



天问二号探测器带电粒子与中性粒子分析仪

苏斌^{1,2,3}, 张爱兵^{1,2,3,5*}, 孔令高^{4,1}, 郑香脂^{1,2,3}, 田峥^{1,2,3}, 关焱炳^{1,2,3}, 李永平^{1,2,3},
高俊^{1,2,3}, 王馨悦^{1,2,3}, 吕玉龙^{1,2,3}, 唐斌斌¹, 李文亚¹, 张立华⁶, 薛长斌¹,
徐海涛¹, 王芳⁷

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. 南京大学苏州校区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
6. 探月与航天工程中心, 北京 100037
7. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

*联系人, E-mail: zhab@nssc.ac.cn

收稿日期: 2025-01-08; 接受日期: 2025-02-17; 网络出版日期: 2025-05-21

国家自然科学基金(编号: 42474239)资助项目

摘要 天问二号任务通过一次发射实现近地小行星2016HO3的近距离探测、采样返回和主带彗星311P的近距离探测. 带电粒子与中性粒子分析仪作为天问二号任务的载荷之一, 将对小行星和彗星等离子体和中性大气进行就位探测. 带电粒子与中性粒子分析仪采用高集成和小型化设计思路, 包含热离子分析仪、热电子分析仪、太阳风离子分析仪、气体与离子分析仪四台单机, 用于对小天体热等离子体、太阳风、彗星中性大气和离子进行高分辨探测. 飞行件已完成地面定标试验, 本文详细介绍了4台单机的工作原理和地面定标, 试验结果表明, 载荷可探测热离子能量范围为2.79 eV–32.03 keV, 能量分辨率为8.79%, 可区分典型热离子成分; 可探测热电子能量范围为1.07 eV–20.61 keV, 能量分辨率为14.29%, 热离子与热电子视场为 $360^{\circ} \times 90^{\circ}$; 可探测太阳风离子能量范围为5 eV–5 keV, 能量分辨率为4.23%; 可探测彗星大气与电离层离子质谱范围为1–350 amu, 质谱分辨率 $\Delta M \leq 0.17 \text{ amu}@1\text{--}50 \text{ amu}$, $\leq 0.52 \text{ amu}@51\text{--}150 \text{ amu}$, $\leq 1.22 \text{ amu}@151\text{--}350 \text{ amu}$, 动态范围为 3.328×10^9 , 能够满足对小行星和彗星科学探测的需求.

关键词 天问二号, 小天体探测, 带电粒子与中性粒子分析仪

PACS: 94.80.+g, 95.55.-n, 96.30.Ys, 95.05.Rx

引用格式: 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. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2025, 55: 279511

Su B, Zhang A, Kong L, et al. Charged and neutral particle analyzer for Tianwen-2 mission (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2025, 55: 279511, doi: [10.1360/SSPMA-2025-0010](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0010)

1 引言

太阳系内小行星、彗星等小天体的探测可为人类了解太阳系内行星形成与演化提供重要科学线索, 从而受到越来越多关注. 随着深空探测活动的发展, 人类利用飞跃、环绕、着陆、采样返回等多种形式对小行星和彗星进行了全方位的探测, 典型的探测任务有美国的 Galileo, ICE, Deep Space 1, 苏联的 Vega1/2, 欧空局的 Rosetta, Giotto, 以及日本的 MS T5 和 Planet A 等^[1-8].

我国首个小天体探测计划天问二号任务通过一次发射实现一颗近地小行星 2016HO3 取样返回和一颗主带彗星 311P 绕飞探测. 天问二号任务总的科学目标为: (1) 揭示太阳系典型小天体的特征和演化机理; (2) 探索太阳系形成早期的物质和生命信息; (3) 认知太阳风与小天体的相互作用过程.

带电粒子与中性粒子分析仪是天问二号的有效载荷之一, 主要对小行星和彗星附近带电粒子与中性粒子以及太阳风参数进行就位探测, 与磁强计、尘埃分析仪等载荷配合共同完成上述科学目标(2)和(3)的探测任务^[9].

以往的小行星探测任务大多集中于其地形地貌以及采样返回等的探测, 对于等离子体环境的探测较少. 由于小行星尺寸较小, 太阳风与其相互作用效应并不如与较大尺寸的天体(比如月球)显著. 因此, 利用粒子探测仪器研究太阳风与小行星相互作用的研究尚未充分开展. Fatemi 和 Poppe^[10]对不同磁化强度下太阳风和小行星(16 Psyche, 平均直径 226 km)的相互作用开展了模拟, 获得了不同磁化强度下的小行星等离子体环境及其参数随太阳风的扰动变化特征.

彗星探测任务大多搭载等离子体探测仪器和中性成分质谱分析仪, 以实现彗星大气、电离层和太阳风的就位探测. 典型的载荷有 ICE 的等离子体分析仪^[2]、Vega1/2 的等离子体分析仪与中性气体分析仪^[4,11]、Giotto 的等离子体分析仪、中性气体质谱分析仪与重离子质谱分析仪^[6,12-14]、Rosetta 的等离子体探测包与离子与中性粒子分析仪^[5,15]、日本的 MS T5 的太阳风分析仪^[7]和 Planet A 的等离子体分析仪^[8].

深空探测任务中, 有效载荷小型化和高集成设计是基本需求, 将极大地节省重量、功耗等资源. 我国深空探测任务载荷小型化和集成化设计的典型载荷包括萤火一号等离子体探测包^[16,17]和天问一号火星离子与中性粒子分析仪^[18].

天问二号任务带电粒子与中性粒子分析仪 (Charged and Neutral Particle Analyzer, CANPA) 首次将热离子、热电子、太阳风离子、中性气体与电离层离子探测功能进行集成, 极大地节约了卫星资源, 也将为我国后续深空轻小型化载荷研制提供宝贵经验.

2 载荷介绍

2.1 任务与功能

带电粒子与中性粒子分析仪的探测任务为:

(1) 通过对主带彗星附近中性气体成分及其同位素、冷等离子体离子及其同位素的测量, 结合尘埃颗粒环境的测量, 研究主带彗星大气层和电离层形成与演化、主带彗星的活动性驱动力起源和机制;

(2) 通过对主带彗星和小行星等离子体环境的测量, 结合空间磁场的测量, 研究太阳风与彗星和小行星的相互作用.

根据上述探测任务, 载荷的主要功能包括以下两方面:

(1) 探测彗星大气层与电离层的电离成分;

(2) 获取小行星及彗星附近太阳风等离子体(离子和电子)、大气层溅射和反射离子及太阳风“拾起”离子的通量数据.

2.2 载荷组成

为了实现上述探测任务, 带电粒子与中性粒子分析仪由热离子分析仪(Thermal Ion Analyzer, TIA)、热电子分析仪(Thermal Electron Analyzer, TEA)、太阳风离子分析仪(Solar Wind Ion Analyzer, SIA)、气体与离子分析仪(Gas and Ion Analyzer, GIA)及数据处理单元(Data Processing Unit, DPU)组成, 如图 1 所示. 四台分析仪安装在卫星舱外不同位置, 太阳风离子分析仪安装于主探测器+Z 板外表面, 主要面向太阳风进行探测, 热离子分析仪、热电子分析仪、气体与离子分析仪安装于主探测器-Z 板外表面, 主要面向小天体探测. 数据处理单元集成在载荷管理器内部并安装为卫星舱内. 本文主要介绍载荷四台单机的工作原理与地面定标试验与结果.

2.3 技术指标要求

基于科学目标对各探测要素的需求分析, 带电粒

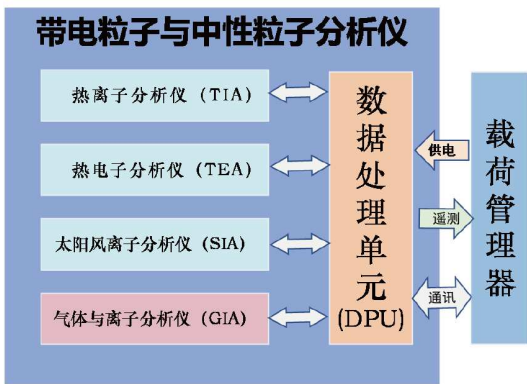


图 1 载荷组成框图
Figure 1 Diagram of the payload composition.

子与中性粒子分析仪技术指标要求包括中性大气、电离层离子、热离子、热电子等主要探测要素, 见表1所示.

2.4 工作原理

带电粒子与中性粒子分析仪各单机分别瞄准不同的探测对象, 其中热离子分析仪主要对小行星、彗星环境中的反射和溅射离子、太阳风拾起离子进行探测, 在小行星转移段和主带彗星转移段也将择机对太阳风离子进行探测; 热电子分析仪对太阳风电子、小行星和彗星附近的电子进行探测; 气体与离子分析仪对彗星环境中的中性大气(主要是蒸发产生)和电离层离子进行探测. 相对于任务要求, 增加了太阳风离子分析仪器, 其主要对太阳风离子进行探测, 也可对小行星和彗星附近的离子进行探测, 太阳风离子分析仪与热离子分析仪视场指向相反, 具有一定的互相备份功能. 四台分析仪的具体工作原理如下.

2.4.1 热离子分析仪工作原理

热离子分析仪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. 传感器将被测离子参数(方向、能量、通量、成分)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时所需的高压信号.

传感器具有旋转对称结构, 包括俯仰角扫描装置、入射窗口、门控电极、静电分析器、微通道板(Microchannel Plate, MCP)和屏蔽栅网等部分, 如图2所示.

表 1 带电粒子与中性粒子分析仪技术指标要求

Table 1 Technical parameter requirements of CANPA

项目	技术指标要求
中性大气和电离层离子成分	(1) 质量数范围: 不小于1-150 amu
	(2) 质量分辨率: ≤ 1 amu (质量数范围1-50 amu)
	≤ 1.5 amu (质量数范围51-150 amu)
	(3) 动态范围: $\geq 1 \times 10^9$
离子	(4) 时间分辨率: 可调, 范围不小于4-256 s
	(1) 能量范围: 不小于5 eV-30 keV
	(2) 能量分辨率: $\leq 15\%$
	(3) 能道数: ≥ 64
	(4) 质量数: 不小于1-70 amu (@5 eV-3 keV)
	(5) 离子分辨能力: 可分辨 H^+ , He^{++} , He^+ , O^{++} , O^+ 组(N^+ , O^+ 和 H_2O^+), O_2^+ 组(N_2^+ 和 O_2^+), CO_2^+ (@5 eV-3 keV)
	(6) 视场: 不小于 360° (方位) $\times 90^\circ$ (俯仰)
	(7) 角度分辨率: 不大于 25° (方位) $\times$ 优于 12° (俯仰)
电子	(8) 时间分辨率: 可调, 范围不小于4-256 s
	(1) 能量范围: 不小于5 eV-10 keV
	(2) 能量分辨率: $\leq 15\%$
	(3) 能道: ≥ 64
	(4) 视场: 不小于 360° (方位) $\times 90^\circ$ (俯仰)
	(5) 角度分辨率: 不大于 25° (方位) $\times$ 优于 12° (俯仰)
	(6) 时间分辨率: 可调, 范围不小于4-256 s

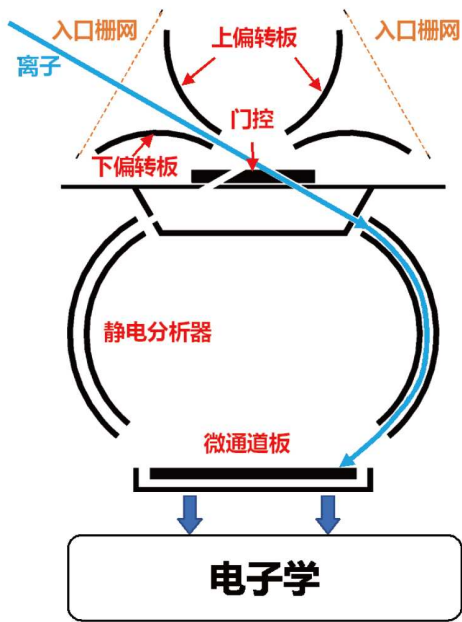


图 2 热离子分析仪组成及工作原理
Figure 2 TIA composition and working principle.

俯仰角扫描装置采用“非对称式”视场偏转板构型, 通过上下偏转板扫描高压建立俯仰角扫描电场, 用于对离子入射的俯仰角进行选择. 该装置包括上下两

个偏转板, 两个偏转板加一定的电压组合时, 只有特定俯仰角入射的离子才能通过俯仰角扫描装置并到达入射窗口. 通过改变两个极板的电压配置, 可以选择不同的俯仰角. 俯仰角扫描个数由仪器内部程序确定.

热离子分析仪测量离子质谱采用的方式是新型门控方法实现对离子飞行时间(Time of Flight, TOF)的探测, 相比于传统的掠入射或者碳膜方式, 无能量损失, 更容易实现较高的质量分辨率, 相关探测方案也应用于BepiColombo/PICAM载荷^[19]. 该载荷可实现10 eV–3 keV能量范围内的离子成分探测. 门控电极用于启动/停止离子进入传感器的飞行时间测量和能量测量部分. 门控电极为0 V时离子能够通过, 门控加一定电压时离子则不能通过. 门控电极的启动时刻为离子飞行时间测量的起始时刻. 离子经过门控电极后通过一段较长的自由飞行区域进入静电分析器.

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, 热离子分析仪采用的带顶盖的半球形静电分析器构型. 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. 能档扫描个数由仪器内部程序确定.

MCP对离子电荷信号进行放大, 输出电荷脉冲给后续的电子学电路. 离子打在MCP上的时刻为离子飞行时间测量的终止时刻.

离子质谱(M/q)分析通过静电分析器的 E/q 测量和离子的飞行速度测量实现. 通过门控电压启动时刻及离子打在MCP的时刻, 可以得到离子的飞行时间, 由于飞行距离已知, 因此可获得离子的速度. 结合静电分析器测量离子的能量电荷比(E/q), 可以获得离子的质量(成分) M/q .

2.4.2 热电子分析仪工作原理

热电子分析仪的组成与热离子分析仪类似, 由传感器和电子学箱组成. 与热离子分析仪相比, 热电子分析仪的传感器不需要门控电极(即热离子分析仪传感器结构去掉门控电极部分), 其他与热离子传感器相同. 传感器由俯仰角扫描装置、入射窗口、静电分析器、MCP和屏蔽栅网组成, 各部分的功能与热离子分析仪一致, 如图3所示.

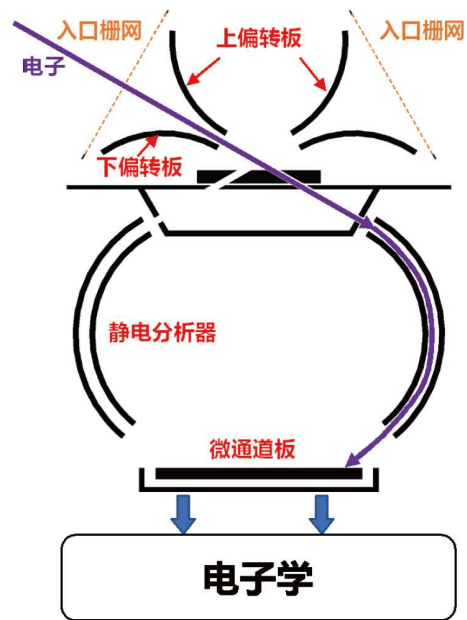


图 3 热电子分析仪组成及工作原理

Figure 3 TEA composition and working principle.

2.4.3 太阳风离子分析仪工作原理

太阳风离子分析仪主要用来测量太阳风的基本物理参数: 密度、温度、速度等. 太阳风离子分析仪由传感器和电子学组成. 传感器负责感应入射太阳风离子电流信号, 输出给后端电子学进行分析; 电子学负责分析电流信号并负责给传感器提供各路高压.

传感器采用阻滞势分析器的探测原理, 该技术还应用于Parker Solar Probe的SPC载荷, 该载荷可实现150 eV–6 keV能量的太阳风离子探测. 阻滞势分析器收集入射的太阳风离子电流, 输出给电子学. 太阳风离子分析仪传感器部分的基本结构如图4所示: 从外到内依次包括入射窗口及接地栅网(Entrance Window, Grounded Grid)、扫描栅网(2-Grids Scanner)、接地栅网(Grounded Grid)、光电子抑制栅网(Photo-electrons Suppressor)和分立阳极(Split Anode).

阻滞势分析器为圆筒形, 前端开口呈圆形. 入口接地栅网将内部电场进行屏蔽. 扫描栅网加扫描电压选择特定能量的离子入射, 打到后端的分立阳极上进行收集, 输出电流. 电流强度的大小对应入射离子的强度. 收集电流和电压的关系曲线为伏安特性曲线. 阻滞势分析器内部还有光电子抑制栅网主要用来抑制内部阳极上产生的光电子出射, 同时抑制外部入射的电

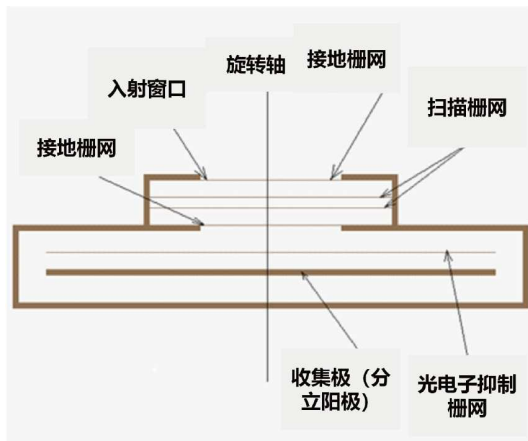


图 4 太阳风离子分析仪传感器组成图
Figure 4 SIA sensor composition.

子打到阳极上。

通过分析阻滞势分析器获得的伏安特性曲线, 可以获得离子的通量和能量, 同时通过分立阳极上收集电流大小的不同还可以获得太阳风离子入射的方向变化, 进而反演太阳风的速度、密度、温度等参量。

2.4.4 气体与离子分析仪工作原理

气体与离子分析仪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。传感器主要负责对入射中性成分和离子的信号进行调制和感应, 并输出电信号给后端电子学进行处理。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, 同时输出传感器工作时所需的高压信号。

传感器包括热阴极、离子引出透镜和飞行时间系统等结构, 其结构和工作原理如图5所示, 反射式飞行时间技术也被Rosetta的RTOF载荷采用实现对质量范围 $1 \rightarrow 300$ amu的离子成分的探测。热阴极发射电子束, 在电离区将中性气体电离成带正电的离子, 具有低、中、高三档不同档位的发射电流, 用于实现对不同密度的气体的探测; 电离后的离子被门控电压牵引至离子透镜区, 离子透镜由三组同轴圆筒形电极组成, 配置特定电压组合, 对离子进行加速、聚焦, 并将离子引导入飞行时间系统; 飞行时间系统采用了自由漂移和反射系统相结合的设计, 相比于传统的均匀场飞行时间系统或单一反射式飞行时间系统能够有效增加离子的飞行时间, 大大提高仪器的质谱分辨率。通过反射

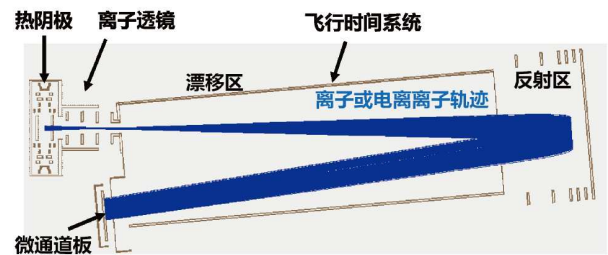


图 5 气体与离子分析仪传感器组成及工作原理
Figure 5 GIA sensor composition and working principle.

级结构优化设计和电压配比, 飞行时间系统能够实现离子成分的高质谱分辨率测量。传感器在不同工作模式下可以分别实现对中性气体和电离层离子的高质谱分辨率探测, 二者为分时探测。

气体与离子分析仪对电离层离子的探测原理为: 离子带正电荷, 热阴极不工作, 电离层离子穿过阻滞栅网将以特定倾角进入离子引出透镜, 引出透镜采取梯次电压配置, 电压依次增大, 离子穿过引出透镜时被加速; 门控高压采用两档高压(+10和-300 V), 加正高压时, 离子无法进入飞行时间系统, 加负高压时, 被引出透镜调制过的电离层离子将沿着特定的入射角度范围穿过门控, 产生飞行时间起始信号, 离子穿过门控后, 被加速区匀强电场加速至1000 eV以上, 离子在漂移区不受电场作用继续沿原方向自由漂移, 反射区各电极采取梯次电压配置, 飞出漂移区的离子被反射区电场加速, 在探测能量范围内的离子被加速至0并反向加速, 再次进入漂移区作自由漂移, 最终打到微通道板上产生终止信号。终止信号和起始信号之间的时间差即为离子的飞行时间, 分析飞行时间谱即可得到离子质谱信息和仪器的质谱分辨率。

气体与离子分析仪对中性大气的探测原理为: 中性大气不带电, 传感器外部设计有阻滞栅网, 加正电压排斥离子, 仅气体能进入传感器内部。热阴极发射电子将中性大气电离, 成为带正电荷的离子, 离子进入引出透镜后的探测过程与电离层离子相同。

3 地面定标试验

3.1 定标设备和场地

带电粒子与中性粒子分析仪的地面定标试验在中国科学院国家空间科学中心怀柔园区的中性大气和等

离子体测试定标系统中进行, 该系统已为多个型号任务等离子体或中性粒子载荷提供了详细的定标服务^[17,18,20,21]. 中性大气定标系统用于气体与离子分析仪中性大气模式的定标, 等离子体定标系统用于对热离子分析仪、热电子分析仪、太阳风离子分析仪和气体与离子分析仪的电离层离子模式进行定标.

中性大气测试定标系统用于准确模拟气体环境的高真空、多气样的复杂环境, 满足超高真空、宽量程、高精度测试定标需求, 实现分析仪对气样的灵敏度参数测试和定标, 为地面测试和定标服务.

中性大气测试定标系统其主要指标如下:

- (1) 定标舱极限真空: 5×10^{-8} Pa;
- (2) 校准气样: He, Ne, N₂, O₂, Ar, CO₂, Kr, Xe等.

等离子体测试定标系统用于模拟空间等离子体中的电子、离子与中性气体的状态, 对仪器技术指标进行详细定标. 带电粒子与中性粒子分析仪的地面定标试验设备有真空靶室、离子/电子束源、紫外光源、真空转台、地检设备、稳压电源、PC电脑等.

在测试定标试验过程中, 真空罐用于提供真空环境, 在真空环境达到要求以后, 利用稳压电源对带电粒子与中性粒子分析仪进行供电, 通过地检设备对仪器进行控制. 测试定标试验开始以后可以调节离子/电子/紫外束源的能量、通量和成分以及通过转台调节离子/电子/紫外束源的入射方向来对仪器进行不同试验项目的定标.

等离子体定标系统的主要性能参数如下:

- (1) 电子束能量范围: 100 eV–30 keV;
- (2) 离子束能量范围: 100 eV–30 keV;
- (3) 离子种类: H⁺, He⁺, N⁺, O⁺, Ar⁺, CO₂⁺等;
- (4) 紫外束源: 可输出典型太阳紫外谱线;
- (5) 束源能散度: 优于2.0%;
- (6) 束源通量范围: 10^3 – 10^{10} cm⁻² s⁻¹;
- (7) 束斑直径: >70 mm;
- (8) 真空度: 优于 5×10^{-5} Pa;
- (9) 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°.

3.2 定标项目

根据技术指标要求及仪器的设计原理, 带电粒子与中性粒子分析仪的定标试验项目见表2.

表 2 带电粒子与中性粒子分析仪定标试验项目

Table 2 Calibration items of CANPA

探头	定标试验项目
热离子分析仪	静电分析器常数与能量分辨率定标
	视场和角度分辨率定标
	离子质量数范围和离子分辨能力定标
	时间分辨率定标
热电子分析仪	静电分析器常数与能量分辨率定标
	视场和角度分辨率定标
	时间分辨率定标
太阳风离子分析仪	能量范围定标
	视场定标
	时间分辨率定标
气体与离子分析仪	质量数范围和质量分辨率定标
	密度动态范围
	时间分辨率

3.3 定标结果

3.3.1 热离子分析仪定标结果

(1) 静电分析器常数与能量分辨率定标

热离子分析仪通过半球形静电分析器选择离子能量, 静电分析器内外极板分别为同心半球壳. 静电分析器的阶梯扫描电压加在内半球上, 外半球接地. 若选择离子能量为 E , 电荷数为 q , 所加电压为 V , 则它们之间的定量关系为

$$E/q = k \cdot V, \quad (1)$$

其中, k 即为静电分析器常数, 完全由静电分析器结构特性决定. 从式(1)可以看出静电分析器扫描电压与所选择离子能量之间呈线性关系.

仪器的能量分辨率定义为: 仪器能谱响应曲线中, 计数最大值一半所对应分布的全宽度 ΔE 和最大值对应的能量 E_0 之比, 即

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

它是度量探测器能量分辨本领的一个量. 热离子分析仪采用静电分析器选择 E/q , 由静电分析器的特性决定, 理论上能量分辨率不随能量和方向变化.

在0.5–20 keV范围内取5个能量点(0.5, 1, 2, 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)(1 keV)所示, 根据曲线半宽可分析出能量分

分辨率为6.93%, 优于15%的指标要求. 对5个能量点的能谱扫描结果进行最小二乘拟合, 可以获得热离子分析仪的静电分析器常数为5.57, 如图6(b); 能量分辨率为8.79%, 如图6(c). 结合静电分析器常数和电压扫描范围可确定离子探测能量范围为2.79 eV–32.03 keV.

(2) 视场和角度分辨率定标

热离子分析仪的探测视场包括俯仰角和方位角视场. 方位角视场为360°, 分为24个探测方向通道. 每个探测通道的视场即角度分辨率, 为360°/24 = 15°.

俯仰角视场由偏转系统高压决定, 离子偏转系统常数表征的是离子偏转板所加电压与测量离子俯仰角视场的关系. 定义离子偏转系统常数:

$$S = \frac{V_{UP} - V_{LOW}}{E/q}, \quad (3)$$

其中, V_{UP} 为离子偏转系统上偏转板电压, V_{LOW} 为离子

偏转系统下偏转板电压, E 为测量离子能量, q 为电荷数.

偏转板不加高压时, 1 keV能量的离子俯仰角响应如图7(a)所示, 俯仰角中心值为30.27°, 俯仰角分辨率即为俯仰角分布曲线的半高宽, 为2.49°. 离子俯仰角与偏转系统常数相关. 通过确定偏转系统常数值, 可以获得离子俯仰角视场, 离子俯仰角与偏转系统常数的关系曲线如图7(b)所示, 根据该曲线可判断, 离子俯仰角可覆盖0°–90°. 离子俯仰角分辨率由俯仰角分布曲线的半高宽决定, 通过改变偏转系统高压可以获得不同俯仰角对应的俯仰角分辨率, 分辨率最大值为3.85°.

(3) 离子质量数范围和离子分辨能力定标

热离子分析仪通过测量离子的飞行时间来确定离子的成分信息(M/q), 门控开门时, 处在仪器探测范围

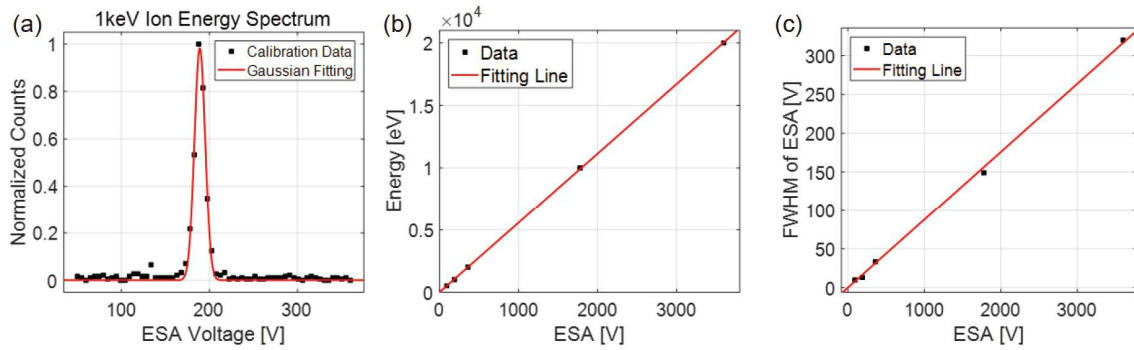


图 6 (a) 1 keV离子能谱曲线; (b) TIA静电分析器常数拟合曲线; (c) TIA能量分辨率拟合曲线
 Figure 6 (a) Ion energy spectrum at 1 keV; (b) TIA analyzer constant fitting; (c) TIA energy resolution fitting.

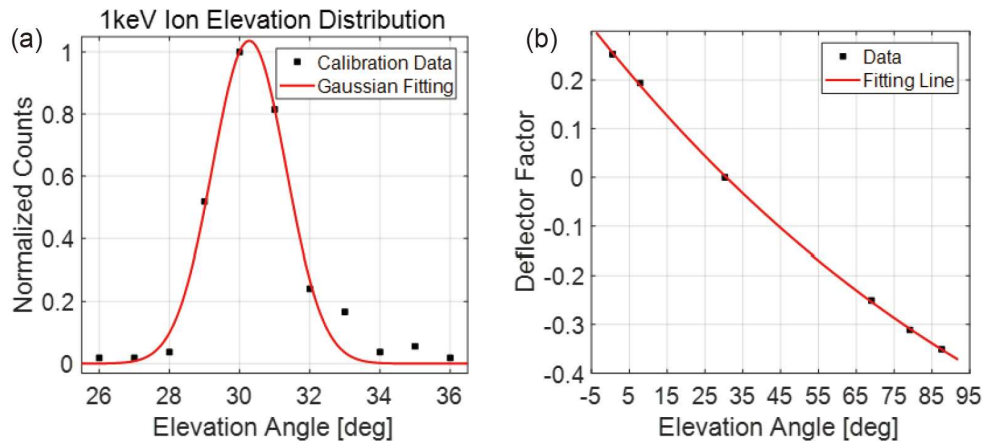


图 7 (a) 1 keV离子俯仰角响应; (b) TIA偏转系统常数与俯仰角关系曲线
 Figure 7 (a) Ion elevation angle spectrum at 1 keV; (b) TIA deflector factor and elevation relationship.

内的离子穿过门控通道, 经过静电分析器的能量选择之后最终打在MCP上, 并记录离子的飞行时间, 通过分析离子的飞行时间谱即可获得离子的成分信息和质谱分辨率.

以能量1 keV的氮离子(N^+)为例, 图8(a)为1 keV能量 N^+ 的飞行时间谱, 飞行时间谱的中心值 t 为905 ns, 飞行时间谱分布的半高宽 Δ 为71.9 ns, 由此可得出热离子分析仪对1 keV的 N^+ 质谱测量的质谱分辨率 $M/\Delta M = 6.29$, $\Delta M = 2.22@N^+$.

同理可得到不同离子能量、不同成分的离子飞行时间谱. 根据不同能量、不同质量数的离子飞行时间拟合曲线(图8(b)), 可推算出在能量2.79 eV–3 keV、质量数 $M = 1\text{--}70$ amu范围内的离子飞行时间范围为160.8 ns–24.8 μ s, 热离子分析仪可探测离子飞行时间范围为100 ns–50 μ s, 能够覆盖指标要求的能量范围内的离子质量数探测需求. 离子的质谱分辨能力取决于热离子分析仪质谱探测的质谱分辨率, 根据指标要求, 热离子分析仪可分辨 H^+ , He^{++} , He^+ , O^{++} , O^+ 组(N^+ , O^+ 和 H_2O^+), O_2^+ 组(N_2^+ 和 O_2^+), CO_2^+ , 区分上述离子成分要求质谱分辨率 $M/\Delta M \geq 3.17$, 对多个成分的飞行时间谱进行分析可得到热离子分析仪质谱分辨率平均值为6.30, 在2.79 eV–3 keV能量范围内能够实现对上述离子成分的区分.

(4) 时间分辨率定标

时间分辨率与能档扫描台阶数 N_{energy} 、俯仰角扫描台阶数 $N_{\text{elevation}}$ 以及每个扫描台阶数的持续时间 t 相关, 这三个参数均可调, 三者乘积为热离子分析

仪总的时间分辨率 $\Delta T = N_{\text{energy}} \times N_{\text{elevation}} \times t$. 热离子分析仪可设置多种在轨工作模式, 每个扫描周期在4–256 s内可调. 定标过程中对2–256 s范围内时间分辨率进行了多点验证, 能够实现2–256 s的时间分辨率变化范围.

3.3.2 热电子分析仪定标结果

(1) 静电分析器常数与能量分辨率定标

热电子分析仪采用的是静电分析器选择能量, 根据静电分析器的特性, 理论上热电子分析仪的能量分辨率不随能量和方位角变化.

在0.3–10 keV范围内取5个能量点(0.310, 1, 2, 5, 10 keV)分别进行能量扫描. 典型的电子能量扫描曲线如图9(a)(1 keV)所示, 根据曲线半宽可分析出能量分辨率为11.79%, 优于15%的指标要求. 对5个能量点的能谱扫描结果进行最小二乘拟合, 可以获得静电分析器常数为5.10, 如图9(b); 能量分辨率为14.29%, 如图9(c)所示. 结合静电分析器常数和电压扫描范围可确定电子探测能量范围为1.07 eV–20.61 keV.

(2) 视场和角度分辨率定标

热电子分析仪的探测视场包括俯仰角和方位角视场. 方位角视场为360°, 分为24个探测通道. 每个通道的视场即角度分辨率, 为360°/24 = 15°.

热电子分析仪俯仰角视场范围和角度分辨率定标方法与热离子分析仪相同. 偏转板不加高压时, 1 keV能量的电子俯仰角响应如图10(a)所示, 俯仰角中心值为29.08°, 俯仰角分辨率即为俯仰角分布曲线的半高

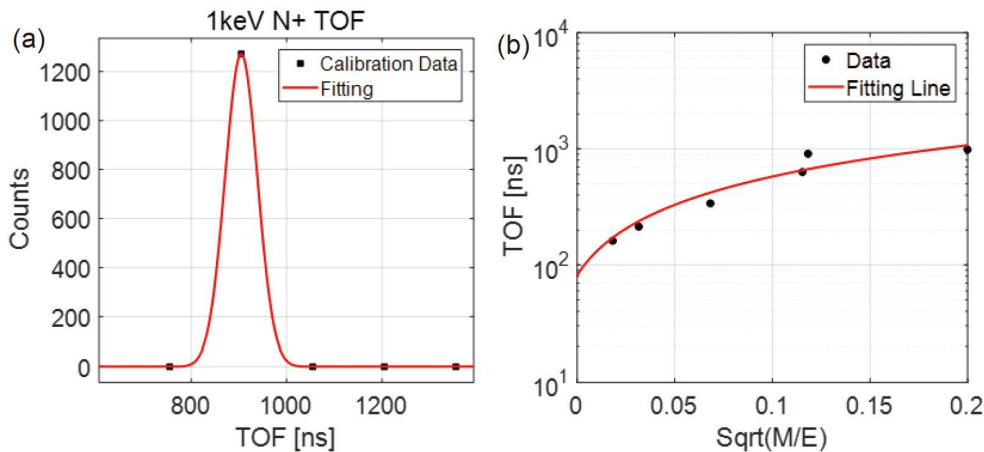


图 8 (a) 能量1 keV的 N^+ 飞行时间谱; (b) 不同能量不同质量数离子飞行时间拟合曲线
Figure 8 (a) Time of flight for N^+ at 1 keV; (b) Time of flight fitting with energy and mass.

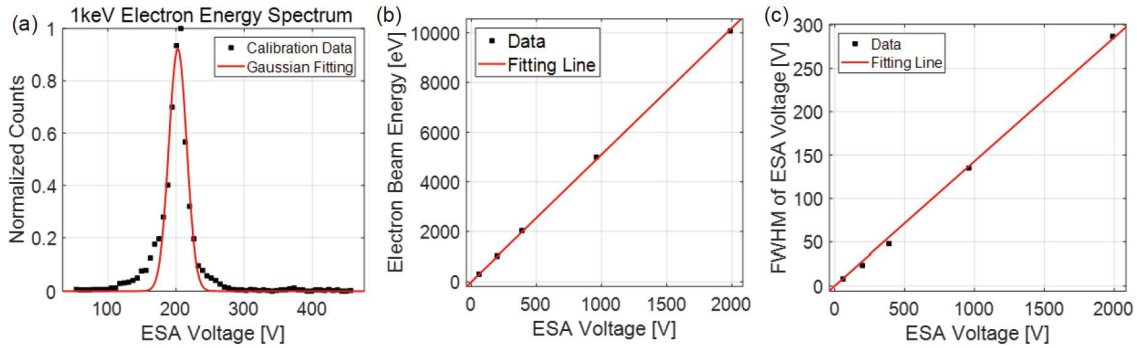


图 9 (a) 1 keV 电子能谱曲线; (b) TEA 静电分析器常数拟合曲线; (c) TEA 能量分辨率拟合曲线
Figure 9 (a) Electron energy spectrum at 1 keV; (b) TEA analyzer constant fitting; (c) TEA energy resolution fitting.

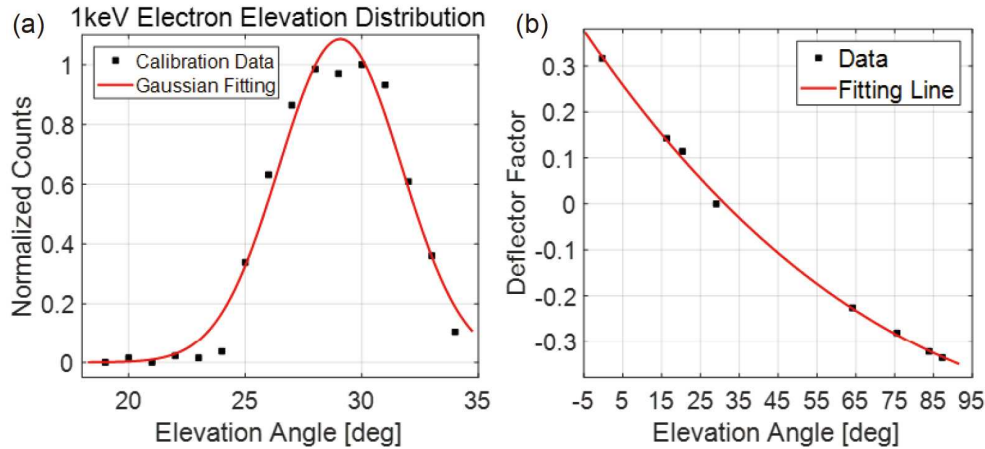


图 10 (a) 1 keV 电子俯仰角响应; (b) TEA 偏转系统常数与俯仰角关系曲线
Figure 10 (a) Electron elevation angle spectrum at 1 keV; (b) TEA deflector factor and elevation relationship.

宽, 为 5.94° 。热电子分析仪的电子俯仰角测量值与偏转系统常数相关。通过确定偏转系统常数值, 可以获得电子测量俯仰角视场, 电子俯仰角与偏转系统常数的关系曲线如图10(b)所示, 根据该曲线可判断, 电子俯仰角可覆盖 $0^\circ\sim 90^\circ$ 。电子俯仰角分辨率由俯仰角分布曲线的半高宽决定, 通过改变偏转系统高压可以获得不同俯仰角对应的俯仰角分辨率, 俯仰角分辨率最大值为 7.12° 。

(3) 时间分辨率定标

时间分辨率定标方法与热离子分析仪相同。地面定标试验过程中, 通过设置能档和俯仰角扫描台阶数, 记录获得一幅完整电子图像的时间即为热电子分析仪的时间分辨率。地面定标试验过程中对2–256 s范围内的时间分辨率进行了多点验证, 能够实现2–256 s的时间分辨率变化范围。

3.3.3 太阳风离子分析仪定标结果

(1) 能量范围定标

太阳风离子分析仪扫描栅网加扫描电压选择特定能量的离子入射, 打到后端分立阳极上进行收集并输出电流。电流和电压的关系曲线为伏安特性曲线, 1 keV 离子伏安特性曲线如图11(a)所示, 由此可确定探测能量和电压的对应关系, 以获得离子能量范围。

定标过程中, 可设置不同能量的离子束源进行多点测试。在 $0.5\sim 5$ keV 范围内, 取6个能量点(0.5, 1, 2, 3, 4, 5 keV)分别测试, 结果见表3。根据不同能量点的伏安特性曲线可计算得到能量分辨率, 能量分辨率优于4.23%。

(2) 视场定标

探测最大视场范围是指仪器在最大入射角下, 收集极仍可接受到离子。保持离子束源不变, 通过转台

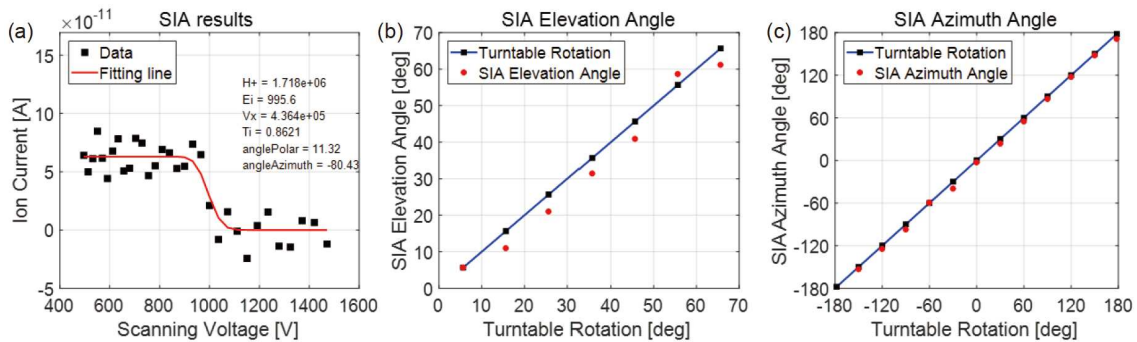


图 11 (a) SIA 伏安特性曲线(1 keV); (b) SIA 俯仰角测试结果; (c) SIA 方位角测试结果

Figure 11 (a) SIA V-I curve line at 1 keV; (b) SIA elevation angle results; (c) SIA azimuth angle results.

表 3 SIA 离子能量测量结果^{a)}

Table 3 SIA ion energy calibration results^{a)}

设定能量 (eV)	测量结果 (eV)	分辨率 (%)
500	489.54	2.09
1000	996.95	0.30
2000	1915.31	4.23
3000	2883.60	3.88
4000	4079.31	1.98
5000	5120.55	2.41

a) SIA 的能量测量范围由扫描电压范围确定, 扫描电压可实现 5–5200 V 范围扫描, 结合实测数据判断仪器可覆盖 5 eV–5 keV 范围的测量。

改变太阳风离子分析仪相对于离子源束流的角度, 可进行不同入射俯仰角测试, 结果如图 11(b) 所示, 可以看出在俯仰半角最大达到 68.25° , 俯仰角视场为 136.50° 。通过转台改变太阳风离子分析仪相对于离子源束流的方位角, 可进行不同方位角的测试, 测试结果如图 11(c) 所示, 方位角具有 360° 范围。

(3) 时间分辨率定标

时间分辨率即为 SIA 获得一条完整的伏安特性曲线所需的时间。地面定标试验过程中对 2–256 s 范围内的时间分辨率进行了多点验证, 仪器能够实现 4–256 s 的时间分辨率变化范围。

3.3.4 气体与离子分析仪定标结果

气体与离子分析仪具有中性探测和电离层离子探测两种工作模式, 中性模式下, 气体被电离成离子, 随后按照电离层离子模式进行探测, 因此电离层离子模式的功能被包含在中性探测模式中。地面定标试验采用不同质量数的标准气源, 通过发射电子束将气体电离成离子, 对仪器各项指标进行定标, 可覆盖两种模

式的指标验证。此外, 还使用地面标准等离子体束源对离子质谱探测功能进行了验证。

(1) 质量数范围和质量分辨率定标

气体与离子分析仪通过发射电子束对中性气体进行电离, 对电离离子进行飞行时间测量, 不同的气体产生的离子具有不同的飞行时间。具体工作流程为: 气体进入电离区, 被灯丝发射的电子束流电离成离子, 门控开门时, 通过负电压将离子引入飞行时间系统, 经过离子透镜、漂移管、反射级等结构, 最终打在 MCP 上并记录飞行时间, 通过分析飞行时间谱即可得到气体的质量与质量分辨率。

以氮气(N_2 , $M = 28$ amu)为例, 图 12(a) 给出了 N_2 飞行时间谱, 飞行时间谱中心值为 4750.70 ns, 半高宽为 7.78 ns, 由此可得出 N_2 测量的 $\Delta M = 0.09$ 。同理可得到其他气体成分(He, Ne, O_2 , Ar, CO_2 , Kr, Xe)的飞行时间谱, 表 4 中列出了不同成分的飞行时间和质谱分辨率, 根据测试结果可推算, $M = 50$, $\Delta M = 0.17$ (@ $M = 50$ amu), $M = 150$, $\Delta M = 0.52$ (@ $M = 150$ amu), $M = 350$, $\Delta M = 1.22$ (@ $M = 350$ amu)。图 12(b) 给出了不同气体成分的飞行时间仿真和实测对比, 据此可推断, $M = 1$ 时的飞行时间约为 850.01 ns, $M = 150$ 时飞行时间约为 10.42 μ s, $M = 350$ 时飞行时间约 15.91 μ s, 仪器可探测最大飞行时间为 51.40 μ s。

气体模式定标完成后, 利用地面标准等离子体束源对电离层离子探测模式进行了交叉验证试验, 典型离子质谱如图 12(c) 所示, Ar^+ 飞行时间中心值约 5600 ns, 飞行时间谱半高宽约为 7 ns, 质谱分辨率约为 400 , 结果与气体模式 Ar 具有一致性。

(2) 密度动态范围定标

气体与离子分析仪可实现大于 9 个量级的气体密

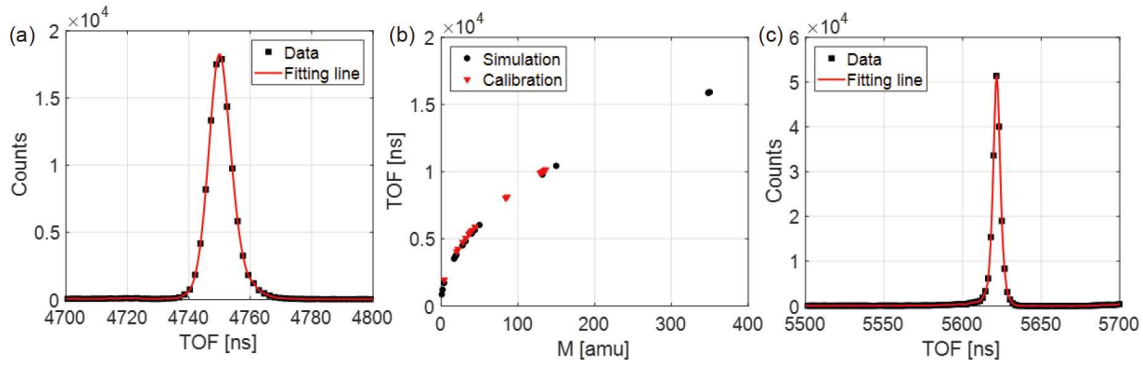


图 12 (a) 氮气(N_2)飞行时间谱; (b) 不同气体成分的飞行时间(仿真与定标对比); (c) Ar^+ 飞行时间谱

Figure 12 (a) Time of flight for N_2 ; (b) time of flight for different species (simulation and calibration comparison); (c) time of flight of Ar^+ .

表 4 不同气体成分的飞行时间和质谱分辨率

Table 4 Time of flight and mass resolution for different species

成分	TOF (ns)	FWHM (ns)	$M/\Delta M$	ΔM
He	1955.90	3.46	282.64	0.01
Ne	4051.80	6.92	292.76	0.07
N_2	4750.70	7.78	305.12	0.09
O_2	5048.30	8.65	291.81	0.11
Ar	5620.90	8.65	324.91	0.12
CO_2	5883.90	9.52	309.19	0.14
Kr	8034.20	13.84	290.25	0.29
Xe	10079.10	32.87	153.32	0.87

度动态范围的质谱分析, 通过调节电子发射电流使 MCP 计数保持在合理范围内, GIA 设计动态范围覆盖 9 个数量级, 真空度范围为 1×10^{-3} – 1×10^{-12} Pa, 测试方法为在真空度 1×10^{-4} – 1×10^{-7} Pa 范围内选取多个测量点进行测试, 由于真空系统能力限制, 在 1×10^{-4} –

1×10^{-3} Pa 和 1×10^{-7} – 1×10^{-12} Pa 范围内采用实测结合外推方式判断仪器动态范围响应性能。

根据在不同真空度、不同灯丝发射电流下的氮气计数响应及计数变化曲线(图 13)可判断, 气体质谱响应与真空度和灯丝发射电流成正比。真空度 8.157×10^{-7} Pa, 灯丝发射电流 $2 \mu A$ 情形下氮气最大响应计数为 21, 由于 MCP 计数响应范围为 1 – 5×10^5 个/s, 据此可推算, 灯丝高发射 ($520 \mu A$), 时间分辨率 256 s 时可探测最高真空度 1.167×10^{-12} Pa. 灯丝低发射 ($2 \mu A$), 时间分辨率 2 s 时可探测最低真空度 3.884×10^{-3} Pa.

根据上述探测气压范围可推算, GIA 探测密度动态范围为 3.328×10^9 , 动态范围覆盖超过 9 个数量级。

(3) 时间分辨率定标

时间分辨率即为气体与离子分析仪获得一幅完整的气体飞行时间谱所需的时间, 试验过程中可通过软件设置仪器时间分辨率在 4–256 s 范围内连续可调。定

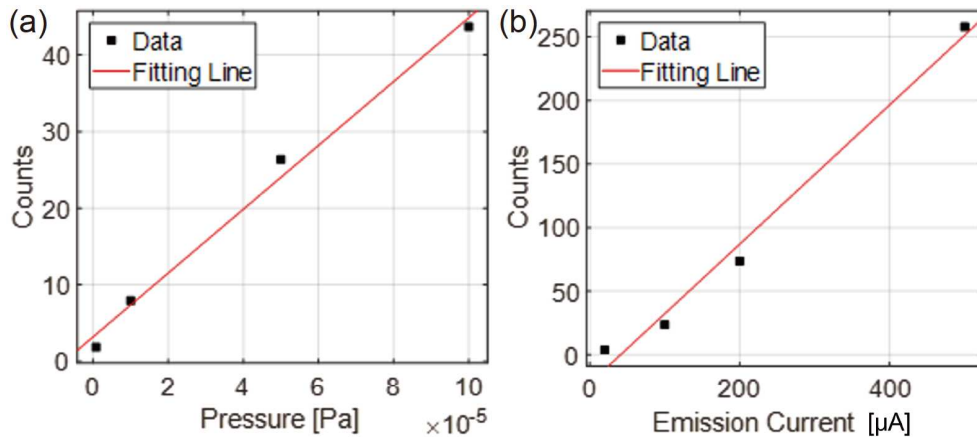


图 13 (a) 氮气计数与真空度的关系; (b) 氮气计数与灯丝电流的关系

Figure 13 (a) N_2 counts variation with vacuum degrees; (b) N_2 counts variation with filament emissions.

表 5 定标结果
Table 5 Calibration results

探头	指标名称	定标结果
热离子分析仪	静电分析器常数与能量分辨率	能量范围: 2.79 eV–32.03 keV 能量分辨率: 8.79%
	视场和角度分辨率	视场: 360° (方位) $\times$ 90° (俯仰) 分辨率: 15° (方位) $\times$ 优于 3.85° (俯仰)
	离子质量数范围和离子分辨能力	质量数: 不小于 1–70 amu 离子分辨能力: 可分辨 H^+ , He^{++} , He^+ , O^{++} , O^+ 组 (N^+ , O^+ 和 H_2O^+), O_2^+ 组 (N_2^+ 和 O_2^+), CO_2^+ (@2.79 eV–3 keV)
	时间分辨率	可调, 2–256 s
热电子分析仪	静电分析器常数与能量分辨率	能量范围: 1.07 eV–20.61 keV 能量分辨率: 14.29%
	视场和角度分辨率	视场: 360° (方位) $\times$ 90° (俯仰) 分辨率: 15° (方位) $\times$ 优于 7.12° (俯仰)
	时间分辨率	可调, 2–256 s
太阳风离子分析仪	能量范围	能量范围: 5 eV–5 keV 能量分辨率: $\leq 4.23\%$
	视场	136.5° (俯仰) $\times$ 360° (方位)
	时间分辨率	可调, 2–256 s
气体与离子分析仪	质量数范围和质量分辨率	质量数范围: 不小于 1–350 amu 质量分辨率: ≤ 0.17 amu@1–50 amu ≤ 0.52 amu@51–150 amu ≤ 1.22 amu @151–350 amu
	密度动态范围	3.328×10^9
	时间分辨率	可调, 2–256 s

标过程中对 2–256 s 范围内的时间分辨率进行了多点验证, 能够实现 2–256 s 的时间分辨率范围.

4 讨论和结论

表 5 给出了带电粒子与中性粒子分析仪所有定标项目定标结果. 试验结果表明, 在实测结合仿真的情况

下, 带电粒子与中性粒子分析仪实现了所有仪器技术指标和功能要求.

天问二号探测器带电粒子与中性粒子分析仪载荷采用了小型化和高集成的设计思路, 将热离子、热电子、太阳风离子、中性气体与电离层离子等多要素探测进行了集成, 节约了资源, 相关定标试验结果表明, 仪器具有优异的性能, 为后续在轨科学数据应用奠定了基础.

参考文献

- 1 Frank L A, Ackerson K L, Lee J A, et al. The plasma instrumentation for the Galileo Mission. *Space Sci Rev*, 1992, 60: 283–307
- 2 Bame S J, Asbridge J R, Felthausen H E, et al. ISEE-C solar wind plasma experiment. *IEEE Trans Geosci Electron*, 1978, 16: 160–162
- 3 Young D T, Nordholt J E, Burch J L, et al. Plasma experiment for planetary exploration (PEPE). *Space Sci Rev*, 2007, 129: 327–357
- 4 Kissel J, Sagdeev R Z, Bertaux J L, et al. Composition of comet Halley dust particles from Vega observations. *Nature*, 1986, 321: 280–282
- 5 Balsiger H, Altwegg K, Bochsler P, et al. Rosina-Rosetta orbiter spectrometer for ion and neutral analysis. *Space Sci Rev*, 2007, 128: 745–801
- 6 Johnstone A D, Coates A J, Wilken B, et al. The Giotto three-dimensional positive ion analyser. *J Phys E-Sci Instrum*, 1987, 20: 795–805
- 7 Oya H. Japanese Halley missions with Sakigake and Suisei. *EoS Trans*, 1986, 67: 65–66
- 8 Mukai T, Miyake W. Transmission characteristics and fringing field effect of a 270° spherical electrostatic analyzer. *Rev Sci Instrum*, 1986, 57: 49–55

- 9 Li C L, Liu J J, Ren X, et al. Scientific objectives and payloads configuration of the Tianwen-2 mission (in Chinese). *J Deep Space Explor*, 2014, 11, 304–310 [李春来, 刘建军, 任鑫, 等. “天问二号”任务科学目标和有效载荷配置. *深空探测学报*, 2024, 11: 304–310]
- 10 Fatemi S, Poppe A R. Solar wind plasma interaction with asteroid 16 Psyche: Implication for formation theories. *Geophys Res Lett*, 2018, 45: 39–48
- 11 Keppler E, Afonin V V, Curtis C C, et al. Neutral gas measurements of comet Halley from Vega 1. *Nature*, 1986, 321: 273–274
- 12 Krankowsky D P, Lammerz D, Dorflinger, et al. The Giotto neutral mass spectrometer. *Esa Sci Exp Aspect Giotto Mission*, 1981, 1070: 109–128
- 13 Reme H, Cotin F, Cros A, et al. The Giotto electron plasma experiment. *J Phys E-Sci Instrum*, 1987, 20: 721–731
- 14 Korth A, Richter A K, Loidl A, et al. The heavy ion analyser PICCA for the Comet Halley fly-by with Giotto. *J Phys E-Sci Instrum*, 1987, 20: 787–792
- 15 Carr C, Cupido E, Lee C G Y, et al. RPC: The Rosetta plasma consortium. *Space Sci Rev*, 2007, 128: 629–647
- 16 Kong L G, Zhang A B, Wang S J, et al. Design and simulation of ion analyzer onboard YH-1 Mars probe (in Chinese). *Aerosp Shanghai*, 2013, 30: 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. *上海航天*, 2013, 30: 164–168]
- 17 Zhang A B, Kong L G, Wang S J, et al. Design and test of electron analyzer onboard YH-1 Mars probe (in Chinese). *Aerosp Shanghai*, 2013, 30: 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. *上海航天*, 2013, 30: 187–191]
- 18 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. *Earth Planet Phys*, 2020, 4: 1–12
- 19 Orsini S, Livi S A, Lichtenegger H, et al. SERENA: Particle instrument suite for determining the sun-mercury interaction from BepiColombo. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 11
- 20 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. *Planet Space Sci*, 2012, 62: 23–30
- 21 Su B, Chen A, Liu M, et al. Ground calibration and in-flight performance of the low energy particle analyzer on FY-4B. *Atmosphere*, 2023, 14: 1834

Charged and neutral particle analyzer for Tianwen-2 mission

SU Bin^{1,2,3}, ZHANG Aibing^{1,2,3,5*}, KONG Linggao^{4,1}, ZHENG Xiangzhi^{1,2,3},
TIAN Zheng^{1,2,3}, GUAN Yibing^{1,2,3}, LI Yongping^{1,2,3}, GAO Jun^{1,2,3}, WANG Xinyue^{1,2,3},
LYU Yulong^{1,2,3}, TANG Binbin¹, LI Wenya¹, ZHANG Lihua⁶, XUE Changbin¹,
XU Haitao¹ & WANG Fang⁷

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

² Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190, China

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

⁴ Institute of Science and Technology for Deep Space Exploration, Suzhou Campus, Nanjing University, Suzhou 215163, China

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

⁶ Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100037, China

⁷ National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

*Corresponding author (email: zhab@nssc.ac.cn)

The Tianwen-2 mission aims at exploring the near-Earth asteroid 2016HO3 and the main belt comet 311P by means of near-distance measuring and asteroid sampling and return. As one of main payloads of the Tianwen-2 mission, the Charged and Neutral Particle Analyzer (CANPA) will measure *in-situ* the plasmas and neutral atmosphere around the asteroid and the comet. The CANPA instrument is highly integrated and miniaturized, and composes four independent subsystems: the thermal ion analyzer (TIA), the thermal electron analyzer (TEA), the solar wind ion analyzer (SIA) and the gas and ion analyzer (GIA). The flight model has been calibrated by using the on-ground calibration system. The results show that the TIA can measure thermal ions at the energy range of 2.79 eV–32.03 keV with an energy resolution of 8.79%. The TEA can measure thermal electrons at the energy range of 1.07 eV–20.61 keV with an energy resolution of 14.29%. Both TIA and TEA have the field-of-view of $360^\circ \times 90^\circ$. The SIA can measure solar wind ions at the energy-per-charge range of 5 eV–5 keV with an energy resolution of 4.23%. The GIA can measure neutral gas and ions of the comet ionosphere at the mass range of 1–350 amu and the mass resolution is about 0.17 amu@1–50 amu, 0.52 amu@51–150 amu, and 1.22 amu@151–350 amu. The CANPA instrument can fulfill the detection requirements for the asteroid and the comet.

Tianwen-2 mission, asteroid exploration, charged and neutral particle analyzer

PACS: 94.80.+g, 95.55.-n, 96.30.Ys, 95.05.Rx

doi: [10.1360/SSPMA-2025-0010](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2025-0010)