

文章编号: 1001-3806(2016)01-0099-04

前向散射粒径探测器测量不确定度的校准

赵琦¹, 杨洁², 蒋泽伟¹, 孟庆安¹, 樊红英¹, 李轶国¹, 耿旭³

(1. 西南技术物理研究所, 成都 610064; 2. 四川大学电子信息学院, 成都 610064; 3. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 南京 210094)

摘要: 为了对粒径探测器的测量不确定度进行校准, 基于衍射原理方法, 研制了一套小孔圆盘校准装置。该方法对米氏散射与夫琅禾费衍射的功率进行计算和模拟, 得到了衍射针孔孔径与气溶胶粒径转换的关系。通过该转换关系, 计算得到校准装置的参量, 并进行了理论分析和实验验证。通过实验将标准粒子的测量不确定度传递给云粒子粒径探测器, 再通过旋转针孔圆盘进行实验, 将测量不确定度传递给校准装置。取得了该校准装置的校准实验数据, 验证了理论分析的正确性。结果表明, 该校准装置效率高、校准方案的可行性好、校准范围大、测量离散性好、重复性高。这一结果对粒径探测器的校准技术研究是有帮助的。

关键词: 测量与计量; 测量不确定度; 校准装置; 前向散射式粒径探测器

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs. issn. 1001-3806. 2016. 01. 022

Calibration of measurement uncertainty of forward-scattering spectrometer probes

ZHAO Qi¹, YANG Jie², JIANG Zewei¹, MENG Qing'an¹, FAN Hongying¹, LI Yiguo¹, GENG Xu³

(1. Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China; 2. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 3. College of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: For the purpose of calibration of a forward-scattering spectrometer probe (FSSP), a pinhole-disc calibration apparatus was designed based on diffraction technology. After calculation and simulation of Mie scattering and Fraunhofer diffraction power, the conversion relationships between the pinhole diameter and aerosol particle size were gotten. Parameters of calibration apparatus were gained after calculation based on the conversion relationship. After theoretical analysis and experimental verification, measurement uncertainty of standard particles was delivered to cloud particle spectrometer probe. And then, after the experiment of rotating pinhole disc, measurement uncertainty was passed to the calibration apparatus. Experimental results of calibration apparatus verified theoretical analysis. The results show that calibration apparatus has feasible calibration scheme with high efficiency, large calibration range, good measurement discrete uniformity and good repeatability. The study is helpful for calibration technology of spectrometer probes.

Key words: measurement and metrology; measurement uncertainty; calibration device; forward-scattering spectrometer probe

引言

气溶胶的有关问题密切地联系着人们的日常生活、环境保护和工业生产等方方面面, 粒度则是描述气溶胶粒子的最基本参量^[1]。有多种原理用于测量颗粒粒径, 随之发展的粒径测试仪器也被广泛研究, 并且很多已经商用化^[2-3]。基于米氏散射理论的激光散射

测量仪器被广泛使用^[4-5], 其中前向散射光粒径探测器 (forward-scattering spectrometer probe, FSSP) 是测试气溶胶粒度的重要测量仪器之一, 其特点包括测量速度快、非接触被测颗粒、人工操作简易等^[6-9]。

但激光粒度仪的计量校准在国际国内的研究还比较空缺^[10]。国际上关于激光粒径探测法, 只对处理样品与操作仪器的具体方法做出了相应规定, 而国内尚未制定关于激光粒径探测器检测和校准的标准^[11]。通常使用的标定或校准方法是在仪器窗口前用压缩气瓶喷射标准粒子进行校准, 该方法具有一定的局限性, 如标准粒子价格昂贵、离散性大、重复性低、不可重复使用、标定过程繁琐等。曾有学者提出采用旋转圆盘针孔的方法作为前向散射式粒径探测器的新校准方

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61205016)

作者简介:赵琦(1985-), 工程师, 硕士, 主要研究高能激光在湍流大气中传输的理论、数值模拟和计算研究以及激光测量与应用。

E-mail: zhaooqi2156@163.com

收稿日期:2014-11-20; 收到修改稿日期:2015-01-17

法,但是对于其中很多细节问题并没有进行深入研究^[12-13]。

作者对采用旋转圆盘针孔方法对前向散射式粒径探测器的校准进行了研究。通过米氏散射理论及其相关算法以及该校准方法,对不同粒径的气溶胶散射光强角分布仿真分析,并建立了一套微米级针孔圆盘校准装置;通过与标准粒子校准方法进行比对实验,将粒子尺度传递到该装置,最后得到旋转圆盘的测量不确定度。

1 校准原理

前向散射式粒径探测器有多种形式,目前国际国内使用比较广泛的是分离式结构角散射法,通常包含激光发射部分、聚焦光学系统、散射光收集系统、探测电路等部分,如图 1 所示。

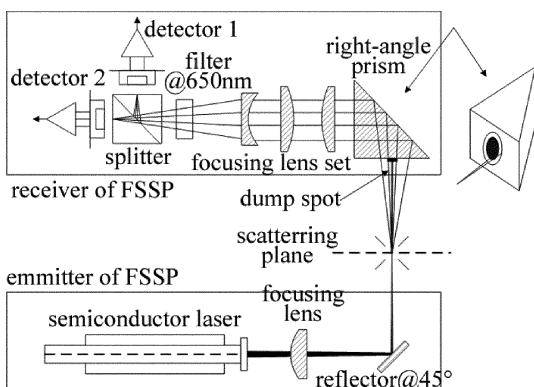


Fig. 1 Structure of FSSP

用于校准的针孔圆盘装置放置于粒子散射平面,主要包括两部分:圆盘工作部分和驱动控制盒。校准原理如图 2 所示。针孔圆盘上设计有多种小孔,校准方法原理是基于小孔夫琅和费衍射与球形粒子米氏散射的相互关系。根据经典的米氏散射理论,散射光强分布为^[14]:

$$I = I_1 + I_2 = \frac{I_0}{\pi^2 r^2} (i_1 \sin^2 \varphi + i_1 \cos^2 \varphi) \quad (1)$$

式中, I_1, I_2 分别为球形颗粒垂直和平行于散射面的光强, I_0 是入射光光强,波数 $k = 2\pi/\lambda$,波长为 λ , r 是半径, i_1 是各向同性的球形颗粒的无因次强度函数, φ 是

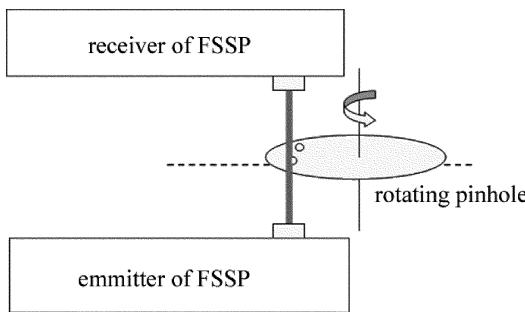


Fig. 2 Schematic diagram of calibrating apparatus

散射角度。

衍射光强分布 $A(x, y)$ 为^[15]:

$$A(x, y) = \left| \frac{A_1 \pi a^2}{\lambda z_0} \cdot \frac{2J(\text{kasin}\theta)}{\text{kasin}\theta} \right| \quad (2)$$

式中, $\text{sin}\theta = \frac{w}{z_0}$, w 是束腰, z_0 为传输距离, A_1 为振幅, θ 为衍射角度, a 为小孔口径, J 是贝塞尔函数。并将结果与小孔衍射得到的光强分布公式进行比对,得到校准值。

该粒径探测器采测量角度为 $4^\circ \sim 12^\circ$,利用(2)式代入计算,可以得到衍射角内的功率与微米级圆孔直径的变化关系。将探测范围内的针孔衍射与米氏散射能量对比,如图 3 所示。可见能量随孔径逐渐增大而波动性增加,周期性出现同一能量对应于多个针孔直径的情况。圆形针孔衍射的光功率远小于同样直径的颗粒米氏散射功率。因此,需要较大的针孔孔径与较小的水滴直径相对应。

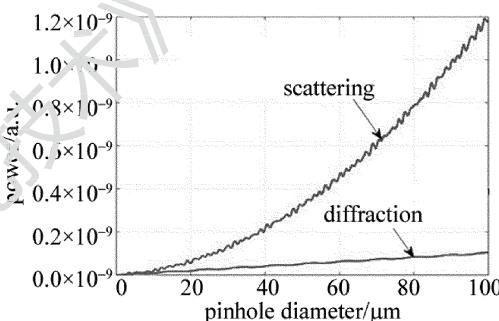


Fig. 3 Scattering and diffraction power at receiving angle of $4^\circ \sim 12^\circ$

令 $4^\circ \sim 12^\circ$ 立体角接收范围内,颗粒粒子的散射

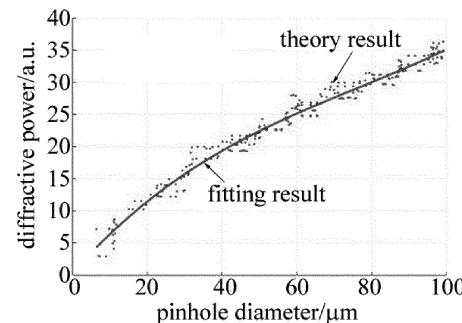


Fig. 4 Diffraction power and pinhole diameter

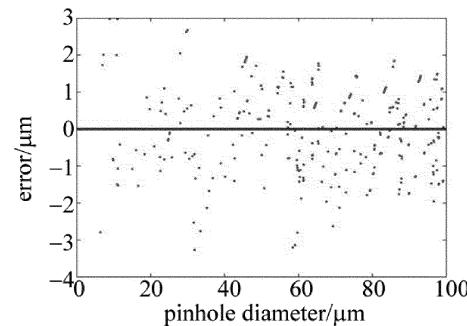


Fig. 5 Relationship between fitting error and pinhole diameter

能量与针孔衍射能量相同,数值计算过程中,取水滴直径对应能量的 0.01% 作为容差,进行数据之间采样可以得到离散的理论结果,进行结果拟合分析,结果如图 4 所示。做出该拟合曲线相对于离散理论结果的误差分布情况,如图 5 所示。可得拟合引入最大误差约为 $3.3\mu\text{m}$,平均偏差为 $1.2\mu\text{m}$ 。

对 4 种常用的接收角度范围,通过计算可以得到在相同能量下散射粒子大小和衍射孔径之间的关系,如图 6 所示。由图 6 可知,衍射针孔孔径与等效散射颗粒粒径变化趋势大致相同。接收角度范围越大,同一孔径对应的等效颗粒粒径越小,说明该方法在各种接收角度下均有良好的一致性。

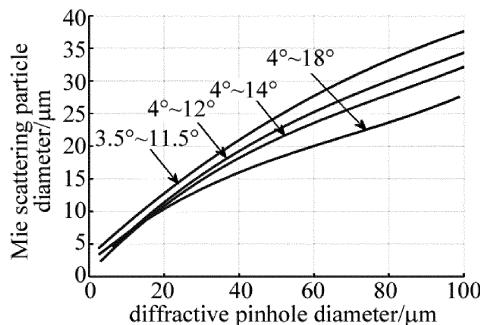


Fig. 6 Relationship between diffractive pinhole diameter and Mie scattering particle diameter

2 校准实验

首先用粒子探测器对标准粒子进行测量,如图 7 所示。采用尺度为 $20\mu\text{m}, 30\mu\text{m}, 40\mu\text{m}, 50\mu\text{m}$ 的杜克标准粒子。该标准粒子具有单一的粒径分布并通过严格的美国国家标准与技术研究院可溯源测量,其给定的测量不确定度为 $\mu_1 = \pm 2\mu\text{m}$ 。

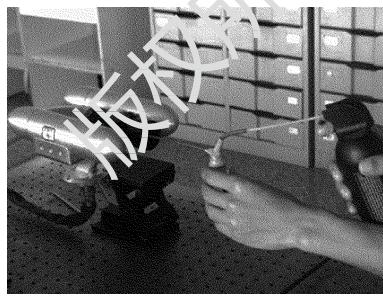


Fig. 7 Picture of measuring standard particle with FSSP

测量得到平均偏差为 $\mu_{21} = 4\mu\text{m}$, 平均离散度为 $\mu_{22} = 2.2\mu\text{m}$, 可以得到探测器的测量不确定度为:

$$\mu_2 = \sqrt{\mu_1 + \mu_{21}^2 + \mu_{22}^2} = 4.98\mu\text{m} \quad (3)$$

将小孔放置于直流电机旋转的圆盘上,整个装置固定于 3 维移动平台上,则小孔的位置可以精密调整。置于粒径探测器发射窗口与接收窗口之间,如图 2 所示。调节装置上的直流电机以控制圆盘旋转速度大

小,控制转速为 $20^\circ/\text{s}$ 。分别使用 $17\mu\text{m}, 25\mu\text{m}, 33\mu\text{m}, 70\mu\text{m}, 95\mu\text{m}$ 孔径针孔的圆盘进行实验,其孔径尺寸由显微镜测量,测量偏差为 $\pm 1\mu\text{m}$ 。

由实验结果可知,相对标准粒子测量结果,使用单一旋转针孔,测试图显示粒径谱分布较窄,测量离散性好。

将装有孔径 $70\mu\text{m}$ 圆盘以接收窗口为起点,沿光轴方向水平移动,得到各个位移量上的测量结果,每组重复测量 10 次,计算出测量平均值。实验数据处理结果如图 8 所示,图中线段表示实验测量结果区间。由实验结果可以得到,前向散射式粒径探测器光学系统景深位于距离接收窗口的 7.5mm 处,误差棒最短,景深附近的数据不确定度最小,并且测试结果关于景深位置对称分布。这是由前向散射式粒径探测器的质量控制部分与探测部分的设计结构^[13] 决定的。由此引入的测量不确定度 $\mu_3 = \pm 1.7\mu\text{m}$ 。

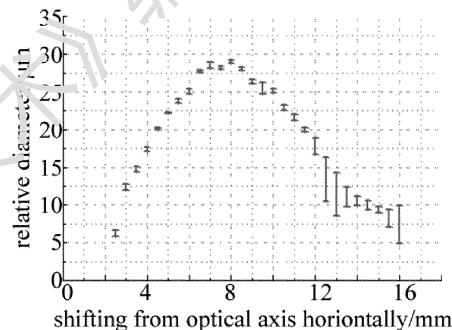


Fig. 8 Measurement result with pinhole diameter of $70\mu\text{m}$ when shifting from optical axis horizontally/mm

将装有孔径 $70\mu\text{m}$ 圆盘以接收窗口为起点,沿垂直于光轴方向移动,逐渐调节水平移动平台,得到各个位移量上的测量结果,每组重复测量 10 次,计算出测量平均值。实验结果如图 9 所示。

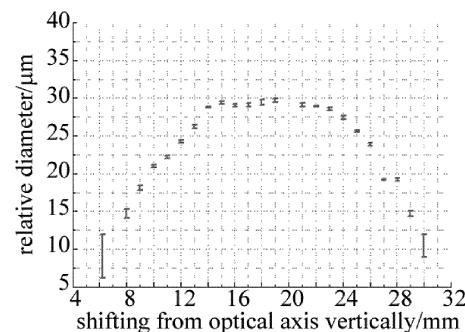


Fig. 9 Measurement result with pinhole diameter of $70\mu\text{m}$ when shifting from optical axis vertically/mm

光斑直径大于微米级孔径,针孔横向移动过程中,逐渐切割采样处焦斑。由于光强分布不均匀,米氏散射强度发生变化,图 9 中 $15\text{mm} \sim 22\text{mm}$ 区域,对于针孔完全处于光斑,数据平均值有较小的波动,表明输出光斑不是严格的均匀光,由此引入的测量不确定度

$\mu_4 = \pm 1.2 \mu\text{m}$ 。

分别使用装有 $17\mu\text{m}, 25\mu\text{m}, 33\mu\text{m}, 70\mu\text{m}, 95\mu\text{m}$ 针孔的圆盘进行校准, 得到的实验结果如图 10 所示。测试小粒径时, 误差相对较大, 一方面源于孔径较小时孔径测量误差较大, 另一方面是信号噪声的影响。由于通过探测器的窗口的气溶胶粒子的运动速率与针孔的线速度难以保证完全一致, 参考文献[8]中曾指出, 穿过工作采样区间的粒子速率会对校准结果有影响。实验结果计算得到的标准偏差 $\mu_5 = \pm 3.8 \mu\text{m}$ 。

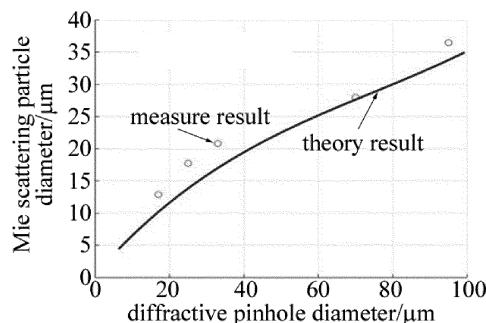


Fig. 10 Calibrating result with pinhole method

由以上的实验结果, 可以得到针孔圆盘用于校准的测量不确定度(当包含因子等于 1 时):

$$\mu = \sqrt{\mu_2^2 + \mu_3^2 + \mu_4^2 + \mu_5^2} = 6.6 \mu\text{m} \quad (4)$$

3 结 论

设计了一套适用校准粒径探测器的圆盘装置, 依据米氏散射理论模型, 结合前向散射式气溶胶粒径探测器参量, 对米氏散射与夫琅禾费衍射的功率进行计算和模拟, 得到了衍射针孔孔径与气溶胶粒径转换关系, 通过该转换关系设计了一套溯源实验方案。通过实验, 将标准粒子的测量不确定度传递给粒径探测器, 再通过孔径为 $17\mu\text{m}, 25\mu\text{m}, 33\mu\text{m}, 70\mu\text{m}, 95\mu\text{m}$ 的旋转针孔圆盘进行实验, 将测量不确定度传递给校准装置。实验验证与理论分析相吻合, 校准装置的测量不确定度优于 $6.6 \mu\text{m}$, 测量离散性好、重复性高。通过调节该针孔装置, 可以用于处理如测试前向散射光学系统景深以及光束分布的具体工作。

参 考 文 献

[1] PAUL A B, KLAUS W. Aerosol measurement principles, techni-

ques, and applications [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 59-99 (in Chinese).

- [2] ZHANG M. The light scattering techniques of ultrafine particle size measurement [D]. Tianjin: Tianjin University, 2005:2-33 (in Chinese).
- [3] WANG X Y, LIU Ch L. Application of independent model inverse algorithm in laser particle size measurement [J]. Laser Technology, 2011, 35(3):352-355 (in Chinese).
- [4] CAI Ch, HUANG Zh Q, CAO X L, et al. Application of laser back-scattering method in wet steam measurement [J]. Laser Technology, 2014, 38(3):398-401 (in Chinese).
- [5] ZHUANG Zh B, HUANG W, FU Ch, et al. Visibility detection of portable backward scattering lidar [J]. Laser Technology, 2015, 39(1): 119-123 (in Chinese).
- [6] LI X Zh, XIE K, HUANG Zh F, et al. Development and prospect of technique for laser particle size analyzer [J]. Modern Scientific Instruments, 2009, 1(4): 146-148 (in Chinese).
- [7] BAUMGARDNER D, SPOWART M. Evaluation of the forward scattering spectrometer probe. Part I: time response and laser inhomogeneity limitations [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1990, 7(5): 666-672.
- [8] LI Sh L, ZHANG L. The uncertainty evaluation of measurement device for static light scattering particle size analyzers [J]. Measurement and Test Technology, 2010, 37(9):72-73 (in Chinese).
- [9] BU L B, ZHOU Y Z, SHAN K L, et al. Development of probe of cloud droplet [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(10):1923-1927 (in Chinese).
- [10] HOVENAC E A, HIRLEMAN E D. Use of rotating pinholes and reticles for calibration of cloud droplet instrumentation [J]. Journal of Atmosphere and Oceanic Technology, 1991, 8(1):166-171.
- [11] BU L B, SHAN K L, HUANG X Y. Studies on probe of cloud droplet [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 216-218 (in Chinese).
- [12] DYE J E, BAUMGARDNER D. Evaluation of the forward scattering spectrometer probe. Part I: electronics and optical studies [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 1984, 1(4):329-344.
- [13] BU L B, WANG M, HUANG X Y. Study of cloud droplet probe and its calibration [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(1):1-4 (in Chinese).
- [14] van de HULST H C, TWERSKY V. Light scattering by small particle [M]. New York, USA:Dover Publications, 1981:114-131.
- [15] LÜ N G. Fourier optics [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 186-241 (in Chinese).