

干涉式冲量摆测试装置及其双精度数据处理方法

金云声, 张兴卫, 谭福利, 赵剑衡, 孙承纬, 杨 华*

中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900

摘要 将激光干涉法应用于冲量摆冲量测试中, 分析了主要的测量不确定度, 在测量过程中给出了相应的处理方法。在利用累计峰值个数来计算最大摆角的常规方法基础上, 新增加了一套独立、互补的数据处理方法, 使其具有双精度测试效果, 结合这两种方法可扩大适用范围并提高了测量的可靠性。

关键词 测量; 激光诱导破坏; 冲量测试方法; 激光干涉; 冲量摆

中图分类号 O439 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0512001

Testing Device Based on Interferometric Ballistic Pendulum and Its Double Precision Data Processing Method

Jin Yunsheng, Zhang Xingwei, Tan Fuli, Zhao Jianheng, Sun Chengwei, Yang Hua

Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The laser interferometry is employed in the ballistic pendulum measurement, and the main uncertainties of measurement are analyzed. In the measurement process, the corresponding treatment methods are provided. A new set of independent complementary data processing methods is added on the basis of the original method that calculates the maximum swing angle with the accumulated peak amount. The combination of these two methods has the double precision test effect and can expand the applicable scope and improve the measurement credibility.

Key words measurement; laser-induced breakdown; impulse measurement method; laser interferometry; ballistic pendulum

OCIS codes 120.4570; 140.3440

1 引 言

脉冲激光能量沉积于物质中, 提高能量密度可形成气化、电离等复杂过程^[1], 产生力学效应, 如激光等离子体冲击波^[2-3]。冲量耦合参数作为可测量参数, 可反映激光能量与宏观物质动能的转化情况, 在激光与物质相互作用机理的研究领域具有重要意义。

实验中通常采用冲量摆、扭摆、弹性杆等方式测量冲量^[4-8]。在冲量摆和扭摆中, 需要测量摆在不同冲量下的最大摆角(或者最大角速度), 方法有电磁感应法、角度编码器法、反射光点法、干涉法等。电磁感应法灵敏度高, 但需要标定最大角速度与感应电压间关系, 且对于导磁材料, 测量过程容易受到影响; 角度编码器法可简便地测量最大摆角, 但可能受到摆杆振动的影响^[7]; 反射光点法是利用光路的几何性质测量角度的方法, 常受到几何距离测量精度和测量空间的限制^[9]; 干涉法使用激光干涉原理测量最大摆角, 精度高, 适用于小角度测量, 但其量程不大, 易受到干扰; 弹性杆测量方法是利用金属杆作为中介, 通过测量金属杆一端自由面位移来反推输入杆件另一端的冲量, 可测量较小的冲量^[10-11]。

收稿日期: 2017-01-05; **收到修改稿日期:** 2017-02-06

作者简介: 金云声(1983—), 男, 博士研究生, 主要从事斜波压缩、激光与物质相互作用方面的研究。

E-mail: yunsheng@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 孙承纬(1939—), 男, 中国工程院院士, 主要从事高能密度物理方面的研究。

E-mail: sunchengwei@hotmail.com

* **通信联系人.** E-mail: yang_caep@163.com

冲量摆与扭摆的主要差别在于摆杆的回复力不同,冲量摆的回复力为重力,扭摆的回复力为弹簧的弹性力,从抗干扰性和稳定性来看,冲量摆优于扭摆。但对于微小冲量的测量,由于扭摆可调节弹簧的弹性系数,可通过选择合适的回复力来匹配微小冲量,因此扭摆优于冲量摆。

本文针对脉冲激光产生大于 $10^{-6} \text{ N}\cdot\text{s}$ 的未知冲量,实现了干涉式冲量摆冲量测试方法,分析了测量不确定度降低因素,并在原干涉方法的基础上发展了双精度实验数据处理方法。

2 干涉式冲量摆冲量测试方法

2.1 测试原理

转动惯量为 J 的复摆,在转矩为 d 的位置与相垂直的冲量 I 作用后,静止瞬间获得最大角速度 ω_M 。由动量矩守恒定理可得

$$Id = J\omega_M, \quad (1)$$

式中 I 为冲量, d 为支点到光斑中心间距, J 为复摆的转动惯量, ω_M 为复摆的最大角速度。

复摆在冲量作用完毕后,获得最大转动角速度,此时复摆具有最大动能。在随后的时间中,复摆以复摆支点为支点向上摆动,直至达到最大摆角 θ_M ,复摆静止,然后反向运动。此过程中机械能守恒,动能转化为重力势能。用样品靶复摆的质心离轴距离 s 表示重力势能,表达式为

$$(1/2)J\omega_M^2 = mgs(1 - \cos\theta_M), \quad (2)$$

式中 m 为复摆质量, g 为当地重力加速度, s 为复摆的质心离轴距离。

复摆在小角度自由摆动时,可用简谐振动近似描述复摆的运动过程,自由摆动周期 T_0 与转动惯量 J 之间的关系为

$$J = [T_0/(2\pi)]^2 mgs. \quad (3)$$

联立(1)~(3)式,获得冲量 I 的计算公式为

$$I = \frac{T_0 mgs \sqrt{2(1 - \cos\theta_M)}}{2\pi d} = \frac{T_0 mgs \sin(\theta_M/2)}{\pi d}, \quad \theta_M > 0. \quad (4)$$

由冲量耦合系数 C_m 的定义式可得

$$C_m = \frac{I}{E_0} = \frac{T_0 mgs \sin(\theta_M/2)}{\pi d E_0}, \quad \theta_M > 0, \quad (5)$$

式中 E_0 为到靶激光能量。

2.2 冲量摆测试装置

冲量摆测试装置由加载激光、复摆、摆角测试三个主要部分组成,如图 1 所示。通过激光加载系统在靶上产生合适的加载光斑,并测量相应的激光参数;摆角测试系统可对复摆系统提供最大摆角的数据。

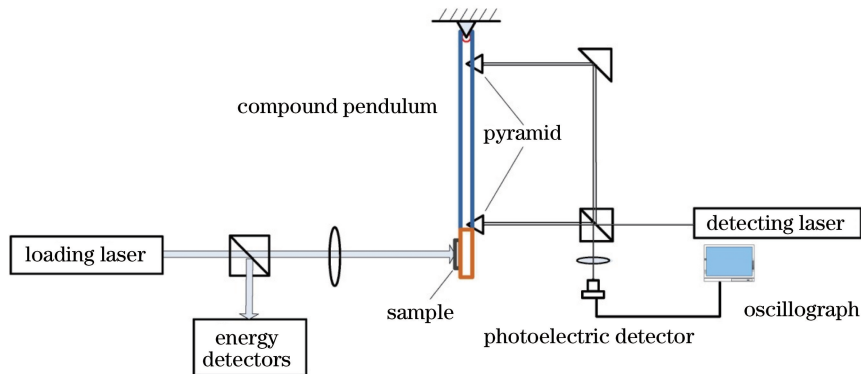


图 1 冲量摆测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ballistic pendulum measurement setup

复摆由摆锤、摆杆、支架、角锥棱镜四个主要部分构成,如图 2 所示。摆锤的中心放置样品,摆杆背面嵌入两个角锥棱镜,摆轴与支架采用点接触的连接方式。

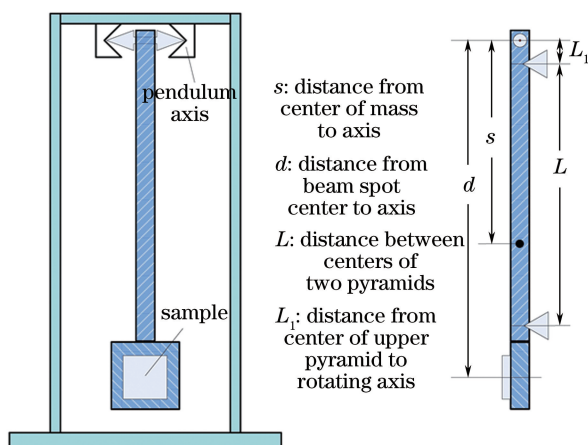


图 2 复摆及各参数示意图

Fig. 2 Schematic diagram of compound pendulum and parameters

复摆的摆角通过激光干涉方法获得。复摆上下两端各配置一个角锥棱镜,并搭建干涉光路。当复摆转动时,上下两个角锥棱镜产生行程差,在干涉装置的两条光路中产生光程差,形成明暗相间的干涉环。利用光电探测器,将明暗相间的干涉环信号转换成电信号,记录于示波器中。探测信号的一个周期变化对应于单色光源波长一半的距离,从而在复摆摆动 1/4 周期的时间内,读出探测信号的周期个数,即可确定两条光路的光程差值。最后,根据入射角锥棱镜的上下两条光路间的距离,计算出复摆转动的角度。

2.3 最大摆角 θ_M 及自由摆动周期 T_0 的获取

由示波器获得典型数据,如图 3 所示。截取其中第二个完整的半周期数据,并记录两个截断时间点,分别记为 t_{front} 和 t_{rear} ,则自由摆动周期 T_0 为

$$T_0 = 2(t_{\text{rear}} - t_{\text{front}}), \quad \theta_M < 5^\circ. \quad (6)$$

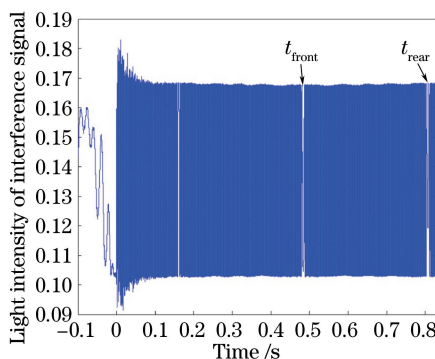


图 3 示波器测量得到干涉信号的典型数据

Fig. 3 Typical data of interference signal measured by oscilloscope

利用峰值个数计数程序,对滤波后的截取数据进行峰值个数计数,获得半周期内的峰值个数 $n_{1/2}$,如图 4 所示。获取探测激光波长 λ_d 和角度测量系统中两条干涉光束间距离 L ,则最大摆角 θ_M 为

$$\theta_M \approx \frac{n_{1/2} \lambda_d}{4L}. \quad (7)$$

2.4 测量不确定度

冲量耦合系数的测量不确定度主要来源于各参数的测量不确定度,这里主要分析可控的复摆最大摆角 θ_M 的测量不确定度和利用复摆小角度自由摆动周期 T_0 计算复摆转动惯量过程中引入的测量不确定度。

最大摆角 θ_M 由近似公式(7)式计算获得,但实际的光程差与复摆摆动最大角度的关系较为复杂,如图 5 所示。利用几何关系可导出光程差与复摆摆动最大角度的具体形式,并与(7)式进行对比,获得最大摆角 θ_M 的相对偏差与复摆摆动最大角度间的关系曲线,如图 6 所示,其中 $h_1 = 0.1140$ m, $h_2 = 0.0095$ m,角锥棱镜的高度为 0.0095 m,透镜焦距为 0.0150 m,角锥棱镜的相对折射率为 1.515,探测激光波长为 632.8 nm。

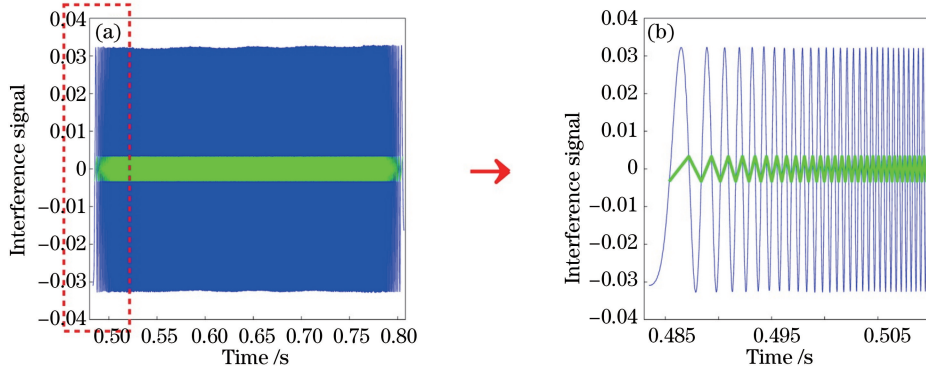


图 4 (a)利用第二个完整半周期数据进行数据处理的示意图及(b)局部放大图

Fig. 4 (a) Schematic diagram of data processing with the second complete half period and (b) partial enlarged view

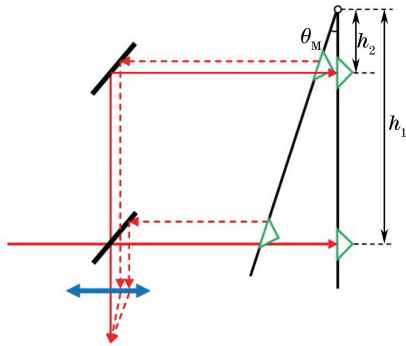


图 5 光程差与复摆摆动最大角度的关系
Fig. 5 Relationship between optical path difference and maximal swing angle of compound pendulum

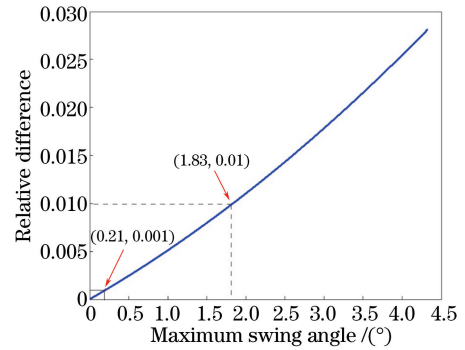


图 6 最大摆角的相对偏差与复摆摆动最大角度间的关系
Fig. 6 Relationship between relative difference of maximum swing angle and maximal swing angle of compound pendulum

从图 6 可以看出,最大摆角的相对偏差随最大摆角的增大而增大。为获得满足一定要求的测量不确定度,在使用(7)式时,最大摆角不能超过限定值。若发现用(7)式计算出的最大摆角过大时,需用几何模型推导出的修正关系式来求解最大摆角,提高精度。

利用复摆小角度自由摆动周期 T_0 可计算复杂外形复摆的转动惯量,但在此过程中复摆摆动的模型假设引入了偏差。复摆的摆动(振动)方程为

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mgs}{J}\sin\theta = 0, \quad (8)$$

存在一个实际的摆动周期 T (该周期 T 与振幅相关),可由(6)式直接测量得到,且测量精度比其他参数的测量精度高。

当复摆摆动的最大角度足够小时,(8)式可简化为简谐振动方程,即

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{mgs}{J}\theta = 0. \quad (9)$$

该简谐振动方程存在摆动周期 T_0 (该周期 T_0 与振幅无关), T_0 与其方程参数间的关系为

$$J = \left(\frac{T_0}{2\pi}\right)^2 mgs. \quad (10)$$

因此,该部分偏差来自于复摆摆动(振动)方程的简化。随着最大摆角的增大,(8)式描述的运动逐步偏离(9)式对应的运动过程,周期 T 与周期 T_0 的差异也随之增大。 T 与 T_0 的关系式为

$$\frac{T}{T_0} = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{(2n-1)!!}{2n!!} \right]^2 \left(\sin \frac{\theta_0}{2} \right)^{2n}. \quad (11)$$

周期相对偏差随最大摆角的变化曲线如图 7 所示。从图 7 可以看出,当自由摆动最大摆角小于 7° 时,运

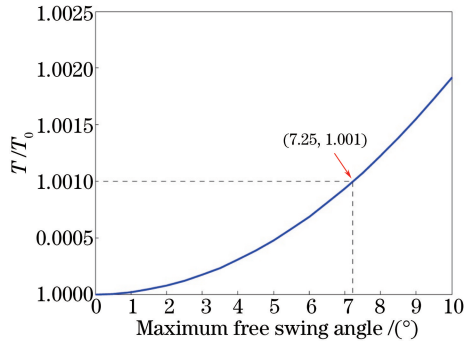


图 7 周期相对偏差随最大自由摆角的变化

Fig. 7 Relative difference of period versus maximum free swing angle

动方程近似引入的相对偏差小于 1/1000。

2.5 典型算例

在波长 1064 nm、脉宽 5 ns、能量空间分布均匀的加载脉冲激光作用下,对铝材料进行冲量测试实验,探测激光出自波长为 632.8 nm 的氦氖激光器。实验获得的其他参数如表 1 所示。利用(4)式和(5)式,获得冲量 $I = 0.25127 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}$ 和冲量耦合系数 $C_m = 57.108 \mu\text{N}/\text{W}$ 。

表 1 实验测量参数

Table 1 Measured parameters in experiment

Parameter	E/J	s/m	d/m	T_0/s	m/kg	$n_{1/2}$	L/m	Spot area / cm^2
Value	4.4	0.1020	0.1247	0.7057	0.0810	2178	0.1000	0.8500

3 干涉法的双精度实验数据处理方法

干涉法利用示波器记录干涉条纹光强变化数据,通过查找每个峰值点对应的时间坐标,计算下角锥棱镜相对上角锥棱镜的速度,并由两个角锥棱镜间距离获得复摆摆动的角速度,最终可得复摆摆动的最大角速度,记为 ω_{\max} 。不同于第 2 节中所述方法,该角速度不需要完整数据,仅需可分辨最大角速度。利用(1)式和(3)式,获得冲量 I 和冲量耦合系数 C_m 的公式为

$$I = \frac{T_0^2}{4\pi^2} \cdot \frac{mgs}{d} \cdot \omega_{\max}, \quad (12)$$

$$C_m = \frac{I}{E_0} = \frac{T_0^2}{4\pi^2} \cdot \frac{mgs}{d} \cdot \frac{\omega_{\max}}{E_0}. \quad (13)$$

在干涉法实验数据中,第 2 节中的方法是获取完整的 1/4 复摆摆动周期数据,利用累计峰值(光强信号变化周期)个数,获取下角锥棱镜相对上角锥棱镜移动的最大距离,计算最大摆角。该方法因累计的效果,在微小角度的测量中具有优势;但未知冲量较大时,因环境振动、摆杆振荡、摆角过大等情况,会出现丢失条纹或图 5 所示附加光程差的情况,数据分析困难。本节中的数据处理方法仅需要复摆经过平衡位置时的干涉条纹数据,引入峰值点时间数据,获取峰值点处瞬时速度。该方法对数据完整性没有要求,适合较大冲量的测量。这是因为复摆经平衡位置时速度越快,干涉条纹越密,峰值点的时间间隔越小,计算速度精度越高,弥补了第 2 节所述方法的不足。将这两种方法联合使用,可通过相互检验的方式来获取更可靠的冲量计算结果。这是冲量测试中干涉法相对其他方法所特有的优势。

利用 2.5 节干涉信号实验数据,获得图 8 所示角速度变化曲线,取其中最大值作为复摆摆动的最大角速度,即 $\omega_{\max} = 0.0308 \text{ rad/s}$,利用(12)式和(13)式,可得冲量 $I = 0.25228 \times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}$ 和冲量耦合系数 $C_m = 57.335 \mu\text{N}/\text{W}$ 。

与 2.5 节中计算结果进行比对,可以认为获得的冲量计算结果具有较好的可靠性。图 8 中出现的小幅度振荡信号是复摆杆体受短时脉冲力作用后出现的自颤信号。从图中可以看出,即使摆杆受到颤动干扰,测量结果仍具有较好的可靠性。

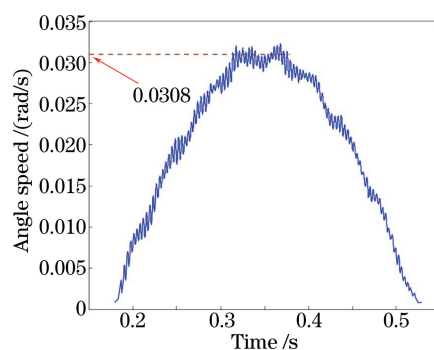


图 8 角速度随时间的变化

Fig. 8 Angle speed versus time

4 结 论

将激光干涉方法应用于冲量摆冲量测试装置,对影响测量精度的主要可控因素进行了分析,将双精度数据处理方法应用于干涉式冲量测试数据中。与常规干涉方法相比,增加了一套独立、互补的数据处理方法,测量精度得到了提升,提升大小因情况而异,如摆角越大精度提升越明显。不仅如此,新增加的数据处理方法仅需要复摆经过平衡位置时的瞬时数据,降低了原测试方法中对数据完整性的要求。在一定程度环境噪声(环境振动、电磁干扰等)中出现丢失条纹或采集信号受到干扰的情况下,该方法仍然适用,拓宽了适用范围,提高了可靠性。

参 考 文 献

- [1] Sun Chengwei, Lu Qisheng, Fan Zhengxiu, *et al.* Laser irradiation effects[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 79-151.
孙承伟, 陆启生, 范正修, 等. 激光辐照效应[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 79-151.
- [2] Wang Wei, Yuan Ruiyang, Ye Ping. Numerical simulation study of the stability of laser-driven shock waves[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(s2): s214008.
王 薇, 袁瑞场, 叶 萍. 激光驱动的冲击波稳定性的数值模拟研究[J]. 光学学报, 2015, 35(s2): s214008.
- [3] Su Junhong, Lü Ning, Ge Jinman. Characteristics of plasma shock waves in laser-induced film damage[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(12): 1203003.
苏俊宏, 吕 宁, 葛锦蔓. 激光薄膜损伤中等离子体冲击波特征[J]. 中国激光, 2016, 43(12): 1203003.
- [4] Li J, Tang Z P. Laser micro-impulse torsion pendulum[J]. Chinese Optics Letters, 2005, 3(2): 650-653.
- [5] Man Baoyuan, Wang Xiangsu. Impulse coupling to HgCdTe by a pulsed laser[J]. Acta Optica Sinica, 1998, 18(8): 1010-1014.
满宝元, 王象素. 脉冲激光与碲镉汞相互作用时的冲量耦合[J]. 光学学报, 1998, 18(8): 1010-1014.
- [6] Shi Haixia, Tan Rongqing, Zheng Yijun. Impulse coupling coefficient in laser ablating aluminium at air ambient[J]. Chinese J Lasers, 2007, 34(6): 804-808.
石海霞, 谭荣清, 郑义军. 大气中激光烧蚀铝靶冲量耦合系数实验研究[J]. 中国激光, 2007, 34(6): 804-808.
- [7] Wang Peng, She Jinhui, Tang Wenhui, *et al.* Analysis of the vibration in the impulse measurement experimentation by using pendulum apparatus[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2006, 17(2): 93-97.
王 鹏, 余金虎, 汤文辉, 等. 冲量摆冲量测量实验中的振动分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2006, 17(2): 93-97.
- [8] Wang Diankai, Hong Yanji, Fang Juan, *et al.* Measurements of impulse coupling coefficient of micro-laser ablate propulsion[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2009, 20(6): 96-99.
王殿恺, 洪延姬, 方 娟, 等. 激光微烧蚀靶材的冲量耦合系数测量方法[J]. 装备指挥技术学院学报, 2009, 20(6): 96-99.
- [9] Sinko J E, Gregory D A. Vaporization-driven impulse generation for laser propulsion[C]. 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2007.
- [10] Pozar T, Petkovsek R, Mozina J. Formation of linear momentum in a rod during a laser pulse-matter interaction[J]. Applied Physics A, 2008, 92(4): 891-895.
- [11] Mozina J, Diaci J. Recent advances in optodynamics[J]. Applied Physics B, 2011, 105(3): 557-563.