

一种新型的激光烟雾浓度检测系统研究

刘峰¹ 刘光远¹ 龙正吉¹ 蒋小平^{2*}

¹西南大学电子信息工程学院, 重庆 400715

²西南大学物理科学与技术学院, 重庆 400715

摘要 研制了一种新型的激光烟雾浓度检测系统,可实现烟雾浓度的实时定量检测。通过侧向散射式光学设计和以数字信号处理器为核心的信号处理电路设计,得到了激光通过烟雾后透射光强和散射光强之间的线性关系。根据此线性关系将散射光强转换为透射光强,进而计算烟雾浓度,降低了运算复杂度,同时解决了低浓度烟雾的检测问题。最后将本系统与现有产品相比较,结果表明,该检测系统结构简单、稳定性和实时性好,具有良好的经济效益。

关键词 激光; 烟雾检测; 光电探测器; 遮光率; 数字信号处理器

中图分类号 TN249; O436.2 **文献标志码** A **doi:** 10.3788/LOP51.121203

A Novel Smoke Detection System Using Laser

Liu Feng¹ Liu Guangyuan¹ Long Zhengji¹ Jiang Xiaoping²

¹College of Electronic and Information Engineering, Southwest University, Chongqing 400715, China

²School of Physical Science and Technology, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract A novel smoke detection system using laser is developed to measure the smoke concentration in real-time and quantitatively. A linear relation between transmitted light and scattering light of laser through the smoke is established based on the design of lateral scattering optical structure and the circuit of digital signal processor as a core. According to this linear relationship, the transmitted light is converted to the scattering light, and then the concentration of smoke is calculated. In this way, the computational complexity is reduced, and the problem of measuring low concentration smoke is solved. Finally, compared with existing product, the result shows that this proposed system is simple in structure, stable, real-time and has good economic benefits.

Key words laser; smoke detection; photoelectric sensor; obscuration; digital signal processor

OCIS codes 120.4630; 220.4830; 250.0040; 290.5820

1 引言

烟雾探测器是早期火灾监测、预警的重要设备。目前,常见的烟雾探测器有离子感烟型探测器、光电感烟型探测器、激光感烟型探测器等^[1]。其中,离子感烟型探测器生产制造成本低,但对阴燃烟雾的检测灵敏度偏低,而且其电离室中采用了放射性元素,在生产、运输和使用过程中有污染环境的危险;光电感烟型探测器受环境变化影响较小,但这种烟雾检测方法采用的是普通的红外发射光源,对火灾产生的黑烟不易响应,无法达到早期报警的目的;激光感烟型探测器,对环境没有污染,对阴燃烟雾的检测灵敏度较高,在早期火灾的检测报警中应用广泛,但生产制造成本较高^[2]。

国内外不少学者已从多方面对激光感烟型探测器进行了研究,研究方法主要分为光散射法和光透射法两类。Nichols^[3], Loepfe等^[4], 疏学明^[5]利用激光散射特性设计了烟雾分析检测系统,使烟雾检测的灵敏度大大提高,但是系统结构和数据运算均比较复杂;冯继青等^[6], 邱健^[7]利用激光透射特性检测烟雾浓度,简化了系统结构,但是透射光对低浓度烟雾的检测灵敏度较低。为了提高低浓度烟雾检测的准确度和灵敏度,同时简化系统结构,降低运算复杂度,本文结合两种方法的优缺点,在对光学结构、电路和浓度计算三个方面进行研究的基础上,设计了一种新型的激光烟雾浓度检测系统。此系统可快速、准确地检测出烟雾浓度

收稿日期: 2014-05-20; 收到修改稿日期: 2013-07-08; 网络出版日期: 2014-11-12

作者简介: 刘峰(1988—),男,硕士研究生,主要从事信号与信息处理方面的研究。E-mail: shouhou@swu.edu.cn

导师简介: 刘光远(1961—),男,博士,教授,主要从事信号与信息处理方面的研究。E-mail: liugy@swu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: jungxp@163.com

并预警,也可应用于空气中其他烟尘的监测。

2 激光烟雾检测原理

激光束照射烟雾时,会发生吸收和散射,从而使光强在原来的传播方向上发生改变,并出现光强在其他方向上的重新分布。光信号经光电探测器转换为电信号,通过检测电信号的变化即可得出烟雾浓度的变化情况。

目前,国内外普遍采用光学方法替代原来的质量浓度法对烟雾浓度进行标定^[8-9],设为参数 R ,表示光通过1 m厚度的烟雾后被遮蔽的程度,计量单位为%/m,数学定义式为

$$R = \left(1 - \frac{P_o}{P_i}\right) \times 100\%, \quad (1)$$

式中 P_o/P_i 为透光率, P_i 为输入光功率, P_o 为光穿过1 m厚度烟雾后的输出光功率。

根据Lambert-Beer定律^[10],入射光强 I_o 与穿过烟雾后的透射光强 I_T 的关系为

$$I_T = I_o \exp(-KL_o N_p A_p), \quad (2)$$

式中 K 为消光系数, L_o 为激光束在含有烟雾的气体中所经过的路程长度, N_p 为单位体积微粒数, A_p 为微粒平均投影面积。对于同一种物质的烟雾其 K 值是一常数, N_p 与烟雾的体积浓度 C 成正比。据此,(2)式可改写为

$$\eta_o = \frac{I_T}{I_o} = \exp(-kL_o C), \quad (3)$$

式中 η_o 称为透光率, k 为常数。对应的遮光率 δ_o 为

$$\delta_o = 1 - \eta_o, \quad (4)$$

本系统烟雾检测腔中激光经过的实际长度 L_o 并非1 m,因此,根据 R 的定义,根据(3)式进行换算。若实际检测装置中激光通过长度为 L (单位为m)的烟雾时透光率为 η_o ,则长度为1 m时透光率为

$$\eta_{1m} = (\eta_o)^{1/L}, \quad (5)$$

对应的遮光率为

$$\delta_{1m} = 1 - (\eta_o)^{1/L}. \quad (6)$$

因此,理论上如果测出入射光强 I_o 和透射光强 I_T ,就可以计算出用 R 标定的烟雾浓度。但是,由于烟雾产生的特殊性,在其浓度较低时,因透射光强较大,入射光的衰减相对值较小,透射光检测的灵敏度较低,而散射光检测低浓度烟雾灵敏度较高。为了保证系统的灵敏度,尤其是对低浓度烟雾的高灵敏度检测,需要用散射光检测烟雾浓度。

对于同一浓度的烟雾,其对激光的散射光强和透射光强之间具有确定的数学关系。因此,可以通过确定散射光强和透射光强的函数关系,将散射光强换算为透射光强,进而计算烟雾浓度。

根据Mie理论,散射光强与入射光强的关系是确定的^[11]。因此,结合Lambert-Beer定律和Mie理论,可以确定散射光强和透射光强的函数关系。但是采用这种方式计算透射光强时,要求粒子严格呈球形,而且计算繁琐^[12]。为了降低运算复杂度,保证烟雾检测的实时性。本文同时测量激光穿过浓度变化的烟雾后的透射光强 I_T 和散射光强 I_s ,根据多次实验得到的大量散射光强和透射光强数据,拟合出两者的函数关系。

3 检测系统设计

图1为激光烟雾浓度检测系统结构示意图。系统主要包括三个部分:光学模块、电子模块和辅助部件。光学模块主要由激光器、检测腔和光电探测器三部分组成。激光器发出的激光照射在检测腔内的烟雾颗粒上,光电探测器将检测到的激光信号转换为电信号并输出。

电子模块主要由信号处理电路、数字信号处理器(DSP)、触摸屏和上位机组成。信号处理电路对光学模块的输出信号进行放大、A/D转换等处理。DSP作为系统主控,负责系统通信和数据处理。检测结果显示在触摸屏上或上传至上位机。

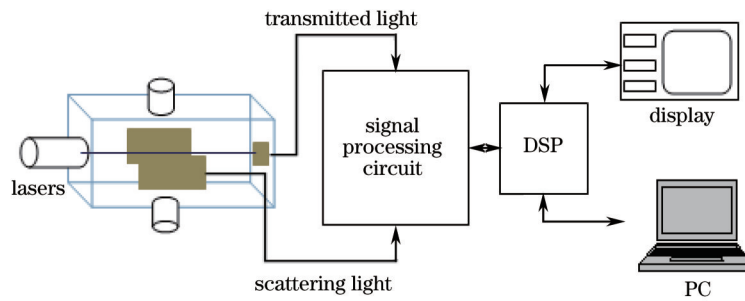


图1 激光烟雾浓度检测系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of smoke detection system using Laser

3.1 光学结构设计

经过多次实验分析和改进,系统中对烟雾的探测采用侧向散射式光学设计。图2为系统光学结构设计原理图。

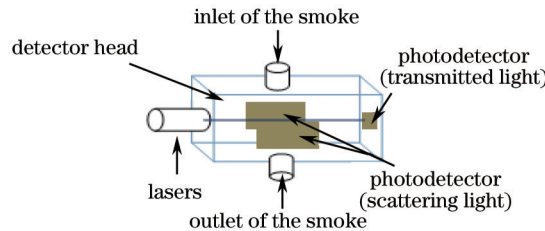


图2 光学结构原理图

Fig.2 Schematic diagram of optical structure

激光器发出的激光入射到检测腔内的烟雾颗粒上,产生散射光和透射光信号,光电探测器将检测到的光信号转换为电流信号。检测腔采用密封性能良好的材料制成,其内壁作氧化消光处理^[13]。光电探测器平行安装在检测腔相对的两侧内壁,安装位置如图2所示。光源采用中心波长为405 nm^[14-15]的蓝紫光半导体激光。光电探测器采用高响应度、低暗电流光电二极管芯片,散射光探测器为10 mm×20 mm的矩形封装,透射光探测器为5 mm×5 mm的圆形封装。

3.2 电子模块设计

电子模块主要由信号处理电路、DSP、触摸屏和上位机组成。信号处理电路包括放大电路和A/D转换电路两部分。光学部分的输出信号是电流信号,而A/D换器的输入要求是电压信号,因此需要把电流信号变成电压信号(*I/V*转换)。本系统采用两级放大电路实现信号的*I/V*转换和放大。前级放大电路将电流信号转换为电压信号,后级放大电路将电压信号放大至A/D转换芯片所需范围内。A/D转换芯片将主放大器输出的模拟信号转换成数字信号。A/D转换后的数字信号通过数据总线传递给处理器进行处理。系统采用DSP作为系统处理器^[16],以型号为TMS320F28335的DSP芯片作为系统控制核心主要完成以下工作:控制A/D转换芯片;对信号进行数字滤波;计算烟雾浓度;控制触摸显示屏;与上位机通信。

3.3 辅助部件

辅助部件主要由烟雾产生装置、烟雾取样管道、微型抽气泵组成,用于烟雾的产生和取样。烟雾由医用脱脂棉阴燃产生,采用负压法泵入,并将大于10 μm的颗粒滤除。

4 实验测试与结果分析

4.1 系统的零点漂移测试

系统开机后,在不通烟的情况下,测得稳定后10 min内的透射光强输出数据如图3所示,其零点的相对波动值(最大值与最小值之差除以平均值)不超过0.08%。

4.2 烟雾检测实验及结果分析

在室温为25 ℃,相对湿度为40%的实验室环境中将脱脂棉阴燃,使用本系统检测其烟雾浓度。对经多次测试的1175组透射光强与散射光强数据进行拟合,得到了两者的关系曲线,如图4所示。

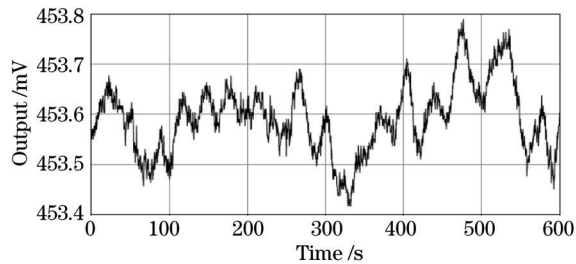


图3 未通烟时透射光强的输出数据

Fig.3 Output data of transmitted light without pumping in smoke

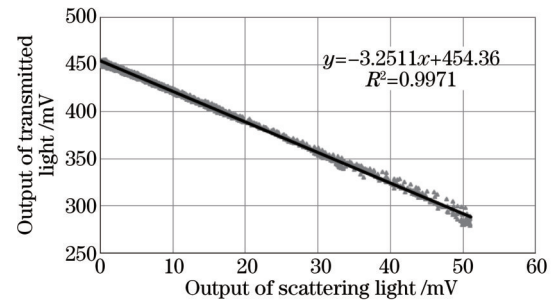


图4 透射光强与散射光强关系曲线

Fig.4 Relation curve of transmitted light and scattering light

从图4可以看出,此系统中透射光强与散射光强呈良好的线性关系。根据此关系可将散射光强换算为透射光强,进而用(6)式计算烟雾浓度。根据图4中的数据,分别用透射光和散射光信号计算0~20%/m范围内的烟雾浓度,得到输出电压与遮光率的关系曲线,如图5所示。

对比图5(a)和图5(b)可以看出,用散射光信号检测烟雾浓度更稳定可靠;对比图5(a)和图5(c)可以看出,用散射光信号检测低浓度烟雾灵敏度更高。

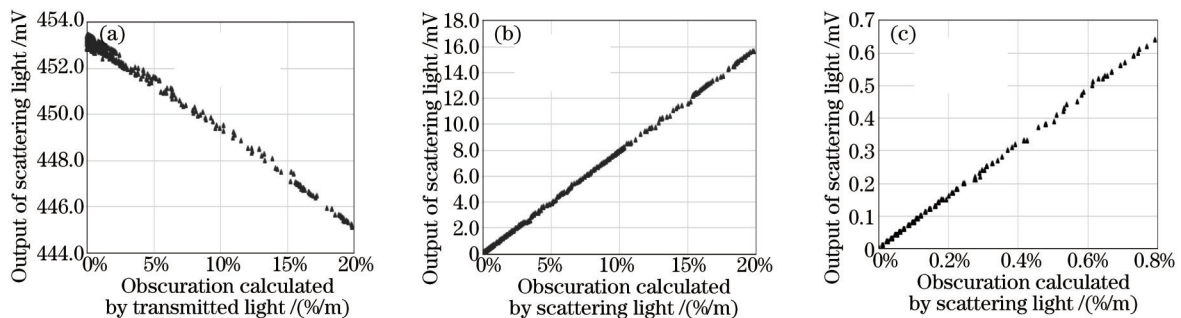


图5 遮光率与光强的关系曲线。(a) 透射光计算遮光率(0~20%/m);(b) 散射光计算遮光率(0~20%/m);(c) 散射光计算遮光率(0~0.8%/m)

Fig.5 Relation curve of obscuration and output voltage. (a) Obscuration calculated by transmitted light (0~20%/m); (b) obscuration calculated by scattering light (0~20%/m); (c) obscuration calculated by scattering light (0~0.8%/m)

本系统还可以检测浓度大于20%/m的烟雾。但在消防技术规范中,烟雾浓度的有效监测范围通常在0~20%/m;同时,随着烟雾浓度的增大,散射光强与透射光强之间的函数关系会逐渐偏离线性。

4.3 与现有产品对比

为了定量分析系统优势,本系统与艾克利斯公司生产的空气采样烟雾探测系统(Xtralis ICAM IFT-4)进行了对比测试。Xtralis ICAM IFT-4通过检测散射光计算烟雾浓度,在烟雾探测行业得到了广泛认证,但是该系统结构复杂且价格昂贵。同时用本系统和Xtralis ICAM IFT-4检测同一烟雾,结果如图6(a)所示。从图6(a)可以看出,本系统提前25 s检测到烟雾,实时性更好。为了进一步比较系统的稳定性,将两系统检测到烟雾的起点移至同一点,如图6(b)所示。从图6(b)可以看出,系统在保证高灵敏度的同时,稳定性更好。

通过与现有产品的对比可知,本系统投入实际应用时,可实时准确地检测烟雾浓度,并大大降低生产成本。

5 结 论

为实现对烟雾浓度的实时、高灵敏度检测,特别是对低烟雾浓度的有效检测,设计了一种新型的激光烟雾浓度检测系统。通过实验确定了激光通过烟雾后透射光强与散射光强的线性关系。根据此线性关系可以将散射光强转换为透射光强,进而计算烟雾浓度。测试结果表明,采用此方法检测烟雾浓度,运算复杂度低、灵敏度高。与现有产品相比,该系统成本低、实时性好、稳定性好,可以应用于火灾预警、环境监测等领域。

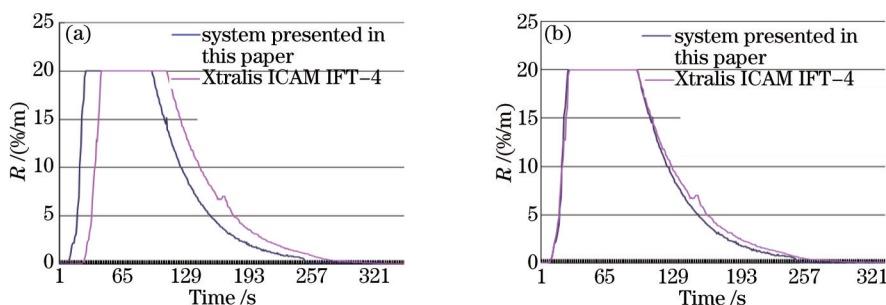


图6 本系统与现有产品对比结果图。(a) 平移前;(b) 平移后

Fig.6 Comparison between the existing product and the proposed system in this paper. (a) Before translation; (b) after translation

参考文献

- 1 Wu Longbiao, Yuan Hongyong. Fire Detection and Control Engineering[M]. Hefei: University of Science & Technology China Press, 1999. 41-78.
吴龙标, 袁宏永. 火灾检测与控制工程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999. 41-78.
- 2 Tong Ruitao. Research on Automatic Fire Detection Technology with Aspirating Smoke Detection Based on Light Scattering Principle[D]. Shenyang: Northeastern University, 2009. 1-5.
全瑞涛. 基于光散射原理的吸气式感烟火灾自动探测技术研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2009. 1-5.
- 3 T Nichols. Aspirating fire detection system[J]. Fire Safety Engineering, 1995, 2(1): 24-26.
- 4 M Loepfe, P Ryser, C Tompkin, *et al.*. Optical properties of fire and non-dire aerosols[J]. Fire Safety Journal, 1997,29: 185.
- 5 Shu Xueming. Study of Fire Smoke Particle Diameter Measurements and Light Scattering Characteristic[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2004. 23-26.
疏学明. 火灾烟雾颗粒粒径测量与散射特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004. 23-26.
- 6 Feng Jiqing, Gao Chunqing, Liu Yidong, *et al.*. Analysis of the characteristic of laser transmitting in smog[J]. Optical Technique, 2006, 32(6): 883-885.
冯继青, 高春清, 刘义东, 等. 激光对于烟雾的穿透特性分析[J]. 光学技术, 2006, 32(6): 883-885.
- 7 Qiu Jian. Design of On-Line Smoke Detecting System Base on Optics[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011.
邱健. 基于火灾烟雾的光学在线检测系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- 8 State Administration of Work Safety. MT382-2011 General Specifications of Mine Smoke Sensor[S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2011.
国家安全生产监督管理总局. MT382-2011 矿用烟雾传感器通用技术条件[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2011.
- 9 NFPA (National Fire Prevention Associati). NFPA 72:National Fire Alarm and Signaling Code and Handbook Set, 2010 Edition[S]. RITTENHOUSE BK DISTRIBUTORS, 2010.
- 10 Tang Zhenyu, Geng Haixiang, Yang Guangqun, *et al.*. Measurement method of powder concentration and development of the instrument[J]. Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition), 2000, 32(4): 28-31.
唐臻宇, 耿海翔, 杨光群, 等. 粉尘浓度测量方法的研究及测量仪器的研制[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2000, 32(4): 28-31.
- 11 C F Bohren, D R Huffman. Absorption and Scattering of Light by Small Particles[M]. New York: JohnWiley & Sons, 1983. 83-129.
- 12 Tang Hong, Sun Xiaogang, Yuan Guibin. Application on circular cytinder particle size distribution based on anomalous diffraction approximation[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(3): 411-416.
唐红, 孙晓刚, 原桂彬. 反常衍射近似在测量圆柱形粒子粒径分布中的应用[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 411-416.
- 13 Hu Jing, Yang Zongkai, Yang Daiqin, *et al.*. Smoke particles' recognition and Monte Carlo simulation of laser scattering [J]. Chinese J Lasers, 2002,29(10): 950-954.
胡静, 杨宗凯, 杨代琴, 等. 烟雾粒子的识别及其激光散射特性的蒙特卡罗模拟[J]. 中国激光, 2002, 29(10): 950-954.
- 14 Tang Pingyu, Zheng Jihong, Sun Guoqiang, *et al.*. Experimental study of four-channel frequency division multiplexed fluorescence confocal microscopy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(11): 1106003.

- 唐平玉, 郑继红, 孙国强, 等. 四路频分复用荧光共焦显微探测系统实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39 (11): 1106003.
- 15 Wang Gao, Feng Qiaoling, Xue Zhongjin, *et al.*. Research on detecting concentration of serum protein based on resonance rayleigh scattering[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(3): 752-755.
- 王 高, 冯巧玲, 薛忠晋, 等. 基于共振瑞利散射血清蛋白浓度检测的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(3): 752-755.
- 16 Hu Xiuhan, Zhou Tianhua, He Yan, *et al.*. Design and analysis of underwater optical communication transceiver system based on digital signal processor[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(3): 0305003.
- 胡秀寒, 周田华, 贺 岩, 等. 基于数字信号处理机的水下光通信收发系统设计及分析[J]. 中国激光, 2013, 40(3): 0305003.