

文章编号: 0253-2239(2005)09-1260-5

激光尘埃粒子计数器微型光学传感器的研究

梁春雷^{1,2} 黄惠杰¹ 任冰强¹ 赵永凯¹ 杜龙龙¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)
(² 武汉化工学院理学院, 武汉 430073)

摘要: 研制成功便携式激光尘埃粒子计数器的核心部件——微型光学传感器。该传感器采用直角散射光收集形式,以高功率半导体激光器作为光源,同时采用高性能的 PIN 型光电二极管作为光电探测器。散射光收集系统为单一大数值孔径的球面反射镜,其对粒子散射光的收集角范围从 20°到 160°。粒子散射光信号是脉冲信号,其频谱成份主要在高频段,所以在 PIN 型光电二极管后用一个带通式前置放大器来消除外界的低频噪声,根据米氏散射理论计算了该光学传感器的光散射响应特性,并用聚苯乙烯标准粒子实测了该光学传感器的性能。结果表明,该系统具有高的信噪比、计数效率和尺寸分辨本领。

关键词: 测量; 光学传感器; 粒径测量; 计数效率

中图分类号: TH741 文献标识码: A

Study of Miniature Optical Sensor for Laser Particle Counter

Liang Chunlei^{1,2} Huang Huijie¹ Ren Bingqiang¹ Zhao Yongkai¹ Du Longlong¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)
(² School of Sciences, Wuhan Institute of Chemical Technology, Wuhan 430073)

Abstract: A miniature optical sensor, the core of a miniature laser aerosol particle counter, has been developed. The optical system of the sensor is a right-angle scattering optics. A high-power laser diode module is used as the light source, and a PIN photodiode with high performance is used as the photo-detector. By using a reflective spherical mirror with large numerical aperture, the light scattered by individual particles is collected over a large angular range of 20° to 160°. The scattered light signal from the particle is short pulse, which consists mainly of high frequency components. A band-pass preamplifier is used to eliminate lower-frequency electromagnetic interference from external environment. The light scattering response characteristics of the sensor are calculated based on Mie scattering theory. The sensor performance has been tested with standard particles of polystyrene latex, the results show that the sensor has high signal-to-noise ratio, counting efficiency, and size resolution.

Key words: measurement; optical sensor; particle size measurement; counting efficiency

1 引 言

基于尘埃粒子在光束中产生的散射现象为原理的光学尘埃粒子计数器,因其可以实时测量空气中的尘埃粒子的尺寸和颗粒数浓度,所以在环境洁净度检测、空气悬浮颗粒物监测、气溶胶研究等方面得到广泛的应用^[1,2]。随着工业技术的发展,工业生产对生产环境洁净度的要求越来越高,特别是微电子行业,空气中尘埃粒子的大小和浓度直接影响芯片的成品率;同时,医疗、食品、化妆品、生物制品等部门越来越多地采用这一专业环境检测仪器,以提高产品质量。

为了满足用户实时实地测量的要求,国内自主研发微型化激光尘埃粒子计数器变得十分迫切。

本文报道激光尘埃粒子计数器的核心部件——微型光学传感器的结构。

2 光学传感器

光学尘埃粒子计数器的性能主要取决于它的光学传感器。本光学传感器由光学系统和前置放大器组成。光学系统主要由照明系统、散射光收集系统和气路系统组成,三者的相交区域为光敏感区,如图 1

作者简介: 梁春雷(1976~),男,辽宁义县人,中国科学院上海光学精密机械研究所硕士研究生,主要从事光学检测和光学测量的研究。E-mail: chunlei@mail.siom.ac.cn

收稿日期: 2004-09-28; 收到修改稿日期: 2004-12-15

所示。这是一个直角散射的光学系统,即照明系统光轴、散射光收集系统光轴和气路系统轴线相交于光敏感区中心,且两两垂直。直角散射光学系统因可以很

好地阻止来自照明系统的杂散光而获得较高的信噪比,所以在光学尘埃粒子计数器中应用较多^[3,4]。

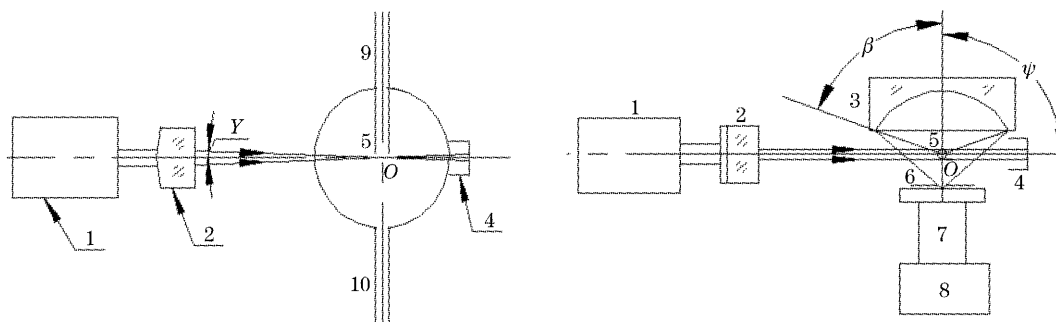


图 1 光学传感器结构示意图。1: 半导体激光器组件;2: 柱面聚焦镜;3: 球面反射镜;4: 光陷阱;5: 光敏感区;6: 视场光阑;7: PIN 型光电二极管;8: 前置放大器;9: 气溶胶入口;10: 气溶胶出口

Fig. 1 Diagram of optical sensor. 1: laser diode module; 2: cylindrical focusing lens; 3: spherical mirror; 4: light trap; 5: sensitive volume; 6: field stop; 7: PIN photodiode; 8: preamplifier; 9: aerosol inlet; 10: aerosol outlet

照明系统主要由半导体激光器组件、柱面聚焦镜和光陷阱组成。与文献[1]相比,本系统中采用的半导体激光器的波长为 780 nm,而不是 650 nm。因为我们选用的 PIN 型光电二极管光谱响应的峰值在近红外区,而光电倍增管的光谱响应的峰值在 400 nm 左右。

为了提高光敏感区的照明光强,将柱面聚焦镜的焦距缩短为原来的 1/4,从而使光敏区的照明光强提高了 4 倍。

与文献[1]相比,散射光收集系统只采用单一数值孔径的球面反射镜,它对散射光的收集半角由原来的 44° 提高到 70°。光敏感区和光电探测器光敏面的位置分别位于球面反射镜球心附近两侧的共轭面处。这种设计简单易行,集光效率高。同时本光学传感器中的光电探测器采用 PIN 型光电二极管而不是侧窗式光电倍增管,这样光学传感器的体积由 180 mm×160 mm×40 mm 变成了 105 mm×28 mm×32 mm,不足原来的 1/10 左右,达到了微型化的目的,如图 2 所示。

气路系统主要由气溶胶入口、气溶胶出口、散射腔和抽气泵等组成。采样流量是 2.83 L/min,简明流畅的腔体设计、恰当的气溶胶入口直径保证了尘埃粒子在散射腔内不产生紊流,一次通过光敏感区。前置放大器采用带通型对数放大电路,这是为了扩大可测粒径的动态范围,它的带宽与散射光脉冲的频谱宽度相一致。前置放大器将 PIN 型光电二极管输出的电脉冲信号滤除低频噪声并放大到适当幅度后送入激光尘埃粒子计数器的后续处理电路,后续处理根据电

脉冲信号的峰值判别被测粒子尺寸,并分档计数,最后得到被测空气中各种粒径尘埃粒子的颗粒数浓度。表 1 给出光学传感器的主要技术参量。

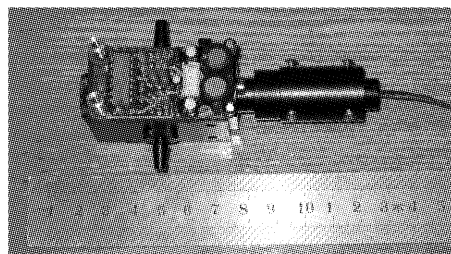


图 2 微型光学传感器照片

Fig. 2 Photograph of miniaturized laser-diode based optical sensor

表 1 光学传感器的主要技术参量

Table 1 Parameters of optical sensor

Laser diode wavelength / nm	780
Output power of laser diode / mW	40
Cylindrical focusing lens / mm	$f' = 17$
Collecting aperture half angle $\beta / (^{\circ})$	70
Scattering angle $\theta / (^{\circ})$	20~160
Inclining angle between illumination and collecting axes $\psi / (^{\circ})$	90
Curvature radius of spherical mirror / mm	12
Sensitive volume / mm ³	$1.6 \times 1.6 \times 0.013$
Bandwidth of pre-amplifier / Hz	$2 \times 10^2 \sim 1 \times 10^6$

3 光散射理论与计算结果

由米氏散射理论可知,当一束波长为 λ ,光强为 I_0 的线偏振单色平面光波照射到单个球形颗粒时,其

散射光的光强分布为

$$I_s = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 r^2} (i_1 \sin^2 \phi + i_2 \cos^2 \phi) I_0. \quad (1)$$

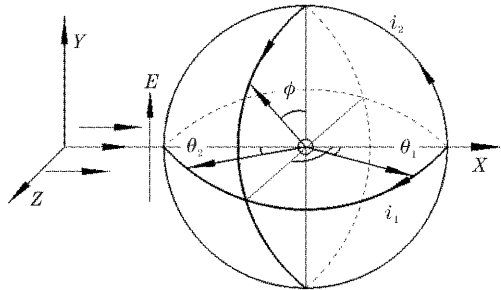


图 3 光散射理论计算参量

Fig. 3 Parameters for light-scattering calculation

如图 3 所示, 式中 r 为散射颗粒与观测点的距离, ϕ 为入射光振动面与散射面间的夹角, 在非偏振光入射的情况下, $i_1(\theta, n)$ 、 $i_2(\theta, n)$ 与 ϕ 无关, 是 θ 角方向上的米氏散射强度函数, 分别表示平行于和垂直于 xz 平面的两个偏振分量, 可具体表示为

$$i_1(\theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} a_n \pi_n + b_n \tau_n \right|^2, \quad (2)$$

$$i_2(\theta) = \left| \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2n+1}{n(n+1)} a_n \tau_n + b_n \pi_n \right|^2, \quad (3)$$

其中米氏散射系数 a_n 、 b_n 为散射颗粒介质折射率 n 和颗粒尺寸参量 x ($x = \pi d / \lambda$) 的函数, 可以用半整数阶贝塞尔函数和第二类汉开尔函数表示; π_n 、 τ_n 为综和勒让德函数, 与散射角 θ 有关, 详细表达及计算方法见文献[5]。依据米氏散射理论, 建立起光通量 F 与粒径 d 之间的关系为^[6,7]

$$F = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{i_1(\theta) + i_2(\theta)}{2} \Psi \sin \theta d\theta, \quad (4)$$

其中

$$\Psi = 2 \arccos \left[\frac{\cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) - \cos\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}\right) \cos \theta}{\sin\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}\right) \sin \theta} \right]. \quad (5)$$

根据(4)式, 我们对一些不同折射率的球形粒子作了理论计算, 结果如图 4 所示。从图 4 中我们可以看出, 粒子是否吸收光对 F 影响较大。当 n 为实数时, 不同的折射率的曲线基本一致^[8]。当 $d < \lambda$ 时, F 近似与 d 的六次方成比例, 曲线的斜率比较陡一些, 在小粒子区域分辨力比较高。当 $d > \lambda$ 时, F 近似与 d 的二次方成比例, 曲线的斜率趋于缓和, 在大粒子区域分辨力比较低^[9]。

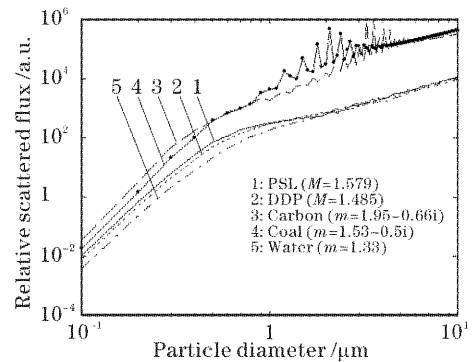


图 4 一些折射率的球形粒子的散射光通量与粒径曲线的关系

Fig. 4 Theoretical scattered light flux to particle diameters of some refractive indices

4 性能测试与分析

4.1 测试仪器简介

与文献[1]相比, 本文对光学传感器的性能进行了更为细致的检测。实验中用到的测试仪器主要是 MCSA-4000 型多通道信号分析仪和 PG-100 型粒子发生器。多通道信号分析仪主要工作原理是记录输入的脉冲信号的峰值, 测量脉冲下降的绝对幅度或相对幅度, 然后将信号按幅度分布分档存储记录。在相对计数模式中, 脉冲信号的跌幅大于或等于设定值时有计数产生。在绝对计数模式时, 脉冲信号跌落到设置基线位置以下时有计数产生。实验中选用的是相对计数模式。美国 PMS 公司 PG-100 型粒子发生器的主要功能是将含有聚苯乙烯(PSL)球形粒子的悬浮液雾化、干燥, 并由抽气泵将粒子送入粒子计数器^[10]。

4.2 50%计数总值和计数准确度

50%计数总值是指对一种单分散标准粒子的累计粒度分布百分数达到 50% 时所对应的散射信号通道电压值。在光学尘埃粒子计数器中把 50% 计数电压值作为该粒子的甄别电压。它的物理意义是粒径对应的散射信号电压值大于它的占 50%, 小于它的也占 50%^[10], 是该单分散标准粒子的平均信号值。计数准确度的定义为落在相邻粒径通道区间内的粒子计数在总粒子计数中所占的比例^[11]。

4.3 实验结果和理论计算的比较

在图 5 中, “+”表示的是光学传感器对几种粒径的标准粒子散射信号用多通道信号分析仪测量得到的 50% 计数总值所对应的通道电压值。从图中可以看出, 实验结果和理论计算响应曲线基本符合, 但略

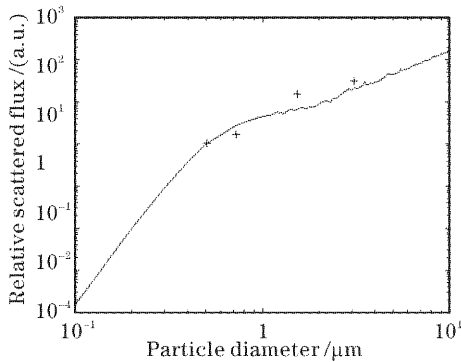


图5 实验标定结果与理论值的比较

Fig.5 Comparison between results of experimental calibration and these of theoretical calculation of the optical sensor

有不同。其中一个重要原因是前置放大器采用了数放大器,对小粒径粒子的散射光信号放大倍数大,对大粒径粒子散射光信号放大倍数小。在设置实际的各粒径通道的甄别电位时,根据实验值的拟和曲线插值,并根据标准仪器作适当的调整^[12,13]。

4.4 光学传感器的信噪比

光学传感器的背景噪声主要来源于大气分子的瑞利散射、照明光束的衍射杂光和光电二极管暗电流等。当我们用 $0.3 \mu\text{m}$ 的标准粒子对光学传感器进行标定时,由多通道信号分析仪采集到的脉冲高度分布如图 6 所示。第一个峰值表示的是背景噪声计数分布,第二个峰值表示的是 $0.3 \mu\text{m}$ 粒子计数分布。在噪声脉冲计数最小处的电压值(即噪声最大值)为 25 mV 左右,而 50% 计数值的点在 61 mV 左右,即最小探测粒径处的信噪比已达到 $2.44:1$ 。

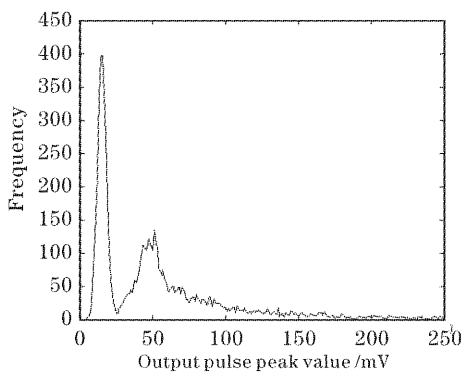
图6 $0.3 \mu\text{m}$ 标准粒子信号和噪声分布图

Fig.6 Diagram of signal and noise pulse height distribution of $0.3 \mu\text{m}$ particles

4.5 光学传感器的分辨本领

一般来讲,单粒子散射光信号幅值概率分布区间越小,表明光学传感器的分辨本领越高。在粒子

浓度适当的情况下,光学敏感区的照明均匀度越好,粒径的幅值分布区间越集中。根据粒子计数器的工作原理,当光敏感区内含有两个或两个以上的粒子时,这些粒子将同时产生散射光,粒子计数器不能分辨光敏感区内实际存在的粒子数,而只是根据散射光通量给出一个较大粒径的信号,这就产生了粒子重叠现象^[14]。由重叠现象而引起的误差被称为重叠误差,它使计数器的测量浓度低于粒子的真实浓度,并使粒径分布向大粒子方向移动。与此同时,由于光敏感区内沿着柱面镜压缩方向,光强的分布成一维的高斯分布,当粒子通过光敏感区边缘时,其产生的散射光通量就会下降,粒子计数器就会将其看成是较小的粒子。所以实测单粒子散射光信号幅值概率分布范围比预期值宽些的原因是:1)标准粒子粒径分布不理想;2)光敏感区光强分布不均匀;3)气路紊流,造成粒子循环通过光敏感区;4)光电二极管光敏面灵敏度不均匀^[14]。其中照明光强分布的不均匀性,是导致尘埃粒子计数器的单径粒子散射光信号幅值分布离散度大,粒子计数器粒径分辨力不高的最主要原因。图 7 是 $1.53 \mu\text{m}$ 粒子的幅值概率分布图。从图中,我们可以看出 $1.53 \mu\text{m}$ 粒子的幅值分布比较集中且对称性好,接近于正态分布,它也间接反映了光学传感器光敏感区的光强分布。由此,我们认为本光学传感器光敏感区内的照明光强均匀性比较好,粒径分辨力高。

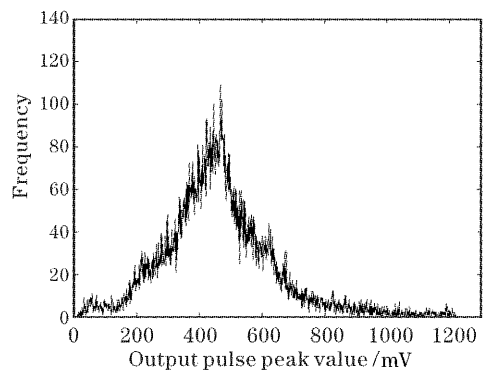
图7 $1.53 \mu\text{m}$ 粒子的脉冲高度分布图

Fig.7 Diagram of pulse height distribution of $1.53 \mu\text{m}$ particles

4.6 散射脉冲

通过示波器可以观测光学传感器输出的脉冲信号,因此我们利用高速采样示波器记录粒子散射光脉冲的形状,对光学传感器的性能进行直观地分析。脉冲宽度与光敏感区的宽度,粒子经过光敏感区的速度相关,并直接决定仪器的测量浓度上限。如图 8 所

示, $0.54\ \mu\text{m}$ 粒子的脉冲形状脉冲高度为 125 mV, 半峰全宽为 $10\ \mu\text{s}$ 。由此说明散射脉冲的带宽为 100 kHz, 在采样速度一定的情况下, 我们可以算出最大可测浓度极限。此外, 如图 9 所示, 通过整齐均匀的粒子散射脉冲波形图, 我们也可以推断采样气流在散射腔内不产生紊流, 粒子一次通过光敏感区。这说明光学传感器在气路设计上是合理的; 同时也说明了光学传感器前置放大器具有良好的电学性能。

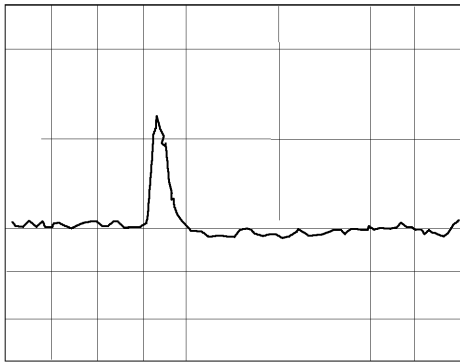


图 8 单粒子光散射脉冲的形状

Fig. 8 Shape of light scattering pulse of single particle

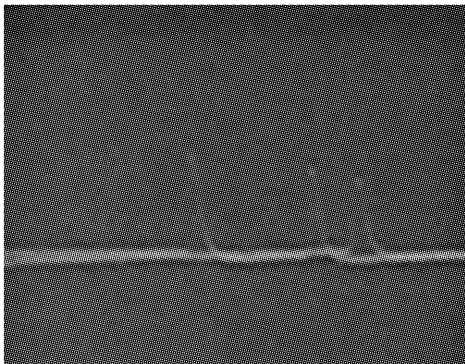


图 9 多粒子光散射脉冲信号图形

Fig. 9 Diagram of light scattering pulse of several particles

5 结 论

研制成功一种用于便携式激光尘埃粒子计数器的微型光学传感器。

对多种粒径的聚苯乙烯标准球形粒子的测量结果表明, 该光学传感器具有很高的信噪比、计数效率

和分辨本领。实测响应特性曲线与理论计算值十分吻合。上述检测结果也说明本微型光学传感器的设计是合理和可行的。

参 考 文 献

- Huang Huijie, Zhao Yongkai, Ren Bingqiang *et al.*. Aerosol particle measurement by laser diode light scattering[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1117~1121 (in Chinese)
黄惠杰, 赵永凯, 任冰强 等. 尘埃粒子的半导体激光散射测量[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(12): 1117~1121
- D. Bemer, J. F. Fabries, A. Renoux. Calculation of the theoretical response of an optical particle counter and its practical usefulness[J]. *Aerosol Sci.*, 1990, **21**(5): 689~700
- Huijie Huang, Dunwu Lu, Lixin Zou *et al.*. A high-efficiency optical sensor for particle counters [C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3898**: 382~387
- A. Lieberman. Royco instruments particle counters: capabilities and limitations [C]. *Aerosol Measurement*, Gainesville, University Press of Florida, 1979. 183~193
- C. F. Bohren, D. R. Huffman. *Absorption and Scattering of Light by Small Particles* [M]. New York: John Wiley & Sons, 1983
- Huang Ting-lei, Li Min, Zheng Gang *et al.*. An improved sensor of extinction particle counter[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(6): 749~751 (in Chinese)
黄庭磊, 李敏, 郑刚 等. 一种改进的消光式颗粒计数传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6): 749~751
- Huang Tinglei, Zheng Gang, Wang Naining *et al.*. Study of particle count technology by light scattering at right angle[J]. *Chin. J. Lasers*, 2000, **A27**(12): 1123~1128 (in Chinese)
黄庭磊, 郑刚, 王乃宁 等. 侧向光散射式颗粒计数技术的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(12): 1123~1128
- D. D. Cooke, M. Kerker. Response calculation for light-scattering aerosol particle counters[J]. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(3): 734~739
- Xu Feng, Cai Xiaoshu, Shen Jiaqi. Geometric approximation of light scattering in arbitrary diffraction regime for absorbing particles: application in laser particle sizing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(12): 1464~1469 (in Chinese)
徐峰, 蔡小舒, 沈嘉祺. 米氏理论的近似及在粒度测量中的应用[J]. *光学学报*, 2003, **23**(12): 1464~1469
- US Federal Standard, FED-STD-209E, Airborne particulate cleanliness classes in cleanrooms and clean zones[S]. 1992
- J. Gebhart, P. Blankenberg, C. Roth. Counting efficiency and sizing characteristics of optical particle counters[C]. New York: Elsevier, 1984. 7~10
- J. R. Hodgkinson, J. R. Greenfield. Response calculations for light scattering aerosol counters and photometers [J]. *Appl. Opt.*, 1965, **4**(11): 1463~1474
- Ren Zhi-bin, Lu Zhen-wu, Liu Yu-ling *et al.*. Study of Mie normalized scattered intensity distributions[J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2003, **14**(1): 83~85 (in Chinese)
任智斌, 卢振武, 刘玉玲 等. Mie 理论归一化散射光强的研究[J]. *光电子·激光*, 2003, **14**(1): 83~85
- R. Jaenicke. The optical particle counter: cross-sensitivity and coincidence[J]. *Aerosol Science*, 1972, **30**: 95~111