

角度加权对动态光散射信号噪声影响的抑制作用

王雅静, 黄钰, 申晋, 徐亚南, 张雯雯, 毛帅

引用本文:

王雅静, 黄钰, 申晋, 等. 角度加权对动态光散射信号噪声影响的抑制作用[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(4): 808–816.

WANG Ya-jing, HUANG Yu, SHEN Jin, et al. Inhibition effect of angle weighting in signal noise in dynamic light scattering[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(4): 808–816.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/OPE.20202804.0808>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

噪声动态光散射数据Tikhonov与截断奇异值正则化反演

Inversion of tikhonov and truncated singular value decomposition regularization for noisy dynamic light scattering data

光学精密工程. 2018, 26(9): 2269–2279 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182609.2267>

动态光散射颗粒分布软测量

Soft sensing of particle size distribution in dynamic light scattering measurement

光学精密工程. 2016, 24(11): 2814–2820 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162411.2814>

航空多角度偏振辐射计信噪比估算与测量

Estimation and measurement of signal-to-noise ratio for aviation multi-angular polarimetric radiometer

光学精密工程. 2015, 23(2): 387–394 <https://doi.org/10.3788/OPE.20152302.0387>

基于超声背散射信号递归分析的金属材料微缺陷识别

Micro defects detection in metallic materials based on recurrence analysis of ultrasonic backscattering signal

光学精密工程. 2019, 27(4): 932–944 <https://doi.org/10.3788/OPE.20192704.0932>

基于位置敏感探测器的六自由度精密位姿测量系统

Six-degree-of-freedom displacement and angle measurement system based on two-dimensional position-sensitive detector

光学精密工程. 2018, 26(12): 2930–2939 <https://doi.org/10.3788/OPE.20182612.2930>

文章编号 1004-924X(2020)04-0808-09

角度加权对动态光散射信号噪声影响的抑制作用

王雅静, 黄钰, 申晋*, 徐亚南, 张雯雯, 毛帅
(山东理工大学 电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000)

摘要:在动态光散射技术中,光强自相关数据中信号噪声对测量结果的影响,主要取决于颗粒粒度反演算法。在多角度测量时,角度加权则成为左右噪声对测量结果影响的又一重要因素。本文在多角度动态光散射角度加权机理分析的基础上,研究了光强均值和迭代递归角度加权方法对测量信号噪声影响的抑制作用。结果表明,无信号噪声时,对于单峰小粒度分布,迭代递归方法加权对小颗粒粒度分布略有展宽;对于中、大颗粒,光强均值法进行角度加权所得的峰值误差略有增大;随着噪声的增加,迭代递归法加权所得反演结果的性能指标无显著变化,而光强均值法进行角度加权所得结果的峰值误差和分布误差均呈显著增大的趋势。306/974 nm 标准双峰颗粒体系光强均值法和迭代递归法的反演峰值误差分别为 0.170/0.121, 0.092/0.097, 迭代递归法峰值位置更准确,能够验证模拟数据的结论。迭代递归法通过各个散射角逐次反演和比较粒度分布重新计算角度权重,这种通过角度权重更新的“修正”作用,在很大程度上抵消了噪声导致的粒度分布误差,从而显现出抵御噪声影响的“去噪”性能。因此,在测量噪声较大的环境下,宜采用迭代递归方法进行多角度加权。

关键词:动态光散射;角度加权;信号噪声;光强均值法;迭代递归法

中图分类号: O436; O439 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20202804.0808

Inhibition effect of angle weighting in signal noise in dynamic light scattering

WANG Ya-jing, HUANG Yu, SHEN Jin*, XU Ya-nan, ZHANG Wen-wen, MAO Shuai

(School of Electrical and Electronic Engineering,
Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)
* Corresponding author, E-mail: shenjin@sdut.edu.cn

Abstract: In dynamic light scattering technology, the influence of autocorrelation data noise on measurement results primarily depends on the particle-size inversion algorithm. In multiangle measurement, angular weighting becomes another important factor restricting the influence of noise on the measurement results. Based on the analysis of angle weighting mechanism of multiangle dynamic light scattering, the inhibition effect of the angle weighting method of light intensity average and the iterative recursive method on the measurement of noise is studied. The results demonstrate that, in the absence of noise, for the small particles of the unimodal distribution, the PSD is slightly broadened when weighted by the iterative recursive method, and for the medium and large particles, the peak

收稿日期: 2019-11-18; **修订日期:** 2019-12-21.

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目 (No. ZR2018MF032, No. ZR2018PF014, No. ZR2017LF026, No. ZR2017MF009); 山东省重点研发计划资助项目 (No. 2019GGX104017)

value error increases slightly when the light intensity average method is adopted. With an increase in noise, the performance index of iterative recursive inversion exhibits no obvious change, while the peak value error and PSD error of the results obtained via the light intensity average method are significantly increased. The inversion peak errors of 306/974 nm standard bimodal particle system were observed to be 0.170/0.121 and 0.092/0.097, respectively. The peak positions obtained via the iterative recursive method were more accurate, and the experimental results verified the conclusions from the simulation data. The iterative recursive method recalculates the angle weight via successive inversion and comparison of the PSD of each scattering angle. The "correction" effect of angle weight updation can largely offset the PSD error caused by noise, and thus, the "de-noising" performance of resisting the impact of noise has been depicted. Therefore, in a noisy environment, the iterative recursive method should be used for multiangle weighting.

Key words: dynamic light scattering; angle weighting; signal noise; light intensity average method; iterative recursive method

1 引言

与单角度测量相比,多角度动态光散射颗粒测量技术通过对散射样品进行多角度测量,避免了测量未知样品时散射角度选取不当造成的偏差,进而获得更加准确的粒度分布^[1-3]。然而,角度数量增多带来的优势也受到诸多因素的制约,包括角度数量^[4-5]、角度组合方式^[6]以及不同散射角的权重计算^[7]等。其中,角度权重的计算是动态光散射由单一散射角扩展至多个散射角获取散射光动态信息的关键环节^[1-2],角度权重的求取会受到角度误差和信号噪声等因素的影响^[5]。信号噪声作为影响动态光散射测量准确性的重要因素,在数据反演过程中直接影响粒度分布,这在单角度测量中有较多的分析和研究^[8-11],而在角度加权条件下则未被关注。随着散射角数量的增加,信号噪声也随之增加,噪声在角度加权条件下对测量结果的影响,在很大程度上决定了多角度动态光散角度加权方式在实际测量中的适用性。

角度权重可以通过理论计算得到,即根据Mie散射理论计算相应散射角的光强,得到对应的权重系数;也可通过实测数据,包括测量对应散射角的静态散射光强或利用各散射角的光强自相关函数(基线),计算相应的权重系数。一般认为,理论方法求取角度权重系数时,角度权重系数不受自相关数据中信号噪声的影响,而实测法求取角度权重系数时,自相关数据中含有的噪声会通过角度权重的计算影响颗粒粒度反演结果。然而,在近年

来的实际应用中,多采用实测方法而非理论方法求取角度权重。这其中既有角度误差影响的原因^[12],也与实测方法逐步改进有关^[13],但从信号噪声的视角,两种加权方法对噪声的抑制作用仍不清晰。本文通过光强均值法^[1]和迭代递归法^[14]对测量信号噪声影响的抑制作用进行研究,分析和评估噪声环境下角度加权方法对粒度反演的影响,进而为不同测量环境下,特别是为多角度动态光散射在线测量时角度加权法的选择提供依据。

2 不同散射角对粒度信息的贡献差异表征与角度加权机理

在多角度动态光散射技术中,对于给定的散射角度 θ_r ,散射光强自相关函数 $G_{\theta_r}^{(2)}(\tau_j)$ 被定义为:

$$G_{\theta_r}^{(2)}(\tau_j) = G_{\infty, \theta_r}^{(2)}(1 + \beta |g_{\theta_r}^{(1)}(\tau_j)|^2) \quad (1)$$

$r = 1, 2, \dots, R, j = 1, 2, \dots, N_s,$

式中: τ_j 为延迟时间, $G_{\infty, \theta_r}^{(2)}$ 为实验基线值, $\beta(\beta < 1)$ 为相干因子, R 为散射角度个数。根据测量光强自相关函数计算电场自相关函数为:

$$g_{\theta_r}^{(1)}(\tau_j) = \sum_{i=1}^N h_{\theta_r}(D_i) \exp(-\Gamma_0 \tau_j / D_i) \quad (2)$$

$i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, N_s,$

式中:衰减线宽 $\Gamma = D_T q^2$,颗粒平移扩散系数 $D_T = K_B T / 3\pi\eta D$,散射矢量 $q = 4\pi n[\sin^2(\theta_r/2)]/\lambda$, n , λ 分别为悬浮介质的折射率、真空中光的波长; $h_{\theta_r}(D_i)$ 为颗粒粒度光强分布,表示散射角 θ_r 处粒度在 $[D_i, D_{i+1}]$ 的所有颗粒的散射光强分数。归一化的散射光强分数为:

$$\sum_{i=1}^N h_{\theta_r}(D_i) = 1. \quad (3)$$

散射光强分数为:

$$h_{\theta_r}(D_i) = k_{\theta_r} C_{1,\theta_r}(D_i) f(D_i), \quad (4)$$

其中: k_{θ_r} 为角度权重系数; $C_{1,\theta_r}(D_r)$ 为 Mie 散射

$$g_{\theta_r}^{(1)}(\tau_j) = k_{\theta_r} \sum_{i=1}^N \exp\left(-\frac{16\pi K_B T n_m^2(\lambda_0) \sin^2(\theta_r/2)}{3\eta D_i \lambda_0^2} \cdot \tau_j\right) C_{1,\theta_r}(D_i) f(D_i). \quad (5)$$

式(5)的矩阵形式为:

$$\mathbf{g}_{\theta_r}^{(1)} = k_{\theta_r} \mathbf{A}_{\theta_r} \mathbf{f}. \quad (6)$$

则多角度电场自相关函数的矩阵形式为:

$$\mathbf{g} = \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{\theta_1} \\ \mathbf{g}_{\theta_2} \\ \dots \\ \mathbf{g}_{\theta_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\theta_1} \mathbf{A}_{\theta_1} \\ k_{\theta_2} \mathbf{A}_{\theta_2} \\ \dots \\ k_{\theta_m} \mathbf{A}_{\theta_m} \end{bmatrix} \mathbf{f} = \mathbf{A} \mathbf{f}, \quad (7)$$

式中: $\mathbf{g} = [\mathbf{g}_{\theta_1}; \mathbf{g}_{\theta_2}; \dots; \mathbf{g}_{\theta_m}]$, 为多角度电场自相

光强分数, 表示粒度为 D_i 的颗粒在角 θ_r 处的散射光强分数; $f(D_i)$ 代表粒度为 D_i 的颗粒在角 θ_r 对散射光的贡献。

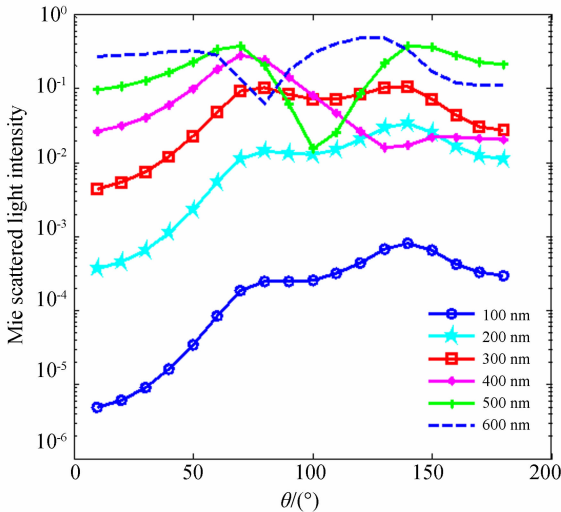
将式(4)带入式(2)得到:

关数据; $\mathbf{A} = [k_{\theta_1} \mathbf{A}_{\theta_1}; k_{\theta_2} \mathbf{A}_{\theta_2}; \dots; k_{\theta_m} \mathbf{A}_{\theta_m}]$, 为相应的核矩阵; \mathbf{f} 为待求粒度分布。

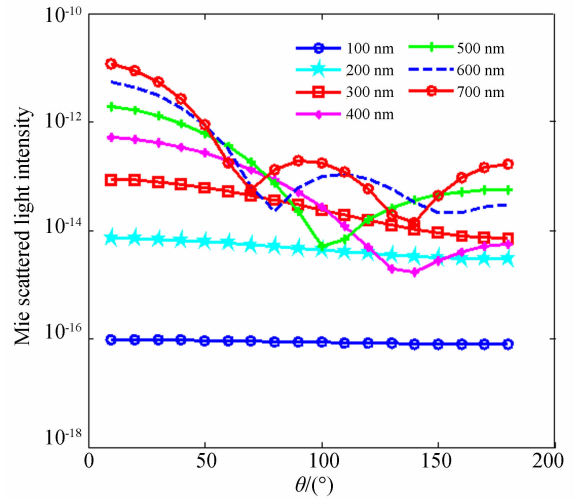
在散射光场中, 散射强度分布与散射颗粒粒度分布满足:

$$X(\theta_r, D_i) = C(\theta_r, D_i) f(D_i), \quad (8)$$

式中 Mie 散射光强分数 $C_{1,\theta_r}(D_i)$ 作为换算因子, 可由 Mie 理论计算得到, 其分布如图 1(a) 所示。



(a) Mie 散射光强分数
(a) Mie scattered light intensity fraction



(b) Mie 散射光强随散射角的分布
(b) Mie scattered light intensity for different particle sizes at different scattering angles

图 1 散射角对不同粒度颗粒的影响

Fig. 1 Effect of scattering angles on particles in different sizes

散射光强分布不仅受颗粒大小影响, 还与散射角度有关。在散射颗粒大于 350 nm 时, Mie 散射光强随散射角呈振荡变化(图 1(b)), 同一颗粒体系的散射光在不同散射角存在很大差异, 这正是多角度测量大于 350 nm 颗粒时, 能够兼顾不同角度散射光强的贡献, 得到更为准确的测量结果的原因。多角度测量, 需要确定散射角 θ_r 处对粒度分布信息贡献的差异, 这一差异是通过角度权重系数进行表征的。由式(3)和式(4)得到理想

角度权重系数:

$$k_{\theta_r} = \frac{1}{\sum_{i=1}^N C_{1,\theta_r}(D_i) f(D_i)}, r = 1, 2, \dots, R, \quad (9)$$

其中 $f(D_i)$ 是未知的, 因此不能用于求取角度权重系数。但从式(9)可以看出, 权重系数 k_{θ_r} 与颗粒在散射角度 θ_r 处散射光强均值的倒数 $\langle I_{\theta_r} \rangle^{-1}$ 具有比例关系, 定义无量纲的角度权重系数比为散射角 θ_r 处角度权重系数与散射角 θ_1 处的角度

权重系数的比,根据两者关系即可获得角度权重系数。式(7)可写成:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{g} &= \begin{bmatrix} \mathbf{g}_{\theta_1} \\ \mathbf{g}_{\theta_2} \\ \dots \\ \mathbf{g}_{\theta_m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{\theta_1} \mathbf{A}_{\theta_1} \\ k_{\theta_2} \mathbf{A}_{\theta_2} \\ \dots \\ k_{\theta_m} \mathbf{A}_{\theta_m} \end{bmatrix} \\
 \mathbf{f} &= k_{\theta_1} \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{\theta_1} \\ k_{\theta_2}^* \mathbf{A}_{\theta_2} \\ \dots \\ k_{\theta_m}^* \mathbf{A}_{\theta_m} \end{bmatrix} \mathbf{f} = \mathbf{A} \mathbf{f}, \quad (10)
 \end{aligned}$$

式中 $k_{\theta_i}^*$ ($i=1,2,\dots,m$),为无量纲的角度权重系数比,确定了角度权重系数比,即可根据式(10)表征不同散射角对粒度分布信息贡献的差异。

2 不同噪声水平下两种加权方法对反演结果的影响分析

为定量分析信号噪声通过加权对测量结果的影响,采用半对数函数及其组合模拟3组单峰 S_1 (200 nm), S_2 (450 nm), S_3 (600 nm) 和1组双峰颗粒 S_4 (500/800 nm) 的数据,计算在6个角度

(30°,50°,70°,90°,110°和130°)的光强自相关数据,同时采用光强均值法及迭代递归法进行角度加权,利用截断奇异值方法对自相关函数进行反演。半对数函数表达式为:

$$f(D_i) = \frac{a}{D_i \sigma_1} \exp\left[-\frac{(\ln(D_i/D_1))^2}{2\sigma_1^2}\right], \quad (11)$$

式中: $f(D_i)$ 是颗粒粒度分布, a 为分布系数, D_1 为峰值处颗粒粒度, σ_1 为标准偏差。通过调整半对数函数参数可以获得相应的粒度分布。4组颗粒体系的参数如表1所示。模拟实验条件为: $K_B=1.3807 \times 10^{-23}$ J/K, 分散介质折射率 $n=1.33$, 入射光在真空中的波长 $\lambda=632.8$ nm, 绝对温度为 $T=298.15$ K, 介质黏度系数 $\eta=0.89 \times 10^{-9}$ g/(nm·s)。

信号噪声添加形式为:

$$G_{\theta}^{(2)}(\tau_j) = G_{\theta}^{(2)}(\tau_j) + \delta n(\tau_j), \quad (12)$$

式中: $G_{\theta}^{(2)}(\tau_j)$ 为无噪的光强自相关函数, $G_{\theta}^{(2)\text{-noise}}(\tau_j)$ 为含噪的光强自相关函数, δ 为噪声水平, $n(\tau_j)$ 是高斯随机噪声。

表1 4组颗粒的模拟参数

Tab.1 Simulation parameters of 4 groups of particles

Sample	D_1/nm	D_2/nm	D/nm	N_s	σ_1	σ_2	a	b
S_1	200	—	100~300	100	0.0515	—	1	—
S_2	450	—	300~600	100	0.055	—	1	—
S_3	600	—	450~700	100	0.415	—	1	—
S_4	500	800	200~1000	100	0.1	0.035	0.4	0.6

为定量评价颗粒粒度的反演效果,引入峰值粒度误差 E 、峰值 P 、峰值比 R 和分布误差 V 4个性能指标。对于单峰与双峰分布颗粒系分别采用 E, P, V 与 E, R, V 描述反演结果与真实分布的接近程度。峰值粒度误差越小;峰值与模拟峰值越接近;模拟分布的峰值比与反演分布的峰值比越接近;分布误差越小,表示反演的颗粒粒度分布与实际粒度分布越接近。

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{|D_{\text{sim}} - D_{\text{inv}}|}{D_{\text{sim}}} \\
 R &= P_1 : P_2 : \dots : P_n
 \end{aligned}$$

$$V = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N_s} [f_{\text{sim}}(D_i) - f_{\text{inv}}(D_i)]^2}{\sum_{i=1}^{N_s} [f_{\text{sim}}(D_i)]^2} \right]^{1/2}, \quad (13)$$

式中: D_{sim} 和 D_{inv} 分别表示模拟分布和反演分布中峰值粒度, P 表示峰值, f_{sim} 和 f_{inv} 分别表示模拟分布和反演分布。

图2~图5分别为4组颗粒体系的反演结果。表2~表5为4组颗粒体系反演的性能参数。其中,“Sim PSD”代表模拟粒度分布,“Wa”代表光强均值角度加权方法,“Wir”为迭代递归角度加权方法。

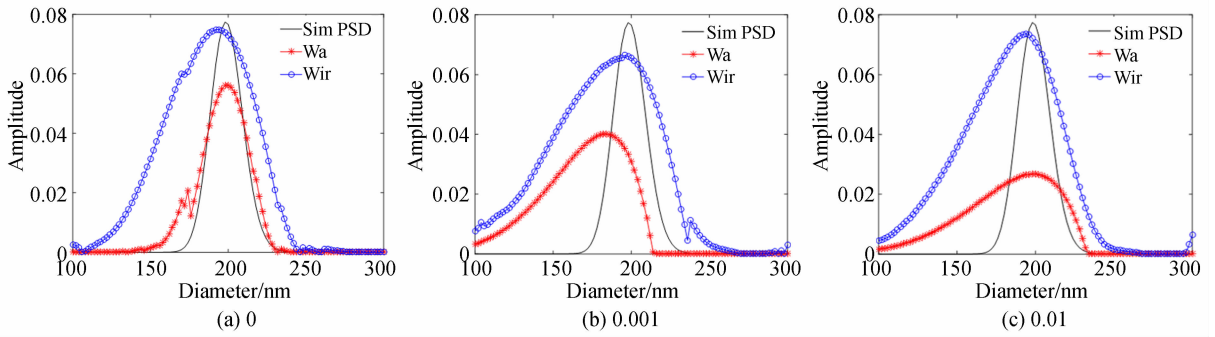


图 2 200 nm 单峰颗粒在不同噪声下光强均值和迭代递归法的反演结果

Fig. 2 PSDs of 200 nm unimodal particle using Wa and Wir methods at different noise levels

从图 2 和表 2 可以看出,对于 200 nm 单峰小颗粒体系,无信号噪声时,采用两种方法进行角度加权,反演得到的峰值误差结果无显著差异,但迭代递归方法加权对小颗粒粒度分布略有展宽,表

现出较大的分布误差。随着噪声的增加,迭代递归方法方法加权所得反演结果的性能指标无显著变化,而光强均值法进行角度加权所得结果的峰值误差明显增大,分布误差也随之增大。

表 2 200 nm 颗粒在不同噪声水平下光强均值法和迭代递归法的性能参数

Tab. 2 Performance parameters of 200 nm unimodal particle using Wa and Wir methods at different noise levels

Noise level	Method	Peak positon/nm	E	P	V
δ	Sim PSD	200	0	0.077	0
0	Wa	198	0.01	0.056	0.278
	Wir	194	0.03	0.074	1.057
0.001	Wa	184	0.08	0.040	0.830
	Wir	196	0.02	0.066	1.075
0.01	Wa	198	0.01	0.026	0.655
	Wir	194	0.03	0.073	1.062

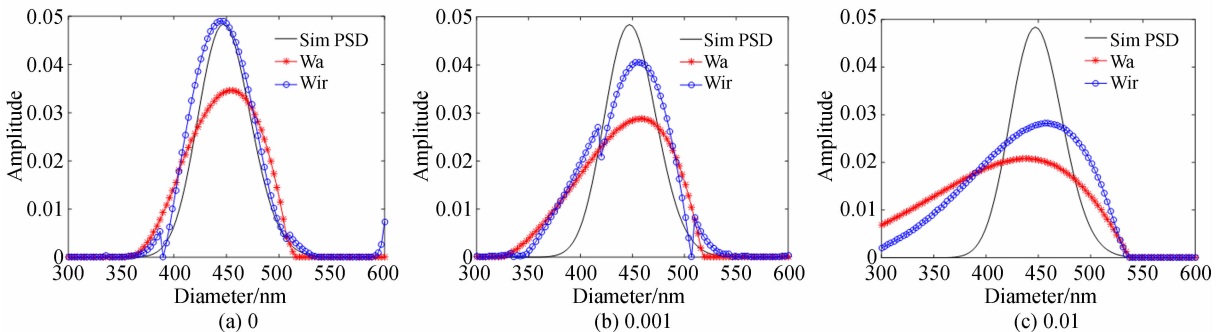


图 3 450 nm 单峰颗粒在不同噪声下光强均值和迭代递归法的反演结果

Fig. 3 PSDs of 450 nm unimodal particle using Wa and Wir methods at different noise levels

对于 450 nm 单峰中等粒径颗粒(图 3 和表 3),在无信号噪声时,采用两种方法进行角度加权,反演得到的性能参数无显著差异,光强均值法

进行角度加权,所得峰值误差略有增大。随着噪声的增加,光强均值法所得峰值误差呈愈加明显的趋势,分布误差也随之增大。迭代递归方法加

权所得的峰值误差和分布误差随噪声增加也有增大的趋势,但增幅明显小于光强均值法。

表 3 450 nm 颗粒在不同噪声水平下光强均值法和迭代递归法的性能参数

Tab. 3 Performance parameters of 450 nm unimodal particle using Wa and Wir methods at different noise levels

Noise level	Method	Peak positon/nm	E	P	V
δ	Sim PSD	450	0	0.048	0
0	Wa	453	0.006	0.034	0.288
	Wir	447	0.006	0.048	0.184
0.001	Wa	459	0.020	0.028	0.427
	Wir	456	0.012	0.040	0.334
0.01	Wa	444	0.013	0.020	0.645
	Wir	462	0.026	0.028	0.535

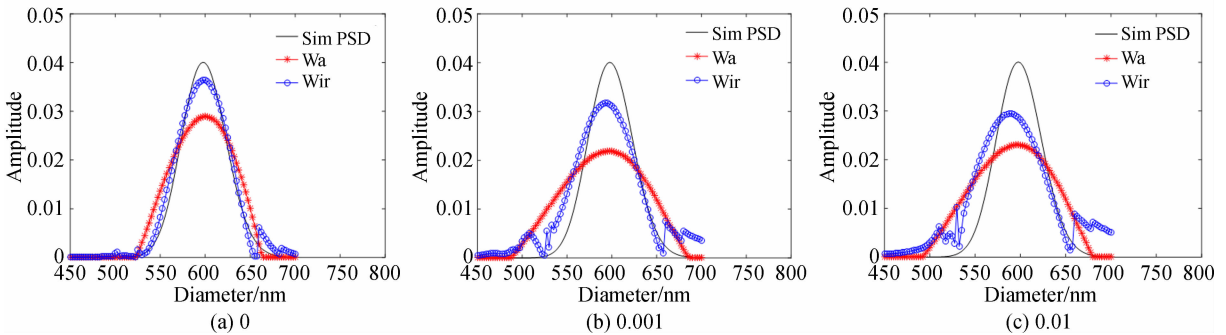


图 4 600 nm 单峰颗粒在不同噪声下光强均值和迭代递归法的反演结果

Fig. 4 PSDs of 600 nm unimodal particles using Wa and Wir methods at different noise levels

表 4 600 nm 颗粒在不同噪声水平下光强均值法和迭代递归法的性能参数

Tab. 4 Performance parameters of 600 nm unimodal particles using Wa and Wir methods at different noise levels

Noise level	Method	Peak positon/nm	E	P	V
δ	Sim PSD	600	0	0.04	0
0	Wa	605	0.008	0.028	0.275 7
	Wir	597	0.005	0.036	0.113 5
0.001	Wa	593	0.010	0.021	0.465 8
	Wir	595	0.008	0.031	0.266 4
0.01	Wa	594	0.010	0.023	0.440 5
	Wir	590	0.016	0.029	0.369 3

对于 600 nm 单峰大颗粒(图 4 和表 4),表现出与 450 nm 单峰中等粒径颗粒相同的结果,即在无信号噪声时,采用两种角度加权方法反演得

到的性能参数无显著差异,光强均值法加权所得峰值误差略大。随着噪声的增加,光强均值法所得峰值误差和分布误差的增大更为显著。

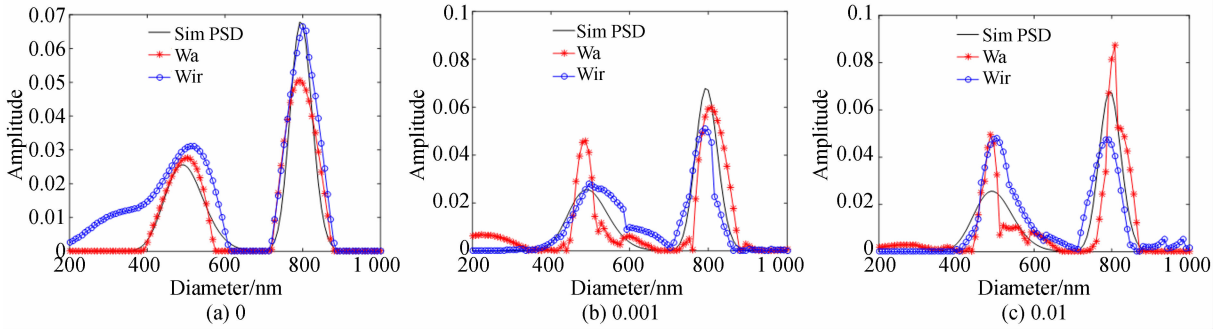


图 5 500/800 nm 双峰颗粒在不同噪声下光强均值和迭代递归法的反演结果

Fig. 5 PSDs of 500/800 nm bimodal particles using Wa and Wir at different noise levels

表 5 500/800 nm 颗粒在不同噪声水平下光强均值法和迭代递归法的性能参数

Tab. 5 Performance parameters of 500/800 nm bimodal particles using Wa and Wir methods at different noise levels

Noise level	Method	Peak positon/nm	E	R	V
δ	Sim PSD	500/800	0	1 : 2.658	0
0	Wa	504/792	0.008/0.01	1 : 1.828	0.251 7
	Wir	512/802	0.024/0.025	1 : 2.133	0.421 1
0.001	Wa	480/808	0.04/0.01	1 : 1.320	0.461 3
	Wir	509/792	0.018/0.01	1 : 1.436	0.353 5
0.01	Wa	486/808	0.28/0.01	1 : 1.769	0.505 2
	Wir	504/792	0.08/0.01	1 : 0.986	0.460 8

对于 500/800 nm 双峰分布(图 5 和表 5),在无信号噪声时,两种角度加权方法得到的性能参数无显著差异,但迭代递归方法表现出较大的分布误差。但随着噪声增加,光强均值法进行角度加权所得结果的分布误差越来越大,迭代递归方法方法加权所得结果则趋于减小。

上述结果可以看出,在无噪声情况下,两种角度加权方法得到的反演结果没有显著差异,作为理论方法的光强均值法加权,由于是根据 Mie 散射理论直接计算所有散射角的权重,避免了权重随机误差导致的偏差。而迭代递归方法角度加权系通过第一个参考角度逐个计算各角度的权重,其权重计算依赖第一个参考角选择和后续角度的修正。对于小颗粒,由于不同角度的散射光强没有显著变化(图 2),导致后续角度没有修正作用,这一情况随着颗粒的增大有所改善。

随着信号噪声的增加,两种角度加权方法得到的反演结果都呈现变差的趋势,主要表现在峰

值和分布误差变大。但是,迭代递归方法角度加权的反演误差显著低于光强均值法。产生这一现象的原因在于其权重计算方式:迭代递归方法是从参考角开始逐次增加角度反演粒度分布,每次反演结果和上一次结果进行比较后计算各角度的权重,每次的权重计算都是对上一次计算结果的调整和更新,通过角度权重的调整抵消噪声导致的粒度分布误差,从而显现出“去噪”性能。

3 实验数据的反演分析

为了验证模拟结论,对 306/974 nm 的标准聚苯乙烯乳胶颗粒组成的双峰颗粒体系进行了测量。测量实验条件为:He-Ne 激光器,测量温度 298.15 K,分散介质为 1 mmol/L NaCl 配制的悬浊液,散射角分别为 30° , 50° , 70° , 90° , 110° 和 130° 。对获得的动态光散射数据分别采用光强均值法和迭代递归法进行角度加权处理数据,并采

用截断奇异值反演算法进行反演获得粒度分布,用L曲线法获得正则参数,反演结果和性能参数分别如图6和表6所示。

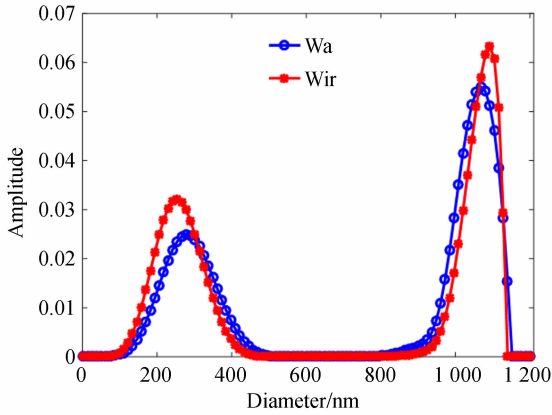


图6 306/974 nm 双峰颗粒在光强均值法和迭代递归的反演结果

Fig. 6 PSDs of 306/974 nm bimodal particles using Wa and Wir methods

表6 306/974 nm 双峰颗粒在不同角度加权方法下的性能参数

Tab. 6 Performance parameters of 306/974 nm bimodal particles at different angular weighting methods

Method	Peak position/nm	E	R
Wa	254/1092	0.170/0.121	0.484 : 1
Wir	278/1068	0.092/0.097	0.453 : 1

从图6和表6可以看出,对于306/974 nm双峰颗粒体系,与采用光强均值法处理数据相比,采用迭代递归方法处理数据进行角度加权时,小颗粒峰值粒度误差由0.170降到了0.092,大颗粒峰值粒度误差由0.121降到了0.097,峰值高度比分别为0.484 : 1和0.453 : 1。

参考文献:

- [1] VEGA J R, GUGLIOTTA L M, GONZALEZ V D G, *et al.*. Latex particle size distribution by dynamic light scattering: novel data processing for multi-angle measurements[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2003, 261(1): 74-81.
- [2] BRYANT G, THOMAS J C. Improved particle size

4 结 论

在多角度动态光散射颗粒测量中,信号噪声对测量结果有着极大的影响,角度加权是左右噪声对测量结果影响的一个重要因素。不同的角度加权方法对测量信号噪声影响的抑制作用不同,通过光强均值及迭代递归角度加权方法研究测量信号噪声影响的抑制作用。对于单峰小颗粒粒度分布,无信号噪声时,采用光强均值法和迭代递归方法进行角度加权,反演得到的峰值误差结果无显著差异,但迭代递归方法加权对小颗粒粒度分布略有展宽。随着噪声的增加,迭代递归法加权所得反演结果的性能指标无显著变化,而光强均值法进行角度加权所得结果的峰值误差明显增大,分布误差也随之增大。对于中、大颗粒,在无信号噪声时,采用两种方法进行角度加权,反演得到的性能参数无显著差异,光强均值法进行角度加权,所得的峰值误差略有增大。随着噪声的增加,光强均值法所得峰值误差增加呈愈加明显的趋势,分布误差也随之增大。迭代递归方法加权所得的峰值误差和分布误差也随噪声增加趋于增大,但增幅明显小于光强均值法。对于双峰分布,迭代递归法角度加权反演的分布误差随着噪声增加也呈现出小于光强均值法角度加权所得误差的趋势。该结果与常规认知不相吻合,其原因在于迭代递归法通过在各个散射角逐次反演和比较粒度分布,通过角度权重的“修正”抵消了噪声导致的粒度分布误差,从而显现出抵御噪声影响的“去噪”性能,而采用光强均值法计算角度权重,尽管权重计算采用无噪声的理论数据,但它对由于角度增加引起的信号噪声增加却无抑制作用。因此,在噪声较大的测量环境下,如现场测量等,宜采用迭代递归方法进行多角度测量的角度加权。

distribution measurements using multiangle dynamic light scattering[J]. *Langmuir*, 1995, 11(7): 2480-2485.

- [3] 徐敏, 申晋, 黄钰, 等. 基于颗粒粒度信息分布特征的动态光散射加权反演[J]. *物理学报*, 2018, 67(13): 293-307.
- XU M, SHEN J, HUANG Y, *et al.*. Weighting inversion of dynamic light scattering based on particle-size information distribution character [J]. *Acta Physica*

- Sinica, 2018, 67(13): 293-307. (in Chinese)
- [4] 刘晓艳, 申晋, 朱新军, 等. 动态光散射技术的角度依赖性[J]. 光学学报, 2012, 32(6): 267-272. LIU X Y, SHEN J, ZHU X J, *et al.*. Angular dependence of dynamic light scattering[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(6): 267-272. (in Chinese)
- [5] GAO S S, SHEN J, THOMAS J C, *et al.*. Effect of scattering angle error on particle size determination by multiangle dynamic light scattering[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(10): 2824-2831.
- [6] 王雪敏, 申晋, 朱新军, 等. 角度组合对多角度动态光散射测量的影响[J]. 光子学报, 2016, 45(8): 0829003. WANG X M, SHEN J, ZHU X J, *et al.*. Influence of angular combination on multiangle dynamic light scattering measurement[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(8): 0829003. (in Chinese)
- [7] LIU X Y, SHEN J, THOMAS J C, *et al.*. Multiangle dynamic light scattering analysis using a modified Chahine method[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2012, 113(6): 489-497.
- [8] 王雅静, 袁曦, 申晋, 等. 噪声动态光散射数据 Tikhonov 与截断奇异值正则化反演[J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2269-2279. WANG Y J, YUAN X, SHEN J, *et al.*. Inversion of Tikhonov and truncated singular value decomposition regularization for noisy dynamic light scattering data[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(9): 2269-2279. (in Chinese)
- [9] DURI A, BISSIG H, TRAPPE V, *et al.*. Fluctuations and noise in time-resolved light scattering experiments: measuring temporally heterogeneous dynamics[C]. *Proc SPIE* 5469, *Fluctuations and Noise in Materials*, 2004: 165-176.
- [10] YANG H, ZHENG G, LI M C. A discussion of noise in dynamic light scattering for particle sizing [J]. *Particle & Particle Systems Characterization*, 2008, 25: 406-413.
- [11] ZHU X J, SHEN J, THOMAS J C. Analysis of noisy dynamic light scattering data using constrained regularization techniques[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(31): 7537-7548.
- [12] 王雪敏, 申晋, 徐敏, 等. 多角度动态光散射角度误差对权重估计的影响[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(10): 320-326. WANG X M, SHEN J, XU M, *et al.*. Effect of angular error on weighting coefficient in multiangle dynamic light scattering[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(10): 320-326. (in Chinese)
- [13] XU Y N, SHEN J, THOMAS J C, *et al.*. Multiangle dynamic light scattering analysis based on successive updating of the angular weighting [J]. *Optics Express*, 2019, 27(15): 21914-21928.
- [14] LIU X Y, SHEN J, THOMAS J C, *et al.*. Multiangle dynamic light scattering analysis using angular intensity weighting determined by iterative recursion [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(7): 846-854.

作者简介:



王雅静(1971—),女,河北承德人,博士,教授,2003年于山东科技大学获得硕士学位,2011年于上海理工大学获得博士学位,主要从事光电精密测试技术方面的研究。E-mail: wangyajing0725@126.com

通讯作者:



申晋(1962—),男,山西晋城人,博士,教授,1996年于中国农业大学获得硕士学位,2004年于上海理工大学获得博士学位,主要从事光电精密测试技术方面的研究。E-mail: shenjin@sdu.edu.cn