

空间站问天舱等离子体原位成像探测技术*

刘超^{1)3)†} 张爱兵¹⁾²⁾³⁾ 孙越强¹⁾³⁾ 孔令高¹⁾³⁾ 王文静¹⁾³⁾
关焱炳¹⁾³⁾ 王永松¹⁾³⁾ 郑香脂¹⁾³⁾ 田峥¹⁾³⁾ 高俊¹⁾³⁾

1) (中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190)

2) (中国科学院大学, 北京 100049)

3) (中国科学院国家空间科学中心, 天基空间环境探测北京市重点实验室, 北京 100190)

(2022年9月7日收到; 2022年11月2日收到修改稿)

等离子体原位成像探测器是中国空间站的第一批舱外空间环境科学载荷, 安装在问天舱的舱外暴露平台, 将首次在空间站平台上开展电离层等离子体原位、成像、充电电位等多要素综合探测任务. 其中, 原位探测要素包括空间站轨道等离子体的密度、温度以及问天舱表面电位强度等. 成像探测要素包括离子能量、运动方向和成像时间分辨率等. 等离子体原位成像探测器采用多传感器的一体化设计, 集成了朗缪尔探针、阻滞势分析仪、参考电位计和离子成像仪等技术. 其中, 离子成像技术是首次应用于我国的空间环境探测领域. 等离子体原位成像探测技术在中国科学院国家空间科学中心定标实验室完成了测试验证, 探测器已随问天舱成功发射, 即将开展中低纬电离层的精细化探测, 为完善空间站轨道电离层模型提供等离子体探测数据. 通过探测累积长周期的充电电位数据, 为研究等离子体对空间站的充电效应, 促进空间站充电评估体系的建立提供支持.

关键词: 中国空间站, 电离层等离子体, 离子成像, 就位探测

PACS: 94.80.+g, 94.20.Fg, 07.87.+v

DOI: 10.7498/aps.72.20221759

1 引言

中国空间站是我国长期在轨运行的空间基础设施, 运行在轨道倾角 42° — 43° 、高度340—450 km的近地轨道, 是我国进行各种空间科学试验的重要平台. 空间站的运行轨道位于电离层F2层峰值高度区域, 该区域等离子体密度最大, 是各种电离层物理现象及其效应发生最集中的区域, 是进行地球电离层等离子体探测和研究的理想平台.

电离层是地球空间环境的重要组成部分, 是导航、定位的重要误差源之一. 其电子密度及小尺度

不规则体会使得穿过的电波信号传播速度变慢、路径发生弯曲, 从而导致雷达测控产生偏差、影响导航定位的精度. 3.0 GHz以下频段电波信号受到的影响最为显著, 且频率越低影响越大^[1–3]. 利用空间站的平台进行电离层等离子体长期探测, 可支持中低纬电离层不规则结构的起源和演化机理的研究, 改善和提高电离层模型的精度, 对提高和修正的卫星导航/定位的精度具有重要意义.

根据国际空间站的运行情况, 国际空间站在轨会发生“正常充电”(normal charging event, NCE)和“快速带电”(rapid charging event, RCE)等现象. 研究表明空间站充电和电子温度、密度、极区

* 国家科技重大专项 (批准号: Y79002AH40) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liuch@nssc.ac.cn

沉降粒子以及其高压太阳电池阵等相关, 尤其是电子温度、电子密度 [4-6]. 空间站充电是科学仪器在轨工作以及航天员执行舱外活动时需要考虑的重要因素.

面对当前中低纬电离层研究的需求以及空间站充电电位监测保障要求, 本文对等离子体原位成像探测载荷技术进行了研究. 根据任务要求, 需探测的空间站轨道等离子体原位参数包括等离子体的离子成份、等离子体密度、温度、充电电位以及离子成像等. 其中, 离子成像参数又包括离子能量、运动方向和时间分辨率等. 任务要求的性能参数见表 1.

表 1 任务要求的性能参数

Table 1. Performances of mission requirements.

参数类型	指标	
等离子体原位探测	离子成分	H^+, He^+, O^+
	密度范围/ cm^{-3}	$1 \times 10^3 - 1 \times 10^7$
	密度测量相对精度	优于 10%
	温度范围/K	500—10000
	温度测量相对精度	优于 10%
	电位范围/V	-300—+300
	离子漂移速度/ $(km \cdot s^{-1})$	-3—+3
	离子漂移速度测量精度/ $(m \cdot s^{-1})$	横向: 优于 20 纵向: 优于 50
	能量范围/eV	0.1—204
	能量分辨率	$\leq 15\%$
等离子体离子成像探测	视场	$\geq 360^\circ \times 94^\circ$
	角度分辨率	$\leq 2^\circ \times 3^\circ$
	时间分辨率/ms	≤ 45

2 技术方案设计

等离子体原位成像探测器采用了多传感器集成化设计, 由朗缪尔探针、阻滞势分析仪、离子漂移计、参考电位计、离子成像仪和载荷管理器等组成, 如图 1 所示. 针对任务要求, 朗缪尔探针负责测量性能参数中的电子密度和电子温度, 阻滞势分析仪负责测量离子成份、离子密度、离子温度以及离子漂移速度等参数, 参考电位计则负责测量空间站问天舱的表面充电电位强度, 即电位范围参数. 离子成像仪负责等离子体离子成像功能, 实现性能指标的能量范围、能量分辨率、视场、角度分辨率和时间分辨率等.

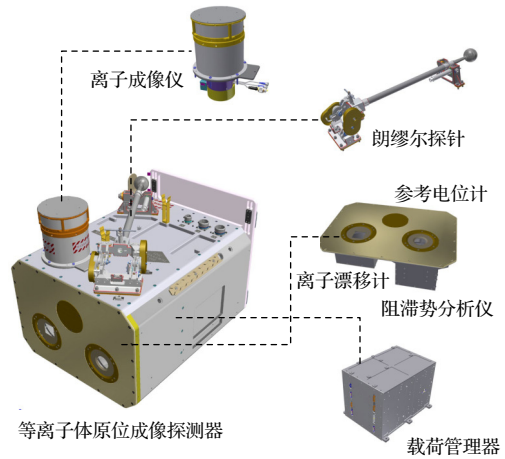


图 1 等离子体原位成像探测器组成

Fig. 1. The composition of the plasma in-situ and imaging detector.

2.1 朗缪尔探针设计

朗缪尔探针是将球形传感器浸入到空间等离子体中, 然后给传感器加载扫描电压, 传感器的收集电流 I 会随着加载扫描电压 V 的变化而变化. 传感器电流和扫描之间形成伏安 ($I-V$) 特性曲线, 如图 2 所示. 通过分析该伏安特性曲线, 可得到等离子体密度、温度和等离子体电位等参数 [7]. 朗缪尔探针传感器设计为直径 50 mm 的球体, 分为上下半球, 上半球为收集极, 下半球为保护极, 上下半球相互隔离, 并同步加载相同的扫描电压 [8,9].

空间站运行在电离层等离子体中, 其等离子体鞘层是朗缪尔探针探测需要考虑的重要因素. 通过对空间站在 -100 V 充电电位情况下的等离子体鞘层的仿真, 结果显示鞘层厚度约 300 mm, 如图 3 所示.

为减小空间站本体鞘层的影响, 探针传感器伸杆设计为折叠式, 可将传感器伸出到空间站鞘层以外. 在发射阶段, 伸杆折叠收拢在仪器表面, 以保证满足包络要求和力学要求. 发射入轨后, 等离子体原位成像探测器从舱内转移至舱外, 并通过机械臂安装在问天舱暴露平台上. 仪器开机后, 探针传感器伸杆按照注入指令解锁, 展开并锁定在垂直位置. 图 4 给出了探针伸杆的展开过程, 分三个阶段: 释放、展开、锁定. 在展开状态下, 探针伸杆与空间站飞行方向 (+X) 夹角为 90° . 探针传感器的伸杆长度设计大于 500 mm (传感器中心至伸杆安装面), 可保证在轨工作期间探针传感器处于不受空间站鞘层影响的背景等离子体区域.

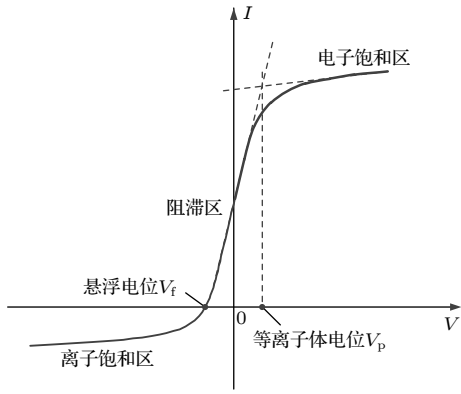


图 2 朗缪尔探针伏安特性曲线

Fig. 2. The $I-V$ characteristic curve of Langmuir probe.

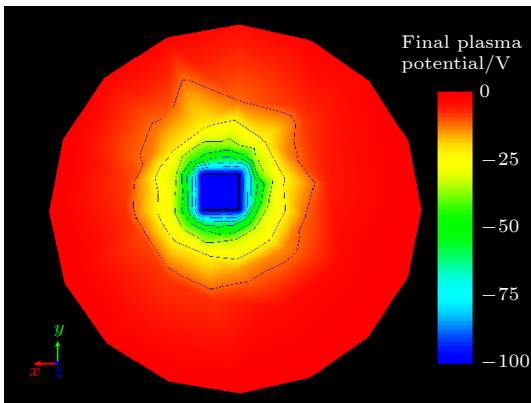


图 3 空间站在 -100 V 充电电位下的等离子体鞘仿真

Fig. 3. The simulation of space station plasma sheath (with -100 V).

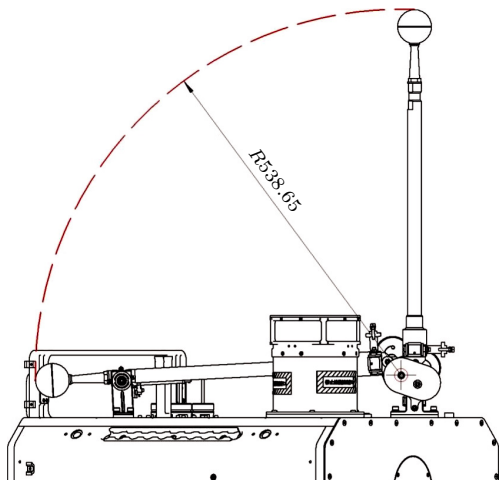


图 4 朗缪尔探针伸杆展开过程

Fig. 4. The figure of Langmuir probe extension process.

2.2 阻滞势分析仪设计

阻滞势分析仪传感器为圆筒形, 前端开口呈圆形, 内部设有多层栅网, 最后端为电流收集极. 图 5

给出了阻滞势分析仪的剖面结构. 传感器内部栅网 G1, G2 和 G5 均与地电位连接以屏蔽外部干扰. 栅网 G6 加载一个负电位以抑制等离子体电子和二次电子的干扰. 栅网 G3 和 G4 为阻滞栅网, 加载扫描电压. 传感器收集极电流, 则随着阻滞栅网扫描电压的变化而变化^[10]. 阻滞势分析仪的传感器电流和扫描电压同样形成其伏安 ($I-V$) 特性曲线, 如图 6 所示. 通过对伏安特性曲线分析, 可获得离子密度、离子温度、离子成份、离子纵向速度等参数^[11,12].

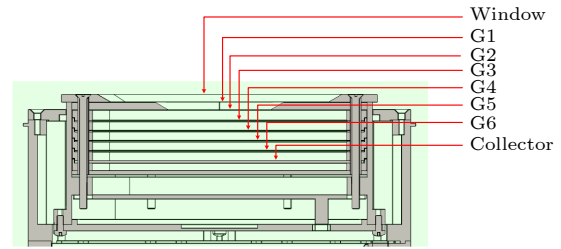


图 5 阻滞势分析仪传感器结构

Fig. 5. Structural diagram of retarding potential analyzer sensor.

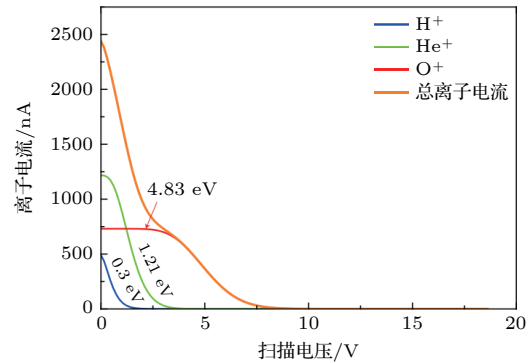


图 6 阻滞势分析仪伏安特性曲线

Fig. 6. The $I-V$ characteristic curve of retarding potential analyzer.

2.3 离子漂移计

离子漂移计传感器窗口为方形, 后端收集极分为均等的四块, 如图 7 所示. 图 8 给出了离子漂移计传感器结构, 栅网 G1, G3 和 G4 均与地电位连接, 栅网 G2 连接一个正电位, 以阻止 H^+ 进入传感器, 造成对速度测量的干扰. 栅网 G5 则连接一个负电位抑制等离子体电子和二次电子的干扰. 传感器 4 个面积相等的收集极收集电流分别为 I_A , I_B , I_C 和 I_D , 将收集极 A, C 收集的电流叠加为 I_{AC} , 收集极 B, D 收集的电流叠加为 I_{BD} , 二者的比值, 与离子的 +Y 方向上的入射角度相关:

$$I_{AC}/I_{BD} = k \tan \alpha, \quad (1)$$

式中, k 为传感器窗口尺寸和结构决定的几何因子; α 为 $+Y$ 方向上的离子入射角度. 该角度由 $+X$ 方向的离子纵向漂移速度与 $+Y$ 方向的离子横向漂移速度决定, 由阻滞势分析仪获取 X 方向的离子纵向漂移速度, 即可计算获得 $+Y$ 方向的离子横向漂移速度 [13].

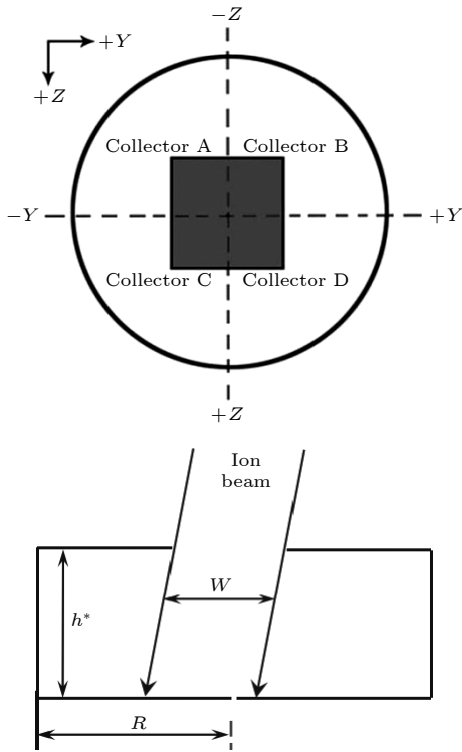


图 7 离子漂移计传感器收集极示意图

Fig. 7. The figure of ion drift meter sensor collector.

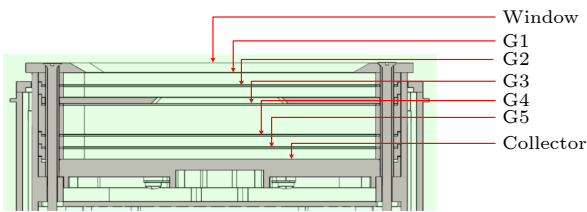


图 8 离子漂移计传感器结构

Fig. 8. Structural diagram of ion drift meter sensor.

同理, 可将收集极 A, B 收集的电流叠加为 I_{AB} , 收集极 C, D 收集的电流叠加为 I_{CD} , 二者的比值与离子的 $+Z$ 方向上的入射角度 β 相关. β 角度由 $+X$ 方向的离子纵向漂移速度与 $+Z$ 方向的离子横向漂移速度决定, 由阻滞势分析仪获取 X 方向的离子纵向漂移速度, 即可计算获得 $+Z$ 方向的离子横向漂移速度.

2.4 参考电位计设计

参考电位计的功能是获得一个接近于背景等离子体电位的基准“零”电位, 通过测量参考电位计与问天舱结构之间的电位差, 即可获得空间站问天舱舱体的充电电位, 即相对于空间等离子体的电位.

参考电位计的传感器是一块与周围绝缘的孤立导体金属板, 安装在仪器迎风面板上, 与阻滞势分析仪传感器和漂移计传感器共平面, 法线方向平行于 $+X$ 方向, 如图 1 所示.

在轨工作期间, 参考电位计传感器与背景的电离层等离子体环境相互作用, 达到动态平衡 [14]. 依据 (2) 式及空间站轨道参数, 平衡状态下的参考电位计相对于背景等离子体的绝对电位通常小于 1 V.

$$\Phi_s = -\frac{K_B T_e}{e} \ln \left(\frac{8 K_B T_e}{\pi m_e V_s^2} \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中, Φ_s 是参考电位计的电位; K_B 是玻尔兹曼常数; T_e 是电子温度; m_e 是电子质量; e 是电子电荷; V_s 空间站速度.

设置一个立方体模拟空间站的等离子体原位成像探测器, 圆形平板电极模拟参考电位计传感器. 设定输入参数为电子密度 $1 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$, 电子温度 0.2 eV (2320 K), 空间站本体充电电位 -100 V . 利用航天器等离子体相互作用仿真软件 (spacecraft plasma interaction software, SPIS), 对参考电位计的充电情况进行仿真计算. 结果如图 9 所示, 参考电位计传感器的电位为 -0.353 V , 十分接近背景等离子体的电位.

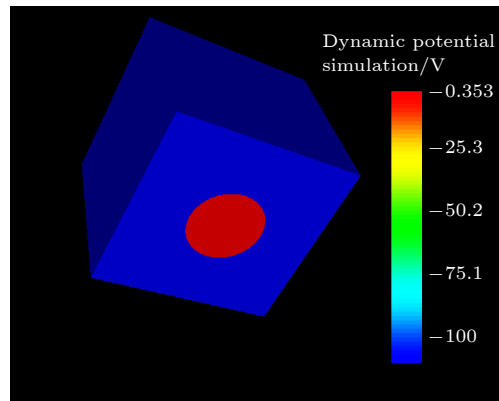


图 9 参考电位计动态电位的仿真结果

Fig. 9. Dynamic potential simulation result of reference potentiometer.

2.5 离子成像仪设计

离子成像仪由静电偏转模块、Whalen 分析器和成像模块三部分组成, 如图 10 所示. 静电偏转系统包括上下两个偏转板, 通过在上下两个偏转板上加载扫描电压, 可选择不同俯仰角方向的离子进入 Whalen 分析器. Whalen 分析器设计为内外两个同心半球, 电压加载到内外半球上, 在内外半球之间形成一个径向的均匀电场. 该电场将不同能量的离子偏转到不同径向位置, 并输出到成像模块.

成像模块由微通道板 (micro-channel plates, MCPs)、荧光屏、透镜组件和 CMOS 图像传感器组成. 当离子打在 MCP 上, 会对离子电荷进行倍增, 形成电子云输出. 电子云打在荧光屏上产生特定波长的光子, 光子经过光锥引到 CMOS 图像传感器, 将光信号转换为电信号输出. 通过分析 CMOS 图像传感器的输出信号即可得到入射离子的位置信息 [15,16].

根据离子成像仪的工作原理, 离子进入 Whalen 分析器, 输出的径向位置与离子能量相关, (3) 式表示了两者之间的理论关系 [17]. 不同能量的离子被偏转的角度不同, 打在 MCP 上的位置也不同 (图 7 中不同颜色的曲线表示). 能量高的离子打在靠近 MCP 边缘的位置, 能量低的离子打在靠近 MCP 中心的位置.

$$E/q = (\Delta V/3) \cdot (\rho/R)^{1.75} \quad (3)$$

其中 E 为离子能量; q 为离子电荷量; ΔV 为 Whalen 分析器内外半球的电压差; ρ 为离子打在 MCP 上

位置与圆心的径向距离; R 为 Whalen 分析器内半球的半径.

离子成像仪的探测视场主要取决于 Whalen 分析器的结构尺寸. 由于 Whalen 分析器设计为具有旋转对称的结构, 因此离子成像仪探测视场在方位角上可达 360° , 根据偏转系统的上下偏转板张角以及扫描电压, 视场在俯仰角上可实现 $\geq 90^\circ$.

2.6 载荷管理器

载荷管理器负责对外与空间应用系统的供电接口、通讯接口, 同时负责对内部各载荷的控制与通信. 载荷管理器依据地面上注控制指令, 可在轨进行开机、关机操作. 同时, 载荷管理器也可依据地面上注控制指令, 分别控制离子成像仪加电断电、朗缪尔探针加电断电、阻滞势分析仪加电断电以及对伸杆展开机构加电断电.

朗缪尔探针、阻滞势分析仪和离子成像仪各自采集其探测数据, 并通过通信总线发送给电控箱. 电控箱将各传感器采集的科学数据打包, 通过 FC-AE-1553 总线发送给应用系统. 同时将采集的仪器遥测参数通过 MIL-STD-1553 B 总线发送给应用系统, 以监测仪器健康状态.

电控箱通过控制内部继电器, 可选择内部二次地与空间站结构地或参考电位计传感器连接. 初始状态, 内部二次电源地与空间站结构地连接. 当空间站充电电位过高, 且影响探测结果时, 可通过注入指令选择内部二次地与参考电位计传感器连接.

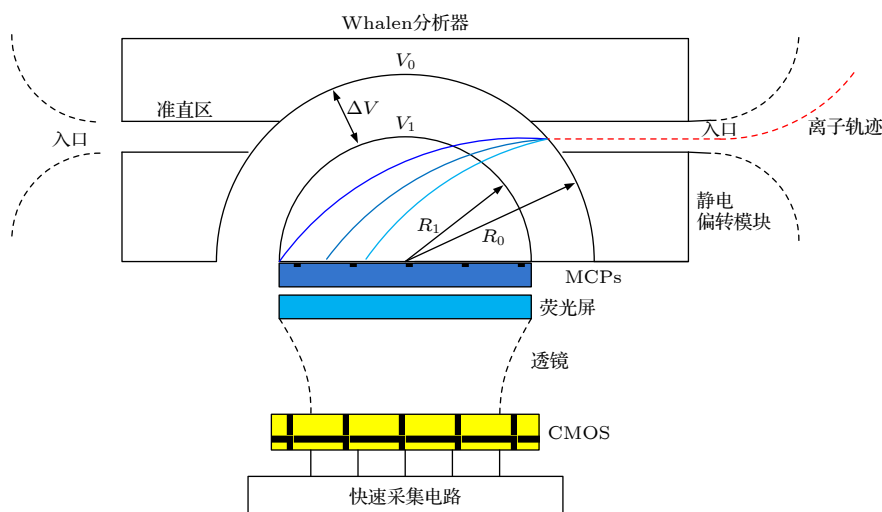


图 10 离子成像仪传感器结构

Fig. 10. Structural diagram of ion imager sensor.

3 测试验证

3.1 等离子体原位探测的测试验证

朗缪尔探针、阻滞势分析仪、离子漂移计和参考电位计完成等离子体原位探测的各项性能. 其中, 朗缪尔探针、阻滞势分析仪和离子漂移计继承了张衡一号卫星的载荷技术, 其测试验证方法与已在轨验证的张衡一号卫星一致.

离子成份是通过能谱的峰值识别来区分, 取决于阻滞势分析仪的能谱设置, 即扫描偏压设置. 电离层中 H^+ , He^+ , O^+ 离子成份相对阻滞势分析仪传感器的入射能量峰值分别为 0.30 eV, 1.21 eV, 4.83 eV, 最小能量间隔为 0.91 eV. 因此, 区分这 3 种成份, 需将扫描偏压的范围覆盖这 3 个峰值所在的能谱位置, 同时扫描步长 (即能谱划分) 应小于最小能量间隔 0.91 eV 的一半, 实测结果扫描偏压的步长为 0.15 V.

密度范围指标包括电子密度和离子密度. 电子密度的测量范围取决于朗缪尔探针的电流测量能力, 对于 $1 \times 10^3 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 范围内的电子密度, 朗缪尔探针传感器 (球体 $\Phi 50 \text{ mm}$) 相应收集电流范围应不小于 1.2 nA—0.5 mA, 测试结果为 20 pA—0.6 mA. 离子密度的测量范围取决于阻滞势分析仪的电流测量能力, 对于 $1 \times 10^3 - 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 范围内的离子密度, 阻滞势分析仪传感器 (窗口 $\Phi 40 \text{ mm}$) 相应收集电流范围应不小于 480 pA—5 μA , 测试结果为 80 pA—11 μA .

温度范围指标包括电子温度范围和离子温度范围. 500—10000 K 的电子温度范围对应于朗缪尔探针伏安特性曲线电子阻滞区的展宽约 0.13—3 V, 扫描电压的最小步长应小于 60 mV. 为保证伏安特性曲线的完整性, 扫描电压范围应不小于 -3—+3 V, 测试结果扫描电压范围为 -4.86—+4.95 V, 扫描电压的最小步长 40 mV. 500—10000 K 的离子温度范围对应于阻滞势分析仪伏安特性曲线能谱的展宽, 考虑到卫星在轨运行速度, 阻滞势分析仪扫描偏压应不小于 0—15 V, 扫描偏压的步长应小于 0.18 V, 测试结果扫描偏压为 0—19.49 V, 扫描偏压的步长 0.15 V.

离子漂移速度包括纵向漂移速度和横向漂移速度, 其中纵向漂移速度由阻滞势分析仪测量, 横向漂移速度由漂移计测量获得. 根据离子漂移速度

要求的指标范围, 考虑到卫星在轨速度, 漂移计电流测量范围应不小于 44 pA—4.9 μA , 测试结果为 20 pA—6 μA .

密度测量精度、温度测量精度以及离子漂移速度测量精度, 本质上均取决于电流测量的噪声水平. 依据性能指标要求, 朗缪尔探针、阻滞势分析仪和离子漂移计的电流测量噪声水平均应小于 1 mV, 测试结果分别为 0.353 mV, 0.328 mV 和 0.333 mV. 电位范围指标是指参考电位计测量空间站结构地与参考电位计传感器之间电位差的动态范围. 测试结果为 -310.86 — +310.90 V, 满足指标要求的 -300 — +300 V 的测量范围.

3.2 等离子体离子成像探测的测试验证

离子成像仪技术是我国首次在轨应用, 在中国科学院国家空间科学中心的热等离子体定标系统进行了定标测试试验.

3.2.1 定标测试系统

热等离子体定标测试系统由磁屏蔽线圈、真空罐、离子束源、真空转台和地面检测设备等组成, 如图 11 所示. 表 2 给出了定标测试系统的基本性能参数.

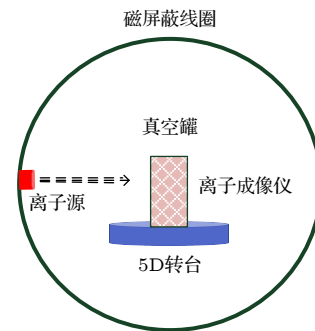


图 11 定标测试系统组成框图.

Fig. 11. A simplified sketch of the calibration facility.

表 2 定标测试系统性能参数

Table 2. Performances of the calibration system.

离子参数	性能
能量范围/eV	50 — 30000
能量散度	$\leq 2\%$
通量范围/ $(\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$	$10^3 - 10^{13}$
束斑直径/mm	≥ 70
转台定位精度/mm	≤ 0.1
转台角度精度	$\leq 0.1^\circ$
磁场控制范围/nT	≤ 500
真空度/Pa	$\geq 5 \times 10^{-5}$

定标过程中将离子成像仪置于真空罐中的转台上, 通过离子束源发射不同能量的离子, 进行能量范围和能量分辨率的测试. 通过转动转台, 改变离子成像仪相对离子束源的角度, 进行视场和角度分辨率的测试. 时间分辨率则通过一定时间存储的图像数量, 计算得到时间分辨率.

3.2.2 测试结果

1) 离子能量测量范围

定标测试系统产生不同能量的离子束, 离子成像仪对不同入射能量的离子束进行测量, 这些离子束在传感器中产生不同的径向位置信息. 在定标过程中, 离子源分别产生了 51.84, 70.17, 85.09, 113.46, 142.25, 165.07 和 185.20 eV 等 7 种能量离子束, 离子成像仪对应 7 种能量离子分别产生相应的图像, 如图 12 所示.

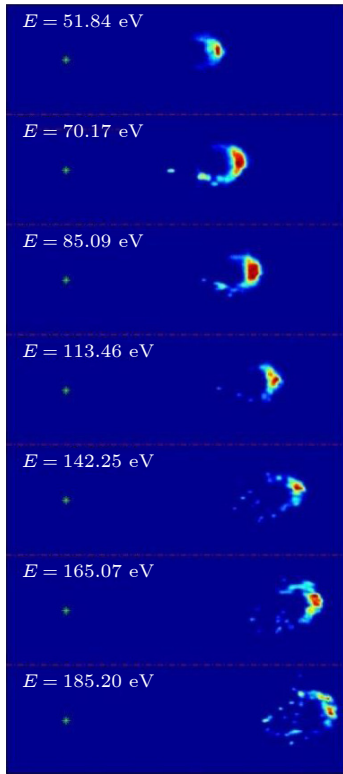


图 12 离子成像仪对 7 种能量离子的测试图像 (图中绿色星号为视场中心)
Fig. 12. Images of 7 kinds of energy ions (the green asterisk is the center of the field view).

通过拟合入射离子能量与径向位置, 得到二者的归一化曲线 (图 13 所示) 以及离子成像仪的实际测量关系式:

$$\frac{E}{q} = 1.161 \left(\frac{\Delta V}{3} \right) \left(\frac{\rho}{R} \right)^{2.084}. \quad (4)$$

离子成像仪在轨工作时 ΔV 有 300 和 850 V 两个档, 测量低端能量时用 $\Delta V=300$ V 的档, 测量能量高端时用 $\Delta V=850$ V 的档. 已知, 内球半径为 23.5 mm, 当成像径向位置为 0.7 mm 时, 对应的离子能量为 (E/q) 为 0.076 eV. 当成像径向位置为 $0.9R$ 时, 可测量的离子最大能量 (E/q) 为 264.10 eV.

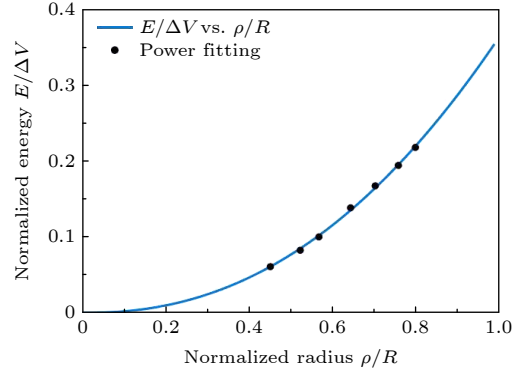


图 13 成像径向位置与离子能量的拟合关系曲线
Fig. 13. Normalized curve of imaging radial position and ion energy.

2) 视场范围

如图 10 所示, 离子成像仪传感器是旋转对称结构, 视场绕对称轴一圈, 因此视场在方位角上为 360° . 离子成像仪俯仰角则由静电偏转系统决定, 当静电偏转系统的上下偏转板加不同电压时, 将选择特定俯仰角方向的离子进入 Whalen 分析器. 定标过程中, 设定离子束流方向固定, 通过转台改变仪器的仰角方向, 等效于改变了入射离子的仰角方向. 其中一组测试: 离子能量设定为 51.84 eV, 偏转电压为 0 V, 通过改变仪器的仰角 -3.5° , -3.0° , -2.5° , -2.0° , -1.5° , -1.0° , -0.5° , 0.05° 和 0.55° , 获得的图像如图 14 所示. 图像对比表明, 偏转电压为 0 V 时对应的仰角为 -1.5° .

视场范围测试共选择了 5 个测试点, 进行仰角与偏转电压的测试. 根据测试结果, 拟合获得了偏转板因子 S 与俯仰角之间的关系曲线, 如图 15 所示. 图中的偏转板因子 S 定义如下:

$$S = \frac{V_{\text{up}} - V_{\text{low}}}{E/q}, \quad (5)$$

式中, V_{up} 和 V_{low} 分别为上、下偏转板电压; E 为入射离子能量; q 为离子电荷.

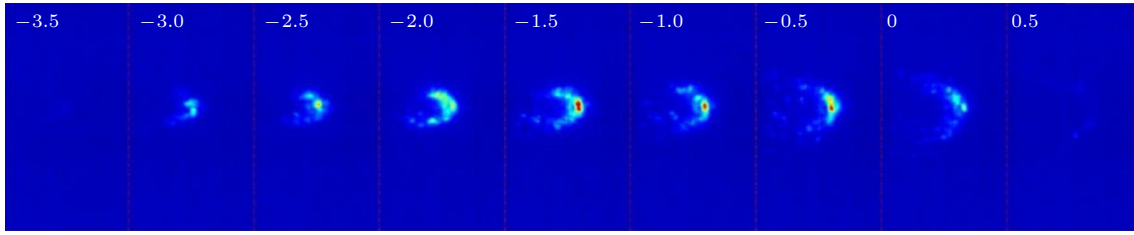


图 14 离子成像仪在离子束能量为 $E = 51.84$ eV 时俯仰角扫描测试图像 (俯仰角扫描范围 $-3.5^\circ \sim 0.5^\circ$, 间隔 0.5°)

Fig. 14. Images of one test case (ion energy is 51.84 eV and deflection voltage is 0 V).

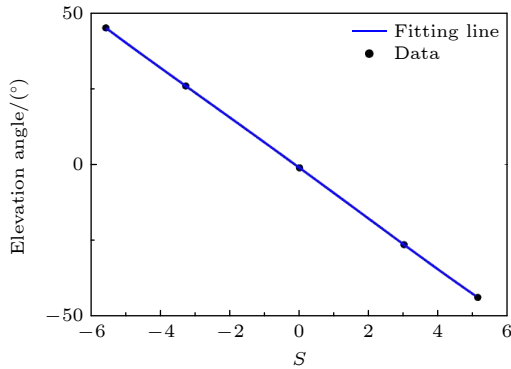


图 15 离子成像仪俯仰角与偏转板因子拟合曲线

Fig. 15. Fitting curve of elevation angle and deflection plate factor.

依据拟合曲线, 可获得了成像仪的俯仰角公式为

$$\begin{aligned} \text{Elevation angle} \\ = 0.00129 \times S^4 + 0.00249S^3 - 0.04006 \times S^2 \\ - 8.35574 \times S - 1.102. \end{aligned} \quad (6)$$

根据偏转板因子 S 与俯仰角拟合公式, 当离子能量是 204 eV 时, 需要的偏转电压最大, 通过调整偏转板因子 S , 获得对应的仰角分别为 -50.47° , 50.91° . 综合分析, 离子成像仪的视场定标结果为 $360^\circ \times 101.38^\circ$

由于定标测试系统的能力限制, 此次定标测试未覆盖全部能量范围, 尤其是 50 eV 以下的能量段. 对 50 eV 以下的能量的性能定标采用结合仿真结果进行外推, 这种方法也是国际上卫星载荷定标的常用方法. 为实现高时间分辨率, 离子成像仪内部设计有一个图像快速采集电路, 该电路由 FPGA 和高速采集 AD 组成. 图像快速采集电路的工作周期为 1 s, 每 1 秒采集 23 张图片. 由此计算得到, 离子成像仪的时间分辨率为 43.478 ms. 通过对离子成像仪定标测试的结果分析, 离子能量分辨率、视场分辨率和时间分辨率也均达到了科学任务的指标要求.

4 结 论

根据空间站的任务要求, 通过对等离子体原位成像探测技术的研究, 完成了等离子体原位成像探测器的自主设计与研制. 探测器所有传感器均已进行了定标测试, 包括离子成像仪、朗缪尔探针、阻滞势分析仪、离子漂移计以及参考电位计等. 定标测试结果表明满足任务要求的性能指标, 能够实现电离层等离子体的密度、温度、离子能量、方向以及空间站充电电位等多要素综合探测.

等离子体原位成像探测器作为中国空间站的第一批舱外空间环境科学载荷, 已随问天舱在海南文昌成功发射. 后续, 将由航天员在轨操作将探测器与载荷适配器、机械臂适配器组装成组合体. 然后, 由机械臂抓取出舱, 安装在问天舱舱外暴露平台上, 开展长期科学探测.

参考文献

- [1] Wang C, Zhao H S, LIU B, Chen L, Xiao P, Liu L, Liu m, Sui X H, Guo W L 2022 *Chin. Space Sci. Technol.* **42** 114 (in Chinese) [王成, 赵海生, 刘波, 陈亮, 肖鹏, 刘露, 刘敏, 睦晓虹, 郭午龙 2022 *中国空间科学技术* **42** 114]
- [2] Liu K, Yuan Z G, Zhou C, Zhao J Q, Zhu Q L, Dong X, Wang H N, Sheng D S 2021 *Chin. J. Radio Sci.* **36** 692 (in Chinese) [刘琨, 袁志刚, 周晨, 赵家奇, 朱庆林, 董翔, 王海宁, 盛冬生 2021 *电波科学学报* **36** 692]
- [3] Liu C B 2013 *Aerosp. Electron. Warfare* **29** 47 (in Chinese) [刘传保 2013 *航天电子对抗* **29** 47]
- [4] Craven P D, Kenneth H W, Joseph I M, Victoria N C, Todd A S, Jason A V, Dale C F, Linda N P 2009 *47th Aerospace Sciences Meeting* Orlando, USA, January 5-8, 2009 p119
- [5] Steve K, Terri C, William H, William S, Megan H, Gary D, Benjamin G, Jerry V 2020 *J. Space Saf. Eng.* **7** 461
- [6] Huang J G, Yi Z, Menf L F, Zhao H, Liu Y N 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 229401 (in Chinese) [黄建国, 易忠, 孟立飞, 赵华, 刘业楠 2013 *物理学报* **62** 229401]
- [7] Mott-Smith H M, Irving Langmuir 1926 *Phys. Rev.* **28** 727
- [8] Liu C, Guan Y B, Zheng X Z, Zhang A B, Piero D, Sun Y Q 2019 *Sci. Chin. Technol. Sci.* **62** 829
- [9] Liu C, Guan Y B, Zhang A B, Zheng X Z, Sun Y Q 2016 *Acta Phys Sin.* **65** 189401 (in Chinese) [刘超, 关隼炳, 张爱兵,

- 郑香脂, 孙越强 2016 物理学报 **65** 189401]
- [10] Zheng X Z, Zhang A B, Guan Y B, Liu C, Wang W J, Tian Z, Kong L G, Sun Y Q 2017 *Acta Phys Sin.* **66** 079401 (in Chinese) [郑香脂, 张爱兵, 关焱炳, 刘超, 王文静, 田峥, 孔令高, 孙越强 2017 物理学报 **66** 079401]
- [11] Heelis R A, Hanson W B 1998 *Geophys. Monogr. Ser.* **102** 61
- [12] Hanson W B, Zuccaro D R, Lippincott C R, Sanatani S 1973 *Radio Sci.* **8** 333
- [13] Zheng X Z, Zhang A B, Guan Y B, Liu C, Sun Y Q, Wang W J, Tian Z, Kong L G, Ding J J 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 209401 (in Chinese) [郑香脂, 张爱兵, 关焱炳, 刘超, 孙越强, 王文静, 田峥, 孔令高, 丁建京 2017 物理学报 **66** 209401]
- [14] Zuccaro D R, Holt B J 1982 *J. Geophys. Res.* **87** S327
- [15] Knudsen D J, Burchill J K, Buchert S C, Eriksson A I, Gill R, Wahlund J E, Åhlen L, Smith M, Moffat B 2017 *J. Geophys. Res. Space Phys.* **122** 2655
- [16] Knudsen D J, Burchill J K, Cameron T G, Enno G A, Howarth A, Yau A W 2015 *Space Sci. Rev.* **189** 65
- [17] Knudsen D J, Burchill J K, Berg K, Cameron T, Enno G A, Marcellus C G, King E P, Wevers I, King R A 2003 *Rev. Sci. Instrum.* **74** 202

Plasma in-situ imaging detection technology on China's Space Station Wentian module*

Liu Chao^{1)3)†} Zhang Ai-Bing¹⁾²⁾³⁾ Sun Yue-Qiang¹⁾³⁾ Kong Ling-Gao¹⁾³⁾
 Wang Wen-Jing¹⁾³⁾ Guan Yi-Bing¹⁾³⁾ Wang Yong-Song¹⁾³⁾
 Zheng Xiang-Zhi¹⁾³⁾ Tian Zheng¹⁾³⁾ Gao Jun¹⁾³⁾

1) (*National Space Science Center, CAS, Beijing100190, China*)

2) (*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing100049, China*)

3) (*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, National Space Science Center, CAS, Beijing 100190, China*)

(Received 7 September 2022; revised manuscript received 2 November 2022)

Abstract

In order to meet the needs of ionospheric research and monitoring of space station charging, the technology of plasma in-situ imaging detection is studied. The plasma in-situ imaging detector is one of the first outside scientific payloads of the Chinese space station to detect the space environment. It is installed on the extravehicular platform of the Wentian module, and will carry out multi-element comprehensive detection of ionospheric plasma, including in-situ, imaging, and charging potential. The refined detection data of the low latitude ionosphere will provide plasma parameters for improving the orbital ionospheric model of the space station. And the long-term charging potential data are collected to support the studying of the charging effect of plasma on the space station and promoting the establishment of the space station charging evaluation system.

The plasma in-situ imaging detector integrates Langmuir probe, retarding potential analyzer, ion drift meter, reference potentiometer, ion imaging technology, etc. Electron density and electron temperature are measured by Langmuir probe. Ion composition, ion density, ion temperature, and ion drift velocity are measured by retarding potential analyzer and ion drift meter. The ion imaging parameters are obtained by ion imager. The reference potential sensor is available to provide the measurements of charging potential of Wentian module. The Langmuir probe sensor inherits the design of the Langmuir probe sensor of CSES (Zhangheng-1 satellite). The retarding potential analyzer and ion drift meter also inherit the design of CSES (Zhangheng-1 satellite), and improve the design of grid voltage and collector voltage which can be adjusted adaptively according to on orbit state. The ion imager consists of an electrostatic deflection module, a Whalen analyzer and an imaging module. The ion imaging technology is for the first time applied to the field of space environment detection in China.

The plasma in-situ imaging detector is tested and calibrated to verify the performance at the National Space Science Center of the Chinese Academy of Sciences. when this paper is submitted, the detector mounted on Wentian module has been successfully launched. Next, the detector will be assembled by astronauts inside the capsule using external interfaces. Then, the detector will be grabbed by the robotic arm and installed on the extravehicular experimental platform to start a long-term exploration mission.

Keywords: china space station, space plasma, ion imager, in-situ detection

PACS: 94.80.+g, 94.20.Fg, 07.87.+v

DOI: 10.7498/aps.72.20221759

* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. Y79002AH40).

† Corresponding author. E-mail: liuch@nssc.ac.cn



空间站问天舱等离子体原位成像探测技术

刘超 张爱兵 孙越强 孔令高 王文静 关燧炳 王永松 郑香脂 田峥 高俊

Plasma in-situ imaging detection technology on China's Space Station Wentian module

Liu Chao Zhang Ai-Bing Sun Yue-Qiang Kong Ling-Gao Wang Wen-Jing Guan Yi-Bing Wang Yong-Song Zheng Xiang-Zhi Tian Zheng Gao Jun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 049401 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20221759

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20221759>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

超高精度空间站共视时间比对新方法

Super-high accurate new method of common-view time comparison based on space station

物理学报. 2018, 67(19): 190601 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180842>

螺旋波等离子体制备多种碳基薄膜原位诊断研究

In-situ diagnosis of Ar/CH₄ helicon wave plasma for synthesis of carbon nanomaterials

物理学报. 2021, 70(9): 097201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201809>

含氘电极真空弧等离子体空间分布特性诊断研究

Spatial distribution characteristics of vacuum arc plasma with occluded deuterium electrode

物理学报. 2022, 71(4): 042901 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211835>

中国聚变工程实验堆等离子体螺旋波阻尼系数的研究

Helicon wave damping coefficient of Chinese fusion engineering testing reactor plasma

物理学报. 2020, 69(14): 145201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200222>

化学复合率对激发赤道等离子体泡影响的数值模拟

Numerical simulation of recombination rate effect on development of equatorial plasma bubbles

物理学报. 2019, 68(19): 199401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190173>

相对论强激光与近临界密度等离子体相互作用的质子成像

Proton imaging of relativistic laser-produced near-critical-density plasma

物理学报. 2019, 68(15): 155201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190610>