

文章编号: 1001-4322(2001)06-0683-04

固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光小信号增益测量

汤海滨¹, 王云萍², 祝寿恩¹, 姜宗福²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083; 2. 国防科学技术大学 理学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 介绍了固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光小信号增益测量的原理、方法及实验系统, 重点说明小信号增益测量光路设计、热敏电阻红外探测器工作原理、增益输出信号滤波和放大电路设计及数据采集系统的硬件配置和软件编制原则, 给出典型实验测量结果。实验证明, 采用放大法可较为准确的测量固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光小信号增益。

关键词: 燃烧驱动; 气动激光器; 小信号增益测量

中图分类号: TN 248. 22; TN 249 **文献标识码:** A

固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光 (SPCD GDL) 是一种特点突出的激光系统^[1], 其原理是以固体火箭推进剂燃烧放热为激光的能源, 以其燃烧产物(固体推进剂燃气)为激光介质主体, 再加入适量燃气中缺少的气体成分, 采用超音速掺混技术均匀混合后形成激光工作介质, 介质流经喷管排在谐振腔产生 10.6 μm 连续波激光输出, 废气由排气段排出。

小信号增益作为描述激光介质微观统计状态及激光器宏观性能的基本参量, 是激光器研究中不可缺少的。小信号增益可用来研究能级的粒子数分布、介质的弛豫过程, 寻求激光介质最佳的组分配比, 利用实测的小信号增益最终优化激光器的设计, 提高激光器的功率和效率。文章介绍 10kW 级固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光器^[2]小信号增益的测量。

1 介质增益、小信号增益及测量方法^[3]

激光器光腔内激活介质对光强度的放大作用就是介质的增益。设强度为 I 的光束通过激活介质 dx 后, 其强度增加 dI , 令

$$dI/I = \alpha dx \quad (1)$$

式中: α 称为介质增益系数, 表示在光的单位传播距离内光强增加的百分比。当光强度 I 趋于无限小时, 的增益称为小信号增益, 小信号增益与光强无关, 只是介质本身的特性, 它与频率、不同能级上的数密度有关, 表征激光介质的激活状态。

小信号增益可根据量子理论推导得出

$$\alpha_0 = \kappa(\nu) \frac{1}{n_0} \left[\frac{g_1}{g_2} n_2 - n_1 \right] \quad (2)$$

式中: α_0 为小信号增益; $\kappa(\nu)$ 为粒子数在玻尔兹曼分布时, 介质对于频率为 ν 光波的吸收系数; n_0 为介质数密度; n_2 为介质中处于高能级上的数密度; n_1 为介质中处于低能级上的数密度; g_1 和 g_2 分别为低能级 E_1 和高能级 E_2 的统计权重。

测量回路的小信号增益, 主要有衰减法和放大法。衰减法利用激光器阈值条件中小信号增益和损失系数之间的关系, 在光路中插入衰减片或加大镜面损失, 从有激光输出直至无激光输出, 在此转折点上, 的条件应满足阈值条件, 若知损失系数, 可算出介质的小信号增益。放大法是用一个同样频率的标准小功率激光光源产生一个稳定、单频的激光束, 一路通过待测回路, 另一路不通过待测回路, 比较两束光强

度,可推算出待测回路的小信号增益。放大法技术上较衰减法复杂,但能给出谱线中反映粒子跃迁过程的许多细节。本文采用放大法测量了固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光器小信号增益。

2 小信号增益测量系统分析

2.1 增益测量光路^[4]

小信号增益测量光路示意图见图 1。

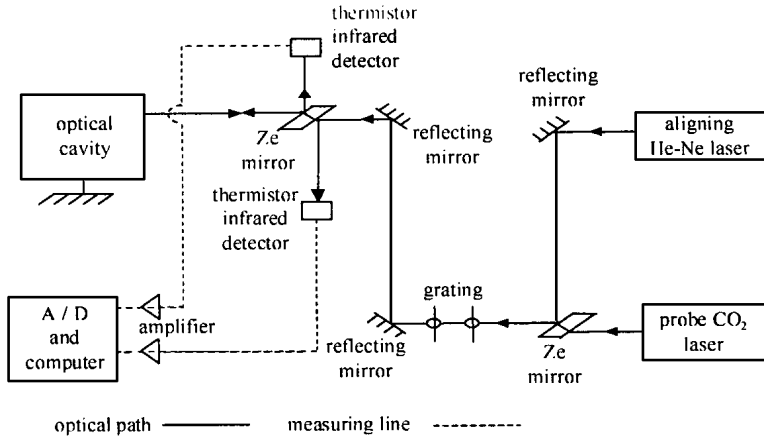


Fig. 1 Optical path and measuring line of small-signal gain

图 1 小信号增益测量光路示意图

氦氖激光器的氦氖激光用来引导不可见的标准 CO₂ 激光来调节光路,其中标准 CO₂ 激光器输出激光功率为 2~4W,衰减后入射激光功率 10~20mW。分束镜采用锗镜,对 CO₂ 光和氦氖光均有一定的透过率和反射率,其中对 CO₂ 光透射 60%,反射 40%。两个热敏探头分别接收通过光腔和未通过光腔的 CO₂ 光,并将光信号转换为电信号,经放大器和 A/D 变换后进入计算机采集。光栅的作用是衰减并引导输出光。

2.2 热敏电阻红外探测器及滤波放大电路

增益测量热敏元件是关键测量器件,采用由中科院上海技术物理研究所研制的热敏电阻红外探测器 RM-2221^[4],该探测器接受热辐射能并输出电信号,其敏感元件由锰、镍、钴氧化物按一定比例制成,工作原理见图 2。

当敏感元件 R₁ 不受辐照时,S 点处于电位 V_{s0},当 R₁ 接受辐照后,其温度发生变化,从而引起 R₁ 电阻值发生变化,S 点电位变为 V_{s1},通过 S 点电位变化能探测出红外辐射。R₂ 为补偿元件,用来补偿环境温度变化引起的影响。热敏电阻红外探测器内部 A, S 接敏感元件,B, S 接补偿元件。

由于光信号很弱,热敏电阻输出的信号几乎被噪声信号淹没,必须将其滤波放大,实测放大滤波电路见图 3,其中,A, B, S 点同图 2 一致。

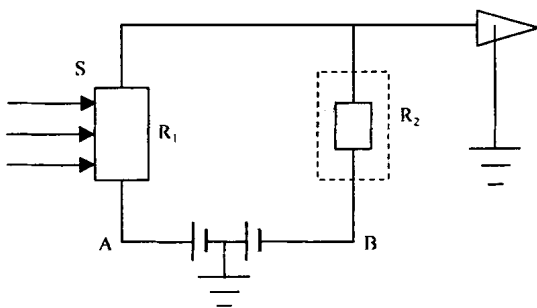


Fig. 2 Thermistor infrared detector operating circuit

图 2 热敏电阻红外探测器工作电路

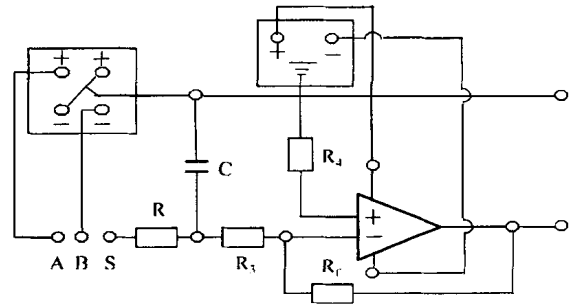


Fig. 3 Filter and amplifier circuit

图 3 放大滤波电路

2.3 数据采集系统及软硬件^[5]

A/D 转换采用研华的 PCL 818-HG 万用测量卡, 采集精度为 12 位。放大器采用 BH8720 高精度低电平直流放大器, 在 0~70 温度域内输入失调电压漂移典型值为 ±0.4 μV/℃, 折合到输入端的噪声电压典型值为 1 μV (P-P), 直流共模抑制比为 120 dB, 输入共模电压范围 ±10 V, 放大器增益仅通过一个多接电阻可在 1~1 000 倍范围内方便调整。放大器本身具有良好的屏蔽措施, 有效防止了杂散差模干扰, 并具有良好的短路保护功能。电源采用高精度 DH1715-2 型双稳压稳流电源。

SPCD GDL 工作时间较短, 推进剂燃烧大约 0.7 s 左右, 所以将采集系统工作时间暂定为 2.5 s。根据冷试结果分析, 气路开启 0.5 s 后压强达到掺混要求的理想值, 所以点火延迟时间定为 0.5 s。由于工作时间较短, 所以希望较高的采样频率, 香农定理只给出了选择采样频率的指导原则, 但在实际应用中并不是按采样定理首先将连续信号频谱的最高频率测出, 然后再确定采样频率, 一般情况总是尽量使采样频率比信号频谱的最高频率大。本系统的采样频率为 2 500 Hz。

采用 C++ 编写的测量软件不仅实现小信号增益的测量, 还同步实现不同点的压力、温度等参数采集及控制高压气路电磁阀开启和点火。

3 实验条件和结果

实验条件如下: 采样时间为 2.5 s, 测量光点距喷管出口端面距离为 14 mm, 喷管个数为 9, 谐振腔长度为 0.4 m, 固体推进剂种类为 SS-2, 固体推进剂总质量为 0.375 kg, 掺混空气进口压力为 13.4 MPa, 燃烧室主喷管直径为 10.9 mm, 掺混器喷管直径(三排)分别为 1.5, 2.0, 2.0 mm。

实测小信号增益 α 按下式计算

$$\alpha = \frac{1}{2L} \ln\left(\frac{I_1}{I_0}\right) \tag{3}$$

式中: L 为增益区长度(实验中为 0.185 m); I₁, I₀ 分别为通过和未通过谐振腔的探测信号。

多次实验测得基本相同的小信号增益, 实验结果重复性较好。典型实验曲线见图 4 燃烧室压强和温度曲线, 对应图 5 小信号增益曲线, 其中空气与燃气流量比为 3.8, 喷管排前的压强为 3.8 MPa。

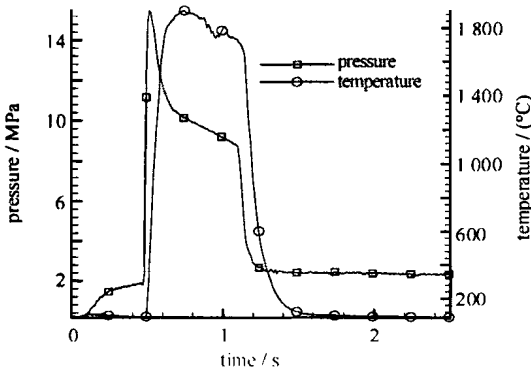


Fig. 4 Chamber pressure and temperature measuring curve

图 4 燃烧室压强和温度曲线

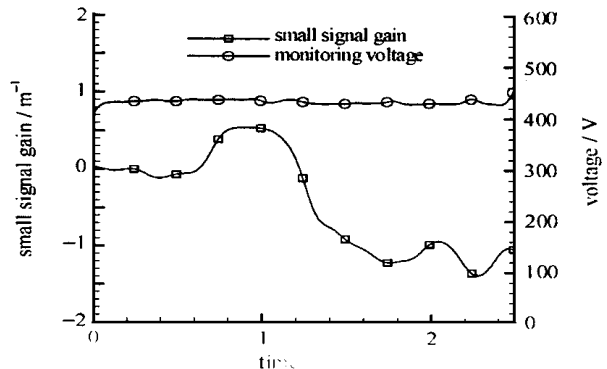


Fig. 5 Small-signal gain measuring curve

图 5 小信号增益曲线

由图 5 实验曲线看出, 激光器工作期间(0.5~1.2 s)小信号增益增大, 最大值接近 0.6。固体推进剂燃烧结束(1.2 s)后, 增益值下降较工作前的初始值小, 分析认为主要由于推进剂燃烧结束, 燃气组分变化较大, 非激活介质成份增加, 如水份含量过大, CO₂ 含量降低, 一部分能量被吸收, 造成增益下降, 另外激光器几何尺寸及气动力学等因素对其也有一定影响。

4 结 论

采用增益的放大法, 合理设计小信号增益测量光路, 增益输出信号滤波和放大电路及选取增益敏感元件、放大器、A/D 等硬件和软件, 成功的测量了固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光小信号增益。采用信号滤波和放大后的输出信号尚存在一定的低频(主要为 50 Hz)干扰, 分析可能是由于接地不完善或整

套实验系统工作等原因引起,有待进一步研究解决。实验进一步采用数字滤波,不影响数据的采集和读取。

参考文献:

- [1] Boreisho A S, Leonov A F. Active medial inhomogeneities of gas flow laser[R]. AIAA 93-3166, 1993
- [2] 刘 宇, 李 强, 祝寿恩, 等. 10kW 连续波固体推进剂燃烧驱动CO₂ 气动激光实验研究[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(4): 515—518 (Liu Y, Li L, Zhu S E, et al. Experimental study on 10kW solid propellant combustion driven CW -CO₂ gasdynamic laser. *High power laser and particle beams*, 1997, 9(4): 515—518)
- [3] 谈 洪, 朱宗厚. 气动激光技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1977. (Tan H, Zhu Z H. *Gasdynamic laser technology*. Beijing: National Defense Industry Press, 1977)
- [4] 王云萍. 燃烧驱动气动CO₂ 激光器小信号增益的研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学 理学院, 2000 (Wang Y P. Small-signal gain investigation of combustion driven CO₂ gasdynamic laser. Thesis for the Master Degree, Institute of Science, National Univ. of Defense Technology, 2000)
- [5] 汤海滨, 祝寿恩, 刘 宇. 10KW 固体推进剂燃烧驱动CO₂ 气动激光数据采集系统[J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(2): 159—164 (Tang H B, Zhu S E, Liu Y. Data acquisition system of solid propellant combustion driven CW -CO₂ gasdynamic laser. *High power laser and particle beams*, 1999, 11(2): 159—164)

Measurement of small-signal gain on solid propellant combustion driven CO₂ gasdynamic laser

TANG Hai-bin¹, WANG Yun-ping², ZHU Shou-en¹, JIANG Zong-fu²

(1. Institute of Aeronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Institute of Science, National University of Defence Technology, Changsha 410073, China)

Abstract An introduction is given to the principle, method and experiment system of measurement of small-signal gain on solid propellant combustion driven CO₂ gasdynamic laser. Measure optical path design of small-signal gain, operating principle of thermistor infrared detector, design of filter and amplifier circuit of gain output signal and hardware configuration as well as rules and methods of software development of data acquisition system are mainly presented. The typical experimental results are also given, which show that the amplification method can measure the small-signal gain accurately.

Key words: combustion-driven; gasdynamic laser; small-signal gain measurement