

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING 中文核心期刊 中国科技核心期刊

一种等离子体溯源测量装置设计及性能测试

李耀 贾军伟 王青青 武宇婧 常猛 董学江 郝剑昆 郎昊 李绍飞 张韧

Design and performance testing of a plasma traceability measurement device

LI Yao, JIA Junwei, WANG Qingqing, WU Yujing, CHANG Meng, DONG Xuejiang, HAO Jiankun, LANG Hao, LI Shaofei, ZHANG Ren

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12126/see.2023124

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

探针校准用ECR等离子体源特性试验研究

Experimental study of characteristics of ECR plasma source for probe calibration 航天器环境工程. 2020, 37(6): 602-609 https://doi.org/10.12126/see.2020.06.011

空间等离子体磁场重联过程地面实验装置及实验研究概述

Ground-based experimental study of magnetic reconnection in space plasma environment 航天器环境工程. 2019, 36(6): 655-661 https://doi.org/10.12126/see.2019.06.019

DBD等离子体非定常激励下的平板流场结构分布研究

Numerical study of flow structure over a flat plate actuated by unsteady DBD plasma 航天器环境工程. 2018, 35(4): 336–341 https://doi.org/10.12126/see.2018.04.005

两种翼型螺旋桨ARA-D和S1223的等离子体增效实验研究

Experimental study of the enhancement of plasma flow control of ARA-D and S1223 propeller airfoils 航天器环境工程. 2017, 34(1): 81-85 https://doi.org/10.12126/see.2017.01.013

太赫兹波在高速飞行器等离子体鞘套中的传输特性

Propagation characteristics of terahertz wave in plasma sheath of high-speed aircraft 航天器环境工程. 2020, 37(5): 421-427 https://doi.org/10.12126/see.2020.05.001

微尺度质谱仪离子源结构设计及离子光学系统仿真

Structural design and optical system simulation of ion source for microscale mass spectrometer 航天器环境工程. 2019, 36(1): 83-88 https://doi.org/10.12126/see.2019.01.013

181

https://www.seejournal.cn

E-mail: htqhjgc@126.com

Tel: (010)68116407, 68116408, 68116544

一种等离子体溯源测量装置设计及性能测试

李 耀, 贾军伟*, 王青青, 武宇婧, 常 猛, 董学江, 郝剑昆, 郎 昊, 李绍飞, 张 韧 (北京东方计量测试研究所,北京 100086)

摘要: 文章设计了一套等离子体溯源测量装置为验证感应耦合等离子体(ICP)源作为校准源的性能,找出满足朗缪尔探针溯源校准的最佳等离子体测试条件,提升测试准确性,采用控制变量法对不同 工况下 ICP 源等离子体电子密度和电子温度的稳定性和均匀性,以及电子密度的重复性进行测试。结果 表明: 在放电开始 5~20 min 内,等离子体电子密度和电子温度的稳定性分别优于 99.4% 和 98.9%;在 探针伸入真空腔体内 440~480 mm 的范围内,等离子体电子密度和电子温度的均匀性分别优于 97.2% 和 93.6%;在等离子体源放电功率 100~900 W 范围时,等离子体电子密度的重复性优于 86.6%,并且多数 在 92% 以上。本研究可为后续等离子体诊断手段的优化提供参考。

关键词:等离子体源; 朗缪尔探针; 控制变量法; 结构设计; 电子密度; 电子温度 中图分类号: O536; P354.4 文献标志码: A 文章编号: 1673-1379(2024)02-0181-09 DOI: 10.12126/see.2023124

Design and performance testing of a plasma traceability measurement device

LI Yao, JIA Junwei^{*}, WANG Qingqing, WU Yujing, CHANG Meng, DONG Xuejiang, HAO Jiankun, LANG Hao, LI Shaofei, ZHANG Ren (Beijing Orient Institute of Measurement and Test, Beijing 100086, China)

Abstract: A plasma traceability measurement device was designed in this article to verify the performance of the inductively coupled plasma (ICP) as a calibration source. It is to identify the optimal plasma testing conditions that satisfy the traceability calibration of the Langmuir probe, and to improve the test accuracy. The control variable method was used to investigate the stability and uniformity of electron density and electron temperature, the repeatability of electron density of ICP source under different working conditions. The results show that, when the measurement time is within 5-20 min, the stabilities of electron density and electron temperature of plasmas are better than 99.4% and 98.9% respectively. When the probe inserts into the vacuum chamber 440-480 mm, the uniformities of electron density and electron temperature of plasmas are better than 99.4% and 98.9% respectively. When the probe inserts into the vacuum chamber 440-480 mm, the uniformities of electron density and electron temperature of plasmas are better than 99.4% and 98.9%. The proposed research may provide a reference for the future optimization of the plasma diagnostic means.

Keywords: plasma source; Langmuir probe; control variable method; structural design; electron density; electron temperature

收稿日期: 2023-08-07; 修回日期: 2024-03-28 基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: U22B2094)

引用格式: 李耀, 贾军伟, 王青青, 等. 一种等离子体溯源测量装置设计及性能测试[J]. 航天器环境工程, 2024, 41(2): 181-189 LI Y, JIA J W, WANG Q Q, et al. Design and performance testing of a plasma traceability measurement device[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2024, 41(2): 181-189

0 引言

等离子体以其独特的物理性质以及广泛的存 在形式,一直是航空航天领域的重要研究及应用对 象^[1]。如今,等离子体在航天工程、能源科技、材料 科学等诸多领域发挥着举足轻重的作用^[2]。航天工 程对等离子体参数的测量需求繁多,对等离子体特 性的深入研究是评估电推进性能、分析等离子体对 材料表面效应及空间环境效应的重要依据^[3-4];特别 是在载人航天、探月工程以及深空探测等重大航天 工程领域,等离子体参数的准确测量已经成为世界 各国竞相发展的核心技术之一[5-8]。随着对等离子 体特征参数精细化测量要求的不断提高,现有的等 离子体测量方法(如朗缪尔静电探针、发射光谱法、 吸收光谱法等[9-13])虽能获取部分电子温度、电子密 度等信息,但是即使最为成熟的静电探针测量方法 也还停留在诊断阶段,只有国外专业实验室可以完 成探针准确性测试。而在实际使用中,由于探针的 使用精度不可避免会受到影响,因此需要建立一套 等离子体溯源测量装置以满足探针的向上溯源和 向下传递。然而,探针测量溯源难度大、周期长、测 量误差较大,难以满足航天工程的高要求;此外,目 前对真空环境下的等离子体测量技术研究也相对 匮乏,尚无相关国内外标准,进一步加剧了等离子 体特征参数测量的不确定性。因此,开展等离子体 测量技术与溯源校准研究,建立有效的等离子体溯 源装置,已成为国内重大航天工程中亟待解决的关 键基础科学问题。

本文针对北京东方计量测试研究所实验室研建 的等离子体溯源测量装置进行设计和测试,使用经 过与国际对标的标准探针,通过控制变量法分别改 变等离子体源功率、气流量、真空度等放电条件,对 等离子体电子密度、电子温度的稳定性、均匀性,以 及等离子体电子密度的重复性进行测试,验证使用 ICP 源作为等离子体溯源测量装置中的校准源的可 行性,找到最适合探针溯源测量的实验条件,旨在 提升静电探针溯源测量的准确性和便捷性。

1 等离子体溯源测量装置

等离子体溯源测量装置主要包括校准源、校准 仪器以及真空系统3部分。校准源(等离子体源)的 种类很多,根据不同的天线耦合方式及其外部是否 施加磁场可分为电容耦合等离子体(CCP)、感应耦 合等离子体(ICP)、电子回旋共振(ECR)等离子体 等多种类型。从直流放电到射频、微波放电,不同的 放电方法产生的等离子体的参数特性不尽相同^[14]。 本文选择的 ICP 源理论成熟、稳定性好、实操性强、 工作原理简单,无须外加直流磁场,能够产生较高 密度的等离子体并较少受到射频电压的限制,生成 的等离子体均匀性好。校准仪器一般指探针测量系 统,具有一定的空间分辨能力,能够在较宽的条件 范围内稳定工作且能获得最多的等离子体参数,测 试较准确。真空系统用于提供等离子体产生的真空 环境。

等离子体溯源测量装置整体结构如图 1 所示。 真空腔舱门处的接口安装 ICP 源, 在测试时, 其产 生的等离子体扩散分布在舱内等离子体区。A~A-3 和 B~B-3 分别是对称分布的 8 个测量窗口, 用于 静电探针和观察窗的安装。以 B 法兰窗口为坐标 轴原点, 探针方向为 x 轴, 垂直于探针方向为 y 轴 建立坐标系, 装置实物如图 2 所示。







图 2 等离子体溯源测量装置实物 Fig. 2 Plasma traceability measurement device

本装置具备对一系列参数可调的功能,具体技 术指标和可调参数如下:

1)等离子体电子密度测量范围: 10¹²~10¹⁸ m⁻³;

2)等离子体电子温度测量范围:1~10 eV;

3)放电气压范围: 10⁻¹~10 Pa;

4)进气量:流量计开度调节 0~200%(对应氩 气流量 0~106.6 sccm);

5)等离子体源放电功率范围:0~1250 W。

1.1 等离子体源

ICP 源的工作原理是:将 13.56 MHz 的射频电 流通入电感线圈中,电流在线圈中环绕并产生射频 磁场,磁场在真空腔室中由电磁感应产生射频电场 从而驱使电子运动,使气体电离产生放电效应^[15-16]。

ICP 源可以看作是一个空气芯变压器模型,主要由4部分组成:射频功率源、射频天线、匹配网络和真空腔室。射频功率源通入高频电流产生激发等离子体的能量;射频天线将射频功率源产生的能量发射至真空腔室中形成等离子体;匹配网络用来调整负载的阻抗,使其与功率源的输出阻抗相匹配;真空腔室为等离子体的产生提供场所。

1.1.1 射频功率源

射频功率源内置射频功率测量探头,可输出频率 13.56 MHz、最大功率 1250 W 的射频功率信号, 射频功率稳定度为±0.005%;在输出功率小于 200 W 时可承受 100% 反射功率。

1.1.2 射频天线

射频天线采用黄铜材料,设计成3圈同心圆形 状,最外圈外径330mm。此设计可产生空间轴对 称的射频耦合,保证了轴向均匀性;可通过调节各 同心圆的直径(即改变同心圆之间的疏密程度)抵 消由于感应磁场分布导致的径向不均匀性;通过调 整线圈之间的电容可改变各同心圆线圈上的射频 电压,降低大尺寸感应线圈的电抗,提高射频功率 的耦合效率并为射频串联谐振功率耦合效率最高 点提供条件。此外,在射频天线与等离子体之间设 计法拉第屏蔽网以减少天线与等离子体之间设 计法拉第屏蔽网以减少天线与等离子体之间设 和实物如图3所示。



1.1.3 匹配网络

射频功率源与射频天线之间通过同轴电缆连接,但是电缆线上由入射波和反射波叠加所产生的 驻波会增加传输线损耗,甚至损坏射频功率源的电 子元件。因此,射频功率源与射频天线之间必须使 用匹配网络,如图4所示。匹配网络带有2个可调 电容,其工作原理主要基于阻抗匹配理论,即:当射 频功率源的输出阻抗与真空腔室的负载阻抗不匹 配时,会导致能量反射和传输效率降低;匹配网络 须通过调整其内部可调电容的参数,改变负载的阻 抗值,使其与功率源的输出阻抗相匹配,从而确保 射频能量能够高效地传输到真空腔室中。



图 4 匹配网络结构示意 Fig. 4 Structural schematic of the matching network

射频天线与匹配网络安装在屏蔽机箱内,以减 少或消除等离子体生成过程中所产生的射频电磁 干扰对外部设备的影响。屏蔽机箱采用4mm 厚铝合金制作,其三维结构及实物如图5所示。通 过机箱外面的2个铝合金旋钮手动调节匹配网络 的可调电容,旋钮附近安装反射功率显示表,方便 根据反射功率的实时值调节电容。机箱上面板安 装有轴流风机,侧面板有条形开孔,以便通过强制 风冷散热来保证额定功率运行情况下屏蔽机箱内 的温度不高于60℃。

183



图 5 屏蔽机箱 Fig. 5 The shielding case

1.1.4 真空腔室

真空腔室是一个封闭环境,采用圆柱形几何设 计,满足高真空度实验环境,用于生成等离子体。 在真空腔室内,配备了多种控制和监测设备,如真 空计、气体流量计、压力传感器等,以便精确控制腔 室内的环境条件。

1.2 探针测量系统

朗缪尔探针又称静电探针,是一种最常用的等 离子体参数接触式测量仪器^[13]。从物理本质上说, 静电探针是一个置于等离子体中的电极,可用来收 集电子和离子电流。通常选择耐腐蚀、耐高温、 Q值较高的金属作为探针材料^[17]。在探针末端连接 一个外部电路,测量回路由探针、等离子体、等离子 体腔室壁面和扫描电源组成。扫描电源为探针施加 从负到正的周期性扫描电压,测量扫描电压和对应 的静电探针收集的总电流,即完成了等离子体探针 测量过程。

1.2.1 装置选型

本实验选用美国 Plasma-sensors 公司生产的 Multifunctional Plasma Probe Analyzer (MFPA) 探 针。针尖直径 0.125 mm,长度 10 mm,可满足 0~ 10²⁰ m⁻³范围的电子密度测量,可覆盖 0.05~20 eV 范围的电子温度测量。MFPA 探针通过真空腔室外 置式可移动平台进行测量,移动平台行程 600 mm。 针尖和探针整体结构如图 6 所示。



Fig. 6 Structural diagram of MFPA probe

实验前将所使用的探针送至爱尔兰 Impedans 公司标准实验室进行量值准确性检测,探针的各项 指标均符合校准要求。

1.3 真空系统

真空系统主要由高精度真空计、真空泵组和真 空腔室3部分组成,如图7所示。真空腔室为等离 子体源提供实验场所,采用放气率低的材料制造, 结构尺寸为 ¢0.8 m×1.0 m。在真空腔室左右两侧各 有4个观察窗。工作介质主要为氩气、氙气、氮气、 氦气,真空泵组由机械粗抽泵和分子泵组成,系统 真空度可通过2组高精度真空计实时测量和显示。



图 7 真空系统示意图 Fig. 7 Schematic diagram of the vacuum system

2 实验过程及数据处理方法

2.1 实验过程

实验过程中采用控制变量法,分别控制 ICP 源 放电功率、工质气体流量以及探针水平位置变化, 采集数据并验证 ICP 源电子密度的重复性,以及真 空腔室内等离子体电子密度和电子温度的均匀性 和稳定性。

在 ICP 源工作过程中,真空度直接影响等离子体的生成和维持。真空度过高会使气体分子间的碰撞概率减小,电离效率降低;真空度过低则气体分子间的碰撞过于频繁,导致能量损失和等离子体稳定性下降。本实验使用的 ICP 源的最佳真空度为10⁻¹~10 Pa,在此真空度内可实现最佳的放电效果和等离子体生成效率。在实验前,使用温湿度计对真空腔室内温度和实验室环境温度进行测量,提前开启室内空调使放电真空腔室内温度保持在(20±1)℃,相对湿度保持在(50±10)%。使用双路流量控制器,进气流量范围为 0~100 sccm。

确认测量装置实验初始条件,检查真空系统、 ICP 源、MFPA 探针的水、电、气和通信正常。开启 前级粗抽泵,并打开真空计,开始粗抽真空,直至舱 内压力降至 1×10² Pa 以下开启分子泵;待舱内压力降 至 1×10² Pa 左右,稳定后开启流量控制器,以 50 sccm 的流量向舱内供应高纯氩气。准备工作完成后开

启 ICP 源,设置初始放电功率,并调节匹配器降低 反射系数,直至等离子体源放电稳定后开始测试。

2.2 数据处理方法

保持进气流量、真空度、放电功率等实验条件 不变,间隔相同时间对等离子体特征参数进行连续 测量,通过式(1)计算参数的短期稳定性*S*,

$$S = 1 - \frac{x_{\max} - \overline{x}}{\overline{x}} \,. \tag{1}$$

改变真空度以及进气流量设定实验工况,每组 工况重复测量多次,每次测量间隔时间均大于 1周。根据贝塞尔公式,基于参数测量数据的标准 偏差 s(x_k)对特征参数重复性 C 进行评估,

$$C = 1 - \frac{s(x_k)}{x},\tag{2}$$

其中

$$s(x_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \,. \tag{3}$$

保持其他条件相同,在满足短期稳定性的最佳 测量时间内,通过改变探针伸入真空腔室的距离测 量等离子体不同位置处的电子密度和电子温度,通过 式(4)计算其空间分布均匀性U,得到测量值最为 均匀的空间范围,

$$U = 1 - \frac{x_{\max} - x_{\min}}{\overline{x}} \,. \tag{4}$$

式(1)~式(4)中: x_i表示第 i 次实验获得的特 征参数值(电子密度或电子温度), i=1, 2, …, n, n 表 示重复次数; x表示特征参数的平均值; x_{max}和 x_{min} 分别表示单次实验中特征参数的最大值和最小值。

3 实验结果及分析

3.1 等离子体电子密度和电子温度的稳定性验证

稳定性表示系统在一定时间范围内保持其特 征参数一致或稳定的能力。对于本次实验,即间隔 相同时间进行连续测量,验证等离子体电子密度与 电子温度的值是否维持稳定,不出现显著的波动或 变化。实验中保持探针向真空腔内伸入 400 mm 距 离不变,在进气流量 90 sccm、真空度 1.2 Pa 和放电 功率 500 W 的条件下,每隔 5 min 测量 1 组数据, 持续测量 60 min,得到等离子体电子密度和电子温 度随时间变化的曲线,如图 8 所示。



图 8 等离子体特征参数随时间变化曲线

Fig. 8 Variation of plasma characteristic parameters with time 由图 8 可知,等离子体电子密度和电子温度在 5~20 min 内曲线较为平稳。其原因可能是等离子 体源在这段时间内放电较为平稳,电子碰撞及扩散 等过程达到了相对平衡。在装置工作 5~20 min 内对等离子体特征参数进行测量,并由式 (1) 计算 该时段特征参数的稳定性,列入表 1。可以看到,电 子密度稳定性为 99.4%,电子温度稳定性为 98.9%, 均相当高。故可认为 5~20 min 为最佳测量时间。

表 1 5~20 min 内等离子体电子密度、电子温度及其稳定性 Table 1 Electron density, electron temperature of plasmas and their stabilities within 5-20 min

测试时间/min	电子密度/(×10 ¹⁵ m ⁻³)	电子温度/eV
5	3.32	2.24
10	3.34	2.24
15	3.34	2.19
20	3.36	2.19
稳定性/%	99.4	98.9

3.2 等离子体电子密度和电子温度的均匀性验证

本节主要通过改变探针伸入真空腔距离来测 量空间不同位置处的等离子体特征参数,验证等离 子体分布是否均匀,找到局部差异最小的空间范 围,进而优化 ICP 源的设计和操作条件。实验时保 持 ICP 源放电功率为 700 W 不变;真空腔进气流量 和真空度分别为 90 sccm、3.4 Pa,90 sccm、1.2 Pa, 50 sccm、1.2 Pa(工况 A、B、C)。实验过程中探针初 始位置及移动状态如图 9 所示,以探针所在法兰孔 内壁的中心位置为原点,向真空腔内部水平延伸方 向为 *x* 轴,将探针沿 *x* 轴向真空腔内部水平延伸方 向为 *x* 轴,将探针沿 *x* 轴向真空腔内部水平延伸方 的考 1CP 源出口先接近后远离),探针从原点开始 每伸入 10 mm 测量 1 次,直至伸入至 500 mm 停 止,全部测试过程均在满足短期稳定性的最佳测量 时间内(5~20 min)完成。





(b) 探针运动实物图
 图 9 测量等离子体特征参数的空间均匀性所用探针
 Fig. 9 The probe to measure the spatial uniformity of plasma characteristic parameters

不同工况下测量得到的电子密度和电子温度 随探针运动距离变化曲线如图 10 和图 11 所示。可 以看出,随着探针不断伸入腔体,电子密度呈先上升 后下降的趋势,电子温度呈先下降后平稳的趋势,当 探针伸入距离在 440~480 mm 范围时局部差异最小。











由式(4)计算3种工况A、B、C下探针伸入距 离为440~480 mm范围内等离子体电子密度和电 子温度均匀性,分别列入表2和表3。

表 2 探针伸入真空腔距离对应的电子密度及其均匀性

 Table 2
 Electron density and its uniformity corresponding to the distance of probe inserting into the chamber

探针伸入真空腔	电子密度/(×10 ¹⁵ m ⁻³)				
距离/mm	工况A	工况B	工况C		
440	2.52	4.27	3.75		
450	2.49	4.26	3.73		
460	2.53	4.23	3.72		
470	2.50	4.25	3.71		
480	2.46	4.25	3.68		
均匀性/%	97.2	99.1	98.1		

表 3 探针伸入真空腔距离对应的电子温度及其均匀性

 Table 3
 Electron temperature and its uniformity corresponding to the distance of probe inserting into the chamber

	-	-		
探针伸入真空腔	电子温度/eV			
距离/mm	工况A	工况B	工况C	
440	1.91	2.22	2.06	
450	1.87	2.23	2.10	
460	1.95	2.21	2.11	
470	1.88	2.27	2.09	
480	1.83	2.31	2.11	
均匀性/%	93.6	95.6	97.6	

可以看出,该空间范围内电子密度和电子温度 均匀性分别优于 97.2% 和 93.6%,均相当高,验证 了图 10 和图 11 的观察结论。

3.3 等离子体电子密度的重复性验证

重复性验证是考察在较长时间内,相同工况条 件重复进行多次实验所得电子密度的一致性程度, 即所得结果之间的差异是否在一定范围内保持稳 定,不随时间推移而发生显著变化。本次实验使用 氩气作为工质气体,保持 MFPA 探针尖向真空腔内 伸入 400 mm 距离不变,分别改变真空腔进气流量 和真空度,获得 30 sccm、0.58 Pa, 30 sccm、1.2 Pa, 90 sccm、1.2 Pa 以及 90 sccm、3.4 Pa 等 4 组实验条 件(工况 a~d),每次测试都在此 4 种工况下测量电 子密度,测试过程均在满足短期稳定性的最佳测量 时间内(5~20 min)完成,共进行6组测试,每组测 试间隔时间不小于1周,获得放电功率对应的不同 工况下等离子体电子密度并绘制曲线,如图 12 所示。图中曲线1~6分别代表在不同时间进行的 6组实验, s为以这6组实验曲线的标准偏差作为 误差棒的均值曲线。





图 12 不同工况下电子密度随 ICP 源放电功率变化曲线 Fig. 12 Variation curve of electron density with discharge power of ICP source under different operating conditions

结果表明, ICP 源放电功率逐渐增大时,等离 子体电子密度整体呈上升趋势,数值范围为10¹²~ 10¹⁶ m⁻³,且进气流量相同时,压力越低(或真空度越高),电子密度越大;真空度相同时,进气流量越大, 电子密度越大。由图 12 可以看到,不同工况测试 得到的电子密度重复性曲线在放电功率为100~ 900 W 时差别较小。分析原因可能是在此功率范围 内, ICP 源的电磁场强度适中,既能够有效地加速 电子使其与气体分子发生碰撞电离,又不会因为电 磁场过强而导致电子被过度加速而使电离过程变 得混乱无序,从而实现均匀放电。

为便于观察,将放电功率 100~900 W 对应的 电子密度重复性列入表 4,可知在 4 种工况下的各 点电子密度重复性均优于 86.6%,多数稳定在 92% 以上。表明在相同或相近的条件下,重复进行多次 测试所得结果能保持较好的一致性,即使在不同的 时间、由不同的人来操作,或者在略有差异的环境 条件下进行,实验结果仍然能够保持相对的稳定和 一致。

表 4	不同工况下电子密度重复性
-----	--------------

Table 4	Repeatability	of	electron	density	under	different
	operating cond	ditic	ons			

ICP源放电	电子密度重复性/%				
功率/W	工况a	工况b	工况c	工况d	
100	96.4	92.3	87.0	92.4	
200	97.7	97.1	94.7	95.4	
300	98.6	90.8	89.6	86.6	
400	97.1	95.8	95.1	92.1	
500	90.4	88.8	93.2	94.7	
600	89.3	90.2	93.2	93.7	
700	91.7	87.1	93.8	92.4	
800	92.1	90.7	94.4	89.0	
900	94.8	89.0	93.6	90.2	

4 结束语

本文以已与国际对标的静电探针作为校准仪器,采用自主研发的 ICP 源作为校准源构建等离子 体溯源测量装置。该等离子体源采用空间轴对称的 射频耦合模式、同心圆结构的可调电容线圈以及法 拉第屏蔽网等设计来消除射频感应天线与等离子 体之间的残余容性耦合,从而产生具有较高稳定度 的等离子体。

在不同放电功率、进气流量、真空度等放电条件下,对装置 ICP 源产生的等离子体电子密度、电子温度的均匀性和重复性,电子密度的稳定性进行测量,发现:在放电开始 5~20 min 内,等离子体电子密度稳定性优于 99.4%,电子温度稳定性优于 98.9%,表明该时段为等离子体溯源测量装置的最佳测量时间;在探针伸入腔体内 440~480 mm 的范围内等离子体均匀性最优,电子密度均匀性优于 97.2%,电子温度均匀性优于 93.6%;等离子体电子密度随放电功率的增加而增大,压力越小、进气流量越大,电子密度越大,放电功率在 100~900 W时,电子密度重复性优于 86.6%,多数稳定在 92%以上。

通过本研究,建立了等离子体溯源测量装置, 掌握了测试装置参数随放电功率、进气流量、真空 度等放电条件的变化关系:获得了不同工况下等离 子体电子温度和电子密度特性曲线,验证了 ICP 源 作为等离子体溯源测量装置中校准源的性能,确定 了满足探针溯源校准的最佳等离子体测试条件,提 升了测试准确性,可为后续等离子体校准技术研究 提供参考。

参考文献(References)

- [1] 刘耀泽. 低温等离子体的发射光谱诊断研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016
- [2] 邓星亮,张书锋,贾军伟,等. 探针校准用 ECR 等离子体 源特性试验研究[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(6): 602-609

DENG X L, ZHANG S F, JIA J W, et al. Experimental study of characteristics of ECR plasma source for probe calibration[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(6): 602-609

- [3] PAISSONI C A, VIOLA N, MAMMARELLA M, et al. Deep space transportation enhanced by 20 kW-class Hall thrusters[J]. Acta Astronautica, 2020, 171: 83-96
- [4] ZHANG Z, ZHANG Z, TANG H B, et al. Measurement of the distribution of charge exchange ions in a Hall-effect thruster plume[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(8): 085001
- [5] 杭观荣,梁伟,张岩,等.大功率等离子体电推进研究进展[J].载人航天,2016,22(2):175-185
 HANG G R, LIANG W, ZHANG Y, et al. Research progress of high power plasma propulsion[J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(2):175-185
- [6] CHOUEIRI E Y. A critical history of electric propulsion: the first 50 years (1906-1956)[J]. Journal of Propulsion & Power, 2004, 20(2): 193-203
- [7] MARTINEZ-SANCHEZ M, POLLARD J E. Spacecraft electric propulsion: an overview[J]. Journal of Power and Propulsion, 1998, 14(5): 688-699
- [8] 张郁. 电推进技术的研究应用现状及其发展趋势[J]. 火 箭推进, 2005, 31(2): 27-36
 ZHANG Y. Current status and trend of electric propulsion technology development and application[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2005, 31(2): 27-36
- [9] 刘磊,张庆祥,王立,等. 电推进羽流与航天器相互作用的研究现状与建议[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(5): 440-445

LIU L, ZHANG Q X, WANG L, et al. Research status and suggestions on the interaction between electric propulsion

plumes and spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(5): 440-445

- [10] ZHANG Z, ZHANG Z, XU S T, et al. Three-dimensional measurement of a stationary plasma plume with a Faraday probe array[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 110: 106480
- [11] NING Z X, LIU C G, ZHU X M, et al. Diagnostic and modelling investigation on the ion acceleration and plasma throttling effects in a dual-emitter hollow cathode microthruster[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2021, 34(12): 85-98
- [12] 杨哲, 蔡国飙, 顾左, 等. LIPS200 离子推力器羽流污染
 地面试验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2016, 36(10):
 1156-1161

YANG Z, CAI G B, GU Z, et al. Ground simulation of contamination induced by plume of LIPS200 ion thruster[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2016, 36(10): 1156-1161

- [13] 侯文琦. 朗缪尔探针在射频离子源中的测量误差研究[D]. 衡阳: 南华大学, 2021
- [14] BROWNING P K. Introduction to plasma physics: with space and laboratory application[J]. Plasma Physics and Controlled Fusion, 2005, 47(7): 1109
- [15] 辛煜, 狄小莲, 虞一青, 等. 多源感应耦合等离子体的产 生及等离子体诊断[J]. 物理学报, 2006(7): 3494-3500
 XIN Y, DI X L, YU Y Q, et al. Generation of multi-source inductively coupled plasma and its diagnostics[J]. Acta Physica Sinica, 2006(7): 3494-3500
- [16] 吴振宇,杨银堂,汪家友. ICP 等离子体源天线设计[J]. 真空科学与技术学报, 2004(1): 42-44
 WU Z Y, YANG Y T, WANG J Y. Antenna design of a new inductively coupled plasma source[J]. Vacuum Science and Technology, 2004(1): 42-44
- [17] 王涛, 张天平, 张海亮. 放电室等离子体诊断朗缪尔探针 设计分析[J]. 真空与低温, 2018, 24(4): 275-278
 WANG T, ZHANG T P, ZHANG H L. Analysis and design of Langmuir probe for diagnose of ion thruster discharge plasma[J]. Vacuum & Cryogenics, 2018, 24(4): 275-278

(编辑:武博涵)

一作简介: 李 耀,硕士研究生,主要从事航天器电推进等离子体及光谱探针诊断等研究。 *通信作者: 贾军伟,研究员,主要从事航天器电推进及热学等研究。