

doi: 10.7690/bgzd.2022.01.011

基于 Matlab 的扭摆型微推力测量数据处理系统

祝超^{1,2}, 王云萍¹, 袁春¹

(1. 北京跟踪与通信技术研究所三室, 北京 100089; 2. 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘要: 针对微推力测量系统中测量实验操作过程复杂、数据处理过程繁琐等问题, 基于 Matlab 平台设计用于微推力和微冲量测量的数据处理系统。介绍扭摆法测推力和冲量的基本原理和试验操作方法, 分析原始数据特点, 梳理出数据处理流程。结果表明: 该系统可将实验原始数据中的位移和时间信息直接计算成推力数据, 可简化操作过程并提高现场测量的效率。

关键词: 微推力测量; Matlab; 数据处理

中图分类号: V43 **文献标志码:** A

Data Processing System of Torsion Pendulum Micro-thrust Measurement Based on Matlab

Zhu Chao^{1,2}, Wang Yunping¹, Yuan Chun¹

(1. No. 3 Research Group, Beijing Institute of Tracking & Telecommunication Technology, Beijing 100089, China;

2. State Key Laboratory of Laser Propulsion & Applications, Beijing 101416, China)

Abstract: In order to solve the problems of complex experimental operation and tedious data processing in micro-thrust measurement system, a data processing system for micro-thrust and micro-impulse measurement was designed based on Matlab platform. The basic principle and test operation method of torsion pendulum method for measuring thrust and impulse are introduced, the characteristics of original data are analyzed, and the data processing flow is sorted out. The results show that the system can directly calculate the displacement and time information in the original experimental data into thrust data, which can simplify the operation process and improve the efficiency of field measurement.

Keywords: micro-thrust measurement; Matlab; data processing

0 引言

随着航天任务的不断拓展, 以重量轻、体积小、成本低、研制周期短为突出特点的微小卫星的应用前景日益受到瞩目, 同时也带动了空间微推力器的不断进步。目前, 微推力器的脉冲冲量普遍可低至 $10^{-6}\text{N}\cdot\text{s}$ 量级, 平均推力一般在 $10^{-6}\text{N}\cdot\text{s}$ 到 $10^{-3}\text{N}\cdot\text{s}$ 量级^[1-2], 这对冲量和推力测量提出了很高要求。为测量如此微小的推力, 目前业界主流的思路为: 将微小的冲量和推力转化为被测物的位移, 通过高精度的位移测量手段, 间接测量微推力^[3]。实现这种测量方法的结构有很多, 其中的扭摆型结构应用较为普遍。冲量源在水平横梁作用, 使水平横梁绕枢轴发生转动; 测量点发生相应的位移, 通过位移传感器测得的位移变化, 便可计算枢轴的转动角度; 再通过扭摆的系统参数和方程, 建立位移与冲量的定标关系, 即可推算出冲量(推力)的大小^[4]。

扭摆测微推力的优点是推进器的重力和推力

能够有效分离, 从而使恢复力不受推进器和扭臂等部件的质量影响, 执行部件对纵向振动不敏感, 通过调整横梁的长度还可以调整灵敏度和信噪比^[5]。

激光推进及其应用国家重点实验室系统性开展了微推力测量的研究, 设计并建立了多种结构的扭摆型微推力测量系统^[6]。系统的主体为一挠性枢轴支撑的扭摆推力台, 通过测量扭转角度获取推力特性。

通过扭摆测量位移的变化间接得到推力和冲量是一种应用范围很广的测量方法, 但扭摆法测量的原始数据量大, 对于现场测量, 数据处理工作较为繁琐。祝超等^[7]基于 LM 数据拟合, 建立一种连续独立冲量测量的扭摆位移数据处理方法, 可以在保持测量精度的同时, 有效提高连续独立冲量测量的效率, 但存在程序操作复杂的缺点。笔者基于扭摆测量的基本原理, 设计了一种基于 Matlab 的微推力测量数据处理系统, 可将实验原始数据直接处理成推力、冲量等推力数据, 简化了测量过程中的数

收稿日期: 2021-09-12; 修回日期: 2021-10-19

作者简介: 祝超(1990—), 男, 山东人, 博士, 从事激光航天应用、光学工程、空间推进器研究。E-mail: zhuchaod1630@163.com。

据处理工作，可以有效提高现场测量的效率。

1 原理与方法

扭摆的基本结构如图 1 所示。

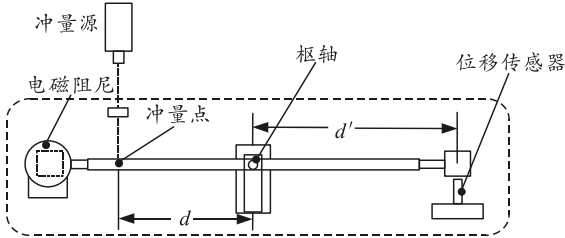


图 1 扭摆结构

当冲量作用在水平横梁上时，水平横梁将在枢轴回复力的作用下在水平平面作二阶阻尼振动，扭摆系统的有阻尼自由振动方程为：

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta = M(t)/J, 0 \leq t \leq T_0. \quad (1)$$

式中： θ 为扭摆横梁的扭转角； J 为横梁组件的转动惯量； ζ 为扭摆系统的阻尼系数； ω_n 为固有振动频率；系统参数间还有关系：

$$\left. \begin{aligned} \omega_n &= \omega_d / \sqrt{1 - \zeta^2} \\ J &= k / \omega_n^2 \\ M(t) &= f(t)d \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

式中： k 为扭摆的扭转刚度系数； $M(t)$ 为外作用力产生的力矩。当冲量作用时间小于扭摆振动周期的 0.1 倍时，冲量可认为是瞬时作用的冲激冲量，记拉普拉斯变换：

$$\Theta = L[\theta(t)]. \quad (3)$$

在单位冲击力的作用下：

$$\Theta(s) = (d/J) / (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2) = (d/J) / ((s + \zeta\omega_n)^2 + \omega_d^2). \quad (4)$$

式中 $\omega_d = \sqrt{1 - \zeta^2}\omega_n$ 为系统频率。当冲量为 $I\delta(t)$ 时，系统响应为：

$$\theta_s(t) = I(d/J) \frac{1}{\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin \omega_d t. \quad (5)$$

单脉冲作用下扭摆位移传感器的位移响应如图 2 所示。

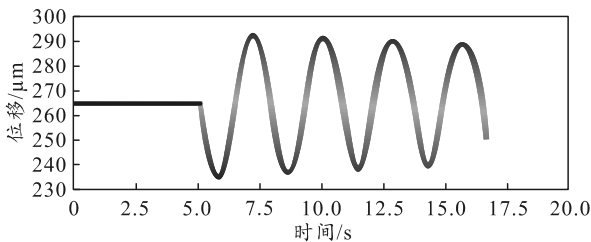


图 2 扭摆法测量冲量的位移数据

当 $t = T/4 = 2\pi/\omega_d$ 时，最大扭转角为：

$$\theta_{\max} = (Id/J\omega_d) e^{-(\pi\zeta/\sqrt{1-\zeta^2})}. \quad (6)$$

基于标定后的系统参数阻尼比 ζ 、系统频率 ω_d 、扭转刚度系数 k 和测量得到的最大扭转角 θ_{\max} ，便可计算出冲量 I 。下面介绍系统参数标定方法。

设有一阶跃的标定力，其产生的力矩为常数 A ，扭摆系统在力矩作用下响应为：

$$\theta(t) = A/J\omega_n^2 - (A/J\omega_d\omega_n) e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t + \alpha); \quad (7)$$

$$\alpha = \arctan(\sqrt{1 - \zeta^2}/\zeta).$$

如图 3 所示，阶跃力作用下扭摆位移传感器的位移响应^[8]。

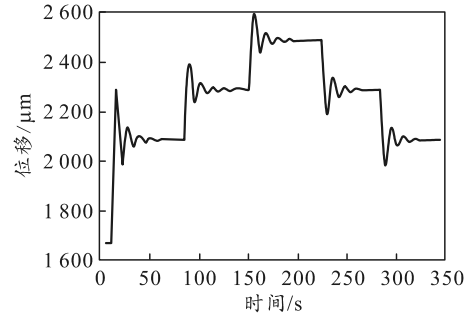


图 3 阶跃力作用下扭摆位移传感器的位移响应

当 $t \rightarrow \infty$ 时：

$$\theta(\infty) = A/J\omega_n^2 = A/k. \quad (8)$$

此时扭转角达到稳态。扭转角导数为：

$$d\theta(t)/dt = (A/J\omega_d) e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t). \quad (9)$$

扭转角极值在 $d\theta(t)/dt = 0$ 时取得，对应的时间序列为：

$$t_{px} = x\pi / \omega_d \quad (x=1, 2, \dots, n). \quad (10)$$

极值点对应的扭转角为：

$$\theta_{px} = \theta(\infty) - (-1)^x \theta(\infty) (e)^{\frac{-x\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (x=1, 2, \dots, n). \quad (11)$$

如图 4 所示，通过测量扭摆系统标定力作用下的稳态扭转角和若干极值扭转角，便可计算出扭摆的系统参数阻尼比 ζ 、系统频率 ω_d 和扭转刚度系数 k 。

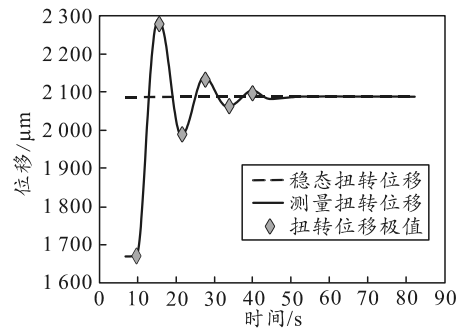


图 4 稳态电磁力标定扭摆的系统参数

常用的阶跃标定力为电磁力，利用多匝线圈和永磁铁的组合，可以生成电磁力

$$F_{EM} = 2nB\pi r i_{em} \quad (12)$$

式中： n 为线圈匝数； B 为磁场强度； r 为线圈半径； i_{em} 为线圈电流。电磁力与电流大小成正比，利用插值法^[9]可以得到电流与电磁力的定标关系，从而实现冲量的测量。

整个测量流程如图 5 所示，系统参数标定后，通过待测冲量或推力在扭摆上产生的位移响应曲线，即可推算出待测冲量和推力。

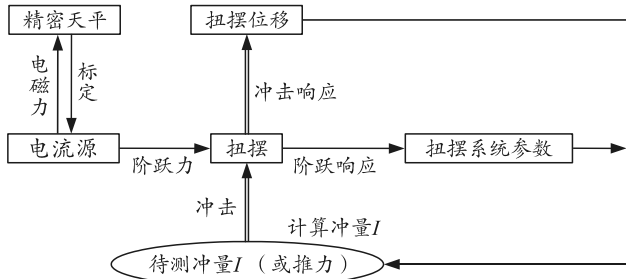


图 5 扭摆测冲量方法步骤

对于稳态的平均推力测量，还有更为简单的方

法：由扭摆振动方程的分析可知，对于同一扭摆系统，最大扭转角与稳态平均推力成正比；因此：

$$F_t / \theta_t = F_{EM} / \theta_{EM} \quad (13)$$

式中： F_t 、 F_{EM} 分别为稳态的待测推力和标定好的电磁力； θ_t 、 θ_{EM} 分别为待测推力和电磁力作用下的最大扭转角度。这时采用如图 5 所示方法可以更方便地得到平均被测推力。

1.1 程序实现

通过上述微推力测量的原理分析可知，测量系统的原始输出主要为位移传感器上的位移数据随着时间的变化、电磁力随电流的变化。为自动将原始数据转化为推力、冲量测量结果，加快现场测量数据处理的速度，提高测量系统的用户友好性。笔者基于 Matlab 编写了以下数据测量系统。

1.2 系统前面板

系统的前面板如图 6 所示，主要分为测量模式、数据选择、系统参数输入、选点显示和计算结果 5 个模块。



图 6 数据处理系统前面板

测量模式选择模块要求用户指定数据处理的模式，选取后系统将对原始数据进行处理。对平均推力测量，需要用户输入标定好的电磁力数据。

数据选择模块要求用户选择原始数据文件。该文件为由位移传感器生成的数据列表，含有推力台位移-时间信息。数据文件加载后，需要对原始数据进行平滑处理，以消除高频噪声和毛刺对测量的干扰。处理完成后，将位移随时间变化的图像显示在独立面板中，以备用户选点。

选点模块要求用户在位移和时间变化图像上指

定系统计算的区间范围。对于平均推力测量，需指定电磁力作用区间端点和平均推力作用区间端点以及它们对应的位移零点；对于单脉冲测量，需指定每一个脉冲的作用区间端点和相应的位移零点。

系统参数输入模块要求用户输入预先标定的系统参数，主要包括推力台的扭转刚度系数 k 、固有频率 ω_n 、测量力臂 a 、推力力臂 b 。依据用户输入的系统参数，系统可计算得到推力参数。

计算结果模块将显示经数据处理得到的推力指标，对于平均推力模式，还将计算推力与电磁力之

间的关系；对于单脉冲冲量模式，还将计算多个脉冲的标准差。

1.3 数据处理主要函数

Matlab 中包含了许多函数用于设计 GUI 和处理数据，下面对本系统中使用的关键函数进行简单介绍。

evalin 和 assignin 可从 Matlab 的工作空间中读取或写入变量，用于各子函数之间进行参量传递，同时方便调试程序。

smooth 可快速将原始数据按照均值法、Savitzky-Golay 法、loess 法进行平滑处理，消除噪声和毛刺。

find 可在数组中找到满足指定条件的元素，并返回其值与序号，用于找到指定区间上位移差的最大值和对应的时刻。

plot 可在 figure 上绘制数据图形，用于查看数据的分布状况，并在图上进行选点，以进行后续的计算。

2 数据处理流程

对于微推力测量应用而言，常用的有平均推力的测量、连续脉冲冲量测量、单脉冲冲量测量。

2.1 数据处理案例

2.1.1 数据导入与参数设置

如图 7 所示，首先指定处理方式为平均推力测量模式，打开原始数据文件，并设定数据文件的采样频率和平滑方式。

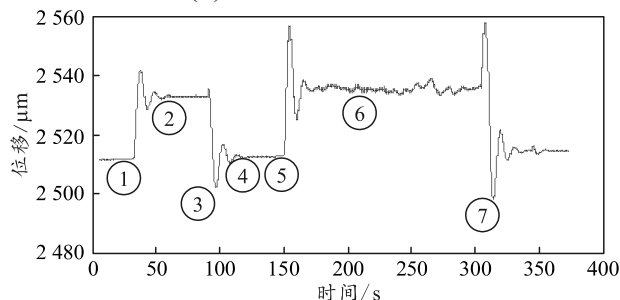


图 7 平均推力测量步骤 1

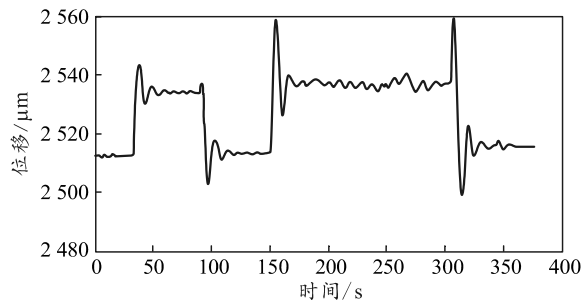
2.1.2 数据平滑

如图 8(a)所示，打开原始数据，可以看到测试中扭转位移数据变化过程分为 7 个阶段：① 电

磁力加载下的位移震荡；② 电磁力作用下的稳态平衡；③ 电磁力卸载后的位移震荡；④ 中间阶段；⑤ 待测力加载下的位移震荡；⑥ 待测力作用下的稳态平衡；⑦ 待测力卸载后的位移震荡。其中，标定电磁力的位移数据较为平滑，而待测力有一定的波动。利用均值法对数据进行平滑处理，消除毛刺，得到如图 8(b)所示的曲线。



(a) 原始数据



(b) 平滑数据

图 8 平均推力步骤 2

2.1.3 选点计算

如图 9 所示，在平滑后的数据图上，利用 Matlab 的图上选点功能，指定电磁力作用的区间端点和位移参考零点，待测推力作用的区间端点及参考位移零点。系统将自动计算最大扭转位移，并将标注出辅助线，以供校验。自动画出辅助虚线，线长为指定区间的长度，选取的点坐标还将在前面板上显示。

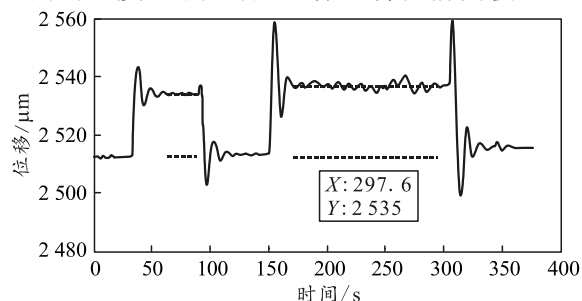


图 9 平均推力测量步骤 3

2.1.4 输出结果

如图 10 所示，计算得到推力持续时间、推力与标定力之比和平均推力。

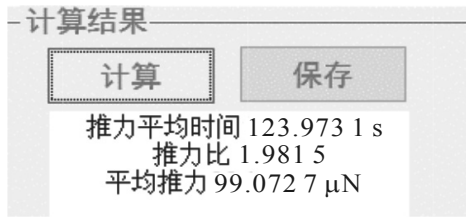


图 10 平均推力测量步骤 4

2.2 连续脉冲测量数据处理

如图 11 所示,首先指定处理方式为推力台脉冲测量模式,打开原始数据文件,设定数据文件的采样频率和平滑方式参数。

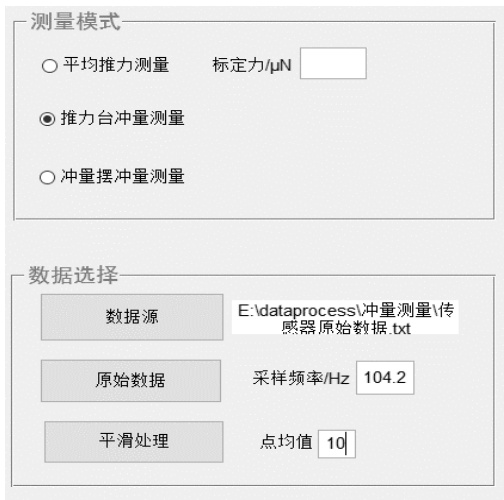


图 11 单脉冲冲量测量步骤 1

打开原始数据及平滑后的推力数据如图 12 所示。该数据段内含有 3 次有效脉冲位移数据。

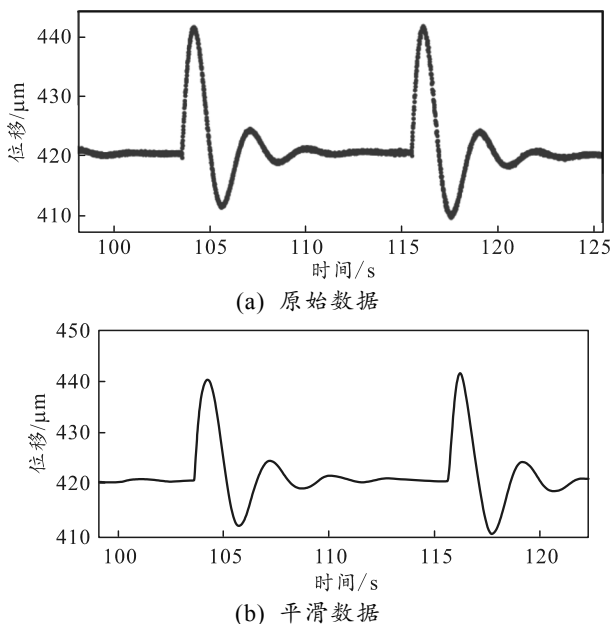


图 12 单脉冲冲量测量步骤 2

如图 13 所示,在平滑数据图上指定每一个脉冲

的作用区间端点和位移零点,系统自动计算区间内位移的最大值并作出辅助虚线。虚线上端点为每一个区间的位移最大值,下端点为指定的位移零点,虚线线长即为位移差 A_{max} 计算得到平均脉冲冲量、标准差和重复性如图 14 所示。

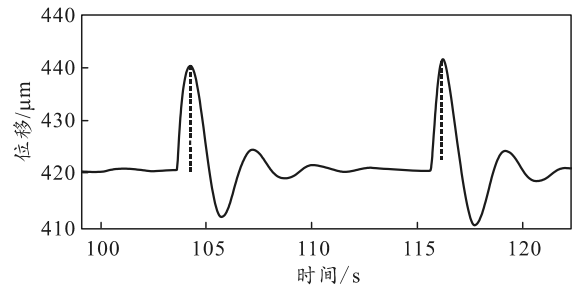


图 13 单脉冲冲量测量步骤 3

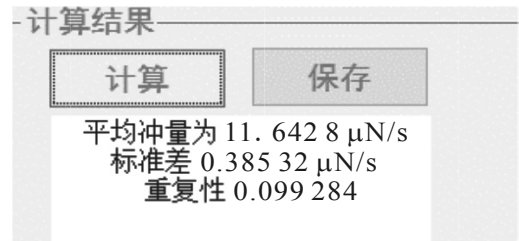


图 14 单脉冲冲量测量步骤 4

3 结束语

基于扭摆的位移测量与数据处理是微推力测量中最为常用手段之一,一种用于位移数据的现场快速处理系统可以有效加快测量效率,提高系统的用户友好性。笔者基于成熟的 Matlab 平台设计的数据处理系统有以下特点:

- 1) 可将位移传感器测得的位移数据直接导入系统,以引导式界面方便简单地得到数据,有效提高现场测量的效率。
- 2) 系统基于 Matlab 平台,降低了实验操作人员对测量系统的学习掌握难度,对微推力测量系统的自动化、产品化有一定帮助。
- 3) 数据导入系统后转化为统一格式显示存储,便于研究人员根据需要二次开发,设计多样化的数据分析任务。

参考文献:

[1] 刘向阳, 范宁军, 李科杰. 微型推进器推力测试的现状和发展趋势[J]. 测控技术, 2004, 23(5): 18-20.
 [2] 陈景鹏, 洪延姬, 王军, 等. 激光微推进扭摆仪冲量测试系统的标定[C]. 中国力学学会学术大会 2005 论文摘要集(下), 2005.