

离心泵空化状态与声发射信号特征关系试验*

邹淑云¹ 刘忠¹ 李志鹏¹ 杨平²

(1. 长沙理工大学能源与动力工程学院, 长沙 410114; 2. 中南林业科技大学机电工程学院, 长沙 410004)

摘要: 为了获得离心泵空化状态下声发射信号的变化规律,在离心泵空化试验基础上,采用声发射技术采集并分析了离心泵不同空化状态下的声发射信号,提取了声发射信号的事件计数、振铃计数、频率中心和有效电压值等4种典型特征参数,分析了这些参数随离心泵汽蚀余量变化的对应关系。研究表明,在空化未发生、刚发生和已完全形成等不同阶段,这些典型特征参数变化具有明显特点,先有少许波动,然后有较大幅度的增加或减少,再呈现较大幅度的减少或增加的趋势。这一规律可作为采用声发射技术辨识离心泵空化状态的技术依据。

关键词: 离心泵 空化 声发射 特征参数

中图分类号: TV131; TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)03-0045-04

引言

离心泵作为大型排灌泵站广泛采用的主要水泵型式之一,大多会遭受不同程度的空化侵害。空化严重影响了水泵的正常运行,导致效率下降和过流部件结构破坏等问题^[1-3]。为了实时监测离心泵的运行状态以便及时采取有效措施避免空化发生,国内外研究人员采用振动、压力脉动、噪声等监测手段做了大量的研究^[4-10],取得了一定的成果。

声发射(Acoustic emission, AE)技术作为一种动态无损检测手段,具有对检测对象的变化敏感、不受检测对象材料限制、能有效避开低频信号干扰等优点^[11],也被用于离心泵空化性能监测,展示了独特的优越性。文献[12-15]的研究成果在一定程度上有助于判别离心泵中是否存在空化,但是哪些AE信号特征参数能够较好地反映空化状态,这些特征参数与离心泵不同空化阶段的对应关系如何,还未被明确揭示。

本文基于离心泵空化试验,采集伴随不同空化状态而生的声发射信号,采用参数分析方法分析出典型特征参数,并明确其随空化状态变化的规律。

1 试验系统与方法

1.1 试验系统

离心泵空化试验在某水力机械质量监督检验授权站的开敞式水泵试验台上进行。该试验台由水

箱、离心泵、电动机、管路、进出口调节阀、测量仪器仪表等组成,如图1所示。试验用离心泵叶轮直径200 mm,额定流量 $Q_r = 20 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H_r = 42 \text{ m}$,转速 $n = 2900 \text{ r}/\text{min}$,功率 $P = 7.5 \text{ kW}$,进、出口管径分别为DN50和DN40。

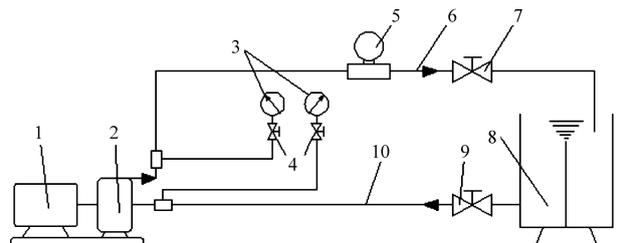


图1 开敞式水泵试验台示意图

Fig.1 Schematic diagram of open pump test-rig

1. 电动机 2. 离心泵 3. 压力表 4. 取压阀 5. 流量计 6. 出水管路 7. 出口阀 8. 水箱 9. 进口阀 10. 进水管路

数据采集与分析软件系统为笔者课题组采用LabVIEW自主研发,选用2个SR-150M型声发射传感器和1块PCI-9846H型多功能数据采集卡采集空化试验过程中的声发射信号,采样频率设置为2 MHz。2个声发射传感器通过耦合剂分别贴在靠近水泵进口和出口处的外壳上,如图2所示。

1.2 试验方法

分别在60%、100%、120%额定流量下进行定转速定流量空化模拟试验。通过调节离心泵进、出口调节阀的开度,在保持流量和转速不变的前提下不断降低水泵进口压力,模拟空化的初生和发展过

收稿日期: 2013-11-19 修回日期: 2013-12-19

* 国家自然科学基金资助项目(51309034)、湖南省科技计划资助项目(2012GK3057)和湖南省教育厅科研项目(11CC0027)

作者简介: 邹淑云, 讲师, 主要从事水力机械状态监测与故障诊断研究, E-mail: fjzha_zsy@126.com

通讯作者: 刘忠, 讲师, 博士, 主要从事水力机械状态监测与故障诊断研究, E-mail: drliu2003@126.com



图2 声发射传感器安放位置

Fig. 2 Installation positions of acoustic emission sensors

程。待每个工况点调整结束并运行稳定后,记录离心泵运行相关参数,采集并保存相同时间的声发射信号数据。

2 试验数据分析

本文以 60% 额定流量下空化试验过程中的声发射数据为研究对象,进行空化状态和声发射信号特征参数对应关系的深入分析。在 100%、120% 额定流量下得到的试验测试结果与 60% 额定流量下的结果变化趋势大体相同,在此不再赘述。

2.1 离心泵空化特性曲线

有效地反映离心泵空化性能的汽蚀余量 (Net positive suction head, NPSH) 可表示为 $\frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - \frac{p_c}{\rho g}$ 。其中, p_1 为泵进口压力, v_1 为泵进口速度, p_c 为该温度下水的汽化压力, ρ 为水的密度。

根据试验过程中记录的工况参数计算整理得到各流量下的汽蚀余量 NPSH 和扬程 H 的关系曲线如图 3 所示。根据“能量法”^[16-17],通常在泵空化特性曲线上取扬程曲线急剧变化且下降 3% 的点作为空化发生的临界点。图中画出了各流量下扬程下降 3% 对应的工况点。

从图 3 中可以看出,随着离心泵进口压力的不断减小, NPSH 逐渐减小。在空化未出现之前,扬程保持基本不变;随着 NPSH 的进一步减小,泵内空化突然变得剧烈,使得离心泵扬程急剧下降。而且,随着流量的增加,离心泵的扬程不断减小,空化性能也变得更差。

2.2 声发射信号特征参数提取

将从离心泵进、出口处外壳上采集到的声发射信号,用 AE1 和 AE2 加以区分。采用参数分析

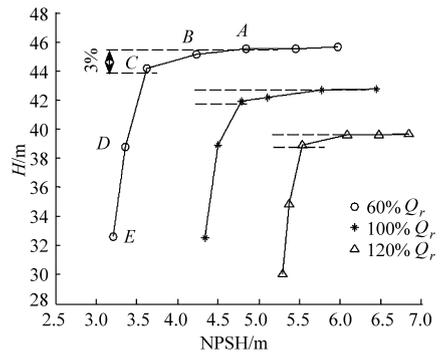


图3 离心泵空化特性曲线

Fig. 3 Cavitation curves of centrifugal pump

法^[15,18]提取其典型特征值,如事件计数、振铃计数、频率中心、有效电压值(RMS)等。其中,事件计数能反映声发射事件的总量频度,振铃计数能反映声发射信号的强度和频度,两者均与信号分析阈值有关。频率中心能反映声发射信号的主频范围,有效电压值则反映声发射信号的大小,这二者不受信号分析阈值影响。综合考虑背景噪声和信号特性,取信号分析阈值为 0.02 V。

2.3 声发射信号特征参数变化曲线

取 60% 额定流量下空化特性曲线上的 5 个工况点,标记为 A、B、C、D 和 E (图 3)。分别计算各工况点对应的 2 路声发射信号的事件计数、振铃计数、频率中心和有效电压值(RMS)。绘制各特征参数随工况变化的曲线如图 4 所示。为了更清晰地分析其中的变化规律,将各工况点下特征参数的平均值随对应 NPSH 的变化曲线绘制于图 5 中。

从图 4 和图 5 可以看出,离心泵进、出口处声发射信号的事件计数、振铃计数、频率中心、有效电压值 RMS 随工况点(以 NPSH 表示)改变而变化明显。在工况点 A 和 B (NPSH 分别为 4.849 和 4.237 m),离心泵扬程未发生明显变化,空化并未出现。除振铃计数外,其他 3 个特征参数只发生了少许波动。在工况点 C (NPSH 为 3.626 m),离心泵扬程较之前下降了不到 3%,事件计数、振铃计数、频率中心、有效电压值(RMS)都发生了明显变化。其中,事件计数增加约 2 倍,振铃计数减少约 30%,频率中心下降约 15 kHz, RMS 下降 40% ~ 50%。在工况点 D (NPSH 为 3.363 m),事件计数、振铃计数和 RMS 发生少许波动,而频率中心又增加约 10 kHz。而在工况点 E (NPSH 为 3.204 m),事件计数又下降较大幅度,振铃计数和 RMS 值均增加较大幅度,频率中心进一步增加,有接近空化发生前各参数值的趋势。

对上述变化现象,可以从空化过程中水流流态和声发射信号源的变化加以解释。

(1)空化未发生前(如工况点 A、B),水流流态

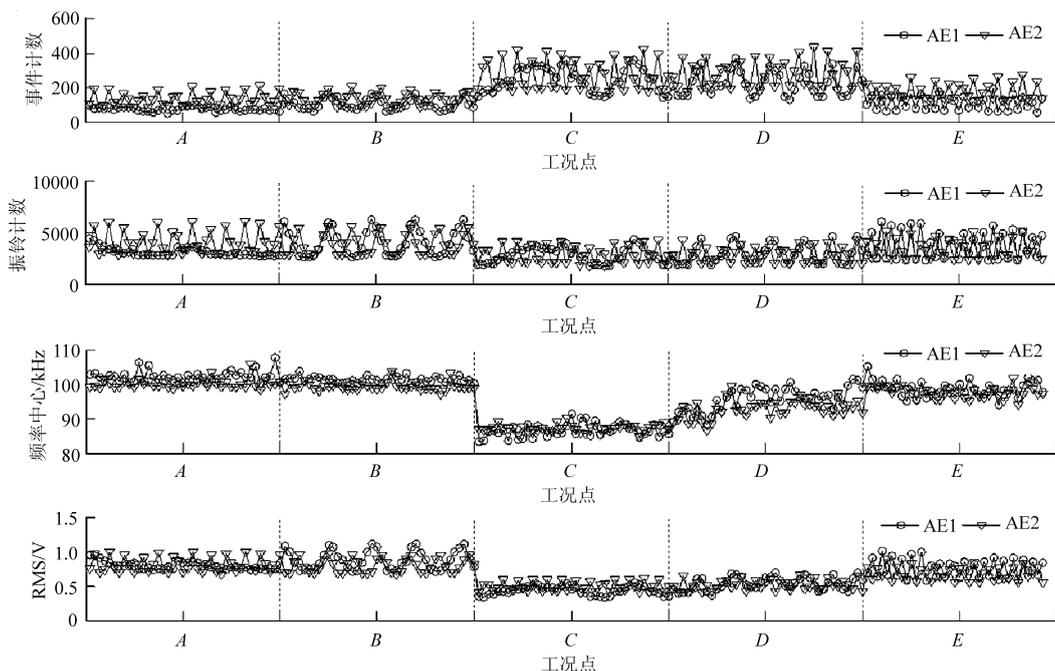


图 4 各工况点下声发射信号特征参数随时间变化曲线

Fig. 4 Characteristic parameters of acoustic emission signals vs time under different operating conditions

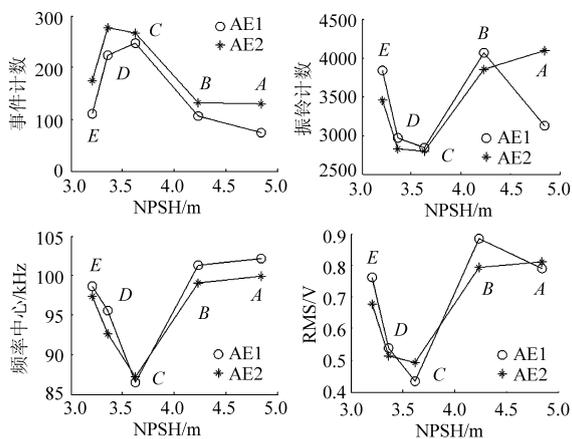


图 5 声发射信号特征参数平均值随 NPSH 变化曲线

Fig. 5 Average values of characteristic parameters of acoustic emission signals vs NPSH

较为平稳,采集到的声发射信号主要由水体流动以及水流与离心泵流道内壁和转轮叶片相互作用产生,并经壳体传递到声发射传感器,故各特征参数变化不大。

(2)当空化出现时(如工况点 C),水中出现一些空泡,水体为气液两相混合物。水流流态不再平稳,声发射信号的连续性减弱,事件计数会突然增加。气液两相混合物的存在,使 AE 信号能量在到达壳体外的声发射传感器之前就发生了衰减,从而 RMS 下降了将近一半,振铃计数会相应下降。而且,若干频段的信号能量减弱,造成了频率中心的减小。

(3)随着空化的发展(如工况点 D),水和混在水中的空泡之间的相互作用变得更为复杂,空泡的

产生和破灭同时并存,由于空泡破灭产生的冲击,使得信号的事件计数、振铃计数和 RMS 值发生波动,并且频率中心呈上升趋势。

(4)随着空化程度加剧(如工况点 E),水流流态更加恶化,气液两相混合流体与离心泵及管道内壁的作用更加剧烈,空泡群破灭产生的高频冲击更大,从而使产生的 AE 信号能量增加,振铃计数和 RMS 急剧增加,频率中心继续朝高频方向移动;AE 信号的连续性增强,事件计数也随之减小。

需要特别指出的是,在工况点 C 空化已经出现,该点比根据能量法确定的临界 NPSH 点出现得早,证明了采用声发射技术检测空化初生的有效性^[9-10]。另外,由于试验用离心泵结构尺寸较小,声发射传感器测点布置的距离很近,造成了 2 路声发射信号的特征参数差异不够明显。这也是后续研究需要重点考虑之处。

3 结论

(1)在离心泵试验台上模拟空化现象,采集了不同工况下离心泵进、出口外壳处的声发射信号,根据声发射信号的频度和强度特点,提取了 4 种典型的特征参数:事件计数、振铃计数、频率中心和有效电压值。

(2)在离心泵空化的不同阶段,声发射信号典型特征参数的变化各有明显特点。在空化未发生时,各参数存在少许波动;当空化出现时,除事件计数出现大幅增加外,其他 3 个参数均出现大幅减小;空化继续发展后,除频率中心略有增加外,其他 3 个

参数均会少许波动;而当空化进一步恶化时,除事件计数出现大幅下降外,其他3个参数均会大幅增加,而且有接近空化发生前水平的趋势。这是空化过程中水流流态和声发射源的变化共同作用的结果。

(3)声发射信号典型特征参数随空化状态的变化规律,可作为采用声发射技术监测离心泵空化状态的技术依据。

参 考 文 献

- Li S C. Cavitation of hydraulic machinery[M]. London: Imperial College Press, 2000.
- 肖若富,王娜,杨魏,等. 复合叶轮改善双吸式离心泵空化性能研究[J]. 农业机械学报,2013,44(9):35-39.
Xiao Ruofu, Wang Na, Yang Wei, et al. Improvement of cavitation characteristics of double suction centrifugal pump with compound impeller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(9):35-39. (in Chinese)
- 曹卫东,张晓娣,高一,等. 径向回流平衡孔低比转数离心泵空化性能研究[J]. 农业机械学报,2012,43(1):37-41.
Cao Weidong, Zhang Xiaodi, Gao Yi, et al. Cavitation performance of the low specific-speed centrifugal pump with radial reflux balance hole[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(1):37-41. (in Chinese)
- 王勇,刘厚林,王健,等. 离心泵叶轮进口空化形态的试验测量[J]. 农业机械学报,2013,44(7):45-49.
Wang Yong, Liu Houlin, Wang Jian, et al. Experimental measurement on cavitation pattern at impeller inlet of centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(7):45-49. (in Chinese)
- Chudina M. Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump[J]. Acoustical Physics, 2003, 49(4):463-474.
- Čeretič J. The use of noise and vibration signals for detecting cavitation in kinetic pumps[J]. Proc IMech E, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2009, 233(7):1645-1655.
- 徐朝晖,徐东海,吴玉林,等. 水泵与水轮机空化状态监测与诊断的研究进展[J]. 农业机械学报, 2003,34(1):139-142.
Xu Zhaohui, Xu Donghai, Wu Yulin, et al. Monitor and diagnose of cavitation in pump and hydro turbine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003,34(1):139-142. (in Chinese)
- 苏永生,王永生,张永祥,等. 基于压力脉动和时序分析的离心泵空化特征提取[J]. 农业机械学报,2009,40(6):81-84.
Su Yongsheng, Wang Yongsheng, Zhang Yongxiang, et al. Study on the method of centrifugal pump cavitation feature extraction based on pressure fluctuation and time serials analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009, 40(6):81-84. (in Chinese)
- He Y, Liu Y. Experimental research into time-frequency characteristics of cavitation noise using wavelet scalogram[J]. Applied Acoustics, 2011, 72(10):721-731.
- 王勇,刘厚林,袁寿其,等. 离心泵非设计工况空化振动噪声的试验测试[J]. 农业工程学报, 2012,28(2):35-38.
Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. Experimental testing on cavitation vibration and noise of centrifugal pumps under off-design conditions[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2):35-38. (in Chinese)
- Sikorska J Z, Mba D. Challenges and obstacles in the application of acoustic emission to process machinery[J]. Proc IMech E, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 2008, 222(1):2041-3009.
- Neill G D, Reuben R L, Sandford P M. Detection of incipient cavitation in pumps using acoustic emission[J]. Proc IMech E, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 1997, 211(4):267-277.
- Alfayez L, Mba D, Dyson G. The application of acoustic emission for detecting incipient cavitation and the best efficiency point of a 60 kW centrifugal pump; case study[J]. NDT&E International, 2005, 38(5):354-358.
- 武新华,王晓伟. 离心泵气蚀故障声发射监测试验研究[J]. 振动工程学报,2004,17(增刊1):484-486.
Wu Xinhua, Wang Xiaowei. Experimental research on diagnosis method in the cavitating centrifugal pump by acoustic emission[J]. Journal of Vibration Engineering, 2004, 17(Supp.1):484-486. (in Chinese)
- 谢志聪,李录平,邹淑云,等. 水泵空化状态下的声发射信号特征实验研究[J]. 水电能源科学,2012,30(3):140-143.
Xie Zhicong, Li Luping, Zou Shuyun, et al. Cavitation experimental research on characteristics of acoustic emission signal under pump cavitation conditions[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3):140-143. (in Chinese)
- IEC 60193. Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines—model acceptance tests [S]. The International Electrotechnical Commission, Geneva, Switzerland, 1999.
- 苏永生,王永生,段向阳. 离心泵空化试验研究[J]. 农业机械学报,2010,41(3):77-80.
Su Yongsheng, Wang Yongsheng, Duan Xiangyang. Cavitation experimental research on centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3):77-80. (in Chinese)
- Grosse C U, Ohtsu M. Acoustic emission testing[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2008.

Numerical Calculation of Cavitation Flow in a Centrifugal Pump

Wang Weijun¹ Wang Yang¹ Liu Ruihua² Li Yibin³ Yin Gang¹ Li Guidong¹

(1. Research Center of Fluid Machinery Engine and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. China Energy Engineering Group Co., Ltd., Zhenjiang 212013, China

3. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730010, China)

Abstract: The paper aims to deal with the numerical simulation of cavitation phenomena inside the centrifugal pump and analyze the development of cavitation based on improved cavitation model, Standard $k-\varepsilon$ and RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. When cavitation flow and non-cavitation flow were simulated and analyzed, the pressure of blades under incipient cavitation, developed cavitation and serious cavitation were gotten. The paper also gave the principle of incipient cavitation and divided the region into five cavitation regions based on bubble relative length. The results show that with the decreasing of inlet total pressure, bubble appears firstly in suction surface of the blade, and then moves along the blade profile, and next forms attached cavitation bubble. After this stage, bubble is gradually out of the mainstream movement and close to the pressure surface. Finally, the flow passage is filled with bubble, which hinders the flow. The number $\sigma = 0.3067$ of incipient cavitation is a greater dimension hierarchy than that of $\sigma = 0.0281$ under design condition. Seen from the impeller meridian plane, bubble appears firstly in the near the hub, goes towards forward cover plate, and attaches near the front cover. Cavitation in centrifugal pump is subdivided again into the five stages, that are incipient cavitation, critical cavitation, developing cavitation, complete cavitation, broken cavitation.

Key words: Centrifugal pump Cavitation Multiphase flow Incipient cavitation Numerical simulation

(上接第 48 页)

Experiment on Relationships between Centrifugal Pump Cavitation Conditions and Acoustic Emission Signal Characteristics

Zou Shuyun¹ Liu Zhong¹ Li Zhipeng¹ Yang Ping²

(1. School of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to obtain the variation law of the acoustic emission signals under the centrifugal pump's cavitation states, the research was based on the centrifugal pump cavitation test. The acoustic emission technology was adopted to collect and analyze the acoustic emission signals. Four typical features were extracted, i. e. event count, ringing count, frequency centroid and root mean square. Their relationships with the net positive suction heads of the centrifugal pump were analyzed in detail. The results show that these typical characteristic parameters change obviously under different stages such as before the occurrence of cavitation, cavitation first appearing and cavitation being fully developed. They firstly fluctuate a little, then increase or decrease substantially, and then there are large reducing or increasing trends respectively. This law can be used as a technical basis for identifying the cavitation conditions of centrifugal pumps with the acoustic emission technique.

Key words: Centrifugal pump Cavitation Acoustic emission Parameter analysis