

基于激光多普勒原理的极低风速测量实验

徐大川¹, 龙彦志², 李玉栋¹, 杨 洋¹, 张国彪¹

(1. 中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000;
2. 中国航空工业集团有限公司 成都凯天电子股份有限公司, 成都 610000)

摘 要: 介绍了利用激光多普勒效应进行风速测量的原理及定点遥测原理,分析了探测气溶胶颗粒大小的要求,并以此搭建了一套极低风速测量系统。同时分析了系统的测速精度,以及安装角度对测量结果的影响。最后分别开展了转台实验、直线导轨实验和风洞实验,实验结果表明,该极低风速测量系统的测量误差基本可以控制在 0.01 m/s 以内,当风洞工作介质为未经处理的环境空气时,系统可以获得稳定可靠的信号,测量结果与高性能仪器十分接近。

关 键 词: 激光多普勒; 极低风速; 气溶胶; 误差分析; 风洞实验

中图分类号: V211 **文献标志码:** A

Experiment of extremely low wind velocity measurement based on laser Doppler

XU Dachuan¹, LONG Yanzhi², LI Yudong¹,
YANG Yang¹, ZHANG Guobiao¹

(1. Facility Design and Instrumentation Institute, China Aerodynamics
Research and Development Center, Mianyang Sichuan, 621000, China;
2. Chengdu Aviation Instrument Company Limited,
Aviation Industry Corporation of China Limited, Chengdu 610000, China)

Abstract: The principles of laser Doppler effect and telemetry were introduced, and the requirement for the size of aerosol particles was analyzed. A low wind velocity measurement system was established, and through which the measurement accuracy and influence of installation angle were analyzed. The experiments of rotary table, linear guideway and wind tunnel were carried out. The results verified the analysis and proved that the measurement accuracy was better than 0.01 m/s by experimental data. The measurement system can obtain stable and reliable signal when the medium in wind tunnel was conventional air, and the measurement results were very close to the high-performance instrument.

Key words: laser Doppler; low wind velocity; aerosol; error analysis; wind tunnel experiment

在大气边界层研究、污染物扩散研究等研究领域内,极低风速测量技术是一种重要的测量技术。本文所关注的极低风速是指在 0.1~1.0 m/s 这一范围。

收稿日期: 2019-11-05

作者简介: 徐大川(1985—),男,副研究员,硕士,主要从事风洞气动设计研究。

引用格式: 徐大川,龙彦志,李玉栋,等. 基于激光多普勒原理的极低风速测量实验[J]. 航空动力学报,2020,35(6):1228-1237. XU Dachuan, LONG Yanzhi, LI Yudong, et al. Experiment of extremely low wind velocity measurement based on laser Doppler[J]. Journal of Aerospace Power, 2020, 35(6): 1228-1237.

在自然环境地面风测量中,通常将风定义为水平面上的二维矢量,用风向和风速表示^[1]。根据测量方式的不同,常见的风速测量方法可分为机械旋转式、风压式、散热式、超声波式等。

机械旋转式风速计是通过检测风向标的旋转角度、风杯的转速来测量风向和风速,经过光电转换、数字量化等环节将测量结果记录下来^[2]。常见的机械旋转式风速测量计有风杯风向标、螺旋桨或尾翼型测风传感器等。王晓蕾等开展了机械旋转式风速计的动态对比实验,指出机械旋转式风速计的动态误差比其静态误差大得多,即测量设备在量值传递、计量检定和校准过程中定义的准确度与实测准确度之间的差异已不能被接受^[3]。

皮托管是测量气流总压的一种装置,是 18 世纪法国工程师 Pitot 发明的。用实验方法直接测量气流的速度比较困难,但气流的压力则可以用测压计方便地测出。主要用来测量气流速度的,同时还兼具其他多种功能。因此,可用皮托管测量压力,再应用伯努利定理算出气流的速度。由于测压孔有一定面积,也由于支杆干扰和制作上等原因,皮托管测得的压差不会正好是总压和静压之差,因此通常对测量结果进行修正,修正值通过同标准皮托管作标定求得。由于皮托管测速是基于伯努利方程,忽略了黏性影响。在实际应用中,特别是黏性作用占主导的低 Re 流动,黏性的影响往往是不可忽略的^[4-5]。当基于皮托管直径的 $Re>700$,或基于测压管内径的 $Re>250$ 时,经过标定后的皮托管可以不考虑黏性影响^[6]。

热线式、热膜式风速仪主要通过检测暴露在流体中的热敏元件的温度耗散和传热速率来测量流体速度^[7-10]。近年来发展的恒温型热线风速测量系统在时间分辨率、动态频响和测量重复性方面有明显优势,特别是可以进行流体连续定量测量,已公开发表的文献表明在湍流研究中利用恒温型热线风速测量系统获得的实验数据可信度最高,使其在流场测量中得到广泛应用^[11-16]。热线式和热膜式风速仪稳定可靠,信噪比高且测量精度高、重复性好,但是受单端输入信号饱和的限制,风速测量的范围不大,而且温度测量需要一定的响应时间。

超声风速仪的测量方法可分为时差法、相位差法、频差法、多普勒法、波束偏移法和噪声法等^[17]。其中时差法是应用较为广泛的方法。时差法是利用超声波在顺风 and 逆风路径上传播的速度差来确定风速的大小。速度差不能直接测量,

一般转换成超声波在顺风和逆风路径上传播的时间差。超声风速仪的优点主要包括:①没有机械转动部件,不存在机械磨损、阻塞、冰冻等问题;②没有“机械惯性”,灵敏度高,可捕捉瞬时的风速微小变化;③输出特性为线性,易于实现数字化输出及流量的计算。但是,超声风速仪的安装直接影响到测量的精度,所以对安装要求十分严格。其次,超声风速仪结构较为复杂,故障排除较为困难,抗干扰性较差^[18]。

激光多普勒测速技术是伴随着激光器的诞生而产生的一种测量技术^[19],利用激光的多普勒效应来对流体或固体速度进行测量的一种技术,广泛应用于军事、航空、航天、机械、能源、计量、医学、环保等领域^[20-22]。目前市场上大多数激光多普勒测速产品采用的脉冲光源,其中 He-Ne 激光器(632.8nm)^[23]和 Ar 离子激光器(514.5nm)^[24]在实际应用中最为广泛。

皮托管无法开展极低风速测量的原因主要有:一是皮托管的测量原理是基于伯努利方程,忽略气流黏性的影响,而极低风速时流体的黏性力会对测量结果产生严重影响;二是受微差压传感器的测量精度所限。热线/热膜式风速仪虽然可以达到较高的测量精度,但是不同探针的测量性能由于制造工艺、尺寸的不一致而存在差异。另外热线/热风速仪的测量性能还和被测流体的物性相关,因此热线在使用前必须进行标定,才能得到准确的测量结果^[25]。超声风速仪由于其探头尺寸较大,对流场会产生较强的干扰,因而不适合作为近场精确测量的测量设备。

本文利用激光多普勒测速技术开展极低风速测量实验研究。与大多数激光多普勒测速产品不同,本系统的激光光源选用的是 C 波段红外连续激光。选用连续激光作为光源从原理上有着极高的测量精度和分辨率。C 波段红外激光可以直接照射大气中的气溶胶颗粒,发生充分的米散射作用,产生可供探测的后向散射信号。这样就避免了向待测流场播撒示踪粒子,从而消除了因播撒示踪粒子对流场造成的破坏以及对其他传感器的污染问题。

1 技术原理

1.1 多普勒测速原理

低层大气中混杂着气溶胶粒子,气溶胶被大气裹挟,在宏观尺度上一起运动。多普勒相干测速是利用气溶胶对信号光的多普勒效应,将频率

已经发生变化的信号光进行采集并与本振光在耦合器处进行混频,由探测器得到两者的差频信息,根据多普勒频移与气溶胶速度间的关系可以推导出气溶胶的运动速度,从而得到气流速度

$$\Delta f = \frac{2v\cos\theta}{\lambda} \tag{1}$$

式中 Δf 为多普勒频移量, v 为气溶胶的速度, θ 为气溶胶速度与激光视线方向的夹角, λ 为信号光的波长。

$$i(t) = D[e_s(t) + e_i(t)]^2 = D\left\{\frac{E_s^2}{2} + \frac{E_i^2}{2} + \frac{E_s^2}{2}\cos 2[2\pi(f_0 + \Delta f)t + \Phi_s] + \frac{E_i^2}{2}\cos 2[2\pi f_0 t + \Phi_i] + E_s E_i \cos[2\pi(\Delta f + 2f_0)t + \Phi_s + \Phi_i] + E_s E_i \cos(2\pi\Delta f t + \Phi_i - \Phi_s)\right\} \tag{4}$$

式中 D 为光电探测器的响应率,由于光电探测器响应带宽的限制,光电流的高频分量将得不到响应,因此,光电流的实际输出为

$$i(t) = I_s + I_i + 2\sqrt{I_s I_i} \cos(2\pi\Delta f t + \Phi_i - \Phi_s) \tag{5}$$

滤除信号光与本振光产生的直流电流 I_s 与 I_i ,光电流只剩下包含多普勒频移信息 Δf 的中频信号,数据处理检测中频信号频移 Δf ,利用多普勒公式即可推导出气溶胶的运动速度。

1.2 气溶胶颗粒要求

光学大气速度传感器的探测对象是大气气溶胶。气溶胶是由固体或液体小质点分散并悬浮在气体介质中形成的胶体分散体系,大气气溶胶由于其来源不同,导致其形态各异,尺度分布极广,其半径的尺度一般在 $0.001\sim 100\mu\text{m}$ 之间。光学大气速度传感器发射 C 波段红外激光照射大气气溶胶,发生的是米散射作用。米散射是粒子尺度接近或大于入射光波长时产生的一种弹性散射现象,其程度变化主要是由粒子半径 r 和激光波长 λ 决定的,其相关函数为

$$\alpha = 2\pi r/\lambda \tag{6}$$

当 α 大于 1 时,米散射才会充分发生作用,产生可供探测的后向散射信号。而当 α 小于 1 时,米散射会向瑞利散射转化,导致频谱展宽,系统退相干,探测能力下降甚至失去探测能力。将 C 波段红外激光的波长 $1550\sim 1560\text{nm}$ 代入公式,计算可得传感器的探测对象是半径大于 $0.25\mu\text{m}$,即直径大于 $0.5\mu\text{m}$ 的气溶胶粒子。当该部分气溶胶粒子浓度不足时,传感器将可能无法探测到风速信号。

如果需要测量的气流十分洁净,比如采用高

假设探测器表面量子效率均匀,偏振方向相同、传播方向平行且重合的两束光波垂直入射到光探测器上,本振光与回波信号光的电场分别为

$$e_i(t) = E_i \cos(2\pi f_0 t + \Phi_i) \tag{2}$$

$$e_s(t) = E_s \cos[2\pi(f_0 + \Delta f)t + \Phi_s] \tag{3}$$

式中 f_0 为激光器本振频率, Δf 为气溶胶多普勒效应引起的频移, E_i 、 E_s 分别为本振光和信号光的振幅, Φ_i 、 Φ_s 分别为本振光与信号光的相位。根据光电探测器的平方率响应特性,输出光电流

效过滤器(HEPA)过滤之后的空气,由于 HEPA 滤网多采用超细玻璃纤维纸作为过滤材料,其对半径大于 $0.1\mu\text{m}$ 微粒的透过率低于 0.001% ,在这种情况下,由于空气中探测颗粒浓度不足,光学大气速度传感器可能无法正常工作。

1.3 定点遥测原理

光学大气速度传感器是通过连续激光照射的方式,来实现固定点风速的遥感探测。如图 1 所示,主机发出的激光由光纤耦合到光学天线,经由光学天线中的透镜折射,使得出射光聚焦到距光学天线距离为象距 L 的固定点 P ,在该点处激光光斑直径最小。激光束在象点 P 处的能量最为集中,在该点与气溶胶发生散射相互作用的程度最高。同时,传感器使用连续激光作为探测介质,使得其接收到的信号始终以焦点处为主。因此光学天线所接受到的散射信号主要体现了焦点处的速度特性,传感器探测到的是焦点处的风速信息。

虽然在几何光学中透镜将激光聚焦于一个无限小的点,但是实际上激光的传播服从高斯

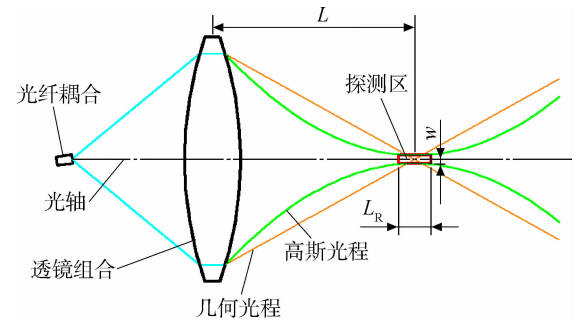


图 1 遥感探测原理图
Fig.1 Schematic of telemetry

光径为束腰半径 w 的近似为圆柱形的区域。此时,传感器探测的是该“圆柱形”区域内空气与传感器的相对速度,一般讨论时,仍认为探测点是象点 P 。束腰半径 w 一般不大于 0.5 mm ,瑞利长度 L_R 与象距 L 成正比例关系,与透镜直径成反比例关系。

2 系统组成

传感器使用相干探测原理测量气流速度。当传感器完成初始化后,传感器内部工控机控制激光器模块,产生一束窄线宽、小功率(约 500 mW)的红外激光。激光被分束器分为出射光和本振参考光两部分,出射光经过环形器(1→2)输出到光学天线,本振参考光输出到耦合器。光学天线将出射光发射到大气中,激光与大气中的气溶胶粒子产生相互作用,由于气溶胶粒子的米散射效应和相对运动产生的多普勒效应,会产生具有多普勒频移的后向散射光。后向散射光由收发一体的光学天线接收,接收的散射光经过环形器(2→3)输入到耦合器。本振参考光与散射光此时具有不同的频率(波长),两者的差频即为多普勒频移。两束光信号在耦合器中相干干涉,输出两束具有 π 相位差的激光信号,并通过光电探测器转换为带有多普勒频移的电流信号,该电流信号由高速

数模转换模块采集,再经由预处理组件中的 field programmable gate array(FPGA)电路进行数据类型转换、滤波、快速傅里叶变换及频谱细化、频谱计算和统计等处理,最后将得到的频谱数据输出到工控机,在工控机中通过算法进行多普勒频移信号的提取以及径向风速解算。

3 误差分析

3.1 测速精度分析

风速这一概念是构成大气粒子运动的宏观统计,直接对风速本身进行测量是不可能的。为了测量风速,需要运用间接测量的方式,将风速信号转变各种物理量,最后还原出风速信息,在这个变换过程中就产生了误差的生成和传递,即误差模型。测量误差由两个方面构成:一方面是来自于仪器设计原理、制造调试存在的欠缺所引起的仪器误差;另一方面来源于测量过程中由于温度变化、振动等外部因素影响所引起的条件误差。光学大气速度传感器利用激光相干多普勒原理进行风速测量,在此过程中宏观风速信号被直接转化为差频频率,相对于空速管(风速-动压-电压)、热线仪(风速-温度-电压)等设备要少一个物理量转化步骤,因此理论上说能更好的控制测量过程中的误差传递。

由多普勒频移公式,得传感器的输出函数为

$$V = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\cos \theta} \lambda f_s \frac{a}{n} \tag{7}$$

式中 λ 为出射激光波长, f_s 为采样频率, $\frac{a}{n}$ 为多普勒频移与采样频率的比值。

利用经典误差理论进行误差函数的推导,推导方式为对输出函数求偏导,然后将系统误差带入公式。记输出函数为

$$V = f(\lambda, \theta, f_s, a) \tag{8}$$

那么有

$$dV = \frac{\partial f}{\partial \lambda} d\lambda + \frac{\partial f}{\partial \theta} d\theta + \frac{\partial f}{\partial f_s} df_s + \frac{\partial f}{\partial a} da \tag{9}$$

用有限增量代替无穷小量,将各个直接测量值的误差 $\Delta\lambda, \Delta\theta, \Delta f_s, \Delta a$ 带入到公式中,得到

$$\Delta V = \frac{f_s a}{2ncos\theta} \Delta\lambda + \frac{\lambda f_s a}{2n} \cdot \frac{\sin\theta}{(\cos\theta)^2} + \frac{\lambda a}{2ncos\theta} \Delta f_s + \frac{\lambda f_s}{2ncos\theta} \Delta a \tag{10}$$

该误差方程的实质是认为 λ, θ, f_s, a 四个物理量相互独立,各项误差因子都是加性误差,在进行误差分析时可以不考虑它们互相之间的作用。

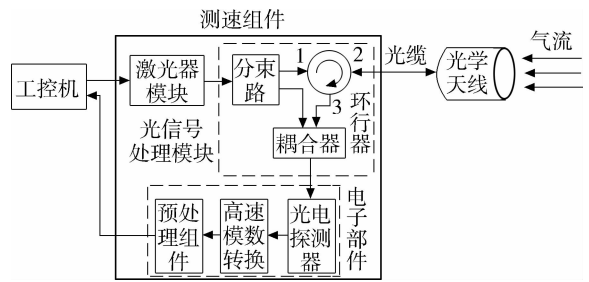


图 2 传感器原理框图
Fig. 2 Principle diagram of sensor



图 3 系统实物图
Fig. 3 Image of system

因此,该误差方程试用于各个误差因子都很小的情况。以上参数中,激光束与气流夹角的误差是在安装过程中实际测量产生的,在后文中进行讨论。根据元器件资料 and 此前相关的测试结果,设定以下参数:

激光多普勒传感器内各关键参数的标称误差为

- 1) 出射激光波长 $\lambda=1550\text{ nm}\pm0.05\text{ nm}$;
- 2) 采样频率 $f_s=65\text{ MHz}\pm0.003\text{ MHz}$,使用低速分析通道时,采样频率为 $32.5\text{ MHz}\pm0.003\text{ MHz}$;
- 3) $n=4096$,频谱分辨率 a 误差为 ±1.5 。

此参数的对应测速范围是 $0\sim10\text{ m/s}$ 。当流场绝对均匀时,不考虑夹角 θ 误差,则简单推导计算可得传感器理论测速误差随实测速度增加而增大,当实测速度为 10 m/s 时得到系统最大测速误差为 $\pm0.01047\text{ m/s}$ 。实际上该测速误差并没有太高的实际价值,因为实验设备内的风速稳定性很难达到该精度。

3.2 安装角对测量精度的影响

当夹角 θ 误差不为 0° 时,传感器将增加角度误差项。由多普勒公式可知,该误差项为乘性误差,即当风速越大时,误差越大。当风速为最大值 10 m/s 时,误差最大。实际环境下夹角 θ 的误差因子由光学天线同轴度误差、光学窗口平行度误差、镜头光轴调节误差(即安装误差)等构成,其中安装误差比其他因子高一个数量级。在传感器安装时,由于测试设备外形和流场方向已知,光学天线和测量点位置可以精确测定,因此,以安装误差定义的夹角 θ 误差可以认为是真实夹角 θ 和实测得夹角 θ_0 之差。表 1 给出了在风速 10 m/s 时,不同安装角度误差对风速测量结果的影响,其中 Δv_1 、 Δv_2 、 Δv_3 分别为安装误差为 1° 、 0.1° 、 0.017° 时风速测量误差。

表 1 风速 10 m/s 时安装误差对测量结果影响
Table 1 Impact of installation error on measurement at 10 m/s

$\theta/(^\circ)$	$\Delta v_1/(m/s)$	$\Delta v_2/(m/s)$	$\Delta v_3/(m/s)$
10	±0.0323	±0.0064	±0.0005
20	±0.0650	±0.0064	±0.0010
30	±0.1023	±0.0101	±0.0016
45	±0.1760	±0.0175	±0.0029
60	±0.3038	±0.0302	±0.0050

再考虑到风洞运行时的振动等因素影响,即便在系统安装时进行了精密调节,运行时也可能造成轻微误差,因此可知

- 1) 为尽量控制测量误差,应尽可能地控制传感器的安装位置角度误差,当安装角度误差为 $0.017^\circ\sim0.05^\circ$,此时夹角 θ 误差带来的风速测量误差基本忽略;
- 2) 受感器光学天线将会使用隔振措施以减少位置误差。

如果对传感器的安装位置测定有困难,可以通过实际测试实验,通过数据拟合的方式解算传感器的安装角度,同样可以将安装角度误差控制到最低。

4 实测结果分析

为了验证激光多普勒传感器在极低速,尤其是在 $0.1\sim1\text{ m/s}$ 范围内的速度测量性能,利用现有设备进行了传感器极低速测量性能的实验验证。实验分为速度模拟实验和风洞实验。其中在速度模拟实验中,根据速度模拟设备的不同,又分为转台实验和直线导轨实验。风洞实验则是在中国空气动力研究与发展中心某研究型低速风洞内开展。

4.1 转台实验

利用精密的转台设备作为低速运动硬靶目标,将探测点设定为转台外缘。此时传感器探测的物理量为转台外缘线速度。转台参数如下:

- 1) 电动机型号为松下 MHMJ042G1U;
- 2) 测量点半径为 162 mm ;
- 3) 实验转速为 $2\sim60\text{ r/min}$,当转速低于 20 r/min 时,步进值为 2 r/min ,当转速高于 20 r/min 时,步进值为 1 r/min 。

由转台参数可得实际的实验速度为 $0.03393\sim1.01788\text{ m/s}$,但是当电动机转速在 10 r/min 以下时,转台机械误差较大,转速不稳定。实际实验场景如图 4 所示。

实验结果如图 5 及图 6 所示。图中结果表明传感器测试值与转台速度值可以很好的吻合,理论速度与实际速度之间的误差大部分在 0.01 m/s 范围内,只有少数测试点出现了偏离。

4.2 直线导轨实验

利用直线导轨作为低速运动硬靶目标,通过控制器控制精密步进电动机运转,从而使得滑轨上的运动滑块按精确的速度进行运动,在此情况



图 4 转台实验实物图

Fig. 4 Image of rotary table experiment

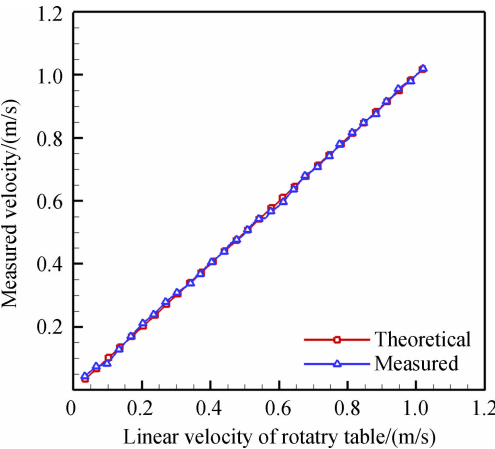


图 5 转台外缘线速度理论值与实测值

Fig. 5 Measured and theoretical linear velocity of rotary table

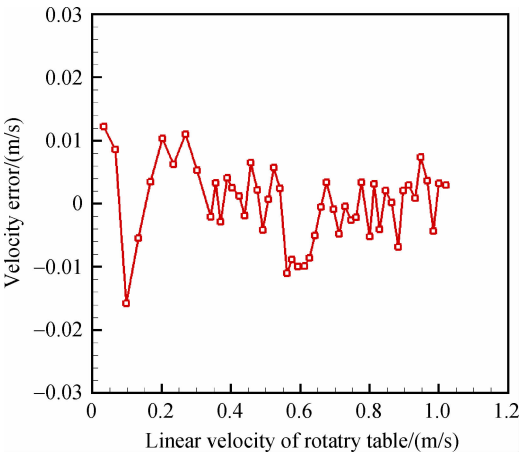


图 6 转台外缘线速度实测值与理论值的误差

Fig. 6 Error curve between measured and theoretical value of rotary table experiment

下,可以通过两种实验方式进行实验

1) 传感器固定,将装在运动滑块上的金属片作为低速运动硬靶目标(或者金属片固定,传感器装在滑块上),运动滑块与传感器之间存在相对运动。此时传感器探测的物理量为移动靶线速度在

传感器激光轴上的投影。

2) 传感器装在运动滑块上。直线导轨运行时,传感器与空气之间存在相对运动,等效于固定的传感器感受风速。此时传感器探测的物理量同样为运动滑块线速度在传感器激光轴上的投影。

直线导轨参数如下:

- 1) 导轨行程为 1.6 m;
- 2) 传动形式为同步带;
- 3) 移动靶速度范围为 0.1~0.7 m/s;
- 4) 速度精度优于 0.05 m/s;

4.2.1 轴向测速实验

在该实验环节内,设计了传感器测量硬靶速度与传感器测量相对风速两项实验,分别如图 7 和图 8 所示。在实验中传感器安装在运动滑块上,激光轴与直线导轨重合,通过更换被测介质来实现硬靶测量和测风速的对比测试。测量的速度是直线导轨的运动速度。其中

1) 硬靶速度测试使用竖直墙体(塑钢材料)作为靶标。靶标位置距离导轨末端约 1 m。



图 7 直线导轨测速实验实物图

Fig. 7 Image of velocity measurement experiment by linear guideway



图 8 直线导轨测相对风速实验实物图

Fig. 8 Image of relative wind velocity measurement experiment by linear guideway

2) 在风速测试实验中,由于室外大气环境相对不稳定,为精确验证传感器性能,在某大厅内的相对静滞空气环境下进行相对风速实验,此时传感器所测量得到的速度是运动滑块的运动速度。大厅提供长度约 30 m 的开阔空间,最大限度抑制激光在坚硬物体上散射产生的干扰信号影响。

实验结果如图 9 及图 10 所示,可以看出,无论探测介质为硬靶还是空气,传感器均能精确测量相对速度,测量的传感器测试值与直线导轨理论速度值可以很好的吻合,理论速度与实际速度之间的误差大部分在 0.01 m/s 范围内。但是在测量风速实验中,传感器最低只能测量到 0.075 m/s 的风速值,更低的风速无法测量。这是由于米散射后向散射过于微弱的缘故。

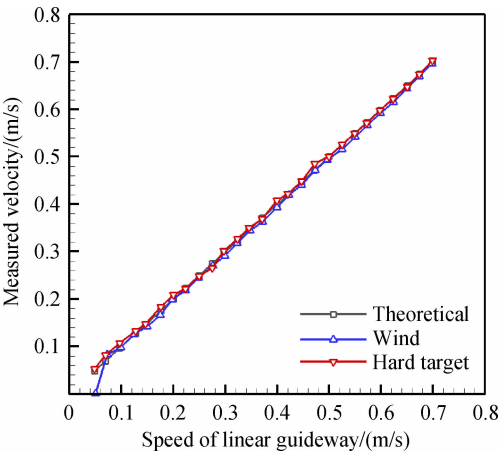


图 9 直线导轨速度测试值与理论速度值
Fig. 9 Measured and theoretical velocity measured with linear guideway

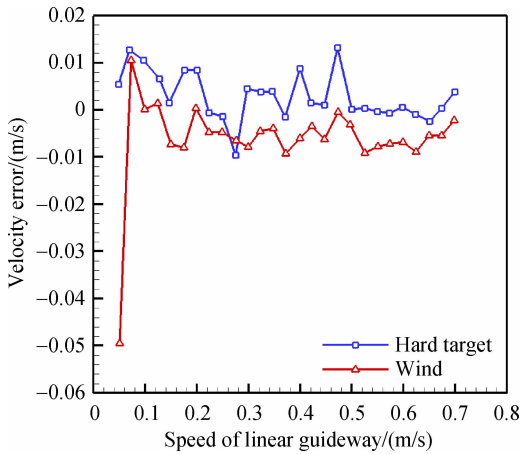


图 10 直线导轨测速的误差曲线
Fig. 10 Curves of velocity errors measured with linear guideway

4. 2. 2 多角度测试实验

为了验证传感器在非轴向速度下的探测能力,设计了多角度探测实验,即传感器的光轴与运动硬靶目标速度方向的夹角分别为 $\alpha_1 = 60^\circ$ 、 $\alpha_2 = 45^\circ$ 、 $\alpha_3 = 30^\circ$,以此充分验证传感器的非径向速度探测能力。本实验中设置角度的精度大约在 1° 。实际实验场景如图 11 所示,初始测试结果如图 12 所示。



图 11 多角度测试实验实物图
Fig. 11 Image of multi-angle experiment

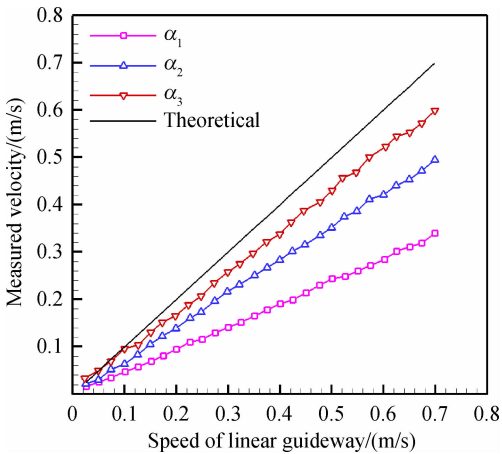


图 12 多角度测试实验下的初始速度曲线
Fig. 12 Initial curves of velocity in multi-angle experiment

根据多普勒公式,将设置的探测角度作为修正系数带入到测试速度结果中,计算得到传感器在各个角度下探测得到的直线导轨实际运行速度,计算结果如图 13、图 14 所示。

由实验数据可见,在探测角度经过拟合标定的情况下,实测速度误差基本可以控制在 0.01 m/s 以下。也就是说,当传感器激光轴与被探测

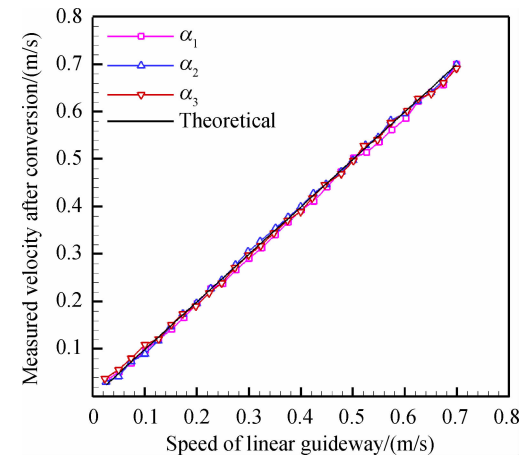


图 13 换算后的直线导轨运行速度实测曲线
Fig. 13 Curves of linear guideway speed after conversion

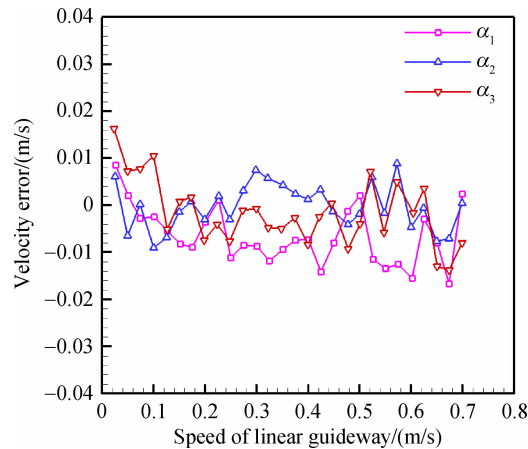


图 14 换算后的速度测试值与导轨理论速度值误差
Fig. 14 Errors between measured and theoretical velocity in multi-angle experiment after conversion

速度方向存在夹角时,无论是对实际夹角进行精确测量标定,或者是通过实际测速实验后进行数据拟合,传感器实测速度与实际速度之间的误差都可以控制到与轴向测量基本一致的水平。

4.3 风洞实验

风洞实验是在中国空气动力研究与发展中心某研究型风洞内开展。该风洞是一座低速回流风洞,实验段截面尺寸为 $0.8\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。风洞实验段常规风速下限为 5 m/s ,在安装上特殊的阻尼装置后,风速下限可达到 0.1 m/s 。图 15 给出了传感器在风洞内安装的实物图,传感器激光轴与风洞轴线平行。

为了与激光雷达传感器的测量结果进行对比,实验中选用了日本加野麦克斯公司(KANOMAX)生产的智能环境测试仪对实验段风速进行测量。智能环境测试仪所使用的探头型号为



图 15 传感器在风洞实验中的实物图
Fig. 15 Image of sensor in wind tunnel experiment

6533-2G,可同时测量气流的速度、温度和湿度。其中风速测量范围为 $0.01 \sim 5\text{ m/s}$,测量精度为读数的 $\pm 2\%$ 。

图 16 给出了两种测量方法测得的风洞实验段风速和风扇转速对应的曲线。图中结果表明,当风洞内工作介质为环境空气时,激光传感器可以获得有效信号,无需专门播撒失踪粒子,并且测量结果与 KANOMAX 探头所得结果十分接近。

为了验证激光传感器测量数据的重复性,在某车次实验中进行了数据重复性的测试,结果如图 17 所示。蓝色曲线 1 为风扇转速逐渐增大时所得,红色曲线 2 为在同一车次内风扇转速逐渐减小所得。图中两条曲线几乎一致,这表明传感器具有良好的数据重复性,测量数据真实可靠。

另外需要特别说明的是,为了验证传感器对大气气溶胶粒径及浓度的要求,在风洞实验中利用高效过滤器进行了对比实验。在风洞稳定段内安装 H13 级的 HEPA,该等级的 HEPA 针对半径为 $0.3\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒过滤效率可达到 99.97% 。

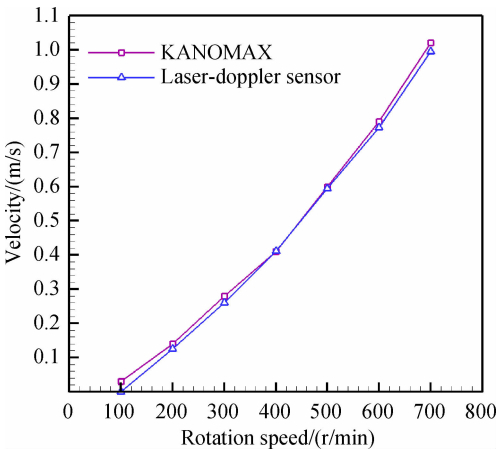


图 16 实验段风速-转速曲线
Fig. 16 Curves of air flow velocity with rotation speed of fan in test section

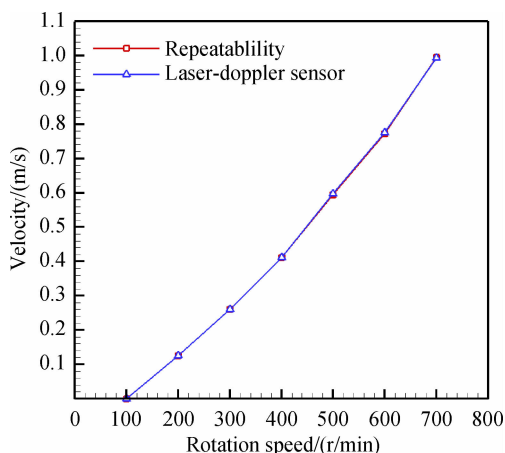


图17 数据重复性

Fig. 17 Data repeatability

实验时发现,风洞安装 HEPA 之后,只有在风洞启动后很短的一段时间(5~10 s)内,激光传感器可以获得较强的信号,随后便无法获得信号。由此也验证了激光传感器对气溶胶粒径要求的分析。

5 结 论

激光多普勒测速技术是一种非接触测量的技术,具有响应快、对流场干扰小、测量范围大等优点。本文针对利用激光多普勒测速技术开展极低风速测量进行了理论分析和实验研究,可以得到以下结论:

1) 在不考虑气流偏角时,理论分析表明,当实测速度为 10 m/s 时得到系统最大测速误差为 ± 0.01047 m/s。

2) 当系统安装角误差不超过 0.05° 时,由安装角带来的测量误差可忽略不计。

3) 转台实验和直线导轨的轴向测速实验结果表明,在 0.1 m/s 这一速度点时,理论速度与实测速度的误差超过了 0.01 m/s,而系统在高于 0.1 m/s 风速的误差基本都在 0.01 m/s 内。

4) 直线导轨的多角度探测实验结果表明,在探测角度经过拟合标定的情况下,实测速度误差基本可以控制在 0.01 m/s 内。

5) 风洞实验结果表明,当风洞工作介质为未经过处理的环境空气时,系统可以获得稳定可靠的信号,测量结果与高性能仪器十分接近。

6) 当风洞内安装 HEPA 时,系统无法获得测量信号,这表明系统可以在一般环境空气内进行测量,如果探测的气流十分洁净,可能会导致系统无法正常工作。

参考文献:

- [1] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社, 2003.
- [2] 何云武. 风向风速传感器的原理及其检测[J]. 四川气象, 2004, 24(1): 40-42.
HE Yunwu. Principle and detection of the wind sensor[J]. Journal of Sichuan Meteorology, 2004, 24(1): 40-42. (in Chinese)
- [3] 王晓蕾, 郭俊, 陈晓颖, 等. 两种测风仪的动态对比试验及分析[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2014, 15(3): 283-289.
WANG Xiaolei, GUO Jun, CHEN Xiaoying, et al. Introduction and analysis of dynamic comparison test between two wind sensors[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 15(3): 283-289. (in Chinese)
- [4] ROBBINS B E. 48-inch water tunnel turbulence level measurements with and without a honeycomb[R]. State College, US: Pennsylvania State University, 1977.
- [5] MAHER B A. A calibration of the preston tube in liquid flow systems[R]. Wright-Patterson AFB, US: Air Force Institute of Technology, 1980.
- [6] 戴昌晖. 流体流动测量[M]. 北京:航空工业出版社, 1992.
- [7] 刘佳佳. AIN 基 MEMS 风速风向集成传感器的设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学, 2013.
LIU Jiajia. Design of AIN-based MEMS wind speed and direction integrated sensor[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2013.
- [8] 姚伟. 微风速矢量测量系统[D]. 合肥:合肥工业大学, 2012.
YAO Wei. Measurement system of low wind speed and direction[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] 高东晖. CMOS 集成二维风速传感器的研究[D]. 南京:东南大学, 2005.
GAO Donghui. Research on CMOS integrated two-dimensional thermal wind sensor[D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)
- [10] 韦青燕, 张天宏. 高超声速热线/热膜风速仪研究综述及分析[J]. 测试技术学报, 2012, 26(2): 142-149.
WEI Qingyan, ZHANG Tianhong. Review and analysis of hot-wire/film anemometry for hypersonic airflow measurement[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2012, 26(2): 142-149. (in Chinese)
- [11] KUMAR S S, ALONE D B, THIMMAIAH S M, et al. Experimental investigation of unsteady flow in a transonic unistage axial compressor[C]//Proceedings of the ASME Gas Turbine India Conference on America Society of Mechanical Engineers. New Delhi: ASME, 2014: 1-8.
- [12] DURI D, BAUDET C, MORO J P, et al. Hot-wire anemometry for superfluid turbulence coflows[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(2): 1-7.

[13] AMINI N,SEKARAN A,SCHWAENEN M,et al. An experimental investigation of the free jet flow from a radially lobed nozzle using hotwire anemometry[J]. International Journal of Mechanical Engineering Education, 2012, 40(4):261-275.

[14] 江智耀,李海旺,由儒全. 旋转光滑直通道湍流流动一维热线实验[J]. 航空动力学报,2019,34(3):556-566. JIANG Zhiyao,LI Haiwang,YOU Ruquan. Experiment on turbulent flow in rotating smooth channel with 1D hot wire[J]. Journal of Aerospace Power,2019,34(3):556-566. (in Chinese)

[15] 魏宽,陶智,邓宏武,等. 旋转状态下方形通道内部流畅特性热线实验[J]. 航空动力学报,2016,31(11):2635-2640. WEI Kuan,TAO Zhi,DENG Hongwu,et al. Hot wire test on the flow fields in a rotating square channel[J]. Journal of Aerospace Power,2016,31(11):2635-2640. (in Chinese)

[16] 王洪伟,宋志强,王治. 单斜热线探针测量压气机旋转失速流场[J]. 航空动力学报,2011,26(2):249-254. WANG Hongwei,SONG Zhiqiang,WANG Zhi. Measurement of rotating stall in an axial compressor using a single slanted hot-wire probe[J]. Journal of Aerospace Power, 2011,26(2):249-254. (in Chinese)

[17] 杨杰. 微机型超声瞬时风速风谱测量系统[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),1999,22(6):89-93. YANG Jie. Microprocessor based instantaneous wind speed and wind spectrum measuring system[J]. Journal of Hefei University of Technology, 1999, 22(6):89-93. (in Chinese)

[18] 程启明,程尹曼,汪明媚,等. 风力发电中风速测量技术的发展[J]. 自动化仪表,2010,31(7):1-4. CHENG Qiming,CHENG Yinman,WANG Mingmei,et al. Development of wind speed measuring technologies in wind power generation[J]. Process Automation Instrumentation,2010,31(7):1-4. (in Chinese)

[19] 张艳艳,巩轲,何淑芳,等. 激光多普勒测速技术进展[J]. 激光与红外,2010,40(11):1157-1162. ZHANG Yanyan,GONG Ke,HE Shufang,et al. Process in laser doppler velocity measurement techniques[J]. Laser and Infrared,2010,40(11):1157-1162. (in Chinese)

[20] 沈熊. 激光多普勒测速技术及应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.

[21] 杨海燕,刘启洲. 叶片裂纹故障的多普勒在线监测技术仿真研究[J]. 航空动力学报,1999,14(1):69-73. YANG Haiyan,LIU Qizhou. Simulation of Doppler on-line monitoring technique for blade crack fault[J]. Journal of Aerospace Power,1999,14(1):69-73. (in Chinese)

[22] 赵军,刘宝杰,刘火星. 机匣视窗折射对 LDV 聚焦的影响分析[J]. 航空动力学报,2007,22(7):1161-1166. ZHAO Jun,LIU Baojie,LIU Huoxing. Analysis of beam refraction effects in laser doppler velocimetry[J]. Journal of Aerospace Power,2007,22(7):1161-1166. (in Chinese)

[23] ERDIL A,KODAL A,AYDIN K. Decomposition of turbulent velocity fields in an SI engine[J]. Flow, Turbulence and Combustion,2002,68:91-110.

[24] ESIRGEMENZ E,ÖLÇMEN S M. A spark-plug LDV probe for in-cylinder flow analysis of production IC engines [J]. Measurement Science and Technology,2005,16(10):2038-2047.

[25] BUCHHAVE P,GEORGE W K,LUMLEY J L. The measurement of turbulence with the laser-Doppler anemometer[J]. Annual Review of Fluid Mechanics,1979, 11(1):443-503.

(编辑:张 雪)