

河北省地方计量技术规范

JJF(冀) XXXX—XXXX

风速变送器校准规范

Calibration Specification for Wind Speed Transmitters

(报批稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

河北省市场监督管理局 发布

风速变送器校准规范
Calibration Specification for Wind Speed
Transmitters

JJF (冀) XXXX—XXXX

归口单位：河北省市场监督管理局

主要起草单位：河北省计量监督检测研究院

参加起草单位：河北省计量监督检测研究院

本规范委托河北省计量监督检测研究院负责解释

本规范主要起草人：

王喜英（河北省计量监督检测研究院）

康熙晖（河北省计量监督检测研究院）

彭 环（河北省计量监督检测研究院）

参加起草人：

袁兆龙（河北省计量监督检测研究院）

范佳美（河北省计量监督检测研究院）

常聪梅（河北省计量监督检测研究院）

程立彬（河北省计量监督检测研究院）

田伟亮（河北省计量监督检测研究院）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 变送器示值误差	(2)
5.2 变送器重复性	(2)
6 校准条件	(2)
6.1 校准环境条件	(2)
6.2 测量标准及其他设备	(2)
6.3 供电电源	(2)
7 校准项目和校准方法	(3)
7.1 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(3)
8 校准结果表达	(6)
9 复校时间间隔	(6)
附录A 风速变送器校准记录参考格式	(7)
附录B 风速变送器校准证书内页参考格式	(9)
附录C 皮托管配合微差压计校准风速变送器的示值误差测量不确定度评定示例	(10)
附录D 激光多普勒流速仪校准风速变送器的示值误差测量不确定度评定示例	(15)

引 言

JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》、JJF 1071—2007《国家计量校准规范编写规则》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范。

本规范参考了现行的风速计相关的技术规范和规程：JJF 1939—2021《热式风速仪校准规范》、JJF 1934—2021《超声波风向风速测量仪器校准规范》、JJG 431—2014《轻便三杯风向风速表》及JJF 1971—2022《叶轮式风速计校准规范》，并结合风速变送器的技术水平和使用现状编制而成。

本规范为首次发布。

风速变送器校准规范

1 范围

本规范适用于测量上限不超过30 m/s的风速变送器（以下简称变送器）的校准。

2 引用文件

本规范引用下列文件：

JJF 1001 通用计量术语及定义

JJF 1934 超声波风向风速测量仪器校准规范

JJF 1939 热式风速仪校准规范

JJF 1971 叶轮式风速计校准规范

JJG 431 轻便三杯风向风速表

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

3 术语

JJF 1001界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 风速变送器 wind speed transmitters

一种将风速变量转换为可传送的标准化模拟或数字输出信号的仪器。

3.2 智能变送器 intelligent transmitters

具备与外部系统和操作人员双向通信功能，发送测量和状态信息、接收和处理外部命令的变送器。

[来源：GB/T 17614.3—2018, 3.1]

3.3 均匀性 uniformity

风洞工作段内同一截面上气流速度分布的均匀程度，用该截面上各点气流速度的相对标准偏差表示。

3.4 稳定性 stability

风洞工作段内气流速度随时间脉动的程度，用规定时间间隔内气流速度相对于气流平均速度变化量的最大值与平均速度之比表示。

4 概述

变送器主要由风速传感器、测量单元、数据处理单元、电输出子系统等组成，风速传感器一般采用三杯、热式、叶轮、超声波等形式，将风速转化为电信号，其输出信号

有(4~20) mA 或(1~5) V 等。部分变送器除具有测量信号转换功能外,还具有测量值本地显示功能。

智能变送器一般包括传感器显示单元和人机接口,以实现量值、量程等参数的调整。部分智能变送器配置了外围系统接口,具备现场总线功能。

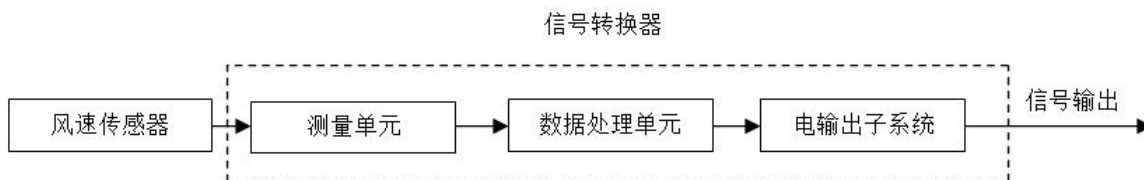


图1 变送器原理框图

5 计量特性

5.1 变送器的示值误差

变送器的示值误差是风速转换成标准化输出信号时产生的误差。变送器的示值误差不超过表1规定的准确度等级对应的最大允许误差。

表1 准确度等级与最大允许误差

准确度等级	最大允许误差 (%FS)
1.0	±1.0
1.5	±1.5
2.0	±2.0

注: 最大允许误差是以输出量程(FS)的百分数表示。

5.2 变送器的重复性

变送器的重复性不超过最大允许误差绝对值的1/3。

注: 以上指标不作为合格性判定依据, 仅供参考。

6 校准条件

6.1 校准环境条件

a) 环境温度: (15~30) °C; 相对湿度: 不大于85%; 大气压力: 一般为(86~106) kPa。

b) 变送器周围除地磁场外, 应无影响其正常工作的外磁场。

环境条件还应满足测量标准及其他设备使用的相关要求。

6.2 测量标准及其他设备

校准时由测量标准及其他设备引入的扩展不确定度 $U(k=2)$ 应不大于被校变送器最大允许误差绝对值的1/3, 校准时所需的标准仪器及设备见表 2。

6.3 电源

变送器的电源:

——交流供电的变送器, 其电压变化不超过额定值的 $\pm 1\%$, 频率变化不超过额定值的 $\pm 1\%$ 、失真小于5%;

——直流供电的变送器, 其电压变化不超过额定值的 $\pm 1\%$, 纹波小于0.1%。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

变送器示值误差和重复性。

表2 变送器校准用测量标准及其他设备

序号	仪器设备名称	技术要求	用途
1	微差压计	测量范围为(0~1500) Pa, MPE: ± 0.5 Pa	测量标准
2	皮托管	L 型皮托静压管系数 K 应在 0.997~1.003 之内, MPE: $\pm 0.30\%$	
3	激光多普勒流速仪	校准的流速段(0.10~30.00) m/s; 扩展不确定度不大于0.5% ($k=2$)	
4	数字直流电流表	(0~30) mA, MPE: $\pm 0.1\%$	
5	数字直流电压表	(0~5) V, MPE: $\pm 0.1\%$	
6	风洞	a) 工作段内气流的稳定性(1min) 不大于0.5% b) 工作段内气流的均匀性不大于1%	提供校准的风速场
7	大气压力计	测量范围为(50~106) kPa; MPE: ± 40 Pa	测量大气压力
8	温度测量仪表	测量范围为(0~50) $^{\circ}\text{C}$; MPE: ± 0.5 $^{\circ}\text{C}$	测量环境温度
9	湿度测量仪表	测量范围为(5~95) % RH; MPE: ± 5 %RH	测量环境湿度
10	负载电阻	250 Ω , MPE: $\pm 0.01\%$	变送器输出负载

7.2 校准方法

7.2.1 准备工作

a) 设备配置与连接

风速变送器校准时的设备连接方式见图2、图3所示(其中signal代表风速信号输出端, V+接电源供电正极端, V-接电源供电负极端)。标准器选用激光多普勒流速仪或者选择用皮托管和微差压计(虚线部分)。

b) 通电预热

校准前, 变送器应与测量标准同时处于校准环境中保持足够长的时间, 应按照仪器说明书进行, 如无说明, 通常不少于1 h, 然后进行通电预热(通常不少于0.5 h)。

c) 调整好微差压计水平状态及零位或其他测量设备状态。使用激光多普勒流速仪测量时, 需待示踪粒子在风场中分布均匀后, 再开始测量。

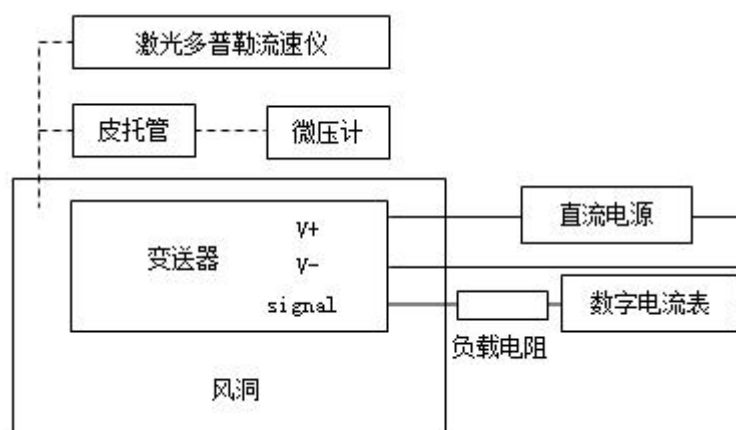


图2 输出标准直流电流信号的变送器的校准线路图

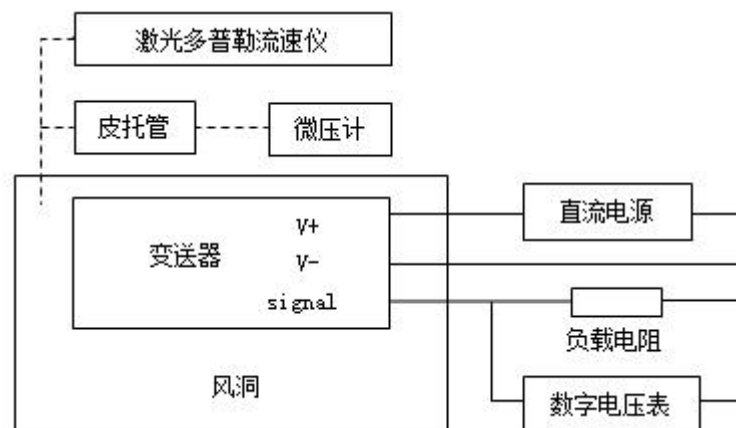


图3 输出标准直流电压信号的变送器的校准线路图

7.2.2 示值误差的校准

7.2.2.1 风速校准点可以选择0.5 m/s、1 m/s、5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s、25 m/s、30 m/s，或者按照客户要求选取校准点。每个校准点的实际风速与设定风速的最大偏差，风速<1 m/s时为±0.05 m/s，风速≥1 m/s时为±5%设定风速。

7.2.2.2 各校准风速点的风速值调好后要稳定至少1 min，确定风速值稳定后才能进行试验。试验过程中环境条件应符合本规范要求。

7.2.2.3 采用皮托管配合微差压计作为标准器时，在微差压计和被校变送器输出值稳定时进行读数，依次读取微差压计和数字直流电流表（或电压表）的测量值3次。同时记录环境温度、相对湿度和大气压力。按照公式（1）计算标准器风速测量值 V_s ，按照公式（2）计算 T 温度下的饱和水汽压。

计算标准风速值 V_s ：

$$V_s = K \times \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} = 23.961 \times k \times \Delta P^{\frac{1}{2}} \times T^{\frac{1}{2}} \times (P_0 - 0.378 \phi e_w)^{-\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中： V_s ——标准风速值，m/s；

K ——标准皮托管系数;

ρ ——空气密度, kg/m^3 ;

ΔP ——微差压计示值, Pa ;

T ——试验段内空气热力学温度, K ;

P_0 ——试验段内大气压, Pa ;

φ ——试验段内空气相对湿度, %;

e_w —— T 温度下的饱和水汽压, Pa 。

$$e_w = k \times e^{\left(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T}\right)} \quad (2)$$

式中: $k=1\text{Pa}$;

A 、 B 、 C 、 D 均为常数, 其值如下:

$$A=1.2378847 \times 10^{-5} \text{ K}^{-2}$$

$$B=-1.9121316 \times 10^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$C=33.93711047$$

$$D=-6.3431645 \times 10^3 \text{ K}$$

7.2.2.4 采用激光多普勒流速仪作为标准器校准时, 在标准器和被校变送器输出值稳定时进行读数, 依次读取标准器和数字直流电流表 (或电压表) 的测量值3次。同时记录环境温度、相对湿度和大气压力。

7.2.3 示值误差的计算

示值误差按公式 (3) 计算:

$$\Delta_A = \bar{A}_d - \left[\frac{A_m}{V_m} \times (V_s - V_o) + A_o \right] \quad (3)$$

式中: Δ_A ——变送器各校准点的示值误差, mA 或 V ;

\bar{A}_d ——变送器在各校准点实际输出的平均值, mA 或 V ;

A_m ——变送器的输出量程, mA 或 V ;

A_o ——变送器输出的下限值, mA 或 V ;

V_m ——变送器的测量量程, m/s ;

V_o ——变送器输入范围的下限对应的风速, m/s 。

7.2.4 重复性

在每个校准点重复测量3次, 根据3次的测得值, 根据公式 (4) 计算变送器在该校准点的重复性:

$$E = \frac{A_{\max} - A_{\min}}{d} \quad (4)$$

式中: E ——变送器重复性;

A_{\max} 、 A_{\min} ——变送器示值的最大值、最小值，mA 或 V；
 d ——极差系数，测量3次时， $d=1.69$ 。

8 校准结果表达

8.1 校准记录参考格式见附录A，校准证书内页参考格式见附录B。

8.2 校准结果应在校准证书上反映。校准证书应至少包括以下信息：

- a) 标题：如“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) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校单位的名称和地址；
- 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和应用有关时，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，以及签发日期；
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由变送器的使用情况、使用者及本身质量等诸多因素所决定的，因此送校单位可根据实际使用情况决定其复校时间间隔，建议一般不超过1年。

附录A

风速传感器校准记录参考格式

风速传感器校准记录（皮托管配合微差压计）

送校单位：_____地址：_____原始记录编号：_____

仪器名称：_____型号规格：_____生产厂家：_____

出厂编号：_____测量范围：_____不确定度/准确度等级/最大允许误差：_____

校准地点：_____校准依据：_____校准证书号：_____

大气压力 (Pa) : _____环境温度 (°C) : _____相对湿度 (%) : _____

测量标准信息：

名称	型号规格	出厂编号	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	有效日期

校准结果：

校准点 (m/s)						
微差压计示值 (Pa)	1					
	2					
	3					
	平均值					
标准风速值 (m/s)						
对应电量 (mA、V)						
变送器输出值 (mA、V)	1					
	2					
	3					
	平均值					
示值误差 (mA、V)						
示值误差 (m/s)						
重复性 (mA、V)						
U (m/s) ($k=2$)						

校准员：_____核验员：_____校准日期：_____

风速传感器校准记录 (激光多普勒流速仪)

送校单位: _____ 地址: _____ 原始记录编号: _____

仪器名称: _____ 型号规格: _____ 生产厂家: _____

出厂编号: _____ 测量范围: _____ 不确定度/准确度等级/最大允许误差: _____

校准地点: _____ 校准依据: _____ 校准证书号: _____

大气压力 (Pa): _____ 环境温度 (°C): _____ 相对湿度 (%): _____

测量标准信息:

名称	型号规格	出厂编号	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	有效日期

校准结果:

校准点 (m/s)						
标准器示值 (m/s)	1					
	2					
	3					
	平均值					
对应电量 (mA、V)						
变送器输出值 (mA、V)	1					
	2					
	3					
	平均值					
示值误差 (mA、V)						
示值误差 (m/s)						
重复性 (mA、V)						
U (m/s) ($k=2$)						

校准员: _____ 核验员: _____ 校准日期: _____

附录B

风速变送器校准证书内页参考格式

校准结果

1、测量范围：

2、输出信号说明：

校准风速点	设定输出值	示值误差		重复性	扩展不确定度 $U(k=2)$
m/s	mA (V)	mA (V)	m/s	mA (V)	m/s

附录C

皮托管配合微差压计校准风速变送器的示值误差测量不确定度评定示例

C.1 概述

采用皮托管、微差压计和直流电流表进行风速变送器示值误差校准，按照本规范的校准方法，以风速变送器校准点10 m/s为例，进行变送器示值误差的不确定度评定。

C.1.1 被校风速变送器

风速变送器：测量范围为（0～30）m/s，电量输出范围为（4～20）mA。

C.1.2 测量使用的设备及其计量特性：

皮托管：皮托管系数 $K=1$ ，MPE： $\pm 0.30\%$ ；

微差压计：量程（0～1500）Pa，MPE： ± 0.8 Pa；

数字直流电流表：测量范围（0～30）mA，MPE： $\pm 0.1\%$ ；

气压表：量程（80～106）kPa，MPE： ± 40 Pa；

温湿度变送器：温度测量范围：（0～50）℃，MPE： ± 0.5 ℃；

湿度测量范围：（0～100）%RH，MPE： $\pm 5\%$ RH；

风洞：稳定性0.48%，均匀性0.52%。

C.1.3 校准结果

校准时环境温度为27.0 ℃，湿度为40.9 %RH，大气压力为100.210 kPa。测量相关数据见表C.1。

表C.1 校准数据

校准风速 点 (m/s)	微差压计示值 (Pa)			微差压计 平均值 (Pa)	标准风速 值 (m/s)	风速变送器示值 (mA)			风速变送器 平均值 (mA)
10	57.73	57.80	57.85	57.79	10.00	9.349	9.343	9.346	9.346

C.2 测量模型

$$\Delta_A = \bar{A}_d - \left[\frac{A_m}{V_m} \times (V_s - V_o) + A_o \right] \quad (C.1)$$

其中：

$$V_s = 23.96 \times K \times \Delta P^{\frac{1}{2}} \times T^{\frac{1}{2}} \times (P_0 - 0.378 \phi e_w)^{-\frac{1}{2}} \quad (C.2)$$

$$e_w = k \times e^{(AT^2 + BT + C + \frac{D}{T})} \quad (C.3)$$

式中： Δ_A ——变送器各校准点的示值误差，mA；

\bar{A}_d ——变送器在各校准点实际输出的平均值，mA；

A_m ——变送器的输出量程，mA；

A_0 ——变送器输出的设定下限值, mA;
 V_m ——变送器的输入量程, m/s;
 V_s ——标准器风速测量值, m/s;
 V_0 ——变送器输入范围的下限对应的风速, m/s。
 K ——标准皮托管系数, 无量纲常数;
 ΔP ——微差压计示值, Pa;
 T ——试验段内空气绝对温度, K;
 P_0 ——试验段内大气压, Pa;
 φ ——试验段内空气相对湿度, 用小数表示;
 e_w —— T 温度下的饱和水汽压, Pa;
 $k=1$ Pa;
 $A=1.2378847 \times 10^{-5} \text{K}^{-2}$
 $B=-1.9121316 \times 10^{-2} \text{K}^{-1}$
 $C=33.93711047$
 $D=-6.3431645 \times 10^3 \text{K}$

C.3 合成标准不确定度 (计算公式)

由公式 (C.1), 示值误差 Δ_A 测量结果不确定度的来源主要有:

- a) 被校风速变送器测量值的不确定度分量 $u(\bar{A}_d)$;
- b) 标准风速的不确定度分量 $u(V_s)$ 。

两者的不确定度互不相关, 因此:

$$u_c^2(\Delta_A) = C_1^2 u^2(\bar{A}_d) + C_2^2 u^2(V_s)$$

灵敏度系数

$$C_1 = \frac{\partial \Delta_A}{\partial \bar{A}_d} = 1 \quad C_2 = \frac{\partial \Delta_A}{\partial V_s} = -0.533 \text{ mA} \cdot \text{s/m}$$

V_s 的各输入量的不确定度不相关, 再考虑风洞的稳定性带来的不确定度 u_w 和均匀性带来的不确定度 u_j , 由此得:

$$\frac{u(V_s)}{|V_s|} = \sqrt{u_j^2 + u_w^2 + u_r^2(K) + \frac{1}{4} u_r^2(\Delta P) + \frac{1}{4} u_r^2(T) + \frac{1}{4} u_r^2(P_0 - 0.378 \varphi e_w T)} \quad (\text{C.4})$$

C.4 不确定度评定

C.4.1 被校风速变送器测量值 \bar{A}_d 的标准不确定度 $u(\bar{A}_d)$ 的评定

标准不确定度 $u(\bar{A}_d)$ 由变送器的测量重复性、输出信号电测设备引入不确定度

分量构成。

C. 4. 1. 1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\bar{A}_d)$

将被校风速变送器安装到风洞工作段内，当风速稳定10 m/s风速点时，读取数字直流电流示值，在相同条件下重复测量3次，得到测量数据为9.349 mA，9.343 mA，9.346 mA。

由极差法计算重复性，得出10 m/s风速点被校风速变送器测量重复性为：

$$s = 0.0036 \text{ mA}$$

则重复性引入的标准不确定度：

$$u_1(\bar{A}_d) = \frac{0.0036}{\sqrt{3}} = 0.0021 \text{ (mA)}$$

C. 4. 1. 2 输出信号电测设备示值误差引入的标准不确定度 $u_2(\bar{A}_d)$

该分量按B类分析，按照均匀分布，则

$$u_2(\bar{A}_d) = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} \times 30 = 0.0173 \text{ (mA)}$$

因此标准风速点10 m/s时，被校风速变送器测量值 \bar{A}_d 的合成标准不确定度 $u(\bar{A}_d)$

$$u(\bar{A}_d) = [u_1(\bar{A}_d)^2 + u_2(\bar{A}_d)^2]^{0.5} = 0.018 \text{ mA}$$

C. 4. 2 标准风速 V_s 的标准不确定度 $u(V_s)$ 的评定

C. 4. 2. 1 风场稳定性引入的相对标准不确定度 u_w

风场的稳定性0.48%，按照均匀分布，则风洞稳定性引入的相对不确定度为：

$$u_w = \frac{0.48\%}{\sqrt{3}} = 0.277\%$$

C. 4. 2. 2 风场均匀性引入的相对标准不确定度 u_j

风场的均匀性0.52%，按照均匀分布，则风洞稳定性引入的相对不确定度为：

$$u_j = \frac{0.52\%}{\sqrt{3}} = 0.300\%$$

C. 4. 2. 3 皮托管系数 K 的相对标准不确定度 $u_r(K)$

根据所用皮托管的校准证书，皮托管系数 $K = 1$ ，MPE: $\pm 0.30\%$ ，按均匀分布，则皮托管系数 K 的相对标准不确定度为：

$$u_r(K) = \frac{0.3\%}{\sqrt{3}} = 0.173\%$$

C. 4. 2. 4 微差压计 ΔP 引入相对标准不确定度 $u_r(\Delta P)$

微差压计最大允许误差为 $\pm 0.8 \text{ Pa}$ ，标准风速点10 m/s时，差压为57.79 Pa，则微差压计引入的相对标准不确定度为：

$$u_r(\Delta P) = \frac{0.8}{57.79 \times 2} \times 100\% = 0.80\%$$

C. 4. 2. 5 空气热力学温度 T 的相对标准不确定度 $u_r(T)$

用数显温湿度表进行温度测量，最大允许误差为 $\pm 0.5\text{ }^\circ\text{C}$ ，测试时环境温度 t 为 $27.0\text{ }^\circ\text{C}$ ，则 T 引入的相对标准不确定度为：

$$u_r(T) = \frac{0.5}{\sqrt{3} \times (27.0 + 273.15)} \times 100\% = 0.096\%$$

C. 4. 2. 6 大气压测量和湿度测量引入的相对不确定度 $u_r(P_0 - 0.378\phi e_w)$

C. 4. 2. 6. 1 大气压测量引入的标准不确定度 $u(P_0)$

用气压表测量大气压，最大允许误差为 $\pm 40\text{ Pa}$ ，则大气压测量引入的标准不确定度为：

$$u(P_0) = \frac{40}{\sqrt{3}} = 23.09\text{ (Pa)}$$

C. 4. 2. 6. 2 空气相对湿度 ϕ 的标准不确定度 $u(\phi)$

用温湿度计测量空气相对湿度，最大允许误差为 $\pm 5\text{ \%RH}$ ，则空气湿度的标准不确定度为：

$$u(\phi) = \frac{5\%}{\sqrt{3}} = 0.75\%$$

C. 4. 2. 6. 3 饱和水汽压 e_w 的标准不确定度

由公式 (C. 3)，可得：

$$u(e_w) = \frac{\partial(e_w)}{\partial(T)} u(T) = \left(2AT + B - \frac{D}{T^2} \right) e_w u(T) = 52.38\text{ Pa}$$

C. 4. 2. 6. 4 $u_r(P_0 - 0.378\phi e_w)$ 的计算

检测时大气压力为 100.21 kPa ，相对湿度为 40.9 \%RH ，温度为 $27.0\text{ }^\circ\text{C}$ 时，由公式 (C. 3) 可得饱和水蒸气压力 $e_w = 3567.89\text{ Pa}$ 。则 $P_0 - 0.378\phi e_w = 99658.40\text{ Pa}$

$$\begin{aligned} u(P_0 - 0.378\phi e_w) &= \sqrt{u^2(P_0) + 0.378^2 \phi^2 u^2(e_w) + 0.378^2 e_w^2 u^2(\phi)} \\ &= 18.00\text{ (Pa)} \end{aligned}$$

因此：

$$u_r(P_0 - 0.378\phi e_w) = \frac{u(P_0 - 0.378\phi e_w)}{P_0 - 0.378\phi e_w} = \frac{18.00\text{ Pa}}{99658.40\text{ Pa}} = 0.018\%$$

则标准风速点 10 m/s 时，标准器的合成相对不确定度分量 $u(V_s)$

$$\begin{aligned}
 u_r(V_s) &= \sqrt{u_w^2 + u_j^2 + u_r^2(k) + \frac{1}{4}u_r^2(\Delta P) + \frac{1}{4}u_r^2(T) + \frac{1}{4}u_r^2(P_0 - 0.378\varphi e_w)} \\
 &= \sqrt{0.277\%^2 + 0.300\%^2 + 0.173\%^2 + \frac{1}{4} \times 0.80\%^2 + \frac{1}{4} \times 0.096\%^2 + \frac{1}{4} \times 0.018\%^2} \\
 &= 0.52\%
 \end{aligned}$$

则标准风速点 10 m/s 时，标准器的不确定度分量 $u(V_s)$

$$u(V_s) = 0.60\% \times 10.00 = 0.060 \text{ (m/s)}$$

10 m/s 风速点示值误差的标准不确定度见表 C. 2。

表 C. 2 10 m/s 风速点示值误差的标准不确定度汇总表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏度系数 C_i	$ C_i u(x_i)$
$u(\bar{A}_d)$	测量重复性	0.0021 mA	1	0.018 mA
	输出信号电测设备	0.0173 mA		
$u(V_s)$	风场均匀性	0.060 m/s	-0.533 mA · s/m	0.032 mA
	风场稳定性			
	皮托管系数			
	流场差压			
	空气热力学温度			
	$P_0 - 0.378\varphi e_w$			

C. 4. 3 合成相对不确定度

输入量 \bar{A}_d 和 V_s 不确定度互不相关，所以合成标准不确定度为：

$$u_c(\Delta_A) = \sqrt{0.018^2 + 0.032^2} = 0.037 \text{ mA}$$

C. 4. 4 扩展不确定度计算

用电流表示： $U = 2 \times u_c(\Delta_A) = 0.074 \text{ mA}$ ($k = 2$)

用风速表示： $U = 0.14 \text{ m/s}$ ($k = 2$)

附录D

激光多普勒流速仪校准风速变送器的示值误差测量不确定度评定示例

D.1 概述

采用激光多普勒流速仪和直流电流表进行风速变送器示值误差校准，按照本规范的校准方法，以风速变送器校准点10 m/s为例，进行变送器示值误差的不确定度评定。

D.1.1 被校风速变送器

风速变送器：测量范围为（0～30）m/s，电量输出范围为（4～20）mA。

D.1.2 测量使用的设备及其计量特性：

激光多普勒流速仪：校准的流速段（0.10～30.00）m/s；扩展不确定度 $U_x=0.5\%$ （ $k=2$ ）；

数字直流电流表：测量范围（0～30）mA，MPE： $\pm 0.1\%$ ；

气压表：量程（80～106）kPa，MPE： ± 40 Pa；

温湿度变送器：温度测量范围：（0～50）℃，MPE： ± 0.5 ℃；

湿度测量范围：（10～90）%RH，MPE： ± 5 %RH；

风洞：稳定性0.48%，均匀性0.52%。

D.1.3 校准结果

校准时环境温度为27.0℃，湿度为40.9%RH，大气压力为100.210 kPa。测量相关数据见表D.1。

表D.1 校准数据

校准风速 点（m/s）	标准器示值 （m/s）			标准风速 值 （m/s）	风速变送器示值 （mA）			风速变送器平 均值（mA）
10	10.003	10.008	10.001	10.004	9.349	9.343	9.346	9.346

D.2 测量模型

$$\Delta_A = \bar{A}_d - \left[\frac{A_m}{V_m} \times (V_s - V_o) + A_o \right] \quad (\text{D.1})$$

式中： Δ_A ——变送器各校准点的示值误差，mA；

\bar{A}_d ——变送器在各校准点实际输出的平均值，mA；

A_m ——变送器的输出量程，mA；

A_o ——变送器输出的设定下限值，mA；

V_m ——变送器的输入量程，m/s；

V_s ——标准器风速测量值，m/s；

V_0 ——变送器输入范围的下限对应的风速，m/s。

D.3 合成标准不确定度（计算公式）

由公式（D.1），示值误差 Δ_A 测量结果不确定度的来源主要有：

- a) 被校风速变送器测量值的不确定度分量 $u(\bar{A}_d)$ ；
- b) 标准风速的不确定度分量 $u(V_s)$ 。

两者的不确定度互不相关，因此：

$$u_c^2(\Delta_A) = C_1^2 u^2(\bar{A}_d) + C_2^2 u^2(V_s)$$

灵敏度系数

$$C_1 = \frac{\partial \Delta_A}{\partial \bar{A}_d} = 1 \quad C_2 = \frac{\partial \Delta_A}{\partial V_s} = -0.533 \text{ mA} \cdot \text{s/m}$$

D.4 不确定度评定

D.4.1 被校风速变送器测量值 \bar{A}_d 的标准不确定度 $u(\bar{A}_d)$ 的评定

标准不确定度 $u(\bar{A}_d)$ 由变送器的测量重复性、输出信号电测设备引入不确定度分量构成。

D.4.1.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(\bar{A}_d)$

将被校风速变送器安装到风洞工作段内，当风速稳定10 m/s风速点时，读取数字直流电流示值，在相同条件下重复测量3次，得到测量数据为9.349 mA，9.343 mA，9.346 mA。

由极差法计算重复性，得出10 m/s风速点被校风速变送器测量重复性为：

$$s = 0.0036 \text{ mA}$$

则重复性引入的标准不确定度：

$$u_1(\bar{A}_d) = \frac{0.0036}{\sqrt{3}} = 0.0021 \text{ (mA)}$$

D.4.1.2 输出信号电测设备示值误差引入的标准不确定度 $u_2(\bar{A}_d)$

该分量按B类分析，按照均匀分布，则

$$u_2(\bar{A}_d) = \frac{0.1\%}{\sqrt{3}} \times 30 = 0.0173 \text{ (mA)}$$

D.4.2 标准风速 V_s 的标准不确定度 $u(V_s)$ 的评定

激光多普勒流速仪引入的不确定度分量分为激光多普勒流速仪测量重复性引入的不确定度、仪器本身引入的不确定度和风场稳定性引入的不确定度。

D.4.2.1 测量重复性引入的标准不确定度 $u_1(V_s)$

当风速稳定10 m/s风速点时，读取标准风速示值，在相同条件下重复测量3次，

得到测量数据为10.003 m/s, 10.008 m/s, 10.001 m/s。

由极差法计算重复性, 得出10 m/s风速点被校风速变送器测量重复性为:

$$s = 0.0042 \text{ m/s}$$

则重复性引入的标准不确定度:

$$u_1(V_s) = \frac{0.0042}{\sqrt{3}} = 0.0024 \text{ (m/s)}$$

D. 4. 2. 2 激光多普勒流速仪引入的标准不确定度 $u_2(V_s)$

$$u_1(V_s) = \frac{0.5\%}{2} \times 10.000 = 0.025 \text{ (m/s)}$$

D. 4. 2. 3 风场稳定性引入的相对标准不确定度 u_w

风场的稳定性0.48%, 按照均匀分布, 则风洞稳定性引入的相对不确定度为:

$$u_w = \frac{0.48\%}{\sqrt{3}} \times 10.000 = 0.028 \text{ (m/s)}$$

则标准风速点10 m/s时, $u(V_s)$ 为:

$$u(V_s) = \sqrt{u_1^2(V_s) + u_2^2(V_s) + u_w^2} = 0.038 \text{ (m/s)}$$

10 m/s风速点示值误差的扩展不确定度见表D. 2。

表D. 2 10 m/s风速点示值误差的不确定度汇总表

标准不确定度	不确定度来源	标准不确定度 $u(x_i)$	灵敏度系数 C_i	$ C_i u(x_i)$
$u(\bar{A}_d)$	测量重复性	0.0021 mA	1	0.018 mA
	输出信号电测设备	0.0173 mA		
$u(V_s)$	测量重复性	0.0024 m/s	-0.533 mA · s/m	0.020 mA
	激光多普勒流速仪	0.025 m/s		
	风场稳定性	0.028 m/s		

D. 4. 3 合成相对不确定度

输入量 \bar{A}_d 和 V_s 不确定度互不相关, 所以合成标准不确定度为:

$$u_c(\Delta_A) = \sqrt{0.018^2 + 0.020^2} = 0.027 \text{ mA}$$

D. 4. 4 扩展不确定度计算

用电流表示: $U = 2 \times u_c(\Delta_A) = 0.054 \text{ mA} \text{ (} k = 2 \text{)}$

用风速表示: $U = 0.11 \text{ m/s} \text{ (} k = 2 \text{)}$

