

工过程中膜体被砂石穿刺,下层土工布能增强膜体与坝体土的摩擦力(摩擦系数 ≥ 0.35),避免极端降水导致库水位骤降时膜体滑动^[2]。

3.2.2 工艺优化

针对中小型水库坝坡坡度大(多为1:2.5-1:3)、施工场地狭窄的特点,采用“分段铺设+热熔焊接+双轨检测”工艺。分段铺设时,每段长度控制在50m以内,避免因膜体过长导致铺设过程中产生褶皱;热熔焊接采用自动爬行焊机,焊接温度控制在180-200℃,焊接速度2-3m/min,搭接宽度15-20cm,形成双轨焊缝(中间留充气检测通道);焊接完成后,采用充气检测法(压力0.2MPa,保压5min无压降)逐段检测,合格率需达100%,杜绝焊缝渗漏。同时,在复合土工膜上游侧铺设5-10cm厚的黏土保护层(压实度 $\geq 90\%$),下游侧设置排水层(级配碎石),既防止紫外线老化与水流冲刷,又能及时排出膜下渗水,避免膜体长期受水压作用破损。

3.3 坝体裂缝精准注浆技术

极端降水下,坝体原有裂缝会因渗压增大而扩展,形成贯通性渗漏通道,传统注浆技术(如单一水泥浆液)因颗粒粗、流动性差,难以注入细微裂缝(宽度 $< 0.5\text{mm}$)。改进后的坝体裂缝精准注浆技术,通过“复合浆液研发+智能化注浆设备应用”,实现渗漏通道的高效封堵,核心改进包括:

3.3.1 复合浆液体系

研发“超细水泥-环氧树脂乳液”复合浆液,超细水泥选用粒径 $\leq 10\mu\text{m}$ 的Portland水泥,其比表面积是普通水泥的3-4倍,能有效填充细微裂缝;环氧树脂乳液以2%-3%的掺量掺入,通过与水泥水化产物的化学反应,提升浆液与坝体材料的黏结强度(黏结强度 $\geq 1.0\text{MPa}$),同时增强注浆体的抗渗性(渗透系数 $\leq 10^{-8}\text{cm/s}$)。浆液配合比需根据裂缝宽度调整:裂缝宽度0.2-0.5mm时,超细水泥:环氧树脂乳液:水=1:0.03:0.6;裂缝宽度0.5-1.5mm时,配合比调整为1:0.02:0.5,确保浆液流动性与强度平衡。此外,针对渗水活跃的裂缝,可掺入1%-2%的水玻璃(模数3.0-3.2),缩短浆液初凝时间(控制在15-30min),避免浆液被渗水稀释流失^[3]。

3.3.2 智能化注浆设备方面

采用“全自动压力流量控制系统+多通道注浆泵”,设备可实时监测注浆压力(控制在0.3-0.5MPa)与流量,当压力骤升时自动降低注浆速度,避免压力过高导致坝体二次开裂;当流量骤降时提示裂缝填充饱满,及时停止注浆,减少材料浪费。同时,设备配备数据存储功能,可记录每孔注浆参数,形成注浆质量追溯档案,解决传统人工注浆参数失控的问题。

3.3.3 注浆施工流程

注浆施工需遵循“先探测-后注浆-再验证”的流程:

首先采用地质雷达(探测深度0-5m,分辨率 $\leq 5\text{mm}$)扫描坝体,确定裂缝分布范围与深度;然后按“先外围孔-后中心孔”的顺序布设注浆孔,孔距1.0-1.5m,孔深超裂缝深度0.5-1.0m;注浆完成后,通过压水试验(透水率 $\leq 1\text{Lu}$)与钻孔电视观测验证封堵效果。在极端降水场景下,此类技术可将裂缝渗流量从1.5-2.5L/s降至0.1L/s以下,注浆体28天抗压强度达15-20MPa,确保裂缝处结构稳定性,避免渗漏通道进一步扩展。

3.4 坝基复合防渗帷幕技术

3.4.1 工艺组合设计

根据坝基地质类型优化流程:对于松散砂卵石层(渗透系数 $> 1 \times 10^{-3}\text{cm/s}$),先采用高压喷射注浆形成防渗桩墙,再进行帷幕灌浆补强。高压喷射注浆采用三重管法,喷射压力20-25MPa,提升速度10-15cm/min,喷射半径0.8-1.2m,防渗桩按梅花形布置,桩间搭接宽度 $\geq 0.3\text{m}$,形成连续的防渗屏障;帷幕灌浆孔布置于防渗桩墙下游侧,孔距1.5-2.0m,孔深穿透砂卵石层进入下伏隔水层0.5-1.0m,浆液选用水泥-水玻璃双液浆(水玻璃掺量3%-5%),初凝时间30-60min,避免极端降水下浆液流失。

3.4.2 参数控制

通过现场试验确定关键指标:高压喷射注浆的桩身完整性检测合格率需达100%,渗透系数 $\leq 1 \times 10^{-6}\text{cm/s}$;帷幕灌浆的压水试验透水率 $\leq 1\text{Lu}$,灌浆结石体28天抗压强度 $\geq 10\text{MPa}$ 。同时,在防渗帷幕上下游侧设置观测孔,监测坝基渗压与渗流量,确保极端降水下坝基扬压力系数控制在0.6-0.7以下,深层渗漏量减少90%以上。

4 结论

极端降水条件下,中小型水库坝体防渗技术的改进需围绕“抗渗性、耐久性、适应性”三大核心,通过改性黏土、复合土工膜、精准注浆、复合帷幕等技术的创新与集成,构建适配中小型水库工程特点的防渗体系。工程实践表明,改进后的技术不仅能有效抵御极端降水下的高渗压、强冲刷风险,还能兼顾经济性与施工便捷性,为水库除险加固提供可行方案,对提升区域防洪安全与水资源保障能力具有重要意义。通过技术持续改进与应用创新,将进一步提升中小型水库在极端天气下的安全韧性,为我国水利基础设施高质量发展提供技术支撑。

参考文献

- [1] 于阳. 水库坝体混凝土防渗墙防渗加固效果模拟分析[J].水利技术监督,2025,(09):199-201+293.
- [2] 刘乾坤. 水库大坝防渗墙施工技术与质量控制[J].城市建设 DOI:10.19569/j.cnki.cn119313/tu.202511045.
- [3] 张伟杰,刘宇,张三定. 花凉亭水库除险加固中对坝体问题之地质勘察分析[J].地下水,2025,47(01):244-246+258.
- [4] 陈世莲. 枫树坪水库库区及坝体坝基渗漏处理措施[J].甘肃水利水电技术,2024,60(10):54-56+61.

Research on Fault Diagnosis and Intelligent Maintenance Technology for Water Conservancy Electromechanical Equipment

Peidong Ji Zhaoxin Gao Wenjuan Ma

China South-to-North Water Diversion Group Central Route Co., Ltd. Henan Branch, Zhengzhou, Henan, 450000, China

Abstract

As an important component of water conservancy projects, the stability and safety of water conservancy electromechanical equipment directly affect the realization of core functions such as water transfer, flood control, irrigation, and power generation. With the deepening development of automation and informatization, the traditional manual inspection and periodic maintenance model can no longer meet the operational demands of large and complex electromechanical equipment. This paper focuses on the fault diagnosis of water conservancy electromechanical equipment as the core research, starting from the system structure characteristics, fault types, and diagnostic principles, analyzing the operational abnormalities of common mechanical, electrical, and control systems, and exploring the application of diagnostic technologies based on intelligent perception, signal analysis, and artificial intelligence algorithms. The paper proposes to build an intelligent maintenance system integrating the Internet of Things, edge computing, and big data analysis to achieve real-time monitoring and predictive maintenance of equipment status. The study shows that intelligent maintenance technology can significantly improve the operational reliability and maintenance efficiency of equipment, providing technical support for the digital management of water conservancy projects.

Keywords

hydraulic and electrical equipment; fault diagnosis; intelligent maintenance; condition monitoring; artificial intelligence

水利机电设备运行故障诊断与智能化维护技术研究

吉培栋 高兆鑫 马文娟

中国南水北调集团中线有限公司河南分公司, 中国·河南 郑州 450000

摘要

水利机电设备作为水利工程运行的重要组成部分,其稳定性和安全性直接关系到调水、防洪、灌溉、发电等核心功能的实现。随着自动化与信息化的深入发展,传统的人工检测与定期维护模式已难以满足大型复杂机电设备的运行需求。本文以水利机电设备的运行故障诊断为研究核心,从系统结构特征、故障类型及诊断原理入手,分析常见机械、电气及控制系统的运行异常机理,探讨基于智能感知、信号分析与人工智能算法的诊断技术应用。文章提出构建融合物联网、边缘计算与大数据分析的智能维护体系,实现设备状态的实时监测与预测性维护。研究表明,智能化维护技术可显著提升设备运行可靠性与运维效率,为水利工程的数字化管理提供技术支持。

关键词

水利机电设备; 故障诊断; 智能维护; 状态监测; 人工智能

1 引言

在现代水利工程体系中,机电设备承担着动力传输、控制调节与自动监测等关键任务,包括启闭机、泵站设备、水轮机组、电气控制系统及监控网络等。由于运行环境复杂、负荷波动频繁、运行周期长,设备易出现机械磨损、振动异常、电气短路、传感器失准等问题,影响系统整体稳定性。传统的设备管理依赖定期巡检与经验判断,存在诊断滞后、效率低、维护成本高等不足。随着智能感知与数据分析技术的广泛应用,水利机电设备的运行维护正由被动修复向主动

诊断与预测性管理转变。智能化诊断技术通过对设备状态数据的实时采集、分析与建模,能够实现早期故障识别与风险预警,减少突发性停机事故。本文旨在系统探讨水利机电设备故障诊断与智能化维护的关键技术路径,提出基于多源信息融合与人工智能算法的创新思路,以期为水利工程设备的高效、安全运行提供科学参考。

2 水利机电设备运行特征与故障成因分析

2.1 水利机电设备的系统构成与运行特点

水利机电设备种类繁多,涵盖动力设备、传动装置、控制系统及测控仪表等多个层面。动力部分包括泵站机组、水轮机和电动机,负责能量的转化与传输;控制部分包含 PLC 控制系统、继电保护及自动监控网络,承担设备启停

【作者简介】吉培栋(1979-),男,中国河南温县人,硕士,高级工程师,从事精密检测与故障诊断技术研究。

与运行调节；测控仪表与传感器用于监测温度、压力、流量、电流、电压等运行参数。设备运行过程中受水流冲击、机械振动及电磁干扰等影响，其动态响应复杂且非线性特征显著。长期运行导致机械部件疲劳、润滑系统老化、电气接触不良，进而引发连锁故障。因此，水利机电设备的运行具有连续性、高风险性与环境依赖性，其健康状态直接决定水利工程系统的稳定与安全。

2.2 常见故障类型及影响机制

水利机电设备的故障主要分为机械类、电气类与控制类三大类。机械类故障常见于轴承磨损、转子不平衡、联轴器松动、叶轮损坏等，表现为振动异常、噪声增加及效率下降。电气类故障包括电机绕组短路、绝缘老化、功率波动等问题，容易引发温度过高或跳闸事故。控制系统故障多源于传感器漂移、信号丢失、控制逻辑异常等，造成设备误动作或运行失稳。这些故障往往相互影响，形成多源耦合效应，增加诊断复杂度。若未能及时识别和干预，不仅会导致设备性能退化，还可能引发安全事故和经济损失。

2.3 传统诊断方法的局限性

传统的水利机电设备维护多采用定期检查与经验判断相结合的方式。虽然此类方法操作简便，但存在明显滞后性与主观性。人工巡检依赖操作人员经验，对早期隐蔽性故障识别能力不足；常规检测方法如红外测温、听音诊断等，难以实现实时监测和数据量化。此外，传统模式无法充分利用设备运行数据，难以建立故障与特征参数之间的系统关联。随着设备规模扩大与自动化水平提升，人工监测模式已无法满足复杂系统的安全需求，迫切需要以数据驱动与智能分析为核心的诊断体系。

3 故障诊断的关键技术与发展趋势

3.1 基于信号特征分析的故障识别方法

信号分析技术是设备故障诊断的基础，通过采集振动、声音、电流、温度等信号特征，提取反映设备状态的关键信息。时域分析能够揭示信号波形的瞬态特征，适用于捕捉设备运行中的瞬时变化，进而识别潜在故障。频域分析通过对信号的频率分量进行分析，可以有效识别轴承、齿轮等转动部件的故障，如振动频率的异常变化常常指示着机械部件的磨损或失效。时频分析技术，如小波变换与 Hilbert-Huang 变换，兼具局部化和分辨能力，能够处理非平稳信号，广泛应用于复杂设备的故障诊断。近年来，信号融合技术取得了显著进展，通过多源数据的协同分析，能够提高特征提取的准确性和鲁棒性，确保智能诊断算法能够获得高质量的输入数据，从而提升故障诊断的精度和可靠性。

3.2 基于模型的故障机理分析

模型驱动的诊断方法以设备的运行机理为基础，建立数学模型或物理模型，通过对比系统的输入与输出特征来识别设备状态的偏离。该方法特别适用于结构明确且运行

规律可以量化的设备，如水泵、阀门、电机等。通过参数估计与残差分析，能够检测设备的故障类型和程度。例如，在水泵系统中，通过建立基于能量平衡方程的数学模型，可以有效检测流量、扬程与效率的异常变化，从而判断设备是否存在故障。随着仿真技术的不断发展，数字孪生模型已广泛应用于设备运行监控中，通过实时映射设备状态，数字孪生不仅支持预测性维护，还能够进行动态优化，提升设备运行的智能化水平。

3.3 基于人工智能的智能诊断技术

人工智能技术的引入为水利机电设备故障诊断提供了全新的思路。机器学习方法通过样本训练构建分类器，能够识别复杂的特征模式并进行故障分类。常见的算法包括支持向量机 (SVM)、随机森林、K 近邻算法 (KNN) 等，尤其适用于中小规模数据分析，能够有效处理从设备采集到的多维信号。深度学习方法则在大数据环境下表现出强大的优势，卷积神经网络 (CNN) 与长短期记忆网络 (LSTM) 可以自动提取高维特征，尤其在振动信号和声学信号的精准识别上展现出强大的能力。通过自适应学习，智能算法能够理解并学习不同设备的运行规律，具备良好的泛化能力和自优化特征，为设备的自学习、自诊断系统奠定了坚实的基础，为实现高效、自动化的故障诊断提供了技术支撑。

4 智能化维护体系的构建与技术实现

4.1 基于物联网的实时监测与数据采集体系

物联网技术的引入使设备状态监测实现了实时化与网络化，推动了智能维护系统的革新。通过传感器、采集节点和通信模块的协同工作，关键运行参数得以在多个监测点进行实时采集，并通过无线通信网络远程传输至数据处理中心。数据经过边缘计算后被上传至云平台，实现多层级的监控与管理。这些传感器通常布设在设备的关键部位，如轴承温度、振动加速度、电流波形、油压与水头变化等，通过精准的数据采集为设备的健康状况提供实时反馈。结合智能终端，设备的健康状态可以在线可视化展示，便于操作人员及时了解设备运行情况。此种实时监测与数据采集体系减少了人工干预的需求，增强了数据采集的连续性与精度，为后续的智能诊断与维护决策提供了可靠的基础。通过对数据的实时监控，能够及时识别潜在故障风险，降低设备故障发生的概率，提升整体系统的运行效率。

4.2 基于大数据与预测算法的健康评估机制

随着海量设备运行数据的积累，健康评估已成为智能维护系统的核心环节。通过对设备运行数据的统计分析、特征提取与异常检测，可以建立设备健康指数模型，量化设备的运行状态，并为后续为维护决策提供依据。基于时间序列分析和机器学习算法，能够预测设备的性能退化趋势，并提前发出故障预警。典型的预测方法包括 ARIMA 模型、神经网络预测与贝叶斯推理等，这些方法能够根据历史数据与实