

激光干涉法在扭摆法测量微冲量中的应用^{*}

方 娟¹, 洪延姬², 叶继飞², 王广宇²

(1 装备指挥技术学院 研究生院, 北京 101416 2 装备指挥技术学院 基础部, 北京 101416)

摘 要: 介绍了激光干涉法测微小转角的原理及测量方法, 提出了采用激光干涉测量微冲量的方法, 将激光与靶作用产生的微冲量转化为扭摆的转动角度, 通过激光干涉法测量此微小转角从而计算出冲量。相同单脉冲能量下, 以 PVC+ 2% C 为工质, 用扭摆法测量了激光与工质作用产生的微冲量, 结果表明该测试系统分辨率为 $2 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{s}$ 量程为 $2 \times 10^{-7} \sim 0.8 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}$ 。

关键词: 微冲量测量; 扭摆; 激光干涉; 小角度测量; 激光微推力器

中图分类号: V493 TN249 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2010) 01-0119-04

Application of laser interference in micro-impulse measurement with torsion pendulum

FANG Juan¹, HONG Yan-ji², YE Ji-fei², WANG Guang-yu²

(1 Dept. of Postgraduate Inst. of Equipment Command and Technology Beijing 101416 China

2 Dept. of Basic Theories Inst. of Equipment Command and Technology Beijing 101416 China)

Abstract The measurement principle of tiny-angle using laser interference method is introduced. This method is used to measure micro-impulse. The impulse can be obtained by measuring tiny rotation-angle of torsion pendulum. The micro-impulses are measured with a torsion pendulum using PVC+ 2% C as target under the same single pulse energy condition. The experimental results indicate that the resolution of measurement system is of $2 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{s}$ and the range is between 2×10^{-7} and $0.8 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}$.

Key words Micro-impulse measurement; Torsion pendulum; Laser interference; Tiny-angle measurement; Micro-laser plasma thrusters

1 引 言

激光微推力器在微小卫星姿态和轨道控制领域有着广泛而深入的应用前景, 比冲高、冲量动态范围大、最小冲量小、功耗低、能量耦合效率高以及易于实现轻量化和数字化控制等显著优势, 受到了国内外学者们广泛的关注^[1, 2]。冲量是反映激光微推力器性能的一个重要参数, 特点是量级小, 约为 $10^{-7} \sim 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}$ 。Photonic Associates 小组 Phlips 等人于 1999 年提出了用扭摆系统测量激光微推力器产生的微小冲量, 并用其进行微推力器性能参数的测试^[3]; 2002 年^[4, 5], Phlips 等人又对扭摆系统进行了改进, 随后

国内的中国科技大学^[6]和装备指挥技术学院^[7, 8]也进行了相关研究。

从目前国内外报告的研究结果来看, 一方面, 测量系统的噪声会影响系统的精度, 在小冲量量级, 系统误差甚至达到了 50%; 同时, 在力作用时间内, 靶平面偏离焦平面, 能量耦合效率降低, 这也会影响微冲量的测量, 因此常规的小冲量测量系统很难满足测量要求。

引入激光干涉法可有效解决常规测试系统存在的以上两个问题, 提高系统的测量精度。采用两个角隅棱镜形成差动测量的方法代替原来的光指针方法测量扭摆转动的角度, 大大提高了系统的精度; 扭摆

* 收稿日期: 2009-06-04 修订日期: 2009-09-20

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328); 国家自然科学基金项目 (90916015)。

作者简介: 方 娟 (1982-), 女, 博士生, 研究领域为激光推进技术。Email: fangjuan314@163.com

的质量由原来的 0.2 g 增加到 58 g 克服了离焦问题。研究表明,激光干涉法的引入极大地改善了扭摆测试系统的性能,能够满足激光微推力器微小冲量的测试要求。

2 激光干涉法测角系统

如图 1 所示,采用两个角隅棱镜形成差动测量的方法^[9-11]测量扭摆转动的角度,虚线圈内为角隅棱镜内部光路。其基本原理是:以激光作为干涉光源,两个角隅棱镜代替了迈克尔逊干涉仪中的平面镜,将被测转角转化成反映干涉光路中光程差变化的线位移量,由此引起干涉条纹的变化,再通过相应的设备对干涉条纹进行一系列的采集处理,从而实现对小角度的测量。

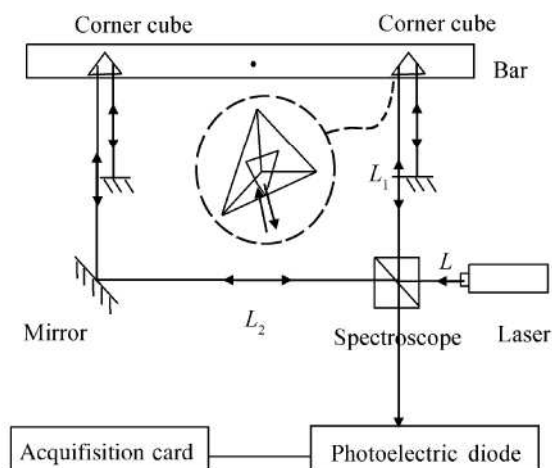


Fig 1 Schematics of angle measurement with two corner cubes

在不考虑外界环境因素的情况下,设两个棱镜间的距离为 D_1 , 横梁转动的角度为 θ 1/4 周期内移过光电二极管的干涉条纹为 ΔN , 激光波长为 λ 则在小角度情况下 (转动角度 $\theta \leq 5^\circ$), 有转动角度与条纹的变化量之间的关系式^[12]为

$$\theta \approx \frac{\Delta N \cdot \lambda}{4D_1} \quad (1)$$

实验中两个棱镜间的距离 D_1 为 10 cm, 用于干涉的激光波长 λ 为 632.8 nm, 由式 (1) 可得到转动角度与条纹变化量的比值为

$$\frac{\theta}{\Delta N} = \frac{\lambda}{4D_1} = 1.6 \mu\text{rad/fring} \quad (2)$$

由文献 [5] 可知, Phipps 等人设计的单棱镜系统角度分辨率只有 $136.6 \mu\text{rad/fring}$ 而本文涉及的双角隅棱镜的激光干涉法测角系统角度分辨率相对较高, 能够分辨的最小角度为 $1.6 \mu\text{rad}$ 该测试系统的

另一优点是只对转动敏感, 对平动不敏感^[11], 因此抗干扰能力强, 特别是人走动时产生的振动, 可以在几秒钟之内恢复到正常工作状态, 这就极大地提高了工作效率。

3 扭摆系统测微冲量原理

实验室建立的扭摆微冲量测量系统如图 2 所示。脉冲激光与工质靶作用产生等离子体喷射, 反喷作用使横梁转动, 通过激光干涉法测得转动的角度, 从而测量出激光与工质作用产生的微小冲量。

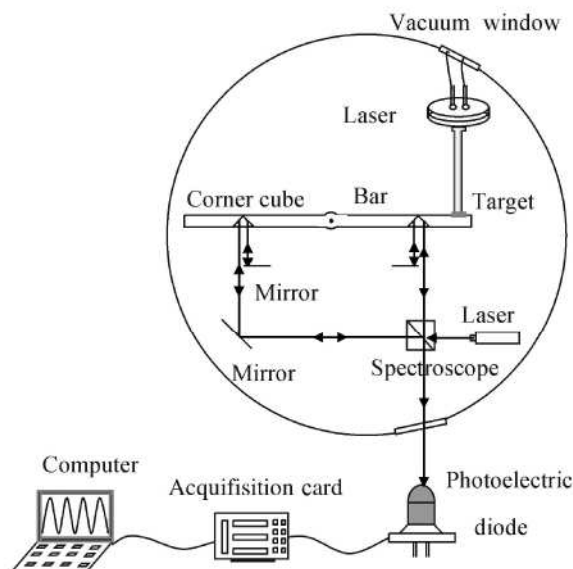


Fig 2 Schematics of experimental setup

根据文献 [8] 中得到的冲量与转动角度的关系 $I = \frac{2I\omega}{D} \cdot \theta$ 及式 (1), 很容易得到冲量与干涉条纹变化量的关系式为

$$I = \frac{2I\omega}{D} \cdot \frac{\Delta N \lambda}{4D_1} = \frac{\pi J \lambda}{DD_1 T} \cdot \Delta N \quad (3)$$

式中 J 为扭摆系统的转动惯量, ω 为阻尼频率, D 为横梁长度, T 为阻尼周期。令 $k = \frac{\pi J \lambda}{DD_1 T}$ 则

$$I = k \Delta N \quad (4)$$

从式 (4) 可以看出, 在小角度近似条件下, 冲量与干涉条纹的变化量 ΔN 成线性关系, k 即等于该系统的分辨率。

4 应用结果

利用本文设计的扭摆测量系统进行了脉冲激光与 PVC 工质靶耦合所产生微冲量的实验测量。在瞬间载入小角度近似条件下, 通过测量规则物体 (标准梁) 的转动惯量来标定扭摆系统的转动惯量, 之后进

行冲击加载, 测量干涉条纹的变化量, 根据式 (3) 计算待测冲量。

4 1 标定结果及系统分辨率

采用文献 [13] 的方法即通过测量加入标准梁前后系统周期的变化, 标定出系统的转动惯量, 标定的实验结果如表 1 所示。

Table 1 Calibration results of torsion pendulum parameters

Moment of inertia of standard bar	System period without standard	System period with standard	Moment of inertia of system
$J_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	$\text{bar} T_1 / \text{s}$	$\text{bar} T / \text{s}$	$J / (\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
1.125×10^{-5}	0.7940	1.151	1.02×10^{-4}

根据参数标定的结果及实验中参数 λ 为 632.8 nm, D 为 15 cm, D_1 为 10 cm, 代入式 (3) 可以得到该扭摆系统能够测量冲量的分辨率为

$$k = \frac{\pi J \lambda}{D D_1 T} = \frac{\pi \times 1.02 \times 10^{-4} \times 632.8 \times 10^{-9}}{(15 \times 10) \times 10^{-4} \times 0.794} \approx 2 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{s}$$

为了保证系统的测量精度和数据处理方便, 要求干涉条纹的变化量 ΔV 应不少于 10 个且不超过 400 个, 根据可测量的条纹数, 代入式 (4), 得到扭摆测量冲量的范围为

$$I = 2 \times 10^{-8} \times (10 \sim 400) = 2 \times 10^{-7} \sim 0.8 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}$$

4 2 冲量测量结果

在 10.0 Pa 的工作条件下, 工质为 PVC (聚氯乙烯) + 2% C, 厚度为 180 μm , 激光电流为 5 A, 脉宽为 50 ms, 得到典型的实验曲线如图 3 所示, 采集数据点为 2M 个, 采集时间为 2 s (图中给出了部分周期曲线)。

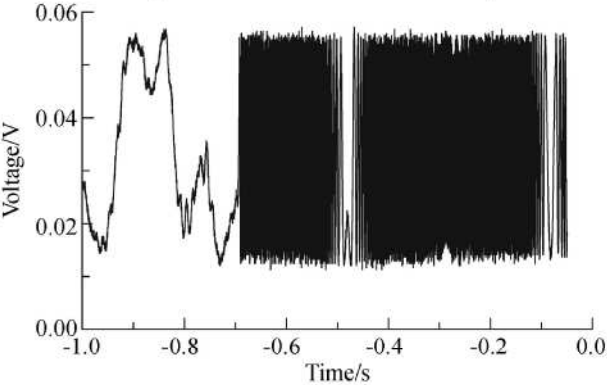


Fig 3 Typical waveform of data acquisition

由图可以看出, 系统虽然存在初始自振, 但初始自振相对于有冲量作用后的振动非常微弱, 所以在进

行分析时可以忽略初始自振对冲量测量的影响。此次测量 1/4 周期对应的条纹变化量 ΔV 为 252 个, 根据式 (4) 可以得到本次激光与工质作用产生的冲量为

$$I = k \Delta V = 2 \times 10^{-8} \times 252 = 5.04 \mu\text{N} \cdot \text{s}$$

用所设计的系统进行多组入射激光的冲击加载实验, 相同单脉冲能量条件下, 冲量测量结果具有很好的重复性, 如表 2 所示。进一步得到 10 ms 和 50 ms 脉宽冲量测量结果的标准差表达式分别为 $(1.817 \pm 0.032) \mu\text{N} \cdot \text{s}$ 、 $(5.248 \pm 0.085) \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s}$ 。5 次冲量测量的相对误差分别为 2.10% 和 1.95%。

Table 2 Impulse of different pulse width ($\mu\text{N} \cdot \text{s}$)

	1	2	3	4	5	Average
10 ms	0.179	0.187	0.181	0.178	0.184	0.1817
50 ms	0.565	0.504	0.529	0.515	0.508	0.5248

5 结 论

针对传统的微冲量测量系统的特点和不足, 提出了一种基于激光干涉测角的扭摆微冲量测量方法, 并进行了实验研究, 得到以下结论:

(1) 两个角隅棱镜形成差动的测量方法线性范围大和分辨率高, 角分辨率为 1.6 $\mu\text{rad}/\text{fring}$ 。此测角方法的优点是对转动敏感, 对平动不敏感, 因此测试系统对振动也有较强抗干扰能力, 特别是低频振动, 可以在几秒钟之内恢复到系统工作状态, 不仅减小了测量误差, 还降低了对测量设备和实验环境的要求;

(2) 在转动角度较小 (小于 5°) 时, 所测的冲量与干涉条纹变化量成线性关系;

(3) 引入激光干涉法后系统的分辨率为 $2 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{s}$, 测量范围为 $2 \times 10^{-7} \sim 0.8 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}$, 实验误差小于 3%, 基本能够满足激光微推力器冲量测量的要求, 为评估激光微推力器的性能提供了很好的测量手段。

参考文献:

[1] Phipps Claude R, Luke James R, McDuff Glen G, et al. Laser ablation powered micro-thruster[R]. SPIE, 4760, 833, 2002.

[2] Phipps Claude R, Reilly James P, Campbell Jonathan W. Laser launching a 5-kg object into low earth orbit[R]. SPIE High power laser ablation, 4065, 502, 2000.

[3] Phipps Claude R. Micro laser plasma thrusters for small

- satellites[R]. *F49620-98-C-0038* 1999
- [4] Phipps Claude R, Luke James R, McDuff Glen G, et al. A laser-ablation-based micro-rocket[C]. *33rd Plasma Dynamics and Lasers Conference* 2152 2002
- [5] Phipps Claude R, Luke James R, Helgeson Wesley D. 3ks specific impulse with a ns-pulse laser microthruster [C]. *International Electric Propulsion Conference IEPC* 319 2005 1.
- [6] Jing Li, Zhiping Tang. Laser micro-impulse torsion pendulum [J]. *Chinese Optics Letters* 2005 76(3).
- [7] 金星,洪延姬,陈景鹏,等. 激光单脉冲冲量的扭摆测量方法 [J]. *强激光与粒子束*, 2006 18(11).
- [8] 方 娟,金星,叶继飞,等. 扭摆测量微冲量的计算方法 [J]. *机电产品开发与创新*, 2007 20(5): 17~19
- [9] 浦昭邦,陶 卫,张 琢. 角度测量的光学方法 [J]. *光学技术*, 2002 28(2): 168~ 171
- [10] 陶 卫,浦昭邦,孙运斌. 角度测量技术的发展 [J]. *激光杂志*, 2002 23(2): 5~ 7
- [11] 李金阳,吴简彤,韩慧群. 小角度测量的光学方法及应用 [J]. *应用科技*, 2006 33(7): 15~ 18
- [12] 王贵甫,郭 强,陈桂林,等. 激光干涉数字化角度计量系统分析 [J]. *光学技术*, 2001 27(3): 200~ 203
- [13] 方 娟. 扭摆微冲量测试系统的研究 [D]. 北京: 装备指挥技术学院, 2008
- (编辑: 梅 瑛)

(上接第 114 页)

- [5] Sasoh A. In-tube laser propulsion[C]. *31st AIAA Plasma Dynamics and Lasers Conference*, 2000 1~ 4
- [6] Ageichik A A, Egorov M S, Rezunkov Y A, et al. Experimental study on thrust characteristics of airspace laser propulsion engine[C]. *Second international symposium on beamed energy propulsion*, 2004 49~ 60
- [7] 文 明,洪延姬,杨 健,等. 气压对吸气式激光推进冲量耦合系数的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2007 19(7): 1077~ 1080
- [8] 文 明,叶继飞,洪延姬,等. 单脉冲能量对吸气式激光推进冲量耦合系数的影响 [J]. *强激光与粒子束*, 2008 19(7): 1077~ 1080
- [9] 冯海兵,窦志国,文 明. 二次反射激光聚焦系统设计 [J]. *装备指挥技术学院学报*, 2008 19(5): 97~ 100
- [10] 李 倩,文 明,曹正蕊,等. 来流对吸气式激光推力器冲量耦合系数的影响 [J]. *推进技术*, 2007 28(5): 19
- (LIQ ian, WEN M ing, CAO Zheng-ni, et al. Effect of inflow on impulse coupling coefficient of air-breathing lightcraft[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(5).)
- [11] 李 倩,洪延姬,曹正蕊,等. 吸气式激光推进推力产生机理的数值模拟 [J]. *爆炸与冲击*, 2006 26(6): 550~ 555
- [12] П • 泽尔道维奇, III • 莱依捷尔. 激波和高温流体动力学现象物理学 (上册) [M]. 张树材译. 北京: 科学出版社, 1985 146~ 149
- [13] 孙承伟. 激光辐照效应 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002 166~ 167
- [14] 李晓彤,岑兆丰. 几何光学 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2003 3~ 6
- (编辑: 姚懿巧)