DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2021.11.019

磨蚀故障下离心泵的振动特性分析*

傅 田¹,麻建坐^{1,2}*

(1. 重庆工业职业技术学院 机械工程与自动化学院,重庆 400040;

2. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044)

摘要:在沙水工况下,离心泵工作过程中会存在振动过大的现象,针对这一问题,通过试验的方法对其磨蚀故障下的振动信号进行 了分析。采用 LabVIEW 虚拟仪器平台搭建了试验装置,选用型号为 IS145-78 单级双吸离心泵作为试验对象;试验过程中,在水箱 中添加黄河沙,对不同时间和流量下的离心泵驱动端和非驱动端振动信号进行了测量,并对其振动信号进行了时域和频域分析, 获得了磨蚀故障下离心泵的振动特性。研究结果表明:磨蚀的产生会降低离心泵的扬程和效率;由时域分析可知,磨蚀故障下的 振动均方根在各个方向有明显增加,但在设计点处最低;从频域分析中发现,不同流量下的振动能量主要集中在轴频 f₀ 处,叶频 f_{BFF}处的振动能量随着流量的增加而逐渐降低;研究磨蚀运行中的双吸离心泵振动特性,可以为离心泵的故障监测提供一定的 帮助。

关键词:离心泵;磨蚀故障;振动特性;时域分析;频域分析;故障监测 中图分类号:TH311;TH113.1 **文献标识码**:A

文章编号:1001-4551(2021)11-1501-06

Vibration characteristic analysis of centrifugal pump under abrasion failure

FU Tian¹, MA Jian-zuo^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Chongqing Industry Polytechnic College, Chongqing 400040, China; 2. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: Aiming at the problem of excessive vibration of the centrifugal pump under sand-water conditions, the vibration signal under abrasion failure was analyzed and studied through experiments. The LabVIEW virtual instrument platform was used to build the test loop, and the model IS145-78 single-stage double-suction centrifugal pump was selected as the test object. During the test, yellow river sand was added to the water tank to measure the vibration signals of the driving end and the non-driving end at different times and flow rates. The vibration signal was analyzed in the time domain and frequency domain, and the vibration characteristics of the centrifugal pump under abrasion failure were obtained. The research results show that abrasion causes the reduction of lift and efficiency. From time-domain analysis, it can be seen that the root-mean-square vibration of the abrasion fault increases significantly in all directions, but the root-mean-square vibration is the lowest at the design point. From the frequency domain analysis, it is found that the vibration energy is mainly concentrated at the shaft frequency f_0 under different flow rates, and the vibration energy at the leaf frequency $f_{\rm BFF}$ gradually decreases with the increase of the flow rate. Studying the vibration characteristics of double-suction centrifugal pumps in abrasion operation can provide a certain reference for fault monitoring of centrifugal pumps.

Key words: centrifugal pump; abrasion failure; vibration characteristic; time domain analysis; frequency domain analysis; failure monitoring

收稿日期:2021-05-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11602041);重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201903209)

作者简介:傅田(1984-),女,重庆梁平人,硕士,副教授,主要从事机械设计及理论方面的研究。E-mail:futian19840516@163.com

通信联系人:麻建坐,男,博士,副教授。E-mail:yiqiesuifeng1983@163.com

0 引 言

在离心泵的正常运行过程中,磨蚀是其最为常见 的故障。由于离心泵的工作条件复杂,其运载液体往 往含有一定量的固体颗粒,固体颗粒的存在会使泵的 过流断面产生一定的磨蚀破坏,磨蚀的产生会加速流 体空化现象的形成,从而加剧离心泵的磨蚀损坏。因 此,对离心泵的磨损故障规律进行研究,可以防止因其 磨蚀故障而造成损失。

在运行过程中,离心泵所产生的振动特性与其故 障类型、振动部位存在直接的关系。而利用振动信号 特征频率对机械进行故障监测诊断是一种常用的方 法^[1]。许志华等人^[2]和纪俊卿等人^[3]采用不同的分 析方法,对齿轮箱和轴承进行了振动信号处理,寻找到 了其故障的特征频率,大大提高了其故障诊断的准确 率。雪增红等人^[4]和赵亮等人^[5]通过对离心泵的振 动现象进行故障分析,提高了该离心泵产品的运行效 率和其工作安全性。

当前,对于离心泵的故障研究多集中在其转子系 统不稳定、叶轮空化和空蚀方面,对于发生磨蚀后离心 泵的研究较少。而磨蚀故障的产生会严重降低泵的水 力性能和可靠性,加大整个泵组的振动水平。

罗先武[6]和田爱民[7,8]等人利用叶轮质量失重测 量的方法和表面涂层法,对泵进行了磨蚀试验分析,发 现叶轮磨蚀的破坏程度取决于颗粒浓度、颗粒形状以及 叶轮材料等因素。刘小兵^[9]通过含沙水对水轮机的磨 蚀进行了研究,发现了水轮机磨蚀破坏的集中区域。徐 姚等人^[10]通过对圆盘的磨蚀现象进行了模拟计算,得 到了其流场的速度分布和颗粒的运动轨迹等。MARSIS E 等人^[11]采用 DPM 与 E-E 颗粒模型,模拟了含有颗粒 水流对潜水泵的磨蚀,并预测了旋转机械的磨蚀情况。 WO Bo 等人^[12]采用离散相模型,对渣浆泵固相颗粒进 行了数值模拟,分析得出了颗粒直径、泵转速、叶片参数 对冲蚀特性的影响。AZIMIAN M^[13]在磨损试验台上测 试了转盘转速、泥沙入射角等对冲蚀磨蚀的影响,发现 固体颗粒的浓度越大,泥沙对其表面磨蚀的程度越大。 WALKER CI和 YOSHIRO J^[14,15]通过实验研究了不同 形状、固体颗粒大小和浓度对离心泵磨损速率的影响, 并通过总结得出了其磨蚀损失的经验公式。

本文通过搭建 LabVIEW 虚拟试验台,在水箱加入 黄河沙,加速离心泵磨蚀故障的产生,采集不同时间和 不同流量下离心泵的振动信号,对其时域下的均方根 及频域的频谱进行分析,以研究磨蚀产生后离心泵的 振动变化规律。

1 试验和数据采集

1.1 试验装置及方法

该磨蚀试验装置由进水管道、出水管道、试验泵、 阀门、传感器等部分组成,如图1所示。



图1 试验装置

在数据采集方面,笔者通过 LabVIEW 虚拟仪器平台,利用采集板卡对试验数据(流量、进口压力、出口压力、振动速度信号等)进行采集;在振动信号测量方面,则是通过 PCB 振动传感器对不同流量下的振动信号进行测量。

试验泵的主要参数如表1所示。

表1 试验泵几何参数

参数	符号和单位	量值
设计流量	m³/h	145
设计扬程	m	78
泵进口直径	$D_{\rm s}/{ m mm}$	150
泵出口直径	$D_{ m d}/ m mm$	100
叶轮出口直径	D_2/mm	245
叶片数	Ζ	6
电机转速	$n/(\mathbf{r} \cdot \min^{-1})$	2 960
电机功率	P/kW	45

根据标准,该双吸单级泵振动测点选在轴承的驱动端和非驱动端(驱动端为靠近电机端轴承座,另一端为非驱动端)。笔者在水箱中添加黄河沙,使其浓度为10 kg/m³,在该工况下进行磨蚀试验。

传感器的安装位置如图2所示。

1.2 泵外特性

为了更准确地绘制双吸泵的外特性(扬程、效率) 曲线,在运行到每个流量点,待离心泵运行平稳后,笔 者对其数据进行采集;并根据泵扬程和效率公式,对不



图 2 传感器安装位置

同时间段磨蚀状态下离心泵的外特性和正常状态下泵 的外特性进行对比。

根据定义,泵的扬程可以表示为:

$$H = \frac{p_d - p_s}{\rho g} + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} + (z_d - z_s)$$
(1)

式中:H—扬程,m; p_a , p_s —泵进出口液体的静压力,Pa; v_d , v_s —泵进出口液体否认速度,m/s; z_d , z_s —泵进出口 到任选的测量基准面的距离,m。

泵的功率通常指输入功率及原动机传到泵轴上的 功率,用 P 表示。泵的有效功率称为输出功率,用 Pe 表示,即:

$$Pe = \rho g Q H \tag{2}$$

式中: ρ —输送液体的密度, kg/m³; Q—泵的流量, m³/s; H—泵的扬程, m; g—重力加速度, m/s²。

有效功率 Pe 和轴功率 P 之比为泵的效率, 用 η 表示, 其公式为:

$$\eta = Pe/P \tag{3}$$

笔者根据磨蚀试验的扬程、效率定义,研究外特性 曲线扬程和效率的变化后发现:磨蚀的破坏会导致泵 过流断面发生磨蚀故障,使阻力系数增加,并产生大量 空穴使流动紊乱,最终导致扬程和效率下降。

为了更好地观察空蚀状态下离心泵振动特性的变 化规律,笔者采用时域、频域的方法对离心泵在磨蚀工 况运行时的振动信号进行分析,以更准确地得到在磨 蚀故障下离心泵的振动特性。

泵外特性曲线如图3所示。

2 振动信号分析

2.1 时域分析

振动信号在不同峰值的变化主要是由离心泵机械 振动和流体诱导振动引起的,各个方向的振动是离心



泵不同因素综合作用的结果。当叶轮发生故障后,整 个泵的振动强度会发生强烈的变化,此时离心泵在各 个方向的振动信号表现出典型的非稳态特征。

均方根(root mean square, RMS)是信号处理中最 常见的数据分析方法,主要分析其故障信号的平均有 效量。

为了更好地分析各个流量下离心泵振动信号的稳 定情况,笔者采用均方根来表征信号的平均强度。因 此,笔者分别对各个方向、各个流量下振动加速度信号 进行均方根处理。

均方根[16]表达式如下:

$$T_{\rm rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{K=1}^{N} X_K^2}$$
(4)

式中: X_{K} —振动信号的测量值, $K = 1, 2 \cdots n_{\circ}$

根据式(4),此处采用均方根表征来每个流量下 离心泵的平均振动强度。

在离心泵驱动端和非驱动端产生磨蚀后,每个方向 上的振动强度变化较大,这是由于磨蚀的发生使叶轮不 平衡造成转子振动过大,动、静部件摩擦加重所致;而在 正常情况下,各个方向振动信号的均方根相对变化较小, 这是由于磨蚀的产生在磨蚀破损位置产生大量漩涡,漩 涡对磨蚀位置造成冲击,使得其振动平均强度增加。

驱动端振动均方根变化曲线如图 4 所示。 非驱动端振动均方根变化曲线如图 5 所示。





由图(4,5)可知:

(1)当发生磨蚀后,离心泵驱动端的整体振动水 平增加,其振动烈度随流量的增加呈抛物线型式,且在 流量为118 m³/h 时其振动烈度最小;

(2)在非驱动端和驱动端轴向方向上,在每个流量下,振动力烈度都远大于初始振动,该方向可以作为磨蚀故障的参考方向;

(3)在竖直方向和水平方向上,其振动较为复杂, 设计点处竖直方向磨蚀后的振动值小于其初始值,设 计点处水平方向磨蚀后的振动值大于初始值。

2.2 频域分析

目前,在工程应用领域,对旋转机械进行振动信号 的频谱分析,基本上都是采用傅里叶变换的方法,该方 法是把信号的时域和频域联系在一起的重要工具。

由于采集到的工程信号有随机性和非平稳性,会存在非同步的采样误差。傅里叶分析可以在频域上把 时域上不明显的信号突显出来,可以对信号进行更好 地识别和处理。

离心泵在磨蚀后,其表面会出现破损,磨蚀后的旋转部件会诱导产生大量振动,不同频率会出现不同的变化,各个频率段振动以轴频以及高倍频为主^[17,18]。 笔者对发生磨蚀后的离心泵驱动端和非驱动端的振动 信号进行傅里叶变换,以分析不同流量下振动各频率 的变化。

在不同流量下,双吸泵驱动端的水平方向、竖直方 向、轴向方向振动信号的频谱图,如图6所示。





在不同流量下,双吸泵非驱动端的水平方向、竖直 方向、轴向方向振动信号的频谱图,如图7所示。



本次试验中,离心泵的额定转速 N = 2.960 r/min,即 旋转频率轴频 $f_0 = 49.3$ Hz,叶频 $f_{BPF} = 6, f_0 = 295.8$ Hz。

由图6和图7可知:

(1)在每个方向上都有振动能量变化,这说明磨 蚀会诱导离心泵产生强烈的振动;在进口水流中,由于 固体颗粒的存在会使液体进入过流部件时的流场变得 相对错乱、不平稳;而长时间的磨蚀会导致离心泵的转 轴和密封环、转轴与轴瓦、转轴与密封瓦等动、静部件 产生摩擦,从而引起振动;

(2)在离心泵驱动端和非驱动端水平方向上,轴频 处振动信号能量相对集中;且随着流量的增加,轴频能 量呈现先下降后上升趋势;在设计点的振动能量最小,呈 抛物线式升降,叶频振动能量逐渐降低;由于颗粒的不均 匀冲击,轴频的谐频处(2 f₀、3 f₀)产生一定能量的振动;

(3)在离心泵驱动端和非驱动端竖直方向,由于 磨蚀造成的破坏,流体会在进入离心泵后产生大量的 漩涡,导致轴频振动能量较大;随着流量的增加,轴频 以及叶频逐渐降低,并在3f。处振动能量逐渐减弱;

(4)在离心泵驱动端和非驱动端轴向方向,由于 颗粒对转动轴的不均匀冲击,致使叶轮运转不平衡,不 同流量下轴频的变化不明显,整个方向振动能量集中 在轴频处。

3 结束语

本文搭建了 LabVIEW 虚拟试验台,通过对单级双 吸离心泵的磨蚀试验,采集了不同时间和不同流量下 离心泵的振动信号,分析了磨蚀故障下水力性能以及 产生的振动特性,通过对其振动信号的时域和频域进 行分析,研究了磨蚀产生后离心泵的振动变化规律,得 出了如下结论:

(1)磨蚀试验中,固体颗粒的存在使流体阻力系 数增加,磨蚀部位产生大量漩涡,造成离心泵扬程和效 率的下降;

(2)磨蚀发生后,在离心泵驱动端和非驱动端的 轴向方向,振动均方根远大于初始振动值,该方向可作 为离心泵故障诊断的参考方向;

(3)磨蚀故障下,在离心泵轴频及谐频处产生一 定能量的振动,轴向方向上的能量主要集中在轴频上。 (下转第1512页)

本文引用格式:

傅 田,麻建坐. 磨蚀故障下离心泵的振动特性分析[J]. 机电工程,2021,38(11):1501-1505,1512.

FU Tian, MA Jian-zuo. Vibration characteristic analysis of centrifugal pump under abrasion failure[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(11):1501-1505,1512. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

研究进展和衰减路径速度积方法[J]. 机械,2019,46 (11):8-15,28.

- [4] 黄 勋. 压力容器应力分类分析设计方法改进研究[D]. 浙江理工大学,2017.
- [5] 靖维飞,韩志远,邢 健,等.含缺陷自增强超高压容器疲劳评价研究[J].中国特种设备安全,2018,34(12):8-11, 18.
- [6] 毛志辉,龙 伟,刘华国,等.基于损伤力学与安全衰减路 径的含裂纹缺陷压力容器扩展寿命分析[J].科学技术与 工程,2020,20(27):11105-11110.
- [7] 涂思浩. XFEM 在压力容器疲劳裂纹扩展分析中的应用 研究[D]. 浙江工业大学,2017.
- [8] 常 磊,张 磊,陈瑞锋.压力容器不同服役周期下初始 裂纹临界尺寸研究[J].化工装备技术,2015,36(5):20-

23,26.

- [9] 张洋洋. 压力容器的疲劳寿命与裂纹扩展规律分析[D]. 兰州理工大学,2014.
- [10] ASME BPVC. VIII. 3-2019, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section VIII-3[S]. New York, 2019.
- [11] API, API579-1/ASMEFFS-1 2016 Fitness-For-Service [S]. American Petroleum Institute, Washington, D. C. ,2016.
- TED L, ANDERSON, DAVID A. Osage. API 579: a comprehensive fitness-for-service guide [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2000, 77 (14): 953-963.
- [13] 徐 平,王立科,马 利,等. 基于 API 579-1/ASME FFS-1 的爆炸容器 FAD 评定方法[J]. 压力容器,2012,29(2): 61-66.

[**编辑:**杨骏泽]

本文引用格式:

高耀东,王壮壮,郭忠亮.初始裂纹对超高压容器疲劳寿命的影响研究[J].机电工程,2021,38(11):1506-1512. GAO Yao-dong, WANG Zhuang-zhuang, GUO Zhong-liang. Influence of initial cracks on fatigue life of ultra-high-pressure vessels[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021,38(11):1506-1512. 《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn

(上接第1505页)

本文得到的磨蚀运行中双吸离心泵的振动特性, 可以为离心泵的故障监测提供一定的帮助。

在后续的研究中,笔者将探讨颗粒浓度、颗粒大小对 离心泵磨蚀试验的影响,以得到其振动特性的变化规律。

参考文献(References):

- [1] 沈庆根,郑水英.设备故障诊断[M].北京:化学工业出版 社,2006.
- [2] 许志华,潘庭龙.基于变分模态分解的风机齿轮箱[J].机 电工程,2021,38(1):129-132.
- [3] 纪俊卿,张亚靓,孟祥川,等. 自适应小波阈值滚动轴承故 障振动信号降噪方法[J]. 哈尔滨理工大学学报,2021,26
 (2):124-130.
- [4] 雪增红,曹 潇,王天周.离心泵机组振动故障诊断与分 析[J]. 排灌机械学报,2018,36(6):467-471.
- [5] 赵 亮,雒晓辉,许德忠.核电厂离心泵底座共振故障诊断方法及优化设计研究[J].水泵技术,2001(2):15-19.
- [6] 罗先武,许洪元. 渣浆泵 ADI 叶片的磨蚀特性分析[J]. 水力发电学报,2001,1(1):79-85.
- [7] 田爱民,田爱杰.离心泵叶轮内磨损规律的试验研究[J]. 煤炭科学技术,1998(11):11-12.
- [8] 安一超,张人会,李 维,等.轻型化工渣浆泵叶轮轴向间 隙泄漏流及磨损特性分析[J].流体机械,2020(1):21-26.
- [9] 刘小兵.水力机械泥沙磨损的数值模拟[J].四川工业学 院学报,2000,19(2):79-84.

- [10] 徐 姚,张 政,程学文,等.旋转圆盘上液固两相流冲 刷磨损数值模拟研究[J].北京化工大学学报:自然科学 版,2002,29(3):12-16.
- [11] MARSIS E, RUSSELL R. A State of the Art Computational Fluid Dynamics Simulation for Erosion Rates Prediction in a Bottom Hole Electrical Submersible Pump [C]. SPE Heavy Oil Conference. Calgary: Society of Petroleum Engineers, 2013.
- WO Bo, YAN Hong-zhi, XU Hai-liang, et al. Numerical simulation about erosion characteristics of solid particle in slurry pump [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(1):124-129.
- [13] AZIMIAN M, BART H J. Erosion investigations by means of a centrifugal accelerator erosion tester [J]. Wear, 2015 (328-329):249-256.
- [14] WALKER C I , BODKIN G C. Empirical wear relationships for centrifugal slurry pumps:Part 1:side-liners[J]. Wear, 2000,242(1-2):140-146.
- [15] YOSHIRO J, KAZUYUKI N. Slurry wear properties of pump lining materials[J]. Wear, 1997, 210(1-2):211-219.
- [16] 秦树人.工程信号处理[M].北京:高等教育出版社, 2008.
- [17] 刘桓秀,陆佳平.基于 ANSYS 的弹性约束包装件的随机 振动特性分析[J].包装与食品机械,2019(1):57-62.
- [18] 梁双印,柳亦兵,胡三高,等.大机组锅炉给水泵振动监测分析[J].中国电力,2001,34(5):1-3.