

激光微推力器多脉冲作用下的力学性能测量方法

周伟静, 洪延姬, 叶继飞

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 怀柔 101416)

摘要: 为研究脉冲激光推力器多脉冲工作模式下的推力/冲量力学特点, 分析了扭摆系统在多脉冲作用力作用下的响应特点, 提出了多脉冲作用力的平均推力和冲量的测量方法, 并通过仿真分析了多脉冲作用力重频、非标准周期多脉冲力对测量的影响。仿真结果表明: 当脉冲力的重频是扭摆固有频率的 10 倍以上时, 可以利用稳态转角均值计算平均推力; 在扭摆周期远大于多脉冲工作时间的 4 倍时, 可以利用转角的最大峰值以及达到最大峰值前的转角测量值计算冲量; 当脉冲作用力为非标准周期性作用力时, 推力/冲量测量方法仍然有效。

关键词: 激光推力器; 多脉冲; 推力测量; 冲量测量

中图分类号: V439; TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.S206002

Mechanical performance measurement method for laser micro-thruster working in multi-pulse mode

Zhou Weijing, Hong Yanji, Ye Jifei

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

Abstract: To research the thrust or impulse characteristics of the laser micro-thruster working in multi-pulse mode, the response characteristics of the torsional balance responding to multi-pulse force was analyzed. The measurement method of average thrust or impulse for multi-pulse force was brought forward, and the influence on the measurement of the frequency of the pulse force and when the pulse force was not standard periodic pulse was analyzed by simulation. The results demonstrate that the average thrust is determined as a function of the average equilibrium when the repetitive frequency of pulse force is much higher than the natural frequency such as 10 times. The impulse is determined as a function of the maximum peak and the angle before the maximum peak time when the period of the balance is longer than the working time of multi-pulse force. And when the multi-pulse force is not standard period pulse, the method above is effective.

Key words: laser micro-thruster; multi-pulse; thrust measurement; impulse measurement

收稿日期: 2016-08-09; 修订日期: 2016-09-07

基金项目: 国家自然科学基金(11502301)

作者简介: 周伟静(1982-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事激光推进、推进性能测量方面的研究。Email: viviazhouyy@163.com

0 引言

激光微推力器以其比冲高、冲量动态范围宽、冲量比特小、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成为最具应用前景的微推力器方案之一^[1]。其工作原理是将脉冲激光整形聚焦于工质表面,通过激光与物质的相互作用,形成微小的物质喷射,实现宏观的力学效应——冲量或推力。目前,根据激光器和工质的特点,激光微推力器工作模式分类众多,比如:根据激光脉冲长短不同,可分为毫秒长脉宽工作模式和纳秒短脉宽工作模式;根据工质制备结构不同,可分为透射式工作模式和反射式工作模式;根据工质物相不同,可分为液体工质工作模式和固体工质模式;等等。不管采用哪种模式,激光与工质耦合产生的宏观力学性能(冲量/推力)测量是激光推力器研制和应用的关键。

单脉冲激光作用下工质产生的单脉冲冲量测量研究甚多^[2-10],也为激光微推力器的设计提供了很好的实验依据。当激光以一定频率、一定占空比的多脉冲形式烧蚀工质时,由于多个脉冲激光能量密度的不稳定性、工质烧蚀表面的不规则性^[11]、工质制备掺杂的不均匀性^[12]等因素,此时工质获得的宏观力学效应(冲量/推力)不能简单地认为是单脉冲激光作用下力学效应的累加。多脉冲激光作用下工质产生的力学性能也需要测量和研究。

文中即以典型的扭摆系统为基本测量方案,研究多脉冲作用力下的扭摆响应特性,分析多脉冲作用力的重复频率等对扭摆响应的影响,从而为激光推力器多脉冲作用下的力学性能测量提供测量原理理论参考和测量装置设计优化依据。

1 多脉冲作用力下的扭摆响应

1.1 扭摆的基本运动方程

扭摆型测量系统是典型的二阶质量-弹簧-阻尼系统,其力学运动模型为:

$$J\ddot{\theta}+c\dot{\theta}+k\theta=M=f(t)b \quad (1)$$

式中: θ 为转角; J 为测量系统对于转轴的转动惯量; c 为阻尼系数; k 为等效弹性系数; M 为推力产生的力矩; b 为力臂长度。在测量过程中,系统做小幅振

动,力的作用点和方向固定,力臂不变,所以 $M \propto F$ 。

引入阻尼比 ζ ,无阻尼自振角频率 ω_n ,式(1)写为标准振动方程:

$$\ddot{\theta}+2\zeta\omega_n\dot{\theta}+\omega_n^2\theta=M/J; \quad (2)$$

式中: $\omega_n=\sqrt{k/J}$; $\zeta=\frac{c}{2\sqrt{kJ}}$ 。引入有阻尼自振角频率

ω_d ,且 $\omega_d=\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$ 。

1.2 多脉冲作用力表达式

设多脉冲作用力为 $f(t)$, T_f 为脉冲周期, T_w 为作用时间。为研究扭摆在 $f(t)$ 作用下的响应特性,需要对式(2)进行求解。将前一个脉冲周期结束时的响应作为下一个脉冲周期的初始条件,如此不断重复求解系统的响应的做法是不可行的。因为不能准确知道脉冲波形的详细信息。更为现实的方法是将重复频率脉冲推力作为周期性函数,求解系统在周期性输入作用下的响应。

一个以 T_f 为周期的标准周期性函数 $f(t)$ 若在一个周期上满足狄利克雷(Dirichlet)条件时,都可以表示为如下形式的傅里叶级数:

$$f(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}(a_n\cos n\omega_0 t+b_n\sin n\omega_0 t) \quad (3)$$

式中: $\omega_0=2\pi/T_f$, $a_0=\frac{2}{T_f}\int_{-T_f/2}^{T_f/2}f(t)dt$,

$$a_n=\frac{2}{T_f}\int_{-T_f/2}^{T_f/2}f(t)\cos n\omega_0 t dt,$$

$$b_n=\frac{2}{T_f}\int_{-T_f/2}^{T_f/2}f(t)\sin n\omega_0 t dt。$$

将式(3)中同频率项合并,可写为:

$$f(t)=\frac{A_0}{2}+\sum_{n=1}^{\infty}A_n\cos(n\omega_0 t+\phi_n) \quad (4)$$

式中: $A_0=a_0$, $A_n=\sqrt{a_n^2+b_n^2}$, $\phi_n=-\arctan\frac{b_n}{a_n}$ 。

1.3 多脉冲作用力下的响应

设多脉冲作用力 $f(t)$ 的作用时间为 T_w ,根据扭摆的基本振动方程可得:

$$\begin{cases} \ddot{\theta}+2\zeta\omega_n\dot{\theta}+\omega_n^2\theta=f(t)b/J, & 0\leq t\leq T_w \\ \ddot{\theta}+2\zeta\omega_n\dot{\theta}+\omega_n^2\theta=0, & T_w\leq t \\ \theta(0)=0, \dot{\theta}(0)=0 \end{cases} \quad (5)$$

(1)多脉冲作用力作用时的方程解

根据式(4)和式(5), $0\leq t\leq T_w$ 时, $A_0/2$ 的分量引

起的系统响应为:

$$\theta_{A_0} = b \frac{A_0}{2k} \left[1 - \frac{e^{-\zeta \omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin \left(\omega_d t + \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta} \right) \right] \quad (6)$$

谐波分量 $A_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n)$ 引起的系统响应为:

$$\theta_n = b X_n \cos(n\omega_0 t - \theta_{ln}) + b e^{-\zeta \omega_n t} Y_n \sin(\omega_d t + \theta_{2n}) \quad (7)$$

式中:

$$\begin{cases} \theta_{ln} = \arctan \frac{2\zeta n\omega_0/\omega_n}{1-(n\omega_0/\omega_n)^2} - \phi_n \\ X_n = \frac{A_n}{k \sqrt{[1-(n\omega_0/\omega_n)^2]^2 + (2\zeta n\omega_0/\omega_n)^2}} \\ Y_n = -X_n \sqrt{1 + \frac{[\zeta + (n\omega_0/\omega_n) \tan \theta_{ln}]^2}{1-\zeta^2}} \cos \theta_{ln} \\ \theta_{2n} = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta + (n\omega_0/\omega_n) \tan \theta_{ln}} \end{cases}$$

则多脉冲作用力作用时扭摆转角 $\theta_{force}(t)$ 为:

$$\theta_{force}(t) = \theta_{A_0} + \sum_{n=1}^{\infty} \theta_n, 0 \leq t \leq T_w \quad (8)$$

可以看出,多脉冲作用力作用时,扭摆转角围绕一定值振荡。

(2)多脉冲作用力结束后的方程解

$t=T_w$ 时,多脉冲作用力结束,此时转角和转角角速度分别为 θ_{T_w} 和 $\dot{\theta}_{T_w}$,根据拉普拉斯变换,由式(5)可得:

$$(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)\Theta(s) = \theta_{T_w}(s + 2\zeta\omega_n) + \dot{\theta}_{T_w} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \Theta(s) &= \frac{\theta_{T_w}(s + \zeta\omega_n) + \omega_d[\theta_{T_w}\zeta\omega_n + \dot{\theta}_{T_w}]/\omega_d}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} = \\ &= \frac{(s + \zeta\omega_n)\sin \alpha + \omega_d \cos \alpha}{(s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2} \times \\ &= \frac{\sqrt{\theta_{T_w}^2 + \left[\frac{\theta_{T_w}\zeta\omega_n + \dot{\theta}_{T_w}}{\omega_d} \right]^2}}{\omega_d} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $\alpha = \arctan \frac{\theta_{T_w} \omega_d}{\theta_{T_w} \zeta \omega_n + \dot{\theta}_{T_w}}$ 。

则多脉冲作用力结束后扭摆转角 $\theta_{unloadforce}(t)$ 为:

$$\begin{aligned} \theta_{unloadforce}(t) &= L^{-1}[\Theta(s)] = \\ &= e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_d t + \alpha) \sqrt{\theta_{T_w}^2 + \left[\frac{\theta_{T_w} \zeta \omega_n + \dot{\theta}_{T_w}}{\omega_d} \right]^2} \end{aligned} \quad (11)$$

可以看出,多脉冲作用力结束后,扭摆转角在零点按照正弦函数振荡,且振荡幅值与多脉冲作用力结束时刻的转角和转角角速度有关,随着时间的推移,转角会趋于零点。

2 多脉冲作用力的推力/冲量测量

根据卫星的控制任务,激光推力器需要提供持续推力(如克服摄动影响)和脉冲冲量(如进行姿态控制)。因为脉冲激光峰值功率较高,通常采用脉冲激光以一定的频率烧蚀工质。当激光器工作时间较长,输出激光脉冲个数较多,烧蚀工质产生宏观的持续推力效应;当激光器工作时间较短,输出激光脉冲个数较少,烧蚀工质产生宏观的冲量效应。

2.1 多脉冲作用力的推力测量

脉冲激光推力器产生的宏观持续推力效应,一般用单位时间内推力的平均值来表示,称为平均推力:

$$\overline{f(t)} = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_w} f(t) dt = \frac{1}{T_f} \int_{-T_f/2}^{T_f/2} f(t) dt = \frac{A_0}{2} \quad (12)$$

由式(8)可以看出,如果推力测量系统满足 $\zeta \neq 0$,多脉冲作用力下,系统的稳态转角为:

$$\theta = b \frac{A_0}{2k} + \sum_{n=1}^{\infty} b X_n \cos(n\omega_0 t + \phi_n) \quad (13)$$

则稳态转角均值为:

$$\bar{\theta} = b \frac{A_0}{2} = \frac{b \overline{f(t)}}{k} \quad (14)$$

因此,利用系统响应的稳态均值即可测量多脉冲作用力的平均推力:

$$\overline{f(t)} = (k \bar{\theta})/b \quad (15)$$

2.2 多脉冲作用力的冲量测量

脉冲激光推力器多脉冲方式下,比如,半导体激光器脉宽在 ms 量级,重频在 100 Hz 以内,当输出有限个脉冲,工作时间在百 ms 量级时,很难测量出推力,一般用推力对时间的累积表示,即冲量:

$$I = \int_0^{T_w} f(t) dt \quad (16)$$

根据式(16),由式(5)可得

$$\begin{aligned} I &= \frac{J}{b} \int_0^{T_w} (\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n \dot{\theta} + \omega_n^2 \theta) dt = \frac{J}{b} (\dot{\theta}(T_w) - \dot{\theta}(0)) + \\ &= \frac{J}{b} [2\zeta\omega_n(\theta(T_w) - \theta(0)) + \omega_n^2 \int_0^{T_w} \theta dt] \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\theta(0)$ 和 $\dot{\theta}(0)$ 为初始时刻角速度和角度,均为 0; $\theta(T_w)$ 和 $\dot{\theta}(T_w)$ 为力作用结束时刻角速度和角度。多脉冲作用力结束时间在百 ms 量级, $\theta(T_w)$ 和 $\dot{\theta}(T_w)$ 很难确定。因此,考虑设计扭摆系统的周期 $T_{balance} \geq 4T_w$,即多脉冲作用力在扭摆转角达到第一个峰值时刻 t_p 前

结束,则

$$I = \int_0^{T_n} f(t) dt = \int_0^{t_p} f(t) dt \quad (18)$$

转角达到第一个峰值时, $\theta(t_p) = \theta_{max}$ 和 $\dot{\theta}(t_p) = 0$ 。根据式(17)可得:

$$I = \frac{J}{b} \int_0^{T_n} (\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta) dt = \frac{J}{b} \left[2\zeta\omega_n\theta_{max} + \omega_n^2 \int_0^{t_p} \theta dt \right] \quad (19)$$

因此, 根据扭摆转角最大峰值和达到最大峰值之前的转角测量值, 即可获取冲量。

3 推力/冲量测量仿真分析

根据式(15)和式(19), 通过扭摆转角测量值即可获得推力或冲量。利用 Matlab/Simulink 仿真验证推力/冲量测量原理, 并仿真分析脉冲作用力重复频率以及脉冲作用力为非标准周期性作用力时对推力/冲量测量的影响。

设定扭摆系统固有周期 $T_{balance} = 2$ s, 阻尼比 $\zeta = 0.3$, 固有角频率 $\omega_n = 3.29$ rad/s, 转动惯量 $J = 0.035$ kg·m², 弹性系数 $k = 0.38$ N·m/rad, 作用力力臂 $b = 0.5$ m。

3.1 推力/冲量测量基本原理验证

设激光脉宽 2 ms, 重复频率 100 Hz, 产生的脉冲力波形近似为方波, 幅值为 100 μN。作用时间分别为 10 s(此时平均推力为 20 μN)和 0.2 s(此时冲量为 4 μNs)时的扭摆响应曲线如图 1 和图 2 所示。

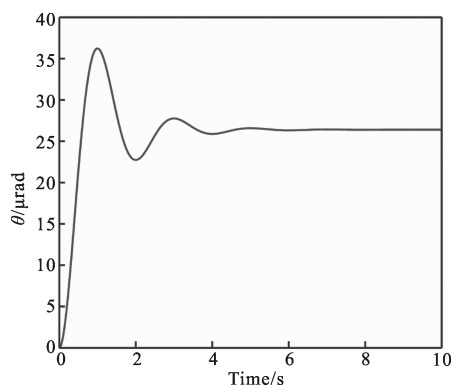


图 1 多脉冲作用力工作 10 s 时的扭摆响应

Fig.1 Response of the torsional balance when multi-pulse force working for 10 s

由图 1 可以看出, 在 6 s 后, 扭摆转角进入稳态, 此时可以根据稳态扭摆转角均值获取平均推力大小, 由式(15)可得平均推力为 20.059 μN, 与理论值一致。

由图 2 可以看出, 在多脉冲作用力结束后, 扭摆做自由振动, 根据式(19)可以计算得到持续 0.2 s 的多脉冲产生的冲量为 4.003 μN·s, 与理论值一致。

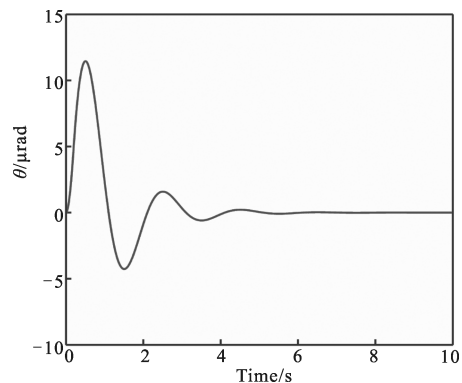


图 2 多脉冲作用力工作 0.2 s 时的扭摆响应

Fig.2 Response of the torsional balance when multi-pulse force working for 0.2 s

3.2 重复频率对推力/冲量测量的影响

由式(13)可以看出, 系统稳态转角围绕一常值做振荡, 且振荡的幅值与脉冲的重频和扭摆固有装置的固有频率的比值 ω_0/ω_n 相关。设激光脉宽 2 ms, 产生的脉冲力波形近似为方波, 幅值为 100 μN。多脉冲作用力工作时间为 10 s, 重复频率分别为扭摆频率的 5、10、20 和 40 倍, 即 2.5、5、10、20 Hz 时, 扭摆的响应如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 脉冲力作用力重复频率越高, 扭摆稳态振荡幅值越小, 当 $\omega_0/\omega_n > 10$ 时, 振荡幅值与稳态均值小于 2%, 有利于转角稳态值的测量。因此, 在测量激光推力器多脉冲模式下平均推力时, 设计扭摆的频率要远低于脉冲频率, 即扭摆周期要达到脉冲周期的 10 倍以上。

同样, 当多脉冲作用力工作时间为 0.2 s, 重复频率分别为扭摆频率的 5、10、20 和 40 倍, 即 2.5、5、10、20 Hz 时, 扭摆的响应如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 当激光推力器多脉冲工作反映出的是冲量效应时, 多脉冲频率不会对扭摆响应产生振荡, 只是同样的时间内累积的冲量效应大, 转角达到第一个峰值时较大。值得注意的是, 测量多脉冲冲量时, 要保证多脉冲的工作时间在扭摆达到第一个峰值的时间之内。因此, 设计扭摆时, 保证扭摆周期是多脉冲工作时间的 4 倍以上, 否则根据转角很难计算冲量。

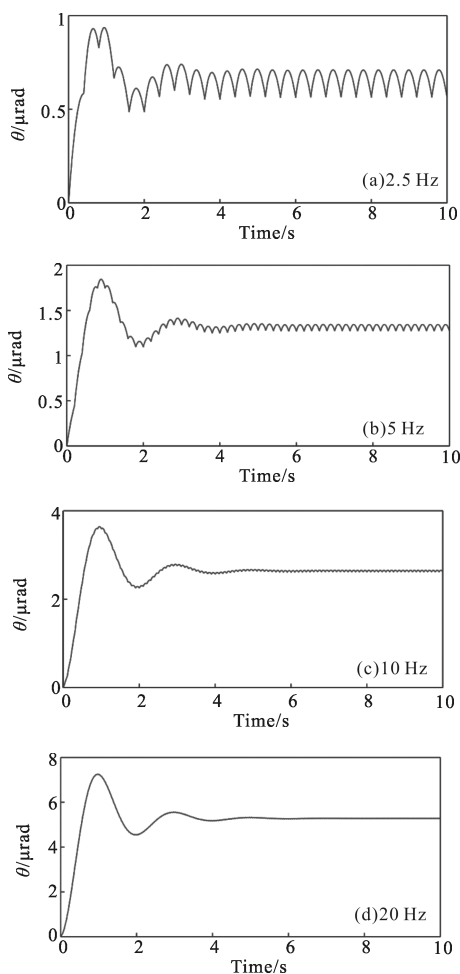


图 3 多脉冲作用力工作时间 10s, 重复频率分别为 2.5、5、10、20 Hz 时的扭摆响应

Fig.3 Response of the torsional balance when the frequency of multi-pulse force is 2.5、5、10 Hz and 20 Hz and working for 10 s

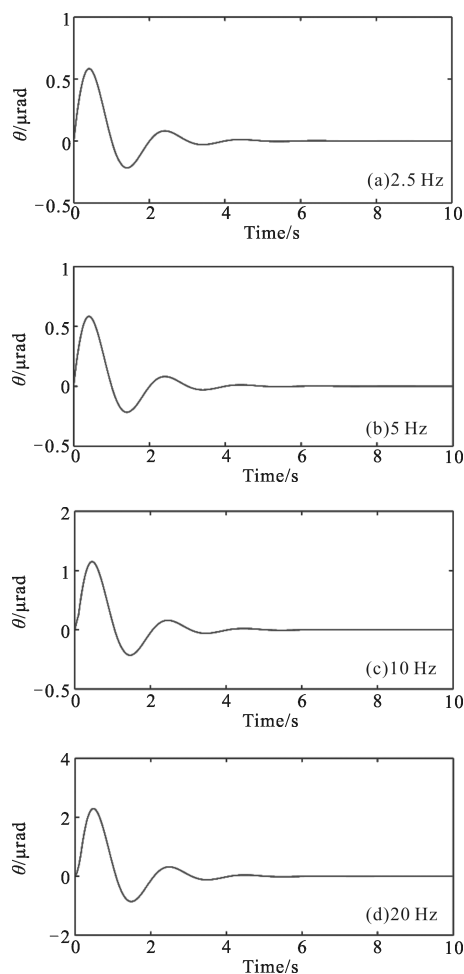


图 4 多脉冲作用力工作时间 0.2s, 重复频率分别为 2.5、5、10、20 Hz 时的扭摆响应

Fig.4 Response of the torsional balance when the frequency of multi-pulse force is 2.5、5、10 Hz and 20 Hz and working for 0.2 s

3.3 非标准脉冲标准力对推力/冲量测量的影响

脉冲激光推力器工作时, 由于激光能量加载的不均匀性、工质烧蚀表面的不规则性、工质制备掺杂的不均匀性等因素, 形成的单个脉冲推力曲线各异, 会造成扭摆输入不是标准周期信号。

设激光脉宽 2ms, 重复频率 100Hz, 作用时间持续 10s, 产生的脉冲里波形近似为方波, 幅值为 100 μN, 但在 1、3s 和 7s 处变为零, 持续时间均为 0.01s。扭摆响应如图 5 所示。

由图 5 可以看出, 在非标准多脉冲推力作用下, 扭摆响应与图 1 相似, 围绕稳态值振荡。根据稳态扭转角均值计算平均推力为 20.009 μN, 平均推力实际值为 19.94 μN, 相对误差为 0.35%。

设激光脉宽 2ms, 重复频率 100Hz, 作用时间持续

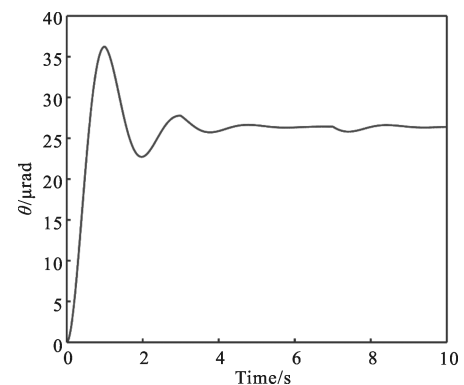


图 5 非标准周期多脉冲作用力工作 10 s 的扭摆响应

Fig.5 Response of the torsional balance when unstandard period multi-pulse force working for 10 s

0.2s, 产生的脉冲里波形近似为方波, 幅值为 100 μN, 但 0.05s 和 0.1s 处脉冲推力变为零, 持续时间均为

0.01 s。扭摆响应如图 6 所示。

由图 6 可以看出,在非标准多脉冲推力作用下,扭摆响应与图 2 相似,计算得到冲量为 $3.5983 \mu\text{N}\cdot\text{s}$,冲量实际值为 $3.55 \mu\text{N}\cdot\text{s}$,相对误差为 1.36%。

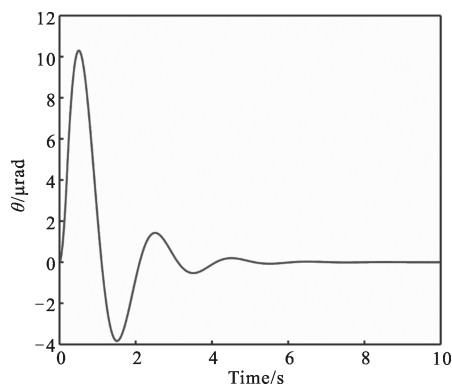


图 6 非标准周期多脉冲作用力工作 0.2 s 的扭摆响应

Fig.6 Response of the torsional balance when unstandard period multi-pulse force working for 0.2 s

4 结 论

针对脉冲激光推力器的多脉冲工作模式产生的推力和冲量力学效应特点,分析了扭摆系统在多脉冲作用力作用下的响应特点,提出了多脉冲作用力的平均推力和冲量的测量方法,并通过仿真分析了测量方法的有效性,以及设计扭摆需要注意的周期问题。具体研究结论如下:

(1)激光推力器在多脉冲工作模式下体现的宏观力学效应为推力时,可用平均推力表示,扭摆响应到达稳态时转角围绕某一稳定值振荡。而且当脉冲力的重频远大于扭摆固有频率时,该振荡越小,可以利用稳态转角均值计算平均推力的误差越小。

(2)激光推力器在多脉冲工作模式下体现的宏观力学效应为冲量时,在扭摆周期远大于多脉冲工作时间的 4 倍时,可以利用转角的最大峰值以及达到最大峰值前的转角测量值计算冲量。

(3)激光能量加载的不均匀性、工质烧蚀表面的不规则性、工质制备掺杂的不均匀性等因素,造成脉冲作用力不是标准周期函数时,利用上述方法计算平均推力和冲量仍然有效。

参考文献:

[1] Hong Yanji, Wang Guangyu, Dou Zhiguo. State of art of

laser ablation microthruster[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2009, 30(9): 1555-1564. (in Chinese)

[2] Jin Xing, Hong Yanji, Chen Jingpeng, et al. Impulse measurement method of single pulse laser with torsion pendulum[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(11): 1809-1812. (in Chinese)

[3] Fang Juan, Hong Yanji, Ye Jifei, et al. Application of laser interference in micro-impulse measurement with torsion pendulum[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(2): 119-122. (in Chinese)

[4] Hong Yanji, Zhou Weijing, Wang Guangyu. Methods of micro thrust measurement and analysis of its key issues[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(10): 2287-2299. (in Chinese)

[5] Ye Jifei, Hong Yanji. Laser interference differential measurement of micro impulse based on torsion balance[J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34 (6): 990-994. (in Chinese)

[6] Jin Xing, Hong Yanji, Zhou Weijing, et al. A Parameter calibration method for torsion pendulum using in micro thrust and impulse measurement[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(10): 1554-1559. (in Chinese)

[7] Chang Hao, Jin Xing. Trajectory simulation of space debris based on laser ablation impulse coupling effect [C]//2013 International Conference on Measurement, Information and Control, 2013: 751-755.

[8] Chang Hao, Jin Xing, Zhou Weijing. Experiment research on plasma plume expansion induced by nanosecond laser ablation Al [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42 (S1): 43-46. (in Chinese)

[9] Zheng Yijun, Tan Rongqing, Shi Haixia. Experimental study (II) on impulse coupling coefficient of laser ablating aluminum target in air ambient [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 76-79. (in Chinese)

[10] 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)

[11] Ye Jifei, Hong Yanji, Wang Guangyu, et al. Measurement method for microgram amounts laser ablation mass [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(3): 372-376. (in Chinese)

[12] Li Nanlei, Ye Jifei, Zhou Weijing. Effects of dopant on impulse coupling of laser ablated glycerin [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(10): 1595-1600. (in Chinese)