

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtk.2019.0024

周颖,郑源,汪昊蓝,等.不同空化条件下轴流泵反向发电压力脉动特性研究[J].南水北调与水利科技,2019,17(1):178-185.
ZHOU Y,ZHENG Y,WANG H L,et al.Study on pressure fluctuation characteristics of axial flow pump in reverse power generation under different cavitation conditions[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2019,17(1):178-185.(in Chinese)

不同空化条件下轴流泵反向发电压力脉动特性研究

周颖,郑源,汪昊蓝,唐魏,陈明昭,赵梦响,亓藏才让

(河海大学 水利水电学院,南京 210098)

摘要:以南水北调某泵站为模型,对该泵站大型轴流泵反向发电发生空化条件现象进行全流道数值模拟。对反向发电工况下空化现象进行定常与非定常研究,并与试验结果做比较,得出了水泵反向发电时发生不同空化条件下的气泡体积分布规律,并预测了叶片发生空化的发展特性。在反向发电工况下对三个监测面的压力脉动进行研究,得出压力脉动幅值在导叶进口处最小,转轮出口处幅值最大,约为转轮进口处7倍,水流受转轮转动影响严重,主频为转频。不同空化数下转轮前后的压力脉动幅值随着空化系数减小而增大,压力脉动主频不受空化系数影响。空化数越小,叶片受到的径向力减小,轴向力增加,加剧转轮的不稳定性。为确保轴流泵反向发电运行的稳定与高效,应使得装置在较高的空化系数下运行。

关键词:轴流泵;反向发电;压力脉动;叶频;空化

中图分类号:TH3;TK7 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on pressure fluctuation characteristics of axial flow pump in reverse power generation under different cavitation conditions

ZHOU Ying,ZHENG Yuan,WANG Haolan,TANG Wei,CHEN Mingzhao,ZHAO Mengshang,GAZANG Cairang
(School of Water Conservancy and Hydropower Engineering,Hohai University,Nanjing 210098,China)

Abstract: Taking a pumping station of South-to-North Water Transfer Project as a model, we conducted full-channel numerical simulation of the cavitation conditions of large-scale axial flow pumps in the pumping station during reverse power generation. We studied the steady and unsteady cavitation phenomena under the condition of reverse power generation, and compared the experimental results. We obtained the bubble volume distribution law under different cavitation conditions, and predicted the development characteristics of blade cavitation. The pressure fluctuation of the three monitoring surfaces was studied under the condition of reverse power generation. The results showed that the pressure fluctuation amplitude was the smallest at the guide blade inlet and the largest at the runner outlet, which was about 7 times of that at the runner inlet. The water flow was seriously affected by the runner rotation and the main frequency was the frequency of the runner. The amplitude of pressure fluctuation before and after the runner would increase with the decrease of the cavitation coefficient under different cavitation numbers, and the main frequency of pressure fluctuation was not affected by the cavitation coefficient. The smaller the cavitation number, the less the radial force of the blade, the greater the axial force, increasing the instability of the runner. To ensure the stable and efficient operation of the axial flow pump in reverser power generation, the device should be running under a high cavitation coefficient.

Key words: axial flow pump; reverse power generation; pressure pulsation; blade frequency; cavitation

收稿日期:2018-11-03 修回日期:2018-11-30 网络出版时间:2018-12-12

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20181210.1506.004.html>

基金项目:国家自然科学基金(51579080)

作者简介:周颖(1995—),女,江苏盐城人,主要从事流体机械及水利水电工程研究。E-mail:1007422002@qq.com

通信作者:郑源(1964—),男,山东日照人,教授,博士生导师,主要从事流体机械及水利水电工程研究。E-mail:zhengyuan@hhu.edu.cn

在雨量充沛时,部分泵站可利用余水进行反向发电,获得一定的经济效益。泵站采用变频反向发电可使水泵处于水轮机工况的高效区运行,且水泵机组本身不需要增加辅助设备能有效节约成本。本文以南水北调某泵站为原型,进行全流道数值模拟,研究该轴流泵在进行反向发电时的压力脉动规律与空化特性。前人对于水泵的压力脉动规律及空化特性研究广泛,吴楠锋等^[1]对从蜗壳进口到尾水管进行全流道非定常湍流计算,研究水轮机全流道的内压力脉动产生和传播原理;邵杰等^[2]利用全流道数值模拟预测原型和模型水轮机的压力脉动性能,进行结果对比;钱忠东等^[3]通过数值模拟与试验,研究机组三种工况下压力脉动规律;吴广宽等^[4]采用全流道数值模拟的方法进行非定常数值模拟,分析水泵水轮机内部压力脉动特性;常书平^[5]等运用数值模拟混流泵在轻微空化,临界空化及严重空化三种情况下的空化特性;李景悦^[6]等研究了混流泵在多工况下的非定常空化现象,揭示了空化现象的发展规律;黄剑峰^[7]等对混流泵模型进行全流道数值模拟,分析了水轮机流道内空化发生的部位与程度;刘东喜等^[8]对双吸泵的空化现象进行研究,揭示空化现象发展规律。前人对于轴流泵的压力脉动特性规律研究较多,对水轮机的空化性能及空化发展研究广泛,但对于水泵在不同空化系数下反向发电的压力脉动规律及空化特性研究很少。本文运用CFX全数值模拟,研究轴流泵在变频反向发电时的压力脉动分布规律,并对空化现象展开进行定常与非定常研究,可为大型轴流泵变频反向发电的安全高效运行提供一定的理论参考。

1 数值模拟方法

1.1 模型建立与网格划分

计算模型为全调节立式轴流泵,如图1所示,由进水流道,导叶,转轮及出水流道构成。叶轮直径为2 700 mm,叶片数3片,设计水头为4.7 m。进行变频反向发电时轴流泵导叶安放角为 $+2^\circ$,水泵转速150 r/min,采用变频发电时转速为75 r/min;试验采用南水北调东线工程皂河二站水泵装置模型(TJ04-ZL-06水力模型)进行水力性能研究。因流道结果复杂,采用非结构化网格对流道进行划分^[9],进行网格无关性验证后,选用划分网格方案总数为214万,其中进水流道为27万,转轮处为90万,导叶为75万,出水流道为22万,网格质量在控制在0.3以上。



图1 水泵全流道计算区域

Fig. 1 Full-channel calculation area of the pump

1.2 基本控制方程

流体基本控制方程采用基于 Reynolds 平均的 Navier-stokes 方程^[10],表示为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m u) + \nabla(\rho_m uu) = -\nabla p + \nabla[(\mu_m + \mu_t)\nabla\mu] + \frac{1}{3}\nabla[(\mu_m + \mu_t)\nabla\mu] \quad (1)$$

式中: t 为时间; ρ_m 为混合项的密度; μ_t 为湍流黏性系数; μ_m 为动力黏性系数,按汽、液两相体积分数加权平均后获得; p 为压力; u 为速度矢量。

空化模型采用基于 Reyleigh-Plesset 的方程^[11],表示为

$$\frac{\partial(\rho_v \alpha_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_v \alpha_v u_i)}{\partial x_i} = m^+ - m^- \quad (2)$$

$$m^+ = C_{\text{vapo}} \frac{3r_g(1-\alpha_v)\rho_v}{R_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max(p_v - p, 0)}{\rho_l}} \quad (3)$$

$$m^- = C_{\text{cond}} \frac{3\alpha_v \rho_v}{R_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\max(p_v - p, 0)}{\rho_l}} \quad (4)$$

式中: m^+ , m^- 分别表示单位体积质量蒸发速率和质量凝结速率; p_v 为汽体密度; u_i 为速度分量; α_v 为空泡体积分数; ρ_v 为液体密度,其值为997 kg/m³; r_g 为单位液体所含气核体积分数,其值为 5×10^{-4} ; R_b 为空泡平均半径,其值为 10^{-6} m; p_v 为液体饱和蒸汽压力,其值为3 574 Pa; C_{vapo} 为蒸发项经验系数,其值为50; C_{cond} 为凝结项经验系数,取其值为0.0001。

1.3 边界条件

非定常计算时以定常计算的结果作初场,转轮进出口均设置为压力边界条件。动静交接面设置为瞬态冻结转子类型(transientrotor),选用湍流模型,选取自动壁面函数,在时间域上采用二阶全隐式进行离散。总采样时间为8个周期,设置转轮每转过 3° 即0.006 s为时间步长,设置收敛残差为 10^{-4} ,为保证压力脉动数据的准确性,选取最后两个周期进行压力脉动规律分析^[12]。

1.4 监测点设置

水泵在反向发电时,导叶与转轮处水流变化剧

烈,为研究水流进入导叶至出转轮时的压力脉动变化规律,分别在水泵反向发电工况下的导叶进口,转轮进口及转轮出口三个截面处,设置径向与周向监测点,监测转轮反向发电时的压力脉动。各监测面及径向监测点见图 2^[10]。

将压力脉动值进行傅里叶变换后研究压力脉动频域规律^[11],在分析压力脉动时,引入无量纲的压

力脉动系数 C_P 以消除监测点本身静压值的影响^[13]。

定义压力脉动系数 C_P 为

$$C_P = \frac{P_i - P_{ave}}{P_{ave}} \quad (5)$$

式中: C_P 为无量纲的压力系数; P_i 为监测点静压值(Pa), P_{ave} 为后两个转动周期内静压的平均值(Pa)。

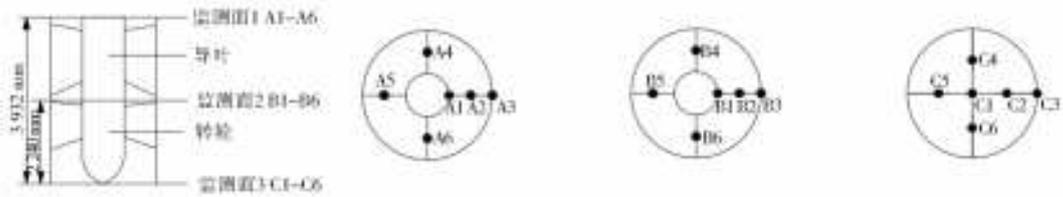


图 2 监测面及监测点示意图
Fig. 2 Schematic diagram of monitoring surfaces and monitoring points

3 计算结果与试验分析

3.1 轴流泵空化试验与定常分析

图 3 为轴流泵反向发电试验在河海大学水力机械多功能试验台,试验台按照 SL 140—2006《水泵模型及装置模型验收试验规程》进行设计与建造,试验综合不确定度 $\leq 0.4\%$ 。试验测得水泵进行反向发电时,叶片安放角为 0 度对应最高效率为 64.45%,数值计算水力效率在 65.5%左右,验证了

数值模拟的准确性。

空化数定义为

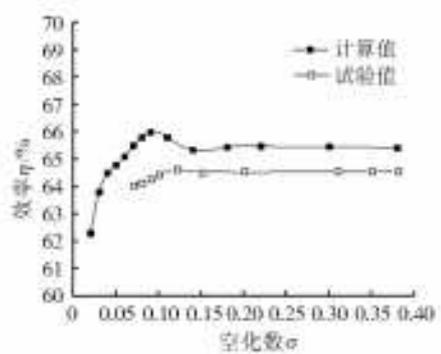
$$\sigma = (P_0 - P_v) / 0.5 \rho v_0^2 \quad (6)$$

式中: P_0 为进口总压(Pa); P_v 为水在 25 °C 时空化压力(Pa); v_0 为进口速度(m/s)。

根据模型试验数据^[14],对轴流泵反向发电的 14 个工况进行数值模拟,图 3(b)为数值模拟结果与试验结果值的对比,其中 σ 为空化数, η 为水力效率。



(a) 水力机械多功能试验台



(b) 异特性对比

图 3 试验台与空化性能曲线
Fig. 3 Test bench and cavitation performance curve

通过不断降低出口处压强以减小空化系数,从模拟水泵在进行反向发电时空化现象产生及发展的过程^[15]。轴流泵在不同空化系数下叶片背面气体体积分数云图,及压力分布见图 4。当空化系数为 0.07 时,因叶片进水边缘侧出现低压区,空化首先出现在叶片进水边缘侧,对转轮边缘侧产生空化破坏;空化系数为 0.05 时,随着转轮背面低压区域的扩散,空泡区域面积增大,逐渐到转轮中部,对叶片边缘及中部区域空化破坏增加;当空化系数为 0.03

时,空化现象严重,叶片背面低压区域进一步增加,空化面积扩散至整个叶片,最高气体体积分数为 0.843。图 5 为不同空化系数下轴流泵发生空化时的气泡分布,随着空化系数降低,空泡区域在转轮背面不断扩大。这与数值模拟结果较好地吻合,验证了空化数值模拟的准确性。

3.2 非定常流动分析

为研究水泵在进行反向发电时空化发生的内在特性,对空化系数为 0.07 时的转轮内部空化现象进

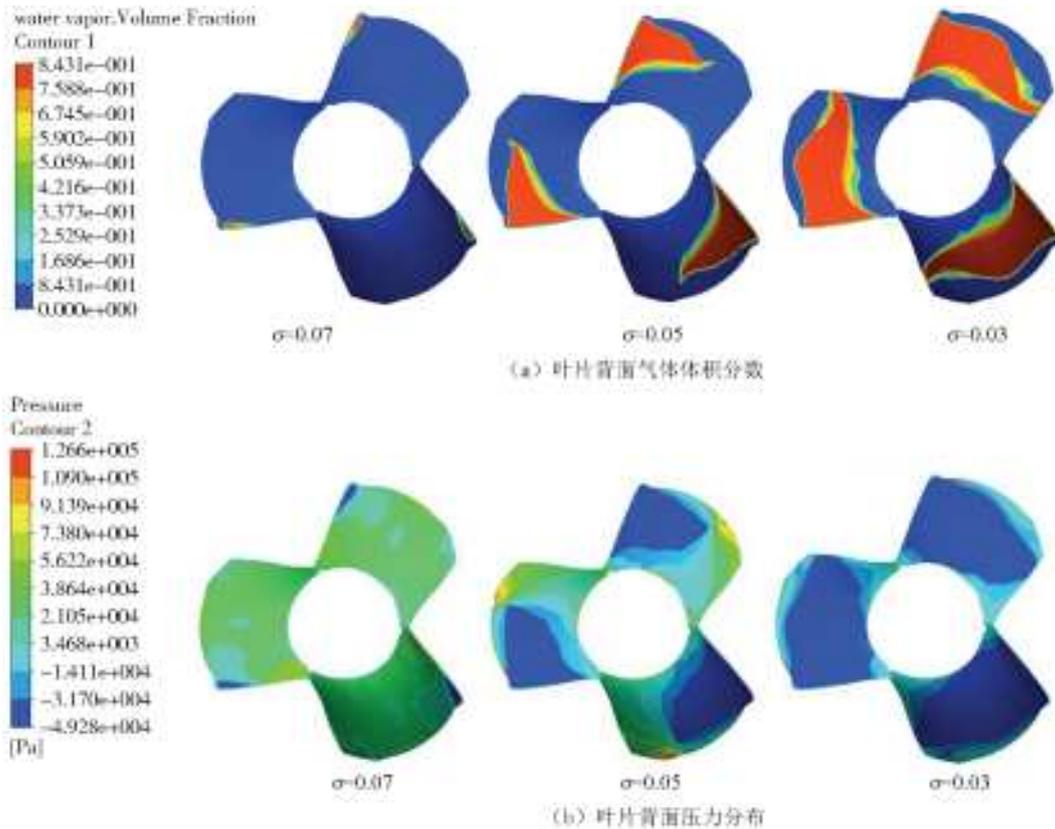


图4 叶片背面气体体积分数与压力分布

Fig. 4 Gas volume fraction and pressure distribution cloud on the back of blades



图5 反向发电空化试验观测结果

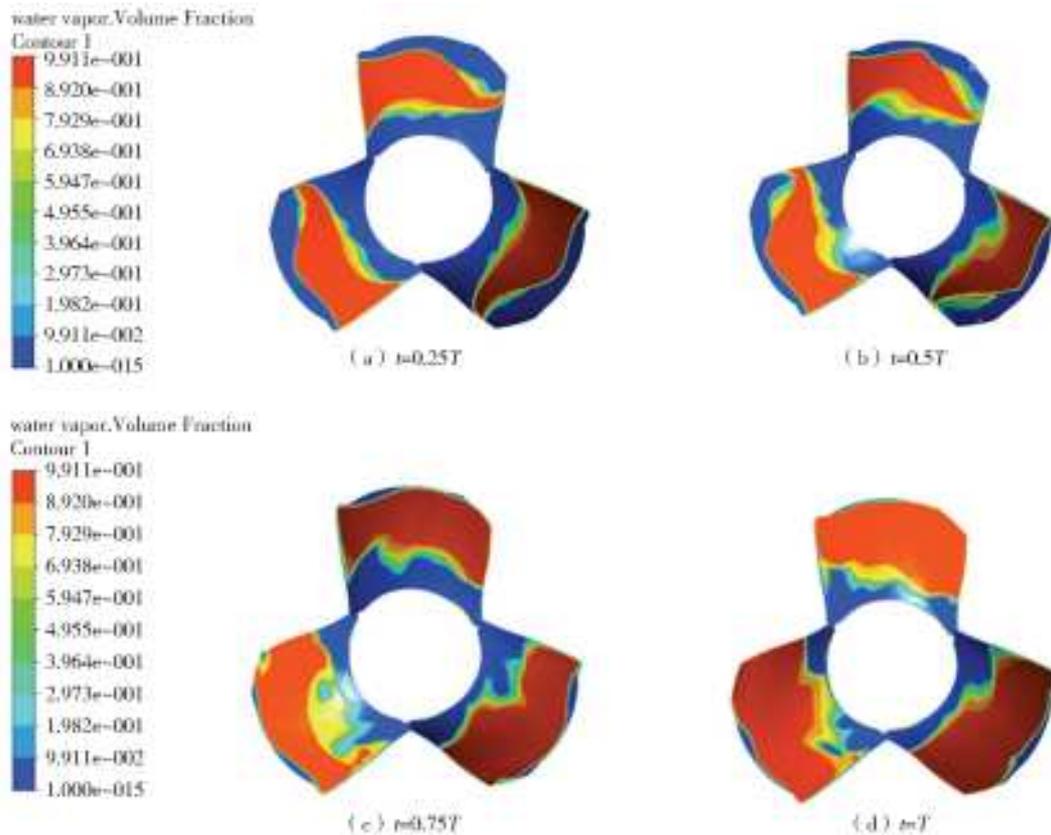
Fig. 5 Test results of reverse power generation cavitation test

行非定常流动分析^[16]。非定常流动分析以定常空化两相流计算结果作为初场,转轮周期 $T=0.4\text{ s}$,时间步长为转轮每转过 1° 所需时间,进行十个周期的非定常运算,设置为 0.001 s 。选取第八个周期内的四个时刻进行空泡变化过程的研究,见图6。图6(a)至6(d)分别表示叶片在 $0.25T$ 、 $0.5T$ 、 $0.75T$ 、 T 在空化系数为 0.03 时的气泡分布。可以看出,在空化系数为 0.03 时,因旋转水流在转轮中部与转轮边缘变化剧烈,产生较大低压区域,空泡从叶片进口处出现,向叶片出口处递减蔓延,此时空泡面积约为叶片整体面积的 60% 。在 $0.5T$ 时,转轮空化面积增大,逐渐向转轮边缘处发展,当 $0.75T$ 时,叶片出口处空化现象严重,逐渐占据出口边缘的 0.667 ,直至时间到达 T 时,转轮空化区域面积达到约 80% ,轮毂处向轮毂处蔓延,空化现象严重,此时流道受气泡

影响,堵塞严重,使得水泵反向发电效率降低。

3.3 不同位置的的压力脉动分析

研究空化系数 $\sigma=0.07$ 时,导叶进口,转轮进口及转轮出口三个截面的压力脉动规律。如图7所示为三个截面监测点的压力脉动频域图。A1, A2, A3 在导叶进口截面径向分布,从径向压力脉动频域图可以看出,水流从进水水道进入导叶分布较均匀,三点的压力脉动系数接近,最大压力脉动系数达 0.008 。A2, A4, A5, A6 四点在导叶进口截面周向分布,从周向压力脉动频域图可以看出,此处水流总体保持均匀,周向出现小部分水流流态不均,出现小部分旋涡, A2, A4, A5 三点的最大压力脉动系数达 0.008 。水流压力脉动周向与径向的监测点频率主要集中在低频,在转频倍数上也存在广泛的压力脉动,因导叶进口截面距转轮较远,水流主频为转频 2.5 Hz ,次频为叶频 7.5 Hz 。

图 6 叶片空泡变化($\sigma=0.07$)Fig. 6 Schematic diagrams of blade cavitation change($\sigma=0.07$)

B1, B2, B3 三点在转轮进口截面,沿轮毂至轮缘依次径向分布。此时水流从导叶进入转轮,受转轮转动影响强烈,受到导叶干扰,水流三点的压力脉动幅值较进入导叶前均明显增大,其中以位于轮缘处 B3 点水流速度变化最为剧烈,其压力脉动至达到 0.03,约为进入导叶前的 4 倍;靠轮毂处水流及中部水流受转轮旋转影响,其压力脉动系数变化较轮毂与轮缘处变化较小, B1, B2 两点压力脉动幅值均达 0.02,约为进入导叶前两倍,压力脉动幅值从轮毂至轮缘依次增大。周向方面,水流从泵装置的导叶流入,呈现不均匀性,水流在 B5 处压力脉动系数最大,达 0.03,其余三点压力脉动幅值达 0.02,均较进导叶前增加。因水流从导叶进入转轮,水流受转轮转动影响严重,压力脉动频率主要集中在低频,主频为叶频 7.5 Hz,次频为转频 2.5 Hz。

转轮出口截面处, C1, C2, C3 纵向分布,水流经过转轮后,水流进一步被扰乱,流态严重不均,三点的压力脉动幅值进一步增大,最大压力脉动幅值达到 0.5,约为进入导叶前的 6 倍。因水流从转轮流出,靠轮毂边缘水流沿轮毂流出,水流变化剧烈,转轮中心 C1 处表现为压力脉动幅值最大,中部 C2 点次之,转轮边缘 C3 处最小。受转轮转动影响严重,

此时水流压力脉动频率主要集中在低频,压力脉动主频仍为叶频 7.5 Hz,次频为转频 2.5 Hz。转轮出口处各点的水流变化剧烈,表现在转轮倍频的压力脉动范围不断增加。

3.4 不同空化系数的压力脉动分析

为进一步研究不同空化数下,水泵反向发电的压力脉动特性,对空化数分别为 0.03, 0.05, 0.07 三个工况进行压力脉动特性分析。如图 8 所示,为转轮进口及出口处径向监测点的压力脉动频域图。因导叶的顺流作用,水流较均匀地流入转轮,三个空化系数下,径向压力脉动总体保持均匀,三点的最大压力脉动系数接近。空化系数为 0.07 时最大压力脉动系数达 0.03,随着空化系数的降低至 0.05 时,此时转轮内空化现象加剧,水流的压力脉动系数也随之上升,最大压力脉动系数达 0.08,接近 $\sigma=0.07$ 时 3 倍。当空化系数降至 0.03 时,转轮内部已发生严重空化,转轮进口及出口处低压区扩大,此时近壁面区域压力接近汽化压力,水流压力变化稳定,最大压力脉动系数反而有所下降。水流受转轮转动影响严重,在转轮前后,水流压力脉动主要集中在低频区域,主频仍然为叶频 7.5 Hz,次频为转频 2.5 Hz。受导叶与转轮间动静干涉影响,还存在叶频及其倍频。

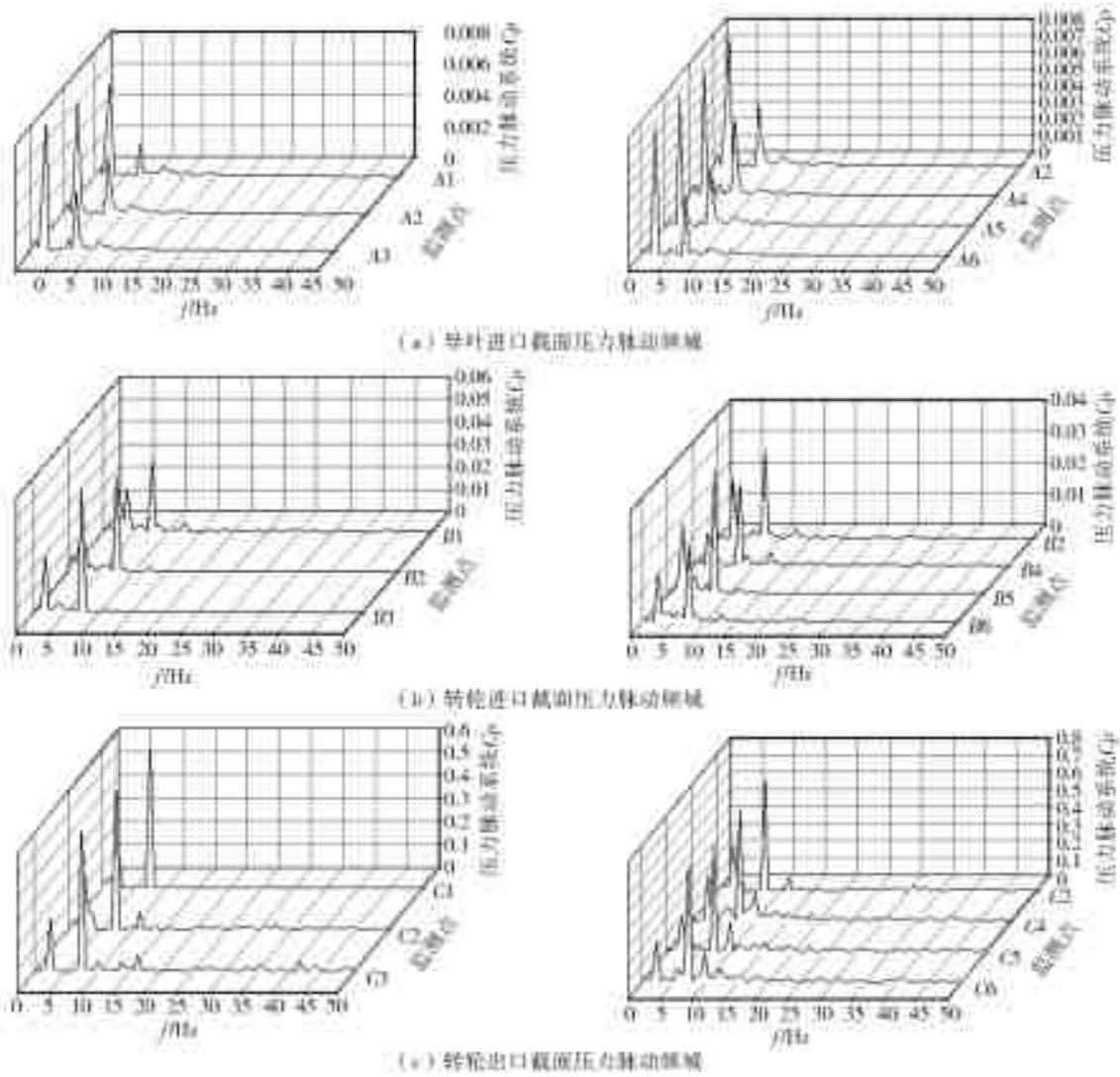


图7 不同位置压力脉动频域($\sigma=0.07$)

Fig. 7 Frequency domain diagrams of pressure fluctuation at different locations ($\sigma=0.07$)

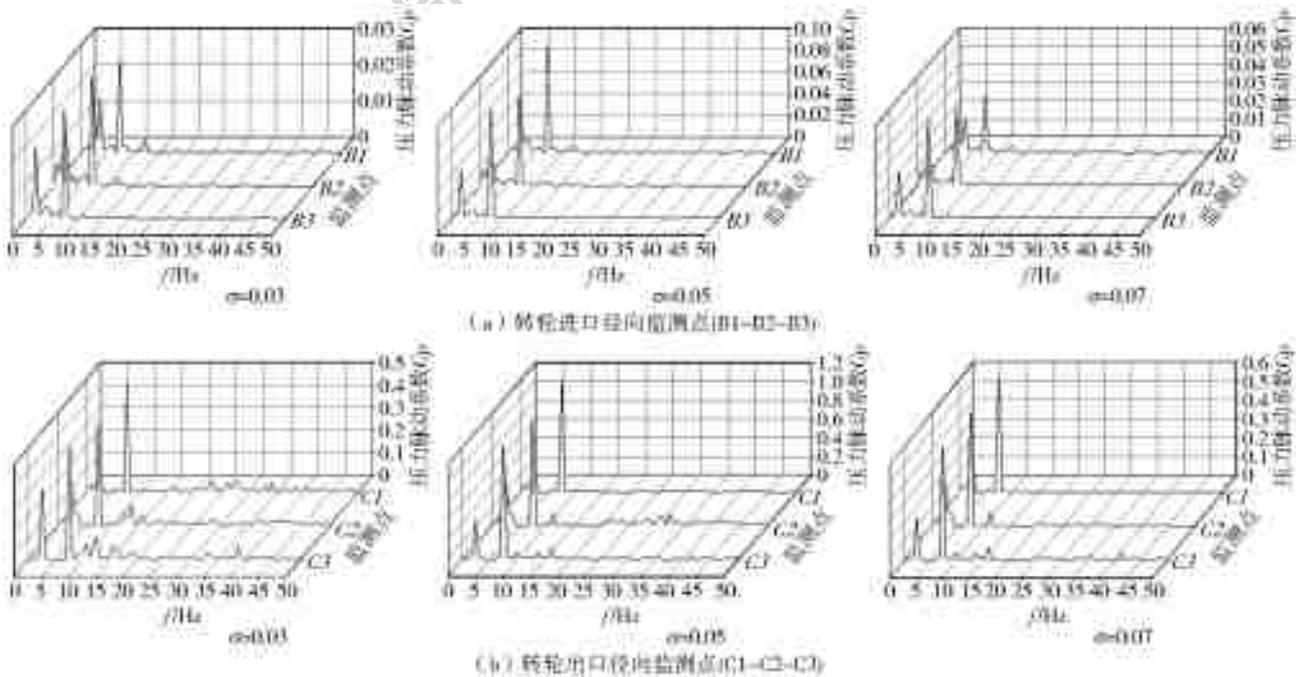


图8 不同空化系数下压力脉动频域

Fig. 8 Frequency domain diagrams of pressure fluctuation under different cavitation coefficients

3.5 不同空化系数下叶片受力分析

当水泵进行反向发电时,转轮主要受到轴向与径向两个方面的水推力^[16]。轴向水推力是由于高低压侧存在水压差产生;径向水推力是由于进口流道主轴扰流作用及导叶与转轮之间动静干涉的影响,使得水流在进入转轮前水力不对称产生。为进一步研究水泵在不同空化数下反向发电转轮受力情况,对转轮受到的径向与轴向水推力进行分析(图 9)。随着空化系数减小,叶片背面气体体积分数不断增加,阻塞水流径向流动,水流流动的圆周性受到干扰,水流进入转轮冲角发生变化,使得叶片径向出力减小,絮乱水流对叶片产生的轴向作用力增加,发电效率下降。同时气泡的产生与溃灭,对叶片产生

空化破坏。根据表 1 可知,空化系数为 0.07 时,转轮径向力最大达到 90.88 N,轴向力最小 6 271.78 N;空化系数为 0.03 时,转轮径向力最小约为 64.05 N,轴向力最小 8 727.21 N。可以看出轴向力随着空化系数的降低,转轮受到的径向合力不断减小,轴向力不断增加。

表 1 不同空化系数下叶轮的受力

Tab. 1 Force on impeller under different cavitation numbers

单位:N				
空化系数	X 方向受力	Y 方向受力	径向合力	轴向力
0.07	63.28	65.23	90.88	6 271.78
0.05	52.90	47.27	70.95	7 283.19
0.03	48.78	41.51	64.05	8 727.21

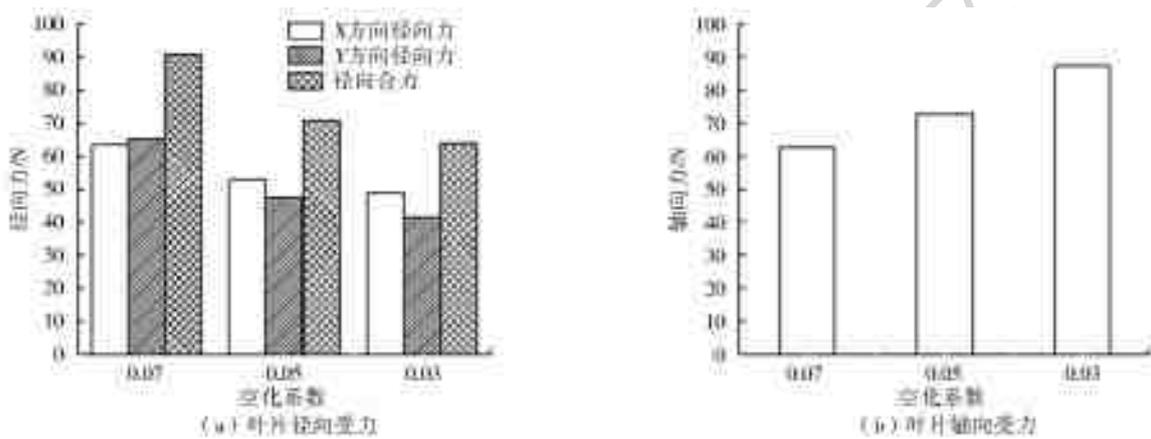


图 9 不同空化系数下轴流泵叶片受力

Fig. 9 Force on blades of axial flow pump under different cavitation coefficients

4 结论

(1)随着空化系数不断减小,叶片空化范围不断增加直至扩散整个叶片,最高气体体积分数为 0.843。非定常空化流分析预测了空化系数在 0.03 时的气泡发展特性,结果表明转轮内空化面积随时间增加,扩散面积达到 80%以上,空泡堵塞大大降低水泵反向发电效率。

(2)该大型轴流泵在进行反向发电时,导叶进口处压力脉动不明显,转轮进口及出口压力脉动呈现较好的规律性,其中转轮出口压力脉动最大,约为转轮进口处的 7 倍,水流受转轮转动影响严重,主频为叶频。

(3)分析不同空化系数下转轮前后压力脉动的变化。压力脉动主频不受空化系数影响,随着空化系数减小,压力脉动幅值增加,且转轮的径向力不断减小,轴向力不断增加,加剧了水泵反向发电的不稳定性,为确保转轮的稳定高效运行,应使得水泵在较高的空化数下运行。

参考文献(References):

[1] 吴培锋,吴玉林,林琳,等.轴流式水轮机三维非定常湍流计算及压力脉动预测[J].工程热物理学报,2006,27(6):956-958. (WU S F, WU Y L, LIN L, et al. Three dimensional unsteady turbulent flow calculation and pressure pulsation prediction for axial flow turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(6): 956-958. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 0253-231X. 2006. 06. 018.

[2] 邵杰,陈铁军,刘树红,等.轴流式原型和模型水轮机的压力脉动相似性分析[J].水力发电学报,2009,28(4): 166-170. (SHAO J, CHEN T J, LIU S H, et al. Similarity analysis of pressure pulsation for axial flow turbine prototype and model turbine[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2006, 27(6): 956-958. (in Chinese))

[3] 钱忠东,陆杰,郭志伟,等.水泵水轮机在水轮机工况下压力脉动特性[J].排灌机械工程学报,2016,34(8): 672-678. (QIAN Z D, LU J, GUO Z W, et al. Pressure pulsation characteristics of pump turbine under water turbine condition[J]. Journal of Drainage and Irrigation

- Engineering, 2016, 34(8): 672-678. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.15.0250.
- [4] 吴广宽, 罗兴铸, 赵强, 等. 水泵水轮机内部压力脉动特性研究[J]. 西安理工大学学报, 2015(3): 265-272. (WU G K, LUO X Q, ZHAO Q, et al. Pressure pulsation characteristics of pump turbines[J]. Journal of Xi'an University of Technology[J]. 2015(3): 265-272. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1006-4710.2015.03.003.
- [5] 常书平, 王永生. 基于 CFD 的混流泵空化特性研究[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(2): 171-175. (CHANG S P, WANG Y S. Study on cavitation characteristics of mixed flow pump based on CFD[J]. Journal of Drainage and Irrigation Engineering, 2012, 30(2) 171-175. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.2012.02.010.
- [6] 李景悦, 赖喜德, 朱李, 等. 多工况下混流泵叶轮非定常空化特性分析[J]. 水力发电学报, 2016, 35(7): 106-111. (LI J Y, LAI X D, ZHU L, et al. Analysis of unsteady cavitation characteristics of Francis pump impeller under multiple working conditions[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2016, 35(7): 106-111. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdbx.20160712.
- [7] 黄剑峰, 张立翔, 姚激, 等. 混流式水轮机三维空化湍流场混合数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(32): 115-121. (HUANG J F, ZHANG L X, YAO J, et al. Mixed numerical simulation of 3-D cavitation turbulent flow field in Francis turbine[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2011, 31(32): 115-121. (in Chinese))
- [8] 刘东喜, 庄宿国, 王健, 等. 双吸泵的空化性能研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(2): 117-121. (LIU D X, ZHUANG S G, WANG J, et al. Study on cavitation performance of double suction pump[J]. China Rural Water Conservancy and Hydropower, 2013(2): 117-121. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2013.02.034.
- [9] 李仁年, 谭海燕, 李琪飞, 等. 低水头下水泵水轮机水轮机工况压力脉动研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(8): 86-91. (LI R N, TAN H Y, LI Q F, et al. Research on pressure fluctuation of hydraulic turbine with low head submerged pump[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2015, 34(8): 86-91. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdbx.20150811.
- [10] 李琪飞, 刘超, 李仁年. 空化条件下水泵水轮机的脉动特性分析[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(3): 50-56. (LI Q F, LIU C, LI R N. Analysis of pump turbine pulse characteristics under cavitation[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2018, 44(3): 50-56. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1673-5196.2018.03.011.
- [11] 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. (WANG S L, TAN L, WANG Y C. Transient cavitation flow and pressure fluctuation characteristics of centrifugal pumps[J]. Vibration and Impact, 2013, 32(22): 168-173. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2013.22.031.
- [12] 朱荣生, 燕浩, 付强, 等. 贯流泵内部压力脉动特性的数值计算[J]. 水力发电学报, 2012, 31(1): 220-225. (ZHU R S, YAN H, FU Q, et al. Numerical calculation of pressure fluctuation characteristics in tubular pumps[J]. Journal of Hydropower, 2012, 31(1): 220-225. (in Chinese))
- [13] 郑源, 陈宇杰, 毛秀丽, 等. 混流泵压力脉动特性及其对流动诱导噪声的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 67-73. (ZHENG Y, CHEN Y J, MAO X L, et al. Pressure fluctuation characteristics of mixed-flow pump and its effect on flow-induced noise[J]. Journal of Agricultural Engineering, 2015, 31(23): 67-73. (in Chinese)) DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.23.009.
- [14] 李琪飞, 张正杰, 李仁年. 水泵水轮机泵工况空化特性与转轮受力分析[J]. 农业机械学报, 2018(1): 137-142. (LI Q F, ZHANG Z J, LI R N. Cavitation characteristics of pump turbine pump and force analysis of runner[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2018(1): 137-142. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.017.
- [15] 王磊, 娄瑜, 王照福. 混流式模型水轮机空化流动分析与试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(9): 771-775. (WANG L, LOU Y, WANG Z F. Analysis and experimental study on cavitation flow of Francis turbine. [J]. Journal of Drainage and Irrigation Mechanical Engineering, 2014, 32(9): 771-775. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1674-8530.13.0214.