

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2022.02.015

# 基于 PIV 的仿生鲸尾型搅拌桨反应器流场研究<sup>①</sup>

韩定强<sup>1,2</sup>, 赵行<sup>1,2</sup>, 武逸凡<sup>1,2</sup>,  
李瑞<sup>1,2</sup>, 杨玲<sup>1,2</sup>, 邹祥<sup>3</sup>, 杨明金<sup>1,2</sup>

1. 西南大学 工程技术学院, 重庆 400715; 2. 丘陵山区农业装备重庆市重点实验室; 重庆 400715;  
3. 西南大学 药学院, 重庆 400715

**摘要:** 为增强搅拌反应器混合性能, 本文基于仿生学思想, 设计了一种鲸尾型搅拌桨, 即 WTT 搅拌桨(Whale tail turbine), 运用 2D-PIV 设备进行流场研究. 结果表明: WTT 搅拌桨相比 RT(Rushton turbine)搅拌桨, 可以提高流体的最大径向速度以及搅拌罐下部流体的轴向速度, 而且远离桨叶时, 轴向速度的提高更加明显; WTT 搅拌桨和 RT 搅拌桨都是径向流搅拌器, WTT 搅拌桨可以产生更大的速度, 能促进流体的混合和能量的传递, 还可略微提高搅拌罐底部流体的湍动能, 其产生的轴向速度和径向速度的最大 Lyapunov 指数均大于 RT 搅拌桨, 即 WTT 搅拌桨产生的流场混沌程度更高, 混合性能更好.

**关键词:** 鲸尾型搅拌桨; 仿生设计; PIV; 最大 Lyapunov 指数

中图分类号: TH693.9

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2022)02-0091-08

## On Flow Field of a Bionic Whale Tail Turbine Agitator Based on PIV

HAN Dingqiang<sup>1,2</sup>, ZHAO Hang<sup>1,2</sup>, WU Yifan<sup>1,2</sup>,  
LI Rui<sup>1,2</sup>, YANG Ling<sup>1,2</sup>, ZOU Xiang<sup>3</sup>, YANG Mingjin<sup>1,2</sup>

1. College of Engineering and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Agriculture Equipment for Hilly and Mountainous Regions, Chongqing 400715, China;

3. College of Pharmaceutical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** In order to enhance the mixing performance of stirred reactors, a whale tail turbine (WTT) was proposed based on the idea of bionics, and the bionic design was proceeded, in addition, the flow field experiments were carried out by mean of 2D-PIV equipment. The results show that WTT impeller can improve the maximum radial velocity and axial velocity at the bottom of the tank compared with the RT impeller, and the enhancement of axial velocity is more obvious when the impeller is far away from the impeller. The WTT and RT are both radial flow agitators. The WTT impeller can generate larger velocity, which can promote the mixing of fluid and the transfer of energy. The WTT impeller can slightly improve the turbulent kinetic energy of fluid at the bottom of the agitator tank. The largest Lyapunov exponent of axial velocity and radial velocity generated by the WTT impeller is greater than that of the RT impeller, which means that the flow field generated by the WTT impeller has a higher degree of chaos and better mixing performance.

**Key words:** whale tail turbine; bionics design; PIV; largest Lyapunov exponent

① 收稿日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(31871783).

作者简介: 韩定强, 硕士研究生, 主要从事农业机械装备研究.

通信作者: 杨明金, 教授, 博士生导师.

搅拌反应器具有操作灵活、搅拌性能良好、经济效益好等优点,广泛应用于农业、化工、医药、生物发酵以及冶金行业等生产过程<sup>[1]</sup>. 搅拌桨作为搅拌反应器的核心部件<sup>[2]</sup>,其结构设计和参数优化一直是学者们关注的重点<sup>[3-5]</sup>.

仿生学是借鉴生物进化成果推进技术进步和理论创新的重要源泉,已被运用于军事、医疗、工业等多个领域<sup>[6]</sup>. 将搅拌桨设计和仿生学结合有助于开发出性能优良的搅拌反应器设备. 刘作华等<sup>[7-8]</sup>提出了一种仿生刚柔组合桨,设计思想源于鱼类、鲸类的游动和鸟类飞行,通过柔性身体的运动部位与周围流体相互作用,使能量以波的方式传递到流场远处,从而提高设备的能量利用率,实现流体高效、节能地混合. ZOU 等<sup>[9]</sup>受生物体消化道混合过程的启发,设计了一种软弹性反应器,该反应器在高黏度流体混合方面具有优势. PIV (Particle Image Velocimetry)作为一种无干扰、瞬态和全场速度测量技术<sup>[10]</sup>,可以测得一定范围内空间点上的速度分布信息,获得丰富的流场形状和流动特性<sup>[11-14]</sup>,PIV 技术已经成为研究流场结构的主要手段之一.

本文基于仿生学设计出一种新型鲸尾型搅拌桨,设计思想源于鲸鱼靠鲸尾推动前行,并搅动鲸尾周围液体<sup>[15]</sup>,这正是搅拌系统所需要的. 本文提取鲸尾轮廓参数进行几何建模,以此制作成桨叶,替换 RT (Rushton Turbine)搅拌桨上的直叶片成为一种新型鲸尾型搅拌桨,即 WTT(Whale Tail Turbine)搅拌桨,并运用 2D-PIV 技术研究 WTT 搅拌桨的流场结构和混合性能,本研究可为搅拌桨设计提供一种新思路.

## 1 搅拌桨的制作

收集多张鲸尾图片,通过对比分析,本文确定了一张具有代表性的图片,如图 1(a)所示. 将鲸尾图片导入 Matlab2018 中进行图像处理,首先对图片进行二值化处理、中值滤波,然后经过 Canny 算法对轮廓提取,最后将轮廓线导入 Matlab 拟合工具箱进行曲线拟合. 考虑到鲸尾对称性,拟合出了图中 5 条曲线. 其表达式分别为

$$y_1 = 2 \times 10^7 x^{-2.455} \quad (1)$$

$$y_2 = -1.19x + 263 \quad (2)$$

$$y_3 = 472.3\sin(0.0539x + 0.5741) + 236.2\sin(0.07593x + 3.278) \quad (3)$$

$$y_4 = -44x + 366 \quad (4)$$

$$y_5 = 150.9e^{-0.078x} \quad (5)$$

在 Solidworks2014 中画出这 5 条曲线,并将其制作成厚度( $m_1$ )为 2 mm 的搅拌桨叶. 为更好地研究该桨叶的性能,使其叶片面积与直径  $d_1$  为 80 mm 的 RT 搅拌桨桨叶相同,如图 1(b)所示. RT 搅拌桨的尺寸与化工行业标准 HG/T3796.5-2005 一致<sup>[16]</sup>,尺寸参数如表 1. 将制作的新型鲸尾叶片代替 RT 搅拌桨的直叶片,形成 WTT 搅拌桨,该桨与 RT 搅拌桨有相同的直径. 考虑到 3D 打印技术加工的精确性和快速性,本文利用 3D 打印技术加工 WTT 搅拌桨.

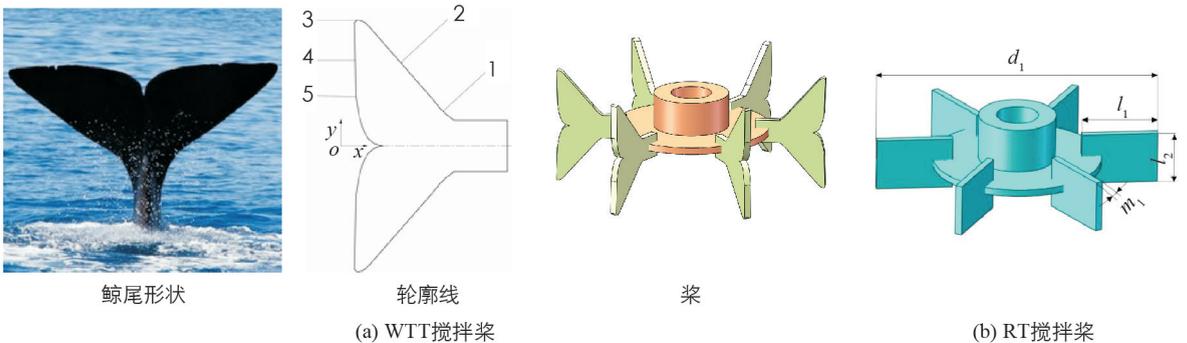


图 1 WTT 搅拌桨和 RT 搅拌桨

表 1 RT 搅拌桨尺寸参数

直径( $d_1$ ) /mm	桨叶长度( $l_1$ ) /mm	桨叶宽( $l_2$ ) /mm	桨叶厚( $m_1$ ) /mm
80	21	15	2

## 2 PIV 实验

### 2.1 几何模型

实验用的搅拌罐为平底圆柱型有机玻璃罐, 为减小光折射对拍摄的影响, 将圆柱型有机玻璃罐放置并固定在  $250\text{ mm} \times 250\text{ mm} \times 255\text{ mm}$  方形有机玻璃容器内, 并且在圆柱型罐和方形有机玻璃容器之间加入纯净水, 水高度和罐内的液体高度一致。

实验使用的搅拌模型和舒雷<sup>[14]</sup>选择的模型相同, 其尺寸结构如图 2, 搅拌罐  $D=200\text{ mm}$ , 高  $H_1=240\text{ mm}$ , 壁厚  $m_2=5\text{ mm}$ , 罐内均匀分布 4 块标准挡板, 挡板高  $H_2=240\text{ mm}$ , 宽  $l_3=19\text{ mm}$ , 厚  $m_3=3\text{ mm}$ . 在实验过程中, 搅拌桨分别采用 RT 搅拌桨和 WTT 搅拌桨, 其尺寸大小与前述相同, 搅拌桨叶中心平面距离罐底面高  $h=47.5\text{ mm}$ .

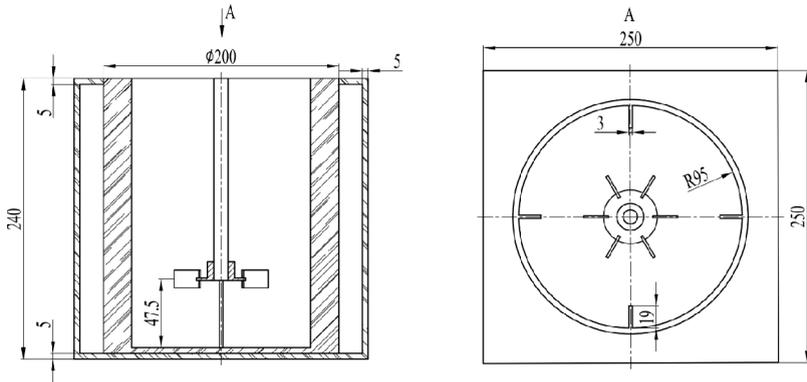
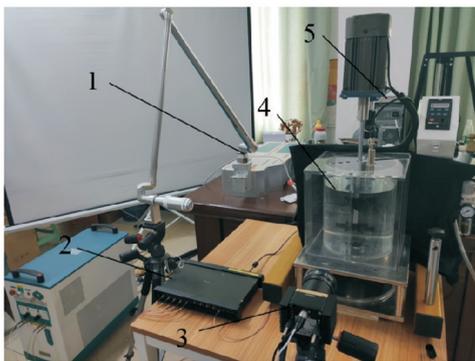


图 2 搅拌罐几何尺寸

### 2.2 PIV 实验装置

使用北京立方天地科技有限公司 2D-PIV 实验装置, 如图 3 所示. 主要由以下部件组成: Vlite-380 双脉冲激光器(北京镭宝光电技术有限公司生产, 脉冲频率  $1\sim 15\text{ Hz}$ , 波长  $532\text{ nm}$ ); CLM-B204M-TF000 CCD 相机(IMPERX 公司, 图像分辨率  $2048 \times 2048$ , 满帧采集速率  $30\text{ 帧/秒}$ ); MicroPluse 725 同步控制器(北京立方天地科技有限公司); 软件 MicroVec. V3. 6(北京立方天地科技有限公司), HPZ44 Workstation Mini Tower 计算机; 霍尔传感器(NJK-5002C).



1. 双脉冲激光器 2. 同步控制器 3. CCD 相机 4. 搅拌装置 5. 计算机

图 3 PIV 实验装置

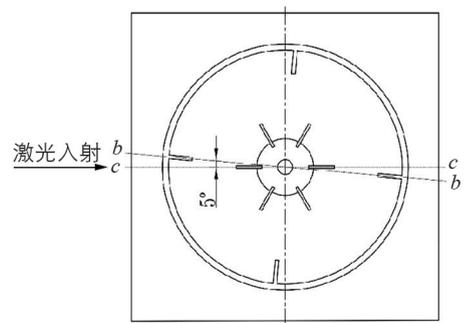


图 4 激光入射面

### 2.3 实验操作与设置

#### 2.3.1 实验预处理

搅拌罐中水液面高度为  $190\text{ mm}$ , 为减少水中气泡对实验准确性的影响, 装好水后, 静置  $4\text{ h}$  再进行实验操作. 对搅拌桨进行喷漆处理, 目的是防止搅拌桨反光损坏相机, 搅拌轴转速为  $120\text{ r/min}$ .

#### 2.3.2 拍摄平面与查询区域的选择

为避免挡板干扰激光平面的照射, 两挡板产生的平面  $b-b$  与经过搅拌轴中心线竖直平面  $c-c$  夹角为  $5^\circ$ , 如图 4 所示. 激光器产生的片光源与竖直平面  $b-b$  重合, 厚度为  $1.5\text{ mm}$ . 相机拍摄区域为搅拌罐右下

100 mm×100 mm 区域<sup>[14]</sup>. 为获得角度解析的流场数据, 即同一平面的流场数据, 利用霍尔传感器实现锁相功能. 查询区域是 PIV 实验数据处理划分的最小区域, 可以影响实验的精确性<sup>[12]</sup>, 本文查询区域大小设置为 32×32 像素, 两相邻查询时间重叠 50%.

### 2.3.3 跨帧延时时间参数调整

跨帧延时时间参数设置不合适会导致拍摄的图像在后期处理时带来很大麻烦, 甚至无法计算出正确的数据结果, 因此在设定此参数时需要谨慎. 跨帧延时时间参数公式为<sup>[17]</sup>

$$\delta_t = \frac{D}{R} \cdot \frac{\delta_d}{v_{\max}} \quad (6)$$

式中:  $\delta_t$  为跨帧时间, s;  $\delta_d$  为最大像素位移, pixel;  $D$  为拍摄区域尺寸;  $v_{\max}$  为流场最大速度, m/s;  $R$  为相机分辨率, pixel.

根据公式(6), 跨帧延时时间参数设定为 700  $\mu$ s.

### 2.3.4 数据采集和处理

在相同转速下, 搅拌罐内流体的速度会随时间变化而变化, 同一点流体瞬时速度围绕其时均速度值上下波动. PIV 测量的是流场瞬时速度, 为了得到时均速度, 需对实验结果进行多次采样取平均值. 实验记录了  $c-c$  平面的 600 副图像, 即 300 组数据, 对 300 组数据进行时均化处理, 得到该平面的时均速度, 将得到的结果导入 Tecplot2014 做进一步分析处理.

## 3 结果分析

### 3.1 速度分析

为了更好地分析不同搅拌状态下流场的径向速度、轴向速度, 对径向速度和轴向速度进行无量纲处理. 即径向速度、轴向速度分别除以桨叶尖端速度 ( $V_{\text{tip}} = 0.5$  m/s), 且分别记为  $U_r, U_z$ . 提取径向位置  $x = 50$  mm 和  $x = 40$  mm 两条轴向直线的速度数据, 制作成图 5 所示的 4 幅速度曲线. 图 5(a), (c) 分别是在  $x = 50$  mm 和  $x = 40$  mm 处提取的轴向直线的径向速度. 图 5(b), (d) 分别是在  $x = 50$  mm 和  $x = 40$  mm 处提取的轴向直线的轴向速度.  $z$  为搅拌罐内拍摄平面轴向位置, 零点位于搅拌罐底部,  $x$  为搅拌罐内拍摄平面径向位置, 零点位于搅拌罐壁面.

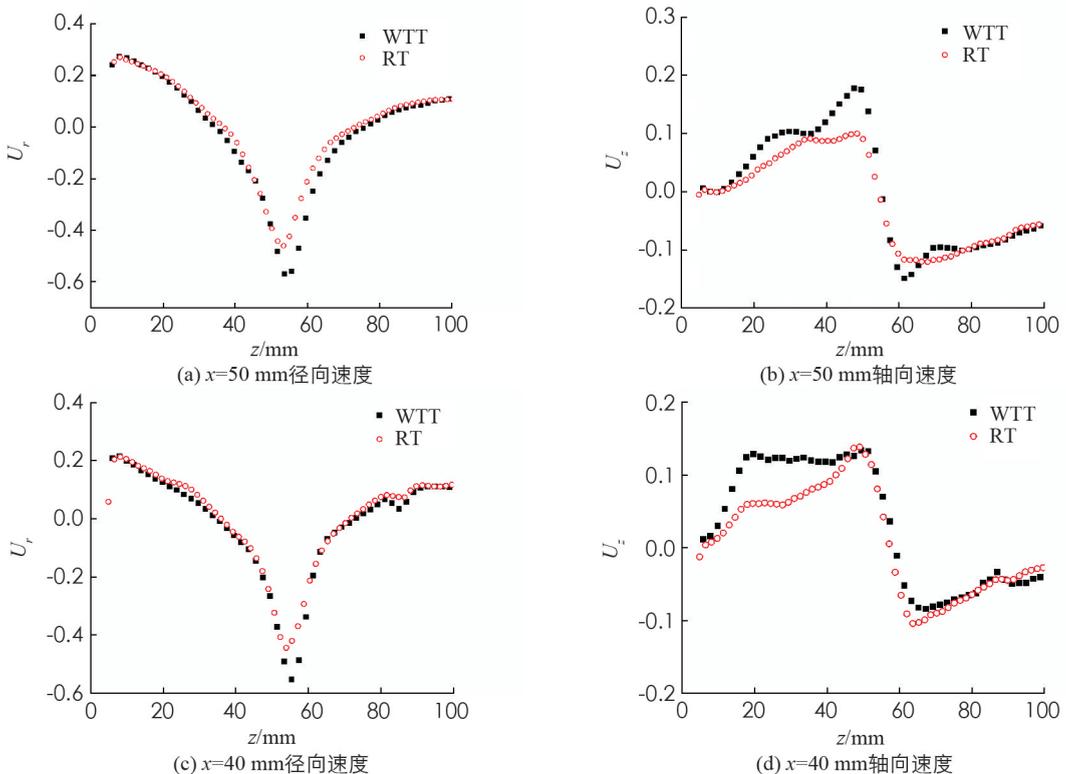


图 5 不同位置的径向速度和轴向速度

从图 5(a)可以看出, 无论是 WTT 搅拌桨还是 RT 搅拌桨, 搅拌罐内产生的较大径向速度都主要集中在  $z=40\sim 70$  mm 之间, 而这一高度和叶片安装高度大致相同. 在  $z=55$  mm 处, 两者都出现了最大的径向速度, 但是 WTT 搅拌桨的最大径向速度有所提高. 对整体而言, WTT 搅拌桨产生的径向速度在桨叶安装高度范围内有略微的提高, 但是不明显. 从图 5(b)可以看出, 在  $z=55$  mm 时, 轴向速度约为 0 m/s, 在  $z<55$  mm 时, 两者轴向速度先增大后减小, 当  $z>55$  mm 时, 两者的轴向速度, 先减小后增大. 但是当  $z<50$  mm 时, WTT 搅拌桨产生的轴向速度大于 RT 搅拌桨产生的轴向速度, 两者轴向速度相差明显. 由图 5(c)可知, 两种搅拌桨在该位置产生的径向速度升降趋势和图 5(a)一致, 但是由于离桨叶较远, 两者的径向速度降低, 另外, 两者的最大径向速度差增大. 从图 5(d)看出, 在  $z>50$  mm 时两者轴向速度相差不大, 在  $z<50$  mm 时, 两者轴向速度差异明显, 尤其是在  $z=20\sim 40$  mm 之间时.

综上所述, WTT 搅拌桨相比 RT 搅拌桨, 可以提高最大径向速度和搅拌罐下部的轴向速度, 而且远离桨叶时两者轴向速度差距更加明显.

### 3.2 迹线图与时均流场图

图 6(a)是 RT 搅拌桨的流线图, 从图中看出, 在桨叶附近, 流体水平向外壁面流动, 当运动到搅拌罐壁面, 流体改变方向, 分别向上和向下运动, 最终形成两个较大的主循环, 这是典型的径向流搅拌桨产生的流场, 这与施乃进等<sup>[13]</sup>观察到的流场一致, 从侧面证明了实验的准确性. 另外除两个大漩涡以外, 还形成两个较小的漩涡, 主要是因为拍摄的平面距离挡板十分接近, 流体打击挡板造成的漩涡. 图 6(b)是 WTT 搅拌桨的流线图, 可以看出 WTT 搅拌桨形成上下两个主循环, 这说明该桨也是一个径向流搅拌桨, 且主循环涡的核心位置并没有改变.

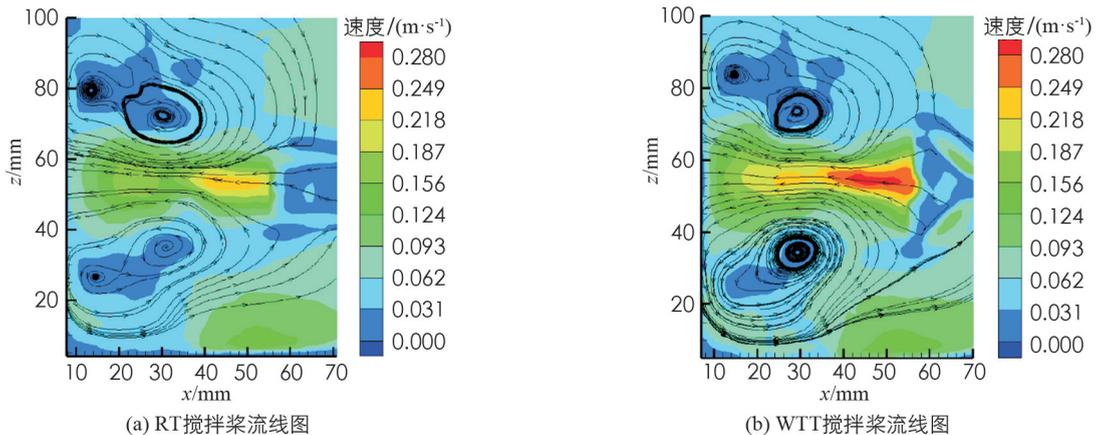


图 6 流线图与时均流场图

图 6(a)、图 6(b)同样是搅拌桨的时均流场图, 对比两图可看出, 在 RT 搅拌桨高度附近, 速度范围主要集中在  $0.124\sim 0.249$  m/s, 而 WTT 搅拌桨的速度范围主要在  $0.124\sim 0.280$  m/s, 即 WTT 搅拌桨在搅拌桨高度附近可以产生更大的速度区域. 在搅拌罐底部, WTT 搅拌桨产生的速度也有所提升. 总体来说, WTT 搅拌桨可以产生更大的速度和混合区域, 可促进流体的混合和能量的传递.

### 3.3 湍动能分析

湍动能是衡量流场湍动指标之一, 流场的微观变化情况与湍动能的变化息息相关. 图 7 是两种搅拌桨状态下流场的湍动能图. 在 2D-PIV 实验中, 湍动能的计算公式<sup>[17]</sup>为

$$k = \frac{3}{4} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2}) \quad (7)$$

式中:  $k$  为湍动能,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ;  $\overline{u'^2}$  和  $\overline{v'^2}$  分别为径向和轴向脉动速度平方均值,  $\text{m}^2/\text{s}^2$ .

图 7(a)为 RT 搅拌桨的湍动能图, 图 7(b)为 WTT 搅拌桨的湍动能图. 从图 7(a)可以看出, 最大湍动能出现在  $z=40$  mm,  $x=55$  mm 处, 这是由于此处是上下两个主循环的交界之处, 且较大湍动能主要集中在桨叶安装高度附近, 其他地方湍动能较小, 尤其是在槽底湍动能几乎为零, 这不利于流体的混合. 图 7(b)看出, WTT 搅拌桨的最大湍动能也出现在两个主循环交界之处, 较大湍动能也集中在桨叶安装高度附

近,另外在槽底部,湍动能有所改善.

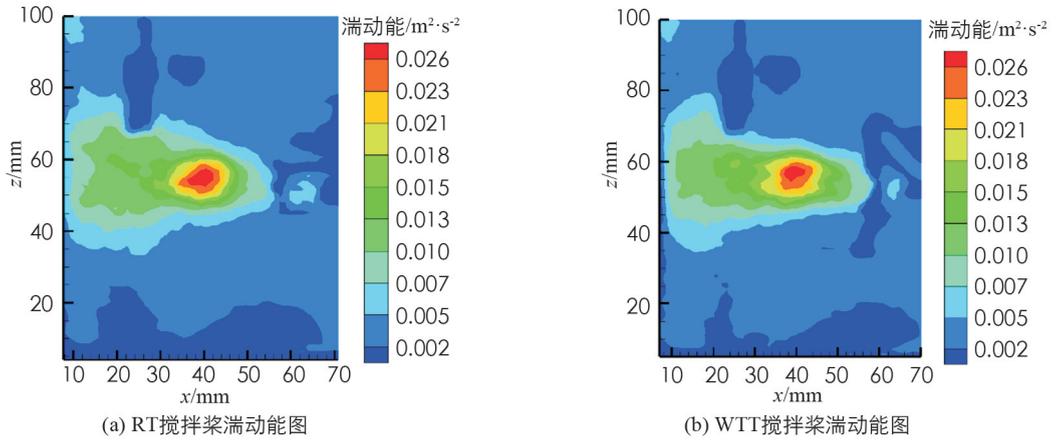


图 7 湍动能图

### 3.4 最大 Lyapunov 指数

最大李雅普诺夫(Lyapunov)指数是描述系统动力学特性的一个重要参数,它是指系统在相空间中相邻轨道间收敛或发散的指数率<sup>[18]</sup>,常被用来判断系统是否处于混沌状态,如果系统的最大 Lyapunov 指数大于零,则该系统处于混沌状态,且指数越大,混沌程度越高,混合性能越好.

用 PIV 系统采集搅拌罐内典型点的速度时间序列数据,选取 2 个典型点,分别为  $P_1$  和  $P_2$ ,其位置坐标  $(x, z)$  分别为  $(40, 30)$  和  $(40, 50)$ . 两点径向速度、轴向速度时间序列如图 8 所示,  $U_r$  表示径向速度,  $U_z$  表示轴向速度.

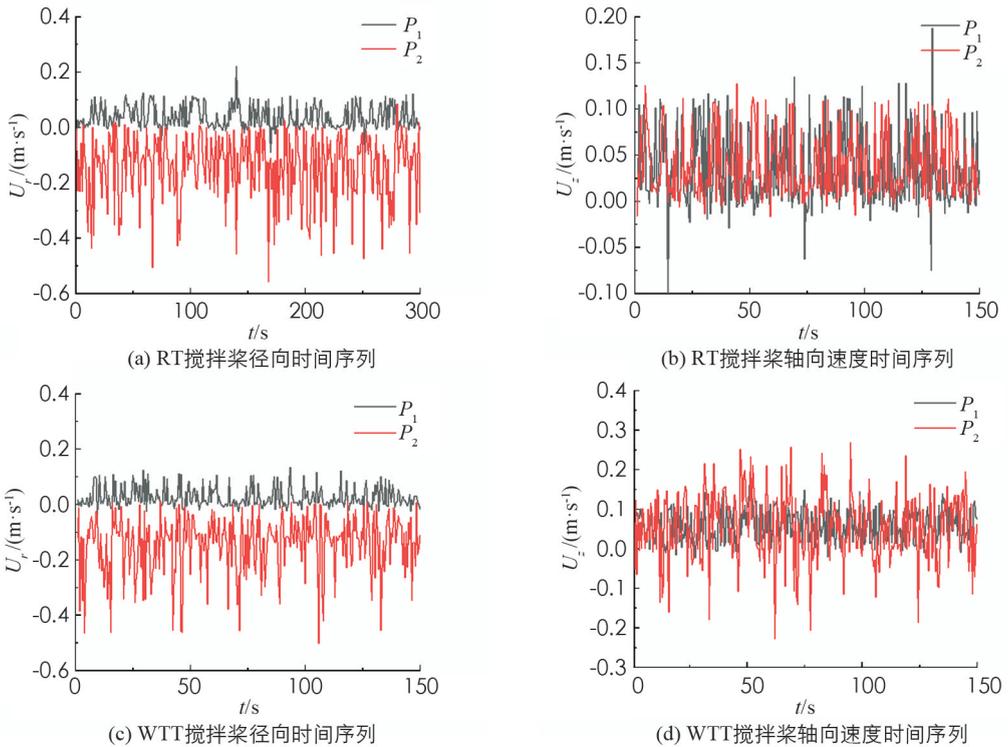


图 8 典型点径向速度、轴向速度时间序列

对时间序列进行傅里叶变换得到平均周期  $P$ ,再用 C-C 算法计算出嵌入维数  $m$  和时间延迟  $t$ ,得到结果如表 2. 再利用小数据算法计算出最大 Lyapunov 指数,结果如表 3 所示. 其中,小数据算法思想<sup>[18]</sup>如下:

1) 根据时间延迟  $t$  和嵌入维数  $m$  重构相空间  $\{Y_i, i = 1, 2, \dots, M\}$ ,其中  $M$  为重构相空间中相空间点个数.

2) 找到相空间每个点  $Y'_j$  的最近邻点  $Y_j$ , 并限制短暂分离, 即:

$$d_j(0) = \min \| Y_j - Y_j^\wedge \|, |j - j^\wedge| > P \quad (8)$$

3) 对相空间每一个点  $Y_i$  计算出该邻点的  $i$  个离散时间步的距离  $d_j(i)$

$$d_j(i) = |Y_{j+i} - Y_{j+i}^\wedge|, i = 1, 2, \dots, \min(M - j, M - j^\wedge) \quad (9)$$

4) 对每个  $i$ , 求出所有  $j$  的  $\ln d_j(i)$  平均  $y(i)$ , 即

$$y(i) = \frac{1}{q \Delta t} \sum_{j=1}^q \ln d_j(i) \quad (10)$$

5) 利用最小二乘法对所得的数据进行拟合, 作出回归曲线, 该直线的斜率就是所求的最大 Lyapunov 指数.

表 2 计算最大 Lyapunov 指数所需参数

桨型	取样位置	取样变量	延迟时间( $t$ )	嵌入维数( $m$ )	平均周期( $P$ )
RT	$P_1$	$U_r$	3	3	12
		$U_z$	2	2	4
	$P_2$	$U_r$	3	4	3
		$U_z$	2	9	19
WTT	$P_1$	$U_r$	2	2	3
		$U_z$	2	2	19
	$P_2$	$U_r$	3	2	4
		$U_z$	3	2	30

表 3 各桨最大 Lyapunov 指数

取样位置	取样变量	桨型	最大 Lyapunov 指数	增长百分比/%
$P_1$	$U_r$	RT	0.078 5	55.9
		WTT	0.122 4	
	$U_z$	RT	0.097 9	3.6
		WTT	0.133 6	
$P_2$	$U_r$	RT	0.048 5	40.0
		WTT	0.068 2	
	$U_z$	RT	0.027 9	63.4
		WTT	0.045 6	

由表 3 可知, 在两种桨型状态下, 各位置的最大 Lyapunov 指数均大于 0, 由此说明两种桨型产生的流场均处于混沌状态. 在  $P_1$  点时, WTT 搅拌桨的轴向速度和径向速度的最大 Lyapunov 指数均大于 RT 搅拌桨, 径向速度的最大 Lyapunov 指数提高了 55.9%, 轴向速度的最大 Lyapunov 指数提高了 3.6%, 这说明在该点 WTT 搅拌桨可以提高流场混沌程度, 且对径向速度的混沌程度提升更多. 在  $P_2$  点时, WTT 搅拌桨产生流场的径向和轴向速度的最大 Lyapunov 指数也大于 RT 搅拌桨, 说明在该点 WTT 搅拌桨产生的流场混沌的程度更高. 同时注意到, 径向速度和轴向速度的 Lyapunov 指数提升较大, 尤其是轴向速度的 Lyapunov 指数提升 63.4%.

## 4 结论

本文运用仿生学原理, 加工制作了一种鲸尾型 WTT 搅拌桨, 并运用了 PIV 技术对该搅拌桨流场进行了研究, 得到结论如下:

1) WTT 搅拌桨相比 RT 搅拌桨, 可以提高最大径向速度和搅拌罐下部的轴向速度, 而且远离桨叶时轴向速度差距更加明显.

2) WTT 搅拌桨可以产生更大的速度, 这有利于流体的混合与能量的传递. WTT 搅拌桨和 RT 搅拌桨的最大湍动能主要集中在两个主循环汇合处, 但是 WTT 搅拌桨在槽底部的湍动能有略微提升.

3) WTT 搅拌桨产生的轴向速度和径向速度的最大 Lyapunov 指数都是大于 RT 搅拌桨, 即 WTT 搅拌桨拥有混沌程度更高的流场, 更好的混合性能.

### 参考文献:

- [1] 陈志平, 章序文, 林兴华, 等. 搅拌混合设备设计选用手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] DING J, WANG X, ZHOU X F, et al. CFD Optimization of Continuous Stirred-tank (CSTR) Reactor for Biohydrogen Production [J]. 2010, 101(18): 7005-7013.
- [3] KAMLA Y, AMEUR H, KARAS A, et al. Performance of New Designed Anchor Impellers in Stirred Tanks. Chemical Papers [J], 2020, 74(3): 779-785.
- [4] 刘宝庆, 张义堃, 刘景亮, 等. 新型同心双轴搅拌器功率与混合特性的数值模拟 [J]. 化工学报, 2013, 64(4): 1135-1144.
- [5] 刘作华, 魏红军, 熊黠, 等. 长短叶片复合型刚柔桨强化搅拌槽内流体混沌混合行为 [J]. 化工学报, 2020, 71(11): 5080-5089.
- [6] VON GLEICH A, PADE C, PETSCHOW U, et al. Potentials and Trends in Biomimetics [M]. Berlin: Springer, 2010.
- [7] 刘作华, 曾启琴, 杨鲜艳, 等. 刚柔组合搅拌桨与刚性桨调控流场结构的对比 [J]. 化工学报, 2014, 65(6): 2078-2084.
- [8] 刘作华, 陈超, 刘仁龙, 等. 刚柔组合搅拌桨强化搅拌槽中流体混沌混合 [J]. 化工学报, 2014, 65(1): 61-70.
- [9] ZOU J S, XIAO J, ZHANG Y, et al. Numerical Simulation of the Mixing Process in A Soft Elastic Reactor with Bionic Contractions [J]. Chemical Engineering Science, 2020, 220: 115623.
- [10] 徐玉明, 迟卫, 莫立新. PIV 测试技术及其应用 [J]. 舰船科学技术, 2007, 29(3): 101-105.
- [11] SEO J, SEOL D M, HAN B, et al. Turbulent Wake Field Reconstruction of Vlc Models Using Two-dimensional Towed Underwater PIV Measurements [J]. Ocean Engineering, 2016, 118: 28-40.
- [12] 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.
- [13] 施乃进, 周勇军, 鲍苏洋, 等. 涡轮桨搅拌槽内湍流特性的 V3V 实验及大涡模拟 [J]. 化工学报, 2017, 68(11): 4069-4078.
- [14] 舒雷. 基于 CFD 的搅拌反应器流场模拟和设计优化研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [15] 韦喜忠, 沈泓萃, 陈伟政. 仿生水动力学研究进展综述 [J]. 船舶力学, 2020, 24(7): 962-970.
- [16] 国家发展和改革委员会. 圆盘涡轮式搅拌器: HG/T 3796. 5-2005 [S]. 北京: 化工出版社, 2006.
- [17] 孙先朋. 机械搅拌槽内非牛顿流体流场的 PIV 试验及数值模拟研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [18] YONG Z. New prediction of chaotic time series based on local Lyapunov exponent [J]. Chinese Physics B, 2013, 22(5): 050502.

责任编辑 汤振金