排灌机械工程学报 2010年9月 Sept. 2010 第28卷 第5期 Vol. 28 No. 5
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

轴流泵模型多叶片安放角的数值计算

陈红勋，朱　兵，李随波
（上海大学 上海市应用数学与力学研究所，上海 200072）

摘　要：在同一轴流泵模型0°安放角数值计算结果的基础上，应用ANSYS CFX软件，选择标准$k-\varepsilon$湍流模型和可伸缩壁面函数，在不同的叶片安放角下，采用全六面体网格和经网格无关性分析的网格数，分别在定常和非定常条件下进行了多工况的数值模拟和外特性计算，并将计算结果与试验结果进行对比. 在规范使用工具软件的条件下，分析了CFD数值模拟技术预估轴流泵性能的精度及其误差的特点. 结果表明，非定常计算扬程值略高于试验值，而定常计算扬程值低于试验值，非定常计算的总体精度高于定常计算，且误差可控制在5%以内；定常和非定常预测的效率误差可控制在7%以内，且非定常计算的效率与试验效率存在一相对固定幅度的偏差，据此可用于修正同类模型效率的预测值. 基于非定常计算的结果，进一步分析了叶轮和导叶圆柱面上流线分布、叶片截线压力分布和轴流泵过流部件各部分水力损失随叶轮叶片安放角和流量的变化规律，发现在小流量工况，靠近轮毂位置存在旋涡堵塞现象；在计算工况范围内，导叶段和出水段水力损失随流量的增大呈现先减小后增大的趋势.

关键词：轴流泵模型；多安放角；性能曲线；数值计算；可信度分析
中图分类号：S277.9；O357　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1674－8530(2010)05－0378－06

Numerical calculation of axial-flow pump model with multi-blade stagger angles

Chen Hongxun, *Zhu Bing*, *Li Suibo*
(Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Based on the earlier numerical calculation about an axial-flow pump model at 0° installation angle, the same axial flow pump model was chosen and simulated at other various angles, and the performance was analyzed under steady and unsteady operating conditions. In the ANSYS CFX software, the standard $k-\varepsilon$ turbulence model and scalable wall function were used with suitable mesh number and distribution. The difference between numerical simulation and experiment was compared and analyzed. Under the standard use of CFD tools, the accuracy and error characteristic of numerical simulation were analyzed in order to guide CFD technique to engineering application. When comparing with the experiment value, it is concluded that the predicted water head value by unsteady simulation is slightly higher, while that by steady simulation is lower. Generally speaking, the unsteady simulation accuracy is superior to the steady one, and the water head error can be controlled within 5%. The efficiency error for both methods can be controlled within 7%, and there is a relative fixed amplitude deviation for unsteady simulation, which can be used to guide the error correction of efficiency prediction. According to the unsteady calculation results, the streamline distribution of impeller and guider span surfaces, the blade

收稿日期：2010－02－21
基金项目：上海市重点学科建设项目(Y0103)；上海市科技人才计划项目(09QT1402000)
作者简介：陈红勋(1962—)，男，江苏镇江人，研究员，博士生导师(chenhx@shu.edu.cn)，主要从事水动力学、水力机械流动机理研究.
朱　兵(1979—)，男，江苏盐城人，博士研究生(klarke_zhu@163.com)，主要从事旋转机械的数值模拟研究.

万方数据

span section line pressure distribution, and the variation of hydraulic loss with blade stagger angles and flow rate for different parts are analyzed. Under small flow rate condition, there exits a vortex jam phenomenon near the hub. Within the range of simulation operation conditions, the hydraulic losses for both guider part and outlet part will firstly decrease and then increase with the flow rate increasing.

Key words: axial-flow pump model; multiple stagger angles; performance curve; numerical calculation; reliability analysis

建立轴流泵几何参数和泵内流体动力参数的定量关系是研发高性能轴流泵的基础,也是指导轴流泵优化运行的基础.随着计算机技术和数值方法的发展,计算流体动力学(CFD)为实现轴流泵的性能预测和内部流场的分析提供了一个重要的手段,在轴流泵研究与开发过程中的应用越来越广泛[1-6].虽然CFD技术的应用取得了很大的发展,但是,总体上数值模拟的精度,在很多工况下还难以达到工程实用的精度要求,且提高CFD技术在轴流泵应用中的可信度的研究还不多见.

本研究是作者在文献[7]工作基础上的继续,在文献[7]中,作者采用定常和非定常的方法对轴流泵模型在0°叶轮叶片安放角下进行了不同工况的数值模拟,经网格无关性分析,认为网格单元节点规模控制在100万左右是合适的;总体而言,非定常计算要优于定常计算,但不管采用哪种方法,效率预测的精度都有待提高.这些主要结论是否对于不同叶片安放角下的运行工况具有普适性,有待进一步分析.作者采用与0°叶轮叶片安放角一致的分析方法对同一轴流泵模型进行了多角度(-2°, +2°, +4°)、多工况的数值模拟,以期能回答这个问题,为轴流泵模型性能的完整预测提供CFD技术基础.在本研究中,作者还将进一步分析叶轮和导叶圆柱面上流线分布、叶片截线压力分布和轴流泵过流部件各部分水力损失随叶轮安放角和流量的变化规律.

1 数值模拟

1.1 物理模型和计算区域

轴流泵模型转轮叶片数4片,导叶叶片数7片,转轮直径300 mm,额定转速1 450 r/min.设定计算区域包括进口延伸段、进水锥管、叶轮室、导叶、出水弯管和出口延伸段.

1.2 网格生成

文献[7]指出六面体网格可以很好地控制流向型分布以及边界层方向的正交性,故本研究仍将采用全六面体网格对计算区域进行离散.

首先采用Pro/E软件生成三维的物理模型,然后以合适的格式导出仅含有表面的模型,再由专业的网格划分工具ANSYS ICEM CFD进行后续网格划分,其六面体网格划分的思想是:通过建立类似于目标几何的空间矩形拓扑,并建立几何和拓扑之间的关联,采用点、线和面的映射技术,生成高质量的全六面体网格.这种网格划分的方法区别于以往直接对几何模型进行操作的方法(实体布尔运算),而是直接对独立创建的拓扑进行操作(切割、合并、点的移动等),极大地提高了网格划分的质量和效率.在边界表面附近,可借助O型网格环绕技术,控制壁面网格边界层的分布.

由于叶轮叶片在空间上是扭曲的,且与轴向有较大夹角,为保证网格的角度和空间的分布,一般选用双J型拓扑,允许网格从叶片前缘和后缘转向.网格划分时先针对一个叶片进行网格划分,再利用周期性,旋转复制生成整个叶轮的网格.临近叶片表面区域,采用O型网格环绕技术,控制边界层网格的分布.叶轮空间拓扑和最终生成的叶轮单通道网格如图1所示.在0°叶轮叶片安放角网格无关性分析的基础上,针对不同叶片安放角的叶轮(-2°, +2°, +4°),采用同样的拓扑、网格分布和网格数量,以保证后续的CFD分析结果具有一致性.

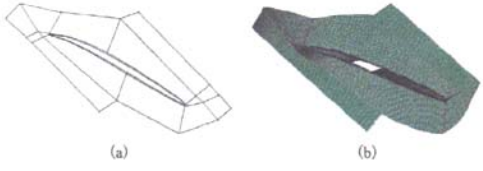


图1 叶轮拓扑和单通道网格

Fig. 1 Impeller topology and single passage mesh

湍流模型的选择直接影响要求的近壁面网格分布状况.本研究采用工程上通用的$k-\varepsilon$模型和壁面函数相结合的方法.若采用标准的对数率壁面函数方法,一般要求Y^+大于11.06(对数率层和线性层流粘性底层的分界点),所以盲目增加临近壁面网格的数目并不能提高数值预测的精度[8].本研究采

万方数据

用伸缩壁面函数方法，自动限制 Y^+ 的下限为11.06，从而避免网格的过密造成结果的不连续性. 关于 Y^+ 的上限需要针对不同的分析对象有所区别，对于水泵，一般建议 Y^+ 的上限小于300. 本研究严格遵循上述原则，调整临近壁面网格分布.

1.3 计算工况及求解控制

本研究采用与文献[7]相同的计算方法和定解条件，分别针对不同的叶片安放角(-2°，0°，+2°和+4°)在不同的流量工况下进行定常和非定常计算. 每个叶片安放角下分别选取了9个工况点，选取的方法是除试验测量获得的最高效率点外，向小流量侧取3个点，大流量侧取5个点. 工况变化范围在各自最高效率点流量的0.85～1.15倍之间.

定常计算选用基于准定常假设的冻结转子交界面模型，此模型可考虑动、静转子在某一固定相对位置的干涉作用，但无法实时反映不同相对位置的动、静干涉作用. 非定常计算采用瞬态滑移交界面模型，此模型能实时考虑动静转子间的干涉作用. 借助此模型，还可进行旋转机械转速快变的非稳态工况分析，如启停和调速过程等. 本研究主要关心转速恒定的稳态工况下宏观性能的实时周期性变化，采用定常计算的结果作为非定常计算的初场，以减少瞬态迭代的步数，加速获得周期稳定解.

一个收敛且网格无关的解对实际工程来说才是真正有价值的. 判断数值计算的结果是否真正收敛需要综合考虑方程的迭代残差、系统守恒量和关心的物理量的变化等方面的因素. 本研究定常计算主要以监控的扬程不随迭代步变化为收敛判据. 非定常计算选取的时间步长保证每个时间步内方程均方根残差(RMS)小于 1.0×10^{-4}，且监控的扬程随叶轮旋转位置呈现周期性变化. 非定常计算叶轮共旋转5圈，选取最后一周不同时刻结果的平均量进行宏观性能的统计.

2 数值计算结果分析

2.1 宏观性能预测精度

本研究在文献[7]工作的基础上，进一步深入分析在不同的叶片安放角下，CFD预测轴流泵模型宏观性能的精度和误差规律，为应用CFD技术指导工程应用提供一定的指导意见.

将根据定常和非定常计算结果预测的扬程和效率以无量纲的形式来表示，不同角度下各工况的流量和扬程均选取0°安放角下最高效率点流量和扬程作为参照进行无量纲化. 预测的扬程和效率与试验结果的相对误差以误差的绝对值表示，如图2－5所示.

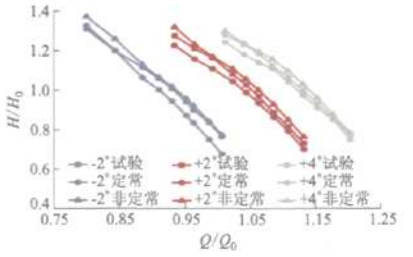


图2 计算扬程与试验扬程对比

Fig. 2 Comparisons between computational and experimental head

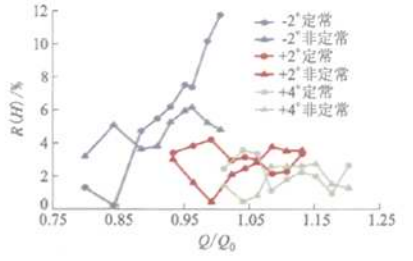


图3 计算扬程与试验扬程的相对误差

Fig. 3 Relative errors between computational and experimental head

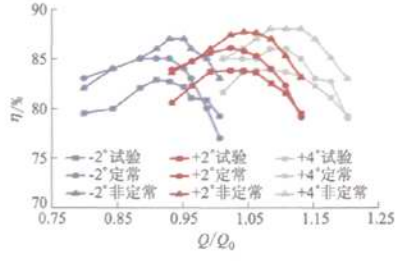


图4 计算效率与试验效率对比

Fig. 4 Comparisons between computational and experimental efficiency

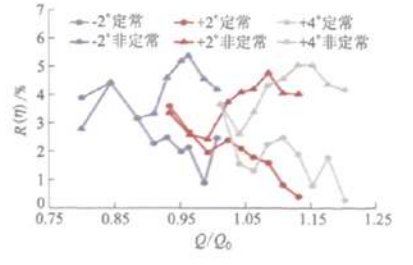


图5 计算效率与试验效率的相对误差

Fig. 5 Relative errors between computational and experimental efficiency

万方数据

由图2定常和非定常计算扬程和试验值对比可以看出，非定常计算的扬程略高于试验值，定常计算的扬程值低于试验值.

由图3预测的扬程相对误差图可以看出，非定常计算的总体精度高于定常计算，且与试验相比，误差可控制在一定的范围之内(5%)；而定常计算的误差，在偏大流量工况，从某一流量开始，误差随流量的增大而增大.

由图4定常和非定常计算效率和试验值对比可以看出，非定常计算的效率在各计算工况下均大于试验值，但非定常的效率曲线和试验曲线的变化趋势却是一致的，说明在最高效率点附近工况点，两者间存在一固定范围的偏差，据此可用于指导计算结果的修正. 而定常计算效率曲线与试验效率曲线存在交点，此交点位于最高效率点的偏大流量侧，这可能与叶轮和导叶相对位置有关，需要针对此问题进行进一步的研究.

由图5预测的效率相对误差图可以看出，非定常计算的效率误差变化幅度较小，在偏大流量工况，随着流量的增大，效率的计算误差呈现逐渐减小趋势. 由于计算效率是由扬程和叶片轴向扭矩共同决定的，而扭矩的误差由作用于叶片表面的分布力的预测精度决定，应与湍流模型和近壁面处理方法的合理性有关，还需进一步研究提高效率计算精度的方法.

2.2 叶轮和导叶内部流动

为了便于分析叶轮和导叶内的流动情况，定义从轮毂到轮缘的无量纲数 *Span*，取值范围为0～1，分别选取 *Span* =0.1，0.5 和0.9 处的圆柱面展开.

在0°叶片安放角设计流量工况下，叶轮和导叶不同的 *Span* 位置内部流线比较平顺，未见大结构的旋涡流动. 但经比较不同的叶片安放角和流量工况发现，在小流量工况下，靠近轮毂位置(*Span* =0.1)存在明显的旋涡结构，如图6所示.

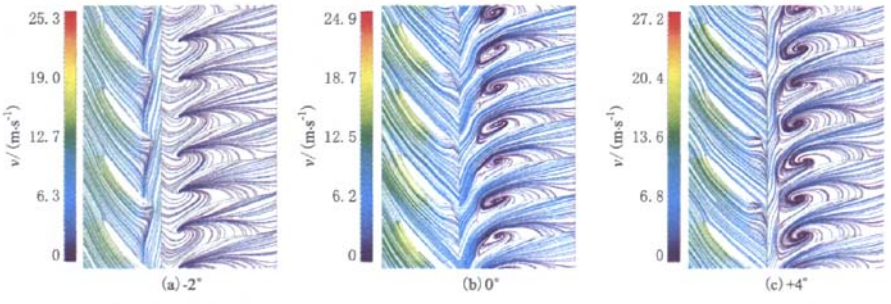


图6 小流量工况叶轮和导叶内部流线分布

Fig. 6 Impeller and guider blades streamline under low flow rate condition

由图6可以看出，叶轮和导叶存在强烈的干涉作用；小流量工况，导叶的入流偏角较大；在靠近轮毂位置，发现旋涡堵塞现象. 这说明如果导叶安放角也能够像叶轮叶片安放角度那样进行调节，则可适应工况的变化，减小水力损失.

2.3 叶片表面截线压力分布

选取设计工况点(最高效率点)的计算结果，在不同的 *Span* 位置采用圆柱面截取叶轮和导叶叶片，形成截线，将不同的叶片安放角下截线上的相对压力分布绘制在同一张图上，如图7,8所示.

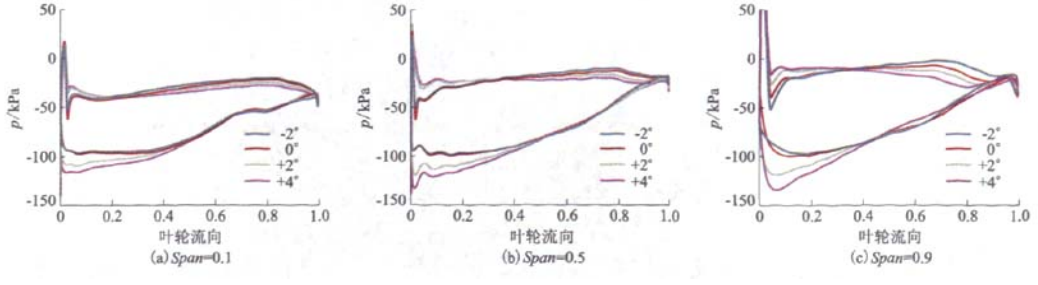


图7 叶轮截线压力分布

Fig. 7 Section line pressure distribution of impeller

万方数据

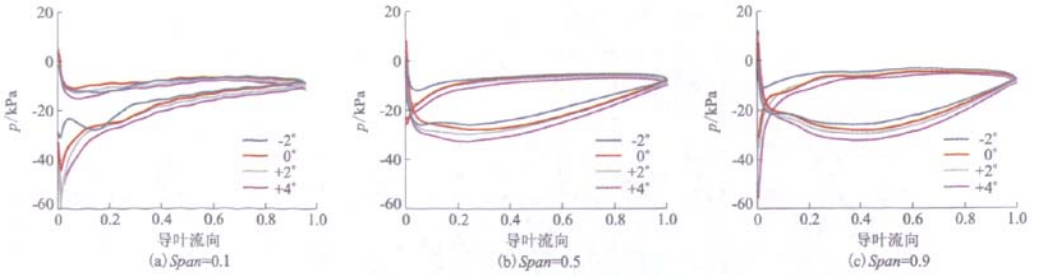


图 8　导叶叶片截线压力分布

Fig. 8　Section line pressure distribution of guider blades

由图 7,8 可以看出,在叶轮和导叶叶片的前缘存在驻点压力急剧升高,背压面脱流压力大幅下降的现象. 叶轮尾缘由于仿真时尾部几何为切割处理,存在一定厚度的台阶,因此发现局部压力下降现象.

2.4　过流部件分段水力损失

将轴流泵模型沿流向分为进水段、叶轮段、导叶段、出水弯管段,不计及进、出口延伸段. 选取瞬态工况最后一个旋转周期的计算结果进行分析,计算不同时刻截面质量流平均总压值,并对不同时刻再进行平均,计算各段的水力损失. 以 0° 安放角下最高效率点流量和各段水力损失为参照进行无量纲化,图 9 为各段水力损失随流量和安放角的变化.

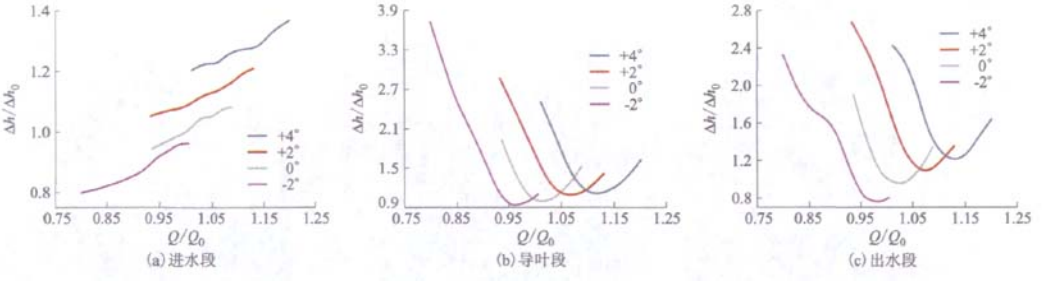


图 9　分段水力损失随流量和角度变化

Fig. 9　Changes of hydraulic losses with different flow rates and installation angles

由图 9 可以看出,进水段水力损失随流量和叶片安放角的增大而增大;在选取的工况点中,导叶段和出水段水力损失随流量增大呈现先减小后增大的趋势,这说明导叶段和出水段的水力损失受上游叶轮流态的影响较大,且导叶段水力损失存在一个最优的运行工况点.

3　结　论

在对轴流泵模型叶片 0° 安放角数值分析工作的基础上,采用一致的分析方法,进一步对同一模型在叶片 -2°, +2° 和 +4° 安放角下进行了多工况定常和非定常计算,以分析 CFD 预测宏观性能的精度和误差规律,得到结论如下:

(1)非定常计算预测轴流泵模型的扬程在高效工况点附近具有较好的精度,而在某些叶片安放角下,定常计算的误差较大,这可能是由于定常计算时假定叶轮位置固定,采用的定常交界面模型不能考虑不同相对位置的动静干涉影响. 定常和非定常预测的效率误差在 7% 以内,预报精度还有待于提高,但发现非定常计算的效率与试验效率存在一相对固定幅度的偏差,据此可用于修正同类模型效率的预测值. 上述结果进一步验证了非定常计算总体而言优于定常计算的结论.

(2)基于非定常计算的结果,进一步分析了叶轮和导叶不同 *Span* 圆柱面上内部流态,发现在小流量工况,靠近轮毂位置存在旋涡堵塞现象.

(3)在设计点附近,导叶段和出水段水力损失随流量增大呈现先减小后增大趋势,说明导叶段和出水段水力损失受叶轮内部的流态影响较大,导叶段也需要适应流量变化进行可调节设计.

(4)为保证不同分析结果具有相似可比性,本研究详细介绍了叶轮网格生成方法和过程,临近壁面边界层的控制及对应选择模型的 Y^+ 要求,比较了

万方数据

定常和非定常交界面模型间的差异,这对规范使用CFD技术指导工程应用具有一定的指导意义.

参考文献(References)

[1] 杨军虎,张 炜,王春龙,等.潜水轴流泵全流道三维湍流数值模拟及性能预估[J].排灌机械,2006,24(4):5-9.
Yang Junhu, Zhang Wei, Wang Chunlong, et al. Numerical simulation of turbulent flow through full passage of submersible axial pump and performance predictions [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2006, 24(4):5-9. (in Chinese)

[2] 王春林,赵佰通,彭 娜,等.带前置导轮轴流泵内流场数值模拟及性能预测[J].排灌机械,2008,26(6):41-45.
Wang Chunlin, Zhao Baitong, Peng Na, et al. Numerical simulation and performance prediction of interior flow field for axial flow pump with front guide impeller[J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(6):41-45. (in Chinese)

[3] Li Yaojun, Wang Fujun. Numerical investigation of performance of an axial-flow pump with inducer[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2007, 19(6):705-711.

[4] 黄欢明,高 红,沈 枫,等.轴流泵内流场的数值模拟与试验[J].农业机械学报,2008,39(8):66-69.
Huang Huanming, Gao Hong, Shen Feng, et al. Numerical simulation and experimental validation of the flow field in axial flow pump[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2008, 39(8):66-69. (in Chinese)

[5] 王国玉,陈荣鑫,余志毅,等. 串列式双级轴流泵性能的数值模拟[J].机械工程学报,2007, 43(12):39-45.
Wang Guoyu, Chen Rongxin, Yu Zhiyi, et al. Numerical simulation of the performance of tandem axial flow pump[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2007, 43(12): 39-45. (in Chinese)

[6] 李江云,胡少华,周龙才,等.新滩口泵站改造方案全流道仿真分析[J].工程热物理学报,2008,29(7):1136-1140.
Li Jiangyun, Hu Shaohua, Zhou Longcai, et al. The numeric simulation of the whole flow passage of Xin Tan Kou Pumping Station for its improved project[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2008, 29(7):1136-1140. (in Chinese)

[7] 陈红勋,朱 兵. 单台轴流泵模型0°安放角的数值计算分析[J]. 水动力学研究与进展,2009,24(4):480-485.
Chen Hongxun, Zhu Bing. Analysis of numerical calculation with an axial-flow pump model at 0° installation angle[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2009, 24(4):480-485. (in Chinese)

[8] Grotjans H, Menter F R, Papailiou K D, et al. Wall functions for general application CFD codes ECCOMAS 98[C]// *Proceedings of the Fourth European Computational Fluid Dynamics Conference*. [s. l.]: John Wiley and Sons, 1998:1112-1117.

(责任编辑 陈建华)

万方数据