

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.11.021

离心泵内示踪粒子运动的离散相模型模拟*

李亚林 袁寿其 汤跃 黄萍 李晓俊

(江苏大学流体机械工程技术研究中心, 镇江 212013)

【摘要】 采用离散颗粒模型(DPM)对离心泵内示踪粒子运动进行了数值计算。在该模型中,采用经典的RNG $k-\varepsilon$ 模型来求解离心泵内的清水流场,并与试验对比验证模拟计算的可靠性,然后在清水流场基础上对离散示踪粒子采用Lagrange方法模拟,求解不同性质的粒子运动方程。通过粒子运动轨迹线与恒定或准恒定流线的对比,以及粒子相对速度随流场空间尺度的变化关系分析了粒子的跟随特性。数值模拟结果表明:当粒子直径大于50 μm ,不同密度的粒子在泵内跟随性差别很大,而直径在20 μm 以下,粒子跟随性对密度的敏感度降低;粒子密度与流体密度相等是一个重要的界点;对于流道内存在漩涡等不稳定流的追踪,只有无量纲密度比 ε 接近1,且直径足够小的粒子其轨迹线才与流体的流线接近;直径在20 μm 以下的粒子相对速度大小与流体接近,跟随精度较高;考虑到粒子的散射特性,建议本泵选用直径在20 μm 左右的聚苯乙烯粒子作为示踪粒子。

关键词: 离心泵 示踪粒子 离散相模型 跟随性 数值模拟

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)11-0113-06

Simulation of Tracer Particles Movement by Discrete Phase Model in the Centrifugal Pump

Li Yalin Yuan Shouqi Tang Yue Huang Ping Li Xiaojun

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract

Motion of tracer particles in the centrifugal pump was calculated by discrete phase model. In this model, the fluid field of the centrifugal pump was solved by the two-equation RNG $k-\varepsilon$ turbulence model. The pump performance curves were simulated to check the calculation accuracy by comparing with the experimental performance curves. Based on the result of the flow field, the tracks of tracer particles with different densities and diameters in various conditions were achieved by using Lagrange method. Through comparing particle trajectory with fluid streamline and analyzing the particle speed changed in the relationship with the spatial scale, the particles tracking characteristics were studied. Numerical simulation results showed that tracking characteristics of different densities, particles were significantly different when their diameters were greater than 50 μm . While diameters were less than 20 μm , densities were very low impact on the following performance. It was very important when the particle density was equal to the density of fluid. In the channel with unstable flow such as the vortex flow, the particle trajectory line was closed to the fluid flow line when the tracer particle with smaller diameters and the density was the same with the fluid density. Changing with spatial scale, the particle's speed was closed to the fluid velocity when the particle's diameter was under 20 μm . Finally, taking the particle scattering characteristics into account, it was recommended that 20 μm polystyrene should be chosen as tracer particles for this centrifugal pump.

Key words Centrifugal pump, Tracer particles, Discrete phase model, Tracking characteristics, Numerical simulation

收稿日期: 2011-11-15 修回日期: 2012-02-09

* 国家杰出青年基金资助项目(50825902)、江苏省自然科学基金攀登项目(BK2009006)和江苏省研究生创新计划资助项目(CXLX12_0641)

作者简介: 李亚林,博士生,主要从事离心泵内部流动PIV试验与CFD数值模拟研究,E-mail: yuanfangfriend@126.com

通讯作者: 袁寿其,研究员,博士生导师,主要从事流体机械及排灌机械研究,E-mail: shouqi@ujs.edu.cn

引言

选择合适的示踪粒子是 PIV 测量中非常关键的问题。根据 PIV 测试要求,示踪粒子一般要满足 3 个条件:跟随性、散射特性和查问区内足够多的粒子数。其中跟随性尤为重要,这是因为 PIV 技术是利用示踪粒子的运动来表征当地流体的运动状况,示踪粒子的特性对 PIV 最终测量结果影响很大^[1-3]。粒子的跟随性取决于粒子的尺寸、密度和形状。这种能力通常用空气动力直径即具有同样沉降速度的单位密度球的直径来描述^[4],这就决定粒子直径越小越好,但是粒子直径越小又制约着粒子的散射性。可见粒子满足跟随性和散射性是相互制约的,需要对具体流场具体分析选择。对于离心泵内流场 PIV 测试,如何获得较好测速精度同时允许选取适当大粒径的粒子以改善取样信号质量是值得研究的问题。

示踪粒子跟随性的获得是靠求解流场中粒子的运动方程^[5],而求解粒子的运动方程要求背景流场为已知条件,实际上离心泵内流动的复杂性,不能表达为具体的已知函数。为了解决这一问题,拟采用数值模拟的方法先获得离心泵内流场,然后计算粒子的运动轨迹,这样不仅可以获得粒子运动轨迹线与恒定或准恒定流线的相对关系,还可以获得粒子相对速度随流场空间尺度的变化关系。本文基于 CFD 技术建立离心泵内示踪粒子运动的离散相模型(DPM),初步揭示泵内示踪粒子运动的变化规律,为离心泵内流场 PIV 试验选取合适的示踪粒子提供理论依据。

1 几何模型

模拟选用的是 PIV 测试专用模型泵,其基本设计参数:流量 $Q = 25 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H = 10 \text{ m}$,转速 $n = 1\,450 \text{ r/min}$ 。主要结构参数如表 1 所示。

叶轮采用的是低比转数设计方法设计的圆柱形

叶片,叶轮的后盖板向外,前后盖板垂直泵的轴线。蜗壳采用的是矩形截面,其中扩散段是侧面出口,直线连接。吸水室设计成半螺旋型吸水室。离心泵结构如图 1 所示。

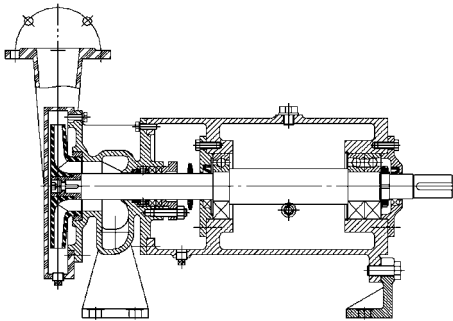


图 1 模型泵结构图

Fig. 1 Structural diagram of model pump

2 数学模型

2.1 连续相模型

对于离心泵内清水流场,采用 Yakhot 和 Orzag 提出的重整化群 RNG $k - \varepsilon$ 两方程紊流模型来描述。相比 Standard $k - \varepsilon$ 模型,RNG $k - \varepsilon$ 模型中考虑了湍流应变率的影响,因此在计算旋转流和近壁湍流方面具有优势。连续相数学方程参见文献[6]。

2.2 离散相模型

示踪粒子作为离散相,计算采用如下假设:首先是粒子的添加量以不影响原流场为前提,因此可以忽略离散相对连续相的影响,计算采用相间非耦合法进行;其次示踪粒子的添加量都很低,粒子的体积分数要小于 12%,满足 DPM 模型的使用要求,可以忽略粒子间的相互碰撞的影响;最后离心泵内流场 PIV 测试用的示踪粒子基本为固体球形颗粒,并假定与壁面的碰撞为完全弹性碰撞,反弹系数为 1。

离散相粒子的作用力平衡方程在笛卡尔坐标系下的形式为^[7]

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u_f - u_p) + g_x(\rho_p - \rho_f)/\rho_p + F_x \tag{1}$$

- 式中 F_D ——拽力系数
 F_x ——其他力在 x 向的分量
 u_f ——流体 x 向相对速度
 u_p ——粒子 x 向速度
 ρ_f ——流体的密度
 ρ_p ——粒子的密度
 g_x ——重力加速度在 x 向的分量

第 1 项 $F_D(u_f - u_p)$ 表示粒子的单位质量拽力,其中拽力系数 F_D 的表达式为

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re_p}{\rho_p d_p^2 24} \tag{2}$$

表 1 离心泵主要结构参数

Tab. 1 Main dimensions of centrifugal pump model

参数	数值
轮毂直径 D_f/mm	40
叶轮出口直径 D_2/mm	188
叶片出口宽度 b_2/mm	12
叶片包角 $\varphi/(\circ)$	160
叶片进口安放角 $\beta_1/(\circ)$	23.4
叶片出口安放角 $\beta_2/(\circ)$	20
蜗壳基圆直径 D_3/mm	210
叶片数 z	4
蜗壳进口宽度 b_3/mm	30

式中 Re_p ——相对雷诺数 μ ——流体动力粘度
 C_D ——阻力系数 d_p ——颗粒直径

C_D 按照 Morsi 和 Alexander^[8] 给出的公式依不同的颗粒相对雷诺数范围取值

$$C_D = \frac{a_1}{Re_p} + \frac{a_2}{Re_p} + a_3$$

(3)

式中系数的取值见表 2。

表 2 式(3)中的系数取值

Tab.2 Coefficient values in Eq. (3)

a_1	a_2	a_3	Re_p
24.00	0	0	≤ 0.1
22.73	0.090	3.690	$0.1 \sim 1$
29.17	-3.890	1.220	$1 \sim 10$
46.50	-116.670	0.617	$10 \sim 100$
98.33	-2.778	0.364	$100 \sim 1\,000$

第 2 项 $g_x(\rho_p - \rho_f)/\rho_p$ 表示单位粒子的相对重力,它影响粒子的上浮或沉降速度。

第 3 项 F_x 表示颗粒所受的其他力项,包括附加质量力、压力梯度引发的附加力、Basset 力等。离心泵是一种旋转机械,所以重点考虑旋转因素对粒子轨迹的影响。如果离心泵旋转轴为 Z 轴,那么由于旋转因素对粒子产生的作用力在笛卡尔坐标系 x 方向和 y 方向的表达式为^[7]

$$\begin{cases} F_{\Omega,x} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \Omega^2 x + 2\Omega \left(u_{y,p} - \frac{\rho_f}{\rho_p} u_{y,f}\right) \\ F_{\Omega,y} = \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p}\right) \Omega^2 y + 2\Omega \left(u_{x,p} - \frac{\rho_f}{\rho_p} u_{x,f}\right) \end{cases}$$

(4)

式中 Ω ——旋转坐标系旋转角速度

$F_{\Omega,x}$ 、 $F_{\Omega,y}$ ——旋转因素分别在 x 、 y 向的作用力

$u_{x,p}$ 、 $u_{y,p}$ ——粒子速度在 x 、 y 向的分量

$u_{x,f}$ 、 $u_{y,f}$ ——流体速度在 x 、 y 向的分量

通过积分拉氏坐标系下的粒子作用力微分方程式(1)可得到离散相轨道上各位置的速度,颗粒轨道式为(只列出 x 方向)

$$\frac{dx}{dt} = u_p$$

(5)

3 求解方法

3.1 计算区域及计算网格

通过 Pro/E 对整机水体进行三维实体建模,然后利用 Gambit 划分网格。网格采用四面体非结构网格,将流体划分为 5 个计算区域,分别为进水段、半螺旋吸水室、叶轮流道、蜗壳流道以及出水段。网格单元总数为 600 757。物理模型和网格化分如图 2 所示。

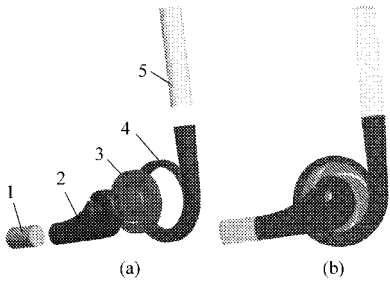


图 2 离心泵的三维造型及网格图

Fig.2 Three-dimensional model and calculation mesh

(a) 整机三维造型 (b) 计算网格模型

1. 进水段 2. 半螺旋吸水室 3. 叶轮 4. 蜗壳 5. 出水段

3.2 边界条件

计算域的进口采用速度进口,出口采用自由出流。半螺旋吸水室、叶轮和蜗壳的壁面均采用无滑移固壁边界条件。粒子在进出口均采用逃逸边界条件,而在各过流部件内表面的边界条件设置为反弹,且为弹性碰撞。

代数方程的数值模拟求解采用经典的 SIMPLE 算法,湍流方程的数值求解差分格式的选择分别为:压力项选用标准的 Standard 格式,其余的动量、湍动能 k 、湍流耗散率 ε 均采用精度较高的二阶迎风格式。

4 试验验证

离心泵的实际扬程和理论扬程分别为^[9]

$$H = \left\{ \sum_i^n \left(\frac{p}{\rho g} \right)_i / N + \sum_i^n \left(\frac{v^2}{2g} \right)_i / N \right\}_{\text{outlet}} - \left\{ \sum_i^n \left(\frac{p}{\rho g} \right)_i / N + \sum_i^n \left(\frac{v^2}{2g} \right)_i / N \right\}_{\text{inlet}} + \Delta z$$

(6)

$$H_t = M\omega / (\rho g Q)$$

(7)

式中 H ——离心泵的实际扬程

N ——进、出口断面节点数 p ——压力

Δz ——泵进、出口法兰高度差

H_t ——离心泵的理论扬程 v ——速度

M ——叶片压力面、吸力面和前后盖板表面受到的绕 Z 轴的力矩之和

ω ——叶轮旋转角速度

离心泵的水力效率为

$$\eta_h = \frac{\rho g Q H}{\rho g Q H_t} = \frac{H}{H_t}$$

(8)

利用式(6)~(8)计算得到的数值模拟预测结果和试验结果的 $H-Q$ 与 $\eta-Q$ 曲线对比如图 3 所示。从图中可以看出,模拟结果和试验结果比较吻合,数值模拟的计算精度在误差允许范围内,这也证实清水流场的模拟准确性,为下一步粒子轨迹的模拟计算奠定了基础。

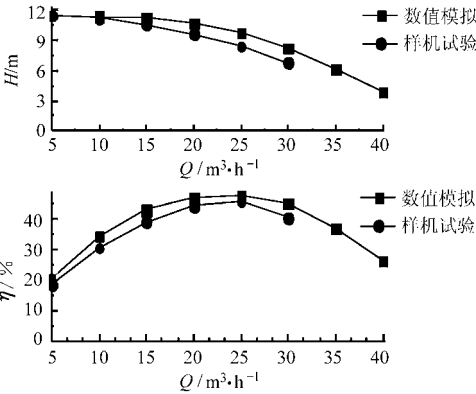


图 3 水泵性能曲线的数值模拟结果与试验结果对比
Fig. 3 Comparison of the performance curves between numerical simulation and experiment results

5 DPM 模拟结果与分析

5.1 示踪粒子密度对轨迹的影响

拟从叶轮进口边的各个流道内靠近压力面的点源进行布置,每个点源释放相同直径、不同密度的示踪粒子,释放初始速度为当地速度。4 种不同粒径的粒子轨迹计算结果如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,在离心泵的叶轮内,同一直径的粒子轨迹线在曲率较大地方发生分离,并且越接近叶轮出口,轨迹差异越大。图 4a 最为明显,可以清楚看出叶轮出口粒子轨迹分开较大,受到叶轮出口射流尾迹的影响,在叶片压力面出口处存在射流区,而叶片吸力面出口存在尾流区,两区之间有着

较大的速度梯度,因此密度小的粒子,尤其是密度小于 $1\,000\text{ kg/m}^3$ 的粒子(以密度为 260 kg/m^3 的空心玻璃球为例)在叶轮压力面出口就要向下一流道偏移,而密度较大的粒子(以密度为 $8\,900\text{ kg/m}^3$ 的铜珠为例)则相对滞后。这表明在离心泵的叶轮出口粒子跟随性不佳,这与选取粒子的密度有关。

从图 4 中还会发现,当粒子直径大于 $50\text{ }\mu\text{m}$ 时,密度对粒子轨迹的影响比较明显。而随着粒子直径减小,尤其是当粒子的直径小于 $20\text{ }\mu\text{m}$ 时,不同密度粒子轨迹线在叶轮内重合率很高,如图 4c、4d 所示。这表明即使密度大的粒子,只要直径足够小,其轨迹也是满足跟随性要求的。

5.2 示踪粒子直径对轨迹的影响

除了密度,影响粒子运动的另一重要参数是粒子的直径。采用与粒子密度分析相同的方法,从叶轮进口边的位置处释放相同密度、不同直径的示踪粒子,4 种不同密度的粒子轨迹计算结果如图 5 所示。为了便于分析对比,参数密度采用无量纲的形式,即定义粒子的密度比 $\varepsilon = \rho_p / \rho_f$ 。从图 5 中发现,对无量纲密度比 $\varepsilon \approx 1$,即密度接近连续相的粒子,在叶轮内粒子直径对轨迹影响将减小,不同直径的粒子轨迹几乎重合,如图 5b 中的聚苯乙烯所示;而对密度远离连续相的粒子,随直径的变化粒子轨迹区别很大,尤其是密度比偏离 1 越远,粒子的轨迹差异越明显,典型粒子如图 5d 中的铜珠所示,其密度比

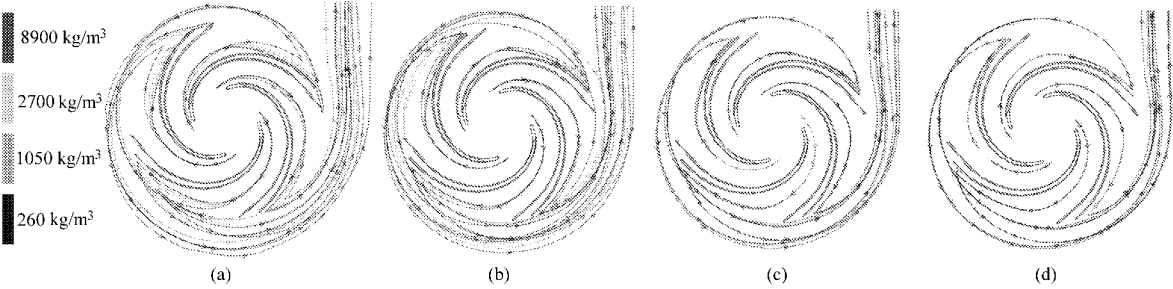


图 4 不同密度粒子轨迹对比
Fig. 4 Contrast of the particle tracks with same diameter and different densities
(a) 粒径 $100\text{ }\mu\text{m}$ (b) 粒径 $50\text{ }\mu\text{m}$ (c) 粒径 $20\text{ }\mu\text{m}$ (d) 粒径 $10\text{ }\mu\text{m}$

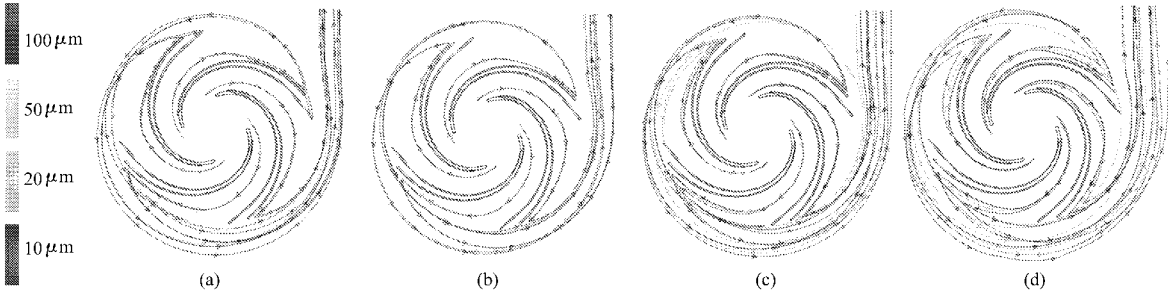


图 5 不同直径粒子轨迹对比
Fig. 5 Contrast of the particle tracks with same density and different diameters
(a) 空心玻璃球 (b) 聚苯乙烯 (c) 铝粉 (d) 铜珠

已经高达 8.9。而密度比小于 1 的空心玻璃球($\varepsilon = 0.26$)在大直径下会有所差异,但不明显。这表明粒子密度与连续相的密度相等时是一个重要的界点,当粒子的密度比 $\varepsilon = 1$,跟随性受粒子直径的影响较小,这与已有的理论分析结论一致^[10-11]。

5.3 有涡流道中粒子轨迹线与流线的对比

在小流量工况下,离心泵叶轮内部流动紊乱,出现回流、漩涡等不稳定流态。若示踪粒子不能很好跟随这类运动,将很难利用 PIV 捕捉到这种不稳定流态,因此有必要研究示踪粒子在离心泵内存在漩涡等不稳定流动时的跟随效果。图 6a 为 0.4 Q_d (设

计工况)下叶轮中截面上($Z = 0.5b_2$)两个流道的流线分布图。从图中可以明显看出:流道 1 流态很好,流线几乎沿叶片型线,而流道 2 在叶轮出口附近存在一个漩涡,该涡占据流道 2 出口大部分区域,使进口流动受阻。

为了研究示踪粒子捕捉不稳定流态的效果,在 2 个流道内释放不同性质的示踪粒子。其中图 6b 是在两个流道内释放直径为 20 μm 的不同密度示踪粒子的轨迹图,密度范围为 260 ~ 8 900 kg/m^3 ;图 6c 是在两个流道内释放不同直径聚苯乙烯粒子的轨迹图,粒子直径为 10、20、50、100 μm 。

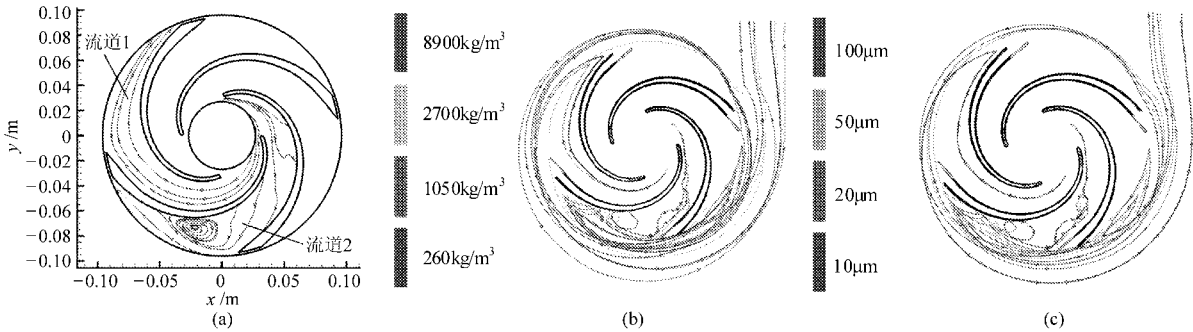


图 6 0.4 倍设计工况下相邻两流道内流线与轨迹线的对比

Fig. 6 Comparison streamlines with trajectories in two adjacent flow passages at 0.4 Q_d

(a) 两流道内流线图 (b) 不同密度粒子轨迹图 (c) 不同直径粒子轨迹图

对比图 6b 中两流道内轨迹线图发现,在流道 2 内,聚苯乙烯对应轨迹线与流线最为相似,无论是涡的位置和大小都跟随较好;其次是铝粉,也能跟随到涡,但是涡的大小比流体的涡要小得多;对于空心玻璃球,由于其密度比水低,在叶轮流道的 2/3 位置处就受到强不稳定流的影响,波动强烈,没有跟随到涡;铜珠也没有跟随到涡,只是在涡的外端有所波动。由此可知密度越接近流体的粒子跟随涡的效果越好。

对比图 6c 中相邻两流道内轨迹线图发现,在流道 2 内,直径为 10 μm 的聚苯乙烯对应的轨迹与相应的流线最为接近;直径为 20 μm 和 50 μm 的聚苯乙烯粒子都没有跟随到涡,受涡的影响,它们被挤到其他流线上,在未受阻区从流道中流出;而直径为 100 μm 的聚苯乙烯对应轨迹涡比流线涡要小,大直径的聚苯乙烯之所以能捕捉到部分涡可能是大直径的聚苯乙烯惯性力大,在涡前没有被挤到其他流线上,而是经过剧烈波动之后与 10 μm 的聚苯乙烯粒子一起进入涡中,但由于大直径的粒子跟随性不如小直径,因此跟随涡轨迹较小。总之粒子直径的变化对涡的跟随性影响规律不如密度明显,但是直径小到一定程度就会捕捉到相应的漩涡。

从图 6b、6c 可以看出:相邻的两流道内,粒子轨迹差别很大,漩涡等不稳定紊流场对粒子轨迹都会产生巨大影响,有的粒子甚至都被漩涡阻塞在流道

内,因此出现漩涡,流道内粒子通过数目都会大大减小,颗粒轨迹也显得杂乱无章,而且计算的是定常流场,没有考虑湍流频率的影响,实际在非定常流场中的规律更加复杂。尽管如此还是可得到示踪粒子密度与流体密度越接近,直径越小的粒子其轨迹线越与流体的流线接近,其跟随性也越好的结论。

5.4 粒子跟随性随空间尺度的变化关系

为了进一步研究示踪粒子相对速度随漩涡空间尺度的变化关系,取图 6a 的漩涡流场为背景流场进行计算,其局部放大如图 7 所示。

模拟获得的流场是定常流场,即各空间点的相对速度与时间 t 无关,只是随空间尺度而变化,所以

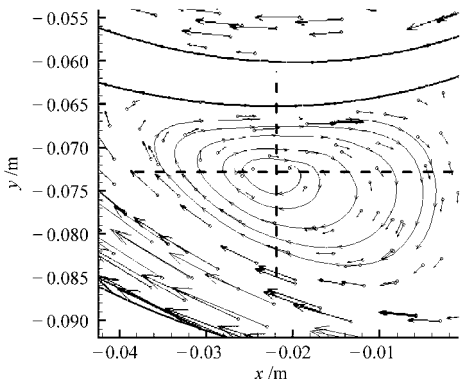


图 7 漩涡的局部放大图

Fig. 7 Enlarged map of vortex

认为 $du_p/dt=0$, 压力梯度力等力均为 0, 式(1)中第 3 项 F_x 只有旋转引起的离心力和科氏力起作用。针对图 7 中的二维背景流场, 相应的离散相运动方程在 x 向和 y 向简化为

$$\begin{cases} 0 = F_D(u_f - u_p) + g_x(\rho_p - \rho_f)/\rho_p + \\ (2\omega \times w_p + r \times \omega \times \omega)_x \\ 0 = F_D(v_f - v_p) + g_y(\rho_p - \rho_f)/\rho_p + \\ (2\omega \times w_p + r \times \omega \times \omega)_y \end{cases} \quad (9)$$

其中 $(w_p)_x = u_p$ $(w_p)_y = v_p$ $w_p = \sqrt{u_p^2 + v_p^2}$

图 7 涡中给出了流体的相对速度在 x 方向分量 u_f 、在 y 方向分量 v_f , 半径 r 以及角速度 ω 的信息, 利用式(9)便可求得不同直径的聚苯乙烯粒子的相对速度 w_p 在 x 方向分量 u_p , 在 y 方向分量 v_p , 然后利用速度三角形求出聚苯乙烯粒子的相对速度 w_p , 再与图 7 背景流场中流体的相对速度大小进行对比, 对比结果如图 8 所示, 图中黑色下三角形代表流体的相对速度大小。

从图 8 中可以看出, 无量纲密度比 $\varepsilon \approx 1$ 的聚苯乙烯粒子在直径为 $10 \mu\text{m}$ 和 $20 \mu\text{m}$ 时, 粒子的相对速度和流体的相对速度相差无几, 跟随性较好; 而直径为 $50 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯粒子出现明显的偏差, 尤其是在涡朝叶轮入口方向上; 直径 $100 \mu\text{m}$ 的粒子在离涡中心较远的外沿偏差较大, 速度值已经超出漩涡流场中的最大相对速度 3.5 m/s , 偏差幅度高达 300% 多, 已经完全跟随不到流体的速度。

上述的模拟计算表明直径在 $20 \mu\text{m}$ 以下的聚苯乙烯粒子($\varepsilon \approx 1$)都具有良好的跟随性, 能够达到跟随精度。考虑到 PIV 对粒子散射光信号的要求, $10 \mu\text{m}$ 的粒子散射性不如 $20 \mu\text{m}$ 的粒子, 所以建议试验采用 $20 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯粒子, 既保证了跟随精度, 又满足 PIV 的光学要求。

6 结论

(1) 对于本泵模型而言, 当粒子直径大于

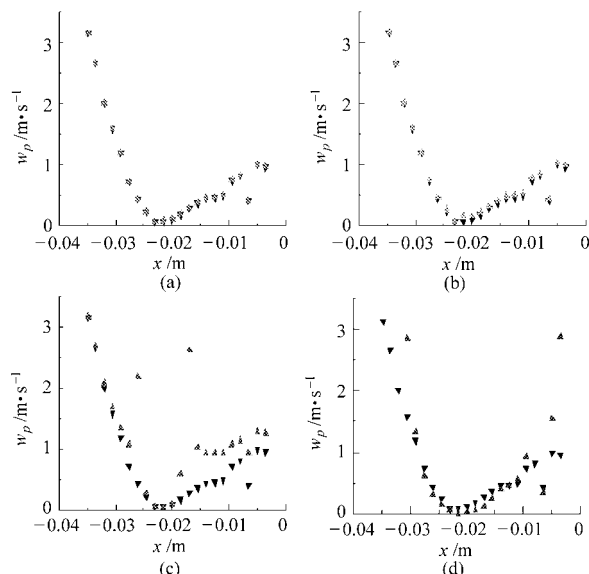


图 8 涡中不同直径聚苯乙烯的相对速度与流体的相对速度对比

Fig. 8 Comparison fluid relative velocity with polystyrene speed of different diameters in the vortex

(a) $d_p = 10 \mu\text{m}$ (b) $d_p = 20 \mu\text{m}$ (c) $d_p = 50 \mu\text{m}$ (d) $d_p = 100 \mu\text{m}$

$50 \mu\text{m}$, 叶轮内不同密度粒子的轨迹线差别很明显, 粒子跟随性受密度影响较大; 而粒子直径小于 $20 \mu\text{m}$ 时, 一定范围内的粒子密度对轨迹影响不大。

(2) 粒子密度与连续相密度相等, 不同直径的粒子轨迹线重合率很高, 粒子跟随差异减小, 所以要保证示踪粒子的密度比 $\varepsilon = 1$, 即中性悬浮粒子对复杂流动具有很好的跟随性。

(3) 漩涡等不稳定紊流场对粒子的轨迹都会产生很大的影响, 严重影响粒子的跟随特性。只有粒子密度与流体密度越接近, 直径越小的粒子其轨迹线与流体的流线越相近, 其跟随性也越好。

(4) 要满足粒子跟随精度和散射特性的要求, 建议本模型泵选用直径在 $20 \mu\text{m}$ 的聚苯乙烯(或其他密度比 $\varepsilon \approx 1$ 的粒子)作为 PIV 拍摄专用的示踪粒子。

参 考 文 献

- Adrian R J. Particle-image techniques for experimental fluid mechanics [J]. Annual Review Fluid Mechanics, 1991, 23: 261 ~ 304.
- Adrian R J. Twenty years of particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 2005, 39(2): 159 ~ 169.
- Melling A. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry [J]. Measurement Science Technology, 1997, 8(12): 1 406 ~ 1 416.
- 杨敏官, 王军锋, 罗惕乾, 等. 流体机械内部流动测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- 李亚林, 袁寿其, 汤跃, 等. 离心泵内流场 PIV 测试中示踪粒子跟随性的计算[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(1): 6 ~ 10. Li Yalin, Yuan Shouqi, Tang Yue, et al. Analysis on tracing ability of PIV seeding particles in flow fields of centrifugal pumps [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(1): 6 ~ 10. (in Chinese)
- 王福军. 计算流体动力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(3):437~442.

- 9 刘春成,李毅,任鑫,等. 四种入渗模型对斥水土壤入渗规律的适用性[J]. 农业工程学报,2011,27(5):62~67.
Liu Chuncheng, Li Yi, Ren Xin, et al. Applicability of four infiltration models to infiltration characteristics of water repellent soils [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 62~67. (in Chinese)
- 10 刘春成,李毅,郭丽俊,等. 微咸水灌溉对斥水土壤水盐运移的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(8):39~45.
Liu Chuncheng, Li Yi, Guo Lijun, et al. Effect of brackish water irrigation on water and salt movement in repellent soils [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(8): 39~45. (in Chinese)
- 11 关冰艺,李毅,任改萍,等. 滴灌条件下斥水土壤水盐运移实验研究[J]. 灌溉排水学报,2012,31(2):19~24.
Guan Bingyi, Li Yi, Ren Gaiping, et al. Experiment study on water and salt transport characteristics of water-repellent soil under the condition of trickle irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2012, 31(2): 19~24. (in Chinese)
- 12 Lascano R J, van Bavel C H M. Simulation and measurement of evaporation from a bare soil [J]. Soil. Sci. Soc. Am. J., 1986, 50(5): 1 127~1 133.
- 13 Mahrer Y, Naot O, Rawitz E, et al. Temperature and moisture regimes in soils mulched with transparent polyethylene[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(2): 362~367.
- 14 Munley W G, Hipps Jr L E. Estimation of regional evaporation for a tallgrass prairie from measurements of properties of the atmospheric boundary layer [J]. Water Resources Research, 1991, 27(2): 225~230.
- 15 李毅,任鑫,Robert Horton. 不同质地和夹层位置对层状土入渗规律的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):485~490.
Li Yi, Ren Xin, Robert Horton. Influence of various layer positions on infiltration characteristics of layered soils [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 485~490. (in Chinese)
- 16 Li Y, Shao M A, Wang W Y, et al. Open hole effects of perforated plastic mulches on soil water evaporation [J]. Soil Science, 2003, 168(11): 751~758.
- 17 李毅,邵明安,王文焰,等. 覆膜不同开孔程度蒸发条件下土壤水热变化动态研究[J]. 土壤学报,2004,41(3):387~393.
Li Yi, Shao Ming'an, Wang Wenyan, et al. Dynamic variations of soil water and heat under evaporation conditions varying with aperture ratio of plastic mulch [J]. Acta Pedologica Sinica, 2004, 41(3): 387~393. (in Chinese)
- 18 陈世平,李毅,高金芳. 覆膜开孔蒸发条件下不同斥水度土壤水盐变化规律[J]. 农业机械学报,2011,42(5):86~91.
Chen Shiping, Li Yi, Gao Jinfang. Evaporation experiment on different water repellent soils under perforated plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 86~91. (in Chinese)
- 19 高金芳,李毅,陈世平,等. 覆膜开孔蒸发条件下土体高度对水盐运移的影响[J]. 农业机械学报,2010,41(9):50~55.
Gao Jinfang, Li Yi, Chen Shiping, et al. Effects of soil column heights on movement of soil water and soil salt during evaporation under perforated plastic mulch [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(9): 50~55. (in Chinese)
- 20 Dekker L W, Jungerius P D. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands [J]. CATENA, 1990, 18(Supp.):173~183.

(上接第 118 页)

- 7 Fluent Inc. FLUENT6.3 user's guide[M]. Lebanon: Fluent Inc., 2006.
- 8 Morsi S A, Alexander A J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1972, 55(2):193~208.
- 9 Lorett J A, Gopalakrishnan S. Interaction between impeller and volute of pumps at off-design conditions [J]. ASHE Journal of Fluids Engineering, 1986, 108(12):12~18.
- 10 黄社华,魏庆鼎. 激光测速粒子对复杂流动响应研究——II 典型流场中粒子跟随性的数值分析[J]. 水科学进展, 2003, 14(1):28~35.
Huang Shehua, Wei Qingding. On velocity response of tracing particles in laser-based velocimetry to complex flow, 2, numerical analysis of sliding velocity of tracing particles in various flows [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(1): 28~35. (in Chinese)
- 11 李恩邦,李志平,李淳,等. 湍流场示踪粒子跟随性的数值分析[J]. 仪器仪表学报,2009,30(2):225~231.
Li Enbang, Li Zhiping, Li Chun, et al. Numerical analysis of following behaviors of particle tracers in turbulent [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(2): 225~231. (in Chinese)