

# 双级加速离子光学系统几何参数研究

贾连军, 张天平, 陈娟娟, 贾艳辉, 刘明正

兰州空间技术物理研究所真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000

**摘要** 针对双级加速离子光学系统的设计,开展了栅极几何参数对离子光学系统性能影响的研究。采用质点网格法和蒙特卡罗碰撞法开展栅极关键几何参数对束流引出能力、束流发散角、交换电荷(CEX)离子的截获影响规律研究;另外,还开展了不同比冲下束流发散角、碰撞交换电荷离子的变化趋势研究。研究表明,屏栅孔径对束流引出能力、束流发散角、CEX离子截获电流以及鞍点电势都有影响,随着屏栅孔径的增加,束流引出能力、束流发散角和鞍点电势呈上升趋势。加速栅孔径的变化对CEX离子得能量分布有影响,随着加速栅孔径的增大,截获的高能CEX离子逐渐减少,而随着加速栅厚度的增加,束流发散角、CEX离子的截获数量和能量呈上升趋势。在8000 s比冲下,加速级间距的改变对束流引出能力影响较小。另外,比冲对离子光学系统性能也有影响,比冲越高,束流发散角越小,且加速栅截获的CEX离子也越少。

**关键词** 测量;离子推力器;双级加速离子光学系统;质点网格法和蒙特卡罗碰撞法;交换电荷离子;数值模拟

**中图分类号** V1      **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.041207

## Geometric Parametric Study of Dual Stage Ion Optics

Jia Lianjun, Zhang Tianping, Chen Juanjuan, Jia Yanhui, Liu Mingzheng

*Key Laboratory of Vacuum Technology and Physics, Lanzhou Institute of Physics, CAST, Lanzhou, Gansu 730000, China*

**Abstract** The goal of the study is to identify the effect of the grid geometry parameters on the performance of the ion optics design. The combination of particle-in-cell method and Monte-Carlo collision method is used to study the influence of the critical geometrical parameters on the beamlet current capability, beamlet divergence angle and capture of charge exchange (CEX) ions. Moreover, the variation trends of beam divergence angle and impingement CEX ion are also investigated under different specific impulse conditions. The results show that with the increase of the screen grid aperture radius, the beamlet current capability, beam divergence angle and saddle point potential are increased. An increase in the accelerator grid radius produces a decrease in impingement CEX ion current. The beamlet divergence angle and the impingement CEX ion current both increase with the incremental thickness of accelerator grid. When the specific impulse is 8000 s, the change of the acceleration stage gap has little effect on the beamlet current capability. In addition, the higher the specific impulse, the smaller the beam divergence angle and the fewer the impingement CEX ions.

**Key words** measurement; ion thruster; dual stage ion optics; particle-in-cell method and Monte-Carlo collision method; charge exchange ion; numerical simulation

**OCIS codes** 120.3620; 350.4990; 350.5400

## 1 引言

未来的深空探测任务,如火星取样返回、近地轨道交会对接、地火货运及行星际探测等要求推进系统具有大功率和高比冲<sup>[1-4]</sup>。在深空探测需求背景下,大功率、高比冲的电推进成为未来发展的重点。目前,正在研制的大功率电推进主要有磁等离子体推力器(MPD)<sup>[5]</sup>、可变比冲磁等离子体推力器(VASIMR)<sup>[6]</sup>和双级加速离子推力器<sup>[7]</sup>。其中,双级加速离子推力器以其大功率、高比冲受到广泛关注。传统的双栅离子推力器,离子的引出和加速由同一对栅极完成,因此被称为单级加速技术。对于单级加速离子光学系统,由于栅极结构的原因,存在束流密度和比冲相互制约的问题,功率受到限制,最大为40~50 kW量级,无法满足未来空

收稿日期: 2016-11-25; 收到修改稿日期: 2016-12-18

基金项目: 真空低温技术与物理重点实验室基金(9140C550206150C55)

作者简介: 贾连军(1977—),男,博士,工程师,主要从事空间电推进技术方面的研究。E-mail: jlj1323962@126.com

间探测的需求<sup>[8]</sup>。1980年, Fearn<sup>[9]</sup>提出了双级加速离子推力器的概念, 将地面上粒子加速器使用的双级加速系统应用在离子推力器上。采用双级加速系统后, 不仅可以解决双栅极离子器的比冲和推力无法同时提高的矛盾, 还可以大幅提高推力器的比冲和功率, 束流直径在10~40 cm的双级加速离子推力器上输入功率可以达到0.25~4.8 MW量级, 比冲可达30000 s。在欧洲航天局(ESA)的支持下, 澳大利亚国立大学开展了双级加速离子推力器的研制, 2005年研制出射频源双级加速离子推力器原理样机, 并开展了实验验证, 采用氙气工质, 实现了比冲15000 s, 发散角约为5°的实验结果<sup>[10]</sup>。英国南安普顿大学的Coletti等<sup>[11-12]</sup>开展了双级加速离子光学系统的理论研究, 并研制出了考夫曼离子源双级加速离子推力器。在Coletti等的理论研究中, 当比冲为8000 s时, 加速级间距最大取为1.2 mm, 导致加速级电场强度超过4000 V/mm, 在工程应用上出现了绝缘问题难以解决, 在实验中出现放电频繁的问题。国内兰州空间技术物理研究所正在开展双级加速离子推力器的研制, 已经研制出原理样机, 正在开展实验研究。基于工程可实现性, 本文采用质点网格法和蒙特卡罗碰撞法(PIC-MCC)开展了加速级电场强度在3000 V/mm时, 栅极关键几何参数对束流引出性能和交换电荷(CEX)引出性能影响的研究。

## 2 双级加速离子光学系统原理及数值模型

### 2.1 工作原理

双级加速离子光学系统由4个栅极组成, 依次为屏栅极、引出栅极、加速栅极和减速栅极。其中, 屏栅极与引出栅极构成引出级, 引出栅极与加速栅极构成加速级。双级加速离子光学系统的特点是将离子的引出过程与加速过程分开进行, 加速电压不会影响离子的引出, 因此加速级可以加载较高的电压。图1为双级加速离子推力器原理图, 图2为双级加速离子光学系统原理图。

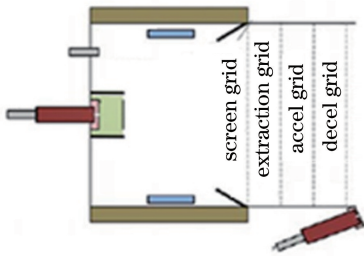


图1 双级加速离子推力器原理图

Fig. 1 Schematic of dual stage ion thruster

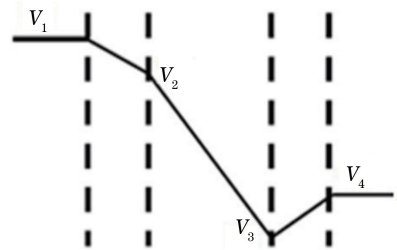


图2 双级加速系统原理图

Fig. 2 Schematic of dual stage ion optics

### 2.2 数值计算模型

栅极孔具有轴对称性, 可以采用二维轴对称模型研究。栅极中心孔引出的离子电流密度最高、电流最大, 腐蚀最厉害, 因此选择栅极系统中心孔为研究对象。图3所示为数值计算模型。

图中 $V_s$ 、 $V_e$ 、 $V_a$ 、 $V_d$ 、 $V_p$ 分别为屏栅、引出栅、加速栅、减速栅和放电室内等离子体电位;  $t_s$ 、 $t_e$ 、 $t_a$ 、 $t_d$ 分别为屏栅、引出栅、加速栅和减速栅的厚度;  $r_{sc}$ 、 $r_{ec}$ 、 $r_{ac}$ 、 $r_{dc}$ 分别为屏栅、引出栅、加速栅和减速栅的半径;  $\phi$ 为上游等离子体总电势大小;  $d_1$ 是屏栅与引出栅之间的距离,  $d_2$ 是引出栅与加速栅之间的距离,  $d_3$ 是加速栅与减速栅之间的距离。

计算区域内的带电粒子在四栅极电势差引起的电场作用下做加速运动, 并和其中的中性原子发生交换

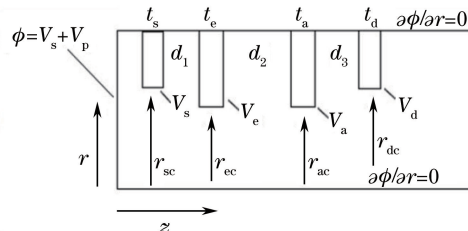


图3 数值计算模型

Fig. 3 Numerical calculation model

电荷碰撞产生 CEX 离子,束流离子通过被加速、聚焦及引出形成了束流。束流发散角是评价离子光学系统好坏的一个重要指标,其经验公式为

$$\theta = 0.62S \left[ \frac{P}{P_0} - 0.4 \left( \frac{r_{ec}}{r_{sc}} \right) \frac{\Gamma^2}{f(1+\Gamma)} + 0.53 \frac{r_{ec}}{r_{sc}} - 1 \right] + 0.31S \frac{p}{P_0} \left[ 1 + \frac{t_s}{t_e} + 0.35 \frac{r_{sc}}{r_{ec}} \left( f + \frac{d_3 + t_e + t_a}{d_1} \right) (1 + 0.5\Gamma)^{-3/2} \right] + \left[ \frac{kT_i}{eV_{ext}(1+\Gamma)} \right]^{1/2}, \quad (1)$$

式中  $P = \frac{I_b}{V_{ext}^{3/2}}$ ,  $P_0 = \frac{4\pi\epsilon_0}{9} \frac{r_{sc}^2}{d_1^2} \sqrt{\frac{2e}{M}}$ ,  $V_{ext} = V_s - V_e$ ,  $\Gamma = \frac{V_e - V_a}{V_s - V_e}$ ,  $S = \frac{r_{sc}}{d_1}$ ,  $f = \frac{d_2}{d_1}$ ,  $T = 2eV$ 。

采用 PIC-MCC 开展了栅极关键几何参数对束流引出能力、束流发散角以及交换电荷离子的截获影响的研究。计算流程如图 4 所示。

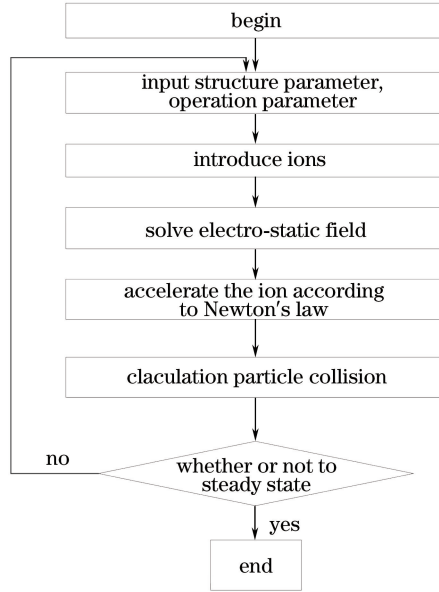


图 4 计算流程图

Fig. 4 Calculation flow chart

### 3 数值参数研究

#### 3.1 工作参数

离子光学系统的几何参数和电参数见表 1。

表 1 双级加速系统几何参数和电参数

Table 1 Geometrical and electrical parameters of dual stage ion optics

Parameter	Value
Screen grid aperture radius $r_s$	0.8, 1.0, 1.2 mm
Extraction grid aperture radius $r_e$	$0.7r_s$
Accel grid aperture radius $r_a$	$0.7r_s$
Screen grid thickness $t_s$	0.4 mm
Extraction grid thickness $t_e$	1.0 mm
Accel grid thickness $t_a$	1.0, 1.3 mm
Extraction stage gap $d_1$	1.0 mm
Accel stage gap $d_2$	1.7 mm
Extraction Voltage $V_{ext}$	2000 V
Accel grid Voltage $V_a$	-250 V
Specific impulse $I_{sp}$	6000, 8000, 10000 s

### 3.2 数值结果与分析

#### 3.2.1 屏栅孔半径

屏栅孔径是离子光学系统关键几何参数之一,其他几个栅极的孔径均以屏栅孔径为参考,如表 1 所示,因此屏栅孔径变化,则其他孔径按比例变化。屏栅孔径的变化会引起束流引出能力、束流发散角、交换电荷能量等性能参数的变化。本文选取  $I_{SP}=8000$  s,  $d_2=1.7$  mm,  $r_a=0.7r_s$ ,图 5 所示为不同屏栅孔径的束流引出能力,其中,纵坐标为加速栅截获电流与束流之比,当这个比值超过 0.1%时,电子返流造成栅极失效。计算结果显示,屏栅孔径越大,离子引出能力越强。

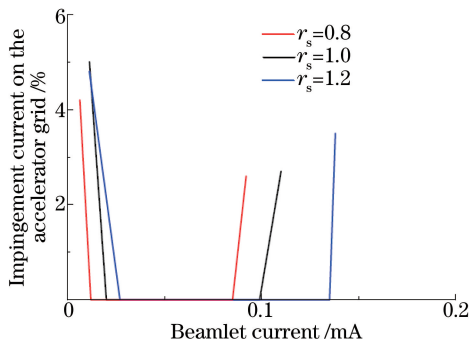


图 5 不同屏栅孔径对束流引出能力的影响

Fig. 5 Beamlet current capability as a function of screen grid radius

图 6 所示为不同屏栅孔径对束流发散角的影响,束流发散角定义为包含 90% 的离子所对应的角度。由图 6 可知,屏栅孔径对束流发散角的影响较小,当  $r_s=0.8$  mm 时,发散半角约为  $2.6^\circ$ ;当  $r_s=1.0$  mm 时,发散半角约为  $2.7^\circ$ ;当  $r_s=1.2$  mm 时,发散半角约为  $2.7^\circ$ 。

根据束流发散角经验(1)式给出的束流发散角分别为,当  $r_s=0.8$  mm 时,发散角约为  $2.5^\circ$ ;当  $r_s=1.0$  mm 时,发散角约为  $3.3^\circ$ ;当  $r_s=1.2$  mm 时,发散角约  $3.4^\circ$ 。数值模拟值与经验公式计算值符合较好,其中  $P/P_0=0.5$ 。

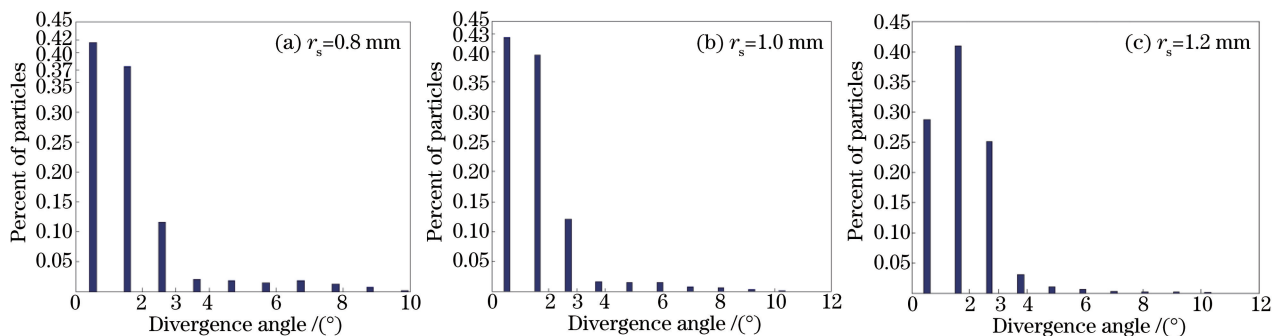


图 6 不同屏栅孔径对束流发散角的影响

Fig. 6 Beamlet divergence angle as a function of screen grid radius

图 7 所示为不同屏栅孔径下,加速栅截获的 CEX 离子电流与 CEX 能量关系。结果表明,三种屏栅孔径下,碰撞的 CEX 能量主要集中在 1000 eV 以内,最高能量小于 3500 eV,这说明只有栅极附近产生的 CEX 离子会碰撞到栅极表面,远离栅极区域产生的 CEX 离子会被光学系统聚焦引出。比较加速栅极截获 CEX 电流占束流的百分比可知,随着屏栅孔径的增加,加速栅极的 CEX 截获呈下降趋势。加速栅截获的交换电荷电流非常低,约为束流的  $10^{-3}\% \sim 10^{-4}\%$  量级,即使能量较高的离子撞击到屏栅极,腐蚀率也是非常小的。

图 8 所示为不同屏栅孔径对鞍点电势的影响,随着屏栅孔径的增大,鞍点电势也逐渐增加。

#### 3.2.2 加速栅孔半径

加速栅是最容易受到交换电荷溅射腐蚀的栅极,加速栅的寿命决定了离子光学系统的寿命。因此,需要开展加速栅极孔径对束流发散角、CEX 离子截获的影响的研究。选取  $I_{SP}=8000$  s,  $d_2=1.7$  mm,  $r_a=1.0$  mm,图 9 所示为不同加速栅孔径对束流发散角的影响,计算结果表明,加速栅孔径对束流发散角没有影响。图 10 所示为不同加速栅孔径对截获交换电荷数量和能量的影响,加速栅孔径的变化对截获 CEX 离子



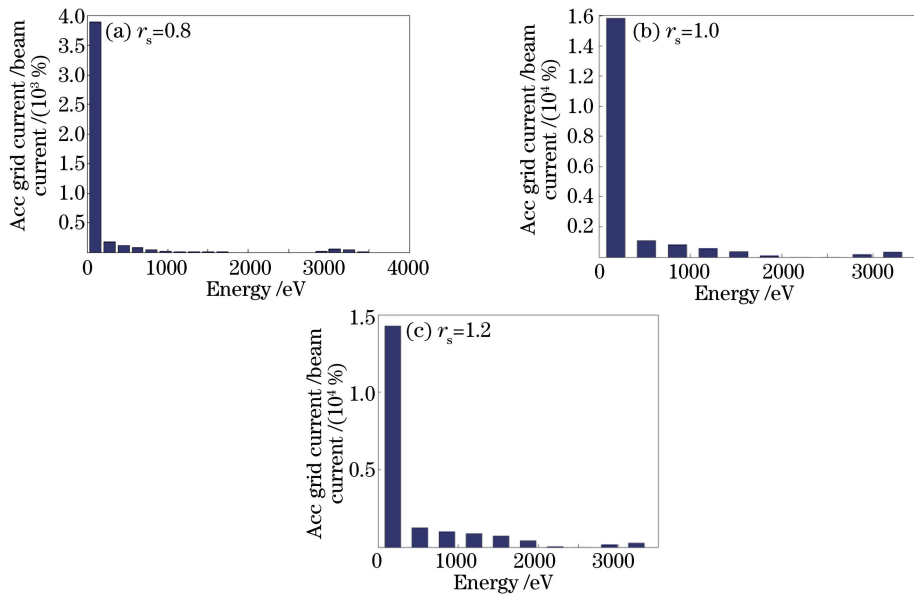


图 7 不同屏栅孔径对加速栅截获交换电荷能量的影响

Fig. 7 CEX ion energy as a function of accelerator grid current

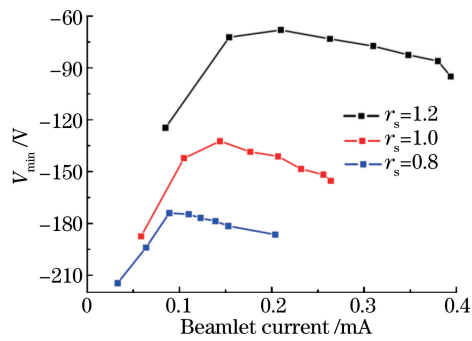


图 8 不同屏栅孔径对鞍点电势的影响

Fig. 8 Minimum centerline voltage as a function of beamlet current and screen grid radius

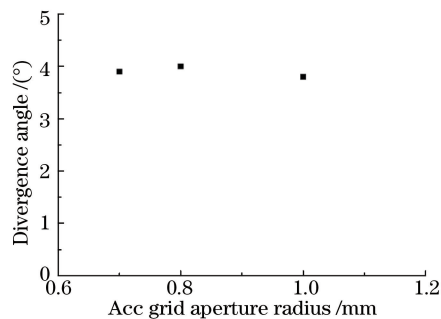


图 9 不同加速栅孔径对束流发散角的影响

Fig. 9 Beamlet divergence angle as a function of accelerator grid radius

数量影响不大,但对 CEX 离子的能量分布有影响,随着加速栅孔径的增大,截获的高能 CEX 离子逐渐减少。

### 3.2.3 加速栅厚度

加速栅厚度对离子光学系统性能的影响如图 11 和 12 所示,其中,图 11 所示为加速栅厚度对 CEX 离子截获数量和能量的影响,图 12 所示为加速栅厚度对束流发散角的影响。可以看出随着加速栅厚度增加,CEX 离子的截获数量和能量呈上升趋势,束流发散角增大。

## 3.2.4 加速级间距

图 13 为不同加速级间距对束流引出能力的影响,计算结果表明,在比冲为 8000 s 时,加速级间距的增大对束流引出能力几乎没有影响。

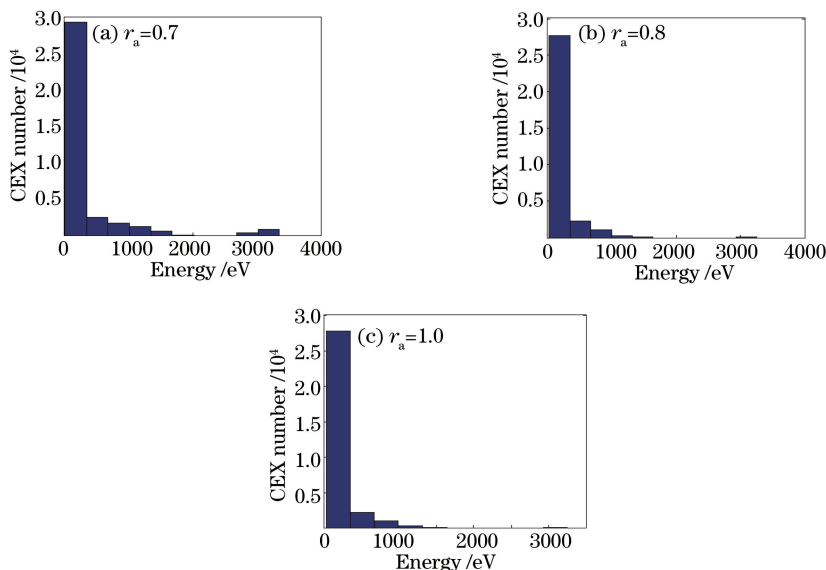


图 10 不同加速栅孔径对截获交换电荷能量的影响

Fig. 10 Energy distribution of CEX ion as a function of accelerator grid radius

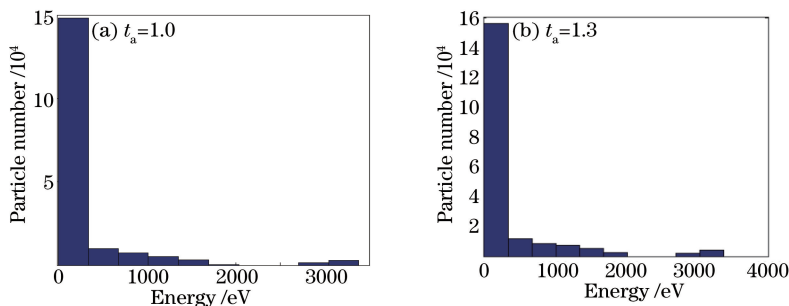


图 11 加速栅厚度对 CEX 离子截获数量的影响

Fig. 11 CEX ion number as a function of accelerator grid thickness

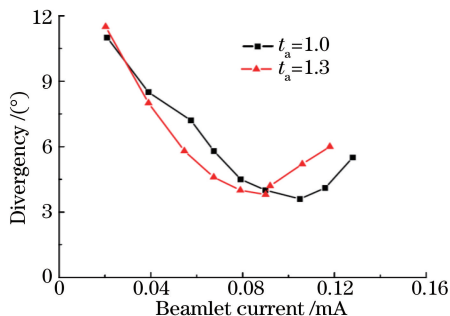


图 12 加速栅厚度对束流发散角的影响

Fig. 12 Trend of the beamlet divergence with beamlet current

图 14 为不同加速级间距下束流与发散角之间的关系图,对于给定的束电压,存在一个加速级间距使得发散角最小。从图 14 可以看出,对于比冲为 8000 s 的情况,加速级间距  $d_2 = 1.7$  mm 时,发散角最小。另外,发散角的大小与加速级间的离子密度有关,改变加速级间距可以改变离子密度,当改变加速级间距使得离子密度最佳时,发散角出现最小值。

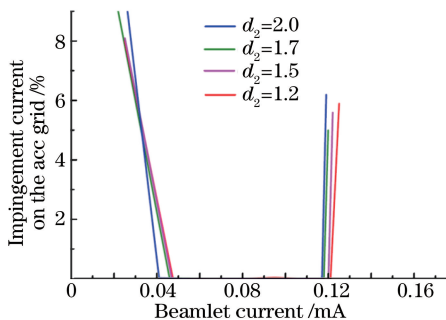


图 13 不同加速级间距对束流引出能力的影响  
Fig. 13 Beamlet perveance range as a function of acceleration stage gap

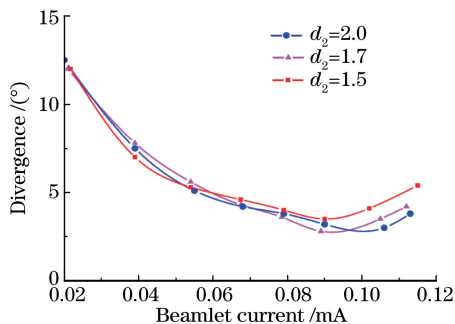


图 14 不同加速级间距对束流发散角影响的研究  
Fig. 14 Beamlet divergence angle as a function of the acceleration stage gap

### 3.2.5 比冲

比冲对离子光学系统性能的影响较大。图 15 所示为不同比冲下对应的最小发散角变化,可以看出,对于双级加速系统,比冲越高,发散角越小。

图 16 所示为不同比冲下,加速栅极截获 CEX 电流所占束流的比例关系,可以看出,比冲越高,加速栅截获的 CEX 电流所占束流的比例越小,截获的 CEX 离子越少。

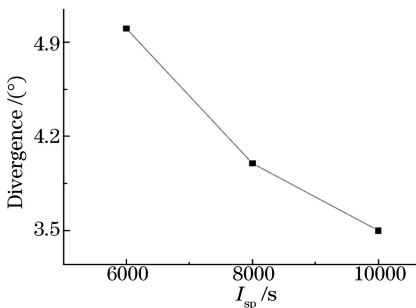


图 15 不同比冲下束流发散角的变化  
Fig. 15 Trend of beamlet divergence angle with specific impulse

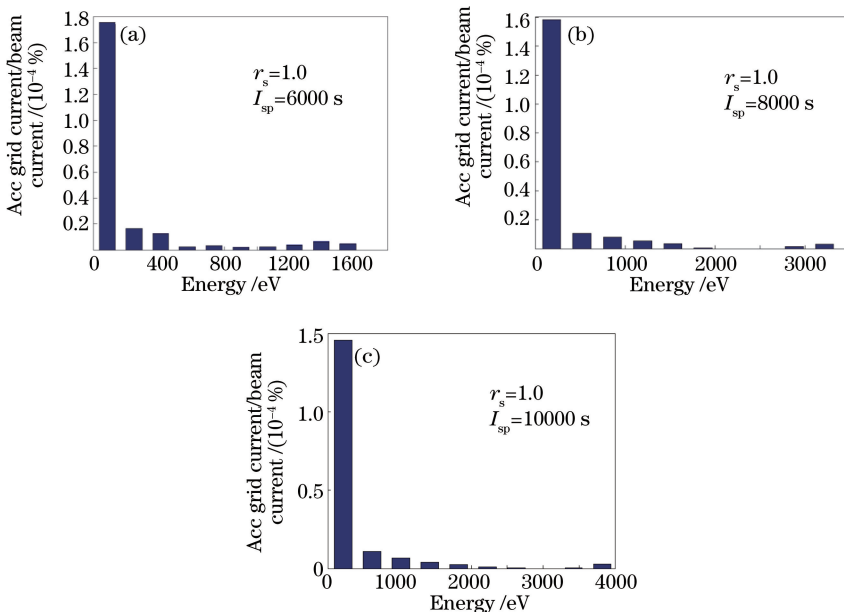


图 16 不同比冲下加速栅截获电流的变化趋势  
Fig. 16 Trend of accelerator grid CEX ion impingement energy with specific impulse

## 4 结 论

基于兰州空间技术物理研究所正在研制的双级加速离子推力器,开展了栅极关键几何参数对推力器性能影响的数值仿真研究。该研究中推力器的设计比冲为 8000 s。通过该研究得到了如下结论:

- 1) 在高比冲下,双级加速离子光学系统的引出能力与加速级间距无关;
- 2) 双级加速离子光学系统束流发散角较小,且比冲越高,发散角越小;
- 3) 双级加速离子光学系统加速栅极截获 CEX 电流较小,约占束流的  $10^{-3}\% \sim 10^{-4}\%$  量级,比冲越高,加速栅截获的 CEX 电流占束流比例越小;
- 4) 加速栅极附近产生的 CEX 离子会碰撞到栅极表面,远离栅极区域产生的 CEX 离子会被光学系统聚焦引出。

后续将开展双级加速离子光学系统的设计和实验,并对上述结论进行实验验证。

## 参 考 文 献

- [1] Marques R I, Gabriel S B. Dual stage four grid (DS4G) ion engine for very high velocity change missions[C]. 31st International Electric Propulsion Conference, University of Michigan, Ann Arbor, USA, 2009.
- [2] Bramanti C, Izzo D, Samarae T, *et al.* Very high delta-V missions to the edge of the solar system and beyond enabled by the dual-stage 4-grid ion thruster concept[J]. *Acta Astronautica*, 2009, 64(7-8): 735-744.
- [3] Walker R, Izzo D, Fearn D. Missions to the edge of the solar system using a new advanced dual-stage gridded ion thruster with very high specific impulse[C]. *Proceedings of the International Symposium on Space Technology and Science*, 2006, 25: 1106.
- [4] Fearn D G. The application of gridded ion thrusters to high thrust, high specific impulse nuclear-electric missions[J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 2005, 27(1): 257-267.
- [5] Lapointe M, Mikellides P. High power MPD thruster development at the NASA Glenn research center[J]. *Journal of Pediatric Oncology Nursing*, 2013, 14(2): 121.
- [6] Longmier B W, Glover T W, Díaz F R C, *et al.* VASIMR<sup>®</sup> VX-200: High power electric propulsion for space transportation beyond LEO[C]. *AIAA SPACE 2009 Conference & Exposition*, 2009.
- [7] Walker R, Bramanti C, Sutherland O, *et al.* Initial experiments on a dual-stage 4-grid ion thruster for very high specific impulse and power[C]. *42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2006: 4669.
- [8] Bramanti C, Walker R, Sutherland O, *et al.* The innovative dual-stage 4-grid ion thruster concept-theory and first experimental results[C]. *Fifty-Seventh International Astronautical Congress*, 2006: 4.
- [9] Fearn D G. The use of ion thrusters for orbit raising[J]. *Journal of the British Interplanetary Society*, 1978, 33(33): 129-137.
- [10] Bramanti C, Fearn D. The design and operation of beam diagnostics for the dual stage 4-grid ion thruster[C]. *30th International Electric Propulsion Conference*, Florence, Italy September, 2007: 17-20.
- [11] Coletti M, Gabriel S. Dual stage ion optics, a parametric study[C]. *42nd AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference in conjunction with the 18th International Conference on MHD Energy Conversion (ICMHD)*, 2011: 3741.
- [12] Coletti M, Gabriel S. Dual Stage Ion Optics, a Parametric Study on Performances and Lifetime[C]. *47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2011: 5735.