

超短脉冲激光烧蚀冲量耦合测量方法

金星, 常浩, 叶继飞

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 超短脉冲激光烧蚀靶材产生的冲量耦合效应在激光烧蚀微推力器、激光清除空间碎片等航天应用中有广泛的应用前景, 而高精度的冲量测量方法是研究冲量耦合效应的必须手段。采用基于激光干涉法的扭摆系统测量激光烧蚀靶材产生的冲量, 并构建测量系统。研究扭摆系统纵轴振动和初始误差角对冲量测量产生的影响, 扭摆系统纵轴高频振动导致了激光干涉条纹间距出现不均匀现象; 此外, 扭摆初始误差角越大, 明条纹出现时间将前移, 条纹数目变大, 导致测量系统精度不高。通过建立的附加高频振动和初始误差角的误差分析模型, 提出了基于最小二乘法的实验数据分析方法, 该方法能够有效滤除高频测量噪声, 解决了冲量测量精度不高的问题, 进一步完善了冲量测量方法。

关键词: 冲量; 脉冲激光; 扭摆; 高频振动; 最小二乘法

中图分类号: V416.5; TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0329002

Methods of extreme short pulse laser ablation impulse coupling measurement

Jin Xing, Chang Hao, Ye Jifei

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: Impulse coupling effect of short pulsed laser ablation the target has great application in the fields of laser ablation micro-thruster and laser orbital debris removal. High precision impulse measurement is the necessary method in studying the impulse coupling effect. The torsion pendulum with laser interferometer method was put forward and the measurement system was constructed. In light of the problems of vertical axis vibration and existing error angle in the initial state of torsion pendulum, the high frequency vibration will lead to the non uniform spacing in laser interference fringes, besides, the initial angle will lead to the bright stripe advancing, these two factors will lead to the low measuring accuracy. An impulse experimental data analysis method was put forward based on ordinary least squares techniques, which can remove the high frequency noise effectively. The method can solve the problem of low measuring accuracy and improve the micro impulse method.

Key words: impulse; pulsed laser; torsion pendulum; high frequency vibration; ordinary least squares techniques

收稿日期: 2016-07-10; 修订日期: 2016-08-11

基金项目: 国家自然科学基金(11502301)

作者简介: 金星(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email: jinxing_beijing@sina.com

通讯作者: 常浩(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光推进技术方面的研究。Email: changhao5976911@163.com

0 引言

高能激光束辐照靶材表面, 可以使其部分气化或电离, 这一过程会使靶材产生推力, 使靶材产生推力的有效烧蚀对于辐照激光的功率密度要求较高, 一般采用脉冲激光(如纳秒脉宽)与靶材相互作用, 使其获得力的作用效果。这一推进方式, 在激光烧蚀微推力器、激光清除空间碎片等激光航天推进应用中有着广阔的应用前景^[1-6]。

在超短脉冲激光烧蚀靶材形成力的耦合过程中, 冲量测量是研究激光与靶材相互作用产生宏观力学作用效果的必须手段, 测量方法是否有效是保证研究可靠可信的必要条件。超短脉冲激光烧蚀靶材产生的冲量最小可至 10^{-6} Ns 量级。因此, 高精度微小冲量测量是面临的主要难题。从文献检索情况来看, 主要测量方法有传感器法^[7]、抛物法^[8]、单摆法^[9-11]和扭摆法^[12]等。传感器法对靶材的相态和传感器的灵敏度都提出了比较高的要求, 而且激光脉冲烧蚀时间通常较短, 不便于脉冲激光烧蚀的冲量测量。抛物法原理简单, 对实验器件要求不高, 但易引入空气阻力等造成的误差, 测量结果存在很大误差。单摆法利用摆的微幅振动间接测量冲量, 对实验器件要求也不高, 但恢复力由重力提供, 导致设计缺乏足够的柔性, 而且重力作为恢复力会引入非线性效应, 特别在摆角较大时需要进行修正。扭摆法原理较复杂, 但是测量精度较高, 而且脉冲推力和重力分离, 设计上具有柔性。论文采用基于激光干涉法的扭摆系统测量冲量, 测量中会受到扭摆系统纵轴振动和初始扭摆状态有误差角的影响, 针对以上问题, 进行建模分析, 提出了基于最小二乘法的实验数据分析方法。该方法能够有效滤除高频测量噪声, 解决了冲量测量精度不高的问题, 进一步完善了微小冲量测量方法。

1 扭摆法测量冲量原理

扭摆系统根据测量精度和测量量程不同, 可以采用不同结构形式, 但是基本结构是一致的。典型的扭摆系统测量方法为: 将靶材置于扭摆一端, 测量靶材在激光烧蚀作用后的摆角, 根据所受力矩与摆角之间的关系求得靶的冲量^[13-14]。靶受冲击作用后摆过的角度可以采用激光差动干涉测量转角, 这样可以显著改

善测角分辨率, 操作也更为简便, 如图 1 所示。

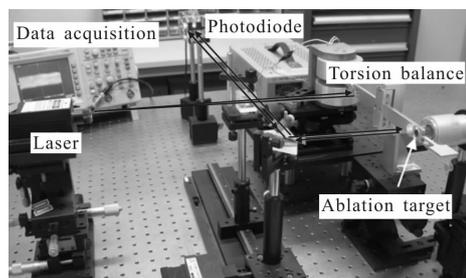


图 1 基于激光干涉法测量微小摆角的扭摆冲量测量系统实物图
Fig.1 Impulse torsion balance system based on laser interferometer measuring small angle

激光干涉测量转角基本原理可以归结为: 利用迈克尔逊干涉原理, 通过干涉条纹的移动数目测量扭摆系统扭转角的变化。设两列光波到达空间一点, 光的波动方程为:

$$\begin{cases} E_1 = a \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x_1 \right) \\ E_2 = a \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} x_2 \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: ω 为振动频率; λ 为光波长。相互叠加后该点的光强为:

$$I = K \left[2a \cos \left[\frac{\pi}{\lambda} (x_2 - x_1) \right] \right]^2 = 2Ka^2 \left\{ 1 + \cos \left[\frac{2\pi}{\lambda} (x_2 - x_1) \right] \right\} \quad (2)$$

式中: K 为比例系数; $R = x_2 - x_1$ 为光程差。当 $R = k\lambda$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时光强为 $I = 4Ka^2$, 产生明条纹; 当 $R = (k + 1/2)\lambda$ ($k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时光强为 $I = 0$, 产生暗条纹。

在单脉冲激光烧蚀下, 靶材烧蚀反喷获得冲量, 扭摆系统横梁瞬间获得角速度 $\dot{\theta}_0$, 开始做有阻尼的自由振动。根据动量矩守恒定理可知:

$$I = \frac{J\dot{\theta}_0}{b} \quad (3)$$

式中: J 为横梁、靶材的总转动惯量; b 为靶材与扭摆中心的距离。

横梁瞬间获得角速度 $\dot{\theta}_0$, 然后有阻尼自由振动, 通过测量扭转角 θ 随时间周期性的变化规律, 计算 $\dot{\theta}$ 估计值, 从而估计出单脉冲激光冲量 I 。在推导冲量计算方程时首先做如下假设: (1) 冲量瞬间完成耦合; (2) 假设扭摆瞬间受到冲量 I 的作用即开始进行自由振动。单脉冲作用时, 系统获得初始角速度 $\dot{\theta}_0$ 后, 阻尼振动方程为:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta = 0 & t \geq 0 \\ \theta(0) = 0, \dot{\theta}(0) = \dot{\theta}_0 \end{cases} \quad (4)$$

求解式(4),可得到自由振动的角度和角速度与初始角速度的关系为:

$$\begin{aligned} \theta(t) &= \frac{\dot{\theta}_0}{\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin\omega_d t, \\ \dot{\theta}(t) &= \frac{\dot{\theta}_0}{\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} (-\zeta\omega_n \sin\omega_d t + \omega_d \cos\omega_d t) \end{aligned} \quad (5)$$

为了把初始角速度 $\dot{\theta}_0$ 转换为实验中易测得的量 θ_{\max} ,令 $\dot{\theta}(t)=0$,得到最大转角对应的时刻 t_{\max} 为:

$$t_{\max} = \frac{1}{\omega_d} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \quad (6)$$

把公式(6)代入公式(5),得到扭摆的最大转角 θ_{\max} 为:

$$\theta_{\max} = \dot{\theta}_0 \frac{\exp\left(-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right)}{\omega_n} \quad (7)$$

联立公式(3)和(7),可得到冲量 I 与最大转角 θ_{\max} 的关系为:

$$I = \frac{J\omega_n}{b} \exp\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta}\right) \theta_{\max} \quad (8)$$

若忽略阻尼 ζ 影响,则冲量可表示为:

$$I_m = \frac{J\omega_n}{b} \theta_{\max} \quad (9)$$

在实际测量中,只要测出最大转角 θ_{\max} 及系统参数 b 、 ω_n 、 J ,就可由公式(10)计算出冲量。利用激光干涉测量转角时,扭秤横梁上装有两个角隅棱镜,因此当扭秤转动时,造成两束相干光的光程差发生改变。当光程差变化一个波长时,两束相干光的相位差变化 2π ,导致光强有一个周期的变化。光强的变化带来干涉条纹的移动,当数据采集卡采集到一条正弦曲线时,代表一个条纹的变化。当满足小角度条件时,转角与条纹移动数目的关系是:

$$\theta = \frac{2\Delta l}{c} = \Delta N \frac{\lambda}{2c} \quad (10)$$

式中: c 为两个角隅棱镜中心之间的距离,这样就建立了扭秤的转角与干涉条纹移动数目的关系。由公式(9)可知,冲量的最终计算公式为:

$$I_m = \frac{J\omega_n \lambda}{2bc} \Delta N_{\max} \quad (11)$$

2 扭摆系统纵轴振动影响

实验中发现光强明条纹出现忽密忽疏现象,即

条纹间距出现不均匀现象,如图 2 所示。由图可以看出,明条纹即电压强时之间的疏密存在明显变化,经分析认为是激光烧蚀过程中扭摆纵轴高频振动影响。

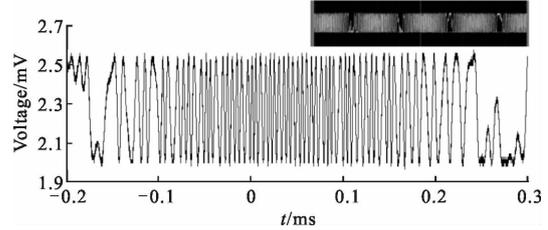


图 2 实验中示波器采集半个周期内电压强度随时间变化
Fig.2 Voltage vs time during half cycle collected by oscilloscope

如图 3 所示,扭摆系统承受烧蚀反喷羽流产生的作用力 $f(t)$,作用力 $f(t)$ 使得纵轴振动,力矩 $M(t)=f(t)(D'/2)$ 使得横梁绕纵轴转动。假设纵轴高度为 h 和直径为 d ,纵轴振动在纵轴中心点处(连接横梁处)垂直纵轴方向位移。

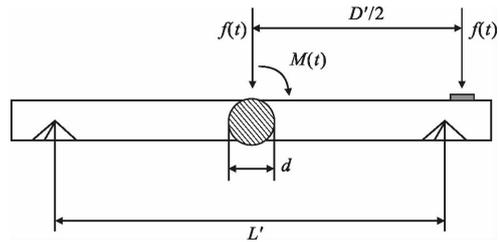


图 3 扭摆系统纵轴振动的影响

Fig.3 Influence of vertical axis vibration of torsion balance system

例如,如果纵轴为钢材制作,弹性模量为 $E=200 \text{ GPa}$,纵轴直径为 $d=5 \text{ mm}$,纵轴高度为 $h=10 \text{ cm}$,并且已知惯性矩为 $I=\pi d^4/64$ 和单位长度质量为 $\rho_l=\pi d^2\rho/4$,纵轴振动的基频为:

$$\omega_1 = \left(\frac{\pi}{h}\right)^2 \sqrt{\frac{Ed^4}{16\rho}} = \left(\frac{\pi}{0.1}\right)^2 \sqrt{\frac{200 \times 10^9 \times (5 \times 10^{-3})^4}{16 \times 7800}} \approx 6247 \text{ rad/s} \quad (12)$$

一般瞬间作用冲量 $I = \int_0^{t_1} f(t) dt$ ($f(t)$ 的作用时间 t_1 很小)作用下,横梁绕纵轴转动的频率 ω_d 比 ω_1 小 2 个数量级以上,横梁转动的扭转角为:

$$\theta_T(t) = \frac{\dot{\theta}_0}{\omega_d} \cdot e^{-\zeta\omega_n t} \sin\omega_d t \quad (13)$$

横梁由于垂直纵轴方向振动,产生的附加扭转角为:

$$\theta_A(t) = a_1 b_1(\zeta_1, \omega_{d1}, t) \sin \omega_{d1} t \quad (14)$$

式中:系数 $b_1(\zeta_1, \omega_{d1}, t)$ 表示阻尼影响,随着时间逐渐减小。因此,横梁扭转角实际上为:

$$\theta(t) = \theta_T(t) + \theta_A(t) = \frac{\dot{\theta}_0}{\omega_d} \cdot e^{-\zeta \omega_n t} \sin \omega_d t + a_1 b_1(\zeta_1, \omega_{d1}, t) \sin \omega_{d1} t \quad (15)$$

为了研究附加高频振动对实验测量的影响,设横梁扭转角为:

$$\theta(t) = \theta_T(t) + \theta_A(t) = a_0 \sin \omega_d t + a_1 \sin \omega_{d1} t \quad (16)$$

将公式(16)带入公式(5),并且光程差 $R = 2L' \tan \theta$,就可计算扭转角、明条纹数目 $k = R/\lambda$ 和光强 I 等随着时间变化规律。具体计算时,参数分别为 $a_0 = 1 \times 10^{-4}$ rad, $a_1 = 1 \times 10^{-6}$ rad, $\omega_d = 20$ rad/s, $\omega_{d1} = 2000$ rad/s, $L' = 15$ cm, 激光波长 $\lambda = 532 \times 10^{-9}$ m, 光强系数 $2Ka^2 = 1$, 其中附加高频振动频率是转动振动频率的 100 倍。

图 4 所示为扭转角 θ 随着时间 t 变化,由于附加高频振动影响,扭转角在转动振动基础上附加了高频干扰。

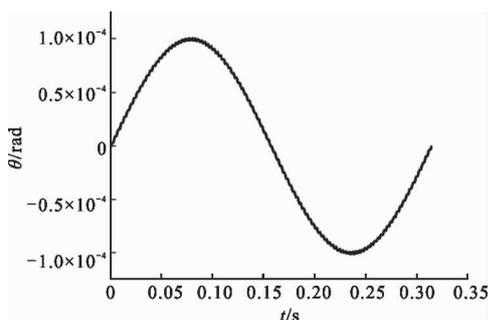


图 4 扭转角随时间变化

Fig.4 Torsion angle vs time

图 5 所示为光强 I 随着时间 t 变化,由于附加高频振动影响,光强明条纹出现忽密忽疏现象,即条纹间距不均匀现象。

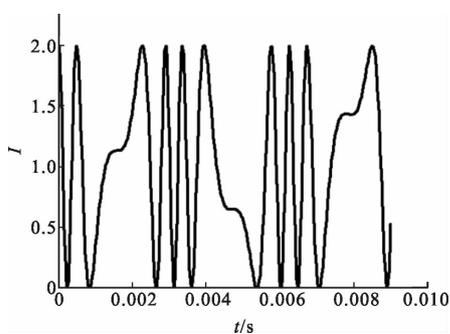


图 5 光强随时间变化

Fig.5 Light intensity vs time

图 6 所示为明条纹数目 k 随着时间变化,由于附加高频振动影响, $k = R/\lambda$ 数值忽然急剧变化忽然平坦变化,平坦变化对应宽条纹间距。

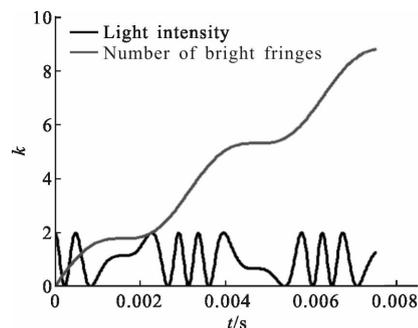


图 6 明条纹数目随时间变化

Fig.6 Number of bright fringes vs time

图 7 所示为无高频振动影响(虚线)和有高频振动影响(实线)情况比较,无高频振动影响时, $k = R/\lambda$ 随着时间基本线性变化,明条纹间距均匀。显然,由于附加高频振动干扰,实验观测量明条纹数目随时间变化(k, t_k)出现疏密不均匀现象,偏离正常状态。

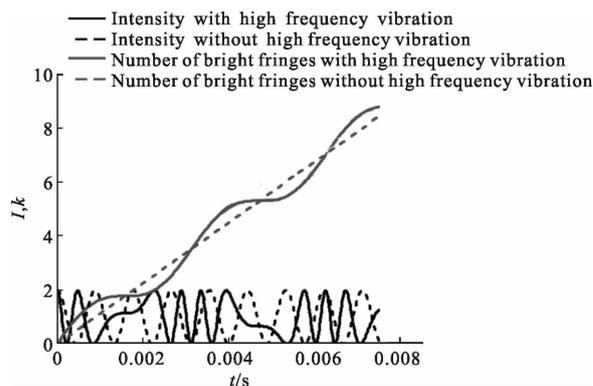


图 7 无高频振动和有高频振动情况下光强和明条纹数目随时间变化

Fig.7 I and k vs time with and without high frequency vibration

3 扭摆系统初始误差角影响

在测量过程中,扭摆系统在未受到激光作用产生冲量前,由于受环境振动影响,不可避免会在其平衡位置附近不停振动,因此会有一个较小的初始误差角,假设初始误差角为 θ_0 ,如图 8 所示,横梁在激光单脉冲作用下,瞬间获得冲量 S ,在初始误差角 θ_0 状态时开始振动,扭转角为 θ 。

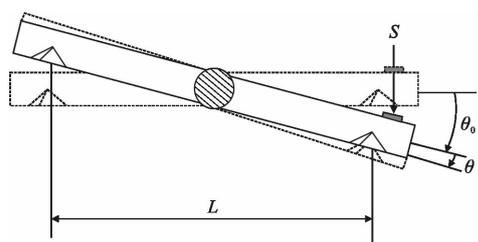


图 8 扭摆系统横梁初始误差角为 θ_0

Fig.8 Initial error angle θ_0 of twist beam of torsion system

扭转角 θ 引起的光程差为:

$$R=2L[\tan(\theta+\theta_0)-\tan\theta_0]=2L\frac{\sin\theta}{\cos(\theta+\theta_0)\cos\theta_0} \quad (17)$$

式中: L 为入射相干光间距, $L=L'\cos\theta_0$, L' 为两个角隅棱镜的间距。

如图 8 所示情况初始误差角 θ_0 为正(顺时针旋转为正), 考虑到初始误差角为负情况(逆时针旋转为负), 光程差可表示为:

$$R=2L\frac{\sin\theta}{\cos\theta_0\cos(\theta_0\pm\theta)} \quad (18)$$

式中: 扭转角 θ 引起的光程差为 $R=k\lambda$ ($\lambda=0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 时产生明条纹。

为了讨论方便, 利用 $L=L'\cos\theta_0$ 进行简化, 对于初始误差角 $\theta_0=0$ 的理想情况, 有:

$$R=2L'\tan\theta \quad (19)$$

对于初始误差角 $\theta_0 \neq 0$ 的情况, 有:

$$R=2L'\tan\theta\frac{\cos\theta}{\cos(\theta_0\pm\theta)} \quad (20)$$

如图 9 所示, 为初始误差角 $\theta_0=0$ (实线表示) 和初始误差角 $\theta_0=10^\circ$ (虚线表示) 时, 明条纹数目 k 和光强 I 随着时间变化, 由于初始误差角较小, 明条纹出现时间前移量不大。

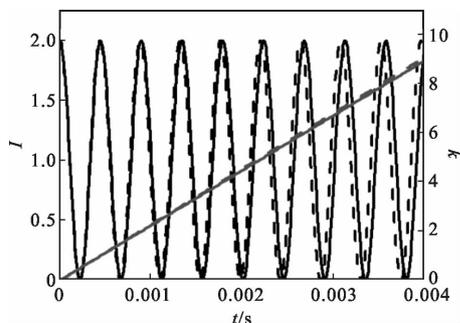


图 9 θ_0 为 $0, 10^\circ$ 时明条纹数目 k 和光强 I 变化

Fig.9 k and I vs time when initial error angle θ_0 was $0, 10^\circ$

显然, 初始误差角增大光程差, 初始误差角越大, 明条纹数目越大, 明条纹出现时间前移量越大, 进一步研究表明, 初始误差角正负号对明条纹时间前移量影响基本一致。

4 基于最小二乘法的实验数据分析方法

4.1 实验数据分析

设有 $n+1$ 个实验数据点 (t, t_k) ($k=0, 1, 2, \dots, n$), 由公式(20)可得, 第 k 个明条纹对应的扭转角 θ_k 满足

$$\frac{\sin\theta_k}{\cos\theta_0\cos(\theta_0\pm\theta_k)} = \frac{k\lambda}{2L'} = C(k), \tan\theta_k = \frac{C(k)\cos\theta_0}{1\pm C(k)\sin\theta_0} \quad (21)$$

式中: L' 为两个角隅棱镜的间距, 扭摆满足 $\theta_k \ll 1$ 和 $C(k)\sin\theta_0 \leq C(k) \ll 1$, 扭转角测量值可表示为:

$$\theta_k \approx C(k)\cos\theta_0 \quad (22)$$

又由于高频振动干扰, 扭转角为:

$$\theta(t) = \theta_T(t) + \theta_A(t) = \frac{\theta_0}{\omega_d} \cdot e^{-\zeta\omega_d t} \sin\omega_d t + a_1 b_1(\zeta_1, \omega_{d1}, t) \sin\omega_{d1} t \quad (23)$$

因此有

$$\theta_k \approx C(k)\cos\theta_0 = \frac{\dot{\theta}_0}{\omega_d} \cdot e^{-\zeta\omega_d t_k} \sin\omega_d t_k + a_1 b_1(\zeta_1, \omega_{d1}, t) \sin\omega_{d1} t \quad (24)$$

令

$$x(k) = e^{-\zeta\omega_d t_k} \sin\omega_d t_k, A = \frac{\dot{\theta}_0}{\omega_d \cos\theta_0}, V(k) = \frac{1}{\cos\theta_0} a_1 b_1(\zeta_1, \omega_{d1}, t) \sin\omega_{d1} t \quad (25)$$

则有

$$C(k) = Ax(k) + V(k) \quad (26)$$

根据最小二乘法, 令高频测量噪声的平方和最

小, 即 $\sum_{k=0}^n V^2(k) \rightarrow \min$, 也就是

$$\frac{d}{dA} \sum_{k=0}^n [C(k) - Ax(k)]^2 = 0 \quad (27)$$

求得系数

$$A = \frac{\sum_{k=0}^n C(k)x(k)}{\sum_{k=0}^n x(k)x(k)} \quad (28)$$

如果高频测量噪声服从正态分布 $V(k) \sim N(0, \sigma_V^2)$,

其方差估计值为:

$$\sigma_V^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=0}^n V^2(k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=0}^n [C(k) - Ax(k)]^2 \quad (29)$$

由于 $C(k) = Ax(k) + V(k)$, 滤波后 $\bar{C}(k) = Ax(k)$, 因此

$$\theta_k \approx C(k) \cos \theta_0 = [Ax(k) + V(k)] \cos \theta_0 = \cos \theta_0 Ax(k) + \cos \theta_0 V(k) \quad (30)$$

即滤波后扭转角为:

$$\bar{\theta}_k \approx \cos \theta_0 \bar{C}(k) = \cos \theta_0 Ax(k) = \frac{\dot{\theta}_0}{\omega_d} \cdot e^{-\zeta \omega_d t_k} \sin \omega_d t_k \quad (31)$$

式中: $\bar{\theta}_k$ 就是真实扭转角。

4.2 冲量计算方法

扭摆系统横梁有初始误差角 θ_0 , 瞬间获得冲量 S 的分量为 $I \cos \theta_0$, 引起扭摆转动, 可得:

$$S \cos \theta_0 = \frac{2J \dot{\theta}_0}{D'} \quad (32)$$

式中: $D'/2$ 为冲量作用点与纵轴(转轴)中心距离。

激光单脉冲能量 S 作用下, 扭摆获得冲量为:

$$S = \frac{2J \dot{\theta}_0}{D' \cos \theta_0} = \frac{2J \omega_d}{D'} A \quad (33)$$

应用上述测量方法, 开展了典型实验测量。在真空中测量 AZ31B 镁合金在纳秒脉冲激光作用下获得的冲量, 烧蚀激光脉宽为 8 ns, 单脉冲激光能量 $E = 0.2678 \text{ J}$, 探测激光波长 $\lambda = 532 \text{ nm}$, 激光聚焦后功率密度为 $2.7 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$, 两个棱镜之间的距离为 $L' = 14.788 \text{ cm}$, 激光作用点到横梁中心距离为 $D'/2 = 9.188 \text{ cm}$ 。经过标定扭摆系统的频率为 $\omega_d = 22.127528 \text{ rad/s}$, 转动惯量 $J = 5.381 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 阻尼比 $\zeta = 7.84842 \times 10^{-4}$ 。如图 10 所示为光强随着时间

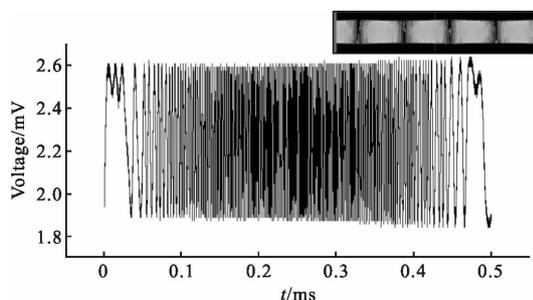


图 10 半个周期内光强随着时间变化的一组实验测量数据
Fig.10 Experimental measurement data of light intensity vs time in half cycle

变化的一组实验测量数据, 明显出现了明条纹间距忽密忽疏现象, 显然扭摆系统有高频振动干扰。根

据图 10 所示测量结果, 可获得条纹数目随时间变化关系, 根据所提出方法对测量实验数据的计算可得, 单脉冲激光烧蚀靶材获得的冲量为 $I = 2.370510 \times 10^{-5} \text{ Ns}$, 并且系数 $A = 1.829224 \times 10^{-4}$, 拟合标准差为 $\sigma_V = 2.432351 \times 10^{-6}$ 。

5 结论

采用基于激光干涉法的扭摆系统测量超短脉冲激光烧蚀产生的冲量, 由于采用激光差动干涉测量转角, 因此可以显著改善测角分辨率, 进而提高冲量测量精度。但利用扭摆系统测量冲量时, 会受到扭摆纵轴高频振动干扰和初始误差角影响, 高频振动干扰造成明条纹间距忽密忽疏现象, 因而对条纹数目变化产生影响, 进而对扭摆转角测量产生影响; 初始误差角造成明条纹对应时间前移, 同样也会对条纹数目产生影响。提出采用最小二乘法滤去高频测量噪声方法, 不用估计初始误差角, 从而在存在高频振动干扰和初始误差角情况下, 解决了冲量测量数据分析问题。

参考文献:

- [1] Phipps C R, Birkan M, Bohn W, et al. Review: laser-ablation propulsion [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 609-637.
- [2] Phipps C R, Luke J, Funk D, et al. Laser impulse coupling at 130 fs [J]. *Applied Surface Science*, 2006, 252(13): 4838-4844.
- [3] Bruno Esmiller, Christophe Jacqueland, Hans-Albert Eckel, et al. Space debris removal by ground-based lasers: main conclusion of the European project CLEANSPACE [J]. *Applied Optics*, 2014, 53(31): 45-54.
- [4] Phipps C R, Baker K L, Libby S B, et al. Removing orbital debris with lasers [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(9): 1283-1300.
- [5] Hong Yanji, Jin Xing, Chang Hao. Discussion of key problems in space based laser centimeter orbital debris removal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0229001. (in Chinese)
- 洪延姬, 金星, 常浩. 天基平台激光清除厘米级空间碎片关键问题探讨 [J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0229001.
- [6] Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Research progress in micro-laser plasma propulsion [J]. *Chinese Optics*,

- 2011, 4(4): 319–326. (in Chinese)
- 叶继飞, 洪延姬, 王广宇, 等. 激光等离子体微推进技术的研究进展[J]. 中国光学, 2011, 4(4): 319–326.
- [7] Pakhomov A V, Thompson M S, Swift W, et al. Ablative laser propulsion: Specific impulse and thrust derived from force measurements[J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(11): 2305–2311.
- [8] Yabe T, Phipps C R, Aoki K, et al. Laser-driven vehicles - from inner-space to outer-space [J]. *Applied Physics A - Materials Science & Processing*, 2003, 77(2): 243–249.
- [9] Jamil Y, Saeed H, Ahmad M R, et al. Measurement of ablative laser propulsion parameters for aluminum, Co-Ni ferrite and polyurethane polymer [J]. *Applied Physics A - Materials Science & Processing*, 2013, 110(1): 207–210.
- [10] Zhang N, Wang W, Zhu X, et al. Investigation of ultrashort pulse laser ablation of solid targets by measuring the ablation-generated momentum using a torsion pendulum [J]. *Optics Express*, 2011, 19(9): 8870–8878.
- [11] Wen Ming, Ye Jifei, Xiong Yong, et al. Measuring method of multiple-pulse impulse coupling coefficient based on compound pendulum model [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(5): 633–637. (in Chinese)
- 文明, 叶继飞, 熊勇, 等. 基于复摆模型的多脉冲冲量耦合系数测量方法[J]. 推进技术, 2009, 30(5): 633–637.
- [12] Ketsdever A D, D' Souza B C, Lee R H. Thrust stand micromass balance for the direct measurement of specific impulse[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2008, 24(6): 1376–1381.
- [13] Wang Guangyu, Jin Xing, Ye Jifei. Principle of micro-impulse measurements using laser interferometry [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(5): 530–533. (in Chinese)
- 王广宇, 金星, 叶继飞. 激光干涉仪测微冲量原理[J]. 推进技术, 2007, 28(5): 530–533.
- [14] Ye Jifei, Hong Yanji, Li Nanlei. Impulse coupling performance of liquid propellant with ns laser micro ablation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 102–106. (in Chinese)
- 叶继飞, 洪延姬, 李南雷. 纳秒激光烧蚀液态工质冲量耦合特性研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 102–106.