

文章编号: 1000-8055(2009)06-1389-07

离子发动机栅极系统电子回流数值模拟

钟凌伟¹, 刘 宇¹, 顾 左², 李 娟²,
江豪成², 王海兴¹, 汤海滨¹

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191;
2. 兰州物理研究所, 兰州 730000)

摘 要: 以离子发动机栅极系统为研究对象, 基于网格质点法(PIC), 建立了二维数值计算模型. 利用模型能够较好地模拟离子在栅极系统中的运动, 得到栅极系统周围的电势分布以及离子和电子的密度分布等. 进一步的计算结果表明, 在几何参数一定的条件下, 加速栅极电压以及加速栅极孔径对加速栅极下游的电子密度分布有重要的影响. 选取合适的加速栅极电压和孔半径, 可以阻止电子回流的产生, 使离子发动机获得较佳的性能.

关 键 词: 离子发动机; 栅极系统; 电子回流

中图分类号: V439

文献标识码: A

Numerical simulation of electron backstreaming in ion thruster optics system

ZHONG Ling-wei¹, LIU Yu, GU Zuo², LI Juan²,
JIANG Hao-cheng², WANG Hai-xing¹, TANG Hai-bin¹

(1. School of Astronautics,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Based on particle-in-cell method, a two-dimensional numerical model has been developed to investigate the ion beam extraction phenomena through the optics system of ion thruster. According to the calculation results, the distribution of electric potential between screen grid and accelerator grid, the ion and electron spatial distribution were obtained for various accelerator voltages and accelerator grid radii. The simulation results show good agreement with the experimental data. The results indicate that the accelerator voltage and the accelerator radius have great influences on electron backstreaming. Electron backstreaming happens when the absolute value of accelerator voltage is more negative. The electrons move downstream with the decrease of accelerator voltage. Moreover, electron backstreaming occurs with the enlargement of accelerator radius. Under moderate accelerator voltage and accelerator radius, the electron backstreaming will not happen, and the ion thruster will reach its better performance.

Key words: ion thruster; optics system; electron backstreaming

收稿日期: 2008-06-14; **修订日期:** 2008-10-24

基金项目: 真空低温技术与物理国家级重点实验室基金(9140C5504020704); 国家自然科学基金(10805004)

作者简介: 钟凌伟(1980-), 男, 河北易县人, 博士生, 主要从事航天推进系统研究. E-mail: zhonglw@sa.buaa.edu.cn

离子发动机为电推进的一种,也是目前发展比较成熟的一种电推进类型.离子发动机具有比冲高、效率高、寿命长及体积小等优点,可以应用于轨道保持、轨道转移、阻力补偿、姿态控制以及行星际飞行主推进等大部分空间推进任务^[1].

离子发动机工作时,一定流量的推进剂进入电离室,受到中空阴极发射电子的轰击而产生离子.离子经栅极系统聚焦、加速喷出,产生推力.在电离室内,阳极电势高于屏栅极电势,所以电子被限制在电离室内.为了防止发动机带上过低的负电压,在栅极系统下游,中和器发射电子,中和从栅极系统中引出的离子.因此,从离子发动机喷出的推进剂呈等离子体状态.

加速栅极的作用主要有两个:一是有效地引出经屏栅极聚焦的离子;二是防止加速栅极下游的电子向电离室运动,即防止电子回流.引起电子回流的因素很多,主要包括栅极系统的几何参数和所施加电压以及电离室等离子体参数等^[2].电子回流对离子发动机的影响主要有:降低离子发动机效率;消耗能量,但不产生推力;使电离室过热,降低电离室内永久磁铁的性能.因此,要尽量避免电子回流的发生.

目前,研究离子发动机栅极系统工作机制的主要途径是实验和数值模拟. Aston G. 等人用静电探针测得了各种工况下屏栅极前的电势分布图^[3]. 鉴于实验成本过高和实验时间太长,数值模拟成为研究离子发动机栅极系统的主要方法.国外已经开发出了离子发动机栅极系统二维和三维数值计算程序,模拟离子在栅极系统电场作用下的运动,并进行了离子发动机栅极系统失效评估,模拟结果和实验数据进行了对比^[4-6].国内也开始了对离子发动机栅极系统的数值模拟研究^[7].

本文采用 Particle-in-cell (PIC) 方法,对离子发动机栅极系统进行了模拟和分析,并着重研究了不同的加速栅极电压及加速栅极孔径对栅极系统电子回流的影响.

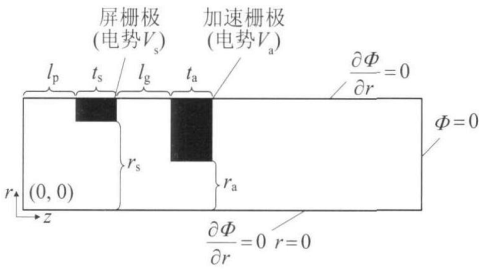
1 模型与计算方法

1.1 数值模型

对于双栅极离子发动机来说,栅极系统由屏栅极和加速栅极组成,栅极均为很薄的电极板,一般由钼或碳碳复合材料制作而成.栅极板上有成千对栅极孔,通常呈六角形均匀分布.

现有设备难以同时模拟栅极上所有的栅极孔.考虑到栅极孔均匀分布和轴对称条件,选取一

对栅极孔的 1/2 进行模拟即可对栅极系统工作机制进行研究.本文选取的计算区域如图 1 所示,图上同时给出了计算的边界条件和一些特征尺寸的符号表示.



l_p 屏栅极上游面到模拟区域前端的距离;
 l_g 屏栅极下游面到加速栅极上游面的距离;
 t_s 屏栅极厚度; t_a 加速栅极厚度;
 r_s 屏栅极孔半径; r_a 加速栅极孔半径;
 V_s 屏栅极电势; V_a 加速栅极电势.

图 1 计算区域

Fig. 1 Computational domain

在本文的模拟中,离子束运动方向为 z 轴.左边界位于电离室内部,因此, l_p 要足够大,以便将等离子体鞘层包括在内,计算时给定边界的电势、离子和电子的温度等参数.下边界为栅极孔中心轴线,右边界为计算域出口,电势为 0. 上、下两个边界均为 Neumann 型边界条件.屏栅极和加速栅极均为等电势体,在计算过程中其电势保持不变.

栅极几何参数、工作电压以及电离室等离子体参数等如表 1 所示.

表 1 几何与工作参数
Table 1 Geometric and operating parameters

栅极参数	数值	电离室参数	数值
l_p / mm	0.7	等离子体电势 V_p / V	30
t_s / mm	0.5	等离子体温度 T / K	500
l_g / mm	0.7	等离子体密度 $n_0 / 10^{17} \text{m}^{-3}$	2.0
t_a / mm	0.5	电子密度 $n_e / 10^{17} \text{m}^{-3}$	2.0
r_s / mm	1.1	离子密度 $n_i / 10^{17} \text{m}^{-3}$	2.0
r_a / mm	0.5 ~ 0.9	电子能量 T_{e0} / eV	4.5
V_s / V	1000	加速栅下游电子 能量 T_∞ / eV	1.0
V_a / V	-150 ~ -850	加速栅下游电子 密度 $n_e / 10^{15} \text{m}^{-3}$	1.5

离子在栅极系统中运动时,自感磁场的影响可忽略不计.因此,求解电磁场的 Maxwell 方程组可以简化为二维轴对称静电场 Poisson 方程

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e) \tag{1}$$

式中 Φ 为电势, e 为电子电量, ϵ_0 为真空介电常数, n_i 为离子数密度, n_e 为电子数密度.

电场强度 E 由下式给出

$$E = -\nabla \Phi \tag{2}$$

离子的运动方程由牛顿第二运动定律给出

$$\begin{aligned} m_i \frac{dv_i}{dt} &= e E \\ \frac{dx}{dt} &= v_i \end{aligned} \tag{3}$$

式中 m_i 为离子的质量, v_i 为离子的速度, x 为离子的位移.

假设等离子体中的电子为恒温的无碰撞流,屏栅极上游以及加速栅极下游的电子数密度服从 Boltzmann 分布.

在屏栅极孔及其上游,电子数密度分布为

$$\begin{aligned} n_e &= n_0 \exp\left\{\frac{\Phi - \Phi_0}{T_{e0}}\right\}, & \Phi < \Phi_0 \\ n_e &= n_0 \left(1 + \frac{\Phi - \Phi_0}{T_{e0}}\right), & \Phi > \Phi_0 \end{aligned} \tag{4}$$

式中 Φ 为屏栅极上游边界的电势,在本文中为屏栅极电势与电离室等离子体电势之和.

在加速栅极孔下游,电子密度分布计算如(4)式所示,只是等离子体密度与参考电势不同.

1.2 粒子模拟方法

本文采用网格质点法^[8]模拟离子在栅极系统间的运动.其基本思路如图 2 所示.在每一个时间步内,一定数目的离子进入计算区域,此数目由发动机的束流密度决定.

本模拟中,离子在节点上的电量和浓度通过面积权重法计算.如图 3 所示,对某网格中的离子 P ,将其电量按其位置分配到网格的 4 个节点,分配方案为

$$\begin{aligned} q_A &= q \frac{bc}{\Delta r \Delta z} \\ q_B &= q \frac{cd}{\Delta r \Delta z} \\ q_C &= q \frac{da}{\Delta r \Delta z} \\ q_D &= q \frac{ab}{\Delta r \Delta z} \end{aligned} \tag{5}$$

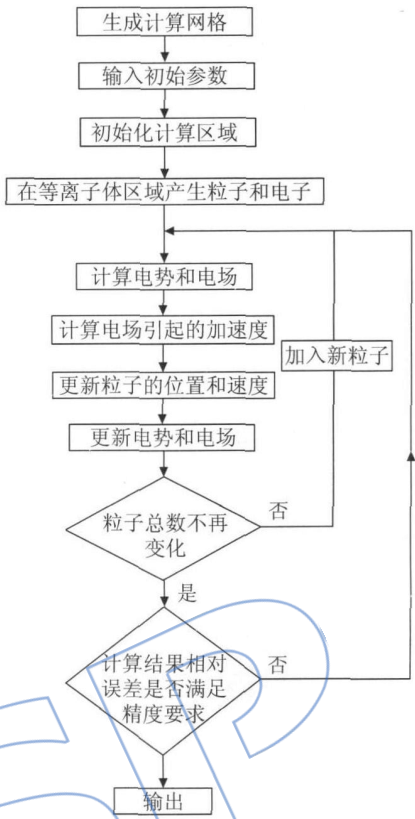


图 2 网格质点法流程图

Fig.2 Flowchart diagram of PIC method

式中 q 为离子所带电量,下标表示相应节点上的物理量, Δr 和 Δz 分别为径向和轴向网格尺寸, a, b, c 和 d 定义见图 3.

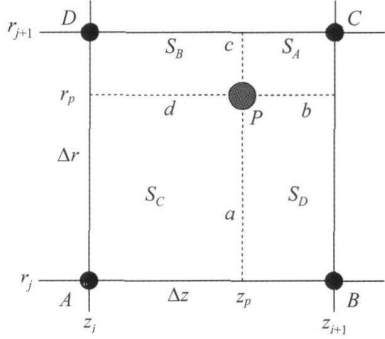


图 3 电量插值示意图

Fig.3 Schematic of charge interpolation

本文采用氩离子作为模拟粒子,离子从左边边界径向随机位置进入模拟区域.此边界上离子的轴向速度满足 Bohm 判据^[9],径向速度满足 Maxwellian 分布.在程序中,离子进入模拟区域位置以及离子速度方向通过 0~1 之间均匀分布的随机数实现.程序采用电脑内部时间作为随机数种子,避免产生相同的随机数.

2 计算结果

2.1 典型结果及分析

图 4 是加速栅极电压取 - 500 V 时,计算区域内的电势等值线图(粗实线)和屏栅极上游的电场线(带箭头虚线).由图中可以看出,屏栅极上游的电势等值线呈凸弧形.在屏栅极上游,离子的速度较小,其运动方向主要取决于电场线方向,离子在屏栅极附近经历聚焦过程.当离子的轴向位置到达加速栅极附近时,离子的速度很大,只要加速栅极电压选择合适,离子不会撞击到加速栅极,而是通过加速栅极孔.因为等离子体电势高于屏栅极电势,所以电子被限制在电离室内,最终被电离室阳极吸收.

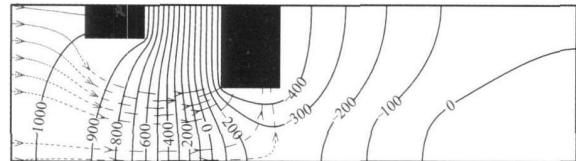
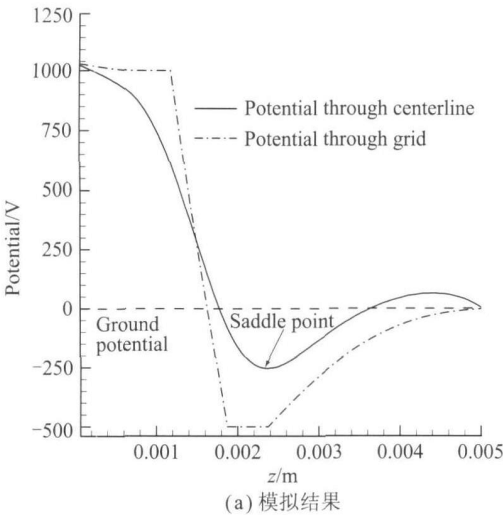


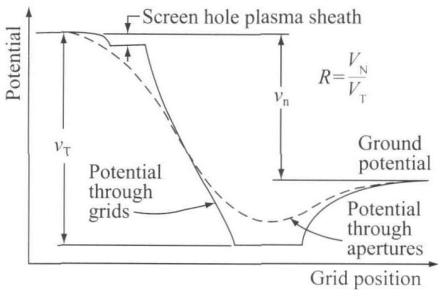
图 4 电势等值线图 (单位:V)
Fig. 4 Potential contours (Unit:V)

图 5 是栅极孔中心线和模拟区域上边界电势沿轴向位置变化曲线图.模拟结果和文献[3]中的趋势相同,说明程序能较好地模拟栅极系统的电势分布.栅极孔轴线电势在加速栅极附近形成鞍点,鞍点电势阻止了下游电子向栅极内部的回流,保证了栅极系统的正常工作.

图 6 是电子对数密度等值线图,由等值线的分布情况也可以看出,电子被限制在加速栅极下游较远处,这和前面的分析一致.



(a) 模拟结果



(b) 文献报道实验结果^[3]
图 5 栅极孔轴线及上边界电势变化曲线
Fig. 5 Potential variation of grid aperture axis and top boundary

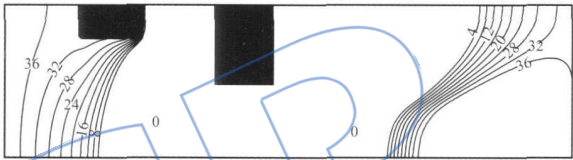


图 6 电子对数密度等值线图 (单位: m⁻³)
Fig. 6 Contours of electron logarithmic density (Unit: m⁻³)

将屏栅极上游模拟电势等值线图和文献报道实验结果对比如图 7 所示.实验等值线间隔为 1 V,模拟等值线间隔为 4 V.因为栅极系统的几何尺寸以及等离子体参数的不同,所以两者之间有差别.但是屏栅极前的等值线图趋势以及形状很相似.这说明程序能较好地模拟离子在屏栅极附近的聚焦过程.

综上,所建立的物理模型可以较好地模拟离子在栅极系统中的运动.

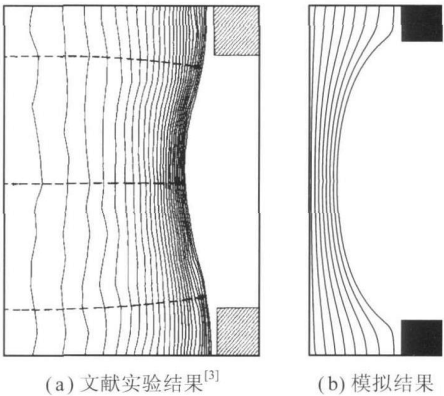


图 7 模拟结果和文献报道实验结果对比
Fig. 7 Comparison of simulation results and experimental data

2.2 改变加速栅极电压

加速栅极电压决定着栅极系统的性能. 不改变表 1 中的其它参数,将加速栅极电压从 - 150 V 逐渐减小到 - 850 V,分别得到栅极系统模拟结果. 在不同的加速电压下,栅极系统电子对数密度等值线变化如图 8 所示.

由图 8 可以看出,当加速栅极上的负电压绝对值较小时,在加速栅极附近有电子分布. 此时,栅极孔轴线及上边界电势变化曲线如图 9 所示. 由图可以看到,鞍点电势大于参考电势. 此时,大量电子将流向栅极系统,形成较强的电子回流,影响离子发机电离室和栅极系统的性能.

随着加速栅极电压绝对值的增大,电子分布逐渐远离加速栅极向其下游移动. 此时,鞍点电势小于参考电势,如图 5 所示. 鞍点形成的势垒阻止了电子向栅极系统的流动,只有能量很高的电子才能越过这个势垒. 因为电子速度服从 Boltzmann 分布,能量较高的电子很少,所以此时的电子回流基本上可以忽略.

同时,由图 8 可以看到,当加速栅极负电压绝对值较小时,屏栅极上游的电子密度等值线凹向栅极系统下游方向,说明栅极系统的聚焦效果较差. 随着加速栅极负电压绝对值的增大,栅极系统的聚焦效果逐渐增强. 但是进一步减小加速栅极电压会使栅极系统出现过聚焦. 所以,综合考虑电子回流、栅极系统聚焦效果以及发动机推力性能等,存在一个最佳的加速栅极电压范围.

在图 5(b)中,定义了净总加速电压比

$$R = \frac{V_N}{V_T} \tag{6}$$

式中 V_N 为净加速电压,为屏栅极电压与电离室内等离子体相对屏栅极电势之和. V_T 为总加速电压,为净加速电压与加速栅极电压之差.

R 可以反映栅极系统对离子聚焦和散焦的程度, R 值增大有利于减小束散角,但要防止电子回流. 文献[10]中给出了判断电子回流的半经验公式

$$\left(1 - R_{\max}\right) \frac{l_e}{d_a} \approx 0.2 \exp\left(-\frac{l_a}{d_a}\right) \tag{7}$$

$$l_e = \sqrt{l_g^2 + r_s^2} \tag{8}$$

式中 l_e 为有效加速长度, d_a 为加速栅极孔直径.

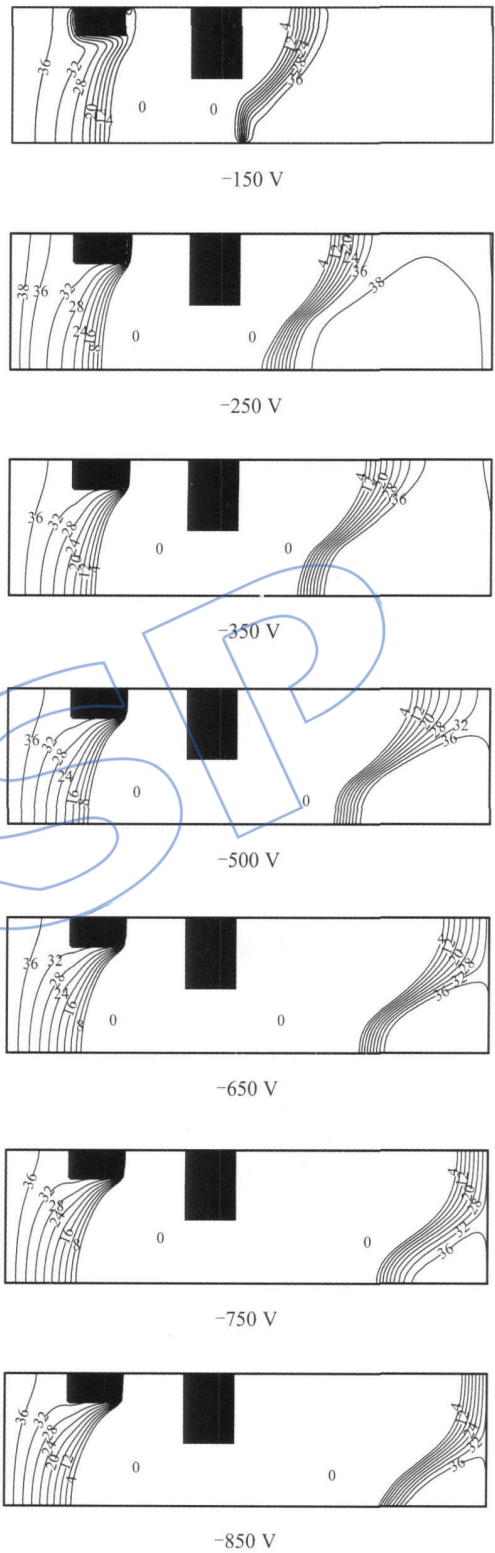


图 8 不同加速栅极电压下电子对数密度分布
(单位: m^{-3})

Fig. 8 Electron logarithmic contours at different accelerator voltages (Unit: m^{-3})

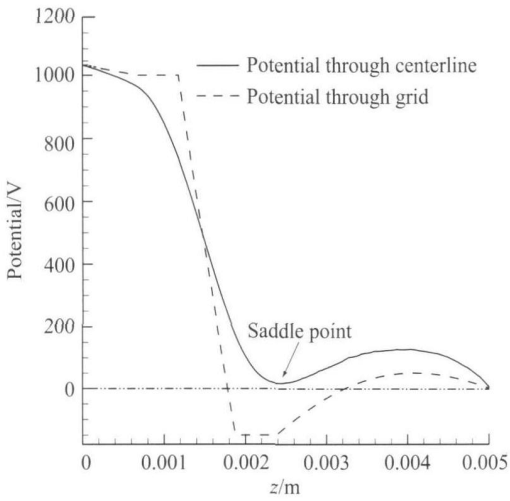


图 9 $V_a = -150\text{ V}$ 时束流轴线及上边界电势变化曲线

Fig. 9 Potential along beamlet centerline and up-boundary at $V_a = -150\text{ V}$

由式(7)和(8)得到本论文中 $R_{\max}$ 为 0.84. 因此,对于本栅极系统,最佳的 R 应小于 0.84. 再结合图 8 知,当加速栅极电压为 -500 V 时不会出现电子回流,同时栅极系统的聚焦性能较好,此时, R 约为 0.67 左右.

2.3 改变加速栅极孔径

图 10 为加速栅极电压为 -300 V 时,加速栅极孔逐渐增大时的电子对数密度分布图. 当加速栅极半径较小时,加速栅极后面的电子分布离栅极系统较远,此时不会形成电子回流. 随着加速栅极半径的逐渐增大,加速栅极后面的电子分布越来越靠近栅极系统,直到形成电子回流.

图 11 是不同加速栅极半径下,栅极孔轴线电势变化曲线. 由图中可以清晰看出,当加速栅极半径较小时,在加速栅极附近轴线上的鞍点电势绝对值较大,此鞍点的存在可以阻止电子向栅极系统流动. 只有极少量能量极高的电子能越过鞍点电势向栅极系统运动.

随着加速栅极孔半径的增大,鞍点电势的绝对值变小,甚至会到参考电势附近. 此时,将有数目可观的电子向栅极系统方向运动,形成电子回流.

模拟结果可知,栅极孔径变大会增加电子回流的可能性. 但是,考虑到离子聚焦性能等因素,加速栅极孔径不能太小. 文献[10]给出加速栅极

和屏栅极孔径之比为 0.6~0.8. 根据本文中栅极系统的几何参数和模拟结果,加速栅极孔半径取为 0.65 mm.

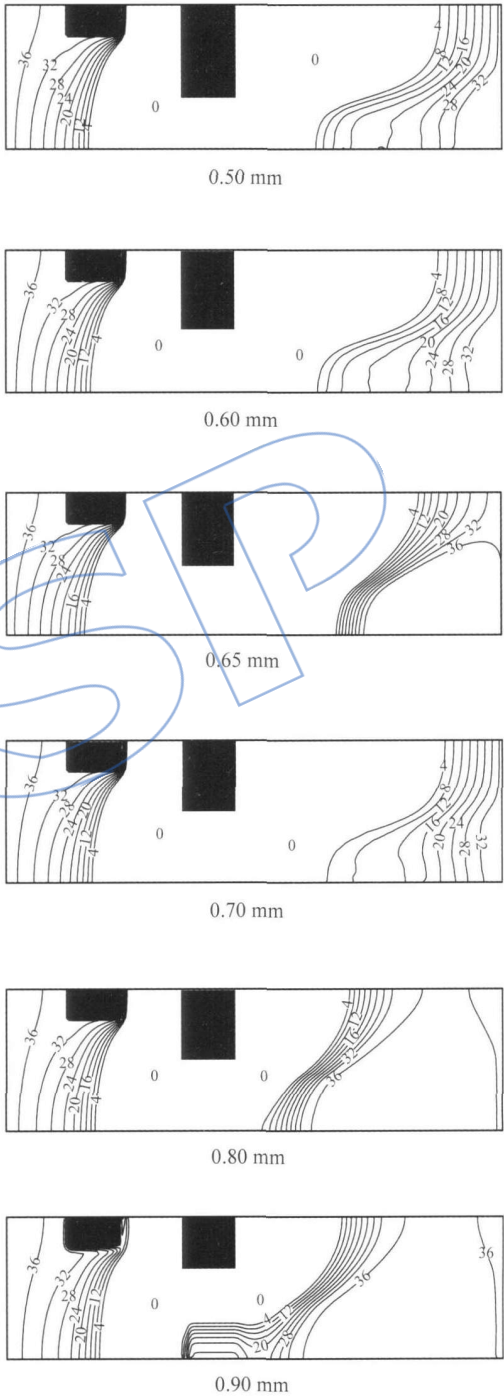


图 10 不同加速栅极半径时电子对数密度分布 (单位: m^{-3})

Fig. 10 Electron logarithmic density at different accelerator radius (Unit: m^{-3})

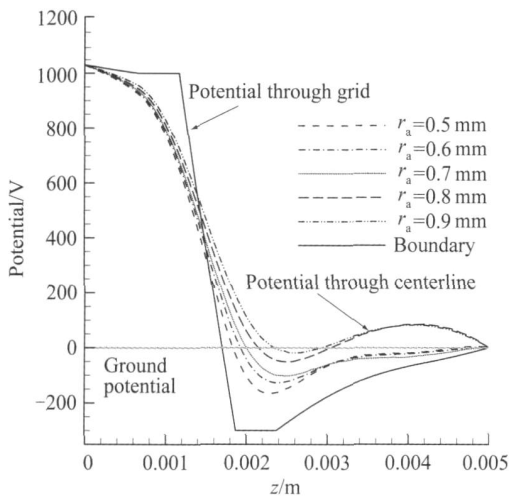


图 11 不同加速栅极半径时栅极孔电势曲线

Fig. 11 Potential variation of grid aperture at different accelerator radii

3 结 论

- 1) 程序可以较好地模拟离子在栅极系统中的运动.
- 2) 加速栅极电压对加速栅极下游的电子分布有较大的影响. 加速栅极电压绝对值减小会增大电子回流可能性.
- 3) 加速栅极孔径是影响栅极系统下游电子回流的另一个主要因素. 随着加速栅极孔径的增大,电子回流的可能性随之变大.
- 4) 选择加速栅极电压和加速栅极孔径要综合考虑栅极引出离子性能、离子对加速栅极的碰

撞以及栅极系统下游电子回流等各种因素.

参考文献:

[1] Frisbee R H. Advanced propulsion for the XXIst century [R]. AIAA-2003-2589 , 2003.

[2] Wang J , Anderson J , Polk J. Three-dimensional particle simulations of ion optics plasma flow [R]. AIAA-1998-3799 , 1998.

[3] Aston G , Wilbur P J. Ion extraction from a plasma [J]. Journal of Applied Physics , 1981 ,52 (4) :2614-2626.

[4] Peng X , Keefer D , Ruyten W M. Plasma particle simulation of electrostatic ion thruster [J]. Journal of Propulsion and Power , 1992 , 8 (2) :361-366.

[5] Okawa Y , Takegahara H. Particle simulation on ion beam extraction phenomena in an ion thruster [R]. IEPC-99-146 , 1999.

[6] Wang J , Polk J , Brophy J , et al. Three-dimensional particle simulations of ion optics plasma flow and grid erosion [J]. Journal of Propulsion and Power , 2003 , 19 (6) :1192-1199.

[7] 刘畅. 离子发动机光学系统数值仿真和实验研究[D]. 北京:北京航空航天大学,2007.
LIU Chang. Numerical simulation and experimental investigation of ion thruster optical system [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics , 2007. (in Chinese).

[8] 邵福球. 等离子体粒子模拟[M]. 北京:科学出版社, 2002 : 9-11.

[9] 李定,陈银华,马锦秀,等. 等离子体物理学[M]. 北京:高等教育出版社,2006:184.

[10] 刘金声. 离子束技术及应用[M]. 北京:国防工业出版社, 1995 :48-55.