

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.07.007

离心泵叶轮正反问题迭代设计方法*

谭磊 曹树良 桂绍波 祝宝山

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

【摘要】 基于流体的连续方程和运动方程,建立了 S_1 流面速度势函数方程和 S_2 流面速度梯度方程,并通过两类相对流面的迭代求解完成了离心泵内部流场的正问题计算。基于正问题计算得到的轴面流场,应用逐点积分法进行叶片绘型,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。利用正问题计算的轴面流场进行反问题设计,将反问题设计得到的叶轮进行正问题计算,正反问题迭代计算直至收敛,得到最终设计的叶轮。该方法反问题设计所需的轴面速度采用叶轮正问题计算的结果,弥补了传统设计方法中轴面速度根据一元假定给出的缺陷,设计得到的叶轮负荷均匀、效率高、抗空化性能好,同时具有设计计算精度高、叶片表面光滑、数据齐全、便于数控机床加工制造等特点。

关键词: 离心泵 叶轮 流场计算 设计

中图分类号: TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)07-0030-06

Centrifugal Pump Impeller Design by Using Direct Inverse Problem Iteration

Tan Lei Cao Shuliang Gui Shaobo Zhu Baoshan

(State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

Based on the continuity and motion equations of fluid, the velocity potential functional equation of the S_1 stream surface and the velocity gradient equation of the S_2 stream surface were established. The flow field of the direct problem was solved by calculating the two families of stream surfaces. Based on the flow field of the direct problem, the inverse problem of centrifugal pump in drawing blade shape by point-by-point integration, thickening blade and smoothing leading edge of the blade by conformal mapping was accomplished. By using the flow field of the direct problem calculated by the impeller of the inverse problem to design the impeller, and using the impeller of the inverse problem designed by the flow field of the direct problem to calculate the flow, the final impeller was designed when the direct and inverse problems was converged. This method which applies the meridional velocity of direct problem result to inverse problem, can make up the deficiency of traditional design method by using one-dimensional flow assumption. The final impeller can distribute load equally with the characters of high efficiency and excellent cavitation performance. This method can increase the efficiency of design work and the accuracy of calculating results. The data of the blade's surface is complete which is convenient for blade manufacturing by numerical control machine.

Key words Centrifugal pump, Impeller, Flow computations, Design

收稿日期: 2009-07-13 修回日期: 2009-11-25

* 国家自然科学基金资助项目(50776052)和国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2008AA05Z201)

作者简介: 谭磊, 博士生, 主要从事流体机械研究, E-mail: tanl06@mails.tsinghua.edu.cn

通讯作者: 曹树良, 教授, 博士生导师, 主要从事流体机械研究, E-mail: caoshl@mail.tsinghua.edu.cn

引言

提高离心泵的效率,对节能减排、实现可持续发展战略有重要的意义和工程实际应用价值^[1]。

本文基于流体的连续方程和运动方程,建立离心泵叶轮内 S_1 流面速度势函数方程和 S_2 流面速度梯度方程,并通过两类相对流面的迭代求解完成离心泵内部流场的正问题计算^[2]。基于正问题计算得到的轴面流场,应用逐点积分法进行叶片绘型,在轴面上加厚叶片,在保角变换平面上修圆叶片头部,实现离心泵叶轮的反问题设计。将上述正反问题计算进行迭代求解直至收敛,得到最终设计的叶轮形状和对应的流场。

1 正问题计算

1.1 S_1 流面速度势函数方程

假定流体为不可压、定常、无粘且 S_1 流面流动无旋,对 S_1 流面的连续方程和运动方程^[3]引入保角变换后,得到保角平面上(xy 平面)的势函数方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(h \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right) = 0 \\ h = h(y) \end{cases} \quad (1)$$

式中 h —— S_1 流面厚度

φ ——保角变换平面上的速度势函数

方程(1)存在泛函,在给定进出口边界条件、物面条件和周期性边界条件下,采用有限元法进行数值计算。

1.2 S_2 流面速度梯度方程

假定流体为不可压、定常、无粘且 S_2 流面流动轴对称,引入如图 1 所示的准正交线 l ,根据几何关系将 S_2 流面的连续方程、运动方程、正交方程、流线方程^[3]转化为沿任意准正交线 l 的轴面速度 v_m 的梯度方程为

$$\frac{dv_m}{dl} = Av_m + B + \frac{C}{v_m} \quad (2)$$

对叶片区

$$A = \frac{1}{1 + \left(r \frac{\partial \theta}{\partial m} \right)^2} \left[- \left(\frac{1}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial m} + \frac{\sin \gamma}{r} + \frac{1}{\cos \delta} \frac{d\gamma}{dl} \right) \cdot \left(\sin \delta + r^2 \frac{d\theta}{dl} \frac{\partial \theta}{\partial m} \right) + \frac{1}{\cos \gamma} \frac{\partial \gamma}{\partial m} \left(1 + r^2 \sin \delta \frac{d\theta}{dl} \frac{\partial \theta}{\partial m} \right) + \frac{d\theta}{dl} \frac{\partial}{\partial m} \left(r^2 \frac{\partial \theta}{\partial m} \right) - \frac{\partial \theta}{\partial m} \frac{d}{dl} \left(r^2 \frac{\partial \theta}{\partial m} \right) \right]$$

$$B = \frac{2\omega r}{1 + \left(r \frac{\partial \theta}{\partial m} \right)^2} \left(\frac{d\theta}{dl} \sin \gamma - \frac{\partial \theta}{\partial m} \cos(\gamma - \delta) \right)$$

$$C = \frac{2\omega r}{1 + \left(r \frac{\partial \theta}{\partial m} \right)^2} \frac{dE_r}{dl}$$

对非叶片区

$$A = \frac{1}{\cos \delta} \left(\frac{\partial \gamma}{\partial m} - \frac{d\gamma}{dl} \sin \delta \right) - \frac{\sin \gamma}{r} \sin \delta$$

$$B = 0 \quad C = - \frac{r^2 \omega + rv_3 d(rv_3)}{r^2} \frac{d}{dl} + \frac{dE_r}{dl}$$

式中 τ ——排挤系数 m ——轴面流线长度
 ω ——叶轮角速度 l ——准正交线长度
 v_3 ——绝对速度沿圆周方向的分量
 E_r ——单位质量流体相对运动的机械能
 γ ——轴面流线与铅垂线的夹角
 δ ——准正交线的法线与轴面流线之间夹角
 r, θ ——计算点对应的半径和圆心角,式中积分常数由流量条件确定

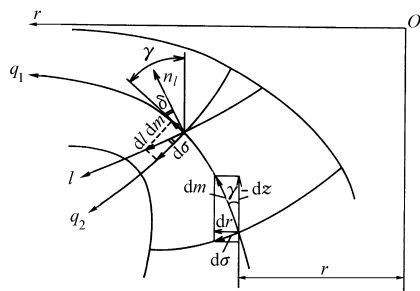


图 1 S_2 流面上正交曲线坐标系与准正交线 l

Fig. 1 Orthogonal curvilinear coordinate system and quasi-orthogonal line of the S_2 stream surface

1.3 S_1 与 S_2 流面迭代计算

S_1 与 S_2 流面之间的迭代计算过程如下: ①取传统反问题设计时计算得到的轴面流线为初始轴面流线,并以轴面流线为母线绕轴线旋转形成 S_1 回转面。②在保角变换平面上,采用有限元法求解 S_1 流面的速度势函数方程式(1),边界条件和流层厚度由设计参数和初始轴面流线确定。通过调整叶片出口环量使得叶片出口满足 Kutta 条件。③依据等流量原则选取每个 S_1 流面的中间流线构成新的 S_2 流面。④求解 S_2 流面沿准正交线的速度梯度方程式(2),反复迭代直至收敛。 S_2 流面上新的轴面流线按各子通道流量相等的条件确定。⑤取 S_2 流面计算得到的轴面流线形成新的 S_1 流面。重复上述②、③、④、⑤过程,直至 S_2 流面流场计算前后轴面流线位置差别满足给定要求。

图 2 给出了 S_2 流面初始轴面流线(实线)与 S_1, S_2 流面迭代收敛后轴面流线(虚线)的比较。从图中可看出,迭代计算前后,轴面流线在流道拐弯处有明显差别,其原因是传统一元理论轴面流场计算时未考虑流体的运动方程和叶片的作用。其次,在叶片进口区域,主盖板附近轴面流线调整的幅度远比前盖板大,说明流道的弯曲对流场有显著的影响,沿过水断面线轴面速度均布的假定不再成立。

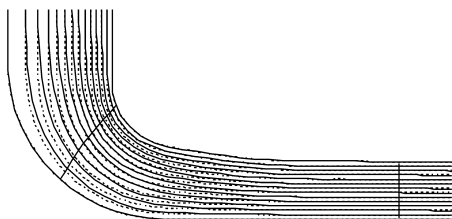


图2 迭代计算前后轴面流线的对比

Fig.2 Meridional streamline comparison of pre- and post iterative calculation

图3显示了 S_1 、 S_2 流面迭代计算得到的叶轮叶片区轴面速度(实线)和非叶片区轴面速度(虚线)沿轴面流线的分布规律(从主盖板到前盖板编号依次为 $K=1, 2, \dots, 14$)。与图4中基于传统一元理论计算得到的轴面速度分布相比:叶轮进口区域的轴面速度明显不均匀,轴面速度的最大值出现在前盖板流线的流道拐弯处;从主盖板到前盖板各条流线上的轴面速度分布规律也明显不同,主盖板附近的轴面速度沿轴面流线先减小后略有增大再单调递减,前盖板附近的轴面速度沿轴面流线先增大后减小;在叶片出口边,从主盖板到前盖板轴面速度大小基本相同,且分布相对均匀,而在叶片进口边,主盖板附近的轴面速度比前盖板附近的轴面速度要小很多,这与叶片的进口边位置有关。

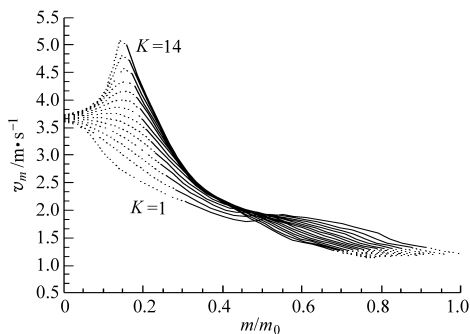


图3 正问题计算得到的轴面速度分布

Fig.3 Meridional velocity distribution of the direct problem

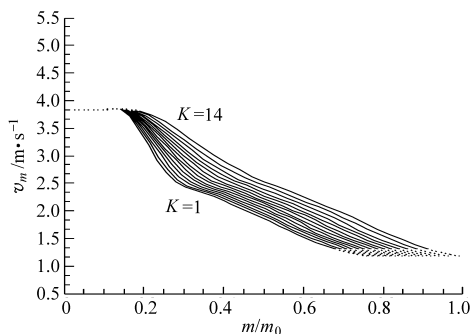


图4 基于一元理论计算得到的轴面速度分布

Fig.4 Meridional velocity distribution based on the one-dimensional flow assumption

的有无对轴面速度分布有很大影响。传统的一元理论设计中,通常假定轴面速度沿过水断面线均布,并不考虑满足流体的运动方程和叶片形状的影响,由此计算得到的轴面速度与实际流动相差甚远,因此,在进行反问题设计时,轴面速度的计算应考虑满足流体的运动方程和叶片的影响。

2 反问题设计

2.1 轴面速度

前已述及,传统的一元理论设计中,轴面速度的计算采用沿过水断面线均布假定,仅满足基于该假定的流体连续方程,而不满足流体运动方程。为克服传统方法的缺陷,本文采用上述正问题计算得到的叶轮轴面速度沿轴面流线分布 $v_m = f(m)$ (图3)进行反问题设计计算。

2.2 叶片骨线绘型

叶片骨线绘型是指通过给定叶片安放角、相对速度或速度矩三者之一沿轴面流线的分布规律,逐点积分骨线微分方程得到叶片骨线形状。积分形式的骨线方程为

$$\varphi = \int_0^m \frac{1}{r \tan \beta_e} dm \quad (3)$$

式中 φ ——叶片包角 β_e ——叶片安放角

离心泵叶轮内叶片安放角沿轴面流线一般按二次曲线规律分布,由基本设计参数确定叶片进出口安放角后,可得叶片安放角沿流线分布的二次函数为

$$\beta_e = \beta_{e1} + m(\beta_{e2} - \beta_{e1})/m_{out} + am(m - m_{out}) \quad (4)$$

式中 m_{out} ——叶片出口点对应的流线总长

β_{e1} ——叶片进口安放角

β_{e2} ——叶片出口安放角

a ——调整系数

离心泵叶轮设计中,通常叶片进口边和出口边分别在同一轴截面,所有流线对应的包角均相等。在设计计算中为方便快捷地实现这一要求,与传统方法不同,本文在给定包角的情况下,通过对式(3)和式(4)联立求解得到式(4)中系数 a 的值,从而得到满足叶片进出口边分别在同一轴面的要求的叶片安放角分布。由此得到的叶片轴面截线如图5中实线所示。

2.3 叶片加厚及头部修圆

2.3.1 叶片加厚

把叶片绘型后得到的轴面截线作为叶片正面,采用沿轴面单边加厚的方法,轴面流线方向的厚度为

$$S_m = T \sqrt{1 + \tan^2 \beta_e + \cot^2 \lambda} \quad (5)$$

式中 T ——计算点处叶片的真实厚度

由以上分析可知,流体运动方程的满足和叶片

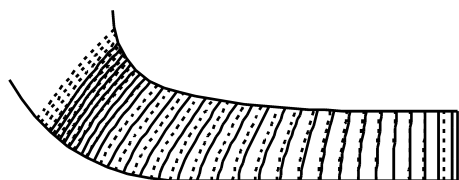


图 5 叶片轴面截线

Fig. 5 Meridional transversal of the blade

λ ——计算点处轴面流线与轴面截线的夹角
 加厚计算时,叶片真实厚度沿轴面流线的分布规律 $T=f(m)$ 由设计者给定;叶片安放角 β_0 在叶片绘型时已根据速度三角形算出,为已知值; λ 可根据轴面流线与轴面截线在计算点的几何关系式算出。

按式(5)计算出 S_m ,在轴面流线上截取长度为 S_m 所确定的点即为对应的叶片背面在轴面流线上的位置,光滑连接同一轴面截线叶片背面的各点,即可得到叶片背面的轴面截线,如图 5 中虚线所示。

2.3.2 头部修圆

采用保角变换法^[4-5],在保角变换平面内对叶片头部进行修圆。叶片头部修圆后得到的三维造型如图 6 所示。

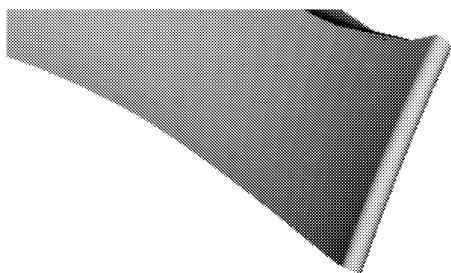


图 6 叶片头部修圆后的三维造型

Fig. 6 3-D modeling after smoothing leading edge of the blade

2.4 叶片木模图

用一组垂直于叶轮轴线的等间距平面去截叶片,得到叶片木模图,如图 7 所示。

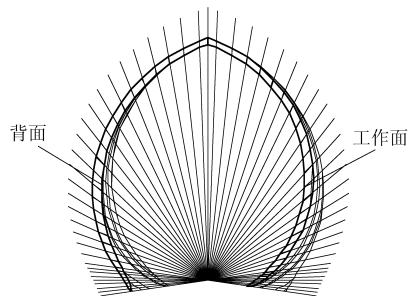


图 7 叶片木模图

Fig. 7 Pattern drawing of the blade

3 正反问题迭代法设计叶片形状

3.1 正反问题迭代过程

图 8 为正反问题迭代计算的流程图,主要迭代

过程如下:①基于传统方法设计初始叶轮。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,给定叶片包角,采用逐点积分法进行叶片绘型、在轴面上加厚、对叶片头部修圆,得到新叶轮的三维造型。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。重复上述③、④过程,直至反问题设计中前后轴面截线位置差别满足给定要求。

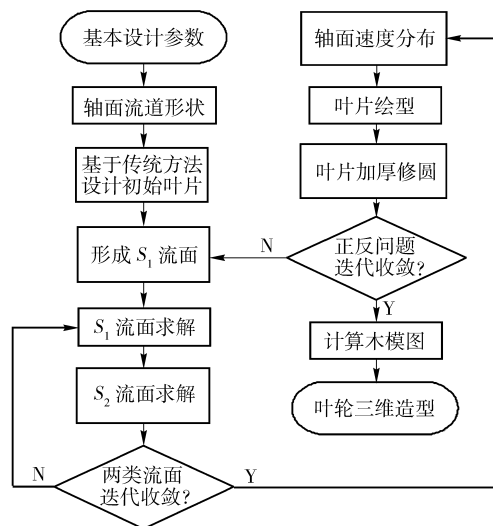


图 8 正反问题迭代计算流程

Fig. 8 Process of the iterative calculation

3.2 算例

按上述方法对一离心泵叶轮进行设计,设计参数为:流量 $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 7 \text{ m}$,转速 $n = 1450 \text{ r/min}$ 。正问题 S_1 、 S_2 流面迭代计算中选取 14 个 S_1 流面和 1 个中间 S_2 流面, S_1 和 S_2 流面相互迭代 10 次后, S_2 流面前后两次计算得到的轴面流线基本重合,正问题迭代收敛。反问题计算中,保持原始轴面流道几何形状、叶片包角、叶片进出口边位置不变,仅考虑传统的一元理论方法对叶片造型的影响。正反问题迭代计算 20 次后,叶片轴面截线基本重合,满足给定的要求,正反问题迭代收敛。在常规 PC 机上,整个计算过程约需 40 min,计算效率高,收敛性好。

迭代计算收敛后,最终设计得到的叶轮三维示意图如图 9 所示。

3.3 计算结果分析

3.3.1 叶片安放角分布

反问题设计计算中,叶片安放角是最重要的设计参数,其分布规律决定了叶片负荷的大小并影响叶道形状、叶轮内的速度分布,进而影响叶轮二次流损失、分离损失、边界层损失、尾流损失等。根据传统一元理论,初始叶轮设计给定的叶片安放角分布

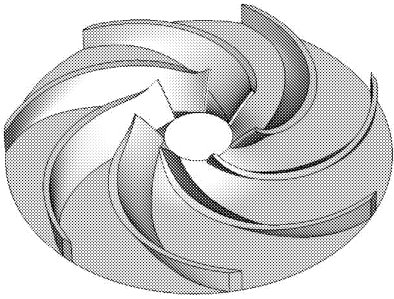


图9 正反问题迭代收敛后的叶轮三维示意图

Fig. 9 Impeller's 3-D modeling after iterative calculation

如图10所示,沿各条轴面流线的分布规律大致相同,从叶片头部到尾部逐渐减小;在叶片进口处叶片安放角从主盖板到前盖板逐渐减小,在出口处基本相同。正反问题迭代计算收敛后叶片安放角分布如图11所示,叶片安放角沿轴面流线的变化规律从主盖板附近的抛物线分布过渡到前盖板附近的线性分布;叶片安放角在叶片进口处从主盖板到前盖板逐渐增大,而在出口处从主盖板到前盖板逐渐减小。对比图10和图11,叶片安放角在叶片进口处相差比较大,在出口处基本一致,这与各自对应的轴面速度沿轴面流线的分布规律是吻合的;正反问题迭代计算收敛后的叶片形状具有明显三维特征,更适合流体的三维运动规律,具有更优的流动特性。

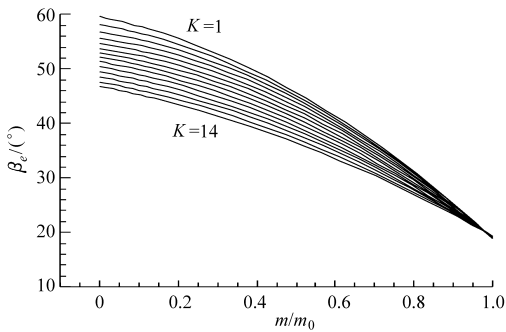


图10 初始叶轮设计给定的叶片安放角分布

Fig. 10 Blade angle distribution of the initial impeller

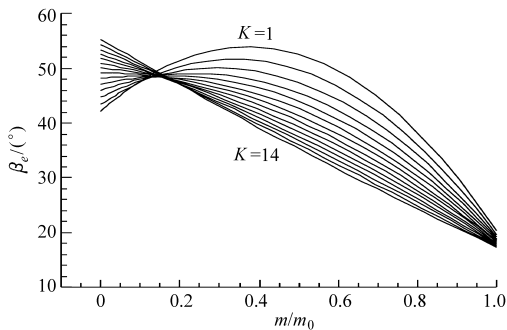


图11 正反问题迭代计算收敛后叶片安放角分布

Fig. 11 Blade angle distribution after iterative calculation

3.3.2 轴面速度分布

初始叶轮正问题计算和正反问题迭代计算收敛后得到的轴面速度分布如图12和图13所示。两图

中,非叶片区的轴面速度沿轴面流线分布基本相同,而叶片区中,由于迭代计算前后得到的叶片形状不同,对应的轴面速度沿轴面流线分布也不同:初始叶轮正问题计算得到的轴面速度最小值出现在前盖板附近叶片出口处,各条流线上的轴面速度变化规律比较接近;正反问题迭代计算收敛后得到的轴面速度最小值出现在主盖板附近靠近叶片进口处,各条流线上的轴面速度变化规律相差较大。离心泵叶轮中,流道在叶片进口处急剧转弯,造成水流冲击,在主盖板附近形成高压区,从而导致轴面速度有最小值。因此,正反问题迭代计算收敛后得到的轴面速度分布更能反映流动的真实情况,将其进行反问题计算的依据是可取的。

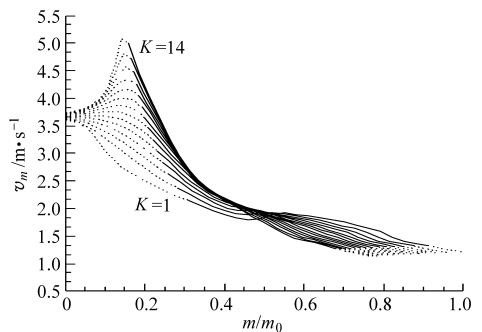


图12 初始叶轮正问题计算得到的轴面速度分布

Fig. 12 Meridional velocity distribution of the initial impeller

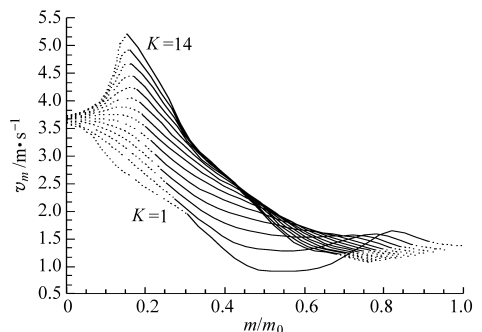


图13 正反问题迭代计算收敛后得到的轴面速度分布

Fig. 13 Meridional velocity distribution after iterative calculation

3.3.3 环量分布

初始叶轮正问题计算和正反问题迭代计算收敛后得到的叶片区相对环量 $C_u r$ (以前盖板叶片出口环量为基准)分布如图14和图15所示。两图中,各条轴面流线上环量的变化规律基本一致。图14中初始叶轮主盖板流线上的环量明显低于其他流线上的环量,在出口处其值约为前盖板流线上的80%,说明主盖板附近的叶型转换能量的能力明显偏低。因此,传统方法设计得到的叶轮不能满足等环量出口的要求。图15中正反问题迭代计算收敛后叶片的负荷明显分布均匀,在所有轴面流线上,其值差别

不大,该分布有利于减小叶轮内的损失;叶片进口处的环量梯度非常小,将大大提高叶轮的抗空化性能;叶片出口处环量基本相等,满足水力机械基本方程的要求,较传统方法有明显的优越性。

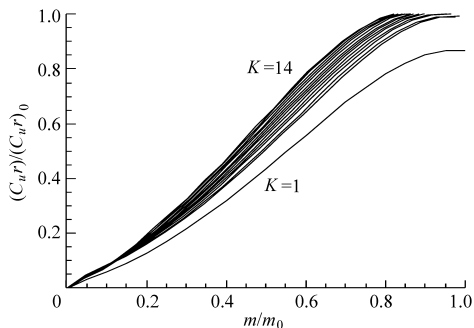


图 14 初始叶轮正问题计算得到的相对环量分布

Fig. 14 Relative circulation distribution of the initial impeller

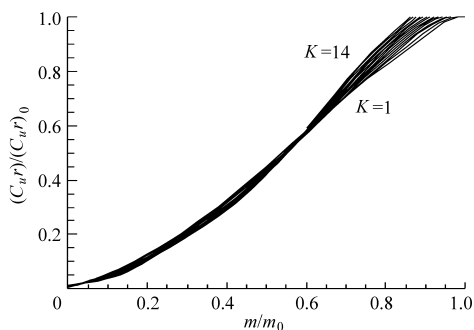


图 15 正反问题迭代计算收敛后得到的相对环量分布

Fig. 15 Relative circulation distribution after iterative calculation

4 性能预估

基于雷诺平均的 Navier - Stokes 方程和 $k - \varepsilon$ 紊流模型,应用数值方法对初始叶轮和正反问题迭代计算收敛后的叶轮进行了内部流场分析和水力效率预估。叶轮的水力效率为

$$\eta_h = \frac{H}{H_t} \times 100\% \quad (6)$$

其中

$$H = \left[\sum_{i=1}^{n_o} \left(\frac{p_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} \right) v_i A_i / \sum_{i=1}^{n_o} v_i A_i \right]_{out} - \left[\sum_{i=1}^{n_i} \left(\frac{p_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} \right) v_i A_i / \sum_{i=1}^{n_i} v_i A_i \right]_{in}$$

式中 H ——叶轮实际扬程

ρ ——水的密度

n_i, n_o ——计算域进、出口断面节点数

p_i ——压力值 v_i ——绝对速度

A_i ——进出口断面上控制单元面积

叶轮理论扬程计算式为

$$H_t = \frac{M\omega}{\rho g Q} \quad (7)$$

式中 M ——水流对旋转轴的力矩

由此计算得到初始叶轮的水力效率为 81.5%,正反问题迭代计算收敛后得到叶轮的水力效率为 82.7%,后者效率明显得到了提高。

5 结论

基于流体连续方程和运动方程,通过两类相对流面的迭代求解得到了离心泵叶轮内轴面速度分布,给出了离心泵叶轮反问题设计的基本理论和方法,在此基础上,提出了离心泵叶轮正反问题迭代设计方法。根据给定的设计参数,应用该方法完成了离心泵叶轮的设计,分析了叶轮内叶片安放角、轴面速度、环量的分布规律。最后,对初始叶轮和正反问题迭代计算收敛后得到的叶轮进行了水力效率预估。研究表明:

(1) 两类相对流面迭代求解中, S_1 流面采用有限元法, S_2 流面采用流线曲率法,可使迭代计算过程变得更为简便,计算效率高、收敛性好。

(2) 反问题设计中,采用逐点积分法绘制叶型骨线,在轴面上加厚叶片,在保角平面内对叶片头部修圆,得到的叶片具有表面光滑、叶片表面数据齐全、便于数控机床加工制造等特点。

(3) 与初始叶轮相比,正反问题迭代计算收敛后得到的叶轮叶片安放角分布更合理;轴面速度的分布更能反映流动的真实情况;叶片出口处环量能很好地满足水力机械基本方程的要求,负荷在叶片区分布较均匀,进口处的负荷梯度小,有利于减小叶轮的损失,提高抗空化性能。

(4) 采用数值计算方法对叶轮进行流场分析,预估了水力效率。在轴面流道几何形状、叶片包角和叶片进出口边位置不变的条件下,正反问题迭代计算收敛后得到的叶轮比初始叶轮效率提高 1.2%,表明本文提出的正反问题迭代设计离心泵叶轮的方法在理论上更加完善,能设计出效率更高的叶轮。

参 考 文 献

- 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.
- Wu C H. A general theory of three-dimensional flow in subsonic and supersonic turbo machines of axial, radial and mixed-flow types[J]. Trans. of ASME,1952(11):360~380.

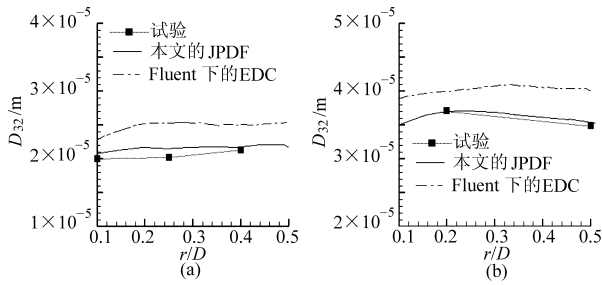


图5 试验和数值模拟所得的喷雾液滴 D_{32} 分布

Fig. 5 Radial profiles of D_{32} at two axial stations for modeling and experiment
(a) $x/D = 5$ (b) $x/D = 15$

相互干扰已比较显著,从而在一定程度上阻碍了液滴的进一步蒸发,从而在该区域实际温度低于本模型数值模拟预测温度。

4 结束语

本文将 JPDF 方法应用于两相湍流燃烧,建立

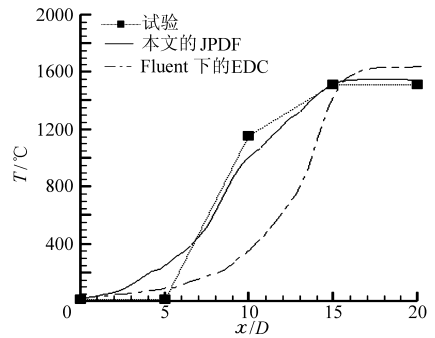


图6 试验和数值模拟所得轴线上($r/D = 0$)温度分布

Fig. 6 Centerline flame temperature for modeling and experiment ($r/D = 0$)

了两相喷雾湍流反应流的 JPDF 数学模型,并结合小火焰面模型开发了相应的数值代码。通过与已建立的试验数据库中试验数据的反复对比分析,对该模型做出了反复的修正,最终数值模拟结果和试验结果的比较,证明了本模型在一定程度上的准确性。

参 考 文 献

- 1 Pope S B. PDF methods for turbulent reactive flows[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1985, 11(2): 119 ~ 192.
- 2 Richard F, Ralph P, Gary C. CFD analyses of complex flows [J]. Computers and Engineering, 2005(29): 2 386 ~ 2 403.
- 3 Bilger R W, Pope S B, Bray K N C, et al. Paradigms in turbulent combustion research[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2005, 30(1): 21 ~ 42.
- 4 Zhu M, Bray K N C, Rumberg O, et al. PDF transport equations for two-phase reactive flows and sprays [J]. Combustion and Flame, 2000, 122(3): 327 ~ 338.
- 5 Bertrand Naud. PDF modeling of turbulent sprays and flames using a particle stochastic approach[D]. Delft: Delft University of Technology, 2003.
- 6 Ge H, Gutheil E. Simulation of a turbulent spray flame using coupled PDF[J]. Combustion and Flame, 2008, 153(1 ~ 2): 173 ~ 185.
- 7 Chen Yungcheng, Starner Sten H, Masri Assaad R. Further study of spray combustion in a simple turbulent jet flow[C] // 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, 2006.
- 8 杜宝国, 隆武强, 冯立岩, 等. 柴油机内锥碰撞式伞状喷雾燃烧系统性能试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(1): 25 ~ 29.
Du Baoguo, Long Wuqiang, Feng Liyan, et al. Conical spray combustion system of diesel engine with inner conical-face impingement mode[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(1): 25 ~ 29. (in Chinese)

(上接第 35 页)

- 3 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, 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, 2008, 48(2): 219 ~ 223. (in Chinese)
- 4 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, 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, 2005, 26(3): 185 ~ 188. (in Chinese)
- 5 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 Qinzha, 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)