

双向流道泵装置内三维流动数值模拟*

刘超金燕

(扬州大学水利科学与工程学院, 扬州 225009)

【摘要】 为了防止和消除双向流道泵装置进水流道内的漩涡和涡带,确保水泵机组的安全运行,在双向进水流道底部泵进口下方加设曲线导流墩。通过 CFD 软件对设导流墩的双向流道泵装置内部流动进行数值模拟,获得泵装置内部的三维流动速度场,并预测了泵装置的性能。结合模型泵装置试验的内外特性,着重研究了双向进水流道的出口流速分布及其对泵装置性能的影响。计算结果表明加设导流墩的双向进水流道出口断面流速分布较为均匀,流速均匀度达到 93%,满足水泵运行的需要;装置性能良好,最优工况点的装置效率为 68.89%。模型试验观测显示导流墩的设置有效地防止水泵进口下方涡带的产生,在各种试验工况下进水流道内均未发现涡带,水泵运转平稳无振动,可保证机组安全可靠运行。比较进水流道出口流速分布的计算结果与模型试验结果,二者在总体结构上相近,数值模拟对泵装置性能预测结果在最优工况点与试验结果基本吻合。

关键词: 双向泵装置 进水流道 三维流动 导流墩 数值模拟

中图分类号: TV131.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)09-0074-05

Numerical Simulation on Three Dimensional Flow in Two-way Reversible Pumping System

Liu Chao Jin Yan

(College of Hydraulic Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China)

Abstract

In order to prevent and eliminate vortex and the vortex tube occurred in the suction passage of two-way-reversible pumping system for the safe operation of the pump unit, an additional curved guide pier was placed on the bottom of suction passage under pump mouth. By using the CFD software the numeric simulation was made to obtain three-dimensional flow fields inside the pumping system with the additional guide pier and predict the performance of the pumping system. Combined with the model test, this paper focused on the velocity distribution of suction passage outlet, and its influences on the pump system performance. Both the computation and the measurement results showed that the additional guide pier on the bottom inside the suction passage did not effect on the velocity distribution of suction passage. The velocity evenness of suction passage outlet reach 93% with guide pier, which can meet the needs of pump operation. The performance of the pumping system was good and the high efficiency of the system at BEP is 68.89%. Experimental observations showed that the set of the guide pier could effectively prevent the vortex generation under pump inlet, the vortices were not found within the suction passage under different operation conditions. The pump ran smoothly without vibration. Comparing the calculated results with the model test results of the outlet velocity distribution of the suction passage, both of them are similar in overall structure and pump performance prediction at BEP is consistent with the test results.

Key words Two-way reversible pumping system, Suction passage, Three dimensional flow, Guide pier, Numerical simulation

收稿日期: 2010-11-26 修回日期: 2011-03-17
* 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: 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

引言

在沿江滨湖地区建有众多的低扬程双向抽水泵站,双向进出水流道的应用越来越多^[1]。双向泵站进水流道的设计直接影响水泵的安全运行和性能^[2]。已经建成的泵站中,往往在进水流道内存在一些漩涡,引发机组的振动,严重影响泵机组正常运行;流道出口流速分布不均匀使泵装置效率降低。本文研究的灌排结合泵站工程既承担提水灌溉,同时承担排水任务,既可以提水又可以利用水位变化的落差自流引水。为此泵站进水流道设计为双向钟形进水流道^[3]。现有双向流道泵站中,采用的进水流道导流措施有:加设普通中隔板、矩形中隔板和椭圆尖形中隔板等。但是其导流消涡的效果并不令人满意,往往在流道内存在一些漩涡,有的对泵的运行影响较大,甚至造成泵机组难以正常运行;有的流道出口流速分布不够均匀,使泵装置效率降低;有的则导致泵站土建工程的挖深加大,增加土建工程的投资。

通常对双向流道泵装置的研究多为模型试验^[4],对其内部流场了解较少,在增设导流措施后进水流道出口水流能否满足水泵运行条件也不够清楚。本文采用CFD数值模拟方法^[5~9]获取泵装置内全流道的流场,详细了解流速分布情况,尤其是泵进口的流速分布,改善进口水流条件。

1 泵装置结构

双向流道泵装置的结构形式如图1所示。泵装置的进水流道为等宽度对称形式,采用闸门控制进水方向。为了确保流道内不产生涡带(大强度的漩涡),需要在泵喇叭口下设置导流体。经过比较,本装置采用了曲锥形断面底坎作为导流体,结构简单,便于施工。

泵装置的出水流道为对称的倒“H”管道形式,

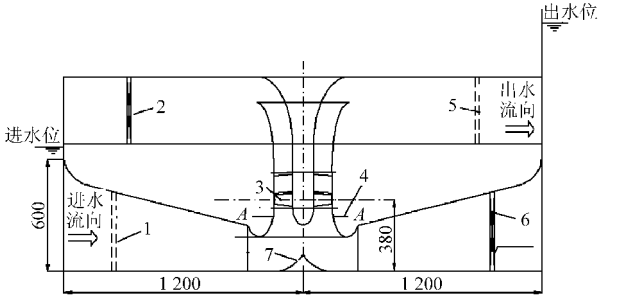


图1 双向流道泵装置示意图

Fig. 1 Two-way pumping system

1. 闸门1 2. 闸门4 3. 泵叶轮 4. 泵进口测量断面 5. 闸门3
6. 闸门2 7. 导流墩

采用4 闸门控制出水方向。水泵为轴流式转轮,整个泵装置通过进、出水闸门的调节来控制进、出水方向,从而实现双向抽水的功能。

2 三维数值模拟计算

2.1 控制方程

对于不可压缩流体的恒定流动,考虑Boussinesq 涡粘性假设,连续方程和动量方程可以写成张量形式

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i)=f_i-\frac{\partial p^*}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_e\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right] \tag{2}$$

其中 $\mu_e=\mu+\mu_t$
式中 ρ ——流体密度,kg/m³
 x_i,x_j ——坐标分量
 u_i,u_j ——速度分量,m/s
 f_i ——体积力分量,m/s²
 p^* ——折算压力,包含了紊动能和离心力
 μ_e ——有效粘性系数
 μ ——分子粘性系数
 μ_t ——紊动涡粘性系数

2.2 紊流模型

为了确定有效粘性系数 μ_e ,使用了高雷诺数 $k-\varepsilon$ 紊动模型,它以紊动能 k 及其耗散率 ε 的输运方程为基础

$$\mu_t=\rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{3}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j k-\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]=\rho(P_k-\varepsilon) \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\rho u_j \varepsilon-\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]=\rho \frac{\varepsilon}{k}\left(C_1 P_k-C_2 \varepsilon\right) \tag{5}$$

其中 P_k 是紊动能的生成项,它可定义为

$$P_k=\frac{\mu_t}{\rho}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{6}$$

在上述紊动模型方程中,附加的经验常数为:
 $C_\mu=0.09, C_1=1.44, C_2=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3$ 。
上述方程式(1)、(2)、(4)、(5)形成了封闭的非线性偏微分方程组。

2.3 边界条件

计算区域入口为进水流道进口前一定距离的断面,给定均匀的压力分布条件。在叶片表面及转轮内部,采用无滑移固壁边界条件。计算域出口为出水流道出口后面一定距离的断面,给定均匀的流速分布条件。

2.4 计算参数

泵最佳效率点 (BEP) 流量 $Q_0 = 340 \text{ L/s}$, 扬程 $H_0 = 5.0 \text{ m}$, 叶轮外径 $D = 300 \text{ mm}$, 叶片数 $Z = 4$, 额定转速 $n_0 = 1\,450 \text{ r/min}$ 。

2.5 计算结果

采用 Fluent 软件进行计算, 获得泵装置内的完整流场。泵装置内的流线图如图 2 所示; 进水流道出口即泵进口断面流速分布如图 3 所示。

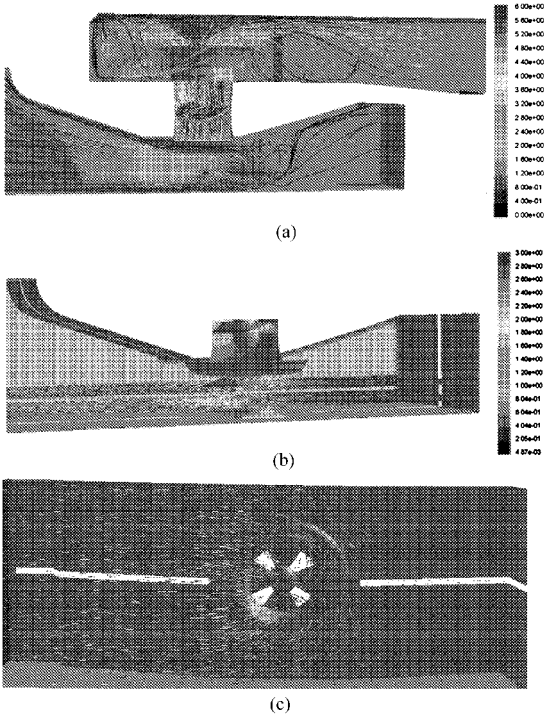


图 2 双向泵装置内流场计算结果

Fig. 2 Computed flow fields of pumping system

- (a) 双向泵装置内流线图
- (b) 双向进水流道内泵进口附近流速分布
- (c) 双向进水流道内水平截面流速图

图 2 所示的数值模拟计算结果表明, 双向泵装置内的流动状态较好。在进、出水流道的主流区水流较为平顺, 在进水流道的后端和出水流道的前端均有较大的回流区。出水流道的前端回流强度较大, 水流紊乱, 这会导致水力损失增大。进水流道的后端回流强度很小, 对泵进口断面水流及水力损失影响微小。由于采用了导流墩, 有效地防止了泵进口下方的漩涡, 保证了泵机组的安全运行。

图 3 所示为双向进水流道出口断面的流速分布计算结果。图中所示的数值均为流速分量与计算的断面平均流速 v_{av} 的比值。

图 3a 可以看出, 较高的轴向流速分布在内侧 (来流方向)。较高的流速为平均流速的 1.0 倍左右, 边界层以外较低的流速为平均流速的 0.9 倍左右, 双向进水流道出口断面的流速分布比较均匀。

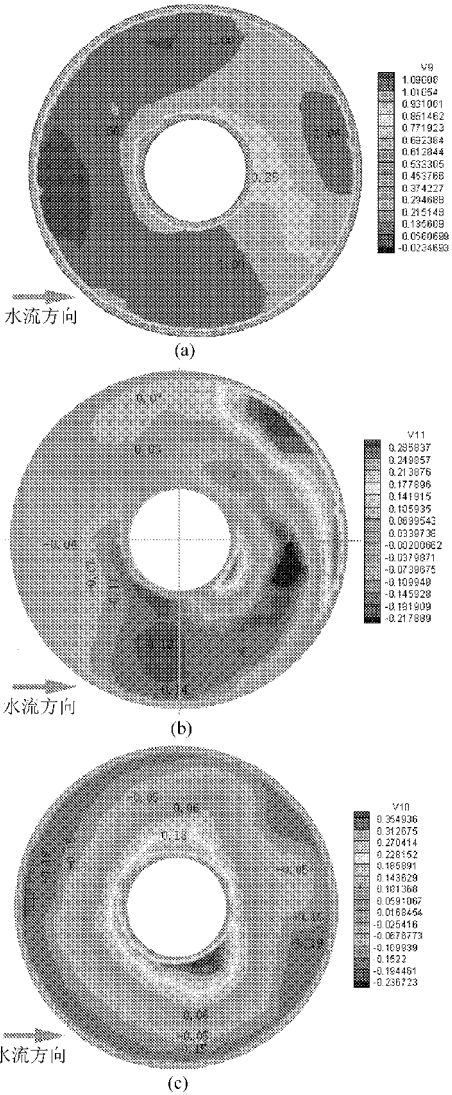


图 3 双向进水流道出口 (泵进口) 断面 A-A 轴向流速分布的计算结果

Fig. 3 Calculated results of velocity distribution at section A-A (plane view)

- (a) 轴向流速分量 v_a/v_{av}
- (b) 圆周流速分量 v_u/v_{av}
- (c) 径向流速分量 v_r/v_{av}

计算得到的流速分布均匀度为 93%。总体上可以认为流速的轴向分量的分布是均匀的。

图 3b 为泵进口断面圆周流速分量 v_u/v_{av} , 水流流速的切向分量反映水流的环量。从测试的结果看, 切向分量数值较小, 方向有正有负, 相互抵消, 故总体环量很小, 也说明出口的预旋很小。

图 3c 所示的泵进口断面径向流速分量 v_r/v_{av} 数值更小, 基本与进水流道的出口收缩角的影响相关联, 这也说明进水流道出口水流的轴向特征是明显的。

3 模型试验

3.1 模型装置

模型试验在标准的轴流泵试验台进行, 模型试

验结果用以验证数值模拟的结果。试验转速为 1 450 r/min;模型转轮直径为 300 mm。采用五孔球形探针测量进水流道的内部流场,流速测孔沿泵进口圆周均匀布置,共 4 个测孔 F(前)、B(后)、L(左)和 R(右),测孔布置如图 4 所示。

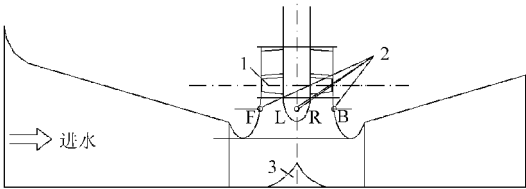


图 4 模型试验装置示意图

Fig.4 Sketch of model test set up

1. 泵叶轮 2. 五孔探针测速孔 3. 导流墩

3.2 试验结果

3.2.1 装置性能

通过试验获得了泵装置的能量性能如图 5 所示。图中 H 、 Q 、 E_{it} 分别是试验得到的扬程、流量和效率值, H_c 、 Q_c 、 E_{itc} 分别是计算得到的扬程、流量和效率值, H_0 、 Q_0 则是最优工况下的扬程和流量值。

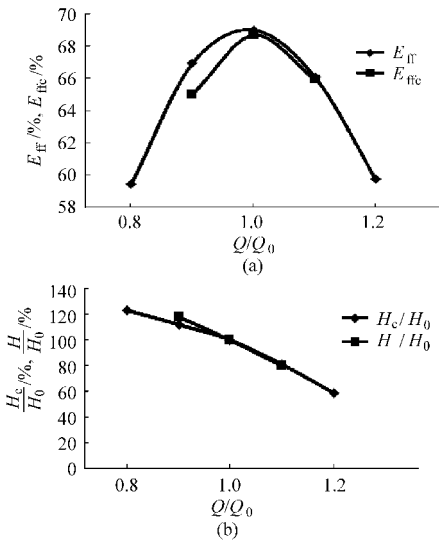


图 5 泵装置性能曲线

Fig.5 Performance curves of pumping system

(a) 泵装置效率 (b) 泵装置扬程

3.2.2 流速分布

流速测量的断面位于进水流道的出口即水泵的进口。4 个测孔沿着圆周均匀布置,同时测量保证较好的同步性。图 6 是在 BEP 工况下双向进水流道出口断面的流速分布试验测量结果,包括水流速度 3 个方向的流速分量。测试中用水流与轴线的偏角,即径向水流角,来表示水流在轴面内的情况。用轴面角度代替径向流速可以直观地了解流速分布的情况。图 7 是轴向流速试验与计算结果的三维视图。

模型泵装置进水流道进口雷诺数为 1.137×10^5 ,进水流道出口雷诺数为 2.359×10^5 。

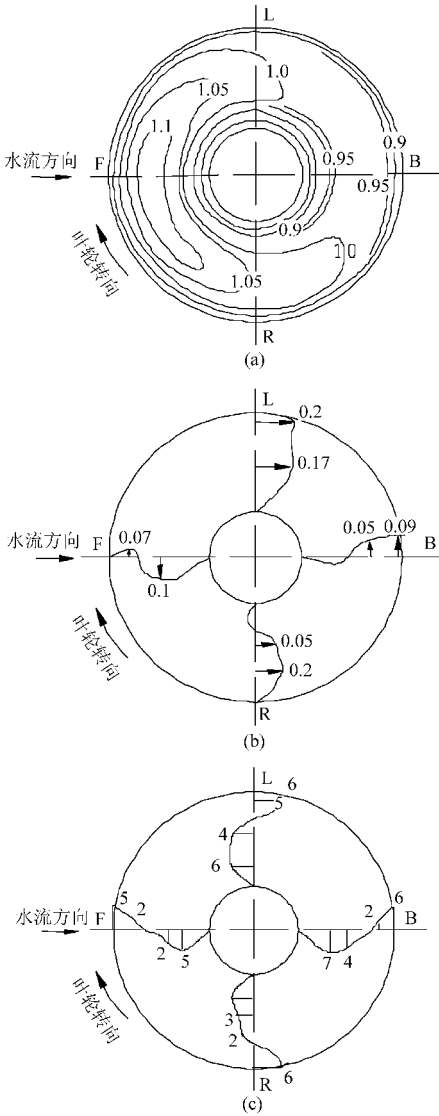


图 6 A-A 泵进口断面流速分布测量结果

Fig.6 Measurement results of velocity distribution at section A-A (plane view)

(a) 轴向流速分量 v_{am}/v_{ava} (b) 圆周流速分量 v_{tm}/v_{atm}
(c) 径向水流角度 θ

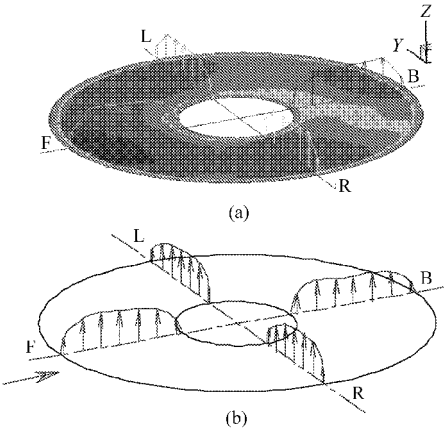


图 7 泵进口断面轴向流速分布三维视图

Fig.7 3D view of axial velocity calculated and measured

(a) 计算结果 v_a/v_{av} (b) 测量结果 v_{am}/v_{ava}

图6所示的试验结果表明,双向进水流道出口的流速分布较为均匀。由图6a的测试结果可知,轴向流速 v_{am} 的较高值也在内侧。 v_{am}/v_{amm} 的最大值为1.0左右,较小值为0.9左右,断面流速均匀度在93%以上。从图6b的测试结果看,切向流速分量 v_{um} 数值也比较小,方向亦有正负。图6c的径向水流角度测试结果表明,径向水流角很小,即径向流速的分量很小,说明水流是收缩的,没有脱流发生。

和其他类似的泵装置的性能相比较,采用双向进水流道的泵装置性能同样优良,最佳效率点 BEP 为 68.89%。

4 结论

(1)通过数值模拟获得了双向流道泵装置内的

流速场,结果表明双向进水流道和单向进水流道一样,水流流态良好,与试验观测的结果相类似,能够满足水泵运行对流态的要求,水泵的装置性能良好,最佳效率 68.89%。

(2)双向进水流道出口断面(泵叶轮进口)的流速分布均匀,流速均匀度达到 93%,可以保证水泵运行所要求的进口水流条件。从本质上讲,双向进水流道在运行时也就是单向进水流道,只不过其后壁距离较大。

(3)从数值模拟的流速分布计算结果和试验的流速分布测量结果比较看,二者较为一致,数值模拟的泵装置性能和试验测试得到的性能在 BEP 高效区比较接近。因此数值模拟的方法用于对双向流道泵装置的流动计算和性能预测具有较大的实用价值。

参 考 文 献

- 刘超. 水泵及水泵站[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.
- 刘超,周济人,汤方平,等. 低扬程双向流道泵装置研究[J]. 农业机械学报,2001,32(1): 49~51.
Liu Chao, Zhou Jiren, Tang Fangping, et al. Study on a low-lift and two-way pumping system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(1): 49~51. (in Chinese)
- 刘超. 双向钟形进水流道的试验研究[J]. 江苏农学院学报,1985(4):9~12.
Liu Chao. A new type suction casing for two-direction pumping installation [J]. Journal of Jiangsu Agricultural College, 1985(4): 9~12. (in Chinese)
- 周济人,刘超,袁家博,等. 大型泵站箱涵式双向进水流道试验研究[J]. 扬州大学学报:自然科学版,1999,2(4):79~82.
Zhou Jiren, Liu Chao, Yuan Jiabo, et al. Model test on the two-way suction box of large pumping station[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 1999,2(4):79~82. (in Chinese)
- Chen Hongxun, Guo Jiahong. Numerical simulation of 3-D turbulent flow in the multi-intakes sump of the pump station[J]. Journal of Hydrodynamics, 2007,19(1):42~47.
- 成立,刘超,周济人,等. 大型立式泵站双向进水流道三维紊流数值模拟[J]. 农业机械学报,2004,35(3):61~64.
Cheng Li, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Numerical simulation of three-dimensional flow inside suction box of reversible pumping station[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3):61~64. (in Chinese)
- 成立,刘超,周济人,等. 基于 RNG 湍流模型的双向泵站出水流动计算[J]. 水科学进展,2004,15(1):109~112.
Cheng Li, Liu Chao, Zhou Jiren, et al. Numerical simulation of flow in the outlet passages of reversible pumping station by RNG $k-\varepsilon$ turbulent model with wall function law [J]. Advances Water Science, 2004, 15(1): 109~112. (in Chinese)
- 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 pump system [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(2):155~159. (in Chinese)
- Constantinescu G. Numerical model for simulation of pump-intake flow and vortices [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 124(2): 123~134.

(上接第 84 页)

- Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations — I: the basic experiment [J]. Monthly Weather Review, 1963, 91(3): 99~164.
- Lilly D K. A proposed modification of the Germano subgrid scale closure model [J]. Physics of Fluids, 1992, 4(3): 633~635.
- 王兵,张会强,王希麟. 亚格子尺度湍流特性研究[J]. 工程力学,2006,23(2): 47~51.
Wang Bing, Zhang Huiqiang, Wang Xilin. On subgrid scale turbulence characteristics [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2): 47~51. (in Chinese)