离子推力器放电室等离子体电势诊断方案研究

吴先明，张天平，王 亮，孙明明
（兰州空间技术物理所 真空技术与物理重点实验室，甘肃 兰州 730000）

摘要：放电室是离子推力器核心部件，目前国内尚未开展离子推力器的等离子体参数诊断工作。应用发射探针诊断离子推力器放电等离子体的参数，介绍了发射探针诊断等离子体电势的原理，发射探针诊断离子推力器放电室等离子体的方案及探针系统的组成。说明了数据处理方法和探针诊断的影响因素。

关键词：离子推力器；放电室；等离子体电势；发射探针；定位系统
中图分类号：V43 **文献标志码**：A **文章编号**：1006-7086(2014)06-0352-05
DOI：10.3969/j.issn.1006-7086.2014.06.011

STUDY ON THE DIAGNOSIS OF THE PLASMA POTENTIAL INSIDE THE ION THRUSTER

WU Xian-ming，ZHANG Tian-ping，WANG Liang，SUN Ming-ming
（Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory，Lanzhou Institute of Space Technology and Physics，Lanzhou Gansu 730000，China）

Abstract：The discharge chamber is the most important component of the ion thruster，currently，the work of diagnosing of the plasma inside the discharge chamber has not been carried out. In this paper，the application of emissive probe in diagnosis the plasma inside the discharge chamber is introduced. The principle of diagnosing the plasma potential using the emissive probe，the diagnostic scheme and the composition of the emissive probe system are mainly introduced. The data processing method and the factors which effect diagnosing accuracy are demonstrated.

Key words：ion thruster；discharge chamber；plasma potential；emissive probe；positioning system

0 引言

离子推力器放电室等离子体参数诊断具有重要意义，稳态下放电室内的等离子体分布决定着推力器性能的许多重要方面，而等离子体的运动是在电磁场共同作用下的结果，因此掌握放电室内的电势分布有助于加深对放电过程的理解，实测数据还用作数值模型的输入，实验诊断数据是对各种数值模型和分析模型的重要检验。

放电室等离子体参数诊断包括非接触式测量和接触式测量法，如LIF（激光诱导荧光）技术[1-2]、静电探针诊断技术等[3-4]。国外开展相关的实验研究工作较早也较成熟，如Sengupta等[5-6]为了研究不同的磁路结构对推力器性能的影响，在NSTAR样机上开展了一系列的实验诊断工作，Herman等针对NEXT型离子推力器开展了离子推力器放电室等离子电势发射探针诊断工作。国内尚未开展离子推力器放电室等离子体参数诊断工作，随着国内电推进技术的发展，开展相关的实验诊断工作已提到议事日程。文章主要介绍了放电室等离子体参数发射探针诊断的原理、系统组成及数据处理和误差分析等几部分内容。

1 发射探针电势诊断原理

悬浮发射探针工作原理简单，能够对当地等离

收稿日期：2014-09-22
基金项目：真空低温技术与物理重点实验室基金：9140c550206130c5503
作者简介：吴先明（1980-），男，江苏扬中人，工程师，博士研究生，主要研究方向为空间电推进技术与物理。
E-mail：wxm0511@163.com

子体电势进行直接测量,而不需要进行偏置电压扫描或者分析大量数据。悬浮发射探针相关理论相对成熟[7-9]。其主要工作原理为将探针灯丝插入等离子体中,然后向灯丝施加电流,当灯丝温度上升,电子自灯丝热发射出来。在理论上,当灯丝加热充分时,发射的电子基本上能够中和探针头周围的鞘层,从而允许探针悬浮于当地的等离子体电势。事实上,对于强发射的悬浮探针,因为过量发出的接近探针表面的慢速电子,空间电荷的限制产生了双鞘层,如图1所示。双鞘层作用使热发射电子反射回探针表面,一些麦克斯韦等离子体电子返回等离子体。高能麦克斯韦尾部电子能够到达探针。考虑到两种电子分布不同的能量比例,最大的发射流不足以补偿收集流,因为等离子体电子具有高得多的速度。

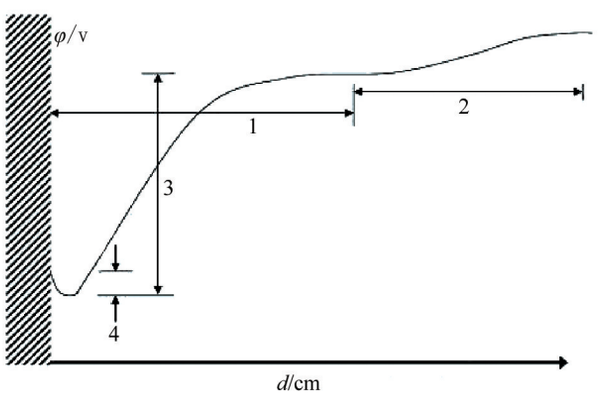

图1 包围发射探针的双鞘层中的电势分布示意图

1. 鞘层区域;2. 预鞘层区域;3. 等离子体电子势垒~T_e/e;4. 发射电子势垒

包围发射探针的结构可以分为预鞘层和收集鞘层区域。预鞘层为平均自由程的量级,而收集鞘层为德拜长度量级。对于发射的电子,势垒的大小为T_w/e,这里的T_w是灯丝温度。阻止等离子体电子到达探针的势垒为T_e/e的量级。结果发射探针将悬浮于电势$(T_e-T_w)/e$,小于真实的等离子体电势。由于$T_e \gg T_w$,$(T_e-T_w)/e$,可近似为T_e/e。正离子的出现有助于去除空间电荷,将悬浮探针电势与等离子体电势之间的差别减小至T_e的几分之一。

实际测量过程中,通常使用"拐点法"[10]确定探针所处位置的电位值,该方法只需对发射探针的U-I特性曲线求导得到拐点,如图2所示,通过外推空间电位的方法可以减小空间电荷的影响。

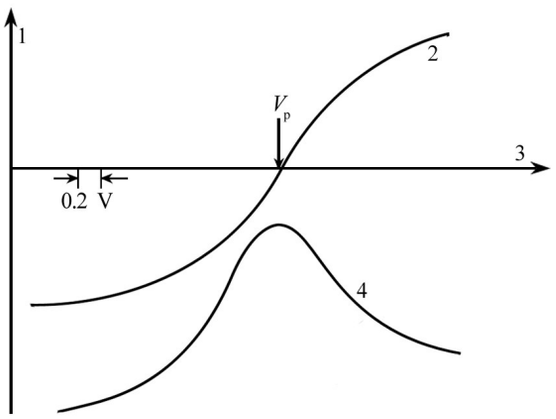

图2 发射探针特性曲线及微分曲线

1. 电流;2. 发射探针扫迹;3. 偏置电压;4. 微分扫迹

2 诊断系统方案

发射探针诊断系统主要由探针系统和高速定位系统构成。利用发射探针诊断放电室等离子体电位需要将探针伸入至放电室内部。因此需要在推力器试验样机的侧壁上开若干个孔,孔的个数视诊断范围而定,如图3中AB、CD及EF段。也可以在阳极壁上开细槽,槽的非探针位置封住,这样探针诊断在轴向也可以具有较高的空间分辨率。高速探针定位系统与推力器的位置关系如图4所示。定位系统的伸杆与y轴平行,推力器的轴线与x轴平行。发射探针安装在伸杆的末端,高速探针定位系统可沿着x轴方向通过滚珠丝杠往返运动,行程视诊断区域定。伸杆长度的选择使得发射探针的诊断区域能够达到推力器的轴线。探针通过孔进入放电室内待诊断位置。对于每个轴向位置(一个小孔对应的位置),通常使探针自轴线位置径向扫描,每个扫描位置由探针定位系统确定。

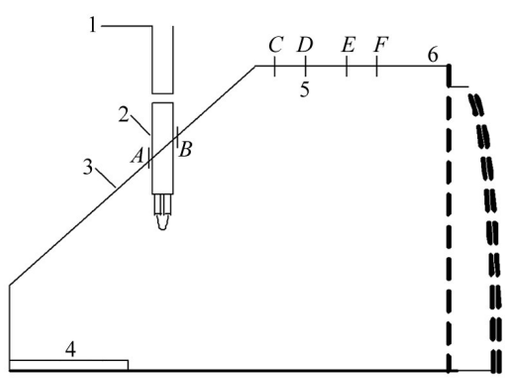

图3 探针在推力器内布局示意图

1. 定位系统安装杆;2. 发射探针;3. 阳极壁;4. 空心阴极;5. 开口;6. 阳极壁

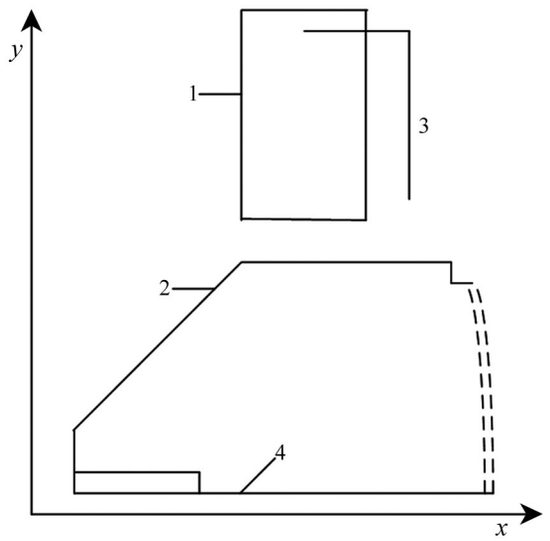

图4 推力器与高速探针定位系统位置关系示意图

1. 高速探针定位系统;2. 离子推力器;3. 伸杆;4. 推力器轴线

2.1 探针系统

2.1.1 发射探针探头

探针头主要是探针的发射部分,图5所示为典型的发射探针探头及其尺寸,发射部分为细的钨丝,钨丝熔点高、不易熔化,而且钨丝在探针定位系统较大的加速力下具有较强的耐受力。钨丝弯成环形,固定于氧化铝陶瓷管,设计氧化铝陶瓷管是为了尽量减小探针对所诊断等离子体的扰动。铜导线的使用是为了降低闭合回路的阻抗,从而降低了与之相关的电压降。

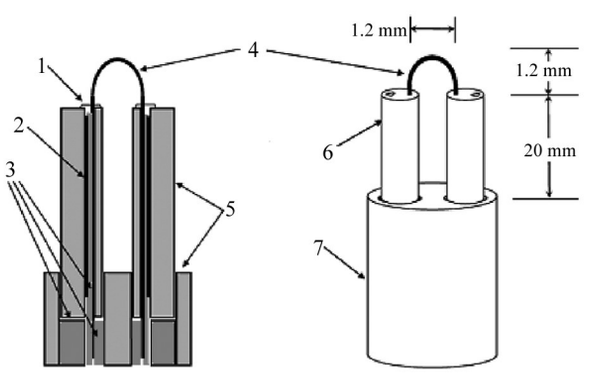

图5 典型的发射探头及相关尺寸示意图

1. 陶瓷环氧;2. 钨丝;3. 铜导线;4. 0.13 mm直径钨丝;5. 双筒氧化铝陶瓷绝缘管;6. 1.4 mm直径陶瓷管;7. 5.6 mm直径陶瓷管

2.1.2 发射探针电路

发射探针电路(如图6所示)采用*dc*电源提供足够的电流以加热灯丝,隔离变压器将电源与地隔离,两台隔离放大器记录发射探针电势和跨过灯丝的电压降。探针在径向离散的轴向位置扫描。对于每次扫描,记录探针位置、探针悬浮电势(等离子体电势)和灯丝电压。

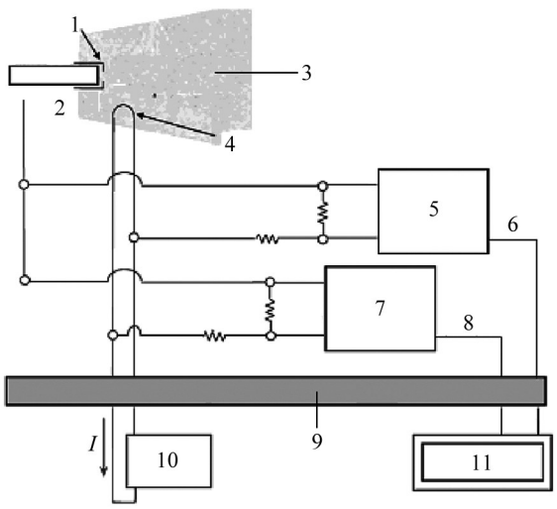

图6 发射探针电路示意图

1. 触持极;2. 阴极;3. 放电等离子体;4. 发射探针;5. 隔离放大器;6. 探针电压(高);7. 隔离放大器;8. 探针电压(低);9. 真空室壁面;10. 电源;11. 显示器

2.2 高速探针定位系统

对于发射探针诊断系统而言,高速探针定位系统的作用是快速而精确地将探针移动至放电室内的相应位置,并快速撤离,这样尽可能减小探针对放电室等离子体的干扰以及减轻对探针的毁坏。

对于高速探针定位器的应用在其他的领域已有很多年,通常使用气动系统,研究Tokamaks中的边缘效应[11]。这种类型的作动器对于研究离子推力器来说不可行,这是由于需要将推力器置于尽量远离真空室器壁的地方,以最小化来自溅射材料和背景气体的污染。由于对推力器位置的限制,作动器需要置于真空室内,这样排除了气动系统的使用。第二个可能的替代性方法是传统的履带/滑轮或者丝杠系统,不能提供必要的加速度和速度,因而也不能使用。最佳的选择是直线电机组件,能够提供很高的速度和加速度。直线电机选择3相无刷*dc*伺服电机,在一组直线轨道上运动。仅有的接触存在于运动部件与导轨之间,这样阻尼很小。电机使用正弦整流,线性编码器以对于很光滑的运动提供位

置反馈。线性编码器能够提供很高的定位分辨率(如5 μm),数字无刷伺服驱动电路(如 Pacific Scientific SC950)用于控制电机,该电路则通过一台PC机经由串行电缆控制。工作台用不锈钢或者石墨外壳进行保护,使其不受高能离子的直接影响以及保护电机不至于过热,电机过热会导致其性能的下降。在工作台一侧有一道细缝,细缝长度与工作台长度相当,探针杆通过其伸出。图7所示为高速探针定位系统示意图。高速探针定位系统主要包括直线电机、保护外壳、导轨和静电探针所系的细杆等部件。

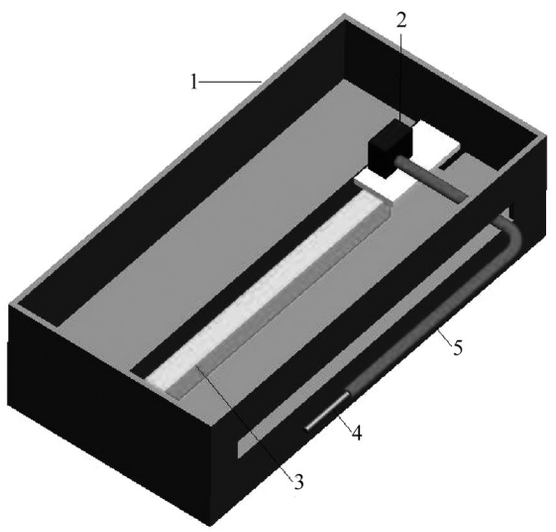

图7 高速探针定位系统示意图

1. 不锈钢/石墨保护外壳;2. 直线电机;3. 导轨;4. 探针;5. 安装杆

3 数据处理及误差分析

3.1 悬浮发射探针数据获取

为进行放电室等离子体电势的发射探针诊断,需要将离子推力器节流至所需要的工作条件,经过足够的时间(最小1/2 h),推力器工作达到稳态后开展诊断工作。值得注意的是诊断过程中必须向灯丝施加充分的加热电流以中和探针鞘层。图8所示为国外实测数据,说明了加热电流与不加热电流之间的差别。为了获得正确的加热电流,可以在轴向位置起点处进行几次初步的扫描以观察探针电势饱和的时间。在正确的加热电流下采集数据。对于获得的发射探针两端的电压 V_1 和 V_2,探针电位可以通过 $(V_1+V_2)/2$ 或者 $\sqrt{V_1^2+V_2^2/2}$ 等公式计算得到,视灯丝的热特性而定。

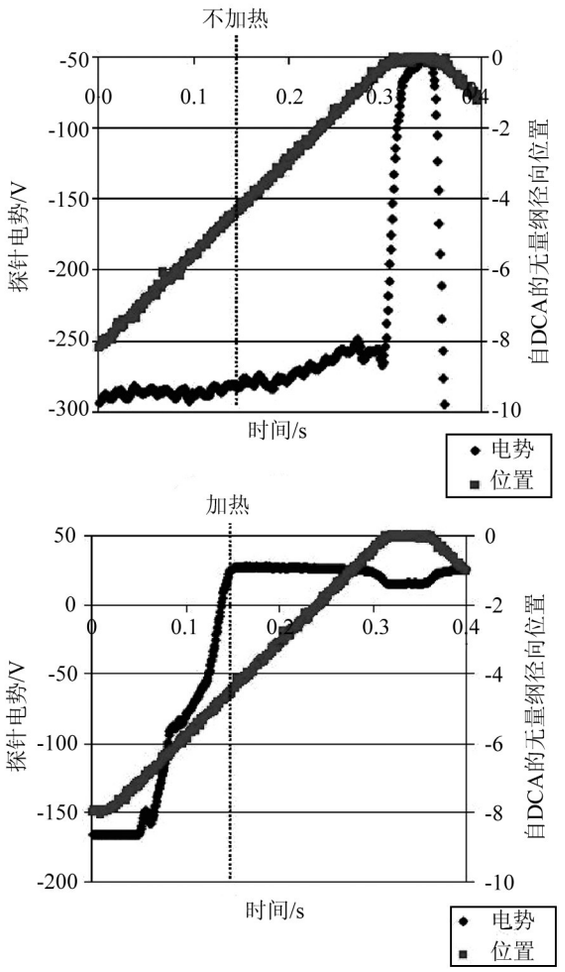

图8 发射探针悬浮电势和位置作为时间的函数

3.2 磁场对诊断的影响

大的磁场和密度梯度的出现会增加与空间电荷限制发射相关的问题。在磁化等离子体中,发射的电子倾向于沿着磁场运动,而不是自探针向各个方向扩展,这就增加了发射探针电势和实际的当地等离子体电势的不一致。另外,由于磁场造成的空间电荷对测量结果的影响可以通过改变探针尺寸即灯丝的直径而避免。钨丝直径比电子的回转半径小得多。Hershkowitz的研究显示,下面的关系满足时,磁场的影响可忽略[12]:

$$B \ll \frac{4.8\sqrt{T_{ev}}}{\frac{d}{10}} \tag{1}$$

式中:T_{ev} 为电子温度,eV;d 为发射灯丝直径,mm;B 为磁场,G。

对于典型的推力器工作条件以及图5所示钨丝直径,可得到 $B \ll 0.65$ T。通常对于推力器而言,在阴极出口平面处的磁场强度为0.1 T的量级,随

着距离放电阴极组件(DCA)出口平面的轴向和径向距离的增加而下降。在离子推力器的放电室内进行诊断,磁场的影响对发射探针测量结果的影响可忽略。

3.3 悬浮探针误差分析

3.3.1 模型误差

模型误差主要来自空间电荷效应。发射探针是一个加热至发射状态的电极,所以用作诊断时必然也会在探针周围形成热发射鞘层,直接影响着诊断的准确性,探针理论上称之为空间电荷效应,会使诊断的电位小于当地实际等离子体电位,发射探针测量给出的误差为 T_e/e 的几分之一量级[13]。通过降低探针发射强度外推可以减弱空间电荷的影响,从而得到更为准确的诊断结果。

3.3.2 电子误差

电子误差包含电路噪声。对于整个电路,通过使用高压SHV同轴电缆噪声可尽可能降低,在放电室内外都是这样。隔离的输入端对于所有元件允许有共同的接地点,从而消除了整个接地环中的噪声。当探针和 dc 电源悬浮于高电位时,非理想的悬浮电源引入了至地的漏电流。可评估的漏电流结果是探针悬浮于小于真实的等离子体电势。

另外,利用加热电流通过灯丝进行等离子体电势的测量导致跨过灯丝的电压下降。该电压降落增加了测量值的不确定度。漏电流和电压降对总的等离子体电势测量的绝对大小的移动有贡献,导致相对电势测量不受影响。

4 结论

对于离子推力器的研制,放电室等离子体参数诊断是一项重要的工作。目前国内还没有开展相关的研究。通过离子推力器放电室等离子体电势诊断方案,介绍了发射探针诊断等离子体电势的原理,对于诊断必须采用的高速探针诊断系统进行了较详细的介绍。分析了磁场对电势诊断的影响以及诊断误差等。为开展离子推力器的等离子体电势诊断提供参考,对于离子推力器的研制以及性能的改进具有一定的意义。

参考文献:

[1] Williams G J, Smith T B, Domonkos M T, et al. Laser-Induced fluorescence characterization of ions emitted from hollow cathodes[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2000, 28(5): 1664-1675,

[2] Williams G J, Smith T B, Hidaka Y, et al. FMT-2 discharge cathode erosion rate measurements via laser-induced fluorescence[C]//36th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2000.

[3]Herman D A, andGallimore A D. Discharge chamber plasma potential mapping of a 40 cm NEXT-type Ion engine[C]//41st AIAA Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2005.

[4] Herman D, Gallimore A D. Discharge cathode electron energy distribution functions in a 40 cm next-type ion engine[C]// 41st AIAA Joint Propulsion Conference, Tucson, Arizona, USA, 2005.

[5] Sengupta A, Goebel D, Wirz R. Experimental investigation of discharge plasma magnetic confinement in the NSTASR ion thruster[M]. Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 2005.

[6] Demidov V I, Ratynskaia S V, Rypdal K. Electric probes for plasmas: the link between theory and instrument[J]. Review of Scientific Instruments, 2002, 73, (10) 3409-3439.

[7] Hershkowitz N, Cho M H, Measurement of plasma potential using collecting and emitting probes[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 1988, 6(3): 2054-2059.

[8] Hershkowitz N, Nelson B, Pew J, et al. Self-Emissive probes [J]. Review of Scientific Instruments, 1983, 54(1): 29-34.

[9] Boedo J, Gray D, Chousal L, et al. Fast scanning probe for tokamak plasmas[J]. Review of scientific instruments, 1998, 69 (7): 2663-2670.

[10] Smith J R, Hershkowitz N, Coakley P. Inflection-point method of interpreting emissive probe characteristics[J]. Review of Scientific Instruments, 1979, 50(2): 210-218.

[11] Boedo J, Gray D, Chousal L, et al. Fast scanning probe for tokamak plasmas[J]. Review of scientific instruments, 1998, 69 (7): 2663-2670.

[12] Hershkowitz N, Cho M H. Measurement of plasma potential using collecting and emitting probes[J]. Journal of Vacuum Science and Technology A, 1988, 6(3): 2054-2059.

[13] Ye M Y, Takamura S. Effect of space-charge limited emission on measurements of plasma potential using emissive probes[J]. Physics of Plasmas, 2000, 7(8): 3457-3463.