

哈尔滨工程大学学报 Journal of Harbin Engineering University ISSN 1006-7043,CN 23-1390/U

《哈尔滨工程大学学报》网络首发论文

题目:	离心泵叶轮后盖板布置小叶片抑制空化					
作者:	赵伟国,郁金红,徐阳,徐泽鑫,王桂鹏					
收稿日期:	2019-05-08					
网络首发日期:	2020-11-30					
引用格式:	赵伟国,郁金红,徐阳,徐泽鑫,王桂鹏. 离心泵叶轮后盖板布置小叶片抑					
	制空化.哈尔滨工程大学学报.					

https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20201130.1146.002.html



www.cnki.net

网络首发:在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶 段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期 刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出 版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出 版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编 辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、 出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。 为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认:纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国 学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷 出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出 版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首 发论文视为正式出版。 第37卷第1期 2015年1月

离心泵叶轮后盖板布置小叶片抑制空化

赵伟国^{1,2}、郁金红^{1,2}、徐阳³、徐泽鑫^{1,2}、王桂鹏^{1,2}

(1.兰州理工大学 能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050; 2.甘肃流体机械及系统重点实验室,甘肃 兰州 730050; 3.
 上海凯泉泵业(集团)有限公司,上海 201804)

摘 要:针对低比转速离心泵内易发生空化现象的问题,本文提出了一种在叶轮后盖板布置小叶片抑制空化的新 方法。通过数值计算和相应的外特性及空化试验,来研究小叶片对低比转速离心泵空化性能的影响,并分析其抑 制空化的机理。结果表明:空化模拟值与试验值吻合较好;空化发展阶段,小叶片改变了流动结构,降低了叶轮 内湍动能强度,明显削弱了叶片背面的旋涡强度,从而改善了离心泵的空化性能;有小叶片的叶轮内空泡体积远 小于无小叶片的叶轮内空泡体积,小叶片抑制空化的同时减小了叶轮内压力主频幅值,但对隔舌处造成一定扰动。 以上分析为离心泵内空化控制提供了一定的研究基础和理论依据。

关键字: 离心泵; 低比转速; 小叶片; 非定常模拟; 空化抑制; 压力幅值; 湍动能; 压力脉动; 叶片载荷 Doi: 10.11990/jheu.201905025

中图分类号: TH311 文献标识码: A

Effect of hub-fitted tiny blade in centrifugal pump on cavitation suppression

ZHAO Weiguo^{1,2}, YU Jinhong^{1,2}, XU Yang³, XU Zexin^{1,2}, WANG Guipeng^{1,2}

(1. College of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China; 2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems of Gansu Province, Lanzhou 730050, Gansu, China; 3. Shanghai Kaiquan Pump Industry (Group) Company, Ltd, Shanghai 201804, China)

Abstract: Aiming at the problem that the cavitation was prone to occur in low specific speed centrifugal pumps, a new method of tiny blade fitted on the hub of impeller was proposed to suppress cavitation. Through numerical calculations, combined with corresponding external characteristics and cavitation experiments, the effect of tiny blades on the cavitation performance of low specific speed centrifugal pumps was investigated, and the mechanism of suppressing cavitation was also analyzed. The results show that the simulation value of cavitation is in good agreement with the experimental value; in the development stage of cavitation, the tiny blade optimizes the flow structure, decreases the intensity of turbulent kinetic energy in the impeller, and obviously weakens the vortex intensity on the hub of the blade, thereby improving the cavitation performance of the centrifugal pump. The cavity volume with the tiny blades is far less than that of prototype impeller, reduces the main frequency amplitude of the pressure in the impeller, also causes a certain degree of disturbance to volute tongue. The above analysis provides a certain research foundation and theoretical basis for suppressing the development of cavitation in the centrifugal pump.

Keywords: centrifugal pump; low specific speed; tiny blade; unsteady numerical simulation; cavitation suppression; pressure amplitude; turbulence kinetic energy; pressure fluctuation; leaf blade surface loading

低比转速离心泵具有高扬程,结构紧凑的优点。 然而,由于其叶片流道狭窄且较长,更容易存在效 率不高,汽蚀性能差以及内部流动不稳定等现象^[1]。

收稿日期: 2019-05-08.
基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0606103); 甘肃省自然基金项目(18JR3RA149).
作者简介: 郁金红,女,硕士研究生; 赵伟国,男,教授.
通信作者: 赵伟国, E-mail: zhaowg@zju.edu.cn 空化的发展是流动不稳定性的来源,会诱发振动^[2,3]、噪声^[4,5]、载荷分布不均衡,伴随流体冲击材料表面所形成的巨大破坏^[6,7],这些均会扰乱系统的正常运行,减小能量转换率,降低机组性能,减少泵体的使用寿命。因此只有充分理解空化的产生、发展和演变特点,才能更好地对其进行控制。

Pouffary 等^[8]采用数值模拟的方法对离心泵内 空化流动进行了全流场分析,结果表明空化发生时

空泡破裂过程中形成并释放的激波影响了离心泵 的能量转换,对外表现为扬程骤降; Medvitz 等^[9] 基于 Kunz 空化模型研究了小空化数下离心泵内的 空化流动,并分析了离心泵在偏离工况点时的扬程 下降机理; Lu 等^[10]模拟研究了低比转速离心泵在 小流量工况下的空化不稳定性现象,结果表明叶轮 与蜗壳间的动静干涉及叶轮内的空化现象是产生 不稳定流动的主导因素; Coutier-Delgosha 等^[11]利 用数值和试验研究了二维离心叶轮中空泡的发生 形式和空间形态分布:Fu 等[12]数值模拟了离心泵在 不同工况下的空化流动,发现设计工况下空泡范围、 尺度、持续时间、压力脉动幅值均最小; Kanwanami 等[13]通过水翼试验提出了一种云空化的控制方法, 即在水翼表面布置障碍物,结果表明布置在水翼中 部的障碍物可以有效阻挡回射流,降低水翼阻力系 数和噪声强度;陈红勋等[14]对带有缝隙引流叶轮的 低比转速离心泵进行了研究,发现缝隙引流叶片可 以提高泵的空化性能,较大程度的改善离心泵的振 动特性; Lee 等[15]发现在水翼尾缘注入的回射流能 够有效延迟梢涡空化的初生,还可降低噪声强度, 之后将其应用于螺旋桨发现有相同的抑制效果;王 巍等[16]提出在水翼吸力面布置凹槽的方法,研究表 明适当的凹槽位置和表面构型可以使水翼边界层 厚度减小,边界层分离点滞后,对空化有明显的抑 制效果,但也会触发凹槽附近区域回射流的加速; Reisman 等^[17]将非冷凝气体注入水翼表面,通过试 验发现空气射流不仅可以减小噪声,同时可以对云 空化产生有效的抑制作用;赵伟国等[18]提出了一种 在离心泵叶片表面布置障碍物抑制空化的主动控 制方法,发现适当高度的障碍物可以改变压力分布, 增大近壁面湍动能,对空化发展各个阶段均有明显 抑制效果; 袁寿其等[19]模拟研究了分流叶片对低比 转速离心泵空化性能和叶轮内流场的影响,其结果 表明分流叶片增大扬程的同时明显提高了泵的抗 汽蚀性能。

本文提出了一种在离心泵叶轮后盖板布置小 叶片来抑制空化发展的新方法,该方法有区别于目 前研究较成熟的分流叶片。将通过数值模拟和试验 相结合的手段,分析小叶片对空化流动的影响及其 控制空化的机理。目前国外还未有该方法的应用, 因此本研究具有一定的创新性。

1 研究模型与数值方法

1.1 计算与试验模型

所选模型为一比转速 $n_s=32$ 、转速 n=500r/min的低比转速离心泵,其设计性能参数如下:流量 $Q_0=8.6m^3/h$,扬程 $H_0=4.2m$,叶轮入口直径 $D_1=85mm$, 叶轮出口直径 $D_2=310mm$,叶轮出口宽度 $b_2=12mm$, 叶片进出口角度 $\beta_1=\beta_2=37^\circ$,叶片数Z=6。

通过 Pro/E 5.0 软件建立三维流场计算域,包括 进口延长段、叶轮、蜗壳三部分,如图 1(a)所示。 该离心泵叶轮,包括原叶片、后盖板和小叶片。小 叶片是基于原型叶片型线减厚降高设计的,厚度为 原叶片的三分之一,高度为原叶片的四分之一,布 置在叶轮后盖板且靠近进口。与原叶片数量相同, 沿叶轮圆周方向,偏置一定角度后与原叶片交错且 均匀布置,如图 1(b)、1(c)所示。



(a) 计算域监测点分布 (b) 单叶片 (d) 小叶片空间分布
 图 1 三维造型
 Fig.1 Three-dimensional modeling

1.2 网格无关性验证

网格划分在 ICEM 中完成,对叶轮进口添加进口延长段,以减小边界条件对泵内部流场的影响。设计了三种不同密度的网格,完成了原型泵在设计工况下的网格无关性分析,见表1。

表1 网格无关性检查	
Tab.1 Check of grid independence	e

方案	叶轮 网格数	进口 网格数	蜗壳 网格数	总网格数	扬程/m
1	1,568,681	444,537	840,303	2,853,521	4.542
2	1,836,551	241,056	374,180	2,451,787	4.499
3	1,352,580	241,056	374,180	1,967,816	4.586

由表1可知,随着网格数的不断减小,扬程误差不大于1%;综合考虑计算资源及数值精度影响,最终网格数确定为1,967,816。

1.3 基本方程

流体运动基本控制方程为基于 Reynolds 平均 的 Navier-Stokes 方程。

连续性方程及动量方程分别为:

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

$$\frac{\partial \left(\rho_{m}u_{j}\right)}{\partial t} + \frac{\partial \left(\rho_{m}u_{i}u_{j}\right)}{\partial x_{j}} = -\frac{\partial p}{\partial x_{i}}$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left[\left(\mu + \mu_{i}\right) \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial u_{i}} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_{k}}{\partial x_{k}} \delta_{ij} \right) \right]$$
(2)

混合相密度可以表示为

$$\rho_{m} = \alpha_{v} \rho_{v} + \rho_{l} \left(1 - \alpha_{v} \right) \tag{3}$$

式中: ρ_m 为混合相密度; u_i 、 u_j 、 u_k 为速度分量; μ 、 μ 分别为混合介质动力粘度、湍流粘度; ρ_v 、 ρ_l 分别为气相和液相密度, α_v 为气相体积分数, δ_{ij} 为克罗内克常数。

1.4 湍流模型

湍流模型选用 SST *k-ω*,不同的湍流模型对近 壁区网格数量要求不同。常用 *Y*⁺值保证近壁面区域 有足够的节点数,从而能更好的捕捉边界层内的流 动情况^[20-21]。*Y*⁺值表示离壁面最近的网格节点到壁面的距离:

$$Y^{+} = \frac{\sqrt{\tau_{\omega}} / \rho^{\Delta} n}{\nu}$$
(4)

式中: τ_{ω} 为壁面切应力, Pa; ρ 为流体密度, kg/m³; Δn 为与壁面最近两个网格节点间距离, m; v 为运动粘度, m²/s。

本文中模拟的近壁网格 Y⁺值能够保证在离心 泵流场模拟中有较好的适用性。

1.5 空化模型

Zwart-Gerber-Belamri 空化模型^[22]基于简化的 Rayleigh-Plesset 方程,忽略二阶项和表面张力,重 点考虑空化初生和发展时空泡体积变化的影响。

$$R_{e} = F_{vap} \frac{3\alpha_{ruc} \left(1 - \partial_{v}\right) \rho_{v}}{R_{B}} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{P_{v} - P}{\rho_{I}}, P < P_{v} \qquad (5)$$

$$R_{c} = F_{\text{cond}} \frac{3\alpha_{v}\rho_{v}}{R_{B}} \sqrt{\frac{2}{3}} \frac{P - P_{v}}{\rho_{l}}, P > P_{v}$$
(6)

式中:源项 R_e 、 R_c 分别表示汽泡的产生(汽化) 和溃灭(凝结)。根据文献[23,24],成核位置体积分 数 $\alpha_{ruc}=5\times10^4$; R_B 为空泡半径取 1.0×10⁻⁶; P为流 场压力, P_v 为饱和蒸汽压力,一般取 25℃下纯水的 饱和蒸汽压力为 3169Pa; F_{vap} 为蒸发过程中经验系 数,取 50; F_{cond} 为凝结过程中经验系数,取 0.01。

1.6 边界条件

采用 ANSYS CFX 软件对计算域进行数值求 解,固体壁面设置为绝热无滑移壁面,边界条件设 为压力进口、质量流量出口。以定常计算结果为初 始值,进行非定常模拟,动静交界面由冻结转子修 改为瞬态冻结转子,收敛精度为 10⁻⁵。叶轮每旋转 3°作为1个时间步长,每个时间步长迭代 20 次,共 旋转8圈,为保证叶轮内部流体进入稳定流动状态, 选取最后一圈的模拟结果进行非定常分析。

2 数值模拟验证

2.1 试验装置

在甘肃省流体机械及工程重点实验室的离心 泵闭式实验台上进行离心泵外特性和空化实验。试 验系统如图2所示。



2.2 湍流模型适用性分析

图 3 为不同工况下有、无小叶片的离心泵模拟 值与试验值的对比曲线。



Fig.3 Performance curves of numerical and experiment values

可以看出,原型泵的扬程试验曲线与模拟曲线 变化趋势接近,误差在 3%以内;效率试验值略低 于其模拟值,主要原因是由于数值计算中并未考虑 机械损失及水力损失。布置的小叶片几乎不影响离 心泵的外特性性能,进一步验证了所选湍流模型对 内部流场有较好的适应性。

2.3 空化模型验证

常采用无量纲空化数来描述空化发生的可能 性和严重程度:

$$\sigma = (P_1 - P_y) / (0.5 \rho U^2)$$
(7)

式中: *P*₁ 是参考压力也是泵的进口压力, *P*_v 是饱和蒸汽压力, 3169Pa; *U*是叶片和前盖板交接 处的圆周速度:

$$U = n\pi D_0 / 60 \tag{8}$$

式中: *n* 是叶轮的转速; *D*₀ 是叶片进口和前盖板交界处的直径。

如图 4 所示,在不同空化数下,无小叶片的扬 程试验曲线均位于其模拟曲线下方,这是因为数值 计算中忽略了部分空化流动的影响因素,例如水质、 气核数以及加工误差等;随着空化数的减小,扬程 试验曲线较模拟曲线下降更为明显;当空化数为 0.15 时,试验值和模拟值分别为 3.80 m 和 3.99 m, 误差为 4.5%。有无小叶片的扬程模拟曲线变化趋势 更为接近,小叶片还可提高低空化数时离心泵的扬 程。由此验证了空化模型对流场分析的可靠性。



Fig.4 Curves of cavitation performance

- 4 -

3 计算结果分析

3.1 小叶片对湍动能分布的影响

湍动能 *k* = 0.5*u*_i*u*_i 描述湍流脉动程度,其强度 和空间不均匀性在一定程度上反映了离心泵能量 的耗散程度,即湍动能越大,流动损失也越大。图 5 为不同空化数下叶轮中间截面的湍动能分布。可 以看出:叶轮内湍动能强度较高区域主要集中在进 口和靠近蜗壳隔舌的出口区域,对水力与空化性能 有较大影响。原型叶轮中,随着空化数的减小,湍 动能分布区域从叶轮进口扩大至叶轮出口,且出口 处的湍动能强度逐渐增强,流动变得紊乱;布置小 叶片后,在空化发展的各个阶段内叶轮中湍动能强 度明显降低,高湍动能分布区域显著缩小且均匀, 能量耗散减少,流动相对稳定,小叶片抑制空化效 果明显。



3.2 小叶片对流场结构的影响

图 6 为不同空化数下叶轮中间截面流线分布。 可以看出,空化数 σ 为 0.84 时,小叶片对流线分布 基本无影响。原型叶轮中,随着空化数减小,叶轮 流道中开始产生漩涡,漩涡强度逐渐增大且集中在 叶片吸力面附近。特别是当空化数 σ 为 0.15 时,流 道内充满了空泡,流线分布较紊乱,旋涡表现出脱 落特征,会导致较大的流动损失与能量耗散;而布 置小叶片的叶轮在空化发展各个阶段内,旋涡强度 明显减弱的同时,有效抑制了空泡的脱落并改善了 空泡形态。小叶片并不会堵塞叶轮入口流道,其作 用类似于分流叶片,通过对流体做功,减小了叶片 背面上的流动分离,进而改善叶轮内流场结构。



3.3 小叶片对叶片载荷分布的影响

图7是叶片压力面与吸力面在设计工况下的不 同位置处的静压分布。横坐标表示叶片上某点在中 间流线上的相对位置,其中0为叶片进口,1为叶 片出口,纵坐标表示叶片表面静压力。叶片表面载 荷定义为同一叶片相同半径处压力面与吸力面压 力之差。可以看出,叶片中间流线表面载荷总体呈 现先增大后减小的趋势,静压最低点位于叶片进口 吸力面处。空化数 σ 为 0.84 时,小叶片基本不影响 叶片中间流线上载荷分布。随着空化数减小,空泡 开始形成于叶片吸力面附近,泵内空化加剧,叶片 表面压力随之减小。而布置小叶片后压力面和吸力 面的静压均明显升高,尤其是当空化数 σ 为 0.15 时, 效果更为显著,进一步说明小叶片在一定程度上能 够改善离心泵的空化性能,这与前面分析结果相一 致。





(9)

3.4 小叶片对空泡体积的影响 定义叶轮内空泡体积为:

定义叶轮内空泡体积为:

$$V_{\rm cav} = \sum_{i=1}^{n} \alpha_{v,i} V_i$$

式中: N 是计算域中控制单元总数量, α_{vi} 是每 一个控制体积中的蒸汽体积分数; V_i是每个控制单 元体积, mm³。图 8 为不同空化数下周期内叶轮中 空泡体积的平均值。当空化数 σ 为 0.84 时,叶轮内 空泡极少,此时有无小叶片的叶轮内空泡体积分别 为 96 和 102mm³; 当空化数 σ 为 0.26、0.19 时,叶 片吸力面附近空化区突然增大,并向流道中部扩展, 此时小叶片较大程度地减少了叶轮内空泡体积,减 少量分别为 6.0%和 14.2%,抑制空化效果明显;空 化数减小为 0.15 时,空泡积累严重,堵塞流道并导 致过流面积受限,影响流体的正常流动和能量转换, 对外表现为扬程曲线大幅下降。对比布置小叶片的 叶轮,可以发现小叶片使叶轮内的空泡体积从 22.18×10⁴mm³减少到 18.03×10⁴mm³,减少量为 18.7%,抑制效果最佳。





3.5 叶轮内压力脉动变化分析

叶轮流道内及蜗壳隔舌处设置监测点如图 1(a) 所示。选择 P₂、P₄、P₆、P₈、P₉、V₀,其中 V₀是蜗 壳隔舌处的点,其余为叶轮流道内的点。

本文中叶轮转速 n=500 r/min, 轴频为 8.3 Hz, 叶片通过频率为 50 Hz。通过快速傅里叶变换,得 到各监测点的压力脉动频域分布,此处并未展示。 频域结果表明,最大压力幅值位于叶频处,且随叶 频倍数增加而快速衰减。小叶片并不会改变不同空 化状态下不同位置处的压力脉动分布,但会略微增 加比原型叶轮更为明显的宽频脉动和轴频脉动,说 明小叶片的存在会对流场产生小幅扰动。

将压力脉动频域分布中主频处的压力值提取

出来,可得到不同空化状态下各监测点的主频压力 幅值。图9可以看出,空化数 σ为 0.84、0.26 时, 小叶片抑制空化的同时,明显降低了叶轮内各个监 测点处的压力幅值,但对隔舌处产生了一定扰动, 表现为幅值增大。空化数 σ为 0.19 时,叶轮进口区 域被空泡覆盖,因此 P2 处压力幅值变化很小;而 P4、P6 监测点处压力脉动由于受到小叶片的干扰, 幅值因此变大。小叶片降低了 P8、P9 处的压力幅值, 是因为 P8、P9 监测点位于叶轮出口区域,不会受到 其干扰作用。空化数为 0.15 时,叶轮流道进口及附 近区域几乎被空泡占据,空化发展严重, P2、P4 监 测点处压力幅值很小;小叶片降低了叶轮出口处 P8、 P9 处的压力幅值,但会增大 P6、V0 处的压力幅值。





力脉动的影响较为复杂,压力幅值变化紊乱;对隔 舌处的扰动随着空化的加剧越来越大。



Fig.9 Amplitudes of dominate frequency of pressure

4 结论

(1) 叶轮盖板布置小叶片后,扬程小幅下降, 效率基本不变,且模拟结果与试验结果吻合较好; 小叶片可提高低空化数时泵的扬程。

(2) 在不同空化数下,小叶片缩小了高湍动能的分布区域,并降低了叶轮内湍动能强度,使流动趋于稳定。这是因为小叶片具有分流作用,通过对流体做功,有效减少了叶片背面上的流动分离,削弱了吸力面附近的漩涡强度,进而改善了离心泵的空化性能。

(3) 有小叶片的叶轮内空泡体积远小于无小叶 片的叶轮内空泡体积,且空化发展严重时,空泡 体积减少量可达 18.7%,小叶片抑制空化效果较 好。

(4) 空化初生及发展阶段,小叶片抑制空化的同时减小了叶轮内压力脉动主频幅值。但在空化严重阶段,小叶片会对流场造成小幅扰动,同时对隔舌处的扰动随空化数减小而增大。

参考文献:

- ZHANG Jinfeng, LI Guidong, MAO Jieyun, et al. Effects of the outlet position of splitter blade on the flow characteristics in low-specific-speed centrifugal pump[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(7): 1-12. DOI:10.1177/1687814018789525
- [2] CHUDINA M. Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump[J]. Acoustical Physics, 2003, 49(4): 463-474. DOI:10.1134/1.1591303
- [3] 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. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2013.22.024
 WANG Songli, TAN Lei, WANG Yuchuan. Characteristics of transient cavitation flow and pressure fluctuation for a centrifugal pump[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(22): 168-173. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2013.22.024
- [4] WEI Yingsan, SHEN Yang, JIN Shuanbao, et al. Scattering effect of submarine hull on propeller non-cavitation noise[J]. Journal of Sound and Vibration,

[5] FRIEDRICHS J, KOSYNA G. Rotating cavitation in a centrifugal pump impeller of low specific speed[J]. Journal of fluids Engineering, 2002, 124(2): 356-362. DOI: 10.1115/1.1457451

2016, 370: 319-335. DOI:10.1016/j.jsv.2016.01.027

- [6] LIU Houlin, LIU Dongxi, WANG Yong, et al. Experimental investigation and numerical analysis of unsteady attached sheet cavitating flows in a centrifugal pump[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2013, 25(3): 370-378. DOI: 10.1016/S1001-6058(11)60375-3
- [7] 黎慧青. 离心泵汽蚀磨损失效分析对策措施研究[D]. 华南理工大学, 2011.
 LI Huiqing. Studies on cavitation and fretting wear of

centrifugal pump and counter measures[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011.

- [8] POUFFARY B, PATELLA R F, REBOUD J L, et al. Numerical simulation of 3D cavitating flows: analysis of cavitation head drop in turbomachinery[J]. Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(6): 061301. DOI:10.1115/1.2917420
- [9] MEDVITZ R B, KUNZ R F, BOGER D A, et al. Performance analysis of cavitating flow in centrifugal pumps using multiphase CFD[J]. Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 377-383. DOI:10.1115/1.1457453
- [10] 卢加兴, 袁寿其, 任旭东, 等. 离心泵小流量工况不 稳定空化特性研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 54-58. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.009
 LU Jiaxing, YUAN Shouqi, REN Xudong, et al. Investigation of instabilities of cavitation at low flow rate of centrifugal pump[J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 54-58. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.08.009
- [11] COUTIER-DELGOSHA O, FORTES-PATELLA R, REBOUD J L. Evaluation of the turbulence model influence on the numerical simulations of unsteady cavitation[J]. Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(1): 38-45. DOI: 10.1115/1.1524584
- [12] FU Qiang, ZHU Rongsheng, Yuan Shouqi, et al. Numberical simulation of low-specific-speed centrifugal pump cavitation influence of pressure different conditions[C]//2010 pulsation under International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010). DOI:10.1109/ICCASM.2010.5619008
- [13] KAWANAMI Y, KATO H, YAMAGUCHI H, et al. Mechanism and control of cloud cavitation[J]. Journal

of Fluids Engineering, 1997, 119(4): 788-794. DOI:10.1115/1.2819499

- [14] 陈红勋,林育战,朱兵. 缝隙引流叶轮离心泵空化试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(7): 570-574.
 DOI:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.07.004
 CHEN Hongxun, LIN Yuzhan, ZHU bin. Experimental study on cavitation performance of centrifugal pump with impeller having leading edge slots[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2013, 31(7): 570-574.
 DOI:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.07.004
- [15] LEE C S, AHN B K, HAN J M, et al. Propeller tip vortex cavitation control and induced noise suppression by water injection[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2018, 23(3): 453-463. DOI:10.1007/s00773-017-0484-4
- [16] 王巍, 唐滔, 卢盛鹏, 等.水翼吸力面布置凹槽抑制空 化研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 40-47.
 WANG Wei, TANG Tao, LU Shengpeng, et al. Investigation of cavitation suppression by arranging pits on hydrofoil suction side[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 40-47. DOI:10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.006
- [17] REISMAN G E, DUTTWEILER M E, BRENNEN C E. Effect of air injection on the cloud cavitation of a hydrofoil[J]. 1997.
- [18] 赵伟国,赵国寿,咸丽霞,等.离心泵叶片表面布置 障碍物抑制空化的数值模拟与实验[J].农业机械学报,2017,48(09):111-120.
 DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.014
 ZHAO Weiguo, ZHAO Guoshou, XIAN Lixia, et al. Effect of Surface-fitted Obstacle in Centrifugal Pump on Cavitation Suppression[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 111-120.

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.014

- [19] 张云蕾, 袁寿其, 张金凤, 等. 分流叶片对离心泵空 化性能影响的数值分析[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(10): 846-852.
 DOI:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0142
 ZHANG Yunlei, YUAN Shouqi, ZHANG Jinfeng, et al. Numerical analysis on effects of splitter blades on cavitation performance in a centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering (JDIME), 2015, 33(10): 846-852.
 DOI:10.3969/j.issn.1674-8530.14.0142
- [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. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.13.007 ZHANG Desheng, WU Suqing, SHI Weidong, et al. Application and experiment of different turbulence models for simulating tip leakage vortex in axial flow pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(13): 46-53. DOI:10.3969/j.issn.1002-6819.2013.13.007
- [21] JI Bin, LUO Xianwu, WANG Xin, et al. Unsteady

numerical simulation of cavitating turbulent flow around a highly skewed model marine propeller[J]. Journal of Fluids Engineering, 2011, 133(1): 011102. DOI: 10.1115/1.4003355

- [22] ZWART P J, GERBER A G, BELAMRI T. A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics[C]//Fifth International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japan. 2004, 152.
- [23] 王柏秋, 王聪, 黄海龙, 等. 空化模型中的相变系数 影响研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(8): 378-384.
 DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2011.09.0592
 WANG Baiqiu, WANG Cong, HUANG Hailong, et al. Study of the influence of phase-change coefficient in the cavitation model[J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(8): 378-384.
 DOI:10.6052/j.issn.1000-4750.2011.09.0592
- [24] JI Bin, 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. DOI:10.1016/j.ijmultiphaseflow.2012.11.008