

光学粒子计数器测量结果的订正

谭 锐 胡欢陵

(中国科学院安徽光学精密机械研究所)

提 要

本文根据球形粒子的米 (Mie) 散射原理计算了光学粒子计数器的散射相函数和仪器响应曲线。根据被测粒子的折射率对测量结果做出订正。在研究大气气溶胶粒子尺寸谱变化规律时, 这种订正是很重要的。文中举例说明了实际订正方法。

在气溶胶粒子研究和微粒尺寸谱测量方面, 光学粒子计数器是一种使用方便又测量迅速的仪器, 可以实现实时测量和自动监控。与其它方法相比其优点是测量过程中粒子不改变其悬浮态, 不必分离出来, 故所测谱的可靠性高。因而在最近十几年发展很快, 出现多种型号的商品, 但是, 商售光学粒子计数器给出的粒径分档值只是标称值, 其实际值应该同被测粒子折射率有关。那么我们要问标称粒径值对应于那个折射率呢? 如果不知道被测粒子, 折射率会产生多大测量误差呢? 甚至有人怀疑它是否真能用于大气粒子测量, 因为大气中粒子的折射率是随天气、地区而变化的。

人们曾讨论过粒子折射率对近前向散射和 90° 散射的仪器响应曲线的影响^[1, 2]。根据分析, 近前向散射式仪器的响应曲线受粒子折射率影响较小, 但是其响应曲线也不是单调变化, 存在几个粒径无法确定的所谓模糊区; 而 90° 散射式仪器的响应曲线单调改变, 但受粒子折射率的影响较大, 故测量也不准确。另外还有一种 60° 散射式仪器^[3], 被认为兼有以上两种的优点, 所以很有吸引力。目前, 比较先进的粒子测量系统 PMS^[4], 采用氦氖激光器做光源, 改进了信噪比, 但粒径模糊区问题仍然存在。因此, 有人用几台不同型号的仪器同时进行测量作相互补充^[5]。这类仪器已广泛用于大气气溶胶研究。

本文根据球形粒子的米散射理论计算了折射率对散射相函数的影响, 对 60° 和 90° 两种散射仪器计算了各种粒子折射率情况下的响应曲线。讨论了粒子折射率不同对测量结果的影响, 根据粒子折射率订正了被测谱, 从而也可以用于大气气溶胶研究。

一、折射率对散射相函数的影响

当粒径与入射光波长相近时, 散射相函数是变化剧烈的曲线。求沿 θ 角的散射光强时应对波长积分, 结果是把较快的变化平滑了。输出电压正比于下式

$$R_1(a, m, \theta) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(a, m, \theta, \lambda) E(\lambda) S(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

其中 λ_1 和 λ_2 是光学系统的通带限。 $E(\lambda)$ 是光源辐射能量, 由于使用白炽灯, $E(\lambda)$ 可由普

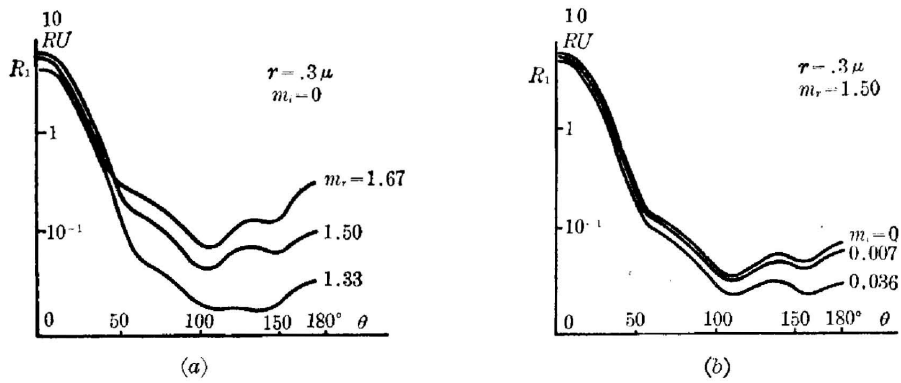


图 1 粒子折射率实部和虚部分别对仪器散射相位函数 R_1 的影响(粒子半径 $r=0.3 \mu\text{m}$)
 Fig. 1 The scattering angular function R_1 is affected by the real and imaginary refraction of particles respectively (particle radius= $0.3 \mu\text{m}$)

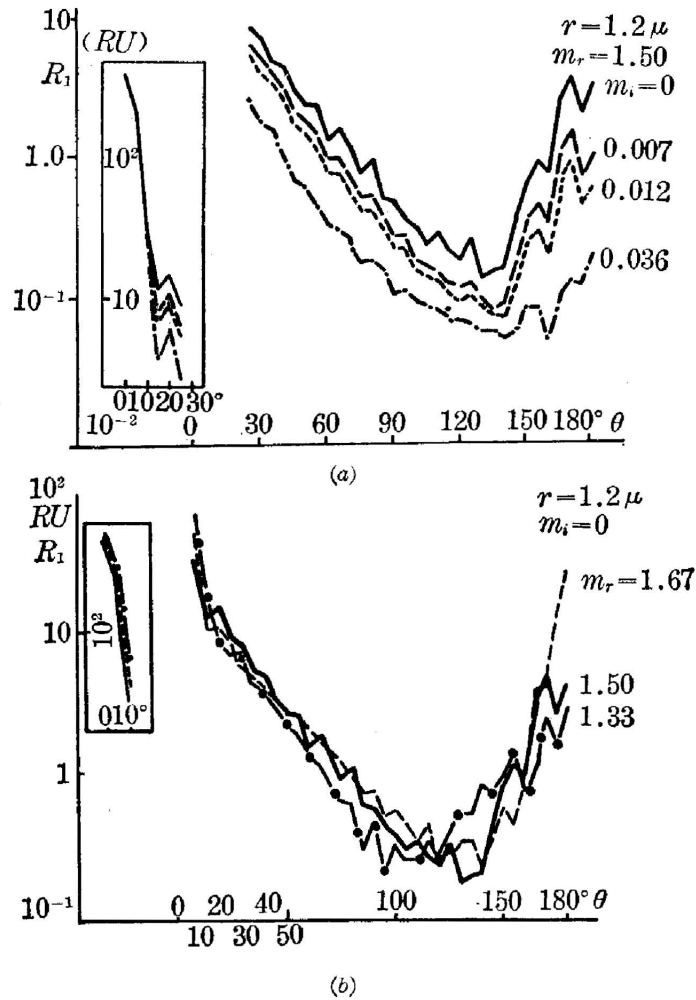


图 2 粒子折射率实部和虚部分别对仪器散射相位函数 R_1 的影响(粒子半径 $r=1.2 \mu\text{m}$)
 Fig. 2 The scattering angular function R_1 is affected by the real and imaginary refraction of particles respectively (particle radius= $1.2 \mu\text{m}$)

朗克公式确定。 $S(\lambda)$ 是探测元件光谱灵敏度, 对于具体型号也可由手册中查到。 σ 是直径为 a 、复折射率为 m 的粒子散射截面, 对球形粒子来说

$$\sigma = \frac{\lambda^3}{8\pi^2} (i_1 + i_2), \quad (2)$$

i_1 和 i_2 是米散射强度分布函数, 它是粒子直径 a 、复折射率 m 、散射角 θ 和波长 λ 的复杂函数, 当这些参数确定后它可由公式求出^[6]。图 1 和图 2 对两种直径的粒子画出了折射率实部和虚部分别变化时对散射相函数 R_1 的影响。

由图可以看出, 对近前向散射情况, 折射率虚部的影响很小, 只要粒子尺寸比较大, 散射强度受折射率实部和虚部的影响都不大, 在 90° 方向有较大影响, 在后向散射方向影响最大。在 $20^\circ \sim 70^\circ$ 区域不同实折射率的曲线有不同程度的交叉[图 2(a)], 在此角度范围散射强度受折射率实部影响较小, 但它受折射率虚部的影响并不小[图 2(b)]。对于较小尺寸的粒子, 这种影响的角度关系不明显。总之, 当测量非吸收性粒子时, 采用 60° 散射比 90° 散射要好。要是在结构上没有困难的话, 估计采用 45° 散射可能更好。如果测量对象包括吸收性粒子, 应该说近前向散射式仪器较好; 而使用 60° 或 90° 散射仪器, 测量结果将与粒子折射率有关。

二、光学粒子计数器的响应曲线

图 3 说明光散射系统原理, 表示其散射几何关系。 OA 是照射光束光轴, γ 是照射半角。 OC 是接收系统光轴, β 是接收系统半张角。 OC 与 OB 的夹角 ψ 对于本文所使用的仪器可以是 60° (也可以是 90°)。 O 点是散射区中心, 被测粒子则与图面垂直地穿过散射区。

对于 60° (或 90°) 散射的仪器响应度可表示成下式^[2]:

$$R(a, m) = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \sigma(\lambda, \theta, m, a) E(\lambda) S(\lambda) F(\theta, \varphi) d\lambda d\theta d\varphi, \quad (3)$$

这里被积函数仅比(1)式多一项 $F(\theta, \varphi)$, 它是仪器的几何结构因子, 是一个三角函数式(参见图 3), φ 是投射光线 OB' 的积分角(相对于 OC 轴取值); θ 是接收光线 OC' 相对于投射角 φ 的散射角, 当 OB' 固定时考虑 OC' 可能的方向, 即对 θ 角积分。然后考虑 OB' 可能的取向, 即对 φ 角积分。显然, θ 与 φ 的积分限是 $\psi - \gamma \leq \varphi \leq \psi + \gamma$; $\varphi - \beta \leq \theta \leq \varphi + \beta$ 。

表 1 列出了两种光学粒子计数器的有关计算参数。根据(3)式即可计算两种仪器在各种折射率下的响应曲线, 分别画在图 4 和图 5。这里所选择的折射率可代表一般天气下大气气溶胶。从这些曲线可以看出:

(1) 粒子折射率不同时响应曲线有很大差别。如果测量中忽略折射率的差别, 则必然造成很大的误差。例如, 对于大气粒子, 粒径误差最大可达四倍, 最小可测粒径相差可达一

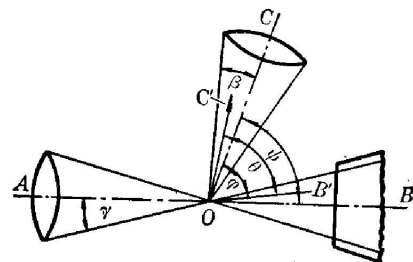
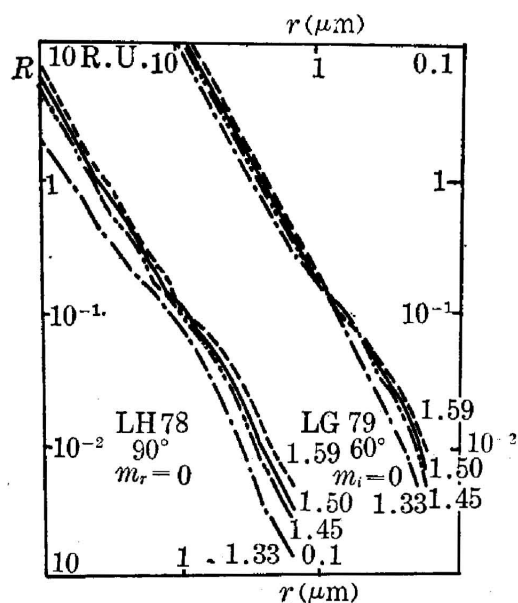
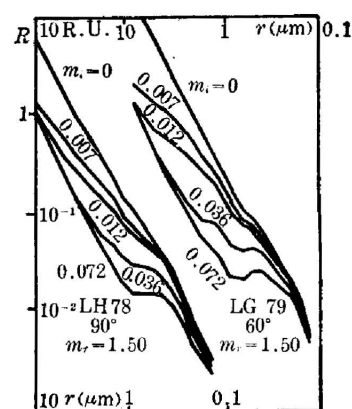


图 3 侧向散射系统的几何关系
Fig. 3 The geometry of off-axis scattering system

表 1 两种散射系统的有关参数

Table 1 Parameters of two scattering systems

型 号	ψ	γ	β	$S(\lambda)$	$T^\circ\text{K}$	λ_1	λ_2
78	90°	22.5°	22.5°	S_4	2700	0.35	0.65
79	60°	20°	20°	S_4	2700	0.35	0.65

图 4 折射率实部对两种散射系统响应曲线的影响
(R 取相对单位)Fig. 4 The responsibility of scattering instruments on the real part of refraction
(R in relative unit)图 5 折射率虚部对两种散射系统响应曲线的影响(R 取相对单位)Fig. 5 The responsibility of scattering instruments on imaginary part of refraction(R in relative unit)

倍,由此引起浓度测量误差可达三倍以上。

(2) 实折射率的不同对最小可测粒径影响较大,故对浓度测量准确度影响较大。 60° 散射仪器受实折射变化的影响比 90° 仪器小。故对非吸收性粒子来说, 60° 散射仪器测量精度较高,例如,测径误差约小一半。

(3) 虚折射的不同主要影响大粒子,特别是在直径 $1\sim 2\mu\text{m}$ 附近响应曲线易出现弯曲,致使出现粒径测量的模糊区。所以对吸收性粒子来说,两种散射仪器的响应曲线受折射率影响都较大, 60° 散射仪器更甚之,应该使用近前向散射式仪器较好。

三、测量结果的订正

由于仪器响应曲线与粒子折射率有关,通常只能根据一条确定的响应曲线对仪器输出电压分档值作相对调整。该响应曲线就是原始标定曲线。仪器的灵敏度则是利用一种直径已知的所谓标准粒子定出的。只有当被测粒子的折射率与标准粒子的折射率和原始标定曲

线对应的折射率三者一致时,测量才正确。否则,这样标定的仪器是不能使用的。因此商品仪器给出的粒径只是标称值,仅能用作估计量级,如果用它来测量粒谱,作一些定量研究是有问题的。然而,在计算出仪器各种不同的响应曲线后,就有可能对仪器粒径分档按照粒子折射率进行订正。

为简明起见,通过实测具体说明粒谱订正方法。图 6 是 60° 散射仪器的响应曲线。其中包括 (1) 折射率为 1.59 的标准粒子对应的响应曲线; (2) 折射率为 1.50~0.007i 的大陆性晴天气溶胶对应的响应曲线; (3) 原始标定曲线。标准粒子是直径为 0.74 μm 的聚苯乙烯小球*。调整仪器灵敏度使该标准粒子的直径与仪器分档标称值相符。(通常仪器的灵敏度就是这样标定的。)从原始标定曲线上可以查出, 0.74 μm 直径对应于 108 mV 电压,这就是标准粒子的输出电压。所以应该相应地移动所有计算出的曲线,使曲线(1)上半径为 0.37 μm 点的纵坐标恰好是 108 mV。移动后的曲线(2)就是实际响应曲线,于是可通过它读出与各分档电压对应的实际粒径。为使用方便起见,也可以不移动这些曲线而移动纵坐标,为此做一根活动标尺(图 6

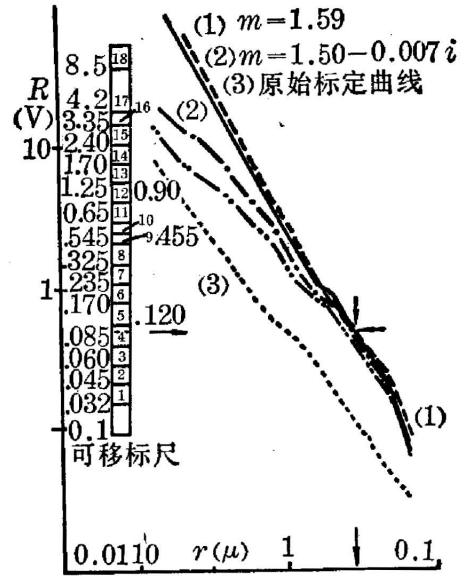


图 6 粒谱订正说明

Fig. 6 Description of correction to the particle size distribution

表 2 测量谱与订正谱比较

Table 2 Comparison of measuring spectrum and corrected spectrum

累积数 N (个/0.3 升)	分档数 ΔN	名义值 r (μm)	订正值 r' (μm)	未订正谱 $\Delta N/\Delta \lg r$ (1/升)	订正谱 $\Delta N/\Delta \lg r'$ (1/升)
52320	20326	0.15	0.195	$54.2 \cdot 10^4$	$108 \cdot 10^4$
31994	13005	0.20	0.227	$44.7 \cdot 10^4$	$47.6 \cdot 10^4$
18989	10237	0.25	0.280	$43.1 \cdot 10^4$	$37.6 \cdot 10^4$
8752	6292	0.30	0.345	$16.8 \cdot 10^4$	$23.1 \cdot 10^4$
2460	1224	0.40	0.426	$4.2 \cdot 10^4$	$3.41 \cdot 10^4$
1236	498.2	0.50	0.56	$2.1 \cdot 10^4$	$0.97 \cdot 10^4$
737.4	306.8	0.60	0.83	$1.06 \cdot 10^4$	$1.09 \cdot 10^4$
430.6	143.0	0.75	1.08	$0.382 \cdot 10^4$	$0.807 \cdot 10^4$
287.6	49.4	1.00	1.18	$0.17 \cdot 10^4$	$0.338 \cdot 10^4$
238.2	52.8	1.25	1.32	$0.222 \cdot 10^4$	$0.317 \cdot 10^4$
185.4	39.6	1.5	1.50	1060	1160
145.8	27.4	2.0	1.95	943	847
118.4	31.8	2.5	2.5	1340	1056
86.6	28.0	3.0	3.15	747	643
58.6	22.2	4.0	4.4	764	379
36.4	20.8	5.0	6.9	876	601
15.6	9.6	6.0	9	144	106
6.0		10	18		

测量仪器: LG79-18, 60° 散射光学粒子计数器
天 气: 晴天到多云, $m \approx 1.50 - 0.007i$

* 聚苯乙烯小球由建材研究院空调所提供。

左面)。它就是原始标定曲线被压缩在一垂直线上,并标出各分档电压值(和对应的通道号数)。同时还标出了108 mV 刻度。使用时移动此标尺把108 mV 线与曲线(1)上横坐标为半径 $0.37 \mu\text{m}$ 点对齐,活动标尺上各分档电压值与曲线(2)的交点对应的横坐标就是各档订正后的粒径。表2是一次实测大气粒子谱,并且按上述方法做出了订正。该实验是在晴天进行的,此时大气粒子平均折射率近似为 $1.50 \sim 0.007i$ 。可以看出,订正后的谱与其它方法测量得到的大气气溶胶粒谱更为一致。

本工作得到我室许多同志的帮助;薛瑞明、吴康乐等同志参加了仪器响应曲线的计算工作;特此致谢。

参 考 文 献

- [1] H. Quenzel; *Appl. Opt.*, 1969, **8**, No. 1 (Jan), 165.
- [2] D. D. Cooke and M. Kerker; *Appl. Opt.*, 1975, **14**, 734.
- [3] *Atmos. Environ.*, 1974, **8**, 717.
- [4] P. M. Livingston. *Appl. Opt.*, 1978, **17**, 818.
- [5] G. E. Schacher *et al.*; *Appl. Opt.*, 1981, **20**, 3951.
- [6] D. Deirmendjian; «*Electromagnetic Scattering on Spherical Polydispersions*», 1969.

Correction of measured results of an optical particle counter

TAN KUN AND HU HUANLING

(*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica*)

(Received 29 December 1982, revised 2 April 1983)

Abstract

Scattering angular function and responsibility of an optical particle counter are calculated by using Mie scattering theory of spherical particle in this paper. The calculations indicate that when non-absorptive particles are measured, the 60° -scattering device is better than the 90° -scattering one. When absorptive particles are measured the measurement results of both devices are dependent on the refraction of the particles, so that it is possible to generate a considerable error. However, after the responsibilities of these devices were calculated, it is possible to correct the measurement results upon refraction of the particles. This is important for size distribution of the atmospheric aerosol.