

火电厂汽轮机 DEH 系统故障诊断与优化策略研究

华金开

江投国华信丰发电有限责任公司 江西 赣州 341600

摘要: 火电厂汽轮机数字电液控制系统 (DEH) 是保障机组安全稳定运行的核心设备, 其故障诊断与优化对提升发电效率、降低非计划停机风险具有重要意义。基于此, 本文针对火电厂汽轮机 DEH 系统故障诊断与优化策略进行了研究, 提出基于模型预测、智能算法与硬件-软件协同优化的综合诊断优化策略, 以期相关人员通过参考和借鉴。

关键词: 火电厂汽轮机; DEH 系统; 故障诊断; 优化

引言

随着火电机组向高参数、大容量方向发展, 汽轮机数字电液控制系统 (DEH) 的复杂性与重要性日益凸显。作为连接汽轮机本体与电网调频需求的关键环节, DEH 系统需同时满足快速响应、高精度控制与长期稳定运行要求。然而, 传统故障诊断方法依赖人工经验与离线检测, 难以实现早期预警与动态定位。因此, 亟需构建融合多学科技术的故障诊断与优化体系, 通过数据驱动与模型驱动深度融合, 实现 DEH 系统全生命周期健康管理。

1 DEH 系统控制逻辑

DEH 系统控制逻辑通过转速控制、负荷控制与主汽压力控制三大核心功能实现汽轮机运行状态的精准调节。(1) 转速控制以维持汽轮机额定转速为目标, 其实现原理基于转速反馈信号与设定值的实时比较, 当转速偏差存在时, PID 控制器输出调节指令至高压调门执行机构, 通过改变蒸汽流量实现转速修正。(2) 负荷控制通过协调转速与功率的关系, 在电网频率稳定时优先响应负荷需求, 其核心在于将功率设定值与实测值对比后, 经 PID 运算生成调门开度指令, 同时引入一次调频功能, 当电网频率波动时自动调整负荷输出以参与系统调频。(3) 主汽压力控制则通过监测主蒸汽压力与设定值的偏差, 利用 PID 算法动态调节调门开度, 防止因燃料量变化或蒸汽需求突变导致压力超限, 其控制优先级通常低于转速与负荷控制, 仅在压力偏差超过阈值时介入^[1]。而 PID 控制算法作为 DEH 系统的核心调节手段, 其参数配置直接影响系统动态响应特性。比例系数 P 通过放大当前误差信号决定控制作用的强度, P 值过大会导致系统超调量增加、振荡加剧, 甚至引发调节过程失稳, 而 P 值过小则使响应速度迟缓, 难以快速消除偏差。积分系数 I 通过累积历史误差实现无静差调节, I 值增大会加速消除稳态误差, 但可能因积分饱和导致系统超调或调节时间延长, 尤其在负荷突变时易引发调门频繁动作, I 值过小则无法彻底消除

静态偏差。微分系数 D 通过预测误差变化趋势提前修正控制量, D 值增大会增强系统对动态扰动的抑制能力, 缩短调节时间并减少超调, 但过大的 D 值会放大高频噪声, 导致控制信号抖动甚至执行机构磨损加剧。

2 DEH 系统故障诊断方法

2.1 基于信号分析的故障诊断

基于信号分析的故障诊断方法通过提取 DEH 系统运行信号中的时域与频域特征, 实现故障模式的精准识别与定位。一方面, 时域分析聚焦信号随时间变化的动态特性, 直接利用原始波形数据提取关键参数, 包括幅值、均值、方差、峰值因子及波形因子等统计量, 这些参数能够反映信号的能量分布与波动程度。当 DEH 系统出现调节阀摆动或伺服阀卡涩时, 调门开度信号的方差会显著增大, 同时峰值因子因异常尖峰的出现而偏离正常范围, 通过监测这些时域特征的变化可初步判断系统是否存在机械卡滞或控制信号干扰。此外, 时域分析还包含波形匹配与相关性分析技术, 通过将实时信号与标准波形模板对比, 或计算不同通道信号间的互相关系数, 可识别信号失真或传输延迟问题。另一方面, 频域分析则通过傅里叶变换 (FFT) 将时域信号转换为频谱分布, 揭示信号中各频率成分的幅值与相位信息。DEH 系统故障通常表现为特定频率段的能量集中, 如伺服阀振荡会在控制信号中引入高频谐波, 而机械共振则导致低频段幅值异常升高。通过分析频谱中主频成分及其谐波关系, 可定位故障源类型。

2.2 基于模型预测的故障诊断

基于模型预测故障诊断方法的核心原理在于构建能够描述系统输入输出关系的动态模型, 通常采用状态空间模型形式, 将 DEH 系统的转速控制、调门开度调节等关键环节抽象为状态变量, 通过微分方程组刻画系统动态特性。(1) 模型输入涵盖转速设定值、负荷指令、主汽压力等控制信号, 输出则为实际转速、调门开度、功

率等测量参数。在系统正常运行时,模型预测输出与实际测量值高度吻合,残差(即两者差值)保持在零均值附近且波动范围较小;当系统发生故障时,故障导致的参数偏移或结构变化会破坏模型准确性,使残差出现显著偏离正常范围的特征模式。(2)残差分析通过统计方法或模式识别技术提取残差中的故障特征,常见方法包括基于阈值的残差比较、卡尔曼滤波残差估计以及主成分分析(PCA)降维处理等^[2]。阈值法通过设定残差允许的最大波动范围,当残差超过阈值时触发故障报警,适用于检测突发性故障;卡尔曼滤波则利用系统噪声与测量噪声的统计特性,对残差进行最优估计,提升故障检测的灵敏度与抗干扰能力;PCA方法通过将高维残差向量投影至低维主成分空间,提取主要故障特征方向,适用于处理多变量系统的复杂故障模式。(3)模型预测故障诊断的准确性高度依赖模型精度,需通过系统辨识技术获取真实参数,并考虑非线性因素对模型的影响。实际应用中常采用在线参数估计方法动态修正模型,或构建多模型切换机制适应不同工况,同时结合数据驱动方法对残差进行补偿,以提升故障诊断的鲁棒性,最终实现DEH系统执行机构卡涩、传感器漂移、控制逻辑异常等典型故障的早期预警与精准定位。

2.3 基于智能算法的故障诊断

基于智能算法的故障诊断通过融合机器学习与模糊逻辑技术,构建具备自适应学习与模糊推理能力的诊断模型,实现对复杂系统故障的精准分类与定位。(1)机器学习算法如支持向量机(SVM)通过在高维空间中构建最优分类超平面,将故障特征映射至不同类别区域,其核函数选择直接影响模型对非线性特征的提取能力。径向基核函数因局部映射特性,适用于处理具有复杂时变特性的故障信号,而多项式核函数则通过全局逼近能力捕捉系统级故障模式。(2)神经网络通过多层非线性变换实现特征自动提取,卷积神经网络利用局部连接与权重共享机制,有效提取振动信号中的频域特征,循环神经网络及其变体通过时序依赖建模,适用于处理具有动态演化特性的故障数据。(3)模糊逻辑通过引入隶属度函数量化故障特征的不确定性,构建IF-THEN规则库实现模糊推理,其核心优势在于处理非精确数据与模拟人类专家决策过程^[3]。模糊C均值聚类算法通过优化目标函数实现故障特征的软划分,适用于处理边界模糊的故障模式。(4)混合智能诊断模型结合机器学习与模糊逻辑的互补特性,采用神经网络进行初始特征提取后,通过模糊推理系统对提取特征进行语义化解释,既保留了机器学习的高精度分类能力,又提升了诊断结果的可解释

性。针对工业系统数据稀缺问题,迁移学习技术通过利用源域数据辅助目标域模型训练,结合生成对抗网络合成故障样本,有效缓解数据不平衡对模型性能的影响。

3 DEH系统优化策略

3.1 硬件优化策略

硬件优化策略通过针对性改进DEH系统关键部件的设计与维护方式,显著提升系统运行的可靠性与稳定性。(1)伺服阀冗余设计采用双MOOG阀并联结构,通过主备阀切换机制实现故障容错,当主阀因油液污染或电磁干扰出现输出波动时,备用阀可立即接管控制任务,避免调门异常摆动。双阀并联结构通过独立油路与独立驱动电路设计,消除单阀故障导致的共模失效风险,同时通过动态压力平衡技术降低两阀输出压力差异,防止因压力不均引发的调门卡涩。(2)LVDT传感器改进聚焦于安装工艺优化,柔性连接结构通过弹性元件缓冲汽轮机振动对传感器本体的冲击,避免因机械应力集中导致的铁芯卡滞或线圈绝缘破损。垂直校准工艺确保传感器铁芯与线圈轴线重合度误差小于0.1mm,消除因安装偏心引发的测量非线性误差,同时通过温度补偿设计降低环境温度波动对铁芯磁导率的影响,提升位移反馈信号的长期稳定性。(3)EH油系统维护强调油质全生命周期管理,通过在线颗粒计数器实时监测油液清洁度,当颗粒度超过NAS 5级时自动触发报警并启动旁路过滤循环,防止微小颗粒磨损伺服阀阀口或堵塞滤芯。此外,油质维护还需关注油温控制,通过电加热器与冷却器协同调节,将油温稳定在40~55℃范围内,避免高温加速油液氧化或低温导致流动性下降。

3.2 软件优化策略

软件优化策略通过精细化调整DEH系统控制算法与信号处理逻辑,显著提升系统动态响应精度与抗干扰能力。(1)控制参数整定聚焦于PID调节器的参数优化,通过缩小转速控制死区至 $\pm 2r/min$,减少系统在额定转速附近的频繁调节。并且,将速度变动率设定在4%~5%范围内,平衡机组一次调频能力与运行稳定性,避免因参数过小导致调门频繁动作或参数过大引发频率超限^[4]。(2)积分分离算法的引入可防止启动阶段因偏差较大引发的积分饱和,通过在偏差超过阈值时暂停积分作用。待偏差进入设定范围后再恢复积分计算,有效缩短调节时间并降低超调量。(3)调门控制逻辑优化通过引入流量特性补偿算法,建立调门开度与蒸汽流量的非线性映射关系,利用多项式拟合或神经网络模型修正实际流量与理想流量的偏差,消除因调门流量特性畸变导致的负荷控制滞后。快开/快关优先级机制通过动态调整控制指令的

执行顺序,当电网频率骤降或机组甩负荷时,优先执行调门快关指令以快速减少蒸汽输入,防止汽轮机超速;而在并网瞬间或负荷突增时,优先执行调门快开指令以提升功率响应速度,该机制通过硬件中断与软件优先级队列协同实现,确保关键指令在10ms内完成响应。(4)信号滤波与抗干扰设计采用多级数字滤波策略,在模拟量输入通道增设硬件低通滤波器,截断频率设定为机组最高振动频率的1/3,有效抑制高频噪声干扰。对于电磁干扰问题,采用屏蔽双绞线传输传感器信号,并在信号调理模块中集成共模抑制比大于100dB的差分放大器,消除共模噪声对测量精度的影响,同时通过看门狗定时器监测控制程序运行状态,当程序跑飞时自动触发系统复位,防止因软件故障导致调门误动。

3.3 系统协同优化策略

系统协同优化策略通过强化DEH系统与CCS(协调控制系统)的动态交互机制,实现机组调频能力与设备安全性的双重提升。一方面,DEH-CCS协同控制采用分层递阶控制架构,以DEH系统作为快速响应层,直接作用于汽轮机调门实现转速的快速调节,CCS系统作为慢速补偿层,通过调整锅炉燃烧率实现负荷的长期稳定。当电网频率发生波动时,DEH系统在50ms内完成调门开度调整,优先发挥一次调频作用,CCS系统则根据DEH动作后的蒸汽流量变化,在2-5秒内同步调整燃料量与给水量,补偿DEH动作引发的锅炉-汽轮机能量失衡,避免因DEH单侧调节导致的压力波动或燃烧不稳定。另一方面,工况适配优化根据机组负荷状态动态调整控制权限分配,低负荷工况下,因锅炉蓄热能力下降且燃烧稳定性变差,系统自动闭锁CCS的一次调频功能,避免因CCS频繁调节燃料量引发燃烧波动甚至熄火风险,此时由DEH系统独立承担调频任务,通过限制调门动作幅度(如单次调节不超过

5%开度)防止蒸汽参数剧烈变化^[5]。而在满负荷工况下,因调门接近全开状态,系统自动限定DEH调门动作方向为关小方向,防止调门过开导致蒸汽流量超限,同时CCS系统通过提升锅炉压力设定值增加蓄热能力,为DEH提供更大的调节空间。此外,系统协同优化还包含异常工况下的控制权切换机制,当DEH系统检测到伺服阀故障或LVDT传感器信号异常时,自动将调门控制权切换至CCS侧,通过锅炉侧调节维持机组负荷稳定,同时触发报警并启动冗余设备,实现故障状态下的安全降级运行。

结语

综上所述,本文围绕火电厂汽轮机DEH系统故障诊断与优化需求,系统提出了基于多技术融合的解决方案。通过模型预测与智能算法结合,实现了故障特征的精准提取与分类;系统协同控制架构则有效解决了DEH与CCS的耦合调节矛盾。未来,研究应进一步探索数字孪生技术在DEH系统虚拟调试中的应用,结合5G通信实现远程状态监测与智能运维,推动火电厂向“自感知、自诊断、自优化”方向演进,为能源行业数字化转型提供典型范式。

参考文献:

- [1]李雪波.基于大数据的火电厂汽轮机故障诊断与预测维护[J].电力设备管理,2024,(24):96-98.
- [2]梁栋.火电厂设备故障诊断与检修技术研究[J].自动化应用,2024,65(16):150-152+155.
- [3]杨理中.热力发电厂设备检修及维护的探究[J].科技创新与应用,2022,12(01):120-122.
- [4]杨东旭.汽轮机常见故障分析与检修[J].装备维修技术,2023,(06):36-38.
- [5]秦治国.汽轮机启机转速异常降低故障剖析[J].今日制造与升级,2023,(10):127-129.