

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2015.03.016

# 利用 PIV 技术对淹没射流瞬时流场特性的研究

刘超<sup>a,b</sup>, 李龙国<sup>a,b</sup>, 李乃稳<sup>a,b</sup>

(四川大学 a. 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室; b. 水利水电学院, 成都 610065)

**摘要:** 对水垫塘内淹没射流流场特性的研究, 过去多采用介入流场中的单点测量技术或涡黏性各向同性假设的紊流数值模拟的方法, 无法获得其全域瞬时精细流场。利用非介入的粒子成像测速技术(PIV)对水垫塘内斜向淹没射流的紊流流场特性进行了研究。试验结果显示, 利用 PIV 技术可获得含有大量瞬时性随机涡的精细流场结构, 射流与水体间的剪切和混掺使流速减小、紊动能产生和水体涡旋运动, 是能量传递和耗散的主要机制; 射流流量沿程增加, 流速沿程减小, 涡量值减小; 在淹没射流区, 流速、紊动能和涡量值沿射流轴线近似对称分布, 但射流下游侧的流速、紊动能和涡量均稍比上游侧稍高, 下游水体紊动相对剧烈, 而上游水体则相对平稳; 在附壁射流区, 射流与上层水体剪切、混掺剧烈, 形成近似淹没水跃的流态, 射流流量沿流向继续增加, 流速、紊动能及涡量值均沿水垫塘竖向和水平方向减小。

**关键词:** 斜向淹没射流; PIV; 流场结构; 能量传递; 能量耗散; 水垫塘

**中图分类号:** TV 653    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0471-05

## Research on instantaneous flow characteristics of the falling submerged jet in a pool based on PIV technique

LIU Chao<sup>a,b</sup>, LI Long-guo<sup>a,b</sup>, LI Nai-wen<sup>a,b</sup>

(a. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

b. College of Hydraulic & Hydroelectric Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In the past, the point measurement techniques, such as laser Doppler velocimetry (LDV) and hot wire anemometry, or the turbulent flow numerical model with the hypothesis of the isotropy of vortex were used to investigate the turbulent flow field in a pool with an oblique submerged jet. All these methods cannot obtain the refined structure characteristics of the instantaneous flow field. The particle image velocimetry (PIV) was adopted to characterize the turbulent flow field in a pool with an oblique submerged jet in term of the velocity, turbulent energy, and flow vorticity. The results indicated that (1) the refined structure of flow fields with instantaneous and random eddies can be obtained, and the shearing and mixing between the jet and surrounding water decrease the jet velocity and produce turbulent energy and vortex motion, which is the dominant mechanism for jet energy transmission and dissipation in the pool; (2) with the jet plunging into the pool, the flow rate of jet increases along the jet path, while the flow velocity and flow vorticity decrease; (3) in the submerged jet region, the velocity, turbulent energy, and flow vorticity are approximately in symmetrical distribution. The values of velocity, turbulent energy, and flow vorticity in the jet downstream are a little higher than those in the jet upstream, indicating that the downstream water is more turbulent while the upstream water is relatively stable; and (4) in the wall jet region downstream, the jet continues to shear and mix with the water above to form the flow pattern of a submerged hydraulic jump, and the velocity, turbulent energy, and flow vorticity decrease in both the vertical and horizontal directions.

**Key words:** oblique submerged jet; particle imaged velocimetry (PIV); flow field structure; energy transmission; energy dissipation; plunge pool

水流自由跌落进入下游水体中的过程可以看做淹没冲击射流, 比如瀑布、明渠中的自由跌流和水电工程中的孔口

收稿日期: 2015-01-07    修回日期: 2015-02-03    网络出版时间: 2015-05-13  
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150513.1532.014.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(50909067; 51009102; 51179113)

作者简介: 刘超(1975-), 男, 四川人, 副教授, 博士, 主要从事水利水电工程和农业水利工程研究。E-mail: liuchao@scu.edu.cn

通讯简介: 李乃稳(1975-), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事水利水电工程研究。E-mail: gxqlnw@163.com

射流+水垫塘消能。射流以较高的流速冲击下游河床或水垫塘底板,产生较大的动水冲击压力和压力脉动,最终导致其失稳破坏<sup>[4]</sup>。为了采用合理的工程措施以保护河床或水垫塘底板,需要研究射流在下游水体中流速衰减规律和能量传递及耗散机理,因此,对淹没射流流场特性进行系统的研究,如流态、流速、紊动能以及涡量分布,是非常必要的。近年来,国内外众多研究者对射流消能机理进行了研究,如 Bollaert and Schleiss<sup>[5-6]</sup>, Melo<sup>[7]</sup>, 和 Borghei and Zarnani<sup>[8]</sup>。许唯临、廖华胜等<sup>[9-10]</sup>,刘沛清、李福田等<sup>[11-13]</sup>利用模型试验和数值模拟相结合的方法对淹没射流进入水垫塘内的流场结构进行了研究。但是,由于模型测量方法和紊流数值模型中涡黏性各向同性的假设,他们的研究不能够获得射流入水垫塘的精细的瞬时流场演化过程和结构特征。

随着现代流场测量技术的迅速发展,新的流速测量技术不断出现,如多普勒测速仪(LDV)和粒子成像测速仪(PIV)。近十几年来,PIV 技术得到充分发展并因为能够在不干扰流场的情况下而获得整个紊流场的瞬时流场信息得到广泛应用。姜国强、李炜<sup>[14]</sup>,Zhang Yan、Fan Jing yu 等<sup>[15]</sup>应用 PIV 技术研究了圆形孔口合成射流在横流中的涡结构特征,Xue Jing lei、Sha Jiang 等<sup>[16]</sup>应用 PIV 技术研究了圆形孔口射流的水流特性,Tsukaca 等<sup>[17]</sup>将 PIV 应用于拦污栅附近的水流特性研究,陈建刚、张建民等<sup>[18]</sup>应用 PIV 技术研究了多层多股横向淹没射流消力池中的紊流涡结构。上述研究结果显示,在捕捉紊流场瞬时流场信息方面,PIV 技术可获得比单点测速技术更好的结果<sup>[19]</sup>。

本文将非介入流场测试新技术,即 PIV 测速技术应用于斜向淹没射流紊流流场特性的研究,包括流态、流速矢量分布、紊动能分布以及紊流涡场,并基于实验数据进一步分析了射流入水垫塘消能的机理和途径。

## 1 试验装置和 PIV 测试系统

### 1.1 试验装置

试验装置(图 1)修建于四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,包括上游水池、泄流孔口、下游水槽和循环水泵组成,下游水槽由长 200.00 cm、宽 60.00 cm 的有机玻璃制作。泄流孔口出口宽 2.50 cm,长 2.00 cm,试验中出口处射流流速为 3.85 m/s,并且射流入下游水槽的入射角为 50°,下游水槽水深为 20.00 cm。

为了避免射流入射下游水体卷吸空气而产生大量气泡对 PIV 测流的影响,泄流孔口出口设置于水面以下 2.00 cm,值得说明的是,这与实际工程中射流入下游水体的过程稍有不同,但就淹没射流入水垫塘的瞬时流场特性而言,比如流态、流速分布、紊动能和紊流涡场,其能反映实际工程中的瞬时流场特征。

### 1.2 PIV 测试系统

PIV 测速仪由 TIS, Inc 公司生产。试验中,以直径为 10~15  $\mu\text{m}$ 、密度为  $1.04 \times 10^3 \sim 1.06 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$  的聚苯乙烯球为示踪物质。如图 1 所示,测试片光源垂直于  $(X, Y)$  面。激光片由 120 mJ 每次的双脉冲的 Nd:YAG 激光器产生。片光源厚度为 0.001 m,并且经设置后穿过整个射流轴线。高

速 CCD 相机垂直于片光源,其拍摄精度经 0.001 m 精度的不锈钢直尺校正,以确保其测试精度。

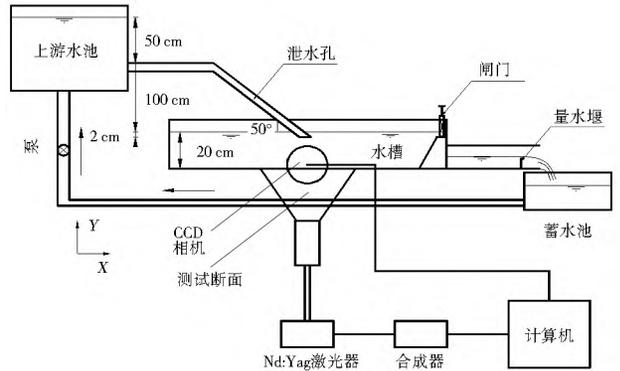


图 1 试验装置及 PIV 测试系统

Fig. 1 Experimental setup and PIV measurement system

试验图像由尼康相机(Powerview Plus 4MPCCD)在双相关模式下获得,图像像素为 2048×2048。试验中仔细调整相机和测试点之间的距离,以确保在试验中获得整个流场测试中的每一幅清晰图像,相机拍摄频率为 4 Hz,获得每两幅清晰图像后再经处理器进行互相关分析计算。

通过互相关分析,利用神经网络方法滤除异常值,滤除的速度矢量通过高斯方法由相邻值替代。然后 PIV 测量值经平滑处理而去除噪音,利用 PIV 系统内置的 Tecplot 数据处理软件即可获得速度矢量、紊动能和涡量。

## 2 结果与分析

### 2.1 流态

试验中首先利用高速摄影机拍摄了斜向淹没射流入水垫塘的水流流态,见图 2,流态示意图见图 3。

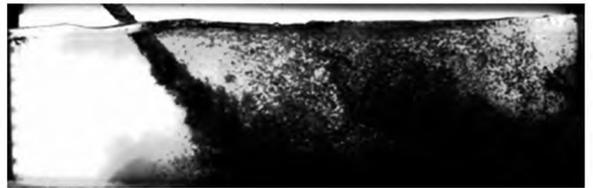


图 2 射流入水垫塘照片

Fig. 2 Photo of a jet in the pool

从图 2 可以看出,射流斜向入水垫塘后在下游水体中扩散和混掺,冲击水垫塘底板后,射流以较高的流速沿底板运动并跃起,流态类似于淹没水跃的流态。如图 3 所示,在水垫塘内沿射流流程存在三个不同的区域,即:淹没射流区(I 区),射流冲击区(II 区)和附壁射流区(III 区),这种分区结构同许唯临、廖华胜等<sup>[9-10]</sup>,刘沛清、李福田等<sup>[11-13]</sup>的试验结果一致。

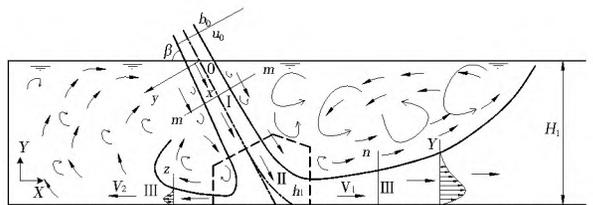


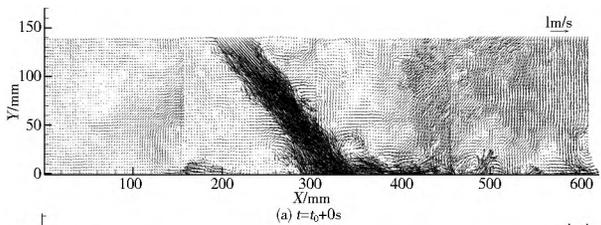
图 3 淹没冲击射流示意图

Fig. 3 Schematic of the pool with a submerged jet

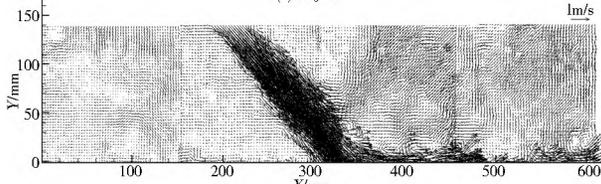
在淹没射流区,射流与周围水体剧烈剪切和混掺并一同向下运动,众多瞬时随机性的大小不同的涡产生,射流迅速扩散和发展。随后,射流在冲击区冲击水垫塘底板,然后在附壁射流区沿底板以较高的流速运动、扩散并跃起,形成紊动剧烈的类似于淹没水跃的流态。在这些区域内,大小不同的涡随机运动。图3中在射流上下游存在两个附壁射流区。由于倾斜射流主流流向下游,故射流上下游两侧的附壁射流区不对称,上游附壁射流区范围较小,下游附壁射流区范围较大,流速也较高,区域内存在大量的不同尺度的涡,在试验中观察到射流下游水流紊动相对剧烈,而上游水流相对比较平稳。正是这种斜向淹没射流在水垫塘内的流态的非对称性才使得其水力特性不同于自由射流的水力特性。

## 2.2 流速

在水垫塘(X, Y)方向上不同时间的流速矢量分布见图4。图5是(X, Y)方向上的平均速度分布,图6为射流的平均流速等值线分布,该速度分布是由PIV系统测量的200个瞬时的流速场经时间平均后得到的。



(a)  $t = t_0 + 0s$



(b)  $t = t_0 + 1.031s$

图4 不同时间的瞬时流速矢量分布

Fig. 4 Vector distributions of instantaneous flow velocity in different times

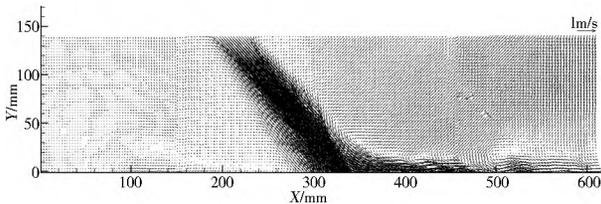


图5 平均速度分布

Fig. 5 Distribution of average flow velocity

从图4可知,在射流入水垫塘的初始阶段,射流内部的流速分布比较均匀而且值较高,射流与周围水体间存在较大的流速梯度。射流同周围水体剧烈剪切和混掺,在射流边缘产生大量的尺寸较小的随机性紊流涡,并且射流边缘流速矢量具有瞬时性和随机性的特征。随着射流向下运动,紊流涡也继续向下运动、发展并相互间合并,出现尺寸较大的涡,射流边界逐渐增大,扰动范围也不断增大,这使得水垫塘内的水体更加紊动。当射流进入底板附近的冲击区时,流速急剧减小并改变方向,之后射流沿底板以较高的流速运动,在射流上下游形成两个附壁射流区,淹没射流转换为壁射流,流态近似于淹没水跃的流态。在下游附壁射流区,由于射流与

上层水体之间强烈的剪切和混掺,流速大小迅速减小,但流速方向的瞬时性和随机性增加,在剪切层内出现尺度更大的紊流涡。不同时刻的射流流速矢量分布图显示(图4(a), 4(b)),射流流速大小和方向以及射流与周围水体剪切而产生的涡均具有瞬时性和随机性的特征,并且射流下游的水体流速明显高于射流上游水体的流速。

如图5所示,时间平均流速分布比瞬时流速分布更加均衡,在射流边界和水垫塘内的许多较小的紊流涡消失。但是,大的紊流涡仍然在射流上下游存在。这进一步证实射流与周围水体剪切、混掺形成的小涡具有高度的随机性和瞬时性的特征,并且紊流涡的分布也具有强烈的空间独立性的特征。

从图6平均速度等值线分布可以看出,在射流的初始阶段(从断面O-O到断面M-M),射流流速大小沿射流轴线对称分布,这同自由射流流速的分布一致。之后,射流范围不断扩大,并在断面M-M之后,由于受射流在水垫塘底板上的冲击的影响,流速沿射流轴线不再对称分布,上游区域的流速较小,大约为0.1 m/s左右,而下游区域的流速相对较高,约0.6 m/s左右。因此,射流下游区域的水体波动剧烈,而上游区域水体相对较为平静。故对斜向淹没射流的上游或下游而言,不但水体流速,而且紊流涡的大小都是在射流两侧是不对称的,这明显不同于自由射流。这主要是因为射流倾斜入射下游水体并冲击水垫塘底板。在下游附壁射流区,水流流速在底板附近最大并沿流程迅速减小。受射流上游区域水体的影响,射流轴线稍向下游偏离,射流在底板上的冲击点不是射流起始轴线延长线与底板的交点 $S_0$ (图3),而是稍微向下偏离一点的S点(图3)。

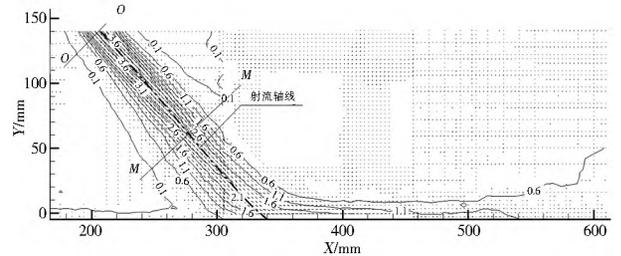


图6 平均流速等值线分布

Fig. 6 Contour of the average flow velocity

在射流孔口出口处,流速为3.85 m/s。在断面M-M处(图6),射流流速最大值为3.17 m/s,断面平均流速为1.22 m/s。在射流冲击点S,最大流速为1.70 m/s,经过冲击点的射流断面平均流速为0.94 m/s。在下游附壁射流区末端,最大流速值只有0.49 m/s,断面平均流速更小,只有0.22 m/s。因此,99%的射流动能在向下运动的过程中,经射流与周围水体之间剧烈的剪切和混掺作用而传递给周围水体或通过水流摩擦而消耗。这显示出随着射流在下游的流动,射流的扰动范围不断扩大,射流流量沿程不断增大,流速急剧减小,射流动能快速耗散,尤其是在射流冲击区和附壁射流区。

## 2.3 紊动能

脉动速度 $u'_i$ 定义为瞬时速度 $u_i$ 与平均速度 $u_i$ 之间的差,如下式所示:

$$u'_i = u_i - u_i \quad (1)$$

故,紊动能 $k_i$ 有

$$k_i = \frac{1}{2} (\overline{u'_i})^2 \quad (2)$$

根据紊流动能方程,能量的传递和耗散主要是通过水流的脉动而实现的。紊动能方程中能量传递项  $e_i$  和耗散项  $\epsilon$  表达式如下:

$$e_i = -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \overline{u'_j (k'_i + \frac{p'}{\rho})} - \nu \frac{\partial k_i}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

$$\epsilon = \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_j}{\partial x_i}} \quad (4)$$

式中:  $k'_i$  为紊动能  $k_i$  的脉动量;  $p'$  为动水压力的脉动量;  $\rho$  为水的密度;  $\nu$  为紊动黏度系数。

从式(3)和式(4)可以看出,脉动流速  $u'_i$  越高,则越多的能量将通过剪切而传递或耗散。在流场中,用紊动能  $k_i$  来表征流速脉动能量的大小,也就是说如果流场中某个位置的紊动能  $k_i$  值较高,这儿就会有更大的流速脉动,也会有更多的能量传递和耗散。在 PIV 测量系统中,紊动能  $k_i$  通过计算瞬时流速  $u_i$  和平均流速  $\overline{u_i}$  之间的方差获得。在  $x$  方向和  $y$  方向的紊动能  $k_i$  通过以下公式计算:

$$k_{U_i} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{u'_i})^2}{n} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (u_i - \overline{u_i})^2}{n} \quad (5)$$

$$k_{V_i} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (\overline{v'_i})^2}{n} = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \overline{v_i})^2}{n} \quad (6)$$

因此,测点的紊动能  $k_i$  为

$$k_i = k_{U_i} + k_{V_i} \quad (7)$$

通过 PIV 系统内置 Tecplot 软件处理 PIV 试验数据,斜向淹没射流入水垫塘的紊动能等值线分布见图 7。

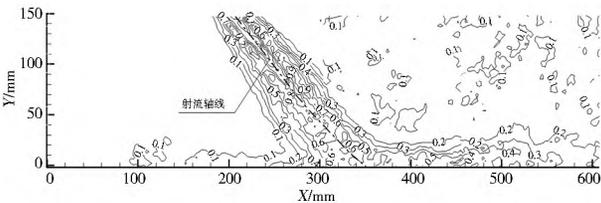


图 7 紊动能等值线分布

Fig. 7 Contour of the turbulent energy k

从图 7 可知,紊动能  $k$  主要沿射流流经的路径分布,该范围内  $k$  值较高,同时射流下游的紊动能  $k$  值明显高于上游的紊动能  $k$  值。因此,射流周边和下游水体脉动流速  $u'$  较大,水体更加紊动,而上游水体则相对较平静。在射流初始阶段,射流内部没有受到与周围水体剪切的影响,因而仅有较小的流速脉动,流速分布相对比较均衡,因此紊动能  $k$  也很小,接近于 0,并且紊动能  $k$  沿射流轴线对称分布。在淹没射流区的射流发展及充分扩散段,射流与周围水体剧烈剪切和混掺,产生了大量的不同尺度的随机性紊流涡,造成流速大小和矢量不断变化,脉动流速  $u'$  也较大,故紊动能值  $k$  较高,因而射流区域是高度紊动的。在射流的起始发展段,紊动能  $k$  值自射流边界到射流轴线先增加而后减小,呈马鞍状分布。这主要是因为由射流与周围水体间剪切和混掺产生的流速脉动首先发生在射流边缘,而后再逐渐扩展至射流内部。如图 7 所示,紊动能  $k$  值沿射流轴线是近似对称分布,射流下游侧的紊动能  $k$  值比上游侧的紊动能  $k$  值稍大些,下游侧的紊动能  $k$  最大值为 0.9,而上游侧紊动能  $k$  最大值

则大约为 0.8。随着射流继续发展和充分扩散,紊动能  $k$  在整个射流横断面上趋向于均匀分布,紊动能  $k$  值减小至大约 0.6 左右(见图 8)。

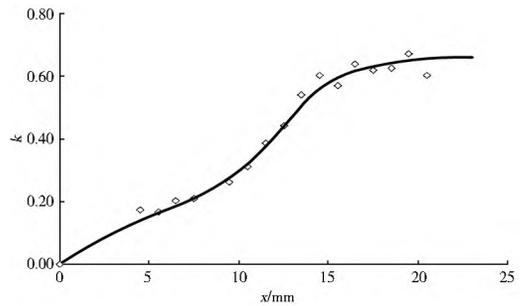


图 8 紊动能沿射流轴线的变化

Fig. 8 Variation of turbulent energy k along the axis of the jet

在射流冲击区和下游附壁射流区,射流继续和周围水体剧烈剪切和混掺,紊流涡不断生成、运动与合并,具有较高的脉动流速  $u'$ ,因此紊动能  $k$  仍然很高,能量交换和耗散继续剧烈进行,紊动能  $k$  值在 0.3 到 0.5 之间变化。但在上游附壁射流区和其它区域,紊动能  $k$  值很小,接近于 0,水体相对稳定,这说明这些区域不是射流能量在水垫塘内传递和耗散的主要区域。

因此,对于斜向淹没射流入水垫塘的能量传递和耗散过程而言,紊动能  $k$  在淹没射流区、射流冲击区和附壁射流区较高,是能量传递和耗散的主要区域。

## 2.4 紊流涡量场

根据紊流理论,紊流除了存在强烈的速度脉动之外,还存在涡旋运动,是由大小不同的瞬时涡组成,大涡传递能量,小涡则通过剪切、摩擦耗散能量。涡运动剧烈的地方也是能量传递和耗散剧烈的地方。紊流中涡的强弱以涡量表示,涡量定义为瞬时速度矢量场的旋度,其值的大小表征了涡旋运动的强度,表达式为

$$\omega = \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8)$$

PIV 测量获得的是测量面上的瞬时速度矢量图,通过其内置软件可以根据公式(8)将速度场与涡量场的转换公式求出为涡量场。在二维流场中涡量向量垂直于流体平面,利用二维有限差分的中心差分格式,可以由流场网格点速度计算出流场的涡量,网格点  $(i, j)$  的涡量  $\omega(i, j)$  为

$$\omega(i, j) = \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)_{i, j} - \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)_{i, j} = \frac{u_{(i+1, j)} - u_{(i-1, j)}}{2 \Delta x} - \frac{v_{(i, j+1)} - v_{(i, j-1)}}{2 \Delta y} \quad (9)$$

式中:  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的网格步长。

PIV 测量系统根据其内部网格划分,通过流速矢量场计算涡量的转换公式为

$$\omega(i, j) = 1000 \times \left[ \frac{u_{(i+1, j)} - u_{(i-1, j)}}{x_{(i+1, j)} - x_{(i-1, j)}} - \frac{v_{(i, j+1)} - v_{(i, j-1)}}{y_{(i, j+1)} - y_{(i, j-1)}} \right] \quad (10)$$

通过上述公式的计算,在水垫塘  $(X, Y)$  剖面上的不同时刻的瞬时涡量分布见图 9。图 10 则为包含上述瞬时涡量的 200 个瞬时涡量场的平均涡量场图。图中,正值表示逆时针方向的涡,而负值则表示顺时针方向的涡。

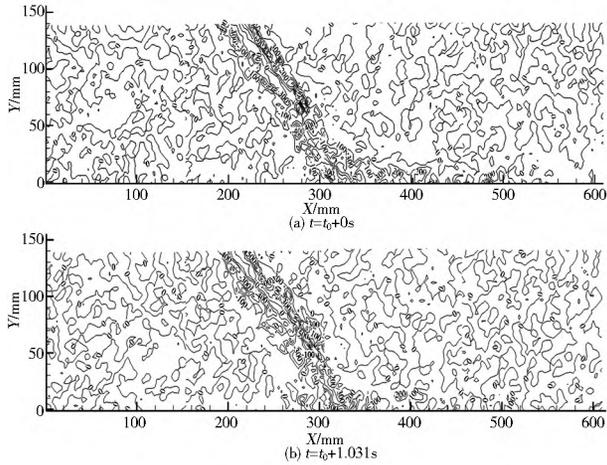


图9 不同时刻的涡量分布等值线

Fig. 9 Contour of the instantaneous vortex in different times

由图9(a)、9(b)不同时刻涡量等值线分布可知,在射流轴线上,涡量的绝对值近似为0,在淹没射流区自射流轴线至射流两侧边界,涡量值先增加而后减小,在附壁射流区涡量值则沿水垫塘Y方向和X方向减小,这说明射流与周围水体间存在较大的速度梯度。正是这种横向速度梯度的存在才使得紊流涡旋转而产生较高的涡量,因此射流与水体间的剪切、混掺剧烈,能量传递与耗散也较剧烈。射流上游涡量矢量为顺时针方向,而下游涡量矢量为逆时针方向,射流上下游涡的旋转方向相反,并且涡量值的大小和出现位置在不同时刻不同,具有明显的瞬时性和随机性的特征,射流下游侧不同时刻涡量最大值大于上游侧的涡量最大值。在附壁射流区,射流贴底运动,与上层水体剧烈剪切、掺混,形成淹没水跃的流态,其涡量值大小和位置同样表现出瞬时性和随机性的特征。

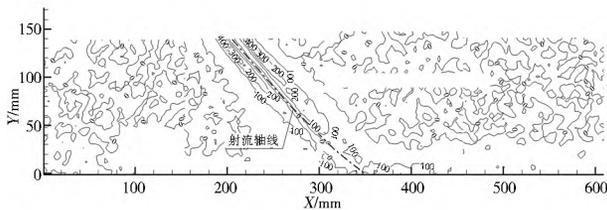


图10 涡量时均分布等值线

Fig. 10 Contour of the average vortex

从图10涡量时均分布可知,涡量时均值比涡量瞬时最大值小,这进一步说明了涡量的瞬时性和随机性的特征,其时均化后使涡量在空间上的平均值减小。在射流的起始阶段,涡量值与时均速度 $u_i$ 和紊动能 $k$ 的分布一样,沿射流轴线近似对称分布,涡量最大值为400,随着射流发展,涡量值沿流程减小。射流轴线下游侧的涡量值稍大于射流轴线上游的涡量值,这与平均流速 $u_i$ 和紊动强度 $k$ 的分布存在相似分布规律。

### 3 结论

通过斜向淹没射流入水垫塘的PIV流速测量,获得了其全域瞬时流场信息,并详细研究了流场的水力特性,如流速矢量、紊动能和紊流涡量分布,结论如下。

(1) 射流斜向进入水垫塘后形成斜向淹没冲击射流流

态,水垫塘内沿射流方向分为三个主要区域,即淹没射流区、射流冲击区和上下游的附壁射流区,这同其他研究者的研究结果一致。

(2) 沿射流流程范围内,射流与周围水体剪切和混掺,流速、涡量分布具有瞬时性和随机性的时空分布特征,在射流初始阶段,射流与周围水体速度梯度较大,涡尺寸较小但运动剧烈,即涡量值较高;随着射流流速的减小和涡的运动与合并,射流与周围水体间速度梯度减小,涡尺寸较大但涡旋运动减慢,即涡量值减小。

(3) 在淹没射流区,射流时均流速、紊动能及时均涡量值沿射流轴线近似对称分布,但流速、紊动能和涡量值在射流下游侧都稍高于上游侧。射流流量沿程增加,流速沿程减小,紊动能沿程先增加后趋于稳定。

(4) 在下游侧附壁射流区,流速、紊动能和涡量都沿程在水垫塘水平方向和竖直方向减小,射流与其上层水体剪切和混掺,附壁射流区同样是能量传递和耗散的主要区域。但是,在上游侧附壁射流区,流速、紊动能和涡量都很小,接近于0,水体近乎静止。因此,在工程中应可能使更多的上游侧水体参与能量传递和耗散,这具有非常重要的工程应用价值。

### 参考文献(References):

- [1] LIU Pei qing, LI Fu tian. Model discussion of pressure fluctuations propagation within lining slab joints in stilling basins[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2007, 133(6): 618-624.
- [2] SUN Jia wen, SUN Zha o chen and LIANG Shu xiu et al. Spectral analysis of random wave uplift force on a horizontal deck [J]. Journal of Hydrodynamics, 2011, 23(1): 8-18.
- [3] MANSO P. A., BOLLAERT E. F. R. and SCHLEISS A. J. Influence of plunge pool geometry on high velocity jet impact pressures and pressure propagation inside fissured rock media[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2009, 135(10): 783-792.
- [4] MANSO P A, BOLLAERT E F R, SCHLEISS A J Impact pressures of turbulent high velocity jets plunging in pools with flat bottom[J]. Experiments in Fluids, 2007, 42(1): 49-60.
- [5] Bollaert E, Schleiss A. Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets. Part I: A state of the art review [J]. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41(5): 451-464.
- [6] Bollaert E, Schleiss A. Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets. Part II: Experimental results of dynamic pressures at pool bottoms and in one- and two-dimensional closed end rock joints[J]. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41(5): 465-480.
- [7] Melo J F, Pinheiro A N, Ramos C M. Forces on plunge pool slabs: Influence of joints location and width[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 2006, 132(1): 49-60.
- [8] Borghei S M, Zarnani P. Jet impact geometry and plunge pool dimensions effects on dynamic pressures at pool sidewalls[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2008, 35(4): 408-417.
- [9] XU Wei lin, LIAO Hu asheng, YANG Yong quan, WU Chigong. Computational and experimental investigation on the 3D flow feature and energy dissipation characteristics of plunge pools [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1998, 30(1): 35-42.

(下转第509页)

的误差在允许的范围內,可见本文所设计的叶片的确具有较高的风能利用率。图 6 为力矩系数  $C_m$  与叶尖速比  $\lambda$  的关系曲线,由数值模拟得出风力提水机在额定风速时最大输出扭矩为  $22 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,与实验结果的  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$  接近,两者的误差在允许的范围內。当扭矩大于  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$  时,可带动扬程  $10 \text{ m}$  的设计配套活塞泵开始工作,故设计的提水机可起动作业。

### 3.2 叶片表面压力分析

风力提水机在  $2.5 \text{ m/s}$  风速下时,风力机叶片压力面的压力分布云图见图 7,吸力面的压力分布云图见图 8。从图 7 中可以看出,在压力面上压力梯度最大的地方位于叶片靠近叶尖的前缘处,这是因为叶片在旋转时叶尖前缘部分最先接触来流,速度梯度发生了较大的变化,导致叶片前缘处为压力最大的区域。叶片在轮毂附近为负压区,除此之外叶片的压力面上压力分布均匀,无高压集中区。

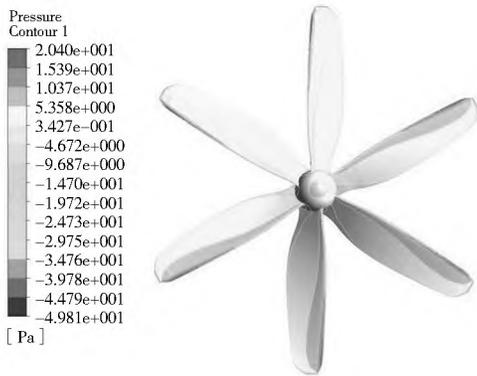


图 7 叶片压力面压力分布云图

Fig. 7 Contour plot of pressure distribution for the blade pressure surface

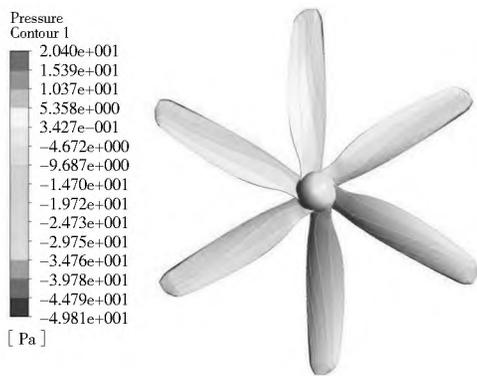


图 8 叶片吸力面压力分布云图

Fig. 8 Contour plot of pressure distribution for the blade suction surface

从图 8 中可以看出叶片的吸力面上存在大面积的负压区,负压大多集中在叶片前缘附近,压力从前缘到后缘呈现逐渐增大的趋势。从叶片压力面以及吸力面的压力分布云图可以看出,气流在流向风轮的过程中压力不断增大,流经风轮之后压力突然减小,甚至形成负压,叶片压力面和吸力面的压力差使得叶片沿塔架方向产生一个推力,这个推力既是加载在塔架上的载荷,也是叶片所获得的升力,使得风轮吸收了来流中的部分风能转化为机械能转动,即所设计的风力提水机在  $2.5 \text{ m/s}$  的微风下是可以起动的。

### 3.3 叶片三维流动特性分析

图 9 为叶片旋转时风轮所在流场的流线图,可以看出流

过风轮的气流由于受到风轮旋转作用的干扰,尾迹呈螺旋状并与风轮的旋转方向相反,流场流态变化剧烈,但是并没有出现漩涡或者回流的现象;气流流速在风轮附近最大,在远离风轮处速度逐渐减小至来流风速。这个特性的研究对风场的选址以及风力机的排布有着极其重要的意义,因为风机尾流的影响范围是广阔的,尤其是对于年平均风速较低的地区,合理的风机排布可以减少尾流干扰,大大提高风能利用率。

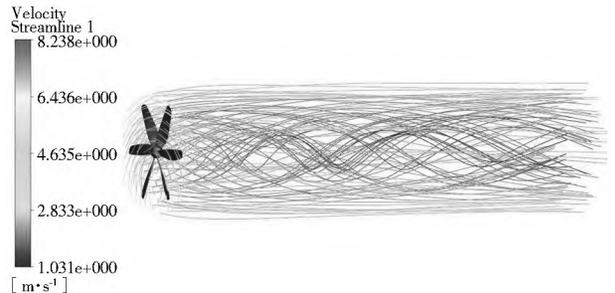


图 9 风轮所在流场流线

Fig. 9 The streamlines for the flowing field of wind rotor

图 10 为额定工况下叶片  $20\% R$  (根部)、 $50\% R$  (中部) 以及  $80\% R$  (叶尖) 处的截面流线图。从图中可以看出,在额定工况下叶片的主要功率输出部分翼型表面流动平稳,在翼型的尾部并没产生漩涡或者脱流的情况,叶片并未发生流动分离,气流流动平顺稳定,证明所设计的叶片具有合理的安装角,使得叶片的每个叶素都处在最佳攻角的状态。

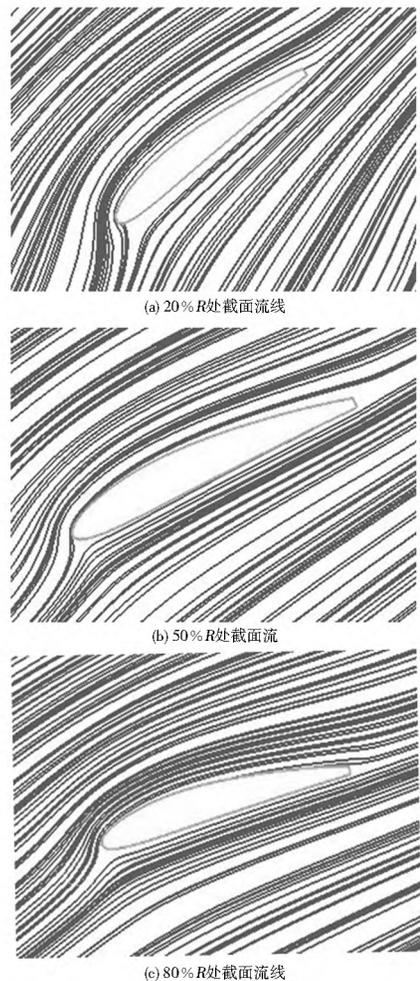


图 10 额定工况下叶片截面流线

Fig. 10 The section streamlines of the blade under certain condition