

斜流泵性能预测与叶轮进出口环量分析*

施卫东 邹萍萍 张德胜 周岭

(江苏大学流体机械工程技术中心, 镇江 212013)

【摘要】 为了揭示大型高比转数斜流泵内部流动规律,采用商业软件 FLUENT,对高比转数斜流泵进行数值模拟。通过计算得到的扬程和效率性能曲线与实验结果基本一致,有效地证明了该数值计算的准确性。同时,还分析了3个工况 $0.8Q_{opt}$ 、 $1.0Q_{opt}$ 和 $1.2Q_{opt}$ 稳态流动下叶轮进出口的轴向速度和环量分布规律。结果表明3个工况下斜流泵内部流动稳定,叶轮叶片背面存在明显的负压区;叶轮进口呈非线性环量流型,出口呈等环量流型,轴向速度均为抛物线分布。

关键词: 斜流泵 数值模拟 性能预测 内部流动

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)09-0094-04

Performance Prediction and Circulation Distribution Analysis at Impeller Inlet and Outlet of Mixed-flow Pump

Shi Weidong Zou Pingping Zhang Desheng Zhou Ling

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

Abstract

In order to reveal the internal flow laws of large-scale mixed-flow pumps, a high specific speed mixed-flow pump was simulated based on the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and SIMPLEC algorithm by using software FLUENT. The axial velocity and circulation distributions of steady flow under working conditions of $0.8Q_{opt}$, $1.0Q_{opt}$, and $1.2Q_{opt}$ at impeller outlet were obtained. The numerical results showed that the flow was stable under all the three working conditions; the axial velocity gradually decreased from hub to tip; the circulation flow pattern of the mixed-flow was nonlinear at impeller inlet, and approximately uniform at impeller outlet. The negative pressure zone which gradually expanded with the flow rate increasing existed obviously at the suction side. The study provided a certain reference for the hydraulic design of mixed-flow pump.

Key words Mixed-flow pump, Numerical simulation, Performance prediction, Internal flow

引言

高比转数斜流泵具有高效范围广,适应扬程范围大,抗汽蚀性能良好等优点,主要用于农业灌排水、市政给排水、电厂供循环水、区域性调水等^[1],在国民经济中发挥着重要作用。斜流泵的结构和性能介于轴流泵和离心泵之间,是一种吸取离心泵和轴流泵优点,补偿两者缺点的理想泵型^[2],使用的范围正在向传统离心泵和轴流泵的范围扩大,已经

从传统的比转数 300 ~ 500,扩展到 800。近几年来已在上海青草沙泵站、引嫩入白五家子泵站、上海陈行泵站、广西安平河泵站等水利工程上得到了广泛的应用。与离心泵和轴流泵相比,目前国内斜流泵的研究^[3~7]不是很多,因此对斜流泵性能研究显得十分必要。本文使用 CFD 软件对比转数为 1000 的斜流泵模型进行三维数值模拟,分析不同流量下叶轮进、出口轴面速度和环量的分布规律,同时对其性能进行实验。

收稿日期: 2010-11-15 修回日期: 2010-12-23

* 国家自然科学基金资助项目(51079063)、江苏高等学校优秀科技创新团队项目(苏教科[2009]10号)和国家科技人员服务企业行动项目(2009GJC30002)

作者简介: 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

1 数学模型

斜流泵是一种比转数较高的泵型,在结构和性能上,介于离心泵和轴流泵之间,兼有离心泵和轴流泵两方面的优点。自1980年以来,国内外大型斜流泵多采用可调节叶片结构,即轮毂和轮缘做成球面,可以改变叶片角度^[8]。这种结构形式与固定叶片轮毂、轮缘为锥面相比,效率略低,但是泵可以在很宽的流量、扬程变化范围内高效运行。其过流部件示意图如图1所示。

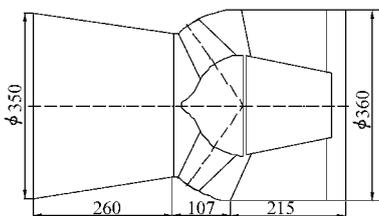


图1 斜流泵模型过流部件示意图

Fig.1 Flow-passage components schematic diagram

1.1 模型思路

该模型采用二元理论设计,对环量和速度分布加以经验修正^[8],其创新点如下:

(1)叶轮出口流动按介于自由旋涡理论(v_u 为常数)和强制旋涡理论(v_u/R 为常数)之间的某种规律进行设计。也就是设计叶轮5条流线的出口采用5种不同的流动规律,目的是减小设计流量下的二次回流。

(2)为减小叶轮进口在非设计工况下的二次回流,进口各流线按变环量设计。

(3)加长轮毂侧翼型的稠密度 l/t ,使叶轮内的流态更为稳定,以防止在非设计工况下出现二次回流。

(4)轮毂侧叶片向前延伸,提前对流入叶轮进口的液流施加力矩,减小液流的相对速度,以改善抗汽蚀性能。

(5)在给定流动规律后叶片按型线逐点积分方法进行计算,在圆锥展开面上叶轮绘型,选择翼型厚度并按规律加厚,计算和绘型由自行开发的CAD软件完成。

$$\theta = \int_{s_1}^{s_2} \frac{\omega R^2 - v_u R}{v_m R^2} ds \quad (1)$$

式中 θ ——型线中心角, ($^\circ$)

ω ——型线角速度, rad/s

R ——型线半径, m

v_u ——流面圆周分速度, m/s

v_m ——流面轴面速度, m/s

s ——流面厚度, m

1.2 物理模型

本文研究的高比转数斜流泵模型设计流量 $Q = 384 \text{ L/s}$, 扬程 $H = 6 \text{ m}$, 转速 $n = 1450 \text{ r/min}$, 比转数 $n_s = 800$, 叶片数 $Z = 4$, 导叶叶片数 $Z_d = 7$ 。通过Pro/Engineer软件对高比转数斜流泵模型进行三维造型,计算区域为从泵的进口段到弯管出口段的整个泵段,如图2所示。其网格划分情况和计算网格分别如表1、图3所示。

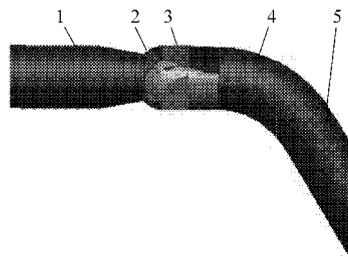


图2 全流场三维模型

Fig.2 Whole flow field of 3-D model

1.进口段 2.叶轮 3.导叶 4.弯管段 5.出口段

表1 三维网格划分

Tab.1 3-D mesh generation

网格参数	进口段	叶轮	导叶	弯管段	出口段	总体
网格结构	Hexahedra	Tetrahedra	Tetrahedra	Tetrahedra	Hexahedra	
单元数	84 360	838 810	1 848 112	759 787	111 100	3 642 169

2 数值计算

2.1 边界设置

基于商用CFD软件FLUENT,采用SIMPLEC方法求解不可压缩时均N-S方程。湍流模型选取标准 $k-\epsilon$ 模型。壁面采用无滑移边界条件,近壁区域采用标准壁面函数处理,进口采用速度进口边界条件,出口采用自由出流边界条件,计算收敛精度设为 10^{-4} 。

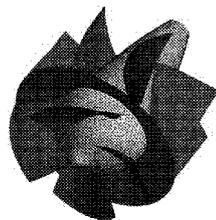


图3 计算网格

Fig.3 Calculation grids

2.2 稳态内部流场分析

在不同工况($0.7Q_{opt}$ 、 $0.8Q_{opt}$ 、 $0.9Q_{opt}$ 、 $1.0Q_{opt}$ 、 $1.1Q_{opt}$ 和 $1.2Q_{opt}$,其中 Q_{opt} 为设计最优工况流量)下,定常流动时的扬程、效率的模拟值与实验值对比如图4所示。从图中可以看出在小流量工况下数值模拟结果与实验结果十分相近,扬程和效率的最小误差分别可以达到2.45%、-2.60%;而在大流量工况下误差较大,主要原因是大流量工况下斜流泵内部流场空化比较严重,而本文选用的标准湍流模型尚未考虑空化的影响,因此计算结果比实验结果

偏高。模拟得到的扬程、效率的数值变化趋势与实验值是一致的,证明本文采用的数值模拟方法是可靠的。

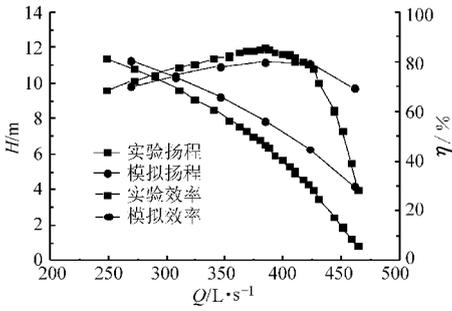


图4 斜流泵性能曲线

Fig. 4 Performance curves of mixed-flow pump

图5分别为3个工况下的叶轮叶片上的静压分布。由图可以看出在工作面上的静压沿叶片轮毂到轮缘递增,在叶片外缘处达到最大;从进口到出口方向看静压先增大后减小,出口处静压减小的主要原因是受后置空间导叶的影响;不同工况下,整体静压随着流量的增加而降低,叶片外缘高压区域随流量增加而明显减小,而叶片进口的低压区域随流量增大而增大。背面上的静压分布与工作面正好相反。可见,斜流泵在大流量情况下叶轮工作面进口和背面叶片外缘容易发生空化,实际运行时应引起重视。

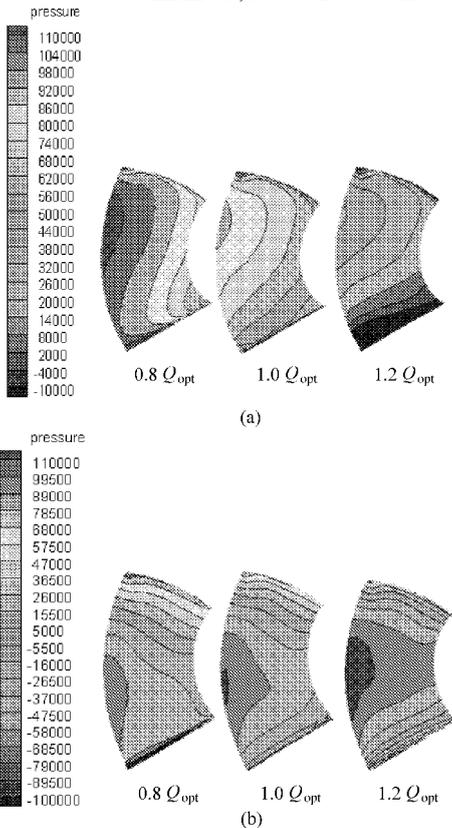


图5 叶轮叶片静压分布

Fig. 5 Static pressure distribution on impeller blades

(a) 叶轮工作面 (b) 叶轮背面

图6和图7为不同工况下叶轮进、出口的轴面速度 v_{m1} 、 v_{m2} 和环量分布 Γ 。径向位置无量纲数 r^* 的表达式为

$$r^* = (r - r_h) / (r_t - r_h) \quad (2)$$

式中 r ——测量半径, mm r_h ——轮毂半径, mm

r_t ——轮缘半径, mm

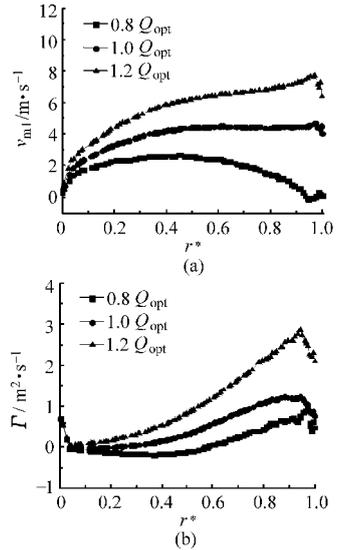


图6 叶轮进口轴面速度与环量分布

Fig. 6 Axial velocity and circulation distributions at impeller inlet

(a) 轴面速度分布 (b) 环量分布

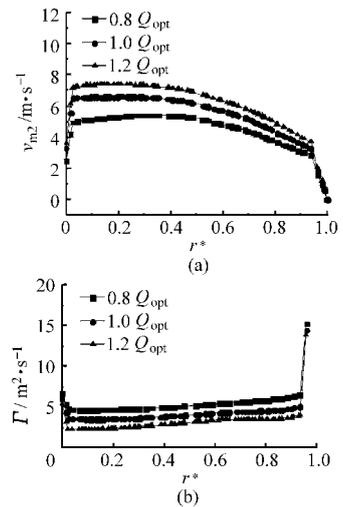


图7 叶轮出口轴面速度与环量分布

Fig. 7 Axial velocity and circulation distributions at impeller outlet

(a) 轴面速度分布 (b) 环量分布

在叶轮进口沿轮毂到轮缘轴面速度先增大后减小,呈抛物线分布(图6a);由图6b可知,在斜流泵叶轮进口各个工况下的流型呈非线性分布,这与设计理论一致。

图7a为不同工况下叶轮出口的轴面速度分布。图中表明叶轮出口的轴面速度呈抛物线分布,从轮

毂到轮缘速度先增大后减小,在轮毂和轮缘壁面区域由于受到近壁区边界层的影响,速度梯度较大;不同工况下,轴面速度随流量的增加而增大。图7b表明在叶轮出口的环量分布呈近似等环量分布,在轮毂和轮缘壁面区域的环量同样也受到近壁区边界层的影响而增大。

3 结论

(1)未考虑空化影响的数值模拟得到的扬程和

效率性能比实测的略高,两者总体变化趋势一致,有效地证明了本文采用的数值方法可靠性。

(2)研究结果表明该模型叶轮进口轴面速度呈抛物线规律分布,环量呈非线性规律分布。这种流型可以较好地减少非设计流量下的二次回流。

(3)叶轮出口轴面速度呈抛物线规律分布,环量呈等环量分布。在3个工况 $0.8Q_{opt}$ 、 $1.0Q_{opt}$ 和 $1.2Q_{opt}$ 下斜流泵的内部流动稳定,能够在较宽的扬程范围内高效运行。

参 考 文 献

- 1 关醒凡. 轴流泵和斜流泵[M]. 北京:中国宇航出版社,2009:42~69.
- 2 关醒凡,袁寿其,刘厚林,等. 高比转数斜流泵模型的试验研究[J]. 中国农村水利水电,2003(5):59~60.
Guan Xingfan, Yuan Shouqi, Liu Houlin, et al. Experimental research on mixed flow pump model of high specific speed [J]. China Rural Water and Hydropower, 2003(5):59~60. (in Chinese)
- 3 袁春元. 混流泵叶轮流场计算与性能试验[J]. 农业机械学报,2008,39(3):52~55.
Yuan Chunyuan. Numerical calculation of turbulent flow and performance experiment of mixed-flow pump impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3):52~55. (in Chinese)
- 4 吴大转,王乐勤. 高速混流泵汽蚀特性与汽蚀性能改善方法[J]. 农业机械学报,2006,37(9):93~96.
Wu Dazhuan, Wang Leqin. Study on cavitations behavior of high-speed mixed flow pump and cavitations performance improvement method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(9):93~96. (in Chinese)
- 5 张德胜,施卫东,关醒凡,等. 轴流泵叶轮进口流场的测量[J]. 排灌机械,2009,27(4):210~214.
Zhang Desheng, Shi Weidong, Guan Xingfan, et al. Measurement on flow field at inlet and outlet of axial-flow pump impeller [J]. Drainage and Irrigation Machinery, 2009, 27(4):210~214. (in Chinese)
- 6 Yumiko Takayama, Hiroyoshi Watanabe. Multi-objective design optimization of a mixed-flow pump [C]//Proceedings of the ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting, August 2~6, 2009, Colorado, USA.
- 7 刘琦,袁寿其. 高比转速斜流泵内部三维湍流场数值模拟的研究[J]. 农机化研究,2007(7):75~79.
Liu Qi, Yuan Shouqi. Numerical simulation of 3D turbulent flow in the mixed-flow pump with high specific speed [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(7):75~79. (in Chinese)
- 8 关醒凡,杨敬江,袁建平,等. 高比转速斜流泵水力模型试验研究[J]. 泵技术,2002(4):3~8.
- 9 施卫东,邹萍萍,张德胜,等. 高比转速斜流泵内部非定常压力脉动特性[J]. 农业工程学报,2011,27(4):147~152.
Shi Weidong, Zou Pingping, Zhang Desheng, et al. Unsteady flow pressure fluctuation of high-specific-speed mixed-flow pump [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(4):147~152. (in Chinese)