

文章编号: 0253-2239(2009)02-0407-05

# 光散射计数法颗粒群质量测量的数学模型

杨娟 卞保民 顾芳 陆建

(南京理工大学 信息物理与工程系, 江苏 南京 210094)

**摘要** 分析了计数法颗粒物质量测量的一般数学模型, 结果表明颗粒群总质量能表示成各通道计数值的线性叠加。在此基础上以光散射球形颗粒群质量测量为例, 以颗粒物的同量子集  $N_i$  为出发点, 依据统计理论推导出计数通道的散射光通量与颗粒群的平均体积之间存在分形关系  $\varphi = L\bar{V}^\beta$ , 由此得出计数通道平均质量  $\bar{m}_j$  与计数通道特征参数  $\varphi$  的一般函数关系  $\bar{m}(\varphi_j) \equiv \rho\bar{V}_j = \rho L^{-\eta}\varphi_j^\eta$ ,  $\eta$  为光散射等效截面分形维数, 且  $0 < \eta < 3$ 。并将其推广到非球形颗粒的测量之中, 由此建立起光散射计数法颗粒群质量测量的完整的数学模型, 为实现计数器在线测量颗粒群的质量浓度提供了一种可行途径。

**关键词** 质量测量; 光散射计数法; 质量子集; 分形

中图分类号 X831.02 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20092902.0407

## A Mathematics Model for Aerosol Mass Measurement Using Light Scattering Counting Method

Yang Juan Bian Baomin Gu Fang Lu Jian

(Department of Information Physics and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China)

**Abstract** The general mathematics model for aerosol mass measurement by using the counting method is analyzed, and the result indicates that the total mass of aerosol can be expressed as linear addition of counting channels. The light scattering counting method for spherical particles mass measurement was studied as an example. Starting with aerosol mass subset  $N_i$ , the fractal relation  $\varphi = L\bar{V}^\beta$  between scattering luminous flux of counting channels and aerosol's average volume can be gained according to statistics. Based on this, the general function  $\bar{m}(\varphi_j) \equiv \rho\bar{V}_j = \rho L^{-\eta}\varphi_j^\eta$  of average mass  $\bar{m}_j$  and characteristic parameter  $\varphi$  of counting channels can be established, where  $\eta$  is the equivalent section fractal dimension with the range from 0 to 3. In further, all of these were extended to non-spherical particles mass measurement, and then the full mathematics model for aerosol mass measurement founded on light scattering counting method was established. This model provides a feasible way for the counter to measure aerosol mass concentration in real time.

**Key words** mass measurement; light scattering counting method; mass subset; fractal

## 1 引言

悬浮颗粒物质量浓度的测定方法主要有<sup>[1~4]</sup>: 滤膜称重法、 $\beta$ 射线吸收法、压电晶体法、光散射法、黑度法等。其中光散射法因具有测量精度高、速度快、可用于在线测量等优点而受到了广泛应用。光

散射法又分为颗粒群法<sup>[5]</sup>和单粒子计数法, 目前悬浮颗粒物质量浓度测量仪大多基于颗粒群法, 其主要适用于测量高浓度的颗粒物, 测量的质量浓度范围较广, 但它只能测量颗粒群的粒径大小和分布, 而不能确定颗粒数或颗粒浓度。基于光散射计数法的

收稿日期: 2008-06-13; 收到修改稿日期: 2008-08-03

作者简介: 杨娟(1976-), 女, 博士研究生, 主要从事颗粒测试和光学传感器技术方面的研究。

E-mail: yang76811@yahoo.cn

导师简介: 陆建(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光与材料相互作用机理与光电测试技术方面的研究。

E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

粒子计数器以前主要用来测量洁净环境中的污染悬浮颗粒物粒度分布,能同时给出颗粒数的散射光通量等效粒度分布,目前在悬浮颗粒物质量浓度测量领域中崭露头角。

利用单粒子光散射计数原理设计的质量浓度测量仪主要有德国 GRIMM 公司 1100 系列粉尘监测仪,其中的 GRIMM1.108 具有 15 个粒度计数通道,GRIMM 1.109 具有 31 个粒度计数通道<sup>[6]</sup>。阎逢旗等<sup>[7]</sup>利用光学粒子计数器对大气进行长期监测,采用 17 个粒度计数通道,给出一个需要 16 个标定参数的悬浮颗粒物质量计算公式。

文献[8,9]中报道了一种光散射计数法测量悬浮颗粒物质量的新计算方法,该方法使用了两个标定参数,由这两个参数得到被测颗粒物的散射光通量对应的单颗粒平均质量  $\bar{m}_i$ 。对于悬浮颗粒物,被实验证明在  $5 \text{ mg/m}^3$  的质量浓度范围内与标准仪器的测量结果吻合得很好。

## 2 计数法颗粒物质量测量的一般数学模型

设颗粒群总数为  $N$ ,将颗粒群内部依颗粒质量大小排序  $m_i$ ,相同质量定义为一个颗粒质量量子集  $N_i$  ( $i=1, \dots, s$ ),  $s$  为颗粒群质量量子集数目,  $N_i$  为质量量子集颗粒数。颗粒群质量量子集结构用分布概率  $\frac{N_i}{N} = f_i$  描述。

将颗粒计数信号按幅度大小顺序划分为  $l$  档,构成  $l$  个信号计数子集,设第  $j$  档中的计数为  $\tilde{N}_j$ ,总计数为  $\tilde{N} = \sum_j \tilde{N}_j$ 。由于每个粒子只产生一个脉冲信号,所以单位时间内输入测量系统的粒子总数与系统测到的脉冲信号总数相等,即有  $N = \tilde{N}$ 。对于一个计数测量系统,按时间先后随机性输入颗粒,颗粒总数为  $N(t)$ ,对应第  $j$  档中的计数分布为  $\tilde{N}_j(t)$ ,总计数为  $\tilde{N}(t)$ 。随测量时间增加,分布  $\tilde{f}_j(t) = \tilde{N}_j/\tilde{N}$  趋于稳定,即  $\frac{d}{dt} \tilde{f}_j(t) \rightarrow 0$ 。各通道内计数的涨落为  $\Delta \tilde{N}_j/\tilde{N}_j \sim 1/[\tilde{N}_j(t)]^{1/2}$ 。则有<sup>[10]</sup>

$$\begin{pmatrix} \tilde{N}_1 \\ \vdots \\ \tilde{N}_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{n}_{11} & \cdots & \tilde{n}_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{n}_{l1} & \cdots & \tilde{n}_{ls} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \Rightarrow \begin{pmatrix} \tilde{N}_1 \\ \vdots \\ \tilde{N}_l \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1s} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{l1} & \cdots & p_{ls} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ \vdots \\ N_s \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中  $\tilde{n}_{ji}$  代表总颗粒数为  $N$  的颗粒群中质量量子集  $N_i$

出现在第  $j$  个计数通道中的对应颗粒数目,二元非负元素  $p_{ji} = \tilde{n}_{ji}/N_i$ , ( $j=1, \dots, l, i=1, \dots, s$ ),  $p_{ji}$  为总颗粒数为  $N$  的颗粒群中质量量子集  $N_i$  出现在第  $j$  个计数通道中的概率。矩阵  $\mathbf{P}$  称为质量计数概率矩阵,当取  $l=s$  时,  $\mathbf{P}$  为质量计数概率方阵。当总计数值与输入颗粒数相等时,由质量概率分布表示的计数概率分布  $\tilde{f}_j$  为

$$\tilde{f}_j = \frac{\tilde{N}_j}{\tilde{N}} = \sum_i \frac{\tilde{n}_{ji}}{\tilde{N}} = \sum_i \frac{p_{ji}}{N} N_i = \sum_i p_{ji} f_i \quad (2)$$

显然,第  $i$  个质量量子集中,出现在第  $j$  个通道中的颗粒在总颗粒群中所占的比例为

$$\frac{\tilde{n}_{ji}}{\tilde{N}} = p_{ji} f_i \quad (3)$$

则非负二元概率函数为

$$p_{ji} = \frac{\tilde{n}_{ji}}{\tilde{N}} / f_i = \frac{\tilde{n}_{ji}}{N_i} \quad (4)$$

当计数法信号幅度平均值与颗粒质量具有单调性关系时,统计测量方法能够区分颗粒物质量大小,(4)式给出了二元概率函数的测量原理,即可在“标准粒子”质量量子集输入的条件下直接测定  $p_{ji}$ 。由于二元概率矩阵元  $p_{ji}$  能够被直接测量,计数概率分布  $\tilde{f}_j$  也能够被直接测量,则由计数方法能够获得被测颗粒物的质量概率分布  $f_i$ 。可以证明,此时质量计数概率矩阵  $\mathbf{P}$  是满秩的<sup>[10]</sup>。令  $\mathbf{P}$  的逆矩阵  $\mathbf{G} = \mathbf{P}^{-1}$ 。定义  $\mathbf{G}$  为颗粒群计数质量变换矩阵。对第  $i$  种粒子,则有  $\sum_j g_{ij} \tilde{N}_j = N_i$ 。在等式两边同时乘以单颗粒质量  $m_i$ ,可得子集的总质量为

$$M_i = N_i m_i = \sum_j m_i g_{ij} \tilde{N}_j \quad (5)$$

颗粒群的总质量为

$$M = \sum_i M_i = \sum_i N_i m_i = \sum_i \sum_j m_i g_{ij} \tilde{N}_j = \sum_j \sum_i m_i g_{ij} \tilde{N}_j = \sum_j \bar{m}_j \tilde{N}_j \quad (6)$$

显然从形式上看,  $\sum_i m_i g_{ij} = \bar{m}_j$  的意义对应于计数通道的颗粒平均质量。(6)式表明,测量颗粒群总质量能表示成各通道计数值的线性迭加。

可见,计数法测量颗粒物质量的前提条件为:1) 颗粒质量量子集计数信号幅度平均值与质量呈单调增加关系;2) 存在标准质量量子集样本用于标定二元概率密度元。

## 3 光散射计数法球形颗粒群质量测量的数学模型

对于光散射计数法,当用系列标准球形颗粒对

测量系统等效参数进行标定时,由于光强分布的不均匀性,标准颗粒产生的散射光信号幅度存在一定程度的离散性。获得  $l$  个对应的等效球质量  $\bar{m}_j$ , 等效球质量与标定所用的标准粒子质量  $m_i$  一定不同。等效球质量  $\bar{m}_j = \frac{4\pi}{3}\rho\tilde{D}_j^3$ , 从原理上讲,  $\tilde{D}_j$  是与计数通道对应的“名义粒径”的真实含义。

质量为  $m$  的球颗粒体积为  $V$ , 颗粒物  $N$  中的质量密度分布为  $f(V) = \frac{dN}{N dV}$ , 颗粒  $V$  多次测量操作可能产生不同强度的散射光通量  $\varphi$ 。设颗粒  $V$  产生散射光通量  $\varphi$  的概率为  $p(\varphi | V)$ , 则颗粒群  $N$  中颗粒  $V$  产生散射光通量  $\varphi$  的概率分布为

$$f(V) \cdot p(\varphi | V) = f(V) \cdot \frac{P(\varphi, V)}{f(V)} = P(\varphi, V)。$$

随着输入到测量系统的颗粒数增加, 颗粒子集  $V$  产生散射光通量  $\varphi$  的概率分布  $P(V, \varphi) = \frac{\partial^2 \tilde{N}(V, \varphi)}{N \partial \varphi \partial V}$  趋于稳定。对于确定颗粒  $V$ , 测量散射光通量对应的平均值为

$$\bar{\varphi} = \int \varphi P(V, \varphi) d\varphi \quad (7)$$

可见在确定的散射光测量装置下, 球颗粒体积  $V$  与平均光通量  $\bar{\varphi}$  之间有一一对应关系,  $\bar{\varphi} = \Phi(V)$ , 即该测量系统提供了一种用平均光通量度量散射球体积的“方法”。对确定的测量系统, 随球颗粒体积增大, 平均散射光通量单调增大; 随着颗粒尺度的减小, 散射光通量概率分布  $P(V, \varphi)$  函数趋于与光敏区相对于颗粒路径上的光强分布函数一致的结构形式。同理, 根据二元概率密度可得

$$\bar{V} = \int V P(V, \varphi) dV \quad (8)$$

即对于确定的颗粒群, 与散射光通量对应存在颗粒平均体积  $\bar{V} = V(\varphi)$ 。该平均体积与计数通道中平均质量  $\sum_i m_i g_{ij} = \bar{m}_j$  对应, 是光散射计数法测定颗粒物质量的物理基础。测量理论需要解决的是平均质量与计数通道参数关系, 即  $\sum_i m_i g_{ij} = \bar{m}(\varphi_j)$ , 则通过测量计数分布就能计算出颗粒物质量。

由于  $\bar{\varphi} = \Phi(V)$  是统计结果, 即随机不稳定因素的影响已经消除了,  $\bar{\varphi}$  对  $V$  的影响只剩下与测量系统相关的影响, 子集元质量大小与平均光通量理论上是完全对应的单调函数。考虑到颗粒元质量趋于零时, 散射光通量趋于零, 设该函数形式为  $\bar{\varphi} = K(V)V^\alpha$ ,  $K(V)$  是与量纲有关的待定函数。假设球内部有  $n$  个分子数, 且这些分子的排列无一定规

则, 则当分子数  $n$  足够大时, 如果这些分子群所产生的散射光满足不相关的单散射条件, 可以证明所有这些分子所产生的总的散射光通量将是单个分子散射时散射光通量的  $n$  倍, 相当于在散射极限条件下有  $\lim \bar{\varphi} \propto n \propto V$ 。当这些分子聚合在一起形成球颗粒时, 显然分子群所产生的散射光不满足不相关的单散射条件, 因此颗粒散射效率低于单分子散射的代数和, 故可推得一般条件下  $\bar{\varphi} \propto V^\alpha$ , 其中  $\alpha < 1$ 。即函数  $\bar{\varphi} = \Phi(V)$  不存在高次幂函数项, 因此有  $K(V) = K$ 。由于颗粒形状具有自相似性, 同时在给定光敏区后, 颗粒产生的平均散射光通量主要由颗粒的形状决定, 因此在小质量范围内不同量子集产生的平均散射光通量在统计意义下与颗粒体积具有相同的关系  $\bar{\varphi} = KV^\alpha$ , 此关系与颗粒体积无关。

同理, 对于颗粒平均体积  $\bar{V} = V(\varphi)$  函数, 当散射光通量为零, 必然有平均体积为零, 即可得函数为  $\bar{V}^\beta L(\bar{V}) = \varphi$ 。由于颗粒散射光通量与颗粒体积相比具有形式低维形式, 平均体积与散射光通量不可能有高维关系, 故  $L(\bar{V}) = L$  与平均体积无关,  $L\bar{V}^\beta = \varphi$  且  $\beta < 1$ 。

由于  $\bar{\varphi}$  随  $V$  单调递增, 所以  $\alpha > 0$ , 即  $0 < \alpha < 1$ , 因此平均散射光通量与颗粒的体积之间存在分形关系。由此可知标准球颗粒的质量测量结果为

$$\bar{m}_i = \rho V_i = (K\bar{\varphi}_i)^{-\alpha} \cdot \rho = \rho K^{-\alpha} (\bar{\varphi}_i)^{-\alpha} \quad (9)$$

同时由于  $\varphi$  随  $\bar{V}$  单调递增, 所以  $\beta > 0$ , 即  $0 < \beta < 1$ , 因此散射光通量与颗粒的平均体积之间也存在分形关系。第  $j$  个计数通道的质量测量结果可表示

$$\bar{m}(\varphi_j) \equiv \rho \bar{V}_j = \rho L^{-\eta} \varphi_j^\eta \quad (10)$$

其中  $\eta = 1/\beta$ , 称  $\eta$  为光散射等效截面分形维数, 是由颗粒的形貌特征决定的。从几何学可知  $0 < \eta < 3$ 。上式即为计数通道的平均质量与计数通道参数之间的关系表达式, 从而建立起光散射计数法测量球形颗粒质量的数学模型。

#### 4 光散射计数法不规则颗粒群质量测量的数学模型

在光散射计数法的测量过程中, 实际输入的是不规则颗粒群。将颗粒群内部依颗粒质量大小  $m_i$  排序, 相同质量归为一个颗粒质量子集  $N_i (i = 1, \dots, s)$ , 显然颗粒群产生的散射光信号幅度存在一定程度的离散性。我们将获得  $l$  个对应的等效球质量  $\bar{m}_j$ ,

等效球质量与质量子集的质量  $m_i$  一定不同。

设质量为  $m$  的不规则颗粒等效球体积为  $V_e$ , 可能产生不同强度的散射光通量  $\varphi$ 。由第 3 节的分析可知平均散射光通量与颗粒群的等效球体积之间存在分形关系:  $\bar{\varphi} = KV_e^\alpha$ ,  $K$  是由测量系统决定的常数,  $0 < \alpha < 1$ ; 固定通道的散射光通量与其颗粒群的平均等效球体积之间也存在分形关系:  $\varphi = LV_e^\beta$ ,  $L$  是常数,  $0 < \beta < 1$ 。则第  $j$  通道的平均质量为

$$\bar{m}(\varphi_j) \equiv \rho \bar{V}_{ej} = \rho L^{-\eta} \varphi_j^\eta \quad (11)$$

(11)式即为利用光散射计数法测量不规则颗粒群质量的计算公式, 其中  $V_{ej}$  为第  $j$  通道中不规则颗粒群对应的平均等效球体积。并且可以看出(10)式和(11)式形式上完全一样, 不同之处仅在于  $\eta$  的取值的不同。由(11)式可知对光散射计数法测量不规则颗粒群质量, 只需标定  $L$  和  $\eta$  两个参数即可。

由于在实际测量中, 测量次数不可能无限多次, 颗粒群的平均光通量  $\bar{\varphi}$  不可能保持不变, 落在同一通道中颗粒的平均体积  $\bar{V}$  也不可能不变。由此导致对每个不同质量子集其  $\eta$  均不相同, 通过一种质量子集标定出的  $\eta$  显然不能适用于其它质量子集的颗粒群。由于  $\eta$  反映的是颗粒的形貌特征, 且在标定实验中只能取被测颗粒物中的小样本对计数器进行标定。但小样本的形貌特征并不等于整个颗粒物样本的形貌特征, 但它一定具有整个颗粒物样本的部分特征。因此, 可以通过取不同小样本颗粒物之间共同形貌特征的方法来表征整个颗粒物的形貌特征, 即通过取不同质量子集标定参数交集的方法来获得适用于所有颗粒群的分形维数  $\eta$ 。显然, 在一定的误差范围内, 此交集区域一定存在, 当误差范围越大时, 交集区域越大。

通过实验方法验证了悬浮颗粒物的平均质量与计数器通道电压之间的关系为  $\bar{M}(v_j) = kv_j^\eta$ <sup>[11]</sup>, 并采用 2048 通道的电路, 通过两步标定法采用取分形维数交集的方法对上述两个参数进行了标定。将其代入(11)式计算粒子计数器测量的质量浓度  $C$ , 并将  $C$  与美国 TSI 公司智能防爆粉尘仪 SIDEPAK AM510 测量的标准参照值  $C_{TSI}$  进行了比较。图 1 是粒子计数器(OPC)和智能防爆粉尘仪测量值的关系图, 两次实验拟合直线的斜率分别为 1.080, 0.9582, 相关系数分别为 0.9939, 0.9991。由此可见, 两次实验拟合直线的斜率均与 1 比较接近, 相关系数都在 0.99 以上, 表明粒子计数器测量的烟尘质量浓度值  $C$  与标准参照仪器的测量值  $C_{TSI}$  基本一致, 从而从实验上验证了上述模型的正确性。

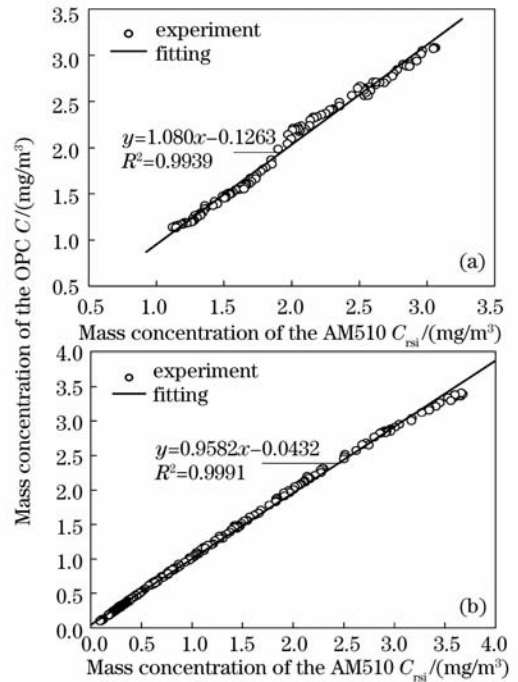


图 1 OPC 测量值与 SIDEPAK AM510 测量值的关系图  
(a) 香烟烟尘 ; (b) 蚊香烟尘

Fig. 1 Plot of measured mass concentration by SIDEPAK AM510 versus that by OPC. (a) cigarette soot ; (b) mosquito incense

## 5 结 论

分析了计数法颗粒物质量测量的一般数学模型, 结果表明颗粒群总质量能表示成各通道计数值的线性迭加。在此基础上以光散射球形颗粒群质量测量为例, 以颗粒物的同质量子集  $N_i$  为出发点, 依据统计理论推导出计数通道的散射光通量与颗粒的平均体积之间存在分形关系  $\varphi = LV^\beta$ , 由此得出计数通道平均质量  $\bar{m}_i$  与计数通道特征参数  $\varphi$  的一般函数关系  $\bar{m}(\varphi_j) \equiv \bar{V}_j \rho = \rho L^{-\eta} \varphi_j^\eta$ 。其中  $\eta$  为光散射等效截面分形维数, 且  $0 < \eta < 3$ 。并将其推广到非球形颗粒的测量之中, 从而建立起光散射计数法颗粒群质量测量的完整的数学模型。同时, 由于参数  $\varphi$  没有进行任何限定, 可将其替换成任何计数法质量测量的特征参数, 因此可以将此模型应用于任何采用计数法对颗粒群进行质量浓度的测量之中, 从而为实现计数器在线测量颗粒群的质量浓度提供了一种可行途径。

## 参 考 文 献

- 1 A. Gmiterko, S. Slosarcik, M. Dovica. Algorithm of nonrespirable dust fraction suppression using an optical transducer of dust mass concentration[J]. *IEEE Transactions*

- on Instrumentation and Measurement, 1998, **47**(5): 1228~1233
- 2 Han Daowen, Liu Wenqing, Liu Jianguo *et al.*. Retrieval method for aerosol mass concentration vertical distribution[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1567~1573  
韩道文, 刘文清, 刘建国 等. 气溶胶质量浓度空间垂直分布的反演方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1567~1573
  - 3 W. Chueinta, P. K. Hopke. Beta gauge for aerosol mass measurement [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **35**(4): 840~843
  - 4 A. Soutar, M. Watt, J. W. Cherrie *et al.*. Comparison between a personal PM10 sampling head and the tapered element oscillating microbalance (TEOM) system [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, **33**(27): 4373~4377
  - 5 P. Görner, D. Bemer, F. Fabriès. Photometer measurement of polydisperse aerosols[J]. *Journal of Aerosol Science*, 1995, **26**(8): 1281~1302
  - 6 Thomas P., Darrin O., Vijay G. *et al.*. Comparison of the Grimm 1. 108 and 1. 109 portable aerosol spectrometer to the TSI 3321 aerodynamic particle sizer for dry particles[J]. *Annals of Occupational Hygiene*, 2006, **50**: 843~850
  - 7 Yan Fengqi, Hu Huanling, Yu Tong. Measurement of particulate mass concentrations and atmospheric visibility with an optical particle counter[J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2004, **21**(1): 98~102  
阎逢旗, 胡欢陵, 虞 统. 用光学粒子计数器测颗粒物质量浓度和能见度[J]. *量子电子学报*, 2004, **21**(1): 98~102
  - 8 Gu Fang, Yang Juan, Bian Baomin *et al.*. Aerosol mass concentration algorithm based on the average mass[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1706~1710  
顾 芳, 杨 娟, 卞保民 等. 基于平均质量的悬浮颗粒物质量密度算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1706~1710
  - 9 Gu Fang, Yang Juan, Wang Chunyong *et al.*. Aerosol mass concentration algorithm based on the number of equivalent spherical particles [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2008, **19**(1): 87~91  
顾 芳, 杨 娟, 王春勇 等. 基于等效球形颗粒数的颗粒物质量浓度算法[J]. *光电子·激光*, 2008, **19**(1): 87~91
  - 10 Yang Ling, Cheng Xiaofei, Bian Baomin *et al.*. The study of transmission of light scattering signal of parcels[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2000, (1): 89~91  
杨 玲, 程晓飞, 卞保民 等. 尘埃粒子光散射信号传输特性的研究[J]. *光电子·激光*, 2000, (1): 89~91
  - 11 Fang Gu, Juan Yang, Baomin Bian *et al.*. A model for aerosol mass concentration using an optical particle counter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 214~217