

基于应变片的双脉冲推力测量初步实现^{*}

辛朝军, 金星, 崔村燕, 赵海滨

(装备指挥技术学院, 北京 101416)

摘 要: 为了获得激光推力器在多脉冲激光作用下产生推力的变化情况, 建立了一套基于半导体应变片技术的双脉冲推力测试系统, 介绍了系统标定及测试原理。在单脉冲能量 80 J 重复频率 10 Hz 的条件下进行了实验, 实验结果表明: 该测试系统响应速度快、精度高, 实验结果可信; 同时发现, 在双脉冲激光作用下, 推力器产生的脉冲推力大小和推力的持续时间均会减小, 冲量耦合系数也有所降低, 与文献报道实验测量结果基本一致, 对激光发动机的理论和数值研究具有一定的参考价值。

关键词: 激光推进; 应变片; 双脉冲⁺; 推力测量

中图分类号: TN249 V439

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2007) 05-0542-04

Realization of measurement of double-pulse thrust based on strain gauge

XN Chao-jun, JN Xing, CUI Cun-yan, ZHAO Hai-bin

(Inst. of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

Abstract To acquire the transformation of thrust with multi-pulse laser, a set of double-pulse thrust measurement system is established based on semiconductor strain gauge technology. Force produced by laser thruster is tested and analyzed with multi-pulse laser whose single pulse energy is 80 J and frequency is 100 Hz. Results indicate that the measurement system is both suitable and credible. Decrease of thrust and impulse coupling coefficient is observed which is in good agreement with the experimental results reported by other literatures.

Key words Laser propulsion; Strain foil; Double-pulse⁺; Thrust measurement

1 引 言

激光推进技术是一种利用全新推进机理, 将高能激光的能量转化为飞行器动能的航天推进技术。随着国内外相关领域对激光推进技术研究的不断深入, 研究工作已经由单脉冲激光作用下推力产生的理论与实验研究, 进入到多脉冲激光作用下推力产生的理论与实验研究。2000年 10月 Myrabo等人利用脉冲能量 1 kJ 频率 10 Hz 脉宽 30 μ s 的 CO₂激光器, 将 51 g 的飞行器推进到距地面 71 m 的高度^[1]。2005年, 中国科学技术大学在气垫导轨上进行了实验, 模拟了不同激光脉冲重复频率 (10~200 Hz) 对大气模式激光推进中冲量耦合系数的影响, 发现冲量耦合系

数随重复频率的增加而下降, 并初步分析认为是由于飞行器内空气未能充分补充造成的^[2]。

本文设计了一套基于半导体应变片技术的多脉冲推力测量测试系统, 克服了瞬态脉冲推力测量中时间分辨率低、精度低、测量持续时间短、难以进行多脉冲测量等问题。通过对激光推力器受到的双脉冲推力的连续测量, 对双脉冲激光作用下激光推力器产生推力的情况进行了实验研究, 为多脉冲激光推进的理论研究提供了实验依据。

2 实验装置与实验原理测量方法

2.1 实验装置

实验中所使用的实验装置如图 1 所示, 其主要结

* 收稿日期: 2007-04-25 修订日期: 2007-06-12

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328)。

作者简介: 辛朝军 (1980-), 男, 硕士生, 研究领域为激光推进技术。Email jingninar@yahoo.com.cn

构为一根铝合金杆,全长 50 cm,直径 0.76 cm,应变片 1 贴于距前端面 6.5 cm 处,应变片 2 贴于距前端面 25 cm 处,所使用的应变片为半导体材料(硅),激光推力器置于杆的前端。为了保证激光推力器与铝合金杆的良好接触,使用真空硅脂将三者粘合。同时,通过预紧装置提供预紧力,以保证激光推力器的稳定。本实验中,预紧装置的作用是使激光推力器底部的光滑端面与铝合金杆的前端面实现紧密接触,让应力波顺利通过连接端面进入铝合金杆。应变片的输出信号经过超动态应变仪后接入数据采集系统,数据采集由四川成都中科动态仪器公司生产的 PC I4712 型数据采集卡完成。

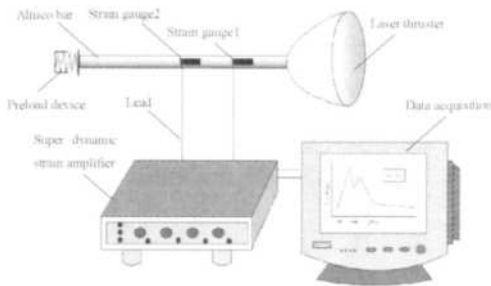


Fig. 1 Schematic of experiment setup

2.2 实验原理

测量元件是两组半导体应变片,制作半导体应变片的半导体晶体材料具有压阻效应,对其某一轴向施加压力时,它的电阻率会发生变化,其变化值 $d\rho/\rho$ 与它所受的压力成正比。应力与应变的关系为

$$\sigma(t) = E \varepsilon(t) \quad (1)$$

式中 $\sigma(t)$ 为材料所受的应力, $\varepsilon(t)$ 是材料发生的应变, E 为材料的弹性模量。

应变片在实验前应进行标定,标定的目的是确定应变片的电压-应变转换系数 k ,其电位计式标定电路如图 2 所示。图中 R_g 为应变片电阻, R_1 为分压回路串联电阻。通常取 R_g 与 R_1 相近, R_c 为标定电阻,通常是一组可选择的精密电阻, C 为耦合电容, E 为直流电源。

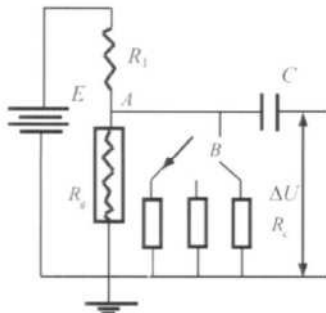


Fig. 2 Circuit diagram of calibration

当开关 B 未闭合时,应变片电阻 R_g 的微小变化 $\Delta R_g = R_g K \varepsilon$ 所引起的电压变化可以表示为

$$\Delta U = E \frac{R_1 R_g}{(R_1 + R_g)^2} K \varepsilon \quad (2)$$

式中电源电压 E , 分压电阻 R_1 , 应变片电阻 R_g 和应变片灵敏度系数 K 均为常量,所以应变片输出的电压变化 ΔU 与应变片的应变 ε 呈线性关系,即

$$\varepsilon = K \Delta U \quad (3)$$

式中 k 为需要标定的电压-应变转换系数。

闭合开关 B, 由于应变片电阻与标定电阻并联, 相当应变片电阻 R_g 产生了一个微小变化

$$\Delta R_g = R_g - \frac{R_g R_c}{R_c + R_g} = \frac{R_g^2}{R_c + R_g} \quad (4)$$

又 $\Delta R_g = R_g K \varepsilon$ 代入式 (4) 可得相应的应变值 ε_c 为

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta R_g}{K R_g} = \frac{1}{K} \cdot \frac{R_g}{R_c + R_g} \quad (5)$$

由式 (3) 可得

$$k = \frac{\Delta U_c}{\varepsilon_c} = K \cdot \frac{R_c + R_g}{R_g} \cdot \Delta U_c \quad (6)$$

式中 ΔU_c 为与标定应变 ε_c 相对应的瞬态波形存储器中记录的标定电压信号。

根据一维应力波理论及式 (3) 可知, 实验中铝合金杆轴向受到的脉冲推力的表达式为

$$F = E \varepsilon(t) A = E k u(t) A \quad (7)$$

式中 A 为铝合金杆的横截面积, $u(t)$ 为采集系统实测电压信号。

3 实验结果与讨论

3.1 实验测量结果

实验中,激光器的出光频率为 10 Hz, 数据采集系统的采样率为 10 MHz, 实验测得的两组应变片的电压信号波形如图 3 所示。测量过程中,由于预紧装置的不稳定性,每次测量中,测量系统仅仅在受到两个激光脉冲的作用后,系统便被破坏,需要重新调整,因此测量系统一次实验只能测得两个连续的脉冲压力信号。图中 Ch1 采集 25 cm 处的应变片信号, Ch2 采集 6.5 cm 处的应变片信号;横轴为时间轴,总长为 0.24 s,纵轴为电压轴,量程为 ± 10 V, a 为第一个脉冲激光到来时的信号, b 为第二个脉冲激光到来时的信号。

从图中可以看出,对于每一个应变片,两个脉冲电压信号的时间间隔为 100 ms,即激光的出光间隔。两个应变片在两次脉冲的作用下其波形基本一致,显

示出测量系统有较好的可重复性。同一时刻不同位置处应变片测得的信号波形有着明显的不同,说明铝合金杆不同位置处受到的力有所不同。

根据式(7)以及标定中获得的电压-应变转换系数,对应变片2获得的脉冲电压信号进行转化,得到了推力随时间的变化曲线,如图4所示。

从图4可以看出,实验测量结果的时间分辨率较高,能够满足实验要求,应变片测得的前后两个脉冲推力随时间的变化趋势一致,推力到达第一个峰值的时间约 $40 \mu\text{s}$ 。而在同样的实验条件下,第一个脉冲推力峰值略大于第二个,且第一个脉冲推力的持续时间比第二个长约 $5 \mu\text{s}$ 。产生这种现象的原因可能与两个脉冲推力之间的互相影响有关。

3.2 实验结果分析

冲量耦合系数定义为飞行器动量增量与入射激光能量的比值,表征激光能量转化为飞行器动能的能力,是重要的力学性能参数,对激光推力器性能评估具有重要作用^[3]。

设激光器单脉冲能量为 E , 则冲量耦合系数为

$$C_m = \frac{F \Delta t}{E} = \frac{\int_{t_0}^{t_1} f(t) dt}{E} \quad (8)$$

式中 F 为单位脉冲产生的推力, Δt 为推力作用时间, $F \Delta t$ 为单位激光脉冲产生的冲量^[4]。 $f(t)$ 为 t 时刻测得的推力大小, t_0 为脉冲推力起始时刻, t_1 为脉冲推力结束时刻。

激光器的单位脉冲能量为 80 J 根据式(8), 应变片2在第一个脉冲推力作用时, 冲量耦合系数为 $1.88 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$, 第二个脉冲推力作用时, 冲量耦合系数为 $1.75 \times 10^{-4} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$ 。从前后两个脉冲推力作用时得到的冲量耦合系数比较可以看出, 第二个脉冲推力作用时的冲量耦合系数明显小于第

一个脉冲推力作用时的冲量耦合系数。在比较中, 第一个脉冲推力由于没有前一时刻脉冲激光作用的影响, 可以近似的视为单脉冲激光作用下推力器产生的推力, 第二个脉冲推力可以视为在 10 Hz 的双脉冲激光作用下推力器产生的一个脉冲推力。冲量耦合系数的比较结果与文献[5-6]中冲量耦合系数的变化趋势相同, 即双脉冲激光作用下的冲量耦合系数小于单脉冲激光作用下的冲量耦合系数。

3.3 实验结果中应力回波信号分析

利用 Das View 2.0 控制软件将图3中所示的应变片信号横向拉伸放大到 $200 \mu\text{s}/\text{div}$ 后, 可以明显的看到, 两组应变片测得的前后两个脉冲推力的结果中有周期性很强的信号, 并随时间逐渐衰减, 在约 12 ms 处完全消失, 如图5所示。

在测量获得的多组实验测量结果中, 该信号的周期均稳定的保持在 $194.1 \pm 1.3 \mu\text{s}$ 。应力波在铝合金杆中的传播速度约为 5090 m/s 如果应力波在实验系统的铝合金杆中来回反射, 其周期应为 $196.5 \mu\text{s}$ 因此可以断定, 应变片测得的周期信号为铝合金杆中来回反射的应力波。

另外, 从图5(c)可以看出, 在应力回波衰减的过程中, 有着几处明显的新的外力信号产生, 该信号引起的新的应力回波与原来正在衰减的应力回波相叠加, 对其有着十分明显的周期性增强和削弱。应变片1检测到的该外力信号出现的时间分别为 2.93 ms 4.58 ms 6.56 ms 7.75 ms 8.76 ms 9.62 ms 在第二个脉冲推力测量结果中同样的存在着这样的现象。经过分析, 该外力信号是由于预紧装置中的弹性部件受到脉冲推力作用后, 因张力发生振荡性变化, 并对铝合金杆产生挤压引起的。

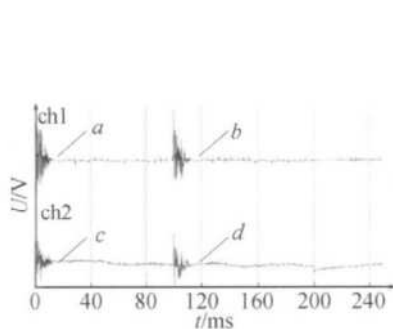


Fig. 3 Results of experimental measurement

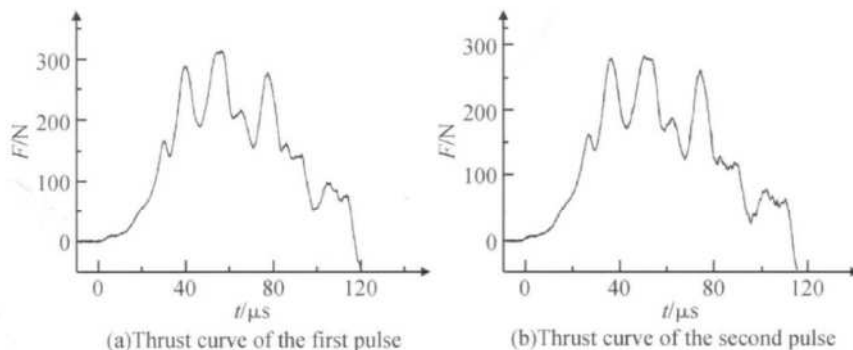


Fig. 4 Thrust curves of strain gauge2

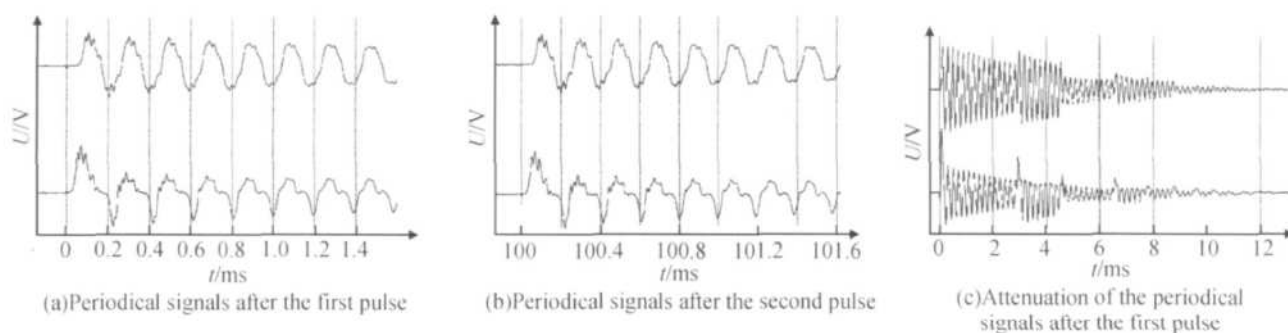


Fig. 5 Periodical signals in the results of experimental measurement

由于应力回波在铝合金杆中持续的时间较长,当激光脉冲频率提高时,前一个激光脉冲产生的回波信号可能对后一个激光脉冲产生的脉冲推力信号产生致命的影响。为了消除应力回波对实验测量结果的影响,增强预紧力产生装置的稳定性,必须对实验装置进行改进。如图 6 所示,在铝合金杆的后端面处,用同质同截面的铝合金短杆连续对接,各接触面都磨的很平,涂以少量油脂使之充分结合,目的是使压缩波顺利通过,而稀疏波无法通过^[7]。当压缩波在最末端短杆的自由端面反射成为稀疏波后,在通过该短杆的前端面即端面 1 时,将会带动该短杆和陷入其中的动量脱离系统,消除应力回波对测量系统的影响,依此类推,多个短杆的连接便会将连续脉冲压力产生的应力回波依次卸载,从而消除应力波对测量结果的影响。短杆长度的确定由两个因素决定: (1)短杆的长度必须大于入射压力脉冲的二分之一波长; (2)在下一个压力脉冲到来前,必须保证最末端的短杆已经从截面 1 脱离。

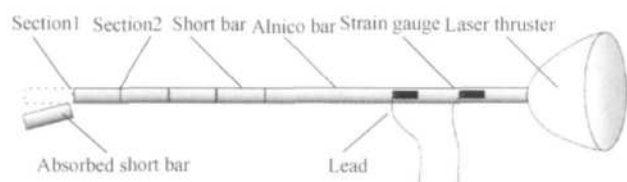


Fig. 6 Design for avoiding the stress wave echo

4 结 论

(1)实验中所建立的双脉冲推力测试系统响应速度快、测量精度高、重复性好,测量结果具有较高的可信度。

(2)双脉冲激光在激光推力器中产生的推力之间互有影响,冲量耦合系数和产生推力的大小与单脉冲激光作用时相比有所降低。

(3)冲量耦合系数和推力的大小是否会随着测量系统捕捉到脉冲数目的增加而继续减少,以及其随入射激光脉冲的频率和能量的改变而变化的趋势,有待进一步研究。

(4)实验系统中预紧力装置的稳定性需要进一步优化,以进行多脉冲推力的测量,应力回波对测量结果的影响需要通过实验装置的改进消除。

致 谢: 本实验研究是在装备指挥技术学院激光推进技术实验室完成的,感谢实验室全体同仁在实验工作中的帮助。

参考文献:

- [1] Myrabo L N. World record flights of beam-riding rocket lightcraft-demonstration of disruptive propulsion technology [R]. AIAA 2001-3798
- [2] 郑义军, 谭荣清, 王东蕾, 等. 激光脉冲重复频率对冲量耦合系数的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17 (7): 979~982
- [3] Feikema D. Analysis of the laser propelled light-craft vehicle [R]. AIAA 2000-2348
- [4] 金星, 洪延姬, 崔村燕, 等. 激光推进冲量耦合系数的测量方法 [J]. 强激光与粒子束, 2004, 16(7).
- [5] Zhen Yijun, Tan Rongqing, Wang Donglei et al. Coupling coefficient for TEA CO₂ laser propulsion with variable pulse repetition rate [J]. Chinese Optics Letters, 2006, 4(2).
- [6] Gong Ping, Tan Rongqing, Tang Zhiping et al. Experimental investigation of the effects of laser parameters on laser propulsion [J]. Chinese Optics Letters, 2004, 2(9).
- [7] 王礼立. 应力波基础 [M]. 第二版. 北京: 国防工业出版社, 2005.

(编辑: 梅 瑛)