

# 轴伸式出水流道内流场数值模拟分析

谢荣盛<sup>1</sup> 汤方平<sup>1</sup> 刘超<sup>1</sup> 石丽建<sup>1</sup> 杨帆<sup>1</sup> 张松<sup>2</sup>

(1. 扬州大学水利与能源动力工程学院, 扬州 225009; 2. 扬州市勘测设计研究院有限公司, 扬州 225009)

**摘要:** 为了探讨在导叶出口剩余环量影响下轴伸式出水流道的水力性能, 对不同水力模型及不同叶片安放角下的后置轴伸式泵装置采用全结构化网格进行了数值模拟计算, 并与实验结果对比验证模拟结果的可信度。对轴伸式出水流道的水力性能进行了分析, 发现轴伸出水流道内部流态受导叶出口剩余环量的影响较大, 尤其是对小流量工况。水力损失系数不再是某一常数, 而是受流态分布相关的一变量。通过对比不同叶片安放角及不同比转数叶轮的出水流道进口断面平均涡角与水力损失系数关系发现, 轴伸式出水流道的水力损失系数与进口断面的平均涡角存在一最优值, 本次模拟计算下 2 副叶轮的最优平均涡角  $4^\circ \sim 5.3^\circ$  下的水力损失系数为  $1.62 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^2 / \text{L}^2$ 。通过分析静压与总压沿流线方向的变化趋势明确了小流量工况下环量是引起水力损失的原因, 而在大流量工况下流量是引起水力损失的主要原因。

**关键词:** 泵装置; 出水流道; 水力损失; 涡角; 计算流体力学; 数值模拟

**中图分类号:** TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)08-0029-06

## Numerical Simulation Analysis of Internal Flow in S-shaped Outlet Conduit

Xie Rongsheng<sup>1</sup> Tang Fangping<sup>1</sup> Liu Chao<sup>1</sup> Shi Lijian<sup>1</sup> Yang Fan<sup>1</sup> Zhang Song<sup>2</sup>

(1. School of Hydraulic, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China

2. Yangzhou Survey Design Research Institute Co., Ltd., Yangzhou 225009, China)

**Abstract:** In order to research the hydraulic performance of the post position S-shaped shaft outlet conduit under the influence of circulation, the hydraulic performance of the post position S-shaped shaft pumping station under different blade models and different blade angles was simulated with commercial CFD software, and the experiment results were compared with the CFD results. The analysis of hydraulic performance of S-shaped outlet conduct showed that the inner flow field was strongly affected by the residual circulation of guide vane, the coefficient of hydraulic loss was no longer a constant, but a variable which was related to flow field. By comparing the relationship of the average swirl angle in the inlet and the hydraulic loss coefficient of the outlet conduit, it was found that an optimal average swirl angle existed for hydraulic loss coefficient. And the optimal average swirl angle was about  $4^\circ \sim 5.3^\circ$  for two different blades models, and the hydraulic loss coefficient was  $1.62 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^2 / \text{L}^2$ . By analyzing the static pressure and total pressure distribution curve, the conclusion below can be drawn: the mainly reason for the hydraulic loss was average swirl angle value at the small discharge, on the contrary the reason for the large hydraulic loss was velocity at large discharge. After the water flowing through the second corner, most of the kinetic energy is recovered. The research result gave a good suggestion for the design and optimization of pump station.

**Key words:** pump device; outlet conduit; hydraulic loss; swirl angle; computational fluid dynamics; numerical simulation

收稿日期: 2016-01-15 修回日期: 2016-02-25

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51376155)、江苏省自然科学基金项目(BK20150457)、扬州大学科技创新培育基金项目(2015CXJ033)和扬州大学研究生科研创新项目(KYLX\_1346)

**作者简介:** 谢荣盛(1987—),男,博士生,主要从事泵站内流场研究,E-mail: xrszilan21@163.com

**通信作者:** 汤方平(1964—),男,教授,博士生导师,主要从事泵装置多学科优化设计及流体机械设计研究,E-mail: tangfp@yzu.edu.cn

## 引言

在大型低扬程泵站工程中,通常采用贯流泵的结构型式来保证流体经过进出水水道时水力损失最小,从而保证整个泵装置的高效稳定运行。在流体经过高速旋转的轴流泵叶轮后,获得的能量以压能和旋转的动能形式存储。在导叶的整流作用下,大部分动能得以回收并转换为压能。出水水道的进口因断面面积较小、速度相对较大以及水流旋转、分布不均匀等因素而动水头较大,在逐渐扩散的出水水道中,速度逐渐降低,部分动能转化为压能,还有部分因水体之间以及与固定壁面的摩擦而损失。出水水道内的流体在速度与环量的共同作用下呈螺旋状流经逐渐扩散的流道,水力损失并不简单地与速度的二次方成正比,而是存在某一最优环量值。

早期的泵站工程中单独将进出水水道进行优化,后来逐步发展成为考虑叶轮导叶与进出水水道的耦合作用而作全水道优化。汤方平等<sup>[1]</sup>定量分析了各种比转数轴流泵导叶可回收的最大能量,为出水水道进口的环量分布提供依据。仇宝云等<sup>[2]</sup>通过对低扬程大型泵站单管出水水道研究发现,水泵出口存在最优旋流,使水力损失最小,并提出了针对具体泵站的导叶设计方法。陆伟刚等<sup>[3]</sup>探讨了流量与环量对低扬程泵装置水道水头损失的交叉影响。通过全水道的模拟开发,低扬程泵站的水力性能有了较大的提高<sup>[4]</sup>,邳州站的竖井贯流泵装置效率突破了80%,最高超过83%<sup>[5]</sup>,轴伸贯流泵装置达到83.55%<sup>[6]</sup>。刘超<sup>[7]</sup>总结了低扬程泵站的发展趋势。文献[8-14]介绍了大型低扬程泵装置中出水水道的内部流动特征。

目前对带环量影响的出水水道水力性能已有初步研究成果,但是水流分布对流场的具体影响,环量对出水水道水力性能的影响急需量化指标。本文基

于全水道模型对轴伸式贯流泵装置进行数值模拟,重点对导叶出口剩余环量影响下轴伸式出水水道的水力性能进行研究与分析。

## 1 计算模型及相关设置

### 1.1 计算模型及相关参数

计算模型中叶片数为3,叶轮室直径为300 mm,叶轮转速为1 022 r/min,叶顶间隙根据安装现场用塞尺量出为0.2 mm,导叶叶片数为5。泵站设计流量对应模型泵装置为222 L/s,计算模型为整个泵装置系统,包括进出水水道及其延长段、叶轮室和导叶室。整个计算模型长度为8 m,叶轮及导叶的模型及网格在Turbogrid中完成,进出水水道及延长段在UG中建立,导入ICEM中完成六面体结构化网格剖分,网格质量均大于0.35,网格角度介于24°~155°之间。各部分网格经无关性分析最终确定的网格及节点数如表1所示,计算域模型及计算网格如图1所示。

表1 各计算域内网格

Tab.1 Grids in computational domain

计算域	节点数	网格数
叶轮室	315 612	292 587
导叶室	291 365	267 210
出水水道及其延长段	498 420	478 898
进水水道及其延长段	200 080	191 089
总和	1 305 477	1 229 784

### 1.2 边界条件设置

基于N-S方程,采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型对计算域进行求解<sup>[15-17]</sup>。进口采用总压进口边界条件,出口采用质量流出口边界条件,依次计算从大到小包括整个设计流量范围内的工况点,壁面采用no-slip壁面,进出口的自由液面采用刚盖假定设置为对称面,旋转叶轮部件与固定导叶及进水水道之

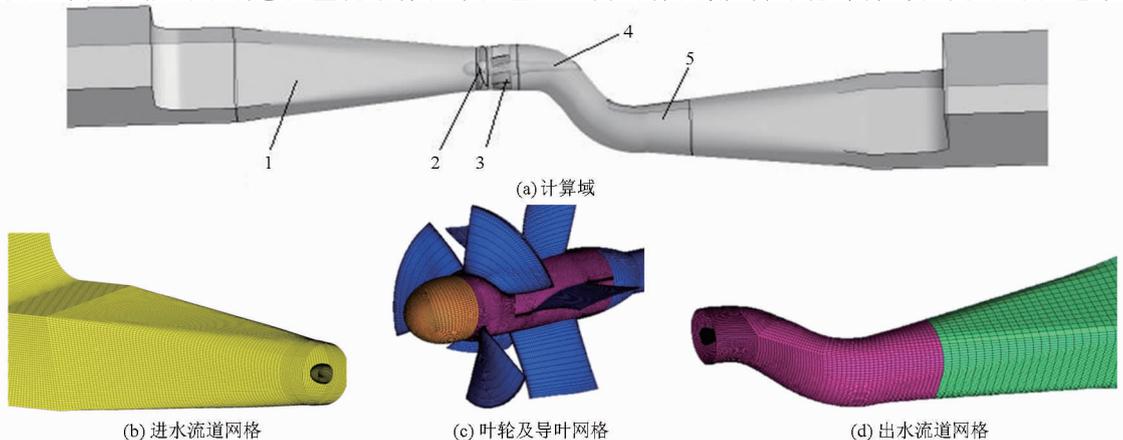


图1 计算域模型及计算网格

Fig.1 Computational domain model and computing grids

1. 进水水道 2. 叶轮室 3. 后导叶 4. 连接轴 5. 轴伸出水水道

间采用 stage 模型传递数据<sup>[18]</sup>。对叶轮的扭矩及进出的总压增量设置监控点,以监控点不随计算的波动为收敛标准。

## 2 结果与分析

### 2.1 计算与实验结果对比

模型实验在江苏省水力动力工程重点实验室高精度实验台上进行,实验台综合精度为  $\pm 0.39\%$ ,模型实验规程按照 SL140—2006 进行。图 2 为模型现场测试段照片。叶片及叶轮室均为数控加工成型,进出水道则是根据控制截面敲制焊接而成。



图 2 模型实验泵装置照片

Fig. 2 Picture of model pump systems

将测试结果的流量、功率、扬程数据取出,对照模拟计算结果整理成图 3 及图 4。

从图 3 可以看出不同叶片安放角下,轴功率模拟计算结果与实验台测试结果保持高度一致,其中模拟结果的  $P-Q$  曲线斜率略陡于实验值。从图 4 可以看出在大范围内  $H-Q$  值较吻合,在小流量时,误差较大,但整体趋势保持一致,模拟计算结果可信。

### 2.2 轴伸出水道进口速度分布

导叶设计时考虑设计流量扬程工况叶轮出口的

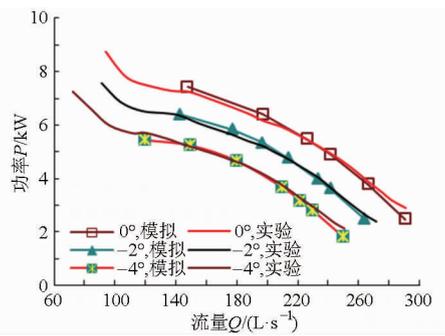


图 3 功率-流量曲线

Fig. 3 Curves of flow power vs rate

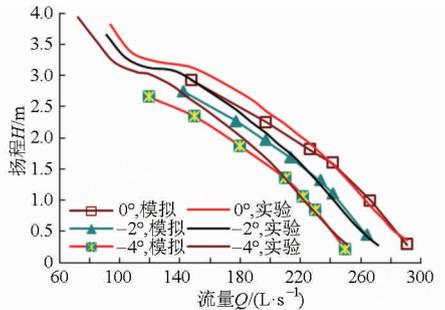


图 4 扬程-流量曲线

Fig. 4 Curves of flow head vs rate

速度分布,尽可能多地回收动能并使经过导叶的水力损失最小。受旋转叶轮影响,叶轮出口水流经过后导叶回收环量后仍有一部分环量未完全回收,甚至有导叶背部的脱流进入到了出水水道的入口,进而引起出水水道内部水流不稳。将出水水道进口的总速度及切向速度取出,如图 5(图中  $Q_d$  为设计流量)所示。

从总速度云图中可以看出,受导叶影响分割成 5 块近似相同的扇型区域,且速度略微偏向一侧,主

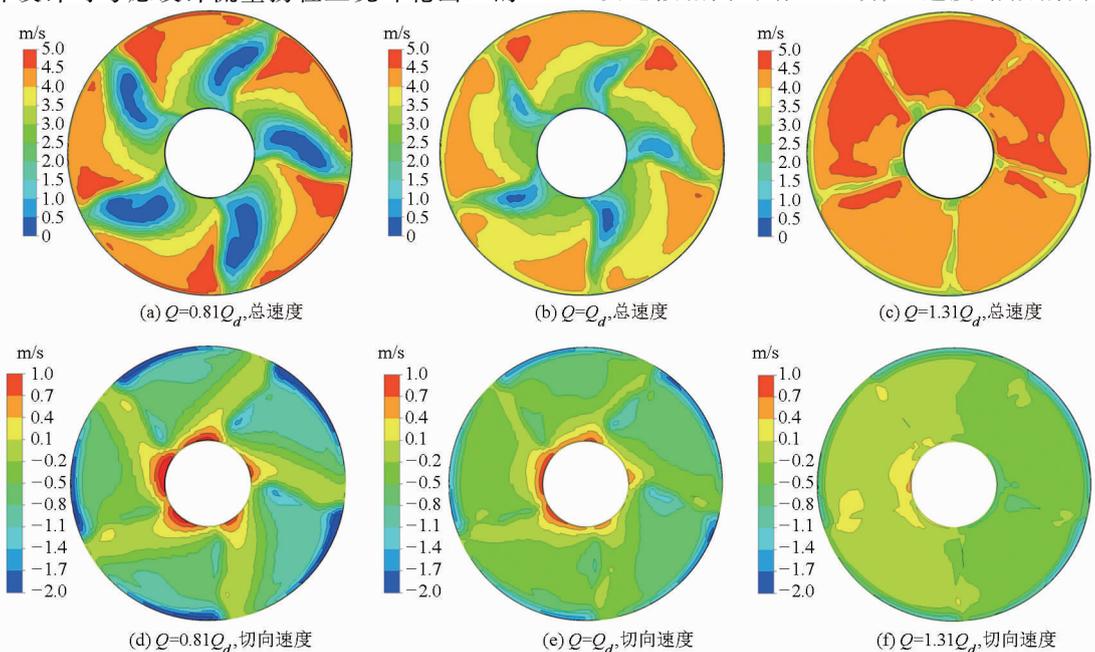


图 5 出水水道进口速度云图(相对坐标系)

Fig. 5 Velocity contours at outlet conduit entrance (reference coordinate system)

要是由轴伸流道在拐角处形成流道凹凸致使两侧速度不均。导叶正面水流挤压,未见明显脱流,进入到进水流道进口表现为速度分布较大,受切向速度旋转作用外侧要比内侧速度大。导叶背面及近轮毂侧在小流量工况脱流较严重,形成类似樱花状的分布。在大流量工况圆周断面在导叶后面速度较小呈现出分割曲线,形成扇形区域。而切向速度云图与总速度相似,数值上要小。因叶轮旋转方向为逆时针,导叶出口的切向速度总体上也表现为负值,在轮毂侧因脱流而导致切向速度反向。而在大流量工况受切向速度较小。此外切向速度分布也存在明显偏向一侧的现象,与总体速度分布偏向的方向相差 $90^\circ$ 相位,刚好对应于弯道引起的二次流与速度分布规律。

### 2.3 出水流道水力损失分析

受导叶出口剩余环量影响,出水流道内部水力损失不再满足经验公式。为分析出水流道内部的水力损失分布规律,将模拟仿真结果中的出水流道单独取出,计算出水流道进口到出口断面的水力损失,整理成图6。

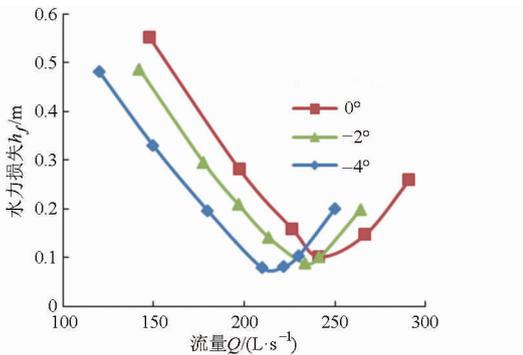


图6 不同叶片安放角下出水流道水力损失与流量关系

Fig. 6 Relationships of hydraulic loss and flow rate at different blade angles

从图6可以看到出水流道内的水力损失并不简单地与流量呈单调递增关系,而是存在某一最小值。且这一最小值所对应的流量随着叶片安放角的减小而相应地减小。在流量小于最小水力损失对应的流量时,水力损失随着流量减小而增大,主要是环量引起的内部流态脱流较严重而引起水力损失增加。在流量大于最小水力损失对应的流量时,水力损失随着流量增加而增大,这时环量较小,对出水流道的流态不起主导作用,壁面切应力引起的水力损失逐渐增大。为了找出出水流道的水力损失影响因素,引入文献[19]涡角 $\bar{\theta}$ 的概念,定义为轴面平均切向速度与轴向平均速度的比值,同时将出水流道的水力损失除以流量的平方得到水力损失系数 $\zeta$ 。

将不同叶片安放角下的流量与出水流道进口断面的平均涡角整理成图7,平均涡角与水力损失系

数整理成图8。

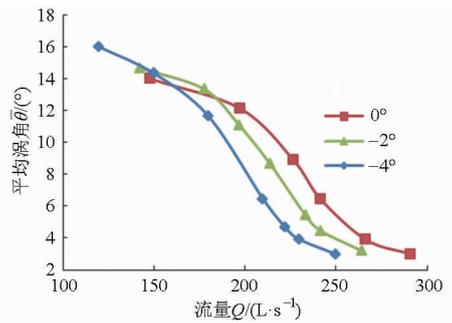


图7 平均涡角与流量关系曲线

Fig. 7 Curves of average swirl angle  $\bar{\theta}$  vs flow rate  $Q$

从图7中可以发现不同叶片安放角下,平均涡角与流量的关系曲线单调递减,主要是小流量工况时扬程较高,从导叶出口流入出水流道的剩余环量较大;而在流量较大时,扬程较低,导叶出口的剩余环量较低,平均涡角小。叶片安放角较大时曲线偏向右侧。

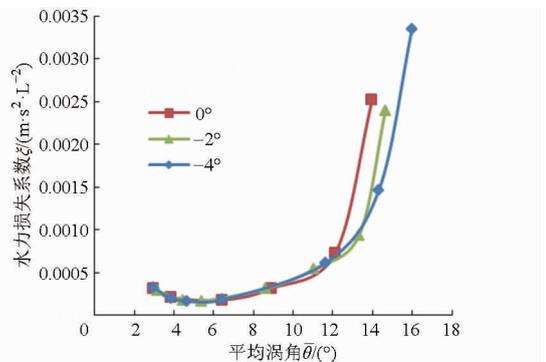


图8 不同叶片安放角下水力损失系数与进口平均涡角关系曲线

Fig. 8 Relationship curves of head loss coefficient  $\zeta$  vs average swirl angle  $\bar{\theta}$  at different blade angles

从图7可以比较直观地得出,不同叶片安放角下,均存在最优环量值,计算模型中为 $5.3^\circ$ 。涡角的存在使得水流呈螺旋状前进,延长了水流的流线条长度,降低了水流的相对扩散角度,扩散损失变小。在最优涡角之前,水力损失系数相对降低;另一方面,流线的加长,增加了流体与壁面的相对摩擦距离,沿程损失增加。当涡角进一步增加时,内部严重脱流是水力损失系数增加较快的主要原因,如图中涡角大于 $12^\circ$ 以后,水力损失系数增长趋势变得陡峭。随着叶片安放角度的减小,拐点出现的位置偏向涡角较大区域。

为了进一步研究轴伸出水流道的水力损失系数与涡角之间的关系,将计算域中的叶轮(叶片1)更换为另一比转数较大的叶轮(叶片2),将平均涡角与水力损失系数绘制成图9。

从图9可知,叶轮更换后,最优平均涡角从

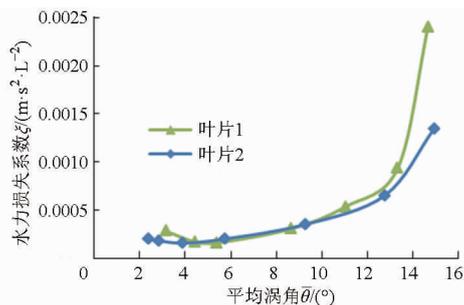


图 9 不同叶片模型水力损失系数与进口平均涡角关系曲线

Fig. 9 Relationship curves of head loss coefficient  $\zeta$  vs average swirl angle  $\bar{\theta}$  at different blades model

5.  $3^\circ$  往小角度方向移动到  $4^\circ$ , 并且在大角度时曲线偏移方向与叶片往小角度旋转时偏移方向相同, 平均涡角与水力损失系数在较大范围内保持吻合, 说明轴伸出水道的水力损失系数与平均涡角的关系主要与水道本身的结构有关, 不同的叶轮对其影响不大。

### 2.4 出水水道总压与静压随流线变化趋势

为分析出水水道内部压力随流线的变化规律, 以出水水道进口为起点, 分别插入与流线中心线相垂直的特征断面, 并绘出总压与静压随流线变化规律曲线, 如图 10 所示。

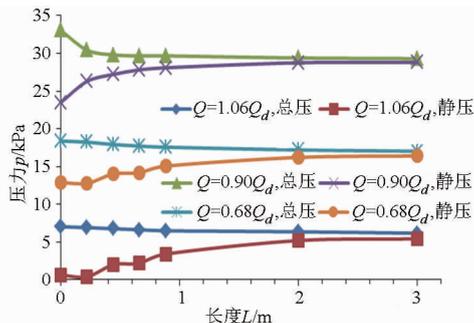


图 10 静压与总压随流线方向分布曲线

Fig. 10 Distribution curves of static pressure and total pressure along with streamline

从图 10 中可知, 沿着流线方向, 水力损失逐渐增加, 总压逐渐降低; 断面面积逐渐扩大, 水道回收动能转化为压力, 静压逐渐增高。在轴伸 S 形处水流得以调整, 动能回收较多, 静压增加较大, 水力损失也较大。比较不同流量下的水道进口动能可知, 在流量偏大以及偏小时动能较大, 从动能转换为压能的时候会有一部分能量损耗, 故水力损失较大, 而在最优流量工况附近, 主要是因为动能所占的比重较小, 出水水道损失较小。在流量较小时, 环量是引起水力损失的主要原因, 而在流量较大时, 流量是引起水力损失的主要原因。

### 2.5 轴伸出水道压力及流线图

根据计算结果取轴伸泵装置出水水道外表面为

参考面并依次向内偏移 2、4、8 cm 得到的相应 4 个面, 依次给出表面的压力分布云图, 如图 11 所示。

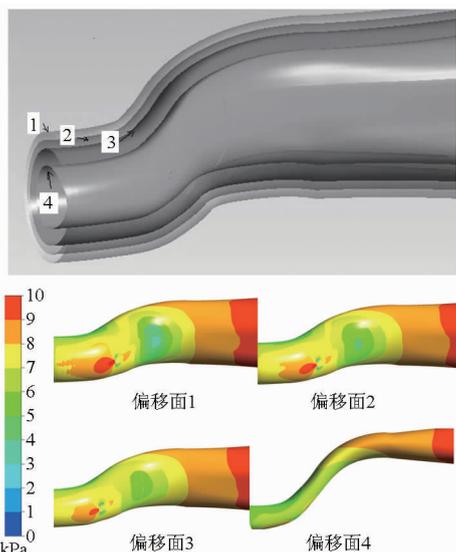


图 11 压力分布云图 ( $Q = Q_d$ )

Fig. 11 Contours of static pressure distribution

总体上压力在流道的入口较低, 随着往出口方向移动, 断面面积增加, 速度减小, 流动变得均匀, 动能转换为压能, 压力逐渐增高。因受轴和水道弯曲的影响, 在水流的第一拐角凸起处, 会有局部增加, 流过轴后会有局部压力降低。在第一拐角凹处, 因流速的局部增加压力会有局部的降低, 水流在拐弯引起的二次流与原先的切向速度合在一起引起速度的重新分配与断面流态重新调整, 对环量的回收较直管式的出水水道要好。在第一拐点和第二拐角之间, 高压区与低压区互换, 压力变化均匀, 靠近水道外侧变化明显大于内侧, 流态又进一步得到调整, 到水道出口环量基本全部回收。

从出水水道内部流线图 (图 12) 可以观测到轴伸出水道在小流量工况时, 受切向速度影响, 水流

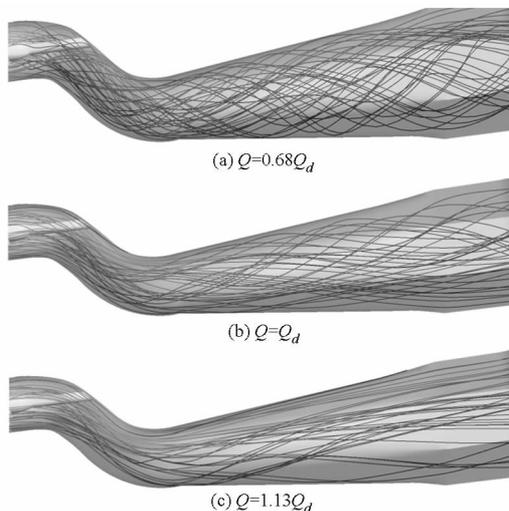


图 12 不同工况下出水水道内部流线图

Fig. 12 Streamline of outlet conduit under different flow rates

呈螺旋状态平顺流出,最优环量流线相对比较平顺。在大流量工况,在拐角处有局部脱离存在。

### 3 结论

(1)通过不同叶片安放角及不同叶轮的轴伸式贯流泵装置模拟计算得到了出水水道内水力损失分布规律,比较得出出水水道的水力损失系数 $\zeta$ 主要与进口的平均涡角 $\bar{\theta}$ 及水道本身的结构参数有关。不同叶片安放角及不同叶轮主要是影响水道进口速度分布来改变出水水道内流态分布,对最小水力损失系数基本无影响,在进口涡角较大时会有不同的影响。

(2)本文中轴伸出水流道的进口最优涡角 $\bar{\theta}$ 在 $4^\circ \sim 5.5^\circ$ 之间, $\zeta$ 最小值在 $1.62 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^2/\text{L}^2$ 附近。

(3)水流在流经轴伸出水流道的2次弯道后,动能回收较充分。

(4)轴伸出水流道的损失在泵装置中设计工况附近因进口断面动能较小,动能转换为压能过程中水力损失较小,整体水力损失较小。在小流量时,环量是引起损失较大的原因,而在大流量时,流速过大是引起水力损失较大的主要原因。

(5)针对泵站具体的运行参数,本文研究成果可为泵装置型线优化设计及导叶的匹配提供参考。

### 参 考 文 献

- 1 汤方平,周济人,鄢碧朋. 轴流泵后导叶回收能量分析[J]. 水泵技术,1995(3):19-22.  
TANG Fangping, ZHOU Jiren, YAN Bipeng. Analysis of recycled circulation by axial flow pump back guide vane[J]. Pump Technology, 1995(3):19-22. (in Chinese)
- 2 仇宝云,刘超,袁伟声. 大型水泵轴向后导叶叶片出口角对出水水道性能的影响[J]. 机械工程学报,2000,36(7):74-77.  
QIU Baoyun, LIU Chao, YUAN Weisheng. Influence of blade outlet angel of axial outlet diffuser of large pump on performance of its discharge passage[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000,36(7):74-77. (in Chinese)
- 3 陆伟刚,董雷,王兆飞,等. 流量与环量对低扬程泵装置水道水头损失的交叉影响[J]. 应用数学和力学,2012,33(12):1431-1441.  
LU Weigang, DONG Lei, WANG Zhaofei, et al. Cross influence of discharge and circulation on head loss of the conduit of pump system with low head [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2012,33(12):1431-1441. (in Chinese)
- 4 梁金栋,陆林广,徐磊,等. 轴流泵装置导叶出口水流速度环量对出水水道水力损失的影响[J]. 农业工程学报,2012,28(1):55-60.  
LIANG Jindong, LU Linguang, XU Lei, et al. Influence of flow velocity circulation at guide vane outlet of axial-flow pump on hydraulic loss in outlet conduit [J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(1):55-60. (in Chinese)
- 5 徐磊,陆林广,陈伟,等. 南水北调工程邳州站竖井贯流泵装置进出水流态分析[J]. 农业工程学报,2012,28(6):50-56.  
XU Lei, LU Linguang, CHEN Wei, et al. Flow pattern analysis on inlet and outlet conduit of shaft tubular pump system of Pizhou pumping station in South-to-North Water Diversion Project[J]. Transactions of the CSAE, 2012,28(6):50-56. (in Chinese)
- 6 杨帆,刘超,汤方平,等. S形贯流泵装置多工况过流部件水力性能分析[J]. 农业机械学报,2014,45(5):71-77.  
YANG Fan, LIU Chao, TANG Fangping, et al. Hydraulic performance analysis of flow passage components in S-shaped shaft extension tubular pumping system under multi-conditions [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(5):71-77. (in Chinese)
- 7 刘超. 轴流泵系统技术创新与发展分析[J]. 农业机械学报,2015,46(6):49-59.  
LIU Chao. Researches and developments of axial-flow pump system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(6):49-59. (in Chinese)
- 8 仇宝云,林海江,袁寿其,等. 大型水泵出水水道优化水力设计[J]. 机械工程学报,2006,42(12):47-51.  
QIU Baoyun, LIN Haijiang, YUAN Shouqi, et al. Optimum hydraulic design for discharge passage of large pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(12):47-51. (in Chinese)
- 9 陈会向,周大庆,张蓝国,等. 基于CFD的双向竖井贯流泵装置水力性能数值模拟[J]. 水电能源科学,2013(11):183-187.  
CHEN Huixiang, ZHOU Daqing, ZHANG Languo, et al. Hydraulic performance improvement of bidirectional shaft tubular pump system base on CFD [J]. Water Resource and Power, 2013(11):183-187. (in Chinese)
- 10 成立,刘超,周济人,等. 低扬程灌排泵装置进出水流道研究进展及展望[J]. 灌溉排水学报,2008,27(1):112-114.  
CHENG Li, LIU Chao, ZHOU Jiren, et al. Review and prospect on passage of low-lift pumping system for irrigation and drainage [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(1):112-114. (in Chinese)
- 11 仇宝云,黄季艳,袁寿其,等. 轴流泵出水水道水力损失实验研究[J]. 机械工程学报,2006,42(5):39-44.  
QIU Baoyun, HUANG Jiyun, YUAN Shouqi, et al. Test investigation on hydraulic losses in discharge passage of axial-flow pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(5):39-44. (in Chinese)
- 12 ZHANG Desheng, SHI Weidong, CHEN B, et al. Unsteady flow analysis and experimental investigation of axial-flow pump [J]. Journal of Hydrodynamics, 2010, 22(1):35-43.

- YANG L B, XIAO Y X, TANG B, et al. Prediction of pulp pump erosion characteristic based on solid-liquid two-phase turbulent flow[J]. *Journal of Drainage & Irrigation Machinery Engineering*, 2015,33(2):98-103. (in Chinese)
- 5 周大庆, 米紫昊, 茅媛婷. 基于欧拉固液两相流模型的泵站进水侧流场三维模拟[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1):48-52. ZHOU D Q, MI Z H, MAO Y T. 3-D numerical simulation of inlet structure flow in pumping station based on Eulerian solid-liquid two-phase flow model[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(1):48-52. (in Chinese)
- 6 汪家琼, 蒋万明, 孔繁余, 等. 固液两相流离心泵内部流场数值模拟与磨损特性[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(11):53-60. WANG J Q, JIANG W M, KONG F Y, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow and wear characteristics of centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(11):53-60. (in Chinese)
- 7 刘建瑞, 徐永刚, 王董梅, 等. 离心泵叶轮固液两相流动及泵外特性数值分析[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(3):86-90. LIU J R, XU Y G, WANG D M, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in impeller channel and pump characteristics analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 41(3):86-90. (in Chinese)
- 8 王洋, 徐小敏, 张翔. 离心泵内低固相浓度固体颗粒运动的数值模拟[J]. *流体机械*, 2009, 37(2):24-27. WANG Y, XU X M, ZHANG X. Numerical simulation for the motion of dilute solid particles in centrifugal pump[J]. *Fluid Machinery*, 2009, 37(2):24-27. (in Chinese)
- 9 张玉良, 李昶, 崔宝玲, 等. 两相流离心泵水力输送性能计算分析[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(14):169-176. ZHANG Y L, LI Y, CUI B L, et al. Computational analysis of hydraulic transmission performance in two-phase flow centrifugal pump[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(14):169-176. (in Chinese)
- 10 刘娟, 许洪元, 唐澍, 等. 离心泵内固体颗粒运动规律与磨损的数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2008, 39(6):54-59. LIU J, XU H Y, TANG S, et al. Numerical simulation of erosion and particle motion trajectory in centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(6):54-59. (in Chinese)
- 11 李亚林, 袁寿其, 汤跃, 等. 离心泵内示踪粒子运动的离散相模型模拟[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(11):113-118. LI Y L, YUAN S Q, TANG Y, et al. Simulation of tracer particles movement by discrete phase model in the centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012,43(11):113-118. (in Chinese)
- 12 许洪元, 陈雪梅, 王琳, 等. 离心泵叶轮中固体颗粒的运动研究[J]. *流体机械*, 1992,20(7):1-6. XU H Y, CHEN X M, WANG L, et al. A study on motion of solid particles in centrifugal pump impeller[J]. *Fluid Machinery*, 1992,20(7):1-6. (in Chinese)
- 13 邓军, 杨永全, 沈焕荣, 等. 水流含水量对磨蚀的影响[J]. *泥沙研究*, 2000(4):1-5. DENG J, YANG Y Q, SHEN H R, et al. The influence to abrasion of sediment concentration[J]. *Journal of Sediment Research*, 2000(4):1-5. (in Chinese)
- 14 余江成, 姚启鹏. 河流泥沙颗粒特性对磨损影响的研究[J]. *水利水电技术*, 1999, 30(11):37-39.
- 15 李双寿, 卢达溶, 洪亮, 等. ADI 渣浆泵叶片磨损机理的研究[J]. *流体机械*, 2000, 28(6):5-8.
- 16 SATO J, USAMI T, OKAMURA K, et al. Comparison of silt erosion characteristics of materials through different types of test methods[C]//The 3rd Japan-China Joint Conference on Fluid Machinery, 1990:201-207.
- 17 许洪元, 吴玉林, 高志强, 等. 稀相固粒在离心泵轮中的运动实验研究和数值分析[J]. *水利学报*, 1997(9):12-18. XU H Y, WU Y L, GAO Z Q, et al. Experimental study and numerical analysis of the motion of dilute solid particles in centrifugal pump impellers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(9):12-18. (in Chinese)
- 18 FINNIE I. The mechanism of erosion of ductile metals[C]//Proceedings of the 3rd US National Congress of Applied Mechanics, 1958.
- 19 FINNIE I. Erosion of surfaces by solid particles[J]. *Wear*, 1960, 3(2):87-103.
- 20 GRANT G, TABAKOFF W. Erosion prediction in turbomachinery resulting from environmental solid particles[J]. *Journal of Aircraft*, 1975, 12(5):471-478.

(上接第 34 页)

- 13 蔡金来. 轴流泵出口环量对出水流道损失影响的数值模拟研究[D]. 扬州:扬州大学, 2009. CAI Jinlai. Study on the numerical simulation of the influence of the outlet circulation of axial flow pump to the hydraulic loss of the outlet conduit[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009. (in Chinese)
- 14 杨帆, 刘超, 孙丹丹, 等. 轴流泵装置虹吸式出水流道内流机理数值分析[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6):60-65. YANG Fan, LIU Chao, SUN Dandan, et al. Numerical investigation of internal flow mechanisms of siphon outlet passage in pumping system[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6):60-65. (in Chinese)
- 15 BLAZEK J. Computational fluid dynamics: principles and applications[M]. 2nd ed. Netherlands: Elsevier Ltd., 2005:227-270.
- 16 LAUNDER B E, SPALDING D B. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London:Academic Press, 1972.
- 17 LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1974,3(2):269-289.
- 18 RODI W. Turbulence models and their application in hydraulics experimental and mathematical fluid dynamics[M]. Delft: IAHR Section on Fundamentals of Division II, 1980:44-46.
- 19 ANSI/HI 9.8-1998 American national standard for pump intake design[S]. 1998.