

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.015

多时距 PIV 技术在复杂流场测量中的应用

周安骐,徐振山,陈雨航,陈永平

(河海大学港口海岸与近海工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:采用一种多时间间距适配(多时距)的粒子图像测速(PIV)技术对静水与横流环境下的垂向圆管射流流场进行测量,对比分析了多时距 PIV 技术测量结果的可靠性,探究了静水与横流环境下垂向圆管射流的运动特性。结果表明,多时距 PIV 技术得到的测量结果能够精确反映射流在静水和横流环境中的时均特征和紊动特征,且其精度明显优于传统 PIV 技术所得到的测量结果。研究发现,多时距 PIV 技术可既方便又精准地测量视窗内速度变化大的流场。

关键词:流场测量;粒子图像测速技术;时间间距;射流

中图分类号:TV132+.1

文献标志码:A

文章编号:1000-1980(2023)02-0114-08

Application of multi time-interval PIV technique in complex flow field measurement

ZHOU Anqi, XU Zhenshan, CHEN Yuhang, CHEN Yongping

(College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A particle image velocimetry (PIV) technique with the adaptation of multi time-interval was used to measure the flow field of vertical round jet in still water and cross-flow environments. The reliability of measurement results of the multi time-interval PIV technique was compared and analyzed, and the motion characteristics of the vertical round jet were studied. The results show that the measurement results obtained by the multi time-interval PIV technique can accurately reflect the time-averaged and turbulent characteristics of the jet in still water and cross-flow environments, and its accuracy is significantly better than that of the traditional PIV technique. This study found that the multi time-interval PIV technique can conveniently and accurately measure the flow field with large velocity variation in the viewing window.

Key words: flow field measurement; particle image velocimetry; time interval; jet

水体运动是自然界最普遍的现象之一,并直接影响河流海洋中的其他物理或生化过程。由于水体本身剪切作用或固边界的存在,水体的流速梯度发生变化、紊动变强。复杂流场的高精度测量对于准确刻画水体运动过程及运动规律至关重要,是研究水体相关现象,如污染物的扩散输运、近底泥沙的起动落淤、桥梁护岸的冲刷侵蚀等的基础和前提^[1-2]。

受量测手段的限制,早期流速测量研究往往局限于局部、逐点、时均量的探讨;随着量测技术水平提高,量测内容逐渐从局部到整体、从单点到多点、从稳态到瞬态发展^[3]。目前常用的流速测量方法和仪器有:激光多普勒测速仪(laser doppler velocimeter, LDV)、声学多普勒测速仪(acoustic doppler velocimeter, ADV)、小威龙剖面流速仪(vectrino profiler)和粒子图像测速(particle image velocimetry, PIV)技术等。其中,LDV 和 ADV 是单点量测仪器;小威龙剖面流速仪属于多点测量的流速仪,可以实现流场的准同步测量,且得到数据的时均量和紊动量都较为准确^[4-8];PIV 技术则可以实现流场的实时全场测量和分析^[9-10]。ADV 和小威龙剖面流速仪均为接触式测量仪器,会对流场产生一定干扰,LDV 和 PIV 属于非接触式测量仪器(技术),不会对流场产生干扰。综合来看,PIV 技术是目前最为先进的全场测量手段。

基金项目:国家自然科学基金(51979076);中央高校基本科研业务费专项(B200202057)

作者简介:周安骐(1998—),男,硕士研究生,主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail:201303020056@hhu.edu.cn

通信作者:徐振山(1988—),男,副教授,博士,主要从事河口海岸水动力环境研究。E-mail:zsxu2006@hhu.edu.cn

引用本文:周安骐,徐振山,陈雨航,等.多时距 PIV 技术在复杂流场测量中的应用[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(2):114-121.

ZHOU Anqi, XU Zhenshan, CHEN Yuhang, et al. Application of multi time-interval PIV technique in complex flow field measurement [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(2): 114-121.

1984 年,Adrian^[11]首次提出了粒子图像测速(PIV)技术,并认为可以将其应用于流体流场的测量中。PIV 技术是一种非接触、瞬时、动态、全流场的速度场测量技术,可测量低速到高速的速度场。PIV 技术的测量原理为将激光束经过组合透镜扩展成片光照明流场,使用数字相机以一定的时间间距拍摄被照亮的流场,捕捉流场中的微粒运动,结合 PIV 配套后处理软件,对粒子图像进行互相关计算,得到流场一个切面内的定量速度分布。随着 PIV 技术的逐渐成熟,该测量技术得到了应用和发展^[12-20]。

姜国强等^[12]利用 PIV 技术对横流环境中的湍射流进行了研究,PIV 系统采用了脉冲激光器与同步 CCD 相机,得到了横流环境中湍射流的流动特性和涡结构。吴剑等^[13]应用 PIV 技术研究了横流中近壁水平圆柱绕流旋涡特性,其 PIV 系统主要由双脉冲激光器和同步 CCD 相机组成,后处理软件采用 Tecplot 9.0,得到了具有一定精度的结果。Nebuchinov 等^[14-15]同样使用双脉冲激光器和同步 CCD 相机组成了 PIV 系统,分别对冲击射流近壁面的流场和水汽两相剪切流进行研究。上述传统的 PIV 技术拍摄时间间距往往固定不变,同时拍摄的最大频率不够高。当视窗范围内流速变化较大时,如翼尖涡流动、射流运动、近底边界层的水流运动、水体分层导致的剪切流等,局部的测量结果精度不高。

近年来,随着激光技术、相机技术和计算机技术的发展,出现了以连续激光器与高速相机作为硬件构成的 PIV 系统。Hsieh 等^[21]基于上述系统,采用多时间间距适配(多时距)方法对平面边界涡激振动作用下圆柱绕流的流场进行了测量分析,对比了不同采样频率与不同时间间距下 PIV 技术测量获得的流场特性,得到了高精度的速度场、湍流特性、涡特性、间隙流速度以及边界上的法向应力和剪应力。该技术在测量有较大流速变化的流场方面有极大优势,然而这种多时距 PIV 技术在国内流速测量方面还鲜有报道。本文采用多时距 PIV 技术对静水以及横流环境下的射流流场进行测量,分析测量结果,并阐明该技术的关键点和优势,为相关试验测量提供借鉴。

1 多时距 PIV 技术原理

PIV 技术是一种具有高空间分辨率的测量方法,并且对流场不会产生干扰,主要设备包括激光器、相机以及计算机等。传统 PIV 技术的原理是测量前在待测流场中散布一定数量的示踪粒子,示踪粒子需要满足随流运动的特性以便准确反映流场的情况。在 t_1 时刻用高强度激光照亮需要测量的流场剖面,通过专用的同步相机对该剖面内的粒子图像进行拍摄,经过一定的时间间距之后在 t_2 时刻再次用激光照亮该剖面,同时第二次拍摄该剖面内的粒子图像,最后利用配套的图像处理技术捕捉前后两帧图像上的粒子,通过粒子的位移 Δs 和两帧图像之间的时间间距计算粒子的移动速度,即其所在位置的流场速度^[21],如图 1(a)(c)所示。其公式如下:

$$u = \frac{\Delta s}{t_2 - t_1} \tag{1}$$

式中 u 为粒子移动速度,cm/s。

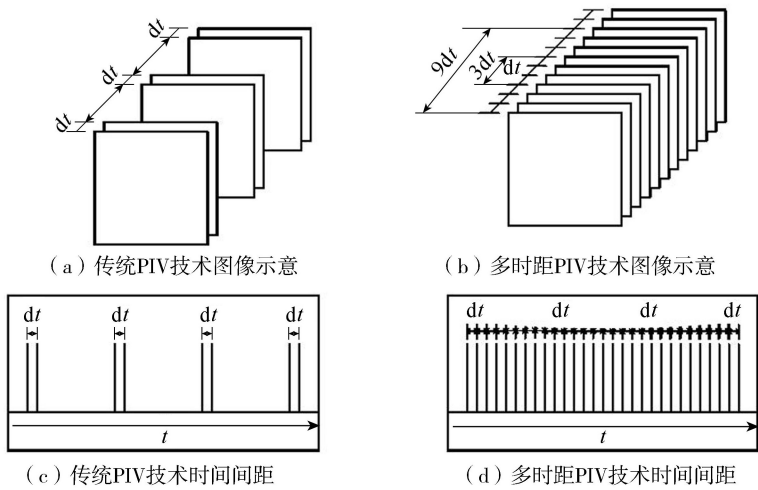


图 1 传统 PIV 技术与多时距 PIV 技术及时间间距对比

Fig. 1 Time interval of the traditional PIV technique and the multi time-interval PIV technique

如图1(b)(d)所示,多时距 PIV 技术是在传统 PIV 技术的基础上,针对传统 PIV 技术的不足进行改进得到的。多时距 PIV 技术采用高速相机和连续波激光器替代传统 PIV 技术所采用的同步相机和脉冲激光器,以此来提高图像的采样率,增大数据的详细程度。此外,采用滤波器结合遮罩的方式消除传统 PIV 技术固体边界周围泛光现象导致的数据误差,提高局部数据的精度。关键是多时距 PIV 技术采用了多时间间距适配计算,而传统 PIV 技术采用的是单一不变的时间间距,即用同一个时间间距对视窗内所有粒子的位移进行计算从而得到流场。射流运动出口处由于紊动剧烈,流速变化很大,而对于射流末端,流动趋于平静,流速变化很小,如采用同一时间间距,必然会导致最后结果精度不足。多时距 PIV 技术可以针对不同区域粒子的运动特征匹配不同的时间间距($1dt$ 、 $3dt$ 、 $9dt$ 、 $21dt$, dt 为相邻两张照片之间的时间间距)来计算粒子的运动速度,对于流速大的区域采用较小的时间间距,对于流速小的区域则采用较大的时间间距,最大程度减小误差。

2 试验装置及方案

试验在河海大学港航工程实验室的波流综合水槽中进行,试验装置如图2所示。该水槽整体由水泥基底加钢架结构组成,水槽两侧均为透明钢化玻璃。水槽总长度为46.0 m,宽度为0.5 m,高度为1.0 m,圆形垂直射流口内径为1 cm,距离底部约10 cm。射流源是放置在高架上距离地面3 m的恒定水箱,电子流量计可以控制射流口处的流量。对于测量区域共设置4个视窗,均以射流出口为零点,静水射流组次测量上下共2个视窗,横流射流组次测量上下左右共4个视窗。试验采用奥林巴斯(Olympus)公司生产的I-SPEEDTR 高速相机,满画幅时拍摄速度可达2000 fps,分辨率为1280×1024,最高拍摄速度为10000 fps,具有采样频率大、分辨率高的特征。激光器为MGL-W-532型固体激光器。拍摄时高速相机工作频率为500 Hz(即 $dt=2\text{ ms}$),每个组次拍摄不少于10 s。

试验共设计了1组静水条件和1组横流条件下的垂向圆管射流试验,组次及参数设置见表1。

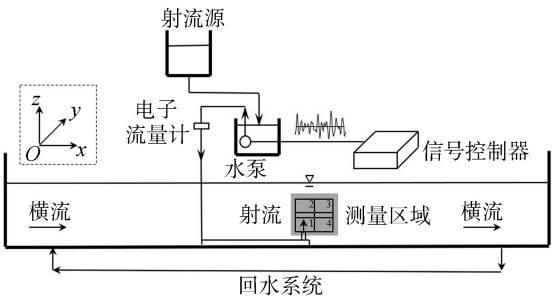


图2 试验水槽示意图
Fig.2 Schematic map of the experimental tank

表1 试验组次参数				
Table 1 Parameters of experimental groups				
组次	初始流量/ ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	初始速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	射流 水深/cm	横流流速/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
JS01	38.5	49	50	0
HL01	26.7	34	50	5

3 试验结果与分析

3.1 静水环境中射流

静水环境中垂向圆管射流的理论已经较为成熟。在射流体内部与外部任取一点,分析其紊动能量与频率之间的关系,如图3所示,图中纵坐标为紊动能量按时间序列进行傅里叶变换之后的能量 E_u 。蓝色线代表紊动能量的分布,红色线代表 $-5/3$ 次幂的关系线,可见JS01组次的射流紊动能量与频率的关系符合 $-5/3$ 次幂,说明该试验的紊动计算方法合理,数据结果可信。

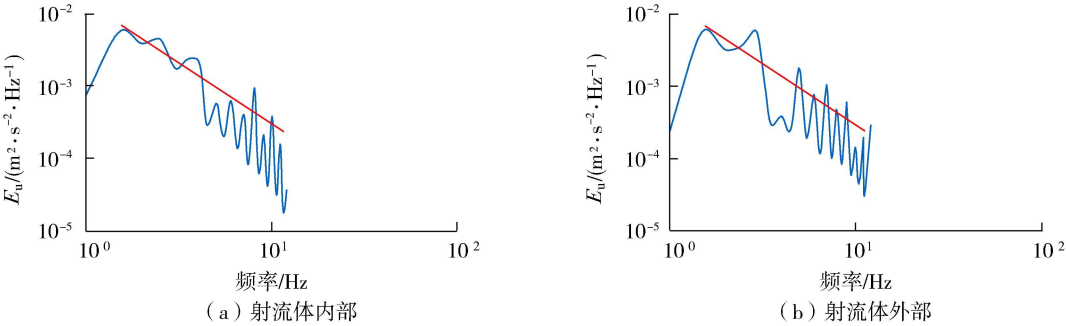


图3 JS01组次射流紊动能量与频率关系
Fig.3 Relationship between jet turbulence energy and frequency in JS01

对于静水环境中射流的轴线速度分布,选取 Kwon 等^[22]采用传统 PIV 技术得到的试验数据、徐振山^[23]采用声学多普勒测速仪(ADV)得到的试验数据以及 Lee 等^[24]的经典理论结果进行对比。Lee 等^[24]的经典理论公式为

$$\frac{w_c}{w_0} = 6.2 \left(\frac{z}{D} \right)^{-1} \quad (z/D > 6.2) \tag{2}$$

式中: w_c 为射流轴线速度; w_0 为射流初始速度; z 为轴线方向的距离; D 为射流喷口的管径。

图 4 为 JS01 组次的射流轴线速度分布图。由图 4 可知,静水环境中垂向圆管射流的轴线速度沿程衰减,三者数据以及经典理论结果在整体上符合较好。其中 Kwon 等^[22]的数据在 $10 < z/D < 25$ 的范围与其他三者基本一致,而在 $z/D > 25$ 与 $z/D < 10$ 的范围出现了较大偏差。可能原因是传统 PIV 技术只能采用单一的时间间距进行处理,准确测量射流运动的某一段,而对于其他部分由于时间间距不合适,得到的结果产生了较大偏差。值得注意的是,Kwon 等^[22]采用传统 PIV 技术并未给出 $0 < z/D < 5$ 范围的速度,可能是相机所支持的拍摄频率过小,而此处射流运动速度过快,很难计算该处的射流速度。多时距 PIV 技术采用拍摄频率较高的高速相机,对于流动速度快的区域也能进行拍摄处理,因此能够完整给出射流的运动速度分布;在数据处理时根据示踪粒子的速度自动适配不同的时间间距,因此结果的精度较高,与 ADV 得到的试验数据整体上一致。

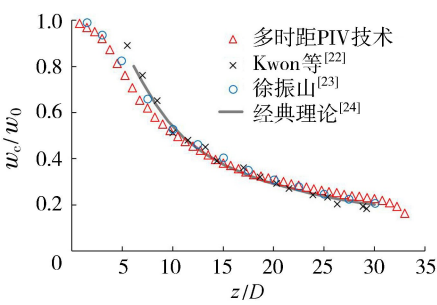


图 4 JS01 组次射流轴线速度分布
Fig. 4 Distribution of jet velocity along centerline in JS01

紊动强度是描述水体掺混程度的物理量,紊动强度的数值越高,说明该部分水体的掺混越剧烈。图 5 为多时距 PIV 技术处理的 JS01 组次射流断面水平方向和垂直方向的紊动强度分布。图 5 中 u' 为射流水平方向的紊动速度, w' 为射流垂直方向的紊动速度, x 为射流水平方向的距离。对于静水射流水平方向的紊动,选取 $z/D=25, 35$ 两个断面的数据,由图 5(a) 可见,紊动强度呈抛物线型分布,在轴线处达到最大值并与 Hussein 等^[25]的试验数据吻合;对于静水射流垂直方向上的紊动,同样选取 $z/D=25, 35$ 两个断面的数据,由图 5(b) 可见,紊动强度大致呈双峰型分布。

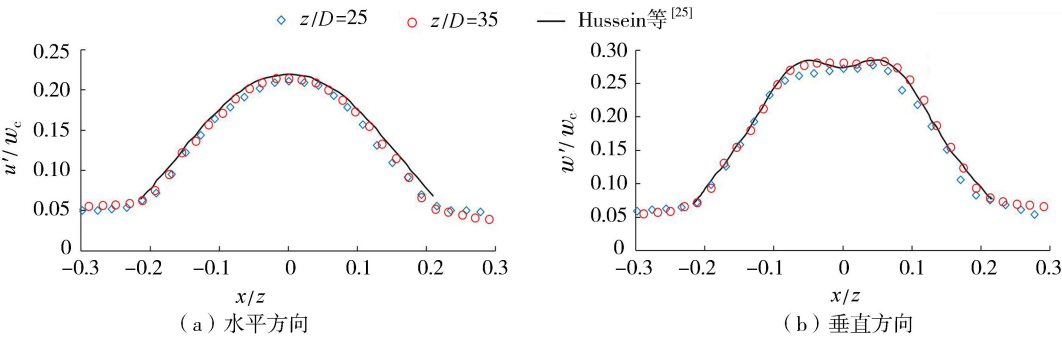


图 5 多时距 PIV 技术 JS01 组次射流断面紊动强度分布

Fig. 5 Distribution of turbulence intensity in the cross section of JS01 with the multi time-interval PIV technique

图 6 为多时距 PIV 技术 JS01 组次射流断面雷诺应力分布,选取 $z/D=25, 35$ 两个断面的数据。雷诺应力沿射流轴线成反对称分布,在射流轴线两侧取极大值和极小值,与 Hussein 等^[25]的试验曲线结果一致。

图 7 为多时距 PIV 技术处理的 JS01 组次射流水平方向和垂直方向的紊动强度分布场。从图 7 可以看出,静水环境中圆管射流的水平方向与垂直方向紊动强度近似呈以射流轴线为中心线的对称分布,紊动强度的最大值出现在射流出口的两侧,说明该处水体的

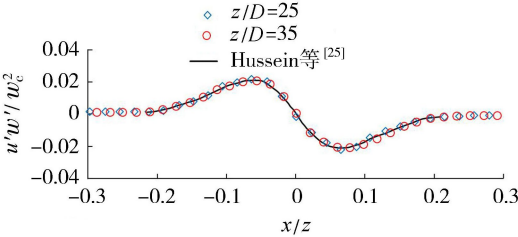


图 6 JS01 组次射流断面雷诺应力分布
Fig. 6 Distribution of Reynolds stress in the cross section of JS01

掺混程度最剧烈;随着射流的发展,紊动强度逐渐减小。图 8 为多时距 PIV 处理的 JS01 组次射流雷诺应力分布场。由图 8 可以明显看出静水环境中圆管射流的射流雷诺应力在射流轴线的两侧成反对称分布,在 $x/D<0$ 时取正值,在 $x/D>0$ 时取负值。

3.2 横流环境中射流

相比于静水射流,横流环境中射流的运动更为复杂,其对称面上的流场如图 9 所示。视窗内既存在流速较大的区域(0.34 m/s,射流口附近),也存在流速较小的区域(0.03 m/s,射流背流侧的红圈内),多时距 PIV 技术可以精确解析上述流速。从图 9 可以看出,在横流环境下射流的背流侧出现了一个源点,这与 New 等^[26]的试验结果一致。其形成原因为:垂向射流在初始阶段动量衰减较少,能够基本保持自身特性,对横流有一定的阻挡作用,因此一部分水流绕过射流体从两侧流向源点,再从源点出发向四周发散。多时距 PIV 技术能够清晰地反映这一复杂流态下的物理现象。

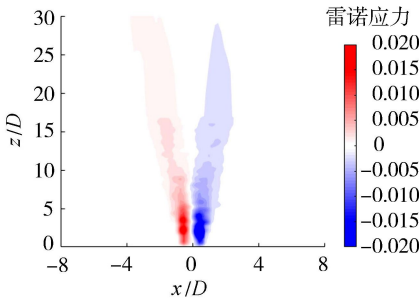


图 8 JS01 组次射流雷诺应力分布场
Fig. 8 Distribution of Reynolds stress field of JS01

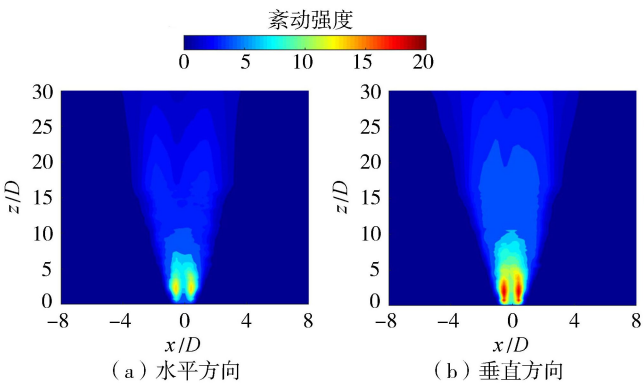


图 7 JS01 组次射流紊动强度分布场
Fig. 7 Distribution of turbulence intensity field of JS01

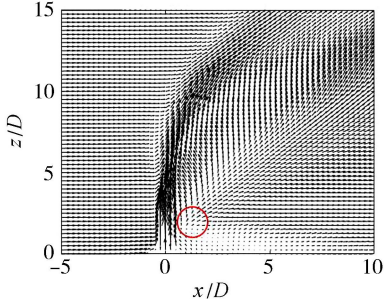


图 9 HL01 组次射流速度矢量场
Fig. 9 Velocity vector field of HL01

图 10 为多时距 PIV 技术 HL01 组次射流不同采样间距断面流速分布对比。试验中高速相机的拍摄频率为 500 Hz,即 $dt=2\text{ ms}$ 。图 10 中 $1dt$ 代表该组每两幅图像之间的时间间距为 2 ms,在多时距 PIV 技术进行

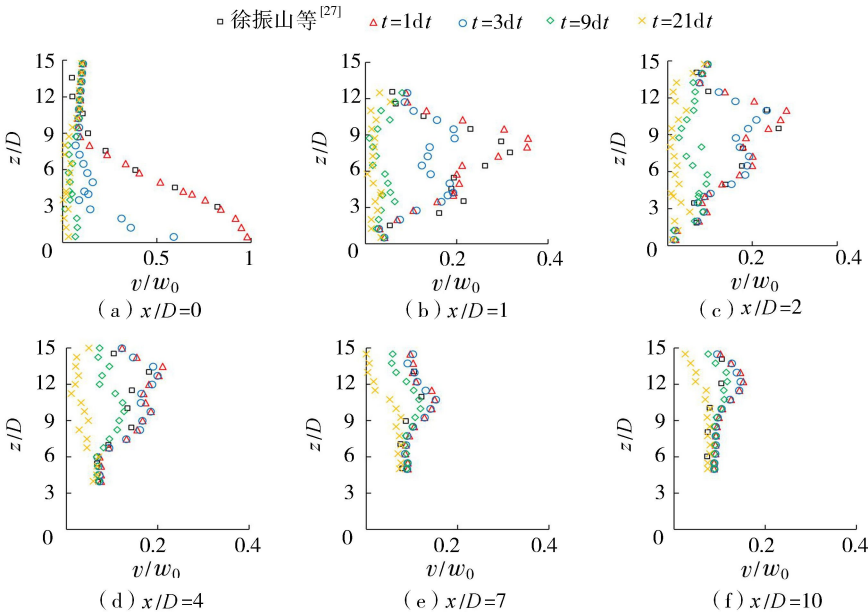


图 10 HL01 组次射流不同采样间距断面流速分布对比

Fig. 10 Comparison of velocity distributions in the cross section of HL01 at different sampling intervals

处理时,会根据图像中粒子的运动情况为其匹配相应的时间间距(2 ms、6 ms、18 ms、42 ms)进行计算。3dt 代表该组每两幅图像之间的时间间距为 6 ms,在多时距 PIV 技术进行处理时,会根据图像中粒子的运动情况为其匹配相应的时间间距(6 ms、18 ms、54 ms、126 ms)进行计算,以此类推。同时选取徐振山等^[27]采用 ADV 测量的相同工况试验数据进行对比, v 为射流运动的合成速度。

在 $x/D=0$ 和 $x/D=1$ 两个断面,采样间距为 1dt 的结果显著优于其余 3 个。 $x/D=0$ 和 $x/D=1$ 两个断面的射流流速较大,需要较小的时间间距,1dt 可以匹配 2 ms 的时间间距,其他组次能匹配的最小时间间距分别为 6 ms、18 ms 及 42 ms。在 $x/D=0$ 断面,当 $z/D>9$ 时,几种采样间距的结果基本一致,这是因为该处已远离射流体,流体运动速度不大,所以较大的时间间距也能满足精度要求。

在 $x/D=2$ 和 $x/D=4$ 两个断面,采样间距为 1dt 和 3dt 的结果显著优于其余两个,这两个断面处的流速相较于 $x/D=0$ 和 $x/D=1$ 两个断面小,匹配的相应时间间距则需增大,1dt 和 3dt 组次都能匹配到合适的时间间距。在 $x/D=4$ 断面上, $3<z/D<6$ 的区域已经处于射流体的边缘,流速相对较小,9dt 和 21dt 组次也能匹配到合适的时间间距来满足精度要求。

在 $x/D=7$ 和 $x/D=10$ 两个断面,1dt、3dt 和 9dt 的组次都和 ADV 试验结果符合,这两个断面的流速相较于 $x/D=0$ 、1、2、4 断面进一步降低,适配的时间间距则进一步增大;当 $z/D<9$ 时,该处的流速相较于同断面其他区域的流速要小很多,21dt 的组次也能匹配到合适的时间间距。

从图 10 中还可以发现,采样间距为 1dt 的组次在各个断面的结果均保持较高的精度,与徐振山等^[27]采用 ADV 获取的试验数据符合良好。这是因为多时距 PIV 技术能够根据图像中示踪粒子的运动状态为其匹配最适合的时间间距,1dt 的采样间距能够匹配 2 ms、6 ms、18 ms、42 ms 的时间间距,时间间距跨度大,就基本能够在流场速度范围内满足测量结果的精度要求,并不需要像传统 PIV 技术那样统筹考虑全流场的流速来选取时间间距,只需要 1 倍的 dt 以满足流场中最大的流速测量要求即可,其他偏小的流速可以用 3 倍、9 倍及 21 倍的 dt 去自动适配。对于复杂流态的流场,流速横跨范围大,传统 PIV 技术的单一时间间距只能在一定范围内满足测量精度要求,而多时距 PIV 技术则可以满足全流场的测量精度要求。

为了进一步定量分析不同采样间距流场测量结果的精度,计算不同采样间距流场测量结果与徐振山等^[27]采用 ADV 测量结果之间的百分比误差,见表 2。由表 2 可见,采样间距为 1dt 的组次在各个断面均能达到较高的精度,采样间距为 3dt 的组次在 $x/D=2$ 之后的断面上也能达到较高的精度,而采样间距为 21dt 的组次在各个断面上的精度均较差,但相比于 $x/D=0$ 、1 断面, $x/D=7$ 、10 断面的精度已经有了较大提升。

同时,定量比较了不同速度区间不同采样间距的测量结果精度(表 3)。在高速区域($v/w_0>0.2$)时,1dt 的采样间距相比于 3dt、9dt 以及 21dt 有着极高的精度,而在低速区域($v/w_0<0.1$),1dt、3dt 以及 9dt 组次都有着不错的精度,21dt 组次的精度仍然较差,但相比于在高速区域的精度已经有了很大的提升。由此可见,多时距 PIV 技术能够使复杂流态流场的高速区域和低速区域均得到高精度的测量。

表 2 HL01 组次射流不同采样间距流场
测量误差

Table 2 The error of flow field
measurement of HL01 at
different sampling intervals

t/dt	误差/%					
	$x/D=0$	$x/D=1$	$x/D=2$	$x/D=4$	$x/D=7$	$x/D=10$
1	2.75	5.33	3.45	4.50	3.92	4.20
3	37.64	21.54	5.72	4.58	3.97	4.15
9	49.37	53.72	29.88	18.93	5.17	3.65
21	51.68	63.88	43.69	42.49	22.46	16.72

表 3 HL01 组次射流不同速度区间和
采样间距流场测量误差

Table 3 Percentage error of flow field measurement
in different speed ranges of HL01 at
different sampling intervals

t/dt	误差/%		
	$v/w_0>0.5$	$0.2<v/w_0\leq 0.5$	$v/w_0<0.1$
1	1.54	3.98	3.90
3	55.71	31.42	3.47
9	76.29	68.70	3.97
21	79.28	72.54	7.67

图 11 为多时距 PIV 技术 HL01 组次射流不同采样间距断面流速结果汇总。将图 10 中所有数据点汇总,以 1dt 组次的数据为基准降序整理。从图 11 可以发现,当 $v/w_0>0.2$ 时,只有采样间距为 1dt 的组次能满足精度;当 $0.1<v/w_0<0.2$ 时,3dt 的组次也逐渐能够满足精度。随着 v/w_0 的继续减小,9dt 的组次也开始能够在一定程度上满足精度。采样间距为 21dt 的组次由于只能匹配到 42 ms、126 ms、378 ms、882 ms 的时间间距,对于视窗内绝大多数粒子的运动状态而言,时间间距过大,因此其结果精度最差。

图 12 为多时距 PIV 技术 HL01 组次射流垂直方向紊动强度分布场。从图 12 可以发现,紊动强度的最大值集中在射流出口附近,并随着射流的发展,紊动强度逐渐减弱。就射流的各个横断面而言,紊动强度整体呈现峰状分布,相比于背流面附近的紊动强度,靠近横流来向迎流面附近的紊动强度总体较大。图 13 为多时距 PIV 技术 HL01 组次射流雷诺应力分布场。与图 12 类似,雷诺应力绝对值的峰值也要偏向迎流面,横流与射流体在此处发生了更为剧烈的掺混。结果表明,多时距 PIV 技术可既方便又精准地测量射流视窗内速度变化大的流场。

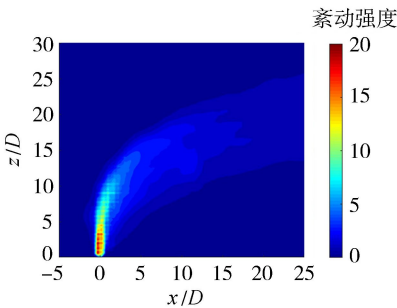


图 12 HL01 组次射流垂直方向紊动强度分布场
Fig. 12 Distribution of vertical turbulence intensity field of HL01

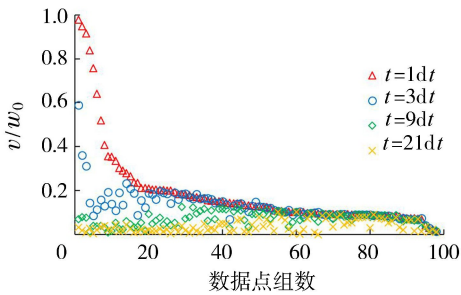


图 11 HL01 组次射流不同采样间距断面流速结果
Fig. 11 Summary of flow velocity results in cross section of HL01 at different sampling intervals

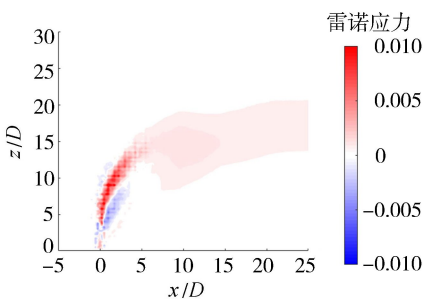


图 13 HL01 组次射流雷诺应力分布场
Fig. 13 Distribution of Reynolds stress field of HL01

4 结 论

- a. 多时距 PIV 技术采用高速相机拍摄,通过与采用传统 PIV 技术以及 ADV 获取的试验数据对比,发现多时距 PIV 技术得到的数据精度更高。
- b. 多时距 PIV 技术可根据图像中示踪粒子的运动特性匹配合适的时间间距,用于速度变化范围大的流场测量,如射流运动、近底泥沙运动、桥梁护岸冲刷等。
- c. 相比于传统 PIV 技术需要统筹考虑全流场选取测量时间间距,多时距 PIV 技术只需根据流场中最大的流速确定测量时间间距,操作处理更加简单方便。

参考文献:

[1] 卓长青,邵春雷,吉雨翔. 离心泵吸水室内气液两相流动试验及数值模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(4): 380-386. (ZHUO Changqing,SHAO Chunlei,JI Yuxiang. Experiment and numerical simulation of gas liquid two phase flow in suction chamber of a centrifugal pump[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(4): 380-386. (in Chinese))

[2] 黄君宝,肖厅厅,孙志林,等. 涌潮水流引发的桥墩局部冲刷试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2021,49(5):441-446. (HUANG Junbao,XIAO Tingting,SUN Zhilin,et al. Experimental study on local scour of piers caused by tidal bore[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2021,49(5):441-446. (in Chinese))

[3] 周丰. 动水环境中射流特性的实验和数值模拟研究[D]. 大连:大连理工大学,2007.

[4] 华明,唐洪武,王惠民. 反向流动中圆射流流动特性试验[J]. 水利水运工程学报,2001(4):33-36. (HUA Ming,TANG Hongwu,WANG Huimin. Experiment of velocity field of a round jet in counter-flowing ambience[J]. Hydro-Science and Engineering,2001(4):33-36. (in Chinese))

[5] 陈永平,李志伟,谭鹰勋,等. 不规则波作用下垂向圆管射流的试验研究[J]. 水利学报,2008,39(2):168-175. (CHEN Yongping,LI Zhiwei,TAN Yingxun,et al. Experimental study on flow characteristics of vertical round jet discharged into ambient with random wave[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2008,39(2):168-175. (in Chinese))

[6] 陈永平,李志伟,张长宽. 不规则波作用下垂向圆管浮射流的试验研究[J]. 水利学报,2009,40(12):1444-1451. (CHEN Yongping,LI Zhiwei,ZHANG Changkuan. Experimental study on flow characteristics of round vertical buoyant jet under random

- waves[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2009,40(12):1444-1451. (in Chinese))
- [7] MOSSA M. Experimental study on the interaction of non-buoyant jets and waves[J]. Journal of Hydraulic Research,2004,42(1):13-28.
- [8] TAM B F,LI C W. Flow induced by a turbulent jet under random waves[J]. Journal of Hydraulic Research,2008,46(6):820-829.
- [9] HSIAO S C,HSU T W,LIN J F,et al. Mean and turbulence properties of a neutrally buoyant round jet in a wave environment [J]. Journal of Waterway,Port,Coastal and Ocean Engineering,2011,137(3):109-122.
- [10] 耿卫明,刘超,汤方平. 轴流泵叶轮出口流场的 3D-PIV 测量[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(5):516-521. (GENG Weiming,LIU Chao,TANG Fangping. 3D-PIV measurements of flow fields at exit to impeller of an axial flow pump[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2010,38(5):516-521. (in Chinese))
- [11] ADRIAN R J. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry[J]. Applied Optics,1984,23(11):1690.
- [12] 姜国强,张晓元,李炜. PIV 在横流中的湍射流实验研究中的应用[J]. 水科学进展,2002,13(5):588-593. (JIANG Guoqiang,ZHANG Xiaoyuan,LI Wei. Study on round turbulent jet in a cross flow with PIV[J]. Advances in Water Science,2002,13(5):588-593. (in Chinese))
- [13] 吴剑,齐鄂荣,李炜,等. 应用 PIV 系统研究横流中近壁水平圆柱绕流旋涡特性[J]. 水科学进展,2005,16(5):628-633. (WU Jian,QI Erong,LI Wei,et al. Research on vortexes of cross flow past a horizontal circular cylinder by PIV system[J]. Advances in Water Science,2005,16(5):628-633. (in Chinese))
- [14] NEBUCHINOV A S,LOZHKIN Y A,BILSKY A V,et al. Combination of PIV and PLIF methods to study convective heat transfer in an impinging jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2017,80:139-146.
- [15] DI N F,PEREIRA F A,DE M G,et al. Two-phase PIV-LIF measurements in a submerged bubbly water jet[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2019,145(9):1-13.
- [16] SHIM Y M,SHARMA R N,RICHARDS P J. Proper orthogonal decomposition analysis of the flow field in a plane jet[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2013,51:37-55.
- [17] MIRSEPASSI A,RANKIN D D. Particle image velocimetry in viscoelastic fluids and particle interaction effects[J]. Experiments in Fluids,2014,55(1):1-7.
- [18] 丁宏伟,杨全义,徐振山,等. 波流环境下双孔浮射流运动特性[J]. 河海大学学报(自然科学版),2019,47(2):183-188. (DING Hongwei,YANG Quanyi,XU Zhenshan,et al. Characteristics of dual buoyant jets movement in wavy-crossflow environment[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2019,47(2):183-188. (in Chinese))
- [19] 蒋昌波,刘洋,邓斌,等. 出渗对均匀大粒径泥沙附近水动力特性影响[J]. 水科学进展,2017,28(1):67-75. (JIANG Changbo,LIU Yang,DENG Bin,et al. Effect of upward seepage on hydrodynamic characteristics around uniform coarse grains [J]. Advances in Water Science,2017,28(1):67-75. (in Chinese))
- [20] 刘洋,徐毅,王茂枚,等. 方形桥墩紊动特性及尾涡区尺寸 PIV 试验[J]. 水利水电科技进展,2022,42(4):55-60. (LIU Yang,XU Yi,WANG Maomei,et al. PIV experiments on turbulence characteristics and tail vortex zone scale of a square pier [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(4):55-60. (in Chinese))
- [21] HSIEH S C,LOW Y M,CHIEW Y M. Flow characteristics around a circular cylinder subjected to vortex-induced vibration near a plane boundary[J]. Journal of Fluids and Structures,2016,65:257-277.
- [22] KWON S J,SEO I W. Reynolds number effects on the behavior of a non-buoyant round jet[J]. Experiments in Fluids,2005,38(6):801-812.
- [23] 徐振山. 波流环境中垂向圆管射流三维数值模拟研究[D]. 南京:河海大学,2016.
- [24] LEE J H W,CHU V H. Turbulent jets and plumes-a Lagrangian approach[M]. Netherlands:Kluwer Academic Publishers,2003:221-248.
- [25] HUSSEIN H J,CAPP S P,GEORGE W K. Velocity measurements in a high-Reynolds-number, momentum-conserving, axisymmetric, turbulent Jet[J]. Journal of Fluid Mechanics,1994,258(1):31-75.
- [26] NEW T H,LIM T T,LUO S C. Effects of jet velocity profiles on a round jet in cross-flow[J]. Experiments in Fluids,2006,40(6):859-875.
- [27] 徐振山,陈永平,张长宽. 波流环境中垂向圆管射流三维运动和稀释过程模拟[J]. 水科学进展,2017,28(2):265-275. (XU Zhenshan,CHEN Yongping,ZHANG Changkuan. Study on three-dimensional movement and dilution of a vertical round jet under the wave-current effect[J]. Advances in Water Science,2017,28(2):265-275. (in Chinese))