

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1800—2020

气溶胶光度计校准规范

Calibration Specification for Aerosol Photometers

2020-01-17 发布

2020-04-17 实施

国家市场监督管理总局 发布

气溶胶光度计校准规范

Calibration Specification for

Aerosol Photometers

JJF 1800—2020

归口单位：全国环境化学计量技术委员会

主要起草单位：上海市计量测试技术研究院

青岛市计量技术研究院

中国计量科学研究院

参加起草单位：上海市环境保护产品质量监督检验总站

沈阳加野科学仪器有限公司

苏州市华宇净化设备有限公司

本规范委托全国环境化学计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

张爱亮（上海市计量测试技术研究院）

夏 春（青岛市计量技术研究院）

刘 悦（上海市计量测试技术研究院）

刘俊杰（中国计量科学研究院）

参加起草人：

施禅臻（上海市环境保护产品质量监督检验总站）

李赫峰（沈阳加野科学仪器有限公司）

高 正（苏州市华宇净化设备有限公司）

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 术语	(1)
3 概述	(1)
4 计量特性	(1)
5 校准条件	(2)
5.1 环境条件	(2)
5.2 计量标准器	(2)
6 校准项目和校准方法	(2)
6.1 校准前准备	(2)
6.2 校准项目	(2)
7 校准结果表达	(5)
7.1 校准记录	(5)
7.2 校准结果的处理	(5)
8 复校时间间隔	(6)
附录 A 精密气溶胶光度计浓度示值误差校准方法	(7)
附录 B 精密气溶胶光度计质量浓度示值误差测量不确定度评定示例	(10)
附录 C 气溶胶光度计质量浓度示值误差的不确定度评定示例	(15)
附录 D 气溶胶光度计校准原始记录格式 (参考)	(19)
附录 E 气溶胶光度计校准证书 (内页) 格式 (参考)	(21)

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》、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》编写。

本规范的技术指标参考了 IEST-RP-CC013.3—2012《洁净室及其他受控环境测量设备的校准程序和选用指南》。

本规范为首次发布。



气溶胶光度计校准规范

1 范围

本规范适用测量范围（0.01~100） $\mu\text{g/L}$ 的光散射原理气溶胶光度计的校准。其他测量范围的气溶胶光度计可参照本规范进行校准。

2 术语

PAO-4 气溶胶 PAO-4 aerosol

气溶胶是指由固体或液体小质点分散并悬浮在气体介质中形成的胶体分散体系，又称气体分散体系，其分散相为固体、液体或固液混合物。本规范中的 PAO-4 气溶胶是指以运动黏度为 $4 \text{ m}^2/\text{s}$ 的聚 α -烯烃油（PAO）为发生介质的，通过气溶胶光度计发雾混匀装置而生成的多分散气溶胶。

3 概述

气溶胶光度计（以下简称仪器）是用于测量高效过滤器泄漏率及安装了高效过滤器的高效过滤系统泄漏率的仪器。其工作原理是仪器以恒定流量分别抽取被测高效过滤器或高效过滤系统上游端和下游端的空气样品，采样单元将空气样品输送到测量单元，测量单元采用前向散射测量对空气样品中的气溶胶质量浓度进行测量，数据处理单元将测量结果进行分析并计算两者的比值得出被测系统泄漏率，最后由显示单元输出测量结果。仪器结构示意图如图 1 所示。

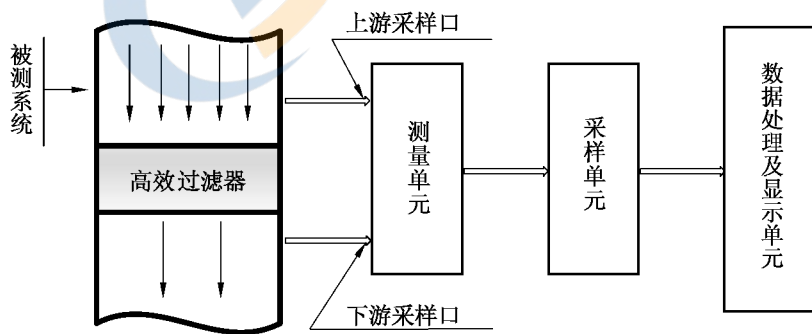


图 1 仪器结构和检测原理简图

4 计量特性

- 4.1 采样流量示值误差：不超过 $\pm 5\%$ 。
- 4.2 采样流量重复性：不大于 2% 。
- 4.3 采样流量稳定性：采样流量在 1 h 内不大于 5% 。

- 4.4 质量浓度示值误差：低浓度（0.01~1） $\mu\text{g/L}$ 不超过 $\pm 30\%$ ；
高浓度（10~100） $\mu\text{g/L}$ 不超过 $\pm 20\%$ 。
- 4.5 质量浓度重复性：低浓度（0.01~1） $\mu\text{g/L}$ 不大于 5% ；
高浓度（10~100） $\mu\text{g/L}$ 不大于 3% 。

注：以上计量特性指标不适用于仪器的合格性判断，仅供参考。

5 校准条件

5.1 环境条件

- 5.1.1 温度：（15~30） $^{\circ}\text{C}$ ；相对湿度： $\leq 85\%$ 。
- 5.1.2 供电电压：AC（220 $\pm$ 22）V，（50 $\pm$ 1）Hz。

5.2 计量标准器

- 5.2.1 精密气溶胶光度计：质量浓度的最大允许误差不超过 $\pm 10\%$ ；
- 5.2.2 流量标准装置：测量范围为（0~50）L/min；最大允许误差不超过 $\pm 1.0\%$ 。
- 5.2.3 气溶胶发雾混匀装置：可发生浓度高低可控、混合均匀的 PAO-4 气溶胶的装置，当发生低浓度（0.01~1） $\mu\text{g/L}$ 气溶胶时其浓度稳定性不超过 $10\%/4\text{ h}$ ，当发生高浓度（10~100） $\mu\text{g/L}$ 气溶胶时其浓度稳定性不超过 $5\%/20\text{ min}$ 。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准前准备

按要求连接好被校仪器、精密气溶胶光度计和气溶胶发雾混匀装置，根据各设备使用要求，开机预热正常运行不少于 10 min。

6.2 校准项目

6.2.1 采样流量示值误差

开启被校仪器下游采样模式，待其稳定后将流量标准装置通过采样管与仪器的下游采样口相连（见图 2），分别读取标准流量值和被校仪器流量示值，按公式（1）计算采样流量示值误差，重复上述测量过程 3 次，取 3 次测量得到的示值误差的平均值作为测量结果。

$$\Delta Q = Q_m - Q_s \quad (1)$$

式中：

ΔQ ——流量示值误差，L/min；

Q_m ——被校仪器流量示值，L/min；

Q_s ——标准流量值，L/min。

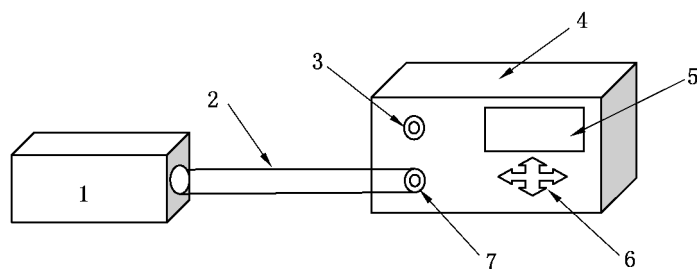


图2 采样流量示值误差连接方式示意图

1—流量标准装置；2—采样管；3—上游采样口；4—被校仪器；
5—显示屏；6—按键；7—下游采样口

6.2.2 流量重复性

按 6.2.1 的连接方式，待仪器稳定后读取标准流量值。重复测量 6 次，按公式 (2) 计算采样流量重复性。

$$s_{rQ} = \frac{1}{\bar{Q}_s} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (Q_{si} - \bar{Q}_s)^2}{5}} \times 100\% \quad (2)$$

式中：

s_{rQ} ——采样流量重复性；

Q_{si} ——第 i 次测量时的标准流量值，L/min；

$\bar{Q}_s$ ——6 次测量的 6 个标准流量值的算术平均值，L/min。

6.2.3 流量稳定性

按 6.2.1 的连接方式，待仪器稳定后使用流量标准装置测量仪器采样流量的初始值并开始计时，以后每隔 10 min 读取 1 次流量值，共 6 次。取 7 个读数中的最大值和最小值按公式 (3) 计算流量稳定性。

$$\delta_Q = \frac{Q_{\max} - Q_{\min}}{\bar{Q}} \times 100\% \quad (3)$$

式中：

δ_Q ——流量稳定性；

$Q_{\max}$ ——7 个标准流量值的最大值，L/min；

$Q_{\min}$ ——7 个标准流量值的最小值，L/min；

$\bar{Q}$ ——7 个标准流量值的平均值，L/min。

6.2.4 质量浓度示值误差

将被校仪器气溶胶光度计内部参考值设定为 100 $\mu\text{g/L}$ 。按照图 3 所示的校准系统进行校准。

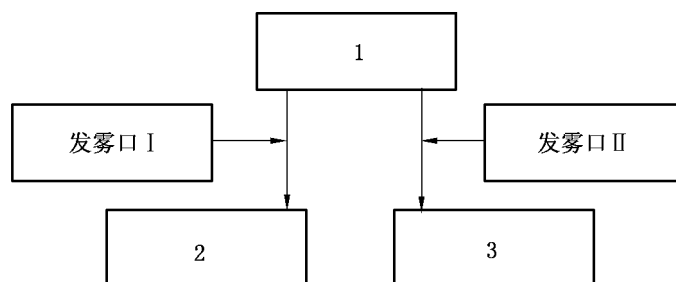


图3 仪器质量浓度示值误差校准系统示意图

1—气溶胶光度计发雾混匀装置；2—精密气溶胶光度计；3—被校仪器

使用气溶胶光度计发雾混匀装置发生质量浓度为 $(0.01 \sim 1) \mu\text{g/L}$ 的 PAO-4 气溶胶，将气溶胶光度计发雾混匀装置的发雾口 I 和 II 通过软管分别连接到精密气溶胶光度计采样口和被校仪器的下游采样口，同时进行等流量采样，记录精密气溶胶光度计测量值 C_{s1} 和被校仪器质量浓度测量值 C_{m1} 。交换精密气溶胶光度计采样口和被校仪器的下游采样口连接的气溶胶光度计发雾混匀装置发雾口，同时进行等流量采样，记录精密气溶胶光度计测量值 C_{s2} 和被校仪器质量浓度测量值 C_{m2} 。按公式 (4) 计算出仪器的单次质量浓度示值误差。再重复以上操作 4 次，将单次质量浓度示值误差按公式 (5) 计算出被校仪器的质量浓度示值误差。

使用气溶胶光度计发雾混匀装置发生质量浓度为 $(15 \sim 25) \mu\text{g/L}$ 和 $(95 \sim 105) \mu\text{g/L}$ 的 PAO-4 气溶胶，将气溶胶光度计发雾混匀装置的发雾口 I 和 II 通过软管分别连接到精密气溶胶光度计采样口和被校仪器的上游采样口，同时进行等流量采样，记录精密气溶胶光度计测量值 C_{s1} 和被校仪器质量浓度测量值 C_{m1} ，交换精密气溶胶光度计采样口和被校仪器的上游采样口连接的气溶胶光度计发雾混匀装置发雾口，同时进行等流量采样，记录精密气溶胶光度计测量值 C_{s2} 和被校仪器质量浓度测量值 C_{m2} 。按公式 (4) 计算出仪器的单次质量浓度示值误差。再重复以上操作 4 次，将单次质量浓度示值误差按公式 (5) 计算出被校仪器的质量浓度示值误差。

$$\delta_i = \frac{(C_{m1} + C_{m2}) - (C_{s1} + C_{s2})}{2} \quad (4)$$

式中：

δ_i ——单次质量浓度示值误差， $\mu\text{g/L}$ ；

C_{s1} ——精密气溶胶光度计连接发雾口 I 的测量值， $\mu\text{g/L}$ ；

C_{s2} ——精密气溶胶光度计连接发雾口 II 的测量值， $\mu\text{g/L}$ ；

C_{m1} ——被校仪器连接发雾口 I 的测量值， $\mu\text{g/L}$ ；

C_{m2} ——被校仪器连接发雾口 II 的测量值， $\mu\text{g/L}$ 。

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^5 \delta_i}{5} \quad (5)$$

式中：

δ ——被校仪器的质量浓度示值误差， $\mu\text{g/L}$ ；

δ_i ——第 i 次的单次质量浓度示值误差， $\mu\text{g/L}$ 。

6.2.5 质量浓度重复性

在被校仪器正常校准过程中,气溶胶光度计发雾混匀装置发生质量浓度为(0.01~1) $\mu\text{g/L}$ 的 PAO-4 气溶胶,每隔 1 min 读取 1 次被检仪器质量浓度测量值,重复上述过程 6 次。按公式(6) 计算质量浓度重复性。

$$s_{\text{rC}} = \frac{1}{\bar{C}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (C_i - \bar{C})^2}{5}} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

s_{rC} ——质量浓度重复性,%;

$\bar{C}$ ——被校仪器质量浓度测量值的算术平均值, $\mu\text{g/L}$;

C_i ——被校仪器第 i 次质量浓度测量值, $\mu\text{g/L}$ 。

气溶胶光度计发雾混匀装置分别发生质量浓度为(15~25) $\mu\text{g/L}$ 和(95~105) $\mu\text{g/L}$ 的 PAO-4 气溶胶,重复上述操作,得到对应条件下的质量浓度重复性。取 3 次重复性测量值中的最大值为气溶胶光度计质量浓度重复性。

7 校准结果表达

7.1 校准记录

校准记录格式参考附录 D。

7.2 校准结果的处理

校准结果应在校准证书或校准报告上反映,校准证书或报告至少包括以下信息:

- 标题,如“校准证书”或“校准报告”;
- 实验室名称和地址;
- 进行校准的地点(如果不在实验室内进行校准);
- 证书或报告的唯一性标识(如编号),每页及总页数的标识;
- 送校单位的名称和地址;
- 被校对象的描述和明确标识;
- 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;
- 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;
- 对校准所依据的技术规范的标识,包括名称及代码;
- 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- 校准环境的描述;
- 校准结果及测量不确定度的说明;
- 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;
- 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- 未经实验室书面批准,不得部分复制证书或报告的声明。

8 复校时间间隔

仪器复校时间间隔由使用者根据仪器的使用情况、仪器本身性能等因素所决定，推荐复校时间间隔不超过 1 年。在相邻两次校准期间，如对仪器的检测数据有怀疑或仪器更换主要部件及修理后应对仪器重新校准。



附录 A

精密气溶胶光度计浓度示值误差校准方法

A.1 校准条件

A.1.1 环境条件

温度：(15~30)℃；相对湿度不大于 85%；供电电压：AC (220±22) V，(50±1) Hz。

A.1.2 滤膜

圆形，直径为 (37±0.25) mm，孔径不大于 2 μm，厚度为 (0.2~0.25) μm；在 0.45 m/s 的洁净空气流速时，压降应小于 3 kPa；暴露在 35% RH 空气中 24 h 后质量增加值不超过 10 μg；可选用玻璃纤维滤膜、石英滤膜等无机滤膜，滤膜对 0.3 μm 标准粒子的截留效率不低于 99.99%。

A.1.3 精密气溶胶光度计校准系统

a) 采样装置：流量量程为 (0~50) L/min，4 h 的稳定性不高于 5%。

b) 流量标准装置：量程为 (0~50) L/min，最大允许误差不超过 ±1.0%；可显示累积采样体积。

c) 天平：准确度等级①，实际分度值不大于 1×10^{-6} g。

d) 气溶胶发雾混匀装置：可发生浓度高低可控、混合均匀的 PAO-4 气溶胶的设备；使用精密气溶胶光度计对该装置的发雾浓度进行测量，在低浓度 (0.01~1) μg/L 条件其浓度稳定性在不超过 10%/4 h，在高浓度 (10~105) μg/L 条件其浓度稳定性不超过 5%/20 min。

A.2 校准方法

A.2.1 校准前准备

A.2.1.1 滤膜外观检查：应保证边缘平整、厚薄均匀、无毛刺、无污染，不得有针孔或任何破损。

A.2.1.2 采样前滤膜平衡称量：在温度为 (15~30)℃、湿度为 (50±5)% RH 恒温恒湿环境中，将滤膜放置至少 24 h 恒重。在与滤膜恒重条件相同的环境中，运用分析天平对滤膜进行称量，记录滤膜质量 (ω_1) 等信息在原始记录上。

A.2.2 开启气溶胶发雾混匀装置，调节相关参数，使之产生稳定的气溶胶。将被校精密气溶胶光度计采样口连接到气溶胶发雾混匀装置的发雾口，当发雾运行稳定后，读取被校精密气溶胶光度计的气溶胶质量浓度显示值，记为 C_1 。将流量标准装置和装有滤膜夹的采样装置连接到气溶胶发雾混匀装置的发雾口，用无锯齿状镊子将已称量的滤膜放入洁净的滤膜夹中，滤膜毛面朝向采样进气方向，连续采样，采样结束后，读取累积采样体积 V ，用无锯齿状镊子将滤膜夹中的滤膜放入洁净的滤膜盒中。再次将被校精密气溶胶光度计采样口连接到气溶胶发雾混匀装置的发雾口，读取被校精密气溶胶光度计

的气溶胶质量浓度显示值，记为 C_2 。

A.2.3 采样后滤膜平衡称量

在温度为 $(15\sim 30)^\circ\text{C}$ 、湿度为 $(50\pm 5)\%$ RH 恒温恒湿环境中，将滤膜放置至少 24 h 恒重。在与滤膜恒重条件相同的环境中，运用分析天平对滤膜进行称量，记录滤膜质量 (ω_2) 等信息在原始记录上。

A.2.4 结果计算

$$\rho = \frac{\omega_2 - \omega_1}{V} = \frac{\Delta(\omega)}{V} \quad (\text{A.1})$$

式中：

ρ ——校准方法得到的气溶胶浓度， mg/m^3 ；

ω_1 ——采样前滤膜的质量， mg ；

ω_2 ——采样后滤膜的质量， mg ；

$\Delta(\omega)$ ——采样前后滤膜的质量之差， mg ；

V ——已换算成标准状态 (101.325 kPa, 273 K) 下的采样体积， m^3 。

A.2.5 精密气溶胶光度计测量浓度的示值误差

取 A.2.3 中的 C_1 和 C_2 值的算术平均值作为被校精密气溶胶光度计的浓度示数，记为 C ，并按公式 (A.1) 计算出校准方法得到的气溶胶浓度 ρ 。根据公式 (A.2) 计算气溶胶浓度示值误差。

$$\delta_c = C - \rho \quad (\text{A.2})$$

式中：

δ_c ——精密气溶胶光度计测量浓度的示值误差；

C ——精密气溶胶光度计显示的气溶胶浓度， mg/m^3 ；

ρ ——校准方法得到的气溶胶浓度， mg/m^3 。

A.2.6 气溶胶发雾混匀装置 4 h 稳定性

开启气溶胶发雾混匀装置，调节相关参数，使之产生稳定的气溶胶。将精密气溶胶光度计连接到气溶胶发雾混匀装置的发雾口，待仪器稳定后读取精密气溶胶光度计的初始值并开始计时，以后每隔 1 h 读取 1 次浓度值，共 5 次。取 5 个读数中的最大值和最小值，按公式 (A.3) 计算气溶胶发雾混匀装置 4 h 稳定性。

$$\rho_\theta = \frac{\rho_{\max} - \rho_{\min}}{\bar{\rho}} \times 100\% \quad (\text{A.3})$$

式中：

ρ_θ ——气溶胶发雾混匀装置稳定性；

$\rho_{\max}$ ——5 个浓度值的最大值， mg/m^3 ；

$\rho_{\min}$ ——5 个浓度值的最小值， mg/m^3 ；

$\bar{\rho}$ ——5 个浓度值的平均值， mg/m^3 。

A.2.7 气溶胶发雾混匀装置 20 min 稳定性

开启气溶胶发雾混匀装置，调节相关参数，使之产生稳定的气溶胶。将精密气溶胶光度计连接到气溶胶发雾混匀装置的发雾口，待仪器稳定后读取精密气溶胶光度计的初始值并开始计时，以后每隔 5 min 读取 1 次浓度值，共 5 次。取 5 个读数中的最大值和最小值，按公式 (A. 3) 计算气溶胶发雾混匀装置 20 min 稳定性。



附录 B

精密气溶胶光度计质量浓度示值误差测量不确定度评定示例

B.1 概述

精密气溶胶光度计是对气溶胶光度计进行校准的仪器，因此精密气溶胶光度计校准结果的不确定度评定主要是针对质量浓度示值误差测量结果的不确定度评定。精密气溶胶光度计质量浓度测量不确定度主要包括：质量浓度测量重复性引入的不确定度，气溶胶发生浓度不稳定引入的不确定度，采样前后滤膜质量差的不确定度，以及采样体积不确定度。

B.2 方法分析

分别使精密气溶胶光度计发生质量浓度等于 0.6 mg/m^3 、 20 mg/m^3 以及 100 mg/m^3 的气溶胶。用镊子将已称量的滤膜放入洁净的滤膜夹中，将标准装置的管路切换到连接有气体采样泵、流量计和滤膜夹一侧，连续采样，记录采样体积 V ；采样结束后，运用天平称量的前后结果计算出质量浓度差 $\Delta(\omega)$ ；质量浓度差比采样体积计算出校准方法得到的气溶胶浓度 ρ ，进而计算出精密气溶胶光度计的示值误差 δ_c 。

B.3 测量模型

$$\delta_c = C - \frac{\Delta(\omega)}{V} \quad (\text{B.1})$$

式中：

C ——被校精密气溶胶光度计质量浓度示值， mg/m^3 ；

$\Delta(\omega)$ ——采样前后滤膜的质量之差， mg ；

V ——采样累积体积， m^3 。

B.4 各不确定度分量的评定

B.4.1 测量重复性和气溶胶发生浓度不稳定引入的不确定度 $u(C)$ B.4.1.1 测量重复性引入的不确定度 $u(C_1)$

测量重复性引入的不确定度采用 A 类不确定度评定。

在浓度为 0.6 mg/m^3 条件下，通过实验，得到 δ_c 的 10 组测得值为：

-0.0093 mg/m^3 ， -0.0258 mg/m^3 ， -0.0194 mg/m^3 ， 0.0101 mg/m^3 ，
 -0.0383 mg/m^3 ， -0.0045 mg/m^3 ， 0.0254 mg/m^3 ， -0.0138 mg/m^3 ，
 -0.0020 mg/m^3 ， -0.0304 mg/m^3 。

$$\bar{\delta}_c = \frac{\sum_{i=1}^{10} \delta_{Ci}}{10} = -0.0108 (\text{mg/m}^3)$$

$$s(\delta_c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\delta_{Ci} - \bar{\delta}_c)^2}{10 - 1}} = 1.92 \times 10^{-2} (\text{mg/m}^3)$$

以 10 次测得值的算术平均值作为 δ_c 的最佳估计值，得：

$$u(C_1) = \frac{s(\delta_C)}{\sqrt{10}} = 6.07 \times 10^{-3} (\text{mg}/\text{m}^3)$$

在浓度为 20 mg/m³ 条件下, 通过实验, 得到 δ_C 的 10 组测得值为:

−0.076 mg/m³, −0.707 mg/m³, −0.115 mg/m³, −0.071 mg/m³, −0.521 mg/m³,
0.116 mg/m³, −0.377 mg/m³, −0.671 mg/m³, 0.091 mg/m³, −0.279 mg/m³。

$$\bar{\delta}_C = \frac{\sum_{i=1}^{10} \delta_{Ci}}{10} = -0.256 (\text{mg}/\text{m}^3)$$

$$s(\delta_C) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\delta_{Ci} - \bar{\delta}_C)^2}{10 - 1}} = 0.307 (\text{mg}/\text{m}^3)$$

以 10 次测得值的算术平均值作为 δ_C 的最佳估计值, 得:

$$u(C_1) = \frac{s(\delta_C)}{\sqrt{10}} = 9.71 \times 10^{-2} (\text{mg}/\text{m}^3)$$

在浓度为 100 mg/m³ 条件下, 通过实验, 得到 δ_C 的 10 组测得值为:

−1.76 mg/m³, −0.82 mg/m³, −0.73 mg/m³, −3.41 mg/m³, −1.18 mg/m³,
−2.33 mg/m³, −1.25 mg/m³, −2.32 mg/m³, −3.08 mg/m³, −0.92 mg/m³。

$$\bar{\delta}_C = \frac{\sum_{i=1}^{10} \delta_{Ci}}{10} = -1.78 (\text{mg}/\text{m}^3)$$

$$s(\delta_C) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} (\delta_{Ci} - \bar{\delta}_C)^2}{10 - 1}} = 0.963 (\text{mg}/\text{m}^3)$$

以 10 次测得值的算术平均值作为 δ_C 的最佳估计值, 得:

$$u(C_1) = \frac{s(\delta_C)}{\sqrt{10}} = 0.305 (\text{mg}/\text{m}^3)$$

B.4.1.2 气溶胶发生浓度不稳定引入的不确定度 $u(C_2)$

气溶胶发生浓度不稳定引入的不确定度采用 B 类方法评定, 假设为均匀分布。

在浓度为 0.6 mg/m³ 条件下, 滤膜称重法得到的气溶胶质量浓度标准值为 0.595 5 mg/m³。气溶胶发雾混匀装置发生的气溶胶质量浓度稳定性不大于 10%。

$$u(C_2) = \frac{10\% \times 0.595\ 5}{2\sqrt{3}} = 1.72 \times 10^{-2} (\text{mg}/\text{m}^3)$$

在浓度为 20 mg/m³ 条件下, 滤膜称重法得到的气溶胶质量浓度标准值为 20.127 mg/m³。气溶胶发雾混匀装置发生的气溶胶质量浓度稳定性不大于 5%。

$$u(C_2) = \frac{5\% \times 20.127}{2\sqrt{3}} = 0.291 (\text{mg}/\text{m}^3)$$

在浓度为 100 mg/m³ 条件下, 滤膜称重法得到的气溶胶质量浓度标准值为 102.94 mg/m³。气溶胶发雾混匀装置发生的气溶胶质量浓度稳定性不大于 5%。

$$u(C_2) = \frac{5\% \times 102.94}{2\sqrt{3}} = 1.49(\text{mg}/\text{m}^3)$$

B.4.1.3 测量重复性和气溶胶发生浓度不稳定引入的不确定度 $u(C)$

$$u(C) = \sqrt{u(C_1)^2 + u(C_2)^2}$$

在浓度为 $0.6 \text{ mg}/\text{m}^3$ 条件下：

$$u(C) = 1.82 \times 10^{-2} \text{ mg}/\text{m}^3$$

在浓度为 $20 \text{ mg}/\text{m}^3$ 条件下：

$$u(C) = 0.307 \text{ mg}/\text{m}^3$$

在浓度为 $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ 条件下：

$$u(C) = 1.52 \text{ mg}/\text{m}^3$$

B.4.2 采样前后滤膜质量差的测量结果不准确引入的不确定度 $u(\Delta\omega)$

采样前后滤膜质量差的测量结果引入的不确定度采用 B 类不确定度方法评定。天平最大允许误差为 0.004 mg ，均匀分布。得：

$$u(\Delta\omega) = \frac{0.004}{\sqrt{3}} = 2.31 \times 10^{-3}(\text{mg})$$

B.4.3 采样体积的测量结果不准确引入的不确定度 $u(V)$

采样体积的测量结果不确定度采用 B 类不确定度方法评定。查阅溯源证书，该流量泵累计体积最大允许误差不超过 $\pm 1.0\%$ ，假设服从均匀分布。

在浓度为 $0.6 \text{ mg}/\text{m}^3$ 条件下，采样 $V = 20.001850 \text{ m}^3$ ：

$$u(V) = 20.001850 \times \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.115(\text{m}^3)$$

在浓度为 $20 \text{ mg}/\text{m}^3$ 条件下，采样 $V = 1.000320 \text{ m}^3$ ：

$$u(V) = 1.000320 \times \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 5.78 \times 10^{-3}(\text{m}^3)$$

在浓度为 $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ 条件下，采样 $V = 0.200550 \text{ m}^3$ ：

$$u(V) = 0.200550 \times \frac{1.0\%}{\sqrt{3}} = 1.16 \times 10^{-3}(\text{m}^3)$$

B.5 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \delta_C}{\partial C} = 1, c_2 = \frac{\partial \delta_C}{\partial \Delta\omega} = -\frac{1}{V}, c_3 = \frac{\partial \delta_C}{\partial V} = \frac{\Delta\omega}{V^2}$$

在浓度为 $0.6 \text{ mg}/\text{m}^3$ 条件下，测量得到 $\Delta\omega = 11.911 \text{ mg}$ ，

$$c_2 = -\frac{1}{V} = -\frac{1}{20.001850} = -0.0500(\text{m}^{-3})$$

$$c_3 = \frac{\Delta\omega}{V^2} = \frac{11.911}{20.001850^2} = 0.0298(\text{mg}/\text{m}^6)$$

在浓度为 $20 \text{ mg}/\text{m}^3$ 条件下，测量得到 $\Delta\omega = 20.133 \text{ mg}$ ，

$$c_2 = -\frac{1}{V} = -\frac{1}{1.000\ 320} = -1.00(\text{m}^{-3})$$

$$c_3 = \frac{\Delta\omega}{V^2} = \frac{20.133}{1.000\ 320^2} = 20.1(\text{mg}/\text{m}^6)$$

在浓度为 $100\ \text{mg}/\text{m}^3$ 条件下, 测量得到 $\Delta\omega = 20.645\ \text{mg}$,

$$c_2 = -\frac{1}{V} = -\frac{1}{0.200\ 550} = -4.99(\text{m}^{-3})$$

$$c_3 = \frac{\Delta\omega}{V^2} = \frac{20.645}{0.200\ 550^2} = 513(\text{mg}/\text{m}^6)$$

B.6 标准不确定度汇总表

表 1 标准不确定度汇总表

输入量的标准 不确定度分量 $u(x_i)$		不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数 c_i	输出量的标准 不确定度分量 $u_i(\delta_C) = c_i u(x_i)$
校准点: $0.6\ \text{mg}/\text{m}^3$	$u(C)$	测量重复性和 气溶胶发生浓度 不稳定引入的 不确定度	$1.82 \times 10^{-2}\ \text{mg}/\text{m}^3$	1	$1.82 \times 10^{-2}\ \text{mg}/\text{m}^3$
校准点: $20\ \text{mg}/\text{m}^3$			$0.307\ \text{mg}/\text{m}^3$		$0.307\ \text{mg}/\text{m}^3$
校准点: $100\ \text{mg}/\text{m}^3$			$1.52\ \text{mg}/\text{m}^3$		$1.52\ \text{mg}/\text{m}^3$
校准点: $0.6\ \text{mg}/\text{m}^3$	$u(\Delta\omega)$	采样前后滤膜 质量差的测量 结果不准确引 入的不确定度	$2.31 \times 10^{-3}\ \text{mg}$	$-0.0500\ \text{m}^{-3}$	$1.16 \times 10^{-4}\ \text{mg}/\text{m}^3$
校准点: $20\ \text{mg}/\text{m}^3$			$2.31 \times 10^{-3}\ \text{mg}$	$-1.00\ \text{m}^{-3}$	$2.31 \times 10^{-3}\ \text{mg}/\text{m}^3$
校准点: $100\ \text{mg}/\text{m}^3$			$2.31 \times 10^{-3}\ \text{mg}$	$-4.99\ \text{m}^{-3}$	$0.0115\ \text{mg}/\text{m}^3$
校准点: $0.6\ \text{mg}/\text{m}^3$	$u(V)$	采样体积的测 量结果不准确 引入的不确定度	$0.115\ \text{m}^3$	$0.0298\ \text{mg}/\text{m}^6$	$3.43 \times 10^{-3}\ \text{mg}/\text{m}^3$
校准点: $20\ \text{mg}/\text{m}^3$			$5.78 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$	$20.1\ \text{mg}/\text{m}^6$	$0.116\ \text{mg}/\text{m}^3$
校准点: $100\ \text{mg}/\text{m}^3$			$1.16 \times 10^{-3}\ \text{m}^3$	$513\ \text{mg}/\text{m}^6$	$0.595\ \text{mg}/\text{m}^3$

B.7 合成标准不确定度和扩展不确定度的计算

由于 C , $\Delta\omega$ 和 V 两两互不相关, 因此:

$$u_c(\delta_C) = \sqrt{c_1^2 u(C)^2 + c_2^2 u(\Delta\omega)^2 + c_3^2 u(V)^2} = \sqrt{u_1(\delta_C)^2 + u_2(\delta_C)^2 + u_3(\delta_C)^2}$$

在浓度为 0.6 mg/m^3 条件下,

$$u_c(\delta_C) = 1.85 \times 10^{-2} \text{ mg/m}^3$$

$$U = k \times u_c(\delta_C) = 2 \times 1.85 \times 10^{-2} = 3.7 \times 10^{-2} (\text{mg/m}^3)$$

在浓度为 20 mg/m^3 条件下,

$$u_c(\delta_C) = 0.328 \text{ mg/m}^3$$

$$U = k \times u_c(\delta_C) = 2 \times 0.328 = 0.66 (\text{mg/m}^3)$$

在浓度为 100 mg/m^3 条件下,

$$u_c(\delta_C) = 1.63 \text{ mg/m}^3$$

$$U = k \times u_c(\delta_C) = 2 \times 1.63 = 3.3 (\text{mg/m}^3)$$

B.8 精密气溶胶光度计示值误差的不确定度表示

在浓度为 0.6 mg/m^3 条件下, $U = 3.7 \times 10^{-2} \text{ mg/m}^3$, $k = 2$;

在浓度为 20 mg/m^3 条件下, $U = 0.66 \text{ mg/m}^3$, $k = 2$;

在浓度为 100 mg/m^3 条件下, $U = 3.3 \text{ mg/m}^3$, $k = 2$ 。

附录 C

气溶胶光度计质量浓度示值误差的不确定度评定示例

C.1 测量方法

在低浓度范围选择 $0.6 \mu\text{g/L}$ ，在高浓度范围选择 $20 \mu\text{g/L}$ 和 $100 \mu\text{g/L}$ 校准点分别评定不确定度。使用气溶胶发雾混匀装置分别发生质量浓度为 $0.6 \mu\text{g/L}$ ， $20 \mu\text{g/L}$ 和 $100 \mu\text{g/L}$ 的气溶胶。按照 6.2.4 的校准方法进行校准，记录气溶胶质量浓度标准值 C_s 和被校气溶胶光度计气溶胶质量浓度测量值 C_m ，其中 C_m 和 C_s 分别为单次浓度示值误差测量时得到的 C_{m1} ， C_{m2} 的平均值和 C_{s1} ， C_{s2} 的平均值，计算气溶胶光度计质量浓度示值误差 δ 。此处的气溶胶质量浓度标准值 C_{s1} ， C_{s2} 由精密气溶胶光度计直接读数得到。

C.2 测量模型

$$\delta = C_m - C_s \quad (\text{C.1})$$

式中：

C_s ——精密气溶胶光度计质量浓度测量值， $\mu\text{g/L}$ ；

C_m ——被校仪器气溶胶质量浓度测量值， $\mu\text{g/L}$ ；

δ ——气溶胶光度计质量浓度示值误差， $\mu\text{g/L}$ 。

C.3 不确定度来源分析

C.3.1 被校气溶胶光度计质量浓度的测量随机误差引入的不确定度。

C.3.2 精密气溶胶光度计的系统误差引入的不确定度。

C.4 各不确定度分量评定

C.4.1 被校气溶胶光度计质量浓度的测量随机误差引入的不确定度 $u(C_m)$

选择 1 台常规水平的气溶胶光度计，分别在 $0.6 \mu\text{g/L}$ ， $20 \mu\text{g/L}$ 和 $100 \mu\text{g/L}$ 条件下按照 6.2.4 的测量方法重复测量 10 次，得到 10 个 δ 值，记为 δ_k ($k=1, 2, 3, \dots, 10$)。数据列分别见表 C.1、表 C.2、表 C.3。

表 C.1 $0.6 \mu\text{g/L}$ 校准点质量浓度校准数据表

测量次数 (第 k 次)	被校仪器质量浓度测量值 C_m $\mu\text{g/L}$	质量浓度标准值 C_s $\mu\text{g/L}$	$\delta = C_m - C_s$ $\mu\text{g/L}$
1	0.579 5	0.612 3	-0.032 8
2	0.573 4	0.587 4	-0.014 0
3	0.595 4	0.635 9	-0.040 5
4	0.571 0	0.620 1	-0.049 1
5	0.542 6	0.597 7	-0.055 1
6	0.591 1	0.612 7	-0.021 6
7	0.561 9	0.624 4	-0.062 5
8	0.573 1	0.602 9	-0.029 8
9	0.540 9	0.586 7	-0.045 8
10	0.568 1	0.590 9	-0.022 8

表 C.2 20 $\mu\text{g/L}$ 校准点质量浓度校准数据表

测量次数 (第 k 次)	被校仪器质量浓度测量值 C_m $\mu\text{g/L}$	质量浓度标准值 C_s $\mu\text{g/L}$	$\delta = C_m - C_s$ $\mu\text{g/L}$
1	19.231	19.621	-0.390
2	19.355	20.121	-0.766
3	19.554	19.946	-0.392
4	19.803	20.322	-0.519
5	19.789	20.075	-0.286
6	18.847	19.870	-1.023
7	19.675	20.233	-0.558
8	18.952	19.638	-0.686
9	19.736	20.145	-0.409
10	19.588	20.469	-0.881

表 C.3 100 $\mu\text{g/L}$ 校准点质量浓度校准数据表

测量次数 (第 k 次)	被校仪器质量浓度测量值 C_m $\mu\text{g/L}$	质量浓度标准值 C_s $\mu\text{g/L}$	$\delta = C_m - C_s$ $\mu\text{g/L}$
1	106.62	101.56	5.06
2	105.38	101.01	4.37
3	104.16	101.87	2.29
4	104.59	100.11	4.48
5	105.21	101.34	3.87
6	103.76	100.75	3.01
7	104.53	100.89	3.64
8	105.99	101.83	4.16
9	105.13	101.95	3.18
10	104.33	100.79	3.54

实际校准时，测量 5 次。根据表 C.1，表 C.2 和表 C.3，被校气溶胶光度计质量浓度的测量随机误差引入的不确定度通过以下方式计算：

校准点为 0.6 $\mu\text{g/L}$ 时：

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{k=1}^{10} \delta_k}{10} = -0.0374 (\mu\text{g/L})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\delta_k - \bar{\delta})^2}{10-1}} = 1.58 \times 10^{-2} (\mu\text{g/L})$$

$$u(C_m) = \frac{s}{\sqrt{5}} = 7.07 \times 10^{-3} (\mu\text{g/L})$$

校准点为 20 $\mu\text{g/L}$ 时:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{k=1}^{10} \delta_k}{10} = -0.591 (\mu\text{g/L})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\delta_k - \bar{\delta})^2}{10-1}} = 0.241 (\mu\text{g/L})$$

$$u(C_m) = \frac{s}{\sqrt{5}} = 0.108 (\mu\text{g/L})$$

校准点为 100 $\mu\text{g/L}$ 时:

$$\bar{\delta} = \frac{\sum_{k=1}^{10} \delta_k}{10} = 3.76 (\mu\text{g/L})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{10} (\delta_k - \bar{\delta})^2}{10-1}} = 0.808 (\mu\text{g/L})$$

$$u(C_m) = \frac{s}{\sqrt{5}} = 0.361 (\mu\text{g/L})$$

C.4.2 精密气溶胶光度计引入的不确定度 $u(C_s)$

精密气溶胶光度计质量浓度的最大允许误差不超过 $\pm 10\%$, 服从均匀分布。

校准点为 0.6 $\mu\text{g/L}$ 时:

$$C_s = 0.6071 \mu\text{g/L}$$

$$u(C_s) = \frac{10\% \times 0.6071}{\sqrt{3}} = 3.51 \times 10^{-2} (\mu\text{g/L})$$

校准点为 20 $\mu\text{g/L}$ 时:

$$C_s = 20.009 \mu\text{g/L}$$

$$u(C_s) = \frac{10\% \times 20.009}{\sqrt{3}} = 1.16 (\mu\text{g/L})$$

校准点为 100 $\mu\text{g/L}$ 时:

$$C_s = 101.21 \mu\text{g/L}$$

$$u(C_s) = \frac{10\% \times 101.21}{\sqrt{3}} = 5.84 (\mu\text{g/L})$$

C.5 合成标准不确定度的评定

C.5.1 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \delta}{\partial C_m} = 1$$

$$c_2 = \frac{\partial \delta}{\partial C_s} = -1$$

C.5.2 标准不确定度汇总表

表 C.4 标准不确定度汇总表

输入量的标准不确定度分量 $u(x_i)$		不确定度来源	标准不确定度	c_i	输出量的标准不确定度分量 $u_i(\delta) = c_i u(x_i)$
校准点： 0.6 $\mu\text{g/L}$	$u(C_m)$	被校气溶胶光度计质量浓度的测量随机误差引入的不确定度	$7.07 \times 10^{-3} \mu\text{g/L}$	1	$7.07 \times 10^{-3} \mu\text{g/L}$
校准点： 20 $\mu\text{g/L}$			0.108 $\mu\text{g/L}$		0.108 $\mu\text{g/L}$
校准点： 100 $\mu\text{g/L}$			0.361 $\mu\text{g/L}$		0.361 $\mu\text{g/L}$
校准点： 0.6 $\mu\text{g/L}$	$u(C_s)$	精密气溶胶光度计引入的不确定度	$3.51 \times 10^{-2} \mu\text{g/L}$	-1	$3.51 \times 10^{-2} \mu\text{g/L}$
校准点： 20 $\mu\text{g/L}$			1.16 $\mu\text{g/L}$		1.16 $\mu\text{g/L}$
校准点： 100 $\mu\text{g/L}$			5.84 $\mu\text{g/L}$		5.84 $\mu\text{g/L}$

C.5.3 合成标准不确定度的计算

由于 C_m 和 C_s 不相关，因此：

$$u_c(\delta) = \sqrt{c_1^2 u(C_m)^2 + c_2^2 u(C_s)^2} = \sqrt{u_1(\delta)^2 + u_2(\delta)^2}$$

代入表 C.4 中各数值，得：

校准点为 0.6 $\mu\text{g/L}$ 时： $u_c(\delta) = 3.58 \times 10^{-2} \mu\text{g/L}$ ；

校准点为 20 $\mu\text{g/L}$ 时： $u_c(\delta) = 1.17 \mu\text{g/L}$ ；

校准点为 100 $\mu\text{g/L}$ 时： $u_c(\delta) = 5.85 \mu\text{g/L}$ 。

C.6 扩展不确定度

扩展不确定度： $U = k \times u_c(\delta)$ ，取 $k=2$ ，得：

校准点为 0.6 $\mu\text{g/L}$ 时： $U = 7.2 \times 10^{-2} \mu\text{g/L}$ ， $k=2$ ；

校准点为 20 $\mu\text{g/L}$ 时： $U = 2.4 \mu\text{g/L}$ ， $k=2$ ；

校准点为 100 $\mu\text{g/L}$ 时： $U = 12 \mu\text{g/L}$ ， $k=2$ 。

附录 D

气溶胶光度计校准原始记录格式 (参考)

送校单位: _____

仪器型号: _____ 仪器编号: _____ 制造厂商: _____

校准环境温度: _____ °C 湿度: _____ %RH

校准依据: _____ 校准用标准和装置: _____

一、校准前准备: _____

二、计量性能校准:

1. 流量示值误差/ (L/min)						
被检仪器流量指示值						
标准流量值						
单次示值误差/ %						
流量示值误差/ %						
2. 流量重复性/ (L/min)						
次数	1	2	3	4	5	6
流量						
流量重复性/ %						
3. 流量稳定性/ (L/min)						
	初始值	第 1 次	第 2 次	第 3 次	流量稳定性/ %	
流量	第 4 次	第 5 次	第 6 次			
4. 质量浓度示值误差						
$C_{s1}/ (\mu\text{g/L})$						校准浓度: 示值误差 δ :
$C_{s2}/ (\mu\text{g/L})$						
$C_{m1}/ (\mu\text{g/L})$						
$C_{m2}/ (\mu\text{g/L})$						
δ_i						

$C_{s1}/(\mu\text{g/L})$						校准浓度： 示值误差 δ ：	
$C_{s2}/(\mu\text{g/L})$							
$C_{m1}/(\mu\text{g/L})$							
$C_{m2}/(\mu\text{g/L})$							
δ_i							
$C_{s1}/(\mu\text{g/L})$						校准浓度： 示值误差 δ ：	
$C_{s2}/(\mu\text{g/L})$							
$C_{m1}/(\mu\text{g/L})$							
$C_{m2}/(\mu\text{g/L})$							
δ_i							
5. 质量浓度重复性							
测量次数	1 $\mu\text{g/L}$	2 $\mu\text{g/L}$	3 $\mu\text{g/L}$	4 $\mu\text{g/L}$	5 $\mu\text{g/L}$	6 $\mu\text{g/L}$	重复性 %
浓度值 1							
浓度值 2							
浓度值 3							
质量浓度重复性 %							

校准员：_____ 核验员：_____

日 期：_____ 日 期：_____

附录 E

气溶胶光度计校准证书（内页）格式（参考）

校准项目	校准结果		
流量示值误差			
流量重复性			
流量稳定性			
质量浓度示值误差	标准浓度值	仪器浓度示值	示值误差
质量浓度重复性			
注：			

第×页 共×页