

文章编号: 1671-6612 (2024) 06-800-07

基于流固耦合的不同叶片数 离心泵水力特性及结构力学性能对比研究

张佳妮

(上海市质量监督检验技术研究院 上海 200072)

【摘要】 离心泵作为一种把机械能转换为流体动能的通用机械,广泛应用于日常的生产生活。叶片数对离心泵内部流场的影响对于保障离心泵稳定、高效和安全运行至关重要。数值模拟方法能够在实验难以完成的条件下获得离心泵的性能预测。现对叶片数为5和6的常用离心泵进行三维定常数值模拟研究,获得了离心泵的外特性及静压分布。结果表明:两种叶片数离心泵的外特性曲线趋势基本相同,在设计流量点下,6叶片离心泵内部流场更加均匀,其扬程增加了8.6%,轴功增加了7.5%,而效率降低了2.5%。两组离心泵方案的流固耦合数值模拟结果对比发现,最大位移发生在叶轮和轴承处。不同叶片数对泵整体结构的应力和形变影响较小,均符合强度要求。

【关键词】 离心泵; 流固耦合; 叶片数量; 水力特性; 结构力学性能

中图分类号 TH311 文献标志码 A

Comparative Study on Hydraulic Characteristics and Structural Mechanical Performance of Centrifugal Pumps with Different Blade Numbers Based on Fluid Structure Coupling

Zhang Jiani

(Shanghai Institute of Quality Supervision and Inspection Technology, Shanghai, 200072)

【Abstract】 As a universal machinery that converts mechanical energy into fluid kinetic energy, centrifugal pumps are widely used in daily production and life. The influence of blade number on the internal flow field and characteristics of centrifugal pumps is particularly important to ensure stable, efficient, and safe operation of centrifugal pumps. The use of numerical simulation methods can obtain performance predictions of centrifugal pumps under conditions where experiments are difficult to complete. A three-dimensional steady-state numerical simulation study was conducted on centrifugal pumps with 5 and 6 blade numbers, and the external characteristics and static pressure distribution of the centrifugal pump were obtained. The results indicate that the trend of the external characteristic curve of centrifugal pumps with different blade numbers is roughly the same. At the design flow point, when the number of blades is 6, the pump head increases by 8.6%, shaft power increases by 7.5%, and efficiency decreases by 2.5%. The increase in the number of blades makes the flow field inside the centrifugal pump more uniform, and the optimal number of blades obtained in this study is 6. When comparing the numerical simulation results of fluid structure coupling between two centrifugal pump schemes, it was found that the maximum displacement occurred at the impeller and bearing. The influence of different blade numbers on the stress and deformation of the overall structure of the pump is minimal, and it still meets the strength requirements.

【Keywords】 Centrifugal pump; Fluid structure coupling; Blade numbers; Hydraulic characteristic; Structural mechanical performance

作者(通讯作者)简介: 张佳妮(1992.12-),女,博士研究生, E-mail: zhangjn@sqi.org.cn

收稿日期: 2024-04-03

0 引言

离心泵是一种将机械能转换为流体动能的一种机械，在核工业、农业灌溉、化工、市政工程和航空航天等领域有着广泛的应用。由于离心泵具有效率较高、操作方便、性能可靠、结构简单和易于维护等优点，是工业领域中最常用的泵类型，在所有泵类产品中占比约 70%。为了提高离心泵的性能，各国的学者进行了大量的研究^[1]。这些研究采用了不同的方法，主要目的是通过提高离心泵的整体效率来改善离心泵的性能。离心泵中的叶轮是影响泵性能的关键零件，因此叶轮的几何参数对离心泵的高效和稳定运行有着至关重要的作用^[2]。研究表明，叶轮的几何参数中，叶片数量 Z 、叶片厚度 b 、叶片入口角 β_1 、叶片出口角 β_2 和叶片宽度 b_2 等参数起着关键的作用。此外，离心泵的性能还受到其他一些参数的影响，如叶轮转速、泵的进口流量和进气体积分数等^[3]。

原则上说，每个型号的离心泵叶轮都具有一个与之最优匹配的叶片数量，这个最佳的叶片数对提升离心泵整体性能有着至关重要的作用，主要在泵的扬程、效率和空化方面影响显著^[4]。目前，国内外的学者采用了多种理论来选取叶轮的最佳叶片数，最常用的一种方法是根据叶片数 Z 与比转数 n_s 之间的关系来确定，但是由于蜗壳和叶片的形状不对称，叶轮出口复杂的内部流动产生周向畸变，使得其内部流场较为复杂，这种三维的非定常湍流会导致实践经验中的叶片选择策略可能并不完全符合实际需求^[5]。因此，有必要深入研究叶轮叶片数量对离心泵的能量转化、内部流动特性和空化性能的影响规律，进而确定叶轮最优的叶片数量，以期最大化能量转化效率，优化空化性能，全面提高离心泵的整体运行表现^[6]。严敬等^[7]发现，针对小型低转速离心泵，提升叶片数量理论上能够提升离心泵的扬程，然而这可能导致叶片密集分布，进而压缩叶轮进气口的流道空间，加剧了液体流动时的冲击效应。这种现象反过来侵蚀了泵的水力性能效率。李文广等^[8]研究了不同叶片数量对离心泵性能的影响。结果表明，随着叶片数量从 3 片提升至 5 片，泵的扬程—流量曲线呈现出逐步升高的趋势。然而，进一步将叶片数增加到 7 片时，观察到了流

量—扬程曲线在图示中形成了一个峰值区域。王洋等^[9]将叶片数与低比转速离心泵之间的联系进行了数值模拟和试验研究，认为叶轮叶片数的选取应随着离心泵比转速的增大而减少。同时试验结果表明，叶片数越少，蜗壳内部流场会更加容易产生压力集中区域，而当叶片数增加后，最高压力值会逐渐降低。叶片内部流场的速度分布模式表明：配置为 4 叶片和 7 叶片的结构中，流体从叶片前端至后端的动态平衡性相对较低，显示出较大的波动性。然而，当叶片数量提升至 5 和 6 时，这一流动特性出现了显著的优化，稳定性得到了显著增强，呈现出更为平稳的流动模式。

综上所述，虽然国内外学者对不同叶片数影响离心泵性能做了很多的研究，但都是集中在离心泵内部流动规律和叶片数对外特性规律的影响，鲜有将计算流体动力学和计算结构动力学耦合起来对离心泵的数值模拟计算。因此，现采用流固耦合的方法对泵进行数值模拟研究，以分析不同叶片数在流固耦合作用下对泵内流道压力波动变化和叶轮径向力的影响，为离心泵的合理选取叶片数以及高效稳定的运行提供参考。

1 数值模型及计算方法

1.1 研究对象

针对某公司制造的 MODEL TCD 40/160 系列离心泵进行分析，该设备的核心规格表现为：比转速 $n_s=60$ ，额定设计流量为 $Q_{BEP}=25\text{m}^3/\text{h}$ ，扬程 $H=50\text{m}$ ，效率 $\eta=65.5\%$ ，运行转速 $n=2900\text{r}/\text{min}$ ，电机功率为 7.5kW。详细的构造参数可参考表 1。该离心泵的三维立体图像如图 1 所示。

表 1 离心泵的主要结构参数

Table 1 Main structural parameters of centrifugal pumps

主要结构	参数	数值
叶轮	叶片数 Z	5
	轮毂直径 d_h/mm	24
	叶轮直径 D/mm	150
	进口直径 D_i/mm	65
	出口直径 D_e/mm	40
蜗壳	出口宽度 b_c/mm	165
	基圆直径 D_0/mm	176

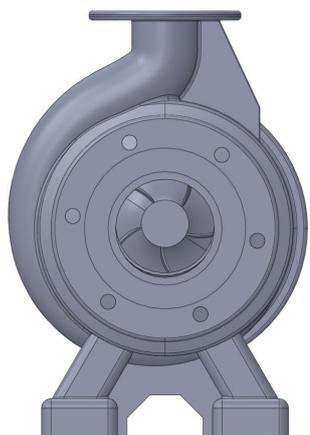
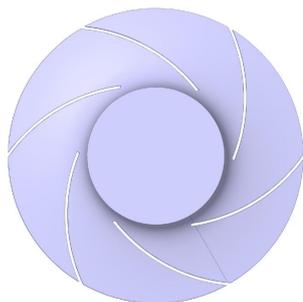


图1 离心泵的三维实体图

Fig.1 Three dimensional diagram of centrifugal pump

1.2 数值计算方案

为了探究该类型离心泵的性能因叶片数量差异产生的变化,旨在确定与叶轮最优化配合的叶片数目。在保持叶轮其他参数不变的情况下,分别设置了叶片数为5和叶片数为6的两种叶轮数值模拟方案。使用 SolidWorks 计算机辅助设计软件生成两种方案的叶轮水体三维模型,如图2所示。



叶片数 Z=6

图2 不同叶片数叶轮水体三维几何模型

Fig.2 Three dimensional geometric models of water bodies with impeller blades

1.3 计算域设置

首先对离心泵的流体域进行三维建模,三维建模质量直接影响到后续网格的划分,网格质量会影响后续数值模拟计算的收敛性和准确性。现采用 SolidWorks 计算机辅助设计软件对离心泵的水体模型进行绘制,完整的流体域计算模型为:叶轮进口延长段、叶轮、蜗壳和出口延长段,如图3所示。设置进出口延长段的目的是使得液流可以充分发展,使数值模拟的结果更加符合实际。

离心泵流体域的数值计算采用 ANSYS Fluent

仿真平台,对离心泵内部的三维复杂流动现象进行了深入的非线性数值模拟研究,特别聚焦于不可压缩雷诺时均 Navier-Stokes 方程的精细化处理。计算过程描述了详细的三维湍流模型,旨在揭示其内在动力学特性,该方程可写为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} \quad (1)$$

式中: t 为时间; u_i 和 u_j 为液体流动的速度方向; f_i 为质量力; ρ 为液体的密度; x_i 和 x_j 为外力的分量; μ 为液体的动力粘度。

采用 SST k- ω 湍流模型,该模型适宜用于旋转机械,具有经济性、鲁棒性较好且具有一定的适用精度的优点^[10]。

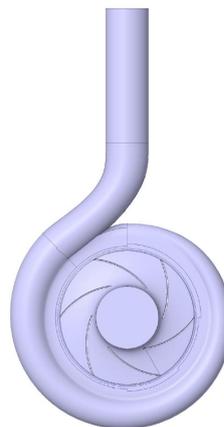


图3 离心泵的三维水体图

Fig.3 Three-dimensional solid domain diagram of a centrifugal pump

1.4 边界条件设置

对于离心泵的入口设定,采取了速度入口的方式,其中径向和切向的速度成分均被假设为零。入口速度的大小则是依据特定工作点的流量来确定的。考虑到离心泵出口处的流体已经达到了充分发展的状态,因此出口的边界条件被设置为自由流出 (outflow) 状态。在离心泵的工作环境中,研究焦点集中在旋转叶片区域,并设置了动态边界的旋转壁效应,而其余区域则保持静态。叶片边缘的流体行为遵循严格的非滑移条件,确保了精确的边界效应。靠近壁面的流体运动则采用改良的壁面函数模型来处理^[11]。

对控制方程采用有限体积法进行离散,压力场和速度场的耦合采用 SIMPLEC 算法,动量方程、耗散率方程和湍动能方程均采用二阶迎风差分格

式。数值计算收敛精度为 0.00001, 输送流体介质为 25°C 的清水。

对于控制方程, 采取了有限体积法对控制方程进行离散, 同时运用 SIMPLEC 算法来联接压力场与速度场的交互作用。在动力学求解过程中, 动量方程、能量耗散率方程以及湍动能方程都采用了二阶迎风差分格式, 以保证解的稳定性。数值模拟结果达到了极高的精度, 收敛误差控制在微不足道的 0.00001 级别。输送流体是常温 (25°C) 的清水, 这种特定介质的选择有助于揭示泵体内部流场的特性。

2 数值模拟精确性分析

2.1 网格无关性验证

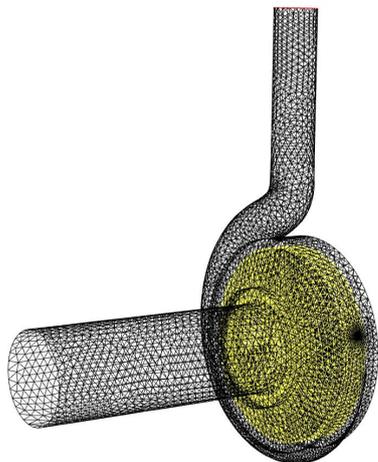


图 4 离心泵流体计算域网格图

Fig.4 Grid diagram of the fluid calculation domain for centrifugal pumps

离心泵的过流部件具有较为复杂的三维几何外形, 所以在划分网格时采用了具有优良适应性的非结构化四面体网格技术, 在关键区域 (叶轮部分) 增加了网格密度, 以此确保计算过程的稳定性和结果的精确度, 采用 ANSYS ICEM 软件进行离心泵的网格剖分。因为网格的数量会影响数值模拟的计算速度和数值的准确性, 但同时过多的网格数量也会大大增加计算的时间, 所以需要平衡计算的速度和精度。现对采用的离心泵流体域网格进行无关性验证, 以离心泵的扬程为指标, 对不同网格数量的离心泵模型进行数值模拟, 结果发现, 当网格总数达到 130 万时, 离心泵的扬程变化在 0.3% 以内, 此时可以确定网格数量的继续增加对计算的精度已再无影响。因此计算的流体域模型网格总数选择

为 135 万, 网格划分后的整体流体计算域网格如图 4 所示。

2.2 数值模拟结果与试验值对比

为了检验离心泵数值模拟计算结果的准确性, 需要将计算的结果和试验测量的结果进行对比。选取 7 个不同流量工况下对原 5 个叶片的离心泵进行数值模拟计算, 并将计算结果与试验结果进行对比分析, 试验数据来自厂家的出厂报告。将数值模拟计算得到的离心泵外特性曲线与试验得到的外特性曲线绘制到同一曲线图中, 如图 5 所示。在计算离心泵的性能参数时未考虑容积损失和机械损失, 计算扬程时在软件中分别读出泵的进出口总压, 其计算公式为:

$$H = \frac{p_{out} - p_{in}}{\rho g} \quad (2)$$

式中: p_{in} 为泵的进口总压, Pa; p_{out} 为泵的出口总压, Pa; ρ 为水的密度, 1000kg/m³; g 为重力加速度, 9.81m/s²。

计算泵的效率时, 在软件中读出泵的叶轮前后盖板和叶片的转矩, 其计算公式为:

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{M \omega} \quad (3)$$

式中: Q 为泵进口体积流量, m³/s; M 为叶轮的转矩, N·m; ω 为叶轮的旋转角速度, rad/s。

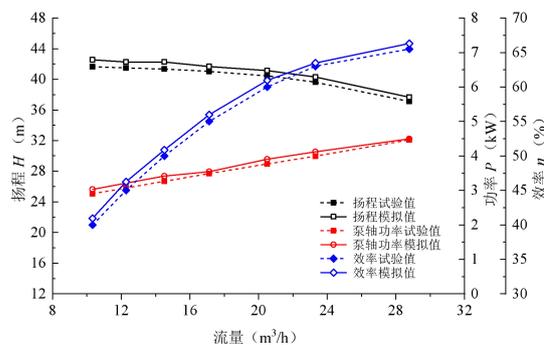


图 5 叶片数为 5 时离心泵外特性数值模拟结果与试验对比

Fig.5 Numerical simulation results and experimental comparison of the external characteristics of centrifugal pumps

从图 5 数值模拟计算的结果与试验结果对比的曲线中可以看出, 在设计点工况下, 扬程与试验值的误差为 2.2%, 效率的误差为 2.7% 以及轴功率的误差为 4.6%, 由此得到, 离心泵的数值模拟偏

差保持在 5% 的范围内，显示出其模拟结果与实验结果的一致性。这验证了所构建的几何模型、选用的数值计算技术及模拟策略在预测离心泵内部流体动力学行为上的准确性和稳定性。因此，基于这些前提的后续分析同样具备可信的真实性和可靠性。

3 计算结果及分析

3.1 不同叶片数外特性分析

由上述的泵性能参数计算得到叶片数为 5 和 6 时，最高效率工况下的扬程、效率和轴功率，如表 2 所示。

表 2 不同叶片数离心泵最高效率点性能参数

Table 2 Performance parameters at the highest efficiency point of centrifugal pumps with different blade numbers

Z	Q/(m ³ /h)	H/m	P/kW	η/%
5	25	50.0	6.6	65.5
6	25	54.3	7.1	63.8

由表 2 可以得到，相同流量下，随着叶片数的增多，泵的扬程也增加了，增加了 8.6%，因为叶

片数增加，叶轮对流体所做的功也会增加，所以轴功率也会增加，增加了 7.5%，计算得到的结果与理论分析的一致。因为增加叶片以后减少了叶轮流道的空间，流体在此处会发生碰撞，增加了流动损失，所以效率会降低，计算预测得到当叶片数增加到 6 片时，效率降低了 2.5%。

3.2 不同叶片数内流场分析

如图 6 揭示了不同叶片数离心泵内部流场速度分布云图，由图 6 可知，在设计工况下，每种叶片数的相对速度分布特征显著，叶片工作区域的速度高于背面，并呈现出有序的层次结构。同时，可以观察到无论叶片数量如何，离心泵叶轮内的相对速度都是从入口向出口渐次提升的过程。通过比较 6 叶片和 5 叶片泵的相对速度云图，可以明显看出，6 叶片泵的速度分布更为均衡，其层状增大的趋势更为明显。相比之下，5 叶片泵的表现稍逊一筹，叶轮流道内速度的梯度变化不显著，特别是在蜗壳与隔舌区域，速度变化尤为细微。值得注意的是，6 叶片叶轮相较于 5 叶片叶轮，其高速区域的分布更为广泛。

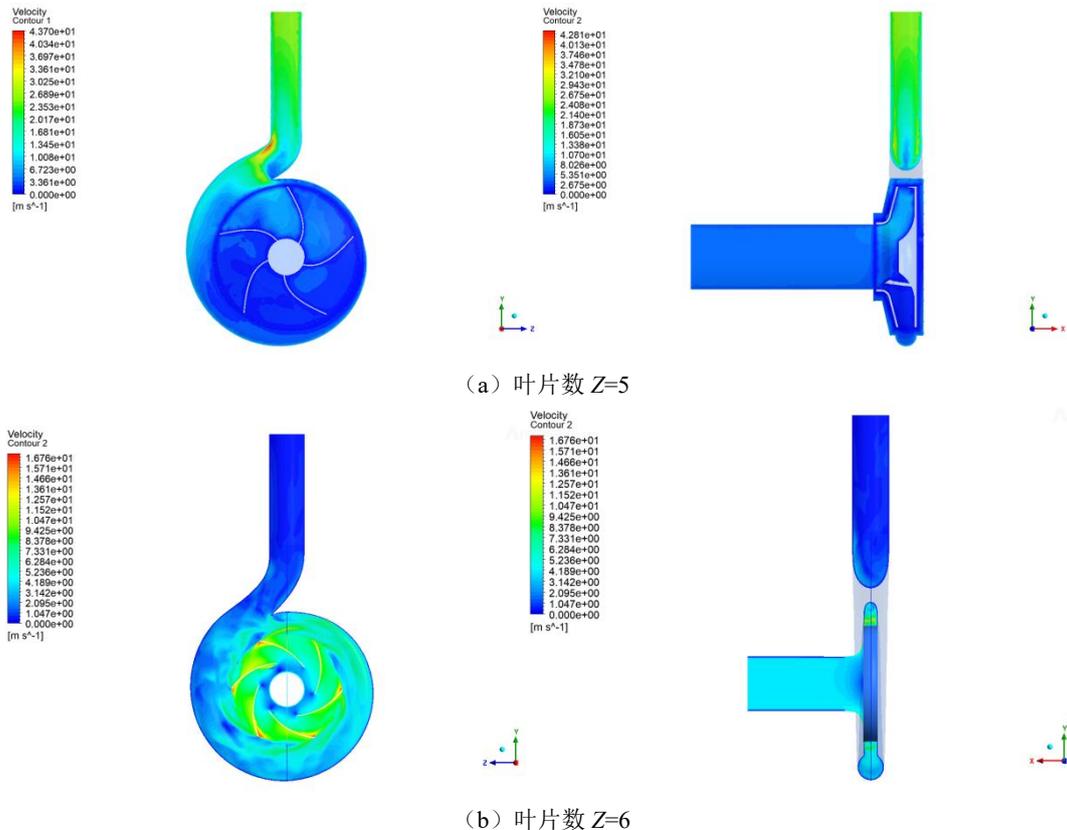


图 6 不同叶片数相对速度分布

Fig.6 The relative velocity distribution of the flow field inside a centrifugal pump

图 7 所示为在设计条件下，不同叶片数对离心泵内部中间截面压力分布的对比。由图 7 可知，压力分布表现出良好的均匀性和稳定性，在系统中，压力分布呈现出对泵轴中心线的对称性，无论是高压区域还是低压区域，分布都相对均衡。观察叶轮的中截面，压力自叶片进口至出口逐步升高。值得注意的是，叶片入口的背面区域形成了一片显著的低压区，这可能导致离心泵在运行时发生空化现象。在蜗壳的隔舌位置，压力显著高于其他区域，此处的压力梯度陡峭，形成了高压区，但这也带来了更大的能量损耗。流体从蜗壳入口至出口，压力

整体呈上升趋势，这符合蜗壳将动能转化为压能的物理原理，进一步验证了本次数值模拟计算的准确性。通过对比不同叶片数量的离心泵，可以发现，随着叶片数量的增多，叶片区域的压力差增大，出现了更多的高压区。同时，蜗壳处的压力也逐渐增强，这表明增加叶片数会加剧离心泵内部的液体摩擦损失。具体来说，当叶片数为 6 时，叶片的正面和背面压力分布较为均匀，压力梯度平滑，没有出现局部压力突然增大的情况。说明该离心泵内部压力场更加均匀。

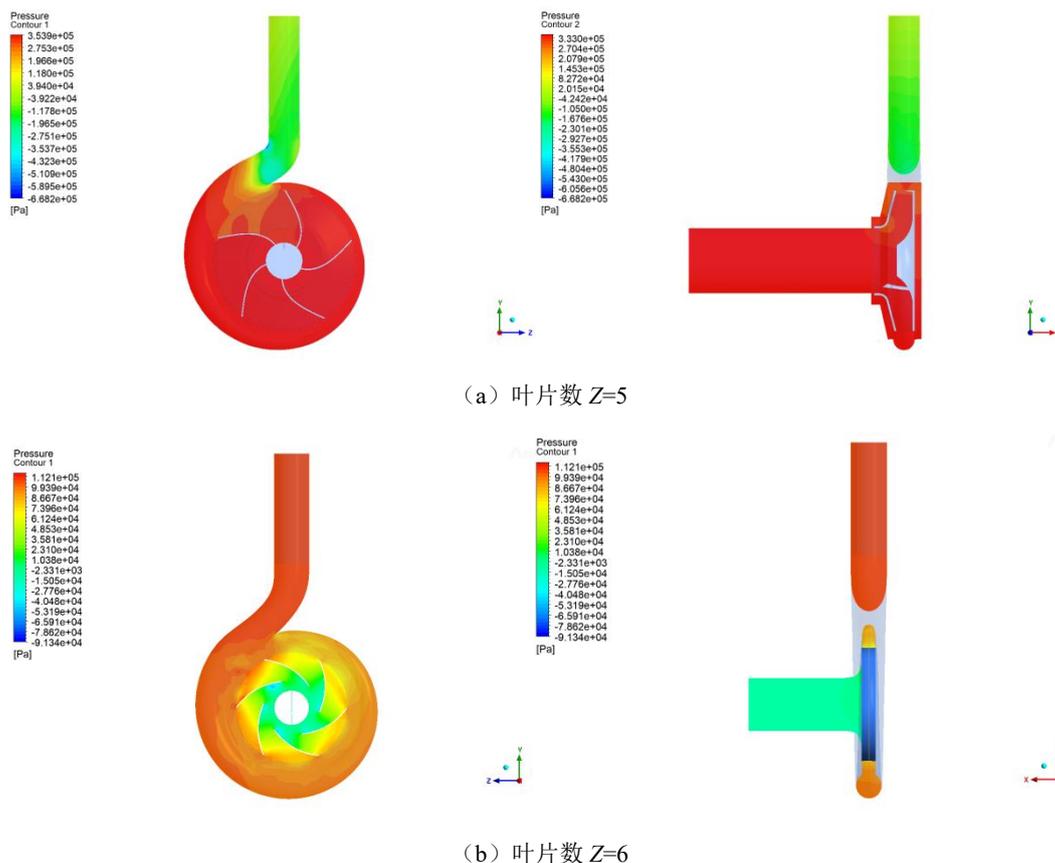


图 7 不同叶片数泵中间截面的压力分布云图

Fig.7 Pressure distribution in the middle section of centrifugal pump

3.3 不同叶片数流固耦合分析

针对离心泵工作腔内的动力学特性研究，对其结构进行泵结构的流固耦合预应力模态分析。将流体动力计算结果映射到流固耦合界面，随后分配各组件的材料属性，并设定相应的力学边界条件，联立求得流固耦合作用下的预应力模态。图 8 所示为不同叶片数离心泵关键部件的变形位移云图。从图

中可以得到，离心泵的底座处所发生的位移最小，而第二阶振型最大位移发生在叶轮和轴承处，位移的最大值为 1.77mm。在预应力和重力作用下，支脚处承受的等效力值最大，最大形变发生于蜗壳的出口处。对比两组不同叶片数的模拟结果，流固耦合预应力模态下对于泵整体结构产生的变形很小，都满足强度的要求。

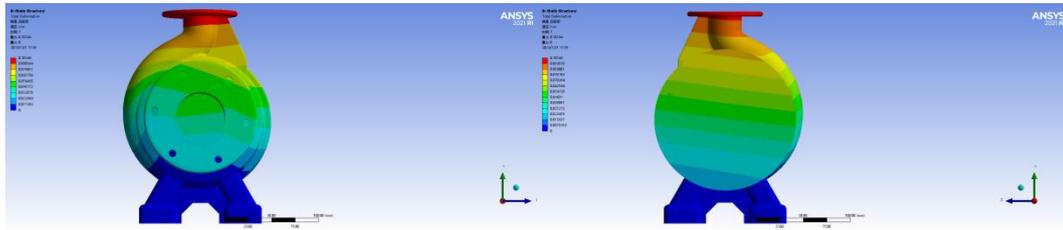
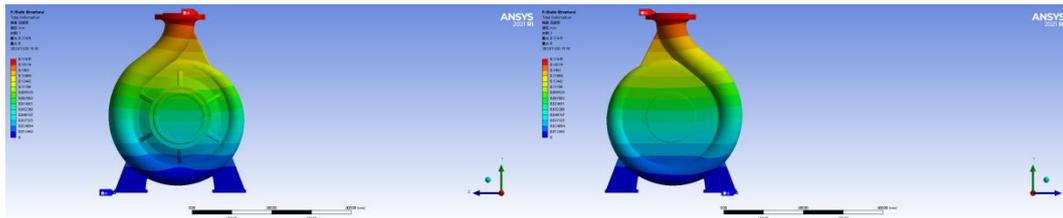
(a) 叶片数 $Z=5$ (b) 叶片数 $Z=6$

图 8 不同叶片数离心泵关键部件的变形位移云图

Fig.8 Deformation distribution of centrifugal pumps with different blade numbers

4 结论

叶轮是离心泵的核心过流部件,叶片数对泵性能的影响很大,针对离心泵性能与叶片数量关系的探索,选择了某公司制造的、具有 60 比转速的单级单吸离心泵作为研究对象。通过数值模拟的方法,详细对比分析了配置 5 片和 6 片叶片的两种设计情况,得出如下结论:

(1) 不同叶片数离心泵的外特性曲线趋势大致相同。在设计流量点下,叶片数为 6 时,泵的扬程增加了 8.6%,轴功增加了 7.5%,而效率降低了 2.5%。

(2) 叶片数的增加使离心泵内的流场更加均匀,运行的综合性能最佳。在本次数值模拟计算的离心泵几何参数条件下,最佳叶片数为 6。

(3) 在两组离心泵方案的流固耦合数值模拟结果对比时发现,最大位移发生在叶轮和轴承处,最大值为 1.77 mm。不同叶片数对泵整体结构的应力和形变影响很小,依然符合强度要求。

参考文献:

- [1] 袁寿其,施卫东,刘厚林,等.泵理论与技术[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [2] 关醒凡.现代泵理论与设计[M].北京:中国宇航出版社,2010.
- [3] 马希金,赵杰,邵莲.叶片数变化对油气混输泵性能影响的研究[J].流体机械,2009,37(6):24-27.
- [4] 张华娟,李春.几何参数对水泵性能的影响[J].农业机械学报,2007,38(4):203-207.
- [5] 齐凤莲,刘冠诚,ABAITANCEI H,等.叶轮不同叶片对离心泵内流道流场的影响[J].中国工程机械学报,2018,16(5):382-388.
- [6] MENHAS M I, FEI M, WANG L, et al. Adaptive mutation-based probability binary pso for control of ball mill pulverizing system[J]. Journal of system Simulation, 2011,8.
- [7] 严敬,潘光玉,阚能琪,等.低比转速叶轮叶片数的选择准则[J].排灌机械工程报,2008,(1):18-20.
- [8] 李文广,魏育添.输送水时叶片数对离心油泵性能的影响[J].水泵技术,2000,(3):3-6.
- [9] 王洋,王维军,刘洁琼.基于 Fluent 的叶片数对低比转速离心泵内部流场的影响[J].中国农村水利水电,2011,(12):148-150.
- [10] 黎义斌,张德胜,赵伟国,等.叶片数及分流叶片位置对离心泵性能的影响[J].兰州理工大学学报,2008,34(2):45-48.
- [11] 刘宜,陈文鹏,肖丽倩,等.不同叶片数对低比转速离心泵压力脉动的影响[J].兰州理工大学学报,2016,42(3):62-66.