

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.03.010

隔舌安放角对离心泵空化状态下 压力脉动的影响*

舒乙宸,宋文武*,马晓堂,陈洪阳,杜 聪
(西华大学 能源与动力工程学院,四川 成都 610039)

摘要:针对隔舌安放角对离心泵空化状态下压力脉动的影响问题,采用 ANSYS CFX 软件对不同隔舌安放角(28° , 29.8° , 32°)的离心泵进行了数值模拟,研究了隔舌安放角对离心泵空化状态下压力脉动的影响。首先,以 3 种不同隔舌安放角的离心泵为研究对象,利用前处理网格软件 ICEM 对模型泵的水体进行了网格的划分;然后,基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 Rayleigh-Plesset 空化模型对不同隔舌安放角的离心泵空化过程进行了求解,通过分析离心泵的内、外特性和不同隔舌安放角模型泵隔舌处的压力脉动特征,对隔舌安放角对离心泵空化状态下压力脉动的影响进行了总结。研究结果表明:在相同有效空蚀余量下,随着隔舌安放角由 28° 向 32° 增大,离心泵的扬程和效率有所提高,压力脉动幅值有所减小;因此,适当地增大隔舌安放角能稳定隔舌在空化状态下的压力脉动,并且能有效地优化离心泵的性能。

关键词:离心泵;空化状态;压力脉动;隔舌安放角

中图分类号:TH311

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2022)03-0350-06

Influence of diaphragm installation angle on pressure pulsation of centrifugal pump under cavitation state

SHU Yi-chen, SONG Wen-wu, MA Xiao-tang, CHEN Hong-yang, DU Cong
(School of Energy and Power Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Aiming at the influence of the installation angle of the diaphragm on the pressure pulsation of the centrifugal pump under cavitation, the numerical simulation of centrifugal pump was carried out by using ANSYS CFX software with different installation angles of the diaphragm (28° , 29.8° , 32°), the influence of tongue angle on the pressure pulsation of centrifugal pump under cavitation condition was studied. Firstly, three centrifugal pumps with different tongue placement angles were studied and the water column of the model pump was meshed using the pre-processing meshing software ICEM, and the cavitation process of the centrifugal pump with different tongue placement angles was solved based on the RNG k -turbulence model and the Rayleigh-Plesset cavitation model. The influence of the spacer angle on the pressure pulsation of centrifugal pumps under cavitation was summarized by analyzing the internal and external characteristics of centrifugal pumps and the pressure pulsation characteristics at the spacer of model pumps with different spacer angles. The results show that with the same effective cavitation margin, as the installation angle of the separating tongue increases from 28° to 32° , the lift and efficiency are improved, and the pressure pulsation amplitude is reduced. Therefore, an appropriate increase in the spacer angle stabilizes the pressure pulsation of the spacer during cavitation and effectively optimizes the performance of the centrifugal pump.

Key words: centrifugal pump; cavitation state; pressure pulsation; tongue placement angle

收稿日期:2021-08-03

基金项目:四川省教育厅重点科研基金资助项目(18ZA0457)

作者简介:舒乙宸(1997-),女,四川雅安人,硕士研究生,主要从事流体机械方面的研究。E-mail:351658875@qq.com

通信联系人:宋文武,男,硕士,教授,硕士生导师。E-mail:wenwus@163.com

0 引言

作为一种靠叶轮旋转时产生的离心力来输送液体的通用机械,离心泵的应用非常广泛。离心泵的基本构造是由叶轮、泵体等部分构成,其中,叶轮是离心泵的核心部分。离心泵的内部流动状况是影响其运行特性的重要因素。

在通常情况下,离心泵大多采用螺旋型蜗壳结构,蜗壳与隔舌的不对称性会造成叶轮出口流动的环形畸变,尤其是在非设计工况点时,其畸变将更为剧烈^[1]。

目前,工业领域对高比转速离心泵性能的要求越来越高,而空化是影响离心泵性能与运行稳定性的重要因素。因此,有必要研究离心泵不同隔舌安放角在空化状态下的压力脉动,并根据压力脉动的对比分析,研究隔舌安放角对离心泵空化过程的影响。

王凯丽等人^[2]研究了不同空化阶段的离心泵非定常流动特性问题,研究发现,在同一空化阶段,不同工况下离心泵隔舌和出口位置的压力脉动变换规律相似,即从未空化到严重空化阶段,离心泵压力脉动幅值降低,且主频均为叶频。蔡建程等人^[3]研究了在非设计工况下的离心泵性能和其隔舌区压力脉动问题,研究发现,对于变转速工况,离心泵隔舌区的压力脉动强度随转速以二次函数的形式升高。罗旭等人^[4]研究了不同空化程度下的高速离心泵,得到了高速离心泵叶轮内部的空化演变过程,以及流体诱发的离心泵压力脉动的变化规律。杨敏官等人^[5]研究了离心泵隔舌附近流场的压力场,并且对离心泵叶轮流道内的空化发生部位和发展程度进行了预测。

在现有的有关于离心泵隔舌安放角压力脉动的研究中,针对中低比转速离心泵的研究较多^[6-12],且其中的多数研究是针对其非空化的状态^[13]。目前,对空化状态下高比转速离心泵压力脉动^[14,15]的研究较少,并且缺乏空化阶段隔舌安放角对隔舌处压力脉动影响的研究。

笔者将采用 CFD 技术对不同空化状态下的模型泵进行数值模拟,并对 3 种隔舌安放角的模型泵隔舌处的压力脉动进行对比,研究不同隔舌安放角在空化状态下对压力脉动的影响,以期对离心泵的水力优化和可靠运行提供参考。

1 数值计算

1.1 计算模型

该研究对象为某一离心泵,其设计参数为:

流量 $Q=48\text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=7.8\text{ m}$,转速 $n=1\,450\text{ r/min}$,叶片数 $Z=6$ 。

笔者利用 CFTurbo 建立了叶轮三维模型和不同隔舌安放角下的蜗壳三维模型,并在 UG 中分别对进口段和出口段进行了适当的延伸。

三维模型如图 1 所示。

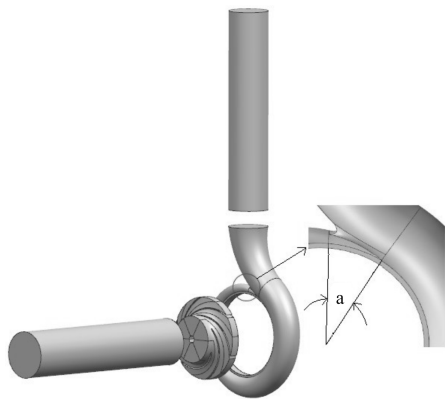


图1 三维模型

为了监测离心泵上各个位置的压力脉动,笔者在模型泵上设置了 5 个监测点,分别位于隔舌、出口、进口、蜗壳。

模型监测点设置如图 2 所示。

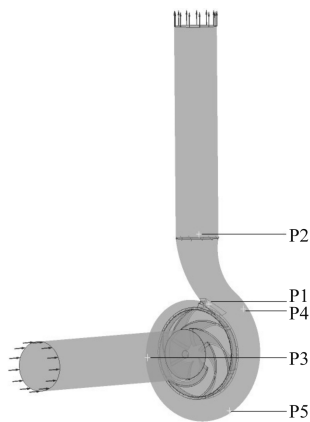


图2 监测点设置

1.2 网格划分

笔者利用 ANSYS-CFX 前处理网格软件 ICEM 对模型泵的水体进行了网格的划分。为了保证网格的质量,笔者分别对叶轮叶片、蜗壳隔舌等扭曲度较大的地方进行了加密处理;对该模型泵的全流道网格进行了无关性验证,选取了 4 组不同密度网格。

网格无关性验证如表 1 所示。

考虑到时间成本和计算机资源,笔者最后确定此处的模拟计算采用方案 2,计算域网格总数为 4 114 820。

其中,叶轮水体为 1 286 597,蜗壳水体为 1 906 561,进口延长段为 506 426,出口延长段为 415 236。

表 1 网格无关性验证

位置	方案 1 网格数目	方案 2 网格数目	方案 3 网格数目	方案 4 网格数目
叶轮水体	1 025 670	1 286 597	1 506 985	1 785 862
蜗壳水体	1 506 985	1 906 561	2 063 598	2 307 869
进口延长段	506 426	506 426	506 426	506 426
出口延长段	415 236	415 236	415 236	415 236
全流道	3 454 317	4 114 820	4 492 245	5 015 393
效率	83.26%	84.37%	84.36%	84.38%

离心泵模型网格图如图 3 所示。

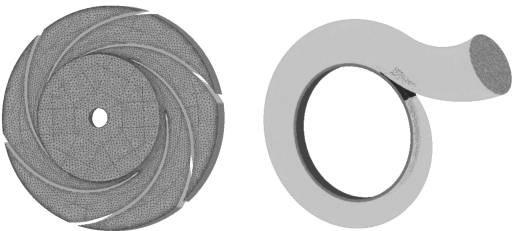


图 3 离心泵模型网格图(叶轮及蜗壳)

2 求解方法及边界条件

2.1 计算模型

此处的计算模型选用 RNG k-Epsilon 湍流模型,湍动能方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k u_e \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

式中:α_k—经验系数;u_e—有效黏性系数;k—湍动能;G_k—湍动能生成项;ε—湍动能耗散率。

此处的空化模型采用基于空泡动力学中简化的 Rayleigh-Plesset 模型:

$$R = \begin{cases} F_e \frac{3r_{nuc}(1-\alpha)\rho v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_L}} & \text{if } P < P_v \\ F_c \frac{3\alpha\rho v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{P_v - P}{\rho_L}} & \text{if } P > P_v \end{cases} \quad (2)$$

式中:P_v—气相压力,Pa;P—水蒸气饱和压力,Pa;r_{nuc}—成核位置的气相体积分数,r_{nuc}=5.0×10⁻⁴;R_B—成核位置的气泡半径,R_B=2.0×10⁻⁶ m;F_e,F_c—气化和压缩过程中的经验参数,其中,F_e=5.0,F_c=0.01。

2.2 数值模拟设置与边界条件

笔者运用 ANSYS CFX17.0 进行模拟计算,将进口设置为总压进口,将出口设置为质量流量。

笔者对非结构四面体网格采用 GGI 适应模式,叶轮和蜗壳水体之间的动静耦合交界面设置为 Frozen Rotor 交界面,并采用无滑移壁面网格。

其中,在定常计算中旋转部件与静止部件的交界面设置为“冻结转子”状态,液体体积分数设置为 1,气体体积分数设置为 0,改变压力进口从而达到不同的

空化程度^[16-18]。
笔者将定常的结果作为非定常的初始状态开始计算,时间步长 344.828 μs,数值计算 10 个周期,选取最后一个周期进行分析,求解精度为 10⁻⁵。

3 数值模拟与结果分析

3.1 不同空化阶段模型泵压力脉动模拟结果

笔者用性能下降法作为判别泵是否发生空化的依据。此处,模型泵的未空化阶段、空化阶段、严重空化阶段,即为泵扬程未下降、扬程下降 3% 与扬程下降 70% 时的状态。

各监测点在不同空化程度下的压力脉动频域图如图 4 所示。

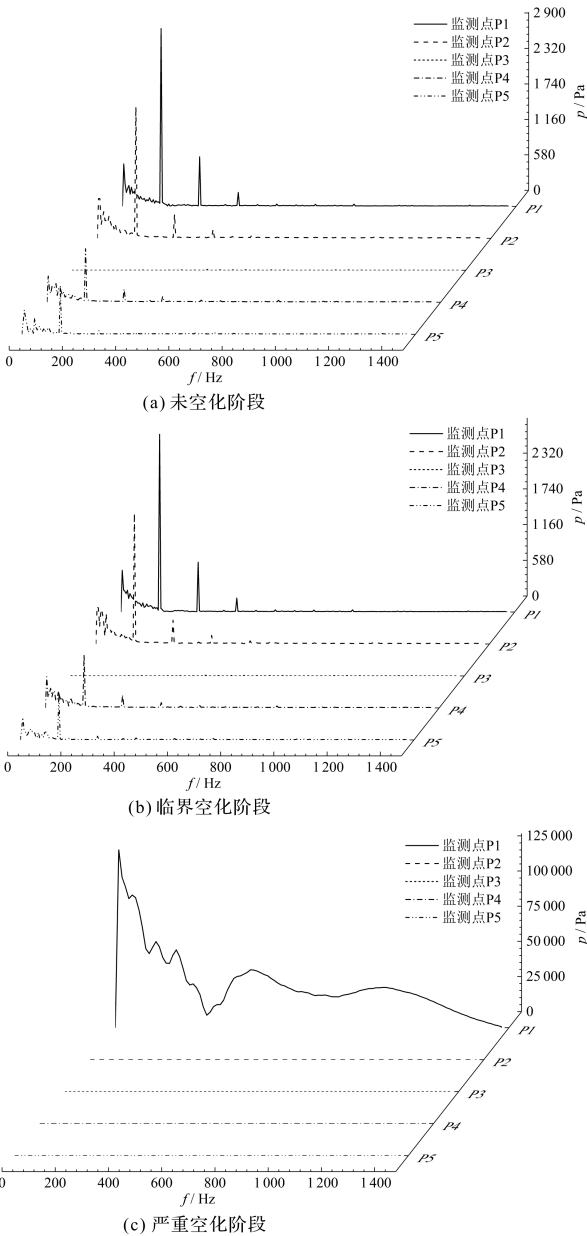


图 4 不同空化程度下的压力脉动频域图

从图4可以看出:

在非空化情况下,各监测点压力脉动频率分布比较一致,主频位于0.2倍转频处;

在空化情况下,隔舌监测点的压力脉动幅值明显高于其他监测点,压力脉动主频位于叶频144 Hz处,次频位于两倍叶频处;

在严重空化的情况下,隔舌监测点的压力脉动幅值较其他监测点来说也较大。这是因为蜗壳和叶轮间产生了较强的动静干涉,压力脉动强度加大。

就隔舌位置的监测点来说,从非空化阶段到临界空化阶段,隔舌监测点的压力脉动幅值有明显下降。从临界空化阶段到严重空化阶段,隔舌处压力脉动的幅值倍增。

离心泵内空泡随着装置空化余量的降低而逐渐增多,空泡的聚集、膨胀及空穴的脱落造成了压力的波动。随着进口压力的减小,空化越来越严重,导致流道内流动不稳定性加剧。

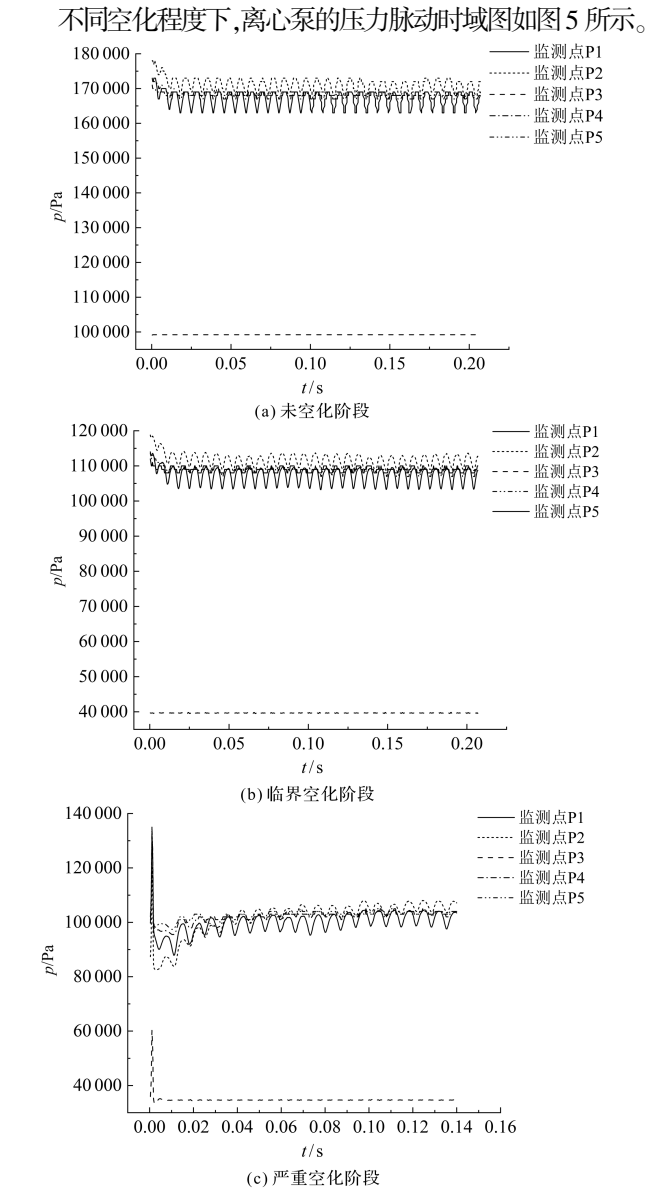


图5 不同空化程度下的压力脉动时域图

从图5可以看出:

随着进口压力的减小,空化逐渐加剧,离心泵内压力也随之减小。进口处压力最小并且压力脉动幅值最小,隔舌附近监测点压力脉动幅值最大;

在空化过程中,离心泵出口、隔舌等位置的压力脉动幅值明显高于进口位置。

以上结果说明,随着空化程度的加剧,流动的不稳定性主要表现在离心泵的下游位置。

3.2 不同空化阶段模型泵扬程与效率

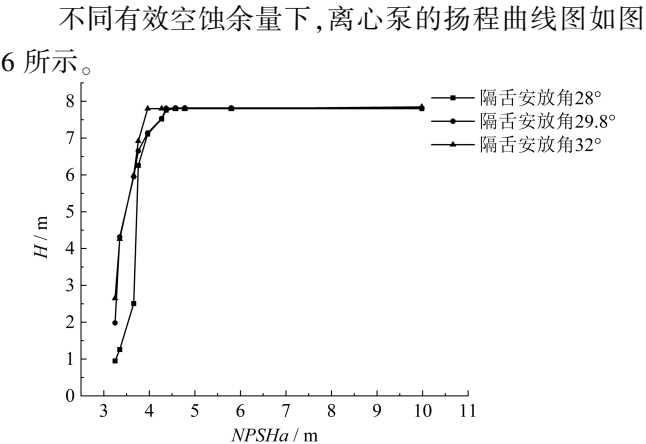


图6 不同有效空蚀余量下的扬程曲线

从扬程曲线可以看出:

在未空化阶段,隔舌安放角的变化对离心泵的扬程基本没有影响;但是随着空化的加剧,相同的有效空蚀余量下,隔舌安放角越大,扬程越高;并且隔舌安放角越大,临界空蚀余量越小。

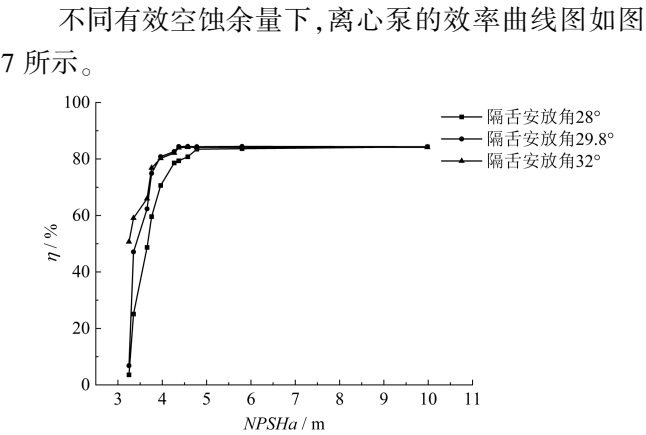


图7 不同有效空蚀余量下的效率曲线

从图7可以看出:

未空化阶段不同隔舌安放角的离心泵效率基本一致,但是开始发生空化之后,相同有效空蚀余量下,隔舌安放角越大,离心泵效率越高,在严重空化时尤为明显;

通过分析可知,相同有效空蚀余量下,隔舌安放角越大,扬程和效率越高;随着隔舌安放角的增大,离心泵在空化条件下的性能有所优化。

3.3 空化过程中不同隔舌安放角压力脉动

未空化阶段时,隔舌安放角为 28° 、 29.8° 、 32° 下隔舌的离心泵压力脉动频域图如图 8 所示。

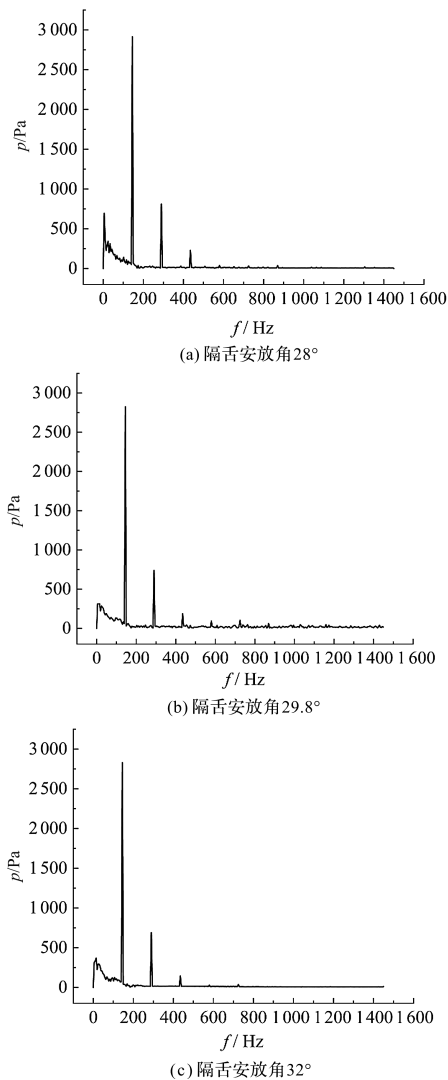


图 8 未空化阶段隔舌监测点压力脉动频域图

从图 8 中相同的空化阶段可以看出:

在非空化状态下,安放角增大对离心泵隔舌处压力脉动幅值影响不大;但是随着安放角的增大,其高频成分有所减少。

临界空化阶段时,隔舌安放角为 28° 、 29.8° 、 32° 下隔舌的离心泵压力脉动频域图如图 9 所示。

从图 9 可以看出:

空化状态下,隔舌处压力脉动的主频和次频分别在叶频和两倍叶频处;随着隔舌安放角增大,其压力脉动的主频频率基本不变,次频有较为明显的减小,高频成分也有所减少。

严重空化阶段时,隔舌安放角为 28° 、 29.8° 、 32° 下隔舌的离心泵压力脉动频域图如图 10 所示。

从图 10 可以看出:

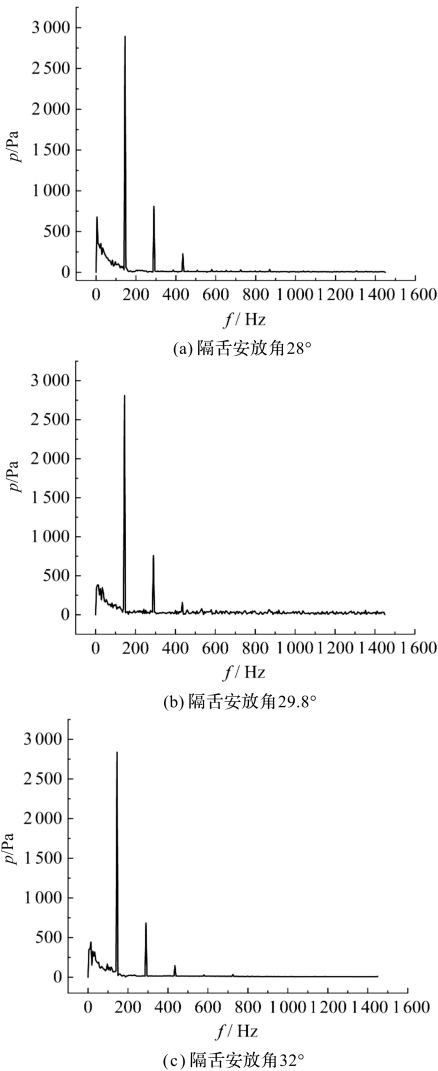
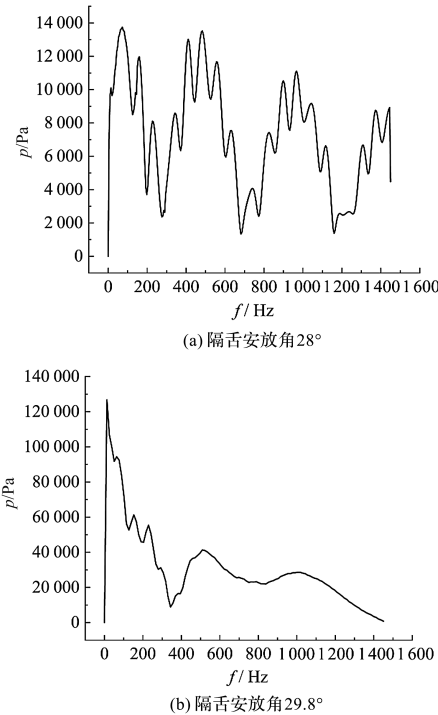


图 9 临界空化阶段隔舌监测点压力脉动频域图



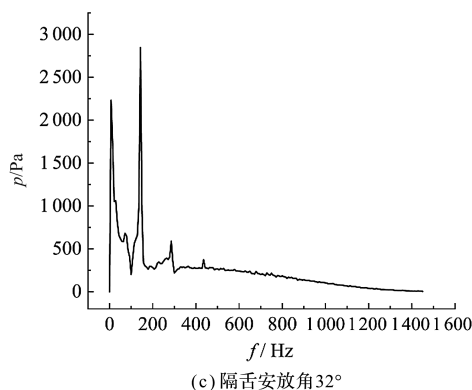


图10 严重空化阶段隔舌监测点压力脉动频域图

严重空化时,随着安放角的增大,从 $28^{\circ} \sim 32^{\circ}$,隔舌处压力脉动由无规律高频振动逐渐平稳下来,振幅明显减小。该结果说明,通过将隔舌安放角适当地增大,能有效地稳定隔舌处的压力脉动;

从未空化阶段到临界空化阶段,相同隔舌安放角的模型泵压力脉动的高频成分增多,低频部分有小幅波动,有不稳定趋势;

从临界空化到严重空化阶段,其振幅大幅度增大。

4 结束语

由于目前业界对空化状态下高比转速离心泵压力脉动的研究较少,并且缺乏空化阶段隔舌安放角对隔舌处压力脉动影响的研究,笔者采用ANSYS CFX软件对不同隔舌安放角(28° 、 29.8° 、 30°)的离心泵进行了数值模拟,研究了隔舌安放角对离心泵空化状态下压力脉动的影响,得到了其外特性和压力脉动特征。

研究结论如下:

(1)空化过程中,离心泵出口、隔舌等位置的压力脉动的幅值明显高于进口位置,泵内流动的不稳定性主要表现在中、下游;其中,隔舌部分的压力脉动较为敏感,压力脉动幅值最大;

(2)在隔舌安放角 $28^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 范围内发生空化时,在相同有效空蚀余量下,隔舌安放角越大,离心泵的扬程和效率越高;随着隔舌安放角的增大,离心泵在空化条件下的性能有所提高;

(3)随着空化的加剧,离心泵隔舌处的压力脉动幅值增大;但在严重空化状态下,隔舌安放角越大,压力脉动幅值越小,整体更稳定。因此,通过适当增大隔舌安放角能有效地稳定离心泵压力脉动。

在后续的工作中,笔者还将研究更大范围的隔舌安放角对压力脉动的影响,以及不同比转速离心泵空化状态下的压力脉动特性。

参考文献 (References):

- [1] 朱荣生,苏保稳,杨爱玲,等.离心泵压力脉动特性分析[J].农业机械学报,2010,41(11):43-47.
- [2] 王凯丽,李红,沈振华.高比转数离心泵空化状态下的压力脉动特性[J].排灌机械工程学报,2020,38(9):891-897.
- [3] 罗旭,宋文武,万伦,等.高速离心泵空化特性研究[J].水力发电,2019,45(11):74-78,94.
- [4] 杨敏官,孙鑫恺,高波,等.离心泵内部非定常空化流动特征的数值分析[J].江苏大学学报:自然科学版,2012,33(4):408-413.
- [5] 王松林,谭磊,王玉川.离心泵瞬态空化流动及压力脉动特性[J].振动与冲击,2013,32(22):168-173.
- [6] 王文婷,孟根其其格,路宏,等.离心泵瞬态空化流动压力脉动及空泡形态[J].中国农村水利水电,2017(9):202-206.
- [7] 万伦,宋文武,符杰,等.隔舌安放角对对比转速离心泵非定常性能的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(9):84-90.
- [8] JOHANN F G. Centrifugal pumps[M]. Dordrecht: Springer, 2014.
- [9] LEE D I, LIM H C. Erosion-corrosion damages of waterpump impeller[J]. International Journal of Automotive Technology, 2009, 10(5):629-634.
- [10] TAN C Z, LEONG M S. An experimental study of cavitation detection in a centrifugal pump using envelope analysis[J]. Journal of System Design and Dynamics, 2008, 2(1):274-285.
- [11] 刘春哲,王国光,尹光志,等.离心泵非定常空化流动特性的数值研究[J].流体机械,2019,47(7):39-43,26.
- [12] 杨敬江,李先军,潘中永,等.双蜗壳离心泵空化流动对隔舌处压力脉动特性的影响[J].排灌机械工程学报,2020,38(5):445-450.
- [13] 赵伟国,王桂鹏,赵国寿,等.低比转速离心泵非定常空化流动特性[J].兰州理工大学学报,2020,46(3):50-56.
- [14] 程效锐,李天鹏,王鹏.叶片V型切割对低比转速离心泵压力脉动的影响[J].流体机械,2021,49(9):7.
- [15] 赵万勇,马得东,史凤霞,等.蜗壳形状对液力透平压力脉动影响的研究[J].流体机械,2020,48(11):7.
- [16] BACHERT R, STOFFEL B, DULARM. Unsteady cavitation at the tongue of the volute of a centrifugal pump[J]. Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(6):061301. 1-061301.6.
- [17] COUTIER-DELGOSHA O, FORTES-PATELLA R, REBOUD J. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1):38-45.
- [18] 施卫东,徐焰炼,李伟,等.蜗壳隔舌安放角对离心泵内部非定常流场的影响[J].农业机械学报,2013,44(S1):125-130.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

舒乙宸,宋文武,马晓堂,等.隔舌安放角对离心泵空化状态下压力脉动的影响[J].机电工程,2022,39(3):350-355.

SHU Yi-chen, SONG Wen-wu, MA Xiao-tang, et al. Influence of diaphragm installation angle on pressure pulsation of centrifugal pump under cavitation state [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2022, 39(3):350-355.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>