

基于数字孪生技术泵闸安全分析评估

万 艳^{1,2}

1. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200335

2. 三峡智慧水务科技有限公司, 上海 200335

[摘要] 随着信息化技术不断发展, 数字孪生技术在水利方向应用不断深入, 如何将传统水利模型计算与信息化技术结合应用, 通过水利模型计算及分析泵站安全健康值得深入研究, 基于信息化及数字化的泵闸工程安全分析与健康评估是以状态监测为核心, 在监测、检测、调查及维修养护的基础上, 建立实时的泵闸工程数字孪生或虚拟仿真(或仿真)物理镜像模型, 结合可视化, 对泵闸工程系统的全生命过程进行实时状态分析、损伤分析、复核分析、安全分析、健康分析及预报预警, 以保证泵闸工程的安全健康和高质量运行。

[关键词] 泵闸安全; 数字孪生; 安全模型评估; 设备健康度

DOI: 10.33142/hst.v8i5.16498

中图分类号: TV697

文献标识码: A

Safety Analysis and Evaluation of Pump Gates Based on Digital Twin Technology

WAN Yan^{1,2}

1. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai, 200335, China

2. China Three Gorges Smart Water Technology Co., Ltd., Shanghai, 200335, China

Abstract: With the continuous development of information technology, the application of digital twin technology in the field of water conservancy is deepening. How to combine traditional water conservancy model calculation with information technology, and analyze the safety and health of pump stations through water conservancy model calculation and analysis is worth further research. Based on information and digitalization, the safety analysis and health assessment of pump and sluice engineering are centered on state monitoring. On the basis of monitoring, detection, investigation, and maintenance, real-time digital twin or virtual simulation (or simulation) physical mirror models of pump and sluice engineering are established. Combined with visualization, real-time state analysis, damage analysis, review analysis, safety analysis, health analysis, and forecast warning of the entire life process of pump and sluice engineering systems are carried out to ensure the safety, health, and high-quality operation of pump and sluice engineering.

Keywords: pump gate safety; digital twin; safety model evaluation; equipment health

1 研究背景

闸站工作条件复杂, 安全受多种因素影响, 其安全性往往是多种因素综合作用的结果, 并不能单纯地用某一种原因解释, 其主要问题为: 防洪能力问题、闸室和翼墙整体稳定性问题、涵闸下消能防冲设施问题、涵闸基和两岸

渗流破坏问题、建筑物结构问题或老化问题、闸室锈蚀问题、启闭设施和电气问题、涵闸上下游淤积及闸室磨损问题、涵闸抗震问题、管理及管理设施问题。根据涵闸安全的主要问题及水闸安全评估工作实际和《水闸安全评价导则》(SL 214—2015)的要求, 闸安全分析主要包括:

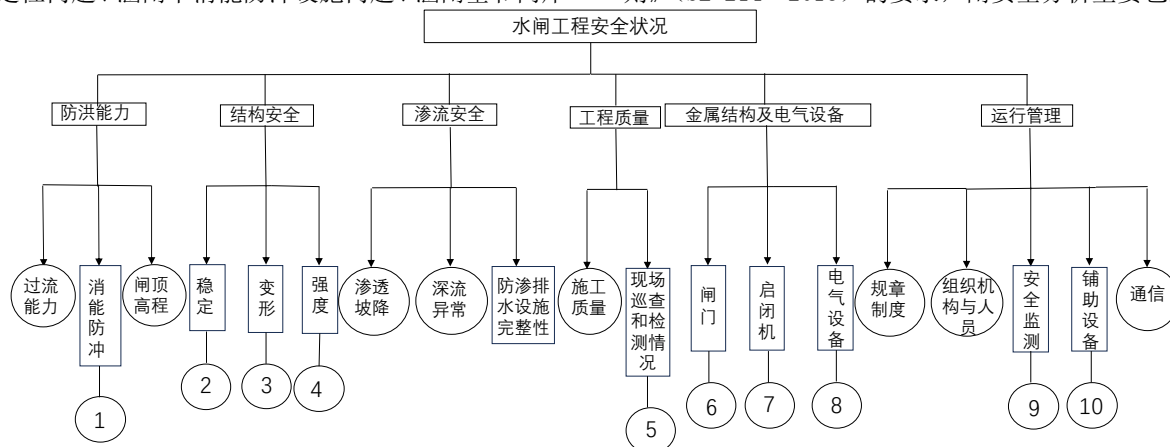


图1 水闸安全状况分析图

2 安全监测模型分析

安全监测模型分析是基于一定的物理背景,确定影响观测量的影响因素,构建统计模型。统计模型是以历史实测数据为基础、以环境量作为自变量、以监测效应量作为因变量、利用数理统计分析方法而建立起来的、定量描述监测效应量与环境量之间统计关系的数学方程。

针对闸站监测系统布置情况,首先进行监测系统工作状况评价,筛选出测值可靠的测点,再对测值总体可靠的测点的实测数据进行误差分析,剔除粗差,然后进行过程线分析、效应量与荷载间的变化规律分析、时空分布规律分析和量值分析。

闸站安全监测领域常用统计模型采用的分析方法是回归分析。在回归分析中,假定因变量的误差呈正态分布,而对自变量的误差分布并无要求。即只把因变量视为随机变量,把自变量视为非随机变量。回归分析的主要目的就是要找出变量的数学期望随着自变量的变动而变动的规律。

水工建筑物的观测物理量大致可归纳为两大类,第一类为荷载集,如水压力,泥沙压力,温度,地震荷载等;第二类为效应集,如变形、裂缝开度、应力、应变、扬压力或孔隙水压力、渗流量等。通常将荷载集的变量称为自变量,效应集的称为因变量^[1]。

建立统计学模型关键是正确选择回归因子。逐步回归是逐步引入因子或剔除因子,而每一步都要作统计检验(F检验),以保证每次引入新的显著因子以前,回归方程中只包含有显著因子,直到所有显著因子都包括在回归方程以内为止^[2]。

在实际工程问题中,影响因变量的因素往往是复杂多样的。找出各个因素对某一变量的影响,建立他们之间的数学表达式,即回归模型。

推求统计模型中的最佳回归系数,基本方法为最小二乘法。按照统计模型,将观测到的某种水工构筑物安全性态分解成若干与环境变量的相关项。集成变形、渗流、应力等专项计算方法,构建安全监测分析模型,可根据实测或预报的环境量,预测水工构筑物安全性态,定量分析工程关键效应量的变化规律,并实现预测预报^[3]。

通过对代表性坝段、代表性监测量进行统计模型研究,对模型进行定性、定量分析,得出因子数目较少、复相关系数较高、成果合理的各监测项目推荐模型。

根据监测类型和测值特点,采用规范法、典型小概率法、置信区间法等方法,建立闸站安全预警指标,评价测点分级指标体系,并构建基于多源信息融合的闸站安全诊断模型,提升工程安全在线监控预警能力。

典型监控效应量的小概率法是根据不同类型闸站的具体情况,选择不利荷载组合时的监测效应量或它们的数学模型中的各个荷载分量。监测效应量为随机变量,每年有一子样,因此得到一个样本空间,估计其特征值,用统

计检验法(如A-D法、K-S法),对其进行分布检验,得其概率密度函数的分布函数(如正态分布函数、对数正态分布和极值I型分布等),确定失事概率后,即可求得相应水平的监控指标。

3 设备健康诊断模型

建立基于本项目泵站的结构和组成,依托在线监测数据和离线检查与试验数据,建立设备健康评价指标体系。基于层次分析理论,根据历史数据拟合计算出动态阈值优化算法,建立“设备-设备部件-部件状态量/性能指标量-判断依据”或“设备-状态量/性能指标量-判断依据”等多层次综合计算评分的健康评价模型,通过状态评价、部件评价、整体评价三个层次实现设备健康状态评价。

设备健康评价模型主要针对泵站的主机组进行健康评价,包括主水泵、主电机。可通过对转速、振动监测、红外视频、大轴姿态与磨损、电机温度、辅机压力流量温度等机组设备监测数据,实现主机组全方位安全评价。

设备健康评价模型算法说明,采用基于大数据、数据可视化技术的设备健康画像分析,综合展示设备运行的全数据,结合设备在线异常检测、故障诊断、声音成像算法、能耗分析算法的运算结果,以时间、设备/部件、工况等多种线索来展示设备运行状态和健康状态,并通过机理、数据关联等线索,展现健康状态与各数据要素间的同步形态和趋势联系,提供设备全方位的健康评估

泵机健康评价即故障预测与健康管理的PHM(PrognosticsHealthManagement),为了满足自主保障、自主诊断的要求提出来的,强调资产设备管理中的状态感知,监控设备健康状况、故障频发区域与周期,通过数据监控与分析,预测故障的发生,从而大幅度提高运维效率^[4]。

根据泵站主设备包括主水泵、主电机等的运行状态,结合现场调研和专家经验,结合关键设备关键部件的测点处布设了大量的传感器,可以采集温度、振动信号。因此,对泵站设备进行健康评估,针对温度、振动指标进行风险预测和分析,建立泵机健康评价模型。

在核心工作部分设置OPC采集器,OPC采集器内包括振动传感器、温度传感器、湿度传感器和计数器等,通过OPC采集器实时采集各个评价对象对应的评价指标的实时数据,然后对采集到的实时数据与对应的阈值进行比较,其中,阈值的制定是根据设备规格和不同工况下对应部分产生的历史数据为依据,且阈值制定为四个等级,四个等级分别对应“良好”“可用”“需维修”“危险”四个指标级别。

3.1 设备健康状态基准模型及阈值模型算法说明

建立了基于历史数据的机组设备健康状态基准模型及阈值模型,该模型根据设备振动、温度数据和对应的相关工况数据建立基于最小二乘曲面的健康状态基准模型及阈值模型,能很好地追踪泵组设备运行过程中振动、温度状态参数的变化,对机组设备状态进行及时评价和预警。

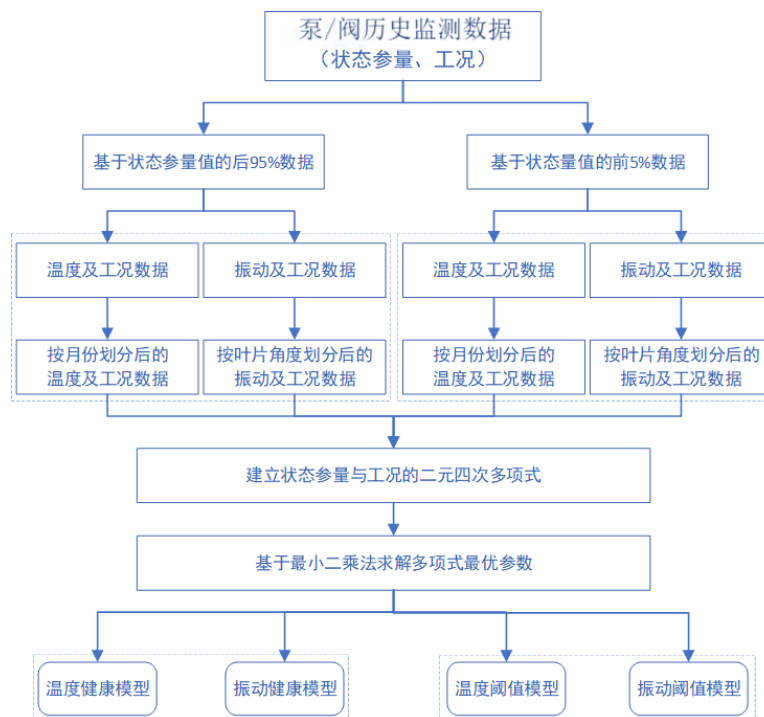


图2 设备健康状态基准模型及阈值模型

3.2 设备健康状态预测模型算法说明

3.2.1 关键状态参数选择

主水泵和主电机是泵站运行的核心设备,影响整个输水系统的运行和性能。因此,对主水泵和主电机进行监测、预测、分析可以及时发现机组的潜在故障和异常情况,避免机组出现停机或者损坏,从而保证泵站的正常运行和供水的稳定性。选择能够表征设备风险的关键状态参数:温度和振动指标来建设智能数据模型。

当主水泵和主电机出现故障或异常情况(如离心泵叶轮不平衡、轴承磨损、主电机不平衡、密封部件磨损破坏等)会导致振动水平上升或振动频率发生变化,这些变化可以通过振动传感器来检测。

综上所述,通过对温度、振动监测和预测可以及时发现主水泵和主电机的异常情况,判断主水泵和主电机是否处于正常工作状态,并对异常状态采取相应措施,避免故障进一步加剧。

3.2.2 数据辨识及清洗方法

泵站设备的传感器采集大量的原始数据,包括温度、振动、流量、水位、压力、功率、转速等各类监测数据和工况数据,需要通过数据辨识方法来检查和识别数据集中的异常值、缺失值、离群值等问题数据,通过统计方法来检查和识别健康状态和故障状态下的监测数据和工况数据,常用的数据辨识方法有:描述性统计、可视化分析、相关性分析。

对经过数据辨识后的原始数据进行处理,将异常值、缺失值、离群值以及特定状态数据进行清洗,常用的数据清洗方法有:异常值处理、缺失值处理、离群值处理、特

定状态数据处理。

3.2.3 状态参数趋势预测模型

根据现场调研和专家经验,泵站运行过程中容易出现故障或故障后影响大的泵站设备有主电机和主水泵,对这些设备不同测点处的温度和振动信号进行采集和处理,可以实现对温度和振动状态参数的预测。

泵站主设备包括主水泵、主电机等,通过温度、振动数据以及相关运行工况数据的综合分析预测学习,结合泵站运行维护相关数据统计分析,构建泵站主设备单参量预测模型,结合专家经验形成预警方案,为日常运行维护业务提供决策数据支撑。模型开发工作描述如下。

4 温度预测模型

(1) 初选候选特征参量

选择主设备的测点温度和对应的工况,如下表所示。

表1 泵站主设备温度预测点一览表

设备	工况	振动测点
主机组	瞬时流量	定子绕组测温
	正向累计流量	上导轴承测温
	流速	推力轴承测温
	水深	下导轴承测温
	水温	下油池测温
	机组效率	
	栅前水位	
	栅后水位	
	上游水位	
	叶片角度	
	扬程	

(2) 数据标准化

对所有的温度输入数据进行预处理,剔除异常值,按照数据标准化方法(即 z-score 法)进行标准化处理。

(3) 条件互信息法筛选关键输入特征参量

计算关键测点温度与每个工况参数之间的条件互信息值,选择条件互信息值高的工况作为关键输入特征参量,通过条件互信息法筛选出与关键测点温度相关的工况。

(4) 建立温度预测模型

将处理好的温度和对对应工况数据集按时间序列进行排序,按 8:2 的比例将数据集划分为训练集和测试集,使用训练集训练 LSTM 模型,然后使用测试集评估模型的性能,通过平均绝对误差(MAE)指标来反映该性能。根据评估结果来改进模型,可能需要调整参数、改变特征选择等。

(5) 输出温度预测序列

使用训练好的温度预测模型来预测新工况数据的输出值,即新工况数据对应的温度预测值,并将该温度预测值用于泵站设备部件的风险评估。

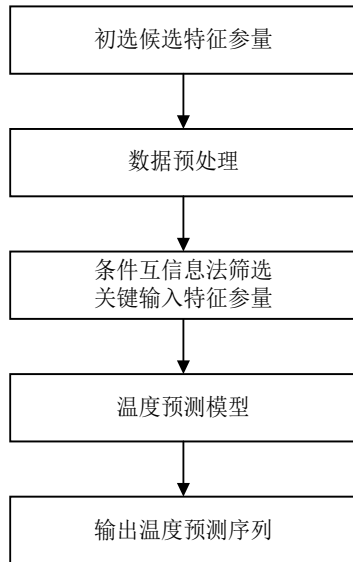


图3 温度预测模型构建流程

5.1 振动预测模型

振动序列相比于温度序列非线性和波动性更强,时序关联性差,预测难度更大,不能对振动监测数据进行直接使用,通过特征工程提取振动特征,建立振动预测模型:

(1) 初选候选特征参量

选择主设备的振动测点和对应的工况。

(2) 数据标准化

对所有的振动输入数据进行预处理,剔除异常值,按

照数据标准化方法(即 z-score 法)进行标准化处理。

(3) 条件互信息法筛选关键输入特征参量

计算关键测点振动与每个工况参数之间的条件互信息值,选择条件互信息值高的工况作为关键输入特征参量,通过条件互信息法筛选出与关键测点振动相关的工况。

(4) 振动信号特征提取

对原始振动信号进行时频分析,采用变分模态分解方法(VMD)将振动信号分解成多个本征模态函数(IMF)分量,通过相关性分析得到各 IMF 分量与原始振动信号之间的相关系数,将相关系数大的 IMF 分量进行合并重构,得到原始振动的重构信号即为原始振动信号特征^[5]。

(5) 建立泵站设备振动预测模型

考虑到泵站设备实际工作情况,泵站设备正常运行过程中振动幅度很小,振动特征不明显,因此,在对建立泵站设备振动预测模型时还考虑使用 LSTM 算法用来捕捉更细微的差异。

(6) 输出振动预测序列

使用训练好的振动预测模型预测新的工况数据的输出值,即新工况数据对应的振动预测值,并将该振动预测值用于泵站设备部件的风险评估。

6 结论与展望

随着科学技术发展,智慧水利与数字孪生的概念不断被提及,很多新技术不断被发现,但是泵闸工程安全及健康的分析评估较多依赖仪器设备,反而忽略传统水利模型计算精准的优势,因此将传统水利模型与数字孪生技术结合,互补,总结一套完整的、准确度较高的安全健康评估方案将具有重大意义。

[参考文献]

- [1]李明,王华.地源热泵系统效能优化的研究进展[J].节能技术,2023,31(5):45-51.
- [2]孙强,刘洋.地源热泵系统设计中的关键问题探讨[J].暖通空调,2024,44(3):78-84.
- [3]高翔,陈伟.提高地源热泵系统运行效率的技术策略[J].可再生能源学报,2023,16(2):112-119.
- [4]黄勇,徐丽.地源热泵系统维护管理及其经济效益分析[J].工程建设与设计,2024,38(4):203-209.
- [5]周杰,吴敏.实时监控技术在地源热泵系统中的应用研究[J].建筑节能,2025,41(1):34-40.

作者简介:万艳(1993.2—),女,汉族,毕业学校:河海大学,现工作单位:上海勘测设计研究院有限公司,三峡智慧水务科技有限公司。