

水电站调速器液压系统故障诊断与智能化维护技术研究

刘佳磊 张彦龙

雅砻江流域水电开发有限公司 四川成都 610000

摘要：水电站调速器液压系统作为机组稳定运行的核心控制单元，其工况直接影响电力系统的安全与效率。本文针对该系统易受油液污染、元件磨损及工况波动影响而产生的故障问题，深入分析典型故障类型与诱因，系统研究基于信号分析、智能算法的故障诊断技术，提出融合状态监测、预测维护与远程协同的智能化维护体系。通过梳理现有技术瓶颈，探索多源数据融合诊断、数字孪生驱动维护等创新方向，为提升调速器液压系统可靠性、降低运维成本提供理论支撑与技术路径，对保障水电站长期稳定运行具有重要实践意义。

关键词：水电站调速器；液压系统；故障诊断；智能化维护；状态监测；预测性维护

引言

在水电站动力系统中，调速器承担着调节机组转速、控制出力的关键职能，而液压系统作为调速器的执行核心，凭借动力密度高、响应速度快的优势，实现对导水机构或桨叶的精准控制。随着水电站向大型化、智能化发展，调速器液压系统结构愈发复杂，工况环境也更趋严苛，油液污染、元件老化、密封失效等问题易引发卡涩、渗漏、响应滞后等故障，不仅导致机组效率下降，更可能触发停机事故，造成巨大经济损失。传统故障诊断依赖人工经验，存在诊断滞后、误判率高的局限，而定期维护模式又易导致过度维修或维护不足。因此，深入研究调速器液压系统的故障机理与诊断技术，构建智能化维护体系，成为解决当前运维困境、提升系统可靠性的关键课题，对推动水电站运维模式从“事后维修”向“预测维护”转型具有重要意义。

一、水电站调速器液压系统典型故障与机理分析

1. 执行机构卡涩故障

执行机构（如接力器、伺服马达）卡涩是液压系统常见故障，表现为动作迟滞、到位精度下降，严重时导致机组无法正常调节。其核心机理在于：一是油液污染引发的磨损，液压油中混入的金属颗粒、粉尘等杂质，在执行机构运动过程中会加剧活塞与缸筒、阀芯与阀套的表面磨损，形成划痕或台阶，破坏配合间隙的密封性与润滑性，增加运动阻力；二是密封件老化失效，长期运行中，密封件受油液温度、压力波动及化学侵蚀影响，易出现硬化、开裂或变形，导致密封性能下降，不仅引

发油液泄漏，还可能使杂质进入配合间隙，进一步加剧卡涩；三是液压油黏度过高或过低，黏度过高会增加油液流动阻力，导致执行机构响应迟缓，黏度过低则会降低润滑效果，加速元件磨损，二者均可能诱发卡涩故障。

2. 液压系统渗漏故障

渗漏故障贯穿液压系统各连接部位，包括管道接头、阀组接口、密封件安装处等，不仅造成油液浪费，还会导致系统压力下降、执行机构动力不足，同时泄漏的油液可能污染设备与环境，增加安全隐患。从机理来看，渗漏可分为内泄漏与外泄漏：内泄漏主要源于元件配合间隙超标，如阀芯与阀套磨损、活塞密封圈损坏，导致高压油腔向低压油腔窜油，虽无明显油液外溢，但会造成系统效率降低、压力波动；外泄漏则多由连接结构失效或密封件损坏导致，如管道接头松动、螺纹密封失效，或密封件选型不当、安装偏差，使油液从连接间隙渗出。此外，液压油温度过高会加剧密封件老化，而系统压力频繁波动则会导致连接部位疲劳变形，进一步增加渗漏风险。

3. 系统压力异常故障

系统压力异常包括压力过高、压力过低及压力波动过大三种类型，直接影响调速器控制精度。压力过高的主要机理是压力控制元件失效，如溢流阀阀芯卡涩、先导阀堵塞，导致阀门无法正常溢流卸压，系统压力持续升高，可能引发管道爆裂、元件损坏；压力过低则多由油液泄漏、油泵排量不足或吸油不畅导致，如油泵磨损使容积效率下降、吸油滤油器堵塞导致吸油阻力增加，或系统存在严重外泄漏，均会造成压力无法建立；压力

波动过大的核心诱因是油液中混入空气，形成气穴现象，空气的可压缩性使系统压力随油液流动产生剧烈波动，同时还会引发气蚀，加剧元件磨损，形成“压力波动—气蚀—磨损”的恶性循环。此外，负载突变、控制信号干扰也可能导致压力短暂波动，若调节元件响应滞后，则会使波动持续扩大。

二、水电站调速器液压系统故障诊断技术研究

1. 基于信号分析的故障诊断技术

基于信号分析的诊断技术通过采集液压系统运行中的特征信号提取故障信息，是当前应用最广泛的诊断方法之一，核心在于信号的有效采集与精准分析。振动信号分析中，液压系统内泵、阀、马达等旋转或往复运动元件，正常与故障状态下振动特性差异显著，如油泵轴承磨损会使振动信号出现特定频率谐波成分，阀芯卡涩会引发振动幅值突变；通过加速度传感器采集关键元件振动信号后，用傅里叶变换将时域信号转为频域信号可识别故障特征频率，小波变换则能处理非平稳振动信号、捕捉故障初期微弱振动变化，避免传统频域分析失真，实践中通过建立正常工况振动信号基准库，将实时信号与之对比，可快速判断是否存在元件磨损、卡涩等故障。油液分析技术通过检测液压油物理化学特性与污染物含量判断系统内部磨损状态及油液质量，油液光谱分析可检测金属元素种类与浓度，如铁、铜元素浓度升高对应齿轮、轴承磨损，硅元素浓度升高提示外界粉尘污染；油液铁谱分析能直接观察磨损颗粒形态、大小与数量，通过颗粒形貌判断磨损类型并定位故障元件，同时油液黏度、酸值、水分含量变化可反映油液老化程度，为油液更换提供依据。压力与流量信号分析是诊断系统压力异常、泄漏故障的关键，通过压力传感器采集油泵出口、溢流阀入口等关键节点压力信号，对比正常工况压力曲线可识别压力过高、过低或波动异常问题，如执行机构无杆腔压力上升缓慢且伴波动可能是油泵排量不足或内泄漏；流量传感器采集的流量信号低于额定值且压力正常，可能是管路堵塞或元件内泄漏，同步分析压力与流量信号可进一步定位故障位置，如对比油泵进出口压力与流量判断油泵是否磨损或吸油不畅。

2. 基于智能算法的故障诊断技术

随着人工智能技术发展，基于智能算法的故障诊断技术凭借强大的特征学习与模式识别能力，成为解决液压系统复杂故障诊断的重要方向，有效弥补传统信号分析依赖人工经验的不足。神经网络算法应用广泛，无需

建立精确数学模型，通过大量样本数据训练可自动学习故障特征与类型的映射关系，如BP神经网络输入振动信号特征或油液分析指标，经迭代训练输出故障类型，且可通过引入动量因子、结合遗传算法改进，避免传统BP网络的局限，训练后对未知故障识别快速、准确率高。支持向量机（SVM）适用于小样本、非线性场景，尤其适合故障样本难获取的情况，通过核函数将低维非线性特征映射到高维空间构建最优分类超平面，如诊断渗漏故障时能提取微弱特征提高精度，还可结合多特征融合技术提升可靠性。模糊逻辑算法针对故障特征模糊性，通过建立模糊规则库实现推理诊断，将特征参数模糊化后结合专家规则推理解模糊，能处理不确定信息，适合复杂非线性场景，且可与其他算法结合形成混合模型提升鲁棒性。

三、水电站调速器液压系统智能化维护技术体系构建

1. 状态监测系统的构建

状态监测是智能化维护的基础，核心是通过部署多类型传感器实现对液压系统运行状态的实时、全面感知，为故障诊断与维护决策提供数据支撑。传感器选型与布置需匹配监测对象：振动监测时，将加速度传感器装于油泵、溢流阀、接力器等关键元件壳体，采集径向与轴向振动信号，采样频率不低于2kHz以捕捉高频故障特征；压力监测采用精度等级不低于0.2%FS的高精度传感器，布置在油泵出口、执行机构腔室、溢流阀进出口等关键节点，实时追踪压力变化；油液监测结合在线传感器与离线分析，在线传感器检测黏度、水分含量、ISO 4406污染度及金属颗粒浓度，离线光谱、铁谱分析辅助全面评估油液状态；温度监测用热电偶或铂电阻传感器，监测液压油、油泵壳体及执行机构温度，防止高温致油液劣化与元件损坏。数据传输与处理是关键环节，通过工业以太网（如Profinet、EtherNet/IP）或无线通信技术（如LoRa、5G）将实时数据传至数据中心，保障传输实时可靠。数据处理需经预处理，包括数据清洗去除噪声与异常值、数据融合整合多源数据消冗余、数据压缩提升传输效率，例如用卡尔曼滤波除压力信号高频噪声、小波阈值去噪处理振动信号干扰，再借加权平均法、D-S证据理论融合多源数据提高状态评估准确性，同时构建实时与历史数据库存储数据，为后续工作提供支持。

2. 预测性维护策略的制定

预测性维护基于状态监测数据与故障诊断结果，通

过预测故障发展趋势，制定个性化的维护计划，实现“按需维护”，避免过度维修与维护不足。其核心是构建故障预测模型，通过分析设备运行状态数据，预测故障发生时间与严重程度。故障预测模型的构建可采用基于物理模型与数据驱动相结合的方法。物理模型基于液压系统的工作原理与故障机理，建立故障发展的数学方程，例如，基于磨损理论建立执行机构磨损量与运行时间、负载、油液污染度之间的关系模型，预测磨损量随时间的变化趋势，当磨损量达到预设阈值时，发出维护预警；数据驱动模型则基于历史运行数据与故障数据，通过智能算法（如LSTM神经网络、灰色预测模型）预测故障发展。例如，采用LSTM神经网络，输入历史振动信号的特征参数（如均方根、峰值因子），预测未来一段时间内的振动特征变化，若预测值超过故障阈值，则判断故障即将发生。在实际应用中，可结合物理模型与数据驱动模型的优势，构建混合预测模型，如通过物理模型确定故障发展的大致趋势，再通过数据驱动模型修正预测结果，提高预测精度。维护决策优化是预测性维护的关键，需综合考虑故障影响程度、维护成本与系统可靠性需求，制定最优维护计划。首先，建立故障影响评估体系，从故障对机组运行的影响（如是否导致停机、出力损失）、维护难度（如是否需要停机、维护周期）、经济损失（如维修成本、停机损失）三个维度，对故障进行优先级排序；最后，结合水电站的发电计划与检修资源（如备件库存、维修人员），制定个性化的维护方案，如对于关键元件（如主油泵），提前储备备件，安排专业维修团队进行维护，而对于非关键元件（如辅助阀组），可适当延长维护周期，降低维护成本。

3. 远程协同维护平台的搭建

远程协同维护平台通过整合状态监测数据、故障诊断结果与维护资源，实现水电站与远程运维中心、设备厂商的实时协同，打破地域限制，提升维护效率。平台架构主要包括数据层、应用层与协同层：数据层负责整合水电站现场的状态监测数据、设备台账数据、历史故障数据，通过云端存储实现数据共享，确保远程运维中心可实时获取现场数据；应用层提供故障诊断、预测维护、维护管理等功能模块，远程专家可通过应用层查看实时监测数据，调用故障诊断算法进行远程诊断，或基

于预测模型制定维护计划；协同层则通过视频会议、在线协作工具（如远程桌面、三维模型标注），实现现场运维人员、远程专家、设备厂商的实时沟通。平台的核心功能：远程诊断、维护指导与资源管理。远程诊断功能是可以对液压系统故障进行实时分析，通过平台，远程专家无需到达现场，通过调用振动、压力、油液等监测数据，结合智能诊断算法，定位故障的位置与原因，避免由于现场人员经验不足导致的诊断延误；维护指导功能通过三维动画、操作手册等形式，对现场人员进行标准化的维护操作指导。此外，平台还可以为后续的类似故障的诊断与维护提供参考，总结每次故障的诊断过程、维护方案与效果，以此形成维护知识库，积累维护经验。

结论

水电站调速器液压系统的故障诊断与智能化维护是保障机组安全运行，推动水电站运维模式升级的核心方向。本文分析了执行机构卡涩、渗漏、压力异常三类典型故障机理，明确了油液污染、元件磨损等关键影响因素；梳理了基于信号分析的传统诊断技术与神经网络、SVM等智能诊断方法，指出各技术适用场景与优势；从状态监测、预测性维护、远程协同构建智能化维护体系，提供可落地框架；分析当前技术瓶颈后，提出融合深度学习、数字孪生等的未来路径。研究表明，三者深度融合，可以提高系统的可靠性和运维效率，未来可以实现全流程的智能化，为水电站的安全高效运行提供支撑。

参考文献

- [1] 周鹏. 水轮机调速器在水电站运行优化与管理策略中的应用研究[J]. 水上安全, 2024, (24): 121-123.
- [2] 曾作朋, 江帆, 张青, 张民威, 李游. 水轮机调速器控制系统对小水电站技术改造应用[J]. 四川水利, 2024, 45(06): 147-150.
- [3] 钟定生, 翁军, 杨祖超. 功阁水电站3#机调速器异响的故障分析[J]. 广东水利水电, 2024, (07): 73-76.
- [4] 丁强. 浅谈调速器液压系统故障分析及改造方法[J]. 水电与新能源, 2024, 38(04): 56-58.
- [5] 张勇. 水电站调速器液压系统故障分析[J]. 四川水力发电, 2019, 38(03): 124-126+132.