

# 省级检定业务风洞流场特性研究

朱旭敏<sup>1,2</sup>, 沙奕卓<sup>2</sup>, 卢会国<sup>1</sup>

(1. 成都信息工程学院电子工程学院, 成都 610200; 2. 中国气象局气象探测中心, 北京 100081)

**摘要:**针对甘肃省气象计量检定站改造后的 HDF-500 直流低速风洞, 对其流场特性进行研究。通过对风洞试验段内气流流速的测量结果计算和分析, 表明该风洞的试验段风速与变频器频率呈线性关系, 且气流流速范围达到改造的要求。改造后风洞的气流稳定性、均匀性、气流偏角和噪音均符合性能要求, 具备开展检定业务的基本条件。

**关键词:**直流低速风洞; 流场测试; 气流品质

**中图分类号:** V211.71   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1006-009X(2013)04-0013-04

## Flow field characteristics of wind tunnel in the provincial metrological verification

Zhu Xumin<sup>1,2</sup>, Sha Yizhuo<sup>2</sup>, Lu Huiguo<sup>1</sup>

(1. *Electronic Engineering Institute of Chengdu Information Technology University, Chengdu 610200*; 2. *CMA Meteorological Observation Centre, Beijing 100081*)

**Abstract:** A low-speed blow down HDF-500 wind tunnel has been transformed in the meteorological metrological verification station of Gansu Province. And its flow field characteristics are studied. According to calculate and analyze airflow velocity in the test section, the results show that the wind speed has a linear relation with the inverter frequency, and the range of airflow velocity is good enough for the modification. After the transformation of wind tunnel, the uniformity, stability, deflection and noisiness of the airflow meet the performance requirements, which satisfy the basic condition for metrological verification.

**Key words:** low-speed blow down wind tunnel; flow field measurement; airflow quality

## 0 引言

风速是气象观测中一项重要的参数, 风速仪表和风速传感器是测量风速的主要设备。测风仪器在使用一段时间后, 由于环境因素或者人为因素的影响, 其物理特性和数据采集器的电子元器件特性均会发生变化, 导致测量结果出现偏差, 因此为保证风速观测数据的准确性、可靠性和可比性, 必须定期送计量检定机构进行检定校准。对风速仪器的检定校准, 一般是在风洞中完成。风

洞是产生流场稳定、风速可变的风场设备, 风洞流场品质的好坏, 直接决定着检定结果的准确性和可靠性。

目前省气象局用于检定业务的风洞为 30 m/s 回流风洞, 该风洞长期使用后存在风洞能量损失大等问题, 因此对风洞进行了改造。一方面更换电机使其风速达到 40 m/s 以上, 从而适应新的气象标定校测需求; 另一方面对扩散段重新设计以减小风洞能量损失。改造后的风洞流场特性应达到规定的技术指标, 才能开展检定业务, 担

收稿日期: 2013-07-05.

作者简介: 朱旭敏(1986-), 女, 硕士研究生. 主要从事气象观测仪器与计量技术研究.

任风速量值传递的角色。本文对甘肃省气象计量检定站改造后的 HDF-500 直流风洞进行流场校测,并对风洞的总体性能做出评价。

### 1 流场测试方法

#### 1.1 测试内容及要求

HDF-500 直流风洞主要由动力段、扩散段、稳定段、收缩段和试验段组成。试验段是整个风洞的中心,被检风速仪器和标准设备安装在此处进行检定,试验段气流品质的好坏是风洞各部位工作的集中体现。所谓气流品质,是指试验段的气流参数在时间和空间的均匀程度。针对改造后的气象检定业务风洞而言,气流参数的测试内容和性能要求<sup>[1]</sup>如下:

- (1) 气流流速的测量:要求改造后的风洞流速范围为 0.5~40 m/s;
- (2) 气流稳定性:气流速度脉动量  $\eta \leq 0.5\%$ ;
- (3) 气流均匀性:要求流场的不均匀度  $\mu \leq 1\%$ ;
- (4) 气流偏角:垂直方向和水平方向均  $\leq 1^\circ$ ;
- (5) 气流的噪音:要求风洞实验室内的最大噪音不超过 85 dB;

#### 1.2 试验设备

甘肃省气象计量检定站改造后的 HDF-500 直流风洞结构如图 1 所示,该风洞在使用的过程中,主试验段的微风速已经能满足业务需求,故不再使用转换段的微风速段。因此气流参数的测定均在主试验段进行,测试所用到的仪器主要包括标准皮托静压管,数字压力计,热线风速仪,声级计,方向探头等仪器。

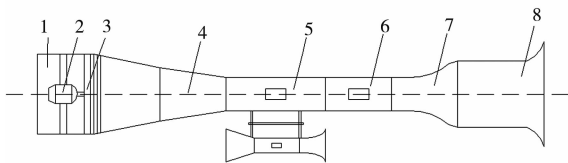


图 1 HDF-500 直流风洞简图

- 1. 动力段 2. 电机 3. 风机 4. 扩散段
- 5. 转换段 6. 主试验段 7. 收缩段 8. 稳流段

#### 1.3 测点布置方式

在测定气流的参数时,皮托管安装在主试验段的工厂原测试孔上,此时皮托管半球形头部位于距试验段观察窗左侧 80 mm 的截面上,气流的流速、稳定性和气流偏角的测量均在该截面的中心位置处进行。测量气流均匀性时,测点采取坐标轴法分布,在该截面的测点布置方式如图 2 所示。

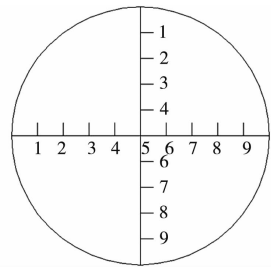


图 2 均匀性测点布置方式

### 2 数据处理及分析

#### 2.1 气流流速的测量

在测量最低风速时,选用能精确测量微风速段的热线风速仪。将热线风速仪探头放置在距试验段观察窗左侧 80 mm 处的截面中心位置处,然后通过调节变频器控制电机转速。将变频器调节在最小频率保持不变,待风速稳定后读取热线风速仪的示值,即为该风洞所能达到的最低风速值。按上述方法测定,甘肃省气象局检定风洞的最低风速为 0.167 m/s。

热线风速仪在低风速段灵敏度高,高风速段灵敏度低;而皮托管则相反,在低风速段灵敏度低,在高风速段灵敏度高。因此当测量完最低风速后,选用皮托管来测量试验段风速。试验段气流可以看作是不可压缩流体,根据伯努利方程,可计算出气流流速<sup>[2]</sup>,即:

$$P_0 + \frac{1}{2}\rho v^2 = P \quad \text{则} \quad v = \sqrt{\frac{2(P - P_0)}{\rho}} \quad (1)$$

式中: $P_0$ 为静压; $P$ 为总压; $\rho$ 为气流密度; $v$ 为气流速度。

将皮托管安装在试验段的工厂原测试孔上,将变频器分别调至 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 Hz,待风速稳定后分别记录微压计示值和环境的温度、湿度和大气压力示值,并根据记录的数值计算变频器在不同频率下气流的流速。变频器频率与试验段风速的关系曲线如图 3 所示,显然,试验段风速与变频器频率呈线性关系<sup>[3-5]</sup>。

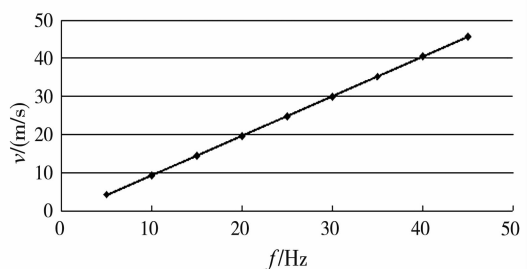


图 3 试验段风速与变频器频率关系

测量最高风速时,调节变频器的频率至保护范围内的上限,待气流稳定后,读取微压计示值和环境参数,并计算出最高风速。经测定该风洞的风速上限为 45.78 m/s。

## 2.2 气流稳定性

气流的稳定性是指气流的速度随时间脉动的情况,这种脉动是低频的,可以用皮托管来测量。气流的稳定性用速度脉动量  $\eta$  表示, $\eta$  定义为在规定的时间内,气流的瞬时速度和平均速度之差绝对值的最大值与平均速度的比值,即:

$$\eta = \frac{|V_i - \bar{V}|_{\max}}{\bar{V}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $V_i$  为某次测试中的气流第  $i$  个瞬时流速值,  $\bar{V}$  为某次测试一分钟内的气流平均流速值。

将试验段风速分别调至 10、15、20、25 m/s 流速下,待流速稳定后测定气流每隔 5 s 钟的流速,测试时间为 1 min,测试所得数据见表 1,因篇幅所限,只列出 10 m/s 流速下所测数据。

由公式(2)可得,在 10、15、20、25 m/s 流速下的速度脉动量分别为:  $\eta_1 = 0.30\%$ ,  $\eta_2 = 0.20\%$ ,  $\eta_3 = 0.24\%$ ,  $\eta_4 = 0.23\%$ ,可见该风洞具有良好的气流稳定性,满足性能要求。

表 1 10 m/s 时气流稳定性测试数据

时间点	1	2	3	4	5	6
流速(m/s)	10.40	10.38	10.37	10.36	10.39	10.36
时间点	7	8	9	10	11	12
流速(m/s)	10.37	10.35	10.35	10.35	10.38	10.35

## 2.3 气流均匀性

气流的均匀性要求风洞试验段所测截面内各点的气流速度与气流平均速度相对偏差的均方根值小于某一给定值,速度偏差的均方根  $\sigma_v$  为:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta V_i / \bar{V})^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$\bar{V} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i$$

式中:  $V_i$  为第  $i$  测点流速值;  $\Delta V_i$  为第  $i$  测点流速与被测截面平均流速之差;  $\bar{V}$  为被测截面的平均流速;  $n$  为测点数。

将皮托管按选定的测点位置安装固定。控制电机转速,将试验风速分别调至 10m/s 和 20 m/s,待流速稳定后测定气流流速。然后根据 1.3 所述测点布置方式的顺序移到下一测点,直到所测截

面内水平和垂直测点的测试均完成,测试数据见表 2 和表 3,因篇幅所限只列出在 10 m/s 流速下所测数据。

通过表 2 和表 3 数据知水平测点和垂直测点的交叉值相差 0.01 m/s,故测量值有效,如测量所得值相差较大,需重新进行测量。测试数据显示,在流场中心区域,气流流速变化较小;边界区域气流流速相差较大,表明流场中心区域气流均匀性较好。根据(3)式计算可得速度偏差的均方根分别为 0.43% 和 0.37%,可见本风洞的气流均匀性满足要求。

表 2 V=10 m/s 时气流均匀性水平测点测试数据

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
流速(m/s)	9.26	9.31	9.32	9.33	9.36	9.34	9.34	9.35	9.33

表 3 V=10 m/s 时气流均匀性垂直测点测试数据

测点	1	2	3	4	5	6	7	8	9
流速(m/s)	9.40	9.39	9.37	9.37	9.35	9.32	9.29	9.26	9.29

## 2.4 气流偏角

测定气流偏角采用的是背靠式方向探头,测定垂直气流偏角的方向探头孔为垂直并排,测定水平气流偏角的方向探头孔为水平并排。感测头部由两根相同的不锈钢管背向背连接在一起构成,探头孔切面与中心截面的切角为  $45^\circ$ 。当气流与探头的中心线平行时,上下两个孔压力相等,即  $\Delta P_a = 0$ ;左右两个孔压力相等,即  $\Delta P_\beta = 0$ 。

$$\text{令: } C_{P_a} = \frac{\Delta P_a}{P}; C_{P_\beta} = \frac{\Delta P_\beta}{P} \quad (4)$$

式中:  $P$  为试验段气流动压;假设气流有偏角,则  $C_{P_a}$  是气流偏角  $\alpha$  (垂直方向)的函数;  $C_{P_\beta}$  是气流偏角  $\beta$  (水平方向)的函数。

通过转动探头,使得两个测孔的压差为零,这时探头的轴线和气流方向平行,探头的转角即为气流偏角。由于偏转机构难设计,因此方向管通过在国家计量站标准风洞校正,得到“ $C_{P_a} - \alpha$ ”和“ $C_{P_\beta} - \beta$ ”曲线关系,通过测定  $C_{P_a}$  和  $C_{P_\beta}$  的值从而得到气流偏角<sup>[6,7]</sup>。

将试验段风速调至 15 m/s 流速下,待试验段风速稳定后,用皮托管测定试验段气流动压,用两个方向探头分别测定垂直和水平方向的压差,测试数据见表 4。取数据的平均值,通过查校正曲线关系得该风洞的垂直气流偏角为  $0.4^\circ$ ,水平气流偏角为  $0.2^\circ$ 。

表 4 V=10 m/s 时气流偏角测试数据

动压 P(mmH <sub>2</sub> O)	11.659	11.619	11.638	11.700	11.697
ΔP <sub>α</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	0.236	0.172	0.223	0.197	0.165
ΔP <sub>β</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	0.166	0.197	0.183	0.179	0.140
动压 P(mmH <sub>2</sub> O)	11.690	11.655	11.701	11.689	11.692
ΔP <sub>α</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	0.149	0.120	0.143	0.117	0.157
ΔP <sub>β</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	0.081	0.073	0.088	0.114	0.123

### 2.5 噪音

将试验段风速调至风速上限,将声级计分别放置在风洞控制台和距试验段 0.5 m 处,读记声级计所测得最大的噪音值,经测定噪音分别为 80.5 dB 和 110.7 dB。试验段附近噪音过大,超出规定要求,但该风洞的控制台是独立在风洞室外,操作人员主要工作在控制台,因此风洞噪音在可承受范围内。

### 3 结论

本文介绍了甘肃省气象计量检定站改造后的检定用风洞流场校测方法,通过对测试结果的计

算和分析,表明该风洞的性能指标均符合气象检定业务风洞的性能要求,具备开展检定业务的基本条件。

### 参考文献:

[1] QX/T 84—2007 气象低速风洞性能测试规范[S].  
 [2] 伍荣林,王振羽. 风洞设计原理[M]. 北京:北京航空学院出版社,1985.  
 [3] 齐娟,周云龙,李峰. 直流式低速风洞流动特性研究[J]. 东北电力大学学报,2009,29(1):19-22.  
 [4] 郑建光,任海洋,聂天晓. 回流式低速风洞流动特性的研究[J]. 中国计量学院学报,2006,17(3):212-216.  
 [5] 胡琨,赵志军,钱廷伟. 直流低速风洞流场特性研究[J]. 机械研究与应用,2012(2):74-75.  
 [6] 王勋年. 低速风洞试验[M]. 北京:国防工业出版社,2002.  
 [7] 许进,植仲培,李军,等. 靠背式测速探头感受特性的数值模拟研究[J]. 广东广播电视大学学报,2007,16(66):108-110.

(上接 12 页)

表 5 风测量方法的历史变迁和资料系统性变化

年限	采样间隔	风向平均	风速平均	系统性变化
2000 年前	人工	最多风向	自记读取	起动风速大,分辨率低,机械摩擦使风速偏小。
2000~2005 年	1 s	算术	算术	观测精度提高,极值增多、变化大,平均风向标准差增大。
2006~2012 年	1 s	指数	指数	风速和风向序列标准差增大,极值更多、更大。
2013 年~	0.25 s(风速) 1 s(风向)	单位矢量	算术	风向序列标准差减小。0.25 s 钟采样间隔提高了小尺度脉动监测能力,但风杯风速传感器的惯性使效果减弱。

风向风速传感器性能和采样处理方法都会影响到风的测量数据,高性能的传感器能感应尺度更小的风脉动,借助现代微电子技术的自动气象站能捕捉传感器的瞬间细微变化,风测量除保证天气预报服务的基本需求外,应把保持连续平滑的历史资料序列和满足国民经济建设各领域特别是空气环境预报分析、风能资源开发利用等纳入功能范畴,风的矢量平均方法得到的平均风向风速较客观地反映了空气团的移动速度和方向,越来越受到使用者的关注,同时它也能和超声风、风廓线仪、探空仪等众多新型测风仪器的处理相容,自动气象站等智能观测仪器可设计增加不同风向风速平均方法的选择功能供用户选择,也可在完成原始采样后同时使用多种风向风速平均方法计算

输出不同的平均风向风速数据以适应各种需求。

### 参考文献:

[1] 世界气象组织. 气象仪器和观测方法指南(6 版)[M]. 北京:气象出版社,1996.  
 [2] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京:气象出版社,2003.  
 [3] 刘连吉. 应用单板计算机测试风速表距离常数的方法[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),1987(3):31-36.  
 [4] 杨恒山,周扬眉. 向量的加权平均值及其方差阵[J]. 测绘科学,2008,33(3):130-132.  
 [5] 陈明,盖小波,樊新宇. 自动站数据对气象历史资料序列连续性影响分析[J]. 安徽农业科学,2011(20):12356-12357.