

油水两相自由表面漩涡的数值模拟

杨猛^{1,2}, 刘硕^{2,3}, 徐万海¹, 许晶禹^{2,3}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津, 300350, 2. 中国科学院 力学研究所, 北京, 100190; 3. 中国科学院 大学 工程科学学院, 北京, 100049, Email:xujingyu@imech.ac.cn)

摘要: 油水两相分层分布时, 自由表面漩涡会对表层油产生回收效果。本文对流场中水和油各自的流动规律进行探究, 采用 Fluent 软件对这一流动现象进行了数值模拟。计算中运用流体体积 (VOF) 模型求解油水两相涡流场, 得到了自由表面漩涡的流动结构和演化过程。研究得到了从自由液面处开始出现漩涡, 到不断向下延伸直至达到稳定的过程中, 油水两相的相分布情况。同时也得到了涡核半径、涡核半径处最大的切向速度、涡核内切面径向速度、轴向速度以及底部进水口油相含率随时间的变化规律。研究揭示了自由表面漩涡具有回收表面轻质流体的特性, 为工程上利用自由表面漩涡特性进行海面浮油的回收提供了参考。

关键词: 数值模拟; 自由表面漩涡; 两相流; 速度分量

1 引言

自由表面漩涡是自然界中常见的现象, 当进水口的上方涡量强度达到一定程度时, 自由表面漩涡会形成具有携带表层物质流动特性的携物流涡。由于自由表面漩涡具有携物特性, 当流场为油水两相分层分布时, 通过自由表面漩涡现象可进行表层油品的回收。Rankine 最早提出了 Rankine 复合涡模型, 给理想状态的涡提供了接近真实情况的模型。Einstein 等^[1]讨论了自由表面漩涡在层流和湍流两种状态下的 N-S 方程。Burgers 等^[2-4]也在层流 N-S 方程的基础上提出了多种涡模型。G. Echávez, E. McCann^[5]通过实验证明了径向流和轴向流对漩涡的重要性, 探究了气芯深度受轴向流影响的敏感度。陈云良^[6]采用了 RNGk- ϵ 模型和标准 k- ϵ 模型分别模拟自由表面漩涡, 得到了漩涡的多圈螺旋结构。李海峰^[7]通过 udf 方法, 给模型预加科氏力, 对自由表面漩涡的机理进行了探究。已有的数值研究多为针对漩涡的相分布情况和漩涡结构进行研究的结果, 对自由表面漩涡的回收表层轻相不相溶介质的特性研究较少。本文为模拟油水分层分布的真实状态, 将进行油水两相模拟, 研究自由表面漩涡的结构特性和速度分布, 为工程上回收水面浮油提供新的方法参考。

2 模型与数值方法

2.1 模型理论

在本文的数值模拟中,多相流模型选择 VOF 模型,湍流模型使用 RNG $k-\varepsilon$ 模型。

VOF 模型多用来处理两种或多种流体(或相)没有互相混合时的问题。在每个单元中,设第 q 相体积分数为 α_q ,则会存在 3 种情况,即 $\alpha_q=0$, $\alpha_q=1$, $0<\alpha_q<1$ 。

RNG $k-\varepsilon$ 模型在 ε 方程中添加了一项来反映主流的时均应变率,并且修正了湍动黏度,考虑了平均流动中的旋转及旋流流动。在一些具有复杂剪切流、大应变率、漩涡、分离等流动中,RNG $k-\varepsilon$ 模型较标准 $k-\varepsilon$ 模型表现更好。RNG 方法的 k , ε 方程为:

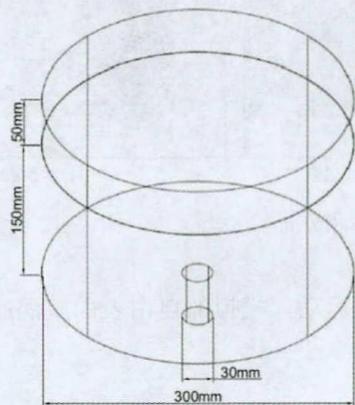
$$k \text{ 方程: } \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G - \rho \varepsilon \quad (4)$$

$$\varepsilon \text{ 方程: } \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (5)$$

其中, $\alpha_k=\alpha_\varepsilon=1.39$; $\mu_{eff}=\mu+\mu_t$ 。

2.2 计算区域、边界条件和计算方法

本文采用模型的计算域高度为 250mm、直径为 300mm、进水口直径为 30mm。为了使计算域水位保持稳定,在侧部设置对称的两个水相入口。计算域上方 50mm 区域内设置为气相和油相。计算模型如图 1(a)所示。



(a) 计算模型



(b) 网格划分

图 1 自由表面漩涡流动模型

对三维模型采用结构化网格划分方法,如图 1(b),使用四面体网格,对液面处和涡核处进行局部网格加密,网格数量共 126078 个,最小尺寸为 $3 \times 10^{-9} \text{m}^3$ 。

计算域上方为压力入口边界,入口压力 $P_i=0\text{Pa}$,出水口采用压力出口边界,设置水相入口。瞬态计算的时间步长设置为 0.0005s,残差控制在 1×10^{-5} 数量级,采用瞬态计算,基于压力的求解方式。

3 计算结果及分析

3.1 模型验证

对底部进水口压力为 -20kPa 下的气-水两相自由表面涡的形成过程进行了模拟,取 $y=0$ 处截面观察水相分布情况。如图2,在3s时,气-水交界面基本保持水平,相分布状态和初始状态较接近,4s时,涡核处交界面开始轻微下陷,4.5s至4.7s时,液面明显下陷,5.1s,气芯不断向下延伸,5.2s后,漩涡演变为吸气漩涡,底部进水口开始有空气出现。

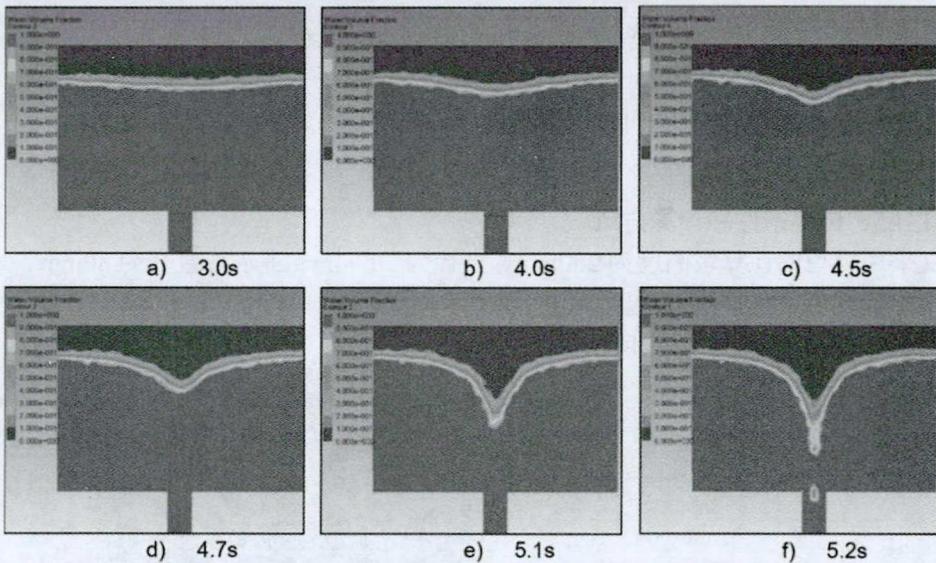
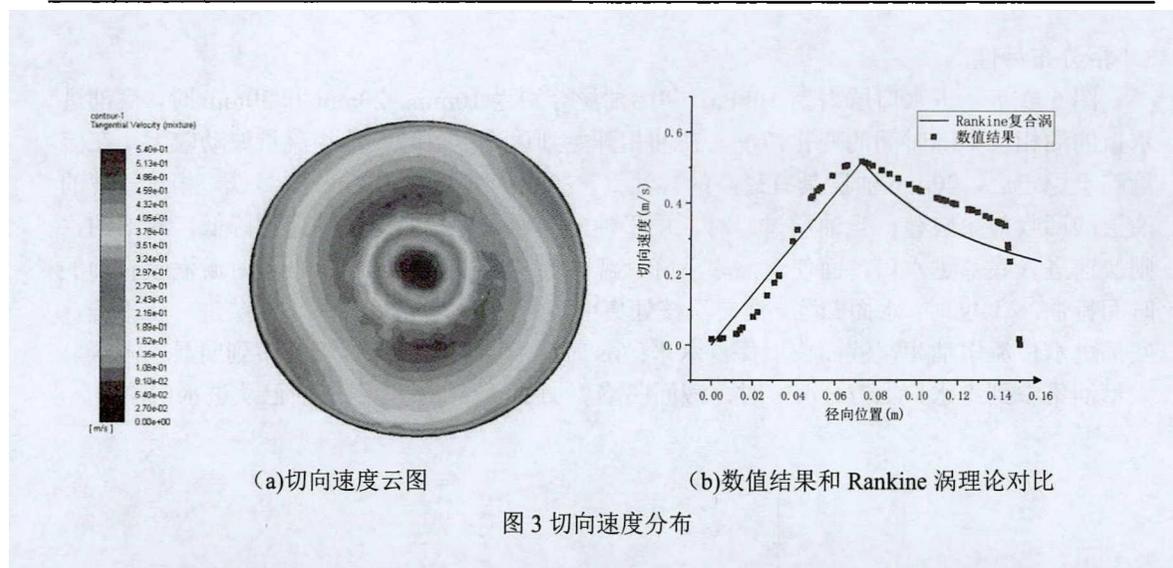


图2 $y=0$ 截面水相分布

自由液面的流体质点的运动形式为多圈螺旋运动,模拟的自由表面漩涡产生过程与流场特性和已有的专家学者的研究结果保持一致。

3.2 漩涡结构特性

图3(a)为距底面 0.15m 高度处的切向速度云图。从漩涡核处向外,切向速度呈增大的趋势,在某圆周位置达到最大,随后切向速度向外逐渐减小,在边界处减小到0。图3(b)中曲线为Rankine复合涡理论切向速度的分布,点为模拟中的切向速度,在小于涡核半径处,模拟与理论值较接近,在大于涡核半径的部分,由于边界层因素以及水相速度入口的影响,导致涡核半径外大部分速度偏高于理论值,而在近壁面处迅速降为0。



3.3 速度场分布

分析距涡核处 60~100mm 处 5 个距离位置的径向速度在高度上的分布,如图 4 a),发现在距底面 0.025m 高度范围内,径向速度存在较大的一段区间,随着高度的增大,径向速度逐渐减小并保持稳定,当高度增大到接近自由液面处时,径向速度出现增大的趋势。表层和底层液体会更快地流向涡核处,随着距涡核处距离的增大,液面以下的径向流速减小,液面处的流速基本保持不变,自由表面涡对远离涡核处的表面物体具有同样的效果。

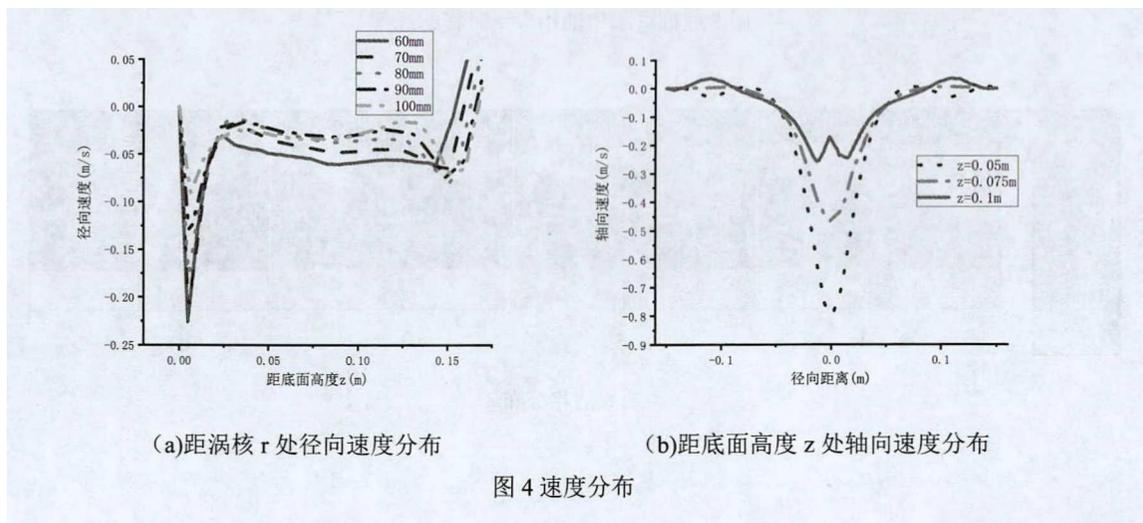


图 4 (b)为距底面高度分别为 0.05m、0.075m 和 0.1m 时的轴向速度分布情况。在涡核半径内的轴向速度大于其他位置的轴向速度,当距底面高度增大后,涡核半径内的轴向速度减小。Z=0.1m 处存在气相,气体的轴向速度要小于液相的速度。上述速度分布导致表层的液体相对于稍深的液体会更多地被漩涡夹带,从而进入底部进水口。

3.4 相分布特性

图 5 展示了进水口压力为-10kPa，初始油层分别为 10mm、20mm 和 30mm 时，底部进水口的油相含率随时间的变化情况。在油相开始到达进水口时，油相流量波动较大，在流量趋于稳定后，20mm 油层具有最高的含油率，30mm 时次之，10mm 时最低。相对较薄的油层的回收效果较差；当油层过厚时，由于油的黏性较大，油层运动速度降低，底部的水则快速进入底部进水口，而使含油率下降。观察图 6，分析油层为 20mm 时漩涡吸收油的时间特性。第 4s 时，水面凹陷，油向涡核处集中，油面保持水平；5s 时，油层进一步下陷，底部进水口流出油相，液面依旧保持水平；6s 时，油层液面凹陷，可观察到明显的漩涡，大量油集中到进水口上方；6.5s 时，液面凹陷更加明显，一定体积的油已从进水口流出。

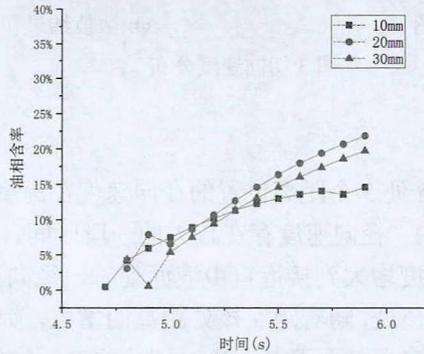


图 5 底部进水口油相含率时程曲线

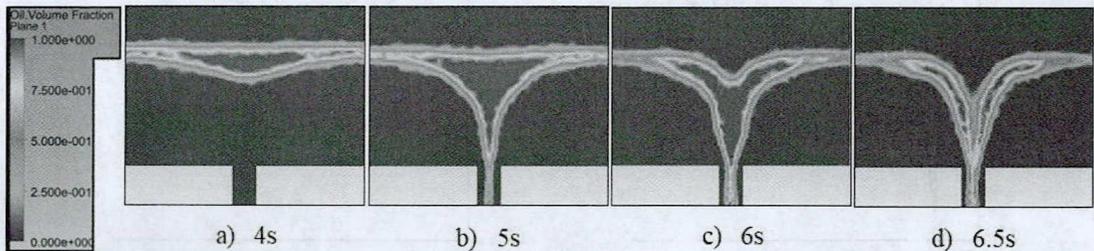


图 6 油相分布

4 结论

本文对自由表面漩涡回收海面浮油的过程进行了 CFD 模拟，建立了开放边界模型，并使用了 VOF 模型处理油水的交界面，得到了自由表面漩涡的演化规律和相分布特性。数值计算的结果表明，自由表面漩涡的表层和底层液体相对于其他高度的径向速度要大得多，涡

核处的轴向速度较大，可利用速度分布规律回收表面轻相流体；底部进水口的含油率受油层厚度的影响，相对过厚或过薄的油层均不利于回收浮油的效率提高。

参考文献

- 1 Einstein H A, Li H. Steady vortex flow in a real fluid. *La Houille Blanche*, 1955(4): 483-496.
- 2 Burgers J M. A mathematical model illustrating the theory of turbulence. *Advances in Applied Mechanics*, 1948, 1: 171-199.
- 3 Rankine W J M. A manual of applied physics. 10th ed. London: Charles Griffin and Company, 1882:663.
- 4 Sullivan R D. A two-cell vortex solution of the Navier-Stokes equations. *Journal of the Aero/Space Sciences*, 1959, 26 (11): 767-768.
- 5 G. Echávez, E. McCann. An experimental study on the free surface vertical vortex. *Journal Citation Reports*, 2002, 33: 414-421.
- 6 陈云良. 进水口前立轴漩涡水力特性的研究, 成都: 四川大学, 2006.
- 7 李海峰. 自由表面旋涡的机理研究. 上海: 上海大学, 2008.

Numerical simulation of oilwater two-phase flow free surface vortex

YANG Meng^{1,2}, LIU Shuo^{2,3}, XU Wan-hai¹, XU Jing-yu^{2,3}

(1.School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin, 300350; 2.Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190; 3.School of Engineering Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, Email: xujingyu@imech.ac.cn)

Abstract: When oil and water are stratified, the free surface vortex can recover the surface oil. In this paper, the respective flow rules of water and oil were investigated, and Fluent software was used to simulate the flow. The structure and evolution process of free surface vortex were obtained by using the fluid volume (VOF) model to solve the interface of oil and water. The phase distribution of oil and water is obtained in the process of vortex from the free liquid level to the steady state. The radius of the vortex core, the maximum tangential velocity at the radius of the vortex core, the radial velocity and axial velocity of the section inside the vortex core, and the variation law of the oil phase holdup at the bottom outlet with time are also obtained. The study reveals that free surface vortex has the property of recovering surface light fluid, which provides a reference for engineering to use the property of free surface vortex for recovering oil slick.

Key words: Numerical simulation; Free surface vortex; Two-phase flow; Velocity components.