

基于复摆模型的多脉冲冲量耦合系数测量方法^{*}

文 明¹, 叶继飞¹, 熊 勇², 金 星¹

(1 装备指挥技术学院, 北京 101416 2 空军驻辽宁地区军事代表室, 辽宁 沈阳 110034)

摘 要: 在单脉冲冲量测量方法的基础上, 增加激光脉冲提取和摆杆控制单元, 提出了一种基于复摆模型的多脉冲冲量耦合系数测量方法。分析了多脉冲的两种测量模式及实现流程, 解决了数据处理面临的新问题, 并对该方法进行了检验, 结果表明: 所设计的激光脉冲提取和摆杆控制单元满足 25Hz 频率要求, 可实现在 40ms 内提取多脉冲序列的任意一个脉冲; 模拟多脉冲序列下测得两种模式 15°锥形喷管的冲量耦合系数为 371.0~375.3N/MW, 具有很好的一致性。该方法可用于吸气式激光推进的多脉冲性能研究, 并作为其他多脉冲研究方法的有效补充。

关键词: 激光推进; 复摆; 多脉冲; 冲量耦合系数; 测量模式

中图分类号: TN249 V439 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2009) 05-0633-05

Measuring method of multiple-pulse impulse coupling coefficient based on compound pendulum model

WEN Ming¹, YE Jifei¹, XIONG Yong², JIN Xing¹

(1 Inst. of Equipment Command and Technology, Beijing 101416, China)

2 Military Representative Office of PLA Air Force in Liaoning Area, Shenyang 110034, China)

Abstract A measuring method of multiple-pulse impulse coupling coefficient based on compound pendulum model was presented, in which a laser pulse extracting and a pendulum controlling unit was added to the single-pulse impulse measurement system. Two multiple-pulse measurement patterns and their implementation procedure were analyzed. Then new problems of data processing for the maximal angle were solved. Finally, the multiple-pulse measuring method was tested. Results indicate that the design of the laser pulse extractor and pendulum controller meets the 25Hz frequency requirement and any pulse in the multiple-pulse sequence can be extracted within the pulse interval of 40ms. As to an analog multiple-pulse sequence, the impulse coupling coefficients in both measurement patterns coincided well with each other, which ranged between 371.0 N/MW and 375.3 N/MW with a 15-degree conical nozzle. The measuring method can be applied in the study of multiple-pulse performance in air-breathing laser propulsion and it can work as a complement for other multiple-pulse research methods.

Key words Laser propulsion; Compound pendulum; Multiple pulses; Impulse coupling coefficient; Measurement pattern

1 引 言

吸气式激光推进作为动力技术将来必然工作于一定重复频率的多脉冲序列中, 并伴随着之前激波流场对后续脉冲的影响。对于多脉冲冲量的测量, 依靠运动参数难以克服摩擦因素随机的影响^[1]; 采用 PVDF 或 PCB 压电传感器, 最大的优势在于可记录所有脉冲的推力波形, 进而获得每个脉冲的冲量耦合系

数。但由于对系统的响应频率数据采集要求较高, 动态标定困难, 而且实验中传感器的固有振荡导致每个脉冲推力曲线叠加高频干扰, 数据处理有难度, 多脉冲冲量测量结果需要校正^[2], 因此多脉冲冲量耦合特性一直是吸气式激光推进研究的热点问题, 国内也进行了尝试性工作, 但对于多脉冲冲量耦合系数的测量方法依然有待建立和完善。

复摆法是一种将单脉冲冲量转化为角位移的测

* 收稿日期: 2009-05-04 修订日期: 2009-08-04

基金项目: 国家“九七三”项目 (61328); 国家自然科学基金项目 (10672184)。

作者简介: 文明 (1978—), 男, 博士, 研究领域为先进推进技术。E-mail: wujicwm@163.com

量方法。2007年,本文作者以增量式旋转编码器为核心部件建立了一套复摆冲量测试系统^[3],广泛应用于吸气式激光推进的高度特性、能量特性等多项研究中,实验结果可信。^[4-5]因此设想通过复摆摆杆的锁紧与松开和后续脉冲的输入终止,来保持之前多个脉冲的耦合效果,同时实现指定脉冲的瞬间耦合。此方法可用于测量高重复频率下任意指定脉冲的冲量,达到多脉冲序列的测量效果,实现与传感器测量结果的对比,最终提高实验效率,得到可信的多脉冲冲量耦合系数结果。

本文基于脉冲激光重复频率 25 Hz,光斑直径小于 100 mm,提出并建立一种从多脉冲序列中提取任意脉冲进行冲量耦合系数测量的多脉冲测量方法,并对其中的数据处理新问题进行分析,最后完成这种多脉冲测量方法的检验。

2 单脉冲冲量测量原理^[3]

本文对文献[3]的复摆冲量测量系统的改进和扩展,为便于摆杆的锁紧与松开控制,采用方形摆杆携带磁力锁的吸附铁板,并可悬挂标准配重块方式,进行冲量缓慢加载时的系统参数标定;改进了喷管与摆杆的刚性连接方式,拆卸方便。E6B2-2000增量式旋转编码器仍然作为角度及时间计量的核心部件,用以提供复摆系统小阻尼转轴和无振动条件下的高精度周期测量和振幅监测。复摆的系统特征不变,1个摆动周期内振幅衰减低于 2.6%,两个相邻周期数值仅衰减 0.04%,继续忽略空气阻力和转轴阻尼对复摆系统的振幅衰减及周期变化的影响。

因此,冲量测量还是分为两个环节:在缓慢加载小角度($< 5^\circ$)近似条件下,视为简谐运动,通过测量小角度摆动周期 T_0 确定复摆系统的转动惯量 J 。瞬态冲击时,冲量耦合过程瞬间完成,约在 1/4周期达到最大摆角 θ_m 。若单脉冲激光能量为 E ,则待测冲量耦合系数为

$$C_m = \frac{1}{E} \cdot \frac{J}{L} \cdot \frac{2\pi}{T_0} \cdot \sqrt{2(1 - \cos\theta_m)} \quad (1)$$

式中 L 为脉冲激光所产生推力的力臂。

所不同的是,文献[1]中复摆受冲击加载后自由往复摆动,本文增加摆杆锁紧与松开控制,限制了复摆的运动范围,信号采集和处理面临新问题;并且对于激光能量的测量,需要借助于脉冲能量的分束实时监测系统,如 25 Hz频率下输出 25个脉冲,可以得到此多脉冲序列每个脉冲的能量值,一般存在波动。注

意到激光器在一定工作电压下单脉冲能量输出稳定,在测量方法检验中,剥离出一定重复频率的多脉冲能量监测,构造了由单脉冲形成的模拟多脉冲序列,用以检验控制时序、数据处理和结果对比的正确性。

3 多脉冲测量模式分析

基于复摆模型的多脉冲测量,实际是将一定重复频率下的多脉冲序列逐一提取进行单脉冲冲量耦合系数的测量,与传感器多脉冲测量,增加了一种新模式。设定激光器在 25 Hz频率下,如工作 1 s 输出 25 个脉冲,形成脉冲序列。脉冲计数电路对每一脉冲按顺序逐一编号 1~25,如待测第 $n+1$ 个脉冲冲量,根据被测脉冲之前是否已有脉冲与喷管发生冲量耦合,分为以下两种测量模式

(1) “ $n+1$ ”模式

该模式是有前期流场耦合的任意脉冲冲量测量,即不遮挡前 n 个激光脉冲,与喷管发生 n 次冲量耦合,但此时复摆摆杆锁紧,无法摆动;在第 n 个结束、第 $n+1$ 个脉冲到来之前,松开复摆摆杆,第 $n+1$ 个脉冲加载继续与喷管发生冲量耦合,复摆正常摆动;并在第 $n+1$ 个结束、第 $n+2$ 个脉冲到来之前完成激光脉冲遮挡动作,这样从第 $n+2$ 脉冲开始的后续脉冲被全部遮挡。

(2) “ $0+1$ ”模式:

该模式是无前期流场耦合的任意脉冲冲量测量,即复摆摆杆一直处于锁紧状态,一个遮光器初始时已将前 n 个激光脉冲遮挡,此时与复摆喷管未发生冲量耦合。第 n 个脉冲输出同时,该遮光器动作,允许激光脉冲通过,放过第 $n+1$ 脉冲与喷管发生冲量耦合。与此同时,另一个遮光器完成遮挡动作,第 $n+2$ 之后的脉冲继续被遮挡。

其中“ $n+1$ ”模式保持了之前脉冲流场的累积效应,与传感器多脉冲测量状态一致,可用于两种方法的结果对比。“ $0+1$ ”模式也是测第 $n+1$ 个脉冲,可用于对比分析有无之前脉冲流场耦合的影响,为激光推力器多脉冲性能研究提供依据。

4 多脉冲冲量测量的实现

为实现以上两种测量模式,在单脉冲冲量测量的基础上,增加了脉冲提取和摆杆松紧两个控制单元。对于 25 Hz设计指标,激光脉冲遮光及摆杆松开动作必须在相邻的脉冲间隔 40 ms内完成。由于一般门禁系统用的磁力锁是采用直流供电,无任何机械结

构, 容易实现电路控制, 所以作为激光脉冲提取和复摆摆杆控制单元的核心部件。

4.1 实验装置

与文献 [3] 不同的是, 复摆摆杆上对称安装了磁力锁 ④ 的吸附铁板, 增加了两个遮光器 iv 和 ⑤。研制了三路磁力锁的时序控制器, 如图 1 所示。透镜 (焦距 300 mm) 聚焦击穿空气, 与圆锥形喷管 (全锥角 15° , 端面直径 32 mm) 冲量耦合。光电二极管感应每个脉冲的等离子体发光信号, 由时序控制器累加计数, 按设定脉冲数及时序输出磁力锁的控制信号。对于 “0+1” 模式, 可以撤离磁力锁 ④ 复摆可自由摆动。遮光器 iv 和 ⑤ 的放置高度相差 100 mm, 遮光器 iv 先 “遮光” 后 “通光”, 遮光器 ⑤ 先 “通光” 后 “遮光”, 其启动时机分别发生于第 n 和 $n+1$ 个脉冲结束时, 并在一个脉冲间隔内完成动作; 对于 “ $n+1$ ” 模式, 撤离遮光器 iv, 磁力锁 ⑤、④ 的断电时机与 “0+1” 模式相同, 对应遮光器 ⑤ 遮挡第 $n+2$ 以后的全部脉冲。为便于数据处理, 磁力锁 ④ 从锁紧至松开后, 增加了复锁信号。

4.2 时序控制流程

两种测量模式均必须在时序控制器的指令下有序动作, 图 2 给出了 “ $n+1$ ” 模式的时序控制示意图。即磁力锁 ⑤、④ 组合使用, 不遮挡前 n 个激光脉冲, 与喷管发生 n 次冲量耦合, 但此时复摆摆杆锁紧, 无法摆动; 与此同时, 控制摆杆的磁力锁断电, 第 $n+1$ 个脉冲加载继续与喷管发生冲量耦合, 复摆正常摆动; 在第 $n+1$ 个脉冲输出时, 由时序控制器同步给出激

光脉冲遮挡的动作信号, 从第 $n+2$ 脉冲开始的后续脉冲被遮挡。并且, 在第 $n+1$ 个脉冲磁力锁 ⑤ 的断电信号发出后, 根据复摆的固有周期约 1 s 计算, 设置了磁力锁 ⑤ 的复锁延迟时间 300 ms 即在复摆已脱离平衡位置足够远但又未再回到平衡位置的时间内, 等待复摆返回。

4.3 数据处理方法

一般情况下复摆受到冲量瞬间加载后, 自由摆动。编码器输出脉冲信号, 正负向最大摆角分界明显, 差值为 $2\theta_m$, 如图 3 所示。

“ $n+1$ ” 模式中, 磁力锁 ④ 阻碍了复摆的负向摆动, 当复摆返回平衡位置时, 会发生高频弹性碰撞, 影响角度计数。但在磁力锁 300 ms 复锁后, 复摆返回平衡位置时被快速吸住, 导致编码器输出电平不变, 从而有效避免了高频反弹, 如图 4 所示。电平不变的启示时刻即复摆重返平衡位置的特征时刻, 则从正向摆幅至平衡位置的角度差即为 θ_m 。

5 多脉冲测量方法检验

5.1 控制时序检验

对遮光器的控制时序和任意脉冲提取进行了检验。图 5 是遮光器的时序控制记录, CH1 记录上升沿触发信号, CH2 记录磁力锁的残磁时间和遮光动作时间延迟, CH3 是磁力锁的断电反冲信号。结果显示从触发输入信号至遮光动作完成的总延时约 26 ms 满足 25 Hz 指标设计要求。

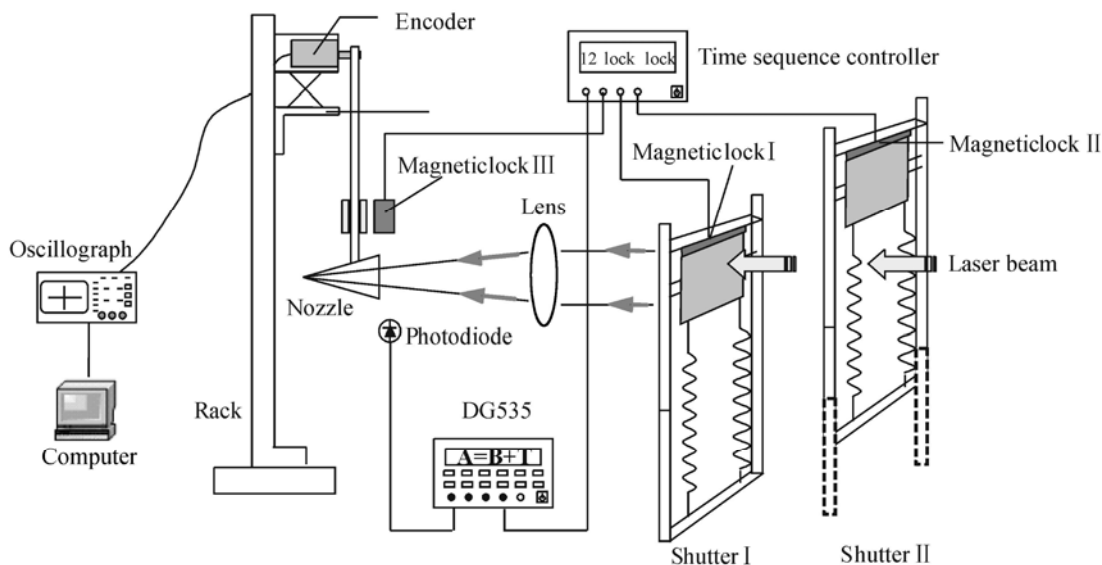


Fig 1 Schematic diagram of experimental setup

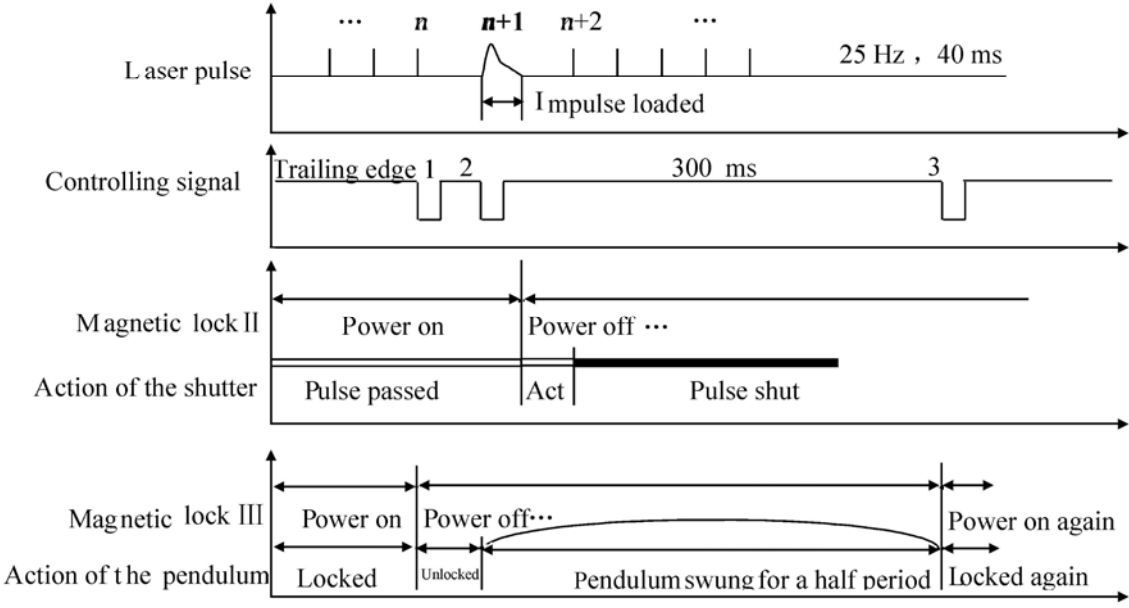


Fig 2 Schematic diagram of time sequence control for “ $n + 1$ ” measurement pattern

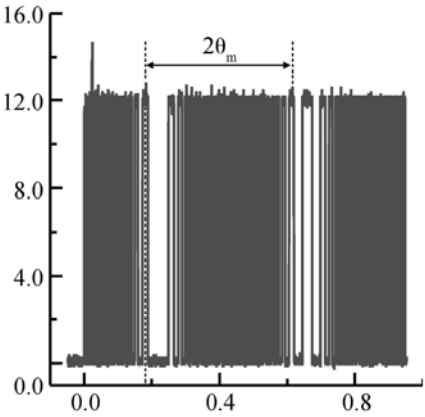


Fig 3 Pulse signal of the encoder at a free swing state

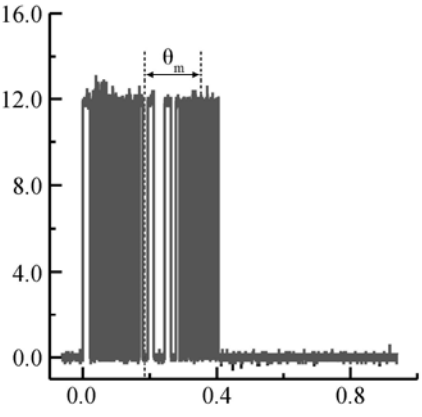


Fig 4 Pulse signal of the encoder at a limited swing state

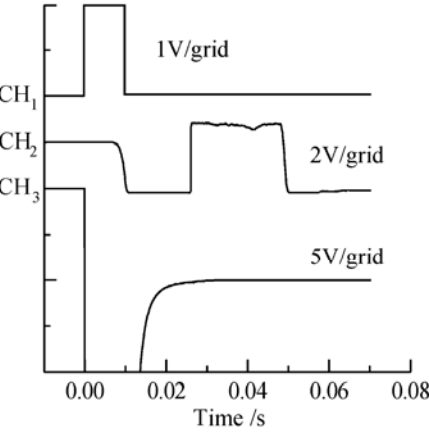


Fig 5 Time sequence process for shutting laser pulse

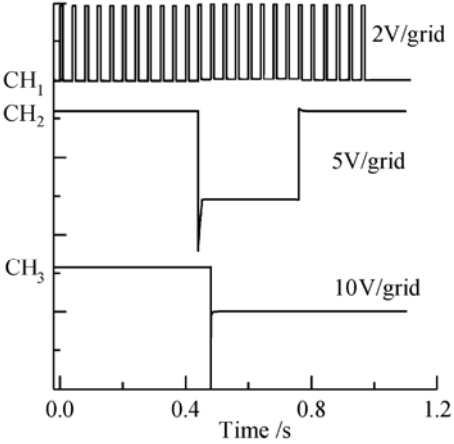


Fig 6 Time sequence of extracting No. 13 pulse within 25 pulses

图 6是任意激光脉冲提取的控制时序。计数 25 个脉冲, 设定提取第 13 个脉冲。CH 1 记录记录编号 1~ 25 的多脉冲序列, 前 1~ 11 个脉冲被遮挡, 时序控制器累计至第 12 个脉冲时, CH 2 检测到磁力锁 iv

断电的信号, 遮光器 iv 打开, 等待第 13 个脉冲通过; 第 13 个脉冲到来时, CH 3 检测到磁力锁 ③ 的断电信号, 遮光器 ③ 由打开切换至关闭。之后的第 14~ 25

个脉冲全部被遮挡,顺利在 25 Hz 频率构成的 25 个多脉冲序列中提取了第 13 个激光脉冲。

5 2 测量结果对比

激光器在较短工作时间内输出单脉冲稳定,波动小于 5%。则公式 (1) 中 E 为实验前的能量监测值。在 1 Hz 情况下,激光器输出单脉冲,模拟形成每个脉冲能量已知的多脉冲序列。由于圆锥形喷管相邻两次间隔时间长,已恢复初始状态,两种测量模式应该

获得基本一致的冲量耦合系数测量结果。

如表 1 所示,先在冲量缓慢加载时标定复摆的系统参数 J, L, T_0 之后模拟“0+ 1”和“ $n+ 1$ ”模式测量每次冲击加载的单脉冲能量 E 和最大摆角 θ_m ,结果显示在能量浮动不大的条件下,多次测量两种模式的冲量耦合系数基本稳定在 371.0~ 375.3 N MW, 具有很好的 consistency。

Table 1 Results of impulse coupling coefficients for both measurement patterns

Pattem	Number	E / J	$\theta_m / ^\circ$	$J / (kg \cdot m^2)$	L / m	T_0 / s	$C_m / (N MW)$
“0+ 1”	1	24.0	2.745	0.005 7	0.218	0.88	372.6
	2	24.3	2.76				374.1
	3	24.0	2.745				372.6
	4	25.0	2.88				375.3
“ $n+ 1$ ”	5	24.5	2.79	0.005 7	0.218	0.88	371.0
	6	24.5	2.79				371.0

6 结 论

本文所提出的测量方法,可在 25 Hz 频率范围内构成的多脉冲序列中提取任意脉冲进行冲量耦合系数测量,实现两种测量模式。分析了该方法数据处理面临的新问题,进行了控制时序检验,并在模拟多脉冲序列下对比了两种测量模式的冲量耦合系数测量结果,得到以下结论

(1) 摆杆冲击加载后返回平衡位置复锁,指示了编码器脉冲计数结束的特征时刻,为摆动受限情况的数据处理奠定基础;

(2) 遮挡激光脉冲的动作延时约为 26 ms,激光脉冲提取的工作时序正确,可实现“0+ 1”、“ $n+ 1$ ”两种冲量耦合系数的测量模式;

(3) 1 Hz 模拟多脉冲序列测量结果显示,两种模式下对 15°锥形喷管,所获得的冲量耦合系数基本稳定在 363.4~ 378.7 N MW,具有很好的 consistency。

因此本文所提出的测量方法可以用于 25 Hz 范围内的吸气式激光推进的多脉冲性能研究,并为其多脉冲测量方法提供可靠的参考数据。

参考文献:

[1] 文 明,洪延姬,王俊花,等. 增量式旋转编码器在复摆法冲量测量中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2007, 28 (1), 140~ 144

[2] 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

[3] 文 明,洪延姬,崔村燕,等. 吸气式激光推进单脉冲性能实验研究 [J]. 推进技术, 2007, 28 (5), 522~ 525 (WEN Ming HONG Yan-Ji CU I Cun-yan et al Experimental investigation of single-pulse performance for air-breathing laser propulsion [J]. Journal of Propulsion Technology, 2007, 28 (5), 522~ 525)

[4] 郑义军,谭荣清,王东蕾,等. 激光脉冲重复频率对冲量耦合系数的影响 [J]. 强激光与粒子束, 2005, 17 (7): 979~ 982

[5] 崔村燕,洪延姬,何国强,等. 基于 PVDF 传感器的单脉冲激光推力加载过程研究 [J]. 强激光与粒子束, 2007, 19 (4): 553~ 556

(编辑: 张荣莉)