

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.03.026

离子风空气加速器流场特性的 实验平台设计及研究

庄蒙蒙¹, 周砚江^{2*}, 孔春林¹, 朱继保¹, 任 燕¹, 刘 杰¹

(1. 杭州天明环保工程有限公司, 浙江 杭州 310018;

2. 浙江理工大学 机械与自动控制学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对离子风空气加速器内部的复杂流场特点,将离子风技术应用于气流加速方面。开展了离子风技术研究,分析了离子风空气加速器的原理。通过对国内外粒子成像技术在离子风效应实验研究方面的分析,建立了粒子图像测速(PIV)技术与离子风空气加速器流场的关系,提出了针对离子风空气加速器流场特性的PIV实验装置平台搭建的实验设计思路,包括PIV测量装置、高压电源、放电电极与流体通道四部分。对实验平台进行了论证,在此基础上,对PIV实验平台搭建的目的和意义、PIV实验设计的重点和难点进行了研究分析;阐述了整个PIV试验流程,指出了PIV实验的测量误差和实验操作误差的来源。研究结果表明,基于离子风空气加速器流场特性的实验平台搭建具有合理性和严密性。

关键词: 离子风空气加速器; 粒子图像测速; 实验平台; 流场特性

中图分类号: TM832 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)03-0358-06

Design and research of experimental platform on ionic wind air accelerator for measuring fluid field characteristic

ZHUANG Meng-meng¹, ZHOU Yan-jiang², KONG Chun-lin¹,

ZHU Ji-bao¹, REN Yan¹, LIU Jie¹

(1. Hangzhou Tianming Environmental Protection Co. Ltd., Hangzhou 310018, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the characteristic of the complex flow fluid of ionic wind air accelerator, ionic wind technology was put into the aspect of air flow accelerating. Research of ionic wind technology was investigated and principle of the ion wind air accelerator was analyzed. After the analysis of particle imaging technology having effect on experimental study of ionic wind effect at home and abroad, the relationship of partied image velocimetry (PIV) technology and the fluid field of the ion wind air accelerator was established. An experimental designed method based on PIV technology was presented to test the internal flow field of ionic wind air accelerator. PIV measuring device, high voltage power supply, discharge electrode and fluid channel were designed. The PIV experimental platform was demonstrated. The purpose and meaning of the PIV experimental platform, the key and difficult point for PIV technology in ion wind air accelerator were analyzed. The controlling of tracing particle distribution, which is the key to the success of PIV experiment, was evaluated. The process of PIV experiment was demonstrated; the resources of errors from PIV experiment measurement and the experimental operations were shown. The results show that the design and research of PIV experimental platform based on ionic wind air accelerator are reasonable and rigor.

Key words: ionic wind air accelerator; partied image velocimetry(PIV); experimental platform; fluid field characteristic

收稿日期: 2012-10-15

作者简介: 庄蒙蒙(1984-),女,浙江杭州人,主要从事电除尘、气流加速、室内空气净化等方面的研究。E-mail: zhuangmengmeng3001@163.com

通信联系人: 周砚江,男,教授,硕士生导师。E-mail: zyj@zstu.edu.cn

0 引言

离子风是指在两个相邻曲率半径相差极大的两电极间,施以高压电源发生电晕放电现象,从而形成的空气加速流动^[1-2]。粒子图像测速技术(PIV)在速度场的测量上可不受单点测量的限制,实现高精度的速度场测量。研究者利用PIV对离子风空气加速器内部的流速场进行研究,可获得离子风空气加速器的速度场、定量流场的流场运动参数。

20世纪以来,各国学者开始利用PIV技术对离子风速问题进行可视化研究和深入探讨。2001年波兰的Jerzy Mizeraczyk等^[3]用PIV方法测量静电除尘器中的烟雾流动的速度场;2006~2007年,法国普瓦提埃大学Eric Moreau研究小组对离子风进行了可视化实验研究,采用烟线法、PIV等技术研究并提出改善离子风绕流边界层及正负电晕对流场分布的影响的方法^[4-12],目的在于提高离子风发生装置的工作效率;2009年,西安交通大学的杨兰君等人^[13]利用PIV技术研究了针-板式离子风特性;2010年,韩国蔚山大学的Jichul Shin和美国德州大学的Laxminarayan L. Raja^[14]通过PIV技术研究了连续和脉冲直流驱动电源形成辉光放电产生的气流驱动;2011年,法国的N. Zouzou和Eric Moreau^[15]利用PIV研究了丝状放电对于板-板式DBD介质阻挡除尘器的粒子轨迹的影响;Sajanish Balagopal和David B. Go^[16]通过利用PIV技术,研究了大容量气流和逆流离子风的相互作用;Nouredine Zouzou, Boni Dramane等人^[17]利用PIV技术研究了线-板式和板-板式电极结构DBD静电除尘中的EHD流动和收集效率,目的是研究离子风对于粒子收集效率的影响;法国的M.Tański, M.Kocik等人^[18]利用三维PIV技术研究了由介质阻挡放电驱动的电流动体动力学气体系。

从目前国际研究的前沿可以看出,PIV技术对改进和完善离子风气流加速技术方面的研究具有无比的优越性。因此,本研究设计用于测量离子风空气加速器流场特性的实验平台,并对其进行了研究,证明PIV实验平台在离子风空气加速器的复杂流场特性测量以及提高气流速度的性能方面有着重大意义。

1 离子风空气加速器结构

离子风空气加速器利用空气放电时的离子运动产生的气流实现气流加速的一种装置,主要由电极结构、高压电源以及流体通道3个部分组成,电源模块为气体分子发生电晕放电和极间离子输运提供能量,电极模块的参数主要涉及极间距离、电极几何形状等。气流通道作为气流运动的通道,可提供不同的实验环境

(包括空气湿度、气体类型、室内温度、光线强度等)。

本研究的离子风空气加速器的实验装置如图1所示,图1中电极部分采用线-筒式电晕放电结构,电晕极采用直径是0.23 mm,长度是150 mm的钼丝,集电极采用直径是25 mm,长度是150 mm的不锈钢钢管。为了防止高压电源击穿流体通道,两电极用聚乙烯材料的绝缘支架进行固定。高压电源的频率调节范围18.2 kHz~22.2 kHz,实现输出高压范围16 364 V~20 000 V,电压微小变化的幅值为1 000 V。流体通道采用透光性好、易于加工、强度高的有机玻璃箱体,尺寸为:250 mm×250 mm×300 mm。

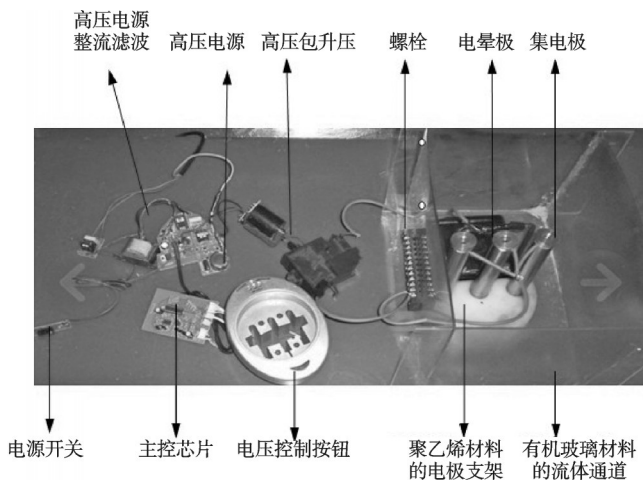


图1 离子风空气加速器的结构实物图

2 离子风空气加速器PIV实验平台设计

2.1 PIV原理

粒子图像测速技术(PIV)是一种基于流场图像互相关分析的二维流场非接触式测试技术。本研究在被测流场中添加一些跟随性和反光性良好的示踪粒子,通过记录示踪粒子的图像,对流体速度进行测量。在被测的流场中,本研究用激光偏光照射所需流场的切面区域,通过CCD高速摄像机记录连续两次或多次曝光的示踪粒子的图像,采用自相关或互相关算法对所拍摄的图像进行处理,从而计算出所需测量流体中各点速度矢量场,得到速度矢量图、流线图、涡量图等。

PIV测速属于一种流体速度的直接测量方法,它通过测量示踪粒子的瞬时平均速度实现对二维流场的测量,克服了传统测速仪器如热线仪、激光多普勒测速仪(LDV)等在单点测量上的限制,可实现高精度测量,并且测速范围大(最高可测流速为几百米/秒的流场),与被测流场截面非接触测量,对流场无干扰,能够获取全流场的瞬时流动速度矢量。PIV对于深入理解复杂流场中流体微团之间的相互作用及流动机理方面具有重要的意义。本研究采用粒子图像测试技术测量离

子风空气加速器内部流场的二维气流分布,通过对复杂流体测量的相关结果进行分析,进一步认识离子风空气加速器机理和内部流场结构,探索提高离子风流量和风速以及实现气流加速的方法和途径。

2.2 PIV 系统组成

2.2.1 PIV 系统的硬件组成

(1) 激光照明系统。该试验所使用的照明激光系统包括Nd:Yag激光器和激光电源控制器。当照明流场的一个截面时,需要将激光束转换成具有一定厚度(0.1 mm,甚至几毫米)均匀和足够强的激光片光。该试验所用Nd:Yag激光器系统的参数指标如下:输出能量为15 mJ;输出波长为532 nm;不稳定性为 $\leq \pm 5\%$;脉宽为15 ns;重复频率为10 Hz或50 Hz。

(2) 同步控制系统。同步控制系统主要是指数字同步脉冲发生器,由同步分离器、计数器、EPROM只读存储器、缓冲器、触发器、编程器等构成。该实验的同步控制器参数如下:最小跨帧时间为200 ns;输出信号为可编程TTL;重量为3.2 kg;外形尺寸为290 mm×250 mm×100 mm;输入电源为100/110/220/240 VAC,50 Hz~60 Hz。

(3) 图像记录系统。图像记录系统主要包括CCD高速摄像机、微距镜头、图像采集卡及相机控制器等。其中图像采集板和高速数字相机、相机控制器与同步控制器相连接,同步控制器发出的触发信号到达高速摄像机后,相机开始执行拍摄。CCD相机捕捉到的粒子图像被传输到计算机内保存。该试验所采用的相机为美国TSI公司生产的POWERVEIEWTMPlus 2MP相机,型号为630057,像素分辨率可以达到1 600×1 200像素。

2.2.2 PIV 软件系统组成

该试验所用PIV系统的软件的主体部分是美国TSI公司的Insight3G。该软件在全场图像采集和分析处理中与2MP相机实现无缝连接,能够提供流场的实时显示功能,相机拍摄到的粒子图像(要保证一定的清晰度)传输到计算机并处理后,得到待测流场的粒子运动的速度矢量等物理量。

粒子图像的判读方法的具体算法如下:

(1) 图像粒子标定:主要将示踪粒子像跟背景像区分开;

(2) 连续两幅图中相同粒子的对应;

(3) 速度的计算;

(4) 误对应粒子速度的判断及其消除。

2.3 PIV 实验平台

本研究的实验平台主要包括电极部分、高压电源、流体通道、PIV测速系统4个部分,该PIV实验的测试流程如图2所示,PIV实验平台的照片如图3所示。

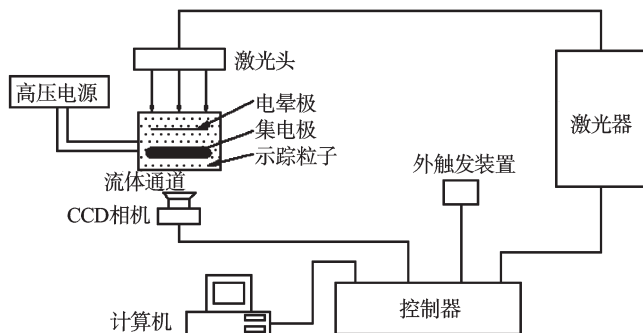


图2 离子风空气加速器的PIV测试流程示意图



图3 该实验中的离子风空气加速器实验平台照片

为保证实验的准确可靠,在实验前,本研究首先要对离子风空气加速器进行通电测试,通过调节离子风空气加速器的风量按钮使其能正常产生离子风;其次,要按照二维PIV测量试验要求,对PIV测试系统进行软件、硬件系统参数设置,并调整离子风空气加速器试验箱体、激光光头、CCD相机三者位置;CCD相机镜头方向和待测流场区域必须保持垂直,激光光头能够发出片光源且能够照亮整个待测流场,即要求激光,待测流场和相机垂直放置。第三,要对示踪粒子的浓度进行调试,向离子风空气加速器中散播示踪粒子,并将打开离子风空气加速器的电源开关,反复调试实验,保证示踪粒子的大小和浓度适合实验条件;最后,要对离子风空气加速器实验装置进行密封。从而保证实验中能够拍摄到清晰的流场图像。

2.4 加速器流场应用PIV测量的技术难点

离子风空气加速器的内部流场具有一定的复杂性,在利用PIV系统对离子风空气加速器流场进行测量过程中,本研究遇到如下实验技术上的难点:

(1) 在示踪粒子的选择上,PIV测量离子风速时要求示踪粒子跟随性和散播性较好且充满整个容器,对示踪粒子产生烟雾的装置温度控制有一定难度;

(2) 在电极结构上,PIV测速时要求不能有反光,但由于该实验中的电极采用不锈钢材料,在激光照亮流场的截面时电极会产生反光,造成CCD相机拍摄的图像亮度不一,直接影响Insight 3G软件对照片的数据处理;

(3) 在CCD相机拍摄流场图片时,由于极间距离

较小,CCD相机拍摄的图片的准确度会受到影响;

(4) 由于笔者所研究的离子风速发生时产生的离子会吸收示踪粒子,在示踪粒子充满整个容器时,离子风空气加速器产生的离子风很快将烟雾吸收,导致示踪粒子很少,CCD相机有可能来不及采集到最优的图片;

(5) 实验环境会影响实验的结果,在该实验中用电炉加热示踪粒子时会导致密封容器内部温度升高,测得的离子风速数据与实际装置产生的离子风有一定的误差。

3 实验装置的测试流程

3.1 示踪粒子的选择

PIV实验成功与否的关键因素之一是选择合适的示踪粒子。对于不同流场的PIV测量,对示踪粒子的选取原则不尽相同,除了满足无毒、无腐蚀、无磨损、清洁、化学性质稳定等一般要求以外,示踪粒子选择必须同时兼顾粒子的跟随性、散射性和易于均匀散播等方面因素。

跟随性是为了保证示踪粒子能真实地反映待测流体的实际流场,散射性是为了有利于粒子成像的质量,示踪粒子在流场中的均匀散布是为了能够获得全流场信息。但粒子的跟随性和散射性是互相制约的。散射性随尺寸的增加而增加,而尺寸愈大的示踪粒子对流动的跟随性愈差。在研究示踪粒子的跟随性时,通常假设:

(1) 示踪粒子的粒径足够的小,对流体运动的扰动可以忽略;

(2) 示踪粒子的形状为圆形的小球;

(3) 不考虑粒子之间的相互作用。

示踪粒子的选择要满足以下一般要求:

(1) 为了能够反映实际流体的真实情况,跟随性要好;

(2) 为了有利于摄影成像,散射特性要好;

(3) 粒子在流体中的分布和浓度大小要满足能获得全流场信息的要求。

本研究所测流体为气态流场,常用示踪粒子如表1所示。

综合上述对频率示踪粒子的跟随性和散射性的相互影响、相互制约的因素,笔者在试验中通过对3种示踪粒子(甘油,煤油,蚊香的烟雾)进行了对比实验,实验结果表明:采用甘油做示踪粒子可产生最适宜浓度,甘油产生的示踪粒子“烟雾”浓度的照片如图4所示。

3.2 示踪粒子散布均匀性的控制

PIV实验能否成功的关键就是示踪粒子的选择以及示踪粒子散布均匀性的程度,因此为了对示踪粒子

表1 气流场中常用的示踪粒子

类型	物质	平均直径/ μm
固体	聚苯乙烯	0.5~10
	铝粉	2~7
	镁粉	2~5
	玻璃球	30~100
	合成棉颗粒	10~500
液体	二氧化钛	5~20
	各种油	0.5~10

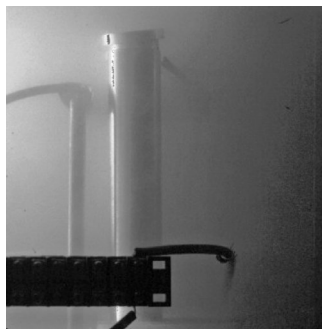


图4 该实验所选择示踪粒子浓度的实物照片

进行控制,本研究选择电压可调的调压器控制烟雾发生器的温度,进而控制烟雾的浓度和均匀性,即对示踪粒子浓度进行控制。同时为了保证流体通道的密封性和实验操作的方便性,调压装置置于流体通道的外部,并且烟雾发生器与流体通道分别通过导线与调压装置连接。

需要进一步说明的是,此处的调压装置主要包括一个电压可调的变压器,且对烟雾发生器进行0~220 V之间的电压电源的供电,本研究通过调节电炉电压,以调节其加热速度,从而调节示踪粒子的挥发速度和散布速度,即达到调节流体通道内的烟雾浓度的目的。

3.3 风粒子图像获取前PIV实验系统的调试

离子风粒子图像的获取是整个PIV实验的关键,要获得良好的粒子图像,在开机前需做的准备工作如下:

(1) 检查激光发生器与同步器、摄像机、冷却装置等的连线是否完好;

(2) 待测流场与激光光头、CCD摄像机等是否处于垂直放置状态;

(3) 调整CCD摄像机的光圈位置,确保待测流场在整个摄像机摄像范围之内。

准备工作就绪后,本研究首先将激光器能量设置成低能量(low),对流场进行初次实验,观察整个待测区域是否在拍摄范围之内,图像是否清晰,否则要调整CCD相机的焦距、光圈大小以及拍摄的角度,同时调节好激光器位置,确保其发出的激光能够照亮整个流场横截面。此外研究者要调节示踪粒子的浓度,保证整个流场内示踪粒子均匀分布。

3.4 离子风PIV实验过程

(1) 打开电源。把电源开关打到“ON”档,同时把激光发生器和同步器也调到“ON”档。

(2) 参数设置。把电子狗放到电脑上,启动电脑,打开 Insight3G 软件,设置 Insight 3G 软件里面的各个参数,软件设置界面如图5所示。

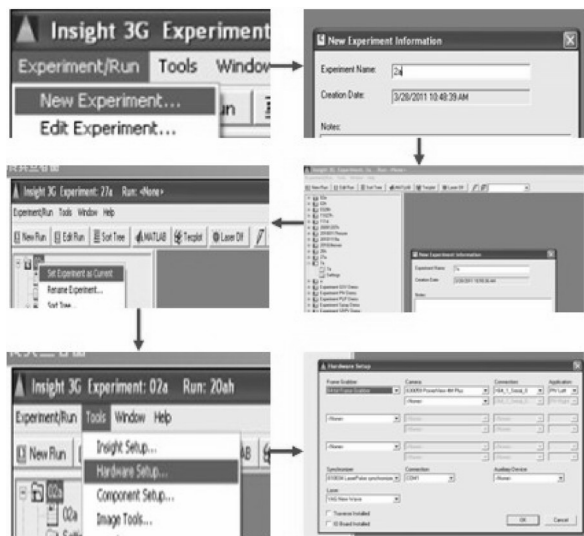


图5 二维PIV实验中Insight 3G 软件设置

(3) 寻找片光源。片光源厚度为1 mm,本研究找到最好的片光源位置以后进行调焦,通过调节光圈来调节光的强度,通过调节焦距来调节光图像的清晰度。

(4) 对待测流场进行标定。为了精确计算出待测流畅的分布,本研究需要进行标定。二维PIV实验的标定方法可以采用尺子或靶盘。标定方法如下:在 Insight 3G 软件中,新建试验用的文件夹,对硬件进行设置之后,通过在“Free/continuous-capture-stop”下“processing create”做一个标定文件,通过点击 Measure 划两条线,再把线的尺寸改为实际尺寸。

(5) 图像采集。在图像采集之前,本研究要对 CCD 相机进行焦距和镜头的调整,并调整激光位置,使待测流场处于最佳拍摄位置,在整个拍摄在“capture Synchronized/sequence”下设置图片的数目。设置能量的大小一般设置为中能量下的120~150。

(6) 查看图像拍摄效果。首先查看示踪粒子浓度分布是否足够良好,分布是否均匀;其次查看激光是否照亮整个流场。本研究先对一幅图像(A、B两帧)进行处理,查看是否误差和粒子分布是否良好。对图像初步计算时,研究者要注意观察向量分布是否平滑,若错误矢量比较明显,则表示图像采集的效果不够良好,要进行离子浓度的调整,直到图像采集效果满足实验要求。

(7) 图像保存和处理。当采集的图像效果令人满意时,本研究要对图像进行批处理,图像处理时一般

设置查询区域大小为 32×32 像素。二维PIV实验后图像保存的方法参数设置如图6所示。

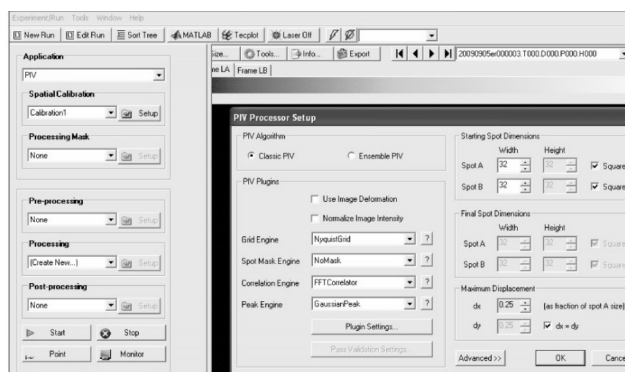


图6 PIV图像保存的方法和参数设置示意图

4 实验误差分析

PIV测量的误差来源如下:

(1) 示踪粒子的跟随性和形状尺寸引起的误差是PIV所测流场与实际粒子运动产生的流场的之间产生误差的一个主要的误差来源,造成误差的因素是示踪粒子的跟随性和流动性不够理想。

(2) 在PIV记录图像和分析图像时,噪音引起的PIV测试随机误差。

(3) 片光源的厚度。一般实验要求产生的片光源厚度为1 mm,如果片光源厚度较薄,在相机曝光时间内将会有少量粒子穿过片光,引起粒子图像位移的误差。若偏光镜太厚,则使是同一速度的粒子,在图像上留下的迹线也会不同。

(4) 系统误差。CCD高速摄像机的分辨率引起的误差。

(5) 实验环境的误差。如空气湿度、室内温度等。

在上述误差中,部分误差是可以通过选择合适的粒子及其撒播浓度、选择好合适的片光源厚度来避免,但有些误差是很难避免的,如由加速度和查询单元内的速度梯度及信号峰值的位置的确定过程中导致的误差等。计算具体误差大小的方法比较复杂,在有关文献[19~22]中已有具体的介绍,本研究不再赘述。

对于离子风空气加速器离子风PIV实验的具体情况而言,由于理论模型是在理想条件下建立的,该实验的实验结果必定会出现与模型不是完全吻合的地方。从流场曲线图可以看出,气流分布不像理想中的那样完全均匀分布,因为离子风速的产生机理比较复杂,不但和电压变化、电极结构、极间距离有关,还和空间电荷密度分布、离子的扩散、离子的输运及分布、电极之间的放电结构、室内温度与空气湿度等各种因素有关,实验必须在完全密封的情况下进行以防止空气中的其他分子的流动的干扰,实验误差主要来自以

下几个方面:

(1) 电极材料和结构。由离子风空气加速器数学模型及前面的分析和实验结果已经证实了电极结构的变化,包括极间距离的改变、电极形状、放电角度等因素都会影响离子风速,因集电极的形状不同容易产生绕流。

(2) 示踪粒子的选择和浓度。由于PIV实验的难点之一是示踪粒子的选择,该试验中,示踪粒子的种类和浓度不同,所得的实验结果就会有差异。

(3) 实验环境。该实验在完全密封的情况下进行,但是示踪粒子的发生器是一个加热单元,且放置在实验容器中,其发生的热量对离子风的流场会产生干扰。

(4) 弧光放电产生的电磁干扰。因为两电极之间只有在极间距离合适、满足起晕电压的情况下才容易发生电晕放电,继而产生离子风;且空气是属于导体,两电极之极很容易发生弧光放电,产生电磁干扰,对气流速度造成很大影响。

5 结束语

本研究分析了离子风空气加速器流场测量的PIV实验平台搭建的目的和意义,论述了离子风空气加速器的PIV实验平台的设计思路,阐述了整个实验流程以及实验的重点、难点,尤其针对整个实验的关键——示踪粒子的选择和浓度控制进行了分析。最后,对PIV测量误差的来源以及整个实验误差的影响因素进行了分析。该实验主要针对离子风空气加速器,尤其是其流场的特殊性而设计。

参考文献(References):

- [1] ROBINSON M. A history of electric wind[J]. **American Journal of Physics**, 1962, 30(5): 366-372.
- [2] CHATTOCK A P. On the velocity and mass of ions in the electric wind in air[J]. **Philosophical Magazine**, 1899, 48(294): 401-420.
- [3] LÉGER L, MOREAU E, ARTANA G, et al. Influence of a DC corona discharge on the airflow along an inclined flat plate[J]. **Journal of Electrostatics**, 2001(51-52): 300-306.
- [4] MOREAU E, LABERGUE A, TOUCHARD G. DC and pulse surface corona discharge along a PMMA flat plate in air: electrical properties and discharge-induced ionic wind[J]. **Journal of Advanced Oxidation**, 2005, 8(2): 241-247.
- [5] LOUSTE C, ARTANA G, MOREAU E, et al. Sliding discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties[J]. **Journal of Electrostatics**, 2005, 63(6-10): 615-620.
- [6] M FORTE, L LÉGER, J PONS, et al. Plasma actuators for airflow control: measurement of the non-stationary induced flow velocity[J]. **Journal of Electrostatics**, 2005, 63(6-10): 929-936.
- [7] LABERGUE A, LEGER L, MOREAU E, et al. Effect of a plasma actuator on an airflow along an inclined wall: P. I. V. and wall pressure measurements[J]. **Journal of Electrostatics**, 2005, 63(6-10): 961-967.
- [8] MOREAU E, LÉGER L, TOUCHARD G. Effect of a DC surface-corona discharge on a flat plate boundary layer for air flow velocity up to 25m/s[J]. **Journal of Electrostatics**, 2006, 64(3-4): 215-225.
- [9] FORTE M, JOLIBOIS J, PONS J, et al. Optimization of a dielectric barrier discharge actuator by stationary and non-stationary measurements of the induced flow velocity: application to airflow control[J]. **Experiments in Fluids**, 2007, 43(6): 917-928.
- [10] MOREAU E. Airflow control by non thermal plasma actuators[J]. **Journal of physics D: Applied physics**, 2007, 40(33): 605-636.
- [11] MOREAU E, TOUCHARD G. Enhancing the mechanical efficiency of electric wind in corona discharges[J]. **Journal of Electrostatics**, 2008, 66(1-2): 39-44.
- [12] MOREAU E, LOUSTE C, TOUCHARD G. Electric wind induced by sliding discharge in air at atmospheric pressure[J]. **Journal of Electrostatics**, 2008, 66(1-2): 107-114.
- [13] 袁均祥, 邱 炜, 郑 程, 等. 空气放电离子风特性的研究[J]. **中国电机工程学报**, 2009, 29(13): 110-116.
- [14] SHIN J, RAJA L L. Cathode-sheath driven low-speed aerodynamic flow actuation using direct-current surface glow discharges[J]. **Journal of Electrostatics**, 2010, 68(5): 453-457.
- [15] ZOUZOU N, MOREAU E. Effect of a filamentary discharge on the particle trajectory in a plane-to-plane DBD precipitator[J]. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2011, 44(28): 285204-285209.
- [16] BALAGOPAL S, GO D B. Counter-flow Ionic Winds for Localized Hot Spot Cooling[C]//Proceedings of ESA Annual Meeting on Electrostatics 2011. Cleveland: [s.n.], 2011.
- [17] ZOUZOU N, DRAMANE B, MOREAU E, et al. EHD flow and collection efficiency of a DBD ESP in wire-to-plane and plane-to-plane configurations[J]. **IEEE Transactions on Industry Application**, 2011, 47(1): 336-343.
- [18] TANSKI M, KOCIK M, MIZERACZYK J. Electrohydrodynamic gas pump with both insulated electrodes driven by dielectric barrier discharge[J]. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, 2011, 18(5): 1429-1432.
- [19] 张 玮, 王 元, 徐 忠, 等. 应用粒子图像速度场仪对泊肃叶流动及圆柱绕流的测量[J]. **西安交通大学学报: 自然科学版**, 2002, 36(3): 246-251.
- [20] 梁爱国, 龙新平, 何培杰. 应用PIV技术测量射流泵内部流场[J]. **水泵技术**, 2004(1): 10-14.
- [21] TSI. Particle Image Velocimetry Software Manual[M]. TSI, 2008.
- [22] MELTING A. Tracer particle and seeding for particle image velocimetry[J]. **Journal of Fluids Engineering**, 2003, 125(5): 61-72.

[编辑: 李 辉]