doi:10.11887/j.cn.201404002 http://journal.nudt.edu.cn

极板构型对脉冲等离子体推力器性能影响*

张 华,吴建军,何 振,张代贤,鲁高飞
(国防科技大学 航天科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

摘 要:极板是脉冲等离子体推力器(PPT)的关键部件之一,极板构型对PPT性能有重要影响。分析表明:保持极板其他参数不变,增大极板张角或减少极板末端宽度都会提高推力器效率的理论上限。以理论分析为指导,分别对采用矩形、梯形和舌形三种形状极板的0°、28°、54°和74°张角共12套极板的PPT性能进行了实验研究,结果表明:对于不同形状的极板,极板张角对PPT性能的影响呈现出不同的规律;元冲量和单脉冲烧蚀质量随极板张角的变化规律基本相同;比冲随极板张角的增大先减小后增大,存在一个转折张角,对于不同形状的极板,其转折张角不同;在不同的极板张角下,极板形状对推力器效率具有不同的影响规律。

关键词:脉冲等离子体推力器;极板形状;极板张角;性能
中图分类号:V435.11 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-2486(2014)04-0005-05

Effects of electrodes configuration on the performance of pulsed plasma thrusters

ZHANG Hua, *WU Jianjun*, *HE Zhen*, *ZHANG Daixian*, *LU Gaofei*
(College of Aerospace Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The electrode is one of the most important components of the pulsed plasma thruster (PPT), which has great influence on PPT performance. In view of this, the upper limitation of PPT efficiency theoretically was analyzed, and the results showed that the upper limitation of PPT efficiency increases by increasing the flare angle or decreasing the end width of electrodes. And then the impulse bit and the mass bit of different PPTs were measured by varying the flare angle and the end width of electrodes. The experimental results indicated that the flare angle has different effects on mass bit of PPTs for different electrode shapes; effects of flare angle on impulse bit are similar to the effects of flare angle on mass bit for corresponding electrode; the specific impulse increases firstly and then decreases with the increase of flare angle; the influence of electrode shape on the performance of PPTs is different at different flare angles.

Key words: pulsed plasma thruster; electrode configuration; flare angle; performance

脉冲等离子体推力器具有结构简单、体积小、重量轻、可靠性高、推力范围广、比冲高等优点,特别适合用于微小卫星的位置保持、阻力补偿、星座编队飞行等空间飞行任务[1]。随着我国微小卫星事业的快速发展,我国已经开展了大量的关于脉冲等离子体推力器的实验和理论研究[2-7]。如今,脉冲等离子体推力器已经在多个空间飞行任务中得到成功应用,虽然其结构简单,但工作过程涉及多种电热、电磁的复杂反应,很多过程的内在机制尚未完全清楚。现在和未来的一段时间内,为了探寻其工作机理还需要大量的研究工作。极板构型是影响脉冲等离子推力器性能的关键因素之一,极板构型又包括极板宽度、长度、形状、张角和极板间距等。

研究发现,通过使用具有一定张角的舌形极板可以在不增加脉冲等离子推进器(Pulsed Plasma Thruster,PPT)总体质量的前提下提高推力器的比冲、效率和等效排气速度等性能参数。1976年,Palumbo和Guman对极板张角对PPT性能的影响进行了研究,结果表明:在20°范围内,增加张角会增加PPT的推功比和比冲;当张角大于20°时,增加张角则会使PPT的性能迅速下降[8]。Arrington等则对采用0°和20°张角极板的PPT进行了对比研究,发现20°张角PPT的效率和推功比(推力/功率)比0°张角的有所提高[9],与Palumbo等[8]的结论相同。2003年,Antropov等对极板形状对PPT性能的影响进行了研究,发现相对于矩形极板,采用舌形极板可以使PPT的

* **收稿日期**:2013-12-24
基金项目:国家自然科学基金资助项目(11172327)
作者简介:张华(1986—),男,山东枣庄人,博士研究生,E-mail:zhann10000@163.com;
吴建军(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:jjwu@nudt.edu.cn

效率提高10%[10]。2009年,Schönherr等综合考虑极板形状和张角分别对不同极板张角的矩形和舌形极板的PPT性能影响进行了研究,为了减少实验的工作量,采用统计学方法只对其中几种构型的极板进行了实验研究,发现采用具有一定张角的舌形极板得到了最优的推进性能[11]。Pottinger等[12]对矩形和舌形极板的0°、40°和60°张角的极板进行了研究,发现增大极板张角会提高PPT性能,但其PPT元冲量是根据放电曲线通过经验公式计算得到,而不是直接测量,其结果准确性不高。

综上所述,关于极板构型的研究大多是通过对几种特定构型的极板的性能的对比研究,不具普遍性,没有得出具体的极板构型对推力器性能的影响规律。本文只考虑极板形状和极板张角,对分别采用矩形、梯形和舌形三种极板形状的0°、28°、54°和74°四种极板张角PPT的性能进行了理论分析和实验研究,探寻极板形状和极板张角对PPT性能的影响规律。

1　理论分析

PPT的工作示意图如图1所示,PPT的工作过程是由火花塞产生少量的等离子体,从而引起已充电的电容放电,在Teflon表面形成放电电弧,表面附近的Teflon被放电电弧加热、烧蚀并部分电离形成等离子体,等离子体在放电电弧产生的自感应磁场的洛伦兹力的作用下被加速喷出,从而产生推力。由于只有y方向的磁场产生的洛伦兹力产生推力,因此只需对y方向的磁场进行分析计算。如图2所示,假设放电电流在极板宽度方向上均匀分布,根据安培定律可得极板上的任意一点在放电通道中的任意空间点所产生的y方向的磁场强度为

$$B_y = \frac{\mu j}{2\pi r}\frac{z}{r} \tag{1}$$

其中$\mu = 1$为真空磁导率,$j = I/d$为电流密度,$r = \sqrt{(y-y')^2 + z^2}$。

对整个下极板积分,则可得到下极板在任意空间点产生的磁场强度

$$B_{y,t1} = \frac{\mu I}{2\pi d}\int_0^d \frac{z}{(y-y')^2 + z^2}\mathrm{d}y' \tag{2}$$

同理可得上极板在任意空间点产生的磁场强度为

$$B_{y,t2} = \frac{\mu I}{2\pi d}\int_0^d \frac{h-z}{(y-y')^2 + (h-z)^2}\mathrm{d}y' \tag{3}$$

则极板在任意空间点产生的磁场强度为

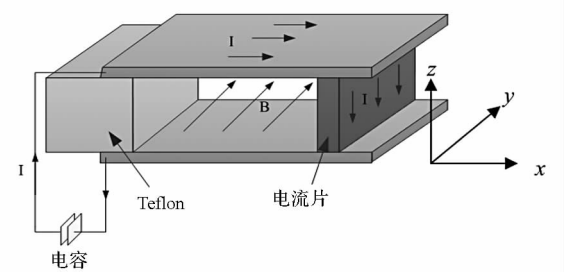


图1　PPT工作示意图

Fig. 1　Working principle of PPT

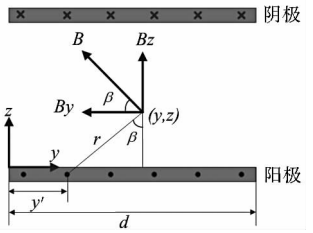


图2　电流在放电通道内的感应磁场

Fig. 2　Calculation of the magnetic field for one current filament

$$B_{y,t} = \frac{\mu I}{2\pi d}\left(\arctan\frac{y}{z} - \arctan\frac{y-d}{z}\right) + \frac{\mu I}{2\pi d}\left(\arctan\frac{y}{h-z} - \arctan\frac{y-d}{h-z}\right) \tag{4}$$

在y方向的平均磁场强度为

$$\bar{B}_{y,t}(z) = \frac{1}{d}\int_0^d B_{y,t}\mathrm{d}y \tag{5}$$

在$x-z$平面内的平均磁通量为

$$\bar{\Phi}(x_p) = \int_0^{x_p}\int_0^h \bar{B}_{y,t}(z)\,\mathrm{d}z\mathrm{d}x \tag{6}$$

则极板的电感梯度为

$$\Delta L(x_p) = \frac{\bar{\Phi}}{I} \tag{7}$$

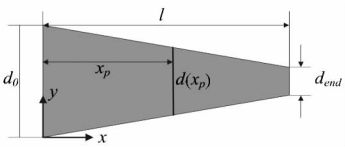


图3　极板形状示意图

Fig. 3　Geometry of trapezoid electrodes

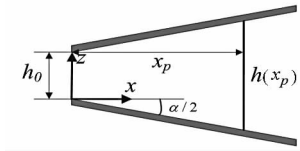


图4　极板张角示意图

Fig. 4　Geometry of flared electrodes

如图3和图4所示,对于不同形状和张角的极板,有

$$d(x) = d_0 - \frac{d_0 - d_{end}}{l}x \tag{8}$$

$$h(x) = h_0 + 2x\tan\frac{\alpha}{2} \tag{9}$$

那么式(7)可以表示为

$$\Delta L(x_p) = \int_0^{x_p} f[x, d(x), h(x)]\,\mathrm{d}x \tag{10}$$

PPT 的效率与极板电感梯度有如下关系[13]:

$$\eta < \frac{\Delta L}{L_0} \tag{11}$$

其中 L_0 为 PPT 电路的初始电感。

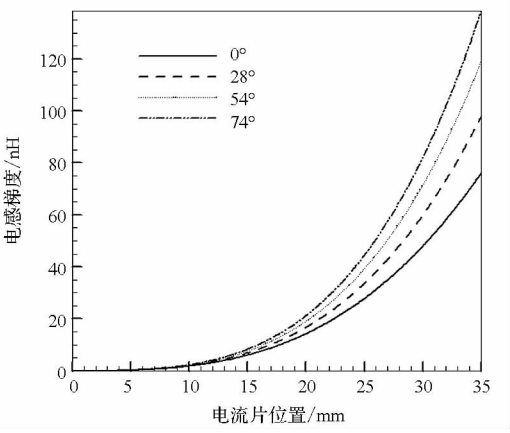


图 5　不同张角的矩形极板电感梯度曲线

Fig. 5　Change in inductance for different angles and rectangular electrodes

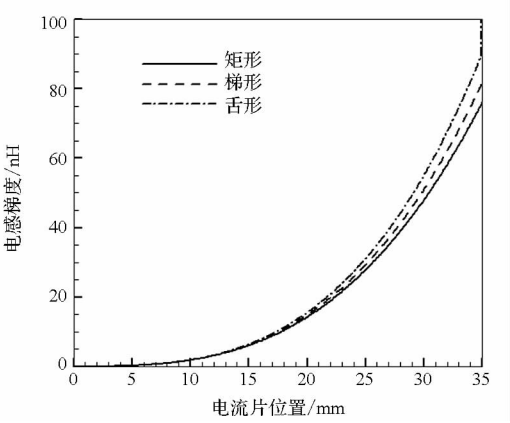


图 6　不同形状的平行极板的电感梯度曲线

Fig. 6　Change in inductance for different shape and parallel electrodes

电路的初始电感由 PPT 结构决定,对于确定构型的 PPT,可以假设其初始电感为常数,则 PPT 效率的上限只和电感梯度有关,与电感梯度呈正比例关系。通过对不同极板形状和不同极板张角的电感梯度进行计算,可以得到 PPT 效率的理论上限。如图 5 所示,增加极板张角会增加极板的电感梯度,当电流片在推进剂表面附近时,极板张角对电感梯度的影响不是很大,随着电流片距推进剂表面的距离增加,极板张角对电感梯度的影响逐渐增大。如图 6 所示,减小极板末端的宽度会增加极板的电感梯度,与极板张角的影响类似,随着电流片距推进剂表面的距离增加,极板末端宽度对电感梯度逐渐增大,当极板末端为尖角时,电流片在末端位置时电感梯度为正无穷。

2　实验设备及方法

本文设计了一台地面实验样机,电容器容量为 10μF,点火装置选用的是一种半导体火花塞,安装在阴极板上,与推力器共用阴极。通过更换极板来研究不同极板张角和不同极板形状对推力器性能的影响。采用聚四氟乙烯(Teflon)作为推进剂,并安装于两极板之间。电容器两端的初始充电电压为 1500V,即放电能量为 11.25J。

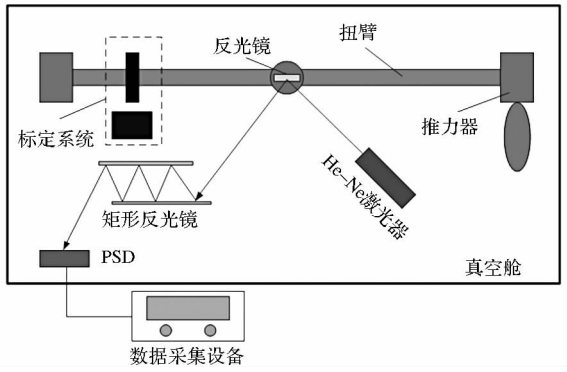


图 7　扭摆工作原理图

Fig. 7　Schematic of the torsional pendulum

实验用真空舱的极限真空度为 5×10^{-5} 帕。用于推力器元冲量测量的扭摆安装于真空仓内。如图 7 所示,扭摆的基本原理是用已知冲量的电磁标定系统来测量未知的 PPT 的冲量。推力器和电磁标定系统分别安装在扭臂的两端。首先,用已知冲量的电磁标定系统单独驱动扭摆,并用一套光学系统记录扭摆相应的摆动角度。然后,用推力器单独驱动扭摆,同样记录扭摆相应的摆动角度,通过与标定曲线比对得到推力器的冲量。更加具体的标定过程请参阅文献[14]。

通过测量连续进行 1800 次脉冲放电前、后推进剂的质量并取平均值得到推力器单次脉冲放电的推进剂烧蚀质量。

推力器的比冲 I_{sp} 和推力效率 η_T 可以简单地用元冲量 I_{bit} 和单次脉冲推进剂烧蚀质量 m_{bit} 计算得到:

$$I_{sp} = \frac{I_{bit}}{m_{bit}\cdot g} \tag{12}$$

$$\eta_T = \frac{I_{bit}^2}{2\cdot m_{bit}\cdot E_0} \tag{13}$$

其中，g 为重力加速度，E_0 为推力器的初始能量 $1/2CV_0^2$，C 为电容器电容，V_0 为电容器初始充电电压。

3　结果和讨论

本研究进行的所有实验的初始充电电压均为1500V，极板间距均为20mm。通过对采用不同极板的PPT的单脉冲烧蚀质量和元冲量进行测量，进而计算得到采用不同极板PPT的比冲和推力效率性能参数，探究不同极板构型对PPT性能的影响规律。表1给出了不同张角的取值和极板的构型，图8为在0°极板张角时的不同形状的极板，图9－图12为不同极板推力器性能参数的实验测量结果。

表1　实验参数

Tab. 1　Experimental parameters

参数	级别
极板张角	0°，28°，54°，74°
极板形状	矩形，梯形，舌形

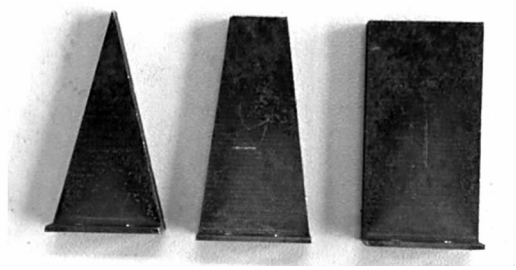


图8　0°张角下的舌形、梯形和矩形阳极侧极板

Fig. 8　Tongue, trapezoid, and rectangular anode electrode at the flare angle of 0°

如图9所示，在0°～74°的极板张角内，矩形和舌形极板的单脉冲推进剂烧蚀质量随极板张角的增大先增加后减小，矩形极板在54°极板张角时单脉冲推进剂烧蚀质量最大，而舌形极板的最大值出现在28°张角处。而梯形极板的单脉冲推进剂烧蚀质量随极板张角的增大一直增大。由此可见，对于采用不同形状极板的PPT，极板张角对单脉冲工质烧蚀质量的影响不是简单地遵循某一规律。在实际的PPT结构设计中，要根据极板的具体形状选定极板张角。

图10为不同极板的PPT的元冲量的实验测量结果，对比单脉冲推进剂烧蚀质量的实验测量结果可以发现，不同形状极板推力器的元冲量随极板张角的变化规律与各对应形状极板的单脉冲烧蚀质量随极板张角的变化规律相似。舌形极板PPT的元冲量随极板张角的增加先增大后减小，最大值出现在28°张角处。梯形极板PPT的元冲量随极板张角的增加一直增大。矩形极板PPT的元冲量最大值出现在74°张角处，比54°张角处的元冲量略大，而其单脉冲推进剂烧蚀质量的最大值出现在54°张角处，比74°张角处的脉冲烧蚀质量略大。

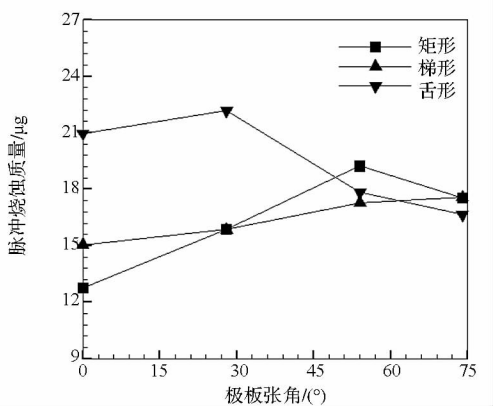


图9　单脉冲烧蚀质量随极板张角的变化

Fig. 9　Mass bit over flare angle

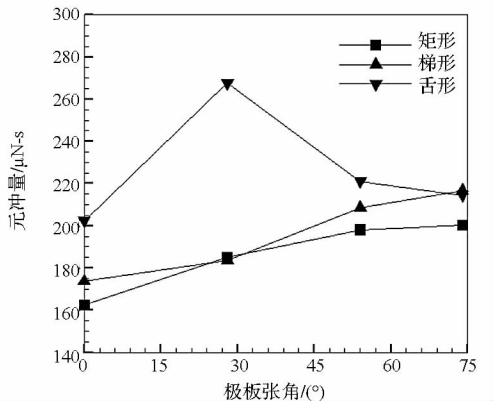


图10　元冲量随极板张角的变化

Fig. 10　Impulse bit over flare angle

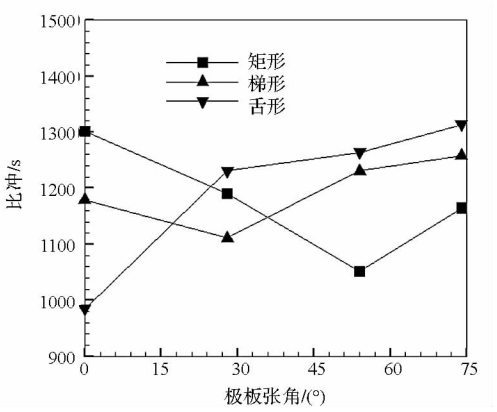


图11　比冲随极板张角的变化

Fig. 11　Specific impulse over flare angle

如图11所示，矩形极板PPT的比冲随极板张角的增大先减小后增大，其最大和最小比冲分别出现在0°张角和54°张角处。梯形极板PPT的比冲随极板张角的增大也是先减小后增大，其最大和最小比冲分别出现在74°和28°极板张角处，

相比于矩形极板,其转折点前移。舌形极板 PPT 的比冲随极板张角的增大而增大。由此可得出如下规律:通过改变极板末端宽度而得到不同极板形状的推力器的比冲随极板张角的增大先减小后增大,其转折点随着极板末端宽度的减小而前移,当极板末端宽度减小到某个值后,推力器比冲只随极板张角的增大而增大。

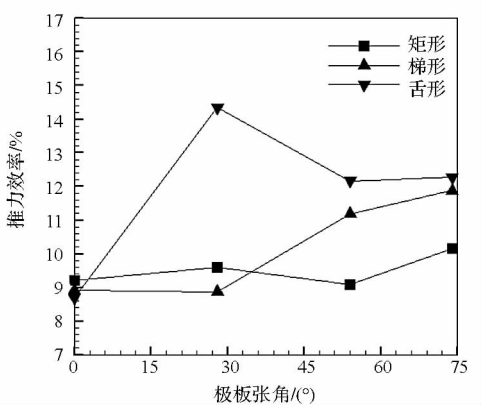


图 12　推力效率随极板张角的变化

Fig. 12　Thrust efficiency over flare angle

如图 12 所示,矩形极板 PPT 的推力效率随着极板张角的增大变化不大,基本保持不变。梯形极板 PPT 的推力效率随着极板张角的增大而增大。而舌形极板 PPT 的推力效率随极板张角的增大先增大后减小。由此可得:在不同的极板张角下,通过减小极板末端宽度来改变极板形状对推力器效率的影响效果存在很大差别,其中,在 0°张角时,极板形状对推力效率几乎没有影响,在 28°张角时,极板形状对推力效率影响最大。

4　结论

通过减小极板末端宽度改变极板形状会提高 PPT 效率的理论上限;增加极板张角也会提高 PPT 效率的理论上限。

极板张角对不同极板形状的 PPT 的脉冲烧蚀质量的影响复杂,没有一定的规律,但是对于某一固定极板形状 PPT,极板张角对推力器的脉冲烧蚀质量的影响有一定的规律;采用不同形状极板的 PPT 的元冲量随极板张角的变化规律与单脉冲烧蚀质量随极板张角的变化规律基本相同;通过改变极板末端宽度而得到不同极板形状的推力器的比冲随极板张角的增大先减小后增大,存在一个转折张角,其转折张角随着极板末端宽度的减小而减小,当极板末端宽度减小到某个值后,推力器比冲只随极板张角的增大而增大;在不同的极板张角下,通过减小极板末端宽度来改变极板形状对推力器效率的影响效果存在很大差别。因此,在具体的 PPT 设计过程中,需要根据具体的飞行任务来合理设计极板构型。

参考文献(References)

[1] Burton R L, Turchi P J. Pulsed plasma thruster[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(5): 716 – 735.

[2] 张锐,张代贤,张帆,等. 脉冲等离子体推力器羽流沉积薄膜的结构与光学性质研究[J]. 物理学报, 2013, 62(2): 025207.
ZHANG Rui, ZHANG Daixian, ZHANG Fan, et al. Structural and optical characterization of film deposited by pulsed plasma thruster plume[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(2): 025207. (in Chinese)

[3] Yang L, Liu X Y, Wu Z W, et al. Analysis of teflon pulsed plasma thrusters using a modified slug parallel plate model[R]. AIAA 2011 – 6077, 2011.

[4] Da H, Zhao W, Xiao K. Operation analysis of pulsed plasma thruster[J]. Acta Astronautica, 2008, 62: 404 – 409.

[5] Zhang R, Zhang D X, Zhang F, et al. Deposition of fluorocarbon films by pulsed plasma thruster on the anode side [J]. Applied Surface Science, 2013, 270: 352 – 358.

[6] 杨磊,刘向阳,武志文,等. 基于克努森模型的脉冲等离子体推力器烧蚀边界层数值研究[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(3): 346 – 352.
YANG Lei, LIU Xiangyang, WU Zhiwen, et al. Numerical analysis on ablating boundary layers of pulsed plasma thruster based on knudsen model [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(3): 346 – 352. (in Chinese)

[7] 谢泽华,周进,张锐,等. 脉冲等离子体推力器羽流场数值分析[J]. 国防科技大学学报, 2013, 35(5): 67 – 73.
XIE Zehua, ZHOU Jin, ZHANG Rui, et al. Numeral analysis of plume field of a pulsed plasma thruster[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2013, 35(5) 67 – 73. (in Chinese)

[8] Palumbo D J, Guman W J. Effects of propellant and electrode geometry on pulsed ablative plasma thruster performance[J]. Journal of Spacecraft, 1976, 13(3): 163 – 167.

[9] Arrington L A, Haag T W, Pencil E J, et al. A performance comparison of pulsed plasma thruster electrode configurations [C]. 25th International Electric Propulsion Conference, IEPC – 97 – 127, 1997.

[10] Antropov N, Diakonov G, Orlov M. Development and refinement of highly efficient 150 J APPT [C]. 28h International Electric Propulsion Conference, IEPC 03 – 061, Toulouse, France, 2003.

[11] Schönherr T, Nawaz A, Herdrich G, et al. Influence of electrode shape on performance of pulsed plasma magnetoplasma dymamic thruster SIMP-LEX[J]. Journal of Propulsion and Power, 2009, 25(2).

[12] Pottinger S J, Krejci D, Acharlemann C A. Pulsed plasma thruster performance for miniaturised electrode configurations and low energy operation[J]. Acta Astronautica, 2011, 68: 1996 – 2004.

[13] Jahn R G. Physics of electric propulsion[M]. New York: McGraw-Hill, 1968.

[14] He Z, Wu J J, Zhang D X, et al. Precision electromagnetic calibration technique for micro-Newton thrust stands[J]. Review of Scientific Instruments, 2013, 84: 055107.