

文章编号: 1001-3806(2007)03-0257-05

用于激光对靶冲量测试的悬摆原理与应用

朱金荣^{1,2}, 杨雁南^{1,3}, 杨波¹, 沈中华¹, 陆建^{1*}, 倪晓武¹

(1. 南京理工大学理学院, 南京 210094 2. 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002 3. 南京航空航天大学理学院, 南京 210016)

摘要: 为了研究激光与靶材相互作用过程中存在的冲量传递问题, 采用悬摆法和光电测速法相结合的测量方法, 用于激光支持爆轰波对靶冲量耦合作用的实验测试研究。在考虑空气浮力、阻力、线重等因素后, 建立合理的空气阻力模型, 并根据功能原理和转动定理, 得到了符合实际情况的悬摆运动方程, 进而通过实验验证了摆运动方程的正确性。结果表明, 该测试方法所得实验结果与 BASS 和 CA 给出的实验结果基本一致。

关键词: 激光物理; 激光靶; 冲量; 空气阻力; 摆运动方程

中图分类号: O434.14 文献标识码: A

The principle and application of pendulum used in the experiment of in pulse coupling between laser and target

ZHU Jin-rong^{1,2}, YANG Yan-nan^{1,3}, YANG Bo¹, SHEN Zhong-hua¹, LU Jian¹, NIXIAOWU¹

(1. Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China 2. College of Physics Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002, China 3. College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract Based on the impulse coupling process between laser and target, a new method of combining pendulum with light electric tachometer was presented, which was adopted in the experiment of impulse coupling between laser supported detonation wave and aluminum target. Considering the air buoyancy, air friction and the pendulum line weight, the actual kinetic equation of pendulum was deduced from the principle of work and power and the rotation theory when the reasonable model of air friction was found. Furthermore, the precision of the kinetic equation of pendulum was checked. Finally, after comparison, the experimental result with the new method was in agreement with the experimental result from other methods.

Key words laser physics; impulse coupling between laser and target; impulse; air friction; the kinetic equation of pendulum

引 言

强激光束辐照于固体靶表面时, 将使靶表面产生熔融、汽化, 直至产生物质蒸气, 在后续激光的持续作用下, 将发生光学击穿和形成等离子体。该高温高压的等离子体膨胀时形成的激光支持爆轰 (laser supported detonation, LSD) 波对靶材有强烈的冲击作用, 使靶获得冲量^[1]。测量不同作用激光对靶材产生冲量的大小, 有助于研究 LSD 波对靶冲量传递过程和效率, 也对激光作为动力源的推进技术具有参考价值。

在激光对靶产生冲量大小的测量技术方面, 国内

外文献中报道的研究方法主要有以下几种。READY 等将靶由细绳或细杆悬挂起来做成一单摆或复摆, LSD 波作用处于平衡位置的静止靶时, 靶便开始摆动, 测量靶摆的初始速度或摆动的幅度, 即可根据摆的运动求得靶的冲量^[2]。PHIPPS 则将靶物质安装在扭摆上, 测量靶物质受冲击波作用后扭摆摆过的角度以及冲击波作用点到转轴的距离, 根据扭摆所受力矩与转角之间的关系求得靶的冲量^[3]。利用悬摆测量较小的冲量是实验研究中最常用的一种方法, 与其它方法相比, 此方法结构简单, 对小冲量的测量精度相对较高。因而 XU 等人利用高灵敏悬摆, 测量了 LY12 铝和 K9 光学玻璃受激光照射时的冲量耦合系数与气体压力的关系^[4]。LU 等人采用靶摆偏移技术测量了高功率激光与靶相互作用时的靶表面的位移, 获得了不同条件下的靶冲量和冲量耦合系数^[5]。ZHENG 等人利用摆装置和高速 CCD 相机, 对激光靶冲量耦合系数进行了实验研究^[6]。这些方法主要是通过测量靶摆动

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60578015, 60208004); 教育部博士点基金资助项目 (20050288025)

作者简介: 朱金荣 (1968-), 男, 硕士研究生, 讲师, 现从事激光与物质相互作用机理与测试方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: nxwhom@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2006-04-04 收到修改稿日期: 2006-08-31

的最大幅值或是测量靶的初始速度来求得靶的冲量。但在采用测量靶摆动最大幅值的方法时,由于靶摆在到达最大摆动的位置后不能静止,而是又将向下回摆,造成靶摆幅值的测量装置较为复杂,且易出现误差;采用测量靶初始速度的方法时,由于靶摆动装置并非刚性结构,摆线随靶以共同速度运动需要一定的响应时间,因而造成摆线与靶摆的加速过程不同步。同时,由于冲力作用的非均匀性,靶自身也会产生一定程度的抖动,造成靶摆的初始速度测量不准确,因而得到的靶冲量误差较大。

针对悬摆法运动时的特点,结合光电测速的实验测试原理和方法。在测试过程中不仅考虑到了空气阻力对有关运动部分的影响,认为靶摆的运动是空气阻力作用下的阻尼摆动,继而建立了符合本实验情况的悬摆运动方程,再根据此方程计算出靶摆的初始速度,由此得到了悬摆激光作用下获得的冲量,最后还通过实验检验了摆运动方程的正确性。与现有文献中报道的测量方法相比,该方法具有操作简单、测量精度高等优点。

1 实验装置

图 1 是实验装置的示意图。图中调 Q Nd:YAG 激

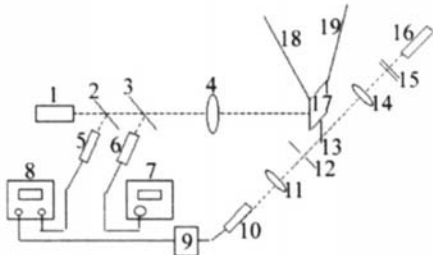


Fig 1 The abridged general view of experimental setup

1—Q-switched Nd:YAG laser (1.06 μ m); 2—3—beam splitter; 4, 11, 14—positive lens; 5—PN photoelectric cell; 6—probe of energy meter; 7—energy meter; 8—digital storage oscilloscope; 9—circuit of photo electricity signal process; 10—photoelectric receiver; 12—screen with a hole; 13—filament; 15—attenuator; 16—He-Ne laser; 17—aluminum target; 18, 19—pendulum string

光器 1 输出波长为 1.06 μ m、脉宽为 15 ns 的激光束,经过焦距为 10.5 cm 聚焦透镜 4 聚焦于铝靶 17。在调 Q Nd:YAG 激光器与聚焦透镜 4 之间有两片分光镜,其中分光镜 2 反射的激光经 PN 光电管 5 连接到数字示波器 8 作为触发信号;分光镜 3 反射的部分激光被能量计探头 6 接收,并在能量计 7 上实时检测每个脉冲激光束的能量。He-Ne 激光器 16 出射的激光经衰减片 15 和聚焦透镜 14 后,在细丝 13 处形成聚焦区,且细丝与聚焦区呈正交状态。当调 Q Nd:YAG 激光器作用于铝靶时,产生的 LSD 波将靶摆 17 推离平衡位置,当摆再次回到该平衡位置时,由于细丝 13 将暂时遮挡 He-Ne 激光束,因而光电接收管 10 接收到的光强

将随之发生变化,在示波器上显示脉冲信号(见图 2)。显然,该波形信号的波谷宽度与细丝遮挡 He-Ne 激光束的时间成正比,与铝靶的运动速度成反比,因而根据该波形信号的波谷宽度和细丝直径可以得到铝靶的运动速度。

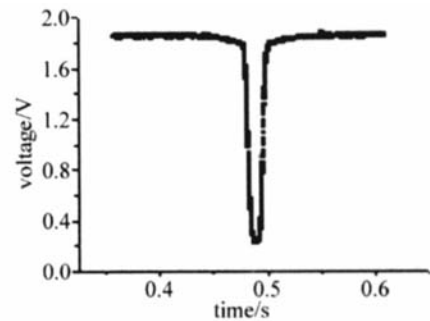


Fig 2 The relation between He-Ne laser intensity and time

图 1 中的铝靶 17 和细丝 13 间是刚性连接的,其形状在图 3 中给出。图中, a 为铝靶长度, b 为铝靶

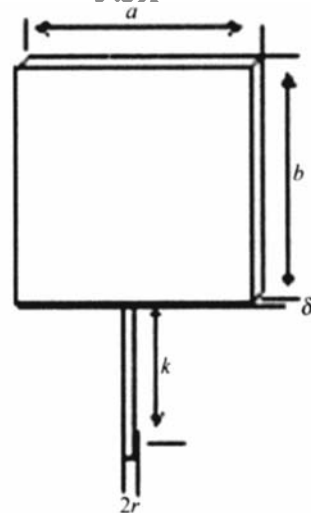


Fig 3 The abridged general view of shape and dimension of pendulum bob
宽度, δ 为铝靶的厚度, k 为细丝长度, r 为细丝半径。以下同时涉及铝靶和细丝二者时均称为悬摆。在实验起始运动阶段,悬摆静止且处于平衡位置,测速用的 He-Ne 激光束恰好与悬摆上的细丝正交。当 LSD 波与悬摆有一个短暂的作用后,悬摆和摆线获得了最大速度。由于该最大速度难以确定,因此测量了悬摆和摆线以共同速度第 2 次遮挡 He-Ne 激光束时的速度。进而考虑到空气阻力的影响,认为悬摆的运动是空气阻力作用下的阻尼摆动,因而建立了符合本实验条件的悬摆运动方程。根据这一方程可以间接得到悬摆的初始最大运动速度,并可以得到悬摆在 LSD 波作用下获得的冲量。

2 悬摆运动方程的建立与理论分析

在建立悬摆的运动方程时,需要考虑的主要因素有:(1)由于悬摆的质量较小,摆线的质量无法忽略,

因而将其作为一体以复摆处理; (2) 由于摆动时的摆角 θ 较大, 因而 $\sin\theta$ 不能用 θ 近似; (3) 悬摆在空气中运动所受的空气阻力不能忽略; (4) 浮力对于摆运动的影响也考虑在内。

2 1 空气阻力模型

由气体动力学理论可知悬摆所受空气阻力满足以下近似公式^[7]:

$$f_a = \frac{1}{2} c \rho_a \bar{v}^2 S \quad (1)$$

式中, f_a 为悬摆所受空气阻力; c 为阻力系数, 在通常情况下与运动物体的表面形状等因素有关; ρ_a 为空气密度, 在靶摆动情况时可视为常数; \bar{v}^2 为悬摆的平均速度; S 为悬摆的表面积。在确定以下空气阻力系数时, 以理想气体假设为前提。

2 1 1 铝靶空气阻力系数 c 的确定 铝靶在运动时某一时刻状态如图 4a 所示。图 4a 中 u 表示空气微团

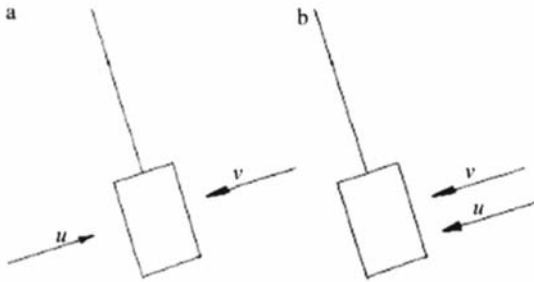


Fig 4 The abridged general view of relative motion between aluminum target and air micelle

运动的平均速度, v 表示悬摆的运动速度。以铝靶为运动参考系, 取 u 的方向为正方向。在摆的左表面, 空气微团碰撞前的相对速度为 $(u + v)$, 由于空气微团受完全弹性碰撞, 故其碰撞后的相对速度为 $-(u + v)$, 则对于一个空气微团的冲量为 $I_{left} = -2m(u + v)$, 在单位时间与靶上的任一面积元 dS 相碰撞的小球个数为 $N_{left} = \frac{1}{6} n(u + v) dS$ 。式中, n 是空气微团的数密度, m 是单个空气微团的质量, 空气密度 $\rho_a = nm$, I_{left} 为空气微团在摆左表面单位面积上的冲量元。则在摆的左表面, 单位时间空气微团的冲量元为:

$$\frac{dI_{S_{left}}}{dt} = I_{left} N_{left} = -2m(u + v) \times \frac{1}{6} n(u + v) dS = -\frac{1}{3} nm(u + v)^2 dS \quad (2)$$

空气在摆的右表面运动情况如图 4b 所示。空气微团碰撞前的相对速度为 $-(u - v)$ 。同理可知, 空气微团经碰撞后的相对速度为 $(u - v)$ 。则在摆的右表面, 单个空气微团的冲量为 $I_{right} = 2m(u - v)$ 。在单位时间与靶上的任一面积元 dS 碰撞的小球个数为: $N_{right} =$

$\frac{1}{6} n(u - v) dS$, $I_{S_{right}}$ 为空气微团在摆右表面单位面积上的冲量元。则在摆的右表面, 单位时间空气微团的冲量元为:

$$\frac{dI_{S_{right}}}{dt} = I_{right} N_{right} = 2m(u - v) \times \frac{1}{6} n(u - v) dS = \frac{1}{3} nm(u - v)^2 dS \quad (3)$$

综合 (2) 式和 (3) 式可得铝靶获得的冲力 f_{A1} 为:

$$f_{A1} = -\left(\frac{dI_{S_{left}}}{dt} + \frac{dI_{S_{right}}}{dt}\right) = \frac{4}{3} nmSuw \quad (4)$$

再考虑到 $u \approx v$, 并将 (4) 式代入 (1) 式可得铝靶的空气阻力系数为: $c = 8/3$

2 1 2 细丝空气阻力系数的确定 图 5 为细丝与空气微团相对运动示意图, 其中图 5a 表示细丝在运动时

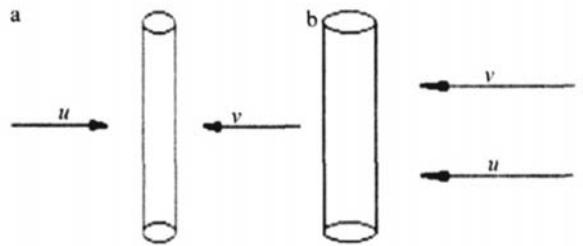


Fig 5 The abridged general view of relative motion between filament and air micelle

某一时刻状态, 图 5b 表示空气在细丝的右表面运动情况。同理可得细丝左表面单位时间空气微团的冲量元为:

$$\frac{dI_{left}}{dt} = \frac{1}{3} \int_{-r}^r \int_0^h nm(u + v)^2 \cos^3 \theta dS = \frac{1}{3} nm(u + v)^2 \times \int_0^h \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} r \cos^3 \theta d\theta = \frac{4}{9} nm(u + v)^2 hr \quad (5)$$

以及在细丝的右表面, 单位时间空气微团的冲量元为:

$$\frac{dI_{right}}{dt} = \frac{1}{3} \int_{-r}^r \int_0^h nm(u - v)^2 \cos^3 \theta dS = \frac{1}{3} nm(u - v)^2 \times \int_0^h \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} r \cos^3 \theta d\theta = \frac{4}{9} nm(u - v)^2 hr \quad (6)$$

综合 (5) 式和 (6) 式可得细丝获得的冲力 f_t 为:

$$f_t = -\left(\frac{dI_{left}}{dt} + \frac{dI_{right}}{dt}\right) = \frac{16}{9} nmSuw \quad (7)$$

同样考虑到 $u \approx v$ 并将 (7) 式代入 (1) 式可得细丝的空气阻力系数为: $c = 32/9$ 。又因假设摆线也为圆柱体, 因而其空气阻力系数与细丝一样。

2 2 悬摆运动方程的确定与验证

2 2 1 悬摆运动方程的确定 在对悬摆运动方程进行讨论时, 先将悬摆的运动过程分解为上升运动和下降运动两大部分进行分析, 如图 6 所示。

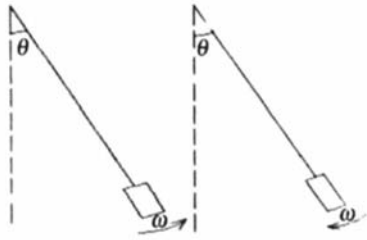


Fig 6 The abridged general view of the ascending and descending process of pendulum

由经典的功能原理可得:

$$-A_f = \Delta(E_{ke} + E_{pe}) \quad (8)$$

式中, A_f 为空气阻力矩的功; E_{ke} 为质心动能; E_{pe} 为质心势能(其中下标 c 表示质心, 下标 k 表示动能, p 表示势能)。

由 (8) 式可得:

$$\frac{1}{2} \left(\sum_{i=1}^3 J_i \right) \omega^2 + \sum_{i=1}^3 (m_i g h_i - \rho_a g V_i h_i) \pm \sum_{i=1}^3 \left(\frac{S_i c_i l_i^3}{2} \right) \cdot \rho_a \int \omega^2 d\theta = 0 \quad (9)$$

式中, 脚标 $i = 1, 2, 3$ 分别代表了摆线、靶摆或细丝对应的力学量、几何量; θ 为运动系统的角位移; m_i 为摆线、靶摆或细丝对应的质量; l_i 为摆线、靶摆或细丝对应的质心到悬挂点的距离; h_i 为摆线、靶摆或细丝对应的质心到转动轴的距离; V_i 为摆线、靶摆或细丝对应的体积; S_i 为摆线、靶摆或细丝对应的运动方向的截面积; J_i 为摆线、靶摆或细丝对应的转动惯量; c_i 为摆线、靶摆或细丝对应的空气阻力系数。 ρ_a 为空气密度, g 为重力加速度, ω 为角速度。

(9) 式中第 1 项是整个运动系统(靶摆、细丝和摆线)的运动动能; 第 2 项是考虑到有浮力影响时整个系统的势能; 第 3 项是阻力在整个系统摆动过程中所做的功, 阻力项前正号表示下降过程, 而负号表示上升过程。

对 (9) 式求导可得:

$$\sum_{i=1}^3 J_i \frac{d^2 \theta}{dt^2} \pm \frac{\sum_{i=1}^3 (S_i c_i l_i^3) \rho_a}{2} \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + \sum_{i=1}^3 (m_i g l_i - \rho_a g V_i) \sin \theta = 0 \quad (10)$$

式中,

Table 1 The measuring result of angular velocity and its error

density/(W · cm ⁻²)	6.7685 × 10 ⁸	9.3812 × 10 ⁸	1.4912 × 10 ⁸	17.47 × 10 ⁸	24.30 × 10 ⁸
angular velocity calculate value/(rad · s ⁻¹)	0.11492	0.20866	0.28403	0.30817	0.32135
angular velocity measuring value/(rad · s ⁻¹)	0.11411	0.20593	0.28216	0.30435	0.32742
error/%	0.7	1.3	0.66	1.23	1.85

速度计算值”是由悬摆第 3 次遮挡 He-Ne 激光束的时间求得的悬摆第 2 次遮挡 He-Ne 激光束时的角速度

$$\left\{ \begin{aligned} J_1 &= \frac{4}{3} m_1 l_1^2 \\ J_2 &= \frac{1}{12} \rho_1 \delta a b^3 + \rho_1 \delta a b l_2^2 \\ J_3 &= \frac{1}{12} \rho_1 \pi r^2 k^3 + \rho_1 \pi r^2 k l_3^2 \\ l_2 &= 2l_1 + \frac{b}{2} \\ l_3 &= 2l_1 + b + \frac{k}{2} \\ \sum_{i=1}^3 (m_i g l_i) &= m_1 g l_1 + \rho_1 a b \delta g l_2 + \rho_1 \pi r^2 k g l_3 \\ \frac{\sum_{i=1}^3 (S_i c_i l_i^3) \rho_a}{2} &= \frac{128}{9 \cos \alpha} \rho_a r_1 l_1^3 + \frac{4}{3} \rho_a a b l_2^3 + \frac{32}{9} \rho_a r k l_3^3 \end{aligned} \right. \quad (11)$$

式中, ρ_1 为摆线密度, k 为细丝长度, r 为细丝的半径, a 为铝靶的长度, b 为铝靶的宽度, δ 为铝靶的厚度; m 为悬摆的质量, 具体位置与数值在图 3 中给出; r_1 为摆线的半径; α 为摆线与铅垂线间的夹角。摆线的空气阻力系数 $c_1 = 32/9$, 靶摆的空气阻力系数 c_2 取为 $8/3$, 细丝的空气阻力系数 $c_3 = 32/9$ 。

2.2.2 悬摆运动方程的验证 在实验中, 为了验证悬摆运动方程的正确性, 采集了悬摆第 2 次和第 3 次遮挡 He-Ne 激光束的信号, 如图 7 所示。根据该信号先

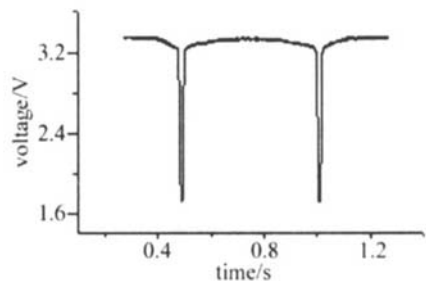


Fig 7 The relation between laser intensity and time when filament passing through He-Ne laser beam in the second and third time

由悬摆第 3 次遮挡 He-Ne 激光束的时间求得角速度值, 然后由悬摆运动方程倒推求得悬摆第 2 次遮挡 He-Ne 激光束角速度计算值, 再与实际测得的悬摆第 2 次的角速度比较, 从而对悬摆运动方程正确性进行验证。悬摆角速度测试值及其误差见表 1。其中“角

速度实际值”是直接由悬摆第 2 次遮挡 He-Ne 激光束时直接得到的角速度值。由表 1 可见, 因悬

摆运动方程引进的误差小于 2%, 可以满足测试要求。

2.3 靶冲量的确定

由以上推导可得摆线的动量为:

$$p_1 = m_1 l_1 \omega \quad (12)$$

铝靶的动量为:

$$p_2 = \rho_{ab} \delta \omega l_2 \quad (13)$$

细丝的动量为:

$$p_3 = \rho_1 \pi r^2 k \omega l_3 \quad (14)$$

最后通过测量细丝遮挡 He-Ne 激光束时示波器显示的波谷底边宽度, 就可以得到细丝通过 He-Ne 激光束的时间, 进而根据细丝的直径可以得到悬摆平均角速度, 再将 $\theta=0$ 的条件引入, 倒推得到系统的初始角速度 ω_0 , 再利用:

$$I = \omega_0 \sum_i^3 M_i l_i \quad (15)$$

就可得到靶摆获得的冲量 I 。

3 测试系统应用实验结果的验证

用该测试方法测量了波长为 1.064 μm、脉宽为 15 ns 的激光束与铝靶相互作用时, 在不同功率密度下的冲量耦合系数 C_m 。并将所得实验结果分别与 BASS 和 CAI^[8,9] 报道的实验结果作了比较, 如图 8 所示, 其

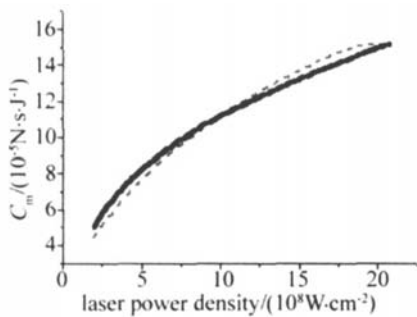


Fig 8 The comparison between BASS and CAI's result and experimental result

中实线为用本文中给出的测试方法所得到的实验结果, 虚线为 BASS 和 CAI 的报道的实验结果, 由图可见, 随着作用于靶面激光功率密度的增大, 靶冲量和冲量耦合系数也随之增大。但当激光功率密度进一步增大时, 由于后续激光能量被等离子体强烈地吸收, 因而

不能完全到达靶表面, 导致靶获得的冲量和冲量耦合系数增速减缓。图 8 中给出的激光功率密度与冲量耦合系数 C_m 的关系与 BASS、CAI 等人^[8,9] 报道的实验结果大致相同。

4 结 论

针对悬摆法和光电测速法相结合的测量方法, 在考虑到悬摆和摆线所受的空气阻力、浮力和摆线质量对于摆运动的影响等因素, 建立了空气阻力模型, 并根据功能原理和转动定理, 导出了本测试条件下悬摆运动方程; 进而通过激光支持爆轰波对靶冲量的实验检验了该运动方程的正确性。最后将应用该测试系统所获得的结果与国内外文献报道的采用其它方法得到的结果基本吻合。针对激光对靶冲量测试问题提出的悬摆测试原理与技术可为研究激光或其它微量推进技术提供一种有效的实验研究方法。

参 考 文 献

- [1] SUN Ch W. Laser exposure effect [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2002. 112~120 (in Chinese).
- [2] READY J F. Development of plume of material vaporized by giant pulse laser [J]. A P L, 1963, 3(1): 11~13.
- [3] PHIPPS C, LUKE J D. Iode laser-driven microthrusters: a new departure from micropropulsion [J]. AIAA J, 2002, 40(2): 310~318.
- [4] XU J B, LI N J D, LIU J *et al*. Impulse coupling to targets in air by pulse laser [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(3): 285~288 (in Chinese).
- [5] LIU J NIX W, HE A Zh. Mechanical response of high-power YAG laser upon metal targets [J]. Laser Technology, 1994, 18(6): 361~365 (in Chinese).
- [6] ZHENG Y J, GONG P, TANG Zh P *et al*. Experimental study of coupling coefficients for air breathing mode laser propulsion [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(7): 889~893 (in Chinese).
- [7] CHEN L X, LI N X L. Duplicate pendulum air damping revision [J]. College Physics, 1991, 10(12): 24~25 (in Chinese).
- [8] BASSM, NASSAR M A, SW MN R T. Impulse coupling to aluminum resulting from Nd: glass laser irradiation induced material removal [J]. J A P, 1987, 61(3): 1137~1144.
- [9] CAI X J, WANG H Y, MAO J H *et al*. Impulse coupling to L₂ target by 1.064 μm and 0.53 μm laser [A]. International Symposium on Laser Plasma Interactions [C]. Washington: SPIE, 1992. 100~102.