

混流泵非均匀轮缘间隙流场数值计算

李伟 季磊磊 施卫东 张扬 周岭

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

摘要: 为了研究非均匀轮缘间隙下混流泵叶轮内部流场, 基于 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 采用 SIMPLEC 算法对混流泵在 0、0.3、0.5 mm 偏心距下的内流场进行数值模拟, 对比分析了有、无偏心状态下混流泵外特性、叶片表面静压分布、周向压力和湍动能分布以及轮缘间隙流场的流线分布。研究表明, 数值模拟采用的网格类型、湍流模型能够较为准确地计算混流泵的内部流动特性。0.5 mm 偏心距下混流泵扬程最大下降了 9.8%, 设计工况点效率下降了 4.3%, 高效点向大流量偏移; 偏心对混流泵叶轮进出口压力分布影响较大, 靠近偏心一侧的叶片出口轮缘处压力分布呈现沿径向梯度分布趋势且周向压力分布严重不均; 非均匀轮缘间隙严重干扰了端壁区流场, 使轮缘间隙流场的泄漏流、二次流等不稳定流动现象明显增多, 湍动能耗散随着偏心距增大不断加剧, 水力损失增大, 是造成效率下降的主要因素。

关键词: 混流泵; 偏心距; 压力分布; 湍动能; 数值计算

中图分类号: TH313 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)10-0066-07

Numerical Calculation of Internal Flow Field in Mixed-flow Pump with Non-uniform Tip Clearance

Li Wei Ji Leilei Shi Weidong Zhang Yang Zhou Ling

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

Abstract: In order to study the impeller internal flow field of the mixed-flow pump with non-uniform tip clearance, the internal flow field in mixed-flow pump with two eccentricities which were 0, 0.3 mm and 0.5 mm was numerically simulated based on the standard RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and SIMPLE algorithm. Besides, the external characteristic, static pressure distribution on blade surface, tangential pressure, turbulent kinetic energy distribution and streamline distribution near the tip clearance of mixed-flow pump were compared under the conditions with or without eccentricity. The results showed that the type of numerical simulation grid and the turbulence model can accurately predict the internal flow characteristics of the mixed-flow pump. The maximum decrease of head in mixed-flow pump was 9.8%, the efficiency at the design point in mixed-flow pump was dropped by 4.3% and the high efficient point was swung to the large flow rate when eccentricity e was 0.5 mm. The pressure distribution of inlet and outlet of mixed-flow pump impeller was affected greatly by eccentric, and pressure distribution near the eccentric side of the blade outlet flange showed a trend which was gradient distribution along the radial and circumferential pressure distribution was greatly imbalanced. Non-uniform tip clearance seriously interfered with the end wall region flow, which led to the unsteady flow phenomenon of the leakage flow and the secondary flow in the flow field of the tip clearance was obviously increased, the turbulent kinetic energy dissipation was increased with the increase of eccentricity and hydraulic loss, which was the main

收稿日期: 2016-02-14 修回日期: 2016-05-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409127, 51579118, 51679111)、江苏省重点研发计划项目(BE2015119, BE2015001-4)、江苏省自然科学基金项目(BK20161472)、江苏省六大人才高峰项目(HYZB-002)、镇江市农业支撑项目(NY2013031)、江苏高校优势学科建设工程项目和江苏大学高级专业人才科研启动基金项目(13JDC105)

作者简介: 李伟(1979—), 副研究员, 博士, 主要从事流体机械与工程研究, E-mail: lwjiangda@ujs.edu.cn

factor resulting in a decline in the efficiency of mixed-flow pump. The research results had reference meaning for revealing the internal flow characteristics of impeller in mixed-flow pump with non-uniform tip clearance.

Key words: mixed-flow pump; eccentricity; pressure distribution; turbulence energy; numerical calculation

引言

混流泵广泛应用于工农业生产的各个领域,在国民经济建设中发挥着重要作用^[1-3]。混流泵转子部件在加工时,由于质量控制不好以及制造误差、装配误差、材料不均匀等原因,不可避免地存在质量偏心^[4-5];同时,由于腐蚀、磨损、介质结垢以及转子受疲劳力的作用,叶轮转子部件在局部损坏、脱落后也会出现偏心^[6-8]。偏心使得混流泵轮缘间隙流场分布不均并导致混流泵在高速运行时出现轴系不平衡的状况^[9-12]。因此,探索偏心对混流泵内外特性影响,研究非均匀轮缘间隙下混流泵叶轮内部流动特性非常有必要。

目前,关于旋转机械的偏心研究已取得了一些成果。KANG 等^[13]研究了一个预测非均匀轮缘间隙扰动流的预测模型,发现轮缘间隙改变了流道面积并合成了沿圆周方向的轴向速度。HATA 等^[14]实验研究了不同叶顶间隙下离心式叶轮偏心旋转过程中的流体力,对端壁区的非稳态压力进行了测量并基于 CFD 分析了泵内部流场。邓啟家等^[15]通过数值模拟方法研究了大流量工况下,平均叶顶间隙高度比分别为 0.7%、1.3%、1.9% 时转子偏心对涡轮性能的影响,表明转子偏心会减小涡轮进口流量,还会影响涡轮等熵效率和总功率。黄来等^[16]利用气流力模型和非稳态油膜力模型对转子运动的动力学特性采用数值模拟技术进行了研究,表明在质量偏心率增大时,在油膜力、气流力和不平衡偏心质量的影响下,系统由概周期运动进入混沌状态。王鹏等^[17]通过模拟分别获得了原型泵和不同偏心距下核主泵外特性、中心截面的静压分布及作用在蜗壳和叶轮上的径向力特性,表明核主泵在设计点运行时径向力最小但不为零,偏心 10 mm 左右时所受径向力最小。在混流泵研究方面,大多数学者是研究均匀轮缘间隙下的内部流动特性,基本不考虑转子存在质量偏心的影响。马桂超等^[18]通过数值模拟,研究了不同流量工况下叶片表面静压分布及各断面翼型附近的相对流速分布。闫利宇^[19]通过数值分析研究了设计工况下的叶片表面的静压变化,并进行了静力学分析。其他学者^[20-24]从混流泵结构等因素探讨了影响混流泵内部流动状态的原因。

本文以导叶式混流泵^[25]为研究对象,基于数值模拟方法研究偏心距 e 为 0、0.3、0.5 mm 下混流泵内部流动特性,探讨非均匀轮缘间隙对混流泵内部流场的影响,为揭示非均匀轮缘间隙诱发的流动失稳提供参考。

1 研究模型

1.1 计算模型

本文研究的混流泵模型参数如下:流量 $Q_{des} = 380 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 6 \text{ m}$,转速 $n = 1450 \text{ r/min}$,比转数 $n_s = 480$ 。叶片数 $Z = 4$,导叶叶片数 $Z_d = 7$ 。混流泵模型如图 1 所示。

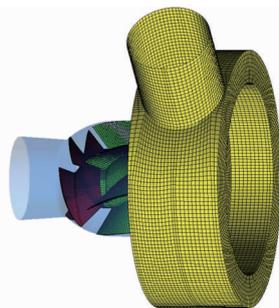


图 1 混流泵模型

Fig. 1 Model of mixed-flow pump

理论上混流泵叶轮是轴对称结构,流体在周向呈轴对称分布,但实际上由于制造误差等不可控因素导致叶轮质量和结构分布不均匀,在实际运行时会使叶轮轴线偏移原先位置(图 2),由此导致轮缘间隙不均匀,流体在周向产生不均匀扰动。考虑实际偏心运行时,数值计算需不断计算叶轮位置并更新叶轮和间隙区网格,同时考虑涡动和叶轮旋转,计算量非常大。因此,本文通过对研究模型的简化,以轴心偏移量(偏心距)模拟涡动流场,忽略叶轮偏心

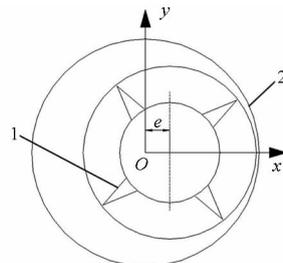


图 2 叶轮偏心示意图

Fig. 2 Schematic diagram of eccentric impeller

1. 叶轮转子 2. 端壁

运动的动力特性,大大提高了数值计算效率,同时对研究混流泵非均匀轮缘间隙流场的流动特性并未产生本质性影响。在混流泵轮缘间隙为 0.8 mm 时,设置偏心距分别为 $e = 0.3$ mm 和 $e = 0.5$ mm,研究非均匀轮缘间隙下混流泵内部流动特性及其对流场的影响。

1.2 网格划分和边界条件

1.2.1 网格划分

应用 Pro/E 软件对混流泵模型的进口段、叶轮、导叶、蜗室和出口段分别进行建模,装配后得到混流泵全流道的三维实体造型并采用 CFX 前处理网格划分软件 ICEM 划分网格。考虑到轮缘间隙相对叶轮的尺寸很小,为保证间隙内部足够的网格单元数和有效节点数以及间隙向叶轮内部网格的均匀过渡,对轮缘间隙部分采用加密处理。计算区域为从泵进口段到环形蜗室出口段的整个装置。通过改变网格尺度来实现网格无关性的检查,计算过程中选取 3 种网格数进行模拟,当网格数大于 70 万时,扬程趋于定值,经检查当网格数为 90 万与 150 万时,扬程误差低于 5%。为了节约计算时间及资源,计算时采用的总网格数为 145 万。叶顶区 y^+ 值控制在 100 以内,加密区域网格如图 3 所示。

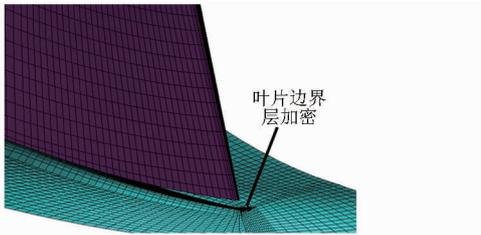


图3 轮缘区域网格

Fig.3 Mesh of tip area

1.2.2 边界条件

采用商用软件 CFX 对全流场进行定常数值计算,以时均 N-S 方程作为基本控制方程,以标准 RNG $k-\epsilon$ 双方程为湍流模型和连续性方程使动量方程封闭,采用二阶精度迎风格式,以基于微元中心有限体积法空间离散的方式,通过 SIMPLEC 算法实

现压力速度的耦合求解。边界条件设置为速度进口、压力出口,取参考压力为 1 个大气压。收敛精度为 10^{-4} 。

2 数值计算结果分析

2.1 外特性实验验证与性能预测

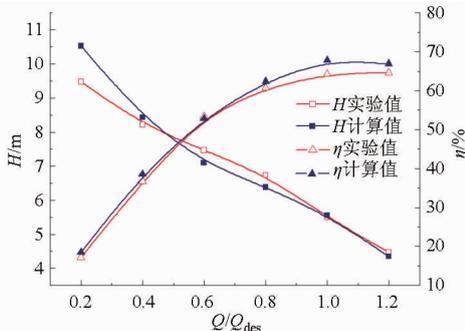
加工高精度实验模型泵并进行动平衡,实验转子实际偏心距非常小,近似认为实验模型不偏心。对混流泵模型进行全流道三维数值模拟,预测了混流泵的外特性并与实验外特性进行对比,如图 4 所示,图中 Q 表示实验流量, η 表示泵效率。

对比实验和数值计算外特性数据,从图 4a 中可以看出,计算的扬程、效率在小流量时比实验值稍高,在设计工况点,扬程数值模拟结果与实验结果非常相近,效率最大误差约为 5%。但从整体上看,数值模拟的扬程、效率与实验测量的性能趋势基本一致,说明数值计算模型能够较准确地预测其性能。

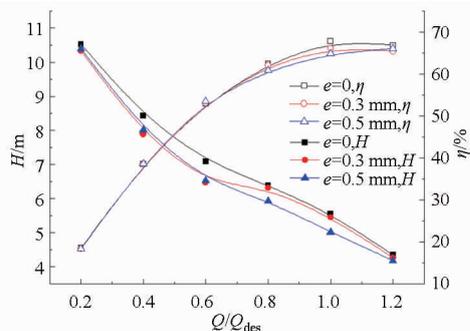
由图 4b 可以看出,偏心后混流泵的扬程和效率都有所下降,尤其是在 $0.4Q_{des} \sim 0.8Q_{des}$ 之间时,扬程下降非常明显,在设计工况点,0.5 mm 偏心距下扬程下降最大幅度达到 9.8%;在 $0.6Q_{des} \sim 1.2Q_{des}$ 之间时,效率均有所下降,0.5 mm 偏心距下高效点向大流量偏移,设计工况点效率下降了 4.3%。由此可见,非均匀轮缘间隙较大程度地影响了混流泵的性能,偏心诱发的不稳定流动是造成扬程和效率下降的主要因素。

2.2 非均匀轮缘间隙下叶片静压分布

在 $e = 0$ 、 $e = 0.3$ mm 和 $e = 0.5$ mm 偏心距下混流泵叶轮叶片压力面和吸力面静压分布如图 5 所示。由图可知,不偏心和 $e = 0.3$ mm 和 $e = 0.5$ mm 2 种偏心距下叶轮叶片进口和轮毂处静压变化不大,但是在叶轮叶片轮缘处和叶片出口处静压变化较明显。叶轮无偏心时,在叶片压力面液体压力在进口边处最低,沿着液体流动方向,液体压力逐渐升高,在靠近叶片出口边的外缘处达到最大,压力在整



(a) 数值计算与实验外特性对比



(b) 不同偏心距下数值计算外特性对比

图4 混流泵外特性曲线

Fig.4 External characteristics of mixed-flow pump

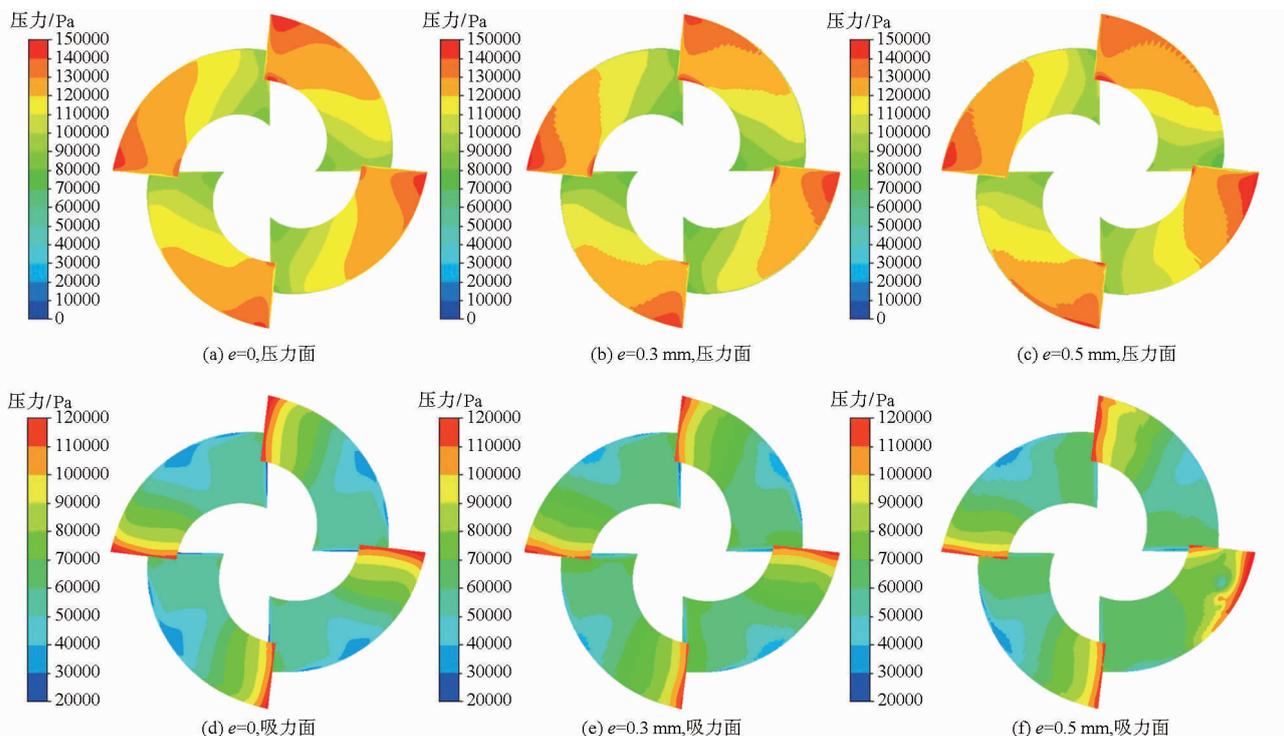


图 5 设计工况叶片表面静压分布

Fig. 5 Static pressure distributions of impeller blade under design point

个圆周方向呈对称分布。叶轮偏心时,压力分布的整体趋势变化不大,但偏心一侧的叶片出口轮缘处高压区明显增大。在叶片吸力面,压力相比压力面要小很多,最大压力出现在出口边。叶轮无偏心时,沿液流方向叶轮出口边压力呈明显梯度增加,并且在叶轮轮缘中部有一小块低压区。0.3 mm 偏心距下,吸力面靠近偏心一侧叶片轮缘中部的低压区明显减小,随着偏心距增大,当 $e = 0.5$ mm 时,偏心一侧低压区逐步消失,其他叶片轮缘中部处的低压区范围相比无偏心叶轮也有所减小。在 0.5 mm 偏心距下,靠近偏心一侧的叶片出口轮缘处压力分布并未呈沿液流方向的梯度增加,受偏心影响,呈现沿径向梯度分布趋势,并在出口边外缘处出现一个极大值,明显区别于其他叶片。

2.3 非均匀轮缘间隙流场压力和湍动能分布

为了研究沿液流方向非均匀轮缘间隙流场的变化,在靠近叶轮进口处、叶片中间和叶轮出口处沿垂直于叶轮轴线方向截得 a 、 b 、 c 3 个截面,截面间距为 20 mm,如图 6 所示。

获得 3 个轴截面上距离端壁 0.2 mm 处周向压力分布曲线,如图 7 所示。在截面 a 处,无偏心时 4 个叶片外缘周向压力分布趋势基本一致,高低压幅值分布基本相同。在 0.3 mm 偏心距下,周向低压分布与无偏心叶轮相差不大,但在靠近偏心一侧,其最低压力高于不偏心叶轮。在 0.5 mm 偏心距下,周向低压分布很不平衡,呈现非对称性,在靠近偏

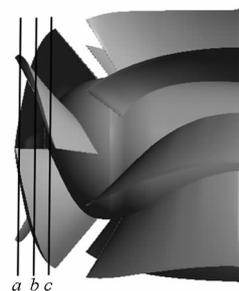


图 6 轴截面位置示意图

Fig. 6 Schematic of axial sections position

一侧,低压区呈梯级上升趋势,高低压幅值差不断减小,整体压力有所增大,这与轴截面压力云图显示相同。在截面 b 处,2 种偏心叶轮的的压力场分布与不偏心叶轮的的压力场分布相差不大,但在偏心一侧,0.5 mm 偏心距叶轮整体压力明显大于不偏心叶轮压力。在靠近叶轮出口的截面 c 处,不偏心时叶片周向轮缘间隙区压力分布基本呈对称分布;在 0.3 mm 偏心距下,截面 c 周向压力分布与不偏心叶轮相似,呈周期性分布,但在偏心一侧的最高压力明显增大;在 0.5 mm 偏心距下,周向压力分布呈现非对称性,高低压参差不齐,靠近偏心一侧压力明显增大,出现压力极值,但周向整体压力有所下降,低压幅值也有所减小。上述分析表明,偏心对混流泵叶轮进出口压力分布的影响较大,而对叶轮中间区域压力分布影响相对较小,偏心改变叶轮内部整个压力场的分布,影响了叶轮的做功效率,从而影响了混流泵的外特性。

获得3个轴截面上距离端壁面0.2 mm处周向湍动能分布,如图8所示。从图中可以看出,无偏心状态下随相位角变化4个叶片外缘周向湍动能分布基本相同,而2种偏心距下湍动能在叶轮内部耗散明显大于无偏心状态下。在截面a处,偏心流场相比不偏心流场湍动能耗散非常明显,并在最小间隙处形成幅值。在截面b处,2种偏心叶轮的周向湍动能耗散幅值均随着间隙不断增大而减小,但该处是

能量损失最严重区域。在靠近叶轮出口的截面c处,偏心叶轮外缘湍动能幅值相比无偏心湍动能幅值成倍增加,损失比较严重。对比不同偏心距下周向湍动能分布,随着偏心距增加,外缘周向湍动能耗散幅值不断增大。因此,非均匀轮缘间隙使得间隙区流体的速度呈多样分布,湍动能耗散明显增加,水力损失增大,这是导致扬程和效率下降的主要原因。

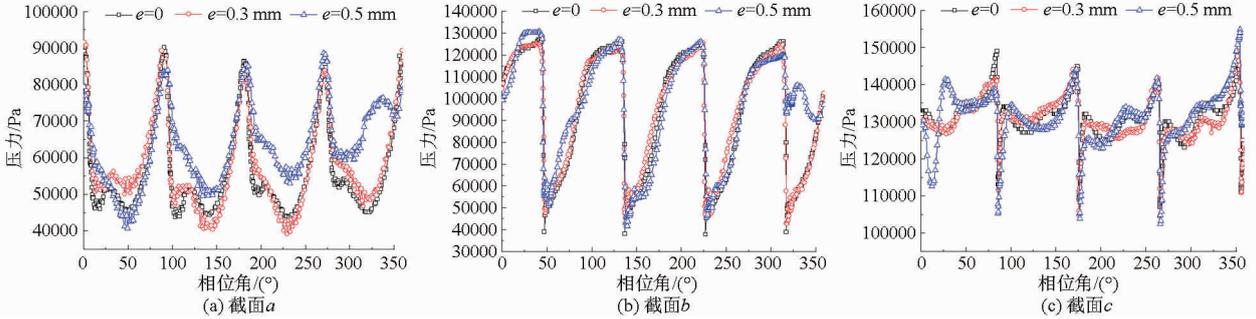


图7 距离端壁面0.2 mm处周向压力分布图

Fig. 7 Circumferential pressure distributions at 0.2 mm away from end wall

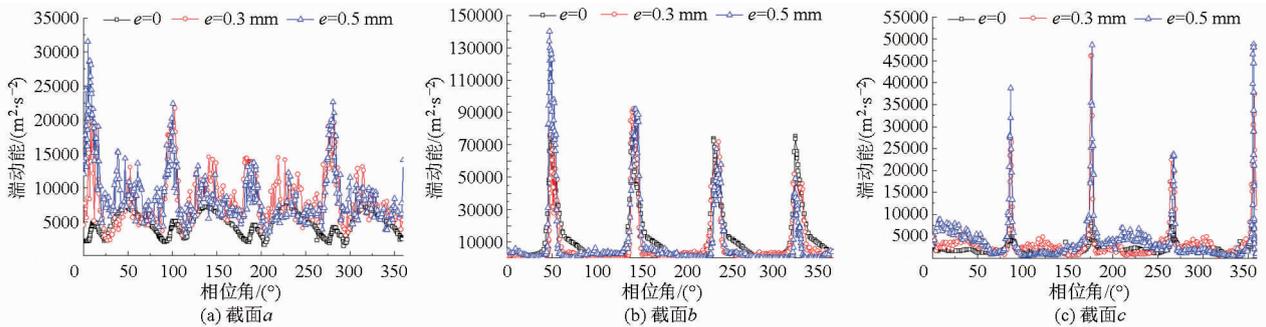


图8 距离端壁面0.2 mm处周向湍动能分布图

Fig. 8 Circumferential turbulence energy distributions at 0.2 mm away from end wall

2.4 非均匀轮缘间隙流场的流线分布

在同一叶片进口、中间位置和出口处过叶轮轴线截取3个平面,如图9所示。

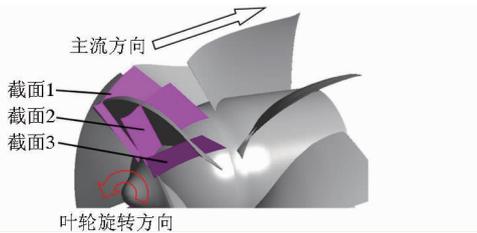


图9 截面位置示意图

Fig. 9 Schematic of cross-sections position

获得了不同偏心距下最大、最小间隙边3个截面的压力和流线图,如图10所示。考虑篇幅限制,重点对比分析了无偏心和0.5 mm偏心距下的压力和流线分布。由于4个叶片对称布置,设置最大、最小间隙位置为截面3处。由图10可知,无偏心和偏心叶轮在轮缘间隙都存在一定的泄漏流,但无偏心时叶轮流道内的流动状态相比偏心叶轮较好,并且

无偏心叶轮在各截面形成的泄漏涡也较小。在无偏心流场中,截面1中叶片压力面所在流道出现一个大的旋涡结构,这是上级叶片泄漏涡在本级叶片压力面的发展,而截面1中所在叶片轮缘区尚未形成叶顶泄漏涡;在截面2处,受逆压梯度的影响,此时在叶片吸力面形成泄漏涡结构,而上级叶片泄漏涡逐步消失。随着相位角的变化,叶顶泄漏涡在叶轮旋转方向逆向发展,逐步发展到叶轮流道中部位置,如截面3中所示。在 $e=0.5$ mm偏心距下的涡动流场中,在较小轮缘间隙处,截面1流道中的上级叶片泄漏涡相比无偏心流场中的泄漏涡尺度更大,也更靠近下游相邻叶片,其对主流的干扰作用更为明显;在截面2处,上级叶片泄漏涡进一步发展,涡结构外围几乎到达相邻叶片压力面,严重堵塞了流道;而本级叶片由于间隙减小,轮缘区泄漏明显减弱,出现轻微泄漏涡;在截面3处,轮缘间隙进一步减小,几乎不存在泄漏流,但非均匀轮缘间隙的扰动作用对叶轮流道产生了更大影响,形成更大范围的扰动涡。

在较大轮缘间隙处,上游叶片的小间隙部分抑制了泄漏涡的产生和发展,上级叶片泄漏涡对主流的干扰作用有所减弱,但随着间隙增大,本级叶片的轮缘间隙泄漏流相比无偏心流场有所增强,在截面 2 和截面 3 处泄漏流在叶片吸力面的轮缘区域形成更为明显的泄漏涡。同时,对比有无偏心状态下混流泵内部压力分布,可以发现,混流泵偏心时由于轮缘间隙的分布不均较大程度地影响了叶轮流道内各截面

的压力分布,尤其是最小间隙截面处叶轮流道内的压力梯度等值线扭曲更为严重;由于叶轮旋转过程中轮缘间隙不均,对叶轮流道内流场产生了更大扰动,最大间隙处的泄漏流、二次流等不稳定流动现象明显增多,形成大量的旋涡流动阻塞流道,造成严重的能量损失,较大影响了混流泵的效率,这与图 8 中部分位置湍动能相比无偏心时幅值成倍增加的结论相一致。

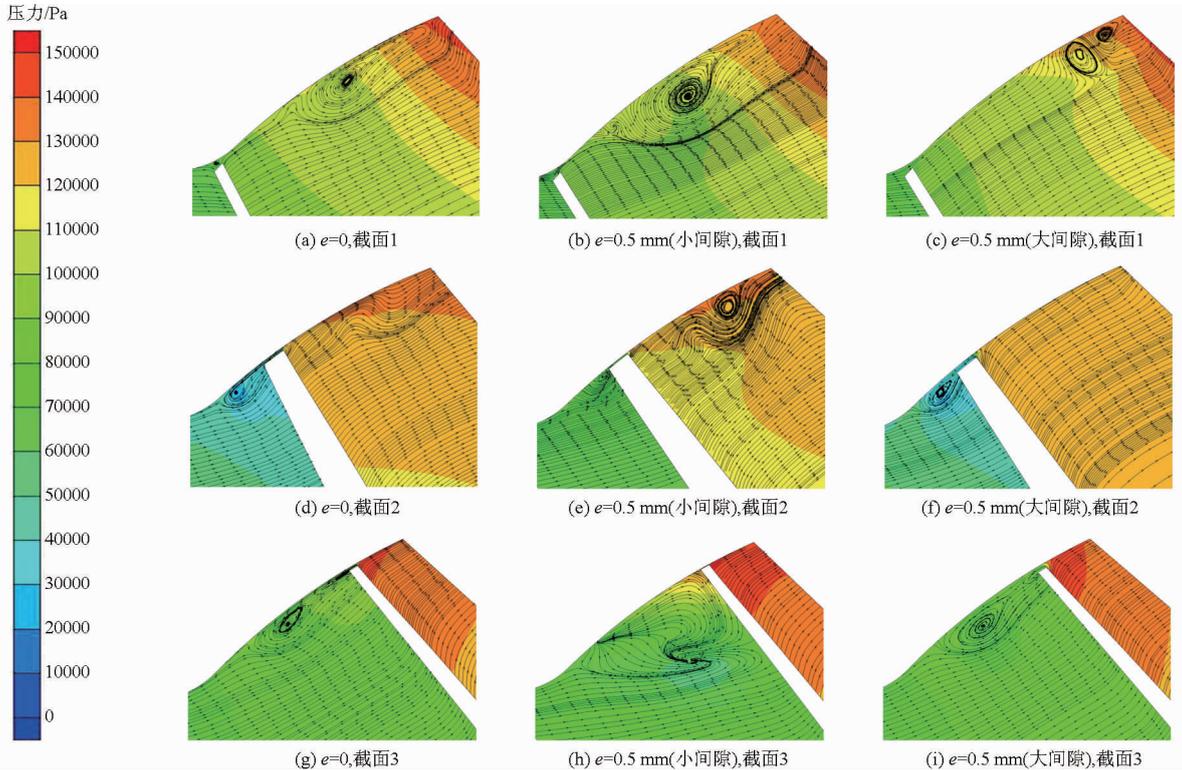


图 10 各截面流线图和压力云图

Fig. 10 Streamline charts and pressure nephograms of each cross-section

3 结论

(1) 非均匀轮缘间隙较大程度地影响了混流泵的外特性,尤其是在 $0.4Q_{des} \sim 0.8Q_{des}$ 之间时,扬程下降非常明显, 0.5 mm 偏心距下设计工况点扬程下降了 9.8% ; 在 $0.6Q_{des} \sim 1.2Q_{des}$ 之间时, 2 种偏心距叶轮效率均有所下降, 0.5 mm 偏心距下高效点向大流量偏移,设计工况点效率下降了 4.3% 。

(2) 在 0.5 mm 偏心距下,靠近偏心一侧的叶片出口轮缘处压力分布并未呈沿液流方向的梯度增加,而是呈现沿径向梯度分布趋势。偏心对混流泵

叶轮进、出口压力分布影响较大,而对叶轮中间区域压力分布影响相对较小,改变了叶轮内部整个压力场的分布,影响了叶轮的做功效率。

(3) 在非均匀轮缘间隙的涡动流场中,随着间隙减小,本级叶片轮缘泄漏涡得到了部分抑制,但非均匀轮缘间隙的扰动作用对叶轮流道产生了更大影响。同时,流道内最大间隙处的泄漏流、二次流等不稳定流动现象明显增多,向下游发展的轮缘泄漏涡尺度变大,严重堵塞了相邻叶片流道,使得流道内湍动能耗散随着偏心距增大不断加剧,水力损失增大,是造成混流泵效率下降的主要原因。

参 考 文 献

- MIYABE M, MAEDA H, UMEKI I, et al. Unstable head flow characteristic generation mechanism of a low specific speed mixed flow pump[J]. Journal of Thermal Science, 2006, 1(2): 115 - 120.
- 黎义斌,胡鹏林,李仁年,等. 不同叶顶间隙对斜流泵性能影响的数值分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(23): 86 - 93. LI Yibin, HU Penglin, LI Rennian, et al. Numerical analysis for effects of different blade tip clearance on performance in mixed-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 86 - 93. (in Chinese)

- 3 常书平, 王永生, 魏应三, 等. 喷水推进器内非定常压力脉动特性[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2012, 33(5):522-527.
CHANG Shuping, WANG Yongsheng, WEI Yingsan, et al. Pressure fluctuation of unsteady flow in waterjet[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2012, 33(5):522-527. (in Chinese)
- 4 NANDI S, AHMED S, TOLIYAT H. Detection of rotor slot and other eccentricity related harmonics in a three phase induction motor with different rotor cages[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(3): 253-260.
- 5 朱磊, 魏道高, 史伟, 等. 偏心量对涡轮增压器转子系统动力学特性的影响分析[J]. 汽车工程学报, 2013, 3(4):282-286.
ZHU Lei, WEI Daogao, SHI Wei, et al. Effects of eccentricity on rotor dynamics characteristic of turbocharger[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2013, 3(4):282-286. (in Chinese)
- 6 GREENHILL L M, NELSON H D. Iterative determination of squeeze film damper eccentricity for flexible rotor systems[J]. Journal of Mechanical Design, 1982, 104(2): 334-338.
- 7 DORRELL D G, SALAH A. Detection of rotor eccentricity in wound rotor induction machines using pole-specific search coils[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- 8 LI Y, LU Q, ZHU Z Q, et al. Analytical synthesis of air-gap field distribution in permanent magnet machines with rotor eccentricity by superposition method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(11): 1-4.
- 9 郭隐彪, 郑琳, 王振忠. 高精度非球面加工双轴动平衡监控技术研究[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3):434-438.
GUO Yinbiao, ZHENG Lin, WANG Zhenzhong. Study on single-plane biaxial balance monitor system in ultra-precision aspheric grinding[J]. Optics and Precision Engineering, 2006, 14(3):434-438. (in Chinese)
- 10 JIANPING J, GUANG M, YI S, et al. On the non-linear dynamic behavior of a rotor-bearing system[J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 274(3): 1031-1044.
- 11 贺小峰, 朱磊磊, 王学兵, 等. 轴向柱塞泵主轴动平衡的设计及实验研究[J]. 流体机械, 2007, 35(6):8-9.
HE Xiaofeng, ZHU Leilei, WANG Xuebing, et al. Design and experimental research on the mainshaft unit's dynamic balance of an axial piston type water hydraulic pump[J]. Fluid Machinery, 2007, 35(6):8-9. (in Chinese)
- 12 MUSZYNSKA A. Whirl and whip-rotor/bearing stability problems[J]. Journal of Sound and Vibration, 1986, 110(3): 443-462.
- 13 KANG Y S, KANG S H. Prediction of the nonuniform tip clearance effect on the axial compressor flow field[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2010, 132(5):0511101-9.
- 14 HATA S, RICHERT J, NISHIYAMA Y, et al. The effects of casing geometry and flow instability on rotordynamic fluid forces on a closed type centrifugal impeller in whirling motion[C]//ASME-JSME-KSME 2011 Joint Fluids Engineering Conference: AJK2011-06022, Volume 1. Hamamatsu, 2011:113-119.
- 15 邓啟家, 康顺, 林鹏. 转子偏心对轴流涡轮气动性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(3): 435-439.
DENG Qijia, KANG Shun, LIN Peng. Influence of rotor eccentricity on the aerodynamic performance of an axial flow turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(3): 435-439. (in Chinese)
- 16 黄来, 黄丕维, 刘永辉, 等. 气流力、油膜力和质量偏心共同作用下的转子非线性动力学研究[J]. 汽轮机技术, 2007, 49(6):428-431.
HUANG Lai, HUANG Piwei, LIU Yonghui, et al. Study of nonlinear dynamic characteristics of turbine rotor system under oil-film force alford force and quality eccentricity[J]. Turbine Technology, 2007, 49(6):428-431. (in Chinese)
- 17 王鹏, 袁寿其, 王秀礼, 等. 偏心距对核主泵径向力影响的数值分析[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(6):461-466.
WANG Peng, YUAN Shouqi, WANG Xiuli, et al. Numerical analysis on effects of nuclear main pump radial force under different eccentricities[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(6):461-466. (in Chinese)
- 18 马桂超, 汤方平, 杨帆, 等. 基于CFX的混流泵内流场数值模拟[J]. 水电能源科学, 2012, 30(3):128-131.
MA Guichao, TANG Fangping, YANG Fan, et al. Numerical analysis of interior flow field of mixed-flow pump based on CFX[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(3):128-131. (in Chinese)
- 19 闫利宇. 基于ANSYS的混流泵数值模拟仿真[D]. 成都: 西华大学, 2015.
YAN Liyu. ANSYS-based numerical simulation of flow pump[D]. Chengdu: Xihua University, 2015. (in Chinese)
- 20 WU D, YAN P, CHEN X, et al. Effect of trailing-edge modification of a mixed-flow pump[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2015, 137(10): 101205.
- 21 WANG K, LIU H, ZHOU X, et al. Experimental research on pressure fluctuation and vibration in a mixed flow pump[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(1): 179-184.
- 22 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)
- 23 LI Y, HU P, LI R, et al. Numerical analysis for effects of different blade tip clearance on performance in mixed-flow pump[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 86-93.
- 24 KIM J H, KIM K Y. Analysis and optimization of a vaned diffuser in a mixed flow pump to improve hydrodynamic performance[J]. ASME Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7): 071104.
- 25 李伟. 斜流泵启动过程瞬态非定常内流特性及实验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013.
LI Wei. Experimental study and numerical simulation on transient characteristics of mixed-flow pump during starting period[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013. (in Chinese)