

电动执行机构故障容错控制与健康状态监测系统设计

薄之勇

中广核核电运营有限公司 广东 阳江 529941

摘要: 本文聚焦电动执行机构,先分析其故障模式与机理,明确故障对系统性能的影响。进而设计故障容错控制系统,采用分层冗余架构,融合“模型预测+数据驱动”的FDI方法,提出自适应容错控制策略。同时设计健康状态监测系统,涵盖参数选择、特征提取、RUL预测及硬件设计。通过一体化软件平台与硬件在环实验平台验证,结果表明系统能精准诊断故障、稳定容错控制、有效监测健康,满足工业需求。

关键词: 电动执行机构;故障容错控制;健康状态监测(PHM);预测性维护;嵌入式系统

引言: 在工业自动化领域,电动执行机构作为关键设备,其运行稳定性直接影响生产安全与效率。而在复杂工况下机械磨损、电气故障及控制异常等问题频发,传统维护方式难以满足高可靠性需求。本文针对电动执行机构,系统开展故障模式与机理研究,提出分层冗余架构的容错控制系统,结合“模型预测+数据驱动”的FDI方法与自适应控制策略,同时设计全生命周期健康监测系统,通过理论创新与实验验证,为工业设备智能化运维提供新思路。

1 电动执行机构故障模式与机理分析

1.1 故障机理建模

电动执行机构故障机理建模需基于故障分类,运用多学科方法构建精准模型。针对机械故障(如齿轮磨损),结合摩擦学与材料力学理论,建立磨损量与运行时间、载荷、润滑状态的函数关系,用阿查德磨损公式量化进程,并考虑温度对材料硬度的影响修正参数。电气故障(如电机绕组烧毁)则通过电路仿真搭建等效电路,分析电流过载、绝缘电阻下降与温度升高的耦合关系,利用热传导方程描述温度变化,明确绝缘失效临界条件。控制系统故障建模采用信号流图与状态空间方程结合,通过MATLAB/Simulink仿真模拟控制信号失真、延迟对输出的影响,复现故障工况响应,确保模型准确反映故障演化规律。

1.2 故障对系统性能的影响

电动执行机构故障对系统性能影响显著,减速器齿轮磨损增大传动间隙,输出位移滞后,控制精度从 $\pm 0.5\%$ 降至 $\pm 2\%$ 以上;轴承卡滞增加阻力,电机功率损耗上升,阶跃响应时间由0.3s延长至0.8s;编码器信号失真致位置反馈偏差,引发频繁启停或超调,破坏稳定性;电机绕组短路使输出扭矩波动,影响工艺参数。控制系统中,反馈回路异常使闭环控制失效,执行机构开环运行,无

法按被控量调整输出,可能引发超压、超温等危险,甚至造成生产中断与设备损坏^[1]。

2 电动执行机构故障容错控制系统设计

2.1 容错控制架构设计

电动执行机构容错控制架构采用“分层冗余+智能决策”的模块化设计,分为感知层、决策层、执行层与冗余层。感知层整合多传感器数据,实时采集电机电流、转速、温度、阀门位移及振动信号,通过CAN总线实现数据高速传输。决策层以嵌入式控制器为核心,集成故障诊断模块、容错决策模块与控制算法模块,采用模糊逻辑与专家系统结合的方法,根据故障类型与严重程度生成容错策略。执行层包含主执行机构与备用执行单元,主机故障时通过电磁离合器快速切换至备用单元,切换时间控制在0.5s内,确保控制连续性。冗余层设计涵盖传感器冗余、控制器冗余与电源冗余,传感器采用“三取二”表决机制,控制器采用双机热备模式,电源配备UPS不间断供电系统。架构通过工业以太网实现各层数据交互,支持在线故障诊断、容错策略更新与远程监控,确保故障工况下系统仍能维持额定性能70%以上。

2.2 故障检测与隔离(FDI)方法

电动执行机构故障检测与隔离方法采用“模型预测+数据驱动”的融合策略。故障检测阶段,基于建立的执行机构数学模型生成预测输出,通过卡尔曼滤波器对电机电流、位移等实测信号进行滤波处理,计算预测值与实测值的残差;设定动态阈值区间,当残差超出阈值且持续3个采样周期时触发故障警报,动态阈值根据运行工况通过自适应算法实时调整。故障隔离阶段,构建故障特征矩阵,结合小波包变换提取振动信号的高频特征与电流信号的谐波特征,通过支持向量机(SVM)建立分类模型,对机械磨损、电气短路、控制信号失真等12类典型故障进行分类识别,识别准确率达95%以上^[2]。针对

多故障耦合场景,采用贝叶斯网络构建故障传播模型,分析故障间因果关系,实现多故障的精准定位与隔离;设计故障隔离逻辑模块,通过继电器阵列切断故障部件回路,避免故障扩散,隔离时间不超过1s。

2.3 自适应容错控制策略

电动执行机构自适应容错控制策略依据故障严重程度分级处理:轻度故障(如轻微齿轮磨损)采用滑模变结构控制,利用扩张状态观测器估计扰动与故障影响,实时补偿控制量,使定位误差控制在 $\pm 1\%$ 内;中度故障(如电机扭矩下降)触发控制律重构,基于模型参考自适应控制理论,以健康状态输出为参考模型,通过李雅普诺夫准则设计自适应律调整PID参数,阶跃响应超调量低于10%;重度故障(如主电机烧毁)启动冗余切换,快速转移控制权至备用单元,并用模糊PID算法抑制切换冲击,位置波动不超过额定行程的5%。策略集成在线参数辨识模块,通过递推最小二乘法实时更新模型参数,确保容错控制适应不同故障场景与运行环境,兼顾适应性与鲁棒性。

3 健康状态监测系统设计

3.1 监测参数选择与传感器布局

电动执行机构健康状态监测参数选择遵循“关键性能关联+故障敏感”原则,确定10项核心监测参数。机械系统选取振动加速度、轴承温度、阀杆位移、传动机构噪声4项参数,振动加速度反映齿轮磨损与轴承缺陷,轴承温度监测热失效风险,阀杆位移直接关联控制精度,噪声信号辅助判断机械间隙变化。电气系统选取电机定子温度、三相电流、绕组绝缘电阻、编码器输出信号4项参数,定子温度与三相电流监测电机过载及短路故障,绝缘电阻预警电气绝缘失效,编码器信号反映位置反馈精度。控制系统选取控制信号延迟时间、输出扭矩2项参数,直接关联控制性能与负载状态。传感器布局采用“关键部位全覆盖+信号无干扰”方案,振动传感器安装于减速器输入端与输出端,温度传感器嵌入电机定子与轴承座,位移传感器采用非接触式激光传感器安装于阀杆末端,电流传感器串联于电机供电回路,噪声传感器布置于传动机构侧方10cm处,所有传感器通过屏蔽线缆连接数据采集模块,避免电磁干扰。

3.2 特征提取与健康指标构建

电动执行机构健康状态特征提取采用“时域-频域-时频域”多域融合方法。时域特征提取针对振动、电流等信号,计算峰值、均值、方差、峭度、脉冲指数等12项统计指标,其中峭度对冲击性故障敏感,可早期识别轴承点蚀。频域特征通过快速傅里叶变换(FFT)将时域

信号转换至频域,提取特征频率、谐波幅值、频谱重心等8项指标,齿轮故障特征频率可通过齿数与转速计算得到,用于识别齿轮磨损。时频域特征采用小波包变换,将信号分解至5层8个频段,提取各频段能量熵、信息熵等6项指标,有效捕捉非平稳故障信号的瞬时特征。健康指标构建采用层次分析法,将多域特征划分为机械健康、电气健康、控制健康3个一级指标,15个二级指标,通过专家评分与熵权法确定各指标权重,采用加权求和方式计算综合健康指数(CHI),取值范围0-1,CHI ≥ 0.8 为健康状态,0.6 \leq CHI < 0.8 为亚健康状态,CHI < 0.6 为故障预警状态,实现健康状态的量化评估。

3.3 剩余使用寿命(RUL)预测

电动执行机构剩余使用寿命预测采用“退化模型+数据驱动”的融合预测方法。首先基于性能退化数据建立基础退化模型,选取综合健康指数(CHI)作为退化指标,通过威布尔分布拟合退化轨迹,确定CHI从0.8降至0.6的退化周期作为寿命基准。数据驱动预测采用长短期记忆网络(LSTM),构建包含输入层、3个隐藏层、输出层的神经网络模型,输入层为多域特征参数与运行工况参数(负载、转速、环境温度),输出层为剩余使用寿命预测值^[1]。模型训练过程中,采用设备全生命周期数据(包含健康、亚健康、故障阶段)构建数据集,划分为训练集(70%)、验证集(20%)、测试集(10%),通过自适应动量优化算法(Adam)优化模型参数,抑制过拟合。引入在线更新机制,每采集100组运行数据后对模型进行微调,结合滚动预测策略,每小时更新一次剩余使用寿命预测结果,预测误差控制在10%以内。针对突发故障场景,设置预测修正模块,根据故障严重程度实时调整预测结果,提高预测准确性。

3.4 监测系统硬件设计

电动执行机构健康状态监测系统硬件采用“模块化+高可靠性”设计,由数据采集模块、信号处理模块、存储模块、通信模块与供电模块组成。数据采集模块选用16位高精度ADC芯片,采样率可达10kHz,支持8路模拟信号(振动、温度)与4路数字信号(电流、编码器)同步采集,输入阻抗 $\geq 10M\Omega$,确保信号采集精度。信号处理模块以STM32H743微控制器为核心,集成信号滤波、放大与特征提取功能,通过硬件滤波电路滤除50Hz工频干扰,采用仪表放大器将微弱振动信号放大1000倍,确保信号信噪比 $\geq 40dB$ 。存储模块采用“本地+云端”双存储架构,本地配备128GB SSD固态硬盘,存储实时采集数据与特征参数,云端通过4G/5G模块将数据上传至阿里云服务器,实现数据长期存储与远程访问。供电

模块采用宽电压输入（12-24VDC）设计，配备电源滤波与过压、过流保护电路，确保硬件系统在电压波动场景下稳定运行。硬件封装采用防水防尘外壳，防护等级达IP65，适应工业现场恶劣环境，模块间通过标准化接口连接，便于维护与升级。

4 系统集成与实验验证

4.1 一体化软件平台架构

电动执行机构一体化软件平台采用“B/S+C/S”混合架构。C/S端部署在本地控制柜，以Qt开发，含四大核心模块：数据采集模块可实时采集解析多传感器数据，采样周期10ms-1s可调；故障诊断模块集成FDI算法，能显示故障信息并生成报告；容错控制模块提供参数配置等功能；健康监测模块展示健康指数与剩余寿命并预警。B/S端基于SpringBoot+Vue开发，部署在云端，通过浏览器访问，实现远程监控等功能，支持多用户三级权限管理。平台用MySQL存结构化数据，MongoDB存非结构化数据，通过RabbitMQ异步传输数据，保障高并发稳定运行，还支持与企业MES系统对接共享数据。

4.2 硬件在环实验平台搭建

电动执行机构硬件在环实验平台以“真实硬件+虚拟仿真”搭建，模拟实际工况与故障。核心含DKJ-4100样机、dSPACE DS1103实时仿真器、负载模拟装置等。样机含完整部件，与负载模拟装置（磁粉制动器，0-50N·m调节）相连。实时仿真器运行模型，与样机通信实现闭环控制。故障注入模块可手动注入10类典型故障。数据采集设备采样率10kHz，实时传数据至上位机。平台还有环境模拟箱，可调节温湿度（-20℃-60℃，30%-90%RH），模拟不同工业环境，确保实验真实可靠。

4.3 实验结果与分析

电动执行机构实验验证分为故障诊断、容错控制与健康监测三大类实验，每类实验设置5组平行实验，取平均值作为最终结果。故障诊断实验中，注入齿轮磨损、

电机短路等10类故障，FDI方法的平均检测率达96.2%，平均隔离时间0.8s，其中机械类故障检测率达98.1%，电气类故障检测率达95.3%，控制类故障检测率达94.8%，表明融合检测方法能精准识别不同类型故障^[4]。容错控制实验中，模拟电机扭矩下降30%（中度故障）时，自适应容错控制策略使定位误差从±2.5%降至±0.9%，阶跃响应时间从0.7s缩短至0.4s；模拟主电机烧毁（重度故障）时，冗余切换时间0.4s，切换过程中位置波动幅度3.2%，确保故障工况下系统性能稳定。健康监测实验中，通过加速老化实验获取全生命周期数据，剩余使用寿命预测误差平均为8.3%，综合健康指数（CHI）在亚健康状态时预警准确率达97.5%，故障预警提前时间平均为24h，为设备维护提供充足时间。实验结果表明，所设计的故障容错控制系统与健康状态监测系统满足工业现场需求，具备较高的可靠性与实用性。

结束语

电动执行机构故障容错控制与健康状态监测系统的设计研究，为提升其可靠性与实用性提供了全面解决方案。通过理论分析、架构设计、算法创新与实验验证，系统在故障诊断、容错控制及健康监测方面表现优异。未来，可进一步优化算法，提升系统智能化水平，探索更多应用场景，为工业自动化发展提供更有力的技术支撑，推动行业向更高质量、更高效益方向迈进。

参考文献

- [1]林德宏.恒春CKD电动执行机构常见故障分析及处理方法[J].装备维修技术,2020,No.175(01):152-153.
- [2]徐德义.延迟焦化装置智能电动执行机构故障诊断及维护[J].化工管理,2020,(10):189-190.
- [3]那炜.电动执行机构在电厂中的应用[J].电工技术,2021(06):81-82.
- [4]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.