



山东省地方计量技术规范

JJF（鲁）186—2024

口罩颗粒物过滤效率测试仪校准规范

Calibration Specification for Mask Particle Filtration Efficiency Testers

2024—01—23 发布

2024—03—01 实施

山东省市场监督管理局发布

口罩颗粒物过滤效率测试仪 校准规范

Calibration Specification for Mask Particle
Filtration Efficiency Testers

JJF (鲁) 186—
2024

归口单位：山东省市场监督管理局

主要起草单位：青岛市计量技术研究院

参加起草单位：青岛众瑞智能仪器股份有限公司

烟台市标准计量检验检测中心

本规范委托山东省医学计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

张 明（青岛市计量技术研究院）

邹亚雄（青岛市计量技术研究院）

刘伟光（青岛市计量技术研究院）

参加起草人：

何春雷（青岛众瑞智能仪器股份有限公司）

郭 亮（青岛众瑞智能仪器股份有限公司）

杜广文（青岛众瑞智能仪器股份有限公司）

张 健（烟台市标准计量检验检测中心）

目 录

引 言.....	(2)
1 范围.....	(1)
2 引用文件.....	(1)
3 术语.....	(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 外观与功能检查.....	(4)
7.2 流量示值误差.....	(4)
7.3 流量重复性.....	(5)
7.4 阻力示值误差.....	(5)
7.5 气溶胶粒径分布.....	(6)
7.6 过滤效率示值误差.....	(6)
8 校准结果表达.....	(7)
9 复校时间间隔.....	(8)
附录 A 口罩颗粒物过滤效率测试仪校准装置.....	(9)
附录 B 校准原始记录格式.....	(13)
附录 C 校准证书内页格式.....	(15)
附录 D 测量不确定度评定示例.....	(18)

引 言

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》、JJF 1059.1-2012《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。

本规范主要参考 JJF 1562-2016《凝结核粒子计数器校准规范》、GB 2626-2019《呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器》、GB/T 32610-2016《日常防护型口罩技术规范》、GB/T 15445.5-2011《粒度分析结果的表述 第 5 部分：用对数正态概率分布进行粒度分析的计算方法》、GB/T 5275.5-2014《气体分析 动态体积法制备校准用混合气体 第 5 部分：毛细管校准器》、GB 19083-2010《医用防护口罩技术要求》、GB/T 38413-2019《纺织品 细颗粒物过滤性能试验方法》、GB/T 38880-2020《儿童口罩技术规范》、YY 0469-2011《医用外科口罩》、EN 13274-7:2019 呼吸防护装置-试验方法-第 7 部分:颗粒过滤器渗透性的测定 (Respiratory protective devices—Methods of test—Part 7: Determination of particle filter penetration)、ISO 15900:2020 气溶胶颗粒粒径分布测量差分电迁移法 (Determination of particle size distribution — Differential electrical mobility analysis for aerosol particles)、ISO 16900-3:2012 呼吸防护装置-试验方法和实验设备-第 3 部分：颗粒过滤器渗透性的测定 (Respiratory protective devices—Methods of test and test equipment—Part 3: Determination of particle filter penetration) 和 NIOSH—42 CFR Part 84 呼吸防护装置 (Respiratory Protective Devices) 等制定。

本规范是首次发布。

口罩颗粒物过滤效率测试仪校准规范

1 范围

本规范适用于口罩颗粒物过滤效率测试仪的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1562-2016 凝结核粒子计数器校准规范

GB 2626-2019 呼吸防护 自吸过滤式防颗粒物呼吸器

GB/T 15445.5-2011 粒度分析结果的表述 第 5 部分：用对数正态概率分布进行粒度分析的计算方法

GB/T 32610-2016 日常防护型口罩技术规范

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

JJF 1562、GB 2626、GB/T 32610 和 GB/T 15445.5 界定的及以下术语和定义适用于本规范。

3.1 过滤效率 filter efficiency

在规定条件下，口罩罩体滤除颗粒物的能力，用百分数表示。

[来源：GB/T 32610-2016，3.2]

3.2 气溶胶 aerosol

悬浮于气体中的固体和/或液体颗粒分散体系。

[来源：JJF 1562-2016，3.1]

3.3 计数中位径 count median diameter (CMD)

当把颗粒物按粒径大小排序时，比它粒径大的和比它粒径小的颗粒物质量各占颗粒物总质量 50%的粒径。

[来源：GB 2626-2019，3.24]

3.4 几何标准偏差 geometric standard deviation (GSD)

标准偏差的指数函数。本规范中用于描述气溶胶颗粒直径的分散程度。

[来源：GB/T 15445.5-2011，3]

4 概述

口罩颗粒物过滤效率测试仪（以下简称“测试仪”）用于口罩颗粒物过滤效率的测试。其工作原理是通过盐性或油性气溶胶发生装置产生一定浓度及粒径分布的气溶胶颗粒，以规定流量通过被测样品，使用气溶胶浓度测量仪检测通过被测样品前后（上下游）的颗粒物浓度。以气溶胶通过被测样品后颗粒物浓度的减少量来评价被测样品对颗粒物的过滤效率。口罩颗粒物过滤效率测试仪主要由气溶胶发生和混匀系统、口罩夹具、流量控制系统、抽气动力及排放系统、气溶胶浓度测量系统、差压计以及数据处理和输入输出单元组成，如图 1 所示。

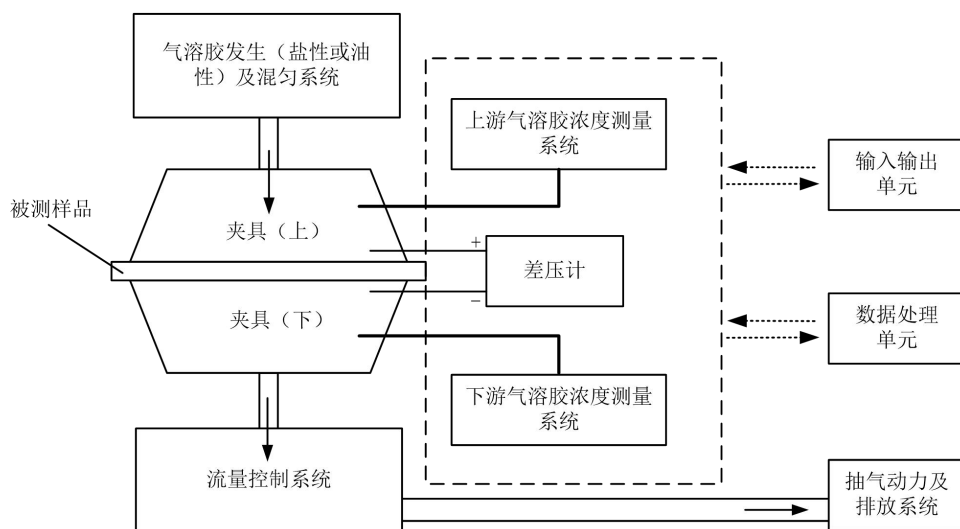


图 1 口罩颗粒物过滤效率测试仪结构示意图

5 计量特性

测试仪的计量特性见表 1。

表 1 计量特性

序号	校准项目	性能指标
1	流量示值误差	不超过 $\pm 3\%$
2	流量重复性	不大于 1%
3	阻力示值误差	不超过 $\pm 10\text{Pa}$
4	气溶胶粒径分布	盐性气溶胶：计数中位径（CMD）为 $(0.075 \pm 0.020) \mu\text{m}$ ， 粒径分布的几何标准偏差不大于 1.86； 油性气溶胶：计数中位径（CMD）为 $(0.185 \pm 0.020) \mu\text{m}$ ， 粒径分布的几何标准偏差不大于 1.60。
5	过滤效率示值误差	过滤效率标准值 $\geq 90\%$ 时：不超过 $\pm 2\%$ ； 过滤效率标准值 $\geq 80\% \sim < 90\%$ 时：不超过 $\pm 3\%$ ； 过滤效率标准值 $< 80\%$ 时：不超过 $\pm 5\%$ 。

注：以上指标不适用于测试仪的合格性判定，仅供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：(25±5)℃；

6.1.2 相对湿度：≤85%；

6.1.3 其他：远离振动、电磁干扰，避免阳光直射。

6.2 测量标准及其他设备

6.2.1 口罩颗粒物过滤效率测试仪校准装置（以下简称“校准装置”）

校准装置包括标准流量计、数字压力计、原位气溶胶稀释器等标准器和校准工装，详见附录 A。

在满足表 1 的气溶胶粒径分布条件下，校准装置的扩展不确定度应满足表 2 的要求。

表 2 过滤效率标准值的扩展不确定度

过滤效率标准值	扩展不确定度 $U(k=2)$
≥90%	1.0%
≥80%~<90%	1.5%
<80%	2.5%

6.2.1.1 标准流量计

测量范围 (0~100) L/min，准确度等级不低于 1.0 级。

6.2.1.2 数字压力计

测量范围 (0~1000) Pa，准确度等级不低于 0.2 级。

6.2.1.3 原位气溶胶稀释器

原位气溶胶稀释器的结构如图 A.2 所示，与标准流量计（6.2.1.1）和数字压力计（6.2.1.2）组合可提供的标准过滤效率值应包含 (99±0.5)%、(95±1)%、(90±2)% 和 (80±5)%。

6.2.1.4 校准工装

包括流量校准工装、阻力校准工装和气溶胶粒径分布取样工装。

6.2.2 扫描电迁移率粒径谱仪（以下简称“粒径谱仪”）

粒径测量范围 (10nm~1μm)，颗粒计数效率 (100±10)%，颗粒计数重复性不大于 3%。

6.2.3 气溶胶稀释器

工作流量可以与粒径谱仪的采样流量相匹配，稀释比应至少包含 10:1。

7 校准项目和校准方法

7.1 外观与功能检查

测试仪应具有下列标识：名称、型号、出厂编号、制造厂名及制造日期。

测试仪外观应完好，所有零件应紧固无松动，不应有妨碍正常工作的机械损伤。通电后，各部件都能正常工作，各旋钮、按键应能正常调节，气路连接正确，密封完好无漏气现象，显示单元应清晰完整。

盐性气溶胶的测试仪应具有能将所发生的颗粒物的荷电进行中和的装置。

7.2 流量示值误差

将校准装置中的标准流量计通过流量校准工装接入测试仪的夹持机构，如图 2 所示。根据实际需要，选择 85L/min、30L/min 或客户要求的其它流量点进行校准。

启动测试仪，待稳定后，同时读取标准流量计和测试仪流量示值，重复测量 3 次，取算术平均值，按照公式（1）进行流量示值误差计算。

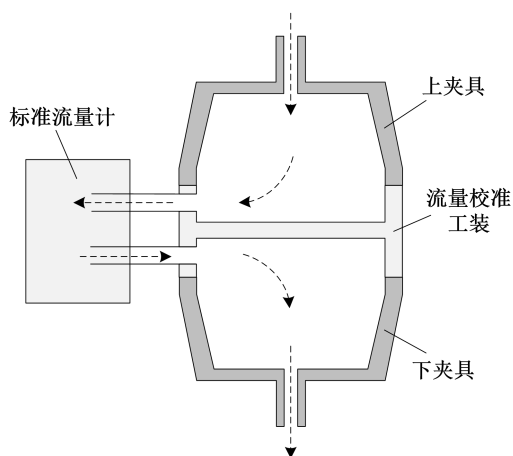


图 2 流量校准安装示意图

$$E = \frac{\bar{Q} - \bar{Q}_s}{\bar{Q}_s} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

E ——流量示值误差，%；

\bar{Q} ——测试仪 3 次流量示值的算术平均值，L/min；

\bar{Q}_s ——标准流量计 3 次测量结果的算术平均值, L/min。

7.3 流量重复性

按条款 7.2 安装标准流量计, 将流量设定为 85L/min, 待测试仪运行稳定后, 读取标准流量计示值。终止测试仪的工作, 待重新启动并运行稳定后, 再次读取标准流量计示值。共计重复 6 次, 按公式 (2) 计算流量重复性。

$$s = \frac{1}{\bar{Q}_s} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}{n-1}} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

s ——流量重复性, %;

n ——测量次数;

$Q_{s,i}$ ——第 i 次测量结果, L/min;

\bar{Q}_s ——标准流量计 6 次测量结果的算术平均值, L/min。

7.4 阻力示值误差

将校准装置中的数字压力计通过阻力校准工装接入测试仪的夹持机构, 如图 3 所示。设定测试仪流量为 30L/min 或可达到的流量下限, 调节校准装置流量控制阀, 使得数字压力计示值分别达到约 100Pa、200Pa、300Pa、500Pa 和 800Pa。运行稳定后, 分别读取数字压力计和测试仪压力示值, 按公式 (3) 计算阻力示值误差。

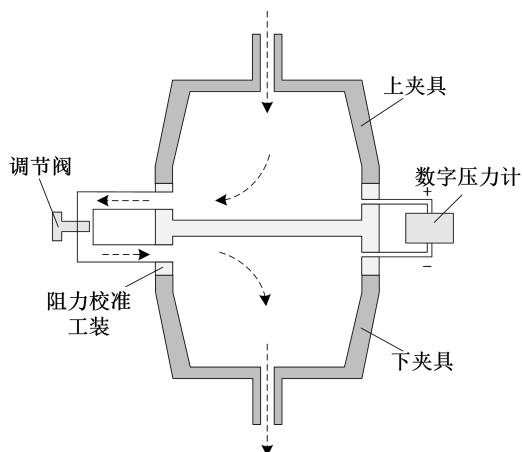


图3 阻力校准安装示意图

$$\Delta p = p - p_s \quad (3)$$

式中：

Δp ——阻力示值误差，Pa；

p ——测试仪压力测定值，Pa；

p_s ——数字压力计压力测定值，Pa。

7.5 气溶胶粒径分布

将校准装置的取样工装接入测试仪夹持机构，如图 4 所示。取样工装的取样口通过气溶胶稀释器与粒径谱仪的进气口相连接。开启测试仪，调节测试仪上游气溶胶浓度，使得经过稀释后的气溶胶颗粒数量浓度在（5000~8000）个/cm³ 范围内。操作粒径谱仪，测得试验气溶胶的计数中位径和几何标准偏差。

盐性气溶胶和油性气溶胶应分别测量。

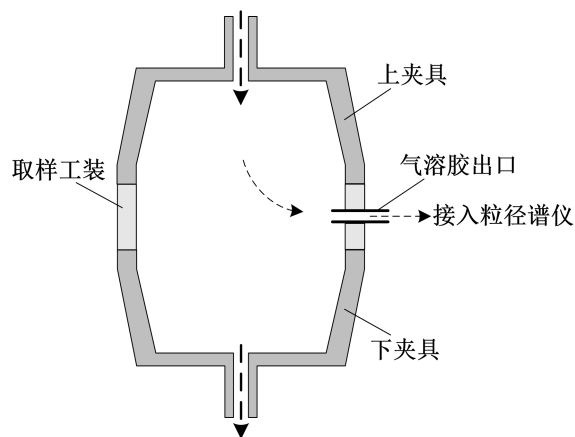


图 4 气溶胶粒径分布测量取样示意图

7.6 过滤效率示值误差

7.6.1 封闭校准装置中原位气溶胶稀释器的所有毛细管入口，并将其接入测试仪的夹持机构。在 85L/min 流量条件下，启动盐性或油性气溶胶的过滤效率测试程序。待运行稳定后，观察测试仪过滤效率测量结果是否能稳定在 99.97% 以上。如不能，应按照说明书对测试仪状态和参数重新进行调整，直至满足要求，方可继续进行校准。

7.6.2 调整原位气溶胶稀释器的稀释倍数到 100 左右，使得过滤效率标准值位于（99±0.5）% 的范围内。稀释倍数及过滤效率标准值的计算方法见附录 A 或校准装置说明书。

7.6.3 将调整到位的原位气溶胶稀释器安装在测试仪上下夹具之间，如图 5 所示。在 85L/min 流量条件下，启动盐性或油性气溶胶的过滤效率测试程序。待测试仪运行稳定后，

记录测试仪过滤效率示值，重复 3 次，取算术平均值，按公式（4）计算过滤效率示值误差。

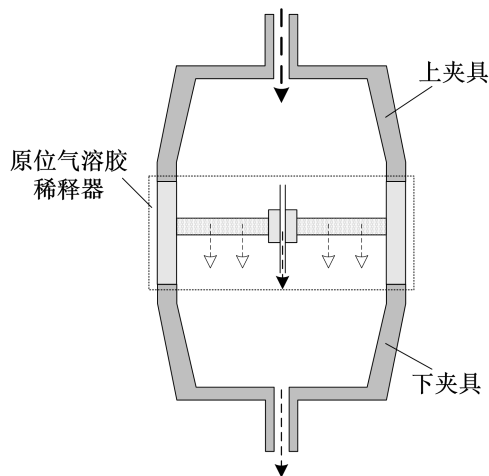


图 5 原位气溶胶稀释器安装示意图

$$\Delta F = \bar{F} - F_s \quad (4)$$

式中：

ΔF ——过滤效率示值误差，%；

\bar{F} ——测试仪过滤效率示值的算术平均值，%；

F_s ——校准装置的过滤效率标准值，%。

7.6.4 依次调整原位气溶胶稀释器的稀释倍数到 20 倍、10 倍和 5 倍左右，使得过滤效率标准值分别位于 $(95 \pm 1)\%$ 、 $(90 \pm 2)\%$ 和 $(80 \pm 5)\%$ 的范围内，按照条款 7.6.3 的方法逐一进行过滤效率示值误差的校准。

7.6.5 盐性和油性气溶胶的过滤效率示值误差应分别校准。

8 校准结果表达

校准结果应在校准证书（报告）上反映，校准证书（报告）应至少包括以下信息：

- 标题，如“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 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；

- 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;
- 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, 不得部分复制证书的声明。

校准原始记录格式见附录 B, 校准证书 (报告) 内页格式见附录 C。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短由测试仪的使用情况、使用者和测试仪本身质量等诸多因素决定, 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。复校时间间隔建议不超过 1 年。在相邻两次校准期间, 如对测试仪的检测数据有怀疑或测试仪更换主要部件及修理后应对测试仪重新校准。

附录 A

口罩颗粒物过滤效率测试仪校准装置

A.1 组成结构

如图 A.1 所示，校准装置分别由流量校准模块、阻力校准模块和原位气溶胶稀释器三部分组成。其中，图 A.1-a 为流量校准模块，主要由标准流量计和流量校准工装组成，标准流量计的进气口和出气口分别与流量校准工装的出气口和进气口相连接。图 A.1-b 为阻力校准模块，主要由数字压力计和具有调节阀的阻力校准工装组成，数字压力计的高压端和低压端通过阻力校准工装分别接入测试仪的上游和下游。图 A.1-c 为原位气溶胶稀释器，主要由稀释器入口、过滤器、限流器和稀释器出口组成。其结构型式符合原位气溶胶稀释法的功能要求。其中，作为气溶胶流路的限流器可由一支或多支具有一定规格的毛细管组成。

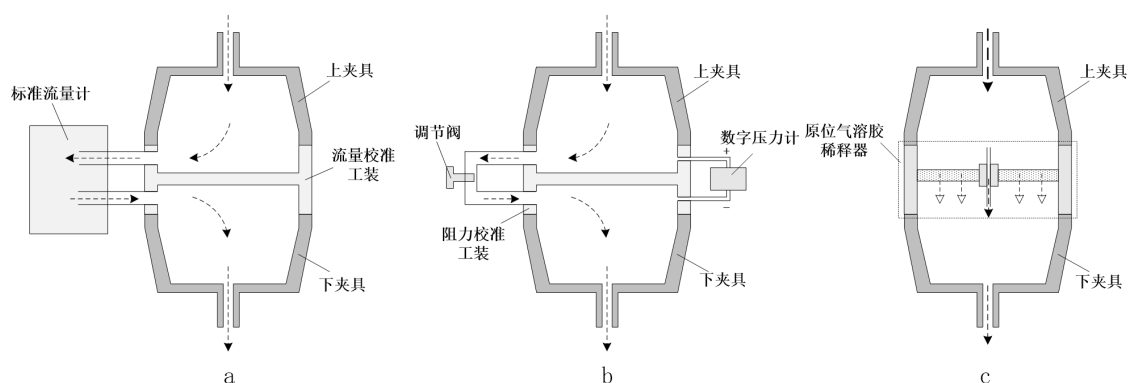


图 A.1 口罩颗粒物过滤效率测试仪校准装置组成结构示意图

A.2 工作原理

A.2.1 流量校准模块

如图 A.1-a 所示，对流量校准时，来自测试仪上游的气流，通过流量校准工装被全部导入标准流量计进行测量。测量后的气流通过标准流量计出口导出后，再次经由流量校准工装全部送回到测试仪下游。整个校准过程在封闭管路内进行，测试仪气流不与外界大气相接触。流量校准模块带来的气流阻力应符合测试仪的正常工况条件。

A.2.2 阻力校准模块

如图 A.1-b 所示，对阻力校准时，来自测试仪上游的气流，在经过调节阀后全部被送回测试仪下游。通过调节阀的调整，使得测试仪在一定流量条件下工作稳定后，数字

压力计的读数分别达到并稳定在条款 7.4 中各校准点附近。同时观察记录测试仪和数字压力计的阻力示值，按照条款 7.4 进行阻力示值误差的计算。

A.2.3 原位气溶胶稀释器

如图 A.1-c 所示，对过滤效率校准时，需要将稀释器入口与上游夹具密合连接，稀释器出口与下游夹具密合连接，使得校准过程中没有外部气流导入和内部气流导出。来自测试仪上游的气溶胶全部在稀释器入口处进行分流，一路通过过滤器净化后成为稀释气，另一路携带气溶胶颗粒，直接经过限流器到达稀释器出口。两路气流在稀释器出口处相遇混合，并回到测试仪流路继续进行下游浓度测量。经此过程，原位气溶胶稀释器将上游气溶胶按照预先设定的分流比例进行了原位稀释。

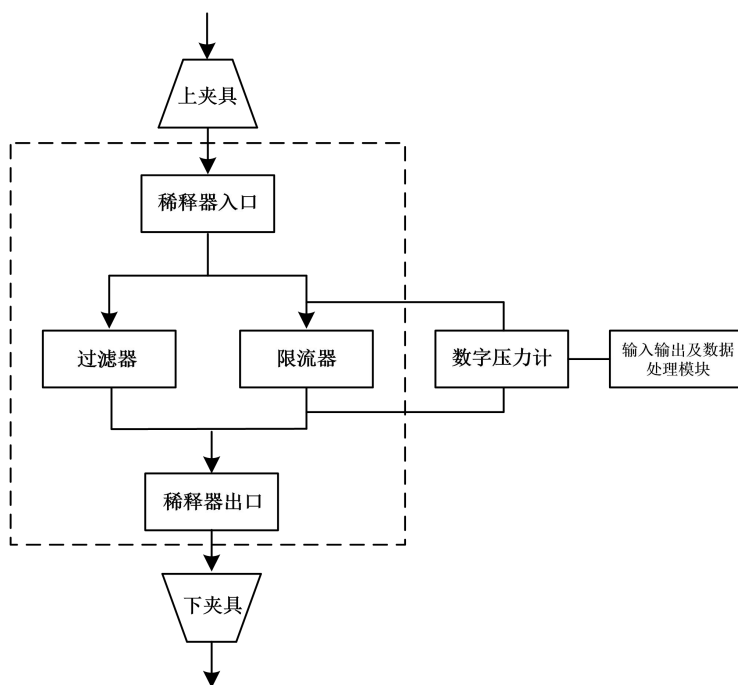


图 A.2 原位气溶胶稀释器结构示意图

A.3 原位气溶胶稀释器的标定

原位气溶胶稀释器的稀释倍数 n 决定了校准装置提供的过滤效率标准值 F_s 。而稀释倍数 n 则由校准过程中测试仪的实际工况流量 Q 和经过稀释器限流孔的气溶胶流量 q 计算得到。公式如下：

$$F_s = \left(1 - \frac{1}{n}\right) \times 100\% , \quad n = \frac{Q}{q} \quad (\text{A.1})$$

式中 Q 通过图 A.1-a 中的流量模块对测试仪工况流量进行校准并测量后得到。而 q

则需通过图 A.2 中的数字压力计测量值经计算得到。根据哈根-泊肃叶公式，通过限流毛细管路体积流量 q 可由公式 (A.2) 近似得到：

$$q = \frac{\pi \times d^4 \times \Delta p}{128 \times \eta \times L} \quad (\text{A.2})$$

式中：

q ——通过毛细管的流量，L/min；

Δp ——毛细管进口与出口之间的压差，Pa；

η ——使用温度下空气的动力黏度（20℃，1atm 状态下空气： $\eta=1.82 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ）；

L ——毛细管长度，mm；

d ——毛细管内径，mm。

由公式 (A.2) 可知，对于给定的毛细管，在稳定的环境条件下，通过毛细管的流量与压差呈线性关系。实际上，由于毛细管内径和长度的微小偏差，以及毛细管内壁的瑕疵，准确的毛细管流量不能直接通过计算得到。需采取如下标定方式获得校准因子：在某个压差范围内，使用标准流量计和数字压力计在一系列不同压差下，分别测量通过一支或多支毛细管路的实际流量，将压差与流量进行线性拟合并获得校准曲线。该直线的斜率作为校准因子，用于确定实测过程中采集到的某一压差下，通过毛细管的体积流量，进而计算得到稀释倍数和过滤效率标准值。

A.4 校准装置的扩展不确定度评定

数学模型：

$$F_s = (1 - \frac{q}{Q}) \times 100\%$$

灵敏系数：

$$\frac{\partial F_s}{\partial q} = -\frac{1}{Q} \quad \frac{\partial F_s}{\partial Q} = \frac{q}{Q^2}$$

则：

$$u^2(F_s) = \left(\frac{\partial F_s}{\partial q} \right)^2 \times u^2(q) + \left(\frac{\partial F_s}{\partial Q} \right)^2 \times u^2(Q) = \frac{u^2(q)}{Q^2} + \frac{q^2 u^2(Q)}{Q^4}$$

$$u(F_s) = \sqrt{\frac{u^2(q)}{Q^2} + \frac{q^2 u^2(Q)}{Q^4}}$$

由毛细管流量 q 引入的不确定度 $u(q)$ 分别来源于线性拟合方程的不确定度 $u_1(q)$ 和数字压力计的不确定度 $u_2(q)$ ，即：

$$u(q) = \sqrt{u_1^2(q) + u_2^2(q)}$$

其中：

$$u_1(q) = \frac{s(\Delta p)}{a} \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{(q_0 - \bar{q})^2}{S_{xx}}}$$

$$s(\Delta p) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_i - b - a q_i)^2}{n-2}}$$

$$a = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})(\Delta p_i - \bar{\Delta p})}{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})(q_i - \bar{q})}$$

$$b = \bar{\Delta p} - a \times \bar{q}$$

m 为标定时重复读取的次数， n 为每条曲线的标定点数量， a 为曲线斜率， b 为截距。

以数字压力计测量范围（0~1000）Pa，准确度等级 0.2 级为例，则有：

$$u_2(q) = \frac{1000 \times 0.2\%}{a\sqrt{3}} = \frac{1.15}{a} \text{ L/min}$$

由工况流量 Q 引入的不确定度 $u(Q)$ 来源于标准流量计的准确度等级。准确度等级 1.0 级，在测试流量 85L/min 条件下，则有：

$$u(Q) = \frac{85 \times 1.0\%}{\sqrt{3}} = 0.49 \text{ L/min}$$

取 $k=2$ ，则有：

$$U = 2 \times u(F_s) = 0.98 \text{ L/min}$$

附录 B

校准原始记录格式
(推荐性表格)

委托单位：地址：

仪器名称		型号规格	
制造厂		出厂编号	
校准依据		温度℃	相对湿度%
校准日期		校准地点	
校准员		核验员	

标准器名称		证书号		有效期	
测量范围		不确定度/最大允许误差/准确度等级			

1. 外观及功能检查：
2. 流量示值误差：

设定值 (L/min)	仪器示值/ (L/min)				测量值/ (L/min)				示值 误差 /%	扩展 不确定度
	1	2	3	平均值	1	2	3	平均值		

3. 流量重复性：

测量次数	1	2	3	4	5	6	平均值	重复性/%
流量 (L/min)								

4. 阻力示值误差：

标准值/Pa	仪器示值/Pa	示值误差/Pa	扩展不确定度

5. 气溶胶粒径分布：

气溶胶类别	计数中位径（CMD）	几何标准偏差（GSD）
盐性		
油性		

6. 过滤效率示值误差：

盐性：

标准值/%	测量值/%			平均值/%	示值误差/%	扩展不确定度

油性：

标准值/%	测量值/%			平均值/%	示值误差/%	扩展不确定度

计量标准状态：出检前 正常 不正常； 出检后 正常 不正常
被检仪器状态：出检前 正常 不正常； 出检后 正常 不正常
校准地点：

附录 C

校准证书内页格式

（推荐性表格）

证书编号 XXXXXX-XXXX

<校准机构授权说明>				
校准结果不确定度的评估和表述均符合 JJF1059.1 的要求。				
校准环境条件及地点：				
温度	℃	地点		
相对湿度	%	其它		
校准所依据的技术文件（代号、名称）：				
校准所使用的主要测量标准：				
名称	测量范围	不确定度/ 准确度等级	证书编号	证书有效期至 (YYYY-MM-DD)

校 准 结 果

序号	校准项目	技术要求	校准结果			扩展 不确定度
1	外观及功能检查					/
2	流量示值误差/%					
3	流量重复性/%					/
4	阻力示值 误差/Pa		标准值	测量值	示值误差	/
5	气溶胶粒径分布		气溶胶类别	计数中 位径/μm	几何标 准偏差	/
			盐性			
			油性			
6	过滤效率 示值误差/%		校准点	盐性	油性	/
以下空白						
说明：						
声明：						
1. 仅对加盖“XXXXXX 校准专用章”的完整证书负责。						
2. 本证书的校准结果仅对本次所校准的计量器具有效。						

校 准 员：

核 验 员：

附录 D

测量不确定度评定示例

D.1 过滤效率示值误差测量结果的不确定度评定

D.1.1 数学模型

$$\Delta F = \bar{F} - F_s = \bar{F} - (1 - \frac{q}{Q}) \times 100\% \quad (\text{D.1})$$

式中:

ΔF ——过滤效率示值误差, %;

\bar{F} ——测试仪过滤效率测量结果, %;

F_s ——校准装置的过滤效率标准值, %;

Q ——测试仪实际工作流量值, L/min;

q ——线性拟合得到的气溶胶流量值, L/min。

D.1.2 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta F}{\partial \bar{F}} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial \Delta F}{\partial F_s} = -1$$

$$c_{21} = \frac{\partial F_s}{\partial q} = -\frac{1}{Q} \quad c_{22} = \frac{\partial F_s}{\partial Q} = \frac{q}{Q^2}$$

D.1.3 测量不确定度来源分析

由公式 (D.1) 可以看出, 影响过滤效率示值误差测量不确定度的因素主要有: 过滤效率标准值引入的不确定度和口罩测试仪测量结果引入的不确定度。过滤效率标准值引入的不确定度主要由线性拟合方程、数字压力计、实际工况流量测量以及校准装置稀释比稳定性引入的不确定度构成。口罩测试仪测量结果引入的不确定度则主要由测试仪重复性测量引入。

D.1.4 测量不确定度分量评定与计算

D.1.4.1 过滤效率标准值引入的不确定度分量 $u(F_s)$

(1) 使用线性回归方程引入的不确定度 $u_1(q)$:

线性回归方程为：

$$\Delta p = b + aq$$

表 D.1 校准装置的标定结果

毛细管数量	1		3		7		13	
序号	Pa	L/min	Pa	L/min	Pa	L/min	Pa	L/min
1	271	1.06	287	3.19	284	7.22	275	12.94
2	301	1.14	320	3.42	320	7.78	303	13.85
3	334	1.22	347	3.61	356	8.35	336	14.80
4	369	1.30	382	3.83	373	8.61	362	15.49
5	394	1.36	402	3.96	395	8.94	379	15.96
6	427	1.44	433	4.16	430	9.45	403	16.62
相关系数	0.9997		0.9998		0.9998		0.9994	
线性回归方程参量	a	b	a	b	a	b	a	b
	414.47073	-170.27481	150.98435	-196.05387	65.21227	-187.57303	35.05306	-180.80956

根据表 D.1 数据可按照公式（D.2）和（D.3）得到线性回归方程的斜率 a 和截距 b ，

其中 $n=6$ ：

$$a = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})(\Delta p_i - \bar{\Delta p})}{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})(q_i - \bar{q})}$$

（D.2）

$$b = \bar{\Delta p} - a \times \bar{q}$$

（D.3）

压力测量结果的实验标准偏差可按照公式（D.4）计算得到为：

$$s(\Delta p) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta p_i - b - aq_i)^2}{n-2}}$$

（D.4）

测试仪校准过程中，压力测量重复三次 $m=3$ ，根据公式（D.5）计算由线性回归得到气溶胶流量的不确定度：

$$u_1(q) = \frac{s(\Delta p)}{a} \sqrt{\frac{1}{m} + \frac{1}{n} + \frac{(q_0 - \bar{q})^2}{S_{xx}}}$$

（D.5）

校准装置各校准点的线性拟合的斜率、截距、测试仪示值及不确定度汇总结果见表 D.2。

表 D.2 线性拟合引入不确定度计算过程量及结果汇总表

毛细管数量	1	3	7	13
$s(\Delta p)$ / (L/min)	1.648952864	1.330951365	1.028605246	2.164817921
S_{xx} / (L/min)	0.10	0.64	3.22	10.93
$(q_0 - \bar{q})^2$ /(L/min) ²	0.000003	0.01	0.00003	2.70
a (Pa · min/L)	414.47073	150.98435	65.21227	33.85359
$u_1(q)$ / (L/min)	0.0028	0.0063	0.0112	0.0553

（2）数字压力计准确性引入的不确定度 $u_2(q)$

按照数字压力计量程（0~1000）Pa，准确度等级 0.2 级计算，则有：

$$u_2(q) = \frac{1000 \times 0.2}{a\sqrt{3}} = \frac{1.2\text{Pa}}{a}$$

（3）实际工况流量引入的不确定度 $u_3(Q)$

测试仪的实际工况流量由 5410A 综合校准仪的流量模块测量得到，其准确度等级为 1.0 级。已知使用该设备进行 85L/min 和 30L/min 流量点校准的不确定度结果为 $U_{\text{rel}}=1.3\%$ $k=2$ ，则有：

$$u_3(Q) = \frac{85 \times 1.3\%}{2} = 0.56 \text{ L/min} \quad u_3'(Q) = \frac{30 \times 1.3\%}{2} = 0.20 \text{ L/min}$$

(4) 由测试仪工况稳定性导致校准装置稀释比不稳定引入的不确定度 $u_4(F_s)$

按照通常对气溶胶混匀发生装置 5% 的稳定性要求估计对稀释比的影响亦为 5%，则在 100 倍、20 倍、10 倍和 5 倍等各点引入的过滤效率标准值的标准不确定度分别为：0.029%、0.145%、0.289% 和 0.579%。

D.1.4.2 口罩测试仪测量结果引入的不确定度分量 $u(F)$

口罩测试仪测量结果为 3 次重复性测量的算术平均值，测量结果、单次测量结果的标准偏差及重复 3 次测量引入的不确定度分量见表 D.3。

表 D.3 口罩测试仪的重复性测量结果

测量次数	1	2	3	$s(F)$	$u(F)$
测量结果/%	98.62	98.65	98.66	0.024	0.014
	94.94	94.83	94.96	0.077	0.044
	89.70	89.52	89.58	0.107	0.061
	78.94	78.98	78.88	0.059	0.034

D.1.5 合成标准不确定度

表 D.4 中包含量不同数量毛细管参与分流条件下，校准装置各校准点的测试仪测量结果、灵敏系数、合成过程参量，以及合成标准不确定度结果。

表 D.4 各校准点合成标准不确定度汇总表

毛细管数量	1	3	7	13
标准过滤效率值	98.9%	95.2%	90.1%	80.4%
校准点	99%	95%	90%	80%
$u_1(q)$ / (L/min)	0.0028	0.0063	0.0112	0.0460
$u_2(q)/a$ / (L/min)	0.002895259	0.007947843	0.018401443	0.035446756
$u_c(q)$ / (L/min)	0.004036952	0.010137287	0.021517708	0.06567167

q_0 / (L/min)	1.339720189	4.080249618	8.396778179	16.65766896
c_{21} / (min/L)	-0.011764706	-0.011764706	-0.011764706	-0.011764706
c_{22} / (min/L)	0.000185428	0.00056474	0.001162184	0.00230556
$u_3(Q)$ / (L/min)	0.56	0.56	0.56	0.56
$u_4(F_s)$	0.029%	0.145%	0.289%	0.579%
$u(F_s)$	0.031%	0.149%	0.297%	0.589%
$u(F)$	0.014%	0.044%	0.061%	0.034%
$u(\Delta F)$	0.034%	0.155%	0.303%	0.590%

D.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则过滤效率各校准点示值误差测量结果的扩展不确定度：

标准值	98.9%	95.2%	90.1%	80.4%
测量值	98.6%	94.9%	89.6%	78.9%
示值误差	-0.3%	-0.3%	-0.5%	-1.5%
扩展不确定度	0.1%	0.3%	0.6%	1.2%

D.2 流量示值误差测量结果的不确定度评定

D.2.1 数学模型

$$E = \frac{\bar{Q} - \bar{Q}_s}{\bar{Q}_s} \times 100\%$$

(D.6)

式中：

E ——流量示值误差，%；

\bar{Q} ——测试仪 3 次流量示值的算术平均值，L/min；

\bar{Q}_s ——标准流量计 3 次测量结果的算术平均值, L/min。

D.2.2 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial E}{\partial Q} = \frac{1}{Q_s} \quad c_2 = \frac{\partial E}{\partial Q_s} = -\frac{\bar{Q}}{Q_s^2}$$

D.2.3 测量不确定度来源分析

由公式 (D.6) 可以看出, 影响流量示值误差测量不确定度的因素主要有: 流量标准值引入的不确定度和测试仪流量示值引入的不确定度。流量标准值引入的不确定度主要来源于流量标准器的准确度等级, 采用 B 类评定。测试仪流量示值引入的不确定度来源于测量方法和测量系统的重复性因素, 采用 A 类评定。

D.2.4 测量不确定度分量评定与计算

D.2.4.1 流量标准值引入的不确定度分量 $u(Q_s)$

标准流量计的准确度等级为 1.0 级, 在测试仪常用测试流量 85L/min 条件下的测量结果分别为: 85.3L/min, 85.2L/min 和 85.1L/min 则有:

$$u(Q_s) = \frac{1.0\% \times \bar{Q}_s}{\sqrt{3}} = 0.49 \text{ L/min}$$

D.2.4.2 测试仪流量示值引入的不确定度分量 $u(q)$

以测试仪常用测试流量 85L/min 为例, 流量示值的重复性数据如下表 D.5 所示, 则有:

表 D.5 测试仪流量重复性数据

次数	1	2	3	4	5	6	$s(Q)$	$u(Q)$
流量示值/(L/min)	85.1	85.2	85.1	85.0	84.9	84.9	0.15	0.09

D.2.5 标准不确定度分量及合成结果

标准不确定度各分量及合成结果汇总于下表 D.6。

表 D.6 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	灵敏系数	标准不确定度	合成标准不确定度 $u_c(E)$
$u(Q_s)$	标准流量计	0.012 min/L	0.49 L/min	0.6%
$u(Q)$	测试仪	0.012 min/L	0.09 L/min	

D.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度： $U = 2 \times u_c(E) = 1.2\%$ 。

D.3 阻力示值误差测量结果的不确定度评定

D.3.1 数学模型

$$\Delta p = p - p_s$$

(D.7)

式中：

Δp ——阻力示值误差，Pa；

p ——测试仪压力测定值，Pa；

p_s ——数字压力计压力测定值，Pa。

D.3.2 灵敏系数

$$c_1 = \frac{\partial \Delta p}{\partial p} = 1 \quad c_2 = \frac{\partial \Delta p}{\partial p_s} = -1$$

D.3.3 测量不确定度来源分析

由公式 (D.7) 可以看出，影响阻力示值误差测量不确定度的因素主要有：阻力标准值引入的不确定度和测试仪阻力示值引入的不确定度。阻力标准值引入的不确定度主要来源于数字压力计的准确度等级，采用 B 类评定。测试仪阻力示值引入的不确定度来源于测量方法和测量系统的重复性因素，采用 A 类评定。

D.3.4 测量不确定度分量评定与计算

D.3.4.1 阻力标准值引入的不确定度分量 $u(p_s)$

数字压力计的准确度等级为 0.2 级，测量范围 (0~1000) Pa，以 300Pa 阻力测量点为例，则：

$$u(p_s) = \frac{0.2\% \times 1000}{\sqrt{3}} = 1.2 \text{ Pa}$$

D.3.4.2 阻力示值引入的不确定度分量 $u(p)$

以 300Pa 阻力测量点为例，阻力示值的重复性数据如下表 D.7 所示，则有：

表 D.7 测试仪阻力重复性数据

次数	1	2	3	4	5	6	$s(p)$	$u(p)$
阻力示值/(Pa)	302.5	303.2	301.2	305.2	301.5	302.6	1.4	1.4

D.3.5 标准不确定度分量及合成结果

标准不确定度各分量及合成结果汇总于下表 D.8。

表 D.8 标准不确定度一览表

标准不确定度分量	不确定度来源	灵敏系数	标准不确定度	合成标准不确定度 $u_c(\Delta p)$
$u(p_s)$	数字压力计	-1	1.2 Pa	1.8 Pa
$u(p)$	测试仪	1	1.4 Pa	

D.3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度： $U = 2 \times u_c(\Delta p) = 3.6 \text{ Pa}$ 。

