

空化对超低比转数离心泵内压力脉动的影响研究

王 聪^{1,2} 张永学^{1,2} 冀凯卓¹ 徐 畅³ 刘 铭⁴

(1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249; 2. 北京市过程流体过滤与分离重点实验室, 北京 102249;
3. 中国石化工程建设有限公司, 北京 100101; 4. 中海油石化工程有限公司, 青岛 266101)

摘要: 为研究空化对超低比转数离心泵内压力脉动的影响,采用实验和数值模拟相结合的方法,研究了IB 50-32-250型超低比转数离心泵在不同有效汽蚀余量下不同位置处的压力脉动,并对其频域和幅值特性进行了分析。结果表明:空化会诱导产生低频及宽频脉动。无空化时,叶轮流道内压力脉动主频为转频及其倍频,蜗壳内压力脉动受叶轮和隔舌间的相互作用激励,主频为叶频及其倍频,且与隔舌越近脉动越强。随着有效汽蚀余量的减小,叶轮通道中大部分测点的压力脉动幅值减小,但空化区边缘的脉动幅值增大;临界空化时,叶轮进口附近的压力脉动主频由转频变为1/6倍转频。此外,蜗壳内流场的不均匀变化导致蜗壳内压力脉动幅值增大;临界空化时,蜗壳及泵出口处的主频仍为叶频,但1/6倍转频成为幅值较大的次频。

关键词: 超低比转数离心泵; 压力脉动; 空化; 非定常流动; 数值模拟

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)01-0122-08 OSID: 

Investigation on Pressure Fluctuation Affected by Cavitation
in Ultra-low Specific Speed Centrifugal Pump

WANG Cong^{1,2} ZHANG Yongxue^{1,2} JI Kaizhuo¹ XU Chang³ LIU Ming⁴

(1. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China
2. Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, Beijing 102249, China
3. Sinopec Engineering Incorporation, Beijing 100101, China
4. CNOOC Petrochemical Engineering Incorporation, Qingdao 266101, China)

Abstract: In order to investigate the influence of cavitation on pressure pulsation in ultra-low specific speed centrifugal pump, combining experimental and numerical simulation methods, the frequency domain and amplitude characteristics of pressure fluctuation were analyzed at different positions in an IB 50-32-250 ultra-low specific speed centrifugal pump with different net position suction head available (NPSHa). The results showed that cavitation can induce low frequency and broadband frequency fluctuation. When there was no cavitation, the pressure pulsation in impeller flow passage was mainly related to the impeller rotation frequency and its harmonic frequency; while in the volute, because of the interference between impeller and volute tongue, the main dominant frequency of pressure pulsation was the blade pass frequency and its harmonic frequency, and the pressure pulsation near tongue was the strongest. With the decrease of NPSHa, pressure fluctuation of most monitors in the impeller passage was weakened, but that in the edge of cavitation zone was enhanced. The main frequency of pressure pulsation near the impeller inlet was changed from rotation frequency to 1/6 rotation frequency at the critical cavitation. Besides, the developing un-uniformity of flow field in volute caused the amplitude of pressure fluctuation strengthened. The main frequency of the volute and pump outlet was still blade pass frequency, but 1/6 rotation frequency became the secondary frequency with larger amplitude. The research can provide necessary basis for the reduction of vibration and noise intensified by cavitation in the ultra-low specific speed centrifugal pump.

Key words: ultra-low specific speed centrifugal pump; pressure fluctuation; cavitation; unsteady flow; numerical simulation

收稿日期: 2019-05-09 修回日期: 2019-08-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(51876220)
作者简介: 王聪(1992—),男,博士生,主要从事离心泵内部流动研究,E-mail: cupwangcong@gmail.com
通信作者: 张永学(1977—),男,教授,博士生导师,主要从事流体机械及工程研究,E-mail: zhyx@cup.edu.cn

0 引言

超低比转数离心泵的比转数低于 30,是为满足小流量、高扬程的特殊需求而设计。其叶片狭长且弯曲、叶轮出口狭窄的典型结构特征导致其内部流场复杂,易产生流动分离、旋涡、强射流-尾流等不稳定流动^[1],且汽蚀性能较差。当空化发生时,非定常空化流会加剧流场内的不稳定流动,不仅导致泵的扬程与效率急剧下降,还会诱发振动和噪声,对离心泵的运行稳定性造成严重影响^[2-6]。压力脉动作为泵运行稳定性的重要评价指标,已成为国内外学者的研究重点。

近年来,众多学者主要对非空化工况下非定常流场内的压力脉动特性进行了研究。文献[7-8]结合实验与数值模拟的结果,得出叶轮与蜗壳隔舌之间的动静干涉作用是压力脉动的主要诱因。文献[9-10]通过数值模拟的方法研究了离心泵蜗壳内的压力脉动,结果表明,位于蜗壳隔舌位置处的压力脉动幅值最大,蜗壳内压力脉动的主频是叶片通过频率。文献[11]通过实验的方法对一低比转数离心泵蜗壳内的压力脉动进行了研究,证实了蜗壳内压力脉动主频是叶频及其高次谐波。

但是目前对空化工况下泵内压力脉动特性的研究较少,且主要集中在数值模拟方面^[12-13]。文献[14]采用数值模拟的方法研究了离心泵未空化与空化发生时的瞬态非定常特性,对比发现空化时叶轮内空泡呈现周期性运动,且出现较明显的低频压力脉动。文献[15]对一中比转数离心泵不同空化工况下的压力脉动特性进行了数值模拟,发现随着空化程度的加剧,泵腔内压力脉动幅值增大,低频及宽频脉动加剧。文献[16]对轴流泵在不同空化工况下的压力脉动特性进行了实验研究,发现随着空化程度的加剧,叶轮进出口监测点主频附近的谐频逐渐向低频段移动。文献[17]分析了混流式射流泵中的空化-涡旋相互作用机理,结果表明,空化的发展会加剧涡流的产生和流动的不稳定性。

从相关研究来看,针对内流场复杂的超低比转数离心泵空化条件下的压力脉动研究相对较少,同时,对空化发生时泵内各区域的压力脉动变化规律,尤其是空化流场与压力脉动特性的关系缺乏系统的研究。本文针对 IB 50-32-250 型超低比转数离心泵,在数值模拟结果的基础上,结合空化性能实验与压力脉动实验,对非空化及空化条件下泵进出口、叶轮及蜗壳区域的压力脉动特性进行研究,揭示空化对超低比转数离心泵内压力脉动特性的影响。

1 离心泵水力空化性能实验装置

本研究所用的水力空化性能实验装置如图 1 所示,包括离心泵系统、管道系统和测量仪器,其中离心泵系统包括低比转数离心泵、扭矩传感仪和电动机。实验采用 IB 50-32-250 型超低比转数离心泵,在该实验台上开展了离心泵空化性能实验与压力脉动性能实验。表 1 给出了实验中使用的测量仪器主要参数。

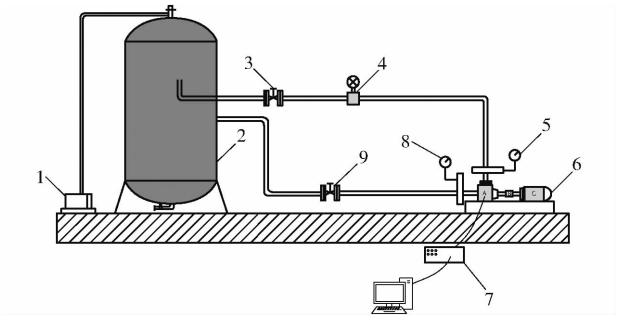


图 1 离心泵水力空化性能实验装置示意图
Fig. 1 Test rig for centrifugal pump hydraulic cavitation experiment

1. 真空泵 2. 储水罐 3. 出口调节阀 4. 电磁流量计 5. 出口压力表 6. 离心泵系统 7. 数据采集系统 8. 进口压力表 9. 进口调节阀

表 1 测量仪器主要参数

Tab.1 Main parameters of measuring instruments			
类别	型号	量程	灵敏度/ 精度等级
压力传感器	8530C	进口:344.74 kPa	0.78 mV/kPa
	8530B	出口:1 378.96 kPa	0.21 mV/kPa
扭矩仪	CYT-302	100 N·m	0.1 级
电磁流量计	EMF8301	15 m ³ /h	0.5 级
压力变送器	GLP3351	进口:-0.1~0.2 MPa	0.2 级
		出口:0~1.2 MPa	

2 数值计算模型及方法

2.1 离心泵几何模型

研究所采用的 IB 50-32-250 型超低比转数离心泵几何模型如图 2 所示。该泵由进口延伸段、四叶片叶轮、蜗壳和出口延伸段组成。泵的额定流量为 0.003 5 m³/s,额定转速为 2 900 r/min,扬程为 80 m;叶轮进口直径为 50 mm,叶轮出口直径为 250 mm,叶轮出口宽度为 5 mm,蜗壳出口直径为 32 mm。

2.2 压力脉动监测点选取

为了研究离心泵内流场的压力脉动特性,在整个流场中设置了 22 个监测点,如图 3 所示。在蜗壳圆周方向上有 5 个监测点,分别位于隔舌头部和 4

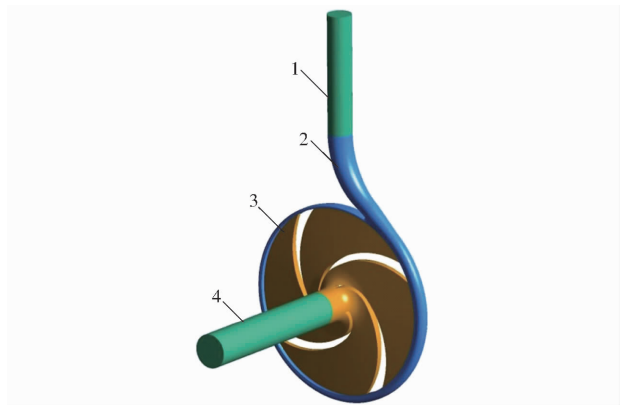


图 2 离心泵几何模型

Fig. 2 Geometry model of centrifugal pump
1. 出口延伸段 2. 蜗壳 3. 叶轮 4. 进口延伸段

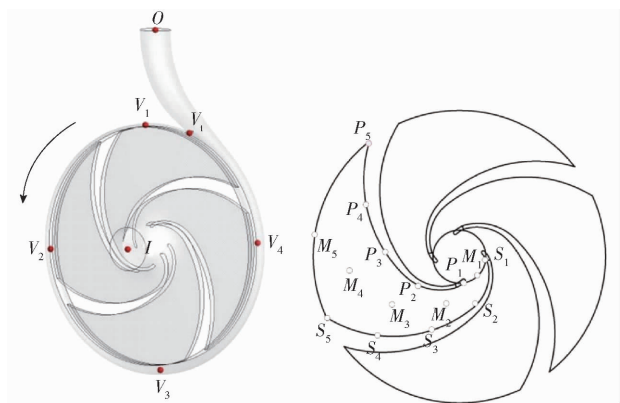


图 3 泵内监测点位置

Fig. 3 Positions of monitoring points in pump

个均匀分布在蜗壳周向的位置,叶片压力侧和吸力侧之间设置了 15 个监测点。最后为了与实验结果进行对比,分别在进口和出口设置了两个监测点。

2.3 数值计算方法

采用 CFX 软件进行数值模拟。控制方程与文献[14]相同,选择 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型^[10]与 Zwart-Gerber-Belamri 空化模型^[18],进口和出口分别以静压和质量流量作为边界条件,固壁边界条件设定为无滑移。

在定常计算时,将动静交界面设置为冻结转子,以收敛的定常计算结果作为非定常计算的初始场,而后在非定常计算中将交界面设置为瞬态冻结转子。空化时,进口处水和气体的体积分数分别设定为 1 和 0。叶轮的旋转周期为 $T=60/n=2.07\times 10^{-2}\text{ s}$, n 为额定转速,非定常模拟的时间步长设定为 $1.15\times 10^{-4}\text{ s}$,即叶片每旋转 2° 为 1 个时间步长。

为了提高数值模拟的稳定性和计算精度,对图 2 所示的几何模型采用混合结构网格划分,并对叶片表面和隔舌区域进行局部加密。为保证数值模拟的计算效率和可靠性,进行了网格无关性验证,各计算域的网格数如表 2 所示。以相对扬程及效率的

误差均小于 1% 时的网格数作为网格无关解,依次以网格方案 1、2 作为基准,经过计算对比可知,方案 2 作为基准时,在网格加密过程中相对扬程及效率的误差均已小于 1%,因此最终采用网格方案 2 进行数值计算,其总网格单元数为 1 902 327。

表 2 网格无关性验证计算域网格数及相对扬程和相对效率

Tab.2 Independence test of different grids together with relative head and relative efficiency

位置	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
进口延伸段	158 712	250 656	319 060	403 520	519 294
叶轮	425 304	846 815	1 329 384	2 304 854	3 167 066
出口延伸段	105 720	226 629	224 352	330 885	376 940
蜗壳	409 873	578 227	715 534	884 614	1 066 468
总网格数	1 099 609	1 902 327	2 588 330	3 923 873	5 129 768
相对扬程	1.010 10	1	0.993 79	0.999 81	1.003 87
相对效率	0.995 83	1	1.006 65	0.993 01	0.993 26

3 计算结果与分析

3.1 空化性能分析

在已有空化研究基础上^[19-21],通过实验和数值模拟分别研究了 IB 50-32-250 型超低比转数离心泵的空化特性,得到额定流量下的空化性能曲线如图 4(图中虚线与曲线的交点分别表示扬程下降约 1%、2% 与 3% 的点)所示。可以看出,数值模拟和实验得到的空化性能曲线总体趋势基本相同,随着有效汽蚀余量的减少,离心泵的扬程先保持不变,然后开始下降,并且当有效汽蚀余量减小到一定程度时扬程发生急剧下降。两条曲线在相同有效汽蚀余量下扬程的最大误差小于 2%,因此可认为本文选取的数值模拟方法较为可靠,从而为进一步分析空化对压力脉动的影响打下了基础。

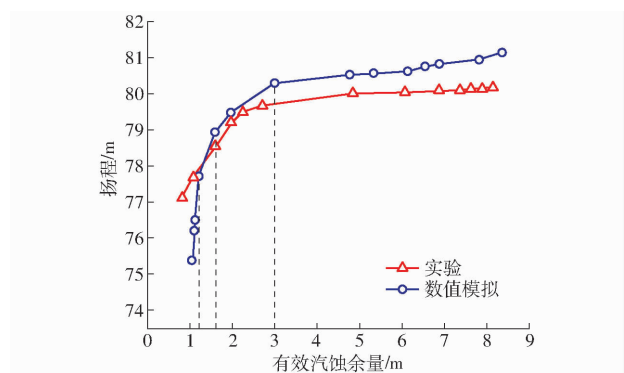


图 4 实验与数值模拟的空化性能曲线

Fig. 4 Cavitation performance curves of experiments and simulation

3.2 不同空化工况下叶轮内空泡分布

当有效汽蚀余量减小到临界值时,离心泵的扬

程迅速下降,这是由于叶轮进口附近的空化导致了叶轮做功能力显著降低。图 5 是额定流量不同有效汽蚀余量下气体体积分数为 0.1 时的空泡分布图,结合图 4 中的离心泵空化性能曲线,容易发现空泡首先在叶轮进口吸力面附近产生,随着有效汽蚀余量的减小,空泡沿吸力面低压区逐渐积聚并延伸到出口和压力面。当有效汽蚀余量为 1.58 m 时,因空化区域较小而仅对流场产生微小影响,因此泵性能几乎没有变化。当有效汽蚀余量降低到临界值 (1.19 m) 时,整个流道中充满了空泡,多种由空化所引发的流体动力学效应破坏了泵内流动的连续性,从而导致严重的能量损失,造成扬程的急剧下降。

3.3 空化对不同位置处压力脉动特性的影响

为简化处理,对旋转频率和叶片通过频率进行无量纲化,分别为转频 f_i (48.33 Hz) 与叶频 f_p (193.33 Hz)。

3.3.1 叶轮压力脉动频域特性

图 6(图中 f 表示频率, p 表示压力)和图 7 分别为叶轮和蜗壳监测点在未空化(有效汽蚀余量为 2.98 m)、空化初生(有效汽蚀余量为 1.58 m)和临

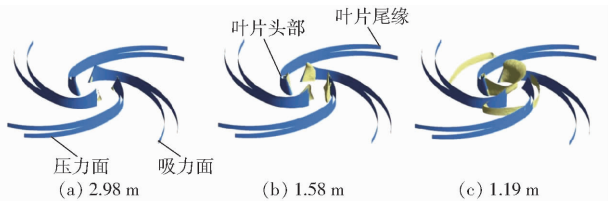


图 5 不同有效汽蚀余量下气体体积分数为 0.1 时的空泡分布图

Fig. 5 Bubble distribution at vapor volume fraction of 0.1 with different NPSHa

界空化(有效汽蚀余量为 1.19 m)时的频域图。

根据图 6 可知,在未空化时,叶轮各监测点压力脉动的主频都是转频及其倍频,随着空化的发展,叶轮各监测点在有效汽蚀余量为 1.58 m 和 1.19 m 时的压力脉动主频仍为转频及其倍频,但低于 1 倍转频区域内的低频压力脉动越来越多,且这种低频脉动逐渐增强。这表明空泡群的形成和破坏会产生低频及其宽频压力脉动。当空化发展到监测点在整个叶轮旋转周期内都处于空化区内部(如 S_1 点)时,该处压力变为饱和蒸气压且压力脉动衰减为零。此外,当有效汽蚀余量为 1.19 m 时,叶轮进口附近处 1/6 倍转频的幅值超过转频幅值成为主频。这是因

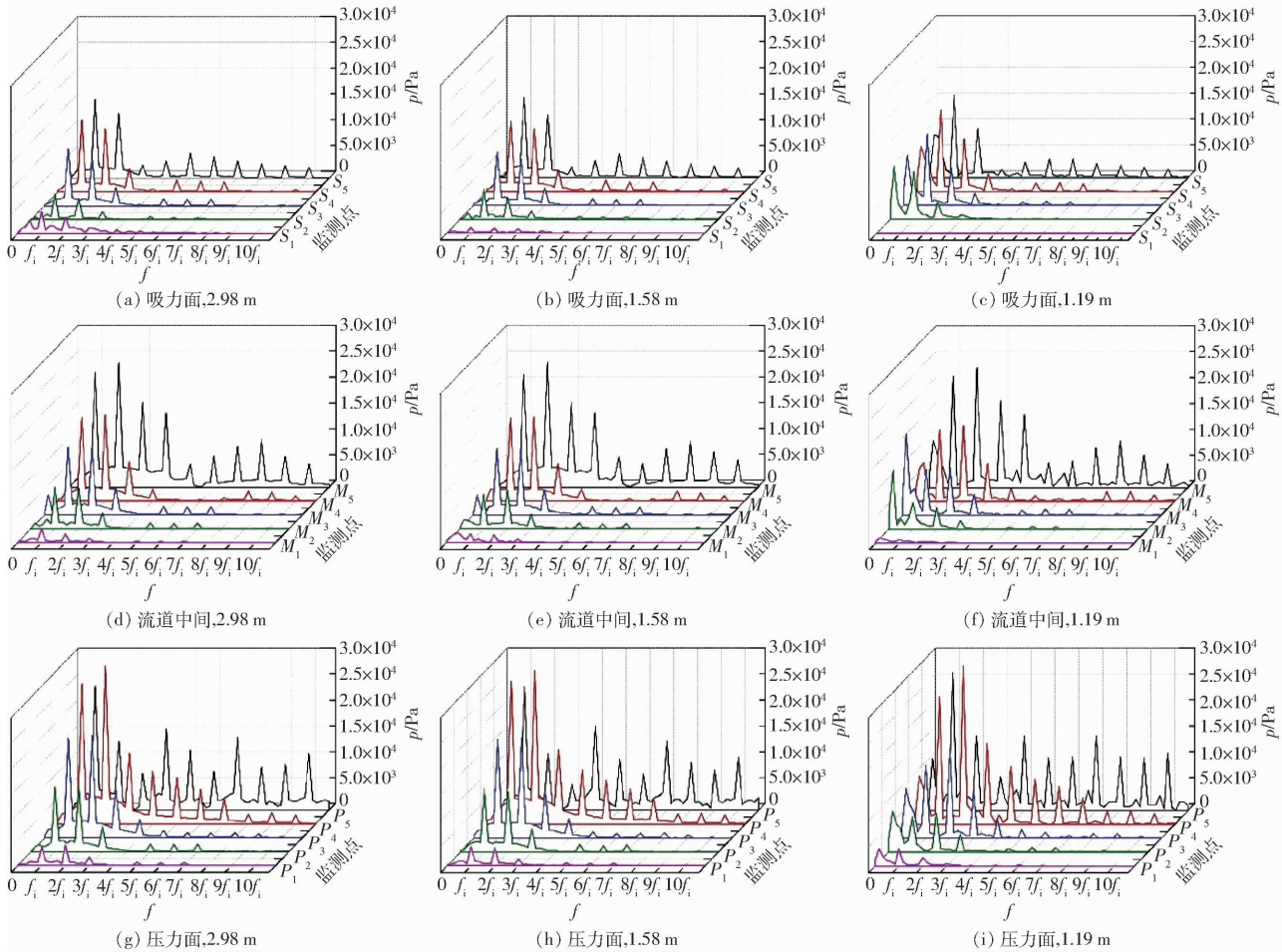


图 6 不同空化程度下叶轮各监测点的压力脉动频域图

Fig. 6 Pressure fluctuation of monitors at impeller by frequency domain method under different cavitation conditions

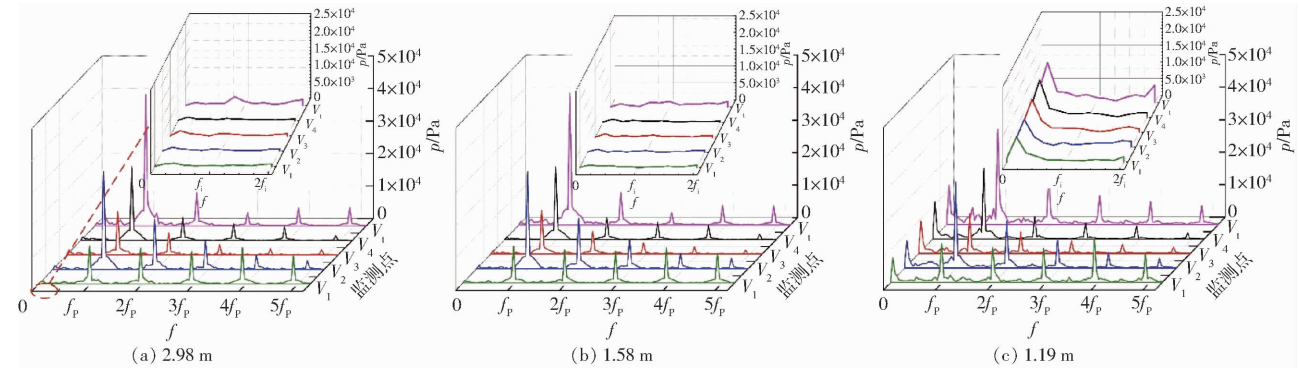


图 7 蜗壳内监测点的压力脉动频域图

Fig. 7 Pressure fluctuation frequency characteristics of monitoring points in volute

为空化的产生削弱了叶轮的做功能力,使得进口附近压力脉动的转频幅值下降,同时由空泡周期性溃灭所产生的不稳定流动使叶片头部的流动结构变得更加复杂,导致该特征低频脉动逐渐增强并成为主频。

未空化时,在同一半径处,吸力面、流道中间及压力面的压力脉动变化规律相似,其主频都为转频及其倍频,但主频幅值依次增大。随着空化的发展,吸力面、流道中间及压力面都出现了低于 1 倍转频的低频压力脉动,且压力面进口处的低频及其宽频压力脉动强度明显大于流道中间及吸力面。

3.3.2 蜗壳压力脉动频域特性

图 7 比较了蜗壳内各监测点在有效汽蚀余量为 2.98、1.58、1.19 m 时的压力脉动频域特性。在未空化时,蜗壳内压力脉动的主频是叶频及其倍频。空化初生时,各监测点的压力脉动仍与叶频有关,且隔舌附近 V_1 点的主频幅值最大,这表明叶片和蜗壳之间的动静干涉作用仍是蜗壳内流体压力变化的主

要诱因。随着有效汽蚀余量的减小,压力脉动主频幅值降低且低频脉动加剧。与叶轮内的监测点类似,在临界空化时,1/6 倍转频成为蜗壳中各监测点幅值较大的次频。

3.3.3 叶轮压力脉动幅值特性

图 8 给出了不同空化程度下叶轮内各监测点的压力脉动最大幅值。可以看出,无论在何种空化程度下,压力脉动的幅值从进口到出口都逐渐增大,并且在同一半径时,吸力面的脉动幅值最小而压力面的脉动幅值最大。在有效汽蚀余量逐渐减少的过程中,由于气体的积累干扰了流场的连续性,削弱了叶片的做功能力,导致压力脉动幅值减小。与有效汽蚀余量为 2.98 m 时相比,在空化发生(有效汽蚀余量为 1.58 m)时, S_2 、 M_5 和 P_4 监测点的压力脉动幅值增加,其他监测点的幅值减小;在临界空化(有效汽蚀余量为 1.19 m)时,只有 S_2 、 P_4 和 P_5 监测点的幅值增加。

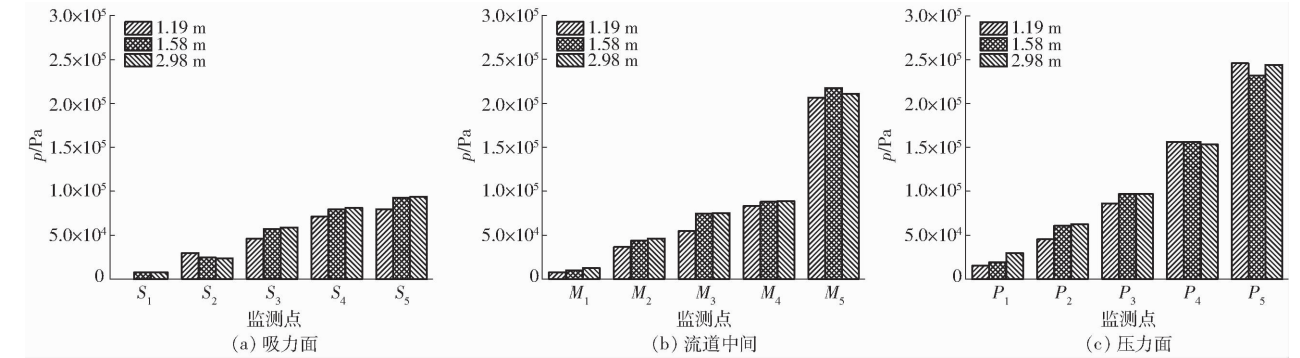


图 8 不同空化程度下叶轮内压力脉动最大幅值

Fig. 8 Maximum pressure fluctuation amplitude of impeller under different cavitation conditions

总体来说,叶轮通道内的压力脉动与空化流场的发展有关,在空化发生时,进口附近的压力脉动幅值变化最明显。从图 8 可以看出,在临界空化时,吸力面 S_1 点的压力脉动幅值降至 0 Pa;流道中间 M_1 点压力脉动幅值变为非空化时(有效汽蚀余量为 2.98 m)的 62.40%;压力面 P_2 点压力脉动幅值变化最大,为非空化时的 72.59%。

叶片头部吸力面上的附着型空泡位置随时间基本不变,所以叶轮进口附近压力脉动幅值下降程度最严重,但是随着叶轮的旋转,叶片头部产生两相流动并向出口运动,使空化尾缘的压力脉动幅值增大(在有效汽蚀余量为 1.19 m 时, S_2 中压力脉动幅值增加最为明显,比未空化时增加了 25.99%)。远离空化区域的叶轮出口处压力脉动幅值下降相对较

慢,但是在 P_4 和 P_5 监测点压力脉动幅值出现略微增加(分别比有效汽蚀余量为 2.98 m 时增加了 1.57% 和 0.90%,这可能是由于空化流的干扰导致出口附近流场比未空化时的湍流程度更强)。

在空化发展过程中,由于蜗壳流动通道的不对称结构,叶轮中的空泡也呈现不对称分布。当叶轮旋转时,叶轮流道周期性地经历不对称的蜗壳结构,导致了空化区域的周期性变化。图 9 为压力面和吸力面上的气体体积分数变化曲线,表明在不同的旋转角度,空化边缘的位置变化明显,且在吸力面上的变化尤为显著。在叶轮旋转期间, S_1 点处于空化区域内, S_2 点处于空化区域的边缘,导致了 S_2 处的压力脉动幅值较大,这与图 8 的现象相对应。

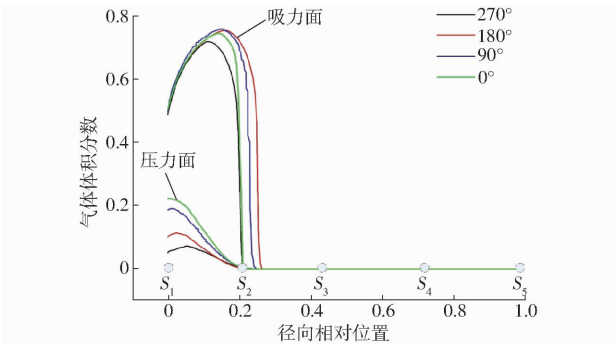


图 9 流体中气体体积分数

Fig.9 Volume fraction of vapors in flow

3.3.4 蜗壳及泵进出口压力脉动幅值特性

表 3 为泵进口与出口、蜗壳各监测点,在有效汽蚀余量为 2.98、1.58、1.19 m 时的压力脉动最大幅值。通过对不同位置处的压力脉动进行比较,可以发现在任何空化条件下进口处的压力脉动最小。在蜗壳的圆周方向上,受动静干涉作用的影响,隔舌附近的压力脉动最强,距隔舌最远的 V_3 点处压力脉动最弱。当空化发生时,进口位置的压力脉动幅值变化最明显,其初生空化点和临界空化点的压力脉动幅值分别约为有效汽蚀余量为 2.98 m 时的 5.09 倍和 10.42 倍。随着空化的发展,出口位置的压力脉动幅值也随之增大,但增长速率明显小于进口。蜗壳内大多数测点的压力脉动幅值也随着空化的发展而增大。与有效汽蚀余量为 2.98 m 时相比,所有监测点的幅值在初生空化时均增大,且 V_1 点的幅值变化最明显,增加了 6.73%。在临界空化时,除 V_2 和 V_1 点外,各监测点的压力脉动幅值均呈现不同程度的增长,且 V_3 点的幅值变化最明显,约为有效汽蚀余量为 2.98 m 时的 1.24 倍。

从表 3 可以看出,与有效汽蚀余量为 2.98 m 时的脉动幅值相比, V_1 点在有效汽蚀余量为 1.58 m 时脉动幅值显著增加,并且在有效汽蚀余量为 1.19 m

时的脉动幅值显著降低,而蜗壳上其他点的变化情况却明显不同。为了分析这种现象,图 10 给出了两个空化阶段隔舌附近的流线分布,从中可以看出,当有效汽蚀余量为 1.58 m 时,隔舌周围出现涡旋,涡旋的不稳定运动加剧了附近的压力脉动。当有效汽蚀余量为 1.19 m 时,隔舌附近的涡旋变小且涡旋中心向上游移动,隔舌头部附近的流线曲率减小,导致了 V_1 点的压力脉动幅值降低。

表 3 不同空化工况下静止监测点的压力脉动最大幅值

Tab.3 Maximum pressure fluctuation amplitude of stationary monitors under different cavitation conditions

监测点	有效汽蚀余量/m		
	2.98	1.58	1.19
进口	260	1 323	2 710
出口	102 597	107 606	133 531
V_1	101 959	102 830	120 048
V_2	109 079	112 815	110 369
V_3	50 987	53 534	62 998
V_4	66 337	66 772	76 741
V_t	110 517	117 952	104 117

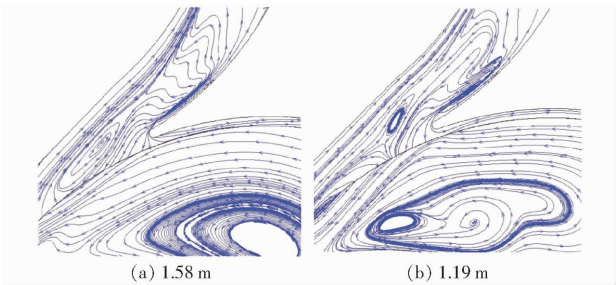


图 10 有效汽蚀余量为 1.58 m 与 1.19 m 时隔舌附近流线图

Fig.10 Streamline near tongue when NPSHa was 1.58 m and 1.19 m

3.4 压力脉动实验验证

为验证非定常数值模拟的可靠性,在图 1 所示的离心泵水力空化实验台上安装了传感器和信号采集器。在不同工况下测量泵进口和出口处的压力信号,并与相应位置的数值模拟结果进行比较。

图 11 是不同空化程度下各监测点的压力脉动频域图。可以看出,实验所得的压力脉动主频特性与数值模拟结果基本一致,出口点的主频接近于叶频,虽然进口点几乎不受隔舌的影响,但主频主要与转频有关,且伴随着大量的随机脉动。随着空化的发展,所有监测点低于叶频的宽频随机脉动逐渐增多,这与数值模拟的结果一致。

表 4 给出了通过数值模拟和实验测量获得的压力脉动最大幅值。数值模拟的压力脉动幅值特性与实验结果基本一致,但进口处的实验测量结果与模

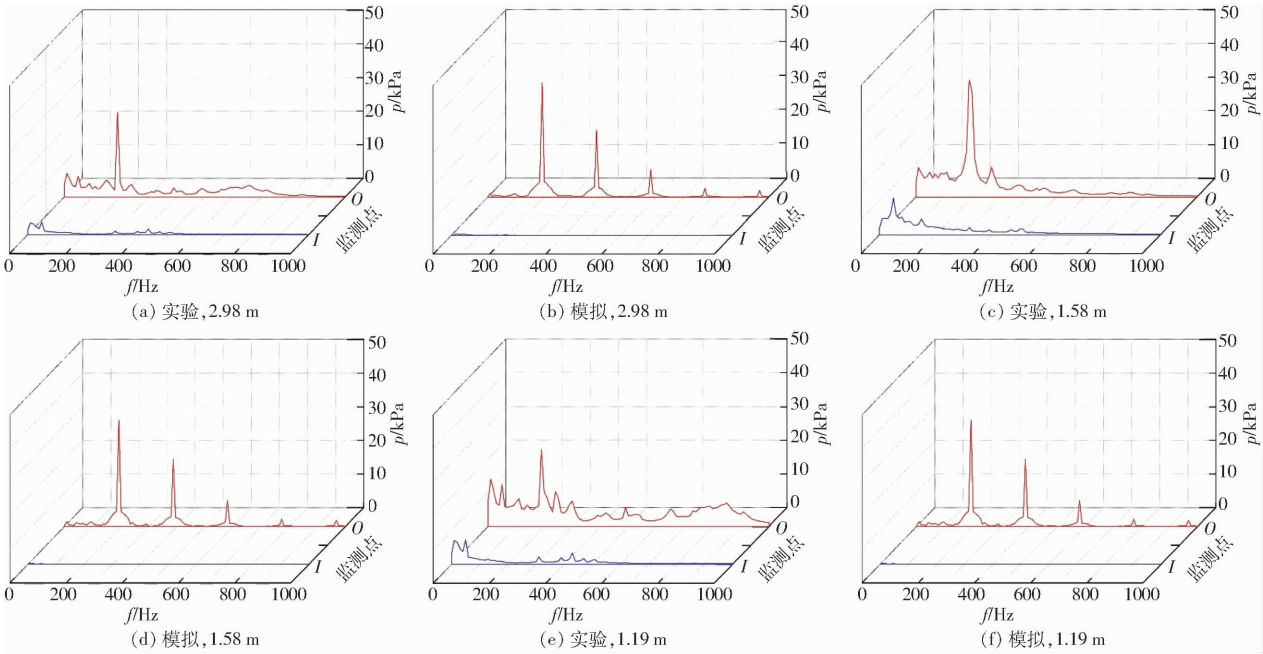


图 11 不同空化程度下泵进出口的压力脉动频域图

Fig. 11 Pressure fluctuation frequency domain of pump inlet and outlet under different cavitation conditions

表 4 空化工况下数值模拟与实验所得压力脉动幅值对比

Tab.4 Pressure fluctuation amplitude comparison of simulation and test under cavitation condition Pa

空化工况	监测点	数值模拟	实验
非空化	进口	260	446
	出口	102 597	106 753
扬程下降	进口	1 323	1 479
	出口	107 606	93 203
临界空化	进口	3 309	3 937
	出口	137 536	122 852

拟结果的相对偏差较大,这主要是因为实验受到管道、地基振动和环境扰动的影响,导致进口处的压力脉动比理想条件下的数值模拟结果偏大。

4 结论

- (1)空化工况下,蜗壳流道的不对称结构使叶轮内空泡区域的分布存在明显不对称性,并且叶轮周期性的旋转导致了空化区域也呈周期性变化。
- (2)无空化时,叶轮内压力脉动主频为转频及其倍频,沿流道从进口到出口、相同半径上从吸力面

- 到压力面,压力脉动强度递增。蜗壳内压力脉动主频为叶频及其倍频,其主要受叶轮-蜗壳动静干涉作用的影响,且离隔舌越近脉动越强。
- (3)随着空化的发展,泵内各区域低于转频的低频压力脉动增强,且其宽频随机脉动加剧。临界空化时,叶轮进口附近的压力脉动主频由转频变为1/6倍转频;蜗壳及泵出口处的压力脉动主频仍为叶频,但1/6倍转频成为幅值较大的次频。该特征频率产生的原因是空化削弱了叶轮的作功能力,使得进口附近压力脉动的转频幅值下降,同时由空泡周期性溃灭所产生的不稳定流动加剧了进口附近的流动复杂程度,导致该特征低频脉动增强。
- (4)空化的发展对离心泵内各区域压力脉动的幅值特性也有较大影响。叶轮内大多数监测点的压力脉动幅值降低,其主要原因是附着型空泡在一定程度上削弱了流道内的压力脉动。但在空化区边缘附近,由于受周期性变化的空化流影响,压力脉动幅值增大。在泵进出口以及蜗壳内的大部分监测点,由于空化的发生对流场造成了扰动,流场中的二次流导致旋涡增多,从而使压力脉动幅值增大。

参 考 文 献

[1] 杨军虎,赵万勇,李金平. 极低比转速叶轮内流体的流动分析和叶轮的设计[J]. 流体机械, 2001, 29(7): 20-22. YANG Junhu, ZHAO Wanyong, LI Jinping. Flow analysis of the impeller in centrifugal pump with very-low specific speed[J]. Fluid Machinery, 2001, 29(7): 20-22. (in Chinese)

[2] 赵伟国,潘绪伟,宋启策,等. 叶片进口边穿孔对离心泵空化性能的影响[J]. 排灌机械工程学报,2019,37(6):461-468. ZHAO Weiguo, PAN Xuwei, SONG Qice, et al. Effect of blade perforation near inlet edge on cavitation performance of centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2019,37(6): 461-468. (in Chinese)

- [3] WANG Yong, LIU Houlin, LIU Dongxi, et al. Application of the two-phase three-component computational model to predict cavitating flow in a centrifugal pump and its validation[J]. *Computers & Fluids*, 2016, 131: 142 – 150.
- [4] 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. WANG Yong, LIU Houlin, YUAN Shouqi, 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)
- [5] CUDINA M. Detection of cavitation phenomenon in a centrifugal pump using audible sound[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2003, 17(6): 1335 – 1347.
- [6] JOHANN F G. Centrifugal pumps[M]. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [7] JORGE L P, JOSE G, JOAQUIN F. The effect of the operating point on the pressure fluctuations at the blade passage frequency in the volute of a centrifugal pump[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(3): 784 – 790.
- [8] 陈杰, 王勇, 刘厚林, 等. 超低比转数离心泵的内部流动及非定常特性[J]. *排灌机械工程学报*, 2018, 36(5): 377 – 383. CHEN Jie, WANG Yong, LIU Houlin, et al. Internal flow and analysis of its unsteady characteristics in centrifugal pump with ultra-low specific-speed[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2018, 36(5): 377 – 383. (in Chinese)
- [9] ZHANG Yongxue, ZHANG Jinya, HOU Hucan. Study on pressure pulsation in the volute of a centrifugal pump by large eddy simulation[C]// ASME 2014 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2014.
- [10] HOU Hucan, ZHANG Yongxue, LI Zhenlin, et al. A CFD study of IGV vane number on hydraulic characteristics and pressure pulsation of an IS centrifugal pump[J]. *Journal of Vibroengineering*, 2017, 19(1): 563 – 576.
- [11] 张宁, 杨敏官, 高波, 等. 低比转速离心泵压力脉动频谱特性的试验研究[J]. *工程热物理学报*, 2017, 38(9): 60 – 64. ZHANG Ning, YANG Minguan, GAO Bo, et al. Pressure spectrum characteristics of a low specific speed centrifugal pump [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2017, 38(9): 60 – 64. (in Chinese)
- [12] LIU Houlin, WANG Jian, WANG Yong, et al. Influence of the empirical coefficients of cavitation model on predicting cavitating flow in the centrifugal pump[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2014, 6(1): 119 – 131.
- [13] SINGHAL A K, ATHAVALE M M, LI Huiying, et al. Mathematical basis and validation of the full cavitation model[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(3): 617 – 624.
- [14] TAN Lei, ZHU Baoshan, WANG Yuchuan, et al. Numerical study on characteristics of unsteady flow in a centrifugal pump volute at partial load condition[J]. *Engineering Computations*, 2015, 32(6): 1549 – 1566.
- [15] 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/OL]. *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 centrifugal pump[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(5): 84 – 90. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140513&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.013. (in Chinese)
- [16] 李彦军, 陈超, 裴吉, 等. 不同空化工况下轴流泵装置压力脉动试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(12): 158 – 164. LI Yanjun, CHEN Chao, PEI Ji, et al. Experiment on pressure fluctuation of axial flow pump system under different cavitation conditions[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(12): 158 – 164. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181220&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.020. (in Chinese)
- [17] HUANG Renfang, JI Bin, LUO Xianwu, et al. Numerical investigation of cavitation-vortex interaction in a mixed-flow waterjet pump[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(9): 3707 – 3716.
- [18] JI Bin, LUO Xianwu, WU Yulin, et al. Numerical investigation of three-dimensional cavitation evolution and excited pressure fluctuations around a twisted hydrofoil[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(7): 2659 – 2668.
- [19] 张永学, 宋鹏飞, 许聪, 等. 预旋调节对离心泵空化影响的试验与数值模拟[J/OL]. *农业机械学报*, 2014, 45(9): 131 – 137. ZHANG Yongxue, SONG Pengfei, XU Cong, et al. Experimental and numerical investigations of cavitation in a centrifugal pump with pre-whirl regulation[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(9): 131 – 137. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140922&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.09.022. (in Chinese)
- [20] SONG Pengfei, ZHANG Yongxue, XU Cong, et al. Numerical studies on cavitation behavior in impeller of centrifugal pump with different blade profiles[J]. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2015, 8(2): 94 – 101.
- [21] BACHERT R, STOFFEL B, DULAR M. Unsteady cavitation at the tongue of the volute of a centrifugal pump[J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2010, 132(6): 061301.