

# 基于探针诊断的HEMPT推力等效测量方法

孙强强, 胡鹏, 刘辉, 于达仁

(哈尔滨工业大学先进动力研究所, 哈尔滨 150000)

**摘要:** 无拖曳卫星任务对会切场推力器(HEMPT)性能有更为精细的技术指标要求, 针对目前的三丝扭摆测量系统由于技术限制不能快速精确地反应这些指标, 从等离子体原理出发, 推导了一种通过探针所测的数据计算推力的等效方法, 并经过实验测量进行了验证。测量结果表明: 该方法可以在一定范围内较为精确地计算推力, 并且为微牛级推力测量以及推力分辨率测量提供了一种行之有效的参考方法。

**关键词:** 会切场推力器; 探针诊断; 推力测量

中图分类号: V514

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)03-0219-06

DOI:10.15982/j.issn.2095-7777.2017.03.003

引用格式: 孙强强, 胡鹏, 刘辉, 等. 基于探针诊断的HEMPT推力等效测量方法[J]. 深空探测学报, 2017, 4(3): 219-224.

**Reference format:** Sun Q Q, Hu P, Liu H, et al. An equivalent thrust measuring method of the cusped field thruster based on probe diagnosis[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(3): 219-224.

## 0 引言

无拖曳卫星是指为了使卫星运行在纯重力轨道上, 要即时补偿在轨卫星受到的干扰力及干扰力矩, 使卫星在地球重力场的作用下运行。对于低轨卫星而言, 其受到的主要干扰为大气阻力, 其控制系统称之为无拖曳控制系统。随着社会需求的提高和科学技术的迅猛发展, 越来越多的无拖曳空间科学任务需要高精度的控制推力输出, 这就对电推力器的推力输出精度、推力分辨率以及电推力器反馈给无拖曳系统的推力噪声提出了苛刻的要求, 并且设计者在设计相应电推力器的时候需要测量出这些指标。

目前针对电推力器的推力测量系统均为三丝扭摆系统, 该系统可以测出的最小推力是有限度的, 并且只适用于推力器工作在稳态下的推力值, 因而不适合推力器的高速响应速度的测量过程。三丝扭摆系统对推力随时间的变化极为迟钝, 并不能测量出微牛级别的推力分辨率和对无拖曳控制系统极为重要的推力噪声, 这对电推力器的设计和测量造成了极大的困扰。本文从计算推力的等离子体原理出发, 逐步推导出了可用法拉第探针和制动势分析仪( Retarding Potential Analyzer, RPA)探针测出的数据估算出推力的方法, 为测量微牛级别的电推力的最小推力、推力分辨率和随时间高速变化的推力噪声提供了一条可行的途径。

本文所采用的推力器为可用于地球重力场与稳态洋流探测任务( Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer Mission, GOCE)的会切场推力器, 工程上对该推力器提出了推力分辨率 $15\text{ }\mu\text{N}$ , 并且同时要求推力噪声小于等于 $1.5\text{ mN/Hz}^{1/2}$ 的任务要求<sup>[1]</sup>, 故采用此推力器进行实验测量。

## 1 探针测量推力的原理

在推力的大范围快速调节过程中, 推力器的电离和加速过程都会相应地发生变化, 最终, 推力的响应过程表现为羽流区离子电流分布及离子能量分布的变化。而羽流区放置法拉第和RPA探针可以快速获取离子电流分布及离子能量分布的变化, 因而通过这两种探针联合测试的办法可以计算出推力变化的响应速度。

对推力器而言, 假设离子形成的羽流是绝对准直的, 那么得到推力的理想值 $F_0$ 为

$$F_0 = \dot{m}_{\text{ion}} v_{\text{ion}} \quad (1)$$

其中:  $\dot{m}_{\text{ion}}$ 是离子出射的质量流量;  $v_{\text{ion}}$ 是离子的速度。

若不考虑高价离子的影响, 对一个离子而言, 根据能量守恒方程, 有

$$U_{ae} = \frac{1}{2} M_{\text{ion}} v_{\text{ion}}^2 \quad (2)$$

其中:  $U_{ae}$ 为离子的电势降;  $M_{ion}$ 为离子质量。

离子电流  $I_i$  大小为

$$I_i = em_{ion}/M_{ion} \quad (3)$$

根据式 (1) ~ (3), 则理想推力值  $F_0$  就可写为

$$F_0 = I_i \sqrt{2U_a M_{ion}/e} \quad (4)$$

考虑发散状羽流时, 且假设离子电势降一致, 则离子所产生的推力  $F_{ion}$  大小可以通过对各离子产生的推力求和得到<sup>[2]</sup>。

$$F_{ion} = \sum_{i=1}^{F_\theta} \cos\theta = \sum_{i=1}^{I_i} (\theta) \sqrt{2U_a M_{ion}/e} \cos\theta \quad (5)$$

其中:  $F_\theta$  是角度  $\theta$  处离子产生推力;  $I_i(\theta)$  为角度  $\theta$  处的离子电流, 并且  $I_i(\theta)$  可以通过法拉第探针测得。

但实际上在不同角度处离子的加速电压存在很大差异, 这就要求知道不同角度处离子的能量分布。因此, 需要进一步借助于RPA探针进行修正。

在角度  $\theta$  处不同电势降的离子所产生的推力  $F_\theta$  大小为

$$F_\theta = \sum I_{U_i, \theta} \sqrt{2U_{i, \theta} M_{ion}/e} \quad (6)$$

其中:  $U_{i, \theta}$  为角度  $\theta$  处对应不同电势降的离子的加速电压;  $I_{U_i, \theta}$  表示角度  $\theta$  处电势降为  $U_{i, \theta}$  的离子电流。

则推力器整体产生的推力大小为

$$F_{ion} = \sum_0^{\pi/2} \sum I_{U_i, \theta} \sqrt{2U_{i, \theta} M_{ion}/e} \cos\theta \quad (7)$$

由于RPA探针自身精度问题, 采集角度  $\theta$  处离子能量为  $U$  的离子电流值不准, 使计算结果有较大偏差, 需要借助法拉第探针测得的离子电流进行修正。

RPA探针所测只是所测具体离子电流值不准确, 但是在RPA探针所测的角度  $\theta$  处离子能量为  $U$  的离子电流值的比例正确。令  $I_{\theta, F}$  为法拉第探针在角度  $\theta$  处所测得的离子电流, 以该值乘以不同电压所对应的比例即可得到真实所对应的离子电流值  $I_{U_i, \theta, F}$ 。

所以双探针测得的推力器产生的推力大小为

$$F_{ion} = \sum_0^{\pi/2} \sum I_{U_i, \theta} \sqrt{2U_{i, \theta} M_{ion}/e} \cos\theta \quad (8)$$

通过法拉第探针和RPA探针对羽流区各个角度的离子电流密度及离子能量分布进行测量就能够计算得到推力的近似值。

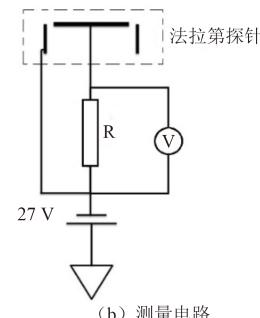
## 2 实验设备和装置

### 2.1 离子电流的测量方法

法拉第探针是一种带电屏蔽的负偏压定向探针, 其实物及测量原理如图 1 所示。给探针一端施加 -27 V 的负偏置电压, 可以使得探针在等离子体中排斥电子, 仅接收离子, 直至接收到的离子电流达到饱和。法拉第探针上的金属屏蔽壳主要作用是保证其有效离子鞘收集面积不变, 在没有带电屏蔽壳时, 有效离子鞘收集面积随电压增加而增大, 通过添加屏蔽壳, 可使收集针前的鞘层面积不变<sup>[3]</sup>。



(a) 法拉第探针实物图



(b) 测量电路

图 1 法拉第探针

Fig. 1 Faraday probe

本次实验中法拉第探针的离子收集面积为  $0.75 \text{ cm}^2$ , 测量电阻为  $100.3 \Omega$ , 探针安装在距离推力器出口约  $25 \text{ cm}$  的转台上。测量方案如图 2 所示。测量时, 法拉第探针固定在一个可控转动平台的转臂上, 转动平台的中心与推力器出口中心重合。利用旋转电机驱动转台转动预设的角度, 法拉第探针便能测量获得以推力器出口中心为圆心的圆周上的离子电流密度分布。

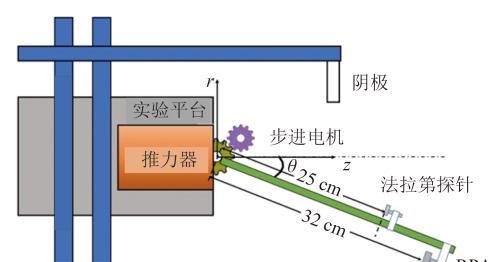


图 2 法拉第探针测量示意图

Fig. 2 Diagram of Faraday probe measurement

## 2.2 离子能量的测量方法

离子能量的测量采用多栅探针, 其结构如图3所示, 它由三个网格G1、G2、G3和收集栅C组成的。网格G1是悬浮的, 以减小等离子体扰动。网格G2一端施加了-27 V的负偏置电压, 用来截断电子而使离子到达下一个栅极。网格G3是离子阻滞栅, 它通过与电源相连能够提供一个使离子减速的正扫描电压, 该扫描电压的最大值一般高于阳极电压。收集栅C用以收集不同扫描电压下的离子。通过连续调节扫描电压, 即可测得离子电流滞止曲线<sup>[4]</sup>, 如图4所示。

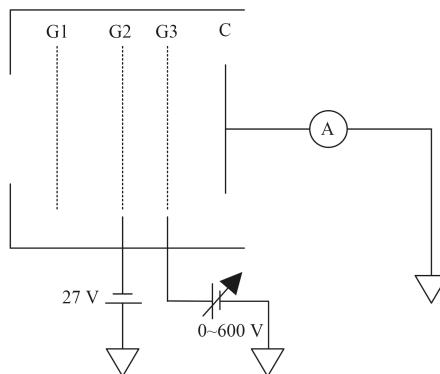


图3 多栅探针测量图示

Fig. 3 Diagram of multi grid probe measurement

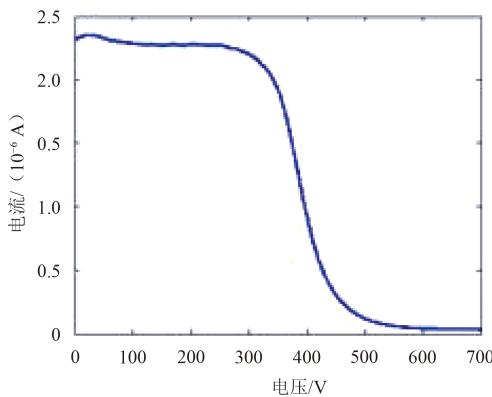


图4 RPA探针测量结果

Fig. 4 The measurements of RPA probe

## 3 实验处理及结果分析

### 3.1 数据处理技巧

理论上, 扫描电压由0~800 V持续增大, 所能够到达最后一层栅网的离子所需离子能量越来越高, 离子电流应单调递减, 所以RPA探针测量的结果应该是电流值随电压的上升而逐渐下降。但是实际测量的过程中, 由于测量的不稳定性、仪器的误差、发生在收集栅上的离子光学效应以及降噪电容的存在, 使得电流值在下降的过程中不断波动, 并不是单调递减, 存

在正导数, 不利于求解。因此需要对其进行处理, 保证离子电流随电压单调下降。

因此为了方便求解, 引入变化趋势与RPA探针测量结果极为相似的玻尔兹曼方程 (Boltzmann equation) 进行拟合<sup>[5]</sup>为

$$f(x) = a + \frac{b}{1 + e^{(x-c)/d}} \quad (9)$$

对式(9)求导为

$$\frac{df}{dx} = \frac{-b(e^{(x-c)/d})}{d(1 + e^{(x-c)/d})^2} \quad (10)$$

如果保证参数b、d均大于0, 则可以保证玻尔兹曼方程必然是单调递减的函数。

图5所示的是在工况流量5 sccm, 500 V电压下用RPA探针0~800 V扫描测量40°处离子电流的波形。其中实线是测量值, 可以看到在300~400 V之间测量值有个鼓包, 为栅极的光学效应引起, 导致曲线不甚平滑, 当采用玻尔兹曼方程进行拟合后可以完美地克服这个缺点。拟合值与测量值极为相似, 均方差 (The Sum of Squares Due to Error, SSE) 基本小于1, 因此可以用该方程作为RPA探针扫描离子电流的曲线, 进行进一步的计算分析。

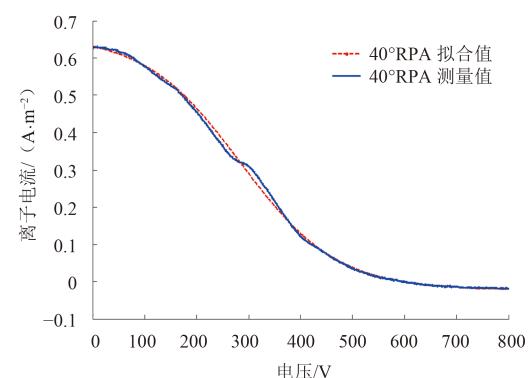


图5 10 sccm、300 V工况下RPA在40°处0~800 V扫描电压下接收到的离子电流

Fig. 5 The ion current of RPA probe through 0~800 V scan voltage under the conditions of 10 sccm and 300 V

为了进一步验证探针测量的可靠性, 图6分析了5 sccm、500 V工况下的加速效率、相对离子电流与角度的关系。设定

$$\text{相对离子电流} = \frac{\text{法拉第扫描电流}}{\text{法拉第扫描电流中的最大值}} \quad (11)$$

定义角度θ处的加速效率为

$$\eta_{acc,\theta} = \frac{\sum I_{U_i,\theta,F} \sqrt{U_{i,\theta}}}{I_{\theta,F} \sqrt{U_a}} \quad (12)$$

RPA数据为每隔10°测得,因此可以得到10个数据离散点,对其进行保值拟合分析。从加速效率的公式(12)中可以看出,该值主要与加速电压及其对应的电流有关。因此在工质利用率高、加速电压利用充分的角度处该值较大。一般而言,电流密度最大处符合该要求。从图6中可以看出,在60°左右的离子电流数值最大,且加速效率值的变化与相对离子电流值的变化基本一致,维持在50%以上,并且峰值也在60°左右,与法拉第扫描结果一致,峰值结果约为88%。该值与法拉第离子电流的一致性也从侧面反映了双探针测量的可靠性。

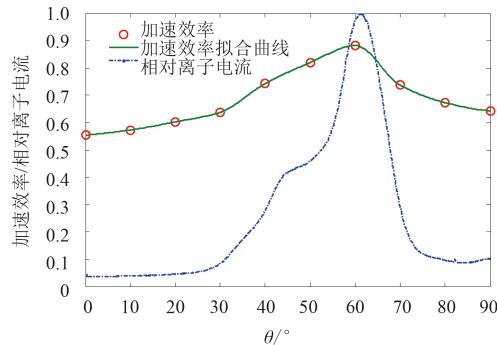


图6 加速效率、相对离子电流与角度的关系图

Fig. 6 The relationships of the change between  $\eta_{acc}$ ,  $\theta$  and ion current with different angle

## 4 实验结果及分析

### 4.1 基于探针数据对推力的估算

如图7所示,为3 sccm、5 sccm、8 sccm和10 sccm4个不同流量下用三丝扭摆所得到的测量推力和计算推力随电压变化的曲线。

由图7可知:推力均是随着电压和流量的增大而增大。4个结果均显示出计算得到的推力与三丝扭摆测得的推力变化趋势相同,波动幅度也是极为相似,但是计算出来的推力比实际测量的推力要大,结果证明计算推力所用的方法是可行的。对于计算推力值偏大的原因是法拉第探针所测得的电流不仅包含羽流中的离子电流,还包括真空罐中存在的暗电流,但是在推导过程中并未减去,并且在实验过程中不容易测得,造成了离子电流值偏大,进而造成推力测量值偏大。

随着流量的增大,发现两个推力之间的距离慢慢变小,计算后发现,二者之间的推力差主体仍在0.2~0.5 mN之间,只是所占比重减少,这可能是因为暗电流的值是一定的,随着流量的增大,该部分电流在所测电流中所占比重逐步减少,对推力计算造成的影响进而减少,所算推力愈发精确,二者之间的差值随流量增大变小;除此之外,由于推导过程中没有考

虑离子电流中存在的少量高价离子;另外,实验设备的不精确性也可能使测算结果存在一定误差,可以考虑在测量推力前拟合一个相关系数,抵消掉暗电流和高价离子的误差,使计算结果更为准确。

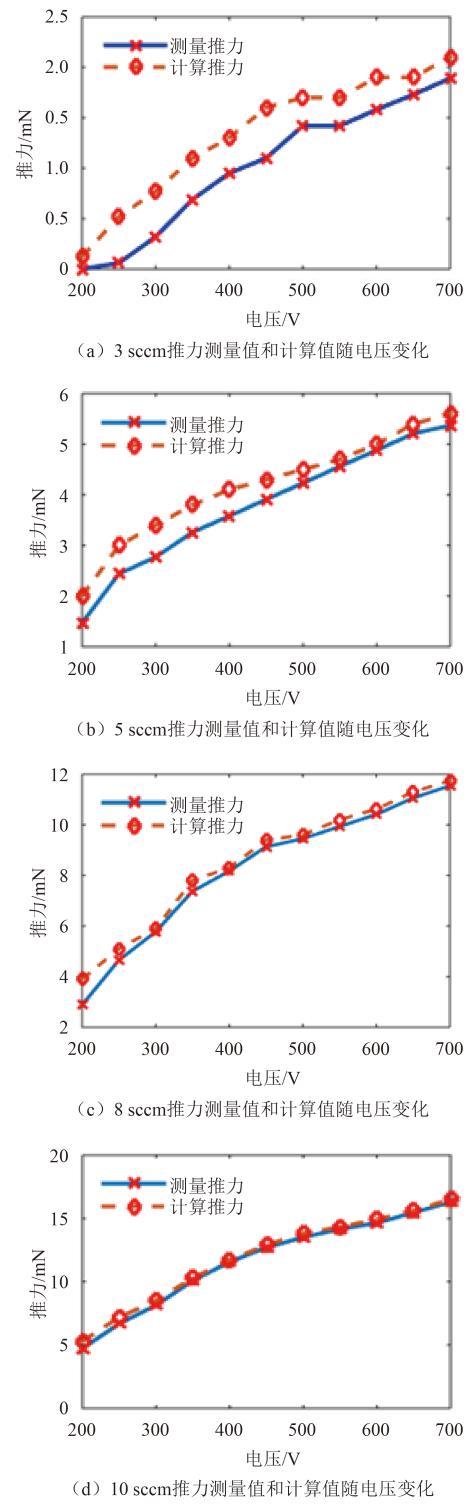


图7 不同流量下推力测量值和计算值随电压变化

Fig. 7 The measured value and the calculated value of the thrust with different voltage

## 4.2 基于探针诊断对推力分辨率的计算

由于推力器的分辨率在微牛量级, 而目前的三丝扭摆推力测量装置尚达不到如此精度, 故可以通过探针的方法进行测量计算。由于推力器工况的调节主要是针对于阳极流量和放电电压。这两个工作参数的调节直接依赖于气体流量计和工作电源的调节精度<sup>[6-7]</sup>。

从图7中可以明显地看出, 如果选择300 V、8 sccm、5.8 mN的工况作为起点, 那么在8 sccm流量下电压增加到400 V和在300 V电压下流量增加到10 sccm能够达到相当的推力水平。因此, 可以近似地认为:  $dU = 100$  V与 $dQ = 2$  sccm对于推力提升的效果一致。这说明, 如果以电压单位为V, 流量单位为sccm作为考虑, 在保证同等推力分辨率的条件下, 电压的调节精度的要求要低于工质流量约两个数量级。于是, 考虑到实际的情况, 对电源电压的调节会实现更高的推力调节分辨率。因此选择调节电压作为推力分辨率的选择。

低流量下, 放电通道内工质原子所能电离出的离子数量比较少, 因而电压的改变对于离子产生反作用力的提升幅度就小, 表现出更高的推力分辨率, 选择低流量有更好的效果, 但是对于推力系统分辨率的计算应该基于能够保证稳定放电时最低流量情况下的变电压, 结果选择3 sccm为目标工况, 重新测量, 通过探针测得推力变化来反映推力分辨率。为了变化方便考虑, 选择以25 V为间距, 更为精确的可以在以后的实验中测量。

为了测量方便考虑, 选择以25 V为间距更为精确, 间距更小的可以在以后的实验中测量。对测量进行拟合并重新绘制推力随电压的变化曲线, 如图8所示。

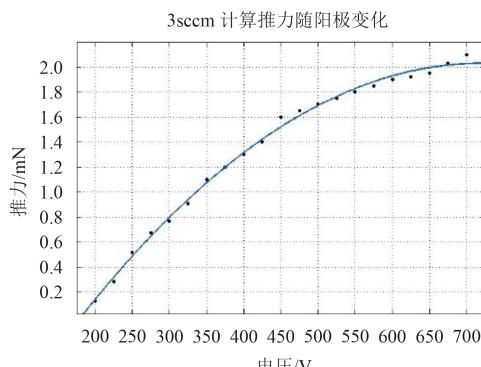


图8 3 sccm阳极流量工况下, 推力器推力随阳极电压变化

Fig. 8 Under the condition of 3 sccm anode flow rate, the thruster thrust varies with the anode voltage

在以上测试结果的基础上, 如果取实验室电源的电压分辨率为 $\delta U = 1$  V, 通过 $\delta F = \frac{dF}{dU} \delta U$ , 便可

计算出推力器在各个电压点的分辨率。从图9中可以看出, 推力器在3 sccm的工况下, 随着电压的提升, 推力器的分辨率不断降低, 理论上甚至可以达到1  $\mu$ N以下, 这些测得的工况点满足工程上对HEMPT推力分辨率的要求。

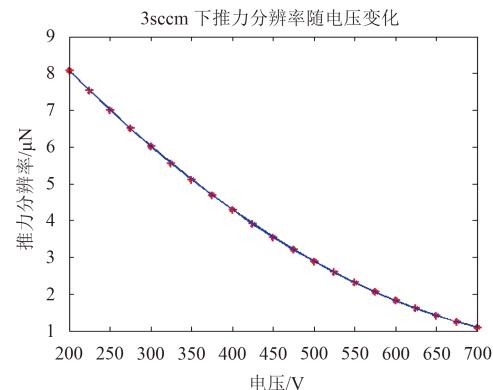


图9 3 sccm阳极流量工况下, 推力器推力分辨率随阳极电压的变化

Fig. 9 Under the condition of 3 sccm anode flow, the thrust resolution of the thruster varies with the anode voltage

## 5 结论和展望

本文从等离子体产生推力原理的角度, 推导出了通过可测得的法拉第探针和RPA探针数据得到推力的公式, 并且在会切场推力器的实验中进行了验证, 与三丝扭摆系统测得的推力进行了对比。根据此方法测得了在低流量和低电压的情况下得不到的部分推力数据, 并且在推力分辨率的测量中进行了应用。

未来, 可通过该方法进一步缩小推力分辨率的测量间距, 进一步提高测量精度, 减少拟合误差, 甚至还可以长时间测量法拉第和RPA随时间变化来反推推力随时间的变化, 从而得到推力器的推力噪声特性。

## 参 考 文 献

- [1] Liu H, Chen P B, Sun Q Q, et al. Design of a cusped field thruster for drag-free flight[J]. Acta Astronautica, 2016, 126: 35-39.
- [2] Keller A, Köhler P, Gärtner W, et al. Feasibility of a down-scaled HEMPT-thruster[D]. Germany: Justus-Liebig-University, 2014.
- [3] 陈蓬勃. 小功率会切场等离子体推力器变截面通道设计及实验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [4] Chen P B. The design and experimental study of variable cross-section channel HEMPT[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [5] Matlock T S. An exploration of prominent cusped-field thruster phenomena : the hollow conical plume and anode current bifurcation[D]. USA: Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [6] Gildea S R, Martinez-Sanchez M, Nakles M R, et al. Experimentally characterizing the plume of a divergent cusped-field thruster[C]//31st International Electric Propulsion Conference (IEPC 09). Michigan: Air Force Research Laboratory, 2009.

[6] 杨福全,赵以德,李娟,等.主带小行星采样返回任务中的离子电推进应用方案[J].深空探测学报,2015,2(2):168-173.  
Yang F Q, Zhao Y D, Li J, et al. Application scheme of ion electric propulsion system for main-belt asteroid sample and return mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(2): 168-173.

[7] 郑茂繁,耿海,梁凯,等.用于小行星探测的离子推力器技术研究[J].深空探测学报,2015,2(3):236-240.  
Zheng M F, Geng H, Liang K, et al. Research on ion thruster technology for asteroid exploration[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2015, 2(3): 236-240.

作者简介:

刘辉(1981-),男,副教授,博士,主要研究方向:电推进器的设计、仿真,等离子体计算。  
通讯地址:黑龙江省哈尔滨市哈尔滨工业大学科学园知源楼2F(150000)  
E-mail: huiliu@hit.edu.cn  
孙强强(1993-),男,硕士,主要研究方向:电推进器的设计、仿真。  
通讯地址:黑龙江省哈尔滨市哈尔滨工业大学科学园知源楼2F(150000)  
E-mail: 18804620161@163.com

## An Equivalent Thrust Measuring Method of the Cusped Field Thruster Based on Probe Diagnosis

SUN Qiangqiang, HU Peng, LIU Hui, YU Daren

(Advanced Power Technology Research Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China)

**Abstract:** Recently, the drag-free satellite mission needs more precise performance for the cusped field thruster (HEMPT), such as precise thrust resolution and accurate measurement of thrust noise. However, due to the technical limitations, the current three-wire torsion pendulum measurement system cannot quickly and accurately reflect these indicators. In this paper, an equivalent method for calculating the thrust from the data measured by the probe is deduced, and is verified by experimental measurements. The results show that the proposed method can calculate the thrust precisely in a certain range. So the method provides a reference for the measurement of the mic-Newton thrust and the thrust resolution.

**Key words:** HEMPT; probe diagnosis; thrust measurement

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱鲁青]