

RM-PTV 中选取候选粒子的形心 DT 网格方法

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: 为提高松弛迭代粒子追踪测速法(RM-PTV)提取瞬态流场的便捷性,提出了一种形心 Delaunay 三角剖分(DT)方法,并用其代替固定阈值法来选取与目标粒子预匹配的候选粒子,以降低 RM-PTV 对待测流场特性的依赖。通过对典型流型的自定义及标准人工粒子流场图像的匹配计算进行全面、有效地验证表明:形心 DT 网格可有效、便捷地选取候选粒子,保证 RM-PTV 得到准确的匹配结果,兼顾匹配准确率和效率,省去流场速度的预先估计,减小算法对流场及具体粒子分布情况的依赖,使 RM-PTV 更独立,应用更方便。

关键词: 松弛迭代粒子追踪测速法;候选粒子;固定阈值;Delaunay 三角剖分

中图分类号: O359;X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)01-0080-05

Determining Candidate Particles with Centroid DT Method in RM-PTV

JIA Pan, WANG Yuan, ZHANG Yang

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

Abstract: To improve the convenience of the relaxation based particle tracking velocimetry (RM-PTV) in obtaining the instantaneous flow structure, a centroid Delaunay triangulation (DT) based technique was proposed to determine candidate particles for the target particles in the matching process, and typical self-defined particle images and standard particle images were analyzed to test the validity of the new method. The results show that the centroid DT method can select the candidate particles effectively and conveniently. Moreover, consideration is given to balance accuracy and efficiency, and the previous estimation of the flow field can be avoided, which makes the application of RM-PTV more independent, especially for the complicated flow situation and inexperienced users.

Keywords: relaxation based particle tracking velocimetry; candidate particles; settled threshold; Delaunay triangulation

粒子追踪测速方法(PTV)是一种光学测速方法,凭借非介入、整场测量的特点而广泛应用于实验流体力学研究的各个领域^[1]。粒子追踪算法一直是研究的热点,在众多算法中,松弛迭代粒子追踪测速法(RM-PTV)克服了一些常见算法的缺点,可对高浓度的复杂流动进行准确、高效的分析^[2-3]。松弛迭代法最早应用于光流测速领域^[4],之后被引入流场测试^[2,5]。Ohmi 等针对 RM-PTV 中无匹配概率的

迭代缺陷,提出了一种独立的无匹配概率迭代方法^[3];张洋等针对孤立无匹配粒子的识别提出了双向法则^[6];另有学者针对孤立粒子和计算效率的缺陷,借鉴 PIV(Particle Image Velocimetry)和 BICC(Binary Cross Correlation)匹配思想,改善了 RM-PTV 的匹配能力^[7-8]。

RM-PTV 应用受限的主要原因是机理复杂,需确定较多的初始参数,有些参数依赖于流场流动及

收稿日期:2012-07-17。 作者简介:贾攀(1987—),男,博士生;王元(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(10972176,11272252)。

网络出版时间:2012-12-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20121211.1008.001.html>

3.1 自定义粒子图像及计算分析

流场的变形包括线变形和角变形,从这个角度出发,可选取以下 3 种流型:径向位移渐大旋转流动、径向位移渐大双曲流动、径向位移渐大扩散流动。这 3 种流场中,局部的速度变形率张量和旋转率张量相对比较大,流场存在较明显的速度梯度。另外,选择自定义流场可以完全避免单一粒子识别对匹配结果的影响,并可将匹配结果与已知的正确结果进行比较。根据运动方程可以获得连续 2 帧自定义图像,考虑到 PTV 实验的实际情况,设粒子均匀分布,粒子的浓度采用空间率 p_v (图像像素总数与粒子总数的比值)来表征。本文中,每种流型采用了 4 种空间率:16.384、21.845、32.768、65.536。由于粒子重叠、第 3 方运动和逃离视场会导致连续 2 帧的粒子数不一致而造成粒子无匹配,以及由于系统外部电磁干扰、中源波动和系统内部器件电路等引起的噪音,需对第 2 帧图像随机添加和抹除一定比例的粒子,抹除和添加的比例分别用 μ_e 和 μ_a 表示。目前,PTV 实验中通过特定的光源和背景、稳压电源以及低噪音设备(低噪音相机等),可有效地降低背景噪音。

按照以上方法生成 12 组图像,并分别采用固定阈值 R_s 和形心 DT 网格选取候选粒子,采用文献[10]的方法选取参选粒子,应用 RM-PTV 进行计算,图像和算法的相关参数见表 1。参与计算的工况有 1 536 种,匹配结果均定性地一致。考虑到在实际的 PTV 实验中,示踪粒子的浓度相对较低^[12](对于 256×256 像素的图像,粒子数一般在 1 000~2 000 之间,较多的是在 2 500 左右),故此处仅给出 $p_v=21.854$ (图像大小为 256×256 像素时对应粒子数为 3 000)时旋转流场的计算结果。

表 1 图像及算法的相关参数

图像大小/像素	256×256
R_s /像素	5~20
$s_{\max}$ /像素	5~12
迭代次数	15
$\mu_e/\%$	5
$\mu_a/\%$	10

典型工况下,帧间的 $s_{\max}=9$ 像素, $p_v=21.854$, 在应用固定阈值选取候选粒子时,匹配准确率 η_{RS} 和计算效率 η_T 随固定阈值的变化如图 3a 所示。其中,计算效率采用一种无量纲时间来表征,即 $\eta_T=$

$1-t_k/t_{\max}, t_{\max}=\max\{t_k|k=1,2,\cdots,N\}$, t_k 为 N 种工况的计算时间,显然最大计算时间对应的计算效率为 0。由图 3a 可见,随着固定阈值的增大,匹配准确率趋于稳定,计算效率单调下降。如果流场的预先估计较为准确,并选取到了合理的固定阈值,则可得到较为准确的匹配结果,即 $R_s=11$ 像素时,匹配准确率为 0.976 2,如图 3b 所示。由图 3b 可见,在整个流场区域,匹配结果均反映出真实的流动情况。如果流场的预估计存在偏差, R_s 选取得比较小,则在流场局部速度较大处会出现错误的匹配结果,如 $R_s=6$ 像素时,匹配准确率为 0.806 5,如图 3c 所示。由图 3c 可见,错误矢量均处于速度较大的位置,这是因为 R_s 太小而不能选取到真实的匹配粒子。由图 3a 亦可得:选取较大的 R_s 更易得到正确的匹配结果,但一味地增大 R_s 也会导致冗余数据产生,由此影响匹配效率。所以,对于速度梯度较大的流场,全局中选取一个固定阈值不能调节匹配准确率和效率之间的矛盾。

直接应用形心 DT 网格方法选取候选粒子时的 RM-PTV 的匹配结果如图 3d 所示。由图 3d 可见,匹配准确率为 0.976 5,与图 3b 所示结果相当,表明该方法真实地显示出流场的分布情况。进一步分析各工况的匹配结果表明:如果流场通过预先估计得到合理的固定阈值 R_s ,则应用 R_s 和形心 DT 网格方法选取候选粒子进行匹配计算的准确率极其接近,两者之差的绝对值基本保持在 0.005 以内,错误匹配矢量均随机分布且数量相当;如果流场的预先估计不准确,选取较小的固定阈值会影响匹配准确率,选取过大的固定阈值会导致匹配效率下降。应用形心 DT 网格方法选取候选粒子时的匹配准确率随 s 的变化趋势如图 3e 所示。由图 3e 可见,粒子位移 s 可在较大的范围内进行,且无需对流场预先估计,直接应用形心 DT 网格方法便可有效、便捷地为目标粒子选取候选粒子,同时匹配准确率较高。

由第 2 节步骤 3 可知,应用形心 DT 网格方法选取候选粒子时需针对第 1 帧中的每个粒子生成新的 DT 网格,然后再经搜索得到初步的选取结果,该操作并不耗时,因为根据 DT 网格的区域性,在已生成的网格中新增、删除、移动一个节点仅会影响变化点邻近的三角形的布局,所以对已有的网格仅需要进行很小的局部修改即可得到新的网格^[13]。另外,根据 DT 网格最接近的性质,节点之间总是通过距离最邻近的相互连接形成网格,因此仅需进行微小的局部搜索即可得到与加入点直接相连的形心

点^[13]。本文的实验环境(Matlab 2011)提供了有关 DT 网格的函数工具箱,其中 DT 网格的生成、三角形形心的计算等均可直接应用经过优化的代码来实现。通过计算效率分析表明:形心 DT 网格与合理的固定阈值选取候选粒子时的 RM-PTV 的计算效率相当,因此形心 DT 网格方法在保证准确率较高的前提下,可兼顾较高的计算效率。

3.2 标准粒子图像计算分析

标准粒子图像已广泛应用于 PIV 和 PTV 算法的检验^[3,7,11,14-15],有关图像及数据可从网站 www.vsj.or.jp/piv 下载。本文选取编号为 01 和 23 的 2 组图像来检验算法性能,01 号图像组描述的是二维的壁面剪切流动,23 号图像组描述的是冲击射流且其中包含了第 3 方的运动,图像和算法的相关参数如表 2 所示,检验时首先采用动态阈值二值化法(DTB)得到单个粒子的位置坐标^[3]。01 号和 23 号 2 组图像的叠加结果分别如图 4a、图 4b 所示,其将作为 RM-PTV 匹配结果的参照。2 组图像分别用 10 组不同的固定阈值 R_s 及形心 DT 网格方法进行候选粒子的选取,参选粒子的选取采用文献[10]的方法。采用固定阈值 R_s 时的 20 组匹配结果中,01 号和 23 号 2 组图像对应 R_s 分别为 15 像素和 10 像素时的匹配结果,如图 4c 和图 4d 所示,可见 R_s 取值较小,匹配准确率较低。 R_s 分别为 12 像素和 7 像素时 2 组图像的匹配结果如图 4e 和图 4f 所示,可见:在速度较大之处,由于流场的预估计不合理而导致较小的 R_s 未能正确地选取候选粒子,不能得到正确的匹配结果(采用空白显示);全流场中选取较大的 R_s 会导致匹配效率下降。采用形心 DT 网格方法选取候选粒子可免去对流场的预先估计而直接进行匹配计算。采用该方法的 01 号和 23 号 2 组图像的匹配结果如图 4g 和图 4h 所示,通过与参考流场比较可知,该匹配结果准确地显示了流场的流动情况,表明形心 DT 网格方法可以有效地选取候选

粒子。

对自定义图像以及标准粒子图像的分析结果表明:采用固定阈值选取候选粒子时需对流场的最大速度做出预先估计,因为匹配准确率和效率依赖于固定阈值的选取,这也是 RM-PTV 难以应用的原因,尤其是速度梯度比较大的复杂流动,选取一个兼顾准确率和效率的固定阈值更为困难。采用本文的形心 DT 网格方法选取候选粒子时,减少了一个参数的选取,避免了预估计偏差对匹配准确率和效率的影响,从而实现了准确率和效率之间的协调性。

表 2 图像及算法的相关参数

图像组序号	01	23
图像大小/像素	256×256	256×256
图像灰阶/b·像素 ⁻¹	8	8
R_s /像素	11~20	6~15
迭代次数	15	15
初始灰度阈值	120	120
灰度对比阈值	5	5

4 结 论

通过匹配计算自定义粒子图像和标准粒子图像,验证了形心 DT 网格方法在选取候选粒子时的有效性和便捷性。研究结果表明:与固定阈值法相比,形心 DT 网格方法可有效地选取候选粒子,避免了固定阈值选取不合理带来的影响,兼顾了匹配准确率和计算效率的关系,保证了 RM-PTV 得到准确的结果。结合应用 DT 网格替代固定阈值 R_s 直接选取参选粒子的方法^[10],RM-PTV 中参选粒子和候选粒子的选取均可采用基于 DT 网格的方法来实现,且不受具体流场及固定阈值选择准确性的影响,从而降低了算法对初始参数的依赖性,使 RM-PTV 更加独立,应用更方便。

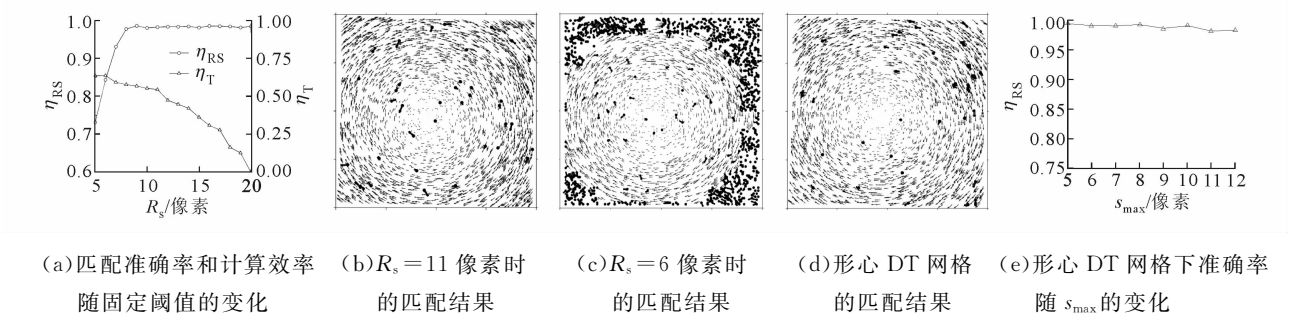


图 3 旋转流场匹配结果

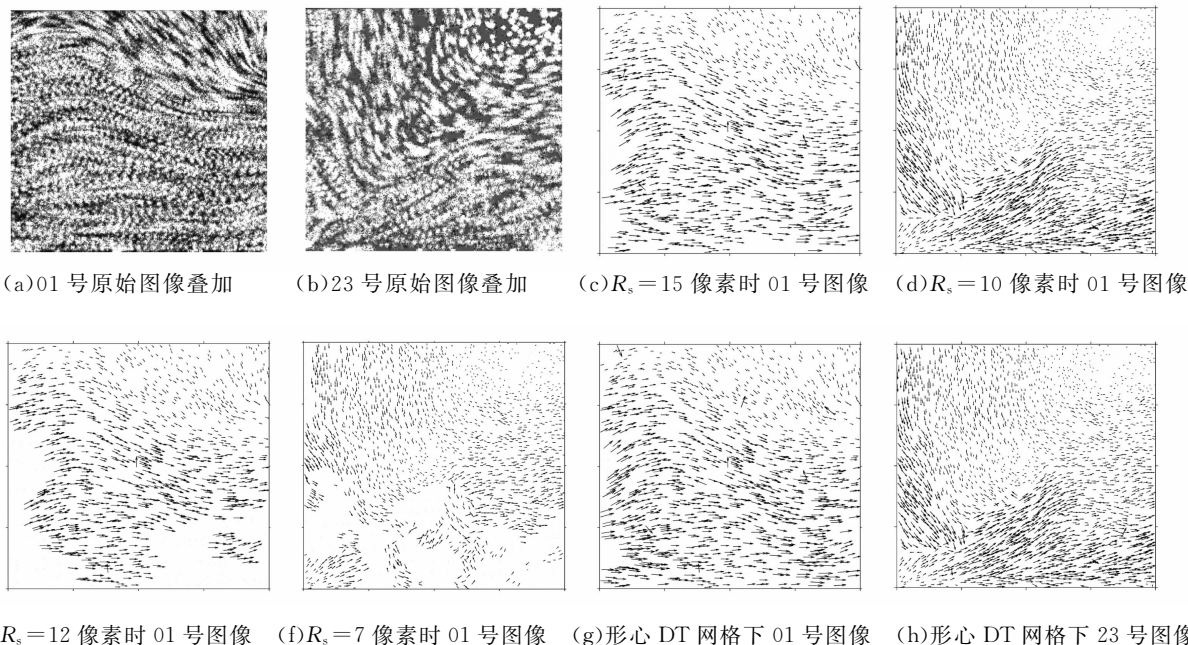


图 4 标准粒子图像的匹配结果比较

参考文献:

- [1] ADRIAN R J. Twenty years of particle image velocimetry [J]. *Experiments in Fluids*, 2005, 39(2): 159-169.
- [2] 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.
- [3] OHMI K, LI H Y. Particle-tracking velocimetry with new algorithm [J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, 11(6): 603-616.
- [4] BARNARD S T, THOMPSON W B. Disparity analysis of images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1980, 2(4): 333-340.
- [5] WU Q X, PAIRMAN D. A relaxation labeling technique for computing sea-surface velocities from sea-surface temperature [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(1): 216-220.
- [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.
ZHANG Yang, WANG Yuan, LI Zhiqiang. Relaxation based PTV with bidirection principle [J]. *Acta Aerodynamic Sinica*, 2010, 28(3): 250-254.
- [7] 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.
- [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] 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.
- [10] 贾攀, 王元, 张洋. 松弛迭代粒子追踪测速法独立性改进 [J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(1): 120-124.
JIA Pan, WANG Yuan, ZHANG Yang. Determination of the reference particles in RM-PTV with a new method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2009, 43(5): 120-124.
- [11] SONG X, YAMAMOTO F, IGUCHI M, et al. A new tracking algorithm of PIV and removal of spurious vectors using Delaunay tessellation [J]. *Experiments in Fluids*, 1999, 26(4): 371-380.
- [12] OKAMOTO K, NISHIO S, SAGA T, et al. Standard images for particle-image velocimetry [J]. *Measurement Science & Technology*, 2000, 11(6): 685-691.
- [13] WATSON D F. Computing the n -dimensional Delaunay tessellation with application to Voronoi polytopes [J]. *Computer Journal*, 1981, 24(2): 167-172.
- [14] CHEN Z C. Finite element method and their application [M]. Berlin, Germany: Springer, 2005.
- [15] OHMI K, PANDAY S P. Particle tracking velocimetry using the genetic algorithm [J]. *Journal of Visualization*, 2009, 12(3): 217-232.

(编辑 苗凌)