



# 进口肋条对离心泵定常流动影响的数值研究

林培锋, 徐文斌

(浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018)

**摘要:** 为研究进口肋条对离心泵内部定常流动特性的影响, 采用 Fluent 软件三维雷诺平均 Navier-Stokes 方程和  $k$ -epsilon 湍流模型, 对进口肋条对离心泵内部流动影响进行了定常数值模拟。对比分析了有、无进口肋条情况下不同流量点离心泵叶轮进口和叶轮中截面内部流场分布, 揭示了肋条对离心泵的内部流动及水力特性的影响。数值模拟结果表明: 进口肋条的加装对小流量点下离心泵内部流场的流动状态有明显的改善, 提高了小流量工况下离心泵的扬程, 拓宽了离心泵的高效运行区。

**关键词:** 进口肋条; 离心泵; 定常; 数值模拟; 内部流动

**中图分类号:** TH311

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851 (2019) 07-0461-05

## Numerical study of influence of inlet ribs on steady flow of centrifugal pump

LIN Peifeng, XU Wenbin

(Faculty of Mechanical Engineering & Automation, Zhejiang Sci-Tech University,  
Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** In order to study the influence of inlet ribs on the steady flow characteristics of centrifugal pump, the three-dimensional Reynolds time-averaged Navier-Stokes equation and  $k$ -epsilon turbulence model were used to simulate the steady flow of influence of inlet ribs on internal flow of centrifugal pump by Fluent software. The flow distribution of centrifugal pump impeller entrance and impeller middle section at different flow points with or without inlet ribs were compared and analyzed. The influence of inlet ribs on the internal flow and hydraulic characteristics of centrifugal pump were revealed. The numerical simulation results showed that the inlet ribs obviously improved the flow state of internal flow field of the centrifugal pump at the small flow rate point, promoted the lift of the centrifugal pump under the small flow condition, and broadened the efficient operation area of the centrifugal pump.

**Key words:** inlet ribs; centrifugal pump; steady; numerical simulation; internal flow

## 0 引言

离心泵作为一种应用广泛的工程机械, 在农业工程、航空航天、石油化工等领域中有着重要的地位<sup>[1]</sup>。离心泵在实际运行中存在着使用寿命短、运行效率低于设计效率等现象。研究表明, 这主要是因为离心泵实际运行工况经常低于设计要求工况, 导致离心泵长期在小流量、低效区运行<sup>[2]</sup>。离心泵在小流量工况下

运行时, 在叶轮进口处容易产生内部旋流与回流<sup>[3-5]</sup>, 造成离心泵性能急剧下降。因此, 除了提高离心泵自身的效率<sup>[6-8]</sup>, 还可以通过改进离心泵工况调节方式对离心泵进行运行优化<sup>[9-11]</sup>。

目前, 许多学者针对离心泵进口段工况调节进行了数值研究。离心泵进口段加装肋条(或称隔板、导叶)作为其工况调节方式<sup>[12-14]</sup>, 在各式叶轮机械中得到了较为广泛的应用。王健等<sup>[15]</sup>分别对吸水

收稿日期: 2018-12-20 网络出版日期: 2019-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51676173)

作者简介: 林培锋(1982—), 男, 浙江温州人, 副教授, 博士, 主要从事流体机械内部流动方面的研究。

室有、无内置隔板的低比转速离心泵进行三维全流场数值计算,结果表明:有内置隔板时蜗壳各断面压力脉动幅值均有所减弱,作用在叶轮上的径向力幅值减小,轴向力明显减弱。桂绍波<sup>[16]</sup>分析了离心泵前置导叶调节的基本原理,讨论了前置导叶在不同预旋角度下离心泵最优工况点的变化趋势,结果表明:前置导叶调节主要适用于流量负荷有较大变化而扬程变化不大的场合。王海民等<sup>[17]</sup>应用叶轮机械设计和前置导叶预旋调节方法,对离心泵运行工况方式进行了优化,研究了不同翼型前置导叶对离心泵水力特性的影响,试验结果显示:弯叶片前置导叶在对离心泵高效区的拓宽、功率降低量等方面均好于等厚直叶片前置导叶。陈睿池等<sup>[18]</sup>设计了两种不同叶高前置导叶片,并对带有不同叶高前置叶片的双吸泵进行了试验研究,结果表明:带有诱导叶片的双吸泵在大流量区域效率降低,但其功率消耗降低;14 mm 叶高诱导叶片调节效果明显优于 20 mm 叶高诱导叶片,且有效地将双吸泵高效区往小流量偏移,同时降低离心泵功率消耗。目前国内外学者对离心泵进口肋条的研究集中在外特性性能影响分析,关于离心泵进口加装肋条所带来的内部流动机理变化尚未得到广泛的研究,因此有必要对此进行研究。

本文利用 CFD 软件 Fluent,在不同流量点对有、无进口肋条的离心泵内部流场进行了定常数值模拟,分析了进口肋条对离心泵定常流动内部流场特性的影响,为今后离心泵的结构优化设计和稳定运行提供一定的理论依据。

## 1 几何模型

本文进行定常数值模拟的离心泵设计参数为:设计流量点  $Q_d$  为  $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ,额定转速为  $1400 \text{ r/min}$ ,叶片数为 5,叶轮进口直径  $86 \text{ mm}$ 。模型泵的扬程  $H$  随流量  $Q$  变化的试验结果如图 1 所示。

依据以上数据,在离心泵进口管段沿轴向布置两个对称的进口肋条,对肋条的周边进行了流线型修锉处理,以降低流动中肋条对流体阻碍,肋条结构如图 2 所示。肋条的主要设计参数包括:肋条高度  $a$  为  $37 \text{ mm}$ 、肋条轴向长度  $b$  为  $50 \text{ mm}$ 、肋条厚度  $c$  为  $3 \text{ mm}$  以及肋条距叶轮进口距离  $l$  为  $150 \text{ mm}$ 。

## 2 数值模拟的网格划分及算法

### 2.1 网格划分

采用三维造型软件对离心泵流体计算域进行建模,对离心泵进行全流道定常湍流场数值模拟,计

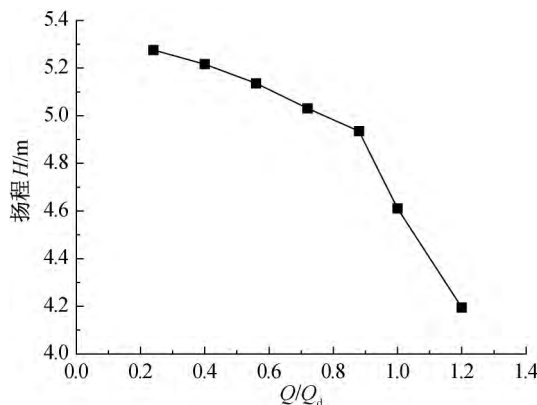


图1 模型泵无肋条扬程试验结果

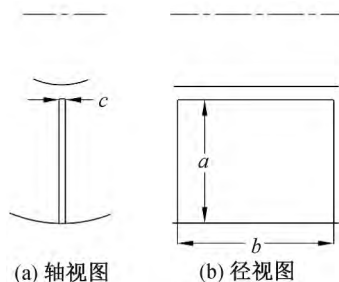


图2 进口肋条几何结构示意图

算域包括进口肋条段、叶轮及蜗壳 3 个部分,选用多重参考坐标系 (MRF),将叶轮区域设置为旋转区域,其余计算区域设置为静止区域。为了保证流动的充分发展,对离心泵进口段进行了延长,由于模型泵为出口结构经过特殊处理的离心泵,为保证模拟结果的准确性,模型泵出口没有进行延长处理。为了保证较高的网格质量和边界层网格尺寸,叶轮和蜗壳部分采用形状规则的正六面体结构网格,进口肋条段使用自适应强的非结构四面体网格,并依据实际湍流强度对叶轮壁面和肋条壁面进行网格加密处理,离心泵整体网格见图 3。



图3 离心泵整体网格示意图

### 2.2 基本方程

采用三维定常雷诺平均 Navier-Stokes 方程作为流体流动的基本控制方程,湍流模型选用标准  $k$ -epsilon 湍流模型。三维定常雷诺平均 Navier-

Stokes 方程的动量方程表达形式为:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij} - \rho \overline{u_i u_j}) + S_M \quad (1)$$

其中:  $U$  为速度;  $\rho$  为液体密度;  $p$  为压强;  $S_M$  为控制方程源项;  $\tau$  为分子应力张量。

标准  $k$ -epsilon 湍流模型的方程表达式为:

$$\rho \frac{dk}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (2)$$

$$\rho \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

其中:  $\mu$  为动力粘度;  $\mu_t$  为湍流粘性系数;  $G_k$  为平均速度梯度形成的湍动能生成项;  $G_b$  是存在浮力的影响形成的湍动能的生成项;  $\epsilon$  为湍动能耗散率;  $k$  为湍动能;  $Y_M$  是可压缩湍流脉动膨胀对总的耗散率的影响;  $C_{1\epsilon}$ 、 $C_{2\epsilon}$ 、 $C_{3\epsilon}$  为模型参数。

### 2.3 数值计算方法和边界条件

在方程进行求解时, 方程的对流项采用二阶迎风格式进行离散, 方程的其他项的离散格式则采用中心差分格式, 采用 SIMPLEC 算法对速度和压力进行分离迭代求解。采用当地时间步长及残差光顺进行加速收敛, 提高计算效率。当管路出口单位面积平均总压力在一定范围内变化, 残差低于  $1 \times 10^{-3}$  时, 则认为计算结果收敛。

在进行数值计算时, 该离心泵的工作介质为清水, 近似看作不可压缩流体。计算区域的进口边界条件设定为均匀来流条件, 速度值根据计算工况点的流量值确定; 计算域的出口边界条件设置为自由出流条件, 设流体到达出口边界时视流动已经充分发展; 离心泵叶轮为转动边界, 叶片表面及前后盖板等设置为固壁无滑移、绝热边界条件, 在临近固壁区域采用标准壁面函数, 对湍流模型进行修正。

## 3 数值模拟结果及分析

### 3.1 叶轮进口分析

#### 3.1.1 吸水室流线分析

小流量点 ( $0.6Q_d$ )、设计工况点 ( $1.0Q_d$ ) 和大流量点 ( $1.2Q_d$ ) 下, 离心泵锥形吸水室进口处的流线图见图 4。从图 4 中可以看出, 在无进口肋条离心

泵在小流量点下, 吸水室进口处出现了明显的回流现象, 流动不规则造成流体流动的能量损失, 在设计工况和大流量点下速度流线分布均匀, 无速回流现象产生。有进口肋条离心泵在小流量点下, 吸水室进口回流现象得到消除; 在设计工况点, 吸水室进口流线出现了小区域的分布不均匀现象, 这是因为由于设计工况点离心泵进口管道流态均匀, 肋条的存在会对吸水室进口流体流动产生一定的干扰; 在大流量点下, 有进口肋条离心泵吸水室流线分布较为均匀, 肋条的存在对叶轮吸水室流体流动状态没有产生明显的影响。

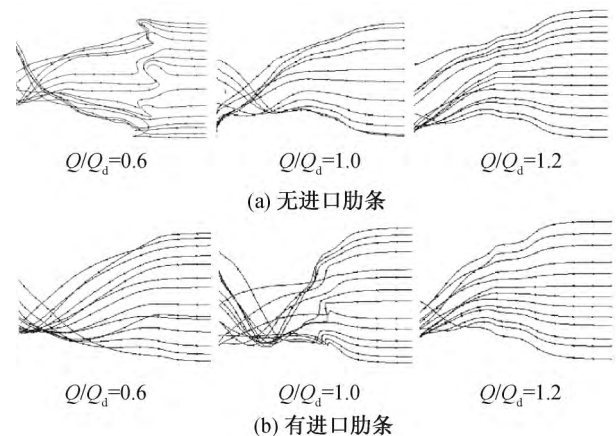


图4 在有、无进口肋条不同流量下吸水室的速度流线

#### 3.1.2 叶轮进口截面压力分析

在不同流量点下有、无进口肋条离心泵叶轮进口截面的压力分布见图 5。从图 5 中可以看出, 由于叶轮的旋转, 离心泵叶轮进口处截面存在周向分布的局部高压区, 叶轮进口截面压力分布不均, 存在较大的压力梯度。在小流量点, 叶轮进口截面局部压力梯度最大。此时, 进口肋条对离心泵叶轮进口的压力分布有较好的改善效果, 使得叶轮进口处的压力梯度变小, 压力分布更加均匀, 减少了因较大压力梯度造成的能量损失, 提高了叶轮进口处的水利性能和能量转化效率。在设计流量点和大流量点, 进口肋条对离心泵叶轮进口压力梯度分布无明显影响。

#### 3.1.3 叶轮进口段涡结构分析

叶轮进口段处涡结构分布见图 6。涡核是涡旋内部有涡量的密集区, 是一种可以显示涡旋的特殊类型的等值面。数值模拟结果表明: 在小流量点下, 在叶轮进口处, 无肋条离心泵在叶轮入口处存在大区域密集的涡核区。涡流引起的强烈剪切导致湍流强度的增大, 是引起叶轮进口总压力损失的主要原因。小流量点下, 有进口肋条离心泵相比无进口肋条离心泵, 在叶轮进口处的涡核区域面积大大减小,

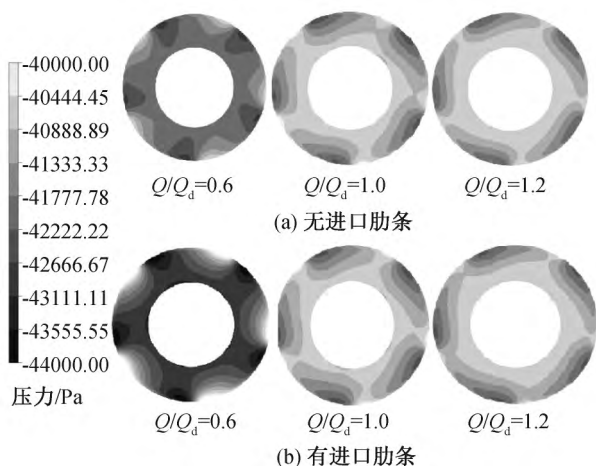


图5 有、无进口肋条不同流量点叶轮进口压力

进口肋条有效抑制了叶轮进口处涡旋的产生,改善了叶轮进口处流场流动状态,减少了总压力的损失;在设计流量点和大流量点下,有、无进口肋条离心泵在叶轮进口处都只存在少量稀疏的涡核区域,流体在叶轮进口处的流态良好,叶轮进口处流场的总压力损失较小。

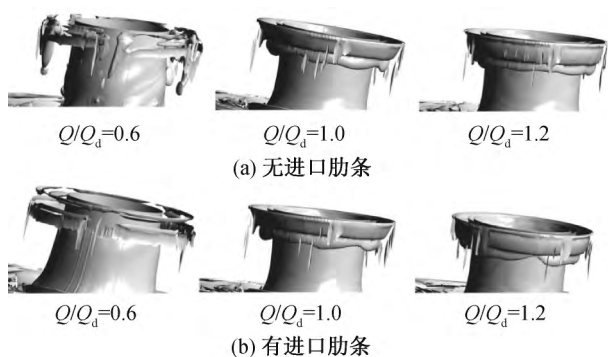


图6 在有、无进口肋条不同流量下叶轮进口的速度流线

### 3.2 叶轮中截面分析

#### 3.2.1 叶轮中截面速度分析

叶轮中截面的速度云图如图7所示。流体由进口管路流入叶轮入口时,叶轮通过旋转做功将机械能传递给流体,使流体获得能量。流体从叶轮进口流出口时速度增大导致流体速度在流道内存在明显的速度梯度。小流量工况下叶片压力面存在较大的低速区域,速度分布不均匀,导致叶轮流道内较大的流动损失。有进口肋条离心泵在小流量点相比无进口肋条离心泵,有进口肋条离心泵叶轮叶片对液体的导流效果更佳,离心泵内液体流动得到更好的控制,叶片压力面低速区域得以减小,叶轮中截面速度分布更加均匀合理。

#### 3.2.2 叶轮中截面湍动能分析

叶轮中截面湍流动能云图如图8所示。离心泵

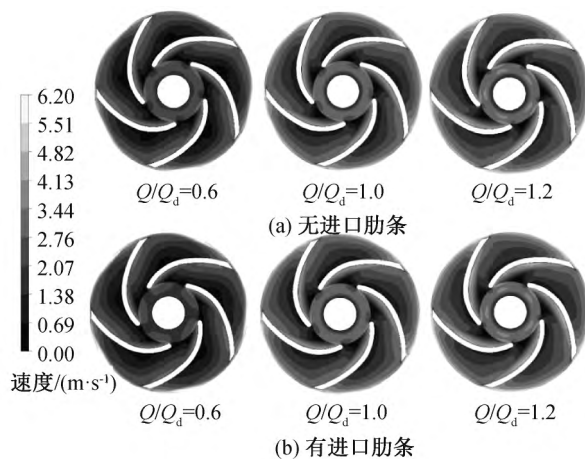


图7 有、无进口肋条不同流量点下叶轮中截面速度云图

内部叶轮流域主要是来源于时均流,湍流的能量来源于雷诺切应力做功,湍动能数值较大的区域,代表流体能量损失较多。离心泵叶轮中截面湍动能分布情况表明,离心泵叶轮中湍动能数值较大的区域主要存在于叶片前端。这是由于叶轮的旋转,流体流经叶片前端时与叶片产生较大冲击,叶片前端区域流体一部分的能量提供给了湍流,造成了叶片前端区域流体能量的损失。叶片的尾端区域,流体的湍动能数值较小,叶轮中截面湍动能在流道内呈明显的梯度分布。在小流量点,有进口肋条的离心泵在叶片前端湍动能高数值区域要小于无进口肋条离心泵,湍动能在流道内的分布梯度较小,流体在叶片前端能量损失较小。在设计流量点和大流量点,进口肋条的存在对离心泵叶轮中截面的湍动能分布影响较小。

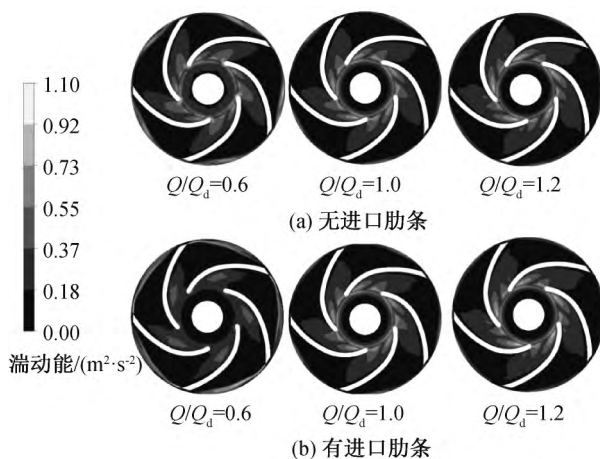


图8 有、无进口肋条不同流量点下叶轮中截面湍动能云图

### 3.3 扬程分析

模型泵的有、无进口肋条的数值模拟结果如图9所示。设计流量点  $Q_d = 2.5 \text{ m}^3/\text{h}$  时,试验扬程  $H = 4.61 \text{ m}$ ,数值模拟扬程  $4.59 \text{ m}$ ,数值模拟预测

的离心泵扬程在设计流量点的数值与试验值比较接近。数值模拟预测扬程与试验值扬程在小流量点附近的趋势基本一致,但是数值上偏小。数值模拟采用的离心泵模型为忽略实际出口面形状细节的简化模型,与实际的试验泵存在一定的差别,导致了数值模拟结果与试验值的不同。数值模拟结果表明:在小流量点附近,有进口肋条离心泵的扬程要高于的无进口肋条离心泵的扬程,在小流量点,有进口肋条离心泵数值模拟结果相比无进口肋条离心泵扬程提高了1.96%;在设计流量点和大流量点下,肋条对离心泵的扬程影响很小;随着流量的增加,有进口肋条离心泵的扬程逐渐减小的幅度要小于无进口肋条离心泵扬程逐渐减小的幅度。

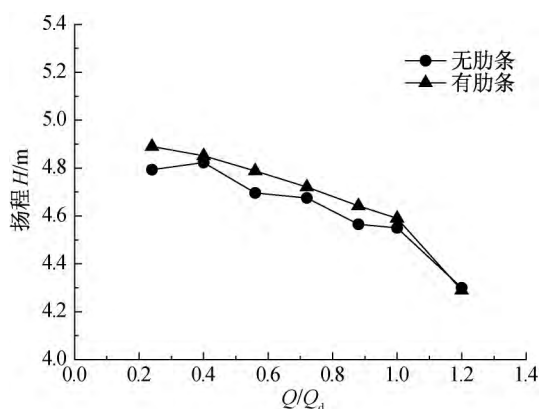


图9 有、无肋条的离心泵扬程数值模拟值对比

#### 4 结论与展望

本文通过对离心泵在不同流量工况条件下的数值模拟,分析了进口肋条对离心泵内部流动的影响机理,对于所选离心泵加装进口肋条的研究发现:

a)进口肋条在一定程度上能改善离心泵的水力性能。相对于无进口肋条离心泵,加装进口肋条的离心泵在小流量点的扬程得以提高,降低了离心泵扬程随流量增加而逐渐减小的幅度。

b)在小流量工况点,进口肋条能有效改善离心泵内部流体流动状态,使得压力、速度分布更加均匀;在设计工况点及大流量点,进口肋条对离心泵的内部流动影响较小。

c)进口肋条减少了小流量工况点下叶轮进口段旋涡的产生,并减少了因湍流动能损耗造成的离心泵叶轮中流体的能量损失。

本文采用了数值模拟的方法着重分析了进口肋条在离心泵小流量工况下,对离心泵内部流动特性的影响,缺少一定的试验验证,希望后续研究中补充试验,来验证数值模拟的可靠与准确性,并设计出针

对设计工况点和大流量工况下的肋条方案。

#### 参考文献:

- [1] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011: 18-25.
- [2] 耿鑫琪. 离心泵小流量工况下的内部流动特性[J]. 山西农经, 2016(18): 89-90.
- [3] 张金凤, 梁赞, 袁建平, 等. 离心泵进口回流场及其控制方法的数值模拟[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2012, 33(4): 402-407.
- [4] 袁寿其, 梁赞, 袁建平, 等. 离心泵进口回流场特性的数值模拟及试验[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(6): 461-465.
- [5] 魏立超, 宋文武, 石建伟, 等. 基于CFD的高速离心泵进口段流动数值模拟分析[J]. 热能动力工程, 2016, 31(7): 103-109.
- [6] 齐学义, 刘永明, 胡家旺, 等. 提高超低比转速离心泵效率的方法[J]. 水电能源科学, 2011, 29(2): 118-120.
- [7] 商延庚, 金娥, 可庆朋, 等. 仿海豚皮肤结构的功能表面提高离心泵效率[J]. 农业工程学报, 2016, 32(7): 72-78.
- [8] 杨军虎, 张人会. 关于离心泵效率问题的分析[J]. 流体机械, 2002, 30(10): 25-27.
- [9] 方清华. 单台离心泵工况调节方式分析[J]. 石油和化工设备, 2014(3): 52-54.
- [10] 段富生, 庞文杰, 嘉红贤. 离心泵运转工况的调节[J]. 有色设备, 2004(3): 80-81.
- [11] 伍年青, 盖学辉, 于景龙. 不同工况条件下离心泵调速运行的节能分析[J]. 石油机械, 2000, 28(7): 40-43.
- [12] Tan L, Zhu B, Cao S, et al. Influence of prewhirl regulation by inlet guide vanes on cavitation performance of a centrifugal pump[J]. Energies, 2014, 7(2): 1050-1065.
- [13] 宋文武, 魏立超, 石建伟, 等. 孔板对带诱导轮高速离心泵进口段流动特性的影响研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(2): 190-195.
- [14] Oro J M F, Diaz K M A, Morros C S, et al. On the structure of turbulence in a low-speed axial fan with inlet guide vanes[J]. Experimental Thermal & Fluid Science, 2008, 32(1): 316-331.
- [15] 王健, 严骏, 刘厚林, 等. 吸水室隔板对低比转速离心泵非定常特性影响[J]. 流体机械, 2018, 46(11): 28-33.
- [16] 桂绍波. 离心泵前置导叶预旋调节的理论分析[J]. 水泵技术, 2008(6): 1-6.
- [17] 王海民, 周裁民, 黄雄, 等. 不同翼型前置导叶正预旋对离心泵性能影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(6): 660-664.
- [18] 陈睿池, 谢淑娟, 赵越, 等. 前置导叶对双吸离心泵性能影响试验研究[J]. 能源研究与信息, 2016, 32(2): 108-112.

(责任编辑:康 锋)