

文章编号: 1001-5078 (2006) 08-0675-03

固体发动机羽烟的激光透过率动态测试

张 波, 杨坤涛, 张南洋生

(华中科技大学光电子工程系, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 文章分析了固体发动机羽烟对激光的衰减原理, 提出了采用双光源透射法对固体发动机羽烟透过率进行动态测试的方法, 介绍了 1064nm 激光羽烟动态测试系统的结构和光电检测原理。经实验标定, 测量误差达 1%, 通过现场测试表明, 该系统满足了发展低特征信号推进剂研究的需要。

关键词: 羽烟; 动态测量; 透过率; 红外激光

中图分类号: TJ06 **文献标识码:** A

Laser Transmittance Dynamic Measurement Technology on Plumes of Solid-propellant Motor

ZHANG Bo, YANG Kun-tao, ZHANG Nan-yang-sheng

(Department of Optoelectronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The 1064nm infrared laser plume measuring system is developed to evaluate the performance of solid propellant. In the paper the laser transmittance which the infrared laser permeates plumes exhausted by solid-propellant motor is analyzed and a dynamic measuring method with double lamp-house is suggested. The principle of photoelectric measurement and the structure of the 1064nm laser plumes transmittance measuring system is introduced. The measuring error is less than 1% by experiment demarcating. The repeatability and precision met the demand of research on solid-propellant with low characteristic signal.

Key words: plumes; dynamic measurement; transmittance; infrared laser

1 引言

固体发动机羽烟是指固体推进剂在燃烧时产生的烟雾和火焰^[1], 羽烟的透过率测试是推进剂研制中的重要课题。本文选取 1064nm 波长激光^[2], 介绍了我们研制的基于固体发动机羽烟的激光透过率动态测试系统。

2 固体发动机羽烟对激光的衰减

根据北约宇航研究和发展咨询小组 (AGARD) 的定义^[3], 羽烟主要分为一次烟和二次烟两种。一次烟主要来自推进剂燃烧产生的固体颗粒以及来自包覆层裂解、燃气与发动机接触的其它部件, 其主要是金属氧化物和碳粒子; 二次烟主要指高氯酸铵及硝酸推进剂燃烧产生的氯化氢气体, 喷出喷管后, 在特定的湿度和温度条件下, 与空气相结合形成 H₂O 及 HCl 的共沸液滴烟云。

羽烟中含有由许多固体微粒、液体微粒以及与空气作用形成的人工气溶胶体系, 因此当激光入射到羽烟中时^[4], 羽烟对其产生吸收和散射, 吸收作

用使得激光的能量发生衰减, 散射作用使得激光的传输方向发生变化, 从而造成沿原来方向传输的激光能量发生衰减。羽烟对不同激光的衰减符合“朗伯-比尔定律”^[5]

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp[-\mu_e(\lambda) L] \quad (1)$$

式 (1) 中 $I(\lambda)$ 为介质透射光强; $I_0(\lambda)$ 为介质入射光强; $\mu_e(\lambda)$ 为消光系数; c 为介质的平均密度; L 为介质内的光程长。激光通过羽烟的散射和吸收, 分别用散射系数 μ_s 和吸收系数 μ_a 表示, 由于羽烟的浓度较大, 复散射有可能发生, 这里用校正因子 R 来校正, 它们与消光系数的关系为 $\mu_e = \mu_s + \mu_a + R\mu_s$ 。由上式可以得到羽烟的透过率:

$$T = \frac{I(\lambda)}{I_0(\lambda)} = \exp[-\mu_e(\lambda) L] \quad (2)$$

作者简介: 张 波 (1972-), 男, 讲师, 硕士, 主要从事光电检测与信号处理方面的研究。E-mail: lzhangbo@sina.com

收稿日期: 2006-01-06

3 激光羽烟透过率动态测试系统

需要指出的是:在羽烟中^[6],由于碰并、凝并、沉降和扩散等作用,将引起其溶胶粒子浓度的减小,其消光系数也随之减少,对激光遮蔽作用也在降低,此过程的综合作用数学模型至今尚未建立,因此这里无法给出其数学描述。羽烟的本质和形成方法决定了羽烟的形成及消失是一个动态过程,因此测试激光对羽烟的透过率必须在动态下进行,要求有严格的测试条件和快速的测试方法。

3.1 激光羽烟透过率动态测试系统的结构

为了对羽烟进行动态测试,我们设计了如图 1 所示的测试系统,测试系统由发射部分、烟箱和接收部分组成。发射部分对已调制的 1064nm 激光进行扩束准直发射出去,经烟箱后到接收部分,在接收部分由光电二极管将接收到激光的能量转换为电信号,经放大、信号处理和采样转换为数字信号送入计算机。

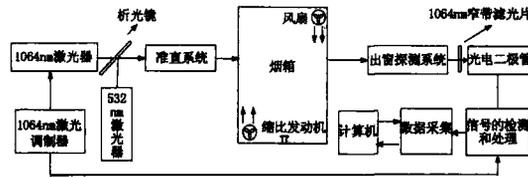


图 1 激光羽烟透过率动态测试系统结构示意图

本测试系统的发射部分采用双光源设计,其中 1064nm 激光器是测量用光源,532nm 激光器用于对光路的调整(因为 1064nm 的红外激光人眼看不到),通过对 1064nm 波长激光全透、532nm 波长激光全反的特种波长折光镜,使入射到准直系统的两束激光同轴,扩束准直系统采用倒置的伽利略望远系统。调制器用于对 1064nm 激光进行调制。烟箱采用中国航天科技集团公司四院四十二所的烟箱^[7],建立了发动机环境试验箱,该环境试验箱主要包括箱体和温湿度调节单元,采用缩比发动机用于模拟固体推进剂羽烟特征信号的产生条件。接收部分采用出窗探测系统,一方面使入射光有确定的形式和方向,一方面收集红外激光能量,将其聚集到光电探测器的灵敏面上。在接收部分中放置 1064nm 窄带滤光片,从连续光谱中滤取所需波长范围内的光信号,消除背景杂散光的干扰,提高系统性能。

3.2 系统的光电检测、数据采集和处理

测试系统主要是测试 1064nm 激光通过羽烟到达接收系统时的强度变化情况。为了有效地去除背景噪声的影响,这里采用变换的方法将激光调制交流信号后,再将其发射出去,在接收端用锁定放大器的相关检测技术滤除背景噪声和干扰,提高测量精

度。通过数据采集和通讯传输将数据送入计算机实现数据的存储、处理和显示等功能。

3.2.1 激光器的调制

根据调制的需要,系统选择 VA - 1064 - 10MW 型号的 1064nm 红外激光器,功率 0 ~ 10mW 可调,激光器的电源提供 TTL 接口供调制用,调制频率最高 50kHz,考虑到系统要求的采样频率为 1kHz,这里对激光器的调制频率选为 10kHz。调制电路如图 2 所示:利用 74HCO₄ 和 100kHz 晶振组成的振荡器产生频率为 100kHz 的方波信号,经十进制计数器 74LS162 分频后变为 10kHz 的调制信号分两路传送,一路经 7406 驱动后送入 1064nm 激光器电源调制的 TTL 输入口;另一路送入 MAX485,转换为差分信号通过 485 总线传输到检测电路,作为锁相放大器的参考信号。

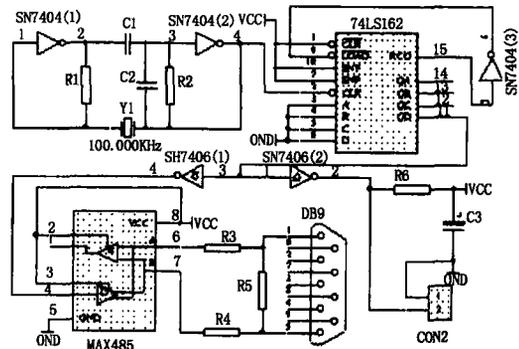


图 2 1064nm 激光器的调制电路

3.2.2 信号检测

光电检测采用的传感器为 GT102 型硅光电二极管,它的工作波长为 1.06μm,检测原理如图 3 所示:采用光电二极管将接收到的激光能量转换为电流,通过 I/V 转换电路将电流信号转换为电压,滤波电路采用中心频率为 10kHz 的有源带通滤波器,信号经滤波和 AC 放大后送入锁相放大器;由激光器的调制端通过 485 总线传送的与激光器调制信号同步的信号,通过 MAX485 芯片转换为 TTL 电平,经电压比较器后变为 ±5V 的方波信号送入锁相放大器作为参考信号,两路信号在锁相放大器中进行相关函数运算,滤除背景及羽烟辐射产生的 1064nm 的红外干扰,锁相放大器的输出信号经放大和积分后送入数据采集系统。

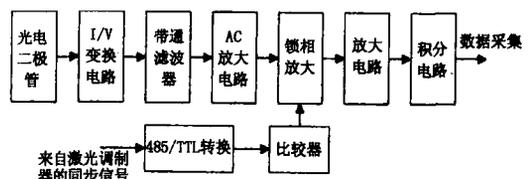


图 3 光电检测系统电路方框图

3.2.3 数据的采集和处理

数据的采集和处理由上位机和下位机组成,上位机采用 PC 机主要完成数据的处理和分析,下位

机采用单片机主要完成数据的采集和通讯,如图 4 所示:下位机采用 89S2051 单片机控制 12 位的 A/D 芯片,完成对积分后的模拟信号进行采样和 A/D 转换,采样频率为 1kHz。单片机将接收到的数字信号通过串行通讯送到 PC 机,串行通讯采用 485 总线的全双工通讯,通讯距离可达 1200m。由 485 总线传送的数据经 485/232 转换后送入 PC 机,在 PC 机上将接收的数据通过自编的软件实现数据的通讯、处理、显示、信号的标定和动态曲线的绘制等功能。

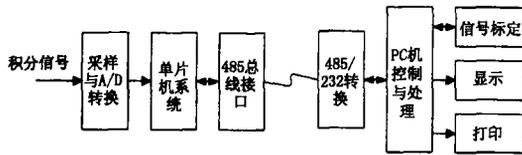


图 4 数据的采集和处理原理框图

系统调试时,在 PC 机上将取得的 A/D 采样电压值与利用光功率计测量 1064nm 激光的能量值采用最小二乘进行了数据拟合,对光电二极管的非线性效应带来的误差进行修正。

4 测试结果及分析

4.1 系统标定

在无烟雾和无风环境下,发射端距接收端的距离为 25m,激光器开机预热 10min 后进行标定,分别在光路中加入透过率为 64%、34% 的衰减片和无衰减片情况下测量 1min,测试曲线如图 5 所示。

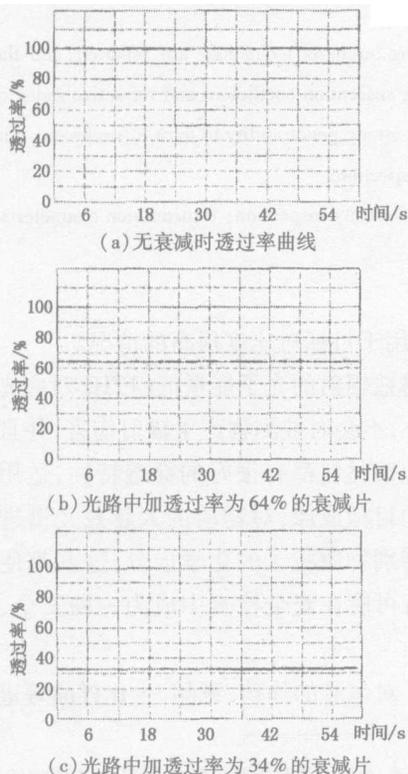


图 5 标定曲线

读取存储在计算机中测试数据的最大值和最小值。测试结果如表 1 所示。

由表 1 可以看出:在无烟雾无风环境下,发射系统

和接收系统相距 25m 时,系统的最大不稳定性为 0.5%,考虑到标定用衰减片的不均匀性误差小于 0.2%,系统的测量误差可达 1% 以内。

表 1 无烟雾、无风条件下测试结果

	无衰减片	透过率为 64% 衰减片	透过率为 34% 的衰减片
标定电压 (V)	4.000	4.000	4.000
信号最大电压 (V)	4.020	2.590	1.390
信号最小电压 (V)	4.000	2.570	1.370
静态最大不稳定性 (%)	0.5%	0.5%	0.5%

4.2 动态测试

为了检测系统在实际使用中的动态性能,我们在羽烟箱条件下对某推进剂进行了动态测试,测试时间为 5min。可以看到图 5 中曲线 10 到 30s 段的透过率偏小,而且变化较大,这主要是发动机点火药的影响,发动机使用黑火药点火,黑火药燃烧时产生大量的炭粒,使透过率减小;在测试过程中发动机会产生较大的震动,使测量系统支架产生微小的变形,影响测量结果的准确性;另外,在烟箱中风扇吹动产生的气流对实验也会引起曲线的微小波动。实验动态测试结果和该推进剂的理论估计情况相一致。

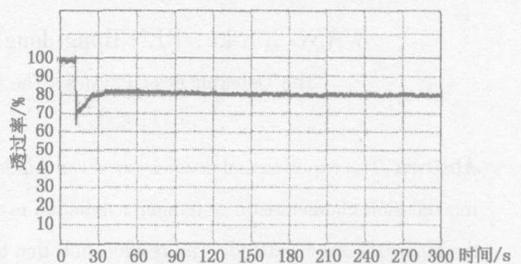


图 6 某推进剂羽烟透过率测试曲线图

6 结束语

本文介绍的羽烟透过率动态测量方法,即可以在烟箱条件下测试,也可以在外场环境下测试,不仅满足了发展低特征信号推进剂研究的需要,也可以用于烟幕、大气等透过率的测量。

参考文献:

- [1] A Rao, S Mahulikar Aircraft Powerplant and Plume Infrared Signature Modelling and Analysis [Z]. A AA - 2005 - 221.
- [2] 张翼飞,邓方林. 激光制导技术的应用及发展趋势 [J]. 中国航天 2004(6): 40 - 43.
- [3] A 达维纳. 固体火箭推进剂技术 [M]. 北京:宇航出版社,1997. 64 - 88.
- [4] Muphy, P J Reed, R A Cox Measurement and analysis of laser transmission through solid propellant rocket motor exhaust plumes [Z]. A AA - 1993 - 2886.
- [5] 姚禄玖,高钧麟,肖凯涛,等. 烟幕理论与测试技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2004, 37 - 55.
- [6] Mills T E B ishop, P J Minardi The measurement of the distribution of the extinction coefficients of laser produced aluminum plumes [Z]. A AA - 1993 - 3228.
- [7] 张劲民,袁华,何铁山,等. 烟箱法测试固体推进剂光学透过率 [J]. 火炸药学报. 2005, 28(1): 12 - 14.