



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF ××××-202×

生物切向流过滤系统校准规范

Calibration Specification of Tangential Flow Filtration System

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

生物切向流过滤系统校准 规范

JJF XXXX—202X

Calibration Specification of Tangential Flow

Filtration System

归口单位：全国生物计量技术委员会

主要起草单位：南京市计量监督检测院

中国计量科学研究院

参加起草单位：南京信息职业技术学院

北京科兴中维生物技术有限公司

本规范委托全国生物计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

全国生物计量技术委员会

目 录

| | |
|-------------------------|----|
| 引 言 | IV |
| 生物切向流过滤系统校准规范 | 1 |
| 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 | 1 |
| 4 概述 | 2 |
| 5 计量特性 | 2 |
| 6 校准条件 | 3 |
| 6.1 环境条件 | 3 |
| 6.2 测量标准及其他设备 | 3 |
| 7 校准项目和校准方法 | 4 |
| 7.1 校准前准备及检查 | 4 |
| 7.2 压力示值误差与回程误差 | 4 |
| 7.4 流量示值误差 | 4 |
| 7.5 温度示值误差 | 5 |
| 7.6 电导率引用误差与重复性 | 6 |
| 7.7 pH 示值误差与重复性 | 7 |
| 7.8 称量示值误差 | 7 |
| 8 校准结果表达 | 8 |
| 9 复校时间间隔 | 8 |
| 附录 A 校准原始记录格式 | 9 |
| 附录 B 校准证书（内页）推荐格式 | 11 |
| 附录 C 测量不确定度评定示例 | 12 |
| 附录 D 电导率标准溶液制备方法 | 25 |
| 附录 E 国际温标纯水密度表 | 27 |

引 言

JJF 1071《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1《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。校准方法及计量特性等主要参考了 JJG 376《电导率仪》、JJG 539《数字指示秤》、JJG 705《液相色谱仪检定规程》、JJG 875《数字压力计》、JJF 1547《在线 pH 计校准规范》。

本规范为首次发布。

全国生物计量技术委员会

生物切向流过滤系统校准规范

1 范围

本规范适用于以切向流过滤为原理的生物过滤系统的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 376—2007 电导率仪

JJG 539—2016 数字指示秤

JJG 705—2014 液相色谱仪检定规程

JJG 875—2019 数字压力计

JJF 1001—2011 通用计量术语及定义

JJF 1265—2022 生物计量术语及定义

JJF 1547—2015 在线 pH 计校准规范

GB/T 27502—2011 电导率测量用校准溶液制备方法

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

JJF 1001—2011、JJF 1265—2022 中界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1.1 切向流过滤 tangential flow filtration

切向流过滤是指液体流动方向切向（平行）于滤膜表面的过滤形式。

3.1.2 切向流过滤膜 tangential flow filtration membrane

通过切向流过滤方式实现物质分离过滤的膜，根据孔径通常又可分为切向流微滤膜和切向流超滤膜，由过滤膜加工制造的过滤器一般称为膜包。

3.2 计量单位

压力单位为帕斯卡（Pa），或是它的十进倍数单位：hPa、kPa、MPa 等；
流量单位为升每分钟（L/min），或是它的十进倍数单位：mL/min、 μ L/min 等；

温度单位为摄氏度（ $^{\circ}$ C）；

电导率单位为毫西门子每厘米（mS/cm）或微西门子每厘米（ μ S/cm）；

酸度（pH 值）无量纲；

重量单位为克（g）或千克（kg）。

4 概述

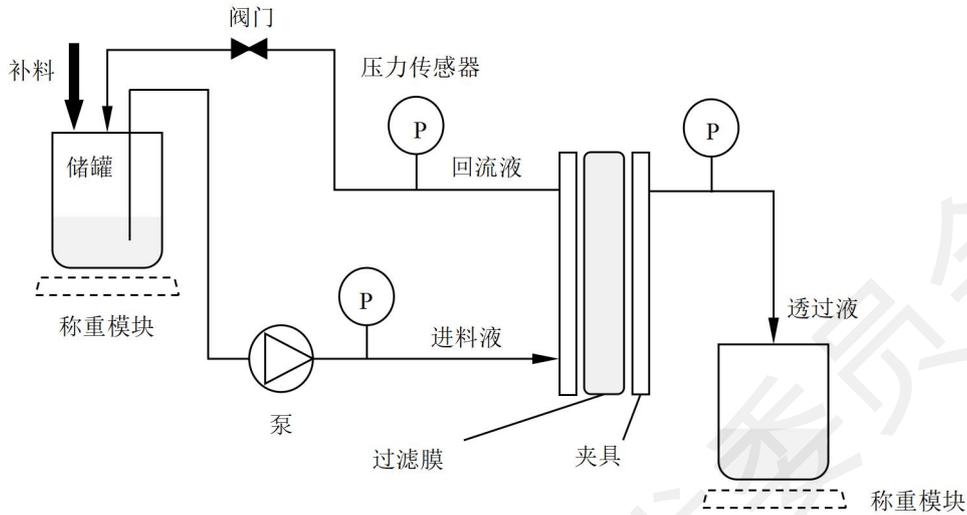


图1 生物切向流过滤系统基本结构

生物切向流过滤系统（以下简称切向流过滤系统）是将切向流过滤膜以一定方式组装而成的过滤装置，可用于生物制品的澄清、浓缩、脱盐、换液、除热原、分离与纯化等，其工作原理是通过泵使原料液体沿过滤膜表面切向流动，在压力驱动下根据分子尺寸不同进行过滤分离。

切向流过滤系统通常由泵、过滤膜、夹具、储罐、连接管路、阀门、压力传感器、控制软件等部件组成，部分系统还配备有流量计、温度传感器、pH传感器、电导率仪、称重模块等。切向流过滤系统基本结构示意图见图1。

5 计量特性

切向流过滤系统的主要计量特性指标见表1。

表1 切向流过滤系统的主要计量特性指标

| 计量特性 | 计量特性指标 |
|-----------|-----------|
| 压力示值误差 | 不超过±5% |
| 压力回程误差 | ≤5% |
| 流量示值误差 | 不超过±5% |
| 温度示值误差* | 不超过±1℃ |
| 电导率引用误差* | 不超过±2%FS |
| 电导率测量重复性* | ≤1.0%FS |
| pH示值误差* | 不超过±0.1pH |
| pH测量重复性* | ≤0.05pH |
| 称量示值误差* | 不超过±1g |

注1：以上技术指标不用于符合性判别，仅供参考。

注 2: *如仪器适用, 可进行该项目的校准。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度 (10~40) °C, 相对湿度不大于 80%。

6.1.2 周围无剧烈振动, 无强电磁干扰。

6.1.3 室内应防潮、避光、防热、无腐蚀性物品, 通风良好。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 压力标准器及压力发生器

压力标准器测量范围应大于等于切向流过滤系统安装压力计的测量范围, 压力标准器的最大允许误差绝对值应不大于被检压力计最大允许误差绝对值的 1/3。一般选用压力标准器测量范围 (0~1) MPa, 最大允许误差不超过 ±1%。

压力发生器: 气瓶、压力 (真空) 泵、空气压缩机等。

6.2.2 电子天平

最大称量不小于 700 g, 分度值不大于 10 mg, ⑩级。

6.2.3 电子秒表

最小分度值不大于 0.1 s, 最大允许误差 ±0.5 s/d。

6.2.4 液体标准流量计

液体标准流量计测量范围应大于等于切向流过滤系统安装流量计的测量范围 (或泵的设定范围), 液体标准流量计的最大允许误差绝对值应不大于被检流量计 (或泵) 最大允许误差绝对值的 1/3。

6.2.5 标准温度计

测量范围 (0~60) °C, 最大允许误差 ±0.2 °C。

6.2.6 电导率标准溶液

按附录 D 方法配置电导率标准溶液, 或使用氯化钾电导率溶液标准物质。标准溶液电导率参考值的相对扩展不确定度应小于或等于 0.3% ($k=2$)。

6.2.7 pH 标准物质

使用国家有证标准物质, 测量范围 (3~10), 扩展不确定度应不大于 0.01 ($k=3$)。

6.2.8 恒温槽

温度范围 (0~60) °C, 温度均匀性不超过 ±0.2 °C, 温度波动度不大于 0.2 °C。

6.2.9 标准砝码

使用的标准砝码应符合 JJG 99 的计量要求, 其误差应不超过切向流过滤系统

称量最大允许误差的 1/3，标准砝码的数量应满足称量的校准要求。一般可选用 1 mg~2000 g 的 F2 等级的砝码组。

6.2.10 纯水

符合 GB/T 6682—2008《分析实验室用水规格和实验方法》要求的二级水。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准前准备及检查

检查待测切向流过滤系统铭牌标识是否完好，开机预热，各传感器工作正常，根据使用说明书完成设备使用前检查。

7.2 压力示值误差与回程误差

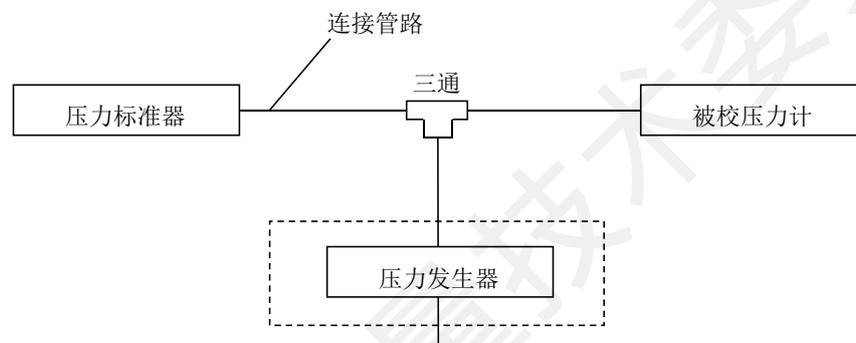


图 2 压力计示值误差与回程误差校准连接示意图

在切向流过滤系统压力全量程范围中均匀取 5 个点（含零点）作为校准点。使用专用导压管路和三通接头，将压力标准器与切向流过滤系统的压力传感器按图 2 所示的方式相连接（若切向流过滤系统无法连接压力发生器，则可将压力标准器串联在系统管路中，将系统本身作为压力源）。从零点依次调节压力发生器压力（或切向流过滤系统工作压力）至最大校准点，再以同样方式调节压力至零点。分别记录标准器测量值和切向流过滤系统的压力传感器示值，按公式（1）计算压力示值误差。取同一校准点正、反行程最大示值之差的绝对值作为被校压力计的回程误差。

$$\Delta P = P_d - P_s \quad (1)$$

式中：

ΔP ——压力示值误差，kPa 或 MPa；

P_d ——切向流过滤系统压力传感器示值，kPa 或 MPa；

P_s ——标准器在各校准点的标准示值，kPa 或 MPa。

7.4 流量示值误差

流量设定值在 0.2 L/min 以下推荐使用称量法，流量设置值在 0.2 L/min 以上

使用流量计法。流量校准点应在切向流过滤系统流量设置范围内均匀选取，或根据客户要求确定。

7.4.1 称量法

使切向流过滤系统的流量控制管路中充满纯水，设定流量值，待压力、流量示值稳定后，在流量计（或泵）后端用合适体积的容器（事先清洗、干燥后称重）分别接收规定时间流出的纯水，使用标准温度计测量其温度，并称量总重量，推荐的测量过程参数设定如表 2 所示。按上述方法重复测量 3 次，根据公式（2）（3）计算流量的实测值，按公式（4）计算流量示值误差 ΔS 。

表 2 流量示值误差测量参数表（推荐）

| 流量设定值 (L/min) | 0.002~0.05 | 0.05~0.1 | 0.1~0.2 |
|---------------|------------|----------|---------|
| 收集时间 (min) | 10 | 5 | 2 |

$$F_m = \Delta W / (\rho_t \times t) \quad (2)$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (3)$$

式中：

F_m ——流量实测值，L/min；

ΔW ——收集的纯水的质量，g；

W_2 ——容器加纯水的质量，g；

W_1 ——容器的质量，g；

ρ_t ——实验温度下纯水的密度，g/cm³，（不同温度下纯水的密度参见附录 E）；

t ——收集时间，min。

$$\Delta S = \frac{F_s - \overline{F_m}}{F_m} \times 100\% \quad (4)$$

式中：

ΔS ——流量示值误差，%；

F_s ——流量设定值，L/min；

$\overline{F_m}$ ——同一设定流量 3 次测量值的算术平均值，L/min。

7.4.2 流量计法

以液体标准流量计为标准器，以纯水为介质，将标准流量计串联于流量控制管路中，以设置值重复测量 3 次，依据公式（4）计算流量示值误差。

7.5 温度示值误差

当切向流过滤系统的温度传感器可被拆卸时，使用直接比较方法进行校准，

若温度传感器不可从管路中拆卸，则使用间接比较方法。

7.5.1 直接比较法

将切向流过滤系统的温度传感器从管路中卸下，与标准温度计置于同一恒温槽中，标准温度计应与温度传感器尽量靠近。设定恒温槽温度为正常使用温度（如 10℃、20℃、25℃或其他客户指定的校准点），待温度平衡后，记录标准温度计温度 T_s 和切向流过滤系统温度显示值 T_d ，重复测量 3 次，按公式（5）计算温度示值误差。

$$\Delta T = T_d - \bar{T}_s \quad (5)$$

式中：

ΔT ——温度示值误差，℃；

T_d ——切向流过滤系统温度显示值，℃；

\bar{T}_s ——标准温度计 3 次测量值的平均值，℃。

7.5.2 间接比较法

使切向流过滤系统的温度传感器所在管路中充满纯水，设置流量为最大值。通过断开或连接管路相应位置，分别在待测温度传感器所在位置的前端和后端收集纯水，用标准温度计分别测量前、后端收集纯水的温度 T_1 、 T_2 ，以两者的平均值作为温度测量值 T_s ，同时读取切向流过滤系统温度显示值 T_d 。重复操作并测量 3 次，根据公式（6）计算温度示值误差。

$$\Delta T = T_d - \frac{\sum_{i=1}^3 (T_{1i} + T_{2i}) / 2}{3} \quad (6)$$

式中：

ΔT ——温度示值误差，℃；

T_d ——切向流过滤系统温度显示值，℃；

T_{1i} ——第 i 次待测温度传感器前端纯水温度测量值，℃；

T_{2i} ——第 i 次待测温度传感器后端纯水温度测量值，℃。

7.6 电导率引用误差与重复性

选择合适的电导率标准溶液进行测量，将标准溶液放置在恒温槽中，设定恒温槽温度为 25℃，系统温度补偿至 25℃。待温度平衡后，使用待测电导率检测器对电导率标准溶液进行测量，读取电导率显示值 k_d ，重复测量 6 次。按公式（7）计算电导率引用误差，按公式（8）计算单次测量标准偏差与满量程的比值，作为电导率测量重复性的表征。

$$\Delta k = \frac{\bar{k}_d - k_s}{k_F} \times 100\% \quad (7)$$

$$\delta = \frac{1}{k_F} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (k_{di} - \bar{k}_d)^2}{5}} \times 100\% \quad (8)$$

式中：

Δk ——电导率引用误差，%FS；

\bar{k}_d ——6次切向流过滤系统的电导率显示值的平均值， $\mu\text{S}/\text{cm}$ 或 mS/cm ；

k_s ——标准溶液的电导率值， $\mu\text{S}/\text{cm}$ 或 mS/cm ；

k_F ——电导率检测量程的上限值， $\mu\text{S}/\text{cm}$ 或 mS/cm ；

δ ——电导率测量重复性，%FS。

7.7 pH 示值误差与重复性

选择三种标准溶液，pH 范围在（3~10），将标准溶液放于 25℃ 恒温槽中，系统温度补偿至 25℃。首先，通过系统自带校准功能利用两种标准溶液进行标定（推荐使用 pH 值 4 和 9 附近的标准溶液），然后使用待测 pH 探头测量第三种标准溶液的 pH 值，记录 pH 显示值 pH_e 。若被校切向流过滤系统无 pH 校准功能，则直接测量标准溶液 pH 值。重复测量 6 次，计算平均值 $\bar{\text{pH}}_e$ ，按公式（9）计算 pH 示值误差，按公式（10）计算 pH 测量重复性。

$$\Delta \text{pH}_e = \bar{\text{pH}}_e - \text{pH}_s \quad (9)$$

$$s_{\text{pH}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^5 (\text{pH}_{ei} - \bar{\text{pH}}_e)^2}{5}} \quad (10)$$

式中：

ΔpH_e ——pH 示值误差，pH；

$\bar{\text{pH}}_e$ ——6 次 pH 测量值的平均值，pH；

pH_s ——标准溶液的 pH 值，pH；

s_{pH} ——pH 测量重复性，pH；

pH_{ei} ——第 i 次 pH 测量值，pH。

7.8 称量示值误差

在切向流过滤系统称量的全量程中均匀选择至少 5 个校准点（应包括接近最小称量、最大称量的称量点）。从零点起逐步施加砝码至最大校准点，并以同样方法逆顺序将砝码卸至零点。分别记录各点的载荷和称量示值，按公式（11）计算在每个校准点的示值误差。

$$\Delta E = I - L \quad (11)$$

式中：

ΔE ——称量示值误差，kg 或 g；

I ——切向流过滤系统称量示值，kg 或 g；

L ——载荷，kg 或 g。

8 校准结果表达

经校准后的切向流过滤系统应填发校准证书，校准证书应符合 JJF 1071—2010 中 5.12 的要求，并给出各校准项目名称和测量结果以及扩展不确定度。推荐的校准原始记录格式见附录 A。推荐的校准证书的内页格式见附录 B。切向流过滤系统校准结果的不确定度按 JJF 1059.1—2012 的要求评定，校准不确定度评定示例见附录 C。

9 复校时间间隔

建议切向流过滤系统复校准间隔一般不超过 1 年。由于复校时间间隔的长短是由仪器的使用情况、使用者、仪器本身质量等诸因素所决定的，因此，送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

附录 A

校准原始记录格式

(推荐性表格)

| | | | | |
|------|----|--|------|--|
| 仪器名称 | | | 型号规格 | |
| 制造厂商 | | | 出厂编号 | |
| 委托单位 | 名称 | | 温度 | |
| | 地址 | | 湿度 | |
| 记录编号 | | | 证书编号 | |
| 校准员 | | | 核验员 | |

| | | | | |
|-------------------|------|-----------------------|------|-------|
| 本次使用的主要 计量标准器具 | 规格型号 | 不确定度/准确度等 级/最大允许误差 | 器具编号 | 有效性确认 |
| | | | | |
| | | | | |

一、压力示值误差（单位： ）

| 校准点 | 标准器示值 | 被校压力传感器示值 | | 示值误差 | 回程误差 |
|-----|-------|-----------|-----|------|------|
| | | 正行程 | 反行程 | | |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

二、流量示值误差

称量法

| 流量设定值 (L/min) 收集时间 (min) | $F_{S1} =$ | | | $t_1 =$ | | | $F_{S2} =$ | | | $t_2 =$ | | |
|----------------------------|------------|---|---|---------|---|---|------------|---|---|---------|---|---|
| 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 容器质量 W_1 (g) | | | | | | | | | | | | |
| 容器加纯水质量 W_2 (g) | | | | | | | | | | | | |
| $W_2 - W_1$ (g) | | | | | | | | | | | | |
| $(W_2 - W_1) / \rho_t$ (L) | | | | | | | | | | | | |
| 流量实测值 F_m (L/min) | | | | | | | | | | | | |
| 平均值 (L/min) | | | | | | | | | | | | |
| 示值误差 (%) | | | | | | | | | | | | |

流量计法（单位：L/min）

| 设定值 | 测量次数 | 1 | 2 | 3 | 平均值 | 示值误差(%) |
|-----|------|---|---|---|-----|---------|
| | 实测值 | | | | | |
| | 实测值 | | | | | |
| | 实测值 | | | | | |
| | 实测值 | | | | | |

三、温度示值误差（单位：℃）

直接比较法

| 温度显示值 | 标准温度计测量值 | | | 平均值 | 示值误差 |
|-------|----------|---|---|-----|------|
| | 1 | 2 | 3 | | |
| | | | | | |

间接比较法

| 温度显示值 | 标准温度计测量值 | | | 平均值 | 示值误差 |
|-------|----------|-------|-------|-----|------|
| | 测量次数 | T_1 | T_2 | | |
| | 1 | | | | |
| | 2 | | | | |
| | 3 | | | | |

四、电导率示值误差（单位： ）

| 标准溶液电导率值 | 仪器测量值 | | | | | | 平均值 | 示值误差 |
|----------|-----------|---|---|----------|---|---|-----|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | |
| | | | | | | | | |
| 量程上限 | 引用误差(%FS) | | | 重复性(%FS) | | | | |

五、pH 示值误差

| 标准溶液 pH 值 | 仪器测量值 | | | | | | 平均值 | 示值误差 | 重复性 |
|-----------|-------|---|---|---|---|---|-----|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | | | |
| | | | | | | | | | |

六、称重示值误差（单位： ）

| 校准点 | 载荷 | 示值 | | 示值误差 | |
|-----|----|-----|-----|------|-----|
| | | 正行程 | 反行程 | 正行程 | 反行程 |
| 1 | | | | | |
| 2 | | | | | |
| 3 | | | | | |
| 4 | | | | | |
| 5 | | | | | |

附录 B

校准证书（内页）推荐格式

（推荐性表格）

1. 压力校准

| 标准值 | 示值误差 | 回程误差 | 测量不确定度 ($k=2$) |
|-----|------|------|------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

2. 流量校准

| 示值 | 实测值 | 示值误差 | 测量不确定度 ($k=2$) |
|----|-----|------|------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

3. 温度校准

| 示值 | 实测值 | 示值误差 | 测量不确定度 ($k=2$) |
|----|-----|------|------------------|
| | | | |

4. 电导率校准

| 示值 | 标准溶液参考值 | 引用误差 | 重复性 | 测量不确定度 ($k=2$) |
|----|---------|------|-----|------------------|
| | | | | |

5. pH 校准

| 示值 | 标准溶液参考值 | 示值误差 | 重复性 | 测量不确定度 ($k=2$) |
|----|---------|------|-----|------------------|
| | | | | |

6. 称重模块校准

| 载荷 | 加载误差 | 卸载误差 | 测量不确定度 ($k=2$) |
|----|------|------|------------------|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 压力示值误差的不确定度评定

C.1.1 测量方法

在各压力校准点处，将压力标准器测量值与被测压力传感器示值相比较。

C.1.2 测量模型

压力示值误差公式可由公式 (C.1) 给出

$$\Delta P = P_d - P_s \quad (\text{C.1})$$

式中：

ΔP ——压力示值误差，kPa 或 MPa；

P_d ——切向流过滤系统压力传感器示值，kPa 或 MPa；

P_s ——标准器在各校准点的标准示值，kPa 或 MPa。

C.1.3 不确定度来源

(1) 测量重复性引入的不确定度。

(2) 标准器引入的不确定度，主要由标准器分辨力引入的不确定度、标准器准确度引入的不确定度组成。

C.1.4 标准不确定度分量的评定

(1) 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

使用压力标准器对切向流过滤系统压力传感器进行校准，系统显示工作压力为 100 kPa，连续测量 10 次，得到一组测量值 P_i (kPa)：98、99、98、98、99、99、98、98、97、98。

则单次测量结果的实验标准差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (P_i - \bar{P})^2}{9}} \approx 0.63 \text{ kPa}$$

实际测量次数为 1 次，则 $u_1 = \frac{s}{\sqrt{1}} = 0.63 \text{ kPa}$ 。

(2) 压力标准器分辨力引入的标准不确定度 u_2

压力标准器分辨力为 1 kPa，不确定度区间半宽 0.5 kPa，服从均匀分布，则分辨率引入的标准不确定度分量：

$$u_2 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \text{ kPa} \approx 0.29 \text{ kPa}$$

(3) 压力标准器最大允许误差引入的标准不确定度 u_3

压力标准器的最大允许误差为 ± 0.5 kPa，则标准器准确度引入的标准不确定度分量：

$$u_3 = \frac{0.5}{\sqrt{3}} \text{ kPa} \approx 0.29 \text{ kPa}$$

C.1.5 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 C.1。

表 C.1 压力示值误差校准结果标准不确定度一览表

| 不确定度来源 | 标准不确定度分量符号 | 标准不确定度 |
|-----------|------------|----------|
| 压力测量重复性 | u_1 | 0.63 kPa |
| 标准器分辨力 | u_2 | 0.29 kPa |
| 标准器最大允许误差 | u_3 | 0.29 kPa |

C.1.6 合成标准不确定度 u_c

由于各不确定度输入量不相关，故

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.75 \text{ kPa}$$

C.1.7 扩展不确定度 U

取 $k=2$ ，则压力示值误差校准的扩展不确定度为 $U = 2u_c = 1.5$ kPa。

C.2 流量示值误差的不确定度评定（称量法）

C.2.1 测量方法

采用称量法对切向流过滤系统的流量进行测量。

C.2.2 测量模型

$$F_m = \Delta W / (\rho_t \times t) \quad (\text{C.2})$$

$$\Delta W = W_2 - W_1 \quad (\text{C.3})$$

$$\Delta S = \frac{F_s - \overline{F_m}}{\overline{F_m}} \times 100\% \quad (\text{C.4})$$

式中：

F_m ——流量实测值，L/min；

ΔW ——收集的纯水的质量，g；

W_2 ——容器加纯水的质量，g；

W_1 ——容器的质量，g；

ρ_t ——实验温度下纯水的密度，g/cm³，（不同温度下纯水的密度参见附录 E）；

t ——收集时间，min；

ΔS ——流量示值误差，%；

F_s ——流量设定值，L/min；

$\overline{F_m}$ ——同一设定流量 3 次测量值的算术平均值，L/min。

不确定度传播率：

$$u(\Delta S) = c_1 u(\overline{\Delta W}) + c_2 u(t) \quad (\text{C.5})$$

式中，灵敏系数：

$$c_1 = \frac{\partial \Delta S}{\partial (\overline{\Delta W})} = -\frac{F_s \times \rho_t \times t}{(\overline{\Delta W})^2}$$

$$c_2 = \frac{\partial \Delta S}{\partial t} = \frac{F_s \times \rho_t}{\overline{\Delta W}}$$

C.2.3 不确定度来源

(1) 称量过程引入的不确定度，主要包括测量重复性引入的不确定度和电子天平引入的不确定度（包括分辨力引入的不确定度和由测量准确度引入的不确定度）；

(2) 测量时间引入的不确定度，主要包括由使用的电子秒表引入的不确定度和人为误差引入的不确定度。

C.2.4 标准不确定度分量的评定

C.2.4.1 称量过程引入的标准不确定度

(1) 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

选定一台切向流过滤系统，在设定值为 0.1 L/min 处测量流量示值误差，收集时间为 5 min，纯水密度取 997.043 kg/m³。在此条件下，进行连续 10 次测量，得到一组数据 ΔW_i ：498.59 g、498.70 g、497.92 g、499.04 g、497.89 g、498.28 g、497.23g、499.09 g、497.16 g、498.85 g。根据测量结果计算其单次测量的实验标准偏差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\Delta W_i - \overline{\Delta W})^2}{9}} \approx 0.705 \text{ g}$$

实际重复测量 3 次，得到一组数据 ΔW_i ：498.59 g、498.70 g、497.92 g，以 3 次测量值的算术平均值作为测量结果，则测量结果平均值的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} \approx 0.407 \text{ g}$$

(2) 电子天平分辨力引入的标准不确定度 u_2

称量使用的电子天平的分辨力为 10 mg，按均匀分布计算，则由电子天平分辨力引入的标准不确定度为：

$$u_2 = \frac{10}{2 \times \sqrt{3}} \text{ mg} \approx 0.003 \text{ g}$$

(3) 电子天平准确度引入的标准不确定度 u_3

称量使用的电子天平的最大允许误差为 ± 100 mg, 按均匀分布计算, 则由电子天平准确度引入的标准不确定度为:

$$u_3 = \frac{100}{\sqrt{3}} \text{ mg} \approx 0.058 \text{ g}$$

C.2.4.3 测量时间引入的标准不确定度

(1) 电子秒表引入的标准不确定度 u_4

电子秒表引入的不确定度可按其最大允许误差进行计算, 电子秒表最大允许误差为 0.5 s/d, 按均匀分布, 则

$$u_4 = \frac{0.5}{86400 \times \sqrt{3}} \times 60 \text{ s} \approx 0.0002 \text{ s}$$

(2) 人为误差引入的标准不确定度 u_5

人为误差主要是指由人的反应时间造成的计时误差, 一般人的反应时间通常为 $(0.2 \sim 0.3)$ s, 则由人为误差引入的标准不确定度为:

$$u_5 = \frac{0.3}{2 \times \sqrt{3}} \text{ s} \approx 0.087 \text{ s}$$

C.2.5 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 C.2。

表 C.2 流量示值误差测定结果标准不确定度一览表 (称量法)

| 不确定度来源 | | 标准不确定度值 | 灵敏系数 |
|--------|---------|----------|-------------------------|
| 称量过程 | 测量重复性 | 0.407 g | -0.002 g ⁻¹ |
| | 电子天平分辨力 | 0.003 g | |
| | 电子天平准确度 | 0.058 g | |
| 测量时间 | 电子秒表 | 0.0002 s | 0.200 min ⁻¹ |
| | 人为误差 | 0.087 s | |

C.2.6 合成标准不确定度 u_{rel}

由于各不确定度分量不相关, 根据公式 (C.5), 计算合成标准不确定度:

$$u_{\text{rel}} = \sqrt{c_1^2(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) + c_2^2(u_4^2 + u_5^2)} \approx 0.087\%$$

C.2.7 扩展不确定度 U_{rel}

取包含因子 $k=2$, 则使用称量法测量得到的流量示值误差结果的相对扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 2u_{\text{rel}} = 0.2\%$ 。

C.3 流量示值误差的不确定度评定（流量计法）

C.3.1 测量方法

将液体标准流量计串联于切向流过滤系统的流量控制管路中，直接测量，与流量设定值比较。

C.3.2 测量模型

示值误差可由公式（C.6）给出：

$$\Delta S = \frac{F_s - \overline{F_m}}{\overline{F_m}} \times 100\% \quad (\text{C.6})$$

式中：

ΔS ——流量示值误差，%；

F_s ——流量设定值，L/min；

$\overline{F_m}$ ——同一设定流量 3 次测量值的算术平均值，L/min。

不确定度传播率：

$$u(\Delta S) = cu(\overline{F_m}) \quad (\text{C.7})$$

式中，灵敏系数：

$$c = \frac{\partial \Delta S}{\partial \overline{F_m}} = -\frac{F_s}{(\overline{F_m})^2}$$

C.3.3 不确定度来源

(1) 测量重复性引入的不确定度。

(2) 标准器引入的不确定度，主要由标准器分辨力引入的不确定度、标准器准确度引入的不确定度组成。

C.3.4 标准不确定度分量的评定

(1) 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

使用液体标准流量计进行，重复测量 10 次，得到一组数据 F_i (L/min)：2.5、2.4、2.5、2.5、2.5、2.4、2.5、2.4、2.5、2.5。根据测量结果计算其单次测量的实验标准偏差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (F_i - \overline{F})^2}{9}} \approx 0.048 \text{ L/min}$$

实际测量时，以 3 次测量值的算术平均值作为测量结果，则测量结果平均值的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} \approx 0.028 \text{ L/min}$$

(2) 标准器分辨力引入的标准不确定度 u_2

使用的液体标准流量计的分辨力为 0.1 L/min，不确定度区间半宽 0.05 L/min，服从均匀分布，则分辨率引入的标准不确定度分量：

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \text{ L/min} \approx 0.029 \text{ L/min}$$

(2) 标准器准确度引入的标准不确定度 u_3

该液体标准流量计的最大允许误差为 1%，则标准器准确度引入的标准不确定度分量：

$$u_3 = \frac{1.5 \times 1\%}{\sqrt{3}} \text{ L/min} \approx 0.009 \text{ L/min}$$

C.3.5 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 C.3。

表 C.3 流量示值误差校准结果标准不确定度一览表（流量计法）

| 不确定度来源 | 标准不确定度分量符号 | 标准不确定度 |
|-----------|------------|-------------|
| 流量测量重复性 | u_1 | 0.028 L/min |
| 标准器分辨力 | u_2 | 0.029 L/min |
| 标准器最大允许误差 | u_3 | 0.009 L/min |

C.3.5 合成标准不确定度 u_{rel}

由于各不确定度输入量不相关，故

$$u_{\text{rel}} = \sqrt{c^2(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)} \approx 1.7\%$$

C.3.6 扩展不确定度 U_{rel}

取 $k=2$ ，则流量计法流量示值误差校准的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 2u_{\text{rel}} = 3\%$ 。

C.4 温度示值误差的不确定度评定（间接比较法）

C.4.1 测量方法

使用标准温度计分别测量切向流过滤系统温度传感器前后端液体温度，以二者的平均值作为测量结果，与系统温度显示值进行比较。

C.4.2 测量模型

温度示值误差公式可由公式（C.8）给出

$$\Delta T = T_d - \frac{\sum_{i=1}^3 (T_{1i} + T_{2i}) / 2}{3} \quad (\text{C.8})$$

式中：

ΔT ——温度示值误差， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_d ——切向流过滤系统温度显示值， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_{1i} ——第 i 次待测温度传感器前端纯水温度测量值， $^{\circ}\text{C}$ ；

T_{2i} ——第 i 次待测温度传感器后端纯水温度测量值， $^{\circ}\text{C}$ 。

由于待测温度传感器前、后端纯水温度测量条件完全相同， T_1 和 T_2 的测量结果不确定度相同，则根据不确定度传播率，温度示值误差的标准不确定度：

$$u(\Delta T) = \frac{1}{2}[u(\bar{T}_1) + u(\bar{T}_2)] = u(\bar{T}_1)$$

C.4.3 不确定度来源

(1) 测量重复性引入的不确定度。

(2) 标准器引入的不确定度，主要由标准器分辨力引入的不确定度、标准器准确度引入的不确定度组成。

C.4.4 标准不确定度评定

(1) 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

使用标准温度计对待测温度传感器前端的纯水温度进行测量，重复测量 10 次，得到一组测量值 T_{1i} ($^{\circ}\text{C}$)：19.4、19.4、19.5、19.5、19.4、19.3、19.4、19.4、19.4、19.5。

则单次测量结果的实验标准差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (T_{1i} - \bar{T}_{1i})^2}{9}} \approx 0.063 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

实际测量 3 次，则 $u_1 = \frac{s}{\sqrt{3}} = 0.037 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ 。

(2) 标准器分辨力引入的标准不确定度 u_2

标准温度计分辨力为 $0.1 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ ，不确定度区间半宽 $0.05 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ ，服从均匀分布，则分辨率引入的标准不确定度分量：

$$u_2 = \frac{0.05}{\sqrt{3}} \text{ } ^{\circ}\text{C} \approx 0.029 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

(2) 标准器准确度引入的标准不确定度 u_3

标准温度计的最大允许误差为 $\pm 0.2 \text{ } ^{\circ}\text{C}$ ，则标准器准确度引入的标准不确定度分量：

$$u_3 = \frac{0.2}{\sqrt{3}} \text{ } ^{\circ}\text{C} \approx 0.115 \text{ } ^{\circ}\text{C}$$

C.4.5 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 C.4。

表 C.4 温度示值误差校准结果标准不确定度一览表

| 不确定度来源 | 标准不确定度分量符号 | 标准不确定度 |
|-----------|------------|----------|
| 温度测量重复性 | u_1 | 0.037 °C |
| 标准器分辨力 | u_2 | 0.029 °C |
| 标准器最大允许误差 | u_3 | 0.115 °C |

C.4.6 合成标准不确定度 u_c

由于各不确定度输入量不相关，故

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.124 \text{ °C}$$

C.4.7 扩展不确定度 U

取 $k=2$ ，则温度示值误差校准的扩展不确定度为 $U = 2u_c = 0.3 \text{ °C}$ 。

C.5 电导率引用误差的不确定度评定

C.5.1 测量方法

将标准溶液放入恒温槽恒温至 25°C ，用被测电导率检测器直接测量，比较标准值与显示值。

C.5.2 测量模型

电导率引用误差公式可由公式（C.9）给出

$$\Delta k = \frac{\overline{k_d} - k_s}{k_F} \times 100\% \quad (\text{C.9})$$

式中：

Δk ——电导率引用误差，%；

$\overline{k_d}$ ——6次切向流过滤系统的电导率显示值的平均值， $\mu\text{S/cm}$ 或 mS/cm ；

k_s ——标准溶液的电导率值， $\mu\text{S/cm}$ 或 mS/cm ；

k_F ——电导率检测量程的上限值， $\mu\text{S/cm}$ 或 mS/cm 。

C.5.3 不确定度来源

- 电导率检测器测量重复性引入的不确定度；
- 电导率标准溶液引入的不确定度，主要包括标准物质的不确定度和恒温槽控温误差引入的不确定度。

C.5.4 标准不确定度评定

(1) 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

使用GBW(E)130107氯化钾电导率标准溶液对待测电导率检测器进行校准，重复测量10次，得到一组测量值 k_i ($\mu\text{S/cm}$)：1405、1406、1405、1405、1404、1405、1405、1404、1404、1406。

则单次测量结果的实验标准差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (k_i - \bar{k}_i)^2}{9}} \approx 0.74 \mu\text{S/cm}$$

实际测量时取 6 次测量结果的平均值，则 $u_1 = \frac{s}{\sqrt{6}} = 0.30 \mu\text{S/cm}$ 。

(2) 标准溶液引入的标准不确定度 u_2

GBW(E)130107 电导率标准溶液 (1410 $\mu\text{S/cm}$, 25 $^{\circ}\text{C}$) 引入的不确定度可根据其标准物质证书给出的不确定度 ($U=0.25\%$, $k=2$) 进行评定。

$$u_2 = \frac{1410 \times 0.25\%}{2} \mu\text{S/cm} \approx 1.76 \mu\text{S/cm}$$

(3) 恒温槽引入的标准不确定度 u_3

GBW(E)130107 标准溶液的温度系数约为 2%/ $^{\circ}\text{C}$ ，而所使用的恒温槽控温误差为 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，认为服从均匀分布，则：

$$u_3 = \frac{1410 \times 2\% \times 0.2}{\sqrt{3}} \mu\text{S/cm} \approx 3.26 \mu\text{S/cm}$$

C.5.5 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 C.4。

表 C.4 电导率示值误差校准结果标准不确定度一览表

| 不确定度来源 | 标准不确定度分量符号 | 标准不确定度 |
|---------|------------|-----------------------|
| 测量重复性 | u_1 | 0.30 $\mu\text{S/cm}$ |
| 标准溶液 | u_2 | 1.76 $\mu\text{S/cm}$ |
| 恒温槽控温误差 | u_3 | 3.26 $\mu\text{S/cm}$ |

C.5.6 合成标准不确定度 u_c

由于各不确定度输入量不相关，故

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 3.72 \mu\text{S/cm}$$

$$u_{\text{rel}} = \frac{u_c}{k_F} = 0.19\%FS$$

C.5.7 扩展不确定度 U_{rel}

取 $k=2$ ，则电导率引用误差校准的扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 2u_{\text{rel}} = 0.3\%FS$ 。

C.6 pH 示值误差的不确定度评定

C.6.1 测量方法

将标准溶液放入恒温槽恒温到 25 $^{\circ}\text{C}$ ，用被测 pH 检测器直接测量，比较标准值与显示值。

C.6.2 测量模型

$$\Delta\text{pH}_e = \overline{\text{pH}_e} - \text{pH}_s \quad (\text{C.10})$$

式中：

ΔpH_e ——pH 示值误差，pH；

$\overline{\text{pH}_e}$ ——6 次 pH 测量值的平均值，pH；

pH_s ——标准溶液的 pH 值，pH。

C.6.3 不确定度来源

pH 检测器示值误差测量结果的不确定度来源主要为：

a) pH 检测器测量引入的不确定度，主要包括测量重复性引入的不确定度和 pH 检测器的分辨力引入的不确定度；

b) pH 标准溶液引入的不确定度，主要包括标准物质的不确定度和恒温槽引入的不确定度。

C.6.4 标准不确定度分量的评定

(1) 重复性引入的标准不确定度 u_1

利用系统自带 pH 校准功能使用两种 pH 标准溶液对其 pH 检测器进行校准后，用 pH 检测器对第三种 pH 标准溶液进行测量，连续测量 10 次，得到一组测量值 pH_{ei} ：6.88、6.87、6.85、6.84、6.88、6.88、6.86、6.84、6.87、6.84，根据测量结果计算其单次测量的实验标准偏差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\text{pH}_{ei} - \overline{\text{pH}_e})^2}{9}} \approx 0.0173 \text{ pH}$$

则测量结果平均值的标准不确定度为：

$$u_1 = \frac{s}{\sqrt{6}} \approx 0.0071 \text{ pH}$$

(2) pH 检测器的分辨力引入的标准不确定度 u_2

被测 pH 检测器的分辨力为 0.01，则由 pH 检测器的分辨力引入的不确定度分量为：

$$u_2 = \frac{0.01}{2 \times \sqrt{3}} \text{ pH} \approx 0.0029 \text{ pH}$$

(3) 标准物质引入的标准不确定度 u_3

标准物质引入的不确定度可以根据标准物质证书提供的扩展不确定度和包含因子确定，例如，使用的国家二级 pH 标准物质，其不确定度为 $U = 0.01$ ($k = 3$)，则 pH 标准物质的引入的标准不确定度为：

$$u_3 = \frac{0.01}{3} \text{ pH} \approx 0.0033 \text{ pH}$$

(4) 温度对标准物质 pH 值影响引入的标准不确定度 u_4

以混合磷酸盐 pH 标准物质为例, 其 pH 值的温度系数为 $0.003/^\circ\text{C}$, 使用的恒温槽均匀性为 $\pm 0.2^\circ\text{C}$, 波动度为 0.2°C , 则温度对标准溶液 pH 值影响引入的不确定度为:

$$u_4 = \sqrt{(0.003/^\circ\text{C})^2 \times \left[\left(\frac{0.2^\circ\text{C}}{\sqrt{3}} \right)^2 + \left(\frac{0.2^\circ\text{C}}{2\sqrt{3}} \right)^2 \right]} \approx 0.0039 \text{ pH}$$

C.6.5 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 C.6。

表 C.6 pH 检测器示值误差测定结果标准不确定度一览表

| 不确定度来源 | 标准不确定度分量符号 | 标准不确定度 |
|------------|------------|-----------|
| 测量重复性 | u_1 | 0.0071 pH |
| pH 检测器的分辨力 | u_2 | 0.0029 pH |
| 标准物质 | u_3 | 0.0033 pH |
| 恒温槽 | u_4 | 0.0039 pH |

C.6.6 合成标准不确定度

由于各不确定度分量不相关, 故

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 0.0092 \text{ pH}$$

C.6.7 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则 pH 检测器示值误差测量结果的扩展不确定度为 $U = 2u_c = 0.02 \text{ pH}$ 。

C.7 称量示值误差的不确定度评定

C.7.1 测量方法

采用标准砝码对切向流过滤系统称重模块进行校准, 比较显示值与砝码标称值。

C.7.2 测量模型

称量示值误差公式可由公式 (C.11) 给出

$$\Delta E = I - L \quad (\text{C.11})$$

式中:

ΔE ——称量示值误差, kg 或 g;

I ——切向流过滤系统称量示值, kg 或 g;

L ——载荷，kg 或 g。

C.7.3 不确定度来源

- (1) 测量重复性引入的不确定度。
- (2) 标准器引入的不确定度。

C.7.4 标准不确定度评定

- (1) 测量重复性引入的标准不确定度 u_1

选定一台切向流过滤系统，使用 2000 g 标准砝码进行校准，连续测量 10 次，得到一组测量值 I_i (g)：1998.4、1998.6、1998.6、1998.5、1998.6、1998.7、1998.7、1998.5、1998.4、1998.4。

则单次测量结果的实验标准差 s ：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (I_i - \bar{I})^2}{9}} \approx 0.117 \text{ g}$$

实际校准时测量 1 次，则 $u_1 = \frac{s}{\sqrt{1}} = 0.117 \text{ g}$ 。

- (2) 称重模块分辨力引入的标准不确定度 u_2

被校切向流过滤系统称重模块的分辨力为 0.1 g，不确定度区间半宽 0.05 g，服从均匀分布，则分辨率引入的标准不确定度分量：

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

- (3) 标准器引入的标准不确定度 u_3

使用的 F2 级 2000g 砝码的最大允许误差为 $\pm 0.03 \text{ g}$ ，按均匀分布，则标准器准确度引入的标准不确定度分量：

$$u_3 = \frac{0.03}{\sqrt{3}} \text{ g} \approx 0.017 \text{ g}$$

C.7.5 标准不确定度一览表

标准不确定度一览表见表 C.7。

表 C.7 称量示值误差校准结果标准不确定度一览表

| 不确定度来源 | 标准不确定度分量符号 | 标准不确定度 |
|-----------|------------|---------|
| 测量重复性 | u_1 | 0.117 g |
| 分辨力 | u_2 | 0.029 g |
| 标准器最大允许误差 | u_3 | 0.017 g |

C.7.6 合成标准不确定度 u_c

由于各不确定度输入量不相关，故

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \approx 0.122 \text{ g}$$

C.7.7 扩展不确定度 U

取 $k=2$ ，则称量示值误差校准的扩展不确定度为 $U = 2u_c = 0.3 \text{ g}$ 。

全国生物计量技术委员会

附录 D

电导率标准溶液制备方法

D.1 电导率标准溶液浓度及其电导率值

氯化钾标准溶液对应电导率值见表 D.1。

| 溶液代号 | 近似浓度 (mol/L) | 电导率 (S/cm) | | | | |
|------|--------------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | | 15 °C | 18 °C | 20 °C | 25 °C | 35 °C |
| A | 1 | 0.09212 | 0.09780 | 0.10170 | 0.11131 | 0.13110 |
| B | 0.1 | 0.010455 | 0.011163 | 0.011644 | 0.012852 | 0.015353 |
| C | 0.01 | 0.0011414 | 0.0012200 | 0.0012737 | 0.0014083 | 0.0016876 |
| D | 0.001 | 0.0001185 | 0.0001267 | 0.0001322 | 0.0001465 | 0.0001765 |

D.2 试剂

制备标准溶液所需试剂：

a) 氯化钾：优级纯，在 (220~240) °C 下烘干 2 h，然后放入干燥器中冷却至室温；

b) 水：实验室一级水或电导率不大于 0.2×10^{-6} S/cm 的蒸馏水或去离子水 (25 °C)。

D.3 仪器或设备

制备溶液所需仪器或设备：

a) 分析天平：最大称量不大于 200 g，检定分度值为 0.1 mg；

b) 1000 mL 容量瓶：A 级；

c) 100 mL 移液管：A 级；

d) 温度计：(0~50) °C，二等；

e) 恒温槽：温度波动度为 ± 0.2 °C；

f) 电热干燥箱：(0~300) °C。

D.4 制备步骤

D.4.1 环境条件

溶液应在下列条件下制备：

a) 环境温度：(23±2) °C；

b) 相对湿度：不大于 85%。

D.4.2 溶液的组成

溶液的组成见表 D.1。

表 D.1 溶液的组成

| 溶液代号 | 近似摩尔浓度 (mol/L) | 制备 1 L 溶液所需氯化钾 (g) |
|------|----------------|--------------------|
|------|----------------|--------------------|

| | | |
|---|-------|------------------------|
| A | 1 | 74.245 7 |
| B | 0.1 | 7.436 5 |
| C | 0.01 | 0.744 0 |
| D | 0.001 | 将 100 mL 的 C 溶液稀释 10 倍 |

D.4.3 溶液的制备

称取干燥后的氯化钾，用蒸馏水溶解后移入 1000 mL 容量瓶中。将容量瓶浸入恒温槽内（ 20 ± 0.2 ）℃恒温，并稀释至容量瓶刻度，充分混合。从恒温槽中取出备用。

D.5 溶液的不确定度

溶液的电导率值扩展不确定度为 0.3%（ $k=2$ ）。

D.6 溶液的保存

溶液储存在密封玻璃容器内，置于室温（5~35）℃下；

溶液有效期三个月；

溶液出现沉淀或长霉时，不能使用。

附录 E

国际温标纯水密度表

表 E.1 1990 年国际温标纯水密度表 (kg/m^3)

| $t_{90}(\text{°C})$ | 0 | 0.1 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 15 | 999.099 | 999.084 | 999.069 | 999.053 | 999.038 | 999.022 | 999.006 | 998.991 | 998.975 | 998.959 |
| 16 | 998.943 | 998.926 | 998.910 | 998.893 | 998.876 | 998.860 | 998.843 | 998.826 | 998.809 | 998.792 |
| 17 | 998.774 | 998.757 | 998.739 | 998.722 | 998.704 | 998.686 | 998.668 | 998.650 | 998.632 | 998.613 |
| 18 | 998.595 | 998.576 | 998.557 | 998.539 | 998.520 | 998.501 | 998.482 | 998.463 | 998.443 | 998.424 |
| 19 | 998.404 | 998.385 | 998.365 | 998.345 | 998.325 | 998.305 | 998.285 | 998.265 | 998.244 | 998.224 |
| 20 | 998.203 | 998.182 | 998.162 | 998.141 | 998.120 | 998.099 | 998.077 | 998.056 | 998.035 | 998.013 |
| 21 | 997.991 | 997.970 | 997.948 | 997.926 | 997.904 | 997.882 | 997.859 | 997.837 | 997.815 | 997.792 |
| 22 | 997.769 | 997.747 | 997.724 | 997.701 | 997.678 | 997.655 | 997.631 | 997.608 | 997.584 | 997.561 |
| 23 | 997.537 | 997.513 | 997.490 | 997.466 | 997.442 | 997.417 | 997.393 | 997.396 | 997.344 | 997.320 |
| 24 | 997.295 | 997.270 | 997.246 | 997.221 | 997.195 | 997.170 | 997.145 | 997.120 | 997.094 | 997.069 |
| 25 | 997.043 | 997.018 | 996.992 | 996.966 | 996.940 | 996.914 | 996.888 | 996.861 | 996.835 | 996.809 |
| 26 | 996.782 | 996.755 | 996.729 | 996.702 | 996.675 | 996.648 | 996.621 | 996.594 | 996.566 | 996.539 |
| 27 | 996.511 | 996.484 | 996.456 | 996.428 | 996.401 | 996.373 | 996.344 | 996.316 | 996.288 | 996.260 |
| 28 | 996.231 | 996.203 | 996.174 | 996.146 | 996.117 | 996.088 | 996.059 | 996.030 | 996.001 | 995.972 |
| 29 | 995.943 | 995.913 | 995.884 | 995.854 | 995.825 | 995.795 | 995.765 | 995.753 | 995.705 | 995.675 |
| 30 | 995.645 | 995.615 | 995.584 | 995.554 | 995.523 | 995.493 | 995.462 | 995.431 | 995.401 | 995.370 |
| 31 | 995.339 | 995.307 | 995.276 | 995.245 | 995.214 | 995.182 | 995.151 | 995.119 | 995.087 | 995.055 |
| 32 | 995.024 | 994.992 | 994.960 | 994.927 | 994.895 | 994.863 | 994.831 | 994.798 | 994.766 | 994.733 |
| 33 | 994.700 | 994.667 | 994.635 | 994.602 | 994.569 | 994.535 | 994.502 | 994.469 | 994.436 | 994.402 |
| 34 | 994.369 | 994.335 | 994.301 | 994.267 | 994.234 | 994.200 | 994.166 | 994.132 | 994.098 | 994.063 |
| 35 | 994.029 | 993.994 | 993.96 | 993.925 | 993.891 | 993.856 | 993.821 | 993.786 | 993.751 | 993.716 |