**气象低速风洞测试规范**

**不确定度评定报告**

规范起草组

2024年4月25日

气象低速风洞测试不确定度评定示例

1 评定依据

本规范的测量不确定度评定依据是JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》。

2 标准设备和被校对象

2.1 标准设备

标准器及配套设备为皮托静压管检定装置，主要技术指标见表D.1。

表D.1 标准器及配套设备主要技术指标

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 分 类 | 名 称 | | 主要技术指标 |
| 标准器 | 热线风速仪 | 范围：0m/s～5m/s；最大允许误差：±2%FS | |
| 标准皮托静压管 | 范围：2m/s～85m/s；校准系数K：0.997～1.003 | |
| 微差压计 | 范围：0hPa～7500hPa；最大允许误差：±0.5Pa | |
| 配套设备 | 温度测量仪器 | 范围：0℃～50℃；最大允许误差：±0.5℃ | |
| 湿度测量仪器 | 范围：0%RH～100%RH；最大允许误差：±8%RH | |
| 气压测量仪器 | 范围：500 hPa～1050hPa；最大允许误差：±2hPa | |

2.2 被测对象

被测单位：杭州佐格通信设备有限公司

器具名称： 直流式风洞

器具型号：WZ860070-E

制造单位：杭州佐格通信设备有限公司

3 均匀性不确定度评定

3.1 主要测量方法

选择试验段仪器安装截面作为被测截面，距离洞壁15cm，每（5～10）cm间距选择一个测试位置,共7个位置。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。测试点选择2m/s、40m/s、60m/s，并逐点分析不确定度。

3.2 建立测量模型和分析不确定度来源

3.2.1测量模型

在测试过程中，测量结果为示值误差，计算如式（D.1）。

（D.1）

式中：

——该风速点下的流速均匀度。

——该风速点下的平均风速值。

将标准风速平均值带入公式（D.1），则：

(D.2)

式中：

——微差压计示值，Pa；

——皮托静压管校准系数；

——试验段内温度，K；

——试验段内气压，Pa；

——试验段内空气相对湿度，用%RH表示；

——温度下的饱和水汽压，Pa。

D.3.2.2 不确定度来源分析

（1）测量重复性引入的标准不确定度；

（2）微差压计引入的标准不确定度；

（3）皮托静压管校准系数引入的标准不确定度；

（4）温度仪引入的标准不确定度；

（5）气压计引入的标准不确定度；

（6）湿度仪引入的标准不确定度。

D.3.3 不确定度分量评定

D.3.3.1 测量重复性引入的标准不确定度

用极差法求取试验标准偏差S（n=7时，C=2.70）。该测试点下风速值重复测量引入的标准不确定度见表D.2。

表D.2 测量重复性引入的不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 测试点 | 2m/s | 40m/s | 60m/s |
| 极差 | 0.0045 | 0.0729 | 0.0732 |
|  | 0.0017 | 0.028 | 0.0028 |

D.3.3.2微差压计引入的标准不确定度

微差压计的最大允许误差为±0.5Pa，取均匀分布，则微差压计示值误差引入的标准不确定度：

=0.5/=0.289 Pa

D.3.3.3皮托静压管校准系数引入的标准不确定度

试验使用的标准皮托静压管的校准系数为：=1.003，相对不确定度为0.1%(k=2)。

故由标准皮托静压管校准系数引入的绝对不确定度分量为



D.3.3.4 温度仪引入的标准不确定度

温度仪的最大允许误差为±0.5℃，按均匀分布，则温度仪测量引入的标准不确定度：



D.3.3.5 气压计引入的标准不确定度

气压计的最大允许误差为±2hPa，按均匀分布，则气压计测量引入的标准不确定度：

D.3.3.6 湿度仪引入的标准不确定度

湿度仪的最大允许误差为±8%RH，按均匀分布，则湿度仪测量引入的标准不确定度：

**

D.3.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表D.3。

表D.3 标准不确定度一览表

|  |  |
| --- | --- |
| 标准不确定度来源 | 灵敏度系数 |
| 测量重复性引入的标准不确定度 |  |
| 微差压计引入的标准不确定度 |  |
| 皮托静压管校准系数引入的标准不确定度 |  |
| 温度仪引入的标准不确定度 |  |
| 气压计引入的标准不确定度 |  |
| 湿度仪引入的标准不确定度 |  |

其中，灵敏度系数可由公式（D.2）求偏导得出，具体如下：

本次试验环境：温度为15.1℃，气压为1021.1hPa，相对湿度为68%，则各灵敏度系数计算如表D.4：

表D.4 各灵敏度系数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| （m/s） | 2 | 40 | 60 |
|  | 0.5124 | 0.0251 | 0.0166 |
|  | -0.00468 | -0.000009 | -0.000003 |
|  | -0.0109 | -0.0086 | -0.0057 |
|  | -0.00004 | -0.00003 | -0.00002 |
|  | 0.00000011 | 0.00000008 | 0.00000006 |
|  | -0.0000007 | -0.0000005 | -0.0000004 |

由于各分量之间相互不相关，合成标准不确定度的计算公式如下所示：

其计算结果见表D.5。

表D.5 合成标准不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 风速（m/s） | 2 | 40 | 60 |
| （m/s） | 0.0016 | 0.0007 | 0.0010 |

D.3.5 扩展不确定度

取=2,则扩展不确定度,则扩展不确定度计算结果见表D.6。

表D.6 扩展不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 风速（m/s） | 2 | 40 | 60 |
|  | 0.0032 | 0.0014 | 0.0020 |

4 稳定性不确定度评定

4.1 主要测量方法

选取试验段被测截面中心作为测试位置，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。测试点选择2m/s、40m/s、60m/s，并逐点分析不确定度。

4.2 建立测量模型和分析不确定度来源

4.2.1测量模型

在测试过程中，测量结果为示值误差，计算如式（D.3）。

(D.3)

式中：

-稳定性；

-某次测试中流速最大误差，单位m/s；

-某次测试中1min内的平均流速值，单位m/s。

将标准风速平均值带入公式（D.4），则：

(D.4)

式中：

——微差压计示值，Pa；

——皮托静压管校准系数；

——试验段内温度，K；

——试验段内气压，Pa；

——试验段内空气相对湿度，用%RH表示；

——温度下的饱和水汽压，Pa。

4.2.2不确定度来源分析

（1）测量重复性引入的标准不确定度；

（2）微差压计引入的标准不确定度；

（3）皮托静压管校准系数引入的标准不确定度；

（4）温度仪引入的标准不确定度；

（5）气压计引入的标准不确定度；

（6）湿度仪引入的标准不确定度。

4.3 不确定度分量评定

4.3.1测量重复性引入的标准不确定度

用求取实验标准偏差。该测试点下风速值重复测量引入的标准不确定度见表D.7。

表D.7测量重复性引入的不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 测试点 | 2m/s | 40m/s | 60m/s |
| 实验标准偏差 | 0.003514 | 0.041239 | 0.080690 |
|  | 0.001014 | 0.011905 | 0.023293 |

4.3.2微差压计引入的标准不确定度

微差压计的最大允许误差为±0.5Pa，取均匀分布，则微差压计示值误差引入的标准不确定度：

=0.5/=0.289 Pa

4.3.3皮托静压管校准系数引入的标准不确定度

试验使用的标准皮托静压管的校准系数为：=1.003，相对不确定度为0.1%(k=2)。

故由标准皮托静压管校准系数引入的绝对不确定度分量为

**

4.3.4温度仪引入的标准不确定度

温度仪的最大允许误差为±0.5℃，按均匀分布，则温度仪测量引入的标准不确定度：

**

4.3.5气压计引入的标准不确定度

气压计的最大允许误差为±2hPa，按均匀分布，则气压计测量引入的标准不确定度：

4.3.6湿度仪引入的标准不确定度

湿度仪的最大允许误差为±8%RH，按均匀分布，则湿度仪测量引入的标准不确定度：

**

4.4 合成标准不确定度

标准不确定度分量汇总见表D.8。

表D.8 标准不确定度一览表

|  |  |
| --- | --- |
| 标准不确定度来源 | 灵敏度系数 |
| 测量重复性引入的标准不确定度 |  |
| 微差压计引入的标准不确定度 |  |
| 皮托静压管校准系数引入的标准不确定度 |  |
| 温度仪引入的标准不确定度 |  |
| 气压计引入的标准不确定度 |  |
| 湿度仪引入的标准不确定度 |  |

其中，灵敏度系数可由公式（D.4）求偏导得出，具体如下：

本次试验环境：温度为14.8℃，气压为1021.2hPa，相对湿度为68.5%，则各灵敏度系数计算如表D.9。

表D.9 各灵敏度系数

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| （m/s） | 2 | 40 | 60 |
|  | 0.488793 | 0.024955 | 0.016765 |
|  | -0.009286 | -0.000012 | -0.000009 |
|  | -0.023898 | -0.011351 | -0.019205 |
|  | -0.000084 | -0.000040 | -0.000071 |
|  | 0.00000024 | 0.00000012 | 0.00000024 |
|  | -0.00000144 | -0.00000072 | -0.00000132 |

由于各分量之间相互不相关，合成标准不确定度的计算公式如下所示：

其计算结果见表D.10。

表D.10 合成标准不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| （m/s） | 2 | 40 | 60 |
|  | 0.0027 | 0.0003 | 0.0004 |

4.5 扩展不确定度

取 =2,则扩展不确定度,则扩展不确定度计算结果见表D.11。

表D.11 扩展不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 风速（m/s） | 2 | 40 | 60 |
|  | 0.0054 | 0.0006 | 0.0008 |