# 基于E×B探针系统的霍尔推力器束流特性分析

余盛楠<sup>1</sup>,梁子轩<sup>2</sup>,徐宗琦<sup>1</sup>,王平阳<sup>1</sup>,杭观荣<sup>2,3</sup>

(1.上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240;2.上海空间推进研究所,上海 201112;

3.上海空间发动机工程技术研究中心,上海201112)

摘 要:为探究霍尔推力器羽流中各价态离子能量分布,并以此为依据评估推力器性能,根据Wien条件,设 计了一种用于测量稀薄等离子体羽流场不同电荷状态离子分布的E×B探针系统。基于对探针最大输入角离 子的运动分析,推导了仅与探针结构参数相关的能量分辨率关系式,并以此为依据设计了探针,使用该E×B探 针系统对200W量级霍尔推力器进行羽流离子成分诊断。分析结果表明:距离推力器出口500mm处,在中轴 线角度0~20°内,单电荷氙离子Xe<sup>+</sup>比例分数为90.42%~94.25%,对应的Xe<sup>2+</sup>比例分数为9.58%~5.75%;随着 角度的增加,Xe<sup>+</sup>比例分数减少,Xe<sup>2+</sup>比例分数增加,平均电荷增加;推力器的电荷利用效率、电压利用效率分别 为99.38%、86.95%。该探针系统的测量结果可为分析推力损失和优化推力器性能提供参考,并可为羽流仿真 提供验证。

关键词:霍尔推力器;离子能量;能量分辨率; E×B探针系统;羽流诊断
 中图分类号: V 439.4 文献标志码: A
 DOI: 10.19328/j.cnki.2096-8655.2022.05.014

#### Beam Characteristics Analysis of Hall Thruster Based on E×B Probe System

YU Shengnan<sup>1</sup>, LIANG Zixuan<sup>2</sup>, XU Zongqi<sup>1</sup>, WANG Pingyang<sup>1</sup>, HANG Guanrong<sup>2,3</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2.Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;
3.Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: In order to explore the energy distribution of various ions in Hall thruster plume and evaluate the performance of the thruster, an E×B probe system is designed for measuring the ion distribution of different charge states in the rarefied plasma plume field according to the Wien condition (formula (2) in the text). Based on the kinematic analysis of the ions at the maximum input angle of the probe, the energy resolution expression related only to the structural parameters of the probe is derived, in terms of which the probe is designed. The E×B probe system is used to diagnose the ionic compositions in the plume of a 200 W Hall thruster. The experimental results show that at a distance of 500 mm from the thruster outlet and with a central axis angle ranging from 0° to 20°, the proportion fraction of the single-charged xenon ion, Xe<sup>+</sup> is between 90.42% and 94.25%, and the corresponding proportion fraction of Xe<sup>2+</sup> is between 9.58% and 5.75%. With the increase in the angle, the proportion fraction of Xe<sup>+</sup> decreases, the proportion fraction of Xe<sup>2+</sup> increases, and the average quantity of electric charge increases. The charge utilization efficiency and voltage utilization efficiency of the thruster are respectively 99.38% and 86.95%. The measurement results can provide references for the thrust loss analysis and the performance optimization, and provide verification for the plume simulation.

Key words: Hall thruster; ion energy; energy resolution;  $E \times B$  probe system; plume diagnosis

收稿日期:2021-03-08;修回日期:2021-05-18

基金项目:上海市科学技术委员会课题(17DZ2280800)

作者简介:余盛楠(1996—),女,硕士研究生,主要研究方向为电推进羽流诊断。

通信作者:王平阳(1971-),男,博士,副教授,博士生导师,主要研究方向为先进空间推进技术。

95

# 0 引言

电推进系统具有比冲高、推力可调、寿命长的 特点,可满足不同空间任务需求,在航天推进领域 逐渐占据着重要的地位<sup>[1]</sup>。霍尔推力器是一种典型 的电推进装置,其结构简单、比冲高且具有较长的 使用寿命,在航天器的位置保持、轨道提升和转移 等任务中拥有诱人的前景。霍尔推力器喷出的带 电粒子形成稀薄等离子体羽流,羽流中高能多电荷 离子是航天器表面被腐蚀和溅射的原因之一,影响 到航天器的寿命<sup>[2]</sup>。航天器表面腐蚀、充电等现象, 可利用不同离子的比例分数及能量分布进行分 析<sup>[3]</sup>。同时在恒定束流下,多电荷离子的存在导致 了霍尔推力器比冲增加,推力及效率降低4,多电荷 离子的影响是霍尔推力器效率损失机理研究的目 标之一<sup>[5]</sup>。此外,羽流中的电荷状态信息可用于计 算推进剂的质量利用效率<sup>[6]</sup>。因此,明确羽流中各 价态离子的分布有助于更准确地评估霍尔推力器 的性能和评估影响推力器寿命的因素;在对霍尔推 力器羽流的完整分析中,研究各价态离子的分布至 关重要。

E×B探针是一种羽流诊断设备,可以利用正 交电磁场筛选出不同速度的离子。1973年VAH-RENKAMP<sup>[7]</sup>使用 E×B 探针对离子推力器羽流中 的1价和2价离子进行测量,并由此得到了该工作 条件下推力器功率损失及质量利用效率损失。与 离子推力器相比,霍尔推力器由于离子的加速电压 不完全相同,其羽流中还存在不同电荷离子,以及 离子与中性原子之间的碰撞,因此获取其中各离子 的参数较困难。1999年KIM<sup>[8]</sup>设计了一种高分辨 率 E×B 探针,并对霍尔推力器进行羽流测量,得到 了羽流中各离子能量分布以及不同离子的比例分 数。文献[9]指出阻滞势分析器(Block Potential Analyzer, RPA)得到的离子平均能量,也可由E×B 探针测量结果计算获得。近年来,E×B探针多用 来探究推力器羽流不同操作条件下的离子比例,探 究电压、推进剂质量流量、环境压强等操作条件的 变化对推力器效率的影响,为设定推力器最佳操作 条件提供依据<sup>[10-13]</sup>。国内对 E×B 探针研究起步较 晚,文献[14]给出了一种针对离子推力器的 E×B 探针设计。

为探究霍尔推力器羽流中各价态离子的能量 分布并以此为依据评估推力器性能,根据Wien条 件,结合探针内离子运动分析,推导与探针结构相 关的分辨率关系式,并以此为依据指导设计E×B 探针系统;实验以氙气为推进剂,对200W量级霍 尔推力器进行羽流诊断,分析多点数据得到探针系 统可分辨的最高价态离子,并得到各价态离子的比 例分数及能量分布;通过分析多个测量点的结果, 总结测量点范围内的各价态离子比例分数变化规 律,并以此评估推力器的效率;结果将为推力器各 种操作条件下的羽流诊断提供依据,为羽流仿真结 果提供验证。

1 E×B探针原理及设计

#### 1.1 E×B探针原理

E×B探针主要包括入口准直管、正交电磁场、 漂移区以及收集器4个部分。入口准直管选择出速 度方向几乎与探针轴线平行的离子,正交电磁场对 离子施加方向相反的洛伦兹力和电场力,通过调节 电场,使离子可不偏转穿过正交电磁场,对于价态 为*i*的离子,即:

$$eq_i E = eq_i u_i B \tag{1}$$

$$E/B = u_i \tag{2}$$

式中:e为元电荷;q<sub>i</sub>为离子所带电荷数;E为电场场强;u<sub>i</sub>为离子速度;B为磁场场强。

根据能量守恒,可通过E×B探针收集到的离子动能*E*<sub>i</sub>为

$$E_{i} = eq_{i}V_{i} = \frac{\left[m\left(V_{p}/dB\right)^{2}\right]}{2} = \frac{mu_{i}^{2}}{2} \qquad (3)$$

式中:m为单个离子质量;d为电极板间距;V<sub>i</sub>为离子有效加速电压;V<sub>p</sub>为探针电极板间电压。

式(2)表明,E×B探针可以分离不同速度的离子。根据式(3),在霍尔推力器中,若忽略不同电荷状态离子经历的加速电压差值<sup>[4]</sup>,则离子的最终速度会和其荷质比相关。惰性气体推进剂,其电离产生的离子通常为单核离子,质量与其原子核质量相近。因此,E×B探针可以通过选择运动速度不同的离子选择出不同电荷状态的离子。收集器收集到的电流*L*可以表示为

$$I_i = eq_i n_i u_i A_c \tag{4}$$

式中:A。为收集离子面积;ni为离子密度。

得到价态为*i*的离子电流分数Ω<sub>i</sub>及离子所占比例分数ξ<sub>i</sub>分别为

$$\Omega_{i} = I_{i} / \sum_{i=1}^{I_{i}} I_{i} = (q_{i}^{3/2} \zeta_{i}) / (\sum_{i=1}^{I_{i}} q_{i}^{3/2} \zeta_{i}) \Omega_{i} =$$

$$I_{i} / \sum_{i=1}^{\eta_{\tilde{m}} \tilde{n} + \frac{1}{2} \tilde{n}_{\tilde{n}} \tilde{n}_{\tilde{n}}} I_{i} = (q_{i}^{3/2} \zeta_{i}) / (\sum_{i=1}^{\eta_{\tilde{m}} \tilde{n}_{\tilde{n}} + \frac{1}{2} \tilde{n}_{\tilde{n}}} q_{i}^{3/2} \zeta_{i}) (5)$$

$$\zeta_{i} = n_{i} / \sum_{i=1}^{n_{i}} n_{i} = (\Omega_{i} / q_{i}^{3/2}) / (\sum_{i=1}^{\Omega_{i}} \Omega_{i} / q_{i}^{3/2}) \zeta_{i} =$$

$$n_{i} / \sum_{i=1}^{\eta_{\tilde{m}} \tilde{n}_{\tilde{n}} + \frac{1}{2} \tilde{n}_{\tilde{n}}} n_{i} = (\Omega_{i} / q_{i}^{3/2}) / (\sum_{i=1}^{\eta_{\tilde{m}} \tilde{n}_{\tilde{n}} + \frac{1}{2} \tilde{n}_{\tilde{n}}} \Omega_{i} / q_{i}^{3/2}) (6)$$

#### 1.2 E×B探针分辨率

理论上, E×B 探针内的磁场强度以及电极板 的位置是固定的, 根据式(3), 固定速度的离子只对 应电极板的一个电压。同一速度大小的离子方向 不一定完全与探针轴线平行, 导致在该速度对应的 电压附近仍可收集到离子。 $V_c$ 为离子速度对应的 电压,  $V_c+w$ 为可收集到离子电流的最大电压, 根据 对称性, 探针在 $V_c-w \sim V_c+w$ 均可收集到离子,则 2w为扫描电压宽度, 扫描电压宽度也代表 E×B 探 针的分辨率<sup>[14]</sup>。

探针最大输入角,即可通过入口准直管,是离 子速度方向与探针轴线偏差最大的角度。根据匀 变速曲线运动分析, 在 $V_{v} - w \mathcal{D} V_{v} + w \mathcal{D} \psi$ 集到的 为探针最大输入角的离子,结合探针的结构参数及 电磁场强度,计算出E×B探针的分辨率。本文设 计的探针基本结构及探针最大输入角离子在其中 的运动轨迹如图1所示。孔1和孔2分别为探针入 口准直管的入口和出口,孔1和孔2采用相同直径 D<sub>2</sub>,并以两孔最低点连线为z轴。图中v为离子入射 时速度方向, vz为离子z方向速度分量, vu为离子y 方向速度分量,D2为孔1及孔2直径,DA3为孔3直 径,D<sub>3</sub>为离子在正交电磁场入口处的 y坐标,D<sub>4</sub>为离 子在正交电磁场出口的y坐标,D<sub>5</sub>为离子在孔3处 的 v 坐标, D<sub>6</sub>为离子在收集器处的 v 坐标, D<sub>6</sub>为离子 收集器的直径,L1为人口准直管长度,L2为人口准直 管与正交电磁场距离,L。为正交电磁场长度,L。为正 交电磁场与孔3距离,L<sub>5</sub>为孔3与离子收集器距离, θ1为探针最大输入角,θ2为离子在正交电磁场出口 与z轴的夹角。



### 图 1 探针中的离子运动轨迹 Fig. 1 Trajectory of ion movement in the probe

根据式(2),设电磁场所选择的离子速度为 $v_{set}$ , 这里假设 $v_z < v_{set}$ ,两者差值的绝对值为 $\Delta v_o$ 。在选择 过程中,由于 $v_{yl} < < v_z$ ,因此 $\Delta v$ 为当前探针选择的 离子速度 $v_{set}$ 和可收集离子速度的最大差值,且此时 电压为可收集到速度为 $v_z$ 离子的最大电压。为使离 子穿过孔3并撞击收集器,结合探针基本结构, $\Delta v$ 需满足

$$\Delta v \leqslant \left[ (L_{2} + L_{3} + L_{4}) \tan \theta_{1} + (D_{A3} + D_{2})/2 \right] m v_{z}^{2} / \left[ Bq \left( \frac{1}{2} L_{3}^{2} + L_{3} L_{4} \right) \right]$$
(7)  
$$\Delta v \leqslant \left[ (L_{2} + L_{3} + L_{4} + L_{5}) \tan \theta_{1} + (D_{c} + D_{2})/2 \right]$$
$$m v_{z}^{2} / \left[ Bq \left( \frac{1}{2} L_{3}^{2} + L_{3} L_{4} + L_{3} L_{5} \right) \right]$$
(8)

式中:q为离子所带电荷量。

Δv对应的电压差值,即扫描电压半宽w为

$$w = \Delta v \cdot B \cdot d \tag{9}$$

根据式(3)、式(7)、式(8),计算 w 和离子有效 加速电压的比值,该比值通常用来表示 E×B 探针 的能量分辨率<sup>[8]</sup>,即:

$$\frac{w}{V_{i}} \leqslant \frac{2d\left[\left(L_{2}+L_{3}+L_{4}\right)\tan\theta_{1}+\left(D_{A3}+D_{2}\right)/2\right]}{\left(\frac{1}{2}{L_{3}}^{2}+L_{3}L_{4}\right)}$$
(10)

$$\frac{w}{V_{i}} \ll \frac{2d\left[\left(L_{2}+L_{3}+L_{4}+L_{5}\right)\tan\theta_{1}+\left(D_{c}+D_{2}\right)/2\right]}{\left(\frac{1}{2}L_{3}^{2}+L_{3}L_{4}+L_{3}L_{5}\right)}$$
(11)

由式(10)和式(11)可知,能量分辨率 w/V<sub>i</sub> 仅与探针的结构参数有关,与离子质量、速度 及电荷状态无关。

#### 1.3 E×B探针设计

根据文献[8]、文献[15-16]中E×B探针参数,探 针中心磁场强度范围为0.090~0.162 T。若长时间 使用E×B探针进行远场测量,要求至少在100℃内 磁极不会发生磁性变化<sup>[17]</sup>,近场测量则需更高的使用 温度。为达到同一磁场强度,所需永磁体体积比电磁 铁更小,因此选用永磁体作为磁极材料。由于钐钴磁 铁剩磁感应强度可达0.118 T,使用温度可达350℃, 实验选择钐钴磁铁作为磁极,使用高斯计对实际磁场 中心轴上的磁场强度进行多点测量,得到磁场中心轴 的平均场强为0.110 T,磁场强度合理。

探针分辨率应与所选磁场、电场以及离子速度 相匹配,为清晰分离出各离子信号,扫描电压半宽w 的理想值应使每种离子的扫描电压没有重叠部分。 若探针分辨率更高,对加工装配的精度要求也更 高。所以,分辨率设计应配合考虑所选电磁场、离 子速度及加工装配难度。以离子速度为依据,若 Xe<sup>+</sup>经过200 V的有效加速电压加速,其速度约为 17 184 m/s,设探针电极板间距为 20 mm,根据式 (3),则Xe<sup>+</sup>速度对应扫描电压约为37.8V,为分辨 出二价离子,扫描电压半宽w应小于7.8V,对应能 量分辨率小于3.9%。由于实际有效加速电压小于 200 V,考虑电源量程,适当增加电极板间距使1价、 2价离子对应的扫描电压在合适范围内,并选择合 适的结构参数。最终设计电极板采用铝板,电极板 间距为21 mm。将E×B探针结构参数代入式(10) 和式(11)可得探针的能量分辨率为1.6%。

E×B探针系统采用法拉第筒结构收集离子,法 拉第收集盘采用不锈钢材料,收集盘直径为28 mm, 收集到的离子电流采用 Keithley 6487型皮安表测 量。E×B探针内部粒子间的堆积和碰撞,将对探 针的测量结果产生影响。KIM 对探针内部粒子堆 积和碰撞进行了实验比较分析,结果表明这一现象 造成的不稳定性可以忽略<sup>[8]</sup>。能量低于1.5 keV 的 氙离子打在不锈钢上二次电子发射系数二次电子 发射率大约为0.05<sup>[18]</sup>,即二次电子带来的误差大约 在5%,实验用皮安表精确度为0.3%,可知探针系 统收集电流的误差为5%。

2 实验设备与设计

#### 2.1 真空条件和推力器

实验使用真空舱直径1.5m,长度3.0m,真空舱 空载条件下极限真空为5×10<sup>-4</sup> Pa,推力器点火状 态下真空度为2×10<sup>-2</sup> Pa。

实验用推力器为200W量级磁层霍尔推力器, 浓度为99.999% 氙气作为工质气体,稳定工作状态 下推力约11mN。推力器实验参数见表1。

表1 推力器实验参数 Tab.1 Experimental parameters of the thruster

参数	参数值
阳极电压/V	200
阳极电流/A	1.03
阳极流量/(mg·s <sup>-1</sup> )	1.02
阴极流量/(mg·s <sup>-1</sup> )	0.260
加热电流/A	4.00
内励磁电流/A	0.9
外励磁电流/A	0.7

#### 2.2 实验设计

相比离子推力器,霍尔推力器具有更高的电流 密度,将导致霍尔推力器的工作背压高于离子推力 器,羽流中存在更多的电荷交换,因此一般E×B探 针很少在霍尔推力器羽流近场进行测量<sup>[16]</sup>。E×B 探针组装及位置摆放如图2所示,E×B探针置于推 力器出口500 mm处。羽流中E×B探针入口中轴 线与推力器出口中轴线角度越大,越容易探测到低 能离子,分辨各价态氙离子的难度越大<sup>[2,8]</sup>,因此选 择在束流较集中的区域进行测量,实验选择与中轴 线角度为0°、10°、20°的3处测量点,实验前使用激光 发射器校准E×B探针对准的方向。为减少离子溅 射的影响,E×B探针外壳使用聚酰亚胺薄膜 包裹。



(a) E×B探针组装图
 图 2 E×B探针组装图及位置摆放
 Fig. 2 Assembly diagram and position of the E×B probe



(b) E×B探针位置摆放
 续图 2 E×B探针组装图及位置摆放
 Continued Fig. 2 Assembly diagram and position of the E×B probe

3 结果及分析

#### 3.1 推力器中轴线上500 mm 处测量结果

推力器中轴线 500 mm 处 E×B 探针测量结果 如图 3 所示。图 3(a)表明该 E×B 探针系统能清晰 地分离一价和二价氙离子的电流信号,图 3(b)表明 Xe<sup>+</sup>电流峰值出现的位置小于 200 eV 且 Xe<sup>2+</sup>电流峰 值出现的位置小于 400 eV,将结果表示成离子能量 与收集电流的关系,可得到离子能量分布。由于霍 尔推力器中离子加速电压不完全相同,因此各离子 的扫描电压半宽 w 比理论计算结果偏大。







为得到更具体的离子能量分布结果,KIM 提出 了一种离子速度分布函数,并用其拟合 E×B 探针 的测量数据<sup>[8]</sup>。由于这种方法较复杂,LINNELL<sup>[19]</sup> 使用高斯函数拟合 E×B 探针测量结果。高斯函数 拟合法与速度分布函数拟合法相比更简单,覆盖相 邻价态离子对应电流信号峰之间重叠部分的面积 较小,文献[16]表明2种方法的结果在计算离子比 例分数方面差异较小。因此,采用高斯函数拟合法 对已得到的探针结果进行处理,如图4所示。



根据实验测量的结果,Xe<sup>+</sup>的最高电流点出现 在 38 V 处,Xe<sup>2+</sup>的最高电流点出现在 54 V 处。根 据探针所用电极板间距及磁场大小,由式(2)计算 出 Xe<sup>+</sup>速度为 16 310 m/s,Xe<sup>2+</sup>速度为 23 178 m/s。 据式(5)和式(6),Xe<sup>+</sup>比例分数为 94.25%,Xe<sup>2+</sup>比 例分数为 5.75%。

# 3.2 推力器出口 500 mm 处多角度测量结果及比较 分析

距离推力器出口 500 mm 处与中轴线角度为 10°和 20°的 E×B 探针测量结果及高斯函数拟合结 果如图 5 所示。



Fig. 5 Measured results of the E×B probe with a distance of 500 mm from the thruster outlet and the angles of 10° and 20° from the central axis



续图5 E×B探针测量结果

Continued Fig. 5 Measured results of the E×B probe with a distance of 500 mm from the thruster outlet and the angles of 10° and 20° from the central axis

由图4及图5可知,距离推力器出口500 mm, 与推力器出口中轴线角度为0°、10°、20°处,2种氙离 子的速度及比例分数见表2。

#### 表 2 各角度下的 Xe<sup>+</sup>、Xe<sup>2+</sup>速度及比例分数

Tab. 2Velocity and proportional fractions of Xe<sup>+</sup> and Xe<sup>2+</sup><br/>at different angles

离子种类	角度/(°)	速度/(m•s <sup>-1</sup> )	比例分数/%
Xe <sup>+</sup>	0	16 310	94.25
	10	15 777	92.75
	20	15 881	90.42
Xe <sup>2+</sup>	0	23 178	5.75
	10	23 020	7.25
	20	22 648	9.58

比较各角度下1价及2价氙离子的比例分数, 如图6所示。随着角度的增加,Xe<sup>+</sup>的比例分数逐渐 降低,Xe<sup>2+</sup>比例分数增加。导致该现象的原因可能 是相比1价离子,2价离子产生在推力器放电室的 更下游,而运动出推力器的离子才可能在羽流中被收 集到,因此2价离子比1价离子具备更大的发散角。



图 6 各角度下 1 价、2 价氙离子比例分数

Fig. 6 Proportion fractions of Xe<sup>+</sup> and Xe<sup>2+</sup> at various angles

## 3.3 推力器电荷利用效率及电压利用效率分析

文献[6]使用了一组推力器的效率计算模型, 使用电荷利用效率描述多电荷离子引起的效率变 化,使用电压利用效率描述放电电源用于加速离子 的电压,即有效加速电压的比例,式(12)及式(13) 为电荷利用效率η。及电压利用效率η、计算公式。

$$\eta_{q} = \left( \sum \Omega_{i} / \sqrt{q_{i}} \right)^{2} / \left( \sum \Omega_{i} / q_{i} \right)$$
(12)  
$$\eta_{q} = \frac{V}{V} V$$
(12)

$$\eta_{\rm v} = V_{\rm i}/V_{\rm d} \tag{13}$$

式中: $V_a$ 为推力器放电电源电压; $\Omega_i$ 为价态为i的离子的电流分数。

依据已得的 E×B 探针测量结果,由式(3)得到 1价和2价氙离子的有效加速电压,见表3。

#### 表3 各测量点的Xe<sup>+</sup>、Xe<sup>2+</sup>有效加速电压

Tab. 3 Effective acceleration voltages of Xe<sup>+</sup> and Xe<sup>2+</sup> at each measuring point

角度及译	离子种类	有效加速电压/V
0°	Xe <sup>+</sup>	180.17
0	${ m Xe}^{2+}$	181.92
10°	10° Xe <sup>+</sup>	168.58
10	$\mathrm{Xe}^{2+}$	179.45
20° X	Xe <sup>+</sup>	170.81
	$Xe^{2+}$	173.70

根据实验分析结果,计算3处测量点离子平均 电荷状态Q及平均有效加速电压ΔV<sup>[9]</sup>:

$$Q = f_1 + 2f_2 \tag{14}$$

$$\Delta V = \left( f_1 V_1 + 2 f_2 V_2 \right) / Q \tag{15}$$

式中: $f_1$ 、 $f_2$ 分别为1价、2价离子比例分数; $V_1$ 、 $V_2$ 分 别为1价、2价离子的有效加速电压,由此得到3处 测量点的平均电荷状态及平均有效加速电压, 见表4。

#### 表4 各测量点的平均电荷状态及平均有效加速电压

Tab. 4 Average electric charge quantity and average effective acceleration voltage of each measuring point

角度/(°)	平均电荷状态	平均有效加速电压/V
0	1.057 5	180.36
10	1.072 5	170.05
20	1.095 8	171.32

由表4可知,随着角度增加,Xe<sup>+</sup>的比例分数降低,Xe<sup>2+</sup>的比例分数增加,测量点处的平均电荷增

加。根据式(12)及式(13),对3个测量点结果分别 计算电荷利用效率和电压利用效率,并取平均值, 得到推力器的电荷利用效率及电压利用效率分别 为0.9938及0.8695。

# 4 结束语

基于对E×B探针最大输入角离子的运动分析, 推导了仅与探针结构相关的分辨率关系式,设计了 一种 E×B 探针系统,该探针系统电流收集误差为 5%,利用该探针系统对200W级霍尔推力器进行羽 流诊断。结果表明:系统可较好的分辨1价及2价氙 离子。实验数据表明在距离推力器出口500mm处, 与中轴线角度 0~20°内, Xe<sup>+</sup>比例分数在 90.42%~ 94.25%, 对应的 Xe<sup>2+</sup>比例分数在 9.58%~5.75%; 随 着角度的增加,Xe<sup>+</sup>比例分数减少,Xe<sup>2+</sup>比例分数增 加,该现象可能是由2价离子产生在推力器放电室的 更下游导致,同时比例分数的变化导致平均电荷增 加,且平均电荷状态范围为1.0575~1.0958;在该测 量范围内,平均有效加速电压可达170.05~180.36 V; 推力器的电荷利用效率为99.38%,电压利用效率为 86.95%。实验得到的离子比例分数及离子能量分 布,平均电荷状态和各价态离子的有效加速电压,为 羽流仿真提供验证;电荷利用效率及电压利用效率, 为推力器推力损失及效率分析提供依据。

#### 参考文献

- [1]康小录,张岩.空间电推进技术应用现状与发展趋势[J].上海航天,2019,36(6):24-34.
- [2] EKHOLM J M, HARGUS W A. E×B measurements of a 200 W xenon Hall thruster [C]// 41st AIAA/ ASME/SAE/ASEE, Joint Propulsion Conference and Exhibit. Tucson, AZ: AIAA, 2005: 4405.
- [3] HUANG W, SHASTRY R. Analysis of Wien filter spectra from Hall thruster plumes [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(7): 073502.
- [4] HOFER R R, GALLIMORE A D. Ion species fractions in the far-field plume of a high-specific impulse Hall thruster [C] //39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Huntsville, AL: AIAA,2003: 5001.
- [5] POLLARD JE, DIAMANT KD, CROFTON MW, et al. Spatially-resolved beam current and charge-state distributions for the NEXT ion engine [C]// 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, USA: AIAA, 2010:

6779.

- [6] HUANG W, KAMHAWI H, HAAG T W. Facility effect characterization test of NASA's HERMES Hall Thruster [C]// 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Reston, USA: AIAA, 2016: 4828.
- [7] VAHRENKAMP R P. Measurement of double charged ions in the beam of a 30 cm mercury bombardment thruster [C]// 10th Electric Propulsion Conference. Reston, USA: AIAA, 1973: 1057.
- [8] KIM S W. Experimental investigations of plasma parameters and species-dependent ion energy distribution in the plasma exhaust plume of a Hall thruster[D]. Michigan: University of Michigan, 1999.
- [9] LARSON C W, BROWN D L, HARGUS W A. Thrust efficiency, energy efficiency and the role of VDF in Hall thruster performance analysis[C]// 43rd AIAA/ ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, USA: AIAA,2007: 5270.
- [10] BUNDESMANN C, EICHHORN C, SCHOLZE F, et al. An advanced electric propulsion diagnostic (AEPD) platform for in-situ characterization of electric propulsion thrusters and ion beam sources[J]. European Physical Journal D, 2016, 70(10): 212.
- [11] FRIEMAN J D, KAMHAWI H, PETERSON P Y, et al. Completion of the long duration wear test of the NASA HERMeS Hall thruster [C]// AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum. Reston, USA: AIAA, 2019: 3895.
- [12] KAMHAWI H, HUANG W, CHOI M. HERMeS thruster magnetic field topology optimization study: plasma plume results [C]// AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. Reston, USA: AIAA, 2020: 3627.
- [13] SKRYLEY A, KRIVORUCHKO D, GORSHKOV
   O. Foundation of the new laboratory-MIPT plasma propulsion lab [C]// 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint
   Propulsion Conference. Reston, USA: AIAA, 2017: 4882.
- [14] 唐福俊,张天平.离子推力器羽流测量 E×B 探针设计 及误差分析[J].真空与低温,2007(2):77-80.
- [15] SNYDER A, KAMHAWI H, PATTERSON M. Single-string integration test measurements of the NEXT ion engine plume [C]// 40th AIAA/ASME/ SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston, USA: AIAA, 2004: 3790.