

起重机械结构健康监测与疲劳寿命评估方法综述

汪 军

湖北特种设备检验检测研究院鄂州分院 湖北 鄂州 436000

摘要: 起重机械结构健康监测与疲劳寿命评估对保障设备安全运行意义重大。本文阐述起重机械结构特性与失效机理,包括典型结构形式、失效模式及疲劳损伤影响因素。介绍健康监测技术体系,涵盖指标构建、感知技术等。分析疲劳寿命评估核心方法,如传统方法、基于载荷谱等。探讨健康监测与疲劳寿命评估融合应用,为起重机械安全评估与维护提供理论支撑。

关键词: 起重机械; 结构健康监测; 疲劳寿命评估; 数据融合; 动态评估

引言: 起重机械在工业领域应用广泛,其结构健康与疲劳寿命关乎生产安全与效率。长期服役中,起重机械受交变载荷、环境等因素影响,易出现疲劳失效、刚度退化等问题。准确监测结构状态、评估疲劳寿命,可提前发现隐患,避免事故发生。研究起重机械结构健康监测与疲劳寿命评估方法,对保障设备安全运行、延长使用寿命意义重大。

1 起重机械结构特性与失效机理

1.1 典型结构形式与力学特征

桥式起重机与门式起重机作为工业领域广泛应用的大型设备,主梁结构是其核心承载部件。主梁通常采用箱型梁或桁架梁形式,在垂直方向承受起升载荷与自重,水平方向则需抵抗小车运行产生的横向力。这种多向受力特性导致主梁截面内产生复杂的弯曲应力与剪应力分布,尤其在跨中区域应力集中现象显著,成为结构设计的关键控制点。塔式起重机与履带式起重机的臂架结构呈现明显的空间受力特征。塔式起重机臂架通过铰接节点与塔身连接,在变幅机构驱动下形成悬臂梁结构,其受力状态随工作幅度变化呈现非线性特征。履带式起重机臂架则通过多节段拼接实现长距离作业,各节段间通过销轴或高强度螺栓连接,在起升与回转过程中需同时承受轴向压力、弯矩及扭矩的复合作用,对结构刚度与稳定性提出严苛要求。关键连接部位的力学传递规律直接影响整体结构安全性^[1]。焊接接头作为主要连接形式,其应力分布呈现明显的三向受拉特征,焊趾区域因几何突变易形成应力集中。螺栓连接则通过预紧力实现夹紧力传递,在交变载荷作用下可能因松动导致连接刚度退化,进而引发局部应力重分布。这些连接部位的力学行为具有高度非线性特征,成为结构疲劳损伤的潜在起源点。

1.2 主要失效模式与诱因

疲劳失效是起重机械结构最常见的失效形式。在长

期服役过程中,结构承受的起升、变幅、回转等动作产生的交变载荷,会在材料内部引发不可逆的微裂纹萌生与扩展。这种损伤累积过程具有隐蔽性,当裂纹扩展至临界尺寸时,剩余截面无法承受设计载荷,最终导致突发断裂。刚度退化与变形失效多源于结构长期超载运行或设计裕度不足。主梁下挠、臂架侧向屈曲等变形现象,不仅影响设备正常作业精度,更会加剧应力集中效应,形成恶性循环。材料老化与腐蚀则通过改变材料微观组织结构降低承载能力,特别是在沿海或化工等腐蚀性环境中,金属材料的腐蚀速率显著加快,厚度减薄与表面缺陷成为诱发疲劳裂纹的先导因素。

1.3 疲劳损伤的核心影响因素

载荷特性对疲劳损伤进程具有决定性作用。动载荷的幅值、频率与波形直接影响损伤累积速率,其中冲击载荷产生的瞬态应力峰值可能超过材料屈服强度,引发局部塑性变形。结构缺陷的应力集中效应则通过放大局部应力水平加速裂纹萌生,制造过程中的焊接缺陷、安装误差导致的几何不连续性,均会显著降低结构疲劳寿命。运行环境的调节作用体现在温度变化引发的材料性能波动,以及湿度条件对腐蚀速率的影响,这些因素通过改变损伤演化路径间接影响结构耐久性。

2 起重机械结构健康监测技术体系

2.1 监测指标体系构建

起重机械结构健康监测需建立多维度指标体系以全面反映设备状态。力学性能指标中,应力与应变直接表征结构承载状态,位移参数反映整体变形程度,振动特性则揭示动态响应规律^[2]。结构状态指标聚焦损伤演化过程,裂纹萌生位置与扩展速率是疲劳损伤评估的核心依据,刚度变化量则用于量化结构退化程度。环境与运行指标通过记录载荷谱特征、温度波动及湿度变化,为损伤机理分析提供边界条件数据。这些指标相互关联,共

同构成结构健康评估的完整证据链。

2.2 感知技术与数据采集

传统传感技术以应变片、加速度计与位移计为代表,通过电信号转换实现基础参数测量。应变片凭借高灵敏度适用于静态应力监测,加速度计则通过惯性测量捕捉动态振动特征,位移计在结构变形监测中发挥关键作用。例如,在起重机臂架监测中,应变片可精确测量臂架关键部位的应力变化,加速度计能实时获取臂架的振动频率和幅值,位移计可监测臂架的侧向位移。先进传感技术中,光纤传感以抗电磁干扰、长距离传输优势应用于大型结构监测,压电传感通过压电效应实现高频振动信号采集,无线传感网络通过自组织拓扑结构解决复杂环境布线难题。光纤传感在起重机主梁监测中可实现长达500米的信号传输,且抗干扰能力强;压电传感可采集频率高达10000赫兹以上的振动信号;无线传感网络可在复杂结构的多个关键部位布置传感器,无需大量布线。数据采集系统需兼顾同步性与抗干扰能力,采用多通道同步采集技术确保多参数时空对齐,通过屏蔽层设计与数字滤波技术抑制电磁噪声,采用有线与无线混合传输方式平衡数据可靠性与部署灵活性。

2.3 数据处理与特征提取

原始监测数据常混杂环境噪声与异常干扰,需通过降噪、滤波与异常值剔除进行预处理。时域特征提取聚焦信号统计特性,均值反映整体水平,峰值指示瞬态冲击,均方根量化能量大小,脉冲因子则用于识别冲击性故障。频域分析通过傅里叶变换将时域信号转换至频域,频谱分析定位主导频率成分,功率谱密度评估能量分布特征,共振频率识别可发现结构刚度变化。时频域方法结合两者优势,小波变换通过多尺度分解捕捉非平稳信号特征,希尔伯特-黄变换则通过经验模态分解实现自适应时频分析,在裂纹扩展监测中可有效识别瞬态冲击成分。例如,利用小波变换对起重机结构振动信号进行分析,可检测到频率在10-100赫兹之间的瞬态冲击成分,这些成分可能与裂纹扩展有关。

2.4 结构状态评估与故障诊断

状态评估指标通过量化结构健康状态实现分级预警,健康指数构建常采用加权融合方法,将多参数归一化处理综合计算,分级标准依据工程经验设定阈值区间。故障诊断方法分为信号驱动与模型驱动两类,前者通过特征参数与故障模式的映射关系实现快速识别,后者基于物理模型或数据模型进行状态反演。智能诊断技术引入机器学习算法,支持向量机通过核函数映射实现非线性分类,随机森林利用多决策树集成提升诊断鲁棒性^[3]。深度

学习则通过卷积神经网络自动提取深层特征,循环神经网络处理时序依赖关系,在复杂故障模式识别中展现显著优势。

3 起重机械疲劳寿命评估核心方法

3.1 传统疲劳寿命评估方法

应力-寿命(S-N)曲线法以材料疲劳极限为基础,通过试验建立应力幅值与循环次数的关系曲线,适用于高周疲劳场景,但对低周疲劳及复杂应力状态预测精度有限。应变-寿命(ϵ -N)曲线法聚焦局部塑性变形,通过循环应力-应变曲线与应变寿命关系,结合Neuber法则计算缺口根部应力应变,适用于低周疲劳与缺口件评估。线性累积损伤理论中,Miner理论假设损伤线性累积,当损伤值达到1时判定失效,适用于随机载荷谱分析,但未考虑载荷顺序效应。非线性累积损伤理论通过引入损伤修正系数或双线性模型,改进了Miner理论在变幅载荷下的预测偏差,如修正Miner理论通过调整临界损伤值提升精度,双线性理论则将损伤过程划分为不同阶段分别计算。

3.2 基于载荷谱的疲劳寿命评估

载荷谱构建需对实测载荷数据进行统计分析,雨流计数法通过识别载荷循环的闭合路径,将复杂载荷序列分解为一系列全循环与半循环,为寿命计算提供基础数据。该方法能有效提取载荷循环特征,但需结合峰值谷值提取技术确保循环完整性。载荷谱修正需考虑实际工况与试验条件的差异,通过引入载荷放大系数补偿测量误差,采用运行比例系数调整不同工况下的载荷频率分布,使修正后的载荷谱更贴近真实服役条件。基于载荷谱的寿命计算流程包括应力幅值统计、S-N曲线匹配、损伤累积计算等环节,关键在于准确识别危险载荷循环并合理分配损伤权重,需结合雨流计数结果与材料疲劳特性进行综合分析。

3.3 基于损伤力学的疲劳寿命评估

损伤力学通过引入损伤变量量化材料劣化程度,损伤变量定义为有效承载面积的减少比例,演化方程描述损伤随循环次数的增长规律。微观损伤模型从位错运动、空穴聚合等机制出发,建立损伤萌生与扩展的物理模型,如位错塞积理论解释裂纹萌生,空穴聚合模型描述微裂纹扩展过程,但计算复杂度高且参数获取困难。宏观损伤模型通过简化假设构建工程适用模型,如Lemaitre模型将损伤演化与塑性应变关联,适用于金属材料疲劳评估,Chaboche模型则引入非线性损伤累积项,提升变幅载荷下的预测精度。

3.4 基于数值模拟的疲劳寿命评估

有限元分析需建立精确的结构模型,合理划分网格

密度以平衡计算精度与效率,准确施加边界条件与载荷工况以模拟真实受力状态。疲劳有限元分析流程包括静态应力计算、疲劳参数定义及寿命预测实现,需结合S-N曲线或 ϵ -N曲线完成最终评估,其中应力集中系数与平均应力修正对结果影响显著^[4]。多物理场耦合模拟考虑温度、腐蚀等因素对疲劳性能的影响,通过热-力耦合模型分析温度梯度引起的热应力,采用腐蚀-疲劳耦合模型评估环境侵蚀对裂纹扩展的促进作用,提升复杂环境下的预测可靠性。

3.5 智能疲劳寿命评估方法

数据驱动模型利用机器学习算法挖掘监测数据与疲劳寿命的映射关系,支持向量机通过核函数映射处理非线性问题,神经网络通过多层感知器自动提取深层特征,适用于数据充足场景下的寿命预测。混合模型融合机理模型与数据驱动优势,通过机理模型提供物理约束,数据驱动模型补偿未知因素影响,构建兼顾精度与泛化能力的评估框架,如将S-N曲线与神经网络结合,实现变幅载荷下的高精度预测。

4 健康监测与疲劳寿命评估的融合应用

4.1 数据融合机制

多源监测数据的时空融合方法通过统一时间基准与空间坐标系,实现不同传感器采集数据的同步对齐。例如,应变传感器与振动加速度计的监测数据需在时间维度上插值匹配,在空间维度上通过结构有限元模型映射至同一节点,确保多源数据反映同一结构状态。针对异构数据特性,采用加权平均或卡尔曼滤波算法融合冗余信息,提升数据可靠性。监测数据与数值模拟结果的互补融合则通过构建数字孪生模型实现,将实测载荷、温度等边界条件输入有限元模型,修正模拟参数以缩小与真实状态的偏差;同时将模拟得到的应力分布、损伤演化规律反馈至监测系统,为异常数据识别提供理论依据。例如,在起重机主梁监测中,模拟结果可辅助判断应变传感器读数异常是否由局部应力集中导致,避免误报发生。

4.2 动态寿命评估体系

基于实时监测数据的疲劳损伤动态更新通过在线识别

载荷循环特征,结合损伤力学模型实时计算损伤增量。例如,采用雨流计数法从应变时程曲线中提取半循环幅值与均值,代入修正Miner理论更新累积损伤值,实现损伤状态的动态跟踪。针对监测数据噪声干扰,引入滑动窗口滤波或机器学习算法优化循环识别精度,确保损伤计算稳定性。全生命周期疲劳寿命的动态预测与修正需建立覆盖设计、制造、服役全阶段的评估框架^[5]。设计阶段基于模拟数据生成初始寿命曲线,服役阶段通过实时监测数据修正模型参数,形成闭环评估体系。例如,在起重机吊钩服役初期,结合模拟结果与少量实测数据训练代理模型;随着服役时间延长,积累足够监测数据后,采用贝叶斯更新方法修正模型不确定性,逐步提升预测精度。此外,动态预测需考虑环境因素与工况变化的影响,通过引入温度、腐蚀速率等参数构建多因素耦合模型,实现全生命周期内寿命的精准动态管理。

结束语

起重机械结构健康监测与疲劳寿命评估是保障设备安全运行的重要手段。通过构建多维度监测指标体系,运用先进感知技术获取数据,结合多种疲劳寿命评估方法,实现数据融合与动态寿命评估,可精准掌握设备状态。这有助于及时发现潜在问题,采取有效维护措施,提升起重机械运行可靠性与安全性,推动行业健康发展。

参考文献

- [1]郁扬.浅析起重机械金属结构振动与故障诊断思考[J].中国设备工程,2025,(03):178-180.
- [2]张广辉,孙森,吕世宁,等.考虑残余应力影响的桥式起重机多轴疲劳寿命评估[J].科学技术与工程,2024,24(25):10768-10775.
- [3]王晓明,李强.起重机械金属结构疲劳寿命预测方法研究[J].机械工程学报,2021,57(3):218-227.
- [4]张华,赵刚.基于有限元分析的起重机械结构疲劳分析[J].工程力学,2020,37(2):166-173.
- [5]刘波,陈建平.统计学方法在金属疲劳寿命预测中的应用[J].失效分析与预防,2019,14(4):311-317.