

## 直流式风洞测量不确定度评定研究<sup>\*</sup>

王 旭<sup>1,2</sup> 白赢策<sup>2</sup> 张昊喆<sup>1</sup> 金元尚<sup>1</sup> 赵雪明<sup>1</sup>

(1. 吉林省气象探测保障中心 长春 130062; 2. 中国气象局气象探测中心 北京 100081)

**摘 要:**为科学评定分析直流式风洞运行数据准确性,以 WZ860070—E 型直流式风洞为研究对象,参照 QX/T84—2007《气象低速风洞性能测试规范》对风洞的流场均匀性和流场稳定性进行测试实验。通过 GUM 方法对 2、40、60 m/s 测试点的流速均匀性、流速稳定性的测试结果开展测量结果不确定度评定。结果表明,测量重复性引入的分量为主要影响量;扩展不确定度评定结果基本满足 JJF1094—2002《测量仪器特性评定》的合格判据,可信程度较高;受标准测试设备性能及外界因素影响,2 m/s 风速流场均匀性和流场稳定性的测量结果扩展不确定度结果同高风速的相比偏大。

**关键词:**直流式风洞;流速均匀性;流速稳定性;不确定度

**中图分类号:** TH765 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Research on measurement uncertainty evaluation of direct flow wind tunnel

Wang Xu<sup>1,2</sup> Bai Yingceng<sup>2</sup> Zhang Haozhe<sup>1</sup> Jin Yuanshang<sup>1</sup> Zhao Xueming<sup>1</sup>

(1. Jilin Meteorological Observation Support Centre, Changchun 130062, China;

2. Meteorological Observation Centre of CMA, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to scientifically analyze the quality of operation data of the direct current wind tunnel, taking the WZ860070—E type direct current wind tunnel as the research object, the test experiments on the flow field uniformity and stability of the wind tunnel were carried out with reference to QX/T84—2007 "Performance Test Specifications for Meteorological Low-Speed Wind Tunnels". The measurement result uncertainty evaluation was carried out for the test results of flow velocity uniformity and stability at the test points of 2, 40, and 60 m/s through the GUM method. The experiment shows that the component introduced by measurement repeatability is the main influencing quantity, the evaluation result of expanded uncertainty basically meets the qualified criterion of JJF 1094—2002 "Evaluation of Measuring Instrument Characteristics", and the credibility is relatively high, affected by the performance of the test equipment and external factors, the expanded uncertainty results of the measurement results of the uniformity and stability of the 2m/s wind speed flow field are larger compared with those of the high wind speed.

**Keywords:** direct current wind tunnel; uniformity; stability; uncertainty of measurement

### 0 引言

近年来随着超声风速传感器、螺旋桨风速传感器等新型传感器的广泛使用,计量溯源的需求日益凸显。回流式风洞已无法满足实际计量需求,因此气象部门逐步对直流式风洞布局建设并成为气象行业计量新型风速传感器的标准设备,为被测风速传感器计量过程提供均匀稳定的空气流场和准确的空气流速。

为了确定风洞自身提供的流速值准确性,需要定期对其性能开展测试并对测试结果进行不确定度评定。广大专家、学者开展了相关研究但也存在不足。刘昕等<sup>[1]</sup>对气象用 WZ860070—E 型 70 m/s 直流式风洞流场均匀性、流场稳定性等测试方法探讨及性能参数分析,对测试点的选择、误差等提出改进建议,但未进行测量结果不确定度评定。韩书新等<sup>[2]</sup>通过皮托管、微差压计的压力变量建立数学模型,对 DZS—II 型 40 m/s 直流式气象低速风洞测量

收稿日期:2024-07-19

<sup>\*</sup> 基金项目:国家计量技术法规项目(市监计量发[2021] 50号)资助

结果不确定度开展评定,得出风洞整体的不确定度评定结果,但未考虑环境因素带来的影响。张鹏等<sup>[3]</sup>对 HDF-500 型回流式低速风洞测量结果不确定度开展评定,考虑了环境变化带来的影响,证明环境因素对不确定度评定存在影响,但是评定结果可信程度不高。黄斌等<sup>[4]</sup>通过更换高精度微差压计、高精度热线风速仪改进低风速测量不确定度,提高了测量结果可信程度。

风洞流场的测试技术指标主要包括流速均匀性和流速稳定性等,其好坏会直接影响被测风速传感器计量结果的准确性与可靠性。因此本文为在计量溯源过程中科学评定分析直流式风洞运行数据准确性,综合考虑皮托管、微差压计及环境因素的影响,以 WZ860070-E 型直流式风洞为研究对象,参考标准 QX/T 84-2007《气象低速风洞性能测试规范》的测试方法,对风洞的流场均匀性和流场稳定性进行测试实验,并基于 GUM 法对测量结果分别开展不确定度评定分析<sup>[5-8]</sup>。

### 1 测量原理

直流式风洞是试验段与环境大气相连通的直路风洞,主要由进风口、整流段、压缩段、实验区域、扩压段、动力段等结构组成<sup>[9-11]</sup>。实验区域为被测风速传感器计量测试提供均匀、稳定的流场。因此通过标准皮托管、数字微差压计、热线风速仪(2 m/s 以下)、风洞控制器和环境检测仪构成测量系统,对测量实验区域的流速均匀性和稳定性进行测试实验,其原理结构如图 1 所示。

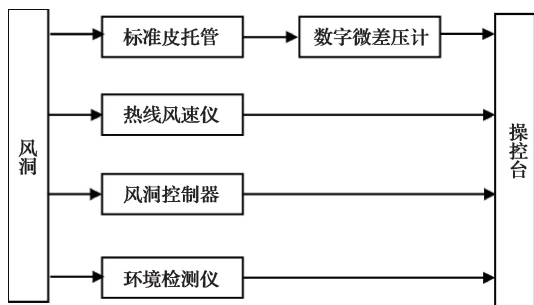


图 1 风洞测量系统结构

Fig. 1 Structure diagram of wind tunnel measurement system

### 2 测试方法

#### 2.1 流速均匀性

参照标准 QX/T84-2007《气象低速风洞性能测试规范》中流速均匀性测试方法开展直流式风洞流速均匀性测试实验<sup>[12]</sup>。选择试验段仪器安装截面作为被测截面,从被测截面中心开始,每 5~10 cm 间距选择一个测试位置,共 7 个位置。

采用极限法求取流速均匀误差,得出:

$$\mu_n = \max(|\overline{v_{m_i}} - \overline{v_{m_j}}|) \quad n = 1, 2, \dots, 10 \quad (1)$$

式中:  $\mu_n$  表示第  $n$  组的流速均匀误差;  $\overline{v_{m_i}}$  表示第  $n$  组第  $i$  个位置的风速值;  $\overline{v_{m_j}}$  表示第  $n$  组第  $j$  个位置的风速值。

该流速点下的流速均匀度为:

$$\mu = \frac{\mu_n}{\bar{v}} \times 100\% \quad n = 1, 2, \dots, 10 \quad (2)$$

$$\bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m v_{ij}}{mn} \quad i = 1, 2, \dots, m; n = 1, 2, \dots, 10 \quad (3)$$

式中:  $\mu$  表示该流速点下的流速均匀性;  $\bar{v}$  表示该流速点下的平均风速值。

#### 2.2 流速稳定性

参照标准 QX/T84-2007《气象低速风洞性能测试规范》中流速稳定性测试方法开展直流式风洞流速稳定性测试实验,流速稳定性为:

$$\eta = \frac{|v_i - \bar{v}|_{\max}}{\bar{v}} \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $\eta$  表示稳定性;  $v_i$  表示某次测试中第  $i$  个瞬时流速值;  $\bar{v}$  表示某次测试中 1 min 内的平均流速值。

### 3 测试结果及不确定度评定分析

WZ860070-E 型直流式风洞流速范围为 0.5~70 m/s。选择 2、40、60 m/s 等 3 个测试点进行流速均匀性和稳定性的测试实验,并逐点分析相应测量结果不确定度。

#### 3.1 标准设备

在实验过程中,对直流式风洞进行性能测试所采用的标准器具有标准皮托静压管、微差压计及环境监测设备,具体技术指标如表 1 所示<sup>[13]</sup>。

表 1 标准器具技术指标

Table 1 Technical specifications of standard instruments

| 仪器名称    | 主要技术指标                                   |
|---------|--|
| 标准皮托静压管 | 校准系数 $K: 1.003$                          |
| 微差压计    | 最大允许误差: $\pm 0.5 \text{ Pa}$             |
| 温度测量仪器  | 最大允许误差: $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| 湿度测量仪器  | 最大允许误差: $\pm 8\% \text{ RH}$             |
| 气压测量仪器  | 最大允许误差: $\pm 2 \text{ hPa}$              |

#### 3.2 测试结果

按照流速均匀性、流速稳定性的测试方法进行流速测试。用标准皮托静压管感应风洞中流动空气的差压(总压和静压之差),并由微差压计测出压力值,通过该压力值及流场的空气密度,用伯努利方程得出风洞的流场风速。流速均匀性、流速稳定性基础参数如表 2 所示。

计算得到 2、40、60 m/s 流速均匀性的风速值如表 3 所示。计算得到 2、40、60 m/s 流速稳定性的风速值如表 4 所示。

表2 流速均匀性基础参数

Table 2 Basic parameters of velocity uniformity

| 基础参数           | 数值        |           |
|----------------|-----------|-----------|
|                | 流速均匀性     | 流速稳定性     |
| 温度/°C          | 15.1      | 14.8      |
| 湿度/%RH         | 68        | 69        |
| 压力/hPa         | 1 021.1   | 1 021.2   |
| 皮托管校准系数 $\xi$  | 1.003     | 1.003     |
| 饱和水汽压 $e_w$    | 17.206 2  | 16.876 3  |
| 空气密度修正系数 $K_p$ | 0.998 486 | 0.997 891 |
| 总修正系数 $K$      | 0.999 983 | 0.999 387 |

按照式(2)和(4)分别计算得到 2、40、60 m/s 的均匀性、稳定性数据如表 5 所示。

### 3.3 不确定度来源分析

在对直流式风洞测量实验过程中,不确定度来源主要包括对风洞实验区域风速重复测量引入的 A 类标准不确定度、微差压计引入的 B 类标准不确定度、皮托管压管校准系数引入的 B 类标准不确定度、温度仪引入的 B 类标准不确定度、气压计引入的 B 类标准不确定度、湿度仪引入的 B 类标准不确定度<sup>[14-16]</sup>。

### 3.4 不确定度模型

1)流速均匀性

(1)测量模型

直流式风洞流速值是间接量,气压、温度、湿度等直接

表3 流速均匀性的风速值

Table 3 The wind speed value of velocity uniformity

| 测试位置 | 实测风速/(m·s <sup>-1</sup> ) |              |              |              |              |              |              |              |              |              |
|------|---------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|      | 第1组                       | 第2组          | 第3组          | 第4组          | 第5组          | 第6组          | 第7组          | 第8组          | 第9组          | 第10组         |
| 1    | 1.95                      | 1.95         | 1.95         | 1.94         | 1.94         | 1.94         | 1.95         | 1.95         | 1.95         | 1.95         |
|      | <b>39.84</b>              | <b>39.97</b> | <b>39.78</b> | <b>39.87</b> | <b>39.94</b> | <b>39.78</b> | <b>39.94</b> | <b>39.87</b> | <b>39.89</b> | <b>39.89</b> |
|      | 60.23                     | 60.19        | 60.30        | 60.28        | 60.26        | 60.23        | 60.25        | 60.35        | 60.22        | 60.29        |
| 2    | 1.96                      | 1.95         | 1.96         | 1.97         | 1.97         | 1.97         | 1.96         | 1.96         | 1.96         | 1.95         |
|      | 39.90                     | 39.95        | 39.85        | 39.89        | 39.85        | 39.85        | 39.83        | 39.88        | 39.80        | 39.88        |
|      | <b>60.34</b>              | <b>60.21</b> | <b>60.24</b> | <b>60.29</b> | <b>60.19</b> | <b>60.14</b> | <b>60.29</b> | <b>60.26</b> | <b>60.25</b> | <b>60.28</b> |
| 3    | 1.95                      | 1.96         | 1.95         | 1.95         | 1.95         | 1.96         | 1.95         | 1.95         | 1.95         | 1.95         |
|      | 39.93                     | 39.84        | 39.81        | 39.86        | 39.87        | 39.82        | 39.94        | 39.81        | 39.84        | 39.89        |
|      | 60.20                     | 60.20        | 60.22        | 60.06        | 60.16        | 60.13        | 60.21        | 60.15        | 60.21        | 60.20        |
| 4    | 1.96                      | 1.95         | 1.95         | 1.96         | 1.95         | 1.94         | 1.95         | 1.96         | 1.95         | 1.95         |
|      | 39.77                     | 39.77        | 39.81        | 39.78        | 39.74        | 39.76        | 39.86        | 39.75        | 39.83        | 39.84        |
|      | 60.29                     | 60.06        | 60.06        | 60.14        | 60.12        | 60.22        | 60.24        | 60.20        | 60.11        | 60.07        |
| 5    | <b>1.96</b>               | <b>1.96</b>  | <b>1.96</b>  | <b>1.96</b>  | <b>1.95</b>  | <b>1.94</b>  | <b>1.95</b>  | <b>1.95</b>  | <b>1.94</b>  | <b>1.95</b>  |
|      | 39.86                     | 39.80        | 39.86        | 39.88        | 39.80        | 39.80        | 39.78        | 39.81        | 39.85        | 39.85        |
|      | 60.01                     | 60.07        | 60.02        | 60.01        | 60.03        | 59.94        | 60.05        | 60.04        | 60.12        | 60.09        |
| 6    | 1.96                      | 1.95         | 1.95         | 1.96         | 1.95         | 1.95         | 1.95         | 1.95         | 1.94         | 1.95         |
|      | 39.87                     | 39.88        | 39.93        | 39.91        | 39.95        | 39.84        | 39.90        | 39.84        | 39.85        | 39.99        |
|      | 60.06                     | 60.03        | 59.88        | 59.97        | 60.00        | 59.92        | 59.87        | 59.95        | 59.96        | 59.90        |
| 7    | 1.95                      | 1.95         | 1.96         | 1.96         | 1.95         | 1.95         | 1.96         | 1.95         | 1.95         | 1.96         |
|      | 39.93                     | 39.95        | 39.92        | 39.98        | 39.96        | 40.00        | 40.03        | 39.91        | 39.94        | 39.89        |
|      | 59.93                     | 59.94        | 59.91        | 59.88        | 59.94        | 59.79        | 59.83        | 59.93        | 59.94        | 59.94        |

测量值会影响风洞流速值,构建流速均匀性测量结果不确定评定模型如下:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sqrt{\frac{2}{3.483 53 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T} (P_0 - 0.378 H e_w)}}}{n} p \xi \quad (5)$$

$n = 1, 2, \dots, 10$

式中:  $p$  表示微差压计示值;  $\xi$  表示皮托管压管校准系数;

$T$  表示实验区域内温度;  $P_0$  表示实验区域内气压;  $H$  表示实验区域内空气相对湿度;  $e_w$  表示  $T$  温度下的饱和水汽压。

(2)不确定度分量评定

①测量重复性引入的标准不确定度  $u(\mu_n)$

考虑测量数比较小,用极差法求取试验标准偏差

$$S(x_i) = \frac{R_i}{C} (n = 7 \text{ 时}, C = 2.70)$$

3个测试点下对风洞流速值进行重复测量引入的标准不确定度如表 6 所示。

表4 流速稳定性的风速值  
Table 4 The wind speed value of velocity stability

| 测试<br>序列/s | 实测风速/(m·s <sup>-1</sup> ) |       |       |      |              |              |             |       |       |
|------------|---------------------------|-------|-------|------|--------------|--------------|-------------|-------|-------|
|            | 第1组                       |       |       | 第2组  |              |              | 第3组         |       |       |
| 0          | 2.05                      | 40.08 | 59.72 | 2.05 | <b>40.07</b> | <b>59.68</b> | <b>2.05</b> | 39.99 | 59.75 |
| 5          | 2.05                      | 40.01 | 59.62 | 2.04 | <b>40.03</b> | <b>59.56</b> | <b>2.04</b> | 39.99 | 59.68 |
| 10         | 2.05                      | 40.06 | 59.69 | 2.05 | <b>40.13</b> | <b>59.65</b> | <b>2.04</b> | 40.11 | 59.65 |
| 15         | 2.05                      | 40.01 | 59.69 | 2.04 | <b>40.02</b> | <b>59.60</b> | <b>2.04</b> | 40.12 | 59.60 |
| 20         | 2.05                      | 40.12 | 59.66 | 2.05 | <b>40.15</b> | <b>59.67</b> | <b>2.05</b> | 40.08 | 59.62 |
| 25         | 2.05                      | 40.09 | 59.69 | 2.05 | <b>40.06</b> | <b>59.67</b> | <b>2.05</b> | 39.99 | 59.54 |
| 30         | 2.05                      | 40.00 | 59.76 | 2.05 | <b>40.08</b> | <b>59.55</b> | <b>2.05</b> | 40.06 | 59.59 |
| 35         | 2.05                      | 40.06 | 59.77 | 2.05 | <b>40.06</b> | <b>59.85</b> | <b>2.05</b> | 40.05 | 59.68 |
| 40         | 2.05                      | 40.08 | 59.64 | 2.04 | <b>40.07</b> | <b>59.66</b> | <b>2.05</b> | 40.03 | 59.70 |
| 45         | 2.05                      | 40.07 | 59.66 | 2.05 | <b>40.04</b> | <b>59.65</b> | <b>2.05</b> | 40.09 | 59.61 |
| 50         | 2.05                      | 40.08 | 59.68 | 2.04 | <b>40.04</b> | <b>59.68</b> | <b>2.04</b> | 40.03 | 59.66 |
| 55         | 2.05                      | 40.06 | 59.67 | 2.05 | <b>40.12</b> | <b>59.56</b> | <b>2.05</b> | 40.00 | 59.64 |

表5 均匀性、稳定性数据  
Table 5 The data of velocity uniformity and velocity stability (%)

| 测试点   | 2 m/s | 40 m/s | 60 m/s |
|-------|-------|--------|--------|
| 流速均匀性 | 0.63  | 0.49   | 0.33   |
| 流速稳定性 | 0.40  | 0.19   | 0.34   |

表6 测量重复性引入的不确定度  
Table 6 Measurement repeatability introduces uncertainty

| 测试点        | 2 m/s    | 40 m/s  | 60 m/s  |
|------------|----------|---------|---------|
| 极差         | 0.004 53 | 0.072 9 | 0.073 2 |
| $u(\mu_n)$ | 0.001 72 | 0.027 5 | 0.027 7 |

②微差压计引入的标准不确定度  $u(p)$

微差压计的最大允许误差绝对值(MPEV)  $\leq 0.5$  Pa且不知道其误差分布规律,在处理这种实际问题时常按均匀分布对待,则引入的标准不确定度:

$$u(p) = 0.5 / \sqrt{3} = 0.289 \text{ Pa}$$

③皮托静压管校准系数引入的标准不确定度  $u(\xi)$

实验采用的标准皮托静压管的校准系数为:  $\xi = 1.003$ ,  $u_{rel}$  为 0.1% ( $k = 2$ ),故其引入的绝对不确定度分量:

$$u(\xi) = \frac{u_{rel}(\xi)}{2} \times \xi = \frac{0.001}{2} \times 1.003 = 0.000 5$$

④温度仪引入的标准不确定度  $u(T)$

同理微差压计标准不确定度评定,温度仪的MPEV  $\leq 0.5$  °C,则测量引入的标准不确定度:

$$u(T) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ °C}$$

⑤气压计引入的标准不确定度  $u(P_0)$

同理微差压计标准不确定度评定,气压计的MPEV  $\leq 2$  hPa,则测量引入的标准不确定度:

$$u(P_0) = \frac{2}{\sqrt{3}} = 115 \text{ Pa}$$

⑥湿度仪引入的标准不确定度  $u(H)$

同理微差压计标准不确定度评定,湿度仪的MPEV  $\leq 8\%$  RH,则测量引入的标准不确定度:

$$u(H) = \frac{8\%}{\sqrt{3}} = 4.61\% \text{ RH}$$

(3)合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总如表7所示。

表7 标准不确定度分量汇总  
Table 7 Summary of components of standard uncertainty

| 标准不确定度分量   | 灵敏度系数       |
|------------|-------------|
| $u(\mu_n)$ | $c_{\mu_n}$ |
| $u(p)$     | $c_p$       |
| $u(\xi)$   | $c_\xi$     |
| $u(T)$     | $c_T$       |
| $u(P_0)$   | $c_{P_0}$   |
| $u(H)$     | $c_H$       |

其中,灵敏度系数可由式(5)求偏导得出:

$$c_{\mu_n} = \frac{\partial \mu}{\partial \mu_n} =$$

$$\frac{mn}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sqrt{\frac{2}{3.483 53 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T} (P_0 - 0.378 H e_w)} p \xi}} \quad (6)$$

$$c_p = \frac{\partial \mu}{\partial p} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \times T^{-\frac{1}{2}} \times p^{-\frac{3}{2}} \times \xi^{-\frac{1}{2}} \times \mu_n \times m \times (3.483\ 53 \times 10^{-3} \times P_0 - 3.483\ 53 \times 10^{-3} \times 0.378He_w)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$c_\xi = \frac{\partial \mu}{\partial \xi} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \times T^{-\frac{1}{2}} \times p^{-\frac{3}{2}} \times \xi^{-\frac{3}{2}} \times \mu_n \times m \times (3.483\ 53 \times 10^{-3} \times P_0 - 3.483\ 53 \times 10^{-3} \times 0.378He_w)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

$$c_T = \frac{\partial \mu}{\partial T} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \times T^{-\frac{3}{2}} \times p^{-\frac{1}{2}} \times \xi^{-\frac{1}{2}} \times \mu_n \times m \times (3.483\ 53 \times 10^{-3} \times P_0 - 3.483\ 53 \times 10^{-3} \times 0.378He_w)^{\frac{1}{2}} \quad (9)$$

$$c_{P_0} = \frac{\partial \mu}{\partial P_0} = \frac{\sqrt{2}}{4} \times 3.483\ 53 \times 10^{-\frac{3}{2}} \times T^{-\frac{1}{2}} \times p^{-\frac{1}{2}} \times \xi^{-\frac{1}{2}} \times \mu_n \times m \times (P_0 - 0.378He_w)^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$c_H = \frac{\partial \mu}{\partial H} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \times 3.483\ 53 \times 10^{-\frac{3}{2}} \times 0.378e_w \times T^{-\frac{1}{2}} \times p^{-\frac{1}{2}} \times \xi^{-\frac{1}{2}} \times \mu_n \times m \times (P_0 - 0.378He_w)^{-\frac{1}{2}} \quad (11)$$

各灵敏度系数计算如表 8 所示。

表 8 各灵敏度系数

| $v/$<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 2            | 40           | 60           |
|------------------------------|--------------|--------------|--------------|
| $c_{\mu_n}$                  | 0.512 4      | 0.025 1      | 0.016 6      |
| $c_p$                        | -0.004 68    | -0.000 009   | -0.000 003   |
| $c_\xi$                      | -0.010 9     | -0.008 6     | -0.005 7     |
| $c_T$                        | -0.000 04    | -0.000 03    | -0.000 02    |
| $c_{P_0}$                    | 0.000 000 11 | 0.000 000 08 | 0.000 000 06 |
| $c_H$                        | -0.000 000 7 | -0.000 000 5 | -0.000 000 4 |

由于各分量之间相互不相关,合成标准不确定度为:

$$u_c(\mu) = \left( [c_{\mu_n} u(\mu_n)]^2 + [c_p u(p)]^2 + [c_\xi u(\xi)]^2 + [c_T u(T)]^2 + [c_{P_0} u(P_0)]^2 + [c_H u(H)]^2 \right)^{1/2} \quad (12)$$

其计算结果如表 9 所示。

表 9 合成标准不确定度

| 风速         | 2       | 40      | 60      |
|------------|---------|---------|---------|
| $u_c(\mu)$ | 0.001 6 | 0.000 7 | 0.001 0 |

(4) 扩展不确定度

取  $k=2$ ,则扩展不确定度  $U=2u_c(\mu)$ 。扩展不确定度计算结果如表 10 所示。

表 10 扩展不确定度

Table 10 Expanded uncertainty

| 风速/( $m \cdot s^{-1}$ ) | 2       | 40      | 60      |
|-------------------------|---------|---------|---------|
| $U(k=2)$                | 0.003 2 | 0.001 4 | 0.002 0 |

2) 流速稳定性

(1) 测量模型

流速稳定性测量亦是受气压、温度、湿度等直接测量量的间接影响,构建结果不确定度评定模型如下:

$$\eta = \frac{\max(H_w)m}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\frac{2}{3.483\ 53 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T}(P_0 - 0.378He_w)} p \xi}} \quad (13)$$

$m=1,2,\dots,12$

式中:  $H_w$  表示某次测试中流速最大误差;  $p$  表示微差压计示值;  $\xi$  表示皮托静压管校准系数;  $T$  表示试验段内温度;  $P_0$  表示试验段内气压;  $H$  表示试验段内空气相对湿度;  $e_w$  表示  $T$  温度下的饱和水汽压。

(2) 不确定度分量评定

① 测量重复性引入的标准不确定度  $u(H_w)$

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

求取实验标准偏差。

3 个测试点下风速值重复测量引入的标准不确定度如表 11 所示。

表 11 测量重复性引入的不确定度

Table 11 Measurement repeatability introduces uncertainty

| 测试点      | 2 m/s     | 40 m/s    | 60 m/s    |
|----------|-----------|-----------|-----------|
| 实验标准偏差   | 0.003 514 | 0.041 239 | 0.080 690 |
| $u(H_w)$ | 0.001 014 | 0.011 905 | 0.023 293 |

② 其他分量引入的标准不确定度

流速稳定性测量过程中微差压计示值误差、标准皮托静压管校准系数、温度仪、气压计和湿度仪测量引入的标准不确定度同流速均匀性不确定度评定中对应的分量一致。

(3) 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总如表 12 所示。

表 12 标准不确定度分量汇总

Table 12 Summary of components of standard uncertainty

| 标准不确定度来源 | 灵敏度系数     |
|----------|-----------|
| $u(H_w)$ | $c_{H_w}$ |
| $u(p)$   | $c_p$     |
| $u(\xi)$ | $c_\xi$   |
| $u(T)$   | $c_T$     |
| $u(P_0)$ | $c_{P_0}$ |
| $u(H)$   | $c_H$     |



其中,灵敏度系数可由式(13)求偏导得出:

$$c_{H_w} = \frac{\partial \mu}{\partial H_w} = \frac{m}{\sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{2}{3.483\ 53 \times 10^{-3} \times \frac{1}{T} (P_0 - 0.378 H_e w)} \right)^2}} p \xi \quad (14)$$

$$c_p = \frac{\partial \mu}{\partial p} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \times T^{-\frac{1}{2}} \times p^{-\frac{3}{2}} \times \xi^{-\frac{1}{2}} \times \max(H_w) \times m \times (3.483\ 53 \times 10^{-3} \times P_0 - 3.483\ 53 \times 10^{-3} \times 0.378 H_e w)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

$$c_\xi = \frac{\partial \mu}{\partial \xi} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \times T^{-\frac{1}{2}} \times p^{-\frac{1}{2}} \times \xi^{-\frac{3}{2}} \times \max(H_w) \times m \times (3.483\ 53 \times 10^{-3} \times P_0 - 3.483\ 53 \times 10^{-3} \times 0.378 H_e w)^{\frac{1}{2}} \quad (16)$$

$$c_T = \frac{\partial \mu}{\partial T} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \times T^{-\frac{3}{2}} \times p^{-\frac{1}{2}} \times \xi^{-\frac{1}{2}} \times \max(H_w) \times m \times (3.483\ 53 \times 10^{-3} \times P_0 - 3.483\ 53 \times 10^{-3} \times 0.378 H_e w)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

$$c_{P_0} = \frac{\partial \mu}{\partial P_0} = \frac{\sqrt{2}}{4} \times 3.483\ 53 \times 10^{-\frac{3}{2}} \times T^{-\frac{1}{2}} \times p^{-\frac{1}{2}} \times \xi^{-\frac{1}{2}} \times \max(H_w) \times m \times (P_0 - 0.378 H_e w)^{-\frac{1}{2}} \quad (18)$$

$$c_H = \frac{\partial \mu}{\partial H} = -\frac{\sqrt{2}}{4} \times 3.483\ 53 \times 10^{-\frac{3}{2}} \times 0.378 e_w \times T^{-\frac{1}{2}} \times p^{-\frac{1}{2}} \times \xi^{-\frac{1}{2}} \times \max(H_w) \times m \times (P_0 - 0.378 H_e w)^{-\frac{1}{2}} \quad (19)$$

各灵敏度系数计算如表 13 所示。

表 13 各灵敏度系数

Table 13 Sensitivity coefficients of the three test points

| $v/$<br>( $m \cdot s^{-1}$ ) | 2             | 40            | 60            |
|------------------------------|---------------|---------------|---------------|
| $c_{H_w}$                    | 0.488 793     | 0.024 955     | 0.016 765     |
| $c_p$                        | -0.009 286    | -0.000 012    | -0.000 009    |
| $c_\xi$                      | -0.023 898    | -0.011 351    | -0.019 205    |
| $c_T$                        | -0.000 084    | -0.000 040    | -0.000 071    |
| $c_{P_0}$                    | 0.000 000 24  | 0.000 000 12  | 0.000 000 24  |
| $c_H$                        | -0.000 001 44 | -0.000 000 72 | -0.000 001 32 |

由于各分量之间相互不相关,合成标准不确定度的计算如下:

$$u_c(\eta) = \left( [c_{H_w} u(H_w)]^2 + [c_p u(p)]^2 + [c_\xi u(\xi)]^2 + [c_T u(T)]^2 + [c_{P_0} u(P_0)]^2 + [c_H u(H)]^2 \right)^{1/2} \quad (20)$$

其计算结果如表 14 所示。

表 14 合成标准不确定度

Table 14 Combined standard uncertainty

| $v/(m \cdot s^{-1})$ | 2       | 40      | 60      |
|----------------------|---------|---------|---------|
| $u_c(\eta)$          | 0.002 7 | 0.000 3 | 0.000 4 |

(4)扩展不确定度

取  $k=2$ ,则扩展不确定度  $U=2u_c(\eta)$ ,则扩展不确定度计算结果如表 15 所示。

表 15 扩展不确定度

Table 15 Expanded uncertainty

| 风速( $m \cdot s^{-1}$ ) | 2       | 40      | 60      |
|------------------------|---------|---------|---------|
| $U(k=2)$               | 0.005 4 | 0.000 6 | 0.000 8 |

## 4 结果分析

### 4.1 流速均匀性

参考标准 QX/T323-2016《气象低速风洞技术条件》中技术要求,流速均匀性  $\leq 1.0\%$ <sup>[17]</sup>。根据 JJF1094-2002《测量仪器特性评定》,对本次试验的测量结果及不确定度进行验证,得出不确定度判定信息如表 16 所示<sup>[18]</sup>。

表 16 流速均匀性不确定度判定

Table 16 Uncertainty determination of velocity uniformity

| 测试点    | MPEV | $U_{95}$ | $\frac{1}{3}$ MPEV |
|--------|------|----------|--------------------|
| 2 m/s  | 1.0  | 0.32     | 0.33               |
| 40 m/s | 1.0  | 0.14     | 0.33               |
| 60 m/s | 1.0  | 0.20     | 0.33               |

通过表 16 可知,3 个测试点流速均匀性测量不确定度均小于 MPEV 的  $\frac{1}{3}$ 。通过比较 3 个测试点,2 m/s 点测量结果不确定度最大,原因是低风速下受检测设备精度和环境变化影响较大。

### 4.2 流速稳定性

参考标准 QX/T323-2016《气象低速风洞技术条件》中技术要求,流速稳定性  $\leq 0.5\%$ 。根据 JJF1094-2002《测量仪器特性评定》,对本次试验的测量结果及不确定度进行验证,得出不确定度判定信息如表 17 所示。

由表 17 可知,通过比较 3 个测试点,2 m/s 点测量结果不确定度最大,原因同流速稳定性。40、60 m/s 的流速稳定性测量不确定度均小于 (MPEV- $U_{95}$ ) 的差值,判定合格。2 m/s 点扩展不确定度较大,表征测量过程中测量结果离散性偏大。原因是 2 m/s 及以下低风速技术要求 MPEV 不超过 0.01 m/s 甚至更小,这对标准设备精度及

表 17 流速稳定性不确定度判定  
Table 17 Uncertainty determination of velocity stability

(%)

| 测试点    | MPEV | $U_{95}$ | $\frac{1}{3}$ MPEV | $ \Delta $ | MPEV- $U_{95}$ |
|--------|------|----------|--------------------|------------|----------------|
| 2 m/s  | 0.5  | 0.54     | 0.33               | 0.40       | -0.04          |
|        | 1.0  | 0.54     | 0.33               | 0.40       | 0.44           |
| 40 m/s | 0.5  | 0.06     | 0.17               | 0.19       | 0.44           |
| 60 m/s | 0.5  | 0.08     | 0.17               | 0.34       | 0.42           |

外界环境稳定性的要求较高,所以采取 2 m/s 及以下流速点的 MPEV $\leq$ 0.02 m/s、其余流速点流速稳定性 $\leq$ 0.5%分段比较合理。

### 5 结论

通过对 WZ860070-E 型直流式风洞流速均匀性、流速稳定性测量结果不确定度进行分析,得到如下结论。

1)测量结果不确定度评定充分考虑测量重复性、微差压计、皮托静压管、温度计、气压计等影响。测量重复性引入的分量为主要影响量。

2)由于各影响量选取最大误差值,评定的结果会比实际情况略微偏大。

3)3 个测试点流速均匀性、流速稳定性测试结果扩展不确定度基本满足 JJF1094-2002《测量仪器特性评定》的合格判据,可信程度较高。

4)受标准设备精度及外界因素影响,2 m/s 风速下稳定性测量结果扩展不确定度结果同高风速的相比偏大。鉴于经济性、合理性,建议分段考虑流速稳定性的 MPEV。

本文充分考虑了各方面因素对直流式风洞计量性能的影响,测量结果可信程度高,为科学评定直流式风洞测量性能以及制定测试规范提供技术参考。下一步工作重点是风洞气流偏角、紊流度测试所使用的标准器溯源研究。

### 参考文献

[1] 刘昕,孔诗媛,麻镡,等. 气象用直路开口风洞测试方法探讨及性能参数分析 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(22):160-164.  
LIU X, KONG SH Y, MA K, et al. Discussion on test method and analysis of performance parameters for meteorological straight opening wind tunnel [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43 (22): 160-164.

[2] 韩书新,侯飙,徐嘉,等. 气象低速风洞检定结果的测量不确定度评定 [J]. 气象水文海洋仪器, 2017, 34(2):23-25.  
HAN SH X, HOU B, XU J, et al. Evaluation on uncertainty measurement for verification result of

meteorological low-speed wind tunnel [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instrument, 2017,34(2):23-25.

[3] 张鹏,孙雪琪,范雪波. 气象低速回路风洞检定结果的测量不确定度分析 [J]. 气象水文海洋仪器, 2023, 40(2):83-85,90.  
ZHANG P, SUN X Q, FAN X B. Analysis on uncertainty measurement in verification results of meteorological low-speed loop wind tunnel [J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instrument, 2023,40(2):83-85,90.

[4] 黄斌,崔学林,匡昌武,等. 减小低风速不确定度的研究 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(8): 1-5.  
HUANG B, CUI X L, KUANG CH W, et al. Research on reducing the uncertainty of low wind speed [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38 (8): 1-5.

[5] 李常春. 热球式风速仪测量不确定度的分析与评定 [J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(8):33-38.  
LI CH CH. Analysis and evaluation of measurement uncertainty of hot ball anemometer [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2019, 38 (8): 33-38.

[6] 曾涛,龚熙,边泽强. 自动气象站风速传感器测量不确定度评定 [J]. 电子测量技术, 2018, 41(15):96-99.  
ZENG T, GONG X, BIAN Z Q. Measurement uncertainty evaluation of the air velocity transducer on the automatic weather station [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41(15): 96-99.

[7] 胡苍龙,郑旭. 轻便三杯风向风速表示值误差不确定度分析 [J]. 计量与测试技术, 2018, 45(4):109-110.  
HU C L, ZHENG X. Analysis of uncertainty of the value error of the light three cup wind direction wind speed [J]. Metrology & Measurement Technique, 2018,45(4):109-110.

[8] 雷晓妹,党选发,张海韬,等. 风速传感器实测风速不确定度评定对比研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37 (11): 56-64.  
LEI X M, DANG X F, ZHANG H T, et al. Comparative study on uncertainty evaluation of

- measured wind speed sensor [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37 (11): 56-64.
- [9] 孔诗媛,刘昕,边泽强,等. 气象用90m/s回流开闭两用强风风洞设计[J]. 气象科技,2021,49(1):7-11.  
KONG SH Y, LIU X, BIAN Z Q, et al. Design of 90 m/s circumfluence open/closed dual-purpose strong wind tunnel for meteorological application [J]. Meteorological Science and Technology, 2021,49(1): 7-11.
- [10] 马帅,刘文思,吴钢,等. 三维皮托管应用现状分析[J]. 电子质量,2024(2): 110-112.  
MA SH, LIU W S, WU G. Analysis of the application status of 3D pitot tube [J]. Electronics Quality, 2024(2): 110-112.
- [11] 郭军,朱灵芝. 不同加压方式对数字差压计压力测量影响的分析 [J]. 轻工标准与质量, 2018(2): 43,49.  
GUO J, ZHU L ZH. Analysis of influence of different pressure modes on pressure measurement of digital differential pressure gauge [J]. Standard & Quality of Light Industry, 2018(2): 43,49.
- [12] 中国气象局. 气象低速风洞性能测试规范: QX/T84—2007[S]. 北京:气象出版社,2007.  
China Meteorological Administration. Test specification for meteorological low speed wind tunnel performance: QX/T84 — 2007 [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [13] 韩书新,孙仁霞,魏新华. 气象低速风洞参数及性能测试 [J]. 气象水文海洋仪器, 2013, 30(4): 122-124, 128.  
HAN SH X, SUN R X, WEI X H. Parameter and performance test for meteorological low-speed wind tunnel[J]. Meteorological, Hydrological and Marine Instrument, 2013,30(4):122-124,128.
- [14] 李松奎,贺晓雷,边泽强,等. 螺旋桨测风仪风洞测试及不确定度分析 [J]. 气象科技, 2021, 49(4): 524-528.  
LI S K, HE X L, BIAN Z Q, et al. Measurement and uncertainty analysis of propeller anemometer in wind tunnel [J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 42(3):25-29.
- [15] 支询,沙莉,李施,等. 风速传感器测量结果的不确定度分析与评定 [J]. 自动化仪表, 2021, 42(3): 25-29.  
ZHI X, SHA L, LI SH, et al. Uncertainty analysis and evaluation of wind speed sensor measurement results[J]. Process Automation Instrumentation, 2021, 42(3): 25-29.
- [16] 武春爱,印佳楠. 风速检定装置不确定度评定及分析[J]. 自动化仪表, 2023, 44(9): 107-110.  
WU CH AI, YIN J N. Uncertainty assessment and analysis of wind speed calibration device [J]. Process Automation Instrumentation, 2023, 44(9): 107-110.
- [17] 中国气象局. 气象低速风洞技术条件: QX/T323—2016[S]. 北京:气象出版社,2016.  
China Meteorological Administration. Technical condition of meteorological low speed wind tunnel: QX/T323—2016[S]. Beijing: China Meteorological Press, 2016.
- [18] 国家质量监督检验检疫总局. 测量仪器特性评定: JJF1094—2002[S]. 北京:中国计量出版社,2003.  
State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Evaluation of the characteristics of measuring instruments: JJF1094 — 2002[S]. Beijing: China Jiliang Press, 2003.

## 作者简介

王旭,硕士研究生,工程师,主要研究方向为综合气象观测。

E-mail:709909577@qq.com

赵雪明(通信作者),本科,副高级工程师,主要研究方向为综合气象观测。

E-mail:11777673@qq.com