

# 大型风洞 PIV 粒子发生装置研制

岳廷瑞, 张 逊, 李付华, 赵亮亮, 张婷婷

(中国空气动力研究与发展中心, 四川 绵阳 621000)

**摘要:** 示踪粒子量不足是制约大型风洞 PIV 试验的关键和难点问题, 结合大型风洞的实际情况, 通过原理设计、分析计算和试验验证, 成功研制了基于加热蒸发原理的大流量粒子发生器, 并应用到了大量的工程实践中; 结果表明, 在大型风洞 PIV 试验中, 采用经济性好的油基材料加热蒸发的方式, 可持续、足量、均匀地供应示踪粒子, 是一种较好的粒子产生方式; 另外, 在粒子发生装置设计时, 应充分考虑实际所需粒子流量, 并针对选择的粒子材料的理化特性开展计算分析。

**关键词:** PIV; 粒子发生装置; 大型风洞

## Development of PIV Particle Generator in Large Wind Tunnel

YUE Tingrui, ZHANG Xun, LI Fuhua, ZHAO Liangliang, ZHANG Tingting

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

**Abstract:** The shortage of tracer particles is the key and difficult problem to restrict PIV test in large wind tunnel. Combined with the actual situation of large wind tunnel, through principle design, analysis and calculation and test verification, a large flow particle generator based on heating evaporation principle is successfully developed and applied to a large number of engineering practice. The results show that in the large-scale wind tunnel PIV test, it is a better way to produce particles by heating and evaporating oil-based materials with good economy and supplying tracer particles continuously, sufficiently and evenly. In addition, in the design of the particle generator, the actual particle flow rate should be fully considered, and the physical and chemical properties of the selected particle materials should be calculated and analyzed.

**Keywords:** PIV; particle generator; large wind tunnel

### 0 引言

示踪粒子作为流体速度的代表, 需要具备良好的跟随性、较高的散射效率、良好的物理和化学特性以及足量可控的流量。市面上有很多小型的基于加压或加热原理的粒子发生器, 比如 Laskin 粒子发生器、舞台发烟器等, 其对于大型风洞来说, 其粒子量远远达不到需求, 同时在风洞中的安装投放也比实验室或小型实验设备中复杂的多。

在国外, W. Beyer 等人在 Bremen 大学的 LSWT 风洞中进行流场测试时, 采用烟雾发生器所产生平均粒径  $1 \mu\text{m}$  的粒子作为示踪粒子<sup>[1]</sup>, 粒子发生器工作面积约  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ , 如图 1 所示。

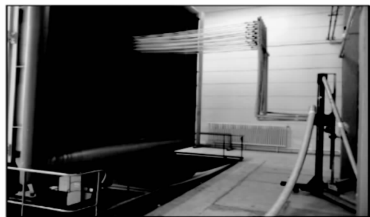


图 1 LSWT 风洞中粒子投放图

美国 DERA 风洞中开展试验时, 粒子发生器放置在收缩段出口, 如图 2 所示。发生器工作面积为  $2.3 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ , 但测量速度较低, 其总流量较小。粒子发生器采用 CIRA 所制作的粒子发生器, 工作材料为橄榄油, 粒子粒径约  $1 \mu\text{m}$ <sup>[2]</sup>。

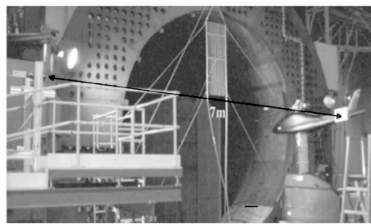


图 2 DERA 风洞中粒子投放图

德荷风洞 (DNW) LLF 回流式风洞中采用 Laskin nozzle 粒子发生器产生粒子<sup>[3-4]</sup>。发生器工作方式为加压气流通过粒子发生器将粒子输入测试区域, 发生器工作面积约  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ , 粒子粒径  $< 1 \mu\text{m}$ , 如图 3 所示。TST-27 直流式跨超声风洞中粒子发生器<sup>[5-6]</sup>为内部压力为 10 个大气压的旋风分离器, 粒子发生器工作面积  $0.26 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$ , 示

收稿日期: 2021-04-21; 修回日期: 2021-05-20。

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

通讯作者: 张 逊(1982-), 男, 河南信阳人, 硕士, 工程师, 主要从事机械设计方向的研究。

引用格式: 岳廷瑞, 张 逊, 李付华, 等. 大型风洞 PIV 粒子发生装置研制[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(10): 250-255.

踪粒子为  $\text{TiO}_2$ , 粒子粒径约 50 nm。

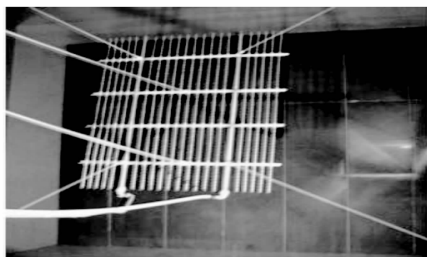


图 3 DNW-LLF 风洞中粒子投放图

德荷风洞 (DNW) SST 直流式超声速风洞中粒子发生器为 120 Laskinnozzle<sup>[7]</sup>, 压力 3.5 bar, 发生器四角分别通过钢丝绳与风洞壁面固定, 未介绍其测量面积大小, 如图 4 所示。



图 4 DNW-SST 风洞中粒子投放图

在国内, 上海交大刘洪等人<sup>[8]</sup>针对高速复杂流场的 PIV 测试现状, 总结了应用于超声速流场 PIV 技术发展过程中示踪粒子及布撒系统所遇到的一系列挑战, 其中一个重要挑战就是流量不足的问题。荣臻等人<sup>[9]</sup>设计了一套超声速风洞 PIV 示踪粒子布撒装置, 提出了利用发生器罐体内的真空度吸入示踪粒子的加注方式, 但在封闭空间内, 所需粒子流量有限。陈小虎等人<sup>[10]</sup>研究了示踪粒子对超声速混合层的湍流变动作用。王彦值等人<sup>[11]</sup>针对法向马赫数大于 1.4 的高速流动所提出粒子松弛特性分析模型, 结合理论分析与数值模拟方法, 发展了高速流动下的示踪粒子布撒技术, 使用  $\text{TiO}_2$  作为粒子材料, 测量面积较小。中国计量大学张振刚<sup>[12]</sup>等人分别采用玻璃微珠和微小油雾作为水和气体的示踪粒子, 并在循环水池和大尺度封闭实验空间内预先撒播示踪粒子, 提出大尺度封闭空间的粒子预撒播可以大幅提升粒子的时空均匀性。北航的陈莹<sup>[13]</sup>等人通过对实测风速及流场均匀度的比较, 得出在实验段出口处向风洞投放粒子, 使其在风洞中循环的方法是最佳散播粒子方式的结论。还有其它学者也开展了相关研究工作<sup>[14-20]</sup>。

综上所述, 在大型风洞中投放示踪粒子, 既要保证测量面积大, 又要保证试验速度较高, 还要持续不间断的供应是非常困难的, 能够方便、经济的产生, 并且能持续、足量、均匀地供应, 是在大型风洞中开展 PIV 试验的关键。目前尚未见有专门的大型粒子发生器研制和应用的相关

文章。

本文针对大型风洞试验, 研制了一套加热蒸发式粒子发生器, 产生粒子流量大, 可以满足 4 米量级直流式风洞不小于 70 m/s 速度下持续粒子供应的需求, 同时使用的粒子材料经济性好。

## 1 方案设计

### 1.1 粒子发生器设计

粒子发生器的基本设计思路是: 通过向粒子发生器内以一定压力持续供应液体材料, 而后以一定温度将液体蒸发汽化, 最后通过粒子筛选器使其均匀排出。

设计时重点解决以下几个问题: 1) 要保证能将足量的材料充分加热汽化, 主要通过增大受热面积提高加热效率; 2) 保证排出粒子的大小与均匀性符合要求, 主要通过适合的粒子材料选择和蒸发器出口的粒子筛选实现; 3) 要使用方便高效, 主要通过设备结构的集成化设计和测控系统的闭环控制来实现。

设备主要由供料装置、蒸发器、粒子筛选器、废料回收装置、控制系统等组成。其工作原理如图 5 所示。材料经齿轮泵注入蒸发器内, 在蒸发器中加热蒸发形成高温蒸汽; 高温蒸汽在蒸发器内部形成高压, 经蒸汽喷嘴进入粒子筛选器中; 在粒子筛选器中, 高温蒸汽与冷空气混合冷凝形成微小粒子, 同时粒子受离心风机从腔体侧面输入的气流作用作旋转运动, 在此过程中, 较大粒子受离心力作用与腔体壁面接触汇聚成液体, 较小粒子则从筛选器粒子出口输出用于试验, 从而实现粒子筛选。材料回收装置与蒸发器出料口、粒子筛选器联通, 用于回收工作过程中多余的材料。

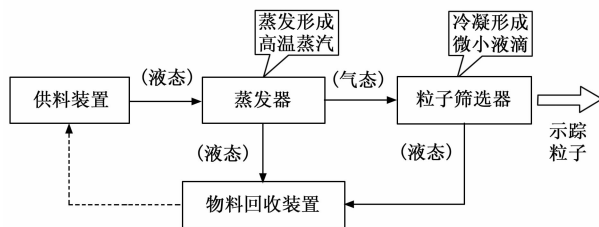


图 5 工作原理图

供料装置用于为蒸发器持续提供材料, 通过闭环的压力控制让进入蒸发器的液体保持恒定的压力和流量, 并可根据试验情况调节流量大小。

蒸发器用于对液态材料进行加热蒸发, 并将高温蒸汽通过喷嘴排放至粒子筛选器中。其中加热汽化温度应在材料的沸点与燃点之间根据试验情况进行具体选择。要通过控制系统保证温度恒定以持续的对材料进行加热, 确保粒子的稳定输出。

粒子筛选器位于蒸发器上方, 主要由离心风机和粒子筛选腔构成。采用可调速离心风机使粒子混合空气进入筛选器, 混合空气高速旋转、碰撞, 将粗大粒子留在筛选器

内，排出均匀的大小一致的粒子，同时可对蒸发器喷出的高温粒子进行降温。

材料回收装置用于收集工作过程中蒸发器和粒子筛选器中的剩余材料，其主要由蒸发器未完全消化的材料和高温粒子冷凝产生的液体组成。设计时应提高加热效率，使进入发生器的材料尽量消化，减少回收的废料。

控制系统用于集中控制粒子发生器的工作运行，主要由面板、蒸发腔压力控制器、缓冲罐压力控制器、温度控制仪、直流调速器和指示灯等组成。

按系统功能主要分为温度控制、流量控制、压力控制三部分，均实行闭环控制。

1) 温度控制部分：使用热电偶检测蒸发器的温度，反馈给温度控制仪；根据温度控制仪设定温度的上下限，通过控制继电器的通断来控制加热管持续工作。温度控制系统控制逻辑如图 6 所示。

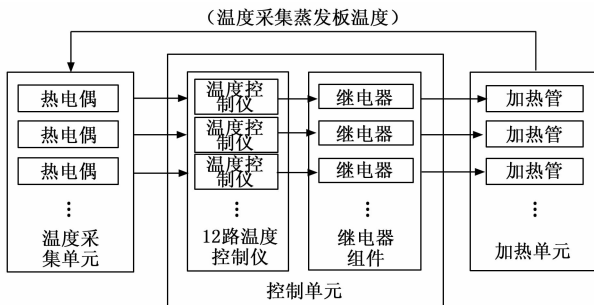


图 6 温度控制逻辑图

2) 流量控制部分：使用无级调速齿轮泵，通过调节转速实现进液流量调节。其电源通断由缓冲罐压力下上限控制，当达到压力上限时停止工作，当低于下限时启动工作，当界于上下限之间时持续工作。最终实现液体材料以一定流量和压力持续向发生器供应。

3) 压力控制部分：设置两个压力表分别实时检测缓冲罐与蒸发腔压力，根据设定的上下限控制供液装置工作。其控制原理如图 7 所示。

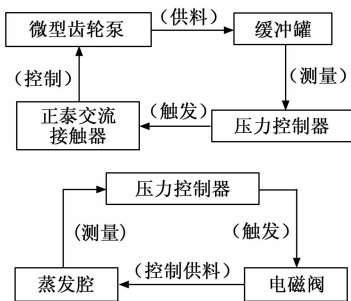


图 7 压力控制系统原理

### 1.2 粒子材料选择

通过大量研究人员的实践经验总结，在粒子材料选择方面，常用的固体材料主要有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、聚苯乙烯等，液体材料主要有乙二醇、硅树脂油、水、甘油、DEHS 等，

作为一种清洁材料，液态二氧化碳在大尺度风洞中有较好的应用前景<sup>[21]</sup>。同时，在大型风洞试验中，成本也是一个必须考虑的重要因素。

在粒子跟随性方面，研究表明，常规条件下，液体中粒径 10~20 μm、空气中粒径 1~5 μm 时跟随性最好，需要根据不同材料的特性和应用场合进行具体分析。

通过预先地面测试，选择粒子大小适合、成本较低的乙二醇作为原材料，其测试指标见图 8，相比小型试验设备使用的 DEHS 成本降低了 80%。

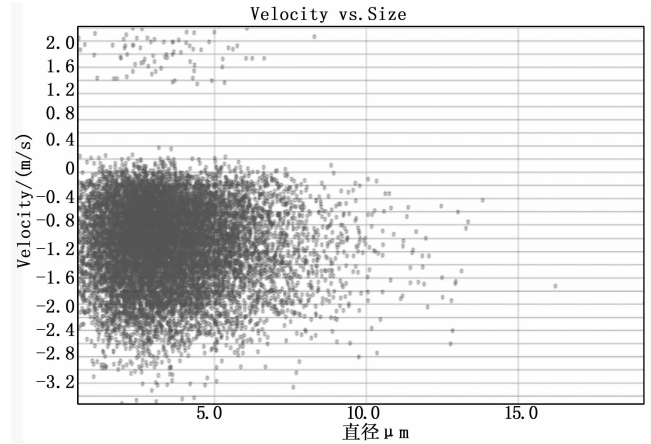


图 8 粒子直径分布

## 2 设计计算

以上介绍了粒子发生器的设计原理及基本方案，其核心是将液体材料通过热能汽化，因此进入发生器的流量直接决定了产生的粒子量，所以，需进行所需要的流量以及转化所需能量的计算，同时应其考虑工作效率问题。

### 2.1 材料流量计算

流量计算的目的是根据风洞尺度、风速、测量面积等要求计算达到试验条件所需的粒子量，进而计算所需的材料流量。

计算中应考虑图像处理时搜索窗大小、单个搜索窗所需基本粒子数、粒子直径、片光厚度、相机像素、视场大小及材料的理化特性等指标，根据 PIV 试验所需的风洞最大风速的要求，整合得到材料流量计算条件如表 1 所示。

表 1 计算条件

搜索窗粒子数 $n$	粒径 $d$	片光厚度 $\delta$	搜索窗 $w$	图像像素 $p$	视场 $S$
10	4 μm	1 mm	16×16	6 000×4 000	1 000×700 mm <sup>2</sup>

材料计算前作如下假设：所生成的粒子为球形，忽略液态材料热胀冷缩效应引起的密度变化，获得标准视场的有效面积比 ( $\eta$ ) 为 0.25。则材料需求流量计算公式为：

$$q_m = S/\eta \cdot v \cdot \phi \cdot \rho$$

式中， $q_m$  为材料总流量， $S$  为视场面积， $\eta$  为有效面积比，

$v$  为风速,  $\varphi$  为粒子体积浓度比,  $\rho$  为材料密度。

粒子体积浓度比计算公式为:

$$\varphi = N_v \cdot V_s$$

$$V_s = (4/3)\pi r^3$$

式中,  $V_s$  为单个粒子体积,  $N_v$  为单位体积内粒子个数,  $r$  为单个粒子半径。单位体积内粒子个数计算公式为:

$$N_v = (N_p/S)/\delta$$

$$N_p = n \cdot \rho/\omega$$

式中,  $N_p$  为图像视场内粒子个数,  $\delta$  为片光厚度,  $n$  为搜索窗内粒子个数,  $\rho$  为图像像素,  $\omega$  为搜索窗像素。

通过计算, 得到在满足风洞试验最大风速下所要求的材料消耗量。

## 2.2 加热功率计算

加热功率计算的目的是计算将满足试验要求量的液体材料加热汽化所需的能量。

材料加热过程中, 为保证试验安全, 蒸发器内应在沸点和燃点之间选择合适的温度。同时计算时应依据所选材料的理化特性指标。

材料加热过程中能量消耗由两部分组成: 一部分为材料由液态加热蒸发为气态所需要的能量; 另一部分为高温蒸汽继续升温至设定温度所需要的能量。单位质量材料蒸发需要的能量计算公式为:

$$W = W_1 + W_2$$

$$W_1 = (T_2 - T_1) \cdot c + H_v, W_2 = (T_3 - T_2) \cdot c$$

式中,  $W$  为单位质量材料蒸发需要的总能量,  $W_1$  为单位质量的材料由液态蒸发为气态所需要的能量,  $W_2$  为单位质量的气态材料继续升温所需要的能量,  $T_1$  为室温,  $T_2$  为材料沸点温度,  $T_3$  为蒸发器内温度,  $c$  为比热容,  $H_v$  为材料汽化热。

通过计算, 得到单位质量的液体材料加热蒸发至设定温度所需要的能量。则要求的蒸发器的加热功率为:

$$P_m = W \cdot q_m$$

最后, 根据所得加热功率数据校核加热管, 同时应考虑热传递过程中的能量损耗。

## 2.3 工作效率计算

蒸发器的工作流程分为准备阶段和间歇式加热阶段。在准备阶段过程中, 先由不含材料的蒸发器在加热管的作用下预热至设定温度。在间歇式加热阶段过程中, 加热管停止加热, 材料进入蒸发器, 并由蒸发器内部余温对材料加热蒸发, 直至蒸发器温度降至下限时加热管再次工作, 如此形成间歇式的周期工作状态。

蒸发器周围填充隔热材料, 加热过程中忽略热量流失, 则准备阶段时间的计算公式为:

$$t_1 = (c_2 \cdot \Delta T_1 \cdot m_2)/P$$

式中,  $t_1$  为设备准备阶段时间,  $c_2$  为蒸发器材料的比热容,  $\Delta T_1$  为设备从室温加热至设定温度变化量,  $m_2$  为加热板重量,  $P$  为加热管总功率。

间歇式加热过程中, 通过计算温度维持时间和再次加热时间可得到间歇式加热周期  $t_2$ 。设定蒸发板的温度控制范围  $\Delta T_2$ , 得到间歇式加热周期计算公式为:

$$t_2 = (c_2 \cdot \Delta T_2 \cdot m_2)/P_m + (c_2 \cdot \Delta T_2 \cdot m_2)/P$$

式中,  $t_2$  为间歇式加热周期时间,  $\Delta T_2$  为蒸发板温度控制范围,  $P_m$  为材料加热需求的功率。

通过计算, 得到蒸发器的维持时间, 蒸发器再次升至设定温度的时间以及间歇式加热周期。

## 3 试验验证

### 3.1 粒子粒径测量

利用 PDI (phase Doppler interferometer, 相位多普勒干涉仪) 系统, 测量粒子发生器发出的粒子粒径分布情况, 发现粒子粒径集中在  $5 \mu\text{m}$  以下, 中心区在  $2 \mu\text{m}$  左右, 符合空气中粒径  $1 \sim 5 \mu\text{m}$  的要求, 如图 8 所示。表明通过离心筛选的方式从根本上保证了粒子大小的均匀性和跟随性。

### 3.2 风洞试验验证

为进一步研究粒子发生器的性能及其对 PIV 流场测量结果的影响, 在中国空气动力研究与发展中心  $\Phi 3.2 \text{ m}$  风洞中进行了性能测试试验。

$\Phi 3.2 \text{ m}$  风洞是一座开闭口两用的回流式风洞, 试验段截面为圆形, 直径为  $3.2 \text{ m}$ , 开口试验段的最高风速可达  $115 \text{ m/s}$ 。使用的 PIV 系统光源为脉冲式双 Nd: Yag 激光器, 单脉冲能量  $500 \text{ mJ}$ , 脉冲宽度为  $6 \sim 8 \text{ ns}$ 。CCD 相机分辨率为  $4008 \times 2672$  像素, 最大采集频率  $2$  对/秒。同步控制器具有  $7$  个同步控制通道, 延时控制精度优于  $10 \text{ ns}$ 。

试验首先研究了粒子对气流湿度的影响规律。具体方法是: 将湿度测量仪放置在流场中, 在试验开始前记录风洞内空气湿度初读数, 然后在试验开始后, 每隔  $1 \text{ min}$  记录气流湿度。持续投放时间不少于  $10 \text{ min}$ , 观察湿度变化情况。停粒子待风洞吹干至初始值后再次测量, 重复测量  $3$  次。得到结果如表 3 所示。

表 3 湿度记录数据

吹风时间/min	湿度	吹风时间/min	湿度
1	65.7	6	65.5
2	65.8	7	65.5
3	66.1	8	66.5
4	65.7	9	65.7
5	65.4	10	65.8

吹风前湿度:  $61.5$ ; 风速  $20 \text{ m/s}$ 。

从测量结果看, 空气湿度维持在一个比较稳定的水平, 投放粒子时间对空气湿度影响较小。

验证试验选择了经典的圆柱绕流流场测量, 测量视场大小  $1000 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ , 按如下步骤进行:

- 1) 安装好圆柱体模型;
- 2) 安装 PIV 设备并调整激光与相机的位置, 确保相机能完整的拍到圆柱尾部流场;

- 3) 相机标定;
- 4) 启动粒子发生器, 并在试验过程中持续投放;
- 5) 启动风洞, 风速 10 m/s;
- 6) 记录数据并计算;
- 7) 增加风速进行下一次记录, 风速从 10 m/s 开始, 至

70 m/s, 每 10 m 一个台阶。

试验现场如图 9 所示。



图 9 验证试验现场图

测量的粒子如图 10 所示。从粒子灰度图来看, 粒子分布均匀, 光散射效果好, 没有出现明显噪点。

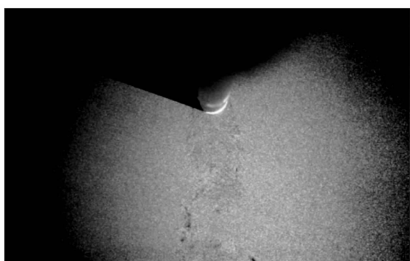


图 10 粒子灰度图

对粒子图像进行互相关分析, 并绘制流线图, 计算结果规律性好且无异常速度矢量, 表明粒子跟随性等指标满足要求。风速 70m/s 时流场流线如图 11 所示。

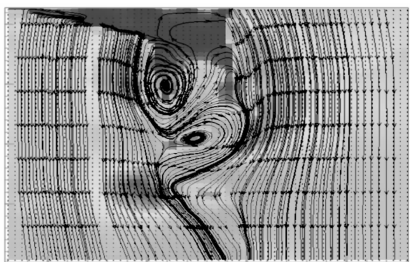


图 11 流场流线图 (风速 70 m/s)

通过设备研制, 粒子发生器应用在了大量的试验研究中。比如, 在中国空气动力研究与发展中心 4 m 量级风洞开展的共轴刚性旋翼悬停流场的 PIV 风洞试验研究, 得到了不同状态下桨尖涡的脱落轨迹以及流场速度矢量图。其拍摄的粒子图和计算结果如图 12~13 所示<sup>[22]</sup>。

### 4 结束语

本文通过原理设计、分析计算和试验验证, 成功研制了适用于大型风洞 PIV 试验的粒子发生装置, 解决了在大

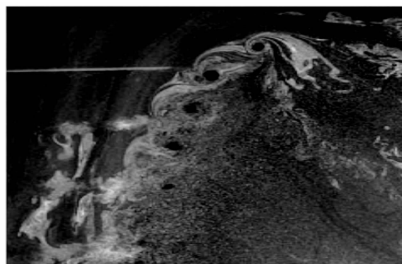


图 12 旋翼试验粒子图

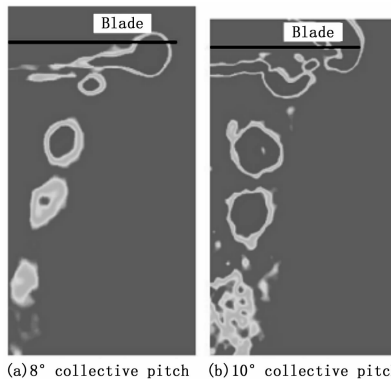


图 13 旋翼试验流场计算结果

型风洞中开展 PIV 试验的关键问题, 并应用到了大量的工程实践中, 具有重要的工程实用意义。通过研究, 可得到以下结论:

- 1) 在大型风洞 PIV 试验中, 采用经济性好的油基材料加热蒸发的方式, 可持续、足量、均匀地供应示踪粒子, 是一种较好的粒子产生方式。
- 2) 在粒子发生装置设计时, 应充分考虑实际所需粒子流量, 并针对选择的粒子材料的理化特性开展计算分析。
- 3) 离心筛选的方式可从根本上保证粒子大小的均匀性, 且采用油基材料产生的粒子对风洞气流湿度响很小。

### 参考文献:

[1] BEYER W, MAHNKEN M, EGBERS C, et al. LDV measurements on wing/engine interferences [C] //10th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal, 2000.

[2] BARBAGALLO D, GREGORIO F D, TINO N. Helicopter wake investigation by means of PIV and HW measurement techniques [C] //9th International Symposium on Flow Visualization, Edimburgh, UK, 2000.

[3] KOMPENHANS J, DIETERLE L, VOLLMERS H, et al. Qualitative and quantitative visualization of wake vortices in industrial test facilities [C] //9th International Symposium on Flow Visualization. Heriot-Watt University, Edimburgh, August, 2000.

[4] RAFFEL M, RICHARD H, EHRENFRIED K, et al. Recording and evaluation methods of PIV investigations on a heli-

- copter rotor model [J]. *Experiments in Fluids*, 2004, 36 (1): 146 - 156.
- [5] SCARANO F, HAERTIG J. Application of non - isotropic resolution PIV in supersonic and hypersonic flows [C] //5th International Symposium on Particle Image Velocimetry. Busan, Korea, 2003.
- [6] HUMBLE R A, SCARANO F, OUDHEUSDEN B, et al. PIV Measurements of a Shock Wave/turbulent Boundary Layer Interaction [C] //13th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisbon, Portugal, 2006.
- [7] VAN DER DRAAI R K. 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, 2005.
- [8] 刘洪, 陈方, 励孝杰, 等. 高速复杂流动 PIV 技术研究实践与挑战 [J]. *实验流体力学*, 2016, 30 (1): 28 - 42.
- [9] 荣臻, 陈方, 刘洪, 等. 超声速 PIV 示踪粒子布撒技术研究 [J]. *实验流体力学*, 2012, 26 (2): 64 - 67.
- [10] 陈小虎, 陈方, 刘洪, 等. 超声速混合层中 PIV 粒子的湍流变动作用研究 [J]. *实验流体力学*, 2017, 31 (6): 8 - 14.
- [11] 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.
- [12] 张振刚, 涂程旭, 包福兵, 等. 泵与风机 PIV 实验的示踪粒子撒播技术研究 [J]. *中国计量大学学报*, 2019, 30 (1): 25 - 30.
- [13] 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.
- [14] 董守平, 双凯. PIV 图像粒子像斑定位偏差综合评估试验及其测速误差评估 [J]. *实验力学*, 1997 (1): 102 - 108.
- [15] 李春丽, 郭劲君, 王志强, 等. 基于 PIV 荧光粒子法的膜面气液两相流场特性研究 [J]. *农业机械学报*, 2016, 47 (12): 373 - 378.
- [16] 胥頔, 张俊, 等. 高速流场中 PIV 粒子发生器的现状及进展 [C] //中国空气动力学学会测控专业委员会六次全国学术交流会, 广东惠州, 2015.
- [17] 秦俊, 黄晨, 王昕, 等. 基于水模拟回风流场的 PIV 测试粒子跟随性研究 [J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26 (1): 143 - 148.
- [18] 朱亮, 汪跃, 陈琳, 等. 基于 CFD 仿真模拟及 PIV 粒子示踪相结合法超滤膜组件优化 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47 (5): 402 - 410.
- [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] 栗鸿飞, 宋文武. PIV 技术在流动测试与研究中的应用 [J]. *西华大学学报 (自然科学版)*, 2009, 28 (5): 27 - 31.
- [21] DELAPP C, REEDER M, CRAFTON J, et al. Clean seeding material for particle image velocimetry measurements [C] //25th AIAA Aerodynamic Measurement Technology and Ground Testing Conference, 2013.
- [22] 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): 154 - 159.
- [3] 柳雨. 基于 6LoWPAN 的无线心电传感网络的设计 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [4] 张昊, 孙元, 王志刚, 等. 基于 ARM 和 WIFI 技术的心电信号实时检测系统设计与研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (1): 54 - 58.
- [5] 饶珂萌. 基于 GPRS 和 Zigbee 的无线心电信号监测系统设计与研究 [J]. *计算机测量与控制*, 2021, 29 (2): 20 - 24, 29.
- [6] 郑毅. 多功能监护仪的硬件系统设计 [D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
- [7] 彭芬. 无线温度测控系统低功耗传感器节点设计 [J]. *邵阳学院学报 (自然科学版)*, 2017, 14 (4): 76 - 79.
- [8] JIA S, MA C. The design of the embedded WEB server based on ENC28J60 [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 15: 2670 - 2674.
- [9] 高吉星, 赵强, 佟为明. 基于 ENC28J60 的 TMS320F2812 以太网通信接口设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2013, 21 (3): 709 - 711.
- [10] 于鹏澎, 潘杰. 基于 6LoWPAN 的植物工厂智能监测系统设计与实现 [J]. *科技视界*, 2019 (22): 16 - 17.
- [11] OSTERLIND F, DUNKELS A, ERIKSSON J, et al. Cross-level sensor network simulation with COOJA [C] //Proceedings of the 31st IEEE Conference on Local Computer Networks, Tampa, FL, USA, 2006: 641 - 649.
- [12] 李凤国. 基于 6LoWPAN 的无线传感器网络研究与实现 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2013.
- [13] DE R A, VALENTIM M, MORAIS A H F, et al. A performance analysis of the Ethernet nets for applications in real-time: IEEE 802.3 and 802.3.1 Q [J]. *IEEE*, 2008, 17: 276 - 280.
- [14] 向浩, 李堃, 袁家斌. 基于 6LoWPAN 的 IPv6 无线传感器网络 [J]. *南京理工大学学报 (自然科学版)*, 2010, 34 (1): 56 - 60.
- [15] 张金龙, 万力. 基于 6LoWPAN 的充电桩群间通信系统设计 [J]. *传感器与微系统*, 2020, 39 (8): 92 - 95.
- [16] 冯馨于, 仇英辉. 基于剩余级别负载均衡的 RPL 路由协议 [J]. *传感技术学报*, 2018, 31 (4): 607 - 612.
- [17] WINTER E T, THUBERT E P, BRANDT A, et al. RPL: IPv6 routing protocol for low-power and Lossy networks [A]. *International Ict Conference on Simulation Tools & Techniques [C]*. 2012.
- [18] 杨钊. 基于 RPL 的 IPv6 无线传感网节点移动切换的研究与实现 [D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2019.
- [19] 朱琳. 无线传感器网络 RPL 路由协议研究与改进 [D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [20] 邱杰. 基于 IPv6 的无线传感网络研究与实现 [D]. 南京: 南京邮电大学, 2016.
- [21] 陈懿. 基于 6LoWPAN 的无线传感网络的应用研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2018.