

涡轮浆搅拌槽内湍流特性的 V3V 实验及大涡模拟

施乃进¹, 周勇军¹, 鲍苏洋¹, 辛伟², 陶兰兰²

(¹南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816; ²江苏省特种设备安全监督检验研究院
国家化工设备质量监督检验中心, 江苏 苏州 215600)

摘要: 分别用体三维速度测量技术 (volumetric three-component velocimetry measurements, V3V) 和大涡模拟 (large eddy simulation, LES) 方法对涡轮浆搅拌槽内流场进行研究, 发现在完全湍流状态下, 涡轮浆搅拌槽内流场的量纲 1 相平均速度及湍动能分布同 Reynolds 数无关。用 V3V 方法实现了 Rushton 桨叶附近三维流场的重构; 探讨尾涡的三维结构及运动规律; 分析了叶片后方 30°截面轴向、径向和环向速度沿径向分布规律。用 V3V 实验结果对比了 2D-PIV (particle image velocimetry) 数据中的尾涡对位置和涡量, 涡对位置吻合度较好, 但 2D-PIV 中涡量较 V3V 小 37.5%; 通过大涡模拟得到完整的尾涡结构, 发现在叶片上边缘后侧存在一个和尾涡形成方式相同但不成对出现的涡结构; 将大涡模拟结果和 2D-PIV 及 V3V 实验结果对比发现, 大涡模拟在速度分布及尾涡运动轨迹方面均同实验结果吻合较好, 表明大涡模拟能较好地预测涡轮浆搅拌槽内流场。

关键词: V3V; PIV; 大涡模拟; 尾涡; 涡轮浆

中图分类号: TQ 022

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2017) 11—4069—10

V3V study and large eddy simulation of turbulence characteristics in a stirred vessel with Rushton turbine impeller

SHI Naijin¹, ZHOU Yongjun¹, BAO Suyang¹, XIN Wei², TAO Lanlan²

(¹College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China; ²National Quality Supervision & Inspection Center of Chemical Equipment, Special Equipment Safety Supervision Inspection Institute of Jiangsu Province, Suzhou 215600, Jiangsu, China)

Abstract: The volumetric three-component velocimetry (V3V) measurements and the large eddy simulation (LES) were used to study the flow field near the standard Rushton impeller in a stirred vessel. The results of V3V indicate that the Reynolds number has almost no influence on the normalized phase-resolved velocity and TKE when the flow field is absolutely turbulent. The structure and movement law of trailing vortices are discussed by reconstruction of the three-dimensional flow field with V3V. The distributions of radial, axial and tangential velocities in 30°cross-section behind the impeller were analyzed. The distributions of vortex pair by V3V were in good agreement with these by 2D-PIV (particle image velocimetry), however the vorticity by V3V is about 37.5% larger. LES method was used to simulate flow field in stirred tank with Rushton turbine impeller. The velocity distribution and trailing trajectory of LES results are in good agreement with the 2D-PIV and V3V data. Complete structure of the trailing vortices had been obtained and a vortex, which is similar with trailing vortices, was discovered near the up surface of the impeller.

2017-05-10 收到初稿, 2017-06-27 收到修改稿。

联系人: 周勇军。第一作者: 施乃进 (1992—), 男, 硕士研究生。

Received date: 2017-05-10.

Corresponding author: ZHOU Yongjun, associate professor, zhouyj@njtech.edu.cn.

Key words: V3V; PIV; LES; trailing vortex; Rushton impeller

引 言

涡轮浆搅拌槽广泛应用于化工、生物、石化、食品和制药等过程工业^[1-2]。搅拌槽内流场结构十分复杂。搅拌浆通过桨叶附近流体将机械能逐渐传递至搅拌槽内，叶片产生的尾涡是这一区域流场的显著特征，搅拌浆叶周围的尾涡有利于流体进行充分的混合^[3-4]。因此，有效地认识涡轮浆搅拌槽的流场特性及尾涡性质，对于搅拌槽的设计及优化有着重大意义。

目前，国内外对涡轮浆搅拌槽内流场的实验研究较多，主要集中在 2D-PIV 和三维 PIV 研究。程先明等^[5]用 2D-PIV 方法实验研究了相同功率下不同叶片长度 Rushton 桨的流场，研究了桨叶离底距离对尾涡特性的影响；Chara 等^[6]使用 2D-PIV 技术，研究了 Reynolds 数对 Rushton 桨搅拌槽内尾涡分布的影响；Sharp 等^[7]用 PIV 方法研究发现 Rushton 搅拌浆在尾涡结构处严重趋于各向异性；Escudie 等^[8-9]采用三维 PIV 方法研究了涡轮搅拌浆的尾涡特性，发现三维 PIV 的涡尺寸较大，但尾涡发展轨迹与 2D-PIV 结果相似；宋戈^[10]用 2D-PIV 和三维 PIV 结合的相位解析测量方法研究了涡轮浆搅拌槽内流场的湍流特性，发现标准 Rushton 桨射流区和尾涡结构区流场偏离各向同性，且 Reynolds 数对各向异性的影响不大。

由于 V3V 方法较二维 PIV 方法先进，能测量的 ，能测量

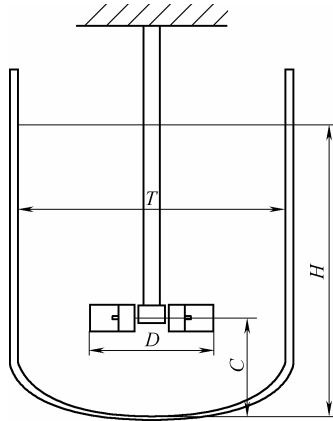


图 1 搅拌槽结构

Fig.1 Scheme of stirred tank

像同时被 3 个相机捕捉，每个粒子在 3 个相机成像并构成三角形。对三角形的分析得到粒子的空间位置。利用针孔成像的原理分析三角形，从而得到了粒子的空间位置的速度矢量。示踪粒子为空心玻璃珠，平均直径约为 50 μm，密度与水相同。示踪粒子在激光器拍摄时，选择要求避光性较好的实验室，避免外界光线对粒子的影响。

2 大涡模拟

2.1 大涡模型

LES 模拟是介于 Reynolds 平均法和直接模拟法之间的一种湍流数值模拟方法，对非稳态流场具有较好的预测效果。LES 模型利用滤波函数将流场中的涡划分为大、小尺度的涡，对大尺度的涡直接计算 N-S 方程，用亚格子尺度应力处理小尺度的涡^[19]。大涡模拟方法由于采用非稳态的计算方法，对计算机运算能力的要求相对较高，计算时间较长。在大涡模拟中，对不可压缩流体，通过连续性方程和动

量方程进行空间滤波后，可得控制方程如下^[20]

$$\partial \bar{U}_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \bar{f}_i \quad (2)$$

其中， τ_{ij} 由亚格子应力模型求取，一般采用标准 Smagorinsky-Lily 模型，但引入的模型参数 C_s 会对湍流参数（湍动能耗散率）产生影响。本工作采用改进的动态 Smagorinsky-Lily 模型^[21]，该模型认为子应力与局部流体应变率呈正比，表达式如下

$$\tau_{ij} = 2\nu \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

$$\nu_i = L_s^2 |\bar{S}| \quad (5)$$

$$|\bar{S}| = \sqrt{2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij}} \quad (6)$$

$$L_s = \min(\kappa l, C_s V^{1/3}) \quad (7)$$

其中， κ 为卡门常数，一般取 0.42；在动态 Smagorinsky-Lily 模型中 C_s 是变化的，通过局部流场信息计算，从而更真实地反映流场情况。

2.2 数值求解方法

为了便于实验测试结果与模拟结果相比较，本文的模拟模型与实验模型相一致。涡轮桨搅拌槽结构较复杂，采用非结构化四面体网格对模型进行离散化，并对桨叶和轴附近网格进行加密处理，其中桨叶区网格尺寸为 1~2 mm，其余区域网格尺寸为 4~6 mm，网格结构如图 3 所示。桨叶的旋转运动通过多重参考系（MRF）方法实现。大涡模拟中动量方程的离散采用中心差分格式，时间推进采用二阶精度的隐式格式，压力与速度的耦合采用 PISO 算法。标准 $k-\epsilon$ 模型计算时分别采用二阶迎风格式和 SIMPLE 算法。计算时先利用标准 $k-\epsilon$ 模型计算

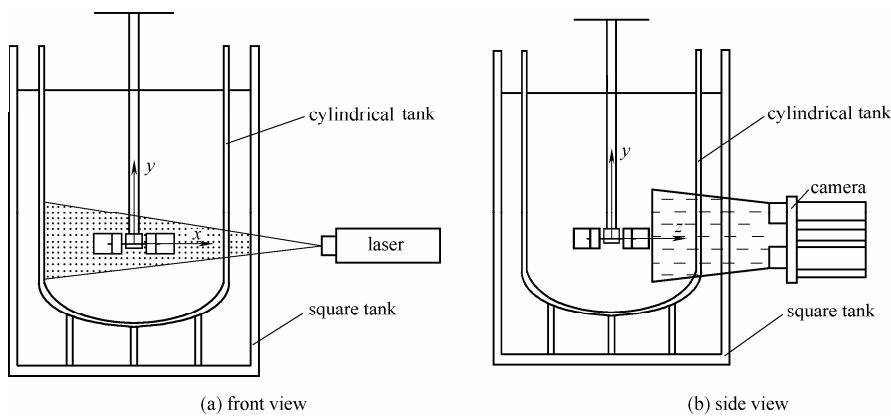


图 2 V3V 的测量区域

Fig.2 Measurement area of V3V

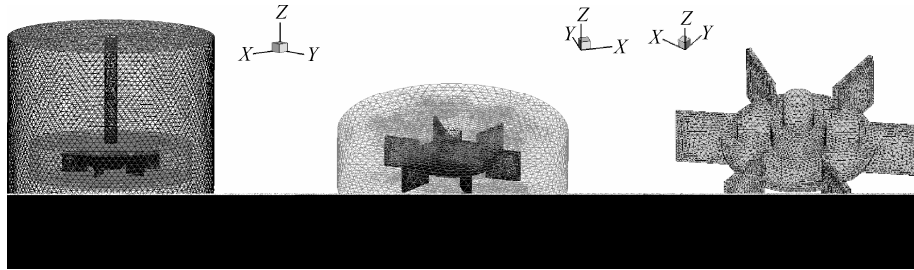


图 3 计算域网格示意图

Fig.3 Grid of computational regional

初始流场，然后再进行非稳态的大涡模拟^[22]。每个桨叶旋转周期内取 36 个时间步，每个时间步内速度残差均收敛至 10^{-4} 。约 20 个桨叶旋转周期后，流场达到近似稳态，然后进行样本数据的收集、统计和后处理等工作。

2.3 网格无关性验证

本文通过搅拌功率准数和网格数相关关系判定网格无关性^[23]。表 1 是同一个模型不同网格数情况下功率准数及其相对偏差。从表中可发现，当网格数达到 95 万时，功率准数的偏差已经小于 3%，再增加网格数到 105 万对模拟结果的影响不大，综合考虑本研究选择网格数为 95 万的网格尺寸模型对流场进行大涡模拟。

表 1 网格数与功率准数及其相对偏差

Table 1 Effect of grid size on power number and deviation

Mesh number $\times 10^{-3}$	Power number, N_p	Relative deviation/%
680	4.95	—
750	5.24	+5.859
860	5.43	+3.626
950	5.52	+1.657
1060	5.55	+0.543

3 实验结果与讨论

3.1 Reynolds 数对流场特性的影响

本实验通过调整转速改变 Reynolds 数的方法来实现对不同 Reynolds 数情况下流场的 PIV 结果分析，搅拌槽内流体不同转速下的 Reynolds 数如表 2 所示，选取桨叶后 $\theta=30^\circ$ ， $2z/W=0$ 位置上流体速度作为研究对象。图 4 为不同 Reynolds 数 V3V 量纲 1 相位平均速度和湍动能分布，发现标准化径向速度、轴向速度、环向速度和湍动能分布基本不随 Reynolds 数的增大而改变，这同 Zhou 等^[24]、Yoon 等^[25]和 Li 等^[16,18]的完全湍流状态下 ($Re>40000$)，相同搅拌槽内流场的量纲 1 相位平均速度及湍动能

分布同 Reynolds 数无关结论十分吻合，而同 Yoon 等^[26]的结论不一致，这主要是由于他们的实验未达到完全湍流状态。湍动能只有在尾涡位置 ($r/R=1.2$ 和 1.6) 处变化较大，而其余位置吻合非常好，这主要是由于尾涡中心处倾向于各向异性。因此，在完全湍流状态下，搅拌槽内量纲 1 相位平均速度及湍动能分布同 Reynolds 数无关，这将为搅拌器在工业放大中的设计及改进提供重要参考。

表 2 不同转速下的 Reynolds 数

Table 2 Reynolds number under different rotation speeds

N/s^{-1}	Reynolds number
1.33	52805
1.67	66007
2.5	99010

3.2 整体流型分析

3.2.1 三维流场 V3V 重构 本实验在 Reynolds 数为 66007 的情况下，对长 140 mm、宽 140 mm、深 100 mm 的三维流场区域进行 V3V 测量，配对得约 18000 个矢量。图 5 为速度等值面和含速度矢量的水平切面图。由图可知，在 $x^*=0.4\sim 0.8$ 的涡轮桨叶区域，速度分布十分均匀。只有 $x^*=1.2\sim 1.4$ 的射流区速度变化显著，其中 $0.8V_{tip}$ 等值面非常小，说明高速射流区非常小，衰减过程十分明显。图 6 为垂直切片及 3 个速度等值面主视图，从图中可以清楚地看出最大速度分布在 $x^*=1.2\sim 1.3$ ， $y^*=0.5\sim 1$ 区域内，而不是桨叶中心高度 $2z/W=0$ 处呈对称分布，这表明射流区流体有明显的向上轴向速度，这是由于本实验得到的为标准的双循环流型，流体从叶片端部射流排出后稍微偏上运动。其中 $0.8V_{tip}$ 等值面（红色）被 $0.67V_{tip}$ 等值面（黄色）包裹其中，说明此区域即为前桨叶的高速射流区。桨叶宽度位置附近 $0.42V_{tip}$ （蓝色）等值面沿 $y^*=0.5$ 基本对称，并且较其余位置远离桨叶区，这是由于桨叶宽度流体主要受桨叶射流影响，径向速度较大；而其余位

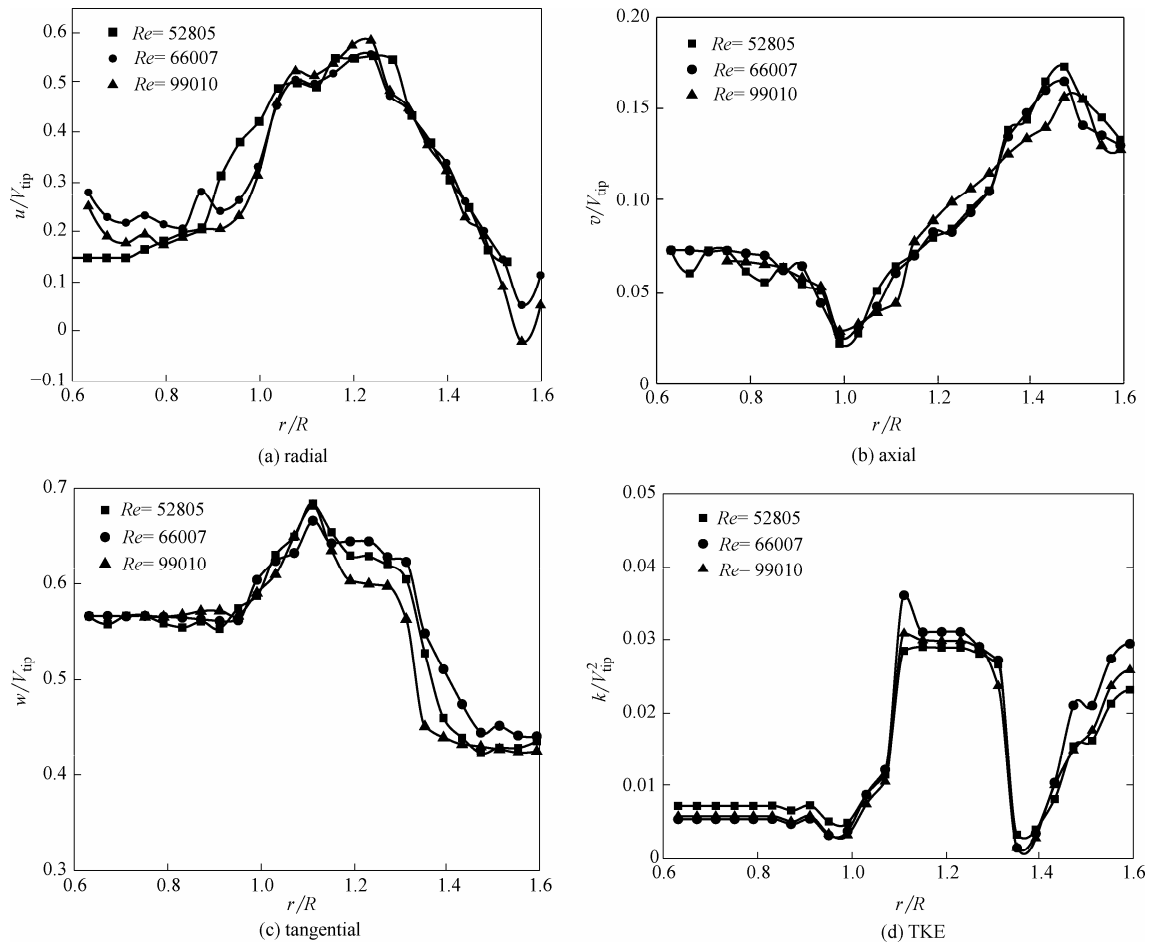


图 4 不同 Reynolds 数 V3V 量纲 1 相位平均速度和湍动能分布 ($\theta=30^\circ, 2z/W=0$)

Fig.4 V3V normalized phase-resolved velocity and TKE profiles for different $Re(\theta=30^\circ, 2z/W=0)$

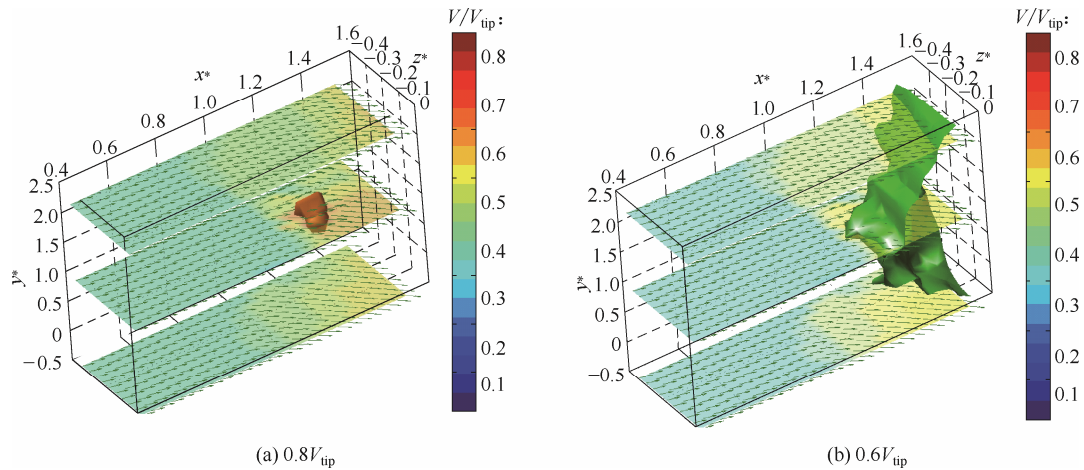


图 5 速度等值面和水平切面图 ($Re=66007$)

Fig.5 Isosurface of normalized velocity and three horizontal slices ($Re=66007$)

置流体是受射流区流体的裹挟及桨叶的卷吸综合作用的结果，径向速度 u 相对较小，运动较慢。

3.2.2 流场速度分布 图 7 为桨叶附近区域不同轴向位置 V3V 速度分布 ($Re=66007, \theta=30^\circ$)。从图

可看出，在 $r/R=0.6\sim 0.9$ 区域，径向速度、轴向速度和环向速度大小与轴向位置无关，因为此区域属于桨叶叶片覆盖区域，流场主要受叶片影响。而在 $r/R>0.9$ 位置，流体受射流区及边界条件影响增大，

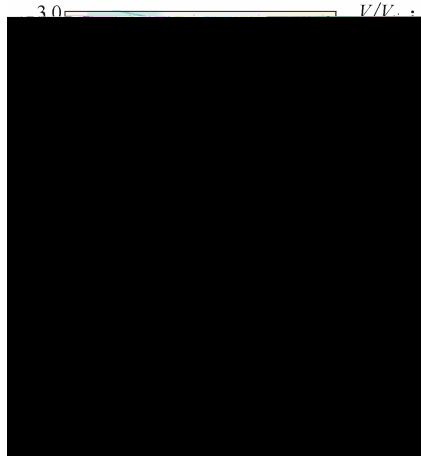


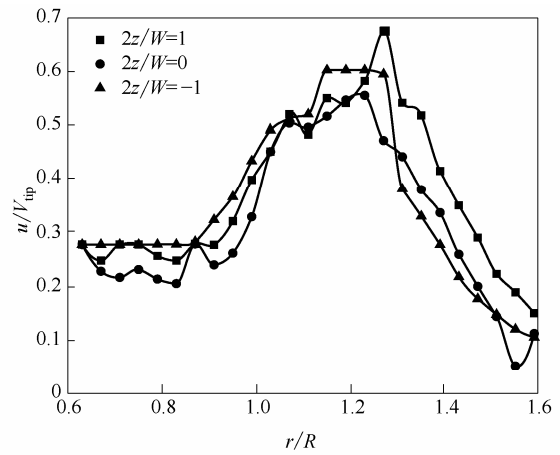
图 6 垂直切片及 3 个速度等值面主视图

Fig.6 Front view of a vertical slice and three isosurfaces of normalized velocity

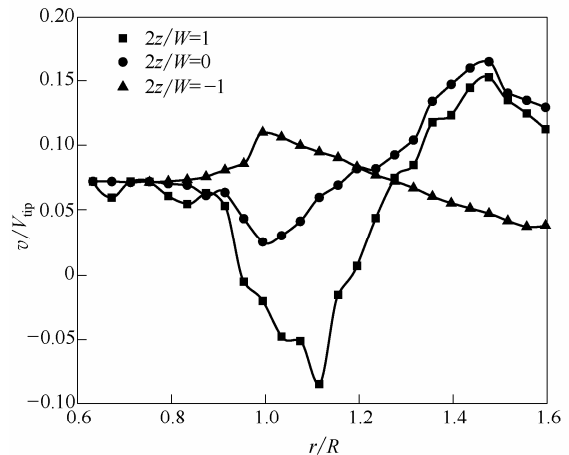
尤其是轴向速度，在 $r/R=0.9$ 位置处即受到双循环流型影响，在 $2z/W=-1$ 高度出现轴向向上速度，而 $2z/W=1$ 高度却出现轴向向下速度。通过对比 3 幅图可以得出，涡轮桨搅拌槽内流场径向射流较强，射流区域中心位置和桨叶卷吸位置处速度突变明显，越远离该区域的流体，速度变化越平缓。

图 8 为 $\theta=30^\circ$ 时 V3V 及 2D-PIV 速度场云图对比。由图可看出 V3V 及 2D-PIV 速度场云图吻合非常好，图左下角均出现速度较大区域；桨叶前端射流有明显向上速度，且最大速度区域出现在 $r/R=1.2\sim 1.3$ ， $2z/W=0.5\sim 1$ 区域，此位置亦为尾涡所在位置。桨叶右上方流体速度较大，且该位置速度矢量图可以判断出，在右上方为一个大型循环流，这是由桨叶形状和离底距离决定的。由于 V3V 测量的是流体的实际速度 (u 、 v 、 w)，而 2D-PIV 只测量得到 u 、 v ，缺少环向速度 w ，且由于叶片尖端射流区环向速度较大，因此在 $r/R=1.3\sim 1.4$ ， $2z/W=1$ 位置附近云图同 2D-PIV 出现差别，这主要由 2D-PIV 测量方法本身的缺陷引起的。

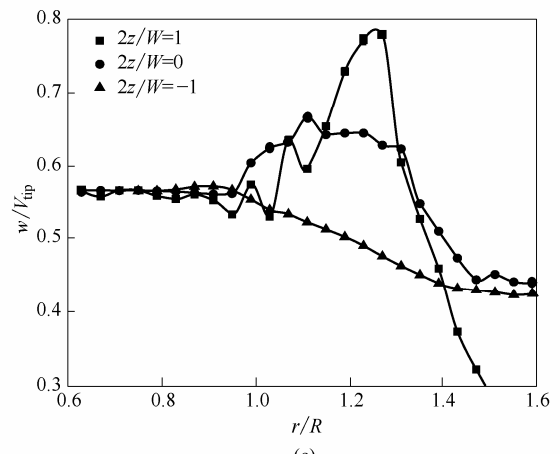
图 9 为 LES 与实验结果的标准化径向、轴向速度对比 ($2z/W=0$ ， $\theta=30^\circ$)，从图可以看出，大涡模拟方法与实验结果吻合较好，即大涡模拟分别在 $r/R=1.2$ 和 $r/R=1.7$ 位置出现径向速度极大值，在 $r/R=1.4$ 附近位置出现轴向速度极大值，且在极大值附近速度吻合非常好，只是在远离桨叶位置处 LES 结果较实验结果更平滑，而实验结果中可以发现明显的随机脉动引起的流体速度波动，且远离桨叶位置处波动对结果影响较大，这和尾涡结构在远离桨叶位置出现的结构不连续性一致。



(a)



(b)



(c)

图 7 不同轴向位置 V3V 速度分布图 ($Re=66007$ ， $\theta=30^\circ$)

Fig.7 V3V velocity profiles for different axial location ($Re=66007$ ， $\theta=30^\circ$)

3.3 尾涡分析

3.3.1 尾涡结构分析 图 10 为转速 $N=1.67\text{ s}^{-1}$ 时，V3V 测量的涡量等值面和速度等值面图。由图可以看出，尾涡对中间为高速射流区，即尾涡对分布于高速射流区两侧，且尾涡运动稍滞后于高速射

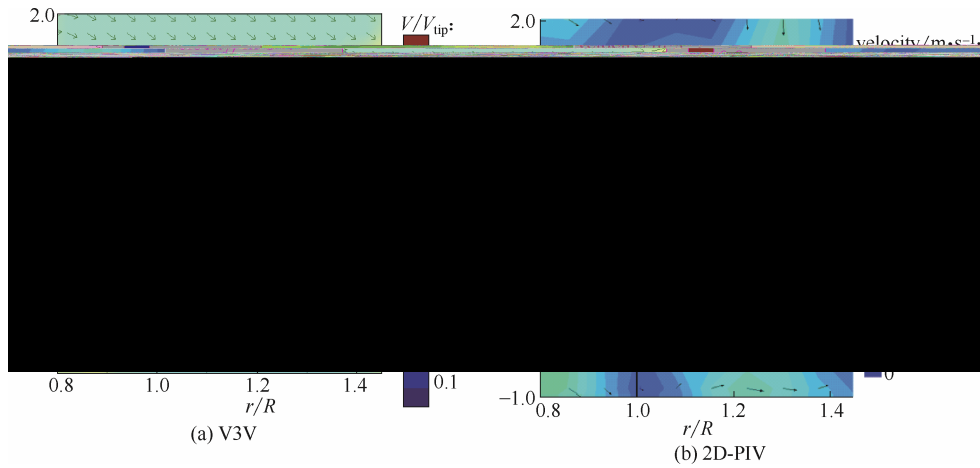


图 8 V3V 及 2D-PIV 速度场云图对比

Fig.8 Comparison of velocity profile from V3V and 2D-PIV

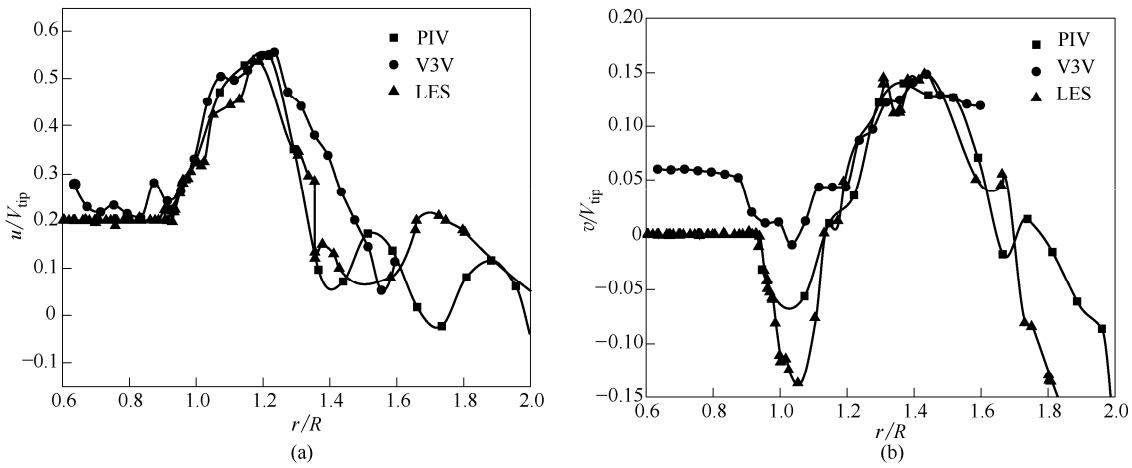


图 9 标准化径向、轴向速度对比 ($2z/W=0, \theta=30^\circ$)

Fig.9 Comparison of normalized radial and axial velocity($2z/W=0, \theta=30^\circ$)

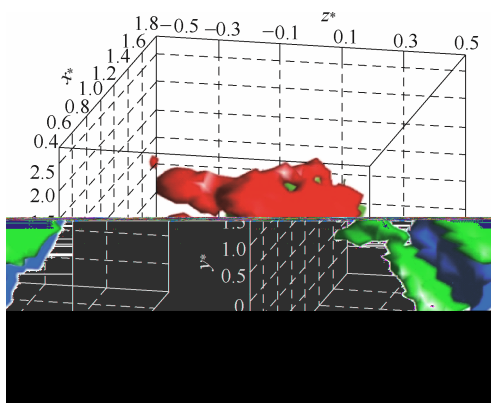


图 10 涡量等值面和速度等值面图 ($Re=66007$)

Fig.10 Isosurfaces of normalized vorticity and velocity($Re=66007$)

流区；相同涡量等值面，上尾涡明显较下尾涡大，下尾涡径向运动较上尾涡快，尾涡耗散亦较快；随

着 θ 的增大，尾涡不断耗散，因此尾涡涡对结构连续性变差，由于下尾涡运动及耗散较快，因此在尾涡即将耗散完毕处结构连续性更差。径向射流遇筒体壁面分流，分别沿上、下两方向运动，在桨叶上部和下部分别形成了两个大型的椭圆形涡旋，尾涡右上方和右下方两涡量较大区域正是两涡旋中心位置。

图 11 为 LES 尾涡结构图，图中可明显看出尾涡涡对成型、发展及耗散消失过程，上尾涡较下尾涡耗散快，下尾涡在 $\theta=60^\circ$ 附近消失，上尾涡在 90° 才耗散完毕，且 $\theta=0\sim 40^\circ$ 范围内，尾涡结构、位移较一致，在 $\theta>40^\circ$ 时，受湍流随机脉动影响很大，甚至部分尾涡结构出现不连续现象，这和图 10 的 V3V 测量结果中尾涡结构不连续性非常吻合。可以明显看出下尾涡较上尾涡径向运动快，且耗散亦较快。该结论同 Li 等^[18]的 SPIV 方法得出的公认尾涡

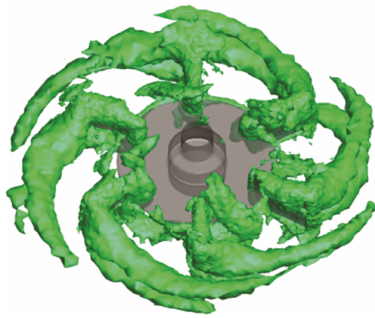


图 11 大涡模拟尾涡结构

Fig.11 Visualization of trailing vortices obtained by LES

结构形成及发展规律基本一致，只是在尾涡耗散完毕的位置处尚存在争议。

除了在每个叶片后面存在一个涡对外，在叶片上方或者后方还存在一个较大的涡结构，但结构并不完整，大小不同，规律性较尾涡弱，且现象并非像尾涡一样成对出现，而只是在圆盘上面区域出现。结合带速度矢量的涡量云图可以发现，该涡成型过程和尾涡相似，只是此涡为桨叶内侧上边缘附近流体受桨叶叶片厚度方向压力梯度影响，流体绕着叶片上边缘旋转，形成了一个涡结构，按照同尾涡相同的鉴别方法，该涡在 $\theta=40^\circ$ 附近即耗散完毕，这表明此尾涡的结构保持性很差；且随着角度增大，涡沿轴向向下、径向向外运动，涡结构范围 $r/R=0.5\sim 0.8$ ，轴向位置不低于圆盘。

3.3.2 尾涡特性的对比分析 图 12 为 $\theta=30^\circ$ 时截面涡量分布。可以看出，V3V 和 2D-PIV 实验结果均出现两个涡量较大区域，此位置即为尾涡涡对位置，随着距离尾涡距离增大，尾涡涡量呈逐渐减小趋势。且 V3V 实验结果中尾涡涡对位置同 2D-PIV 结果吻

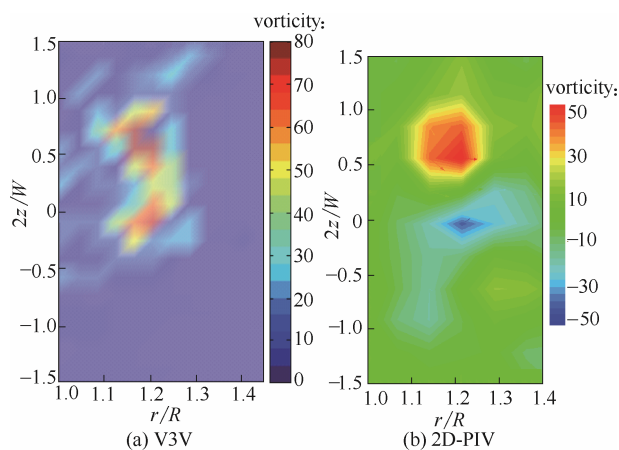


图 12 V3V 和 2D-PIV 涡量对比($\theta=30^\circ$, $Re=66007$)

Fig.12 Comparison of vorticity magnitude from V3V and 2D-PIV ($\theta=30^\circ$, $Re=66007$)

合非常好。但是，2D-PIV 结果中涡量较 V3V 中小 37.5%，这是由于 V3V 可以实现三维速度的测量，而 2D-PIV 仅能测量径向速度及轴向速度，因此涡量计算缺少环向速度分量。

目前，确定尾涡中心主要有 3 种方法，分别为速度法、最大涡量法及特征值法。Escudie 等^[8]采用这 3 种方法分别对尾涡中心进行研究，发现 3 种方法得出的结果相差不大。本文采用最大涡量法来确定尾涡中心，涡量最大处即为尾涡的中心位置，研究了尾涡的运动轨迹。图 13 为 V3V 和 LES 尾涡径向运动轨迹对比。从图中可以发现尾涡运动轨迹基本一致，但 LES 研究结果表明，由于双循环结构中下尾涡运动较上尾涡快，耗散亦较快，因此下尾涡在 $\theta=60^\circ$ 基本耗散完毕，而上尾涡结构一直持续到桨叶后方 90° 位置，但 Escudie 等^[8]用 DES 方法发现尾涡最大持续到桨叶后方 100° ，Sharp 等^[11]用 V3V 方法在桨叶后方 140° 位置发现尾涡结构。因此，涡轮桨尾涡耗散完毕位置有待继续研究。

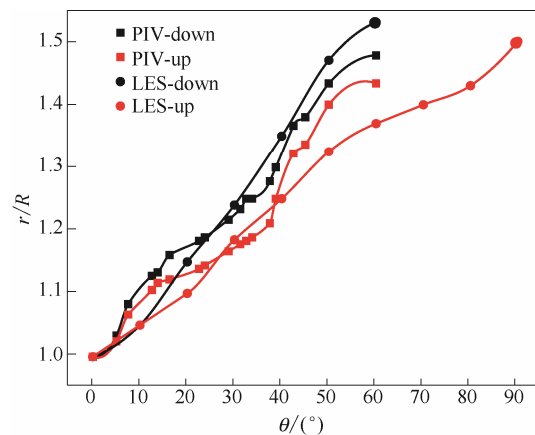


图 13 2D-PIV 和 LES 尾涡径向运动轨迹对比

Fig.13 Radial displacement of trailing vortices obtained by 2D-PIV and LES

4 结 论

(1) 采用 V3V 方法对涡轮桨搅拌槽内桨叶附近流场进行了实验研究，在完全湍流状态下 ($Re>40000$)，涡轮桨搅拌槽内流场的量纲 1 相位平均速度及湍动能分布同 Reynolds 数无关。对比 V3V 和 2D-PIV 的速度场云图分布，发现两种方法研究结果吻合很好，尤其是在桨叶射流区。

(2) 用 V3V 实验方法实现了尾涡的三维重构，下尾涡运动比上尾涡稍快，且下涡量耗散亦较快，且涡对沿轴向向上运动；尾涡涡对分布于高速射流区两侧，且尾涡运动稍滞后于高速射流区；随着 θ

的变化,尾涡不断耗散,因此尾涡涡对结构,尤其是下尾涡连续性变差,对比 2D-PIV 实验结果中尾涡涡对位置,吻合度非常高。

(3) 对涡轮桨搅拌槽内流场进行了大涡模拟研究,模拟得到了非常完整的尾涡结构,发现下尾涡在 $\theta=60^\circ$ 附近消失,上尾涡在 90° 才耗散完毕,且 $\theta=0\sim 40^\circ$ 范围内,尾涡结构、位移较一致,在 $\theta>40^\circ$ 时,部分尾涡结构出现不连续现象。将大涡模拟结果和 2D-PIV 及 V3V 实验结果对比发现,大涡模拟在速度分布及尾涡运动轨迹方面均同实验结果吻合较好,表明大涡模拟能较好预测涡轮桨搅拌槽内流场。

符号说明

c	——离底距离, m
D	——桨叶直径, m
H	——液面高度, m
N	——桨叶转速, s^{-1}
R	——涡轮桨桨叶半径, m
Re	——Reynolds 数
r	——坐标系径向坐标, m
T	——搅拌槽直径, m
u	——径向速度, $m\cdot s^{-1}$
V	——流体速度, $m\cdot s^{-1}$
V_{tip}	——叶端线速度, $m\cdot s^{-1}$
v	——轴向速度, $m\cdot s^{-1}$
W	——桨叶叶片宽度, m
w	——环向速度, $m\cdot s^{-1}$
x^*	—— x/R
y^*	—— $2y/W$
z	——坐标系轴向坐标, m
θ	——桨叶后角度, ($^\circ$)

References

- [1] 刘敏珊,张丽娜,董其伍. 涡轮桨搅拌槽内混合特性模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(10): 1700-1702.
LIU M S, ZHANG L N, DONG Q W. Numerical research of mixing characteristics in a stirred tank with turbine impellers[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(10): 1700-1702.
- [2] 周国忠,王英琛,施力田. 用 CFD 研究搅拌槽内的混合过程[J]. 化工学报, 2003, 54(7): 886-890.
ZHOU G Z, WANG Y C, SHI L T. CFD study of mixing process in stirred tank[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2003, 54(7): 886-890.
- [3] 蔡清白,戴干策. 翼型桨叶片尾涡结构的 PIV 实测与 LES 模拟研究[J]. 过程工程学报, 2011, (4): 541-548.
CAI Q B, DAI G C. Measurement of trailing vortices around a hydrofoil impeller with PIV and large eddy simulation[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2011, (4): 541-548.
- [4] SHARP K V, ADRIAN R J. PIV study of small-scale flow structure around a Rushton turbine[J]. AIChE Journal, 2001, 47(4): 766-778.
- [5] 程先明,李志鹏,高正明,等. 涡轮桨搅拌槽内流动及尾涡特性研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2009, 36(6): 16-21.
CHENG X M, LI Z P, GAO Z M, et al. Characteristics of flow fields and trailing vortices in a stirred tank with a Rushton turbine[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology(Natural Science), 2009, 36(6): 16-21.
- [6] CHARA Z, KYSELA B, KONFRST J, et al. Study of fluid flow in baffled vessels stirred by a Rushton standard impeller[J]. Applied Mathematics and Computation, 2016, (272): 614-628.
- [7] SHARP K V, ADRIAN R J. PIV study of small-scale flow structure around a Rushton turbine[J]. AIChE Journal, 2001, 47(1): 766-778.
- [8] ESCUDIE R, BOUYER D, LINE A. Characterization of trailing vortices generated by a Rushton turbine[J]. AIChE Journal, 2004, 50(1): 75-86.
- [9] ESCUDIE R, LINE A. A simplified procedure to identify trailing vortices generated by a Rushton turbine[J]. AIChE Journal, 2007, 53(2): 523-526.
- [10] 宋戈. 涡轮桨搅拌槽内湍流特性的三维 PIV 实验研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2012.
SONG G. The experiment investigation of fluid characteristics in the stirrer tank using stereo PIV[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2012.
- [11] SHARP K V, HILL D, TROOLIN D, et al. Volumetric three-component velocimetry measurements of the turbulent flow around a Rushton turbine[J]. Exp. Fluids, 2010, 48(1): 167-183.
- [12] HILL D, TROOLIN D, WALTERS G, et al. Volumetric 3-component velocimetry (V3V) measurements of the turbulent flow in stirred tank reactors[C]//Proc. 14th Intern. Symp. Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, 2008: 1-12.
- [13] 鲍苏洋,周勇军,王璐璐,等. 涡轮桨搅拌槽内流场特性的 V3V 实验[J]. 化工学报, 2016, 67(11): 4580-4586.
BAO S Y, ZHOU Y J, WANG L L, et al. V3V study on flow field characteristics in a stirred vessel with a Rushton turbine impeller[J]. CIESC Journal, 2016, 67(11): 4580-4586.
- [14] 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 Y H, YANG C, MAO Z S. Large eddy simulation of turbulent flow in a stirred tank[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2007, 58(10): 2474-2479.
- [15] 苗一,潘家祯,牛国瑞,等. 多层桨搅拌槽内的宏观混合特性[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2006, (3): 357-360.
MIAO Y, PAN J Z, NIU G R, et al. Mixing in stirred tanks with multiple impellers[J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2006, (3): 357-360.
- [16] 李志鹏,高正明. 涡轮桨搅拌槽内单循环流动特性的大涡模拟[J]. 过程工程学报, 2007, 7(5): 900-904.
LI Z P, GAO Z M. Large eddy simulation of single loop flow field in a Rushton impeller stirred tank[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2007, 7(5): 900-904.
- [17] BAO Y, LI Z, GAO Z. PIV experiments and large eddy simulations of single loop flow fields in Rushton turbine stirred tank[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(6): 1219-1231.
- [18] LI Z P, BAO S Y. Stereo-PIV experiments and large eddy simulations

- of flow fields in stirred tanks with Rushton and curved-blade turbines[J]. *AIChE Journal*, 2013, **59**(10): 3986-4003.
- [19] BAKKER A, OSHINOWO L M. Modelling of turbulence in stirred vessels using large eddy simulation[J]. *Trans. IChemE: Chem.Eng.Res.*, 2004, **82**: 1169-1178.
- [20] 张兆顺, 崔桂香, 许春晓. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009: 236-247.
ZHANG Z S, CUI G X, XU C X. *Theory and Application of Turbulent Large Eddy Simulation*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 236-247.
- [21] MENEVEAU C, KATZ J. Scale-invariance and turbulence models for large-eddy simulation[J]. *Annual. Rev. Fluid Mech.*, 2000, **32**: 1-32.
- [22] DERKSEN J, VAN D, AKKER E A. Large eddy simulations on the flow driven by Rushton turbine[J]. *AIChE Journal*, 1999, **45**(2): 209-221.
- [23] 周勇军, 卢源, 陈明濠, 等. 改进型 INTER-MIG 搅拌槽内固液悬浮特性的数值模拟[J]. *过程工程学报*, 2014, (5): 744-750.
ZHOU Y J, LU Y, CHEN M H, *et al.* Numerical simulation of solid-liquid suspension characteristics in a stirred tank with improved INTER-MIG impeller[J]. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 2014, (5): 744-750.
- [24] ZHOU G, KRESTA S M. Impact of tank geometry on the maximum turbulence energy dissipation rate for impellers[J]. *AIChE Journal*, 1996, **42**(9): 2476-2490.
- [25] YOON H S, HILL D F, BALACHANDAR S, *et al.* Reynolds number scaling of flow in a Rushton turbine stirred tank (I): Mean flow, circular jet and tip vortex scaling[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005, **60**(12): 3169-3183.
- [26] YOON H S, BALACHANDAR S, MAN Y H. Large eddy simulation of flow in an unbaffled stirred tank for different Reynolds numbers[J]. *Physics of Fluids*, 2009, **21**(8): 137-1.