

铁路灯塔受力变形及强度分析

吴贵

北京建筑大学

DOI:10.32629/etd.v6i5.16920

[摘要] 本研究针对铁路灯塔在复杂荷载下的力学响应开展有限元模拟分析,探究不同工况下的变形与强度特性。在重力与风压联合作用时,0.49MPa风压下最大应力3459MPa、位移14.93mm; 0.686MPa风压下位移20.57mm、应力4495MPa; 0.784MPa风压下位移23.4mm、应力5012MPa,随风压增大,变形和应力显著上升。集中力工况里,2N集中力下位移5.333mm、应力403.9MPa; 4N集中力下位移同前、应力4852MPa,集中力引发局部应力集中。可变量作用时,位移 4.25×10^{-4} mm、应力0.1238MPa,时变荷载易致材料疲劳。不同荷载工况下灯塔力学响应差异显著,后续需结合实际优化设计保障安全。

[关键词] 铁路灯塔; 有限元; 风压; 集中力; 可变量

中图分类号: TE833 **文献标识码:** A

Force Deformation and Strength Analysis of Railway Lighthouses

Gui Wu

Beijing University of Civil Engineering and Architecture

[Abstract] This study conducts finite element simulation analysis on the mechanical response of railway lighthouses under complex loads to explore the deformation and strength characteristics under different working conditions; when subjected to the combined action of gravity and wind pressure, under a wind pressure of 0.49 MPa, the maximum stress is 3459 MPa and the displacement is 14.93 mm, under a wind pressure of 0.686 MPa, the displacement is 20.57 mm and the stress is 4495 MPa, under a wind pressure of 0.784 MPa, the displacement is 23.4 mm and the stress is 5012 MPa, and as wind pressure increases, deformation and stress rise significantly; in the concentrated force working condition, under a concentrated force of 2 N, the displacement is 5.333 mm and the stress is 403.9 MPa, under a concentrated force of 4 N, the displacement remains the same as above while the stress reaches 4852 MPa, and concentrated forces cause local stress concentration; when subjected to variable forces, the displacement is 4.25×10^{-4} mm and the stress is 0.1238 MPa, and time-varying loads are prone to cause material fatigue; the mechanical responses of the lighthouse vary significantly under different load conditions, and future work needs to optimize the design based on practical situations to ensure safety.

[Key words] Railway Lighthouse; Finite Element; Wind Pressure; Concentrated Force; Variable Force

前言

在铁路基础设施体系中,铁路灯塔作为核心照明设施,在夜间及恶劣天气环境下为铁路站场与沿线区间提供了不可或缺的照明保障,对铁路运输作业安全、高效开展意义重大^[1]。随着铁路建设逐步向地形地貌复杂、气候条件多变的区域推进,铁路灯塔面临的服役环境日趋严峻。不同地区的风压存在明显差异,无论是沿海地区的强风,还是内陆开阔平原的季节性大风,都给灯塔带来巨大挑战。同时,灯塔顶部灯具自重、检修人员作业产生的集中力,以及列车高速运行引发的空气动力学效应、风力脉

动等可变量,也时刻作用于灯塔结构。这些力单独或耦合作用,极易导致灯塔塔身变形、连接节点疲劳损伤,甚至引发整体结构失效^[2]。目前,针对铁路灯塔在复杂荷载作用下的力学性能研究仍不够深入,难以充分满足灯塔设计优化与安全运维的需求。因此,系统研究铁路灯塔在不同风压、集中力和可变量作用下的力学响应,对提升铁路基础设施可靠性与安全性具有重要的现实意义^[3]。

1 有限元模型

在铁路灯塔结构力学性能研究中,材料参数的准确设定是

构建可靠有限元模型的基础^[4]。铁路灯塔作为保障铁路运输安全的重要设施,其主体结构常采用钢材建造,钢材的力学性能直接决定了灯塔在复杂环境荷载下的承载能力与变形特性。其中,杨氏模量206000MPa表征钢材抵抗弹性变形的能力,决定了结构在受力时的刚度特性;密度7800kg/m³影响结构整体质量分布与惯性特性,对动力学响应分析至关重要;泊松比0.3描述材料横向变形与纵向变形的关系,是刻画材料三维力学行为的关键参数。这三个参数相互关联,共同构建了钢材力学性能的核心框架,直接影响有限元模型中应力、应变及位移等关键物理量的计算精度^[5]。在实际工程中,材料参数的选取偏差会导致有限元模型与实际结构力学行为之间存在显著差异,难以精准预测结构在极端工况下的响应。目前,部分研究对钢材参数的精细化考量不足,致使模型在模拟复杂荷载工况时出现计算误差,影响对铁路灯塔结构安全性的准确评估^[6]。基于此,本文以钢材典型力学参数为基准,构建铁路灯塔有限元模型。通过精细化材料参数设定与模型验证,系统研究灯塔在不同荷载工况下的力学响应^[7],旨在为铁路灯塔的结构优化设计与安全运维提供更具可靠性的理论依据与技术支持,具体操作(见图1)。

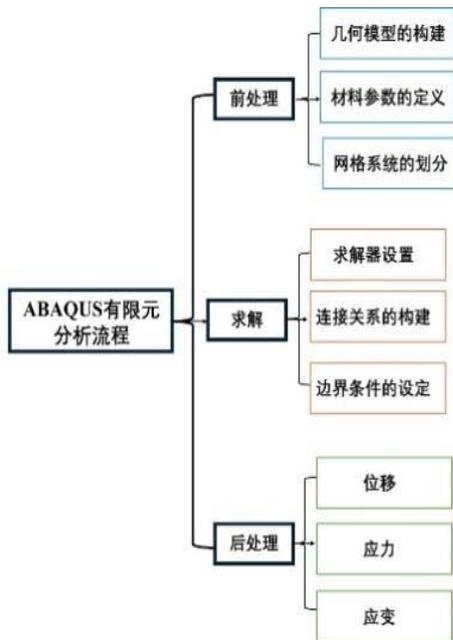


图1 ABAQUS分析流程图

1.1 单元选择

十结点二次四面体单元作为一种高阶实体单元,凭借其独特的几何与力学特性,成为复杂结构分析的理想选择^[8]。该单元在每个角点布置节点的基础上,于棱边中点增设节点,通过二次形函数描述单元内位移场分布,相比四结点线性四面体单元,能够更精确地拟合结构的几何形状与应力梯度变化,尤其适用于

铁路灯塔这类存在应力集中、曲面过渡等复杂特征的结构。在处理灯塔复杂连接节点、灯具安装部位等局部区域时^[9],十结点二次四面体单元可通过更细腻的位移插值,有效捕捉应力集中现象,准确反映结构变形与强度变化。其高阶特性不仅提升了模型对非线性变形的模拟能力,还能在较少单元数量下实现较高计算精度,平衡计算效率与准确性。因此,选用十结点二次四面体单元构建铁路灯塔有限元模型,有助于深入剖析其在各类荷载工况下的力学行为,为灯塔结构优化设计与安全评估提供坚实的技术支撑^[10]。

1.2 载荷施加

在铁路灯塔受力变形及强度分析的载荷施加中,需全面模拟结构实际服役环境下的受力状态,故采用不同风压、集中力及可变量组合的加载方式。不同风压模拟不同区域风力荷载的差异^[11],涵盖沿海强风、内陆季节性阵风等典型风环境,以反映风荷载对灯塔塔身的持续作用;集中力主要对应顶部灯具自重、检修人员作业等恒定荷载,体现局部静态受力特征;可变量则模拟列车高速通行引发的气流脉动、风力瞬时变化等动态荷载,捕捉荷载随时间的波动效应。通过多类型、多工况的载荷施加,可系统分析灯塔在静态与动态荷载耦合作用下的力学响应,精准识别结构薄弱部位的变形规律与强度储备,为评估灯塔在复杂荷载组合下的安全性提供全面依据^[12]。

2 结果分析

2.1 不同风压

在铁路灯塔的受力变形及强度分析中,重力与风压共同作用的工况对结构安全至关重要。当灯塔承受重力及0.49MPa风压时(见图2),二者耦合形成复杂力学环境,深刻影响结构的应力与位移响应。从应力角度看,计算结果显示最大应力达到3459MPa。这一数值集中出现在杆件连接节点、几何形态突变处及受力传递关键部位。铁路灯塔的杆件连接节点是力流交汇区域,重力产生的竖向荷载与风压引发的水平推力在此叠加,加上几何突变导致应力集中效应,使得这些部位成为强度薄弱点。若长期处于此应力水平,材料易因疲劳积累出现微裂纹,逐步扩展可能引发局部开裂,威胁灯塔整体结构安全,需重点关注其强度储备与疲劳寿命。位移表现上,最大位移为 1.499×10^{-1} m,反映出结构在荷载下的整体变形程度。位移分布与应力场高度关联,位移较大区域往往伴随应力集中。过大的位移会使灯塔结构产生变形不协调问题,比如顶部位移过大可能导致上部杆件失稳,或因整体变形影响灯具正常工作姿态。同时,位移也间接体现结构刚度特性,若位移超出设计允许值,说明结构在该荷载工况下刚度不足,需优化设计以提升稳定性。

在重力与0.686MPa风压共同作用下(见图3),铁路灯塔呈现特定力学响应。最大位移达20.57mm,反映结构整体变形程度,位移分布体现荷载传递路径与结构刚度特性;最大应力为

4495MPa, 集中于杆件连接等关键部位, 应力集中易致材料疲劳损伤。二者数值及分布, 为评估灯塔强度、变形是否满足安全要求提供依据, 助力识别薄弱环节, 指导结构优化与运维。

在铁路灯塔受力变形及强度分析中, 重力与0.784MPa风压共同作用工况(见图4), 对结构安全评估意义重大。从计算结果看, 最大位移达23.4mm, 该数值直观呈现灯塔在荷载下的整体变形程度, 位移分布与结构传力路径相关, 反映出不同部位刚度对变形的约束差异, 大位移区域若长期处于此状态, 易引发结构稳定性问题。最大应力为5012MPa, 集中于杆件连接节点、受力关键杆件等部位。此处因力流交汇、几何构造特点, 应力集中效应显著, 持续的高应力易使材料产生疲劳损伤, 甚至引发开裂、断裂, 威胁灯塔结构安全。通过分析这两个数值及分布, 可精准识别结构薄弱点, 判断在该荷载工况下, 灯塔强度是否满足设计要求、变形是否处于合理范围, 为后续结构优化及安全运维提供关键依据, 保障铁路灯塔服役可靠性。

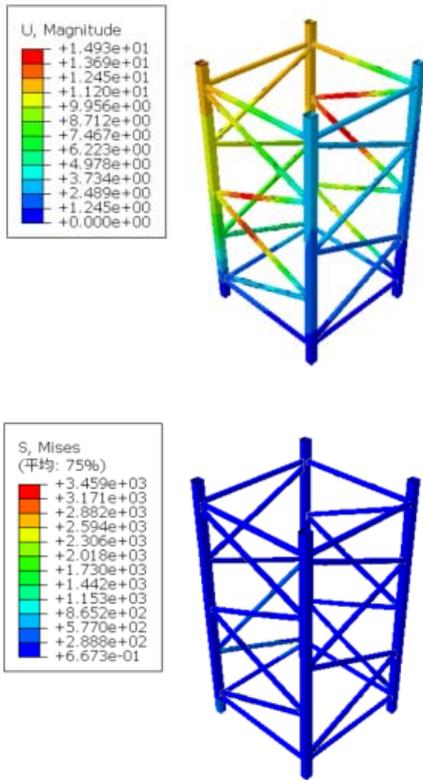


图2 0.49MPa风压下应力位移云图

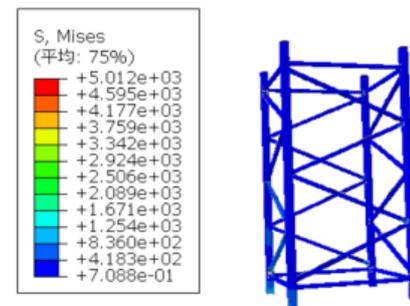
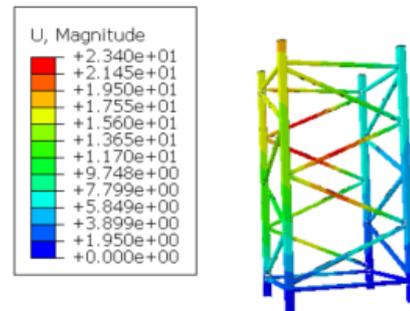


图4 0.784MPa风压下应力位移云图

2.2 不同集中力

在铁路灯塔受力变形及强度分析中, 重力与2N集中力共同作用的工况(见图5), 是评估结构性能的关键场景。从模拟结果可知, 最大位移为5.333mm, 该数值体现了灯塔在双重荷载下的整体变形程度。位移分布呈现出从底部到顶部逐步变化的特征, 反映出结构传力路径及刚度分布对变形的影响, 过大位移可能影响灯塔顶部设备的正常工作姿态, 需关注其对结构稳定性的潜在威胁。最大应力达到403.9MPa, 集中于集中力作用点附近的杆件及节点区域。此处因力的集中传递, 应力集中现象显著, 材料长期承受该应力, 易产生疲劳损伤, 甚至引发开裂, 威胁结构安全。通过分析最大应力与位移的数值及分布, 可精准识别结构

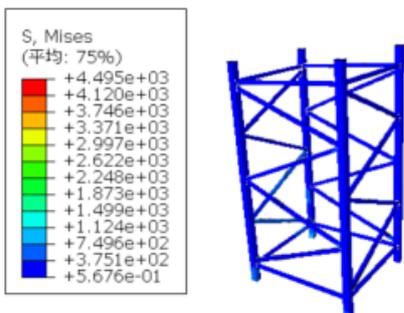


图3 0.686MPa风压下应力位移云图

薄弱环节,判断在该荷载工况下,灯塔强度是否满足设计要求、变形是否处于合理区间,为后续结构优化与安全运维提供依据,保障铁路灯塔服役可靠性。

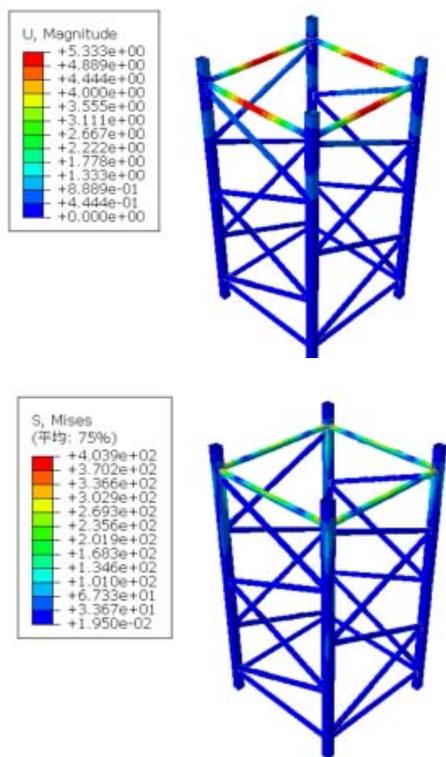


图5 2N集中力下应力位移云图

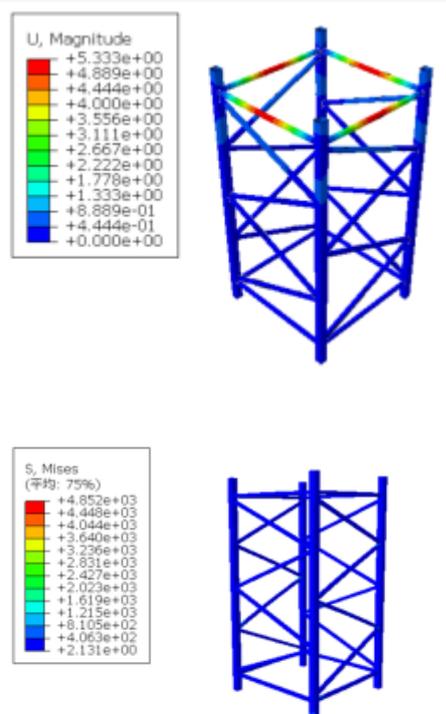


图6 4N集中力下应力位移云图

在铁路灯塔受力变形及强度分析中,重力与4N集中力共同作用工况下(见图6),结构力学响应需重点关注。模拟结果显示,最大位移达5.333mm,该位移反映灯塔在双重荷载叠加下的整体变形程度,位移分布沿结构竖向呈现梯度变化,与荷载传递路径及结构刚度特性相关,过大位移可能导致顶部设备安装精度受影响,需核查是否满足结构变形允许值。最大应力为4852MPa,集中于集中力作用部位的杆件及节点区域。集中力的局部加载,使力流在此处密集传递,引发显著应力集中,若长期处于该应力水平,材料疲劳损伤风险上升,可能削弱结构强度储备。结合最大应力与位移数值,可识别结构薄弱环节,判断当前荷载下灯塔强度是否达标、变形是否可控,为优化杆件截面、强化节点构造等设计调整提供依据,保障铁路灯塔在复杂荷载下的服役安全与稳定。

2.3 可变量作用下

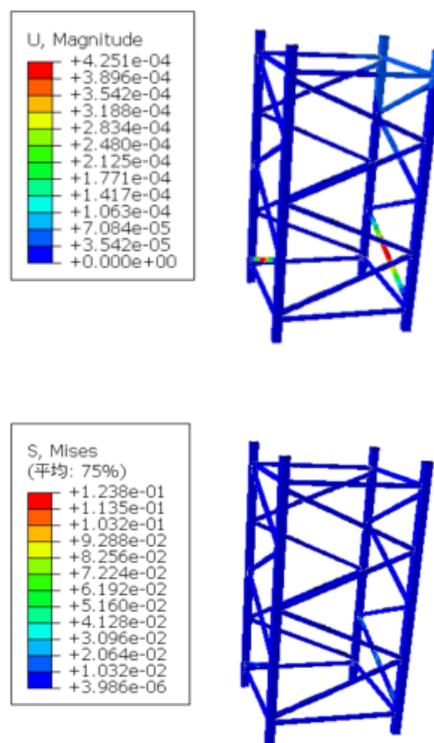


图7 可变量下应力位移云图

在铁路灯塔受力变形及强度分析中,重力与可变量作用的工况(见图7),对结构动态力学响应研究意义重大。模拟结果显示,最大位移为 4.25×10^{-4} mm,位移随可变量加载历程呈现动态变化,反映出结构在时变荷载下的变形适应过程,其分布与荷载传递路径及结构刚度分布相关,微小位移变化也需关注,避免长期累积影响结构稳定性。最大应力达0.1238MPa,集中于可变量作用区域的杆件及节点处。可变力的时变特性使力流传递呈动态波动,引发局部应力集中,虽应力绝对值小,但频繁荷载变化

易导致材料疲劳损伤,需结合疲劳寿命理论评估。通过分析最大应力与位移数值及动态响应规律,可识别结构动态薄弱点,判断在该时变荷载工况下,灯塔强度、变形的安全性与稳定性,为优化结构抗动态荷载设计、制定运维策略提供依据,保障铁路灯塔在复杂动态荷载环境下的服役可靠性。

3 强度提升措施

3.1 智能结构健康监测系统的集成

将智能结构健康监测系统集成到铁路灯塔中,是一种具有创新性的强度提升措施。通过在灯塔结构的关键部位安装传感器网络,实时监测结构的应力、应变、位移等力学参数,以及环境因素(如风速、温度、湿度等)对结构的影响。这些传感器可以将监测数据实时传输到中央控制系统,利用先进的数据分析算法和机器学习技术,对结构的健康状态进行实时评估和预警。一旦发现潜在的结构损伤或强度不足问题,系统将自动发出警报,并提供相应的维修建议。这种智能监测系统的应用,不仅可以及时发现和处理结构问题,避免事故的发生,还能根据监测数据优化灯塔的维护策略,延长结构的使用寿命,提高结构的强度和可靠性。

3.2 多尺度结构优化设计

采用多尺度结构优化设计方法,从宏观结构布局到微观材料性能,全方位提升铁路灯塔的强度和性能。在宏观层面,通过优化灯塔的整体几何形状、杆件布局 and 连接方式,使结构在满足使用功能的前提下,具有更好的力学性能和抗风能力。例如,采用空间桁架结构代替传统的单杆结构,可以有效分散荷载,降低应力集中现象。在微观层面,对钢材等材料的微观组织进行优化,通过热处理、合金化等工艺手段,提高材料的强度和韧性。同时,结合纳米技术,在材料中添加纳米颗粒,进一步改善材料的力学性能和抗疲劳性能。这种多尺度优化设计方法,从整体到局部,从宏观到微观,综合考虑了结构和材料的性能,使铁路灯塔在复杂荷载作用下具有更高的强度和更好的稳定性,为铁路运输的安全运行提供了有力保障。

3.3 动态自适应结构系统

开发动态自适应结构系统,使铁路灯塔能够根据实时荷载和环境变化自动调整自身的结构性能,是一种具有创新性的强度提升措施。在灯塔结构的关键部位安装智能驱动器和可调节的支撑装置,这些装置可以根据传感器监测到的荷载和变形信息,实时调整自身的刚度和阻尼特性,以适应不同的工况。例如,在强风作用下,智能驱动器可以自动增加结构的刚度,减少变形;在可变力作用下,可调节的支撑装置可以自动调整阻尼,降低振动和应力集中。这种动态自适应结构系统,使灯塔能够像生物一样具有自适应能力,不仅提高了结构在复杂动态荷载下的强度和稳定性,还延长了结构的使用寿命,减少了维护成本。

4 结论

不同风压作用时,随着风压增大,灯塔结构受力与变形呈显著变化。风压作为水平荷载,对塔身侧向作用增强,使杆件应力分布与位移形态动态调整,高风压下应力集中区域扩大,位移幅值提升,反映出风压等级对结构稳定性的直接影响,需依据区域风环境特征,针对性强化抗风设计,优化杆件布置与节点构造,削弱风致效应危害。不同集中力工况中,集中力大小与作用位置改变,引发结构局部与整体力学响应的差异。集中力加载使力流在局部杆件与节点集中传递,导致应力梯度变化,大集中力或不作用点下,易出现局部强度不足,提示在灯塔设备安装、检修荷载设计中,需精准控制集中荷载参数,通过结构拓扑优化,提升局部承载能力,避免应力集中引发疲劳损伤。可变力作用时,荷载的时变特性使结构呈现动态力学响应,应力与位移随荷载历程波动。可变力的周期性或非周期性变化,考验结构刚度与阻尼特性,长期作用下易引发材料疲劳累积。这要求在设计中融入动态荷载考量,通过增设减震、耗能装置,优化结构动力特性,降低时变荷载对结构耐久性的影响。铁路灯塔在不同荷载工况下,受力变形与强度表现各异。需结合实际服役环境,综合风压、集中力、可变力的作用特点,从结构设计、材料选型、节点优化等维度提升性能,保障铁路灯塔长期安全稳定运行,为铁路运输配套设施的可靠性提供支撑。

[参考文献]

- [1]高自林.常压塔底泵机械密封故障分析与优化措施[J].石油化工设备技术,2025,46(03):41-47+77.
- [2]周红宇,程文明,孙翊然.塔式起重机振动的模态空间最优控制[J].起重运输机械,2025,(09):51-57.
- [3]杨红星.一种塔机起重臂缓冲器的计算与设计[J].建设机械技术与管理,2025,38(02):44-45.
- [4]程锦翔,周金字,朱福先.机械专硕“双融”人才培养的格式塔心物场[J].江苏理工学院学报,2024,30(06):121-128.
- [5]宁厚波,杨国营.基于FMEA和POKA-YOKE技术的塔机顶升安全防控设计[J].机电工程技术,2024,53(10):256-261.
- [6]杨磊,魏永涛,严平.桥塔施工中塔式起重机基础的安装设计[J].建筑机械化,2024,45(09):42-45.
- [7]黄舒,黄祖鑫,胡浪.塔机新型平衡臂铰点结构研究[J].建筑机械,2024,(09):211-213.
- [8]陈亚文,杜几平,向丽,等.基于Hyperworks的塔机有限元仿真分析研究[J].建筑机械,2024,(06):179-182.
- [9]孙帅.风载下的塔式起重机振动主动控制研究[D].山东建筑大学,2024.
- [10]吴玉水,王猛虎,王超,等.狭小空间塔机拆除方案实施[J].建筑机械化,2024,45(04):120-124.
- [11]季建国,刘海滨.海水中塔机基础的设计及施工[J].建

筑机械,2024,(03):147-150.

[12]张志,文朝辉,李炜.自动驾驶塔机的场景建模及运行路径规划研究[J].建筑机械化,2024,45(01):11-18.

作者简介:

吴贵(2004--),男,彝族,贵州黔西人,本科在读,学生,研究方向:智能制造工程。