

# 叶轮风速表示值误差测试方法研究

牛永红<sup>1</sup>, 马修才<sup>1</sup>, 郑树芳<sup>1</sup>, 关虹<sup>2</sup>

(1. 内蒙古自治区气象数据中心, 呼和浩特 010051;  
2. 内蒙古电力(集团)有限责任公司信息通信分公司, 呼和浩特 010051)

**摘要:** 以皮托管和微压计测量的空气流速作为参考风速, 研究叶轮式风速表的风洞实验室示值误差测试方法; 介绍了叶轮式风速表的工作原理, 分析了测试所用仪器设备技术指标, 进行了叶轮式风速表实例测试, 对测试实例进行了不确定度评定与分析并作了示值误差的符合性判定; 结果表明, 5 m/s 及以下时不确定度的最主要来源为风洞流场总压和静压差的测量, 5 m/s 以上时不确定度的最主要来源为风洞流场的不均匀性、皮托管与气流夹角等影响量, 可通过提高微压计精度、减小风洞流场不均匀性和减小皮托管与气流夹角等方式进一步减小测量不确定度。

**关键词:** 皮托管; 微压计; 叶轮式风速表; 风洞; 不确定度评定; 符合性判定

## Research on Indication Error Test Method of Impeller Anemometer

NIU Yonghong<sup>1</sup>, MA Xiucui<sup>1</sup>, ZHENG Shufang<sup>1</sup>, GUAN Hong<sup>2</sup>

(1. Inner Mongolia Meteorological Data Center, Huhhot 010051, China;  
2. Information and Communication Branch of Inner Mongolia Power (Group) Co., Ltd., Huhhot 010051, China)

**Abstract:** As a reference wind speed, an air velocity is measured by a pitot tube and micro differential pressure gauge, The indication error measurement method of an impeller anemometer in a wind tunnel laboratory was studied. This paper introduced the working principle of the impeller anemometer, analyzed the technical indexes of the instruments used in the method, tested an example of the impeller anemometer by using this method, evaluated and analyzed the uncertainty of the test example, and determined the conformity of the indication error. The results show that the most important source of uncertainty at 5 m/s and below is the measurement of the total pressure and static pressure difference in the wind tunnel flow field, and the most important source of uncertainty above 5 m/s is the non-uniformity of the wind tunnel flow field and the angle between the pitot tube and the air flow. The measurement uncertainty can be further reduced by improving the accuracy of the micromanometer, reducing the non-uniformity of the wind tunnel flow field and the angle between the pitot tube and the airflow.

**Keywords:** pitot tube; micromanometer; impeller anemometer; wind tunnel; evaluation of uncertainty; conformity determination

## 0 引言

目前市面上常见的便携式风速测量仪器大体分为三类: 轻便三杯风向风速表、热球式风速仪和叶轮式风速表。叶轮式风速表轻便易用, 通常与温度、湿度、气压等多种要素观测集成于一体, 被越来越多的企事业单位采用, 使用叶轮式风速表作为测风仪器的单位涉及到各行各业, 包括制造业、服务业、农业、科学研究等。轻便三杯风向风速表和热球式风速仪的检定, 有相应的国家检定规程可以依据, 叶轮式风速表的校准/测试目前尚无相应规程、规范, 当前国内与叶轮式风速表相关的现行标准仅有《QX/T 23-2004 旋转式测风传感器》<sup>[1]</sup>和《JB/T 11258—2011 数字风向风速测量仪》<sup>[2]</sup>。上述两个行业标准主要涉及旋转式测风传感器和数字显示的风速测量仪器的技术要求、出厂试验、检验规则及包装、标志, 属于产品标准, 对测试环境、标

准器及配套设备要求没有明确说明。因此, 叶轮式风速表测试方法的研究, 对规范该类风速表的校准/测试有着重要的意义。

国内较多学者对轻便三杯风向风速表、风杯式风速传感器、超声波风速测量仪器的校准方法<sup>[3-6]</sup>及测量不确定度评定<sup>[7-10]</sup>等进行了大量的研究, 已形成了相对成熟的校准、测试方法。国内目前对叶轮式风速表校准、测试方法的研究相对较少, 李文博等参照风杯式风速仪相关规程针对叶轮式风速仪提出了一种校准方法并进行了验证<sup>[11]</sup>, 本文提出的叶轮式风速表在低速风洞实验室内的示值误差测试方法, 从测试所用仪器设备技术指标的确定、测量结果不确定度评定等方面详细阐述了该方法, 方法更为具体, 依据测量模型进行了测试实例的不确定度分析, 并根据测试结果和不确定度评定结果进行了示值误差的符合性评定分析。

收稿日期: 2022-12-15; 修回日期: 2023-01-14。

基金项目: 内蒙古自治区地方标准编制项目(2019年第一批 019号)。

作者简介: 牛永红(1988-), 女, 内蒙古清水河人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事气象信息技术方向的研究。

通讯作者: 郑树芳(1968-), 女, 内蒙古乌拉特前旗人, 高级工程师, 主要从事气象计量方法与技术方向的研究。

引用格式: 牛永红, 马修才, 郑树芳, 等. 叶轮风速表示值误差测试方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(4): 104-109.

# 1 叶轮式风速表简介

## 1.1 叶轮式风速表外观与结构

叶轮式风速表主要由旋转器、转换器和显示器构成<sup>[12]</sup>, 典型叶轮式风速表的外观和结构如图 1 所示。旋转器包括用于感应风的叶轮和用于机械传动的水平转轴, 转换器主要包括电磁组件(将叶轮转动转换成电脉冲)和信号转换电路(将电脉冲变换和计算后得到风速值), 显示器用于显示测量的风速。

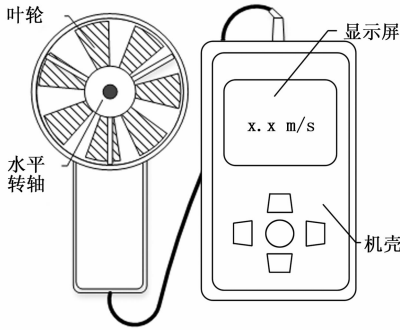


图 1 典型叶轮式风速表外观与结构

## 1.2 叶轮式风速表工作原理

叶轮式风速表常用于定向风速的测量, 其工作原理是将叶轮转速转化成电脉冲信号, 通过测量脉冲频率达到测量风速的目的, 图 2 为叶轮式风速表工作原理示意图。叶轮感应到来风, 带动水平转轴转动; 水平转轴周围均匀分布着磁铁, 置于磁铁旁的霍尔元件感应到磁场的变化, 将产生与叶轮转速成正比的电脉冲信号; 转换电路采集到电脉冲信号并经过处理后, 按照一定的换算关系得到测量风速值, 并在显示器上直观显示出测量到的风速。

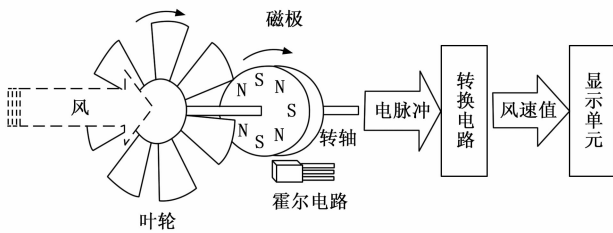


图 2 叶轮式风速表工作原理示意图

# 2 测量原理与仪器设备

## 2.1 基本测量模型

用叶轮式风速表示值与参考风速的差值作为风速表示值误差的测量结果, 如式 (1) 所示:

$$\Delta v = v' - v \quad (1)$$

式中,  $\Delta v$  为被测试风速表示值误差,  $v'$  为被测试风速表测得的风速值,  $v$  为风速参考值 (m/s)。

## 2.2 参考风速测量原理

压力管原理测量风速是目前国内风洞参考风速测量的最常用方式, 通过测量风洞气流总压和静压差(后续简称

差压)即空气的动压, 根据空气动压与空气密度、流速之间的关系<sup>[13-14]</sup>, 按照式 (2)、(3) 计算得到风洞参考风速:

$$v = K \sqrt{2\Delta P / \rho} \quad (2)$$

$$\rho = \frac{3.48353 \times 10^{-3} (P - 0.378 H p_w e^{(AT^2 + BT + C + DT^{-1})})}{T} \quad (3)$$

式中,  $v$  为参考风速 (m/s),  $K$  为皮托管系数,  $\Delta P$  为风洞流场测量点的差压 (Pa),  $\rho$  为风洞流场空气密度 ( $\text{kg/m}^3$ ),  $T$  为风洞流场温度 (K),  $P$  为风洞流场气压 (Pa),  $H$  为风洞流场湿度 (%RH),  $e_w$  为风洞流场在  $T$  温度下的饱和水汽压 (Pa),  $p_w$  固定为 1 Pa,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  为常量。

将式 (3) 的减号前后拆分成两项, 设前项等于  $\rho_d$ , 后项等于  $\rho_w$ , 分别代表干空气密度及水汽修正, 实际应用中  $\rho_w$  对参考风速的影响很小, 基本不超过风速值的 1%, 因此实际应用中常常忽略水汽修正项的影响<sup>[15]</sup>, 用式 (4) 作为风洞流场空气密度的计算公式:

$$\rho = \frac{3.48353 \times 10^{-3} \times P}{T} \quad (4)$$

## 2.3 校准用仪器设备

利用数字微压计、皮托管静压管、低速风洞及风洞流场温度、湿度、气压测量仪器组成叶轮式风速表的示值误差测试系统, 图 3 为系统示意图, 其中风洞为横截面示意。

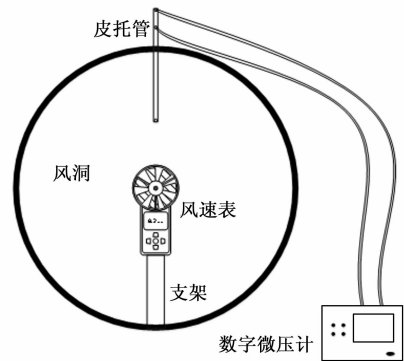


图 3 叶轮式风速表示值误差测试示意图

叶轮式风速表示值误差测试所涉及的仪器设备分为标准器和配套设备, 其主要技术指标和用途见表 1, 其中皮托管静压管和数字微压计为标准器, 用于测量气流总压和静压之差以确定气流速度, 风洞、温度计、湿度计、气压计为配套设备, 风洞用于产生并控制气流, 模拟风速表周围气体流动情况, 温度计、湿度计、气压计用于测量风洞流场温、湿、压参数进而得到空气密度。

表 1 测试用仪器设备主要技术指标

名称	测量范围	最大允许误差/准确度等级
皮托管	0.997~1.003(校准系数)	二等
微压计	0~2 500 Pa	±0.5 Pa
风洞	0.2~30/(m/s)	均匀性≤1%, 稳定性≤0.5%
温度计	0~50 °C	±0.5 °C
湿度计	10~95% RH	±8% RH
气压计	500~1100 hPa	0.2 级及以上

2.3.1 皮托静压管技术指标

现行皮托管检定规程和相关国际标准对 L 型皮托管校准系数的要求为 (0.99~1.01)，但当皮托管作为标准器使用时，这样的范围不能满足精度要求。因此本方法将皮托管的校准系数范围按照新修订的皮托管检定规程关于 L 型标准皮托管校准系数的要求，规定为 0.997~1.003。

2.3.2 数字微压计技术指标

根据参考风速的计算公式，按环境条件 20 °C、40% RH、1013.1 hPa (海平面气压)，设定风速 60 m/s，推算得到差压为 2 160.36 Pa，设定风速 45 m/s 反推得到差压为 1 215.20 Pa (通常海拔越高气压越低，推算得到的差压数值更低)。因此测量范围 (0~2 500) Pa 的数字微压计，完全满足叶轮式风速表的量程要求。

按《JJG 875-2019 数字压力计检定规程》<sup>[16]</sup> 要求，本方法将数字微压计最大允许误差定为 ±0.5 Pa，根据规程对数字压力计的示值误差要求，其准确度等级对应为 0.02 级。与其相邻的两个等级 0.01 级和 0.05 级的测量范围为 (0~2 500) Pa 数字压力计对应的最大允许误差分别为 ±0.25 Pa 和 ±1.25 Pa。

本文通过实际试验结合理论推算的方式验证了数字微压计最大允许误差的合理性。实验主要为观察参考风速的影响因素，因此风洞试验段内只放置皮托静压管，不放置被测试风速表，调节风洞依次达到设定测试点风速，共计 11 个常用风速点，实验结果见表 2。

表 2 风洞不放置被测试风速表情况下的实验数据实例

风速点 /m·s <sup>-1</sup>	差压 /Pa	温度 /°C	湿度 /%RH	气压 /hPa	ρ /kg·m <sup>-3</sup>	参考风速 /m·s <sup>-1</sup>
1	0.50	22.0	37.0	895.0	1.052 5	0.975
2	2.06	22.1	36.9	895.1	1.052 3	1.979
5	13.05	22.4	36.8	895.1	1.051 1	4.983
8	33.52	22.6	36.6	895.3	1.050 6	7.988
10	52.40	22.7	36.5	895.3	1.050 3	9.989
12	75.50	22.8	36.4	895.4	1.050 0	11.992
15	118.11	23.0	36.2	895.3	1.049 2	15.005
18	169.75	23.1	36.0	895.2	1.048 7	17.993
20	208.85	23.3	35.9	895.1	1.047 8	19.966
25	327.01	23.5	35.7	895.2	1.047 2	24.991
30	471.12	23.7	35.5	895.1	1.046 4	30.008

0.02 级的数字微压计，测量误差可能取值半宽为 0.5 Pa，按均匀分布，包含因子  $k$  取值  $\sqrt{3}$ ，则其由测量误差引入的不确定度  $u_1 = 0.5/\sqrt{3} \approx 0.289$  Pa，按同样方法计算得到假设采用 0.01 级和 0.05 级的数字微压计测量误差引入的不确定度分别为 0.144 Pa 和 0.722 Pa。假设实验中其他参与参考风速计算的测量值不变，由数字微压计测量误差可能带来的风速不确定度计算结果如图 4 所示。

一般叶轮式风速表的分辨力为 0.1 m/s，5 m/s 以下的风速点对大允许误差为 ±0.5 m/s。由图 4 可以看出，0.05 级的数字微压计在 8 m/s 以下的风速点引起的风速不确定

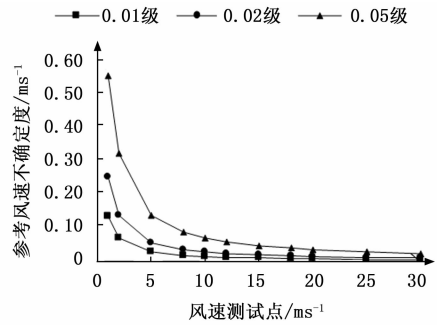


图 4 数字微压计测量误差引起的参考风速不确定度

度均超过了风速表分辨力，1 m/s 风速点引起的参考风速不确定度已超过了风速表的最大允许误差，而 0.02 级和 0.01 级的数字微压计除了 1 m/s 风速点引起的参考风速不确定度超过了风速表的分辨力外，其他测试点均远小于或接近风速表分辨力。因此，0.05 级的数字微压计无法满足叶轮式风速表测试需求，尤其是在低风速情况，0.01 级数字微压计除在 1 m/s 风速点相较于 0.02 级数字微压计存在较明显的精度优势外，其余测试点两者差距不大。本着科学合理与经济适用的原则，本方法将数字微压计的最大允许误差定为 ±0.5 Pa，即 0.02 级 (针对 2 500 Pa 的测量范围上限)。

2.3.3 低速风洞技术指标

本方法将风洞风速控制在 0.2~30 m/s，满足叶轮式风速表 30 m/s 测量范围上限的需要。均匀性与稳定性按照《QX/T 84-2007 气象低速风洞性能测试规范》<sup>[17]</sup> 相关规定。阻塞比是表征被测试风速表迎风面积对测量结果影响大小的参数，主要参照《JJG 431-2014 轻便三杯风向风速表检定规程》<sup>[18]</sup>、《GB/T 33691-2017 杯式测风仪测试方法》<sup>[19]</sup> 中对阻塞比的要求，将阻塞比规定为不大于 0.05。当阻塞比大于 0.05 时，需要考虑被测试风速表对参考风速的影响，需要对参考风速进行修正<sup>[20]</sup>，而目前对修正方法没有较为权威的参考。

2.3.4 风洞流场温、湿、压测量仪器技术指标

风洞流场温度、湿度、气压测量仪器测量误差引起的不确定度，造成空气密度测量的不确定度，最终引起参考风速测量的不确定度。根据表 2 的实验数据，结合参考风速计算公式，推算 温度、湿度、气压测量仪器各自的测量误差引起的参考风速不确定度以及三者综合考虑引起的参考风速不确定度，结果如图 5 所示。可以看出，综合考虑温、湿、压测量仪器测量误差带来的参考风速不确定度时，20 m/s 以下点对应的风速偏差均不超过 0.03 m/s，30 m/s 点对应的风速偏差均不超过 0.05 m/s，相对于各风速点对应的风速表最大允许误差可以忽略不计，因此本方法中所定用于测量风洞流场温度、湿度、气压仪器的指标合理。

3 测试过程

3.1 测试前的准备

测试前需要对被测试风速表进行相应的检查，对于不

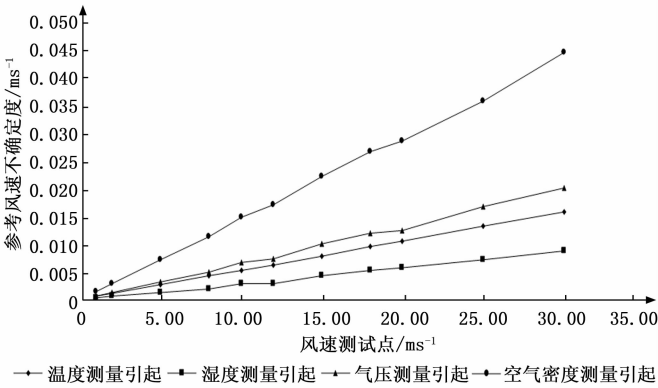


图 5 空气密度测量引起的参考风速测量不确定度

能通过检查的风速表, 即难以保证后续测试结果可靠性的, 基本没有进行后续测试的必要。通过检查, 需要进行标准器和配套设备的安装和被测试风速表的安装。

进行示值误差测试前需要先进行启动风速的测试, 叶轮风速表的启动风速应当为当风速表叶轮开始转动, 并能显示不为零的风速值时的风洞试验段的参考风速, 具体测试方法在本文中不详细展开。

### 3.2 风速示值误差测试

为了保证风速表在整个测量范围内性能的可靠性, 应均匀选择不少于 7 个测试点, 原则上应包含风速表测量范围的上限点。考虑到多数叶轮式风速表的启动风速通常接近 1 m/s, 此风速点不再作为测试点, 测量范围上限为 20 m/s 的风速表测试点选择成 2 m/s、5 m/s、8 m/s、10 m/s、12 m/s、15 m/s、20 m/s 的组合, 测量范围上限为 30 m/s 的风速表测试点选择 2 m/s、5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s、30 m/s 的组合, 也可根据需求适当改变或者增加测试点。

记录数字微压计的初始示值, 按照风速从小到大的顺序, 依次调节风洞风速到各指定测试点, 待风速稳定 1 min 后, 依次记录数字微压计示值、风洞试验段内空气温度、湿度及气压值和风速表示值为一组测试数据, 每个测试点记录 6 组。根据参考风速计算公式算出各测试点的参考风速值, 并与叶轮式风速表示值比较得出各测试点的测量误差, 以各测试点 6 组示值误差的算术平均值作为叶轮式风速表示值误差的最终测量结果。

### 3.3 示值误差测试实例

根据本文的测试方法, 选用一套 AVM-01 风速表作为实验样本, 在测量范围内选择 9 个风速测试点进行风速示值误差的测试, 测试结果表 3 所示。

## 4 不确定度评定及符合性判定

利用 GUM 法对 3.4 节测试实例中的风速表示值误差测量结果进行不确定度评定, 并分析各个不确定度分量对合成标准不确定的贡献大小, 对测试方法和测试用仪器设备指标进行合理性验证。

表 3 测试实例数据

测试点/ m·s <sup>-1</sup>	微压计示值/ Pa	温度/ °C	湿度/ /% RH	气压/ hPa	空气密度/ kg·m <sup>-3</sup>	参考风速/ m·s <sup>-1</sup>	被检表示值/ m·s <sup>-1</sup>	示值误差/ m·s <sup>-1</sup>	最大允许误差/ m·s <sup>-1</sup>
2	2.06	22.3	43.5	896.2	1.052 0	1.98	1.83	-0.15	±0.50
5	13.10	22.6	43.3	896.2	1.050 9	4.99	4.73	-0.26	±0.50
8	33.50	23.1	43.0	896.2	1.049 0	7.99	7.53	-0.46	±0.80
10	52.43	23.6	42.6	896.1	1.047 0	10.01	9.43	-0.58	±1.00
12	75.55	24.4	41.9	896.1	1.044 0	12.03	11.13	-0.90	±1.20
15	117.53	25.1	41.5	896.0	1.041 3	15.02	14.00	-1.02	±1.50
20	207.70	25.9	41.2	896.1	1.038 3	20.00	19.17	-0.83	±2.00
25	322.99	26.8	39.9	896.0	1.035 0	24.98	23.73	-1.25	±2.50
30	463.02	28.1	39.6	896.0	1.030 1	29.98	28.37	-1.61	±3.00

### 4.1 测量模型及不确定度来源

叶轮式风速表示值误差的测量模型在 2.1 中已进行阐述。由于标准风速和被测风速为独立测量得到, 两者不相关, 即相关系数为零, 根据测量模型可知两者不确定度合成时的灵敏系数绝对值均为 1, 由不确定度传播率<sup>[21]</sup>, 得到风速表示值误差测量结果的不确定度如式 (5) 所示, 由于测量模型中未体现影响量对测量结果不确定度的影响, 将测量中影响量的不确定度分量设为  $u(v_0)$ , 在标准不确定度合成时需要考虑  $u(v_0)$  的影响。

$$u(\Delta v) = \sqrt{u^2(v') + u^2(v) + u^2(v_0)} \quad (5)$$

式中,  $u(\Delta v)$  为示风速示值误差测量结果的标准不确定度,  $u(v')$ 、 $u(v)$ 、 $u(v_0)$  分别为被测风速、参考风速和影响量的标准不确定度, 单位均为 m/s。

被测风速和参考风速引入的不确定度可根据测量模型确定, 影响量中可引起测量结果不确定度的因素有多种, 包括风洞流场的不均匀性、不稳定性、皮托静压管探头与气流夹角、阻塞效应等, 但本着避免“重复计算”不确定度的原则<sup>[22]</sup>, 因其他影响因素均在测量模型中得到了体现, 所以影响量中仅考虑风洞流场不均匀性和皮托静压管探头与气流夹角对测量结果造成的影响。测量不确定度来源分析见表 4 所示。

表 4 不确定度来源汇总

不确定度分量	评定方法	分布类型	包含因子
风速表示值重复性	A 类	—	—
风速表分辨力	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$
皮托管校准系数	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$
差压测量误差	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$
风场温度测量误差	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$
风场气压测量误差	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$
风场湿度测量误差	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$
风洞流场不均匀性	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$
皮托静压管探头与气流夹角	B 类	均匀分布	$\sqrt{3}$

下面以 10 m/s 测试点为例进行不确定度分析, 其余测

试点的不确定度评定使用同样的方法进行。

### 4.2 标准不确定度计算

#### 4.2.1 被测风速表引入的标准不确定度 $u(v')$

1) 风速表示值重复性引入的不确定度  $u_1(v')$ : 用 A 类标准不确定度评定, 10 m/s 测试点的风速表示值测量序列: [9.5 m/s, 9.4 m/s, 9.5 m/s, 9.5 m/s, 9.5 m/s, 9.5 m/s], 根据贝塞尔公式标准偏差约为 0.04 m/s, 测试结果取 6 次测量序列平均值, 则  $u_1(v') = 0.04/\sqrt{6} \approx 0.02$  m/s。

2) 风速表分辨力引入的不确定度  $u_2(v')$ : 被测风速表分辨力为 0.1 m/s, 区间半宽为 0.05 m/s, 按均匀分布, 其标准不确定度  $u_2(v') = 0.05/\sqrt{3} \approx 0.03$  m/s。

被测风速表引入的标准不确定度应综合考虑示值重复性和分辨力两者, 并取其中较大者。综合上述两种因素, 由被测风速表引入的标准不确定度:

$$u(v') = 0.03 \text{ m/s}$$

#### 4.2.2 参考风速测量引入的标准不确定度 $u(v)$

参考风速并非直接测得, 而是由多个物理量联合测得, 从参考风速的测量模型即 (2) 式可以看出, 其符合  $Y = A(X_1^p X_2^q \dots X_N^r)$  的情形, 宜采用相对形式进行合成<sup>[23]</sup>。合成公式如式 (6) 所示:

$$\frac{u(v)}{v} = \sqrt{\left[\frac{u(K)}{K}\right]^2 + \left[\frac{u(\Delta P)}{2\Delta P}\right]^2 + \left[-\frac{u(\rho)}{2\rho}\right]^2} \quad (6)$$

式中,  $u(K)$  为由皮托管校准系数引入的标准不确定度,  $u(\Delta P)$  为差压测量误差引入的标准不确定度,  $u(\rho)$  为空气密度测量引入的标准不确定度。

##### 1) 由皮托静压管校准系数引入的标准不确定度 $u(K)$

由皮托管检定规程, 皮托管范围应在 0.997~1.003 之间, 区间半宽为 0.003, 按均匀分布, 由皮托管校准系数引入的标准不确定度分量:

$$u(K) = 0.003/\sqrt{3} \approx 0.17\%$$

本次测试实例中所使用的皮托管校准系数为 1.000, 因此其相对不确定度为:

$$u(K)/K = 0.17\%$$

##### 2) 差压测量引入的标准不确定度 $u(\Delta P)$

用于测量皮托管差压的微压计最大允许误差为  $\pm 0.5$  Pa, 区间半宽为 0.5 Pa, 按均匀分布, 则差压测量引入的标准不确定度:

$$u(\Delta P) = 0.5/\sqrt{3} \text{ Pa} \approx 0.289 \text{ Pa}$$

由表 3 测试实例数据可知, 10 m/s 测试点测得的差压为 52.43 Pa, 则该风速点差压测量的相对不确定度为:

$$u(\Delta P)/\Delta P = 0.289/52.43 \approx 0.55\%$$

##### 3) 空气密度测量引入的标准不确定度

由式 (4), 空气密度  $\rho$  由风洞流场大气压力  $P$  和温度  $T$  计算得到, 其模型同样符合  $Y = A(X_1^p X_2^q \dots X_N^r)$  的情形, 采用相对形式合成。合成公式如式 (7):

$$\frac{u(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left[-\frac{u(T)}{T}\right]^2 + \left[\frac{u(P)}{P}\right]^2} \quad (7)$$

式中,  $u(T)$  为风洞流场空气温度测量引入的标准不确定度,  $u(P)$  为风洞流场大气压力测量引入的标准不确定度。

风洞流场空气温度测量引入的标准不确定度: 用于风洞流场温度测量的温度计最大允许误差为  $\pm 0.5$  °C, 即  $\pm 0.5$  K, 区间半宽为 0.5 K, 按均匀分布, 则由空气温度测量引入的标准不确定度:

$$u(T) = 0.5/\sqrt{3} \text{ K} \approx 0.289 \text{ K}$$

由表 3 测试实例数据可知, 10 m/s 测试点测得的空气温度为 23.6 °C, 即 296.75 K, 则该点空气温度测量的相对不确定度为:

$$u(T)/T = 0.289/296.75 \approx 0.1\%$$

风洞流场大气压力测量引入的标准不确定度: 用于大气压测量的气压计最大允许误差为  $\pm 2$  hPa, 区间半宽为 2 hPa, 按均匀分布, 则由大气压测量引入的标准不确定度:

$$u(P) = 200/\sqrt{3} \text{ Pa} \approx 116 \text{ Pa}$$

由表 3 测试实例数据可知, 10 m/s 测试点测得的大气压力为 896.1 hPa, 则该点大气压力测量的相对不确定度为:

$$u(P)/P = 116/89610 \approx 0.13\%$$

根据式 (7), 空气密度测量引入的相对标准不确定度:

$$u(\rho)/\rho = \sqrt{0.10^2 + 0.13^2} \% \approx 0.16\%$$

根据式 (6), 可得出由参考风速测量所引入的相对标准不确定度:

$$u(v)/v = \sqrt{0.17^2 + 0.25 \times 0.55^2 + 0.25 \times 0.16^2} \% \approx 0.34\%$$

10 m/s 风速点的实测参考风速为 10.01 m/s, 则该风速点由参考风速测量所引入的标准不确定度:

$$u(v) = 0.34\% \times 10.01 \text{ m/s} \approx 0.03 \text{ m/s}$$

#### 4.2.3 影响量引入的标准不确定度 $u(v_o)$

1) 由皮托静压管探头相对气流来向偏斜引入的标准不确定度  $u(v_{o1})$ : 根据 ISO 3966<sup>[24]</sup> 可知, 皮托管安装时偏角在  $\pm 3^\circ$  之内, 造成的误差不超过 0.5%, 对于 10 m/s 的风速点, 误差在  $\pm 0.05$  m/s 之内, 区间半宽为 0.05 m/s, 按均匀分布, 其标准不确定度:

$$u(v_{o1}) = 0.05/\sqrt{3} \text{ m/s} \approx 0.03 \text{ m/s}$$

2) 由于风洞实验段流场的不均匀而引入的标准不确定度  $u(v_{o2})$ : 风洞实验段气流流速的不均匀性根据要求不超过 1%, 对于 10 m/s 的风速, 引起的误差在  $\pm 0.1$  m/s 范围内, 区间半宽为 0.1 m/s, 按均匀分布, 其标准不确定度:

$$u(v_{o2}) = 0.1/\sqrt{3} \text{ m/s} \approx 0.06 \text{ m/s}$$

以上两者不相关, 则由影响量引入的标准不确定度:

$$u(v_o) = \sqrt{0.03^2 + 0.06^2} \text{ m/s} \approx 0.07 \text{ m/s}$$

### 4.3 标准不确定度的合成与扩展

根据式 (5), 得到 10 m/s 测试点风速示值误差的合成标准不确定度:

$$u(\Delta v) = \sqrt{0.03^2 + 0.03^2 + 0.07^2} \text{ m/s} \approx 0.08 \text{ m/s}$$

取覆盖因子  $k = 2$ , 则扩展不确定度:  $U = u(\Delta v) \times 2$

$= 0.08 \times 2 = 0.16 \text{ m/s}$ 。

其他风速测试点参考上述  $10 \text{ m/s}$  风速点示例评估测量结果的不确定度,结果如表5所示。

表5 扩展不确定度评定结果

各测试点的扩展不确定度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$								
2	5	8	10	12	15	20	25	30
0.28	0.14	0.14	0.16	0.18	0.21	0.28	0.34	0.41

#### 4.4 各分量对合成标准不确定度的贡献分析

将4.3标准不确定度计算过程中各分量按其最终合成标准不确定度的贡献量进行统计,得到表6。

表6 各分量对合成标准不确定度的贡献  $\text{m/s}$

测试点	风速表	皮托管系数	差压测量	空气密度测量	影响量	合成
2	0.03	0.00	0.13	0.00	0.01	0.14
5	0.03	0.01	0.06	0.00	0.03	0.07
8	0.03	0.01	0.03	0.01	0.05	0.07
10	0.03	0.02	0.03	0.01	0.07	0.08
12	0.03	0.02	0.02	0.01	0.08	0.09
15	0.03	0.03	0.02	0.01	0.10	0.11
20	0.03	0.03	0.01	0.02	0.13	0.14
25	0.03	0.04	0.01	0.02	0.16	0.17
30	0.03	0.05	0.01	0.02	0.19	0.21

可以看出,低风速时( $5 \text{ m/s}$ 及以下),风洞流场的差压测量为不确定度的最主要来源, $5 \text{ m/s}$ 以上风速点,影响量(流场的不均匀性和皮托管偏角)成为主要的不确定度来源,皮托管本身引入的不确定度和空气密度测量引入的不确定度均随风速升高而变大,但占合成比例较低。

#### 4.5 示值误差符合性判定

根据《QX/T 23-2004 旋转式测风传感器》对叶轮式风速表最大允许误差的要求,本测试实例各测试点的示值误差均在最大允许误差范围内,除了 $2 \text{ m/s}$ 测试点外,其他各个测试点的扩展不确定度 $U$ 均不超过最大允许误差绝对值MPEV的 $1/3$ ,在 $2 \text{ m/s}$ 风速点,风速表的示值误差小于MPEV- $U$ ,根据示值误差符合性判定的原则<sup>[25]</sup>,本次测试实例的风速表在各测试点示值误差均满足要求。

### 5 结束语

根据不确定度评定及示值误差的符合性判定结果,验证了本方法所规定的各仪器设备指标的合理性,通过对不确定度评定过程中各分量的统计分析,得出如下结论: $5 \text{ m/s}$ 及以下风速点,若要进一步减小测量不确定度,提高微压计的精度是最有效的办法; $5 \text{ m/s}$ 以上风速点,若要进一步减小测量不确定度,需要减小影响量对测量结果的影响,包括减小风洞流场的不均匀性,减小皮托管与气流夹角。

#### 参考文献:

[1] 中国气象局. 旋转式测风传感器: QX/T 23-2004 [S]. 北京:

中国标准出版社, 2005.

- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 数字风向风速测量仪: JB/T 11258-2011 [S]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [3] 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.
- [4] 马柏慧, 王洪玮. 低风速条件下风速测试技术研究 [J]. 装备制造技术, 2021 (10): 75-78.
- [5] 左丽. 一种管道风速在线检测系统的原理及试验研究 [J]. 中国设备工程, 2021 (7): 158-159.
- [6] 张正, 杨敏, 赵泉钦, 等. 轻便三杯风速表检定时常见问题分析 [J]. 中国计量, 2021 (6): 131, 135.
- [7] 雷晓妹, 吴丽娜, 韩玉婷, 等. 基于GUM的叶轮数字风速仪不确定度分析与评定 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39 (3): 30-34.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 李文博, 颜平江, 武灿灿. 一种叶轮式风速仪的校准方法 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39 (8): 129-133.
- [12] 陈嘉琛. 叶轮式风速仪的标定及其修正标准的数值研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
- [13] 袁峰, 沈彦燕, 赵士伟. 空气流速一等标准装置测量不确定度的分析与评定 [J]. 气象水文海洋仪器, 2007 (1): 34-39.
- [14] 魏明明. 皮托管测量风速时GUM评定不确定度的偏差修正 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40 (6): 146-154.
- [15] 魏明明. 风速测量结果中关于水汽修正项的影响分析 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33 (6): 103-111.
- [16] 中国标准化技术委员会. 数字压力计检定规程: JJG 875-2019 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2020.
- [17] 中国气象局. 气象低速风洞性能测试规范: QX/T 84-2007 [S]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [18] 全国压力计量技术委员会. 轻便三杯风向风速表检定规程: JJG 431-2014 [S]. 北京: 中国质检出版, 2015.
- [19] 中国气象局. 杯式测风仪测试方法: GB/T 33691-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [20] 吴宇, 吴丹, 李学良, 等. 风速表在环形风洞检测的阻塞修正研究 [J]. 国外电子测量技术, 2020, 39 (9): 7-10.
- [21] 中国计量测试学会. 一级注册计量师基础知识及专业实务 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [22] 全国认证认可标准化技术委员会. 测量不确定度评定和表示: GB/T 27418-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [23] 全国法制计量管理计量技术委员会. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059.1-2012 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2013.
- [24] ISO. Measurement of fluid flow in closed conduits: ISO/FDIS 3966-2020 [S]. IX-ISO, 2020.
- [25] 全国法制计量技术委员会. 测量仪器特性评定: JJF1094-2002 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2002.