

大型风洞 PIV 试验的关键技术

岳廷瑞, 李付华, 张鑫, 覃晨, 张逊, 肖亚琴

(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

摘要: 从粒子产生及投放技术、图像拼接技术、反光处理技术、时序调整技术、设备标定技术五个方面深入探讨了大型风洞 PIV 试验的关键问题及处理方法; 提出了在大型风洞试验中开展粒子投放, 应选择经济实用的材料, 研制足量可控且可持续供应的粒子发生装置, 同时要在适当的位置进行投放; 在进行大视场图像拼接时, 应选择先分别计算再进行速度场结果进行拼接的方法, 并在图像采集前做拼接标定, 以获得拼接参数; 在反光处理时, 应根据实际情况选择最佳的反光处理方法, 如选择移动相机的方法, 应在图像处理时进行变形修正; 在大型风洞中, 应掌握快速高效的时序调整及设备标定方法, 提高试验效率。

关键词: PIV; 关键技术; 大型风洞

Key Technologies of PIV Test in Large Wind Tunnel

YUE Tingrui, LI Fuhua, ZHANG Xin, QIN Cheng, ZHANG Xun, XIAO Yaqin

(China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The key problems and processing methods of partial image velocimetry (PIV) test is discussed in large wind tunnel from five aspects: particle generation and delivery technology, image mosaic technology, reflective processing technology, timing adjustment technology and equipment calibration technology. In order to launch particles in large-scale wind tunnel test, it is necessary to select economic and practical materials, develop sufficient controllable and sustainable supply of particle generation devices, and launch particles at appropriate positions; As stitching large field of view images, we should choose the method of calculating separately and then stitching the velocity field results, and do stitching calibration before image acquisition to obtain stitching parameters; In reflective processing, the best reflective processing method should be selected according to the actual situation. For example, the method of moving camera should be selected, and deformation correction should be carried out in image processing; In large wind tunnel, it is necessary to master fast and efficient timing adjustment and equipment calibration methods to improve test efficiency.

Keywords: partial image velocimetry (PIV); key technology; large wind tunnel

0 引言

粒子图像测速 (PIV) 技术自 20 世纪 80 年代问世以来, 经过近 40 年的技术发展, 在硬件设备、系统集成和软件算法上取得了大量重要的进步, 其成熟的测量技术被国内外研究人员广泛认可并应用到以流体力学为代表的大量研究领域。

在小尺度研究型风洞, 大量科研人员采用二维 PIV 技术、三维层析 PIV 等技术, 深入探索了

流动现象, 揭示了流动机制, 从而催生了一大批创新成果。相比于小尺度研究型风洞, 大型风洞的 PIV 试验相对较少。而开展大型风洞 PIV 试验对于在高雷诺数下摸清大型飞行器流场演化规律、考核飞行器布局优化性能, 推动优化及流动控制技术工程应用具有重要意义。

在国外, 美国 NASA 国家全尺寸风洞 (NFAC) 中部署了低频 PIV 系统^[1], 试验段尺寸为 12 m×24 m

收稿日期: 2021-06-07; 修回日期: 2021-07-20。

作者简介: 岳廷瑞(1983-), 男, 四川南部县人, 硕士, 工程师, 主要从事风洞测控技术及 PIV 试验技术方向研究。

通讯作者: 李付华(1983-), 男, 四川筠连县人, 硕士, 工程师, 主要从事风洞应变天平方向的研究。

引用格式: 岳廷瑞, 李付华, 张鑫, 等. 大型风洞 PIV 试验的关键技术[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(1): 273-281.

表 1 国内外主要大型风洞 PIV 应用情况

序号	国家/机构	风洞(尺寸)	PIV 设备	视场大小	粒子材料/装置	投放位置
1	德荷 DNW	LLF(6~9 m)、LST、NWB(3 m)	低频系统(10 Hz)	0.4 m×0.4 m	橄榄油	稳定段中
2	美国 NASA	NFAC(12 m×24 m)	低频系统(15 Hz)	2.4 m×1.2 m	矿物油	稳定段中
3	美国 NASA	3.7 m 压力风洞、2.7 m×2.1 m、3.4 m×3.4 m 风洞	低频系统		矿物油	试验段后方
4	欧洲 ETW	2.4 m×2 m 风洞	低频系统(15 Hz)		水	模型支撑立柱上
5	日本 JAXA	LPT 1(6 m 量级)	低频系统(8 Hz)	0.5 m×0.4 m	DEHS	试验段后方
6	吉林大学	4 m×2.2 m 汽车风洞			舞台发烟器	
7	中国辐射防护研究院	1.5 m×1 m 风洞	低频系统	0.18 m×0.18 m	SPT 烟雾发生器	试验段前
8	航天气动院	1.2 m×1.2 m 风洞、1.5 m×1.95 m 风洞等	低频系统(8 Hz)	0.7 m×0.3 m	TiO ₂ 、XQ1200 烟雾发生器	试验段前
9	气动中心	8 m、5 m、3 m 量级等多座风洞	低频系统(2 Hz)	最大 2 m×2 m	乙二醇、DEHS 等	试验段前、试验段后

×24 m, 激光器单脉冲能量 350 mJ, 测量频率 15 Hz, 相机分辨率 1 100 万。NASA 3.7 m 压力风洞、3.4 m×3.4 m 跨声速风洞、2.7 m×2.1 m 超声速风洞均部署了低频 PIV 系统^[2-4]。德荷风洞(DNW)的 LLF(8 米量级)和 LST、NWB(3 米量级)风洞, 均部署了低频 PIV 系统^[5-7], 激光器单脉冲能量 600 mJ, 测量频率 10 Hz, 相机分辨率 100 万。日本 JAXA 的 LPT1 风洞(6 米量级)中部署了低频 PIV 系统, 激光器单脉冲能量 1 J, 测量频率 8 Hz, 相机分辨率 120 万。欧洲 ETW 跨声速风洞试验段尺寸 2.4 m×2.0 m 也配置了 PIV 系统^[8]。

总的来说, 国外 PIV 技术发展较早, 从 20 世纪 90 年代就开始从小型研究型设备进入到生产型风洞。

相比于国外, 国内大型风洞 PIV 试验起步较晚。文献 [9] 将 PIV 试验应用到汽车风洞中测量汽车周围流场流动状况。文献 [10] 在中国航天气动院 FD-12 亚跨超声速风洞开展了超临界翼型小肋减阻的试验验证。文献 [11-12] 在环境风洞中应用了 PIV 系统。文献 [13-14] 在中国空气动力研究与发展中心(以下简称气动中心)低速风洞中开展了相关 PIV 流场测量试验研究, 文献 [15] 在气动中心 8 m×6 m 风洞中开展了列车模型流场测量试验。文献 [16] 对小展弦比飞翼标模在 2.4 米跨声速风洞中开展了 PIV 试验。文献 [17] 在跨超声速暂冲式风洞中开展

了 PIV 试验。表 1 列出了国内外主要大型风洞 PIV 应用情况。

尽管国内外在大型风洞开展了一些 PIV 试验, 但大多只是针对具体实验给出了实验方法和结果, 对于大型风洞 PIV 试验的细节及关键问题介绍较少。

本文梳理了大型风洞 PIV 试验常见的关键问题, 提出了相应的解决措施, 并列举了典型试验结果。

1 大型风洞 PIV 试验常见的问题

1) 粒子产生及投放问题。区别于小尺度研究型风洞 PIV 试验, 大型风洞测量面积大, 在试验时需要大量可持续的示踪粒子, 这就给合适的粒子材料选择、流量及浓度的控制、投放位置及方式带来了极大的难度。

2) 图像拼接问题。在大型风洞试验中, 经常需要拍摄较大的视场范围, 比如大于 1 m×1 m 的大视场, 一般一个相机的视场和分辨率不能满足要求, 就需要进行多视场的拼接。

3) 反光处理问题。在大风洞中, 试验模型往往是金属模型, 加之测量面积大、激光能量强, 片光打到模型表面的反光也就更强烈, 反光不仅影响近壁面的测量, 而且还会影响周围区域的测量效果。

4) 时序调整问题。在大型风洞中, 安装的设备往往离测量岗位较远, 有时还会安装在高处, 调整极不方便, 如何快速有效的调整时序也是一个关键的难

点问题。

5) 设备标定问题。设备标定的准确与否会直接影响测量结果数据的好坏,与时序调整一样,大型风洞与实验室条件完全不同,更需要快速有效的标定方法,以提高试验效率。

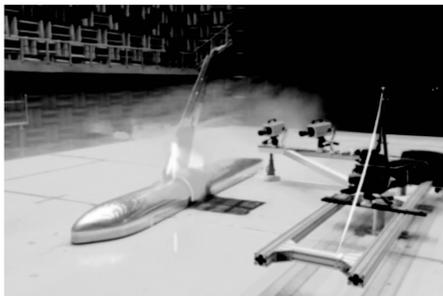


图1 大型风洞 PIV 试验示意图(气动中心 5 米风洞)

2 粒子产生及投放技术

示踪粒子作为流体速度的代表,其投放效果直接影响了试验测量结果。

流量总量可以用以下公式计算:

$$q_m = \frac{S}{\eta} \cdot v \cdot \varphi \cdot \rho$$

式中, q_m 为材料总流量, S 为视场面积, η 为有效面积比, v 为风速, φ 为粒子体积浓度比, ρ 为物料密度。

由上面公式可以看出,测量面积越大、风速越高,需要的粒子量就越大。如:大型风洞测量 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 范围的用量是小型实验设备测量 $0.2\text{ m} \times 0.2\text{ m}$ 范围用量的 25 倍,一般的小型粒子发生装置如舞台发烟器、Laskin 喷管粒子发生器等就无法满足要求。

另外,示踪粒子还需具备良好的跟随性、较高的散射效率、具有良好的物理和化学特性。为此,相关学者做了大量的工作,如文献 [18] 研究了低速风洞 PIV 实验中的示踪粒子投放技术,文献 [19] 开展了高速流动中 PIV 示踪粒子松弛特性研究,文献 [20] 开展了高速流动 PIV 示踪粒子跟随响应特性实验研究,文献 [21] 研究了示踪粒子发生和布撒问题,均取得了重要的研究成果。

美国 NASA、德荷风洞 (DNW) 等国外大型风洞中也开展了大量的粒子发生及投放技术研究^[22-28],气动中心的战培国对国外大型风洞中的 PIV 技术应用进行了综述^[29-30],国外大型风洞试验过程中,针对不同的应用在粒子投放方面做了大量的工作。

气动中心研制的基于油基材料加热蒸发的大型粒子发生器,在 3 米至 8 米量级风洞中均得到了应用,其中直流式风洞通过排管架投放,播撒面积 $2\text{ m} \times 2\text{ m}$,回流式风洞可充满整个风洞循环使用。图 2 为大型粒子发生器在气动中心 $8\text{ m} \times 6\text{ m}$ 风洞 $12\text{ m} \times 16\text{ m}$ 试验段中布置情况。

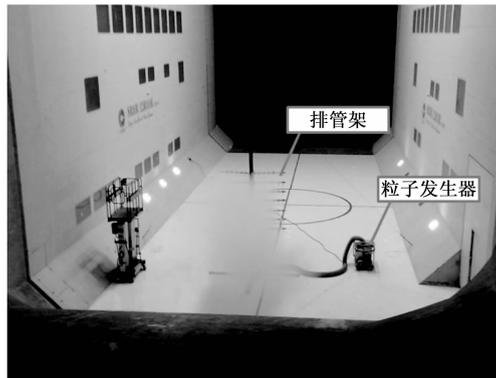


图2 $8\text{ m} \times 6\text{ m}$ 风洞粒子发生器布置图

因此,在大型风洞中,最好采用加压或加热的方式将液体粒子材料雾化或汽化产生示踪粒子,并将其使用排管阵列架均匀的播撒到流场当中。同时应关注以下几个关键问题:

1) 粒子材料选择。经过广大学者的经验总结,常用的固体材料主要有 Al_2O_3 、 TiO_2 、聚苯乙烯等;液体材料主要有乙二醇、硅树脂油、水、乙二醇/水混合、液态二氧化碳等。需要根据不同的应用场合进行选择,其中固态粒子材料不易挥发,容易造成污染,水及二氧化碳等材料与空气结合后消散较快。针对大型风洞,其测量面积大,大量使用成本高,采用油基材料比如乙二醇加热蒸发的方式可大量持续的供应,是一种较好的选择。

2) 流量及浓度的控制。粒子浓度首先要满足每个查询窗体中所需的基本粒子数,一般来讲,单个查询窗中至少需要 8~10 个粒子,测试精度随粒子浓度的增加而增加,但粒子浓度过高会影响流动特性,出现双向耦合 (Two-way coupling) 现象。以液体材料加热蒸发为例,产生的粒子总量是由单位时间内消耗的液体量决定的,因此要产生高浓度的粒子,就必须将足量的液体材料加热汽化,对于发生装置本身来说,主要途径是增加加热功率和增大加热面积,提高加热效率,及时的将输入的液体消化。反之,如果要控制粒子浓度,就可以通过控制输入发生器的液

体流量来实现控制。

3) 投放位置及方式的确定。由于在早期修建风洞时, 相关流场测量技术还不成熟, 又或修建者更关注风洞结构本身的性能, 因此并未考虑在风洞结构上安装粒子投放装置, 比如在上游蜂窝器、阻尼网或导流片上安装喷嘴阵列来实现粒子的均匀投放。所以目前主要的粒子投放方式都是在风洞内架设排管架, 其上布置小孔或喷嘴阵列。

在直流式风洞中, 排管架应放置在流场上游尽量少干扰流场的位置, 比如蜂窝器、阻尼网之前, 如果有负压进气口, 可以考虑从进气口吸入, 最后考虑放置在试验段上游或试验模型之前。

在回流式风洞中, 发生器粒子量足够的情况下, 应尽量从下游投放, 通过气流循环后再到达试验段时粒子会比较均匀, 此时可以不用排管架。

3 图像拼接技术

拼接主要有两种方式, 一是粒子图像直接拼接, 然后进行速度场的计算, 二是首先分别进行速度场的计算, 然后进行速度场结果的拼接。

文献 [31] 在风力机叶尖涡流场特性测试试验时采用了数据拼接的方式。拼接过程如图 3 所示。各窗口重叠部分速度矢量采用 3×3 网格平均, 拼接产生的空白区域用常数填补, 将窗口拼接后的数据整合导入 TecPlot, 得到同一子午面、同一工况下、大范围

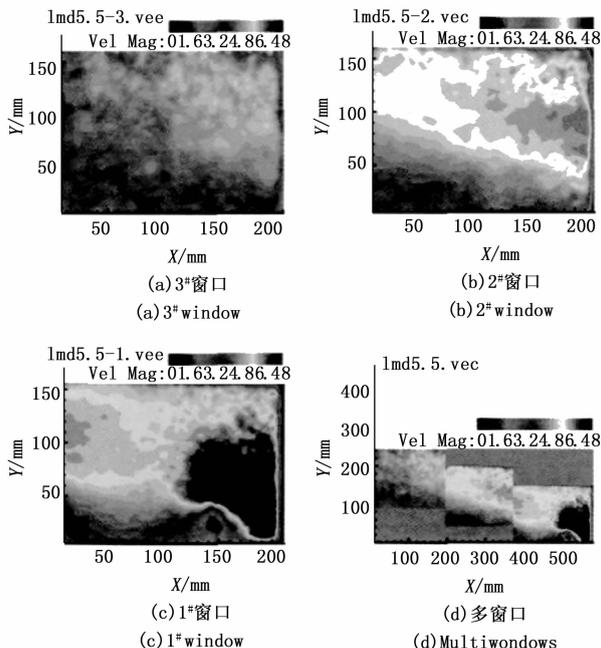


图 3 风力机叶尖涡流场拼接结果

的叶尖涡流场信息。文献 [15] 在列车头型气流流动的 PIV 测量中也用到了图像拼接技术。

图像拼接之前应做图像标定。以两相机拼接为例, 首先在标定时需确保相机视场有至少 10% 的重叠区域, 如图 4, 且相机视场的放大系数保持基本一致, 也可认为两个相机使用同样焦距镜头时到目标的位置距离相等且对称。要使用一整块标定板完成两个相机的标定, 而不是使用两块标定板分别标定两个相机或移动一块标定板来先后标定两个相机。重叠区域的位置参数将是后期拼接的依据。

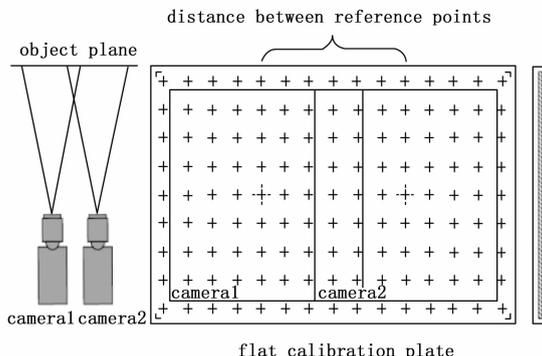


图 4 图像拼接标定示意图

对比两种拼接方式, 一般采用第二种速度场拼接的方式更为准确, 主要原因是直接进行粒子图像拼接时重叠区域及两幅图像的边沿部分信息将得到大量丢失, 而且在整个图像的插值过程中, 同样可能会丢掉大量的真实信息, 导致后续的速度场计算误差增大, 使用速度场结果拼接时可以避免这个问题。首先计算出各自速度场的结果, 然后只在边界区域做插值处理, 较好的保留了流场的原始信息。同理可进行多个相机的拼接。

以上是针对多个相机同时拍摄, 还有另外一种情况, 那就是只利用一台相机通过移动位置拍摄不同时刻的图像进行结果拼接, 前提是认为流场是稳定不变化的定常流场。图 5~6 给出了在气动中心特殊气象模拟风洞的流场测量原理及结果, 分别测量 14 个截面位置后进行结果拼接, 单次测量视场大小 $330 \text{ mm} \times 330 \text{ mm}$, 重合区域 30 mm , 总区域大小 $1800 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$ 。图 4 是测量原理图, 图 5 是流场拼接结果云图。

4 反光处理技术

在大风洞中, 试验模型往往是金属模型, 加之测

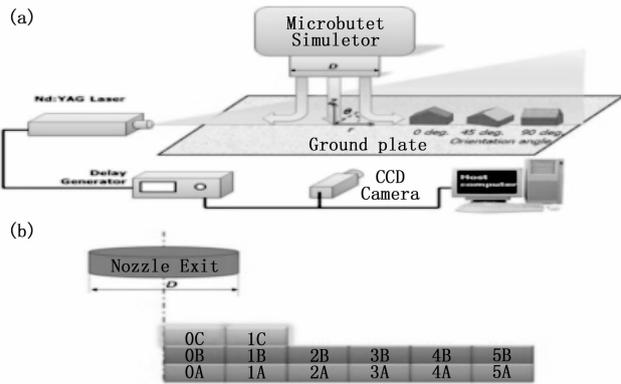
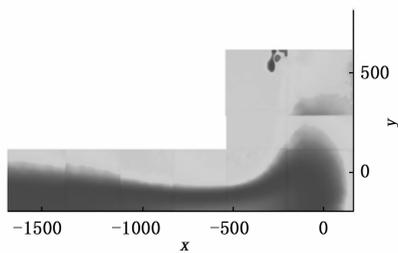
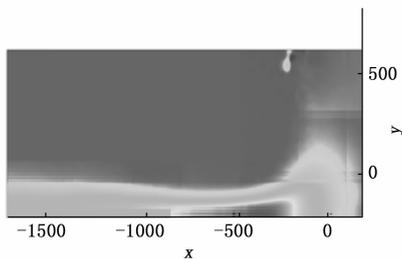


图 5 气象风洞流场测量原理图



(a) 图像直接拼接结果



(b) 速度场拼接结果

图 6 气象风洞流场拼接结果

量面积大、激光能量强，片光打到模型表面的反光也就更强烈。如图 7 所示。从而影响周围区域的测量，尤其是近壁面的测量^[32-39]。

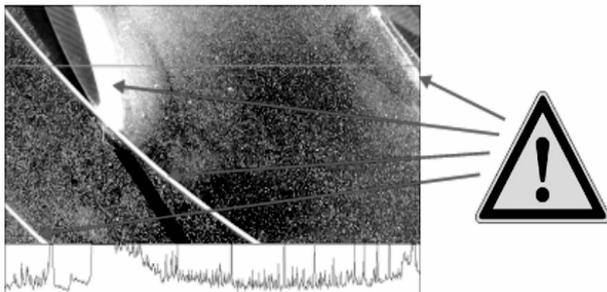


图 7 近壁面反光示意图

一般采用的方法主要有：将模型表面喷涂黑色的漆、将模型表面处理粗糙、贴黑色或表面粗糙的胶带

等方法减小反射等。这些方法虽能在一定程度上减小反光，但其改变了模型物理表面，且效果不明显。

比较有效的方法还有以下几种：

1) 增大相机的光圈同时减小激光能量的方法。通过加大光圈增大相机镜头的通光量，可以有效降低所需的激光能量，无需破坏模型表面，从而从源头上减小了反光强度。

2) 通过减去初始背景的方式实现。首先在不投放示踪粒子时拍摄激光反光图像，然后在有粒子的结果图像中减去初始反光背景图像。此方法可较好地减轻反光的干扰，但并不能完全去除反光，原因是在投放了示踪粒子后，示踪粒子的反射光会影响图像结果，由于光反射角度不同，图像的不同部位增强强度不一致，部分反光可能会减弱，因此在前后图像相减后可能会导致某些部位图像信息被错误的减去，从而带来新的问题。

3) 通过改变相机拍摄角度来避开反光，由于光反射是有一定方向性的，在某些特定方向上最强，只需改变观察角度，就可有效避开反光。图 8 给出了在气动中心喷流试验设备测量射流冲击平板试验时相机移动前的反光效果，当相机向左移动一定距离后，如图 9 所示，有效的避开了反光，近壁区域的图像也得以清晰的拍摄。

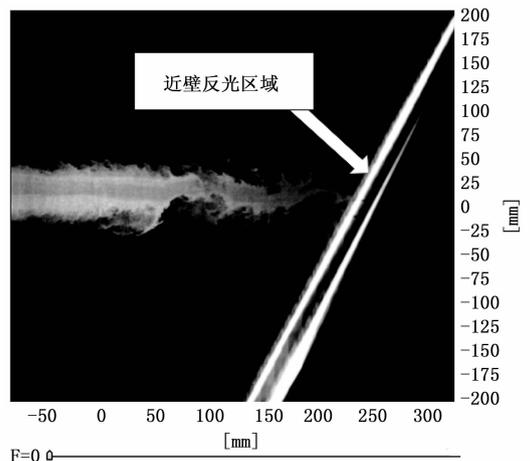


图 8 相机移动前效果图

在这种情况下，相机镜头平面与测量面不一定是平行的，根据沙姆定律，也就是 PIV 试验中的 Schiempflug 成像条件可轻松解决这个问题，沙姆定律基本原理图如图 10。沙姆定律是指：当被摄体平面、影像平面、镜头平面这三个面的延长面相交于一直线

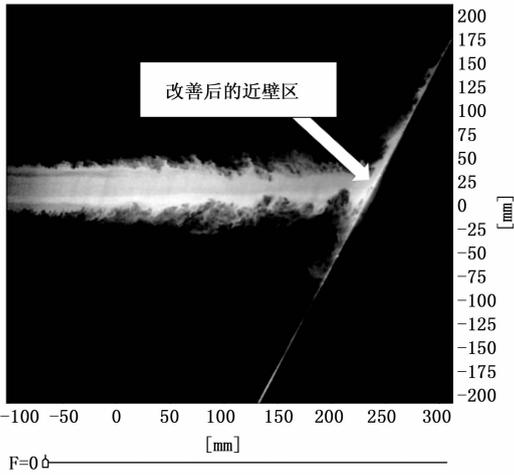


图 9 相机移动后效果图

时,即可得到全面清晰的影像。但此时不能用标尺等工具进行线性标定,即使是 2D2C 测量方式也需要利用标定板进行标定,进行图像变形修正,如图 11。

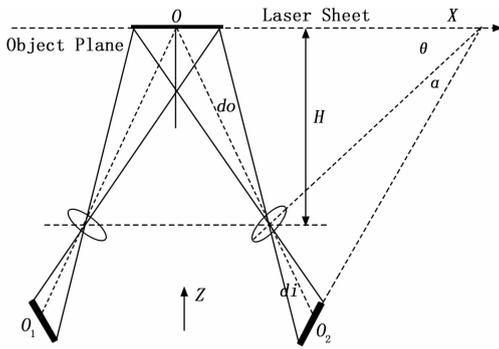


图 10 沙姆定律成像原理

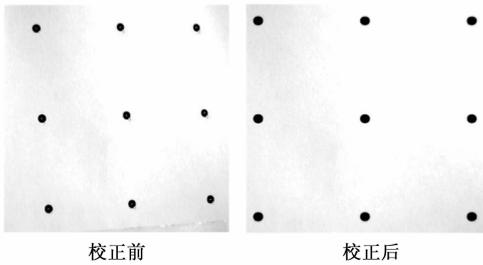


图 11 标定板图像校正示意图

5 时序调整技术

在开展风洞试验时,经常会遇到时序不同步造成的拍摄图像对不相关的问题,其现象是拍不到粒子图像或不论如何调整 dt (一对图像的时间间隔) 拍摄的图像对都不相关,计算不出结果或出现明显错误,原因一方面可能来自于设备振动、电磁信号干扰等,

这些干扰信号会直接干扰时序控制器的正常运行,另一方面设备由于搬动或使用时间过长也可能造成时序不同步的问题。

在大型风洞中,试验环境更为复杂,操作更为不便,因此能快速调整好时序非常关键。有效的快速时序调整方法主要有以下两种:

1) 结果图像观察法。通过观察 A、B 两路激光与第 1、第 2 两帧图像的对应关系来直接判断。根据 PIV 时序的基本原理,如图 12,需要在 dt 时间内的两路激光与两帧图像一一对应,如果时序出现问题导致了结果图像对不相关,那么有可能是都不对应、只有一路对应或两路对应正好相反等情况。这时就需要调整激光或相机的信号延迟时间来进行调整。直接观察法是利用片光打到物体上的反光亮线来判断(此时需注意能量不能过高,相机光圈尽量调小,否则可能损伤相机成像芯片)。具体做法是:设置 dt 为使用时的较小值(如 5 μs),然后只打开 A 路激光,拍摄一对图像,观察亮线是否出现在某一帧图像,同样只打开 B 路激光,再拍摄一对图像,观察结果,根据时序原理图判断可能需要设置的延迟时间,直至 A、B 两路激光分别被第一、第二两帧图像拍到。可采用极大值与极小值往中间逼近的方法可快速找到合适的延迟时间。

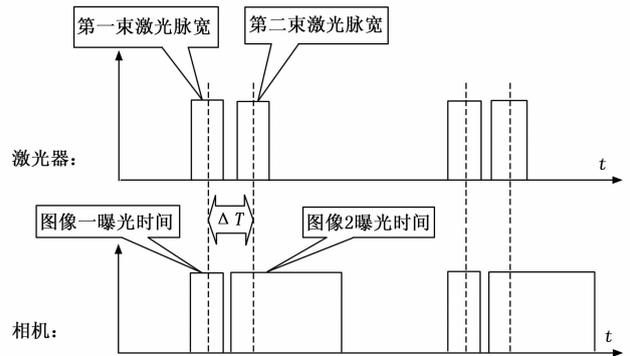


图 12 PIV 系统简易时序图

2) 反馈信号测量法。采用结果图像观察法虽可以快速调整好时序,但采用估算延迟时间的方法不太直观,如果对设备不熟悉,可能会花费较长时间。如果有相关的测量工具,采用反馈信号测量法则更为直观快捷。反馈信号测量法是利用光电探头测量激光信号,同时与相机的曝光输出信号同步通过示波器显示观察的方法确定同步时序。具体做法是:将相机的曝

光信号 (exposure out) 接到示波器的第一路输入 (如有多个相机, 依次接到示波器测量输入接口), 将两路激光器触发信号输出 (trigger out) 分别接到示波器第二路和第三路输入 (或将光电探头放置在片光可以照射的地方, 用以测量激光的出光信号, 接到示波器的第二路输入, 此时可在一路信号同时测量两路激光的脉冲信号), 通过时序控制器运行激光器与相机, 调整示波器, 观察测量信号。如图 13, 可直观的看到, 示波器显示了两路信号的时序并且定量测量出了信号的周期及宽度, 从上至下依次是相机曝光时间信号、第一路激光脉冲信号和第二路激光脉冲信号。此时根据时序原理将错位的时序通过测量到的错位时间对延迟时间进行修正即可。

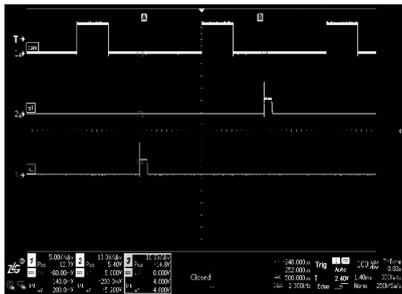


图 13 示波器测量时序示意图

6 设备标定技术

在正式开始风洞试验之前, 我们往往需要对测量结果进行判定, 判断测量的结果是否准确合理、符合测量要求。

一般来讲, PIV 生产厂家在售出仪器前就已经对其进行了系统标定, 并提出了一个速度精度的经验指标, 但由于各自算法的差异, 风洞应用情况复杂, 实际的测试误差要比理想环境大的多, 因此具体应用之前, 首先应当对其测试精度进行分析。主要包括平时标定和试验时标定两个方面。

1) 平时标定。一种是利用计算机模拟生成基准流场研究测量结果误差, 另外一种是采用一些不可压缩定常流作为基准速度场, 比如标准转速装置, 对实际 PIV 系统测量误差进行估计和分析。

2) 试验时标定。在实际风洞试验时, 在粒子投放、光路布置以及操作人员安装经验等都可能带来新的误差, 因此有必要在安装好设备后进行测试试验。常用快速标定的方法是对比法, 一种是利用 LDV、

热线风速仪等测量设备测量的结果进行对比, 另外一种则是测量空风洞流场, 与风洞给定参考风速做对比。

在大型风洞试验时, 由于设备往往安装在洞内或高处, 且离操作岗位较远, 测量更为不便, 因此更加便捷的标定方式是直接测量空风洞的定量结果来判断测量结果是否合理, 进而利用对比结果对后续测量数据进行修正。

图 14 是气动中心某风洞出口纵截面流场结果 (风速 12 m/s), 矩形框内部为风洞的流场, 四周为边界层, 可以看出, 此流场结果比较均匀, 但其测量值与给定风速有误差, 可以此计算出其相对误差用于测量数据的修正。

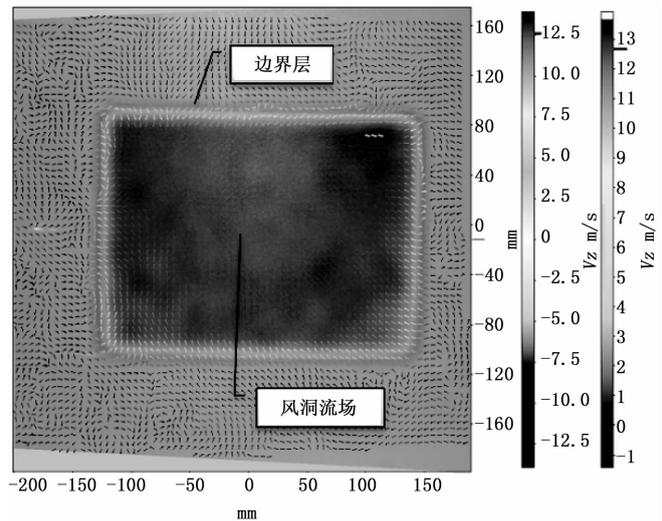


图 14 某风洞出口纵截面流场结果

图 15 是该风洞水平面流场结果 (风速 62 m/s), 其上下两侧为湍流边界层, 中间为均匀的风洞流场, 同理可根据此测量结果作为后续数据的修正依据。

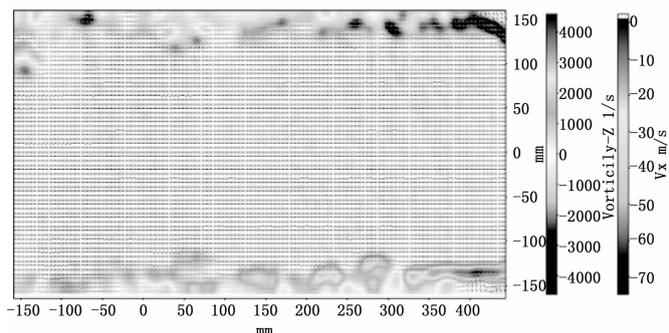


图 15 某风洞水平面流场结果

7 结束语

以上从粒子产生及投放、图像拼接、反光处理、

时序调整、设备标定技术等 5 个方面探讨了大型风洞 PIV 试验时常见的关键问题及处理方法,可以得到以下结论:

1) 在大型风洞试验中开展粒子投放,应重点解决粒子材料选择、流量及浓度的控制、投放位置及方式等问题,选择经济实用的材料,研制足量可控且可持续供应的粒子发生装置,同时要在适当的位置进行投放。

2) 在进行大视场图像拼接时,应选择先分别计算再进行速度场结果进行拼接的方法,并在图像采集前做拼接标定,以获得拼接参数。

3) 在反光处理时,应根据实际情况选择最佳的反光处理方法,如选择移动相机的方法,应在图像处理时进行变形修正。

4) 在大型风洞中,应掌握快速高效的时序调整及设备标定方法,提高试验效率。

PIV 系统是一套较复杂的精密测量设备,其使用过程中会遇到很多的细节问题,需要大量的工程经验积累才能做出好的结果。在具体试验时,还会遇到其它各种各样的问题,比如设备振动、信号干扰、激光能量不一致、镜头对焦不清晰、触发信号异常等,需要根据实际情况进行分析。

参考文献:

- [1] WATANABE S, KATO H. Stereo PIV Applications to Large-Scale Low-Speed Wind Tunnels [C] //41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada, January, 2003, 6-9.
- [2] HEINECK J, SCHAIRER E. PIV in NASA ames unitary wind tunnels [C] //49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando, Florida, January, 2011, 4-7.
- [3] QUEST J, KONRATH R. Accepting a Challenge - The Development of PIV for Application in pressurized cryogenic Wind Tunnels [C] //41st AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit. Honolulu, Hawaii, June, 2011, 27-30.
- [4] STEVEN B, SEAN K. Pulse-burst PIV in a high-speed wind tunnel [J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26 (9): 95-305.
- [5] DRAAI R, SCHINKEL R V. Application of PIV in

(Local) Supersonic Flows in DNW Wind Tunnels [C] //41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Tucson, Arizona, July, 2005, 10-13.

- [6] PENGEL K, KOOIJ W, RAFFEL M. Application of PIV in the large low speed facility of DNW [M]. ViewegTeubner Verlag, 1997.
- [7] EITELBERG G, ECKERT D. Some developments in experimental techniques of the German-Dutch Wind Tunnels (DNW) [C] //21st Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference. Denver, CO, U.S.A., June, 2000, 19-22.
- [8] BROOKS J M, GUPTA A K. Development of Non-Intrusive Velocity Measurement Capabilities at AEDC Tunnel 9 [C] //52nd Aerospace Sciences Meeting. National Harbor, Maryland, January, 2014, 13-17.
- [9] 张英朝, 李杰, 刘畅, 等. 汽车风洞的 PIV 试验技术 [J]. 吉林大学学报(工学版), 39 (S1): 83-87.
- [10] 李晓辉, 王宏伟, 张森, 等. Tomo-PIV 亚跨声速风洞应用探索 [J]. 实验流体力学, 2020, 34 (4): 44-52.
- [11] 钱广强, 董治宝, 王洪涛, 等. 粒子图像测速 (PIV) 技术在风沙环境风洞中的应用 [J]. 中国沙漠, 2006, 26 (6): 890-893.
- [12] 姚仁太, 张茂栓, 张杰. 环境风洞中流动的 PIV 测量 [J]. 实验流体力学, 1999, 13 (3): 91-96.
- [13] 黄明其, 王畅, 岳廷瑞, 等. 共轴刚性旋翼悬停流场的 PIV 风洞试验研究 [J]. 南京航空航天大学学报, 2019, 51 (2): 22-27.
- [14] 肖京平, 武杰, 陈立, 等. 风力机叶尖涡尾迹结构 PIV 测量研究 [J]. 应用数学和力学, 2011, 32 (6): 683-692.
- [15] 武杰, 黄志祥, 史喆羽, 等. 列车头型气流流动的 PIV 测量与数据精细化后处理 [C] //2012 年全国环境工程学术会议论文集, 2012: 80-88.
- [16] 杨可, 蒋卫民, 熊健, 等. 飞翼模型高速风洞 PIV 试验研究 [J]. 空气动力学学报, 2015, 33 (3): 313-318.
- [17] 蒋卫民, 熊健, 程松, 等. 粒子图像测速 (PIV) 技术在跨超声速暂冲式风洞中的应用 [C] //第六届全国流动显示学术交流会议论文集, 2006: 120-125.
- [18] 陈莹, 邓学莹, 王延奎, 等. 低速风洞 PIV 实验中的示踪粒子投放技术 [J]. 实验流体力学, 2007 (2):

78-81.

- [19] 张亚, 陈方, 刘洪, 等. 高速流动中 PIV 示踪粒子松弛特性研究 [J]. 实验流体力学, 2013, 27 (6): 70-75.
- [20] 王彦植, 陈方, 刘洪, 等. 高速流动 PIV 示踪粒子跟随响应特性实验研究 [J]. 实验流体力学, 2018, 32 (3): 94-99.
- [21] 肖亚克, 贾元胜, 张孝棣, 等. PIV 技术中的示踪粒子发生和布撒 [J]. 气动研究与实验, 2005, 22 (4): 8-15.
- [22] BEYER W, MAHNKEN M. LDV measurements on wing/engine interferences [C] //10th Int. Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, July, 2000, 10-13.
- [23] BARBAGALLO D, GREGORIO F D. Helicopter wake investigation by means of PIV and HW measurement techniques [C] //9th International symposium on flow visualization, Heriot - Watt University Edinburgh, 2000.
- [24] KOMPENHANS J, DIETERLE L. Qualitative and quantitative visualization of wake vortices in industrial test facilities [C] //9th International Symposium on Flow Visualization. Edinburgh, UK, August, 2000, 22-25.
- [25] RAFFEL M, RICHARD H. Recording and evaluation methods of PIV investigations on a helicopter rotor model [J]. Experiments in Fluids, 2006, 40 (4): 665-665.
- [26] SCARANO F. Application of non-isotropic resolution PIV in supersonic and hypersonic flows [C] //5th International Symposium on Particle Image Velocimetry. Busan, Korea, September, 2003, 22-24.
- [27] HUMBLE R A. PIV Measurements of a Shock Wave/Turbulent Boundary Layer Interaction [C] //13th Int. Symp. on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, June, 2006, 26-29.
- [28] DRAAI R, SCHINKEL R V. Application of PIV in the DNW industrial supersonic wind tunnel SST [C] //PIVNET II International Workshop on the Application of PIV in Compressible Flows. Delft, The Netherlands, June, 2005, 6-8.
- [29] 战培国. 美国全尺寸风洞中的 PIV 系统 [J]. 航空科学技术, 2017 (28): 1-4.
- [30] 战培国. 国外大型风洞中的粒子图像测速技术发展 [J]. 飞航导弹, 2017 (3): 62-67.
- [31] 高志鹰, 汪建文, 东雪青, 等. 风力机叶尖涡流场特性的多窗口 PIV 测试 [J]. 工程热物理学报, 2013 (2): 258-261.
- [32] 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 (5): 628-633.
- [33] 施臻臻, 余俊, 万津津, 等. 近壁方柱绕流非定常特性的 TR-PIV 测量 [J]. 工程热物理学报, 2009, 30 (8): 1312-1314.
- [34] 薛志亮, 王肖, 吴学成, 等. 水平槽道近壁面附近颗粒尾流特性的高分辨率 PIV 实验研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017 (3): 810-818.
- [35] 许宏庆, 袁格. 用 PIV 技术对湍流边界层近壁区流动的研究 [C] //全国实验流体力学学术会议论文集, 1993.
- [36] 俞建阳, 刘华坪, 陈浮, 等. 等离子体影响平板近壁区流场的 PIV 研究 [C] //2012 中国工程热物理学会论文集, 2012.
- [37] 万津津. 近壁方柱绕流湍流场非定常特性的 PIV 实验研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- [38] 许宏庆, 袁格. 用 PIV 技术对湍流边界层近壁区流动的研究 [C] //第四届全国实验流体力学学术会议论文集, 1993: 123-127.
- [39] 陈波. 基于 PIV 技术的近壁双圆柱绕流尾迹特性研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [21] 伍江华. C4ISR 体系结构建模与设计技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [22] 杨峰. 面向效能评估的平台级体系对抗仿真跨层次建模方法研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2007.
- [23] 吕彩艳, 程若发, 杨宏超, 等. 关于网络故障脆弱性优化评估仿真 [J]. 计算机测量与控制, 2018, 26 (5): 275-277.

(上接第 272 页)

- [19] 高明君, 张国义, 高家一, 等. 基于粒子群优化的网络动态可靠性分析 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (1): 307-309.
- [20] 赵欣, 战兴群, 杠刚, 全球导航卫星系统脆弱性计算机仿真环境设计及其评估方法实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (9): 2847-2850.