中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

利用离焦诱导的弥散圆进行镜面颗粒尺寸测量

路洪腾 宫平 卢鑫磊 韶莉霞 马辰昊

Using defocus-induced circle of confusion for particle size measurement of the dust on mirrors

LU Hong-Teng, GONG Ping, LU Xin-Lei, SHAO Li-Xia, MA Chen-Hao

引用本文:
路洪腾, 宫平, 卢鑫磊, 韶莉霞, 马辰昊. 利用离焦诱导的弥散圆进行镜面颗粒尺寸测量[J]. 中国光学, 2026, 19(1): 39−48. doi: 10.37188/CO.2025−0108
LU Hong-Teng, GONG Ping, LU Xin-Lei, SHAO Li-Xia, MA Chen-Hao. Using defocus-induced circle of confusion for particle size measurement of the dust on mirrors[J]. *Chinese Optics*, 2026, 19(1): 39-48. doi: 10.37188/CO.2025-0108

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2025−0108

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

多维度单分子成像研究进展

Advances in multi−dimensional single molecule imaging

中国光学（中英文）. 2022, 15(6): 1243 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0088

舰船尾流气泡目标激光后向散射特性研究

Laser backscattering characteristics of ship wake bubble target

中国光学（中英文）. 2023, 16(6): 1333 https://doi.org/10.37188/CO.2023−0043

偏振光在椭球细粒子中多次散射传输特性

Multiple scattering transmission characteristic of polarized light in ellipsoidal fine particles

中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 348 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0144

基于差分传递函数法的大口径平面镜检测

Detection of large aperture flat mirror based on the differential optics transfer function method

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 992 https://doi.org/10.37188/CO.2022−0122

水下光场的迭代求解

Iterative solution of underwater scattering light field

中国光学（中英文）. 2022, 15(2): 297 https://doi.org/10.37188/CO.2021−0162

基于摄影测量的定日镜面形误差检测方法研究

The measurement method of heliostat surface shape error based on photogrammetry

中国光学（中英文）. 2023, 16(2): 425 https://doi.org/10.37188/CO.2021−0210

文章编号 2097-1842(2026)01-0039-10

利用离焦诱导的弥散圆进行镜面颗粒尺寸测量

路洪腾, 宫 平, 卢鑫磊, 韶莉霞, 马辰昊*
（长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022）

摘要: 光学表面颗粒污染检测是保障空间望远镜成像性能的重要措施。传统颗粒污染检测常使用暗场散射显微镜拍摄颗粒图像, 再对图像中颗粒外轮廓作外接圆计算颗粒尺寸。该方法要求拍摄过程严格对焦, 对不规则形状的颗粒尺寸检测结果误差较大。为了提高检测镜面上微小颗粒尺寸的精度, 消除对焦不准和颗粒形状差异带来的误差。本文提出利用离焦诱导的弥散圆检测颗粒尺寸的方法。利用颗粒尺寸与颗粒散射能量的对应关系, 通过离焦将颗粒的暗场散射图像变成弥散圆。最后分析颗粒离焦弥散圆特征来测量颗粒的真实尺寸。该方法可以规避颗粒形状以及系统对焦程度对检测结果的干扰。实验结果表明: 利用离焦弥散圆检测颗粒尺寸的方法在不同离焦量下都有较高的检测精度, 相较于传统的使用暗场散射显微镜的方法, 对于不规则形状颗粒尺寸的检测误差从平均 58% 降低到 10.3%。验证了离焦弥散圆检测颗粒尺寸方法的可行性, 并可以有效提高检测不规则颗粒尺寸的精度。

关 键 词: 颗粒检测; 暗场散射; 点扩散函数; Mie 散射
中图分类号: O436.2 **文献标志码:** A **doi:** 10.37188/CO.2025-0108 **CSTR:** 32171.14.CO.2025-0108

Using defocus-induced circle of confusion for particle size measurement of the dust on mirrors

LU Hong-Teng, GONG Ping, LU Xin-Lei, SHAO Li-Xia, MA Chen-Hao*
(*School Of Opto-Electronic Engineering*, *Changchun University of Science and Technology*, *Changchun* 130022, *China*)
* *Corresponding author*, *E-mail*: *mach@cust.edu.cn*

Abstract: Optical surface particulate contamination detection is critical to maintaining the imaging performance of space telescopes. Conventional approaches typically employ dark-field scattering microscopy to capture particle images, where particle size is estimated from the circumcircle of the particle's contour. However, this method requires precise focusing during image acquisition and is prone to large errors when dealing with irregularly shaped particles. To address these limitations, this paper introduces a novel sizing method based on defocus-induced blur circles. By exploiting the relationship between particle size and its scattered light energy, the defocused dark-field scattering image of a particle is transformed into a blur circle, whose properties can be analyzed to determine the actual particle size. Unlike conventional contour-based measurements, the blur-circle approach is inherently less sensitive to particle shape irregularities and system

收稿日期: 2025-08-12; **修订日期:** 2025-09-09
基金项目: 吉林省科技发展计划项目(No. 20240404052ZP)
Supported by Jilin Provincial Scientific and Technological Development Program (No. 20240404052ZP)

defocus. Experimental validation demonstrates that the proposed method achieves high sizing accuracy across varying defocus distances. Compared with traditional dark-field scattering microscopy, the average measurement error for irregularly shaped particles is significantly reduced from 58% to 10.3%. These results confirm both the feasibility and effectiveness of the blur circle method in improving measurement precision for irregular particulate contaminants.

Key words: particle detection; dark-field scattering; point spread function; Mie scattering

1 引 言

空间望远镜是天体物理研究的重要工具[1]，随着科学研究的逐渐深入，对望远镜性能的要求也日益提高。在空间望远镜的制造、装配、测试与运输过程中，光学镜面难免会引入颗粒污染物[2-3]。镜面存在的颗粒污染会严重影响系统成像质量，不仅降低光学传输效率，还会产生散射光[4]，当颗粒散射光经光学系统传播至出瞳时，将引入杂散光[5]。为保障望远镜性能不受影响，以确保镜面洁净度符合要求，必须对光学镜面的颗粒污染水平进行准确检测，以便及时发现污染源并采取相应纠正措施。

暗场显微镜是检测镜面颗粒污染的常用技术手段[6-8]。在该系统中，光源以较大角度斜入射至待测表面，使得只有来自颗粒的散射光能够进入物镜成像，从而在暗背景下形成明亮的颗粒斑点。由于具备灵敏度高、非接触、操作便捷等优点，暗场散射法已被广泛应用于精密光滑表面的亚微米级颗粒污染检测中[8-11]。

评估镜面颗粒污染水平的一个关键指标是面积覆盖率（Percent Area coverage, PAC）[2]，为获得镜面的 PAC 信息，通常需要统计采样区域内颗粒的尺寸与数量。具体方法是对镜面颗粒进行暗场成像，通过图像算法计算各颗粒尺寸，进而统计颗粒覆盖的总面积。然而，该方法在实际应用中面临以下几个难点：（1）由于颗粒直径差异显著，同时检测尺寸相差 5 倍的颗粒要求相机具备约 25 倍的动态范围。若曝光值过低，较小颗粒将无法成像；曝光值过高，则较大颗粒的图像会出现饱和。在饱和情况下，受探测器溢出效应影响，图像中颗粒的尺寸会大于其真实尺寸。（2）显微镜系统景深有限，当待测镜面为非平面结构时，难以保证整个采样区域内的颗粒均处于合焦状态。离焦会导致颗粒图像弥散为较大亮斑，从而使检测结果偏大。（3）在获取颗粒图像后，尺寸计算本身也存在困难。现有理论多将颗粒近似为球形，而实际颗粒形状复杂多样。常用的以轮廓外接圆直径作为颗粒尺寸，会引入显著的计算误差。

上述问题导致传统暗场散射法的测量结果与颗粒污染的实际水平之间存在显著误差，制约了该技术在空间望远镜镜面颗粒污染高精度检测中的应用。

离焦弥散圆是物点沿光轴远离焦平面时，由一系列衍射环构成的同心圆结构。其光学特性可由点扩散函数（Point Spread Function, PSF）来描述[12]。弥散圆的结构编码了目标与焦平面之间的距离信息，该原理已被广泛应用于目标深度检测中[13]。本文创新性地将这一原理应用于颗粒尺寸检测：通过有意引入离焦，使暗场散射显微镜下的颗粒光斑转化为弥散圆。通过检测弥散圆所包含的总散射光能量，并基于颗粒散射能量与其尺寸的对应关系，即可反演出颗粒的真实尺寸。为验证此方法，设计了实验来标定离焦弥散圆能量与颗粒尺寸的关联，结果证实该方法在颗粒尺寸检测中具有更高的精度。

2 离焦诱导弥散圆检测颗粒尺寸原理

2.1 颗粒散射能量与尺寸关系

颗粒的散射光能量与其尺寸之间存在确定的数学关系，基于此关系通过测量散射能量来反演颗粒尺寸，已成为单颗粒粒度检测的一种有效方法[14]。严格的光散射理论需基于光的电磁波本质，通过求解麦克斯韦方程组来获得精确的散射场分布[14]。但求解过程繁琐且受到诸多限制，对于一些复杂问题难以给出精确的结果。Mie 散射理论被视作均匀球状粒子对平面电磁波散射的严格数学解，适用于微米到纳米尺度任意尺寸和光

波长的球形粒子[14-15]。

Mie 理论引入了无量纲参数$\alpha = 2\pi a/\lambda$作为颗粒尺寸参数, 其中a为颗粒半径, λ为入射光波长。Mie 散射的主要物理量有消光系数K_{ext}、散射系数K_{sca}、吸收系数K_{abs}、散射振幅函数S_1和S_2等[14]。

$$K_{\text{ext}} = \frac{4}{\alpha^2}\text{Re}[s(0)] = \frac{2}{\alpha^2}\sum_{l=1}^{\infty}(2l+1)\text{Re}(a_l + b_l) \quad , \tag{1}$$

$$K_{\text{sca}} = \frac{C_{\text{sca}}}{\pi a^2} = \frac{2}{\alpha^2}\sum_{l=1}^{\infty}(2l+1)\left(|a_l|^2 + |b_l|^2\right) \quad , \tag{2}$$

$$K_{\text{abs}} = K_{\text{ext}} - K_{\text{sca}} \quad , \tag{3}$$

$$S_1(\theta) = \sum_{l=1}^{\infty}\frac{2l+1}{l(l+1)}[a_l\pi_l + b_l\tau_l] \quad , \tag{4}$$

$$S_2(\theta) = \sum_{l=1}^{\infty}\frac{2l+1}{l(l+1)}[b_l\pi_l + a_l\tau_l] \quad , \tag{5}$$

式中π_l和τ_l与散射角θ有关, Mie 系数a_l和b_l是尺寸参数α和颗粒相对周围介质折射率m的函数, 表达式为

$$a_l = \frac{\psi_l(\alpha)\psi_l'(m\alpha) - m\psi_l'(\alpha)\psi_l(m\alpha)}{\zeta_l(\alpha)\psi_l'(m\alpha) - m\zeta_l'(\alpha)\psi_l(m\alpha)} \quad , \tag{6}$$

$$b_l = \frac{m\psi_l(\alpha)\psi_l'(m\alpha) - \psi_l'(\alpha)\psi_l(m\alpha)}{m\zeta_l(\alpha)\psi_l'(m\alpha) - \zeta_l'(\alpha)\psi_l(m\alpha)} \quad , \tag{7}$$

其中ψ_l和ζ_1分别表示半整数阶 Bessel 函数和 Hankel 函数。

颗粒散射的能量可以用散射截面C_{sca}来描述[14]。C_{sca}表示颗粒在单位时间内散射的全部光能量与入射光强之比, 即颗粒单位时间散射总能量为入射光单位时间投射到散射截面的能量。散射截面表示为

$$C_{\text{sca}} = \frac{2\pi a^2}{\alpha^2}\sum_{l=1}^{\infty}(2l+1)\left(|a_l|^2 + |b_l|^2\right) \quad . \tag{8}$$

当颗粒粒径远小于入射光波长($\alpha \ll 1$)时, 颗粒散射特性近似于瑞利散射, 散射截面公式为

$$C_{\text{sca}} = \frac{8}{3}\alpha^4\left|\frac{m^2-1}{m^2+2}\right|^2\pi a^2 \quad , \tag{9}$$

颗粒的散射能量与粒径的 6 次方成正比, 故颗粒的粒径变化会大幅影响其散射能量。

当粒径尺寸远大于波长范围时($\alpha \gg 1$), 颗粒散射特性近似夫琅禾费衍射。散射截面公式可推导为

$$C_{\text{sca}} \approx 2\pi a^2 \quad , \tag{10}$$

颗粒的散射能量与粒径的 2 次方成正比, 散射关系与几何光学结论近似。

当颗粒尺寸接近波长尺度时 ($\alpha \approx 1$), 其散射特性会出现显著的米氏共振现象[16]。表现为散射效率随颗粒尺寸变化而发生剧烈振荡。其物理机理是: 当入射光波长与球形微粒尺寸满足特定比例时, 光波可在微粒内部或表面激发出稳定的驻波模式。当入射光频率与该谐振模式的固有频率匹配时, 能量将高效地耦合到模式中并被强烈地再辐射, 从而导致散射强度出现尖锐的增强峰。这一过程的散射效率可由 Mie 散射理论精确描述。此时, 颗粒的散射效率表达式为

$$Q_{\text{sca}} = \frac{2}{\alpha^2}\sum_{l=1}^{\infty}(2l+1)\left(|a_l|^2 + |b_l|^2\right) \quad , \tag{11}$$

式中$|a_l|$和$|b_l|$会随着尺寸参数α而发生变化, 在特定α处$|a_l|$和$|b_l|$表现为极大值, 发生谐振。散射截面与颗粒尺寸的曲线如图 1(彩图见期刊电子版)所示。

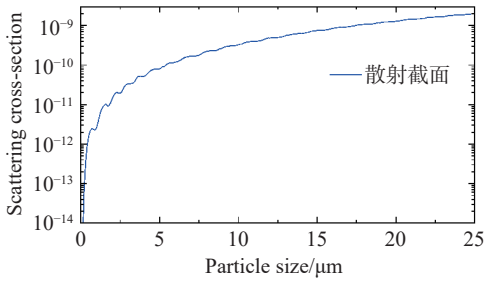

图 1　散射截面与颗粒尺寸的关系

Fig. 1　Scattering cross-section varying with particle size

基于 Mie 散射理论, 可以建立球形颗粒的散射能量与其粒径尺寸之间的定量关系。例如, 在粒径远大于波长的条件下, 散射能量与颗粒直径的平方呈线性正比, 这意味着 20 μm 颗粒的散射能量为 10 μm 颗粒的 4 倍。基于这一原理, 只需已知某一标定粒径的标准颗粒在特定光强和曝光时间下的散射能量, 即可通过理论公式推算出整个测量范围内任意粒径颗粒对应的理论散射能

量。据此，实验上可通过测量已知粒径的标准微球在设定条件下的散射能量，标定出散射能量与粒径尺寸的关系曲线。最终，通过该标定曲线，即可根据实测的散射能量反演获得待测颗粒的尺寸。

Mie 散射理论能够精确描述自由空间中颗粒的散射特性。然而，光学镜面上的污染颗粒是附着于表面的，其与基底之间存在复杂的相互作用，因此不能直接套用自由空间模型进行分析[6-7]。针对此情形，研究人员常使用 Nahm 和 Wolfe 提出的双交互模型描述[17]。在该模型中，忽略颗粒与其镜面反射虚像间的相互作用，颗粒的照明电场由两个成分叠加构成：振幅为A_0的光源直射光（主光束）和经镜面反射的光源入射光（次光束）。如图 2（彩图见期刊电子版）所示。

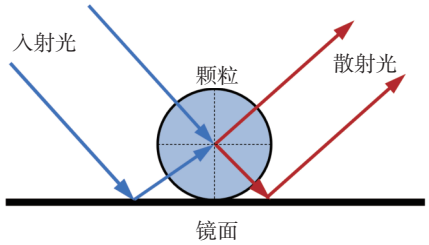

图 2 双交互模型原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the principle of the double interaction model

次光束由于额外的光程和菲涅耳反射系数$\hat{r}(\theta_{\mathrm{i}})$，产生了一个相位偏移$\delta(\theta_i)$。

$$\delta(\theta_i)=\frac{2\pi}{\lambda}2R\cos\theta_i \quad , \tag{12}$$

其中R是粒子半径，λ是入射光束的波长，θ_i是入射角。对于s入射偏振，菲涅耳反射系数$\hat{r}(\theta_{\mathrm{i}})$为

$$\hat{r}(\theta_{\mathrm{i}})=\frac{\cos\theta_{\mathrm{i}}-\sqrt{\hat{\varepsilon}-\sin^2\theta_{\mathrm{i}}}}{\cos\theta_{\mathrm{i}}+\sqrt{\hat{\varepsilon}-\sin^2\theta_{\mathrm{i}}}} \quad , \tag{13}$$

其中$\hat{\varepsilon}$是材料的复介电常数。

对于每个入射光束，颗粒在任意方向上产生的散射光包含两部分：其一是颗粒对光束的直接散射；其二是该散射光经基底反射后的结果。后者因额外光程产生相位偏移$\delta(\theta_s)$，并受到基底菲涅耳反射系数$\hat{r}(\theta_s)$的调制。表达式为

$$\delta(\theta_s)=\frac{2\pi}{\lambda}2R\cos\theta_s \quad , \tag{14}$$

其中θ_s是散射角，从基底法线测量，指向镜面反射方向为正。总散射远场将是 4 个散射贡献的相干叠加：（1）主光束被颗粒直接散射到探测器；（2）主光束被颗粒散射，然后经基底镜面反射后到达探测器；（3）次光束被颗粒直接散射到探测器；（4）次光束被颗粒散射，然后经基底镜面反射后到达探测器。构成总散射场的 4 个分量可以写成[14]

$$\begin{aligned}
[E_s]_1 &= A_0 A(\pi-\theta_{\mathrm{i}}-\theta_s)\exp[\mathrm{i}\varphi(\pi-\theta_{\mathrm{i}}-\theta_s)],\\
[E_s]_2 &= A_0\hat{r}(\theta_s)\exp[\mathrm{i}\delta(\theta_s)]\times\\
&\quad A(\theta_i-\theta_s)\exp[\mathrm{i}\varphi(\theta_i-\theta_s)],\\
[E_s]_3 &= A_0\hat{r}(\theta_{\mathrm{i}})\exp[i\delta(\theta_{\mathrm{i}})]\times\\
&\quad A(\theta_{\mathrm{i}}-\theta_s)\exp[\mathrm{i}\varphi(\theta_{\mathrm{i}}-\theta_s)],\\
[E_s]_4 &= A_0\hat{r}(\theta_{\mathrm{i}})\exp[\mathrm{i}\delta(\theta_{\mathrm{i}})]\hat{r}(\theta_s)\exp[\mathrm{i}\delta(\theta_s)]\times\\
&\quad A(\pi-\theta_{\mathrm{i}}-\theta_s)\exp[\mathrm{i}\varphi(\pi-\theta_{\mathrm{i}}-\theta_s)],
\end{aligned} \tag{15}$$

其中$A(\theta_s)$和$\varphi(\theta_s)$颗粒是在散射角θ_s处的远场振幅和相位。这些振幅可以通过标准的光散射模型进行计算，总散射远场由下式给出：

$$E_T=\sum_{j=1}^{4}[E_s]_j \quad . \tag{16}$$

该模型将颗粒附着于镜面的情形简化为自由空间颗粒散射的情景，将颗粒与镜面复杂的交互作用表示为 4 个分量的叠加，最终方便计算颗粒尺寸与其散射能量的关系。

2.2 弥散圆特征与颗粒散射能量的关系

离焦弥散圆是理想点源偏离光学系统焦平面时，在像面上所形成的、尺寸随离焦量增大而增大的衍射图样，通常呈现为明暗相间的同心圆环[11, 18]。其形成机理如下：当微小颗粒恰好位于焦平面上时，其发出的光线经光学系统后完美汇聚于像面，形成一个清晰的点像。当该颗粒（物点）沿光轴远离焦平面时，对应像点将不再汇聚，而是扩散为一个弥散圆斑，且其内部会出现复杂的环状结构。

离焦弥散圆的表现特征主要受到系统的点扩散函数（Point Spread Function, PSF）的影响[12]。PSF 定义了系统对理想点源的响应，即一个微小颗粒（可视为点源）经系统后所成的光强分布。当点源沿光轴偏离焦平面时，其 PSF 不再是一个锐利的点，而是扩散为尺寸渐增的弥散斑。因此，在任一离焦位置观察到的弥散圆，实质上就是该位置所对应的 PSF 在像平面上的二维光强投影[12]。

经过光学系统所成的像可以看作理想像与系

统 PSF 卷积的结果, 可以表示为

$$I_i(x_i,y_i)=I_g(x_0,y_0)*PSF(x_0,y_0)\quad , \qquad (17)$$

其中I_i为经过光学系统受 PSF 调制过后所成的模糊像, I_g为物体理想成像, $PSF(x_0,y_0)$为系统的点扩散函数, “*”表示卷积运算。PSF 是光学系统的固有属性, 任何物点都会受到等同的光学系统 PSF 的影响。

现实成像物体可视为由无数理想点光源构成的。每个点光源经光学系统后, 在像面上形成一个与其点扩散函数(PSF)相符的能量分布。因此, 物体所成的像实为所有点源对应 PSF 分布的叠加结果。当成像物体为微小颗粒时, 在离焦状态下, 其 PSF 的尺寸将远大于颗粒本身。此时, 构成该颗粒的各点源所成的 PSF 分布高度重叠, 几乎重合为单一光斑。因此, 该微小颗粒的成像可近似为理想点源的 PSF, 如图 3 所示。在此条件下, 该颗粒可被视作理想点源。相应地, 在相近离焦距离下, 这些可视为理想点源的颗粒所成的弥散圆结构也具备高度相似性。

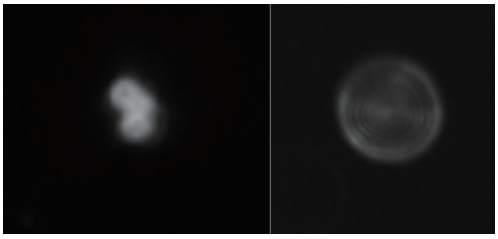

图 3　对焦下的颗粒散射(左)与离焦下的散射(右)

Fig. 3　Particle scattering in focus (Left) and defocused (Right)

由于离焦过程仅改变像面能量的空间分布, 而对进入系统的总散射能量影响很小, 因此离焦弥散圆所包含的总能量可等效为颗粒散射至成像系统中的总能量。基于这一原理, 可以通过测量离焦弥散圆的能量, 来定量表征颗粒的散射能量信息。

3　暗场散射离焦检测方法

3.1　离焦暗场显微系统

在获取颗粒的弥散圆图像后, 并不能直接得出颗粒的尺寸信息。需建立颗粒散射能量与尺寸之间的对应关系, 将弥散圆中所反映的散射能量与颗粒尺寸进行一一对应, 从而通过计算散射能量来计算颗粒尺寸。

实验所采用的颗粒散射弥散圆检测设备如图 4 所示, 其主要由暗场显微镜和六足多维调整台两部分构成。其中, 暗场显微镜包括相机、物镜和环形光源三个组件。该显微镜用于采集颗粒的暗场散射图像。六足多维调整台则在暗场显微成像的基础上, 引入沿光轴方向的离焦量, 实现对颗粒散射图像定向、定量的离焦操作。

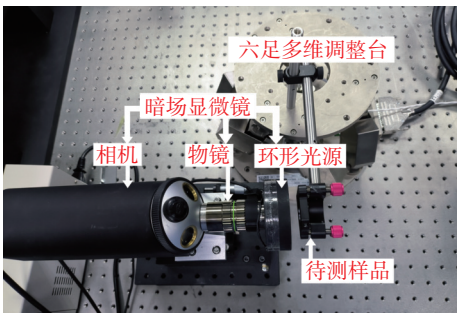

图 4　暗场散射离焦检测设备

Fig. 4　Dark field scattering defocus detection system

得到颗粒弥散圆图像后, 为了量化弥散圆的能量水平, 使用数字量化值(Digital Number, DN)作为计算标准。计算每个弥散圆的 DN 总值, 将 DN 总值作为对应颗粒的散射能量信息。

弥散圆的 DN 值计算流程主要包括弥散圆识别与 DN 总值计算两个步骤。首先进行弥散圆的识别与定位。为提升识别精度, 实验中先将目标弥散圆所在区域单独裁剪出来进行分析。对裁剪后的图像采用固定阈值进行二值化处理, 以分离出亮斑区域, 继而提取其中面积最大的连通域作为弥散圆本体。接着, 计算该连通域的最小外接圆, 从而确定弥散圆的圆心与半径, 实现区域的精确标定。

随后进行 DN 总值计算。由于裁剪后的区域仅占原始视场的约 1%, 可将因表面粗糙度引起的背景噪声近似为均匀分布。实验中通过选取图像中 4 处暗背景区域计算平均亮度, 作为本底噪声值。DN 总值的计算过程如下: 生成一个与前述最小外接圆相匹配的圆形掩模, 覆盖弥散圆区域; 计算掩模内所有像素的平均亮度, 并减去背景平均亮度, 得到弥散圆的净平均亮度; 最后, 将净平均亮度与弥散圆内的总像素数相乘, 即获得该弥散圆 DN 总值。图 5(彩图见期刊电子版)展示了两种典型颗粒的弥散圆 DN 总值检测结果。

图 5 弥散圆识别计算

Fig. 5 Identification and calculation of the circle of confusion

在光源强度固定的条件下，影响检测结果的主要因素为相机曝光值与颗粒的离焦量。由于实验中以 DN 总值表征散射能量，曝光值会直接决定成像中弥散圆的亮度。亮度过高会导致像素饱和，使 DN 值计算结果偏低。亮度过低会使小尺寸颗粒弥散圆淹没在背景噪声中，降低检测可靠性。离焦量会影响弥散圆的尺寸，随着离焦量增大，弥散圆尺寸扩大，其能量分布更为分散，导致图像中的平均亮度相应降低。下文将分别讨论这两个因素对检测结果的具体影响。

3.2 离焦量与曝光值的影响

物体离焦会影响光学系统的 PSF 分布，PSF 可由基尔霍夫衍射定理求解，表示为：

$$PSF(x;x_p,\tau)=\left|k\int_0^1 J_0(krNA\rho)\,e^{i\varphi(\rho,z;Z_p,\tau)}\rho\mathrm{d}\rho\right|^2, \tag{18}$$

其中$X=(x,y,z)$表示像面上的一点，$X_p=(x_p,y_p,Z_p)$为点光源坐标，Z_p为轴向离焦距离，r表示像面径向距离，NA 为物镜数值孔径，ρ 为归一化光瞳径向坐标，k 为复振幅归一化常数，e 表示自然常数，J_0 为零阶贝塞尔函数。增加离焦距离会使 PSF 逐渐扩展，同心环间距变小，环数增多，亮度降低。

为了验证离焦量与颗粒散射能量的关系，使用平面镜与标准尺寸的聚苯乙烯微球制作了样品。将不同粒径的微球分散平铺在镜面上，测量不同离焦量下的弥散圆 DN 总值信息。实验采集了粒径分别为 1 μm、5 μm、10 μm 和 15 μm 的标准球形颗粒，在离焦量分别是 0.04 mm、0.05 mm、0.06 mm、0.07 mm 和 0.08 mm 下的 DN 总值数据，结果如图 6(彩图见期刊电子版)所示。

图 6 中展示了 4 种不同粒径的标准微球在不同离焦量下所对应的 DN 总值。随着离焦量的改变，同一颗粒的 DN 总值存在一定波动。当离焦量增至 0.07 mm 和 0.08 mm 时，各粒径颗粒的 DN 总值普遍出现下降。原因在于，离焦量增大会导致弥散圆尺寸扩大、能量分布更为分散，从而降低弥散圆的亮度，使得部分较暗区域淹没于背景噪声中，导致测量结果低于理论预期。为评估同一颗粒在不同离焦条件下 DN 总值的重复性与稳定性，计算了 5 种离焦量下 DN 总值的最大相对偏差和变异系数(Coefficient of Variation, CV)，结果如表 1 所示。

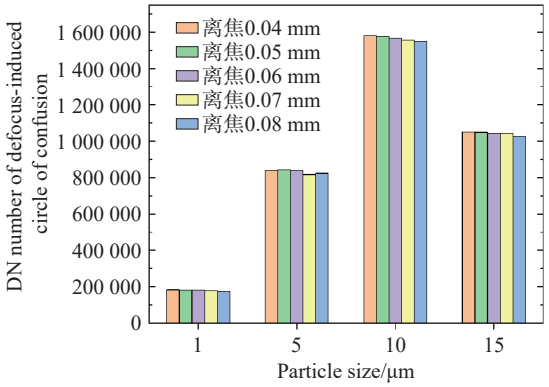

图 6 不同标准微球颗粒弥散圆 DN 总值与离焦量关系

Fig. 6 The relationship between the total DN value of the circle of confusion and the defocus amount for different standard microsphere particles

表 1 不同颗粒在不同离焦量下的 DN 总值差异

Tab. 1 Differences in total DN values of different particles across various defocus amounts

颗粒尺寸	最大相对偏差	变异系数
1 μm	4.6%	1.93%
5 μm	2.9%	1.31%
10 μm	2.5%	0.98%
15 μm	2.4%	0.97%

从表 1 中可以看到，4 种不同粒径的标准微球在 5 种离焦量的 DN 总值变异系数均低于 2%，最大相对浮动也均控制在 5% 以内。可以认为一定范围内的离焦量变化对弥散圆的 DN 总值影响较小。

曝光值是影响弥散圆成像亮度的另一关键因素。提高曝光值会显著增加弥散圆的亮度，有助于增强较暗信号与背景的对比度，提升小尺寸颗粒的识别能力。然而，若曝光值过高，大尺寸颗粒产生的弥散圆亮度可能超出相机的动态范围，导致信号饱和，从而使检测结果偏低。

为了测试曝光值对检测精度的影响，设计实

验统计了两种尺寸的标准微球颗粒, 研究在不同曝光值下的弥散圆 DN 总值比例的变化。通过比值变化即可得知曝光值对检测结果的影响。实验选用 5 μm 与 10 μm 的聚苯乙烯微球作为样本, 在除曝光时间外其余参数保持恒定的条件下, 分别拍摄曝光时间从 80 ms 至 150 ms 的弥散圆图像, 记录结果如图 7 所示。可见, 曝光时间分别为 80 ms、90 ms、100 ms、110 ms 和 120 ms 时两种颗粒的 DN 总值比分别为: 4.228、4.220、4.184、4.198、4.171, 在此区间内比值的变异系数为 0.45%。在曝光时间为 130 ms、140 ms、150 ms 时的 DN 总值比为 4.047、4.039、3.911, 在 120 ms 至 150 ms 范围内的变异系数增大至 2.63%。

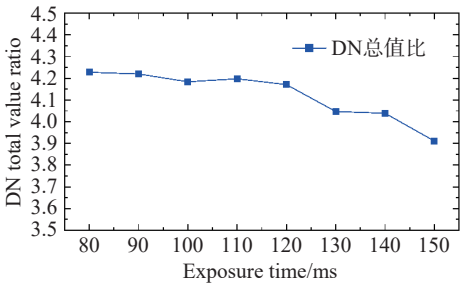

图 7　标准颗粒(5 μm/10 μm)DN 总值比与曝光值关系

Fig. 7　Relationship between the DN-total ratio (5-μm/10-μm) and the exposure time for calibrated particles

实验结果表明, 当曝光时间不超过 120 ms 时, 5 种曝光条件下 DN 总值比值的变异系数仅为 0.45%, 最高与最低比值之差为 0.057, 相对于均值的偏差为 1.36%, 可认为在该曝光区间内比值变化幅度很小。当曝光值超过 120 ms 之后, DN 总值比出现明显下降, 比值的变异系数达 2.63%。

这是由于曝光时间较短时, 微球的弥散圆图像亮度并未超过相机的动态范围, 弥散圆的亮度会随着曝光时间同步变化, DN 总值可以准确地反映其散射能量。而当曝光时间进一步延长, 大尺寸微球弥散圆中亮度较高的区域开始出现饱和, 导致该部分 DN 值不再随曝光时间增加而线性上升, 使得测得的大尺寸颗粒 DN 总值低于理论预期, 进而引起两种颗粒的 DN 总值比值下降。

从分析结果可以发现, 在弥散圆图像亮度未超过探测器动态范围的前提下, 选择不同曝光值并不会对检测结果有明显影响。

实验中还发现, 离焦量在不同放大倍率中存在最优选取范围, 在该范围内离焦量的变化不会显著影响测量结果。10 倍物镜的最优离焦范围为 0.15 mm 到 0.2 mm, 20 倍物镜下的最优范围为 0.04 mm 到 0.07 mm。同时曝光时间也存在合理的选择区间, 具体由检测的目标颗粒尺寸范围决定。

通过系统研究不同离焦量与曝光时间对检测结果的影响, 实验确定了适用于不同尺寸颗粒及不同放大倍率物镜的较优参数组合。在构建颗粒尺寸计算模型时, 需将离焦量和曝光时间作为关键参数纳入建模过程, 建立特定条件下弥散圆能量与颗粒尺寸之间的定量对应关系。

3.3　颗粒尺寸检测精度分析

暗场散射显微成像技术根据颗粒的散射图像计算尺寸, 但其准确性受曝光时间制约, 形成一个两难问题: 延长曝光时间可增强小颗粒的微弱信号, 但会导致大颗粒的信号饱和。饱和引起的溢出效应会使图像中的大颗粒光斑失真、尺寸变大, 影响测量结果的准确性。

为分析曝光时间对颗粒尺寸检测(基于外接圆法)的影响, 实验测量了同一微球在不同曝光时间下的粒径结果, 如图 8(彩图见期刊电子版)所示。其中 1~4 号分别是同一颗粒在曝光时间为 10 ms、20 ms、50 ms 和 100 ms 下的颗粒粒径尺寸检测结果。结果显示, 随着曝光时间从 10 ms 增加至 100 ms, 所测得的颗粒尺寸显著增大, 增幅分别达 12.6%(20 ms)、25.1%(50 ms)和 62.7%(100 ms)。该变化趋势表明, 曝光时间对检测结果具有不可忽略的系统性影响。

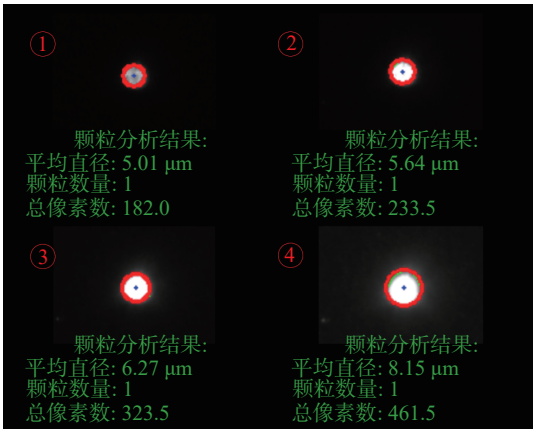

图 8　不同曝光值对尺寸检测结果的影响

Fig. 8　The effect of different exposure values on size detection

除了曝光时间影响尺寸检测误差之外，颗粒的形状对于检测误差的影响也需要分析。由于颗粒形态不规则，其外接圆往往无法准确反映真实粒径，从而引入测量误差。为量化该误差，设计实验对比外接圆法对标准微球与不规则颗粒的检测结果，如图 9(彩图见期刊电子版)所示。颗粒 1 是直径为 10 μm 的标准微球，颗粒 2 为尺寸未知的不规则形状灰尘颗粒。

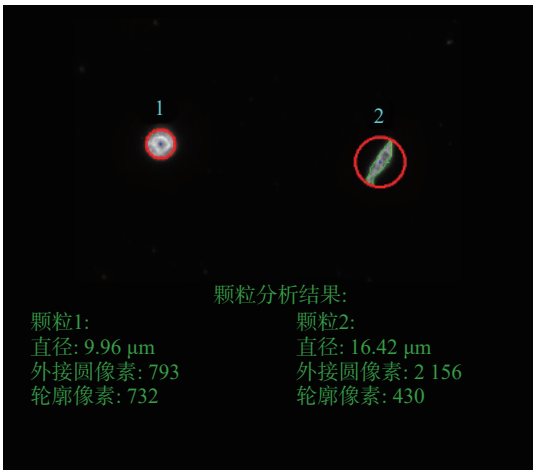

图 9 标准微球与不规则颗粒尺寸检测结果

Fig. 9 Size detection results of standard microspheres and irregular particles

为便于比较标准微球与不规则灰尘颗粒的尺寸，实验中以像素数量作为统一的尺寸度量参数。图 9 中所标示的直径为外接圆直径，即采用外接圆算法所得到的颗粒等效粒径。外接圆像素数表示该外接圆所覆盖的总像素数量，作为基于外接圆法的尺寸度量结果。为获取更接近真实的灰尘颗粒尺寸参考值，采用固定阈值分割算法提取灰尘颗粒的实际外轮廓，并计算该轮廓内部所包含的像素总数，记为轮廓素数，以此表征颗粒的实际投影面积，作为评估外接圆法测量误差的基准。

真实尺寸的计算误差主要源于图像中颗粒边缘模糊像素的归属判定，即灰度阈值的选择。为评估阈值选取对结果的影响，实验分析了不同阈值检测结果，发现最高与最低阈值所获结果的相对差异在 5% 以内，表明该方法对阈值变化不敏感，具有较好的重复性与可信度。

为评估外接圆算法的测量准确性，将基于轮廓像素所得的颗粒真实尺寸与外接圆像素所测尺寸进行对比分析。表 2 展示了两种颗粒的轮廓像素与外接圆像素的数据，分别对应其实际尺寸和外接圆法测得的尺寸。通过比较二者差异，即可量化外接圆法在不同颗粒检测中的误差水平。

从检测结果可以看出，外接圆法对规则圆形颗粒的测量精度较高，相对误差为 4.2%，而对于不规则颗粒，该方法误差显著增大，相对误差高达 401.4%。表明其在不规则形状的颗粒尺寸识别中存在明显局限性。

表 2 圆形与不规则颗粒检测结果

Tab. 2 Detection results of the round and irregular particles

	圆形颗粒	不规则颗粒
轮廓像素	732	430
外接圆像素	793	2 156
相对误差	4.2%	401.4%

为了研究离焦弥散圆检测方法对不规则颗粒上的检测精度，使用粒径为 10 μm 的标准颗粒制作样本进行实验。将已知尺寸的聚苯乙烯标准微球，与尺寸接近的不规则形状的颗粒附着于同一洁净镜面之上。使用暗场散射显微镜拍摄二者的离焦弥散圆。此时，颗粒尺寸参数$\alpha \gg 1$，其散射能量与颗粒的投影面积成正比。因此，若两个弥散圆的 DN 总值之比接近于两颗粒面积之比，则表明该方法具有较高的检测准确性。共采集了 5 个灰尘颗粒样本进行实验，灰尘颗粒暗场散射结果如图 10 所示，其中 1~5 号为灰尘颗粒散射图，6 号为标准微球散射图。

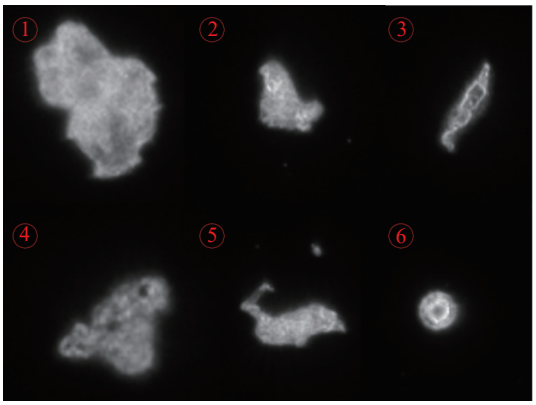

图 10 灰尘颗粒散射图样

Fig. 10 Dust particle scattering patterns

实验测得使用外接圆方法和离焦弥散圆检测法的颗粒尺寸计算结果，将采集到的数据进行对比分析，可以得到不同检测方法下的误差水平。

由于外接圆算法受曝光时间和对焦程度影响较大, 为了提高结果的检测精度, 实验要求拍摄的颗粒图像亮度不饱和且颗粒边缘清晰, 确保检测结果仅受到颗粒形状的影响。测得 5 组样本的数据结果如表 3 所示。

表 3　离焦检测与外接圆算法的误差水平

Tab. 3　Error level of defocus detection and circumcircle algorithms

	弥散圆方法误差	外接圆方法误差
1	8%	54%
2	0.5%	79%
3	10%	40%
4	20%	54%
5	13%	67%
平均误差水平	10.3%	58%

从表 3 结果可以发现, 与传统的使用外接圆检测面积的方法相比, 本文提出的使用离焦弥散圆颗粒尺寸检测方法, 对于不规则形状颗粒的检测误差从 58% 降低到 10.3%。极大地提高了对于颗粒尺寸的检测精度。

对实验结果中误差较大的 4 号样本进行分析, 发现主要原因在于该颗粒表面存在的孔洞等微结构会降低颗粒散射效率, 使颗粒的散射总能量降低, 进而影响离焦弥散圆方法的计算精度。

4　结　论

本文创新地提出一种使用离焦诱导的弥散圆检测颗粒尺寸方法。该方法的核心在于建立颗粒散射能量与其尺寸之间的对应关系, 通过引入离焦将颗粒的暗场散射图像转化为弥散圆, 进而通过分析弥散圆能量反演颗粒尺寸。相较于传统暗场显微检测方法, 本文所提方法避免了因颗粒外轮廓识别不准而产生的误差, 也克服了由镜面弧度引起的失焦问题。为验证所提方法的有效性, 设计系统实验以标定弥散圆能量与颗粒尺寸的关系, 并对其检测精度进行了评估。实验结果表明, 该离焦弥散圆检测方法的尺寸计算误差为 10.3%, 与传统暗场显微方法相比, 检测精度显著提升。

参考文献:

[1] 周济林, 谢基伟, 葛健, 等. 空间系外行星探测与研究进展[J]. 空间科学学报, 2024, 44(1): 5-18.
ZHOU J L, XIE J W, GE J, *et al*.. Progress on exoplanet detection and research in space[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2024, 44(1): 5-18. (in Chinese).

[2] WOOLDRIDGE E, ARENBERG J. Contamination effects and requirements derivation for the James Webb Space Telescope[J]. *Proceedings of SPIE*, 2008, 7069: 70690J.

[3] WARD J O, JONES C B, GOLDMAN E W. Precious cargo: transporting contamination-sensitive instruments and optics[J]. *Proceedings of SPIE*, 2022, 12224: 1222405.

[4] VENKATA S, BUDIHAL R P. Light scattering due to particulate contamination over the primary mirror of Visible Emission Line Coronagraph on board Aditya-L1 mission[J]. *Optical Engineering*, 2021, 60(7): 074103.

[5] 冷荣宽, 王上, 王智, 等. 空间引力波探测前向杂散光测量和抑制[J]. 中国光学 (中英文), 2023, 16(5): 1081-1088.
LENG R K, WANG SH, WANG ZH, *et al*.. Measurement and suppression of forward stray light for spaceborne gravitational wave detection[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1081-1088. (in Chinese).

[6] 杨星宇. 超光滑表面疵病的显微散射检测方法[D]. 南京: 南京理工大学, 2015.
YANG X Y. *Microscopic scattering detection for defects on ultra-smooth surfaces*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese).

[7] 吴凡. 基于暗场散射的精密表面微小缺陷检测能力提升技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
WU F. *Detection capability improvement technology for weak defects on smooth surfaces based on dark field scattering*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. (in Chinese).

[8] 邓泉, 赵泽宇, 林鹤, 等. 晶圆金属表面纳米颗粒暗场检测系统设计[J]. 中国激光, 2023, 50(22): 2204003.
DENG Q, ZHAO Z Y, LIN H, *et al*.. System design for dark-field detection of nanoparticles on wafer metal surface[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2023, 50(22): 2204003. (in Chinese).

[9] 李佳慧, 匡翠方, 徐月暑, 等. 极紫外光学元件全频段面形误差检测与缺陷探测技术研究进展[J]. 光学 精密工程,

2025, 33(17): 2661-2690.
LI J H, KUANG C F, XU Y SH, *et al*.. Research progress of full-spatial frequency error measurement and defect detection technology for extreme ultraviolet optical components[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(17): 2661-2690. (in Chinese).

[10] 刘自轩. 基于机器学习的颗粒光散射信号特征提取与属性识别[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
LIU Z X. *Feature extraction and attribute recognition of particle light scattering signals based on machine learning*[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese).

[11] 艾立夫. 基于散射光暗场显微的基片表面颗粒检测方法研究[D]. 成都: 中国科学院大学 (中国科学院光电技术研究所), 2019.
AI L F. *The detection method of substrate surface particles based on dark field microscopy of scattered light*[D]. Chengdu: Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, 2019. (in Chinese).

[12] 高友帅. 基于光散射成像的单颗粒追踪方法及其在细胞微环境中的应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
GAO Y SH. *Research on single particle tracking method based on light scattering imaging and its application in cellular microenvironment*[D]. Jinan: Shandong University, 2024. (in Chinese).

[13] 贺仁智. 基于离焦图像的深度估计与测量[D]. 重庆: 重庆大学, 2023.
HE R ZH. *Depth estimation and measurement based on focused images*[D]. Chongqing: Chongqing University, 2023. (in Chinese).

[14] 沈建琪. 光散射法测粒技术延伸测量下限的研究[D]. 上海: 上海理工大学, 1999.
SHEN J Q. *Extension of lower measurement limit for particle sizing by light scattering*[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 1999. (in Chinese).

[15] DORODNYY A, SMAJIC J, LEUTHOLD J. Mie scattering for photonic devices[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2023, 17(9): 2300055.

[16] 曹西乐, 田兴, 穆童. 基于 Mie 理论和 Debye 模型的球形粒子散射特性研究[J]. 电子制作, 2025, 33(1): 116-120.
CAO X L, TIAN X, MU T. Study on scattering characteristics of spherical particles based on Mie theory and Debye model[J]. *Practical Electronics*, 2025, 33(1): 116-120. (in Chinese).

[17] NAHM K B, WOLFE W L. Light-scattering models for spheres on a conducting plane: comparison with experiment[J]. *Applied Optics*, 1987, 26(15): 2995-2999.

[18] STOKSETH P A. Properties of a defocused optical system[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1969, 59(10): 1314-1321.

作者简介：

马辰昊(1988—), 女, 吉林长春人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 2015 年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事现代光学测试理论技术研究。E-mail: mach@cust.edu.cn