

港口起重机电气控制系统故障诊断与智能预警技术研究

李兰盛

北部湾港防城港码头有限公司 广西防城港 538000

摘要: 港口起重机是港口物流的核心装备,其电气控制系统的稳定性直接影响港口作业效率和安全。针对传统故障诊断效率低和预警滞后等问题,本文结合传感器技术及机器学习算法和多源数据融合方法,系统研究适用于港口起重机电气控制系统的智能化故障诊断与预警技术。通过分析系统组成及工作原理和常见故障特征来构建基于数据驱动的诊断模型和分层预警体系,为提升港口起重机运行可靠性、降低维护成本提供技术路径和实践参考。

关键词: 港口起重机; 电气控制系统; 故障诊断; 智能预警; 传感器技术

1. 引言

港口起重机承担港口货物装卸的核心任务,其电气控制系统集成电机驱动和PLC控制变频调速等关键模块,负责执行起升、运行、变幅等复杂动作。随着港口自动化和智能化升级,电气控制系统的集成度和复杂度显著提升,电机故障和变频器异常等隐患频繁发生,而传统人工巡检和经验判断的诊断方式难以满足实时性以及精准性需求,常导致停机损失和安全风险。因此研究基于数据驱动的智能故障诊断与预警技术对保障港口作业连续性和提升设备全生命周期管理水平具有重要现实意义。

2. 港口起重机电气控制系统概述

2.1 系统组成结构

港口起重机电气控制系统由五大模块构成,分别是动力模块包括电动机、变频器与软启动器,为机械机构提供动力源;控制模块以PLC或DCS为核心,实现逻辑控制和参数调节;检测模块通过电流、电压、振动、温度等传感器实时采集运行数据;执行模块由接触器、继电器等元件组成,执行控制指令驱动机械动作;人机交互模块通过触摸屏与监控软件实现人机信息交互。各模块协同工作,保障起重机精准完成装卸任务。

2.2 工作原理

系统通过传感器实时采集电机转速、电流、温度等参数,传输至PLC或上位机进行处理。控制模块根据预设逻辑和算法(如PID控制),输出信号至执行机构调节电机状态。例如,起升过程中,编码器反馈卷筒位置,变频器根据负载自动调整电机频率,PLC通过闭环控制维持起升速度稳定,

实现货物的精准定位和安全装卸^[1]。

2.3 常见故障类型及特点

系统常见故障包括电机故障(占比35%,如绕组短路、轴承磨损)、变频器故障(25%,如模块损坏、电容老化)、传感器故障(15%,如信号漂移)、线路故障(10%,如接线松动)及软件故障(10%,如程序逻辑错误)。这些故障具有隐蔽性(初期征兆不明显)、关联性(单一故障可引发连锁反应)及时变性(随负载与环境动态演变)等特点,增加了早期识别和精准诊断的难度。

3. 故障诊断与智能预警技术基础

3.1 传感器技术

传感器是港口起重机电气控制系统数据采集的基础单元,通过多元协同部署实现对设备运行状态的立体监测。霍尔效应电流/电压传感器可实时捕捉三相电压波动、电流异常等电气参数,其测量精度达 $\pm 0.5\%FS$,能精准识别电机绕组短路、变频器输入异常等早期电气隐患;加速度振动传感器(灵敏度 $\geq 100mV/g$)用于采集齿轮箱、电机轴承等机械部件的振动信号,通过分析振动幅值、频率分布(分辨率达 $0.1m/s^2$),可有效捕捉轴承磨损、齿轮啮合不良等机械故障的初期征兆;热电偶(精度 $\pm 0.5^\circ C$)与热电阻(精度 $\pm 0.3^\circ C$)覆盖变频器模块、电机绕组等关键发热部位,实时构建温度场分布模型,对温升速率超过 $0.5^\circ C/h$ 的异常热行为进行即时感知;高精度编码器(分辨率 $\leq 0.01^\circ$)通过实时反馈卷筒转速、小车位移等运动参数,为故障定位提供时空基准。多类型传感器的协同布局,形成了覆盖电气参数、机械振动、热特性及运动状态的多维度数据采集

集网络，为后续故障诊断与智能预警提供了高密度、高保真的原始数据支撑^[2]。

3.2 信号处理技术

原始传感器信号需经预处理以提取特征，其中低通滤波与小波滤波去除噪声，时域分析通过均值、方差等统计量识别异常波动，频域分析利用傅里叶变换解析故障特征频率（如轴承故障特征频率），时频分析则通过小波变换处理非平稳信号，适用于变负载工况下的故障特征提取。

3.3 机器学习算法

机器学习为智能诊断提供核心算力支持，其中支持向量机(SVM)通过核函数解决小样本分类问题，随机森林(RF)利用多决策树投票机制提升精度，BP神经网络与卷积神经网络(CNN)可自动提取数据深层特征，适用于复杂故障模式识别；K-means等聚类算法用于无标签数据的异常状态聚类，辅助发现潜在故障模式。

3.4 数据通信与传输技术

数据通信与传输技术是连接港口起重机电气控制系统各环节的重要部分，其核心作用是实现多源异构数据的实时和可靠传输，为故障诊断与智能预警提供底层通信支撑。系统采用工业总线通信与无线通信双模式融合架构，其中工业总线通信以Modbus、PROFINET等协议为核心，构建高可靠性的有线通信网络，例如PROFINET基于以太网技术，支持实时数据传输（延迟 $< 1\text{ms}$ ）与设备自动拓扑发现，可将PLC控制器、变频器、传感器等设备快速接入系统，实现控制指令与运行数据的精准交互。而无线通信则通过5G、Wi-Fi等技术满足移动场景下的数据传输需求，5G网络的高带宽（理论峰值速率10Gbps）与低时延（ $< 10\text{ms}$ ）特性，可支持高清视频监控、实时振动数据等大流量数据的远程传输；Wi-Fi适用于起重机本地局域网部署，实现人机交互界面与监控系统的数据同步。

另外为应对港口复杂电磁环境下的数据传输挑战，系统引入边缘计算技术优化通信效率。在起重机本地部署边缘计算节点（如嵌入式工业计算机），对传感器原始数据进行实时清洗、特征提取与压缩（数据压缩比可达10:1），仅将关键特征参数（如电流有效值、振动特征频率能量）传输至云端或上位机，减少90%以上的无效数据传输，显著降低网络带宽压力与云端计算负载。同时，边缘节点支持数据缓存与断点续传功能，确保在通信中断时数据不丢失，网络恢

复后自动补传，保障数据链路的连续性。

与此同时系统采用时间敏感网络(TSN)技术实现多源数据的精准同步。通过IEEE802.1AS协议对振动传感器（采样率10kHz）、电流传感器（50Hz）等不同速率的数据源进行时钟同步，误差控制在微秒级，解决因时间不同步导致的故障特征错位问题，为多源数据融合分析提供基础保障^[3]。

数据通信与传输技术的综合应用，使港口起重机电气控制系统能够实时获取全域运行数据，支撑远程监控、故障溯源与预测性维护等智能化功能的落地，为构建“设备-边缘-云端”三级协同的智能诊断体系奠定通信基础。

4. 港口起重机电气控制系统故障诊断技术研究

4.1 基于数据驱动的故障诊断方法

该方法通过历史数据训练机器学习模型实现故障自动识别。以电机轴承故障为例，振动传感器采集正常、内圈故障、外圈故障等工况的信号，提取均方根、峭度、频谱能量等特征，利用SVM或CNN模型训练分类器，最终通过实时数据输入实现故障类型的在线判别，显著提升诊断效率与准确率。

4.2 故障树分析方法

故障树分析(FTA)以图形化逻辑结构演绎故障因果关系，适用于港口起重机电气控制系统的层级化故障定位，其构建流程包括顶事件定义、中间事件分解与底事件识别。首先确定顶事件（如“起重机无法响应操作指令”），然后逐层分解为电气系统故障（如电源失电或控制回路断路）与机械系统故障，针对电气部分进一步分解为一次回路故障（断路器跳闸或电缆老化）与二次回路故障（PLC模块损坏、继电器触点烧蚀），最终形成包含30-50个底事件的故障树。通过布尔代数运算（如“与门”“或门”逻辑）计算顶事件发生概率，结合底事件发生频率统计（如某型号接触器年故障率为0.8次/台），确定各底事件的重要度排序（如电源模块故障重要度达45%）。

4.3 多源信息融合诊断技术

多源信息融合诊断技术针对港口起重机电气控制系统“机电液气”多域耦合特性，融合电气参数（如变频器输出谐波含量）、机械参数（如制动器响应时间）、环境参数（如湿度、电网波动）等异构数据，通过证据理论或神经网络实现跨域特征关联。其核心步骤包括：

①数据配准：对不同采样率的振动（10kHz）与电

流(50Hz)信号进行时间同步,采用线性插值法统一至100Hz;

②特征级融合:构建包含电参数(均方根电流、功率因数)、机械参数(振动烈度、峭度值)、控制参数(PLC循环周期、I/O响应延迟)的多维特征向量;

③决策级融合:基于D-S证据理论对各传感器诊断结果进行置信度合成,例如当振动诊断为轴承故障置信度0.7、电流诊断置信度0.6时,融合后置置信度提升至0.89,显著降低单一传感器误判风险。

5. 港口起重机电气控制系统智能预警技术研究

5.1 故障预测模型构建

故障预测模型的核心是通过历史数据挖掘设备性能退化规律,实现从“状态监测”到“趋势预测”的跨越。在港口起重机应用中,以起升电机轴承故障预测为例,需首先构建多维度特征向量,采集振动信号的时域特征(峰值、峭度)、频域特征(轴承特征频率能量占比)、温度特征(温升速率)及电流特征(谐波畸变率),形成包含20-30个特征参数的数据集。采用长短时记忆网络(LSTM)建模时,需将数据划分为时间窗口(如10分钟/窗口),每个窗口内的时序数据作为模型输入,输出为未来1小时、1天或7天的故障概率值。

模型训练过程中,通过引入注意力机制(Attention Mechanism),可增强对关键特征(如振动信号中突发冲击成分)的权重分配,提升预测精度。例如,某港口25吨门座起重机的起升电机在实际运行中,当轴承进入磨损后期时,振动信号的峭度值会在24小时内从1.5跃升至3.2,而LSTM模型通过学习历史峭度变化趋势,可在异常波动前48小时预测到故障概率超过预警阈值(如80%)^[4]。此外结合迁移学习技术可将在同类设备上训练的模型快速迁移至新设备以减少小样本场景下的训练成本。

5.2 智能预警系统设计

智能预警系统需兼顾实时性与可扩展性,其架构设计需融合边缘计算与云端协同。在边缘层,部署工业级边缘计算网关(如研华UNO系列),实现传感器数据的实时采集(采样频率可达10kHz)、预处理(去噪、归一化)及初步特征提取,仅将关键特征参数(如振动有效值、电流均方根)传输至云端,可减少90%以上的数据传输量。云端平台采用微服务架构,集成机器学习服务(如TensorFlow Serving)、

时序数据库(如InfluxDB)及可视化模块(如Grafana),支持多台起重机的集群化监控。

系统功能设计需包含三大核心模块:①阈值预警模块,支持动态阈值设置(如根据负载变化自动调整电流阈值),避免传统固定阈值在变工况下的误报问题;②趋势预警模块,通过多项式拟合或指数平滑算法,对特征参数的变化速率进行分析,当温升速率超过0.5℃/h时触发预警;③健康度评估模块,基于层次分析法(AHP)综合多源数据,为设备生成0-100分的健康度指数,当指数低于60分时启动预警流程。某自动化码头试点应用显示,该系统将故障平均发现时间从人工巡检的4.2小时缩短至实时预警,预警准确率达92%。

5.3 预警信息发布与处理

预警信息的有效传递与闭环管理是系统落地的关键。在发布机制上采用分级分类策略,一级预警(如电机绕组温度超过130℃)通过硬接线直接触发控制柜紧急停机继电器,并同时向运维主管发送包含故障位置、类型的短信(如“#3起重机起升电机温度超限,建议立即停机检查”);二级预警(如变频器输入电压波动超过±10%)通过中控系统声光报警,并在操作界面高亮显示故障点,同时推送至运维人员手机APP,附带历史趋势曲线与相似故障案例链接;三级预警(如钢丝绳张力波动偏大)则在监控界面以黄色图标提示,自动生成巡检任务工单,纳入下一次定期维护计划^[5]。

另外处理流程的闭环管理通过区块链技术实现,运维人员接收预警后,需在APP中记录处理时间、措施及结果,数据上链存储不可篡改。系统自动统计各类型预警的平均响应时间(如一级预警平均响应时间需≤15分钟)、处理成功率等KPI,并生成季度预警分析报告,识别高频故障部件(如某型号接触器年均预警5次),为设备选型与设计改进提供数据支撑。某港口应用该机制后,故障处理闭环率从68%提升至95%,停机时间减少40%以上。

结语:本文围绕港口起重机电气控制系统的智能化需求,构建了“传感器数据采集—信号处理—机器学习诊断—分层预警”的完整技术体系。研究表明,数据驱动的诊断方法可提升故障识别准确率,智能预警系统能提前3-7天预测潜在风险,为设备维护从“事后维修”向“预知性维护”转型提供技术支撑。未来可进一步融合边缘计算与云计算,优化模型在复杂工况下的泛化能力,推动港口装备智能化与

低碳化升级。

参考文献:

- [1] 张瑞峰,高剑钊.基于CAN总线的移动式港口起重机分布式电气控制系统[J].机械工程师,2020,(09):84-86+89.
- [2] 黄晓辉.港口起重机电控系统优化研究[J].中国设备工程,2020,(05):130-131.
- [3] 何志渔,王素玲.变频调速技术在港口及船舶起重机械中的应用[J].中国修船,2002,(02):36-38.

[4] 向爱国,蔺伯文.交流变频调速系统在港口起重机上的应用研究[J].港口装卸,2001,(02):11-13.

[5] 刘清,黎明森.门座起重机电力传动控制系统CAD[J].港口装卸,1995,(02):7-9.

作者简介:李兰盛,出生年月日:1987.4.8,男,瑶族,籍贯:广西防城港市;学历:本科,职称:工程师,研究方向:门座起重机电气维保