

## 用于微推力测量的电磁恒力特性研究

常浩<sup>1,2</sup>, 叶继飞<sup>1</sup>, 陈粤<sup>2</sup>, 周伟静<sup>1\*</sup>

- (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. 中国空间技术研究院, 北京 100094)

**摘要:** 基于扭摆结构的微推力测量装置是空间微推力器微推力测量的常用方法, 稳定、准确的标定力是标定微推力测量系统的关键。利用音圈电机能够产生较长行程恒定电磁力的特点, 研究基于音圈电机的电磁力恒力特性。介绍了基于音圈电机的电磁力装置组成及在基于扭摆结构的微推力测量装置中的标定应用; 仿真分析了音圈电机中的磁场分布情况, 以及线圈电流、线圈与磁轭磁铁相对距离等控制因素下的电磁力变化特性; 在此基础上, 通过搭建微小电磁力恒力特性实验系统, 采用高精度电子天平称重方式, 获得了精确的电磁力变化特性; 以电磁力误差小于等于 5% 作为判断标准, 获得了音圈电机的稳定力输出行程, 为应用于扭摆的微推力标定奠定基础。

**关键词:** 电磁力; 标定; 微推力测量; 音圈电机

**中图分类号:** V439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.S117011

## Characteristics of electromagnetic constant force for micro-thrust measurement

Chang Hao<sup>1,2</sup>, Ye Jifei<sup>1</sup>, Chen Yue<sup>2</sup>, Zhou Weijing<sup>1\*</sup>

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

**Abstract:** Micro-thrust measurement device based on torsion pendulum structure is a common method for micro-thrust measurement of space micro-thruster. Aiming at the calibration problem in micro-thrust measurement, the electromagnetic force constant characteristic based on voice coil motor was studied. The composition and function of the voice coil motor and its calibration application in micro-thrust were introduced. The distribution of magnetic field in voice coil motor and the variation of electromagnetic force under the control factors of coil current, relative distance between coil and magnet were analyzed. An experimental system of constant force characteristics of micro-electromagnetic force was built. Based on the weighing method of high precision electronic balance, the precise electromagnetic force was obtained. With the criterion of electromagnetic force error less than 5%, the stable force output of voice coil motor was obtained, which will lay the foundation for the micro-thrust calibration of torsion pendulum.

**Key words:** electromagnetic force; calibration; micro-thrust measurement; voice coil motor

收稿日期: 2018-11-10; 修订日期: 2018-12-20

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

作者简介: 常浩(1987-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事激光航天应用技术方面的研究。Email: changhao5976911@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

微小卫星由于其功能密度高、研发成本低、研制周期短、发射和应用灵活的优势日益凸显,逐渐发展为备受青睐的新技术验证平台、地球科学探索平台等,其在空间态势感知、天基目标监视、军事通信、空间攻防等领域<sup>[1-2]</sup>的潜能也备受瞩目。受限于微小卫星的体积功耗,一般应用于微小卫星的推力器在推力和冲量输出上也受到限制,推力通常在微牛至百毫牛量级范围,冲量在微牛至毫牛秒量级范围<sup>[3]</sup>。目前发展较为成熟的微推力器包括冷气、离子、场发射电推进、胶体、脉冲等离子体推力器等。对于上述新型微推力器,其力学性能评价是推力器研究和应用的基础,工程上通常采用扭摆系统测量这样的微小推力或冲量<sup>[4-7]</sup>。然而,不管采用何种力学性能测量系统,系统参数的标定是必不可少的,标定是分析和验证测量系统性能的关键技术,也是测量前的基础工作<sup>[8-9]</sup>。以典型的扭摆测量系统为例,测量前首先要标定系统参数,比如固有频率、阻尼比、刚度系统等。在系统参数标定及测量实验中最为关键的就是需要大小准确、方向稳定的标定力,利用产生的高精度标定力进一步获得测量系统的系统参数,因而标定装置在微推力微冲量测量系统中具有重要地位。

对于标定装置而言,产生的标定力需要有很好的稳定性、精确性和可灵活控制性,尤其对于毫牛及以下的推力测量,外界各种干扰因素对标定力的稳定性和精确性有很大的影响。目前,对于微小推力测量而言,常用的标定力方法有砝码法、静电力法<sup>[10-11]</sup>和电磁力法<sup>[12-14]</sup>。其中,砝码法易受滑轮摩擦、绳线的弹性伸缩等影响,并且受限于砝码的最小质量,能够提供的标定力无法达到微牛量级。静电力法易受电机板间距影响,所需输入电压较大,能达到百伏甚至千伏。电磁力由于不存在机械接触,标定范围宽、标定力连续可调、容易实现等优势成为微小恒力产生的首选。目前较为成熟的电磁力产生方法一般是采用多匝线圈与永磁铁配对组合产生电磁力(简称“多匝线圈+永磁铁”方法),多匝线圈由标准的低功率电源直接驱动,由于不同线圈匝数、不同永磁铁直径和厚度,可获得不同大小的电磁恒力,因此,根据线圈匝数调节、永磁铁直径和厚度调节,可获得覆盖

各种量程范围的电磁恒力。

在实际使用过程中,线圈与永磁体分开放置,以扭摆测量系统为例,如图 1 所示,永磁体安装在扭摆横梁上,线圈安装固定在测量平台上,线圈通电后,扭摆作为运动执行部件在水平面内发生转动,因此要求标定装置产生的电磁力有较宽的稳定力输出行程。

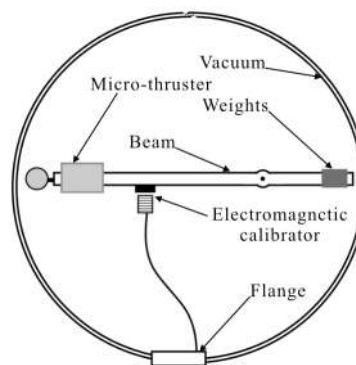


图 1 基于扭摆结构的微推力器推力测量装置

Fig.1 Thrust measurement device of micro-thruster based on torsion pendulum structure

但是在使用此方法过程中,发现由于永磁体磁场分布随空间变化的不均匀性,导致电磁力稳定行程较小,导致横梁转动角度不能太大,大大限制了推力测量范围。音圈电机是一种直接驱动的直线电机,其结构简单、体积小、行程大、输出力稳定。针对微推力测量中标定问题,研究基于音圈电机的电磁力恒力特性,仿真分析了音圈电机中的磁场分布情况,以及线圈电流、线圈与磁轭磁铁相对距离等控制因素下的电磁力变化特性;基于高精度电子天平称重方式,获得了精确的电磁力变化特性,得到了音圈标定装置的稳定力输出行程,为应用于扭摆的标定力奠定基础。

## 1 基于音圈电机的电磁力产生装置

音圈电机典型结构由线圈部分、磁轭和永磁铁构成,如图 2 所示,永磁体产生的磁力线穿过音圈线圈后,通过磁轭圆柱筒返回,与单独的永磁铁相比,磁场主要分布在磁轭圆柱体内部,可以为线圈所处的空间提供均匀的永久磁场,因而能够在一定行程范围内保证磁场稳定。

根据通电线圈在磁场中产生洛伦兹力的原理,

电流瞬间流入线圈产生的电磁力将驱动线圈与磁铁磁轭部件发生相对运动。线圈与永磁体实际上构成线性洛伦兹力驱动器，并且可以通过控制电流大小和方向，实现驱动力大小控制和运动方向控制。

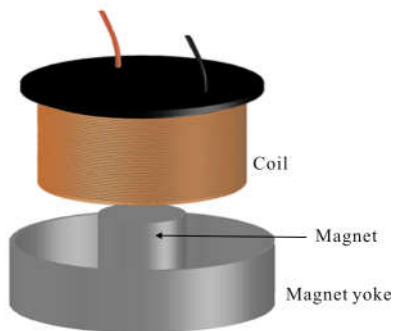


图 2 音圈电机组成

Fig.2 Voice coil motor composition

在微推力测量中，通常将磁轭磁铁固定在横梁上，将线圈固定在底板上，电磁力的作用导致两者之间的相对运动，如图 3 所示，通过上述方法，对测量系统进行精确标定。由于在微推力测量中，一般需要的标定力在毫牛及以下，因此，基于音圈电机的电磁力装置需要设计合适的尺寸大小，以及线圈电流、匝数等参数特性。

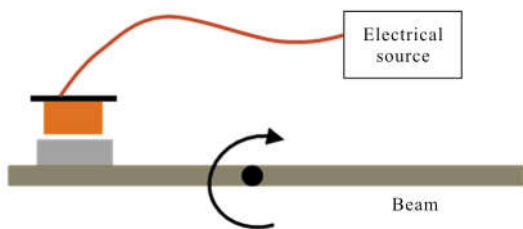


图 3 基于音圈的扭摆微推力测量装置(俯视图)

Fig.3 Micro-thrust torsion measuring device based on voice coil(top view)

## 2 音圈电机电磁力特性仿真

音圈电机中的通电导线线圈由多匝导线按一定方向缠绕而成，其线圈电流密度为 $\vec{J}$ ：

$$\vec{J} = \frac{NI_{\text{coil}}}{A} \vec{e}_{\text{coil}} \quad (1)$$

式中： $N$  为线圈匝数； $I_{\text{coil}}$  为线圈电流； $A$  为导线横截面积； $\vec{e}_{\text{coil}}$  为电流方向。

静磁场中磁场强度满足安培环路定律：

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2)$$

式中： $H$  为磁场强度。根据麦克斯韦方程 $\nabla \cdot B = 0$ ，并且 $\vec{B} = \mu \vec{H}$ ，可以得到：

$$\nabla \times \frac{\vec{B}}{\mu} = \vec{J} \quad (3)$$

式中： $\vec{B}$  为磁感应强度； $\mu$  为磁导率。

根据 $\vec{B} = \nabla \times \vec{A}$ ，可得：

$$\nabla \times \left( \frac{\nabla \times \vec{A}}{\mu} \right) = \vec{J} \quad (4)$$

式中： $\vec{A}$  为磁矢量。

根据安培定律，音圈中通电线圈受到的力为：

$$\vec{F} = \int_V \vec{J} \times \vec{B}_g dV \quad (5)$$

式中： $\vec{B}_g$  为线圈周围磁轭磁铁间隙处磁感应强度。

根据上述物理模型，在 COMSOL 中建立音圈电机仿真模型。根据扭摆测量微推力中使用的电磁标定装置尺寸限制包络，设定了基本结构几何尺寸，具体为：线圈外径 21 mm、内径 17 mm、高 23 mm、匝数 150 匝，电流为控制参数，磁轭磁铁部分中永磁体为圆柱体，圆柱体高 8 mm、直径 8 mm，磁轭部分外径 30 mm、套筒壁厚 1 mm。在材料的选择上，考虑常用材料，永磁铁材料为 N40H，其矫顽力为 860 kA/m，剩磁为 1.3 mT，线圈线径为 0.5 mm，铜漆包线最大载流量为 6 A。确定完上述参数后，首先对基于音圈的电磁力特性开展仿真研究。当输入电流为 0.5 A 时，音圈电机中的磁力线分布如图 4 所示。可以看出，由于高磁导率的磁轭作用，磁场基本分布在磁轭圆柱形套筒内。

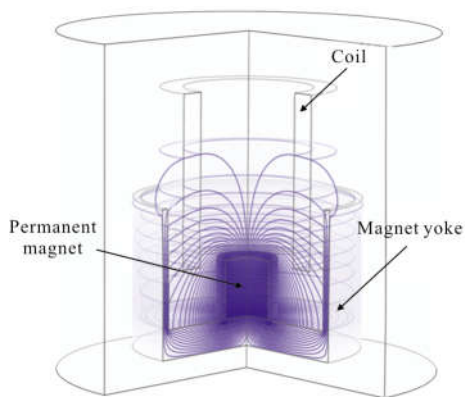


图 4 音圈电机内磁力线分布

Fig.4 Distribution of magnetic lines in voice coil motor

根据电流施加方向和磁场方向,由左手法则,可以得到线圈受力矢量方向,如图 5 所示,因此,通电导线线圈相对于磁轭磁铁做直线运动。在基于扭摆法的微推力测量中,可以将磁轭磁铁固定在扭摆横梁上,线圈固定在底板上,组成电磁力标定系统,对扭摆系统进行标定。

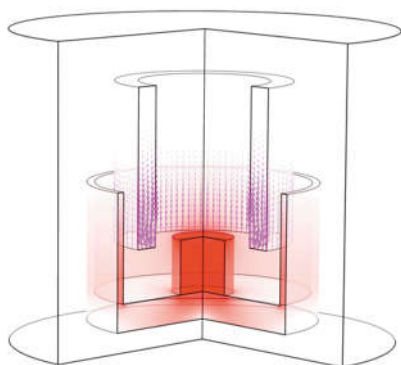


图 5 通电线圈受力方向

Fig.5 Force direction on electric coil

在上述尺寸、材料选择基础上,仿真分析线圈不同电流下的受力情况,如图 6 所示,电流选择为 0.1~0.5 A,线圈底部距离磁轭底部距离为 0.5~7.5 mm,可以看出,在上述仿真参数下,电磁力大小范围在 19~193.5 mN 之间,可以跨一个量级左右。此外,在同样距离下,随着电流增大,电磁力增大,这是因为同样距离下,磁场强度基本不变,根据洛伦兹力原理,电流增大,电磁力增大;但是,在相同电流大小条件下,距离的变化对电磁力的影响却不是线性的,以 0.5 A 条件下为例,在线圈与磁轭磁铁距离较小时,电磁力大小基本保持不变,随着相对距离的继续增大,电磁力逐渐变小。从磁力线仿真结果可以看出,

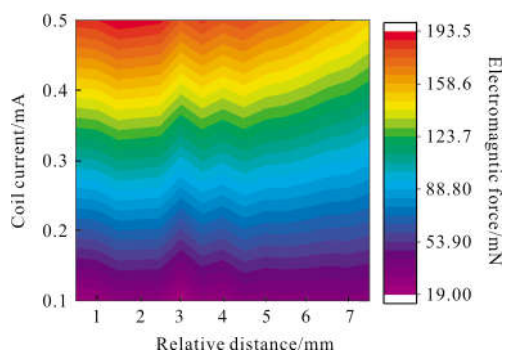


图 6 线圈电流、相对距离控制因素下的电磁力仿真结果

Fig.6 Simulation results of electromagnetic force under coil current and relative distance

在靠近磁轭磁铁底部时,由于磁场强度较为均匀,因此,电磁力的变化并不大,但随着距离的增加,磁场强度逐渐减小,电磁力减小。

### 3 音圈电机电磁力特性实验测量

在仿真分析基础上,摸清楚音圈电机的电磁力大致范围及变化趋势,为音圈电机设计提供依据。但音圈电机精确电磁力特性需要通过实验测量得到。基于高精度电子天平测量音圈电机电磁力特性,具体如图 7 所示。通电线圈固定在调节机构上,通过调节机构上的位移台调整线圈与磁轭磁铁之间的轴向距离,磁轭磁铁放置在电子天平托盘上,通过称重方式获得电磁力大小。

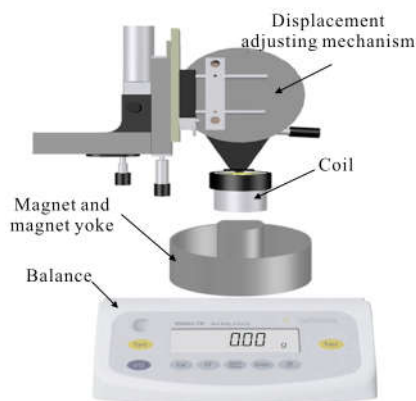


图 7 基于天平的音圈电机电磁力特性测量系统

Fig.7 Measurement system of electromagnetic force characteristics of voice coil motor based on balance

整套测量装置最为关键的是电子天平装置(如图 8 所示),实验采用为梅特勒-托利多超越系列专

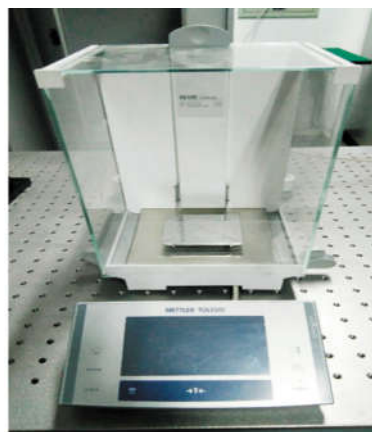


图 8 高精度天平

Fig.8 High precision balance

业型 XSE105DU 电子天平,其主要性能参数为:(1)最大称量值(精细量程)为 41 g;(2)可读性(精细量程)为 0.01 mg。

根据实验研究内容的要求,搭建了音圈电磁力力学特性测量系统,在实验前,必须对天平进行调平,称重样品应放置在秤盘的中央以防止四角误差,称重开始前应先检查一下显示器是否已处于零点状态,必要时需进行去皮使之回零,避免零点误差。设定实验条件与仿真条件一致,即音圈电机中线圈电流大小控制在 0.1~0.5 A 之间,线圈与磁铁轴向距离控制在 0.5~7.5 mm 之间,实验获得的电磁力特性如图 9 所示。可以看出,电磁力范围大致在 10~207 mN 之间,与仿真得到的数值范围接近。

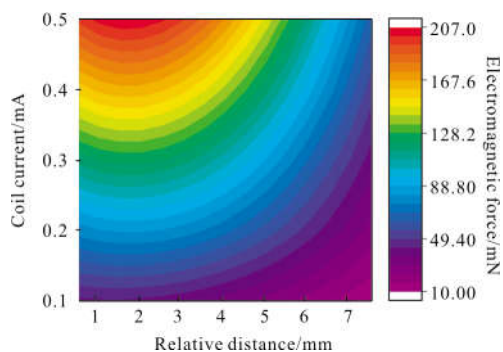


图 9 线圈电流、相对距离控制因素下的电磁力实验结果  
Fig.9 Experimental results of electromagnetic force under coil current and relative distance

进一步分析音圈电机产生的电磁力变化特性,如图 10 所示,可以看出在电流不变情况下,相对距离的变化导致电磁力变化是非线性的。当相对距离在 0.5~2.5 mm 之间时,电磁力变化范围不超过其相应电磁力最大值的 5%,即当电流为 0.1 A 时,电磁力最大值为 42.174 49 mN,当相对距离在 0.5~2.5 mm 之间时,电磁力范围为(42.174 49±2.108 72) mN。当相对距离超过 2.5 mm 时,距离增大导致电磁力迅速减小。因此,在基于扭摆法测量微推力时,由于扭摆横梁的运动,将导致线圈与磁轭磁体发生相对运动,为了保证电磁力大小的稳定,在误差不超过 5%条件下,可以得到电磁力装置在上述不同电流下的稳定力输出行程为 0.5~2.5 mm。上述 5%误差的影响因素主要有输出电流大小的不稳定,距离变化导致的磁场不均匀,天平称重时的气流影响等。在实际应用时,如进一步降低误差,可以通过采用高精度稳恒电

流源输出电流大小,距离变化导致的磁场不均匀可通过特殊结构的电磁标定装置进一步保持稳恒磁场,天平称重时的气流影响可以通过天平防风罩等来降低。

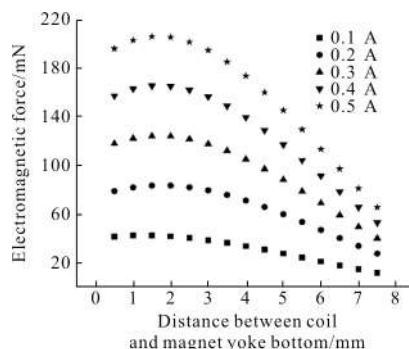


图 10 不同线圈电流下的电磁力输出与相对距离之间的关系  
Fig.10 Relationship between electromagnetic force output and relative distance under different coil currents

在音圈电机电磁力稳定行程基础上,进一步细分线圈与磁轭磁铁之间的相对距离,每隔 0.2 mm 进行测量,同一电流下,共测量 4 次往返行程,即每个相对距离上测量 8 次,得到相对距离 0.5~2.5 mm 之间,不同电流对应的电磁力大小,对其进行稳定性分析,如图 11 所示。可以看出,在 0.5~2.5 mm 相对距离之间,力的大小基本保持恒定,不同电流、不同距离下的电磁力大小标准差最大不超过 0.19;同一电流,不同相对距离下的电磁力大小相差不超过 5%,因此,可以看出,在文中实验条件下,电磁力输出有很好的稳定性。

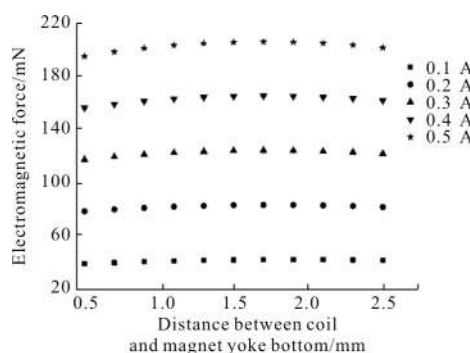


图 11 稳定力输出下电磁力与电流、相对距离之间的关系  
Fig.11 Relationship between electromagnetic force, current and relative distance under the output of stable force

在上述研究基础上,进一步研究电磁力稳定行程范围内电流大小与电磁力的线性关系,见图 12。



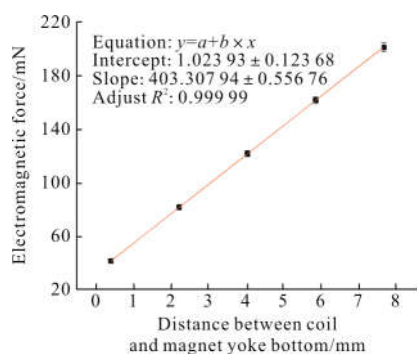


图 12 稳定力行程范围内电磁力与电流之间的关系

Fig.12 Relationship between electromagnetic force and current under the stable force output distance

可以看出,每个数据点处的误差棒较小以至被图标题覆盖。在电磁力稳定行程范围内,随着电流的增大,电磁力线性增大,可用线性方程进行拟合,且拟合效果理想,由此获得了电磁力与线圈电流之间的关系。因此,在应用于微推力测量中,采用文中的音圈结构,可适用于约 40~200 mN 之间的推力测量范围,为获取不同量程的推力,可以通过改变音圈匝数、尺寸、以及电流大小等方式,获得更宽量程的推力范围。

## 4 结论

针对扭摆结构测量空间微推力器微推力测量中的标定力稳定输出问题,设计了基于音圈电机的电磁力装置,通过仿真分析音圈电机中的磁场分布及电磁力输出特性,为电磁力输出特性设计提供依据。基于高精度天平设计了电磁力特性测量装置,以电磁力误差小于等于 5%作为判断标准,获得了音圈电机的稳定力输出行程以及输入电流与输出电磁力的关系,可为扭摆测量装置中的扭转角设计提供依据,从而为微推力测量系统参数标定、推力测量奠定基础。

## 参考文献:

[1] Cao Xibin, Sun Zhaowei. Rapid Response Micro Satellite Design[M]. Beijing: Science Press, 2016. (in Chinese)  
 [2] Qiao Yi, Li Xiaoyu, Zhao Tian. Analysis on typical military application of small satellite [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2017, 36(3): 47-50. (in Chinese)  
 [3] Igor Levchenko, Kateryna Bazaka, Yongjie Ding, et al. Space

micropropulsion systems for Cubesats and small satellites: From proximate targets to furthestmost frontiers [J]. *Applied Physics Reviews*, 2018, 5: 011104.

[4] 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.  
 [5] Brian C D'Souza, Andrew D Ketsdever. Investigation of time-dependent forces on nano-Newton-Second impulse balance [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76: 015105.  
 [6] Liu Xuhui, Yang Feihu, Wei Yanming, et al. Study of dynamic thrust measurement using torsional pendulum [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(4): 925-931. (in Chinese)  
 [7] 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)  
 [8] 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)  
 [9] 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)  
 [10] Manuel Gamero -Castaño. A torsional balance for the characterization of microNewton thrusters [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(10): 4509-4514.  
 [11] Nathaniel P Selden, Andrew D Ketsdever. Comparison of force balance calibration techniques for the nano-Newton range[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 73(12): 5249-5254.  
 [12] Zhou Weijing, Hong Yanji, Chang Hao. A microNewton thrust stand for average thrust measurement of pulsed microthruster [J]. *Review of Scientific Instrument*, 2013, 84: 125115.  
 [13] He Zhen, Wu Jianjun, Zhang Daixian, et al. Precision electromagnetic calibration technique for micro-Newton thrust stands[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2013, 84: 055107.  
 [14] Tang Haibin, Liu Chang, Xiang Min, et al. Full elastic microthrust measurement equipment [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2007, 28(6): 703-706. (in Chinese)