

SU Bin, KONG Linggao, GAO Jun, LIU Chao, ZHANG Aibing, LÜ Yulong, WANG Wenjing, MA Liyuan. Design and Ground Calibration of the Low-energy Ion Analyzer and Low-energy Electron Analyzer onboard the Chang'E-7 Mission (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(2): 454–464. CSTR:32142.14.cjss.2025–0095. DOI:10.11728/cjss2026.02.2025–0095

»嫦娥七号任务有效载荷定标方法

嫦娥七号低能离子与低能电子 探头设计与地面定标

苏 斌^{1,2,3} 孔令高^{4,1} 高 俊^{1,2,3} 刘 超^{1,2,3}
张爱兵^{1,2,3,5} 吕玉龙^{1,2,3} 王文静^{1,2,3} 马利媛^{1,2,3}

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

4(南京大学深空探测科学与技术研究院 苏州 215163)

5(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 100049)

摘 要 低能离子和低能电子探头作为嫦娥七号探测器着陆器月表环境探测系统的组成单机, 主要用于开展月表低能带电粒子就位探测, 为揭示太阳风与月表的相互作用与耦合机制, 研究月表空间环境微观结构的形成机理提供关键背景数据, 并为月球科研站的空间环境评估及保障提供科学支撑. 低能离子和低能电子探头采用相同的传感器设计方案, 利用半球形静电分析器与非对称式静电偏转板实现对月表低能带电粒子的大视场和宽能量范围探测, 利用可变几何因子功能实现大通量动态范围. 采用地面标准等离子体束源对两台探头的性能进行详细定标. 定标结果显示, 低能离子低能电子探头可实现 0.001~30 keV 能量范围的等离子体探测, 能量分辨率优于 15%, 通量探测范围可覆盖 7 个数量级, 探测视场为 90°×360°, 角度分辨率优于 15°×22.5°, 所有技术指标均满足任务要求.

关键词 嫦娥七号, 低能离子探头, 低能电子探头, 等离子体探测, 地面定标

中图分类号 P354.4,V447+.1

Design and Ground Calibration of the Low-energy Ion Analyzer and Low-energy Electron Analyzer onboard the Chang'E-7 Mission

SU Bin^{1,2,3} KONG Linggao^{4,1} GAO Jun^{1,2,3} LIU Chao^{1,2,3}
ZHANG Aibing^{1,2,3,5} LÜ Yulong^{1,2,3} WANG Wenjing^{1,2,3} MA Liyuan^{1,2,3}

2025-06-19 收到原稿, 2026-01-16 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/>)

1(National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190)

3(Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

4(Institute of Science and Technology for Deep Space Exploration, Nanjing University, Suzhou 215163)

5(School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract The Low-Energy Ion Analyzer (LEIA) and Low-Energy Electron Analyzer (LEEA), integral components of the Chang'E-7 lander's lunar surface environment detection system, conduct in-situ measurements of low-energy charged particles (0.001~30 keV) to elucidate solar wind-regolith interaction mechanisms, investigate microstructure evolution in the lunar near-surface plasma environment, and support space-environment assessment for future lunar research stations. Employing identical hemispherical electrostatic analyzers with asymmetric electrostatic deflectors, both analyzers achieve wide-field detection ($90^\circ \times 360^\circ$ FOV), broad energy coverage, and voltage-controlled variable geometric factors. Ground calibration using standard plasma beam sources confirmed compliance with mission requirements: energy resolution $<15\%$ ($\Delta E/E$), dynamic flux range spanning seven orders of magnitude, and angular resolution $<15^\circ \times 22.5^\circ$, collectively enabling comprehensive characterization of lunar surface plasma phenomena.

Key words Chang'E 7, Low-Energy Ion Analyzer (LEIA), Low-Energy Electron Analyzer (LEEA), Plasma detection, Ground calibration

0 引言

月球是地球唯一的天然卫星,人类航天活动已对月球开展了多次探测.月球因没有稠密的大气与全球性磁场,太阳风等离子体、高能粒子、日冕物质抛射、银河宇宙线、地球磁尾带电粒子以及高通量的太阳紫外光子能够到达月球表面,并与月表产生能量耦合与物质交换,形成了复杂的电磁、尘埃及等离子体环境,而局部磁异常又使月表环境更加复杂^[1,2].月表粒子辐射环境的综合测量对深化月表粒子辐射环境认知与前沿科学问题的探索以及人类的月球活动安全具有重要意义.比较典型的具备等离子体探测载荷的月球探测任务包括:苏联的 Luna 10;美国的 Lunar Prospector, Discovery 3, PFS1/2, Apollo 11 等;印度的 Chandrayaan 1;日本的 SELENE;中国的嫦娥一号、嫦娥二号、嫦娥四号、嫦娥六号等^[3-11].

月球等离子体载荷的科学探测数据均支撑了月球等离子体环境的形成、演化及其耦合机制的研究. Halekas 等^[12]根据 Lunar Prospector 电子探测数据发现了月表日侧太阳风电子的能量损失锥,并分析了月面磁异常对太阳风上升流分布特性的影响. Poppe 等^[13]利用 ARTEMIS 的观测数据发现受强月

表磁化特性影响的太阳风等离子体的反射现象,典型磁异常区(例如南极艾特肯盆地)的反射率达到 5%~12%,而非磁化区域的反射率约为 0.1%~1%,日本 SELENE 探测^[8,14]和印度 Chandrayaan 探测任务^[15]的数据研究也得到了类似的结果.中国利用嫦娥一号太阳风离子探测器的数据发现太阳风双离子流现象,同时观测到了月表反射离子的自捕获与加速现象^[9].此外,针对月表太阳风与中性成分的研究结果还表明,太阳风粒子以能量中性原子的形式被月壤散射,其过程与太阳风状态、月表电磁环境、局部地形、月壤特性等因素均有关系^[16].同时,月球局部地区的磁异常能阻挡太阳风到达月面,并形成微磁层,进一步影响月表等离子体分布^[17].

近月表空间环境与环月轨道存在较显著的差异,主要体现在太阳风粒子和宇宙线在月面的溅射/反射、月面带电与等离子体鞘层、带电尘埃的动力学过程、带电粒子与月面物质的作用等.这些过程不仅与入射的粒子、辐射状况有关,还涉及月表局部的形貌、磁场等地质条件.只有在月面开展原位测量,才能深入了解其本质^[18].此外针对月表等离子体环境,能量可低至 eV 量级^[19],需对月表反射、溅射等离子体进行宽动态范围和大视场探测,有助于获得鞘层内

部带电粒子能量、物质交换的物理规律.

嫦娥七号任务作为中国探月工程四期的重要组成部分, 将实现月球南极的综合探测^[20]. 其中着陆器月表环境探测系统由低能离子探头、低能电子探头、中能粒子探头、高能粒子探头、尘埃探头、电场探头及电缆组件组成, 将开展月表环境综合探测与研究, 同时将开展月基对地球等离子体层及磁尾带电粒子的探测与研究^[21]. 低能离子与低能电子探头将对月表低能离子和低能电子能谱、方向及通量开展就位探测, 也是中国首次开展月表低能等离子体的综合探测.

1 载荷功能与技术指标

1.1 任务与功能

低能离子与低能电子探头的主要探测任务如下.

(1) 测量等离子体鞘层内的离子和电子的三维速度分布函数, 研究鞘层分布的准确特性及其产生和演化规律, 同时为鞘层模型的修正提供准确输入, 实现鞘层内离子、电子的三维分布特性及其对月表鞘层模型的修正.

(2) 低能离子与电子的探测数据可用于揭示太阳风与月表物质的相互作用机制, 研究月表空间环境微观结构的形成机理, 并为月球科研站的空间环境评估及保障提供科学数据.

根据上述探测任务, 载荷的主要功能为探测月表低能离子与低能电子的能量、方向及通量.

1.2 技术指标要求

基于嫦娥七号探测任务科学目标对载荷各探测要素的需求分析, 低能离子与低能电子探头的技术指标要求见表 1.

1.3 载荷组成与工作原理

根据低能离子与低能电子探头的技术指标, 该载荷属于典型的热等离子体探测仪器, 对于该类仪器, 国内外广泛采用静电分析器方案实现对热等离子体的探测^[22-25]. 低能离子探头与低能电子探头为独立的两个探头, 分别负责对月表离子与电子进行探测. 低能离子探头与低能电子探头传感器采用完全相同的设计, 二者探测原理相同, 仅内部电压极性相反. 低能离子与电子探头由传感器和电子学箱组成, 传感器和电子学箱采用一体化设计. 传感器将被测离子/电子参数 (方向、能量、通量等) 转换为电信号, 电子学对传感器输出的电信号进行采集和初步处理, 并发送给数据处理单元, 电子学输出传感器工作所需高压信号.

传感器具有旋转对称结构, 包括俯仰角扫描装置、入射窗口、顶盖电极、静电分析器、微通道板 (Microchannel Plates, MCP) 和屏蔽栅网等部分, 如图 1 所示. 俯仰角扫描装置采用非对称式视场偏转板构型, 包括上下两块偏转板, 通过偏转高压建立扫描电场, 用于对离子/电子入射俯仰角进行选择. 当偏转板加一定的电压时, 仅沿着特定俯仰角方向入射的离子/电子才能通过偏转区域并进入后端的传感器探测通道. 通过改变两个偏转板的电压配置, 可以选择不同的入射俯仰角.

离子/电子穿过偏转系统后进入准直通道, 准直通道包含一个顶盖电极, 顶盖电极电压可用于调节入射离子/电子的飞行轨迹, 从而控制到达后端传感器通道的离子/电子计数. 在大通量等离子体入射时可通过调节顶盖电极的电压, 改变局部电场形态及离子/电子飞行路径, 避免仪器计数率达到饱和, 扩展可探测通量范围^[26-28].

表 1 低能离子与低能电子探头技术指标要求
Table 1 Technical parameter requirements of LEIA and LEEA

指标名称	指标要求
低能粒子能量范围	电子: 0.001~30 keV 离子 (含质子): 0.001~30 keV
低能粒子探头视场	360° (方位角)×90° (俯仰角) @0.001~30 keV
低能粒子通量动态范围	10 ⁷ @0.001~30 keV
低能粒子角分辨率	方位角分辨率: ≤22.5° 俯仰角分辨率: ≤15.0°
低能粒子能量分辨率	≤15% @10 keV

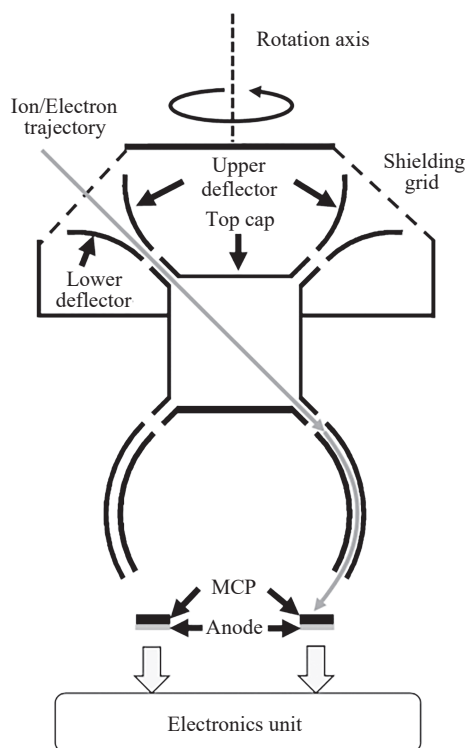


图 1 低能离子/电子探头组成及工作原理

Fig. 1 Analyzer composition and working principle

静电分析器是空间热等离子体探测的常用方案, 用于对热等离子体的能量电荷比 (E/q) 进行测量, 低能离子与低能电子探头以半球形静电分析器为基本方案. 静电分析器由内、外两个半球电极组成. 内球电极加高压, 外球电极接地. 内球电压固定时, 只有一定能量电荷比的离子/电子才能通过静电分析器并打在 MCP 上. 通过改变静电分析器电压, 可以测量不同能量电荷比的离子/电子. 能档和俯仰角扫描个数均由仪器内部程序确定.

穿过静电分析器内外极板间通道的离子/电子将被后端 MCP 探测, MCP 对入射的粒子电荷信号进行放大, 输出电荷脉冲并传输给后续的电子学电路. 方位角由离子/电子打在环形 MCP 上的位置确定, 低能离子与低能电子探头在方位角方向分为 16 个完全一样的探测通道, 每个探测通道的方位角视场为 22.5° , 如图 2 所示. 组装完成后的载荷实物见图 3.

2 定标方法

2.1 定标试验设备与场地

低能离子与低能电子探头的定标试验在中国科

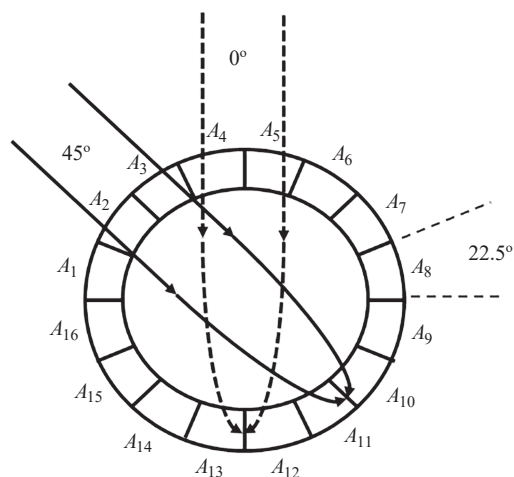


图 2 阳极划分及方位角探测原理

Fig. 2 Anode division and azimuth detecting principle

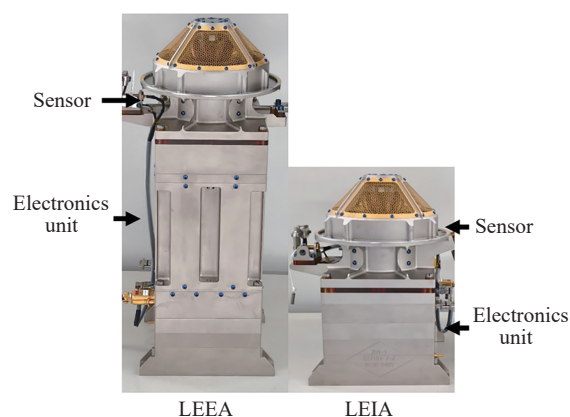


图 3 低能离子/电子探头实物照片

Fig. 3 Photograph of the two analyzers

学院国家空间科学中心怀柔园区的热等离子体测试定标系统中进行, 该系统包含一套标准离子束源和一套标准电子束源, 已服务于多个型号任务等离子体探测载荷的定标试验^[9,22,23,29-32].

热等离子体测试定标系统用于模拟空间等离子体的电子、离子状态, 对仪器技术指标进行详细定标. 定标试验设备有真空靶室、离子/电子束源、真空转台、地检设备、稳压电源、PC 电脑等. 在定标试验过程中, 真空罐用于提供真空环境, 在真空环境达到要求后, 利用稳压电源对仪器进行供电, 通过地检设备对仪器进行控制. 定标开始以后, 可调节离子/电子束源能量、通量, 以及通过转台调节离子/电子束源的入射方向对仪器进行不同项目的定标.

图 4 给出了定标组织框架与定标系统组成. 热等

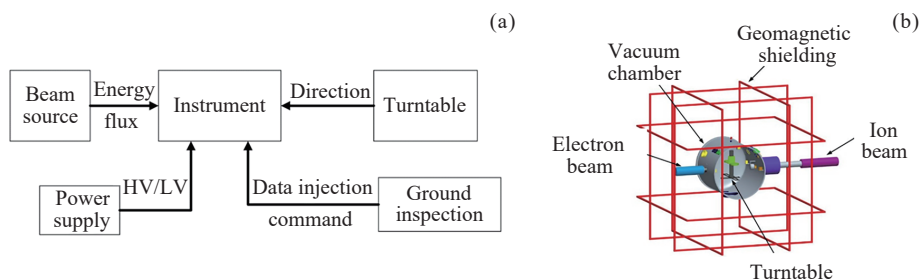


图4 定标组织框架 (a) 与系统组成 (b)

Fig. 4 Flowchart for the calibration operation (a) and components of the calibration system (b)

离子体定标系统的主要性能参数如下.

电子束能量范围: 0.1~30 keV.

离子束能量范围: 0.1~30 keV.

离子种类: H^+ , He^+ , N^+ , O^+ , Ar^+ , CO_2^+ 等.

束源能散度: $\leq 2.0\%$.

束源通量范围: $10^3 \sim 10^{10} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$.

束斑直径: $> 70 \text{ mm}$.

真空度: 优于 $5 \times 10^{-5} \text{ Pa}$.

真空转台: 方位角旋转范围 $\pm 180^\circ$, 俯仰角旋转范围 $\pm 90^\circ$, 平移重复定位精度优于 0.1 mm, 转动重复定位精度优于 0.1° .

2.2 定标项目

根据技术指标要求及仪器设计原理, 低能离子与低能电子探头的定标试验项目见表 2.

2.3 定标方法

低能离子探头与低能电子探头的工作原理、定标项目与方法相同, 仅内部电压极性相反. 以下定标方法以低能离子探头为例进行阐述. 图 5 给出了低能离子探头在定标系统内部的位置及系统内部组成情况, 包括五维转台、离子束源和电子束源入口位置、束源流向、束流监测设备(法拉第筒)等. 定标过程中, 低能离子探头可借助转台实现平动和转动, 完成对各项指标的详细定标试验.

2.3.1 静电分析器常数与能量分辨率

低能离子探头通过半球形静电分析器选择离子能量, 静电分析器内外两层金属极板为同心半球壳. 静电分析器工作时, 内极板加电压, 外极板接地. 若离子能量为 E , 电荷数为 q , 静电分析器电压为 V , 则定量关系为

$$E/q = kV. \quad (1)$$

其中, 静电分析器常数 k 为仪器的固有特性参数. 从式 (1) 可以看出静电分析器扫描电压与所选择离子能

表 2 低能离子与低能电子探头定标试验项目
Table 2 Calibration items of LEIA and LEEA

探头	定标试验项目
低能离子探头	静电分析器常数和能量分辨率 方位角视场范围和角度分辨率 俯仰角视场范围和角度分辨率 通量动态范围
低能电子探头	静电分析器常数和能量分辨率 方位角视场范围和角度分辨率 俯仰角视场范围和角度分辨率 通量动态范围定标

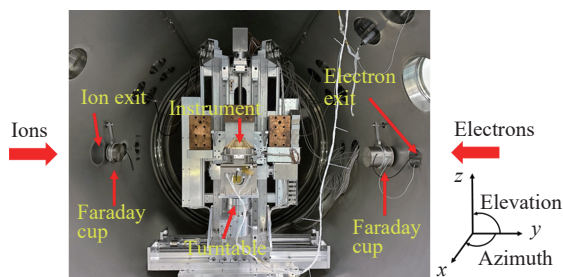


图5 低能离子探头在定标系统内部的位置及系统内部组成

Fig. 5 Position of low-energy ion probe in calibration system and internal composition of the system

量之间呈线性关系.

能量分辨率 η 是仪器能探测到两种不同能量粒子的最小能量间隔, 具体是指仪器能谱响应曲线中半高宽 (Full Width at Half Maximum, FWHM) ΔE 与中心能量 E_0 之比, 即

$$\eta = \frac{\Delta E}{E_0} \times 100\%. \quad (2)$$

静电分析器常数与能量分辨率的定标流程为: 低

能离子探头在定标真空罐内, 真空度及离子束源满足定标需求, 固定低能离子探头方向, 扫描静电分析器电压, 记录低能离子探头计数响应, 即可获得能谱响应曲线, 分析曲线峰值对应中心电压 V_0 和半高宽 ΔV , 结合式 (1) 和式 (2) 可以给出静电分析器的常数和能量分辨率。

2.3.2 方位角视场范围与角度分辨率

低能离子探头传感器具有旋转对称结构, 理论上其方位角具有 360° 视场范围, 包含 16 个探测通道, 每个通道的角度范围即为方位角分辨率, 约为 22.5° 。定标时将离子束源扫过不同的方位角入射方向, 可获得仪器的方位角视场及分辨率。

方位角视场范围及分辨率的定标流程为: 低能离子探头在定标真空罐内, 真空度、离子束源满足定标需求, 转动转台, 使离子束源入射方向的方位角从 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化, 扫过完整的方位角视场, 记录扫描过程中仪器计数响应, 即可获得方位角响应曲线, 分析响应曲线即可得到视场范围及角度分辨率。

2.3.3 俯仰角视场范围与角度分辨率

俯仰角视场主要由偏转电极高压与能量决定, 定义偏转电极常数为

$$R = \frac{V_{up} - V_{low}}{E/q}. \quad (3)$$

其中, V_{up} 为上偏电极电压, V_{low} 为下偏转电极电压。俯仰角与偏转电极常数相关, 通过确定偏转电极常数, 可获得俯仰角探测视场。

俯仰角视场范围与角度分辨率的定标流程为: 低能离子探头在定标真空罐内, 真空度和离子束源满足定标需求, 扫描静电分析器电压, 固定偏转板电压, 转动转台, 扫描仪器俯仰角, 记录低能离子探头的计数响应, 即可获得特定偏转板电压下的俯仰角响应曲线, 改变偏转板电压, 转动转台, 再次扫描仪器俯仰角, 即可获得不同偏转板电压对应的俯仰角响应曲线。通过不同响应曲线的峰值对应的中心角度即可获得不同偏转系统常数与俯仰角的对应关系曲线, 进而得到俯仰角探测视场范围。离子俯仰角分辨率由俯仰角分布曲线的半高宽决定。

2.3.4 通量动态范围

低能离子的通量通常由几何因子和仪器计数率计算得到。空间等离子体探测载荷的几何因子通常是固定值, 即通量动态响应范围是固定的, 在大通量等

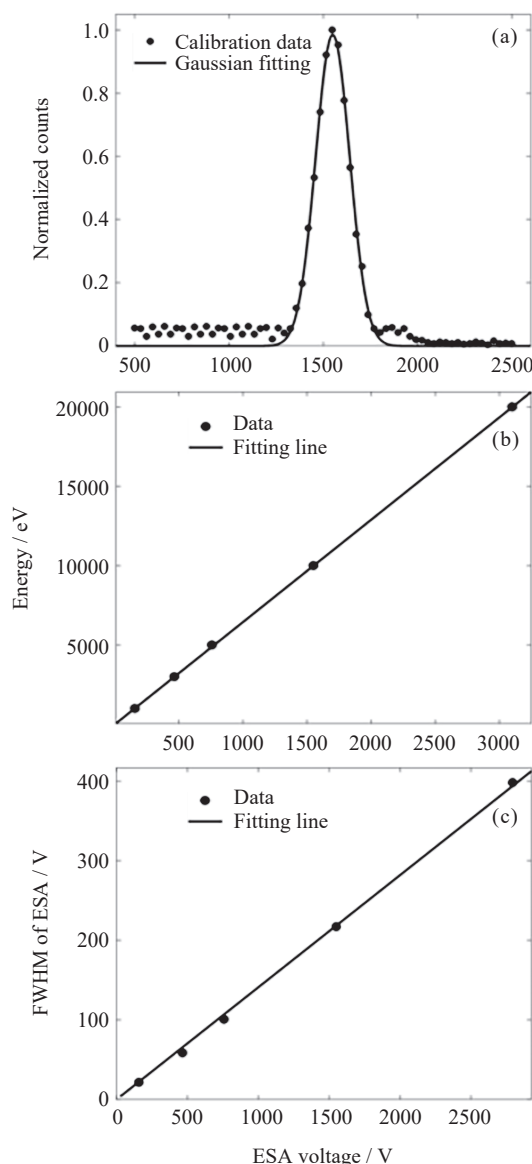


图 6 10 keV 离子能谱 (a) 与离子静电分析器常数拟合 (b) 及离子能量分辨率拟合 (c) 曲线

Fig. 6 Ion energy spectrum at 10 keV (a), ion analyzer constant fitting line (b), and ion energy resolution fitting line (c)

离子体入射时, 若入射通量超过临界值, 仪器计数率会达到饱和。通常静电分析器类探测器采用微通道板对粒子进行计数, 覆盖最大约 4 个量级的动态范围, 可变几何因子功能可在粒子入射通量超过临界值时对计数进行抑制, 从而扩大仪器通量响应范围。

低能离子探头具备可变几何因子功能, 在入射通量不变的情况下, 几何因子与仪器计数率成正比, 该

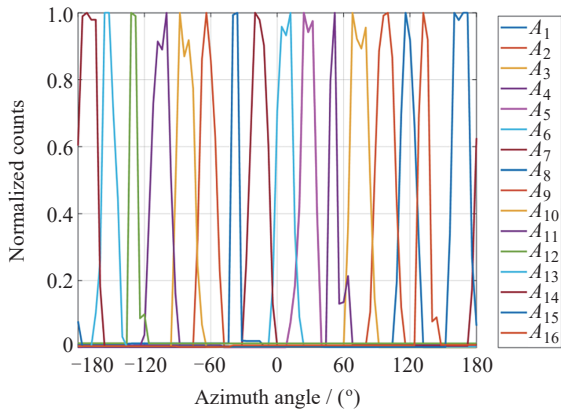


图 7 10 keV 离子方位角响应曲线

Fig. 7 Ion azimuth response curve at 10 keV

功能通过调节顶盖电压改变区域电场分布与几何因子, 从而调节有效离子计数响应范围。

通量动态范围的定标流程为: 低能离子探头在定标真空罐内, 真空度、离子束源满足定标需求, 扫描静电分析器电压 (ESA, V_{ESA}), 固定仪器方向, 设定顶盖电压 (VGF, V_{VGF}), 在不超过扫描静电分析器电压范围内选取不同的采样点进行顶盖电压测试, 记录低能离子探头计数响应, 即可得到计数响应随电压比值 (V_{VGF}/V_{ESA}) 的变化曲线, 分析曲线即可得到通量动态范围。

3 定标结果

3.1 低能离子探头定标结果

3.1.1 静电分析器常数与能量分辨率

低能离子探头采用静电分析器选择能量, 理论上静电分析器常数与能量分辨率均不随能量或方向变化。在 1~20 keV 范围内取 5 个能量点 (1, 3, 5, 10, 20 keV) 分别进行能量扫描。典型的离子能量扫描曲线如图 6(a) 所示 (10 keV), 对 5 个能量点的能谱扫描结果进行线性拟合, 可以获得低能离子探头的静电分析器常数为 6.45, 如图 6(b) 所示, 能量分辨率为 14.11%, 如图 6(c) 所示。高压电源提供静电分析器电压为 $-0.1 \sim -5000$ V, 可探测离子能量范围为 0.65~32250 eV, 满足指标要求。

3.1.2 方位角视场范围与角度分辨率

图 7 为 10 keV 的离子源在仪器 16 个探测方位角的响应曲线。从图 7 可以看出, 总的探测方位角视场范围为 360° , 每个通道的视场范围即方位角分辨率

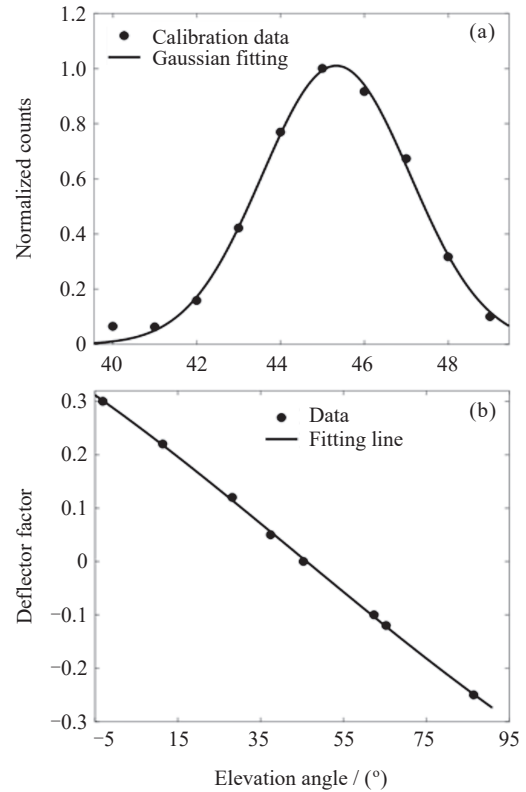


图 8 偏转板 0 V 时 3 keV 离子俯仰角响应 (a) 及离子偏转电极常数与俯仰角关系曲线 (b)

Fig. 8 Ion elevation angle spectrum at 3 keV when both deflectors are grounded (a), and relationship of ion deflector factor and elevation angle (b)

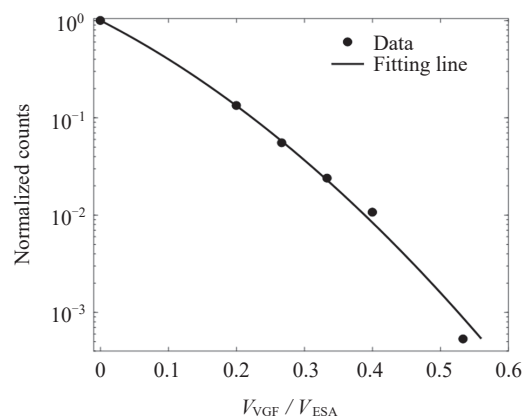


图 9 离子可变几何因子响应

Fig. 9 Ion variable geometric factor response

约为 22.5° 。由于仪器支撑结构的遮挡, 会有部分方位角计数较小或分布较窄, 具体分布角度为 -135° , -45° , $+45^\circ$ 和 $+135^\circ$ 。

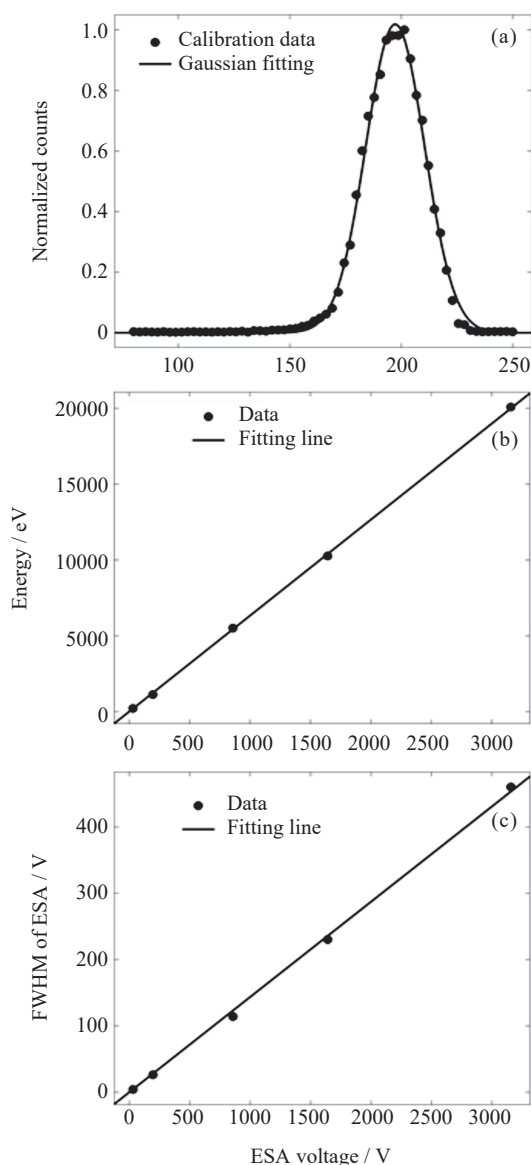


图 10 1.1 keV 电子能谱 (a) 与电子静电分析器常数拟合曲线 (b) 及电子能量分辨率拟合曲线 (c)

Fig. 10 Electron energy spectrum at 1.1 keV (a), electron analyzer constant fitting line (b), and electron energy resolution fitting line (c)

3.1.3 俯仰角视场范围与角度分辨率

偏转板不加高压时, 离子俯仰角响应如图 8(a) 所示, 俯仰角中心值为 45.33° , 俯仰角分辨率即为俯仰角分布曲线的半高宽, 为 4.14° . 离子俯仰角与偏转电极常数相关. 通过确定偏转电极常数, 可以获得离子测量俯仰角视场, 离子俯仰角与偏转电极常数的关系曲线如图 8(b) 所示. 根据该曲线可判断, 离子俯仰

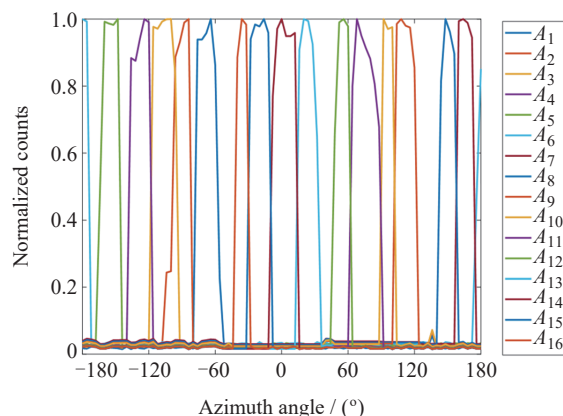


图 11 10 keV 电子方位角响应曲线

Fig. 11 Electron azimuth response curve at 10 keV

角可覆盖范围 $0^\circ \sim 90^\circ$. 离子俯仰角分辨率由俯仰角分布曲线的半高宽决定, 俯仰角分辨率优于 5.23° , 满足 15° 的俯仰角分辨率指标要求.

3.1.4 通量动态范围

图 9 为归一化后的离子计数与几何因子控制电压的关系曲线, 即离子可变几何因子响应. 从定标曲线可得出, 当顶盖电压 (V_{VGF}) 为静电分析器高压 (V_{ESA}) 的 52% 时, 离子探头可以实现 3 个量级的几何因子变化, 归一化计数范围为 $1 \sim 0.00053$, 可变几何因子倍数为 1886.8, MCP 通常响应范围跨越 4 个数量级. 根据实测结果, MCP 计数响应最低为 1, 最大 20983. 由此可计算得到离子通量动态范围约为 $1886.8 \times 20983 = 3.94 \times 10^7$, 满足指标要求.

3.2 低能电子探头定标结果

3.2.1 静电分析器常数与能量分辨率

与低能离子探头相同, 低能电子探头的静电分析器常数与能量分辨率理论上不随能量或方向变化. 在 $0.002 \sim 20$ keV 范围内取 5 个能量点 (0.002, 1.1, 5, 10, 20 keV) 分别进行能量扫描. 典型的电子能量扫描曲线如图 10(a) 所示, 对 5 个能量点的能谱扫描结果进行线性拟合, 可以获得低能电子探头的静电分析器常数为 6.33, 如图 10(b) 所示; 能量分辨率为 14.36%, 如图 10(c) 所示. 高压电源提供静电分析器电压为 $0.1 \sim 5000$ V, 可探测电子能量范围为 $0.63 \sim 31650$ eV, 满足指标要求.

3.2.2 方位角视场范围与角度分辨率

图 11 为 10 keV 的电子束源在仪器 16 个方位角方向的响应. 从图 11 可看出, 16 个通道总的方位角

范围为 360° , 每个通道的视场即方位角分辨率为 22.5° . 与低能离子探头相同, 由于仪器支撑结构的遮挡, 会有部分方位角计数较小或分布较窄, 具体分布角度为 $-135^\circ, -45^\circ, +45^\circ$ 和 $+135^\circ$.

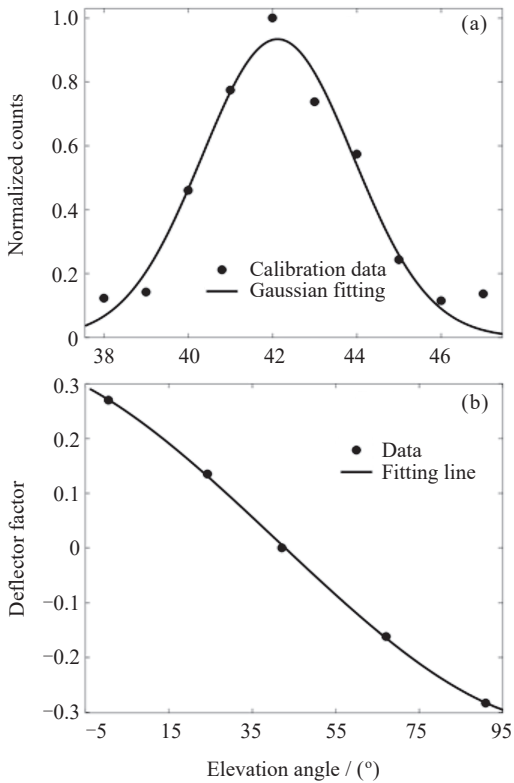


图 12 偏转板为 0 V 时 1 keV 电子俯仰角响应 (a) 及电子偏转电极常数与俯仰角关系曲线 (b)

Fig. 12 Elevation angle spectrum at 1 keV when both deflectors are grounded (a), and relationship of electron deflector factor and elevation angle (b)

3.2.3 俯仰角视场范围与角度分辨率

偏转板不加高压时, 1 keV 能量的电子俯仰角响应如图 12 (a) 所示, 俯仰角中心值为 42.12° , 俯仰角分辨率即为俯仰角分布曲线的半高宽, 为 4.04° . 电子俯仰角与偏转电极常数相关. 确定偏转电极常数值即可以获得电子俯仰角探测视场, 电子俯仰角与偏转电极常数的关系曲线如图 12 (b) 所示. 根据该曲线可判断, 电子俯仰角可覆盖范围 $0^\circ \sim 90^\circ$. 电子俯仰角分辨率由俯仰角分布曲线的半高宽决定, 俯仰角分辨率优于 5.92° , 满足 15° 的俯仰角分辨率指标要求.

3.2.4 通量动态范围

图 13 为归一化后的电子计数与几何因子控制电压的关系曲线, 即电子可变几何因子响应. 从定标曲线可得出, 当顶盖电压 (VGF) 为静电分析器高压 (ESA) 的 80% 时, 电子探头可做到 3 个量级的几何

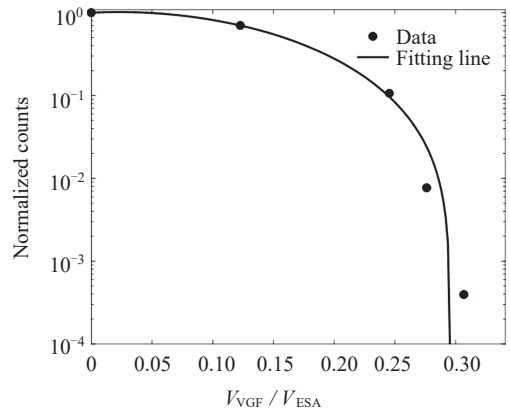


图 13 电子可变几何因子响应
Fig. 13 Electron variable geometric factor response

表 3 低能离子与低能电子探头所有定标项目定标结果与指标要求的对比
Table 3 Comparison between calibration results of all calibration items and index requirements for LEIA and LEEA

指标名称	指标要求	定标结果
低能粒子能量范围	电子: 0.001~30 keV 离子 (含质子): 0.001~30 keV	电子: 0.63~31650 eV 离子 (含质子): 0.65~32250 eV
低能粒子探头视场	360° (方位角) $\times 90^\circ$ (俯仰角) @0.001~30 keV	电子: 360° (方位角) $\times 90^\circ$ (俯仰角) @0.63~31650 eV 离子: 360° (方位角) $\times 90^\circ$ (俯仰角) @0.65~32250 eV
低能粒子通量动态范围	10^7 @0.001~30 keV	电子: 2.78×10^7 @0.63~31650 eV 离子: 3.94×10^7 @0.65~32250 eV
低能粒子角分辨率	方位角分辨率: $\leq 22.5^\circ$ 俯仰角分辨率: $\leq 15.0^\circ$	方位角分辨率: $\leq 22.5^\circ$ 俯仰角分辨率: 电子 $\leq 5.92^\circ$, 离子 $\leq 5.23^\circ$
低能粒子能量分辨率	$\leq 15\%$ @10 keV	电子: 14.36% @1~30000 eV 离子: 14.11% @1~30000 eV

因子变化, 归一化计数范围为 $1 \sim 0.00039$, 可变几何因子倍数为 2564, MCP 通常响应范围跨越 4 个数量级. 根据实测结果, MCP 计数响应最低 1 个, 最大 10857. 由此可计算得到电子通量动态范围约为 $2564 \times 10857 = 2.78 \times 10^7$, 满足指标要求.

4 讨论与结论

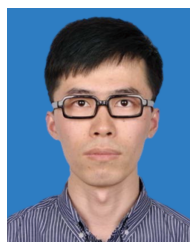
嫦娥七号月表环境探测系统低能离子与低能电子探头用于监测月表等离子体分布参数, 为太阳风与月表相互作用研究提供重要支撑数据. 综合科学探测需求、仪器技术方案特点和技术指标要求, 开展了定标试验. 表 3 为低能离子与低能电子探头所有定标项目定标结果与指标要求的比对, 试验结果表明, 在实测结合仿真的情况下, 低能离子与低能电子探头实现了所有仪器技术指标要求, 为仪器在轨科学数据处理奠定了基础.

参考文献

- [1] LUO Bingxian, ZHANG Xianguo, SUN Tianran, *et al.* Progress in lunar space weather detection and research[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2024, **11**(2): 159-168 (罗冰显, 张贤国, 孙天然, 等. 月球空间天气探测与研究进展[J]. 深空探测学报(中英文), 2024, **11**(2): 159-168)
- [2] SHI Quanqi, ZONG Qingang, YUE Chao, *et al.* Response of the lunar space environment to solar wind and Earth wind[J]. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 2022, **36**(6): 871-879 (史全岐, 宗秋刚, 乐超, 等. 月球表面及空间环境对太阳风与地球风的响应[J]. 中国科学基金, 2022, **36**(6): 871-879)
- [3] GRIGOROV N L, MADUYEV V L, MANDELSHTAM S L, *et al.* Study of the Soft Corpuscular Radiation on the AMS "Luna-10"[R]. Washington: NASA, 1966
- [4] LIN R P, MITCHELL D L, CURTIS D W, *et al.* Lunar surface magnetic fields and their interaction with the solar wind: results from lunar prospector[J]. *Science*, 1998, **281**(5382): 1480-1484
- [5] BAUM J J, HARMAN R W, MARONDE R G, *et al.* Design of the particles experiment subsystem of the Apollo Lunar Subsatellite[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1972, **19**(1): 632-639
- [6] BÜHLER F, EBERHARDT P, GEISS J, *et al.* Apollo 11 solar wind composition experiment: first results[J]. *Science*, 1969, **166**(3912): 1502-1503
- [7] BHARDWAJ A, WIESER M, DHANYA M B, *et al.* The SUB-keV Atom Reflecting Analyzer (SARA) experiment aboard Chandrayaan-1 mission: instrument and observations[J]. *Advanced Science*, 2010, **19**: 151
- [8] SAITO Y, YOKOTA S, ASAMURA K, *et al.* Low-energy charged particle measurement by MAP-PACE onboard SELENE[J]. *Earth, Planets and Space*, 2008, **60**(4): 375-385
- [9] KONG L G, WANG S J, WANG X Y, *et al.* In-flight performance and preliminary observational results of Solar Wind Ion Detectors (SWIDs) on Chang'E-1[J]. *Planetary and Space Science*, 2012, **62**(1): 23-30
- [10] WIESER M, BARABASH S, WANG X D, *et al.* The Advanced Small Analyzer for Neutrals (ASAN) on the Chang'E-4 rover Yutu-2[J]. *Space Science Reviews*, 2020, **216**(4): 73
- [11] CANU-BLOT R, WIESER M, KÉRÉNYI M, *et al.* The Negative Ions at the Lunar Surface (NILS) instrument on the Chang'E-6 mission[J]. *Space Science Reviews*, 2025, **221**(3): 38
- [12] HALEKAS J S, POPPE A, DELORY G T, *et al.* Solar wind electron interaction with the dayside lunar surface and crustal magnetic fields: evidence for precursor effects[J]. *Earth, Planets and Space*, 2012, **64**(2): 73-82
- [13] POPPE A R, HALEKAS J S, LUE C, *et al.* ARTEMIS observations of the solar wind proton scattering function from lunar crustal magnetic anomalies[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2017, **122**(4): 771-783
- [14] SAITO Y, NISHINO M N, FUJIMOTO M, *et al.* Simultaneous observation of the electron acceleration and ion deceleration over lunar magnetic anomalies[J]. *Earth, Planets and Space*, 2012, **64**(2): 83-92
- [15] LUE C, FUTAANA Y, BARABASH S, *et al.* Strong influence of lunar crustal fields on the solar wind flow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(3): L03202
- [16] WANG Chi, LI Lei, ZHANG Aibing, *et al.* The solar wind and particle radiation environment on the surface of the Moon—new observations from Chang'E-4[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, **9**(3): 239-249 (王赤, 李磊, 张爱兵, 等. 月表太阳风和粒子辐射环境——“嫦娥四号”观测新结果[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, **9**(3): 239-249)
- [17] XIE Lianghai, ZHANG Aibing, LI Lei, *et al.* Chang'E-4 energetic neutral atom observation reveals new features about the solar wind-moon interaction[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 11-24 (谢良海, 张爱兵, 李磊, 等. 嫦娥四号能量中性原子观测揭示太阳风与月面相互作用新特征[J]. 2022, **42**(1): 11-24)
- [18] WU Weiren, YU Dengyun, WANG Chi, *et al.* Research on the main scientific and technological issues on lunar polar exploration[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, **7**(3): 223-231, 240 (吴伟仁, 于登云, 王赤, 等. 月球极区探测的主要科学与技术问题研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2020, **7**(3): 223-231, 240)
- [19] HALEKAS J S, SAITO Y, DELORY G T, *et al.* New views of the lunar plasma environment[J]. *Planetary and Space Science*, 2011, **59**(14): 1681-1694
- [20] YU Houman, RAO Wei, ZHANG Yiyuan, *et al.* Mission analysis and spacecraft design of Chang'E-7[J]. *Journal of*

- Deep Space Exploration*, 2023, **10**(6): 567-576 (余后满, 饶伟, 张益源, 等. “嫦娥七号”探测器任务综述 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2023, **10**(6): 567-576)
- [21] WANG C, JIA Y Z, XUE C B, *et al.* Scientific objectives and payload configuration of the Chang'E-7 mission[J]. *National Science Review*, 2023, **11**(2): nwad329
- [22] KONG L G, ZHANG A B, TIAN Z, *et al.* Mars Ion and Neutral Particle Analyzer (MINPA) for Chinese Mars exploration mission (Tianwen-1): design and ground calibration[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2020, **4**(4): 333-344
- [23] SU Bin, ZHANG Aibing, KONG Linggao, *et al.* Charged and neutral particle analyzer for Tianwen-2 mission[J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2025, **55**(7): 279511 (苏斌, 张爱兵, 孔令高, 等. 天问二号探测器带电粒子与中性粒子分析仪 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, **55**(7): 279511)
- [24] HALEKAS J S, TAYLOR E R, DALTON G, *et al.* The solar wind ion analyzer for MAVEN[J]. *Space Science Reviews*, 2015, **195**(1): 125-151
- [25] MCFADDEN J P, KORTMANN O, CURTIS D, *et al.* MAVEN Suprathermal and Thermal Ion Composition (STATIC) instrument[J]. *Space Science Reviews*, 2015, **195**(1): 199-256
- [26] SU Bin, KONG Linggao, ZHANG Aibing. Design and simulation of light ion analyzer for SMILE satellite[J]. *Journal of Astronautics*, 2018, **39**(3): 347-354 (苏斌, 孔令高, 张爱兵. SMILE 卫星低能离子分析仪的设计与仿真 [J]. 宇航学报, 2018, **39**(3): 347-354)
- [27] SU Bin, KONG Linggao, ZHANG Aibing. Design and simulation of a hot plasma analyzer with a 2π field-of-view and high resolution[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, **40**(5): 604-610 (苏斌, 孔令高, 张爱兵. 一种 2π 视场高分辨热等离子体分析仪设计与仿真 [J]. 宇航学报, 2019, **40**(5): 604-610)
- [28] COLLINSON G A, KATARIA D O. On variable geometric factor systems for top-hat electrostatic space plasma analyzers[J]. *Measurement Science and Technology*, 2010, **21**(10): 105903
- [29] KONG Linggao, ZHANG Aibing, WANG Shijin, *et al.* Design and simulation of ion analyzer onboard YH-1 Mars probe[J]. *Aerospace Shanghai*, 2013, **30**(4): 164-168 (孔令高, 张爱兵, 王世金, 等. 萤火一号火星探测器离子分析器设计和仿真技术 [J]. 上海航天, 2013, **30**(4): 164-168)
- [30] ZHANG Aibing, KONG Linggao, WANG Shijin, *et al.* Design and test of electron analyzer onboard YH-1 Mars probe[J]. *Aerospace Shanghai*, 2013, **30**(4): 187-191 (张爱兵, 孔令高, 王世金, 等. 萤火一号火星探测器电子分析器设计和试验 [J]. 上海航天, 2013, **30**(4): 187-191)
- [31] SU B, CHEN A Q, LIU M H, *et al.* Ground calibration and in-flight performance of the low energy particle analyzer on FY-4B[J]. *Atmosphere* 2023, **14**(12): 1834
- [32] KONG Linggao, ZHANG Aibing, TIAN Zheng, *et al.* Integrated ion and neutral particle analyzer for Chinese Mars mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2019, **6**(2): 142-149 (孔令高, 张爱兵, 田峥, 等. 自主火星探测高集成离子与中性粒子分析仪 [J]. 深空探测学报, 2019, **6**(2): 142-149)

作者简介



苏斌 男, 1992 年出生, 博士, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 主要从事空间等离子体探测载荷研制与数据应用研究。

E-mail: subin@nssc.ac.cn