

半开式叶轮离心泵的效率优化与分析^{*}

陈松松¹, 阮越广², 阮晓东^{1*}, 邹俊¹, 付新¹

(1. 浙江大学 流体传动与控制国家重点实验室, 浙江 杭州 310027;

2. 浙江机电职业技术学院, 浙江 杭州 310053)

摘要: 为了提高半开式叶轮离心泵的水力效率, 应用速度系数法对半开式叶轮离心泵的水力效率进行了优化, 并采用 $k-\varepsilon$ 湍流模型和标准壁面函数对离心泵进行了数值模拟, 仿真分析了蜗壳和叶轮顶端间不同间隙以及不同叶片数对离心泵水力效率的影响。研究表明, 当蜗壳与叶轮顶面的间隙为 0.5 mm, 叶片数为 6 时, 离心泵的效率较好。

关键词: 离心泵; 优化设计; 速度系数法; 计算流体力学

中图分类号: TH311; TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)07-0806-03

Optimization and analysis of efficiency for centrifugal pump with semi-open impeller

CHEN Song-song¹, RUAN Yue-guang², RUAN Xiao-dong¹, ZOU Jun¹, FU Xin¹

(1. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China)

Abstract: To improve the hydraulic efficiency of the centrifugal pump with semi-open impeller, the speed coefficient method was used to optimize the hydraulic efficiency. The $k-\varepsilon$ turbulence model and standard wall function were applied to simulate the centrifugal pump. The effects of different clearances and numbers of vane on pump hydraulic efficiency were simulated and analyzed. It is showed that the efficiency of centrifugal pump has satisfactory result, while the clearances between volute and impeller is 0.5 mm, the number of vane is 6.

Key words: centrifugal pump; optimization design; speed coefficient method; computational fluid dynamics

0 引言

离心泵广泛应用于石油化工、锅炉给水、航空航天等领域, 而离心泵的效率是离心泵的一个重要指标, 针对离心泵效率的提高, 研究者做了很多相关研究^[1-4], 对于半开式离心泵而言, 尤其是小型泵的效率问题, 叶片数和叶轮上端与蜗壳的间隙大小也是影响效率的重要参数。

在离心泵的设计中速度系数法是较为常见的设计理论, 是建立在一系列相似泵基础上的设计方法。本研究基于速度系数法给出离心泵的水力损失与叶轮

参数的关系, 并通过参数优化使离心泵达到效率最高。

1 离心泵的水力设计

本研究设计的离心泵流量扬程要求是在 2 L/min ~ 7 L/min 流量下, 提供 1.0 m ~ 1.6 m 的扬程, 所以离心泵设计的工况点设为在 1.3 m 扬程下能够提供 5 L/min 流量。根据速度系数法设计泵^[5-6], 蜗壳和叶轮的三维造型如图 1、图 2 所示。其中, 叶轮的转速设为 3 000 r/min, 泵的入口和出口直径为 8 mm, 叶轮外径为 38 mm, 内径为 25 mm, 叶片出口角为 27°, 入口角为 25°, 叶片宽度为 3.5 mm, 压水室采用蜗壳形式。

收稿日期: 2011-01-10

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2010AA045401); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2009QNA4001)

作者简介: 陈松松(1985-), 男, 浙江台州人, 主要从事离心泵的设计与优化、流场数值计算与分析方面的研究。E-mail: css079@zju.edu.cn

通信联系人: 阮晓东, 女, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: xdruan@zju.edu.cn

2 离心泵叶轮的参数优化

在本研究中离心泵叶轮的优化设计是在保证满足流量扬程的要求下,以速度系数法为前提,忽略泵的容积损失和圆盘摩擦损失,以泵的水力效率为优化目标建立优化模型,并通过 Matlab 优化工具箱计算,得出最优结果。水力效率的优化主要通过经验公式法,建立水力损失和叶轮参数之间的关系。

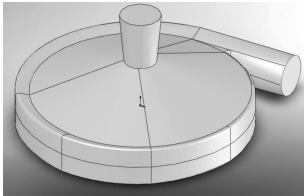


图 1 蜗壳的三维造型图

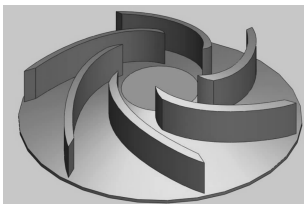


图 2 叶轮的三维造型图

叶轮的参数有叶轮入口直径 D_1 , 叶轮出口直径 D_2 , 叶轮入口角 β_1 , 叶轮出口角 β_2 , 叶轮入口宽度 b_1 , 叶轮出口宽度 b_2 , 叶片包角 ψ ; 本研究为了保证泵的设计要求,同时作相应的简化,忽略叶轮与蜗壳间隙的影响,设计变量设为 D_1, β_1, β_2 。

水力损失 Δh 包括沿程损失 $\Delta h'$ 和局部损失 $\Delta h''$:

$$\Delta h = \Delta h' + \Delta h'' \tag{1}$$

沿程水力损失 $\Delta h'$ 可以用等效平板摩擦计算^[7]:

$$\Delta h' = 2C_f \times \frac{1}{2g} \times u_2^2 \times \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \times \left(\frac{1+\gamma}{2}\right)^3 \times \frac{Z \frac{lb_m}{D_1 b_1} + \frac{\pi}{4} \cdot \frac{D_2}{D_1} \cdot \frac{b_2}{b_1} \cdot \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)}{\pi \cdot \sin \beta_1 \cdot \cos^2 \beta_1} \tag{2}$$

式中: C_f —损失系数, $C_f = 0.005$; u_2 —出口牵连速度, v_{2m} —出口轴面速度, l —叶片长度, b_m —平均叶片宽度。且:

$$u_2 = \frac{\omega D_2}{2} = \frac{n \times 2\pi \times D_2}{2 \times 60};$$
$$\gamma = \frac{\omega_2}{\omega_1};$$
$$\omega_1 = u_2 \times \frac{D_1}{D_2} \times \frac{1}{\cos \beta_1};$$
$$\omega_2 = \frac{v_{2m}}{\sin \beta_2};$$

$$v_{m_2} = K_{m_2} \sqrt{2gH};$$
$$l \approx \frac{D_2 - D_1}{2 \sin \beta_2};$$
$$b_m = \frac{b_1 + b_2}{2}。$$

局部损失 $\Delta h''$ 为:

$$\Delta h'' = \zeta \frac{1}{2g} (\omega_1^2 - \omega_2^2)$$

其中: $\zeta = 0.1 \sim 0.2$ 。

根据离心泵的设计理论,为满足基本的流量扬程要求,本研究对叶轮参数包括叶轮入口直径 D_1 , 叶轮入口角 β_1 , 叶轮出口角 β_2 进行约束,约束方程如下:

$$4.0 \times \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} \leq D_1 \leq 5.5 \times \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} \tag{3}$$
$$3^\circ \leq \beta_1 \leq 15^\circ$$
$$18^\circ \leq \beta_2 \leq 33^\circ$$

优化目标是水力损失最小,并结合约束条件,通过 Matlab 优化工具箱对叶轮参数进行优化,优化后参数结果如表 1 所示。

表 1 叶轮参数优化前后对比			
叶轮参数	D_1/mm	$\beta_1/(^\circ)$	$\beta_2/(^\circ)$
优化前	16	27	25
优化后	11	19.5	33

3 数值模型的建立和分析

3.1 仿真模型的建立和仿真结果

本研究对离心泵内部流场进行数值模拟,分析比较优化前后的效率变化,采用网格划分软件 Gambit 对整体流道进行网格划分,并用非结构化的四面体网格划分整个流道,整个流道的网格划分图如图 3 所示,其中,网格单元数为 1 219 652。入口边界为速度入口,出口设为 outflow。介质为水,转子和静子之间的流动采用混合面的模型^[8],计算模型采用三维不可压湍流 Navier-Stokes 方程、standard $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型,选择标准壁面法及交界面的混合壁面函数^[9],收敛条件为残差 1.0×10^{-4} ,转速设为 3 000 r/min。分别对优化前和优化后的离心泵进行仿真计算,得出两种叶轮的效率的比较,其结果表明优化后的泵比优化前的泵效率有所提高。

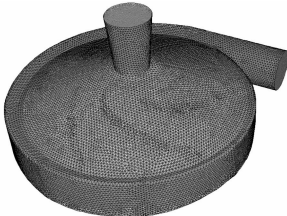


图 3 流道网格图

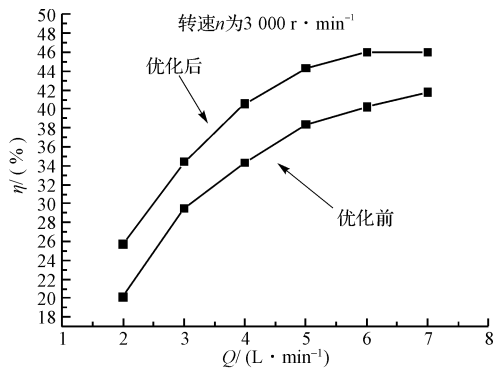


图 4 优化前后的效率比较

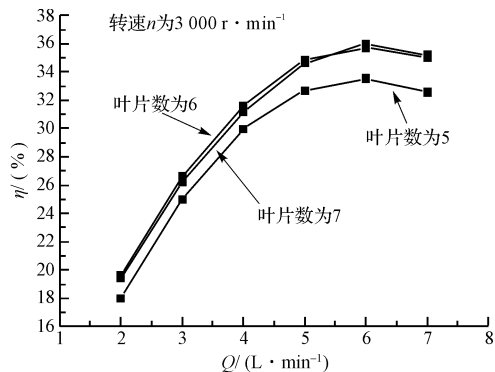


图 6 不同叶片数下离心泵的效率比较

3.2 间隙和叶片数对效率的影响分析

通过仿真可分析间隙大小和叶片数对离心泵的效率的影响,本研究分别对 0.5 mm, 1 mm, 1.5 mm 这 3 种间隙下的离心泵在流量范围 2 L/min ~ 7 L/min 情况下的效率进行仿真分析,如图 5 所示,离心泵的效率随着间隙的变小而增大,叶轮与蜗壳的间隙主要影响着半开式离心泵的容积效率,间隙越大,容积损失越大,离心泵的总效率越低。

本研究分别对叶片数为 5, 6, 7 这 3 种情况下的离心泵在流量范围 2 L/min ~ 7 L/min 情况下的流场进行仿真分析,不同叶片数下离心泵的效率变化如图 6 所示。从图中可知 3 种叶片数下效率的变化不大,叶片数为 5 时效率最低,叶片数为 6 和 7 时效率基本上变化不大,总体上叶片数 6 的效率略高于叶片数 7 的效率。叶片数对离心泵的效率主要有两个方面影响:首先叶片数的增加,带来排挤系数的增大,引起轴面速度的增大,从而提高了叶轮内流场的整体过流速度,增大流动中的水力损失;其次,叶片数越多,叶轮内的叶片对流动的挤压越大,使得叶片间流动越规整,从而降低叶轮的水力效率。在从叶片数 6 变为叶片数 7 的过程中,由于排挤系数的增大带来的效率损失略大于流动规整带来的水力效率的提高,所以在叶片数为 6 的情况下,效率较好^[10-12]。

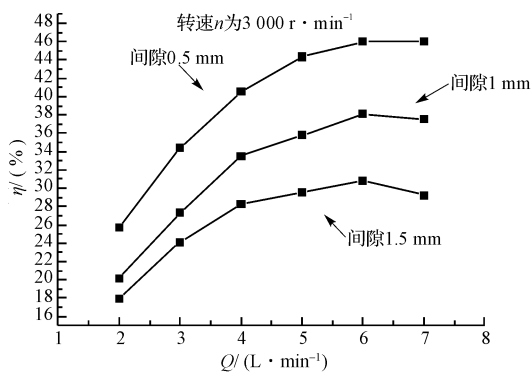


图 5 不同间隙下的效率比较图

4 结束语

本研究应用速度系数法对半开式叶轮离心泵的水力效率进行优化,并采用 k-ε 湍流模型和标准壁面函数对离心泵进行数值模拟,仿真分析了蜗壳和叶轮在不同间隙下对离心泵效率的影响,以及叶片数对效率的水力特性的影响。其结果表明间隙在 0.5 mm 下,且叶片数为 6 的情况下离心泵的效率较好。

参考文献 (References):

- [1] 王乐勤,平仕良,吴大转. 大功率高压离心泵的优化设计[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(6): 470-473.
- [2] 孙建平,张克危,刘龙珍. 离心泵的优化设计[J]. 农业机械学报, 1997, 28(3): 25-28.
- [3] 陈洪海,袁寿其. 低比速离心泵优化设计方法[J]. 排灌机械, 2001, 29(8): 19-22.
- [4] 黄列群,武鹏,薛存球,等. 离心式化工流程泵设计技术进展综述[J]. 机电工程, 2009, 26(6): 1-4.
- [5] 关醒凡. 泵的理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1986.
- [6] 陈乃祥,吴玉林. 离心泵[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [7] 葛宰林,吕斌,于馨. 基于速度系数法的离心泵叶轮优化设计[J]. 大连铁道学院学报, 2006, 27(3): 37-40.
- [8] 高殿荣,王广义. 锥形螺旋轴流泵流场三维数值模拟与分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(9): 47-50.
- [9] WU Jin-chun, PADEN B E, BORVENTZ H S. Computational fluid dynamics analysis of blade tip clearances on hemodynamic performance and blood damage in a centrifugal ventricular assist device[J]. Artificial Organs, 2009, 34(5): 402-411.
- [10] 郭永胜,赵杰,王虚成. 叶轮的数字化建模和整体加工[J]. 现代制造技术与装备, 2008(3): 39-40.
- [11] 季力,颜建军. STM32 芯片泵综合参数测量中的应用[J]. 轻工机械, 2010, 28(6): 77-81.
- [12] 郑炜. 基于非定常数值模拟的微型循环水泵性能预测[J]. 机电技术, 2010, 33(2): 86-88.