

文章编号: 0258-7025(2002)05-0393-04

固体推进剂燃烧驱动的 CO₂ 气动激光器 小信号增益的计算与实验研究

汤海滨, 祝寿恩, 李 , 张景升

(北京航空航天大学宇航学院, 北京 100083)

摘要 采用喷管准一维定常非平衡流场方程耦合三振型三温度模型建立的振动弛豫方程, 对固体推进剂燃烧驱动的 CO₂ 气动激光器的小信号增益进行了计算, 计算结果同实验测量结果进行了对比, 分析了影响其性能的各种因素。

关键词 燃烧驱动, 气动激光器, 小信号增益

中图分类号 TN 248.2⁺2 **文献标识码** A

Calculation and Experiment of Small-signal Gain on Solid Propellant Combustion Driven CO₂ Gasdynamic Laser

TANG Hai-bin, ZHU Shou-en, LI Lu, ZHANG Jing-sheng

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, School of Astronautics, Beijing 100083)

Abstract Based on the nozzle flow field equations on the assumption of quasi-one-dimension, steady, non-balance flow and vibration relaxation equations build by 3-vibration and 3-temperature model, the small-signal gain and some influence parameters are calculated and analyzed. The results of calculation and measurement are compared.

Key words combustion-driven, gas-dynamic laser, small-signal gain

固体推进剂是一种高能燃料, 不需要加入氧化剂即可燃烧, 采用燃烧室内固体推进剂的燃烧产物和空气在掺混室进行超音速掺混补燃, 能够获得合适的激光工作介质, 介质流经喷管排入谐振腔产生 10.6 μm 连续波激光输出。固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光是一种很有特点的激光系统^[1]。

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份配比, 利用计算和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^[2]。本文介绍

在我校 10 kW 级固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光实验台^[3]的基础上对小信号增益进行计算和实验测量。

1 小信号增益计算

固体推进剂燃烧驱动 CO₂ 气动激光小信号增益的计算方法为: 首先计算固体推进剂在燃烧室内的平衡组份, 利用组份配比求解耦合振动弛豫方程的喷管非平衡流气动方程, 将求解获得的参量代入由量子理论推导的小信号增益计算公式获得小信号增益的计算值。

1.1 固体推进剂燃烧组份计算

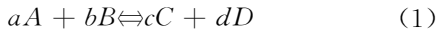
利用化学平衡法^[4]求解燃烧组份方程组。在含

收稿日期: 2001-03-05; 收到修改稿日期: 2001-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 69788004)资助项目。

作者简介: 汤海滨(1970—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 工程师, 博士研究生, 主要从事高功率气动激光和电推进研究。E-mail: bhthb@263.net

有 C, H, O 和 N 四种原子的燃料中, 忽略次要组份, 最终燃烧产物为 $\text{CO}_2, \text{N}_2, \text{CO}, \text{H}_2\text{O}, \text{H}_2, \text{O}_2$, 它们是构成激光介质的主要成分。对于以下化学反应式



化学平衡常数 K 为

$$K = \frac{n_C^c n_D^d}{n_A^a n_B^b} \quad (2)$$

n 为对应物质的摩尔浓度。(2) 式同质量守恒方程构成封闭方程组。

化学平衡常数 K 是温度的函数, 计算时首先给定温度值, 利用燃烧产物总焓不变作为控制条件, 通过计算前后两次的误差来控制计算精度。

1.2 气动方程耦合弛豫方程计算

对于 $\text{CO}_2\text{-N}_2\text{-H}_2\text{O}$ 混合气体分子振动弛豫过程, 建立的三振型三温度模型^[5]见图 1。

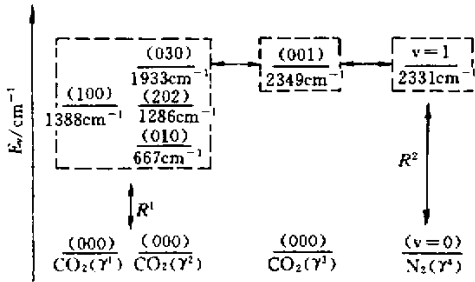


图 1 三振型三温度模型振动图

Fig. 1 3-vibration and 3-temperature model

假定: 1) 激光器喷管在垂直流动方向的参量为常数(准一维流动); 2) 燃气为理想气体, 忽略流场的不均匀性, 不考虑热传导和扩散的影响; 3) 比热比 γ 为常数。用于数值积分的一维气动方程耦合以三振型三温度模型建立的弛豫方程组守恒形式为

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = G \quad (3)$$

$$U = \begin{bmatrix} \rho A \\ \rho u A \\ \rho A \left(E + \frac{u^2}{2} \right) \\ \rho E_2 A \\ \rho E_3 A \\ \rho E_4 A \end{bmatrix} \quad F = \begin{bmatrix} \rho u A \\ (\rho u^2 + P) A \\ \rho A u \left(H + \frac{u^2}{2} \right) \\ \rho E_2 u A \\ \rho E_3 u A \\ \rho E_4 u A \end{bmatrix}$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 \\ P \frac{\partial A}{\partial x} \\ 0 \\ \rho A \alpha \\ \rho A \beta \\ \rho A \gamma \end{bmatrix}$$

其中

$$P = \rho RT \quad (4)$$

$$H = E + \frac{P}{\rho} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{dE_2}{dt} \quad (6)$$

$$\beta = \frac{dE_3}{dt} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{dE_N}{dt} \quad (8)$$

A 为喷管截面积, ρ, u, P, T 分别为气体密度、流速、压力和温度, E 为混合气体总内能, R 为气体常数, $E_i (i = 1, 4)$ 分别代表 CO_2 分子 ν_1, ν_2, ν_3 和 N_2 ($\nu = 1$) 能级的振动能。

方程组封闭, 方程无量纲化, 采用 MacCormack 显式差分格式进行数值差分计算可求得 $\rho, u, T, E_2, E_3, E_N$ 等未知量。

1.3 小信号增益计算

根据量子力学理论, 小信号增益的表达式为^[6]

$$G_0(\nu) = \frac{c^2}{8\pi^{3/2}\nu^2} A_{mn} \left(N_m - \frac{g_m}{g_n} N_n \right) \frac{\alpha}{\Delta\nu_c} H(\alpha, 0) \quad (9)$$

式中, A_{mn} 为爱因斯坦自发辐射系数, N_m, N_n 为上下能级粒子数密度, g_m, g_n 为统计权重, $H(\alpha, 0)$ 为 Foigt 函数, 碰撞加宽谱线半宽 $\Delta\nu_c$ 按下式估算

$$\Delta\nu_c = \frac{P \cdot 300}{T} \Sigma(\Delta\nu_c^0)_j \xi_j \quad (10)$$

ξ_j 为各组份的摩尔百分数, $\Delta\nu_c^0$ 为各分子在温度 $T = 300$ K 时的碰撞半宽。

2 小信号增益实验测量

实验采用放大法^[2]测量小信号增益, 其原理是用一个同样介质(这里采用 CO_2 介质)的标准小功率激光光源产生一个稳定、单频的激光束, 通过待测回路, 比较通过待测回路和不通过待测回路的两束光强度, 推算出待测回路的小信号增益。

燃烧驱动所用固体推进剂燃料为 SS-2, 其成分

为: 硝化棉: 55.0%, 硝化甘油: 29.3%, 二硝基甲苯: 10.0%, 二号中定剂: 3.0%, 苯二甲酸铅: 0.9%, 凡士林: 1.3%, 石墨: 0.5%。

2.1 测量小信号增益的光路及电路

小信号增益测量光路示意图见图 2。

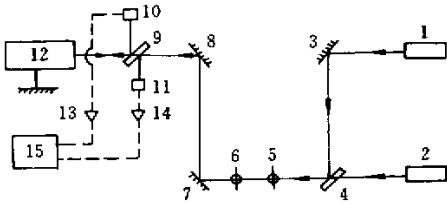


图 2 小信号增益测量光路示意图

1: 准直用 He-Ne 激光器; 2: CO₂ 探测激光器; 3, 7, 8: 反射镜; 4, 9: Ze 镜; 5, 6: 光栅; 10, 11: 热敏探头; 12: 光腔; 13, 14: 放大器; 15: A/D 及计算机。——: 光路; ----: 测量线路

Fig. 2 Optical path for the measuring of small-signal gain
1: aligning He-Ne laser; 2: probe CO₂ laser; 3, 7, 8: reflecting mirror; 4, 9: Ze mirror; 5, 6: grating; 10, 11: thermistor infrared detector; 12: optical cavity; 13, 14: amplifier; 15: A/D and computer. ——: optical path; ----: measuring line

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 2~4 W, 衰减后入射激光功率 10~20 mW。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。热敏探头 10, 11 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, 滤波并放大接 A/D 进入计算机采集。光栅的作用是衰减并引导输出光。

2.2 小信号增益的计算及结果

小信号增益 G 按下式计算

$$G = \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{I_1}{I_0} \right) \quad (11)$$

式中, L 为增益区长度 ($L = 0.175$ m), I_1, I_0 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 3。可以看出, 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 m^{-1} 。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, 燃气组份变化较大, CO₂ 含量降低, 一部分能量被吸收, 造成增益变为负值, 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。实验过程中测得谐振腔压强为 7.3×10^4 Pa。

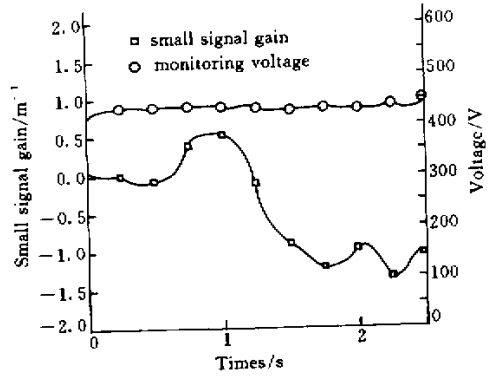


图 3 小信号增益测量曲线

Fig. 3 Small-signal gain measuring curve

3 计算与实验测量结果的比较分析

利用计算程序进行了大量与实验相关的计算, 在此重点比较分析激光器空气燃气混合比 β (反映燃气的组份) 与喷管排前的压强值 P (反映燃气的流量) 对小信号增益的影响。

图 4(a), (b) 是燃气混合比 β 和喷管排前的压强值 P 不同时小信号增益的变化, 并给出计算结果同实验测量结果的比较。从图 4(a) 可以看出计算值偏大于实验测量值, 但计算和测量均反映出随混合比的增大, 小信号增益值增大到一个最大值, 然后减小, 其变化规律一致, 当 $\beta = 3.9$ 左右时, 掺混后的气体组份比例比较合适; 同样, 图 4(b) 显示计算值偏高, 且随压强变化小信号增益值在 $P = 2.7$ MPa 左右达到最大值, 之后随喷管排前的压强增大, 接近于线性减小。实验数据也说明较高的工作压强并不能使激光器工作在理想状态。其原因是, 当喷管排压强较小时, CO₂ 分子粒子数密度随压强的增加而增加, 激活粒子数增多, 小信号增益增大; 当压强较高时, 再增高压强, 分子间碰撞过程加剧, 使 CO₂ 分子上能级 (001) 及 N₂ 分子第一振动能级 ($\nu = 1$) 快速激活, 燃气非平衡膨胀快速趋于平衡, 反转粒子数不断减少, 小信号增益下降, 其结论与文献 [6] 一致。计算结果偏高, 分析原因主要是振动模型较为简单, 另外喷管计算也作了理想假设, 实际上粘性、激波、尾流及传热等都会对介质的小信号增益产生影响。

4 结 论

理论计算与实验测量结果均说明:

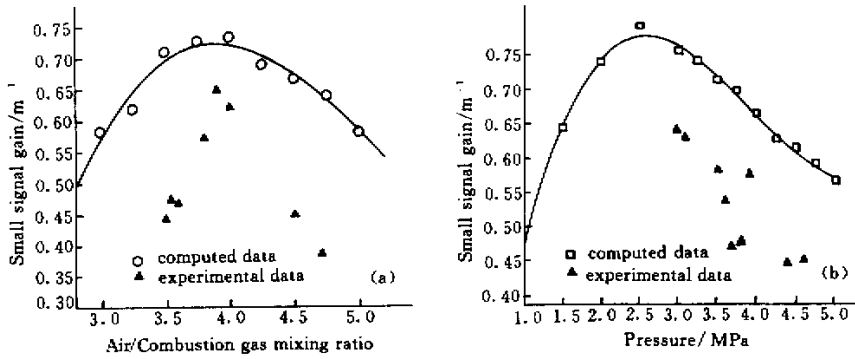


图 4 混合比(a)和压强(b)对小信号增益的影响

Fig. 4 Small signal gain as a function of air/combustion mixing ratio (a) and pressure (b)

- 1) 空气燃气混合比 β 在 3.9 左右时, 掺混后的气体组份比例较理想, 小信号增益值达到最大值;
- 2) 单纯提高激光器喷管排前气体压强, 除有利于废气排放外, 不能提高介质的小信号增益值。

参 考 文 献

- 1 A. S. Boreisho, A. F. Leonov. Active medial inhomogeneities of gas flow laser [J]. *AIAA* 93-3166, 1993
- 2 T. Hong, Z. H. Zhu. *Gasdynamic Laser Technology* [M]. Beijing: Defense Industry Publishing Company, 1977 (in Chinese)
- 3 Y. Liu, L. Li, J. S. Zhang. Experimental study on 10 kW solid propellant combustion driven CW-CO₂ gasdynamic laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (强激光与粒子束), 1997, 9(4):515~518 (in Chinese)
- 4 Y. M. Li, Z. Q. Zhang, Y. J. Zhang. *Solid Rocket Motor Principle* [M]. Beijing: Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics Publishing Company, 1991 (in Chinese)
- 5 H. B. Xie. *The Primary Investigation of CO₂ Gasdynamic Laser* [D]. A Thesis for the Master Degree of Beijing Univ. of Aeronautics and Astronautics, 1992 (in Chinese)
- 6 Y. P. Wang. *Small-signal Gain Investigation of Combustion Driven CO₂ Gasdynamic Laser* [D]. A Thesis for the Master Degree of National Univ. of Defense Technology, 2000 (in Chinese)