

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.010

离心泵口环间隙附近的空化特性研究*

黄先北 刘竹青 杨 魏

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为研究前口环间隙附近空化现象的成因,首先通过一系列无关性验证确保了包含口环间隙及泵腔的完整离心泵模型计算的可靠性,在此基础上进行空化条件下的非定常计算,预测了必需汽蚀余量工况下口环间隙附近的空化现象,结果表明:前口环间隙出口附近流动受叶轮旋转的影响,其静压呈周期性的非均匀分布,其频率为2.27倍转频,并于低压区发生空化,空化开始于以进口段中心为圆心,半径稍小于前口环间隙内侧与进口段流动交汇点半径的某处;前口环间隙出口附近的压力脉动受叶轮旋转及空化的影响而呈现2类频率,其一为叶频及其倍频,其二为空化周期性变化导致的低频,该频率为空化周期性变化频率的整数倍。

关键词: 离心泵 口环间隙 空化 CFD

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)02-0059-05

Cavitation Characteristics of Centrifugal Pump near Wear-ring Clearance

Huang Xianbei Liu Zhuqing Yang Wei

(College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to clarify the cavitation near the clearance outlet, firstly, the detailed dependence checks were done to ensure the calculation accuracy. Based on these, the unsteady calculations including cavitation were done and the cavitation near the clearance outlet under NPSHr condition was predicted. Results showed that the static pressure presented a periodical non-uniform distribution with frequency of 2.27 times of the rotation frequency due to the rotation effects near the wear-ring. The cavitation occurred at the low-pressure region which located at the circle whose center was the center of the inlet pipe and the radius was slightly smaller than the intersection radius of the inlet pipe and the wear-ring outlet. The pressure pulsation near the wear-ring outlet was influenced by the impeller rotation and cavitation, it had two kinds of frequency, the first one was the blade passing frequency and its multiple, the second one was caused due to the periodic changes of cavitation and the frequency was an integral multiple of cavitation frequency. The conclusion was helpful to get a better understanding of the cavitation characteristics in the centrifugal pump near the wear-ring clearance.

Key words: Centrifugal pump Wear-ring clearance Cavitation CFD

引言

离心泵的口环对泵性能有影响,会造成容积损失,同时改变离心泵内部流场形态^[1],从现有研究结果来看,口环间隙会对离心泵性能产生一定程度的影响^[2-5],同时,李意民^[6]通过试验验证了前口环

间隙附近的“第二汽蚀区”,牟介刚等^[4]通过试验证实了口环间隙大小对空化性能的影响。可见口环间隙会对离心泵的内部流动造成影响,其中更关键的在于对空化性能的影响。

因此,作为离心泵中易引发运行不稳定的重要因素,空化特性的研究,尤其是口环间隙附近的空化

收稿日期: 2014-02-21 修回日期: 2014-03-27

* 国家自然科学基金资助项目(51139007)、教育部科技资助项目(113010A)和教育部博士学科点基金资助项目(20130008110047)

作者简介: 黄先北,博士生,主要从事流体机械动力学分析研究,E-mail: znhuang@163.com

通讯作者: 刘竹青,教授,博士生导师,主要从事流体机械及流体工程研究,E-mail: lzq@cau.edu.cn

特性的研究显得尤为重要。目前,鉴于 CFD 技术的低成本性,其已成为流体机械领域研究与设计不可或缺的工具之一。基于 CFD 的水泵性能预测已基本达到工程实用程度^[7],国内外对离心泵的 CFD 计算已趋成熟^[8-10]。但纵观各研究可见鲜有针对离心泵口环间隙的 CFD 研究,多数研究将口环间隙作为提高 CFD 预测精度的手段^[11]。同时,也有少部分学者对口环间隙进行了研究,Will 等^[12]提出了离心泵口环间隙计算的简化二维模型,并针对口环间隙及泵腔内的流动作了详细的分析^[13]。但综合这些研究可见,口环间隙附近的空化 CFD 研究在国内外少有报道。

本文以某单级单吸离心泵为研究对象,采用 CFD 定常计算验证完整模型在外特性及空化特性预测方面的准确性,并在此基础上作空化条件下的非定常计算,揭示前口环间隙附近空化的成因。

1 定常分析

研究对象为一单级单吸离心泵,主要参数为:额定流量 $q_r = 700 \text{ m}^3/\text{h}$,额定扬程 $H_r = 50 \text{ m}$,额定效率 $\eta_r = 86\%$,转速 $n = 1480 \text{ r}/\text{min}$,叶片数 $z_b = 7$,平衡孔 7 个均布,叶轮直径 $D = 409 \text{ mm}$,口环间隙厚度 0.3 mm ,长度 23 mm 。

1.1 网格无关性验证

该泵共划分 4 个计算域:蜗壳、叶轮、口环间隙及泵腔、进口管段。除蜗壳域采用非结构的四面体网格外,其余计算域皆采用结构化的六面体网格。

采用商业软件 Ansys CFX 进行非空化条件下的定常计算,边界条件采用常用的质量流量进口, $q = q_r = 700 \text{ m}^3/\text{h}$,出口给定压力,取相对静压 $p = 0 \text{ Pa}$,叶轮域设为旋转域,除各计算域的交界面及进出口,其余面均为光滑的无滑移壁面条件,壁面处采用 automatic 壁面处理方式,控制方程的离散采用二阶后退欧拉法(Second order backward Euler)。

严格而言,CFD 计算中每个计算域都会对计算结果产生或大或小的影响,为保证计算结果的可靠性,需对每个计算域进行网格无关性验证,但考虑到离心泵核心在于泵部分,管段的影响很小,因此本文仅对除进口管段外的其余部分进行网格无关性验证。首先,画一套基准网格,其中蜗壳域网格数 704 706,叶轮域为 1 247 554,口环间隙及泵腔域为 745 440,进口管段 454 242。

由于蜗壳域采用非结构网格进行划分,控制整体网格密度即可控制总网格数,此时仅需验证总网格数对计算结果的影响;对于叶轮域,由于核心在于叶轮流道的划分,总体采用 C 型及 O 型混合方式进

行分块,本文考虑 2 个方向的网格划分策略——叶片表面附近的边界层网格以及流道内两叶片间的周向网格;而对于口环间隙及泵腔域,本文考虑 2 个方向的网格密度:厚度方向(口环厚度方向)及周向。

采用 SST 湍流模型进行网格无关性验证,以扬程为标准计算各网格数下的扬程计算值与参照网格的偏差,结果如表 1 所示。其中偏差为 0 代表参照网格,考虑叶轮周向网格在参照网格的基础上进一步减小易导致网格质量的恶化,本文仅考虑周向网格增加的情况,类似地,口环间隙及泵腔的周向网格同样仅考虑周向网格增加的情况。

表 1 网格方案及计算结果

Tab. 1 Mesh schemes and calculation results

计算域	划分方式	网格数	扬程偏差/%
蜗壳	—	445 234	0.03
	—	704 706	0
	—	1 060 518	0.003
叶轮	边界层(12层)	1 027 054	0.38
	边界层(19层)	1 247 554	0
	边界层(26层)	1 532 804	0.165
	周向(22层)	1 247 554	0
	周向(35层)	1 588 062	0.05
口环间隙及泵腔	周向(120层)	745 440	0
	周向(100层)	625 600	0.07
	厚度方向(9层)	957 960	0.32
	厚度方向(5层)	745 440	0

由表 1 易知,蜗壳网格数对计算结果影响不大;对于叶轮域,叶片表面边界层的影响大于周向网格影响;对于口环间隙及泵腔域,厚度方向网格影响大于周向。

而从扬程偏差量来看,所有偏差都在 0.4% 以内,因此取各计算域中网格数最小的方案,再次进行计算,结果表明,此时与参照网格计算值的偏差为 0.24%,满足网格无关性要求,总网格数 2 552 130,叶轮与口环间隙及泵腔网格如图 1 所示。

1.2 湍流模型验证

湍流模型的选择与泵的几何结构相关,不同泵的最适用模型可能不完全一致,如 Kaewnai 等^[14]比较发现标准 $k-\varepsilon$ 模型适于其研究对象,而刘梅清等^[15]则发现 RNG $k-\varepsilon$ 的扬程预测效果要优于标准 $k-\varepsilon$ 模型。因此,为选取针对本研究对象的最佳湍流模型,本文采用 4 个常用的湍流模型——标准 $k-\varepsilon$ 模型、 $k-\omega$ 模型、RNG $k-\varepsilon$ 模型以及 SST 模型,分别进行计算,并与试验扬程曲线作对比。结果显示:尽管各模型预测结果相近,与试验值的偏差都在 4% 以内,但 $k-\omega$ 模型在 3 种方案的计算中均为最接近试验值的模型,因此下文研究均采用 $k-\omega$ 模

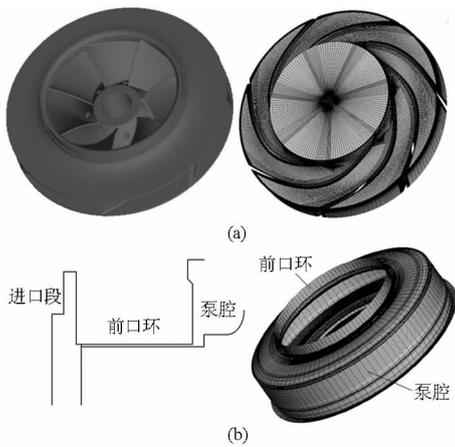


图1 部分网格示意

Fig. 1 Part of grids

(a) 叶轮域结构及网格 (b) 口环间隙及泵腔域网格

型。

1.3 空化性能预测

现有的空化模型都基于经典的空泡动力学方程——Rayleigh - Plesset 方程, 最具代表性的为 Singhal 等^[16]提出的 Full cavitation model 以及 Zwart 等提出的 Zwart - Gerber - Belamri model^[17] (简称 ZGB 模型)。鉴于 ZGB 模型良好的数值稳定性及 LES (Large eddy simulation) 兼容性, 其已成为目前极为常用的空化模型, 本文即采用该模型。空化计算中边界条件设置与外特性预测略有不同, 关键在于其进口设置为压力进口, 以模拟空化试验中的压力控制, 出口设置为流量出口。

额定工况下 ($q/q_r = 1$) 的空化特性曲线如图 2 所示。必需汽蚀余量的判定通常以扬程下降 3% 为标准, 图中扬程下降 3% 时的扬程与曲线交点的横坐标即为必需汽蚀余量, 易知与试验值 (图 2 中竖线所示) 接近。

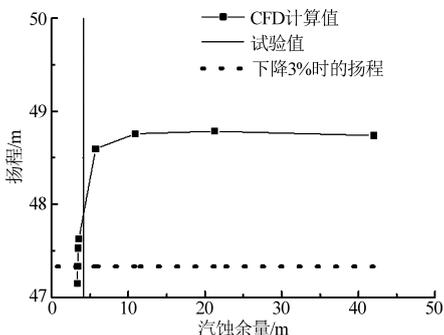


图2 额定工况下空化特性曲线

Fig. 2 Cavitation curve under rated condition

2 非定常分析

2.1 时间步长无关性验证

非定常计算需对时间步长进行无关性验证, 考虑叶轮一个旋转周期内分别计算 180、270、360 步,

则对应时间步长为 1.126×10^{-4} 、 1.5×10^{-4} 、 2.25×10^{-4} s。经计算, 本文时间步长采用 1.5×10^{-4} s。

由于本文并未做该泵的压力脉动试验, 因此无法直接从压力脉动的角度来评判非定常计算的精度。在泵性能试验中, 扬程的测量是通过进出口压差来确定的 (同 CFD), 其中进出口压力为一段测量时间内的平均值, 因此从测量所得扬程带有一定程度的非定常性, 同样可以用来验证非定常计算结果的可靠性。为此, 本文以平均扬程与试验扬程之间的偏差为指标验证非定常计算的准确性。

在不考虑空化的条件下, 取 q/q_r 为 0.715、1 和 1.286 这 3 个工况, 选择计算达到稳定之后的 3 个周期的扬程作算术平均。计算结果表明, 不同工况下的预测精度相近且偏差都在 4% 以下, 验证了非定常计算的准确性。

2.2 结果分析

将空化模型加入到计算中, 以额定工况下, 进口汽蚀余量为必需汽蚀余量时的内特性为研究对象进行分析。首先, 选择 $z = 0$ 截面 (图 3a)。绘制一个叶轮旋转周期 ($T = 0.041$ s) 内 3 个不同时刻下的水蒸气的体积分数分布及流线, 如图 3b 所示。

图 3b 所示 $+x$ 区域内, $t = 0$ 时进口段与前口环间隙流动汇合处出现了一块空化区域, 水蒸气体积分数 v_g 约为 0.05, 并出现了一对反向漩涡, 该区域形状基本与反向漩涡对之间的流线形状一致; 而 $t = 0.22T$ 时空化消失, $t = 0.44T$ 时再次出现, 可见空化区域呈周期性变化, 且其形状受流动直接影响。图 3b 所示 $-x$ 区域内, 同样出现了周期性变化的空化区域, 对比二者可见, 2 个对称位置的空化出现时间不一致, 体现了流场在此处的非均匀性。

离心泵的非定常特性中, 压力脉动是其中的重要成分。Zhao 等^[18]研究发现前口环间隙对离心泵性能影响较大。为分析该空化现象产生的原因, 本文在前口环间隙附近布置 3 个压力脉动测点以揭示空化状态下间隙附近的压力脉动情况, 测点 1、2 布置如图 4 所示, 测点 3 位于测点 2 与进口段中心点连线的中点, 与测点 1、2 共线 (位置未在图中显示)。

取计算达到稳定之后的 3 个周期的压力信号进行 FFT 分析以得到频域特性, 频率以转频的倍数来表征, 即 $N = f_d/f$, 其中 f_d 为 FFT 变换所得频率, f 为转频。额定工况下不同测点的频域特性及测点 2 的时域特性如图 5 所示。

由图 5a 中各点幅值可见, 测点 1、2 处的压力脉动幅值较大, 结合图 3 中反向漩涡对可知, 该点附近受漩涡影响较大, 测点 3 由于远离口环间隙, 受漩涡

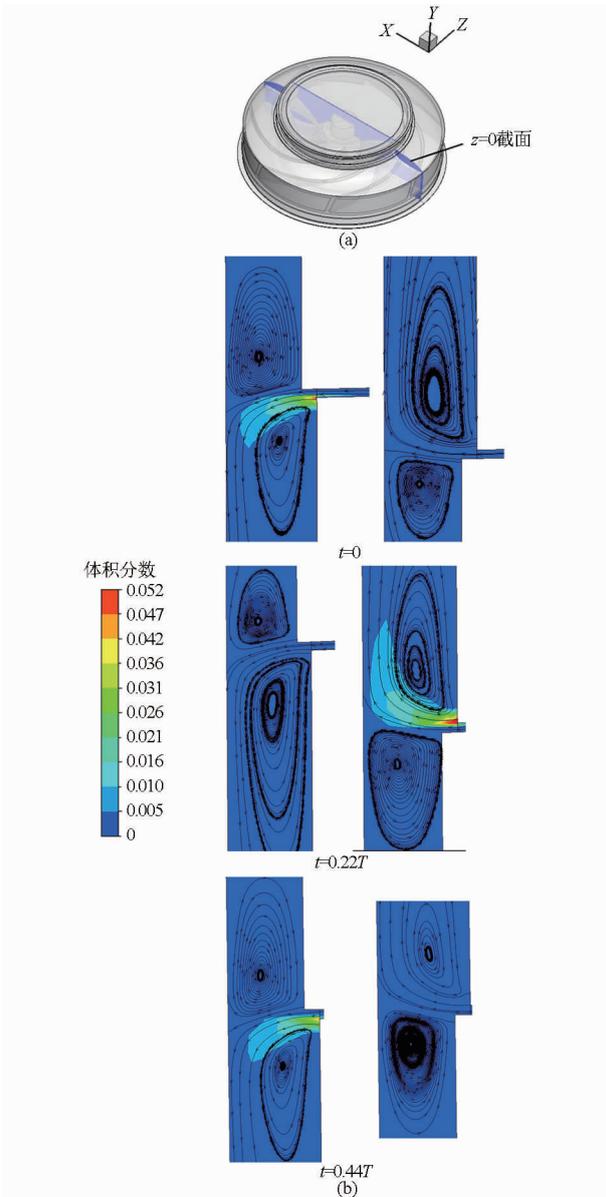


图3 $q/q_r = 1$ 工况下前口环间隙附近水蒸气
体积分数及流线图

Fig.3 Distribution of vapor volume fraction and streamlines
near front wear-ring when $q/q_r = 1$

(a) $z=0$ 截面位置

(b) 水蒸气分布及流线图(左: $+x$ 区域, 右: $-x$ 区域)

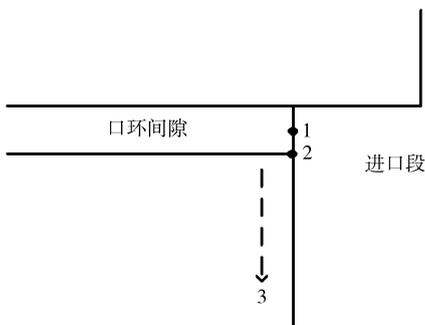


图4 压力脉动测点分布

Fig.4 Distribution of monitor points

看,口环间隙出口附近测点1、2的压力脉动主频为叶频,叶频倍频次之,而进口段远离口环间隙处的压力脉动除叶频外,还存在相对明显的低频成分,该频率 f_{dl} 为 $0.33f$,且该点压力脉动的叶频倍频消失。

尽管由图3知测点2附近流动不稳定,但根据图5b,其绝对静压始终在10000 Pa以上,远高于水的饱和蒸汽压(20℃时为2330 Pa),说明空化的起源不在该点。由图3显示的空化区域位置可知,空化发生于口环间隙出口与泵进口段交汇处一定范围内,由此推测空化起源于测点2附近某一区域。

进一步的分析可从图6得出(r_2 为测点2到圆心的距离, r_a 为靠近测点2的一点到圆心的距离),其中分析断面位于图4所示测点1~3所在的进口段截面。根据图6静压分布可明显看出流场的非均匀性,高压与低压区交替出现,恰为7个分隔区,对应于叶片数,说明进口段压力分布受叶轮旋转影响,从而导致测点1~3的主频为叶频。从静压数值来看,压力最低点接近零且位于测点2附近(图中椭圆形标定区域),远低于水的饱和蒸汽压,因此发生空化;根据上文中图5b的分析结果,空化起源于测点2附近,而测点1压力脉动小于测点2,因此有理由推测空化发生于距离图6中圆形截面圆心的半径 $r < r_2$ 的区域,其中 $r_2 = 131.59$ mm为测点2到圆心的半径。

为验证该推测并分析空化沿圆周方向的分布情况,取 $r_a = 131.25$ mm,在每个时刻的静压分布图下绘制对应2个不同半径的圆上沿圆周方向的 v_g 分布,其中周向角度 $\theta = 0$ 代表 $+x$ 轴与该圆的交点。由图6中气体体积分数 v_g 的分布可知,不同时刻下半径为 r_a 时的 v_g 始终大于 r_2 时,即半径 r_a 下空化程度大于 r_2 下,因此空化发生于 $r < r_2$ 的区域;观察圆周方向的分布可知, v_g 共出现7个峰值,且相邻两峰值基本为等间距,恰与静压分布相对应,同时,各峰值大小不一致,进一步体现了流场的非均匀性。

再由图6中不同时刻的压力分布可见, $t=0$ 时刻与 $t=0.44T$ 时刻的分布相近, $+x$ 区域存在低压区,导致图3中所示的 $+x$ 区域出现空化;而 $t=0.22T$ 时刻下的分布与其余2时刻不同,原本出现于 $+x$ 区域的低压区转过一定角度而在 $-x$ 区域出现低压区,因此图3中 $-x$ 区域出现空化,结合图6中同一时刻下的 v_g 沿圆周方向的分布同样可知,同一圆周位置上的空化情况随时间而呈周期性变化,对照图3可知变化周期为 $T_c = 0.44T$,对应其变化频率 $f_{dc} = 1/T_c = 2.27f$ 。若将此频率除以图5b中所得的低频脉动频率 f_{dl} ,则有 $f_{dc}/f_{dl} = 6.89 \approx 7$,即空化区域变化频率约为低频信号的整数倍。如此即可合

影响小,因而压力脉动幅值小;由各点频率特性来

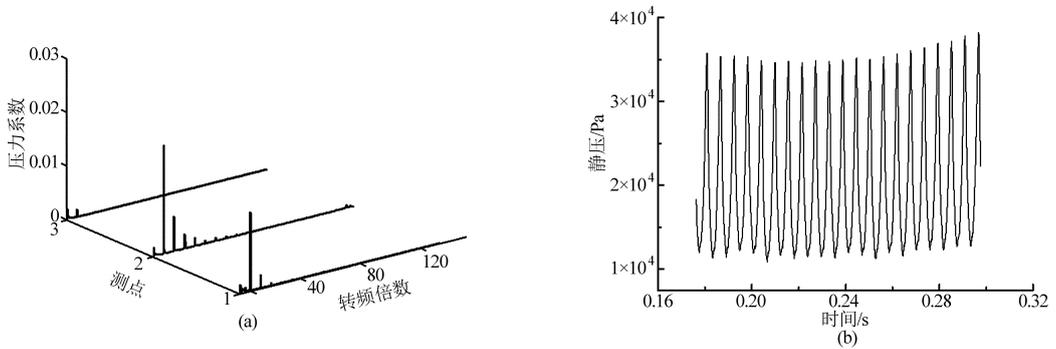


图 5 $q/q_r = 1$ 工况下压力脉动频域与时域特性

Fig. 5 Frequency domain and time domain of pressure pulsation when $q/q_r = 1$

(a) 不同测点频域特性对比 (b) 测点 2 时域图

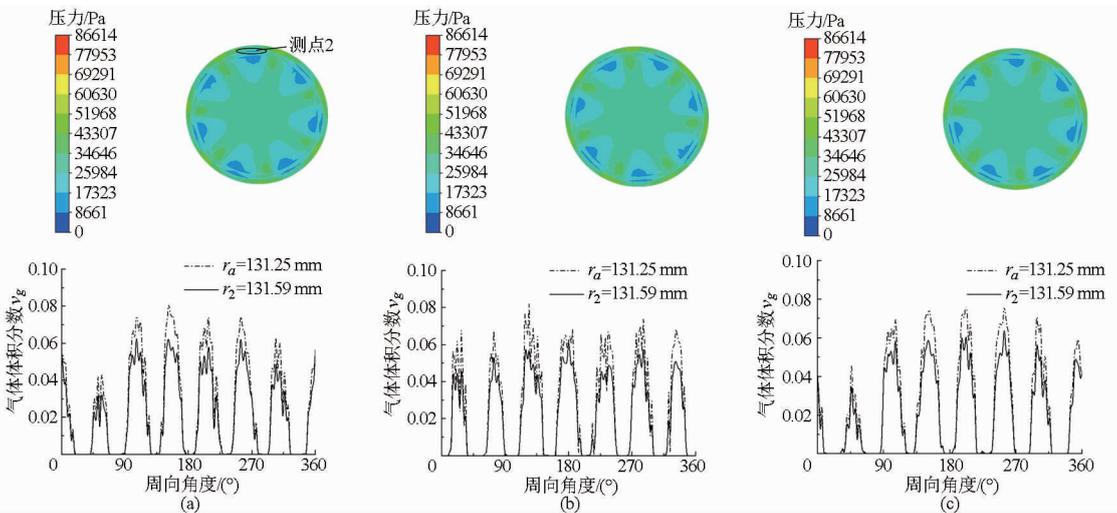


图 6 $q/q_r = 1$ 工况下进口段与口环间隙相交面内静压分布及某圆上沿圆周方向的水蒸气体积分数分布

Fig. 6 Distribution of static pressure on interface of inlet pipe and front wear-ring and vapor volume fraction along circumferential direction when $q/q_r = 1$

(a) $t = 0$ (b) $t = 0.22T$ (c) $t = 0.44T$

理解释图 6 低频信号的产生是受叶轮旋转影响的口环间隙出口附近空化的周期性变化所致。

3 结论

(1)前口环间隙出口附近流动受叶轮旋转的影响,其压力分布呈非对称的 7 个高压与低压区相间,并于低压区发生空化,空化开始于以进口段中心为圆心、半径稍小于前口环间隙内侧与进口段流动交

汇点半径的某处。

(2)压力分布存在周期性变化,其频率为 2.27 倍转频,从而导致空化出现相同的周期性变化,且由于流动的非对称性,各低压区的空化程度不一致。

(3)前口环间隙出口附近的压力脉动受叶轮旋转及空化的影响而呈现 2 类频率,其一为叶频及其倍频,其二为空化周期性变化导致的低频,该频率为空化周期性变化频率的整数倍。

参 考 文 献

- 1 Chen S X, Pan Z Y, Wu Y L, et al. Simulation and experiment of the effect of clearance of impeller wear-rings on the performance of centrifugal pump[M]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(7): 072017.
- 2 Li W G. An experimental study on the effect of oil viscosity and wear-ring clearance on the performance of an industrial centrifugal pump[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(1): 011501.1 - 011501.6.
- 3 吴大转,许斌杰,武鹏,等. 多级离心泵内部间隙流动与泄漏损失[J]. 浙江大学学报:工学版,2011,45(8):1393 - 1398. Wu D Z, Xu B J, Wu P, et al. Internal clearance flow and leakage loss in multi-stage centrifugal pump[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(8): 1393 - 1398. (in Chinese)
- 4 牟介刚,苏苗印,张孝风,等. 叶轮口环间隙对农用离心泵汽蚀性能的影响[J]. 农机化研究,2010,32(11): 25 - 29. Mou J G, Su M Y, Zhang X F, et al. Effect of clearance of impeller wear-rings on cavitation characteristic of agriculture pump [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2010, 32(11): 25 - 29. (in Chinese)

106.

Zhang Jinfeng, Xu Yuping, Yuan Shouqi, et al. Numerical analysis on pressure fluctuation of unsteady flow in double blade screw type centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(12): 102 - 106. (in Chinese)

- 12 袁寿其, 司乔瑞, 薛菲, 等. 离心泵蜗壳内部流动诱导噪声的数值计算[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 93 - 98. Yuan Shouqi, Si Qiaorui, Xue Fei, et al. Numerical calculation of internal flow-induced noise in centrifugal pump volute [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery, 2011, 29(2): 93 - 98. (in Chinese)
- 13 付强. 1 000 MW 核电站离心式上充泵水力设计与结构可靠性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010. Fu Qiang. Study on hydraulic design and reliability of centrifugal charging pump in 1 000 MW nuclear power plants [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2010. (in Chinese)
- 14 Fluent Inc. FLUENT user's guide[M]. Fluent Inc., 2003.
- 15 Launder B E, Spalding D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London: Academic Press, 1972.
- 16 窦华书, 蒋威, 张玉良, 等. 基于能量梯度理论的离心泵内流动不稳定研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(12): 88 - 92, 103. Dou Huashu, Jiang Wei, Zhang Yuliang, et al. Flow instability in centrifugal pump based on energy gradient theory [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(12): 88 - 92, 103. (in Chinese)
- 17 司乔瑞, 袁寿其, 李晓俊, 等. 空化条件下离心泵泵腔内不稳定流动数值分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(5): 84 - 90. Si Qiaorui, Yuan Shouqi, Li Xiaojun, et al. Numerical simulation of unsteady cavitation flow in the casing of a centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(5): 84 - 90. (in Chinese)

~~~~~  
(上接第 63 页)

- 5 王秀勇, 王灿星, 黎义斌. 离心泵泵腔内流动特征的数值分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 86 - 90. Wang X Y, Wang C X, Li Y B. Numerical study of flow characteristics in the impeller side chamber of centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 86 - 90. (in Chinese)
- 6 李意民. 离心泵第二汽蚀区初探[J]. 水泵技术, 1994(3): 13 - 14.
- 7 王福军, 黎耀军, 王文娥, 等. 水泵 CFD 应用中的若干问题与思考[J]. 排灌机械, 2005, 23(5): 1 - 10. Wang Fujun, Li Yaojun, Wang Wene, et al. Analysis on CFD application in water pumps [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(5): 1 - 10. (in Chinese)
- 8 Spence R, Amaral-Teixeira J. Investigation into pressure pulsations in a centrifugal pump using numerical methods supported by industrial tests [J]. Computers & Fluids, 2008, 37(6): 690 - 704.
- 9 González J, Fernandez J, Blanco E, et al. Numerical simulation of the dynamic effects due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 348 - 355.
- 10 Barrio R, Parrondo J, Blanco E. Numerical analysis of the unsteady flow in the near-tongue region in a volute-type centrifugal pump for different operating points [J]. Computers & Fluids, 2010, 39(5): 859 - 870.
- 11 Yang S S, Shahram D, and Fan Y K. Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance [J]. Renewable Energy, 2012, 48: 507 - 513.
- 12 Will B C, Benra F K. Investigation of the fluid flow in a rotor-stator cavity with inward through-flow [C] // ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, 2009, 2: 207 - 218.
- 13 Will B C, Benra F K, Dohmen H J. Investigation of the flow in the impeller side clearances of a centrifugal pump with volute casing [J]. Journal of Thermal Science, 2012, 21(3): 197 - 208.
- 14 Kaewnai S, Chamaoot M, Wongwiset S. Predicting performance of radial flow type impeller of centrifugal pump using CFD [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2009, 23(6): 1620 - 1627.
- 15 刘梅清, 李秋玮, 白耀华, 等. 湍流模型在双吸离心泵数值模拟中的适用性分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 6 - 9. Liu M Q, Li Q W, Bai Y H, et al. Applicability of turbulence models in numerical simulation of double suction centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 6 - 9. (in Chinese)
- 16 Singhal A K, Athavale M M, Li H, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(3): 617 - 624.
- 17 Morgut Mitja, Enrico Nobile, Ignacijo Biluš. Comparison of mass transfer models for the numerical prediction of sheet cavitation around a hydrofoil [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2011, 37(6): 620 - 626.
- 18 Zhao W G, Li Y B, Sun J P, et al. Research on the effect of wear-ring clearances to the performance of centrifugal pump [M] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2012, 15(7): 072018.1 - 072018.7.