

文章编号 :1000-2472(2008)03-0024-04

复杂流动下泥沙起动概率的图像测量*

刘春嵘^{1†},邓丽颖¹,呼和敖德²

(1. 湖南大学 力学与航空航天学院,湖南 长沙 410082;2. 中国科学院 力学研究所,北京 100080)

摘 要:提出了一种适合于复杂流动下泥沙起动概率的测量方法——图像测量法.该方法对床面上砂颗粒的运动图像进行采集,根据采集到的图像采用互相关算法计算出砂颗粒的运动速度,由砂颗粒运动速度得到泥沙的起动概率.采用该方法测量了槽道流动及后台阶流动 2 种情况下床面泥沙的起动概率.在槽道流动下,床面泥沙的起动概率随着床面剪应力的增大而增大.由本文测量方法得到的临界起动剪应力与希尔兹曲线所得到的结果相一致.在后台阶流动下,测量结果表明,再附点附近处泥沙的起动概率最大.这一结果能够解释在后台阶下游床面局部冲刷实验中发现的再附点附近冲刷最为严重的现象.

关键词:泥沙;起动概率;图像测量;局部冲刷

中图分类号:TV142

文献标识码:A

Image Measurement of the Probability of Sediment Incipience under Complex Flow

LIU Chun-rong^{1†}, DENG Li-ying¹, HU HE Ao-de²

(1. College of Mechanics and Aerospace, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A technique based on image process, which is suitable to measure the probability of sediment incipient under complex flow, was presented. The sediment motion image was grabbed and transformed to digital image. Base on the digital image, the cross correlation method was used to calculate the velocity of sediment particles. The probability of sediment incipience was obtained by the velocity of sediment particles. This technique was employed to measure the sediment incipience probability in two cases: the flow in the channel and the backward-facing step flow. In the case of flow in the channel, the sediment incipience probability increased with the bed shear stress. The critical incipient shear stress obtained by the presented method agreed with that obtained by Shields curve. In the case of backward-facing step flow, the maximum incipient probability was found near the reattachment point, which accounted for the phenomenon, in which the maximum depth of scouring hole appeared near the reattachment point in the experiment of the local scouring process at the downstream of backward-facing step.

Key words: sediment; incipience probability; image measurement; local scouring

泥沙起动问题是泥沙运动理论中最基本的问题之一,也是研究泥沙输运及局部冲刷时首先遇到的问题.其研究主要集中在起动流速和泥沙起动的统

计规律 2 方面的内容.目前,泥沙起动流速(或起动剪应力)的公式已有上百个,泥沙的起动流速和泥沙起动的标准有关.关于泥沙起动的标准有 2 种观点:

* 收稿日期:2007-10-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10602017)

作者简介:刘春嵘(1972-),男,广东顺德人,湖南大学副教授,博士后

†通讯联系人, E-mail:liucr@singhua.edu.cn

以输沙率作为泥沙的起动标准; 以起动概率作为泥沙起动的标准. Rijin^[1]提出的以输沙率作为泥沙起动标准的方法适用于槽道流动, 但不适用于复杂流动; 而以起动概率作为泥沙起动标准的方法既适用于槽道又适用于复杂流动. 研究工作者在这方面做了大量的研究^[2-5]. 但这些研究主要根据随机变量的分布规律间接地给出泥沙起动概率. 直接测量泥沙起动概率方面的研究目前尚不多见.

随着 CCD 摄像机技术的发展^[6], 应用图像技术进行定量测量成为可能. 本文根据床面上泥沙颗粒的运动图像, 采用互相关算法计算泥沙颗粒的运动速度, 从而得到泥沙的起动概率. 采用本文提出的方法对槽道流动及后台阶流动 2 种情况下床面泥沙的起动概率进行了测量. 并将槽道流动下的测量结果和希尔兹曲线得到的结果进行了比较. 将后台阶流动下的泥沙起动概率的空间分布规律与后台阶下游床面局部冲刷过程进行了比较.

1 实验设备及方法

1.1 实验设备

实验在循环玻璃水槽中进行, 水槽实验段长 5 m, 宽 0.3 m, 深 0.295 m. 实验时在水槽中间布置长 1 m, 宽 0.3 m, 深 0.02 m 的沙槽. 实验采用粒径为 0.1 mm 的均匀石英砂, 泥沙颗粒的密度 $\rho_s = 2\,500\text{ kg/m}^3$. 激光器安置在水槽的一侧, 激光束通过棱镜形成的水平片光与沙床表面相切. CCD 相机安置在水槽的正上方, 镜头轴线与水平面保持垂直以保证采集图像的质量. 为消除水面波动对图像采集的影响, 在水面上放置一水平玻璃以保证采集图像范围内水面的平稳. CCD 的采样频率为 25 Hz, 分辨率为 60 像素/mm, 曝光时间为 1/125 s, 图像采集板为加拿大的 Matrox Meteor-. 实验装置示意图见图 1 所示.

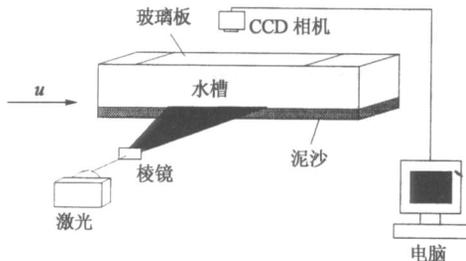


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 The sketch of the experiment apparatus

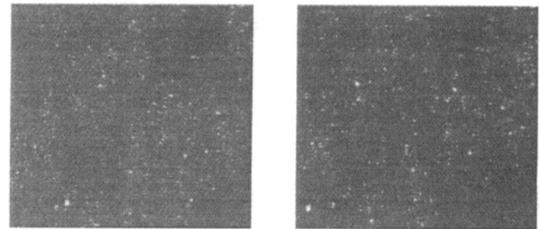
1.2 泥沙起动测量方法

本文实验的主要任务是测量不同流速情况下泥沙的起动概率. 根据采集到的图像进行粒子识别, 然

后计算泥沙颗粒的运动速度以判断泥沙颗粒是否起动. 实验步骤如下:

1) 图像采集. 泥沙颗粒在片光照射下形成的粒子图像经 CCD 摄像头由光信号转化为电信号进入图像采集板, 由采集软件控制图像板对图像进行采集. 图 2 是采集到的灰度图.

2) 粒子识别. 从图 2 可以看到被激光照亮的泥沙颗粒十分明显, 有大量泥沙颗粒起动. 为了更好地识别颗粒团, 并摒除噪音对图像产生的影响, 对采集到的灰度图首先进行二值化处理. 根据二值化处理后的图像采用连通域标记算法^[7], 得到同一泥沙颗粒图像所包含的所有像素点, 这就完成了粒子识别的过程.



(a) $T = 0\text{ s}$ (b) $T = 0.04\text{ s}$
图 2 床面泥沙颗粒灰度图

Fig. 2 The gray image of sediment particle on the bed

3) 泥沙起动概率计算. 本文根据泥沙颗粒运动速度的大小来判断泥沙是否起动. 计算泥沙颗粒运动速度的关键是诊断泥沙颗粒在曝光时间内的位移. 本文根据诊断泥沙颗粒所包含像素点的灰度值计算相关系数, 根据相关系数的最大值计算出泥沙颗粒的位移. 算法步骤如下: 假设图 2(a) 上某一泥沙颗粒中心的位置为 (I_c, J_c) . 根据流速估计泥沙颗粒运动的最大位移分别为: $I_{\max} = u_{\max} t / R_d$, $J_{\max} = u_{\max} t / R_d$. 其中, R_d 为实际尺寸转换为像素的比例因子. 得到搜索域范围: $- I_{\max} \leq I \leq I_{\max}$, $- J_{\max} \leq J \leq J_{\max}$.

根据下面公式计算相关系数:

$$R(I, J) = \frac{2 \iint g_1(I, J) g_2(I + I, J + J) dI dJ}{\iint g_1^2(I, J) dI dJ + \iint g_2^2(I + I, J + J) dI dJ}$$

其中, $g_1(I, J)$ 为图 2(a) 上的灰度值; $g_2(I, J)$ 为图 2(b) 上的灰度值; 为泥沙颗粒所包含的所有像素点的集合. 相关系数 $R(I, J)$ 最大值对应的 (I, J) 即为泥沙颗粒的位移. 根据同一粒子在两幅图像上的位移, 就可以计算得到泥沙颗粒的运动速度以判断它是否起动. 理论上, 当泥沙颗粒速度大于零时就视为起动. 为消除噪音的影响, 本文以泥沙颗粒

运动速度大于 1 mm/s 时为起动. 当泥沙颗粒运动速度很大时, 图 2(a) 上的泥沙颗粒在图 2(b) 上可能会消失, 这时无法采用互相关方法计算其运动速度. 但此时 $R(0,0)$ 值很小. 因此, 当 $R(0,0)$ 小于某一临界值 R_c 时, 泥沙颗粒可视为起动. 而 $R(0,0)$ 高于临界值 R_c 时, 则可采用互相关方法来计算泥沙颗粒的运动速度, 根据运动速度来判断其是否起动. 这样, 当 R_c 在某一范围内变化时, 其值的大小对泥沙起动概率的计算结果不会造成太大影响. 本文在 0~1 之间取了不同的 R_c 值对泥沙起动概率进行了计算, 发现当 R_c 在 0.4~0.8 之间变化时, 其值的大小对计算结果影响很小. 因此, 本文取 $R_c = 0.6$. 用起动泥沙颗粒的数目除以搜索到的泥沙颗粒的总数目就得到泥沙颗粒的起动概率.

1.3 流场速度测量

在本文的实验中, 流场的速度测量采用 DPTV 技术^[8]. 测量流速的具体参数为: 示踪粒子采用粒径为 40 μm 的花粉颗粒, 曝光时间为 0.008 s, 图像分辨率为 60 像素/mm.

2 实验结果

2.1 槽道冲刷实验

为了验证本文提出的概率测量方法, 采用该方法对槽道流动中不同流速下床面泥沙的起动概率进行了测量. 同时, 采用 DPTV 技术测量了垂直断面的流速剖面. 根据流速剖面, 采用对数律分布规律给出了床面的剪应力(或摩阻流速). 从而给出泥沙起动概率 P_c 和砂颗粒雷诺数 Re_* 的关系. 其中 $Re_* = U_* d / \nu$, U_* 为摩阻流速, d 为泥沙颗粒粒径, ν 为水的运动粘性系数. 进行了 4 组实验来验证实验的重复性.

图 3 给出了 4 组实验下泥沙起动概率 P_c 和泥沙颗粒雷诺数 Re_* 的关系. 由于影响泥沙起动的因素较多, 不同组次下的实验结果存在一些差别, 但总的趋势和量级上是相同的. 由图 3 可知, 对于所有组次, 随着床面剪应力的增加, 床面泥沙的起动概率都将增大. 不同 Re_* 下泥沙起动概率都大致可分为 3 种情况: 当 $Re_* < 0.8$ 时泥沙颗粒起动概率非常小, 可视为个别起动; $Re_* = 0.8 \sim 1.1$ 时泥沙颗粒起动概率开始增大, 可视为少量起动; 当 $Re_* > 1.1$ 时泥沙颗粒起动概率迅速增大, 可视为大量起动. 根据窦国仁^[9]的分析, 克雷默提出的 3 种推移质运动状态分别相当于 3 个不同的起动概率 P_c : 个别起动: $P_{c1} = 0.00135$; 少量起动: $P_{c2} =$

0.0227; 大量起动: $P_{c3} = 0.159$. 图 3 中的结果和窦国仁分析所得的结果基本吻合. 对图 3 中的数据进行分析, 可知少量起动情况下对应的泥沙颗粒雷诺数大约为 $Re_* = 0.8 \sim 1.1$; 摩阻流速大约为 $U_* = 0.008 \sim 0.011$ m/s; 临界起动剪应力大约为 $\tau_c = 0.064 \sim 0.121$ Pa 之间. 从而可得到希尔兹数 $\tau_c / (\rho_s - \rho) d = 0.043 \sim 0.08$. 与希尔兹曲线^[10]中对应的点基本吻合

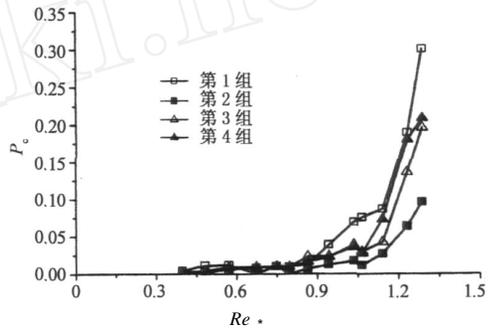


图 3 槽道流动下泥沙起动概率

Fig. 3 The probability of sediment incipience in the channel

2.2 后台阶冲刷实验

为了将本文提出的概率测量方法应用到复杂的流动情况, 采用后台阶流动作为模型, 测量后台阶下游床面泥沙的起动概率. 后台阶流动是指在槽道上游放置一台阶后, 在台阶下游所形成的流动. 该几何模型虽然简单, 但具有流动分离、再附、三维涡系结构及其与床面的相互作用等复杂流动特征. 因此, 在该模型中的研究成果有望推广到其他复杂流动中. 流动模型的示意图见图 4. 在本文的实验中台阶高度 $D = 2.5$ cm. 在 3 种来流速度情况下, 对后台阶下游不同位置的泥沙起动概率进行图像测量. 同一流速下, 进行 4 组实验.

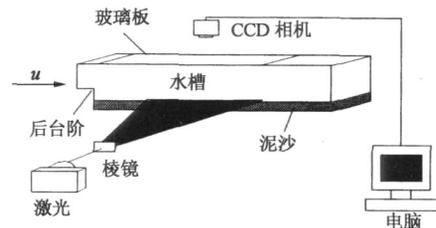


图 4 后台阶流动下起动概率测量示意图

Fig. 4 The sketch of incipience probability measurement in the backward facing step flow

图 5 给出了来流速度分别为 0.15, 0.20 和 0.25 m/s 时, 台阶下游不同位置处床面泥沙的起动概率. 图中 x 表示下游距台阶的距离. 由图 5 可知, 无论流速怎样变化, 在同一流速下的 4 组实验结果

在总的趋势和量级上都是相同的. 当来流速度较低时(流速分别为 0.15 m/s, 0.20 m/s), 床面泥沙起动概率的最大值大约在台阶下游距台阶 6 倍台阶高度附近. 而当来流速度较高时(流速为 0.25 m/s), 床面泥沙起动概率的最大值大约在台阶下游距台阶 4~6 倍台阶高度附近. 根据以往人们对后台阶下游流动结构的大量研究^[11,12]可知, 当流动雷诺数大于 5 000 后, 再附点的位置基本上在 6 倍台阶高度的附近, 在再附点附近存在大尺度流动结构的振荡行为. 随着流动雷诺数增大, 大尺度流动结构的振荡范围

会向上游延展. 由于大尺度流动结构的振荡, 导致了床面附近湍流强度大大增加. 因此, 在再附点附近泥沙起动概率出现了最大值. 对于来流速度较高的情况, 由于大尺度流动结构振荡范围会向上游延展, 导致了再附点上游泥沙起动概率也出现了很高的值.

根据刘春嵘^[12]后台阶下游床面局部冲刷过程的实验结果可知, 再附点附近冲刷最为严重, 最大冲刷深度位置在再附点附近. 这一现象和本文给出的再附点附近泥沙起动概率最大的测量结果相对应.

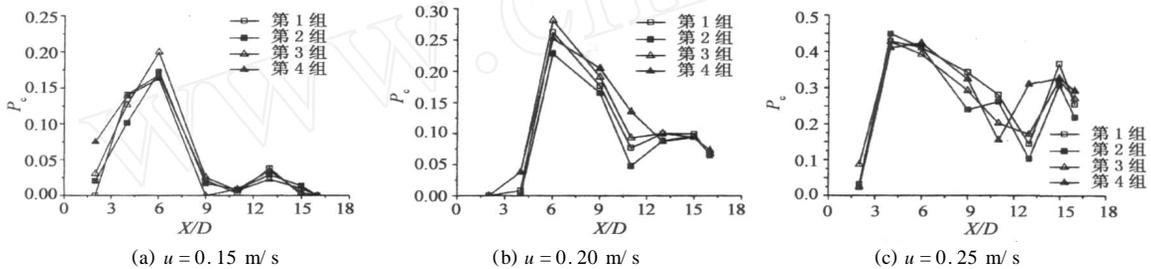


图 5 后台阶下游泥沙起动概率图

Fig. 5 The sediment incipient probability at the downstream of the backward facing step

3 结 论

本文提出一种测量泥沙起动概率方法——图像测量法. 在槽道冲刷实验中应用该方法所得到的泥沙起动概率和窦国仁提出的克雷默 3 种泥沙运动强度相应的起动概率基本一致, 在少量起动情况下对应的起动条件和希尔兹曲线中对应的点也基本吻合. 采用该方法对后台阶下游的泥沙起动概率进行测量, 根据测量结果可知再附点附近的冲刷最为严重. 证明了这种测量泥沙起动概率的方法是可行的.

该方法目前只适用于床面形状比较平坦的泥沙起动概率的测量.

参考文献

[1] RIJIN L C V. Sediment transport, part III: bed forms and alluvial roughness[J]. Hydr Engrg, ASCE, 1984, 110(12): 1733 - 1754.
 [2] EINSTEIN H A. The bed-load function for sediment transportation in open channel flows[R]. Washington DC, US: Department Agriculture Technical Bulletin, 1950.
 [3] GESSLER J. Critical shear stress for sediment mixtures[C]// Proceedings of the 14th Congress, IAHR. Paris: [s. n.], 1971, 3: 1 - 8.
 [4] 韩其为, 何明民. 泥沙运动统计理论[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
 HAN Q W, HE M M. The theory of sediment motion's statistical[M]. Beijing: Science Press, 1984. (In Chinese)

[5] 罗飞路, 傅恩锡. CCD 摄像机内外部参数快速准确的标定方法[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 1997, 24(2): 71 - 74.
 LUO F L, FU E X. A fast and accurate calibration method of intrinsic and extrinsic parameters of CCD cameras[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 1997, 24(2): 71 - 74. (In Chinese)
 [6] KESHAVARZY A, BALL J E. An application of image processing in the study of sediment motion[J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(4): 559 - 576.
 [7] 王煦法, 庄镇泉, 王东生. C 语言图像处理程序设计[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 1994: 98 - 103.
 WANG X F, ZHUANG Z Q, WANG D S. Image processing designed by C programming language[M]. Beijing: China Science and Technology University Press, 1994: 98 - 103. (In Chinese)
 [8] LIU C R, TAO L B. Two-dimensional digital particle tracking velocimetry algorithm based on the image of particle trace[J]. Journal of Coastal Research, 2007(S150): 415 - 419.
 [9] 窦国仁. 再论泥沙起动流速[J]. 泥沙研究, 1999(6): 1 - 9.
 DOU G R. Incipient motion of coarse and fine sediment[J]. Journal of Sediment Research, 1999(6): 1 - 9. (In Chinese)
 [10] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 247.
 QIAN N, WAN Z H. Sediment motion mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 247. (In Chinese)
 [11] LE H, MOIN P, KIM J. Direct numerical simulation of turbulent flow over a backward-facing step[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 330: 349 - 374.
 [12] 刘春嵘. 复杂流动下底床局部冲刷实验和数值模拟研究[D]. 北京: 中国科学院力学研究所, 2003.
 LIU C R. The experimental and numerical study of local bed scour in the case of complex flows[D]. Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2003. (In Chinese)