

激光推进冲量耦合系数的测量方法*

金星, 洪延姬, 崔村燕, 王军, 文明

(解放军装备指挥技术学院 测试发射工程教研室, 北京 101416)

摘 要: 激光推进冲量耦合系数是激光推进的重要参数, 反映激光能量转化为动能的能力。提出了水平双线支撑激光推进试验方法, 推导了水平双线支撑激光推进时光船的运动方程和测量方程; 通过高速相机测量位移, 利用卡尔曼滤波计算速度的方法, 解决了激光脉冲瞬间作用时速度随机起伏大和计算困难的问题。为水平激光推进冲量耦合系数的计算, 提供了工程测量和计算方法。

关键词: 激光; 水平激光推进; 速度; 耦合系数; 冲量

中图分类号: O439; TN249 **文献标识码:** A

激光推进技术是将激光的能量转化为飞行器动能的一种新型的推进技术。激光推进主要采用两种模式: 空气吸气模式和火箭模式。激光推进的突出特点是比冲大、成本低、快速机动。

空气吸气模式是通过聚焦激光束击穿空气, 产生等离子体, 形成激光维持的爆轰波产生推力, 不需要携带工质, 可应用于距离地面 20km 以内的飞行器推进。火箭模式是激光束触发携带的工质, 产生瞬态等离子体维持的爆轰波(或高速射流)而产生推力, 需要携带工质, 可应用于距离地面 20km 以外的飞行器推进。

激光能量转化为推进动能的能力, 采用冲量耦合系数表示, 冲量耦合系数测量中通常采用复摆测量方法, 该方法存在以下难点: 复摆的摆动模型为非线性, 并且阻尼系数标定困难, 运动规律准确描述困难。激光脉冲的瞬间冲击作用力, 使复摆转动部分的主惯性轴难以准确对准, 产生扭转、弯曲干扰振动, 抑制干扰困难。复摆在单位激光脉冲作用下的转角, 一般采用角编码器测量。角编码器的转动惯量无法准确确定, 以及瞬间冲击作用下, 角编码器动态响应滞后。因此, 本文提出水平激光推进冲量耦合系数的测量方法。

1 冲量耦合系数

设激光器的单位脉冲能量为 E , 则冲量耦合系数

$$C_m = F t / E \quad (1)$$

式中: F 为单位脉冲产生的推力; t 为推力作用时间; $F t$ 为单位激光脉冲产生的冲量。

激光推进实验中, 采用的模拟飞行装置称为光船。设光船的质量为 m , 单位激光脉冲产生的冲量 $F t$ 作用下, 光船获得的速度为 v_0 , 则冲量耦合系数

$$C_m = F t / E = m v_0 / E \quad (2)$$

作用时间 t 在 μs 量级 ($1\mu\text{s}$), 可以认为光船在瞬间获得速度 v_0 , 目前国内实验室采用的脉冲激光器单位脉冲能量一般小于 30J。

冲量耦合系数越大, 说明光船将激光能量转化为动能的能力越强, 因此, 激光冲量耦合系数的实验测量技术, 是光船结构优化设计, 以及研究激光推进的关键技术之一^[1-4]。

2 水平双线支撑激光推进试验

将光船放置在水平面内平行的双线金属细丝上, 光船的支撑部分与金属细丝形成点接触, 通过润滑使点接触摩擦力很小, 脉冲激光束水平方向作用于光船的旋转抛物形内表面, 聚焦激光束, 简称为水平双线支撑激光推进试验, 如图 1 所示。

采用高速相机测量 t_k 时刻的水平位移 s_k ($k=0, 1, 2, \dots, n$), 采样点数目为 $n+1$ 个, 采样周期为 $T = t_{k+1} - t_k$ 。水平双线支撑激光推进试验, 根据基本量测量位移和时间, 需要确定单位激光脉冲作用下, 光船瞬间获得的速度 v_0 , 利用式(2)计算冲量耦合系数 C_m 。

* 收稿日期: 2003-12-08; 修订日期: 2004-02-23

基金项目: 国家 863 计划项目资助课题

作者简介: 金星(1962—), 男, 教授, 博士, 从事可靠性、安全性、先进推进技术研究; 北京 3380 信箱 86 号; E-mail: jinxing-beijing@sina.com.cn。

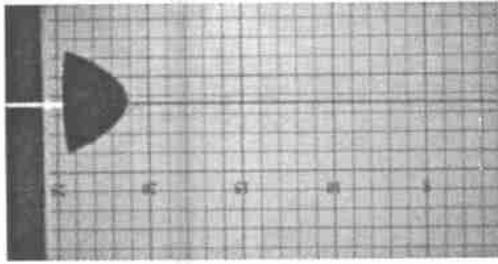


Fig. 1 Horizontal parallel wire supported laser propulsion test

图 1 水平双线支撑激光推进试验

由位移和时间计算速度 v 和加速度 a , 通常采用切割线方法, 公式为

$$v_k = \frac{s_{k+1} - s_k}{t_{k+1} - t_k}, \quad a_k = \frac{v_{k+1} - v_k}{t_{k+1} - t_k} \quad (3)$$

采用切割线方法计算速度和加速度的主要缺点在于: 观测量为位移和时间, 速度曲线波动大, 不易准确估计速度, 如图 2 所示为直接采用切割线方法计算的速度; 需要计算的是脉冲作用下瞬间的速度, 切割线方法只利用测量起始时间的若干个位移和时间测试点, 造成较大估计误差; 无法合理利用脉冲作用后一直到停止运动之间的位移和时间的测量信息。如果进一步采用曲线拟合方法, 拟合曲线的阶次和两端边界条件未知, 因此脉冲作用下瞬间的速度 v_0 计算误差较大。

为了克服切割线方法计算速度的缺点, 研究了基于卡尔曼滤波理论的计算方法。

3 水平双线支撑激光推进时光船的运动方程

水平双线支撑激光推进时光船运动过程的特点是: 水平双线的小摩擦阻力变化不大, 但是存在随机的起伏, 可以认为是加速度基本不变, 加加速度为白噪声的水平直线运动。因此, 作如下基本假设:

(1) 由于激光脉冲作用时间 $t \sim 1\mu\text{s}$, 设光船在单位激光脉冲作用下瞬间获得的速度为 v_0 ;

(2) 光船在瞬间获得速度 v_0 后, 在金属细丝摩擦阻力作用下, 速度逐渐减小到零。由于受各种干扰的影响, 采用在恒定摩擦阻力基础上, 叠加零均值白噪声来描述。例如, 光船加速度 a 满足 $da/dt = w(t)$, 这里 $w(t)$ 为零均值白噪声。

设 s 表示光船位移, v 表示光船速度, a 表示光船加速度, 在激光脉冲作用瞬间, 完成能量交换, 光船获得速度 v_0 。在水平推进时, 恒定加速度 (恒定摩擦阻力), 存在零均值白噪声干扰的运动方程为

$$\begin{bmatrix} ds/dt \\ dv/dt \\ da/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ v \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t) \quad (4)$$

式中: $w(t)$ 是零均值正态白噪声, 表示水平双线支撑摩擦阻力的随机干扰部分, 满足

$$E[w(t)] = 0, \quad E[w(t)w(\tau)] = q(t - \tau) \quad (5)$$

式中: q 是白噪声方差强度; $E(\cdot)$ 表示取均值运算; (\cdot) 函数满足 $(t - \tau) = 1(t = \tau)$ 和 $(t - \tau) = 0(t \neq \tau)$ 。

采用高速相机测量位移, 任意给定 t_k 时刻, 高速相机测量的位移为 $z(t_k)$, 它与状态变量 $s(t_k)$ 的关系为

$$z(t_k) = s(t_k) + V(t_k) \quad (6)$$

式中: $V(t_k)$ 是零均值正态白噪声, 描述高速相机测量中的随机干扰, 满足

$$E[V(t_k)] = 0, \quad E[V(t_k)V(t_j)] = r(t_k - t_j), \quad (k, j = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中, r 为测量正态白噪声的方差强度。

从式 (4) 运动方程和式 (6) 测量方程可知, 正好满足卡尔曼滤波条件, 因此, 水平激光推进时, 可以采用卡尔曼滤波方法估计光船的速度。

4 利用卡尔曼滤波方法估计光船的速度^[5,6]

在光船的运动方程中, 令状态向量为 $X = [s, v, a]^T$, 则光船运动的状态方程和测量方程为

$$\begin{cases} dX(t)/dt = F(t)X(t) + G(t)w(t) \\ z(t_k) = HX(t_k) + V(t_k) \end{cases} \quad (8)$$

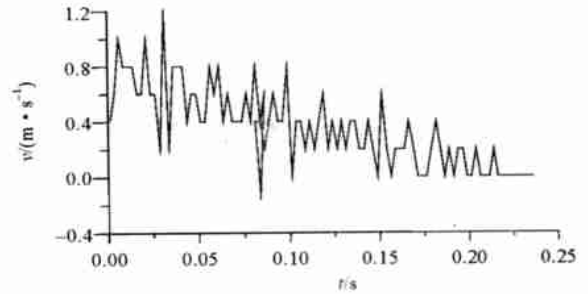


Fig. 2 Velocity curve calculated by secant method

图 2 切割线方法计算的速度曲线

式中

$$F(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad G(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad H = [1 \quad 0 \quad 0]$$

根据线性系统理论对状态方程离散化,并且采用卡尔曼滤波方法估计速度,滤波周期为

$$T = t_{k+1} - t_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots)$$

状态方程可以离散化为

$$\begin{cases} X_{k+1} = F_{k+1,k} X_k + W_k \\ z_k = H X_k + V_k \end{cases} \quad (9)$$

式中: $z(t_k) = z_k; X(t_k) = X_k; V(t_k) = V_k$ 。选择滤波周期,使 $F(t)$ 可以看作分段常阵时,有

$$F_{k+1,k} = e^{TF(t_k)} = I + \sum_{i=1}^T F^i(t_k) \frac{T^i}{i!} \quad (10)$$

式中: I 为相应阶数的单位矩阵; W_k 为零均值的白噪声序列,其方差阵 Q_k 为

$$Q_k = \sum_{i=1}^T M_i \frac{T^i}{i!} \quad (11)$$

其中

$$M_{i+1} = F_k M_i + (F_k M_i)^T \quad (i = 1, 2, 3, \dots)$$

$$M_1 = G_k q G_k^T, \quad G_k = G(t_k), \quad F_k = F(t_k)$$

5 光船速度与冲量耦合系数的计算

采用卡尔曼滤波方法计算速度时,需要注意的问题是:如果直接根据位移和时间的测量值,从激光脉冲作用的瞬间起步估计,状态变量的初始条件不好确定。例如脉冲作用瞬间的速度就是需要计算确定的值。因此,设光船在与摩擦阻力相等、方向相反的力的作用下,由静止位置运动到激光脉冲作用瞬间的位置,速度刚好达到激光脉冲作用瞬间后的速度 v_0 。根据上述分析,将位移和时间作如下变换

$$t_k = t_n - t_{n-k}, \quad s_k = s_n - s_{n-k} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, n)$$

水平激光推进在大气中进行(即空气吸气模式),采用高速相机进行拍照,每隔 2.5ms 判读位移值(即每隔 2.5ms 进行 1 次量测)。卡尔曼滤波初始条件为:状态向量 X_0 的均值为 $[0, 0, 0]^T$,协方差阵为 $P_0 = I$ (可取较大值,此处取 $= 10^3$),系统噪声方差强度为 $q = 0.1 \text{ m}^2/\text{s}^6$,测量噪声方差强度为 0.1 m^2 。滤波过程中每步式(10)中 $i=2$ 时一步状态转移矩阵值稳定,每步式(11)中 $i=5$ 时噪声方差阵值稳定,滤波稳定时上述初值对速度估计基本无影响。

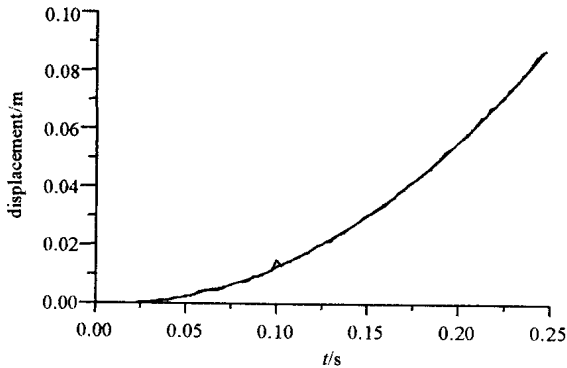


Fig. 3 Displacement observation and filtering curve

图 3 测量位移与滤波位移曲线

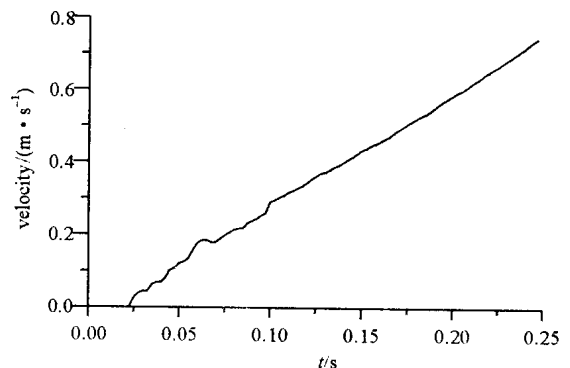


Fig. 4 Velocity filtering curve

图 4 滤波速度曲线

图 3 所示为测量位移-时间与滤波位移-时间曲线。滤波位移曲线比测量位移曲线波动小,说明滤波计算正确。图 4 所示为滤波速度-时间曲线。从图中可看出,时间大于 0.1s 后,滤波稳定,呈直线,速度最大值为 0.744m/s,即 $v_0 = 0.744 \text{ m/s}$ 。图 5 所示为滤波加速度-时间曲线。从图中可看出,时间大于 0.1s 后,滤波稳定,

呈水平直线,加速度最大值为 3.18m/s^2 。图6所示为位移、速度、加速度误差的方差。从图中可看出,时间大于0.1s后,滤波稳定,方差迅速降低,计算稳定,说明计算正确。

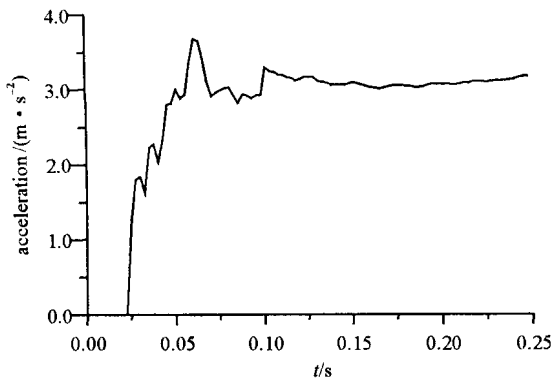


Fig. 5 Acceleration filtering curve

图5 滤波加速度曲线

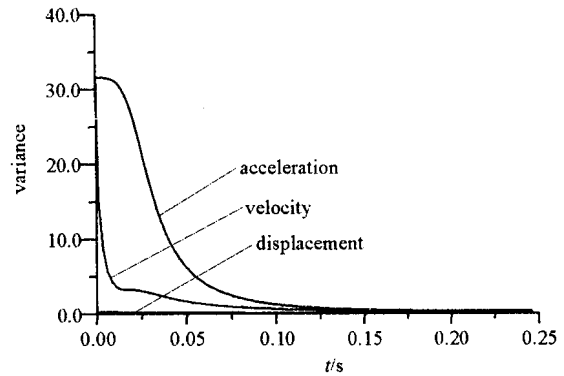


Fig. 6 Variance curve of displacement, velocity and acceleration

图6 位移、速度、加速度估计误差方差曲线

水平双线支撑激光推进试验,采用的光船和附加装置的总质量为 $m = 6.85\text{g}$,因此,单位激光脉冲光船获得的冲量为 $mv_0 = 6.85 \times 10^{-3} \times 0.744 = 0.005\ 096\ 4(\text{N} \cdot \text{s})$,所采用激光器的单位脉冲能量为 20J ,故激光水平推进冲量耦合系数为 $0.005\ 096\ 4 / 20 = 25.482 \times 10^{-5}(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1})$ 。国外采用空气吸气模式激光推进时冲量耦合系数测量值一般在 $18 \times 10^{-5} \sim 33 \times 10^{-5}(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1})$ 之间^[4],可见文本测量和计算结果与其符合。

6 小结

提出了激光推进冲量耦合系数测量的水平推进方法,巧妙利用卡尔曼滤波方法,提出了激光推进单位脉冲作用下速度的计算方法,从而解决了较高精度地确定激光推进中冲量耦合系数计算问题。所提出的方法,还可以进一步估计加速度,为工程测试、设计提供了方法和手段。

参考文献:

- [1] Phipps C R, Reilly J P. Laser launching a 5kg object into low earth orbit[A]. Proc of SPIE[C]. 2000, **4065**: 502—510.
- [2] Feikema D. Analysis of the laser propelled lightcraft vehicle[R]. AIAA-2000-2348.
- [3] Myrabo L N, Messitt D G. Ground and flight tests of a laser propelled vehicle[R]. AIAA-1998-1001.
- [4] Schall W O, Bohn W L, Echel H A. Light craft experiments in Germany[A]. Proc of SPIE[C]. 2000, **4065**: 472—480.
- [5] 秦永元, 张洪钺, 汪叔华. 卡尔曼滤波与组合导航原理[M]. 西安:西北工业大学出版社, 1998. 41—49. (Qin Y Y, Zhang H Y, Wang S H. Kalman filtering theory and combined navigation principle. Xi an: Press of Northwest Industry University, 1998. 41—49)
- [6] 刘福生, 罗鹏飞. 统计信号处理[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 1999. 80—91. (Liu F S, Luo P F. Statistical signal processing. Changsha: Press of National University of Defense Technology, 1999. 80—91)

Measure method of impulse coupling-coefficient of laser propulsion

JIN Xing, HONG Yan-ji, CUI Cur-yan, WANG Jun, WEN Ming

(Academy of Equipment Command and Technology, P. O. Box 3380-86, Beijing 101416, China)

Abstract: Impulse coupling-coefficient is an important index, which represents the capability of laser energy transforming kinetic energy. Based on the measure displacement method of high-speed photograph technology, using Kalman filtering method, velocity calculated method of lightcraft is proposed for horizontal parallel wire supported laser propulsion. From the proposed testing and calculation method, the problem of velocity random fluctuating phenomenon owing to test data fluctuating is resolved. The presented method can be used in engineering measure and design for calculating impulse coupling-coefficient of laser propulsion.

Key words: Laser; Horizontal laser propulsion; Velocity; Coupling-coefficient; Impulse