

离心泵内部非定常数值模拟与压力脉动研究

全良桂, 许海明, 吕金喜, 庄卫将

(江苏振华泵业制造有限公司, 江苏 泰州 225500)

摘 要: 利用雷诺时均方程、双方程湍流模型并结合 SMPLEC 算法对离心泵内部三维不可压湍流场进行数值模拟, 得出其内部的压力分布及监测点的压力脉动情况, 在模拟的基础上, 进行了外特性试验, 试验证明了模拟结果的正确性。研究表明: 由于蜗壳的非对称性使离心泵内部流动具有非对称及非定常特性, 压力以叶片旋转频率发生周期性变化; 额定流量时, 监测点的压力波动幅度比偏工况时脉动幅值要小。

关 键 词: 离心泵; 非定常; 压力脉动

中图分类号: TH311 文献标识码: A

引 言

离心泵内部流动为复杂的三维非定常湍流流动, 常伴有流动分离、空化、水力振动等影响离心泵稳定运行的现象。同时, 离心泵转动的叶轮和静止的蜗壳部件间流场的相互作用, 特别是隔舌和叶轮叶片间的相对位置随叶片转动周期性变化必然引起流场的周期性变化, 使泵的损失增大, 甚至会损坏系统设备^[1~3]。

目前, 对离心泵压力脉动的一些研究, 为分析压力脉动对离心泵性能影响奠定了基础, 但这些研究主要针对离心泵的压力脉动情况, 没有将其与离心泵内压力的变化结合起来分析。为了正确研究离心泵内压力脉动情况, 本研究应用 CFD 软件 Fluent 研究离心泵多工况下的内压力脉动变化情况, 并结合压力分布, 揭示离心泵内部压力脉动情况, 为进一步预测非定常流动诱发压力脉动提供依据。

1 计算域及测试点的选取

模型泵的型号为 CH400-350-18 设计参数为: 流量 $Q=1\ 500\ \text{m}^3/\text{h}$ 扬程 $H=18\ \text{m}$ 转速 $n=1\ 470\ \text{r/min}$ 。计算域如图 1 所示, 包括吸水室、叶轮和压

水室。为了监测不同工况下径向力的分布情况和离心泵内部压力脉动, 选取监测点如图 1 所示。T₁ 处在隔舌靠近叶轮一侧, T₂ 处在隔舌靠近出口一侧, ck 位于出口位置附近, 所有的点均处在蜗壳中截面上。

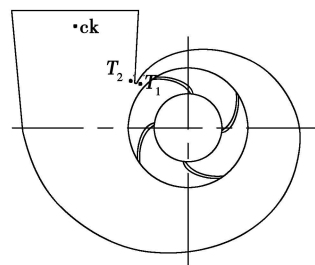


图 1 计算域及监测点位置

2 数值计算方法

2.1 控制方程及湍流模型

离心泵内部流动可以认为是不可压、非定常的三维湍流流动。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0$$

动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho F_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

三维湍流模型采用标准的 $\kappa-\epsilon$ 湍流模型。

计算方法为 Segregated 隐式方法, 采用 SMPLEC 算法和二阶迎风格式离散差分方程进行计算。利用动静双参考系处理叶轮和蜗壳中的水流运动问题, 叶轮流道区域采取旋转坐标系, 蜗壳流道区域为静止坐标系, 设定各个速度分量及 κ, ϵ 收敛精度为 10^{-5} 。为了加速收敛, 在定常的基础上进行非定常数值计算。

2 2 网格划分

模型利用 PRO/E软件进行三维造型,应用 GAMBIT软件对计算域进行网格划分,采用非结构化网格,网格数 120 万左右,图 2 为划分好的计算域。

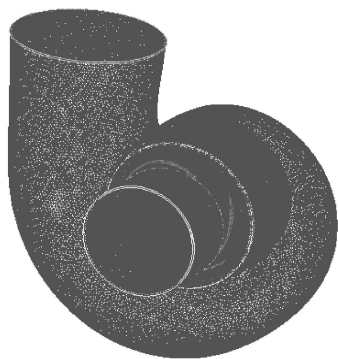


图 2 网格划分

2 3 边界条件

进口边界取为速度进口,假设进口边界上轴向速度均匀分布,无切向速度与径向速度,因而可根据流量计算出轴向平均速度;出口边界上在求解前流速和压力未知,但可认为此处流动已充分发展,该处的流动情况完全由区域内部外推得到,而对上游没有影响,所以出口边界取在出口管出口截面处,取为自由出流边界条件;离心泵叶轮和蜗壳壁面设为固壁条件,由于不存在壁面有喷射或抽吸情况,所以固壁表面取为无滑移边界。

2 4 非定常模拟设置

非定常数值模拟的时间步长设定为 1.701×10^{-4} s(每经过 240 个时间步长,叶轮旋转一周^[3]),能够获取叶轮所需要的旋转角度,每个时间步长迭代次数为 60 叶轮转速为 1 470 r/min。

3 结果分析

3 1 外特性预测

计算得到泵的流量—扬程曲线及其与试验数据的比较如图 3 所示。旋流泵性能试验是在具有 B 级精度的江苏振华泵业制造有限公司的水泵开式实验台上进行的,相关测试数据由计算机自动采集。

由图 3 可以看出:预测结果与试验结果在趋势上完全一致。在小流量时,扬程计算值略低于试验值;大流量时计算值略高于试验值,但与试验值相比误差不超过 4%。可见,该数学模型比较准确地预测了该泵的外特性,也为进一步的预测分析提供了

保证。

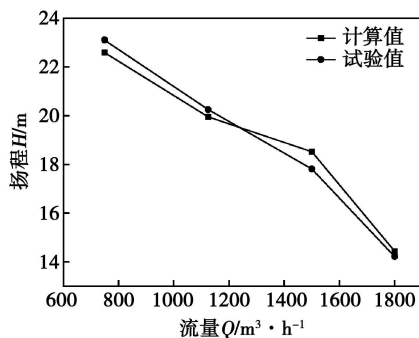


图 3 流量—扬程曲线

3 2 不同流量同一时刻压力分布

由图 4 可以看出,不同流量下的总压分布明显不同(Q 为设计流量)。基本趋势为:在同一位置,流量越小,总压越大。由总压等值线可以看出,在额定流量时,等值线分布最好,小流量时分布比较紊乱。

叶片两侧均存在压差,其中压力面侧压力大于吸力面侧压力^[4]。总压为静压与动压之和,反映了流体所具有的能量。从图中可以看出,由于叶片对流体做功,流体进入流道后总压逐渐升高,到叶片出口处达到最大,进入蜗壳后由于存在流动损失,总压沿流动方向递减。不同流量时具有相似的压力分布规律。

3 3 蜗壳出口压力分布

图 5 为同一时刻、不同流量下出口截面处的静压分布云图。可以看出:出口截面上的静压不是处处相等。小流量时,压力分布比较均匀,大流量时分布最不均匀^[5]。这主要是因为流量不同时,液体的流动轨迹是不同的,即流线分布不一样,而流线的能量也不尽相同,造成出口截面总压的差异。

3 4 同一流量不同时刻压力分布

离心泵理想的流量与扬程曲线在某一流量点扬程是静态的。事实上旋转的叶轮和静止、非对称的蜗壳间相互影响必然引起流场的稳定性,导致泵在产生静态压力分量的同时还产生动态压力分量,也就是压力脉动。因此,分析不同时刻流体的流动状态对压力脉动分析有重要意义。

同一流量不同时刻静压分布如图 6 所示。可以看出:同一流量下不同时刻的压力分布变化非常明显,当叶片在隔舌附近时,耦合作用强烈,附近区域压力很高^[6~7];当叶片掠过隔舌时,其附近压力又减小。不同时刻,出口处的压力也不同,表现为扬程的

瞬时值不同。

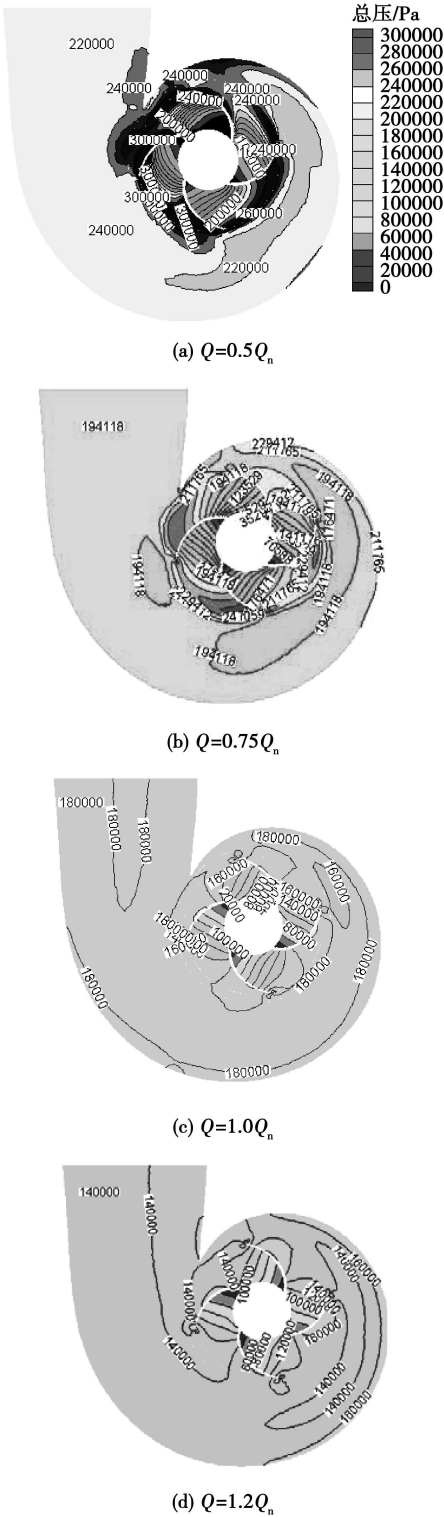


图 4 不同流量时总压分布 (Pa)

3.5 监测点出压力脉动分析

图 7 为分析离心泵内压力脉动情况, 在隔舌附近设置监测点来观察静压随时间的变化规律 (监测点如图 1 所示) 从图中可以看出:

(1) 隔舌处 (T_1 、 T_2) 的压力脉动: 从图中可以看出隔舌靠近叶轮处 (T_1) 的波动明显比靠近出口处 (T_2) 的波动剧烈, 这主要是因为靠近叶轮处的点受到叶轮与蜗壳相互耦合的作用。在两个监测点处, 小流量时波动更剧烈。在额定点时, 靠近出口处波动幅度为 5.63%, 靠近叶轮处为 9.83%。

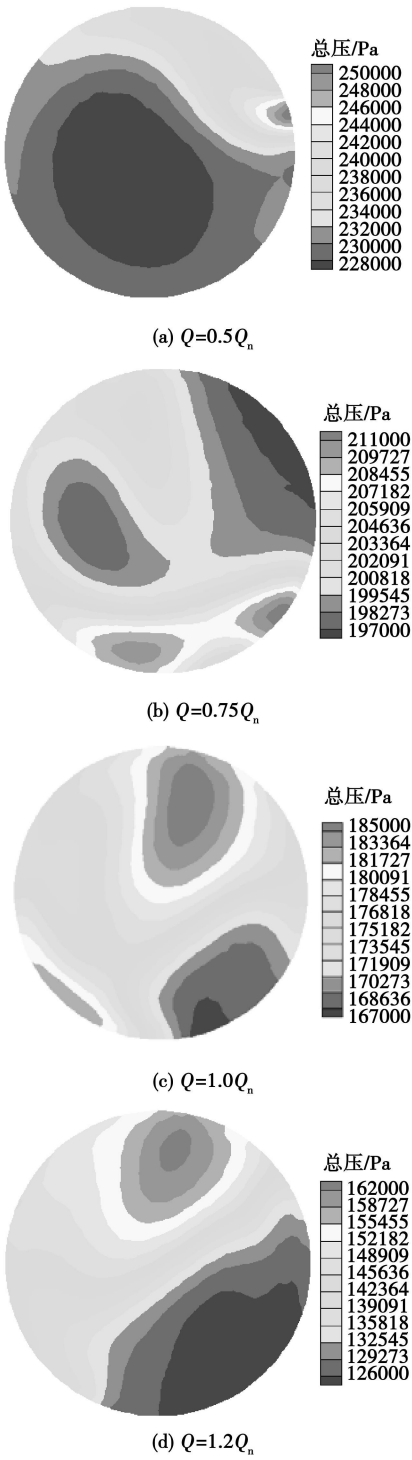


图 5 不同流量时出口截面总压分布

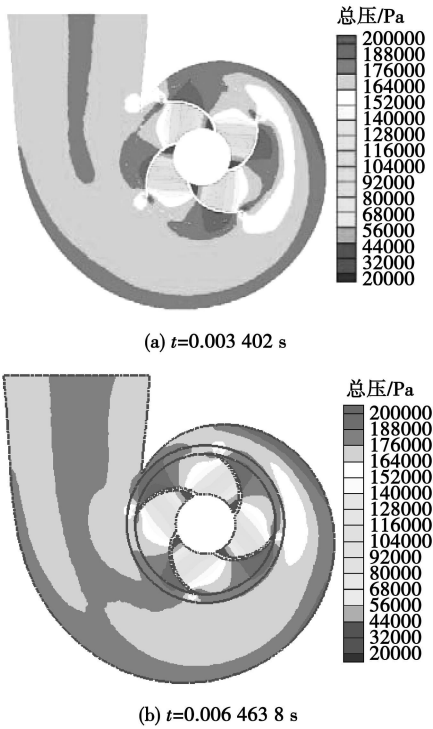


图 6 同一流量不同时刻静压分布

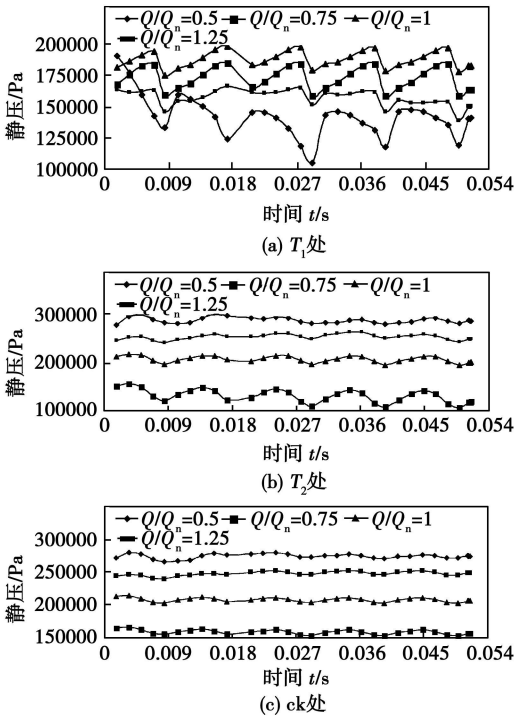


图 7 压力脉动时域

(2) 出口处 (监测点 ck) 的压力脉动: 由于扩散管的缓冲与稳流作用, 出口处的波动情况变得非常平缓, 额定点时波动幅度为 5.46%。

(3) 由于旋转的叶轮和静止、非对称的蜗壳间相互耦合作用强烈, 隔舌处监测点 (T_1 、 T_2) 的波动比出口监测点处的波动剧烈。

(4) 在每个监测点, 额定流量时, 波动幅度最小, 偏离额定点时, 波动幅度变大且偏离越多, 波动幅度越大^[8~9]。

4 结 论

(1) 不同流量下的总压分布明显不同, 在额定流量时, 等值线分布情况最好。

(2) 同一流量下不同时刻的压力分布变化非常明显, 这表现为瞬态扬程的变化, 其值由叶片和蜗壳的相对位置所决定^[10]。

(3) 不同工况下压力脉动波形成明显的周期性, 周期的大小为转动周期除以叶片数; 额定流量时脉动幅度比偏离工况时的幅度要小, 这表明额定工况下泵的运行稳定性最好。

(4) 蜗壳的非对称性使离心泵内部流动具有非对称及非定常特性, 压力以叶片旋转频率发生周期性变化; 额定流量时, 监测点的压力波动幅度比偏工况时脉动幅值要小。

参考文献:

[1] YUAN SHOUQI, NI YONGYAN. Unsteady turbulent simulation and pressure fluctuation analysis for centrifugal pumps[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 22 (1): 1—6

[2] 刘 阳. 离心泵的压力脉动研究进展[J]. 流体机械, 2008, 36 (9): 33—37

[3] 吴玉林, 刘树红, 钱忠东. 水力机械计算流体力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007

[4] 陈红勋, 邹雪莲. 单流道泵内部非定常流动特征[J]. 农业工程学报, 2005, 41(11): 163—167.

[5] 邓文剑, 楚武利, 吴艳辉, 等. 离心泵整机非定常特性数值研究[J]. 机械科学与技术, 2009, 28(6): 744—748

[6] 郭鹏程, 罗兴铸, 刘胜柱. 离心泵内叶轮与蜗壳间耦合流动的三维紊流数值模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8): 1—5

[7] 王德军, 周惠忠, 黄志勇, 等. 对旋式轴流泵全流道三维非定常紊流场的数值模拟[J]. 工程力学, 2004, 3 (21): 150—154.

[8] 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.

[9] 丛国辉, 王福军. 双吸离心泵隔舌区压力脉动特性分析[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6): 60—67

[10] 季柳金, 李 红, 王艳艳. 降低离心式纸浆泵压力脉动的措施[J]. 流体机械, 2006, 34(8): 50—52

old value treatment of the wavelet coefficients of the decomposed signals with a criterion for evaluating noise reduction based on measure of quasi-separability being introduced. It was used for analyzing and evaluating the simulation signals and actually measured signals. The research results show that the method integrates the merits of the second-generation wavelets and the improved threshold value function, thus capable of better eliminating noise.

Key words: vibration signal; second-generation wavelet; threshold value function; threshold value noise reduction; quasi-separability

半开式离心泵内部流场的数值模拟研究 = Numerical Simulation Study of the Flow Field Inside a Semi-open Type Centrifugal Pump [刊, 汉] SHAO Jie ZHANG Guiying (Guohe Electric Power Planning and Designing Institute, Beijing, China, Post Code: 100094), WU Yulin (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 290 ~ 294

The standard $k-\epsilon$, SST (shear stress transport) and DES (detached eddy simulation) three turbulent flow models were used to numerically simulate the flow rate-lift curves and inner flow field of a semi-open type centrifugal pump operating under a small flow rate condition. To verify the simulation result, the two-dimensional PIV (Particle Image Velocimetry) technology was employed to conduct an experiment and measurement of the inner flow field of the pump. It has been found that with respect to the prediction of the flow lift curves of the pump, all the three numerical simulation methods can predict relatively accurately. As for the prediction of the inner flow field, the standard $k-\epsilon$ and SST turbulent flow models can not provide an overall and accurate result while the DES method can relatively accurately predict the details of the inner flow field. Key words: semi-open type centrifugal pump; impeller; PIV (Particle Image Velocimetry) measurement; inner flow detail; turbulent flow model; contrast

离心泵内部非定常数数值模拟与压力脉动研究 = Study of the Non-steady Numerical Simulation and Pressure Pulsation Inside a Centrifugal Pump [刊, 汉] QUAN Liang-gui XU Hai-ming IU Jin-xi et al. Jiangsu Zhenhua Pump Industry Manufacturing Co., Ltd., Taizhou, China, Post Code: 225500) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 295 ~ 298

By using the Reynolds number time-average equation and the dual-equation turbulent flow model in combination with the SIMPLEC algorithm, numerically simulated was the three-dimensional non-compressible turbulent flow field inside a centrifugal pump. Furthermore, the internal pressure distribution and pulsations at various monitoring points were obtained. On the basis of the simulation, an outer characteristic experiment was conducted, proving that the simulation results are correct. The research results show that the asymmetry of the volute makes the flow inside the centrifugal pump be of asymmetrical and non-steady characteristics, and force the pressure to change periodically at the frequency of the rotating blades. At the rated flow rate, the pressure fluctuation amplitude at the mo-

monitoring points is smaller than that under off design operating conditions. Key words: centrifugal pump; non-steady; pressure pulsation

狭缝通道内核态沸腾中的气泡动力学研究 = Study of the Bubble Kinetics in Nucleate Boiling Inside Narrow Gap Passages [刊, 汉] GUO Lei, ZHANG Shu-sheng, CHENG Lin, et al (Research Center for Thermal Sciences and Engineering, Shandong University, Jinan, China, Post Code: 250061) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 299 ~ 303

To deepen the exploration of the mechanism governing the bubble kinetics in nucleate boiling inside narrow gap passages, studied was the nucleate boiling in narrow gap passages of two different sectional shapes, i.e. I-shape of 2 mm wide and Z-shape. By adopting a numerical simulation method, the influence of different wall surface contact angles on the bubble formation and growth process and the relationship between the gap shapes and flow pressure drops were investigated. During the calculation, the effect of the gravity force, surface tension and wall surface adhesion were taken into consideration. It has been found that the wall surface contact angles exercise a very big influence on the morphology of the bubbles. The smaller the wall surface contact angle, the more close to a circle the bubbles produced and the shorter the time for the bubbles to depart from the wall surface. Contrarily, it is more difficult for the bubbles to depart from the wall surface. Any change in the contact angle also influences the heat exchange coefficient. The bigger the wall surface contact angle, the more the area covered by the bubbles, the bigger the heat resistance of the wall surface and the smaller the heat conduction coefficient. The surface tension plays a role far bigger than the gravity force in the boiling heat exchange in the gap passages. The nucleation of bubbles will lead to a strong disturbance to the boundary layer. The existence of the thin layer at the bottom of the bubbles can function to intensify the heat exchange. The heat exchange coefficient of the Z-shaped passage is somewhat improved compared with that of the I-shaped passage and the pressure drop in the flow process, however, increased conspicuously. Key words: nucleate boiling; narrow gap passage; bubble dynamics

流体纵掠多孔泡沫金属换热器中顺列传热管外表面的试验研究 = Experimental Study of a Fluid Longitudinally Sweeping the Outer Surface of the Heat Pipes Arranged in Line in a Porous Foam Metal Heat Exchanger [刊, 汉] WANG Jing-hao, GOU Qing-ge (East China Design Subcompany, China National Petroleum Corporation (CNPC), East China Designing Institute, Qingdao, China, Post Code: 266071), LI Ju-xiang (College of Energy Source, Nanjing Polytechnical University, Nanjing, China, Post Code: 210009), SHI Yu (Nantong Acetic Acid Fiber Co., Ltd., Nantong, China, Post Code: 226008) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power — 2011, 26(3). — 304 ~ 309

An experimental study was performed of the flow and heat transfer of a fluid in the shell side longitudinally sweeping the outer surface of the heat conduction tubes in the porous foam metal Brinkman-Forchheimer extended Darcy flow