

旋流自吸泵导壁结构对性能的影响

王春林, 梁俊, 易同祥, 刘红光, 吴志旺

(江苏大学能源与动力工程学院, 江苏镇江 212013)

摘要: 运用商用 CFD 软件 FLUENT, 对旋流自吸泵内部三维流场进行了数值模拟。计算采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 选择多重参考系模型将叶轮流场与蜗壳流场进行动静耦合, 得到导壁附近的压力场及湍动能流场的分布规律。分析了导壁包角结构对流场的影响, 建立了性能预测模型, 通过对导壁包角分别为 $55^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ 这 3 种结构尺寸模型的性能预测对比, 探讨了导壁结构对于旋流自吸泵性能的影响。分析可知导壁结构对性能有一定影响, 65° 包角为最佳导壁结构。通过预测与试验结果的对比, 二者结果较为一致。

关键词: 旋流自吸泵; 数值模拟; 导壁; $k-\varepsilon$ 模型

中图分类号: TH317 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-6254(2009)06-0388-05

Study of guide wall structure influence on performance of rotational flow self-priming pump

Wang Chunlin, Liang Jun, Yi Tongxiang, Liu Hongguang, Wu Zhiwang

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: The internal 3D flow field of rotational flow self-priming pump was simulated numerically by using commercial CFD software FLUENT. Standard $k-\varepsilon$ model was adopted in calculation, and reference frame model was chosen to couple the static-dynamic flow field of impeller and volute. The flow fields of pressure and turbulent kinetic energy near guide wall were obtained, and guide wall influence on flow field was analyzed. A performance prediction model was established. The influence of guide wall structure on performance was discussed by comparing the prediction performances of three models with different guide wall wrap angles of $55^\circ, 65^\circ, 70^\circ$. It is shown that the guide wall structure has some influence on the performance and wrap angles of 65° is the optimal structure from three guide wall structures. The predicted results are also in agreement with experimental results.

Key words: rotational flow self-priming pump; numerical simulation; guide wall; $k-\varepsilon$ model

旋流自吸泵是一种新型的自吸泵,它的工作原理与一般的自吸泵有着很大的区别,它采用强制气液分离技术排出空气从而实现泵的自吸。其优点是泵体结构简单、紧凑,且具有接近相同参数普通离心泵的效率指标。过流面积较大,输送杂质较多的介质也不易堵塞,工作可靠性高^[1]。可是由于旋流自吸泵结构较为特殊,目前国内外对旋流自吸泵的研究

还不多见。大连耐酸泵厂的张立臣、刘培成对于旋流自吸泵的工作原理做了讨论,初步探索了其设计方法并通过试验分析了其性能。近年来,虽然对泵的三维流场进行模拟及性能预测的研究很多^[2,3],但对旋流自吸泵作数值模拟研究还较少。

笔者应用 FLUENT 软件对旋流自吸泵流场进行数值模拟。分析导壁附近的压力和湍动能分布,并对

收稿日期: 2008-12-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50776040)

作者简介: 王春林(1962—),男,江苏盐城人,副教授(wangzha@pub.zj.jsinfo.net),主要从事流体力学理论、特性及流动模拟研究。

梁俊(1984—),男,四川苍溪人,硕士生(sichuanliangjun@163.com),主要从事流体力学理论、设计及流动模拟研究。

模型进行性能预测,通过对导壁包角为 $55^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ 3种结构尺寸模型性能曲线的对比研究,分析导壁结构尺寸对性能的影响.并对3种尺寸结构导壁模型进行试验研究,找出最佳导壁结构,并将预测结果与试验结果做对比.

1 研究对象及数学模型

模型泵设计参数:流量 $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 30 \text{ m}$,转速 $n = 2900 \text{ r/min}$,比转速 $n_s = 68.8$.

1.1 模型泵的基本结构

旋流自吸泵采用普通离心式叶轮,蜗壳结构较为特殊,腔内有一导壁,导壁通道上接气-液分离室.图1中 θ 为导壁的包角,它的大小变化会引起导壁起始点与叶轮距离 d 的变化,从而影响旋流自吸泵的性能^[4].旋流自吸泵结构见图1.

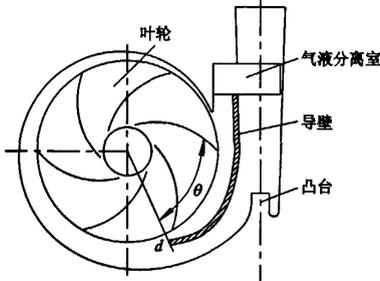


图1 旋流自吸泵结构图
Fig.1 Structural pattern of rotational flow self-priming pump

1.2 数学模型与网格划分

应用 $k-\epsilon$ 双方程模型是求解工程流动问题的主要方法.采用三维定常不可压雷诺时均 $N-S$ 方程,并采用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型使方程组闭合^[5].

三维不可压紊流场的控制方程的通用形式^[3]

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\mathbf{u}\phi) = \text{div}(\Gamma\text{grad}\phi) + S \quad (1)$$

式中 ϕ 为通用变量,可以代表各个求解变量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项; ρ 表示流体密度; \mathbf{u} 表示速度矢量.

各符号在连续性方程和动量方程及标准 $k-\epsilon$ 紊流模型中的具体形式和含义见参考文献[5].

对装配好的蜗壳和叶轮进行网格的划分.采用四面体混合网格,Interval size 取2,划分蜗壳流道的网格数426 909,叶轮流道的网格数243 269.计算网格系统见图2.

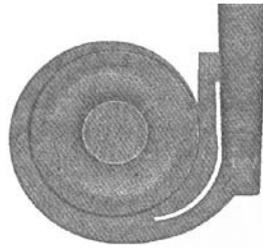


图2 计算网格系统
Fig.2 Calculation grid system

1.3 多重参考系模型与边界条件

旋转叶轮与静止蜗壳之间的耦合采用多重参考系模型(multiple reference frame),它的基本思想是将泵的流场简化成旋转叶轮固定在某一位置时的瞬时流场.

进口边界条件:假定进口无旋,切向速度与径向速度为0,并且湍流充分发展,根据流量与进口截面面积设定速度.

出口边界条件:选用自由出流条件^[6],假定在出口截面上满足所有流动变量具有零扩散通量,出口截面条件是由区域内部推导得来,而对上游流动没有影响.

壁面边界条件:叶轮和蜗壳与流体相接触的所有壁面上均采用无滑移固壁条件,壁面附近采用标准壁面函数^[7].

2 数值模拟结果与分析

对导壁包角 65° 的旋流自吸泵导壁区域压力、流线和湍动能分布进行模拟.

图3为导壁附近流场静压图,在导壁起始位置存在一个高压区.原因是滞止增压,形成静压的聚集.沿导壁向泵出口方向,静压逐渐升高,符合蜗壳内静压向着出口方向递增的变化规律^[8].

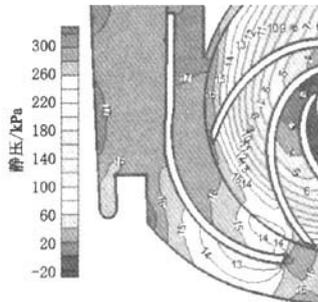


图3 导壁附近区域静压分布图
Fig.3 Static pressure distribution near guide wall region

图 4 为导壁附近区域动压图,导壁对流体的顺利出流影响不大.在导壁前半段动压逐渐降低,然后随着出流通道的扩大,流通截面积增大而速度骤减,动压能迅速减小.

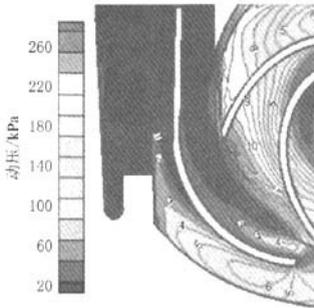


图 4 导壁附近区域动压分布图

Fig.4 Dynamic pressure distribution near guide wall region

图 5 为导壁附近区域湍动能图,在导壁起始位置靠近叶轮出口边存在湍动能较大的区域.其原因是此处流动较为紊乱,一方面流体遇到导壁产生冲击,另一方面靠近的一个叶道流体的出流与小流道内的流体发生混合,导致速度方向紊乱.在导壁外侧靠近凸台也产生了较大紊乱,这是由于流道凸台处受导壁结构影响,流道突扩而导致流动紊乱.

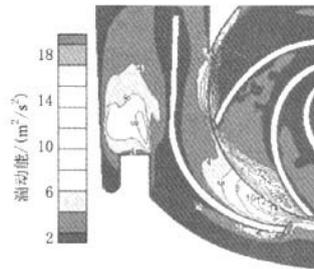


图 5 导壁附近区域湍动能分布图

Fig.5 Turbulent kinetic energy distribution near guide wall region

图 6 为导壁包角为 55°,65°,70°时的局部流线图,导壁包角 70°时流场存在很明显的漩涡,其原因是导壁端点距叶轮外径太近,导致流入小流道的流体与叶轮流出的流体发生冲击,产生损失,导致性能下降.而导壁包角 65°,55°时流线分布较为均匀顺畅,没有漩涡.但是考虑到导壁的包角不同会使导壁端点与叶轮外径的距离变化,从而导致流入小流道的流量发生变化,小流道里的流体流入分离室后螺旋运动将造成较大的流动损失,所以导壁包角不能太大,否则将影响其性能^[9,10].



图 6 导壁包角 55°,65°,70°的流线对比图

Fig.6 Contrast of streamlines with guide wall wrap angle 55°,65°,70°

3 导壁结构对性能影响的预测

3.1 建立预测模型

使用 FLUENT 提供的表面积分功能,通过试验得到泵进口总压 p_{in} 和出口总压 p_{out} .将总压差除以 ρg ,加上位差,就得到某一点的总水头

$$H = \frac{p_{out}}{\rho g} - \frac{p_{in}}{\rho g} + \Delta z \quad (2)$$

轴功率

$$P = T\omega \quad (3)$$

泵的水力效率

$$\eta_h = \frac{\rho g Q H}{P \eta_m \eta_v} = \frac{\rho g Q H}{T \omega \eta_m \eta_v} \quad (4)$$

总效率

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{T \omega} \quad (5)$$

式中 p_{in} 为泵进口总压, Pa; p_{out} 为泵出口总压, Pa; g 为重力加速度, m/s^2 ; Δz 为位差, m; P 为轴功率, W; T 为扭矩, $N \cdot m$; ω 为旋转角速度, rad/s ; H 为扬程, m; η_v 为容积效率, %; η_m 为机械效率, %.

通过上述所建立的水力性能预测模型, 就获得了一个工况下的外特性, 通过计算多个工况点, 就可以预测出不同流量下泵的扬程和效率, 绘制 $H - Q$ 、 $\eta - Q$ 关系曲线, 直观预测其水力性能.

3.2 导壁结构对性能影响的预测

旋流自吸泵导壁包角的变化, 会影响导壁起始点与叶轮的间隔, 从而影响流道的过流面积, 导致出水管路内的流场发生变化. 为了研究其对泵性能影响, 设计了导壁包角分别为 55° , 65° , 70° 的模型, 分别对其进行数值模拟, 对不同流量下性能进行计算, 得到性能曲线图. 通过对比分析, 得出其对性能的影响. 不同包角下导壁端点与叶轮外径之间的距离 d 见表 1.

表 1 导壁端点与叶轮外径之间的距离
Tab. 1 Distance between guide wall endpoint and impeller outside diameter

| $\theta/(^\circ)$ | 55 | 65 | 70 |
|-------------------|----|----|----|
| d/mm | 8 | 5 | 3 |

由图 7 可知, 导壁结构对扬程影响很小. 导壁包角分别为 55° , 65° , 70° 时, 对应不同流量点扬程相差较小. 只是在大流量区, 导壁包角为 65° , 扬程大于其他两种包角下的扬程.

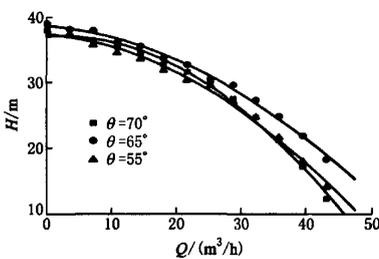


图 7 扬程对比图
Fig. 7 Heads contrast

由图 8 可知, 导壁结构对效率有较大的影响. 在小流量区, 差别不大, 而在大流量区, 导壁包角 65° 时, 不同流量点的效率均明显大于其他两者对应的效率, 最优工况点效率高达 72.8%, 高出相同流量点其他曲线 5% ~ 6%, 其高效区很宽.

导壁结构尺寸对旋流自吸泵性能有影响, 其中对于效率影响较大, 而对扬程影响较小. 在原设计方案下, 其他几何参数确定的情况下, 导壁包角为 65°

时, 效率较高且高效区范围较宽, 且设计工况点扬程能达到要求, 综合性能最好.

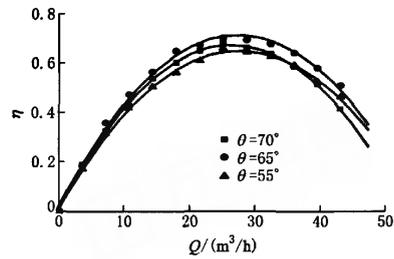


图 8 效率对比图
Fig. 8 Efficiencies contrast

4 结论

1) 对旋流自吸泵导壁区域静压、动压及湍动能流场作了分析, 导壁对旋流自吸泵内部流场有一定影响.

2) 建立了预测模型, 通过对不同导壁包角的性能曲线, 预测与试验得到的性能的对比较, 证明数值模拟的结果较为合理.

3) 根据不同导壁角度方案的对比分析得到导壁包角对扬程和效率有一定的影响. 在原设计参数下, 导壁包角为 65° 的方案优于其他两个方案, 性能最佳.

4) 在其他参数确定的情况下, 分离室高度存在一个最佳值. 最佳值的选取通过先初选几个值, 然后使用 CFD 进行性能预测对比, 根据对比结果确定.

参考文献 (References)

[1] 王春林, 司艳雷, 郑海霞. 旋流自吸泵内部流场的数值模拟[J]. 排灌机械, 2008, 26(2): 31 - 35.
Wang Chunlin, Si Yanlei, Zheng Haixia. Numerical simulation of rotational interior flow in self-priming pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(2): 31 - 35. (in Chinese)

[2] 朱红耕, 袁寿其, 刘厚林, 等. 大型泵站蜗壳式出水流道三维紊流数值模拟[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 49 - 54.
Zhu Honggeng, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. Numerical simulation of the 3 - D flow of a volute-type discharge passage in large pumping stations [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(10): 49 - 54. (in Chinese)

[3] Blanco E. Numerical simulation of the dynamic effects

- due to impeller-volute interaction in a centrifugal pump [J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124: 348 - 355.
- [4] 吕智君, 兰才有, 王福军. 自吸泵研究现状及发展趋势[J]. 排灌机械, 2005, 23(3): 1 - 5.
Lü Zhijun, Lan Caiyou, Wang Fujun. The present status and development of self-pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(3): 1 - 5. (in Chinese)
- [5] 陈松山, 葛强, 严登丰, 等. 泵站竖井进水流道数值模拟与装置特性试验[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 58 - 61.
Chen Songshan, Ge Qiang, Yan Dengfeng, et al. Numerical simulation of turbulent flow inside inlet duct and experiment[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(10): 58 - 61. (in Chinese)
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [7] Caridad J, Kenyery F. CFD analysis of electric submersible pumps handling two-phase mixtures[J]. *Transaction of the ASME: Journal of Energy Resource Technology*, 2004, 126(2): 99 - 102.
- [8] 赵万勇, 刘天宝, 李易松. 旋流泵的流动规律[J]. 排灌机械, 2007, 25(6): 52 - 55.
Zhao Wanyong, Liu Tianbao, Li Yisong, Flow mechanism in vortex-pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(6): 52 - 55. (in Chinese)
- [9] 施卫东, 张启华, 陆伟刚. 新型井泵水力设计及内部流动的数值模拟[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(6): 528 - 531.
Shi Weidong, Zhang Qihua, Lu Weigang. Hydraulic design of new-type deep well pump and flow calculation [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2006, 27(6): 528 - 531. (in Chinese)
- [10] Zhou Weidong, Zhao Zhimei, Lee T S, et al. Investigation of flow through centrifugal pump impellers using computational fluid dynamics [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2003, 9(1): 49 - 61.

(责任编辑 贾国方)

(上接第 287 页)

- [3] 刘国安. 低碳铁在冰箱压缩机中的应用[J]. 天津冶金, 1999(3): 10 - 11.
Liu Guo'an. Application of low carbon iron on refrigerator compressor[J]. *Tianjin Metallurgy*, 1999(3): 10 - 11. (in Chinese)
- [4] 国家标准局. GB 700—2006 碳素结构钢[S]. 北京: 标准出版社, 2007.
- [5] Standaert C, Eloot K, De Paepe A, et al. Decarburisation of interlocked and laser welded stator and rotor cores [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1996, 160: 139 - 140.
- [6] 黄卫华. 半工艺无取向电工冷轧钢的技术特点及其退火热处理工艺探讨[J]. 电机电器技术, 2002(1): 40 - 43.
Huang Weihua. Technical features of semi-processed non-oriented cold rolled electric steel and study of its annealing heat treatment [J]. *Electric Machine and Apparatus Technology*, 2002(1): 40 - 43. (in Chinese)
- [7] Oldani C, Silvetti S P. Microstructure and texture evolution during the annealing of a lamination steel [J]. *Scripta Materialia*, 2000, 43: 129 - 134.
- [8] 毛必华, 华向东. 热处理工艺参数对硅钢片电磁性能的影响[J]. 江西冶金, 2000, 20(1): 13 - 14.
Mao Bihua, Hua Xiangdong. The influence of the parameter of heat treatment technique on electromagnetic property of silicon steel slice [J]. *Jiangxi Metallurgy*, 2000, 20(1): 13 - 14. (in Chinese)
- [9] 陈国钧, 李茂昌, 周元龙. 金属软磁材料及其热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.

(责任编辑 赵 鸣)