

三维 PIV 技术在吸入涡流态测量中的应用

李 永¹, 吴玉林², 袁辉靖³, 潘海林¹

(1. 北京控制工程研究所, 北京 100080; 2. 清华大学热能系, 北京 100084; 3. 北京大学力学系, 北京 100871)

摘要: 为了研究进水口前吸入涡的流动特性以及不同结构的进水口对吸入涡的影响, 对水平进水口前的吸入涡流动进行了三维 PIV 测量。测量时应用折射率校正法解决了不同介质中进行三维 PIV 试验时所产生的粒子成像不清晰的问题, 并采用多次成像标定法来减小垂直方向上的速度测量误差。通过该试验, 得到进水口前吸入涡的三维速度分布规律, 并得出后壁面角度与吸入涡大小和强弱关系。试验表明, 后壁面角度为 30° 的进水口比角度为 0° 进水口更能有效的阻止吸入涡发生, 因此可以通过加大后壁面的夹角的方式来削弱进水口处的吸入涡。

关 键 词: 吸入涡; 三维 PIV; 进水口; 折射率校正

中图分类号: TV134 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2007)03-0368-06

吸入涡是发生在进水口处的一种常见的流动形式。在水力机械和水利设施的入口部位发生的吸入涡, 会对这些设备和设施的性能产生很大影响。吸入涡是一种典型的三维流动, 以往人们只能通过流动显示的方法对其做定性研究。近年来, 随着粒子成像测速 (Particle Image Velocimetry, PIV) 技术的逐渐成熟, 人们可以通过追踪示踪粒子的方式得到整个测量面上的全场速度信息, 这样就使得定量地研究吸入涡这种具有特征结构的流动成为可能^[1,2]。三维 PIV 技术是在二维 PIV 技术的基础上发展起来的, 三维 PIV 在测量涡的三维结构上比二维 PIV 有质的突破, 它除了能够得到测量面上的二维速度分布之外, 还可以得到沿着测量面垂直方向的第三维速度^[3,4]。本文中, 将三维 PIV 技术作了改进, 采用折射率校正的方法, 在不同介质中实现了吸入涡的三维 PIV 测量, 得到了吸入涡的三维速度分布规律。

1 三维 PIV 基本原理

1.1 三维 PIV 系统组成

本试验所用三维 PIV 试验系统主要由如下几部分组成:

(1) 激光器 三维 PIV 系统所用激光器是 Nd-YAG 双脉冲激光器, 它实际上是由两个独立的激光器组成, 并通过同一个光路系统出光。对于单个激光器来说, 它的最大发光频率为 15 Hz, 最大能量为 120 mJ/Pluse。

(2) 同步器 三维 PIV 中使用的同步器与二维 PIV 相同。只是在三维 PIV 中需要使用同步器的两个通道来分别控制两个 CCD 相机, 而二维 PIV 中只有一个通道发挥作用。

(3) CCD 相机 在本试验中使用了分辨率为 2K × 2K 像素的跨帧 CCD 相机, 最高拍摄速度可达每秒 15 对。

(4) 计算机和采集系统 在本试验中, 每张照片的数据量是 8 M, 两个相机分别采集一对照片的数据量就是 32 M, 使用的计算机为 64 位的工作站, 相机的采样频率设为 7.5 Hz, 这样每秒钟的数据传输量为 240 M。

1.2 三维 PIV 基本原理

在三维 PIV 中, 将片光源看作一个立体的结构, 为了得到粒子在片光厚度方向的位移, 需要把相机偏离原

收稿日期: 2006-02-11; 修订日期: 2006-06-30

作者简介: 李 永 (1977 -), 男, 山东临沂人, 工程师, 博士, 主要从事流动测量和微重力下流体特性的研究。

E-mail: ly00@mails.tsinghua.edu.cn

来垂直方向一定夹角。

图 1 所示为粒子的实际位移与像中位移的关系。假设在初始时刻，粒子的位置是 A，A 点的坐标为 $x_i = (x, y, z)$ ，经过 t 时间后，粒子到达位置 B，B 点的坐标为 $x_f = (x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$ 。在相机的成像中，初始时刻粒子成像的位置是 X_i ，在 t 时间后粒子成像的位置是 X_f 。这样在一个相机的成像里，就可以得到粒子在像中的位置为 X 。

在进行三维 PIV 测量的时候，同一个粒子的位移，会在两个相机中都成像，而且成像都满足图 1 所示的关系。这样，就可以得到粒子的实际位移与像中位移关系的 4 个方程：

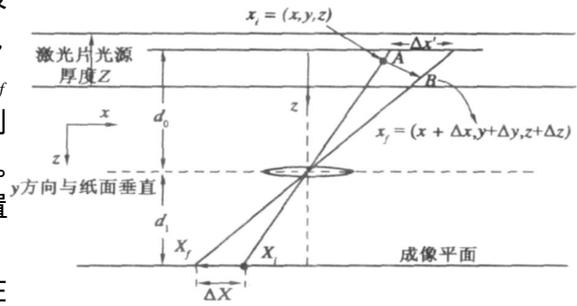


图 1 粒子实际位移与像中位移的关系
Fig. 1 Sketch of the 3D PIV principle

$$X_1 = x_f(dX_1/dx_f) + y_f(dX_1/dy_f) + z_f(dX_1/dz_f) \quad (1)$$

$$Y_1 = x_f(dY_1/dx_f) + y_f(dY_1/dy_f) + z_f(dY_1/dz_f) \quad (2)$$

$$X_r = x_f(dX_r/dx_f) + y_f(dX_r/dy_f) + z_f(dX_r/dz_f) \quad (3)$$

$$Y_r = x_f(dY_r/dx_f) + y_f(dY_r/dy_f) + z_f(dY_r/dz_f) \quad (4)$$

式(1)~式(4)中 X 和 Y 是粒子在像里的 x 、 y 方向的位移；角标 1 和 r 分别表示左右两个相机的像； x 、 y 和 z 表示粒子在 x 、 y 和 z 方向的实际位移；角标 f 表示实际的情况。

上述方程中共有 19 个量，其中， X_1 、 Y_1 、 X_r 和 Y_r ，可以直接从图像中计算得到，而 (dX_1/dx_f) 、 (dX_1/dy_f) 、 (dX_1/dz_f) 、 (dY_1/dx_f) 、 (dY_1/dy_f) 、 (dY_1/dz_f) 、 (dX_r/dx_f) 、 (dX_r/dy_f) 、 (dX_r/dz_f) 、 (dY_r/dx_f) 、 (dY_r/dy_f) 和 (dY_r/dz_f) 这 12 个量需要通过标定得到。 x_f 、 y_f 和 z_f 是要求的量，可以解方程组得到。

1.3 Scheimpflug 立体 PIV 布置方案

在三维 PIV 中，要求两个相机的安放位置与片光的垂直方向具有一定夹角，这样就会使得测量面上的点到相机感光面的距离不一致，在焦距不变的情况下，就会导致只有特定距离处的粒子才可以在相机内清晰成像，所有大于或者小于这个距离的粒子，在相机上的成像都是模糊的。为了解决这个问题，三维 PIV 中采用了 Scheimpflug 布置方案。这个方案的示意图如图 2 所示。

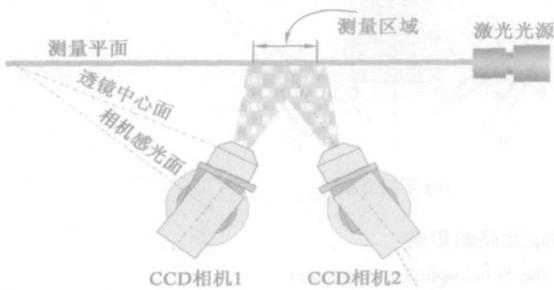


图 2 Scheimpflug 立体 PIV 布置方案
Fig. 2 Scheimpflug arrangement for the 3D PIV

当测量平面、相机镜头的中心面和相机感光面这三个平面交于同一条线上时，测量面上的所有粒子都能清晰成像，这就是著名的 Scheimpflug 立体 PIV 布置方案。所有的三维 PIV 测量，都必须按照这个布置方案来布置光路。Scheimpflug 立体 PIV 布置方案的关键是将相机镜头和机身分开，使得镜头与机身之间的夹角可以调节。

2 试验模型介绍

为了研究吸入涡的流动特性，本文设计了一种水平放置的进水口结构^[5]，如图 3 所示。

在该进水口中，吸入涡经常发生在后壁面的前方。使用该模型，可以通过调节后壁面与垂直方向的角度 d 和来流速度 v ，来改变吸入涡的强弱和位置。本研究中主要考察不同夹角 d 对吸入涡的影响^[6]。

在三维 PIV 试验中，选择吸入涡经常发生的位置作为试验测量位置，它是由前期试验确定的。具体位置如

图4所示,在该图中,深色的区域表示试验的测量位置,它位于自由水面下方3 cm的平面上,处于后壁面和侧壁面相交的位置。由于左右两侧的吸入涡是对称的,因此只选择其中一半的面积进行测量,这样可以在相机分辨率一定的情况下,提高流场的解析度,使得涡结构的细节更加清楚。

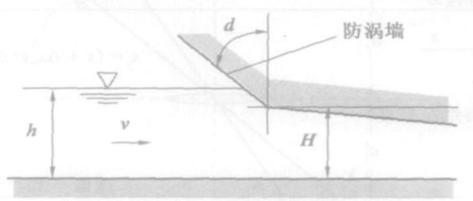


图3 进水口结构示意图

Fig. 3 Structure of intake

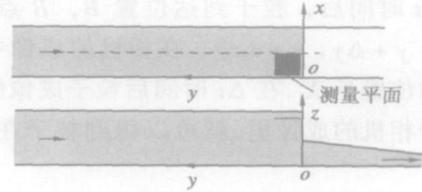


图4 三维 PIV 试验的测量位置

Fig. 4 Measuring positions of 3-D PIV

表1 三维 PIV 的试验工况 ($h = 0.3 \text{ m}$)

Table 1 Operation condition of 3D PIV experiment
($h = 0.3 \text{ m}$)

夹角	$v1 = 0.2 \text{ m/s}$	$v2 = 0.3 \text{ m/s}$	$v3 = 0.4 \text{ m/s}$
$d1 = 0^\circ$	$d1 v1$	$d1 v2$	$d1 v3$
$d2 = 30^\circ$	$d2 v1$	$d2 v2$	$d2 v3$

三维 PIV 试验远比二维的要复杂,所以在选择工况时,本着宁精勿滥的原则,选择有代表性的流动情况作为试验工况,本文只选择了水位高度为 $h2 = 0.3 \text{ m}$ 时,两种不同夹角 d ,三种来流速度 v 的情况进行测量,共有 6 个工况,如表 1 所示。

3 试验的布置方案和标定方法

3.1 折射率校正法

(1) 折射率不同对 Scheimpfl \ddot{u} 布置方案的影响 在三维 PIV 中,相机的布置方式必须满足 Scheimpfl \ddot{u} 立体 PIV 布置方案,但是这种 Scheimpfl \ddot{u} 立体 PIV 布置方案在折射率不同的介质中难以直接实现,这是因为折射率的不同导致了光路的偏转,为了更清楚得说明这个问题,对同一介质和不同介质中 Scheimpfl \ddot{u} 布置方案中的光路变化情况做了对比,如图 5 所示。

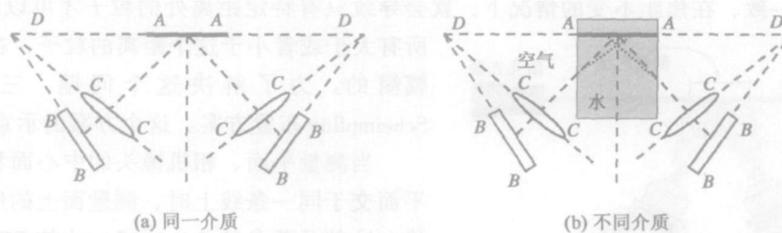


图5 折射率不同对 Scheimpfl \ddot{u} 光路的影响

Fig. 5 Influence of refractivity on the light of the Scheimpfl \ddot{u} arrangement

图5中, A-A 为测量位置, D-D 为测量位置所在的平面, C-C 为相机镜头的中心平面, B-B 为相机感光面所在的平面。在图 5(a) 中,光路的布置满足 Scheimpfl \ddot{u} 方案, A-A 中的粒子都可以清晰成像。而对于图 5(b),由于折射率的不同,光路发生偏转,原来的粒子成像发生变形,不能得到清晰的粒子图像。

(2) 折射率校正方法 为了解决折射率不同对 Scheimpfl \ddot{u} 布置方案的影响,本文提出了折射率校正的方法,来实现不同介质情况下的三维 PIV 布置方案。对于折射率不同的介质来说,如果光线以垂直方向进入另一种介质,光的传播方向是不会改变的。根据这个原理,设计了一个折射率校正装置,来满足光线垂直入射的条件。图 6 所示就是这种附属装置及其对光路的校正效果图。这个装置中,添加了与测量流体相同的介质,这就保证了在其内部不受折射率不同的影响,而这个装置的一个侧面与相机透镜的中心面平行,测量面粒子反射的光能够垂直的从校正装置的该侧面射出,因而传播方向不发生改变,使得 Scheimpfl \ddot{u} 布置方案得以实现,这就

是折射率校正法。图7为安装了折射率校正装置的试验现场图。

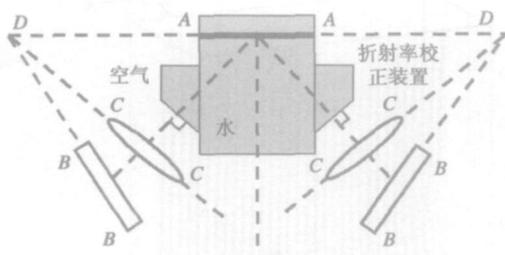


图6 折射率校正装置对光路的校正效果

Fig.6 Effect of the refractivity-revised device on the light



图7 三维PIV试验现场布置图

Fig.7 Work station of the 3D PIV experiment

3.2 三维PIV试验标定

三维PIV的标定分多次成像标定和一次成像标定。在本试验中,采用多次成像的方式对试验进行标定。在标定时,把激光片光源的厚度分成四等分,这样,共有5个标定位置,将靶盘自上而下移动,分别完成5个位置的标定。具体的标定方法如下:根据试验位置区域的大小,自制了一块标定靶盘,这个靶盘平面上均匀分布着一系列的点,前后和左右相邻点的距离都是1cm,在靶盘的中心处,有一个十字形标志的点,这个点作为两侧相机中图像定位的依据,整个靶盘固定在一个千分尺上,便于在垂直方向上进行精确移动。在标定的时候,首先把这个靶盘放在激光片光源的上边缘处,此时用两个相机进行第一次照相,然后把靶盘向下平移0.25mm,进行第二次拍照,这样依此类推,共移动4次,全部的移动距离为1mm,成像次数为5次,这样就把实际的图像位置变化与像中位置变化的关系找了出来。这种标定方法使 z 方向的标定更加细化,减小了试验系统误差,提高了三维速度的测量精度。

4 试验结果分析

试验时,对于每一个工况,每个相机分别连续采集100对图像。对所采集的粒子图像进行处理,就可以从两个相机在同一时刻分别拍摄的一对照片中得到流场的三维流动信息。限于篇幅,本文只选择速度 v_2 情况下,对 $d_1=0^\circ$, $d_2=30^\circ$ 时的流动进行比较,分别命名为 d_1v_2 、 d_2v_2 工况。为了对比不同工况时的总流动效果,把每个工况的100个瞬态结果进行平均,得到了每个工况下的平均三维流动分布。

4.1 三维速度矢量分析

图8为 d_1v_2 、 d_2v_2 工况的三维速度矢量分布图。从图中可以看出,吸入涡发生在靠近侧壁面的位置,在吸入涡的中心存在非常明显的垂直方向速度分量,涡结构向下延伸,这是通过二维PIV无法得到的结果。同时可以得到,在来流速度相同时,对于 $d=0^\circ$ 时,靠近侧壁面处有明显的吸入涡存在,而对于 $d=30^\circ$ 时,吸入涡的影响区域远小于 0° 的情况,这说明后壁面夹角为 30° 时的防涡效果远好于 0° 的效果。

4.2 流线结果分析

图9所示为 d_1v_2 、 d_2v_2 工况下的流线结果分布图。从图9中可以看出,流线分布图显示的吸入涡结构分布规律与三维矢量图中显示的分布规律是一致的。对于 $d=0^\circ$ 的进水口,在靠近侧壁面的地方都有明显的涡结构,而对于 $d=30^\circ$ 的进水口,涡结构不明显,而且吸入涡更加靠近后壁面处。这也证明了 $d=30^\circ$ 进水口的防涡效果更佳。

4.3 垂直速度分量结果分析

图10所示为 d_1v_2 、 d_2v_2 工况下沿着 z 轴方向的垂直速度分量 w (与 XY 平面垂直)的分布图,图中同时附有流线的分布情况以便于比较。从图中可以看出,对于 $d=0^\circ$ 的进水口,在靠近侧壁面和后壁面处,都存在非

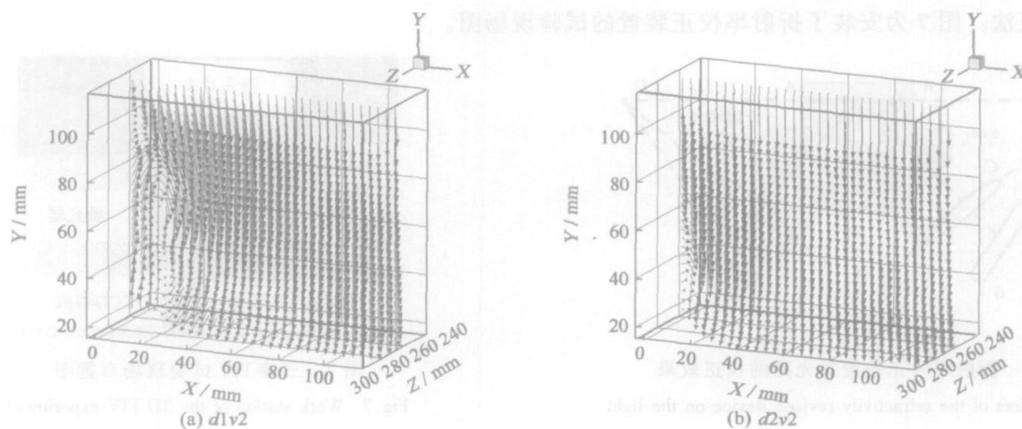


图8 三维速度矢量对比图

Fig.8 Comparison of 3D velocity vectors for $d1v2$ and $d2v2$

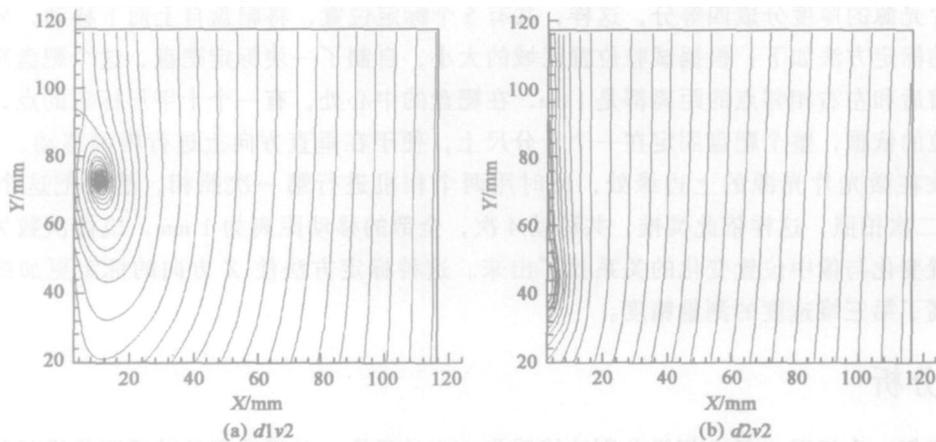


图9 流线结果对比图

Fig.9 Streamlines of $d1v2$ and $d2v2$

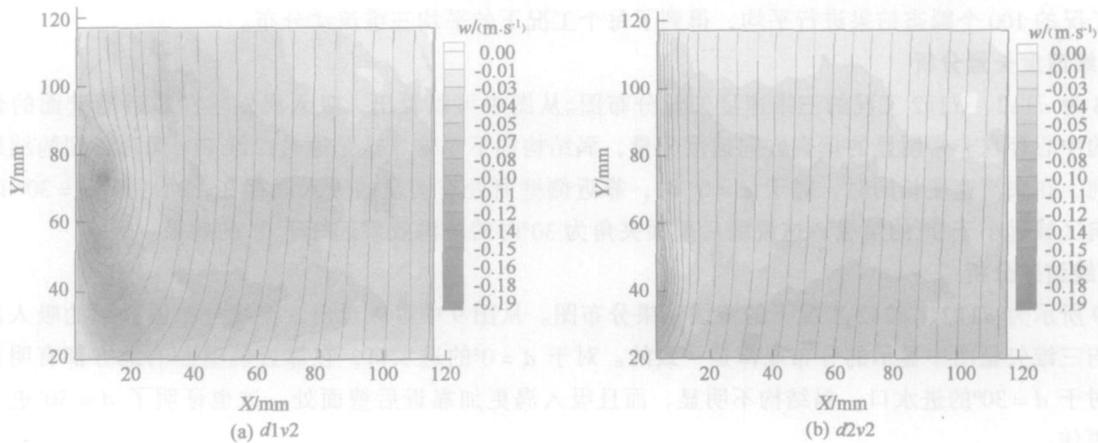


图10 垂直速度分量对比图

Fig.10 Contours of w -component of velocity with streamlines of xy plane

常明显的向下的垂直速度分量, 而对于 $d = 30$ 的进水口, 在相同的平均来流速度的情况下, 该处的垂直速度分量明显小于 0° 时的情况, 而且垂直速度分量较大的区域更加靠近后壁面。这表明, 垂直速度分量的分布与进水口前的吸入涡有着密切的联系。

5 结 论

通过对进水口前的吸入涡进行三维 PIV 测量, 得出如下结论:

(1) 使用折射率校正法可以避免折射率不同对 Scheimpflug 光路布置方案的影响, 从而实现不同介质中的三维 PIV 测量。

(2) 使用多步标定法可以提高三维 PIV 试验中对垂直速度分量的测量精度。

(3) 通过三维 PIV 试验, 可以得到吸入涡的三维流动速度, 对吸入涡流动有全面的把握。

(4) 后壁面角度不同的进水口对吸入涡的大小和强弱都有直接影响, $d = 30$ 的进水口比 $d = 0$ 进水口更能有效的阻止吸入涡发生, 可通过加大后壁面夹角 d 的方式来削弱进水口处的吸入涡。

参考文献:

- [1] 盛森芝, 徐月亭, 袁辉靖. 近十年来流动测量技术的新发展[J]. 力学与实践, 2002(24): 1 - 14.
- [2] Adrian R J. Multi-point optical measurements of simultaneous vectors in unsteady flow a review[J]. Heat and Fluid Flow, 1986, Vol 127 (7): 127 - 145.
- [3] Grant I, Fu S, Pan X, *et al.* The application of an in-line, stereoscopic, PIV system to 3-component measurements[J]. Experiments in Fluids, 1995(19): 214 - 221.
- [4] Guezenned Y G, Brodkey R S, Trigui N, *et al.* Algorithms for fully automated three-dimensional particle tracking velocimetry[J]. Experiments in Fluids, 1994 (17): 209 - 219.
- [5] 李永. 进水口前空气吸入涡流态的试验研究和数值模拟[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [6] Echavez G, McCann E. An experimental study on the free surface vertical vortex[J]. Experiments in Fluids, 2002 (33): 414 - 421.

Application of 3-D-PIV in measuring the entrained vortex

LI Yong¹, WU Yu-lin², YUAN Hui-jing³, PAN Hai-lin¹

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100080, China;

2. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Mechanics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: In order to study the entrained vortex flow and get the influence of the structure of the intake on it, the 3-D-PIV technique is used to measure this kind of flow near the horizontal intake. The image of the particles got by 3-D-PIV experiment in two media is unclear for the difference of refractivity in different media. So the refractivity-revised method is used to solve the problem. And the multi-step calibrated method is used to improve the measurement precision of the w vector. In the experiments, the distributions of the 3-D velocities of the entrained vortex are obtained. The relation between the entrained vortex and the structure of the intake is also found. Results show that the intake with 30° angle chest wall can prevent the entrained vortex effectively than that with 0° angle chest wall, so it is a good idea, through changing the angle of the chest wall, to prevent the entrained vortex near the intake.

Key words: entrained vortex; 3D-PIV; intake; refractivity-revised method