

跃移沙粒运动参数的数字图像分析

李志强, 王元, 张洋

(西安交通大学流体工程系, 710049, 西安)

摘要: 采用高速相机记录了大气边界层风洞中的沙粒跃移运动, 并对所获取的跃移图像序列运用双向粒子追踪算法对帧间沙粒进行匹配, 从中提取出准确的跃移轨迹. 对跃移沙粒位置函数进行基于时间自变量的曲线拟合及求导来计算运动参数, 结果表明, 与传统方法及降频差分法相比, 拟合-求导法能更好地克服数据波动性大、端点数据损失及时间分辨率低等问题, 在单颗粒连续性运动量化分析中更具实际意义. 结合拟合-求导法和简化受力模型, 计算得出了真实跃移过程中阻力加速度的变化以及广义升力在来流方向的作用方式.

关键词: 高速摄影; 跃移轨迹提取; 曲线拟合

中图分类号: O359; X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0109-05

Digital Image Analysis on Motion Parameters of Saltating Sand Grains

LI Zhiqiang, WANG Yuan, ZHANG Yang

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

Abstract: A high-speed digital camera was adopted to record the saltation of sand grains in an atmospheric boundary layer (ABL) wind tunnel. The bidirectional particle tracking algorithm was employed in matching interframe particles and abstracting trajectories from image sequence. The time based curve fitting and the derivation were applied to calculate motion parameters for the position function of sand particle saltation. Compared with conventional and frequency reduced discrete difference methods, the present curve fitting and continuous derivation method is more effective in single-particle continuous motion analysis. Moreover, the drag acceleration and the way of the general lift force in wind direction are achieved.

Keywords: high-speed photography; saltating trajectory abstraction; curve fitting

作为风场与沙床间能量传递主要载体的跃移运动是一种群体运动, 而对单沙粒跃移运动特征的研究就是揭示这种运动的本质^[1], 高速摄影则是获取单颗沙粒运动轨迹的重要手段^[2-3]. 考虑到图像采集中的高帧率和沙粒相的离散性, 两帧粒子追踪算法^[4-6]无疑是对图像中粒子进行跨帧匹配的理想算法. 选取基于三角铺设的粒子追踪算法并通过双向算法对其升级, 可提取更为准确的跃移轨迹^[6].

跃移运动明显区别于蠕移运动, 在提取跃移轨迹的基础上, 可从粒子型心坐标 φ 出发计算沙粒运动参数. Zhang^[3]采用有限差分的方法通过相邻点

坐标计算沙粒速度. 在从图像采集到轨迹提取的过程中, 由于实际拍摄(片光照明、沙粒散射光线等)与粒子识别算法都会引入误差, 所以不可避免地导致了粒子单像素化误差 e_p , 使得相邻点差分的结果存在着波动(加速度的结果尤为明显), 从而削弱了算法在单沙粒运动量化分析中的作用. 邱玉琚^[7]对拍摄获得的跃移轨迹进行曲线拟合来反算颗粒起跳和入射的位置, 进而可对跃高、跃长等轨迹参数进行统计分析. 但是, 该拟合仅考虑沙粒在 x 、 y 方向位移呈线型的关系, 并未将跃移轨迹看作是粒子迹线. 为了进一步计算跃移运动参数, 本文以采样时间 t 为

自变量,分别对 $t-x$ 和 $t-y$ 的离散关系采用高次多项式方法进行拟合,实际拟合的曲线为9次多项式,再通过求导得到了连续变化的运动参数,并在最大程度上减小了 e_{φ} 。

1 跃移实验

跃移实验如图1所示,本实验旨在记录近床面沙粒跃移运动和粒/床碰撞过程,并为统计分析提供原始数据^[2]。实验分为跃移运动发生单元和图像采集单元。

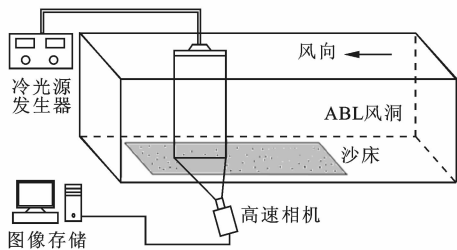


图1 跃移实验布置

跃移运动发生单元 包括大气边界层风洞和平铺的沙床。在风洞测试段,通过铺设粗糙元等来模拟生成中性边界层。沙床在距测试段入口5 m处铺设,这样可形成稳定摩阻风速下的稳态跃移运动。实验设置须符合 Re 、 Fr 等主要相似准数的要求,即 Fr 在其阈值下才能避免因颗粒碰撞顶壁带来的干扰。因此,本实验在风洞尺寸固定的前提下,主流风速不大于10 m/s。沙样按直径分为3种:粗沙(300~500 μm)、中沙(200~300 μm)和细沙(100~125 μm)。

图像采集单元 包括以片光形式照明的冷光源、高速数字相机以及图像存储系统。片光面位于风洞正中的纵剖面上,相机摄像方向与主流方向垂直,相机分辨率为1 024×512像素,采样频率2 000 Hz,曝光时间为1/3 000 s。

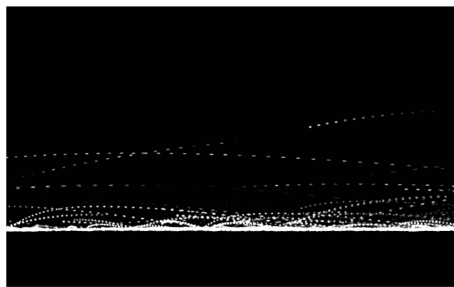
2 双向粒子追踪算法提取轨迹

运用算法在匹配连续帧图像中的沙粒之前,利用自动阈值法^[4]先识别颗粒并提取型心,从而使颗粒单像素化,进而生成了单像素化误差 e_{φ} 。

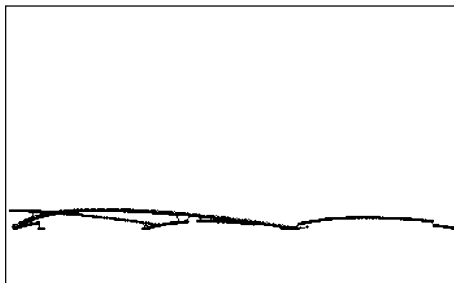
双向算法升级版的基于三角铺设的两帧粒子追踪算法较之传统算法具备更强的伪矢量剔除能力^[6]。因为,从轨迹提取的角度考虑,单向算法的双帧匹配成功率为 k_1 ,双向算法的双帧匹配成功率为 k_2 ,且 $k_2 > k_1$,也就是说,对于提取长度为 s 个粒子的轨迹的成功率,双向算法是单向算法的 $m_s = (k_2/k_1)^s$ 倍。由于实际情况下一对图像中多对粒子的

匹配准确率是相互关联的,所以实际的 m_s 将会更大。因此,在跃移运动连续性分析中采用双向算法提取轨迹是必要的。

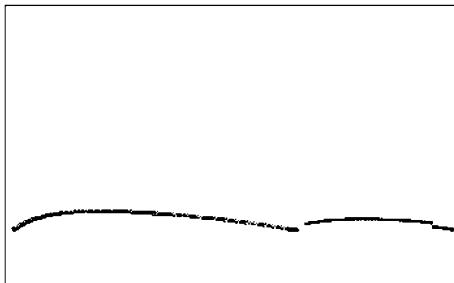
实验中采用了3种风速,主流风速分别为7.5 m/s、8.55 m/s和9.02 m/s,对应的摩阻风速分别为0.2 m/s、0.3 m/s和0.38 m/s。图2显示为摩阻风速 $u_* = 0.38$ m/s时粗沙(300~500 μm)的跃移图像叠加结果,以及单向、双向算法的部分轨迹提取结果。通过比较可明显看出双向算法的优越性。



(a)50帧图像叠加结果



(b)单向算法提取结果



(c)双向算法提取结果

图2 跃移轨迹提取结果

3 跃移沙粒运动参数的计算

任选一条跃移轨迹,在跃移颗粒运动参数的计算中对差分法和拟合-求导法进行了如下比较。

3.1 差分方式的选取

在差分法的计算中生成传递误差和截断误差,二者均为 e_{φ} 和采集频率 f 的函数。在 $f = 2\,000$ Hz、 e_{φ} 约为0.1个像素的情况下,传递误差较

截断误差更大,故可选择传递误差最小的中心差分方式.

图 3 显示了二阶中心差分下的水平加速度的计算结果.从结果可见,受 e_{φ} 的影响,计算结果波动巨大,所以其无实际分析意义.利用降频法可有效降低差分法的传递误差,即间隔 n 点(称为降频数)取点进行差分,这样加速度的传递误差仅为原差分法的 $1/n^2$,但此结果只能反映不同时间尺度的量,牺牲了数据的时间分辨率.

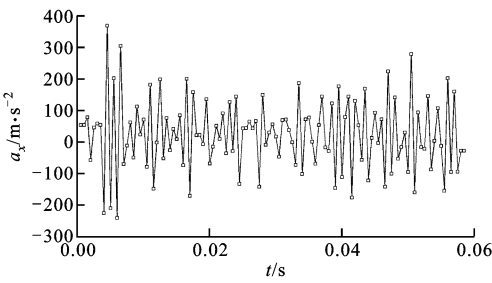


图 3 水平方向加速度二阶中心差分计算结果

综上,差分选取方式为:对于速度,选取中心差分法(端点值通过向前或向后差分计算);对于加速度,选取降频数 $n=15$ 的中心差分法(端点值通过向前或向后差分计算).

3.2 利用理论分析结果作为参照

将拟合及求导所得的沙粒跃移轨迹起点坐标和初速度作为初始条件,代入基于相同风速廓线的单沙粒跃移理论模型来计算运动参数.在拉格朗日框架下,所建模型主要考虑了重力、阻力 F_D 、沙夫曼升力 F_{LS} 和马格努斯升力 F_{LM} 的作用^[8-11].沙粒的运动方程为

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = m_p g + F_D + F_{LS} + F_{LM} \tag{1}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{60\mu}{\rho_p d_p^2} \left(\omega - \frac{1}{2} \frac{du}{dy} \right) \tag{2}$$

式中: m_p 、 v_p 、 ω 、 ρ_p 和 d_p 分别为沙粒的质量、线速度、角速度、密度和当量直径; u 是沿高度分布的风速; μ 为空气动力黏性系数.沙粒初始自旋加速度为经验值 500 r/s ^[11].以上 2 个运动方程均采用四阶显式龙格-库塔方法求解.

3.3 运动参数计算结果对比

当摩阻风速 $u_* = 0.38 \text{ m/s}$ 时,提取的粗沙跃移轨迹如图 4 所示,3 种方法的速度计算结果如图 5 所示.

将运动参数序列看作向量,通过向量的修正相关系数

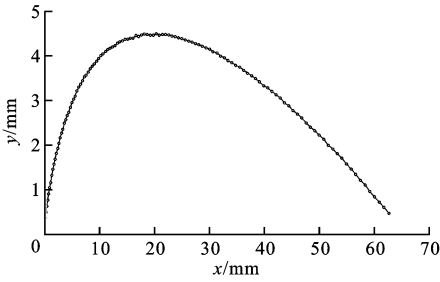


图 4 沙粒跃移轨迹

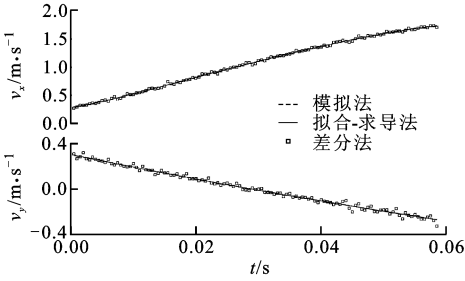


图 5 3 种方法的速度计算结果比较

$$c'_{ij} = \frac{\min(\overline{u_i}, \overline{u_j})}{\max(\overline{u_i}, \overline{u_j})} \frac{\overline{u_i u_j}}{(\overline{u_i^2} \overline{u_j^2})^{1/2}} \tag{3}$$

可以比较两向量 u_i 、 u_j 的相似程度,其取值范围为 $[0,1]$,其中 1 表示向量完全相同.假设 i 、 j 、 k 分别表示拟合-求导、离散差分以及数值模拟法的计算结果,由式(3)计算得出的 2 个方向的 c'_{ij} 有如下两种情况:均大于 0.97,这是速度计算的差分及求导均为一阶的原故,差分计算结果波动较小,所以 2 种方法计算结果非常相似,表明离散差分在速度计算上是有效的;均大于 0.99,表明拟合-求导法与理论模型是契合的.

图 6 显示了 3 种方法水平方向加速度的计算结果, $c'_{ij} = 0.7549$,表明差分与拟合-求导法的结果相差较大且差分结果存在较大的波动,始末端数值存在不合理跃变.这是由始末端采用不同差分法引起的,说明降频差分法存在牺牲空间分辨率的弊端.降频数 n 选取得越大,波动的程度降得越低,但数据损失越大(始末端非中心差分节点个数均为 n). $c'_{ik} = 0.9874$,表明拟合-求导法与理论结果能保持高

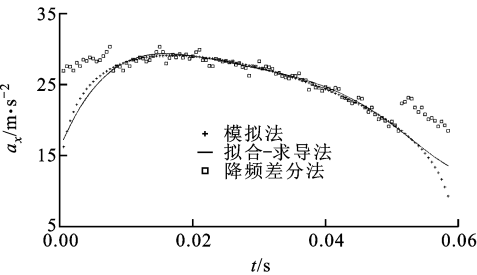


图 6 3 种方法水平方向加速度计算结果比较

度相似.值得注意的是,这2个结果的最大偏差发生在近壁面处(起跳和入射碰壁处),也就是近床面风速测量及沙床面的变形是产生偏差的主要因素,前者,近壁面湍流是最主要影响因素.拟合-求导法在运动参数的计算上则避开了这2种影响因素.

图7显示了3种方法垂直方向加速度的计算结果. $c'_{ij}=0.7604$ 、 $c'_{ik}=0.9747$,表明可以获得与水平方向加速度基本相同的结论.

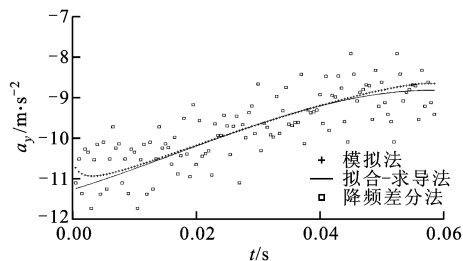


图7 3种方法垂直方向加速度计算结果比较

通过比较可知,利用拟合-求导法可以得到连续变化的跃移运动参数.将理论分析结果作为参照,拟合及求导的结果可更好地反映出沙粒跃移过程的速度及受力变化.

4 阻力加速度分析

本文在拟合-求导法的基础上计算了跃移阻力加速度 a_D .考虑到各主要受力之间的相互关系^[12-13],即 F_{LS} 和 F_{LM} 为总升力并与阻力 F_D 垂直,则 a_D 仅取决于合加速度 a 以及重力加速度 g 在相对运动方向上的投影量,如图8所示.

图9表示跃移简化模型下拟合-求导法获得的水平方向加速度 a_x 及阻力加速度 a_D 的变化.一方面, a_x 、 a_D 修正的相关系数 $c'_{xD}=0.9763$,说明阻力是产生水平方向加速度的最主要力量;另一方面, a_x 、 a_D 的差别表明了广义升力在来流方向上的作用方式^[13].

由于相对速度与横向速度梯度构成右手螺旋系,对于上升的沙粒,广义升力起水平加速作用,而对于下降的沙粒,广义升力起水平减速作用.

5 结论

(1)通过双向算法升级版的粒子追踪算法能更为准确地提取跃移轨迹.

(2)相比离散差分法,以时间为自变量对颗粒两方向位移分别作曲线拟合并求导,可得到在连续性分析上更为准确的跃移运动参数.

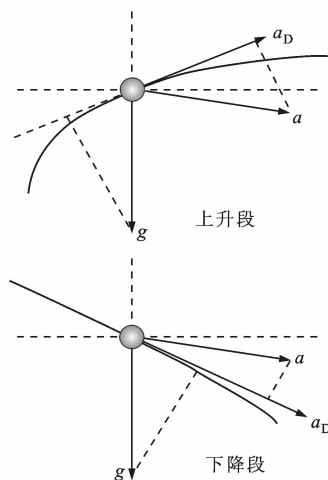


图8 计算阻力加速度 a_D 的简化受力模型

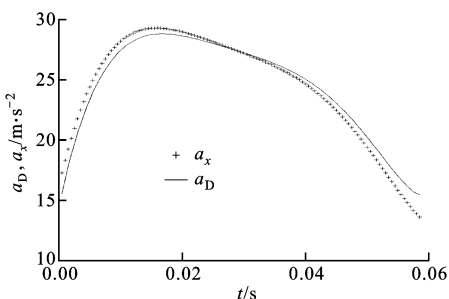


图9 阻力加速度 a_D 与流向加速度 a_x 的变化

(3)在广义升力和阻力互为垂直的假设前提下,拟合-求导法的结果显示出了水平加速度的影响因素及其作用方式.考虑到沙粒形状的不规则性,未来的工作将从统计的角度反算出适用于风沙跃移运动的阻力系数 C_D 方程.

参考文献:

- [1] ANDERSON R S, HAFF P K. Simulation of aeolian saltation [J]. Science, 1988,5(241):820-823.
- [2] WANG Dawei, WANG Yuan, YANG Bin, et al. Statistical analysis of sand grain/bed collision process recorded by high-speed digital camera [J]. Sedimentology, 2007,55(2):461-470.
- [3] ZHANG Wei, KANG J H, LEE S J. Tracking of saltating sand trajectories over a flat surface embedded in an atmospheric boundary layer [J]. Geomorphology, 2007,86(3):322-331.
- [4] OHMI K, LI H Y. Particle-tracking velocimetry with new algorithms [J]. Meas Sci Technol, 2000,11(6):603-616.
- [5] SONG Xiangqun, YAMAMOTO F, IGUCHI M, et al. A new tracking algorithm of PIV and removal of spurious vectors using Delaunay tessellation [J]. Exp

Fluids, 1999,26(4):371-380.

[6] 张洋,王元,王大伟. DT-PTV 离散相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.

[7] 邱玉珺,邹学勇,张春来. 沙粒跃移轨迹参数的统计研究 [J]. 中国沙漠, 2005,25(4):577-580.

QIU Yujun, ZOU Xueyong, ZHANG Chunlai. Statistic study on trajectory parameters of saltating sand grains [J]. Journal of Desert Research, 2005,25(4):577-580.

[8] 郭烈锦. 两相与多相流动力学 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002:351-352.

[9] SAFFMAN P G. . The lift on a small sphere in a slow shear flow [J]. Fluid Mech, 1965,6(22):385-400.

[10] MEI R. An approximate expression for the shear lift force on a spherical particle at finite Reynolds number [J]. Int J Multiphase Flow, 1992,18(1):145-147.

[11] LUN C K K, LIU H S. Numerical simulation of dilute turbulent gas-solid flows in horizontal channels [J]. Int J Multiphase Flow, 1997,23(3):575-605.

[12] 杨保,邹学勇,王周龙,等. 气流中跃移颗粒的受力分析 [J]. 地理科学, 1999,19(5):475-478.

YANG Bao, ZOU Xueyong, WANG Zhoulong, et al. Mechanical analysis of a single saltating particle in air flow [J]. Scientia Geographica Sinica, 1999,19(5):475-478.

[13] 倪晋仁,李振山. 风沙两相流理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2006:11-14.

(编辑 苗凌 王焕雪)