



中华人民共和国工业和信息化部
机械计量技术规范

JJF (机械) 1103—2023

氢燃料电池系统及电堆测试台架
校准规范

Calibration Specification for
Hydrogen Fuel Cell System and Stack Test Bench

20**—**—**发布

20**—**—**实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

氢燃料电池系统及电堆测试台架校准规范

Calibration Specification for Hydrogen

Fuel Cell System and Stack Test Bench

JJF（机械）1103—2023

归口单位：中国机械工业联合会

主要起草单位：襄阳达安汽车检测中心有限公司

参加起草单位：中国汽车工程研究院股份有限公司

上海机动车检测认证技术研究中心有限公司

中汽研汽车检验中心（天津）有限公司，

本规范委托中国机械工业联合会负责解释

本规范主要起草人：

刘 茹 （襄阳达安汽车检测中心有限公司）

李 昕 （襄阳达安汽车检测中心有限公司）

参加起草人：

李文芳 （中国汽车工程研究院股份有限公司）

涂远扬 （襄阳达安汽车检测中心有限公司）

叶仁根 （襄阳达安汽车检测中心有限公司）

兰燕飞 （襄阳达安汽车检测中心有限公司）

冯晓枫 （上海机动车检测认证技术研究中心有限公司）

苏 衡 （中汽研汽车检验中心（天津）有限公司）

目 录

引 言	I
1 范围	1
2 引用文件	1
3 概述	1
4 计量特性	1
4.1 温度示值误差	1
4.2 压力示值误差	1
4.3 湿度示值误差	2
4.4 电压、电流示值误差	2
4.5 流量示值误差	2
5 校准条件	2
5.1 环境条件	2
5.2 标准装置	2
6 校准项目和校准方法	2
6.1 校准项目	3
6.2 校准方法	3
7 校准结果表达	6
8 复校时间间隔	6
附录 A (资料性) 氢燃料电池系统及电堆测试台架各参数测量结果的不确定度评定示例 ..	8
附录 B (资料性) 校准证书或校准报告内容	31

引 言

本规范依据 JJF1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》等规范编写。

《氢燃料电池系统及电堆测试台架校准规范》用于氢燃料电池系统及电堆测试台架校准的计量特性要求。

本校准规范给出了氢燃料电池系统及电堆测试台架的校准条件，校准项目、校准方法及不确定度评定方法。

本规范为首次制定。

氢燃料电池系统及电堆测试台架校准规范

1 范围

本文件规定了氢燃料电池系统及电堆测试台架的计量特性要求，描述了氢燃料电池系统及电堆测试台架各计量特性的校准方法，适用于氢燃料电池系统及电堆测试台架的校准（其他类似设备可参考本规范进行校准）。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF1001-2011 通用计量术语及定义

JJF1059.1-2012 测量不确定度评定与表示

JJF1071-2010 国家计量校准规范编写规则

JJF1094-2002 测量仪器特性评定与表示

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 概述

氢燃料电池系统及电堆测试台架是用于测试质子交换膜燃料电池性能的专用设备，通常由电子负载（内含电压测量单元和电流测量单元），湿度控制单元，气体流量计、液体流量计、温度和压力参数测量系统等部分组成。

4 计量特性

4.1 温度示值误差

4.1.1 热电偶型：测量范围：（0～1000）℃；零值误差不超过±0.3%FS，示值误差不超过±0.5%FS；

4.1.2 Pt100 型：测量范围：（-40～200）℃；零值误差不超过±0.2℃，示值误差不超过±1.0℃。

4.2 压力示值误差

测量范围：（-100～1000）kPa；零值误差不超过±0.2%FS，示值误差不超过±1.0%FS。

4.3 湿度示值误差

相对湿度示值误差不超过 $\pm 3.0\%RH$ 。

4.4 电压、电流示值误差

4.4.1 电压示值误差不超过 $\pm 0.5\%FS$ ；

4.4.2 电流示值误差不超过 $\pm 0.5\%FS$ 。

4.5 流量示值误差

4.5.1 气体流量计（质量流量计）示值误差不超过 $\pm 1.0\%FS$ ；

4.5.2 液体流量计（冷却液流量计）示值误差不超过 $\pm 1.0\%FS$ 。

注：上述技术要求仅供参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

校准时环境温度为 $(0\sim 40)^\circ C$ 、相对湿度不大于 $85\%RH$ 。

5.2 标准装置

表 1 标准装置

序号	仪器名称	最大允差
1	温度校验仪	热电偶型： $\pm 0.1\%FS$ 热电阻型： $\pm 0.1^\circ C$
2	压力标定器	$\pm 0.075\%FS$
3	标准湿度装置	其允差应不大于被校湿度控制单元允差的 1/3
4	高精度电压表	$\pm 0.01\%$
5	高精度电流表	$\pm 0.01\%$
6	标准气体流量计	$\pm 0.5\%$
7	高精度液体流量计	$\pm 0.3\%$

6 校准项目和校准方法

对氢燃料电池系统及电堆测试台架进行外观检查，应有唯一性的识别标识，各部件操

作灵活，显示清晰，不应有影响校准的缺陷，并按使用说明书规定进行预热。

6.1 校准项目

校准项目见表 2

表 2 校准项目表

序号	项目
1	热电偶型温度通道示值误差
2	Pt100 型温度通道示值误差
3	压力通道示值误差
4	湿度示值误差
5	电压示值误差
6	电流示值误差
7	气体流量示值误差
8	液体流量示值误差

6.2 校准方法

6.2.1 温度通道校准

6.2.1.1 接线方式如图 1 所示

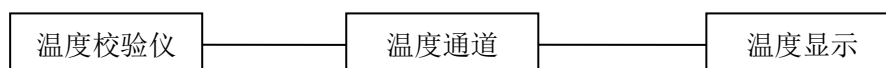


图 1 温度通道校准连接方式

6.2.1.2 对每一个温度通道，在其测量范围内，均匀选择至少 5 个校准点（也可以根据用户的要求选择校准点），用温度校验仪输入标准温度值，每个校准点重复测量 3 次，分别读取各点相应的仪表示值。

6.2.1.3 示值误差计算

对热电偶型温度通道，按公式（1）计算示值引用误差：

$$\Delta T_i = \frac{T_i - T_{oi}}{(T_{FS})} \times 100\% \quad (1)$$

式中： ΔT_i —第 i 校准点示值误差，%FS；

\bar{T}_i —第*i*校准点仪表 3 次示值的平均值, °C;

T_{oi} —标准装置第*i*校准点示值, °C;

T_{FS} —被校温度通道满量程值, °C。

对 Pt100 型温度通道, 按公式 (2) 计算示值绝对误差:

$$\delta_{ti} = \bar{T}_i - T_{oi} \quad (2)$$

式中: δ_{ti} —第*i*校准点示值误差, °C;

\bar{T}_i —第*i*校准点仪表 3 次示值的平均值, °C;

T_{oi} —标准装置第*i*校准点示值, °C。

标准装置值为零的校准点对应的示值误差即为零值误差。

6.2.2 压力通道校准

6.2.2.1 接线方式

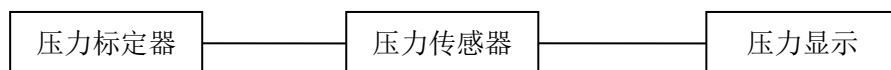


图 2 压力传感器校准连接方式

6.2.2.2 对每一个压力传感器, 在其测量范围内, 均匀选择至少 5 个校准点 (也可以根据用户的要求选择校准点), 用压力标定器输入标准压力值, 每个校准点重复测量 3 次, 分别读取各点相应的仪表示值;

6.2.2.3 示值误差的计算

按公式 (3) 计算示值引用误差:

$$\Delta P_i = \frac{\bar{P}_i - P_{oi}}{(P_{FS})} \times 100\% \quad (3)$$

式中: ΔP_i —第*i*校准点示值误差, %FS;

\bar{P}_i —第*i*校准点仪表 3 次示值的平均值, kPa;

P_{si} —标准装置第*i*校准点示值, kPa;

P_{FS} —被校压力通道满量程值, kPa。

标准装置示值为零的校准点对应的示值误差即为零值误差。

6.2.3 湿度控制单元校准

将湿度标准装置放置于被测气体管路出口，于出口处设置密闭装置，在湿度控制单元测量范围内，均匀选取3个校准点，待湿度控制单元示值稳定后，分别读取湿度标准装置与湿度控制单元的示值，按公式（4）计算相对湿度示值误差：

$$\delta_{Hi} = H_i - H_{0i} \quad (4)$$

式中： δ_{Hi} —第*i*校准点相对湿度示值误差，%RH；

H_i —第*i*校准点湿度控制单元示值，%RH；

H_{0i} —湿度标准装置第*i*校准点示值，%RH。

6.2.4 电压、电流测量单元校准

6.2.4.1 对于电压测量单元，由标准功率源发出标准电压，利用高精度电压表与电压测量单元并联连接测量进行电压校准，在量程范围内均匀选择至少5个校准点（也可以根据用户的要求选择校准点），分别读取各点高精度电压表及电压测量单元的示值。

按公式（6）计算示值引用误差：

$$\delta_{Vi} = \frac{V_i - V_{0i}}{(V_{FS})} \times 100\% \quad (6)$$

式中： δ_{Vi} —第*i*校准点电压示值误差，%FS；

V_i —第*i*校准点电压测量单元示值，V；

V_{0i} —高精度电压表第*i*校准点示值，V；

V_{FS} —被校电压测量单元满量程值，V。

6.2.4.2 对于电流测量单元，由标准功率源提供稳定电流，在电路中串联连接一已知的标准电阻、高精度电流表，进行电流示值校准。在其测量范围内，均匀选择至少5个校准点（也可以根据用户的要求选择校准点），分别读取各点高精度电流表及电流测量单元的示值。

按公式（7）计算示值引用误差：

$$\delta_{Ai} = \frac{A_i - A_{0i}}{(A_{FS})} \times 100\% \quad (7)$$

式中： δ_{Ai} —第*i*校准点电流示值误差，%FS；

A_i —第*i*校准点电流测量单元示值，A；

A_{0i} —高精度电流表第*i*校准点示值，A；

A_{FS} —被校电流测量单元满量程值，A。

6.2.5 流量计校准

6.2.5.1 气体流量计校准

将标准气体流量计串接入气体流量计测量系统回路，由流量控制器提供稳定的气体流量（校准介质为空气，温度为 $(25 \pm 3)^\circ\text{C}$ ），在气体流量计量程范围内，均匀选择至少3个校准点（也可以根据用户的要求选择校准点），分别读取各点气体流量计流量示值及标准气体流量计的示值。按公式（8）计算示值引用误差：

$$\delta_{Qi} = \frac{Q_i - Q_{oi}}{(Q_{FS})} \times 100\% \quad (8)$$

式中： δ_{Qi} —第*i*校准点流量示值误差，%FS；

Q_i —第*i*校准点气体流量计示值，L/min；

Q_{oi} —标准气体流量计第*i*校准点示值，L/min；

Q_{FS} —被校质量流量计满量程值，L/min。

6.2.5.2 液体流量计校准

将高精度液体流量计串接入液体流量计测量系统回路，由水泵提供稳定的液体流量（液体可为水），在液体流量计量程范围内，均匀选择至少3个校准点（也可以根据用户的要求选择校准点），分别读取各点液体流量计流量示值及高精度液体流量计的示值。按公式（9）计算示值引用误差：

$$\delta'_{Qi} = \frac{Q'_i - Q'_{oi}}{(Q'_{FS})} \times 100\% \quad (9)$$

式中： δ'_{Qi} —第*i*校准点示值误差，%FS；

Q'_i —第*i*校准点液体流量计示值，L/min；

Q'_{oi} —高精度液体流量计第*i*校准点示值，L/min；

Q'_{FS} —被校液体流量计满量程值，L/min。

7 校准结果表达

经校准的氢燃料电池系统及电堆测试台架，出具校准证书。注明校准项目，校准用测量标准的溯源性及有效性说明，测量不确定度等(详见附录B)。

8 复校时间间隔

氢燃料电池系统及电堆测试台架的复校时间间隔由用户自定。

附录 A

(资料性)

氢燃料电池系统及电堆测试台架各参数测量结果的不确定度评定示例

A.1 热电偶型温度通道示值误差测量结果的不确定度评定

A.1 测量方法

用本规范规定的测量方法如正文 6.2.1 所述。

A.1.2 数学模型

$$\Delta T_i = \frac{\bar{T}_i - T_{oi}}{T_{FS}} \times 100\% \quad (\text{A.1.1})$$

式中： ΔT_i —第 i 校准点示值误差，%；

\bar{T}_i —第 i 校准点仪表 3 次示值的平均值，℃；

T_{oi} —标准装置第 i 校准点示值，℃；

T_{FS} —被校温度通道满量程值，℃。

A.1.2.1 方差

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播定律：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (\text{A.1.2})$$

由 (A.1.1) 式得方差：

$$u_c^2(\Delta T_i) = c_1^2 u^2(\bar{T}_i) + c_2^2 u^2(T_{oi}) \quad (\text{A.1.3})$$

式中： $u(\bar{T}_i)$ —被校温度通道引入的不确定度分量；

$u(T_{oi})$ —标准装置引入的不确定度分量。

A.1.2.2 灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta T_i)}{\partial(\bar{T}_i)} = \frac{1}{T_{FS}} \quad (\text{A.1.4})$$

$$c_2 = \frac{\partial(\Delta T_i)}{\partial(T_{oi})} = -\frac{1}{T_{FS}} \quad (\text{A.1.5})$$

根据 (A.1.4)，(A.1.5) 式得标准不确定度：

$$u_c^2(\Delta T_i) = \frac{u^2(\bar{T}_i) + u^2(T_{oi})}{(T_{FS})^2} \quad (\text{A.1.6})$$

A.1.3 标准不确定度分量

A.1.3.1 由被校热电偶通道测量引入的标准不确定度 $u(\bar{T}_1)$

由被校热电偶测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

以 K 型为例, 选择标准温度 1000℃ 输入, 进行 10 次独立、等精度测量, 测量结果如表 A.1 所示。(单位: ℃)

表 A.1 热电偶温度通道重复性测量数据表

999	997	999	997	998	997	996	997	997	998
-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

得单次测量的实验标准差:

$$s(T_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (T_i - \bar{T}_i)^2}{9}} = 0.97^\circ\text{C}$$

在实际测量中, 重复条件下测量 3 次, 以 3 次测量结果的算术平均值为测量结果, 其标准不确定度分量为:

$$u_1 = \frac{s(T_i)}{\sqrt{3}} = 0.56^\circ\text{C}$$

由热电偶温度显示仪表数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2

热电偶温度显示仪表的分辨力为: $\pm 1^\circ\text{C}$, 其量化误差以等概率分布在半宽为 0.5°C 的区间内, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其引入的标准不确定度分量为:

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29^\circ\text{C}$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度分量。

由热电偶温度测量引入的标准不确定度为:

$$u(\bar{T}_1) = u_1 = 0.56^\circ\text{C}$$

A.1.3.2 标准装置引入的标准不确定度分量 $u(T_{oi})$

根据仪器用户手册中提供的信息, 输出为热电偶时的误差限为 0.055%, 以 K 型热电偶, 1000℃ 时为例, 其不确定度为:

$$u(T_{oi}) = \frac{0.055\% \times 1000}{\sqrt{3}} = 0.32^\circ\text{C}$$

A.1.4 合成相对标准不确定度为:

$$u_{cr}(\Delta T_i) = \sqrt{\frac{u^2(\bar{T}_l) + u^2(T_{oi})}{(1000)^2}} = \sqrt{\frac{0.56^2 + 0.32^2}{(1000)^2}} = 0.066\%$$

A.1.5 相对扩展不确定度:

取 $k=2$, 则相对扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = 2 \times 0.066\% = 0.14\%$$

结论: 上述分析及计算得到热电偶型温度通道示值误差测量结果的相对扩展不确定度为: $U_{\text{rel}} = 0.14\%$ ($k=2$)。

A.2 Pt100 型温度通道示值误差测量结果的不确定度评定

A.2.1 测量方法

用本规范规定的测量方法如正文 6.2.1 所述。

A.2.2 数学模型

$$\delta_{ti} = \bar{t}_i - T_{oi} \quad (\text{A.2.1})$$

式中： δ_{ti} —第 i 校准点示值误差，℃；

\bar{t}_i —第 i 校准点仪表 3 次示值的平均值，℃；

T_{oi} —标准装置第 i 校准点示值，℃。

A.2.2.1 方差

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播定律：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (\text{A.2.2})$$

由 (A.2.1) 式得方差：

$$u_c^2(\delta_{ti}) = c_1^2 u^2(\bar{t}_i) + c_2^2 u^2(T_{oi}) \quad (\text{A.2.3})$$

式中： $u(\bar{t}_i)$ —被校温度通道引入的不确定度分量；

$u(T_{oi})$ —标准装置引入的不确定度分量。

A.2.2.2 灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\delta_{ti})}{\partial(\bar{t}_i)} = 1 \quad (\text{A.2.4})$$

$$c_2 = \frac{\partial(\delta_{ti})}{\partial(T_{oi})} = -1 \quad (\text{A.2.5})$$

根据 (A.2.4)，(A.2.5) 式得标准不确定度：

$$u_c^2(\delta_{ti}) = u^2(\bar{t}_i) + u^2(T_{oi}) \quad (\text{A.2.6})$$

A.2.3 标准不确定度分量

A.2.3.1 由被校温度通道引入的不确定度分量 $u(\bar{t}_i)$

由被校热电阻测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

以 Pt100 为例，选择温度 50℃ 输入，进行 10 次独立、等精度测量，测量结果如表 A.2 所示。（单位：℃）

表 A.2 Pt100 温度通道重复性测量数据表

50.2	50.1	50.2	50.3	50.2	50.3	50.4	50.3	50.1	50.2
------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

得单次测量的实验标准差:

$$s(t_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (t_i - \bar{t}_l)^2}{9}} = 0.10^{\circ}\text{C}$$

在实际测量中, 重复条件下测量 3 次, 以 3 次测量结果的算术平均值为测量结果, 其标准不确定度分量为:

$$u_1 = \frac{s(t_i)}{\sqrt{3}} = 0.06^{\circ}\text{C}$$

由热电阻温度数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2

热电阻温度显示仪表的分辨力为: $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 其量化误差以等概率分布在半宽为 0.05°C 的区间内, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其引入的标准不确定度为:

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03^{\circ}\text{C}$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度。

由热电阻温度测量引入的标准不确定度分量为:

$$u(\bar{t}_l) = u_1 = 0.06^{\circ}\text{C}$$

A.2.3.2 标准装置引入的标准不确定度分量 $u(T_{oi})$

根据仪器的用户手册中提供的信息, Pt100 型热电阻的误差限制为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$, 在 50°C 时, 其对应的温度为 0.26°C , 服从均匀分布, 故其不确定度为:

$$u(T_{oi}) = \frac{0.26}{\sqrt{3}} = 0.15^{\circ}\text{C}$$

A.2.4 合成标准不确定度:

$$u_c(\delta t_i) = \sqrt{u^2(\bar{t}_l) + u^2(T_{oi})} = \sqrt{0.06^2 + 0.15^2} = 0.16^{\circ}\text{C}$$

A.2.5 扩展不确定度:

取 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U = 2 \times 0.16 = 0.32^{\circ}\text{C}$$

结论: 上述分析及计算得到热电阻温度通道示值误差测量结果的扩展不确定度为: $U =$

0.32℃ ($k=2$)。

A.3 压力传感器示值误差测量结果的不确定度评定

A.3.1 测量方法

用本规范规定的测量方法如正文 6.2.2 所述。

A.3.2 数学模型

$$\Delta P_i = \frac{\bar{P}_i - P_{oi}}{(P_{FS})} \times 100\% \quad (\text{A.3.1})$$

式中： ΔP_i —第 i 校准点示值误差，%FS；

\bar{P}_i —第 i 校准点仪表 3 次示值的平均值，kPa；

P_{si} —标准装置第 i 校准点示值，kPa；

P_{FS} —被校压力通道满量程值，kPa。

A.3.2.1 方差

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播定律：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (\text{A.3.2})$$

由 (A.3.1) 式得方差：

$$u_c^2(\Delta P_i) = c_1^2 u^2(\bar{P}_i) + c_2^2 u^2(P_{oi}) \quad (\text{A.3.3})$$

式中： $u(\bar{P}_i)$ —被校压力传感器引入的不确定度分量；

$u(P_{oi})$ —标准装置引入的不确定度分量。

A.3.2.2 灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\Delta P_i)}{\partial(\bar{P}_i)} = \frac{1}{P_{FS}} \quad (\text{A.3.4})$$

$$c_2 = \frac{\partial(\Delta P_i)}{\partial(P_{oi})} = -\frac{1}{P_{FS}} \quad (\text{A.3.5})$$

根据 (B.3.4)，(B.3.5) 式得标准不确定度：

$$u_c^2(\Delta P_i) = \frac{u^2(\bar{P}_i) + u^2(P_{oi})}{(P_{FS})^2} \quad (\text{A.3.6})$$

A.3.3 标准不确定度分量

A.3.3.1 由被校压力传感器测量引入的标准不确定度 $u(\bar{P}_i)$

由被校压力传感器测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

选择标准压力 200kPa 输入，进行 10 次独立、等精度测量，测量结果如表 B.1 所示。

(单位: kPa)

表 A.3 压力传感器重复性测量数据表

200.1	200.2	199.3	199.4	199.9	199.4	199.8	199.3	200.2	199.3
-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

得单次测量的实验标准差:

$$s(P_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (P_i - \bar{P}_i)^2}{9}} = 0.390 \text{ kPa}$$

在实际测量中, 重复条件下测量 3 次, 以 3 次测量结果的算术平均值为测量结果, 其标准不确定度分量为:

$$u_1 = \frac{s(P_i)}{\sqrt{3}} = 0.225 \text{ kPa}$$

由压力传感器显示仪表数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2

压力传感器显示仪表的分辨力为: $\pm 0.1 \text{ kPa}$, 其量化误差以等概率分布在半宽为 0.05 kPa 的区间内, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其引入的标准不确定度分量为:

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.029 \text{ kPa}$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度分量。

由压力传感器测量引入的标准不确定度为:

$$u(\bar{P}_i) = u_1 = 0.225 \text{ kPa}$$

A.3.3.2 标准装置引入的标准不确定度分量 $u(P_{oi})$

根据仪器使用手册提供的信息, 压力标定器给定最大允许误差为 $\pm 0.075\% \text{FS}$, 压力标定器满量程是 2000 kPa , 即标准器的最大允许误差限为 $\pm 1.5 \text{ kPa}$ 。其不确定度为:

$$u(P_{oi}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \times 1.5 = 0.867 \text{ kPa}$$

A.3.4 合成相对标准不确定度为:

$$u_{cr}(\Delta P_i) = \sqrt{\frac{u^2(\bar{P}_i) + u^2(P_{oi})}{(1000)^2}} = \sqrt{\frac{0.225^2 + 0.867^2}{(1000)^2}} = 0.09\%$$

A.3.5 相对扩展不确定度:

取 $k=2$, 则相对扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}}=2\times 0.09\%=0.18\%$$

结论：上述分析及计算得到压力示值误差测量结果的相对扩展不确定度为： $U_{\text{rel}}=0.18\%$ （ $k=2$ ）。

A.4 相对湿度示值误差测量结果的不确定度评定

A.4.1 测量方法

用本规范规定的测量方法如正文 6.2.3 所述。

A.4.2 数学模型

$$\delta_{Hi} = H_i - H_{0i} \quad (\text{A.4.1})$$

式中： δ_{Hi} —第*i*校准点相对湿度示值误差，%RH；

H_i —第*i*校准点湿度控制单元示值，%RH；

H_{0i} —标准温湿度仪第*i*校准点示值，%RH。

A.4.2.1 方差

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播定律：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (\text{A.4.2})$$

由 (A.4.1) 式得方差：

$$u_c^2(\delta_{Hi}) = c_1^2 u^2(H_i) + c_2^2 u^2(H_{0i}) \quad (\text{A.4.3})$$

式中： $u(H_i)$ —被校湿度控制单元引入的不确定度分量；

$u(H_{0i})$ —标准温湿度仪引入的不确定度分量。

A.4.2.2 灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\delta_{Hi})}{\partial(H_i)} = 1 \quad (\text{A.4.4})$$

$$c_2 = \frac{\partial(\delta_{Hi})}{\partial(H_{0i})} = -1 \quad (\text{A.4.5})$$

根据 (A.4.4)，(A.4.5) 式得标准不确定度：

$$u_c^2(\delta_{Hi}) = u^2(H_i) + u^2(H_{0i}) \quad (\text{A.2.6})$$

A.4.3 标准不确定度分量

A.4.3.1 由被校湿度控制单元引入的不确定度分量 $u(H_i)$

由被校湿度控制单元测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

在湿度约为 50%RH 时进行 10 次独立、等精度测量，测量结果如表 A.4 所示。(单位：%RH)

表 A.4 湿度控制单元重复性测量数据表

标准值	50.06	49.94	50.03	49.86	49.95	50.23	50.02	50.03	49.93	49.95
-----	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

显示值	50.1	50.0	50.1	49.9	49.9	50.2	50.1	50.1	49.9	50.0
误差	0.04	0.06	0.07	-0.04	-0.05	-0.03	0.08	0.07	-0.03	0.05

得单次测量的实验标准差:

$$s(\Delta H_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta H_i - \bar{\Delta H})^2}{9}} = 0.06\%RH$$

在实际测量中, 重复条件下测量 1 次, 其标准不确定度分量为:

$$u_1 = s(\Delta H_i) = 0.06\%RH$$

由湿度控制单元数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2

湿度控制单元显示仪表的分辨力为: $\pm 0.1\%RH$, 其量化误差以等概率分布在半宽为 $0.05\%RH$ 的区间内, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其引入的标准不确定度为:

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03\%RH$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度。

由湿度控制单元湿度测量引入的标准不确定度分量为:

$$u(H_i) = u_1 = 0.06\%RH$$

A.4.3.2 标准装置引入的标准不确定度分量 $u(H_{oi})$

根据仪器的用户手册中提供的信息, 标准温湿度仪的允许误差为 $\pm 1\%$, 在 $50\%RH$ 时, 其对应的温度为 $0.5\%RH$, 服从均匀分布, 故其不确定度为:

$$u(H_{oi}) = \frac{0.5}{\sqrt{3}} = 0.29\%RH$$

A.4.4 合成标准不确定度:

$$u_c(\delta_{Hi}) = \sqrt{u^2(H_i) + u^2(H_{oi})} = \sqrt{0.06^2 + 0.29^2} = 0.30\%RH$$

A.4.5 扩展不确定度:

取 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U = 2 \times 0.30 = 0.6\%RH$$

结论: 上述分析及计算得到湿度控制单元湿度示值误差测量结果的扩展不确定度为:

$U = 0.6\%RH$ ($k=2$)。

A.5 电压示值误差测量结果的不确定度评定

A.5.1 测量方法

用本规范规定的测量方法如正文 6.2.4.1 所述。

A.5.2 数学模型

$$\delta_{Vi} = \frac{V_i - V_{oi}}{(V_{FS})} \times 100\% \quad (\text{A.5.1})$$

式中: δ_{Vi} —第 i 校准点电压示值误差, %FS;

V_i —第 i 校准点电压测量单元示值, V;

V_{oi} —高精度电压表第 i 校准点示值, V;

V_{FS} —被校电压测量单元满量程值, V。

A.5.2.1 方差

因为各输入量彼此独立, 依不确定度传播定律:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (\text{A.5.2})$$

由 (A.5.1) 式得方差:

$$u_c^2(\delta_{Vi}) = c_1^2 u^2(V_i) + c_2^2 u^2(V_{oi}) \quad (\text{A.5.3})$$

式中: $u(V_i)$ —被校电压测量单元引入的不确定度分量;

$u(V_{oi})$ —高精度电压表引入的不确定度分量。

A.5.2.2 灵敏系数:

$$c_1 = \frac{\partial(\delta_{Vi})}{\partial(V_i)} = \frac{1}{V_{FS}} \quad (\text{A.5.4})$$

$$c_2 = \frac{\partial(\delta_{Vi})}{\partial(V_{oi})} = -\frac{1}{V_{FS}} \quad (\text{A.5.5})$$

根据 (A.5.4), (A.5.5) 式得标准不确定度:

$$u_c^2(\delta_{Vi}) = \frac{u^2(V_i) + u^2(V_{oi})}{(V_{FS})^2} \quad (\text{A.2.6})$$

A.5.3 标准不确定度分量

A.5.3.1 由被校电压测量单元引入的不确定度分量 $u(V_i)$

由被校电压测量单元测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

在标准功率源提供稳定电压 500V 时进行 10 次独立、等精度测量, 测量结果如表 A.5 所示。(单位: V)

表 A.5 电压测量单元重复性测量数据表

标准值	500.21	500.50	500.43	500.23	500.09	500.28	500.14	500.09	500.31	500.07
显示值	500.3	500.4	500.3	500.1	500.2	500.4	500.3	500.2	500.4	500.2
误差	0.09	-0.10	-0.07	-0.13	0.11	0.12	0.16	0.11	0.09	0.13

得单次测量的实验标准差:

$$s(\Delta V_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta V_i - \bar{\Delta V})^2}{9}} = 0.11\text{V}$$

在实际测量中, 重复条件下测量 1 次, 其标准不确定度分量为:

$$u_1 = s(\Delta V_i) = 0.11\text{V}$$

由电压测量单元数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2

电压测量单元显示仪表的分辨力为: $\pm 0.1\text{V}$, 其量化误差以等概率分布在半宽为 0.05V 的区间内, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其引入的标准不确定度为:

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03\text{V}$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度。

由电压测量单元电压测量引入的标准不确定度分量为:

$$u(V_i) = u_1 = 0.11\text{V}$$

A.5.3.2 标准装置引入的标准不确定度分量 $u(V_{oi})$

根据仪器的用户手册中提供的信息, 高精度电压表的允许误差为 $\pm 0.01\%$, 在 500V 时, 其对应的电压为 0.05V , 服从均匀分布, 故其不确定度为:

$$u(V_{oi}) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03\text{V}$$

A.5.4 合成相对标准不确定度:

$$u_{cr}(\delta_{Vi}) = \sqrt{\frac{u^2(V_i) + u^2(V_{oi})}{(1000)^2}} = \sqrt{\frac{0.11^2 + 0.03^2}{(1000)^2}} = 0.02\%$$

A.5.5 扩展不确定度:

取 $k=2$, 则相对扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = 2 \times 0.02\% = 0.04\%$$

结论：上述分析及计算得到电压测量单元示值误差测量结果的相对扩展不确定度为：
 $U_{\text{rel}} = 0.04\%$ ，（ $k=2$ ）。

A.6 电流示值误差测量结果的不确定度评定

A.6.1 测量方法

用本规范规定的测量方法如正文 6.2.4.2 所述。

A.6.2 数学模型

$$\delta_{Ai} = \frac{A_i - A_{oi}}{(A_{FS})} \times 100\% \quad (\text{A.6.1})$$

式中： δ_{Ai} —第*i*校准点电流示值误差，%FS；

A_i —第*i*校准点电流测量单元示值，A；

A_{oi} —高精度电流表第*i*校准点示值，A；

A_{FS} —被校电流测量单元满量程值，A。

A.6.2.1 方差

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播定律：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (\text{A.6.2})$$

由（A.6.1）式得方差：

$$u_c^2(\delta_{Ai}) = c_1^2 u^2(A_i) + c_2^2 u^2(A_{oi}) \quad (\text{A.6.3})$$

式中： $u(A_i)$ —被校电流单元引入的不确定度分量；

$u(A_{oi})$ —高精度电流表引入的不确定度分量。

A.6.2.2 灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\delta_{Ai})}{\partial(A_i)} = \frac{1}{A_{FS}} \quad (\text{A.6.4})$$

$$c_2 = \frac{\partial(\delta_{Ai})}{\partial(A_{oi})} = -\frac{1}{A_{FS}} \quad (\text{A.6.5})$$

根据（A.6.4），（A.6.5）式得标准不确定度：

$$u_c^2(\delta_{Ai}) = \frac{u^2(A_i) + u^2(A_{oi})}{(A_{FS})^2} \quad (\text{A.6.6})$$

A.6.3 标准不确定度分量

A.6.3.1 由被校电流测量单元引入的不确定度分量 $u(A_i)$

由被校电流测量单元测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

在标准功率源提供稳定电流 500A 时进行 10 次独立、等精度测量，测量结果如表 A.6

所示。(单位: A)

表 A.6 电流测量单元重复性测量数据表

标准值	500.29	500.29	500.37	500.03	500.29	500.41	500.27	500.18	500.27	500.26
显示值	500.2	500.4	500.3	500.1	500.2	500.3	500.4	500.3	500.4	500.4
误差	-0.09	0.11	-0.07	0.07	-0.09	-0.11	0.13	0.12	0.13	0.14

得单次测量的实验标准差:

$$s(\Delta A_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta A_i - \bar{\Delta A})^2}{9}} = 0.11A$$

在实际测量中, 重复条件下测量 1 次, 其标准不确定度分量为:

$$u_1 = s(\Delta A_i) = 0.11A$$

由电流测量单元数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2

电流测量单元显示仪表的分辨力为: $\pm 0.1A$, 其量化误差以等概率分布在半宽为 $0.05A$ 的区间内, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其引入的标准不确定度为:

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03A$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度。

由电流测量单元电流测量引入的标准不确定度分量为:

$$u(A_i) = u_1 = 0.11A$$

A.6.3.2 标准装置引入的标准不确定度分量 $u(A_{oi})$

根据仪器的用户手册中提供的信息, 高精度电流表的允许误差为 $\pm 0.01\%$, 在 $500A$ 时, 其对应的电流为 $0.05A$, 服从均匀分布, 故其不确定度为:

$$u(A_{oi}) = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03A$$

A.6.4 合成相对标准不确定度:

$$u_{cr}(\delta A_i) = \sqrt{\frac{u^2(A_i) + u^2(A_{oi})}{(1200)^2}} = \sqrt{\frac{0.11^2 + 0.03^2}{(1200)^2}} = 0.01\%$$

A.6.5 扩展不确定度:

取 $k=2$, 则相对扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = 2 \times 0.01\% = 0.02\%$$

结论：上述分析及计算得到电流测量单元示值误差测量结果的相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = 0.02\%, \quad (k=2)。$$

A.7 气体流量计示值误差测量结果的不确定度评定

A.7.1 测量方法

用本规范规定的测量方法如正文 6.2.5.1 所述。

A.7.2 数学模型

$$\delta_{Qi} = \frac{Q_i - Q_{oi}}{Q_{FS}} \times 100\% \quad (\text{A.7.1})$$

式中： δ_{Qi} —第*i*校准点流量示值误差，%FS；

Q_i —第*i*校准点气体流量计示值，L/min；

Q_{oi} —柯氏力流量计第*i*校准点示值，L/min；

Q_{FS} —被校质量流量计满量程值，L/min。

A.7.2.1 方差

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播定律：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (\text{A.7.2})$$

由 (A.7.1) 式得方差：

$$u_c^2(\delta_{Qi}) = c_1^2 u^2(Q_i) + c_2^2 u^2(Q_{oi}) \quad (\text{A.7.3})$$

式中： $u(Q_i)$ —被校气体流量计引入的不确定度分量；

$u(Q_{oi})$ —柯氏力流量计引入的不确定度分量。

A.7.2.2 灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\delta_{Qi})}{\partial(Q_i)} = \frac{1}{Q_{FS}} \quad (\text{A.7.4})$$

$$c_2 = \frac{\partial(\delta_{Qi})}{\partial(Q_{oi})} = -\frac{1}{Q_{FS}} \quad (\text{A.7.5})$$

根据 (A.7.4)，(A.7.5) 式得标准不确定度：

$$u_c^2(\delta_{Qi}) = \frac{u^2(Q_i) + u^2(Q_{oi})}{(Q_{FS})^2} \quad (\text{A.7.6})$$

A.7.3 标准不确定度分量

A.7.3.1 由被校气体流量计引入的不确定度分量 $u(Q_i)$

由被校气体流量计测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

由流量控制器提供稳定气体流量，在流量 2000L/min 时进行 10 次独立、等精度测量，

测量结果如表 A.7 所示。(单位: L/min)

表 A.7 气体流量计重复性测量数据表

标准值	2000.23	2000.71	2000.53	2000.51	2000.06	2000.57	2000.44	2000.43	2000.52	2000.17
显示值	2000.6	2000.2	2000.1	2000.9	2000.5	2000.2	2000.8	2000.1	2000.1	2000.5
误差	0.37	-0.41	-0.43	-0.39	0.44	-0.37	-0.36	-0.33	-0.42	0.33

得单次测量的实验标准差:

$$s(\Delta Q_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta Q_i - \bar{\Delta Q})^2}{9}} = 0.38 \text{ L/min}$$

在实际测量中, 重复条件下测量 1 次, 其标准不确定度分量为:

$$u_1 = s(\Delta Q_i) = 0.38 \text{ L/min}$$

由气体流量计数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2

气体流量计显示仪表的分辨力为: $\pm 0.1 \text{ L/min}$, 其量化误差以等概率分布在半宽为 0.05 L/min 的区间内, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其引入的标准不确定度为:

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ L/min}$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度。

由气体流量计流量测量引入的标准不确定度分量为:

$$u(Q_i) = u_1 = 0.38 \text{ L/min}$$

A.7.3.2 标准装置引入的标准不确定度分量 $u(Q_{oi})$

根据仪器的用户手册中提供的信息, 柯氏力流量计的允许误差为 $\pm 0.5\%$, 在 2000 L/min 时, 其对应的流量为 10 L/min , 服从均匀分布, 故其不确定度为:

$$u(Q_{oi}) = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.78 \text{ L/min}$$

A.7.4 合成相对标准不确定度:

$$u_{cr}(\delta_{Q_i}) = \sqrt{\frac{u^2(Q_i) + u^2(Q_{oi})}{(6000)^2}} = \sqrt{\frac{0.38^2 + 5.78^2}{(6000)^2}} = 0.1\%$$

A.7.5 扩展不确定度:

取 $k=2$, 则相对扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = 2 \times 0.1\% = 0.2\%$$

结论：上述分析及计算得到气体流量计示值误差测量结果的相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = 0.2\%, \quad (k=2)。$$

A.8 液体流量计示值误差测量结果的不确定度评定

A.8.1 测量方法

用本规范规定的测量方法如正文 6.2.5.2 所述。

A.8.2 数学模型

$$\delta'_{Qi} = \frac{Q'_i - Q'_{oi}}{(Q'_{FS})} \times 100\% \quad (\text{A.8.1})$$

式中： δ'_{Qi} —第*i*校准点流量示值误差，%FS；

Q'_i —第*i*校准点液体流量计示值，L/s；

Q'_{oi} —高精度液体流量计第*i*校准点示值，L/s；

Q'_{FS} —被校液体流量计满量程值，L/s。

A.8.2.1 方差

因为各输入量彼此独立，依不确定度传播定律：

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (\text{A.8.2})$$

由 (A.8.1) 式得方差：

$$u_c^2(\delta'_{Qi}) = c_1^2 u^2(Q'_i) + c_2^2 u^2(Q'_{oi}) \quad (\text{A.8.3})$$

式中： $u(Q'_i)$ —被校液体流量计引入的不确定度分量；

$u(Q'_{oi})$ —高精度液体流量计引入的不确定度分量。

A.8.2.2 灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial(\delta'_{Qi})}{\partial(Q'_i)} = \frac{1}{Q'_{FS}} \quad (\text{A.8.4})$$

$$c_2 = \frac{\partial(\delta'_{Qi})}{\partial(Q'_{oi})} = -\frac{1}{Q'_{FS}} \quad (\text{A.8.5})$$

根据 (A.8.4)，(A.8.5) 式得标准不确定度：

$$u_c^2(\delta'_{Qi}) = \frac{u^2(Q'_i) + u^2(Q'_{oi})}{(Q'_{FS})^2} \quad (\text{A.8.6})$$

A.8.3 标准不确定度分量

A.8.3.1 由被校液体流量计引入的不确定度分量 $u(Q'_i)$

由被校液体流量计测量重复性引入的标准不确定度分量 u_1

由流量控制器提供稳定液体流量，在流量 200L/min 时进行 10 次独立、等精度测量，

测量结果如表 A.8 所示。(单位: L/min)

表 A.8 液体流量计重复性测量数据表

标准值	200.09	200.34	200.33	200.14	200.11	200.24	200.11	199.55	199.35	200.57
显示值	200.3	200.2	200.0	199.8	199.8	200.5	200.4	199.8	199.7	200.3
误差	0.21	-0.14	-0.33	-0.34	-0.31	0.26	0.29	0.25	0.35	-0.27

得单次测量的实验标准差:

$$s(\Delta Q_i') = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta Q_i' - \overline{\Delta Q_i'})^2}{9}} \text{ L/min}$$

在实际测量中, 重复条件下测量 1 次, 其标准不确定度分量为:

$$u_1 = s(\Delta Q_i') = 0.30 \text{ L/min}$$

由液体流量计数显量化误差引入的标准不确定度分量 u_2

液体流量计显示仪表的分辨力为: $\pm 0.1 \text{ L/min}$, 其量化误差以等概率分布在半宽为 0.05 L/min 的区间内, 取包含因子 $k = \sqrt{3}$, 其引入的标准不确定度为:

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} = 0.03 \text{ L/min}$$

由重复性引入的不确定度分量大于由分辨力引入的不确定度分量, 因此可以不考虑分辨力引入的不确定度。

由气体流量计流量测量引入的标准不确定度分量为:

$$u(Q_i') = u_1 = 0.30 \text{ L/min}$$

A.8.3.2 标准装置引入的标准不确定度分量 $u(Q_{oi}')$

根据仪器的用户手册中提供的信息, 高精度液体流量计的允许误差为 $\pm 0.3\%$, 在 200 L/min 时, 其对应的流量为 0.6 L/min , 服从均匀分布, 故其不确定度为:

$$u(Q_{oi}') = \frac{0.6}{\sqrt{3}} = 0.35 \text{ L/min}$$

A.8.4 合成相对标准不确定度:

$$u_{cr}(\delta_{Q_i}') = \sqrt{\frac{u^2(Q_i') + u^2(Q_{oi}')}{(500)^2}} = \sqrt{\frac{0.30^2 + 0.35^2}{(500)^2}} = 0.10\%$$

A.8.5 扩展不确定度:

取 $k=2$, 则相对扩展不确定度为:

$$U_{\text{rel}} = 2 \times 0.1\% = 0.2\%$$

结论：上述分析及计算得到液体流量计示值误差测量结果的相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = 0.2\%, \quad (k=2)。$$

附录 B

（资料性）

校准证书或校准报告内容

- 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（如不在实验室内进行校准）；
- d) 证书或报告的唯一性标识（如编号），每页及总页的标识；
- 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的应用有关时，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) 校准结果及测量不确定度的说明；
- m) 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；
- n) 校准结果仅对被校对象有效的声明；
- o) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书或报告的声明。