

# 运用三维动网格技术模拟计算离心泵非定常流动

黄思<sup>1</sup>, 杨富翔<sup>1</sup>, 郭京<sup>1</sup>, 区国惟<sup>2</sup>

1. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640
2. 广东省佛山水泵厂有限公司, 广东佛山 528000

**摘要** 运用三维动网格技术,对离心泵非定常流场进行数值模拟。使用 Fluent 流动软件的 Profile 文件定义叶轮计算域边界面的转向和转速,将所有计算域设在同一个惯性系中。采用弹簧光滑法、动态分层法及局部网格重构法 3 种方式实现计算域网格变形。在同样的计算模型、计算网格、初始条件、边界条件及软件设置条件下,将动网格与传统的滑移网格计算结果进行了对比。计算结果显示:在经历约 5 个叶轮旋转周期后,两种计算网格数值结果趋于一致,但动网格的迭代速度几乎是滑移网格迭代速度的 3 倍。原因是动网格计算仅在一个惯性系中进行,新旧网格节点的拓扑关系保证了良好的计算精度和时间上的连贯性;而滑移网格计算因多参考系之间的数据对接影响了时间上的连贯性、降低了迭代速度。研究表明采用动网格技术可实现水泵的三维非定常流场数值模拟,具有较强的通用性和广阔的应用前景。

**关键词** 三维动网格;离心泵;非定常流场;数值模拟

**中图分类号** TQ051.7

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.24.004

## Numerical Simulation of 3D Unsteady Flow in Centrifugal Pump by Dynamic Mesh Technique

HUANG Si<sup>1</sup>, YANG Fuxiang<sup>1</sup>, GUO Jing<sup>1</sup>, OU Guowei<sup>2</sup>

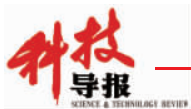
1. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China
2. Foshan Pump Factory Co., Ltd. (Kenflo), Foshan 528000, Guangdong Province, China

**Abstract** The 3D dynamic meshing technique is applied for the numerical simulation of unsteady flow fields in a centrifugal pump using the Fluent software. The surface motion of the impeller in the computational domain is defined by the profile file in the Fluent software, in which the rotational direction and the speed of the impeller are specified. The simulation results are compared with those obtained by the widely used sliding mesh technique to illustrate the superior computational efficiency of the dynamic mesh method. In the dynamic mesh technique, all computational domains, considered as stationary, are defined in an inertial reference frame, while the topological relationships between the previous and the current mesh nodes are retained to ensure a good precision and time coherency. Three methods, namely the spring-based smoothing, the dynamic layering and the local re-meshing are used to cope with mesh deformations. Comparisons of solutions with those obtained by using the sliding mesh technique with an identical computational model, the same meshes, and initial and boundary conditions show that the results of both methods converge to comparable solutions within five revolutions of the impeller. The iterative speed of the dynamic mesh method, however, is almost three times of that of the Sliding Mesh method. The results thus suggest that the dynamic mesh technique for the flow simulation in centrifugal pumps, defined in an inertial reference frame, yields a substantially better computing efficiency than the sliding mesh method involving a comprehensive data transfer among multiple reference frames. This work shows that dynamic mesh technique can be used for numerical simulations of a three-dimensional unsteady flow field in pumps and has a strong versatility and broad application prospects.

**Keywords** three-dimensional dynamic mesh; centrifugal pump; unsteady flow field; numerical simulation

收稿日期: 2013-03-15;修回日期: 2013-04-26

作者简介: 黄思, 教授, 研究方向为流体机械及工程, 电子信箱: huangsi@scut.edu.cn



## 0 引言

水泵的非定常流动分析对于了解水泵的动态特性,提高其性能及可靠性具有重要的科学和工程应用价值。现阶段水泵的非定常流动计算方法主要有滑移网格法<sup>[1,2]</sup>,该方法使用多参考系 (Multiple Reference Frame, MRF)<sup>[3]</sup>,将叶轮计算域作为一个滑移子域设置在旋转参考系 (非惯性系) 中,滑移网格随参考系一起转动无须重新生成,并可保持初始网格的质量,其余计算域设在惯性系。两个参考系之间利用滑移界面进行数据对接,从而实现整体流场的计算。

动网格技术<sup>[4,5]</sup>主要用来解决流场形状因边界运动而随时间改变的问题。理论上讲,动网格是解决非定常流动问题的通用办法,在工业中的应用主要有偏心泵或齿轮泵的转动<sup>[6,7]</sup>、阀门的开关过程<sup>[8-10]</sup>、活塞在缸中的往复运动<sup>[11-12]</sup>等。但动网格方法在应用到三维情形时,复杂性陡增,变形后的网格往往出现负体积而导致计算出错终止,因此动网格技术应用目前仍局限于二维<sup>[13]</sup>或准三维 (二维域在法向拉伸而成) 的案例。

鉴于动网格技术具有自适应调节特点、较强的通用性和广阔的应用前景,本文采用三维动网格方法开展离心泵非定常流动计算并与传统的滑移网格计算进行对比,探讨动网格技术应用于水泵计算的可行性和潜力。为便于比较,在上述两种网格的计算中,采用了同样的计算模型、计算网格、初始条件、边界条件及统一的软件设置。

## 1 计算方法

### 1.1 计算域建模及网格划分

选取单级单吸 IS 型管道离心泵作为研究对象,泵设计工况参数为:转速  $n=2900\text{r}/\text{min}$ ,流量  $Q=155\text{m}^3/\text{h}$ ,扬程  $H=64\text{m}$ 。工作介质为水,密度  $\rho=998.2\text{kg}/\text{m}^3$ ,动力黏度  $\mu=1.003\text{mPa}\cdot\text{s}$ 。流动计算域由吸入管、叶轮及泵壳组成,叶轮的叶片数  $Z=5$ 。应用 Pro/E 建立水泵的三维流动计算域,使用 Gambit 进行计算域网格的划分,得到如图 1 所示的非结构性网格单元。其中吸入管 77200 单元、叶轮 195008 单元、蜗壳 105176 单元,网格单元总数为 377384,节点总数为 83648。

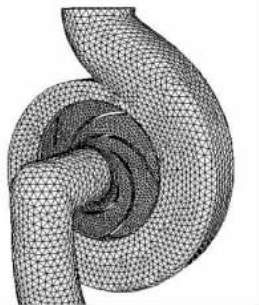


图 1 离心泵计算域非结构性网格

Fig. 1 Unstructured grid for the centrifugal pump

### 1.2 计算域、动网格及边界条件

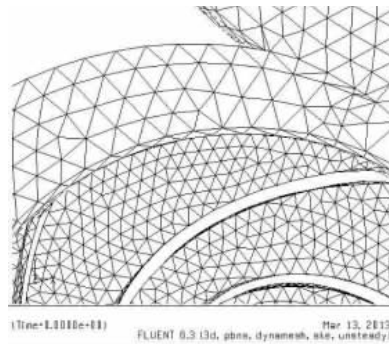
计算使用 Fluent 流动软件,选取标准  $k-\varepsilon$  湍流模型。采用的边界条件:(1) 进出口条件按流量值给定;(2) 壁面采用无

滑移固壁条件并由标准壁面函数确定固壁附近流动。由泵转速与叶轮叶片数计算得到叶轮的旋转周期为  $2.069 \times 10^{-3}\text{s}$ ,叶片掠过周期为  $4.138 \times 10^{-3}\text{s}$ ,因此选取计算时间步长  $\Delta t=4.138 \times 10^{-4}\text{s}$ ,即一个叶片掠过周期使用 10 个时间步进行计算。

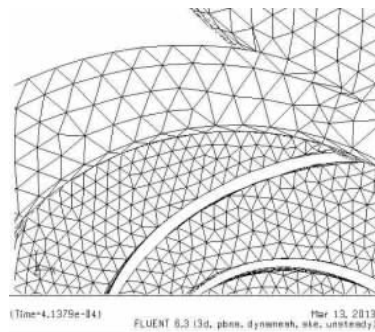
对于滑移网格计算,按常规的方法将叶轮域设为旋转的滑移子域 (Moving Mesh) 并给定转向和转速,其余计算域设为静止域。

对于动网格计算,使用 Profile 文件定义叶轮计算域边界的转向和转速。为简化计算,变形网格仅限于叶轮计算域,将所有计算域在惯性系中设为静止域。采用 3 种方式实现网格变形:弹簧光滑法 (Spring-based Smoothing)、动态分层法 (Dynamic Layering) 及局部网格重构法 (Local Remeshing)。弹簧光滑法将网格边视为节点连接的弹簧,以边界位移作为弹簧的边界条件,通过求解弹簧的力平衡方程得到新网格的节点位置,但弹簧光滑法一般只能处理小变形问题。动态分层法是根据边界的位移量动态地增加或减少边界上的网格层,使计算域网格层保持一定的密度。网格重构法是对弹性光滑法的补充,以网格尺寸和畸变率作为评判标准,当变形过大、局部网格发生严重畸变时,则对这些区域重新划分网格。新网格上的物理量通过守恒定律和插值映射从旧网格中获得。

图 2 是一个时间步  $\Delta t$  前后计算域表面的局部网格对比。因叶轮计算域表面是流场与旋转固体的交界面,因此叶轮域表面的网格除了随体转动,未看出明显的变形或局部重构。



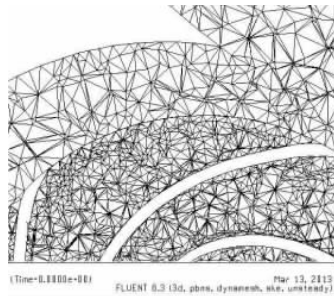
(a) 初始状态  
(a) Initial state



(b)  $\Delta t$  后的状态  
(b) State after  $\Delta t$

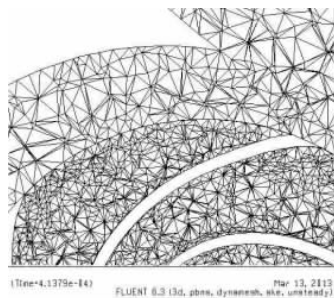
图 2 变形前后的局部网格图 (计算域表面)  
Fig. 2 Deformation of grids (surface of the computational domain)

图3是与图2对应的计算域中心截面的局部网格对比。为便于观察,图4给出图3中叶轮出口叶片附近的局部放大效果。由图4可以看出,计算域内网格除了随体转动,还出现了不同程度的变形和局部重构(见图中绿色方框)。



(a) 初始状态

(a) Initial state

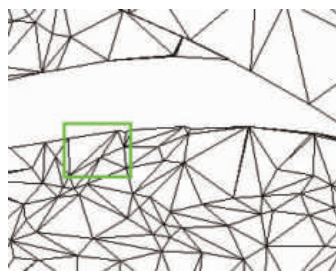


(b)  $\Delta t$ 后的状态

(b) State after  $\Delta t$

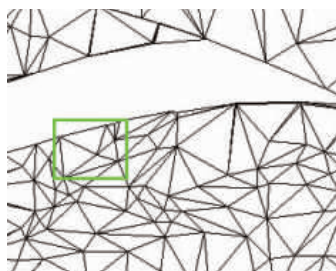
图3 变形前后的局部网格图(计算域中心截面)

Fig. 3 Deformation of grids (central section of the domain)



(a) 初始状态

(a) Initial state



(b)  $\Delta t$ 后的状态

(b) State after  $\Delta t$

图4 变形前后的局部网格放大图(计算域中心截面)

Fig. 4 Deformation of grids zoomed in the vicinity of the blade tip (central section of the domain)

## 2 计算及结果分析

### 2.1 迭代计算收敛性

图5和图6分别给出动网格和滑移网格迭代计算离心泵非定常流场的残差记录,图中6条线分别是流动连续方程、动量方程(3个分量)、 $k$ 方程及 $\epsilon$ 方程残差值随迭代步数的变化。曲线的每一次脉动代表某一时间步迭代收敛并开始进入下一时间步的计算。由图可见,与滑移网格相比,动网格具有较快的收敛速度。对同样的模拟时间段( $t \approx 0.2069s$ ),动网格的残差上限在0.1以下,滑移网格的残差上限则在1.0左右,相差一个数量级。动网格迭代总步数为15500,而滑移网格的迭代总步数则需要47000,在该算例中动网格的迭代速度几乎是滑移网格迭代速度的3倍。究其原因,是因为动网格计算仅在一个惯性系中进行,迭代过程中尽管有网格的变形和重构等不利因素,但新旧网格节点的拓扑关系保证了良好的计算精度和时间上的连贯性。滑移网格计算则是在多参考系MRF下进行,多参考系之间的数据对接影响了时间上的连贯性从而导致迭代速度的下降。

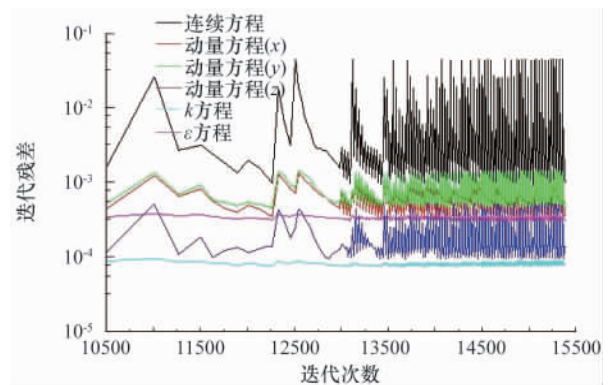


图5 动网格迭代计算的残差记录

Fig. 5 Residuals by dynamic mesh

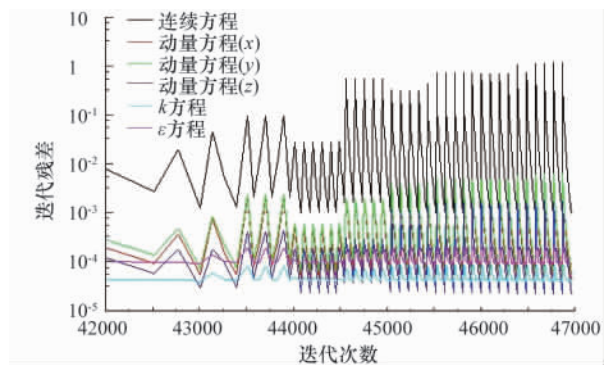


图6 滑移网格迭代计算的残差记录

Fig. 6 Residuals by sliding mesh

### 2.2 非定常流场计算

对于离心泵的非定常流动问题,国内外已有不少文献给出了各种工况条件下的计算结果。下面主要对动网格与常规



滑移网格方法计算得到的结果进行对比,从中了解动网格技术应用于水泵计算的可行性和潜力。图7和图8分别给出了按两种网格计算得到的叶轮所受的 $x,y$ 方向量纲—径向力 $F'_x$ 和 $F'_y$ 随时间的变化曲线。量纲—径向力的定义为

$$F'_i = F_i / \frac{1}{2} \rho A U_{in}^2 \quad i=x,y \quad (1)$$

其中, $A$ 为叶轮受力总面积, $F_x$ 和 $F_y$ 分别为叶轮所受 $x,y$ 方向径向力, $U_{in}$ 为泵入口平均流速。由图7和图8可见,在经历叶轮启动了一段时间( $t \approx 0.02s$ ,约1个旋转周期)后,径向力值随时间作有规律的周期脉动。在任一个叶轮旋转周期内,径向力出现5次脉动信号,脉动频率与叶轮的叶片数 $Z$ 相对应。在经历约5个叶轮旋转周期后( $t \approx 0.1s$ ),两种网格计算数值结果逐渐趋于一致,径向力脉动进入了相对稳定的阶段,因此可认为从此往后的计算结果基本接近真实情况。

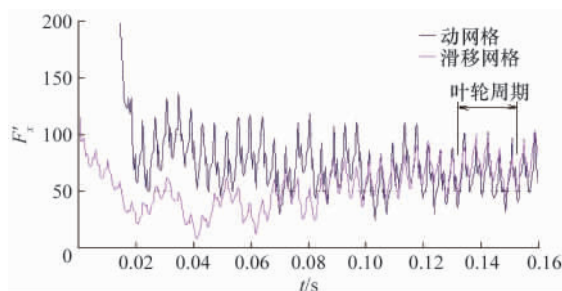


图7 叶轮无量纲径向力 $F'_x$ 随时间的变化  
Fig. 7 Dimensionless radial force  $F'_x$  on impeller with time

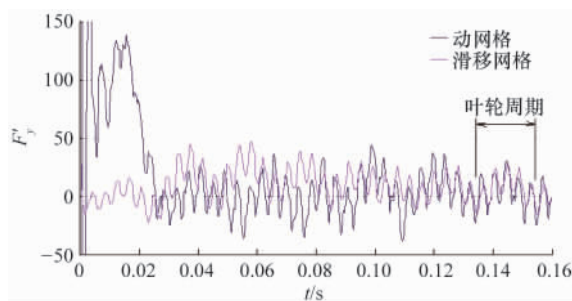


图8 叶轮无量纲径向力 $F'_y$ 随时间的变化  
Fig. 8 Dimensionless radial force  $F'_y$  on impeller with time

### 3 结论

(1) 采用动网格技术可实现离心泵等旋转叶片泵的全三维非常流场数值计算,该技术在流体机械研究领域将具有广阔的应用前景。

(2) 在同样的离心泵计算模型、计算网格、初始条件、边界条件及软件设置条件下,在经过一段泵启动时间后,动网格与滑移网格的计算结果趋于一致,但动网格具有较快的迭代速度。

(3) 离心泵的动网格计算仅在一个参考系中进行,新旧网格节点的拓扑关系保证了良好的计算精度和时间上的连贯性;而滑移网格计算因为多参考系之间的数据对接影响了时间上的连贯性,降低了迭代速度。

### 参考文献 (References)

- [1] 徐朝晖, 吴玉林, 陈乃祥, 等. 基于滑移网格与 RNG 湍流模型计算泵内的动静干扰[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(1): 66-68.  
Xu Zhaohui, Wu Yulin, Chen Naixiang, et al. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(1): 66-68.
- [2] 黄思, 邓庆健, 王宏君. 应用滑移网格技术分析多级离心泵的三维瞬态流动[J]. 流体机械, 2009, 37(3): 24-27.  
Huang Si, Deng Qingjian, Wang Hongjun. Fluid Machinery, 2009, 37(3): 24-27.
- [3] Luo J Y, Issa R I, Gosman A D. Prediction of impeller-induced flows in mixing vessels using multiple frames of reference[J]. Institute of Chemical Engineers Symposium Series, 1994, 140: 47-58.
- [4] Wang Z J, Parthasarathy V. A fully automated Chimera methodology for multiple moving body problems [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000, 33(7): 919-938.
- [5] Weatherill N P. Delaunay triangulation in computational fluid dynamics [J]. Computers & Mathematics with Applications, 1992, 24 (5/6): 129-150.
- [6] Houzeaux G, Codina R. A finite element method for the solution of rotary displacement pumps[J]. Computers & Fluids, 2007, 36(6): 667-679.
- [7] 黄思, 杨国麟, 苏丽娟. 应用动网格技术模拟分析滚动转子压缩机的瞬态流动[J]. 流体机械, 2010, 38(1): 11-14.  
Huang Si, Yang Guomang, Su Lijuan. Fluid Machinery, 2010, 38(1): 11-14.
- [8] 刘华坪, 陈浮, 马波. 基于动网格与 UDF 技术的阀门流场数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2008, 50(2): 106-108.  
Liu Huaping, Chen Fu, Ma Bo. Turbine Technology, 2008, 50 (2): 106-108.
- [9] 包海涛. 基于 Fluent 液压阀流场的动态仿真及可视化研究[J]. 制造技术与机床, 2008(2): 53-55.  
Bao Haitao. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008(2): 53-55.
- [10] 高希彦, 王燕, 方武. 数值仿真的在泵阀参数优化中的应用 [J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(1): 63-67.  
Gao Xiyuan, Wang Yan, Fang Wu. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(1): 63-67.
- [11] 刘金武, 龚金科, 钟志华, 等. 内燃机缸内复杂空间三维动态网格生成技术[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2006, 18(4): 487-492.  
Liu Jinwu, Gong Jinke, Zhong Zhihua, et al. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2006, 18(4): 487-492.
- [12] 张慢来, 廖锐全, 冯进. 往复泵吸入特性的流体力学数值模拟 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(S2): 242-247.  
Zhang Manlai, Liao Ruiquan, Feng Jin. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(S2): 242-247.
- [13] 江帆, 陈维平, 王一军, 等. 基于动网格的离心泵内部流场数值模拟 [J]. 流体机械, 2007, 35(7): 20-24.  
Jiang Fan, Chen Weiping, Wang Yijun, et al. Fluid Machinery, 2007, 35(7): 20-24.

(责任编辑 刘志远)