基于预警预报系统的大中型泵站故障诊断方法分析

秦宜瑄[1] 聂梦爱[1] 任义坤[2] 任泽俭[2]
1. 南水北调东线山东干线有限责任公司 山东 济南 250102
2. 山东润鲁工程咨询集团有限公司 山东 济南 250102

摘 要：针对大中型泵站传统故障诊断方式存在识别滞后、精度偏低、运维模式粗放的技术短板，本文结合南水北调泵站运行管理实践，依托预警预报系统的全域数据监测能力，归纳泵站故障可感知、可融合、可预判、可分级的核心演化特征。结合多源数据融合、实时异常识别、BP神经网络分类与模糊运算技术，构建多技术协同的一体化故障诊断体系，实现泵站设备隐患早期识别、精准溯源与趋势预判。实践结果表明，该诊断方案准确率可达98%以上，能够有效优化泵站运维模式，降低设备运维损耗与非计划停机风险。研究成果可为大中型泵站智能化运维、安全稳定运行提供科学的技术支撑。

关键词：大中型泵站；预警预报；网络故障；模糊逻辑

引言：大中型泵站承担水资源调配、防洪排涝与供水保障任务，机组工况波动频繁，设备劣化过程隐蔽，运行风险管控难度较大。现有故障诊断手段多依靠人工巡检与周期检修，对早期隐患识别能力不足，预判水平有限，难以适配水利工程智能化运维发展需求。为此，本文依托预警预报系统采集的多维度运行数据，剖析故障演化特征，搭建一体化智能诊断体系，探索泵站运维提质增效的可行途径，为同类工程数字化管理提供理论支撑。

1 基于预警预报系统的大中型泵站故障特征

大中型泵站机电、管路及自控设备相互耦合，工况动态变化，传统巡检难以捕捉潜在隐患。预警预报系统依靠在线感知与数据分析，能够量化故障演变规律，为早期风险研判提供新途径。

1.1 故障早期微弱可感知

大中型泵站多数故障存在缓慢退化阶段，在明显失效前会产生幅值较低、变化平缓的异常信号，依靠人工巡检很难捕捉。预警预报系统布设多类型传感装置，持续采集振动、温度、压力、流量、电气运行参数，对设备状态实现不间断跟踪监测。系统能够捕捉参数缓慢漂移、小幅波动等萌芽状态信号，将隐性隐患转化为可量化的监测指标，区别于设备正常工况波动。通过长期时序数据比对，过滤随机扰动带来的干扰，在故障尚未引发性能大幅衰减时完成识别，为提前处置预留时间，避免隐患持续累积、逐步恶化，降低突发性停机风险[1]。

1.2 故障诱因耦合特征可融合

泵站故障很少由单一因素造成，机械磨损、水力扰动、电气老化、环境条件相互叠加，形成耦合式故障，仅依靠单项监测参数极易产生误判。预警预报系统打破各监测点位数据相互独立的局限，整合设备实时运行数据、负荷变化规律、历史故障记录与运维资料，建立多维度特征数据集。系统对不同来源的监测信息开展关联分析与交叉验证，区分设备本体缺陷与外部工况扰动造成的异常，厘清故障之间的内在关联。多源特征融合能够补齐单一监测信息的短板，更加完整地反映故障形成机理，减少诊断偏差，为故障溯源提供可靠的数据支撑。

1.3 故障演化时序趋势可预判

大部分泵站故障属于渐进式劣化，设备性能随服役时间逐步衰减，隐患从萌生、发展直至爆发存在连续的演变路径。预警预报系统依托时序分析方法，持续跟踪各项特征参数的变化速率，掌握故障发展动态，预判设备性能衰减走向，评估劣化发展速度[2]。系统能够识别隐患由局部向多部件扩散的传导趋势，提前发现连锁故障风险，改变故障处置被动滞后的现状。依靠趋势预测结果，运维工作不再局限于事后抢修，可根据设备健康状态提前制定管控方案，推动运维模式向预防性维护转变。

1.4 故障危害程度可分级量化

不同故障对泵站运行的影响差异明显，部分隐患仅小幅降低运行效率，部分故障会直接造成机组停机甚至设备损坏。预警预报系统综合故障发生位置、参数偏离幅度、演化速度、波及范围等指标，建立量化评估机制，对识别出的隐患划分不同危害等级。分级结果可以直观反映风险高低，为运维资源调配提供依据，优先处置高等级隐患，合理安排检修窗口，避免平均投入造成

资源浪费。通过分级管控实现风险差异化处置，在保障泵站稳定运行的同时，提升运维管理的经济性与针对性。

2 基于预警预报系统的大中型泵站故障诊断方法

以预警预报系统采集的运行数据为基础，融合多种智能分析手段构建闭环诊断流程。整套方法实现故障感知、研判与处置联动，推动运维由事后抢修向预判式维护转变，提高故障识别的时效性与准确度。

2.1 多源监测数据融合处理

多源数据融合是泵站故障诊断的基础前提，依托预警预报系统实现全维度数据归集与标准化处理。系统全面采集泵站机械运行、流体参数、电气指标、环境工况及历史运维数据，覆盖振动、温度、压力、流量、电流电压等核心监测指标，打破数据分散、信息孤岛问题。针对原始监测数据存在的噪声、缺失、冗余、量纲不统一等问题，依次开展滤波降噪、缺失值插值、异常值剔除、数据归一化处理，消除数据干扰因素。在此基础上完成数据时空对齐、逻辑关联与核心特征提取，剔除冗余无效信息，提炼故障敏感特征参数，构建统一规范的诊断数据库，为后续故障精准诊断提供高质量数据支撑，保障诊断结果的可靠性与稳定性[3]。

2.2 设备故障异常实时识别

故障异常实时识别以融合数据为核心，实现泵站设备早期故障精准感知。结合泵站设备运行规范与历史运维数据，设定各监测参数动态阈值与正常运行基线，适配不同工况、不同负荷下的设备运行状态，摒弃单一固定阈值的局限性。预警预报系统实时比对实时监测数据与基准参数，精准捕捉参数微小波动、趋势偏离等早期异常信号，快速筛选故障疑似特征。同时结合设备运行逻辑与工况条件，自动过滤非故障性参数波动，有效降低误报、漏报概率。对识别出的异常信号进行初步定位与分类，标记异常发生部位、参数变化幅度，划分异常紧急等级，为后续深度诊断明确方向，实现故障隐患早发现、早预警。

2.3 BP神经网络故障分类诊断

BP神经网络诊断依托非线性映射能力，实现泵站故障类型精准分类。选取预处理后的故障特征参数作为网络输入层数据，构建适配大中型泵站的多层神经网络模型，利用历史正常工况与各类故障工况数据完成模型训练，优化网络权重与阈值，提升故障模式识别精度。诊断过程中，将实时异常特征向量输入训练完成的网络模型，通过前向传播运算，快速完成故障类型智能分类，精准区分机械磨损、电气故障、管路异常、部件老化等常见泵站故障[4]。该方法可高效处理多维海量监测数据，适配故障与运行参数间的复杂非线性关系，具备自适应学习能力，可通过新增故障数据持续优化模型，提升未知故障识别能力，实现故障高效、精准初步判定。

2.4 模糊运算故障精细化分析

模糊运算主要解决诊断过程中的数据不确定性问题，实现故障程度与风险精准量化分析。针对泵站监测数据存在的模糊性、随机性特征，通过构建科学隶属函数，完成精确数据到模糊语言变量的转化，直观表征故障程度与风险态势。整合泵站运维专家经验、设备技术规范与历史故障规律，搭建完善的模糊推理规则库，建立故障特征与故障类型、严重程度的关联推理逻辑。采用标准模糊推理算法完成逻辑运算，通过去模糊化处理输出故障发生概率、严重程度等量化结果，弥补单一神经网络诊断的局限性。该方法可有效处理不确定数据与干扰信号，细化故障等级，明确故障发展态势，为故障根源深度分析提供精准依据。

2.5 多技术协同诊断决策优化

多技术协同诊断整合各类技术优势，构建闭环式泵站故障诊断与决策体系。以预警预报系统为载体，衔接异常识别、神经网络分类、模糊运算分析环节，形成逐层递进、优势互补的诊断流程，先完成故障初步定位与分类，再开展精细化风险分析。整合专业运维知识、设备技术手册、历史故障案例，构建完善的专家诊断知识库，通过规则推理精准定位故障根源，输出针对性维修方案、处置流程与长效防控建议。同时建立诊断结果反馈优化机制，将实际故障排查、维修处置数据同步录入系统，持续优化诊断模型与规则库，完善诊断逻辑，全面提升故障诊断的全面性、实操性与智能化水平。

3 基于预警预报系统的大中型泵站故障诊断效果

依托预警预报平台构建协同诊断体系，形成隐患感知、智能研判与处置反馈的闭环管理。相较于传统运维方式，该体系在预警、检修、设备管护与能耗管控方面优势突出，可改善泵站运维短板，保障工程长期稳定运行。

3.1 提升故障诊断精准度与预警超前性

整套诊断体系以多源监测数据融合为基础，配合动态阈值比对、神经网络分类与模糊推理联合研判，改变单一参数报警容易误判、漏判的缺陷。系统能够捕捉设备劣化初期微弱信号，将故障识别节点前移至隐患萌芽阶段，故障综合诊断准确率可达98%以上。算法可自动剥离工况波动带来的虚假异常，减少无效预警干扰，同步锁定故障发生位置、劣化发展速率与危害等级，缩短人工排查耗时。在机组出现明显故障现象之前完成风险识别，为运维人员预留充足处置窗口，遏制隐患持续恶

化，降低突发性停机概率，满足泵站连续不间断运行的现实需求。

3.2 推动运维模式转型优化资源配置

传统运维多采用固定周期检修或者故障发生后抢修，检修时机难以与设备实际健康状态匹配，容易出现检修过剩或者维护缺位的问题。智能诊断体系依靠持续健康评估与故障趋势预判，推动运维方式向状态检修转变。系统依据风险分级结果生成差异化维护计划，合理确定检修时段、检修项目与备件储备，减少应急抢修产生的额外投入。运维资源优先投向高风险部件，避免盲目拆解、无差别更换零部件，提升备品备件利用效率，从资源调度层面实现运维管理精细化[5]。

3.3 延缓设备性能衰减延长服役周期

大中型泵站机组长期在变负荷、水力扰动复杂条件下运行，隐性缺陷不断累积会加速部件老化磨损。预警预报系统持续跟踪振动、温升、水力工况等特征参数，动态评估设备健康状态，及时发现润滑失效、间隙增大、气蚀损伤等渐进式劣化问题。在损伤较轻阶段开展治理，阻止缺陷持续扩展，降低零部件不可逆损坏概率，减缓整体性能下滑速度。持续的健康管控能够保持机组运行工况稳定，减少冲击载荷对机械、电气部件的损耗，有效延长主要机电设备的使用年限，提升固定资产利用效益。

3.4 改善机组运行工况降低综合能耗

设备出现隐性故障后，运行阻力增大、水力匹配关系失衡，会造成泵站能耗上升、运行效率下降。智能诊断平台在识别故障的同时，同步采集流量、扬程、功率等运行指标，分析机组低效运行诱因，区分设备故障与调度方案不合理两类问题。通过持续优化机组运行组合与工作区间，使泵组尽量维持在高效区间运行，降低无用能耗。长期运行数据表明，依托诊断系统开展工况优化，能够减少异常损耗带来的电能浪费，在保障输水能力不变的前提下，实现泵站运行能效稳步提升，削减工程常态化运行能耗成本[6]。

3.5 完善数字化运维体系促进管理升级

诊断系统长期积累设备监测记录、预警信息、故障类型、维修台账，形成完整的设备全生命周期数据库，所有运维流程均可追溯。平台将分散的运维经验转化为标准化诊断规则，降低现场管理对资深技术人员的依赖，统一故障处置流程，减少人为判断偏差。同时，系统可以不断吸纳新增故障样本持续迭代算法模型，形成自我完善的智能运维机制，推动泵站运维由经验驱动向数据驱动转变。整套数字化管控体系能够为泵站智慧化改造提供实践样本，持续提升大中型水利泵站现代化管理水平。

结束语

本文依托预警预报系统，总结大中型泵站故障演化的量化特征，建立多源数据融合、BP神经网络分类与模糊运算相结合的协同诊断体系，实现隐患提前识别、故障溯源与风险分级管控。研究结果表明，该一体化方案诊断准确率可达98%以上，能够推动运维模式由事后抢修转向状态检修，改善机组运行能效，为泵站数字化运维提供可行思路。

参考文献

[1]孙承鹏,胡厚科,孟胜兰,等.大型泵站机电设备安全管理的分析与探讨[J].水电站机电技术,2024,47(02):106-109.

[2]范开鑫.BIM技术在大型泵站机电设备维修中的应用[J].冶金管理,2026,(02):55-57+61.

[3]李昂.大型泵站机电设备安装分析及措施[J].水电站机电技术,2024,47(02):27-30+123.

[4]王榕,宋银杰,武健,等.双王城水库入库泵站机电设备运行问题分析及措施[J].水电站机电技术,2024,47(02):84-87.

[5]康晴.某泵站机电设备故障分析及维护策略[J].水电站机电技术,2024,47(07):108-111+141.

[6]张健,孙鲁楠,董通,等.信息化背景下泵站机电设备维修养护策略研究[J].水电站机电技术,2024,47(10):111-114+133.