

文章编号: 1001-3806(2008)03-0255-04

尘埃粒子计数器信号传输特性研究

杨娟, 顾芳, 卞保民, 陆建*

(南京理工大学 信息物理与工程系, 南京 210094)

摘要: 为了研究尘埃粒子计数器信号传输的本质特性, 采用从单粒子信号出发的方法, 在研究单粒子散射光收集特性、光电转换特性的基础上分析单径粒子群信号分布的统计特性及混合粒子群在传感器中的输入-输出信号传输特性, 并进行了实验验证, 实验值与理论值基本一致, 相关系数高达 0.9 以上。结果表明, 尘埃粒子计数器的信号传输特性的本质是将粒子群的粒径分布描述方式以线性变换的方式转换成相应的脉冲信号幅值分布描述方式。这一结果为促进仪器向大流量、高灵敏方向发展奠定了理论基础。

关键词: 测量与计量; 尘埃粒子计数器; 信号传输特性; 线性变换

中图分类号: X831.02 文献标识码: A

The study of signal transmission characteristic in airborne particle counter

YANG Juan, GU Fang, BIAN Baomin, LU Jian

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

Abstract In order to study the essential characteristic of airborne particle counter signal transmission, some basic characteristics of airborne particle counter are studied with proceeding from single particle signal including collecting characteristic of scattered light and photoelectric transfer characteristic. Based on these statistics characteristic of signal distribute of single particle group and signal transmission characteristic of mixed particles group were analyzed. At the same time, the experiment was performed and the result is consistent with the theory with the correlation coefficient more than 0.9. Results indicate the essence of airborne particle counter signal transmission is changing particle's diameter distribute way to corresponding pulse signal amplitude distribute way with linear transform. All these establish the theoretical foundation for promoting the instrument's development toward the large flow and high sensitivity.

Key words measurement and metrology; airborne particle counter; signal transmission characteristic; linear transform

引 言

尘埃粒子计数器是现代超净环境检测的主要仪器, 具有很高的检测灵敏度和可靠性^[1]。许多学者对尘埃粒子的光学散射特性、计数器的光学系统设计等方面进行了广泛的研究^[2-3]。近年来又对其光学传感器的信号传输特性开展了研究, 提出了尘埃粒子计数器信号幅值响应函数的概念^[4-6], 并研制成多通道的高速脉冲信号幅值分析器对激光传感器的信号传输特性进行了测试^[7]。但是这些研究还不完善, 侧重点也主要在反演计算上, 而对标准粒子信号传输的一些基本特性并没有进行研究。而这些认知的不足导致了仪器在向大流量、高灵敏方向的发展时面临着许多的困难,

严重制约了仪器的进一步发展。

针对上述问题, 作者在研究传感器单粒子散射光收集特性、光电转换特性的基础上分析单径粒子群信号分布的统计特性及混合粒子群在传感器中的输入-输出信号传输特性, 揭示出尘埃粒子计数器的信号传输特性的本质是将粒子群的粒径分布描述方式以线性变换的方式转换成相应的脉冲信号幅值分布描述方式, 并用实验进行了验证。

1 光学尘埃粒子计数器基本工作原理

根据 Mie 的光学散射理论, 折射率相同的亚微米级均匀介质小球粒子, 在均匀照明光场中产生的散射光强度分布与粒子的粒径相关。通过分析粒子产生的散射光信号幅值的大小来计算被测粒子的等效光学粒径, 这就是光学尘埃粒子计数器测量粒子粒径大小的工作原理。

尘埃粒子计数器的光学传感器工作原理见图 1。尘埃粒子穿越光束时产生一个光脉冲信号, 光学传感

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。

* 通讯联系人。E-mail: lujian@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2007-01-22 收到修改稿日期: 2007-03-27

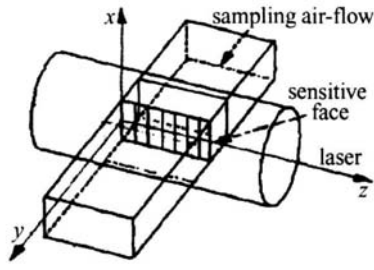


Fig 1 Sketch map of the sensitive volume

器以不变立体角收集粒子产生的散射光信号,通过光电信号转换及放大形成对应的电压脉冲信号,粒子计数器根据脉冲信号幅值的大小判断粒子粒径的大小。

2 尘埃粒子计数器信号传输特性研究

2.1 单粒子信号传输特性

2.1.1 单粒子散射光收集特性 粒子穿越光敏区后产生一个光脉冲信号。若入射光为完全偏振光,对侧向 90°采光系统,球面反射镜收集到的颗粒散射光通量 F 为^[8-9]:

$$F = \frac{\lambda^2 I_0}{4\pi^2} \int_0^{\theta_1} \frac{i_1 + i_2}{2} \phi \sin\theta d\theta + \frac{\lambda^2 I_0 \cos(2\phi_0)}{4\pi^2} \int_0^{\theta_2} \frac{i_2 - i_1}{2} \sin\phi \sin\theta d\theta \quad (1)$$

式中, λ 为入射光波长, θ 和 ϕ 分别为散射角和方位角, I_0 为入射光强度, $i_1(\theta, n, D, \lambda)$ 和 $i_2(\theta, n, D, \lambda)$ 为散射光的强度函数,详细表达式见文献 [10]。其中, $\theta_1 + \theta_2 = 180^\circ$, $\phi_0 = 90^\circ$:

$$\phi = 2 \cos^{-1} \left[\frac{\cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right) - \cos\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}\right) \cos\theta}{\sin\left(\frac{\theta_2 + \theta_1}{2}\right) \sin\theta} \right] = 2 \cos^{-1} \left[\frac{\cos\left(\frac{\theta_2 - \theta_1}{2}\right)}{\sin\theta} \right] \quad (2)$$

当光敏区光强分布均匀时,光通量与粒子的空间位置无关。而实际光敏区光强分布不均匀,光通量与粒子所在的空间位置有关。考虑收集效率的影响,用 x, y, z 表示光敏区中的空间坐标,则尘埃粒子计数器光电传感器收集到的单颗粒子通过光敏区产生的散射光强为:

$$A(\tau, x, y, z, n, \lambda) = \Omega(x, y, z) \cdot F(\tau, x, y, z, n, \lambda) \quad (3)$$

对给定的传感器和标准粒子,粒径的折射率 n 和入射光波长 λ 是固定的。当粒子穿越光敏区时,不同时刻粒子所处的 y 轴的位置不同,因此 y 是时间 t 的函数,即有:

$$A(\tau, x, y(t), z) = \Omega(x, y(t), z) \cdot F(\tau, x, y(t), z) \quad (4)$$

2.1.2 单粒子光电转换特性 粒子产生的散射光信号通过光电转换器件转换成相应的电脉冲信号,从光信号到电信号的转换过程是一个卷积过程。其计算公

式如下:

$$g(\tau, x, y(t), z, n, \lambda) = \int A(\tau, x, y(\tau), z, n, \lambda) \omega_0 e^{-\omega_0(\tau-\tau')} d\tau \quad (5)$$

式中, $\omega_0 = 2\pi/T_0$ (T_0 为电路响应时间)。积分上限一般取为 $T + 5T_0$, T 为粒子穿越光敏区的时间。计数器记录到的粒子产生的信号幅度的大小为:

$$V(\tau, x, y(t), z, n, \lambda) = \max[g(\tau, x, y(t), z, n, \lambda)] = \max\left[\int_{T-5T_0}^{T+5T_0} \Omega(x, y(\tau), z) F(\tau, x, y(\tau), z, n, \lambda) \times \omega_0 e^{-\omega_0(\tau-\tau')} d\tau\right] \quad (6)$$

由上式可知,粒子经过计数器后产生的脉冲信号与粒子穿越光敏区的时间、电路的响应频率等有关。通过测量光敏区的光强分布,同时代入相应的参数于 (6) 式进行计算,结果如图 2 图 3 所示。由计算结果可

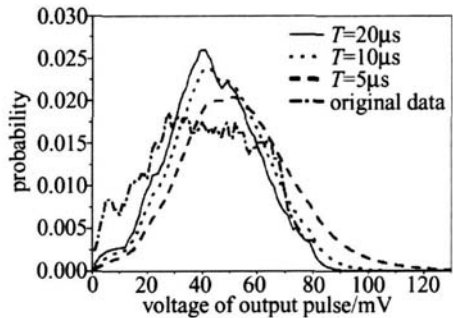


Fig. 2 Signal responding waveform of $T_0 = 5\mu s$ and different value of T

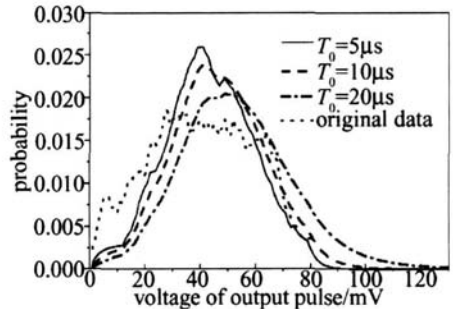


Fig. 3 Signal responding waveform of $T = 20\mu s$ and different value of T_0

知,当电路响应时间固定时,随着计数器流量的增大,粒子穿越光敏区的时间变短,粒子通过计数器后产生的脉冲信号峰值减小并向电压高的方向移动,同时信号的半峰全宽增大;而当粒子流速固定时,随着电路响应时间的延长,粒子通过计数器后产生的脉冲信号峰值减小并向电压高的方向移动,同时信号的半峰全宽增大。

2.2 单径粒子群信号分布的统计特性

设单位时间内计数器输入的粒径为 r 的单径粒子群的粒子总数为 $N(r)$,产生的脉冲总数为 $M(r)$ 。由于粒子群经过计数器时,一个粒子对应一个脉冲信号,因此脉冲总数 $M(r)$ 与粒子总数 $N(r)$ 相等。而对大量的全同粒子来说,粒子在采样气流中的位置分布满足统计分布规律。即全同粒子群先后通过光敏区时,其在光敏区的不同位置的分布几率是确定值,产生某种

脉冲信号幅度 V 的几率是确定的。

设粒径为 r 的单径粒子群在单位时间内产生的信号幅度为 V 的粒子数为 $f(r, V)$, 则其在单位时间内产生的信号总和为:

$$N(r) = M(r) = \int_{V_{c, \min}}^{V_{c, \max}} f(r, V) dV = \int_{V_{c, \min}}^{V_{c, \max}} f(r, \max(g(r, x, y(t), z, n, \lambda))) dV = \int_{V_{c, \min}}^{V_{c, \max}} f(r, \max(\int \Pi(x, y(\tau), z) \times F(r, x, y(\tau), z, n, \lambda) \omega_0 e^{-\omega_0(t-\tau)} d\tau)) dV \quad (7)$$

式中, $V_{c, \max}$ 和 $V_{c, \min}$ 为粒径为 r 的粒子所产生的最大和最小信号幅度值。归一化后的数据为:

$$\rho(r, V) = \frac{f(r, V)}{M(r)} = \frac{f(r, V)}{\int_{V_{c, \min}}^{V_{c, \max}} f(r, V) dV} \quad (8)$$

$\rho(r, V)$ 称之为单径粒子群的信号幅度响应函数, 满足

$$\int_{V_{c, \min}}^{V_{c, \max}} \rho(r, V) dV = 1.$$

在理想状态下, 单径粒子群产生的信号幅度完全相同, $\rho(r, V)$ 为 δ 函数形式。而实际测量中, 由于光敏区光强分布不均匀、收集效率不一致等因素, 导致标准粒子穿越光敏区后产生的散射光信号幅度是不同的。因此, 单径粒子群的信号幅度响应函数 $\rho(r, V)$ 具有一定的展宽, 其展宽的大小反映了仪器的状态。仪器越接近理想状态, 其展宽越小。

在统计意义下, 尘埃粒子计数器对粒径为 r 的粒子的响应是确定的。由 (6) 式可知, 当 r 变动时, 在其他条件不变的情况下, 信号幅度随粒径的变动是简单的正比关系。因此, 当 r 变化时, 其信号幅度响应函数的形状不变, 但是曲线的展宽和峰值的位置会发生变动。

2.3 混合粒子群在传感器中的信号传输特性

设单位时间内计数器输入的混合粒子群的粒子总数为 N , 产生的脉冲总数为 M 。其中每一种粒子的总数为 $N(r)$, 其产生的信号总数为 $M(r)$ 。设整个粒子群在单位时间内产生的信号幅度为 V 的信号数为 $K(V)$, 则单位时间内整个粒子群产生的信号数为:

$$N = M = \int_{V_{c, \min}}^{V_{c, \max}} K(V) dV = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} M(r) dr = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \int_{V_{c, \min}}^{V_{c, \max}} f(r, V) dV dr \quad (9)$$

其中, 积分限 r_{\max} , r_{\min} 为粒子群的最大和最小粒径值, $V_{c, \max}$, $V_{c, \min}$ 为粒子群产生的最大和最小脉冲信号幅度值。

对单位时间内产生的幅度为 V 的信号数做归一化处理:

$$\sigma(V) = \frac{K(V)}{M} = \frac{1}{M} \cdot \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} f(r, V) \cdot N(r) dr = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \rho(r, V) \cdot N(r) dr$$

$$\frac{N(r)}{N} dr = \int_{V_{c, \min}}^{V_{c, \max}} \rho(r, V) \cdot \mu(r) dV \quad (10)$$

式中, $\mu(r) = N(r) / \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} N(r) dr$ 是粒径为 r 的粒子在粒子群中所占的比重, $\sigma(V)$ 为混合粒子群的信号幅度响应函数。当测量对象由单径粒子组成时, 粒径分布函数 $\mu(r) = \delta(r - r')$, 此时 $\sigma(V) = \rho(r', V)$ 。显然 $\sigma(V)$ 满足 $\int_{V_{c, \min}}^{V_{c, \max}} \sigma(V) dV = 1$ 。(10) 式说明混合粒子群的信号幅度响应函数是由其中所包含的单径粒子群所产生的信号幅度响应函数的线性叠加组成, 其权重为该粒子在总粒子群中所占的比重。即尘埃粒子计数器信号传输特性的本质是将粒子群的粒径分布描述方式按线性变换的方式转换成相应的脉冲信号幅值分布的描述方式。

3 实验验证

用 4096 通道的计数电路和国产尘埃粒子计数器光电传感器对粒子的信号幅度响应函数进行测量, 粒子粒径分别取 $0.38 \mu\text{m}$ 和 $0.54 \mu\text{m}$ 。将测量结果按照 (8) 式进行计算, 得到该粒子对应的信号幅度响应函数。

图 4 是两种粒子典型的信号幅度响应函数。将两

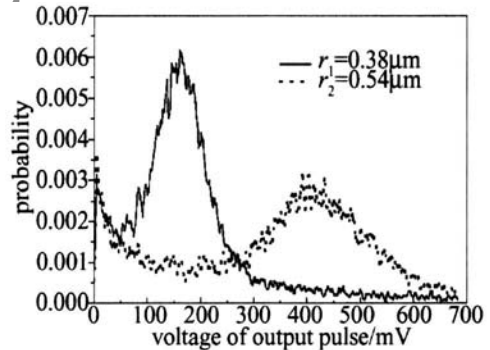


Fig 4 The typical signal amplitude response function of two kinds of particles

条曲线平移、缩放后移至相同的峰值处后, 计算它们的相关系数:

$$p_{12} = \frac{\langle \rho_1(r_1, V), \rho_2(r_2, V) \rangle}{\| \rho_1(r_1, V) \|_2 \| \rho_2(r_2, V) \|_2} = 0.905 \quad (11)$$

可以看出, 这两种粒子的信号幅度响应曲线的相似度较高, 仅曲线的展宽和峰值的位置会发生变动。同时由实验还可以得知, 在相同的条件下, 对同一种粒子不同传感器给出的曲线展宽略有差异, 说明传感器的性能存在着差异, 同时也说明粒子的信号幅度响应函数主要由传感器所决定。这些与前面的理论分析完全吻合。

图 5 是两种粒子按照 1:1 的比例混合以后的混合粒子群的信号幅度响应函数的理论和实验对比图。实

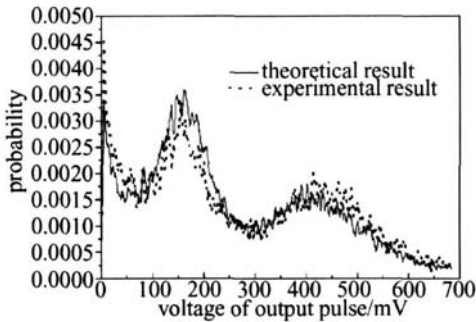


Fig 5 Comparison between signal amplitude response function of experiment and theory of mixed particles group

线是根据(10)式计算出的理论值 σ_t ,虚线为实际测量值 σ_e 。用同样的方法计算两条曲线的相关系数:

$$P_{1e} = \frac{\langle \sigma_t(V), \sigma_e(V) \rangle}{\| \sigma_t(V) \|_2 \| \sigma_e(V) \|_2} = 0.976 \quad (12)$$

可以看出,理论和实验结果吻合度非常高,说明了混合粒子群的信号幅度响应函数是由其中所包含的单径粒子群所产生的信号幅度响应函数的线性叠加组成,其权重为该粒子在总粒子群中所占的比重。

4 结 论

分析了单粒子在尘埃粒子计数器中的信号传输特性,包括其散射光收集特性、光电转换特性,在此基础上分析了单径粒子群信号分布的统计特性。指出当粒径发生变化时,信号幅度响应函数的形状不变,但展宽和峰值的位置会发生变动;同时指出展宽的大小主要由传感器的性能所决定。另外分析了混合粒子群在传感器中的信号传输特性,指出混合粒子群的信号幅度响应函数是由其中所包含的单径粒子群所产生的信号幅度响应函数的线性叠加组成,其权重为该粒子在总

粒子群中所占的比重。揭示了尘埃粒子计数器信号传输的本质是将粒子群的粒径分布描述方式按线性方式转换成相应的脉冲信号幅值分布描述方式,从而建立起尘埃粒子计数器信号传输的完整的数学模型。

参 考 文 献

- [1] HUANG H J, ZHOU H X. Improvement on optics of optical particle counter [J]. *Optical Instruments*, 1994, 16(2): 10-14 (in Chinese).
- [2] LIANG Ch L, HUANG H J, REN B Q. Study of miniature optical sensor for laser particle counter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(9): 1260-1264 (in Chinese).
- [3] LI Z Y, LIU Zh Q, YE Y. Study on the effects of selection and process of the holography film for inline particles holography [J]. *Laser Technology*, 2005, 29(6): 617-620 (in Chinese).
- [4] BIAN B M, HE A Zh, WU D L. Reflexive speckle image of the point light source in the laser airborne particle counter for 0.1 μ m and its processing [J]. *Journal of Optoelectronics* Laser*, 1997, 8(4): 246-250 (in Chinese).
- [5] BIAN B M, HE A Zh, CHENG X F. Study of signal amplitude distribution for single particle in airborne particle counter [J]. *Journal of Southeast University*, 1999, 29(1): 145-149 (in Chinese).
- [6] YANG L, CHENG X F, BIAN B M. The study of transmission of light scattering signal of particles [J]. *Journal of Optoelectronics* Laser*, 2000, 11(1): 89-91 (in Chinese).
- [7] ZHOU L X, LI R, SHENG D F. PLC controlling stamping machine [J]. *Journal of Suzhou Institute of Silk Textile Technology*, 2005, 21(3): 45-49 (in Chinese).
- [8] GAO Y F, ZOU L X, HUANG H J. Influence of the light source in airborne laser particle counter on the flux of transducer [J]. *Journal of Applied Optics*, 2005, 26(3): 45-49 (in Chinese).
- [9] HAN G C, WANG Y W. The influence of two definitions for arbitrary particles on the shape-affecter [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(6): 520-523 (in Chinese).
- [10] REN Zh B, LU Zh W, LIU Y L. Study of Mie normalized scattered intensity distributions [J]. *Journal of Optoelectronics* Laser*, 2003, 14(1): 83-85 (in Chinese).
- [11] position information U S 5025148 [P]. 1991-06-18
- [12] HALLDORSSON T, SEIFFARTH E A. Laser radiation warning sensor utilizing polarization U S 4682024 [P]. 1987-06-21.
- [13] BAIXM, ZHOU X J, ZENG Q Y. Measurement method of azimuth angle for laser beam [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(4): 278-280 (in Chinese).
- [14] GE Q Sh, GONG Ch K. Research of vehicular laser passive reconnaissance warning system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(3): 248-250 (in Chinese).
- [15] GE Q Sh, GONG Ch K. Reconnaissance performance analysis for vehicular laser warning device [J]. *Laser and Infrared*, 2003, 33(3): 176-177 (in Chinese).
- [16] GONZALEZ R C, WOODS R E. Digital image processing [M]. 2nd ed. Beijing Publishing House of Electronics Industry, 2002, 91-95 (in Chinese).
- [17] YANG Z F, QIAN H W, GAO G H. Development of laser warning technology [J]. *Laser Technology*, 2004, 28(1): 98-102 (in Chinese).
- [18] YANG Y H, ZENG Q Y, LÜ B Ch. Optimization design of the length encoder of optical fiber delay lines [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(4): 438-441 (in Chinese).

参 考 文 献

- [1] HALLDORSSON T, MANHART S, SEIFFARTH E A. Laser detection device U S 4674874 [P]. 1987-06-23
- [2] POISEL H, TROMMER G. Laser warning sensor with frequency-coded

(上接第 254 页)

警系统的虚警率指标更优。为了使光纤阵列激光告警器的定向更加精确、系统更加可靠,考虑在如下几个方面进行更进一步的研究:(1)在修正激光脉冲幅值时,修正因子中涉及到的光纤衰减系数考虑为定值,但实际测试中发现,光纤衰减系数随着入射激光能量的强弱变化有一定的改变,并不是一个固定值;(2)对水平角和俯仰角的修正,是通过计算测向窗口矩阵 W 的二维重心坐标,该算法应该还有进一步改进的空间;(3)光纤的长度直接影响告警天线的体积,可以对光纤长度编码进行优化^[9],用最短的光纤实现高精度光纤阵列激光告警。