0254-6124/2026/46(2)-0436-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

编者按 为促进月球与深空探测领域学科发展，加强国内外相关研究单位的学术交流，《空间科学学报》联合中国科学院月球与深空探测总体部，邀请薛长斌研究员作为执行主编，何红艳、贺怀宇、侯东辉、李想、李存惠、李玉喜、马涛、乔丽、邵金发、苏斌、王沛、王梅竹、薛彬、薛随建、杨双、叶新、张莹、周斌、朱平作为执行编委，策划了“嫦娥七号科学载荷定标方法”专题，相关论文将在本刊持续刊出。

WENG Chenghan, ZHOU Bin, LI Lei, XIE Lianghai, HE Xinxin, ZHU Linshan, XUE Yongliang, RUAN Ronghui. Physical Verification Test of Plasma Environment for Chang'E-7 Electric Field Probe (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(2): 436–443. CSTR:32142.14.cjss.2025–0137. DOI:10.11728/cjss2026.02.2025–0137

≫嫦娥七号任务有效载荷定标方法

嫦娥七号电场探头等离子体环境物理验证试验*

翁成翰 周 斌 李 磊 谢良海
何昕馨 朱林杉 薛永亮 阮荣慧

(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

摘 要 月球表面在太阳风和阳光的作用下会带电, 表面电位的差异在月球表面形成不同尺度的电场环境, 这是月球表面物质迁移的主要机制之一, 嫦娥七号电场探头将在月球表面首次实现原位电场探测. 电场探头的基本原理是等离子体电探针原理, 将探针电流钳制在特定值上, 根据等离子体伏安特性曲线, 探针的电位是确定的, 不同探针的电位差是电场在等离子体上形成的电位差. 进行等离子体伏安特性曲线测量是探针设计的关键. 针对电场探头, 提出了探头在等离子体环境中的物理特性的验证试验的设计. 借助地面的低能等离子体模拟装置开展这一试验, 进行了固定电流的驱动和扫描电流的测量, 试验结果表明, 嫦娥七号电场探头能够正确反映模拟装置内部的等离子体环境, 并得到稳定的伏安特性曲线, 证明电场探头在月面工作时可以通过对探针电流的驱动实现获取等离子体电位的功能, 探头的物理特性通过试验得到充分验证.

关键词 嫦娥七号, 月球表面, 电场, 等离子体

中图分类号 V447+.1, V524

Physical Verification Test of Plasma Environment for Chang'E-7 Electric Field Probe

WENG Chenghan ZHOU Bin LI Lei XIE Lianghai

* 低轨空间等离子体环境模拟装置关键部件中意合作研究项目资助 (Z221100002722006)

2025-08-01 收到原稿, 2025-09-21 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

HE Xinxin ZHU Linshan XUE Yongliang RUAN Ronghui

(*State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

Abstract The lunar surface becomes charged under the influence of solar wind and sunlight, and the potential differences on the surface form an electric field environment of various scales, which is the main mechanism for material transfer on the lunar surface. The electric field probe of Chang'E-7 will, for the first time, conduct in-situ electric field detection on the lunar surface. This paper introduces the design and results of the physical verification test of the probe in plasma environment based on the qualification model of the electric field probe. The basic principle of the electric field probe is the plasma electric probe principle. By clamping the probe current at a specific value, the potential of the probe can be determined according to the plasma *V-I* characteristic curve. The potential difference between different probes is the potential difference formed by the electric field environment on the plasma environment. Whether the probe can measure the plasma *V-I* characteristic curve is the key to the success of the probe design. With the help of a ground low-energy plasma simulation device, this test was carried out, and fixed current drive and scanning current measurement were conducted. The test results show that the electric field probe of Chang'E-7 can correctly reflect the plasma environment inside the simulation device and obtain a stable *V-I* characteristic curve. This proves that the electric field probe can achieve the function of obtaining the plasma potential by driving the probe current when working on the lunar surface, and the physical characteristics of the probe have been fully verified through the test.

Key words Chang'E-7, Lunar surface, Electric field, Plasma

0 引言

中国嫦娥七号任务计划在月球南极沙克尔顿坑附近对月表空间环境以及水冰分布进行综合探测. 月球在受到光照的一面产生大量光电子, 使得月球表面带正电, 而在月球的夜侧, 月球表面与行星际或者地球磁层环境中的等离子体相互作用, 导致表面带负电, 因此月球表面晨昏交界处存在大尺度的水平电场[1], 同时月表等离子体鞘层内也存在以垂直电场为主的电场. 在月球南极, 太阳风和太阳光几乎平行于水平面, 但是当表面有复杂的地形遮挡时, 也有类似的效应产生局部电场, 所以嫦娥七号面临的电场分布比较复杂. 月球表面电场是月球表面物质输运的主要机制, 也是理解月尘等月面物质运动规律的输入[2,3]. 在月球表面进行电场探测具有重要意义.

月球没有大气层, 月球表面直接与太阳风等离子体环境或者地球磁层等离子体环境接触, 同时在阳光照射下会放出光电子, 高能粒子的轰击也会产生次级粒子, 月球表面存在大量带电粒子, 形成等离子体环境. 在这种环境下可以利用等离子体电探针作为传感器进行电场探测. 目前, 国际上尚未有针对月表电场的就位探测数据. 卫星平台上的等离子体电探针技术非常成熟, 是卫星开展空间环境探测的主要手段. 在地球电离层中, 法国的 DEMETER 卫星利用 4 个球型电探针[4], 用 4 根伸杆使其在卫星周围形成四面体 4 个顶点探测, 并反演三维电场, 中国的张衡一号 01 星和 02 星也采取类似方案[5], 利用 4 个球型电探针实现三维电场探测. 在地球磁层中, 等离子体环境相比电离层更为稀薄, 等离子体德拜半径较长, 卫星平台 (CLUSTER II 卫星[6]、THEMIS 卫星[7]、MMS 卫星[8] 等) 一般采用自旋平台结合绳系球型电探针的探测方案, 电探针被伸出卫星外几十米. 月表电场探测可以参考这些卫星的电探针电场探测技术开展载荷设计.

电探针测量电场的本质是测量电位, 通过一定间距外两个探针的电位差反演该方向上的电场. 电探针在等离子体中的伏安特性曲线并非线性, 电场探测需要找到等效阻抗最小的工作区域驱动电流, 以获得更为稳定的等离子体电位. 电探针能够正确反映与其设计一致的等离子体伏安特性曲线, 对于载荷设计非常

重要, 在地面实验室条件下无法进行真实环境的测试. 利用真空罐、磁补偿线圈、等离子体源等设备构建起局部的低能等离子体环境, 可以为电探针提供较为接近真实的环境, 可以进行等离子体伏安特性的验证试验. 本文将介绍嫦娥七号电场探头鉴定件开展的试验情况.

1 探测原理与目标环境

根据月球南极几何条件, 太阳风来流与月面近似平行, 假设月球表面等离子体密度为月球轨道无扰动太阳风密度, 约为 10^7 m^{-3}, 等离子体温度约为 10 eV[9]. 这种条件下, 在月球表面等离子体德拜半径 λ_D 约为 7.5 m, 电子回旋半径 ρ_e 达到为 100 m 以上, 电子碰撞频率达到 1×10^{-6}, 而电子振荡频率约为 170 kHz. 当探针足够小 (尺寸在 cm 量级) 时, 可以忽略磁场和碰撞效应的影响. 电探针在等离子体中与带电粒子相互作用, 描述探针电流的理论公式很多, 最经典的是 Mott-Smith 提出的 OML 理论[10], Allen 等[11] 在 OML 理论基础上, 考虑离子温度小于电子温度的情况提出了 ABR 模型, Laframboise[12] 结合 ABR 和 OML 理论, 进一步发展了数值计算理论, 这些模型为后期的电探针应用奠定了基础. 在实际空间探测活动的朗缪尔探针和电场仪的物理设计中, 更简洁的 OML 理论仍占据主流. 这一理论忽略磁场和碰撞对粒子运动的影响, 通过对玻尔兹曼分布的带电粒子行为统计积分获得探针的整体电流. 由 OML 理论推导得到的 V-I 特性曲线描述公式如下:

$$I_p = I_e + I_i. \tag{1}$$

$$I_e = \begin{cases} 4q\pi a^2 N_e \sqrt{\dfrac{KT_e}{2\pi m_e}} \exp\left(-\dfrac{qV}{KT_e}\right), V \leqslant 0; \\ 4q\pi a^2 N_e \sqrt{\dfrac{KT_e}{2\pi m_e}} \left(1-\dfrac{qV}{KT_e}\right), V > 0. \end{cases} \tag{2}$$

$$I_i = \begin{cases} 4q\pi a^2 N_i \sqrt{\dfrac{KT_i}{2\pi m_i}} \exp\left(-\dfrac{qV}{KT_i}\right), V \geqslant 0; \\ 4q\pi a^2 N_i \sqrt{\dfrac{KT}{2\pi m_i}} \left(1-\dfrac{qV}{KT}\right), V < 0. \end{cases} \tag{3}$$

式中, I_p 为探针电流, 由电子电流 I_e 和离子电流 I_i 构成; V 为电探针传感器与周围等离子体环境的电位差. 当 $V<0$ 时, 电子电流的自然对数与 V 成正比, 离子电流与 V 成正比; 当 $V>0$ 时, 电子电流与 V 成正比, 离子电流的自然对数与 V 成正比; 当 $V=0$ 时, 电子电流和离子电流是各自的饱和电流. 其中, q, m, N 和 T 分别为对应粒子的电荷、质量、密度和温度; k 为玻尔兹曼常数; a 为电探针传感器半径.

在此种环境下, 电探针收集的等离子体电流非常微弱, 饱和电流约为 7 nA; 而在光照条件下, 探头的光电子将起到主导作用, 在地球轨道附近, 电探针的光电流与面积相关, 饱和光电子 I_{ph0} 约为 4 nA·cm^{-2}[7]. 探头的光电子电流与探针相对等离子体电位的关系式如下:

$$\begin{cases} I_{ph} = I_{ph0} \exp\left(-\dfrac{qV}{kT_{ph}}\right), V \geqslant 0; \\ I_{ph} = I_{ph0}, V < 0. \end{cases} \tag{4}$$

以直径 5 cm 的电探针为例, 电场探头的伏安特性曲线如图 1 所示. 传感器理想的工作区是 V-I 特性曲线斜率较大且接近等离子体电位的区域. 当有光照在探针上时, 光电子阻滞区域是较为理想的工作点, 驱动电流可以取到–60～–70 nA, 在此区间里, 探针测量电位相对稳定. 而对于没有光照的条件下, 理想工作区在探头的饱和电流附近, 驱动电流应设置在 7 nA 左右.

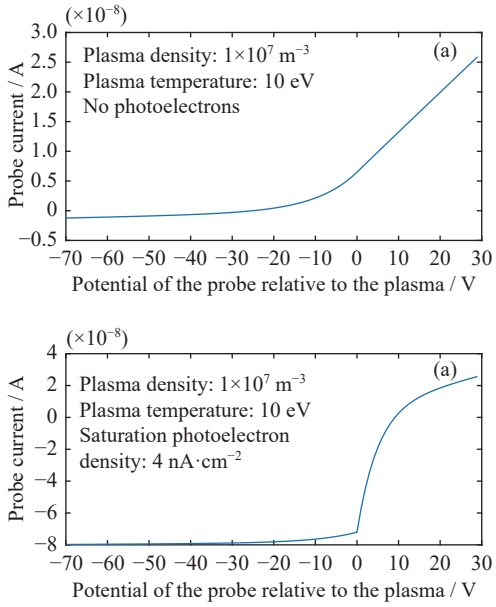

图 1 月表等离子体 V-I 曲线仿真. (a) 不考虑光照条件, (b) 考虑光电流

Fig. 1 Simulation of plasma V-I curve on the lunar surface. (a) Without considering lighting conditions, (b) considering photocurrent

电场探测是等离子体电探针的一种应用, 无需关注 V-I 特性曲线的形态, 包括其能否正确反演等离子体温度密度等参数. 该应用仅关注两个探针在等离子体中探测结果的一致性, 假设 4 个电探针所处等离子体环境一致, 电场将引起等离子体环境整体电位的偏置, 而伏安特性曲线的形态不会发生变化. 此时, 将 4 个电探针在相同电流的驱动下感应出来的电位差可归因于电场; 电位差梯度测量结果结合探针的距离和连线方向, 可以反演空间特定方向的电场. 为了降低环境等离子体扰动, 避免电流驱动误差造成的电位误差过大, 电场探头的工作点将设置在 V-I 特性曲线最为陡峭的区域, 即等离子体阻抗最小的区间.

2 载荷设计

嫦娥七号电场探头是月表环境探测系统传感器之一, 由 4 个球型电探针组成, 电场探头部署在着陆器的载荷安装侧板上, 采用卷筒式伸杆将电探针伸展到距离着陆器 0.5～1 m 的位置, 构成四面体构型, 如图 2(a) 所示. 这种构型可以进行三维电场的反演, 同时降低着陆器表面等离子体鞘层的影响. 这种卷筒式伸杆技术是利用钢制卷筒的弹性驱动自身实现展开的, 在 THEMIS, DEMETER 以及张衡一号等卫星任务上均有应用. 由于电场探头伸展长度较短, 不再使用复杂的驱动装置和辅助电缆旋转的滑环, 完全依靠自身弹性驱动实现展开, 如图 2(b) 所示.

电场探头直径 a 为 5 cm, 采用钛合金制造, 表面进行 TiN 涂层处理. TiN 是等离子体电探针常用的表面涂层材料, 具有表面刚度高、导电性高、功函数大等特点. TiN 功函数约为 4.2～5 eV[13,14], 有研究表明 TiN 作为电探针表面涂层材料, 相比另外一种常用涂层石墨 DAG213, 其在表面硬度和光电特性方面更具有优势[15]. 根据前述分析, 在月球表面环境中德拜半径与探针半径的比值 (λ_D/a) 达到 300, 电子回旋半径与探针半径的比值 (ρ_e/a) 达到 4000, 电子碰撞频率与振荡频率的比值 (ν_e/ω_e) 可达到 1×10^{-11}.

考虑到月表等离子体稀薄, 等离子体阻抗较大, 在光照和阴影下的等离子体环境变化较大, 探头可能在驱动电流的作用下感应到几十伏的较高电位, 2024 年 Xie 等[2] 数值模拟研究了月球着陆器周围在尘埃、等离子体和光照作用下形成的电位分布. 电场探头的驱动电路采用悬浮电源设计, 通过电路基准地随探针电位的自适应调整, 实现±100 V 的电位适应能力[16]. 电场探头通过跟随器获取探头电位, 驱动 DAC 在探头电位基础上施加偏置电位, 并通过电阻形成对探头的电流. 在外部等离子体形成阻抗后, 电场探头锁定输出电流并测量等离子体电位. 电场探头的驱动电路和信号采集电路安装在着陆器载荷管理器内部.

3 等离子体模拟环境

电场探头只能在等离子体环境中工作, 采用模拟阻抗仅能对其进行电性功能测试, 无法证明电场探头在等离子体条件下的工作状态, 而在地面上模拟月面等离子体环境相当困难. 这不仅要有真空环境, 还需要以扩散为主的等离子体环境, 为此应避免地球磁场的影响. 意大利空间天体物理学与行星学研究所拥有一套弱磁环境下的冷等离子体模拟设备, 为张衡一号朗缪尔探针等多个等离子体探测仪器提供了地面等离子体物理验证试验环境[17,18].

中国科学院国家空间科学中心建有一套冷等离

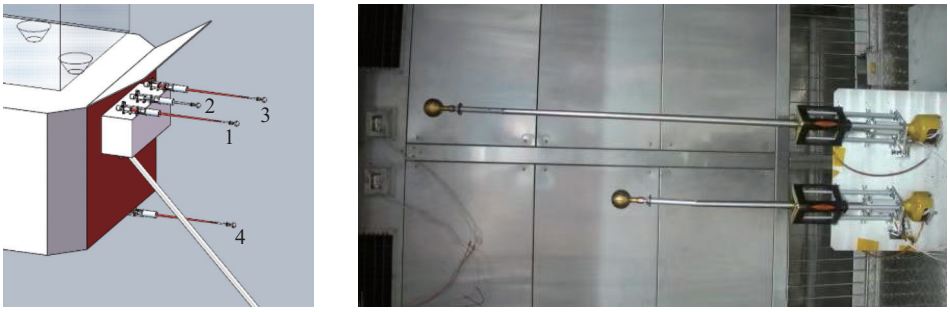

图 2 电场探头在嫦娥七号着陆器上的部署 (a) 和实物照片 (b)

Fig. 2 Deployment of the electric field probe on Chang'E-7 lander (a) and photo of the electric field probe (b)

子体环境模拟装置, 如图 3 所示. 其外部线圈系统可以部分抵消地磁场, 将罐体内的磁场降低至几百 nT, 从而避免强磁场对于带电粒子运动的约束. 罐体内设计了氩气等离子体源, 采用扩散的方式实现罐内低能等离子体的均匀分布. 罐内等离子体密度可以控制在 5×10^{10} m^{-3} 以下, 温度在 1 eV 左右. 虽然这些参数与月球表面等离子体环境仿真结果还有较大差异, 但是这里分析 $\lambda_D/a=3$, $\rho_e/a=1320$, $\nu_e/\omega_e\approx8\times10^{-9}$, 仍然可以满足基本模拟要求. 电场探头在模拟环境下测量等离子体 *V-I* 特性曲线, 在物理原理上可以认为是等效的.

4 物理验证试验及结果

将未安装在伸杆上的 2 个电场探头鉴定件安装在试验罐体中, 如图 4 所示. 在等离子体环境内进行稳定电流驱动试验和电流驱动扫描试验.

4.1 稳定电流驱动试验

等离子体罐内模拟环境下, 等离子体的响应时间在 0.2 μs 左右, 为了便于试验操作和数据分析, 试验每次稳定驱动电流设置为 400 s, 同时测量不同探头的电压信号. 在稳定驱动电流的情况下, 电压也应稳定, 根据实际测量结果, 单个探头的磁场测量不确定度 (1 σ) 在 0.15 V 以下. 罐内等离子体密度并不十分均匀, 在电流驱动时, 等离子体平衡被破坏, 罐内等离子体不能达到理想程度的均匀. 试验中调整电流的系数, 两次试验的电流范围不同, 得到的试验结果如图 5 所示.

从图 6 可以看到, 在不同驱动电流作用下罐内两个电场探头电位差的变化, 每个驱动电流下的电位差稳定性非常好. 当电流驱动为正电流时, 即电探针接收电子的过程中, 罐内的电位差较小; 电流驱动为负电流时, 探头接收离子, 罐内电位差随着电流的增大而显著增大, 这与罐内 *V-I* 特性曲线的斜率是相对应的. 说明 *V-I* 特性曲线的正离子饱和区电位受到收集电流影响较大, 在模拟装置内, 离子收集电流的改变

图 3 冷等离子体测试定标系统

Fig. 3 Cold plasma test calibration system

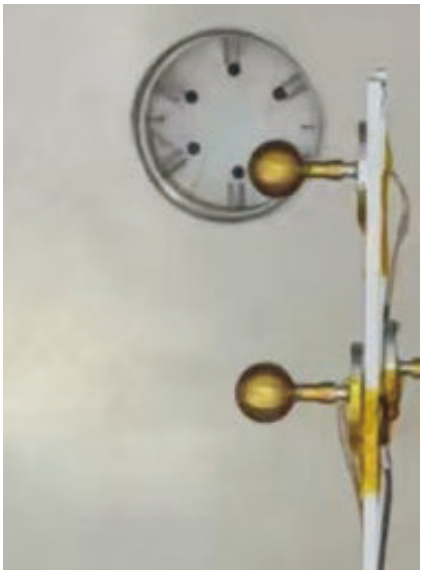

图 4 探头在等离子体罐内的安装状态

Fig. 4 Photo of probe installed inside plasma tank

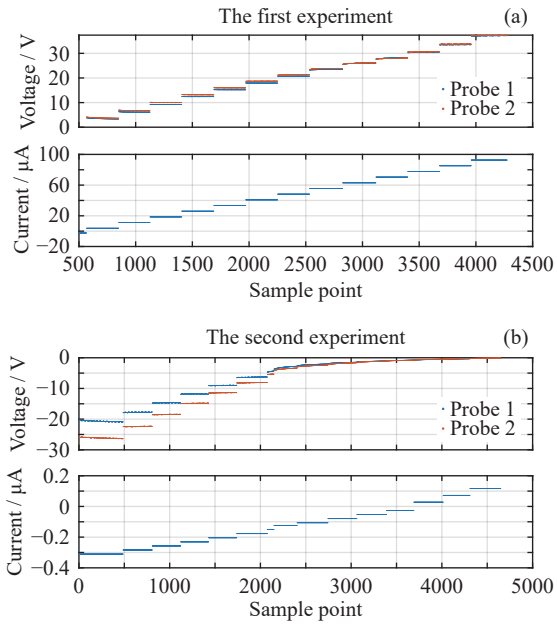

图 5 两次试验电流驱动和电压测量曲线

Fig. 5 Current drive and voltage measurement curves of the two experiments

很容易改变罐内的等离子体环境.

4.2 电流扫描试验

第二个试验是进行快速电流扫描试验, 扫描步长设置为 2 s, 每一步的持续时间远大于等离子体的响应时间. 理论上可以通过扫描获得罐内等离子体的 V-I 特性曲线. 试验通过改变扫描步长, 得到两个幅度的扫描曲线. 分析扫描电压曲线图 7 和图 8, 等离子体罐内的扫描一致性和重复性较好, 说明电场探头在等离子体环境下的物理特性测量是稳定的. 从正向扫描和负向扫描的过程来看, 扫描曲线未能完全重合, 考虑到 V-I 曲线不是线性曲线, 采用 $\left|\dfrac{\Delta V}{\mathrm{d}V/\mathrm{d}I}\right|$ 作为评估曲线重合的标准. 在 0.694 μA 步长下, 电流正反向扫描曲线的最大差异约为 3 μA, 0.008 μA 步长扫描曲线的最大差异约为 0.05 μA.

通过试验得到的 V-I 特性曲线, 依据 OML 模型可以计算罐内等离子体的电子密度和离子密度, 见表 1. 同时根据 0.008 μA 步长扫描数据, 可以计算得到电子温度在 0.35～0.8 eV 内. 罐内等离子体环境无法进行非常准确的控制, 此外, 扫描过程中过大的电位和电流会破坏内部等离子体平衡, OML 只是一种理想的近似模型, 因此反演结果会出现一定的不确定度和误差. 但是整体上, 反演得到的温度和密度与预期的 1 eV 和 10^{10} m^{-3} 在 1 个数量级内.

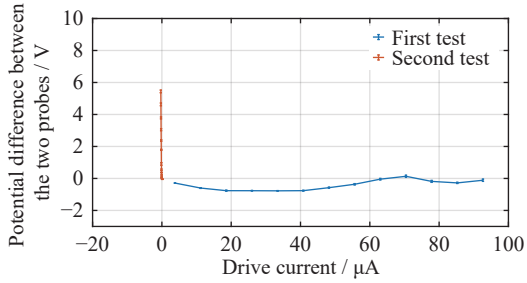

图 6 两个探头之间电位差随驱动电流的变化

Fig. 6 Variation of the potential difference between the two probes with the drive current

5 讨论与结论

试验采用的低能等离子体模拟试验环境空间有限, 在较大的电流驱动下, 罐内等离子体平衡被破坏, 很难保持非常稳定. 罐内等离子体扩散平衡会有一定的梯度, 这可能是不同探针电位存在一定差异的原因. 两个电场探头所在位置不同, 二者间的电位差在 V-I 特性斜率较大的区域里非常稳定, 而在离子阻滞区斜率较小, 电位的稳定性较差, 这完全符合电探针的特性, 为后续的电场探头工作区设置提供了参考. 试验针对的是电场探头鉴定件, 下一步将针对正样飞行设计一个转台, 分别将 4 个探头转动至相同的位置, 作为主探头开展试验. 这样处理后, 探头所在的等离子体环境基本一致, 对于 4 个探头的物理特性可以更好地进行分析. 光照对于 V-I 特性曲线的影响是显著的, 虽然 TiN 涂层的光电特性可以在部组件级进行测试, 但是如果结合等离子体测试, 将对实际探测更有帮助. 在后续试验中将考虑增加真空紫外光源模拟光照, 以验证光照条件下的探针电流收集情况. 另外, 在后续试验中还将增加第三方朗缪尔探针作为参考, 改变等离子体环境参数, 考察电场探头对环境的敏感性. 在电探针的工作模式上, 试验以整体扫描测量为

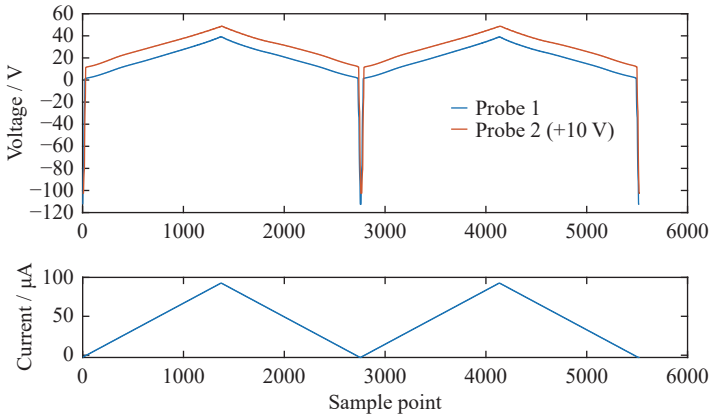

图 7 步长 0.694 μA 时的电流扫描和电压测量结果

Fig. 7 Current scanning and voltage measurement results with a step size of 0.694 μA

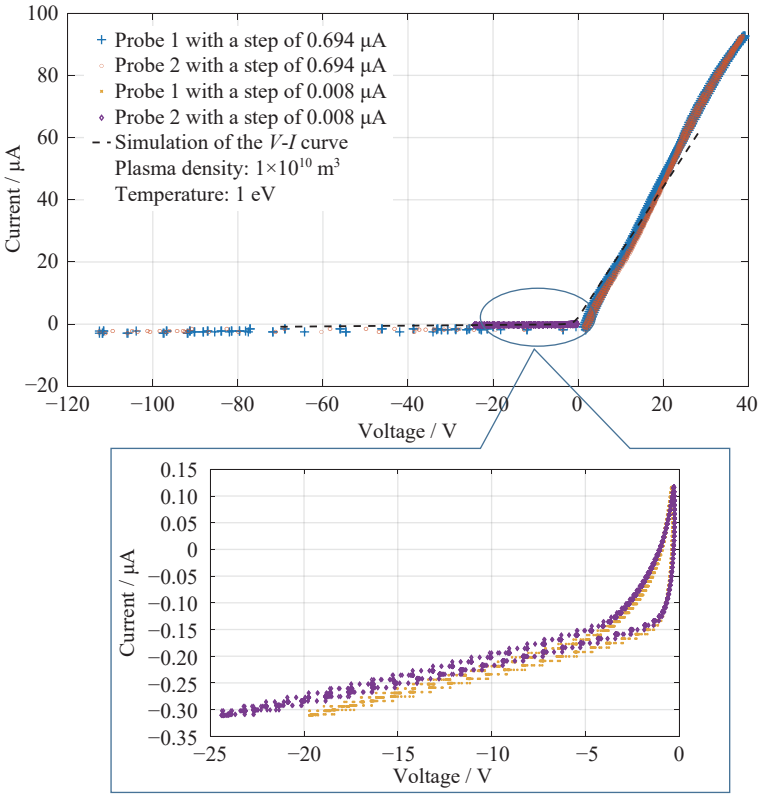

图 8 两次扫描得到的 *V-I* 曲线

Fig. 8 *V-I* curves obtained from the two scans

表 1 通过 *V-I* 曲线反演的离子密度与电子密度

Table 1 Ion density and electron density inverted from *V-I* curve

电探针	扫描步长/μA	N_i $(\times10^{10})/m^{-3}$				N_e $(\times10^{10})/m^{-3}$			
		第一次	第二次	第三次	第四次	第一次	第二次	第三次	第四次
1	0.694	0.970	1.543	1.109	1.420	1.368	1.875	1.392	1.882
2	0.694	1.640	1.606	1.632	1.621	1.475	2.257	1.464	2.236
1	0.008	1.060	0.901	1.048	1.048	—	—	—	—
2	0.008	1.000	0.766	1.000	1.000	—	—	—	—

主, 未来将设计更多工作模式, 例如通过区域小振幅交流法快速测量某一曲线区域的斜率, 利用多种工作模式进行测量对比.

本次试验对嫦娥七号电场探头鉴定件开展等离子体环境下的物理特性验证试验, 通过扫描电流分析得到两个探头在等离子体内的 *V-I* 特性曲线, 两个探头在相同的等离子体环境中得到的曲线高度一致. 由 *V-I* 曲线反演得到的等离子体参数与罐内控制的等离子体环境参数接近. 两个探针在相同驱动电流下得到的电位和电位差在电子阻滞和饱和区非常稳定, 这表明未来可以将探头工作点设置在 *V-I* 曲线的这一区域. 试验对电场探头进行了较好的物理验证, 未来将改进试验方案, 实现对电场探头正样飞行件的标定和验证.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] LI L, ZHANG Y T, ZHOU B, *et al.* Lunar surface potential and electric field[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2019, **19**(6): 077

[2] XIE L H, LI L, ZHANG Y T, *et al.* Numerical investigation of the electrostatic dust transport around a lunar lander[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **73**(1): 1198-1207

[3] ZHAO C X, GAN H, XIE L H, *et al.* Theoretical analysis of the electric potential and the electrostatic dust transport around the Shackleton crater in the Lunar south pole region[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, **66**(10): 2278-2286

[4] BERTHELIER J J, GODEFROY M, LEBLANC F, *et al.* ICE, the electric field experiment on DEMETER[J]. *Planetary and Space Science*, 2006, **54**(5): 456-471

[5] HUANG J P, LEI J G, LI S X, *et al.* The Electric Field Detector (EFD) onboard the ZH-1 satellite and first observational results[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2018, **2**(6): 469-478

[6] GUSTAFSSON G, BOSTRÖM R, HOLBACK B, *et al.* The electric field and wave experiment for the Cluster mission[J]. *Space Science Reviews*, 1997, **79**(1/2): 137-156

[7] BONNELL J W, MOZER F S, DELORY G T, *et al.* The Electric Field Instrument (EFI) for THEMIS[J]. *Space Science Reviews*, 2008, **141**(1): 303-341

[8] LINDQVIST P A, OLSSON G, TORBERT R B, *et al.* The spin-plane double probe electric field instrument for MMS[J]. *Space Science Reviews*, 2016, **199**(1): 137-165

[9] LI Mengyao, XIA Qing, CAI Minghui, *et al.* Characteristics of dust plasma environment at lunar south pole[J]. *Acta Physica Sinica*, 2024, **73**(15): 155201 (李梦谣, 夏清, 蔡明辉, 等. 月球南极尘埃等离子体环境特性 [J]. 物理学报, 2024, **73**(15): 155201)

[10] MOTT-SMITH H M, LANGMUIR I. The theory of collectors in gaseous discharges[J]. *Physical Review*, 1926, **28**(4): 727-763

[11] ALLEN J E, BOYD R L F, REYNOLDS P. The collection of positive ions by a probe immersed in a plasma[J]. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 1957, **70**(3): 297-304

[12] LAFRAMBOISE J G. Theory of Spherical and Cylindrical Langmuir Probes in a Collisionless, Maxwellian Plasma at Rest[R]. Fort Belvoir: Defense Technical Information Center, 1966 (DTIC Report No. AD0634596)

[13] ZHUANG Y Y, LIU Y Q, XIA H, *et al.* Effective work function of TiN films: profound surface effect and controllable aging process[J]. *AIP Advances*, 2022, **12**(12): 125222

[14] SAMANIEGO J I, WANG X, ANDERSSON L, *et al.* Investigation of coatings for Langmuir probes: effect of surface oxidation on photoemission characteristics[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(3): 2357-2361

[15] WAHLSTRÖM M K, JOHANSSON E, VESZELEI E, *et al.* Improved Langmuir probe surface coatings for the Cassini satellite[J]. *Thin Solid Films*, 1992, **220**(1/2): 315-320

[16] HU Yun, ZHOU Bin, ZHAO Hua. Research of the front-end signal processing circuit for the magnetospheric electric field instrument[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2015, **35**(1): 104-109 (胡云, 周斌, 赵华. 磁层电场仪前端信号处理电路研究 [J]. 空间科学学报, 2015, **35**(1): 104-109)

[17] LIU Chao, GUAN Yibing, ZHANG Aibing, *et al.* The ionosphere measurement technology of Langmuir probe on China seismo-electromagnetic satellite[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, **65**(18): 189401 (刘超, 关燚炳, 张爱兵, 等. 电磁监测试验卫星朗缪尔探针电离层探测技术 [J]. 物理学报, 2016, **65**(18): 189401)

[18] PLAINAKI C, ANTONUCCI M, BEMPORAD A, *et al.* Current state and perspectives of space weather science in Italy[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2020, **10**: 6

作者简介

翁成翰 男, 1988 年生于江苏苏州, 现为中国科学院国家空间科学中心高级工程师, 主要研究方向是空间电场和磁场探测技术, 担任嫦娥七号着陆器月表空间环境探测系统副主任设计师, 主要负责电场探头的研制.

E-mail: saber719@nssc.cn

周 斌（通信作者） 男, 1979 年 10 月出生于辽宁沈阳, 中国科学院国家空间科学中心教授级高级工程师, 博士生导师, 主要从事空间环境磁场、电场探测技术研究.

E-mail: zhoubin@nssc.ac.cn