太阳系边际热离子高分辨飞行时间系统设计与仿真

苏 斌[1,2,3]，孔令高[1,5]，刘 超[1,2,3]，张爱兵[1,2,3,4]，郑香脂[1,2,3]，吕玉龙[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. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京 100049；
5. 南京大学 深空探测科学与技术研究院，苏州 215163）

摘 要：面向太阳系边际热离子高质谱分辨率探测需求，设计了高分辨飞行时间系统，该系统利用反射式线性场串列电极形成的线性反射电场，将入射离子进行一次反射，可在不增加传感器尺寸的前提下延长离子的飞行时间并减小飞行时间谱的展宽，从而达到提高飞行时间系统的质谱分辨率的目的。对传感器的电极电场分布及典型粒子运动轨迹进行了模拟仿真，并针对典型太阳系边际热离子成分开展了质谱分辨能力仿真分析。仿真结果表明：太阳系边际热离子高分辨飞行时间系统质谱分辨率≥50，能够满足对深空尤其是太阳系边际热离子的高分辨质谱探测需求。

关键词：太阳系边际；热离子；飞行时间；质谱分辨率

中图分类号：P354.4；V447+.1 **文献标识码：**A **文章编号：**2096-9287(2025)05-0503-07

DOI:10.3724/j.issn.2096-9287.2025.20250056

引用格式：苏斌，孔令高，刘超，等. 太阳系边际热离子高分辨飞行时间系统设计与仿真[J]. 深空探测学报（中英文），2025，12（5）：503-509.

Reference format: SU B，KONG L G，LIU C，et al. Design and simulation of a high-resolution Time-Of-Flight system for thermal ions at the solar system boundary[J]. Journal of Deep Space Exploration，2025，12（5）：503-509.

引 言

自从人类进入太空时代以来，太阳系边际探测一直是国际空间科学研究关注的热点，通常是指距离太阳80～150 AU的区域[1]。太阳系边际探测主要面向星际空间物质、日球层结构、太阳风与星际物质相互作用与演化以及外太阳系天体分布等目标进行综合探测。太阳系边际是未来深空探测的重要方向，而其复杂的环境和工程约束也亟需开展关键核心技术的攻关。其中热离子质谱的就位探测将为日球层顶等离子体分布规律、太阳风与中性成分的相互作用机制研究提供关键科学参数。

太阳系边际等离子体环境尤其是太阳系边际热离子（包括太阳风离子与拾起离子）对于太阳系起源演化研究及星际物质相互作用的研究具有重要的科学价值，太阳系边际热离子包含H～Fe等多种成分，其中又包含诸如H^+，$^4He^{2+}$，$^3He^+$，N^+，O^+，Ne^+等对星际中性成分与拾起离子形成及演化密切相关的成分[2]。国内外多个探测任务的相关载荷对行行星际太阳风、行星空间热离子质谱开展了不同程度的探测，如“磁层粒子主动示踪探测器”（AMPTE）、“尤利西斯号”（Ulysses）、“太阳与日球观测台”（SOHO）、“先进成分探测器”（ACE）等。近20 年内的如“卡西尼号”（Cassini）、“日地关系观测台”（STEREO）、“火星大气与挥发物演化任务”（MAVEN）、“罗塞塔”（Rosetta）和“木星冰卫星探测器”（JUICE）等[3-6]。然而针对太阳系边际，目前仅“先驱者”10和11号（Pioneer 10、Pioneer 11）、“旅行者”1和2号（Voyager 1、Voyager 2）开展过探测[7-8]。“新视野号”（New Horizons）将在完成冥王星探测任务之后开启太阳系边际探测扩展任务，其SWAP载荷也不具备离子质谱探测功能[9-10]，后续探测计划如欧洲的IHP/HEL（Interstellar Heliopause Probe/Heliospheric Explorer）与美国的IIE（Innovative Interstellar Explorer）均计划搭载等离子体或离子质谱载荷对太阳系边际进行探测[11-12]。中国也在积极推进太阳系边际探测任务论证，对粒子就位探测载荷也进行了详细的规划[13]。

国际上热离子质谱探测载荷发展较早，技术也较为成熟，这些载荷大多采用均匀场飞行时间技术作为质谱探测基本方案，该方案结构简单，但质谱分辨率较低，如ACE/SWICS、CLUSTER/CIS、STEREO/

收稿日期：2025-06-23 修回日期：2025-08-13

基金项目：国防科工局民用航天预研项目（D010202）

PLASTIC、Juno/JADE-I等载荷，质谱分辨率$M/\Delta M$通常为2～10，质量探测范围通常覆盖典型的太阳风离子（H～Fe）及行星热离子（如H、C、N、O、CO_2等）[14-17]。国内典型的热离子质谱探测载荷包括“天问一号”MINPA与“天问二号”CANPA载荷，针对热离子的质谱分辨率与质量探测范围与上述国际载荷相当[18-19]。

太阳系边际热离子探测对象既包括太阳风离子，也包括行星际拾起离子，这些拾起离子通常由来自星际空间的中性粒子与太阳风进行电荷交换形成，并随着太阳风一起运动[20]。随着日心距的逐渐增加，拾起离子的探测也越来越受到关注，对拾起离子和太阳风离子进行高质谱分辨探测对于认识外日球层太阳风的加热等物理过程具有重要的作用[21]。由于其低速和低温的特性，对这类拾起离子探测要求具有较低的能量探测下限，通常可低至～eV，同时具备较高质谱分辨率，通常要求$M/\Delta M \geqslant 30$，离子成分主要有H、He、C、N、O、Ne等[22-24]。

由于太阳系边际热离子质谱探测对质谱分辨率的要求更高，传统的探测方案（均匀场飞行时间技术）质谱分辨率较低，难以满足后续载荷研制与科学探测需求，亟需对更高质谱分辨率的飞行时间探测方案进行研究。本文所述高质谱分辨离子飞行时间系统可作为热离子质谱探测载荷的关键组成部分，用于对太阳系边际热离子（包括太阳风离子、拾起离子）开展就位探测，对该系统的设计进行介绍，并对核心技术指标开展仿真分析。

1 飞行时间系统探测原理

飞行时间方法（Time-Of-Flight，TOF）是空间粒子成分鉴别的主要方法之一，被广泛应用于空间带电粒子的成分分析中。在空间热离子质谱探测仪器中，飞行时间法通常在前端与静电分析器配合使用，被静电分析器筛选过的离子以特定能量电荷比（E/q）进入飞行时间系统，不同质量电荷比（M/q）的离子飞行时间不同，据此可得到不同成分离子的飞行时间谱，并计算得到针对各成分探测的质谱分辨率。根据飞行时间内部的电场特性，可将其分为均匀场飞行时间系统与反射式线性场飞行时间系统，其中均匀场飞行时间系统因其结构简单，易于工程实现被广泛应用于空间热离子质谱探测载荷。反射式线性场飞行时间系统质谱探测范围较宽、分辨率也较高，但其结构与分析方法更为复杂。此外，磁分析器也可用于空间热离子的质谱探测，根据内部磁场对不同成分的离子的偏转半径不同实现对离子质谱的探测，但磁分析器通常重量较大，且需要携带磁铁，仅有Mar Express等少数任务采用该方案[25-27]。

均匀场飞行时间内部电场不随位置变化，离子在飞行时间系统内部做匀速直线飞行。离子在进入飞行时间系统前，先被一加速电场加速（典型电压15 kV），离子获得足够的能量使其能够穿过厚度约10 nm的碳膜，并损失部分能量E_{loss}，同时碳膜上产生二次电子[28]。二次电子被一偏转电场吸引到电子起始微通道板（MicroChannel Plate，MCP）上产生飞行时间起始信号，离子则沿着直线飞行一段距离d后最终打在终止MCP上产生飞行时间终止信号，终止信号与起始信号之间的时间差即为离子的飞行时间t，根据飞行时间与飞行距离可获得离子的速度，进而结合静电分析器探测到的E/q信息，即可得到离子成分。离子质量电荷比（即M/q）与飞行时间t符合下列关系式

$$M/q = 2(E/q + U_{\mathrm{ACC}} - E_{\mathrm{loss}}/q)\cdot(t/d)^2 \tag{1}$$

其中：U_{ACC}为加速高压；E/q由静电分析器电压给出，d为飞行距离，具有相同E、M、q的离子能量损失E_{loss}相同，可由地面定标得到，因此公式（1）中可通过飞行时间直接计算得到离子的M/q信息。

均匀场飞行时间系统受限制于离子散射（包括能量和方向）和仪器整体尺寸，质谱分辨率通常较低。反射式线性场飞行时间系统能够较好地解决这一难题，离子在飞行时间内部经过反射与飞行时间聚焦，可在既有尺寸下提高质谱分辨率。反射式线性场飞行时间系统在与静电分析器配合使用时，从静电分析器出射的离子（特定E/q）被一加速电场加速至15 keV以上，然后穿过超薄碳膜（约10 nm厚）进入线性电场飞行时间系统。离子穿过碳膜时，产生二次电子，电子在内部线性反射电场的作用下被加速至起始微通道板，产生起始脉冲信号。穿过碳膜的离子则在电场的作用下被减速至0，然后反射至顶部的终止微通道板，产生终止脉冲信号。起始信号和终止信号的时间差即为离子的飞行时间t，结合线性电场理论公式即可获得离子的质量电荷比（M/q）。

在反射式线性场飞行时间系统中，离子的飞行时间t为[29]

$$t = \pi\sqrt{\frac{M}{qeC}} \tag{2}$$

其中：C为反射式线性场飞行时间系统的特性常数，与离子种类及飞行时间无关；q为离子核电荷数；M为

离子质量，e为单元电荷量。

离子质量电荷比的表达式为

$$\frac{M}{q}=Ce\left(\frac{t}{\pi}\right)^2 \tag{3}$$

至此，可确定离子的M/q信息，进而判断离子种类。

图1给出了上述两类飞行时间系统的技术原理与典型粒子运动轨迹示意图。均匀场飞行时间的原理如图1（a）所示，主要包含加速高压（U_{ACC}）、碳膜、起始MCP与终止MCP等组件，飞出静电分析器的离子穿过碳膜时产生二次电子，二次电子被起始MCP接收并产生飞行时间起始信号，离子在飞行时间系统内部继续匀速飞行，最终打到终止MCP上产生终止信号。反射式线性场飞行时间的原理如图1（b）所示，主要包含加速高压（U_{ACC}）、碳膜、起始MCP与终止MCP等组件，在内部电场的作用下，碳膜产生的二次电子被加速至底部起始MCP上记录起始信号，离子则被电场反射至顶部终止MCP上记录终止信号。根据式（1）和（3），可得到，离子的质谱分辨率$(M/q)/\Delta(M/q)$符合下式

$$\frac{M/q}{\Delta(M/q)}=\frac{t}{2\Delta t} \tag{4}$$

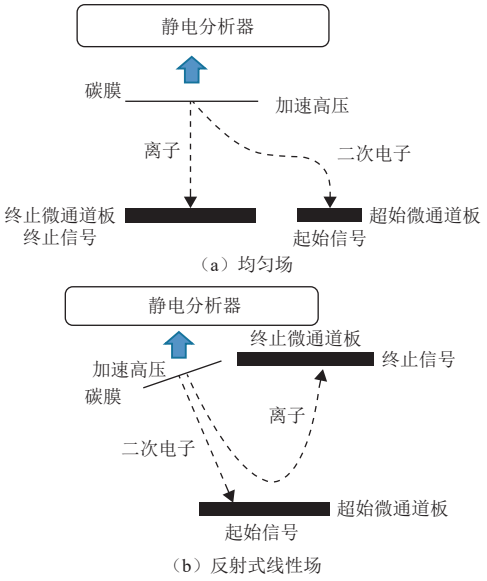

图 1　两类飞行时间技术基本原理图

Fig. 1　Basic principle for the two types of time-of-flight technologies

因此根据飞行时间谱即可得到离子的M/q与质谱分辨率。

2　反射式线性场飞行时间系统设计

反射式线性场飞行时间系统组成与工作原理如图2所示。通常在前端配合静电分析器，实现对离子能量电荷比（E/q）的测量，后端接电子学，以实现对信号的处理分析并为传感器提供高压。反射式线性场飞行时间系统包括入口碳膜及加速高压、线性电场反射电极及屏蔽栅网、起始微通道板、终止微通道板等。

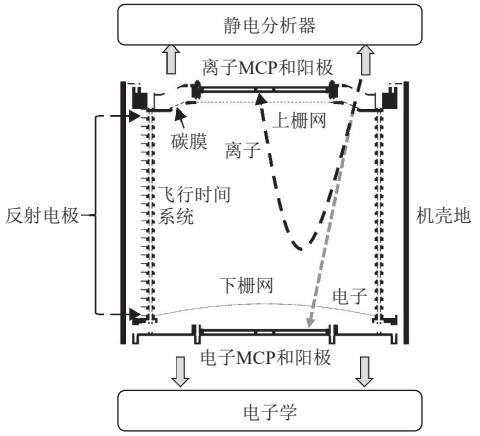

图 2　反射式线性场飞行时间系统组成与工作原理

Fig. 2　Composition and principle of the reflectron linear electric field type TOF system

反射式线性场飞行时间对离子质谱探测的基本过程如下：特定E/q的离子在飞出静电分析器时被15 kV的加速高压，打在10 nm厚的超薄碳膜上，产生二次电子。线性场内部反射电极按−15 kV～+15 kV排列，电场沿轴向线性变化，电子在该电场的作用下加速向底部飞行，并在穿过+15 kV电极栅网后打在起始微通道板上，产生飞行时间起始信号；离子穿过碳膜后将在内部线性场的作用下先被加速至0，然后反向加速向顶部飞行，并在穿过−15 kV电极栅网后打在终止微通道板上产生飞行时间终止信号，终止信号与起始信号的时间差即为离子的飞行时间。根据飞行时间谱与式（3）可得到离子的质谱信息，根据式（4）可得到特定离子成分的质谱分辨率。

3　热离子质谱探测功能仿真

3.1　仿真模型

仿真模型采用有限元仿真软件SIMION建立[29-30]，主要包括两部分：①飞行时间系统内部电场模型；②典型离子与二次电子源模型。

根据仪器工作原理与设计，图3给出了反射电极−15 kV～+15 kV排列，起始微通道板前端+200 V，终止微通道板前端−3 000 V，超薄碳膜−15 kV、其它电极接地（0 V）的配置下的电场等势线分布及典型离子与二次电子的飞行轨迹图。图4给出了典型能量的H^+在飞行时间系统内部的飞行轨迹图。

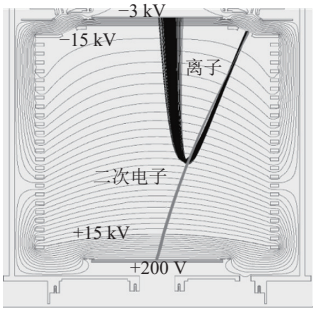

图 3　飞行时间系统内部电场等势线、离子与二次电子轨迹

Fig. 3　Equipotential lines、particle trajectories of ions and secondary electrons in the TOF system

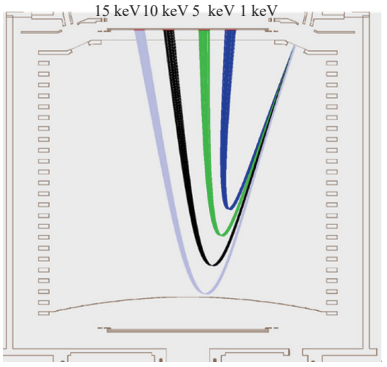

图 4　典型能量（加速前）的H+在飞行时间系统内部轨迹

Fig. 4　Trajectories of H^+ with typical energies in the TOF system

仿真模型内部的离子及二次电子源均采用蒙特卡洛方法建立。在特定范围内采用随机抽样的方式产生N个离子或电子作为入射源，主要参数包括粒子数目、质量、电荷数、起始位置（X、Y、Z）、起始方位角、起始俯仰角、起始能量及轨迹颜色等。定义所有能穿过传感器各通道打到MCP上的离子（电子）为有效离子（有效电子），各参数选取的抽样范围应覆盖所有有效离子（有效电子）的参数范围，SIMION根据内部电场分布和粒子源，计算粒子在整个系统内部的运动轨迹，并根据需要记录在指定区域的粒子坐标、速度、方向、质量、电荷与能量等信息。由于电子在内部电场的加速下打到起始MCP上的时间远远小于离子的飞行时间，实际仿真中可不考虑这部分飞行时间。由于离子穿过碳膜时会发生散射，仿真过程中应考虑碳膜的散射对结果的影响，图5给出了典型能量、典型成分的离子10 nm厚度的碳膜内部的轨迹。

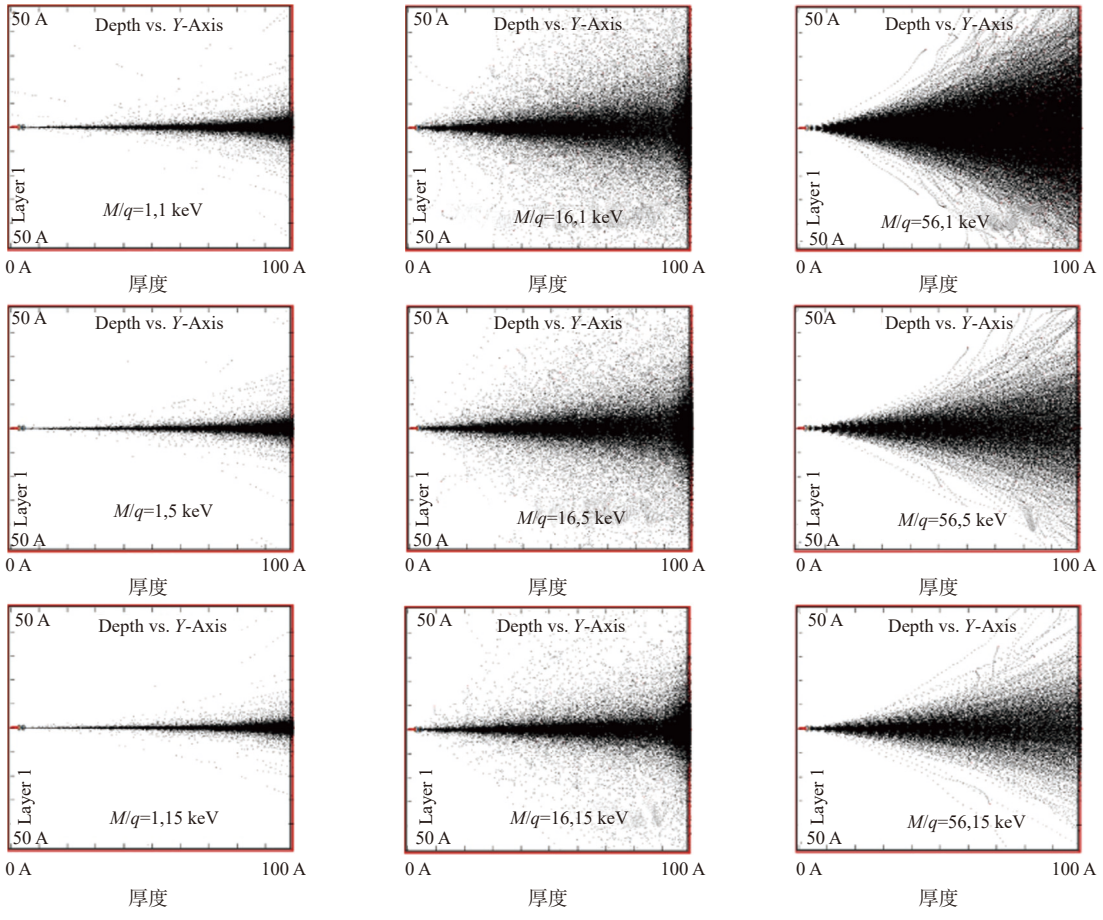

图 5　典型能量（加速前）的离子在10 nm厚度的碳膜中的飞行轨迹

Fig. 5　Trajectories of ions with typical energies (before being accelerated) in 10 nm carbon foil

3.2　典型离子飞行时间谱与质谱分辨率

以1 keV/e的H^+为例，图6给出了典型离子成分的飞行时间谱。根据图中曲线可得到1 keV/e的H^+飞行时间谱中心值t为257.0 ns，飞行时间谱的半高宽Δt为2.5 ns，根据式（4）可计算得到反射式线性场对1 keV/e的H^+探测的质谱分辨率$(M/q)/\Delta(M/q)$为53.5。

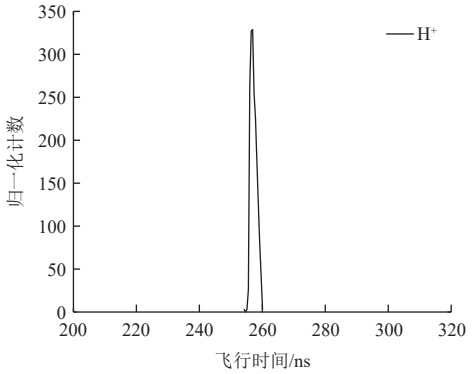

图 6　典型离子成分飞行时间谱：1 keV/e的H^+
Fig. 6　Typical ion TOF spectrum: H^+ of 1 keV/e

同理可得到在该能量下其他成分离子的飞行时间谱，如图7所示。根据不同离子成分的飞行时间与理论式（3），可将t^2与M/q进行线性拟合，如图8所示。由拟合曲线可得到1 keV/e离子能量下的飞行时间仿真关系式

$$\frac{M}{q} = 256t^2 \tag{5}$$

根据上述公式即可推算不同测量飞行时间对应的离子M/q信息，进而确定离子种类。

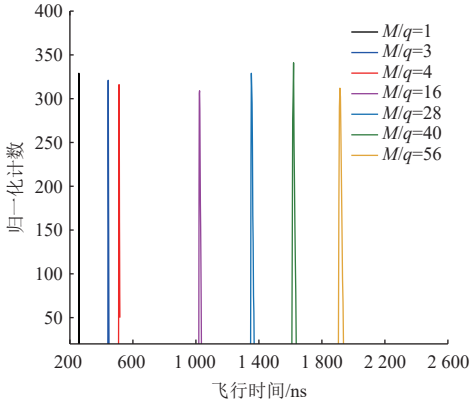

图 7　典型离子成分飞行时间谱：M/q = 1～56 @ 1 keV/e
Fig. 7　Typical ion TOF spectrum: M/q = 1～56 @ 1 keV/e

图9给出的是不同M/q、不同E/q的离子飞行时间，从曲线中可看出，离子飞行时间随着E/q基本保持稳定，仅与M/q相关，与理论吻合。

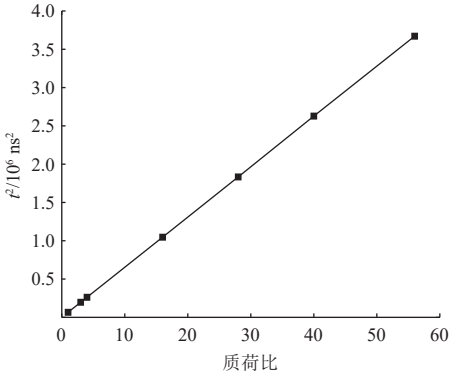

图 8　t^2与M/q关系曲线@1 keV/e
Fig. 8　Curve line between t^2 and M/q @ 1 keV/e

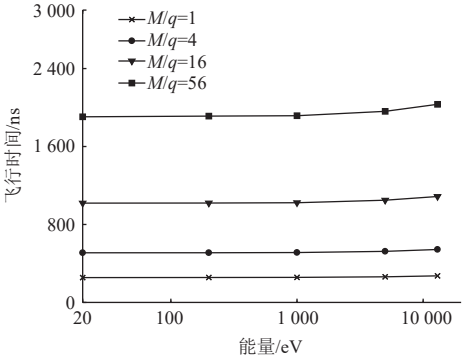

图 9　不同能量与M/q的离子飞行时间
Fig. 9　Flight time of ions with different energies and M/q

根据上述不同离子成分的飞行时间谱，还可以得到反射式线性场飞行时间系统对这些离子成分的质谱分辨率，如图10所示。从曲线可得出，离子质谱分辨率≥50，不同M/q的质谱分辨率基本一致。

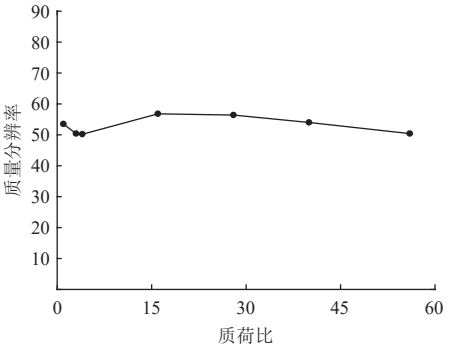

图 10　不同M/q的质谱分辨率
Fig. 10　Mass resolution of ions with different M/q

4　结束语

本文结合国内外技术发展现状，瞄准中国太阳系边际探测任务对热离子质谱探测载荷的高质谱分辨率指标要求，开展了反射式线性场飞行时间系统的详细方案设计与仿真分析，根据仿真结果可得出如下结论：

1）反射式线性场飞行时间系统采用内部线性变化的电场可实现对离子飞行距离的加倍，进而延长飞行时间，从而达到提高质谱分辨率的目的；

2）仿真结果显示，不同成分的离子M/q与飞行时间t的平方成正比，可据此分析实测飞行时间对应的离子成分信息；

3）反射式线性场飞行时间系统对不同成分的质谱分辨率≥50，可实现热离子质谱的高分辨探测；

本文所述研究结果为后续完整的静电分析器、反射式线性场飞行时间及电子学技术方案的工程研制与测试奠定了基础。

致　谢

感谢天基空间环境探测北京市重点实验室和太阳活动与空间天气全国重点实验室相关课题的支持。

参考文献

[1] WANG C，BELCHER J W. Numerical investigation of hydrodynamic instabilities of the heliopause[J]. Journal of Geophysical Research，1998，103(A1)：247-256.

[2] KALLENBACH R，GEISS J，GLOECKLER G，et al. Pick-up ion measurements in the heliosphere-a review[J]. Astrophysics and Space Science，2000，274：97-114.

[3] MOBIUS E，GLOECKLER G，HOVESTADT D，et al. The time-of-flight spectrometer SULEICA for ions of the energy range 5-270 keV/charge on AMPTE IRM[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing，2007，GE-23(3)：274-279.

[4] PASCHMANN G，LOIDL H，OBERMAYER P，et al. The Plasma instrument for AMPTE IRM[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing，1985，GE-23(3)：262-266.

[5] GLOECKLER G，GEISS J，BALSIGER H，et al. The solar wind ion composition spectrometer[J]. Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 1992，92：267-289.

[6] HOVESTADT D，HILCHENBACH M，BÜRGI A，et al. CELIAS - charge，element and isotope analysis system for SOHO[J]. Solar Physics，1995，162(1-2)：441-481.

[7] WOLFE J H. The Pioneer 10 plasma analyzer results at Jupiter. The magnetospheres of the Earth and Jupiter[M]. Dordrecht：Astrophysics and Space Science Library，Spinger，1975.

[8] BRIDGE H S，BELCHER J W，BUTLER R J，et al. The plasma experiment on the 1977 Voyager Mission[J]. Space Science Reviews，1977，21(3)：259-287.

[9] MCCOMAS D，ALLEGRINI F，BAGENAL F，at al. The Solar Wind Around Pluto(SWAP) instrument aboard New Horizons[J]. Space Science Reviews，2008，140：261-313.

[10] GRUNTMAN M. Instrumentation for interstellar exploration[J]. Advances in Space Research，2004，34(1)：204-212.

[11] GUO Y P，FARQUHAR R W. New Horizons mission design[J]. Space Science Review，2008，140：49-74.

[12] MEWALDT R A，LIEWER P C，INTERSTELLAR P S，et al. Scientific payload for and interstellar probe mission[J]. COSPAR Colloquia Series，2001(11)：451-464.

[13] 张爱兵，李晖，孔令高，等. 太阳系边际探测任务的科学载荷配置研究[J]. 深空探测学报(中英文)，2020，7(6)：545-553.
ZHANG A B，LI H，KONG L G，et al. Scientific payloads proposal for Chinese Solar system boundary exploration mission[J]. Journal of Deep Space Exploration，2020，7(6)：545-553.

[14] GLOECKLER G，CAIN J，IPAVICH M，et al. Investigation of the composition of solar and interstellar matter using solar wind and pickup ion measurements with SWICS and SWIMS on the ACE spacecraft[J]. Space Science Reviews，1998，86：497-539.

[15] LEWIS G R，ARRIDGE C S，LINDER D R，et al. The calibration of the Cassini–Huygens CAPS electron spectrometer[J]. Planetary and Space Science，2010，58(3)：427-436.

[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] MCCOMAS D J，ALEXANDER N，ALLEGRINI F，et al. The Jovian Auroral Distributions Experiment (JADE) on the Juno mission to Jupiter[J]. Space Science Reviews，2017，213：547-643.

[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[J]. Earth Planetary Physics，2020，4(4)：333-344.

[19] 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. https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-JGXK202507012.htm.
SU B，ZHANG A，KONG L，et al. Charged and neutral particle analyzer for Tianwen-2 mission[J/OL]. Sci Sin-Phys Mech Astron，2025，55(7)：279511. https://www.cnki.com.cn/Article/CJFDTotal-JGXK202507012.htm.

[20] BARANOV V B，MALAMA Y G. Effect of local interstellar medium hydrogen fractional ionization on the distant solar wind and interface region[J]. Journal of Geophysical Research，1995，100(A8)：14755-14761 .

[21] WANG C，RICHARDSON J D. Energy partition between solar wind protons and pickup ions in the distant heliosphere：a three-fluid approach[J]. Journal of Geophysical Research，2001，106(A12)：29401-29407.

[22] GLOECKLER G，GEISS J. Interstellar and inner source pick-up ions observed with swics on ULYSSES[J]. Space Science Review，1998，86：127-159.

[23] WITTE M，ROSENBAUER H，BANASZKIEWICZ M，et al. The ULYSSES neutral gas experiment-determination of the velocity and temperature of the interstellar neutral helium[J]. Advances in Space Research，1993，13(6)：121-130.

[24] MÖBIUS E，RUCINSKI D，HOVESTADT D，et al. The Helium parameters of the very local interstellar medium as derived from the distribution of He+ Pick-up ions in the solar wind[J]. Astronomy & Astrophysics，1995，304：505-519.

[25] MCFADDEN J P，KORTMANN O，CURTIS D，et al. MAVEN Supra Thermal and Thermal Ion Compostion (STATIC) instrument[J]. Space Science Reviews，2015，195(1-4)：199-256.

[26] CARR C，CUPIDO E，LEE G Y，et al. RPC：the rosetta plasma

consortium[J]. Space Science Reviews，2007，128：629-647.

[27] BARABASH S，LUNDIN R，ANDERSSON H，et al. The Analyzer of Space Plasmas and Energetic Atoms（ASPERA-3）for the Mars express mission[M]. New York：Spinger，2007.

[28] 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：B，2003，211(4)：487-494.

[29] GILBERT J A，LUNDGREN R A，PANNING M H，et al. An optimized three-dimensional linear-electric-field time-of-flight analyzer[J]. Review of Scientific Instruments，2010，81：3302-3311.

[30] DAHL D A. SIMION for the personal computer in reflection[J]. International Journal of Mass Spectrometry，2000，200(1)：3-25.

作者简介：

苏斌(1992－)，男，博士，助理研究员，主要研究方向：空间等离子体探测载荷研制与数据处理。

通信地址：北京市海淀区中关村南二条1号(100190)

电话：(010)62582635

E-mail：subin@nssc.ac.cn

Design and Simulation of a High-Resolution Time-Of-Flight System for Thermal Ions at the Solar System Boundary

SU Bin[1,2,3]，KONG Linggao[1,5]，LIU Chao[1,2,3]，ZHANG Aibing[1,2,3,4]，ZHENG Xiangzhi[1,2,3]，LYU Yulong[1,2,3]

（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. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China；
5. Institute of Science and Technology for Deep Space Exploration, Suzhou Campus, Nanjing University, Suzhou 215163, China）

Abstract： Targeting the high-resolution mass spectrometric detection requirements for thermal ions at the heliospheric boundary, a high-resolution Time-Of-Flight (TOF) system was designed. This system utilized a linear reflection electric field formed by reflective wire-generated parallel electrodes to reflect incident ions once, thereby extending ion flight time and shortening time-of-flight peak broadening without increasing sensor size, thus achieving the goal of enhancing the mass resolution of the TOF system. Simulations were conducted on electrode electric field distribution and typical particle trajectories within the sensor, and simulation analyses of mass resolution capability were performed for typical heliospheric boundary thermal ion components. Simulation results demonstrate that the mass resolution of this high-resolution TOF system for heliospheric boundary thermal ions is ⩾50, meeting the requirements for high-resolution mass spectrometric detection of thermal ions in deep space, especially at the heliospheric boundary.

Keywords： solar system boundary exploration；thermal ions；Time-Of-Flight；mass resolution

Highlights：

- Designed a reflectron-type high-resolution TOF system using linear reflection electric fields from wire-generated parallel electrodes to extend ion flight time without increasing sensor size.
- Simulated electrode fields, particle trajectories, and mass resolution for typical ions to validate system performance.
- Achieved a mass resolution of ⩾50, meeting the requirements for high-resolution mass spectrometric detection of thermal ions at the solar system boundary.

[责任编辑：高莎，英文审校：宋利辉]