

舌形张角型脉冲等离子体推力器极板结构参数影响仿真研究

程笑岩, 刘向阳, 黄启陶, 武志文, 谢侃, 王宁飞

(北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘要: 脉冲等离子体推力器是一种具有发展前景的电推进装置, 具有比冲高、质量轻等优点, 可用于微小卫星的姿态控制、轨道转移等任务。以ADD SIMP-LEX推力器为例, 建立数学仿真模型, 并对舌形张角型极板构型进行仿真, 经过仿真和实验结果对比, 探究了不同极板参数对推力器的主要性能参数(元冲量、效率、比冲等)的影响, 研究表明: 增大宽度比, 元冲量和效率随之增大, 比冲有所降低; 增大张角, 元冲量和效率也随之增大, 比冲略有降低, 但幅度不大。

关键词: 脉冲等离子体推力器; 机电模型; 数学仿真; 构型影响

中图分类号: V439+.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2017)03-0225-07

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.03.004

引用格式: 程笑岩, 刘向阳, 黄启陶, 等. 舌形张角型脉冲等离子体推力器极板结构参数影响仿真研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(3): 225-231.

Reference format: Cheng X Y, Liu X Y, Huang Q T, et al. Simulation researches on the pulsed plasma thruster with tongue-shaped and flared electrodes[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2017, 4(3): 225-231.

0 引言

从1964年前苏联首次在“Zond-2”火星探测器上使用脉冲等离子体推力器(Pulsed Plasma Thruster, PPT)起至今^[1], PPT已经经历了50余年的发展历程, 期间发展出了多种外形、结构、尺寸、用途、工质等不同的脉冲等离子体推力器, 取得了不错的进展^[2]。研究人员也开始关注PPT性能的影响因素, 希望能通过模拟PPT工作过程来寻求提高性能的方法^[3]。

PPT的性能参数主要包括元冲量、比冲和效率等。它们与推力器电参数和极板构型参数直接相关。为了深入了解PPT的工作过程, 提高PPT的性能, 研究人员针对PPT的工作过程开展了大量的仿真与实验研究。目前国内外关于PPT的研究主要在二次放电^[4]、含能工质、PPT工作效率的提高等方面^[5]。

德国斯图加特大学研制的最新PPT, 采用了舌形张角型极板构型, 实验结果显示这种新型PPT拥有更好的性能, Tony基于早先的PPT模型进行了理论研究。John于1968年针对平行极板型PPT提出了用于描述其工作过程的机电模型, 是一个RLC电路与动力学系统相互作用的模型。该模型将动力学系统理想化成因

受洛伦兹力作用而沿极板向外喷出的电流片, 又称为“弹丸”模型^[6]。随后, Vondra改进了这个模型, 在运动控制方程中加入了气动力仿真^[7]。但是这些模型都是针对矩形平行极板构型的PPT, 为了模拟舌形张角型PPT的工作过程, 需要对模型进行改进。

本文以舌形张角型极板构型的脉冲等离子体推力器ADD SIMP-LEX为研究对象^[8], 以弹丸模型为基础构造出一套可以用于计算舌形张角型极板构型的仿真数学模型, 并以此来研究不同的极板几何参数对这种构型PPT性能的影响。

1 仿真数学模型的建立

1.1 ADD SIMP-LEX简介

ADD SIMP-LEX是由德国斯图加特大学研制的, 用于月球探索项目BW1推进系统的SIMP-LEX推力器的改进型号^[9]。卫星的体积只有1 m³, 质量约为200 kg, 由于能源供应和推进剂储存空间有限, 所以采用脉冲等离子体推力器, 其尺寸为40 × 25 × 10 cm³, 包括4个电容器, 总电容为80 uF。ADD SIMP-LEX构造如图1所示。

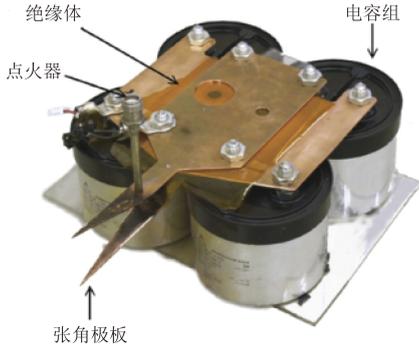


图1 ADD SIMP-LEX推力器
Fig. 1 ADD SIMP-LEX thruster

ADD SIMP-LEX采用了舌型张角型极板构型。为了探究这种构型对PPT性能的影响, 本文建立了一套适用于ADD SIMP-LEX这种舌形张角型极板构型PPT的数学仿真模型, 主要包括电路模型、电感模型、动力学模型、等离子体电阻模型、烧蚀模型等。

1.2 舌形极板参数定义

舌形带张角极板结构如图2所示, 由图可知, 随着 x 的增大, 极板的高度 h 逐渐变大, 而极板宽度 d 则逐渐减小, 具体变化关系为

$$h(x) = h_0 + 2 \tan \frac{\alpha}{2} x \quad (1)$$

$$d(x) = d_0 \left(1 - \frac{x}{l_e}\right) + d_e \frac{x}{l_e} \quad (2)$$

其中: d_0 和 d_e 分别代表极板的初始宽度和末端宽度; h_0 为极板初始高度; $\alpha/2$ 为极板的半张角。

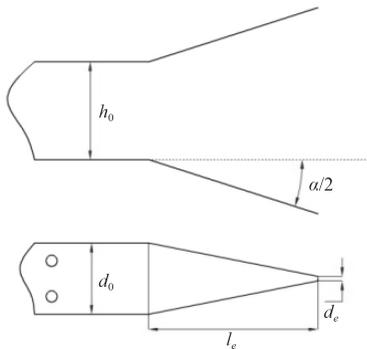


图2 舌形带张角极板构型
Fig. 2 Tongue-shaped configuration with flared angles

α_d 为极板的宽度比, 为

$$\alpha_d = \frac{d_0}{d_e} \quad (3)$$

1.3 电路模型

目前普遍认为PPT的放电回路可以等效成为RLC串联电路, 等效电路图如图3所示。

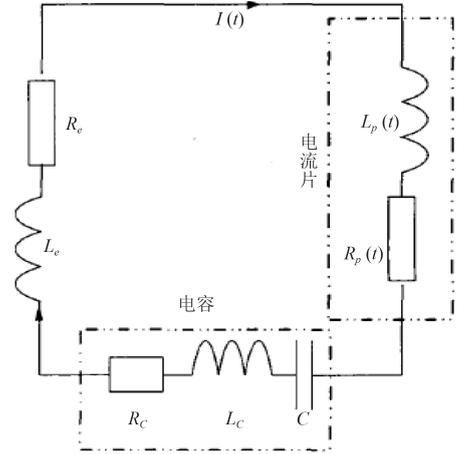


图3 PPT等效电路
Fig. 3 Equivalent circuit of PPT

放电回路中包括电容器的电阻 R_c ; 导线的电阻 R_e ; 电流片的电阻 $R_p(t)$; L_c 为电容器电感; L_e 为导线电感; $L_p(t)$ 为电流片电感。其中电流片的电感和电阻会随着时间的变化而变化, 但是有研究表明^[10]: 这个变化是十分微弱的, 所以也把它当成常数来看待。

由基尔霍夫定律和法拉第电磁感应定律, 放电回路的方程可以表示为

$$V_c(t) = V_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I(t) dt = R_T + \frac{d}{dt} (L_T I(t)) \quad (4)$$

其中: R_T 和 L_T 是回路中所有电感和电阻的总和; V_0 为初始电压; C 为电容大小; $V_c(t)$ 为电容的端电压。

1.4 电感及电感梯度模型

假设电流薄片的厚度为 δ , 并且忽略极板厚度, 以 $t=0$ 时刻作为坐标原点, 利用磁场的环路定律, 可以得到极板内磁场的分布规律如下^[11]

$$\begin{aligned} B_{y,\text{total}} &= \frac{\mu I}{2\pi d(x)} (\beta_1 + \beta_2) \\ \beta_1 &= \arctan\left(\frac{y}{z}\right) + \arctan\left(\arctan\frac{d(x)-y}{z}\right) \\ \beta_2 &= \arctan\left(\frac{y}{h(x)-z}\right) + \arctan\left(\frac{d(x)-y}{z}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

将磁场 B 积分, 得到磁通量为

$$\bar{\phi}(x_p) = \int_0^{x_p} \frac{1}{d(x)} \int_0^{d(x)} \int_0^{h(x)} B_{y,\text{total}} dz dy dx \quad (6)$$

由磁通量和电感的可得电流片的电感表达式

为

$$L_p(x_s(t)) = \frac{\iint B(x, y) dA}{I(t)} \quad (7)$$

而电感梯度表示为

$$L'_p(x_s(t)) = \frac{L_p(x_s(t))}{x_s(t)} \quad (8)$$

1.5 动力学模型

用牛顿第二定律来解释电流薄片的运动为

$$\frac{d}{dt} [m(t)x'(t)] = \iiint -\frac{I(t)}{d^2\delta} \hat{Z} \times B(x, t) dV + F_{\text{gas}} \quad (9)$$

其中: $m(t)$ 是电流片的质量(可认为在过程中不发生变化); $x'(t)$ 为电流片的速度。

式(9)右边是电流片所受到的外力总和, 包括洛伦兹力和气动力。

假设电流片的质量在运动过程中不发生改变, 动力学模型进一步简化为

$$m_0 \ddot{x}_s(t) = \frac{1}{2} L'_p(I(t))^2 + F_{\text{gas}} \quad (10)$$

1.6 等离子体电阻模型

假设等离子体为一阶完全电离, 那么等离子体电阻为

$$R_p = \frac{h}{\sigma_p d l} \quad (11)$$

其中: σ_p 为等离子体的电导率

$$\sigma_p = 0.0153 \frac{T_e^{1.5}}{\ln \Lambda} \quad (12)$$

其中: Λ 为德拜长度与碰撞参数之比。

$$\Lambda = \frac{\lambda_D}{b_0} = 1.24 \times 10^7 \left(\frac{T_e^3}{n_e} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

其中: T_e 为电子温度; n_e 为电子数密度。

电流片的厚度可以表示为

$$\delta = \sqrt{\frac{\tau}{\sigma_p \mu_0}} \quad (14)$$

其中: τ 为特征时间。

由式(14)可以推得等离子体电阻

$$R_p = \int_0^{l_c} 8.08 \frac{h(x)}{T_e^{\frac{3}{2}} d(x)} \sqrt{\frac{\mu_0 \ln \left[1.24 \times 10^7 \left(\frac{T_e^3}{n_e} \right)^{\frac{1}{2}} \right]}{\tau}} dx \quad (15)$$

对于ADD SIMP-LEX的舌形张角型极板构型, h 和 d 在极板不同位置是不同的, 对此可以对电阻沿 x 轴进行积分, 最后得出整个极板的等离子体电阻。

1.7 模型汇总

将上述模型进行整理汇总, 可以得到一个二阶微分方程组。同时为了便于使用四阶龙格库塔法计算, 建立如下几个状态向量

$$\begin{cases} x_1(t) = x_s(t) \\ x_2(t) = x'_s(t) \\ x_3(t) = \int_0^t I(t) dt \\ x_4(t) = I(t) \\ x_5(t) = \int_0^t I^2(t) dt \end{cases} \quad (16)$$

其中: $x_1(t)$ 代表的是电流薄片的位移; $x_2(t)$ 代表电流薄片的速度; $x_3(t)$ 代表单位脉冲时间内电流的积分; $x_4(t)$ 代表的是电流; $x_5(t)$ 表示电流平方的积分。

将状态向量代入汇总的模型中, 可以改写为以下形式

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) = \frac{1}{m_0} L'_p [x_4(t)]^2 + \frac{F_{\text{gas}}}{m_0} \\ \dot{x}_3(t) = x_4(t) \\ \dot{x}_4(t) = \frac{V_0 - \frac{1}{C} x_3(t) - L'_p x_4(t) - R_T x_4(t)}{L_T} \\ \dot{x}_5(t) = I^2(t) \end{cases} \quad (17)$$

初始值: $x_1(0) = 0$, $x_2(0) = 0$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$, $x_5(0) = 0$ 。建立了带4个变量的一阶微分方程组。

在MATLAB中, 通过对上述关系式的求解可以确定电流和电压的变化曲线, 并进一步求得元冲量、比冲、效率等推力器性能参数。

1) 元冲量 I_{bit} 为

$$I_{\text{bit}} = \frac{1}{2} L'_p \int_0^t I^2(t) dt + I_{\text{gas}} \quad (18)$$

2) 比冲 I_{sp} 为

$$I_{\text{sp}} = \frac{I_{\text{bit}}}{mg} \quad (19)$$

3) 推力器效率 η_T 为

$$\eta_T = \frac{I_{\text{bit}}^2}{2mE_0} \quad (20)$$

4) 推力器能量 E_0 为

$$E_0 = \frac{1}{2} CU^2 \quad (21)$$

1.8 模型的验证

以德国ADD SIMP-LEX作为仿真对象, 通过MATLAB的ode45函数来计算上述微分方程组, 以此验证数学模型的准确性。该推力器的具体参数如表1所示。

将表1中的参数代入仿真模型, 得到电压变化曲线, 将该曲线与实验测得的ADD SIMP-LEX电压曲线

进行比对, 比对的结果如图4所示。仿真电压曲线和实验电压曲线在周期和峰值等方面都比较吻合^[13]。

表1 ADD SIMP-LEX参数

Table 1 Parameters of the ADD SIMP-LEX

参数	设计值
V/V	1 220
$C/(10^{-6}F)$	80
$h_0/(10^{-3}m)$	21
$d_0/(10^{-3}m)$	20
$l_0/(10^{-3}m)$	68.5
$d_0/(10^{-3}m)$	1.97
$\alpha/(\circ)$	20

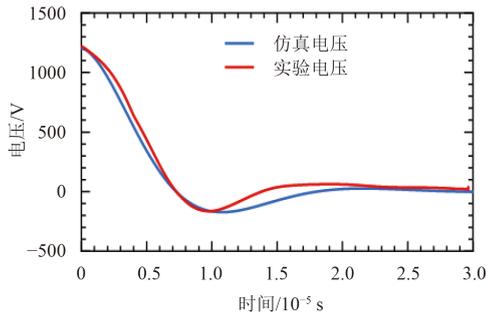


图4 仿真和实验电压曲线对比

Fig. 4 Comparison of simulated and experimental voltage curves

随后将仿真模型计算得到的推力器性能参数与实验所测得的ADD SIMP-LEX参数进行比较, 比较结果如表2所示, 可见元冲量的吻合性比较好, 效率和比冲吻合度稍差^[14]。

总体来说认为这套仿真模型可以比较好的预测ADD SIMP-LEX推力器的性能特征。

表2 ADD SIMP-LEX仿真与实验性能比较

Table 2 Comparison of the simulated and experimental parameters

性能参数	仿真	实验
元冲量/ $(10^{-3}N \cdot s)$	1.35	1.375
效率/(%)	34	26
比冲/s	3 048	2 620

2 极板参数对PPT性能的影响

对于舌形张角型极板构型PPT, 讨论不同的极板构型对其性能的影响。主要从极板宽度比、极板张角2个方面讨论^[15]。

2.1 宽度比影响

ADD SIMP-LEX推力器的极板采用的是10的宽度比。为了探究不同的宽度比对推力器性能的影响, 保持推力器的初始能量不变, 改变其宽度比。为了方便比较, 取40、20、5和1, 四组宽度比绘制电流电压曲线。四组电压电流仿真结果如图5~6所示。

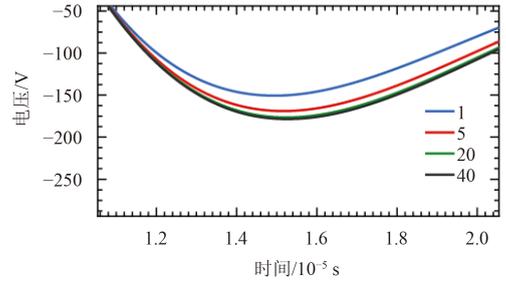


图5 仿真电压曲线

Fig. 5 The voltage curves of simulation

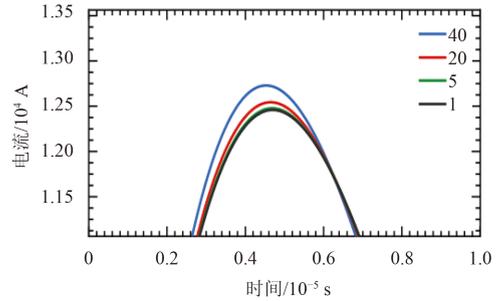


图6 仿真电流曲线

Fig. 6 The current curves of simulation

从图5的电压局部图可以看出, 随着极板宽度比的增大, 电压曲线变得更加平缓, 达到最小值的时间提前。

由图6的电流局部图可以看出, 随着极板宽度比的减小, 电流的峰值逐渐变小, 但是幅度越来越小。

最后得到极板宽度比与性能参数的变化关系如图7~9所示。

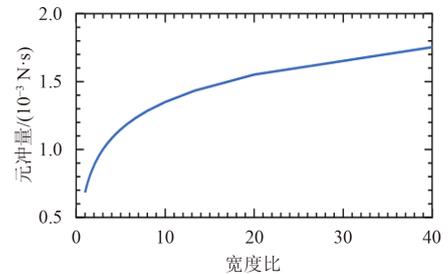


图7 元冲量与宽度比关系

Fig. 7 The change of the impulse bit with the width ratio

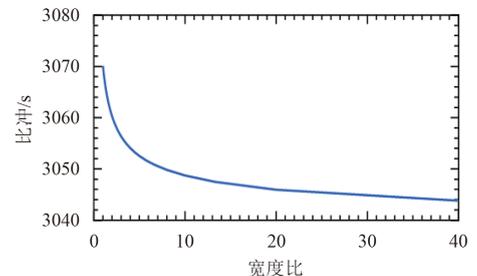


图8 比冲与宽度比关系

Fig. 8 The change of the specific impulse with the width ratio

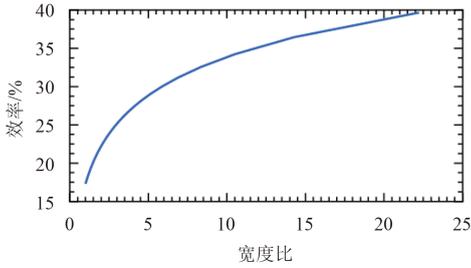


图 9 效率与宽度比关系

Fig. 9 The change of the efficiency with the width ratio

由图 7~9 可知：随着宽度比变大，元冲量和效率也随之增大，但宽度比从 10:1 之后增长趋势逐渐变缓，而比冲则随着宽度比增大而减小。

2.2 极板张角影响

为了探究不同的张角对推力器性能的影响，保持推力器的初始能量不变，改变其宽度比。为了方便比较，取 0°、20°、40° 和 60° 四组张角绘制电流电压曲线。四组电压电流仿真结果如图 10~11 所示。

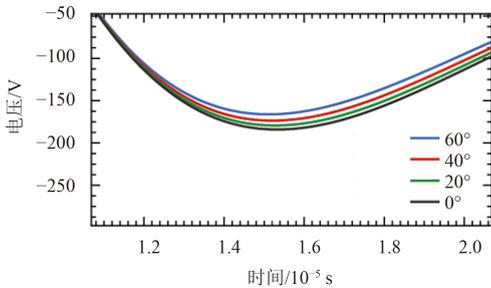


图 10 仿真电压曲线

Fig. 10 The voltage curves of simulation

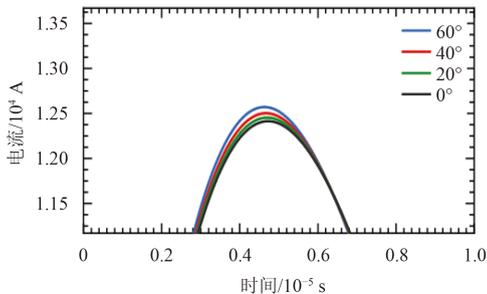


图 11 仿真电流曲线

Fig. 11 The current curves of simulation

由图 10 的电压局部图可知，随着极板张角的减小，电压曲线的最小值也变大，即曲线变的更加陡峭，并且达到最小值的时间略有增加。

由图 11 的电流局部图可知，随着极板张角的变小，电流的峰值变小，并且电流到达峰值的时间略有增加。性能参数与极板张角的变化关系如图 12~14 所示。

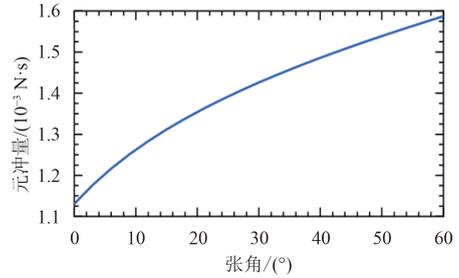


图 12 元冲量与张角

Fig. 12 The change of the impulse bit with the flared angles

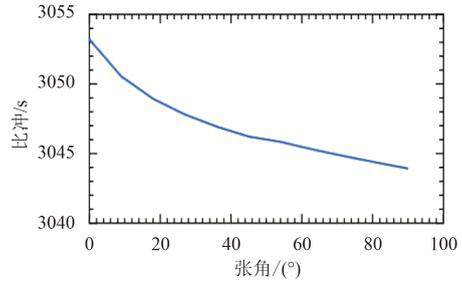


图 13 比冲与张角

Fig. 13 The change of the specific impulse with the flared angles

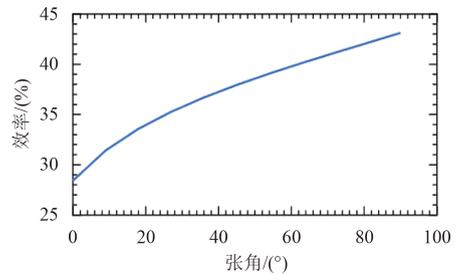


图 14 效率与张角

Fig. 14 The change of the efficiency with the flared angles

由图 12~14 可知，随着极板张角的增大，元冲量和效率也随之增大，但比冲有所降低。

随着张角的增大，为了保持极板水平长度 l_e 不变，首先定义极板末端高度与初始高度的比值为高度比。由式 (1) 可以推导出极板高度比与张角的变化关系，如图 15 所示。随着张角增大，高度比也增大，在 80° 以后，变化幅度更加明显。高度比的增大会增大推力器的体积，使 PPT 的尾喷变的臃肿，因此张角不宜过大。

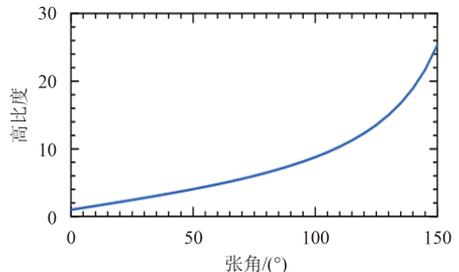


图 15 极板高度比与张角

Fig. 15 The change of the height ratio with the flared angles

3 结论与展望

本文基于舌形张角极板构型建立的模型仿真结果和实验结果进行对比,得到结论:①吻合的较好,认为模型具有一定的可行性;②在 20° 张角的前提下,增大宽度比,元冲量和效率也随之增大,但宽度比从10之后增长趋势逐渐变缓,比冲有所降低,但降低趋势逐渐变缓;③在宽度比为10的前提下,增大张角,元冲量和效率也随之增大,比冲略有降低,但幅度不大。但是张角过大会增大推力器的质量与体积,因此要根据推力器具体情况选择合适的张角。

由于PPT工作过程的复杂性,本文并未涉及极板宽度比和张角是如何在机理上影响PPT的性能的,需要进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 牛禄,王宏伟,杨威. 用于微小卫星推进装置的脉冲等离子体推力器[J]. 上海航天, 2004, 21(5): 39-43.
Niu L, Wang H W, Yang W. The pulsed plasma thruster for propeller in small and micro satellite[J]. Aerospace Shanghai, 2004, 21(5): 39-43.
- [3] 杨磊,刘向阳,陈成权,等. 脉冲等离子体推力器宏观特性数值研究[J]. 推进技术, 2011, 32(6): 776-780.
Yang L, Liu X Y, Chen C Q, et al. Numerical analysis on macro-characteristics of pulsed plasma thruster[J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(6): 776-780.
- [4] Vondra R J, Thomassen K I. Performance improvements in solid fuel microthrusters[J]. Journal of Spacecraft, 1972, 9(10): 738-742.
- [5] 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.
- [6] 杨乐. 脉冲等离子体推力器工作过程理论和实验研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
Yang L. Theoretical analysis and experiment investigation of pulsed plasma thruster [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2007.
- [7] Solbes A, Thomassen K, Vondra R. Analysis of solid teflon pulsed plasma thruster[J]. Journal of Spacecraft & Rockets, 2013, 7(7): 1402-1406.
- [8] Schönherr T, Komurasaki K, Kawashima R. Effect of capacitance on discharge behavior of pulsed plasma thruster[J]. Journal of IAPS, 2010, 18(1): 23-28.
- [9] Kamhawi H, Arrington L, Pencil E, et al. Performance evaluation of a high energy pulsed plasma thruster[C]//AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. USA: AIAA, 2005.
- [10] Liu X, Zuo G, Herdrich G, et al. Numerical simulation of ADD SIMPLEX pulsed plasma thruster based on a modified electromechanical model[C]//Space Propulsion. Rome: [s.n], 2016.
- [11] Schönherr T, Nawaz A, Herdrich G, et al. Influence of electrode shape on performance of pulsed magneto plasma dynamic thruster SIMPLEX [J]. Journal of Propulsion & Power, 2009, 25(2): 380-386.
- [12] Nawaz A, Albertoni R, Auweter-Kurtz M. Thrust efficiency optimization of the pulsed plasma thruster SIMPLEX[J]. Acta Astronautica, 2010, 67(3): 440-448.
- [13] Lau M, Grabe M, Herdrich G. Experimental characterization of a scalable pulsed magneto plasma dynamic propulsion system[C]//Space Propulsion. Germany: [s.n], 2014.
- [14] Krejci D, Scharlemann C. Analytic model for the assessment of the electrode configuration of a μ PPT[C]//45th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Colorado: AIAA, 2009.
- [15] 张华,吴建军,何振,等. 极板构型对脉冲等离子体推力器性能影响[J]. 国防科技大学学报, 2014(4): 5-9.
Zhang H, Wu J J, He Z, et al. Effects of electrodes configuration on the performance of pulsed plasma thrusters[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2014(4): 5-9.

作者简介:

程笑岩(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向:脉冲等离子体推力器实验与仿真。

通信地址:北京市海淀区北京理工大学宇航学院(100081)

E-mail: 2120160048@bit.edu.cn

刘向阳(1972-),男,副研究员,博士,主要研究方向:电推进技术,推进系统测控技术,固体发动机寿命预估试验方法研究。本文通信作者。

通信地址:北京市海淀区北京理工大学宇航学院(100081)

E-mail: liuxy@bit.edu.cn

Simulation Researches on the Pulsed Plasma Thruster with Tongue-Shaped and Flared Electrodes

CHENG Xiaoyan, LIU Xiangyang, HUANG Qitao, WU Zhiwen, XIE Kan, WANG Ningfei

(School of Aerospace Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Pulsed plasma thruster (PPT) is a promising electric propulsion device with the advantage of high specific impulse and light quality. This paper studied a mathematical model of the pulsed plasma thruster with tongue-shaped and flared electrodes. The results of simulation are closer to the experiment. It also simulated the performance of the pulsed plasma thruster with different structures of electrodes. It is possible to conclude that different electrodes affect the performance of the pulsed plasma thruster.

Key words: pulsed plasma thruster; electro-mechanical model; electrode structure; mathematical simulation

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 任树芳]

(上接第218页)

The Research Progress in the Micro-Cathode Arc Thruster

GENG Jinyue¹, XIONG Zichang², LONG Jun¹, SHEN Yan¹, LIU Xuhui¹, CHEN Jun¹

(1. Beijing Institute of Control Engineering, Beijing 100094, China;

2. School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A new micro electric propulsion, micro-cathode arc thruster (μ CAT), is introduced. The μ CAT is based on the vacuum arc process where an arc flows through a medium between two electrodes. The high ionized plasma is produced by the cathode spot ablation and then spell out to produce the thrust. The magnetic field is applied to focus the plasma plume and increase the specific impulse. A lot of researches on the μ CAT have been conducted in the foreign institutes, and the μ CAT has been verified on orbit in USA. In China, Beijing Institute of Control Engineering (BICE) has made breakthroughs in the key technologies including uniform ablation on the cathode, low voltage discharge, magnetic field design, etc. The influences of magnetic fields on the thruster are studied by experimental measurement. And the numerical simulations are conducted to obtain the plasma information in the thruster and plume region and study the work process and mechanism. The research will lay the foundation for engineering applications.

Key words: micro cathode arc thruster; research progress; experimental measure; numerical simulation

[责任编辑: 杨晓燕, 英文审校: 朱鲁青]