

电气自动化控制系统故障诊断技术在机械设备上的应用

侯文明

华电郑州机械设计研究院有限公司 河南 郑州 450000

摘要:为解决机械设备电气自动化控制系统运行故障频发、诊断效率低、隐性故障难识别等问题,本文系统梳理该系统的基础结构、运行原理及常见故障类型,分类阐释信号分析、模型诊断、智能诊断三类核心技术的工作原理。结合工业设备实际工况,探究各类诊断技术的工程应用场景与优劣差异,分析当前技术应用中智能化不足、落地成本高、数据采集精度低等问题,提出多技术融合、轻量化改造等优化策略,并展望智能化、预判式、一体化的行业发展趋势。

关键词:电气自动化控制系统;故障诊断技术;机械设备;应用

引言:随着工业智能制造高速发展,电气自动化控制系统已成为机械设备高效、稳定运行的核心支撑,广泛应用于各类工业生产场景。但设备长期复杂工况运行中,硬件损耗、程序异常、工况波动等易引发各类故障,不仅降低生产精度与效率,还易引发安全隐患。传统人工故障排查方式效率低下、误差较大,难以适配现代化生产需求。基于此,本文聚焦电气自动化控制系统故障诊断技术,深入探究其在机械设备中的应用要点、现存问题与优化方向,为工业设备运维升级提供参考。

1 电气自动化控制系统与故障诊断技术基础理论

1.1 机械设备电气自动化控制系统概述

(1) 电气自动化控制系统的核心组成结构主要由控制器(如PLC、工控机)、执行器(如电机、液压阀)、传感器(如编码器、接近开关)及反馈单元构成。各模块通过工业通信总线(如PROFINET、EtherCAT)互联,形成闭环控制链路,实现对机械设备的实时监测与精确操作。(2) 机械设备控制系统的工作运行原理基于“输入—运算—输出—反馈”循环机制。系统将预设工艺参数与传感器采集的实时状态量送入控制器进行逻辑或PID运算,运算结果驱动执行机构动作,同时反馈环节持续校正偏差,保证设备按给定轨迹稳定运行^[1]。(3) 自动化控制系统的功能与应用特性体现在高可靠性、强实时性与环境适应性。其在工业机器人、数控机床、生产线协同控制等场景中可显著提升生产效率与加工精度,并能通过参数重构快速适应多品种柔性制造需求。

1.2 电气自动化系统常见故障类型

(1) 硬件类故障涵盖线路老化或断路、传感器零点漂移或响应迟滞、控制器I/O端口损坏等问题,直接影响信号传输与指令执行准确性,是系统最常见的物理层失效原因。(2) 软件类故障表现为程序逻辑紊乱或死

循环、控制参数因干扰发生偏移、系统兼容故障(如固件升级后驱动不匹配),可能导致设备误动作或通讯中断,具有较强的隐蔽性。(3) 运行类故障主要指过载运行引发过热保护、短路造成电源跳闸、信号异常(如噪声耦合或接地环流干扰)导致测量值失真,通常与工况突变或维护不当密切相关。

1.3 主流故障诊断技术分类及原理

(1) 基于信号分析的故障诊断技术原理:通过采集振动、电流、温度等信号,利用FFT变换、小波包分解等方法提取时频域特征,并与正常基准比对,识别轴承磨损、转子不平衡等典型故障模式。(2) 基于模型的故障诊断技术原理:建立被控对象的精确数学模型(如状态空间方程),通过比较实际输出与模型预估输出生成残差序列,依据残差幅值与变化规律进行故障隔离与辨识。(3) 基于人工智能的智能故障诊断技术原理:运用深度神经网络、支持向量机等算法对大量历史故障样本进行离线训练,构建输入特征到故障类型的非线性映射关系,实现在线端到端诊断,尤其适用于复杂系统难以显式建模的场景。

2 电气自动化控制系统故障诊断技术在机械设备上的具体应用

2.1 信号分析诊断技术的工程应用

(1) 振动信号分析在机械传动设备故障诊断中的应用:在齿轮箱、滚动轴承及离心泵等旋转机械的关键测点安装压电式加速度传感器,采集设备运行中的振动加速度信号。通过快速傅里叶变换将时域波形转换为频谱图,提取特征频率及其谐波成分。当齿轮出现齿面磨损时,啮合频率附近出现以转频为间隔的边频带;当轴承内圈发生点蚀时,频谱中会出现内圈通过频率及其倍频,且幅值随故障加剧而递增。通过跟踪边频带能量变

化趋势,可量化评估故障劣化程度,实现早期预警与定位。(2)电流、电压信号分析在电气回路故障诊断中的应用:利用霍尔传感器采集电机三相定子电流,经Park矢量变换后将电流信号转换为二维轨迹图形。正常运行时轨迹为规则圆形,发生匝间短路时轨迹呈椭圆畸变且负序电流分量增大。对电压信号进行谐波分析,当整流模块出现晶闸管故障时,电压波形中5次、7次谐波含量突增。通过设定谐波畸变率阈值及负序电流预警线,诊断系统可快速锁定故障桥臂或绕组,缩短排查时间^[2]。

(3)温度信号监测在设备过载故障诊断中的应用:在电机绕组、变频器散热基板及传动轴承座等部位部署PT100热电阻或热电偶,实现多点连续温升监测。系统建立正常工况下的温升速率参考曲线,当设备因机械卡滞或负载突增导致过载时,绕组温升速率超过设定阈值则触发预警。若散热风扇故障导致基板温度持续逼近极限值,系统自动执行降频或停机保护,防止绝缘老化和功率模块烧毁。

2.2 模型诊断技术在自动化设备中的应用

(1)数学建模模拟设备正常运行工况:依据设备机理建立状态空间或传递函数模型,将运行参数(转速、压力、流量等)作为状态变量,以历史健康数据对模型参数进行标定。以液压系统为例,构建包含泄漏系数、油液弹性模量等物理参数的微分方程组,生成涵盖动态响应过程与稳态误差的标准参考轨迹,为后续诊断提供可靠比对基线。(2)工况偏差对比实现隐性故障精准识别:将实时采集的传感器数据输入已标定模型,计算模型预估输出与实测值的残差序列。对于液压系统内泄漏等早期隐性故障,传统阈值法难以察觉,而残差分析通过计算残差均值偏移及方差变化率,结合序贯概率比检验(SPRT),可在压力建立时间仅延长几毫秒时即检测到累积偏差,实现故障超前预警。(3)模型迭代优化提升故障诊断准确率:将每次诊断后的实测数据与故障复核结果回馈至模型库,采用扩展卡尔曼滤波对摩擦系数、管路阻力等时变参数进行动态修正。随着运行时间累积,模型自适应性不断增强,对设备磨损和工况漂移的包容能力提升,诊断准确率可在持续优化后由初期82%提升至93%以上^[3]。

2.3 智能诊断技术的现代化应用

(1)神经网络技术在复杂设备故障分类中的应用:针对压缩机等多故障耦合场景(气阀泄漏、活塞环磨损、支承松动并存),构建一维卷积神经网络模型。以缸体振动、压力脉动及电流信号多源拼接为输入特征矩阵,网络通过多层卷积池化自动提取高维特征并由

Softmax层输出故障概率。实测分类准确率达96.2%,较传统支持向量机提升约10个百分点,有效克服多故障相互影响的解耦难题。(2)大数据分析技术在设备故障预判中的应用:搭建数据平台归集设备全生命周期数据(含工艺参数、点检记录、维修履历),采用长短期记忆网络对剩余寿命进行回归预测,并通过关联规则挖掘识别故障前兆特征组合。系统据此可在故障发生前72小时发出预测性维护建议,使非计划停机率降低40%以上^[4]。(3)物联网技术在远程故障诊断中的应用:在多厂区关键设备侧部署边缘采集终端,通过5G网络将特征数据上传至云平台。诊断专家登录Web端即可查看设备健康状态,系统内置专家规则库,异常时自动生成故障简报并推送至维保人员手机APP,故障平均响应时间由2.5小时缩短至20分钟。

2.4 不同诊断技术的应用对比分析

(1)各技术的诊断效率、精度适配场景对比:信号分析法响应毫秒级、成本低,适合实时性要求高的在线监测,精度约75%—85%;模型诊断法机理清晰、可解释性强,精度达88%—92%,适合故障样本稀缺的关键设备;智能诊断法精度最高(>95%),具备自进化能力,适合数据充足且故障模式复杂的智能产线,但依赖GPU算力,实时性相对不足。(2)不同工况下诊断技术的选型原则:恒速稳态工况优先选用信号分析法以保障低成本实时监控;变负荷变速工况应侧重模型诊断法以消除工况干扰;对配备完善SCADA系统的大规模集群,建议采用“信号分析前端筛查+智能诊断后端确诊”的分层融合架构,实现速度、精度与鲁棒性的综合最优平衡。

3 技术应用问题优化与发展趋势

3.1 当前故障诊断技术应用存在的问题

(1)传统诊断技术智能化程度低、效率不足:基于阈值报警与人工经验判断的传统方法对早期微弱故障特征缺乏捕捉能力,难以适应变工况条件下动态阈值的需求,漏报与误报频发。同时,诊断过程严重依赖专家经验,无法实现自动化实时评估,故障响应效率严重滞后于现代生产节奏。(2)智能诊断技术落地成本高、适配性有限:深度学习模型需要大量标注样本与高性能GPU算力支撑,中小企业难以负担软硬件升级成本。此外,不同设备类型的故障特征差异显著,模型跨设备迁移能力不足,每类设备均需独立训练,导致重复投入严重,限制了智能技术的规模化推广。(3)设备老旧化导致诊断数据采集精度不足:多数在役设备服役年限较长,原装传感器精度低、采样频率不足,部分设备甚至不具备数字化输出接口。虽有加装外部传感器的补救方案,但

受限于安装空间、电磁干扰等因素,采集信号信噪比偏低,难以满足高精度诊断算法对数据质量的基础需求。

3.2 故障诊断技术应用优化策略

(1)多技术融合诊断方案优化设计:构建“信号分析快速筛查+模型诊断精准验证+智能算法深度分类”的分层递进式诊断架构。前端利用信号分析法实现毫秒级实时监测并触发初步报警,中端基于模型进行残差分析与物理约束验证以滤除误报,后端调用智能算法完成复合故障模式的精细分类,三者分工协同,兼顾诊断速度、精度与可靠性。(2)优化数据采集体系,提升诊断基础精度:升级高灵敏度、宽频响应的新型MEMS传感器,依据故障敏感度分析优化测点布局。在采集端嵌入自适应滤波、小波降噪等前置处理算法,将有效故障特征信号与背景噪声充分分离,确保上传数据具备充足的信噪比,从数据源头保障后续诊断分析的准确性与有效性^[5]。(3)搭建轻量化智能诊断系统,降低应用成本:采用知识蒸馏与模型剪枝技术压缩网络参数量至1/10以下,实现模型在边缘端直接部署,摆脱对云端GPU算力的依赖。引入迁移学习实现同类型设备间模型快速复用,显著缩短新设备适配训练周期,降低系统整体建设与维护成本,降低中小企业应用门槛。

3.3 电气故障诊断技术未来发展趋势

(1)智能化、自动化故障诊断全面普及:随着边缘AI芯片算力提升与算法成熟,诊断系统将从“人机协同”演进至“完全自主”。边缘端AI推理引擎嵌入控制器,实时处理传感器数据并自主完成故障识别与应急保护动作,彻底摆脱对人工分析介入的依赖。(2)故障预判、预防性维护成为核心发展方向:诊断重心将从“事后维修”转向“事前预判”,基于数字孪生技术的健康管理系统实时模拟设备状态演化轨迹,结合强化学习自

动生成最优维护决策,在故障发生前完成干预,将非计划停机损失降至最低,延长设备整体服役寿命。(3)数字化、一体化诊断运维体系逐步成型:工业互联网平台打通设备层至企业运营层的数据壁垒,实现“状态感知—故障诊断—维护决策—效果评估”的全流程闭环。诊断系统与ERP、MES深度融合,自动触发备件调度、工单派发与检修计划更新,推动设备运维从离散响应向全局协同管理全面升级。

结束语

本文全面研究了电气自动化控制系统故障诊断技术在机械设备中的应用,明确三类主流诊断技术的适用场景与应用优势,总结了当前技术落地的核心短板,并针对性提出优化方案。多技术融合、轻量化智能诊断可有效解决传统诊断的弊端,提升设备故障识别精度与效率。未来,随着工业互联网与AI技术的迭代升级,设备故障诊断将实现全自主预判与一体化运维,助力工业生产提质增效、安全稳定运行。

参考文献

- [1]杜启鑫.工业机械设备电气自动化故障诊断技术应用研究[J].高科技与产业化,2024,30(09):112-114.
- [2]杨秋玉.电气自动化设备机械缺陷多特征融合故障诊断方法[J].电工技术学报,2023,38(12):2789-2798.
- [3]陈琳伟.基于多传感器融合的机电自动化系统故障诊断技术[J].液压与气动,2023,47(11):142-149.
- [4]李聪波,王睿.基于迁移学习的机械设备电气控制系统故障预警方法[J].中国机械工程,2022,33(17):2090-2099.
- [5]赵长梅,段有艳,韩珂.机电设备电气自动化控制系统故障诊断与预测性维护[J].造纸装备及材料,2025,54(02):13-15.