

文章编号:1005-4642(2020)04-0054-05

## 基于粒子图像测速技术的涡旋筒易测控

吴佩芳,张润生,杜 森,吴利灿,刘宇帆,邵志刚

(华南师范大学 物理与电信工程学院 物理国家级实验教学示范中心,广东 广州 510006)

**摘要:**基于立轴涡旋理想模型结合漏水及水泵冲击方法精巧设计了抽水进水平台,利用该装置生成稳定且可控的流体涡旋.采用跟踪流体运动的示踪粒子、激光器、CCD相机等器材构成本实验的测量系统,利用 Virtual Dub 软件处理视频得到连续分帧的清晰像,通过 PIV 粒子图像测速技术对摄取图像进行处理,得到不同高度、距离涡旋中心不同距离的三维平面内的涡度、速度环量等涡旋相关物理量的具体数据.结果表明:对于同一稳定流体涡旋,越靠近涡旋中心,流速越小,涡度越大;涡旋高度越高,涡旋表面速度越小.

**关键词:**涡旋;地转偏向力;Virtual Dub;PIV 粒子图像测速技术

中图分类号:O351.2;O4-39

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.04.011

对于涡旋的研究,自 Rankine 组合涡旋模型问世以来,科学家们就一直试图利用简化的纳维-斯托克斯方程以及流体测速设备对于不同的涡旋进行理论或实验的研究.对于立轴涡旋来说,也有科学家开始陆续进行对其理论分析、模型试验以及数值模拟的探索<sup>[1-2]</sup>,Tomomi 等人更是研究了水流上升气泡与涡核的相互作用<sup>[3]</sup>.本文在立轴涡旋理想数学模型基础上设计了相关的涡旋产生装置,并基于 PIV 粒子图像测速技术测出涡旋的相关物理量,进行对立轴涡旋的筒易测控,结果验证立轴涡旋理想数学模型的正确性,同时为初次接触涡旋的人们提供基础理论与实验指导.

### 1 实验原理

#### 1.1 立轴涡旋数学模型

涡旋的特性参量主要包括涡旋半径、涡量、最大切向速度等.文献[4]提出,常见的表面涡旋由涡旋的有旋和无旋 2 部分组成,同时给出了立轴涡旋的理想流体数学模型,如图 1 所示.

假设立轴涡旋为轴对称流动  $\Delta t$

$$\frac{\partial v_k}{\partial \theta} = \frac{\partial p}{\partial \theta} = 0, \quad (1)$$

其中,  $v_k$  为切向流速  $v_\theta$ 、径向流速  $v_r$  或轴向流速  $v_z$ ,  $p$  为静水压力.

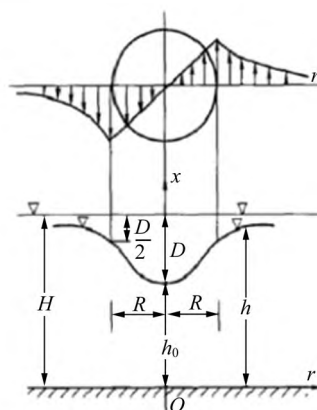


图1 立轴涡旋理想数学模型

若在水深为  $H$  的水面上出现恒定半径为  $R$ , 角速度为  $\omega$  的立轴涡旋,则切向速度  $v_\theta = \omega r$ , 由于水体具有黏性,在  $r \geq R$  以外的水体也会被带动从而绕着立轴涡旋中心做圆周运动,其切向速度  $v_\theta$  随着  $r$  增大而减小,即

$$v_\theta = \frac{\omega R^2}{r}, \quad (2)$$

且王英奎等对于立轴涡旋公式进行了改进<sup>[5]</sup>,得

收稿日期:2019-12-16;修改日期:2020-02-19

基金项目:国家自然科学基金面上项目资助(No. 11774100);广东省自然科学基金项目资助(No. 2018A030313322)

作者简介:吴佩芳(1999-),女,广东韶关人,华南师范大学物理与电信工程学院 2017 级本科生.

通讯作者:邵志刚(1980-),男,湖北仙桃人,华南师范大学物理与电信工程学院教授,博士,主要从事统计物理方面的研究.



$v_z=0$ ;而且,表明在有旋流动区域

$$\omega = \frac{v_\theta}{r}, \quad (3)$$

在无旋流动区域

$$\omega = \frac{v_\theta r}{R^2}. \quad (4)$$

张兰丁等人则在上述立轴涡旋理想流体模型的基础上给出了精确满足 N-S 方程的理论解<sup>[6]</sup>,其中并未进行任何假设,同时指出根据有旋部分的旋转角速度  $\omega$  结合涡旋半径  $R$  可以计算出涡深为

$$D = \frac{\omega^2 R}{g}. \quad (5)$$

## 1.2 PIV 粒子图像测速技术原理

在涡旋流场中撒入示踪粒子,使之漂浮于流场表面,利用工业相机 CCD 记录 1 组具有固定时间间隔的图像,通过对相邻时间间隔的 2 张流场图像进行数据处理,则可获取流场中的示踪粒子分布图像并进行对应的数据处理。

贾辉等人给出了一种计算涡旋速度的方法<sup>[7]</sup>.如果已知某示踪粒子在时刻  $t_1$  后经过时间  $\Delta t$  后在时刻  $t_2$  的对应图像,则可计算出  $\Delta t$  时间内粒子运动的位移,从而根据速度-位移公式流体速度矢量,从而表征涡旋表面流体速度.计算公式为

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{x(t+1) - x(t)}{\Delta t}, \quad (6)$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{y(t+1) - y(t)}{\Delta t}, \quad (7)$$

则速度矢量大小和方向为

$$|v| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}, \quad (8)$$

$$\theta = \arctan \frac{v_y}{v_x}. \quad (9)$$

## 2 实验装置

### 2.1 涡旋发生控制系统

由于水从漏水口往下漏与阀门壁摩擦,水流的速度变小,外圈的水向中心补充导致水流呈涡旋旋进,同时还有水泵冲进的水为涡旋源源不断地提供动力,使其不会慢慢耗散,协同水泵进水和漏水口大小可以控制涡旋的大小和速度。

为了保证涡旋稳定,引入了通心圆筒,圆筒内巧妙地连接了 2 个水泵,通心圆筒不仅起到隔绝和缓冲的作用,保证实验得到的涡旋稳定且易测量,而且节省了经费。

装置如图 2 所示,上部分是方形水槽(内含通心圆筒)即涡旋产生控制部分,漏水口和进水口都在上部分,下部分是储水箱,水通过漏水口漏在储水箱里,然后被水泵泵上方形水槽,这样既有助于形成涡旋,也可以保持涡旋水面的稳定。

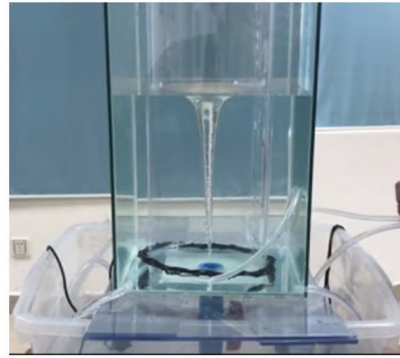


图 2 实验装置图

### 2.2 涡旋测量系统

PIV 粒子图像测速技术是一种瞬态流动平面二维速度场测试技术,能对一定平面内的速度场分布进行测量<sup>[8]</sup>.其原理是在被测量的流场中加入示踪粒子,用激光照亮流场,在照亮片区的法线方向附近用高速摄像机记录流场中示踪粒子的图像,再采用互相关算法对图像进行处理得到流场速度矢量分布图.该方法克服了以往其他测量方法只能单点测量的缺陷。

### 2.3 实验器材

实验器材:

1) 方形水槽 1 个,尺寸为 25 cm × 25 cm × 40 cm,4 个侧壁的左下角均开有 9 mm 的小孔,用于接入水管;在水槽底部开有漏水口,接入水阀门,可以控制漏水的速度。

2) 水泵 4 台,选用了 2 台扬程为 15 m 的水泵、1 台扬程为 10 m 的水泵、1 台扬程为 1 m 的水泵,分别接上 8 mm 外径的水管.通过水泵之间开关的搭配,可以实现涡旋的稳定形成。

3) 水阀门 1 个,水阀门实用直径约 2 cm,通过开关水阀门实现涡旋大小的控制,也可以调节水面的稳定。

4) PVC 软管(水管)4 根,外径为 8 mm,连接水泵与方形水槽。

5) 储水箱 1 个,储水箱用来储存发生涡旋用水,漏水口漏水漏在储水箱中,水泵也从储水箱中

抽水.

6) 外置纸箱 1 个, 提供黑暗的环境.

7) PVC 塑料通心圆筒 1 个, 通心圆筒底部侧面开有 2 个小口, 用于连接水管, 使得在圆筒内形成涡旋.

8) 铁丝圈 1 个, 用于固定住通心圆筒, 不会使通心圆筒在内外水压的挤压下变形, 进而维持涡旋的形状.

9) 5 mV 激光器 1 台, 照亮示踪粒子, 使得相机能够清晰地拍到, 也方便软件对其进行图像处理和识别.

10) CCD 高速相机 1 部, 记录示踪粒子运动地轨迹与图像.

11) 示踪粒子选用塑料粒子, 作用为跟随水体做涡旋的运动.

12) 双凹柱透镜 1 个, 将激光源拓展成扇形光源, 照亮整个涡旋水面.

13) Virtual Dub 软件, 将视频素材进行剪辑、分帧, 获得连续的清晰的图片.

14) Matlab PIVlab 工具包, 将进行图像处理, 模拟流场的速度矢量图.

### 3 结果及分析

#### 3.1 实验步骤

1) 关闭方形水槽底部的漏水阀门, 打开 4 台水泵, 向水槽底角进水口泵水, 其中有 2 台水泵通过接水管接入水槽内的通心圆筒中.

2) 待水位上升 30 cm 后, 打开水槽底部漏水阀门, 控制漏水速率, 保持水面维持稳定并形成稳定涡旋.

3) 接通线性激光并照射涡旋表面, 撒入示踪粒子, 利用 CCD 相机拍摄清晰视频.

4) 关闭其中 1 台水泵, 使液面高度水面下降到 1 cm, 打开水泵让液面维持稳定, 重复步骤 3), 每降低 1 cm 测 1 组数据, 测 10 组数据.

5) 利用 Virtual Dub 软件将获得的不同高度的涡旋视频进行剪辑、分帧, 获得连续的、清晰的图片.

6) 利用 Matlab PIVlab 互相关算法对获得的图片进行图像处理, 模拟出流场的速度及涡度矢量场, 得到不同高度、距离涡旋中心不同距离的三维平面内的涡度、速度环量等涡旋相关物理量的具体数据.

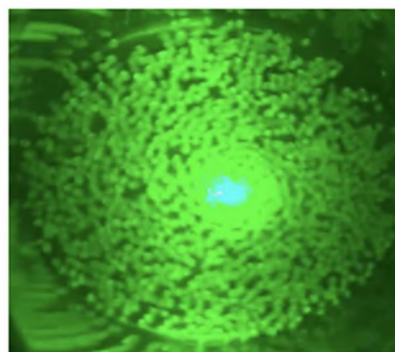
#### 3.2 实验效果

##### 3.2.1 涡旋发生效果

图 3(a) 为产生稳定涡旋时的侧视图, 图 3(b) 为在激光器照射下撒入示踪粒子后涡旋的效果图.



(a) 稳定涡旋侧视图



(b) 撒入示踪粒子后涡旋侧视图

图 3 涡旋发生效果

##### 3.2.2 涡旋剪辑效果

图 4 为应用 Virtual Dub 将得到的涡旋视频进行分帧处理, 得到的一系列连续的分帧图片.

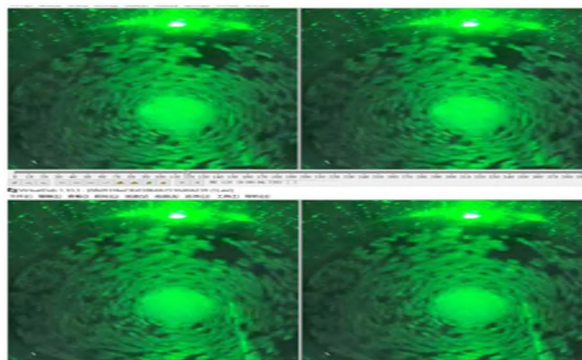
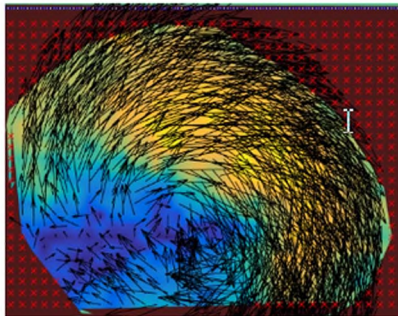


图 4 Virtual Dub 处理后的分帧照片

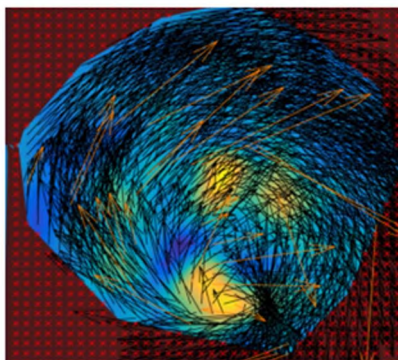


3.2.3 实验结果

首先,对所得的分帧图片进行流场分析. 为了减小实验误差,将激光曝光以及气泡部分进行了 Mask 处理(Mask 选中区域将在后面的运算中不会被分析处理),多次傅里叶变换后可得到稳定涡旋的涡旋流场流量图. 图 5 为通过 PIVlab 得到稳定涡旋在液面高度为 25 cm 和 30 cm 的涡旋流场图.



(a)25 cm



(b)30 cm

图 5 不同液面高度下涡旋流场图

然后跟踪单个粒子的运动轨迹,图 6 为在液面高度为 30 cm 时画出的单个粒子从涡旋外圈向中运动的轨迹图.

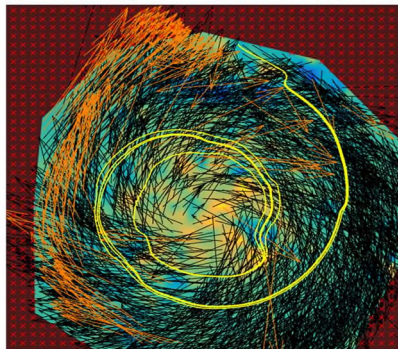
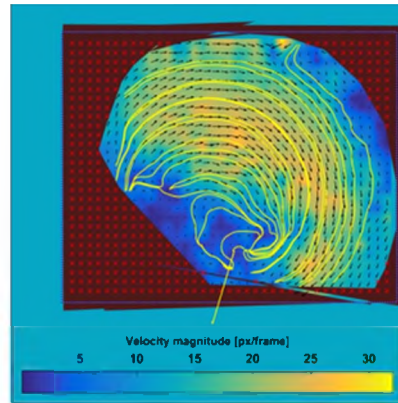
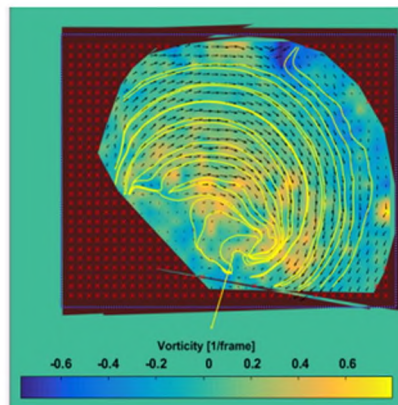


图 6 液面高度 30 cm 粒子运动轨迹图

其次,同时跟踪多个粒子,得到涡旋的流线图,同时处理得到涡旋二维平面速度及涡度矢量分布图,如图 7 所示.



(a)30 cm 高度流线及速度分布图

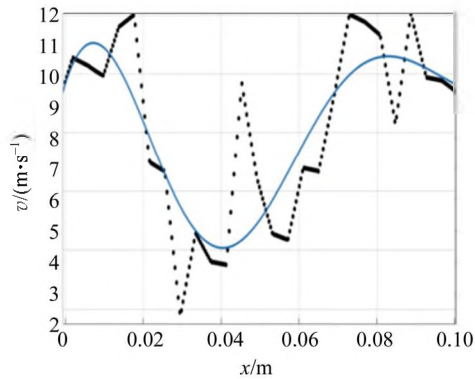


(b)30 cm 高度流线及涡度分布图

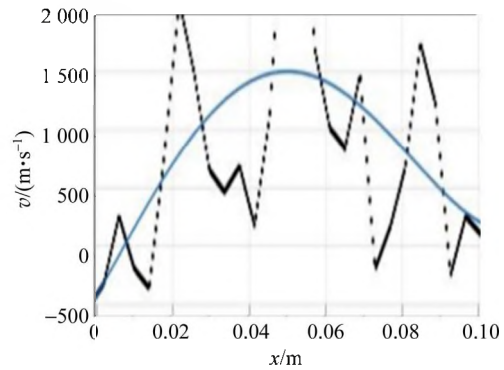
图 7 液面高度 30 cm 粒子流场特征图

最后,从图像处理后的涡旋流场图中可以清晰地看到涡旋各处的流速矢量方向、各粒子的运动轨迹以及确定涡旋中心,对处理后的涡旋流场图采用自适应互相关法,选中过涡旋中心的 1 条直线,分析其上的涡度及速度分布,通过去噪处理,模拟得到贴合实际情况下的涡度及速度分布,其中取涡旋高度 30 cm 及涡旋高度 25 cm 数据,如图 8 所示,图中,黑色虚线为实际得到数据,蓝色实线为去噪模拟得到的涡度及速度分布.

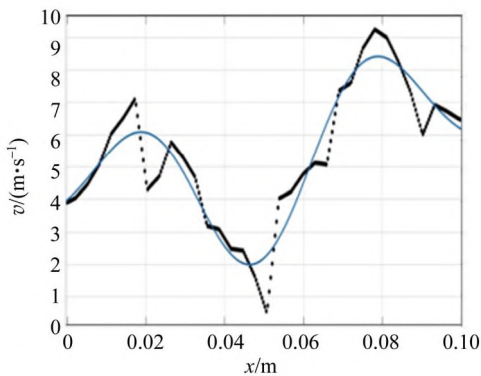
通过对比可以看出,对于同一稳定流体涡旋,越靠近涡旋中心,流速越小,涡度越大;涡旋高度越高,涡旋表面速度越小.



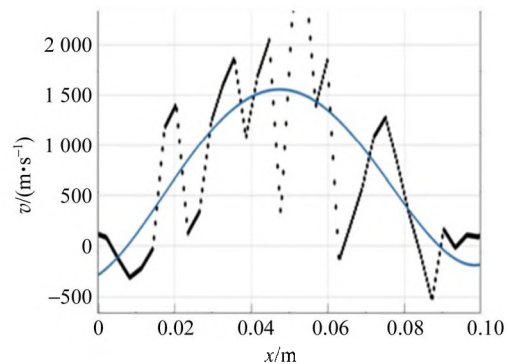
(a)液面高度 25 cm 过涡旋中心直线上的速度分布



(b)液面高度 25 cm 过涡旋中心直线上的涡度分布



(c)液面高度 30 cm 过涡旋中心直线上的速度分布



(d)液面高度 30 cm 过涡旋中心直线上的涡度分布

图 8 不同高度过涡旋中心的速度、涡度分布图

## 4 结 论

在立轴涡旋理想数学模型基础上设计了涡旋产生装置,生成稳定且可控的流体涡旋,通过 PIV 粒子图像测速技术对于立轴涡旋在不同液面高度下的速度和涡度进行实验分析. 实验结果表明,对于同一稳定流体涡旋,越靠近涡旋中心,流速越小,涡度越大;越远离涡旋中心,流速越大,涡度越小. 对于同一稳定流体涡旋,涡旋高度越高,涡旋表面速度越小,涡旋高度越低,涡旋表面速度越大. 实验结论与立轴涡旋理想流体速度环流数学模型的结果相似<sup>[1]</sup>,验证了立轴涡旋理想数学模型的正确性.

### 参考文献:

- [1] 陆遥,宿晓辉,李俊杰. 进水口立轴漩涡问题综述[J]. 水电能源科学,2019,37(9):78-82.  
[2] 刘强,杨敬. 溪洛渡电站泄洪洞进口立轴漩涡模型

试验研究[J]. 水电站设计,2014,30(3):56-59.

- [3] Tomomi U, Yukihiko I. Study of the interactions between rising air bubbles and vortex core of swirling water flow around vertical axis [J]. Chemical Engineering Science, 2016:142.  
[4] 张长高. 水动力学[M]. 北京:高等交易出版社,1993.  
[5] 王英奎. 立轴漩涡的力学特性与防控措施研究[D]. 北京:清华大学,2011.  
[6] 张兰丁. 立轴漩涡精确解及其实用意义[C]. 第七届全国海事会议论文集,2001.  
[7] 贾辉. 河工模型中漩涡参数图像测量研究[D]. 开封:河南大学.  
[8] 柯森繁,石小涛,王恩慧,等. 简易粒子图像测速(PIV)技术开发与优化技巧[J]. 长江科学院学报,2016,33(8):144-150.  
[9] 何焰兰,彭刚,欧阳建明,等. 如何建设好实验 MOOC[J]. 物理实验,2019,39(8):38-40.

(下转 61 页)

的不足,以能够更加方便、准确地测量相关数据为目标,利用生活中常见的材料、学校实验室的力传感器、购置的步进电机等器材制作向心力影响因素探究仪。该仪器具有良好的可视性、可操作性,既可进行演示实验,又可进行学生小组实验。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准[M]. 北京:人民教育出版社,2017:15.
- [2] 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心. 普通高中物理课程标准实验教科书·物理(必修2)[M]. 北京:人民教育出版社,2005:20-25.
- [3] 黄军,代伟,谢春茂,等. 用传感器探究影响向心力大小的因素[J]. 物理实验,2015,35(2):25-27.
- [4] 列晓东. 基于STM32的向心力探究演示仪的研制[J]. 物理实验,2017,37(4):59-62.
- [5] 刘银奎. 自制向心力表达式验证仪[J]. 物理实验,2012,32(1):25-26.

## Demonstrator on exploring influence factor of centrifugal force

JIANG Hua, ZHANG Wei-lin

(Tongnan Middle School, Chongqing 402660, China)

**Abstract:** To make up for the shortcomings of existing experimental instruments, according to the principle of centripetal force, a centripetal force demonstrator was designed by using stepping motor, force sensor, wireless transmitter and ruler. The centripetal force formula was obtained through experiments. The device could explore not only the centripetal force formula, but also the influence factors of centripetal force according to the control variable method.

**Key words:** centripetal force; radius; angular velocity

[责任编辑:尹冬梅]

(上接 58 页)

## Vortex based on particle image velocity measurement technology

WU Pei-fang, ZHANG Run-sheng, DU Miao, WU Li-can, LIU Yu-fan, SHAO Zhi-gang

(National Demonstration Center for Experimental Physics Education, School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Based on the ideal mathematical model of vertical vortex, combined with the method of water leakage and water pump impact, a pumping water inlet platform was designed elaborately, and a stable and controllable fluid vortex was generated by using the platform. The measuring system of the vortex was composed of tracer particles, lasers, CCD cameras and other devices to track the fluid movement. The specific data of vortex related physical quantities such as vorticity and velocity circulation in three-dimensional planes with different height and distance from the vortex center were obtained by PIV particle image velocimetry technology and were used to process the captured image acquired from the video by Virtual Dub software. The results showed that for the same stable fluid vortex, the closer it was to the vortex center, the smaller the velocity was, the greater the vorticity was; and the higher the vortex height was, the smaller the vortex surface velocity was.

**Key words:** vortex; geostrophic bias force; Virtual Dub; PIV particle image velocity measurement technique

[责任编辑:郭 伟]