

文章编号: 1001-4322(2005)07-0979-04

# 激光脉冲重复频率对冲量耦合系数的影响\*

郑义军, 谭荣清, 王东蕾, 郑光, 柯常军, 张阔海, 万重怡, 吴谨

(中国科学院 电子学研究所, 北京 100080)

**摘 要:** 设计了触发间隔从 100 ms 到 5 ms 可调的双脉冲触发器驱动 TEA CO<sub>2</sub> 激光器高压开关, 用以模拟激光器不同的输出脉冲重复频率。用该装置精确控制的不同激光脉冲重复频率下, 对抛物面型光船模型进行了大气模式激光推进中冲量耦合系数的实验研究。发现冲量耦合系数随着重复频率的增加而下降, 而单位时间内光船获得的冲量耦合系数的增量则随着重复频率的增加而增大。初步分析认为, 这是由于飞行器内的空气未得到充分的补充造成的。

**关键词:** 激光推进; 脉冲重复频率; 大气模式; 冲量耦合系数

**中图分类号:** TN 249 **文献标识码:** A

早在 1972 年, 美国学者 Kantrowitz 就提出高功率激光可能用于推进飞行器, 从而可通过地基或空基激光远距离传输能量将小卫星或飞行器送入近地轨道<sup>[1]</sup>。随着激光技术和航天技术的不断发展, 激光推进的研究受到各个国家的重视<sup>[2]</sup>。2000 年 10 月 Myrabo 等人利用脉冲能量为 1 kJ, 重复频率为 10 Hz, 脉宽为 30  $\mu$ s 的 CO<sub>2</sub> 激光器, 将 51 g 的飞行器成功地推进到距地面 71 m 的高度, 持续飞行时间达到了 12.7 s<sup>[3]</sup>。2003 年 3 月至 2004 年 3 月间, 中国科学院电子学研究所与中国科学技术大学联合进行了一系列 TEA CO<sub>2</sub> 脉冲激光推进抛物面型飞行器的实验, 实现了大气模式下的激光推进, 垂直飞行高度超过了 1 m, 并研究了不同气压对冲量耦合系数的影响<sup>[4,5]</sup>。本文设计了双脉冲触发器触发高重复频率 TEA CO<sub>2</sub> 激光器, 脉冲间隔时间从 5~100 ms 可调, 对应于激光器脉冲输出重复频率在 10~200 Hz 范围内连续可控, 以此模拟不同激光脉冲重复频率对大气模式激光推进中冲量耦合系数的影响, 从而为此类激光推进模式选取理想的激光脉冲频率提供基础实验依据。

## 1 实验装置

### 1.1 激光器

激光器采用中国科学院电子学研究所研制的 TEA CO<sub>2</sub> 高重复频率激光器, 谐振腔采用平凹腔结构, 腔长 2.0 m, 耦合输出镜的反射率为 50%, 激光输出波长为 10.6  $\mu$ m, 最大单脉冲输出能量可达 15 J, 近场光斑轮廓为长方形, 面积 45 mm(y)  $\times$  25 mm(x), 分布十分均匀, 如图 1 所示, 激光脉冲的 10% 极大值处的全宽度约为 3  $\mu$ s, 半极大值处全宽度小于 200 ns, 实验中我们采用 40 mm 的光阑, 以保证激光光斑完全照射在飞行器内反射面上。

通过设计的双脉冲可调延迟触发器, 控制激光器每次触发产生两个脉冲, 脉冲间隔从 5 ms 到 100 ms 可调。其激光器触发时序如图 2 所示。

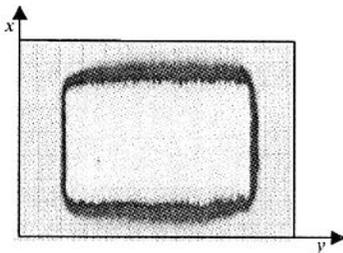


Fig. 1 Profile of the laser beam  
图 1 激光光斑轮廓

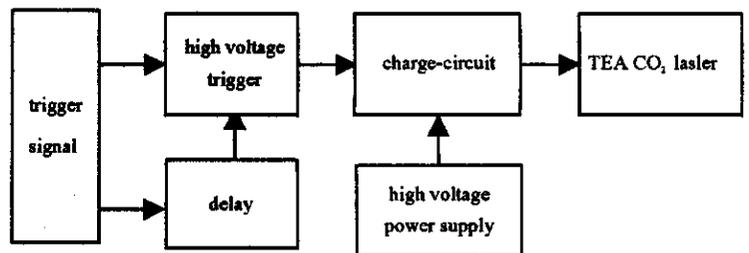


Fig. 2 Signal sequence of double pulse laser  
图 2 双脉冲激光信号时序图

\* 收稿日期: 2005-03-01; 修订日期: 2005-04-18  
基金项目: 中国科学院知识创新资助课题(D5067-7)  
作者简介: 郑义军(1975—), 男, 博士研究生, 从事光电子激光技术及其应用的研究。

## 1.2 飞行器

飞行器为铝合金材料,用数控机床加工成抛物面型光船模型,焦距为 5 mm,质量为 8g,口径为 50 mm,其内表面经过光学处理,反射率可达 90%以上。

## 1.3 实验装置

如图 3 所示,双脉冲触发器 1 触发 TEA CO<sub>2</sub> 激光器 2,产生波长为 10.6 μm 的激光,光束经取样板 3 和 4 取样后,通过光电探测器 5 及示波器 11 测取激光脉冲的输出波形,通过激光能量计探头 6 和能量计显示器 7 测得激光单脉冲能量。激光束的主要能量在抛物面型光船 8 的内表面反射聚焦后将空气击穿形成爆轰波,推动光船在气垫导轨 9 上运动,采用光电门阵列 10 和示波器 11 记录 U 型挡光片两次通过光电门阵列的时间间隔,测量出 U 型挡光片的宽度,由此计算光船获得的速度和获得的冲量耦合系数。实验中选取了 30,28 和 25 kV 3 个电源电压,分别对应着 13,10 和 8 J 3 个不同激光单脉冲能量,进行了激光水平推进的实验。

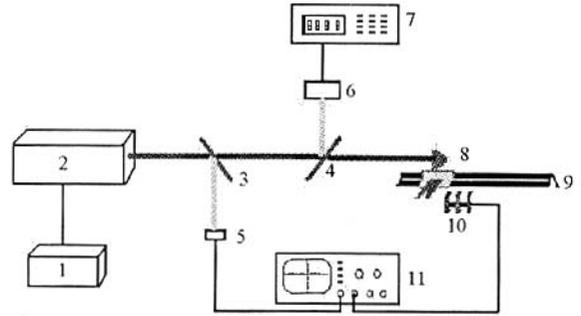


Fig. 3 Experimental setup

图 3 实验装置图

图 4 是通过光子牵引探测器获得的激光波形(a),其水平方向每格为 1 μs,和通过示波器记录下来的挡光片作用在光电门上产生的两个峰值时刻的时间间隔(b),其水平方向每格为 250 ms。

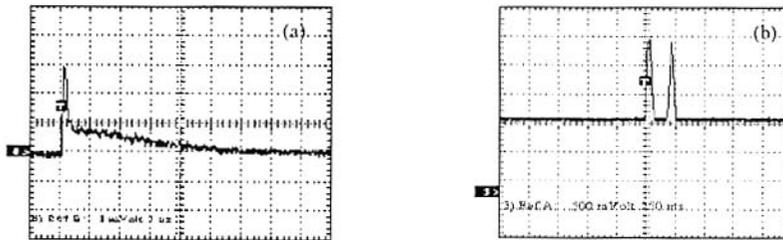


Fig. 4 Waveform of laser pulse(a) and signal of the interval of the baffle passing the photoelectric switch(b)

图 4 激光脉冲波形(a)及挡光片通过光电门的时间间隔信号(b)

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 冲量耦合系数的计算

在不考虑空气阻力和系统摩擦力的情况下,光船在两个激光脉冲作用下所获得的动量为

$$p = mv = ml / \Delta t \quad (1)$$

式中: $l$  为 U 型挡光片的宽度; $\Delta t$  为 U 型挡光片通过光电门阵列的时间间隔。

实际上,抛物面型光船在第一个激光脉冲和第二个激光脉冲作用下,获得冲量耦合系数大小是不同的,这也正是研究重复频率对其影响的意义所在。考虑到脉冲的次数,根据耦合系数的定义,抛物面型光船在两次激光脉冲作用下所获得的平均耦合系数  $C_m$  为

$$C_m = \frac{p}{E} = \frac{1}{2E_0} \frac{ml}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: $E_0$  为入射激光单脉冲能量。

### 2.2 冲量耦合系数的测量

实验中,对光船获得最大速度的位置进行了估算,在相应位置采用光电门阵列,通过示波器读取挡光片的时间间隔  $\Delta t$ ,取最小的时间间隔  $\Delta t$  作为参量代入(2)式计算。如图 5 中(a)、(b)、(c) 三组图形表示的是入射激光单脉冲能量分别为 13,11,8 J 时,由实验得出的挡光片的时间间隔(a-1,b-1,c-1),光船的速度(a-2,b-2,c-2),冲量耦合系数(a-3,b-3,c-3)与双脉冲间隔关系的测量数据及数值拟合曲线。

定义单位时间内获得的冲量耦合系数为

$$C_{mp} = C_m / t \quad (3)$$

式中: $t$  为两个脉冲的时间间隔。

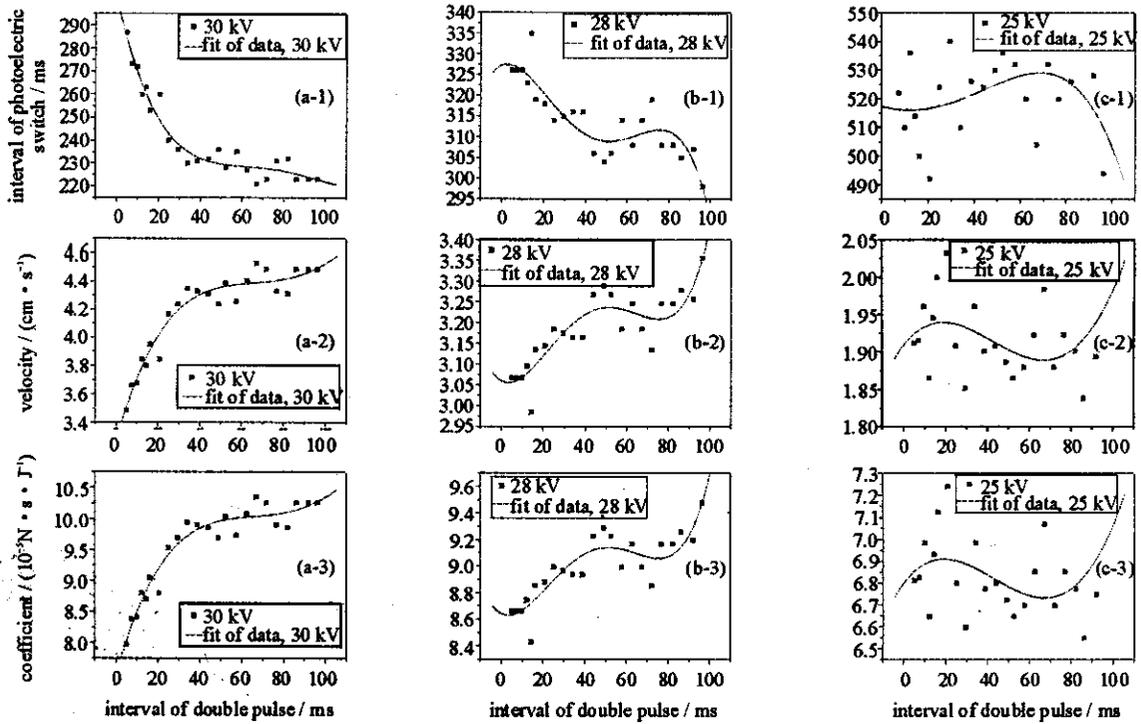


Fig. 5 Interval of baffle passing the photoelectric switch(a-1,b-1,c-1), the velocity of light craft(a-2,b-2,c-2) and momentum coupling coefficients(a-3,b-3,c-3) vs the interval of pulse

图 5 挡光片通过光电门的时间间隔(a-1,b-1,c-1),光船的速度(a-2,b-2,c-2),冲量耦合系数(a-3,b-3,c-3)与脉冲间隔的关系

图 6 根据(3)式给出单脉冲能量为 13 J 时,单位时间内光船所获得冲量耦合系数与脉冲间隔的关系。

### 2.3 结果与讨论

由图 5(a)可以看出,在入射激光的单脉冲能量为 13 J 时,随着双脉冲激光时间间隔的增大,挡光片的时间间隔越来越短,所对应的光船速度越来越大,获得的冲量耦合系数也越来越大。在 0 到 20 ms 这个脉冲间隔段,激光冲量耦合系数急剧增长,其增加斜率达到约 0.01 N/(J · s<sup>-1</sup>),从 20 ms 到 100 ms 间隔中,激光冲量耦合系数基本保持一个缓慢增长的过程,其增加斜率为 0.009 N/(J · s<sup>-1</sup>)。即对应脉冲重复频率在 50 Hz 左右,冲量耦合系数存在一个拐点,当脉冲重复频率小于 50 Hz 时,冲量耦合系数较大,而当脉冲重复频率大于 50 Hz 时,冲量耦合系数明显下降。在图 5(b)中,当入射激光的单脉冲能量为 11 J 时所呈现的曲线也基本上验证了以上规律,但从所采集的数据点可以看出曲线的波动性较大。在图 5(c)中,当入射激光的单脉冲能量为 8 J 时规律已基本被湮没,这是由于没有考虑空气阻力及滑块与气垫导轨间的摩擦所造成的系统误差。对于能量较小的入射激光,系统阻力造成的动量损失与光船本身获得的动量相比达到同一量级,不可忽略,从而湮没了所呈现的规律性。

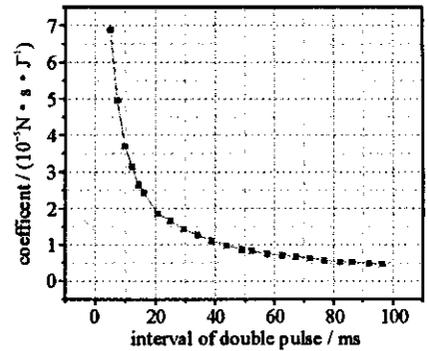


Fig. 6 Momentum coupling coefficients per unit time vs the interval of pulses

图 6 单位时间所获得冲量耦合系数与脉冲间隔的关系

图 6 表明,在实验中所采用的双脉冲间隔 5~100 ms 内,尽管光船所获得的耦合效率随间隔的减小呈下降趋势,但其在单位时间内所获得的冲量耦合系数仍随时间间隔的减小呈增加的趋势。

对于重复频率的大气模式激光推进可以简化为以下物理过程:首先是脉冲激光光束在抛物面焦点处聚焦并击穿空气产生爆轰波,爆轰波在瞬间将光能转化为机械能推动光船运动,光船内的空气在高温膨胀的同时,大部分逸出飞行器,在光船的内部形成一个低气压区,随着爆轰波向外的推移,在光船的抛物面口附近形成气压差,抛物面口外附近的空气向抛物面口内部流动从而达到补充空气的目的。由此可见,若激光重复频率过高的话,在两个脉冲的时间间隔内,抛物面罩内作为激光推进物质的空气得不到充分的补充,势必影响大气模式推进的效果。

### 3 结 论

从实验所作的研究中,可以得出如下结论:(1)在采用 TEA CO<sub>2</sub> 激光器进行大气模式的激光推进中,冲量耦合系数随着重复频率的增加而呈下降趋势,对应脉冲重复频率在 50 Hz 左右,冲量耦合系数存在一个拐点,当重复频率小于 50 Hz 时,有较大的冲量耦合系数,而当重复频率大于 50 Hz 时,冲量耦合系数明显下降;(2)在实验所采用的双脉冲间隔范围内,飞行器在单位时间内所获得的冲量耦合系数仍随脉冲重复频率的增加呈上升的趋势。其值是否会随着双脉冲间隔时间的进一步减小而达到最大值进而下降,以及脉冲能量是否对这一规律产生影响还有待进一步的实验研究。

#### 参考文献:

- [1] Kantrowitz A. Propulsion to orbit by ground-based lasers[J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1972, **10**(5):74—76.
- [2] 胡少六, 江超, 李波, 等. 用于激光推进的高功率激光器的选择[J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(7):853—856. (Hu S L, Jiang C, Li B, et al. Choosing high-power laser in laser propulsion technology. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(7):853—856)
- [3] Myrabo L N. Brief history of the lightcraft technology demonstrator(LTD) project [A]. the First International Symposium on Beamed Energy propulsion[C]. New York: American Institute of Physics Conference Proceedings, 2003. 49—60.
- [4] 郑义军, 龚平, 谭荣清, 等. 大气模式激光推进耦合系数的实验研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):889—893. (Zheng Y J, Gong P, Tan R Q, et al. Experimental study of coupling coefficients for air-breathing mode laser propulsion. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, **32**(7):889—893)
- [5] Tang Z P, Gong P, Tan R Q, et al. Experimental investigation on air-breathing mode of laser propulsion [A]. Second International Symposium on Beamed Energy Propulsion[C]. New York: American Institute of Physics Conference Proceedings, 2004. 23—70.

## Effect of laser pulse repetition rate on momentum coupling coefficients

ZHENG Yi-jun, TAN Rong-qing, WANG Dong-lei, ZHENG Guang,

KE Chang-jun, ZHANG Kuo-hai, WAN Chong-yi, WU Jin

(*Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

**Abstract:** A double pulse trigger was designed, and the interval of the trigger pulse controlling the TEA laser high voltage switch could be adjusted from 5 ms to 100 ms to simulate different operating repetition rate of the TEA CO<sub>2</sub> laser. By this means, the laser repetition rate was accurately controlled. The momentum coupling coefficients for the air-breathing mode laser propulsion were studied with a parabolic light craft model. It was found in the experiment that the momentum coupling coefficients decreased when the laser repetition rate increased, while the increment of the momentum coupling coefficients increased in unit time. The reason might be that the air as the propellant could not be supplied enough for the high laser pulse repetition rate, which would weaken the effect of the propulsion.

**Key words:** Laser propulsion; Pulse repetition rate; Air-breathing mode; Momentum coupling coefficients