

基于 LabVIEW 的大气气溶胶实时监测系统设计

李辰宇 程智 陈锋 杜耀华 暴洪涛 吴太虎

(中国人民解放军军事医学科学院卫生装备研究所 天津 300161)

摘要:近年来随着人们对大气环境质量的重视程度日益提高,大气气溶胶浓度的定量分析方法也越来越受到关注。该大气气溶胶实时监测系统基于 Mie 弹性散射分析技术,利用 LabVIEW 数据流图形化编程方法完成数据实时处理、动态显示以及历史数据保存等功能。系统可以通过实时获取单个气溶胶粒子在激光照射后向散射光的强度来分析采集样本中各粒度气溶胶粒子浓度,并以此来评估当前环境的气溶胶质量状况。此系统具有操作简单、界面友好、数据翔实的优点,可广泛应用于大气气溶胶分析领域。

关键词:大气气溶胶;实时监测;Mie 散射;LabVIEW

中图分类号: X851 TP274 TN247 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Design of atmospheric aerosol real-time monitoring system based on LabVIEW

Li Chenyu Cheng Zhi Chen Feng Du Yaohua Bao Hongtao Wu Taihu

(Institute of Medical Equipment, Academy of Military Medical Sciences, Tianjin 300161, China)

Abstract: In recent years, with great importance increasingly attached to atmospheric environmental quality, methods of quantitative analysis for the concentration of atmospheric aerosol was receiving more and more attention. The atmospheric aerosol real-time monitoring system was based on Mie scattering analytical technique, taking the advantage of LabVIEW data stream graphical programming to realize the functions of real-time process, dynamic display and historical data saved. This system analyzed the concentration of sampled various size aerosol particle by real-time getting the back-scattering light intensity of every aerosol particle, which can reflect the air quality of current environment. This system had advantages of easy operation, friendly interface and abundant information, which can be widely used for atmospheric aerosol analysis area.

Keywords: atmospheric aerosol; real-time monitoring; Mie scattering; LabVIEW

1 引言

伴随着工业的迅速发展和化石燃料的大量使用,气溶胶污染物正在源源不断地产生并被排放到大气环境中,一方面破坏着自然环境和生态气候;另一方面也直接威胁到人类的生命健康^[1]。当气溶胶进入人体呼吸系统后,约有 50% 吸附在肺壁上,其携带的有害物质能渗透到肺部组织的深处,引起支气管炎、肺炎、哮喘、肺气肿与肺癌,导致心肺功能减退甚至衰竭。更为严重的是,气溶胶也是致病菌以及生物战剂的主要传播途径^[2]。据统计约有 20% 的致病菌是以生物气溶胶的形式进行传播的^[3],居致病菌传播途径之首,因此对大气气溶胶各粒径浓度进行实时在线监测是对气溶胶污染威胁进行预警并制定处置方案的重要依据。

2 大气气溶胶实时监测系统原理

该文所设计的大气气溶胶实时监测系统基于弹性散射

光谱技术,对大气环境中的气溶胶逐个进行粒径尺寸分析,并将分析结果参数化地体现在人机交互界面上。

大气气溶胶实时检测系统原理如图 1 所示,系统利用 405 nm 半导体激光器作为监测能量源,负压气泵作为气流动力源,将大气中存在的气溶胶负压吸入装置的测量腔内,并逐个通过由激光器经整形形成的测量光斑发生弹性散射。光的弹性散射包括瑞利散射和 Mie 散射 2 种。其中瑞利散射指当散射体的线度比光波长小一个数量级时,分子散射光的强度与入射光的频率的四次方成正比^[4]。Mie 散射则指粒子的线度接近或大于光波长时对入射光的散射现象^[5]。由于可以长期悬浮空气中的气溶胶的尺寸(0.3~10 μm)绝大部分接近或大于光源波长,所以在生物气溶胶弹性散射光中绝大部分为 Mie 散射,应按 Mie 散射原理分析散射光的空间强度特性,因此粒子散射光强度在空间上的分布可表示为^[6-9]:

$$I = \frac{\lambda^2 \cdot I_i}{4\pi^2 r^2} (i_a \sin^2 \varphi + i_b \cos^2 \varphi) \quad (1)$$

式中： I_i 为入射光强度， λ 为入射光波长， r 为待测粒子和接收面之间的距离， φ 为接收点与光源连线在入射光垂直平面投影与电磁波线偏振方向的夹角， i_a, i_b 为 Mie 散射函数，其值由入射光波长 λ ，粒子直径 D ，粒子的相对折射率 m 和散射角 θ 共同决定，即：

$$i_a = i_a(D, m, \theta, \lambda)$$

$$i_b = i_b(D, m, \theta, \lambda)$$

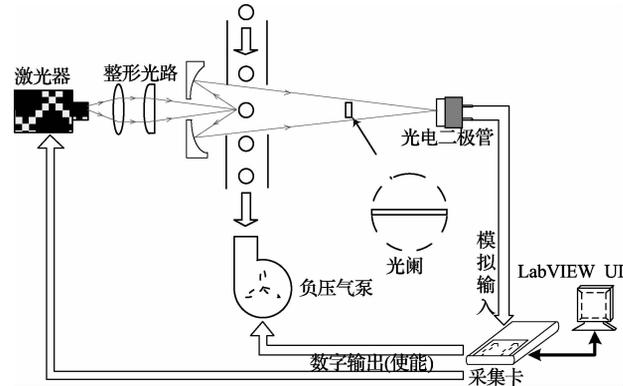


图1 大气气溶胶实时监测系统原理

利用 Mie 散射公式计算各粒径的粒子散射光随散射角的变化趋势，根据图 2 的计算仿真结果可以看出，当设定光源波长 $\lambda = 405 \text{ nm}$ ，偏振角为 45° 时，气溶胶直径越大散射光强就会越集中于后向的小角度内，因此可以在入射光后向角方向设置光电传感器，该传感器所接收到的光信号强度与粒子粒径成正相关关系，可以用来表征气溶胶粒子的物理尺寸。

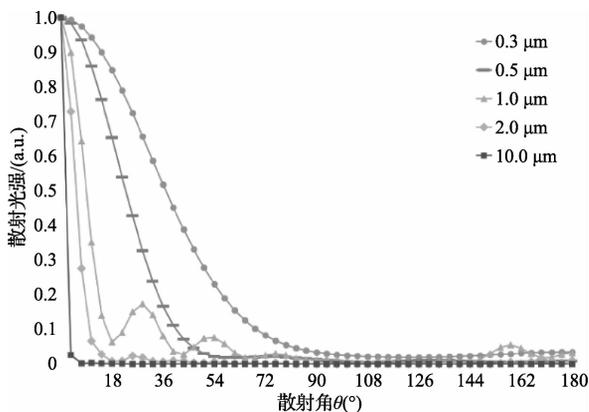


图2 半径变化时散射光强随散射角的变化曲线

根据图 1 中的大气气溶胶实时监测系统原理图可知，作为整个系统控制和数据处理转换的核心部件，采集卡需要提供相应的数字输出、模拟输入接口。数字输出可以为

系统中的激光器、负压气泵等部件提供使能信号，而模拟输入将光电传感器的模拟电信号转换为可被上位机读取的数字信号，为软件算法处理提供原始信号数据。

3 大气气溶胶实时监测系统上位机功能设计与实现

本系统使用 NI 公司所提供的多通道高速采集卡作为模数转换单元，因此可以使用 NI 公司配套研发的 LabVIEW 图形化编程语言完成上位机软件的编写。由于 LabVIEW 最初就是为测试测量而设计的，可以很容易地找到适用于测试测量的 LabVIEW 的函数和开发包，所以针对测试系统的开发速度会更快；而且 LabVIEW 基于数据流编写程序，更便于进行数据的处理分析^[10-11]。

从实时监测系统的实际需求出发，上位机需要实现的功能包括数据的实时处理，根据要求显示大气中不同粒径的气溶胶浓度，以及对历史数据进行缓存并选择性导出等功能。根据上述功能需求，基于 LabVIEW 的数据程序编写模式，软件的功能模块时序流程图如图 3 所示。

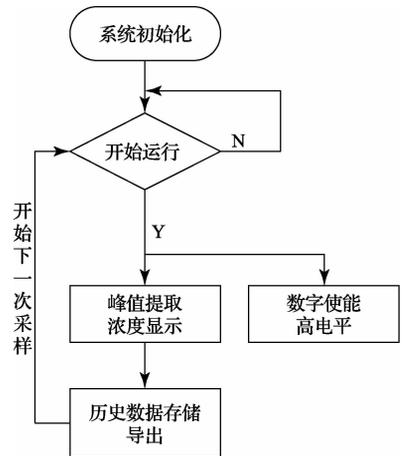


图3 软件功能模块时序流程

3.1 数据采集与信号处理

通过数据采集卡传送到上位机的原始信号来自于气溶胶流经激光光斑所产生的弹性散射光。由于单个粒子经过测量光斑的时间极短（小于 $5 \mu\text{s}$ ），所以采集卡所需设置的采样频率至少应在 10^6 以上，而这样高的采样频率在完成实时处理时极易发生采集循环和处理循环不同步导致丢失数据或是程序崩溃的情况。因此，需要在数据处理单元设计高速数据缓冲队列。如图 4 所示，采样循环将从硬件采集卡读取到的数据包保存在队列中，然后由数据处理循环从队列尾部取出数据进行处理，而队列可以达到的最大长度则取决于系统内存的大小。

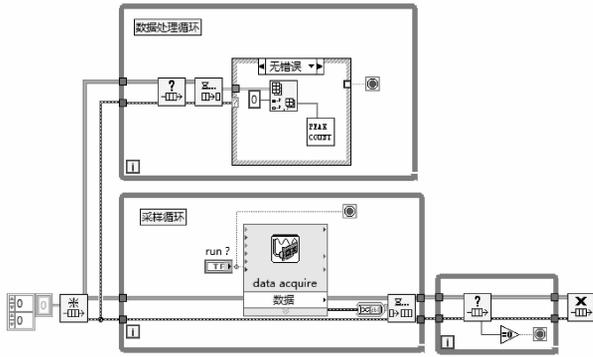


图4 高速缓冲队列

因为激光光斑的能量近似高斯分布,因此当气溶胶经过光斑时,光电探测器会生成一个如图5所示的类高斯分布的模拟信号。

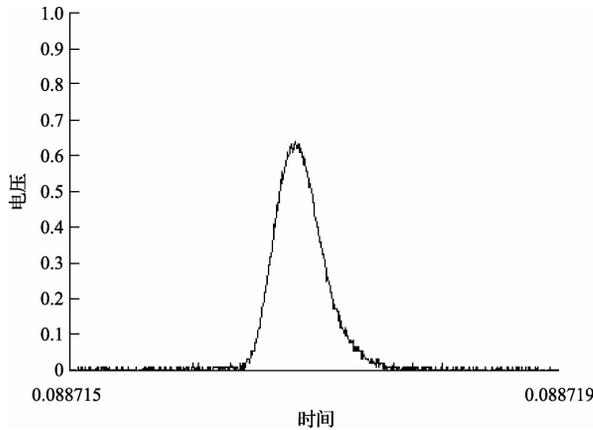


图5 原始信号峰曲线

根据第2部分的分析可知,该高斯峰的峰值可以表征单个气溶胶的粒径信息,所以需要检测信号峰的幅值。根据上述要求考虑采用LabVIEW中的数组选板和公式节点等工具编写信号处理子程序实现该功能。因为受到采集卡采样频率上限的局限,每个信号峰上的离散点个数一般仅为3~5个,不能简单地利用LabVIEW数组面板中的极值工具求采集点中的最大值代表峰值,还需要利用高斯函数拟合获取更为精确的峰值信息,其具体算法推导过程如下。

高斯峰信号的数学模型:

$$f(x) = a \cdot e^{-\frac{(x-b)^2}{\sigma^2}} \quad (2)$$

将采集到的最大值点 P 和其左右两点 P_n 和 P_m 幅值代入式,构成方程组:

$$P = a \cdot e^{-\frac{b^2}{\sigma^2}} \quad (3)$$

$$P_m = a \cdot e^{-\frac{(b+1)^2}{\sigma^2}} \quad (4)$$

$$P_n = a \cdot e^{-\frac{(b-1)^2}{\sigma^2}} \quad (5)$$

联立解方程组求取表征信号峰拟合后极值的参数 a :

$$a = P \cdot e^{\frac{(\ln P_n - \ln P_m)^2}{(16) \ln P - \ln^2 P_n - \ln^2 P_m}} \quad (6)$$

如图6所示按式(6)编写LabVIEW公式节点。

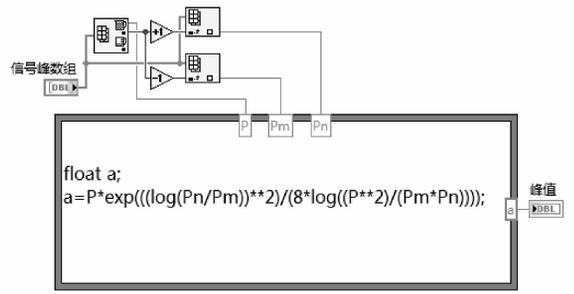


图6 拟合信号峰最大值的公式节点

最后编写算法验证程序验证算法的实际运算结果。图7给出了寻峰算法的实际运算结果:绿线为设置的阈值,红色曲线表示原始信号;白点则表示算法所搜寻到的峰值。从图中可以看出该算法准确地找到信号峰并记录峰值结果,满足系统的设计要求。

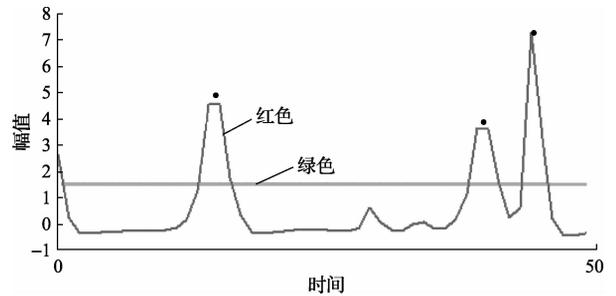


图7 寻峰算法实际运算结果

3.2 气溶胶浓度的计算和显示

当系统提取出一组信号脉冲峰的峰值信息后,应通过定标曲线将之转化为相应的粒径信息。在本系统搭建之前,已通过标准粒径的单分散聚苯乙烯微球对检测系统的标准曲线函数进行多项式拟合,拟合后的标准曲线如图8所示:

$$y = 0.012x^3 - 0.1x^2 + 0.98x + 0.612 \quad (7)$$

拟合度 R -square=0.9927。在程序中将峰值代入到定标函数中即可得到对应的粒子粒径。

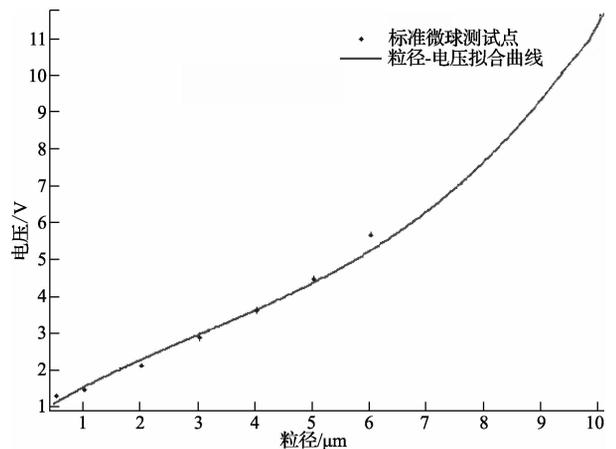


图8 气溶胶粒径定标曲线

当系统获取了一系列粒径数据后,需要利用形象直观的数据显示方法将监测结果实时显示在交互界面上。LabVIEW 中为用户提供了波形图表(Chart)和波形图(Graph)2 种常用的高级显示控件,因为波形图表内含一个先入先出缓冲区(FIFO),特别适合显示实时数据,所以本系统中选用波形图表作为表示测量数据随时间变化曲线显示控件。另外,在前面板中还利用直方图变换控件加入粒径分布图,使使用者可以更直观地了解大气气溶胶的粒径分布密度。大气气溶胶监测系统的用户交互前面板设计如图 9 所示。

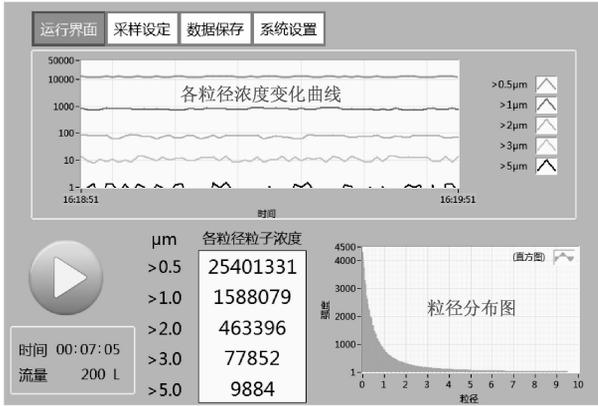


图 9 前面板操作界面

3.3 数据保存

数据保存对于大气气溶胶检测系统是必不可少的。当每一次采样结束后,系统应及时将检测到的环境信息以及

运行参数等信息保存在本地以供查询回溯和导出。LabVIEW 提供了许多可用来显示的高级控件,其中树形控件的属性和使用方法使用灵活,满足本系统这样的动态填充编辑要求,而且属性控件所具有的分层结构也便于本系统中的数据表达。图 10 是系统中关于历史数据的前面板视图,每一次运行的采样结果都作为父项显示在属性列表中,当需要进一步了解某一条目的详细信息时则可以单击该条目打开其中包含的详细信息。



图 10 历史数据前面板控件视

历史数据的自动保存是依靠调用树形控件的方法属性节点实现的。图 11 是一个可以在树形控件中添加父节点的子 VI,程序通过编写该节点中左单元格字符串和子项文本(数据类型为字符串数组)2 个参数将父项中的数据内容添加到树形控件中,并重复调用该方法节点来完成其他子项内容的填充。

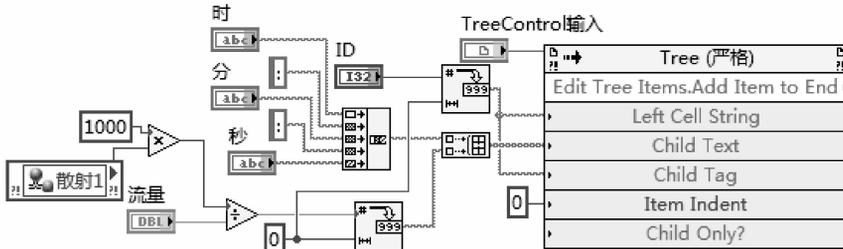


图 11 树形控件添加子节点程序

另外,软件还提供了 Excel 兼容格式的数据保存接口,方便历史数据的导出、查询和处理。Excel 数据格式的保存功能需要使用 report generation 工具包。程序如图 12 所示,将测试数据以 Excel 兼容格式的文件存入到指定的路径中。

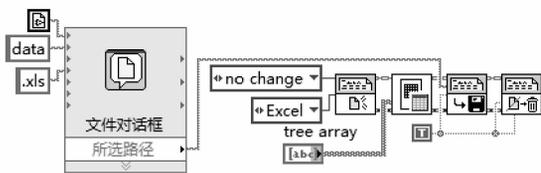


图 12 Excel 数据保存程序

4 结 论

基于 LabVIEW 图形化编程语言所设计的大气气溶胶监测系统,可以实现对被测环境气溶胶样品的粒度进行实时分析、显示并记录的功能,实时反映当前环境的气溶胶质量状况,提供了一种对大气环境迅速直观有效的评价方法。经测试,本系统具有良好的运行稳定性,同时兼具友好的人机交互界面,而且自动化程度高,操作简单,可广泛用于大气气溶胶监测领域。

参考文献

[1] 杜茜,李劲松. 微生物气溶胶污染监测检测技术研究

- 进展[J]. 解放军预防医学杂志, 2011, 26(6): 455-458.
- [2] 李金有, 王林, 李西标, 等. 生物气溶胶采集与检测研究进展[J]. 检验检疫学刊, 2013(6): 59-61.
- [3] 孙平勇, 刘雄伦, 刘金灵, 等. 空气微生物的研究进展[J]. 中国农学通报, 2010, 26(11): 336.
- [4] 刘红丽, 张伟, 李昌禧. 室内可吸入颗粒物浓度与粒径分布检测方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(2): 340-344.
- [5] 王峥, 徐平, 王文文, 等. 瑞利散射和米氏散射现象的实验演示[J]. 物理实验, 2010, 30(7): 27-29.
- [6] 李娟, 江海鹰, 牟向阳. Mie 散射系数算法改进[J]. 济南大学学报, 2009, 23(4): 347-350.
- [7] 张伟, 路远, 杜石明, 等. 球形粒子 Mie 散射特性分析[J]. 光学技术, 2010, 36(6): 936-939.
- [8] 何华, 柯熙政. 紫外光通信中的 Mie 散射机制[J]. 应用科学学报, 2012, 30(3): 245-250.
- [9] 张艳春, 刘缠牢, 赵丁. 基于米氏散射理论的粒度测试算法研究[J]. 国外电子测量技术, 2009, 28(11): 24-29.
- [10] 李婧, 张永祥, 石丙寅. 基于 LabVIEW 的远程校准系统的设计与实现[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(增刊): 59-62.
- [11] 冯强, 李敬东, 石晶, 等. 基于 LabVIEW 的 SMES 监测系统[J]. 电子测量技术, 2013, 36(12): 71-75.

作者简介

李辰宇, 在读博士研究生。主要研究方向为生物气溶胶在线监测与应用。

E-mail: 875887326@qq.com

吴太虎, 研究员, 博士生导师。主要研究方向为智能仪器。

E-mail: wutaihu@vip.sina.com

(上接第 79 页)

- [6] 聂品, 田海英, 董斌, 等. 矩形靶标测试 CCD 相机调制传递函数的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1204002.
- [7] 李晓云, 杜伟. 星载 TDICCD 相机像移对成像质量的影响分析[J]. 航天器工程, 2011, 20(3): 51-55.
- [8] 李清军, 刘志明, 张雪菲, 等. TDI CCD 全景航空相机行转移信号产生方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(9): 844-849.
- [9] 杨飞, 金光, 曲宏松, 等. 航天时间延迟积分 CCD 相机摆扫成像快速几何校正设计与分析[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 78-81.
- [10] 周翟和, 汪丽群, 沈超, 等. 基于 CPLD 的磁致伸缩高精度时间测量系统设计[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(1): 103-108.
- [11] 李国宁, 刘妍妍, 张柯, 等. 高频差分采样技术在 CCD 信号处理中的实现[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 123-129.
- [12] 吕恒毅, 刘杨, 郭永飞. 遥感相机焦面 CCD 机械拼接中重叠像元数的确定[J]. 光学精密工程, 2012, 20(5): 1041-1047.
- [13] 郭汉洲, 吕恒毅, 曲利新. 遥感相机动态调制传递函数与时间延迟积分 CCD 行周期误差的关系[J]. 光学精密工程, 2013, 21(8): 2195-2200.
- [14] 武奕楠, 张宇, 韩双丽, 等. 长线阵 TDI CCD 空间相机像移匹配及 MTF 分析[J]. 电子测量技术, 2014, 37(10): 71-75.

作者简介

李国宁, 1979 年出生, 副研究员, 2008 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位。主要研究方向为光电成像及图像压缩技术。

E-mail: Lgning@netease.com

韩双丽, 1968 年出生, 硕士学位, 副研究员。主要研究方向为空间相机主动热控技术。

E-mail: hansl@ciomp.ac.cn

张宇, 1981 年出生, 博士学位, 副研究员, 2010 年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位。主要研究方向为光电成像和图像压缩存储技术。

E-mail: zhangyu@ciomp.ac.com

刘妍妍(通讯作者), 1981 年出生, 博士, 副教授, 2005 年于长春理工大学获得硕士学位。主要研究方向为光电成像和图像压缩存储技术。

E-mail: Liuyy306@163.com

高印寒, 1953 年出生, 教授, 博士生导师。主要从事仪器仪表检测技术方面的研究。

E-mail: Gaoyh@163.com