

用于脉冲微推力器的枢轴式微冲量测量系统设计方法

金星¹, 吴文堂², 周伟静^{1*}, 常浩¹

- (1. 航天工程大学 宇航科学与技术系 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416;
2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

摘要: 微冲量测量系统是研究脉冲微推力器推进性能的必备试验手段。提出了一种用于冲量测量的、通用的枢轴式扭摆测量系统的设计方法。首先, 基于二阶振动系统微冲量测量模型, 提出将冲量量程和误差限、测量噪声误差限、位移传感器量程和误差限作为基本设计条件; 其次, 根据冲量与系统响应之间关系、位移传感器测量扭转角方法以及冲量瞬间作用模型, 提出了测量臂、力臂、扭转刚度系数、转动惯量等关键测量系统参数的约束条件; 最后, 通过建立基本设计条件与关键系统参数之间关系, 给出了设计步骤。该设计方法可以用于星载脉冲微推力器冲量性能测量装置的设计, 有很好的通用性和实用性。

关键词: 冲量; 测量系统; 枢轴; 设计方法; 微推力器

中图分类号: V439; TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S117005

Design method of micro-impulse measuring system based on pivots for pulsed micro-thruster

Jin Xing¹, Wu Wentang², Zhou Weijing^{1*}, Chang Hao¹

- (1. State Key Laboratory of Laser Propulsion & its Application, Department of Aerospace Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China;
2. Beijing Institute of Tracking and Communication Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: Micro-impulse measuring system is the essential experimental support for pulsed micro-thruster development. An universal design method of micro-impulse measuring system based on pivots was put forward. Firstly, based on the second-order vibration system of micro-impulse measurement model, the basic design conditions were brought forward: the impulse measuring range and the corresponding error range, the measuring error range, the displacement sensor range and the corresponding error range. Secondly, according to the relationship between the impulse and the response, the torsional angle measuring method based on the displacement sensor and the impulse instantaneous impacting model, the constraint conditions of the system parameters, such as the measuring arm, the force applied arm, the torsional spring and the moment of inertia, were analyzed. Lastly, the design steps were given according to the relationship between the basic design conditions and the system parameters. The design method is appropriate for the impulse measuring system design for any pulsed micro-thruster, and has good universality and practicability.

Key words: impulse; measuring system; pivot; design method; micro-thruster

收稿日期: 2018-12-10; 修订日期: 2019-01-20

基金项目: 国家自然科学基金(11602304, 11502301); 中国博士后面上基金(2018M631547)

作者简介: 金星(1962-), 男, 研究员, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email: jinxing_beijing@163.com

通讯作者: 周伟静(1982-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事空间微推力器评测技术方面的研究。Email: viviazhouyy@163.com

0 引言

脉冲式微推力器在微纳卫星姿态控制、轨道转移、位置保持、编队飞行等空间任务重有着独特的应用前景。在研制阶段,脉冲式微推力器需要以冲量、比冲等推进性能指标作为设计目标,不断迭代、优化。因此,冲量测量技术成为脉冲式微推力器最为关键的技术环节。

在研制脉冲微推力器过程中,国内外学者根据各自推力器特点构建了各种冲量测量装置。具有代表性的研究有:美国 Phipps 实验室采用悬丝扭摆式测量装置测量激光与工质靶片的冲量耦合性能^[1-2],以及脉冲激光微推力器的推进性能^[3-4];参考文献[5]研制了刚性轴水平扭摆,用于测量脉冲等离子体推力器的脉冲冲量;参考文献[6]也构建了类似的刚性轴水平扭摆,用于测量该团队自行研制的液体推进剂脉冲等离子体推力器和激光烧蚀微推力器的脉冲冲量;参考文献[7-8]通过特殊悬挂设计以及精密的扭秤结构组装,研制了特殊悬挂式测量装置,用于测量脉冲等离子体微推力器的单脉冲冲量和多脉冲平均推力。作者所在团队也针对自研的脉冲激光推力器对冲量测量技术进行了研究,研制了基于悬丝的水平扭摆冲量测量装置^[9]以及基于刚性枢轴的水平扭摆冲量测量装置^[10],并针对冲量测量模型误差^[11]、高精度标定方法^[12]、基于扭摆的比冲测量方法^[13]、冲量测量关键问题^[14-16]都进行了系统和深入研究。

上述冲量装置具有以下特点:(1)从结构角度来看,测量装置均为在水平面内转动的扭摆结构,因为水平扭摆对纵向振动不敏感,比较适合小推重比微推力的推进性能测量;(2)从动力学角度看,测量装置均为二阶质量-弹簧-阻尼振动力学模型;(3)从通用性角度看,上述冲量测量装置均是各研究团队根据自行研制的推力器而搭建的,在推力器推进性能测试中起到了非常重要的实验支撑作用。

尽管各研究团队研制了各种冲量测量装置,但如何根据推力器的性能特点进行系统性的冲量测量装置设计未见报道。针对该问题,文中不针对任一型号脉冲推力器,以常用的水平转动扭摆为例,提出一种通用的冲量测量装置设计方法:首先,提取基本设计条件;然后,分析基本设计条件与测量模型、测量

的关系,提出设计依据,进而提出设计条件;最后,根据实例展示了设计方法的应用。

1 基于二阶振动系统的微冲量测量模型

1.1 微冲量测量模型

水平扭摆典型结构如图 1 所示。推力器工作时,推力作用使得水平扭摆工作在谐振状态,利用位移传感器测量固定点的振幅(如线位移或转角),经过测量模型转化即可获得冲量信息。对转动轴应用动量距定理,可得水平扭摆动力学模型为二阶质量-弹簧-阻尼系统,基本方程为:

$$J\ddot{\theta} + c\dot{\theta} + k\theta = f(t)L_f \quad (1)$$

式中: θ 为转角; J 为转动部件相对于中心转轴的转动惯量; c 为阻尼; $f(t)$ 为推力; L_f 为推力作用力臂; k 为扭转刚度系数。

公式(1)转化为标准方程为:

$$\ddot{\theta} + 2\zeta\omega_n\dot{\theta} + \omega_n^2\theta = f(t)L_f/J \quad (2)$$

式中: ζ 为阻尼比; ω_n 为无阻尼自振角频率,且 $\omega_n = \sqrt{k/J}$ 。

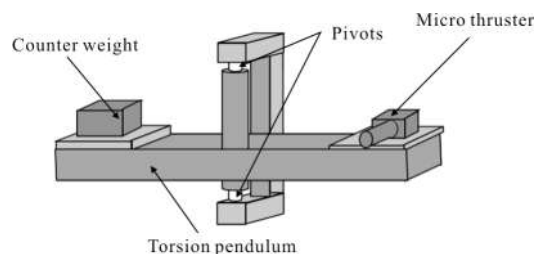


图 1 典型的水平扭摆结构

Fig.1 Typical horizontal torsion pendulum structure

脉冲推力器的推力作用时间较短,机械式冲量测量装置属于低频测量系统,频率通常小于 1 Hz。因此,脉冲推力器的推力测量一般转化为冲量测量。

假设在推力 $f(t)$ 作用下,理想的系统响应(扭转角随着时间变化)为:

$$\theta(t) = \frac{L_f}{J\omega_d} \int_0^t f(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin\omega_d(t-\tau) d\tau \quad (3)$$

式中: L_f 为力臂; J 为横梁转动惯量; ζ 为阻尼比; ω_n 为固有振动频率; $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ 为振动频率。

冲量为 S 的脉冲力为 $f(\tau) = S\delta(\tau)$,此时,理想系

统响应为:

$$\theta(t) = \frac{SL_f}{J\omega_d} \int_0^t \delta(\tau) e^{-\zeta\omega_n(t-\tau)} \sin[\omega_d(t-\tau)] d\tau = \frac{SL_f}{J\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_d t) \quad (4)$$

实际系统响应为:

$$\Theta(t) = \theta(t) + \Delta\theta(t) = \frac{SL_f}{J\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t} \sin\omega_d t + \Delta\theta(t) \quad (5)$$

式中: $\Delta\theta(t) \sim N(0, \sigma^2)$ 为环境、位移传感器和冲量加载等产生的测量噪声, 采用零均值正态分布表示, 其误差限可取: $\Delta\theta = 3\sigma$ 。

根据实际系统响应测量值 $[t_i, \Theta(t_i)] (i=0, 1, 2, \dots)$, 即可分析和计算冲量 S , 其中, 扭转角测量采用位移传感器。实际系统响应测量值 $\Theta(t_i)$ 包含冲量误差 ΔS 引起的响应:

$$\Theta(t_i) = \frac{(S + \Delta S)L_f}{J\omega_d} e^{-\zeta\omega_n t_i} \sin\omega_d t_i \quad (6)$$

则冲量测量相对误差为:

$$\frac{\Delta S}{S} = \frac{\Theta(t_i) - \theta(t_i)}{\theta(t_i)} = \frac{\Delta\theta(t_i)}{\theta(t_i)} \quad (7)$$

即测量噪声引起扭转角与冲量的测量误差, 并且扭转角相对误差与冲量相对误差相等。

在瞬间作用冲量 S 作用下, 最大扭转角为:

$$\theta_{\max} = \frac{SL_f}{J\omega_d} e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}(\pi/2)} = \frac{SL_f}{\sqrt{kJ} \sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}(\pi/2)} \quad (8)$$

则冲量 S 可表示为:

$$S = \frac{\theta_{\max} J\omega_d}{L_f} e^{\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}(\pi/2)} = \frac{\theta_{\max} \sqrt{kJ} \sqrt{1-\zeta^2}}{L_f} e^{\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}(\pi/2)} \quad (9)$$

公式(9)即为冲量耦合作用模型, 即忽略力作用时间的冲量测量模型。

设测量系统的冲量量程为 $[S_d, S_u] (S_d < S_u)$, 则冲量量程对应的最大扭转角为:

$$\begin{cases} \theta_{\max, S_d} = \frac{C_s S_d L_f}{\sqrt{kJ}} \\ \theta_{\max, S_u} = \frac{C_s S_u L_f}{\sqrt{kJ}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $C_s = \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}(\pi/2)}$, 且阻尼比 $\zeta=0$ 时, $C_s=1$ 。

1.2 冲量瞬间作用模型误差分析

通过冲量作用与系统响应的关系可知, 冲量测

量是基于脉冲力作用下的冲量瞬间作用模型, 认为冲量作用时间很短, 可忽略不计, 但是实际冲量总是占有一定作用时间。

采用冲量瞬间作用模型计算冲量时, 所选择扭转角为极值点对应扭转角。此时, 冲量瞬间作用模型的相对误差为:

$$\varepsilon_M = (-1)^i \sqrt{A^2 + \left(\frac{\zeta A + B}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)^2} e^{\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} 2\pi k_{T_0}} \cdot \sin[(i+1/2)\pi - 2\pi k_{T_0} + \alpha_2] - 1 \quad (11)$$

式中: $A = \int_0^1 e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} 2\pi k_{T_0}(1-s)} \sin[2\pi k_{T_0}(1-s)] ds$; $B =$

$\int_0^1 e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} 2\pi k_{T_0}(1-s)} \cos[2\pi k_{T_0}(1-s) + \alpha_1] ds$; $\alpha_1 = \arctan$

$\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}$; $\alpha_2 = \arctan \frac{\sqrt{1-\zeta^2} A}{\zeta A + B}$; $k_{T_0} = T_0/T_d$ 为冲量作用

时间 T_0 与测量系统周期 T_d 比值, 其中 $i=0, 1, 2, \dots$, 依次对应第一个极大值点、第一个极小值点、第二个极大值点、第二个极小值点等。计算表明: 当阻尼比 $0 < \zeta \leq 0.3$ 时, 采用极值点计算冲量条件下, 只要 $k_{T_0} = T_0/T_d \leq 0.01$, 冲量瞬间作用模型误差不大于 1%, 后面将以此作为设计依据之一。

2 微冲量测量系统设计条件分析

冲量测量系统的核心问题是建立基本设计条件和关键系统参数之间的关系, 作为定量设计的基本依据。当初始设计条件选择不合理时, 将造成设计条件过少不能完成系统参数设计、或设计条件过多系统参数设计冲突的问题。因此, 根据工程设计需求, 选择基本设计条件: 首先, 应当满足被测冲量的量程和测量误差; 其次, 测量系统总是存在测量噪声, 应当明确测量噪声的强度即噪声误差限; 再次, 由于是通过位移传感器测量振动扭转角实现冲量测量, 应当明确位移传感器的有效量程和误差限; 最后, 冲量作用时间应当满足冲量瞬间作用条件。因此, 提出以下基本设计要求:

(1) 测量系统的冲量量程、测量误差。冲量量程为 $[S_d, S_u] (S_d < S_u)$, 冲量测量的相对误差为 ε_s (误差限), 在该量程范围内, 冲量的测量误差满足指定要求。

(2) 推力作用时间。推力作用时间 T_0 与测量系统周期 T_d 比值为 $k_{T_0}=T_0/T_d$ ，为了满足冲量瞬间作用条件，要求 $k_{T_0}=T_0/T_d \ll 1$ 。

(3) 测量噪声。测量噪声的误差限为 $\Delta\theta$ ，环境的外力激励和位移激励、位移传感器、冲量加载等干扰将造成测量噪声，采用隔振平台与隔振物体、电磁阻尼器等可抑制测量噪声。

(4) 位移传感器的量程、误差限。位移传感器的量程为 $[h_{sd}, h_{su}]$ ($h_{sd} < h_{su}$)，在该量程范围内，位移测量的误差限为 Δh_s 。位移传感器作用是高精度测量系统响应。

冲量测量系统设计的基本依据是冲量作用与系统响应之间关系，位移传感器测量扭转角方法，以及冲量瞬间作用模型。

3 测量系统关键参数计算

枢轴式扭摆测量系统设计的关键是测量系统参数的设计方法。从公式(9)可以看出，主要的系统参数涉及测量臂长度、扭转刚度系数、转动惯量、推力作用力臂等。

3.1 扭转刚度系数、力臂、转动惯量参数计算

设冲量测量的相对误差为 ε_s ，由于冲量测量的相对误差与扭转角测量的相对误差相等，根据公式(10)，只需：

$$\frac{\Delta\theta\sqrt{kJ}}{C_s S_d L_f} \leq \varepsilon_s \quad (12)$$

因此，要求扭转刚度系数、转动惯量、力臂满足：

$$\frac{\sqrt{kJ}}{L_f} \leq \frac{\varepsilon_s C_s S_d}{\Delta\theta} \quad (13)$$

又由于最大扭转角为 $\theta_{\max, s_s} = C_s S_d L_f \sqrt{kJ}$ ，应在位移传感器量程之内 $\theta_{\max, s_s} = C_s S_d L_f \sqrt{kJ} \leq h_{su}/L_s$ ，还要求扭转刚度系数、转动惯量、力臂满足：

$$\frac{\sqrt{kJ}}{L_f} \geq \frac{C_s S_u L_s}{h_{su}} \quad (14)$$

综合公式(13)、(14)可得，扭转刚度系数、转动惯量、力臂满足的设计条件为：

$$\begin{cases} \frac{C_s S_u L_s}{h_{su}} \leq \frac{\sqrt{kJ}}{L_f} \leq \frac{\varepsilon_s C_s S_d}{\Delta\theta} \\ L_s \leq \frac{\varepsilon_s h_{su} S_d}{\Delta\theta S_u} \end{cases} \quad (15)$$

设已知冲量的作用时间 T_0 ，冲量作用时间 T_0 与测量系统周期 T_d 比值为 $k_{T_0}=T_0/T_d$ ，为了满足冲量瞬间作用条件，要求 $k_{T_0}=T_0/T_d \ll 1$ 。且当阻尼比 $0 < \zeta \leq 0.3$ 时，只要 $k_{T_0}=T_0/T_d \leq 0.01$ ，冲量瞬间作用模型的相对误差不大于 1%。因此，设 $\omega_d \leq \frac{\pi}{50T_0}$ ，则要求转动惯量、扭转刚度系数满足：

$$\frac{J}{k} \geq \left(\frac{50T_0}{\pi}\right)^2 C_\zeta \quad (16)$$

式中： $C_\zeta = 1 - \zeta^2$ ，且当阻尼比 $\zeta^2 = 0$ 时， $C_\zeta = 1$ 。

为便于标定系统参数^[12]，以及冲量瞬间作用模型误差不大于 1% 的条件，要求阻尼比 $0 < \zeta \leq 0.3$ ，因此有 $0.91 \leq C_\zeta < 1$ 。由于阻尼比 $\zeta \propto 1/\sqrt{Jk}$ ，可通过调节扭转刚度系数与转动惯量乘积，将阻尼比控制在 $0 < \zeta \leq 0.3$ 范围内。

3.2 测量臂参数计算

如图 2 所示，扭摆横梁在推力作用下在水平面内扭转振动，位移传感器的探测方向垂直扭摆横梁对称面，位移传感器的测量臂为 L_s ，测量位移为 h_s ，扭摆横梁的扭转角为：

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_s}{L_s}\right) \quad (17)$$

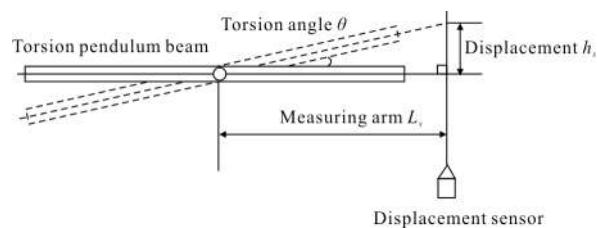


图 2 位移传感器测量扭转角

Fig.2 Measurement of the torsion angle by displacement sensor

将扭转角展开为：

$$\theta = \arctan\left(\frac{h_s}{L_s}\right) = \frac{h_s}{L_s} - \frac{1}{3}\left(\frac{h_s}{L_s}\right)^3 + \frac{1}{5}\left(\frac{h_s}{L_s}\right)^5 - \frac{1}{7}\left(\frac{h_s}{L_s}\right)^7 + \dots \quad (18)$$

($|h_s/L_s| \leq 1$)

工程中为了计算方便，采用近似公式

$$\theta \approx \frac{h_s}{L_s} \quad (19)$$

具体计算表明，当扭转角 $\theta \leq 5^\circ$ 时，相对误差小于 0.255%，因此小扭转角 $\theta \leq 5^\circ$ 条件下可采用近似

计算公式。此时,由于位移传感器测量误差造成的扭转角测量误差,其绝对误差和相对误差可近似为:

$$\Delta\theta_s \approx \frac{\Delta h_s}{L_s}, \frac{\Delta\theta_s}{\theta} \approx \frac{\Delta h_s}{h_s} \quad (20)$$

即对于位移传感器造成的扭转角测量误差来讲,位移相对误差与扭转角相对误差相等。

设位移传感器的误差限为 Δh_s , 位移传感器误差造成的扭转角误差为 $\Delta\theta_s$, 要求位移传感器能够辨识环境造成的测量噪声, 取 $\Delta\theta_s = \frac{\Delta h_s}{L_s} \leq \frac{\Delta\theta}{C_s}$, 可取

$C_s=5\sim 10$ 。因此, 测量臂满足 $L_s \geq \frac{C_s \Delta h_s}{\Delta\theta}$; 又由于 $\Delta\theta$

$\theta_{\max, S_d} \leq \varepsilon_S$ 和 $\theta_{\max, S_d} = h_{sd}/L_s$, 还要求测量臂满足 $L_s \leq$

$\frac{\varepsilon_S h_{sd}}{\Delta\theta}$; 由于位移传感器的量程为 $[h_{sd}, h_{su}] (h_{sd} < h_{su})$,

小扭转角 $\theta \leq 5^\circ$ 条件下, $\frac{h_{su}}{L_s} \leq \frac{\pi}{36}$, 还要求测量臂满

足 $L_s \geq \frac{36h_{su}}{\pi}$ 。综上所述, 测量臂设计条件为:

$$\max\left(\frac{C_s \Delta h_s}{\Delta\theta}, \frac{36h_{su}}{\pi}\right) \leq L_s \leq \min\left(\frac{\varepsilon_S h_{sd} S_d}{\Delta\theta S_u}, \frac{\varepsilon_S h_{sd}}{\Delta\theta}\right) \quad (21)$$

4 测量系统设计步骤

设计冲量测量装置时, 首先, 根据测量要求, 设计系统参数; 其次, 实施并实现测量系统设计; 最后, 根据实际测量系统校核与验证系统参数, 反复迭代直到满足测量系统要求。具体设计步骤为:

(1) 根据公式(21)确定测量臂取值范围, 根据测量要求以及扭摆横梁上布置位移传感器要求确定测量臂。

(2) 令 $J_0 = k\left(\frac{50T_0}{\pi}\right)^2 C_\zeta, J_1 = \frac{L_f}{k}\left(\frac{C_s S_u L_s}{h_{su}}\right)^2, J_2 =$

$\frac{L_f^2}{k}\left(\frac{\varepsilon_S C_s S_d}{\Delta\theta}\right)^2$ 。首先, 根据扭摆横梁上布置冲量加载

装置要求确定力臂。其次, 在枢轴的货架产品中, 选择扭转刚度系数的取值范围 $[k_d, k_u] (k_d < k_u)$ 。最后, 根据 $\max(J_0, J_1) \leq J \leq J_2$ 确定转动惯量取值范围, 其

中, $C_s=5\sim 10, C_\zeta=1-\zeta^2, C_s = \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}(\pi/2)}$ 。

(3) 根据上述选定的测量臂、力臂、扭转刚度系

数、转动惯量, 设计并研制枢轴式扭摆测量系统, 测量实际阻尼比, 并确定系数 C_ζ 和 C_s 。

(4) 根据 $\frac{\Delta\theta\sqrt{kJ}}{C_s S_d L_f} \leq \varepsilon_S, \theta_{\max, S_d} = \frac{C_s S_d L_f}{\sqrt{kJ}}, \theta_{\max, S_u} =$

$\frac{C_s S_d L_f}{\sqrt{kJ}}$, 校核测量误差、扭转角量程、小扭转角条件

等。

重复(1)~(4), 反复迭代, 直到测量系统满足设计要求为止。

5 应用举例

激光与空间碎片作用的冲量耦合效应研究中, 需要研制微冲量测量系统测量激光与空间碎片的耦合冲量。在纳秒脉宽激光作用下, 采用阴影成像方法观察激光等离子体羽流演化过程, 可知激光等离子体羽流脱离靶材表面时间 $T_0 \leq 100$ ns。激光单脉冲能量控制范围为 50~200 mJ, 常见空间碎片材料冲量耦合系数为 $4 \times 10^{-5} \sim 20 \times 10^{-5}$ N·s/J, 因此, 激光单脉冲产生冲量为 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-5}$ N·s。在枢轴货架产品中, 扭转刚度系数范围为 $1.3 \times 10^{-3} \sim 48$ N·m/rad。基本设计条件选择为: (1) 冲量测量量程为 $S_d=10^{-6}$ N·s 和 $S_u=10^{-4}$ N·s, 测量误差为 $\varepsilon_S=5\%$; (2) 推力作用时间为 $T_0 \leq 100$ ns; (3) 根据以往测量经验, 采用隔振平台与隔振物体、电磁阻尼器抑制测量噪声方法, 可实现扭转角误差限为 $\Delta\theta=1$ μ rad; (4) 位移传感器的量程为 $h_{sd}=0.01 \times 10^{-3}$ m 和 $h_{su}=10^{-3}$ m, 位移传感器的误差限为 $\Delta h_s=20$ nm。

具体设计过程为:

(1) 初步设计时阻尼比未知, 令阻尼比 $\zeta=0$ 和 $C_s=7$ 。根据公式(21)可得, 测量臂取值范围为 0.14 m $\leq L_s \leq 0.5$ m。为了提高对微冲量敏感性和小型化, 取测量臂为 $L_s=0.145$ m。

(2) 为了提高对微冲量敏感性和小型化, 以及测量臂与力臂的布局要求, 取力臂为 $L_f=0.09$ m; 扭转刚度系数考察范围为 $1.3 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3}$ N·m/rad。

根据第 4 节中步骤(2), 转动惯量随着扭转刚度系数的变化如图 3 所示。由于很小, 转动惯量变化范围为 $J_1 \leq J \leq J_2$, 对应振动周期变化如图 4 所示。

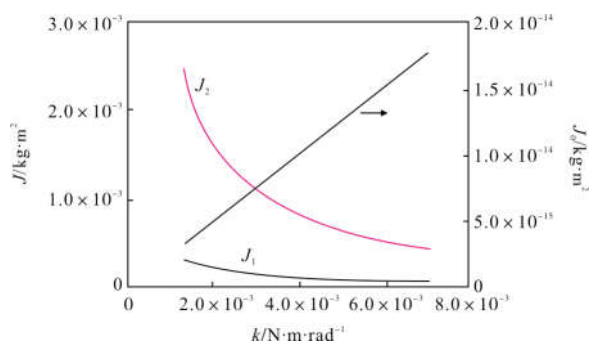


图 3 转动惯量随着扭转刚度系数的变化

Fig.3 Changes of moment of inertia with torsion stiffness coefficient

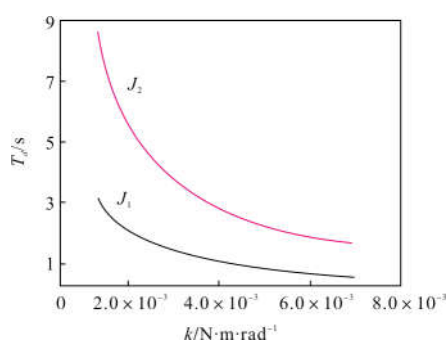


图 4 振动周期随着扭转刚度系数的变化

Fig.4 Changes of vibration period with torsion stiffness coefficient

为提高对微冲量敏感性和小型化,在枢轴货架产品中选择扭转刚度系数为 $k=0.0052 \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, 此时,转动惯量变化范围为 $3.28\times 10^{-4}\sim 3.89\times 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{m}/\text{rad}$, 转动周期变化范围为 $1.58\sim 5.44 \text{ s}$ 。

(3) 按照上述测量臂、力臂、扭转刚度系数等选择,设计并研制测量系统,经过测量,所研制测量系统的实际阻尼比为 $\zeta=2\times 10^{-3}$, 振动频率为 $\omega_d=3.902 \text{ rad}/\text{s}$ (周期 $T_d=1.610 \text{ s}$), 转动惯量为 $J=3.652\times 10^{-4} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。

(4) 校核参数。实际测量误差为 1.59% , 扭转角量程为 $6.90\times 10^{-5}\sim 6.90\times 10^{-3} \text{ rad}$, 比值 $k_{T_0}=6.2\times 10^{-3} < 0.01$, 在扭转角量程范围内近似公式 $\theta\approx h_s/L_s$ 的相对误差为 10^{-7} , 测量系统满足设计要求。

需要指出的是,在实际测量中,由于测量装置存在加工误差、装配误差、环境激励等影响,实际标定得到的系统参数与设计参数可能存在一定偏差,因此需要在测量装置加工装配完毕后,在实际测试环境中进行标定,获得系统参数准确值,并进一步计算量程,分析误差等测量系统指标。

6 结论

文中提出的设计方法的特点:针对枢轴式扭摆微冲量测量系统设计问题,通过分析量程、误差等设计条件,提出测量臂、力臂、扭转刚度系数、转动惯量等系统参数设计方法。该方法的适用范围:针对微冲量(通常在 $10^{-7}\sim 10^{-3} \text{ N}\cdot\text{s}$)测量问题,通过采用枢轴式扭摆框架测量装置进行测试,该方法对于新型脉冲式微推力器(如激光微推力器)有较好的应用。该系统设计方法的优点是能够针对任一款脉冲推力器的微冲量量程,基于扭摆式测量结构,在推力器开展力学性能测试之前,通过一种通用的冲量测量装置设计方法,即:首先提取基本设计条件;然后分析基本设计条件与测量模型、测量的关系,提出设计依据,进而提出设计条件;最后开展关键系统参数设计。该方法能够为测量装置设计提供一定的理论设计依据。

参考文献:

- [1] Phipps C R, Luke J. Diode laser-driven microthrusters: a new departure for micropropulsion [J]. *AIAA Journal*, 2002, 40(2): 310-318.
- [2] Phipps C R. Micro laser plasma thrusters for small satellites [R]. AFRL-SR-BL-TR-99-0180, 1999.
- [3] Phipps C, Luke J, Lippert T, et al. Micropropulsion using a laser ablation jet [J]. *J Propulsion and Power*, 2004, 20(6): 1000-1011.
- [4] Phipps C R, Luke J R, Helgeson W. A 25 nN low-noise thrust stand for microthruster [C]//International Electric Propulsion Conference, 2005: IEPC 318.
- [5] Manuel Gamero -Castaño. A torsional balance for the characterization of microNewton thrusters [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(10): 4509-4514.
- [6] Koizumi H, Komurasaki K, Arakawa Y. Development of thrust stand for low impulse measurement from microthrusters [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 3185-3190.
- [7] Yang Yuanxia, Tu Liangcheng, Yang Shanqing, et al. A torsion balance for impulse and thrust measurements of micro-Newton thrusters [J]. *Review of Scientific Instrument*, 2012, 83: 015105.
- [8] Yang Yuanxia. Researches on the thrust and impulse

- performances of micro-Newton thrusters [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2012. (in Chinese)
- 杨元侠. 微牛顿量级推进器的推力性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [9] Fang Juan, Hong Yanji, Ye Jifei, et al. Application of laser interference in micro-impulse measurement with torsion pendulum [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2010, 31(2): 119-122. (in Chinese)
- 方娟, 洪延姬, 叶继飞, 等. 激光干涉法在扭摆法测量微冲量中的应用[J]. 推进技术, 2010, 31(2): 119-122.
- [10] Li Nanlei, Ye Jifei, Zhou Weijing. Effects of dopant on impulse coupling of laser ablated glycerin [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(10): 1595-1600. (in Chinese)
- 李南雷, 叶继飞, 周伟静. 掺杂对甘油激光烧蚀冲量耦合特性的影响[J]. 推进技术, 2015, 36(10): 1595-1600.
- [11] Wang Guangyu, Hong Yanji. Modeling error analysis of micro-impulse measurements [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2009, 30(4): 509-512. (in Chinese)
- 王广宇, 洪延姬. 微冲量测量的建模误差分析 [J]. 推进技术, 2009, 30(4): 509-512.
- [12] Jin Xing, Hong Yanji, Zhou Weijing, et al. A parameter calibration method for torsion pendulum using in micro thrust and impulse measurement [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(10): 1554-1559. (in Chinese)
- 金星, 洪延姬, 周伟静, 等. 一种用于微小推力冲量测量的扭摆系统参数标定方法 [J]. 推进技术, 2015, 36(10): 1554-1559.
- [13] Zhou Weijing, Hong Yanji, Ye Jifei. Direct measurement method of specific impulse for pulse laser ablation micropropulsion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(6): 1434-1440. (in Chinese)
- 周伟静, 洪延姬, 叶继飞. 一种用于激光烧蚀微推进的比冲直接测量方法[J]. 推进技术, 2017, 38(6): 1434-1440.
- [14] Hong Yanji, Zhou Weijing, Wang Guangyu. Methods of micro thrust measurement and analysis of its key issues [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(10): 2287-2299. (in Chinese)
- 洪延姬, 周伟静, 王广宇. 微推力测量方法及关键问题分析[J]. 航空学报, 2013, 34(10): 2287-2299.
- [15] Zhou Weijing, Hong Yanji, Chang Hao. A microNewton thrust stand for average thrust measurement of pulsed microthruster [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(12): 125115.
- [16] Zhou Weijing, Hong Yanji, Ye Jifei. Mechanical performance measurement method for laser micro-thruster working in multi-pulse mode [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(S2): S206002. (in Chinese)
- 周伟静, 洪延姬, 叶继飞. 激光微推力器多脉冲作用下的力学性能测量方法研究 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(S2): S206002.