扭曲叶片离心泵叶轮内三维湍流数值模拟

付　强，朱荣生，李维斌
（江苏大学流体机械工程技术研究中心，江苏　镇江　212013）

摘　要：为提高离心泵的优化设计水平，介绍了计算的控制方程和叶轮通道网格划分方法，采用压强连接的隐式修正SIMPLEC算法，结合雷诺平均法的RNG κ-ε模型和壁面函数法，应用商业CFD软件FLUENT，对叶轮内部的三维湍流流动进行了计算。分析了具有扭曲叶片的离心泵叶轮叶型对流速分布、压力分布和泵性能的影响，揭示了叶轮内流动规律。

关键词：低比速离心泵；扭曲叶片；三维湍流；数值模拟
中图分类号：TH311　　文献标识码：A　　文章编号：1005-6254(2005)03-0014-03

0　引言

低比速离心泵具有流量小、扬程高的特点，广泛用于农业排灌、城市供水、锅炉给水、矿山、石油和化工等领域，需求量极大。在叶轮设计时，受制造工艺和生产成本等因素的影响，低比速离心泵通常采用圆柱形式叶片。运行中，圆柱叶片形式的叶轮会发生汽蚀和运行不稳定等现象，使叶轮遭受破坏，缩短使用寿命，也影响工作性能并妨碍其正常运行。因此，将圆柱叶片改进为更加符合离心泵叶轮内流场特点的空间扭曲叶片，对提高低比速离心泵优化设计水平，解决困扰其正常运行的难题就显得尤为重要。

由于国内外对于叶轮内部真实的流动机理尚不清楚，在叶轮优化设计中往往依靠经验来选取，给叶轮的设计带来了一定的难度。同时这种基于经验的传统设计也需要繁琐的模型试验，大大增加了设计成本，制约离心泵的进一步发展。近年来，CFD在离心泵叶轮内部流场计算中应用日益广泛，成为优化设计的重要工具。本文旨在通过数值模拟稳定工作状态下工质为清水低比速离心泵叶轮内部的流场分布情况，揭示其叶轮内部流动规律，为高性能低比速离心泵的优化设计提供基础信息。

1　控制方程

低比速离心泵稳定运行中叶轮内部近似为三维定常不可压湍流流动，存在尾涡和二次流等现象。考虑Boussrnesq涡粘性假设，采用适应强旋转流和带弯曲壁面流的RNG $k-e$ 湍流模型，建立控制方程如下：

连续性方程：

$$\frac{\partial(ru_i)}{\partial x_i}=0 \tag{1}$$

动量方程：

$$\frac{\partial(ru_iu_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial P^*}{\partial x_i}+\frac{\partial\left[m_e\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right]}{\partial x_j}-2e_{ijk}^{k}w_ju_k \tag{2}$$

式中，ρ 为流体密度；x_j 分别代表各坐标分量 x，y，z；u_i 为平均相对速度分量 u，v，w；P^* 为包括了紊动能 k 和离心力的折算压力；ω_j 为角速度；ε_{ijk} 为张量；μ_e 为等效粘性系数，分子粘性系数 μ 与Boussrnesq涡粘性系数 μ_t 之和。

$$m=m+m_t \tag{3}$$

$$m_t=rC_m\frac{k^2}{e} \tag{4}$$

$$\frac{\partial(rkm_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[a_km_e\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+re \tag{5}$$

$$\frac{\partial(reu_i)}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[a_em_e\frac{\partial e}{\partial x_j}\right]+\frac{C_{1e}^*}{k}G_k-C_{2e}r\frac{e^2}{k} \tag{6}$$

$$C_{1e}^*=C_{1e}-\left(\frac{1-h/h_0}{1+bh^3}\right) \tag{7}$$

作者简介：付强（1975-），男，黑龙江宝清人，硕士研究生，主要从事泵的优化设计。

万方数据

$$h=\left(2E_{ij}\times E_{ij}\right)^{1/2}\frac{k}{e} \tag{8}$$

$$E_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \tag{9}$$

式中,$C_m=0.00845$;$a_k=a_e=1.39$;$C_{1e}=1.42$;$C_{2e}=1.68$;$h_0=4.377$;$b=0.012$。

2 网格生成

因离心泵叶片弯曲严重,几何形状复杂,所以采用适用性强,且对具有复杂边界模型特别有效的非结构化混合网格。叶轮流道三维几何实体模型是在专业三维CAD软件Pro/ENGINEER下生成的,再调入FLUENT前处理器GAMBIT进行网格划分。网格划分时,壁面采用三角形网格,在计算区域内采用四面体网格,共有网格节点数238886个,扭曲叶片形状见图1。

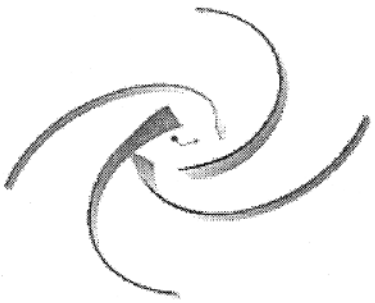


图1 扭曲叶片

3 边界条件

给定进口处相对速度,压力在进口截面上设为均匀分布,湍动能k和湍动能耗散率e分别由下列经验公式确定。

$$k=\frac{3}{2}\left(\bar{u}_{ref}T_i\right)^2;\ e=C_m^{3/4}\frac{k^{2/3}}{l};\ l=0.07L$$

式中,$\bar{u}_{ref}$为进口处的平均速度;L为特征长度,按等效管径D计算。$L=0.5D$。

出口处的速度由上游网格点的速度推得,再根据质量守恒定律按比例修正,其它物理量取为上游一层网格点的值。

固壁上速度满足无滑移条件,压力取第二类边界条件,湍流壁面采用壁面函数边界条件。

稳定状态下,叶轮以恒定的角速度旋转,建立与叶轮同步旋转且与轴线重合的旋转直角坐标系(x,y,z),将直角坐标系(x,y,z)固定在叶轮上,并绕着z轴以恒定角速度旋转。

4 数值计算结果及分析

根据扭曲叶片流道几何特点,考虑各物理量在相邻节点间分布曲线的曲率影响,采用压强连接的隐式修正SIMPLEC算法,同时应用二阶迎风差分格式分离对流项,依据上述边界条件进行空间扭曲叶片离心泵叶轮内流场计算,计算结果见图2~6。

4.1 速度矢量

由图2可见,计算得到叶轮内总的流动趋势良好,没有出现大的流动分离。在叶轮的压力侧和前盖板处速度较小,这与叶轮内流情况相吻合。由图还可以看到冲击现象,因为采用空间叶片形式,冲击幅度不大,有效的降低了运行噪音,同时也提高了使用寿命。

4.2 压力分布

由图3~6可以看到,进口到出口,总压和静压均持续上升,压力分布合理。叶片压力面入口靠近前盖板的一小块区域压力为负值,与实际发生汽蚀的低压区相符,同时也发现低压区较小,说明空间叶片对改善低比速离心泵汽蚀性能具有一定作用。

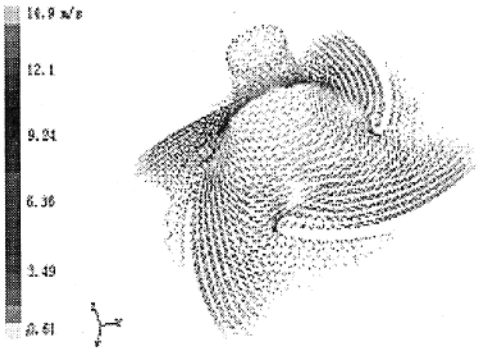


图2 后盖板叶片进口相对速度矢量分布

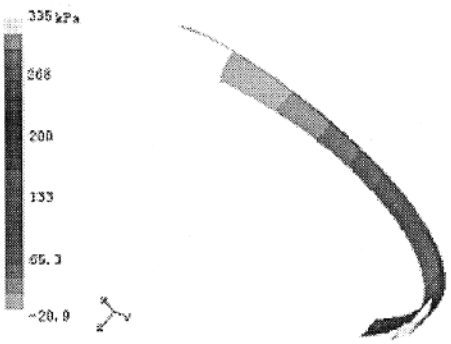


图3 叶片总压分布

万方数据

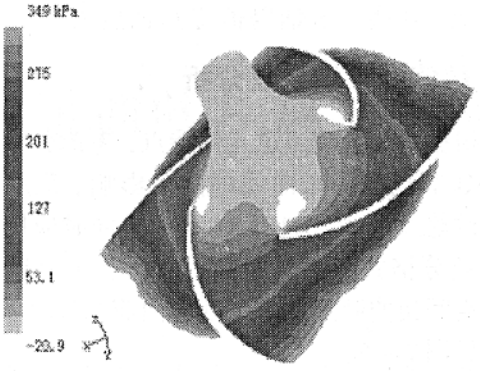


图4　后盖板叶片进口相对速度矢量分布

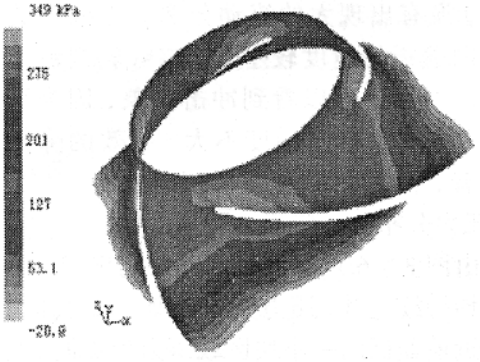


图5　前盖板叶片进口总压分布

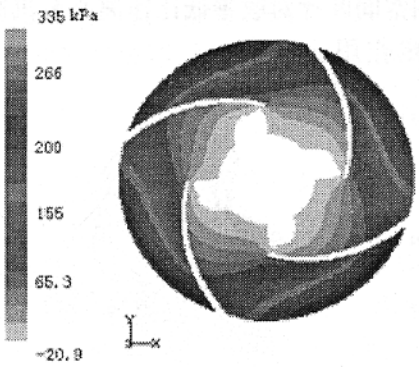


图 6　Z=15mm 平面叶片进口总压分布

5　结论

通过对空间叶片离心泵叶轮的模拟，根据三维速度矢量和压力分布，可得出如下结论：

1）利用 CFD 技术对具有空间扭曲叶片的离心泵叶轮进行三维湍流数值模拟，得到的流场结果与实际相吻合，计算结果能够有效反映叶轮内的流动状态，同时又揭示了叶轮内部流动的特殊规律和流动机理，弥补了试验方法没有理论依据的不足。

2）在离心泵叶轮设计时，基于传统设计思想的圆柱叶片通常会发生汽蚀和运行不稳定等情况，而通过计算发现扭曲叶片可以提高离心泵的汽蚀性能和优化设计水平。

综上所述，将 CFD 技术与传统的实验方法相结合，应用于叶轮优化设计当中，对提高离心泵的各项性能将起到一定的参考价值。

参考文献：

[1] 袁寿其．低比速离心泵理论与设计[M]．北京：机械工业出版社，2001．

[2] 王福军．计算流体动力学分析[M]．北京：清华大学出版社，2004．

[3] 关醒凡．现代泵技术手册[M]．北京：宇航出版社，1995．

[4] 袁寿其，陈池，郑铭．无过载离心泵叶轮内三维不可压湍流场计算[J]．机械工程学报，2000，36(5)：31~34．

[5] 刘胜柱，等．离心泵叶轮内的网格生成与计算流体动力学分析[J]．农业工程学报，2004(9)：78~81．

[6] 李海锋，吴玉林，赵志妹．利用三维紊流数值模拟进行离心叶轮设计比较[J]．流体机械，2001(9)：18~21．

Numerical Simulation of 3D Turbulent Flow in the Centrifugal Pump with Twisted-blade

FU Qiang，ZHU Rong-sheng，LI Wei-bin

（Jiangsu University Engineering Research Center For Fluid Machinery，Zhenjiang，Jiangsu 212013，China）

Abstract: According to peculiarities of the geometry of the centrifugal pump impeller and its inner flow field, method for the grid generation impeller's passage and the governing equations for calculation of flow field are briefly represented. Based on RANS Equation, SIMPLEC algorithm, the RNG K-ε model and wall function, the 3-D turbulent flow in the impeller is studied. Results show that the distorted blade profile of centrifugal pump can exert much influence on pressure distribution, velocity distribution and pump扭 performance. This method can be use to improve level of optimization design for the centrifugal pump and check its internal flow field condition.

Key words: Low Specific Speed Centrifugal Pump; Twisted-blade; 3D turbulent flow; Numerical Simulation

万方数据