

激光与光电子学进展

高稳定性光散射法颗粒物浓度传感器

侯春彩*, 贾日波, 徐亚蛟, 杨申昊, 赵韦静, 杨凌, 李鑫

中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027

摘要 我国针对环境空气颗粒物污染治理的政策日益严格。为解决工业现场长期测量稳定性的问题, 国内外研究者提出采用鞘流结构来制约颗粒物重叠和光腔污染的方案。从光腔结构、质量浓度计算方法和气路结构三方面入手, 对传感器的测量精度和抗污染性进行优化。基于光学追迹, 对光腔结构进行模拟, 以实现散射光的最佳收集效果; 通过修正特征参数, 降低传感器的测量误差; 设计简易内循环模式的鞘气保护结构, 降低由颗粒重叠导致的测量误差并对光腔进行保护; 研究上述结构下气体流速对总尘浓度(TSP)、PM₁₀和PM_{2.5}检测结果的影响, 设置最优的气泵流量。实验结果表明, 得到了高稳定性的气溶胶浓度传感器, 可同时测量TSP、PM₁₀和PM_{2.5}的质量浓度, 测量误差小于±5%。

关键词 传感器; 光散射法; 颗粒物浓度传感器; 稳定性; 鞘气保护; 质量浓度计算方法

中图分类号 X831

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2128002

High Stable Light Scattering Based Particulate Matter Concentration Sensors

Hou Chuncai*, Jia Ribao, Xu Yajiao, Yang Shenhao, Zhao Weijing,
Yang Ling, Li Xin

The 718 Research Institute of CSIC, Handan, Hebei 056027, China

Abstract The policy for controlling air particulate matter pollution is becoming increasingly stringent. To address the issue of measurement stability, researchers proposed the sheath flow structure used to limit particle overlap and the pollution of light cavity. To achieve high stability concentration measurement, this paper optimizes the measurement accuracy and antipollution performance of the sensor from three perspectives: optical cavity structure, mass concentration calculation method, and gas path structure. The optical cavity structure is simulated using optical tracing to achieve the best-scattered light collection effect. Modifying the sensor's characteristic parameters reduces its measurement error. The simple sheath gas protection structure with internal circulation mode is designed to reduce measurement error caused by particle overlap and protect the optical cavity. The effect of gas flow rate on the detection results of total dust concentration (TSP), PM₁₀, and PM_{2.5} is studied, and the optimal air pump flow rate is set. The experimental results show that the aerosol concentration sensor simultaneously achieves a high stable mass concentration measurement of TSP, PM₁₀, and PM_{2.5}, and the measurement error is < ±5%.

Key words sensors; light scattering; particulate matter concentration sensor; stability; sheath gas protection; mass concentration calculation method

OCIS codes 010.1120; 120.1880; 230.0040

收稿日期: 2021-04-29; 修回日期: 2021-05-07; 录用日期: 2021-06-10

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFF0301602-8)、邯郸市科技计划项目(17131050291)

通信作者: houchuncai@163.com

1 引言

气溶胶颗粒物产生于工业生产、车辆尾气、临床应用等各种各样的环境,一直是影响产品质量、环境气候以及人体健康的重要问题之一^[1-2]。近年来,随着科技高速发展,人们对生活质量的要求越来越高,各省市对空气中颗粒物的监测和治理越来越重视。多地政府要求定期停止土石方工程、黄标车禁行等。2015年,石家庄为应对严峻的空气质量问题正式颁布扬尘污染综合整治工作考核办法;2018年,上海市启动2018—2020年环境保护和建设三年行动计划实施意见;2020年,济南市持续开展扬尘污染综合整治,制定颁布了整治攻坚工作方案。可见,我国针对环境空气颗粒物污染治理的政策日益严格。

目前颗粒物浓度检测方法主要有微振荡天平法、 β 射线法、称重法和光散射法^[3-4]。光散射法利用颗粒物对光产生散射的原理进行检测,具有检测速度快、可实时监测、测量方便、成本低等优点,已经成为主要的颗粒物浓度监测手段^[5-7]。光散射法分为浊度法和颗粒计数法^[8]:浊度法是根据检测腔内所有粒子散射光强度与颗粒浓度之间的关系进行检测,灵敏度低,并且需要物理切割器预先滤除大于 $PM_{2.5}$ 或者 PM_{10} 以上的粒子,才能实现 $PM_{2.5}$ 或者 PM_{10} 的测量;光学颗粒计数法是根据单个粒子的散射光大小测量粒子的粒径,从而求出气体采样体积内颗粒物的大小和数量,可同时测量出大气中TSP、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 的浓度。

测量稳定性是气溶胶浓度传感器的重要指标,粉尘浓度检定规程^[9]中规定测量范围内的示值误差不应超过 $\pm 20\%$ 。但是,在高颗粒物浓度的恶劣环境下,传感器的测量稳定性很容易受到影响。因为空气中颗粒进入光腔后很容易在光敏区发生重叠,故传感器的检测精度产生较大误差;另外,高浓度颗粒物环境下大量颗粒物进入腔室并很快沉积,从而污染内部光学元件,使传感器的稳定性快速下降,其寿命大大缩短。这些因素始终影响着传感器在工业现场的长时间稳定运行^[10-12]。

为解决这一问题,借鉴液态物质测量原理,鞘流技术逐渐被用于气体环境的颗粒物浓度检测。美国TSI公司在其专利^[13-14]中介绍了气体鞘流器,但只在理论上介绍了鞘流器的作用,没有详细描述相关参数和结构。韩国科学技术院的Hyun团队^[15]

从理论上对气体鞘流器的参数进行了研究,还没有应用到具体实例中。在国内,中科院大气物理研究所的发明专利^[16]公开了一种基于鞘气绕流原理的气溶胶粒子束喷射装置,利用该装置降低了测量误差。中科院上海光学精密机械研究所的鲁晨阳等^[17]基于仿真分析设计了鞘流器,并在外循环气路中验证了该鞘流器对气流的压缩效果,但是此气鞘保护系统独立于进样气路,需要两个气泵提供系统动力,不适用于高集成度、低成本的气溶胶传感器。随后,江苏天瑞公司的刘召贵等^[18]设计了一种单泵支持的内循环鞘流系统,该系统对称设置多个鞘气口,并通过压差控制装置控制压差解决了鞘气流量不稳的问题。

在此基础上,本文提出一种高稳定性气溶胶传感器,并将其应用于空气中TSP、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度的测量。通过修正特征参数,降低了传感器的测量误差;设计简易的内循环模式鞘气保护结构,研究此结构对测量误差的影响,以及此结构下气体流速对TSP、 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 检测结果的影响,以期得到高稳定性的气溶胶浓度传感器。

2 基本原理

2.1 粒子计数器测量系统

图1是粒子计数器测量系统示意图,它由光学传感模块和信号采集处理模块两部分组成。在光学传感器中,单个颗粒通过光敏区时散射入射光,光电探测器接收散射光并将其转换成电信号,信号经前置放大、多通道计数后,我们可得颗粒物的电压脉冲信号分布。扣除测量系统的本底噪声,得到的电压脉冲个数即颗粒个数,电压脉冲幅度则包含颗粒尺寸信息。电压脉冲的幅度与脉冲数目之间的关系称为颗粒物的信号幅度分布,用于计算颗粒物的质量浓度。

2.2 颗粒物质量浓度计算方法

颗粒物的质量浓度是指单位体积气体中所有颗粒的总质量。在利用粒子计数器测量的信号幅度分布计算颗粒物的质量浓度中,基于Mie散射理论,散射光的电压脉冲信号个数为被测颗粒的个数信息,脉冲信号的幅度分布包含了颗粒物的尺寸信息。颗粒群的平均质量^[8]为

$$M(D) = \frac{\pi}{6} \rho D_F^3, \quad (1)$$

其中 D_F 为等效直径, α 为与颗粒形貌相关的参数。颗粒等效直径与脉冲信号电压 U 一一对应,则有

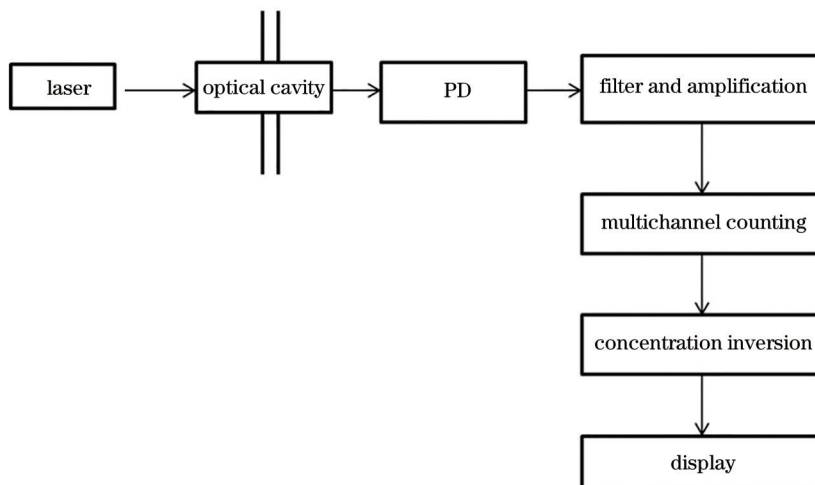


图1 粒子计数器测量系统

Fig. 1 Measuring system of particle counter

$$M(D) = A \frac{\pi}{6} \rho U^\eta, \quad (2)$$

其中 A 为常数, η 为待标定参数。该测量系统中的电压脉冲信号幅度分布是离散的, 所以质量浓度的算法公式为^[8]

$$C = k \sum_{i=1}^q N(U_i) U_i^\eta, \quad (3)$$

其中, q 为电压脉冲信号的通道数, $N(U_i)$ 为离散电压脉冲信号幅度分布, k 为比例系数。特征参数 k 和 η 可通过标定得到。

3 系统装置

3.1 光电传感设计

光电传感模块设计如图 2(a) 所示, 650 nm 激光经聚焦镜在光敏区聚焦, 当颗粒通过光敏区时入射的激光被散射, 只有很小一部分光直接被探测器接收。为提高散射光利用率, 在 90° 采光角方向放置一块球面反射镜用于收集散射光, 并使散射光会聚到探测器表面。由于散射光强度很弱, 反射镜和探测器之间的微小距离偏差即可对信号强度和集中度产生影响, 故设计过程中须考虑光腔结构加工误差。为得到二者之间的距离范围, 本研究对该光学腔模块进行了光学模拟。反射镜口径 $\Phi = 12.5$ mm, 焦距 $f = 5$ mm, 半径 $R = 10$ mm, 为增大散射光收集角度, 设计采光立体角 $\beta = 50^\circ$, 反射镜内顶点距离光敏区中心的距离为 7.4 mm。光学追迹模拟图如图 2(b) 所示, 光敏区产生的部分散射光被处于 90° 位置的反射镜收集, 再会聚到探测器表面。在反射镜与光敏区距离为 7.4 mm 时, 前后移动探测器的位

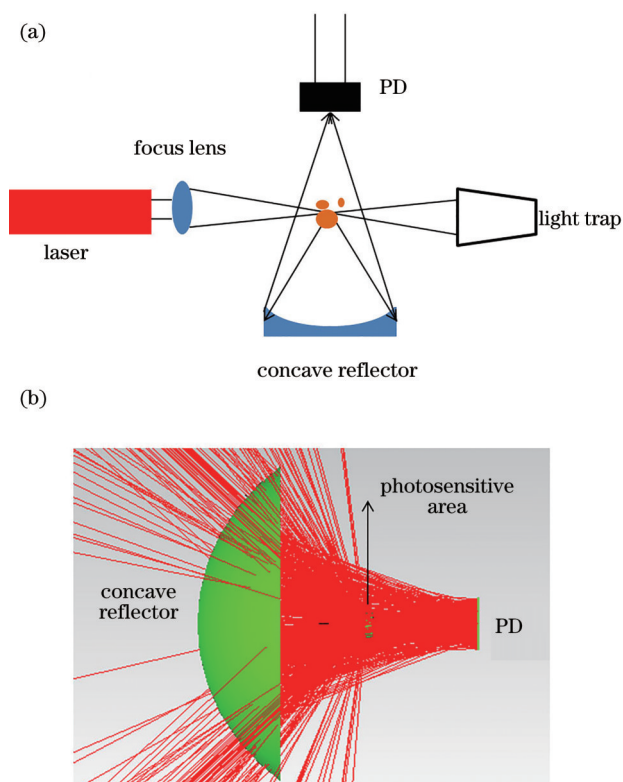


图2 光腔结构图。(a)结构设计图;(b)结构模拟图

Fig. 2 Structure diagram of light cavity. (a) Structural design diagram; (b) structural simulation diagram

置, 观察探测器接收面的散射光强度和聚集度, 如图 3 所示。当探测器与反射镜之间的距离在 13.0~14.5 mm 范围内时, 探测器接收的散射光强度最强, 且位置较集中; 在此范围之外, 探测器接收的散射光强度逐渐变弱, 且光束位置愈加分散。以上仿真结果有助于光学腔结构设计达到最佳效果。

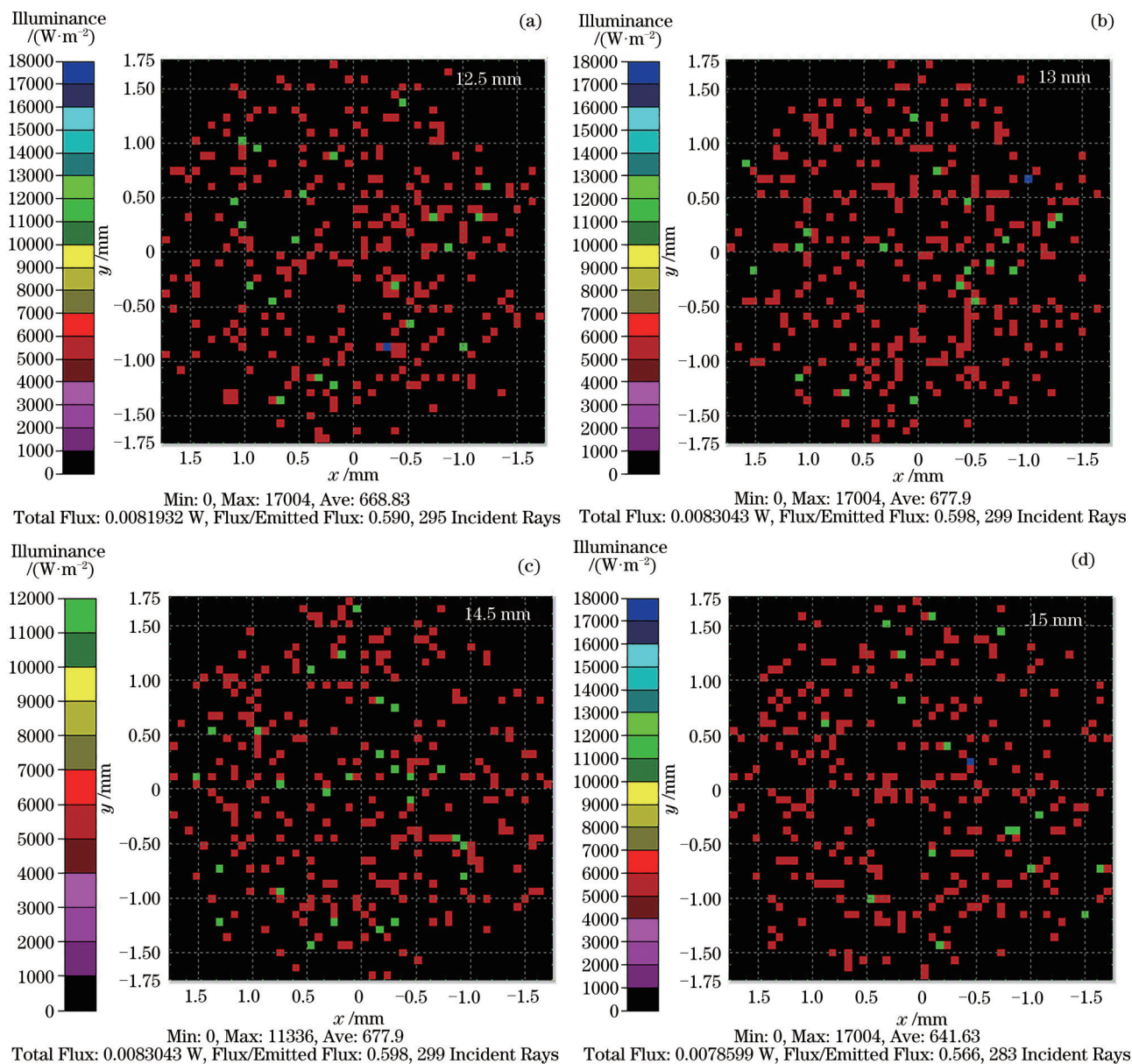


图 3 距反射镜不同距离时,探测器光敏面的照度分布图。(a) 12.5 mm;(b) 13.0 mm;(c) 14.5 mm;(d) 15.0 mm

Fig. 3 Illuminance distribution maps of photosurface of detector at different distances from concave reflector. (a) 12.5 mm; (b) 13.0 mm; (c) 14.5 mm; (d) 15.0 mm

3.2 气鞘结构设计

不同于文献中的外循环鞘气结构^[17],考虑到传感模块的实用性,本研究采用内循环模式结构,即用微型气泵提供样气和鞘气的动力,结构示意图如图 4 所示。含有颗粒物的样气由进气口进入光腔,在光敏区与激光发生散射后由光腔的出气口流出,再经由过滤器 1 进行粗过滤,对气泵进行保护。经过气泵的气流分为两路:一路与外界大气连通,排出过滤后的样气;另一路通过过滤器 2 形成鞘气,再连通鞘气接口进入光腔,形成样气保护气。其中,过滤器 2 能够过滤 0.1 μm 以上

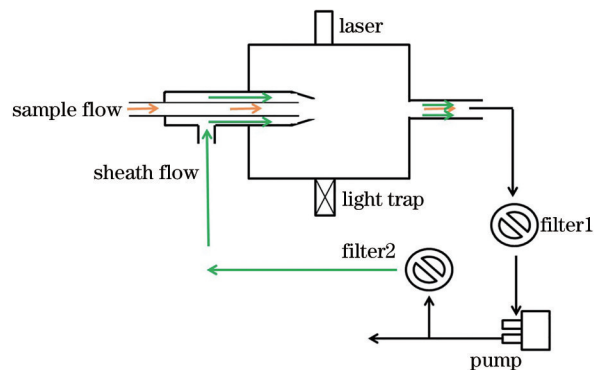


图 4 传感器气路循环结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of sensor's pneumatic loop

的粒子,确保鞘气是干净的气流,不会对样气中的颗粒物浓度产生影响。不同于文献[18]中采用压差控制装置解决气流不稳的方式,本研究采用特定滤芯材质的高精度过滤器,通过过滤器的阻力平衡进出气压差,解决了鞘流流量不稳的问题。同时,在有限的气泵流速下,确保了进气口有较大的流量。

表1 常见管道的临界雷诺数

Table 1 Critical Reynolds number of common pipelines

Pipe shape	Smooth metal tube	Rubber hose	Smooth concentric ring slit	Smooth eccentric ring slit	Concentric ring slit with a ring groove	Eccentric ring slit with a ring groove	Slide valve
Re	2000-2300	1600-2000	1100	1000	700	400	260

本文中的鞘气结构由一组光滑金属同心套管组成,结构示意图如图5所示。内部管径很小,为样气通道;外部空心管壳直径较大,为保护气通道;喷嘴倾斜一定角度。结合样机腔室结构尺寸和机械加工工艺,设计鞘气结构内壁厚为 s 为 0.5 mm,样气当量直径 d_1 为 1 mm,进气管道直径 d_2 为 4 mm。

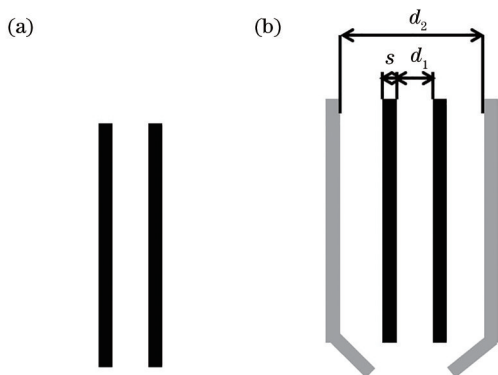


图5 气嘴结构。(a)普通气嘴;(b)鞘气结构气嘴
Fig. 5 Structure diagrams of gas jet. (a) General jet; (b) sheath flow jet

若满足层流条件,则雷诺系数需满足以下条件:

$$Re_1 = \frac{\rho_0 u_0 D_1}{\mu_0} = \frac{4\rho_0 Q_1}{\mu_0 \pi d_1} < 2300, \quad (5)$$

$$Re_2 = \frac{\rho_0 u_0 D_2}{\mu_0} = \frac{4\rho_0 Q_2}{\mu_0 \pi (d_2 + d_1 + 2s)} < 1100, \quad (6)$$

其中, Q_1 为样气流量, Q_2 为鞘气流量。由以上参数得到气路流速条件: 样气流速 $Q_1 < 1.58$ L/min, 鞘气流速 $Q_2 < 4.51$ L/min。

4 实验结果分析

本实验首先采用无鞘气保护结构系统进行颗粒物浓度测试,通过实验测试和修正得到适合本系统

气体在鞘流器中的流动必须是层流^[16],雷诺数 Re 为主要表征参数,表达式为

$$Re = \frac{\rho_0 u_0 D_0}{\mu_0} = \frac{4\rho_0 Q_0}{\mu_0 \pi D_0}, \quad (4)$$

式中 ρ_0 为空气密度, u_0 为气流的平均速度, Q_0 为流量大小, μ_0 为空气动力黏度, D_0 为当量直径。层流必须满足的条件^[16]如表1所示。

的质量浓度特征参数,以保证系统的正常运行和浓度计算。在此基础上,加入鞘气保护结构,并验证此结构对减小测量误差的作用;研究不同气泵抽速度下,传感器的测量稳定性,为设置气泵转速参数提供实验依据。测试过程中,采用气溶胶浓度发生器对聚苯乙烯小球溶液或烟尘进行雾化,雾化的气由载气带入密封箱,通过气流量控制气溶胶浓度。

4.1 质量浓度标定方法优化

利用本文样机对烟尘颗粒物进行测量,记录本装置电压脉冲信号幅度分布 $N(U_i)$ 和参考仪器 (TSI 8533) 的质量浓度 C 。在信号幅度分布统计过程中,将系统最大输出电压平均分为 8 个通道,分别为 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 V。经参考仪器标定,得到特征参数 $\eta = 1.5$ 。利用此特征参数和 8 个通道值,计算出质量浓度。图6为在 $0 \sim 1800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的质量浓度下,样机和参考仪器的总尘浓度 (TSP) 测量结果。在整个测量过程中,样机测量结果波动程度大,且颗粒物浓度越大,样机表现出的稳定性越低。

由质量浓度计算方法可知,参数 η 作为电压的指

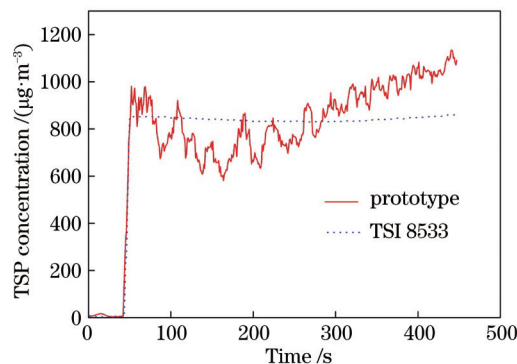


图6 样机和 TSI 8533 参考仪器的 TSP 测量结果
Fig. 6 TSP concentrations of prototype and TSI 8533

数对浓度值有很大的影响,不合适的 η 值会导致浓度结果过大或过小,使大颗粒环境产生较大电压,测量结果的稳定性差。因此,需要对 η 值进行修正。空气体积较小的颗粒占颗粒物的大多数,大颗粒因易沉降,含量较低,信号幅度分布中小幅度信号占据多数,大幅度信号较少。所以,在修正过程中,为使小信号的提取量增加,设置电压间隔为不等值且随电压的增大而电压间隔逐渐增大,分别为 0.2377, 0.3196, 0.4295, 0.5772, 0.7757, 1.0425, 1.4010, 1.9515 V。经同样方法标定,修正后的特征参数 η 为 0.46。

采用以上优化后的参数,样机和参考仪器在 0~4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 浓度范围内对 TSP 进行测试,结果如图 7 所示。优化后样机测试结果与参考仪器的测试结果一致性很高,测量精度和稳定性都得到了很大提升。

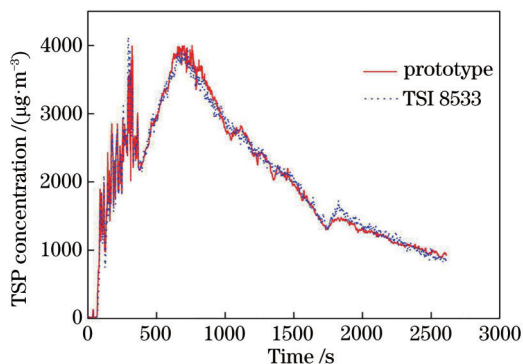


图 7 质量浓度标定方法优化后样机和参考仪器的 TSP 测量结果

Fig. 7 TSP concentrations of prototype and TSI 8533 after inversion parameters optimized

4.2 鞘气结构效果分析

光敏感区的样气截面直径越小,颗粒越不容易出现重叠,对应的粒径分布误差越小。本研究采用间接测量法来验证带有鞘气结构气嘴的效果,参照粒子计数器性能试验方法^[19]和文献^[16],利用粒径分布误差进行间接判定。在本文设计的样机结构中,分别安装如图 5 所示的直径为 1 mm 的普通气嘴及带有鞘气结构气嘴,对不同浓度粒径为 0.6 μm 的聚苯乙烯颗粒进行粒径分布测量,计算并比较 1 μm 以上粒径的数目在 0.6 μm 以上粒径的数目中所占的比例,以此来评价两个气嘴的测量误差。

在不同 TSP 浓度 (300、600、900、1200、1500、1800、2100、2500、2900 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 下进行电压分布测试,其中 $N_{0.6}$ 表示 0.6 μm 粒径档之上的颗粒数目, $N_{1.0}$ 表示 1 μm 粒径档之上的颗粒数目, $N_{1.0}/N_{0.6}$ 表示 1 μm 以上粒径的数目在 0.6 μm 以上粒径的数目中

所占的比例,结果如图 8 所示。由图可知,低浓度下两种气嘴 1 μm 以上粒径档数目占 0.6 μm 以上粒径档数目比值保持相对稳定。当 TSP 浓度上升到 4000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,普通气嘴结构中 0.6 μm 颗粒严重重叠,1 μm 以上粒子浓度快速上升,达到饱和测量浓度。当 TSP 浓度超过 10000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,鞘气结构的 $N_{1.0}/N_{0.6}$ 比值上升迅速,开始达到饱和测量浓度。从以上结果可见,本文中鞘气结构系统具有较高的分辨能力,可对 0~10 mg/m^3 TSP 浓度范围内的颗粒物进行高精度测量。

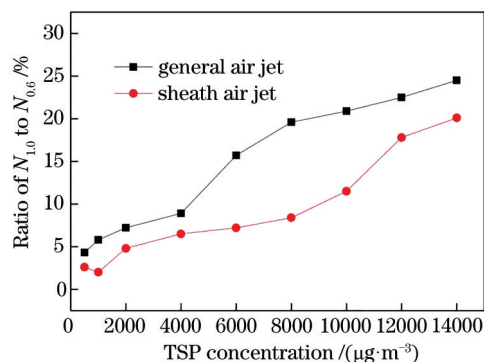


图 8 两种气嘴性能测试结果

Fig. 8 Performance test results of the two kinds of jets

4.3 不同泵抽速度下的稳定性对比

在满足层流条件下,研究不同气体流速对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 三者浓度测量结果产生的影响,以完善鞘气气路系统的最优化设计,这对确保系统的稳定性具有重要意义。

本装置中通过控制气泵电压来控制气泵转速,可以达到控制气体流速的目的。使用微机电系统气体流量计测量气体流速,量程范围为 0~3 L/min,分辨率为 0.010 L/min。在不同进气流速下对样机的 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 进行测量,结果如图 9 所示。当颗粒物浓度和进气流速较小时,气体流速的变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 三者的测量值影响较小;当颗粒物浓度逐渐增加时,气体流速变化对 PM_{10} 和 TSP 的影响开始增大。气体流速小于 300 mL/min 时,三者浓度值随气体流速的增加呈现上升趋势,但变化不明显;气体流速从 300 mL/min 上升至 450 mL/min 过程中,三者随流速的增加变化明显,可见在此流速范围内流速波动引起的浓度波动较大,不利于系统的稳定;流速上升到 600 mL/min 过程中,流速变化对三者浓度值影响均不大。以上结果表明:气体流速对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 的测量是有影响的,颗粒物浓度越高影响越明显,主要原因是:颗粒物浓度和气体流

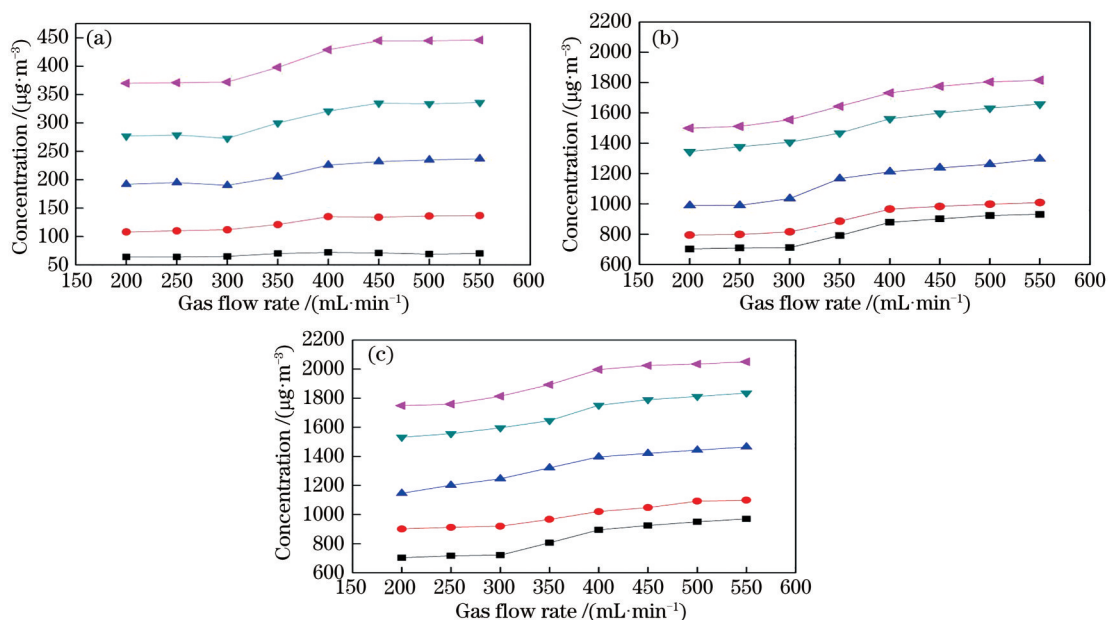


图9 进气流速对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和TSP测试结果的影响。(a) $\text{PM}_{2.5}$; (b) PM_{10} ; (c) TSP

Fig. 9 Influence of gas flow rate on the measurement of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and TSP concentration. (a) $\text{PM}_{2.5}$; (b) PM_{10} ; (c) TSP

速较高时,气体中大量粒子相互吸附,导致颗粒粒径增大。在本文中,考虑到带有气鞘结构的循环气路和微型气泵的成本,气体流速控制在 $500\text{ mL}/\text{min}$ 时,系统测试得到的浓度值比较稳定,满足层流条件。

4.4 整体性能

综上,本研究对光腔的最佳结构进行了模拟,对质量浓度标定方法进行了优化,设计了内循环鞘气气路,以缓解光腔污染,同时研究了气嘴结构和进气流

速对测量结果稳定性的影响。最终,设计光腔中反射镜与光敏区距离为 7.4 mm ,反射镜与探测器距离为 14 mm (此时容许 $\pm 1\text{ mm}$ 的加工误差,降低了对加工技术的要求);质量浓度计算公式中关键参数 η 为 0.46 ;采用内循环鞘气气路结构,进气气嘴设为同心套管结构;进气口进气流速为 $500\text{ mL}/\text{min}$ 。基于以上参数,在一定浓度范围内同时对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和TSP进行测量,并与参考仪器对标,结果如图10所

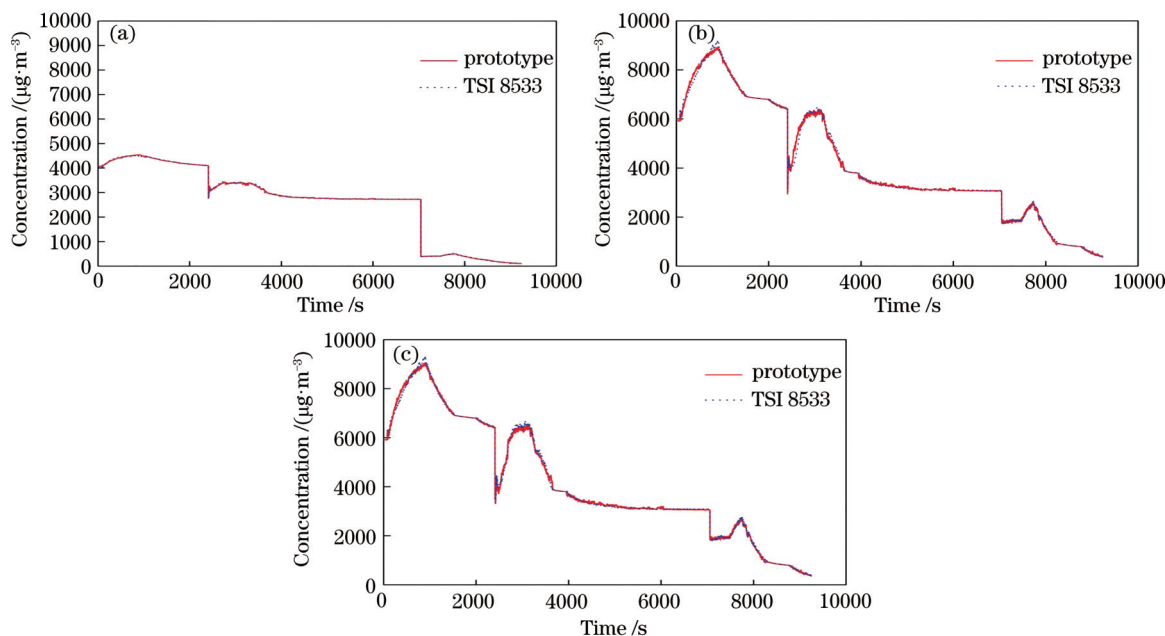


图10 不同浓度下样机和参考仪器 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 和TSP测试结果。(a) $\text{PM}_{2.5}$; (b) PM_{10} ; (c) TSP

Fig. 10 $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} and TSP concentration measurement of prototype and TSI 8533 at different concentrations.

(a) $\text{PM}_{2.5}$; (b) PM_{10} ; (c) TSP

示。相较于参考仪器,样机无需安装外部切割器即可实现 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 的同时测量,并且具有高稳定性,测量误差在 $\pm 5\%$ 之内。

5 结 论

为实现高稳定性颗粒物浓度测量,从光腔结构、质量浓度标定方法和气路结构三方面入手,对传感器的测量精度和抗污染性进行了研究。采用 Tracepro 对光腔结构进行了模拟,反射镜与探测器距离在 13~14.5 mm 范围内可避免加工误差带来的影响,能够保证信号强度。通过调整电压间隔、优化质量浓度特征系数,可以得到关键参数 η 为 0.46。设计了简易内循环鞘气气路结构,通过采用高阻滤芯过滤器平衡进出口气压以稳定气路,该气路降低了高浓度颗粒物的测量误差,并且对光腔污染具有较好的缓解作用。同时,测量内循环鞘气系统不同进气流速下样机的浓度值,结果表明进气流速为 500 mL/min 时测量结果比较稳定。基于以上三方面优化,样机可实现 0~10 mg/m^3 范围内 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 和 TSP 的高稳定性测量,测量误差低于 $\pm 5\%$ 。

参 考 文 献

- [1] Chen P L, Wang T J, Xie X D, et al. Source apportionment of fine particles based on combined numerical model and receptor model[J]. Chinese Science Bulletin, 2018, 63(18): 1829-1838.
陈璞珑, 王体健, 谢晓栋, 等. 基于数值模式的细颗粒物来源解析[J]. 科学通报, 2018, 63(18): 1829-1838.
- [2] Lubick N. Breathing less easily with ultrafine particles[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(13): 4615-4617.
- [3] Wang W Y, Liu J G, Zhao X, et al. Study of optical counting and coincidence correction method for particle with small flow and high concentration[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(6): 0629001.
王文誉, 刘建国, 赵欣, 等. 小流量高浓度颗粒物光学计数及重叠校正方法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(6): 0629001.
- [4] Che F, Zhang G N, Gu Y Y, et al. Study on domestic and foreign fugitive emission standards of particulate matters for industrial sources[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, 9(6): 34-40.
车飞, 张国宁, 顾国悦, 等. 国内外工业源颗粒物无组织排放控制标准研究[J]. 中国环境管理, 2017, 9(6): 34-40.
- [5] Chu C X, Zhou H G, Liu J, et al. Light scattering characteristic simulation of nonspherical particles for cloud particle probe[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0529003.
储晨曦, 周红根, 刘娟, 等. 用于云粒子探测器的非球形粒子的光散射特性模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0529003.
- [6] Zhao T F, Duan Y Z, Li X S, et al. Effect of soot aggregates on light scattering in ultraviolet communication channels[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(15): 1529001.
赵太飞, 段钰桢, 李星善, 等. 煤烟凝聚粒子对紫外光散射信道的影响研究[J]. 光学学报, 2020, 40(15): 1529001.
- [7] Gu F. The theoretical model and application for aerosol mass concentration by the single particle scattering method[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.
顾芳. 单粒子光散射法测量悬浮颗粒物质量浓度的理论模型及应用[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [8] Gu F, Yang J, Bian B M, et al. Extraction of the signal amplitude distribution of aerosol and application of information entropy[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(11): 2341-2345.
顾芳, 杨娟, 卞保民, 等. 悬浮颗粒物信号幅度分布提取及信息熵的应用[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(11): 2341-2345.
- [9] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Metrological Verification Standard of the People's Republic of China: Verification regulation of dust concentration measuring instruments. JJG 846—2015[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing, 2015.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 粉尘浓度测量仪检定规程 JJG 846—2015[S]. 北京: 中国质检出版社, 2015.
- [10] Deng K Y, Lei L, Wu Q H, et al. High-precision aerosol particle size concentration measurement realized by one-dimensional linear array photoelectric sensor[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2020, 31(2): 136-141.
邓凯元, 雷亮, 伍庆华, 等. 基于线阵光电传感器的高精度气溶胶粒径浓度测量[J]. 光电子·激光, 2020, 31(2): 136-141.
- [11] Zhang J H, Wei Y Y, Gu F, et al. Research on signal processing of high-precision light-scattering measurement systems for aerosol mass concentrations

- [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2016, 29(4): 536-544.
张加宏, 韦圆圆, 顾芳, 等. 高精度光散射气溶胶质量浓度测量系统的信号处理研究[J]. 传感技术学报, 2016, 29(4): 536-544.
- [12] Zhang P, Liu L L, Li C L, et al. Design of inhalable particulate matters measurement based on the Mie scattering extinction[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(8): 2298-2302.
张棚, 刘路路, 李传亮, 等. 基于 Mie 散射的可吸入颗粒检测仪的设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(8): 2298-2302.
- [13] Hairston P P, Dorman F D, Sem G J, et al. Apparatus for measuring particle sizes and velocities: US5561515[P]. 1996-10-01.
- [14] Ho J Y W. Fluorescent biological particle detection system: US5701012[P]. 1997-12-23.
- [15] Hyun W K, Choi D Y, Lee K H, et al. Effects of sheath gas geometry on aerosol jet patterning and coating[C]//International Conference on Flexible and Printed Electronics, November 11-13, 2009, Jeju Island, Korea. [S. l. : s. n.], 2009: 11-13.
- [16] Pan X L, Tian Y, Wang Z F. Aerosol particle beam injection device based on sheath gas streaming principle: CN110763611A[P]. 2020-02-07.
潘小乐, 田雨, 王自发. 一种基于鞘气绕流原理的气溶胶粒子束喷射装置: CN110763611A[P]. 2020-02-07.
- [17] Lu C Y, Zhang P, Wang G H, et al. Application of sheath flow technique in aerosol particle sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0104006.
鲁晨阳, 张佩, 王光辉, 等. 鞘流技术在气溶胶颗粒物光学传感器上的应用研究[J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0104006.
- [18] Liu Z G, Lu C Y, Luan X D, et al. Optical equivalent particle size spectrometer with internal circulation sheath flow structure: CN111366506A[P]. 2020-07-03.
刘召贵, 鲁晨阳, 栾旭东, 等. 一种带有内循环鞘流结构的光学等效粒径谱仪: CN111366506A[P]. 2020-07-03.
- [19] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: methods for testing the performance of airborne particle counter. GB/T 6167—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 尘埃粒子计数器性能试验方法 GB/T 6167—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.