

搅拌槽流场特性的大涡模拟研究

刘玉玲*, 郑艳, 魏文礼

(西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048)

摘要:采用大涡模型结合气液两相流时均方程,对六直叶圆盘涡轮搅拌槽内的流场特性进行了数值模拟。自由水面的捕捉用VOF(Volume of Fluid)法,用Simplec方法求解控制方程。通过模拟得到了搅拌槽内复杂的双涡旋流场结构、转轮叶端尾涡的发展变化情况以及轴向流速的分布规律。通过对比大涡模拟与RNG κ - ϵ 的计算结果,得知大涡模型能模拟出流场内瞬时旋涡的发展变化过程,反映出挡板的存在破坏了圆形搅拌槽的流通模式,提高了叶片附近的混合效率;桨叶区域湍流呈现明显的各向异性,时均流速存在明显的波动性。从而证明了用大涡模拟探讨搅拌槽内湍流现象及流场结构的可靠性。

关键词:搅拌槽;数值模拟;湍流结构

中图分类号:O351.3;O242.1

文献标志码:A

doi:10.7511/jslx201405015

1 引言

湍流对于搅拌槽内的混合起着非常重要的作用。对于粘度不太高的流体,湍动即涡流扩散决定了槽内流体的混合速率^[1]。搅拌槽内湍流的主要特征为不规则性、随机性、扩散性、漩涡、耗散及大雷诺数等。虽然搅拌槽内的湍流理论过于抽象,但鉴于湍流对于混合及物质传递的重要作用,研究搅拌槽内的湍流现象及流场结构在化工、食品、制药和废水处理等领域有十分重要的意义。

在过去的研究成果中,学者们应用计算流体力学(CFD)模拟搅拌槽的流场特性、气体分散规律及固体悬浮性能等。Egges^[2]首先将大涡模拟引入搅拌槽,利用Lattice-Boltzmann方法离散Navier-Stokes方程,来模拟带挡板搅拌槽内的湍流流动,认为大涡模拟可适用于此类不稳定的和准周期性的复杂流动;张艳红等^[3]采用大涡湍流模型对有档板的Rushton桨搅拌槽进行了数值模拟研究,计算结果和文献值吻合得很好;侯拴弟等^[4]用 κ - ϵ 湍流模型,模拟出六直叶涡轮搅拌槽内“双循环”流动形式;李伟等^[5]模拟了Rushton气液搅拌釜内的

气液流动特性,并与试验结果做了比较,表明单相流的径向速度峰值更接近搅拌叶片的尖端,而两相流的径向速度峰值向外发生了平移;Avinash等^[6]布置了三种叶轮位置,用 κ - ϵ 模型模拟了平行及分叉等流场结构对搅拌器气体扩散的影响。该模拟的预测结果应用于其他两向流装置,并为搅拌器的性能配置提供了重要信息。Ducci等^[7]用双通道LDA对Rushton桨搅拌槽内的流场进行了测量,用系综平均和角度解析两种方法,对湍流动能的生成项、扩散项和对流项进行了计算,为验证数值模拟搅拌浆流态提供了可靠数据。Kilander等^[8]也用双通道LDA方法对Lighnin翼形桨和A310桨的方形搅拌槽进行了流场和湍流特性的研究,计算获得的耗散率与实验基本一致。董厚生等^[9]对搅拌槽中的流场进行了模拟,得到流场和固体颗粒体积分数的分布规律,进而利用模拟出的数据计算搅拌轴的功率;Wu^[10]通过测量,观察到叶轮附近区域流速的非耗散波动,分析出湍流强度和湍动动能耗散的分布规律,并通过波动流速和湍流尺度计算局部能量耗散率。还有学者^[11,12]通过大涡模拟研究了转轮内的流场特性。但针对搅拌槽内湍流大涡模拟的优越性仍需要进一步探讨,本文采用Fluent6.3.26对搅拌器进行模拟,分别利用RNG κ - ϵ 和大涡模拟两种紊流模型模拟搅拌槽内的湍流特征,并对模拟结果进行了比较和分析。

收稿日期:2013-04-27;**修改稿收到日期:**2013-07-10.

基金项目:国家自然科学基金(51178391);陕西省西北旱区生态水利工程重点实验室开放基金(106-221223);中央财政支持地方高校发展专项资金特色重点学科(106-00X101)资助项目。

作者简介:刘玉玲*(1969-),女,博士,教授
(E-mail: Liuyuling@xaut.edu.cn).

2 数学模型

2.1 控制方程

搅拌槽内的流动进行空间滤波后,大涡模拟笛氏坐标系下控制方程为^[13]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu_t \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \bar{\tau}_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中 $\bar{\tau}_{ij} = -\rho(\overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j)$ 为亚格子湍流尺度应力,反应了大涡与小涡之间的作用,运用涡粘性模型进行封闭。在涡粘性模型中,亚格子量 τ_{ij} 与滤波后的应变率张量之间的关系为

$$\bar{\tau}_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{\tau}_{kk} = -2 \mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

在标准 Smagorinsky-Lilly 模式中, $\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}|$, 其中 $|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$, L_s 为亚格子尺度混合长度, $L_s = \min(\kappa d, c_s V^{1/3})$, κ 为卡门系数, d 为与壁面距离, c_s 为 Smagorinsky 系数, V 为网格单元体积。在 Smagorinsky-Lilly 动力模型中 c_s 不能预先给定,而是由各处流动信息动态得到^[14,15]。

采用 RNG κ - ϵ 紊流模型模拟时,其湍动动能 k 和湍动动能耗散率 ϵ 的方程为

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \left[\rho k + \mu_t \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \right] \delta_{ij} \quad (6)$$

式中系数及表达式为

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, C_\mu = 0.085, C_1 = 1.42 - \frac{\tilde{\eta}(1 - \tilde{\eta}/\tilde{\eta}_0)}{1 + \beta \tilde{\eta}^3}$$

$$C_2 = 1.68, \sigma_k = \sigma_\epsilon = 0.7179, \tilde{\eta} = S k / \epsilon$$

$$S = (2 S_{i,j} S_{i,j})^{1/2}, \tilde{\eta}_0 = 4.38, \beta = 0.015$$

$$S_{i,j} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right]$$

2.2 VOF 法

VOF 法^[16]的基本思想是,定义体积率函数 $F = F(x, y, z, t)$ 表示计算区域内流体体积与计算区域体积的相对比例。对于某一个计算单元,当 $F(x, y, z, t) = 1$, 则表示该单元被液体充满;当 $F(x, y, z, t) = 0$, 则表示它是一个空单元;若

$F(x, y, z, t) \in (0, 1)$, 则表示该单元部分充满液体。显然,自由表面存在于第三种单元中。 F 的梯度可以用来确定自由边界的法线方向。计算各单元的 F 数值及梯度之后,即可确定各单元中自由表面的近似位置。在每个单元中,水和气的体积分数之和为 1。与真正的单相流相比,会多一个(水或气的)体积分数变量。如果 a_w 表示水的体积分数,则气体的体积分数 a_a 可表示为

$$a_a = 1 - a_w \quad (7)$$

只要流场中各处的水和气的体积分数均已知,所有其他水和气共有的未知量和特征参数均可用体积分数的加权平均值来表示。所以在任何给定单元中,这些变量和特征参数要么代表纯水或气,要么代表二者的混合。换言之,在一个单元中,水的体积分数会有三种情况,即 $a_w = 0, 1$ 或介于 0 与 1 之间,分别与充满气、充满水和包含水气界面三种情况相对应。

水气界面的跟踪通过求解式(8)来完成。

$$\frac{\partial a_w}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial a_w}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

式中 t 为时间, \bar{u}_i 和 x_i 分别为速度分量和坐标分量($i=1, 2, 3$)。

引入 VOF 的 κ - ϵ 模型与单相流的 κ - ϵ 模型的形式是完全相同的,只是密度 ρ 和 μ 的具体表达式不同,前者是通过体积分数加权平均值给出的,即 ρ 和 μ 是体积分数的函数,而不是一个常数,其形式为

$$\rho = a_w \rho_w + (1 - a_w) \rho_a \quad (9)$$

$$\mu = a_w \mu_w + (1 - a_w) \mu_a \quad (10)$$

式中 a_w 为水的体积分数, ρ_w 和 ρ_a 分别表示水和气的密度。 μ_w 和 μ_a 分别为水和气的分子粘性系数。通过对水的体积分数 a_w 的迭代求解, ρ 和 μ 值均可以由式(9,10)求出。

3 网格划分和边界条件

3.1 模型尺寸与网格划分

搅拌器为平底圆柱型,如图 1 所示。一般由有机玻璃制成,高为 0.24 m,底面直径为 0.2 m,内设搅拌桨,桨叶形状各异,按外形可分为二叶平桨式、四叶折桨式和推进式等。本文采用六直叶圆盘涡轮,直叶半径为 0.0295 m,宽为 0.013 m,多为扁钢制成,设置在离槽底为 0.07 m 处(桨型简图如图 2(b)所示)。槽内设 4 块挡板,宽为 0.02 m,厚为 1.5 mm。

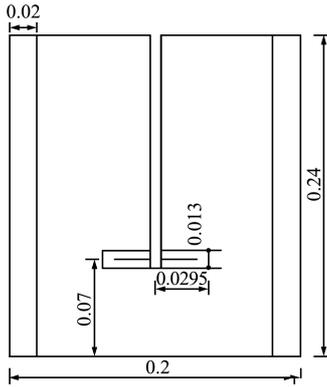


图1 模型尺寸图
Fig.1 Model size

对搅拌槽整体采用结构化网格,把三维区域划分成若干简单子块,采用贴体网格生成技术构造网格,最后耦合成整体的网格系统。在靠近搅拌桨附近进行局部加密。图2(a)为搅拌槽整体网格剖分图,为了更清晰地显示内部网格,图2(b)单独显示了内部搅拌桨的网格。由于网格密度过大影响分辨率,图2显示的网格数沿各个方向均为实际计算网格数的1/2。

3.2 网格收敛性证明^[17]

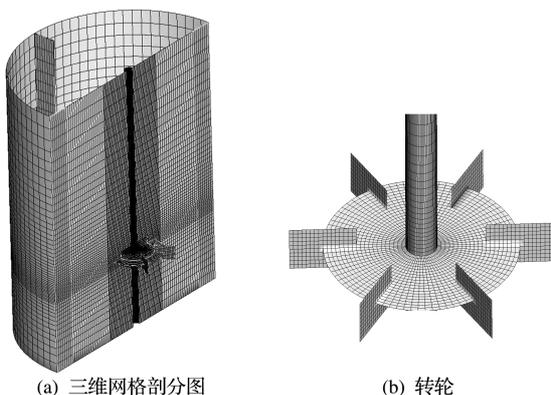
采用3套网格对搅拌槽进行大涡模拟,网格数列入表1。

表1 三种不同的网格数量

Tab.1 Three different numbers of finite elements

Mesh 1	Mesh 2	Mesh 3
60126	454016	562202

图3为 $Z=0.03\text{ m}$ 截面上沿径向的流速分布,当网格加密到一定程度时,根据 Mesh 1 和 Mesh 2 的流速分布,网格密度对该物理参量的变化具有较大影响;而对比 Mesh 2 和 Mesh 3 的计算结果,随着网格密度的增加,流速基本相同,说明网格数量达到一定程度时,对计算结果的影响可以



(a) 三维网格剖分图

(b) 转轮

图2 计算区域网格图

Fig.2 Grid of the computational domain

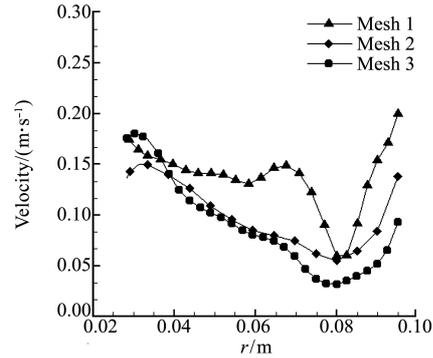


图3 三种网格密度计算结果比较图
Fig.3 Comparison of calculation results with 3 different mesh densities

忽略。网格密度达到 Mesh 2 的网格数时,能够满足 LES 的要求。

3.3 边界条件

搅拌桨与反应器的相对运动采用多参考系模型,模型顶面设置压力出口,其他区域设为墙。设置转轮转速为 350 rpm。采用 RNG κ - ϵ 紊流模型及 LES 模型,对流项采用一阶迎风格式离散,压力与速度的耦合采用 SIMPLEC 算法。初始条件为设置液高为 0.18 m,液体流速为 0 m/s。

4 结果与分析

4.1 整体流场分析

图4(a,b)分别为采用 RNG κ - ϵ 与大涡模型模拟平直叶搅拌器搅拌混合的结果。这两种模型计算出来的流场趋势大致相同。由于搅拌器剪切作用较大,属于径流式搅拌器,在叶轮区流体垂直于搅拌轴的方向产生高速径向射流,排出液流在撞到挡板后分成两股流体,分别沿壁面向上、向下流动,最终由于叶片的抽吸作用回到叶端,形成典型的双涡旋结构。

两种模型的模拟结果存在本质的区别。图4(a)中 RNG κ - ϵ 计算得到的流场结构比较均匀,只存在明显的双涡旋结构。该模型考虑到了湍流漩涡,在处理近壁区域的耗散率时增加了新的传输方程,提高了计算精度。RNG κ - ϵ 模型与标准 κ - ϵ 模型相比,能更好地描述强流线弯曲、漩涡和旋转等水力现象,因此选用 RNG κ - ϵ 来模拟搅拌槽内的混合运动能够较准确地模拟出涡旋结构。但是搅拌槽内大尺度涡为各向异性,随流动情形发生改变;而 κ - ϵ 模型是通过各向同性的湍流粘度来计算湍流应力,因而与实际混合过程的流场结构存在偏差。

图 4(b)为大涡模型的计算流场结构,可以看出,大涡模型能够模拟出搅拌槽外复杂的流场结构。除了叶轮上下的两个对称双涡旋结构外,在扩散的过程中大漩涡逐渐分裂为小漩涡,大漩涡有明显的各向异性。小漩涡则不然,它们有更多共性,更接近各向同性。大涡模拟方法就是把湍流分成大尺度和小尺度两部分运动,大尺度涡直接模拟,小尺度涡对小尺度涡的影响采用亚格子模型来模拟。大涡模拟能够更好地模拟大尺度涡的基本特征。

图 5 为采用不同的紊流模型计算出的转轮下部区域($z=0.04\text{ m}$)截面的流速矢量图。图 5(b)比图 5(a)更能反映出径向挡板的存在破坏了圆形的流通模式。图 5(a)反映出的流通模式基本与搅拌槽体型一致,而图 5(b)中能明显观察到挡板附近形成了大小不一的涡流。根据文献[18],搅拌槽内湍流流体的宏观流动状况,是一次旋转流分别与径向流和轴向流的合成运动。挡板将搅拌槽内液体的旋转运动改为垂直翻转运动,限制了液体的切向速度,增加了轴向和径向速度分量,使得轴向流动更加剧烈。由此可知,用大涡模型模拟挡板影响

流场的效果更符合实际,径向挡板的存在提高了叶片附近的混合效率。

4.2 叶轮附近局部尾涡结构

尾涡是搅拌槽内湍流流动场中常见的现象,每个叶片后方产生一连串尾涡,图 6 为大涡模拟得到的桨叶区某一时刻不同角度尾涡局部放大的流线图。不同的搅拌桨产生尾涡的数量及大小各异,从图 6 可以清晰看到叶轮后方尾涡的产生、发展以及消失的过程。当桨片后方相位角为 0° 时,可以观察到桨尖处尾涡的大小和位置,尾涡约是叶片高度的二分之一。当相位角达到 30° 时,尾涡开始随径向流动离开叶片,叶轮上区域尾涡运动比较迅速,下区域发展相对缓慢。当相位角为 50° 时,叶轮下部的尾涡结构开始衰退,说明尾涡衰减的速度很快。这种快速衰减的现象可能是由于计算的湍流粘度太大,使尾涡所含的能量不足以继续发展,机械能因流体粘性而最终变为热能,小漩涡随之湮灭。

由于叶轮产生高速液流,通过静止或较低流速的液体中时,搅拌槽内会产生大小漩涡运动。比较而言,大涡模型能够更加准确地模拟出这种大小漩涡的运动,能够反映出漩涡造成的宏观不稳定

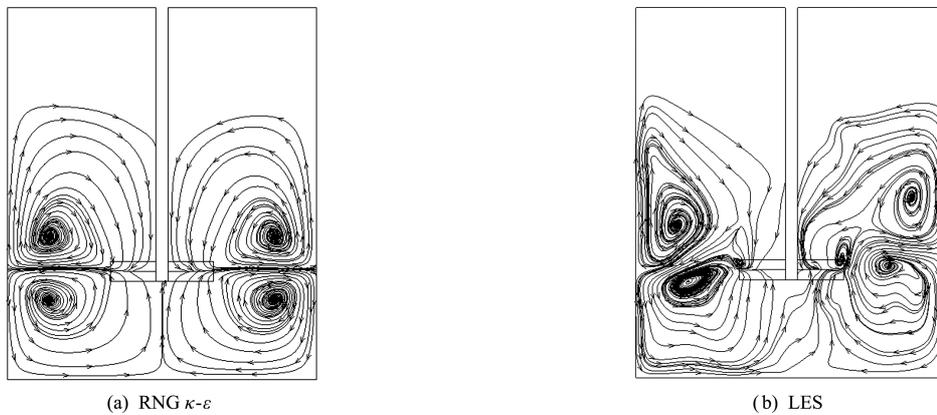


图 4 截面流线图
Fig. 4 Streamlines on the axial section

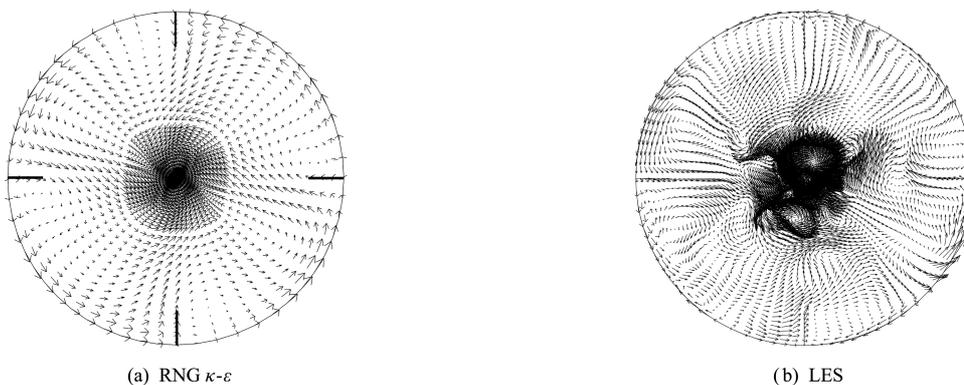


图 5 截面流速矢量图
Fig. 5 Velocity vectors on the cross section

性,更加接近搅拌槽内的混合及物质交换过程。

4.3 流速分析

搅拌槽内流速沿轴向的分布如图7所示,图7(a)为 RNG κ - ϵ 模型的计算结果,图7(b)为大涡模拟的计算结果。可以看出,转轮附近的流速沿轴向的分布规律大体一致,转轮附近提供了较大的转速,带动流体在槽中做搅拌运动,转轮处($Z=0.07$ m)流速出现峰值。转轮上部区域及下部区域受转轮影响

效果逐渐减少,转速也呈相应的减小趋势。径向流速分布规律与轴向一致,同样显示出转轮中心影响区域附近流速大,靠近边壁区域流速小的分布规律。图7(a)中,模拟结果的整体趋势大致相同,但是大涡模拟的流速线图波动变化比较剧烈,而 RNG κ - ϵ 模拟的流速在微小区域中几乎没有波动变化。由图7可知,大涡模型计算出来的时均流速较 RNG κ - ϵ 模型而言,更加符合实际。

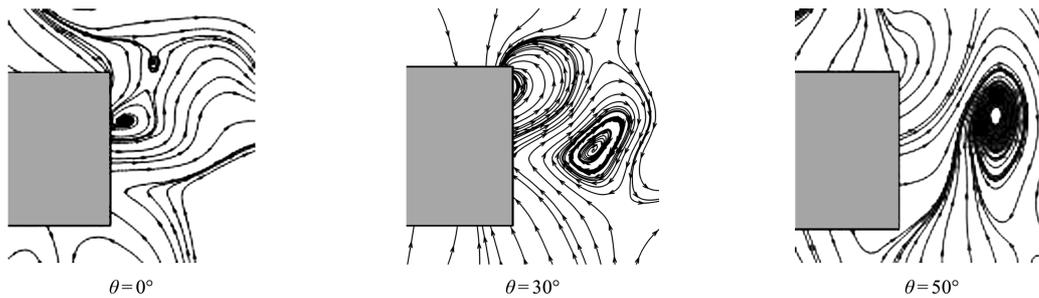


图6 局部尾涡图

Fig. 6 Trailing vortex in the local regions

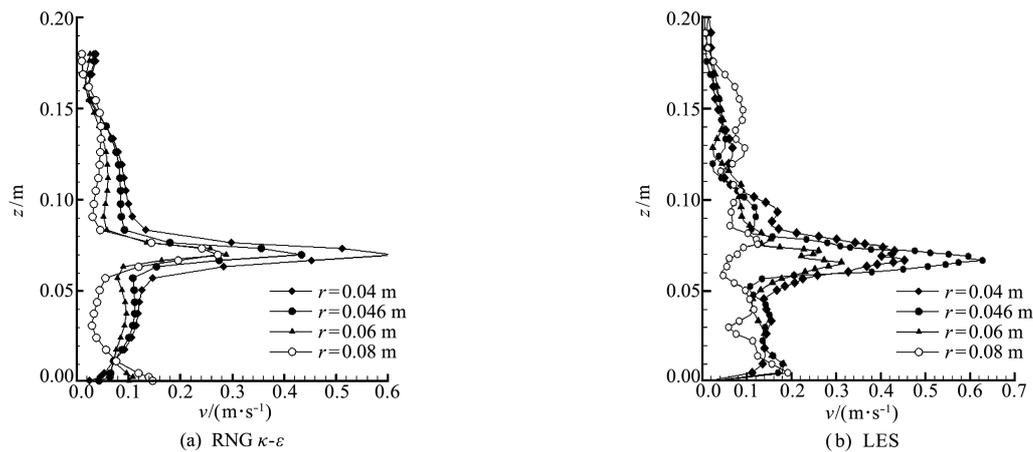


图7 流速沿水深分布图

Fig. 7 Velocity distribution along the water depth

5 结论

本文采用大涡和 RNG κ - ϵ 两种湍流模型来模拟搅拌槽的流场结构与速度分布情况,得到了六直叶涡轮搅拌槽内流动的双涡旋结构,以及叶轮附近的尾涡结构。通过计算结果的对比,得出以下结论。

(1) 采用大涡模拟能够得到瞬时流场结构,显示出瞬时旋涡的发展变化情况,并且上尾涡的运动速度大于下尾涡运动速度;而采用 RNG κ - ϵ 模型,模拟不出这些结果。

(2) 由大涡模拟的结果可知,挡板的存在破坏了圆形的流通模式,轴向流动变得更加剧烈,并提高了叶片附近的混合效率。

(3) 在预测时均速度值时,大涡模拟也比 RNG κ - ϵ 有所改进,桨叶区湍流呈现明显的各向异性,时均流速呈现明显的波动性。

参考文献(References):

- [1] 丁绪淮,周理. 液体搅拌[M]. 北京: 化学工业出版社,1983. (DING Xu-huai, ZHOU Li. *Liquid Agitation*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1983. (in Chinese))
- [2] Eggels M G. Direct and large-eddy simulation of turbulent fluid flow using the Lattice-Boltzmann scheme [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1996, 17(3):307-323.
- [3] 张艳红,杨超,毛在砂. 大涡模拟搅拌槽中的液相流

- 动[J]. 化工学报, 2007, **58**(10):2474-2479. (ZHANG Yan-hong, YANG Chao, MAO Zai-sha. Large eddy simulation of turbulent flow in a stirred tank [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2007, **58**(10):2474-2479. (in Chinese))
- [4] 侯拴弟, 张政, 王英琛, 等. 涡轮桨搅拌槽流动场数值模拟[J]. 化工学报, 2001(3): 241-246. (HOU Shuan-di, ZHANG Zheng, WANG Ying-chen, et al. Prediction of flow fields generated by rushton turbine [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2001(3):241-246. (in Chinese))
- [5] 李伟, 刘跃进, 孔丽娜, 等. Rushton 搅拌釜内的气含率分布及其流动特性的模拟[J]. 化工学报, 2011, **62**(10): 2691-2698. (LI Wei, LIU Yue-jin, KONG Li-na, et al. Simulation for gas hold-up distribution and flow behavior in Rushton stirred tank [J]. *CIESC Journal*, 2011, **62**(10):2691-2698. (in Chinese))
- [6] Khopkar A R, Tanguy P A. CFD simulation of gas-liquid flows in stirred vessel equipped with dual rushton turbines influence of parallel, merging and diverging flow configurations [J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, **63**(14):3810-3820.
- [7] Ducci A, Yiannakakis M. Direct determination of energy dissipation in stirred vessel with two point LDA [J]. *AICHE Journal*, 2005, **51**(8):2133-2149.
- [8] Kilander J, Rasmuson A. Energy dissipation and macro instabilities in a stirred square tank investigated using an LE PIV approach and LDA measurements [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, **60**(24): 6844-6856.
- [9] 董厚生, 魏化中, 舒安庆, 等. 搅拌槽内固液两相流的数值模拟及功率计算[J]. 化工装备技术, 2012, **33**(193): 14-16. (DONG Hou-sheng, WEI Hua-zhong, SHU An-qing, et al. Numerical simulation and power calculation of solid-liquid two-phase flow in stirred tank [J]. *Chemical Equipment Technology*, 2012, **33**(193):14-16. (in Chinese))
- [10] Wu H, Patterson G K. LDA measurements of turbulent flow parameters in a stirred mixer [J]. *Chemical Engineering Science*, 1989, **44**(10):2207-2221.
- [11] Alcamo R, Micale G, Grisafi F, et al. Large-eddy simulation of turbulent flow in an unbaffled stirred tank driven by a Rushton turbine [J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, **60**(8-9):2303-2316.
- [12] Hartmann H, Derksen J J, Montavon C, et al. Assessment of large eddy and RANS stirred tank simulations by means of LDA [J]. *Chemical Engineering Science*, 2004, **59**(12):2419-2432.
- [13] 魏文礼, 戴会超. 紊流模型理论及工程应用 [M]. 陕西: 陕西科学技术出版社, 2006. (WEI Wen-li, DAI Hui-chao. *Turbulence Model Theory and Engineering Applications* [M]. Shanxi: Shanxi Science and Technology Press, 2006. (in Chinese))
- [14] 王小华, 朱文芳, 何钟怡. 方形钝体受限绕流的三维数值模拟[J]. 计算力学学报, 2008, **25**(5): 671-675. (WANG Xiao-hua, ZHU Wen-fang, HE Zhong-yi. Three dimensional large eddy simulation of the flow field and energy loss characterisation of a ribbed duct trubulent flow [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2008, **25**(5):671-675. (in Chinese))
- [15] 潘宏禄, 史可天, 马汉东. 可压缩自由剪切流混合转捩大涡模拟[J]. 计算力学学报, 2009, **26**(5): 745-750. (PAN Hong-lu, SHI Ke-tian, MA Han-dong. An analysis of transition coherent structures in convective Mach Number 0.14 compressible free shear flow [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2009, **26**(5):745-750. (in Chinese))
- [16] 袁丽蓉, 沈永明, 郑永红. 用 VOF 方法模拟横流下窄缝紊动射流[J]. 海洋学报(中文版), 2005(4): 155-160. (YUAN Li-rong, SHEN Yong-ming, ZHENG Yong-hong. Simulation on a slittype turbulent jet in a cross-flow using the VOF method [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005(4):155-160. (in Chinese))
- [17] 刘亚丽, 张昭, 陈金涛, 等. 搅拌摩擦焊接数值模拟的网格敏感性分析[J]. 计算力学学报, 2012, **29**(1): 140-145. (LIU Ya-li, ZHANG Zhao, CHEN Jin-tao, et al. Mesh sensitivity analysis in the simulation of friction stir welding [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2012, **29**(1): 140-145. (in Chinese))
- [18] 沈春银, 陈剑佩, 张家庭, 等. 机械搅拌反应器中挡板的结构设计[J]. 高校化学工程学报, 2005(2): 162-168. (SHEN Chun-yin, CHEN Jian-pei, ZHANG Jia-ting, et al. Performance and design of baffles in mechanically agitated gas-liquid reactor [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*, 2005(2): 162-168. (in Chinese))

Numerical investigation of freely self-propelled flexible fish using immersed boundary method

WANG Wen-quan^{*}, HAO Dong-wei, YAN Yan, ZHANG Li-xiang

(Department of Engineering Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Study on the motion performance of interaction between a swimming or flying creatures and fluid, usually applied to reveal the biological mechanism of mechanics and movement. A “C” type swimming fish as the research object, a flexible model of freely self-propelled swimming fish is established. This model can reflected truly the interaction among fish movement, internal force and the external fluid. Using hybrid finite difference/finite element immersed boundary method combined with traditional feedback force method, the movement of a swimming fish is simulated. The hydrodynamic performance of start-up and cruise process of a swimming fish is analyzed. The results reveal that the conversion of “C” type and “S” type of fish body can improve the efficiency of the fish swimming, and the conversion of “C” type and “S” type is mainly affected by structure of fish body and flow field.

Key words: fluid-structure interaction; immersed boundary method; freely self-propelled; numerical simulation

~~~~~  
(上接第 639 页)

## Study on flow characteristics in a stirred tank by large-eddy simulation

LIU Yu-ling<sup>\*</sup>, ZHENG Yan, WEI Wen-li

(Institute of Water Conservancy and Hydraulic Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The gas-liquid two-phase flow equations were solved by the large eddy model to numerically simulate the flow field characteristics in a stirred tank equipped with six-bladed Rushton turbine. The free fluid surface was simulated by the VOF method. The equations were solved by the Simplec method. The complex double vortex flow structures in the stirred tank, the trailing vortex development near the impellers' tips and the flow velocity distribution were obtained. The comparisons of the large eddy simulation and RNG  $\kappa$ - $\epsilon$  model calculated results show that the large eddy model is able to simulate the development process of instantaneous vortex flow field, and that the presence of the baffles destroys the flow field in the round stirred tank to improve the mixing efficiency near the blades, and that the turbulence near the blades shows significant anisotropy, and mean velocity shows obvious fluctuations. Thus the reliability of large eddy simulation to explore turbulence phenomena and flow structures in a stirred tank is proved.

**Key words:** stirred tank; numerical simulation; turbulence structure