

离子推力器羽流测量 $E \times B$ 探针设计及误差分析

唐福俊, 张天平

(兰州物理研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 分析了 $E \times B$ 探针测量离子电推进羽流的误差, 重点讨论了 $E \times B$ 探针的分辨率以及 $E \times B$ 探针设计的主要问题。设计了一种用于离子推力器羽流双荷离子测量的 $E \times B$ 探针。

关键词: 离子推力器; $E \times B$ 探针; 测量误差; 羽流

中图分类号: TL817+.4

文献标识码: A

文章编号: 1006-7086(2007)02-0077-04

ANALYSIS AND DESIGN OF $E \times B$ PROBE FOR MEASUREMENT OF ION THRUSTER PLUMES

TANG Fu-jun, ZHANG Tian-ping

(Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

Abstract: $E \times B$ probe measurement error was analysed. The resolution of the $E \times B$ probe and the key problems of design of $E \times B$ probe were discussed in detail. A design of $E \times B$ probe for measurement of doubly charged ions in ion thruster plumes was presented as well.

Key words: ion thruster; $E \times B$ probe; measurement error; plume

1 引 言

$E \times B$ 探针又称为威恩过滤器 (Wien filter), 是质谱仪器, 作为速度过滤器可以根据离子速度分离不同荷电状态离子。在电推进研究中主要用于测量羽流中双荷离子比例。离子推力器羽流等离子体中的离子主要是单电荷离子, 同时存在一定比例的双电荷离子。由于经历的加速电压相同, 双电荷氙离子的能量是单电荷氙离子的两倍, 对航天器危害较大, 同时影响离子推力器产生的推力以及推力器的寿命。在电推进系统研究中开展羽流双电荷离子比例的测量具有重要的意义。

2 $E \times B$ 探针结构与测量原理

$E \times B$ 探针结构如图 1 所示。探针主要由准直套、电磁场区、飘移管、离子接收器组成。经准直套进入电磁场区的离子速度方向平行于探针轴线。电场和磁场为均匀电场和磁场, 二者相互正交, 且分别与离子速度方向正交。离子受到电场力和洛伦兹力的作用, 2 个力方向相反, 合力由式 (1) 表示

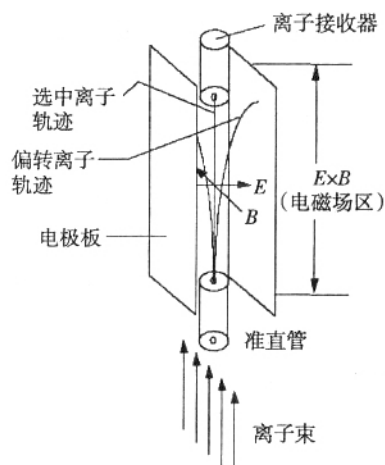


图 1 $E \times B$ 探针原理图

收稿日期: 2007-3-18.

作者简介: 唐福俊 (1973-), 男, 甘肃省武山县人, 硕士研究生, 从事电推进研究。

$$\vec{F} = e\vec{q}_i \cdot \vec{E} + e\vec{q}_i \cdot \vec{v}_i \times \vec{B} \quad (1)$$

式中 e 为电子电量; q_i 为离子所带的电荷数; v_i 表示离子的速度。对于给定速度的离子可以调节两电极板间电压差使离子受力为零, 离子不改变方向地通过电磁场区, 被离子接收器接收形成探针电流。此时由式 1) 可知, 离子速度满足式 2)

$$E = Bv_i \quad (2)$$

对于离子推力器羽流中的离子, 所经历的加速电压相同, 不同荷电状态的离子具有不同速度。应用 $E \times B$ 探针可以分离不同荷电状态的离子, 通过探针电流可以计算出双荷离子比例。用 V_i 表示加速电压; M_i 表示离子质量; V_p 表示探针两电极板间电压差; d 表示两电极板间距; v_i 表示离子的速度; e 为电子电量; q_i 为离子所带的电荷数, 则有

$$(M_i \cdot v_i^2) / 2 = e \cdot q_i \cdot V_i \quad (3)$$

$$V_p = Ed \quad (4)$$

由式 2) + 4) 可得

$$V_p = d \cdot B \sqrt{2e \cdot q_i / M_i} \cdot V_i \quad (5)$$

式 5) 是离子加速电压 V_i 与 $E \times B$ 探针电极板扫描电压 V_p 之间的关系式。

3 $E \times B$ 探针设计与测量误差分析

3.1 $E \times B$ 探针的分辨率^[1]

理想情况下, 经准直套进入 $E \times B$ 探针电磁场区的离子方向平行于探针轴线。同一种速度的离子被探针收集形成探针电流对应的电极板扫描电压为一个确定值。实际上, 由于探针准直套的入口和出口小孔具有一定尺寸, 故进入探针电磁场区的离子速度方向并不全是平行于探针轴线, 部分离子的方向与探针轴线存在一定夹角 (一般很小)。因此, 对应同一种速度 (大小相同) 的离子被 $E \times B$ 探针收集形成探针电流时, 电极板扫描电压具有一定宽度, 如图 2 所示。 $E \times B$ 探针的分辨率就用探针电极板扫描电压宽度, 即 $2W$ 表示。

$E \times B$ 探针分辨率的计算关系如图 3 所示, 假设只有一种速度的离子从准直套入射口进入, 只是方向有所不同。设与探针中心轴线平行的入射离子, 方向不偏转通过电磁场区所对应的电极板电压差为 V_c 。进入电磁场区入射方向偏离最大的离子能够被收集时电极板电压差为 V , 那么, $V = V_c + W$ (或 $V = V_c - W$), V_c 满足式 6)

$$V_c = d \cdot B \cdot v_i \quad (6)$$

图 3 中符号含义: a_1 为准直套入口孔径; a_2 为准直套出口孔径; a_3 为飘移管入口孔径; a_4 为离子收集盘直径; Z_c 为准直套长度; Z_{cb} 为电磁场区长度; Z_d 为飘移管长度; d 为平行电极板间距; α 为离子最大偏角方向与探针轴线的夹角; β 为离子进入飘移管入口时速度与探针轴线的夹角; X_1 为不考虑电磁场作用时, 最大偏角方向的离子从准直套出口孔到达飘移管入口时在 X 轴向的位移; X_2 为准直套出口孔一侧到飘移管入口孔相反侧的 X 方向距离。

由图 3 所示几何关系可知

$$\tan \alpha \approx (a_1 + a_2) / (2Z_c) \quad (7)$$

$$X_1 = Z_{cb} \cdot (a_1 + a_2) / (2Z_c) \quad (8)$$

$$X_2 \approx (a_2 + a_3) / 2 \quad (9)$$

从准直套入口一侧进入、从准直套出口相反一侧射出的离子偏角最大, 如图 3 所示。当偏角最大的离子同时满足式 10)、式 11) 2 个条件时, 才有可能在电磁场作用下偏转被离子收集盘收集。即 W 值不超过由式

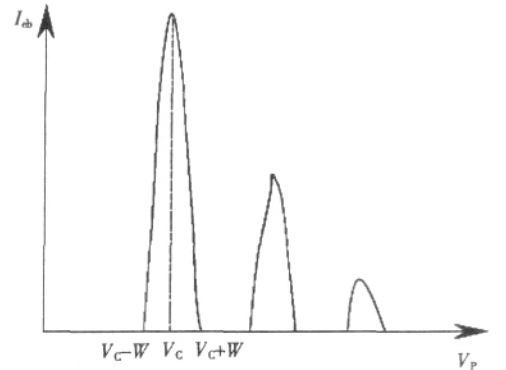


图 2 $E \times B$ 探针分辨示意图

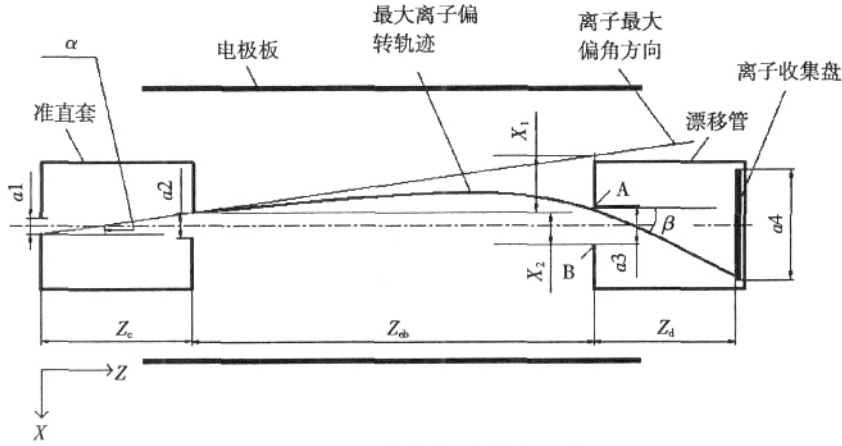


图3 E×B 探针分辨率计算关系图

(10)、式(11) 2 式确定的最大值

$$(1/2) a_x \cdot t_f^2 \leq X_1 + X_2 \quad (10)$$

$$\tan \beta \leq (a_3 + a_4) / (2Z_d) \quad (11)$$

式中 a_x 为离子在探针电磁场区飞行时 x 方向的加速度; t_f 为离子在探针电磁场区飞行的时间。 a_x 、 t_f 、 $\tan \beta$ 分别讨论如下:

加速度 a_x 满足关系式(12)

$$M_i \cdot a_x = e \cdot q_i \cdot (V_c + W) / d - e \cdot q_i \cdot v_i \cdot B \quad (12)$$

将式(9)代入上式可得

$$a_x = e \cdot q_i \cdot W / (M_i \cdot d) \quad (13)$$

由于离子偏角很小, z 轴方向的速度变化可以忽略不计, x 轴方向的加速度变化可以忽略。飞行时间 t_f 、 $\tan \beta$ 分别由式(14)、式(15)表示

$$t_f = Z_{cb} / v_i = d \cdot B \cdot Z_{cb} / V_c \quad (14)$$

$$\tan \beta = v_x / v_z \approx (a_x \cdot t_f - \tan \alpha \cdot v_i) / v_i \quad (15)$$

可得 E×B 探针分辨率计算公式

$$W \leq \frac{2d \cdot V_i}{Z_{cb}} \left(\frac{a_1 + a_2}{Z_c} + \frac{a_2 + a_3}{Z_{cb}} \right) \quad (16)$$

且

$$W \leq \frac{d \cdot V_i}{Z_{cb}} \left(\frac{a_1 + a_2}{Z_c} + \frac{a_3 + a_4}{Z_d} \right) \quad (17)$$

设计探针时,要合理选择探针分辨率。分辨率太高,加工和装配精度很难保证,而且测量探针电流变得困难;分辨率太低,测量误差较大,甚至无法分辨单电荷离子与双电荷离子。因此,设计时要在追求高分辨率和实现难度上进行一定的优化。一般情况,探针必须能够分离单电荷与双电荷离子,即探针分辨率要小于2种电荷离子所对应的电极板扫描电压中心间距,在此前提下,尽可能提高分辨率以提高测量精度。

值得注意的是,以上分析结果是假设探针不存在装配误差得到的,在实际设计探针结构时要充分考虑加工和装配精度。因为探针准直套孔径、漂移管入口孔径很小(一般为0.5~2.0 mm),较小的装配误差对探针分辨率以及测量结果有较大的影响。另外,探针结构设计、装配时要保证电磁场区电场和磁场的均匀性、电场与磁场的正交关系以及二者与离子入射方向的垂直关系,这是探针设计时需要考虑的重要问题。

3.2 其他测量误差

E×B 探针电流属于微小电流,电流的测量精度对探针的测量误差影响较大。国外电推进研究中,测量仪器普遍采用皮安表。一般情况下,扫描电压范围从0 V到500 V,与十分微小的探针电流相比,扫描电压的测量相对容易。因此,设计 E×B 探针测量电路时应充分考虑探针电流的测量精度问题。

E×B 探针在测量时,处在推力器羽流中,探针内部存在压力,一般高于真空室背压。由于探针内部离子与中性粒子、不同电荷离子之间的相互作用,会造成一定的测量误差。这部分误差分析和计算比较困难,一般采用实验数据对比分析的方法^[4]。

3.3 E×B 探针设计

3.3.1 探针基本参数选取

根据以上分析,参考国外 E×B 探针结构参数^[1,2-5],作者将基本参数选择如下:

$a_1=a_2=2\text{ mm}$, $a_3=3\text{ mm}$, $a_4=10\text{ mm}$, $d=25\text{ mm}$; $Z_c=150\text{ mm}$, $Z_{ab}=122\text{ mm}$, $Z_d=115\text{ mm}$ 。

离子推力器加速电压为 1 000 V,计算结果是 $W_0=28\text{ V}$ 。取磁场强度为 0.16 T,由式 5) 计算,对应 2 种电荷扫描电压差为 63.5 V,能够满足测量要求。为了在实际测量时能够调整分辨率,准直套和漂移管可以方便更换不同孔径的小孔。

3.3.2 E×B 探针电磁场设计

探针采用永磁体,形成均匀磁场。永磁体为扁平型铁氧体永磁体,上下两块相互平行,间距为 50 mm,中间用铝支承块隔开。探针外壳体采用磁导率高的钢板,外壳体同时起屏蔽外部电磁场、汇聚磁场能量的作用,有助于使探针磁场工作区形成均匀的磁场。磁感应强度设计值为 $B=0.16\text{ T}$,以实测为准。

电极板采用铝板,宽度为 40 mm。电极板与探针外壳体可靠绝缘,两电极板相互平行的关系由尺寸一致的绝缘块保证,电极板与磁场的垂直度由装配保证。为了减小磁场和电场的边缘效应,准直套和漂移管深入电磁场区 15 mm。

3.3.3 探针电流测量^[6]

取探针所在位置束流密度为 2 mA/cm^2 ,进入探针小孔的总电流约 $60\text{ }\mu\text{A}$ 。设双荷离子电流占 10%,双荷离子电流值为 $6\text{ }\mu\text{A}$,假定对双荷离子的测量精度为 5%,则电流测量精度要达到 $0.30\text{ }\mu\text{A}$ 。考虑到羽流束流中离子的飞行方向,实际能够被探针测量的离子电流远比以上估计值小。测量电路设计充分考虑微小电流的测量精度,选用皮安表测量探针电流。电流收集器采用杯形法拉第筒,电流收集盘材料为二次电子发射系数较小的钼。

4 结 论

E×B 探针主要用于测量电推进羽流中的双荷离子。经过分析计算,讨论了 E×B 探针测量电推进羽流中的双荷离子的误差,并提出了设计 E×B 探针时需考虑的几个关键问题。最后,根据分析计算,设计了一种用于测量离子推力器羽流双荷离子的 E×B 探针,该 E×B 探针能够满足测量要求。在实际测量时进行验证,并根据实测情况和研究工作需要进一步改进探针的设计。

参考文献:

- [1] SANG-WOOK KIM, Ph.D. Thesis, Experimental investigations of plasma parameters and species-dependent Ion energy distribution in the plasma exhaust plume of a Hall Thruster[D]. University of Michigan, Department of Aerospace Engineering, 1999.
- [2] MITCHELL LOUIS RONALD WALKER, Ph.D. Thesis, Effects of facility backpressure on the performance and plume of a Hall Thruster[D]. University of Michigan, Department of Aerospace Engineering, 2005.
- [3] RICHARD ROBERT HOFER, Ph.D. Thesis, The development and characterization of High-efficiency, High-specific Impulse Xenon Hall Thruster[D]. University of Michigan, Department of Aerospace Engineering, 2004.
- [4] PETER YOUNG PETERSON, Ph.D. Thesis, The development and characterization of a two-stage Hybrid Hall/Ion Thruster[D]. University of Michigan, Department of Aerospace Engineering, 2004.
- [5] GEORGE J, WILLIAMS JR. Measurement of Doubly Charged Ions in Ion Thruster Plumes[R], IEPC- 01- 310, 1999.
- [6] 李娟, 顾佐, 江豪成, 等. 氙离子火箭发动机补偿栅极设计[J], 真空与低温, 2005, 11(1): 29-33.