

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.014

离心泵叶片表面布置障碍物抑制空化的数值模拟与实验

赵伟国^{1,2} 赵国寿¹ 咸丽霞¹ 韩向东¹

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050;

2. 兰州理工大学甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050)

摘要: 以一台比转数为 32 的低比转数离心泵作为研究模型, 提出了一种在叶片工作面加障碍物的方法来抑制空化初生及发展的方法。在不同空化数下, 采用修正的 SST $k-\omega$ 湍流模型和 Kubota 空化模型对模型泵叶片表面在有、无障碍物条件下进行三维非定常数值模拟。结果表明: 低比转数离心泵在有障碍物运行时扬程下降在 5% 以内, 效率下降在 3% 以内, 设计点扬程下降 3%, 效率下降 1.2%。障碍物可以有效增大叶片近壁湍动能, 改变压力分布, 对离心泵内各个阶段空化均有抑制作用。障碍物可以优化流场结构, 削弱靠近叶片背面的旋涡强度, 对靠近隔舌区域的叶片工作面 and 背面作用效果明显。有障碍物时离心泵叶轮内空泡体积在空化各个阶段均小于无障碍物时叶轮内空泡体积。在空化发展阶段, 障碍物使空泡体积持续衰减。空泡尺度发展到障碍物位置时, 障碍物可以较大程度减低压力脉动主频幅值, 对流场优化产生最佳效果。在空化发展其他阶段, 障碍物会对叶轮内压力脉动造成小幅扰动。

关键词: 离心泵; 障碍物; 空化抑制; 数值模拟

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2017)09-0111-10

Effect of Surface-fitted Obstacle in Centrifugal Pump on Cavitation Suppression

ZHAO Weiguo^{1,2} ZHAO Guoshou¹ XIAN Lixia¹ HAN Xiangdong¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Key Laboratory of Fluid Machinery and System, Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Centrifugal pumps are widely used to deliver liquid media in agriculture, pharmacy, industry, petrochemical industry, etc. Compared with the case delivering pure liquid such as water, centrifugal pumps not only have lower efficiency but also are subject to severe vibration, noise and erosion when delivering cavity two-phase flow, leading to the deterioration of flow field and even the shortage of service life. The cavitation flow in centrifugal pump performs strong instabilities, thus a method of a tiny obstacle fitted on the blade surface was proposed to suppress the cavitation development on a $n_s = 32$ model pump. The unsteady cavitation flow varied with cavitation number in centrifugal pump was simulated by modified SST $k-\omega$ turbulence model combined with Kubota cavitation model. The results showed that the head of centrifugal pump with obstacle was decreased within 5% at various flow rate and within 3% at design point, the efficiency was decreased within 3% at various flow rate and 1.2% at design point, the head with obstacle was great improved when cavitation flow developed. The obstacle can enhance the turbulent kinetic energy near the blade wall and reset the absolute pressure distribution, which can suppress the cavitation at different stages in centrifugal pump. The obstacle can optimize the flow structure and degrade the vortex intensity near the suction side of blade especially the area close to the tongue. The obstacle can decrease the cavity volume at varied cavitation number and the cavity volume keep attenuating when cavitation developed. The obstacle can cause small magnitude of the disturbance on the pressure frequency spectrum. The effects of cavitation suppression were optimal when the bubbles reached close to the obstacle.

Key words: centrifugal pump; obstacle; cavitation suppression; numerical simulation

收稿日期: 2017-01-05 修回日期: 2017-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51269011)

作者简介: 赵伟国(1979—), 男, 副教授, 主要从事水力机械流动理论及空化多相流研究, E-mail: zhaowg@zju.edu.cn

引言

离心泵是应用最广泛的流体机械之一,其中低比转数离心泵一直存在效率不高、汽蚀性能较差、内部流动不稳定等问题。空化是离心泵运行时常见的一种物理现象,离心泵在运行时产生的回流与空化流动相互作用,形成对叶轮内能量交换更为复杂的干扰和破坏^[1]。空化不仅对定常态的流体流动产生影响,还会影响流动的非定常特性或动态响应特性。动态响应的改变会使流动内部出现不稳定性,对外表现为离心泵的振动和噪声特性。离心泵内部空化表现为旋转空化^[2-3]、空化喘振^[1,4]、堵塞喘振及其他一些高频流动不稳定性^[5]。在离心泵空化状态由空化初生工况到扬程断裂工况的发展过程中,空泡在叶轮流道内积累并逐渐影响叶轮内正常的能量交换。空化是包含相变、非定常、多维湍流等多种复杂影响因素的流动现象,流体机械内部空化流动严重影响机器性能,其非定常脱落更是引起机器振动、噪声和磨蚀等严重问题^[5]。离心泵内空化现象通常发生在叶片前缘,在低流量工况时在叶片吸力面发生空化,高流量时在压力面发生空化。在工程应用中,常以净正吸头、空化数和吸入比转数等来表征离心泵的工作条件和吸入性能^[1]。对于空化的数值模拟已成为目前研究的重要手段。

目前抑制空化的方法主要有3种:在叶片空化面布置障碍物阻挡回射流、设置反向空气射流^[6]、使用开缝叶片优化流场结构^[7]。KAWANAMI等^[8]通过一系列水翼实验观察到片空化的破裂是由翼型尾部向头部流动的回射流引起的,并指出在片空化末端即翼型中部设置小的障碍物阻挡回射流,可以预防空化的产生。戴月进等^[9]在翼型表面施加粗糙带,增加了近壁面流场湍动能,使转捩提前,提高了近壁面流场压力,抑制空化初生的发生。牟介刚等^[10]分析了非光滑表面离心泵叶轮的流动减阻特

性。司乔瑞等^[11]采用 SST $k-\omega$ 湍流模型分析了空化条件下离心泵泵腔内不稳定流动。卢加兴等^[12]基于模拟和实验研究了空化条件下泵进出口的压力频率特性。付燕霞等^[13]数值模拟了离心泵叶片入口处的回流旋涡空化。MEDVITZ等^[14]基于 Kunz 空化模型^[15]研究了小空化数下离心泵内空化流动。TAN等^[16]基于修正的 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型^[17]模拟了离心泵小流量工况下运行时的压力脉动特性。

本文在前人研究工作的基础上,基于修正的 SST $k-\omega$ 湍流模型^[18]和 Kubota 空化模型^[19],通过对比离心泵叶片工作面布置障碍物发生空化的形式、形成过程、空化团的非对称分布及其与压力脉动之间的关系,采用瞬态模拟方法,分析障碍物对空泡流动的抑制作用,以期抑制空化和离心泵的优化设计提供参考。

1 计算模型与网格划分

计算模型为一比转数为32的低比转数离心泵,设计参数为:流量 $Q = 8.6 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 4.2 \text{ m}$,转速 $n = 500 \text{ r}/\text{min}$ 。叶片形状为圆柱叶片,主要几何参数如下:泵入口直径 $D_s = 90 \text{ mm}$,泵出口直径 $D_d = 65 \text{ mm}$,叶轮入口直径 $D_1 = 80 \text{ mm}$,叶轮出口直径 $D_2 = 310 \text{ mm}$,叶轮出口宽度 $b_2 = 12 \text{ mm}$,叶片进口角 $\beta_1 = 37^\circ$,叶片出口角 $\beta_2 = 37^\circ$,叶片数 $Z = 6$ 。

对叶轮流道内进行六面体网格划分,以便准确捕捉障碍物凸起对周围流场的影响,蜗壳采用适应性较强的四面体网格,整体计算域如图1a所示。网格无关性检查如表1所示,随着网格数增大,扬程逐渐趋于稳定,最终确定网格单元数1 017 321,节点数838 520。为保证数值模拟精度,常用 Y^+ 值来保证近壁面区域有足够的节点数来捕捉边界层内的流动^[20],文中 Y^+ 表示离壁面最近的网格点到壁面的距离,为无量纲变量,定义为

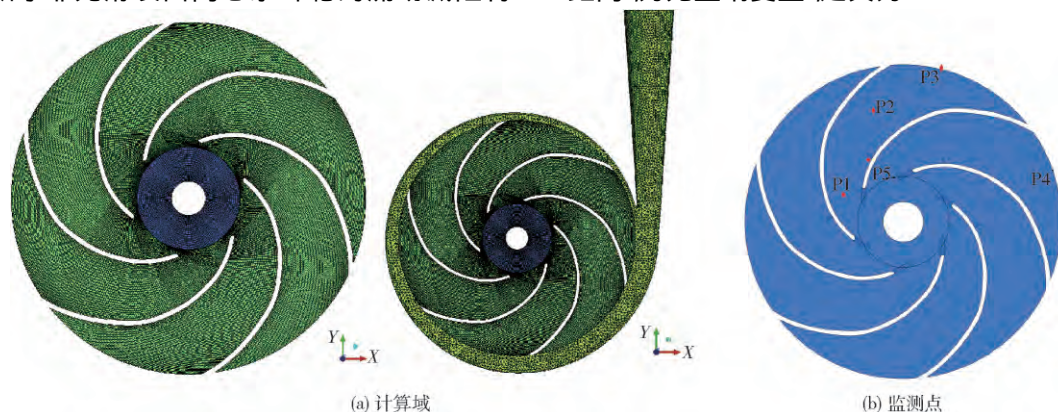


图1 计算域网格与监测点

Fig. 1 Grid of computational domain and monitoring points

$$Y^+ = \frac{\sqrt{\tau_w} \Delta n}{\nu}$$

式中 τ_w ——壁面切应力, Pa
 ρ ——流体密度, kg/m³
 Δn ——离壁面最近 2 个网格点间距离, m
 ν ——运动粘度, m²/s

表 1 网格无关性检查

Tab.1 Check of grid independence

网格类型	进口 网格数	叶轮 网格数	蜗壳 网格数	总网格数	扬程/ m
粗糙网格	104 238	426 300	156 272	686 810	4.43
中等网格	145 236	531 810	196 168	873 214	4.57
优化网格	145 236	675 917	196 168	1 017 321	4.58

本文所采用的 SST $k-\omega$ 模型近壁区应用 $k-\omega$ 模型, 考虑到边界层网格的 Y^+ 值范围, Y^+ 在 100 左右基本满足 $k-\omega$ 湍流模型对近壁网格质量要求^[21]。本次模拟近壁网格 Y^+ 值能够保证在离心泵流场模拟中具有较好的适用性。

叶轮流道内及隔舌监测点位置如图 1b 所示, P1、P2、P3 位于叶轮流道内, P5 位于流道内障碍物前侧, 流道内点 P1、P2、P3 及 P5 均随叶轮旋转, P4 点位于蜗壳隔舌处, 不随叶轮旋转。结合前人对水翼表面障碍物的形状位置研究^[9-10, 22] 以及离心泵空化流场的观测, 障碍物布置在叶轮半径 45% 处, 障碍物截面形状为 2 mm × 2 mm 矩形, 高度取 6 mm, 如图 2 所示。



图 2 障碍物网格划分

Fig.2 Grid generation of obstacle

2 湍流模型和空化模型

汽液两相采用 ANSYS-CFX 中的均相模型, 即汽液两相有相同的压力场与速度场, 两相间无速度滑移, 假定汽相在液相中均匀分布, 混合相密度可变, 混合相控制方程如下:

连续性方程

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial (\rho_m u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) \right] \quad (2)$$

式中 u_i, u_j, u_k ——速度分量

ρ_m ——混合相密度

δ_{ij} ——克罗内克常数

μ ——层流粘度 μ_t ——湍流粘度

t ——时间 x_i, x_j, x_k ——坐标分量

p ——压力

N-S 方程通过 SST $k-\omega$ 湍流模型封闭。混合相密度可以表示为

$$\rho_m = \alpha_v \rho_v + \rho_l (1 - \alpha_v) \quad (3)$$

式中 ρ_v, ρ_l ——汽相和液相密度

α_v ——汽相体积分

2.1 修正的 SST $k-\omega$ 湍流模型

由 MENTER^[23] 发展的 SST $k-\omega$ 模型考虑到了湍流剪应力的传输, 不但能对各种来流进行准确预测, 还能在各种压力梯度下精确地模拟分离现象, 综合了 $k-\omega$ 模型在近壁模拟和 $k-\epsilon$ 模型在外部区域计算的优点, 这是由于 SST $k-\omega$ 模型比标准 $k-\omega$ 模型中多了一个混合方程, 这个混合方程的作用是在近壁区域激活了标准 $k-\omega$ 模型, 在远场区域激活使用 $k-\epsilon$ 模型, 而且 SST $k-\omega$ 使用了修正的湍流粘度来考虑湍流剪应力的传输, 且较标准 $k-\omega$ 模型, SST $k-\omega$ 模型的 ω 方程中多了一个交叉扩散项 D , 这些改进使 SST $k-\omega$ 模型比标准 $k-\omega$ 模型在广泛的流动领域中有更高的精度和可信度。尤其适合低比转数离心泵内高旋转、大曲率变形的流动。其控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial t} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \quad (6)$$

式中 G_k ——湍动能 k 的生成项

G_ω ——耗散率 ω 的生成项

Γ_k, Γ_ω —— k 和 ω 的有效扩散系数

Y_k, Y_ω ——由于紊流引起的 k 和 ω 的耗散

D_ω ——交叉扩散项

S_k, S_ω ——用户自定义的源项

由于空化流具有密度可变、两相之间密度比较大的特点, 因此空化流的数值模拟主要困难在于处理汽液相变而造成的密度变化。特别是空化区域, 密度急剧变化, 采用常规的 SST $k-\omega$ 湍流模型会过大地预测流道内近叶片表面的流体黏性, 从而导致云空化泡难以脱落, 因此需要对 SST $k-\omega$ 模型湍流粘度进行修正, 以便更好地捕捉模拟离心泵内空泡

流的动态特性。本文仅对式(2)中的黏性项进行修正,应用密度函数 $f(\rho)$ 替代式(6)中的混合密度,故计算湍流黏度的公式为

$$\mu_t = f(\rho) \frac{k}{\omega} \quad (7)$$

$$\text{其中 } f(\rho) = \rho_v + \frac{(\rho_m - \rho_v)^n}{(\rho_l - \rho_v)^{n-1}} \quad (n > 1) \quad (8)$$

对于式(8)中 n 的取值一般建议取10。引入密度函数后,特别是对水蒸气含量较小的气液混合区域,可以限制空穴尾部水气混合区过大的湍流度,以更好地模拟离心泵内非稳态空泡脱落行为^[24]。

2.2 Kubota 空化模型

Kubota 空化模型由简化 Rayleigh-Plesset 方程发展而来,忽略了空泡半径随时间的二阶导数^[25],重点考虑了空化初生和发展时空泡体积变化的影响,适于模拟离心泵空化的非定常特性。Kubota 空化模型是基于输运方程,即

$$\frac{\partial(\rho_m f_v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m u_i f_v)}{\partial x_i} = R_e - R_c$$

$$\text{其中 } R_e = C_e \frac{3\alpha_{nuc}(1-\alpha_v)\rho_v}{R_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} \quad (p < p_v)$$

$$R_c = C_c \frac{3\alpha_n \rho_v}{R_b} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}} \quad (p > p_v)$$

式中 f_v ——汽相质量分数

R_e ——液相蒸发速率

R_c ——汽相凝结速率

R_b ——简化汽泡半径

p_v ——饱和蒸汽压力

α_{nuc} ——气核体积分数

C_e, C_c ——蒸发和凝结经验系数

前人研究经工作验证^[26],上述经验系数的合理取值为: $R_b = 1 \times 10^{-6}$ m; $\alpha_{nuc} = 5 \times 10^{-4}$; $C_e = 50$; $C_c = 0.01$ 。

3 边界条件给定

采用商用代码 ANSYS CFX 15.0 全隐式耦合技术对方程组进行求解,修改的 SST $k-\omega$ 湍流模型通过 CFX 二次开发嵌入程序,计算模型边界条件为入口设置成总压进口,出口设置成质量流量出口,系统参考压力设置为 0 Pa,空化临界压力取常温下(25℃)纯水饱和蒸汽压力(3 169 Pa),固壁面边界设置成无滑移壁面。

定常计算中动静交界面设置为冻结转子,将收敛的定常计算结果作为非定常计算的初始场,非定常计算中动静交界面设置为瞬态冻结转子,时间步

长 Δt 取 0.001 s,即叶轮每旋转 3° 为 1 个时间步长,总计算步数为 240 步,即叶轮旋转 2 圈,并取第 2 个旋转周期的计算结果进行非定常特性分析。求解过程中控制方程的对流离散型采用二阶高精度格式,时间项离散格式为二阶后向欧拉差分格式,库朗数下限设为 0.5,上限设为 1 以加快每一时间步数的收敛,将最大残差作为求解收敛的判别标准,收敛精度设置为 10^{-4} 。

本次计算通过降低进口压力使离心泵流道内发生空化,比较有、无障碍物时的内部空化形态,以及对流场压力脉动的影响,分析其抑制效果与机理。

4 计算结果与分析

4.1 外特性实验对比

为了验证数值模拟的准确性,在兰州理工大学离心泵闭式实验台上进行离心泵外特性实验,图3(图中 Q_0 表示设计流量)为不同流量工况下叶片有、无障碍物性能模拟值与实验值对比曲线。

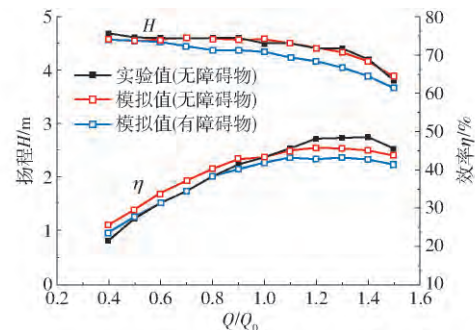


图3 外特性曲线

Fig.3 Curves of external performance

在流体机械领域,常用无量纲空化数 σ 表述空化发生的可能性,其定义为

$$\sigma = \frac{p_1 - p_v}{\frac{1}{2} \rho U^2}$$

其中

$$U = \frac{n\pi D_1}{60}$$

式中 p_1 ——基准静压力,采用泵进口压力, Pa

U ——基准速度,采用叶轮叶片进口边与前盖板交点处的圆周速度, m/s

n ——轴转速, r/min

D_1 ——叶轮叶片进口边与前盖板交点处的直径, m

图4为叶片在有、无障碍物条件下空化数 σ 与扬程的计算结果对比曲线。

图3可以看出无障碍物时模拟值与实验值吻合较好,与模拟值比较,增加障碍物后扬程下降在5%

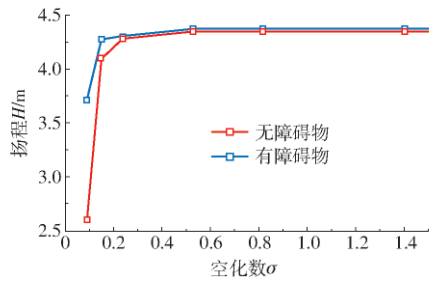


图 4 汽蚀特性曲线

Fig. 4 Curves of cavitation performance

以内,对效率影响较小,下降在 3% 以内。设计点扬程相差 3%,效率相差 1.2%。

由图 4 可以看出增加障碍物后对扬程的影响,对空化初生无明显影响,扬程断裂时,无障碍物时 $H = 2.60\text{ m}$,有障碍物时 $H = 3.71\text{ m}$,提高 29.7%,抑制效果明显。

4.2 障碍物对湍动能分布影响

图 5 为不同空化数下,叶轮中间截面湍动能等值线图,上图为不加障碍物时湍动能分布,下图为加障碍物时湍动能分布。

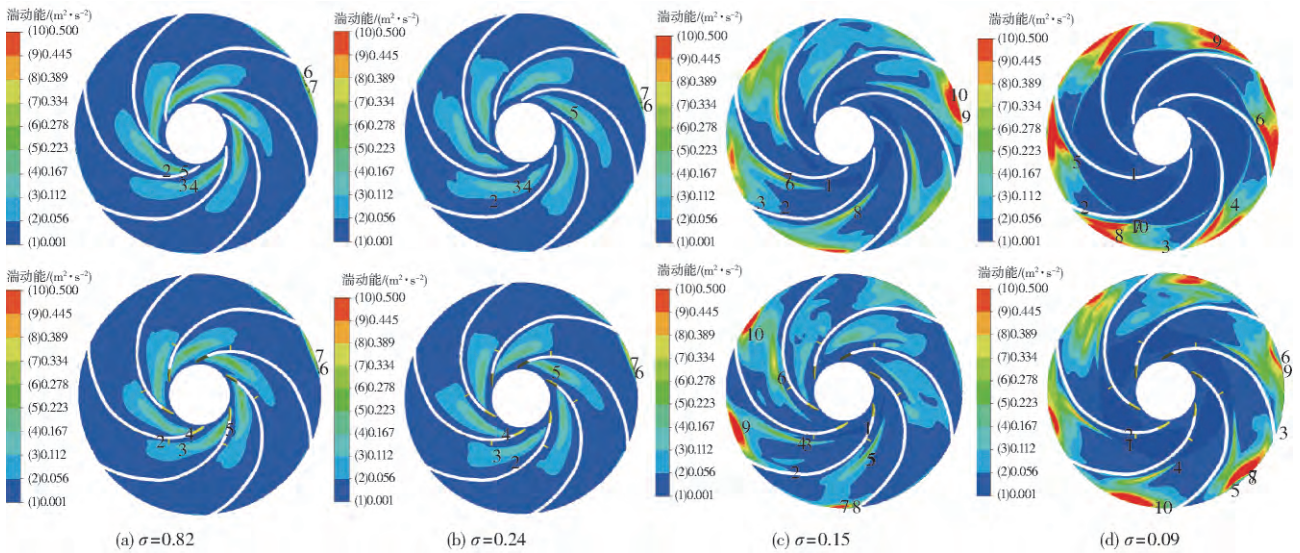


图 5 湍动能分布

Fig. 5 Turbulence kinetic energy distributions

湍流流动具有动量大且传递快的特点。叶片表面障碍物能够增加近壁面流场湍动能,从而使转捩提前发生,减少分离引起的压差阻力,使压力梯度变大,从而对空化产生抑制作用。如图 5a 所示,障碍物对空化初生湍动能分布无明显影响。当空化发展到一定长度,障碍物前后壁面湍动能影响显著增大,

如图 5b、5c 所示。空化完全发展时,障碍物对湍动能的影响趋向最大化,抑制效果最明显,如图 5d 所示。

4.3 障碍物对压力分布影响

图 6 为不同空化数下,叶轮中间截面绝对压力等值线图,上图为不加障碍物时压力分布,下图为加

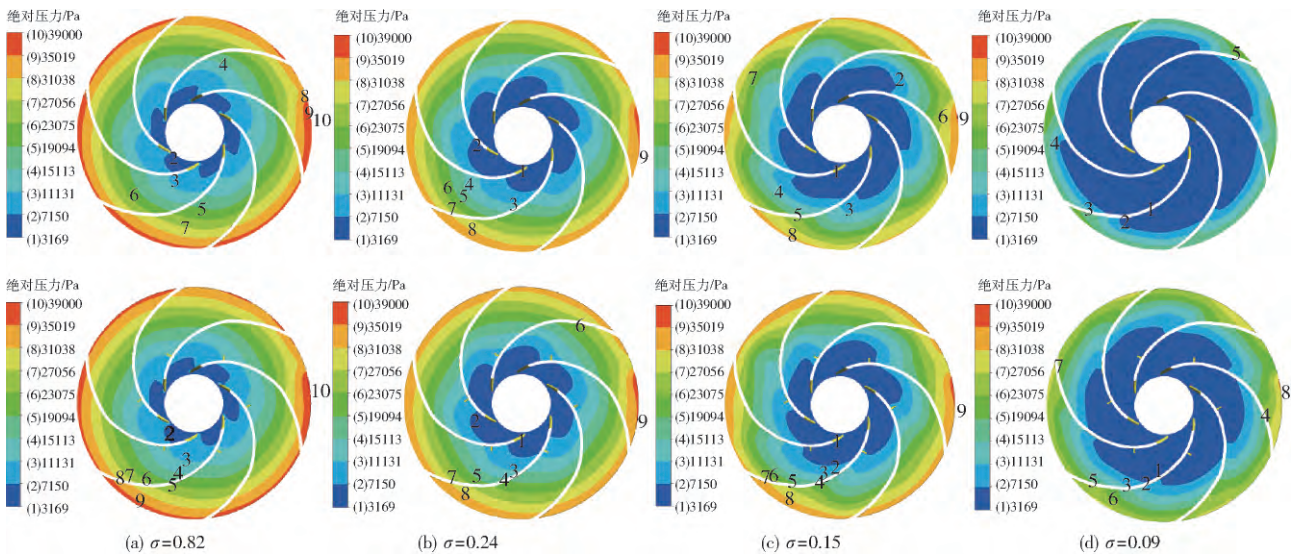


图 6 绝对压力分布

Fig. 6 Absolute pressure distributions

障碍物时压力分布。

空化发生时,低压区向叶轮出口扩张是使离心泵内空化发展的主因。叶片表面障碍物诱发了叶片表面附近相对高压区和较大的逆压梯度,压力分布的变化会导致空泡形态的改变,因此加障碍物以后引起的压力和压力梯度的变化是产生抑制作用的重要因素。障碍物对空化初生的压力分布无明显影响,如图6a所示。空化发展时,障碍物使流道内逆压梯度增大,在叶片工作面障碍物附近形成了相对高压区域,有效阻止了低压区域向外扩张,如图6b~6d所示。

4.4 障碍物对流场结构影响

图7为不同空化数下,空泡在最终时刻的体积

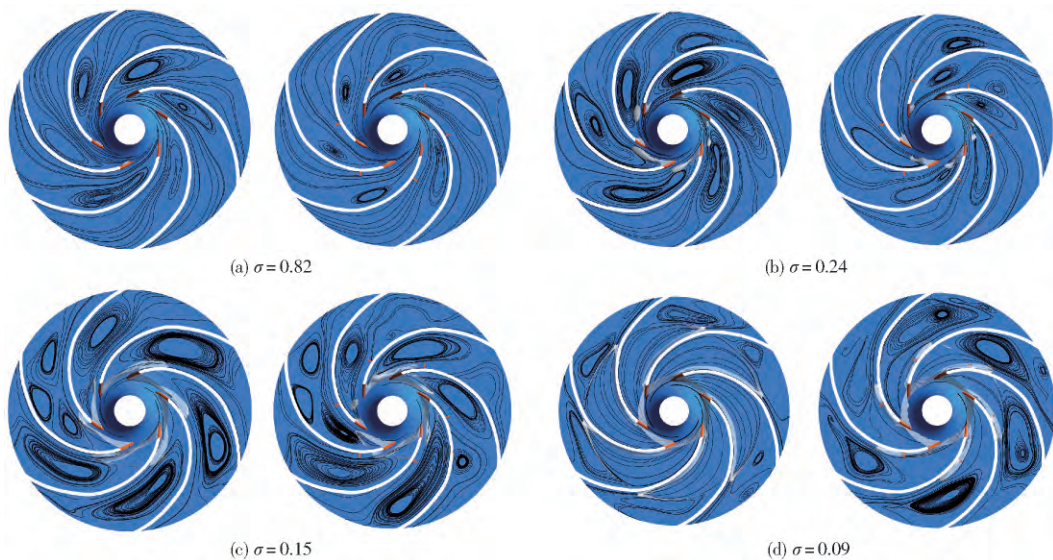


图7 空泡形态及流线

Fig. 7 Cavity patterns and streamlines

4.5 障碍物对空泡体积影响

叶轮内空泡体积 V_{cav} 定义为

$$V_{cav} = \sum_{i=1}^N \alpha_{v_i} V_i$$

空泡体积增长速度 V_e 定义为

$$V_e = \frac{dV_{cav}}{dt}$$

式中 N ——叶轮内总控制单元数

α_{v_i} ——每个控制单元内汽相体积分数

V_i ——每个控制单元体积, mm^3

在一个叶轮旋转周期内,空泡体积及体积增长随时间变化如图8所示。

由图8a可知空化数 $\sigma = 0.82$ 时,加障碍物后在整个旋转周期内汽泡体积明显减小,增长和衰减交替变化,体积增减趋势有无障碍物基本一致。由图8b可知空化数 $\sigma = 0.24$ 时,两种情况体积均表现出先衰减后增长趋势,衰减阶段有障碍物流道空

分数 ($\alpha_v = 10\%$) 等值面及中间截面流线在有、无障碍物时的比较,左侧为无障碍物时流场图,右侧为有障碍物时流场图。

如图7a所示,空化初生时,障碍物可以优化流场结构,削弱靠近叶片背面的漩涡强度,对靠近隔舌区域的叶片工作面 and 背面作用效果明显,对空泡形态并无较大影响。图7b为空化发展时,空泡形态呈现出云空化的脱落特征,障碍物梳理了空化发展时的紊乱流场,削弱漩涡强度使流场更具流线型,无障碍物时空泡具有脱落特征,障碍物有效抑制了空泡的脱落。图7c、7d显示当空泡径向尺度发展到障碍物位置时,由障碍物诱发的高压区和增大的湍动能共同作用导致了空泡形态的变化。

泡体积均小于无障碍物时空泡体积,有障碍物空泡体积变化速度相较无障碍物更为稳定。由图8c可知空化数 $\sigma = 0.15$ 时,加障碍物后空泡体积在整个周期内都小于无障碍物时的空泡体积,体积均呈现衰减趋势且有障碍物时衰减速度更快。由图8d可知空化数 $\sigma = 0.09$ 时,加障碍物后空泡体积在整个周期内都小于无障碍物时的空泡体积,无障碍物时,空泡体积稳定增长,有障碍物时空泡体积持续衰减。由障碍物诱发的叶片壁面附近相对高压区和增大的湍动能共同作用抑制了叶轮内空泡体积的增长。

4.6 障碍物对内部流动瞬态特性影响

障碍物的存在对流场内部造成了扰动,影响了流动的瞬态特性,图9为对流道内部及隔舌处监测点压力脉动做快速傅里叶变换,从压力频谱角度分析障碍物对内部流动瞬态特性影响。图10为各个监测点在有、无障碍物时的主频幅值比较。

图9为压力脉动时域数据通过快速傅里叶变换

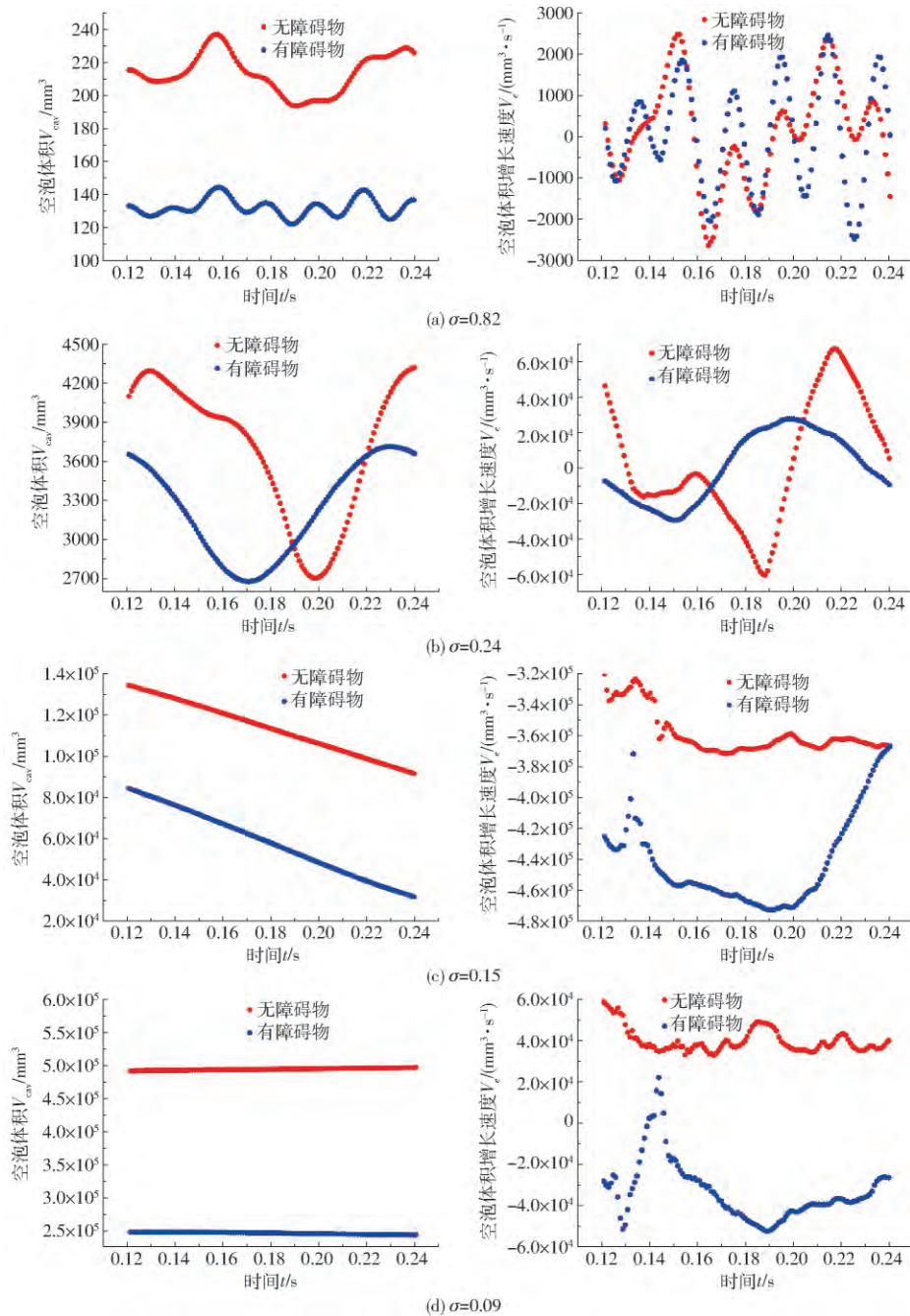


图 8 空泡体积与空泡体积增长速度图

Fig. 8 Diagrams of cavity volume and its growth rate

得到的压力脉动频域分布图。本文中叶轮转速 $n = 500 \text{ r/min}$ 轴频为 8.3 Hz 叶轮叶片数 $z = 6$ 则叶片通过频率(即叶频)为 50 Hz 。从图 9 中可以看出,脉动主频为 50 Hz 障碍物并不改变在不同空化数下不同位置处的压力脉动频率分布。图 10 显示障碍物对不同空化数的主频幅值影响,如图 10a、10b 所示 在空化初生及发展阶段,障碍物对流场造成了扰动,压力脉动频率有较小幅度增大;如图 10c 所示,障碍物使流道内和隔舌处的压力脉动幅值均有明显减低作用,当空泡尺度发展到障碍物位置时(图 7c) 障碍物既可以起到抑制空化效果,同时降低压力脉动主频幅值,可以对空化流诱发的振动、噪

声、磨损等产生抑制作用,对流场优化产生最佳效果;图 10d 中有障碍物时的主频幅值略大于无障碍物时主频幅值,此时空泡完全发展,如图 7d 所示附着整个流道,空泡区形成了较为稳定的区域,空泡径向尺度远大于障碍物径向位置,障碍物的存在会使高压区向流道内部区域扩张,使空泡溃灭,起到抑制空化的效果,但是压力脉动变得较为剧烈。

5 结论

(1) 叶片表面加障碍物后,会使离心泵在各个工况下扬程有所降低,降低在 5% 以内,效率降低在 3% 以内,在设计点扬程下降 3% ,效率下降 1.2% 。

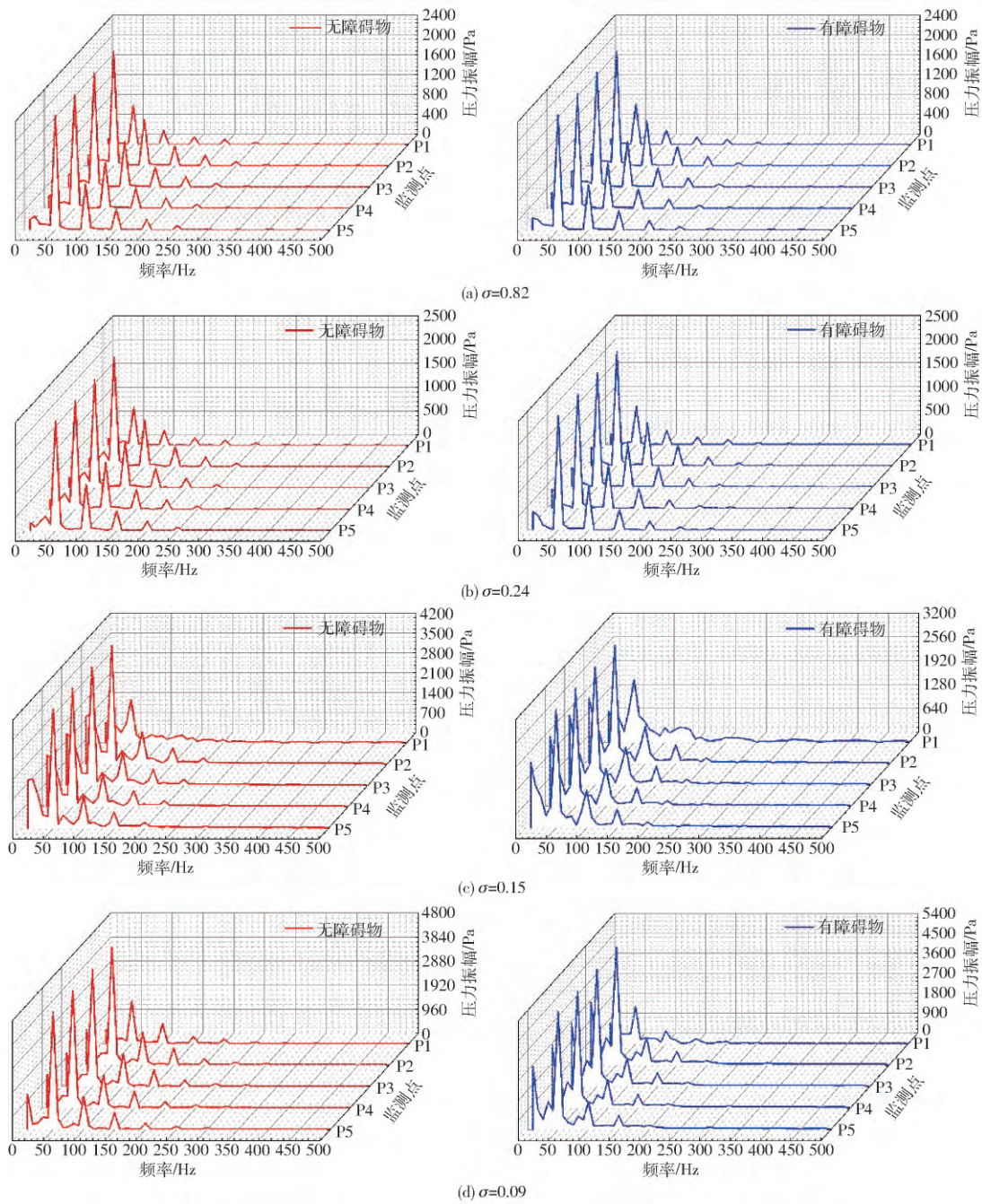


图9 压力频谱

Fig. 9 Pressure frequency spectra

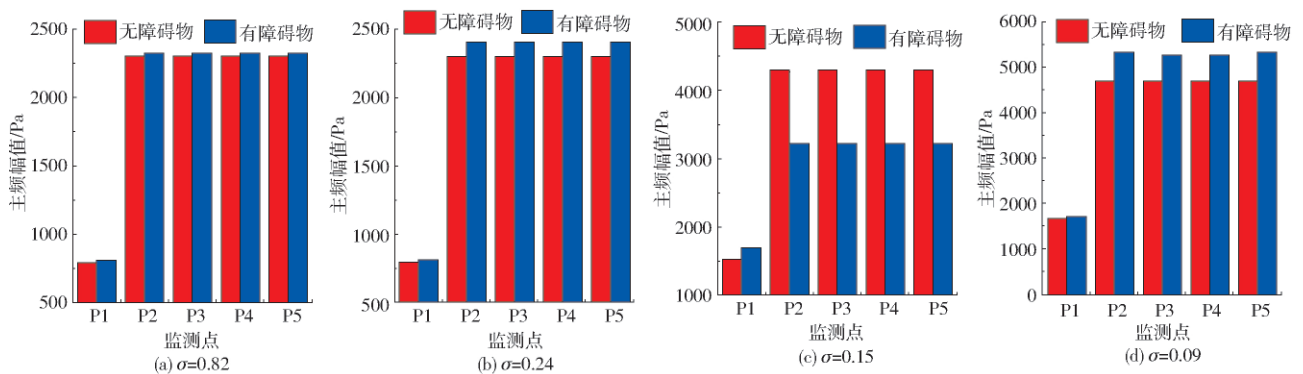


图10 压力主频幅值

Fig. 10 Amplitudes of dominate frequency of pressure

发生空化时,对空化初生扬程无较大影响。相同空化数下,对断裂点扬程影响较大,提高近30%,对于在空化状态下运行的离心泵具有重要意义。

(2) 对于空化初生及发展阶段,障碍物对靠近叶片背面的漩涡强度削弱作用明显,可以对云空泡脱落起到明显的抑制作用,空泡径向发展到障碍物位置后,障碍物引起的周围流场高压区和增大的湍动能抑制了空泡增长。

(3) 在一个旋转周期内,对于空化初生阶段,障碍物使空泡体积明显减小,空泡发展阶段,障碍物减

小空泡体积的同时使空泡体积以更快的速度衰减,空泡完全发展阶段,无障碍物时,空泡体积稳定增长,有障碍物时,空泡体积持续衰减。

(4) 空化初生阶段,障碍物抑制空化的同时,会对流场造成扰动,增强流道内及隔舌处压力脉动主频幅值,增幅较小;当空泡径向发展到障碍物位置时,抑制空化的同时减低压力脉动主频幅值,可以有效抑制空化流动诱发的流场非定常特性,效果最优;空泡完全发展时,障碍物抑制效果明显,对流场的扰动使压力脉动主频幅值变大。

参 考 文 献

- BRENNEN C E. Hydrodynamics of pumps [M]. Norwich, VT, USA: Concepts ETI Inc., 1994.
- FRIEDRICHS J, KOSYNA G. Rotating cavitation in a centrifugal pump impeller of low specific speed [J]. ASME Journal of Fluids Engineering 2002, 124(12): 356-362.
- FRIEDRICHS J, KOSYNA G. Unsteady PIV flow field analysis of a centrifugal pump impeller under rotating cavitation [C] // Proceedings of the 5th International Symposium on Cavitation 2003.
- TSUJIMOTO Y, HORIGUCHI H, YONEZAWA K. Cavitation instabilities in cavitating and non-cavitating pumps [J]. Design and Analysis of High Speed Pumps 2006, 7(1): 7-24.
- BRENNEN C E. Multifrequency instability of cavitating inducers [J]. ASME Journal of Fluids Engineering 2007, 129(6): 731-736.
- KUIPER G. New developments and propeller design [J]. Journal of Hydrodynamics 2010, 22(9): 7-16.
- 王洋, 谢山峰, 王维军等. 开缝叶片低比转数离心泵空化性能的数值模拟 [J]. 排灌机械工程学报 2016, 34(3): 210-215. WANG Yang, XIE Shanfeng, WANG Weijun, et al. Numerical simulation of cavitation performance of low specific speed centrifugal pump with slotted blades [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 2016, 34(3): 210-215. (in Chinese)
- KAWANAMI Y, KATO H, YAMAGUCHI H, et al. Mechanism and control of cloud cavitation [J]. ASME Journal of Fluids Engineering 1997, 119(4): 788-794.
- 戴月进, 张媛媛, 黄典贵. 水翼表面粗糙带对空化抑制效果的数值研究 [J]. 工程热物理学报 2012, 33(5): 770-773. DAI Yuejin, ZHANG Yuanyuan, HUANG Diangui. Numerical study of the impact of hydrofoil surface roughness on cavitation suppression [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2012, 33(5): 770-773. (in Chinese)
- 牟介刚, 代东顺, 谷云庆等. 非光滑表面离心泵叶轮的流动减阻特性 [J]. 上海交通大学学报, 2016, 50(2): 6-12. MOU Jiegang, DAI Dongshun, GU Yunqing, et al. Characteristics of non-smooth surface drag reduction influence on centrifugal pump impeller [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2016, 50(2): 6-12. (in Chinese)
- 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. http://www.j-csam.org/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20140513&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.05.013. SI Qiaorui, YUAN Shouqi, LI Xiaojun, et al. Numerical simulation of unsteady cavitation flow in the casing of a centrifugal pump [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2014, 45(5): 84-90. (in Chinese)
- 卢加兴, 袁寿其, 任旭东等. 离心泵小流量工况下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?file_no=20150809&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.009. LU Jiaying, YUAN Shouqi, REN Xudong, et al. Investigation of instabilities of cavitation at low flow rate of centrifugal pump [J/OL]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery 2015, 46(8): 54-58. (in Chinese)
- 付燕霞, 沈陈栋, 袁建平等. 离心泵进口回流诱导的空化特性 [J]. 排灌机械工程学报 2016, 34(10): 841-846. FU Yanxia, SHEN Chendong, YUAN Jianping, et al. Cavitation characteristic induced by inlet backflow in a centrifugal pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 2016, 34(10): 841-846. (in Chinese)
- MEDVITZ R B, KUNZ R F, BOGER D A, et al. Performance analysis of cavitating flow in centrifugal pumps using multiphase CFD [J]. ASME Journal of Fluid Engineering, 2002, 124(2): 377-383.
- KUNZ R, BOGER D, STINEBRING D, et al. A preconditioned implicit method for two-phase flows with application to cavitation prediction [J]. Computers & Fluids, 2000, 29(8): 849-875.
- TAN Lei, ZHU Baoshan, CAO Shuliang, et al. Numerical simulation of unsteady cavitation flow in a centrifugal pump at off-design conditions [J]. Proc. IMechE, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science 2014, 228(11): 1994-2006.
- COUTIER-DELGOSHA O, FORTES-PATELLA R, REBOUD J. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 38-45.

- 18 张淼,薛瑞,皮漫,等.修正的 SST $k-\omega$ 模型在云状空化流动计算中的应用研究[J].西北水电,2014(4):76-81.
ZHANG Miao,XUE Rui,PI Man,et al. Study on application of the modified SST $k-\omega$ model in computation of cloud cavitating flows[J]. Northwest Hydropower,2014(4):76-81. (in Chinese)
- 19 KUBOTA A,KATO H. Unsteady structure measurement of cloud cavitation on a foil section [J]. ASME Journal of Fluids Engineering,1989,111(3):204-210.
- 20 张德胜,吴苏青,施卫东,等.不同湍流模型在轴流泵叶顶泄漏涡模拟中的应用与验证[J].农业工程学报,2013,29(13):46-53.
ZHANG Desheng,WU Suqing,SHI Weidong,et al. Application and experiment of different turbulence models for simulating of the tip leakage vortex in axial flow pump [J]. Transactions of the CSAE,2013,29(13):46-53. (in Chinese)
- 21 李晓俊,袁寿其,潘中永,等.离心泵边界层网格的实现及应用评价[J].农业工程学报,2012,28(20):67-72.
LI Xiaojun,YUAN Shouqi,PAN Zhongyong,et al. Realization and application of near-wall mesh in centrifugal pumps [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(20):67-72. (in Chinese)
- 22 赵伟国.水翼云空化及其抑制机理研究[D].杭州:浙江大学,2012.
- 23 MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications [J]. AIAA Journal,1994,32(8):1598-1605.
- 24 REBOUD J L,STUTZ B,COUTIER O. Two phase flow structure of cavitation experiment and modeling of unsteady effects [C]// Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation,1998.
- 25 ZWART P J,GERBER A G,BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics [C]// Proceedings of International Conference on Multiphase Flow,2004.
- 26 纪斌,LUO Xianwu,WU Yulin,et al. Numerical analysis of unsteady cavitating turbulent flow and shedding horse-shoe vortex structure around a twisted hydrofoil [J]. International Journal of Multiphase Flow,2013,51:33-43.

~~~~~  
(上接第101页)

- 12 杜韧,张晗,李丹.圆捆机成型室的试验与研究[J].北华航天工业学院学报,2010,20(5):1-3.  
DU Ren,ZHANG Han,LI Dan. Experiment and research on forming box of wound bundler [J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering,2010,20(5):1-3. (in Chinese)
- 13 李叶龙,王德福,李东红,等.辊盘式圆捆机卷捆机理分析与试验[J/OL].农业机械学报,2016,47(12):45-52. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx?file\_no=20161207&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.12.007.  
LI Yelong,WANG Defu,LI Donghong,et al. Theoretical analysis and experiment of baling mechanism of roll-disk round baler [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(12):45-52. (in Chinese)
- 14 雷军乐,王德福,李东红,等.钢辊式圆捆机旋转草芯形成影响因素分析与优化[J/OL].农业机械学报,2015,46(12):18-25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\_abstract.aspx?file\_no=20151203&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.003.  
LEI Junle,WANG Defu,LI Donghong,et al. Influence factors and optimization of forming rotary straw core by steel-roll round baler [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(12):18-25. (in Chinese)
- 15 雷军乐,王德福,张全超,等.完整稻秆卷压过程应力松弛试验[J].农业工程学报,2015,31(8):76-83.  
LEI Junle,WANG Defu,ZHANG Quanchao,et al. Experiment on stress relaxation characteristics of intact rice straw during rotary compression [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(8):76-83. (in Chinese)
- 16 李汝莘,耿爱军,赵何,等.碎玉米秸秆卷压过程的流变行为试验[J].农业工程学报,2012,28(18):30-35.  
LI Ruxin,GENG Aijun,ZHAO He,et al. Rheologic behavior of chopped corn stalks during rotary compression [J]. Transactions of the CSAE,2012,28(18):30-35. (in Chinese)
- 17 房欣,陈海涛,黄振华,等.不同含水率大豆秸秆与不同材料间滑动摩擦特性的研究[J].大豆科学,2012,31(5):838-841.  
FANG Xin,CHEN Haitao,HUANG Zhenhua,et al. Sliding friction characteristic of different moisture content of soybean stalk with different materials [J]. Soybean Science,2012,31(5):838-841. (in Chinese)
- 18 王琛,黄东明,周益君,等.9YY-550型小型秸秆捡拾圆捆机的设计[J].中国农机化,2008,29(4):67-68.  
WANG Chen,HUANG Dongming,ZHOU Yijun,et al. Design on the model 9YY-550 mini type rotary baler for straw [J]. Chinese Agricultural Mechanization,2008,29(4):67-68. (in Chinese)
- 19 任亨斌,宁先雄.实现急回运动且传动性能最优的机构综合[J].机床与液压,2005(4):63-64.  
REN Hengbin,NING Xianxiong. Optimal synthesis of four-bar linkage with both quick-return characteristics and maximum transmission angle [J]. Machine Tool & Hydraulics,2005(4):63-64. (in Chinese)
- 20 中国农业机械化科学研究院.农业机械设计手册:下册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.