

doi: 10.7690/bgzdh.2014.06.017

## 混流式喷水推进泵叶轮刮擦故障诊断方法

明廷涛<sup>1</sup>, 苏永生<sup>2</sup>, 王益成<sup>1</sup>

(1. 海军上海地区装备修理监修室, 上海 200136; 2. 海军工程大学动力工程学院, 武汉 430033)

**摘要:** 针对喷水推进泵的叶顶间隙过大或者过小都会影响喷水推进船航速的问题, 提出一种利用泵壳体振动和输入轴力矩参量对叶轮刮擦故障进行识别的方法。在介绍混流式喷水推进泵叶轮径向摩擦振动机理的基础上, 对装有 2 台喷泵的某高速巡逻艇的实船试航, 通过获取的靠近叶轮的壳体振动信号以及输入轴力矩信号分析, 得到了具体的故障特征指标。该分析结果为使用人员及时对这类异常状态做出快速、准确的判断, 及时调整叶轮安装的状态以防止更大事故的发生提供了参考。

**关键词:** 混流式喷水推进泵; 叶轮; 刮擦; 诊断方法

**中图分类号:** TJ83 **文献标志码:** A

## Fault Diagnosis Method of Impeller Scratching in Mixed Flow Water Jet

Ming Tingtao<sup>1</sup>, Su Yongsheng<sup>2</sup>, Wang Yicheng<sup>1</sup>

(1. *Repairing & Supervising Office, Naval Equipment in the Shanghai Area, Shanghai 200136, China;*

2. *College of Marine Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China*)

**Abstract:** For water jet pump tip clearance is too large or too small will affect the problem of the speed of the water jet propulsion boat, the impeller scratch fault identification method is put forward by vibration of the pump shell and shaft torque. Based on pump impeller radial vibration mechanism of friction, a real high-speed patrol boat which is equipped with two pumps is tested for trials, according to the impeller casing vibration signal and the input shaft torque signal analysis, the fault indicators of the specific characteristics are received. The analysis result can be make quickly, accurate judgments for the abnormal state, and also can provide the reference for prevent a greater accident by adjusting the impeller installed state.

**Keywords:** mixed-flow water jet; impeller; scratching; diagnosis method

### 0 引言

叶顶间隙的控制是喷水推进泵效率参量的关键因素之一<sup>[1]</sup>。为了提高所设计喷水推进泵的水力效率, 一般都把叶顶间隙设计得较小, 以减少过流液体的泄漏和回旋<sup>[2]</sup>。但是, 由于制造工艺的缺陷和安装水平的限制, 过小的叶顶间隙往往会导致喷水推进泵工作时旋转叶轮与腔室内壁之间发生摩擦, 使得泵的吸收功率增大, 振动和噪声加强, 轻者会引发转动系统的摩擦损失, 重者会导致叶轮与壳体的变形, 造成泵性能下降, 甚至发生事故。喷水推进船航速未达设计值的一个重要原因就是叶顶间隙过大或者由于过小导致严重刮擦。所以, 解决这个问题就需要对已安装好的喷水推进泵工作时是否会发生叶轮的刮擦故障进行现场的快速诊断, 以指导现场叶轮叶顶间隙的控制。一般而言, 仅仅依靠操作者的经验或进行人工试转等方法来判断推进泵工作时是否刮擦是相当困难的, 而通过振动分析来评

估和监测泵的工作状态有很好的效果并在很多领域都得到了广泛的应用<sup>[3-4]</sup>。笔者在分析混流式喷水推进泵叶轮径向摩擦振动机理的基础上, 通过对某混流式喷水推进泵试航过程中泵壳体振动信号和推进轴的输入力矩的测量和分析, 提出了判断推进泵叶轮刮擦的方法, 给出了具体的故障特征指标, 以便使用人员及时对这类异常状态做出快速、准确的判断, 及时调整叶轮安装的状态, 以防止更大事故的发生。

### 1 叶轮与壳体径向摩擦的振动机理

#### 1.1 混流式推进泵叶轮的工作机理分析

叶轮转动时, 水流从船底进水口吸入, 经进水流道进入叶轮。叶轮对水做功, 使水获得动能和压能。叶轮作用后的水流既有轴向速度又有周向速度。水流经过导叶体时, 导叶片将水流的周向运动整流成轴向运动, 导叶体和喷口的渐缩型流道同时也将水流的压能转换成动能, 增加了水流的轴向运动速

收稿日期: 2014-03-20; 修回日期: 2014-04-14

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51306205); 海军工程大学青年基金(HGDQNJJ11014)

作者简介: 明廷涛(1981—), 男, 湖北人, 博士, 工程师, 从事机电设备状态监测与故障诊断和舰船装备技术保障研究。

度，使水流从喷口高速向后喷射，高速喷射的水流对船体的反作用力推动船体向前运动<sup>[5]</sup>。对于喷水推进泵的轮毂内没有安装推力轴承，转动叶片及其轮毂上承受的流体动力  $F$  通过叶轮轴传递到机舱内的推力轴承上，通过该推力轴承将这部分力传递到船体。采用外置推力轴承的喷水推进器工作时，叶轮轴上不但承受力矩，同时也传递较大的推力。对于混流式喷水推进泵的这种推力传递方式，高速运转中的叶轮是向右轴向移动的，这导致了叶顶间隙的减小。如果原装配中叶顶间隙过小，就会出现叶轮与壳体之间刮擦。混流式喷水推进泵工作原理如图 1。

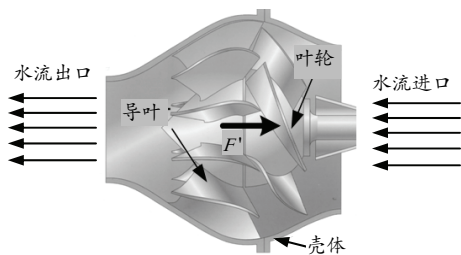


图 1 混流式喷水推进泵工作原理示意图

### 1.2 叶轮与壳体碰磨的故障特征

当叶轮轴在转动时，叶轮叶顶局部与壳体内壁发生接触瞬间，叶轮刚度增大；被壳体反弹后脱离接触，叶轮的刚度减小，并且发生横向自由振动（大多数按照一阶自振频率振动）。因此，叶轮的刚度在接触与非接触两者之间变化，变化的频率就是叶轮旋转频率。叶轮的横向自由振动与强迫的旋转运动叠加在一起，就会产生一些特有的、复杂的振动相应频率。局部摩擦引起的振动频率中包含有不平衡引起的转速频率  $\omega$ ，同时摩擦振动是非线性振动，所以还包含有  $2\omega, 3\omega, \dots$  一些高次谐波。除此之外，还会引起低次谐波振动，在频谱图上会出现低次谐波成分  $\omega/n$ ，重摩擦时  $n=2$ ，轻摩擦时  $n=2, 3, 4, \dots$ 。次谐波的范围取决于叶轮的不平衡状态、阻尼、外载荷的大小以及材料特性等因素<sup>[6]</sup>。

在混流式喷水推进泵这个系统中，由于无法或者很难直接监测叶轮和叶轮轴的振动，比较简易的监测位置可以选在泵壳体靠近叶轮的地方，所以利用该系统中靠近叶轮壳体上的振动所蕴含的信息来判断刮擦就显得尤为重要。假定高速旋转的叶轮与泵壳之间存在刮擦，那么对于泵壳体而言，该故障特征与转速频率  $\omega$  息息相关，考虑到叶轮的叶片数，监测泵壳体振动时，叶轮与壳体碰磨的故障特征频率  $f$  就是  $m \cdot \omega$ ， $m=1, 2, \dots, Z$ ，其中  $Z$  为叶片数。当产

生刮擦故障时，整套推进系统是一种不稳定状态，上述横向自由振动和强迫运动的综合，还会出现一些特有的频率。另外，对于推进泵的输入转矩而言，与稳定工作状态相比，受刮擦的影响也会呈现剧烈的波动特性。

## 2 实船试验研究

### 2.1 实船测试系统设计

根据叶轮刮擦故障振动机理，对实际装船后的某混流式喷水推进泵是否会存在刮擦故障开展了相关的试验研究，设计如下的测试系统，选用的传感器如图 2 所示。其中，力矩通过东华测试的 DH5905 无线力矩测量装置来实现，转速采用 DH5640 光电转速传感器来获取，泵壳体振动通过 PCB352C34 传感器，经由 NI-PXI 系统现场采集，所有的传感器和测试系统在试航前均进行了检定。

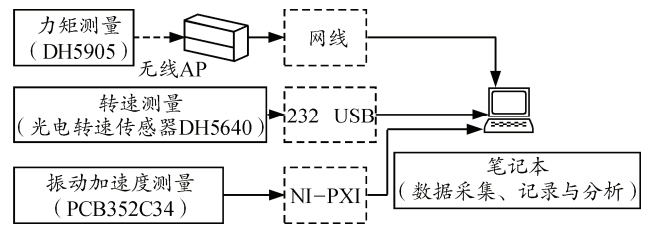
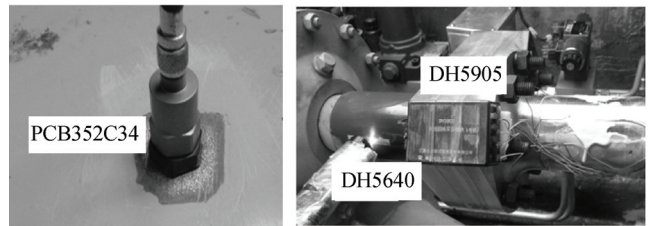


图 2 叶轮刮擦故障实船测试系统原理

传感器通过电缆和转换接头与笔记本相连，转矩和转速通过东华测试的 DHDAS 软件进行参数设置和数据采集和分析，壳体的振动加速度通过 Labview 8.6 自编程序进行信号采集分析、实时显示和在线保存。设置的参数如下：振动加速度传感器的采样频率  $f_s=1\ 280\ \text{Hz}$ ，稳定工况下采样时间  $t=10\ \text{s}$ 。力矩测量的采样频率  $20\ \text{Hz}$ ，转速的测量是计算感光片通过光电传感器的次数并由 232 串口经过 USB 传输至电脑中的测试软件，经过参数设置、计算分析折合到  $r/\text{min}$ ，实际保存的数据和力矩采样频率一致。该喷水推进船安装有 2 套喷水推进器，实际测试时 2 套推进器的上述参数可以同时获取，现场传感器和布置如图 3 所示。



(a) 加速度传感器 (b) 力矩和转速传感器

图 3 传感器布置

## 2.2 测试数据结果分析

在安装有 2 套喷水推进器的某高速巡逻艇正式试航前，对喷水推进器进行现场安装，符合相关规范，叶顶间隙的控制根据要求，由卡尺来标识和确定。喷水推进泵安装完毕后，在船坞中对驱动轴进行人工试转（不带负荷），没有任何的卡顿，整个系统运转平稳，无明显摩擦和撞击。

笔者选取在长江试航过程中推进泵的 2 个稳定转速 2 200 r/min 和 2 400 r/min 对喷水推进泵是否存在刮擦进行实时监测和快速诊断。这 2 个转速对应

的轴频和半倍轴频的整数倍值如表 1 所示。

表 1 转速和轴频参数对照

$n/(r/min)$	$f_r/Hz$	$i/2f_r(Hz), i=3, 4, 5, 6, 7, 8$					
		3	4	5	6	7	8
2 200	36.67	55	73.34	90.9	110	128.35	146.68
2 400	40.00	60	80.00	100.0	120	140.00	160.00

分别选取该高速巡逻艇左右 2 台混流式喷水推进泵 2 200 r/min 和 2 400 r/min 的壳体振动和输入轴力矩信号 10 s 的数据进行分析，得到的时域和频域信号如图 4 和图 5 所示，相应的轴力矩测量值如图 6 所示。

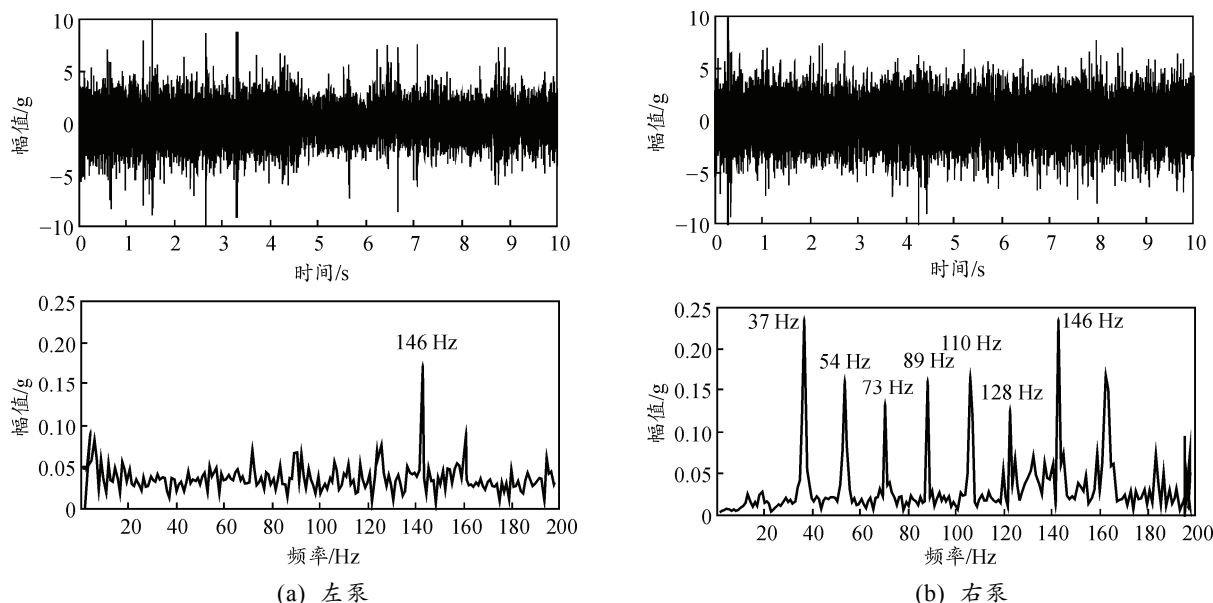


图 4 2 200 r/min 壳体振动信号时域和频域分析

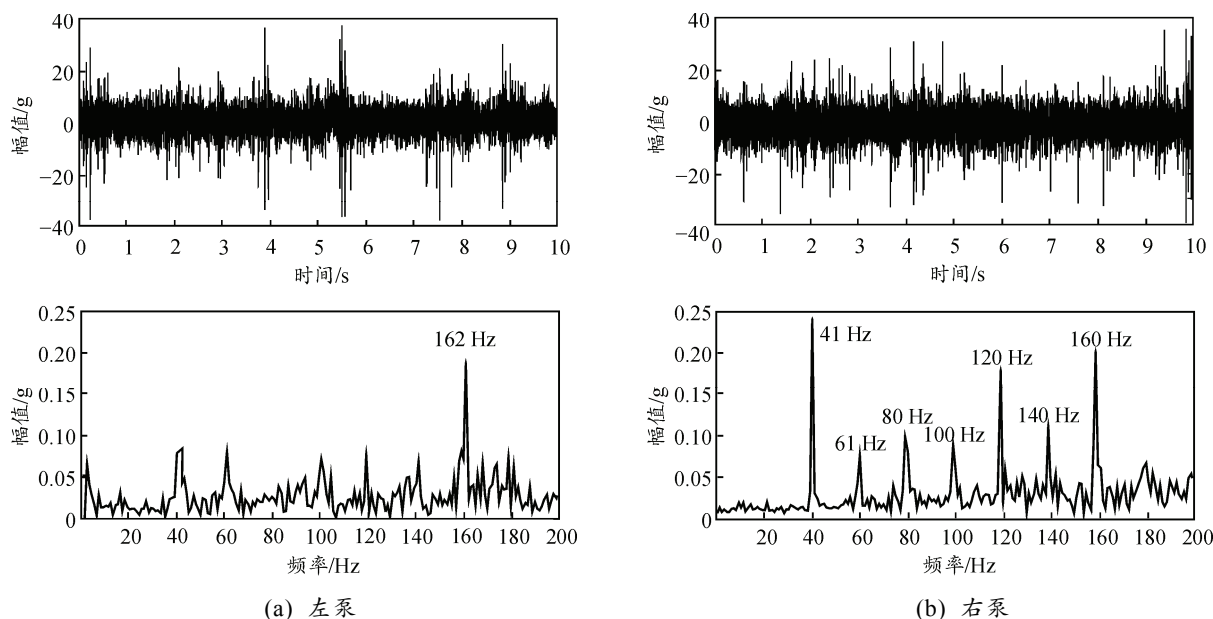


图 5 2 400 r/min 壳体振动信号时域和频域分析

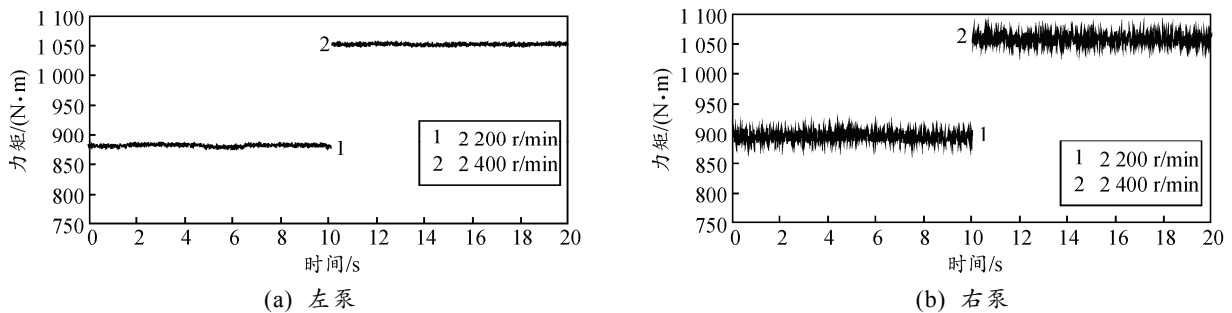


图 6 2 200, 2 400 r/min 对应的输入轴力矩值

分析图 4 和图 5 数据可知, 对于左泵, 在这 2 种工况下, 频域信号中突出的信号 146 Hz 和 162 Hz 与对应的叶频 (2 200 r/min, 146.68 Hz; 2 400 r/min, 160 Hz) 基本吻合, 说明此时在壳体上所反应的振动信号蕴含了泵正常工作时水流通过叶轮做功所表征的过流状态。而对于右泵, 同样在这 2 种工况下, 频域信号中突出的成分就丰富得多了。2 200 r/min 时, 所表征的谱线中 37 Hz, 54 Hz, 73 Hz, ……与对应的轴频和半倍轴频的整数倍数值基本吻合; 同样, 2 400 r/min 时, 所表征的谱线中 41 Hz, 61 Hz, 80 Hz, ……与其对应的轴频和半倍轴频的整数倍数值也基本吻合。而对获取的输入轴力矩值的图例来看, 2 个转速下左轴的均值分别为 879 N·m, 1 048 N·m; 而右轴的均值分别为 885 N·m 和 1 053 N·m。同样, 在分析的这段时间内, 输入轴力矩的峰值左泵在 5 N·m 左右, 而右泵则达到了 20 N·m 多, 说明左右泵的工作状态是有差别的。因为这 2 台泵安装前都是新泵, 而且都经过了出厂的检验 (台架试验, 叶轮的动平衡等), 所用的传感器和测试仪器在试航前都经过了生产厂家的标定; 所以, 这种信号特征的差异疑似右泵在现场安装、调试过程中出现某种故障所导致, 通过试航后推进泵的拆检发现, 右泵的叶轮和壳体之间出现了大面积的刮擦, 从而说明上述特征的出现就是刮擦故障所引起。因而, 可以通过对泵壳体的振动分析, 结合测试过程中的力矩监测来实时判断叶轮与腔室是否存在刮擦, 及时排除该故障, 保证喷水推进泵的水力性能和提高其使用寿命, 防止事故的发生。

### 3 结论

笔者在分析叶轮与壳体刮擦故障振动机理的基础上, 结合对安装有 2 台混流式喷水推进泵的某高速巡逻艇的实船试航, 通过获取的靠近叶轮的壳体振动信号以及输入轴力矩信号分析, 得到如下结论:

- 1) 叶轮与壳体的刮擦故障与输入轴的转速息息相关, 表征为轴频和半倍轴频的整数倍关系;
- 2) 在相同的转速下, 发生刮擦故障的输入轴力矩要稍大于不发生刮擦的, 而且呈现出剧烈的波动特性;
- 3) 混流式喷水推进泵叶轮与壳体的刮擦可以通过现场壳体的振动监测, 经过相应的特征分析来实现准确、快速的诊断。

### 参考文献:

- [1] Il Sung M, Ki Sup K, Chang Sup L. Blade Tip Gap Flow Model for Performance Analysis of Waterjet Propulsors[C]. International Association for Boundary Element Methods, UT Austin, TX, USA, 2002.
- [2] David R Lavis, Brian G Forstell, Jhon G Purnell. Advanced Compact Waterjet Propulsion for High-Speed Ships[C]. 9th International Marine Design Conference, Ann Arbor, MI, 2006.
- [3] Escaler X, Egusquiza E, Farhat M, et al. Detection of Cavitation in Hydraulic Turbines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20: 983-1007.
- [4] Mike K. Cavitation Monitoring of Hydraulic Machines by Vibration Analysis[D]. Switzerland: Laboratoire de Machines Hydrauliques (LMH), 2000.
- [5] 王永生, 丁江明, 刘承江, 等. 舰船新型推进系统[M]. 武汉: 海军工程大学, 2011: 1.
- [6] 盛兆顺, 尹琦岭. 设备状态监测与故障诊断技术的应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 166-168.