

诱导轮离心泵空化条件下扬程下降分析*

李晓俊 袁寿其 潘中永 刘威 骆寅

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 以空化条件下离心泵的扬程下降为切入点, 基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流方程和 Rayleigh-Plesset 空化模型研究诱导轮的离心泵空化流动, 获得了空化条件下离心泵流道的空泡分布及扬程下降规律, 分析结果表明, 空泡发展至诱导轮的喉部时, 扬程开始下降; 随着压力的降低, 空泡首先出现在叶轮进口, 并逐步发展至整个流道, 进而影响离心泵的内部流动及能量转换; 空化同时会引起局部流道的压增现象, 压增的位置随空化强度的增大向下游流动道移动。验证了诱导轮可以改善泵的空化性能, 它能抑制空泡在主叶轮内的扩散, 使空化仅造成主叶轮叶片进口处压力的缓慢下降, 而主叶轮的扬程并未明显下降。

关键词: 离心泵 诱导轮 扬程 空化 数值模拟

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)09-0089-05

Analysis of Cavitation Head Drop in Centrifugal Pump with Inducer

Li Xiaojun Yuan Shouqi Pan Zhongyong Liu Wei Luo Yin

(Research Center of Fluid Machinery and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Based on the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and Rayleigh-Plesset cavitation function, three dimensional turbulent flow fields in centrifugal pump with inducer were calculated and analyzed numerically. The results showed a good prediction of the head drop for five flow rates. The hydrodynamic mechanism of the head drop was investigated through a local and global study of the flow fields. It was found that head began to approximately drop when the cavitation sheet reached the throat between two adjacent blades. The total pressure breakdown caused by cavitation firstly occurred in the upstream region of the impellers, then progressive decreased as the pressure rose in the whole blade-to-blade passage. Meanwhile, the cavity increased the total pressure of local regions, which would move downstream by the development of cavitation.

Key words Centrifugal pump, Inducer, Head, Cavitation, Numerical analysis

引言

空化是水力机械运行中的一种特有现象, 在流体流动过程中, 液体的局部压力等于或接近于当地温度饱和蒸汽压时, 就产生气泡或空化^[1]。对于离心泵来说, 空化会干扰机组的正常运行, 甚至对过流部件造成破坏。如何提高离心泵的空化性能是一个重要研究方向, 而在主叶轮前加装诱导轮就是为了提高离心泵空化性能^[2]。

一般来说, 空化发展到一定程度会使离心泵的效率 and 扬程降低, 并由此出现了以扬程下降 3% 时的有效净正吸头为当前流量点的泵的必需净正吸头。由于该方法存在很多不足之处, 有学者提出修正泵必需净正吸头以表征和预测泵的空化状态^[3-4]。但这些值都只是从外特性角度确定的一个静态临界值, 而没有兼顾到空化对离心泵性能的影响是动态的、不断积累的过程。因此, 研究空化状态下离心泵内部流动特征及其能量转换过程是非常必

收稿日期: 2010-11-01 修回日期: 2010-12-07

* 国家杰出青年科学基金资助项目(50825902)、江苏省创新学者攀登项目(BK2009006)和江苏省研究生创新计划项目(CXZZ11_0564)

作者简介: 李晓俊, 博士生, 主要从事离心泵空化性能研究, E-mail: lixiaojun530@163.com

通讯作者: 袁寿其, 研究员, 博士生导师, 主要从事排灌机械及流体机械研究, E-mail: shouqi@ujs.edu.cn

要的。本文以带前置诱导轮的离心泵为研究对象,通过数值模拟和实验探索诱导轮离心泵的内部流动和外特性的相关细节,定性和定量分析空化条件下带诱导轮离心泵的扬程下降规律,并讨论加装诱导轮对离心叶轮空化性能的影响。

1 空化模拟方法

1.1 控制方程及边界条件

在旋转坐标系下,建立三维不可压缩湍流流动相应的控制方程^[5]。湍流方程选取 RNG $k-\varepsilon$ 方程,空化模型选取均相流模型,并采用 Rayleigh-Plesset 方程进行空化计算。方程离散时,对流项采用二阶精度格式,其他项采用中心差分格式,收敛精度设为 1×10^{-5} 。整个计算选用商用软件 ANSYS-CFX。

根据流量设定进口速度,进口的湍动能 k 和湍动能耗散率 ε 取值参照文献^[5],设定进口气体的体积分数为零。对于无空化流动,参考实验扬程值,设置出口总压。进行空化计算时,逐步变化出口压力,以控制空化的发生和发展。叶轮形成的壁面定义为旋转边界,其转速为叶轮转速;其他壁面定义为无滑移边界。近壁区采用标准壁面函数,并令所有壁面粗糙度为 0.012 5 mm。为简化空化计算,以 25℃ 的清水为工作介质。

1.2 计算模型及网格划分

几何尺寸及设计工况参数如下:诱导轮轮毂直径 $D_i = 139.6$ mm,叶片数 $Z_i = 2$,进口轮毂比 $R_{d1} = 0.25$,轮缘包角 $\varphi = 265^\circ$;主叶轮出口直径 $D = 262$ mm,叶片数 $Z = 6$ 。设计流量 $Q_d = 122.5$ m³/h,设计扬程 $H_d = 84.5$ m,必需净正吸头为 0.86 m,转速 $n = 2930$ r/min。

本文的网格生成在 ICEM 中完成,选取四面体非结构化网格对离心泵以及进出口伸长段划分网格,考虑到计算机的处理能力及计算结果的可靠性,设定整个计算域的网格数为 1 638 367,其网格图如图 1 所示。

2 CFD 计算结果与实验验证

图 2 为额定转速下离心泵预测值与实验值的比较。由图可见,数值模拟得到的扬程值与实验值的误差在 3% 以内。实验测得的最佳效率时的流量为 122.5 m³/h,而模拟的结果为 125 m³/h,在整个流量范围内,其效率变化的趋势一致,模拟的水力效率与实验总效率之间的差值不超过 10%。

图 3 为实验和数值预测得到的流量-临界净正吸头曲线,在离心泵发生空化时,选取扬程下降 3%

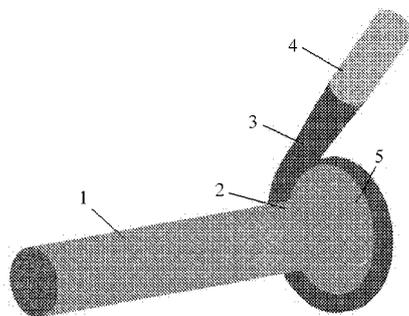


图 1 计算域及网格

Fig. 1 Computational domain and unstructured mesh

1. 进口段 2. 诱导轮 3. 蜗壳 4. 出水段 5. 叶轮

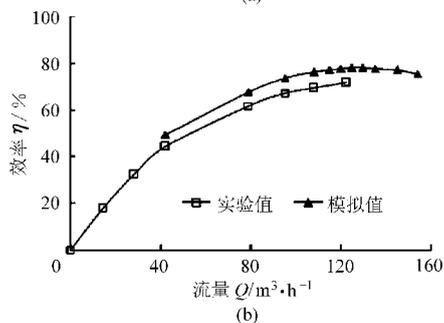
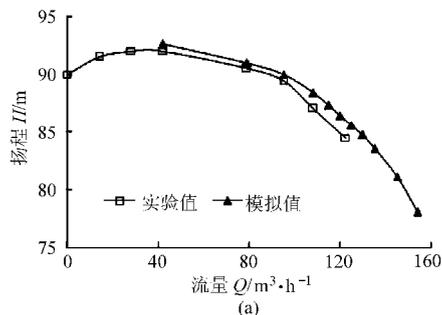


图 2 离心泵模拟与实验性能曲线对比

Fig. 2 Overall performance of centrifugal pump

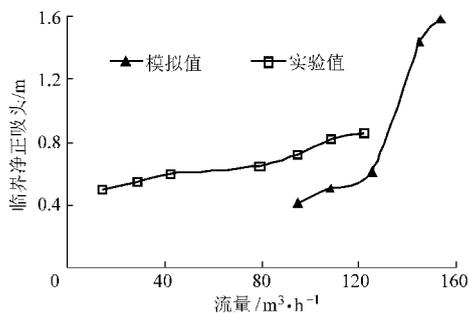


图 3 模拟与实验流量-临界净正吸头对比

Fig. 3 Cavitation curves of centrifugal pump

时的汽蚀余量作为临界净正吸头。可求得模拟流量范围内的模拟值和实验值最大误差为 0.32 m。

由上述外特性曲线可以发现,在空化和无空化状态下,数值模拟的结果与实验值较为接近,说明所使用的计算方法是有效的。

3 离心泵的扬程下降分析

为研究离心泵空化状态下的扬程下降及能量转

换机理, 计算了5个流量下的空化性能: Q 为 95、108、125、145 和 $153.9 \text{ m}^3/\text{h}$, 并分析了空化对离心泵总体性能及局部的空化流态的影响。图4为离心泵有效净正吸头与扬程的关系, 从图中可见, 空化会造成扬程的下降: 对任一流量点, 有效净正吸头均存在一个临界值, 低于该值时, 扬程开始明显的下降。

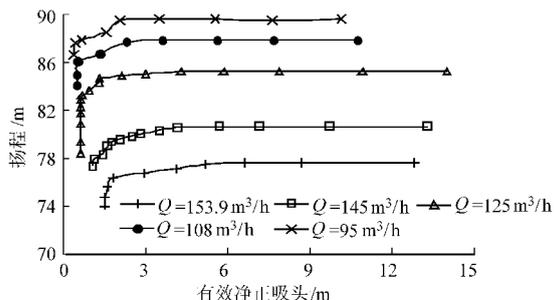


图4 离心泵有效净正吸头与扬程关系曲线

Fig. 4 Curves of head and NPSHa

Gonzalo-Flores N 认为泵的扬程下降是由于流道内的空泡增加到一定程度的结果。由于空化的出现, 会改变叶轮内的流态分布, 尤其是叶片进口处; 而且压缩和凝结空泡也需消耗部分能量^[6]。本文将从定性和定量两个方面, 系统的探讨离心泵扬程下降的规律。

3.1 叶轮内的空泡发展

选取设计流量 $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的扬程下降曲线 (图5), 并结合图6探讨诱导轮和主叶轮内空化的发展与离心泵的扬程下降之间的关系。

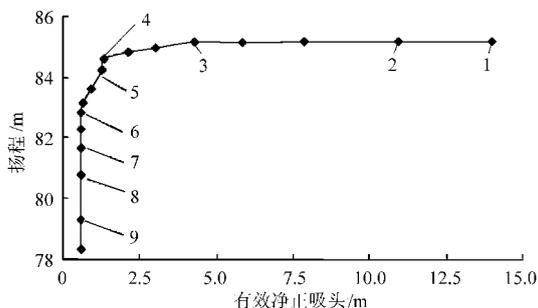


图5 $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的扬程下降曲线

Fig. 5 Head-drop curves in cavitating regime

本文以图5上的9个工况为研究对象, 并将每个工况点对应的空泡分布绘制成图6。为便于分析离心泵中的空化程度, 采用气体体积分数为10%的等值面来定性描述叶轮流道的空泡区域, 其中点1为无空化工况。由图可见, 在离心泵进口压力很高, 即有效净正吸头为 10.94 m 时, 主叶轮叶片进口的背面已经出现空泡 (点2), 而该流量下扬程下降3%对应的有效净正吸头为 0.61 m (点6)。叶轮进口稍后的叶片背面是叶片上压力最低处, 因为此处位于流道转弯的内壁, 流体由进口段的轴向运动转换为旋转运动, 由于流体的离心效应, 此处流速大,

压力低, 因此该区域通常易发生空化。但此时空泡只是在局部区域产生和破灭, 不会堵塞流道或者影响叶轮内部的能量交换, 因而不会影响泵的扬程。随着进口压力的降低, 空泡区的长度和厚度增加, 并沿着叶片背面填充叶轮流道。由图可见, 相对于主叶轮, 空泡在诱导轮内的发展更加剧烈, 空泡发展到诱导轮流道喉部时, 扬程开始下降 (点3、点4)。值得注意的是, 点4和点5的有效净正吸头相差不大, 但两个工况诱导轮空泡分布差别很大, 并造成扬程迅速下降, 形成了所谓的断裂工况。有效净正吸头为 0.609 m 时 (点7), 空泡完全占据了诱导轮的流道, 诱导轮丧失了做功的能力, 此后, 空泡在主叶轮流道内迅速发展 (点8、点9)。

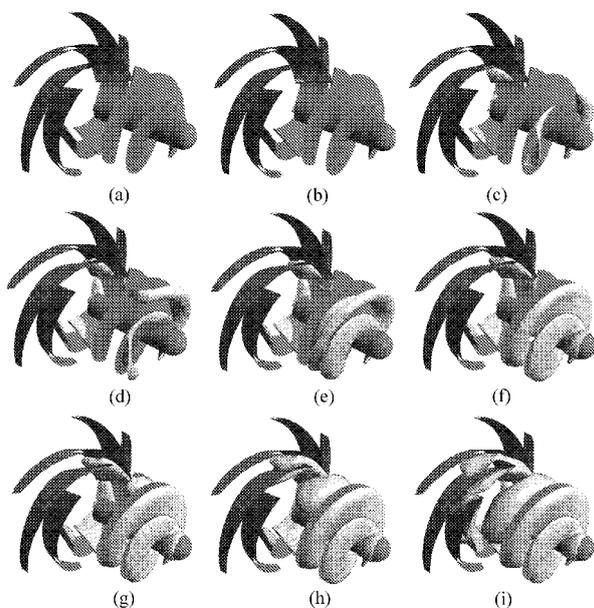


图6 $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$ 时叶轮流道内的空泡分布

Fig. 6 Cavitation figures at $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$ for centrifugal pump (a) 点1, 14 m (b) 点2, 10.94 m (c) 点3, 4.3 m (d) 点4, 1.36 m (e) 点5, 1.3 m (f) 点6, 0.61 m (g) 点7, 0.609 m (h) 点8, 0.608 m (i) 点9, 0.608 m

3.2 叶轮流道内总压分布

采用切割叶轮流道的方法, 定量分析诱导轮和主叶轮内部的能量转换过程。

3.2.1 诱导轮

将其流道分为8个断面, 并用字母 a~h 表示, 如图7所示。以叶片前缘与轮毂的交点为基点, 作垂直轴面的间距为 12 mm 的断面, a 断面靠近叶片前缘, 与基点间距为 2 mm , h 断面在叶片尾缘附近。并在 CFD-POST 中读取各流量点不同净正吸头时8个断面上的总压。

绘制图7所示的 $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$ 的诱导轮切割面上的总压分布 (图8), 选取有效净正吸头不断减小的9个工况分析流道的总压变化。

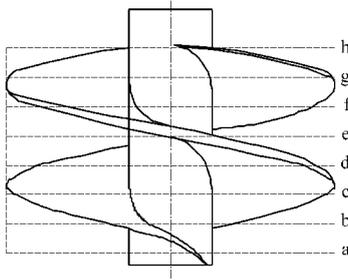
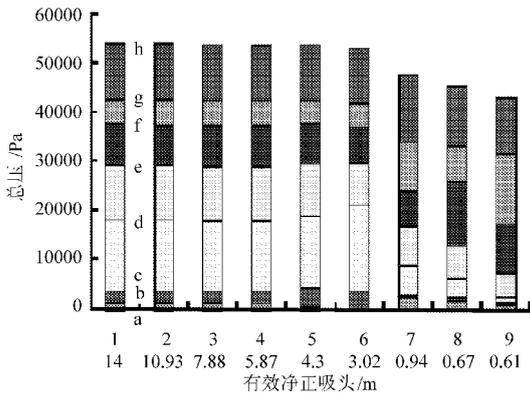
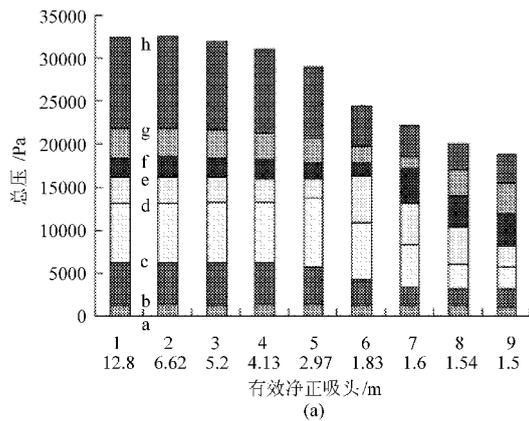


图7 诱导轮切割面简图

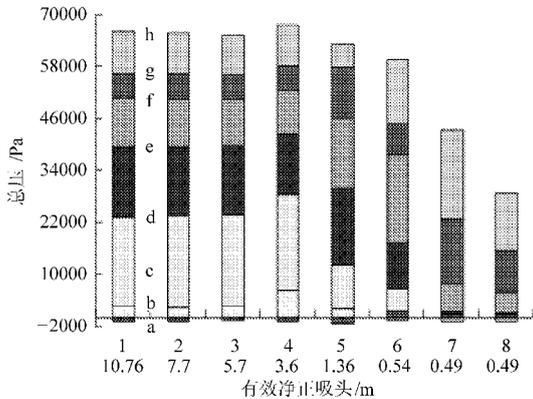
Fig. 7 Illustration of the meridian view of inducer

图8 $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$ 时的诱导轮总压分布Fig. 8 Repartition of the total pressure rise between section a and h at $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$ for inducer

在空化发展的初始阶段,诱导轮的扬程保持不



(a)



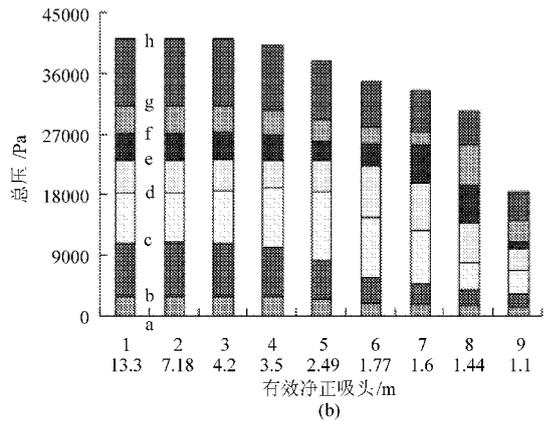
(c)

变,空化引起的总压下降位于上游的断面 a ~ c,对下游流道没有影响^[7]。扬程开始下降时,观察柱体 4 ~ 6 可以发现 c ~ d 断面的压力却有所增加,该现象的出现,可以认为空泡的出现,影响流道内的流态分布^[8]。也就是说,在空化过程中,空泡附着于叶片的叶顶处,并沿着叶片前缘向轮毂方向扩展,这种附着空泡改变了液流流动方向,使该区域的液流冲角增大,从而形成局部的压增现象。继续降低进口压力,空化对诱导轮性能的影响加大,并迅速改变整个流道的压力分布。

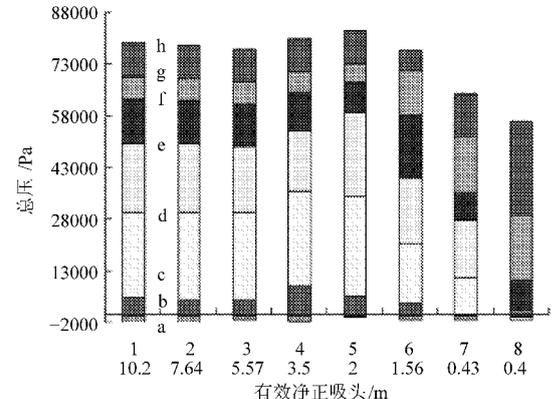
采用相同的方法,绘制出其他 4 个流量的诱导轮流道的总压分布,见图 9。总的来说,大流量下的空化造成压力变化主要集中在诱导轮的下游流道;低于设计流量时,在空泡的作用下,扬程有局部的增加,该扬程的增大主要是由于 b ~ c 段的总压增加引起的,另外空化对诱导轮进口处的流道影响很大,该区域压增为负。也就是说:流量不同,诱导轮内空化影响的位置是不同的。该结论与 Bakir F 通过实验观测到得结果一致,也进一步验证了数值模拟的有效性^[9]。

3.2.2 主叶轮

图 10 为主叶轮的切割简图,在叶轮流道内划分 9 个断面,其中 0 断面靠近叶片进口,Ⅷ断面靠近叶



(b)



(d)

图9 非设计工况下的诱导轮总压分布

Fig. 9 Repartition of the total pressure rise from section a to h at off-design operating conditions for inducer

(a) $Q = 153.9 \text{ m}^3/\text{h}$ (b) $Q = 145 \text{ m}^3/\text{h}$ (c) $Q = 108 \text{ m}^3/\text{h}$ (d) $Q = 95 \text{ m}^3/\text{h}$

轮出口,读取各断面上的总压值绘制出最佳流量下的总压分布柱状图,如图 11 所示。

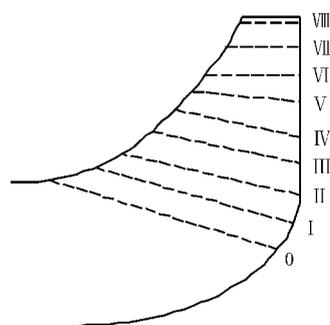


图 10 主叶轮 0~VIII 切割面简图

Fig. 10 Location of the flow sections for the main impeller

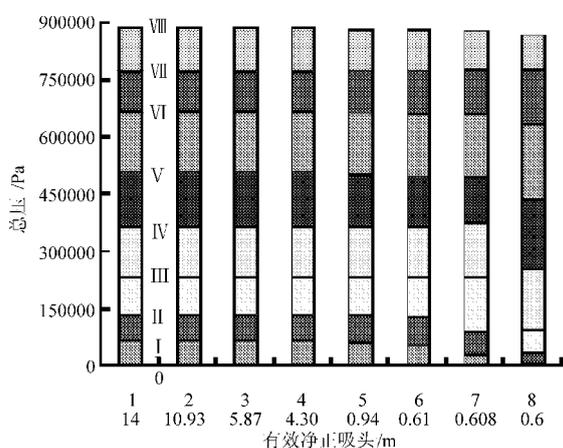


图 11 主叶轮流道总压分布

Fig. 11 Repartition of the total pressure rise at $Q = 125 \text{ m}^3/\text{h}$ for the main impeller

由图 11 可见,空化对主叶轮的影响并不明显,仅造成叶片进口处压力的下降,其余断面的压力在有效净正吸头降低的过程中并没有明显变化。只有当空化发展至断裂工况以后时,主叶轮的扬程才开始缓慢下降。该结论进一步说明了诱导轮能改善离心泵空化性能,减轻主叶轮的空化破坏。

4 结论

(1) 空化条件下,离心泵的扬程下降是流道内空泡增加到一定程度的结果。对任一流量点,有效净正吸头均存在一个临界值,低于该值时,扬程开始明显下降。对于不同的流量点,扬程下降的趋势也有所不同,高于设计流量时,扬程下降较为平缓,低于设计流量时,在有效净正吸头降低的过程中,扬程呈迅速下降趋势。

(2) 空化开始发生时,诱导轮的扬程不变,仅造成进口流道的局部压力下降,随着空化的加剧,逐步影响整个流道的能量转换过程。空化发展的过程中,局部流道会出现压增现象,压增的位置随空化强度的增大向下游流道移动。

(3) 诱导轮虽不能完全防止主叶轮发生空化,但能改善主叶轮的空化性能。主叶轮的叶片背面的进口最先出现空泡,由于诱导轮对主叶轮内空泡的抑制作用,空泡在主叶轮内的发展并不剧烈,只有当诱导轮丧失能力后,空泡才迅速发展;诱导轮能最大限度保证主叶轮的的能量转换过程,空化仅造成主叶轮叶片进口处压力的缓慢下降。

参 考 文 献

- 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京:宇航出版社,1995.
- 潘中永. 泵诱导轮实验研究与 CFD 分析[D]. 镇江:江苏理工大学,2001.
Pan Zhongyong. Experimental research and CFD analysis for pump inducer [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2001. (in Chinese)
- 牟介刚,张生昌,邓鸿英,等. 离心泵汽蚀判据的研究[J]. 农业机械学报,2006,37(9):97~99.
Mou Jiegang, Zhang Shengchang, Deng Hongying, et al. Research and discussion of cavitation criterion of centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(9):97~99. (in Chinese)
- 潘中永,倪永燕,汤跃,等. 离心泵汽蚀余量计算与预测[J]. 农业机械学报,2008,39(12):206~209.
- 吴玉林,刘树红,钱忠东. 水力机械计算流体动力学[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.
- Gonzalo-Flores N, Goncalves E, Fortes-Patella R, et al. Head drop of a spatial turbo pump inducer[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(11): 111301.
- 孔繁余,张洪利,张旭峰,等. 基于空化流动数值模拟的变螺距诱导轮设计[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(1):12~17.
Kong Fanyu, Zhang Hongli, Zhang Xufeng, et al. Design on variable-pitch inducer based on numerical simulation for cavitation flow[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(1):12~17. (in Chinese)
- Pouffary B, Fortes-Patella R, Roboud J, et al. Numerical simulation of 3D cavitating flows: analysis of cavitation head drop in turbo machinery[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(6): 061301.
- Bakir F, Kouidri S, Noguera R, et al. Experimental analysis of an axial inducer influence of the shape of the blade leading edge on the performances in cavitating regime [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2003, 125(3): 293~301.