

起重机臂架结构动态载荷分析与优化设计研究

徐熔俊

浙江省特种设备科学研究院，浙江杭州，322200；

摘要：随着现代工业的飞速发展，起重机作为不可或缺的重型设备，在建筑、港口、物流等领域扮演着举足轻重的角色。然而，起重机的安全性和经济性一直是业界关注的焦点，其中，臂架结构的动态载荷分析与优化设计是提升性能和降低成本的关键环节。本章将阐述研究的背景，阐明这项工作的必要性，并讨论其对起重机行业乃至整个工程领域的重要性。

关键词：起重机；臂架结构动；态载荷；设计

DOI:10.69979/3029-2727.24.04.044

引言

在现代工业生产中，起重机作为关键的重型机械，其性能直接影响到生产效率和安全。随着技术的进步，对起重机的性能要求越来越高，尤其是其臂架结构的稳定性和可靠性。臂架结构在工作过程中承受着复杂的动态载荷，这些载荷的分析和优化对于提高起重机的整体性能至关重要。

1 起重机臂架结构理论

起重机臂架结构的理论基础主要涉及结构力学、材料力学和动力学。这些理论构成了分析和设计起重机臂架的基石，确保其在各种工况下既满足承载需求又能保持足够的安全性。

结构力学是研究结构体系在荷载作用下的平衡、位移和内力等问题的学科。在臂架设计中，它主要涉及梁、柱和桁架等基本结构形式的分析，以及截面设计和几何非线性分析。结构力学理论用于确定臂架的几何形状、截面尺寸和连接方式，以保证其在静载和动载下的稳定性和承载能力。例如，通过对臂架截面的应力分析，可以确定其受力最大的部位，进而优化其形状和厚度。

材料力学则关注材料的强度、刚度和塑性等特性，以及这些特性如何影响结构的性能。在臂架设计中，材料力学用于选择合适的材料，如钢材或铝合金，并基于其材料性质来计算其应力应变关系，从而确定结构的安全系数。此外，材料的疲劳特性也是关键，因为臂架在实际使用中会经历反复的加载卸载，疲劳分析有助于防止材料在长期使用后发生失效。

动力学理论则关注系统在受力下的运动规律，包括运动方程的建立、求解和分析。在起重机臂架的设计中，动力学理论主要用于研究臂架的动态响应，如在起升、下降、回转等操作下的振动和摆动，以及由于风载和惯性力造成的额外载荷。动力学分析能够揭示臂架在不同

工况下的动态行为，这对于预测和控制臂架的运动特性至关重要。

结合结构力学、材料力学和动力学，可以构建出准确的动态模型，通过有限元分析工具进行模拟计算，对臂架结构进行深入的分析。有限元方法将复杂的结构划分为多个互不干扰的子结构，即有限元，通过求解每个元素内的应力和位移，再汇总得到整个结构的行为。这种分析方法可有效处理臂架的非线性问题，如大变形和接触问题，同时也能处理复杂的载荷输入，如非均匀分布的风载和多阶段的起升动载。

起重机臂架结构理论是多学科知识的综合应用，它为臂架的动态载荷分析提供了坚实的理论基础。通过深入理解这些理论，可以更准确地预测和控制臂架的性能，为结构优化设计提供科学依据。在后续章节中，我们将详细介绍如何利用这些理论进行动力学建模，以及如何通过优化算法实现结构的性能提升和成本降低。

2 动态载荷分析方法

动态载荷分析是起重机臂架结构研究中的核心环节，它涉及了多种工况下的载荷效应，包括但不限于起升动载荷、风载荷和惯性载荷。这些载荷在起重机的实际操作中对臂架的强度、刚度及稳定性产生显著影响，因此精确分析这些动态载荷至关重要。

起升动载荷分析主要关注在起升或下降过程中，由于重物加速度或减速度造成的动态载荷。这种载荷的特点是随时间变化，且与起升速度密切相关。通过使用动力学模型，可以模拟这一过程，计算出臂架在起升不同阶段的受力情况。通常，通过建立非线性动力学方程，结合臂架的运动学模型，可以预测在不同起升速度下的动态载荷，从而评估结构的疲劳寿命。

风载荷分析主要针对在露天作业时，由风速变化产生的水平和垂直载荷。风载的不确定性使得分析更具挑

战性，通常采用概率统计方法研究风速分布，结合结构动力学模型，计算风载作用下的结构响应。在分析过程中，需考虑风速与起重机操作状态的耦合效应，例如，风速变化可能与臂架的运动同步，加剧载荷效应。

再者，惯性载荷分析主要针对臂架在快速起升、下降或回转时产生的惯性力。这些载荷往往与起升动载荷和风载荷交织，对于结构响应产生显著影响。通过分析臂架的运动学和动力学方程，可以量化这些惯性力，并结合有限元分析，确定它们对结构的局部和整体影响。

动态载荷分析方法通常基于有限元分析技术，这涉及到建立精细的三维模型，模型包括臂架的几何形状、材料属性以及与之相连的部件。通过施加实际工况下的载荷，例如起升重量、风速和运动速度，有限元软件能够计算出在不同时间步长下的结构响应，包括应力、应变和位移。这些信息对于理解臂架在动态环境下的行为至关重要，因为它们揭示了可能的应力集中和结构疲劳热点。

在实际应用中，动态载荷分析不仅限于静态载荷的叠加，而是通过动力学仿真模拟完整的运动过程，包括考虑非线性行为，如大变形和接触效应。通过这些仿真，可以识别和预测臂架在各种操作条件下的动态响应，有利于在后续优化设计中进行针对性的调整。

在后续章节中，我们将详细讨论如何在这些动态载荷分析的基础上，应用多目标优化算法，对起重机臂架的结构参数、材料选择和几何形状进行优化，以达到在保证性能的同时减轻结构重量，降低制造成本，从而实现整体性能的提升。这样的分析和优化过程将为起重机臂架的设计提供科学依据，推动行业的进步。

3 起重机臂架结构动态载荷分析

3.1 实验设计与数据采集

实验设计与数据采集是起重机臂架结构动态载荷分析的先决步骤，它们为后续的有限元模拟和优化设计提供了真实工况下的基础数据。在本研究中，实验设计旨在模拟起重机在实际工作中的典型工况，包括起升、下降、回转以及在风载和惯性载荷下的响应。通过精心设计的实验，我们可以收集到臂架结构在不同操作阶段的应力、应变、位移和振动等关键参数。

实验设备选择至关重要。为了精确模拟起重机臂架的动态行为，我们采用专业的测试台架，配备高精度的传感器和测量设备，如应变片、位移传感器、加速度计以及风速计，确保数据的准确性和可靠性。测试台架需具备模拟真实起升、下降及回转运动的能力，能够施加预期的载荷，包括重物、风力和惯性力。

数据采集阶段，我们设计了一系列实验，涵盖了起

重机臂架的常规工作范围。在起升实验中，我们根据起重机构的额定起重量，逐步增加负载，同时记录臂架在不同高度下的应力和应变数据。在下降实验中，同样采用分级的方式减少负载，记录下降过程中的响应。回转实验则考察臂架在不同旋转速度下的动态性能，特别关注旋转轴附近可能的应力集中。

风载实验通常在控制风速的环境下进行，风速范围覆盖起重机构可能遇到的环境条件。实验中，臂架在不同风速下保持静止和运动状态，以评估风载对结构的影响。至于惯性载荷实验，我们通过模拟快速起升和下降过程中臂架的加速与减速，记录相应的惯性力及其对结构的动态响应。

在每个工况下，我们收集的时间序列数据包括应力、应变、位移和加速度等，每一组数据对应一个特定的工况和时间点。通过数据采集，我们能获得臂架结构在不同工况下动态响应的完整映射，这将为后续的有限元分析提供详实的输入数据。

数据采集过程中，我们遵循严格的质量控制标准，确保数据的准确性和一致性。所有数据将经过预处理，去除非物理异常值，然后进行标准化处理，以便于后续的分析。此外，我们还会对实验结果进行重复性实验，以验证数据的稳定性和可靠性。

实验设计与数据采集的结果，将为有限元模型的校准和验证提供宝贵信息，确保模型能够准确模拟臂架结构的真实行为。这些数据也是验证优化设计效果的关键依据，通过与优化后模拟结果的对比，我们可以评估优化策略的有效性，进一步调整和优化设计方案，以期在实际应用中实现最佳性能。

3.2 载荷特性分析

起重机臂架在实际作业中所承受的载荷具有显著的动态特性，这些特性决定了结构的响应和性能。理解并分析这些载荷特性是动态载荷分析的基础，也是优化设计的关键。载荷特性分析主要关注起升动载荷、风载荷、惯性载荷以及它们的交互效应，这些载荷在不同的工况下对臂架的强度、刚度和稳定性产生重要影响。

起升动载荷分析集中于研究起升和下降过程中由于重物加速或减速产生的动态效应。起升动载荷的大小和分布与起升速度密切相关，且会随着臂架的伸缩产生变化。通过非线性动力学模型，我们可以模拟不同起升速度下的动态载荷，从而评估臂架在极端工况下的承载能力，预测可能的疲劳寿命。

风载荷分析则侧重于分析在露天作业中，由风速变化产生的水平和垂直载荷对臂架的影响。风载荷的不确定性使得分析更具挑战性，通常采用风速的概率分布模

型，结合结构动力学模型，计算在不同风速下的结构响应。分析过程需考虑风速与起重机操作状态的相互作用，例如，臂架可能在风速最大时达到最大倾角，这会显著增加风载效应。

惯性载荷分析关注臂架在快速起升、下降或回转时产生的动态惯性力。这些载荷在实际工况中经常与其他载荷交织，对结构响应产生复杂影响。分析过程中，通过解运动学和动力学方程，可以量化这些惯性力，并结合有限元分析，揭示其对结构局部和整体的影响。

载荷特性分析通常通过有限元软件进行，先建立精细的三维模型，包括臂架的几何形状、材料属性以及与之相连的部件，然后施加实际工况下的载荷，如起升重量、风速和运动速度。软件将计算出在不同时间步长下的结构响应，如应力、应变和位移，揭示可能的应力集中和疲劳热点。除了考虑静态载荷的叠加，还会模拟完整的运动过程，包括非线性行为如大变形和接触效应。

通过载荷特性分析，我们可以识别出可能的强度和稳定性问题，进而为优化设计提供依据。例如，分析结果显示的应力集中区域可能需要通过改变结构形状或使用更高级的材料来加强。另一方面，如果风载荷分析显示风对结构影响显著，可能需要在设计中增加抗风措施，如减阻设计或增强结构的侧向稳定性。

载荷特性分析的成果为优化设计提供了深入的见解，帮助工程师在满足性能要求的同时，寻找平衡负载、重量和成本的最优设计方案。它揭示了结构在不同工况下的行为，使得优化设计更加精确和有针对性，从而提升起重机臂架的性能和经济性，确保在复杂工况下的稳定运行。这项研究对起重机设备的性能提升具有重要意义，为整个行业的安全与可持续发展做出贡献。

3.3 起重机臂架结构优化设计

起重机臂架结构优化设计是提升起重机性能和降低成本的关键环节。本章将详细介绍如何在动态载荷分析的基础上，利用结构参数优化、材料选择优化和拓扑优化，以实现臂架结构的轻量化、强度提升和成本降低。我们将从理论与方法、案例分析和优化结果验证三个方面进行深入探讨。

理论与方法部分将阐述优化设计的策略。通常，优化设计的目标包括臂架的承载能力、重量和成本。为实现这些目标，设计者通常采用多目标优化算法，如遗传算法、粒子群优化或模拟退火算法。这些算法能有效地在设计空间内寻找具有最优性能的结构参数组合，同时考虑结构的几何约束和材料特性。参数化建模在此过程中扮演重要角色，它允许设计者通过调整结构参数来创

建不同的设计方案，以便于算法搜索。

案例分析将展示具体优化设计的过程。以某型号汽车起重机的臂架为例，设计者首先基于有限元分析建立详细的结构模型，考虑起升动载荷、风载荷和惯性载荷的影响。然后，通过多目标优化算法，对臂架的截面尺寸、材料选择和连接方式等进行迭代优化。算法会根据每次迭代的结果，调整参数以寻找最佳解决方案。在优化过程中，设计者会密切关注结构的性能指标，如应力、应变和位移，同时考虑制造成本和工艺性。此外，为确保优化结果的可行性，优化设计需与有限元仿真紧密结合，测试优化后的结构在不同工况下的稳定性和安全性。

优化结果验证是优化设计的重要组成部分。验证过程通常包括模拟验证和实体验证两个方面。模拟验证通过有限元分析，将优化后的结构模型在各种工况下进行仿真，与未优化的结构进行比较，验证优化设计是否切实提高了性能，降低了重量。实体验证则通过实验，如疲劳测试、振动测试和静载试验，来验证优化设计在实际工况下的性能表现。这包括测试结构在极端工况下的承载能力和耐久性，以及结构的振动特性，以确保优化设计的可靠性和实用性。

4 结语

起重机臂架结构的优化设计不仅关注性能的提升，还注重成本的控制和制造的可行性。在实际应用中，优化设计需要综合考虑材料成本、制造工艺、维护成本以及可能的环境影响。通过采用先进的材料和制造技术，可以进一步提高结构的性能，同时控制成本。例如，使用高强度钢材可以减轻结构重量，降低运输和安装成本，同时提高起重机的工作效率和安全性。

参考文献

- [1] 王相兵. 强夯起重机臂架结构有限元分析及优化[J]. 《农业装备与车辆工程》, 2024年第3期 87-90, 共4页
- [2] 戚其松. 起重机生命周期载荷谱预测及基于疲劳寿命的结构优化设计[J]. 《工程设计学报》, 2023年第3期 380-389, 共10页
- [3] 陈小龙. 飞机起落架结构拓扑优化设计及动态特性分析[J]. 《陕西理工大学学报(自然科学版)》, 2024年第2期 1-8, 共8页
- [4] 张晋强. 铸造起重机主梁腹板门开孔结构的优化设计[J]. 《山西冶金》, 2023年第6期 123-125, 128, 共4页