

基于碳烟的超细颗粒物 PN 检测仪校准 系统设计与研制

朱乐文¹, 董乐园¹, 王 健¹, 余同柱^{1,2}, 杨义新^{1,2}, 郭皓天², 桂华侨^{1,2,*}

(1. 合肥综合性科学中心环境研究院, 安徽 合肥 230088; 2. 中国科学院合肥物质科学研究院 安徽光学
精密机械研究所, 安徽 合肥 230031)

摘要: 为有效控制移动源颗粒物排放, 缓解日益严峻的大气污染问题, 我国自国五阶段起在法规中明确提出柴油车颗粒物数量浓度(Particle Number, PN)的控制要求, 并在国六阶段进一步将PN限值监测范围扩展至轻型车。然而, 当前市场上用于法规认证与执法的PN检测设备品牌众多, 虽已出台针对PN计数效率及计数线性等关键技术参数的法规标准, 但行业内尚未建立完善、统一且可溯源的PN监测校准体系。计量溯源链条的缺失, 直接导致数据一致性差、可靠性不足, 使得现行国六标准在实际执行中面临挑战。针对这一迫切需求, 设计了一套基于横向淬火碳烟颗粒发生的校准系统, 可稳定可控地生成形态和性质高度接近真实机动车尾气排放的碳烟颗粒物。在计量原理上, 系统通过精密测量带电颗粒感应微电流, 将颗粒物数量浓度直接溯源至国际单位“安培”, 实现了PN检测仪的快速、可靠校准。性能验证结果显示: 研制的碳烟颗粒发生装置具有极高稳定性, 可稳定产生 10~100 nm 标准碳烟颗粒; 核心分级部件差分电迁移率分析仪(Differential Mobility Analyzer, DMA)在 10 nm 至 100 nm 等各个关键粒径上的筛分偏差均小于 2.0%; 法拉第杯气溶胶静电计(Faraday Cup Aerosol Electrometer, FCAE)测量各个粒径的线性系数优于 99.6%, 计数效率保持在 100.0%~110.0% 范围内。应用测试结果表明, 该系统在台架式PN设备、便携式排放测量系统PN模块(Portable Emissions Measurement Systems Particle Number Module, PEMS-PN)校准中表现出优异的适用性, 校准所得计数效率与设备出厂标称值的绝对误差均小于 $\pm 6.7\%$ 。

关键词: 颗粒物数量浓度; 校准; 便携式排放测量系统; PN 模块; 差分电迁移率分析仪; 计数效率

中图分类号: X859

文献标识码: A

Design and Development of a Calibration System for Soot-Based Ultrafine Particle PN Detectors

ZHU Lewen¹, DONG Leyuan¹, WANG Jian¹, YU Tongzhu^{1,2}, YANG Yixin^{1,2},
GUO Haotian², GUI Huaqiao^{1,2,*}

(1. *Institute of Environment Hefei Comprehensive National Science Center, Hefei 230088, China*; 2. *Anhui
Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences,
Hefei 230031, China*)

Abstract: In order to effectively control mobile source particulate matter emissions and mitigate the increasingly severe issue of atmospheric pollution, environmental regulations in China have imposed strict control requirements on the particle number (PN) concentration of diesel vehicles since the

收稿日期: 2025-11-21

修回日期: 2026-01-16

接受日期: 2026-01-18

DOI: 10.20078/j.eep.20260104

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金重点资助项目(U2133212); 合肥综合性科学中心环境研究院科研团队建设资助项目(HYKYTD2024006); 国家环境保护机动车污染控制与模拟重点实验室开放基金(VECS2021S05)

第一作者: 朱乐文(1998—), 男, 安徽宿州人, 研究实习员, 主要研究方向为机动车排放颗粒物在线监测技术。E-mail: 369466286@qq.com

*通讯作者: 桂华侨(1979—), 男, 安徽潜山人, 研究员, 主要研究方向为大气颗粒物在线监测技术。E-mail: hqgui@aiofm.ac.cn

National V stage. These requirements were further expanded in the National VI stage to include light-duty vehicles. However, the current market features a multitude of PN detection devices from various manufacturers. Although specific regulations for key technical parameters—such as PN counting efficiency and counting linearity—have been promulgated, a unified and traceable calibration system remains absent. This lack of a robust metrological traceability chain compromises data consistency and undermines measurement reliability, posing significant challenges to the implementation of National VI Standards. To address this critical gap, this paper designs and develops a calibration system based on transverse-quenched soot particle generation system. This system is capable of generating soot particles that are stable, controllable, and highly similar in morphology and properties to real vehicle exhaust emissions. From a metrological perspective, the system measures the micro-current induced by charged particles, directly tracing the particle number concentration to the ampere, a base unit of the International System of Units (SI). This approach eliminates reliance on secondary transfer standards, enabling rapid, high-precision, and reliable calibration of PN detectors. Rigorous laboratory tests were conducted to validate the metrological performance of the system. The results indicate that the developed soot particle generation device exhibits exceptional stability, capable of producing standard soot particles in the 10–100 nm size range. The differential mobility analyzer (DMA), a core component for particle sizing, demonstrates superior performance, with sizing deviations strictly controlled to less than 2.0% across all key particle size nodes from 10 nm to 100 nm. Furthermore, the Faraday cup aerosol electrometer (FCAE), serving as the reference standard, shows excellent linearity in measuring various particle sizes, with a linearity coefficient better than 99.6%, and its counting efficiency is stably maintained within the range of 100.0% to 110.0%. Application test results demonstrate that the system possesses outstanding versatility in practical engineering applications. In calibration experiments involving both bench-top PN equipment and the portable emissions measurement system particle number module (PEMS-PN), the system exhibited excellent applicability. The counting efficiency obtained from the calibration aligns closely with the manufacturers' nominal factory values, with absolute errors consistently less than $\pm 6.7\%$. These results verify the precision of the proposed calibration system and provide strong technical support for solving the traceability issues of PN equipment under the National VI Standards.

Keywords: Particle number concentration; Calibration; Portable emissions measurement system; Particle number module; Differential mobility analyzer; Counting efficiency

0 引言

随着全国机动车保有量突破 4.53 亿辆, 移动源污染已成为我国大气污染的主要来源, 其贡献率接近 60%^[1-3]。生态环境部发布的《中国移动源环境管理年报(2024 年)》显示, 2023 年全国机动车颗粒物(Particulate Matter, PM)排放量仍高达 4.4 万吨。需特别关注的是, 机动车排放的颗粒物主要由超细颗粒物(粒径 ≤ 100 nm)构成^[4]。这些颗粒物不仅数浓度(Particle Number, PN)远高于同等质量浓度下的工业排放颗粒, 而且由于粒径极小(通常小于 2.5 μm), 能够长期悬浮于大气中, 穿透人体生理屏障, 对人体健康构成严重威胁^[5-8]。

为应对这一挑战, 我国已全面实施机动车国六排放标准, 并对 23 nm 以上颗粒物的数量浓度进行严格管控。法规的严格实施对机动车尾气 PN 检测仪的测量准确性提出了更高要求, 使得对这类仪器的定期标定与校准变得至关重要^[9-10]。然而, PN 检测设备在长期运行过程中, 会因颗粒物沉积等因素导致采样流量、稀释比及计数效率发生变化, 从而影响测量结果的可靠性。目前, 该领域面临的核心问题: 国际上缺乏统一的计量校准方法, 也缺少专用的现场校准设备。各生产厂商仅依据内部标准在实验室内进行“出厂校准”, 无法保证不同品牌、不同批次仪器之间测量结果的一致性。尽管国内已有研究机构搭建了基于差

分电迁移分析仪(Differential Mobility Analyzer, DMA)和凝结核粒子计数器(Condensation Particle Counter, CPC)等进口仪器的固定式校准装置,但其存在体积庞大、成本高昂、操作复杂及送检周期长等问题,难以满足日常现场校准与快速维护的迫切需求。

在此背景下,国家市场监督管理总局于 2025 年 3 月正式发布了《移动源排放颗粒物数量检测仪校准规范》(JJF 2215—2025)^[11]。该规范明确规定了 23~200 nm 粒径区间内仪器的计数效率、计数线性等量化指标,并强调校准结果必须溯源至国家计量基准。因此,开发一套能够现场应用、测量结果可溯源的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统,已成为当前环境监测计量领域的紧迫任务。

实现准确校准的关键之一在于选择能够真实模拟机动车尾气颗粒物物理化学特性的标准颗粒源。移动源尾气颗粒物主要成分为碳烟,具有粒径分布宽、数浓度高的特征。现有的颗粒物发生方案(如雾化法、高温煅烧法、电喷雾法等)产生的颗粒物,在组分、结构及浓度等方面与真实尾气颗粒物存在显著差异,难以满足高精度校准的需求。基于不完全燃烧原理的碳烟颗粒物,因其生成机理与内燃机燃烧过程最为接近,被认为是校准移动源 PN 检测仪的最优颗粒源^[12]。

在碳烟发生技术中,研究人员已探索多种路径。早期采用内燃机压燃方式直接产生颗粒,但发生粒径与浓度未知,且稳定性和重复性差,不适用于标定研究。火花烧蚀与激光烧蚀法能产生粒径和浓度可控的碳烟,稳定性较好,但其生成的颗粒物在理化性质上与真实发动机燃烧产生的碳烟存在本质区别^[13-15]。由瑞士联邦计量研究所提出的淬火式火焰燃烧法^[16],通过有机燃料的不完全燃烧生成碳烟,其过程与发动机内燃烧高度相似,最能反映真实尾气颗粒物的特征,因而目前应用最为广泛。然而,该方法在火焰燃烧过程中存在闪烁现象,导致生成颗粒的浓度和峰值粒径稳定性不佳,浓度偏差最高可达 2 倍,粒径偏差可达 10%,这严重制约了其在精确计量校准中的应用,此外,该方法产生的颗粒粒径主要集中在 61~311 nm 范围内^[17],无法覆盖 10 nm 等更小粒径的颗粒,因而难以满足未来国七标准对 10 nm 颗粒检测的技术要求。

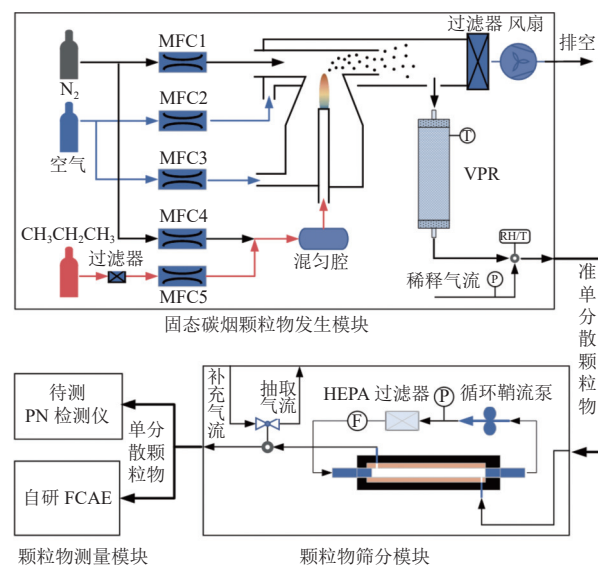
针对以上问题,本文攻克了横向淬火式扩散火焰燃烧的碳烟颗粒发生技术,研制了一套超细

颗粒物 PN 检测仪校准系统。该系统能够稳定产生低粒径下限、宽粒径范围的标准碳烟颗粒,并采用研制的法拉第杯气溶胶静电计,通过测量带电颗粒的感应微电流,将颗粒物数量浓度直接溯源至国际单位(A),确保了量值的准确传递与现场可溯源性^[18-20]。整套设备采用一体化集成设计,具有操作便捷、检测快速的优点,为填补我国在移动源 PN 浓度测量仪器溯源校准领域的空白提供了有效的技术解决方案。

1 超细颗粒物 PN 检测仪校准系统的设计

1.1 总体方案

如图 1 所示,研制的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统采用颗粒物发生、筛分、测量三段式模块化设计。颗粒物发生端配置碳烟颗粒物发生器,通过质量流量控制器(Mass Flow Controllers, MFC)精确配比丙烷、空气与氮气等气体流量,以稳定产生高度模拟实际机动车尾气排放特征的多分散碳烟颗粒。



注: VPR 为挥发性粒子去除器, HEPA 为高效空气过滤器

图 1 超细颗粒物 PN 检测仪校准系统

Fig. 1 Calibration system for ultrafine particle PN detectors

筛分模块采用研制的平板式差分电迁移率分析仪(Differential Mobility Analyzer, DMA),将多分散颗粒筛分为单分散气溶胶,随后气流分为并联两路:一路进入研制的法拉第杯气溶胶静电计(Faraday Cup Aerosol Electrometer, FCAE);另一路进入便携式排放测量系统 PN 模块(Portable Emissions Measurement Systems Particle Number

Module, PEMS-PN)模块。

本研究基于研制的 FCAE, 建立了颗粒物数浓度的精确计算模型。该模型的计算公式如下:

$$N = \frac{I}{n_p e q_e} \quad (1)$$

式中, N 为颗粒物数浓度(个/ m^3), n_p 为每个粒子的平均带电荷数(1/个), e 为电荷的基本单位($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$), q_e 为采样流量(m^3/s), I 为静电计测得的电流值(A)。

如式(1), 根据 FCAE 技术测得的电流 I , 可直接计算出被测颗粒物的数浓度, 且该电流信号能够直接溯源至国际单位制(SI)的基本单位“A”。

通过比对两路 PN 读数, 依据 JJF 2215-2025 计算计数效率, 实现现场判定待测设备的 PN 检测性能。

如图 2 所示, 本文设计的 PN 检测仪校准系统尺寸为 $75.5 \text{ cm} \times 48.0 \text{ cm} \times 46.0 \text{ cm}$, 主机重量 $< 50 \text{ kg}$, 便携性高, 可携带至各个发动机和主机厂、排放测试实验室等对 PN 检测仪进行现场标定。



图 2 超细颗粒物 PN 检测仪校准系统实物图

Fig. 2 Photograph of the calibration system for ultrafine particle PN detectors

1.2 碳烟颗粒发生器模块设计

碳烟颗粒物是碳氢化合物不完全燃烧或热分解的分散碳产物, 由各种形状和大小的颗粒组成^[21]。碳烟颗粒物主要由燃料和空气发生燃烧反应生成, 如式(2)所示, m_{fuel} 与 m_{air} 分别表示燃料与空气的流量, 下标 st 表示化学计量流量比, ϕ 为当量比^[22]。

$$\phi = \frac{m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}}}{(m_{\text{fuel}}/m_{\text{air}})_{\text{st}}} \quad (2)$$

当 $\phi > 1$ 时, 反应为富燃状态; 当 $\phi < 1$ 时, 反应为贫燃状态。不同的燃烧状态下, 生成的颗粒物浓度和粒径存在差异。

本研究基于扩散火焰燃烧原理, 设计了一款横向淬火式碳烟颗粒物发生器。该发生器通过在燃烧火焰的特定径向位置通入化学性质稳定的淬

火气体(如高纯氮气), 迅速终止燃烧反应进程, 有效抑制颗粒物的进一步氧化与表面反应, 从而生成具有稳定粒径与组分特征的碳烟颗粒物。碳烟颗粒物生成器物理结构如图 3 所示, 主要由燃烧反应腔、点火装置、排空管等部件组成。此外, 为了确保燃烧过程的稳定性和安全性, 该碳烟颗粒物发生器还设有散热结构, 能够有效散发燃烧过程中产生的热量, 稳定生成颗粒物。

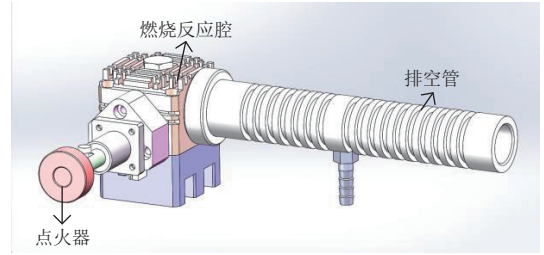


图 3 碳烟颗粒物发生器结构示意图

Fig. 3 Schematic of the soot particle generator

在使用时, 通过五路质量流量控制器分别调控预混氮气、氧化空气、淬火氮气及稀释空气的流量。通过调节丙烷与预混氮气、氧化空气的流量可控制燃烧火焰状态, 调节稀释空气流量用于实现颗粒物的定量稀释。如图 4 所示, 在碳烟发生过程中, 颗粒物依次经历凝结与聚集两个关键阶段。首先, 碳烟颗粒通过凝结过程形成碳氢化合物分子、多环芳烃(PAH)及初始的球形单体颗粒。随后, 这些球形颗粒进一步发生聚集, 生成具有特定峰值粒径且呈窄分布的团聚状碳颗粒。通过调控该过程, 可制备出不同粒径的颗粒物, 从而有效模拟机动车尾气排放中的实际颗粒物特征。

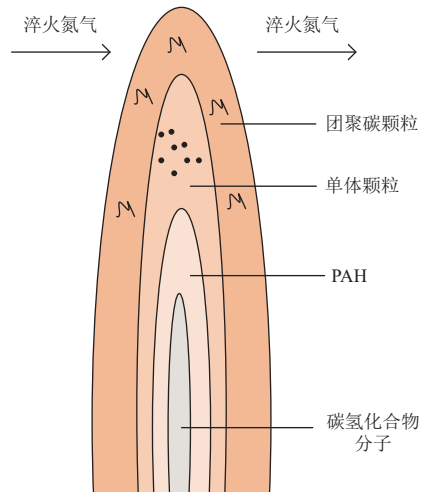


图 4 碳烟颗粒物产生原理

Fig. 4 Generation principle of soot particles

尽管在实操过程中,碳烟颗粒物发生器的使用可能因携带气瓶而稍显繁琐,并存在一定的空气污染风险,但是其生成机理与机动车排放颗粒物高度相似,能够最大限度地模拟真实尾气颗粒物的特性。因此,碳烟颗粒物仍是机动车排放颗粒数浓度标定研究中最理想的颗粒源。

1.3 差分电迁移率分析仪模块设计

DMA 为大气超细颗粒物粒径谱测量领域的核心设备,其可以从一组多分散的颗粒物中筛选出特定粒径的单分散颗粒物,是带电颗粒迁移率分布测量的重要工具^[23-24]。

本文研制的 DMA(图 5)由 2 块平行的金属板组成,一块接高压,一块接地以形成均匀电场,洁净鞘气沿极板平行流动形成层流。设计的 DMA 多分散气溶胶入口延伸至电场区域内,使得气溶胶进入 DMA 瞬间即受到电场力作用;高压极板选择铺铜印刷电路板(Printed Circuit Board, PCB),相较于传统的金属材质极板,铺铜 PCB 表面更为光滑,能够产生更加均匀的电场,有效减少颗粒物在极板上的沉积;此外,在鞘气入口和样气入口添加滤网结构,并在多分散气溶胶入口处采用斜切角结构设计,相比于直角,气溶胶流入更加顺滑,不会产生扰流等问题,确保了 DMA 对小粒径颗粒(如 10 nm、15 nm 等)的准确筛分。当带电颗粒进入通道后,大粒径颗粒因电迁移率小随鞘气被过滤器吸附,小粒径颗粒因电迁移率大被高压极板吸附,仅有目标粒径颗粒因电场力与流场力平衡,能够从出口流出,通过调节 DMA 极板间电压,从而实现不同目标粒径颗粒的筛选。

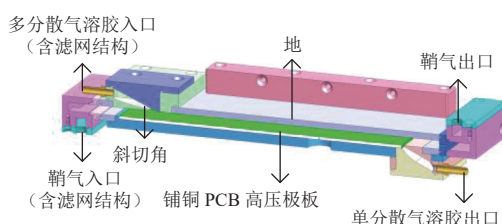


图 5 DMA 结构示意图

Fig. 5 Schematic of the DMA structure

1.4 法拉第杯气溶胶静电计模块设计

为实现颗粒物 PN 的可溯源测量,本文设计了一款法拉第杯静电计,结构如图 6 所示。该 FCAE 的滤芯选用玻璃纤维材质,相比于多孔金属材料其间隙较小,更易捕捉到小粒径颗粒物。当颗粒物进入法拉第杯并与敏感电极碰撞时,会失去所携带的电荷,从而产生微弱电流,转换成电压后进

行放大记录^[25]。该 FCAE 集成了微弱信号采集组件和信号放大组件,具有结构简单、检测效率高、小型化、稳定性高^[26]等优点。

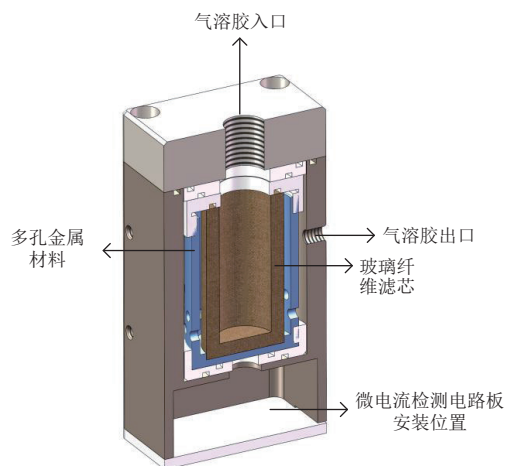


图 6 FCAE 结构示意图

Fig. 6 Schematic of the FCAE structure

当待测颗粒物进入 FCAE 后,假设每个粒子只携带一个电荷,则可以通过式(1)精确计算颗粒物数浓度。

2 超细颗粒物 PN 检测仪校准系统性能验证

颗粒物测量校准系统需要对各关键模块的性能严格要求。具体而言,颗粒物发生模块需保证生成的颗粒物浓度稳定、粒径分布明确;颗粒物筛分模块则要求具备高精度的粒径筛分能力以及良好的颗粒物单分散性(Geometric Standard Deviation, GSD);颗粒物测量模块则着重关注测量误差与数据相关性。基于这些要求,本文设计了一系列实验,用于全面评估测量研制的碳烟颗粒物发生器、平板型 DMA 以及 FCAE 3 个模块的性能,确保其能够满足颗粒物测量系统的校准需求。

2.1 颗粒物发生器评估

为评估碳烟颗粒物发生器的发生粒径范围,本研究搭建了如图 7 所示的测试方案。在保持丙烷、稀释空气及淬灭氮气流量恒定的条件下,通过系统调节预混氮气与氧化空气的流量比例,以控制生成颗粒物的粒径。对不同条件下产生的碳烟颗粒物,首先采用软 X 射线中和器对其所带电荷进行中和处理,随后将其通入扫描电迁移率粒径谱仪(Scanning Mobility Particle Sizer, SMPS)中,以获取详细的颗粒物粒径分布谱图,并记录其峰

值粒径。实验结果如图 8 所示,该图以氧化空气流量为横坐标、预混氮气流量为纵坐标,绘制峰值粒径的等高线分布。结果表明:在固定氧化空气流量时,颗粒物峰值粒径随预混氮气流量的增加而单调递减;而在固定预混氮气流量时,峰值粒径随氧化空气流量的增加呈现先增大后减小的变化趋势。当氧化空气与预混氮气流量分别设定为 700 mL/min 与 0 mL/min 时,系统可产生峰值粒径为 165.50 nm 的颗粒物;而当流量分别调整为 300 mL/min 与 35 mL/min 时,则可获得峰值粒径为 8.98 nm 的颗粒物。上述实验结果表明,本研究开发的碳烟发生器所产生的颗粒物峰值粒径覆盖范围为 8.98~165.50 nm,满足现行国六标准及未来国七标准对颗粒物检测的粒径要求。

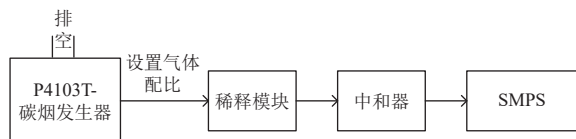


图 7 颗粒物发生器性能评估实验方案

Fig. 7 Experimental scheme for the performance evaluation of the particle generator

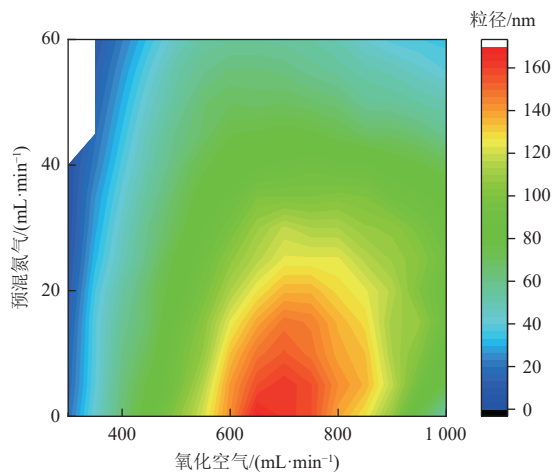


图 8 碳烟颗粒物发生器粒径分布图

Fig. 8 Particle size distributions of the soot generator

在校准工作中,为了避免多荷电现象的产生,通常选择“发小筛大”原则,即筛选指定粒径,其所处粒径分布图的位置最好位于中心粒径右侧。为获取符合实验需求的标准碳烟颗粒,实验通过调控气体配比(包括氧化空气、预混氮气、丙烷、淬火氮气、稀释空气),采用 SMPS 对发生的颗粒粒径谱进行扫描,记录其用于筛分指定粒径的分布光谱图。实验结果如图 9 所示,碳烟颗粒物发生器在产生 10/15、23、30、41、50、70、100 nm

目标峰值粒径时,所对应粒径分布的 GSD 分别为 1.33、1.29、1.43、1.42、1.44、1.36、1.60,均不大于 1.60。进一步对分布曲线进行分析,在 20、30、46、60、82、100、140、200 nm 粒径点右侧曲线面积分别占总面积的 3.30%、0.51%、0.06%、0.15%、0.41%、0.16%、0.02%、0.02%,粒径为目标峰值两倍的颗粒物占比极低。上述结果表明,在特定气体配比条件下,该碳烟颗粒物发生器能够产生粒径分布集中的单分散碳烟颗粒,满足校准实验对颗粒物单分散性的要求。

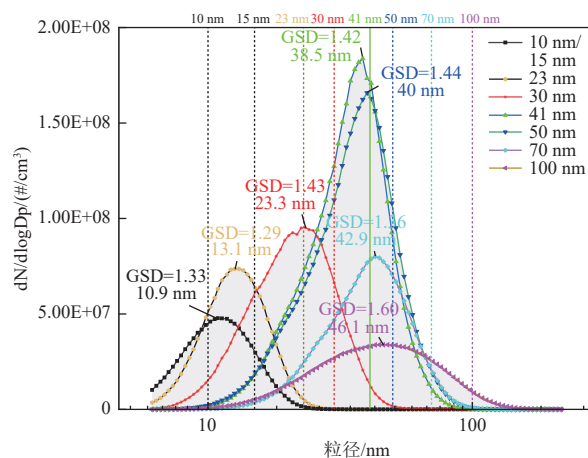


图 9 不同气体配比下发生碳烟颗粒粒径分布图

Fig. 9 Particle size distributions of soot at various gas ratios

2.2 DMA 模块筛分性能

为评估研制的差分电迁移分析仪的粒径筛分性能,本研究搭建了如图 10 所示的实验系统。采用 MiniCAST Model 6 301 碳烟颗粒发生器产生多分散碳烟颗粒,经 VPR 挥发性粒子去除器、稀释器及软 X 射线荷电器处理后,形成带电稳定的多分散气溶胶。将该气溶胶通入研制的 DMA 中进行指定粒径的筛分,随后使用扫描电迁移率粒径谱仪(SMPS,由 DMA3082 与 CPC3750 组成)对筛分后的颗粒物粒径分布进行精确测量,以此验证研制的 DMA 的粒径筛分准确度。图 11 为实验现场实物图。

实验结果如图 12 和表 1 所示,研制的 DMA 对 10、15、23、30、41、50、70 及 100 nm 共 8 个目标粒径点的筛分误差分别为 2.0%、0.7%、1.3%、0、1.0%、-0.8%、1.4% 与 1.8%。误差可能是由 DMA 高压源输出高压不可避免的波动引起。尽管如此,所有测试粒径点的筛分误差均小于 2.0%,显著优于校准设备误差小于 10.0% 的技术要求。

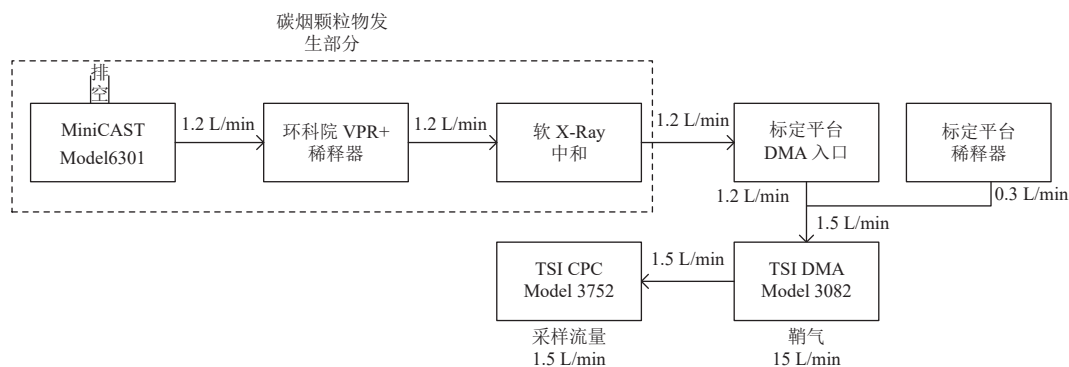


图 10 实验接线示意图

Fig. 10 Schematic of the experimental wiring

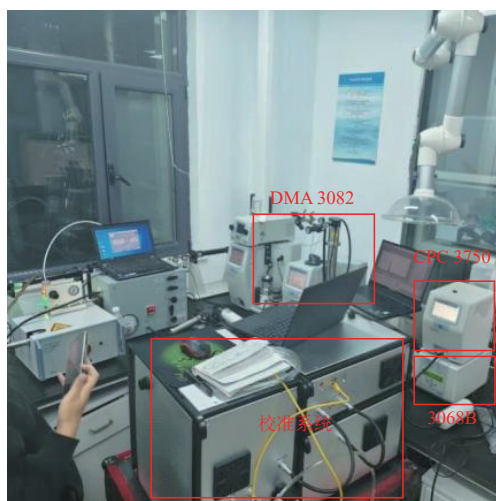


图 11 DMA 模块性能测试现场图

Fig. 11 On-site photograph of the DMA module performance testing

各筛分粒径点对应的 GSD 分别为 1.1、1.1、1.1、

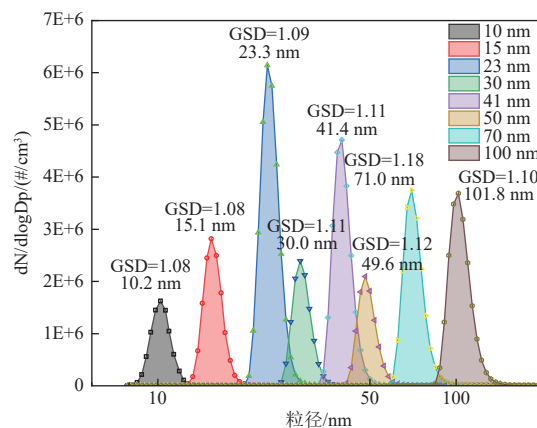


图 12 研制的 DMA 筛分粒径谱图

Fig. 12 Sizing spectra of the developed DMA

1.1、1.1、1.1、1.2、1.1, 所有 GSD 均小于 1.2, 说明颗粒物具有高度单分散性。以上实验结果均表明研制的 DMA 具备优异的粒径筛分准确度。

表 1 研制的 DMA 筛分结果

Table 1 Sizing results of the developed DMA

目标粒径/nm	10	15	23	30	41	50	70	100
实际粒径/nm	10.2	15.1	23.3	30.0	41.4	49.6	71.0	101.8
相对误差/%	2.0	0.7	1.3	0.0	1.0	-0.8	1.4	1.8
GSD	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1

2.3 法拉第杯气溶胶静电计性能验证

2.3.1 计数线性测试

为评估研制的法拉第杯气溶胶静电计在不同粒径下的计数线性, 本研究将其测量结果与基准仪器 TSI 3068B 进行系统性比对。实验方案如图 13 所示。由研制的碳烟颗粒发生器产生多分散颗粒, 经研制的 DMA 筛分获得单分散颗粒流, 随后将其等分并同步通入研制的 FCAE 与 TSI

3068B 中进行并行测量。

实验结果见表 2, 在 10~100 nm 的 8 个特征粒径点下, 研制的 FCAE 与 TSI 3068B 在所有粒径点下测量结果的线性相关系数均优于 99.60%。相关性系数的偏差主要源于颗粒物在管路中因沉积、扩散等因素造成的损失不一致。该结果表明, 研制的 FCAE 在测试粒径范围内均表现出与基准仪器高度一致的线性响应特性, 具备优异的颗粒物

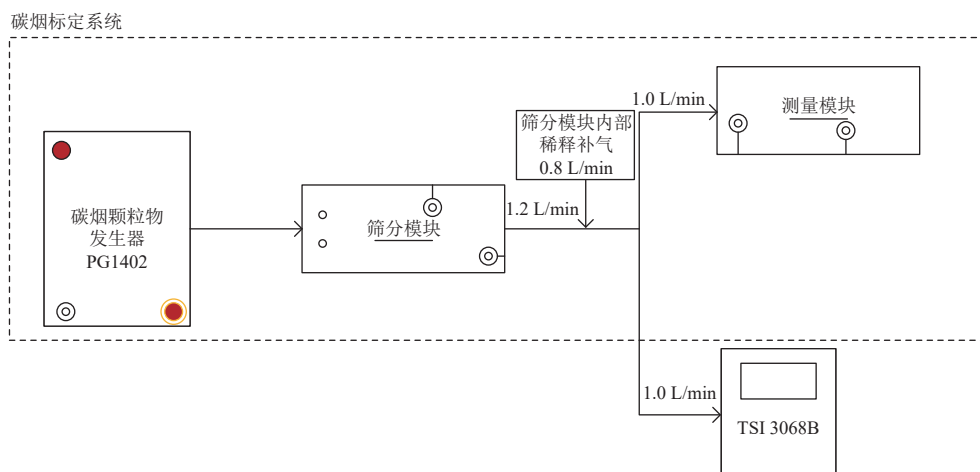


图 13 研制的 FCAE 计数线性测试方案

Fig. 13 Experimental scheme for the counting linearity test of the developed FCAE

计数线性。

表 2 研制的 FCAE 计数线性测试结果

Table 2 Counting linearity results of the developed FCAE

粒径/nm	10	15	23	30
相关系数/%	99.94	99.98	99.93	99.66
粒径/nm	41	50	70	100
相关系数/%	99.80	99.90	99.60	99.60

2.3.2 计数效率测试

为评估研制的法拉第杯气溶胶静电计的颗粒物计数效率性能,本研究搭建了如图 14 所示的测试系统。该系统以研制的碳烟颗粒物发生器作为颗粒源,利用研制的差分电迁移分析仪筛分获得单分散颗粒物,通过并行连接的方式,将研制的 FCAE 与商用凝结核粒子计数器 (TSI CPC3750) 进行同步测量,从而对比二者的计数结果以验证研制的 FCAE 的性能。

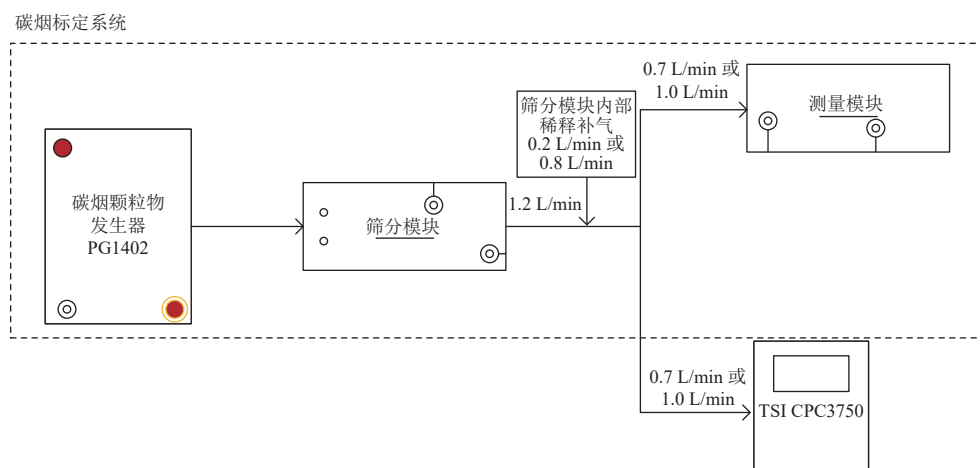


图 14 研制的 FCAE 计数效率测试方案

Fig. 14 Experimental scheme for the counting efficiency test of the developed FCAE

测试结果如图 15 所示,在未进行任何参数修正的情况下,研制的 FCAE 与参考仪器 CPC3750 在 8 个粒径点下进行对比,所有粒径点的计数效率(定义为研制的 FCAE 测量值与 CPC3750 测量值之比)均在 100.0%~110.0% 范围内,这表明研制的 FCAE 本身具有优异的物理性能,具备与商用

基准仪器 CPC3750 相当的精确计数效率。

3 应用验证

为验证本研究自主研发的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统在实际应用中的性能,分别针对台架式 PN 检测仪与 PEMS-PN 模块设备开展了系

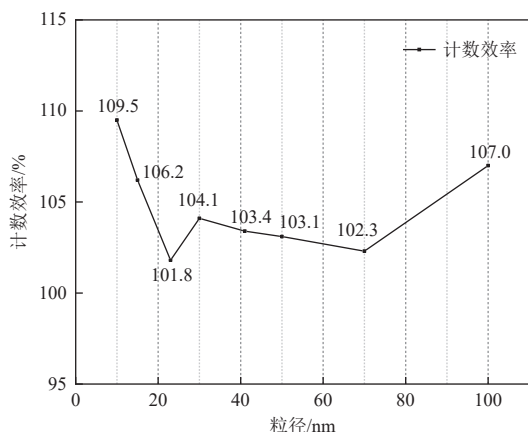


图 15 研制的 FCAE 计数效率测试结果
Fig. 15 Counting efficiency results of the developed FCAE

统的校准实验研究,并采用绝对误差(校准系统测量值-出厂标称值)作为评价指标。

3.1 对 PEMS 设备进行校准实验

3.1.1 对 PEMS-PN(PN10)进行校准实验

实验采用研制的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统对 1 号 PEMS-PN 设备(HORIBA OBS-ONE-PN10)计数性能进行校准,结果见表 3。

表 3 研制的校准系统测量和出厂的计数效率(1 号)
Table 3 Measured and factory-calibrated counting efficiency of the developed calibration system (No. 1)

粒径/nm	10	30	50	70	100
出厂计数效率/%	20.5	79.8	95.0	100.1	103.7
校准系统测量计数效率/%	26.5	78.0	91.0	106.5	110.0
绝对误差/%	6.0	-1.8	-4.0	-6.4	6.3

由表 3 可知,在粒径点 10、30、50、70、100 nm 处,使用研制的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统对该设备校准的计数效率与该设备出厂时的计数效率基本一致,绝对误差在 $\pm 6.4\%$ 以内,因此,本文研制的校准系统能够对台架式设备进行校准,且校准准确度较高。

3.1.2 对 PEMS-PN(PN23)进行校准实验

实验采用研制的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统对 2 号、3 号 PEMS-PN(HORIBA OBS-ONE-PN23)的计数性能进行校准,实验结果分别见表 4、表 5。

由表 4、表 5 可知,2 号与 3 号设备在粒径点 23、30、50、70、100 nm 处,使用研制的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统对该设备校准的计数效率

与该设备出厂的计数效率基本一致,绝对误差分别在 $\pm 6.7\%$ 、 $\pm 5.3\%$ 以内。

表 4 研制的校准系统测量和出厂的计数效率(2 号)
Table 4 Measured and factory-calibrated counting efficiency of the developed calibration system (No. 2)

粒径/nm	23	30	50	70	100
出厂计数效率/%	49.2	69.1	90.1	91.3	92.0
校准系统测量计数效率/%	50.9	75.8	90.7	91.8	97.7
绝对误差/%	1.7	6.7	0.6	0.5	5.7

表 5 研制的校准系统测量和出厂的计数效率(3 号)
Table 5 Measured and factory-calibrated counting efficiency of the developed calibration system (No.3)

粒径/nm	23	30	50	70	100
出厂计数效率/%	46.0	62.7	84.3	92.2	91.5
校准系统测量计数效率/%	41.0	63.0	79.0	95.0	95.0
绝对误差/%	-5.0	-0.3	-5.3	2.8	3.5

3.2 对台架式设备进行校准实验

实验采用研制的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统对 4 号台架式设备 HORIBA Solid Particle Counting System (SPCS-ONE-DL-10) 进行校准并与其出厂计数效率进行对比,实验结果见表 6。

表 6 研制的校准系统测量和出厂的计数效率(4 号)
Table 6 Measured and factory-calibrated counting efficiency of the developed calibration system (No.4)

粒径/nm	10	15
出厂计数效率/%	68.9	98.4
校准系统测量计数效率/%	73.7	96.0
绝对误差/%	4.8	-2.4

由表 6 可知,在粒径点 10nm、15nm 处,研制的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统对该设备进行校准的计数效率与该设备出厂时的计数效率基本一致,绝对误差在 $\pm 5.0\%$ 以内,由此可以验证研制的校准系统对台架式 PN 检测仪具有优异的校准性能。

以上结果表明,由于校准条件与出厂校准条件存在差异,PN 检测设备使用一段时间后会现计数效率漂移,以及人为操作不一致等因素,导致测量计数效率与出厂计数效率之间存在一定误差。尽管如此,该误差仍控制在 $\pm 6.7\%$ 以内,满足校准技术要求。因此,本文设计的超细颗粒物 PN 检测仪校准系统能够有效对台架 PN 设备及 PEMS-

PN 设备进行校准,具有较高的校准准确度,并能从计数效率角度直观反映 PN 设备的当前状态。

4 结 论

本研究成功研制一套模拟机动车尾气排放颗粒物发生的可溯源 PN 检测仪校准系统。该系统基于淬火式扩散火焰燃烧的碳烟颗粒发生装置,可稳定产生校准所需的 10~100 nm 标准碳烟颗粒。研制的 DMA 模块可对粒径进行精确筛分,筛分误差小于 2.0%。研制的 FCAE 模块可将测量结果直接溯源至国际单位“A”,经测试,FCAE 在各粒径下的响应线性系数均优于 99.6%,计数效率在 100.0%~110.0% 范围内。本校准系统能够对台架 PN 设备及 PEMS-PN 设备进行校准,其校准测试结果与出厂数据绝对误差均小于 $\pm 6.7\%$,显示出优异的校准性能,满足现行国六及未来国七排放标准对 PN 监测设备的校准要求。

未来,为进一步满足国六标准修订单对 PEMS-PN 设备实验前后校准的要求,将依据《移动源排放颗粒物数量检测仪校准规范》(JJF 2215—2025)开发全流程自动化软件,提升用户操作的便捷性与校准流程的规范性;同时,将持续推进设备小型化研究,通过优化核心模块结构与提升系统集成度,进一步改善设备整体性能、缩小体积、增强便携性,从而为移动源排放监管及未来更严格法规的实施提供更为完善的技术支持。

参考文献 (References):

- [1] JI Zhe, GUO Chengxiang, YU Tongzhu, et al. Design and evaluation of a calibration system for portable motor vehicle emission particle number detectors[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2024, 52(6): 711–730.
- [2] 余同柱. 机动车尾气超细颗粒物采样与数浓度在线测量关键技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018: 4–9.
YU Tongzhu. Research on key technologies of on-line measurement of sampling and number concentration of ultrafine particles in motor vehicle[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018: 4–9.
- [3] GIECHASKIEL B, MELAS A, MARTINI G, et al. Overview of vehicle exhaust particle number regulations[J]. *Processes*, 2021, 9(12): 2216.
- [4] 王文誉. 基于凝结粒子计数的机动车排放超细颗粒物数浓度在线测量关键技术研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020: 1–3.
WANG Wenyu. Research on key technologies of on-line measurement of ultrafine particle number concentration of motor vehicle emission based on condensation particle counting[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2020: 1–3.
- [5] 康士鹏, 余同柱, 桂华侨, 等. 机动车排放超细颗粒物在线监测技术研究进展 [J]. *大气与环境光学学报*, 2020, 15(6): 413–428.
KANG Shipeng, YU tongzhu, GUI Huaqiao, et al. Research progresss of on-line monitoring technology for ultrafine particulate matter emitted by motor vehicles[J]. *Journal of Atmospheric and Enviromental Optics*, 2020, 15(6): 413–428.
- [6] MORENO RÍOS A L, TEJEDA BENÍTEZ L P, BUSTILLO LECOMPTE C F. Sources, characteristics, toxicity, and control of ultrafine particles: An overview[J]. *Geoscience Frontiers*, 2022, 13(1): 101147.
- [7] MARVAL J, TRONVILLE P. Ultrafine particles: A review about their health effects, presence, generation, and measurement in indoor environments[J]. *Building and Environment*, 2022, 216: 108992.
- [8] PARK M V D Z, NEIGH A M, VERMEULEN J P, et al. The effect of particle size on the cytotoxicity, inflammation, developmental toxicity and genotoxicity of silver nanoparticles[J]. *Biomaterials*, 2011, 32(36): 9810–9817.
- [9] 徐杨东博, 桂华侨, 康士鹏, 等. 荷电可调软 X 射线荷电器的设计与集成应用 [J/OL]. *大气与环境光学学报*: 1–21[2026-01-13]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.O4.20250513.1047.002>.
XU Yangdongbo, GUI Huaqiao, KANG Shipeng, et al. Design and integration of charge adjustable soft x-ray charger for application[J/OL]. *Journal of Atmospheric and Enviromental Optics*: 1–21[2026-01-13]. <https://link.cnki.net/urlid/34.1298.O4.20250513.1047.002>.
- [10] 解智博, 桂华侨, 张礁石, 等. 大气细颗粒物测量技术研究新进展 [J]. *能源环境保护*, 2023, 37(2): 16–29.
XIE Zhibo, GUI Huaqiao, ZHANG Jiaoshi, et al. Measurement techniques new progress of atmospheric fine particles[J]. *Energy Environmental Protection*, 2023, 37(2): 16–29.
- [11] 国家市场监督管理总局. 移动源排放颗粒物数量检测仪校准规范: JJF 2215—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
State Administration for Market Regulation. Calibration specification for particle number monitors of mobile source emission: JJF 2215—2025[S]. Beijing: Standards Press of China, 2025.
- [12] GIECHASKIEL B, MARICQ M, NTZIACHRISTOS L, et al. Review of motor vehicle particulate emissions sampling and measurement: From smoke and filter mass to particle number[J]. *Journal of Aerosol Science*, 2014, 67: 48–86.
- [13] MALEKZADEH M, SWIHART M T. Vapor-phase production of nanomaterials[J]. *Chemical Society Reviews*, 2021, 50(12): 7132–7249.
- [14] AJTAI T, KOHUT A, RAFFAI P, et al. Controlled labo-

- ratory generation of atmospheric black carbon using laser excitation-based soot generator: From basic principles to application perspectives: A review[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(9): 1366.
- [15] GIECHASKIEL B, MELAS A. Comparison of particle sizers and counters with soot-like, salt, and silver particles[J]. *Atmosphere*, 2022, 13(10): 1675.
- [16] JING L, Standard combustion aerosol generator (SCAG) for calibration purposes[C]// 3rd ETH Workshop “Nanoparticle measurement”, ETH Hönggerberg Zürich, 1999: 9–10.
- [17] GUO Haotian, YANG Yixin, GUI Huaqiao, et al. Controllable generation of engine exhaust similar soot particles using an inverted nitrogen-diluted flame burner for calibration purpose[J]. *Powder Technology*, 2024, 448: 120342.
- [18] 员永兴. 机动车排放超细颗粒物粒径谱高分辨率测量系统设计及实验验证 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023: 20–22.
- YUN Yongxing. Design and experimental verification of high-resolution measurement system for particle size spectrum of ultrafine particles emitted by motor vehicles[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023: 20–22.
- [19] 齐天缘. 尘埃粒子计数器溯源及校准技术研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019: 15–16.
- QI Tianyuan. Research for tracing and calibration technology of optical particle counter[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2019: 15–16.
- [20] KANG Shipeng, YU Tongzhu, YANG Yixin, et al. Design and evaluation of a thermal precipitation aerosol electrometer (TPAE) [J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2023, 16(12): 3245–3255.
- [21] LYUBOV V K, POPOV A N, POPOVA E I. Emissions of soot particles from heat generators[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, 891: 012217.
- [22] MOORE R H, ZIEMBA L D, DUTCHER D, et al. Mapping the operation of the miniature combustion aerosol standard (mini-CAST) soot generator[J]. *Aerosol Science and Technology*, 2014, 48(5): 467–479.
- [23] 刘建国, 康士鹏, 桂华侨, 等. 一种基于 TDMA 标定平台的 DMA 传递函数反演方法及装置: CN118035616B[P]. 2025–12–02.
- Liu Jianguo, KANG Shipeng, GUI huaqiao. A method and device for inverting the DMA transfer function based on the TDMA calibration platform: CN118035616B[P]. 2025–12–02.
- [24] 刘洋. 蛋白质浓度绝对定量方法电喷雾—差分电迁移率—粒子计数法的建立和应用 [D]. 北京: 北京化工大学, 2020: 9–10.
- LIU Yang. Absolute quantification method for protein concentration establishment and application of electrospray-differential mobility analysis-condensation particle counting[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020: 9–10.
- [25] 曹阳阳, 王焕钦, 秦飞虎, 等. 用于颗粒物监测仪的小型法拉第杯的优化设计 [J]. *仪表技术与传感器*, 2018(2): 48–51+57.
- CAO Yangyang, WANG Huanqin, QIN Feihu, et al. Optimum design of small faraday cup for ultrafine particle monitor[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2018(2) : 48–51+57.
- [26] AHLAWAT A, SEEGER S, GOTTSCHALK M, et al. Observation of systematic deviations between Faraday cup aerosol electrometers for varying particle sizes and flow rates—Results of the AEROMET FCAE workshop[J]. *Metrologia*, 2021, 58(5): 055006.