

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF××××——××××

手持式皮托管风速仪校准规范

**Calibration Specification for Hand-held Pitot Tube Anemometers**

(征求意见稿)

20XX-XX-XX发布 20XX-XX-XX实施

国家市场监督管理总局 发布

手持式皮托管风速仪

JJF ××××-××××

校准规范

Calibration Specification for

Hand-held Pitot Tube Anemometers

本规程经国家质量监督检疫总局于20XX年X月XX日批准，并自20XX年XX月XX日起施行。

归 口 单 位：全国气象专用计量器具计量技术委员会气象压力分技术委员会

主要起草单位：江西省气象探测中心

中国气象局气象探测中心

参加起草单位：江西省检验检测认证总院计量科学研究院

江西省气象探测中心

中国气象局气象探测中心

本规范委托全国气象专用计量器具计量技术委员会气象压力分技术委员会负责解释

本规程主要起草人：

魏明明（江西省气象探测中心）

刘 昕（中国气象局气象探测中心）

周桃成（江西省气象探测中心）

李常春（江西省气象探测中心）

参加起草人：

姚 舜（江西省检验检测认证总院计量科学研究院）

郑德彬（江西省气象探测中心）

白赢策（中国气象局气象探测中心）

目 录

引 言 （I）

1 范围 （1）

2 引用文件 （1）

3 术语和计量单位 （1）

3.1 术语 （1）

3.2 计量单位 （2）

4 概述 （2）

5 计量特性 （3）

6 校准条件 （4）

6.1环境条件 （4）

6.2校准用介质 （4）

6.3测量标准及配套设备 （4）

6.3.1 标准器 （4）

6.3.2 配套设备 （4）

7 校准项目和校准方法 （4）

7.1校准项目 （4）

7.2校准方法 （4）

7.3 数据处理 （5）

8 校准结果表达 （6）

9 复校时间间隔 （6）

附录A 标准风速值计算方法 （7）

附录B 校准原始记录格式 （8）

附录C 校准证书参考格式 （9）

C.1.校准证书封面参考格式 （9）

C.2.校准证书内页参考格式 （10）

C.3.校准证书结果页参考格式 （11）

附录D 测量结果不确定度评定示例 （12）

附录E 蒙特卡洛法评定测量结果不确定度示例 （19）

# 引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001—2011《通用计量术语及定义》和JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

手持式皮托管风速仪校准规范

# 1 范围

本规范适用于测量范围为（2~40）m/s的手持式皮托管风速仪的校准。

# 2 引用文件

本规范引用下列文件：

GB/T 44448-2024 低速风洞性能测试规范

JJG 518-2023 皮托管

JJF 1939-2021 热式风速仪校准规范

JJF 1935-2021 自动气象站杯式风速传感器校准规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

# 3 术语和计量单位

# 3.1 术语

3.1.1 皮托管风速仪 pitot tube anemometer

由皮托管和压差元件构成，能直接显示风速量值的测风仪器。

3.1.2 流速均匀性 uniformity of velocity

风洞试验段内同一横截面上气流速度分布的均匀程度。

[GB/T 44448-2024，3.3]

3.1.3 流速稳定性 stability of velocity

风洞试验段内气流速度随时间脉动的程度。

[GB/T 44448-2024，3.4]

3.1.4 压差differential pressure

总压孔和静压孔之间的压力差。

[JJG 518-2023，3.1.3]

3.1.5 压差元件differential pressure component

用于测量压差的元件。

# 3.2 计量单位

计量单位为米每秒（m/s）。

# 4 概述

手持式皮托管风速仪（以下简称风速仪）是利用空气的全压与静压差来测定风速，并以数字形式输出（显示）风速量值的测量仪器。由皮托静压管（简称皮托管）、压差元件、数据处理单元、输出（显示）单元组成。其工作原理如图1所示，皮托管总压孔迎着气流的方向，感应气流的全压力，静压孔感应静压力，皮托管的总压输出端口和静压输出端口分别连至压差元件的总压和静压输入端口上，根据压差元件测得的压差，经数据处理单元处理后，由输出（显示）单元输出风速值。



图1 风速仪工作原理

根据风速仪的皮托管类型的不同，一般分为L型手持式皮托管风速仪（图2所示）和S型手持式皮托管风速仪（图3所示），其中压差元件、数据处理单元均集成在风速仪的主机部分。

****

图2 手持式皮托管风速仪（L型）结构示意图

1. L型皮托管 2-测头 3-总压孔 4-静压孔 5-定位杆 6-压力表接头 7-总压输出端口 8-静压输出端口 9-软管 10-总压输入端口 11- 静压输入端口 12-风速显示屏 13-开关及控制键 14-主机 15-气流方向

****

图3 手持式皮托管风速仪（S型）结构示意图

1-S型皮托管 2-测头 3-总压孔 4-静压孔 5-总压输出端口 6-静压输出端口 7-软管 8-总压输入端口 9- 静压输入端口 10-风速显示屏 11-开关及控制键 12-主机 13-气流方向

# 5 计量特性

示值误差

# 6 校准条件

# 6.1环境条件

环境温度：（20±5） ℃；

环境湿度：≤85％RH；

大气压力：（500~1060）hPa。

# 6.2测量标准及配套设备

测量标准及配套设备技术指标见表1。

表1 配套设备技术要求

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 分类 | 名称 | 技术性能指标 | 用途 |
| 标准器 | 标准皮托管 | 标准皮托管校准系数为0.997~1.003 | 作为标准器测量风洞试验段的风速。 |
| 微差压计 | 测量上限不低于1200Pa，最大允许误差为土0.5Pa。 |
| 配套设备 | 风洞 | 调速范围为（2~40）m/s；  流速稳定性（1 min）不大于0.5%；  流速均匀性不大于1%。 | 提供测量风速场。 |
| 温度计 | 最大允许误差为±0.5℃。 | 用于风洞流场的温度测量。 |
| 湿度计 | 最大允许误差为±8%RH。 | 用于风洞流场湿度测量。 |
| 气压计 | 准确度等级为0.2级及以上。 | 测量大气压力。 |

# 7 校准项目和校准方法

# 7.1校准项目

示值误差

# 7.2校准方法

7.2.1 校准前检查

a）外观检查

风速仪的外观结构应完好，文字符号应清晰可见，不应有明显的凹陷、外伤、裂缝和变形等，金属件不应有锈蚀及其他机械性损伤。皮托管的感应孔周围不应有毛刺、缺口、裂痕、凹凸不平等现象。皮托管的总压孔与总压接头、静压孔与静压接头均应畅通，不得堵塞；皮托管的总压管与总压接头、静压管与静压接头之间各焊缝处应气密，不得漏气；皮托管与压差元件端口之间的连接应气密，不得漏气。

b）显示检查

输出（显示）单元所显示的数字应清晰完整，当处于静风状态时，其显示值应为零，当风速状态稳定时，其显示值不应有不规则跳动。

c）功能检查

风速仪的开关、按钮等功能键应正常工作，不应有影响计量性能的缺陷。

7.2.2 安装

a）标准器安装

将标准皮托管稳固安装于风洞试验段，其测头轴线与风洞试验段轴线平行，并对准风的来向，且保持总压孔距洞壁的距离不小于100mm，并按要求连接标准皮托管与微差压计。温度计、湿度计感应部分和气压计的气路连接管安装在与风洞试验段相通的流场区域。

b）风速仪安装

将被测风速仪的皮托管牢固安装在风洞试验段，其总压孔与标准皮托管的总压孔应处于风洞工作段内同一截面上，并以风洞轴线中心为原点对称安装，间距不小于120mm，且距洞壁不小于100mm。

7.2.3 示值误差

a）校准点的选择

校准点应覆盖被测风速仪测量范围并兼顾均匀性，至少在风速仪的测量范围内均匀选取6~7个校准点，并包含测量范围的上、下限点，也可以根据用户要求选取校准点，各校准点应控制在该校准点±5%范围内。

b）校准方法

示值误差的校准采用比较法。

按风速校准点顺序调整风速，稳定1min后，同时读取微差压计示值、被测风速仪示值，试验段内温度、湿度、气压值，连续读取三次读数的算术平均值作为该校准点的测量数据。

c）数据处理

示值误差计算见式如公式1所示。

 （1）

——示值误差，m/s；

——风速仪示值，m/s；

——标准风速值，m/s；

标准风速值根据校准时所得的空气温度、湿度、气压和微差压计示值进行计算（计算方法见附录A）。

# 8 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映（校准证书内页格式参考附录C）。校准证书至少应包括以下信息：

a) 标题“校准证书”；

b) 实验室名称和地址；

c) 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；

d) 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；

e) 客户的名称和地址；

f) 被校对象的描述和明确标识；

g) 进行校准的日期，如果与校准结果的有效性和应用有关时，应说明被校对象的接收日期；

h) 如果与校准结果的有效性应用有关时，应对被校样品的抽样程序进行说明；

i) 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号；

j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明；

k) 校准环境的描述；

l) 校准结果及其测量不确定度的说明；

m) 对校准规范的偏离的说明；

n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识；

o) 校准结果仅对被校对象有效性的声明；

p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

# 9 复校时间间隔

建议复校时间间隔不超过1年。由于复校时间间隔的长短由仪器使用情况、使用环境等诸多因素决定，当发现风速测量值出现异常时建议提前送校。

# 附录A

# 标准风速值计算方法

A.1 用风洞试验段内测得的空气温度按式（A.1) 计算出饱和水汽压:

 （A.1)

式中：*ew*——*T*温度下的饱和水汽压，Pa；

*T*——试验段内空气温度，为对应的热力学温度（开氏温度），K；

*k*=1Pa；

*A、B、C、D*均为常数，其值如下：

*A*=1.2378847×10-5K-2；

*B*=-1.9121316×10-2K-1；

*C*=33.93711047；

*D*=-6.3431645×103K；

*e*=2.71828。

A.2 用风洞试验段内测得的温度、湿度、气压按公式（A.2）计算出空气密度。

 （A.2)

式中：——校准时试验段内空气密度，kg/m3；

*T*——试验段内空气温度，为对应的热力学温度（开氏温度），K；

*P*0——试验段内气压，Pa；

*H*——试验段内空气相对湿度，用小数表示；

*ew*——*T*温度下的饱和水汽压，Pa。

A.3 将A.2计算得到的空气密度值和微差压计示值代入公式（A.3）计算出标准风速值。

 （A.3)

式中：*v*——标准器测得的风速值，m/s；

*K*——皮托管校准系数；

——校准时试验段内空气密度，kg/m3；

*p*——微差压计压差测得值，Pa。

# 附录B

# 校准原始记录格式

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 送检单位 | | |  | | | | | | 记录编号 | | | |  | | | | |
| 仪器名称 | | |  | | | | | | 型号/编号 | | | |  | | | | |
| 仪器编号 | | |  | | | | | | 生产厂家 | | | |  | | | | |
| 允许误差 | | |  | | | | | | 校准地点 | | | |  | | | | |
| 校准依据 | | |  | | | | | | 校准证书编号 | | | |  | | | | |
| 计量（基）标准装置 | | | 测量范围： 不确定度/准确度等级/最大允许误差：  证书编号： 证书有效期： | | | | | | | | | | | | | | |
| 标准器 | | | 标准器名称： 型号： 出厂编号：  准确度等级/最大允许误差： 检定证书编号： | | | | | | | | | | | | | | |
| 环境参数 | | | 温度:( )℃， 湿度：( )%RH， 气压：( )hPa | | | | | | | | | | | | | | |
| 一、通用技术要求检查 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 外观 | | | 🞎正常 🞎不正常 | | | | | | | | | | | | | | |
| 显示 | | | 🞎正常 🞎不正常 | | | | | | | | | | | | | | |
| 功能 | | | 🞎正常 🞎不正常 | | | | | | | | | | | | | | |
| 二、测量误差校准 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 校准点 | 微差压计读数/Pa | | | | | 风洞试验段内 | | | | 标准风速值m/s | 风速仪示值m/s | | | | | 校准结果 | |
| 1 | 2 | | 3 | 平均 | 温度  ℃ | 湿度  %RH | 气压hPa | | 1 | 2 | | 3 | 平均 | 示值误差 | 扩展不确定度 |
|  |  |  | |  |  |  |  |  | |  |  |  | |  |  |  |  |
|  |  |  | |  |  |  |  |  | |  |  |  | |  |  |  |  |
|  |  |  | |  |  |  |  |  | |  |  |  | |  |  |  |  |
|  |  |  | |  |  |  |  |  | |  |  |  | |  |  |  |  |
|  |  |  | |  |  |  |  |  | |  |  |  | |  |  |  |  |
|  |  |  | |  |  |  |  |  | |  |  |  | |  |  |  |  |
|  |  |  | |  |  |  |  |  | |  |  |  | |  |  |  |  |
|  |  |  | |  |  |  |  |  | |  |  |  | |  |  |  |  |
|  |  |  | |  |  |  |  |  | |  |  |  | |  |  |  |  |
| 备注： | | | | | | | | | | | | | | | | | |

记录人：\_\_\_\_\_\_校准日期:\_\_\_\_\_\_\_\_\_ 核验人:\_\_\_\_\_\_\_\_\_核验日期:\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

## 附录C

## 校准证书参考格式

## C.1.校准证书封面参考格式

**（机构名称）**

Name for Institute of Verification

**校 准 证 书**

Verification Certificate

证书编号： 字第 号

**Certificate No.**

计量器具名称

**Name of Instrument\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

型号规格

**Model/Type\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**制造厂**

**Manufacture\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**器具编号**

**No. of Instrument\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**送检单位**

**Applicant\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**校准依据**

**Calibration based on\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**

**批准人**

**Approved by**

**(专用章) 核验人**

**Stamp Inspected by**

**校准人**

**Verified by**

**校准日期 年 月 日**

**Date of Verification Y M D**

地址（ADD）: 邮编（Post Code）: 电话（Tel）: 传真（Fax）:

## C.2.校准证书内页参考格式

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 证书编号：××××××××××   |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | | 校准机构授权说明： | | | | | | 校准地点： | | | | | | 校准环境条件 | 温度 | ℃ | 气压 |  | | 湿度 | %RH |  |  | | 校准使用的计量（基）标准 | | | | | | 名称 | 测量范围 | 不确定度/准确度  等级/最大允许误差 | 计量（基）标准  证书编号 | 有效期至 | |  |  |  |  |  | | 校准使用的标准器 | | | | | | 名称 | 测量范围 | 不确定度/准确度  等级/最大允许误差 | 计量（基）标准  证书编号 | 有效期至 | |  |  |  |  |  | | 校准是标准器与被校风速仪安装位置描述 | | | | | |  | | | | |   第2页，共×页 |

## C.3.校准证书结果页参考格式

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 证书编号：××××××××××   |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 校准结果  1、外观：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  2、显示：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  3、功能：\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_  4、测量误差   |  |  |  |  |  |  | | --- | --- | --- | --- | --- | --- | | 序号 | 校准点  m/s | 标准风速值  m/s | 风速仪示值  m/s | 示值误差  m/s | 扩展不确定度  m/s | |  |  |  |  |  |  | |  |  |  |  |  |  | |  |  |  |  |  |  | |  |  |  |  |  |  | |  |  |  |  |  |  |   5、其他说明  （以下空白） |   第×页，共×页 |

# 附录D

# 测量结果不确定度评定示例

D.1 概述

根据本规范的校准方法，以10m/s、20m/s、30m/s风速校准点为例，对手持式皮托管风速仪（以下简称风速仪）进行校准，并依据JJF1059.1-2012测量不确定度评定与表示，对其示值误差的不确定度进行评定。

D.1.1 测量标准及配套设备

所用标准器及配套设备技术指标如表D.1所示。

表D.1 标准器及配套设备

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 分类 | 名称 | 测量范围 | 技术指标 |
| 标准器 | 皮托管 | （2~40）m/s | *K*=1.003 *Urel*=0.1%（*k*=2） |
| 微差压计 | （0~2500）Pa | MPE：±0.5Pa |
| 配套设备 | 风洞 | （1~70）m/s | 稳定性0.5%；均匀性1% |
| 温度计 | （0~80）℃ | *U*=0.2℃（*k*=2） |
| 湿度计 | （5~95）%RH | *U*=2%RH（*k*=2） |
| 气压计 | （500~1100）hPa | *U*=0.06hPa（*k*=2） |

D.1.2 被校风速仪

送校单位：江西省气象探测中心；

器具名称：手持式皮托管风速仪；

型号/编号：MP120 / 230901678；

制造单位：法国凯茂（KIMO）仪器公司；

测量范围：（2~40）m/s；

分辨力：0.1m/s。

D.1.3 校准数据

实验环境：温度为20℃，气压为1010hPa，湿度为55%RH，校准有关数据参见表D.2

表D.2 校准数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 校准点/（m/s） | 微差压计示值/（Pa） | | | | 标准风速值/（m/s） | 风速仪示值/（m/s） | | | | 示值误差  /（m/s） |
| 1 | 2 | 3 | 平均值 | 1 | 2 | 3 | 平均值 |
| 10 | 60.4 | 60.5 | 60.6 | 60.5 | 10.10 | 9.9 | 10.0 | 10.1 | 10.0 | -0.10 |
| 20 | 241.8 | 242.0 | 242.0 | 241.9 | 20.19 | 20.0 | 20.1 | 19.9 | 20.0 | -0.19 |
| 30 | 544.2 | 544.4 | 544.3 | 544.3 | 30.28 | 30.1 | 30.0 | 29.9 | 30.0 | -0.28 |

D.2 测量模型及不确定度来源

D.2.1 测量模型

测量模型如公式（D.1）所示。

 （D.1）

式中：

——示值误差，m/s；

——标准值，m/s；

——被测值，m/s；

将标准风速的计算公式代入公式（D.1），同时考虑到风洞稳定性和均匀性对测量结果的影响，则：

 （D.2）

公式（D.2）即为被校风速仪测量结果不确定度评定的测量模型。式中：

——被校风速仪在某一点的示值误差，m/s；

——被校风速仪在该点的示值，m/s；

——微差压计读数，Pa；

*K*——皮托管校准系数；

*T* ——试验段内温度，K；

*H*——试验段内空气相对湿度，用小数表示；

*P*0——试验段内气压，Pa；

*ew* ——*T*温度下的饱和水汽压，Pa；

——风洞稳定性对测量结果的影响，m/s；

——风洞均匀性对测量结果的影响，m/s。

D.2.2 不确定度来源

不确定度的来源主要包括以下内容：

1. 风速仪测量引入的标准不确定度；
2. 皮托管校准系数引入的标准不确定度；
3. 微差压计测量引入的标准不确定度；
4. 温度计引入的标准不确定度；
5. 湿度计引入的标准不确定度；
6. 气压计引入的标准不确定度；
7. 风洞稳定性引入的标准不确定度；
8. 风洞均匀性引入的标准不确定度；

D.3 标准不确定度评定

D.3.1 风速仪测量引入的标准不确定度

（1）测量重复性引入的标准不确定度

根据每个风速点进行的3次重复风速测量值（参见表D.2），用极差法求出实验标准差（*n*=3时，*C*=1.69），风速仪测量值为3次测量结果的平均值，因此测量重复性引入的标准不确定度如表D.3所示。

表D.3 风速仪测量重复性引入的标准不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 校准点/（m/s） | 10 | 20 | 30 |
| 极差/（m/s） | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| 实验标准差/（m/s） | 0.118 | 0.118 | 0.118 |
| 标准不确定度/（m/s） | 0.068 | 0.068 | 0.068 |

（2）风速仪分辨力引入的标准不确定度

风速仪分辨力为0.1m/s，属均匀分布，其引入的标准不确定度：



由于测量重复性引入的标准不确定度大于分辨力引入的标准不确定度，此时重复性中已经包含了分辨力对校准结果的影响，故不再考虑分辨力引入的标准不确定度。因此，风速仪测量引入的标准不确定度：



D.3.2 微差压计测量引入的标准不确定度

（1）微差压计测量误差引入的标准不确定度

微差压计的MPE为±0.5Pa，属均匀分布，其引入的标准不确定度：



（2）微差压计测量重复性引入的标准不确定度

根据每个风速点进行的3次重复微差压计测量值（参见表D.2），与风速仪测量重复性引入的不确定度计算方法类似，用极差法求出测量重复性引入的标准不确定度如表D.4所示。

表D.4 微差压计测量重复性引入的标准不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 校准点/（m/s） | 10 | 20 | 30 |
| 极差/（Pa） | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| 实验标准差/（Pa） | 0.118 | 0.118 | 0.118 |
| 标准不确定度/（Pa） | 0.068 | 0.068 | 0.068 |

（3）微差压计分辨力引入的标准不确定度

微差压计分辨力为0.1Pa，属均匀分布，其引入的标准不确定度：



由于测量重复性引入的标准不确定度大于分辨力引入的标准不确定度，此时重复性中已经包含了分辨力对校准结果的影响，故不再考虑分辨力引入的标准不确定度。因此，微差压计测量引入的标准不确定度：



D.3.3 皮托管校准系数引入的标准不确定度

皮托管校准系数*K*=1.003，其相对扩展不确定度*Urel*=0.1%（*k*=2），其引入的标准不确定度：



D.3.4 温度计引入的标准不确定度

温度计测量值对应的扩展不确定*U*=0.2℃（*k*=2），以开氏温度表示时，*U*=0.2K（*k*=2），其引入的标准不确定度：



D.3.5 湿度计引入的标准不确定度

湿度计测量值对应的扩展不确定*U*=2%RH（*k*=2），用小数表示时，*U*=0.02（*k*=2），其引入的标准不确定度：



D.3.6 气压计引入的标准不确定度

气压计测量值对应的扩展不确定*U*=0.06hPa（*k*=2），其引入的标准不确定度：



D.3.7 风洞稳定性引入的标准不确定度

风洞稳定性为0.5%，属反正弦分布，其引入的标准不确定度：



因此，10m/s、20m/s、30m/s校准点对应的分别为：0.04m/s、0.07m/s、0.11m/s。

D.3.8 风洞均匀性引入的标准不确定度

风洞均匀性为1.0%，属均匀分布，其引入的标准不确定度：



因此，10m/s、20m/s、30m/s校准点对应的分别为：0.06m/s、0.12m/s、0.18m/s。

D.4 合成标准不确定度

各标准不确定度如表D.5所示。

表D.5 各标准标准不确定度信息

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 符号 | 标准不确定度来源 | 灵敏度系数符号 |
| 1 |  | 风速仪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 |  | 皮托管校准系数引入的标准不确定度 |  |
| 4 |  | 温度计引入的标准不确定度 |  |
| 5 |  | 湿度计引入的标准不确定度 |  |
| 6 |  | 气压计引入的标准不确定度 |  |
| 7 |  | 风洞稳定性引入的标准不确定度 |  |
| 8 |  | 风洞均匀性引入的标准不确定度 |  |

将测量模型中输出量对各输入量求偏导得对应的灵敏度系数：

；

；

；

；

 ；

；

。

各灵敏度系数值如表D.6所示。

表D.6 各灵敏度系数值

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 校准点/（m/s） | 10 | 20 | 30 |
|  | 1 | 1 | 1 |
| /（） | -0.08343 | -0.04172 | -0.02782 |
| /（） | -10.06503 | -20.1259 | -30.18956 |
| （） | -0.01722 | -0.03443 | -0.05165 |
| /（） | -0.04440 | -0.08879 | -0.13318 |
| （） | 0.00005 | 0.00010 | 0.00015 |
|  | 1 | 1 | 1 |
|  | 1 | 1 | 1 |

由于各不确定度分量之间彼此不相关，因此合成标准不确定度的计算公式如D.3所示。

 （D.3）

计算结果如表D.7所示。

表D.7 合成标准不确定度

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 校准点/（m/s） | 10 | 20 | 30 |
| （m/s） | 0.0992 | 0.1524 | 0.2149 |

D.5 扩展不确定度*U*

取*k*=2，则扩展不确定度，校准结果（含示值误差及扩展不确定度）如表D.8。

表D.8 校准结果

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 校准点/（m/s） | 10 | 20 | 30 |
| 示值误差/（m/s） | -0.10 | -0.19 | -0.3 |
| *U*（*k*=2）/（m/s） | 0.19 | 0.3 | 0.4 |

# 附录E

# 蒙特卡洛法评定测量结果不确定度示例

E.1 概述

根据本规范的校准方法，以10m/s、20m/s、30m/s风速校准点为例，对手持式皮托管风速仪（以下简称风速仪）进行校准，并依据JJF1059.2-2012用蒙特卡洛法评定测量不确定度，对其示值误差的不确定度进行评定。

E.1.1 测量标准及配套设备

所用标准器及配套设备技术指标如表E.1所示。

表E.1 标准器及配套设备

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 分类 | 名称 | 测量范围 | 技术指标 |
| 标准器 | 皮托管 | （2~40）m/s | *K*=1.003 *Urel*=0.1%（*k*=2） |
| 微差压计 | （0~2500）Pa | MPE：±0.5Pa |
| 配套设备 | 风洞 | （1~70）m/s | 稳定性0.5%；均匀性1% |
| 温度计 | （0~80）℃ | *U*=0.2℃（*k*=2） |
| 湿度计 | （5~95）%RH | *U*=2%RH（*k*=2） |
| 气压计 | （500~1100）hPa | *U*=0.06hPa（*k*=2） |

E.1.2 被校风速仪

送校单位：江西省气象探测中心；

器具名称：手持式皮托管风速仪；

型号/编号：MP120 / 230901678；

制造单位：法国凯茂（KIMO）仪器公司；

测量范围：（2~40）m/s；

分辨力：0.1m/s。

E.1.4 校准数据

实验环境：温度为20℃，气压为1010hPa，湿度为55%RH，校准有关数据参见表E.2

表E.2 校准数据

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 校准点/（m/s） | 微差压计示值/（Pa） | | | | 标准风速值/（m/s） | 风速仪示值/（m/s） | | | | 示值误差  /（m/s） |
| 1 | 2 | 3 | 平均值 | 1 | 2 | 3 | 平均值 |
| 10 | 60.4 | 60.5 | 60.6 | 60.5 | 10.10 | 9.9 | 10.0 | 10.1 | 10.0 | -0.10 |
| 20 | 241.8 | 242.0 | 242.0 | 241.9 | 20.19 | 20.0 | 20.1 | 19.9 | 20.0 | -0.19 |
| 30 | 544.2 | 544.4 | 544.3 | 544.3 | 30.28 | 30.1 | 30.0 | 29.9 | 30.0 | -0.28 |

E.2 测量模型及输入量来源

E.2.1 测量模型

测量模型如公式（E.1）所示。

 （E.1）

式中：

——示值误差，m/s；

——标准值，m/s；

——被测值，m/s；

将标准风速的计算公式代入公式（E.1），同时考虑到风洞稳定性和均匀性对测量结果的影响，则：

 （E.2）

公式（E.2）即为被校风速仪测量结果不确定度评定的测量模型。式中：

——被校风速仪在某一点的示值误差，m/s；

——被校风速仪在该点的示值，m/s；

——微差压计读数，Pa；

*K*——皮托管校准系数；

*T* ——试验段内温度，K；

*H*——试验段内空气相对湿度，用小数表示；

*P*0——试验段内气压，Pa；

*ew* ——*T*温度下的饱和水汽压，Pa；

——风洞稳定性对测量结果的影响，m/s；

——风洞均匀性对测量结果的影响，m/s。

E.2.2 输入量来源

输入量的来源主要包括以下内容：

（1）风速仪测量引入；

（2）微差压计测量引入；

（3）皮托管校准系数引入；

（4）温度计引入；

（5）湿度计引入；

（6）气压计引入；

（7）风洞稳定性引入；

（8）风洞均匀性引入；

E.3 输入量概率密度函数（PDF）的构建

E.3.1 风速仪测量示值的PDF

由于风速仪在10m/s、20m/s、30m/s校准点时，其对应的平均示值分别为10.0m/s、20.0m/s、30.0m/s，且引入的标准不确定度*u*(*v’*)均为0.068m/s，其满足正态分布，因此对应的PDF分别为*N*(10,0.068)、*N*(20,0.068)、*N*(30,0.068)。

E.3.2 微差压计测量示值的PDF

由于风速仪在10m/s、20m/s、30m/s校准点时，其对应的平均示值分别为60.5Pa、241.9Pa、544.3Pa，且引入的标准不确定度*u*(*p*)均为0.068Pa，其满足正态分布，因此其对应的实测数据*p’*的PDF分别为*N*(60.5,0.068)、*N*(241.9,0.068)、*N*(544.3,0.068)。与此同时，考虑微差压计的MPE为±0.5Pa，属均匀分布，因此，对应的*p*的PDF为*U*(*p’*-0.5 , *p’*+0.5)。

E.3.3 皮托管校准系数的PDF

由于皮托管校准系数*K*=1.003，由其引入的标准不确定度*u*(*K*)=0.0005，满足正态分布，因此对应的PDF为*N*(1.003,0.0005)。

E.3.4 温度计的PDF

由于试验在温度*t*=20℃的实验室环境下进行，其对应的温度*T*=(273.15+20)K，由其引入的标准不确定度*u*(*T*)=0.1K，满足正态分布，因此对应的PDF为*N*(293.15,0.1)。

E.3.5 湿度计的PDF

由于试验在湿度为55%RH的实验室环境下进行，其对应的*H*=0.55，由其引入的标准不确定度*u*(*H*)=0.01，满足正态分布，因此对应的PDF为*N*(0.55,0.01)。

E.3.6 气压计的PDF

由于试验在湿度为1010hPa的实验室环境下进行，其对应的*P*0=101000Pa，由其引入的标准不确定度*u*(*P*0)=3Pa，满足正态分布，因此对应的PDF为*N*(101000,3)。

E.3.7 风洞稳定性的PDF

由于风洞稳定性为0.5%，满足反正弦分布，其对应的包含区间为[(1-0.5%)*v*,(1+0.5%)*v*]，该区间的半宽度为(1.005-0.995)*v*/2，在10m/s、20m/s、30m/s校准点时，对应的区间半宽度分别为0.05m/s、0.10m/s、0.15m/s，因此对应的PDF分别为*A*sin(-0.05,0.05)、*A*sin(-0.10,0.10)、*A*sin(-0.15,0.15)。

E.3.8 风洞稳定性的PDF

由于风洞均匀性为1.0%，满足反均匀分布，其对应的包含区间为[(1-1.0%)*v*,(1+1.0%)*v*]，该区间的半宽度为(1.01-0.99)*v*/2，在10m/s、20m/s、30m/s校准点时，对应的区间半宽度分别为0.10m/s、0.20m/s、0.30m/s，因此对应的PDF分别为*U*(-0.10,0.10)、*U*(-0.20,0.20)、*U*(-0.30,0.30)。

各输入量的PDF如表E.3所示。

表E.3 各输入量的PDF

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 输入量符号/(单位) | 输入量来源 | | 标准不确定度 | PDF | | |
| 10m/s | 20m/s | 30m/s |
| 1 | *v’* /（m/s） | 风速仪测量示值引入 | | 0.068 | *N*(10,0.068) | *N*(20,0.068) | *N*(30,0.068) |
| 2 | *p* /（Pa） | 微差压计引入 | 最大允许误差 | —— | *U*(*p’*-0.5 , *p’*+0.5) | | |
| 测量示值 | 0.068 | *p’~N*(60.5,0.068) | *p’~N*(241.9,0.068) | *p’~N*(544.3,0.068) |
| 3 | *K* | 皮托管校准系数引入 | | 0.0005 | *N*(1.003,0.0005) | | |
| 4 | *T* /（K） | 温度计引入 | | 0.1 | *N*(293.15,0.1) | | |
| 5 | *H* | 湿度计引入 | | 0.01 | *N*(0.55,0.01) | | |
| 6 | *P*0 /（Pa） | 气压计引入 | | 3 | *N*(101000,3) | | |
| 7 | △*s* /（m/s） | 风洞稳定性引入 | | —— | *A*sin(-0.05,0.05) | *A*sin(-0.10,0.10) | *A*sin(-0.15,0.15) |
| 8 | △*f* /（m/s） | 风洞均匀性引入 | | —— | *U*(-0.10,0.10) | *U*(-0.20,0.20) | *U*(-0.30,0.30) |

E.4 蒙特卡洛法（MCM）的传播与输出

从各输入量的PDF随机抽取*M*=106个样本值，然后将其代入实际测量模型中（公式E.2），计算出*M*个对应的输出量的离散值，并将其进行严格递增排序，得到排序后的输出量的分布函数的离散表示。

E.5 蒙特卡洛法（MCM）的报告结果

分布函数的离散表示，确定对应的风速仪示值误差的最佳估计值△*v、*标准不确定度*u*(△*v*)、约定包含概率*p*=95%时的区间左右端点△*v*low和△*v*high如表E.4所示。

表E.4 报告结果/（m/s）

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 校准点 | 10 | 20 | 30 |
| △*v* | -0.10 | -0.19 | -0.30 |
| *u*(△*v*) | 0.10 | 0.15 | 0.21 |
| [△*v*low,△*v*high] | [-0.29,0.10] | [-0.48,0.10] | [-0.68,0.12] |

**\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_**