

基于状态监测的大型水泵预防性维护体系构建思考

郁昊

苏州市河道管理处, 江苏 苏州 215000

DOI:10.61369/WCEST.2025090013

摘 要 : 本文针对大型水泵故障诊断和维护的需求, 系统分析了机械故障、水力故障以及电气故障的典型模式。提出基于振动、温度、压力-流量等多参数的状态监测方案, 构建了数据采集、信号分析、故障诊断、维护决策四层预防性维护体系。通过物联网技术实现多源数据传输和边缘-云端协同存储, 结合特征工程提取故障敏感参数, 采用支持向量机、卷积神经网络等智能算法实现故障分类和剩余寿命预测。

关 键 词 : 大型水泵; 状态监测; 预防性维护; 故障诊断

Thoughts on the Construction of a Preventive Maintenance System for Large Water Pumps Based on Condition Monitoring

Yu Hao

Suzhou River Management Office, Suzhou, Jiangsu 215000

Abstract : This article systematically analyzes the typical modes of mechanical, hydraulic, and electrical faults in response to the needs of fault diagnosis and maintenance for large water pumps. A state monitoring scheme based on multiple parameters such as vibration, temperature, pressure flow rate, etc. was proposed, and a four layer preventive maintenance system was constructed, including data acquisition, signal analysis, fault diagnosis, and maintenance decision-making. By using IoT technology to achieve multi-source data transmission and edge cloud collaborative storage, combined with feature engineering to extract fault sensitive parameters, intelligent algorithms such as support vector machines and convolutional neural networks are used to achieve fault classification and remaining life prediction.

Keywords : large water pump; status monitoring; preventive maintenance; fault diagnosis

大型水泵在水利、电力、市政等很多领域都广泛应用, 它可是流体输送系统中的核心设备, 它长期处在高负荷、多尘又潮湿的环境中, 容易出现轴承磨损、汽蚀、绕组短路等各类故障, 这会导致系统停机甚至引发安全事故, 传统的定期维护模式存在过度维护或者故障漏检的风险, 很难适应现代化的运维需求。

一、大型水泵故障模式与状态监测参数分析

(一) 大型水泵典型故障模式

1. 机械故障

机械故障主要是源于运动部件的摩擦、磨损或者结构失效, 轴承作为核心支撑部件, 长期承受着径向和轴向的载荷, 容易因为润滑不足或者装配偏差, 导致滚道剥落、滚子裂纹或者保持架断裂。在运行中会表现出异常振动或者异响, 轴系故障大多是由安装精度不足引发的, 如泵轴与电机轴不对中会导致联轴器偏磨和产生附加力矩, 而叶轮不平衡则会引起转子偏心旋转, 加剧轴承负荷并且产生周期性振动。密封系统故障通常表现为轴封泄漏, 机械密封面因为磨损、热变形或者杂质卡滞失去贴合性, 导致介质渗漏并且污染环境, 严重时会引起泵腔压力下降和效率损失。

2. 水力故障

水力故障是造成水泵性能退化的主要原因, 汽蚀属于最典型的水力故障, 主要是泵内局部压力低于介质饱和蒸汽压时, 液体会汽化从而形成气泡, 气泡在高压区溃灭会产生冲击载荷, 反复作用会让叶轮表面出现剥蚀、叶片变薄甚至穿孔。同时还会伴随着噪声和振动的情况, 流道异常包含流道内有异物堵塞、叶轮入口滤网破损或者导叶流道磨损, 这会导致过流面积减小、流速分布不均匀, 表现出来的就是流量下降、扬程降低或者效率大幅衰减。

3. 电气故障

电气故障会直接对设备的安全运行造成威胁, 电机绕组故障大多是由绝缘老化或者过热的情况所引起, 长期过负荷运行、电源电压波动或者环境潮湿会让绕组绝缘层出现开裂、击穿的情况, 进而形成匝间短路或者接地故障。其表现为电机温升异常、

电流增大或者保护装置跳闸，定子铁芯故障通常是因为硅钢片绝缘损坏产生了涡流损耗，从而导致铁芯局部过热、磁性能下降，严重时还会引发绕组烧毁。

（二）状态监测参数选取与监测方法

1. 振动监测

在轴承座、泵体或者电机端盖等关键部位安装加速度传感器，采集振动加速度、速度或者位移信号就能有效识别典型机械故障，在时域分析中，振动幅值的均方根值能够反映整体振动强度，峰值因子可以敏感捕捉冲击性故障，频域分析是通过傅里叶变换把时域信号转换为频谱图，特定频率成分对应着不同故障特征，如轴承故障的特征频率、转子不平衡的一倍频分量或者不对中的二倍频分量，通过连续监测振动信号的变化趋势能够早期预警轴承磨损、轴系失衡或者松动等潜在故障^[1]。以滚动轴承外圈故障为例，轴承故障特征频率计算公式如下：

$$f_o = \frac{n}{2} \times \frac{D}{d} \times (1 - \cos \alpha)$$

其中， n 为轴转速（Hz）；

D 为轴承节圆直径（mm）；

d 为滚动体直径（mm）；

$\cos \alpha$ 为接触角（°）。

2. 温度监测

轴承温度监测一般采用热电偶或者热电阻传感器，这些传感器安装在轴承外圈或者端盖的位置，能够实时监测滚动体与滚道产生的摩擦热，要是温度出现异常升高的状况，那就提示可能存在润滑不良、装配过紧或者内部磨损问题，电机温度监测需要覆盖定子绕组和铁芯这些部位，采用埋置式 PT100 传感器或者红外测温技术来进行监测，绕组温度一旦超过限定值可能预示着绝缘老化或者匝间短路现象，而铁芯温度出现异常大多与涡流损耗或者冷却系统失效存在关联。

3. 压力与流量监测

压力和流量这些参数能直接反映出水泵的水力性能以及运行状态，通过在泵的进出口管道安装压力变送器，监测进出口压力差就能计算出实际扬程，要是压力波动幅度增大可能意味着叶轮堵塞或者汽蚀发生了，流量监测会采用电磁流量计或者超声波流量计，这样能实时跟踪体积流量的变化情况，要是流量出现异常下降可能是因为进口滤网堵塞、叶轮磨损或者出口阀门误关了，监测泵腔真空度可以对汽蚀风险进行早期预警，当入口真空度接近临界值时就需要及时调整运行参数或者清理流道，对压力与流量进行联合分析能够评估水泵的效率，效率曲线出现异常偏移往往预示着水力部件的性能开始退化。水泵效率计算公式如下：

$$\eta = \frac{P_{\text{水力}}}{F_{\text{轴功率}}} \times 100\% = \frac{\rho g Q H}{1000 P_{\text{输入}}} \times 100\%$$

其中， ρ 为介质密度（kg/m³）；

g 为重力加速度（m/s²）；

Q 为流量（m³/s）；

H 为扬程（m）；

$P_{\text{输入}}$ 为电机输入功率（kW）。

4. 油液分析

油液分析是通过检测润滑油物理化学特性和污染物含量来评估机械部件磨损状态的，油液理化指标监测涵盖了粘度、酸值、水分和闪点这些方面，粘度升高有可能是因为润滑油氧化老化导致的。水分超标会降低润滑性能并且加剧机械部件的锈蚀情况，磨损颗粒分析是油液分析中的核心内容，它采用铁谱分析或者光谱分析这样的技术，能够识别颗粒的浓度、尺寸、形态以及成分等信息。

5. 电流与功率监测

电流与功率监测能够用来评估电气系统和负载状态，以此间接反映设备运行的实际工况。要通过在电机电源回路安装电流互感器，来采集三相电流信号。要是电流不平衡度超过了允许范围，就有可能提示绕组匝间短路、电源缺相或电机偏心。有功功率监测可以反映水泵实际输出的功率，功率突增可能是源于叶轮堵塞或者介质密度发生变化，功率骤降则可能与叶轮损坏或者联轴器断裂相关^[2]。

二、预防性维护体系总体框架设计

（一）体系构建目标与原则

体系构建的目标是把状态监测技术和维护管理流程整合起来，从而实现大型水泵全生命周期的高效运维，核心目标有实时掌握设备的健康状态，早期识别潜在的故障风险来避免突发停机，优化维护资源的配置，减少过度维护或者维护不足的情况以降低综合运维成本，延长设备的有效使用寿命，提升系统运行的可靠性与经济性，构建原则要满足系统性、实用性和可扩展性，系统性要求覆盖从数据采集到维护执行的全流程环节，确保各个模块能够协同联动^[3]。实用性强调技术方案要与现场工况相适配，避免过度依赖复杂算法或者高端硬件，可扩展性需要预留接口，支持新增监测参数、诊断模型或者管理功能，以适应设备升级和技术迭代的需求。

（二）体系分层架构

1. 数据采集层

数据采集层负责获取能反映设备状态的原始信息。要根据水泵的结构与故障特性情况，在关键部位部署多种类型的传感器。对于机械系统监测要选用振动加速度传感器，把它安装在轴承座、泵轴等振动敏感点^[4]。热状态监测采用温度传感器来进行，要覆盖轴承、电机绕组以及泵体表面。水力性能监测通过压力变送器与流量计，采集进出口的压力、流量数据。电气参数监测依托电流互感器与功率传感器，获取电机的电流、功率信号。传感器需要具备一定的抗干扰能力，要适应水泵运行的潮湿、多尘环境。数据采集频率要满足故障特征捕捉的需求，同时避免产生冗余的数据。

2. 信号分析层

信号分析层要对采集到的原始数据进行处理以及特征提取，从而为故障诊断提供数据方面的支撑。一开始要进行数据预处理工作，借助滤波算法把环境干扰和传感器噪声去除掉，采用平滑

处理方式消除信号上面的毛刺，并且对缺失的数据进行插值补全操作，以此确保数据的完整性。时域特征提取工作包含计算振动信号的峰值、均方根、峭度等统计量，以此反映信号的整体强度与冲击特性^[5]。频域特征是通过傅里叶变换将时域信号转换为频谱图，进而识别和故障相关的特征频率，时频域分析比较适用于非平稳信号，通过小波变换等方法来捕捉瞬时频率的变化，能够敏感识别早期出现的故障。

3. 故障诊断层

故障诊断层会根据信号分析结果来判断设备故障类型和严重程度，采用分层诊断策略开展工作，首先通过规则推理进行初步诊断工作，依据预设的阈值条件识别明显故障情况，例如振动幅度超限提示机械出现异常、温度超标预警过热风险问题，然后结合智能算法实现精细诊断操作。基于机器学习构建故障分类模型，把提取的特征向量输入训练好的支持向量机或神经网络，以此输出故障类型与发生概率，对复杂故障采用多参数融合诊断方式，通过证据理论或贝叶斯网络融合不同来源数据的诊断结果，进而提高故障诊断的准确性，诊断过程需要具备自学习能力，通过积累故障案例不断优化诊断模型，从而适应设备老化与工况变化情况。

4. 维护决策层

维护决策层需按照故障诊断结果来制定有针对性的维护策略，以此实现从状态监测到维护执行的闭环管理。一开始要进行健康状态评估，综合考虑故障类型、严重程度以及设备的历史数据，构建出健康度指数模型，从而量化设备当前的性能状态^[6]。接着要基于健康度指数与剩余寿命预测结果，制定分级的维护策略，对于轻度故障采用在线监测与状态跟踪的方式，对于中度故障安排计划性的维修工作，对于严重故障则触发紧急停机维护的操作。设备健康度指数（HI）计算公式如下：

$$HI = \sum_{i=1}^n w_i \times \frac{\text{参数}i - \text{参数}min}{\text{参数}max - \text{参数}min}$$

维护方案需考虑到资源方面的约束条件，要优化维护时间以及人员的配置情况，还需平衡好维护成本和系统的可用性，维护执行完成之后要进行效果评估工作，通过对比维护前后的各项状态参数，验证决策的有效性并且反馈到诊断模型中，以此持续优化维护策略。

三、状态监测关键技术实现

（一）物联网（IoT）数据传输与存储

物联网技术能给状态监测数据的实时采集和高效管理提供支撑，数据传输采用的是分层网络架构，感知层借助低功耗无线传

感器网络采集振动、温度等相关参数，利用 LoRa 或者 NB - IoT 技术达成远距离、低速率的数据传输，这适用于分散布置的水泵站点，核心层依靠工业以太网或者 5G 技术，保障振动频谱等高带宽数据的实时传输以满足毫秒级延迟要求^[7]。数据存储采用的是边缘 - 云端协同模式，边缘节点负责实时数据的本地化缓存与预处理，在过滤无效数据之后将关键特征上传到云端平台，云端数据库采用时序数据库来存储历史监测数据，结合关系型数据库管理设备基础信息与维护记录，通过数据压缩与冷热数据分离策略优化存储效率确保长期数据可追溯与快速查询。

（二）基于智能算法的故障诊断与寿命预测

智能算法能给故障诊断与寿命预测提供核心技术支撑，故障诊断采用“传统算法 + 深度学习”融合方案，针对典型故障利用支持向量机或随机森林模型实现快速分类，基于历史故障数据来训练模型参数，针对复杂多故障耦合场景采用卷积神经网络提取振动频谱图空间特征，结合长短期记忆网络捕捉时序依赖关系，通过端到端学习来提升诊断精度^[8]。寿命预测基于退化数据驱动方法，采用粒子滤波或高斯过程回归模型，把监测数据中的性能退化指标作为输入，构建设备剩余寿命预测模型，结合物理失效模型修正预测结果，通过动态更新模型参数适应设备老化规律变化，为维护决策提供定量依据（见表 1）。基于振动趋势的剩余寿命（RUL）预测模型如下：

$$RUL = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{RMS_{\text{极限}}}{RMS_0} \right)$$

其中，*k* 为退化速率（通过历史数据拟合）；

*RMS*_{极限} 为故障阈值；

*RMS*₀ 为当前 RMS 值。

表 1 智能算法性能对比表

算法类型	诊断准确率（%）	数据需求	计算复杂度	适用场景
SVM	85~90	中等	低	单一故障分类
随机森林	88~92	大	中	多故障识别
CNN	92~95	极大	高	频谱特征诊断

四、结论

本文针对大型水泵状态监测以及预防性维护问题，通过理论分析和整合，机械故障可以凭借振动特征频率这些参数精准定位，水力故障能依靠压力波动和效率衰减等参数来精准定位，电气故障则可通过电流不平衡与温度异常等参数精准定位，构建四层预防性维护体系实现了全流程闭环管理。

参考文献

[1] 陈凤霞. 大型水泵的运行维护与管理 [J]. 水上安全, 2023, (15): 130-132.
[2] 陈公朴. 大型水泵机组振动趋势预测方法研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9(07): 38-40.
[3] 龚雪峰. 大型水泵日常维护及常见故障处理探究 [J]. 水上安全, 2024, (06): 178-180.
[4] 张磊. 大型水泵维护与性能优化研究 [J]. 水上安全, 2024, (03): 157-159.
[5] 陈凤霞. 大型水泵的运行维护与管理 [J]. 水上安全, 2023, (15): 130-132.
[6] 吴志兵. 大型水泵机组检修方法探析 [J]. 科技风, 2022, (11): 94-96.
[7] 潘书鹏. 大型水泵故障诊断应用管理系统 [J]. 工业控制计算机, 2021, 34(01): 109-111.
[8] 王世儒. 大型水泵机组耐久性影响因素及对策分析 [J]. 时代农机, 2017, 44(03): 52-53.