

# 港口机械故障诊断及管理系统研究与进展

李 岩 张 磊 许文龙 刘明浩  
天津金岸重工有限公司 天津 300450

**摘 要:** 港口机械故障诊断及管理系统对保障港口作业高效安全意义重大。本文分析港口机械故障基础理论与特征,包括故障定义分类、形成机制及核心特征。阐述传统与现代智能诊断技术,梳理发展演进路径。介绍系统架构与功能设计,剖析国内外发展现状,指出复杂工况诊断精度不足、老旧设备改造难等关键问题,为系统优化与推广提供参考。

**关键词:** 港口机械;故障诊断;管理系统;智能技术;发展现状

**引 言:** 港口作为物流枢纽,其机械设备的稳定运行至关重要。港口机械作业环境复杂,长期处于高负荷、多工况状态,故障频发。故障不仅影响作业效率,还可能引发安全事故。传统诊断与管理方式难以满足需求,建立高效准确的故障诊断及管理系统迫在眉睫。研究港口机械故障诊断及管理系统,有助于提升港口设备管理水平,保障港口作业的连续性与安全性,推动港口智能化发展。

## 1 港口机械故障基础理论与特征分析

### 1.1 港口机械故障定义与分类

故障的核心界定标准以机械丧失规定功能为核心,质量管理体系相关标准明确指出,港口机械在预定使用条件下,无法完成设计规定的作业任务或性能指标低于允许范围的技术状态即可判定为故障。这一标准需要结合机械实际作业参数与设计规范开展综合判定,以此保障界定结果的客观性与准确性。按故障性质可划分为三类。突发性故障大多由外部瞬时强干扰引发,电压骤变、载荷冲击等都可能成为诱因,这类故障发生前通常没有明显征兆,表现出较强的偶然性<sup>[1]</sup>。渐进性故障则与机械使用过程中的性能劣化密切相关,故障程度会随着运行时间逐步加剧,设备精度缓慢下降就是其典型表现。复合型故障则融合了前两类故障的特点,既存在潜在的性能衰减趋势,又可能因突发因素的影响而触发故障显现。按故障部位分类需要结合港口机械的结构组成展开。结构件故障常见于门座起重机臂架、集装箱岸桥主梁等承载部件,变形、开裂是其主要表现形式。传动系统故障涉及齿轮箱、联轴器等关键部件,往往会导致动力传递中断或效率降低。控制系统故障则集中在可编程逻辑控制器模块、传感器等电子元件,容易引发设备运行逻辑紊乱。

### 1.2 港口机械故障形成机制

机械磨损与疲劳老化机制是故障形成的基础。根据摩擦学理论,运动副间的粘着磨损、磨粒磨损会逐步破坏配合精度,而交变载荷作用下的疲劳裂纹扩展,最终会导致部件失效,这一过程与线性累积损伤理论的描述相契合。环境因素影响机制同样不可忽视。港口潮湿环境引发的电化学腐蚀会削弱金属部件强度,散货作业产生的粉尘进入运动副会加剧磨损,昼夜温差导致的热胀冷缩则会引发部件配合间隙变化,这些因素都会加速故障的形成进程。运行负荷与操作因素直接影响故障发生概率。长期超载运行会使机械应力超过设计许用值,违规操作如急停、猛启等会产生冲击载荷,破坏机械运行稳定性。相关统计数据显示,规范操作能够使港口机械故障发生率降低三成以上。多因素耦合故障的形成逻辑更为复杂。各因素并非独立作用,而是相互促进形成叠加效应。例如腐蚀造成的表面缺陷会成为疲劳裂纹的萌发点,振动负荷则会加速裂纹扩展,最终导致故障提前发生。

### 1.3 港口机械故障核心特征

故障关联性体现在部件间的故障传导特性上。港口机械各系统高度集成,某一部件发生故障后,可能通过动力传递或信号传输引发连锁反应,液压系统泄漏会导致执行机构动力不足,进而影响整机作业效率就是典型案例。故障隐蔽性与延迟性表现较为突出。部分故障如疲劳裂纹在初期难以通过常规检测发现,且故障诱因与故障显现之间存在时间差,等到外观表现明显时,故障往往已经发展至严重阶段。运行工况对故障特征存在干扰性。不同作业负荷、作业频率下,故障表现形式存在差异。同类型轴承在轻载与重载工况下,失效时的振动频率特征就截然不同,这给故障诊断工作带来了不小的

挑战。不同机械类型的故障特征差异显著。集装箱机械故障多集中于起升与平移系统，散货机械故障则以输送系统和结构件磨损为主，这种差异与机械的作业对象和结构设计有着直接关联。

## 2 港口机械故障诊断核心技术体系

### 2.1 传统故障诊断技术

振动监测诊断技术以机械动力学为原理，通过采集设备振动信号分析故障特征。频率、幅值及相位等是其核心分析指标，依据机械振动评价相关标准，能够有效识别旋转机械的不平衡、不对中问题，在齿轮箱、电机等部件诊断中应用广泛。温度监测诊断技术分为接触式与非接触式两类。接触式测温如热电偶测温依托热传导实现，精度较高但需要直接安装；非接触式测温如红外测温通过接收热辐射完成检测，适用于高温、高速等不便接触的场景，两类方式相互补充能够满足不同监测需求<sup>[2]</sup>。油液分析技术通过检测油样状态关联设备故障情况。利用光谱、铁谱分析法识别磨损颗粒的成分与数量，结合黏度、水分等油质指标变化，能够判断润滑系统劣化及运动副磨损程度，是液压与传动系统诊断的重要手段。声信号诊断技术借助声特性差异判断故障。噪声监测可捕捉设备运行过程中的异响，超声监测则利用超声波穿透性检测内部缺陷，二者依据声学传播规律，分别适用于表面故障与内部隐患的初步排查。传统诊断技术的优势在于成熟可靠，局限性则表现为对复杂故障的识别能力不足。

### 2.2 现代智能诊断技术

机器学习诊断技术中，监督学习通过已标注故障数据训练模型，能够实现故障类型的精准分类；无监督学习则无需先验知识，可自动挖掘未标记数据中的异常模式，两类方法能够适配不同数据条件下的故障识别需求。深度学习诊断技术依托神经网络强大的特征提取能力。卷积神经网络擅长处理振动、图像等二维信号，循环神经网络则适用于时序监测数据，各类模型根据信号特性适配不同诊断场景，有效提升了复杂故障的识别精度。模糊诊断与专家系统以领域知识为核心。通过模糊数学处理不确定信息，专家系统则将专家经验转化为推理规则，依据知识表示与推理机制，模拟人工诊断流程完成故障判断。数据融合诊断技术致力于整合多源信号。采用特征层、决策层等融合方式，结合不同技术优势降低单一信号的误判率，其技术突破在于提升诊断可靠性，应用瓶颈则集中在多源数据处理与融合算法的复杂度上。

### 2.3 诊断技术的发展演进路径

诊断技术的发展演进路径清晰呈现多维度升级态势。技术实现从离线诊断到在线实时诊断的转变，依托传感器与5G通信技术进步，配合边缘计算节点的毫秒级响应能力，能够实现故障的实时捕捉与及时预警，大幅降低停机损失，山东港口日照港的智慧运维平台已通过该模式将故障响应时间压缩至秒级。诊断逻辑完成从经验驱动到数据驱动的升级，海量监测数据替代传统经验，显著提升诊断的客观性与科学性，秦港股份的设备管理系统便基于十年运行数据构建了精准诊断模型。技术应用呈现从单一技术到多技术融合的趋势，通过组合互补形成完善诊断体系，更好满足复杂设备的诊断需求。

## 3 港口机械故障管理系统架构与功能设计

### 3.1 系统核心架构设计

硬件层由传感器网络、数据采集终端及传输设备协同构成。传感器网络按功能安全相关标准部署，全面覆盖振动、温度等关键参数采集；数据采集终端具备边缘计算能力，可对数据进行预处理；传输设备结合第五代移动通信技术与工业以太网，保障数据传输的稳定性，为系统运行提供坚实硬件支撑。数据层聚焦数据全生命周期管理<sup>[3]</sup>。采用分布式数据库实现海量数据存储，通过数据清洗、归一化等预处理操作提升数据质量。数据安全设计依据信息安全相关标准，采用加密与访问控制措施防护数据，确保数据可用可信。算法层构建多元化算法资源池。诊断算法库整合传统与智能诊断方法，预测模型库基于设备退化数据训练构建，决策支持算法则结合成本与效率指标输出优化方案，各类算法按需调用支撑系统核心功能。应用层按业务需求划分功能模块，各模块遵循模块化设计原则，交互逻辑符合工业软件操作规范。架构设计遵循扩展性与兼容性原则，采用微服务架构便于功能扩展，通过标准化接口适配不同品牌港口机械，有效提升系统适用性。

### 3.2 系统核心功能模块

数据采集与传输模块以实时性和数据质量为核心。通过时钟校准技术保障数据时间一致性，建立数据校验机制过滤异常数据，确保上传数据能够准确反映设备状态，为后续诊断工作提供可靠输入。故障诊断与预警模块构建标准化诊断流程。结合设备历史数据与运行参数设定动态预警阈值，诊断发现异常后立即触发分级预警，通过声光与系统消息等方式通知相关人员，实现故障的早发现早处理。故障信息管理模块记录故障全维度信息。涵盖故障发生时间、部位、原因等内容，支持按设备类型、故障模式进行分类统计，形成可追溯的故障数据库，为设备改进提供有力数据支撑<sup>[4]</sup>。维护计划生

成模块依据诊断结果匹配维护策略。基于可靠性维修理论,针对不同故障类型自动生成保养维修计划,明确维护内容、周期与备件需求,显著提升维护工作的针对性。设备健康状态评估模块构建多维度健康指数。整合设备运行参数、故障历史、维护记录等指标,通过可视化图表展示设备健康趋势,帮助管理人员直观掌握设备状态。

### 3.3 系统开发关键技术考量

系统开发关键技术考量需兼顾兼容性与实用性。多设备接入依赖标准化接口设计,运用MODBUS等工业通信协议实现不同设备统一接入,破解国外厂家数据壁垒,有效降低集成难度,设备集成时间可从2周大幅缩短至1周。海量数据处理采用流计算与分布式存储架构来应对需求,配合国产化芯片模组提升数据处理效率,宁波港的设备诊断系统便通过该方案实现日均百万级数据的实时处理。系统界面设计注重易用性,模块化布局简化流程,针对港口作业优化显示,操作步骤从10步减至5步。与现有管理系统通过接口交互数据、用映射技术保障协同,实现无缝对接,中伟视界预警平台已通过该方式完成与皮带机PLC系统的联动。同时引入智能预警与自适应优化机制,进一步强化了系统在复杂工况下的稳定性和实时响应能力,为港口运营的持续优化与智能化转型提供了坚实的技术底座。

## 4 港口机械故障诊断及管理系统的发展现状与关键问题

### 4.1 国内外研究与应用现状

国外技术发展呈现系统集成化特征,欧美企业依托成熟工业基础,开发的诊断系统具备完善的预测功能与全球化服务能力。其应用特点体现在标准化程度高,可适配多品牌设备,西门子开发的机械设备健康管理平台已在鹿特丹港等大型枢纽实现规模化应用。国内研究近年来进展显著,在本土化适配方面成果突出。科研机构针对国内港口多工况、高负荷的作业特点,优化诊断算法参数,开发出适应散货、集装箱等不同场景的专用系统。振华重工等企业的智能诊断系统已在沿海主要港口完成部署,实现诊断精度与本土需求的精准匹配。当前系统主流技术路线以传统技术与智能算法融合为主,应用水平已从单一故障识别升级为健康状态综合评估。多数系统可实现基础故障预警,但高端预测功能在复杂场

景下的应用仍处于完善阶段,与国际先进水平存在一定差距。

### 4.2 系统发展的关键问题与制约因素

复杂工况下诊断精度与稳定性不足的问题尤为突出。港口粉尘、振动等干扰因素容易导致监测信号失真,影响算法判断准确性,极端天气下这一问题更为明显,成为系统可靠运行的主要障碍。老旧设备智能化改造面临双重制约。这类设备缺乏标准数据接口,技术适配需要额外定制改造方案,同时改造费用占设备残值比例较高,企业投入意愿受限,导致改造进程缓慢。多源数据融合中安全防护与标准化缺失问题凸显<sup>[5]</sup>。数据跨系统传输时的加密技术尚不完善,不同设备数据格式差异较大,行业内缺乏统一标准,增加了融合难度与数据泄露风险。技术成果向实际运营转化存在衔接障碍。实验室环境下的算法性能难以直接迁移至复杂现场,技术人员与运营团队的沟通偏差,也导致系统功能与实际需求脱节。系统高可靠性需求与实用化成本的平衡同样棘手,提升冗余设计保障可靠性会显著增加投入,制约中小港口的应用普及。

### 结束语

港口机械故障诊断及管理系统在保障港口稳定运行中发挥着关键作用。尽管当前在诊断精度、老旧设备改造、数据融合等方面存在诸多挑战,但随着技术不断进步与创新,这些问题将逐步得到解决。通过持续优化系统架构、提升算法性能、加强标准制定等举措,港口机械故障诊断及管理系统将不断完善,为港口的高效运营和智能化发展提供更有力的支撑。

### 参考文献

- [1]肖炳林,何威誉,赵伟龙,等.港口机械故障诊断及管理系统研究与进展[J].起重运输机械,2025(6):25-33.
- [2]陈彦彬.振动在线监测系统在港口机械中的应用分析[J].造纸装备及材料,2022,51(5):57-59.
- [3]梁家源.港口工程机械设备的管理与信息化建设路径研究[J].中国设备工程,2024,(20):43-45.
- [4]王国江.基于边缘计算的港口机械设备数据分析与实时监控研究[J].中国机械,2024,(12):95-98.
- [5]张伟.港口机械液压系统常见故障及其修复技术研究[J].机械工程师,2023(12):45-50+89.