内蒙古自治区地方计量技术规范

JJF（蒙） 089－2024

污染源烟气温压流湿监测仪校准规范

Calibration Specification for Temperature, Pressure, Flow, Humidity Monitor in the Flue Gas Emitted from for Pollution Source

2024－06－01 发布　　2024－09－01 实施

内蒙古自治区市场监督管理局 发布

污染源烟气温压流湿监测仪校准规范

JJF（蒙） 089—2024

Calibration Specification for Temperature, Pressure, Flow, Humidity Monitor in the Flue Gas Emitted from Pollution Sources

归 口 单 位： 内蒙古自治区市场监督管理局

主要起草单位：鄂尔多斯市检验检测中心

参加起草单位：北京市计量检测科学研究院

内蒙古自治区计量测试研究院

本规范技术条文由鄂尔多斯市检验检测中心负责解释

本规范主要起草人：

高世飞（鄂尔多斯市检验检测中心）

杨振琪（北京市计量检测科学研究院）

杨晓元（内蒙古自治区计量测试研究院）

参加起草人：

高媛媛（鄂尔多斯市检验检测中心）

秦亚平（鄂尔多斯市检验检测中心）

王季锋（鄂尔多斯市检验检测中心）

白　杰（鄂尔多斯市检验检测中心）

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）
6　校准条件 ..... （2）
6.1 环境条件 ..... （2）
6.2 校准用计量器具及配套设备 ..... （2）
7　校准项目和校准方法 ..... （3）
7.1 烟气温度示值误差 ..... （3）
7.2 压力示值误差 ..... （3）
7.3 流速示值误差 ..... （4）
7.4 含湿量示值误差 ..... （5）
8　校准结果表达 ..... （5）
9　复校时间间隔 ..... （6）
附录 A 校准原始记录（参考）格式 ..... （7）
附录 B 校准证书（内页）参考格式 ..... （9）
附录 C 校准结果的不确定度评定示例 ..... （10）

引言

本规范依据 JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》、JJF 1001-2011《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》的规定而制定。

本规范为首次制定。

污染源烟气温压流湿监测仪

1 范围

本规范适用于固定污染源监测领域中污染源烟气温压流湿监测仪的校准。其中俯仰角和偏航角的适用范围为-10°～10°。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 1.1—2020 标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则

JJG 680—2021 烟尘采样器

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—2010 国家计量校准规范编写规则

HJ/T 48—1999 烟尘采样器技术条件

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

3.1 俯仰角（pitch angle）

烟囱或管道轴线与烟气流速的俯仰分量（也即速度矢量在定义的俯仰平面 pitch plane 上的分量）之间的夹角。对应俯仰角转动装置，从皮托管尾端看，俯仰角为 0°时为皮托管垂直轴线方向，逆时针摆动为正，顺时针摆动为负。

3.2 偏航角（yaw angle）

烟囱或管道轴线与烟气流速的偏航分量（也即速度矢量在定义的偏航平面 yaw plane 上的分量）之间的夹角。对应皮托管扭转装置，从皮托管尾端看，偏航角为 0°时为皮托管垂直轴线方向，顺时针旋转为正，逆时针旋转为负。

4 概述

污染源烟气温压流湿监测仪（以下简称监测仪）是对污染源排放烟气的温度、压力、流速及含湿量进行实时连续测量的设备。其中，烟气温度的测量主要是利用热电阻和热电偶等温度传感器；烟气压力由压力传感器测得；烟气流速通过皮托管或超声波流量计等不同原理的方法得到；烟气含湿量的测量主要是利用阻容法、干湿球法、激光法、冷凝法和重量法等不同工作原理的检测装置。监测仪一般由温度测量模块、压力测量模块、流速测量模块、含

湿量测量模块、处理单元、通讯单元和显示单元等部分组成。

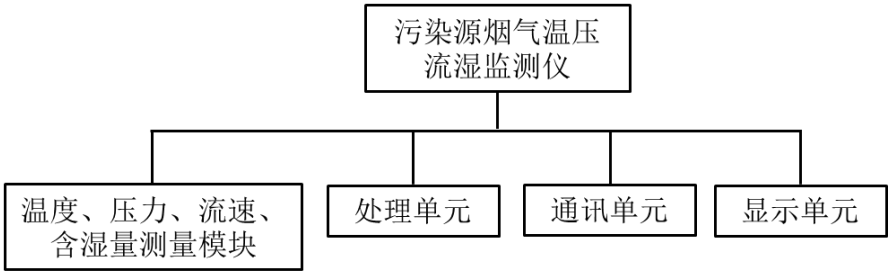

图1 污染源烟气温压流湿监测仪示意图

5 计量特性

污染源烟气温压流湿监测仪计量特性要求见表 1。

表 1 污染源烟气温压流湿监测仪计量特性要求

参数	示值误差
烟气温度	±3℃
压力	±4%FS
烟道轴向流速	±8%
含湿量	绝对误差：±0.75% L/L（含湿量＜5.0% L/L 时） 相对误差：±10%（含湿量≥5.0% L/L时）
注：以上指标不适用于合格性判定，仅供参考。	

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：（5～35）℃。

6.1.2 相对湿度：≤85%RH。

6.1.3 大气压力：（86～106）kPa。

6.1.4 供电电源：（220±22）V，（50±1）Hz。

6.1.5 其它：周围无明显影响校准系统正常工作的机械振动和电磁干扰。

6.2 校准用计量器具及配套设备

6.2.1 温度计：测量范围（0～220）℃，最大允许误差±0.3℃。

6.2.2 干燥箱：测量范围（50～300）℃，最大允许误差±1℃，均匀度：≤4.0℃，波动度：±0.4℃。

6.2.3 风速装置：调速范围（0.4～30）m/s，均匀性偏差≤1%，稳定性偏差≤1%，U=0.42 m/s,（k=2）。

6.2.4 微压差计：准确度等级不低于二等。

6.2.5 标准皮托管：L 型标准皮托管，校准系数为（0.998～1.004）。

6.2.6 压力计：（-50～50）kPa，准确度等级不低于 0.5 级。

6.2.7 精密微压计：（0～2500）Pa，最大允许误差不超过±0.5 Pa。

6.2.8 微压发生器（加压泵）：加压范围（-50～50）kPa。

6.2.9 数字气压计：测量范围应满足当地大气压要求，最大允许误差：±1.0 hPa。

6.2.10 高温精密露点仪：测量范围（10～80）℃ DP，最大允许误差：±0.3℃ DP，重复性：≤0.1℃ DP。

6.2.11 高温湿度标准箱（或其他高温湿度发生设备）：湿度为（20~98）%RH。

6.2.12 俯仰角和偏航角定位设备：偏航角定位设备：角度范围-180°～180°，角度分辨力优于 0.1°；俯仰角定位设备：角度范围-180°～180°，角度分辨力优于 0.1°。

7 校准项目和校准方法

7.1 烟气温度示值误差

将监测仪温度测量探头和温度计同时放入干燥箱中心位置附近，对 80℃，120℃，200℃三个温度点进行校准，或者选择其他有实际需要的温度点进行校准。待示值稳定后，同时读取监测仪温度值和温度计温度值，每个校准点连续测量 3 次，取 3 次示值的算术平均值作为监测仪的温度示值，按式（1）计算监测仪测量烟气温度的示值误差。

$$\Delta T = T_i - T_{si} \tag{1}$$

式中：

ΔT——监测仪第 i 个温度校准点的烟气温度示值误差，℃；

T_i——第 i 个温度校准点，监测仪温度示值，℃；

T_{si}——第 i 个温度校准点，温度计测得的温度值，℃。

7.2 压力示值误差

在全量程范围内均匀选取包括 0 点在内的不少于五个测量点，在压力发生器的压力输出端接一个三通，其一端接精密微压计，另一端接监测仪的静压测量口。调节压力输出至测量点，分别同时记录精密微压计和监测仪压力示值，用公式（2）计算压力示值误差。

$$\Delta P = \frac{P_i - P_{si}}{P} \times 100\% \qquad (2)$$

式中：

ΔP ——监测仪第 i 个压力校准点的压力示值误差，%FS；

P_i ——监测仪压力测定值，Pa；

P_{si} ——精密微压计测定值，Pa；

P ——监测仪压力测量装置的满量程值，Pa。

7.3 流速示值误差

将监测仪的流速测量探头安装在风洞工作段内，与标准皮托管保持位置一致，转动测量探头位置，让其正对风速方向，调整俯仰角和偏航角分别为-10°，0°和 10°（俯仰角和偏航角组合见表 2），启动风机，使流速达到 5 m/s、10 m/s、15 m/s、20 m/s 和 25 m/s 左右，或者选择其他有实际需要的流速校准点，每个校准点调好后稳定（1～2）min，分别同时记录标准皮托管流速值和监测仪的流速示值，每个校准点连续读取示值 3 次，取 3 次示值的算术平均值作为监测仪各校准点的流速示值。

表 2 俯仰角与偏航角组合

俯仰角（°）	-10	-10	-10	0	0	0	10	10	10
偏航角（°）	-10	0	10	-10	0	10	-10	0	10

按式（3）计算各测试点的流速示值误差；如果俯仰角和偏仰角为零，公式（3）可进一步简化为公式（4）：

$$\Delta v = \frac{v_i - v_{si}\cos\alpha\cos\beta}{v_{si}\cos\alpha\cos\beta} \times 100\% \qquad (3)$$

$$\Delta v = \frac{v_i - v_{si}}{v_{si}} \times 100\% \qquad (4)$$

式中：

Δv——监测仪第 i 个流速测试点的流速示值误差，%；

v_i——第 i 个流速测试点，监测仪流速示值，m/s；

v_{si}——第 i 个流速测试点，流速标准值，m/s；

α ——第 i 个流速测试点的俯仰角，°；

β ——第 i 个流速测试点的偏航角，°。

7.4 含湿量示值误差

将监测仪的湿度测量探头和探头外置式精密露点仪的露点探头（或探头内置式精密露点仪的露点采样管）放入高温湿度标准箱中心位置附近，依次设置含湿量为 5% L/L、10% L/L、20% L/L 三个测量点（依次对应标准大气压下的温湿度值分别为：50℃时 41%RH、50℃时 80%RH、70℃时 65%RH），待湿度稳定后分别读取并记录精密露点仪标准湿度值和监测仪的湿度示值，每个校准点连续读取示值 3 次，取 3 次示值的算术平均值作为监测仪各校准点的示值，按式（5）或式（6）计算监测仪各校准点的示值误差ΔH：

$$\Delta H = H_i - H_{si} \tag{5}$$

式中：

ΔH ——监测仪第 i 个校准点含湿量绝对误差，% L/L；

H_i——第 i 个含湿量校准点，监测仪含湿量显示值，% L/L；

H_{si}——第 i 个含湿量校准点，含湿量标准值，% L/L。

$$R = \frac{\Delta H}{H_{si}} \times 100\% \tag{6}$$

式中：

R——监测仪第 i 个校准点含湿量相对误差，%；

ΔH ——监测仪第 i 个校准点含湿量绝对误差，% L/L；

H_{si}——第 i 个含湿量校准点，含湿量标准值，% L/L。

8 校准结果表达

校准结果应反映在校准证书或校准报告上，校准证书或报告至少包括以下信息：

a) 标题，如“校准证书”或“校准报告”；

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受日期；

h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时，应对抽样程序进行说明；

i) 对校准所依据的技术规范的标识，包括名称及编号；

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

建议监测仪复校时间间隔为 1 年。使用单位也可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

校准原始记录(参考)格式

委托单号_____ 证书编号_____

送检单位_____ 校准地点_____

仪器名称_____ 仪器型号_____

制造厂商_____ 仪器编号_____

校准依据_____

1. 环境条件：

温度_____℃ 湿度_____%RH 大气压_____hPa 其他_____

2. 校准使用的主要计量器具

标准器名称	编号	测量范围	准确度等级/最大允许误差/测量不确定度	证书编号/溯源单位	有效期至

3. 烟气温度示值误差

标准值 ℃	仪器示值（℃）				示值误差 ℃
	1	2	3	平均值	

4. 压力示值误差

满量程（kPa）		
标准值 kPa	仪器示值 kPa	示值误差 %FS

5. 流速示值误差

标准器标准值 m/s	偏航角°	俯仰角°	流速标准值 m/s	流速测量值 m/s	流速示值误差

6. 含湿量示值误差

标准值（% L/L）	仪器示值（% L/L）				示值误差	
	1	2	3	平均值	绝对误差（% L/L）	相对误差（%）

本次烟气温度测量结果的扩展不确定度为_____

本次压力测量结果的扩展不确定度为_____

本次流速测量结果的扩展不确定度为_____

本次含湿量测量结果的扩展不确定度为_____

校准员_____核验员_____　　校准日期：_____年_____月_____日

附录 B

校准证书（内页）参考格式

校准项目	校准结果		
烟气温度示值误差	标准值（℃）	显示值（℃）	示值误差（℃）
压力示值误差	标准值（kPa）	显示值（kPa）	示值误差（%FS）
流速示值误差	标准值（m/s）	显示值（m/s）	示值误差（%）
含湿量示值误差	标准值（% L/L）	显示值（% L/L）	示值误差（%）

本次烟气温度测量结果的扩展不确定度为_____

本次压力测量结果的扩展不确定度为_____

本次流速测量结果的扩展不确定度为_____

本次含湿量测量结果的扩展不确定度为_____

附录 C

校准结果的不确定度评定示例

C.1 概述

C.1.1 评定依据

JJF 1059.1-2012 测量不确定度评定与表示。

C.1.2 标准设备和被测对象

C.1.2.1 标准设备

标准器及配套设备的主要技术指标见表 C.1。

表 C.1 标准器及配套设备主要技术指标

名称	主要技术指标
温度计	测量范围（0～220）℃，最大允许误差 0.3℃
干燥箱	测量范围（50～300）℃，最大允许误差 1℃
风速装置	调速范围（0.4～40）m/s，均匀性偏差≤1%，稳定性偏差≤1%，U=0.42m/s,（k=2）
微压差计	准确度等级不低于二等
标准皮托管	L 型标准皮托管，校准系数为（0.998～1.004）
压力表或压力计	（-50～50）kPa，准确度等级不低于 0.5 级
精密微压计	（0～2500）Pa，准确度等级不低于二等
微压发生器（加压泵）	加压范围（-50～50）kPa
数字气压计	最大允许误差 1.0hPa
高温精密露点仪	测量范围（10～80）℃CDP，最大允许误差 0.3℃CDP
高温湿度标准箱	湿度为（20~98）%RH

C.2 烟气温度测量结果的不确定度

C.2.1 数学模型

$$\Delta T = T_i - T_{si} \tag{C.1}$$

式中：

ΔT——监测仪第 i 个温度校准点的烟气温度示值误差，℃；

T_i——第 i 个温度校准点，监测仪温度示值，℃；

T_{si}——第 i 个温度校准点，温度计测得的温度值，℃。

$$u_c（\Delta T）=\sqrt{u^2（T_i）+u^2（T_{si}）} \qquad （C.2）$$

C.2.2 温度计引入的不确定度u_1

根据温度计的证书可知，高精度温度计的最大允许误差为：±0.3℃，假设服从均匀分布，则由温度计引入的不确定度为：

$$u_1=\frac{0.3}{\sqrt{3}}=0.17℃$$

C.2.3 测量不重复性引入的不确定度u_2

在 80℃条件下，把被测件放入温箱，重复测量 10 次，得到 80.6℃、80.4℃、80.3℃、80.4℃、80.5℃、80.4℃、80.4℃、80.5℃、80.6℃、80.4℃，通过计算得到由仪器重复性引入的不确定度为：

$$u_2(T_{80})=\frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i-\overline{C})^2}{n-1}}=0.06℃$$

在 120℃条件下，把被测件放入温箱，重复测量 10 次，得到 120.7℃、120.4℃、120.3℃、120.5℃、120.4℃、120.6℃、120.4℃、120.3℃、120.5℃、120.4℃，通过计算得到由仪器重复性引入的不确定度为：

$$u_2(T_{120})=\frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i-\overline{C})^2}{n-1}}=0.07℃$$

在 200℃条件下，把被测件放入温箱，重复测量 10 次，得到 200.1℃、200.3℃、200.2℃、200.1℃、200.5℃、200.2℃、200.1℃、200.3℃、200.2℃、200.3℃，通过计算得到由仪器重复性引入的不确定度为：

$$u_2(T_{200})=\frac{1}{\sqrt{3}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i-\overline{C})^2}{n-1}}=0.07℃$$

C.2.4 温度计分辨力引入的不确定度u_3：

温度计的分辨力为 0.01℃，假设为均匀分布，则由温度计分辨力引入的不确定度为：

$$u_3=\frac{1}{2}\times\frac{0.01}{\sqrt{3}}=0.003℃$$

由于温度计分辨力引入的不确定度小于重复测量引入不确定度的$\frac{1}{3}$，可忽略不计。

C.2.5 温箱不均匀性引入的不确定度u_4：

根据温箱的证书可知，温箱的不均匀性为±0.2℃，假设服从均匀分布，则有温箱的不均匀性引入的不确定度为：

$$u_4 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} = 0.12℃$$

C.2.6 合成标准不确定度

$$u_c(\Delta T_{80}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.04^2 + 0.12^2} = 0.13℃$$

$$u_c(\Delta T_{120}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.06^2 + 0.12^2} = 0.13℃$$

$$u_c(\Delta T_{200}) = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2} = \sqrt{0.01^2 + 0.06^2 + 0.12^2} = 0.13℃$$

P=95%时，可取包含因子 k=2，则：

$$U（\Delta T）= u_c（\Delta T）\cdot k = 0.3℃$$

C.3 压力测量结果的不确定度

C.3.1 数学模型

$$\Delta P = \frac{P_i - P_{si}}{P} \times 100\% \qquad （C.3）$$

式中：

ΔP——监测仪第 i 个压力校准点的压力示值误差，%FS；

P_i——监测仪压力测定值，Pa；

P_{si}——微压差计测定值，Pa；

P——监测仪压力测量装置的满量程值，Pa。

$$u_c（\Delta P）= \sqrt{\frac{u^2（P_i）+u^2（P_{si}）}{P^2}} \qquad （C.4）$$

C.3.2 静压力测量结果的不确定度

C.3.2.1 测量不重复性引入的不确定度u_1

对一台被校检测仪进行测量，压力范围（-30～30）kPa，压力为 30 kPa 时重复测量 6 次，压力表的读数分别为 30.42 kPa、30.50 kPa、30.58 kPa、30.60 kPa、30.55 kPa、30.36 kPa。

$$u_1(P_{30}) = \frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i - \bar{C})^2}{n-1}} = 0.04kPa$$

压力为 0 kPa 时重复测量 6 次，压力表的读数分别为 0.12kPa、0.15 kPa、0.13 kPa、0.14 kPa、0.16 kPa、0.15 kPa。

$$u_1(P_0)=\frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i-\bar{C})^2}{n-1}}=0.01\text{kPa}$$

压力为-30 kPa 时重复测量 6 次，压力表的读数分别为-29.87kPa、-29.75 kPa、-29.82 kPa、-29.80 kPa、-29.87 kPa、-29.78 kPa。

$$u_1(P_{-30})=\frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i-\bar{C})^2}{n-1}}=0.02\text{kPa}$$

C.3.2.2 压力表分辨力引入的不确定度u_2

压力表的分辨力为 0.01kPa，假设为均匀分布，则由压力表分辨力引入的不确定度为：$u_2=$

$$\frac{1}{2}\times\frac{0.01}{\sqrt{3}}=0.003\text{ kPa}$$

由于温度计分辨力引入的不确定度小于重复测量引入不确定度的$\frac{1}{3}$，可忽略不计。

C.3.2.3 压力表引入的不确定度u_3

压力表测量范围（-50～50）kPa，示值误差 0.2 级，假设为均匀分布，则由压力表引入的不确定度为：

$$u_3=100\times\frac{0.2\%}{\sqrt{3}}=0.12\text{ kPa}$$

C.3.2.4 合成标准不确定度

$$u_c(\Delta P_{30})=\sqrt{\frac{u_1^2+u_3^2}{P^2}}=\sqrt{\frac{0.04^2+0.12^2}{360}}=0.21\%$$

$$u_c(\Delta P_0)=\sqrt{\frac{u_1^2+u_3^2}{P^2}}=\sqrt{\frac{0.01^2+0.12^2}{360}}=0.20\%$$

$$u_c(\Delta P_{-30})=\sqrt{\frac{u_1^2+u_3^2}{P^2}}=\sqrt{\frac{0.02^2+0.12^2}{360}}=0.20\%$$

当 P=95%时，可取包含因子 k=2，则：

$$U_{rel}(\Delta P)=u_c(\Delta P)\cdot k=0.42\%\approx 0.5\%$$

C.4 流速测量结果的不确定度分析

C.4.1 测量模型

$$\Delta v=\frac{v_i-v_{si}\cos\alpha\cos\beta}{v_{si}\cos\alpha\cos\beta}\times 100\% \qquad (C.5)$$

$$vsi=\sqrt{\frac{2}{\rho_i}P_{0i}\xi_i} \qquad (C.6)$$

式中：

Δv——监测仪第 i 个流速测试点的流速示值误差，%；

v_i——第 i 个流速测试点，监测仪流速示值，m/s；

v_{si}——第 i 个流速测试点，流速标准值，m/s；

α ——第 i 个流速测试点的俯仰角，°；

β ——第 i 个流速测试点的偏航角，°。

ρ_i——风场内空气密度，kg/m^3；

P_{0i}——微差压计读数，Pa；

ξ_i——皮托管系数。

将模型中输出量对各输入量求偏导得各灵敏系数：

$$c_1 = c_4 = c_5 = \frac{\partial \Delta v}{\partial v_i} = \frac{1}{v_{si} cos\alpha cos\beta};$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta v}{\partial P_{0i}} = \frac{\partial \Delta v}{\partial v_{si}} \times \frac{\partial v_{si}}{\partial P_{0i}} = -\frac{v_i}{v_{si}^2 cos\alpha cos\beta} \times \left(-\frac{v_{si}}{2P_{0i}}\right) = \frac{v_i}{2P_{0i} v_{si} cos\alpha cos\beta} \approx \frac{1}{2P_{0i} cos\alpha cos\beta};$$

$$c_3 = \frac{\partial v_{si}}{\partial \xi_i} \approx \frac{1}{2\xi_{i cos\alpha cos\beta}};$$

C.4.2 测量不确定度来源

C.4.2.1 对被校准风速传感器示值进行多次重复测量引入的不确定度。

C.4.2.2 微差压计引入的不确定度。

C.4.2.3 皮托管引入的不确定度。

C.4.2.4 风洞均匀性引入的不确定度。

C.4.2.5 被校准风速传感器分辨力引入的不确定度。

C.4.3 输入量的标准不确定度评定

C.4.3.1 对被校准风速传感器示值误差重复性测量引入的标准不确定度

依据本规范对风速传感器的计量特性要求和校准方法，对被校准风速传感器重复 10 次测量，计算单次测量的实验标准偏差，测量数据见表 C.2 所示。

表 C.2 测量数据列

测量序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

标准值 v_i（m/s）	9.97	9.97	9.98	9.97	9.98	9.97	9.98	9.97	9.98	9.97
测量值 v'_i（m/s）	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1	10.1
误差值Δv_i（m/s）	0.03	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.03

用贝塞尔公式计算各校准点单次测量的标准为 0.005m/s 则：

$$u_1 = \frac{0.005}{\sqrt{3}} = 0.003 \text{ m/s} \quad \text{（C.7）}$$

C.4.3.2 微差压计引入的标准不确定度

微差压计最大允许误差为±0.5 Pa，假设为均匀分布，则微差压计引入的标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.289 \text{ Pa} \quad \text{（C.8）}$$

C.4.3.3 皮托管引入的标准不确定度

皮托管校准证书上给出的相对扩展不确定度为 0.5%（k= 2），则由皮托管引入的标准不确定度 u_3 为 0.0025ξ。

C.4.3.4 风洞均匀性引入的标准不确定度

风洞流速均匀性技术指标最大允许误差为±1.0%，假设为均匀分布，则由风洞均匀性引入的不确定度为：

$$u_4 = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.005774\, v_{si} \quad \text{（C.9）}$$

C.4.3.5 被校风速传感器分辨力引入的标准不确定度

风速传感器的分辨力为 0.1 m/s，假设为均匀分布，则由分辨力引入的标准不确定度为：

$$u_5 = \frac{0.1}{2\times\sqrt{3}} = 0.0289 \text{ m/s} \quad \text{（C.10）}$$

C.4.4 合成标准不确定度计算

标准不确定度分量汇总见表 C.3（以 v_{si} = 10 m/s 为例），由于分辨力引入的标准不确定度大于重复性引入的不确定度，因此，在合成标准不确定度时，只考虑分辨力引入的标准不确定度。

表 C.3 输入量标准不确定度及灵敏系数汇总表

标准不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数

微差压计引入的标准不确定度 u_2	0.289 Pa	$\frac{1}{2P_{0i}cos\alpha cos\beta}$
皮托管引入的标准不确定度 u_3	0.0025ξ	$\frac{1}{2\xi_i cos\alpha cos\beta}$
风洞均匀性引入的标准不确定度 u_4	0.005774v_{si}	$\frac{1}{v_{si}cos\alpha cos\beta}$
分辨力引入的标准不确定度 u_5	0.0289 m/s	$\frac{1}{v_{si}cos\alpha cos\beta}$

本次试验环境为气压为 1008.5 hPa，偏航角和俯仰角为 10°皮托管系数为 1.000。

以上各标准不确定度分量不相关，根据不确定度传播率，合成相对标准不确定度按公式（C.11）计算。

$$u_{rel}（\Delta v_i）= \sqrt{c_2^2u_2^2 + c_3^2u_3^2 + c_4^2u_4^2 + c_5^2u_5^2} = 0.4\% \qquad （C.11）$$

C.4.5 扩展不确定度

在 10m/s 校准点，相对扩展不确定度 U_{rel}= 0.8%（k =2）。

对风速传感器 5 个测量点进行校准，各校准点的测量不确定度见下表 C.4（俯仰角和偏航角均选择 10°），v 为标准风速值(m/s)：

表 C.4 风速测量值

v	5	10	15	20	25
u_{rel}	0.5%	0.4%	0.4%	0.3%	0.2%
U_{rel}	1.0%	0.8%	0.8%	0.6%	0.4%

C.5 湿度测量结果的不确定度

C.5.1 高低温试验箱波动度引入的不确定度分量u_{1rel}

根据溯源证书，高低温试验箱湿度波动度为±1.0%RH，假设为均匀分布，则；

$$u_1 = \frac{1.0\%\text{RH}}{\sqrt{3}} = 0.58\%\text{RH}$$

当含湿量为 5%时，对应标准大气压下 50℃时 41%RH，计算相对不确定度为$u_{1rel}(5\%) = \frac{0.58}{41} \times 100\% = 1.41\%$。

当含湿量为 10%时，对应标准大气压下 50℃时 80%RH，计算相对不确定度为$u_{1rel}(10\%) = \frac{0.58}{80} \times 100\% = 0.73\%$。

当含湿量为 20%时，对应标准大气压下 70℃时 65%RH，计算相对不确定度为

$u_{1\mathrm{rel}}(20\%)=\frac{0.58}{65}\times 100\%=0.89\%$。

C.5.2 露点仪引入的不确定度分量$u_{2\mathrm{rel}}$

根据溯源证书，露点仪的最大允许误差为±0.3 ℃CDP，假设为均匀分布，则；

$$u_2=\frac{0.3℃\mathrm{CDP}}{\sqrt{3}}=0.17℃\mathrm{CDP}$$

当含湿量为 5%时，对应标准大气压下 50℃时 41%RH，此时露点温度为 33.1℃CDP，因此露点仪引入的相对不确定度为$u_{2\mathrm{rel}}(5\%)=\frac{0.17}{33.1}\times 100\%=0.51\%$。

当含湿量为 10%时，对应标准大气压下 50℃时 80%RH，此时露点温度为 45.6℃CDP，因此露点仪引入的相对不确定度为$u_{2\mathrm{rel}}(10\%)=\frac{0.17}{45.6}\times 100\%=0.37\%$。

当含湿量为 20%时，对应标准大气压下 70℃时 65%RH，此时露点温度为 60.4℃CDP，因此露点仪引入的相对不确定度为$u_{2\mathrm{rel}}(20\%)=\frac{0.17}{60.4}\times 100\%=0.28\%$。

C.5.3 仪器重复性引入的不确定度分量$u_{3\mathrm{rel}}$

被测件在含湿量为 10%时，对应标准大气压下 50℃时 80%RH 条件下，重复测量 6 次，得到 10.1、10.3、10.2、10.2、10.4、10.1，通过计算得到由仪器重复性引入的不确定度为：

$$u_{3\mathrm{rel}}=\frac{1}{\sqrt{6}}\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(C_i-\overline{C})^2}{n-1}}=0.07\% \qquad (C.12)$$

C.5.4 合成标准不确定度

$$u_{\mathrm{rel}}(5\%)=\sqrt{u_{1\mathrm{rel}}^2+u_{2\mathrm{rel}}^2+u_{3\mathrm{rel}}^2}=\sqrt{1.41^2+0.51^2+0.07^2}\%=1.50\%$$

$$u_{\mathrm{rel}}(10\%)=\sqrt{u_{1\mathrm{rel}}^2+u_{2\mathrm{rel}}^2+u_{3\mathrm{rel}}^2}=\sqrt{0.73^2+0.37^2+0.07^2}\%=0.82\%$$

$$u_{\mathrm{rel}}(20\%)=\sqrt{u_{1\mathrm{rel}}^2+u_{2\mathrm{rel}}^2+u_{3\mathrm{rel}}^2}=\sqrt{0.89^2+0.28^2+0.07^2}\%=0.94\%$$

P＝95％时，可取包含因子 k＝2，则：

$$U_{\mathrm{rel}}(5\%)=u_{\mathrm{rel}}(5\%)\cdot k=3.0\%$$
$$U_{\mathrm{rel}}(10\%)=u_{\mathrm{rel}}(10\%)\cdot k=1.7\%$$
$$U_{\mathrm{rel}}(20\%)=u_{\mathrm{rel}}(20\%)\cdot k=1.9\%$$