

水中悬浮颗粒的三维体散射函数测量

王万研, 杨克成, 罗曼, 郭文平, 夏珉, 李微*

华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 提出了一种水中悬浮颗粒的三维体散射函数测量方法, 采用抛物面镜结合传感器探测方式, 同时获取了半球空间内多个散射面所对应的体散射函数。搭建了三维体散射函数测量装置, 采用粒径为 57~954 nm 的标准聚苯乙烯颗粒作为样本, 获得了方位角 $0^\circ\sim 180^\circ$ 对应的多个散射面内的水中颗粒体散射函数, 测量的散射角范围为 $18^\circ\sim 160^\circ$ 。实验结果与计算结果吻合, 验证了利用该装置对水体中粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的悬浮颗粒的体散射函数进行测量的可行性。

关键词 散射; 体散射函数; 颗粒; 偏振光

中图分类号 O436.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0329001

Measurement of Three-Dimensional Volume Scattering Function of Suspended Particles in Water

Wang Wanyan, Yang Kecheng, Luo Man, Guo Wenping, Xia Min, Li Wei

School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract An approach for measuring three-dimensional (3D) volume scattering function (VSF) of suspended particles in water is proposed, in which one can simultaneously obtain the VSFs of several scattering planes in the hemisphere space by using the detection method of parabolic mirrors combining with sensors. The 3D VSF measuring device is constructed. With the standard polystyrene particles with diameters of 57-954 nm as samples, the VSFs of the suspended particles in water are obtained, which are in multiple scattering planes corresponding to azimuthal angles of $0^\circ\sim 180^\circ$. The detectable scattering angle is in the range of $18^\circ\sim 160^\circ$. The experimental results agree with the simulated ones, which verifies the feasibility to detect the VSFs of suspended particles with diameter less than $1\ \mu\text{m}$ in water by this device.

Key words scattering; volume scattering function; particles; polarized light

OCIS codes 290.5850; 100.2960; 290.5855

1 引 言

水体的体散射函数(VSF)是用于描述水体在各个方向上散射光强度分布的重要参数之一, 其与水体中颗粒物质的尺寸、形状、成分、结构等性质密切相关。VSF 可用于模拟辐射传输中的光场, 也可以用于反演颗粒的复折射率、粒径分布, 以及结构特性。因此, 水体悬浮颗粒的 VSF 测量技术在生化、遥感、环境监测等领域应用广泛, 具有重要的研究价值^[1-9]。

VSF 测量技术发展的重点与难点是实现大角度 VSF 的快速、连续测量。在进行大角度 VSF 测量时, 散射能量主要集中在前向角度, 且在全角度 ($0^\circ\sim 180^\circ$) 范围内, 散射的能量分布可覆盖 5~6 个数量级^[10]。早期的 VSF 测量装置多基于光源或探测器的旋转, 测量角度分辨率高, 但耗时长, 系统结构复杂。近年来, 在一个特定角度或者多个角度 (采用阵列式探测原理) 进行水体 VSF 测量的技术已经较为成熟^[11-12], 该技术具有测量速度快, 灵敏

收稿日期: 2017-07-26; 收到修改稿日期: 2017-10-31

基金项目: 国家自然科学基金(41276042, 61775065)

作者简介: 王万研(1990—), 男, 博士研究生, 主要从事光散射方面的研究。E-mail: wawayu@hust.edu.cn

导师简介: 杨克成(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子技术和激光技术方面的研究。

E-mail: kcyang@hust.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: weili@hust.edu.cn

度高等优点,但角度分辨率低,目前已有基于该技术的商品化仪器,如 Wetlab 公司生产的多角度散射光测量仪等^[13-14]。

近年来,VSF 测量技术主要通过采用特殊的结构设计来实现大范围、高精度测量。例如,Tan 等^[15]采用双反射镜结构收集大范围的散射光,并使用衰减片削弱前向散射光,以减小信号的动态范围,结合图像探测技术,能够以 1° 的分辨率在数秒内获得 8°~172° 的 VSF; Slade 等^[16]将商用测量仪与一个旋转眼球式的探测器组合,实现了对 0.1°~150° 范围内悬浮颗粒 VSF 的测量;Shao 等^[17-20]采用椭圆镜对散射光进行收集,结合图像处理技术提取了空气中颗粒的三维 VSF 曲线。以上方法能够在实验室条件下,在大角度范围内以较快的速度对悬浮颗粒的 VSF 进行连续、高精度的测量,但系统结构仍较复杂,并且无法在一次测量中获得悬浮颗粒的三维 VSF。

本文搭建了一种基于空间映射成像技术的 VSF 测量装置,对三维空间的散射光进行了成像,实现了水体中粒径小于 1 μm 的微小悬浮颗粒的 VSF 快速测量,结合图像处理技术,同时对多个散射面对应的 VSF 曲线进行了计算提取,并与理论曲线进行了对比。

2 实验系统

2.1 测量原理

入射光束照射水中悬浮颗粒发生散射,形成散射光。以散射体质心为原点,入射线偏振光沿 z 轴正向传播,电场和磁场的振动方向分别与 x 和 y 轴平行。散射角 θ 为散射光矢量与 z 轴正方向的夹角,方位角 φ 为散射矢量在 x 和 y 轴确定的平面内的投影与 x 轴的夹角。图 1 所示为颗粒散射光模型示意图^[21],其中散射方向与入射方向确定的平面为散射平面,入射光的平行分量与垂直分量分别标为 $e_{//i}$ 与 $e_{\perp i}$,散射光矢量为 e_s ,其平行分量与垂直分量分别标为 $e_{//s}$ 与 $e_{\perp s}$ 。

VSF 的定义:在给定的散射角度下,每单位辐照度的光入射在无限小的散射体积元上时单位体积的辐射强度^[22],即

$$\beta(\theta) = \frac{dI(\theta)}{E dV}, \quad (1)$$

式中 $dI(\theta)$ 为 θ 处的散射强度, E 为入射光辐照度, dV 为散射体积元。三维空间内的 VSF 为 θ、φ 以及颗粒表面与质心的距离的函数。对于均匀介质构成

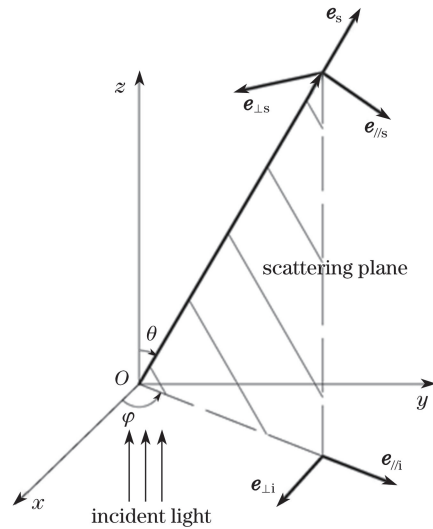


图 1 颗粒散射光模型示意图

Fig. 1 Schematic of particle scattering model

的理想球形颗粒,其质心即为球心,球表面各点到球心的距离均为球的半径,令三维 VSF 为 $\beta(\theta, \varphi)$ ^[23], 则

$$\beta(\theta, \varphi) = \frac{dW_{\text{scat}}(\theta, \varphi)}{I_i dV d\Omega}, \quad (2)$$

式中 W_{scat} 为单个颗粒在单位时间内散射的全部光能量, I_i 为入射光强, $d\Omega$ 为单位立体角。

假设接收平面为与颗粒同心的球面,则散射光在均匀介质中各个方向的传输距离相同且衰减相同,计算时只考虑比例关系。测量时,探测表面的半径远大于颗粒的半径,假设入射光为单位辐照度,则对三维空间内的散射光归一化后推导所得的三维 VSF 为散射光与入射光辐照度的比值。

2.2 实验系统

搭建的水中颗粒三维 VSF 测量装置的原理图与照片如图 2 所示,该装置主要由激光器、抛物面反射镜、远心透镜组和电荷耦合装置(CCD)相机等组成。水平放置的激光器发出波长为 532 nm 的线偏振光,在出光处设置半波片以控制激光的偏振方向,衰减片可控制激光的强度。激光通过抛物面反射镜上与焦点等高的小孔,照亮位于比色皿中的颗粒样品,并从另一侧出射。根据抛物面反射镜的工作原理,被颗粒散射的光反射后会成为平行光束竖直向上出射并进入远心透镜组,CCD 相机采集从远心透镜组出射的平行光,生成包含三维散射光信息的二维散射光图像。全系统无活动机械构件,理论上一次测量即可获得整个半球内的三维散射光信息,但由于机械结构的遮挡,散射角的有效测量范围为 18°~160°。

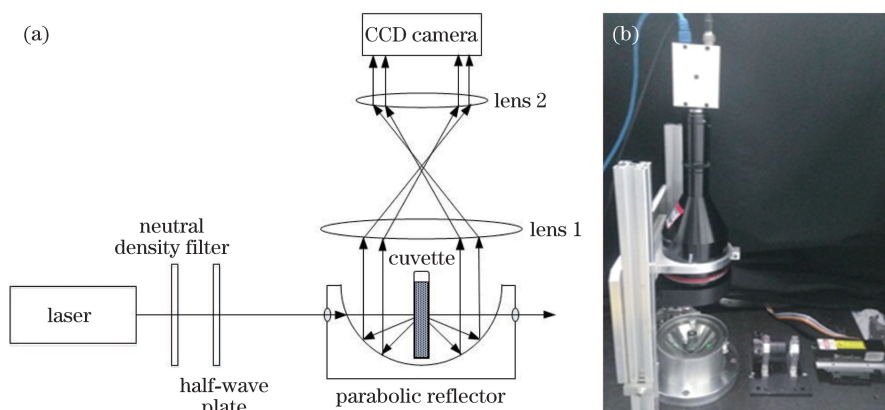


图 2 水中颗粒三维 VSF 测量装置。(a)原理图;(b)照片

Fig. 2 Measurement device of three-dimensional VSF of measuring device for particles in water.

(a) Schematic; (b) photograph

2.3 实验样本

实验采用苏州纳微生物科技有限公司生产的标准交联聚苯乙烯颗粒,其粒径分别为 57, 89, 193, 242, 362, 456, 528, 710, 806, 954 nm。颗粒粒径的实际值与标定值的偏差随颗粒大小而变化,较大的颗粒的粒径偏差较小,约为 5%,粒径为 57 nm 的颗粒,粒径偏差达到近 10%。聚苯乙烯颗粒的密度为 $1.08 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,折射率为 1.59。

由于标准溶液的颗粒浓度较高,需要使用去离子水对其进行稀释,以抑制多次散射,并控制散射光的强度。粒径越大,散射光能量越集中于前向角度区域,而 CCD 的动态响应范围有限(64 dB),为使散射光信号的强度匹配 CCD 的动态范围,故以光学厚度 τ 作为稀释程度的依据,最终将绝大多数颗粒样品的光学厚度控制在 0.2~0.25 之间。

3 二维散射图像分析与校正

3.1 仿真结果

对于 τ 小于 0.3 的单分散颗粒系,只考虑单次散射,则颗粒系的总散射是全部单个颗粒散射的线性叠加,即颗粒系的三维 VSF 与单颗粒的三维 VSF 分布相同。计算特定像素点对应的散射角与方位角的值,再依据 Mie 理论计算像素点对应的光强^[24],对光强作归一化处理。当散射角为 $18^\circ \sim 160^\circ$ 时,得到的不同直径的单颗粒二维散射光图像如图 3 所示,其中红色区域表示散射光强较强的区域,蓝色区域表示散射光强较弱的区域,入射光为线偏振光,入射方向从图片左侧至右侧。可以看出,随着颗粒粒径的增大,散射光趋向集中于前向小角度区域,且散射光强增大。

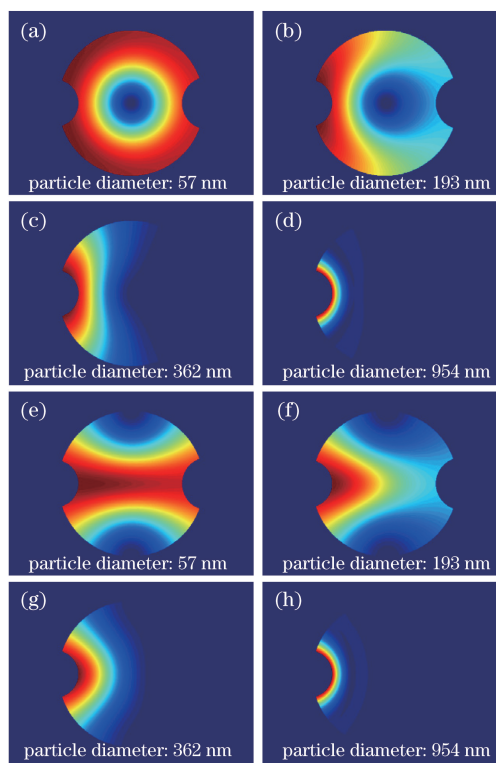


图 3 仿真得到的不同直径的单颗粒二维散射光图像。

(a)~(d)入射光偏振方向沿 x 轴;
(e)~(h)入射光偏振方向沿 y 轴

Fig. 3 Two-dimensional scattering patterns of single particle with different diameters obtained by simulation. (a)-(d) Polarization direction of incident light along x axis; (e)-(h) polarization direction of incident light along y axis

不同方位角对应的散射面的光强在极坐标下的分布如图 4 所示。对于粒径小于 362 nm 的颗粒,其散射光强分布受入射光偏振方向的影响较大,且后向角度区域($\theta > 90^\circ$)内仍有一定强度的散射光;而对于粒径大于 362 nm 的颗粒,其散射光强受人

射光偏振方向变化的影响很小,且散射光集中于前向小角度区域,后向区域散射光的强度极弱,基本可以忽略。

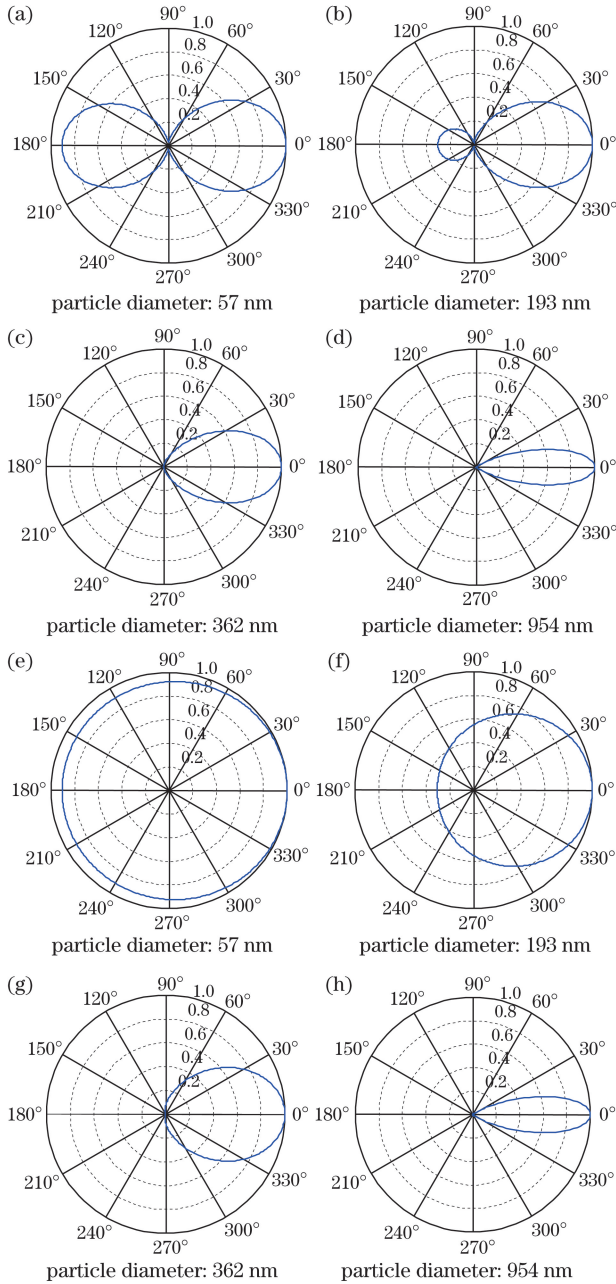


图 4 不同方位角对应的散射面的光强在极坐标下的分布。
(a)~(d) $\varphi = -80^\circ$; (e)~(h) $\varphi = 10^\circ$

Fig. 4 Intensity distributions in scattering planes corresponding to different azimuthal angles in polar coordinate. (a)-(d) $\varphi = -80^\circ$; (e)-(h) $\varphi = 10^\circ$

3.2 实验条件分析

激光器发出的入射光为线偏振光,经半波片后,其偏振方向可调整为沿 x 轴方向,即垂直于 CCD 接收面方向,或沿 y 轴方向,即平行于 CCD 接收面方向。当偏振方向沿 x 轴时,不同直径的粒子的散射

光强分布的理论值与实验值如图 5 所示,实验采用的 CCD 的像素个数为 2336×1752 ,图中受到小孔杂散光及过度曝光影响的区域已被去掉。可以看出,理论预测与实验结果较为一致,即散射光强随着颗粒粒径的增大而增大,散射能量趋向集中于前向角度区域。理论计算结果表明,对于粒径 362 nm 的颗粒和粒径 57 nm 的颗粒,它们的散射信号强度之比可达到 10^7 ,超出了探测器的动态范围,故前向区域出现曝光过度现象,这对实验结果有一定的影响。此外,实验测得的散射光图像与理论图像存在一定差异,这是杂散光、成像系统的离轴偏差与像差、光学器件的中心偏差等问题导致的,可通过后期的数据处理解决这些问题。

3.3 二维散射图像校正方法

实验测得的图像需要经过校正及补偿处理后,才能提取 VSF 曲线。对实验系统及实验结果的校正途径如下:拍摄多幅图案进行叠加取平均;去除离子水的背景光;引入十字校准板;使用中值滤波算法去除孤立噪点。但是,由光学系统的像差引起的图像失真依然存在,故采用补偿矩阵对散射光图像进行处理。

设多组实验获得的散射光强度 (I_{exp}) 与对应的仿真散射光强度 (I_{theory}) 之间的误差为线性关系,用二维补偿矩阵进行线性补偿,即

$$C_2 = AC_1 + B, \quad (3)$$

式中 C_1 为减去背景光后的散射光强度矩阵, C_2 为补偿后的散射光强度矩阵, A 、 B 为二维补偿矩阵。补偿矩阵可通过基于最小二乘法的曲线拟合获得,即对任一像素行的元素,设其探测到的实验光强值与仿真光强值分别为 x_i 和 y_i ,当拟合经验方程 $F(x)$ 为线性方程时,对 CCD 阵列特定行上的像素求取误差平方和的极小值,误差平方和的表达式为 $e = \sum [y_i - F(x_i)]^2$,从而获得特定行的拟合曲线,进而得到一维强度补偿矩阵。二维强度补偿矩阵即为一维强度补偿矩阵的集合。

对于补偿后的散射光强度,由于 CCD 上每个像素点对应抛物球面上的特定微面元,该面元收集到的光能量对应一定空间角度范围内的颗粒散射光,因此对特定空间角度范围内的散射光,选取其对应像素点及相邻区域内若干像素点光强的中值,作为该特定角度的散射光强。确定光强后,对给定方位角对应的散射光强进行归一化,即得到该方位角对应的散射面的一维 VSF 曲线。

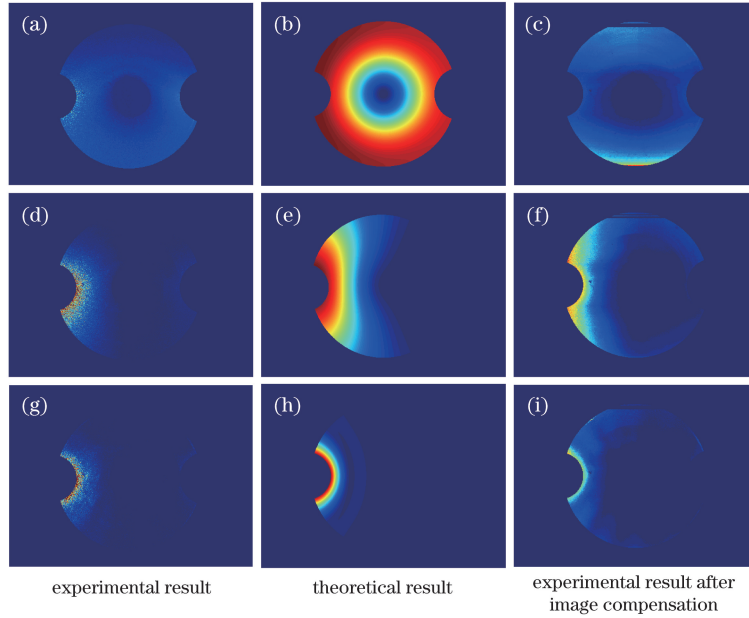


图 5 不同直径的粒子的散射光强分布的理论值与实验值。(a)~(c) 57 nm; (d)~(f) 362 nm; (g)~(i) 954 nm
Fig. 5 Theoretical and experimental data of scattering intensity distributions of particles with different diameters.

(a)-(c) 57 nm; (d)-(f) 362 nm; (g)-(i) 954 nm

CCD 的像素尺寸对 VSF 曲线的分辨率有影响。抛物镜面的微元收集的散射光映射到 CCD 上时,覆盖的像素数量不均匀,靠近 CCD 正中心区域的像素点较多,远离正中心区域的像素点较少。由于在提取 VSF 曲线时使用中值滤波算法降噪,在剔除强杂散光区域后,在有效区域内,VSF 曲线的理论最大测量分辨率约为 0.5° 。增大测量分辨率后,提取的 VSF 曲线没有明显变化,但当测量分辨率过大时,曲线局部会出现波动,增大误差的同时减小了数据处理效率。因此综合考虑后,设定测量分辨率为 1° 。

考虑到粒径增大导致的散射光分布区域变化,对于粒径大于或等于 362 nm 的颗粒,使用基于直径为 362 nm 的颗粒散射光图像生成的补偿矩阵进行补偿;对于粒径小于 362 nm 的颗粒,使用基于直径为 193 nm 的颗粒散射光图像生成的补偿矩阵进行补偿。

4 一维体散射函数

4.1 入射光偏振方向沿 x 轴时的实验结果

当入射光的偏振方向沿 x 轴时,探测区域为方位角 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 对应的散射半球。其中散射光图像的中心区域为接近平行于入射光偏振方向的散射面 ($\varphi=0^\circ$),图像边缘区域为接近垂直于入射光偏振方向的散射面 ($\varphi=\pm 90^\circ$)。

根据大量实验结果,剔除系统杂散光影响强烈

的前向小角度区域(散射角为 $0^\circ \sim 17^\circ$)和部分后向角度区域(散射角为 $161^\circ \sim 180^\circ$),以及比色皿遮挡的区域(方位角为 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 的散射面,散射角 90° 附近区域)。当入射光偏振方向固定为沿 x 轴时,有效测量范围为方位角 $-90^\circ \sim -35^\circ$ 及 $35^\circ \sim 90^\circ$ 对应散射面,散射角 $18^\circ \sim 160^\circ$ 对应的区域。同时,在入射光为线偏振光的条件下,对于各向均匀的理想球形颗粒,其 VSF 关于 $\varphi=0^\circ$ 对应的散射面对称。

当入射光偏振方向沿 x 轴, $\varphi=-80^\circ$, θ 为 $18^\circ \sim 160^\circ$ 时,不同直径颗粒的 VSF 曲线如图 6 所示。采用均方根误差作为实验与理论曲线之间的偏差的量化参考,均方根误差可表示为

$$P_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [I_{\text{exp}}(\theta_k) - I_{\text{theory}}(\theta_k)]^2}, \quad (4)$$

式中 n 为采样点数量, k 为自然数, θ_k 为对应的散射角。引入相关系数 r 对实验与理论曲线的相似程度进行评估,即

$$r = \frac{\sum_{k=1}^n [I_{\text{exp}}(\theta_k) - \bar{I}_{\text{exp}}][I_{\text{theory}}(\theta_k) - \bar{I}_{\text{theory}}]}{\sqrt{\sum_{k=1}^n [I_{\text{exp}}(\theta_k) - \bar{I}_{\text{exp}}]^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^n [I_{\text{theory}}(\theta_k) - \bar{I}_{\text{theory}}]^2}}, \quad (5)$$

式中 \bar{I}_{exp} 和 \bar{I}_{theory} 分别为实验获得的散射光强度与对应的仿真散射光强度的平均值。计算可得,图 6(a)

中 P_{RMSE} 与 r 的值分别为 0.1734 和 0.8652, 图 6(b) 中 P_{RMSE} 与 r 的值分别为 0.2473 和 0.9796, 图 6(c) 中 P_{RMSE} 与 r 的值分别为 0.0810 和 0.9823, 图 6(d) 中 P_{RMSE} 与 r 的值分别为 0.0730 和 0.9532。实验曲线与理论曲线越接近, P_{RMSE} 的值越小, r 的值越接近于 1。对于 $\varphi = -80^\circ$ 的散射面, 粒径为 193 nm

和 362 nm 的颗粒的 VSF 实验曲线趋势与理论预测一致, 且波动较小, 相关系数较大; 而粒径为 57 nm 的颗粒的 VSF 实验曲线波动较为明显; 尤其值得注意的是, 粒径为 954 nm 的颗粒, 其 P_{RMSE} 值较小, 但是由于在 $\theta = 40^\circ$ 附近出现了峰值, 故其相关系数较小, 这说明理论计算未能预测该细节。

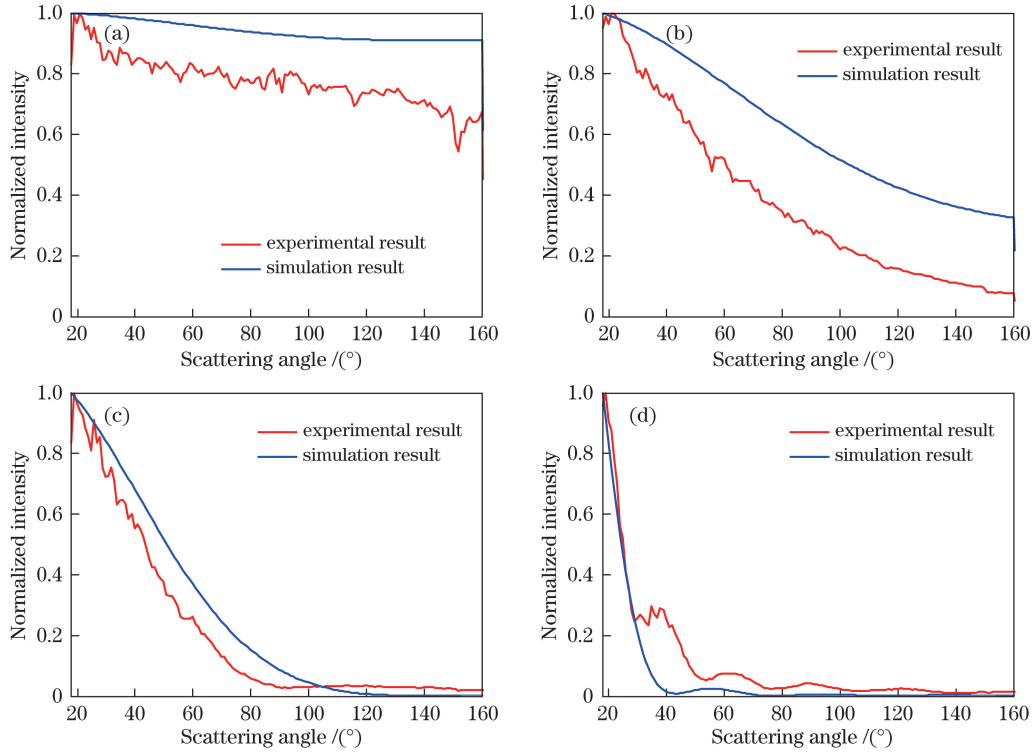


图 6 偏振方向沿 x 轴时不同直径颗粒的 VSF 曲线。(a) 57 nm; (b) 193 nm; (c) 362 nm; (d) 954 nm

Fig. 6 VSF curves of particles with different diameters under polarization direction along x axis.

(a) 57 nm; (b) 193 nm; (c) 362 nm; (d) 954 nm

以散射光图像上半部分区域提取的 VSF 为例, 不同方位角、不同直径的颗粒的 VSF 理论曲线与实验曲线间的均方根误差与相关系数分别见表 1, 2。可以看出, 均方根误差小于 0.1 且相关系数大于

0.95 的散射面, 其实验曲线与理论曲线吻合良好, 当方位角为 $-90^\circ \sim -75^\circ$ 时, 对于直径小于 362 nm 的颗粒, 其在多个散射面上均具有较大的均方根误差值。

表 1 当偏振方向沿 x 轴时, 不同方位角、不同直径的颗粒的 VSF 理论曲线与实验曲线间的均方根误差

Table 1 Root mean square error between theoretical and experimental VSF curves of particles with different azimuthal angles and different diameters under polarization direction along x axis

Azimuthal angle / (°)	57 nm	89 nm	193 nm	242 nm	362 nm	456 nm	528 nm	710 nm	806 nm	954 nm
-90	0.1291	0.1832	0.2351	0.2013	0.0322	0.1204	0.0713	0.0683	0.1141	0.0949
-85	0.1118	0.2238	0.2407	0.2093	0.0487	0.0923	0.0395	0.0473	0.0955	0.0793
-80	0.1734	0.2501	0.2473	0.2228	0.0810	0.0895	0.0330	0.0482	0.0828	0.0730
-75	0.2074	0.2792	0.2746	0.2261	0.1009	0.0869	0.0372	0.0392	0.0745	0.0704
-70	0.2892	0.3450	0.2885	0.2381	0.1445	0.0782	0.0599	0.0340	0.0476	0.0509
-65	0.2909	0.3365	0.2846	0.2362	0.1627	0.0613	0.0679	0.0392	0.0422	0.0447
-60	0.3813	0.3807	0.2988	0.2403	0.1712	0.0451	0.0847	0.0474	0.0345	0.0415
-55	0.3600	0.3826	0.3008	0.2380	0.1872	0.0496	0.0940	0.0536	0.0290	0.0373
-50	0.3881	0.3841	0.2874	0.2387	0.1939	0.0599	0.1062	0.0610	0.0292	0.0350
-45	0.3756	0.3764	0.2900	0.2346	0.1978	0.0703	0.1117	0.0561	0.0315	0.0311
-40	0.3240	0.3500	0.2669	0.2202	0.1954	0.0732	0.1103	0.0566	0.0286	0.0278
-35	0.3354	0.3329	0.2526	0.2038	0.1853	0.0695	0.1077	0.0566	0.0270	0.0276

表 2 当偏振方向沿 x 轴时,不同方位角、不同直径的颗粒的 VSF 理论曲线与实验曲线间的相关系数
Table 2 Correlation coefficient between theoretical and experimental VSF curves of particles with different azimuthal angles and different diameters under polarization direction along x axis

Azimuthal angle / ($^{\circ}$)	57 nm	89 nm	193 nm	242 nm	362 nm	456 nm	528 nm	710 nm	806 nm	954 nm
-90	0.6730	0.9544	0.9895	0.9750	0.9964	0.9312	0.9806	0.9803	0.9564	0.9350
-85	0.7949	0.9691	0.9858	0.9711	0.9898	0.9563	0.9942	0.9870	0.9688	0.9375
-80	0.8652	0.9699	0.9796	0.9628	0.9823	0.9636	0.9938	0.9864	0.9743	0.9532
-75	0.8392	0.9620	0.9683	0.9594	0.9753	0.9679	0.9909	0.9859	0.9775	0.9471
-70	0.9063	0.9582	0.9734	0.9582	0.9612	0.9778	0.9886	0.9883	0.9855	0.9638
-65	0.9373	0.9710	0.9733	0.9581	0.9500	0.9853	0.9847	0.9876	0.9877	0.9716
-60	0.9254	0.9608	0.9665	0.9522	0.9311	0.9890	0.9752	0.9831	0.9896	0.9741
-55	0.9406	0.9521	0.9611	0.9494	0.9084	0.9875	0.9638	0.9775	0.9908	0.9787
-50	0.9255	0.9320	0.9577	0.9406	0.8942	0.9829	0.9498	0.9717	0.9898	0.9817
-45	0.9209	0.9201	0.9469	0.9408	0.8781	0.9769	0.9422	0.9727	0.9903	0.9847
-40	0.9355	0.9243	0.9476	0.9424	0.8773	0.9745	0.9465	0.9754	0.9919	0.9877
-35	0.9340	0.9291	0.9487	0.9469	0.8843	0.9762	0.9449	0.9744	0.9919	0.9888

4.2 入射光偏振方向沿 y 轴时的实验结果

当入射光的偏振方向沿 y 轴时,有效探测区域为方位角 $0^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 和 $125^{\circ} \sim 180^{\circ}$ 对应的散射面。其中散射光图像中心区域为接近垂直于入射光偏振方向的散射面 ($\varphi = 90^{\circ}$), 图像边缘区域为接近平行于入射光偏振方向的散射面 ($\varphi = 0^{\circ}$)。令入射光分别以两种偏振方向入射, 即能实现全部角度

的 VSF 测量。

当入射光偏振方向沿 y 轴, 且 $\varphi = 10^{\circ}$ 时, 不同直径颗粒的 VSF 曲线如图 7 所示。计算可得, 图 7(a) 中 P_{RMSE} 与 r 的值分别为 0.0456 和 0.9894, 图 7(b) 中 P_{RMSE} 与 r 的值分别为 0.0850 和 0.9725, 图 7(c) 中 P_{RMSE} 与 r 的值分别为 0.0262 和 0.9962, 图 7(d) 中 P_{RMSE} 与 r 的值分别为 0.0575 和 0.9671。

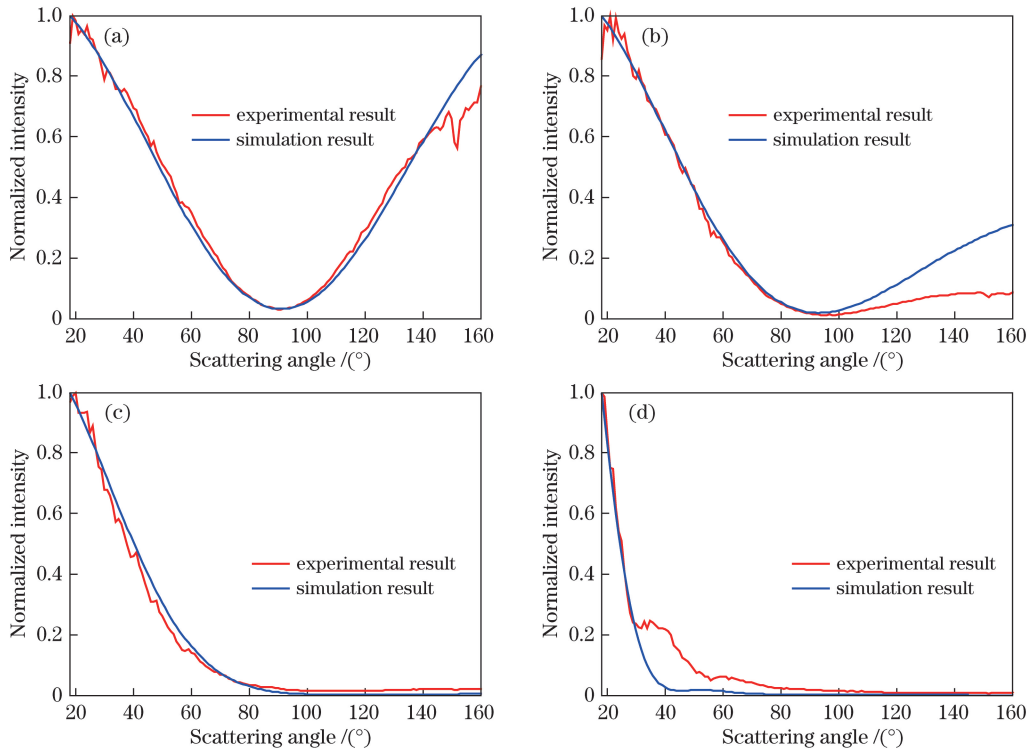


图 7 偏振方向沿 y 轴时不同直径颗粒的 VSF 曲线。(a) 57 nm;(b) 193 nm;(c) 362 nm;(d) 954 nm

Fig. 7 VSF curves of particles with different diameters under polarization direction along y axis.

(a) 57 nm; (b) 193 nm; (c) 362 nm; (d) 954 nm

仍以散射光图像上半部分区域提取的 VSF 为例,不同方位角、不同直径的颗粒的 VSF 理论曲线与实验曲线间的均方根误差与相关系数分别见表 3,4。相对于偏振方向沿 x 轴的结果,入射光沿 y 轴方向

偏振时,实验曲线与理论曲线的相似程度更高,直径大于 362 nm 的颗粒的结果更加理想,但对于粒径小于等于 362 nm 的颗粒,其 P_{RMSE} 值在多个散射面上仍较大,实验曲线与理论曲线仍有一定差距。

表 3 当偏振方向沿 y 轴时,不同方位角、不同直径的颗粒的 VSF 理论曲线与实验曲线间的均方根误差
Table 3 Root mean square error between theoretical and experimental VSF curves of particles with different azimuthal angles and different diameters under polarization direction along y axis

Azimuthal angle / ($^{\circ}$)	57 nm	89 nm	193 nm	242 nm	362 nm	456 nm	528 nm	710 nm	806 nm	954 nm
0	0.0793	0.1320	0.0897	0.0570	0.0298	0.1094	0.0771	0.0568	0.0967	0.0655
5	0.0542	0.1286	0.0826	0.0572	0.0189	0.0943	0.0523	0.0410	0.0931	0.0597
10	0.0456	0.1052	0.0850	0.0557	0.0262	0.0873	0.0433	0.0379	0.0826	0.0575
15	0.0496	0.1024	0.0957	0.0679	0.0507	0.0829	0.0321	0.0284	0.0713	0.0552
20	0.0970	0.1348	0.1179	0.0741	0.0943	0.0712	0.0435	0.0285	0.0455	0.0466
25	0.0947	0.1425	0.1241	0.0860	0.1166	0.0431	0.0515	0.0323	0.0416	0.0428
30	0.1412	0.1562	0.1667	0.1092	0.1370	0.0308	0.0722	0.0409	0.0297	0.0369
35	0.2298	0.2103	0.1920	0.1328	0.1568	0.0439	0.0795	0.0514	0.0268	0.0376
40	0.2614	0.2389	0.2256	0.1684	0.1833	0.0639	0.0942	0.0609	0.0303	0.0373
45	0.3038	0.3234	0.2679	0.1977	0.2015	0.0787	0.0998	0.0607	0.0276	0.0356
50	0.3772	0.3940	0.2959	0.2255	0.2140	0.0872	0.1043	0.0650	0.0271	0.0334
55	0.4286	0.4522	0.3373	0.2517	0.2145	0.0882	0.1063	0.0647	0.0287	0.0349

表 4 当偏振方向沿 y 轴时,不同方位角、不同直径的颗粒的 VSF 理论曲线与实验曲线间的相关系数
Table 4 Correlation coefficient between theoretical and experimental VSF curves of particles with different azimuthal angles and different diameters under polarization direction along y axis

Azimuthal angle / ($^{\circ}$)	57 nm	89 nm	193 nm	242 nm	362 nm	456 nm	528 nm	710 nm	806 nm	954 nm
0	0.9797	0.9298	0.9606	0.9868	0.9970	0.9542	0.9872	0.9891	0.9647	0.9562
5	0.9917	0.9300	0.9693	0.9888	0.9983	0.9630	0.9926	0.9946	0.9721	0.9622
10	0.9894	0.9362	0.9725	0.9904	0.9962	0.9716	0.9951	0.9942	0.9766	0.9671
15	0.9893	0.9405	0.9676	0.9888	0.9908	0.9761	0.9958	0.9949	0.9791	0.9631
20	0.9908	0.9428	0.9744	0.9922	0.9806	0.9860	0.9942	0.9925	0.9877	0.9695
25	0.9926	0.9477	0.9807	0.9945	0.9683	0.9938	0.9896	0.9917	0.9901	0.9732
30	0.9862	0.9472	0.9820	0.9927	0.9471	0.9949	0.9797	0.9859	0.9928	0.9791
35	0.9743	0.9522	0.9796	0.9882	0.9244	0.9907	0.9752	0.9798	0.9919	0.9791
40	0.9638	0.9515	0.9759	0.9781	0.8959	0.9821	0.9618	0.9732	0.9902	0.9777
45	0.9491	0.9463	0.9659	0.9669	0.8713	0.9713	0.9542	0.9711	0.9915	0.9809
50	0.9391	0.9432	0.9506	0.9482	0.8615	0.9656	0.9515	0.9689	0.9922	0.9824
55	0.9414	0.9424	0.9274	0.9355	0.8560	0.9650	0.9508	0.9681	0.9914	0.9816

对比图 6.7 可以发现,当入射光为线偏振光时,粒径小于 362 nm 的颗粒的 VSF 曲线变化明显,粒径为 57 nm 和 193 nm 的颗粒的 VSF 变化趋势与理论预测一致,但因为后向($\theta > 90^{\circ}$)部分与理论预测存在一定的差异,所以曲线的相似系数小于粒径较大的颗粒的。在 $\varphi = 10^{\circ}$ 对应的散射面上,直径为

362 nm 的颗粒的 VSF 实验曲线与理论曲线吻合程度比 $\varphi = -80^{\circ}$ 的更高,体现为其具有更接近于 1 的相关系数及更小的 P_{RMSE} 值。粒径为 954 nm 的颗粒的 VSF 曲线随散射面变化不明显,但在 $\theta = 40^{\circ}$ 左右处,依然有理论计算未能预测的峰值。

综上所述,测量结果虽然与 Mie 理论计算结

果趋势一致,但是部分区域存在明显偏差。这是因为相对同类 VSF 曲线连续测量仪器,本文的测量方式是基于空间映射成像的,测量结果更容易受到成像系统的像差影响,因此需要采用补偿处理手段进行修正。同时,本文采用的标准颗粒的粒径均小于 $1\ \mu\text{m}$,而其他 VSF 连续测量仪器采用的标准颗粒的粒径普遍较大。例如 Harmel 等^[9]采用的颗粒粒径为 $3\ \mu\text{m}$;Tan 等^[15]采用的标准颗粒的粒径为 $10.9\ \mu\text{m}$;Lee 等^[23]测量了粒径从 $64\ \text{nm}$ 至 $87.9\ \mu\text{m}$ 的 6 种标准颗粒的 VSF,但最后因稳定性不足放弃了粒径为 $64\ \text{nm}$ 的颗粒的测量结果;Slade 等^[16]分别对粒径为 $330\ \text{nm}$ 与 $1.03\ \mu\text{m}$ 的标准颗粒进行 VSF 测量之后,发现两种颗粒可能因为聚合现象的存在出现了一定的稳定性问题。因此,即便经过充分混合、声波振荡处理,小颗粒的聚合现象对结果仍不可避免地会有一些影响,但本文介绍的装置相对于同类文献的装置,能够对粒径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒进行较为稳定的 VSF 测量。

4.3 平均相对误差

对于粒径大于 $362\ \text{nm}$ 的颗粒,二维散射光图像及一维 VSF 曲线的理论计算与实验测量结果均表明,当 $\theta > 100^\circ$ 时,后向区域的散射光强极弱,基本可以忽略;而对于粒径小于 $362\ \text{nm}$ 的颗粒,其散射光分布较为均匀,可以在 $\theta > 100^\circ$ 的后向区域探测到散射光。当粒径小于 $362\ \text{nm}$ 的颗粒在散射角

范围为 $20^\circ\sim 160^\circ$ 的区域,粒径大于等于 $362\ \text{nm}$ 的颗粒在散射角范围为 $20^\circ\sim 100^\circ$ 的区域,入射光偏振方向沿 x 轴和 y 轴时,颗粒的 VSF 曲线平均相对误差分别见表 5,6。可以看出,对于全部 10 种颗粒,平均相对误差的值普遍较大,且变化规律不明显。粒径小于 $362\ \text{nm}$ 的 4 种颗粒在散射角 $20^\circ\sim 160^\circ$ 范围内的平均相对误差普遍相对较小(小于 70%),而粒径大于 $362\ \text{nm}$ 颗粒,即便将 $\theta = 100^\circ$ 的后向散射区域剔除,平均相对误差依然普遍较大(大于 100%)。在所有颗粒 VSF 曲线中,只有方位角为 $35^\circ\sim 55^\circ$ 对应的散射面的平均相对误差较小(多数小于 80%)。

对于单个散射面的平均相对误差,在多数情况下,一个点的相对误差值过大将导致平均相对误差值急剧增大,例如对于方位角 0° 的散射面,因为粒径小于 $362\ \text{nm}$ 的颗粒的归一化 VSF 曲线在 $\theta = 90^\circ$ 时,其理论值接近于 0,导致入射光偏振方向沿 y 轴时,该点附近计算得到的相对误差极大。同时,虽然粒径大于 $362\ \text{nm}$ 的颗粒的 VSF 曲线在后向区域的理论值普遍趋于 0,已经对计算范围有所取舍,但当粒径为 $806\ \text{nm}$ 和 $954\ \text{nm}$ 的颗粒在多个散射面上,且 $\theta = 40^\circ$ 附近出现了理论计算未能预测的峰值时,平均相对误差始终较大。

因此,对粒径较小颗粒的测量精度需要进一步提高,对粒径较大颗粒的测量也需要更为有效的补偿手段。

表 5 当入射光偏振方向沿 x 轴时,不同方位角、不同直径的颗粒的 VSF 曲线的平均相对误差

Table 5 Average relative error of VSF curves of particles with different azimuthal angles and different diameters under polarization direction along x axis

Azimuthal angle / ($^\circ$)	57 nm	89 nm	193 nm	242 nm	362 nm	456 nm	528 nm	710 nm	806 nm	954 nm
-90	10.37	18.80	44.18	55.39	11.44	1386.34	1145.07	714.44	2302.61	1413.20
-85	10.32	24.14	44.98	57.08	22.74	635.97	566.02	424.27	1241.31	876.47
-80	17.70	27.58	46.35	59.72	34.74	508.17	432.94	357.19	989.51	711.88
-75	21.81	31.86	51.48	61.13	42.09	396.78	367.58	262.69	820.26	587.28
-70	32.07	41.03	55.43	64.66	54.52	314.03	261.05	194.58	598.15	378.54
-65	33.46	41.62	56.73	66.34	59.77	237.34	190.55	142.05	464.84	298.88
-60	46.32	49.63	61.43	69.10	62.84	168.27	149.16	107.06	361.38	226.60
-55	46.43	52.93	64.69	71.18	67.69	114.62	111.30	82.83	261.89	144.97
-50	53.53	56.73	65.77	73.72	70.89	82.52	86.23	63.03	190.67	107.18
-45	55.85	59.83	69.59	75.68	73.51	62.78	65.95	51.95	148.67	88.48
-40	52.90	60.74	69.68	76.48	74.90	49.30	52.07	47.78	94.58	65.21
-35	60.11	63.66	71.45	77.14	74.37	44.71	48.07	46.46	68.81	52.24

表 6 当入射光偏振方向沿 y 轴时,不同方位角、不同直径的颗粒的 VSF 曲线的平均相对误差
Table 6 Average relative error of VSF curves of particles with different azimuthal angles and different diameters under polarization direction along y axis

Azimuthal angle /($^{\circ}$)	57 nm	89 nm	193 nm	242 nm	362 nm	456 nm	528 nm	710 nm	806 nm	954 nm
-90	1705.19	3415.62	222.92	1285.81	76.36	34.58	181.17	310.07	548.72	603.10
-85	23.21	165.90	33.54	51.04	82.47	39.71	212.20	323.06	588.15	713.74
-80	7.78	59.28	31.28	41.13	50.42	40.60	189.44	269.47	521.95	649.24
-75	5.17	24.95	35.63	49.93	30.48	41.27	164.99	226.28	467.64	569.34
-70	18.53	18.12	45.96	53.55	31.21	41.24	120.49	155.42	394.79	412.91
-65	19.06	23.94	47.29	56.84	45.97	39.31	109.65	118.35	320.78	294.07
-60	27.07	28.93	55.60	60.79	54.95	44.30	99.11	82.42	247.61	231.74
-55	40.27	39.05	58.54	63.51	62.82	50.32	84.63	63.48	194.01	163.24
-50	42.42	41.42	61.87	67.36	70.44	54.54	75.04	54.58	143.02	116.97
-45	45.42	51.70	66.18	69.74	75.08	58.92	66.69	52.27	114.56	79.61
-40	52.16	58.40	67.61	71.67	77.83	59.49	61.24	52.69	103.24	67.17
-35	55.07	62.44	71.11	73.60	77.32	58.95	57.17	57.77	88.56	72.81

5 结 论

搭建了一种基于空间映射成像技术的三维 VSF 测量系统,结合图像处理技术,在一次测量中实现了对水中悬浮颗粒的大角度范围的 VSF 测量,测量方位角范围为 $0\sim 180^{\circ}$,散射角范围为 $18^{\circ}\sim 160^{\circ}$,测量分辨率为 1° 。

使用该仪器对粒径在 $57\sim 954$ nm 范围内的 10 种水中悬浮颗粒进行测量,对比理论计算结果,以均方根误差值和相关系数作为判断标准,证明了仪器能够在多个散射面上获得多种颗粒稳定且与理论曲线基本吻合的实验曲线,验证了测量装置与测量方法的可靠性。同时,提取到的 VSF 曲线的平均相对误差的计算结果表明,误差值普遍较大,这是 VSF 曲线的分布特性所致,因此测量精度仍有提高空间;另一方面,对粒径较大的颗粒的测量结果出现了一些理论计算未能预测的峰值,因此在进行水中悬浮颗粒测量时,还需要更为有效的补偿手段。

为进一步提高仪器的测量分辨率,增大适用范围,最终实现对自然水体中直径小于 $1\ \mu\text{m}$ 的颗粒的 VSF 的大范围、快速精确测量与分析,在理论与实验方面均需进一步分析改进,例如结合衰减片增大 CCD 的动态响应范围,以将前向小角度纳入测量范围;尝试采用蒙特卡罗算法建模,分析并提取特定尺度的颗粒的 VSF 以作为判别依据等。

参 考 文 献

[1] Lain L R, Bernard S, Matthews M W. Understanding

the contribution of phytoplankton phase functions to uncertainties in the water colour signal[J]. *Optics Express*, 2017, 25(4): A151-A165.

[2] Ding C Z, Yang K C, Li W, *et al.* Intensity distribution of polarized light scattering for a nucleated cell[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 1129001.

丁驰竹, 杨克成, 李微, 等, 有核细胞对偏振光的散射强度分布[J]. *光学学报*, 2013, 33(11): 1129001.

[3] Cui T W, Zhang J, Ma Y, *et al.* Backscattering coefficient retrieval model for nearshore area of Bohai Sea[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(11): 2041-2045.

崔廷伟, 张杰, 马毅, 等, 渤海近岸水体后向散射系数反演模型[J]. *光学学报*, 2008, 28(11): 2041-2045.

[4] Sun C S, Zhang X H, Zhu D H. Energy distribution properties of light scattered by far ship wakes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 2006-2009.

孙春生, 张晓辉, 朱东华, 舰船远程尾流的散射光能量分布特性[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 2006-2009.

[5] Berthon J, Shybanov E, Lee M E, *et al.* Measurements and modeling of the volume scattering function in the coastal northern Adriatic Sea[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(22): 5189-5203.

[6] Pan L C, Ge B Z, Zhang F G. Laser particle size measurement with an annular sample cell[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1029001.

潘林超, 葛宝臻, 张福根. 基于环形样品池的激光粒度测量方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1029001.

[7] Wu J L, Zhang J B, Zhang L, *et al.* Near forward light scattering characteristics of airborne particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(5): 287-297.

吴金雷, 张金碧, 张莉, 等, 大气颗粒物近前向光散

- 射特性研究[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 287-297.
- [8] Ai Y S, Shen Y L. Measurement uncertainty-aware quantitative remote sensing inversion to retrieve suspended matter concentration in inland water[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(7): 0701002.
艾焯霜, 沈永林. 顾及测量不确定性的水体悬浮物浓度遥感定量反演方法[J]. 光学学报, 2016, 36(7): 0701002.
- [9] Harmel T, Hieronymi M, Slade W, *et al.* Laboratory experiments for inter-comparison of three volume scattering meters to measure angular scattering properties of hydrosols[J]. Optics Express, 2016, 24(2): A234-A256.
- [10] Chami M, Thirouard A, Harmel T. POLVSM instrument: an innovative device to measure the directional and polarized scattering properties of hydrosols[J]. Optics Express, 2014, 22(21): 26403-26428.
- [11] Li C, Ke T C, Cao W X, *et al.* An instrument for measuring *in-situ* profiles of the volume scattering function[J]. Optical Technique, 2005, 31: 211-214.
李彩, 柯天存, 曹文熙, 等. 水体体散射函数剖面仪[J]. 光学技术, 2005, 31: 211-214.
- [12] Li C, Cao W X, Ke T C, *et al.* Progress in measurement techniques of volume scattering function of the ocean[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2013, 32(5): 65-72.
李彩, 曹文熙, 柯天存, 等. 水体体散射函数测量技术研究进展[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(5): 65-72.
- [13] Sullivan J M, Twardowski M S. Angular shape of the oceanic particulate volume scattering function in the backward direction[J]. Applied Optics, 2009, 48(35): 6811-6819.
- [14] Babin M, Stramski D, Reynolds R A, *et al.* Determination of the volume scattering function of aqueous particle suspensions with a laboratory multi-angle light scattering instrument[J]. Applied Optics, 2012, 51(17): 3853-3873.
- [15] Tan H, Doerffer R, Oishi T, *et al.* A new approach to measure the volume scattering function[J]. Optics Express, 2013, 21(16): 18697-18711.
- [16] Slade W H, Agrawal Y C, Mikkelsen O A. Comparison of measured and theoretical scattering and polarization properties of narrow size range irregular sediment particles[C]. Oceans, 2013: 14127144.
- [17] Shao B, Jaffe J S, Chachisvilis M, *et al.* Angular resolved light scattering for discriminating among marine picoplankton: modeling and experimental measurements[J]. Optics Express, 2006, 14(25): 12473-12484.
- [18] Auger J, Aptowicz K B, Pinnick R G, *et al.* Angularly resolved light scattering from aerosolized spores: observations and calculations[J]. Optics Letters, 2007, 32(22): 3358-3360.
- [19] Fernandes G E, Pan Y, Chang R K, *et al.* Simultaneous forward- and backward-hemisphere elastic-light-scattering patterns of respirable-size aerosols[J]. Optics Letters, 2006, 31(20): 3034-3036.
- [20] Han C. Theoretical and experimental study of the light scattering properties of micro particles[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2013: 14-16.
韩晨. 微小颗粒光散射特性的理论与实验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013: 14-16.
- [21] Slade W H, Boss E. Calibrated near-forward volume scattering function obtained from the LISST particle sizer[J]. Optics Express, 2006, 14(8): 3602-3615.
- [22] Ding C Z. Study on size retrieval of weakly-scattering particles from light scattering[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2014: 16-18.
丁驰竹. 基于光散射的水中弱散射颗粒粒度反演研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014: 16-18.
- [23] Lee M E, Lewis M R. A new method for the measurement of the optical volume scattering function in the upper ocean[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(4): 563-571.
- [24] Mätzler C. MATLAB functions for Mie scattering and absorption[R]. University of Bern, 2002: 3-5.