

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0108



基于改进 Kunz 模型的船用离心泵空化特性

王勇¹, 陈杰¹, 罗凯凯¹, 刘东喜², 李雨¹, 严骏¹

(1. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013; 2. 上海交通大学海洋工程学院, 上海 200240)



王勇

摘要: 为研究空化对船用离心泵的影响,把湍流压力脉动的影响引入到 Kunz 模型以修正汽化压力. 以一台比转数为 132.7 的船用离心泵为研究对象,在不同流量工况情况下,进行了空化性能的模拟计算和试验研究. 通过对比空化性能的数值计算结果和试验值发现,在不同流量系数下 Kunz 模型改进前后都能捕捉到扬程系数下降时的临界空化数,但改进后的 Kunz 模型预测到的临界空化数更加贴近试验值. 此外,分析了设计工况下基于改进 Kunz 模型获得的叶片间气相体积分布和叶片表面载荷分布,研究表明:空泡首先在叶片进口边的吸力面产生,随着空化数的减小,叶片压力面也会有少量空泡产生,少数位置吸力面和压力面相接,最后空泡充满整个流道,导致泵的性能下降;随着空化数的减小,叶片进口边附近会先产生低压区,随后沿着叶片向出口边叶片蔓延,最后在叶片吸力面和压力面都存在大面积的低压区;叶片 5(隔舌附近)比叶片 2(叶片 5 相对的叶片)中间流线承受的载荷要小,随着空化数的减小,叶片表面压力有所减小,且叶片 2 进口处压力出现了零点,这主要是空化程度加剧导致的.

关键词: 船用离心泵;空化特性;Kunz 模型;试验;数值分析

中图分类号: S277.9; TH311 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2017)05-0381-06

王勇, 陈杰, 罗凯凯, 等. 基于改进 Kunz 模型的船用离心泵空化特性[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(5): 381-386.

WANG Yong, CHEN Jie, LUO Kaikai, et al. Analysis of cavitation characteristics of marine centrifugal pump based on modified Kunz model[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2017, 35(5): 381-386. (in Chinese)

Analysis of cavitation characteristics of marine centrifugal pump based on modified Kunz model

WANG Yong¹, CHEN Jie¹, LUO Kaikai¹, LIU Dongxi², LI Yu¹, YAN Jun¹

(1. National Research Center of Pumps, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China; 2. School of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Cavitation erosion may be inevitable when a marine centrifugal pump is in operation. Thus, in order to investigate effects of cavitation on the performance of a marine centrifugal pump, the turbulent pressure fluctuation was involved in the Kunz cavitation model to alter the phase transition critical pressure, i. e. vaporization pressure. A marine centrifugal pump with a specific speed of 132.7 was chosen as a study model and its cavitation performance was predicted numerically and experimentally at different flow rates. It was found that both Kunz model and its updated version were able to capture the critical cavitation condition, and the head curve due to the updated model was in better agreement with the observed curve. In addition, the vapor volume fraction distribution between two blades and the

收稿日期: 2016-05-17; 网络出版时间: 2017-05-03

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170503.1640.024.html>

基金项目: 江苏省“六大人才”高峰项目(GDZB-017); 流体及动力机械教育部重点实验室开放课题资助项目; 江苏省产学研联合创新资金——前瞻性联合研究项目(BY2015064-10); 江苏高校优势学科建设工程项目

作者简介: 王勇(1982—),男,吉林白山人,副研究员,博士(wylq@ujs.edu.cn),主要从事泵空化特性研究.

陈杰(1991—),男,安徽合肥人,硕士研究生(通信作者,985724472@qq.com),主要从事流体机械内部流动研究.

blade loading distribution based on that improved model were analyzed at the design point. The results show that bubbles were generated on the pressure suction side near the leading edge at first, then a small amount of bubbles occurred on the blade pressure side with decreasing cavitation number. At last, the impeller passages were fully blocked by bubbles, leading to a declined performance for the centrifugal pump. With the decrease of cavitation number, a low pressure zone occurred near the blade inlet edge firstly, then spread along the blade toward the blade outlet, eventually the low pressure covered the blade pressure and suction sides. The blade loading in the middle streamline of blade 5 (the blade near the tongue) was smaller than that in blade 2 (the blade is axisymmetric with blade 5). With the decrease of cavitation number, the pressure on the blade surfaces was reduced, and there was a zero pressure at the inlet of blade 2, this is mainly caused by cavitation aggravation.

Key words: marine centrifugal pump; cavitation characteristics; Kunz model; experiments; numerical analysis

船用离心泵作为一种特殊用途的泵,与普通离心泵相比,由于受运行环境的限制以及特殊性能要求,从设计到制造,再到安装运行都有着极为苛刻的要求.目前中国船用离心泵设计及制造水平较国外均有很大差距,在可靠性方面的研究更是处于缓慢的起步阶段^[1].随着船舶向着高速、轻型、小型化发展,对船用离心泵的要求也越来越高,空化问题是设计船用离心泵所不能回避的问题,它对船用离心泵的可靠性有着重要影响^[2].由于试验成本过高,随着计算机科学和计算流体力学技术的发展^[3],数值模拟成为船用离心泵空化特性研究的主要方法^[4-5].

数值模拟的关键是建立合适的空化模型^[6-7].近几年 Kunz 模型在水翼、螺旋桨等空化流的数值模拟中得到了较广泛的应用.该模型是 KUNZ 等^[8]在 MERKLE 等^[9]工作的基础上对影响空化的因素进行量纲分析而获得,模型中包含 2 项源项:蒸汽的生成项和凝结项. LIU 等^[10]选用 Kunz 空化模型和 $k-\varepsilon$ 湍流模型对 NSRDC4381 螺旋桨进行了空化模拟,得到的模拟结果与试验值比较吻合.刘厚林等^[11]采用 Kunz 模型在不同流量系数下对离心泵的空化特性进行了数值计算和试验研究,并对设计工况下叶轮流道空泡、总压系数分布规律和叶片压力系数分布规律进行了分析,结果表明 Kunz 模型能够比较准确地反应离心泵内部流动特性. MORGUT 等^[12]应用 Kunz 模型对水翼空化进行了数值模拟,对相变系数得到了比较理想的结果.黄彪等^[13]采用 Kunz 模型对绕水翼的云状空化流动进行了数值模拟,比较准确地捕捉到了云状空化区域的空穴形态和空泡脱落的非定常细节.上述研究都是 Kunz 模型在数值模拟中的应用,模拟结果也都比较理想,但

是在进行空化模拟时,上述研究并没有考虑湍动能的影响,而湍动能是引起压力脉动的主要原因,压力脉动会对空化流产生影响.因此,笔者根据 SINGHAL 等^[14]提出的利用密度函数来研究压力脉动影响的思想,把湍流压力脉动引入到空化模型中,对 Kunz 模型进行改进.

文中以 125c11a-13 型立式舰船用离心泵为研究对象,分别应用 Kunz 模型和改进后的 Kunz 模型对模型泵进行空化流数值计算,并与空化性能的试验结果进行对比以验证改进 Kunz 模型的有效性和准确性,最后基于改进后的 Kunz 模型,分析船用离心泵内部空化流动特性.

1 研究对象及网格划分

1.1 研究对象

以 125c11a-13 型立式舰船用离心泵为研究对象,离心泵主要设计性能参数分别为设计流量 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 50 \text{ m}$,转速 $n = 2\,900 \text{ r/min}$,比转数 $n_s = 132.7$.离心泵主要结构参数分别为进口直径 $D_1 = 125.00 \text{ mm}$,出口直径 $D_2 = 222.00 \text{ mm}$,叶片数 $Z = 6$,叶片包角 $\varphi = 105^\circ$,叶轮出口宽度 $b_2 = 21.06 \text{ mm}$,蜗壳基圆直径 $D_3 = 234.00 \text{ mm}$,蜗室进口宽度 $b_3 = 40.00 \text{ mm}$.

应用 Pro/E 软件对计算域进行三维造型,三维造型如图 1 所示(为了在结果分析中叶片位置比较明确,仅给出叶轮、蜗壳、进口弯管和出口延长段部分参考网格区域),计算域包括进口弯管、叶轮、蜗壳、出口延长段 4 部分.离心泵为单级单吸,进口弯管设有隔板,以改善叶轮进口流态,减少预旋.增加出口延长段是为了减小较大的出口速度梯度对计

算结果精度的影响。



图1 计算模型

Fig.1 Computational model

1.2 网格划分

应用 ICEM CFD 软件对该船用离心泵计算域进行六面体结构化网格划分,流体域网格划分如图2所示.进行网格无关性验证,最终选择网格单元总数为 2 093 542.

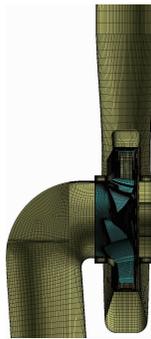


图2 计算区域网格划分

Fig.2 Grid in computational domains

2 数学模型与参数设置

2.1 空化模型改进

为了充分考虑湍流压力脉动对船用离心泵的影响,在 Kunz 空化模型的基础上把湍流压力脉动引入到空化模型中,模型的最终形式为

$$R_e = \frac{C_{dest} \rho_v (1 - \alpha_v) \max(p_v - p, 0)}{(0.5 \rho_l U_\infty^2) t_\infty}, \quad (1)$$

$$R_c = \frac{C_{prod} \rho_v \alpha_v (1 - \alpha_v)^2}{t_\infty}, \quad (2)$$

$$p_{turb} = 0.39 \rho k, \quad (3)$$

$$p_v = (p_{sat} + p_{turb})/2, \quad (4)$$

式中: p_v 为汽化压力; α_v 为气相体积分数; ρ_l 为液相密度; U_∞ 为自由流速度; t_∞ 为特征时间尺度, $t_\infty = L/U_\infty$,其中 L 为特征长度; ρ_v 为气相密度; p_{turb} 为湍流

压力脉动; ρ 为混合介质密度; k 为湍动能; p_{sat} 为饱和汽化压力; $C_{dest} = 9.2 \times 10^5$, $C_{prod} = 3.0 \times 10^4$.

2.2 数值计算方法

应用计算流体动力学软件 ANSYS CFX 14.5 全隐式耦合技术对方程组进行求解,采用 RNG $k - \epsilon$ 湍流模型以考虑湍流的影响.2 种计算模型边界条件均为总压进口和质量流量出口,固壁处采用无滑移边界条件,近壁处采用 Scalable 壁面函数,进口空泡体积分数设为 0,液体体积分数设为 1.叶轮与蜗壳之间的耦合作用通过设置 Frozen Rotor 交界面实现.泵内部空化的产生通过逐渐降低进口压力实现,参考压力设置为 0.

为了使数值计算数据和试验数据便于处理,定义以下量纲一化参数,分别为流量系数 ϕ ,扬程系数 ψ ,空化数 σ ,即

$$\phi = \frac{Q}{\pi D_2 b_2 u_2}, \quad (5)$$

$$\psi = \frac{H}{u_2^2 / 2g}, \quad (6)$$

$$\sigma = \frac{p_{in} - p_v}{0.5 \rho_l u_2^2}, \quad (7)$$

上述式中: u_2 为叶轮出口圆周速度; H 为扬程; g 为重力加速度; p_{in} 为进口静压.

3 空化性能曲线及试验验证

为了验证计算结果的正确性,对该离心泵进行空化试验,试验在江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心泵性能试验台上进行.

图3为不同流量系数下的数值计算结果和试验结果对比.由图3可以看出:在不同的流量系数下,当空化数减小时,2 个空化模型都能预测到扬程系数的变化趋势;在一定空化数范围内,空化数的减小并没有引起扬程系数的变化,这在 3 个流量系数下都有体现;随着空化数逐渐减小到临界值时,扬程系数急剧变化,3 个流量系数下基本都能反映该变化趋势,而且与试验值的变化趋势基本一致;随着空化数的进一步减小,在大流量工况下,数值计算结果与试验结果的偏差大于小流量工况,这主要与大流量工况下更易发生空化有关;与 Kunz 模型相比,3 个流量系数下改进 Kunz 模型的计算结果更加贴近试验值.这说明通过将湍流压力脉动的影响引入到 Kunz 空化模型中,修正了汽化压力,更加符合离心泵的空化流动.

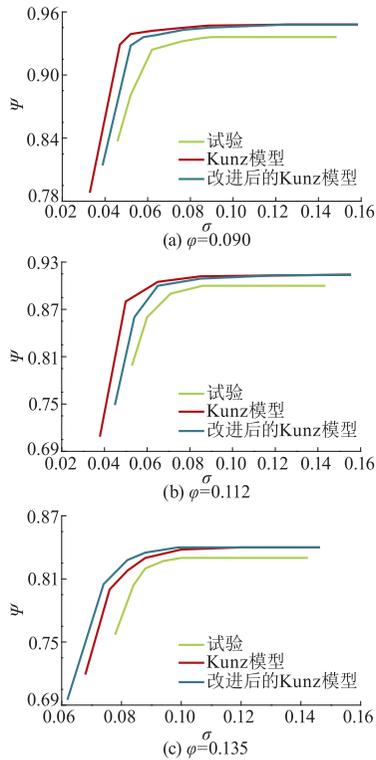


图 3 离心泵空化性能曲线

Fig. 3 Cavitation head curves of centrifugal pump

定义扬程系数下降 3% 时对应的空化数为临界空化数 σ_c , 表 1 给出了不同空化模型在不同流量系数下的临界空化数与试验的临界空化数.

表 1 临界空化数值计算值和试验值对比
Tab. 1 Comparison between critical cavitation values with different model and measured values

ϕ	σ_c		
	改进 Kunz 模型	Kunz 模型	试验
0.090	0.051	0.046	0.058
0.112	0.061	0.054	0.065
0.135	0.081	0.077	0.085

由表 1 可以看出, 在相同流量系数下, 2 种模型数值模拟的结果基本一致, 而改进后的 Kunz 模型预测的临界空化数与试验值更为接近, 可见改进后的 Kunz 模型的预测结果更为准确, 能较好地反映船用离心泵的实际运行情况. 因此, 基于该模型的计算结果对船用离心泵进行内部空化特性分析.

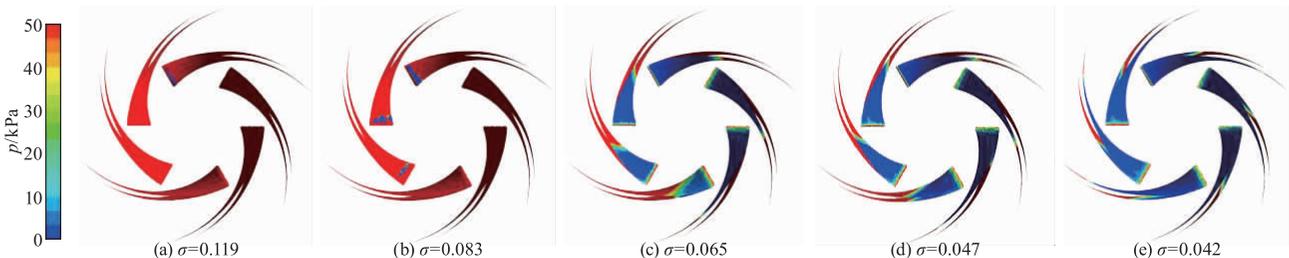


图 5 不同空化数叶片静压分布

Fig. 5 Static pressure contour in blade-to-blade surface at different cavitation numbers

4 空化特性计算结果及分析

4.1 空泡分布

当离心泵内的局部工作压力小于该温度下的饱和蒸汽压时, 就会产生空泡. 图 4 为在流量系数 $\phi = 0.112$ (设计工况), 不同空化数条件下的 $span = 0.5$ 切面上的叶片间气相体积分分数分布, 其中, 定义 $span$ 为后盖板到前盖板的量纲一化距离.

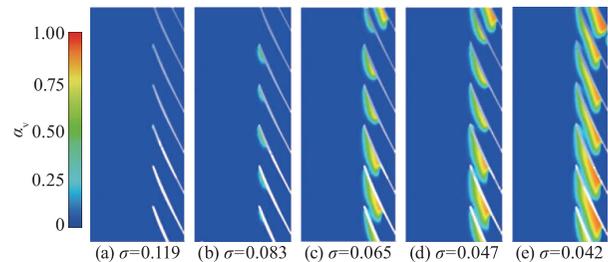


图 4 不同空化数切面上叶片间空泡体积分数分布

Fig. 4 Vapour volume fraction distribution in blade-to-blade surface at different cavitation numbers

由图 4 可以看出: 随着空化数的减小, 空化程度总体趋势逐渐加剧; 当空化数 $\sigma = 0.119$ 时, 此时空化并没有发生, 在叶片间没有空泡的产生; 当空化数 $\sigma = 0.083$ 时, 此时空化现象发生, 在叶片的吸力面产生少量的空泡, 但对离心泵正常运转并没有什么影响; 随着空化数的减小, 当空化数 $\sigma = 0.065$ 时, 此时叶片吸力面的空泡增加, 在叶片压力面也有少量的空泡产生; 当空化数降低到 $\sigma = 0.047$ 时, 叶片压力面的空泡进一步增加, 压力面的空泡也变得多, 同时有少数位置吸力面的空泡与压力面的空泡相接; 当空化数 $\sigma = 0.042$ 时, 空泡基本充满整个流道, 此时对泵的运行产生严重影响, 会导致泵的性能下降. 从图中还可以看出空泡的分布并不对称, 这可能是蜗壳、吸水室不对称导致的.

4.2 叶片静压分布

图 6 为流量系数 $\phi = 0.112$ (设计工况) 时, 不同空化数下叶片表面静压分布.

结合图4和图5可以看出:随着空化数的减小,进口处的低压区沿着叶片逐渐向出口处蔓延;当空化数 $\sigma = 0.119$ 时,仅在1个叶片吸力面有极小的低压区,这并不影响离心泵的正常运行;当空化数 $\sigma = 0.083$ 时,叶片进口边附近低压区的范围扩大至几个叶片,此时会在叶片进口边附近产生空泡;随着空化数的进一步减小,当空化数为 $\sigma = 0.065$ 时,叶片进口边处附近吸力面全部有低压区的存在,空泡大量产生;当空化数为 $\sigma = 0.047$ 时,低压区沿着叶片向出口处蔓延;当空化数 $\sigma = 0.042$ 时,在叶片吸力面和压力面都有大面积低压区存在,流道内会有大量空泡产生,会对离心泵的运转产生较大的影响。

4.3 叶片表面中线分布

图6为选取的2个叶片(叶片2和叶片5,见图1)在流量系数 $\phi = 0.112$ (设计工况)时不同位置叶片表面压力分布,横轴 X 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,纵轴代表叶片表面压力。定义叶片表面载荷为同一叶片相同半径处压力面与吸力面压力之差。

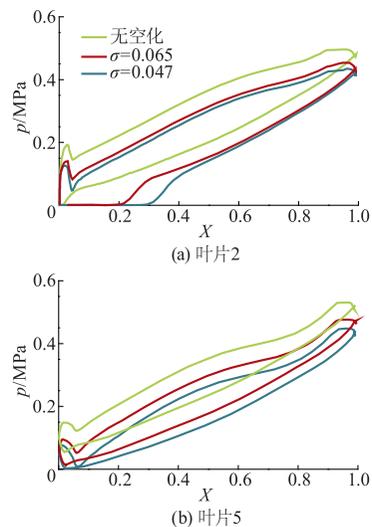


图6 叶片中间流线载荷分布

Fig. 6 Blade loading distribution in middle streamline

由图6可以看出:当泵内无空化发生时,叶片压力面中间流线的载荷变化规律比较复杂,先出现增大的趋势,然后减小到一个最小值,然后又增大,在出口处达到最大值,对于这个最小位置认为是由于该点处边界层分离导致的;吸力面中间流线载荷的变化比较有规律,从叶片进口处开始增大,到叶片出口处达到最大值,其中叶片5的出口处最大值要大于叶片2的,并且中间流线承受的载荷也比叶片2的要小,主要原因可能是叶片5靠近蜗壳的隔舌

部位,隔舌对其表面的载荷影响比较大,动静干涉作用比较明显;随着空化数的减小,泵内部空化程度增加,叶片表面中间流线的载荷也相应地发生变化,叶片5和叶片2叶片表面压力有所减小,压力面中间流线载荷规律并没有发生明显的变化,但在叶片5吸力面进口处,中间流线的载荷几乎保持为0,然后继续增大,到出口处达到最大值,这可能是因为空化对叶片表面载荷产生了影响;随着空化数减小到0.047,此时泵内的空化程度比较剧烈,叶片5的变化趋势与之前一致,但在叶片2进口处,叶片压力面表面进口处压力出现了零点,然后又增大,这也可能是空化程度加剧对叶片表面压力的影响。

5 结论

1) 为了更好地模拟离心泵内的流动情况,在Kunz模型的基础上,把压力脉动的影响引入到空化模型中以修正汽化压力。通过将模型改进前后计算得到的空化性能曲线与试验结果进行对比发现,改进后的Kunz模型比Kunz模型更加贴近试验值,能更加准确地预测到临界空化数,说明改进后的Kunz模型具有一定的可行性和准确性。

2) 对改进后Kunz模型在设计工况时不同空化数条件下叶片表面静压分布分析发现:当空化数 $\sigma = 0.119$ 时,进口边附近低压区并不明显;空化数 $\sigma = 0.083$ 时,进口边附近吸力面低压区扩大;空化数 $\sigma = 0.065$ 时,低压区沿着叶片向出口边蔓延;空化数 $\sigma = 0.047$ 时,低压区继续向出口边蔓延;当空化数进一步减小至0.042时,在叶片的吸力面和压力面都存在大面积低压区。

3) 通过对改进后的Kunz模型在流量系数 $\phi = 0.112$ (设计工况)下对叶片间气相体积分分数分布进行分析发现:当空化数 $\sigma = 0.119$ 时,无空泡产生;空化数减小0.083时,叶片吸力面产生少量空泡;空化数进一步减小至0.065时,叶片吸力面产生大量空泡,同时叶片压力面也产生少量空泡;随着空化数的减小,空化程度加剧,叶片吸力面的空泡蔓延至压力面,最后充满整个流道,导致船用离心泵的性能严重下降。

4) 通过对改进后的Kunz模型在流量系数 $\phi = 0.112$ (设计工况)下叶片表面载荷分布分析发现:叶片5(隔舌附近叶片)比叶片2(叶片5相对的叶片)中间流线承受的载荷要小;随着空化数减小,叶片表面压力有所减小,叶片2进口处压力出现了零

点,这主要原因是空化程度加剧导致的。

参考文献 (References)

- [1] 李颜. 基于 CFD 的船用离心泵叶轮抗汽蚀优化设计 [D]. 大连:大连海事大学,2012.
- [2] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京:中国宇航出版社,2011.
- [3] 杨孙圣,孔繁余,周水清,等. 离心泵汽蚀性能的数值计算与分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2010,38(10):93-95.
YANG Sunsheng, KONG Fanyu, ZHOU Shuiqing, et al. Numerical simulation and analysis of centrifugal pump cavitation[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition), 2010, 38(10): 93-95. (in Chinese)
- [4] 杨敏官,倪丹,李忠,等. 791 翼型非定常空化流动数值计算研究[J]. 流体机械,2015,43(2):17-23.
YANG Minguan, NI Dan, LI Zhong, et al. Numerical simulation of unsteady cavitation flow structure around 791 hydrofoil[J]. Fluid machinery,2015,43(2):17-23. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] LI H, KELECY F K, EGELJA M A, et al. Advanced computational modeling of steady and unsteady cavitating flows[C]//Proceedings of the 2008 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition,2008:1-11.
- [7] 刘厚林,刘东喜,王勇,等. 三种空化模型在离心泵空化流计算中的应用评价[J]. 农业工程学报,2012,28(16):54-59.
LIU Houlin, LIU Dongxi, WANG Yong, et al. Application evaluation of three cavitating models on cavitating flow calculation in centrifugal pump[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16): 54-59. (in Chinese)
- [8] KUNZ R F, BOGER D A, SRINEBRING D R. A preconditioned Navier-Stokes method for two-phase flows with application to cavitation prediction[J]. Computers & fluids,2000,29(8):850-872.
- [9] MERKLE C L, FENG J, BUELOW P E O. Computational modeling of the dynamics of sheet cavitation [C]//Proceedings of the Third International Symposium on Cavitation, 1998: 307.
- [10] LIU Dengcheng, HONG Fangwen, ZHAO Fen, et al. The CFD analysis of propeller sheet cavitation [C]//Proceedings of the 8th International Conference on Hydrodynamics. Nantes: Ecole Centrale de Nantes Fluid Mechanics Laboratory,2008:1-6.
- [11] 刘厚林,刘东喜,王勇,等. 基于 Kunz 模型的离心泵空化流数值计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2012,40(8):17-20.
LIU Houlin, LIU Dongxi, WANG Yong, et al. Kunz model-based numerical prediction of the cavitating flow in centrifugal pumps[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition), 2012, 40(8): 17-20. (in Chinese)
- [12] MORGUT M, NOBILE E, BILUS I. 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.
- [13] 黄彪,王国玉,张博,等. 云状空化流动数值模拟的空化模型评价[J]. 北京理工大学学报,2009,29(9):785-789.
HUANG Biao, WANG Guoyu, ZHANG Bo, et al. Evaluation of the cavitation models on the numerical simulation of cloud cavitating flows around a hydrofoil[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2009,29(9):785-789. (in Chinese)
- [14] SINGHAL A K, VAIDYA N, LEONARD A D. Multi-dimensional simulation of cavitating flows using a PDF model for phase change[C]//Proceedings of the ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting,1997.

(责任编辑 陈建华)