

大型立式轴流泵装置流道内部流动特性分析*

杨帆¹ 刘超¹ 汤方平² 周济人¹

(1. 扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009; 2. 扬州大学能源与动力工程学院, 扬州 225009)

【摘要】 基于三维不可压缩流体的雷诺平均 N-S 方程和 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型,采用 CFX 软件计算了额定转速下 180~340 L/s 流量范围内 6 个工况点的立式轴流泵装置内部流动,分析了进水流道和出水流道的流动特性,重点研究进口流动细部结构,同时预测了泵装置的水力性能。计算结果表明:叶轮旋转对进水流道出口轴向流速分布和切向流速分布的影响较小。导叶出口环量对出水流道的流场影响较大,导致隔墩两侧流量分配不均,大流量时隔墩两侧水流流态比较平顺,而小流量时隔墩右侧流道内出现螺旋状水流,两侧水流严重不平衡。通过计算预测了泵装置水力性能,并与泵装置模型性能试验结果进行了对比,表明最优工况时数值模拟与试验结果吻合较理想,可以满足工程实际的需要。

关键词: 立式轴流泵装置 进水流道 水力性能 数值模拟
中图分类号: TV131; TH312 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)05-0039-05

Characteristics of Flow in Large Vertical Axial Flow Pumping System

Yang Fan¹ Liu Chao¹ Tang Fangping² Zhou Jiren¹

(1. College of Hydraulic Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China
2. College of Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract

The internal flow field in a vertical axial flow pumping system was simulated by CFX software using the Reynolds averaged N-S equations and RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. Focusing on details of the inlet flow field, the flow characteristics in the inlet and outlet passages of pumping system were analyzed based on the calculation of different operating conditions with the flow rates range 180~340 L/s at the rated rotating speed. The results show that rotating of impeller has effects on the distribution of axial and tangential velocity components at the pump inlet, but the numerical values are relatively small. Outlet circulation of guide vane has great influence on flow pattern in the outlet passage. The flow distribution for both sides of the dividing pier is not symmetric, especially for small flow rate condition, the helical flow occurs at the right side of dividing pier. A good agreement is achieved in the performances of the pumping system between the predicted data and experimental data at the best efficiency point, which can meet the requirement of practical application.

Key words Vertical pumping system, Inlet and outlet passages, Hydraulic performance, Numerical simulation

引言

大型立式轴流泵排涝泵站不仅具有扬程低、流量大的特点,还具有投资少、效率高、安装检修方便

等优点,因此在排涝、调水工程中得到了广泛应用。立式泵装置的进出水流道内的流动直接影响装置性能,历来是人们关注的重点。目前已有的研究多集中于进出水流道内的流态对装置性能的整体影响,

收稿日期: 2010-06-27 修回日期: 2010-09-01
* 国家自然科学基金资助项目(50779060)和江苏省产学研前瞻性联合研究资助项目(BY2009138)
作者简介: 杨帆,博士生,主要从事水泵内部流动试验及数值模拟研究,E-mail: sqzyangfan@126.com
通讯作者: 刘超,教授,博士生导师,主要从事水泵、泵站工程研究,E-mail: liuchao@yzu.edu.cn

对泵段(叶轮、导叶)进出口的流场细部结构即泵叶轮与进水流道出口流场的相互影响、泵导叶出口环量对出水流道流态的影响研究较少。本文对一大型立式轴流泵模型装置流道内的流场进行研究,重点研究进口流动的细部结构。目前,研究泵装置的方法主要有数值模拟和模型试验两种,其中模型试验成本较高,所需周期也较长,而先进的 CFD 技术已成为研究泵及泵装置水力特性的重要工具,数值模拟结合模型试验研究已成为必然趋势。计算流体动力学大型商用软件得到了愈来愈广泛的应用,本文采用对泵类适用较好的商用软件 CFX 对泵模型装置进行计算,分析泵装置进、出水流道的水力特性,预测泵装置性能,并通过模型试验外特性数据验证数值计算的结果。

1 计算模型与边界条件

1.1 计算模型

该立式轴流泵装置采用肘形进水流道、上升式短直管出水流道的结构形式。数值模拟和模型试验所采用的装置模型尺寸均是按原模型叶轮名义直径几何比换算而得,数值计算和模型试验采用的主要参数:叶轮叶片数为 3 片,叶轮转速为 1 292 r/min,导叶叶片数为 7 片,流量范围为 180 ~ 340 L/s。泵装置的计算区域包括前池、进水流道、泵段、出水流道和出水池。本文采用 TurboGrid 软件完成对叶轮和导叶的建模和网格剖分,其余部分均应用 ICEM 软件完成建模和网格剖分工作,最终在 CFX 中完成对该泵装置实体造型的组装及计算,实体建模如图 1 所示。

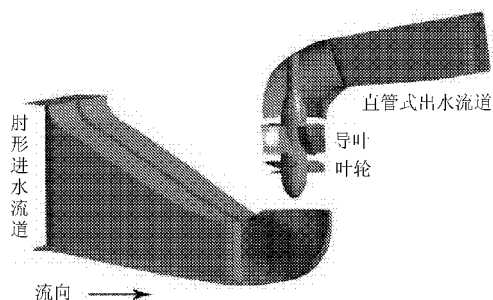


图 1 计算区域

Fig. 1 Computational domain

1.2 边界条件

(1)进口边界条件:因进水流道进口处的流速分布未知,本次计算将速度进口设置在距进水流道一定距离的前池进口断面上,进口速度边界条件按速度均匀分布给出。

(2)出口边界条件:出口边界条件设置在距出水流道出口有一段距离的出水池出口断面上,采用

平均静压的边界条件。

(3)壁面条件:计算流场中,壁面边界包括前池壁面、进水流道、出水流道边壁以及出水池边壁,壁面采用无滑移的壁面处理。

(4)自由表面:前池、出水池表面为自由表面,若忽略水面因风所引起的切应力及大气热交换,则自由表面对速度和紊动能均可视为对称平面处理。

(5)交界面:叶轮与导叶、叶轮与进水流道的交界面均采用动静交界面,而其他部分间的交界面均采用静静交界面。

2 数值计算方法

采用不可压缩流体的连续性方程和雷诺平均方程,方程式如下:

$$\text{连续性方程} \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

雷诺平均方程

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j + \tau_{ij}) = \bar{f}_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型通过修正湍动粘度和在 ε 方程中增加了反映主流的时均应变率,考虑了平均流动中的旋转及旋流流动情况,因此更适合于计算高应变率和流线弯曲程度较大等较为复杂的流动^[1]。

采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型计算立式轴流泵装置的流场,该方法已在文献[1~5]中作了介绍,这里不再赘述。

3 计算结果及分析

3.1 泵装置流态分析

通过数值模拟计算得到了立式轴流泵装置整体流场结果。图 2 为计算得到的最优工况时泵装置粒子迹线图。由图可见,泵装置内的流动是复杂的三维流动,水流在肘形进水流道内收缩、转向的过程中平顺、均匀,无漩涡与回流产生,这与试验过程中观察到的现象相符合,通过叶轮旋转做功及导叶的回收环量和压能,水流呈螺旋状流入出水流道,因出水流道为上升式短直管出水流道,受水流环量和惯性的双重影响,水流在流道内作约 70°转向之后,流道内左右侧的流场不再对称,顺水流方向看,主流偏向流道的左侧,在出水流道内部区域,由于出水弯道的作用,流道顶部流速较大,底部流速小,导致在出水流道的下部易产生脱流和漩涡。

3.2 进水流道水力特性分析

进水流道的作用为叶轮进口提供良好的流态,

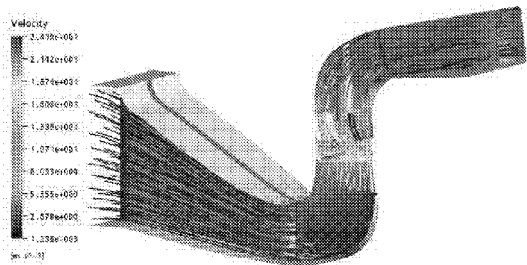


图2 泵装置内部粒子迹线图

Fig. 2 Internal particle path line of pumping system

保证水泵机组稳定高效运行^[6]。为便于分析,选取进水流道出口附近的6个断面(图3g)。图3a~3f分别为流量280 L/s时6个断面的轴向速度分布云图。因导水锥的存在,过水断面由圆形变为环形,逐步调整流速与压力分布。从1-1至2-2断面,轴向流速内侧高于外侧,流速分布的等值线呈半月牙形,从3-3至4-4断面,断面流速分布趋于总体均匀,进入5-5断面后,因受叶轮旋转的影响,水流有预旋发生,越接近叶轮进口对轴向流速的影响越明显,在6-6断面,外侧的流速已大于内侧的流速。为了便于比较,计算了各个断面的轴向速度分布均匀度如图4所示。从1-1断面至6-6断面,轴向速度分布均匀度整体趋势越来越好,仅3-3断面轴向速度分布均匀度下降,因此处为圆形断面突变到环形断面,此处流场突受导水锥扰动的影响,引起了分布均匀度的下降。随着水流在流动工程中不断地调整,从4-4、5-5到6-6断面的轴向速度分布均匀度又上升到较高的数值,满足了水泵运行对叶轮进口水流条件的要求。

不同流量下,进水流道水力损失如图5所示。为便于比较,也计算了无叶轮时的进水流道损失。由图5可见进水流道的水力损失与流量基本符合二次方关系。水力损失与流道出口的流速分布均匀度关联较小,与环量大小正相关。叶轮旋转引起的水流预旋增加了水流动能,故进水流道出口的能量增大,水力损失有所减小。然而最大减小值为2.38 cm,仅占进水流道损失的8%,其对泵装置性能的影响可以忽略,这与文献^[7]试验得到的结论相符。

3.3 叶轮旋转对进口水流的影响

进水流道出口水流对水泵性能有直接的影响,而旋转的叶轮对进水流道出口水流影响如何,历来为研究者所关注。为进一步说明叶轮旋转对进口水流即进水流道出口水流的影响,对无叶轮的装置进行了数值模拟,并与有叶轮的泵装置的计算结果进行比较,分析两者差异。针对图3g中的6个断面,对各断面分别算出断面的轴向速度分布均匀度

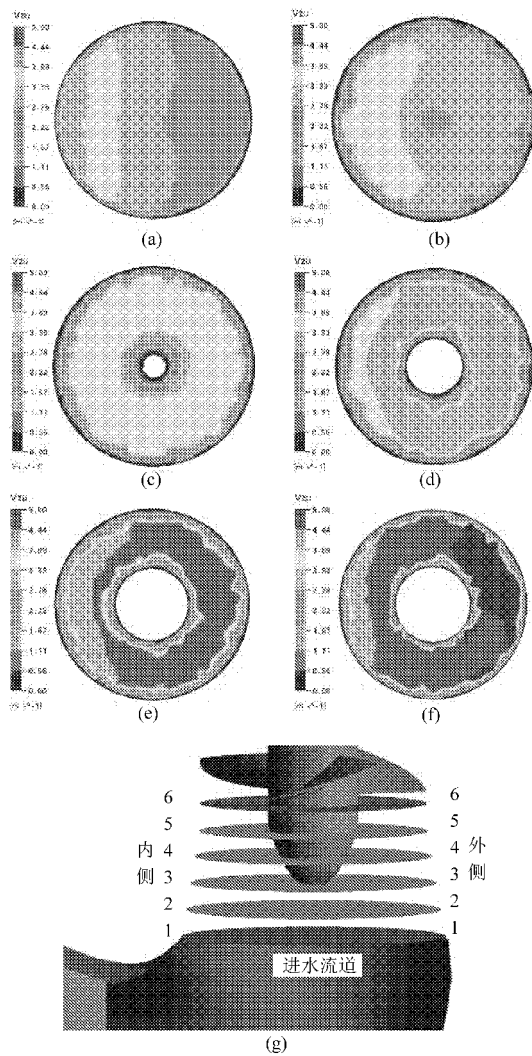


图3 进水流道出口断面轴向速度分布图

Fig. 3 Axial velocity contour of cross sections

(a) 1-1断面 (b) 2-2断面 (c) 3-3断面 (d) 4-4断面 (e) 5-5断面 (f) 6-6断面 (g) 出口断面位置

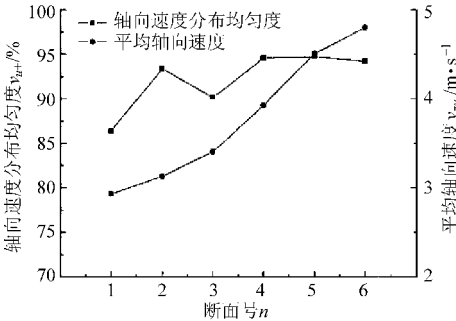


图4 各断面轴向速度分布均匀度 v_{u+} 与平均轴向速度 v_{u-} 曲线

Fig. 4 Uniformity of axial velocity distribution and velocity-weighted average swirl angle of the sections

v_{u+} 、速度加权平均角 $\bar{\theta}$, 平均环量 $\bar{L}$, 计算结果如图6所示。

1-1断面至3-3断面,有、无叶轮时轴向速度分布均匀度数值最大相差0.35%,速度加权平均角最大相差0.17°,平均环量最大差值0.009 m²/s。

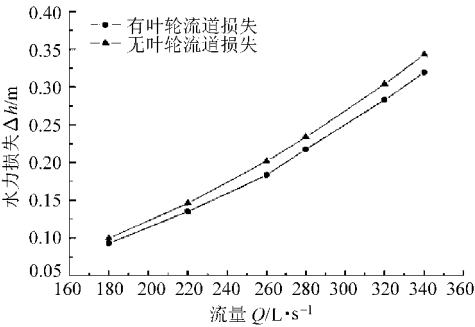


图5 水力损失 Δh 与流量 Q 关系曲线

Fig.5 Hydraulic loss Δh vs discharge Q

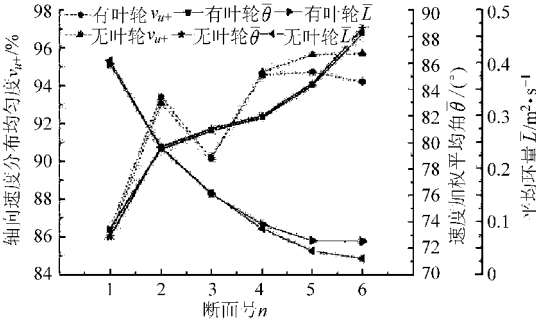


图6 有、无叶轮各断面计算结果对比

Fig.6 Comparison diagram of numerical results

4-4 断面至 6-6 断面,有叶轮时轴向速度分布均匀度相比无叶轮时已明显减小,且减小幅值逐渐变大;有叶轮时平均环量比无叶轮时增加明显,且增加幅值逐渐变大。无叶轮时 6-6 断面的轴向速度分布均匀度为 95.7%,速度加权平均角为 88.64°,平均环量为 0.031 m²/s,而有叶轮时 6-6 断面的轴向速度分布均匀度为 94.22%,相比降低了 1.48%,速度加权平均角为 88.23°,相比降低了 0.41°,平均环量为 0.066 m²/s,相比无叶轮时增加了 112.9%。

有、无叶轮时 5-5、6-6 断面的轴向速度与切向速度分布云图如图 7 所示。从图 7 中 8 张图的对比,可直观看出 6-6 断面比 5-5 断面受叶轮旋转的影响要大,且叶轮旋转对切向速度的影响大于对轴向速度的影响。图 7b 与图 7f 的对比,可看出无叶轮时 6-6 断面轴向速度在 3.89 ~ 4.44 m/s 区间内分布范围比有叶轮时明显小,而图 7a 与图 7e 相比,有、无叶轮时 5-5 断面轴向速度分布差别较小。图 7d 与图 7h 的相比,有叶轮时 6-6 断面切向速度受叶轮影响比无叶轮时明显,而图 7c 与图 7g 相比,有、无叶轮时 5-5 断面切向速度分布差别较小。

结果表明,水流的预旋对进水流道出口断面轴向速度分布均匀度和平均环量的影响较大,而对速度加权平均角和水力损失的影响很小。出口断面越接近叶轮,其受叶轮旋转的影响越大,从流场分析来看必需考虑叶轮的影响。

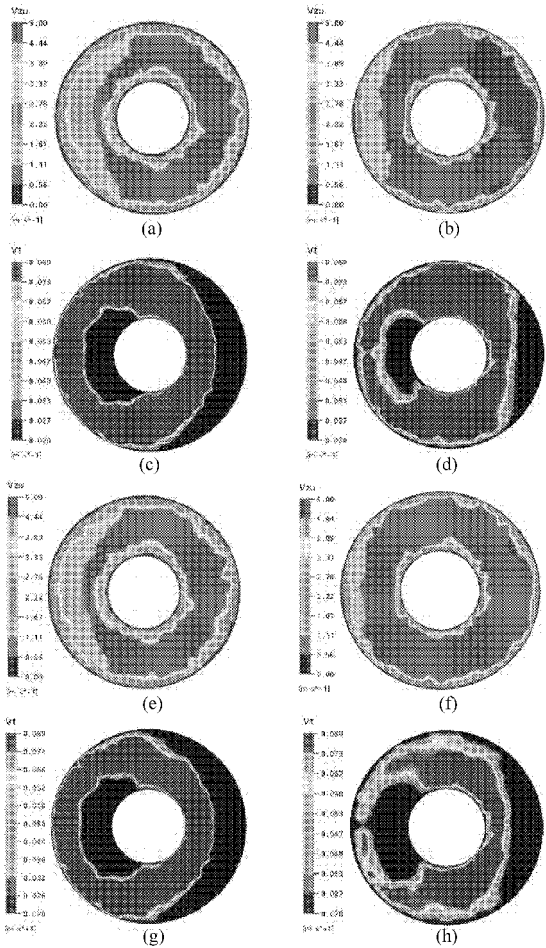


图7 有、无叶轮 5-5、6-6 断面速度云图

Fig.7 Velocity contour of different conditions

- (a) 有叶轮 5-5 断面轴向速度
- (b) 有叶轮 6-6 断面轴向速度
- (c) 有叶轮 5-5 断面切向速度
- (d) 有叶轮 6-6 断面切向速度
- (e) 无叶轮 5-5 断面轴向速度
- (f) 无叶轮 6-6 断面轴向速度
- (g) 无叶轮 5-5 断面切向速度
- (h) 无叶轮 6-6 断面切向速度

3.4 出水流道水力特性分析

出水流道的作用是使水流从导叶出口流入出水池的过程中更好地转向和扩散,在不发生脱流和漩涡的条件下最大限度地回收动能^[6]。计算结果表明:在不同工况下,水流进入出水流道时受导叶出口环量和自身惯性的双重影响,引起出水流道隔墩左、右侧的流量分配不均匀。在流量 180 L/s 时,通过隔墩左侧的流量相当于右侧流量的 2.147 倍;最优工况时,通过隔墩左、右侧的流量相差为总流量的 10.98%;流量大于最优工况流量时,隔墩两侧流量差基本维持在 10% 左右。不同流量时隔墩两侧流量分布关系如图 8 所示。

在小流量 (180 ~ 220 L/s) 的工况下,隔墩左侧流道内流态良好,而右侧均出现螺旋式水流,主要原因是小流量工况时导叶出口环量较大,受导叶出口环量的影响,进入隔墩右侧的顶部水流和底部水流交错而形成螺旋式流态,如图 9a 所示。在大流量

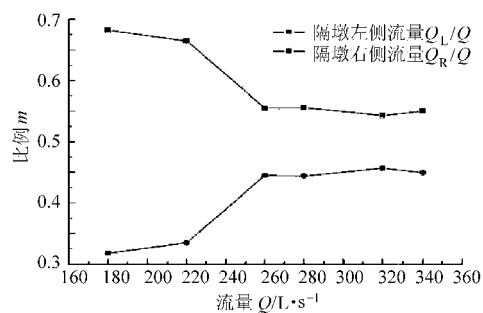


图 8 出水流道隔墩两侧流量分配关系

Fig. 8 Flow distribution for different discharges

(260 ~ 340 L/s) 时,出水流道隔墩两侧流态较为平顺,无螺旋式水流的产生,如图 9b 所示。在出水流道内部区域,水流受自身惯性和转弯半径的双重作用,致使流道顶部流速较大,底部流速小,易导致出水流道下部产生漩涡。

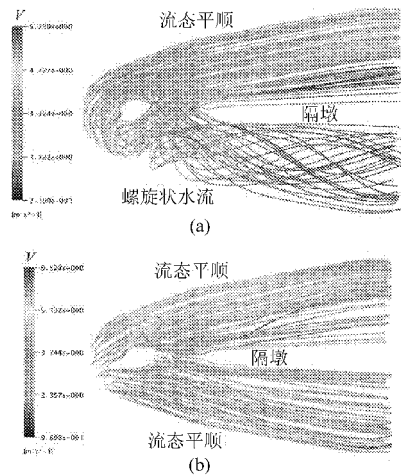


图 9 不同流量时出水流道内部粒子迹线图

Fig. 9 Internal particle path line of outlet passage

(a) 小流量工况 ($Q = 180 \text{ L/s}$) (b) 大流量工况 ($Q = 340 \text{ L/s}$)

在流量 180 ~ 340 L/s 范围内,出水流道压能恢复系数越大,出水流道水头损失值越小,表明导叶出口环量越大,出水流道回收的压能也越大。结果表明,出水流道的水力损失并没有与流量呈二次方关系,这与文献[7]中通过试验得到的结论相符合,主要原因是受导叶出口环量的影响造成的。出水流道压能恢复系数、水头损失与流量的关系如图 10 所示。

4 性能预测与试验对比

为了验证数值模拟计算结果的准确性,对该立式轴流泵模型装置进行了能量试验,获得了相应的外特性试验数据,将对应的试验值与计算值进行对比,结果如图 11 所示。通过比较发现,数值模拟预测的扬程-流量曲线、效率-流量曲线与试验结果总体趋势相同,在最优工况附近预测的效率和扬程与

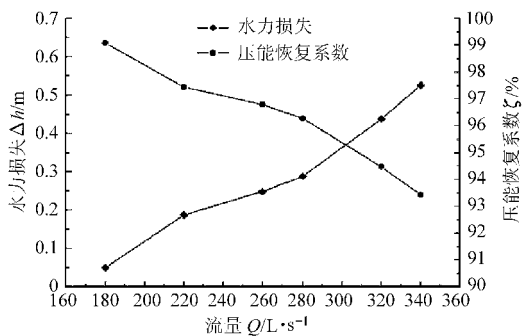


图 10 出水流道压能恢复系数与损失曲线

Fig. 10 Pressure energy recovery coefficient ζ and hydraulic loss Δh

试验值相对误差均在 1.5% 以内,满足工程应用的要求。在非最优工况下偏差较大,尤其是大流量工况下效率偏差很大,也表明了数值模拟不能完全取代模型试验的作用。

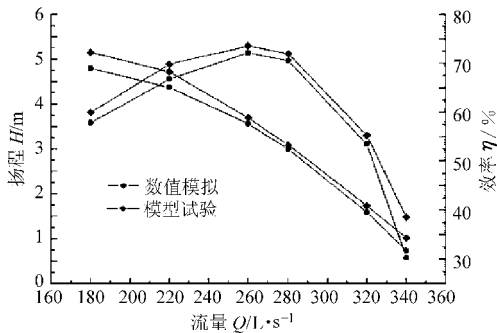


图 11 扬程流量与效率流量曲线

Fig. 11 Performance curves of pump device

5 结论

(1) 基于计算流体动力学 CFX 软件对泵装置进行整体数值模拟,在此基础上对立式轴流泵装置进行内特性分析。通过与模型试验外特性数据的对比,表明该方法在最优工况附近计算的精度能满足工程的实际需要。

(2) 通过对进水流道计算流场的分析,表明叶轮进口水流条件满足水泵运行要求。轴向速度分布及其均匀度、切向流速分布和平均环量受叶轮旋转的影响较明显并随着断面接近叶轮而增大。叶轮旋转引起环量增加,使进水流道水力损失有所减小,但不足以影响泵装置性能。

(3) 出水流道受导叶出口环量影响较大,导致出水流道隔墩两侧的流量分配不均,两孔流量最大差值达 114.7%。小流量工况时,在出水流道右侧产生螺旋状水流,导致附加的能量损失,降低了装置效率。在设计出水流道时,应充分考虑导叶出口环量对其水力性能的影响。

- 1 181.
- 8 González J, Parrondo J L, Santolaria C, et al. Steady and unsteady radial forces for a centrifugal pump with impeller to tongue gap variation [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2006, 128(3): 454 ~ 462.
- 9 González J, Fernández J, Blanco E, et al. Numerical simulation of the dynamic effects due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2002, 124(2): 348 ~ 355.
- 10 Barrio R, Blanco E, Parrondo J, et al. The effect of impeller cutback on the fluid-dynamic pulsations and load at the blade-passing frequency in a centrifugal pump [J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2008, 130(11): 111 102 - 1 ~ 111 102 - 11
- 11 田辉,郭涛,孙秀玲,等. 离心泵动静干涉作用的数值模拟[J]. 农业机械学报,2009,40(8):92 ~ 95.
Tian Hui, Guo Tao, Sun Xiuling, et al. Numerical simulation of unsteady flow in a centrifugal pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40 (8): 92 ~ 95. (in Chinese)
- 12 Longatte F, Kueny J L. Analysis of rotor-stator-circuit interactions in a centrifugal pump [C] // Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, 2009: 1 039 ~ 1 045.
- 13 姚志峰,王福军,肖若富,等. 离心泵压力脉动测试关键问题分析[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(3):219 ~ 223.
Yao Zhifeng, Wang Fujun, Xiao Ruofu, et al. Key issues in pressure fluctuation experiment for centrifugal pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(3):219 ~ 223. (in Chinese)
- 14 祝磊,袁寿其,袁建平,等. 阶梯隔舌对离心泵压力脉动和径向力影响的数值模拟[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):21 ~ 26.
Zhu Lei, Yuan Shouqi, Yuan Jianping, et al. Numerical simulation on pressure fluctuations and radial hydraulic forces in centrifugal pump with step-tongue[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.): 21 ~ 26. (in Chinese)
-

(上接第 43 页)

参 考 文 献

- 1 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- 2 成立,刘超,汤方平,等. 对称翼型转轮双向泵装置紊流数值模拟与性能预测[J]. 农业机械学报,2004,35(5):78 ~ 81.
Cheng Li, Liu Chao, Tang Fangping, et al. Numerical simulation and performance prediction of reversible pump with symmetric aerofoil [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35 (5): 78 ~ 81. (in Chinese)
- 3 Tang Fangping, Wang Guoqiang. Influence of outlet guide vanes upon performances of waterjet axial-flow pump [J]. Journal of Ship Mechanics, 2006, 10(6):19 ~ 26.
- 4 Zhang Desheng, Shi Weidong, Chen Bin, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump [J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B., 2010, 22(1):35 ~ 43.
- 5 金燕,刘超,汤方平. 灯泡贯流泵装置内部流动数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(2):155 ~ 159.
Jin Yan, Liu Chao, Tang Fangping. Numerical simulation of internal flow of tubular pumping system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(2):155 ~ 159. (in Chinese)
- 6 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- 7 汤方平,袁家博,周济人. 轴流泵站进出水流道水力损失的试验研究[J]. 排灌机械,1995,13(3):13 ~ 14.
Tang Fangping, Yuan Jiabo, Zhou Jiren. Experimental study on the inlet and outlet channels of pump device [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 1995, 13(3):13 ~ 14. (in Chinese)
- 8 李忠,杨敏官,王春林. 轴流泵叶轮出口流场实验[J]. 农业机械学报,2009,40(9):94 ~ 97.
Li Zhong, Yang Minguan, Wang Chunlin. Experiment of the flow field at the outlet of impeller of axial-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(9):94 ~ 97. (in Chinese)