

离心泵压力脉动对流动噪声影响的试验研究

袁寿其, 薛菲, 袁建平, 汤跃

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏镇江 212013)

摘要: 为了研究离心泵内部压力脉动和流动噪声在不同工况下的变化规律及其关系, 采用试验方法, 用高频压力传感器和水听器分别采集离心泵出口脉动压力和流动噪声信号, 并进行时频域和自功率谱分析。结果表明: 各工况下, 叶片通过频率是压力脉动和流动噪声的主频, 这是由叶轮和蜗舌之间的动静干涉引起的, 而流动噪声在轴频二倍频(44.8 Hz)和224.8 Hz处也有明显峰值, 这是由叶轮叶片数和蜗壳壳体振动引起的。小流量和设计流量下, 流动噪声频谱与压力脉动频谱形状比较相符, 流动噪声可以近似看作是由压力脉动引起的; 随着流量的增大, 流动噪声频谱除了包括压力脉动的主频外, 还包括汽蚀和湍流等引起的500 Hz以上的高频部分。

关键词: 离心泵; 流动噪声; 压力脉动; 叶片通过频率; 汽蚀; 湍流

中图分类号: TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-6254(2009)05-0287-04

Experimental study on impact of pressure fluctuation on flow-noise in centrifugal pump

Yuan Shouqi, Xue Fei, Yuan Jianping, Tang Yue

(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: In order to study the rules of pressure fluctuation and flow-noise change under different flow conditions in a centrifugal pump, and to find the relationship between pressure fluctuation and flow-noise, the frequency spectra of pressure signals and noise signals collected by high-frequency pressure transducer and hydrophone located at the pump discharge have been obtained with experimental method. The results show that the blade passage frequency dominates for all operating conditions, which manifests that the fluid-structure interaction between the rotating blades and the volute tongue may be the primary source of pressure fluctuation and noise generation. The flow noise frequency spectra has evident peak at the second multiple of the rotating frequency and 224.8 Hz, which is caused by the number of blade and the volute vibration. The frequency spectra of pressure fluctuation and flow noise are unanimous for small flow, and the flow noise may be predicted with the pressure fluctuation. But with the increase of flow, the high frequencies above 500 Hz and the blade passage frequency appear in the flow noise frequency spectra, which implies that the flow noise is partly caused by cavitation and turbulence, except pressure fluctuation for these operating conditions.

Key words: centrifugal pump; flow-noise; pressure fluctuation; blade passage frequency; cavitation; turbulence

收稿日期: 2009-07-20

基金项目: 国家杰出青年基金资助项目(50825902); 江苏省创新学者攀登项目(BK2009006)

作者简介: 袁寿其(1963—), 男, 上海金山人, 教授, 博导(shouqi@ujs.edu.cn), 主要从事流体机械及工程研究。

薛菲(1984—), 女, 河南南阳人, 硕士生(xuefei-xc@163.com), 主要从事泵内部流动诱导噪声研究。

泵广泛应用于船舶领域,但在运行过程中会产生强烈的噪声.这些噪声会随着管道传播并辐射,对舰艇的隐蔽和安全有很大危害.泵的噪声主要分为机械噪声和流动噪声,机械噪声已得到比较有效的控制,流动噪声在实现“安静型”船舶的过程中成为越来越突出的问题.流动噪声主要是由于不稳定流动造成的,包括压力脉动、湍流和汽蚀等^[1].

20 世纪 50 年代末,Stepanoff 等人就开始从理论上研究离心泵汽蚀产生噪声的机理.直到 20 世纪 70 年代,才有学者对非汽蚀引起的噪声进行研究^[2-4].这些研究主要是通过数值计算的方法,将主要由叶轮和蜗舌之间相互作用引起的压力脉动作为唯一声源来预测流动噪声,对其它引起流动噪声的原因进行了简化和忽略.近年来,PIV 测试和数值模拟成为离心泵内部流场、压力脉动、诱导振动和流动噪声研究的热点^[5],但以上的研究均未涉及到其间的相互关系.

本研究采用试验的方法,用高频压力传感器和水听器分别采集离心泵出口脉动压力和流动噪声信号,并进行时频域和自功率谱分析,通过改变离心泵的运行工况来探寻内部压力脉动和流动噪声在各种流量工况下的变化规律及其关系.

1 试验测试

1.1 循环系统

闭式试验台由汽蚀筒、稳压筒、进出水管道、蝶阀、真空泵、电机、离心泵、压力变送器、高频传感器、水听器和数据采集系统等部分组成,见图 1^[6].

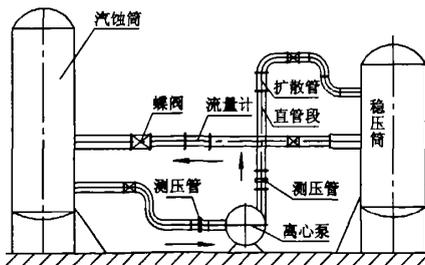


图 1 试验台示意图

Fig. 1 Schematic of test system

水泵性能参数为 $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 10 \text{ m}$, $n = 1450 \text{ r}/\text{min}$, 当叶轮叶片数 $Z = 4$ 时,轴频 $f_1 = n/60 = 24.2 \text{ Hz}$, 叶片通过频率 $f_2 = Z \times f_1 = 96.8 \text{ Hz}$.

1.2 测点布置和数据采集

为了研究离心泵内部流动噪声和压力脉动随流

量变化的情况,试验分别在泵的出口布置了脉动压力测点和流动噪声测点,如图 2 所示.

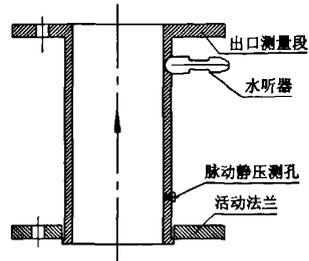


图 2 压力脉动和流动噪声测点位置

Fig. 2 Pressure and flow noise monitoring locations

试验的采样频率为 20 000 Hz, 采样点数为 2 000, 采样持续时间为 0.1 s. 利用 LabVIEW 中的 DAQ Assistant 功能, 实现信号的同步采集, 并实时显示和存储, 然后在 Matlab 中完成频谱分析.

2 数据处理与分析

2.1 压力脉动分析

图 3 为泵出口压力脉动的时域图. 从图中可以看出, 小流量和设计流量下, 压力脉动随时间变化具有一定的准周期性, 在 0.1 s 时间内, 约为两个周期; 大流量下, 脉动程度加剧, 周期性不明显.

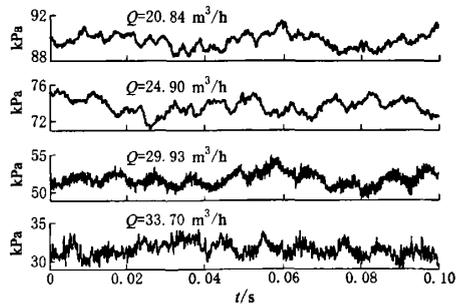


图 3 各流量工况时的压力脉动时域图

Fig. 3 Pressure fluctuations at different operating conditions

图 4 为各流量下泵出口压力脉动频谱图. 从图中可以看出, 各流量下, 在叶片通过频率 (97.75 Hz) 处有一非常突出的峰, 峰值最大. 表明叶轮和蜗壳之间的动静干涉对压力脉动影响很大. 小流量下, 频谱图表现为一离散谱特性, 在 224.6 Hz 处也有明显峰值出现, 分析发现这恰好是泵体振动的主频. 说明泵体振动也是影响流动噪声的主要原因. 由于泵体的振动激励了流场的不稳定, 导致压力脉动. 随着流量的增大, 压力脉动的频谱出现宽带谱特性,

224.6 Hz 处峰值不明显了,这是因为大流量下流场相对小流量时流态更不稳定,湍流程度加剧,这些原因对压力脉动的影响较大,而粘性底层随着流量变大而变薄,使泵体振动对流场的影响变得越来越小.

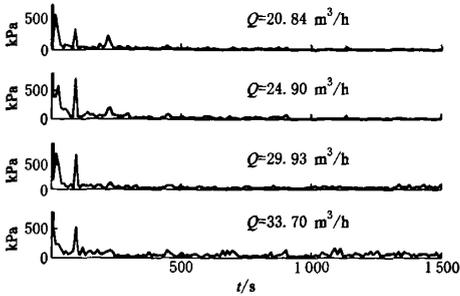


图4 各流量下泵出口压力脉动频谱

Fig.4 Frequency spectra of pressure fluctuations at different operating conditions

图5是各流量下泵出口压力脉动的自功率谱.图中可以看出,各流量下,只是在叶片通过频率(97.75 Hz)处有突出峰值,在设计工况下,该频率处的峰值尤其明显.进一步说明叶片通过频率是离心泵出口压力脉动的主频,叶轮和蜗舌之间的相互作用是引起离心泵出口压力脉动的主要原因^[7].224.6 Hz 处峰值与频谱图相比不明显,这说明该频率的功率在压力脉动功率中所占比重不大.

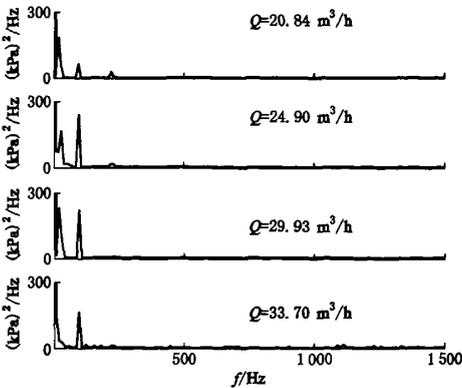


图5 各流量下泵出口压力脉动自功率谱

Fig.5 Power spectrum of pressure fluctuations at different operating conditions

2.2 流动噪声分析

图6为各流量下泵出口处流动噪声的时域图.从图中可以看出,离心泵出口流动噪声随时间变化具有明显的周期性,只是在流量为33.70 m³/h时,流动噪声随时间变化剧烈,在某些时刻甚至出现大的突变.

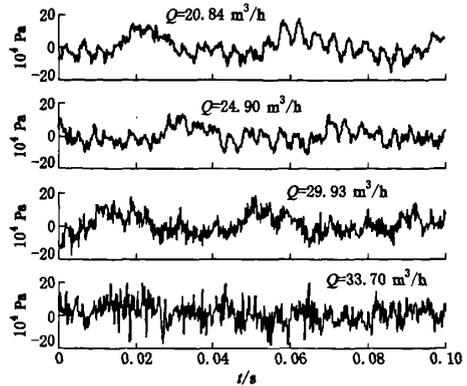


图6 各流量下泵出口处流动噪声时域图

Fig.6 Flow noise at different operating conditions

图7为各流量下泵出口处流动噪声频谱图.从图中可以看出,噪声频谱表现为宽带谱.在泵噪声频谱上,轴频及其谐频是由于轴承不平衡引起的,叶片通过频率是由于叶轮和蜗壳的动静干涉引起的,而高频非峰值噪声是无规律的随机噪声,由汽蚀、紊流及冲击引起.各流量下,在叶片通过频率(97.75 Hz)处都有明显的峰值.在小流量工况下,频率主要集中在500 Hz 以内的频率段内,且轴频的倍频48.88 Hz和224.6 Hz 处峰值很大.但随着流量的增大,高频部分的峰值有序的凸现出来,在设计流量下,500 Hz 以上已经有小峰值开始出现,随着流量的继续增大,500 Hz 以上的峰值越来越明显,高频非峰值噪声(湍流噪声的频谱为“草堆”状)出现.

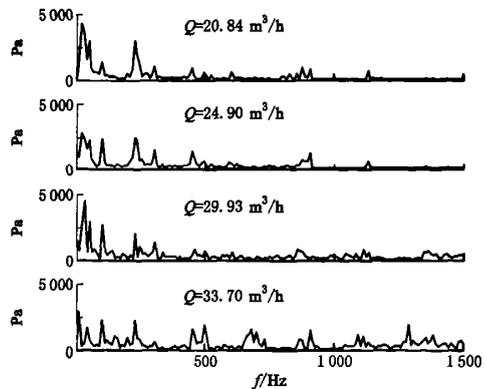


图7 各流量下泵出口处流动噪声频谱图

Fig.7 Frequency spectra of flow noise at different operating conditions

图8是泵出口处流动噪声自功率谱.由图知,各流量下,峰值主要集中在低频段.在二倍轴频48.88 Hz 处有大的峰值,但随着流量增大,该峰值越来越不明显,在流量达到33.70 m³/h 时消失,说明小流

量工况下,叶片数为非素数对流动噪声有影响.叶片通过频率(97.75 Hz)处峰值明显,并且随着流量增大越来越突出,这说明叶轮和蜗舌的相互作用始终是产生流动噪声的一个主要原因.224.8 Hz处峰值一直都很明显,说明泵体振动对流动噪声影响也很大.当流量达到33.70 m³/h时,500 Hz以上的频段出现明显的峰值,说明只有当流量增大到一定程度,高频非峰值噪声对声功率才有明显影响.

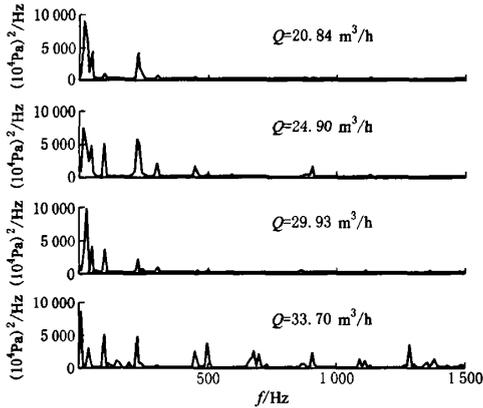


图 8 各流量下流动噪声自功率谱
Fig. 8 Power spectrum of flow noise at different operating conditions

综上所述,在不同工况下,叶片通过频率(97.75 Hz)是离心泵出口压力脉动主频,也是流动噪声的主要频率.从功率谱可以看出,压力脉动的峰值越明显,流动噪声在该频率处峰值越突出.

泵体的振动与流体的压力脉动和流动噪声之间也存在着明显关系.本试验中的泵体振动主要是由于进口预旋等流态不稳定引起的,这就等于施加给流场一个周期性的激励源,加剧了流场的压力脉动,进而加大了流动噪声.

3 结 论

1)各工况下,叶片通过频率是压力脉动的主要频率,说明叶轮与隔舌间的动静干扰是产生压力脉动的主要脉动源,工况的变化对压力脉动影响不大.

2)各流量下,噪声频谱在224.8 Hz处都有明显

峰值,该频率是蜗壳壳体的振动主频,说明壳体振动也是流动噪声的一个重要噪声源.因此,在泵运行过程中,控制泵体振动是降低流动噪声的重要手段.

3)忽略泵体振动的影响时,小流量和设计流量下,流动噪声频谱与压力脉动频谱形状比较相符,但随着流量的增大,流动噪声频谱呈现宽带谱特性,除了压力脉动的特征频率外,还包括500 Hz以上的高频部分.说明小流量和设计流量下,流动噪声可以近似看作是由压力脉动引起的,可以用压力脉动来预测流动噪声的大小,大流量下进行流动噪声预测时,除了考虑压力脉动外,汽蚀和湍流等作用不容忽视.

参考文献 (References)

- [1] Dürrer B, Wurm F-H. Noise sources in centrifugal pumps [C]// *Proceedings of the 2nd WSEAS Int. Conference on Applied and Theoretical Mechanics*. Italy: Venice, 2006:203-207.
- [2] Qin W, Tsukamoto H. Theoretical study of pressure fluctuations downstream of a diffuser pump impeller [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1997, 119:647-658.
- [3] Langthjem M A, Olhoff N. A numerical study of flow-induced noise in a two-dimensional centrifugal pump. Part I: Hydrodynamics [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19:349-368.
- [4] Chu S, Dong R, Katz J. Relationship between unsteady flows, pressure fluctuations and noise in a centrifugal pump [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1995, 117:24-35.
- [5] 袁建平. 离心泵多设计方案下内流 PIV 测试及其非定常全流场数值模拟 [D]. 镇江: 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 2008.
- [6] 杨 勇. 离心泵变工况下的内部流动诱导噪声测试 [D]. 镇江: 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 2008.
- [7] Rzentkowski G, Zbroja S. Experimental characterization of centrifugal pumps as an acoustic source at the blade-passing frequency [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2000, 14:529-558.

(责任编辑 赵 鸥)