

文章编号: 0253-2239(2010)06-1693-04

颗粒群光散射脉冲信号统计参数分形特征

彭 刚 赖小明 闫振纲 王春勇 卞保民* 陆 建

(南京理工大学信息物理与工程系, 江苏 南京 210094)

摘要 与不规则颗粒对应的随机脉冲信号计数分布是颗粒群粒度分布的完整反映。以幅度、宽度两个相对独立的特征参数为基础,研究了散射光脉冲信号计数分布的统计特性。利用激光尘埃粒子计数光电传感器对空气中尘埃粒子产生的散射光脉冲信号的幅度、宽度分布进行了统计测量,实验结果表明脉冲信号的统计分布不具有中心对称性,其幅度和宽度的计数分布都是满足对数正态分布规律。对数正态分布规律是测量过程中随机作用的具体表现。进一步的计算结果可证明,不规则颗粒群特征参数幅度和宽度之间存在分形结构关系,其分形维数为两者计数统计离散度的比值。

关键词 光学测量;分形;随机脉冲信号;对数正态分布

中图分类号 TH741 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103006.1693

Fractal Characteristic of Statistic Parameter of Particles' Scattering Pulse Signal

Peng Gang Lai Xiaoming Yan Zhengang Wang Chunyong Bian Baomin Lu Jian

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

Abstract The scattering pulse signal counting distribution generated by the irregular particle is the full reflection of particle size distribution. On the basis of two parameters-amplitude and width, the statistic characteristic of the random pulse signal is studied. The laser particle counter photoelectric sensor is used to measure the amplitude and width of the scattering pulse signal which is generated by the aerosol particles in air. The experimental results indicate that the statistical distribution of the pulse signal is not axis-symmetrical but lognormal distribution which is a specific exhibition of the random effects in measurement. It shows that it has fractal structure relation among the characteristic parameters of the non-spherical particles. In particular, the fractal dimension is the statistical dispersion's ratio of the amplitude and width of the scattering light pulse.

Key words optical measurement; fractal; random pulse signal; lognormal distribution

1 引 言

基于散射光原理的激光尘埃粒子计数器广泛应用于微电子和光电子、生物医学工程、航天技术和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微电子产品质量、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。长期以来有关尘埃粒子计数器的研究大多集中在测量原理^[2]、光电传感器设计^[3]和信号分析模型^[4,5]等方面。文献[6,7]以尘埃粒子计数技术为基础,研究空气中悬浮颗粒质量浓度测量技术中的等效粒度模型;文献[8,9]则进一步研究

收稿日期: 2009-08-17; 收到修改稿日期: 2009-09-07

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等方面的研究。

E-mail: su35mkk19810207@sina.com

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等方面的研究。

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

* 通讯联系人。E-mail: bianbaomin_56@yahoo.com.cn

光散射法颗粒测量光电传感器的非线性效应,提出以量子集概念为基础的非球形颗粒粒度分析模型,指出随机性颗粒群的结构参数模型具有显著的分形特征,这种特征源于颗粒群测量过程中的随机性的统计结果。

对数正态分布在地质矿业、医药、大气科学、生态学和社会经济学的随机现象研究领域有着广泛应用^[10]。本文从尘埃粒子计数器测量的一般原理出发,分析测量过程中的随机性,结合尘埃粒子计数光电传感器,对空气尘埃粒子光散射脉冲信号的特性参数——脉冲宽度和脉冲幅度的统计分布规律进行研究,脉冲信号的幅度和宽度分别是尘埃粒子散射截面和质量的反映,它们之间满足分形关系,对应的分形维数为各自对数正态分布离散度的比值。

2 尘埃粒子光散射脉冲信号测量过程中的随机性

尘埃粒子计数器光敏区(如图1),是指采样气流(沿 y 轴正方向)与照明光束(沿 z 轴正方向)垂直相交的区域。同构颗粒随样气流经光敏区时产生散射光脉冲信号,对应的输出电压信号有两个基本特性参数幅度 V 、宽度 τ ,它们的记录值由于测量过程中的随机作用而出现涨落。

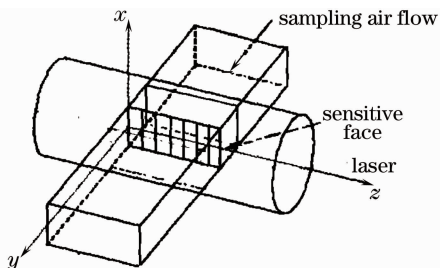


图1 光敏区示意图

Fig.1 Sketch map of photosensitive volume

设 S 为粒子等效散射截面, H 为光电信号转换特性参数, η 为光电探测器的粒子散射光收集效率,输出脉冲信号电压幅度 V 与粒子路径等效光通量 I 成正比^[11]:

$$V = \eta SHI. \quad (1)$$

实际测量过程中,粒子的路径影响光收集率范围(η_m, η_M),粒子姿态影响散射截面范围(S_m, S_M),光电传感器转换参数波动范围(H_m, H_M),粒子路径上光强范围(I_m, I_M)等因素,这四个独立因素决定了颗粒信号幅度 V 的分布范围为(V_m, V_M)。信号幅度涨落与颗粒大小、形貌结构、运动姿态、运动路径分布和光源不均匀性等有关,但信号幅度统计参数与

上述因素对应统计特征参数之间满足单调关系。

同样,颗粒散射光脉冲信号的宽度 τ 与光敏区结构、粒子路径、粒子速度有关,所以脉冲信号的宽度也有一定的分布范围(τ_m, τ_M)。一般来说,颗粒的质量越大,颗粒运动速度越小,信号宽度越大。信号宽度统计参数 τ 与颗粒质量 m 存在单调关系。

传感器输出信号参数 V, τ 在时间序列上的随机性,是颗粒结构、运动随机性和光电转换作用随机性的表现。计数法取分档平均宽度为 ΔV 和 $\Delta \tau$,进行脉冲信号数分档统计。以信号幅度参数为例, (V_m, V_M)对应的分档序号为(n_m, n_M),设测量脉冲信号总数为 M ,第 n 分档中的计数值为 $M(n)$, $M(n \leq n_m) = 0$,则对应的计数比率记为 $M(n)/M$ 。随着总计数值 M 的增加,计数比率趋于稳定,定义计数分布函数 $p(n) = \bar{M}(n)/M$ 。可见,计数法用计数分布函数 $p(n)$ 描述颗粒群光散射脉冲信号测量过程,是研究测量过程中随机作用特性的基本方法。

3 颗粒群光散射脉冲信号分布的统计测量

采用采样流量为28.3 L/min激光尘埃粒子计数器对空气中悬浮颗粒群光散射信号的统计分布进行测量。测量系统的主要技术参数为:数据采样率 f_s 约为20 MHz,电压通道间隔 ΔV 约为2.4 mV,总计数通道数 N 约为2048,时间分辨率 $\Delta \tau$ 约为0.05 μ s,最大计数为 $1.0 \times 10^6 \text{ min}^{-1}$,传感器采样管的喷口尺寸为7 mm \times 0.8 mm,采样气体的平均流速约为84 m/s,光敏区宽度约为0.1 mm,脉冲信号的宽度均值约为1.2 μ s。

取最小电压阈值以限制电路噪声影响,分别测量5个脉冲宽度范围,信号随幅度的分布统计结果如图2中的点线,对应的统计参数如表1。

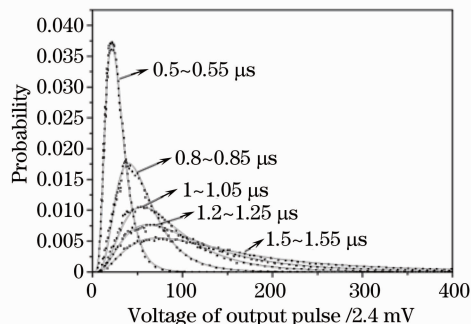


图2 不同脉宽条件下脉冲信号的幅度分布

Fig.2 Signal amplitude distribution under different pulse widths

表 1 统计参数值

Table 1 Statistic parameter values

width / μs	Dispersion σ_V	Average value μ_V	V_m
0.5~0.55	0.42	3.33	4
0.8~0.85	0.48	3.95	6
1~1.05	0.54	4.38	6
1.2~1.25	0.62	4.62	8
1.5~1.55	0.75	4.86	10

显然,信号随幅度的统计分布不具有中心对称性。图中的实线是根据特征参数 $\mu_V = \overline{\ln(V - V_m)}$, $\sigma_V = \sqrt{(\ln(V - V_m) - \mu_V)^2}$ 绘制的对数正态分布函数曲线,对应的表达式为

$$p(V - V_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(V - V_m)\sigma_V} \exp\left\{-\frac{[\ln(V - V_m) - \mu_V]^2}{2\sigma_V^2}\right\}, V \in (V_m, V_M) \quad (2)$$

计算可以证明,当特征参数 $\sigma_V < 0.1$ 时,对数正态分布趋于正态分布。实验中,不同宽度范围的信号,近似对应于颗粒群中的不同质量子集。可见,

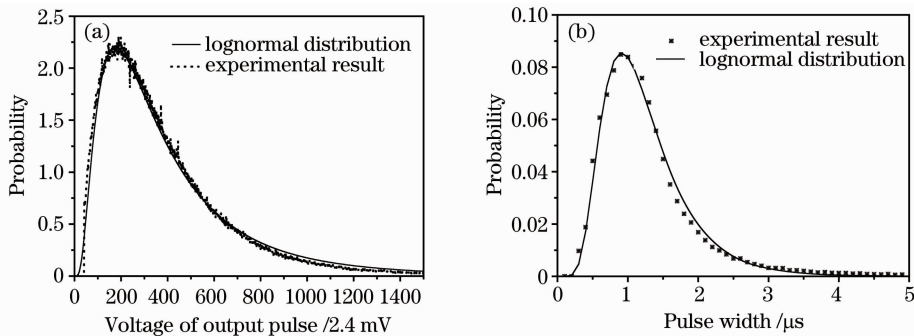


图 3 脉冲信号随脉冲幅度和宽度的分布

Fig. 3 Amplitude and width distributions of pulse signal

显然颗粒群信号整体分布同样很好地服从对数正态分布规律。其宽度分布函数为

$$p(\tau - \tau_m) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(\tau - \tau_m)\sigma_\tau} \exp\left\{-\frac{[\ln(\tau - \tau_m) - \mu_\tau]^2}{2\sigma_\tau^2}\right\}, \tau \in (\tau_m, \tau_M) \quad (3)$$

脉冲信号幅度分布、宽度分布基本规律相同,表明颗粒群光散射信号结构的整体特性参数之间具有密切的对应关系。统计分布服从对数正态分布规律,本质上是不规则颗粒群结构随机性具有的分形特征的表现。

从原理上考虑,随着颗粒信号幅度、宽度分度精度的提高,分档数总数 $L, K \rightarrow \infty$, 分布函数趋于连续形式。令 $\mu_\tau = \overline{\ln(\tau - \tau_m)} = \ln \bar{\tau}$, 单位信号宽度档内的计数分布为

$$\begin{aligned} \frac{\Delta M}{M} &= p(\tau - \tau_m) \Delta \tau \rightarrow \frac{d\tau}{\sqrt{2\pi}(\tau - \tau_m)\sigma_\tau} \exp\left\{-\frac{[\ln(\tau - \tau_m) - \mu_\tau]^2}{2\sigma_\tau^2}\right\} = \\ &= \frac{d\ln(\tau - \tau_m)}{\sqrt{2\pi}\sigma_\tau} \exp\left\{-\frac{[\ln(\tau - \tau_m) - \ln \bar{\tau}]^2}{2\sigma_\tau^2}\right\} = \frac{d\ln[(\tau - \tau_m)/\bar{\tau}]}{\sqrt{2\pi}\sigma_\tau} \exp\left\{-\frac{[\ln[(\tau - \tau_m)/\bar{\tau}]]^2}{2\sigma_\tau^2}\right\} = \\ &= \frac{d\ln[(\tau - \tau_m)/\bar{\tau}]^{1/\sigma_\tau}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln[(\tau - \tau_m)/\bar{\tau}]^{1/\sigma_\tau}]^2}{2}\right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

同样单位信号幅度档内的计数分布为

不同脉宽范围内的颗粒量子集光散射脉冲信号的幅度分布均很好地与对数正态分布吻合。从表 1 计算结果可见看出,统计参数 μ_V, σ_V 的值随脉宽单调增大,脉冲信号幅度下限也单调增大。这些数据表明,脉冲信号幅度统计参数与宽度统计参数并不完全独立,两者存在单调正相关性。这种单调相关性反映了两个输出统计参数与颗粒群量子集参数的单调相关性。

4 颗粒群光散射信号脉宽与幅度参数之间的分形关系

对空气悬浮颗粒群光散射信号幅度、宽度的分布分别进行统计测量。幅度分布数据如图 3(a),总分档数超过 1500。信号随宽度分布测量则采用分段测量形式,在保持总样本不变的条件下,逐次提高脉冲宽度下限,计算不同宽度档内的计数比率。测量中取脉宽间隔为 0.1 μs , 宽度分布数据如图 3(b),总分档数为 50。

$$\frac{\Delta M}{M} = p(V - V_m)\Delta V \rightarrow \frac{d\ln[(V - V_m)/\tilde{V}]^{1/\sigma_V}}{\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{[\ln[(V - V_m)/\tilde{V}]^{1/\sigma_V}]^2}{2}\right\}. \quad (5)$$

由(4)式和(5)式可见,若分别以 $\left(\frac{\tau - \tau_m}{\bar{\tau}}\right)^{1/\sigma_\tau}$, $\left[\frac{V - V_m}{\tilde{V}}\right]^{1/\sigma_V}$ 为自变量,则两个分布函数同构。这种同构分布表明,统计参数之间满足下列关系式:

$$\frac{V - V_m}{\tilde{V}} = \left(\frac{\tau - \tau_m}{\bar{\tau}}\right)^{\sigma_V/\sigma_\tau} = \left(\frac{\tau - \tau_m}{\bar{\tau}}\right)^\alpha, \quad (6)$$

即不规则颗粒群光散射信号统计参数之间具有分形关系^[12],且分形维数 α 为两个统计参数离散度 σ 的比值。实际应用中,若信号参数分布较宽,而且 $V_m \ll V$, $\tau_m \ll \tau$, (6)式表现为如下的近似形式:

$$V \propto \tau^\alpha, \quad (7)$$

统计意义下,信号幅度 V 随颗粒散射截面 S 单调增大,脉宽 τ 随颗粒质量 m 单调增大,研究表明空气中悬浮粒子粒度的统计分布同样满足对数正态分布^[13],因此结合前面的推导过程可得

$$V \propto \tau^\alpha \propto m^\beta, \quad (8)$$

式中指数 β 代表不规则颗粒群子集质量参数与散射信号幅度统计参数对应的分形维数。(8)式对应的分形关系是颗粒群内部质量子集不规则几何结构统计参数分形关系的映射。

5 结 论

空气悬浮颗粒群在激光照射下产生的脉冲信号随幅度、宽度分布服从对数正态分布规律是颗粒群质量子集、形貌结构、测量过程中光电转换及放大电路随机性的反映形式。研究结果表明,随机信号参数的对数正态分布能够在更高精度基础上描述反映随机作用的分形特征。不规则颗粒群信号特征参数在它们的定义域内存在非线性关系,是参数群具有分形自相似特征的表现,且分维数等于计数统计离散度 σ 的比值。

参 考 文 献

1 Huang Huijie, Zhao Yongkai, Ren Bingqiang *et al.*. Aerosol particle measurement by laser diode light scattering[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(12): 1171~1121

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): 1171~1121

2 Huang Tinglei, Zheng Gang, Wang Naining. Count technology for particulate condition in indoor air[J]. *J. Appl. Opt.*, 2000, **21**(2): 17~21

黄廷磊,郑刚,王乃宁. 室内空气中心颗粒状污染物的计数技术[J]. *应用光学*, 2000, **21**(2): 17~21

3 Liang Chunlei, Huang Huijie, Ren Bingqiang *et al.*. Study of miniature optical sensor for laser particle counter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(9): 1260~1264

梁春雷,黄惠杰,任冰强等. 激光尘埃粒子计数器微型光学传感器的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(9): 1260~1264

4 Yang Juan, Gu Fang, Bian Baomin *et al.*. The study of signal transmission characteristic in airborne particle counter[J]. *Laser Technology*, 2008, **32**(3): 255~258

杨娟,顾芳,卞保民等. 尘埃粒子计数器信号传输特性研究[J]. *激光技术*, 2008, **32**(3): 255~258

5 Sivakumar Manick avasagam, Meng M P. Scattering matrix elements of coated infinite-length cylinders[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(12): 2473~2482

6 Gu Fang, Yang Juan, Bian Baomin. A model for aerosol mass concentration using an optical particle counter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 214~217

7 Gu Fang, Yang Juan, Bian Baomin *et al.*. Aerosol mass density algorithm based on 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的质量密度算法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1706~1710

8 Yang Juan, Bian Baomin, Gu Fang. A mathematics model for aerosol mass measurement using light scattering counting method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 407~411

杨娟,卞保民,顾芳. 光散射计数法颗粒群质量测量的数学模型[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 407~411

9 Yang Juan, Lai Xiaoming, Peng Gang *et al.*. The fractal measurement of aerosol equivalent volume based on counting signal[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, **58**(5): 3008~3013

杨娟,赖晓明,彭刚等. 悬浮颗粒等效体积的分形测度[J]. *物理学报*, 2009, **58**(2): 3008~3013

10 Eckhard Limpert, Wernera Stahel, Markus Abbt. Log-normal distributions across the science: keys and clues[J]. *BioScience*, 2001, **51**(5): 341~352

11 Ji YunJing, Bian BaoMin, He AnZhi. Research on performances of LPCS with different lampouses[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2004, **33**(3): 264~268

纪运景,卞保民,贺安之. 不同光源对激光尘埃粒子计数器性能的影响[J]. *红外与激光工程*, 2004, **33**(3): 264~268

12 Zhang Jizhong. Fractal[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. 355~363

张济忠. 分形[M]. 北京:清华大学出版社, 1995. 355~363

13 Charlie Zender. Particle size distribution: theory and application to aerosols, clouds and soils[EB/OL]. (2008-01-25)[2010-02-10]. <http://dust.ess.uci.edu/facts/psd/psd.pdf>