

松弛迭代粒子追踪测速法独立性改进

贾攀, 王元, 张洋

(西安交通大学流体机械及工程系, 710049, 西安)

摘要: 为了提高提取瞬态流场结构的便捷性,对松弛迭代粒子追踪测速法(RM-PTV)的独立性进行了改进.引入 Delaunay 三角剖分(DT)法代替固定阈值法来选取与目标粒子保持相似运动的参选粒子并对典型自定义流场进行了匹配计算,同时引入邻域窗口分析法对改进前后的流场在匹配结果中突兀矢量分布的数量和大小进行了比较.计算结果表明:DT 方法可以有效选取目标的参选粒子,改进方法可以较好地保持抗噪音和识别粒子无匹配的能力,省去固定阈值的选取,减小对具体流场的依赖性;当噪音和粒子无匹配存在时,改进前后的流场在匹配结果中突兀矢量分布的数量和大小基本相同.最后,通过实验证明了改进方法在大气边界层内提取沙粒跃移运动轨迹上是有效的.

关键词: 粒子追踪测速;Delaunay 三角剖分;邻域窗口分析;跃移沙粒轨迹

中图分类号: O359;X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)01-0120-05

Independence Improvement for Relaxation Method Based Particle Tracking Velocimetry

JIA Pan, WANG Yuan, ZHANG Yang

(Department of Fluid Machinery and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The independence of the relaxation method based particle tracking velocimetry (RM-PTV) was improved to obtain the instantaneous flow structure more conveniently. Delaunay triangulation (DT) was employed to determine reference particles which preserve similar motion with target particles and simulation calculation was done for the typical self-defined flow fields. The neighborhood window method was applied to analyze the fake vectors' distribution and magnitude. The results show that DT can effectively determine the reference particles and the improved algorithm reserves the advantages of against noise and calculating "particles having no matched candidate"; fake vectors' distribution and magnitude appear to be quite similar in the two cases when noise and particles having no matched candidate exist. The improved RM-PTV was employed to track trajectories of saltating sand in an atmospheric boundary layer and the results can meet the requirement. It seems that the independence can be improved and the original advantages can be reserved by adopting DT in RM-PTV.

Keywords: particle tracking velocimetry; Delaunay triangulation; neighborhood windows analysis; trajectories of saltating sand

粒子追踪测速法(PTV)具有无介入、整场测量等特点,已成为提取瞬态流场结构、进行流动可视化研究的有力工具^[1-2]. 松弛迭代粒子追踪算法(RM-

PTV)在连续两帧图像中着眼于粒子间匹配概率的收敛特性,避免了常见 PTV 方法的缺陷,对复杂流动实现了高效分析,进而使得应用 PTV 方法来分

析高浓度流场图像成为可能^[3-4]. 松弛迭代法最先应用于标记化实景图像测速中^[5],此后 Beak 等^[4]将松弛迭代的思想用于流场测量,并提出了 RM-PTV, Ohmi 等^[3]对 RM-PTV 的无匹配概率的迭代方式进行了修正,张洋等^[6]针对 RM-PTV 对孤立粒子无匹配的计算缺陷提出了改进的双向法则,Brevis 等^[2]通过将 RM-PTV 和 BCC(binary cross correlation)算法有效的整合来提高算法的整体性能.

为第 1 帧图像中的粒子选取预匹配的候选粒子以及选取与之保持相似运动的参选粒子,是应用 RM-PTV 的首要环节. 确定候选和参选粒子的方法通常采用直接给定 2 个固定阈值的圈选法,而这 2 个阈值的确定主要依赖于流场的流动特性和流场示踪粒子的分布^[3,6]. 为了减小 RM-PTV 对流动特性的依赖,本文通过引入 Delaunay 三角剖分(DT)法来确定参选粒子,并通过匹配计算典型的自定义图像进行了有效性验证,利用图像随机添加和抹除研究了算法的抗噪能力及对孤立无匹配的识别情况,采用领域窗口判别法分析了自定义流场的计算结果,最后以提取大气边界层中跃移沙粒的轨迹为例进行了实验验证.

1 基本原理

1.1 RM-PTV 基本流程

图 1 为 RM-PTV 的基本原理,其中 x_i, y_j 分别为第 1 帧和第 2 帧图像中的粒子坐标, R_n 和 R_s 分别为圈选的参选粒子和候选粒子的固定阈值半径, R_q 为相似运动半径(一般为 R_s 的 20%^[7]), $d_{ij} = x_i - y_j, d_{kl} = x_k - y_l$.

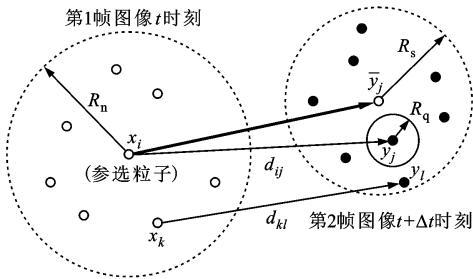


图 1 RM-PTV 的基本原理

目标粒子匹配法的步骤如下.

步骤 1 分别确定固定阈值 R_n 和 R_s , 并为第 1 帧中的 x_i 选取参选粒子和候选粒子.

步骤 2 根据概率归一化原理, 即 $P_{ij} + P_i^* = 1$, $P_{ij}^{(0)} = P_i^{*(0)} = \frac{1}{(M+1)}$ 进行迭代概率初始化, 其中 P_{ij} 为第 1 帧中的 x_i 和第 2 帧中的 y_j 的匹配概率,

P_i^* 为无匹配概率, M 为候选粒子数.

步骤 3 对 x_i 的每一个匹配概率 P_{ij} 及无匹配概率 P_i^* 进行迭代(迭代次数用 N 表示), 并进行归一化处理.

步骤 4 选择匹配概率 P_{ij} 中最大者的粒子作为 x_i 的匹配粒子或无匹配粒子, 对第 1 帧中所有的粒子进行计算, 直至匹配完成.

1.2 采用 DT 法选取参选粒子

DT 法是以空间或平面的离散点为节点, 再将节点连接(连接形式唯一^[8])为四面体或三角形形成非结构化网格. 在 DT 网格中, 任意一个三角形的外接圆不包括三角形 3 个顶点之外的任何一个节点, 这也称之为 DT 网格的空圆特性^[8]. 本文采用 Bowyer-Waston 方法生成 DT 网格^[9].

传统 RM-PTV 是通过固定阈值半径 R_n 和 R_s 来圈选参选粒子和候选粒子的^[3,4], 其中 R_s 的取值一般为 2 帧时间间隔内粒子的最大位移 s . 参选粒子的圈选还需要考虑流场示踪粒子的具体分布和计算效率. 为了提高 RM-PTV 的独立性, 本文应用 DT 网格来代替固定阈值进行参选粒子选取, 具体方法是: ①在第 1 帧图像中, 以粒子为节点生成 DT 网格; ②选取与目标粒子的 x_i 直接相连而形成三角形的粒子来构成 x_i 的参选粒子集合. DT 法选取参选粒子的示意图如图 2 所示. 由图 2 可见, 编号为 72 的粒子, 其参选粒子应包括编号为 65、58、61、68、71、70 的粒子.

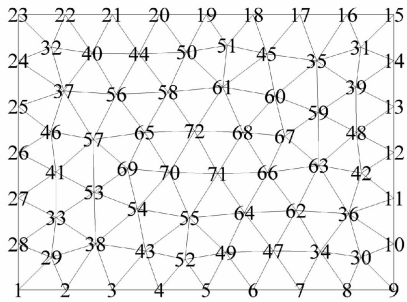


图 2 DT 法选取参选粒子的示意图

2 计算结果及分析

2.1 自定义流场及参数

为了验证 DT 法的有效性, 取 3 种典型流场, 即位移径向渐大的旋转流场(流场 1)、位移径向渐大的双曲流场(流场 2)及位移径向渐大的扩散流场(流场 3)进行匹配. 根据已知的运动方程可以获得 2 帧的自定义流场图像^[10]. 设粒子随机、均匀分布, 则流场粒子浓度可用空间率 p_v (p_v 为图像中粒子

总数与图像像素总数的比值)来表征,每种流场采用了 4 种空间率,分别为 13.107、16.384、21.845、32.768。

在孤立粒子无匹配和图像噪声的模拟过程中,对第 2 帧图像中的粒子进行了随机抹除和添加,以改变原有的匹配关系,同时假设随机添加和抹除的粒子数相对于第 1 帧粒子总数的比值分别为 μ_a 和 μ_d 。首先生成 μ_a 和 μ_d 同时为 0 的连续 2 帧图像,然后以此为基准生成 μ_a 和 μ_d 依次变化的图像序列。图像及算法的相关参数如表 1 所示。

表 1 算法及图像的相关参数

R_s /像素	R_n /像素	s /像素	N	μ_d	μ_a
9	12	8	15	0.0~0.3	0.0~0.3

2.2 流场匹配结果分析

分别应用 R_n 和 DT 法选取参选粒子,用 R_s 圈选候选粒子,结合双向法则^[6]、应用 RM-PTV 对 12 组共 1 344 个图像对进行匹配计算,匹配结果表明,所有结果定性一致,因此本文仅给出 $p_v=21.845$ 时流场的计算结果。

图 3 为 $\mu_a、\mu_d$ 均为 0.1 时 3 种流场应用 DT 和固定阈值法选取参选粒子的计算结果。由图 3 可见,各种流场下 2 种方法的错误匹配矢量均随机分布且

数量相当。通过进一步分析计算结果显示,应用 DT 和固定阈值法选取参选粒子时的匹配准确率 η_{DT} 和 η_{R_n} 极其接近,二者之差的绝对值基本都保持在 0.005 以内,表明采用 DT 法可以有效地选取参选粒子。

在粒子添加和抹除的情况下,3 种流场匹配准确率的变化趋势定性一致。图 4 为应用 DT 和固定阈值法选取参选粒子时旋转流场匹配准确率的变化趋势。由图 4 可见:当 μ_d 固定时,准确率随 μ_a 的增大而减小,表现为 μ_a 每增大 0.05,准确率下降 0.01;当 μ_a 固定时, μ_d 增大,准确率显示出对 μ_d 较好的适应性,并始终保持在较高的水平,即使 $\mu_a、\mu_d$ 均为 0.3 时,准确率仍可以达到 0.95。该结果表明,利用 DT 法可以有效地选取参选粒子,此时 RM-PTV 能够保持一定的计算噪音及无匹配粒子的能力。

2.3 匹配结果的邻域窗口分析

在连续体流动的假设下,可使用邻域窗口分析法来判断矢量场的合理性。其基本思想是:对于一个 $m \times n$ 的流动区域,使用 $w_1 \times w_2$ 的窗口在其中移动(移动区域可重叠),移动一次,判断起点所在窗口内的所有矢量的相似性,并将判断结果的泛函作为一个数值;循环移动窗口,直至流场所有的区域被覆盖

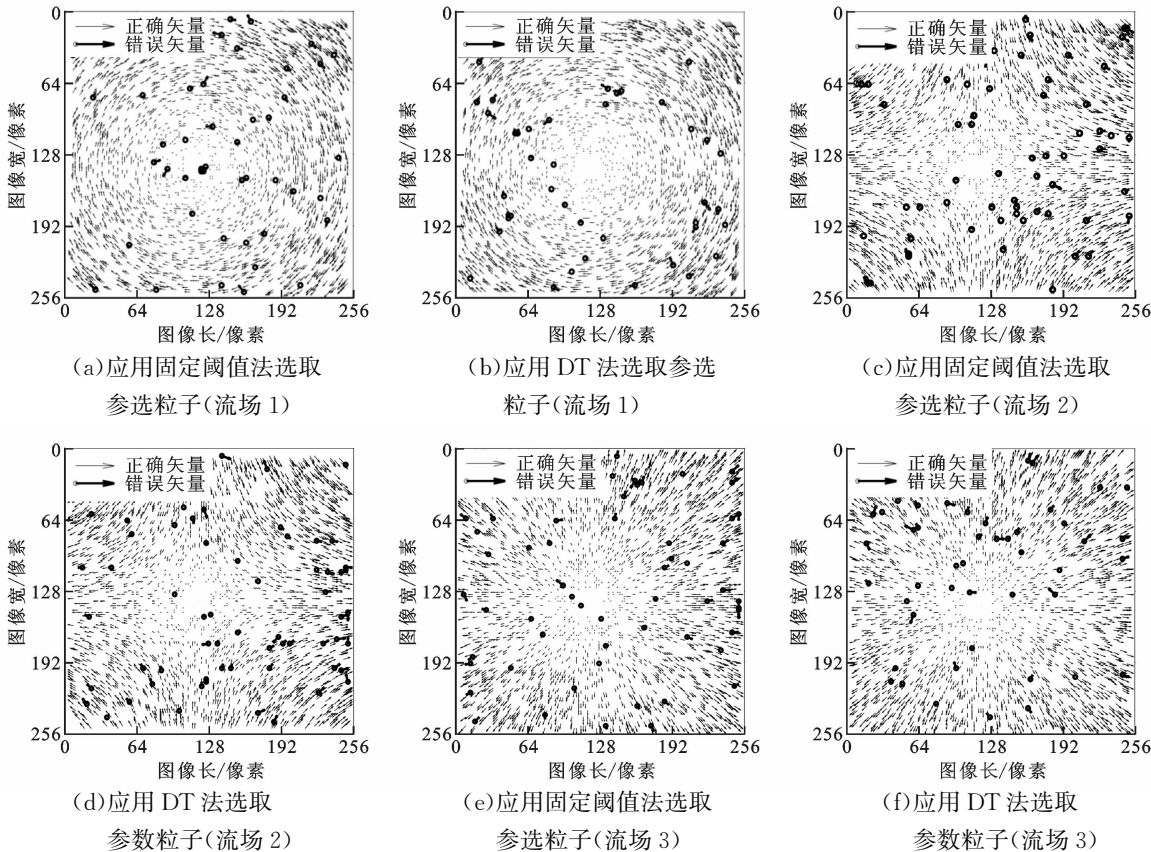
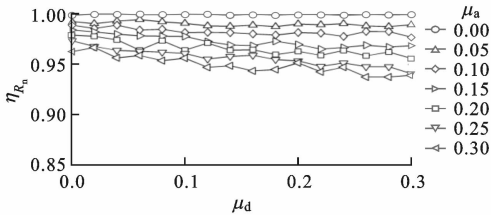
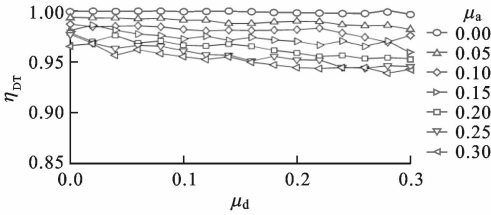


图 3 流场匹配结果对比



(a)固定阈值法选取参选粒子



(b)DT 法选取参选粒子

图 4 匹配准确率的变化趋势

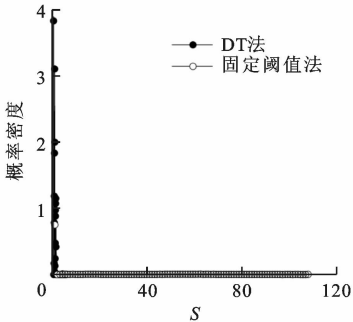
为止. 至此,得到一个二元函数 $S=g(x,y)$,它是一个可以表征矢量相似性的函数,其中 x,y 为窗口形心所在的坐标. 对于连续流动的流场,流场的速度分布应该是连续的,若 w_1 和 w_2 取得足够小, S 应该是平滑的. 对于速度均匀的平移流场,所有矢量的大小和方向均相同,则 S 为一平面. 应用邻域窗口既可描述流场的固有梯度,也可找出突兀矢量所在的区域. 显然,对连续流动来说, S 的峰值越少、越小就越好.

以 S 为一个总体的样本空间,通过统计分析得到 S 的频率直方图,由此得到相应的概率密度曲线,再经过增加样本的容量和分组的数量来提高概率密度曲线的准确度^[11],量化表征 S 的大小及分布特性.

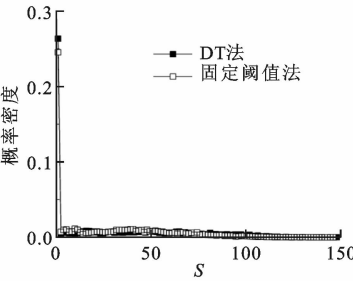
3 种流场下应用邻域窗口分析获得的 RM-PTV 匹配结果表明:当 $\mu_a=\mu_d=0$ 时,应用 DT 法的流场匹配结果中突兀矢量明显比固定阈值法少;当 $\mu_a=\mu_d\neq 0$ 时,2 种方法的邻域窗口分析结果的概率密度曲线分布基本一致. 图 5 为受噪声和粒子无匹配干扰时旋转流场在邻域窗口分析结果下的概率密度曲线. 由图 5 可见,应用 DT 法、RM-PTV 分析所得流场的突兀矢量的数量和大小与固定阈值法相当,且随着 μ_a,μ_d 的增大, S 取值较大的概率增大.

3 实验验证

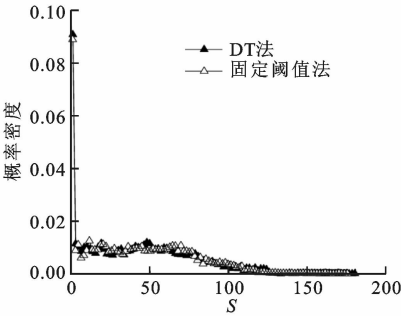
采用高速数字相机记录了大气边界层内平坦沙床表面沙粒的跃移运动^[12]. 应用本文方法分析了历时 2 048 ms 采集到的 4 096 帧连续图像,提取了沙粒的跃移轨迹,其中粒径为 300~500 μm ,平均风速



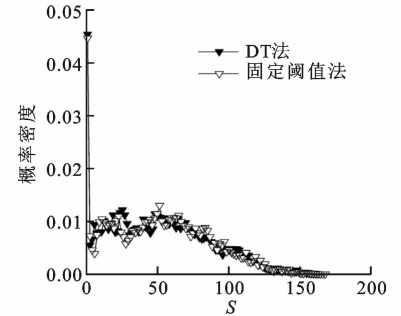
(a) $\mu_a=\mu_d=0$



(b) $\mu_a=\mu_d=0.1$



(c) $\mu_a=\mu_d=0.2$

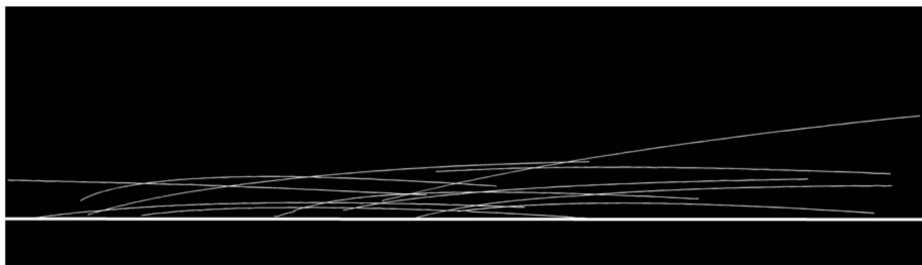


(d) $\mu_a=\mu_d=0.3$

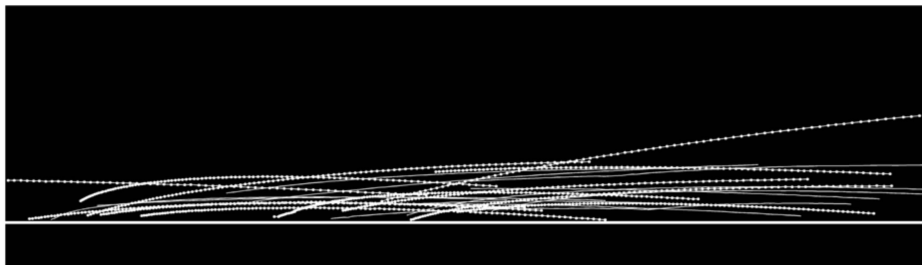
图 5 邻域窗口分析结果的概率密度曲线

为 9.5 m/s.

图 6a 为应用本文方法提取的跃移轨迹,图中仅显示了部分比较完整和清晰的轨迹;图 6b 为应用传统 RM-PTV 提取的轨迹. 图 6a、6b 中对应的同一条提取轨迹被加粗标记. 通过比较可知,2 种方法提取的轨迹吻合较好,说明本文方法是有效,而且 DT 法的引入提高了本文方法的独立性,使得其应用更为便捷.



(a) 本文方法



(b) 传统 RM-PTV

图6 2种方法提取的轨迹对比

4 结 论

通过自定义流场的分析验证了DT法在选取参选粒子上的有效性,通过对第2帧图像中的粒子进行随机的添加和删除模拟,计算了噪声和粒子无匹配结果.由邻域窗口分析法的分析结果表明:本文方法和传统RM-PTV在流场突兀矢量的分布和大小上是相当的;本文方法在分析跃移层内粒子的运动上是有效的,在应用上是便捷的.综上所述,通过DT法的引入,不仅使得本文方法保持了传统RM-PTV的流场处理能力、抗噪声能力和解决准确计算孤立无匹配粒子的能力,而且无需进行参选粒子的选取,使得方法对具体流场的依赖性减小,RM-PTV的独立性提高.

参考文献:

- [1] OHMI K, PANDAY S P, SAPKOTA A. Particle tracking velocimetry with an ant colony optimization algorithm [J]. *Experiments in Fluids*, 2010, 48 (4): 589-605.
- [2] BREVIS W, NINO Y, JIRKA G H. Integrating cross-correlation and relaxation algorithms for particle tracking velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2011, 50 (1): 135-147.
- [3] OHMI K, LI H Y. Particle-tracking velocimetry with new algorithm [J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, 11 (6): 603-616.
- [4] BAEK S J, LEE S J. A new two-frame particle tracking algorithm using match probability [J]. *Experiments in Fluids*, 1996, 22 (1): 23-32.
- [5] BARNARD S T, THOMPSON W B. Disparity analysis of images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, 2 (4): 333-340.
- [6] 张洋, 王元, 李志强. 结合双向法则的松弛迭代粒子追踪测速法 [J]. *空气动力学学报*, 2010, 28 (3): 250-254.
- [7] ZHANG Yang, WANG Yuan, LI Zhiqiang. Relaxation based PTV with bidirection principle [J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2010, 28(3): 250-254.
- [8] PEREIRA F, STUER H, GRAFF E C, et al. Two-frame 3D particle tracking [J]. *Measurement Science & Technology*, 2006, 17 (7): 1680-1692.
- [9] CHEN Z C. Finite element method and their application [M]. Berlin, Germany: Springer, 2005.
- [10] WATSON D F. Computing the n -dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes [J]. *Computer Journal*, 1981, 24 (2): 167-172.
- [11] OKAMOTO K, NISHIO S, SAGA T, et al. Standard images for particle-image velocimetry [J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, 11 (6): 685-691.
- [12] 施雨, 李耀武. 概率论与数理统计应用 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [13] WANG D W, WANG Y, YANG B, et al. Statistical analysis of sand grain/bed collision process recorded by high-speed digital camera [J]. *Sedimentology*, 2008, 55 (2): 461-470.

(编辑 苗凌)