

河流水面成像测速中的水流示踪物综述

张 振, 徐立中, 王慧斌

(河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 211100)

摘要:系统地综述了河流水面成像测速中可利用的水流示踪物,重点分析了天然漂浮物和天然水面模式的生成机理、适用条件及示踪性能,讨论了人工示踪粒子选择及布撒方式,指出天然水面模式产生的本质原因是明渠紊流,当流速大于一定阈值并且河床满足一定条件时就会发生。天然示踪方式特别适合于高洪期测流,是大尺度粒子图像测速在现场环境下应用推广的发展趋势;在受控条件下开展示踪物的示踪性能分析和精度评定是未来研究的主要工作。

关键词:河流水面成像测速;水流示踪物;天然漂浮物;天然水面模式;人工示踪粒子;示踪性能;综述

中图分类号:P335 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)03-0081-08

Review of natural flow tracers for river surface imaging velocimetry//ZHANG Zhen, XU Lizhong, WANG Huibin (College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The available flow tracers for river surface imaging velocimetry were reviewed systematically. Generation mechanism, application conditions, and tracing performance of natural floating objects and natural free-surface patterns were analyzed. The selection and distribution methods of artificial tracer particles is discussed in this paper. It can be concluded that natural free-surface patterns occur because of the turbulent flows in open channels. The natural free-surface pattern occurs when the velocity is greater than a certain threshold, and the river bed meets a certain condition. A natural tracer method that particularly fits flow measurement during high-flood seasons and times is the trend in development of application of large-scale particle image velocimetry (LSPIV) in the field. Performance analysis and accuracy evaluation of flow tracers under controlled conditions are the main areas of research for the future.

Key words: river surface imaging velocimetry; flow tracers; natural floating objects; natural free-surface patterns; artificial tracer particles; tracing performance; review

大尺度粒子图像测速 (large-scale particle image velocimetry, LSPIV) 是一种基于图像的河流水面成像测速技术^[1],是实验室环境下的粒子图像测速 (particle image velocimetry, PIV) 技术^[2]在大尺度现场环境下的扩展,它假设水流示踪物紧密跟随待测水面流场中的局部流体,采用统计识别的方法匹配无畸变连续图像中包含示踪物的分析区域,估计区域的平均运动矢量,进而实现水面流场的定量表示及可视化^[3],如图1所示。由于该技术融合了数字图像处理、模式识别及摄影测量等多学科领域的成果,相比现有的视频浮标跟踪法^[4],它可以利用可视性和稳定性较差、但分布更均匀的天然漂浮物及水面模式作为水流示踪物;其瞬时全场流速测量能力不仅可用于常规条件下天然河流紊动特性及时均特性的研究^[5],其非接触特性更使之具有极端条件

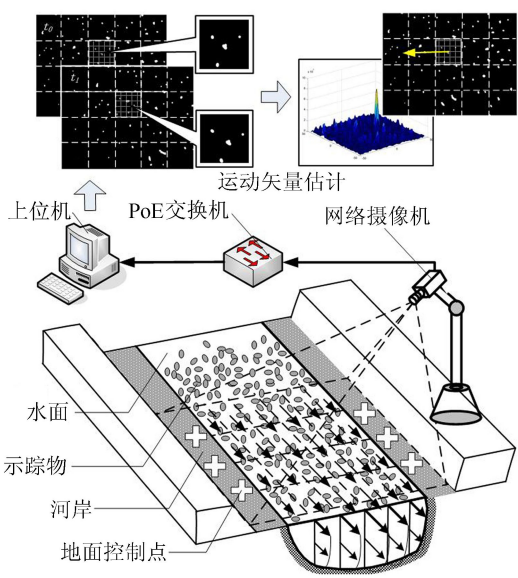


图1 LSPIV 原理示意图

下流速、流量监测的应用潜力^[6]。

从原理上看,河流水面成像测速方法完全依赖于水流示踪物的可见性、跟随性及分布情况,因此精确、稳定的测量必须建立在对水流示踪物的生成机理和物化特性具有深刻理解的基础上。然而,河流水面成像测速中可利用的水流示踪物显著区别于面向体流动测量^[7]以及面向河工模型水面流动测量^[8]的人工示踪粒子,大致可分为天然漂浮物、天然水面模式及人工示踪粒子3类,其中前两种天然示踪物的种类繁多、特性各异,其存在性取决于河段周围的环境和河床的水力条件。尽管近年来部分LSPIV的现场试验已通过流量比测等手段间接验证了天然示踪的可行性,但研究大多针对具体测验河段介绍河流水面的表现现象,关于明渠紊流形成水面模式的机理尚不明朗,针对复杂流态下垂线流速分布的研究尚不深入。本文系统地总结河流水面成像测速中水流示踪物的类型、生成机理和物化特性,进而评述其示踪性能及应用条件,以便指导测验河段及时段的选取。

1 天然漂浮物

河流畅流期的漂浮物种类繁多,主要受上游两岸植被及人为因素的影响。山区河流中较为常见的漂浮物有树枝、树叶等植物碎片;流经农村的河流中漂浮物以水稻、玉米、小麦等作物的秸秆和杂草垛为主;而流经城市的河流中经常出现木板、塑料瓶、泡沫塑料制品等生活垃圾以及油污、有机废水形成的表面活性物质。

河流凌汛期的漂浮物以流冰为主,包括漂浮在水面流动的水内冰、棉冰、冰珠、冰屑及薄冰等。我国的凌汛多发于北方河流,特别是黄河上游从宁夏到内蒙的河套段和下游山东入海段。凌汛期的流凌过程可分为春季淌凌和秋季淌凌两种:①秋季淌凌发生于河流的结冰过程。当气温下降至0℃以下时,水面蒸发的水分子在空气中形成凝结核后落回水面,由于河流的紊动作用,在水面和水下的过冷却水处产生冰晶体并结成多孔而不透明的海绵状冰团,称为水内冰;在河底附着的称为底冰,悬浮状态的冰屑称为冰花,其数量由水面向河底递减。随着水内冰的体积不断增大,底冰上浮至水面,与河面冰花顺流而下形成淌凌。②春季淌凌发生于河流的解冻过程。在气温回升至0℃以后,河岸土壤吸热较冰层多,沿岸冰层首先消融,出现自由水面,如果上游来水温度较高,会加速冰盖下部融化,由于水流或大风作用,产生冰层滑动,甚至断裂,脱岸的碎冰顺流而下形成淌凌。

上述天然漂浮物往往导致流速仪法等传统接触式方法无法施测或出现较大误差,但对浮标法及图像法等非接触式方法而言却是有利的。由于可以直接采用目视的方式观察和定位,可用于浮标法高洪流量测验^[9]和冰流量测验^[10]。Bradley等^[11]以水面树叶作为示踪物采用LSPIV技术测量了浅水(<0.2 m)、低流速(<0.2 m/s)山溪性河流的表面流速,如图2所示,并以此作为水力学模型的输入,通过运动学原理求出三维流场用于流量估计,和流速仪比测的标准差为6.4%。Jasek等^[12]以水面流冰为示踪物测量了加拿大Yukon河凌汛期的冰流量,其结果和基于一维冰塞剖面模型的数值模拟结果相吻合。然而需要注意的是,和标准人工浮标相比,天然漂浮物的可视性较差,特征不明显,在图像中往往表现为弱小目标。对此,张振等^[13]认为可以利用漂浮物和水体间光谱反射率的差异,采用近红外成像的方式抑制水面光学噪声,增强目标和水体背景间的亮度对比,如图3所示。

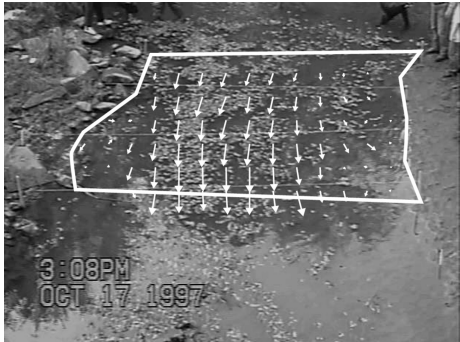


图2 天然漂浮物的流场示踪结果



(a) 全光谱波段



(b) 近红外波段

图3 近红外成像的水面目标增强

2 天然水面模式

气-水界面是天然河流和人工渠道中流体运动的基本边界形式之一,受明渠水力条件和刮风、降雨等气象条件的影响,在水流的自由表面通常可以观察到更为一般的表观模式,即天然水面模式。

2.1 泡漩模式

泡漩模式主要由水流的折冲现象产生。有泡必有漩,这是河段中流态紊乱的共生规律。泡漩分泡水和漩水两种。泡水是一种由水底向水面翻涌犹如锅中沸水的水流。如图 4 所示,当河底的局部高速水流在其紊动流动过程中遇到障碍物阻挡或受底流受阻后的折冲水流反击时,水流就会急速上涌,冲破水面时阵发性地出现泡水。泡水中心的压力与强度均大于四周,因此水面向上隆起,水流向四周成辐射状滚出,形似泡花。漩水是一种中心水面凹陷、中心流速大于回流边缘流速的竖轴环流。当两股水流以不同流向汇流形成的分界面发生波动时,压力分布发生变化形成旋转力偶,使其附近的部分水体转动,随着旋转速度的逐渐增加,中心水面逐渐低凹呈现出漏斗状。泡漩产生初期的作用范围较小,在跟随底层水流向下游移动的过程中其形态逐渐增大、强度逐渐减弱直至消散。在此过程中,水面发生形变并形成杂乱的镜面反射模式为水流示踪提供了信息。

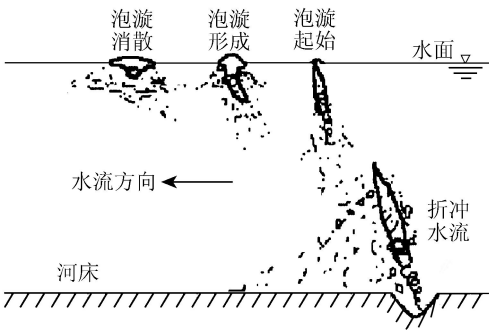


图 4 泡漩模式的形成过程

泡漩模式多发于流量大、水流急、河谷窄深、河槽纵横断面变化急剧的河流,特别是具有复杂多变的石质河床边界的山区河段,图 5 为岷江都江堰河

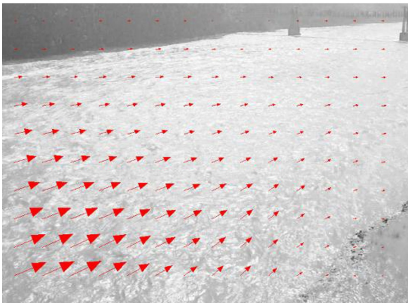


图 5 泡漩模式的流场示踪结果

段的泡漩模式流场示踪结果。高速水流的急剧转向和相应的降速升压作用是形成泡漩的根本原因,因此,流速、水深与河床形态是形成泡漩的基本因素。一般水深大于 2 m、流速大于 2 m/s 才会出现泡漩;流速越高、河床地形变化越急剧,形成泡漩的强度也越大^[14]。Fujita 等^[15]以高速水流与河床相互作用产生的波纹及泡漩模式作为水面天然示踪物,绘制出了日本 Shin 河决堤时的水面流速分布图。

2.2 漩滚模式

漩滚模式主要由水流的水跃现象产生。水跃是明渠水流从急流状态过渡到缓流状态时发生的水面破碎、跃起的局部水力现象。水跃区的水流可分为上下两部分,如图 6 所示:上部是急流冲入缓流所激起的表面漩滚,漩滚体不断从水面裹挟大量气泡进入水中,而旋转的水流质点在上下部交界面处,又不断被水流主体带走,同时从水流主体末端再得到水质点的补充,促使旋转继续进行;下部为主流,是一个水深不断增加的扩散体,在扩散体的某一位置,水质点可穿越临界水深进入上部。在发生水跃的突变过程中,水流内部产生强烈的摩擦混掺作用并消耗大量的机械能,因而流速急剧下降,水流很快转化为缓流状态。

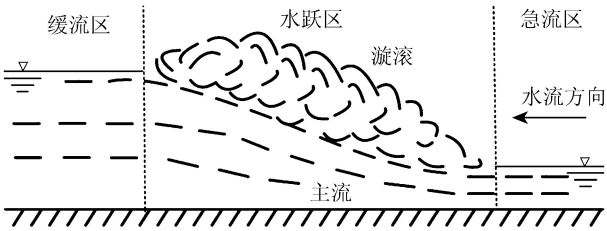
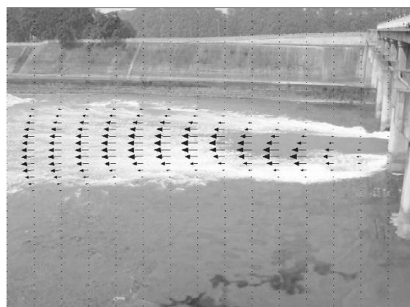


图 6 漩滚模式的形成过程

由于水跃的消能效果较好,常常被用作闸、坝等泄水建筑物下游水流衔接的一种有效消能方式^[16]。如图 7 所示,上游的闸孔出流受到下游平坡渠道中缓流的顶托作用,在主流的上部形成表面漩滚。漩滚体由于饱掺空气而呈白色,和周围的水体形成对比,起到水流示踪的作用。

2.3 泡沫模式

泡沫模式主要由水流的水跌现象产生。水跌是明渠水流流经跌坎处时,由缓流状态过渡到急流状态所形成的水面急骤降落的局部水力现象。它一般发生在明渠纵向边界突然降低的地段,如泄流闸坝、瀑布等。以图 8 为例,水闸上游为缓坡明渠,水流为均匀流,其水深大于临界水深;由于闸前、闸后存在水位落差而使阻力减小,上游水流在重力作用下以水舌形式自由泻落,并剪切下游气-水界面产生水面破碎从而把空气卷吸带入水中,该过程被称为强迫掺气;水中气泡在“助泡剂”的促进作用下,在水面形成大量跟随水流运动的白色泡沫。

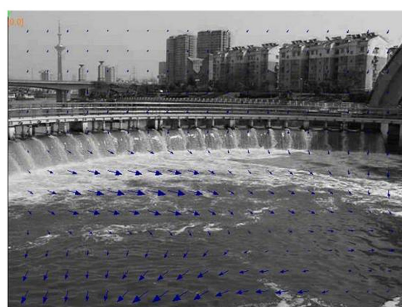


(a) 闸孔出流形成的水跃(上游)

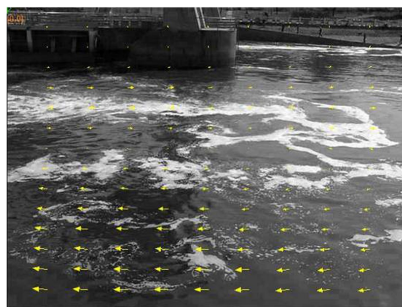


(b) 闸下平坡渠道形成的水跃(下游)

图 7 漩滚模式的流场示踪结果



(a) 水坝泄流形成的水跃(上游)



(b) 水跃掺气形成的泡沫(下游)

图 9 泡沫模式的流场示踪结果

用良好的河流,可以通过主动近红外成像的方式增强水中跟随水流运动的微小颗粒,如图 11 所示。

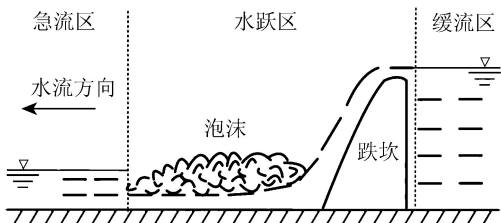


图 8 泡沫模式的形成过程

泡沫是一群漂浮在液面上的具有很薄表面的气泡聚集体,是表面张力、黏度和悬浮固体相互作用的产物。水中气泡的存在是泡沫形成的充分条件,而气泡的稳定性则是泡沫形成的必要条件,二者缺一不可^[17]。清水中的气泡上逸至水面后,由于表面张力和大气压强的作用,立刻就会溃灭;但在特定条件时,可以增强气泡的稳定性,延长溃灭时间。图 9 为南京市外秦淮河三汊河口闸河段的泡沫模式流场示踪结果,由于流经城区并汇入长江,水体中含有较高浓度的悬浮物及表面活性物质,为泡沫的形成和维持创造了条件。Creutin 等^[18]以测流断面上游产生的天然泡沫作为天然示踪物,通过对比 LSPIV 的测量值和 USGS 提供的流量和平均流速的历史数据验证了泡沫模式的有效性。

2.4 悬移质云团模式

悬移质云团是指在紊流作用下远离床面并以悬浮方式进行搬运的一群具有相似运动特性的碎屑物,通常包括泥沙颗粒及胶质物等。图 10 为含沙量不同的两条河流交汇形成的悬移质云团模式,表现出“泾渭分明”的水体颜色差异。由于悬浮泥沙在近红外波段的反射率远大于清洁水体,对于混合作



图 10 河流交汇处的悬移质云团模式

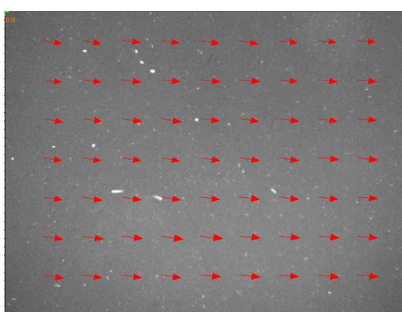


图 11 悬移质云团模式的流场示踪结果

悬移质云团的产生和水流的猝发现象存在着密切联系,主要表现在:①当流速增大到一定程度时猝发现象必然发生,并且随着雷诺数的增大,紊流猝发现象也相应地增强,表现为群喷现象的增多、无量纲猝发周期的延长,以及喷射和清扫尺度的增大^[19];②河床上泥沙颗粒的起动与雷诺应力的峰值相对应,取决于形成清扫冲击的决定性水流^[20];③猝发紊动是维持泥沙悬浮运动的主要能量来源^[21];④水

面近区悬移质的垂向瞬时速度出现较大幅度的脉动,并在时间上表现出高度的相关性^[22]。

2.5 表面波模式

表面波模式主要由大气及结构物对水体自由表面的扰动产生。当静止水面受扰后,水质点将偏离平衡位置并在惯性、重力和表面张力的作用下发生振动,在水面附近的一个薄层内形成厚度远小于波长的机械波,称为表面波^[23]。

2.5.1 风生表面波

当微风作用于水面时,水面上的轻微凹凸将引起风压分布的不一致,使得局部水面受压产生波动形成毛细波,如图 12 和图 13 所示。风生毛细波的波长较短,一般从几毫米到几厘米;波高较小,波脊圆滑,波谷尖锐;当波速远小于流速时其影响可以忽略,故而能够作为有效的水流示踪物。随着风速的加大,风的能量可以借助于气流和水面的摩擦作用直接施加在毛细波的迎风坡上,促使波长和波高增大变成重力波。风生重力波的波长从几厘米到几分米;外形不对称,迎风面缓、背风面陡,波脊较长^[24]。大尺度的风生重力波受水平剪切气流的影响较大,因此当风力的影响不可忽略而又无法获得确切的水面风速、风向信息时,风生重力波就变成了一种干扰模式。

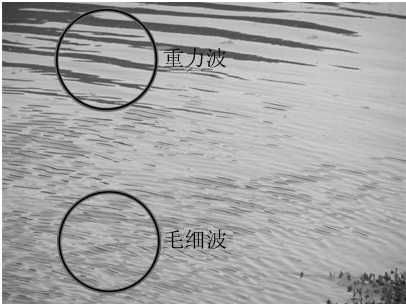


图 12 风生表面波模式

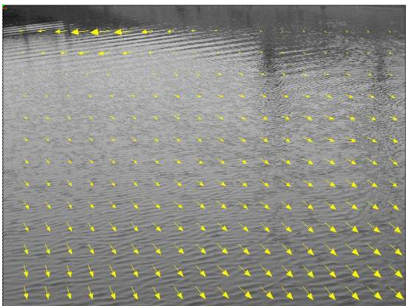


图 13 风生表面波模式的流场示踪结果

2.5.2 雨生表面波

当单滴雨滴在重力作用下自由落体并撞击水面时,在水面形成以落点为圆心向外扩散的辐射状同心圆表面波。雨生表面波的波长和振幅均在毫米至厘米量级,取决于雨滴的大小和入水速度,属于毛细波或毛细重力波^[25];波面曲率很大,能够反射大部

分阳光辐射,加之雨滴作用于水体的垂向和切向应力产生的气泡及飞沫,在短小时内形成区域独有的纹理特征。在图 14 所示的自然条件下,由于风场和重力的作用,雨滴会对运动水流的自由表面产生水平和垂直方向上的动量和质量输入,产生形变的椭圆状表面波。随着降雨强度的稳定,大量雨滴形成的表面波相互干涉呈现出局部纹理杂乱但整体运动特征规则的水面模式。

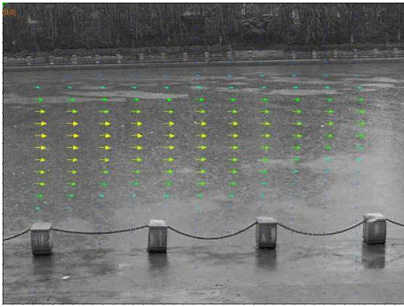


图 14 雨生表面波模式的流场示踪结果

2.5.3 尾迹表面波

当大桥桥墩、立管等结构物穿透水体的自由表面时,由于物体表面的黏性效应,形成的绕流将产生明显的波动现象,进而在下游形成尾迹表面波模式,如图 15 所示。以圆柱绕流为例,在圆柱前驻点的流体质点速度减小至零,动能转化为势能,在正压力的作用下,前驻点的自由表面逐渐升高;而在圆柱背压区,流场的压力到达最大负压,圆柱背部的自由液面明显下降,达到一定深度,形成漏斗状。Graf 等^[26]在模型试验中观测到,在下游距离桥墩 10 倍水深的区域,水流将恢复到正常的对数流速分布。基于该准则,Bechle 等^[27]在桥墩下游大约 500 m 处设点(水深 5 m),利用上游持续产生的尾迹表面波测量了完整涨潮、落潮过程的水面流场和河口流量,如图 16 所示。和浮标法相比,水面流速测量的平均偏差为 0.021 m/s,标准差为 0.07 m/s,而 LSPIV 和 ADCP 的偏差为 0.005 m/s,验证了尾迹表面波作为有效示踪物的假设。



图 15 尾迹表面波模式

需要注意的是:在静水条件下,表面波的传播只是波动形状的传播,水质点本身并不向前移动,而是

在平衡位置的周围做圆周运动。在研究表面波模式作为天然水面示踪物时,为了便于分析而又抓住主要矛盾,假定表面波在不可压缩的理想流体表面运动,水体内的摩擦可以忽略并且只考虑横波,这和电波流速仪利用水面波动测速原理相似。此外,从图 16 可以看出,远场的表面波模式比近场的更为明显,说明选择合适的拍摄倾角和照明条件可以增强水面的镜面反射,而小角度拍摄反而有利于提高表面波模式的可见性,这与水体介质的折射率和二向性反射密切相关^[28]。



图 16 尾迹表面波模式的流场示踪结果

表 1 比较了各种天然水面模式的水力现象、生成条件及示踪性能。

表 1 天然水面模式的水力现象、生成条件及示踪性能					
水面模式	水力现象	生成条件	跟随性	可见性	均匀性
泡 漩	折 冲	河床陡急	★★	★★	★★
漩 滚	水 跃	闸坝出流	★	★★★	★★
泡 沫	水 跌	水面落差	★★	★★★	★★
悬移质云团	猝 发	高 流 速	★★★	★	★★
表面波	毛细波	风雨、桥墩	★★	★★	★★★

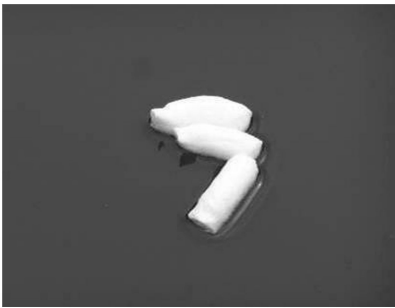
3 人工示踪粒子

天然示踪物的出现通常是随机且不稳定的,特别是在低流速条件下,要么缺乏上述天然漂浮物或水面模式,要么跟随性和可见性难以保证,此时可以采用布撒人工粒子的方式进行补充以获得较为理想的水流示踪效果。

3.1 示踪粒子选择

河流水面成像测速中的人工示踪粒子除了和传统 PIV 中的示踪粒子一样应满足跟随性、可见性以及布撒均匀性和浓度的要求之外,还应当具备以下特点:①环保性。作为饮用水源地的重要组成部分,许多河渠对水质有很高要求,严禁向水体投放会对水源造成污染的腐蚀性及有毒性物质或像泡沫塑料等难于降解的白色垃圾。②低成本。传统 PIV 的示踪粒子普遍存在价格昂贵的问题,根据丹麦 DANTEC 公司的报价,即使最便宜的空心玻璃球每 100 g 的售价也在 300 元左右;而相比实验室水槽和河工模型,向天然河流中投放的人工示踪粒子几乎不可能回收

进行循环利用,因此示踪粒子必须廉价易得。一种用作填充缓冲材料的生物基发泡粒已被证明可用于河工模型及天然河流下的水面成像测速^[29]。生物基发泡粒由 99% 的玉米淀粉制成,是一种生物可降解的天然高分子环保材料,废弃后在自然环境中可自行降解,亦可作安全焚烧处理;由于淀粉的水溶性,这种发泡粒投放于水中 1 min 左右就开始逐渐溶解,如图 17 所示,因此不会对水体和生态环境造成污染;吸水后其密度与水流的密度相近,能够满足跟随性的要求,而部分浸没于水中亦可减轻风力干扰引起的复杂度;其形状近似为直径 15 mm、长度 50 mm 的圆柱形,白色的粒子能与深色水体形成较强的亮度对比,从而满足成像可见性要求;淀粉作为一种可再生资源,其来源丰富、价格低廉,加之加工技术成熟、产品化程度高,生物基发泡粒每 100 g 的单价仅在 2 元左右,目前在欧美发达国家的物流运输中得到了广泛应用,国内也逐渐开始普及。鉴于上述优点,生物基发泡粒是一种可用于河流水面成像测速的理想人工示踪粒子。



(a) 入水状态



(b) 溶解状态

图 17 生物基发泡粒的水溶过程

3.2 示踪粒子布撒

现场条件下示踪粒子的布撒和实验室条件下大不相同,除了断面较窄(一般在 20 m 以下)的渠道和溪流,一般很难保证大范围流动区域内粒子布撒的均匀性,对此研究人员进行了各种尝试,如图 18 所示,布撒方法包括:①测船布撒^[30]。在动船法测流时通过测船向拍摄区域人工投放示踪粒子。该方法需要人工涉水操作,费时费力,主要用于浅水湿地的测流。②过河悬索布撒^[31]。在待测断面上游的两



(a) 测船布撒



(b) 过河悬索布撒



(c) 纸屑喷射机布撒

图 18 人工示踪粒子的布撒方法

岸间连接一根与峡谷穿越法类似的过河悬索,将内部装填示踪粒子的滑动容器固定在悬索上,由两岸的操作人员拉拽绳索控制容器的往复运动,进而通过底部的漏斗将粒子布撒于横跨河流断面的水面,条带状分布的粒子顺流而下通过待测断面。该方法需要预先布设悬索,操作过程至少需要两人配合,适用于无法进行涉水测量的高洪期测流。③纸屑喷射机布撒^[30]。在河岸架设一台鼓风机并通过物料斗向其提供碎纸屑形成一套纸屑喷射机。机器仅需单人操作,喷射距离远且方向可控,使得粒子分布较为均匀,同样适用于发泡粒等轻质材料。

4 结 语

综上所述,在河流水面成像测速可利用的水流示踪物中,天然漂浮物可以直接采用目视的方式观察和定位,有利于测量结果的校验,因此具有较高的可信度;大多数天然水面模式产生的本质原因是明渠紊流,当流速大于一定阈值并且河床满足一定条件时就会发生,因此特别适合于高洪期测流;人工示踪粒子具有稳定的示踪性能,适合在浅水低流速条件下作为天然示踪物的补充,但现有布撒方式普遍存在自动化程度低、费时费力的问题,难以长期连续监测。目前河流水面成像测速的示踪方式正从布撒人工粒子向有效利用天然漂浮物和水面模式转变,可以说天然示踪是 LSPIV 在现场环境下应用推广的必然趋势。

实际测流中通常会同时包含多种天然漂浮物和水面模式,使得示踪物的浓度更高、分布更均匀,而水面表现也更加复杂。这些天然模式可能存在自身的振荡、扩散及形变运动,加之模式出现的短时性和随机性,使得人眼难以稳定、连续地捕获,必须依赖鲁棒的图像分析技术才能达到测速目的。此外,由于拟序结构的复杂性和河道水流条件的多样性,当前对明渠紊流的认识尚不成熟,研究上述流态下的明渠流速分布规律,准确建立水面模式和底层水流间的流速关系也是提高河流水面成像测速精度的关键。未来的研究工作将在受控条件下开展示踪物的

示踪性能分析和精度评定,并通过分析水面光学成像中目标、背景和噪声的光谱特性及偏振特性,建立一套完善的河流水面成像测速工作模式,避免 LSPIV 在现场应用的复杂性,

参考文献:

- [1] MUSTE M, FUJITA I, HAUET A. Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments [J]. Water Resources Research, 2008, 44, W00D19.
- [2] 王龙,李丹勋,王兴奎. 高帧频明渠紊流粒子图像测速系统的研制与应用 [J]. 水利学报, 2008, 39(7): 781-787. (WANG Long, LI Danxun, WANG Xingkui. High frame frequency particle image velocimetry for experimental study of open channel turbulent flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(7): 781-787. (in Chinese))
- [3] 张振,严锡君,樊棠怀,等. 近红外成像的便携式大尺度粒子图像测速仪 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(12): 2840-2850. (ZHANG Zhen, YAN Xijun, FAN Tanghui, et al. Portable large-scale particle image velocimeter based on NIR imaging [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(12): 2840-2850. (in Chinese))
- [4] 江杰,李刚. PTV 技术在河流流速测量中的实验研究 [J]. 水文, 2011, 31(6): 44-47. (JIANG Jie, LI Gang. Experimental research on river flow velocity measurement using PTV technology [J]. Journal of China Hydrology, 2011, 31(6): 44-47. (in Chinese))
- [5] HAUET A, KRUGER A, KRAJEWSKI W F, et al. Experimental system for real-time discharge estimation using an image-based method [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(2): 105-110.
- [6] Le COZ J, HAUET A, PIERREFEU G, et al. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers [J]. Journal of Hydrology, 2010, 394(1): 42-52.
- [7] 唐立模,禹明忠,刘春晶,等. 三维粒子示踪测速技术的开发及初步应用 [J]. 水利学报, 2006, 37(11): 1378-1383. (TANG Limo, YU Mingzhong, LIU Chunjing, et al. The development and elementary application of 3-D

- particle tracking velocimetry [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(11): 1378-1383. (in Chinese))
- [8] TANG Hongwu, CHEN Cheng, CHEN Hong, et al. An improved PTV system for large-scale physical river model [J]. Journal of Hydrodynamics, 2008, 20(6): 669-678.
- [9] 高斌, 张伟, 张春成. 天然漂浮物施测高洪流量测验方法[J]. 水利天地, 2008(12): 38-39. (GAO Bin, ZHANG Wei, ZHANG Chunheng. Measuring high flow with natural floating objects [J]. Hydraulic World, 2008(12): 38-39. (in Chinese))
- [10] 王联合, 黄开玲. 冬季河流冰流量测验初探[J]. 吉林水利, 2012(10): 43-46. (WANG Lianhe, HUANG Kailin. Discussion on the ice flow test in winter rivers [J]. Jilin Hydraulic, 2012(10): 43-46. (in Chinese))
- [11] BRADLEY A A, KRUGER A, MESELHE E A, et al. Flow measurement in streams using video imagery [J]. Water Resources Research, 2002, 38(12): 1315-1323.
- [12] JASEK M, MUSTE M, ETTEMA R, et al. LSPIV and numerical-model estimation of Yukon River discharge during an ice jam near Dawson [C]//DOERING J L. Proceedings of the 10th Workshop on River Ice, Winnipeg: Manitoba, 1999: 223-235.
- [13] ZHANG Zhen, WANG Xin, FAN Tanghui, et al. River surface target enhancement and background suppression for unseeded LSPIV [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2013, 30: 99-111.
- [14] 张秀芳. 泡漩水形成机理研究[D]. 重庆: 重庆交通学院, 2003.
- [15] FUJITA I, HINO T. Unseeded and seeded PIV measurements of river flows videotaped from a helicopter [J]. Journal of Visualization, 2003, 6(3): 245-252.
- [16] 袁新明, 毛根海, 吴寿荣, 等. 闸后水跃水流的数值模拟[J]. 水利学报, 1999(5): 44-48. (YUAN Xinming, MAO Genghai, WU Shourong, et al. The numerical simulation of hydraulic jump downstream of the sluices [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999(5): 44-48. (in Chinese))
- [17] 邱静, 黄本胜. 泡沫成因分析及污染治理工程措施研究[J]. 广东水利水电, 2002(5): 26-27. (QIU Jing, HUANG Bensheng. Analysis of the causes of foam and study of engineering measures for pollution control [J]. Guangdong Water Resources and Hydropower, 2002(5): 26-27. (in Chinese))
- [18] CREUTIN J D, MUSTE M, BRADLEY A A, et al. River gauging using PIV techniques: a proof of concept experiment on the Iowa River [J]. Journal of Hydrology, 2003, 277(3): 182-194.
- [19] 毛野, 杨华, 袁新明, 等. 平底光面明渠中紊流猝发的特性研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2002, 17(4): 413-421. (MAO Ye, YANG Hua, YUAN Xinming, et al. Characteristics of turbulent bursting phenomenon in open channel with a flat and smooth bottom [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2002, 17(4): 413-421. (in Chinese))
- [20] 牛军宜. 非均匀沙起动、沙垄演化及其相应湍流动力特性实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- [21] 艾克达 S, 阿舍达 T. 沙坡河床的泥沙悬浮[J]. 华水科技情报, 1984(3): 63-73. (AIKEDSA S, ASHEDA T. Sediment suspension in shoal riverbed [J]. Information of Chinese Water Science and Technology, 1984(3): 63-73. (in Chinese))
- [22] 王双峰, 贾复, 王晋军. 剪切水-气界面下湍流猝发特征的实验研究[J]. 力学学报, 2005, 37(2): 129-134. (WANG Shuangfeng, JIA Fu, WANG Jinjun. Experimental investigation of the bursting characteristics under sheared air-water interface [J]. Acta Mechanica Sinica, 2005, 37(2): 129-134. (in Chinese))
- [23] 朱峰. 液体表面特性的光学可视化[D]. 西安: 陕西师范大学, 2008.
- [24] ZHANG Xin. Observations on waveforms of capillary and gravity-capillary waves [J]. European Journal of Mechanics B/Fluids, 1999, 18(3): 373-388.
- [25] 李明明. 降雨对表面波结构影响的实验研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [26] GRAF W H, ISTIARTO I. Flow pattern in the scour hole around a cylinder [J]. Journal of hydraulic Research, 2002, 40(1): 13-20.
- [27] BECHLE A J, WU Chin H, LIU Wencheng, et al. Development and application of an automated river-estuary discharge imaging system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138(4): 327-339.
- [28] 季耿善, 杨静, 傅江, 等. 水体遥感的镜面反射特性研究[J]. 遥感学报, 1994, 9(3): 195-202. (JI Gengshan, YANG Jing, FU Jiang, et al. A study of remote sensing on water body mirror reflection [J]. Journal of Remote Sensing, 1994, 9(3): 195-202. (in Chinese))
- [29] MUSTE M, XIONG Z, SCHÖNE J, et al. Validation and extension of image velocimetry capabilities for flow diagnostics in hydraulic modeling [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 130(3): 175-185.
- [30] HO H C, MUSTE M, GONZALEZ-CASTRO J A, et al. Lessons learned from use of large-scale particle image velocimetry in shallow-, low-velocity flows and floods [C]//33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment. Vancouver: Canadian Society for Civil Engineering, 2009: 612-619.
- [31] JODEAU M, HAUET A, PAQUIER A, et al. Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions [J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2008, 19(2): 117-127.

(收稿日期: 2013-04-25 编辑: 熊水斌)