

基于偏振比检测和支持向量机的颗粒在线检测

赵儒强, 李璟文*

江南大学理学院, 江苏 无锡 214122

摘要 提出一种基于偏振比检测和支持向量机的颗粒物实时检测与分类方法。采用双波长的半导体激光器作为光源, 使用高灵敏度的雪崩光电二极管分别测量散射光的两个偏振分量, 计算出单个颗粒散射光的偏振比, 从而实现颗粒分类与识别。结合支持向量机算法与神经网络模型可进一步提升颗粒物的分类精度。针对所研究的二元及三元分类场景, 分类精度分别由 64% 和 83% 提升至 100% 和 98%。该方法在制药、化妆品以及工业生产控制与检测等领域具有很好的应用前景。

关键词 光散射; 偏振比; 支持向量机; 颗粒检测

中图分类号 TB96

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230597

Online Particle Detection Based on Polarization Ratio Measurement and Support Vector Machine

Zhao Ruqiang, Li Jingwen*

School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China

Abstract A real-time particle detection and recognition method based on polarization ratio measurement and support vector machine is proposed. A dual-wavelength semiconductor laser was used as the light source. Additionally, a highly sensitive avalanche photodiode was employed to measure the two polarization components of scattered light, following which the polarization ratio of the scattered light was measured for particle classification. Furthermore, we combined a support vector machine and a neural network model to further increase the accuracy of particle classification and recognition. For the binary and ternary classifications in our study, the classification accuracy increases from 64% and 83% to 100% and 98%, respectively. This method has excellent application prospects in the fields of pharmacy, cosmetics, industrial production control, and detection.

Key words optical scattering; polarization ratio; support vector machine; particle detection

1 引言

空气中的颗粒物无处不在^[1], 与人类健康息息相关。此外, 在制药、化妆品等领域, 颗粒物的粒径、密度、折射率将影响生物药效率、寿命等关键指标。因此, 需要准确检测、识别颗粒才能趋利避害, 使颗粒物更好地为人类生产、生活服务^[2-8]。

目前, 一种常用的颗粒检测方法是采用过滤器收集颗粒, 然后再送至实验室分析^[9-10]。虽然这种方法具有较高的检测精度, 但耗时耗力, 无法进行现场实时检测。另一种常见的方法基于激光散射理论^[11-12], 通过分析颗粒物散射光的强度估算颗粒的大小。然而, 由于颗粒的光散射强度不仅取决于颗粒大小, 而且还取

决于其折射率(通常未知), 这不仅影响粒径尺寸检测的准确度, 而且从原理上限制了这种方法在颗粒物折射率测量以及其材质分类中的应用。

文献[13-16]提到的偏振激光雷达及机载气溶胶探测器等偏振极化率测量方法可用于颗粒材质的分类。然而, 为了克服聚焦、准直、滤波等光学元件对散射信号的衰减, 往往需要较高功率的激光器, 这无疑限制了其在如制药等涉及易燃、有毒、热敏颗粒的领域中的应用, 无法满足其对便携式仪器 intrinsic safety 的需求^[17]。其次, 偏振敏感激光雷达通常使用脉冲激光来实现更好的信噪比, 当基于此方法对颗粒物进行逐个采样分析时, 颗粒可能会在激光脉冲的占空比之外通过感应区域从而出现漏检, 无法满足单颗粒的实时检测。

收稿日期: 2023-02-08; 修回日期: 2023-03-12; 录用日期: 2023-04-03; 网络首发日期: 2023-04-13

基金项目: 国家自然科学基金(11904135)

通信作者: *jingwenli@jiangnan.edu.cn

为了克服现有颗粒检测方法在能量敏感型颗粒物检测中的局限性,本文提出一种基于双波长激光照明和调制触发采集模式的颗粒物在线检测与分类方法。其中,一个功率较低(5 mW)的激光器处于连续工作模式,当颗粒物通过感应区域时,光电探测器接收到粒子的散射脉冲,并在上升沿触发另一个具有较高功率(40 mW)的半导体激光器照明该颗粒,同时测量散射信号的水平偏振分量。通过分析颗粒物的偏振比,实现颗粒分类。此外,为了进一步提高分类精度,使用支持向量机(SVM)算法,通过对已知类别的样本进行监督学习后,所研究的二元和三元颗粒分类精度分别由 64% 和 83% 提升至 100% 和 98%。最后,为了进一步降低成本并减小体积,研究了不同的偏振模块在采集颗粒物散射光不同偏振分量时的性能和精度。研究发现,成本更低、体积更小的薄膜偏振片与偏振分束器具有相近的偏振信号检测效果。为了进一步验证其实际应用的可行性,采用基于薄膜偏振片的便携式传感器设计与装置,实现了微米尺度炭黑和二氧化硅颗粒的分类。这也为后续在保证检测性能的基础上进

一步降低传感器的成本提供了有力支撑。

2 光学设计和实验装置

所研究颗粒检测装置的光学设计原理如图 1 所示。气溶胶颗粒被气泵抽运并通过锥形喷嘴,形成与激光束直径相匹配的准直粒子流(直径 0.6 mm),然后依次通过检测区域^[18]。两个准直的半导体激光器模块在粒子流垂直的平面内以不同的角度照向感应区域。其中,连续工作的激光器 1 以角度 1(即 60°)照向颗粒,产生的散射光被光电二极管(PD)检测,该脉冲信号强度用于估算感应区域内的颗粒直径。同时,信号的上升沿也作为激光器 2 的触发信号,用于开启激光器 2 照明感应区域内的颗粒。激光器 2 产生的背向散射光(155°~165°,由光学透镜和激光束 2 之间的角度 2 及光学透镜直径决定)依次通过准直透镜、聚焦透镜、空间滤波器(用于消除背景噪声和杂散光)、偏振分束器和光谱滤波器(只限波长与激光 2 相同的散射光通过),最后由两个雪崩光电二极管模块记录散射光的平行(P)和垂直(S)偏振分量。

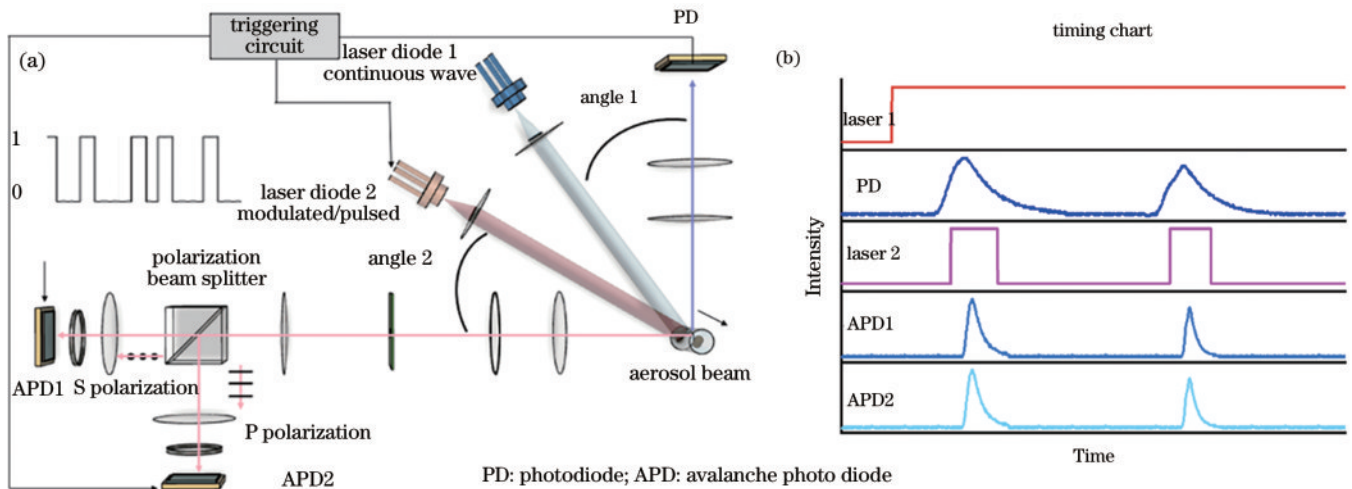


图 1 光学设计图及时序图。(a)光学设计图,颗粒物由激光二极管 1 和 PD 监测,粒子经过时产生的电脉冲信号用于触发较高功率的半导体激光管 2,后向散射光的偏振分量由两个 APD 探测器记录;(b)信号时序图

Fig. 1 Schematics of the optical setup and the timing chart. (a) Schematics of the setup, particle is monitored by laser diode 1 and a PD, the presence of particle represents as an electrical pulse, which triggers the laser diode 2 with high power, the backward polarization components of the scattered light are registered by two APD detectors; (b) timing chart

在目前的实验中,使用 TO 封装的半导体激光二极管(L637P5、637 nm、5 mW、索雷博光电科技(上海)有限公司)对粒子进行持续监测,并使用具有 TTL 调制功能的激光器模块(LBX-730、上升沿时间为 15 ns、730 nm、40 mW、上海昊量光电设备有限公司)作为触发调制的激光器。此外,利用 PD 采集的散射脉冲的强度来提取粒径信息,并使用任意波形信号发生器卡(PCIe9105,2 通道,北京阿尔泰科技发展有限公司)来进行数据同步并将触发信号以 50 MHz 的触发频率发送到 TTL 控制的激光器 2(见图 1 时序图)。通过设置触发阈值可消除因粒径不同而产生的不确定性,从而更精确地控制激光

器 2。最后,使用两台 APD 探测器(APD130、50 M 带宽、光敏面积直径 0.5 mm、28 A/W、桂林光翼智能科技有限公司)将每个粒子散射的光信号转换为电信号,并使用高速数据采集卡(USB-8506、40 MS/s、16 位、4 个单端模拟输入、北京阿尔泰科技发展有限公司)对 PD 和 APD 模块接收的散射光进行采集和输出,从而确定每个粒子的偏振比,利用偏振比区分和识别不同类型的颗粒。以上所有设备和模块均使用 Labview 程序控制。

3 基于偏振比表征的颗粒分类

偏振比可以由背向散射光(155°~165°)的平行分

量和垂直分量简单地计算出来。

$$\delta = \frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}}, \quad (1)$$

式中： I_{\perp} 为散射光的垂直偏振分量； I_{\parallel} 为散射光的平行偏振分量。

在下文中，通过偏振比对 3 种不同颗粒 (PMMA、TPU、PEEK) 进行分类，对应的光学和物理参数如表 1 所示。

在图 2(a) 中，采集不同粒径颗粒的总背向散射强度。其中，对每种粒径均进行 50 次测量并对数据进行平均处理。从图 2 可以看出，颗粒的散射强度会随其粒径的增加而增强，这与光的散射规律相符。此外，在大多数粒径下，PMMA 颗粒的总背向散射强度最低，

表 1 3 种颗粒的特性参数

Type of particles	Refractive index	Mass density / (g/mm ³)	Diameter / μm
PMMA	1.488	1.17	50-250
TPU	1.540	1.2	50-250
PEEK	1.670	1.3	50-250

PEEK 颗粒的总背向散射强度最高。这证实了散射强度不仅取决于粒径，也与其组成成分有关。因此，一般而言，在确定粒径的基础上，利用散射强度可以实现不同材料颗粒的分类。然而，在实际检测应用中，散射光强度往往用于估算颗粒粒径，较难实现不同颗粒的分类。

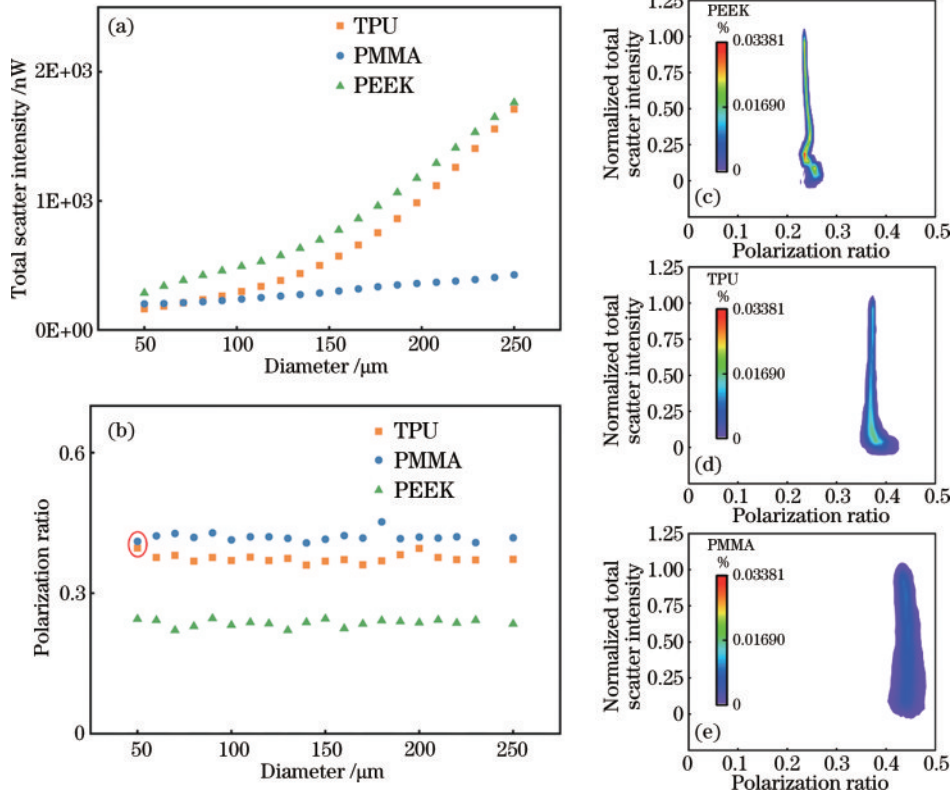


图 2 3 种不同材质颗粒的测量结果。(a) 总背向散射强度和其偏振比的关系；(b) 总背向散射强度和颗粒直径的关系，圆圈表示两种不同材质颗粒的偏振比出现重叠或较为接近的情况；(c)~(e) PEEK、TPU 和 PMMA 的总背向散射强度与其偏振比
Fig. 2 Measurement results of three materials. (a) The relationship between total backscatter intensity and polarization ratio; (b) the relationship between total backscatter intensity and particle diameter, circles indicate cases where the polarization ratios of the two materials overlap; (c)~(e) total backscatter intensity to polarization ratio of PEEK, TPU and PMMA

通过分析偏振比为颗粒物的分类提供了可能。在图 2(b) 中，对不同粒径颗粒的偏振比进行了平均处理。可以看出，不同种类颗粒的偏振比总体稳定且几乎没有交集，证实了偏振比可以作为区分颗粒成分的有效指标。因此，通过分析偏振比进行颗粒分类可以有效避免粒径的不确定性带来的影响，在更大尺寸范围内实现更可靠的颗粒分类。为了更为直观地展示，画出了不同种类颗粒的总背向散射强度与偏振比的特征图，如图 2(c)~(e) 所示。PEEK 材质的颗粒物的特征图较为陡峭，具有明显的集群分布，颗粒的偏振比均

位于 0.23~0.27 之间。相比之下，TPU 和 PMMA 材质的颗粒物特征图的集群特性变弱，在偏振比坐标轴出现了明显的展宽。尽管两种颗粒的偏振比特征分别集中在 0.3~0.4 和 0.4~0.5 区间，然而在边界处，二者出现了较为接近或者重叠的区域，这无疑增加了采用基于偏振比分析进行颗粒物分类与识别的难度。此外，需要说明的是，上述结果是在对颗粒物进行多次测量并平均后的效果。正如图 2(b) 中圆圈标示部分所示，此时，平均处理后的 TPU 和 PMMA 颗粒的偏振比已十分接近，如果不进行平均处理，分类准确度将大幅

下降。针对上述问题,采用支持向量机算法进一步优化这些场景下的颗粒分类精度。

4 基于 SVM 算法的精确分类

4.1 二元分类 SVM 算法

SVM 算法是一种常用于解决分类问题的监督式机器学习算法^[19-21]。算法的目的是找到将两组数据点分开的最佳决策边界即最大边距超平面。在二维空间中,最大边距超平面为一条线。这条线由边距和支持向量(与线距离最小的数据点)决定,边距越大分类效果越好,因此线的位置与支持向量保持最大边距。对

于线性可分的情况,SVM 算法仅需找到边距最大的一条直线。

在数据分析中,应用 SVM 算法对两种粒子进行二元分类。提取图 2(a)中圆圈内标记的原始数据,比较偏振比表征方法和支持向量机的分类效果,具体如图 3(a)所示。在没有统计平均的情况下,基于偏振比分析的分类精度仅为 64%。将数据映射到其他特征空间(即正交方向的归一化偏振强度)并使用 SVM 算法分析数据,即使只是简单地应用线性核来分离也可以达到 100% 的分类精度,如图 2(b)所示。因此,SVM 算法可以作为一种最佳的粒子分类方案。

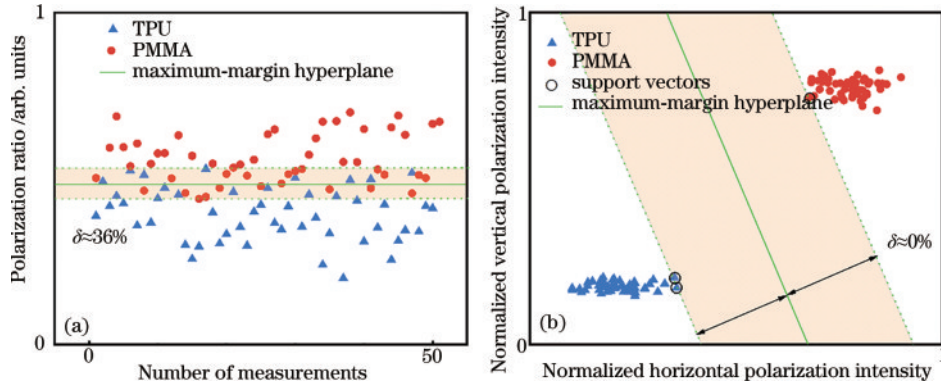


图 3 二元分类 SVM 实验结果对比。(a)TPU 和 PMMA 颗粒偏振比 50 次测量的原始数据;(b)将数据映射到其他特征空间(即正交方向的归一化偏振强度)并应用线性核进行分类的效果

Fig. 3 Comparison of experimental results of binary classification SVM. (a) Raw data of 50 measurements of TPU and PMMA particle polarization ratio; (b) the classification effect of mapping data to other feature spaces (i. e., normalized polarization intensity in the orthogonal direction) and applying linear kernels to classify them

4.2 三元分类 SVM 算法

在实际工业应用中,颗粒种类往往不局限于两种,于是进一步分析了一个三元分类问题。事实上,多元分类问题可以拆解为多个二元分类情况,通常采用“一对一”(ovo)方法和“一对其余”(ovr)两种方法来解决此类问题^[22]。ovo 方法指在不考虑其他类的情况下,每两个类之间找到一个最大边距超平面,对于 N 元分类问题,需要 $N(N-1)/2$ 个二元分类器;ovr 方法指同时考虑所有类,用一个超平面同时将一类和其他所有

类分为两组,一组仅含此类数据,另一组包含其他所有类数据,因此需要构造 N 个二元分类器。对于超过三类的分类问题,ovr 方法分类器更少,因此具有更高的计算效率和预测准确性。在下文中,使用 ovr 方法来解解决颗粒分类问题。

接下来,基于 ovr 方法使用 Python 构建一个三元分类器。实验中,对每种粒子分别采集 100 个数据点,其中,75 个数据点用来训练数据集,另外 25 个数据点用来测试数据集。图 4(a)中, x 轴和 y 轴分别对应于每

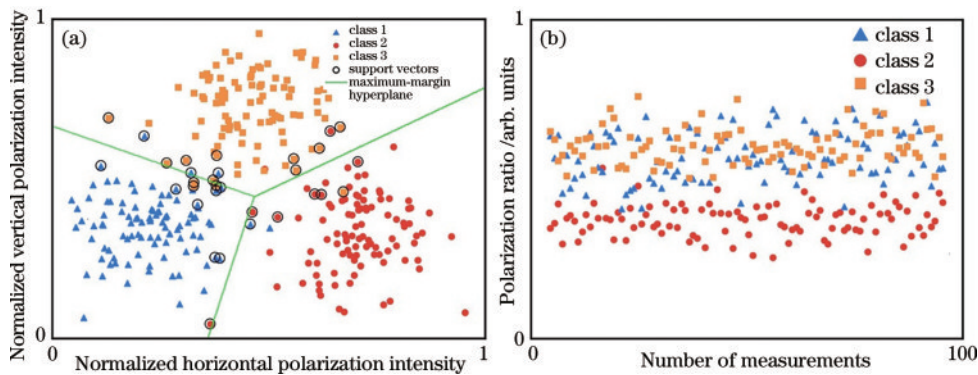


图 4 三元分类 SVM 结果对比。(a)基于 ovr 的多类颗粒类型的实际分类;(b)通过分析颗粒的偏振比对颗粒类型进行分类

Fig. 4 Comparison of SVM results of ternary classification. (a) The actual classification of multiclass particle types based on ovr; (b) classification of particle types by analyzing the polarization ratio of the particles

个粒子的平行和垂直偏振分量的归一化强度,使用经过训练的 SVM 算法模型可以实现 98% 的分类准确度。作为对比,还展示了使用偏振比分析方法的效果,如图 4(b)所示。显然,三类粒子表现出了较大的重叠,准确率较低,仅为 83%。因此,对多种颗粒进行分类时,使用经过训练的 SVM 算法模型可以实现粒子的高准确率分类。此外,在实际应用中通过加大数据训练量可以进一步提高其分类准确性。

5 不同偏振模块的效果比较

在实际的便携式粒子传感器产品搭建中,通常首选尺寸更小和成本更低的光学元件。目前实验中使用

的偏振分光元件是偏振分束器(1000 元/个),通过使用成本更低的偏振元件(例如:薄膜偏振片,20 元/个;线栅偏振片,100 元/个)可以进一步降低粒子传感器的总成本。因此,比较研究了 5 种不同的偏振模块(即偏振分束器、薄膜偏振片、线栅偏振片,以及非偏振分束器(分光比为 1:1)与薄膜偏振片或线栅偏振片的组合)在采集颗粒散射光偏振分量时的性能和效果,其原理设计图和实验结果如图 5 所示。可以看出,相较于偏振分束器,薄膜偏振片和线栅偏振片在保持相近的偏振比测量精度的同时,具有更高的散射信号强度。因此,使用薄膜偏振片更有利于小粒径颗粒散射光的弱信号采集。此外,由于使用了 1:1 分光比的非偏振

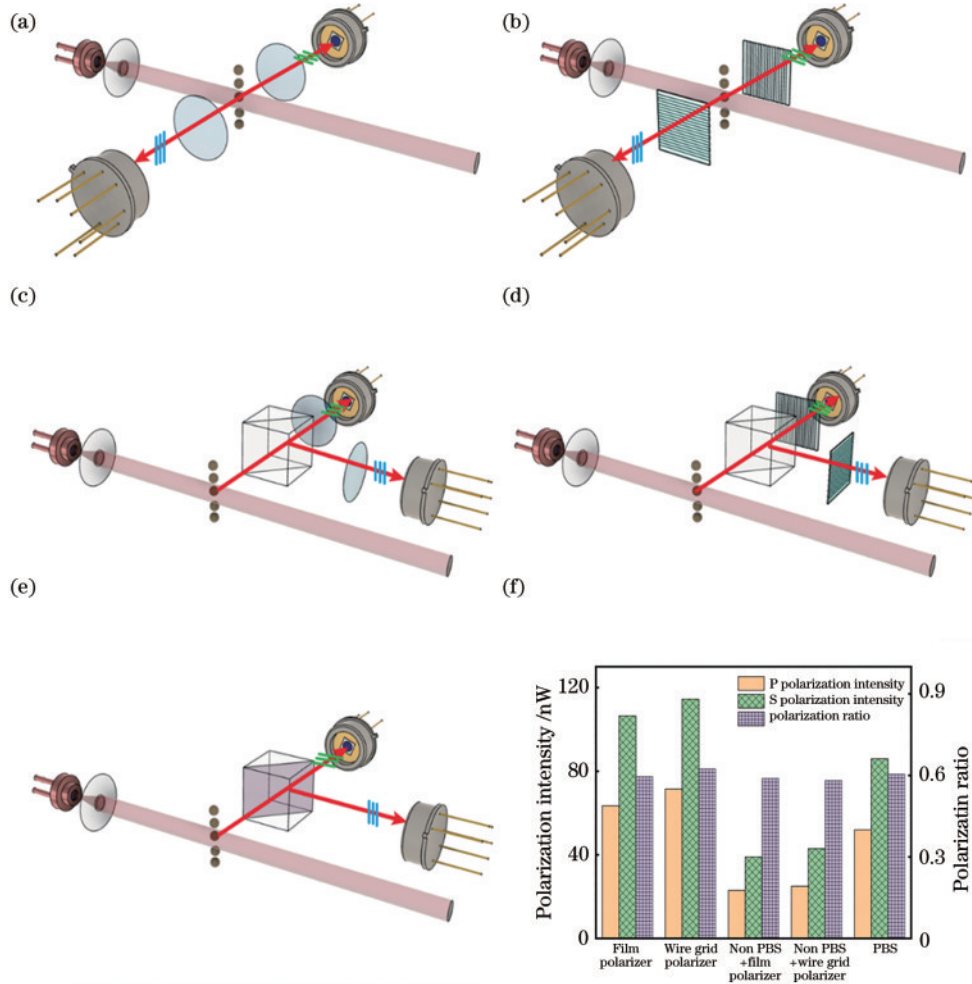


图 5 不同偏振模块对散射光的平行和垂直偏振分量采集效果的比较。(a)直接将薄膜偏振片正交放置在粒子流和激光束相交面的两侧;(b)直接将线栅偏振片正交放置在粒子流和激光束相交面的两侧;(c)非偏振分束器(1:1 分光比)与薄膜偏振片的组合;(d)非偏振分束器(1:1 分光比)与线栅偏振片的组合;(e)基于偏振分束器和两个光电探测器的配置;(f)不同配置下测量的散射光强度和偏振比

Fig. 5 Comparison of the parallel and vertical polarization component acquisition effects of scattered light by different polarization modules. (a) Placing the thin film polarizer directly orthogonally on either side of the intersection surface of the particle stream and the laser beam; (b) directly orthogonal placement of the line grid polarizer on either side of the intersection surface of the particle stream and the laser beam; (c) a combination of an unpolarized beam splitter (1 : 1 splitting ratio) and a thin-film polarizer; (d) a combination of an unpolarized beam splitter (1 : 1 splitting ratio) and a grid-polarizer; (e) configuration based on a polarization beam splitter and two photodetectors; (f) the sampling intensity and the calculated polarization ratio according to the different configurations

分束器,非偏振分束器与薄膜偏振片或线栅偏振片组合的信号衰减大于 50%。最后,总体来说,尽管使用不同偏振模块的散射信号强度有较大差异,但测得的偏振比仍较为稳定。因此,在检测和分类粒子时,偏振比是一个比散射强度更可靠和有效的指标。在下一节中,将进一步研究基于薄膜偏振片的实验装置在实际颗粒分类应用中的效果。

6 实时颗粒监测和分类的紧凑型传感器演示

为了进一步简化粒子传感器设计并降低实际产品的搭建成本,将先前使用的偏振分束器换成两个正交放置的薄膜偏振片,并将其用于颗粒物偏振信号的采集。测试时,使用空气泵将粒径范围为 1~15 μm 的炭

黑和二氧化硅颗粒(物理、光学特性见表 2)以 1 L/min 的流速泵送进检测区域。实验结果如图 6 所示,两种颗粒表现出明显不同的偏振比,因此,可以将偏振比作为区分两种颗粒的指标。为了便于对比,还使用 Mie 散射理论进行了模拟验证^[23-25]。模拟结果如图 6(b)所示,仿真曲线与实验结果的良好吻合再次证实了使用偏振比实现有效粒子分类的可行性。

表 2 本节粒子的特性参数

Table 2 Characteristic parameters of particles in this section

Type of particles	Refractive index	Mass density / (g/mm ³)	Diameter / μm
Silica	1.45	2	1-14
Carbon black	1.9	1.8	1-14

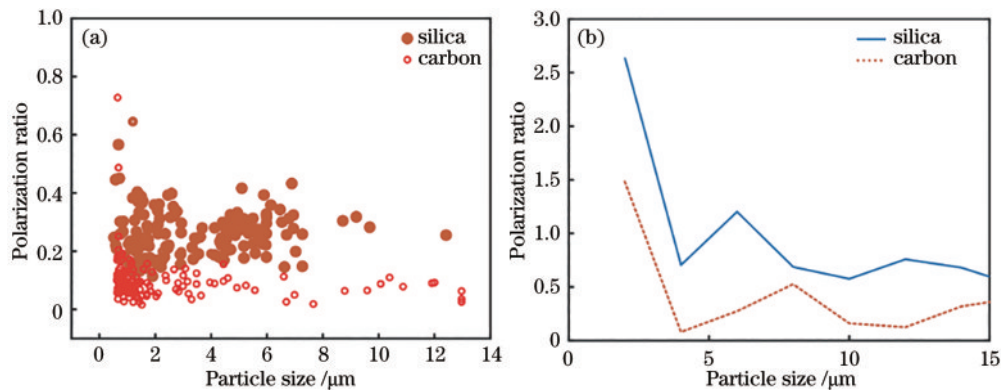


图 6 实验结果和模拟仿真。(a) 粒径从 1~14 μm 变化时的偏振比实验结果;(b) 粒径从 1~15 μm 变化时的偏振比模拟结果

Fig. 6 Experimental results and simulation. (a) Experimental results of polarization ratios when particle size varying from 1-14 μm ; (b) simulated results of polarization ratios when particle size varying from 1-15 μm

7 分析与讨论

本研究主要针对有毒、易燃等能量敏感型颗粒的实时检测需求,同时满足医药、化妆品等特定应用场合对检测仪器 intrinsic safety 的标准^[17],即对于连续工作的激光器功率不高于 35 mW,对脉冲输出(小于 20 μs)的激光要求功率不高于 70 mW,提出一种基于双波长激光照明和调制触发采集模式的颗粒物在线检测与分类方法。较低功率(5 mW)的激光器为连续工作模式,通过颗粒经过该光束时产生的散射光脉冲触发另一只较高功率(40 mW)的半导体激光器照明该颗粒,同时采集散射光的垂直和水平偏振分量。通过分析颗粒物的偏振比信息,实现对颗粒物的实时检测与分类。首先,结合连续工作的低功率半导体激光器和脉冲调制工作的较高功率激光器可以极大程度满足特定工业领域对传感器 intrinsic safety 的要求,同时,也可以保障粒子的散射光信号在经过其他光学元件的衰减后,仍有足够的信号强度,从而提高检测精度和降低误判率。需要说明的是,目前实验中所测的颗粒物尺寸较大,颗粒散射光强度较大。当需要基于该装置进行几百 nm 甚至更

小的颗粒物检测时,为了提高偏振信号的检测信噪比,可以进一步提高脉冲激光的功率。此外,通过基于支持向量机的监督学习模型,显著提高了同样应用场景下颗粒物的分类精度。在本研究的二元及三元颗粒分类中,精度分别由 64% 和 83% 提升至 100% 和 98%。

目前,使用高速数据采集卡(USB-8506、40 MS/s、16 位、4 个单端模拟输入、北京阿尔泰科技发展有限公司)进行数据采集,并使用任意波形发生器卡(PCIe9105、2 通道、北京阿尔泰科技发展有限公司)进行数据同步和触发。实际上,为了优化设计,这两个卡可以进一步替换成一个可重新配置的多功能 I/O 设备(USB-7856、美国国家仪器有限公司)。该设备可以非常灵活地对 I/O 设备进行板载数据处理、同步以及控制。同时,该设备也与 Labview 兼容。此外,相较于传统的 DAQ 硬件,其集成的 FPGA 模块提供了专门的定制功能,可以用于高速采样和单通道触发。当然,设计一种更复杂且更专业的专用集成电路(ASIC)有望进一步提高系统效率,增强鲁棒性,降低总体成本。

在研究过程中发现,某些情况下,仅仅简单地分析偏振比来区分粒子分类准确度较差。因此,使用 SVM

监督学习进一步提高粒子的分类精度。选用 SVM 算法是因为其易于实现且计算要求较低。然而, SVM 算法在处理大数据量样本或复杂重叠样本时存在局限性。因此, 为了达到更稳定的优化效果, 在实践中还可以结合 k-最近邻(k-NN)和人工神经网络(ANN)等其他监督学习方法^[26-28]。

此外, 需要说明的是, 在涉及大量不规则颗粒和非球形颗粒的应用场景下, 颗粒的取向可能会降低颗粒尺寸测量和颗粒分类的准确性。高度不规则的粒形会导致散射强度和偏振比出现较大的差异^[29]。为进一步解决此类问题, 一种常见方法是用椭球体、圆柱体和立方体等理想几何形状来表征粒子, 从而获得与实际更为相符的散射特征^[30-31]。另一种常见方法是采用适用于非球形散射光计算的 T 矩阵法(T-matrix method)^[32], 从而建立任意形状颗粒的散射特征, 为解析颗粒的偏振变化提供更为精确的参考。

最后, 本研究描述了颗粒物的粒径、偏振比、散射强度等特性及其之间的关系。在实际应用中, 颗粒物的另一个关键参数为粒子的运动速度。粒子的运动速度与其飞行时间和空气动力学尺寸相关。一种常用的颗粒飞行时间和运动速度的测量方法为采用一种具有特定间隔的双峰激光束照明粒子, 然后记录颗粒经过两个峰之间的时间差来估算粒子的飞行时间。这种方

法已在美国 TSI3321 桌面型空气动力学粒径谱仪中应用。在实际应用场景中, 特别是需要利用便携式传感器对颗粒进行实时、在线检测时, 另一种可以估算颗粒飞行时间和运动速度的方法是分析时域散射光信号的脉冲宽度。在颗粒照明激光光斑尺寸确定的情况下, 可以由脉冲宽度来估计其飞行时间。基于此原理, 采用第 6 节所用实验装置, 测量了不同粒径尺寸炭黑颗粒的散射光信号。在图 7(a)中, 提取了其中一个时域脉冲, 并利用脉冲的半高宽来估算颗粒飞行时间。同时, 脉冲的峰值用于计算颗粒物的粒径。颗粒粒径与其飞行时间的关系如图 7(b)所示。粒径不同, 通过激光光斑所用的时间也不同。此外, 图 7(c)展示了由此计算而得的颗粒在不同粒径下的运动速度。正如预期, 颗粒粒径不同, 飞行速度不同。较大的颗粒由于其沉降速度相对慢, 飞行时间较长。粒径较小的颗粒正好相反, 通过同样距离所用的时间更短。理论上, 颗粒物的飞行时间和运动速度与颗粒的密度相关, 因此也可以用来识别和分类颗粒。然而, 由于实际场景下颗粒物的形状、运动朝向也将影响颗粒的散射脉冲形状和飞行时间, 在前期研究中, 基于脉冲半高宽估算飞行时间和运动速度仍有一定的误差。在后期的研究工作中, 将进一步开发基于双峰激光束的飞行时间测量装置, 从而提升所提方法的颗粒分类精度。

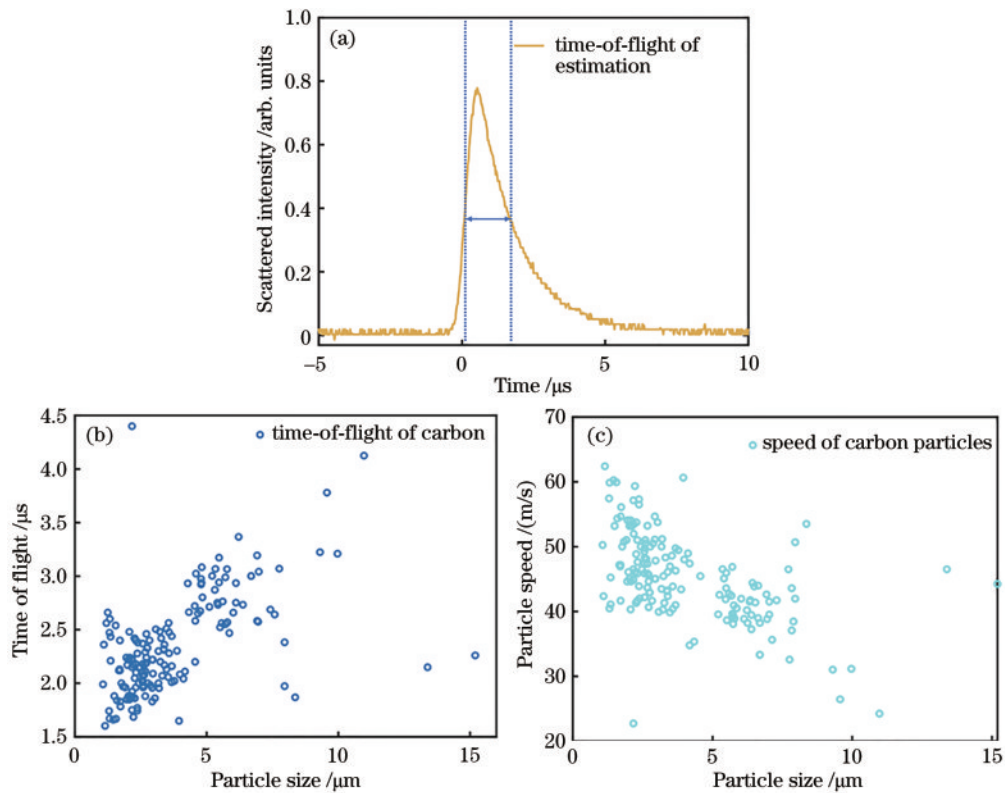


图 7 颗粒飞行时间和运动速度的实验结果。(a) 单个炭黑颗粒的散射光脉冲信号, 通过提取单颗粒散射光脉冲的半高宽信息来估算颗粒的飞行时间; (b) 不同粒径炭黑颗粒的飞行时间分布; (c) 不同粒径炭黑颗粒的运动时间分布

Fig. 7 Experimental results of particle flight time and speed of motion. (a) Scattering pulse of a carbon particle, extraction of the pulse half-maximum full width for estimation of the time-of-flight measurement; (b) time-of-flight distribution of carbon black particles with different particle sizes; (c) movement time distribution of carbon black particles with different particle sizes

8 结 论

综上所述,提出并研究了一种基于偏振比检测的颗粒物在线检测方法与装置。该装置主要用于解决特定工业领域对仪器设备 intrinsic safe 的特殊需求,同时实现对单颗粒的检测、识别等统计分析。工作在连续模式的低功率激光器监测到粒子通过时,触发第二只较高功率的激光器照射感应区域中的粒子,并由雪崩光电二极管采集其散射光的偏振分量,通过分析偏振比,实现单颗粒的实时鉴别与分类。此外,为了提高分类精度,采用了 SVM 算法,使用经过训练的算法模型后,准确率提升至 98%。最后,研究了不同偏振模块和方法在分离颗粒物散射光偏振分量时的效果,这对搭建便携式颗粒检测装置具有参考意义。所提技术在制药和化妆品行业的颗粒监测和分类以及易燃、有毒粉末的检测等方面有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 梁立东, 李明文. 空气颗粒物研究进展[J]. 防护林科技, 2020(6): 48-51.
Liang L D, Li M W. Research progress of airborne particulate matter[J]. Protection Forest Science and Technology, 2020(6): 48-51.
- [2] Bhanarkar A D, Majumdar D, Nema P, et al. Emissions of SO₂, NO_x and particulates from a pipe manufacturing plant and prediction of impact on air quality[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2010, 169 (1/2/3/4): 677-685.
- [3] 靳雅丽, 杨德智, 杨世颖, 等. 纳米药物分析技术方法研究新进展[J]. 医药导报, 2021, 40(4): 491-495.
Jin Y L, Yang D Z, Yang S Y, et al. New advances in analytical techniques and methods of nanomedicine[J]. Herald of Medicine, 2021, 40(4): 491-495.
- [4] Muller C O, Yu H, Zhu B. Ambient air quality in China: the impact of particulate and gaseous pollutants on IAQ [J]. Procedia Engineering, 2015, 121: 582-589.
- [5] 魏兰芬, 潘协商, 王亚霞, 等. 洁净手术室部分净化指标动态变化规律的研究[J]. 中国消毒学杂志, 2010, 27 (5): 554-556, 560.
Wei L F, Pan X S, Wang Y X, et al. Research on change regularity of some cleanliness indexes in clean surgical theaters in operation[J]. Chinese Journal of Disinfection, 2010, 27(5): 554-556, 560.
- [6] Cadelis G, Tourres R, Molinie J. Short-term effects of the particulate pollutants contained in Saharan dust on the visits of children to the emergency department due to asthmatic conditions in Guadeloupe (French Archipelago of the Caribbean)[J]. PLoS One, 2014, 9(3): e91136.
- [7] Williams M, Villarreal A, Bozhilov K, et al. Metal and silicate particles including nanoparticles are present in electronic cigarette cartomizer fluid and aerosol[J]. PLoS One, 2013, 8(3): e57987.
- [8] Kaur A, Bansal D, Singla S. A review on estimating the effects of inhaling airborne pollutants and air quality monitoring[C]//2017 8th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), July 3-5, 2017, Delhi, India. New York: IEEE Press, 2017.
- [9] Shin S E, Jung C H, Kim Y P. Analysis of the measurement difference for the PM₁₀ concentrations between beta-ray absorption and gravimetric methods at gosan[J]. Aerosol and Air Quality Research, 2011, 11(7): 846-853.
- [10] Pucer J F. The correction of TEOM PM₁₀ measurements at different monitoring sites and climates[J]. SN Applied Sciences, 2019, 1(10): 1-13.
- [11] 肖宏波, 陈刚. 光散射法测量颗粒尺寸、浓度的实验研究[J]. 应用光学, 2009, 30(4): 635-638.
Xiao H B, Chen G. An experimental research on particle size and volume concentration based on light scattering [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(4): 635-638.
- [12] Pitz M, Hellmann A, Ripperger S, et al. Development of a 3D light scattering sensor for online characterization of aerosol particles[J]. Particle & Particle Systems Characterization, 2018, 35(6): 1800045.
- [13] 杨昊, 谢晨波, 方志远, 等. 星-地激光雷达联合观测合肥地区的气溶胶垂直分布[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 0110001.
Yang H, Xie C B, Fang Z Y, et al. Joint observations of vertical distribution of aerosols in Hefei area by spaceborne and ground-based lidars[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(1): 0110001.
- [14] 石一鸣, 殷高方, 赵南京, 等. 静态光散射法水体悬浮颗粒物粒度测量背景干扰消除方法[J]. 中国激光, 2022, 49(7): 0704004.
Shi Y M, Yin G F, Zhao N J, et al. Static light scattering method for measuring particle sizes of suspended particles in water body to eliminate background interference [J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(7): 0704004.
- [15] 丁宁, 于博, 颜昌翔, 等. 星载气溶胶被动光学遥感仪器: 进展与未来展望[J]. 光学学报, 2022, 42(17): 1701002.
Ding N, Yu B, Yan C X, et al. Spaceborne aerosol passive optical remote sensing instrument: progress and future prospect[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(17): 1701002.
- [16] Baumgardner D, Jonsson H, Dawson W, et al. The cloud, aerosol and precipitation spectrometer: a new instrument for cloud investigations[J]. Atmospheric Research, 2001, 59/60: 251-264.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局. 爆炸性环境第 4 部分: 由本质安全型“i”保护的设: GB/T 3836.4—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Explosive atmospheres-part 4: equipment protection by intrinsic safety “i”: GB/T 3836.4—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021.
- [18] Sivaprakasam V, Lin H B, Huston A L, et al. Spectral characterization of biological aerosol particles using two-wavelength excited laser-induced fluorescence and elastic

- scattering measurements[J]. *Optics Express*, 2011, 19(7): 6191-6208.
- [19] Cortes C, Vapnik V. Support-vector networks[J]. *Machine Learning*, 1995, 20(3): 273-297.
- [20] Hsia J Y, Lin C J. Parameter selection for linear support vector regression[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 31(12): 5639-5644.
- [21] 白鹤轩, 杨峰, 李丹阳, 等. 基于表面增强拉曼光谱的多组物质分类识别[J]. *光学学报*, 2021, 41(20): 2024001. Bai H X, Yang F, Li D Y, et al. Multi-component substance classification and recognition based on surface-enhanced Raman spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(20): 2024001.
- [22] 窦丹丹, 姜洪开, 何毅娜. 基于信息熵和SVM多分类的飞机液压系统故障诊断[J]. *西北工业大学学报*, 2012, 30(4): 529-534. Dou D D, Jiang H K, He Y N. Effectively diagnosing faults for aircraft hydraulic system based on information entropy and multi-classification SVM[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2012, 30(4): 529-534.
- [23] Bi L, Yang P. Accurate simulation of the optical properties of atmospheric ice crystals with the invariant imbedding T-matrix method[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2014, 138: 17-35.
- [24] Mishchenko M I, Travis L D, Lacis A A. Book review: scattering, absorption, and emission of light by small particles[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2002: 83-129.
- [25] Mishchenko M I, Dlugach J M, Yurkin M A, et al. First-principles modeling of electromagnetic scattering by discrete and discretely heterogeneous random media[J]. *Physics Reports*, 2016, 632: 1-75.
- [26] Yang X W, Yu Q Z, He L F, et al. The one-against-all partition based binary tree support vector machine algorithms for multi-class classification[J]. *Neurocomputing*, 2013, 113: 1-7.
- [27] Chojaczyk A A, Teixeira A P, Neves L C, et al. Review and application of Artificial Neural Networks models in reliability analysis of steel structures[J]. *Structural Safety*, 2015, 52: 78-89.
- [28] Kuhkan M. A method to improve the accuracy of k-nearest neighbor algorithm[J]. *International Journal of Computer Engineering and Information Technology*, 2016, 8(6): 90-95.
- [29] Piedra P, Kalume A, Zubko E, et al. Particle-shape classification using light scattering: an exercise in deep learning[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2019, 231: 140-156.
- [30] Mishchenko M I, Hovenier J W. Depolarization of light backscattered by randomly oriented nonspherical particles [J]. *Optics Letters*, 1995, 20(12): 1356-1358.
- [31] Mishchenko M I, Dlugach J M, Liu L. Linear depolarization of lidar returns by aged smoke particles[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(35): 9968-9973.
- [32] Bi L, Lin W S, Liu D, et al. Assessing the depolarization capabilities of nonspherical particles in a super-ellipsoidal shape space[J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1726-1742.