

# 自主火星探测高集成离子与中性粒子分析仪

孔令高<sup>1,2,3</sup>, 张爱兵<sup>1,2,3,4</sup>, 田 崢<sup>1,2,3</sup>, 郑香脂<sup>1,2,3</sup>, 王文静<sup>1,2,3</sup>, 刘 勇<sup>1,2,3,4,5</sup>, 丁建京<sup>1,2,3</sup>

(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. 中国科学院大学, 北京 100049;

5. 空间天气国家重点实验室, 北京 100190)

**摘要:** 小型化、高集成化是深空探测载荷发展的主要趋势。在我国自主火星探测计划中, 设计了一种高集成化的火星离子与中性粒子分析仪。采用从传感器到电子学进行最大限度共用的设计思路, 在一台仪器中实现对离子和能量中性原子进行能量、方向和成分的探测, 大大降低了仪器对卫星平台的资源需求。仪器采取静电分析进行离子的方向和能量测量、采取飞行时间方法进行离子成分的测量。中性原子采用电离板电离成带电离子, 后端的能量测量和成分测量与离子相同。鉴定件样机已经完成了初步的测试定标, 结果表明其满足设计要求。

**关键词:** 高集成化; 火星; 离子; 能量中性原子; 分析仪

中图分类号: TH832

文献标识码: A

文章编号: 2095-7777(2019)02-0142-08

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2019.02.005

**引用格式:** 孔令高, 张爱兵, 田崢, 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.

**Reference format:** KONG L G, ZHANG A B, TIAN Z, et al. Integrated ion and neutral particle analyzer for Chinese Mars mission[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (2): 142-149.

## 引言

火星, 这颗太阳系中红色的星球, 自古以来就吸引着人类好奇的目光。近几十年来, 人类利用飞越、环绕以及着陆的方式, 对火星空间环境的各个要素进行了全面的探测。从早期的 Mariner 系列、Mars 系列、Viking 系列、Phobos-2 到近期的 Mars Global Surveyor (MGS)、Mars Express、MAVEN (Mars Atmosphere and Volatile Evolution Mission) 对火星的空间环境进行了不同程度的探测<sup>[1-6]</sup>。

我国自主火星探测预计于 2020 年左右发射, 包括环绕器、着陆器和巡视器。自主火星探测总的科学研究目标主要为: ①火星形貌与地质构造特征及其变化; ②火星表面土壤特征与水冰分布; ③火星表面物质组成; ④火星大气电离层及表面气候与环境特征; ⑤火星物理场与内部结构。

火星离子与中性粒子分析仪是环绕器上的科学有效载荷之一, 将与环绕器上的磁强计和能量粒子分析仪共同完成火星的第 4 项科学目标的探测任务。

火星离子与中性粒子分析仪将对火星空间的低能离子环境和能量中性原子 (Energetic Neutral Atom, ENA) 环境开展深入的探测, 其科学目标为: ①研究火星大气逃逸机制, 估算火星大气和水的逃逸率, 了解火星大气和水的演化历史; ②研究激波附近中性粒子的加速机制, 探索太阳风与火星相互作用机理。

历次火星探测计划中, 低能离子是火星空间环境的重要探测目标, 比如 Phobos-2<sup>[3]</sup>、Mars Express<sup>[5]</sup> 和 MAVEN<sup>[6]</sup> 均开展了低能离子的探测, 而对能量中性原子, 目前为止只有 Mars Express 开展了相关探测。Mars Express 是目前唯一一个既有低能离子又有能量中性原子探测的火星计划, 通过 2 种独立的载荷分别实现离子和能量中性原子的探测功能<sup>[5]</sup>。

深空探测计划中, 有效载荷的小型化和高集成化设计是基本需求, 将最大限度地节省重量、功耗等宝贵资源。“萤火 1 号”上搭载的等离子体探测包是国内等离子体载荷小型化和高集成化设计的代表<sup>[7-8]</sup>。

收稿日期: 2018-11-15 修回日期: 2018-12-13

基金项目: 自主火星探测计划资助项目 (MARSY601-1-H); 中国科学院重点部署资助项目 (ZDRW-KT-2019-1-01)

自主火星离子与中性粒子分析仪采取高集成化的载荷设计思路，将离子和中性粒子的探测功能集成于一台载荷，最大限度地节省资源的需求。

### 1 仪器设计方案

#### 1.1 总体方案选择

低能离子与能量中性原子是2种不同类别的粒子，离子带电而中性原子不带电，两者探测方法也有所不同。

目前，能量中性原子探测手段主要有2种：电离和不电离。电离的探测方式是利用电离板对中性粒子电离为低能离子，此后按照低能离子的分析手段进行参数测量<sup>[9-12]</sup>。不电离的方式是利用超声振动快门技术直接对能量中性原子进行探测。电离方式是目前唯

一经过在轨验证的能量中性原子探测方案。

电离后的能量中性原子将变为带电的低能离子，其探测手段可以与传统低能离子相同。因此火星离子与中性粒子分析仪的基本探测思路为：将能量中性原子电离成为低能离子，采用传统的探测手段进行低能离子的能量、方向和成分分析。能量中性原子电离以后的测量部分将可以和离子测量部分共用，来实现仪器的高集成化设计。

#### 1.2 探测原理

火星离子与中性粒子分析仪的基本设计方案是：首先利用多层膜电离板将入射能量中性原子电离成带电离子，后端的能量和成分分析与低能离子探测共用带顶盖的半球形静电分析器以及基于碳膜飞行时间系统<sup>[13]</sup>，探测原理如图1所示。

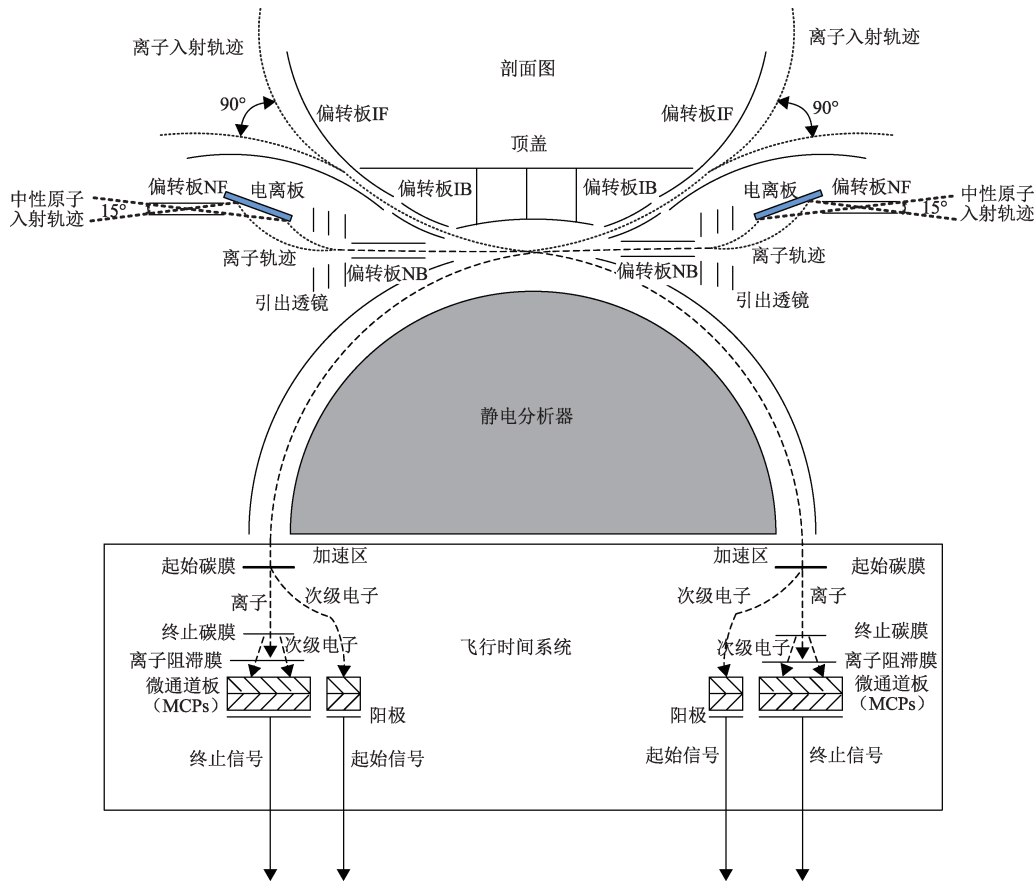


图1 仪器探测原理图  
Fig. 1 Measurement principle of instrument

图1主要给出了探头部分的剖面结构，具有旋转对称特性。探头主要由以下4大部分组成：离子偏转系统、中性粒子电离及偏转系统、带顶盖半球形静电分析器系统和飞行时间系统。

离子偏转系统主要有偏转板IF和偏转板IB组成。偏转板IF由2块偏转板组成，主要作用分别为加负的

扫描电压、对入射离子的俯仰角方向进行选择，所选择视场范围为0~90°。偏转板IB由2块偏转板组成，分别加与偏转板IF具有固定关系的扫描电压将入射离子引导至静电分析器的入口。

能量中性原子电离及偏转系统主要有偏转板NF、电离板、引出透镜和偏转板NB组成。偏转板NF上

下2个板上分别加固定的偏转电压，在两块偏转板之间形成足够强的电场可以去除带电粒子的入射，以免对能量中性原子的探测形成干扰。偏转板NF形成15°的中性粒子入射视场。电离板是以硅为基底的氧化铝镀层，入射的能量中性原子在电离板上被电离成正离子。引出透镜和偏转板NB分别加不同的负偏压将电离后的正离子引入到静电分析器入口。

静电分析器系统是一种带顶盖的半球形静电分析器。半球形静电分析器外半球接地，内半球加负的扫描电压，在内外半球之间的狭缝形成一个周期变化的电场。顶盖加与内半球电压匹配的电压。离子经过准直器入射到内外半球的狭缝，受到狭缝之间电场的偏转在狭缝之间作圆周运动，能够通过狭缝的离子能量电荷比与内半球电压成正比： $E/q = kV$ ，比例系数 $k$ 即为静电分析器因子（ $k$ -factor）。

飞行时间法是低能离子成分分析最常用的技术<sup>[14-20]</sup>。飞行时间法的核心思想是：测量离子在固定飞行距离内的飞行时间。飞行时间是通过飞行距离起始处的起始信号（START）和终止处的终止信号（STOP）之间的时间差给出。飞行时间系统的结构如图1所示。以往的飞行实践表明，飞行时间法是空间离子成分分析最有效的方法，其可应用于0.1 eV/n~60 MeV/n能量范围的离子成分分析。离子在进入飞行时间系统之前被一固定的加速电压 $U_{ACC}$  (>15 kV)加速。离子进入飞行时间系统首先要穿过起始碳膜并损失部分能量 $E_{loss}$ 同时产生次级电子。次级电子被飞行时间系统中的偏转电极偏转到起始微通道板（Micro Channel Plate, MCP）上，产生起始信号。穿过起始碳膜的离子在飞行时间系统中继续飞行一段距

离 $d$ 后打到终止碳膜上并再次产生次级电子，次级电子继续飞行穿过离子阻滞膜后打在终止MCP上，产生终止信号（离子将被离子阻滞膜所阻止）。起始信号与终止信号时间差为离子飞行时间 $\tau$ 。

离子质量电荷比可表示为

$$M/q = 2(E/q + U_{ACC} - E_{loss}/q)/(d/\tau)^2 \quad (1)$$

其中： $M$ 为离子质量； $q$ 为离子的电荷； $E$ 为离子的能量； $U_{ACC}$ 为飞行时间系统的加速高压； $E_{loss}$ 为穿过起始碳膜的能量损失； $d$ 为离子飞行距离； $\tau$ 为离子的分析时间。

能量损失通过在定标过程中测量已知成分和能量的离子飞行时间给出。式（1）等号右边部分所有的量均是已知值或可测量值，因此，离子的成分信息可以通过该式给出。

飞行时间系统中，起始碳膜产生的次级电子打在起始MCP上的位置信息可用来判断静电分析器入射口处离子的方位角信息。将起始MCP后的阳极划分为16等份，对应静电分析器16个方位角方向探测通道。由于静电分析器是旋转对称结构，方位角总的视场为360°，因此每一个探测方向通道的视场为22.5°。

在飞行时间测量中，利用一定的逻辑关系判断一次有效的飞行事件（一个起始信号对应唯一的终止信号）。单位时间内有效飞行事件的个数反映了入射离子的通量强度。

### 1.3 电子学设计

电子学部分主要有3方面功能：①处理MCP输出的起始和终止信号；②为探头部分提供高压；③负责与外部平台进行供电和通讯。电子学部分原理框图如下图2所示。

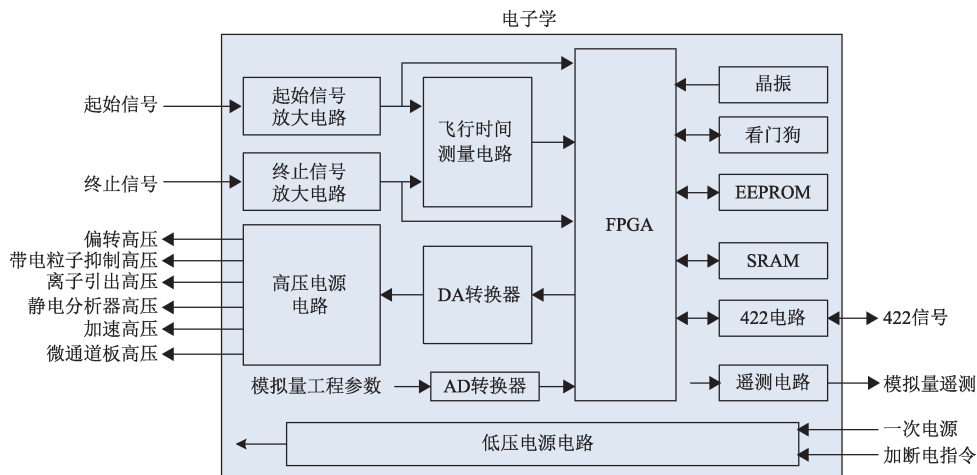


图2 电子学原理框图

Fig. 2 Block diagram of electronics

电子学部分包括前置放大电路（起始信号放大电路、终止信号放大电路）、飞行时间测量电路、高压电路、数据采集及处理电路（FPGA、晶振、看门狗、EEPROM、SRAM、AD、DA）、电源电路、接口电路（422接口、遥测接口、指令接口、电源接口）。

起始信号放大对起始微通道板输出的电荷脉冲信号进行延时和放大，输出起始脉冲信号；终止信号放大电路对终止微通道板输出的电荷脉冲进行延时和放大，输出终止脉冲信号。

飞行时间测量电路对前放电路输出的起始信号和终止信号之间的时间差进行测量。

高压电路输出传感器所需的多路高压：偏转高压、带电离子抑制高压、离子引出高压、静电分析器高压、加速高压、MCP高压。

数据采集和处理电路主要用于对探测数据进行采集和处理并对仪器进行控制。

电源电路将外部平台提供的一次电源转换为仪器电子学电路所需的二次电源（+5、+12、-12、+24、-24 V）。

接口电路负责仪器与外部平台的供电接口、数据传输接口以及遥测遥控接口。

## 2 仪器测试定标结果

基于以上高集成化设计的火星离子与中性粒子分析仪初样鉴定件样机照片如图3所示。仪器总重量为4.3 kg，与国际同类仪器相比，重量节省了约1/3。

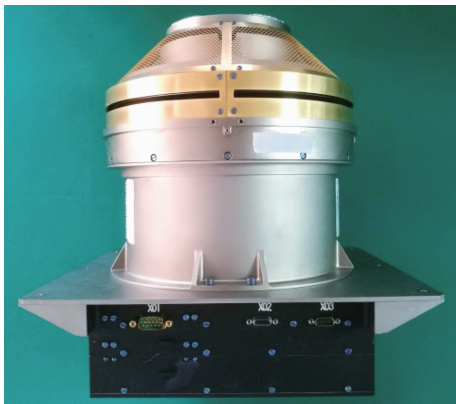


图3 火星离子与中性粒子分析仪

Fig. 3 Picture of Mars ion and neutral particle analyzer

测试定标是仪器研制过程中重要的环节，用于确定仪器各项性能指标参数<sup>[21]</sup>。火星离子与中性粒子分析仪样机在瑞士伯尔尼大学和中科院空间中心共同完成了测试定标工作，获得了仪器的各项性能指标参

数。瑞士伯尔尼大学的等离子体及中性原子定标系统是国际上著名的空间定标系统，为国际上多个卫星计划的等离子体及中性原子载荷提供了定标服务。定标系统具体性能指标参数如下：

- 离子能量范围：3~100 keV/q
- 离子成分：H<sup>+</sup>、He<sup>+</sup>、C<sup>+</sup>、N<sup>+</sup>、O<sup>+</sup>等
- 中性原子能量范围：15 eV~3 keV
- 中性原子成分：H、He、N、O等

中科院空间中心的等离子体定标系统于2015年建设完成，基本性能指标参数如下：

- 离子能量范围：30 eV~30 keV/q
- 离子成分：H<sup>+</sup>、He<sup>+</sup>、N<sup>+</sup>、O<sup>+</sup>、Ar<sup>+</sup>等
- 电子能量范围：100 eV~30 ke V/q

以下的定标内容中，与He<sup>+</sup>相关的能量响应定标以及质谱定标在中科院空间中心完成，其他定标内容均在瑞士伯尔尼大学完成。

### 2.1 离子能量响应定标

离子采用的是静电分析器选择其能量。由静电分析器的特性可知，测量离子的能量范围由所加扫描电压范围确定，能量分辨率由静电分析器结构特性决定，理论上能量分辨率不随能量和探测方向而变化。

图4给出了固定离子源为10 keV的He<sup>+</sup>，扫描静电分析器电压获得的扫描曲线，该曲线近似符合高斯分布。曲线峰值中心点对应的静电分析器电压值为1 761 V，则可计算静电分析器常数 $k = 10\ 000/1\ 761 = 5.6$ 。通过曲线半高宽和峰值中心点电压的比值可以获得能量分辨率 $\eta = 14.5\%$ 。

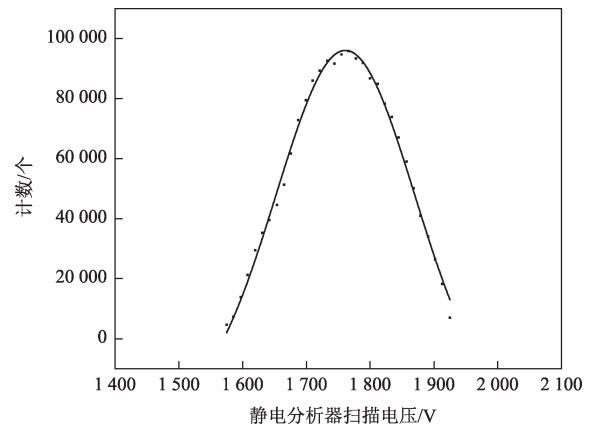


图4 仪器计数响应与静电分析器扫描电压关系曲线

Fig. 4 Instrument ion counts versus sweeping high voltage of electrostatic analyzer

离子与中性粒子分析仪静电分析器扫描电压输出范围为0.5~5 000 V，则结合静电分析器常数可以计算出可探测离子的能量范围 $E/q$ 为：2.8 eV~28 keV。

### 2.2 离子俯仰角响应定标

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为

$$R = (V_{\text{defup}} - V_{\text{deflow}}) / E \quad (2)$$

其中： $V_{\text{defup}}$ 为离子偏转系统上偏转板电压； $V_{\text{deflow}}$ 为离子偏转系统下偏转板电压； $E$ 为测量离子能量。

离子与中性粒子分析仪的离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，可以获得离子测量俯仰角视场。

在定标过程中，只对25°和65°进行了偏转系统常数的定标。定标采用的离子源能量为10 keV。图5和图6分别给出了25°和65°的俯仰角扫描曲线：图5中25°对应的 $V_{\text{defup}} = 0 \text{ V}$ ， $V_{\text{deflow}} = -1250 \text{ V}$ ，则25°的偏转系统常数 $R = 0.125$ ；图6中65°对应的 $V_{\text{defup}} = -1280 \text{ V}$ ， $V_{\text{deflow}} = 0 \text{ V}$ ，则65°的偏转系统常数 $R = -0.128$ 。在25°和65°获得的偏转系统常数与图7的仿真曲线符合得很好，验证了仿真结果的准确性，因此可以将图7的仿真结果作为偏转板扫描电压与测量俯仰角的关系曲线。仿真结果显示仪器俯仰角测量范围可达0~90°。

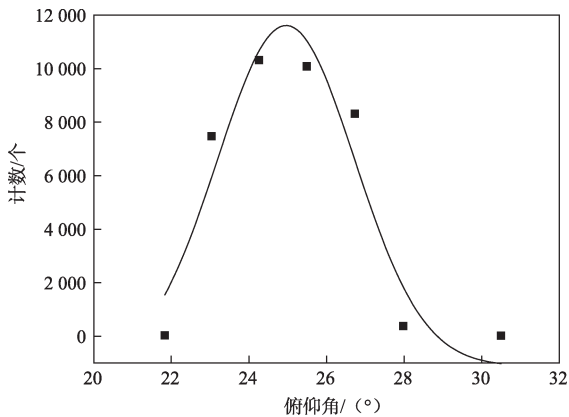


图5 俯仰角25°扫描曲线

Fig. 5 Instrument ion counts versus sweeping high voltage of deflectors at 25° elevation angle

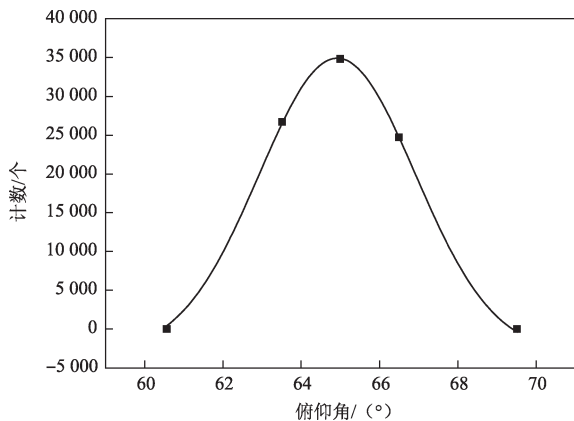


图6 俯仰角65°扫描曲线

Fig. 6 Instrument ion counts versus sweeping high voltage of deflectors at 65° elevation angle

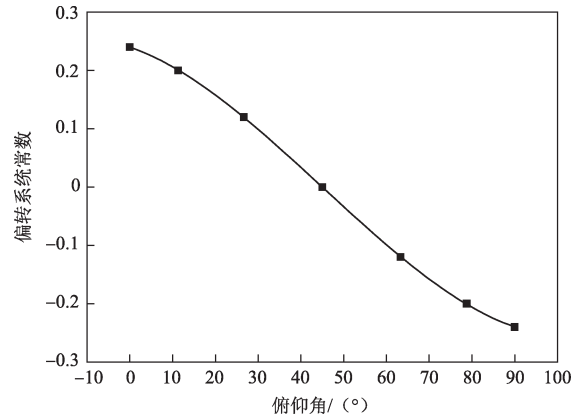


图7 偏转系统常数与俯仰角关系

Fig. 7 Deflection factor's variation with elevation angle

### 2.3 离子方位角响应定标

离子与中性粒子分析仪的方位角视场为360°，分为16个探测方向通道，每一个探测通道的视场即角度分辨率为 $360^\circ/16 = 22.5^\circ$ 。通过仪器对离子束源不同入射方向的响应，确定方位角探测视场和角度分辨率。

图8给出的是固定离子源为10 keV的 $\text{H}^+$ ，仪器16个探测方向通道的响应。从图8中可以看出，16个探测方向通道总的探测视场为360°，每一个探测通道的视场即角度分辨率约为22.5°。

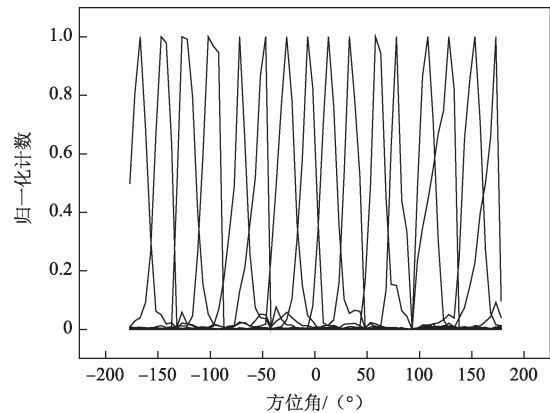


图8 方位角视场扫描响应曲线

Fig. 8 Instrument ion counts' variation with azimuth angle

### 2.4 离子成分分辨能力

离子与中性粒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 $M/q$ 。离子经过静电分析器之后被一固定的加速电压 $V_{\text{post}}$ 加速。相同成分、相同能量的入射离子的飞行时间也相同。离子的飞行时间取决于离子的总能量（离子原始能量和加速电压的加速能量之和）。

图9和图10分别给出了对不同离子成分不同总能量离子的飞行时间谱，可以看出离子与中性粒子分析

仪可以很好地对主要离子成分 ( $H^+$ 、 $He^+$ 、 $C^+$ 、 $H_2O^+$ 、 $CO^+$ 、 $CO_2^+$ ) 进行区分, 质谱范围  $1\sim 44\text{ amu}$ , 质谱分辨率 ( $\Delta M/M$ ) 约  $20\% @ 15\text{ keV He}^+$ 。

图9~10中不同成分离子的飞行时间谱的展宽, 主要由离子穿过起始碳膜后的方向散度和能量散度决定。通过仿真计算得知: 进入起始碳膜前离子总能量越高, 穿过起始碳膜后的离子方向和能量越集中, 飞行时间谱展宽越小。因此, 离子总能量越高, 仪器的成分分辨能力越好。

离子与中性粒子分析仪测量离子的能量范围为  $2.8\text{ eV}\sim 28\text{ keV}$ , 飞行时间系统的加速电压为  $15\text{ kV}$ , 则离子进入飞行时间系统前的总能量为  $15\sim 43\text{ keV}$ 。在定标过程中由于时间的关系, 选择总能量较低的两个能量点, 采用尽量接近火星空间常见离子成分的离子束源进行定标。仪器在总能量低端时, 可以对火星空间  $1\sim 44\text{ amu}$  的主要离子成分进行分辨, 结合仿真结果则可推算在整个能量范围内也可以对主要离子成分进行分辨, 在能量高端分辨效果将更好。

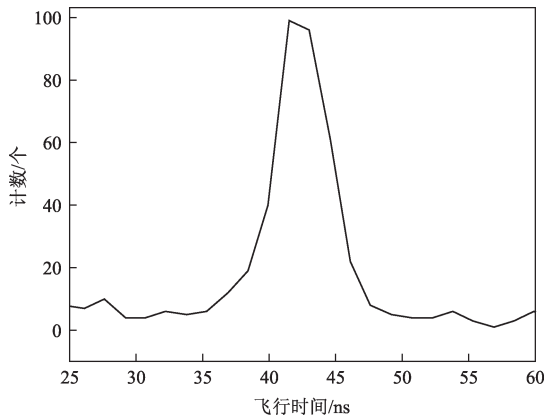


图9 总能量  $15\text{ keV}$  的  $He^+$  飞行时间谱  
Fig. 9 Time of flight spectrum of  $He^+$  with  $15\text{ keV}$  total energy

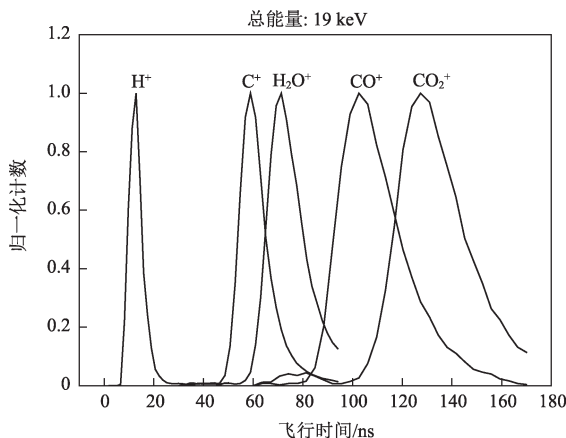


图10 总能量  $19\text{ keV}$  不同离子成分飞行时间谱  
Fig. 10 Time of flight spectrum of different ion species with  $19\text{ keV}$  total energy

### 2.5 ENA 俯仰角视场响应

离子与中性粒子分析仪的 ENA 俯仰角视场由偏转板 NF 的结构确定, 一般为固定值。仪器通过对不同入射方向 ENA 的响应来确定 ENA 俯仰角探测视场。

图11给出的是固定定标 ENA 束源为  $2.55\text{ keV}$  的 H, 仪器 ENA 探测通道的俯仰角响应曲线。取分布的半高宽 (FWHM) 约  $8^\circ$  作为 ENA 俯仰角探测视场。

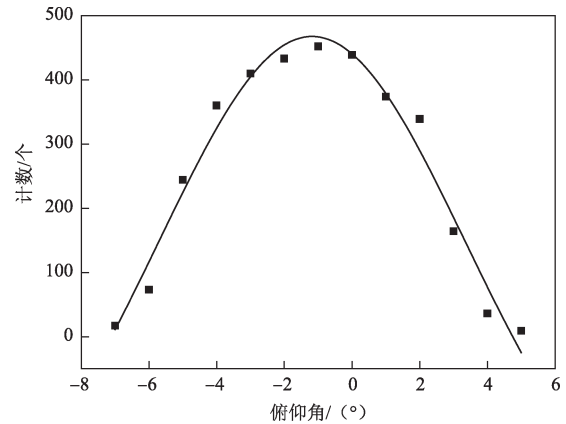


图11 ENA 俯仰角视场扫描响应曲线  
Fig. 11 Instrument ENA counts versus elevation angle

### 2.6 ENA 能量响应

ENA 能量响应的能量范围和能量分辨率主要由3部分决定: ① ENA 在电离板上被电离时造成的能损和能散; ② 静电分析器电压扫描范围和能量分辨率; ③ 引出透镜的电压配置。ENA 测量的能量分辨率要差于离子测量的能量分辨率。图12给出的是  $2.55\text{ keV}$  的 H 原子的能量分辨率。从图12中可以看出对于 H 测量的能量分辨率约为  $66.7\%$ 。结合仿真结果, 通过对静电分析器和引出透镜的电压配置和范围的限定, 可限定 ENA 的能量测量范围约  $50\text{ eV}\sim 3\text{ keV}$ 。

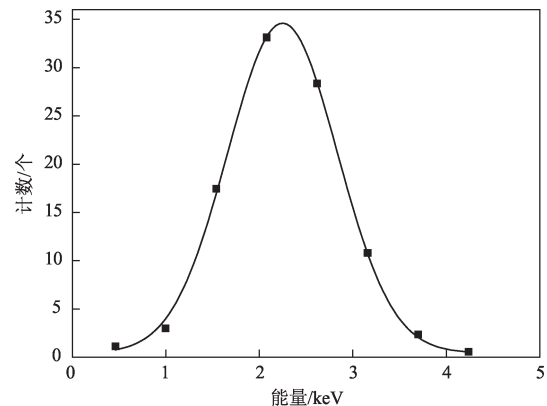


图12 中性 H 的能量响应曲线  
Fig. 12 Instrument counts versus H energy

## 2.7 ENA成分分辨能力

ENA的测量中首先将ENA电离成带电离子,后端与离子测量共用飞行时间测量系统。ENA的测试定标过程中,采用了H和O两种ENA束源,初始中性粒子的能量均为2.55 keV,飞行时间系统的加速高压均为1万V,仪器的飞行时间谱响应如图13~14所示。从图13~14的飞行时间谱可以看出仪器可以对H和O进行很好的区分,结合仿真结果,仪器对中性粒子He也可以很好地进行区分。

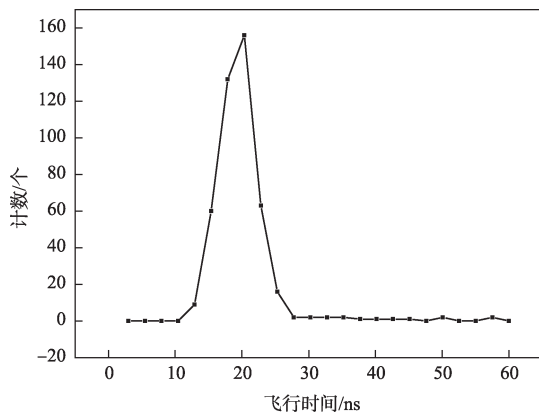


图13 中性H的飞行时间谱  
Fig. 13 Time of flight spectrum of H

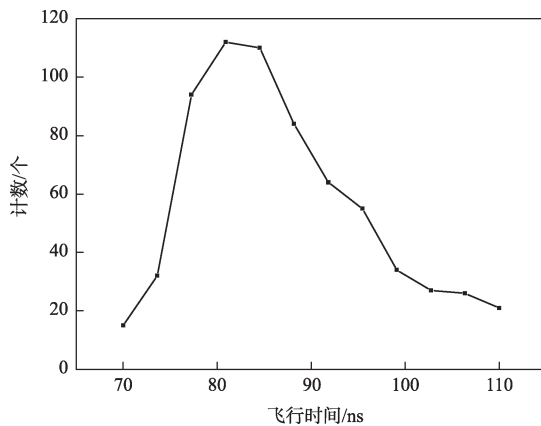


图14 中性O的飞行时间谱  
Fig. 14 Time of flight spectrum of O

## 3 结论

火星离子与中性粒子分析仪采用了高集成化的设计方案,将离子与ENA两种粒子的探测集成于一台仪器,节约了仪器的资源需求。研制完成的鉴定件样机经过测试定标,仪器可实现对离子和ENA的探测功能,实现技术指标如表1所示。

定标实测的技术指标验证了仪器高集成化设计的有效性,为后续我国相关载荷的高集成化设计奠定了基础。

表1 仪器实测技术指标

Table 1 Instrument performance by calibration		
探测对象	指标名称	实测指标
离子	能量	2.8 eV~28 keV
	能量分辨率( $\Delta E/E$ )	14.5%
	质量数/amu	1~44
	质量分辨率( $\Delta M/M$ )	20%@He
	视场	$90^\circ \times 360^\circ$
ENA	角分辨率	$4.5^\circ \times 22.5^\circ$
	能量	50 eV~3 keV
	能量分辨率( $\Delta E/E$ )	66.7%@H
	质量分辨	H、He、O
	视场	$14^\circ \times 360^\circ$
	角分辨率	$8^\circ \times 22.5^\circ$

## 致谢

感谢瑞士伯尔尼大学Peter Wurz教授、德国马普所Berndt Klecker教授对仪器设计方案的有益建议。感谢瑞士伯尔尼大学为仪器提供定标设备。

## 参考文献

- [1] SNYDER C W, NEUGEBAUER M. The mission for Mariner II: preliminary observations, Solar plasma experiment[J]. Science, 1962, 138(3454): 1095-1100.
- [2] FARMER C B, DAVIES, D W, HOLLAND A L, et al. Mars: water vapour observations from THE Viking orbiters[J]. Journal of Geophysical Research, 1977, 82(28): 4225-4248.
- [3] VERIGIN M, GRINGAUZ K I, KOTOVA G A, et al. On the problem of the martian atmosphere dissipation: PHOBOS 2 AUS spectrometer results[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96(19): 315-320.
- [4] MITCHELL D L, LIN R P, MAZELLE C, et al. Probing Mars' crustal magnetic field and ionosphere with the MGS electron reflector meter[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(E10): 23419-23427.
- [5] BARABASH S, LUNDIN R, ANDERSSON H, et al. The analyzer of space plasmas and energetic atoms (ASPERA-3) for the Mars express mission[J]. Space Science Reviews, 2006, 126(1-4): 113-164.
- [6] MCFADDEN J P, KORTMANN O, CURTIS D, et al. MAVEN suprathermal and thermal ion composition (STATIC) Instrument[J]. Space Science Reviews, 2015, 195(1-4): 199-256.
- [7] LI L, WANG S J, ZHANG A B, et al. The plasma experiment of the YH-1 mission[C]//Seventh International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Optoelectronic Technology and Instruments, Control Theory and Automation, and Space Exploration. Beijing: The International Society for Optical Engineering, 2008.
- [8] 孔令高, 张爱兵, 王世金, 等. 基于SIMION软件的空间等离子体探测器的数值仿真[J]. 中国空间科学技术, 2012, 32(4): 71-76.

KONG L G, ZHANG A B, WANG S J, et al. Numeric simulation

- analysis of a miniature space plasma analyzer by SIMION[J]. Chinese Space Science and Technology, 2012, 32(4): 71-76.
- [9] GRUNTMAN M. Neutral atom imaging[J]. Review of Scientific Instrument, 1997, 68(10): 3617-3656.
- [10] FUSELIER S A, BOCHSLER P, CHORNAY D, et al. The IBEX-Lo sensor[J]. Space Science Reviews, 2009, 146(1-4): 117-147.
- [11] MOORE T E, CHORNAY D J, COLLIER M R, et al. The low-energy neutral atom imager for IMAGE[J]. Space Science Reviews, 2000, 91(1/2): 155-195.
- [12] WIESER M, WURZ P. Production of a 10~1 000 eV neutral particle beam using surface neutralization[J]. Measurement Science and Technology, 2005, 16(12): 1511-2516.
- [13] ALLEGRINI F, WIMMER-SCHWEINGRUBER R F, WURZ P, et al. Determination of low-energy ion-induced electron yields from thin carbon foils[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2003, 211(4): 487-494.
- [14] WUEST M. Time-of-flight ion composition measurement technique for space plasmas[C]//Measurement Techniques in Space Plasmas-Particles: Geophysical Monograph 102. Washington, DC: Geophysical Monograph Series, 102, American Geophysical Union, 1998: 141-155.
- [15] GLOECKLER G. Ion composition measurement techniques for space plasmas[J]. Review of Science Instruments, 1990, 61(11): 3613-3620.
- [16] GALVIN A B, KISTLER L M, POPECKI M A, et al. The plasma and suprathermal ion composition (PLASTIC) investigation on the STEREO observatories[J]. Space Science Reviews, 2008, 136(1-4): 437-486.
- [17] REME H, BOSQUED J M, SAUVAUD J A, et al. The cluster ion spectrometry (CIS) experiment[J]. Space Science Reviews, 1997, 79(1/2): 303-350.
- [18] YOUNG D T, BERTHELIER J J, BLANC M, et al. Cassini plasma spectrometer investigation[J]. Space Science Reviews, 2004(114): 1-112.
- [19] KONG L G, ZHANG A B, ZHENG X Z, et al. A satellite-borne miniature ion mass spectrometer for space plasma[J]. Chinese Journal of Space Science, 2015, 35(6): 755-762.
- [20] 孔令高, 张爱兵, 郑香脂, 等. 热离子质谱分析仪研制及定标[J]. 空间科学学报, 2017, 37(5): 585-592.
- KONG L G, ZHANG A B, ZHENG X Z, et al. Development and calibration of thermal ion mass spectrometer[J]. Chinese Journal of Space Science, 2017, 37(5): 585-592.
- [21] WUEST M, DAVID S E, RUDOLF V S. Calibration of particle instruments in space physics[M]. Netherlands: ESA Publications Division, 2007.

作者简介:

孔令高(1981-), 男, 研究员, 主要研究方向: 空间环境载荷研制及数据分析。

通信地址: 北京市海淀区中关村南二条一号(100190)

电话: (010)62582636

E-mail: klg@nssc.ac.cn

## Integrated Ion and Neutral Particle Analyzer for Chinese Mars Mission

KONG Linggao<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Aibing<sup>1,2,3,4</sup>, TIAN Zheng<sup>1,2,3</sup>, ZHENG Xiangzhi<sup>1,2,3</sup>,  
WANG Wenjing<sup>1,2,3</sup>, LIU Yong<sup>1,2,3,4,5</sup>, DING Jianjing<sup>1,2,3</sup>

(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, Beijing 100190, China;

4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

5. State Key Laboratory of Space Weather, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The miniature and integrated design is a main trend in science payload development for deep space. An integrated ion and neutral particle analyzer is built for Chinese Mars exploration project. The measurements of ion and energetic neutral atom share the sensor and electronics and are integrated in a single instrument with lower mass and power. Electrostatic analyzing method is used to measure the ions' energy and direction. Time of flight method is used to measure the ions species. The energetic neutral atoms are ionized firstly and the same measurement method with ions. The qualification model is calibrated and the results fulfill the requirements for the Mars project.

**Key words:** integrated design; Mars; ion; energetic neutral atom; analyzer

**High lights:**

- Innovative design to integrate the ENA measurement with ion detector using the top-hat hemisphere electrostatic analyzer.
- Large field of view ( $360^\circ \times 90^\circ$ ) for ion measurement.
- Ability of distinguishing main ion species in Martian magnetosphere.

[责任编辑: 高莎, 英文审核: 朱恬]