

智能电动执行机构故障自诊断与自修复技术研究

雷震威 赵欣欣 黄文远 李佳荫 王泽健

中广核核电运营有限公司 广东 深圳 518000

摘要: 针对智能电动执行机构在复杂工况下的运行可靠性需求, 研究其故障自诊断与自修复技术。通过分析系统组成与故障机理, 构建多源信号采集与特征提取的自诊断体系, 实现故障精准识别。提出涵盖硬件冗余、解析冗余、软件重构与降级运行的多层次自修复策略。研究为提升工业自动化系统智能化水平与运行稳定性提供了技术支撑。

关键词: 智能电动执行机构; 故障自诊断; 自修复技术

引言: 智能电动执行机构作为工业自动化核心终端, 其可靠性直接影响生产安全。设备在长期运行中易发机械磨损、电气异常及控制失灵等故障, 且故障传播迅速。传统人工维护响应滞后, 难以满足高可靠性需求。因此, 研究故障自诊断与自修复技术, 对实现设备智能化、保障系统稳定运行具有重要意义。

1 智能电动执行机构结构与故障机理分析

1.1 智能电动执行机构的系统组成

智能电动执行机构是工业自动化控制系统的核心终端设备, 融合机械传动、电气驱动、智能控制与传感检测多领域技术, 可精准完成阀门、风门等设备的启停、调节与定位控制, 广泛应用于电力、化工、冶金等工业场景。其整体系统主要由四大核心单元构成, 各单元协同工作实现电能向机械能的精准转化与闭环调控。驱动单元以伺服电机为核心动力装置, 依托电磁感应原理提供旋转驱动力, 是设备运行的动力基础。传动单元由减速齿轮、蜗轮蜗杆、传动丝杆等构件组成, 负责降低电机转速、提升输出扭矩, 适配工业设备的负载运行需求。智能控制单元搭载微处理器、信号处理模块与通信模块, 承担指令接收、运算处理、运行调控等核心功能。传感反馈单元集成温度、力矩、位移、电流传感器, 实时采集设备运行状态参数, 形成闭环控制体系, 保障执行机构高精度、稳定化运行。

1.2 典型故障模式与机理分析

结合智能电动执行机构长期工业运行工况, 其典型故障可划分为机械故障、电气故障、控制故障与传感故障四大类, 各类故障具备差异化的发生机理与故障特征。机械故障以传动构件磨损、卡滞、松动为主, 长期交变负载、粉尘侵蚀、润滑失效会导致齿轮咬合间隙增大、蜗轮蜗杆磨损, 引发输出卡顿、定位偏差等问题, 是设备高发故障类型^[1]。电气故障主要包含电机缺相、绕组过热、线路老化、接触器失灵等, 多由电网电压波

动、过载运行、散热不良引发, 会直接导致动力输出异常、设备停机。控制故障源于主控芯片程序紊乱、模块虚焊、通信中断, 易造成指令响应滞后、控制失灵。传感故障表现为传感器精度漂移、信号失真、数据断传, 受高温、振动、电磁干扰影响显著, 会导致系统闭环调控失效, 引发执行机构超程、过力矩等次生故障, 严重影响工业系统运行稳定性。

1.3 故障传播路径分析

智能电动执行机构各单元高度耦合、关联紧密, 单一部件故障会沿固定路径逐级传播, 引发连锁故障, 扩大设备失效范围。其故障传播主要分为内部单元传播与系统联动传播两条核心路径。内部传播层面, 传感单元故障会向控制单元传递失真数据, 导致主控系统输出错误调控指令, 进而引发电机过载、传动机构异常受力, 最终造成机械与电气次生故障; 电气线路故障会导致动力输出不稳定, 加剧传动构件磨损, 形成恶性循环。系统联动传播层面, 执行机构自身故障会传导至前端工业控制网络, 引发阀门调节失效、管路流量异常等工艺故障, 影响整套自动化系统运行。明确故障传播路径, 可精准定位故障源头、阻断故障连锁扩散, 为故障诊断与自愈控制提供核心依据。

2 故障自诊断关键技术研究

2.1 多源信号采集体系

多源信号采集体系是智能电动执行机构故障自诊断的基础支撑, 可全方位、高精度获取设备运行的多维度状态信息, 打破单一信号采集的检测局限性。该体系依托分布式传感布局, 覆盖机械、电气、控制三大维度的核心运行参数, 构建全方位信号采集网络。机械状态层面, 部署振动、力矩、位移传感器, 实时采集传动机构振动幅值、输出力矩、行程位移等动态信号, 反映机械构件磨损与运行状态^[2]。电气状态层面, 通过电流、电压、温度采集模块, 监测电机工作电流、母线电压、

绕组温度等参数,捕捉电气回路异常特征。控制状态层面,依托通信接口采集主控指令、反馈信号、运行工况代码等数据,实现控制逻辑与通信状态的实时监测。整套采集体系具备高频采样、抗干扰、同步采集的特性,可过滤工业现场粉尘、电磁、振动干扰,保障多源信号的完整性与准确性,为后续信号处理与故障诊断提供可靠数据来源。

2.2 信号预处理与特征提取

工业现场采集的原始多源信号混杂大量噪声与干扰数据,无法直接用于故障诊断,需通过预处理与特征提取挖掘有效故障特征信息。信号预处理主要完成降噪、滤波、异常数据剔除与信号归一化处理,采用小波滤波、均值滤波算法去除电磁干扰、环境振动带来的高频噪声,通过阈值筛选剔除瞬变异常数据,同时统一不同维度信号的量纲与幅值范围,消除数据差异带来的检测误差,提升信号纯净度。在预处理基础上,开展多维度故障特征提取,针对时域信号提取峰值、有效值、波动系数等时域特征,反映设备运行稳定性;针对频域信号通过傅里叶变换提取频率、幅值、谐波分量等频域特征,捕捉构件磨损、电气异常的隐性故障特征。通过融合时频域特征,构建完善的故障特征数据集,精准区分正常运行、轻微退化、故障异常三种状态,为故障诊断算法的精准识别提供核心特征支撑。

2.3 故障自诊断算法研究

故障自诊断算法是实现智能电动执行机构自主故障识别、定位与定级的核心,相较于传统人工排查方式,具备高效、精准、实时的优势。现阶段主流自诊断算法包含模型驱动与数据驱动两类,适配不同故障场景检测需求。模型驱动算法依托设备动力学模型、电气特性模型,通过对比实际运行参数与理论标准参数的偏差,实现故障识别,适用于结构性、规律性故障的精准检测。数据驱动算法以机器学习、深度学习为核心,依托海量故障特征数据集,通过神经网络、支持向量机等模型完成故障特征训练,可精准识别隐性故障、复合故障,适配复杂工业工况。为提升诊断精度,优化后的融合算法结合两类算法优势,先通过数据驱动算法快速筛查异常状态,再通过模型驱动算法精准定位故障点位、判定故障等级,有效解决单一算法误诊率高、复杂故障识别能力弱的问题,实现故障实时诊断、精准定级与自动报错。

2.4 多源信息融合诊断策略

单一信号、单一维度的诊断方式存在信息片面性,难以应对智能电动执行机构的复合故障与隐性故障,多

源信息融合诊断策略可整合多维度数据,大幅提升故障诊断的全面性与准确性。该策略分为数据层、特征层、决策层三级融合架构,层层递进实现信息深度整合。数据层融合同步整合机械振动、电气参数、控制信号、温度工况等多源原始数据,实现数据互补,弥补单一数据的检测盲区。特征层融合对各维度提取的时频域故障特征进行关联整合,挖掘不同信号间的故障关联特征,破解复合故障特征重叠、难以区分的难题。决策层融合依托融合算法,综合各维度诊断结果,完成故障类型判定、故障位置定位与故障风险评级,输出最终诊断结论。该策略可有效降低工业干扰带来的诊断误差,解决单一信息诊断的局限性,大幅提升复杂工况下故障诊断的可靠性与通用性^[3]。

3 故障自修复策略与实现技术研究

3.1 自修复技术总体策略

智能电动执行机构故障自修复总体策略以“主动预判、自主修复、降级保运、安全兜底”为核心原则,构建全方位、多层次的自愈控制体系,有效降低设备故障停机率与运维成本。该策略立足设备全运行周期,结合前期故障诊断结果,针对不同故障类型、故障等级制定差异化修复方案,实现故障分类处置。对于传感器偏移、参数漂移、通信小幅异常等轻微隐性故障,采用实时在线修复模式,无需停机即可完成参数校正、信号重构与逻辑优化,保障设备持续稳定运行。对于硬件轻微失效、控制回路异常等中度故障,通过冗余切换、控制重构技术完成自主修复,规避故障扩大。对于严重机械损坏、电气短路等无法在线修复的重度故障,启动降级运行策略,限制设备部分功能,保障核心工艺稳定运行,同时输出故障预警,提示人工介入维修。整套策略融合硬件自愈、软件重构、降级调控多重手段,实现故障从预判、诊断到修复的全流程自主管控。

3.2 硬件冗余自修复技术

硬件冗余自修复技术是保障智能电动执行机构硬件故障快速自愈的核心物理手段,通过配置备用硬件模块,替代失效工作模块,实现设备无间断运行,适用于关键硬件失效故障修复。该技术主要包含传感冗余、驱动冗余、电源冗余三类核心应用。传感冗余为核心检测传感器配置备用传感单元,当主传感器出现精度漂移、信号中断等故障时,系统自动切换至备用传感器接管数据采集工作,同时对故障传感器进行隔离,保障状态检测不间断。驱动冗余针对电机驱动模块、功率模块配置备用驱动回路,主驱动模块过载、损坏失效时,快速完成回路切换,维持动力输出稳定。电源冗余通过双电源

切换设计,避免单电源故障导致设备整体停机。硬件冗余技术无需复杂算法运算,响应速度快、可靠性高,可快速解决关键硬件单点故障,杜绝硬件失效引发的系统停机,大幅提升设备运行容错能力与稳定性。

3.3 解析冗余与重构控制

解析冗余与重构控制属于无硬件冗余的智能化自愈技术,依托系统数学模型与算法优化,替代硬件冗余功能,有效降低设备硬件改造成本与结构复杂度。解析冗余通过设备动力学方程、电气特性方程构建精准的系统解析模型,当某一传感器或硬件模块失效、数据异常时,系统依托模型结合其他正常运行参数,推算出缺失、失真的运行数据,实现故障数据的重构与补偿,替代故障硬件的检测功能。重构控制则基于解析冗余的数据支撑,针对故障后的设备运行状态,实时优化控制算法参数、调整控制逻辑,重构闭环控制系统。当执行机构出现传动偏差、力矩不足等性能退化故障时,通过重构控制修正输出指令,补偿设备运行偏差,抵消故障带来的性能损耗。

3.4 软件层面的自修复

软件层面自修复聚焦控制系统程序、逻辑、参数的故障自愈,主要解决程序紊乱、参数漂移、通信异常、逻辑出错等软件类故障,是智能电动执行机构轻量化自愈的关键技术。其核心功能包含参数自校正、程序自修复、通信自适应三大模块。参数自校正可针对设备长期运行产生的定位参数、力矩参数、阈值参数漂移问题,依托实时运行数据与标准模型对比,自动修正控制参数,消除参数偏移引发的运行偏差。程序自修复具备程序异常复位、漏洞自检、卡死恢复功能,可实时监测程序运行状态,出现死循环、程序紊乱、指令卡死等问题时,自动完成局部程序重启与逻辑复位,无需整机停机。通信自适应可自主检测总线通信异常、信号延迟、数据丢包等问题,通过调整通信波特率、重构通信链路、纠错数据帧,恢复正常通信状态。

3.5 降级运行策略

降级运行策略是智能电动执行机构故障兜底保障技术,针对重度故障、无法通过自愈技术完全修复的故障场景,通过限制设备运行功能、降低运行指标,优先保障工业核心工艺连续运行,规避突发停机引发的生产事故与设备损坏。该策略依据故障等级划分多级降级模式,分级精准管控运行状态。一级降级针对中度硬件或软件故障,保留设备基本调节功能,限制高精度定位、快速响应等附加功能,降低运行负荷,避免故障加剧^[4]。二级降级针对严重传动、电气故障,关停自动调控功能,切换为手动控制模式,保障设备可人工干预运行,维持基础工艺工况。三级降级为紧急兜底模式,针对重大故障,设备锁定安全位置,停止动态运行,杜绝故障扩散引发的过载、短路、设备损毁等次生风险。降级运行过程中,系统持续记录故障数据、发出预警信号,为后续人工精准维修提供依据,平衡设备运行安全性与生产连续性。

结束语

研究构建了智能电动执行机构故障自诊断与自修复技术体系,实现了从故障感知、精准诊断到自主修复的闭环管控。该技术显著提升了设备运行可靠性与智能化水平,降低运维成本。未来将进一步优化算法实时性,拓展自修复场景,推动技术在工业领域的深度应用与推广,助力工业自动化系统向更高层次发展。

参考文献

- [1]赵荣泳,沈周杰,丁戌卫,等.超超临界燃煤机组电动执行机构智能服务技术综述[J].自动化仪表,2026,47(1):1-9.
- [2]杨琦,朱涛涛,佟洁.核电站智能型电动执行机构数据库探索与运用[J].仪器仪表用户,2023,30(11):33-36,25.
- [3]乔磊.基于智能型嵌入式电动执行机构控制器设计[J].电工技术,2023(2):107-108,122.
- [4]曾海云,于海生,王晓洋,等.某系列电动执行机构阀门跳变故障的研究与处理[J].中国设备工程,2023(z2):1-3.