

# 绞吸船泥泵在线振动状态监测系统

李晓燕, 曹湘波

(中交广州航道局有限公司, 广东 广州 510290)

**摘要:** 泥泵是绞吸船的关键设备, 其状态直接影响绞吸船的疏浚效率。通过对绞吸船主要疏浚装备泥泵进行振动状态实时监测, 建立针对绞吸船泥泵的 diagnostic 分析系统, 以实现泥泵设备运行状态的实时监控, 同时了解泥泵状态变化趋势, 对泥泵设备故障早知道、早预报, 并建立更优化的泥泵维修管理, 以提高绞吸船的疏浚效率和经济效益。

**关键词:** 绞吸船; 泥泵; 振动; 状态监测

中图分类号: U615.351.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-7874(2020)07-0054-05

doi: 10.7640/zggwjs202007013

## Real-time vibration condition monitoring system of cutter suction dredger pump

LI Xiao-yan, CAO Xiang-bo

(CCCC Guangzhou Dredging Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510290, China)

**Abstract:** Dredge pump is the critical equipment of cutter suction dredger, and its condition affects the dredging efficiency directly. Through the real-time monitoring of the vibration condition of the cutter suction dredger's main dredging equipment, a diagnostic analysis system through monitoring the vibration condition of dredge pump was established in order to realize the real-time monitoring of the operation status of dredge equipment, and to learn about the pump's condition changing trend, so as to know and forecast the equipment fault early, establish a more optimized maintenance management of the dredger, improve the dredging efficiency and economic benefit of cutter suction dredger.

**Key words:** cutter suction dredger; dredge pump; vibration; condition monitoring

### 0 引言

绞吸挖泥船是航道疏浚、吹填造地、水利工程和港口建设的主要工具, 作为工程船, 船上有大量的船机设备和疏浚装备, 设备正常运转是保障船舶正常施工作业的关键。目前国内外对于船机关键设备, 如柴油机、发电机等的运行状态检测技术方面的研究已经较为深入, 已形成系统的监测管理和故障诊断理念, 并研发出较为成熟的柴油机检测诊断方法, 如状态参数监测法, 振动分析法和油液分析法等; 在监测绞刀运行状态方面的研究, 有绞刀控制系统等, 实现了自动控制, 并实时显示绞刀在挖泥剖面的位置和产量等各种

信息参数。而迄今对于挖泥船故障频发、影响施工效率的泥泵工作状态监测研究则较少。泥泵因其工作运行环境恶劣, 经常发生叶轮失衡、流道堵死、断轴、轴承失效、过度磨损等问题故障, 拟通过实时获得泥泵工作状态, 提早发现泥泵故障征兆, 及时采取维修养护。泥泵在其工作生命周期内, 历经叶轮自然磨损、非均匀流体泥浆通过、杂物冲击等<sup>[1]</sup>, 从状态完好到恶劣, 呈现逐渐变化趋势, 这些都会通过其固有振动频率趋势变化和冲击振动而体现, 同时在对某系列绞吸船多次发生泥泵断轴事故后的调查中了解到, 在故障发生前, 泥泵均出现异常振动, 由此拟通过对泥泵建立一种实时在线振动监测系统来研究其变化, 从而实现更科学有效的泥泵效率评估、维修与保养手段。

收稿日期: 2020-03-07 修回日期: 2020-05-11

作者简介: 李晓燕 (1976—), 女, 安徽淮北人, 高级工程师, 研究方向为疏浚船舶修造。E-mail: lxyqf@163.com

## 1 系统设计与安装

### 1.1 系统方案设计

泥泵是典型的旋转往复型机械,振动分析法是进行旋转机械监测与诊断的主要方法<sup>[2]</sup>,它直接、有效,并且可靠度高,在机械行业得到普遍应用;泥泵在线振动状态监测系统(船载服务器系统)由前端的设备传感器群、中间的信号采集系统和后端的故障分析与诊断系统软件组成,包括传感器、数据采集仪和计算机,其结构分为3层<sup>[3-5]</sup>:

1) 系统结构第1层,即泥泵现场,在泥泵设备适当位置安装振动加速度传感器和转速传感器,用于实时测量采集泥泵的振动和转速参数。

2) 系统结构的第2层,即船舶施工作业控制室(驾驶室)。机械监测系统装备放置在控制室内环境较好的地方,从泥泵安装的传感器传输回来的信号经过处理后,根据信号的强弱转换成相应大小的电流(4~20 mA)信号输出,通过与预先设定的警戒值相比较,在屏幕上通过红、黄、绿指示灯来显示设备的运行状态,通过这种直观的方式,让现场施工管理人员、操作人员实时掌握泥泵的运行状况。

3) 系统结构第3层,即各种扩展功能所需。电流信号可以通过电缆传输至其他配置的中控系统或者拓展功能设备,船载服务器系统的服务器再通过移动数据网络与陆岸监测中心进行数据传输,陆岸监测中心和客户端设备构成广域局域网。陆岸监测中心集中处理从挖泥船上收集的数据,客户端设备可以是台式计算机、笔记本电脑、平板电脑或者智能手机。在互联网环境下,通过访问陆岸监测中心及在用户权限系统的监督控制下,相关人员根据自己的权限,监控挖泥船上的测量数据。通过互联网进行数据采集、传输或下载,以满足后续进行数据回放、报警查看、状态趋势记录或数据分析研究。

泥泵在线监测系统流程如图1所示。

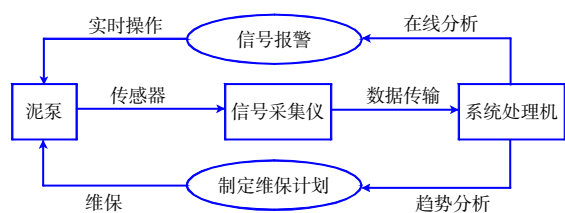


图1 泥泵在线监测流程图

Fig.1 Real-time monitoring flow chart of dredge pump

### 1.2 系统硬件与安装

本文研究对象是“华安龙”(设计产量为4 500 m<sup>3</sup>/h的绞吸船),船上2台甲板泥泵,额定转速325 r/min,额定功率3 626 kW,属于大型、低速的旋转机械。鉴于泥泵工作环境恶劣,选用频率范围0.1~10 000 Hz的工业ICP加速度传感器。所选择的数据采集设备必须具备较强的可靠性,同时主要考虑以下两个方面的要求:1) 采集设备的处理能力,采集系统不仅需要合适的采样频率、较大的存储空间,还需要快速的数据计算处理能力;2) 数据采集精度,这是保证获取可靠分析数据的重要因素。

系统中泥泵测点选择依据主要参考标准为GB 10889—1989《泵的振动测量与评价方法》。每个测点都要在3个相互垂直的方向(水平、垂直、轴向)进行振动测量。系统中约定:泥泵主轴方向为X轴,水平方向为Y轴,垂直方向为Z轴。传感器布置分主测点和辅助测点,主测点位于泥泵齿轮箱输入和输出的轴承座处和靠近轴承处,辅助测点布置在泥泵基座和出口法兰处。测点位置布置如图2所示。

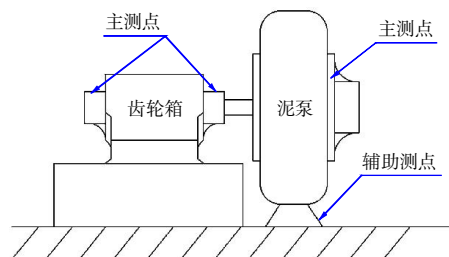


图2 泥泵测点示意图

Fig.2 Schematic diagram of pump measuring point

因监测系统工作环境恶劣,系统硬件必须采取适当的防护措施:铠装工业型ICP加速度传感器配备的信号线适用于长距离信号的传输,双层屏蔽层能够有效的屏蔽外界干扰信号,更适用于长距离信号传输;采集仪专用防护箱采用特殊设计,能够防电磁干扰、防潮。

### 1.3 系统振动分析方法

振动分析功能包括时域分析、幅值频谱、功率频谱、倒频谱、自相关谱、互相关谱、概率密度函数、轴心轨迹曲线、包络解调、趋势分析等实用功能,本系统中用于泥泵振动状态的分析算法主要有时域分析、频谱分析、包络谱分析等<sup>[6-8]</sup>。

时域分析是信号最基本的分析方法之一,它

直观给出了信号原始的时域波形,在各个方面有重要的作用。对于具体的信号,它表现出不同的应用特点。监测系统随时测量当前振动信号的相应特征值,并与标准值进行比较,实现监测任务。

频谱分析方法主要为研究其内在规律,建立在傅里叶变换(FFT)技术的基础上,将振动时间信号中包含的频率成分换成频谱表示形式,旋转机械常见故障均会产生某一种固定频率或者频率范围的振动,可以通过观察分析振动信号在相应频率或范围的变化,从而确定故障是否发生及故障的类型来实现诊断的目的。它具有运算速度快、物理概念清晰简单的优点。

包络谱分析即共振解调分析常用于滚动轴承、齿轮等旋转机械元件的故障诊断中,共振解调一般是对信号中的共振波形的包络线进行频谱分析,所以称为包络谱分析。共振解调分析诊断轴承损伤类故障的原理:当轴承某一元件表面出现局部损伤时,在负载运行过程中要与其他元件

发生碰撞,产生冲击脉冲力,由于冲击脉冲力的频带很宽,必然包含了轴承外圈、传感器等的固有频率而激起这个测振系统的高频固有振动。

## 2 泥泵振动监测实测分析

2018年5月“华安龙”绞吸挖泥船泥泵振动在线监测系统完成安装与调试,系统投入使用。振动数据分析的测试时段,“华安龙”一直在广西北海铁山港工地进行吹填造地作业施工,该工地土质主要为中粗沙。

### 2.1 监测数据分析

2台泥泵实时状态测试工况选择挖泥、清水(低速)、清水(高速)3个工况,对所采集的泥泵监测数据进行分析,主要包括时域分析和频域分析。

#### 1) 挖泥工况

挖泥工况下,对“华安龙”泥泵测试数据进行时域分析。可以发现在挖泥过程中,泥泵上会出现随机的冲击振动,如图3所示,左、右泥泵X、Y、Z三个方向的时域振动幅值。

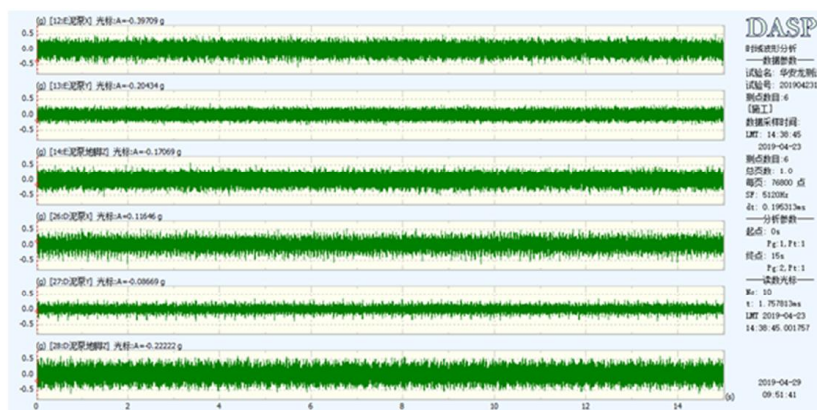


图3 泥泵挖泥工况时域振动幅值

Fig. 3 Time domain vibration amplitude of dredge pump in dredging condition

此时泥泵振动时域最大值是有效值的4倍左右,主要是在挖泥过程中,由于泥土土质不均匀、

流速、泵真空度等因素导致的冲击振动,如图4所示。

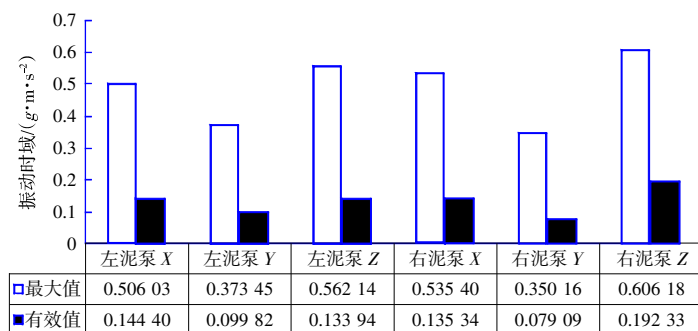


图4 挖泥工况泥泵的振动时域分析

Fig. 4 Vibration time domain analysis of dredge pump in dredging condition

此时对泥泵测试数据进行频域分析。可以发现在挖泥过程中,泥泵叶轮转速为 280 r/min,泥泵的振动频谱主要集中在 500 Hz 以下,14 Hz 为泥泵叶片通过频率。

### 2) 清水工况(低速)

泥泵低速泵送清水工况下,对泥泵测试数据进行时域分析。可以发现在泥泵泵送清水过程中,泥泵上也会出现随机的冲击振动。泥泵振动时域最大值和有效值比挖泥工况都有不同程度的减小,而出现冲击振动可能是由于流体流动特性导致。泥泵低速泵送清水工况下,对泥泵测试数据进行频域分析。可以发现在挖泥过程中,泥泵的振动频谱主要集中在 500 Hz 以下;泥泵叶轮转速为 280 r/min,14 Hz 为泥泵叶片通过频率。

### 3) 清水工况(高速)

泥泵高速泵送清水工况下,泥泵柴油机转速为 920 r/min。对泥泵测试数据进行时域分析。可以发现在泥泵泵送清水过程中,泥泵上也会出现随机的冲击振动,与泥泵低速泵送清水工况类似。通过对比分析可以发现,高速泵送清水比低速时泥泵振动略有增大。

泥泵高速泵送清水工况下,对泥泵测试数据进行频域分析。可以发现在泥泵高速泵送清水过程中,泥泵的振动频谱主要集中在 500 Hz 以下,

泥泵叶轮转速为 301 r/min,15.07 Hz 为泥泵叶片通过频率,比低速工况振动略大。

综上所述,“华安龙”绞吸船在以上 3 个工况下,从时域和频域方面对泥泵振动状态测试数据进行了分析,泥泵无明显故障征兆,船机设备运行良好。

## 2.2 监测数据趋势分析

选取 2019 年 4—6 月“华安龙”绞吸船在广西北海铁山港工地施工过程中泥泵施工测试数据进行趋势分析。

正常施工过程中,左右甲板泵转速基本上稳定在 315 r/min 左右,但 2 个泥泵的出口压力有一定的波动,图 5、图 6 分别是左、右泥泵振动均方差趋势图,左泥泵是施工前更换的新叶轮,故左泥泵振动较平稳,右泥泵在更换叶轮前后,泥泵轴向(X 向)振动数据差异较明显,从数据看更换叶轮后泥泵振动均方差减小了 70%左右。右泥泵拆换下的叶轮,目视磨损严重,无法继续使用。

通过分析对比右泥泵更换泥泵叶轮前后的在线振动系统监测数据发现,叶轮磨损程度和 400 Hz 以下振动频谱能量有关。选取右泥泵更换叶轮前后多组数据进行分析对比,低频能量占比变化明显,新叶轮的低频能量占比从 80%降到 20%,降幅达 60%。

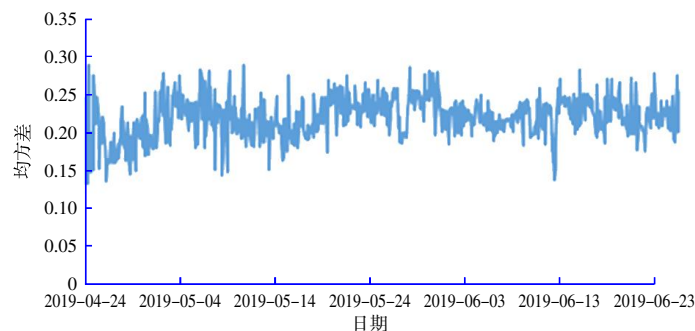


图 5 左泥泵振动均方差趋势图

Fig. 5 Trend chart of vibration mean square error of left dredge pump

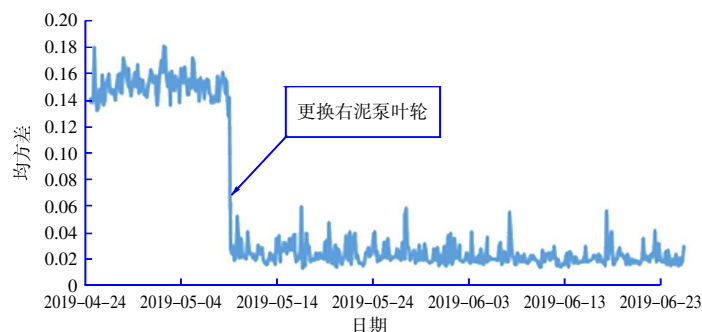


图 6 右泥泵振动均方差趋势图

Fig. 6 Trend chart of vibration mean square error of right dredge pump

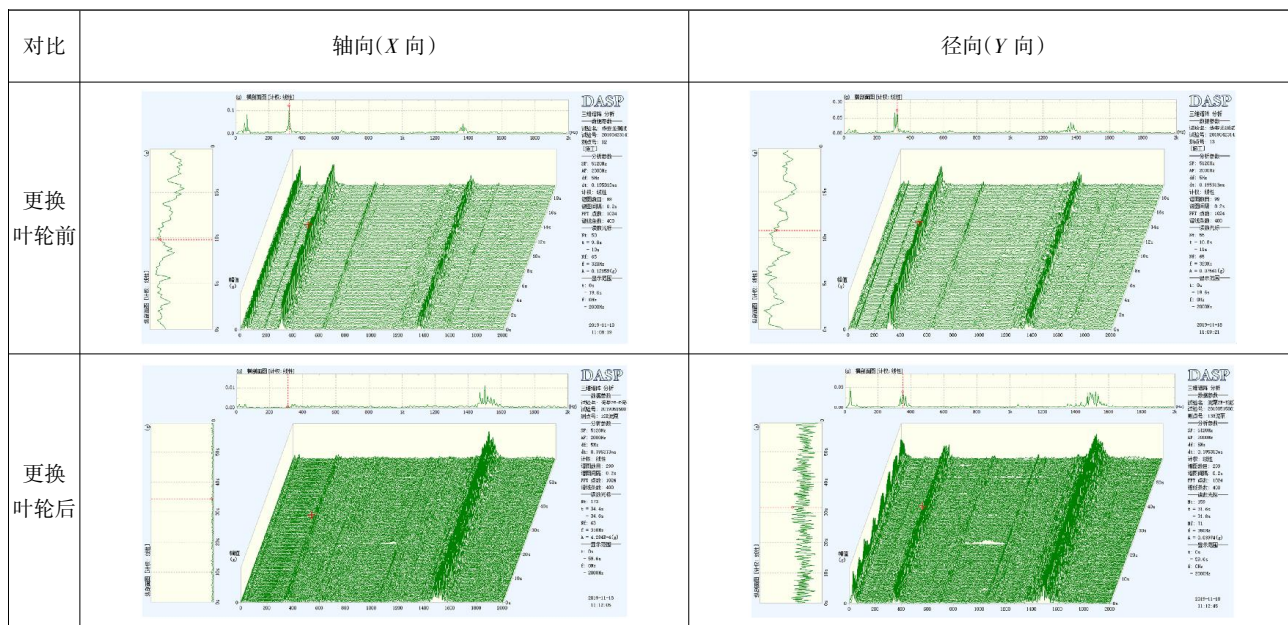


对比右泥泵叶片通过频率的幅值谱可以发现, 更换右泥泵叶轮前后差异明显。进一步分析右泥

泵的三维谱阵可以发现, 更换右泥泵叶轮前后频谱变化比较明显, 见表1。

表1 右泥泵叶片频率三维谱阵对比

Table 1 Comparison of three-dimensional spectral array of blade frequency of right dredge pump



### 3 结语

泥泵在线状态监测系统在“华安龙”船上的安装和使用, 从其实际使用效果看, 可达到研究的目的。由此可见, 通过泥泵在线监测技术能够及时发现故障征兆, 最大限度地减少泥泵的计划外维修、消除冗余检查和经常性地计划内维护以及带来的过剩维修; 如处理及时, 或可避免突发故障的发生; 使泥泵零部件的寿命得到充分发挥, 优化泥泵检修周期, 降低维修费用, 从而使泥泵维修更加合理, 可大大提高绞吸挖泥船的疏浚效率, 带来可观的经济效益。

### 参考文献:

- [1] 李玉军. 挖泥船泥泵在线监测系统的研制[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2004.  
LI Yu-jun. Research on on-line monitoring system of dredge pump[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2004.
- [2] 尹丽. 旋转机械振动信号处理算法研究与程序设计[D]. 西安: 西安工业大学, 2016.  
YIN Li. Research and program design of vibration signal processing algorithm of rotating machinery[D]. Xi'an: Xi'an Industrial University, 2016.
- [3] 江恒, 王友钊. 旋转机械在线状态监测与故障诊断系统开发研究[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(3): 68-70.  
JIANG Heng, WANG You-zhao. Research on condition monitoring and fault diagnosis system for rotating machinery[J]. Oil Field

Equipment, 2005, 34(3): 68-70.

- [4] 杨世锡, 尚小林, 柳亦兵, 等. 大型旋转机械状态监测与故障诊断研究进展[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(1): 1-11.  
YANG Shi-xi, SHANG Xiao-lin, LIU Yi-bing, et al. Advances in condition monitoring and fault diagnosis of large rotating machinery [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(1): 1-11.
- [5] 胡志湘, 梅通友. 状态监测技术在旋转设备故障诊断中的应用[J]. 设备管理与维修, 2012(4): 48-51.  
HU Zhi-xiang, MEI Tong-you. Application of condition monitoring technology fault diagnosis on the rotating equipment[J]. Plant Maintenance Engineering, 2012(4): 48-51.
- [6] 赵中敏. 以振动信号分析方法诊断机械故障[J]. 中国设备工程, 2006(11): 39-40.  
ZHAO Zhong-min. Diagnosing mechanical faults by vibration signal analysis[J]. China Plant Engineering, 2006(11): 39-40.
- [7] 王金福, 李富才. 机械故障诊断技术中的信号处理方法: 时域分析[J]. 噪声与振动控制, 2013(2): 128-132.  
WANG Jin-fu, LI Fu-cai. Review of signal processing methods in fault diagnosis for machinery[J]. Noise and Vibration Control, 2013(2): 128-132.
- [8] 李舜酩, 郭海东, 李殿荣. 振动信号处理方法综述[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(8): 1 907-1 915.  
LI Shun-ming, GUO Hai-dong, LI Dian-rong. Review of vibration signal processing methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(8): 1 907-1 915.