

极低速范围风速仪的校准

张佩龙 苏锁群 杨 云

(国家气象局气科院计量所)

本文简要介绍了我所新建成的微风仪检定风洞及其工作原理。通过该风洞工作段与测速段流速关系的测定,揭示了在极低速范围内两段流速之间的非线性关系,从而改进了过去线性外延的检定方法。

一、前 言

目前在农田小气候、大气污染等科技领域,广泛使用了速度下限可测量到 0.1 m/s 的多种微风仪;另外,随着法制工作的不断完善,送来要求检定的微风仪也逐年增多。

我所原有的风速仪检定标准是从英国引进的标准皮托管,经英国海事研究所(代行国家物理实验室职能)传递系数;检定设备是最高流速可达 40 m/s 的低速回路风洞。该系统能够给出检定不确定度的速度下限是 2 m/s 。为了更准确地检定微风仪,满足我

所承担空气流速标准传递工作的需要,近年来我所建成了新的微风仪检定设备。

目前世界各国已建立的微风仪检定设备及所采用的标准并不统一,根据我所开展大量检定工作的需要和现有设备技术条件,微风仪检定设备采用了直路闭口串式双试验段(工作段及测速段)风洞形式。

二、风洞简介

风洞的轮廓如图 1 所示,图中工作段用于安装被检微风仪,气流速度范围是 $0.1 \sim 2.4 \text{ m/s}$,该段的横截面是削小圆角的正方形,两侧备有平行的大玻璃门窗,供激光多普勒测速仪测量及观察用。测速段装有 ISO 推荐的椭圆形鼻部标准皮托管,用来测量该段气流速度,此段流速比工作段流速大约高 20 倍,最低流速是 2 m/s ,用皮托管可准确测

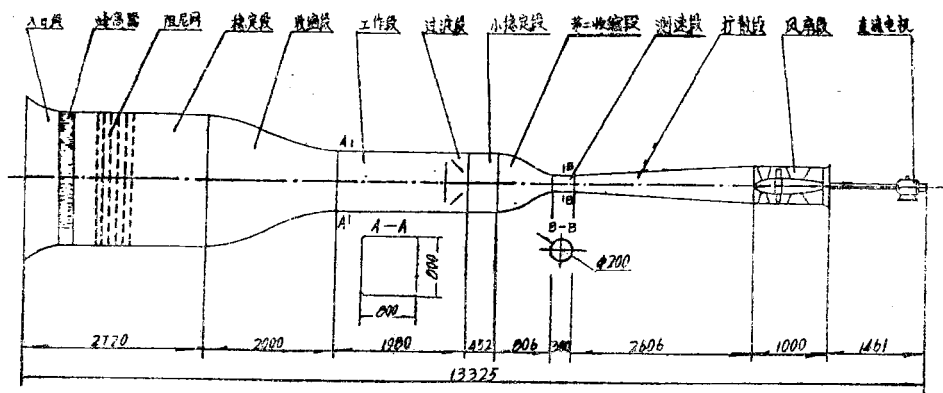


图 1 风洞轮廓图

量。

设备的检定原理是用工作段安装的激光多普勒测速仪和测速段的标准皮托管,在整个速度范围测出工作段与测速段的流速关系。检定微风仪时,根据标准皮托管的测值,利用已测好的两段流速关系,即可计算出被检微风仪的实际流速。

为保证在整个速度范围内工作段与测速段具有均匀稳定的流场,风洞设计采取了以下几项主要技术措施:① 较为理想的整流设施。在风洞入口段下游,安装了对边距离仅有 6 mm 的小口径六角形蜂窝器,长度是 80 mm,结构材料选用厚度只有 0.2 mm 的铝箔片,采用粘接拉伸工艺制成。蜂窝器下游是由六层 34 目铜丝网构成的阻尼网。② 收缩比适中的第一收缩段,稳定段与工作段的收缩比是 6.25:1。③ 适于检定多种微风仪的工作段。工作段截面是 0.8 m×0.8 m 削小圆角的正方形,根据现有微风仪及轻型风速仪传感器尺寸计算,堵塞比小于 5%。实测表明,在工作段安装轻型风速仪后,洞壁附近流速与空风洞时相比相当一致。为减小轴向速度偏差,采用上下洞壁扩张的方法。④ 工作段与测速段之间的合理过渡收缩。过渡段分为两段,一段是方变圆的过渡,另一段是为使第二收缩段收缩效果更佳的等直段。⑤ 配有高精度控制装置的风扇。风扇叶片采用新型 GA(W)-2 翼型,共六片,风

扇叶片前后分别设有导流片、反扭导流片及整流罩,风扇与电机之间采用长轴直接传动。为降低出口流速,在风扇段末端设有双扭线扩散口。风扇的稳速控制系统采用大功率晶体管控制器件,信号控制为频率控制,数字给定,可无极调速,在整个调速范围内控制精度为 $\pm(16.50 \sim 2.067) \times 10^{-4}$ 。

风洞建成后,我们选用了激光多普勒测速仪和标准皮托管,分别对工作段和测速段进行了流场性能测试。在工作段安装的仪器附近确定了三个不同截面及三种代表速度,进行了流场均匀性测试,其结果是 85~90% 测点的相对偏差为: $|\Delta\mu_i| \leq 0.5\%$ ($\Delta\mu_i = \frac{V_i}{\bar{V}}$, V_i 为各点流速, $\bar{V}$ 为平均流速),其他测点(截面边缘测点)的相对偏差为: $0.5\% < |\Delta\mu_i| < 1\%$ 。此值表明,流场是足够均匀的。

三、工作段与测速段流速关系的测定

流速关系是通过工作段的激光多普勒测速仪和测速段的标准皮托管测定的。

1. 激光多普勒测速仪系统

激光多普勒测速仪包括光机系统和信号处理系统。光机系统采用 5 毫瓦氩氖激光器,测量时用前向接收,为使信号质量尽可能好,并提高数据率,实际测量时附加 4 倍的光束扩展器,在气流中加入少量烟气作为散

射粒子。发射透镜焦距为 886 mm。仪器直接测量风洞平均流速，所测流速正比于光电信号的频率，比例系数是

$$a = \frac{\lambda}{2 \sin(\theta/2)} \tag{1}$$

此处 $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$ ，是激光波长， θ 是两激光束的夹角，实测角度 θ 后，由(1)式得出 $a = 7.975 \text{ m/s/MHz}$ ，系数的不确定度为 0.2%。

由于两发射激光束的腰部位于探测体积中心，而探测体积中的干涉条纹数为 20，据此计算，干涉条纹间距不均匀性对测速平均值的影响不大于 0.8%。

信号处理系统包括计数式处理器及微计算机。用标准电信号校验表明，在所测量的相应频率范围内，信号处理系统的不确定度不大于 0.3%。为了使测量结果更可靠，在信号通路中串接了丹麦 DANTEC 公司 55L 90 a 型信号处理器的滤波器，使电路系统的通频带可取得更窄，这样既能提高信噪比，又能使滤波后的信号更对称。

为了检验所用激光多普勒测速仪整机测量的准确性，用两种方法对电机转轴法兰盘外缘线速度进行了测量。一种是由电机配套的稳速控制装置测量转速，根据法兰盘直径计算线速度；另一种是直接利用激光多普勒测速仪测量，两种方法得出的线速度相比，相差不大于 0.25%。

2. 标准皮托管测速系统

测速段装有 ISO 推荐的椭圆形鼻部标准皮托管，经英国引进标准皮托管传递系数。为了提高测量准确度，根据测速的不同范围，皮托管测压仪表选用从日本进口的量程不同的 ISP 型数字式精密微差压计，即测量 20 m/s 以下流速时，用量程是 50 mm H₂O 的差压计，测量 20 m/s 以上流速时，用量程是 200 mm H₂O 的差压计。该系统的测量不确定度是 0.5~0.7%。

3. 流速关系的测量方法及结果

在工作段不安装微风仪时，用激光多普

勒测速仪测量工作段中心的流速 V_w ，同时用标准皮托管测量测速段的流速 V_s 。(皮托管头部位于测速段纵向中心线上方 35 mm 处)。在工作段流速范围内，选择不同的 16 种流速，在流速稳定情况下，对 V_w 及 V_s 同时测量三次，分别取其平均值，结果见表 1。

表 1

序号	V_w (m/s)	V_s (m/s)	$R = \frac{V_w}{V_s}$	序号	V_w (m/s)	V_s (m/s)	$R = \frac{V_w}{V_s}$
1	0.104	1.941	0.0536	9	0.907	18.151	0.0500
2	0.132	2.473	0.0534	10	1.123	22.527	0.0499
3	0.171	3.216	0.0532	11	1.344	27.025	0.0497
4	0.213	4.139	0.0515	12	1.548	31.250	0.0495
5	0.304	5.920	0.0514	13	1.777	35.786	0.0496
6	0.401	7.872	0.0509	14	1.991	40.467	0.0492
7	0.495	9.760	0.0507	15	2.213	45.051	0.0491
8	0.707	14.013	0.0504	16	2.428	49.570	0.0490

从表 1 中数据可看出，在整个流速范围，流速之比 R 不是固定常数， V_w 愈大， R 愈小，在测量的流速范围内， R 的相对变化量达 9%。

为了准确表达 V_w 与 V_s 的相互关系，根据表 1 中数据，我们运用最小二乘法，提出了以下关系式

$$V_w = 0.0486 V_s + \frac{0.0305 V_s}{4 \text{ m/s} + V_s} \tag{2}$$

检定微风仪时，根据测得的 V_s ，利用(2)式便可计算出 V_w ，计算值与表 1 实测值相比，一致性极好，最大差值仅为 0.6%。

四、分析与结论

从上述测量结果可知，在测量流速范围内， R 值随流速增加而减小，分析其原因主要是风洞附面层效应引起的。在测速段内流速较高，附面层厚度随流速变化很小；而在工作段内流速较低，附面层随流速变化较大，流速愈低，附面层愈厚；因而中部流速 V_w 偏高，以致 R 值变大；反之，流速愈高，附面层愈薄，中部流速 V_w 偏低，导致 R 值变小。

为了验证这一观点，我们用激光多普勒

测速仪对工作段附面层厚度随流速的变化进行了测量。测量时,选择工作段流速为 0.1、0.4、0.92 和 1.98 m/s 四种情况,测得附面层厚度分别是 100、50、25 和 20 mm。附面层厚度随流速 V_w 的变化关系见图 2。我们又

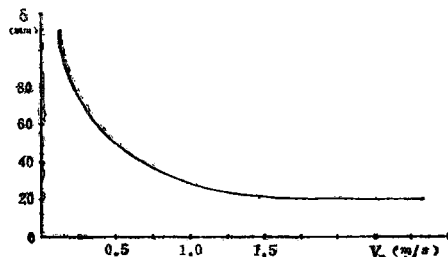


图 2 流速 V_w 与附面层厚度 δ 的变化关系

用极细的总压探头,在不同流速情况下,对测速段的附面层厚度进行了测量,结果是流速改变时附面层厚度没有明显的变化。此实验定性地说明了上述对于 R 值随流速变化的分析是正确的,是符合物理属性的。

从以上分析也可得知,类似本装置工作原理的风速仪检定设备,工作段与测速段的流速关系应在整个流速范围内实测,而不应在高速下测定后外延到很低的流速下使用。

工作段安装微风仪后对工作段与测速段的流速关系影响如何,我们也进行了实测分析。其方法是在工作段分别安装了叶轮微风表、螺旋桨微风仪和轻型风速仪,同样用激光多普勒测速仪测量工作段流速 V_w ,测点在微风仪斜上方 350 mm 位置,同时用皮托管测量测速段的流速 V_s 。结果是 V_w 测得值与按(2)式的计算值比较,非常一致,完全在测量误差范围以内。

综上所述,在本风洞中检定微风仪,根据测速段内标准皮托管测出的流速 V_s ,运用(2)式计算出工作段内微风仪所感受的实际风速,方法是准确而又切实可行的。

(本方法的测试得到了中国科学院力学所杨家寿等同志的协助,在此表示感谢。)