

氙离子推力器束流分布特性研究

陈琳英, 宋仁旺

(兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 建立了离子推力器束流分布的高斯模型, 以 200mm 氙离子推力器为例, 在不同工作环境下对推力器束流分布进行了数值模拟, 并通过试验测量了推力器引出切面不同位置 (轴向 $z=50\text{mm}$, $z=100\text{mm}$) 下的径向束电流密度和束离子密度分布。通过对数值模拟结果与试验测量结果的比较, 误差为 17%, 认为数值模拟结果与试验测量结果吻合较好。表明离子推力器引出束流呈轴对称分布, 在推力器出口附近, 束离子密度很大, 越往下游, 密度越小且束流出现发散。

关键词: 离子推力器; 束流分布; 模拟计算; 试验测量

中图分类号: V439.1

文献标识码: A

文章编号: (2007) 04-0020-03

Research of xenon ion thrusters beam current distribution characteristic

Chen Linying, Song Renwang

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: In this paper, the gauss model of the ion thruster beam current distribution was set up. The beam current distribution numerical simulation was performed by this model at different work conditions of 200mm xenon ion thruster. The beam current density and the ion density radial distribution were measured at different position ($z=50\text{mm}$, $z=100\text{mm}$) of the ion thruster exit in the thruster tests. The comparison between the simulation results and experimental data displaces good agreement. The error is 17%. The test results also reveal the axial symmetzical distribution of the exit ion beam current. High ion density is located around the thruster exit. At the downstream, the ion density decteases and the beam becomes divergence.

Key words: ion thruster; beam current distribution; simulation calculation; experimental measurement

收稿日期: 2007-04-26; 修回日期: 2007-06-11。

作者简介: 陈琳英 (1976—), 女, 博士, 研究领域为空间电推进技术。

1 引言

离子推力器是利用电能加热、电离和加速推进剂获得反作用力的推进装置。束流中的高能离子是影响推力器工作性能的主要因素。推力器引出束流的束密度大小直接影响推力器所产生的推力,决定推力器工作的有效性。因此,研究高能束离子分布对于推力器性能优化具有非常重要的意义。

2 基本方程

离子推力器产生的束流分布模型有两种:一种是以点源模型为基础,认为服从抛物线分布;另一种是高斯分布。

如果径向束流密度分布符合高斯分布,那么,束电流密度分布可以表示为^[1]:

$$j_{bi} = \frac{I_b}{\xi^2 \pi r_b^2} \exp\left[-\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right] \quad (1)$$

束离子密度为:

$$n_{bi} = \frac{I_b}{\xi^2 \pi r_b^2 e v_{bi}} \exp\left[-\left(\frac{r}{r_b}\right)^2\right] \quad (2)$$

束离子速度表示为:

$$V_{bi} = \sqrt{\frac{2eV_b}{m_i}} \quad (3)$$

式中, $r_b = r_T + z \tan \alpha$; ξ 为高斯半峰宽比例系数,取 0.95; r_T 为推力器束径; r 为离子的径向位置; z 为离子轴向位置; α 为束发散角; e 为电子电量; m_i 为 Xe^+ 的质量; V_b 为束加速电位; I_b 为引出束流。

图 1, 2 是利用高斯模型计算得到 200mm 氙离子推力器出口 $z=50\text{mm}$ 处, 图 3, 4 是 $z=100\text{mm}$ 处, 不同径向位置下的束流密度和束离子密度分布。图中可以看到, 在束流 $I_b=0.9\text{A}$, $z=50\text{mm}$ 时, 束流密度峰值 $j_{bi}=25\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$; $z=100\text{mm}$ 时, $j_{bi}=20\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$ 。随着引出束流的不断增大, 束离子的电流密度和束离子密度的峰值也在增加。离推力器出口越远, 束离子密度和电流密度越小, 且峰宽变大, 即束流出现发散。

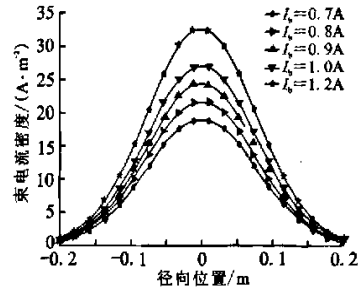


图 1 $z=50\text{mm}$, 束电流密度分布

Fig.1 $z=50\text{mm}$, beam current density distribution

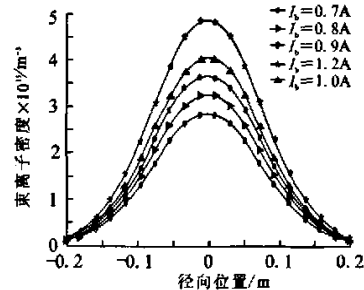


图 2 $z=50\text{mm}$, 束离子密度分布

Fig.2 $z=50\text{mm}$, beam ion density distribution

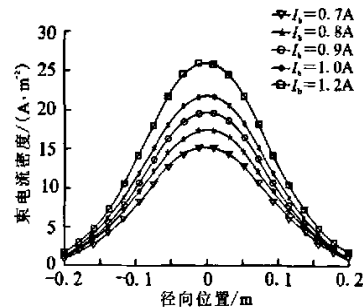


图 3 $z=100\text{mm}$, 束电流密度分布

Fig.3 $z=100\text{mm}$, beam current density distribution

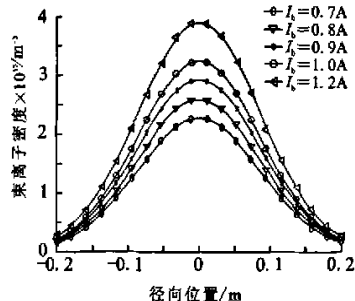


图 4 $z=100\text{mm}$, 束离子密度分布

Fig.4 $z=100\text{mm}$, beam ion density distribution

3 试验

200mm 氙离子推力器束流测量试验在 TS-6 真空系统中完成。整个试验系统由三部分构成：一是真空系统 (TS-6)；二是离子发动机系统；三是法拉第筒测量系统。首先，将法拉第筒安装在真空舱内的三维运动机构台上，调整法拉第筒的位置，使它的 z 轴方向对准推力器的中心轴线。当系统真空度达到 $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 时，启动发动机，进行束流测量实验。推力器屏栅电压 1200V，加速栅电压 -200V，引出束流 0.9A，轴向位置分别在 $z=50\text{mm}$ ， 100mm 。

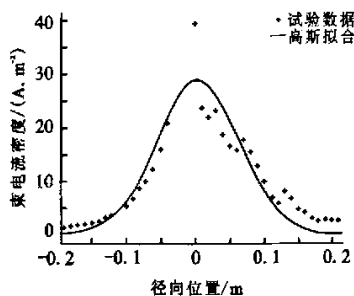


图 5 $z=50\text{mm}$ ，束电流密度分布

Fig.5 $z=50\text{mm}$ ，beam current density distribution

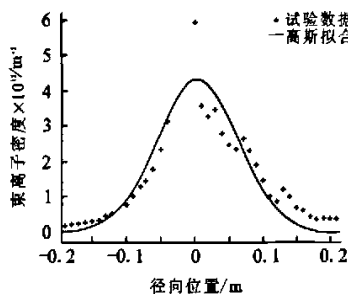


图 6 $z=50\text{mm}$ ，束离子密度分布

Fig.6 $z=50\text{mm}$ ，beam ion density distribution

图 5、7 分别是在 $z=50\text{mm}$ ， 100mm 时，利用法拉第筒测量到的径向束流密度分布值。图 6、8 是在 $z=50\text{mm}$ ， 100mm 下的径向束离子密度分布图，并对试验结果进行了高斯拟合。从图上结果可以看到径向束离子电流密度分布、束离子密度分布呈轴对称分布。在 $z=50\text{mm}$ 处，最大电流密度值为 $28 \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ；当 $z=100\text{mm}$ 处，最大电流密度值为 $26 \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ ；所以说，离推力器出口越近，离

子流越大。在 $z=50\text{mm}$ 处，即在推力器前方，离子密度产生一个很大的峰值。这说明在这个区域离子刚被引出，密度很大，再往下游，如 $z=100\text{mm}$ 时，峰值下降。

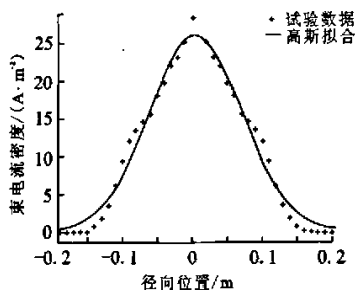


图 7 $z=100\text{mm}$ ，束电流密度分布

Fig.7 $z=100\text{mm}$ ，beam current density distribution

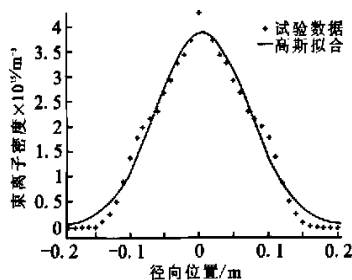


图 8 $z=100\text{mm}$ ，束离子密度分布

Fig.8 $z=100\text{mm}$ ，beam ion density distribution

4 结论

(1) 利用高斯模型计算得到的束分布与试验结果符合较好。高斯模型与试验数据误差约为 17%。由于在试验测量过程中高能束离子与真空系统中的本底中性气体产生电荷交换，形成氙离子；另外材料溅射形成的二次电子发射也会影响数据测量，使得实际测量值比模拟值偏大。

(2) 试验结果表明：离子推力器引出束流呈轴对称分布，在推力器出口附近，束离子密度很大，越往下游，密度越小且束流出现发散。

参考文献：

- [1] Wang J, Brophy J, Brinza D. 3-D simulations of NSTAR ion thruster plasma environment [R]. AIAA 96-3202.

(编辑：马杰)