

基于 Fluent 的动态旋流器流场计算机模拟仿真^①

郭广东, 邓松圣, 华卫星

(后勤工程学院 军事供油工程系, 重庆 401311)

摘 要: Fluent 软件是一款集流场、热传质、燃烧以及化学反应于一体的商业 CFD 软件. 针对动态旋流器流场的复杂多变性, 以 Total 型动态旋流分离器为例, 在 Gambit 软件中简化并建立了物理模型, 通过 fluent 软件对其速度场进行计算机模拟仿真, 得出了柱坐标系统下, 切向速度、轴向速度和径向速度三个速度分量云图, 通过研究发现, 基于 Fluent 的动态旋流器流场计算机模拟仿真可以有效地解决复杂流动问题, 为动态旋流器工艺设计和性能优化提供可靠的依据, 且节省开发费用, 缩短设计周期.

关键词: Fluent; 模拟仿真; 动态旋流器; 速度场; 油水分离

Flow Field Computer Simulation of Dynamic Hydrocyclone Based on Fluent Software

GUO Guang-Dong, DENG Song-Sheng, HUA Wei-Xing

(Department of Petroleum Supply Engineering, Logistic Engineering University of PLA, Chongqing 401311, China)

Abstract: Fluent is a commercial CFD software. The flow field, heat transfer, combustion and chemical reaction can all be simulated by Fluent. In view of the complexity of dynamic hydrocyclone flow field, as an example, the Total type dynamic hydrocyclone separator was simulated. The physical model was simplified and established by Gambit software, and simulated through the fluent software by computer. The velocity field is obtained under cylindrical coordinate system, the tangential velocity, axial velocity and radial velocity of three velocity components cloud image. Through the study found that, the flow field of dynamic hydrocyclone was simulated and the complex flow problems can be solved by the fluent software. The simulation results can provide reliable basis to the process design and performance optimization for dynamic hydrocyclone, and also, it can save development cost, shorten the design cycle.

Key words: Fluent; numerical simulation; dynamic hydro-cyclone; velocity field; oil-water separation

动态旋流分离器具有结构简单, 分离效率高优点, 但其内部流场复杂. 初期, 研究人员主要通过黑箱理论, 即把旋流器看成一个黑箱, 通过改变旋流器的设计参数和操作参数, 测定所对应的分离性能和操作性能, 从而得出有关的经验模型, 以指导同类水力旋流器的设计^[1]; 或者利用各种流速测定仪对旋流器内部的流动状况进行测定, 了解旋流器内流体流场分布规律, 揭示旋流器的分离原理^[2]. 黑箱理论可以较为真实地研究旋流器的内部流场分布规律, 但一方面实验工作量非常大; 另一方面, 以现有的测试水平, 一些参数还无法通过实验手段准确测量. 随着计算流体力学(Computer Fluid Dynamics, CFD)的

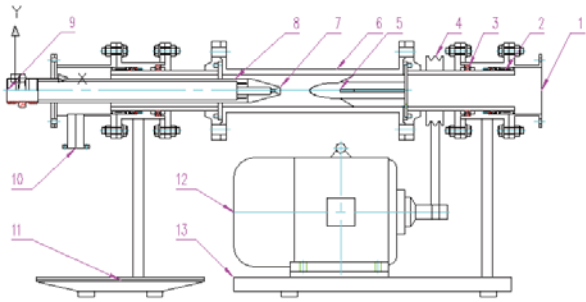
迅猛发展, 在计算机上进行一个特定的计算和模拟, 它能解决理论和实验都不能解决的复杂流动问题, 而且省时、省力, 灵活、经济, 不受模型的限制, 能得出系列、详细和完整的结果, 大大弥补了试验的不足. 因此, 近几年来动态旋流器的数值模拟仿真得到了迅猛的发展, 数值模拟已成为研究流体流动的主要方法之一^[3].

本文充分利用 Fluent 强大的数值模拟功能, 结合 Gambit 软件的建模和网格划分, 充分模拟并分析了动态旋流分离器内部速度场三个方向分量的分布图, 为动态旋流分离器今后的设计、加工及制造提供了可靠依据.

^① 收稿时间:2013-03-21;收到修改稿时间:2013-04-26

1 动态旋流分离器简介

动态液-液旋流器结构如图 1 所示, 主要由入口、旋流分离腔、底流口及溢流口等部分组成. 其主体结构包括转筒、旋转栅、收油套、收油杆、溢流嘴及其调节组件等; 辅助构件主要包括电机、带轮、皮带、导轨、底座、支架、轴承、机械密封及标准紧固件等.



1-入口; 2-机械密封(入口); 3-轴承; 4-带轮; 5-旋转栅; 6-转筒; 7-溢流口; 8-收油杆; 9-出油通道; 10-出水通道; 11-导轨; 12-电机; 13-底座

图 1 动态旋流器结构组成

2 数学模型

2.1 控制方程

对于油-水动态旋流分离器的数值模拟研究, 根据其运行规律对其建立物理模型, 然后, 根据流体在油-水动态旋流分离器内部的运动规律, 假设流体为稳态不可压缩流体, 并建立基本方程组^[4]:

$$(1) \text{ 连续性方程: } \frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0$$

(2) 动量方程通式:

$$\frac{\partial U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i u_j} \right]$$

通过对基本方程组做时间平均计算, 由此得到湍流时均质量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho U \overline{u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \varepsilon_{ij}$$

由于只有让方程组封闭才能对其进行求解, 现有的相应的湍流模型主要包括: $k-\varepsilon$ 模型、 $RNG k-\varepsilon$ 模型和雷诺应力模型(RSM). 对于动态旋流器内部流场呈现时均定常、轴对称和各向异性脉动的特点, 本文拟采用 RSM 模型对方程组封闭求解.

2.2 RSM 模型

RSM 模型即雷诺应力模型, 为使输运方程封闭,

对输运方程右端各项处理后的形式为^[5]:

应力扩散项为:

$$D_{ij} = -C_s \rho \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_i u_k} \frac{\partial}{\partial x_k} \overline{u_j u_j}$$

剪力产生项为:

$$P_{ij} = -\rho \left[\overline{u_i u_k} \frac{\partial U_j}{\partial z_k} + \overline{u_j u_k} \frac{\partial U_i}{\partial z_k} \right]$$

压力-应变项为:

$$\Pi_{ij} = -C_1 \rho \frac{k}{\varepsilon} \left(\overline{u_i u_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \right) - C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} P_k \right)$$

$$P_k = -2 \rho \overline{u_i u_k} \frac{\partial U_i}{\partial x_k}$$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_j}$$

其中 P_k 和 k 的值由以下输运方程式来确定:

$$\frac{\partial (U_k \varepsilon)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} \left(C_\varepsilon \frac{k}{\varepsilon} \overline{u_i u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} \left(C_{\varepsilon 1} \frac{1}{\rho} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon \right)$$

其中有关模型常数为:

$$C_\varepsilon = 0.15 \quad C_{\varepsilon 1} = 1.45 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.9 \quad C_s = 0.22$$

$$C_1 = 1.5 \quad C_2 = 0.4$$

湍能耗散项为:

$$\varepsilon_{ij} = 2 \delta_{ij} \rho \varepsilon / 3$$

3 物理模型

针对 Total 型油-水动态旋流分离器, 从原理上分析存在转筒与旋转栅以及油水混合液的旋转, 同时又有支架、入口, 出口等静止部件, 本文主要研究转筒内油相浓度分布规律, 故可对旋转栅、入口、底流口以及溢流口形式做合理的简化, 其控制体模型结构如图 2 所示, 主要固定结构参数为: 直径 $D=60\text{mm}$; 叶片长度 $L1=95\text{mm}$ 、中心轴直径 $d=30\text{mm}$ 、叶片厚度 $h=5\text{mm}$. 通过 Gambit 建模, 分区域生成混合网格, 即六面体和少量四面体网格, 网格视图如图 3 所示.

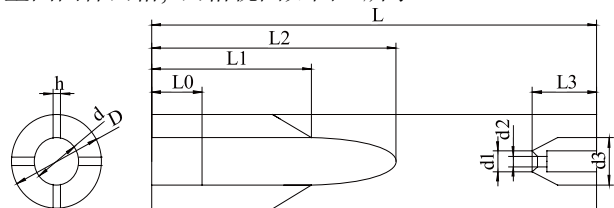


图 2 动态液-液旋流分离器计算模型图

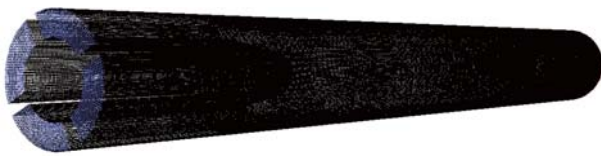


图3 动态液-液旋流分离器网格划分

其中, L 为转筒长度, D 为转筒主直径, n 为旋转栅叶片个数, h 为叶片厚度, d 为旋转栅中心轴直径, L_1 为旋转栅叶片长度, L_2 为旋转栅导流锥长度, d_1 为溢流口内锥面入口直径, d_2 为溢流口直径, L_3 为溢流管插入深度。

4 数值方法研究

4.1 离散格式和耦合算法

基于 Fluent 的 CFD 数值模拟的基础是有限体积法, 在模拟中根据条件的不同会采用不同的对流-扩散离散格式和压力-速度耦合算法。旋流器内流场为复杂的三维强旋流场, 湍流强度高, 因而需要仔细考量离散格式和耦合算法的选择。将 Gambit 建模形成的网格文件导入 Fluent 软件, 模拟动态旋流分离器浓度场分布, 其中湍流模型采用雷诺应力模型; 离散化方法选取有限体积法, 离散格式先采用一阶迎风离散控制方程, 通过监视残差曲线判断计算稳定后, 改用二阶迎风继续计算; 对于求解不可压缩流场计算方法选取基于交错网格的求解压力耦合方程的半隐式算法。

4.2 可动区域模型及边界条件

对于动态液-液旋流分离器运转过程中, 转筒与旋转栅以及油水混合液旋转而涉及的可动区域模拟, 由于转筒与旋转栅连在一起做旋转运动, 而且转筒内油水分离过程可认为是稳态流动, 所以对于动态液-液旋流分离器流场的数值模拟的可动区域模型可以选取 SRF 模型, 即单个参考系模型。

对于动态液-液旋流器的模拟入口边界选取速度入口边界; 出口边界包括底流与溢流均按充分发展来处理, 设定各流动参数的法向梯度为零; 壁面按照无滑移条件处理, 近壁处理采用了壁面函数法。以柴油和水的混合物为模拟流体, 入口流量为 $3\text{m}^3/\text{h}$, 转筒转速为 1500 r/min , 混合液含柴油控制在 10% 。

4.3 求解计算

选用 RSM 湍流模型对旋流器进行模拟计算, 图 4 给出了数值计算迭代的步数与残差的关系。迭代收敛与否与残差等级精度有关, 在设定各个相关参数, 残差数量

级为 10^{-5} , 如图所示, 各监视参数的残差逐渐减小, 计算到 1400 步时, 近似达到收敛, 在观察进出口的质量流速稳定, 这也表明所选模型和初始参数的设置较为合理。

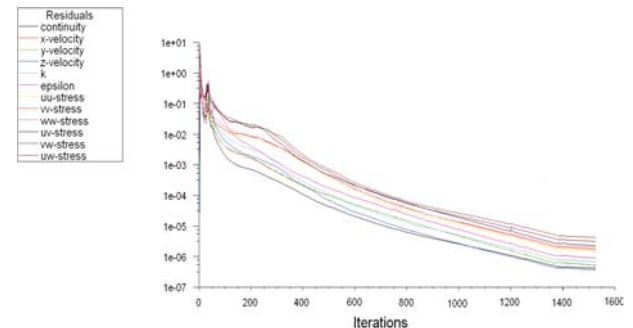


图4 残差监视曲线

5 速度场模拟仿真及分析

动态旋流器内流场特性中速度是最重要的表征参量之一, 在柱坐标系统下, 通常采用切向速度、轴向速度和径向速度三个速度分量来表征。

5.1 切向速度模拟与分析

切向速度是柱坐标系统下三个速度分量中数值最大的, 对动态旋流器分离性能至关重要, 直接决定油滴在旋流场中所受离心力。

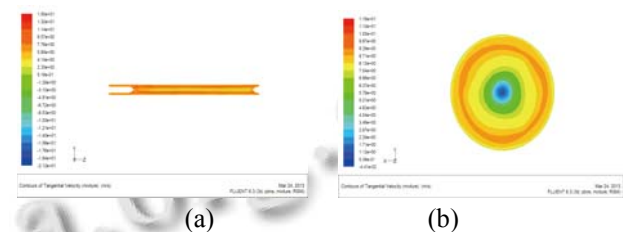


图5 切向速度分布

图 5(a)、(b) 是经 Fluent 模拟仿真得到的动态水力旋流器切向速度分布云图, 依次是 $x=0.005\text{ m}$ 截面切向速度云图、 $z=0.5\text{ m}$ 截面切向速度云图。从图中可以看出, 动态旋流器的流场分成内旋流和外旋流两个区域, 在外旋流区, 切向速度随半径的减小越来越大; 在内旋流区, 切向速度随半径减小越来越小。由于强旋湍流各向异性的存在, 切向速度在径向呈现并非绝对的轴对称结构, 并且由于空气柱的作用, 存在偏心现象。从轴向分布来看, 切向速度分布规律几乎一致; 只是最大值和外旋流区的数值, 沿轴向略有变化; 可见切向速度在轴向具有良好的相似性, 即流场分布随入流压力保持线性变化的能力较好。但旋转栅和溢流

口对切向速度的分布影响显著,在旋转栅附近切向速度存在较大的速度梯度,最大切向速度点和内外旋流区的速度值都发生变化,在旋转栅导流锥尾端甚至出现漩涡和回流现象.在溢流管附近,切向速度的双涡结构遭到破坏,类似刚体旋转的强制涡结构基本消失,切向速度呈现类似势涡的结构特征.

5.2 轴向速度模拟与分析

图 6(a)、(b)是通过数值方法模拟计算得出的动态旋流器轴向速度分布,依次是 $x=0.005\text{m}$ 截面轴向速度云图、 $z=0.5\text{m}$ 截面轴向速度云图.由图中可以看出,从径向分布来看,轴向速度在旋转栅以外区域基本呈笔架型分布,在器壁附近轴向速度有一个高速区,并且在器壁上有一个薄的轴向速度很小的边界层;在轴心附近轴向速度同样存在着一个高速区;在中径附近轴向速度出现一个低速区,类似静态水力旋流器的零速度包络面.这两个高速区轴向速度方向一致,并且数值大体相等.近似可看作是理想圆管流和 Sullivan 涡流共同作用的结果,也可看作是实际紊流圆管流在强旋转力场作用下的轴向速度分布.

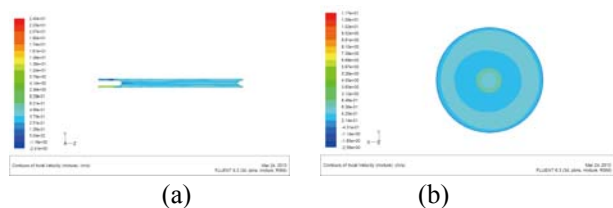


图 6 轴向速度分布

5.3 径向速度模拟与分析

径向速度的模拟数值非常小,一般比切向速度小两个数量级,且分布复杂,稳定性较差.图 7(a)、(b)是通过数值方法模拟计算得出的动态水力旋流器径向速度分布,依次是 $x=0.005\text{m}$ 截面径向速度云图、 $z=0.5\text{m}$ 截面径向速度云图.

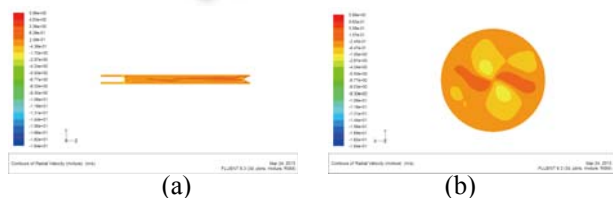


图 7 径向速度分布

由图 7 可见,除去旋转栅和溢流口附近的特殊数值外,径向速度在空气柱附近存在一个高速区,在器

壁附近径向速度数值很小,在轴心和器壁之间存在一个速度零点,这个零点将径向速度分布正、负两个区域,在轴心和零点之间存在一个最大值,径向速度呈现塔形结构.在器壁和零点之间,径向速度在数值上随半径的增大而减小,呈现类似势涡分布的特点.径向速度这种分布特点及方向变化,与修正后的 Sullivan 涡径向速度分布规律一致,只是在器壁和零点之间模拟的径向速度数值比 Sullivan 涡分析要小.从轴向看,径向速度受旋转栅和溢流口的影响更为显著,径向速度在旋转栅流道上数值相比其他位置都要大,且都为负值,这与 Burgers 涡类似.

6 结论

动态旋流器 Fluent 计算机数值模拟仿真,其基础理论是涡动理论,本文从理论研究出发,通过讨论数学物理模型及数值方法,研究了动态旋流分离器内速度场的分布特征,着重从切向速度、轴向速度和径向速度三个方面进行模拟研究,动态液-液旋流器切向速度分布与修正的 Burgers 涡和 Sullivan 涡结构非常接近,在外旋流区随半径的减小而增大,在内旋流区随半径的减小而减小;轴向速度近似可看作是理想圆管流和 Sullivan 涡流共同作用的结果,轴向速度受旋转栅和溢流口的影响非常大,轴向分布的相似性非常差,这与赵庆国等的实验数据对比相似,从而验证基于 Fluent 的动态旋流器的计算机模拟仿真研究的可靠性,可以有效地解决复杂流动问题,指导动态旋流器工艺设计和性能优化.

参考文献

- 1 Mirri D, Iuculano G, Traverso PA. Non-linear dynamic system modelling based on modified vulture series approaches. Measurement, 2003, 33(1): 9-21.
- 2 李建隆, 车香荣, 陈光. 新型 α 旋流器流场模拟与实验研究. 高校化学工程学报, 2008, 22(3): 371-377.
- 3 郭劲松, 张永东, 方芳. 基于 Fluent 软件的旋流池分离效果数值模拟. 重庆建筑大学学报, 2006, 28(4): 79-82.
- 4 Shukla SK, Shukla P, Ghosh P. Evaluation of numerical schemes using different simulation methods for the continuous phase modeling of cyclone separators. Advanced Powder Technology, 2011(22): 209-219.
- 5 陆耀军, 周力行, 沈熊. 不同湍流模型在液液旋流分离管流场计算中的应用及比较. 清华大学学报(自然科学版), 2001, 41(2): 28-33.