排灌机械工程学报 2010年7月 第28卷 第4期
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering Vol. 28 No. 4

中比转速离心泵叶轮的优化设计及数值模拟

谭 磊，曹树良
（清华大学 热能工程系 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室，北京 100084）

摘 要：基于流体流动的连续方程和运动方程，通过两类相对流面的迭代计算，实现中比转速离心泵叶轮内准三维正问题的数值计算，得到了轴面速度分布. 应用逐点积分法进行叶片骨线绘型，在轴面上加厚叶片，在保角变换平面上修圆叶片头部，实现了离心泵叶轮的反问题设计. 正反问题进行迭代计算求解直至收敛，得到最终设计的叶轮. 采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和 SIMPLEC 算法，对离心泵叶轮内三维流场进行数值模拟，得到了叶轮内压力和速度分布. 模拟结果表明设计得到的叶轮内部压力分布非常均匀，流动稳定无分离，叶轮出口能量分布合理，所设计的叶轮具有优越的水力性能.

关键词：离心泵；叶轮；优化设计；数值模拟
中图分类号：S277.9；TH312 **文献标志码**：A **文章编号**：1674-8530(2010)04-0282-04

Optimal design and numerical simulation for impeller of centrifugal pump with medium-high specific speed

Tan Lei, *Cao Shuliang*
(State Key Laboratory of Hydroscience and Engineering, Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Based on continuity equation and motion equation of fluids, the flow field of quasi-three-dimensional direct problem was solved through iterative calculation for two kinds of stream surfaces. The distribution of axis plane velocity in medium-high specific speed centrifugal pump impeller was obtained. Based on the flow field of the direct problem, the inverse problem of centrifugal pump impeller was designed by drawing blade shape with point-by-point integration, thickening blade and smoothing leading edge of the blade through conformal mapping. The impeller was not finally accomplished until the iterative calculation of direct and inverse problems were converged. The three-dimensional flow fields of the centrifugal pump impeller designed were simulated with RNG $k-\varepsilon$ turbulent model and SIMPLEC algorithm. The distributions of pressure and velocity field inside the impeller were obtained. The simulation results show that pressure distribution inside the impeller designed here is well uniform. The flow inside impeller is steady without separation. The energy distribution at impeller outlet is reasonable. The impeller designed by this method has superior hydraulic performance.

Key words: centrifugal pump; impeller; optimal design; numerical simulation

水泵作为一种通用机械，将机械能转换成液体的动能和压能，在国民经济中占有非常重要的地位[1]. 叶轮是泵重要的过流和做功部件，其水力设计及叶片空间形状的确定非常关键. 近年来，许多学者对离心泵叶轮的设计进行了广泛而深入的研究，并取得一定成果[2-4]. 离心泵的叶轮设计一直采用

收稿日期：2010-01-25
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50776052)；国家863计划项目(2008AA05Z201)
作者简介：谭 磊(1984—)，男，湖南浏阳人，博士研究生(tanl06@mails.tsinghua.edu.cn)，主要从事流体机械设计研究.
曹树良(1955—)，男，甘肃会宁人，教授，博士生导师(caoshl@mails.tsinghua.edu.cn)，主要从事流体机械设计研究.

万方数据

基于一元理论方法，该方法仅满足流体的连续方程，而不满足流体的运动方程. 随着计算机技术的发展以及对泵内部流场研究的深入，建立在三维流场数值模拟基础上的水泵设计方法已广泛应用[5]，提高了水泵的设计效率，降低了设计成本.

文中提出一种正反问题迭代法设计离心泵叶轮，该方法弥补了传统一元理论设计方法中假定轴面速度沿过水断面线均布的缺陷，考虑到叶片形状的影响，通过迭代计算使设计的叶轮内部流动满足流体的连续方程和运动方程，并进行三维流场数值模拟，分析叶轮内压力、速度及能量分布，为叶轮的优化设计提供参考.

1 叶轮设计

1.1 基本参数

离心泵的设计参数为流量 $Q = 25\ \mathrm{m^3/h}$，扬程 $H = 7\ \mathrm{m}$，转速 $n = 1\ 450\ \mathrm{r/min}$，设计比转速 $n_s = 102$.

叶轮出口直径

$$D_2 = K_{D2}\sqrt{\frac{Q}{n}}, \tag{1}$$

其中 $K_{D2} = 9.35\left(\frac{n_s}{100}\right)^{-1/2}$.

叶轮出口宽度

$$b_2 = K_{b2}\sqrt[3]{\frac{Q}{n}}, \tag{2}$$

其中 $K_{b2} = 0.64\left(\frac{n_s}{100}\right)^{5/6}$.

一般认为，叶轮出口直径大，泵的扬程就高，有利于消除驼峰现象，但随着叶轮出口直径的增大，泵的效率将不断降低；叶轮出口宽度小，泵的扬程曲线就陡，不利于提高泵的性能，加工铸造困难.

1.2 设计方法

离心泵叶轮的一元理论设计方法求解轴面速度时，仅满足流体的连续方程，采用流线迭代法沿准正交线求解轴面速度梯度方程，即

$$\frac{\mathrm{d}C_m}{\mathrm{d}s} = P(s)C_m, \tag{3}$$

$$P(s) = \left(\frac{\mathrm{d}\alpha_1}{\mathrm{d}s}\sin\delta - \frac{\partial\alpha_1}{\partial l}\right)\frac{1}{\cos\delta} - \left(\frac{\sin\alpha_1}{r} + \frac{\partial\ln\psi}{\partial l}\right)\sin\delta, \tag{4}$$

式中 C_m 为轴面速度；s 为准正交线长度；r 为轴面投影半径；ψ 为排挤系数；l 为轴面流线长度；α_1 为轴面流线与铅垂线的夹角；δ 为准正交线法向与流线的夹角.

文中提出的叶轮设计正反问题迭代法求解轴面速度时，同时满足流体的连续方程和运动方程，通过两类相对流面的迭代计算[6]求解联立方程组：

$$\begin{cases}\nabla\cdot\boldsymbol{u} = 0,\\ \boldsymbol{u}(\nabla\times\boldsymbol{u}) = \nabla E,\end{cases} \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{u}$ 为流体运动的速度矢量；E 为单位质量流体的机械能.

一元理论设计方法计算得到轴面速度后，应用逐点积分法进行叶片骨线绘型，在轴面上加厚叶片，在保角变换平面上修圆叶片头部完成反问题设计[7-8]. 正反问题迭代设计方法的计算流程如图 1 所示，主要过程为 ① 基于一元理论设计方法设计初始叶轮；② 对初始叶轮进行正问题计算，得到满足流体运动方程和考虑空间叶片形状影响的轴面速度分布；③ 利用正问题计算得到的轴面流场，完成反问题设计；④ 对新设计得到的叶轮再次进行正问题计算，得到轴面速度分布；⑤ 重复③和④步骤，直至反问题设计中前后轴面截线位置差满足要求.

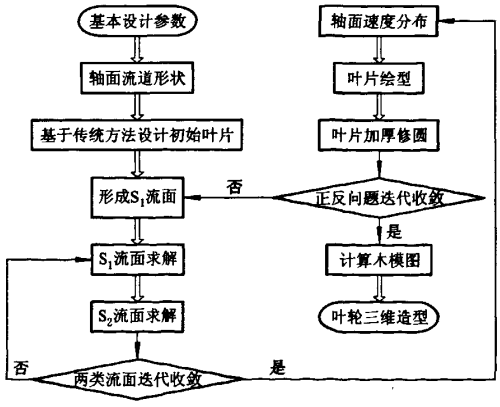


图 1 正反问题迭代计算流程

Fig. 1 Iterative calculation process of direct and inverse problems

叶片加厚中，为使叶片具有良好的水力性能，采用如图 2 所示的叶片厚度分布规律，图中 δ 为叶片厚度，L/L_0 为相对轴面流线长度.

叶片头部修圆时，按照加厚叶片时定义的坐标转换关系将叶片压力面和吸力面的轴面流线在圆柱展开面内展开，图 3 为各空间流线在圆柱展开面内的头部形状.

根据一元理论方法和正反问题迭代方法所设计

万方数据

的叶轮木模图如图 4 所示，正反问题迭代设计法设计的叶片形状具有明显的三维特征.

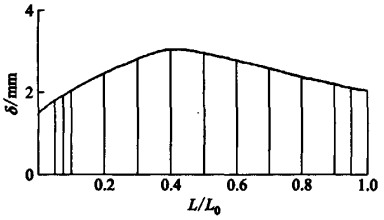


图 2　叶片厚度分布

Fig. 2　Distribution of blade thickness

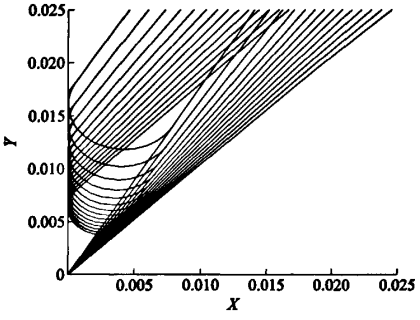


图 3　空间流线在圆柱展开面内的头部形状

Fig. 3　Head shape of spatial streamline in cylindrical surface

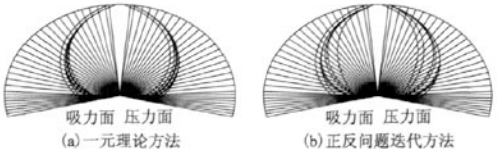


图 4　叶片木模图

Fig. 4　Pattern drawing of blade

2　数值模拟

2.1　控制方程及计算方法

控制方程采用三维定常雷诺时均 Navier – Stokes 方程，为更准确地预测旋转和曲率流动，采用在水力机械中得到广泛应用的 RNG $k-\varepsilon$ 双方程湍流模型[9-11].

方程的空间离散采用有限体积法，对流项采用二阶迎风格式，其他项采用中心差分格式离散. 基于 SIMPLEC 算法实现速度和压力分离迭代求解，不同的坐标系之间采用多参考坐标系模型实现耦合计算. 进口边界设定均匀来流，其速度值依据当前计算工况点的流量值确定. 出口边界设定压力出口，其他变量假定满足充分发展条件. 固体壁面设定不可滑移边界条件. 近壁区域属低雷诺数流动，采用标准壁面函数对湍流模型进行修正.

2.2　叶片表面压力分布

叶片表面压力分布如图 5 所示，叶轮进口处前盖板附近存在低压区，压力梯度比较大. 总体上，压力从进口到出口逐渐增大，叶片压力面的压力大于相应位置吸力面的压力.

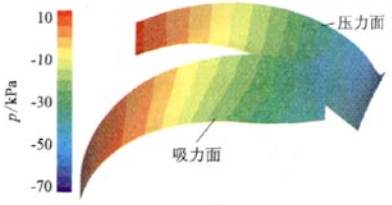


图 5　叶片表面压力分布

Fig. 5　Pressure distribution of blade surface

2.3　叶轮内压力分布

图 6 为叶轮内前盖板附近、中间截面和主板附近的压力分布. 压力从进口到出口逐渐增大，最大压力出现在叶轮出口处，同一半径上压力面一侧的压力大于吸力面一侧的压力. 叶片吸力面头部出现最小压力，是最易发生空化的部位. 叶轮流道出口附近，压力云图几乎是等半径递增，说明叶轮内部压力分布非常均匀.

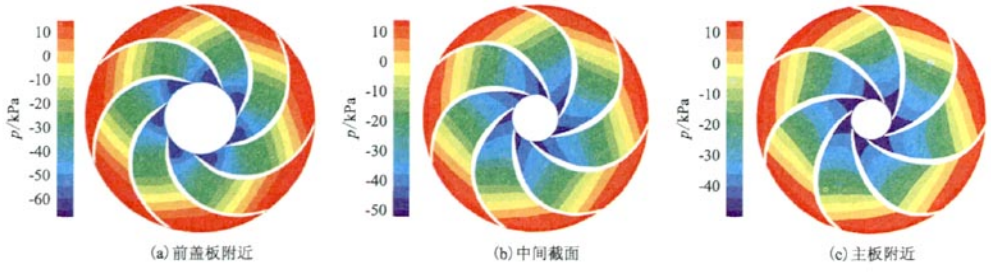


图 6　叶轮内压力分布

Fig. 6　Pressure distribution in impeller

万方数据

2.4 相对速度分布

叶轮内相对速度分布如图 7 所示. 相对速度从压力面到吸力面变化平缓,流动稳定. 在靠近叶片表面,相对速度变化的梯度较大,相对速度最低值出现在压力面附近,但没有明显的流动分离. 在两叶片间的中间位置,相对速度的流线与叶片弯曲形状一致,叶片对水流方向的控制能力强,说明正反问题迭代方法设计的叶片更适合流体的三维运动规律,具有更优的流动特性. 叶轮出口附近,沿圆周方向相对速度变化不大.

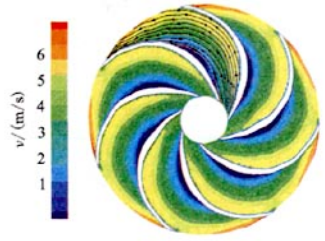


图 7 叶轮内相对速度分布

Fig. 7 Relative velocity distribution in impeller

2.5 叶轮出口总压分布

由于叶片旋转和曲率的影响,离心泵叶轮流道内往往会产生二次流,在叶轮出口形成"射流 - 尾迹"结构,定义流场总压系数为

$$C_p = \frac{p + 0.5\rho u^2}{0.5\rho v_2^2}, \qquad (6)$$

式中 p 为压力;v_2 为叶片出口轮缘位置的圆周速度;ρ 为水的密度.

图 8 为叶轮出口的总压分布. 可以看出,叶片吸力面附近存在一个低能区,但是范围很小,压力面一侧能量相对较高. 总体上,从吸力面到压力面能量分布均匀.



图 8 叶轮出口截面总压分布

Fig. 8 Total pressure distribution at impeller outlet

3 结 论

(1)正反问题迭代法设计的叶轮满足流体连续方程和运动方程,弥补了一元理论设计方法的不足,叶轮三维扭曲特征明显,更符合流体的真实流动情况. 设计得到的叶轮具有计算精度高、叶片表面光滑、数据齐全便于数控机床加工制造等特点.

(2)叶片表面压力分布合理,叶轮内部压力分布非常均匀,从进口到出口逐渐增大. 叶片对水流方向的控制能力强,叶轮内流动稳定无分离,叶轮出口能量分布均匀.

参考文献(References)

[1] 桂绍波,曹树良. 离心泵前置导叶预旋调节的理论分析[J]. 水泵技术,2008 (6):1 - 6.
Gui Shaobo, Cao Shuliang. Theory analysis on centrifugal pump with inlet guide vane[J]. *Pump Technology*, 2008 (6): 1 - 6. (in Chinese)

[2] 谈明高,刘厚林,王 勇,等. 叶轮外径对离心泵内流影响的 CFD 分析[J]. 排灌机械,2009,27(5):314 - 318.
Tan Minggao, Liu Houlin, Wang Yong, et al. CFD analysis on effects of impeller outlet diameter on flow field in centrifugal pump[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(5): 314 - 318. (in Chinese)

[3] 潘中永,谢 蓉,曹英杰,等. 叶片安放角变化规律对离心泵性能影响分析[J]. 排灌机械,2009,27(5):319 - 322.
Pan Zhongyong, Xie Rong, Cao Yingjie, et al. Analysis effects of blade angle on centrifugal pump performance [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(5): 319 - 322. (in Chinese)

[4] 牟介刚,李 思,郑水华,等. 离心泵叶轮出口盖板形状对水力性能的影响[J]. 排灌机械,2009,27(5):323 - 326.
Mou Jiegang, Li Si, Zheng Shuihua, et al. Relationship between hydraulic performance of centrifugal pump and shape of impeller shroud[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2009, 27(5): 323 - 326. (in Chinese)

[5] 杨从新,王 斌. 离心泵在启动阶段的瞬态三维数值模拟[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(2):122 - 126.
Yang Congxin, Wang Bin. 3D numerical simulation on transient characteristics of centrifugal pump during starting period[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2010, 28(2): 122 - 126. (in Chinese)

[6] 林 恺,曹树良,祝宝山,等. 用于高比转速混流泵设计的流场计算[J]. 清华大学学报:自然科学版,2008,48(2):219 - 223.
Lin Kai, Cao Shuliang, Zhu Baoshan, et al. Flow computations for the design of high specific speed mixed-flow pumps[J]. *Journal of Tsinghua University: Natural*

(下转第 290 页)

万方数据

locity and pressure fields[J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2005 (3): 244 - 255.

[6] Spence R, Amaral - Teixeira J. A CFD parametric study of geometrical variations on the pressure pulsations and performance characteristics of a centrifugal pump[J]. *Computers and Fluids*, 2009, 38(6): 1243 - 1257.

[7] Kitano M. Numerical study of unsteady flow in a centrifugal pump[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2005, 127 (2): 363 - 371.

[8] Yuan Shouqi, Ni Yongyan, Pan Zhongyong, et al. Unsteady turbulent simulation and pressure fluctuation analysis for centrifugal pumps[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 22 (1): 64 - 69.

[9] 关醒凡. 现代泵技术手册[M]. 北京: 宇航出版社, 1998: 532 - 542.

[10] Gulich J F. Disk friction losses of closed turbomachine impellers[J]. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2003, 68 (2): 87 - 95.

(责任编辑　陈建华)

(上接第 285 页)

Science Edition, 2008, 48(2): 219 - 223. (in Chinese)

[7] 曹树良, 梁　莉, 祝宝山, 等. 高比转速混流泵叶轮设计方法[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005, 26 (3): 185 - 188.
Cao Shuliang, Liang Li, Zhu Baoshan, et al. Design method for impeller of high specific speed mix-flow pump [J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 2005, 26(3): 185 - 188. (in Chinese)

[8] 张勤昭, 曹树良, 陆　力. 高比转速混流泵导叶设计计算[J]. 农业机械学报, 2008, 39(2): 73 - 76.
Zhang Qinzhao, Cao Shuliang, Lu Li. Research on the guide vane design of high specific speed mixed-flow pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2008, 39(2): 73 - 76. (in Chinese)

[9] Yakhot V, Orszag S A, Thangam S, et al. Development of turbulent models for shear flows by a double-expansion technique[J]. *Physics of Fluids A*, 1992, 4(7): 1510 - 1520.

[10] 桂绍波, 曹树良, 谭　磊, 等. 前置导叶预旋调节离心泵性能的数值预测与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 101 - 106.
Gui Shaobo, Cao Shuliang, Tan Lei, et al. Numerical simulation and experiment of inlet guide vane pre-whirl regulation for centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40 (12): 101 - 106. (in Chinese)

[11] 田　辉, 郭　涛, 孙秀玲, 等. 离心泵内部动静干涉作用的数值模拟[J]. 农业机械学报, 2009, 40(8): 92 - 95.
Tian Hui, Guo Tao, Sun Xiuling, et al. Numerical simulation of unsteady flow in a centrifugal pump[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(8): 92 - 95. (in Chinese)

(责任编辑　陈建华)

万方数据