

离心泵内空泡演化与其对振动的影响

叶阳辉 朱相源 孙光普 李国君

(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室, 西安 710049)

摘要: 对不同流量下离心泵内稳态及旋转空化进行了可视化研究, 获得了不同汽蚀余量下空泡团形态, 同时对泵体振动进行了测量, 分析了泵体振动与空泡团形态之间的关系。试验结果表明: 压力面上发生空化将加剧振动, 尤其是发生超空化后更加显著。多数情况下吸力面上空泡团较薄, 且吸力面发生空化对振动影响相对压力面较小。旋转空化发生后振动减弱, 处于正对位置的流道内空泡团形态基本相同, 空泡团脱落频率约为 27 Hz, 压力面出现稳定空化后振动开始回升。

关键词: 离心泵; 振动; 旋转空化; 可视化

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2017)06-0088-06

Evolution of Cavitation Bubbles and Its Influence on Vibration in Centrifugal Pump

YE Yanghui ZHU Xiangyuan SUN Guangpu LI Guojun

(Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Ministry of Education, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Visual analysis illustrated the steady and rotating cavitation in a centrifugal pump at different flow rates. The cavity structures under different NPSH were captured and the cavity lengths, including the supercavity length were obtained. The corresponding vibrations of the volute and bearing were measured by using acceleration sensors. The influences of the cavity structures on the vibrations were analyzed. Experimental results showed that the vibration was increased when the cavitation occurred at the pressure side, especially when the supercavitation occurred. The cavitation at the suction side was usually thin and its influence on the vibration was relatively small. The growth rate of the cavity length at the pressure side was increased after the appearance of supercavitation. At the flow rates of $0.6Q_d$ and $0.8Q_d$, the vibration turned from increase to decrease soon after the rotating cavitation appeared, and the ratios of the cavitation number to attack angle at the turning point were close to each other. And then the vibration was increased again when the stable cavitation occurred at the pressure side, and finally it was decreased sharply when the pump head was extremely small. Besides, the vibration was increased when large shedding cavities blocked the flow channel. During the rotating cavitation, the cavity structures in the opposite channels were similar to each other, and the cloud shedding frequency was around 27 Hz according to visual observations and the fast Fourier transform of inlet pressure fluctuations.

Key words: centrifugal pump; vibration; rotating cavitation; visualization

引言

空化会导致离心泵水力性能下降、过流部件损坏、振动和噪声等一系列问题^[1]。此外,空化还会使离心泵在小流量下更容易出现不稳定性,包括旋

转空化和空化喘振等,导致压力和流量的周期性振荡。空泡团形态对离心泵水力性能、汽蚀、振动噪声及小流量下不稳定现象起着决定性的作用。虽然数值模拟被大量应用于水力机械内空化流动的预测,但由于汽液两相密度差较大、空泡溃灭异常剧烈且

收稿日期: 2016-09-06 修回日期: 2016-11-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(51076126)

作者简介: 叶阳辉(1987—),男,博士生,主要从事空化试验与数值模拟研究, E-mail: steven.stef@stu.xjtu.edu.cn

通信作者: 李国君(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事流体机械优化设计研究, E-mail: liguojun@mail.xjtu.edu.cn

湍流-空化相互作用极为复杂,适用于空化流动的高精度数值方法仍有待开发。可视化是研究空化流动形态变化和验证数值方法最直接和有效的手段。

在小流量下诱导轮和离心泵内都容易出现旋转空化现象,该现象是各流道内空化流动相互作用的结果。起初随着空化数的降低各流道内空泡团尺度同步增大,当空泡团尺度增大到一定程度时个别流道内空泡团发生分离脱落从而堵塞该流道,使得下个流道的流量增大、攻角减小从而使空泡团尺度减小,在各流道空化流动相互作用下,最终每个流道内空泡团都不断经历增大、脱落和消失的周期性变化过程,且相邻流道相位不同,该现象即为旋转空化。不少学者对此进行了研究^[2-7]。

对离心泵振动信号进行分析是判断空化发展程度的有效手段^[8-10]。王勇等^[11]测试了不同流量下离心泵内空化诱导振动,高波等^[12]对离心泵内空化诱导低频振动进行了试验研究,而蒲道林^[13]的试验研究表明4~8 kHz为离心泵内空化诱导振动的敏感频段。FRIEDRICHS等^[5]并未就空化尤其是旋转空化对泵体振动的影响进行研究,本文在其工作的基础上对离心泵内空化流动进行可视化研究,同时对泵体振动进行测量,分析泵体振动与空泡团形态之间的关系,为通过振动判断离心泵内空化发展程度及减小空化诱导振动提供基础。

1 试验装置与方法

1.1 试验装置和试验泵

试验在离心泵闭式试验台上完成,水从汽蚀罐流入试验泵,经稳压罐流回汽蚀罐,通过与汽蚀罐相连的真空泵降低泵进口压力。流量通过电动调节阀控制、使用电磁流量计测量,转矩和转速使用扭矩传感器测量,振动使用压电式单向加速度传感器测量,可用频率范围为0.5~5 000 Hz。泵出口压力使用绝对压力传感器测量,量程为0~0.5 MPa,精度等级为0.5级,泵进口压力使用动态压力传感器测量,量程为0~0.12 MPa,精度等级为0.5级。温度使用热电阻数显温度传感器测量,量程为0~100℃。高速摄像机使用德国Mikrotron公司的Eosens mini-2,在30万像素下能达到4 500帧/s的拍摄速率,最大分辨率为1 696像素×1 710像素。

试验泵主要设计参数为:流量 $Q_d = 25 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H_d = 15 \text{ m}$,转速 $n = 2 500 \text{ r}/\text{min}$,比转数 $n_s = 135$ 。蜗壳使用透明有机玻璃加工,试验过程中由蜗壳右侧垂直于蜗壳进行拍摄(图1),可拍摄到叶片进口到出口的完整流道区域。为便于观测离心泵内空化流动,设计了具有较大汽蚀余量的叶轮,其结构与

FRIEDRICHS等^[5]使用的叶轮结构类似(图2),同样采用头部为半圆形的圆柱形叶片。叶轮几何参数:叶片入口直径 $D_1 = 100 \text{ mm}$ 、叶轮出口直径 $D_2 = 170 \text{ mm}$ 、叶轮出口宽度 $b_2 = 6 \text{ mm}$ 、叶片数 $Z = 6$ 、叶片入口角 $\beta_1 = 22^\circ$ 、叶片出口角 $\beta_2 = 18^\circ$ 、叶片包角 $\varphi = 90^\circ$ 。为了保证小流量下叶轮出口周向均匀性^[14],使发生旋转空化时叶轮内流场基本不受隔舌的影响,叶轮出口直径较蜗壳基圆直径小115 mm,即等效于FRIEDRICHS等^[5]使用的无叶扩压器。叶轮后盖板和叶片的材料为6065铝合金,数控加工完成后喷上黑色漆以便对空泡进行拍摄。前盖板为聚碳酸酯(PC)塑料,具有高透明度和强度,使用高强度胶将前盖板与叶片粘合,此外,前盖板上开设6个直径5 mm的小凹槽与叶片上相应的凸台契合。为减小间隙泄漏的影响,未设置平衡孔及后口环,前口环使用迷宫型密封结构,口环间隙为0.3 mm。



图1 试验泵及可视化拍摄角度

Fig. 1 Test pump and shooting angle



图2 叶轮实物图

Fig. 2 Photograph of impeller

1.2 试验方法

试验开始前向试验系统灌注水后静置3 d,使水中大气核充分溢出。试验泵通过变频器变频启动,逐渐增加至额定转速,选择 $0.6Q_d$ 、 $0.7Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 $0.9Q_d$ 、 Q_d 、 $1.1Q_d$ 和 $1.2Q_d$ 7个流量工况进行性能试验,然后选择 $0.6Q_d$ 、 $0.8Q_d$ 、 Q_d 和 $1.2Q_d$ 4个流量工况进行空化试验。空化试验时通过真空泵抽气降低泵进口压力,每个工况点都待运行稳定后采集记录泵的进口静压、扬程、效率和振动等信号,采样频率为15 kHz,记录时间为1 min(后处理时外特性数据取该1 min内的平均值),与此同时拍摄记录空泡

团形态。试验初随着进口压力降低扬程略微上升,该阶段泵进口压力每下降 10 kPa 测量一个工况点,当扬程开始下降或发生旋转空化后减小压降值,并通过调节电动阀开度使流量保持不变,在临界汽蚀余量附近尽量多测几个工况点,直到电动调节阀完全打开为止。对每个流量重复以上步骤,整个试验过程中水温上升约 1℃,满足汽蚀试验要求。对以上 4 个流量下试验测量过程再重复进行 2 次,确保试验结论的可重复性。

通过试验可视化观察可见,发生旋转空化时每个流道内空泡团形态与正对面流道基本相同,通过对泵进口压力进行快速傅里叶变换可以获得空泡团脱落频率。采集安装于蜗壳和轴承侧面的 2 个加速度传感器信号来测量水平方向的振动(图 3),取测量结果的均方根 T 来表征振动的强度^[11],公式为

$$T = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i^2}$$

式中 X_i ——信号的测量值 N ——采样数



图 3 加速度传感器安装位置

Fig. 3 Mounting for acceleration sensors

2 试验结果与分析

2.1 水力及空化性能试验

首先对离心泵进行了水力性能试验,所得的扬程 H 和效率 η 随流量 Q 变化曲线如图 4 所示。由图 4 可见最高效率点在 $0.9Q_d$ 附近,大流量下效率下降较快,主要原因是大流量下隔舌后部流动分离显著、流动损失较大。

图 5 为试验泵在不同流量下空化性能曲线,横坐标为对数坐标,实心三角形为小流量下旋转空化发生区间。各流量下起初随着汽蚀余量降低都出现小范围的附着空化而改善了过流条件^[15-16],扬程随之略微增大。在 $1.2Q_d$ 下由于空化主要集中在压力面上,扬程很快开始下降,并在汽蚀余量为 6.7 m 时达到临界汽蚀余量点(扬程下降 3%),其余 3 个流量在到达临界汽蚀余量点之前空化主要集中在吸力面上,临界汽蚀余量相对 $1.2Q_d$ 下显著减小。在 $0.8Q_d$ 和 $0.6Q_d$ 下发生旋转空化,旋转空化发生后

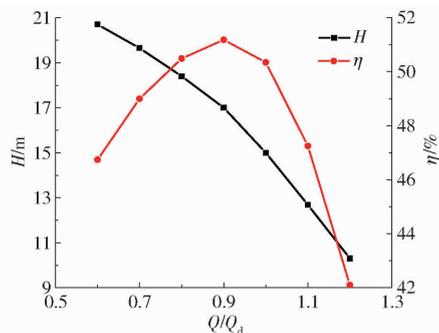


图 4 试验泵水力性能曲线

Fig. 4 Performance curves of test pump

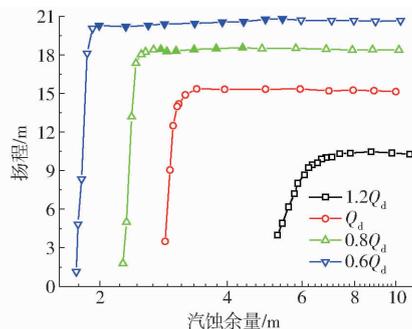


图 5 不同流量下空化性能曲线

Fig. 5 Cavitation performance curves at different flow rates

扬程开始缓慢下降,在旋转空化结束阶段扬程略微回升,该扬程变化过程与 HOFMANN 等^[17]的试验结果一致。试验过程中平均温度约为 19℃,下面分别详细介绍稳态空化和旋转空化下空泡团长度和泵体振动随汽蚀余量的变化情况。

2.2 稳态空化下空泡演化及振动特性

图 6 为 $1.2Q_d$ 下不同汽蚀余量时空泡团形态,本文中 空泡团长度为空泡团起止点间的直线距离,如图 6d 所示。图 7 为空泡团长度 L_{cav} 和振动随汽蚀余量变化的情况,顶部横坐标为相应的空化数 σ 。由图 9 可见,随着汽蚀余量的降低,压力面空泡团长度起初缓慢增长,超空泡出现后其增长加快,且压力面空泡团长度与超空泡长度之差几乎不变,而吸力面空泡团长度始终缓慢增长且较薄。空化较严重时(图 6c、6d)由于流道变窄流速升高,在吸力面末端会出现少量空泡。在叶片头部成核区附近距离叶片约 1.5 mm 处不时有空泡产生,随着空泡向下游流动与叶片的距离逐渐增大,形成断断续续的空泡层。该空泡层是由空泡筛选效应^[18]导致的:大气核在垂直于流线方向的压力梯度作用下向远离叶片方向运动。由于空泡团始终集中在压力面,振动变化较为简单,随着汽蚀余量降低振动单调增大,出现超空泡后振动增幅提升。起初轴承处振动比蜗壳处大,而蜗壳处振动上升得更快,在最后 2 个工况点蜗壳处振动更大。

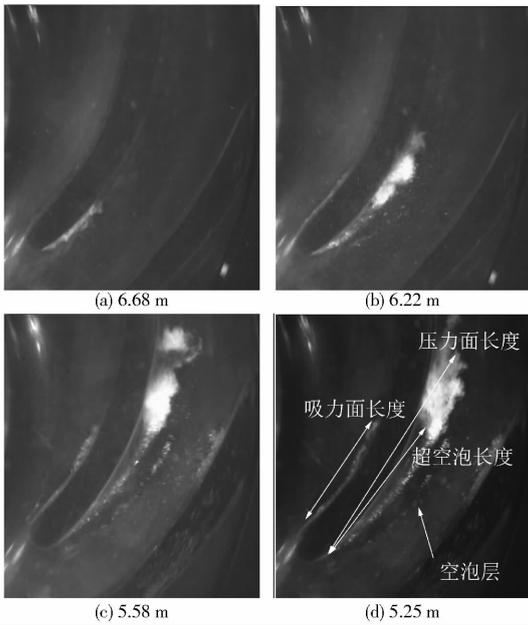


图 6 $1.2Q_d$ 下不同汽蚀余量时空泡团形态

Fig. 6 Cavity structures under different NPSH at $1.2Q_d$

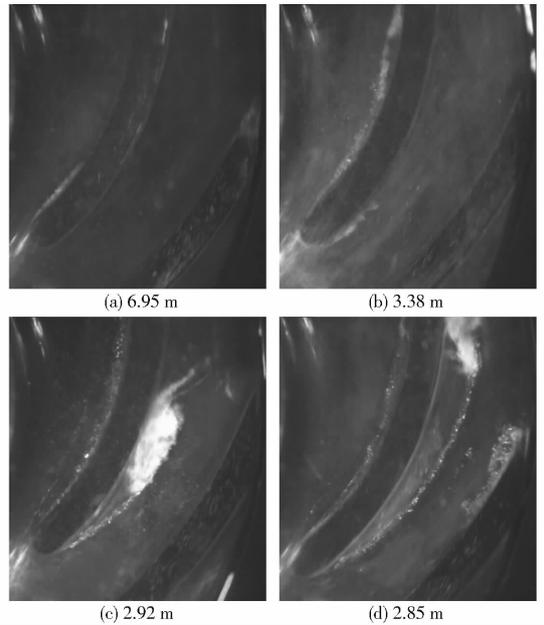


图 8 额定流量下不同汽蚀余量时空泡团形态

Fig. 8 Cavity structures under different NPSH at Q_d

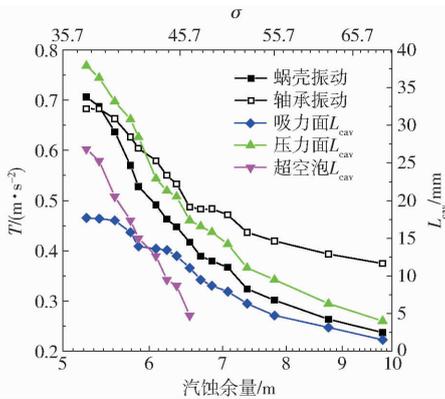


图 7 $1.2Q_d$ 下振动和 L_{cav} 随汽蚀余量的变化

Fig. 7 Variations of vibration and cavity lengths with NPSH at $1.2Q_d$

图 8 为额定流量下不同汽蚀余量时空泡团形态,图 9 为空泡团长度和振动随汽蚀余量变化情况,空心三角形表示空泡团时有时无。由图 9 可见,随着汽蚀余量的降低,吸力面空泡团长度稳定增长且仍然较薄,压力面刚出现空化时并不稳定存在,其后压力面空泡团长度和超空泡长度的增速逐渐增大。振动起初缓慢增大,汽蚀余量降到约 9 m 后振动减小并几乎保持不变,当压力面上出现空化后振动开始增大,尤其是发生超空化后振动显著增大,蜗壳处振动的增幅同样较轴承处大。

2.3 旋转空化下空泡演化及振动特性

图 10 为 $0.8Q_d$ 下空泡团长度和振动随汽蚀余量变化情况,在旋转空化区间内吸力面空泡团长度包括最大和最小长度。旋转空化发生后吸力面空泡团的最大长度先快速增大后基本不变,而最小长度则先基本不变后快速增大,空泡团仍然较薄,脱落的

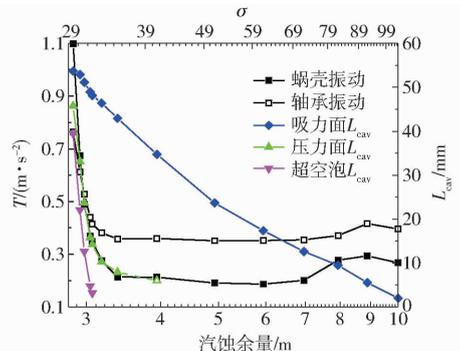


图 9 额定流量下振动和 L_{cav} 随汽蚀余量变化

Fig. 9 Variations of vibration and cavity lengths with NPSH at Q_d

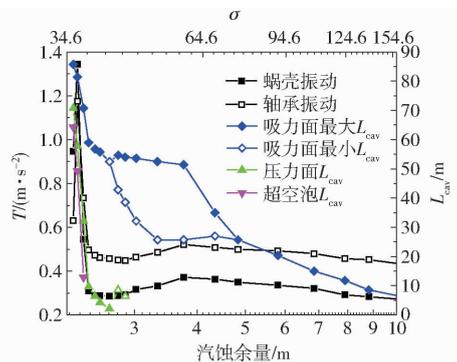


图 10 $0.8Q_d$ 下振动和 L_{cav} 随汽蚀余量的变化

Fig. 10 Variations of vibration and cavity lengths with NPSH at $0.8Q_d$

空泡团尺度较小。在旋转空化末期当吸力面空泡团延伸至流道喉部时将阻塞部分流道,使得该流道的压力面附近流速较大而发生空化,故该阶段压力面上空泡团时有时无。空化较为严重时压力面附近由空泡筛选效应导致的空泡层较为显著,不过该空泡层仍然时有时无。汽蚀余量为 3.34 m 时泵进口压

力脉动频谱见图 11, 该工况点位于旋转空化区间内, 其中在轴频 (41.7 Hz) 及 2 倍轴频处存在峰值^[19-20], 该频率是由叶轮偏心导致的, 另一峰值为 27.6 Hz, 旋转空化区间内其余工况的频谱图也在 27 Hz 附近存在峰值, 该频率即为空泡团脱落频率, 由此可见空泡团脱落周期约为叶轮旋转周期的 1.5 倍。汽蚀余量为 3.34 m 时某时刻及叶轮旋转 180°、360°和 540°后的空泡团形态见图 12, 由于处于正对位置的流道内空泡团形态基本相同, 该图可视作某流道一个周期内空泡团形态变化。叶轮旋转 540°后与初始时刻空泡团形态基本相同, 从可视化角度验证了空泡团脱落周期约为叶轮旋转周期 1.5 倍的结论。起初随着汽蚀余量的降低振动缓慢增大, 直到发生旋转空化后开始减小, 当压力面发生空化后振动回升, 且出现超空化后增速加快, 在最后一个工况点又快速减小, 主要原因是在该工况点泵的进口

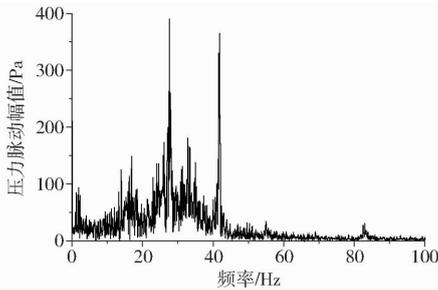


图 11 0.8 Q_d 下汽蚀余量为 3.34 m 时泵进口压力脉动频谱

Fig. 11 FFT of inlet pressure when NPSH was 3.34 m at 0.8 Q_d

压力及扬程都很低, 空泡溃灭处压力较低使得空泡溃灭过程较缓和。前述 1.2 Q_d 和额定流量下若汽蚀余量进一步减小也可能会出现振动减弱的情况。

图 13 为 0.6 Q_d 下空泡团长度和振动随汽蚀余量变化的情况, 汽蚀余量为 4.37 m 时某时刻及叶轮旋转 180°、360°和 540°后的空泡团形态见图 14, 由该图可较明显地看出空泡团生长和脱落的过程。旋转空化发生后吸力面空泡团的最大与最小长度之差逐渐增大, 脱落的空泡团尺度不断增大, 随着旋转空化加剧, 该差值逐渐减小, 脱落的空泡团尺度也减小。与 0.8 Q_d 相比压力面上空泡团时有时无的情况出现得较早且持续时间较长。最后一个工况点 (汽蚀余量为 1.76 m) 空化极为严重, 叶轮前盖板前方充满空泡使得该工况点难以看清叶轮内空泡团形态。在旋转空化区间对进口压力进行快速傅里叶变

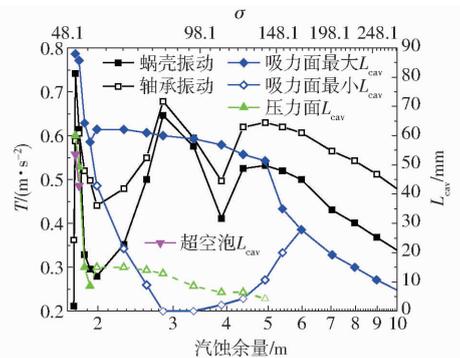


图 13 0.6 Q_d 下振动和 L_{cav} 随汽蚀余量的变化

Fig. 13 Variations of vibration and cavity lengths with NPSH at 0.6 Q_d

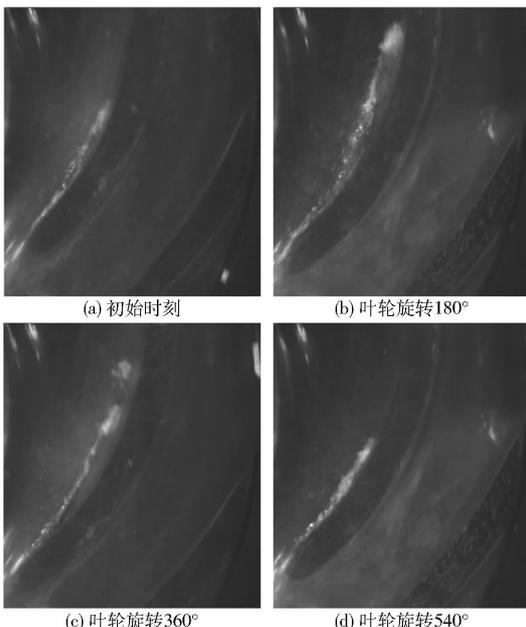


图 12 0.8 Q_d 下汽蚀余量为 3.34 m 时一个周期内空泡团形态变化

Fig. 12 Evolution of cavity structure during one period when NPSH was 3.34 m at 0.8 Q_d

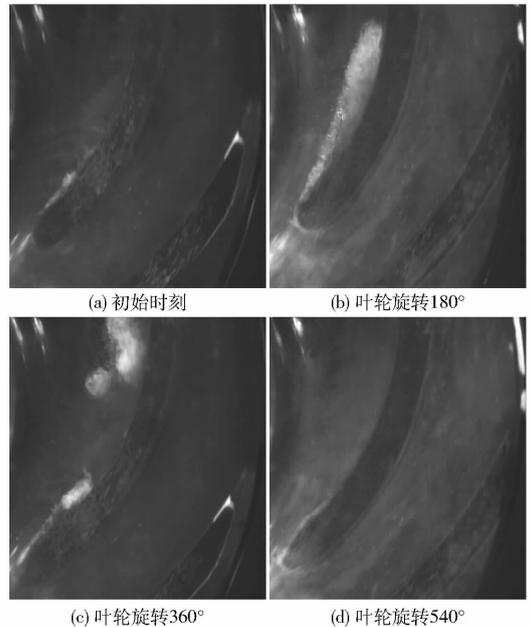


图 14 0.6 Q_d 下汽蚀余量为 4.37 m 时一个周期内空泡团形态变化

Fig. 14 Evolution of cavity structure during one period when NPSH was 4.37 m at 0.6 Q_d

换得到旋转空化周期同样约为 27 Hz。振动变化的趋势与 0.8 Q_d 下大体相同,起初随着汽蚀余量的降低振动缓慢增大,发生旋转空化后开始减小,而压力面出现空化后振动开始增大,在最后一个工况点又突然减小。不同的是 0.6 Q_d 下的振动在汽蚀余量为 3 m 附近时存在一个极大值点,重复测量得到相同结论,这是脱落的大尺度空泡团移动至喉部时阻塞流道导致的。

FRIEDRICHS 等^[5]的试验结果表明不同流量下旋转空化初生点的空化数 $\sigma_{1, \text{Rot}}$ 与进口攻角 α_A 之比非常接近。表 1 列出了旋转空化初生空化数及其后振动极大值点空化数 $\sigma_{T, \text{vib}}$ 与进口攻角之比。由表

表 1 旋转空化初生及振动强度转折区间

Tab. 1 Intervals of onset of rotating cavitation and transition of vibration

Q	$\alpha_A / (^\circ)$	$\sigma_{1, \text{Rot}}$	$\sigma_{1, \text{Rot}} / (2\alpha_A)$	$\sigma_{T, \text{vib}}$	$\sigma_{T, \text{vib}} / (2\alpha_A)$
0.8 Q_d	3.9	68.3 ~ 75.9	8.76 ~ 9.73	59.2 ~ 68.3	7.59 ~ 8.76
0.6 Q_d	8.2	152 ~ 169	9.32 ~ 10.32	123 ~ 139	7.54 ~ 8.49

可见 0.6 Q_d 和 0.8 Q_d 下 $\sigma_{1, \text{Rot}} / (2\alpha_A)$ 所在区间部分重合,其值较为接近, $\sigma_{T, \text{vib}} / (2\alpha_A)$ 所在区间基本重合,其值在 8 附近。

3 结论

(1) 压力面上发生空化后振动加剧,尤其是发生超空化后更加显著。而吸力面发生空化对振动影响较为复杂,总体而言其影响相对压力面较小。

(2) 旋转空化发生后扬程下降、振动减弱,处于正对位置的流道内空泡团形态基本相同,压力面出现稳定空化即旋转空化结束后振动开始回升,当扬程极小时振动骤降。在 0.6 Q_d 下若有大空泡团脱落阻塞喉部会使振动增强。

(3) 在 0.6 Q_d 和 0.8 Q_d 下,旋转空化初生点的空化数与进口攻角之比相近,且振动转折点的空化数与进口攻角之比也相近,发生旋转空化时空泡团脱落频率均约为 27 Hz。

参 考 文 献

- 1 D'AGOSTINO L, SALVETTI M V. Fluid dynamics of cavitation and cavitating turbopumps [M]. Vienna: Springer-Verlag, 2008.
- 2 KAMIJO K, YOSHIDA M, TSUJIMOTO Y. Hydraulic and mechanical performance of LE-7 LOX pump inducer [J]. Journal of Propulsion and Power, 1993, 9(6): 819-826.
- 3 TSUJIMOTO Y, YOSHIDA Y, MAEKAWA Y, et al. Observations of oscillating cavitation of an inducer [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 1997, 119(4): 775-781.
- 4 FUJII A, AZUMA S, YOSHIDA Y, et al. Higher order rotating cavitation in an inducer [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2004, 10(4): 241-251.
- 5 FRIEDRICHS J, KOSYNA G. Rotating cavitation in a centrifugal pump impeller of low specific speed [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 356-362.
- 6 卢加兴, 袁寿其, 任旭东, 等. 离心泵小流量工况不稳定空化特性研究 [J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 54-58. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150809&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.009.
- 7 LU J X, YUAN S Q, REN X D, et al. Investigation of instabilities of cavitation at low flow rate of centrifugal pump [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 54-58. (in Chinese)
- 8 FU Y, YUAN J, YUAN S, et al. Numerical and experimental analysis of flow phenomena in a centrifugal pump operating under low flow rates [J/OL]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2014, 137(1): 205-207. <http://fluidsengineering.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1846562>.
- 9 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.
- 10 XU Z H, XU D H, WU Y L, 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)
- 11 ESCALER X, EGUSQUIZA E, FARHAT M, et al. Detection of cavitation in hydraulic turbines [J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2006, 20(4): 983-1007.
- 12 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.
- 13 SU Y S, WANG Y S, DUAN X Y. Cavitation experimental research on centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 77-80. (in Chinese)
- 14 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.
- 15 WANG Y, LIU H L, YUAN S Q, 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)
- 16 高波, 杨敏官, 李忠, 等. 空化流动诱导离心泵低频振动的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2012, 33(6): 965-968.
- 17 GAO B, YANG M G, LI Z, et al. Experimental study on cavitation induced low frequency vibration in a centrifugal pump [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(6): 965-968. (in Chinese)
- 18 蒲道林. 空化诱发离心泵振动特性的试验研究 [J]. 水泵技术, 2015(3): 6-8.

- ZHU Xiaohua, DING Jingjing, LIU Yansui, et al. Construction and application of land use classification system on village scale: a case study of Paizi village, Lun zhen, Yucheng city, Shandong province[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(5):883-890. (in Chinese)
- 9 史舟,梁宗正,杨媛媛,等. 农业遥感研究现状与展望[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(2):247-260. https://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20150237&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.037.
- SHI Zhou, LIANG Zongzheng, YANG Yuanyuan, et al. Status and prospect of agricultural remote sensing[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(2):247-260. (in Chinese)
- 10 龙花楼. 论土地整治与乡村空间重构[J]. *地理学报*, 2013, 68(8):1019-1028.
- LONG Hualou. Land consolidation and rural spatial restructuring[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(8):1019-1028. (in Chinese)
- 11 李政,李永树,郭加伟,等. 词袋特征支持下的无人机影像滑坡解译模型[J]. *遥感信息*, 2016, 31(5):24-29.
- LI Zheng, LI Yongshu, GUO Jiawei, et al. An automatic landslide interpretation model of UAV imagery based on BoW[J]. *Remote Sensing Information*, 2016, 31(5):24-29. (in Chinese)
- 12 张明媚. 面向对象的高分辨率遥感影像建筑物特征提取方法研究[D]. 太原:太原理工大学, 2012.
- ZHANG Mingmei. The method of object-oriented building features extraction from high resolution remote sensing images[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2012. (in Chinese)
- 13 鲁恒,付萧,贺一楠,等. 基于迁移学习的无人机影像耕地信息提取方法[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(12):274-279. https://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20151237&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.037.
- LU Heng, FU Xiao, HE Yi'nan, et al. Cultivated land information extraction from high resolution UAV images based on transfer learning[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12):274-279. (in Chinese)
- 14 邓曾,李丹,柯樱海,等. 基于改进 SVM 算法的高分辨率遥感影像分类[J]. *国土资源遥感*, 2016, 28(3):12-18.
- DENG Zeng, LI Dan, KE Yinghai, et al. An improved algorithm for high spatial resolution remote sensing image classification[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2016, 28(3):12-18. (in Chinese)
- 15 FEI-FEI L, PERONA P. A bayesian hierarchical model for learning natural scene categories[C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'05), 2005, 2: 524-531.
- 16 CORTES C, VAPNIK V. Support-vector networks[J]. *Machine Learning*, 1995, 20(3):273-297.
- 17 DALAL N, TRIGGS B. Histograms of oriented gradients for human detection[C]//2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005), 2005, 1: 886-893.
- 18 LOWE D G. Object recognition from local scale-invariant features[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision, 1999, 2: 1150-1157.
- 19 BAY H, TUYTELAARS T, VAN GOOL L. Surf: speeded up robust features[C]//European Conference on Computer Vision, 2006: 404-417.
- 20 HARRINGTON P. *Machine learning in action*[M]. Cherry Hill, NJ: Manning Publications, 2012:116-133.
- 21 FAWCETT T. An introduction to ROC analysis[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(8):861-874.

~~~~~

(上接第 93 页)

- 14 叶长亮,王福军,李怀成,等. 双进口两级双吸离心泵过渡流道压力脉动特性研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(2):126-134. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170217&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170217&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.017.
- YE C L, WANG F J, LI H C, et al. Pressure fluctuation characteristics in inter-stage flow channel of double-inlet two-stage double-suction centrifugal pump[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(2):126-134. (in Chinese)
- 15 BRENNEN C E. *Hydrodynamics of pumps*[M]. Oxford: Concepts Nrec & Oxford University Press, 2011.
- 16 孙寿. 离心泵和混流泵的气蚀特性[J]. *水利水电技术*, 1983(5):42-47.
- 17 HOFMANN M, STOFFEL B, FRIEDRICHS J, et al. Similarities and geometrical effects on rotating cavitation in two scaled centrifugal pumps[C]//Fourth International Symposium on Cavitation, 2001.
- 18 LIU Z H, BRENNEN C E. Cavitation nuclei population and event rates[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 1998, 120(4):728-737.
- 19 李伟,季磊磊,施卫东,等. 不同流量工况下混流泵压力脉动试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(12):70-76. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20161210&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161210&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.010.
- LI W, JI L L, SHI W D, et al. Experiment on pressure fluctuation in mixed-flow pump under different flow rate conditions[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12):70-76. (in Chinese)
- 20 王超越,王福军. 离心泵瞬态模拟中滑移界面形状和位置研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(1):81-88. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20170111&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170111&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.011.
- WANG C Y, WANG F J. Shape and position of sliding interface for transient flow simulation of centrifugal pump[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1):81-88. (in Chinese)