

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.11.001

美国全尺寸风洞中的 PIV 系统

战培国*

中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳 621000

摘 要: PIV 技术已成为大型风洞重要的流动测量和显示工具。在概述美国全尺寸风洞发展现状的基础上, 重点阐述美国国家全尺寸空气动力设施全尺寸风洞中的 PIV 系统设计, 探讨 PIV 技术在全尺寸风洞中应用需注意的问题, 为国内大型风洞中 PIV 应用提供参考。

关键词: 全尺寸风洞; PIV; 流动显示

中图分类号: V211.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-5453 (2017) 11-0001-04

流动显示是认知飞行器与空气相互作用机理、分析气动现象、改进气动设计的重要试验研究手段, 测量显示结果也是计算流体动力学 (CFD) 工具验证的重要参考。在流动测量和显示领域, 粒子图像测速 (PIV) 技术得到广泛应用, 发展了二维 / 二分量、二维 / 三分量、全息 / 三分量、解析时间、微型等多种 PIV 测量形式, 形成了多种品牌的 PIV 商业化产品, 如美国的 TIS、德国的 Lavision、丹麦的 Dantec 等^[1-3]。从 20 世纪 90 年代后期开始, 国外 PIV 应用开始从小型研究风洞进入大型工业生产风洞, 主要用于飞行器复杂流场诊断和 CFD 工具验证^[4-6]。2009 年, 在美国航空航天局 (NASA) 基础航空计划亚声速旋翼机项目的需求牵引下, NASA 在全尺寸风洞中建立了 PIV 测量系统^[7]。

1 美国全尺寸风洞

风洞试验段尺寸是风洞试验能力的一个重要指标, 它决定着风洞能够承受的最大试验模型尺寸。为了最大限度地满足风洞试验模拟相似条件的要求, 减少模型缩尺带来的试验数据不确定度影响, 美国在 20 世纪 30 年代开始发展全尺寸亚声速风洞。

1.1 兰利全尺寸风洞 (LFST)

1931 年, 美国国家航空咨询委员会 (NACA, NASA 前身) 兰利航空实验室建设了双回路布局、椭圆开口试验段的兰利全尺寸风洞 (LFST), 试验段尺寸: 9m (高) × 18m

(宽) × 17m (长), 试验风速 54m/s。

LFST 经历过第二次世界大战期间大量的全尺寸型号试验; 20 世纪 50—60 年代开展了各种飞行器的基础和技术预研, 如航天飞机、升力体、垂直 / 短距起落 (V/STOL) 飞机直升机、可变性机翼概念、超声速运输机、登月计划等。该风洞除具有进行全尺寸模型或真实飞机试验能力外, 还是 NASA 亚声速模型自由飞试验的指定风洞。20 世纪 90 年代后期, 美国国家风洞试验设备开始“去产能” (从 1993 年到 2006 年, 消减了 50%), 许多冗余设备被拆除, 如兰利 4.8m 跨声速风洞等, LFST 被关停, 后被旧多米宁大学接管运营, 取得了很好的经济效益, 在航空航天、风工程和工业空气动力学试验领域继续发挥作用。

2003 年和 2006 年, LFST 遭遇两次罕见的暴风雨袭击, 风洞损毁严重。考虑到恢复和维持成本, 2011 年, NASA 拆除了该风洞。

1.2 美国国家全尺寸空气动力设施

为满足飞机起降、全尺寸垂直 / 短距起落飞机和旋翼机试验研究需要, 美国于 1944 年建设了 12.2m × 24.4m (40ft × 80ft) 风洞。20 世纪 80 年代, 在 12.2m × 24.4m 风洞的洞体结构基础上, NASA 又建设了 24.4m × 36.6m 风洞, 风洞试验段尺寸: 24.4m (高) × 36.6m (宽) × 57.9m (长), 最大试验风速 50m/s。并且把两个风洞统称为国家全尺寸空气动力设施 (NFAC)。

NFAC 全尺寸风洞进行了上百个各种布局的飞行器、约

收稿日期: 2017-07-07; 退修日期: 2017-07-17; 录用日期: 2017-08-27

* 通信作者. Tel.: 0816-2463134 E-mail: zpg63@163.com

引用格式: ZHAN Peiguo. PIV system in national full-scale aerodynamics complex of American [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(11): 01-04. 战培国. 美国全尺寸风洞中的 PIV 系统 [J]. 航空科学技术, 2017, 28(11): 01-04

500 项试验研究,在倾转旋翼机、短距垂直起落飞机、直升机等飞行器研究上发挥了重要作用。

目前,在世界发达国家的国家航空航天研究机构中,只有美国的 NASA、俄罗斯的 TsAGI 拥有全尺寸亚声速风洞。NASA 的 NFAC 是世界最大的全尺寸风洞,是美国亚声速领域的核心试验设备,是全尺寸旋翼试验的首要设备。为了满足航空航天风洞试验精细化发展的需要,NASA 于 2010 年为 NFAC 配套了旋翼试验 PIV 测量系统。

2 美国 NFAC 全尺寸风洞中的 PIV

NFAC 的 $12.2\text{m} \times 24.4\text{m}$ 试验段,最大试验风速 150m/s 。为了满足旋翼机试验研究需要,NFAC 发展了配套的 PIV 测量系统。PIV 系统的设备配置主要包括:激光器 Spectra-Physics PIV-400 laser (Nd: YAG), 350mJ /脉冲, 15Hz ; 同步器 TSI Model 610035; 示踪粒子 4 个 MDG MAX 5000 HO 粒子发生器,矿物油燃烧产生的烟粒子直径 $0.5 \sim 0.7\mu\text{m}$; 相机 TSI PowerView Plus 11Mp, 像素 4008×2672 , 拍摄速率 2.4fps ; 计算软件 Insight 3G (TSI), proVISION (IDT); 双平面校准板面积 $2.4\text{m} \times 1.2\text{m}$ 。

(1) 光路设计

将激光片光投射到试验观测区是光路设计的任务。为了减少对洞体的改动,首先最大限度地利用 NFAC 试验段已有的开口,但为了避开模型阻挡光路,还是在比已有窗口的更高位置新增建了一个安装反射镜的窗口,如图 1 所示。

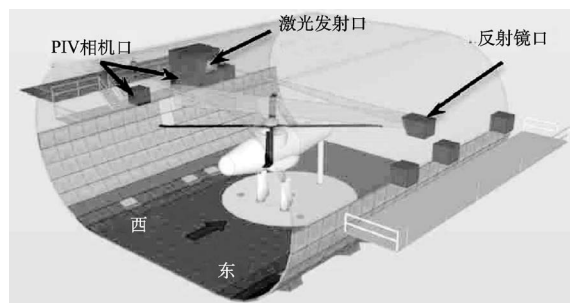


图 1 PIV 系统光路设计

Fig.1 PIV system optical design

(2) 照相机设置

在测量区上、下游的洞壁拍摄窗口各设置一个照相机,从两个不同角度拍摄的照相机尽可能按保持最大的相同覆盖区来设置,如此它们距离激光片光拍摄区的距离约 2.4m 。拍摄窗口有一个移动支架,便于相机在外边安装和进入,在移动支架上有固定相机的支撑板,支撑板可以旋转并有隔振垫,防止洞壁震动引起移动。相机系统的遥控装置可以调节相机拍摄角度和焦距调整,洞壁窗口内同时安装试验录像机。

(3) 激光发射系统

激光器发射系统在激光安全箱中(如图 2 所示),该箱子由两层构成,内层是铝制可伸缩箱子,外套激光安全防护帘。洞体顶门打开时,为了防止对激光装置冲击,箱子前部需要收缩回来。激光器型号为: Spectra-Physics PIV-400 laser (Nd: YAG), 350mJ /脉冲, 频率 15Hz , 波长 532nm , 脉冲宽度 5ns , 光束直径 9mm , 光束发散角小于 0.5mrad 。

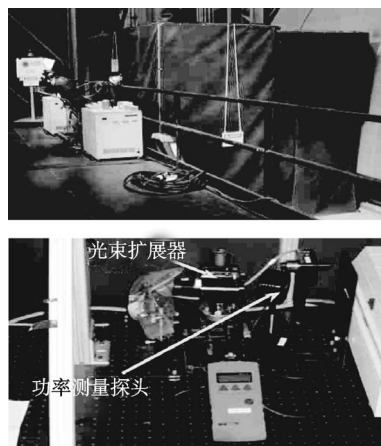


图 2 激光发射安全箱和内部光学装置

Fig.2 Laser safety enclosure and optical device inside

(4) 激光反射镜系统

在激光发射系统对面的风洞洞壁上新改造了激光反射镜系统,如图 3 所示。主要由控制箱和反射镜口箱两部分组成。反射镜高 0.9m , 宽 0.3m 。安装在洞体的反射镜口箱内,结构如图 4 所示。由激光发射器投射过来的激光片光高度调为 1.5m , 取中间片光厚度均匀的 0.9m 投射到反射镜上。控制箱内的电源和驱动控制系统能够精确调整反射镜的俯仰和偏转角度。反射镜对面洞壁上贴有间隔 6mm 的



图 3 激光反射镜系统装置

Fig.3 Laser mirror device

两条垂直胶带,用作投射位置标定用的参考线,以此确定片光打到了所需的测量面上。

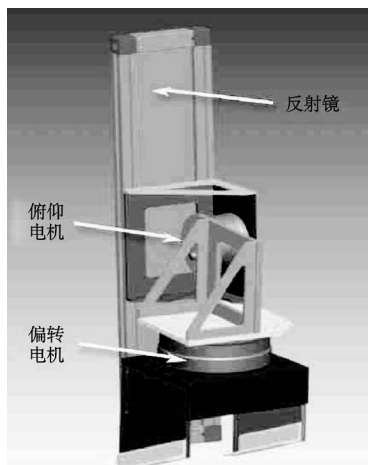


图4 激光反射镜装置
Fig.4 Laser mirror system

(5) 同步器

TSI 激光脉冲同步器 Model 610035 用于自动控制激光脉冲和 PIV 相机之间的计时同步。同步器通过 TSI 内嵌软件控制需要计时采集的跨帧照片。同步器产生激光闪光灯、Q-开关、照相机和抓拍器的控制信号并自动同步。

(6) 示踪粒子发生器系统

示踪粒子由 4 个高输出 MDG MAX 5000 HO 粒子发生器产生,发生器安装在风洞稳定段地板上,沿展向均匀分布。矿物油加热产生的烟粒子直径 $0.5\sim 0.7\mu\text{m}$,烟粒子由高压氮气(气瓶在风洞外)吹入风洞气流中。此外,高压氮气也用于加热模块的清洁,如图 5 所示。



图5 示踪粒子发生器系统
Fig.5 Seeder system

(7) 相机校准

相机校准使用 TSI 软件和一个双平面校准板,这样可以快速确定相机拍摄的范围和位置。整个拍摄区面积大约宽 4.3m,高 1.2m,但如果制造如此大的一个双平面板并悬挂于 6m 高空中,既昂贵又难以保持稳定。因此,板的面积选定为宽 2.4m,高 1.2m,移动一次就可以完成整个拍摄区的校准。板上钻有直径 10mm 的小孔,按 25×11 排列,如图 6 所示。

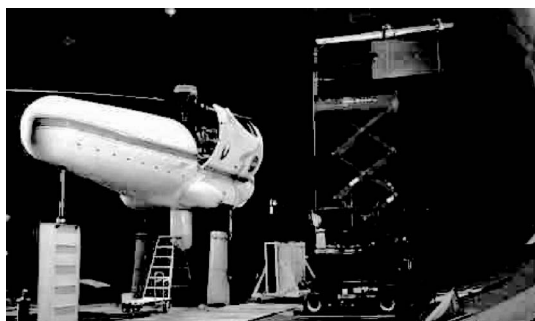


图6 相机校准
Fig.6 Camera calibration

(8) 安全管控系统

由于全尺寸风洞 PIV 系统工作区分布广,如激光遥控在二楼数据采集机房,试验段人员通道在三楼,激光发射系统安全箱在四楼,所以激光系统安全管控非常重要。PIV 作为风洞标配测量设备,建立了完善遥控测量和试验安全监视体系,试验段入口和激光器设备箱通道具有自动切断激光保护装置;激光器设备箱内外、试验段门口和 PIV 数据采集处都有应急激光切断开关;位于稳定段的粒子发生器有红外摄像机监视。操作人员在机房能够对 PIV 系统测量进行遥控调整。

3 全尺寸风洞中应用的几个问题

(1) PIV 测量的不确定度。通常认为 PIV 测量精度介于 $1\%\sim 0.1\%$ 之间,这只能视作是 PIV 产品测量精度的名义值。由于 PIV 测量系统在全尺寸风洞中应用环境和测量对象的差异,PIV 测量的不确定度需要根据大型风洞的实际情况评定。PIV 测量的不确定度评定应考虑 4 个主要误差来源:设备、粒子动力学、采样、图像分析。

(2) 示踪粒子的可用性。示踪粒子是影响该技术应用效果的一个关键因素。涉及示踪粒子主要有 4 方面的问题:一是粒子的可用性,包括对环境的影响、成本、如何产生并引入气流中;二是粒子的统计偏差影响;三是对流动动力学的响应能力;四是对空间的解析力。油基类粒子对大型工业风洞的污染和以后可能对其他光学测量试验产生的影响是一个不可忽视的问题。

(3) PIV 的商品化与大型风洞的差异化。尽管 PIV 技术已经成熟并商品化,但在大型工业风洞应用仍面临许多挑战。对大多数大型工业风洞而言,在设计建造的过程中没有考虑 PIV 系统应用的要求,风洞结构可能对 PIV 光路产生制约,粒子的有效播撒途径也是难点,复杂的流场测试环境和测试目标影响 PIV 测量可用性。因此,尽管 PIV 已经商品化,但在大型工业风洞中应用仍需要进行针对性的设计和应用研究。

(4) PIV 与传统流动显示技术。PIV 在大型工业风洞应用是一项复杂的工作,大型工业风洞需要考虑可靠性、成本和效率。因此,需要 PIV 与传统流动显示技术相结合应用,PIV 主要用于复杂流场的测量,通常不仅是为了传统意义上的“显示”,也是为了细化型号设计、验证和发展 CFD 工具。大型工业风洞型号试验和飞行器精细化设计对 PIV 技术有应用需求,同时,方便实用的传统丝线、油流、纹影、阴影等流动显示工具仍将在大型工业风洞中发挥重要作用并不断创新,如油膜干涉测量、基于背景的纹影等。

4 结束语

PIV 技术在国外各类大型工业风洞中的普遍应用提升了风洞的试验能力,利用 PIV 技术,科研人员能够更好地观察和分析飞行器的绕流流场,优化和改进飞行器的气动设计,提高飞行器的精细化设计水平。PIV 技术在国外大型工业风洞中应用的经验表明,PIV 系统虽已形成商品并商业化,但实际应用需要结合具体风洞结构和流场特征设计相关光路和软硬件系统,需要根据不同风洞特点选择和设计粒子

发生器及引入位置。因此,PIV 在大型工业风洞中应用,需要风洞工程技术人员和 PIV 产品开发商共同努力。 **AST**

参考文献

- [1] Van der Draai R K. Application of PIV in (local) supersonic flows in DNW wind tunnels [C] // AIAA, 2005.
- [2] Konrath R. Flow field measurements by PIV at high Reynolds numbers [C] // AIAA, 2013.
- [3] Quest J. Accepting a challenge—the development of PIV for application in pressurized cryogenic wind tunnels [C] // AIAA, 2011.
- [4] Wernet M P. Application of stereo PIV on a supersonic parachute model [C] // AIAA, 2009.
- [5] Heineck J T. PIV in NASA Ames unitary wind tunnels [C] // AIAA, 2011.
- [6] Konrath R. Flow field measurements by PIV at high Reynolds numbers [C] // AIAA, 2013.
- [7] Watanabe S. Stereo PIV applications to large-scale low-speed wind tunnels [C] // AIAA, 2003.

(责任编辑 王潇一)

作者简介

战培国 (1963-) 男,硕士,高级工程师。主要研究方向: 空气动力学。

Tel: 0816-2463134

E-mail: zpg63@163.com

PIV System in National Full-Scale Aerodynamics Complex of American

ZHAN Peiguo*

Computational Aerodynamics Research Institute CARDIC, Mianyang 621000, China

Abstract: The PIV technique has been an important flow measurement and visualization tool in large wind tunnels. The paper based on the summary of the development of full-scale wind tunnel in America, laid emphasis on the PIV system in the National Full-Scale Aerodynamics Complex (NFAC) of American, and discussed the points need to pay attention when PIV used in large wind tunnels. The purpose was to provide thoughts and references for the application of PIV in domestic large wind tunnels.

Key Words: full-scale wind tunnel; PIV; flow visualization

Received: 2017-07-07; Revised: 2017-07-17; Accepted: 2017-08-27

*Corresponding author. Tel.: 0816-2463134 E-mail: zpg63@163.com