

云粒子探测器及其标定研究

卜令兵 王敏 黄兴友 朱亚宗 李慧龙

(南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘要 前向散射式云滴粒子探测器散射光探测效率高、结构简单, 是目前 $50\ \mu\text{m}$ 以内云滴粒子探测的重要仪器之一。建立了基于前向散射原理的云滴粒子探测器, 利用固定于多维调整平台的微米量级的小孔光阑模拟周期性出现于探测区域的小粒子, 并沿光轴方向前后平移小孔光阑的位置, 获得系统的景深。使用 $5, 10$ 和 $30\ \mu\text{m}$ 3 种固定尺寸的标准粒子对系统进行了标定, 获得了系统对不同尺寸标准粒子的响应曲线, 利用米氏散射原理计算分析了系统对标准粒子与云滴粒子响应的对应关系, 利用该关系得到系统对云滴粒子的响应曲线, 该响应曲线可以用于云滴粒子粒径谱的测量。

关键词 测量; 前向散射; 景深; 标准粒子; 响应曲线

中图分类号 TH741 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.0808005

Study of Cloud Droplet Probe and Its Calibration

Bu Lingbing Wang Min Huang Xingyou Zhu Yazong Li Huilong

(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044, China)

Abstract Probe of cloud droplet (CDP) based on forward scattering is one of the most important instruments for small cloud particles, smaller than $50\ \mu\text{m}$ in diameter, measurement because of its high efficiency and simple structure. A CDP based on forward scattering is constructed. To measure the depth of field, a pinhole adhered to a rotating disk which is fixed to multi-dimensional optical table is used to simulated as a particle appeared in the detection area periodically, as it moved along the laser beam, the depth of the field can be measured. Standard particles with size of $5, 10$ and $30\ \mu\text{m}$ are used to calibrate the system and the response curve to standard particles is obtained. Mie theory is used to study the corresponding relation between the system's responses to standard particles and cloud droplet. The response curve to cloud droplets is obtained to measure the sizes of cloud droplets.

Key words measurement; forward scattering; depth of field; standard particles; response curve

OCIS codes 230.0040; 280.1100; 250.0040

1 引言

对于云、气溶胶等粒子的微物理观测, 最为有效的方法是基于激光散射式的直接测量仪器。该类仪器是地面颗粒粒径仪在气象探测领域的扩展^[1~3]。20 世纪 70 年代以来, 美国研制了一套自动化的机载云粒子测量系统(PMS), 目前该系统在自动化测量和探测精度方面均有了很大的提高。前向散射式云滴粒子探测器是该系统的一个重要组成部分^[4,5]。我国目前云的相关研究中所用的机载云粒子探测系统都是从国外进口的, 不但价格昂贵, 而且

在使用中也逐渐发现仪器的设计缺陷及问题: 1) 边缘效应问题, 测量云滴前后向散射时, 要求激光光源是完全均匀的照明场, 实际上激光光源强度分布不均匀, 在光束边缘, 光强变弱, 同样尺寸的小云滴穿过激光光斑中心位置或者边缘位置部分散射的能量不同, 引起测量误差; 2) 穿越时间问题, 粒子的穿越时间决定光电脉冲的宽度, 在对电脉冲进行放大时, 对同一运放设备, 脉冲宽度与放大倍数有关, 因此由于对脉冲信号的放大倍数不同而引起测量误差^[6]。

本文介绍了基于前向散射原理的云滴粒子探测

收稿日期: 2011-04-07; 收到修改稿日期: 2011-04-25

基金项目: 国家自然科学基金(40805016)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY200806015)资助课题。

作者简介: 卜令兵(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: lingbingpu@gmail.com

器,利用小孔光阑模拟周期性出现于探测区域的小粒子,获得系统的景深,最后使用标准粒子对系统进行标定,得到系统对云滴粒子的响应曲线。

2 实验系统

系统结构如图 1 所示,激光二极管出射波长为 685 nm 的单模激光,为得到高斯分布的圆形光斑,透镜 L1 将激光汇聚到一段很短的单模光纤中,将光纤出射的光使用非球面透镜 L2 进行准直,准直后发散角小于 1 mrad,激光光斑直径为 2 mm,功率为 30 mW。激光二极管、透镜 L1、光纤和透镜 L2 封装在高为 50 mm 的紧凑型圆柱体结构中。为产生近似均匀的激光照明并保证测量区域内粒子穿越时间,将方形光阑 P1(300 μm × 300 μm)定位在圆形光斑的中心位置,对光斑进行切割,仅取高斯光斑的中心部分。透镜 L3, L4 与光阑 P2 构成的 4f 成像系统将方形光阑处的光斑成像在探测敏感区域,在敏感区域产生近似均匀照明,消除该类仪器由于照射光不均匀产生的边缘效应。W1 和 W2 为用于密封的窗口玻璃, W2 居中贴有不透明的橡胶片,作为光陷阱阻挡照射光进入接收系统。考虑光陷阱及接收系统的孔径,最终 4°~13° 立体角内的散射光被系统接收。F 为中心频率为 685 nm 的窄带滤光片,其峰值透射率为 98%。分光棱镜 BS 将收集得到的散射光分为透射和反射两部分,分别采用光电探测器 D1 和 D2 进行探测,它们的响应电压值分别为 D_1 和 D_2 。光电探测器 D1 前焦点处放有直径 200 μm 的圆孔光阑 P3 用于控制景深。粒子形成的光电流经前置放大后形成电压幅度与粒子直径相关的电脉

冲。数据采集处理系统使用采集卡(NI5105)采集粒子脉冲信号并将采集得到的电压信号按照电压幅度对脉冲进行归类、计数,获得云滴的粒径谱分布;数据采集处理系统同时实时获取激光器功率的变化信息,用以修正由于激光器能量变化而引起的误差。

3 系统标定实验

3.1 探测灵敏区域测量

云滴粒子探测器的特殊工作环境要求其取样体积小且准确。系统采用监视质量控制通道与探测通道的比值的方法控制景深。分束棱镜将收集到的粒子散射光分为探测部分和质量控制部分,质量控制通道使用直径为 200 μm 的圆孔光阑控制景深,当粒子从测量敏感区域的中心位置通过时,光信号全部通过光阑到达探测器;当粒子偏离中心位置时,光阑挡住部分光能量,脉冲探测通道与质量控制通道响应电压的比值(D_2/D_1)发生变化,当变化到一定程度时,即可以认为粒子所在位置超出了敏感区域,因此该粒子不列入统计范围。小孔的夫琅禾费衍射与小粒子的米氏散射存在一定的相似性,又由于真实小粒子位置的不可控性,因此,可以使用一定尺寸的小孔模拟周期性出现在系统灵敏区域的小粒子进行系统景深的测量^[7]。实验中,将尺寸为 30 μm 的小孔装在可以随直流电机旋转的圆盘上,直流电机与调速器相连,速度可控,用旋转小孔模拟具有不同飞行速度的粒子,直流电机固定于三维精密平移台上,则小孔的位置可以精密调整。小孔位于接收系统的物点时,测量探测通道与质量控制通道电压脉冲高度之间比值最小;小孔位置沿光轴方向发生偏移时,两者之间的比值增加。实验获得小孔位置不同时两通道间响应电压比值的变化,如图 2 所示。由图 2 可知, D_2 与 D_1 比值随位置的变化曲线在测

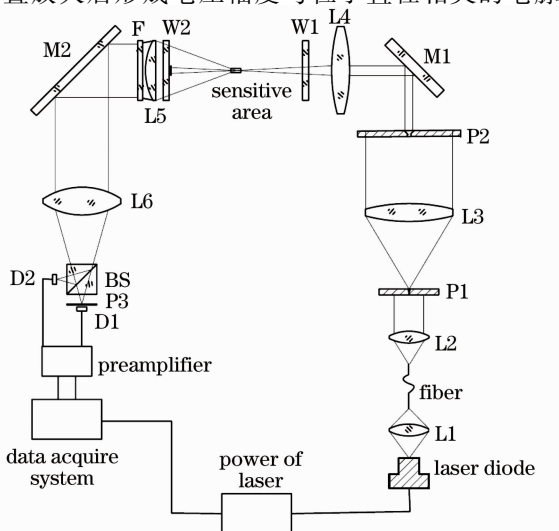


图 1 系统结构图

Fig. 1 Diagram of the system

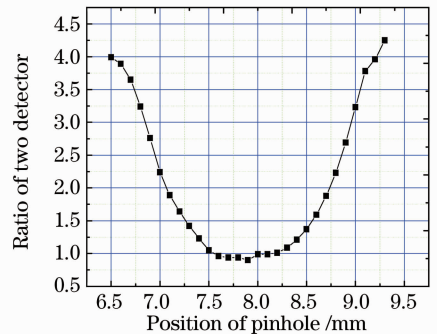


图 2 小孔位置变化时双通道探测的能量比值

Fig. 2 Ratio of two detector versus the position of the pinhole

量中心位置两侧对称分布,随位置变化速率近似,与系统设计相符。因此,可以根据图 2 进行景深控制。在数据处理过程中,若舍去两者比值大于 2.5 的粒子,则系统的测量区域的长度为 2 mm,取样面积为 $0.3 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

3.2 系统响应曲线标定

系统景深确定后,使用不同尺寸的标准粒子(购于杜克公司)即可以完成系统对标准粒子响应曲线型的测量^[8]。使用内径为 2 mm 的洁净细管固定于探测区域,标准粒子通过洁净管进入仪器的探测区域,记录系统对不同尺寸粒子的响应,即可以获得系统的响应曲线。实验中由于 $5 \mu\text{m}$ 和 $10 \mu\text{m}$ 的标准粒子是溶于溶液中的,故使用 KANOMAX 公司的 F9431 型标准粒子发生器喷出。 $30 \mu\text{m}$ 的标准粒子则使用高压氮气从容器里直接吹入,考虑到粒子在产生过程中有可能在探测区域合并,因此应尽量减小单位时间粒子的喷出量并通过气流加速的方法增大标准粒子通过探测区域时的速度。图 3 是 $5 \mu\text{m}$ 标准粒子通过测量区域时探测器 D1 和 D2 给出的电压值,可以看出两通道均有较高的信噪比,能够用于反演粒径的大小。图 4 为 $5 \mu\text{m}$ 标准粒子的计数结果,其中横坐标为探测通道信号脉冲幅度,纵坐标为相应粒子在不同电压区间的统计个数,系统对 $5 \mu\text{m}$ 标准粒子的响应为 0.025 V 。图 4 中小于 0.025 V 的电压计数也较多,经实验证明,该计数是由于非洁净实验室中的较大尘埃粒子引起的,可以认为是误差,不影响最终结果。同理,系统对 $10 \mu\text{m}$ 和 $30 \mu\text{m}$ 标准粒子的响应也可以得到。

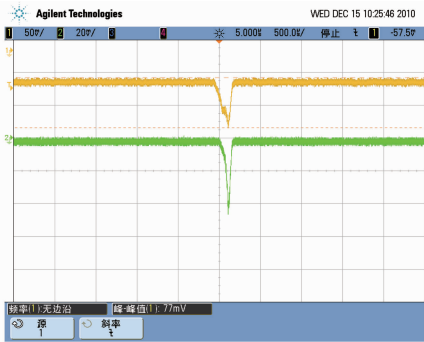


图 3 示波器记录的 $5 \mu\text{m}$ 标准粒子的脉冲信号

Fig. 3 Pulse signals of $5 \mu\text{m}$ standard particle recorded by oscilloscope

粒子在特定方向特定立体角内的散射能量强度可以由米氏散射算出,按照本系统的接收立体角,可以计算出不同尺寸标准粒子和云滴粒子散射能量的相对值,如图 5 所示^[9]。由图 5 可见,云滴粒子散射

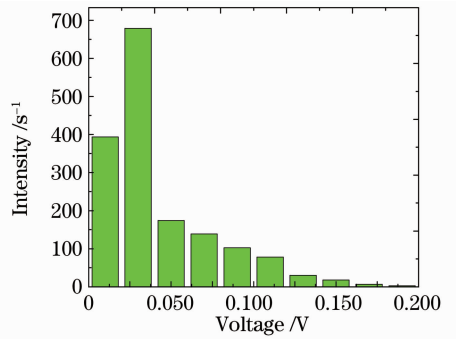


图 4 $5 \mu\text{m}$ 标准粒子产生的电压脉冲分布
Fig. 4 Distribution of voltage pulse generated by $5 \mu\text{m}$ standard particles

曲线随粒子尺寸增加而振荡,即散射能量与粒子尺寸不是一一对应的。为克服振荡带来的不确定性,采用四次多项式对粒径与散射能量的关系进行拟合,建立散射能量与粒径大小的唯一对应关系。若通过标准粒子得到该曲线上的几个点则该曲线可以唯一确定,即系统对标准粒子的响应曲线可以得到。系统实际测量对象为云滴粒子,需要将系统对标准粒子的响应曲线转化为系统对云滴粒子的响应曲线,进行云滴观测时才可以根据测量的云滴粒子的输出幅度由响应曲线查算出云滴粒子的大小。系统对云滴粒子与标准粒子的响应差别主要由于两者折射率不同,根据米氏散射理论可以计算得到引起测量系统同样响应的标准粒子与云滴粒子的关系。根据此关系可以将系统对标准粒子的响应曲线转化为系统对云滴粒子的响应曲线。系统对云滴粒子的响应曲线如图 6 所示,图 6 中“▲”表示的是光学传感器对与几种粒径(分别为 $5, 10$ 和 $30 \mu\text{m}$)的标准粒子相等价的云滴粒子的响应;其中的拟合曲线为系统对云滴粒子的响应曲线,该响应曲线可以用于云滴粒子尺寸的测量,结合系统的灵敏区域大小以及飞

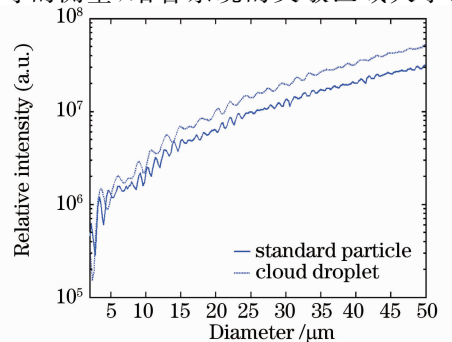


图 5 系统接收到的标准粒子与云滴粒子散射的相对强度

Fig. 5 Collected relative intensities of different standard particles and cloud droplet

机飞行速度可以得到云滴粒子的粒径谱分布。

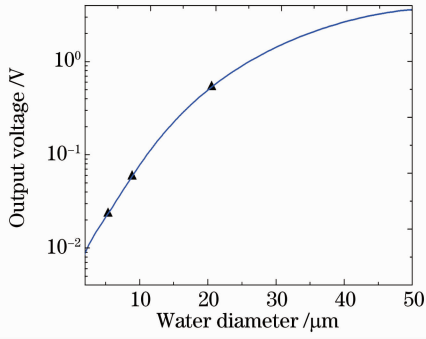


图 6 系统对云滴粒子的响应曲线

Fig. 6 Response curves of cloud droplet

4 结 论

建立了基于前向散射原理的云滴粒子探测器，选择探测通道与质量控制通道响应电压的比值为 2.5 作为信号甄别阈值，获得了 2 mm 的景深。使用固定尺寸的标准粒子对系统进行了标定，得到标准粒子尺寸与系统输出电压之间的关系，并以此获得了系统对云滴粒子的响应曲线，该响应曲线可以用于云滴粒子尺寸的测量。

参 考 文 献

1 Liang Chunlei, Huang Huijie, Ren Bingqiang *et al.*. Study of miniature optical sensor for laser particle counter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1260~1264

梁春雷, 黄惠杰, 任冰强 等. 激光尘埃粒子计数器微型光学传感器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1260~1264

2 Fang Gu, Juan Yang, Baomin Bian *et al.*. A model for aerosol mass concentration using an optical particle counter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 214~217

3 Lei Chengxin, Liu Hanfa, Zhang Huaifu. Research on laser scattering property by randomly oriented soot clustered agglomerates[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 876~880

类成新, 刘汉法, 张化福. 随机取向烟尘团簇粒子激光散射特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(3): 876~880

4 Liu Weiguo, Su Zhengjun, Wang Guanghe *et al.*. Development and application of new-generation airborne particle measurement [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2003, **14**(s): 11~18

刘卫国, 苏正军, 王广河 等. 新一代机载 PMS 粒子测量系统及应用[J]. *应用气象学报*, 2003, **14**(s): 11~18

5 Bu Lingbing, Shan Kunling, Huang Xingyou. Studies on probe of cloud droplet[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 216~218

卜令兵, 单坤玲, 黄兴友. 云粒子探测器研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 216~218

6 D. Baumgardner, M. Spowart. Evaluation of the forward scattering spectrometer probe. part III, time response and laser inhomogeneity limitations [J]. *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*, 1990, **7**: 666~672

7 E. A. Hovenac, E. D. Hirlleman. Use of rotating pinholes and reticules for callibration of cloud droplet instrumentation [J]. *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*, 1991, **8**: 166~171

8 D. Nagel, U. Maixner, W. Strapp *et al.*. Advancements in techniques for calibration and characterization of in situ optical particle measuring probes, and applications to the FSSP-100 probe[J]. *Journal of Atmosphere and Oceanic Technology*, 2007, **24**: 745~760

9 C. F. Bohren, D. R. Hufm. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. New York: John Wiley & Sons, 1983. 83~129