

霍尔效应推力器放电双稳态机理研究*

韩轲^{1)2)†} 江滨浩²⁾ 纪延超²⁾

1) (哈尔滨商业大学计算机与信息工程学院, 哈尔滨 150028)

2) (哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 哈尔滨 150001)

(2011年5月5日收到; 2011年6月30日收到修改稿)

实验发现霍尔效应推力器在自励磁模式下具有两个稳定的放电工作点, 且运行过程中在这两个工作点上往复跳变, 很大程度上影响了推力器通道内等离子体的放电物理过程及其综合性能. 本文结合推力器放电电磁安特性曲线与励磁电流曲线的相互关系, 给出了推力器放电双稳态特性形成的物理机理. 在此基础上提出了通过改变励磁电流曲线斜率, 使推力器稳定工作于单放电工作点的方法, 结合一维动态流体模型给予了物理解释, 并通过实验加以验证.

关键词: 霍尔效应推力器, 自励磁模式, 双稳态, 一维流体模型

PACS: 52.75.Di

1 引言

霍尔效应推力器是一种具有同轴圆环形几何结构的电磁式等离子体加速器, 在其放电通道内正交电磁场的作用下, 工质电离后在电场作用下加速喷出, 形成推力. 由于霍尔效应推力器具有比冲高、效率高、推力适中、寿命长等诸多特点, 目前广泛应用于航天器的位置保持、轨道修正和姿态控制等空间推进任务^[1,2].

由于霍尔效应推力器放电通道内的磁场直接影响电子的轴向传导过程, 进而影响工质的电离、加速等重要物理过程, 因而磁场对霍尔效应推力器的运行起着至关重要的作用^[3]. 鉴于磁场较易人为设计和控制, 所以磁场设计一直是霍尔效应推力器性能优化过程中最重要的设计自由度. 霍尔效应推力器的励磁模式有两种, 一种是单独励磁模式, 即每个励磁线圈由不同的电源独立供电; 另一种是自励磁模式, 即把励磁线圈串入等离子体放电主回路, 由推力器放电电流来励磁.

在霍尔效应推力器的地面实验中, 通常采用单独励磁模式. 这种励磁方式的优点是每个线圈中的励磁电流均可独立调节, 磁场调节的自由度较大,

同时也便于分析和研究推力器在不同磁场下的放电物理过程. 比如目前针对磁场强度、磁场梯度, 以及不同真空背景下的磁场优化等问题, 研究者普遍采用单独励磁工作模式^[4-8]. 然而在霍尔效应推力器的航天应用中, 为了简化电路和减小电源系统重量以提高航天器的可靠性和有效载荷率, 均采用自励磁模式. 虽然 Morozov 在阐述霍尔效应推力器理论^[1]、Hruby^[9] 和 Gray^[10] 等人在研究霍尔效应推力器的电气等效模型过程中均对这种励磁模式的结构特点进行了较为详尽的论述, 但有关这种励磁模式下推力器的放电机理至今尚未发现有关文献资料描述.

推力器在自励磁工作模式下, 放电电流即为励磁电流, 放电电流的波动会影响到磁场. 磁场的变化反过来又会影响到电子横越磁场的传导, 进而影响到放电电流. 这种强烈的耦合反馈作用正是自励磁放电模式区别于单独励磁放电模式的主要原因, 也是影响自励磁放电模式稳定性的关键因素之一.

本文采用 P70 霍尔效应推力器进行自励磁放电相关研究, 实验发现放电电流在 4.7 A 和 3.9 A 两个稳定的工作点之间往复跳变, 出现双稳态跳变现象. 在 3.9 A 工作点下, 放电振荡小, 羽流聚焦, 推力

* 国家自然科学基金 (批准号: 60871035) 和黑龙江省教育厅科学技术研究项目 (批准号: 12511138) 资助的课题.

† E-mail: hanke@hit.edu.cn

效率高. 而在 4.7 A 工作点下, 放电振荡大, 羽流发散, 推力效率低, 推力器综合性能差. 避免双稳态跳变现象有助于提高航天器的控制精度, 延长推力器寿命和减小羽流离子沉积对电子设备的影响. 因此, 针对自励磁模式下特有的双稳态跳变现象的研究, 对实际航天应用中霍尔效应推力器的设计具有重要的参考价值.

2 实验装置

P70 霍尔效应推力器的环形陶瓷通道外径 71 mm、宽 14 mm、长 35 mm, 如图 1 所示. 线圈导线直径为 1 mm、过流能力 8 A、材料为铜铬铌合金, 其中铜含量为 99%.

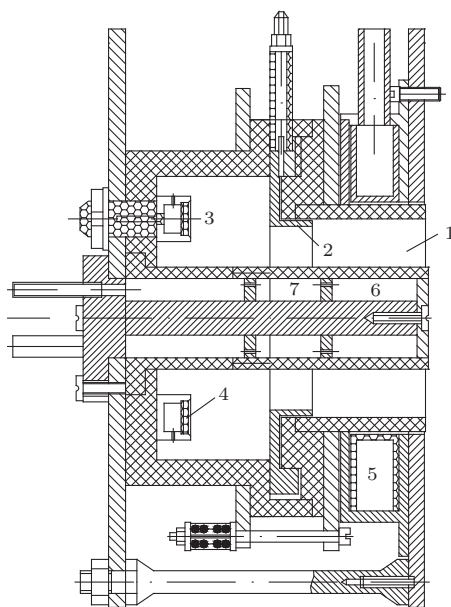


图 1 P70 霍尔效应推力器结构图 (1 为放电通道; 2 为阳极; 3 为缓冲腔; 4 为气体分配器; 5 为外线圈 1; 6 为内线圈 2; 7 为附加线圈 3)

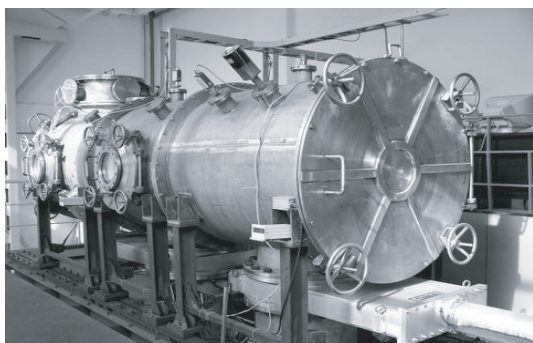


图 2 真空系统

真空罐体长 4 m, 直径 1.5 m, 如图 2 所示. 真空系统由两台油扩散泵、一台罗茨泵和三台机械泵实现并维持所需真空背压, 静压能达到 2.7×10^{-3} Pa.

自励磁模式即所有励磁线圈与主放电回路串联, 仅用一个直流电源作为主放电电源, 电路结构如图 3 所示. 需要注意的是, 励磁线圈需要串联进主放电电源 1 的负极, 是出于绝缘可靠性方面的考虑. 如果串入电源 1 的正极, 会对线圈导线的绝缘材料提出更高的要求, 绝缘失效会导致推力器熄火. 放电电流由泰克 (Tektronix) 的 TPS2024 型 4 通道隔离型数字存储示波器从电阻 R_1 两端测量采集.

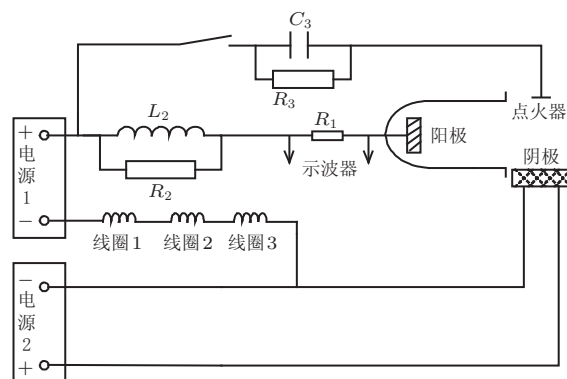


图 3 自励磁模式电路结构示意图

3 放电工作点

霍尔效应推力器的放电电流工作点受很多因素影响, 比如阳极质量流量、放电电压、磁场或者绝缘陶瓷壁面材料等. 因此放电电流可以写成如下函数关系式:

$$I_d = f(m_a, U_d, B, \delta), \quad (1)$$

其中, I_d 是放电电流, m_a 是阳极质量流量, U_d 是通道放电电压, B 是通道内磁场, δ 是与绝缘陶瓷壁面材料、推力器结构和几何尺寸等相关的参数. 当阳极质量流量 m_a 、放电电压 U_d 固定时, 放电电流 I_d 与磁场 B 之间的关系可用磁安特性曲线来确定 [11,12]. 当磁场为最优磁场 B_{opt} 时, 放电电流会达到最小 I_{dmin} . 这是因为放电电流由离子电流 (当质量流量固定时, 离子电流基本不变) 和电子电流组成, 电子电流代表功率损失, 所以当放电电流最小时, 推力器效率达到最大. 最小放电电流 I_{dmin} 即为最优放电工作点.

4 自励磁模式放电双稳态现象

与单独励磁模式不同, 推力器在自励磁运行模式下, 放电电流即线圈励磁电流. 因此为了满足自励磁模式最优磁场要求, 需要参照单独励磁下每个线圈匝数、每个线圈电流和最小放电电流, 重新调整线圈匝数^[2]. 调整时依据磁势不变条件, 即

$$F = N_c I_c, \quad (2)$$

其中, F 为磁势, N_c 为电磁线圈匝数, I_c 为电磁线圈电流.

P70 霍尔效应推力器线圈重新调整后的匝数分别为: 外线圈 134 匝、内线圈 215 匝和附加线圈 80 匝. 实验条件为放电电压 350 V, 推进剂为氦气工质, 阳极质量流量 2.7 mg/s 和阴极质量流量 0.3 mg/s. 点火发现放电电流工作点在 3.9 A 和 4.7 A 之间往复自发跳变, 每个放电工作点可稳定数秒时间. 整体来看, 放电电流跳变频率远低于等离子体振荡频率, 表现出长时间尺度行为, 不存在周期性. 放电电流为 3.9 A 时, 羽流聚焦, 放电振荡小, 功率谱幅值分散. 而放电电流为 4.7 A 时, 羽流呈紫色且发散严重, 放电振荡大, 如图 4 所示.

5 自励磁双稳放电现象机理分析

霍尔效应推力器自励磁运行模式下, 应满足如

下方程组:

$$I_d = f(m_a, U_d, B, \delta), \quad B = KN_c I_c, \quad I_d = I_c, \quad (3)$$

其中, K 为与磁路材料和尺寸等相关的系数. 当 m_a, U_d, δ 固定时, 在单独励磁模式下, 可以测量磁场 B 与放电电流 I_d 之间的磁安特性曲线. 对于电磁磁路, 当 K 和 N_c 固定时, 如果磁路系统未达到磁饱和, B 与 I_c 近似呈线性关系, 称为磁场线圈电流曲线. 图 5 为磁安特性曲线与磁场线圈电流曲线交点稳定特性分析示意图. 图中曲线 1 为磁安特性曲线, 曲线 2 为磁场线圈电流曲线, 两条曲线的交点 M_1, M_2 和 M_3 即为自励磁运行模式下的推力器放电工作点.

首先分析 M_1 点, 假如某一时刻因为某种扰动, 放电电流由 I_{M1} 增大至 I_2 , 那么放电工作点由 M_1 点移动至 A 点. 由于工作在自励磁模式下, 所以电磁线圈电流也变为 I_2 . 线圈电流 I_2 对应于磁场线圈电流曲线上的 A_1 点, 此时 A_1 点磁场 B_2 小于 A 点磁场 B_3 . 放电工作点会由 A 点向 A_2 点移动, A_2 点放电电流小于 A 点放电电流, 这是一个负反馈过程. 另一方面, 假如某一时刻因为某种扰动, 放电电流由 I_{M1} 减小至 I_1 , 放电工作点会由 M_1 点移动至 C 点. 由以上相同分析方法可知, 放电工作点会由 C 点移动至 C_2 点, C_2 点的放电电流大于 C 点放电电流, 这同样是一个负反馈过程. 所以 M_1 点是稳定的放电工作点.

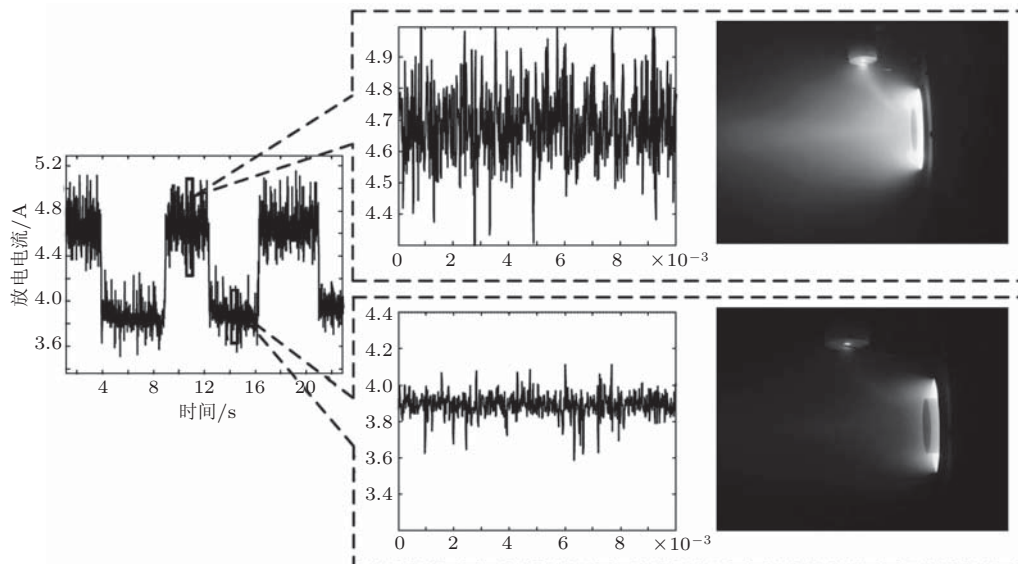


图 4 自励磁模式双稳跳变电流及对应的羽流

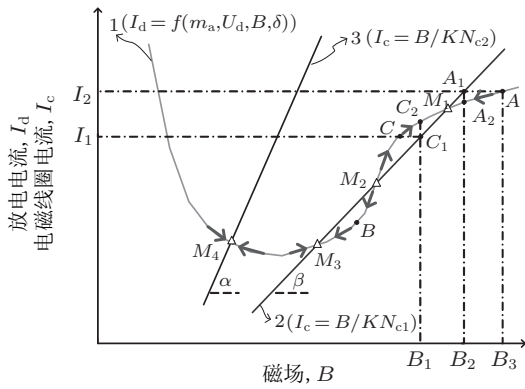


图5 磁安特性曲线与磁场线圈电流曲线交点分析示意图

同理, M_3 点也是稳定的放电工作点. M_2 点性质则不同于 M_1 和 M_3 点, 假如放电工作点由 M_2 点变化到 C 点, 那么工作点会由 C 点继续移动至 M_1 点. 如果放电工作点由 M_2 点变化到 B 点, 则工作点会由 B 点继续移动至 M_3 点. 所以 M_2 点为非稳定放电工作点.

如果初始放电工作点稳定在 M_1 点, 某时受到较大的扰动而使工作点由 M_1 点越过 M_2 点而到达 B 点, 那么工作点会继续移动并稳定至 M_3 点. 假如初始放电工作点稳定在 M_3 点, 某时受到较大的扰动而使工作点由 M_3 点越过 M_2 点而到达 C 点, 那么工作点会继续移动并稳定至 M_1 点. 对应实验现象, 自励磁放电工作点会在两个不同数值之间往复跳变. 准确地说, M_1 和 M_3 点为小偏差范围内的稳定平衡工作点.

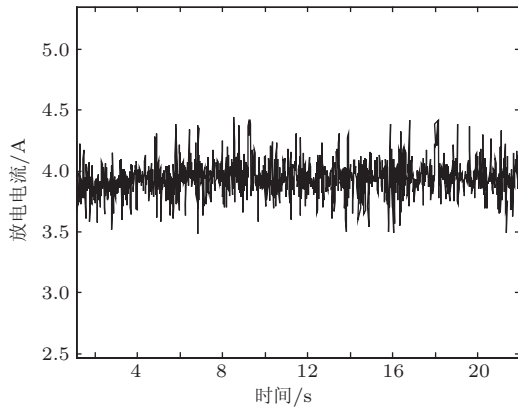


图6 自励磁模式稳定放电电流

图5中曲线1与曲线2的交点数目即为方程组(3)解的数目. 为了稳定自励磁模式的放电工作点, 可以把曲线2移动至曲线3的位置. 曲线3斜率大于曲线2斜率, 即 $\tan \alpha > \tan \beta$. 曲线1与曲线3

仅有唯一交点 M_4 , 可以判断 M_4 点也是稳定放电工作点. 为了保证通道内最优磁场不变, 通过同比例调整线圈匝数的方法可以把曲线2移动至曲线3的位置. 经过调整的P70推力器电磁线圈匝数分别为: 外线圈94匝、内线圈151匝和附加线圈56匝. 在同样的实验条件下, 自励磁模式放电电流稳定在3.9 A且低频振荡较小, 推力效率为49.4%, 羽流发散半角 11.8° , 比冲2281.8 s, 推力60.4 mN, 放电电流如图6所示.

6 自励磁模式一维仿真模型

6.1 流体模型的建立

为了深入研究自励磁模式放电双稳态机理, 建立一维流体动态数学仿真模型. 假设霍尔效应推力器通道长度为 L , 沿通道长度为 x 轴, $x = 0$ 为阳极处, $x = L$ 为放电通道出口处. 模型中的主要变量是离子密度 $n(x, t)$ (由于等离子体的准电中性, 电子密度等于离子密度)、离子速度 $V(x, t)$ 、原子密度 $n_a(x, t)$, 以及放电电流 $J(t)$. 模型方程包括离子连续方程

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \frac{\partial nV}{\partial x} = \beta nn_a, \quad (4)$$

式中, β 为电离率 (m^3/s).

离子动量方程

$$\frac{\partial nV}{\partial t} + \frac{\partial nV^2}{\partial x} = \frac{en}{M}E + \beta nn_a V_a, \quad (5)$$

式中, e 为基本电荷 (库仑 C), E 为电场强度 (V/m).

依据欧姆定律的电场方程

$$E = \frac{J/A - enV}{\sigma(x, t)}, \quad (6)$$

式中, A 为通道截面积 (m^2).

原子连续方程

$$\frac{\partial n_a}{\partial t} + V_a \frac{\partial n_a}{\partial x} = -\beta nn_a, \quad (7)$$

式中, V_a 为原子速度 (m/s , $V_a = \text{const} > 0$).

电流回路方程

$$L_c \frac{dJ}{dt} + RJ + \int_0^L E dx = U, \quad (8)$$

式中, U 为电源电压 (V), L_c 为电感 (H), R 为电阻 (Ω).

在方程(6)中, 等离子体传导率 $\sigma(x, t)$ 只依赖于径向磁场 $H(x, t)$, 且均是时间 t 函数, 为动态变量,

$$\sigma(x, t) = \sigma_0 \left(\frac{H_0}{H(x, t)}, t \right)^2, \quad (9)$$

其中 $H_0(L, t)$ 为通道出口处的磁场强度, $H(x, t)$ 为磁场沿通道的分布,

$$H(x, t) = H(H_0(h_0 + (1 - h_0)(x/L)^2), t), \quad (10)$$

式中, $h_0 = H(0, t)/H_0$.

模型的边界条件即为阳极处的参数值,

$$\begin{aligned} n(0, t) &= n_0, \\ n_a(0, t) &= n_{a0}, \\ V(0, t) &= V_0 > 0. \end{aligned} \quad (11)$$

由于自励磁模式下放电电流与磁场之间存在直接耦合反馈作用, 放电电流即励磁电流, 为此引入耦合约束关系式

$$H'(x, t) = KJ(t)H(x, t), \quad (12)$$

式中, K 为常数, 用来表示放电电流与磁场间的耦合强度.

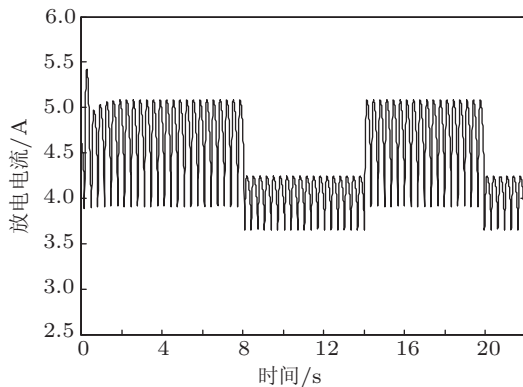


图7 双稳态放电电流

令上述一维流体模型中对时间的偏导数 $\frac{\partial}{\partial t} = 0$, 就得到一维稳态模型. 求解采用 Matlab 中的 Simulink 动态仿真工具, 对微分方程采用半离散化的差分方法.

6.2 计算结果与分析

(12) 式中引入的常数 K 可表征放电与磁场的耦合强度. 当 $K = 2$ 时, 计算得到的放电电流波形如图 7 所示, 放电电流在约 4.5 A 和 3.9 A 两个工

作点之间跳变, 3.9 A 工作点下放电电流振荡更小. 当 $K = 0.05$ 时, 放电电流如图 8 所示, 放电稳定并没有出现跳变情形. 在图 5 中, 磁场线圈电流曲线 2 移动至曲线 3 位置, 实际上即为减弱放电与磁场的耦合强度. 仿真模型的建立与计算分析, 进一步证实了自励磁模式双稳态现象的内在机理.

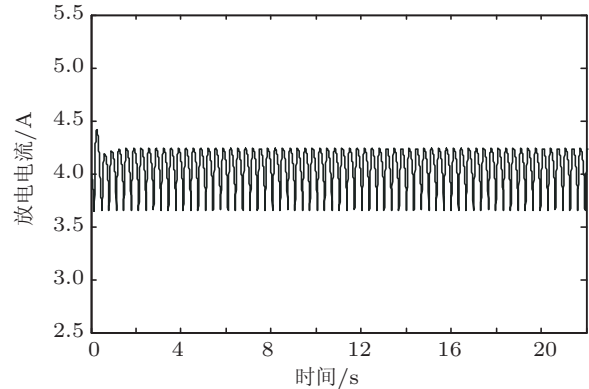


图8 稳定放电电流

7 结论

霍尔效应推力器在自励磁模式下运行, 可以减少电源数量, 降低推进系统重量, 改善整个推进系统的可靠性和提高卫星的有效载荷. 然而, 在自励磁工作模式下, 实验发现放电工作点往复跳变, 严重影响了推力器的放电物理过程及输出特性. 本文通过分析推力器放电磁安特性曲线与励磁电流曲线的相互关系, 给出了放电工作点往复跳变的物理机理. 在此基础上提出了采用调整励磁线圈匝数, 从而改变励磁电流曲线斜率使推力器稳定工作于单放电工作点的方法. 通过放电电流与磁场之间的耦合反馈关系进行了物理上的解释, 且得到了实验证实. 建立的自励磁一维流体动态数学仿真模型, 通过改变放电与磁场的耦合强度, 复现了放电电流往复跳变的实验结果, 并进一步证实采用磁安特性曲线与磁场线圈电流曲线交点稳定性分析方法的可行性. 自励磁模式下, 如果放电与磁场耦合过强, 会引入更为复杂的非线性效应. 对双稳态现象的研究, 有利于更深入的认识霍尔效应推力器通道内等离子体放电与磁场之间的非线性耦合过程.

- [1] Morozov A I, Savelyev V V 2000 *Reviews of Plasma Physics* (Volume 21) (New York: Plenum Publishers) 210
- [2] Zhurin V V, Kaufman H R, Robinson R S 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** R15
- [3] Liu H, Wu B Y, E P, Duan P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7201 (in Chinese) [刘辉, 吴勃英, 鄂鹏, 段萍 2010 物理学报 **59** 7201]
- [4] Walker M L R, Gallimore A D 2007 *Journal of Propulsion and Power* **23** 528
- [5] Linnell J A, Gallimore A D 2006 *Journal of Propulsion and Power* **22** 1402
- [6] Book C F, Walker M L R 2010 *Journal of Propulsion and Power* **26** 1036
- [7] Ross J L, Sommerville J D, King L B 2010 *Journal of Propulsion and Power* **26** 1312
- [8] E P, Duan P, Wei L Q, Bai D Y, Jiang B H, Xu D G 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 8676 (in Chinese) [鄂鹏, 段萍, 魏立秋, 白德宇, 江滨浩, 徐殿国 2010 物理学报 **59** 8676]
- [9] Hruby V, Pote B, Gamero-Castano M, Kolencik G, Byrne L, Tedrake R, Delichatsios M 2001 *27th International Electric Propulsion Conference*, Pasadena, CA, October 15–19, 2001 IEPC-01-66
- [10] Gray H, Provost S, Glogowski M, Demaire A 2005 *29th International Electric Propulsion Conference*, Princeton University, October 31–November 4, 2005 IEPC-2005-082
- [11] Yamamoto N, Komurasaki K, Arakawa Y 2005 *Journal of Propulsion and Power* **21** 870
- [12] Tamida T, Nakagawa T, Suga I, Osuga H, Ozaki T, Matsui 2007 *Journal of Applied Physics* **102** 043304

Study on the mechanism of Hall effect thruster discharge with bistable state*

Han Ke^{1)2)†} Jiang Bin-Hao²⁾ Ji Yan-Chao²⁾

1) (School of Computer and Information Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China)

2) (School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

(Received 5 May 2011; revised manuscript received 3 June 2011)

Abstract

Experimental results indicate that there exist two stable discharge operation points in a self-excited mode Hall effect thruster. During the operation, the discharge operation point jumps to and fro between two values, which greatly influences the physical process of plasma discharge in the thruster channel and the comprehensive performance of thrusters. In this paper, by using the relationship between discharge magneto-ampere characteristic curve and magnetic field coil current curve, we propose the physical mechanism of forming the discharge bistable characteristic. On the basis of the mechanism, a method of stabilizing the single discharge operation point is presented through changing the slope of magnetic field coil current curve. The physical explanation is given through established one-dimensional dynamic fluid model for self-excited mode, and the results are approved by the self-excited experiment.

Keywords: Hall effect thruster, self-excited mode, bistable state, one-dimensional fluid model

PACS: 52.75.Di

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60871035) and the Scientific and Technology Research of Heilongjiang Province Education Commission, China (Grant No. 12511138).

† E-mail: hanke@hit.edu.cn