

文章编号: 0253-2239(2009)09-2347-04

基于微分法精确测量气溶胶飞行时间的新方法

黄书华^{1,2} 刘建国^{1,2} 刘文清^{1,2} 陆亦怀^{1,2} 张玉钧^{1,2} 桂华侨^{1,2}
孙世杰^{1,2} 江宇^{1,2} 陈军^{1,2} 王亚萍^{1,2}

(¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)
² 安徽省环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 利用飞行时间气溶胶粒子束光谱技术对大气气溶胶粒子粒谱分布进行监测是精确测量大气气溶胶粒子粒径大小及浓度的典型方法。而精确测量气溶胶粒子飞行时间是实现粒径谱精确监测的关键。利用微分法对门限电平比较法进行优化改进, 利用信号微分后的零点对应信号最大值的特点, 将飞行时间提取中变化的门限电平的比较转换成零电平的比较, 设计了一种精确测量气溶胶粒子飞行时间的方法。该方法不但可以忽略因气溶胶粒子大小而引起的散射光强弱变化, 而且, 即使散射光双峰信号并非理想的对称信号, 该方法也能精确地测得飞行时间。

关键词 大气光学; 气溶胶; 气溶胶的粒谱; 飞行时间; 空气动力学粒径

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092909.2347

A New Method of Aerosol Particles' Time-of-Flight Accurate Measurement Based on Differentiation

Huang Shuhua^{1,2} Liu Jianguo^{1,2} Liu Wenqing^{1,2} Lu Yihuai^{1,2} Zhang Yujun^{1,2}
Gui Huaqiao^{1,2} Sun Shijie^{1,2} Jiang Yu^{1,2} Chen Jun^{1,2} Wang Yaping^{1,2}

(¹ Key Laboratory of Environment Optical and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)
² Anhui Key Laboratory of Environment Optical and Technology, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Time-of-flight aerosol beams spectrometry is a typical method of accurate size and concentration measurement in aerosol particles' size distribution monitoring. Accurate measurement of aerosol particles' time-of-flight is the key to monitor the distribution of particles' size. A method of accurate measurement of aerosol particles' time-of-flight is designed by improving the threshold level comparison method, and the comparison of zero-level instead of the changing threshold level is realized based on differentiation since the maximum value of the original signal is corresponding to zero-level of the differential signal. By using this method, the time-of-flight can be accurately measured when the strength of the scattered light changes, or when the two peaks of the scattered light are not symmetrical.

Key words atmospheric optics; aerosol; size distribution of aerosol; time-of-flight; aerodynamic diameter

1 引言

大气气溶胶在大气辐射^[1]、空气污染^[2~4]、大气物理化学性质^[5~9]、人类健康状况等方面扮演着重要角色, 是衡量大气污染状况的重要指标。研究表

明, 气溶胶粒子因其空气动力学粒径不同而滞留在人体呼吸道的不同部位。大于 5 μm 的气溶胶粒子滞留在上呼吸道, 小于 5 μm 的多滞留于气管、支气管和肺泡内, 而且 0.01 μm 的气溶胶粒子在肺泡内

收稿日期: 2008-12-16; 收到修改稿日期: 2008-12-29

基金项目: 国家 863 计划(2006AA06A302)和中科院知识创新工程重要方向项目(KJCX22SW2H08)资助项目。

作者简介: 黄书华(1976—), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事环境监测中的光电子技术方面的研究。

E-mail: hsh@aiofm.ac.cn

导师简介: 刘建国(1968—), 男, 研究员, 主要从事大气环境光学监测新方法方面的研究。E-mail: jgliu@aiofm.ac.cn

的沉积率最高,可以进入人体血液循环,对人类健康危害很大^[10]。因此,如何持续有效地监测气溶胶粒子成为我们越来越关心的问题^[11~14]。正是在此目标的驱动之下,本课题组开展了空气动力学粒谱仪的研制,该仪器可以连续、实时、在线高速监测大气气溶胶粒子粒径谱分布。

2 空气动力学粒谱仪原理

空气动力学粒谱仪采用 Dahnek 发展的一种飞行时间气溶胶粒子束光谱技术^[15,16],即气溶胶粒子发生真空膨胀后的速度与气溶胶粒子的空气动力学直径有着直接的关系。根据这个原理,采用已知粒径的标准粒子得到粒子飞行速度与粒径大小之间关系的定标曲线以后,只要测得粒子的飞行速度,就可得知该粒子空气动力学直径的大小。在实际应用中,气溶胶粒子飞行时间测量结构如图 1 所示,根据空气动力学原理设计一个气溶胶粒子束自由膨胀喷嘴,将大气中悬浮的粒子按空气动力学粒径大小排成从小到大的单粒子流。在光路设计上,使用两束靠近的连续激光垂直于粒子飞行路径的轴线照射到沿着轴线飞行的气溶胶粒子上,两激光束之间相距一定的距离 d ,单粒子飞越两束激光产生与飞行时间相关的散射光,散射光分别经椭球面反射镜聚焦到探测器探测,得到表征单粒子空气动力学特征的双峰信号,双峰信号的强度表示气溶胶粒子的散射光强,即该气溶胶粒子的光学直径信息,而双峰信号的峰峰间隔则表示气溶胶粒子的飞行时间 t ,由 d/t 即可计算出粒子的飞行速度,再根据定标曲线就能得到粒子的空气动力学直径。由此,对粒子空气动力学直径的测量转换为对飞行时间的测量,精确测量飞行时间成为研制空气动力学粒谱仪的关键。

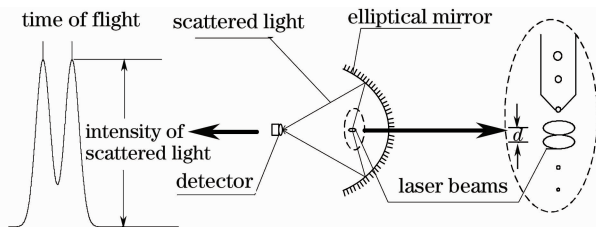


图 1 气溶胶粒子飞行时间测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of aerosol particles' time-of-flight measurement

3 精确测量飞行时间的微分方法

目前,测量飞行时间常用的方法有以下两种:

第 1 种方法是:门限电平比较法,它是将散射双

峰信号与设定的信号经过高速比较电路比较,得到两个脉冲数字信号,其脉冲间隔与双峰信号峰峰间隔接近。如图 2 所示。

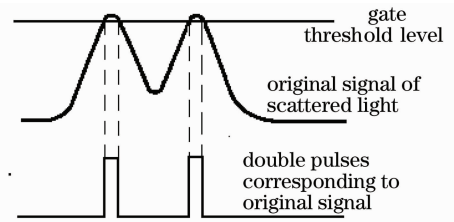


图 2 门限电平比较法

Fig. 2 Threshold level comparison method

当门限电平选取得适当的时候,模拟双峰信号的峰峰间隔与两数字窄脉冲信号的间隔基本相等,该窄脉冲信号可以用来触发计数器进行双峰信号峰峰间隔的测量功能。但是,该处理方法要求门限电平的选择要随着散射光信号强度的变化而变化,才能确保每次测量的准确性。另一方面,由于粒子在通过激光束时,它的飞行轨迹并不严格位于同一飞行路径轴线上,所以对对应粒子的散射峰信号可能会出现不对称,导致门限电平的选择更加困难。

第 2 种方法是:用高速 A/D 采集卡将粒子的散射光双峰信号完整地采集记录下来,然后由计算机计算出气溶胶粒子的飞行时间和散射光强。这种方法的优点是飞行时间和散射光强的测量可以特别准确,缺点就是,高速 A/D 采集卡的价格昂贵,数据的存储量大且其中有很多数据是不必记录的。

为了克服上述两种测量方法的缺点,我们对上述门限电平选择法进行优化革新,设计了一种飞行时间精确测量方法,下面主要介绍该方法的原理与电路实现。

由于门限电平的选择需要综合考虑气溶胶粒子的散射光强度以及散射光双峰对称性,使得门限电平的选择比较复杂。为此,我们利用信号微分后的零点对应信号最大值的特点,对门限电平法进行了优化。首先,将原始气溶胶粒子的散射光双峰信号 $S(t)$ 经过一段时间 τ 的延迟,得出信号 $S(t+\tau)$,即原始信号 $S(t)$ 的延迟信号。由于气溶胶粒子的散射光信号由一系列离散的双峰信号组成,所以,假设散射光双峰信号是连续的,则可以近似地将原始信号 $S(t)$ 用下式来表达:

$$S(t) = A[1 + \sin(\omega t)], \quad (1)$$

式中 A 表示原始散射光信号的强度, ω 表示原始散射光信号的角频率。其信号波形如图 3 所示。

角频率 ω 又可表示为

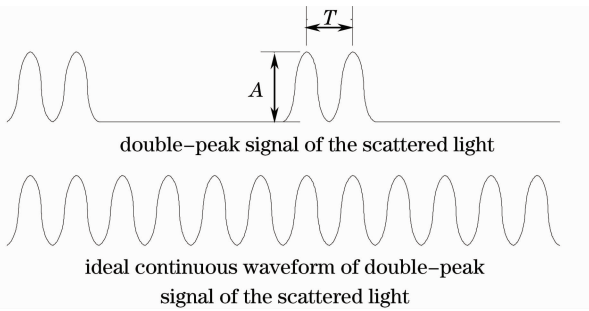


图3 散射光双峰信号及其连续化理想波形示意图

Fig. 3 Double-peak signal of the scattered light and schematic of its ideal continuous waveform

$$\omega = 2\pi/T, \quad (2)$$

其中 T 是散射光信号的周期, 即飞行时间。经过 τ 延时后的延迟信号 $S(t + \tau)$ 可以用(3)式表示:

$$S(t + \tau) = A\{1 + \sin[\omega(t + \tau)]\}. \quad (3)$$

将原始信号与延迟信号进行减法运算就可以得到差信号 $\Delta S(t)$:

$$\Delta S(t) = S(t) - S(t + \tau), \quad (4)$$

将(1)式和(3)式代入(4)式得

$$\Delta S(t) = A(1 + \sin \omega t) - A\{1 + \sin[\omega(t + \tau)]\}, \quad (5)$$

整理后得

$$\Delta S(t) = 2A \sin \frac{\omega\tau}{2} \times \cos(\omega t + \frac{\omega\tau}{2}). \quad (6)$$

当延时 τ 固定后, $2A \sin \frac{\omega\tau}{2}$ 则表示差信号 $\Delta S(t)$ 的振幅, $\frac{\omega\tau}{2}$ 则表示差信号 $\Delta S(t)$ 的相位。由(6)式可以看出,

差信号 $\Delta S(t)$ 就是原始信号 $S(t)$ 经过处理后的微分表达, 它和原始信号 $S(t)$ 具有相同的角频率 ω , 即, 经过微分运算后, $\Delta S(t)$ 的周期 T 相对于 $S(t)$ 并没有发生变化。所以, 对原始双峰信号 $S(t)$ 峰峰间隔的测量就可以转换成对其差信号 $\Delta S(t)$ 周期的测量。实际测量中, 气溶胶粒子的散射双峰信号是单极性的, 经过上述微分处理后就得到了以零电平为轴的余弦信号, 该信号均匀分布在零电平两边, 其正值向负值变化的连续两个过零点就是 $\Delta S(t)$ 信号的周期, 也就是我们需要测量的飞行时间。变换处理的示意图如图4所示。因此, 无论信号强度如何变化, 差信号 $\Delta S(t)$ 的周期都严格与原始气溶胶粒子散射双峰信号的峰峰间隔一致, 只要测量连续两个由正向负变化的过零点的时间间隔, 就可以测量出原始气溶胶粒子散射双峰信号的峰峰间隔。将这两个过零点模拟信号转换为数字下降沿信号, 就可以方便地用数字电路实现飞行时间的测量。

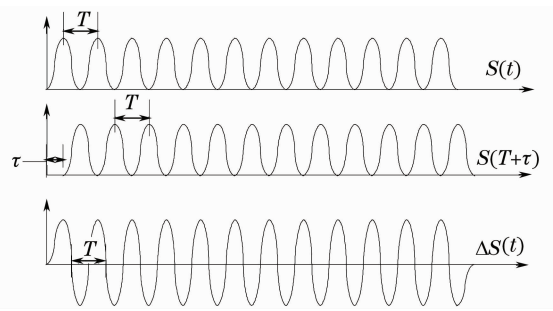


图4 飞行时间提取示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the time-of-flight extraction

在实际应用中, 由于气溶胶粒子真空膨胀后的飞行时间一般在 600 ns 到 4096 ns 之间, 所以延时 τ 可取最小飞行时间的一半左右(在实验中确定)。

4 电路实现

根据上述飞行时间的精确测量方法, 我们设计了相应的飞行时间精确提取电路。如图5所示, 飞行时间精确提取电路中主要包括延迟电路2、减法运算电路3、高速箝位电路4、高速比较电路5等部件。原始信号1首先经过部件2延迟一段固定的时间, 然后经部件3进行减法运算, 将得出的信号经部件4进行箝位放大, 最后经过部件5与零电平比较实现信号的过零检测, 得出差信号的数字化信号 ΔS 。由高精度脉冲计数器对 ΔS 信号的两个下降沿进行精密计数, 就能精确测量出气溶胶粒子的飞行时间, 进而反演出气溶胶粒子的空气动力学粒径。

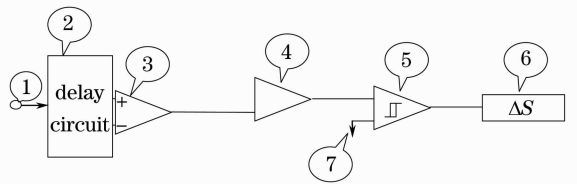


图5 飞行时间提取电路框图

Fig. 5 Circuit diagram of the time-of-flight extraction

5 实验结果

采用高达 500 MHz 的时钟对上述电路产生的 ΔS 信号进行精确的测量, 实际测量结果达到 4 ns 的精度。我们共计发生 56778 个 600 ns 的测试信号, 实际记录有 52204 个测试信号在 600 ns, 另有 4533 个测试信号在 596 ns, 41 个测试信号记录在 604 ns。记录在 600 ns 通道上的测试信号占总信号的 91.94%, 记录在 596 ns 通道上的测试信号占总信号的 7.98%。误差范围在 ± 4 ns, 完全满足设计要求。

6 结 论

在空气动力学粒谱仪中,气溶胶单粒子与两平行激光束碰撞形成散射光双峰信号,双峰信号的峰峰间隔代表单粒子飞越两平行激光束所用的飞行时间,通过测量飞行时间可以得到粒子的空气动力学直径。本文主要阐述了飞行时间精确测量方法的理论基础和实际应用。该方法不但可以忽略气溶胶粒子因大小而引起的散射光强弱变化,而且,即使散射光双峰信号并非理想的对称信号,该方法也能精确地测得散射峰的峰峰间隔,成为双峰信号峰峰间隔检测的一个突破。本课题组基于该方法研制的空气动力学粒谱仪已在上海中国计量研究院通过检测,实现气溶胶监测及对大气传输特性的研究。

参 考 文 献

- 1 Wang Xianhua, Qiao Yanli, Philippe Goloub *et al.*. Radiometric calibration of sunphotometer system applied to aerosol robotic network[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 87~91
王先华, 乔延利, Philippe Goloub 等. 应用于全球气溶胶测量网的太阳辐射计附设定标系统[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 87~91
- 2 Xiao Rui, Li Bing, Yang Hongxia *et al.*. Source identification and apportionment of particulate matter and aerosol lead in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, **21**(6): 148~155
肖 锐, 李 冰, 杨红霞 等. 北京市大气颗粒物及其铅的来源识别和解析[J]. *环境科学研究*, 2008, **21**(6): 148~155
- 3 Xu Li, Wang Yaqiang, Luo Yong *et al.*. Research progress in climate effects of black carbon aerosol and its expanding fields [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, **3**(6): 328~333
许 黎, 王亚强, 罗 勇 等. 黑碳气溶胶的气候效应和拓展的研究领域[J]. *气候变化研究进展*, 2007, **3**(6): 328~333
- 4 Li Ang, Xie Pinhua, Liu Wenqing *et al.*. Monitoring of total emission volume from pollution sources based on passive differential optical absorption spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(9): 1537~1542
李 昂, 谢品华, 刘文清 等. 被动差分光学吸收光谱法监测污染源排放总量研究[J]. *光学学报*, 2007, **27**(9): 1537~1542
- 5 Wang Zhenzhu, Chi Ruli, Liu Bo *et al.*. Depolarization properties of cirrus clouds from polarization lidar measurements over Hefei in spring [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(4): 235~237
- 6 Zhao Peitao, Zhang Yinchao, Wang Lian *et al.*. Measurement of tropospheric CO₂ and aerosol extinction profiles with Raman lidar [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **6**(7): 961~964
- 7 Zhu Jinshan, Chen Yubao, Yan Zhaoai *et al.*. Relationship between the aerosol scattering ratio and temperature of atmosphere and the sensitivity of a Doppler wind lidar with iodine filter[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(6): 449~453
- 8 Wu Yonghua, Hu Huanling, Hu Shunxing *et al.*. Raman lidar measurements of the tropospheric water vapor over Hefei [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(7): 373~376
- 9 Gu Fang, Yang Juan, Bian Baomin *et al.*. A model for aerosol mass concentration using an optical particle counter [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(3): 214~217
- 10 Suess D. T, Prather K. A. Mass spectrometry of aerosols [J]. *Chemical Reviews*, 1999, **99**(10): 3007~3035
- 11 Huang Yinbo, Huang Honglian, Han Yong *et al.*. Measurement and model analysis of the aerosol optical properties in the regions of Hefei and southeast coast [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2007, **2**(6): 423~433
黄印博, 黄红莲, 韩 永 等. 合肥、东南沿海地区气溶胶光学特性测量及模式分析[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(6): 423~433
- 12 Li Xuebin, Xu Qingshan, Wei Heli *et al.*. Study on relationship between extinction coefficient and mass concentration [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1655~1658
李学彬, 徐青山, 魏合理 等. 气溶胶消光系数与质量浓度的相关性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1655~1658
- 13 Xu Honghui, Wang Yuesi, Wen Tianxue *et al.*. Size distributions and vertical distributions of metal elements of atmospheric aerosol in Beijing [J]. *Environmental Chemistry*, 2007, **26**(5): 675~679
徐宏辉, 王跃思, 温天雪 等. 北京市大气气溶胶中金属元素的粒径分布和垂直分布[J]. *环境化学*, 2007, **26**(5): 675~679
- 14 Liu Zengdong, Liu Jianguo, Wang Bei *et al.*. Aerosol observation in fengtai area, Beijing [J]. *Particulology*, 2008, **6**(3): 214~217
- 15 Gard E, Mayer J. E, Morrical B. D *et al.*. Real-time analysis of individual atmospheric aerosol particles: design and performance of a portable ATOFMS [J]. *Anal. Chem.*, 1997, **69**(20): 4083~4091
- 16 Hang W, Yan X. M, Wayne D M *et al.*. Glow discharge source interfacing to mass analyzers: theoretical and practical considerations [J]. *Anal. Chem.*, 1999, **71**(15): 3231~3237