

# 循环泵振动故障机理分析及在线监测技术应用

康鹏杰

中电能投(福建)有限公司 福建 福州 350000

**摘要:** 循环泵作为工业流体输送系统的核心动力设备,其运行稳定性直接关系到整个生产系统的安全、效率与经济性。振动是反映循环泵健康状态的关键指标,异常振动往往是设备内部故障的先兆。本文系统阐述了循环泵振动故障的主要机理,包括转子不平衡、轴系不对中、轴承磨损、水力不平衡及气蚀等,并深入剖析了各类故障的产生原因及其在振动信号中的特征表现。在此基础上,详细介绍了循环泵振动在线监测技术的系统架构、核心原理与关键技术,涵盖传感器选型、数据采集、信号处理(时域、频域、时频域分析)及智能诊断方法。分析了在线监测技术在故障早期预警、精准诊断和预测性维护方面的显著作用。最后,文章展望了该技术融合人工智能与数字孪生的发展趋势,旨在为循环泵的安全、高效、智能化运维提供理论参考与实践指导。

**关键词:** 循环泵; 振动故障; 故障机理; 在线监测; 频谱分析; 预测性维护

## 引言

在现代工业体系中,无论是电力、化工、冶金还是市政供水领域,循环泵都扮演着不可或缺的角色。它负责驱动冷却水、工艺介质或生活用水在封闭或半封闭系统中持续循环,保障了关键工艺流程的稳定运行。然而,循环泵在长期、高负荷的工况下工作,不可避免地会因机械磨损、疲劳老化、操作不当或设计缺陷等原因出现各类故障。其中,振动异常是最为普遍且危害极大的一种表现形式。过大的振动不仅会加速轴承、密封、叶轮等关键部件的磨损与损坏,缩短设备寿命,还会引发管道连接松动、基础开裂,甚至导致灾难性的设备损毁和非计划停机,给企业带来巨大的经济损失和安全风险。传统的设备维护模式主要依赖于定期检修和事后维修,这种方式存在明显的滞后性,无法有效捕捉故障的早期征兆,往往是在故障已经造成严重后果后才进行干预。随着物联网(IoT)、传感器技术、大数据分析及人工智能(AI)的飞速发展,基于状态的预测性维护(Predictive Maintenance, PdM)已成为工业设备管理的主流方向。振动在线监测技术作为PdM的核心手段,能够对循环泵的运行状态进行全天候、连续、实时的监控,通过对振动信号的深度挖掘与分析,实现对潜在故障的早期识别、精确诊断和趋势预测。这不仅能将设备维护从“被动响应”转变为“主动预防”,还能显著降低维护成本,提高设备可用率,保障生产的连续性和安全性。因此,深入研究循环泵振动故障的机理,并有效应用先进的在线监测技术,具有极其重要的理论价值和现实意义。

## 1 循环泵振动故障机理分析

循环泵的振动源复杂多样,可大致归结为机械、水力和电气三大类。准确理解各类故障的内在机理,是进行有效监测与诊断的前提。

### 1.1 转子不平衡

转子不平衡是旋转机械中最常见的振动故障之一,其根本原因在于转子的质量中心线与其旋转轴线未能重合。当泵轴高速旋转时,这种质量偏心会产生一个强大的离心惯性力,该力的频率与转子的旋转频率完全一致,从而在径向方向上激发出强烈的周期性振动。这种不平衡现象可能源于多个环节:在制造阶段,叶轮可能存在材质分布不均或结构上的微小不对称;在长期运行过程中,叶轮会因介质的腐蚀、冲刷、结垢或汽蚀作用而导致质量分布发生改变,甚至出现叶片断裂或局部缺损;此外,在设备装配时,如果转子组件未经过精确的动平衡校正,或者校正后的配重块发生松动,同样会引入不平衡量<sup>[1]</sup>。在振动信号的频谱分析中,转子不平衡的特征极为鲜明,即一倍转频(1X)分量占据绝对主导地位,且其振幅大小与转速的平方成正比,这一规律性特征使其成为区分其他类型故障的重要依据。

### 1.2 轴系不对中

轴系不对中是指电机轴与泵轴在通过联轴器连接时,其中心线未能达到理想的同轴状态,通常表现为角度偏差或平行偏差。这种几何上的错位使得联轴器在运转过程中承受额外的交变应力和弯矩,进而成为振动的重要激励源。不对中的形成原因多种多样,既可能是设备初次安装时对中精度控制不严,也可能是设备在运行中因电机与泵体热膨胀系数不同而产生的相对位移,或是由于设备基础发生不均匀沉降,破坏了原有的精密对

中状态。在振动诊断领域,轴系不对中有着非常典型的频谱特征。与不平衡主要激发1X振动不同,不对中故障会显著放大二倍转频(2X)的振动分量,其幅值有时甚至会超过1X分量。对于更为严重的角不对中情况,还常常能观察到三倍、四倍乃至更高阶次的谐波成分被一同激发出来,这些丰富的频率信息共同构成了不对中故障的独特“指纹”。

### 1.3 轴承磨损与故障

作为支撑泵轴并确保其平稳旋转的核心部件,轴承一旦出现损伤,将直接威胁到整台泵的运行安全。轴承的失效形式主要包括磨损、点蚀、裂纹以及因润滑不良导致的胶合等,这些问题会破坏滚动体与内外圈滚道之间理想的滚动接触状态,取而代之的是高频的冲击和摩擦。这些冲击事件的发生并非随机,而是与轴承自身的几何结构参数——如内径、外径、滚动体直径和接触角——以及当前的转速密切相关。因此,每一种特定类型的轴承故障(如内圈、外圈、滚动体或保持架损伤)都会对应一个或一组固有的“故障特征频率”<sup>[2]</sup>。滚动轴承的故障具有特定的“故障特征频率”,这些频率由轴承的几何尺寸(内径、外径、滚动体直径、接触角)和转速决定,包括内圈故障频率(BPFI)、外圈故障频率(BPFO)、滚动体故障频率(BSF)和保持架故障频率(FTF)。通过频谱分析或包络解调技术,可以有效地识别出这些特征频率,从而判断轴承的具体损伤部位。

### 1.4 水力不平衡与流体激振

除了机械因素外,泵内部流场的不稳定性也是引发振动的重要原因。水力不平衡特指作用在叶轮上的流体合力偏离了其旋转中心,这通常是由于叶轮流道因介质冲刷或腐蚀而出现不对称磨损,或是泵腔内有异物堵塞,破坏了原本设计的对称流场。此外,叶轮或蜗壳的水力设计本身若存在缺陷,也可能导致固有的水力不平衡。这类故障在振动频谱上通常表现为叶片通过频率( $BPF = \text{叶片数} \times \text{转频}$ ),即叶片数量与转频乘积处的能量集中。更值得注意的是,当循环泵被迫在远离其最佳效率点的工况下运行时,例如在极小流量或超大流量状态下,叶轮进口或出口区域极易产生旋涡、脱流等非正常流动现象。这些不稳定的流动结构会以随机或准周期的方式冲击泵体,引发所谓的流体激振,其振动信号呈现出宽频带、低相干性的特点,给故障诊断带来一定挑战。

### 1.5 气蚀(Cavitation)

气蚀是循环泵特有且极具破坏性的一种水力故障。其物理过程始于泵入口处的压力低于所输送液体在当前

温度下的饱和蒸汽压,导致液体局部汽化,形成大量微小气泡。这些气泡随主流进入泵内的高压区域后,会在极短时间内溃灭,瞬间释放出巨大的能量,形成强烈的局部冲击波和高速微射流。这种反复的、高频的冲击作用会像“微型炸弹”一样不断轰击叶轮表面,造成材料的疲劳剥蚀,同时伴随着剧烈的噪声和宽频带的振动。气蚀的诱因主要与系统的吸入条件有关,例如吸入管路阻力过大、储液罐液位过低、泵的安装高度过高,或者泵本身的必需净正吸入压头(NPSH<sub>r</sub>)超过了系统所能提供的有效净正吸入压头(NPSH<sub>a</sub>)。在振动监测中,气蚀的信号特征表现为中高频段能量的急剧增加,整体呈现出类似白噪声的宽频随机特性,并伴有独特的噼啪声。振动烈度的大小与气蚀的严重程度呈正相关,因此,对振动水平的实时监控是评估和防范气蚀风险的有效手段。

## 2 循环泵振动在线监测技术

为了有效应对上述各类振动故障,在线监测技术应运而生,其核心目标是实现从“数据采集”到“智能决策”的闭环。

### 2.1 系统总体架构

一个完整的循环泵振动在线监测系统通常由以下四个层次构成:(1)感知层,部署在泵体关键部位(如轴承座、电机端盖)的高精度振动传感器(如IEPE压电式加速度传感器),负责将机械振动信号转换为电信号。(2)采集与传输层,数据采集单元(DAQ)对传感器信号进行调理、放大、滤波和模数转换(A/D),并通过有线(如RS485、以太网)或无线(如LoRa、4G/5G)方式将数据上传至云端或本地服务器<sup>[3]</sup>。(3)数据处理与分析层,在服务器端,利用专业的软件平台对原始振动数据进行存储、管理和深度分析。这是系统的核心,涉及多种信号处理算法。(4)应用与展示层,通过Web端或移动端APP,向用户提供直观的可视化界面,展示实时振动值、历史趋势、频谱图、报警信息及诊断报告,并支持远程管理和维护决策。

### 2.2 关键技术与方法

在线监测的有效性依赖于一系列先进的信号处理与故障诊断技术。

#### 2.2.1 时域分析

直接对原始振动信号的时间历程进行分析,计算其统计特征量,如均方根值(RMS)、峰值、峭度、裕度因子等。RMS值是衡量振动烈度最常用的指标,常被用作报警阈值的设定依据。国际标准ISO 10816系列根据设备类型、功率和支撑条件,对振动烈度等级(A、B、

C、D)进行了明确规定,为状态评估提供了统一基准。

### 2.2.2 频域分析(频谱分析)

通过快速傅里叶变换(FFT)将时域信号转换到频域,得到振动幅值随频率变化的频谱图。这是故障诊断的“金钥匙”。如前所述,不同类型的故障会在频谱上留下独特的“指纹”(如1X、2X、BPF、轴承特征频率等)。通过识别这些特征频率及其幅值变化,可以精准定位故障类型。

### 2.2.3 时频域分析

对于非平稳信号(如启停过程、负载突变或冲击性故障),单纯的时域或频域分析存在局限。小波变换(Wavelet Transform)等时频分析方法能够同时提供信号的时间和频率信息,特别适用于检测轴承早期点蚀等瞬态冲击事件<sup>[4]</sup>。

### 2.2.4 智能诊断与预测

随着机器学习和深度学习技术的发展,越来越多的在线监测系统开始集成智能算法。通过构建历史正常与故障数据的训练集,可以训练出分类模型(如支持向量机SVM、随机森林)或深度神经网络(如卷积神经网络CNN),实现故障的自动识别与分类。更进一步,利用时间序列预测模型(如LSTM),可以对关键振动指标的未来发展趋势进行预测,从而实现真正的预测性维护。

## 3 技术发展趋势与展望

展望未来,循环泵振动在线监测技术正站在新一轮技术革命的浪潮之巅,其发展路径日益清晰。首先,与人工智能的深度融合将成为主流。未来的监测系统将超越简单的数据记录与阈值报警,进化为具备自主学习、推理和决策能力的智能体。通过融合生成式AI等前沿技术,系统不仅能高效诊断已知的故障模式,更能从浩如烟海的运行数据中自主发现未知的异常关联,并自动生成包含最优处置方案在内的综合性维护策略建议。其次,构建循环泵的数字孪生体代表了更高阶的发展方向。数字孪生技术通过在虚拟空间中创建一个与物理泵实时同步、高保真的数字化镜像,将在线监测数据、历史运行档案、三维设计模型、材料属性乃至环境变量等

多源信息融为一体。这个动态演化的“数智孪生体”不仅能够实现毫秒级的状态映射和故障复现,更能进行前瞻性的性能仿真、运行优化和寿命预测,真正实现从“治疗已发生的疾病”到“预防未来可能的风险”的范式转变。最后,边缘计算与云计算的协同架构将得到广泛应用。为了应对海量数据带来的传输延迟和带宽压力,部分轻量级的计算任务,如初步的特征提取和即时报警,将被下沉到靠近数据源头的边缘智能设备上执行;而复杂的模型训练、深度挖掘和跨设备关联分析则依托强大的云端算力完成,从而形成一个高效、敏捷、安全的云边协同智能运维生态。

## 4 结语

循环泵的振动故障机理复杂,但并非不可捉摸。通过深入理解转子不平衡、不对中、轴承故障、水力不平衡及气蚀等核心机理,我们能够建立起故障与振动特征之间的映射关系。在此基础上,以传感器网络、数据采集、先进信号处理和智能算法为核心的振动在线监测技术,为我们提供了一双洞察设备内部状态的“慧眼”。该技术的应用,成功地将设备维护模式从被动的事后维修和盲目的定期检修,升级为主动、精准、高效的预测性维护。展望未来,随着人工智能与数字孪生等前沿技术的深度融合,循环泵的健康管理将迈入一个更加智能、自主的新时代,为工业生产的本质安全与高质量发展提供坚实保障。

## 参考文献

- [1]曹智,李振祥,伏洪勇.基于振动信号分析的极端环境下循环泵可靠性评估[J].电子测量与仪器学报,2021,35(08):93-98.
- [2]马忠南,丛述广,肖永国,等.热网循环泵振动问题的分析及处理[J].流程工业,2022,(06):50-53.
- [3]邓凯,冯辉,王之赫,等.阀冷系统主循环泵切换过程振动数据采集方法研究[J].机电信息,2025,(22):86-89.
- [4]曹镛勇.脱硫浆液循环泵振动问题分析与处理[J].机电技术,2024,(06):91-94.