

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.03.016

离心泵空化试验研究*

苏永生 王永生 段向阳

(海军工程大学船舶与动力学院, 武汉 430033)

【摘要】 在离心泵试验平台,对离心泵进行最好运行工况、同转速降流量、同转速同流量下空化模拟试验并采集3种状态水泵进口的水声信号和壳体振动信号。试验结果表明:在模拟100、110、120 m³/h的3种工况下,试验得到水泵 *NPSH3* 值随流量增大而升高;泵进口的水声信号和壳体振动信号在模拟空化过程中基本符合声压规律。根据试验数据点分布以及 *NPSH3* 判别和声压规律曲线,工程上使用的扬程下降3%作为空化初生点接近声能最大的位置。利用试验得到的声压曲线峰值,借助 3σ 原则可进行水泵空化的实时监测。

关键词: 离心泵 空化模拟 声压曲线 空化监测

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)03-0077-04

Cavitation Experimental Research on Centrifugal Pump

Su Yongsheng Wang Yongsheng Duan Xiangyang

(College of Naval Architecture and Marine Power, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract

A series of tests were conducted in a laboratory to improve cavitation monitoring techniques. The best run condition together with the cavitation at the same rotary speed-dropping flow rate and same rotary speed-flow rate were simulated on this test-bed. Moreover, the inlet water sound and enclosure vibration signal of the pump were acquired. The results of the cavitation experimental study showed that pump's *NPSH3* was increased by flow rate at 100, 110, 120 m³/h; the inlet water sound and enclosure vibration signal of pump were followed uniformly by sound pressure rule; according to the distribution of experimental data points and *NPSH3* distinguishable curve, as well as sound pressure curve, the range of lift declined 3% which was regarded as inception cavitation that used in project was near the pressure energy maximal position; pump cavitation real time monitoring was carried through sound pressure curve peak value and 3σ principle.

Key words Centrifugal pump, Cavitation simulation, Sound pressure curve, Cavitation monitoring

引言

空化和空蚀现象严重影响水泵使用寿命与性能,在现场或者实验室条件下监测与分析水泵的空化状态一直是空化空蚀研究的重要领域^[1-4]。为提高水泵空化监测技术水平,在实验室对离心泵进行了最好运行工况、同转速降流量、同转速同流量下的空化模拟试验,并借助信号采集设备捕获了这3种

状态下的水泵进口水声信号和壳体振动信号。利用试验得到的数据并借鉴国内外有关水力机械空化监测的研究成果,分别对水泵 *NPSH3* 值在额定流量点附近随流量变化的规律,模拟空化过程中泵进口的水声信号和壳体振动信号的变化规律以及水泵扬程下降3%和声空化初始之间的关系进行研究,最后提出利用试验得到的声压曲线峰值点,结合其出现规律,借助 3σ 原则可确定空化监测的阈值。

收稿日期:2009-03-26 修回日期:2009-06-04

* 国防“十一五”预研资助项目

作者简介:苏永生,博士生,主要从事舰船喷水推进装置状态监测与故障诊断研究,E-mail: suyongsheng1981@163.com

1 试验装置

试验用水泵为单级单吸离心泵,型号 100PWF-125,叶片数为 6 个。水泵由额定功率 7.5 kW,转速 1 440 r/min 的交流电动机驱动,其额定流量为 100 m³/h。整个试验装置是开式系统(图 1),通过调节进口阀开度改变进口管路流动损失,从而降低进口压力以模拟空化现象的产生。该平台满足标准试验装置要求,即入口节流阀处于任意开度状态时,泵入口等直径直管长度大于 12*D*,泵出口等直径直管长度大于 5*D*(B 级)^[5];当满足 $NPSH \geq 5$ m 时,利用闭式台抽真空和开式台调阀门的方法,空化试验结果基本一致。试验使用的离心泵应满足该条件,因此利用调节吸入阀门阻力(即开度)来实现空化的模拟是可行的。

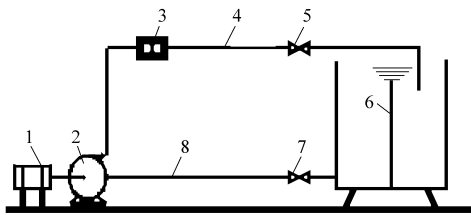


图 1 离心式水泵试验平台

Fig. 1 Test-bed of centrifugal pump

1. 电动机 2. 离心泵 3. 流量计 4. 出水管路 5. 出口阀
6. 水箱 7. 进口阀 8. 进水管路

加速度传感器布置在水泵壳体上,水听器布置在进口管路有机玻璃面的注水腔室中。传感器通过相应的信号调理装置和 20 kHz 的低通抗混叠滤波进入数据采集系统,加速度传感器与水听器两通道同步采样,采样频率设置为 64 kHz。

2 试验内容

清洗水箱,注入干净水,一次试验过程中需基本保证水温不发生变化。利用变频调速技术将水泵运行至额定转速,分别进行以下 3 项试验:①模拟试验台最好运行工况下(进出口阀开至最大位置)的信号采集。②定转速下,调节进出口阀改变流量模拟空化及空化状态下的信号采集。③定转速定流量(100、110、120 m³/h)下模拟空化从无到有,从弱到强整个阶段(即空化系数逐渐变小)的信号采集,采集信号包括流量、转速、进出口压力以及水温等参数。

3 试验方法和空化监测

3.1 模拟空化试验方法

3.1.1 定转速定流量方法

① 选定进行汽蚀试验的工况点。② 将运转工

况点调节到所需试验的工况点,如转速 1 440 r/min,流量 100 m³/h,此时进口阀开度最大,调节出口阀开度控制流量。③ 独立调节吸入侧进口阀,一次工况点控制在 8 个点以上,同时调节出口阀保持流量不变。④ 每调节一次进口阀,待测量数据稳定后,记录进出口压力,一直调到出口阀最大开度。同时,对每一次的稳定状态进行数据采集。⑤ 数据计算和整理:将上述各稳定工况测点记录下来的数据,按照汽蚀余量的表达式和泵扬程计算公式,分别计算出对应的汽蚀余量 $NPSH$ 值和泵的扬程

$$NPSH = Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_b}{\rho g} - \frac{p_v}{\rho g} \quad (1)$$

$$H = Z_2 - Z_1 + \frac{p_2 - p_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (2)$$

式中 Z_1 、 Z_2 ——进出口测压中心线到水平面高度

p_1 、 p_2 ——水泵进出口的压力

v_1 、 v_2 ——进出口面的平均流速

g ——重力加速度 ρ ——水密度

p_b ——当地大气压值

p_v ——试验水温的饱和蒸汽压力

3.1.2 定转速变流量方法

① 进出口阀开至最大,启动电动机,将水泵运行至 1 440 r/min。记录流量,进出口压力,并对该稳定状态进行数据采集,以此作为该离心泵最佳工况点,即在此转速下无空化产生。② 将进口阀开度调小,人为控制实现降压,出口阀开度调小,实现增压。模拟其气泡在进口易产生,出口易溃灭,以实现空化的模拟。

3.2 空化监测

利用由于空泡溃灭产生的直接效应或者二次效应是进行空化监测的基础和源头。利用水听器接收空泡在液体中溃灭并通过液体传播的冲击波,利用加速度计接收微射流作用到金属表面产生的振动。空泡的溃灭不论是冲击波还是微射流,对能量的贡献主要集中在高频段,监测的思路也产生于此。通过试验研究,设法找出在模拟空化条件下得到的水声信号或者加速度信号符合一定规律的某一频段,以这个频段作为监测的出发点,计算分析此频段的能量特征,寻找监测的突破点。

4 试验与分析

4.1 $NPSH_3$ 值的判别

根据水泵试验标准规定,在保证试验工况点流量不变前提下,叶轮的扬程下降值 $\Delta H = H_0 - H' \geq 3\% H_0$ 时,相应的 $NPSH$ 值即为该工况点的 $NPSH_3$ 值^[5]。以选定的 3 个流量 100、110、120 m³/h,在水

泵额定转速 1 440 r/min 下,用作图法对水泵的 $NPSH_3$ 值进行判别,图 2~4 虚线与 $NPSH$ 轴的交点即为该工况点的 $NPSH_3$ 值,3 个流量点的值分别为 6.91、8.23、8.78 m,可以看出水泵 $NPSH_3$ 值随流量增大而升高。

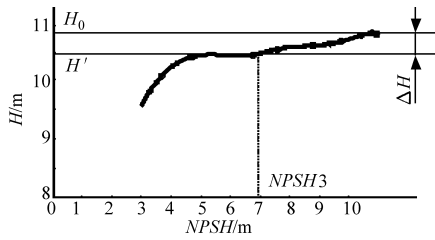


图 2 流量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 的 $NPSH_3$ 值判别曲线

Fig.2 $NPSH_3$ distinguish graph at $100 \text{ m}^3/\text{h}$

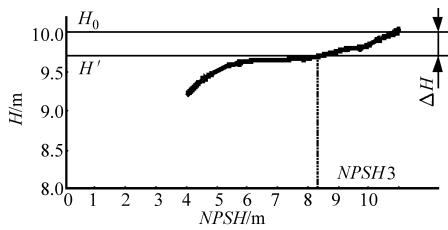


图 3 流量为 $110 \text{ m}^3/\text{h}$ 的 $NPSH_3$ 值判别曲线

Fig.3 $NPSH_3$ distinguish graph at $110 \text{ m}^3/\text{h}$

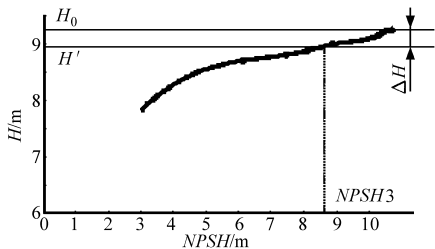


图 4 流量为 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 的 $NPSH_3$ 值判别曲线

Fig.4 $NPSH_3$ distinguish graph at $120 \text{ m}^3/\text{h}$

4.2 进口水声与壳体振动信号规律

4.2.1 监测能量段的选择办法

图 5、图 6 描述了加速度和水声信号在 0 ~ 20 kHz 的频谱图,图中轴频和叶频及其二次谐波在其低频段占据了主导地位,但由于空化对能量的贡献主要集中在高频段,在监测能量段的选择上不考虑 5 kHz 以下的信号,另外从图 5、图 6 可以看出,3 种工况在 10 kHz 附近具有一个明显的峰值出现,这就为监测的频段选择找到了方向。本文对监测能量段的选择采用以下 2 种办法:一是利用 BK1617 带通滤波器对模拟工况下水声信号的各个频带进行模拟带通滤波后进入数据采集系统,实时分析判断,发现中心频率从 2 kHz 开始,2 ~ 5 kHz 能量较高,5 kHz 以后逐渐降低,8 ~ 12 kHz 出现明显的峰值;二是原始数据先进行 20 kHz 的低通抗混叠滤波进入数据采集系统后对其进行频谱分析,确定分析频带,计算频带能量的均方根值。

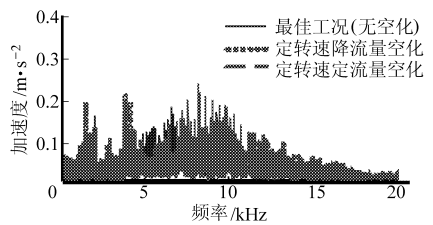


图 5 加速度信号的频谱图

Fig.5 Frequency spectrum graph of acceleration signal

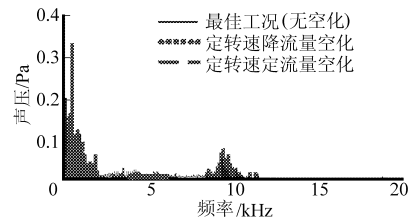


图 6 水声信号的频谱图

Fig.6 Frequency spectrum graph of sound pressure signal

表 1 列出了对比不同频宽振动和水声信号的能量均方根值。结合上述 2 种方法,试验装置的空化监测频段选在 8 ~ 12 kHz 比较合理。

表 1 振动与水声信号频带能量值

Tab.1 Frequency band energy value of vibration and sound pressure signal

工况	水泵壳体均方根		水泵进口均方根	
	/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$		/ Pa	
	1 ~ 20 kHz	8 ~ 12 kHz	1 ~ 20 kHz	8 ~ 12 kHz
最佳工况(无空化)	1.8	0.7	0.037	0.012
定转速变流量空化	5.2	3.3	0.321	0.276
定转速定流量空化	4.1	2.8	0.178	0.115

4.2.2 水声与振动信号规律

文献[2~3]中指出,在空化发生时,随着空化系数下降,空化强度增强,空化噪声强度同时增强;但当空化发展到一定程度后,再降低空化系数,空化噪声强度反而下降,此即为声压规律,如图 7 所示。图中空化系数从右到左逐渐变小, E_R 代表侵蚀率,即在声压值最高的位置侵蚀最厉害,图中空化噪声强度下降主要是因为空化系数太小后空穴膨胀较大,吸收了部分空穴溃灭时产生的冲击压力和噪声。对上述模拟得到的两种空化信号数据经频谱分析和选定 8 ~ 12 kHz 带通滤波后,以水声信号为例在此通带内对模拟空化过程点的能量值进行计算并进行归一化处理,得到如图 8 ~ 9 所示的声能变化趋势图,发现测得的水声符合上述的声压规律。

4.2.3 空化监测方法

文献[3]中指出,目前对空化产生的初始点一般有 3 种描述,依次为初始声空化、可视空化和初始侵蚀空化,从图 10 可知,定义扬程下降 3% 的点位

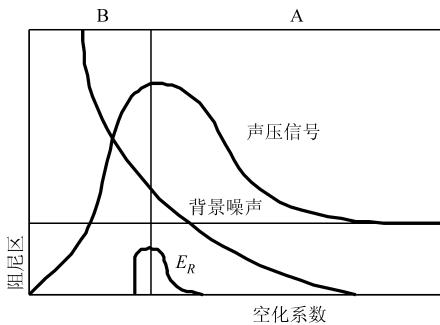


图7 声压、背景噪声和侵蚀率随空化系数的变化规律
Fig.7 Variety rule curves of sound pressure, background noise and corrosion rate follow by cavitation coefficient

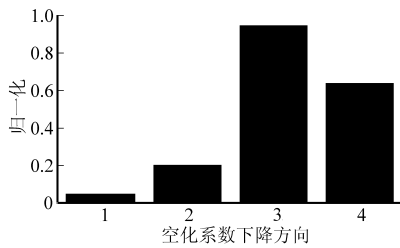


图8 定转速降流量时声能的变化

Fig.8 Sound energy variation of constant rotational speed and dropping flow rate

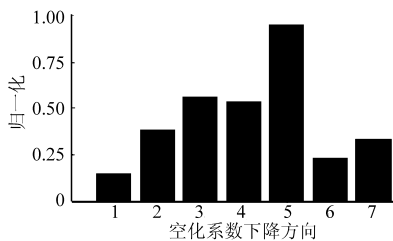


图9 定转速定流量时声能的变化

Fig.9 Sound energy variation of constant rotational speed and flow rate

于空蚀破坏之后。结合图2~4、图7和图9可知,试验获得的数据也基本符合这个规律。在试验测得的数据中,3个流量下作图得到的 $NPSH_3$ 值基本在

测试点的后半部分,即扬程下降3%的点已经接近声压的峰值点。空化监测的目的是为了减少或者减缓空蚀对水泵的影响。根据图8中的关系结合试验结果提出要在声压达到最高点之前就判断出空化状态,空化阈值判断方法如下:对水泵的几种常用工况进行定转速定流量的多次试验,选用8~12 kHz带通进行滤波,对能量段进行量化获取峰值,利用 3σ 原则进行统计分析,在得到的下限值基础上再下降3~5 dB作为该工况下空化的阈值。

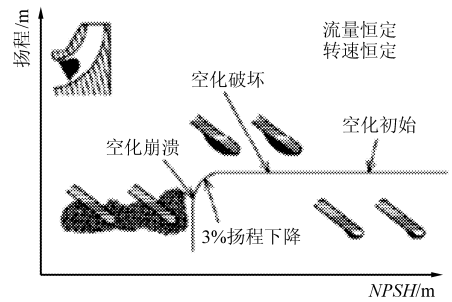


图10 定转速定流量下空化出现规律

Fig.10 Cavitation occurrence rule graph at constant rotational speed and flow rate

5 结论

(1) 在模拟100、110、120 m^3/h 的3种空化工况下,得到水泵 $NPSH_3$ 值随流量增大而升高。

(2) 无论是加速度信号还是水声信号,在这种布置方式下,选用8~12 kHz带宽作为该装置空化监测特征符合声压规律。

(3) 根据试验数据点分布、 $NPSH_3$ 判别曲线图以及声压规律曲线,得到扬程下降3%的点基本处于或接近声压最高点。

(4) 利用试验得到的声压曲线峰值,借助 3σ 原则进行统计分析,并将得到的下限值再下降3~5 dB可实现水泵空化的实时监测。

参 考 文 献

- Xavier Escaler, Eduard Egusquiza, Mohamed Farhat, et al. Detection of cavitation in hydraulic turbines[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006, 20(4): 983~1007.
- 徐朝辉,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 hydroturbine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(1): 139~142. (in Chinese)
- Bruno Schiavello, Frank C Visser. Pump cavitation-various $NPSH_r$ criteria, $NPSH_a$ margins, and impeller life expectancy [C]// Proceedings of the 24th International Pump Users Symposium, 2008: 1~37.
- Henrik Lohrberg, Bernd Stoffel. Measurement of cavitation erosive aggressiveness by means of structure born noise [C]// CAV2001, 4th International Symposium on Cavitation, 2001, session A3.003: 1~8.
- 郑梦海. 泵测试实用技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.