

DOI: 10.7652/xjtuxb201901020

利用沃罗诺伊划分的粒子追踪测速算法及其在大速度梯度流场中的应用

吴长松¹, 白旭峰², 张洋¹, 周立飞¹

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 西安陕鼓动力股份有限公司, 710075, 西安)

摘要: 为了克服传统粒子追踪测速(PTV)算法在应对大速度梯度流场时的不足以及预设参数过多的问题,基于沃罗诺伊划分(Voronoi Diagram)技术,给出了适用于二维及三维复杂流场重构的PTV算法。二维算法利用沃罗诺伊划分将粒子群落转化为多边形网格,然后通过比较多边形特征曲线的相似性来实现前后帧粒子之间的匹配;三维算法则是利用沃罗诺伊划分的对偶技术德劳内(Delaunay)网格,将三维空间中的离散粒子群联结为互不重叠的四面体集合,然后引入一种特殊的四面体投票机制,从而将前后帧四面体匹配信息转化为最终的粒子匹配结果。这两种新算法结构简洁,且预设参数均不超过两个,因此拥有较高的用户友好度。通过人工流场的检测,初步表明新的二维算法拥有令人满意的准确率。最后,通过真实的二维脉冲流及三维尾迹流对新算法进行测试,结果表明,在简单设置控制参数的前提下,两种新算法均能准确地重构包含较大速度梯度的流场,具有良好的实用性。

关键词: 流动可视化;粒子追踪测速算法;沃罗诺伊划分;脉冲流;尾迹流

中图分类号: O359;X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)01-0150-07

Particle Tracking Velocimetry Algorithms Based on Voronoi Diagram and Their Applications in the Flows with Large Velocity Gradient

WU Changsong¹, BAI Xufeng², ZHANG Yang¹, ZHOU Lifei¹

(1. School of Power and Energy Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Shaangu Power Co., Ltd., Xi'an 710075, China)

Abstract: To provide an alternative to the classic particle tracking velocimetry (PTV) algorithms with excessive preset parameters and incapability of tackling large velocity gradient flow field, this paper proposes PTV algorithms based on Voronoi diagram (VD) for 2D and 3D flows. The 2D algorithm converts the particle clusters into compact polygons, and matches the particles by comparing the similarity of polygonal characteristic curves. The 3D algorithm applies the Delaunay tessellation, i. e., dual VD, to convert the particles into non-overlapping tetrahedrons, where particles are matched through a special voting process based on the comparison of similarity among involved tetrahedrons. An artificial flow is used to confirm the satisfactory accuracy of the new 2D algorithm. Finally, experiments for a 2D pulsation flow and a 3D wake flow around a rigid body are carried out, by which the applicability of the newly developed PTV algorithms is tested. The result shows that the algorithms are robust in reconstructing large velocity gradient

收稿日期: 2018-05-02。 作者简介: 吴长松(1996—),男,硕士生;白旭峰(通信作者),男,工程师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11402190)。

网络出版时间: 2018-11-08

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181107.1442.002.html>

flow field with a simple presetting of controlling parameters.

Keywords: flow visualization; particle tracking velocimetry; Voronoi diagram; pulsation flow; wake flow

随着图像识别技术的提高和精细测量的需要,粒子追踪测速(PTV)算法在近年来得到了不断的进步^[1]。在需要观测粒子运动轨迹的情况下^[2],PTV 则直接跟踪流场中的粒子运动,从而避免了 PIV 方法的平均效应^[3]。在众多 PTV 算法中,有一类算法基于粒子丛思想,即以目标粒子与其周围粒子的相对位置关系为判断基准来实现前后帧粒子匹配。粒子丛算法预设参数少,因此运行速度较快,而在构建了合理的粒子丛特征后,此类算法在粒子丢失或图像噪音等问题程度较轻时能够获得可观的准确率。典型的粒子丛类算法有 Okamoto 等提出的弹簧模型算法^[4],以及 Ishikawa 等提出的速度梯度张量算法^[5],这两种算法的问题在于粒子丛的大小需要提前规定。因此,当临近粒子所组成粒子丛的大小随流动发生改变时,算法的准确率骤降,而采用适当的网格划分技术则可以避免此问题。Song 等提出的基于德劳内划分的算法(DT-PTV)将图像中离散粒子分布转化成为三角形非结构化网格,通过匹配前后两帧的三角形单元来实现粒子的匹配^[6],张洋等通过引入逻辑判断模块实现了 DT-PTV 运算结果中错误矢量的有效剔除^[7],贾攀等将这种方法推广到了三维情况,即利用四面体单元的信息进行粒子匹配^[8]。然而,上述算法存在两个问题:首先,由于三角形或四面体结构简单,在粒子浓度较高时会出现形状趋同,从而导致匹配难度增加;其次,无论对于二维还是三维问题,利用德劳内划分进行粒子匹配时,需要对三角形或四面体进行表层匹配,然后再通过三角形或四面体的顶点配对来实现里层的粒子匹配,这不仅造成算法结构的复杂化,而且在粒子分布相对均匀时将增加里层匹配的逻辑甄别难度。本文以沃罗诺伊划分为基础,提出了更为简洁高效的粒子丛类 PTV 算法,尝试构建以原始粒子为中心的匹配单元,从而仅通过一层匹配完成运算,同时引入人工模拟流场和实际复杂流场来检验算法的准确性和实用性。

1 算法准备

1.1 确定候选粒子

粒子丛类算法利用目标粒子与其周围粒子的相对位置关系构建匹配单元。第 1 帧中的每个目标粒

子需要从第 2 帧挑选出自己的候选粒子,原则如下

$$| \mathbf{X}_n - \mathbf{Y}_m | < R_s \tag{1}$$

式中: $\mathbf{X}_n$ 、 $\mathbf{Y}_m$ 分别为第 1、2 帧粒子的矢量坐标; R_s 为查问域半径,其取值需要大于两帧间粒子最大位移,而后者可以通过实际流场的主流速度进行估算。构建与粒子一一对应的匹配单元,然后将目标粒子的匹配单元与候选粒子的匹配单元逐一比较,最匹配单元所对应的候选粒子则被定义为匹配粒子。

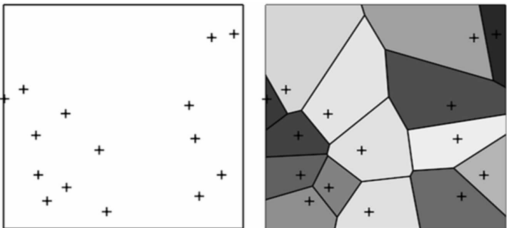
1.2 两种对偶划分

对于二维平面中的离散点,沃罗诺伊划分是将平面区域离散点群落转化为互不重叠的多边形,而德劳内划分是将平面区域离散点连接成为成互不重叠的三角形,如图 1 所示。在构建沃罗诺伊网格时,常先将离散点构成德劳内三角网格,再将德劳内三角形各边的中垂线段进行连接可得到沃罗诺伊划分,因此沃罗诺伊网格和德劳内网格互为对偶,而原始粒子是沃罗诺伊多边形的中心^[9]。在三维空间中,沃罗诺伊划分(多面体)和三维德劳内划分(四面体)同样互为对偶。两种结构在运用时各有好处,可根据实际情况选择合适的结构,德劳内网格曾被用于改进松弛迭代类 PTV 算法中用来圈选匹配粒子的模块^[10]。

2 算法原理

2.1 二维算法

图 1 中原始粒子用“+”符号表示,经划分之后得到的封闭区域被称为沃罗诺伊多边形,它们紧密排列且绝对没有交叠,并与原始粒子呈一一对应的关系,即每一个沃罗诺伊多边形都拥有一个核。对参与匹配的前后两帧粒子群分别作沃罗诺伊划分,基于两帧流动相关性假设,同一粒子在前后两帧中对应的沃罗诺伊多边形变形有限。利用这一特性,



(a)二维平面粒子点 (b)沃罗诺伊多边形

图 1 粒子群的沃罗诺伊划分

将沃罗诺伊多边形定义为基本匹配单元。

(1) 提取多边形即匹配单元的特征。二维算法中的匹配单元如图 2 所示, 以原始粒子 (x_0, y_0) 为中心建立笛卡尔坐标系, 它所对应的匹配单元由若干个三角形 I, II, ..., V 组成, 三角形的极半径 r 与极角 α 的关系为

$$\left. \begin{aligned} r(\alpha) &= \frac{h}{|\sin(\alpha + \theta_1 - \alpha_1)|} \\ h &= \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2} |\sin(\theta_1)| \end{aligned} \right\} (2)$$

最后, 此多边形就被转换成特征曲线, 结果如图 3 所示。

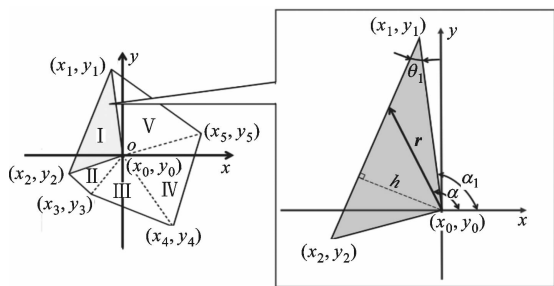


图 2 二维算法中的匹配单元

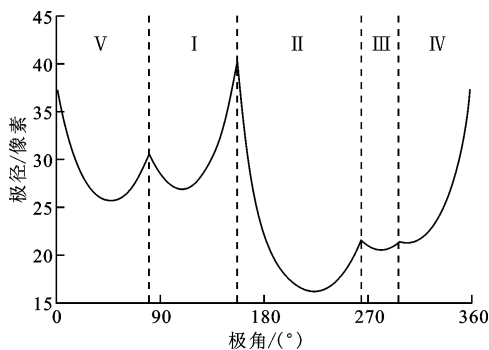


图 3 沃罗诺伊多边形特征曲线

(2) 通过对比特征曲线来判断匹配单元的相关性。比较目标粒子和其某一个候选粒子所分别对应的特征曲线 r_1 和 r_2 , 对二者均除以 $(|r_1|^2 + |r_2|^2)^{1/2}$ 可得 r'_1, r'_2 , 计算两条无量纲特征曲线的相关系数

$$\rho_r = \frac{\Gamma(r'_1, r'_2)}{\sqrt{D(r'_1)D(r'_2)}} \quad (3)$$

式中: Γ 为协方差运算; D 为方差运算。考虑到多边形跨帧过程中有可能进行旋转, 需要比较两条曲线在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 不同相位差下的相似性, 本文选择的相位变化步长为 2° 。根据式 (3), 相比较的两条曲线长度相同, 因此当相位差不为零时, 仅取两条曲线相位重叠的部分进行比较, 任意一对特征曲线会计算出多个相关系数, 选择最大值作为最终相关系数。

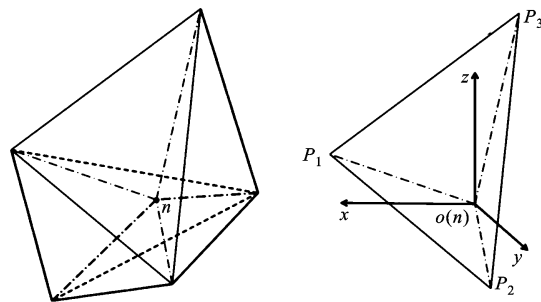
最后, 所有候选者中对应最大相关系数的粒子被认定为匹配粒子。

考虑到候选粒子中真实匹配粒子已经丢失的情况, 例如粒子在第 2 帧中逃逸至图像之外, 只有足够相似的匹配才会被认为有效, 若某一粒子与其所有候选粒子的相关系数均小于 0.5, 则认为此粒子在第 2 帧中没有匹配。由于实际流场变形方式及强度均不相同, 0.5 实际上对应均匀概率, 即两个多边形完全相同与完全不同两种极端情况之间的中间点。对于变形较强的流动, 可适当放宽匹配条件即相关性阈值小于 0.5, 并基于匹配结果的人眼判断返回修正这一阈值, 直至达到满意结果, 反之亦然。

(3) 遍历第 1 帧所有粒子, 完成整场粒子匹配, 基于匹配关系和时间间隔可得向前差分格式的瞬时速度场, 即实现追踪测速, 而二维算法仅有 R_s 。这一个独立预设参数。

2.2 三维算法

对三维空间离散的粒子点, 采用三维德劳内划分将其转化为空间四面体群, 此时名义上的匹配单元为所有包含同一粒子 n 的四面体所聚合而成的多面体, 或者此多面体可以被划分成若干个以粒子 n 为共同顶点的四面体, 如图 4 中所示。但是, 实际操



(a) 空间中的粒子 n (b) 粒子 n 的参考四面体

图 4 三维算法中的匹配单元

作中的基本匹配单元则是这些四面体, 如此拆分的原因在于多面体的参数化远比二维多边形的要困难。此处引入一种全新的四面体投票机制, 所涉及的多面体匹配与三维 DT-PTV 中的表层匹配有根本不同, 这些作为基本匹配单元的四面体被称为粒子的参考四面体。如果一个四面体单元可在空间中做任意旋转且具有一个基点, 那么它一共有 6 个自由度。因此, 选取 6 个线性无关量作为参考四面体的特征量, 包括从粒子 n 指向其余 3 个顶点的向量的长度, 以及代表这 3 个向量间夹角的点积。将上述特征量汇总为如下两个四面体特征向量

$$\begin{aligned}
 l &= (\overrightarrow{OP_1} \cdot \overrightarrow{OP_1} \quad \overrightarrow{OP_2} \cdot \overrightarrow{OP_2} \quad \overrightarrow{OP_3} \cdot \overrightarrow{OP_3}) \\
 a &= (\overrightarrow{OP_1} \cdot \overrightarrow{OP_2} \quad \overrightarrow{OP_2} \cdot \overrightarrow{OP_3} \quad \overrightarrow{OP_3} \cdot \overrightarrow{OP_1})
 \end{aligned} \quad (4)$$

参考四面体之间的差异 d_{ij} , 计算式为

$$d_{ij} = \| \mathbf{l}_{ni} - \mathbf{l}_{mj} \|_1 + \| \mathbf{a}_{ni} - \mathbf{a}_{mj} \|_1 \quad (5)$$

式中:下标 n 和 m 分别为第 1 和第 2 帧中的粒子;下标 i 和 j 分别为第 1 帧和第 2 帧中粒子的参考四面体; $\| \cdot \|_1$ 为向量的 1 范数。 d_{im} 为 d_{ij} 的最小值,取得最小值的参考四面体为 j' ,对应的四面体特征向量为 $\mathbf{l}_{mj'}$ 和 $\mathbf{a}_{mj'}$ 。对 d_{im} 进行无量纲化处理,即

$$d_{im}^* = d_{im} \cdot$$

$$(\| \mathbf{l}_{ni} \|_1 + \| \mathbf{a}_{ni} \|_1 + \| \mathbf{l}_{mj'} \|_1 + \| \mathbf{a}_{mj'} \|_1)^{-1} \quad (6)$$

为了避免多面体局部大变形或者粒子缺失所带来的影响,引入参考四面体投票机制来确定匹配粒子。粒子 n 的全部参考四面体即为选民,粒子 n 的候选粒子即为候选人。选民根据如下公式来决定投票与否,获得最多认可的候选人当选,即

$$v_{im} = \begin{cases} 1, & d_{im}^* \leq \alpha \\ 0, & d_{im}^* > \alpha \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\alpha \in [0, 1]$ 为差异系数。候选粒子 m 所得到的总票数为 $v_m = \sum_i v_{im}$, 其中 N_i 为粒子 n 对应的参考四面体个数。与二维算法相同,考虑到候选粒子中并不存在真实匹配的情况,三维算法需要附加一个判断:只有获得足够多票数的候选人才能当选,即

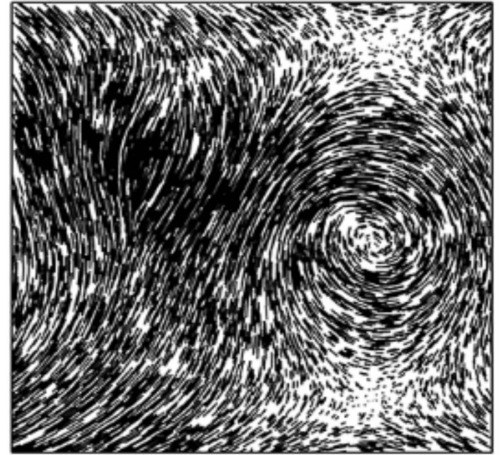
$$v_m / N_i > \beta \quad (8)$$

式中: $\beta \in [0, 1]$ 为投票系数。如果式(8)成立,对粒子 n 的所有候选粒子进行相同操作,否则认为本次投票结果无效,此时 v_m 为 0。 v_m 值最大的候选粒子即为粒子 n 在第 2 帧中的匹配粒子,若 v_m 的最大值为 0,则认为粒子 n 在第 2 帧粒子中没有匹配结果。

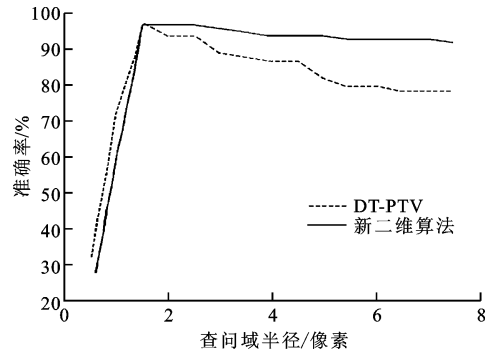
α 代表两个参考四面体间的差异,在算法中决定是否投票; β 代表两个粒子之间相似性的预判,在算法中决定投票最终是否有效。如果 α 增大,根据式(7)可知,投票的可能性增大,即总票数增加,此时 β 也相应增大,从而提高了投票的有效性,使算法在逻辑上更加合理,反之亦然。由式(7)和 v_m 的定义可知, α 增加一个较小量就可能会导致总票数有较大增长,即 β 有较大增长, β 的增速应大于 α 的。本文通过人工流场测试证明 $\alpha \in (0, 0.25]$ 和 $\beta = 2\alpha$ 是较为有效的选择,三维算法仅有 R_s 和 α 两个独立的预设参数。

3 人工流场测试

以二维算法为例进行人工流场测试。通过叠加流动解析解生成复杂人工流场。首先在第 1 帧随机布置粒子,然后赋予一定的流动规则,从而在第 2 帧形成新的粒子位置,并使得前后两帧联合描述一个瞬时流动。流动规则分多步实施:首先形成具有一定速度梯度的剪切流,然后设置若干旋涡和偶极子,最后增大流场速度和粒子浓度,并添加相对误差为 5% 的位置扰动,以及随机抹除第 2 帧数量比例为 5% 的粒子。流场大小为 256×256 像素,旋涡区大小为 128×128 像素,偶极子的距离为 80 像素,两帧之间最大位移为 10 像素,由于人工流场真实匹配结果已知,任一种 PTV 的匹配结果与其比较之后即可得到计算准确率,人工流场及测试结果如图 5 所示。随着 R_s 的增大,新二维算法的准确率更加稳定,这是因为所有的三角形在拓扑结构上是相同的, R_s 值的增大将包纳更多形状相似、但实际上毫无关系的候选匹配单元,这将对 DT-PTV 的表层匹配产



(a) 人工流场速度矢量图



(b) 两种算法的准确率随查询域半径的变化

图 5 人工流场及测试结果

生较大干扰,而多边形的个体差异远大于三角形之间的差异,所以能够更好抵抗 R_s 的变化所带来的影响。因此,采用一个足够大的固定 R_s 值可使算法满足一个图像序列中所有瞬时或者一个瞬时中所有粒子的匹配需要,这两种情况分别对应流动的非定常性和非均匀性。

4 实验测试

4.1 二维算法测试

采用脉冲流检验算法,流动通过模拟腹主动脉瘤中血液流动实现,流动循环系统如图 6 所示。

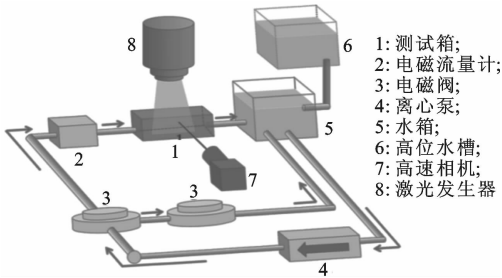
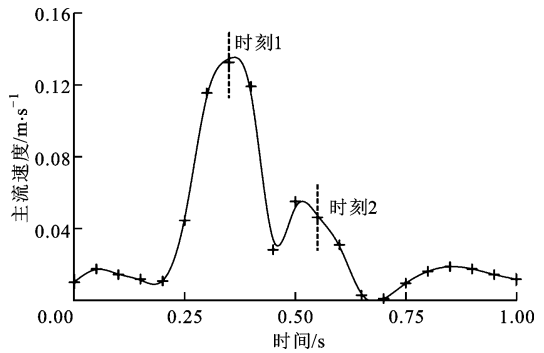


图 6 人工腹主动脉瘤中脉冲流动循环系统

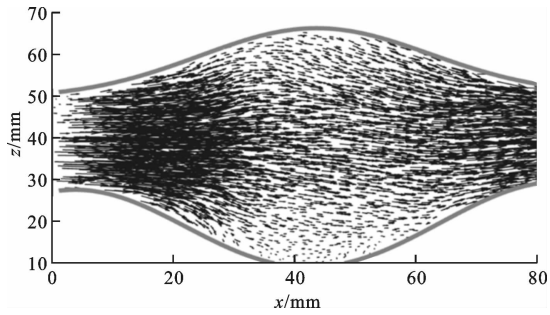
系统主要包括位于测试段的腹主动脉瘤模型、一个离心泵以及两个电磁阀。其中离心泵用来给流体提供动力,两个电磁阀用来模拟周期约为 1 s 的人体血流脉冲波形,电磁流量计用来测试主流速度。腹主动脉瘤模型由透明聚甲基丙烯酸甲酯制成,人造血液为 45%蒸馏水加 55%甘油混合而成,并添加了一定浓度的荧光示踪粒子。通过高速激光器和狭缝装置在测试段的流向中心纵剖面上形成片光,然后采用高速相机以最高 100 Hz 的频率在侧面记录粒子图像。实验共记录 20 个脉冲周期的图像,选择其中一个周期测试二维算法,每个周期包含 20 对图像,每对图像对应一个瞬时流场。记人造血液的流动方向为 x ,铅垂方向为 z 。用动态阈值算法^[11]识别图像中的示踪粒子并将其转化为单像素点。模型总长 $L=80$ mm,选择固定查问域半径为 $L/5$,这已超过主流速度所对应的两帧间最大位移,选取 2 个时刻进行分析,结果与文献^[12]的分析结果一致,二维算法对人工脉冲流动的重构如图 7 所示。新算法可以在选取较大 R_s 值的条件下应对流动序列的非定常性以及瞬时流场的非均匀性。

4.2 三维算法测试

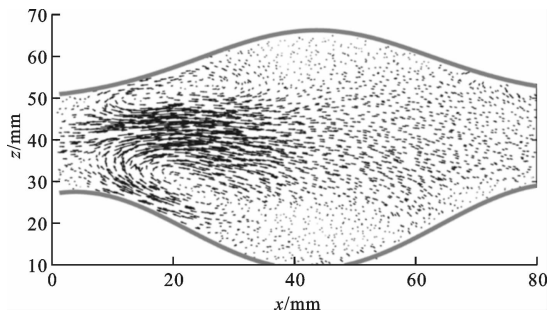
本实验在循环水洞中进行。在水中播撒直径为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 的荧光粒子作为示踪粒子,在测试段上游布置电磁流量计,测得主流速度约为 0.16 m/s。尾迹



(a) 模拟脉冲流动波形



(b) 时刻 1 的流场重构



(c) 时刻 2 的流场重构

图 7 二维算法对人工脉冲流动的重构

流实验段示意图如图 8 所示,图中透明测试段长约 200 cm,截面尺寸为 $30\times 30\text{ cm}^2$ 。V3V 系统^[13]安装在测试段的顶部,通过 3 个镜头重构示踪粒子的瞬时三维坐标,拍摄频率为 15 Hz。V3V 的测量区域为一长方体,其厚度为 7 cm,截面积为 $20\text{ cm}\times 20\text{ cm}$,距离水洞底部 10 cm。拍摄区域上游 10 cm 处放置一个高为 30 cm、截面积为 $6\text{ cm}\times 6\text{ cm}$ 的长方体障碍物以生成尾迹流。

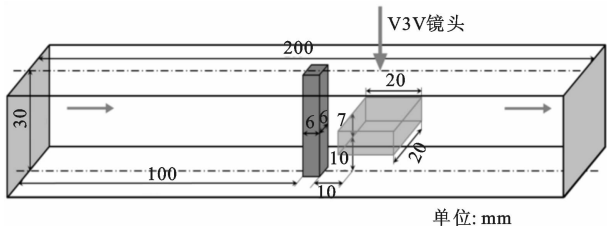
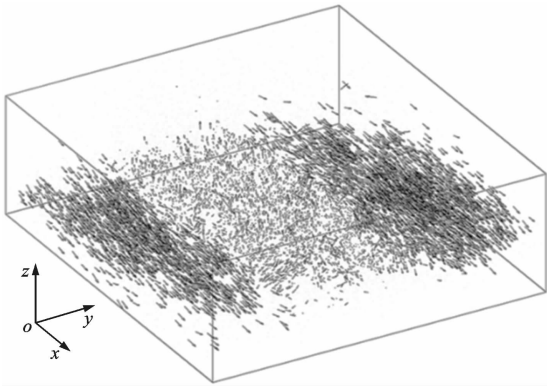
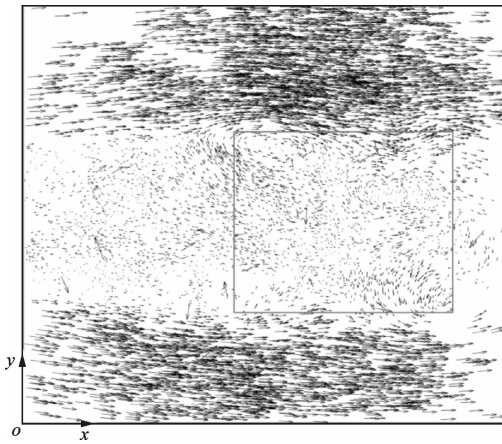


图 8 尾迹流实验段示意图

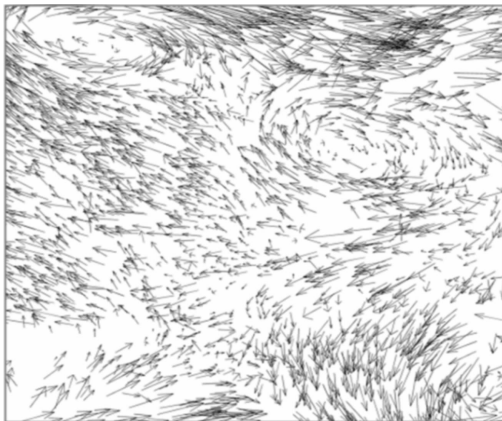
将 V3V 系统计算得到的粒子三维坐标导入新发展的三维算法中,预设参数 $\alpha=\beta/2=0.05$,综合主流速度和采集频率信息设置查询域半径为 1.2 cm,通过三维算法重构得到的瞬时流场如图 9 所示,图中 x 方向为主流方向。由图 9 可知:算法成功重构了速度梯度较大的区域,即势流-尾迹流结合区域以及尾迹内部的旋涡结构;图 9c 所示的少量错误匹配可通过基于逻辑判断的后处理方法移除^[7,14-15]。



(a) 流场全局图



(b) 流场俯视图



(c) 旋涡区域放大图

图 9 三维算法重构的尾迹流速度场

目前,V3V 系统的后处理模块采用基于松弛迭代的粒子追踪算法进行粒子匹配,其预设参数较多,用户友好性一般^[11],当前的三维流场测试结果表明,预设参数少、结构简洁的新三维算法亦可用来与 V3V 等三维成像硬件系统搭配使用。

5 结 论

本文提出了一种基于沃罗诺伊划分的粒子聚类 PTV 算法,并针对匹配单元的构建原则提出了相应的二维及三维算法。二维算法充分利用了多边形形状的特异性,是一种结构简单、稳定性与准确率兼得的算法;三维算法则采用沃罗诺伊的对偶划分来构建最小匹配单元,从而规避了三维多面体自由度过多、难以参数化的问题。人工脉冲流场和尾迹流流场的测试结果表明,新发展的算法能很好处理速度梯度较大的复杂流场,具有良好的实用价值。

参考文献:

- [1] PEREIRA F, STUER H, GRAFF E, et al. Two-frame 3D particle tracking [J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17: 1680-1692.
- [2] 李志强,王元,张洋. 跃移沙粒运动参数的数字图像分析 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(7): 109-113. LI Zhiqiang, WANG Yuan, ZHANG Yang. Digital image analysis on motion parameters of saltating sand grains [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(7): 109-113.
- [3] 靳斌,杨冠玲,何振江,等. 一种利用示踪粒子群体运动特征的 PTV 方法 [J]. 光学技术, 2000(1): 16-18. JIN Bin, YANG Guanling, HE Zhenjiang, et al. [J]. Optical Technique, 2000(1): 16-18.
- [4] OKAMOTO K, HASSAN Y A, SCHMIDL W D. New tracking algorithm for particle image velocimetry [J]. Experiments in Fluids, 1995, 19(5): 342-347.
- [5] ISHIKAWA M, MURAI Y, WADA A, et al. A novel algorithm for particle tracking velocimetry using the velocity gradient tensor [J]. Experiments in Fluids, 2000, 29: 519-531.
- [6] SONG X, YAMAMOTO F, IGUCHI M, et al. New tracking algorithm of PIV and removal of spurious vectors using Delaunay tessellation [J]. Experiments in Fluids, 1999, 26: 371-380.
- [7] 张洋,王元,王大伟. DT-PTV 离散相流场伪矢量的概率择优式剔除算法 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(5): 119-123.

- ZHANG Yang, WANG Yuan, WANG Dawei. Elimination of discrete phase outliers in DT-PTV by preferential probability [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(5): 119-123.
- [8] 贾攀, 王元, 张洋. 三角嵌铺粒子追踪算法的三维化扩展 [J]. 空气动力学学报, 2014, 32(6): 840-847.
- JIA Pan, WANG Yuan, ZHANG Yang. Extension of the Delaunay-tessellation particle tracking algorithm to 3D field [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(6): 840-847.
- [9] SI Hang. TetGen: a Delaunay-based quality tetrahedral mesh generator [J]. ACM Transactions on Mathematical Software, 2015, 41(2): 11.
- [10] 贾攀, 王元, 张洋. RM-PTV 中选取候选粒子的形心 DT 网格方法 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(1): 80-84.
- JIA Pan, WANG Yuan, ZHANG Yang. Determining candidate particles with centroid DT method in RM-PTV [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(1): 80-84.
- [11] OHMI K, LI H. Particle tracking velocimetry with new algorithms [J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(6): 603-616.
- [12] BERNAD S I, BOSIÖC A, BERNAD E S, et al. Comparison between experimentally measured flow patterns for straight and helical type graft [J]. Bio-Medical Materials and Engineering, 2014, 24: 853-860.
- [13] SHARP K V, HILL D, TROOLIN D, et al. Volumetric three-component velocimetry measurements of the turbulent flow around a Rushton turbine [J]. Experiments in Fluids, 2010, 48(1): 167-183.
- [14] ZHANG Yang, WANG Yuan, JIA Pan. Improving the Delaunay-tessellation particle tracking algorithm in the three-dimensional field [J]. Measurement, 2014, 49: 1-14.
- [15] WESTERWEEL J, ELSINGA G E, ADRIAN R. Particle image velocimetry for complex and turbulent flows [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2013, 45: 409-436.
- (编辑 赵炜)
-
- (上接第 134 页)
- [14] MUCHARAM L, RAHMAWATI S, RAMADHANI R. Drag reducer selection for oil pipeline based laboratory experiment [J]. Modern Applied Science, 2017, 12(1): 112.
- [15] BANNA M, KUWABARA K, ITASAKA H. Energy-saving in chilled-water supply system for clean room of semiconductor manufacturing plant; variable flow control of chilled water and addition of drag reduction [J]. Transactions of the Japan Society of Refrigerating & Air Conditioning Engineers, 2012, 23: 133-143.
- [16] 马卫荣, 谭芳, 赵玲莉, 等. 减阻剂的发展与应用 [J]. 新疆石油天然气, 2005, 1(1): 71-74.
- MA Weirong, TAN Fang, ZHAO Lingli, et al. Development and application of drag reduction agents [J]. Xinjiang Oil & Gas, 2005, 1(1): 71-74.
- [17] GAPONOV V D, STARKOV V K. The investigation of influence polyisobutylene additions to kerosene at the efficiency of combustion. [M]. London, England: IntechOpen, 2011: 296-312.
- [18] 杜宗罡, 朱成财, 吴金. 火箭煤油降阻技术研究 [J]. 火箭推进, 2017(6): 32-37.
- DU Zongxi, ZHU Chengcai, WU Jin. Research on drag reduction technology of rocket kerosene [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017(6): 32-37.
- [19] 周强泰. 电加热厚壁管内壁温度的计算 [J]. 南京工学
- 院学报, 1985(4): 38-43.
- ZHOU Qiangtai. Calculation of the temperature of the inner wall of an electrically heated thick-walled pipe [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology, 1985(4): 38-43.
- [20] ZHONG F Q, FAN X J, YU G, et al. Heat transfer of aviation kerosene at supercritical conditions [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2009, 23(3): 543-550.
- [21] ZHANG C B, XU G Q, GAO L, et al. Experimental investigation on heat transfer of a specific fuel(rp-3) flows through downward tubes at supercritical pressure [J]. The Journal of Supercritical Fluids, 2012, 72: 90-99.
- [22] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 246-247.
- [23] 胡志宏, 陈听宽, 罗毓珊, 等. 高热流条件下超临界压力煤油流过小直径管的传热特性 [J]. 化工学报, 2002, 53(2): 134-138.
- HU Zhihong, CHEN Tingkuan, LUO Yushan, et al. Heat transfer characteristics of supercritical pressure kerosene flowing through small diameter pipe under high heat flux [J]. CIESC Journal, 2002, 53(2): 134-138.
- (编辑 荆树蓉)