

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.05.014

离心泵空化监测阈值确定方法研究*

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】 空化监测阈值的确定是对水泵空化状态判别的关键环节,通过获取某离心泵进口声压和壳体振动信号,对其在额定转速 1 440 r/min,流量为 90、100、110、120 m³/h 的 4 种工况进行空化模拟试验研究。基于统计理论,提出利用参考频带能量的峰值确定空化阈值的方法。结果表明:在给定的参考的频宽下,试验测得的水声信号和壳体振动信号符合声压变化规律曲线,即随着空泡数的减小能量值先上升后下降。将试验得到的能量曲线峰值利用 3 σ 原则确定其下限,再降低 3~5 dB 可作为空化阈值的参考。随着流量的增大,水声信号在参考频域能量的峰值先增大后减小,其对空化的敏感性大大强于壳体振动信号。

关键词: 离心泵 空化模拟 声压曲线 3 σ 原则 阈值

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2010)05-0068-04

Experimental Research on the Method to Determine the Centrifugal Pump Cavitation Monitoring Threshold

Su Yongsheng Wang Yongsheng Duan Xiangyang

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

Abstract

The determining of cavitation monitoring threshold is the key segment of distinguishing pump running state. A series of tests have been put into effect in a laboratory to simulate the cavitation, the signal of inlet sound pressure and enclosure vibration were acquired at 1 440 r/min, flow rate at 90, 100, 110, 120 m³/h. The method to determine the cavitation monitoring threshold which based on statistic theory was posed by making use of reference frequency band energy. The results of cavitation experimental study showed that the inlet pressure sound and enclosure vibration signal of pump were followed uniformity by sound pressure rule at the reference frequency band, the energy value first rose then dropped along with cavity number diminishing; using 3 σ principle, the energy curve peak lower limit value was firstly acquired by the experiment, then the value of decreasing 3~5 dB was taken as the reference of cavitation threshold; the reference frequency band energy peak value of sound pressure first rose then dropped along with the increase of flow rate, and its cavitation sensitivity is stronger than the vibration signal.

Key words Centrifugal pump, Cavitation simulation, Sound pressure curve, 3 σ principle, Threshold

引言

空化和空蚀现象严重影响水泵的使用寿命和性能,在现场或者实验室条件下判别水泵的空化状态一直是空化、空蚀研究的重要领域^[1],而确定空化

监测的阈值是开展其空化状态判别的关键环节^[2]。本文基于数理统计理论并结合实验室对某离心泵进行空化试验,对其工作在额定转速 1 440 r/min,流量为 90、100、110、120 m³/h 的 4 种工况下空化监测阈值的确定进行试验研究。提出利用参考频带能量的

收稿日期: 2009-05-18 修回日期: 2009-06-16

* 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

峰值确定空化阈值的方法,研究不同流量下水泵空化引起的进口水声和壳体振动效应在给定参考频带下产生的峰值规律,最后给出利用 3σ 原则确定作为空化监测的参考阈值。

1 试验装置

试验用水泵为单级单吸离心泵,型号为100PWF-125,叶片数为6个。整个试验装置是开式系统(图1),通过调节进口阀的开度来改变进口管路流动损失从而降低进口压力来模拟空化的产生。水泵由额定功率为7.5 kW,转速为1440 r/min的交流电动机驱动。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 $12D$,泵出口等直径直管长度大于 $5D$ (B级)。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^[3]。试验用到的离心泵平台满足该条件,所以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。

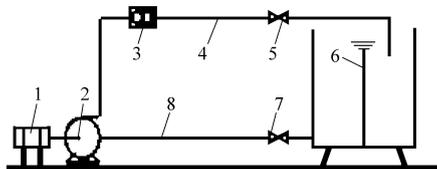


图1 离心式水泵试验平台

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 试验方法

严格按照开式试验台空化模拟的试验规程进行试验,具体步骤如下: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做试验的工况点,如转速1440 r/min,流量 $100 \text{ m}^3/\text{h}$,此时进口阀开度最大,靠出口阀开度控制流量。③ 独立调节吸入侧节流阀门,随后调节出口节流阀来保持流量不变,可控制在10个工况点。④ 每调节一次吸入节流阀门,待测量数据稳定后,记录进出口压力,同时对每一次的稳定状态进行出口压力和壳体振动的数据采集。

按上述步骤对该离心泵在额定转速1440 r/min,流量分别为90、100、110、 $120 \text{ m}^3/\text{h}$ 的4种工况

重复试验5次。

3 阈值判定理论基础

3.1 声压规律曲线

声压规律曲线如图2所示^[2]。

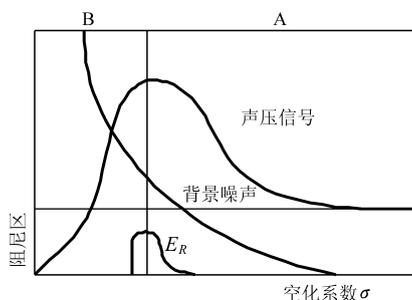


图2 声压随空化系数的变化规律图

Fig. 2 Sound pressure variety rule curves followed by the cavitation coefficient

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。这是因为空化系数太小,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。

3.2 参考带宽的能量计算

按照传感器使用规定以及信号采集装置的要求设置传感器灵敏度、放大倍数、采样频率、采样时间以及保存格式等。通过相应转换将数据采集得到的电压值换算成相应的物理量,对这些物理量进行量化分析。

通过转换得到的物理量(折算放大倍数),先进行下述均值——方差标准化处理,将所测信号转换成一维离散数据 (y_1, y_2, \dots, y_n) , n 为样本长度,则数据样本均值为

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (1)$$

样本的方差为

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

则均值-方差标准化后的样本数据为

$$y'_i = \frac{y_i - \bar{y}}{\sqrt{S}} \quad (3)$$

经过上述标准化处理的数据先进行数字带通滤波,其频段参照监测能量段选择办法^[4],然后进行FFT变换,将得到的频域量进行叠加求和并与某一参考量进行比对,将单位换算成分贝。

依次计算模拟空化从无到有,从弱到强过程的10个点在参考频段的能量值。

3.3 3σ 原则

对上述每种工况计算其均值序列为

$$X(i) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M x_i(j) \quad (i=1, 2, \dots, N) \quad (4)$$

方差序列为

$$S^2(i) = \frac{1}{M-1} \sum_{j=1}^M (x_i(j) - X(i))^2 \quad (5)$$

式中 $M=5, N=10$ 。

得到两条光滑的上下阈值限 $X(i) \pm CS(i), i=1, 2, \dots, N$, 根据统计理论, 当 $C=3.0$ 时, 该工况下得到的声压曲线 99.73% 在此阈值限之内, 而当 $C=3.5$ 时, 得到的声压曲线 99.95% 在此阈值之内, 本文就是利用这个原则量化曲线的峰值, 将其下限值再降低 3~5 dB 作为空化监测的参考阈值。

4 试验结果分析

4.1 进口水声与壳体振动信号规律

对上述 4 种工况模拟空化过程获得的进口水声信号以及壳体振动进行参考频段能量计算。典型的能量随模拟空化从无到有, 从弱到强的变化如图 3、4 所示。从图中可以看出这两类信号特征(水声——空化的直接效应, 振动——空化的二次效应)基本符合声压规律, 且峰值点出现在第 7 个点。

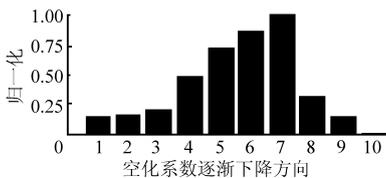


图3 进口水声信号的声能变化

Fig.3 Sound energy variation of inlet sound pressure

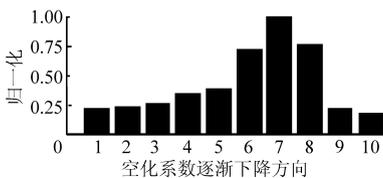


图4 壳体振动信号的能量变化

Fig.4 Energy variation of enclosure vibration signal

4.2 空化监测阈值的确定

根据试验得到的数据分析, 不管是进口水声还是壳体振动信号, 其峰值点均出现在第 6 或者第 7 个点, 此位置水泵的性能点通过扬程换算, 基本上处于扬程下降 3% 点处, 图 5 表示试验中流量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 的 $NPSH3$ 值判别曲线, 通过作图法得到 $\Delta H = H_0 - H' = 0.03H_0$ 点, 此点也位于本次试验的第 6 与第 7 个点之间。从图 6 可知, 在扬程下降 3% 之前, 空蚀现象早已发生, 而试验中得到此点值也基本处于声压曲线的峰值。图 2 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

侵蚀最严重, 避免在此工况下运行是开展空化监测的目的。根据图 6 空化出现的规律再结合试验结果, 本文提出在声压达到最高点之前就判断空化状态, 在峰值产生之前寻找并确定监测阈值^[2], 即利用 3σ 原则找出给定工况下阈值的下限, 在此基础上再降低 3~5 dB 作为空化监测的参考阈值。以下对开展的空化模拟试验数据按照上述数据处理方式进行分析处理, 确定该型离心泵空化监测的阈值。此处针对不同的参考的带宽进行研究, 壳体振动参考带宽 6~8 kHz, 8~12 kHz; 进口水声 8~12 kHz, 5~15 kHz, 具体得到的数据参考表 1, 峰值点对应的空化系数如表 2 所示。分析表 1 数据可知, 定转速定流量工况下模拟产生空化时随着流量的增大, 在给定的参考频段下, 进口水声峰值呈现先增加后减小的趋势, 这正说明水泵运行在额定转速额定流量工况下, 是其最高效率点、最佳工况以及经常运行的工况点, 确定空化监测阈值时选用其最高点附近具有典型性和代表性。振动信号的阈值变化量 1 dB 左右, 而水声信号在这一过程中的变化量 4 dB 左右, 相比而言, 振动信号能量峰值随流量的变化不明显。说明水声信号(空化的直接效应——冲击波水中传播)对空化工况的敏感性大大强于壳体振动信号(空化的二次效应——微射流作用壁面)。表 3 列出了根据上述算法得到的不同参考频段下空化监测的参考阈值。

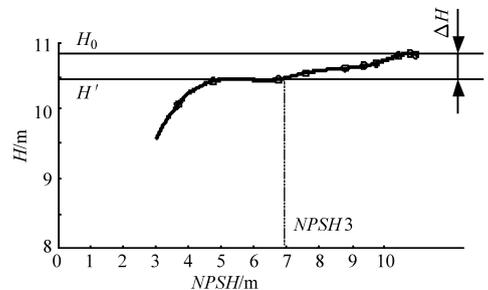


图5 流量为 $100 \text{ m}^3/\text{h}$ 的 $NPSH3$ 值判别曲线图

Fig.5 $NPSH3$ distinguish graph at $100 \text{ m}^3/\text{h}$

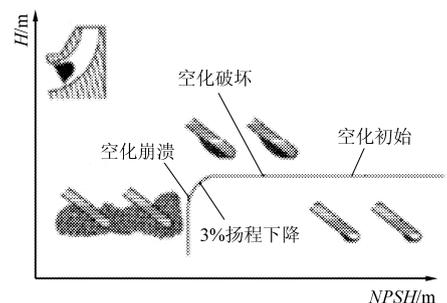


图6 定转速定流量下空化的出现规律

Fig.6 Cavitation occurrence rule graph at constant rotational speed and flow rate

表1 不同信号类型与带宽下能量峰值

Tab.1 Energy peak value at different signal types and bandwidths

工况/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	信号类型	带宽/kHz	参考频带能量峰值/dB					3σ 下限/dB
90	壳体振动	6~10	127.2	127.3	126.8	126.2	126.3	125.4
		5~12	128.4	128.5	128.1	127.5	127.6	126.8
	进口水声	8~12	131.5	130.1	130.5	131.4	131.5	129.2
		5~15	132.1	131.5	131.1	132.3	131.9	130.5
100	壳体振动	6~10	125.6	125.7	126.0	125.1	125.8	124.7
		5~12	127.1	127.2	127.7	126.4	127.2	125.9
	进口水声	8~12	133.1	133.8	133.6	134.5	133.8	132.4
		5~15	136.1	135.4	135.1	136.2	136.1	134.4
110	壳体振动	6~10	126.4	126.6	126.7	125.2	126.9	124.6
		5~12	127.5	127.7	127.8	126.2	128.0	125.5
	进口水声	8~12	133.1	132.2	132.3	133.5	133.1	131.3
		5~15	134.4	134.4	133.3	134.5	133.8	132.7
120	壳体振动	6~10	125.7	127.1	126.1	126.9	126.4	124.9
		5~12	126.6	127.9	127.0	127.7	127.2	125.9
	进口水声	8~12	128.4	129.2	128.2	128.7	128.5	127.6
		5~15	130.3	130.6	130.6	131.0	129.7	129.1

表2 能量峰值点对应的空化系数

Tab.2 Cavitation coefficient of the energy peak value

工况/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	能量峰值点对应的空化系数				
90	0.133 0	0.130 7	0.131 1	0.131 7	0.130 8
100	0.111 0	0.113 1	0.116 2	0.110 2	0.117 1
110	0.103 8	0.096 9	0.093 2	0.100 6	0.101 8
120	0.097 2	0.094 1	0.095 0	0.095 1	0.093 8

表3 空化监测阈值参考值

Tab.3 Reference value of cavitation monitoring threshold

信号类型	参考频段/kHz	监测阈值参考值/dB
壳体振动	6~8	122 ± 1.0
	8~12	124 ± 1.0
进口水声	8~12	128 ± 2.0
	5~15	130 ± 2.0

5 结论

(1) 在模拟的90、100、110、120 m^3/h 的4种空化工况下,不管是壳体加速度信号还是进口水声信

号,其随空化强度的变化趋势均与声压曲线变化规律相似。

(2) 根据试验数据点分布、得到的NPSH3判别曲线、声压规律曲线以及空化出现规律图,得到扬程下降3%的点基本处于或接近声压最高点。

(3) 随着流量的增大,在给定的参考频段下,该离心泵的进口水声信号能量峰值均呈现先增加后减小的趋势,并且水声信号对空化的敏感性大大强于壳体振动信号。

(4) 利用试验得到的曲线峰值,借助 3σ 原则进行统计分析,将得到的振动信号下降约3 dB,水声信号下降约5 dB作为参考阈值,基于此可通过硬件设计报警装置并实现水泵空化的在线监测。

(5) 对于其他类型的水力机械监测也可参照本文提出确定空化阈值的方法进行实施。另外,给出的监测值还需在工程应用中不断调整完善,使其更加成熟、可靠。

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 ~ 1 007.
- Bruno Schiavello, Frank C Visser. Pump cavitation-various NPSHr criteria, NPSHa margins, and impeller life expectancy [C] // Proceedings of the 24th International Pump Users Symposium, 2008: 1 ~ 37.
- 郑梦海. 泵测试实用技术 [M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- 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)