Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering

doi: 10.3969/j. issn. 1674 - 8530. 14.1003

# 基于大涡模拟的动静叶栅内固液两相流动

韩伟,岳婷,李仁年,金毅,申正精,张钊

(兰州理工大学能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050)



韩伟

摘要:为研究离心泵动静叶栅内固液两相非定常流动情况,了解流道内的流动细节,以导叶式离心泵为研究对象,采用 ICEM 软件对模型泵进行结构化六面体网格划分,基于 Mixture 混合模型和滑移网格(sliding mesh)技术,运用大涡模拟(large eddy simulation, LES)模型对其全流道进行三维非定常数值计算.对比分析了清水和固液两相2种介质时,动静叶栅内的拟序涡流结构及演化过程的不同,并分析了固液两相流介质时流道内几个不同位置处涡的演化.结果表明:泵在输送清水和固液两相介质时,附着涡的结构基本保持不变,而由于叶轮旋转所产生的涡,在叶轮旋转运动的过程中则会有卷曲、合并、撕裂的演化形式;流道内的涡量大小分布规律在清水和固液两相介质下是相同的,但是固体颗粒的加入会加快涡的耗散速度,并且涡产生的位置和合并形式都发生了变化;固液两相介质时,动静叶栅内的涡在不同位置的演化过程是不同的.

关键词: 离心泵; 动静叶栅; 固液两相流; 大涡模拟; 拟序涡结构演化

中图分类号: TH311 文献标志码: A 文章编号: 1674-8530(2015)11-0940-05

韩伟 岳婷 李仁年 等. 基于大涡模拟的动静叶栅内固液两相流动[J]. 排灌机械工程学报 2015 33(11):940-944.

Han Wei ,Yue Ting ,Li Rennian ,et al. Solid-liquid two-phase flow in rotor and stator cascades based on LES[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering( JDIME) , 2015 ,33(11):940 - 944. (in Chinese)

## Solid-liquid two-phase flow in rotor and stator cascades based on LES

Han Wei , Yue Ting , Li Rennian , Jin Yi , Shen Zhengjing , Zhang Zhao (School of Energy and Power Engineering , Lanzhou University of Technology , Lanzhou , Gansu 730050 , China)

Abstract: In order to study unsteady solid-liquid two-phase flows in rotor and stator cascades of centrifugal pump and understand the flow details in the flow passages, a centrifugal pump with radial diffuser is chosen, and then the unsteady 3D flow field is simulated based on the mixture multiphase model and sliding mesh as well as the large eddy simulation (LES) turbulence model with structures mesh generated in ICEM. The evolution process of coherent vortexes in the two cascades is exploited and the change in vortex pattern at different locations is analyzed in the solid-liquid two-phase flow by comparing with single phase water flow. The results show that the pattern of attached vortexes remains unchanged basically under two-phase and single phase flow conditions. The vortexes produced by impeller rotation experience a series of evolution process, namely curling, merging and breaking. Even though the solid particles affect the distribution of vorticity in the flow field in the pump a little, they accelerate the dissipation of eddy energy and alter the vortex location and breaking pattern. The evolution process of vortexes depends on positions considered in the cascades under either single or two-phase flow condition.

**Key words**: centrifugal pump; stator-rotor cascades; solid-liquid two-phase flow; large eddy simulation; evolution process of vortex

收稿日期: 2014-12-25; 网络出版时间: 2015-11-18

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20151118.1524.014.html

基金项目: 国家自然科学青年基金资助项目(51209113)

作者简介: 韩伟(1977—) ,男 安徽砀山人 副教授 ,博士(hanwei@ lut. cn) ,主要从事水力机械固液两相流动理论研究. 岳婷(1991—) ,女 ,甘肃文县人 ,硕士研究生(yuetinglife@ sina. com) ,主要从事水力机械内部固液两相流动研究.

固液两相流泵广泛应用于采矿矿渣、电厂粉煤灰以及煤炭水煤浆的输送、运输和水利工程中疏浚作业等<sup>[1]</sup>.在固液两相流运动过程中,固相颗粒和液相流体有着密切的联系并在运动中相互影响和制约,同时还存在着固相与固相、液相与液相之间的作用,固相颗粒的存在会改变原有流场的特性<sup>[2]</sup>.

目前 已有学者对离心泵内部非定常瞬态流动 特性进行了研究[3]. 王志坚等[4]、侯树强等[5]对叶 轮机械内部流场的数值模拟的发展进行了介绍,模 拟并分析了离心泵叶轮内的三维流场. 文献[6-8] 对离心泵内固液两相流场进行了研究,分析了其内 部速度、压力的分布规律以及固相的本身属性对流 场的影响. Feng 等<sup>[9]</sup> 采用非定常雷诺平均方法研究 了小流量下径向导叶与叶轮动静干涉效应下的非 定常流动特性. 黎义斌等[10]、肖若富等[11]对离心泵 和水泵水轮机变工况流场进行了预测和分析,得到 了泵和水泵水轮机内部的旋涡结构; 张立翔等[12] 基 于三维瞬态 N-S 方程,采用大涡模拟方法中的 Smargorinsky 模型,应用模拟动静干扰效果较好的 滑移网格技术 模拟了水轮机导水机构和转轮流道 内大尺度涡结构的瞬态发展演变过程. 黄思等[13]、 刘梅清等[14] 采用大涡模拟分别对离心泵、双吸离心 泵内部湍流场进行数值计算,得到其内部非定常流 动特性.目前大多数研究都集中于清水介质时的动 静叶栅内非定常流动特性,而在多相流工况下的非 定常流动特性研究成果还较少.

为了研究离心泵动静叶栅内固液两相非定常流动特性,文中以导叶式离心泵为研究对象,借助计算流体动力学工具,采用大涡模拟方法,对固液两相介质时导叶式离心泵内部三维全流场进行数值模拟,对比分析不同位置由于动静干涉引起的涡的演化过程,并与清水介质时比较,分析固体颗粒对流场内涡结构变化的影响,为研究动静叶栅内固液两相非定常流动特性提供参考.

## 1 离心泵动静叶栅物理模型

#### 1.1 三维模型及网格划分

所研究泵的性能参数分别为设计流量 Q=45.7 m³/h ,扬程 H=29.3 m ,转速 n=2900 r/min. 几何参数分别为叶轮叶片数 Z=5 ,导叶叶片数  $Z_{\rm g}=8$  ,叶轮进口直径  $D_{\rm j}=74$  mm ,叶轮出口直径  $D_{\rm 2}=161$  mm ,蜗壳出口直径  $D_{\rm 3}=80$  mm.

因为大涡模拟对网格质量要求较高,为了更容易实现区域的边界拟合,与实际的模型更接近,采用 ICEM 软件对模型泵进行结构化六面体网格划分.采用分区域网格划分技术,对模型泵进口段、叶轮、导叶、蜗壳进行区域网格划分,各区域的网格划分如图1所示,针对每个区域用不同的网格尺度进行网格无关性检验,最终确定整个计算域网格数为9451312 网格节点数为9804844.数值求解器选择 Fluent 软件.

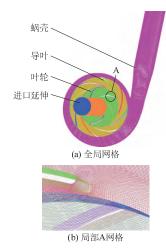


图 1 计算域网格 Fig. 1 Mesh of computational domain

#### 1.2 控制方程和湍流模型

文中研究的流场是三维不可压缩湍流,根据时均连续性方程和 N-S 方程建立流动控制方程组,并采用有限体积法对控制方程进行离散.

CFD 数值计算时,选择大涡模拟 Smagonisky 模型. 两相介质工况下,采用 Mixture 多相流模型,主相为清水,第二相为固体颗粒(粒径为 0.01 mm,颗粒密度为 2 650 kg/m³ 颗粒质量分数为 10%). 考虑叶轮转速以及计算规模,确定叶轮每旋转 3°(0.172 4 μs)作为1个时间步长,共 120个时间步长. 由于叶轮旋转前几圈数据不稳定,选择对第 4 个周期的计算结果进行分析[15].

#### 1.3 边界条件

假定入口固相均匀分布,进口边界条件设定速度进口,出口边界条件设定自由出流,壁面采用无滑移边界条件.

 $y^{+}$ 表示近壁区的黏性底层距离的量纲一参数,影响到数值计算时黏性底层的捕捉情况. 不同湍流模型对  $y^{+}$ 值的要求不同,大涡模拟 Smagonisky 模型对  $y^{+}$ 值的要求较高,第一层网格布置应尽量使  $y^{+}$ 值接近 1.

$$y^{+} = \frac{h_{y}}{\mu} \sqrt{\frac{\tau_{w}}{\rho}} , \qquad (1)$$

式中:  $h_y$  为第一层网格到壁面的高度;  $\rho$  为液体密度;  $\mu$  为动力黏度;  $\tau_w$  为壁面切应力.

图 2 为叶轮壁面处  $y^+$  值分布 ,可以看出 ,叶片表面大部分区域  $y^+$  值为 0. 35 ~ 4. 21 ,盖板壁面处  $y^+$  值为 1. 31 ~ 5. 17 ,局部区域达到 8. 07 ,基本满足大涡模拟 Smagonisky 模型在数值计算中对近壁区的  $y^+$  值要求.

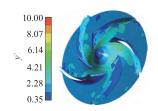


图 2 壁面处  $y^+$  值分布 Fig. 2  $y^+$  distribution on impeller walls

## 2 计算结果及分析

#### 2.1 涡量分析

涡量是流体速度矢量的旋度,通常用涡量反映涡旋的大小和方向.泵内的流动是由一系列大小、能量各不同的涡构成的,涡量在一定程度上可以反映涡的变化情况.图 3 分别为清水介质和固液两相介质时,在某一时刻叶轮出口处垂直于轴线方向中间截面的涡量分布.

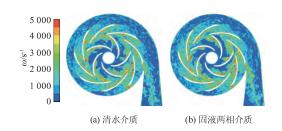


图 3 中间截面涡量分布 Fig. 3 Vorticity contour in mid-span plane

由图 3 可以看出: 不论是清水介质还是固液两相介质 涡量大小的分布规律基本一致 ,这说明所加固体颗粒对流场的涡量分布影响不大; 在整个流道内,叶片背面附近、导叶和隔舌处的涡量较大; 靠近导叶进口会出现明显的高涡量区 ,蜗壳内涡量则很小,且涡量随着蜗壳截面面积增大而逐渐减小 ,这是由于高速水流从叶片流出后与导叶发生强烈的撞击,从而产生了涡,经过导叶的整流作用,使得蜗壳内流态改善,且随着蜗壳截面变大流动缓冲区

变大而逐渐平稳.

#### 2.2 清水介质时叶轮和导叶处涡的演化

图 4 为清水介质时 ,叶轮和导叶附近涡的演化过程. 叶轮顺时针旋转  $t_0$  为初始时刻  $\pi$  为叶轮旋转  $6^\circ$ 所需时间.

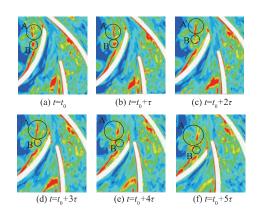


图 4 清水介质时动静叶栅区域涡演化过程 Fig. 4 Evolution process of vortexes in impeller and diffuser in water flow

由图 4 可以看出 叶片出口方向 2 个小涡在  $t=t_0$  到  $t=t_0+\tau$  时段内合并为类似于 "1"字形涡 A 体积逐渐变大; 在  $t=t_0+4\tau$  时此涡开始被撕裂为 2 个小涡 随后 2 个小涡距离越来越远 ,有向相反方向移动的趋势; 贴在叶片背面的一条带状涡在  $t=t_0$  开始脱落出一个体积较小的涡 B ,涡 B 的能量被消耗 ,体积逐渐减小 在  $t=t_0+3\tau$  时刻分解为体积更小的 2 个涡,分别向叶轮出口移动;脱落下涡 B 后,附着在叶片背面的带状涡变为波浪形状 到  $t=t_0+5\tau$  时刻时,又被撕裂为 3 个小涡;导叶上的涡主要附着在导叶凹面,在  $t=t_0$  到  $t=t_0+\tau$  时段内,涡的结构变化并不明显;到  $t=t_0+2\tau$  时,由于叶片越来越靠近,脱落下来一个涡,随着叶片旋转远离导叶之后,其沿着导叶移动,形状变化不大,可以看到,清水介质时,导叶区涡的耗散比较缓慢.

#### 2.3 固液两相介质时叶轮和导叶处涡的演化

图 5 为加入固体颗粒后流场内涡的演化过程,可以看出: 一条连续的带状涡紧贴在叶片背面,随着叶轮的旋转,从  $t=t_0+\tau$  时刻开始此带状涡被切断为多个小涡,这些被撕扯间断的涡随后一直附着在叶片上,涡结构基本不变; 叶片出口处在  $t=t_0+\tau$  时形成一个"V"字形的涡 C,在  $t=t_0+2\tau$  时刻分解为 2 个涡,体积逐渐变小; 在导叶内,贴附在导叶凹面上的圆弧形涡 D 随着叶片靠近,在  $t=t_0+\tau$  时刻迅速分解为 D1 和 D2; D2 能量逐渐被耗散,体积变小,而 D1 依然附着在导叶凹面; 到  $t=t_0+3\tau$  时刻,

观察到涡 D2 开始分解. 到  $t = t_0 + 4\tau$  时刻 ,叶片慢慢远离 ,涡 D2 吞并了涡 D1 分解的一个小涡 ,逐渐向导叶出口运动; 与清水相比可知 ,固液两相介质时导叶区涡的耗散速度较快 ,而叶轮叶片处的涡结构变化没有清水介质时明显 ,这说明固体颗粒的加入对涡在耗散过程中的位置和合并形式有一定的影响.

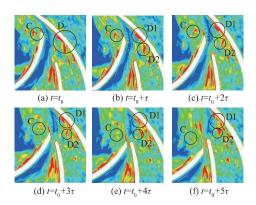


图 5 固液两相介质时叶轮和导叶区域涡演化过程 Fig. 5 Evolution process of vortexes in impeller and diffuser in two-phase flow

### 2.4 固液两相介质时导叶出口和隔舌处涡的演化

因为靠近隔舌的 2 个导叶出口流动面积突然减小,所以只有在 2 处明显地观察到了强烈的涡. 同样 在隔舌处也有较大的涡量. 图 6 为靠近隔舌处导叶出口以及隔舌处涡的变化过程,可以看出: 导叶出口处涡结构的变化不明显,从  $t=t_0$  到  $t=t_0+\tau$  时段形成紧贴在导叶出口的涡,吸收周围小涡的能量之后,体积有变大的趋势;在  $t=t_0+3\tau$  时刻开始分解同时吸附周围的小涡,慢慢地偏离导叶出口,向蜗壳方向移动;附着在隔舌的涡,在  $t=t_0+2\tau$  时刻开始沿着隔舌形状向上凸起分解为 2 个小涡,并向前移动.

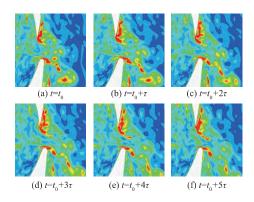


图 6 固液两相介质时导叶出口、隔舌处涡演化过程 Fig. 6 Evolution process of vortexes at diffuser outlet and near volute tongue in two-phase flow

## 3 结论

应用大涡模拟 Smagonisky 模型和 Mixture 多相流模型 进行高质量结构化网格划分,成功实现了固液两相条件下导叶式离心泵的非定常数值计算,得到结论如下:

- 1) 在清水介质或固液两相介质下,流道内附着 涡的结构差别不大,由于叶轮旋转所产生的涡,都 会有卷曲、合并、撕裂的演化形式.
- 2) 两种介质条件下 模型泵全流道内涡量大小分布规律一致,但导叶区和叶片区涡的合并形式、耗散速率不同. 所加固体颗粒对泵内流场没有影响,但是对涡在耗散过程中的位置、合并形式和涡的耗散速率有明显的影响.

#### 参考文献(References)

- [1] 倪福生 杨年浩 孙丹丹. 固液两相流泵的研究进展 [J]. 矿山机械 2006 34(2):67-69.

  Ni Fusheng ,Yang Nianhao ,Sun Dandan. The research progress of solid-liquid two-phase pump [J]. Mining Machinery 2006 34(2):67-69. (in Chinese)
- [2] 倪晋仁,王光谦. 固液两相流研究的两种基本方法之比较[J]. 泥沙研究,1992(3):95-102.

  Ni Jinren, Wang Guangqian. The comparison of two basic study methods in the solid-liquid two-phase flow[J].

  Journal of Sediment Research,1992(3):95-102.(in Chinese)
- [3] 邵春雷 顾伯勤 陈晔. 离心泵内部非定常压力场的数值研究[J]. 农业工程学报 2009 25(1):75-80. Shao Chunlei Gu Boqin Chen Ye. Numerical simulation of unsteady pressure field in centrifugal pumps [J]. Transactions of the CSAE ,2009 ,25(1):75-80. (in Chinese)
- [4] 王志坚 李璐璐 郑建设. 基于 CFD 的离心泵内部三 维数值模拟和性能预测 [J]. 流体机械 2012 40(6): 14-18.
  - Wang Zhijian ,Li Lulu Zheng Jianshe. Numerical simulation of three-dimensional flow in centrifugal pump and performance prediction based on CFD [J]. Fluid Machinery 2012 40(6):14-18. (in Chinese)
- [5] 侯树强 ,王灿星 林建忠. 叶轮机械内部流场数值模拟研究综述[J]. 流体机械 2005 33(5):30-35.

  Hou Shuqiang ,Wang Canxing ,Lin Jianzhong. Summary of numerical simulation of the internal flow in the turbomachinery [J]. Fluid Machinery 2005 33(5):30-35.

#### (in Chinese)

- [6] Li Yi Zhu Zuchao "He Zhaohui , et al. Abrasion characteristic analyses of solid-liquid two-phase centrifugal pump [J]. Journal of Thermal Science , 2011 ,20 (3): 283 287.
- [7] 刘栋玉 横亚宇 刘光伟 等. 旋流泵内部固液两相流动的 CFD 模拟分析 [J]. 新技术新工艺 2010(9):35-38.

Liu Dongyu ,Huang Yayu ,Liu Guangwei , et al. CFD simulation analysis of the solid-liquid two-phase inner flow field of vortex pump [J]. New Technology and New Process 2010(9):35 – 38. (in Chinese)

- [8] 李国威 冯新伟 崔俊奎 等. 两种叶型离心泵内固液 两相流场的对比[J]. 南水北调与水利科技 2012 ,10 (2):116-119.
  - Li Guowei 'Feng Xinwei 'Cui Junkui , et al. Comparative study of solid-liquid two-phase flow field in centrifugal pump with two types of vanes [J]. South to North Water Diversion and Water Science & Technology ,2012 ,10 (2):116-119. (in Chinese)
- [9] Feng J, Benra F K, Dohmen, et al. Unsteady flow visualization at part-load conditions of a radial diffuser pump: By PIV and CFD [J]. Journal of Visualization 2009, 12 (1):65-72.
- [10] 黎义斌 赵伟国 汪秀勇 等. 离心泵变工况流场分析 及数值模拟[J]. 兰州理工大学学报 2007 33(6):43 -46.
  - Li Yibin Zhao Weiguo ,Wang Xiuyong , et al. Analysis and numeric simulation of off-design flow field in centrifugal pump [J]. Journal of Lanzhou University of Technology 2007 33(6):43 46. (in Chinese)
- [11] 肖若富 孙卉 刘伟超 筹. 预开导叶下水泵水轮机 S 特性及其压力脉动分析 [J]. 机械工程学报 2012 48 (8):174-179.

Xiao Ruofu Sun Hui Liu Weichao, et al. Analysis of S characteristics and its pressure pulsation of pump-turbine

- under pre-opening guide vanes [J]. Journal of Mechanical Engineering 2012 48(8):174-179. (in Chinese)
- [12] 黄剑峰, 张立翔, 王文全, 等. 基于大涡模拟的水轮机内瞬态湍流场特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2010 28(6):502-505.

Huang Jianfeng Zhang Lixiang ,Wang Wenquan , et al. Large eddy simulation of transient turbulent flow in Francis turbine [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering 2010 ,28 (6): 502 – 505. (in Chinese)

[13] 黄思,吴玉林. 离心泵全三维流场的大涡数值模拟 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版 2006 34(4): 111-114.

Huang Si ,Wu Yulin. Large-eddy numerical simulation of three-dimension flow in centrifugal pump [J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition 2006 34(4):111-114. (in Chinese)

[14] 刘梅清,李秋玮,白耀华,等. 湍流模型在双吸离心 泵数值模拟中的适用性分析 [J]. 农业机械学报, 2010 41(S1):6-9.

Liu Meiqing ,Li Qiuwei ,Bai Yaohua , et al. Applicability of turbulence models in numerical simulation of double suction centrifugal pump [J]. Transaction of the Chinese Society for Agricultural Machinery 2010  $\sharp$ 1(S1):6-9. (in Chinese)

[15] 祝磊,袁寿其,袁建平,等. 不同型式隔舌离心泵动静干涉作用的数值模拟[J]. 农业工程学报 2011 27 (10):50-55.

Zhu Lei ,Yuan Shouqi ,Yuan Jianping , et al. Numerical simulation for rotor-stator interaction of centrifugal pump with different tongues [J]. Transactions of the CSAE ,  $2011\ 27(\ 10):50-55$ . (in Chinese)

(责任编辑 陈建华)