

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.03.011

# 立式循环泵进水流道的内部流场研究\*

欧鸣雄 施卫东 田飞 张德胜 卢熙宁

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

**摘要:** 进水流道设计是大型立式循环泵装置设计中的重要环节, 为了解不同工况下叶轮对流道出口流场的影响, 分别对考虑叶轮影响和不考虑叶轮影响下的进水流道内部流场进行计算和分析。研究发现不考虑叶轮影响下的进水流道内部流场特征几乎不受流量变化的影响, 而考虑叶轮影响的进水流道情况则比较复杂。在小流量情况下, 叶轮流场的进口回流效应会对进水流道出口流场产生显著影响。随着流量的降低, 进水流道出口分析截面内的流速分布均匀度和流速加权吸入角两个指标逐渐降低, 在  $0.4Q_0$  流量时, 截面外缘出现明显的圆周速度分量, 其变化接近于涡核内的圆周速度曲线, 并不断向叶轮上游流道扩展。

**关键词:** 立式循环泵 进水流道 数值模拟 均匀度 吸入角

**中图分类号:** TH3; TV136 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)03-0055-04

## Flow Field Analysis of Inlet Sump in Vertical Circulation Pump

Ou Mingxiong Shi Weidong Tian Fei Zhang Desheng Lu Xining

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

**Abstract:** The design of inlet sump is an important part in whole project-design. With the aim to investigate the change of inlet chamber affected from impeller under different flows, an inlet sump model with and without impeller was analyzed with numerical simulation method. The results revealed that the fluid field of inlet sump without impeller almost had no change in different flows. The situation in the one with impeller was complicated. The inlet recirculation effect of impeller in part-load had a main influence on the outlet of inlet sump which grew with decreased flow. The distribution uniformity and velocity-weighted suction angle changed down with decreased flow rate. Tangent velocity appeared obviously in the outer of sump outlet at the flow rate of  $0.4Q_0$ . It had similar distribution with tangent velocity curve in the vortex and upstream developed in sump. All of these can provide an important reference for design and optimization of large vertical pump unit.

**Key words:** Vertical pump Inlet sump Numerical simulation Uniformity Suction angle

### 引言

大型立式循环水泵主要用于排涝防洪、跨流域调水和电厂冷却系统等场合, 因其具有流量大、效率高和空间布置合理等特点而被广泛使用。在大型立式循环水泵的设计中, 进水流道的设计是其整体设计中的重要部分, 作为进水前池与叶轮室之间流体转换的过渡段, 进水流道的内部流场

对于泵装置的能量特性、汽蚀性能及可靠性具有很大影响<sup>[1]</sup>。近 10 余年来, 在传统试验方法基础上, 仇宝云、陆林广和朱红耕等结合 CFD 技术对大型循环水泵的进水流道特性进行了各类分析和试验研究, 并充分验证了数值计算方法对于流道内部流场研究的有效性和准确性<sup>[2-4]</sup>。由于以往大型立式泵的水力模型和进水流道采用分开设计和试验的方式, 其水力模型试验数据仅反映其在试

收稿日期: 2012-03-11 修回日期: 2012-07-01

\* 国家自然科学基金资助项目(51079063)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAF14B01)

作者简介: 欧鸣雄, 博士生, 主要从事泵产品水力模型优化研究, E-mail: myomx@yahoo.cn

通讯作者: 施卫东, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究, E-mail: wdshi@ujs.edu.cn

验吸入条件下的性能。而在实际运行中,很多大型立式循环水泵往往在非设计工况下运行,此时进水流道内部流场出现很大变化,容易导致水泵效率与扬程等指标降低,甚至影响到机组的正常运行,该现象已通过以往的数值分析和试验方式得到了证实<sup>[5-6]</sup>。

因此,对不同工况下的进水流道出口流场变化进行研究具有很重要的工程指导意义。本文采用数值模拟方法针对考虑叶轮影响的和单独的进水流道内部流场进行计算,并通过在不同工况下其出口流线、流速及量化指标进行对比分析,详细了解流道出口流场的变化趋势,从而为大型立式循环泵的设计运行提供参考。

## 1 研究方案及数值模型

### 1.1 研究方案

研究采用高比转数混流泵水力模型,其设计参数:流量  $Q_0 = 0.42 \text{ m}^3/\text{s}$ ,扬程  $H_0 = 15 \text{ m}$ ,转速  $n = 1450 \text{ r}/\text{min}$ 。进水流道按浸没式钟形结构设计,整个流道浸没在进水前池中,该结构为常用的设计型式。方案1为单独的进水流道模型,方案2为进水流道、叶轮室和导叶的组合模型。根据水力模型的设计参数,分别对方案1、2在  $0.2$ 、 $0.4$ 、 $0.6$ 、 $0.8$ 、 $1.0$  及  $1.2$  倍设计流量下的流场进行计算,各方案的计算域模型分别如图1、2所示。

### 1.2 数值模型

#### 1.2.1 数值分析方法

计算采用商用 CFD 软件 Fluent,考虑到流道内部的弯曲变化影响,采用修正的 RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型,对流项采用二阶迎风差分格式,扩散项采用中心差分格式。压力速度耦合方式选用 SIMPLEC 算法,壁面为无滑移边界条件,近壁区采用标准壁面函数处理<sup>[7]</sup>。

#### 1.2.2 网格划分

由于整个流域模型比较复杂,因此模型采用混合网格结构,在进水流道模型部分采用结构化网格,在叶轮室及导叶室部分采用非结构化的四面体网格,并以叶轮模型的扬程指标进行网格无关性检查,以获得合理的网格质量和数量。

#### 1.2.3 边界条件

根据以往分析经验,模型进口采用速度进口边界条件,出口采用自由出流边界条件。由于研究重点在于考察进水流道的出口流场分布,因此对前池水平液面按对称平面处理,该边界条件处理能够很好地反映立式循环泵及进水流道内部的流场特征<sup>[8-10]</sup>。

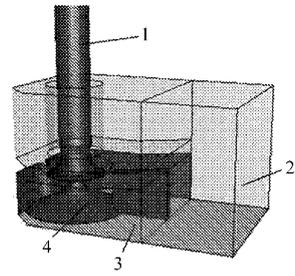


图1 方案1模型图

Fig. 1 Model of scheme 1

1. 出口管路 2. 前池 3. 钟形流道 4. 导水锥

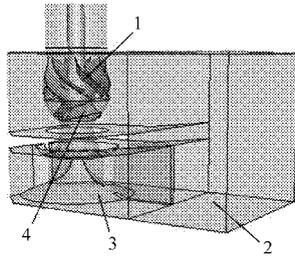


图2 方案2模型图

Fig. 2 Model of scheme 2

1. 导叶体 2. 前池 3. 钟形流道 4. 叶轮室

## 2 结果分析

### 2.1 进水流道出口流线分析

通过流道出口流场的流线分布可对其内部流动进行较直接的观察。

#### 2.1.1 方案1流场及分析

方案1模型在  $1.0 Q_0$  及  $0.4 Q_0$  下的流道出口流线分别如图3、4所示。

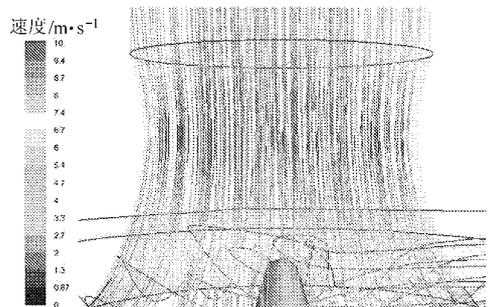


图3  $1.0 Q_0$  流量点流道出口流线图(方案1)

Fig. 3 Streamlines of outlet in  $1.0 Q_0$  flow-rate

从图3、4可知,在  $1.0 Q_0$ 、 $0.4 Q_0$  下,方案1流道的出口流线分布基本一致,流道出口附近的流线分布十分均匀,流速随流线逐渐变化。综合其他流量点情况,其出口流场也基本如此,因此可判断,在设计运行的流量范围内,进水流道的出口流线特征基本不受流量变化的影响。

#### 2.1.2 方案2流场及分析

方案2模型在  $1.0 Q_0$  及  $0.4 Q_0$  下的流道出口流线分别如图5、6所示。

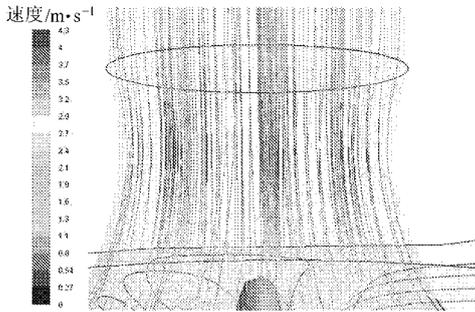


图4 0.4Q<sub>0</sub>流量点流道出口流线图(方案1)

Fig.4 Streamlines of outlet in 0.4Q<sub>0</sub> flow-rate

从图5可知,在设计流量点下,方案2在1.0Q<sub>0</sub>下的流道出口流线分布较均匀,流速沿流线逐渐变化,在进入叶轮之前的流线分布与方案1一致。图6为0.4Q<sub>0</sub>点的流场情况,从图6可知,在进入叶轮之前的流线出现了如图所示明显的回流状况,流线分布均匀度下降。再综合其他流量下的分布情况可知,这种明显的回流特征和不均匀变化随着流量的降低而增加。

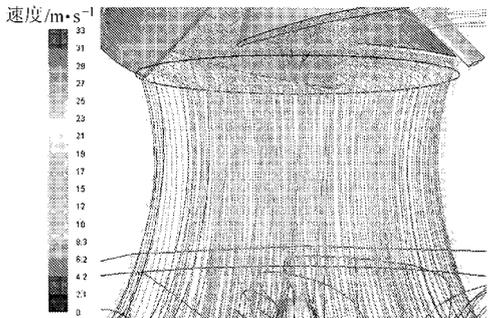


图5 1.0Q<sub>0</sub>流量点流道出口流线图(方案2)

Fig.5 Streamlines of outlet in 1.0Q<sub>0</sub> flow-rate

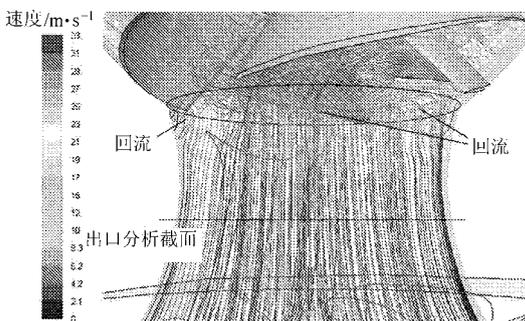


图6 0.4Q<sub>0</sub>流量点流道出口流线图(方案2)

Fig.6 Streamlines of outlet in 0.4Q<sub>0</sub> flow-rate

### 2.2 流道出口流场量化统计及分析

在设计叶轮水力模型时,一般均假设叶轮进口流团为轴向均匀流动。因此,在进水流道的设计中,满足叶轮的理想吸入条件是其主要设计目标,并采用流速分布均匀度β和流速加权吸入角Φ两个量化指标对出口流场进行量化评析<sup>[11]</sup>。

$$\beta = \left[ 1 - \frac{1}{u_m} \sqrt{\frac{\sum (u_i - u_m)^2}{n}} \right] \times 100\% \quad (1)$$

$$\Phi = \frac{\sum u_i \left[ 90^\circ - \arctan \left( \frac{u_z}{u_i} \right) \right]}{\sum u_i} \quad (2)$$

- 式中  $u_i$ ——单元轴向流速
- $u_m$ ——截面平均轴向流速
- $n$ ——截面单元数
- $u_z$ ——单元圆周方向流速

根据式(1)、(2)可知,在理想吸入条件下,其数值分别为: $\beta = 100\%$ 、 $\Phi = 90^\circ$ ,实际测量值越接近理想值,说明出口流场越接近理想吸入条件。考虑进水流道的出口尺寸,选择叶轮进口前0.5R<sub>0</sub>处的截面为出口分析截面(如图6所示),其中R<sub>0</sub>为叶轮进口半径。对方案1、2的出口分析截面在各流量点时的流速分布均匀度β和加权吸入角Φ进行分析,结果如图7、8所示。

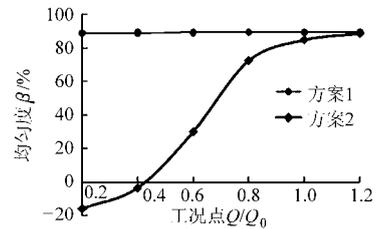


图7 流速分布均匀度变化曲线

Fig.7 Velocity distribution uniformity curve

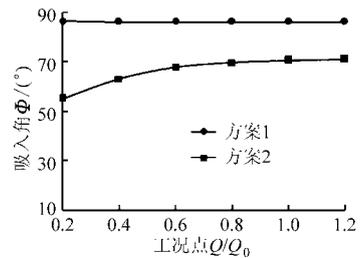


图8 流速加权吸入角变化曲线

Fig.8 Flow-weighted suction angle curve

从图7、8可知,方案1进水流道出口分析截面的量化指标基本不变,该结论印证了前述的出口流线分析结果。对于受到叶轮进口回流及预旋影响的方案2,其出口分析截面的量化指标则随流量的减小而明显降低,其中流速分布均匀度指标变化较大,甚至产生了负值,其反映了分析截面内轴向流速差异的增大,该结论也证实了前述针对方案2的出口流线分析结果。

### 2.3 流道出口流场流速分布及分析

进水流道出口流场的流速分布是影响叶轮水力性能的重要因素,根据前述分析,方案1进水流道的出口流线分布、流速分布均匀度和加权吸入角在设计流量范围内基本保持不变,从而可知其出口流场的流速分布也同样几乎不受流量变化的影响。因此,以下仅针对方案2进水流道出口流场的速度分

布进行分析。

如图9所示,在方案2的出口分析截面上,分别选择与进口来流同方向的直径1和与来流方向垂直的直径2作为速度取样曲线,对直径线1、2在不同流量下的轴向、圆周速度进行分析,结果如图10所示。

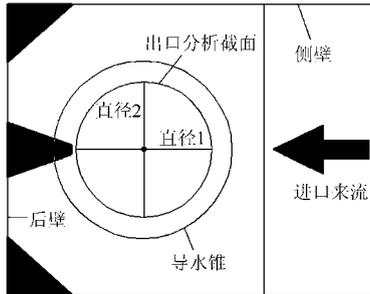


图9 出口分析截面示意图

Fig. 9 Structure of chamber outlet

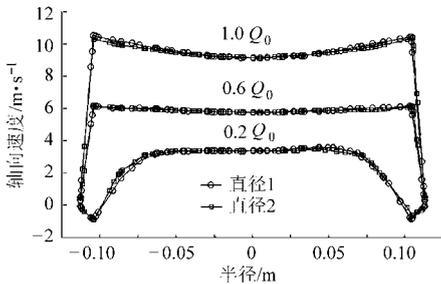


图10 轴向速度分布图

Fig. 10 Axial velocity distribution

图10显示了不同流量时直径线1、2上的轴向速度分布,在 $1.0 Q_0$ 和 $0.6 Q_0$ 流量点,出口轴向流速呈轴对称分布,在 $0.2 Q_0$ 流量时,轴向速度在半径 $0.06 \text{ m}$ 处开始逐渐下降,并在流道外缘出现逆流,进口回流已发生,其轴向速度分布与文献[1、4]所述结果一致。

从图11可以观察到,在 $1.0 Q_0$ 和 $0.6 Q_0$ 流量时,直径线上的圆周速度基本为零,也就意味着叶轮进口在该流量下没有预旋发生。当流量降至 $0.4 Q_0$ 时,随着回流的出现,直径线上的圆周速度也从半径 $0.06 \text{ m}$ 处开始随着半径的增加而迅速增大,其速度分布接近于旋涡核内的圆周速度曲线。从图中还

可知,在回流发生的 $0.4 Q_0$ 流量点,直径线1上未受回流影响的中间区域流团圆周速度几乎为零,而直径线2上的中间区域流团圆周速度稍大于零,这是由于受到与直径线1同方向的导流板影响。

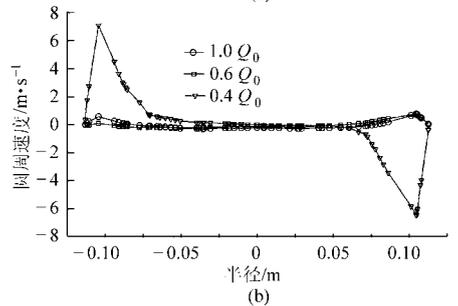
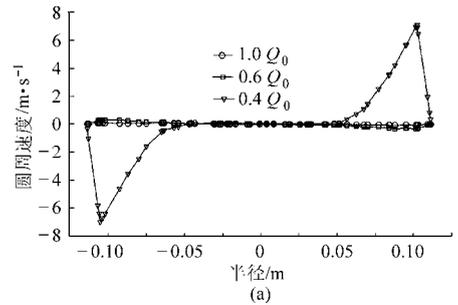


图11 圆周速度分布

Fig. 11 Tangent velocity distribution

(a) 直径1 (b) 直径2

### 3 结论

(1)在设计运行的流量范围内,方案1进水流道出口流场的流线分布、流速分布均匀度和吸入角基本保持不变,该结论可为进水流道的设计与试验验证提供参考。

(2)根据方案2的分析结果,在叶轮进口发生回流之前,进水流道的出口流场变化较小。当进口回流发生时,其通过强烈的动量交换,使得叶轮进口外缘的流团产生显著的圆周速度分量,并因此形成进口的预旋。回流效应是影响进水流道出口流场的主要因素,也是形成回流和预旋现象的原因。

(3)回流效应是叶轮运行中无法消除的现象,但可通过合理的结构设计进行优化,例如导流板等,具体的方案和措施还有待进一步研究。

### 参 考 文 献

- 1 施卫东,邹萍萍,张德胜,等. 斜流泵性能预测与叶轮进出口环量分析[J]. 农业机械学报,2011,42(9):94~97.  
Shi Weidong, Zou Pingping, Zhang Desheng, et al. Performance prediction and circulation distribution analysis at impeller inlet and outlet of mixed-flow pump [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(9): 94~97. (in Chinese)
- 2 陆林广,冷豫,吴开平,等. 泵站进水流道内部流场模型试验方法研究[J]. 排灌机械,2005,23(3):17~19.  
Lu Linguang, Leng Yu, Wu Kaiping, et al. Study on method for model test of flow pattern in suction box of pumping station [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2005, 23(3): 17~19. (in Chinese)
- 3 仇宝云,林海江,黄季艳,等. 大型立式轴流泵叶片进口流场及其对水泵影响研究[J]. 机械工程学报,2005,41(4):28~34.  
Qiu Baoyun, Lin Haijiang, Huang Jiyun, et al. Study on flow field in blade inlet of large vertical axial-flow pump and its influence on pump [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(4): 28~34. (in Chinese)

- Resources and Water Engineering,2006,17(6):79~83. (in Chinese)
- 4 张仁田,程吉林,朱红耕,等. 低扬程泵变速工况性能及合理变速范围的确定[J]. 农业机械学报,2009,40(4):78~81.  
Zhang Rentian, Cheng Jilin, Zhu Honggeng, et al. Low-head pump performances and determination of reasonable scope for variable speed operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(4):78~81. (in Chinese)
- 5 Izabela Rojek. Neural networks as prediction models for water intake in water supply system [C] // Proceedings of the 9th International Conference on Artificial Intelligence and Soft Computing-ICAISC,2008:1 109~1 119.
- 6 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京:科学出版社,2008.
- 7 胡义生. 使用变频调速系统对电动机的影响[J]. 氯碱工业,2010,46(4):1~3.  
Hu Yisheng. Influences of adopting frequency converters to control speed on motors[J]. Chlor-Alkali Industry, 2010,46(4):1~3. (in Chinese)
- 8 张承慧,夏东伟,石庆升. 计及变频器和电机损耗的全变速泵站效率优化控制[J]. 电工技术,2006,21(5):52~57.  
Zhang Chenghui, Xia Dongwei, Shi Qingsheng. Optimization control of full-variable-speed pump stations considering the losses of the frequency converter and the motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(5):52~57. (in Chinese)
- 9 席平原,朱江,申屠留芳. 带式输送机闭环特性动态分析与PID控制[J]. 农业机械学报,2010,41(12):210~214.  
Xi Pingyuan, Zhu Jiang, Shentu Liufang. Analysis and PID control on dynamical performance of conveyor possessing closed-loop [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(12):210~214. (in Chinese)
- 10 Casada D A, Kueck J D, Staunton R H, et al. Efficiency testing of motors powered from pulse-width modulated adjustable speed drives[J]. IEEE Transactions on Energy Convers,2000,15(3):240~244.
- 11 马登成,杨士敏. 基于PID转速控制系统动态性能仿真[J]. 微计算机信息,2010(34):31~33.  
Ma Dengcheng, Yang Shimin. Study on dynamic characteristics of secondary regulated speed control system[J]. Microcomputer Information, 2010(34):31~33. (in Chinese)
- 

(上接第58页)

- 4 陆林广,徐磊,梁金栋,等. 泵站进水流道三维流动及水力损失数值模拟[J]. 排灌机械,2008,26(5):55~58.  
Lu Linguang, Xu Lei, Liang Jindong, et al. Numerical simulation for 3D turbulent flow and hydraulic loss of inlet for pump station [J]. Drainage and Irrigation Machinery,2005,23(3):17~19. (in Chinese)
- 5 朱红耕,袁寿其,刘厚林,等. 进水流道对立式混流泵装置能量特性的影响[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2007,28(1):46~51.  
Zhu Honggeng, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. Influence of suction box on energy characteristics of vertical mixed-flow pumping system[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition,2007, 28(1):46~51. (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 Wang Fujun, Li Yaojun, Cong Guohui, et al. CFD simulation of 3D flow in large-bore axial-flow pump [J]. Journal of Hydrodynamics,2006,18(2):243~247.
- 8 Ismaier A, Schlücker E. Fluid dynamic interaction between water hammer and centrifugal pumps[J]. Nuclear Engineering and Design,2009,239(12):3 151~3 154.
- 9 Spence R, Teixeira A J. A CFD parametric study of geometrical variations on the pressure-pulsations and performance characteristics of centrifugal pump[J]. Computers & Fluids,2009,38(6):1 243~1 257.
- 10 Chuang Weiliang, Hsiao Shihchun. Three-dimensional numerical simulation of intake model[J]. Journal of Hydrodynamics, 2011,23(3):314~324.
- 11 陆林广. 泵站进水流道设计理论的新进展[J]. 河海大学学报,2001,29(1):40~45.  
Lu Linguang. Progress indesign theory for suction boxes of pumping station[J]. Journal of Hohai University, 2001,29(1):40~45. (in Chinese)