

基于成像的极化浊度计设计与实验验证

孟祥谦^{1,2,3}, 潘新^{1,2,3}, 刘兴涛^{1,2,3}, 王秀芬^{1,2,3}, 庄全风^{1,2,3}, 李辉^{1,2,3}, 陈超^{1,2,3},
李先欣^{1,2,3}, 王章军^{1,2,3}

¹ 齐鲁工业大学(山东省科学院), 山东省科学院海洋仪器仪表研究所, 山东 青岛 266001;

² 山东省海洋监测仪器装备技术重点实验室, 山东 青岛 266001;

³ 国家海洋监测设备工程技术研究中心, 山东 青岛 266001

摘要 采用连续波半导体激光器为发射光源,以电荷耦合器件(CCD)与鱼镜头为探测器,设计了一套测量大气分子与气溶胶散射光成像的极化浊度计装置。该装置可实时观测大气样品的散射图像,散射角观测范围为 $14^{\circ}\sim 162^{\circ}$,极化角观测范围为 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 。利用该装置分别对氮气与水汽进行实时观测,得到其散射图像,其中氮气的散射光与瑞利散射理论相吻合,不同极化角的散射光强与理论值的拟合优度为98%,而水汽散射光随散射角的变化趋势与米氏散射理论的一致性较好。结果表明本装置在定量观测气溶胶散射光方面有潜在的应用价值。

关键词 散射; 大气散射; 极化浊度计; 电荷耦合器件; 米氏散射; 瑞利散射

中图分类号 P415.3

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0510009

Design and Experimental Verification of Polar Nephelometer Based on Imaging

Meng Xiangqian^{1,2,3}, Pan Xin^{1,2,3}, Liu Xingtao^{1,2,3}, Wang Xiufen^{1,2,3},
Zhuang Quanfeng^{1,2,3}, Li Hui^{1,2,3}, Chen Chao^{1,2,3}, Li Xianxin^{1,2,3}, Wang Zhangjun^{1,2,3}

¹ Institute of Oceanographic Instrumentation, Shandong Academy of Sciences, Qilu University of Technology
(Shandong Academy of Sciences), Qingdao, Shandong 266001, China;

² Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Monitoring Instrument Equipment Technology,
Qingdao, Shandong 266001, China;

³ National Engineering and Technological Research Center of Marine Monitoring Equipment,
Qingdao, Shandong 266001, China

Abstract Using a continue-wave semiconductor laser as transmitter and a charge-coupled device (CCD) with a fish-eye lens as detector, a set of polar nephelometer is designed for measuring angular distribution of light scattered by atmospheric molecular and aerosols. The device can observe the scattering image of the atmospheric sample in real time, the scattering angle observation range is $14^{\circ}\sim 162^{\circ}$, and the polarization angle observation range is $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$. We use this device to observe pure nitrogen and water vapor in real time seperately, then obtain their scattering images. The nitrogen scattering light shows good correlation with Rayleigh scattering theory and the linear fitting R -square of scattering intensity varied by polarization angle with calculation is 98%. The variation trend of water vapor scattering light with scattering angle is in good agreement with Mie scattering theory. The results show that the device has potential application value in quantitative observation of aerosol scattering light.

Key words scattering; atmospheric scattering; polar nephelometer; charge-coupled device; Mie scattering; Rayleigh scattering

OCIS codes 290.5820; 010.1310; 290.5870; 290.4020

收稿日期: 2017-11-21; 收到修改稿日期: 2018-01-18

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(41405023)、海洋公益性行业科研专项项目(201505031)、国家重点研发计划(2016YFC1400301)、山东省自然科学基金(ZR2017QD009)

作者简介: 孟祥谦(1986—),男,博士,助理研究员,主要从事激光大气探测方面的研究。E-mail: lidarmeng@foxmail.com

1 引 言

大气散射是现实生活中一种常见的光学现象,众多学者在图像、光学探测与遥感等方面利用大气散射模型对大气散射开展了相关研究:文献[1-2]用大气散射物理模型及光学反射成像模型开发出了针对雾霾天气图像的快速去雾算法;叶松等[3]基于偏振信息提出了大气散射校正方法,提高了航空遥感图像的质量;王向川等[4]通过大气散射模型计算了激光雷达的关键参量——激光雷达比。综上,大气散射是一种既普遍又重要的现象,设计一种可以观测大气散射光的实验装置十分必要。

目前,观测大气散射的仪器或装置主要有散射式能见度仪、激光雷达、太阳光度计、浊度计和遥感卫星等[5]。极化浊度计是一种新兴的用于观测大气散射光强随散射角或偏振角变化的仪器[6]。目前该装置的实验设计方式可概括为三类:单探测器扫描观测、多探测器阵列与 CCD 成像方式。通常,单探测器由电机带动扫描镜或探测器沿着导轨移动进行扫描,接收来自圆心处气溶胶粒子团与激光束因相互作用而在各散射角上产生的散射光。在单探测器扫描观测方式下也可以将探测器固定,用扫描旋转镜来实现观测[7-8]。这种方法的优点是角度分辨率高,缺点是扫描过程需要的时间较长。多探测器阵列将多个探测器排布在以观测气溶胶为中心的圆弧上,接收气溶胶因受激光束作用而产生的散射光[9-10]。多探测器阵列可以有效减少采集数据的时间,进行实时测量,但由于角分辨率与探测器的数目相关,探测器过少会导致角分辨率不高,探测器过多则会导致成本增加,测控复杂度加大。CCD 成像方式在兼顾测量实时性的同时,还可以保证较高的角度分辨率,是近年来大气散射装置测量气溶胶光学参数的研究热点[11-15]。本文采用 CCD 成像方式对实验装置进行设计,使用鱼镜头对大气散射进行观测,通过实验确定接收视场角为 148°,并标定了镜头的畸变。

2 实验装置

实验装置的设计如图 1 所示,整个系统放置在一个机柜内。为方便固定镜架,将底面设计成铝合金光学平台;为避免强光散射引起的 CCD 像元的饱和现象,增加散射光在 CCD 阵面成像的像元数量,在光路中放置扩束镜。实验时,由激光器出射 532 nm 的线偏振激光束,光斑直径为 5 mm,经过

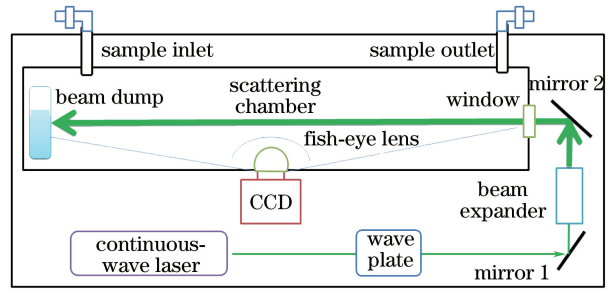


图 1 基于成像的极化浊度计设计

Fig. 1 Design of polar nephelometer based on imaging

波片改变其偏振态,再经过第 1 片 45°反射镜导入扩束镜,扩束后的激光束经过第 2 片 45°反射镜,然后通过窗口玻璃进入散射光接收室。将制冷 CCD 搭配鱼镜头头放置在接收室侧壁,通过鱼镜头接收散射光束。在光路终止处安装消光池,以防止光束发射到接收室侧壁而产生杂散光。在散射光接收室的后侧设置样品进出口,用阀门控制大气样品的进出。

散射光观测实验装置中的波片安装在精密电动旋转镜架上,电动镜架的指标如表 1 所示,步进电机的分辨率为 0.00125 (°)/step。

表 1 电动镜架参数

Table 1 Parameters of the electrical mirror mount

Parameter	Value
Resolution /[(°)·step ⁻¹]	0.00125
Maximum speed /[(°)·s ⁻¹]	25
Positioning accuracy / (°)	<0.005
Radial jump / μm	<20
Horizontal jump / μm	<20

3 实验标定

3.1 检验 CCD 的光电转换线性度

2017 年 3 月 16 日 16:00—17:00,利用可控光强的均匀光源(积分球)检验 CCD 的光电转换线性度,得到不同光强与其相应图像的响应曲线。积分球可产生 0~64 挡位的均匀线性光源。本次标定分别采集了 2,4,6,⋯,26 挡位的图像。采集出的部分图像如图 2 所示,随着挡位增加,积分球光强由弱变强。因 26 个光源全部打开会导致 CCD 上的灰度值饱和(16 位灰度饱和数值为 65535),所以 26 挡位图像不作为标定图像。

对 2017 年 3 月 16 日观测的图像进行处理,分别选取散射图像中心点坐标的灰度值与散射光束所在图像的平均灰度值作为观测对象,以光强为横坐标(积分球内的光强度挡位),以 CCD 图像上的灰度值为纵坐标,进行线性拟合,实验结果如图 3 所示。

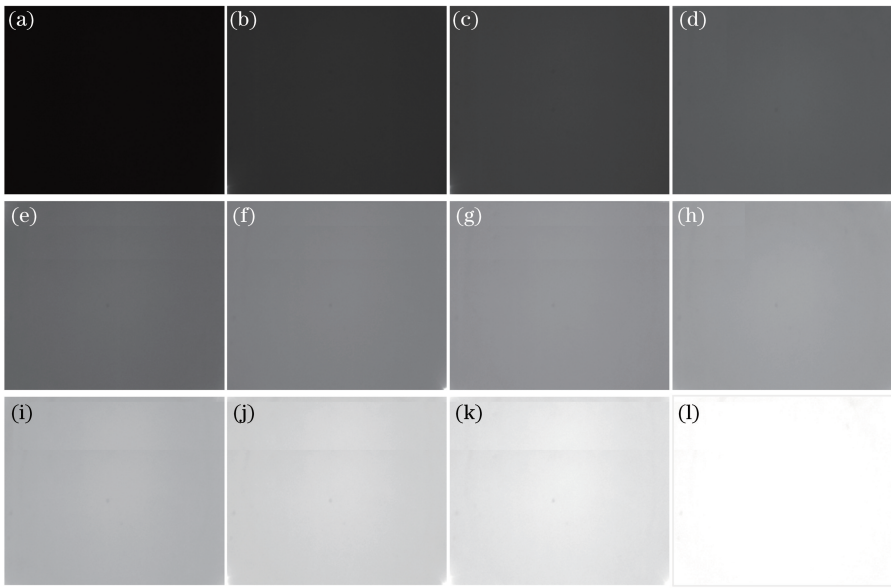


图 2 (a) 2 挡、(b) 4 挡、(c) 6 挡、(d) 8 挡、(e) 10 挡、(f) 12 挡、(g) 14 挡、(h) 16 挡、(i) 18 挡、(j) 20 挡、(k) 22 挡、(l) 24 挡积分球光强下 CCD 观测的图像

Fig. 2 Images captured by CCD at (a) grade 2, (b) grade 4, (c) grade 6, (d) grade 8, (e) grade 10, (f) grade 12, (g) grade 14, (h) grade 16, (i) grade 18, (j) grade 20, (k) grade 22 and (l) grade 24 light intensity of integrating sphere

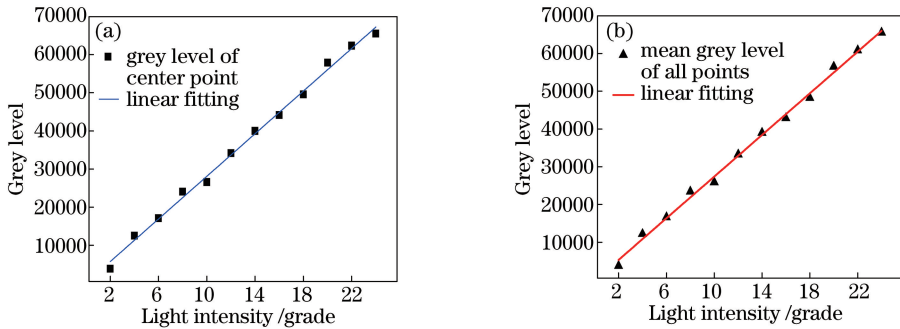


图 3 (a) 散射图像中心点灰度值与光强挡位的线性拟合曲线; (b) 散射光束区域灰度均值与光强挡位的线性拟合曲线
Fig. 3 (a) Linear fitting curves between light intensity grade and grey scale of center point in the scattering image; (b) linear fitting curves between light intensity grade and grey level of scattering beam region

由表 2 可见, 无论是单点的灰度值与光源强度的相关性, 还是个散射图像区域的灰度值与光源强度的相关性, 拟合优度均在 0.99 以上, 表明实验用 CCD 具有良好的光电转换线性度。

表 2 散射光束区域灰度光电转换的线性拟合参数

Table 2 Linear fitting parameters of the photoelectric conversion at scattering beam region

Intercept		Slope		Statistics
Value	Standard error	Value	Standard error	
-183.902	752.6943	2757.653	51.13551	0.996231

3.2 鱼镜头头校正

CCD 对光束的观测情况如图 4 所示, 将 CCD 放置于光束或标准尺侧面, 其中 D 为 CCD 至光束

或标准尺的垂直距离, R 为 CCD 至各像元的距离, θ_0 为有效视场, θ_1 为起始散射角, θ_2 为终止散射角, $d\theta$ 为单像元的散射角。用 CCD 对一个标准刻度尺(点线)成像, 分别记录标准刻度尺对应的刻度值与 CCD 成像的灰度值。实验时散射光束成像与标准尺的几何位置基本一致, 因此找出标准尺与灰度值的对应关系即可作为散射图像畸变校正的标准函数。

实验观测的刻度值与像素位置之间的对应关系如图 5 所示。像素位置与标准尺刻度并不是线性关系, 经过鱼镜头在面阵 CCD 上所成图像边缘单个像素灰度值对应的标准尺长度大于中间单个像素灰度值对应的标准尺长度。

为了直观地显示, 对图 5 的关系曲线求导(表示为 D_{pixel}), 结果如图 6 所示, 曲线上点的含义为单

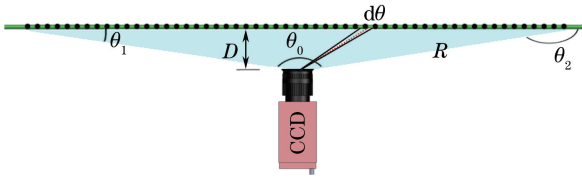


图 4 用 CCD 对光束(点线)成像

Fig. 4 Imaging of beam (dotted line) with a CCD

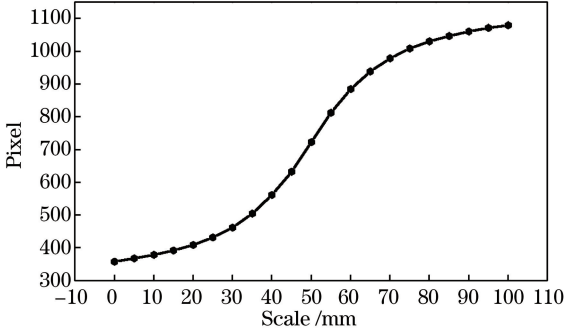


图 5 像素位置与标准尺刻度之间的关系曲线

Fig. 5 Relationship between pixel position and the scale of standard ruler

位长度所需的像素个数。可以看出,测量相同长度的目标,图像两侧占用较少的像素,而图像中间需要更多的像素。

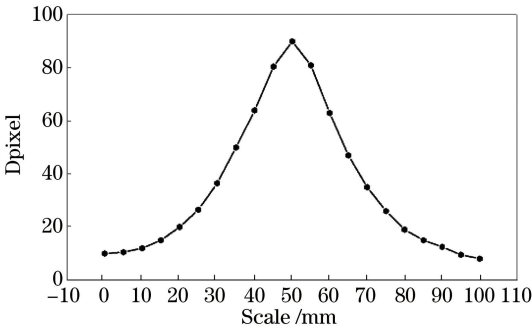


图 6 像素宽度与标准尺刻度之间的关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between pixel width and the scale of standard ruler

通过计算可以得到标准尺上各个距离的点对应的散射角,为探究两者间的关系,将散射角与像素位置进行线性拟合,拟合结果如图 7 所示,拟合优度为 0.99967,可见散射角与像素位置的线性度非常高。

4 实验原理

光通过大气时遇到空气分子、尘粒、云滴等质点时会发生散射,散射时以质点为中心向四周传播。气溶胶粒子的尺度参数 $\alpha = 2\pi r/\lambda$,其中 r 为粒子半径, λ 为入射光波长。一般认为当尺度参数 $\alpha \ll 1$ 时

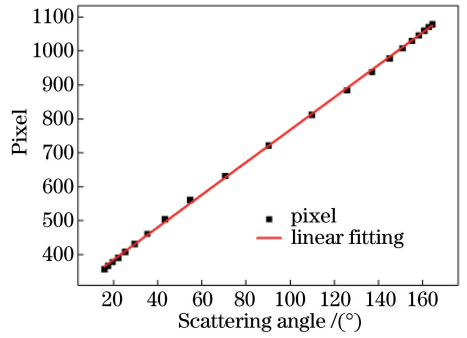


图 7 像素位置与散射角的拟合关系

Fig. 7 Fitting relationship between pixel position and scattering angle

为瑞利散射, α 为 0.1~0.3 时为米氏散射^[16]。当照射光为线偏振光时,单个球形小粒子的散射光强有如下关系:

$$I_s \propto I_0 (1 - \sin^2 \theta \cos^2 \varphi), \quad (1)$$

式中: I_s 为观测散射光强度; I_0 为入射光强度; θ 为散射角; φ 为偏振角。

而瑞利散射的散射相函数为

$$P_m(\theta) = \frac{3}{4} (1 + \cos^2 \theta). \quad (2)$$

米氏散射理论讨论了任意大小、折射率的均匀球形粒子对光的散射问题。根据米氏散射理论,单个球形气溶胶粒子的散射相函数表示为^[17]

$$P_n(\theta) = \frac{|S_1(\theta)|^2 + |S_2(\theta)|^2}{2\pi\alpha^2 Q_{scn}}, \quad (3)$$

式中: Q_{scn} 为气溶胶粒子的散射效率因子; $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 为散射波的复振幅。 $S_1(\theta)$ 和 $S_2(\theta)$ 的表达式为

$$S_1(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [a_n \pi_n(\cos \theta) + b_n \tau_n(\cos \theta)], \quad (4)$$

$$S_2(\theta) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} [b_n \pi_n(\cos \theta) + a_n \tau_n(\cos \theta)], \quad (5)$$

式中: a_n 和 b_n 为由 Riccati-Bessel 函数决定的复数,是尺度参数 α 和复折射率 m 的函数,与散射角 θ 无关; $\pi_n(\cos \theta)$ 和 $\tau_n(\cos \theta)$ 仅与角度有关,两者都包含以 $\cos \theta$ 为宗量的 n 阶勒让德多项式 $P_n(\cos \theta)$ 的一阶和二阶导数。

5 部分对比结果

目前,国内外相关研究普遍通过观测高纯气体^[18]、聚苯乙烯小球^[10-11]、铵盐^[19]或水汽^[20]等样品在激光作用下的散射现象,然后将实验观测数据与

瑞利散射和米氏散射模型分别进行对比。本实验以高纯氮气(体积分数为 99.9995%)和水汽作为样品进行散射现象的观测,得到了部分对比结果,使用扣背景法^[21]与高斯拟合法^[22]对实验图像的灰度值进行提取。

5.1 与瑞利散射的对比结果

向样品池中充入高纯氮气,为得到更好的大气散射状态,在充入样品 1 h 之后采集 14°~162°散射角内的散射光图像。观测结果如图 8 所示,观测值与瑞利散射相函数的总体趋势一致,误差棒为 1 h 观测时间内的标准差。其中 40°之前的光散射强度标准差较大,这是因为靠近样品池入的射光窗口受到窗口及窗口外侧气溶胶的散射影响;40°之后散射光强度的标准差不大。

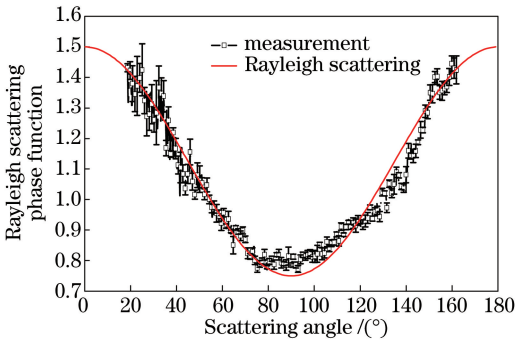


图 8 实验观测的氮气散射相函数与瑞利散射相函数的比较
Fig. 8 Comparison between experimental nitrogen scattering phase function and Rayleigh scattering phase function

在观测氮气光散射图像过程中,在旋转镜架上安装了二分之一波片,波片旋转一周,偏振角在 0°~72°之间变化。从实验图像中选择 30°~150°散射角中整十度的数据做图,结果如图 9 所示,横轴为偏振角,纵轴为散射灰度值。由图 9 可见:处理后的图像灰度值随角度呈正弦平方函数变化;30°、40°、140°与 150°散射角的灰度曲线相位稳定,灰度值较大,但峰-峰值不稳定;50°~130°散射角相位清晰,峰-峰值稳定;当散射角为 90°时,散射强度与偏振角正弦值的平方成正比关系。如(1)式中,如果散射角为 90°,那么散射光强与偏振角正弦值的平方线性相关,以散射光灰度值与对应偏振角正弦的平方进行线性拟合,结果如图 10 所示,拟合优度为 98%。散射角为 90°的散射光强随偏振角的变化曲线如图 11 所示,实验值与理论值相吻合。

5.2 与雾化器产生水雾的对比结果

使用百瑞雾化器产生颗粒直径为 2.2 μm 的水雾为实验样品,观测其散射图像。由水雾颗粒直径可推

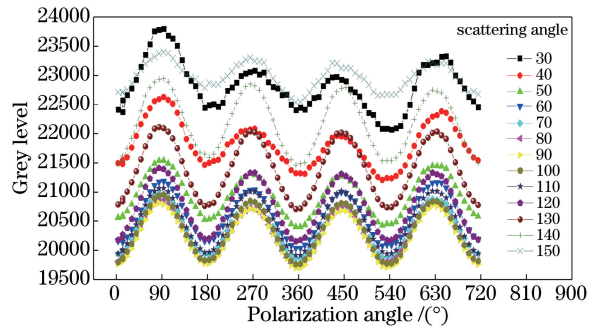


图 9 不同散射角时散射灰度随偏振角的变化
Fig. 9 Variation of scattering grey level with polarization angle at different scattering angles

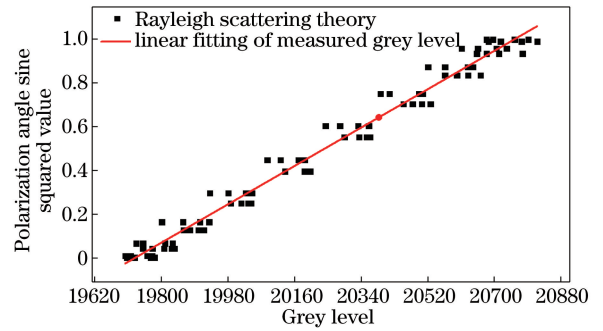


图 10 散射角为 90°时散射光灰度值与对应偏振角正弦平方的线性拟合
Fig. 10 Linear fitting of measured grey level with the corresponding polarization angle sine squared value at scattering angle of 90°

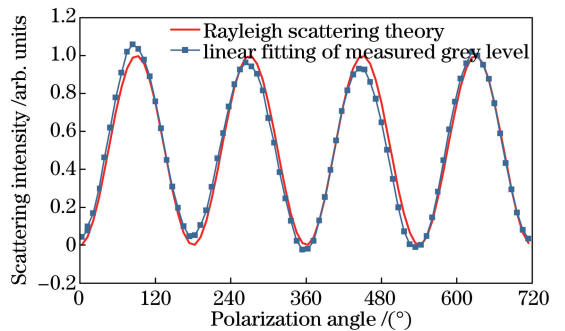


图 11 散射角为 90°的散射光强随偏振角的变化
Fig. 11 Variation of scattering intensity with polarization angle at scattering angle of 90°

测其散射相函数符合米氏散射理论,通过(3)式计算了半径为(2.2±0.2) μm 的实验样品呈幂指数谱分布的米氏散射相函数。实验观测值与 Mie 理论计算的散射相函数的对比如图 12 所示,在 30°~150°范围内两者符合得较好,在 14°~30°和 150°~162°区间两者的偏差较大,这主要是由于光源在样品池窗口会发生散射,光束在消光池处未完全消光,导致散射灰度值偏大。

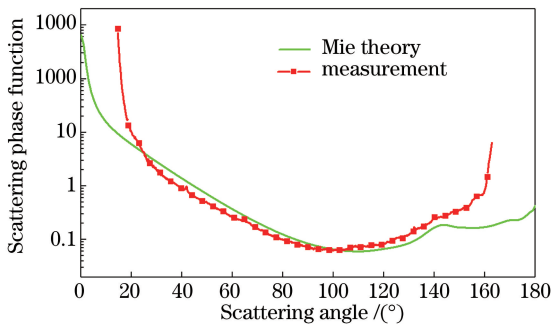


图 12 水汽散射实验的观测值与 Mie 理论计算的散射相函数的对比

Fig. 12 Comparison between measured values in water vapor scattering and scattering phase function calculated by Mie theory

6 结 论

通过 CCD 搭配鱼镜头设计了观测大角度气溶胶散射光的装置,分别用氮气与水汽代表小粒子与大粒子进行了相关实验。从进气采样口充入高纯氮气,观测瑞利散射现象,实验结果与瑞利散射理论基本吻合。向样品池中充入水雾,观测到的水汽散射相函数值与米氏散射理论相函数的一致性较好。该设计可根据实验需要更换激光器光源,以观测更多的大气散射参数。实验表明,基于成像的浊度计设计在观测大气散射方面具有较好的应用前景,可发展为原位实时观测大气散射的仪器。

参 考 文 献

[1] Gan J J, Xiao C X. Fast image dehazing based on accurate scattering map [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(5): 583-590.
甘佳佳, 肖春霞. 结合精确大气散射图计算的图像快速去雾 [J]. *中国图象图形学报*, 2013, 18(5): 583-590.

[2] Sun W, Li D J, Liu H J, *et al.* Fast single image fog removal based on atmospheric scattering model [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 1040-1046.
孙伟, 李大健, 刘宏娟, 等. 基于大气散射模型的单幅图像快速去雾 [J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 1040-1046.

[3] Ye S, Fang Y H, Sun X B, *et al.* Polarization method for atmospheric scattering correction of remote sensing image [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(6): 999-1003.
叶松, 方勇华, 孙晓兵, 等. 基于偏振信息的遥感图像大气散射校正 [J]. *光学学报*, 2007, 27(6): 999-

1003.

[4] Wang X C, Rao R Z. Lidar ratios for atmospheric aerosol and cloud particles [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(10): 1321-1324.
王向川, 饶瑞中. 大气气溶胶和云雾粒子的激光雷达比 [J]. *中国激光*, 2005, 32(10): 1321-1324.

[5] Fan X H, Chen H B, Xia X A. Progress in observation studies of atmospheric aerosol radiative properties in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(2): 477-498.
范学花, 陈洪滨, 夏祥鳌. 中国大气气溶胶辐射特性参数的观测与研究进展 [J]. *大气科学*, 2013, 37(2): 477-498.

[6] Barkey B, Paulson S, Liou K N. Polar nephelometers for light scattering by ice crystals and aerosols: design and measurements [M] // *Light Scattering Reviews*. Berlin: Springer, 2012: 3-37.

[7] Porter J N, Cooney T F, Motell C. Coastal aerosol phase function measurements with a custom polar nephelometer [C]. *Ocean Optics XIV Conference*, 1998.

[8] Castagner J L, Bigio I J. Polar nephelometer based on a rotational confocal imaging setup [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(10): 2232-2239.

[9] Leong K H, Jones M R, Holdridge D J, *et al.* Design and test of a polar nephelometer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 1995, 23(3): 341-356.

[10] Nakagawa M, Nakayama T, Sasago H, *et al.* Design and characterization of a novel single-particle polar nephelometer [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2016, 50(4): 392-404.

[11] Dolgos G, Martins J V. Polarized imaging nephelometer for *in situ* airborne measurements of aerosol light scattering [J]. *Optics Express*, 2014, 22(18): 21972-21990.

[12] McCrowey C J, Tinilau S S, Calderon G, *et al.* A portable high-resolution polar nephelometer for measurement of the angular scattering properties of atmospheric aerosol: design and validation [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2013, 47(6): 592-605.

[13] Meng X Q, Hu S X, Wang Z Z, *et al.* Vertical distribution of aerosol extinction coefficient detection in boundary layer using CCD lidar [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0801003.
孟祥谦, 胡顺星, 王珍珠, 等. CCD 激光雷达探测边界层气溶胶消光系数垂直分布 [J]. *光学学报*, 2013, 33(8): 0801003.

[14] Ma X M, Tao Z M, Ma M J, *et al.* Retrieval method of side scatter lidar signal based on charge coupled device technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34

- (2): 0201001.
- 麻晓敏, 陶宗明, 马明俊, 等. 基于 CCD 的侧向散射激光雷达信号提取方法 [J]. 光学学报, 2014, 34(2): 0201001.
- [15] Shi B, Tao Z M, Ma X M, *et al.* Measurements of near-ground aerosol backscattering coefficient profile with side-scatter technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(5): 0501006.
- 史博, 陶宗明, 麻晓敏, 等. 基于侧向散射技术的近地面气溶胶后向散射系数廓线探测 [J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0501006.
- [16] Sun J Q. Laser atmospheric detection [M]. Beijing: Science Press, 1986: 30-39.
- 孙景群. 激光大气探测 [M]. 北京: 科学出版社; 1986: 30-39.
- [17] Bohren C F, Huffman D R. Absorption and scattering of light by small particles [M]. New York: John Wiley & Sons, 2008.
- [18] Zhao F. Determination of the complex index of refraction and size distribution of aerosols from polar nephelometer measurements [J]. *Applied Optics*, 1999, 38(12): 2331-2336.
- [19] Curtis D B, Aycibin M, Young M A, *et al.* Simultaneous measurement of light-scattering properties and particle size distribution for aerosols: application to ammonium sulfate and quartz aerosol particles [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(22): 4748-4758.
- [20] Barkey B, Liou K N. Polar nephelometer for light-scattering measurements of ice crystals [J]. *Optics Letters*, 2001, 26(4): 232-234.
- [21] Meng X Q, Hu S X, Wang Y J, *et al.* Aerosol scattering phase function and visibility based on charge coupled device [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(9): 0901001.
- 孟祥谦, 胡顺星, 王英俭, 等. 基于电荷耦合器件探测气溶胶散射相函数与大气能见度的研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0901001.
- [22] Barnes J E, Sharma N P, Kaplan T B. Atmospheric aerosol profiling with a bistatic imaging lidar system [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(15): 2922-2929.