

渣浆泵叶轮阻力特性及寿命预测模型研究

刘辉

石家庄宏昌泵业有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i4.20279

[摘要] 渣浆泵作为输送含固介质的核心设备,其叶轮在强磨蚀与高阻力工况下易发生非线性磨损,导致性能衰减与寿命缩短。针对传统方法难以兼顾复杂工况与多物理场耦合的问题,本研究以叶轮阻力特性为切入点,通过CFD-DEM流固耦合数值模拟,揭示颗粒碰撞、湍流脉动对阻力分布的动态影响机制;结合时间系数法修正磨损预测模型,提出融合物理约束与BiLSTM-Attention深度学习的混合寿命预测框架。实验验证表明,该模型在变浓度、粒径工况下的预测误差较传统方法降低42%,为渣浆泵的优化设计与智能运维提供了理论支撑。

[关键词] 渣浆泵; 叶轮阻力特性; 流固耦合; 磨损预测; 混合模

中图分类号: TN622 **文献标识码:** A

Research on the resistance characteristics and life prediction model of slurry pump impeller

Hui Liu

Shijiazhuang Hongchang Pump Co.,Ltd.

[Abstract] As the core equipment for conveying solid media, the impeller of the slurry pump is prone to nonlinear wear under strong abrasion and high resistance conditions, resulting in performance degradation and shortened service life. In response to the difficulty of traditional methods in balancing complex working conditions and multi physics field coupling, this study takes the impeller resistance characteristics as the starting point and uses CFD-DEM fluid structure coupling numerical simulation to reveal the dynamic impact mechanism of particle collision and turbulent pulsation on resistance distribution; Combining the time coefficient method to modify the wear prediction model, a hybrid life prediction framework is proposed that integrates physical constraints and BiLSTM Attention deep learning. Experimental verification shows that the prediction error of the model under variable concentration and particle size conditions is reduced by 42% compared to traditional methods, providing theoretical support for the optimization design and intelligent operation of slurry pumps.

[Key words] slurry pump; Impeller resistance characteristics; Fluid structure coupling; Wear prediction; Mixed mode

1 引言

在工业输送领域,渣浆泵作为处理含固颗粒浆体的关键设备,其运行稳定性与使用寿命直接关系到生产系统的经济性与安全性。然而,由于浆体中固体颗粒的磨蚀作用以及流体湍流脉动的综合影响,渣浆泵叶轮表面常出现非均匀磨损,导致水力性能快速衰减、振动噪声加剧,甚至引发突发故障,严重制约了设备在矿山、电力、冶金等行业的长期可靠运行。现有研究多聚焦于单一工况下的磨损机理分析或经验公式预测,但对多物理场耦合作用下叶轮阻力特性的动态演化规律,以及复杂工况中颗粒参数与流体参数的协同影响机制仍缺乏系统性研究。因此,本文以渣浆泵叶轮为研究对象,通过流固耦合数值模拟与深度

学习算法融合,构建面向全工况的阻力特性分析与寿命预测模型,为设备优化设计及智能运维提供理论支撑。

2 渣浆泵叶轮阻力特性理论分析

2.1 叶轮水力设计参数与阻力关系

叶轮几何参数对流体动能转换效率及阻力特性影响显著。叶轮进口直径决定流体初始吸入能力,直径过小易导致进口流速过高、局部阻力增大,引发气蚀现象;直径过大则会使叶轮内部流速分布不均,增加流动损失。出口宽度需依据颗粒粒径调整,依据设计准则,粒径越大,出口宽度应越大,以确保颗粒顺利排出,避免在出口处堆积造成堵塞与额外阻力。叶片数增加可提高叶轮做功能力,但过多叶片会增大流体与叶片间的摩擦阻力,降

低效率; 叶片包角影响流体在叶轮内的停留时间与能量转换过程, 包角过大, 流体在叶轮内流动路径增长, 摩擦阻力上升, 包角过小则能量转换不充分。

轴向力平衡机制对叶轮阻力亦有重要影响。平衡孔通过使部分液体从叶轮出口回流至进口, 产生与轴向力相反的液压力来抵消轴向力; 平衡盘则利用其两侧压力差实现轴向力平衡。然而, 平衡盘磨损会导致泄漏量增加, 改变叶轮前后压力分布, 使流体流动状态改变, 间接影响叶轮阻力, 增加能量损耗。

2.2 固液两相流阻力模型构建

基于欧拉-欧拉方法构建固液两相流模型, 将连续相(水)与离散相(颗粒)均视为连续介质, 分别建立质量、动量与能量守恒方程。在动量方程中, 引入曳力模型描述颗粒与流体间的相互作用力, Gidaspow模型综合考虑了颗粒浓度对曳力的影响, 适用于不同工况下的固液两相流计算。考虑湍流耗散力对颗粒运动的影响, 建立湍流耗散力模型, 以准确模拟颗粒在湍流中的扩散与碰撞行为。

边界条件设定是模型准确性的关键。进口速度根据实际工况设定, 通常为均匀或充分发展的速度分布; 出口压力依据系统压力要求确定; 壁面粗糙度反映叶轮内壁对流体的摩擦作用, 通过实验数据确定其取值。结合实验数据对模型进行验证, 确保模型能够准确模拟固液两相流在叶轮内的流动状态与阻力特性。

2.3 阻力特性影响因素敏感性分析

采用正交试验设计方法, 系统研究颗粒浓度、粒径、流速及叶轮转速对叶轮阻力的影响程度。通过设定不同水平的参数组合进行数值模拟, 分析各因素对阻力的主效应与交互效应。结果表明, 颗粒浓度增加会使流体黏度增大, 颗粒间碰撞频率提高, 导致阻力显著上升; 颗粒粒径对阻力影响较大, 每增大10mm, 扬程下降速率提升15%, 这是因为大粒径颗粒具有更大的动量, 对叶轮表面的冲击与磨损作用更强; 流速升高会加剧流体与颗粒间的相对运动, 增加摩擦阻力与碰撞阻力; 叶轮转速提高虽能增强流体动能, 但也会使流体与颗粒对叶轮的冲击力增大, 导致阻力上升。通过敏感性分析, 可识别出影响叶轮阻力的关键参数, 为渣浆泵的优化设计提供依据。

3 基于CFD-DEM的叶轮磨损数值模拟

3.1 数值模拟方法与模型验证

在模拟渣浆泵叶轮磨损过程中, 数值模拟方法的选择至关重要。对比CFD-DEM计算流体动力学-离散单元法与欧拉-拉格朗日方法, 欧拉-拉格朗日方法将流体视为连续介质, 颗粒视为离散相, 虽能考虑颗粒的运动, 但在处理颗粒间碰撞及复杂边界条件时存在一定局限性。而CFD-DEM方法将流体相用CFD求解, 颗粒相用DEM求解, 能更精确地模拟颗粒间的碰撞以及颗粒与壁面的相互作用, 更适用于模拟叶轮内颗粒碰撞与壁面磨损情况, 故选择其作为本次模拟方法。

网格划分是数值模拟的基础, 采用结构化网格对叶轮流道进行划分。结构化网格具有生成质量高、计算精度好等优点,

能更准确地捕捉流场细节。为捕捉叶片旋转效应, 设置动网格区域, 使网格随叶片的旋转而动态变化。同时, 进行网格无关性验证, 通过改变网格密度, 对比不同网格数量下模拟结果如扬程、效率等参数的变化, 当网格数量增加到一定程度, 模拟结果不再随网格数量的增加而显著变化, 此时可认为网格无关, 确保模拟结果的可靠性不受网格因素影响。

模型验证是保证模拟准确性的关键环节。搭建与实际渣浆泵工况相似的实验平台, 测量不同工况下的扬程、效率等参数。将模拟结果与实验数据进行对比, 当扬程误差 $\leq 5\%$ 、效率误差 $\leq 8\%$ 时, 认为所建立的数值模拟模型能够准确反映叶轮内的流动及磨损情况, 可用于后续的深入研究。

3.2 叶轮磨损机制动态分析

通过CFD-DEM模拟计算叶轮表面磨损率密度(PERD), 以直观呈现叶轮表面的磨损情况。分析发现, 叶片出口边和蜗壳隔舌附近为磨损高发区。在叶片出口边, 流体携带颗粒高速冲出, 颗粒与叶片表面发生强烈碰撞和摩擦, 导致该区域磨损严重; 在蜗壳隔舌附近, 流体流动方向发生急剧变化, 颗粒在此处受到较大的离心力作用, 不断冲击隔舌表面, 造成磨损加剧。

流场与磨损之间存在复杂的耦合效应。泄漏流与主流的相互作用会改变流场分布, 进而影响颗粒的运动轨迹和碰撞频率。利用动网格技术模拟磨损边界的动态演变, 随着磨损的进行, 叶轮表面形状发生改变, 流场也随之变化, 这种动态变化进一步影响磨损过程, 形成流场-磨损的耦合循环。为提高磨损预测模型的精度, 引入时间系数 k 对传统磨损预测模型进行非线性修正。传统模型在处理复杂工况下的磨损预测时存在一定误差, 时间系数 k 考虑了磨损过程中时间因素的影响, 如磨损速率随时间的变化等。通过实际案例验证修正后模型的预测精度, 以磨损量与实际值的拟合优度 R^2 为评价指标, 修正前 R^2 为0.72, 修正后提升至0.89, 表明修正后的模型能更准确地预测叶轮磨损情况, 为渣浆泵的维护和优化设计提供更可靠的依据。

4 渣浆泵叶轮寿命预测模型构建

4.1 数据驱动与物理模型融合框架

在渣浆泵叶轮寿命预测中, 数据质量直接影响预测结果的准确性。由于实际运行环境中, 渣浆泵振动信号受多种噪声干扰, 采用SVD-VMD-WT联合去噪方法对振动信号进行处理。奇异值分解可对信号进行降维处理, 去除部分噪声成分; 变分模态分解能将信号自适应分解为多个模态分量, 有效分离出噪声与有用信号; 小波变换进一步对信号进行精细去噪, 提取出包含故障信息的特征参数, 如包络谱峰值、峭度值等, 为后续模型训练提供高质量数据。为增强模型的可解释性, 将物理模型嵌入数据驱动模型中。基于前文对叶轮磨损机制的研究, 得到磨损率公式, 将其作为损失函数项加入神经网络训练过程。这样, 模型在训练时不仅要拟合数据, 还要满足物理规律约束, 使预测结果更符合实际情况, 提高模型的可靠性和可解释性。

4.2 混合寿命预测模型实现

构建以双向长短期记忆网络为核心的混合寿命预测模型。

BiLSTM能够同时考虑序列数据的前向和后向信息,有效捕捉渣浆泵运行数据中的长期依赖关系。结合注意力机制,为不同时刻的特征分配不同的权重,突出关键特征对寿命预测的影响,使模型更加关注与叶轮寿命密切相关的信息。最终,模型输出剩余使用寿命(RUL)的概率分布,为设备维护提供更全面的决策依据。在模型训练过程中,超参数的选择对模型性能至关重要。采用改进麻雀搜索算法对超参数进行优化,如学习率、隐藏层维度等。ISSA算法通过模拟麻雀的觅食和反捕食行为,具有更强的全局搜索能力和收敛速度。通过基准测试函数验证算法的稳定性,确保其能够在复杂的多参数空间中找到最优解,提高模型的预测精度。

4.3 模型验证与对比分析

为全面验证混合寿命预测模型的性能,设计实验采集渣浆泵全寿命周期数据。实验涵盖正常工况、单一故障工况(如叶轮磨损、轴封泄漏等)以及复合故障工况,以模拟实际运行中可能出现的情况。将采集到的数据划分为训练集和测试集,训练集用于模型训练,测试集用于评估模型的泛化能力。

将混合模型与核极限学习机、长短期记忆网络等模型进行对比分析。通过计算平均绝对百分比误差等指标评估模型性能,结果显示混合模型在复杂工况下具有明显优势,MAPE降低至3.8%,预测精度显著提高。这表明混合模型结合了数据驱动和物理模型的优势,能够更好地处理渣浆泵运行数据中的复杂信息,准确预测叶轮剩余使用寿命,为渣浆泵的智能运维提供有力支持。

5 工程应用与案例分析

5.1 选型优化与运维策略

在渣浆泵的实际工程应用中,选型优化是确保其高效稳定运行的关键。先需遵循参数匹配原则,依据输送介质的特性,如粒径大小、浓度高低以及硬度强弱等,合理选择叶轮材料。对于粒径较大、硬度较高的介质,可选用高铬合金叶轮,其具有高强度和良好的耐磨性;而对于浓度较高且对磨损要求相对较低的情况,橡胶衬里叶轮则更为合适。同时结合计算流体动力学分析,对叶片型线进行优化,以改善流体在叶轮内的流动状态,减少能量损失,提高渣浆泵的效率。

基于前文构建的叶轮寿命预测模型,可为运维决策提供有力支持。根据寿命预测结果,制定动态维护计划,合理安排检修时间和更换周期。例如在某选煤厂的实际应用案例中,采用该动态维护计划后,渣浆泵的年停机时间大幅减少,从原来的200小时降至80小时,减少了120小时;运维成本也显著降低,由原来的每年50万元降至36.5万元,降低了27%,有效提高了选煤厂的生产效率和经济效益。

5.2 局限性讨论

尽管所构建的模型在常规工况下取得了良好的应用效果,但仍存在一定的局限性。在极端工况下,如输送超浓浆体或处于高温腐蚀环境时,模型的适应性不足。超浓浆体的流动特性复杂,颗粒间的相互作用增强,对叶轮的磨损机制也会发生改变;高温腐蚀环境则会影响叶轮材料的性能,加速磨损过程。针对这些局限性,未来的改进方向包括引入多尺度模拟方法,更精确地描述颗粒间的相互作用和磨损过程;利用强化学习优化模型参数,提高模型在复杂工况下的预测精度和适应性。

6 结论与展望

本研究基于CFD-DEM方法深入探究渣浆泵叶轮磨损机制,构建数据驱动与物理模型融合的寿命预测模型,经工程案例验证,该模型在选型优化与运维决策方面成效显著,能减少停机时间、降低运维成本。然而模型在超浓浆体、高温腐蚀等极端工况下适应性欠佳。未来可引入多尺度模拟精准刻画磨损过程,利用强化学习优化模型,进一步提升预测精度,为渣浆泵的可靠运行与智能化维护提供更坚实支撑。

[参考文献]

- [1]李双寿,卢达溶,洪亮,等.ADI渣浆泵叶片磨损机理的研究[J].流体机械,2000,28(6):5-8.
- [2]王艳春.渣浆泵叶片结构形式对其水力性能的影响分析[J].机械管理开发,2022,37(5):115-117.
- [3]李明义.渣浆泵副叶轮的研究[J].金属矿山,2001(12):54-56.

作者简介:

刘辉(1973—),男,汉族,河北石家庄人,大专,泵与流体机械设计、制造工装及检测技术领域。