

岸边集装箱起重机典型结构故障模式及预防性维护策略

梁敦超

营口新世纪集装箱码头有限公司 辽宁 营口 115007

摘要: 岸边集装箱起重机 (Quay Crane, QC) 作为现代港口集装箱装卸作业的核心装备, 其运行的安全性、可靠性和效率直接关系到整个港口的吞吐能力和运营效益。然而, QC长期处于高负荷、强腐蚀、多变载荷的恶劣工况下, 其金属结构易发生疲劳、腐蚀、变形等多种形式的损伤, 进而演变为严重的结构故障, 威胁人员安全并造成巨大经济损失。本文系统梳理了岸边集装箱起重机金属结构的典型故障模式, 深入分析了其成因与演化机理, 并在此基础上, 提出了一套融合多源信息感知、数据驱动分析与专家知识的预防性维护策略。该策略旨在实现从“被动维修”向“主动预防”的转变, 为提升港口大型装卸设备的本质安全水平和全生命周期管理效能提供理论支撑与实践指导。

关键词: 岸边集装箱起重机; 结构故障; 疲劳裂纹; 腐蚀; 预防性维护

引言

在全球贸易持续增长的背景下, 港口作为国际物流的关键节点, 其自动化、智能化、高效化水平已成为衡量国家竞争力的重要指标。岸边集装箱起重机 (QC) 作为连接船舶与陆域运输的核心纽带, 承担着繁重且复杂的装卸任务。一台现代化的超巴拿马型QC, 其自重可达数千吨, 起重量超过百吨, 年作业量高达数十万标准箱 (TEU)。在如此高强度的循环作业中, QC的金属结构——包括门框、主梁、前后大梁、梯形架、海陆侧门腿以及司机室支撑等——长期承受着交变应力、冲击载荷、风载、地震载荷以及海洋大气环境的侵蚀。一旦这些关键承力结构发生失效, 轻则导致设备停机, 影响港口作业计划; 重则可能引发整机倾覆、吊具坠落等灾难性事故, 造成无法估量的生命财产损失。近年来, 国内外港口发生的多起QC结构断裂事故, 无不凸显了对其结构健康状况进行有效监控与维护的极端重要性。传统的定期检修和事后维修模式已难以满足现代港口对设备高可用性和本质安全性的严苛要求。因此, 深入研究QC的典型结构故障模式, 并构建科学、高效的预防性维护体系, 具有重大的工程应用价值和现实意义。

1 岸边集装箱起重机结构特点与受力分析

1.1 结构组成

岸边集装箱起重机主要由以下几大部分构成: 金属结构、起升机构、小车运行机构、大车运行机构以及电气与控制系统。其中, 金属结构是整机的骨架, 主要包括门框 (由海侧和陆侧门腿及上横梁组成)、主梁 (承载小车运行轨道)、前后大梁 (伸出至船舱上方和后伸距区域)、梯形架 (支撑主梁并传递载荷至门框) 以及司机室、机器房等附属结构。起升机构负责吊具和集装

箱的垂直升降, 小车运行机构驱动小车沿主梁轨道前后移动, 大车运行机构则使整机沿码头轨道行走, 而电气与控制系统协调各机构动作, 实现自动化作业。在所有组成部分中, 金属结构是所有载荷的最终承载者, 其完整性直接决定了整机能否安全、稳定地运行。

1.2 典型工况与受力特征

QC在作业过程中经历多种复杂工况, 其结构受力呈现出高度动态化和非线性的特征。每一次完整的装卸循环——从取箱、提升、小车运行、下降到放箱——都会使主梁、前后大梁等主要承力构件承受一次完整的拉-压或弯-扭交变应力。这种高频次、高幅值的应力循环是诱发结构疲劳损伤的根本原因。此外, 在起制动、吊具抓放箱或小车换向等瞬态过程中, 系统会产生显著的动载冲击, 导致局部应力峰值远超静态设计值, 进一步加剧材料损伤。当小车运行至前大梁最前端并吊有重箱时, 整机处于最不利的偏载状态, 此时门框和主梁不仅要承受巨大的垂直载荷, 还需抵抗由此产生的倾覆力矩和扭转载荷, 结构受力极为复杂。与此同时, QC常年暴露于高盐雾、高湿度的海洋大气环境中, 钢结构表面持续遭受电化学腐蚀的侵蚀。在台风季节, 强风载荷还会对整机的抗风稳定性提出严峻挑战。正是这些力学载荷与腐蚀环境的长期耦合作用, 共同塑造了QC结构故障的独特演化路径。

2 典型结构故障模式分析

2.1 疲劳裂纹

疲劳裂纹是岸边集装箱起重机最为普遍、隐蔽性最强且危险性最高的结构故障形式。这类裂纹通常并非突然出现, 而是源于结构不连续区域或几何突变处的微观缺陷, 在数以百万计的装卸循环作用下逐步萌生并扩

展。实践中,疲劳裂纹高发于应力集中效应显著的部位,例如主梁与梯形架的连接焊缝区域、前后大梁的根部、门腿与上下横梁的焊接接头,以及小车轨道支撑结构等。这些位置往往存在焊缝余高、未熔合、咬边等制造缺陷,或因截面突变、开孔、加劲板端部等几何不连续性而形成高应力梯度区。在交变载荷的反复作用下,材料内部的微观滑移带不断累积塑性应变,最终在缺陷处形成宏观裂纹^[1]。一旦裂纹形成,其扩展速率将受到应力强度因子范围、材料韧性及环境因素的共同影响。由于早期裂纹尺寸微小,常规目视检查几乎无法察觉,但随着裂纹长度的增加,剩余有效截面逐渐减小,直至在某一正常作业载荷下发生突发性脆性断裂,造成灾难性后果。因此,疲劳裂纹的早期识别与干预是保障QC结构安全的关键环节。

2.2 腐蚀损伤

腐蚀损伤是QC在海洋服役环境中不可避免的另一类主要结构退化形式。与内陆地区相比,港口区域的高湿度、高盐分大气极大地加速了钢铁材料的电化学腐蚀过程。腐蚀现象不仅表现为构件表面的均匀减薄,更常见的是局部点蚀(坑蚀),后者因其深度大、隐蔽性强而更具危害性。水线附近区域由于干湿交替频繁,氧气供应充足,腐蚀速率尤为剧烈;而箱型梁、门腿等封闭或半封闭腔体内部则因通风不良、易积水积尘,形成稳定的腐蚀电池,导致内部腐蚀难以被及时发现。此外,防腐涂层一旦因机械刮擦、紫外线老化或施工质量不佳而破损,基材将迅速暴露于腐蚀介质中,加速锈蚀进程。不同金属材料的接触还可能引发电偶腐蚀,进一步加剧局部损伤。更为严重的是,腐蚀与疲劳之间存在强烈的协同效应:腐蚀坑不仅直接削弱构件的有效承载面积,降低其静强度,更会成为新的应力集中源,显著加速疲劳裂纹的萌生与扩展。

2.3 结构变形与失稳

结构变形与失稳通常是疲劳和腐蚀长期累积损伤的外在表现,也可能是超载、碰撞或基础沉降等偶然事件的直接结果。主梁下挠、门框扭曲、梯形架倾斜等超出设计允许公差的现象,不仅影响小车运行的平稳性和定位精度,更会改变整机的载荷传递路径,诱发新的应力集中区域,形成“损伤—变形—新损伤”的恶性循环。对于受压构件,如门腿腹杆或主梁的受压翼缘,当所受压力接近其屈曲临界载荷时,可能发生突然的失稳破坏。这种失稳往往没有明显预兆,破坏具有突发性。结构变形的成因是多方面的:一方面,在长期高应力作用下,材料可能发生缓慢的蠕变与应力松弛;另一方面,局部疲劳裂纹和腐蚀坑

的累积会显著降低结构的整体刚度,使其在正常工作载荷下产生过大变形^[2]。此外,制造或安装过程中存在的初始几何缺陷(如构件初弯曲)会降低屈曲稳定性,而大车轨道不平顺或码头地基的不均匀沉降则会改变结构的边界约束条件,引入附加内力,进一步加剧非预期变形的风险。因此,对结构几何形态的持续监测是评估其整体健康状态不可或缺的一环。

3 预防性维护策略构建

3.1 多层次状态监测体系

为有效应对上述复杂多样的结构故障模式,必须构建一个覆盖宏观到微观、静态到动态的多层级状态监测体系。该体系的第一层级以人工巡检与专业无损检测为主,通过定期组织经验丰富的技术人员对高风险区域进行目视检查,记录涂层剥落、锈蚀斑块、明显变形等宏观异常,并辅以超声波、磁粉或渗透等无损探伤技术,对重点怀疑部位进行深度检测,以精确定位和量化潜在的内部或表面裂纹。第二层级则依托在线传感器网络,实现对结构状态的实时、连续感知。在关键测点布设光纤光栅或电阻应变片,可捕捉结构在各种作业工况下的真实应力响应,用于反演实际载荷谱并识别异常应力集中;加速度传感器则用于监测结构的振动特性,其固有频率、阻尼比等模态参数对刚度变化极为敏感,是诊断裂纹、连接松动等损伤的有效手段;同时,部署腐蚀探针或采用电化学噪声技术,可实时量化特定位置的腐蚀速率;倾角仪与高精度定位系统则共同监控整机的姿态与位移,为判断基础沉降或整体失稳提供依据。在此基础上,第三层级致力于构建QC的数字孪生模型,将物理世界采集的多源异构数据实时同步至虚拟空间,通过集成设计参数、材料性能、历史维修记录与实时工况,动态仿真结构的应力场、应变场及损伤演化过程,为故障预测与健康管理的可视化决策平台。

3.2 数据驱动故障诊断与寿命预测

海量监测数据的价值在于通过先进的数据分析方法挖掘其内在规律,从而实现从“感知”到“认知”的跃升。首先,可利用机器学习算法,如支持向量机、孤立森林或自编码器,建立结构在健康状态下的正常行为基准模型。当实时监测数据显著偏离该基准时,系统即可自动触发早期异常预警,提示可能存在潜在损伤。其次,结合从小车、起升机构PLC系统获取的实际作业循环数据(即实测载荷谱)与结构关键点的应力响应,可以采用Miner线性累积损伤理论或更先进的非线性疲劳模型,对高风险部位进行精细化的剩余疲劳寿命评估。这一过程不再依赖于保守的设计假设,而是基于设备的真

实使用强度,大大提高了预测的准确性^[3]。最后,针对海洋环境下的特殊挑战,有必要建立腐蚀-疲劳耦合寿命模型。该模型需综合考虑腐蚀深度、腐蚀坑的几何形状及其对应力集中系数的放大效应,从而更真实地反映在腐蚀与交变载荷共同作用下结构的损伤演化规律,为制定科学的维护窗口提供理论依据。

3.3 基于风险的维护决策优化

预防性维护的终极目标是在保障安全的前提下,实现运维成本的最优化。为此,必须引入基于风险的检验(Risk-Based Inspection, RBI)理念,将技术判断与经济决策有机结合。具体而言,需要对每一个识别出的潜在故障模式进行系统性的风险评估。该评估过程包含两个核心维度:一是故障发生的概率,这主要依据前述的数据驱动寿命预测结果进行量化;二是故障后果的严重程度,需通过失效模式与影响分析(FMEA)等方法,综合考量其对人员安全、环境、生产中断时长及直接经济损失等多方面的影响。将发生概率与后果严重程度相乘,即可得到该故障模式的风险值。基于此风险值,可以对所有待处理的维护项目进行优先级排序,确保有限的资源首先投入到高风险项上。更重要的是,维护计划不再是僵化的日历驱动模式,而是能够根据最新的监测数据和动态更新的风险评估结果进行灵活调整。例如,若某关键焊缝的裂纹扩展速率经监测证实远低于预期,则可安全地延长其下一次详细检测的周期;反之,若风险值急剧升高,则需立即启动应急预案,安排紧急维修,从而真正实现“该修才修,修必修好”的精准维护。

3.4 维护执行与闭环反馈

预防性维护策略的成功实施,离不开高效的执行机制与持续的学习能力。一旦维护决策确定,必须制定详尽的维修技术方案,明确修复工艺(如打磨止裂、焊接修补或采用碳纤维复合材料加固)、严格的质量控制流程以及科学的验收标准,确保维修效果达到预期。维修完成后,所有相关信息——包括故障根本原因、维修过程细节、所用材料、检测验证结果以及操作人员的经

验总结——都应被系统性地录入设备健康管理数据库,形成可追溯、可复用的知识资产^[4]。这些沉淀下来的知识,反过来又可用于校准和优化数字孪生模型中的损伤演化算法,或改进机器学习模型的训练集,使其在未来能做出更准确的诊断与预测。通过这种“监测—诊断—决策—执行—反馈—学习”的完整闭环,预防性维护体系得以不断自我进化,其可靠性与智能化水平将持续提升,最终实现港口大型装卸设备全生命周期管理的卓越运营。

4 结语

岸边集装箱起重机作为港口的“心脏”,其结构安全不容有失。本文系统剖析了QC金属结构面临的三大典型故障模式——疲劳裂纹、腐蚀损伤和结构变形/失稳,并揭示了其背后的力学与环境耦合机理。在此基础上,提出了一套融合多源感知、数据智能与风险管理的预防性维护策略框架。该策略通过构建多层次状态监测体系,运用数据驱动方法进行精准诊断与寿命预测,并以风险评估为核心优化维护决策,最终实现了维护模式从被动响应到主动预防的根本性转变。未来的研究方向将聚焦于更高精度的多物理场耦合损伤模型、更鲁棒的边缘计算与AI诊断算法,以及如何将单台设备的健康管理无缝集成到智慧港口的全局调度与运维体系中。

参考文献

- [1]秦仙蓉,赵俊陆,丁旭,等.岸边集装箱起重机结构系统故障模式及其影响分析[J].起重运输机械,2022,(20):58-61.
- [2]肖利涛,谢宛朋,韩元,等.基于整机系统分析的轨道式集装箱起重机吊具故障诊断方案[J].起重运输机械,2024,(06):65-70.
- [3]王云飞.集装箱正面吊运起重机抖动故障诊断分析[J].工程机械文摘,2025,(05):44-48.
- [4]张氢,李帅杭,陈星,等.基于无监督学习的岸边集装箱起重机关键部件故障诊断方法[J].起重运输机械,2022,(02):61-65.