

潜油离心泵内流场的三维数值模拟与试验

Numerical Simulation and Experiment of the 3D Internal Flow Field in Submersible Centrifugal Pump

胡玉平 闫理贵 孙平

(山东大学 能源与动力工程学院 250061)

摘要:基于 $k-\varepsilon$ 湍流模型和 SIMPLEC 算法,采用 CFD 软件 STAR-CD 对 SL45 离心泵不同工况下的内流场进行三维数值模拟,得到了泵内流场的速度分布、压力分布情况。通过数值模拟与试验研究的比较分析,两者结果非常吻合,最大误差为 4.4%,表明该数值模拟方法可以较好地模拟离心泵叶轮内流场,为优化设计、提高泵的效率提供了理论依据。

关键词: 离心泵; 数值模拟; 试验; STAR-CD

Abstract: Based on the $k-\varepsilon$ turbulence model and SIMPLEC algorithm, the numerical simulation of the 3D internal flow Field in centrifugal pump was performed by using the commercial CFD software STAR—CD under different operating conditions. Results show velocity and pressure profiles in the centrifugal pump. Comparison between simulation and experiment shows that the results of simulation are in good agreement with experimental data, the maximum deviation is 4.4%. So the simulation provides more dependable theoretical evidence for centrifugal pump optimization.

Key words: Centrifugal pumps; Numerical Simulation; Experiment; STAR-CD

1 引言

潜油电动离心泵目前广泛应用于我国各油田,约占采油装备的 10%。潜油电动离心泵为多级离心泵,每级由导轮和叶轮组成,导轮不转动。叶轮和导轮性能的优劣,直接决定和影响潜油电动离心泵抽液的功效。叶轮是离心泵中做功的主要部件,叶轮内部流场是十分复杂的三维紊流流动,受到曲率、旋转及进出口条件的影响。对它的研究,多年来一直受到了许多学者的高度重视,也取得了一些成果,但缺少试验验证^[1-5]。随着计算机技术的飞速发展,数值模拟开始更为广泛地应用于叶轮机械的设计和流场分析中,应用计算流体力学 CFD (Computational Fluid Dynamics) 的软件(如 STAR—CD、FLUENT 等)对离心泵内部流场进行数字模拟,成为了目前研究的热点。

本文利用 STAR-CD 对 SI45 型 4 级离心泵在转速 $n = 2500r/min$, 不同流量 ($15m^3/h$, $30m^3/h$, $45m^3/h$, $60m^3/h$, $75m^3/h$) 下的内流场进行了竖直模拟,给出了速度分布,压力分布以及各流量

下的扬程分布情况，并与试验对比进行了验证。

1 计算模型

1.1 几何建模与网格划分

采用三维设计软件 Pro/E 建立了离心泵的几何模型如图 1 所示。图 2 为叶轮的实体模型。为了保证计算结果真实可靠，未对几何模型作任何简化处理。为提高计算精度和模拟的准确性，利用 STAR-CD 自动网格生成器 Pro-am，采用网格单元与任意的交界面技术和局部加密技术对离心泵进行网格划分，网格以六面体为主，网格总数量约 53 万，如图 3 所示。图 4 为叶轮的网格模型。

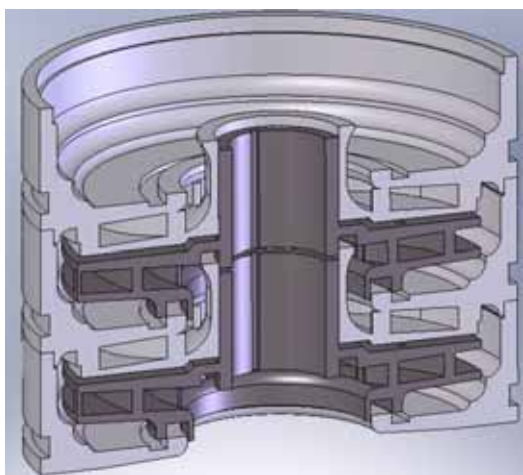


图 1 离心泵几何模型

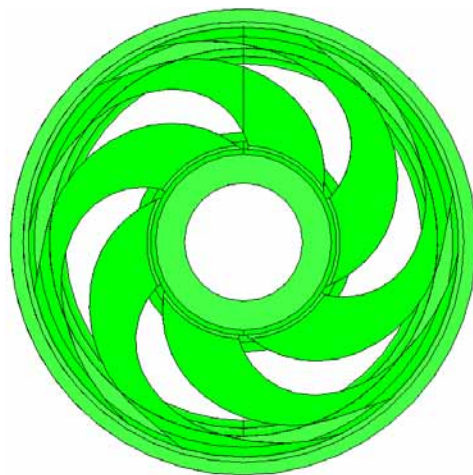


图 2 叶轮实体模型

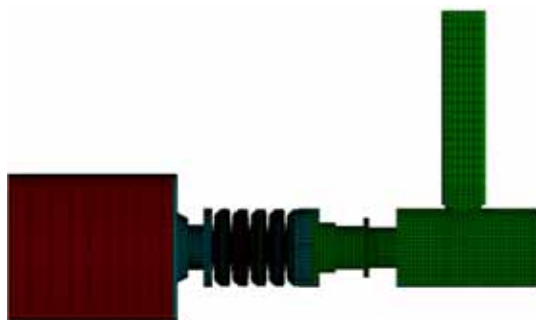


图3 计算区域CFD模型

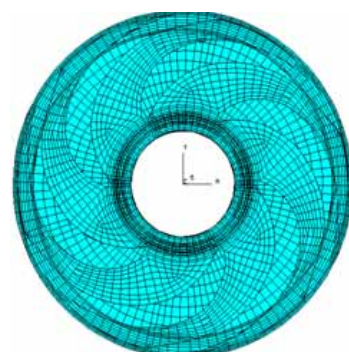


图4 叶轮网格

1.2 数学模型与边界条件

本文中水在叶轮内作非定常流动，采用多参考坐标系模型(multiple reference frame)把离心泵内流场简化为叶轮在某一个位置的瞬时流场，用定常流来近似模拟旋转流场^[6-7]。将离心泵中水的流动视为不可压缩的湍流流动，采用稳态计算模式，用优化的 SIMPLE 算法求解，湍流模型和 k- ϵ 高 Reynolds 湍流模型进行求解。

边界条件：入口采用速度边界条件，假定进口处速度是均匀的；出口采用出流(outflow)边界条件；壁面采用无滑移壁面边界条件和旋转壁面边界条件(叶轮转速为 2500r/min)。

2 计算结果分析

2.1 速度分布

图 5 中(a),(b)分别给出了 $Q = 45\text{m}^3/\text{h}$ 和 $Q = 75\text{m}^3/\text{h}$ 时,泵内叶轮截面上的速度矢量分布(单位: m/s),可以看出在叶轮的出口处或多或少都存在一定的边界层分离。进口处压力面附近的流体速度比吸力面附近的小,主要是在流道的入口段流动受叶片弯曲的影响更大;随着半径的增大,流动受旋转的影响增大,在叶轮进口处速度增加较快,流速很快增加到最大值。随着质量流量的增加,流速减小。

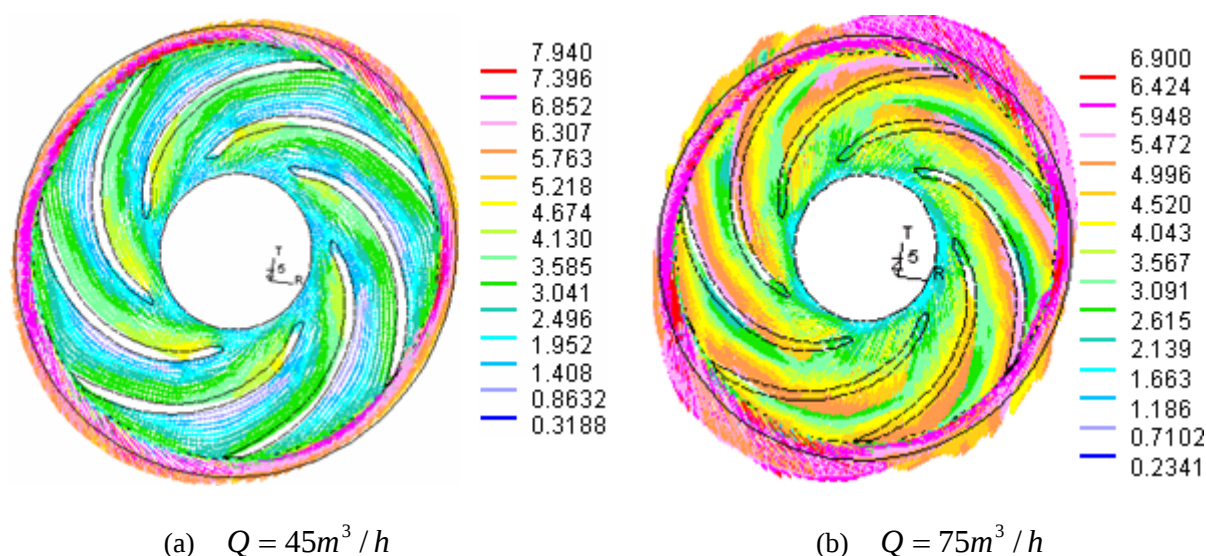


图 5 叶轮截面上的速度分布

2.2 压力分布

图 6 为 $Q = 45\text{m}^3/\text{h}$ 时,泵内截面上的总压分布(单位: Pa),可以看出不管是叶片还是流道,压力分布都比较均匀,说明翼型规律基本合理。从叶轮流道进口到出口,随着叶轮做功,水的压力逐渐增加,叶轮的最大压力出现在出口处,最小压力出现在进口处,在进口处叶片背面上,压力为负值。

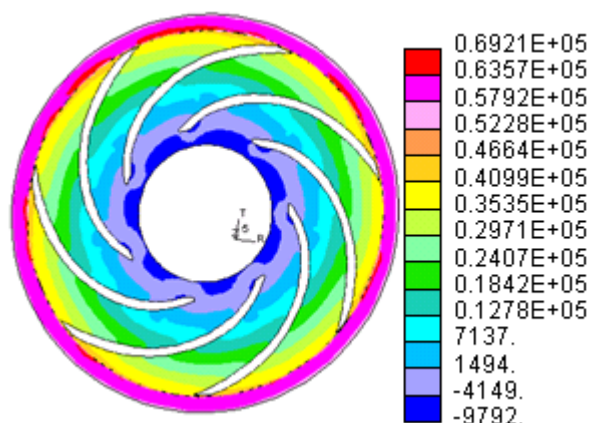


图 6 叶轮截面上的压强分布

2.3 扬程分析

离心泵进口位置到出口位置的总压差，即该水泵的扬程。

$$H = \frac{\bar{p}_{out} - \bar{p}_{in}}{\rho g} + h \quad (1)$$

式中 H 为扬程， $\bar{p}_{in}$ ， $\bar{p}_{out}$ 分别为泵进出口截面平均压力 (Pa)， h 为入口与出口的垂直距离 (m)。根据模拟结果，按式(1)可计算得到不同流量工况下该离心泵的单级扬程。设计工况下，计算得到的泵扬程 $H=5.72\text{m}$ ，比厂家提供的该泵的试验扬程 ($H=5.79\text{ m}$) 低 1.2%，其可能的原因是数值计算过程中忽略了泵的泄漏损失，模拟条件与试验条件不能完全吻合。

3 试验验证

为了验证数值模拟的准确性，采用试验对其进行校验，试验条件与数值计算条件完全相同。采用 SC4S 离心泵、潜水电机、压力表、转矩转速传感器、涡轮流量传感器、水泵性能测试试验台等试验仪器进行试验，如图 7 所示。试验设备及仪表的型号如表 1 所示。不同流量下单级泵扬程的模拟值与试验值如表 2 所示，测量误差 2% 左右；比较模拟值与试验值的大小，并作出其扬程—流量曲线，如图 8 所示。

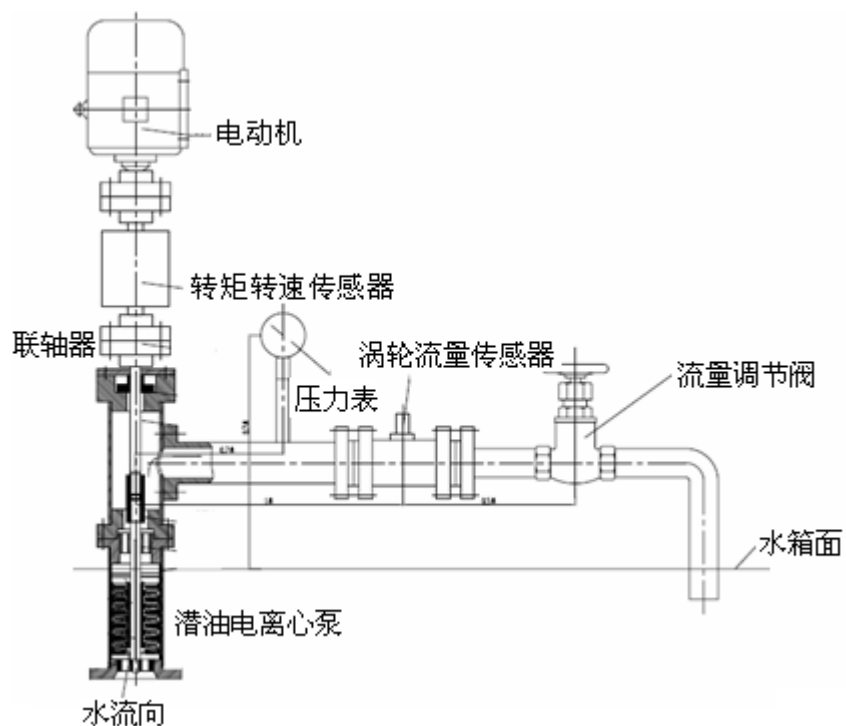


图 7 试验台工作示意图

表 1 试验设备及仪表型号

名称	型号	备注
潜油电离心泵	SL45	
电动机	YS1734	
压力表	M309708	精度 0.4 级
转矩转速传感器	SJ30-SL06300AT	
涡轮流量传感器	M287093	

表2 模拟值与试验值的比较

流量/ m^3	试验扬程 /m	模拟扬程 /m	相对误差/ %
15	6.30	6.57	-4.4
30	6.09	6.05	0.6
45	5.79	5.72	1.2
60	5.30	5.32	-0.3
75	4.31	4.27	1.0

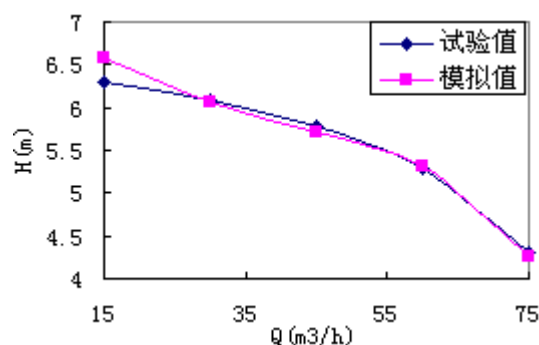


图7 不同流量下扬程分布

由表 1 和图 7 分析可知：

(1)随着流量增加，预测值和实测值都相应减小，其变化趋势大体一致，这样就较为准确地反映了各种工况下的扬程分布。

(2)在不同的流量情况下，模拟值相对于实测值的误差在 5% 以内，平均误差为 1.5%；可知模拟值是可信的，具有足够的精度。

(3)流量 $Q = 15\text{m}^3/\text{h}$ 时偏差最大，原因有待进一步研究。

4 结论

(1) 本文采用数值模拟的方法，对 4 级 SI45 离心泵不同流量下的内流场进行模拟计算，得到了速度分布，压力分布以及各流量下的扬程分布，并对其进行了分析，为泵的优化提供了理论依据。

(2) 通过与试验结果进行比较，两者结果基本吻合，误差在 5% 以内，表明了该模拟具有足够的精度。

参考文献：

- [1] 王福军，黎耀军，王文娥．水泵 CFD 应用中的若干问题与思考[J]．排灌机械，2005，23(5)：1-10．
- [2] 钱健，刘超，汤方平等．离心泵叶轮内部三维紊流数值模拟与验证[J]．农业机械学报，2005，36(1):32-34
- [3] 李巍，王国强，刘立军．离心叶轮内三维紊流流动数值模拟[J]．上海交通大学学报，2000，34(1)：143-147
- [4] 杨敏官，刘 栋，贾卫东等．离心泵叶轮内部三维湍流流动的分析[J]．江苏大学学报(自然科学版)，2006,27(6):524-527
- [5] 沈海涛，郑水英，应光耀．圆柱形叶片潜油离心泵流场的三维数值分析[J]．FLUID MACHINERY，2005，

33(12):12-15

- [6] Jin Yan , D . G . . Smith . CFD Simulation of 3-Dimensional Flow in Turbomachinery Applications ,
Fluent Technical Notes , Presented at Turbomachinery Flow Prediction , ERCOFTAC Workshop ,
March 2000 .
- [7] 张淑佳 , 胡清波 , 朱保林等 . IS80 — 65—160 离心泵三维内流场数值模拟[J] . 水泵技术 , 2006 , 3 :
24 - 27