从而增强作业的灵活性并减少能耗。轻量化技术的重要性主要表现在以下几方面:通过降低动力需求,设备的能耗得以减少,进而实现燃料的节约;此外,自重的减少改善了稳定性,从而降低倾覆风险;碳排放的减少也成为设备轻量化的附加优势;机械的使用寿命延长了,因为部件的磨损率降低,设备的耐用性随之提升;轻量化设计还简化了搬运和转场操作,施工效率因此得以提升,作业时间得以缩短。

1.3 现有高空作业机械的轻量化发展趋势

高空作业机械中轻量化设计的发展趋势已日益明显。随着材料科学的发展,高强度钢、铝合金及镁合金逐渐取代了传统的碳钢结构。高强度钢和轻质材料,因其兼具优良的机械性能和较低的密度,不仅大大减轻了设备重量,还在保证安全的同时提升了使用性能。尤其是铝合金,凭借其突出的抗腐蚀性,在行业内得到广泛应用。消除结构冗余部分,对构件进行精细化优化设计作为轻量化的另一种手段,不仅减少了结构重量,同时降低成本,增加了稳定性。在复合材料的应用方面,玻璃纤维复合材料(GFRP)凭借其较高的强度重量比,在外观覆盖部件上广泛应用,从而提高了设备的抗腐蚀性和耐用性。模块化设计的轻量化策略同样值得关注,通过标准化和简化部件设计,设备的拆装与维护变得更为便捷,进一步减少了结构冗余,从而显著降低了运营成本。

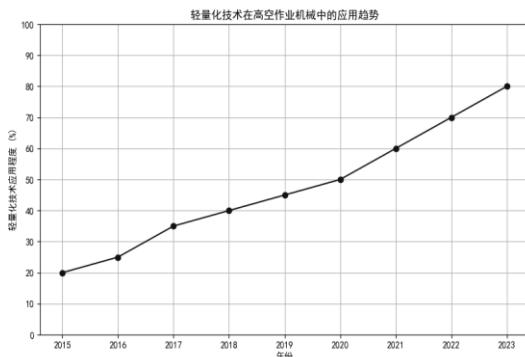


图2 轻量化技术在高空作业机械中的应用趋势图

2 轻量化技术原理

2.1 轻量化设计原则

在高空作业机械的轻量化设计中,虽然轻量化设计旨在减少设备的重量,但不能因此忽视机械的承载能力与使用寿命。在设计过程中,结构与材料的合理选择起着决定性的作用,为此设计师应综合考虑设备的工作环境和使用条件,以确保材料的强度与韧性能够满足工作要求。机械的减重不仅仅依赖于选择轻质材料,设计者还需要消除结构中的冗余部分,减少不必要的材料,以实现重量的最小化。同时,轻量化设计还应注重经济性,使得设计既能满足技术要求,又能保证成本效益的最大化。

2.2 轻量化技术类型

2.2.1 材料轻量化

在高空作业机械的轻量化过程中,通过选择强度高、密度低的材料,机械的重量可显著减轻,同时不会影响其强度和耐用性。铝合金、镁合金、碳纤维复合材料及高强度钢材料是最常用于实现轻量化设计的材料。铝合金以其较低的密度和良好的耐腐蚀性能成为高空作业机械中常见的材料。镁合金作为一种比铝合金更轻的材料,广泛应用于对重量要求更加严格的部件上^[2]。碳纤维复合材料则凭借其超高的强度重量比,成为高负载部件的首选材料。高强度钢虽然较为传统,但随着加工工艺的不断进步,其强度与重量的平衡已得到很好的控制,因此依然在高空作业机械中占据重要地位。采用这些材料能够在保证机械性能的前提下实现减重。图3显示了不同材料在高空作业机械中的应用对比。通过对比铝合金、镁合金、碳纤维复合材料与高强度钢的性能指标,帮助设计人员根据具体需求选择最合适的材料。

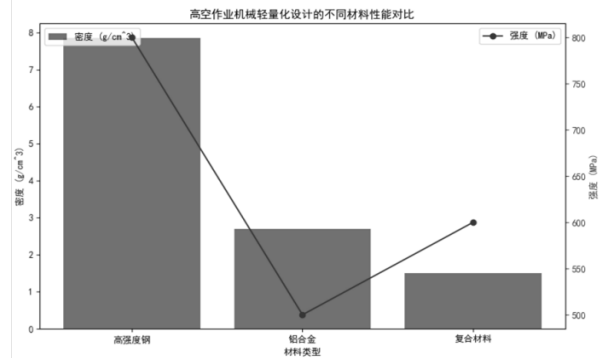


图3 高空作业机械轻量化设计的不同材料性能对比图

2.2.2 结构形状优化设计

结构形状优化设计作为实现轻量化的重要手段之一,通过采用消除冗余结构或多段折弯结构等设计,能够有效降低重量,同时保持必要的承载能力与机械稳定性。结构优化不仅有助于减轻重量,还能增强机械的整体性能,特别是在承受复杂负载时。结构优化设计过程中,常利用有限元分析(FEA)与计算机辅助设计(CAD)等先进工具对设计方案进行模拟分析,评估不同结构在实际工作条件下的表现。

3 高空作业机械轻量化技术的应用

3.1 高强度钢材料的应用

高强度钢材料在高空作业机械中得到了广泛应用,主要因其出色的力学性能,尤其在承载部件中。与传统钢材相比,高强度钢能够在不增加重量的情况下,提供更高的抗拉强度,确保设备在负载较大的环境下运行稳定。在起重臂、支撑架等关键部件的设计中,广泛采用高强度钢以确保机械的结构强度与稳定性,同时显著降低了自重。图4中,高空作业机械部件臂架原本使用材料强度为780Mpa的钢材,通过优化计算,显示可以采用材料强度更高,抗拉强度为960Mpa的高强钢,机械的重量大幅减轻,但承

载能力和稳定性得到了充分保障。这是因为高强度钢材料结合合理的设计,使得在实现轻量化的同时,确保了机械的安全性能。高强度钢的应用具有较高的生产成熟度,不仅提升了机械部件的性能,还降低了生产成本。对于大型高空作业机械,采用高强度钢材料更有助于提升结构安全性,同时延长设备的使用寿命。

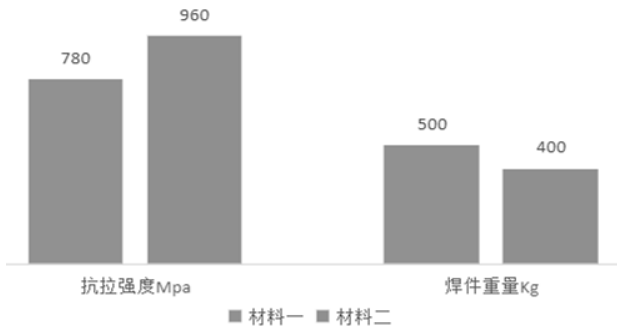


图4 高强度钢在高空作业机械部件中的应用与轻量化效果对比图

3.2 铝合金及镁合金在高空作业机械中的应用



图5 铝合金材料在高空作业机械上的应用

选用强度较高且密度较低的材料,能够在不牺牲机械强度的前提下,实现设备的轻量化。合金、高强度铝合金以及新型轻质合金材料的应用,极大地推动了高空作业机械的轻量化进程。随着新型合金材料的不断研发,这些高性能轻质材料也广泛地应用于高空作业机械的设计中,提升机械的可靠性与性能。高强度镁合金从密度上比铝合金更轻,在高空作业机械中的轻量化应用能起到最大的作用,特别适用于对重量要求极为严格的部件,如起重臂和平台支架。但是镁合金的成本较高,比较适合在航空航天、电子、汽车等高价工业机械领域。高强度铝合金除了具备低密度外,还具有较强的耐腐蚀性能,而且成本在普通工程机械领域还可以接受,所以在工程机械一些关键部件中得到了广泛应用。在高空作业机械领域,铝合金被广泛应用于需要减轻重量的部件,如升降平台、支架等,具备较

高的抗拉强度同时能够有效减少机械的总重。以直臂式高空作业平台为例,应用铝合金材料替换整个工作斗的钢制材料,如图5所示,不仅可以减轻工作斗重量1/4,而且在保持整车稳定支反力不变的情况下,可以减去配重的重量,从而进一步减少整机的重量。

3.3 新材料与新工艺的应用

复合材料作为轻量化设计中的重要组成部分,碳纤维复合材料(CFRP)与玻璃纤维复合材料(GFRP)拥有优越的力学性能,凭借其超高的强度与轻质特性,广泛应用于高空作业机械的各个部件,成为高空作业机械中减重与增强性能的理想选择。这些材料不仅能显著减轻机械重量,还能保证机械在高强度工作条件下的稳定性,特别适用于需要高强度同时又有重量限制的结构部件,如机械框架、升降平台等^[3]。碳纤维复合材料具有极高的强度与刚性,同时重量轻、抗腐蚀性强,因此常用于要求承载能力较高的部件。玻璃纤维复合材料的虽然强度略低,但其成本较为经济,且具备良好的加工性,常应用于一些负载较轻的部件。在高空作业机械中,合理使用这些复合材料,不仅能够降低机械重量,还能提升其综合性能,增强机械的稳定性与安全性,外观也有一定的改善。以直臂式高空作业平台低米段产品为例,如图6所示,其转台侧面覆盖件应用玻璃纤维复合材料(GFRP),可以减重50~80kg左右,更高米段应用还能减少更多重量。



图6 玻璃钢材料在高空作业机械机罩上的应用

3.4 结构形状设计优化的应用

在进行高空作业机械结构设计时,设计者必须对机械结构的零部件形状进行细致的审查,识别并消除其中的冗余部分。应当采用精细化的设计方法,确保每一部分都具有其独特的功能和价值,可以有效减少不必要的材料使用,避免任何多余的重量负担,从而实现结构重量的最小化。这种优化不仅有助于提高结构的效率,还能降低成本,并可能提升其性能。在转台焊接件结构设计中,如图7所示,可以通过有限元分析(FEA)仿真技术分析零部件应力和变形,对每个零件进行精细化识别和优化,采用中空结构、降低板厚、局部加强的方法降低焊接件的重量。

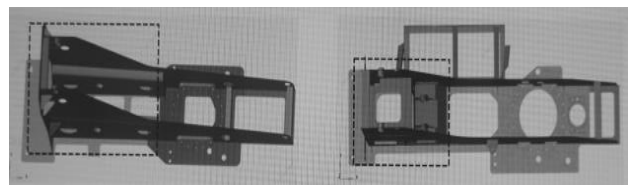


图7 转台焊接件精细化设计结构对比

在机械结构设计领域中,对于同一种结构形状时,折

弯件相较于焊接件具有诸多优势。具体来说,折弯件在强度方面表现出色,能够整体承受更高的负荷而不易变形或损坏。此外,折弯件直接成型过程更为迅速高效,能够在较短的时间内完成生产,从而显著提高生产效率。在外观方面,折弯件的外形整洁美观,具有较高的视觉吸引力,这在许多应用场景中尤为重要。如图8所示,高空作业机械的臂架在保持同等力学性能要求的前提下,从四板焊接改为多边对扣折弯焊接,不仅能够减轻整体的重量,从而提高机械结构的能效和灵活性,还能显著提升整体结构的美观度。这种美观度的提升不仅仅体现在外观上,还能够增强产品的市场竞争力,使其在激烈的市场竞争中脱颖而出。

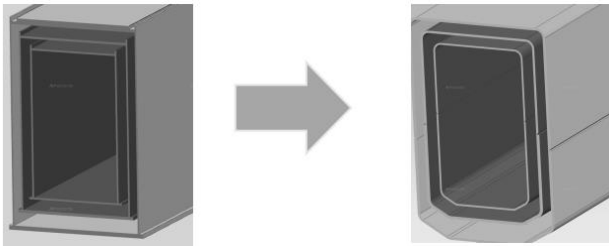


图8 臂架焊接件和折弯件对比

4 轻量化设计分析与优化

4.1 轻量化设计的仿真分析方法

借助仿真分析技术,设计人员可以在方案实施前进行虚拟模拟,提前识别潜在问题。有限元分析(FEA)与多体动力学仿真(MBD)是两种常用的分析手段,它们各自从不同角度优化设计。有限元分析(FEA)通过将机械结构划分为多个小单元,评估应力、应变等物理参数。这种方法帮助优化材料配置及结构设计,在不影响机械强度与刚度的前提下,最大程度地减轻重量。多体动力学仿真(MBD)则着重分析机械在多部件相互作用下的动态表现,有助于预测机械的运动行为与稳定性,确保轻量化设计不会影响机械的动态性能,从而保证其正常工作。

4.2 轻量化技术对机械性能的影响评估

轻量化设计的目标是减少机械重量,减重过程中,必须确保承载能力、稳定性与刚度等关键性能不受影响。只有在平衡各项需求的基础上,轻量化设计才能成功应用。承载能力是高空作业机械性能中的核心指标。通过选择高强度、低密度的材料,如高强度钢与铝合金,设计师能够在保持机械承载能力的同时,减轻整体重量。结构刚度也是影响机械性能的重要因素,轻量化设计需要确保足够的刚度来支撑工作负载,从而保证机械的稳定性^[4]。在设计过程中,动态响应必须被充分考虑,确保在减重后,机械依然具备稳定的动态性能。精确的分析与优化可以避免潜在的不稳定因素,使机械在多变的工作环境中保持高效运转。

4.3 轻量化设计的经济性分析

在采用高性能材料与先进工艺的同时,设计者应合理控制成本,确保设计方案具备经济可行性。高强度钢、铝合金等轻质材料虽然能够提升机械性能,但其成本较传统材料高。因此,设计人员必须在满足性能要求的前提下,平衡材料选择与生产成本。除了材料本身,制造工艺的选择也会对成本产生影响。精密加工与复合材料的应用虽能提升质量,但同样会增加生产费用。在这一过程中,设计者需要权衡成本与性能之间的关系,确保项目的经济性。虽然初期投入较高,但通过降低机械的能源消耗,长期使用将有效降低运营成本。因此,在经济性分析中,除了关注直接成本外,评估节能效果与维护成本的降低也是至关重要的。

6 结语

高空作业机械的轻量化设计在提高作业效率、降低能源消耗及运输成本方面发挥了重要作用。减轻机械重量,不仅能够提升作业效率,还能显著降低能耗,进而减少运营成本。本文探讨了轻量化设计的原理,重点分析讨论了材料轻量化、结构形状优化设计两种轻量化设计方法在高空作业机械中的应用,在确保机械的稳定性、安全性及承载能力的前提下,如何有效减重是设计中的核心问题。随着新型材料及智能设计技术的不断发展,高空作业机械的轻量化设计将在未来变得更加高效与智能,高强度钢、铝合金、复合材料等轻质材料的广泛应用为轻量化设计提供了技术支持。与此同时,仿真技术及智能优化设计方法的成熟,也为精准设计奠定了基础。随着相关技术的不断完善,高空作业机械的轻量化设计将在推动行业高效、智能化发展方面,释放更大潜力,为各种作业任务提供更加优质的机械设备。

[参考文献]

- [1]李飞,曹志皓,黄玉麟.起重机械高空轨道智能化检测系统应用[J].设备管理与维修,2021(1):124-128.
 - [2]田超,董海龙,雒佛庶,等.基于气压传动的高空水果采摘收集机械设计[J].现代制造技术与装备,2022,58(1):55-57.
 - [3]赵腾,郭春华,罗天娇.一种高空作业机械稳定性试验风载模拟装置研究[J].中国储运,2023(7):77.
 - [4]何东日.高空作业工程机械核心部件及行业平台研发[J].湖南省中电工业互联网有限公司,2020(1):16.
- 作者简介:陈献平(1987.4—),男,学历:本科,毕业院校:中南大学所学专业:机械制造,工程目前职称:中级工程师,目前就职单位:湖南中联重科智能高空作业机械有限公司。