

文章编号: 1001-3806(2010)01-0063-04

激光尘埃粒子计数器信号幅度概率密度函数

彭刚, 卞保民*, 陆建

(南京理工大学 信息物理与工程系, 南京 210094)

摘要: 为了研究激光尘埃粒子计数器计数信号幅度概率分布, 对激光尘埃粒子计数器计数信号幅度概率分布与传感器光敏区光强分布、采样气流中的粒子数密度、气体层流速度分布之间的关系进行了理论分析。采用自行设计的带保护气套的光电传感器测定粒子计数信号幅度概率分布, 给出的分布模型与理论分析相吻合。结果表明, 尘埃粒子计数器计数信号幅度概率分布由传感器光敏区光强分布和粒子数密度空间分布共同决定, 这为尘埃粒子计数器的设计提供了理论依据。

关键词: 测量与计量; 激光尘埃粒子计数器; 保护气套; 概率密度函数

中图分类号: TH741 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.018

Probability density function of signal amplitude in laser airborne particle counter

PENG Gang, BIAN Bao-min, LU Jian

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

Abstract: In order to study the probability distribution of counting signal amplitude in a laser airborne particle counter, the relationship between the probability distribution of counting signal amplitude, particles number density in the sampling air-flow, light-intensity uniformity of the sensitive volume and the speed distribution of the lamellar flow were theoretically analyzed. Then, the probability density distribution of the counting signal amplitudes was tested with a self-designed optical sensor with sheath-air inlet, and it matched well with the theoretical result. In a word, the results indicate that the probability distribution of counting signal amplitude is determined by both the intensity distribution of the sensitive volume and the space distribution of the particles number density, which proposes a theoretical basis for the design of the particle counter.

Key words: measurement and metrology; laser airborne particle counter; sheath-air inlet; probability distribution function

引言

激光尘埃粒子计数器是以 Mie 散射理论为基础的测量颗粒数目及大小的仪器。主要用于微电子、光电子、生物医学工程、航天技术、材料科学等领域的洁净环境及超洁净微环境中亚微米级颗粒数分布的检测和实时监控^[1], 保证生产作业环境洁净度对提高电子产品质量、集成芯片成品率, 对现代生物制品、新材料研制过程中的微污染控制具有重要意义。有关激光尘埃粒子计数器的研究大多集中在测量方式^[2-3]、光学传感系统设计^[4-5]、信号分析模型^[6-7]、反演方法^[8]及粒子形貌^[9]等方面, 也有人光敏区光强概率分布和标准粒子信号幅度概率分布的关系作了理论探讨^[10]。近期有报道以“质量子集”^[11]概念为基础, 研究悬浮颗粒测量理论模型中的分形特性。但是对于光敏区光强

分布、颗粒数空间分布与信号幅度概率分布的关系目前还未见有理论和定量的分析, 因此, 对粒子计数信号幅度概率分布特性进行深入的理论和实验研究是十分必要的。

本文中分析了光敏区光强分布、颗粒数空间分布对信号幅度概率分布的影响, 研究了不同粒径标准粒子的信号幅度概率分布的相似性, 并且应用带保护气套的特殊采样气路^[12], 测定了光电传感器的单径标准粒子信号幅度概率分布。所测出的信号幅度概率分布函数与理论分析吻合得很好。研究结果对改进国产激光尘埃粒子计数光电传感器的设计, 提高光电传感器的灵敏度、粒径分辨能力、计数效率有重要指导意义。

1 粒子计数信号幅度分布函数理论分析

激光尘埃粒子计数器光敏区, 参见图 1, 是指计数器聚光腔内采样气流(沿 y 轴正方向)与照明光束(沿 z 轴正方向)垂直相交的区域。粒子随气流流经光敏区产生对应的光脉冲, 仪器依据脉冲幅度大小判断粒子粒径大小。

作者简介: 彭刚(1981-), 男, 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: bianbaomin_56@yahoo.com.cn

收稿日期: 2008-12-09; 收到修改稿日期: 2009-02-26

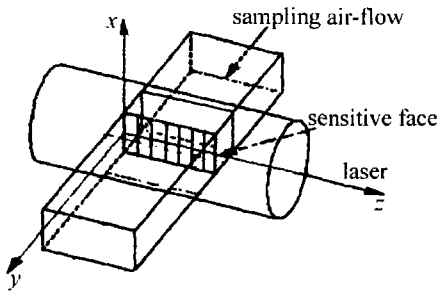


Fig. 1 Sketch map of the sensitive volume

一般半导体激光器的光斑呈长条形,可近似看作椭圆形,设入射激光光束为准直光束,则光敏区内的光强空间分布 $I(x, y)$ 可用下面的公式表示:

$$I(x, y) = I_0 \exp\left[-\left(\frac{x^2}{a} + \frac{y^2}{b}\right)\right] \quad (1)$$

式中, I_0 是入射激光光束截面中心处光强值, a, b 为描述激光光束光强分布的参量。由于光电传感器信号输出电路采用的是积分形式, 设对于半径为 d 折射率为 n 的粒子, 沿不同的流线 (x, z) 进入光敏区, 电路输出的对应信号电压 $V(x, d)$ 可表示成:

$$V(x, d) = H\eta\sigma(n, d) \int_{y(-x)}^{y(x)} I(x, y) dy \quad (2)$$

式中, H 为传感器的光电转换特性参量; η 为光学系统对粒子散射光的收集效率, 一般情况下为常数; $\sigma(n, d)$ 代表粒子散射光收集立体角内总的有效散射截面, n 为粒子等效折射率。对于粒径为 d 的标准粒子, 散射光对应的信号幅度 V 只与该粒子穿越光敏区的位置 x 有关。由(2)式还可知, 对同一个传感器, 不同粒径 d 的标准粒子的信号幅度概率分布曲线是相似的; 因 $\sigma(n, d)$ 随着粒径增大, 故信号幅度分布曲线的半宽也随粒径增大单调增加。

粒子信号幅度 V 有一定的分布范围, 可用区间 (V_{\min}, V_{\max}) 来表示。计数法需要对测量信号幅度进行分档计数, 假设分档的平均宽度为 ΔV , 则粒子信号幅度所占通道个数 K 为:

$$K = (V_{\max} - V_{\min}) / \Delta V \quad (3)$$

传感器设计要求光敏区的宽度不大于照明光束的有效宽度, 由(2)式、(3)式可以看出, 粒子信号幅值分布的宽度与光敏区光强均匀程度密切相关。

假设采样气流内的粒子数密度 ρ 是常数, 采样气流近似作为层流处理, 则采样气流截面上单位时间内通过的粒子数 N 就只与所处位置气流速度有关。考虑到粒子计数器的采样气管多为圆形, 根据流体力学^[13], 取光敏区内采样气流流速分布公式为:

$$u(r) = \frac{gJ}{4\nu}(r_0^2 - r^2) \quad (4)$$

式中, ν 是物性参量; J 是比降; g 是重力加速度; r_0 是采样气流等效层流半径, 在实际测试中, 粒径 $d = r_0$ 。

粒子穿越光敏区的轨迹线近似与照明光束垂直, 所以单位时间内在通过采样气流截面元 $\Delta S = \Delta x \Delta z$ 的颗粒数 ΔN 为:

$$\Delta N(x, z) = \rho u \Delta S = \rho u(r) \Delta x \Delta z \quad (5)$$

考虑到 $r = \sqrt{x^2 + z^2}$, 将(4)式代入可得:

$$\Delta N(x, z) = \frac{\rho g J}{4\nu}(r_0^2 - x^2 - z^2) \Delta x \Delta z \quad (6)$$

由于光束沿 z 轴均匀分布, 粒子信号幅度只与 x 有关, 给定 x 处采样气流内颗粒数分布函数为:

$$m(x) = \frac{dN}{dx} = \frac{\rho g J}{4\nu} \int_{-\sqrt{r_0^2 - x^2}}^{\sqrt{r_0^2 - x^2}} (r_0^2 - x^2 - z^2) dz = \frac{\rho g J}{3\nu} (r_0^2 - x^2)^{\frac{3}{2}} \quad (7)$$

由(2)式可以得到如下关系式:

$$x = f(V, d) \quad (8)$$

由(7)式、(8)式可以得到粒子的信号幅度分布:

$$m(V, d) = \frac{\rho g J}{3\nu} [r_0^2 - f^2(V, d)]^{\frac{3}{2}} \quad (9)$$

因此, 传感器性能与光敏区光强均匀性以及气流中颗粒密度分布直接相关。光敏区光强决定传感器的灵敏度, 光强分布越均匀, 粒子的信号幅度分布越窄, 对应传感器的粒子信号分辨率越高, 若采样气流扩散严重, 一部分粒子会进入弱光区, 其信号被噪声湮没, 导致传感器计数效率降低。

2 光电传感器信号幅度分布函数实验测量

对于传感器来说, 粒子信号幅度分布函数可以直观地反映光敏区内粒子的分布状况, 而光敏区内粒子的分布状况影响传感器的计数效率和粒子信号分辨率等重要技术参量, 测定计数器信号幅度分布函数对光电传感器尤其是采样气路的设计来说有重要的指导意义。图2为苏州苏信净化设备厂 SX-L310 型大流量尘埃传感器 0.38 μm 和 0.54 μm 标准粒子的信号概率分布。

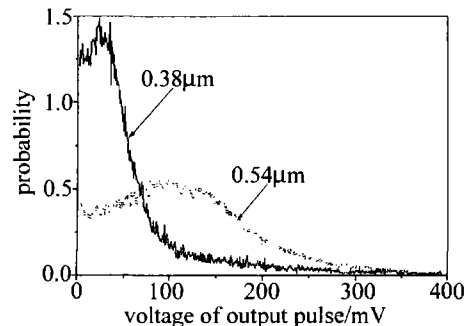


Fig. 2 The probability density distribution of the pulse signal amplitude produced by standard particles of SX-L310

由图2可以发现, 传感器粒子信号幅度概率分布曲线相似性非常差, 主要原因就是由于采样气流在光敏区的扩散严重。这就导致很大一部分粒子进入弱光

区被噪声湮没而检测不到,计数效率偏低,这对研究粒子信号幅度概率分布是不利的。因此,为测定粒子信号幅度概率分布与光敏区光强均匀性以及气流中颗粒密度分布之间的关系,设计了采样气路带空气保护套的传感器,如图3所示。进入传感器的气流被分为两

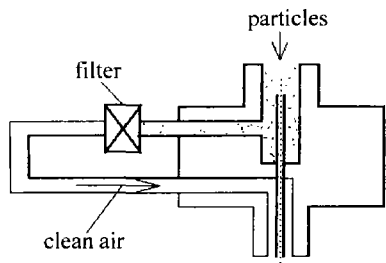


Fig. 3 Sketch map of the sheath-air inlet

部分,外层为洁净空气,内层为采样气体,洁净空气流速要大于采样气体流速,过滤后的空气进入传感器后形成清洁空气保护套,在粒子穿过光敏区时包围在粒子流的外围。采用的保护气套进气管管径为6mm,内采样管的管径为0.8mm,出气管管径为3mm,使形成的洁净空气保护套不致发散。

采用2048通道的电路系统和PG100型粒子发生器,分别用0.38μm,0.499μm和0.54μm3种聚苯乙烯标准粒子对传感器进行测试,得到的结果见图4。

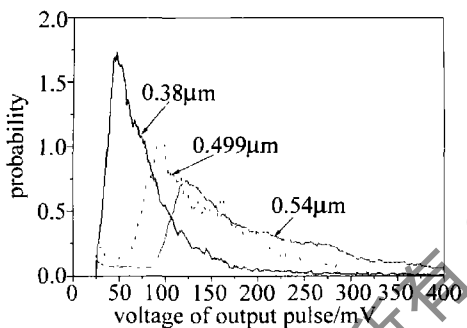


Fig. 4 The probability density distribution of the pulse signal amplitude produced by standard particles of sensor with sheath-air inlet

3 带保护气套光电传感器光敏区粒子数密度分布的特征分析

传感器加装保护气套后,采样气流的扩散被抑制,相当于粒子的分布范围减小,标准粒子的数密度分布可以表示为:

$$m(x) = \frac{\rho g J}{3\nu} (r_0^2 - x^2)^{3/2}, (\text{若 } r' \leq x, \rho = 0) \quad (10)$$

式中, r' 为保护气套采样气流等效层流半径,则有 $r' < r_0$,此时粒子只会出现在半径 r' 范围之内,出现的小信号数量将减少,粒子的分布更为集中。最小信号的所处电压通道提高,在粒子信号幅值概率分布曲线上就会表现为上升沿的半宽减小,更为陡峭,峰值的高度也会增加。

3.1 计数效率分析

对比图2和图4可以发现,保护气套传感器的标准粒子信号幅值概率分布宽度大大减小。0.38μm粒子计数效率已接近100%,对于粒径较大的粒子,小信号大大减少,粒子信号概率分布曲线的起点概率值已经接近0。信号概率分布曲线的上升沿半宽减小,峰值的大小也有提高,坡度变陡,近似一条直线。说明在保护气套作用下,采样气流的扩散被抑制,光敏区的范围相对减小。而信号概率分布曲线的下降沿依然接近高斯分布,恰是光敏区内部光强不均匀的体现。

3.2 不同标准粒子信号幅值概率分布相似性

根据理论分析,对于同一个传感器来说,不同标准粒子的信号幅值概率分布曲线应该是相似的,其差别主要与其粒径的差异造成,也就是说,可以找到一个以粒径为自变量的通用的方程来描述所有粒径粒子的分布。由图4可以看出,各粒子的信号幅值概率分布曲线分为上升沿和下降沿,差异较大,分别用 p_{up} 和 p_{down} 来表示,上升沿接近直线,根据对信号幅度分布统计特征的分析,用以下的方程来表示:

$$\begin{cases} p_{up} = k(n - n_{max}) + p_{max}, (0 \leq n \leq n_{max}) \\ p_{down} = p_{max} \exp\left(\frac{n_{max} - n}{t}\right), (n_{max} \leq n \leq 2048) \end{cases} \quad (11)$$

式中, k 为上升沿的斜率, p_{max} 和 n_{max} 分别代表信号幅值概率分布曲线峰值的概率值和对应的通道, t 表示分布的参量,可知它们都与粒径有关,而且 p_{up} 和 p_{down} 满足归一化。

n_{max} 的关系较简单,只与粒径有关,假设 $n_{max} = k'\lambda^\alpha$,其中, k' 是与测量有关的系数, λ 为粒子的粒径与0.38μm粒子粒径之比。结合图4的数据,可以得到:

$$n_{max} = 43.4\lambda^{2.9} \quad (12)$$

k, p_{max} 和 t 的关系较为复杂,不仅与粒径有关,还与整个曲线归一化有关,由图4的数据及归一化近似得到:

$$\begin{cases} p_{max} = 0.154 \exp(2.4\lambda^{-0.95}) \\ k = \frac{p_{max} - p_0}{n_{max} - n_0} = \frac{8 \times 10^{-3} \exp(2.4\lambda^{-0.95})}{\lambda^{2.9}} \\ t = 51.42\lambda^{1.5} \end{cases} \quad (13)$$

式中, p_0 和 n_0 为图4中上升沿的起始点,由图4可知, $p_{max}/p_0 \approx 10$,分别对应峰值处概率与最小信号处概率。 n_0 与 n_{max} 形式相同。将(12)式、(13)式代入(11)式得:

$$\begin{cases} p_{up} = 8 \times 10^{-3} \left[\frac{\exp(2.4\lambda^{-0.95})}{\lambda^{2.9}} (n - 43.4\lambda^{2.9}) + 19.25 \exp(2.4\lambda^{-0.95}) \right], (0 \leq n \leq 43.4\lambda^{2.9}) \\ p_{down} = 0.154 \exp(2.4\lambda^{-0.95}) \exp\left(\frac{43.4\lambda^{2.9} - n}{51.42\lambda^{1.5}}\right), (43.4\lambda^{2.9} \leq n \leq 2048) \end{cases} \quad (14)$$

取 λ 分别为 1, 1.31 和 1.42, 即粒径分别是 $0.38\mu\text{m}$, $0.499\mu\text{m}$ 和 $0.54\mu\text{m}$ 的标准粒子, 得到 3 种粒子信号幅值概率分布曲线的模拟结果, 见图 5。

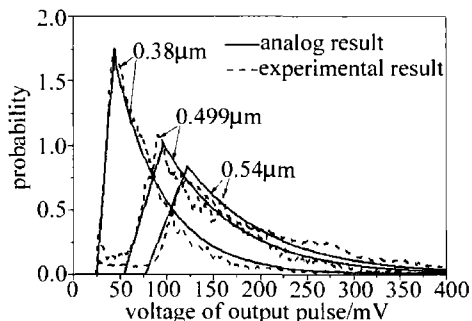


Fig. 5 The comparison between theoretical results and experimental results

由图 5 可知, 模拟结果很好地反映了真实实验的测试结果, 其能够比较准确地描述带保护气套光电传感器标准粒子计数信号幅度概率分布。也验证了在对一个传感器, 即光强分布给定的情况下, 粒子的信号幅度概率分布只与粒径有关。

4 结论

光敏区的光强均匀性决定粒子信号概率分布的宽度, 而粒子信号幅度概率分布与光敏区光强均匀性以及气流中颗粒密度分布直接相关, 对于同一个光学传感器来说, 不同标准粒子的信号幅度概率分布都是相似的。同种标准粒子在不同尘埃粒子计数器, 得到的信号幅度概率分布之间的差异, 可以直接反映传感器性能的好坏。而提高光敏区光强的均匀性以及合理的采样气路设计是提高激光尘埃粒子计数器性能水平的关键所在。

参考文献

[1] HUANG H J, ZHAO Y K, REN B Q, *et al.* Aerosol particle measure-

(上接第 62 页)

艺上不存在任何困难, 较经济实用。实验结果与理论值基本一致。

参考文献

[1] LI G H, WU F Q. The study of bireflective parallel beam-splitting polarization prism [J]. Journal of Optoelectronics · Lasers, 1990, 1(1): 43-47 (in Chinese).

[2] ZHAO M Sh, LI G H. Double-element bireflectant polarization beam splitting prism [J]. Laser Journal, 1992, 13(1): 39-43 (in Chinese).

[3] LI G H, ZHAO M Sh, DI Zh Q. A new type sing-element polarization prism [J]. Journal of Qufu Normal University, 1991, 7(3): 58-61 (in Chinese).

[4] WU F Q, LI G H. The study of sing unit bireflective polarization beam-splitting prism with larger splitting angle [J]. Laser Technology, 1991, 15(5): 317-320 (in Chinese).

[5] MENG F H, SONG L K. A new symmetric beam-splitting polarization prism [J]. Laser Technology, 2006, 30(6): 670-672 (in Chinese).

ment by laser diode light scattering [J]. Chinese Journal of Lasers, 2002, A29(12): 1171-1121 (in Chinese).

[2] LI Z Y, LIU Zh Q, YE Y. Study on the effects of selection and process of the holography film for in-line particles holography [J]. Laser Technology, 2005, 29(6): 617-620 (in Chinese).

[3] HUANG T L, ZHENG G, WANG N N. Count technology for particulate condition in indoor air [J]. Journal of Applied Optics, 2000, 21(2): 17-21 (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 $0.1\mu\text{m}$ and its processing [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1997, 8(4): 246-250 (in Chinese).

[5] LIANG Ch L, HUANG H J, REN B Q, *et al.* Study of miniature optical sensor for laser particle counter [J]. Acta Optica Sinica, 2005, 23(9): 1260-1264 (in Chinese).

[6] YANG L, CHENG X F, BIAN B M, *et al.* The study of transmission of light scattering signal of parcels [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2000, 11(1): 89-91 (in Chinese).

[7] YANG J, GU F, BIAN B M, *et al.* The study of signal transmission characteristic in airborne particle counter [J]. Laser Technology, 2008, 32(3): 255-258 (in Chinese).

[8] FERRI F, RIGHINI G, PAGANINI E. Inversion of low-angle elastic light-scattering with a new method devised by modification of the Chahine algorithm [J]. Appl Opt, 1997, 36(30): 7539-7550.

[9] WANG Y W. The study of the measurement method and theory for the dimension of particles [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2000: 52-63 (in Chinese).

[10] YANG J, GU F, BIAN B M. Relation between light-intensity's uniformity and standard particle signal distribution [J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(s1): 405-409 (in Chinese).

[11] GU F, YANG J, BIAN B M. A model for aerosol mass concentration using an optical particle counter [J]. Chinese Optics Letters, 2008, 6(3): 214-217.

[12] YANG J, PENG G, GU F. Design of performance optimization for optical sensor in laser airborne particle counters [J]. Instrument Technique and Sensor, 2008(4): 59-61 (in Chinese).

[13] SHI Y Sh, XU X R. Fluid mechanics [M]. Beijing: Science Press, 2005: 110-112 (in Chinese).

[6] NI Zh B, SONG L K, LIU J P, *et al.* The design and performance analysis of modular structural reflected polarizing prism of equal splitting angle [J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 151-156 (in Chinese).

[7] REN Sh F, WU F Q, ZHAO P, *et al.* Ternary parallel beam splitter combined of iceland and glass [J]. Optical Technique, 2006, 30(3): 311-316 (in Chinese).

[8] JIA P, LI G H, PENG H D. New design of turning composite parallel splitting prism [J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 154-156 (in Chinese).

[9] SONG L K, LI G H. Design of the three-element combination achromatic retarder made of mica and quartz [J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2000, 11(1): 51-53 (in Chinese).

[10] SU F F, WU F Q, WANG W. Analysis of optical path character of Wallaston prisms in the diversity compound mode [J]. Optical Technique, 2003, 29(6): 680-684 (in Chinese).

[11] CHEN X Y, SAN M. Studies of characteristic of double Wollaston prisms [J]. Applied Laser, 2003, 23(3): 161-163 (in Chinese).