**JJF**

**中华人民共和国国家计量技术规范**

JJF XXXX—202X

差分电迁移分析仪校准规范

Calibration Specification of Differential Electrical Mobility Analyzers

**（征求意见稿）**

202×-××-××发布 202×-××-××实施

国家市场监督管理总局发 布

差分电迁移分析仪校准规范

JJFXXXX-202X

Calibration Specification

of Differential Electrical Mobility Analyzer

归 口 单 位：全国新材料与纳米计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：

本规范委托全国新材料与纳米计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人**：**

 参加起草人：

目 录

[引 言 II](#_Toc111200847)

[1 范围 3](#_Toc111200848)

[2 引用文件 3](#_Toc111200849)

[3 术语 3](#_Toc111200850)

[3.1迁移速度 3](#_Toc111200851)

[3.2电迁移 3](#_Toc111200852)

[3.3双极荷电器 3](#_Toc111200853)

[3.4单极荷电器 3](#_Toc111200854)

[3.5差分电迁移分级器 4](#_Toc111200855)

[4 概述 4](#_Toc111200856)

[5 计量特性 4](#_Toc111200857)

[6 校准条件 5](#_Toc111200858)

[6.1 环境条件 5](#_Toc111200859)

[6.2 测量标准及其他设备 5](#_Toc111200860)

[6 校准项目和校准方法 6](#_Toc111200861)

[6.1 校准前的准备 6](#_Toc111200862)

[6.2 零点误差 6](#_Toc111200863)

[6.3 流量示值误差 6](#_Toc111200864)

[6.4 粒径示值误差 6](#_Toc111200865)

[6.5 颗粒计数效率和颗粒计数重复性 7](#_Toc111200866)

[7 校准结果表达 9](#_Toc111200867)

[8 复校时间间隔 9](#_Toc111200868)

[附录A 10](#_Toc111200869)

[附录B 14](#_Toc111200873)

[附录C 19](#_Toc111200874)

[附录D 21](#_Toc111200875)

# 引 言

本规范以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》为基础性规范进行制定。

本规范中，“迁移速度”和“电迁移”引自ISO15900-2020 粒度分析 气溶胶颗粒的差分电迁移分析法（Determination of particle size distribution — Differential electrical mobility analysis for aerosol particles）3.18和3.13中的内容；“双极荷电器”、“单级荷电器”、“差分电迁移分级器”引自ISO27891-2015气溶胶颗粒数量浓度-凝结核粒子计数器的校准（Aerosol particle number concentration -Calibration of condensation particle counters）3.2、3.32、3.12中的内容。“粒径示值误差”、“颗粒计数效率和计数重复性”校准方法参照了ISO15900-2020 粒度分析 气溶胶颗粒的差分电迁移分析法（Determination of particle size distribution — Differential electrical mobility analysis for aerosol particles）和JJF1562-2016《凝结核粒子计数器》校准规范中的内容。

本规范为首次发布。

差分电迁移分析仪

# 1 范围

本规范适用于电迁移法原理、粒径测量范围（10~1000）nm的差分迁移分析仪的校准。

# 2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF1562-2016 凝结核粒子计数器校准规范

ISO15900-2020 粒度分析 气溶胶颗粒的差分电迁移分析法（Determination of particle size distribution — Differential electrical mobility analysis for aerosol particles）

ISO27891-2015气溶胶颗粒数量浓度-凝结核粒子计数器的校准（Aerosol particle number concentration -Calibration of condensation particle counters）

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范。

# 术语

### 3.1迁移速度migration velocity

在外加电场中带电气溶胶颗粒的稳态速度。

### 3.2电迁移 electrical mobility

气体中颗粒或离子的迁移速度与电场之比

### 3.3双极荷电器bipolar charger

一种颗粒荷电调节器，通过将颗粒样品暴露于装置内的正负离子区域，使其达到与粒径相关的电荷分布和电荷平衡。

注：将气溶胶颗粒暴露在由正负电荷组成的电中性气体中，该电中性气体在足够高的电荷密度下和足够长的时间内，气溶胶的净电荷几乎为零，从而达到平衡（也称电荷中和）。

### 3.4单极荷电器 unipolar charger

一种颗粒荷电调节器，可将颗粒样品暴露于装置内的正离子区域或负离子区域。

### 3.5差分电迁移分级器 differential electrical mobility classifier，DEMC

可根据气溶胶颗粒的电迁移选取和获得样品的一种分级装置。

注：1）通过将作用于单颗粒的电场力与空气阻力的相互抵消，DEMC可实现对颗粒样品的分级。电迁移取决于DEMC的操作条件及物理尺寸，分级后颗粒具有较窄的电迁移范围。

2）若颗粒携带的电荷数量不同，分级所得颗粒可有不同的粒度。附录A中给出了分级后单分散颗粒样品中个携带多个电荷的颗粒分数$φ\_{P}$的测量方法。

# 4 概述

差分电迁移气溶胶分析仪（以下简称DMAS）主要用于测量环境空气中纳米及亚微米级颗粒的粒径分布。主要包括气溶胶中和器（电荷调节器）、差分电迁移分离器（DEMC）、颗粒检测器、控制系统等部分。其工作原理为：当颗粒样品进入DMAS后，在荷电器（气溶胶中和器）作用下，颗粒样品首先达到与其粒径相关的电荷平衡。之后样品进入DEMC，在均匀电场的作用下，带电颗粒会在电场方向以一定的速度移动，若样品流量、鞘流流量等参数已知，DEMC电压与颗粒粒径、电迁移具有定量的函数关系。因此，通过连续改变DEMC中的电压，颗粒检测器可实时测得DMEC出口处颗粒形成的光脉冲数或电流值，从而计算得到各个粒径通道的颗粒数量浓度，最终计算得到颗粒样品的粒径分布。

通常，荷电器可分为双极荷电器和单级荷电器；DEMC可分为同轴圆柱型、径向型、平行板型；颗粒检测器可分为凝结核粒子计数器（CPC）、法拉第杯气溶胶静电计（FCAE）。DMAS通常具有两种工作模式，即连续扫描和单通道模式。

# 5 计量特性

DMAS的计量特性见表1。

表1 DMAS的计量特性

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 校准项目 | 性能指标 |
| 1 | 零点误差 | ≤1个/cm3 |
| 2 | 流量示值误差 | 不超过±5% |
| 3 | 粒径示值误差 | （15~50）nm | 不超过±10% |
| （50~200）nm | 不超过±8% |
| （200~1000）nm | 不超过±10% |
| 4 | 颗粒计数效率 | （50~100）nm | （100±20）% |
| 5 | 颗粒计数重复性 | ≤5% |

# 6 校准条件

### 6.1 环境条件

6.1.1 环境温度：（15~30）℃；

6.1.2 相对湿度：20%~80%；

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粒度标准物质

应使用标称粒径在（10~1000）nm范围的国家有证标准物质，粒径分布≤8%。在（10~50）nm、（50~200）nm和（200~1000）nm粒径范围内，标准物质的相对扩展不确定度应分别优于6.5%、2.5%和1.5%（*k*=2）。

6.2.2 参考仪器

FCAE或CPC：在（5000~20000）个/cm3颗粒数量浓度范围内的颗粒计数效率应为（100±6）%，校准不确定度优于3.5%（*k*=2）。

6.2.3 气溶胶发生及分离系统

主要由气溶胶发生器、干燥器、荷电器（气溶胶中和器）、差分电迁移分级器、气溶胶分流器、混匀箱组成。该系统应可产生（10~1000）nm范围内的固体气溶胶样品。

6.2.4 气溶胶稀释器

稀释比在（20~100）倍范围内可调，稀释比的示值误差不超过±10%。

6.2.5流量计

流量范围（0.3~2）L/min，相对误差不超过±1.5%。

# 6 校准项目和校准方法

校准项目可根据被校仪器的预期用途选择使用。对校准规范的偏离，应在校准证书中注明。

### 6.1 校准前的准备

按仪器使用说明书将DMAS进行预热。设定其单次测量时长≥60s，数据采集频率≤1s。

### 6.2 零点误差

将DMAS的电压设定为0V，设定鞘流/样品流量比为≥10:1或为DMAS的上限值。测量环境空气中的颗粒数量浓度，记录颗粒数量浓度测量平均值C0，并以C0作为零点。

### 6.3 流量示值误差

对于流量连续可调的DMAS，选取流量满量程的20%、50%、80%附近点作为校准点；对于流量固定的DMAS，选取该流量值作为校准点。

关闭DMAS的旁路补气口，将流量计连接到DMAS的样品入口处，读取3次工况流量测量值$Q\_{m}$，并计算其平均值$\overline{Q}\_{m}$。根据公式（1）计算流量示值误差。

$$ΔQ=\frac{Q\_{ST}−\overline{Q}\_{m}}{\overline{Q}\_{m}}×100\% (1)$$

式中：$ΔQ$—DMAS的流量示值误差，%；

$Q\_{ST}$—DMAS的流量设定值，L/min；

$\overline{Q}\_{m}$—流量计的3次测量平均值，L/min。

### 6.4 粒径示值误差

6.4.1按照图1的方式连接校准系统。在（10~50）nm、（50~200）nm和（200~1000）nm范围内或在DMAS粒径测量范围内选择低、中、高3种粒度标准物质，分别记为1#、2#、3#粒度标准物质。

6.4.2 首先使用气溶胶发生器将含有1#粒度标准物质的样品雾化，并得到相应粒径的气溶胶样品。设定DMAS的粒径测量范围、鞘流/样品流量比，使得气溶胶样品粒径值在被校DMAS测量范围内。待气溶胶样品浓度稳定后开始测量，记录被校DMAS的峰值粒径测量结果，重复测量3次。按照公式（2）计算DMAS粒径示值误差$∆D$。

$$∆D=\frac{（\overline{D}−D\_{s}）}{D\_{s}}×100\% （2）$$

式中：$∆D$—粒径示值误差，%；

 $\overline{D}$—DMAS的3次测量平均值， nm；

 $D\_{s}$—标准物质的数量平均粒径，nm；

6.4.3分别将2#、3#粒度标准物质雾化，得到相应粒径的气溶胶样品。依据6.4.2中的方法，得到不同粒径段内DMAS的粒径示值误差。



图1粒径示值误差校准系统示意图

### 6.5 颗粒计数效率和颗粒计数重复性

6.5.1按照图2连接校准系统，并将气溶胶分流器或混匀箱出口分别与DMAS、气溶胶稀释器的入口相连接。

6.5.2开启气溶胶发生器，通过差分电迁移分级器的粒径设定、气溶胶发生器参数调节等方式，得到峰值粒径在（50~200）nm的单分散气溶胶颗粒样品。设定DMAS的粒径测量范围、鞘流/样品流量比，使得气溶胶样品粒径值在被校DMAS测量范围内。调节气溶胶样品浓度，使得气溶胶分流器或混匀箱出口浓度控制不低于5000个/cm3。

6.5.3 待浓度稳定后开始测量，记录被校DMAS和参考仪器的颗粒浓度测量结果，共计10次，计算10次测量结果的平均值$\overline{C\_{T}}$和$\overline{C\_{S}}$。按照公式（4）计算得到被校DMAS颗粒浓度测量设备的颗粒计数效率。

6.5.4 按照公式（5）计算得到颗粒计数重复性

$$η\_{T }=\frac{\overline{C\_{T}}×η\_{S}}{\overline{C\_{S}}×f} （4）$$

$$δ\_{C}=\frac{\sqrt{\frac{\sum\_{i=1}^{n}(C\_{i}−\overline{C\_{T}})^{2}}{n−1}}}{\overline{C\_{T}}}×100\% （5）$$

式中：$η\_{T }$—被校DMAS的颗粒计数效率，%

$δ\_{C}$—颗粒计数重复性，无量纲量

 $η\_{S}$—参考仪器的颗粒计数效率，%

*f*—气溶胶稀释器的稀释比，%

$C\_{i}$—颗粒数量浓度第i次测量平均值，/cm3；

*n*—测量次数，*n*=10

注：若需单独对DMAS中颗粒浓度测量设备的颗粒计数效率进行校准，需参照凝结核粒子计数器、法拉第杯气溶胶静电计校准规范中的方法进行。



图2 颗粒计数效率校准系统示意图

# 7 校准结果表达

校准结果应在校准证书上反映。校准证书应包括以下信息：

a) 标题: “校准证书”；

b) 实验室名称和地址；

c) 进行校准的地点；

d) 校准证书编号、页码及总页数的标识；

e) 客户名称和地址；

f) 被校仪器的制造单位、名称、型号及编号；

g) 校准单位校准专用章；

h) 校准日期；

i) 校准所依据的技术规范名称及代号；

j) 本次校准所用有证标准物质和主要测量设备名称、型号、准确度等级或不确定度或最大允许误差、仪器编号、证书编号及有效期；

k) 校准时的环境温度、相对湿度；

l) 校准结果及其测量不确定度；

m) 对校准规范偏离的说明（若有）；

n) 复校时间间隔的建议；

o) “校准证书”的校准人、核验人、批准人签名及签发日期；

p) 校准结果仅对被校仪器本次测量有效的声明；

q) 未经实验室书面批准，部分复制证书或报告无效的声明。

# 8 复校时间间隔

DMAS的复校时间间隔建议为1年。由于复校时间间隔的长短是由DMAS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

# 单分散颗粒样品中个携带多个电荷的颗粒分数$φ\_{P}$的测量方法

气溶胶样品进入差分电迁移分级器（DEMC）后，会垂直进入其中的均匀电场，带电颗粒会在电场中以一定的速度移动，其在电场方向的电迁移率与粒径大小密切相关。因此理论上，通过DEMC内部电压的设定，可对气溶胶样品进行分级进而得到颗粒表面携带单一电荷（p=1）的单分散的气溶胶样品（假设峰值直径为*d*）。但是，若原始气溶胶样品的粒径分布较宽，大粒径（直径大于d）且携带多个电荷（p≥2）的颗粒电迁移会与直径为*d*且携带单一电荷颗粒的电迁移值一致，进而从DMC的出口一起流出。携带多个电荷颗粒物的存在会影响法拉第杯气溶胶静电计颗粒数量浓度的测量结果，需对携带多个电荷的颗粒分数$∅\_{p}$进行测量和修正。

### A.1 颗粒物的荷电概率分布

气溶胶发生器产生的原始气溶胶样品通常带有电荷，经过基于双极荷电器后可达到电荷平衡。在标准状况下（293.15K，101.3kPa），不同粒径（d）颗粒物的荷电概率分布可用公式（A.1）和（A.2）计算得到。其中，采用公式（A.1）可计算得到粒径为（20~1000）nm、携带0,±1, ±2个电荷的颗粒的概率。采用公式（A.2）可计算得携带±3个及以上电荷的颗粒的概率。



 （A.1）

式中：$f\_{p}\left(d\right)$*—*经双极荷电器后，粒径为d、表面携带P（0,±1, ±2）个电荷颗粒的荷电概率，无量纲量；

d*—*颗粒直径，nm；

$a\_{i}(p)$ *—*计算系数（量值见表A.1），无量纲量；



 （A.2）

式中：$f\_{p}\left(d\right)$*—*经双极荷电器后，粒径为d、表面携带P（≥3和≤-3）个电荷颗粒的荷电概率，无量纲量；

d*—*颗粒直径，m；

$\frac{Z^{+}}{Z^{−}}$ —正负离子电迁移率的比值，0.875；

$\frac{N^{+}}{N^{−}}$ —正负离子数量的比值，1；

$p$—颗粒表面携带的电荷数，≥3和≤-3；

e—电子电荷，1.602×10-19C；

$ε\_{0}$—介电常数，8.854×10-12 F/m；

k—玻尔兹曼常数，1.381×10-23J/K；

T-绝对温度，K

表A.1 计算系数

|  |  |
| --- | --- |
| *i* | *p* |
| -2 | -1 | 0 | 1 | 2 |
| 0 | -26.3328 | -2.3197 | -0.0003 | -2.3484 | -44.4756 |
| 1 | 35.9044 | 0.6175 | -0.1014 | 0.6044 | 79.3772 |
| 2 | -21.4608 | 0.6201 | 0.3073 | 0.4800 | -62.8900 |
| 3 | 7.0867 | -0.1105 | -0.3372 | 0.0013 | 26.4492 |
| 4 | -1.3088 | -0.126 | 0.1023 | -0.1553 | -5.7480 |
| 5 | 0.1051 | 0.0297 | -0.0105 | 0.0320 | 0.5049 |

表A.2 经双极荷静电中和器后几种不同粒径颗粒的$f\_{p}(d$)计算值

|  |  |
| --- | --- |
| d | $f\_{p}(d$) |
| -5 | -4 | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | 0.0004 | 0.1253 | 0.7631 | 0.0963 | 0.0002 | 0 | 0 | 0 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0.0017 | 0.1579 | 0.7028 | 0.1207 | 0.0010 | 0 | 0 | 0 |
| 41 | 0 | 0 | 0 | 0.0059 | 0.1982 | 0.6288 | 0.1509 | 0.0034 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0.0114 | 0.2229 | 0.5814 | 0.1696 | 0.0066 | 0 | 0 | 0 |
| 70 | 0 | 0 | 0.0005 | 0.0280 | 0.2579 | 0.5032 | 0.1965 | 0.0158 | 0.0002 | 0 | 0 |
| 100 | 0 | 0.0001 | 0.0037 | 0.0561 | 0.2793 | 0.4259 | 0.2138 | 0.0317 | 0.0017 | 0 | 0 |
| 200 | 0.0005 | 0.0053 | 0.0341 | 0.1211 | 0.2641 | 0.2991 | 0.2043 | 0.0719 | 0.0153 | 0.0018 | 0.0001 |

### A.2 单分散气溶胶样品中携带多个电荷的颗粒分数$φ\_{P}$的校准

以使用TSI3086DEMC（配有X射线中和器）分离得到的100nm单分散气溶胶样品为例，说明多电荷颗粒分数的测量方法。

A.2.1开启气溶胶发生器，并将DEMC的电压设定为U1（=743.4V，对应粒径为$d\_{1}$=100nm）。待系统稳定后，使用CPC测量DEMC出口的浓度，记为$C\_{N}(d\_{1})$。由表A.2可得，100nm的单分散气溶胶样品经双极荷电器和TSI3086DEMC分级后，存在表面携带1, 2，3个正电荷的颗粒物，因此：

$C\_{N}(d\_{1})=η\_{C}×(C\_{1}(U\_{1})+C\_{2}(U\_{1})+C\_{3}(U\_{1}))$ （A.3）

式中：$C\_{N}(d\_{1})$—DEMC电压设定为U1后，CPC测得的颗粒数量浓度值，个/cm3；

$η\_{C}$—CPC的颗粒计数效率，无量纲量；

$C\_{1}(U\_{1})$，$C\_{2}(U\_{1})$，$C\_{3}(U\_{1})$—DEMC电压设定为U1后，分别携带1,2,3个正

电荷的颗粒数量浓度值，个/cm3；

A.2.2将DEMC的电压设为2U1（对应粒径为$d\_{2}$=146nm）。待系统稳定后，用CPC测量其出口处的颗粒数量浓度，记为$C\_{N}(d\_{2})$。依据ISO15900标准，此时只存在表面带有单一电荷的颗粒，因此：

$C\_{1}(d\_{2})=\frac{C\_{N}(d\_{2})}{η\_{C}}$ （A.4）

将公式（A.4）带入公式（A.5）后可计算得到$C\_{2}(U\_{0})$。

$C\_{2}\left(U\_{0}\right)=C\_{2}(d\_{2})=C\_{1}(d\_{2})×\frac{f\_{2}(d\_{2})}{f\_{1}(d\_{2})}$ （A.5）

式（A.4）和（A.5）中：

$C\_{N}(d\_{2})$—DEMC电压设定为2U0后，CPC测得的颗粒数量浓度值，个/cm3；

$η\_{C}$—CPC的颗粒计数效率，无量纲量；

$C\_{1}(d\_{2})$，$C\_{2}(d\_{2})$—粒径为146nm、表面分别携带1，2个正电荷的单分散气溶胶样品的颗粒数量浓度值，个/cm3；

$f\_{1}(d\_{2})$，$f\_{2}(d\_{2})$—粒径为146nm、表面带有1，2个正电荷颗粒的荷电概率，可由公式A.1计算得到；无量纲量；

A.2.3 将DEMC的电压设为3U0（对应粒径为$d\_{3}$=195nm）。待系统稳定后，用CPC测量其出口处的颗粒数量浓度，记为$C\_{N}(d\_{3})$。依据ISO15900标准，此时只存在表面带有单一电荷的颗粒，因此：

$C\_{1}(d\_{3})=\frac{C\_{N}(d\_{3})}{η\_{C}}$ （A.6）

将公式（A.6）带入公式（A.7）后可计算得到$C\_{3}(U\_{0})$。

$C\_{3}\left(U\_{0}\right)=C\_{3}(d\_{3})=C\_{1}(d\_{3})×\frac{f\_{3}(d\_{3})}{f\_{1}(d\_{3})}$ （A.7）

式（A.6）和（A.7）中：

$C\_{N}(d\_{3})$—DEMC电压设定为3U0后，CPC测得的颗粒数量浓度值，个/cm3；

$η\_{C}$—CPC的颗粒计数效率，无量纲量；

$C\_{1}(d\_{3})$，$C\_{3}(d\_{3})$—粒径为195nm、表面分别携带1，3个正电荷、的单分散气溶胶样品的颗粒数量浓度值，个/cm3；

$f\_{1}(d\_{3})$，$f\_{3}(d\_{3})$—粒径为146nm、表面带有1个和3个正电荷的颗粒分数，可由公式（A.1）和（A.3）计算得到，无量纲量；

A.2.4 将计算得到的$C\_{2}\left(U\_{0}\right)$、$C\_{3}\left(U\_{0}\right)$代如公式A.3中，计算得到$C\_{1}\left(U\_{0}\right)$，依据公式（A.8）可计算得到携带p（=1,2,3）个正电荷的颗粒分数

$φ\_{P}=\frac{C\_{p}\left(U\_{0}\right)}{C\_{N}\left(d\_{0}\right)/η\_{C}}×100\% $ （A.8）

式中：

$φ\_{P}$—携带p（=1,2,3）个正电荷的颗粒分数，无量纲量；

$C\_{N}(d\_{0})$—DEMC电压设定为U0后，CPC测得的颗粒数量浓度值，个/cm3；

$C\_{p}(U\_{0})$—DEMC电压设定为U0后，分别携带p（=1,2,……n）个正电荷的颗粒数

量浓度值，个/cm3；

$η\_{C}$—CPC的颗粒计数效率，无量纲量

# 附录B

不确定度评定示例

B.1 粒径测量示值误差的校准不确定度评定示例

B.1.1 校准方法简述及测量模型

按本规范6.4部分进行粒径测量示值误差的校准。按公式（B.1）计算DMAS的粒径测量示值误差。

$$∆D=\frac{（\overline{D}−D\_{s}）}{D\_{s}}×100\% （B.1）$$

式中：$∆D$—粒径示值误差，%；

 $\overline{D}$—DMAS的3次测量平均值， nm；

 $D\_{s}$—标准物质的数量平均粒径，nm；

B.1.2 不确定度计算公式

从公式（B.1）和校准过程可以看出，粒径测量示值误差校准的不确定度来源主要包括：粒径谱仪测量结果、标准物质粒径标准值。不确定度计算公式可导出为：

$$u\left(∆D\right)=\sqrt{(\frac{1}{D\_{S}})^{2} u^{2}\left(\overline{D}\right)+(−\frac{\overline{D}}{D\_{S}^{2}})^{2}u^{2}\left(D\_{S}\right)} (B.2)$$

式中：$u\left(∆D\right)$：粒径测量示值误差的合成标准不确定度，%；

$u\left(\overbar{D}\_{OPS}\right)$：被校DMAS测量结果$\overline{D}$引入的不确定度，nm；

$u\left(D\_{S}\right)$：标准物质粒径标准值$D\_{S}$引入的不确定度，nm；

B.1.3 不确定度分量的评定与计算

B.1.3.1 被校DMAS测量结果$\overline{D}$引入的不确定度

被校DMAS测量结果$\overline{D}$引入的不确定度主要包括两部分，即：测量重复性引入的不确定度和分辨力引入的不确定度。

本规范6.4部分规定以3次测量的平均值作为测量结果（见表B.1）。因此重复性引入的不确定度

$$u\left(A\right)=\frac{1.44nm}{\sqrt{3}}=0.83nm$$

被校DMAS的3次测量结果平均值为70.2 nm，在此粒径段粒径挡的宽度为1.5nm，即分辨力为0.75 nm。若分辨力引入的不确定度服从均匀分布，则分辨力$u\left(D\_{R}\right)$引入的不确定度为：

$$u\left(D\_{R}\right)=\frac{0.75nm}{\sqrt{3}}=0.43nm$$

表B.1 被校DMAS的测量结果

|  |  |
| --- | --- |
| 测量次数 | 峰值粒径测量值 /nm |
| 1 | 71.0 |
| 2 | 68.5 |
| 3 | 71.0 |
| 平均值 | 70.2 |
| 标准偏差 | 1.44 |

因此，$u\left(\overline{D}\right)=\sqrt{u^{2}\left(A\right)+u^{2}\left(D\_{R}\right)}=0.94nm$

B.1.3.2 标准物质标准值$D\_{S}$引入的相对不确定度

所使用的标准物质为GBW(E)120091，标准物质的标准值为69.8nm，不确定度为1.5nm（*k*=2）。因此，$u\left(D\_{S}\right)=^{1.5nm}/\_{2}$=0.75nm

B.1.3 合成标准不确定度

粒径测量示值误差的合成标准不确定度：

$$u\left(∆D\right)=\sqrt{(\frac{1}{D\_{S}})^{2} u^{2}\left(\overline{D}\right)+(−\frac{\overline{D}}{D\_{S}^{2}})^{2}u^{2}\left(D\_{S}\right)}$$

 =$\sqrt{(\frac{1}{69.8})^{2} ×0.94^{2}+(−\frac{70.2}{69.8^{2}})^{2}×0.75^{2}}$

=1.7%

B.1.4 扩展不确定度

粒径测量示值误差的扩展不确定度：$U$=3.4%，*k*=2。

B.2 颗粒计数效率校准的不确定度评定示例

B.2.1 校准方法简述及测量模型

按本规范6.5部分进行DMAS颗粒计数效率的校准。按公式（B.3）计算仪器的计数效率。

$$η\_{T }=\frac{\overline{C\_{T}}×η\_{S}}{\overline{C\_{S}}×f} （B.3）$$

式中：$η\_{T }$—被校DMAS的颗粒计数效率，%

 $η\_{S}$—参考仪器的颗粒计数效率，%

*f*—气溶胶稀释器的稀释比，%

B.2.2 不确定度计算公式

从公式（B.3）和校准过程可以看出，颗粒计数效率校准的不确定度来源主要包括：被校DMAS测量结果、参考仪器的测量结果、参考仪器的计数效率、气溶胶稀释器的稀释比。其中，被校DMAS测量结果与参考仪器的测量结果相关，因此不确定度计算公式可表示为：

$u\left(η\right)=\sqrt{\begin{array}{c}\left(\frac{η\_{S}}{\overline{C\_{S}}×f}\right)^{2}u^{2}\left(\overline{C\_{T}}\right)+\left(\frac{\overline{C\_{T}}×η\_{S}}{−\overbar{C}\_{S}^{2}×f}\right)^{2}u^{2}\left(\overline{C\_{S}}\right)+\left(\frac{\overline{C\_{T}}}{\overline{C\_{S}}×f}\right)^{2}u^{2}\left(η\_{S}\right)+\left(\frac{\overline{C\_{T}}×η\_{S}}{−f^{2}×\overline{C\_{S}}}\right)^{2}u^{2}\left(f\right)\\+\left(\frac{η\_{S}}{\overline{C\_{S}}×f}\right)\left(\frac{\overline{C\_{T}}×η\_{S}}{−\overbar{C}\_{S}^{2}×f}\right)r(\overline{C\_{T}},\overline{C\_{S}})u\left(\overline{C\_{T}}\right)u\left(\overline{C\_{S}}\right)\end{array}}$ (B.4)

式中：$u\left(η\right)$—计数效率的合成标准不确定度，%；

$u\left(\overline{C\_{T}}\right)$—被校DMAS测量结果$\overline{C\_{T}}$引入的不确定度，个/cm3；

$u\left(\overline{C\_{S}}\right)$—参考仪器测量结果$\overline{C\_{S}}$引入的不确定度，个/cm3；

$u\left(η\_{S}\right)$—参考仪器的计数效率引入的不确定度，%；

$u\left(f\right)$—气溶胶稀释器的稀释比*f*引入的不确定度，%；

$r(\overline{C\_{T}},\overline{C\_{S}})$ —被校DMAS测量结果与参考仪器的测量结果的相关系数，无量纲量

B.2.3 不确定度分量的评定与计算

B.2.3.1 测量结果$\overline{C\_{T}}$引入的相对不确定度

由本规范6.5部分， 被校DMAS的测量结果为10次测量的平均值，测量结果见表B.2。

被校DMAS测量重复性引入的相对不确定度为$u\left(\overline{C\_{T1}}\right)=\frac{δ\_{c}}{\sqrt{10}}$=11.7 个/cm3。

被校DMAS的示值误差不大于2.0%，假设服从均匀分布，$ u\left(\overline{C\_{T2}}\right)=\frac{2.0\%}{\sqrt{3}}×5871.4$=67.8 个/cm3。

因此，$u\left(\overline{C\_{T}}\right)=\sqrt{u^{2}\left(\overbar{N}\_{OPS1}\right)+u^{2}\left(\overbar{N}\_{OPS2}\right)}$=68.8 个/cm3。

表B.2 颗粒计数测量结果

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 测量次数 | 参考仪器测量结果 （个/cm3） | 被校DMAS测量结果 （个/cm3） |
| 1 | 6548 | 5867 |
| 2 | 6604 | 5903 |
| 3 | 6547 | 5879 |
| 4 | 6523 | 5860 |
| 5 | 6601 | 5926 |
| 6 | 6612 | 5908 |
| 7 | 6539 | 5850 |
| 8 | 6504 | 5828 |
| 9 | 6573 | 5792 |
| 10 | 6536 | 5901 |
| 平均值 | 6558.7 | 5871.4 |
| 标准偏差 | 36.9 | 40.9 |

B.2.3.2 参考仪器测量结果$\overbar{N}\_{S}$引入的相对不确定度

参考仪器的测量结果为10次测量的平均值，测量结果见表B.2。因此，标准仪器测量结果引入的不确定度为$u\left(\overline{C\_{S}}\right)=\frac{δ\_{c}}{\sqrt{10}}$=12.9 /cm3。

B.2.3.3 参考仪器的计数效率引入的相对不确定度

所用凝结核粒子计数器颗粒计数效率为98.0%，不确定度≤3.6%（*k*=2）。因此，参考仪器计数效率引入的不确定度$u\left(η\_{s}\right)$=1.8%。

B.2.3.4稀释比引入的不确定度

稀释器的稀释比校准不确定度可从校准证书中获得，本校准中，由于颗粒数量浓度较低，校准中没有使用稀释器，即f=1，$u\left(f\right)=0$。

B.2.3.5 粒径谱仪测量结果与参考仪器的测量结果的相关系数

相关系数$r(\overbar{N}\_{OPS},\overbar{N}\_{S})$可由下式计算得到

$$r\left(\overline{C\_{T}},\overline{C\_{S}})\right)=\frac{\sum\_{i=1}^{n}(C\_{Ti}−\overline{C\_{T}})(C\_{Si}−\overline{C\_{S}})}{\left(n−1\right)s\left(\overline{C\_{T}}\right)s(\overline{C\_{T}})}=0.52$$

B.2.4 合成标准不确定度

根据上述计算，颗粒计数效率合成标准不确定度为：

$u\left(η\right)=$2.0%

B.2.5 扩展不确定度

颗粒计数效率的扩展不确定度：$ U$=4%，*k*=2

# 附录C

校准记录格式

差分电迁移分析仪校准原始记录

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 校准日期 |  | 原始记录编号 |  | 证书编号 |  |
| 校准员 |  | 核验员 |  |
| 仪器型号 |  | 制造厂 |  |
| 仪器编号 |  | 委托单位 |  |
| 委托单位地址 |  |
| 温度 | ℃ | 湿度 | %RH |
| 校准依据 |  |
| 校准地点 |  |
| 校准用主要标准及仪器设备 | 名称 | 型号 | 编号 | 证书编号 | 有效期至 |
| 粒度标准物质 |  |  |  |  |
|  |  |  |  |
|  |  |  |  |
| 参考仪器 |  |  |  |  |
| 气溶胶稀释器 |  |  |  |  |
| 流量计 |  |  |  |  |

校准结果

|  |  |
| --- | --- |
| 1. 零点 | $N\_{0}$= |
| 2. 流量示值误差 |
| $$Q\_{VS}$$ | $$Q\_{m}$$ | $$\overline{Q}\_{m}$$ | $$ΔQ$$ |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
| 3. 粒径测量示值误差 |
| $$D\_{S}$$ | 测量值 | $$\overline{D}$$ | $$∆D$$ |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
| 粒径测量示值误差的不确定度 |  |
| 4. 颗粒计数效率 |
| 粒径 | 测量值 | 平均值 | 计数效率 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |  |
| 颗粒计数效率的不确定度 |  |
| 5. 颗粒计数重复性 |
| 粒径 | 测量点 | 平均值 | 重复性 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

# 附录D

校准证书（内页）格式

D.1 校准证书第2页式样

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 证书编号：XXXX-XXXX

|  |
| --- |
| 校准机构授权说明 |
| 校准所依据的技术文件（代号、名称） |
| 校准环境条件及地点：温度：　　 　　　 　　℃　　　　地点：相对湿度：　　 　　　　%　　　　其他： |
| 校准使用的主要标准器/主要仪器 |
| 名称 | 测量范围 | 不确定度/准确度等级/最大允许误差 | 证书编号 | 有效期至 |
|  |  |  |  |  |

第X页共X页 |

D.2 校准证书第3页式样

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 证书编号：XXXX-XXXX校准结果

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 校准项目 | 技术要求 | 校准结果 |
| 零点 |  |  |
| 流量示值误差 |  |  |
| 粒径测量示值误差 | / | 标准值 | 测量值 | 示值误差 | 示值误差不确定度*U*rel (*k*=2) |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
| 颗粒计数效率 |  | 标准值 | 测量值 | 计数效率 | 计数效率不确定度*U*rel (*k*=2) |
|  |  |  |  |  |
| 计数重复性 |  |  | / |

以下空白第X页共X页 |