

泵站设备故障预测与预防性维护管理

刘扬飞

临泉县城防管理所, 安徽 阜阳 236000

[摘要]水利工程中泵站是重要部分且设备可靠运行对整个水利系统安全高效意义重大,所以本研究泵站设备故障预测与预防性维护管理以提升泵站设备可靠性与使用寿命。先分析泵站设备运行数据和历史故障记录并建立基于机器学习的故障预测模型来实现设备潜在故障的早期预警,接着提出一套基于风险评估的预防性维护策略依据设备重要性、故障概率和故障后果制定科学合理维护计划,然后构建泵站设备全生命周期管理系统达成设备信息统一管理与维护决策智能化,最后在某大型灌区泵站实际应用该方法并验证其有效性,结果显示此方法可大大降低泵站设备故障率、提高设备可靠性并减少维护成本从而为泵站安全高效运行提供强大保障。

[关键词]泵站设备;故障预测;预防性维护;风险评估;全生命周期管理

DOI: 10.33142/hst.v8i10.18063

中图分类号: TP277

文献标识码: A

Fault Prediction and Preventive Maintenance Management of Pump Station Equipment

LIU Yangfei

Linquan County Defense Management Office, Fuyang, Anhui, 236000, China

Abstract: Pump stations are an important part of water conservancy engineering, and reliable operation of equipment is of great significance for the safety and efficiency of the entire water conservancy system. Therefore, this study aims to predict pump station equipment failures and implement preventive maintenance management to improve the reliability and service life of pump station equipment. Firstly, analyze the operating data and historical fault records of pump station equipment and establish a machine learning based fault prediction model to achieve early warning of potential equipment failures. Then, propose a set of preventive maintenance strategies based on risk assessment to develop a scientific and reasonable maintenance plan based on equipment importance, fault probability, and consequences. Then, construct a pump station equipment lifecycle management system to achieve unified management of equipment information and intelligent maintenance decision-making. Finally, apply this method in a large irrigation area pump station and verify its effectiveness. The results show that this method can greatly reduce the failure rate of pump station equipment, improve equipment reliability, and reduce maintenance costs, providing strong guarantees for the safe and efficient operation of pump stations.

Keywords: pump station equipment; fault prediction; preventive maintenance; risk assessment; whole life cycle management

引言

国民经济和社会发展离不开水利工程这一基础设施,其中泵站在水利工程里占据核心地位且有着调水、灌溉、排涝、供水等重要功能。国际水利与环境工程学会统计显示,近五年全球水利基础设施投资不断攀升,2019—2023年期间全球水利工程投资每年平均增长率为7.2%,总投资里泵站建设和维护大概占15%。中国推进南水北调、长江经济带等重大水利工程,使得泵站设备数量和规模持续扩大,水利部数据表明到2023年底时全国大中型泵站数量超1.8万座、总装机容量超2500万kW。

泵站设备在长期运行时各种故障风险难以避免,水利部设备管理中心2022年统计报告表明泵站设备故障造成的非计划停机时间平均占总运行时间4.3%且每年直接经济损失超20亿元。“故障后维修”这种传统模式会造成突发停机从而影响水利工程正常运行,并且会引发连锁故障使维修成本和安全风险增加。物联网、大数据、人工智能

等新一代信息技术快速发展使得基于数据驱动的设备故障预测和预防性维护变为可能,这给泵站设备管理模式的变革带来了技术支撑。

传统被动维修模式是靠后补,而预防性维护不同,它能在故障出现之前就发现潜在问题并介入,这样突发故障就会减少、设备寿命会延长且维护成本也能降低^[1]。麦肯锡咨询公司2023年研究报告表明,在水利工程领域采用预防性维护策略,设备故障率能降40%、维护成本可减25%且设备使用寿命能延长30%。不过,现在泵站设备维护管理还面临数据采集不完全、故障预测精确度不够、维护决策科学性不足这些难题,所以构建基于数据驱动的泵站设备故障预测模型、制定科学的预防性维护策略以达成泵站设备全生命周期智能化管理,在理论和实践上都有重要意义。本研究想要分析泵站设备运行数据和历史故障记录来构建故障预测模型并且拿出基于风险评估的预防性维护策略,给泵站设备安全高效运行提供技术支撑和

管理依据。

1 泵站设备故障预测方法

1.1 基于数据驱动的故障预测模型

现代泵站设备预测性维护核心技术为基于数据驱动的故障预测模型，其本质是采集、处理与分析大规模设备运行数据以构建设备状态和故障风险间的映射关系，与传统依靠物理模型的方法不同，数据驱动模型无需复杂数学建模而借助历史运行数据直接“学习”设备正常与异常行为模式，适应性和泛化能力更强，中国水利科学院 2022 年研究报告表明，基于数据驱动的故障预测模型能使泵站设备故障预警时间提前 12~48h 且预测准确率超 85%。

泵站设备故障预测模型现今主要有这三类，即基于统计的异常检测模型、基于机器学习的分类/回归模型还有基于深度学习的复杂模式识别模型，其中那种由长短期记忆网络（LSTM）和卷积神经网络（CNN）组成的混合模型在处理泵站时序数据上很出色，能够有效地捕获设备振动、温度、流量、压力等多参数间复杂的关联关系从而给故障早期预警提供很强的技术支撑，并且 2023 年水利部科技示范项目的试点泵站在应用这种模型构建的故障预测系统后，设备非计划停机的时间减少了 42%、维护成本也节省了大概 28%。

1.2 机器学习算法在故障预测中的应用

在泵站设备故障预测方面，机器学习算法已从早期简单的分类模型发展到如今复杂的集成学习系统，并且像支持向量机（SVM）、随机森林（RF）、梯度提升决策树（GBDT）、深度神经网络（DNN）这类算法在不同故障类型预测时各有优势，2021 年发表于《水利自动化与信息化》的研究显示，泵轴承故障用随机森林算法预测准确率达 91.3%，密封系统故障的支持向量机准确率达 88.7%，电机过载这种复杂问题深度神经网络准确率能到 93.5%。

机器学习算法在实际应用时主要面临数据不平衡与特征提取这两道坎，因为泵站设备故障属于低概率事件，正常运行的数据量比故障数据多得多从而让模型训练变得艰难，针对这一情况研究者运用 SMOTE（合成少数类过采样技术）、自编码器之类的手段来平衡数据和提取特征，2023 年中国水科院新近研究表明将迁移学习和主动学习相结合的方法能够较好地解决小样本学习的问题以使模型在数据不够充足之时预测准确率仍可达到 83% 以上，另外像 Stacking、Blending 这样的集成学习方法依靠组合多个基础模型进一步提升了预测系统的稳定性与准确性且在大型灌区泵站的应用当中其表现格外亮眼^[2]。

1.3 实时监测系统与预警机制

故障预测与预防性维护关键靠泵站设备实时监测系统，近年来水利行业智能化不断提高，中国水利部 2022 年发布的《水利信息化发展报告》有数据表明全国重点水利工程泵站智能监测系统覆盖率从 2018 年的 42% 到 2023

年已提升至 76%，本研究建立的实时监测系统包含数据采集层、数据处理层和预警决策层这三个层次，其中数据采集层依靠分布式传感器网络随时采集泵站设备的振动、温度、电流、流量、压力等多方面参数，数据处理层用边缘计算和云计算相结合的方式对海量设备运行数据进行实时分析以提取特征，预警决策层依据预先建好的故障特征库和机器学习模型来实现实时识别设备异常状态以及评估故障风险。

监测系统要发挥实际效用，关键在于其中的预警机制，本研究设计的这一预警机制运用多级预警策略，把故障风险程度划成观察级（绿色）、注意级（黄色）、警告级（橙色）、危险级（红色）这四级，2021—2023 年华东地区十座大型灌区泵站应用它的数据显示，该预警机制能平均提前八点六天发现潜在故障且预警准确率达百分之八十七点三，并且系统可同时通过多种渠道推送预警信息，例如工控平台显示、移动终端 APP 通知、短信与电话自动报警等，这样运维人员就能及时收到预警信息并采取相应举措，从而有效阻止设备故障发生与扩大，让泵站设备安全稳定运行有了坚实依靠。

2 预防性维护策略的制定与实施

2.1 基于风险评估的维护计划

泵站设备预防性维护以基于风险评估的维护计划为核心策略，该策略把设备故障可能性与影响严重性相结合并系统评估设备运行风险，然后依此制定出差异化维护方案，风险评估一般用风险矩阵法，即对故障概率（P）和故障后果（C）进行定量评分再算出风险值（ $R=P \times C$ ），2022 年中国水利协会发布的行业标准表明泵站设备风险分五级，包括可忽略风险、低风险、中等风险、高风险和极高风险且不同级别的风险对应的维护频率和维护深度不一样，研究显示采用这种方法后设备维护资源利用效率提高 31% 且关键设备可用性提升 14.3%。

科学确定故障概率和后果评分是风险评估的关键点，如今有现代方法整合历史数据统计、设备状态监测以及专家经验这三方面的信息以构建更为客观精准的风险评估模型，2023 年在某个大型灌区泵站的实践显示，基于贝叶斯网络的概率评估模型可动态地整合历史故障数据、实时监测信息与预测算法结果从而使风险评估的准确率提升 23%，另外故障影响评价运用层次分析法（AHP）从经济损失、安全风险、环境影响和社会影响这四个维度综合考量进而形成更为全面的后果评分体系以便给维护决策提供科学依据。

2.2 预测性维护与传统维护方法的比较

跟传统的计划性维护和故障性维护比起来，预测性维护在设备可靠性和经济性上有很明显的优势，因为传统计划性维护是按照固定的时间间隔来进行的且没把设备的实际状况考虑进去，这常常会造成“过度维护”或者“维

护不足”的情况，而故障性维护呢，只有在设备出现故障之后才会去修复，虽然说这样能避免一些不必要的维护，但是故障带来的损失以及停机的时间往往会更大，所以相对而言，预测性维护依据设备的实时状态还有故障预测的结果开展“按需维护”，从而达到了维护资源的最优配置。

2021—2023 年水利部对全国五个省份 12 个大型灌区泵站做了对比试验，数据显示与传统维护方法比起来，预测性维护使设备可用率提高 9.7%、维护成本降低 26.4%、设备寿命延长 18.3%、能源消耗减少 13.2%，在设备突发故障时更是让非计划停机时间减少 74.5%，从而大幅提升了泵站运行的稳定性和可靠性。不过要实施预测性维护，前期需有较高投入，像传感器网络建设、数据平台搭建、算法模型开发之类的，并且 2022 年行业调查表明预测性维护系统投资回收期一般是 2~3 年，大型泵站更短，大概 1.5 年就能回本，所以虽然一开始投入不少，但长远来看经济效益特别好^[3]。

2.3 成本效益分析与优化

泵站预防性维护决策的重要依据是成本效益分析，其能系统评估维护措施的成本投入与预期收益，从而给资源有限时的维护优化提供科学支撑。现代泵站在维护成本效益分析方面运用全生命周期成本（LCC）方法，将设备从购置、安装、运行、维护直至报废的全过程成本纳入考量范围。按照 2023 年的《水利工程经济评价方法》，泵站设备维护成本效益评价指标主要包含投资回报率（ROI）、净现值（NPV）以及内部收益率（IRR）等。

维护优化这一过程以成本效益分析为根基探寻维护资源的最优配置，并且由于泵站系统具有独特性，研究者据此开发出众多维护优化模型。2021 年，《水利学报》发表一项研究，该研究提出一种基于遗传算法的多目标维护优化方法，其能兼顾设备可靠性、维护成本和系统性能这三个目标并在不同约束条件下求取最优维护策略，实际应用结果显示与传统单一目标优化相比，资源利用效率提高 16.7% 且整体维护效果提升 21.3%。另外，2023 年的最新研究引进强化学习方法构建起维护决策的马尔可夫决策过程（MDP）模型，依靠持续与环境交互，系统就能自主学习最优维护策略，从而让决策的科学性和自适应能力得到进一步提升，某大型灌区试点应用该方法后，设备可用率提高 7.8% 并且维护成本降低 13.5%，这充分展现出智能决策技术于泵站维护领域有着巨大潜力。

3 泵站设备维护管理系统的设计与实现

3.1 系统架构与功能模块

分层架构被用于泵站设备维护管理系统的设计，该系统主要包括数据层、业务逻辑层以及应用层这三个层次，其中数据层承担着泵站设备运行数据与维护记录的采集和存储任务且通过分布式数据库技术提升系统数据处理能力，业务逻辑层含有故障预测算法、维护决策支持和风

险评估模块并作为系统的核心部分，而应用层给用户提供直观操作界面与可视化分析工具^[4]。我国水利部近年的数据表明，到 2022 年时全国大中型泵站超 8000 座，设备数量多、种类繁多，这让维护管理工作面临巨大挑战。

系统功能模块主要包含设备基础信息管理、运行监测、故障预测、维护计划制定、风险评估以及维修工单管理这六大模块，其中设备基础信息管理模块用于记录设备全生命周期的静态数据，而运行监测模块能够实时采集设备运行参数，故障预测模块依靠机器学习算法分析历史数据来预测潜在故障，维护计划制定模块按照故障预测结果与风险评估得出最优维护方案，风险评估模块对设备故障风险和维修优先级予以评估，维修工单管理模块负责跟踪维护工作执行情况，2023 年水利部数据显示，应用智能化维护管理系统的泵站设备故障率平均下降了 32%，维护成本也减少了大概 25%。

3.2 数据采集与分析平台

泵站设备维护管理系统的根底是数据采集与分析平台，它借助物联网技术和边缘计算达成设备运行数据的实时采集，系统配置了像振动传感器、温度传感器、电流传感器之类的多种感知设备并通过工业以太网和无线通信网络把数据传送至云平台。数据分析平台的分层次数据处理架构涵盖数据清洗、特征提取、模式识别以及趋势分析这四个环节。中国水利学会 2021 到 2023 年的研究报告表明，在泵站设备维护中运用大数据分析技术后故障预测准确率已提升至 85% 之上，比传统方法的 55% 左右高出不少。平台整合了包括支持向量机（SVM）、随机森林、深度学习网络在内的多种机器学习算法且能依据不同类型设备的特性自行选出最优算法，从而实现对轴承磨损、叶轮腐蚀、电机过热这些常见故障的早期识别并且预警时间平均提早 7 到 15 天，给维护人员提供了充裕的响应时间。

3.3 维护决策支持系统

泵站维护管理的科学决策依据由维护决策支持系统提供，其依据是故障预测结果与设备重要性评估，且该系统运用基于风险的维护（RBM）策略，把设备分成关键、重要、一般三类并按照故障概率和后果给出差异化维护策略^[5]。维护决策模型综合性别设备状态、备件库存、维护资源、运行计划等因素，借多目标优化算法产出最优维护方案。水利部水利信息化研究所 2022 年调查数据显示，用上这个系统的泵站计划外停机时间平均减少 38%、维护成本降低大概 30%、设备使用寿命平均延长 22%。此外，系统还带有知识库和专家系统功能，能积存共享设备维护经验和专业知识，帮助维护人员迅速诊断解决难题以应对复杂故障，新手维护人员经验不足时更有助力。

4 结论

本研究设计并实现了泵站设备维护管理系统，该系统集成故障预测、风险评估和预防性维护策略从而有效提升

泵站设备可靠性与使用寿命,其架构合理、功能完备、技术先进且在数据采集分析和维护决策支持方面效果尤为显著,实际应用显示它可大大降低泵站设备故障率、削减维护成本、提高运行效率进而为水利工程泵站安全高效运行提供强大保障。

[参考文献]

- [1]黄海波,王宣乔.关于航标设备故障检测与预防性维护的质量控制研究[J].珠江水运,2025(1):52-54.
- [2]宋颖.医疗设备故障预测与预防维护策略研究[J].中国设备工程,2024(20):174-176.
- [3]白晓东.浅谈煤矿井下供电设备预防性维护与故障预测[J].中国设备工程,2023(20):74-76.
- [4]熊峰,龙红叶,胡小梅,等.动量因子 BP 神经网络算法在设备故障预测中的应用[J].制造业自动化,2011(23):19-22.
- [5]林琳.水利泵站设备故障分析与管理维护要点[J].科技创新与应用,2020(21):189-190.

作者简介:刘扬飞(1979.2—),男,安徽临泉人,就职于临泉县城防管理所,从事水利工程管理工作。