

塔机风致响应分析及疲劳寿命研究进展

梅博浩^{1*}, 陈 华^{2,3}, 潘钧俊^{2,3}, 余少乐^{2,3}

¹华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州

²中国建筑第八工程局有限公司, 上海

³中建八局总承包建设有限公司, 上海

收稿日期: 2024年12月20日; 录用日期: 2025年1月11日; 发布日期: 2025年1月23日

摘 要

塔机广泛应用于建筑和工程领域,其安全性和可靠性对施工效率和人员安全至关重要。在复杂风环境下,风致响应和疲劳寿命是影响塔机性能的关键因素,通过风洞试验、数值模拟和现场监测,深入分析不同风速、风向及工况下的风致响应特性,并基于疲劳寿命理论研究塔机在复杂载荷组合下的损伤机制及疲劳寿命预测方法,为设计优化和维护管理提供依据。未来需结合多物理场耦合模型、智能监测技术,完善风致响应与疲劳寿命预测体系,为塔机的安全性评估和使用寿命延长提供更加精准的技术支持。

关键词

塔机, 风致响应, 疲劳寿命

Advancements in Wind-Induced Response Analysis and Fatigue Life Research of Tower Cranes

Bohao Mei^{1*}, Hua Chen^{2,3}, Junjun Pan^{2,3}, Shaole Yu^{2,3}

¹School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou Henan

²China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai

³China Construction Eighth Engineering Bureau General Contracting Construction Co., Ltd., Shanghai

Received: Dec. 20th, 2024; accepted: Jan. 11th, 2025; published: Jan. 23rd, 2025

Abstract

Tower cranes are widely used in construction and engineering fields, where their safety and reliability

*通讯作者。

文章引用: 梅博浩, 陈华, 潘钧俊, 余少乐. 塔机风致响应分析及疲劳寿命研究进展[J]. 土木工程, 2025, 14(1): 78-85.
DOI: 10.12677/hjce.2025.141010

are critical to construction efficiency and personnel safety. In complex wind environments, wind-induced response and fatigue life are key factors affecting tower crane performance. Through wind tunnel tests, numerical simulations, and field monitoring, the wind-induced response characteristics under various wind speeds, directions, and working conditions are analyzed in depth. Based on fatigue life theory, the damage mechanisms under complex load combinations and fatigue life prediction methods for tower cranes are investigated, providing a foundation for design optimization and maintenance management. In the future, it is necessary to integrate multi-physics coupling analysis, intelligent monitoring technologies, and advanced materials to enhance the wind-induced response and fatigue life prediction systems. This will offer more precise technical support for safety assessments and service life extensions of tower cranes.

Keywords

Tower Crane, Wind-Induced Response, Fatigue Life

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塔式起重机(塔机) [1]因其优异的起重性能和机动性,能在有限空间内高效地将重物提升至高空,提高施工的安全性和效率,被广泛用于建筑、工程及基础设施等领域[2] [3]。随着塔机向大型化发展,其大、细、长、高的柔性特征,使得其对风荷载更为敏感,易受外界环境因素的影响而导致灾难性的后果。近年来,塔机安全事故频频发生[4] [5],根据国家市场监督管理总局的统计数据,图 1 显示了特种设备和起重机械的事故数量及死亡人数,起重机械事故已成为特种设备事故高发的主要原因,且一旦发生,将会引起严重的经济损失和人员伤亡。因此,研究其风振响应和疲劳寿命对保证塔机结构安全至关重要。

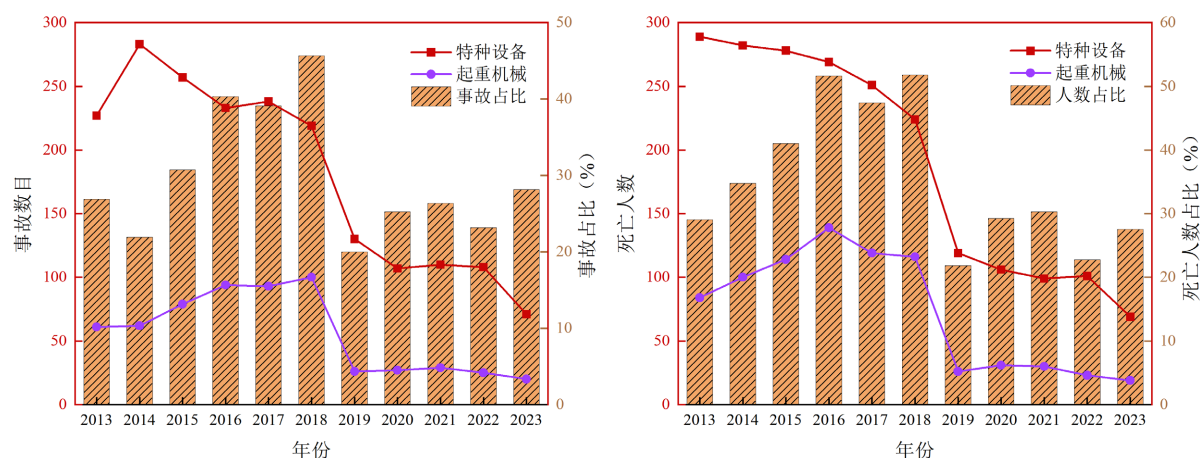


Figure 1. Summary of accidents and fatalities of special equipment and lifting machinery

图 1. 特种设备和起重机械事故及死亡人数汇总

塔机在运行过程中,由于机械装置的启停,常产生较大的冲击和振动,影响作业效率和精度,甚至可能引发结构疲劳失效。风振响应对塔机的安全稳定运行有重要影响,并可能威胁其长期安全性,为确保结构安全,设计和运行中应充分考虑风荷载的作用。疲劳寿命分析重点研究材料在周期荷载作用下的

失效过程。塔机在服役期间承受频繁的载荷,风荷载作为随机性和动态性外界因素,加速了结构的疲劳破坏。因此,深入研究塔机在复杂工况下的工作特性和机理,特别是风振响应与疲劳寿命,有助于更深入地了解塔机服役过程中可能面临的风险,为其设计优化、维护和安全评估提供理论依据,是保障其安全运行和延长使用寿命的关键。

综上所述,对塔机风振响应与疲劳寿命的系统研究,不仅能提升设备的可靠性和安全性,还能制定更合理的维护和管理策略,降低事故风险,提高工程效率。本文总结了塔机风致响应和疲劳寿命研究的进展,提出了未来研究的关键方向,建议结合多物理场耦合分析、智能监测技术和新型材料应用,完善风致响应模型和疲劳寿命预测体系,为塔机安全评估和寿命延长提供更精准的技术支持。

2. 塔机动态特性分析

结构的动态特性分析[6]是进行其他动力学研究的基础工作,能够有效提升结构的动力性能,进而避免在动态载荷作用下发生共振。由于计算手段和理论基础的限制,早期研究通常将风载荷简化为沿塔机最不利水平方向作用的静力载荷,忽视了其动态效应,因此对动态特性的关注较少。随着塔机向更高起升高度的发展,风载荷的动态效应逐渐受到广泛关注。在满足强度、刚度和稳定性要求的同时,研究脉动风载荷对塔机动态特性的影响,对于了解其结构受力方式和确保安全可靠运行具有重要的现实意义。

2.1. 模态分析理论

结构的固有特征(固有频率、振型、阻尼等)将直接决定结构在随时间变化的载荷作用下的响应特征。通过模态分析可获得塔机的固有频率和振型,为其动力响应分析与优化设计提供依据。模态分析基于系统的运动方程,可以描述为以下形式:

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1)$$

式中, M 、 C 、 K 分别为系统质量、阻尼、刚度矩阵; $\ddot{x}(t)$ 、 $\dot{x}(t)$ 、 $x(t)$ 分别为加速度向量、速度向量、位移向量; $F(t)$ 是外力,假设系统无外力作用,即 $F(t) = 0$,用来确定结构的固有频率和模态振型。

2.2. 模态分析方法

模态分析方法大致分为基于理论模型的数值模态分析和基于实验的试验模态分析。数值模态分析是基于理论模型和数值计算的分析方法,朱朋冲等[7]以塔机吊臂钢丝绳为对象,建立了涡激振动的流固耦合模型,通过数值分析研究其气动特性,计算不同工作长度下的自然频率,并模拟不同风速条件下的振动特性,为塔机的设计和运行提供参考。崔少杰[8]分析了塔机在不同荷载条件下的动态特性,研究了不同风向和起重臂仰角对动臂塔机的影响规律。余震[9]对塔机在常规工况下的整体钢结构应力和振动特性进行了分析。陈鹏[10]基于风载特性,利用 Fluent 对平均风和脉动风下 SC 结构在两种吊装方案中的响应进行数值模拟,分析自重和风载影响下的结构安全性,并对比不同荷载组合对结构响应的影响。韩松君[11]对平头塔起重机进行了整体振动模态和响应分析,研究了起升机构产生的惯性力对结构振动的影响。王永岩等[12]则结合脉动风的随机特性与 Ansys 的随机振动模块,分析了塔机非工作状态下的预应力模态,确定了其固有频率和振型,并进一步探讨了塔机振动特性的机理和规律。

试验模态分析通过实验手段获取系统的模态特性,主要包括冲击激励法[13]和频响函数分析法[14]。秦仙蓉等[15]对塔机进行整机风致振动实测,获取结构的实测动态特性,并建立考虑边界条件不确定性的塔机有限元模型,基于二次响应面法对该有限元模型进行修正,表 1 显示了实测模态和修正有限元模型计算模态,二者能较好地吻合。陈亚钊[16]采用有限元法建立塔机模型,通过模态分析获得结构的主要振型与频率,同时进行现场环境振动实测以获取实测振型和频率。通过对比有限元模拟与实测结果,开展

相关性分析，校验塔机动力特性的准确性。在工程实践中，通常结合数值分析与试验分析以提高结果的准确性。蔡康等[17]以深圳平安金融中心的实测加速度数据为例，提出了一种新型的时频分析方法，利用经验小波变换将实测信号分解为单一模态分量，并通过改进的随机减量法提取自由衰减响应，从而准确计算超高层结构在风激励下的模态参数。

Table 1. Comparison of the frequency before and after the correction of the tower crane and the measured frequency
表 1. 塔机修正前后频率和实测频率对比[15]

模态阶次	实测频率/Hz	初始模型		修正模型	
		初始频率/Hz	误差/%	修正后频率/Hz	误差/%
1	0.12	0.10	-16.7	0.13	8.3
2	0.26	0.22	-15.4	0.28	7.7
3	0.35	0.29	-17.1	0.35	0.0
4	0.70	0.61	-12.8	0.66	5.7
5	0.88	0.84	-4.5	0.89	1.1

误差 = (计算值 - 实测值)/实测值 × 100%。

3. 塔机风致响应

随着风工程和结构健康监测技术的发展，关于塔架结构风致响应研究取得了显著进展，使得对风振响应的研究日趋智能化和系统化。国内外学者深入分析了塔机的振动特性和风荷载作用机理，开展了针对塔机风致响应的理论研究和实践应用，特别是在复杂风环境下的动态响应分析。

3.1. 风致响应影响因素

塔机在风荷载作用下的动态响应不仅对结构的瞬时性能产生影响，还直接关系到其长期稳定性和安全性，因此，精确分析塔机的风致响应对其结构设计至关重要。塔机风致响应主要受以下因素的影响。

- (1) 风速和风向: 风速增大会直接增加风荷载, 引发更显著的位移和振动。风向变化影响风荷载分布, 不同入射角(顺风、横风、斜风)会对结构产生不同的力学效应。
 - (2) 结构几何尺寸: 塔机高度和臂长增大会增加风荷载作用面积, 从而加大响应强度。横截面形状(如圆形、方形、多边形)对绕流模式及风荷载分布有显著影响, 高细比结构柔性大, 易引起显著振动。
 - (3) 质量和刚度: 质量与刚度是抗风性能的关键参数。质量分布不均会引起局部响应差异, 而较大质量通常增强抗风能力。刚度不足则易发生显著变形, 不均匀刚度会引发复杂振动模式。
- 综合考虑这些因素可以更准确地预测塔机的风致响应, 提高设计的安全性和可靠性。

3.2. 主要研究方法

对塔架结构的风振响应进行研究, 首先需要对塔架的风荷载特征和风工程学进行深入的研究。目前, 国内外对塔机风致响应的研究主要采用现场实测、风洞试验和数值模拟等手段。

现场实测是获取结构在风荷载作用下实际响应的最直接研究手段, 通过现场监测可以获得塔机的风致响应实时数据, 有效验证理论模型和数值模拟的准确性。Ross 等[18]对美国棒球场起重机倒塌事故进行了现场测量与分析, 得出风致效应是事故的主要原因。Tomcayk 等[19]在塔机上安装状态模拟器, 实时监测运行情况, 针对干扰条件下的负载运行、定位及动态补偿进行了仿真分析。Klinger [20]通过分析两起不同设计的塔机倒塌事故, 发现风载荷引起的结构弛振是导致疲劳破坏和最终倒塌的主要原因。现场

实测作为最直观的结构分析手段,不仅能够验证其他研究方法的准确性,还为其改进与优化提供了科学依据。然而,由于实测周期长、难度大、成本高,目前塔机在风荷载特性和风致动力响应方面的研究仍较为欠缺。

风洞试验是研究结构风荷载特性的重要手段,也是国家标准和规范中参数选取的依据。通过模拟真实风场条件,风洞试验可提供结构风荷载特性的重要数据,并结合统计学与随机振动理论对结构受力与响应进行分析。Mara 等[21]通过风洞实验研究了风荷载作用下塔机结构与建筑之间的空间关系,结果表明,塔机与建筑物之间几何剖面的变化显著影响整体气动性能,塔机越靠近建筑物立面中间时,其影响越小。Voisin 等[22]通过对塔机模型进行风洞试验,模拟了边界层湍流风作用下塔机的倾覆力矩和旋转部件位置,提出了减小倾覆力矩的改进方案,为塔机设计提供了参考。王澄[23]以港口单臂架门座式起重机为研究对象,利用数值风洞试验和流固耦合计算,分析了风载作用下起重机的响应特性,揭示了流场参数的分布规律以及结构的力学行为。风洞试验通过调整风速、风向及湍流特征,模拟不同工况,获得塔机在风荷载下的动力学特性,为理解结构动态行为提供数据支持。

随着计算机技术和数值方法的快速发展,数值模拟已成为预测结构表面风压及区域风场的重要手段。马晋等[24]利用 Ansys 软件对典型塔机建立力学模型,分析其疲劳损伤效应,发现起重臂端部和塔顶在风荷载下位移较大,易形成破坏,并指出工作中应考虑起升荷载对结构的损伤。Gur 等[25]通过数值模拟研究臂架位置、偏航角、梯度高度及梯度风速对集装箱起重机失效脆弱性的影响。符康等[26]使用 AR 法模拟脉动风速时程,利用 Ansys 计算塔机的静风响应和脉动风响应,并对比分析两者结果。Jiang 等[27]通过风致响应分析,获得了不同风速条件下塔机的振动响应及位移可靠性数据。霍东敏等[28]采用谐波叠加法模拟脉动风,研究高塔风电专用塔机在安装过程中的风响应,以确保其非工作状态下的稳定性和安全性。臧付连[29]研究了门式起重机,通过设置不同形态的超高质量比柱体,进行单自由度涡激振动模拟。通过对比这些结构的锁定区、振幅和流场特征,评估了各类结构的抗风致振动性能,为起重机的抗风减载设计提供了指导。数值模拟不仅克服了风洞试验的局限性,还能提供高效、准确的风场模拟结果。通过有限元法对塔架结构进行风振响应仿真,可有效分析复杂工况和环境条件,更精确地预测结构的实际响应特性。

总体来说,塔机风致响应的研究正逐步深入,各种研究方法的结合使得对其风致响应特征的理解更加全面,为设计和安全评估提供了重要依据。

4. 塔机疲劳寿命分析

4.1. 疲劳寿命研究现状

目前,国内外学者在机械装备寿命预测方面的研究主要集中于材料与结构的失效机理,建立基于力学模型和概率统计的寿命预测理论。同时,发展先进的寿命试验方法与数据分析技术也是寿命预测研究热点之一,通过研究复杂载荷、多环境因素及多种失效模式下的寿命试验方案,为理论研究提供试验支持。在工程实践中,机械结构的使用寿命预测是一项重要的研究工作。在疲劳寿命预测过程中,材料的疲劳强度,危险位置的应力谱,结构的疲劳累积损伤是关键因素。由于疲劳寿命的影响因素复杂,目前仍缺乏准确的疲劳寿命计算方法。

4.2. 塔机疲劳寿命分析方法

近年来,疲劳寿命预测方法正在急速发展,国内高校及一些研究机构在材料疲劳的失效分析、疲劳裂纹的扩展速率、疲劳寿命、疲劳试验的数据处理等许多方面展开了较为深入的研究。基于现场实测,赵威威[30]通过现场试验获取塔机疲劳载荷谱,在测点粘贴应变片,记录典型工况下的应力时间历程,并

处理数据编制疲劳载荷谱。查雅妮[31]采用名义应力法,通过有限元分析计算不同工况下的应力状态,并结合现场实测数据,获得载荷的时间历程,最终计算了塔式起重机的疲劳寿命,并通过反向推算法进行验证。董攀浩[32]结合综合测试、信号处理及以太网技术,采用电阻应变法采集塔机应力应变数据,用于计算金属疲劳损伤。周凯笛[33]搭建硬件和网络架构,进行现场测试,启动数据采集与安全报警功能,并根据记录数据评估结构寿命。Caglayan 等[34]研究钢厂起重机轨道梁的疲劳寿命,通过传感器收集应变数据,完善有限元模型并进行数值分析以评估剩余疲劳寿命。Ozden [34]通过获取起重机轨道梁在实际工作过程中的应力数据,结合有限元分析软件,编制了实际载荷谱,并进行了寿命分析。

通过有限元分析方法,渠晓刚[35]等通过损伤理论模型结合疲劳应力谱评估桥式起重机金属结构寿命,利用 Ansys 进行力学分析,通过动态仿真确定疲劳危险点的累积损伤。Yang 等[36]基于有限元静力分析与模拟载荷谱,结合材料 S-N 曲线,建立 480t 桥式起重机主梁疲劳损伤及寿命模型,得到关键部件的最小寿命。左旻[37]基于断裂力学方法,首先利用有限元分析确定塔机的危险点,然后通过神经网络算法获取应力谱,最终计算了塔机的疲劳寿命。董兴建等[38]通过风压载荷的有限元分析,结合雨流计数法处理关键点应力响应,基于 Basquin 方程、Miner 准则和 Goodman 修正方程,提出概率累积损伤模型及风振疲劳可靠度与寿命计算方法。刘俊卿等[39]基于有限元建立含焊缝细节的塔臂焊接节点模型,通过等效结构应力法与主 S-N 曲线,完成焊接节点疲劳寿命分析。将实验与数值分析相结合,范小宁等[40]以桥式起重机为研究对象,采集不同载荷下的工作循环数据,利用神经网络技术生成载荷谱,并结合 Miner 准则、线弹性断裂力学及雨流计数法,基于 Paris 方程估算疲劳剩余寿命。同时,通过有限元分析软件对主梁疲劳裂纹进行模态分析,利用前三阶模态频率和等高线交点法定量定位裂纹位置及损伤程度[41]。王爱红等[42]基于现场特征参数数据,建立概率分布模型,通过仿真获取疲劳核算点的应力-时间历程,应用雨流计数法得到双参数应力谱,并利用 Forman 公式估算金属结构疲劳寿命。

5. 结论

当前塔机的风致响应及疲劳寿命研究存在多方面不足,包括风致响应模型过度简化、疲劳寿命预测精度不高、风荷载与结构耦合的非线性研究不足,以及智能监测手段匮乏。现有风致响应模型未能充分考虑湍流特性与复杂气动效应,传统疲劳寿命预测方法无法有效涵盖多载荷联合作用,且大多数研究基于线性化假设,忽视了风荷载与结构的非线性耦合,低估了极端风条件下的风险。同时,现有监测手段依赖传统传感器,难以实现动态智能维护。

未来研究应聚焦于多尺度、多物理场耦合模型的构建,提升风致响应模拟精度;发展基于概率的疲劳寿命评估方法,考虑多载荷联合作用;深入研究非线性振动与气动弹性问题,结合非线性有限元分析和实验验证;利用物联网与人工智能技术实现塔机健康监测与故障预警的智能化;探索新型高强度材料及轻量化设计,结合气动外形优化提升抗风性能;加强风洞试验与现场测量结合,以验证数值模拟结果,为设计优化提供科学依据。这些改进将使塔机风致响应及疲劳寿命研究更加准确,为提升结构安全性与智能化运行提供强有力支持。

基金项目

河南省科技研发计划联合基金(应用攻关类)项目(242103810102)。

参考文献

- [1] Jiang, W. and Ding, L. (2024) Unsafe Hoisting Behavior Recognition for Tower Crane Based on Transfer Learning. *Automation in Construction*, **160**, Article ID: 105299. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105299>
- [2] Jeong, I., Hwang, J., Kim, J., Chi, S., Hwang, B. and Kim, J. (2023) Vision-Based Productivity Monitoring of Tower

- Crane Operations during Curtain Wall Installation Using a Database-Free Approach. *Journal of Computing in Civil Engineering*, **37**, Article ID: 04023015. <https://doi.org/10.1061/jccee5.cpeng-5105>
- [3] 宋世军, 臧泓源, 杨蕊, 等. 塔式起重机塔身钢结构不同损伤部位特征研究[J]. 噪声与振动控制, 2023, 43(5): 109-114.
- [4] 陈伟, 王利莹, 杨劼, 等. 基于关联规则的塔式起重机事故致因网络模型研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(4): 1161-1168.
- [5] Zhou, W., Zhao, T., Liu, W. and Tang, J. (2018) Tower Crane Safety on Construction Sites: A Complex Sociotechnical System Perspective. *Safety Science*, **109**, 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.05.001>
- [6] 陈易明, 朱才朝, 宋朝省, 等. 基于 TMD 的单柱式海上风力发电机系统动态特性分析[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 276-284.
- [7] 朱朋冲, 徐建坤, 裴超超, 等. 塔式起重机吊臂钢丝绳风致振动响应分析[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 2031-2037.
- [8] 崔少杰. 动臂塔式起重机动态特性及优化设计研究[D]: [博士学位论文]. 天津: 河北工业大学, 2015.
- [9] 余震. 常规工况下塔机整体钢结构应力分析及其振动特性研究[J]. 电焊机, 2017, 42(5): 22-27.
- [10] 陈鹏. 风载作用下大型钢结构吊装过程安全性分析[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
- [11] 韩松君, 李莉. 平头塔机整机振动模态及振动响应分析[J]. 起重运输机械, 2018(4): 128-131.
- [12] 王永岩, 蔡亚东, 乔有涛, 等. 风荷载作用下塔式起重机结构的随机振动分析[J]. 中国工程机械学报, 2024, 22(3): 375-378+403.
- [13] 胡红波, 孙桥, 白杰. 基于窄脉冲冲击激励的压电加速度计动态校准[J]. 计量学报, 2017, 38(2): 184-188.
- [14] 李坤, 曾劲, 于明月, 等. 考虑螺栓连接刚度不确定性的带法兰-圆柱壳结构频响函数分析[J]. 振动工程学报, 2020, 33(3): 517-524.
- [15] 秦仙蓉, 郝婧兰, 徐俭, 等. 考虑边界条件不确定性的塔式起重机有限元模型修正[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 92-96.
- [16] 陈亚钊. 强风环境中塔式起重机抗风性能研究[D]: [硕士学位论文]. 福州: 福州大学, 2021.
- [17] 蔡康, 郅伦. 海环境风激励下超高层建筑模态参数识别[J]. 应用力学学报, 2021, 38(2): 465-473.
- [18] Ross, B., McDonald, B. and Vijay Saraf, S.E. (2007) Big Blue Goes Down. The Miller Park Crane Accident. *Engineering Failure Analysis*, **14**, 942-961. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.12.002>
- [19] Tomczyk, J., Cink, J. and Kosucki, A. (2014) Dynamics of an Overhead Crane under a Wind Disturbance Condition. *Automation in Construction*, **42**, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.02.013>
- [20] Klinger, C. (2014) Failures of Cranes Due to Wind Induced Vibrations. *Engineering Failure Analysis*, **43**, 198-220. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.12.007>
- [21] Mara, T.G. (2010) Effects of a Construction Tower Crane on the Wind Loading of a High-Rise Building. *Journal of Structural Engineering*, **136**, 1453-1460. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000243](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000243)
- [22] Voisin, D., Grillaud, G., Sollic, C., Beley-Sayettat, A., Berlaud, J. and Miton, A. (2004) Wind Tunnel Test Method to Study Out-of-Service Tower Crane Behaviour in Storm Winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **92**, 687-697. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.03.005>
- [23] 王澄. 不同风况下港口起重机风致响应研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津理工大学, 2021.
- [24] 马晋, 王子通, 周岱, 等. 典型塔式起重机塔架结构风致动力响应与疲劳分析[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(6): 804-808.
- [25] Gur, S. and Ray-Chaudhuri, S. (2013) Vulnerability Assessment of Container Cranes under Stochastic Wind Loading. *Structure and Infrastructure Engineering*, **10**, 1511-1530. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.834943>
- [26] 符康, 于兰峰, 程兵, 等. 塔式起重机结构风致响应分析[J]. 现代制造工程, 2017(7): 138-142.
- [27] Jiang, H. and Li, Y. (2019) Dynamic Reliability Analysis of Tower Crane with Wind Loading. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **677**, Article ID: 052031. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/677/5/052031>
- [28] 霍东敏. 高塔风力发电机专用塔式起重机的抗风性能研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2020.
- [29] 臧付连. 门式起重机门架结构风致振动研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [30] 赵威威. 基于试验的在役塔式起重机疲劳寿命分析[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [31] 查雅妮. WQ6 平头塔式起重机的疲劳寿命研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 暨南大学, 2010.
- [32] 董攀浩. 基于应变测量的塔吊疲劳监测系统研究与设计[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津工业大学, 2018.

-
- [33] 周凯笛. 起重机械结构健康监测系统的研究与开发[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2019.
- [34] Caglayan, O., Ozakgul, K., Tezer, O. and Uzgider, E. (2010) Fatigue Life Prediction of Existing Crane Runway Girders. *Journal of Constructional Steel Research*, **66**, 1164-1173. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2010.04.009>
- [35] 渠晓刚, 温鑫, 张晓康. 基于损伤力学的桥式起重机疲劳寿命分析[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1012-1016.
- [36] Yang, M., Chang, Z., Xu, G., Wang, C. and Wang, P. (2020) Analysis on Fatigue Life of Overhead Travelling Crane Girder under Impact Load for Sustainable Transport System. *IET Intelligent Transport Systems*, **14**, 1426-1432. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0656>
- [37] 左旻. 基于神经网络获取应力谱的塔机疲劳寿命评估[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原科技大学, 2021.
- [38] 董兴建, 李鸿光, 孟光. 岸桥起重机随机风振疲劳可靠性分析[J]. 振动工程学报, 2013, 26(6): 901-907.
- [39] 刘俊卿, 马岩, 曹书文. 基于等效结构应力法的塔吊焊接节点疲劳寿命评估[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(5): 522-528.
- [40] 范小宁, 徐格宁, 王爱红. 基于人工神经网络获取起重机当量载荷谱的疲劳剩余寿命估算方法[J]. 机械工程学报, 2011, 47(20): 69-74.
- [41] 范小宁, 罗志宏. 等高线法的桥式起重机主梁损伤识别[J]. 中国工程机械学报, 2021, 19(2): 170-175.
- [42] 王爱红, 徐格宁, 高有山. 桥式起重机随机应力谱获取及疲劳剩余寿命估算[J]. 机械工程学报, 2012, 48(18): 192-198.