

电磁监测试验卫星阻滞势分析器探测技术

郑香脂 张爱兵 关燧炳 刘超 王文静 田峥 孔令高 孙越强

Research on retarding potential analyzer aboard China seismo-electromagnetic satellite

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

引用信息 Citation: [Acta Physica Sinica](#), **66**, 079401 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.079401

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.079401>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphys.ac.cn/CN/Y2017/V66/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电磁监测试验卫星朗缪尔探针电离层探测技术

[The ionosphere measurement technology of Langmuir probe on China seismo-electromagnetic satellite](#)

物理学报.2016, 65(18): 189401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.189401>

Vernier型光子计数探测器阳极电容仿真与试验研究

[Simulation and experiment for electrode capacitance based on Vernier anode photon counting detector](#)

物理学报.2015, 64(8): 080702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.080702>

火箭尾焰对高频回波的影响及其频域能量凝聚检测方法

[Effect of rocket flame on high-frequency echo and its frequency energy agglomerated detection method](#)

物理学报.2014, 63(11): 119401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.119401>

空间微小碎片超高速撞击诱发的等离子体特性研究

[Study on plasma characteristics from hypervelocity impacts by small space debris](#)

物理学报.2014, 63(1): 019401 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.019401>

电磁监测试验卫星阻滞势分析器探测技术*

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

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)(中国科学院大学, 北京 100190)

(2016年10月10日收到; 2016年12月26日收到修改稿)

依据电磁监测试验卫星的任务要求, 自主研发了等离子体分析仪, 首次实现电离层等离子体原位探测. 作为等离子体分析仪的重要组成部分, 阻滞势分析器主要用于探测电离层等离子体的密度、沿轨道方向漂移速度、温度以及成分等参数. 阻滞势分析器传感器栅网材料选用铍铜, 表面镀金处理, 并通过仿真验证了多层栅网总透过率与理论计算的一致性. 依据技术指标, 详细设计了阻滞势分析器传感器的窗口半径、收集极半径、有效高度及扫描电压等参数. 在电子学电路设计时通过前放电路三个可调量程的设计, 保证了电路测量精度. 在此基础上, 借助意大利国家天体物理研究院行星际物理研究所的地面等离子体环境, 完成了阻滞势分析器的等离子体环境测试. 测试结果表明, 该阻滞势分析器的性能指标满足设计要求, 能够实现电磁监测试验卫星的任务需求.

关键词: 等离子体分析仪, 阻滞势分析器, 电磁监测试验卫星, 离子密度, 电离层扰动

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

DOI: 10.7498/aps.66.079401

1 引言

大量观测资料表明, 地质学、地球物理学和地球化学等的许多现象中, 电磁异常是对短临地震反映最敏感的前兆现象. 地球-大气层-电离层之间的耦合作用, 会使地面出现的一些地震前兆异常信号在向空间传播过程中被放大, 因此在空间较容易观测. 利用空间技术进行地震相关的空间电磁现象的观测, 具有覆盖全面、时间连续的特点, 可较好地反映地震孕育、发生的相关现象^[1].

近年来, 电磁卫星的相关技术及其应用发展迅速. DEMETER 卫星作为全球第一颗专门用于与地震有关电离层扰动研究的卫星, 获得了大量的科研成果^[2-6]. 此外, 俄罗斯 COMPASS-II 卫星、欧空局 Cluster 卫星以及 Swarm 卫星星座的发射, 均为电离层地震前兆观测研究积累了更多的观测数

据和经验^[7].

虽然能够解释地震相关异常现象的地球-大气层-电离层的耦合机制还没能形成完整和统一的观点, 但是地震前电离层异常现象的存在已经取得了较为广泛的认同, 并将会作为地震短临期预测的一种判断参量进行更为深入的研究^[8]. 发射地震电磁卫星形成天地一体化监测系统, 有利于进一步加深对地震电磁前兆及其机理的认识, 并将促进地震电磁科学研究和地震预测领域的发展^[9-11].

电磁监测试验卫星 (CSSES) 是我国计划发射的第一颗用于电离层特性及电离层地震电磁效应研究的空间探测卫星, 轨道高度为 500 km 左右, 其主要科学目标是获取全球电磁场、等离子体、高能粒子观测数据, 提取地震电磁信息, 研究大震短临预测新方法, 探索地震发生机制, 为地震预报实现突破提供基础^[12,13]. 等离子体分析仪作为磁监测试

* 国家科技重大专项 (批准号: Y26604AG90) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zxz@nssc.ac.cn

验卫星的载荷之一,用于测量电离层低能等离子体参数,其探测物理量包括离子密度、离子温度、离子漂移速度、离子成分以及离子密度涨落.实现以下科学目标:

1) 监测震前电离层参数异常(等离子体密度、温度、成分等),从而为电离层-地震耦合关系的研究提供支持;

2) 为电离层物理的研究提供科学探测数据.

电磁监测试验卫星等离子体分析仪将首次实现电离层等离子体原位探测,填补我国此项载荷技术的空白.电磁监测试验卫星等离子体分析仪的指标与代表了国际先进水平的法国 Demeter 卫星^[14]以及美国 DMSP 卫星^[15]的同类仪器的指标对比情况列于表 1.

电磁监测试验卫星等离子体分析仪从功能上可以分为四个部分:阻滞势分析器(RPA)、离子漂移计(IDM)、离子捕获计(ICM)和导体扩展板(MP).阻滞势分析器是等离子体分析仪的重要组成部分,用于探测电离层等离子体密度、沿轨道方向漂移速度(纵向)、温度、成分;离子漂移计探测等离子体的垂直轨道方向(横向)漂移速度;离子捕获

计用于获取高精度、高时空分辨率的离子密度信息以及离子密度涨落信息;导体扩展板用于保持传感器开口处的电场均匀,避免周围差异电场干扰探测结果.电磁监测试验卫星等离子体分析仪整体结构如图 1 所示,图中 X 为卫星飞行方向, Z 为指向地球方向.本文对等离子体分析仪中的阻滞势分析器探测技术进行研究.

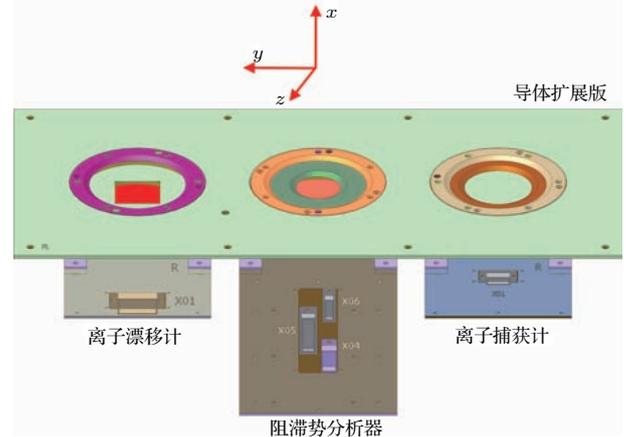


图 1 等离子体分析仪整体结构图

Fig. 1. Composition of the payload plasma analyzing package.

表 1 电磁监测试验卫星等离子体分析仪指标和国际同类仪器指标对比

Table 1. Performance compared with similar international instruments.

序号	项目	电磁监测试验卫星 等离子体分析仪指标	Demeter 同类仪器指标	美国国防气象卫星 DMSP
1	离子成分	H ⁺ , He ⁺ , O ⁺	H ⁺ , He ⁺ , O ⁺	H ⁺ , He ⁺ , O ⁺
2	离子密度	$5 \times 10^2 - 1 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$	$10^2 - 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$	$1 \times 10^1 - 1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$
3	离子密度相对测量精度	优于 10%	10%	10%
4	离子温度	500—10000 K	500—5000 K	500—9000 K
5	离子温度测量相对精度	优于 10%	5%	10%
6	离子沿轨道向漂移速度	-3—3 km/s	0—1.5 km/s	-5—5 km/s
7	离子沿轨道向漂移速度 相对测量精度	±50 m/s	5%	±200 m/s
8	离子垂直于轨道方向漂移速度	-3—3 km/s	±15° (漂移角度)	-2.7—2.7 km/s
9	离子垂直于轨道方向 漂移速度相对测量精度	±20 m/s	~ 0.1° (角度精度)	±50 m/s
10	离子密度涨落 ($\Delta N_i/N_i$)	优于 1×10^{-2}		10%

2 方案设计

2.1 工作原理

在 ZH-1 卫星阻滞势分析器的剖面结构如图 2 所示^[16-18].

卫星相对空间等离子体飞行时,等离子体由阻滞势分析器传感器开口进入仪器.在传感器内部,栅网 G1 和 G2 构成了传感器的窗口,处于仪器地电位,其作用是防止传感器内部的扫描偏压影响环境等离子体的状态.栅网 G5 也处于地电位,用于屏蔽扫描偏压对仪器后端电子学的干扰.栅网 G6 为

“抑制栅网”，相对仪器地保持 -12 V 偏压，其作用是阻止等离子体中的电子到达收集极，同时防止收集极上的二次电子和光电子逃出，以保证收集极探测到的电流完全由等离子体中的离子所形成。G3 与 G4 两层栅网称为“阻滞栅网”，这两层栅网相对仪器地的电压随时间变化，只有高于阻滞偏压(扫描电压)能量的离子才可以进入。随着阻滞栅网的扫描偏压随时间逐渐变化，收集极可以得到离子电流随扫描偏压变化的伏安特性曲线，如图 3 所示。

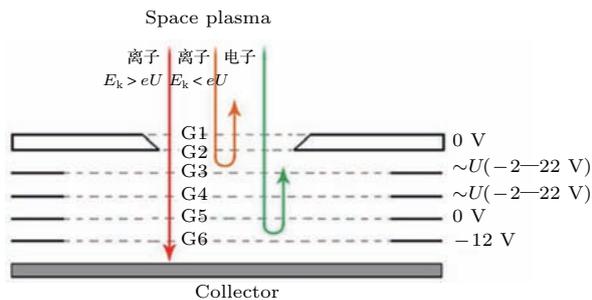


图 2 阻滞势分析器的剖面结构

Fig. 2. Structural diagram of retarding potential analyzer (RPA).

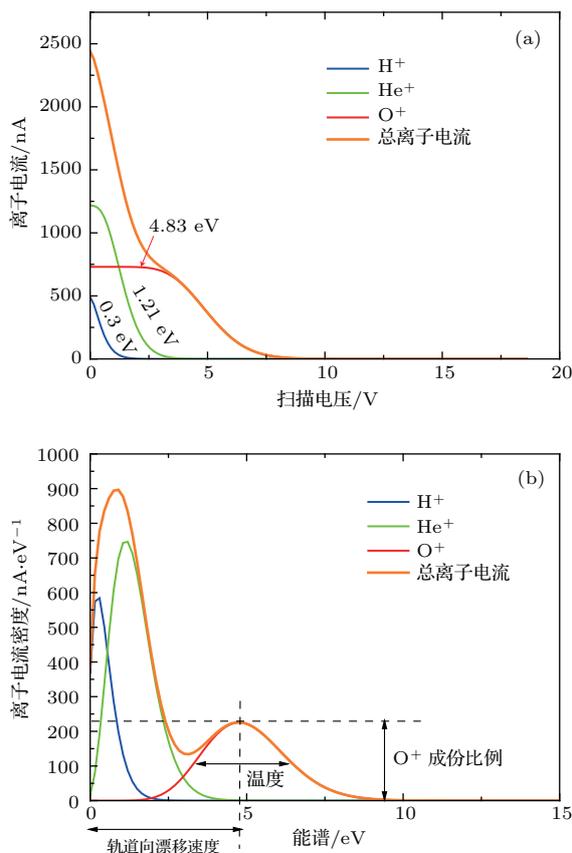


图 3 (网刊彩色) 阻滞势分析器的伏安特性 (a) 积分曲线; (b) 微分曲线

Fig. 3. (color online) I - V characteristic curve of RPA: (a) Integral curve; (b) differential curve.

对于电磁监测试验卫星 500 km 轨道高度的电离层，离子的电离态主要为一价，成分以 O^+ 为主，此外还有少量的 H^+ 、 He^+ 。假设空间中的等离子体符合 Maxwell 分布，则对于第 i 种离子成分（一价），其在阻滞势分析器传感器轴向方向相对卫星符合一维漂移 Maxwell 分布，如 (1) 式所示：

$$f(v_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(v_i - V_r)^2}{2\sigma_i^2}\right), \quad (1)$$

式中， $\sigma_i = \sqrt{kT_i/m_i}$ ， k 为玻尔兹曼常数，且有 $k = 1.38 \times 10^{-23}\text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$ ； T_i 为第 i 种离子的温度， m_i 为第 i 种离子的质量； v_i 为第 i 种离子的运动速度； V_r 为等离子体沿传感器轴向整体相对卫星的速度，即离子法向速度，且有 $V_r = V_s + V_{dX}$ ，其中 V_s 为卫星运动速度(对电磁监测试验卫星，有 $V_s = 7600\text{ m/s}$)， V_{dX} 为等离子体沿卫星轨道方向自身的漂移速度(以进入传感器方向为 $+X$ 向)。当扫描偏压大小为 U 时，第 i 种离子的电流贡献为：

$$\begin{aligned} I_i &= KAeN_i \int_{v_g}^{\infty} \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(v_i - V_r)^2}{2\sigma_i^2}\right) v_i dv_i \\ &= KAe \frac{V_r}{2} N_i \left(1 + \operatorname{erf}(\beta_i f_i)\right) \\ &\quad + \frac{1}{V_r \sqrt{\pi} \beta_i} \exp(-\beta_i^2 f_i^2), \end{aligned} \quad (2)$$

式中， K 对多层栅网的总透过率； A 为传感器窗口面积； e 为单位电荷； N_i 为第 i 种离子的密度； $\beta_i = \sqrt{\frac{m_i}{2KT_i}}$ ； $f_i = V_r - v_g$ ，其中 $v_g = \sqrt{\frac{2e(U + \phi)}{m_i}}$ ； ϕ 为卫星结构地相对空间等离子体的绝对电位； U 为扫描电压。则所有离子种类的总电流贡献为

$$\begin{aligned} I &= \frac{1}{2} KV_r Ae \sum_i N_i \left[1 + \operatorname{erf}(\beta_i f_i)\right] \\ &\quad + \frac{1}{V_r \sqrt{\pi} \beta_i} \exp(-\beta_i^2 f_i^2). \end{aligned} \quad (3)$$

利用图 2 所示伏安特性曲线中的电压 (U)、电流数据 (I)，并根据 (3) 式进行非线性最小二乘拟合，便可得到离子密度、离子温度、离子沿轨道向漂移速度以及各离子成分所占的比例等参数。

2.2 传感器设计

2.2.1 栅网设计和透过率仿真分析

栅网是阻滞势分析器的关键部件，材料选择主要考虑以下几个方面：电导率高、栅网透过率高、机械性能好、磁性低、高弹性、耐腐蚀、耐高温，且要求功函数高，二次电子及光电子发射率低以防止原子

氧腐蚀和离子溅射引起的质量损失. 电磁监测试验卫星阻滞势分析仪栅网材料选用铍铜, 并采用镀金的方法增加表面功函数和抗原子氧腐蚀能力.

栅网网孔尺寸设计原则为: 网丝间距 $l \leq 2\lambda_D$, 其中 λ_D 为等离子体的德拜半径^[19]. 根据国际参考电离层 (IRI) 模型计算得到 500 km 轨道德拜半径的上限和下限, 并综合考虑空间环境扰动时等离子体密度上升会减小德拜半径的值, 阻滞势分析仪的栅网设计方案如图 4 所示, 网孔设计为蜂窝状正六边形小孔, 网丝间距设计为 (1 ± 0.01) mm, 网丝宽度和厚度均设计为 (0.1 ± 0.01) mm, 栅网单层正面透过率设计为 $82.64\% \pm 1.4\%$.

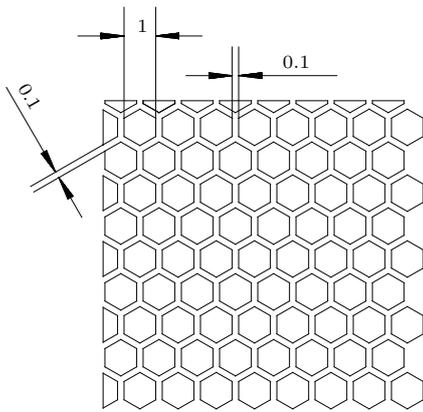


图 4 栅网设计示意图

Fig. 4. The diagram of grid.

电磁监测试验卫星阻滞势分析仪采用 6 层栅网压紧结构, 各层栅网之间采用聚酰亚胺绝缘. 为验证由安装引起的栅网之间相对位置偏移对透过率的影响采用软件 SIMON8.1^[20] 进行仿真模拟分析.

模型中建立两个平行的栅网, 根据电磁监测试

验卫星阻滞势分析器实际情况, 栅网网丝间距为 1 mm, 网丝宽度为 0.1 mm, 两片栅网相距 10 mm. 为了模拟栅网相互之间错位带来的影响, 基于 3 种工况建立两层栅网总透过率的仿真模型, 分别是: 1) 两片栅网严格对齐的情况; 2) 在 Y (纵向) 方向错位半个周期的情况; 3) 在 X 方向 (横向) 和 Y 方向 (纵向) 均错位半个周期的情况. 模拟时设定离子热运动速度符合不同温度 (900 K 和 1750 K) 下的麦克斯韦分布, 并在相对栅网的方向叠加 7.6 km/s 的离子速度分量, 该速度就是模拟卫星速度. 模拟时用程序均匀取样产生 5000 个离子, 并记录模拟后通过栅网的离子数量. 共进行 5 次模拟, 计算获得平均值, 仿真结果如表 2 所列. 结果表明, 900 K 和 1750 K 的离子透过率的模拟结果接近, 并且与理论值 (离子通过单层栅网的概率为 82.64%, 那么离子通过两层栅网的概率理论值是 $82.64\% \times 82.64\%$) 相符. 其中, 透过率误差是由于模拟时离子随机取样造成的.

为验证上述结论, 建立 3 层栅网的模型, 栅网间距 10 mm, 且 3 层栅网横向相互错位. 在中间栅网上加 1 V 电压, 两端栅网为地电位. 设置离子温度为 900 K, 5 次模拟结果如图 5 及表 3 所列. 图 5 中左图是顺着离子运动方向看到的离子轨迹图, 右图是离子从左往右的运动轨迹图. 图中, 由于模拟使用离子数量较多, 离子的轨迹相互叠加后在图上无法分清每个离子的轨迹. 仿真结果表明, 3 层栅网在加一定电压后, 透过率的仿真结果与理论计算结果相符.

以上仿真结果表明, 多层栅网由安装引起的位置偏移对透过率无影响, 多层栅网的总透过率与理论计算一致.

表 2 两层栅网透过率五次仿真结果

Table 2. The simulation results of two layer grid's total transmission rate.

温度	模型种类	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	平均值	误差
900 K	两层栅网严格对齐	67.64%	69.32%	67.78%	68.54%	70.16%	68.69%	1.06%
	Y 方向错位半个周期	67.56%	68.62%	67.44%	68.38%	69.22%	68.24%	0.75%
	X, Y 方向错位半个周期	69.14%	67.92%	68.10%	68.80%	69.10%	68.61%	0.57%
1750 K	两层栅网严格对齐	68.38%	66.94%	68.88%	68.64%	67.72%	68.11%	0.79%
	Y 方向错位半个周期	68.60%	67.02%	68.08%	68.60%	68.00%	68.06%	0.65%
	X, Y 方向错位半个周期	68.18%	67.60%	68.02%	67.76%	67.82%	67.88%	0.23%

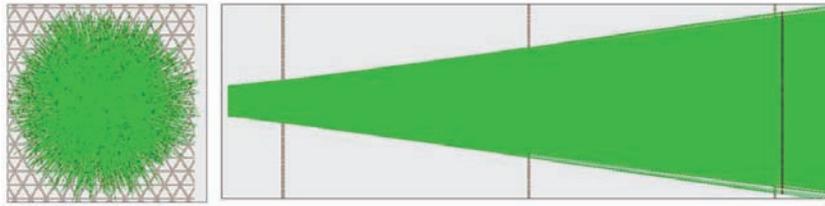


图5 3层栅网仿真结果

Fig. 5. The simulation results of three layer grid's total transmission rate.

表3 3层栅网透过率5次仿真结果

Table 3. The simulation results of three layer grid's total transmission rate.

模拟次第	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次	平均值	误差
三层栅网透过率	55.66%	56.86%	56.16%	56.12%	54.94%	55.95%	0.71%

2.2.2 传感器尺寸设计

阻滞势分析仪传感器尺寸设计的重要依据之一是满足量程低端的精度要求. 在离子密度探测指标的最低端, 为了保证足够的信噪比, 收集到的电流应该不小于 100 pA, 即要求满足如下关系 [21]:

$$KAeV_r \cdot N_i \geq 100 \text{ pA}. \quad (4)$$

由于阻滞势分析器传感器一共6层栅网, 每层透过率 82.64%, 代入 (4) 式计算得 $r \geq 13 \text{ mm}$. (4) 式中各个参数含义与 (2) 式相同, 其中 A 为传感器窗口面积 (πr^2). 为留有一定余量, 阻滞势分析器传感器窗口的半径 r 取值为 20 mm.

设计收集极半径 R 和传感器有效高度 h 时, 考虑空间环境较为极端的情况, 离子温度为 3000 K 时对应 H^+ 的热速度为 7 km/s, He^+ 的热速度为 3.5 km/s, O^+ 离子的热速度为 1.8 km/s. 同时考虑较极端的离子漂移速度 $V_{dY} = 2 \text{ km/s}$, 则需要阻滞势分析器传感器的视场角大于 $\arctan((7 + 2)/7.6) = 49.8^\circ$, 即要求满足如下关系:

$$\arctan((R - r)/h) \geq 49.8^\circ. \quad (5)$$

因此, 电磁监测试验卫星阻滞势分析器传感器窗口半径 $r = 20 \text{ mm}$, 传感器收集极半径 $R = 50 \text{ mm}$, 传感器有效高度 $h = 20 \text{ mm}$, 视场角为 56.3° , 满足上述要求.

2.2.3 扫描电压设计

在 500 km 轨道的电离层环境中, 卫星速度为 7.6 km/s, 电离层中各主要离子成分相对等离子体分析仪的入射能量峰值分别为: H^+ 离子为 0.3 eV, He^+ 离子为 1.21 eV, O^+ 离子为 4.83 eV, 其中最小

能量间隔为 $1.21 \text{ eV} - 0.3 \text{ eV} = 0.91 \text{ eV}$. 离子成分通过能谱的峰值识别来区分, 因此, 若要区分这 3 种成分, 则扫描偏压的范围首先应充分覆盖这 3 个峰值所在的能谱位置, 且扫描步长 (能谱划分) 应小于最小能量间隔 0.91 eV 的一半.

此外, 离子温度引起能谱的展宽, 温度 10000 K 对应的最大能量展宽为 O^+ 离子 $-3.2 \text{ eV} - 4.9 \text{ eV}$, He^+ 离子 $-1.2 \text{ eV} - 2.9 \text{ eV}$, H^+ 离子 $-0.46 \text{ eV} - 1.88 \text{ eV}$. 峰值能量最高的为 O^+ 离子 (4.83 eV), 其能量分布最高扩散到约 10 eV 处, 且离子沿轨道方向漂移 3 km/s 会引起能谱 4.6 eV 的平移, 因此扫描电压上限应大于 15 V. 而 500 K 对应的最小能量展宽为 O^+ 离子 $-0.87 \text{ eV} - 0.96 \text{ eV}$, He^+ 离子 $-0.4 \text{ eV} - 0.5 \text{ eV}$, H^+ 离子 $-0.18 \text{ eV} - 0.27 \text{ eV}$, 因此扫描电压的步长应小于 0.18 V.

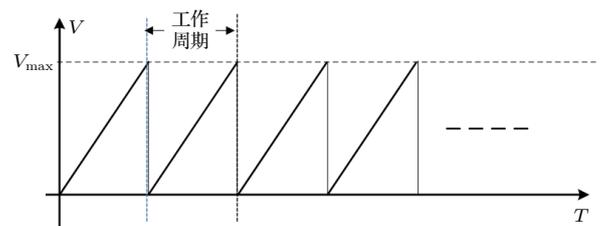


图6 阻滞势分析器扫描电压

Fig. 6. Sweeping voltage of RPA.

综上所述, 阻滞势分析器设计的扫描电压范围从 $-2 \text{ V} \pm 0.1 \text{ V}$ 到 $+20 \text{ V} \pm 0.5 \text{ V}$ (缺省扫描范围为 $0 \text{ V} \pm 0.1 \text{ V}$ 到 $+20 \text{ V} \pm 0.5 \text{ V}$, 可根据在轨测试结果注入指令调整最小电压至 $-2 \text{ V} \pm 0.1 \text{ V}$), 可以充分覆盖 3 种离子的入射能量. 此外, 扫描电压的步长缺省 0.160 V, 且在 0.056—0.179 V 之间可调, 满足最小能量划分的要求. 扫描电压如图 6 所示, 每

个工作周期从最小电压开始, 经过 125 个台阶扫描到最大电压, 而后再从最小值开始扫描.

2.3 电子学设计

阻滞势分析器传感器和电子学电路为一体式设计. 阻滞势分析器的电子学原理框图如图 7 所示, 扫描电压控制电路加载一个连续的扫描电压信号到阻滞栅网, 传感器收集极收集空间等离子体中的离子, 得到一个变化的电流信号. 电流经过前放电路, 输出电压信号, 由现场可编辑门阵列 (FPGA) 采集该信号. 其中, 扫描电压信号是由 FPGA 控制 D/A 转换输出后, 再经电压偏置调整电路和放大电路后加载到阻滞栅网.

根据等离子体分析仪技术指标, 阻滞势分析器传感器探测到的电流信号范围为 140 pA—7 μA, 电流范围很宽, 且低端电流极其微小, 而仪器对电流检测精度要求很高. 由于空间等离子体的变化, 如果始终保持在某一量程会在探测过程出现输出

达到饱和或低于噪声水平, 从而降低数据精度. 电磁监测试验卫星阻滞势分析器解决该难题的途径是在前放电路部分设置了三个可选量程, FPGA 采集传感器输出电压的同时, 需要对采样到的数据进行阈值比对, 通过量程控制, 选择前放电路中合适的量程, 降低噪声, 提高测量精度. 电子学电路噪声测量结果如表 4 所列.

表 4 噪声测量结果

Table 4. The results of electronic noise.

量程	1	2	3
电路噪声/V	1.48×10^{-3}	1.76×10^{-4}	6.57×10^{-5}
测量精度	优于 1.3%	优于 0.9%	优于 0.9%

此外, FPGA 在采集前放输出电压的同时还采集当前扫描电压, 并保存当前量程, 形成阻滞势分析器的原始数据, 经打包后通过 RS422 总线发送到卫星数传分系统. 且仪器在工作过程中随时接收来自卫星星务分系统的间接指令, 并解析执行.

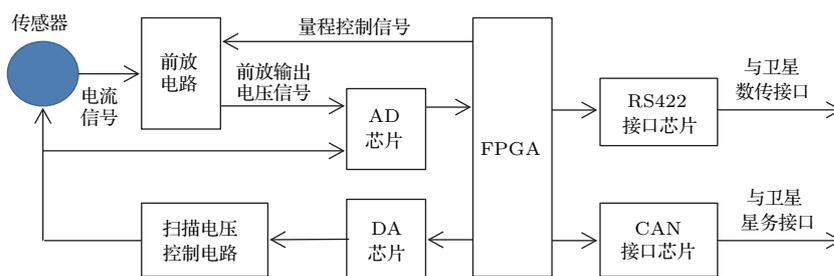


图 7 阻滞势分析器电子学原理框图

Fig. 7. Electronic design diagram of RPA.

在电子学设计过程中, 从元器件选择和控制、降额设计、耐环境设计和关键电路冗余设计等方面采取措施提高可靠性, 并进行可靠性预计, 5 年寿命末期的可靠度为 0.981.

3 地面测试结果分析

3.1 地面测试环境

2015 年 4 月, 根据以上方案自主研发的电磁监测试验卫星等离子体分析仪在意大利国家天体物理研究院行星际物理研究所 (INAF-IAPS) 进行了等离子体环境下的定标测试试验.

意大利 INAF-IAPS 的等离子体实验设备模拟的空间等离子体环境和空间等离子体典型参数的比对如表 5 所列, 表中等离子体罐内参数由意大

利 INAF-IAPS 于 2010 年测量得到. 该设备以氩气 (Ar) 为工作介质, 等离子体源安装在真空罐的一端, 其产生的等离子体环境在真空罐内分布存在着一定的梯度, 即离子密度大小随着与等离子体源距离的增加而减小, 如图 8 所示.

3.2 测试方法和结果

把阻滞势分析器放入真空罐内的等离子体环境中, 利用离子密度在等离子体罐内的梯度分布, 通过改变阻滞势分析仪在等离子体罐内的相对位置, 获取三个密度特征点. 将 3 个特征点测量结果与已知的等离子体环境的梯度分布规律以及意大利 INAF-IAP 参考阻滞势分析器的测量结果进行比对.

表5 电离层等离子体典型参数与等离子体罐内参数对比

Table 5. Comparison between typical ionospheric plasma parameters and the values obtained within the plasma chamber.

电离层				等离子体罐内		
h/km	P/mbar	N/m^{-3}	T_e/K	P/mbar	N/m^{-3}	T_e/K
100	2.7×10^{-4}	1×10^{11}	300			
150	8.0×10^{-6}	3×10^{11}	1000			
200	1.2×10^{-6}	4×10^{11}	2000	约等于 7×10^{-6}	$1 \times 10^{12} - 3 \times 10^{12}$	2000—4000
400	4.0×10^{-8}	1×10^{12}	3000			
500	1.0×10^{-9}	5×10^{11}	3000			

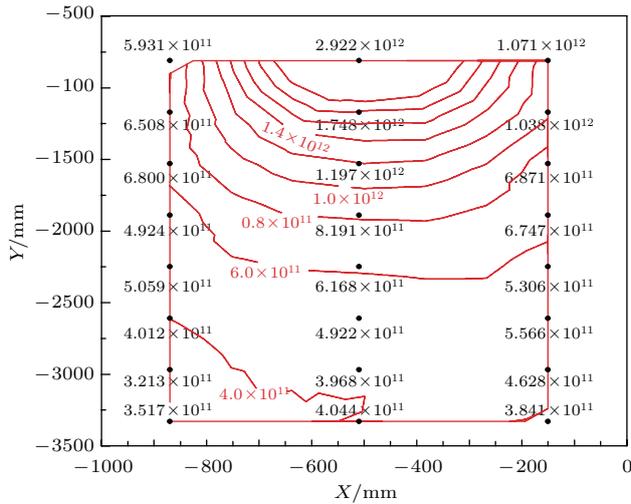


图8 IAPS 等离子体真空罐内的密度分布梯度

Fig. 8. Ion density distribution in IAPS plasma vacuum tank.

试验过程中, 阻滞势分析器安装在等离子体罐内的水平滑轨车上, 通过滑轨车的移动, 可获得阻滞势分析器相对于等离子体源 3, 2.5, 2 m 三个位置处的离子密度. 阻滞势分析器离子密度测量结果如表 6 和图 9 所示 (细实线为设计的阻滞势分析器测量结果, 虚线为 INAF-IAPS 参考阻滞势分析器测量结果). 测试结果表明: 1) 阻滞势分析器测量的 3 个不同位置处的离子密度, 随着相对等离子体源距离的增加而逐渐变小, 符合等离子体罐内等离子体分布的变化规律; 2) 与意大利 INAF-IAPS 参

考阻滞势分析器结果相比, 两者具有相同的梯度变化规律; 3) 阻滞势分析器密度测量精度优于精度设计指标.

在电磁监测试验卫星的轨道, 卫星飞行速度为 7.6 km/s, 则整体处于静态的空间等离子体将以 7.6 km/s 的速度进入传感器. 在意大利 INAF-IAPS 等离子体模拟试验设备内, 离子沿轨道方向漂移速度等效于离子束流的能量, 为了保持等离子体的稳定, 可提供 3 个特征点 10 eV (6.9 km/s), 12 eV (7.6 km/s), 15 eV (8.5 km/s) 进行离子沿轨道方向

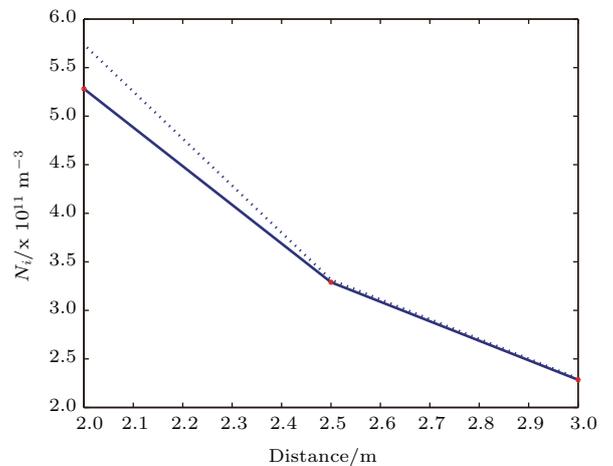


图9 阻滞势分析仪测试离子密度测量结果

Fig. 9. The results of ion density measurements at three positions.

表6 阻滞势分析仪测试在 3 个特征点处的离子密度测量结果

Table 6. The results of ion density measurements at three positions.

与源的距离/m	3	2.5	2
电磁监测试验卫星 RPA 测量结果/ N_i/m^{-3}	2.29×10^{11}	3.29×10^{11}	5.28×10^{11}
意大利 INAF-IAP 参考结果/ N_i/m^{-3}	2.30×10^{11}	3.32×10^{11}	5.74×10^{11}
电磁监测试验卫星 RPA 测量相对精度	0.2%	0.1%	0.08%

表7 阻滞势分析器离子能量(沿轨道方向漂移速度)测量结果
Table 7. The results of ion energy measurements.

纵向速度	10 eV (6.9 km/s)	12 eV (7.6 km/s)	15 eV (8.5 km/s)
电磁监测试验卫星 RPA 测量结果	9.82 eV (6.922 km/s)	11.8 eV (7.598 km/s)	14.73 eV (8.478 km/s)
意大利 INAF-IAP 参考结果	10.5 eV	12.2 eV	15.1 eV
电磁监测试验卫星 RPA 测量相对精度	1.2 m/s	0.6 m/s	0.9 m/s

漂移速度的测量. 离子能量(沿轨道方向漂移速度)特征点测试结果如表7和图10所示. 通过沿轨道方向漂移速度测量结果可知: 1) 3个特征点测量结果与等离子体源输出变化趋势均一致; 2) 3个特征点测量结果和与意大利 INAF-IAPS 参考阻滞势分析器基本一致; 3) 阻滞势分析器纵向测量精度远优于精度指标.

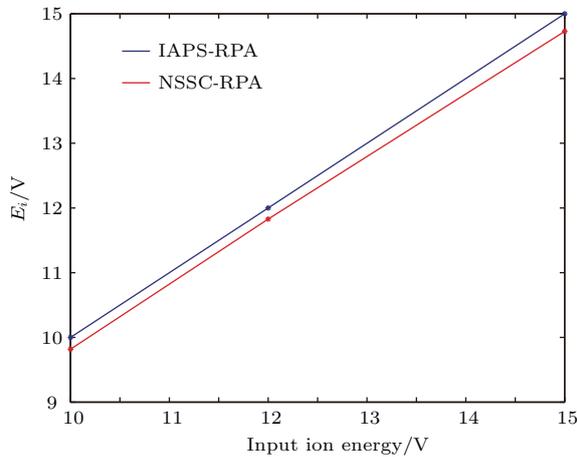


图10 (网刊彩色) 阻滞势分析器测试离子能量(纵向漂移速度)测量结果
Fig. 10. (color online) The results of ion energy measurements.

此外, 由于意大利 INAF-IAP 真空罐内离子的存在时间很短, 离子温度达不到平衡态, 约为300 K左右, 超出了等离子体分析仪 RPA 的测量下限, 因此离子温度不具可测性.

4 结 论

依据电磁监测试验卫星的任务要求, 详细设计了阻滞势分析器的探测技术方案, 并自主完成了阻滞势分析器的研制工作. 在此基础上, 借助意大利国家天体物理研究院行星际物理研究所的等离子体环境, 进行了阻滞势分析器的地面环境测试, 结果表明该阻滞势分析器的性能指标满足设计要求.

等离子体分析仪作为电磁监测试验卫星的载荷之一, 将首次实现电离层等离子体原位探测. 利用卫星技术进行地震相关的电离层等离子体参数的监测, 具有覆盖全面和时间连续的特点, 对探索地震孕育、发生的相关现象有重要意义. 作为等离子体分析仪的重要组成部分, 阻滞势分析器所获得的电离层等离子体的密度、温度以及成分等参数, 对于监测震前电离层参数异常起到重要的指导作用, 同时可为电离层-地震耦合关系及电离层物理的研究提供科学探测数据.

参考文献

- [1] Zhao G Z, Chen X B, Cai J T 2007 *Prog. Geophys.* **22** 667 (in Chinese) [赵国泽, 陈小斌, 蔡军涛 2007 地球物理学进展 **22** 667]
- [2] Yao L 2011 *Postdoctoral Research Report* (Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration) (in Chinese) [姚丽 2011 博士后研究报告 (北京: 中国地震局地球物理研究所)]
- [3] Liu J, Huang J P, Zhang X M, Shen X H 2013 *Acta Seismol. Sin.* **35** 72 (in Chinese) [刘静, 黄建平, 张学民, 申旭辉 2013 地震学报 **35** 72]
- [4] Yan R, Wang L W, Hu Z, Liu D P, Zhang X G, Zhang Y 2013 *Acta Seismol. Sin.* **35** 498 (in Chinese) [颜蕊, 王兰炜, 胡哲, 刘大鹏, 张兴国, 张宇 2013 地震学报 **35** 498]
- [5] Nilupar T, Zhang Y X 2012 *Earthquake* **32** 103 (in Chinese) [尼鲁帕尔·买买吐孙, 张永仙 2012 地震 **32** 103]
- [6] SarKar S, Choudhary S, Sonakia A, Vishwakarma A, Gwal A K 2012 *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **12** 671
- [7] Wang L W, Shen X H, Zhang Y, Zhang X G, Hu Z, Yan R, Yuan S G, Zhu X H 2016 *Acta Seismol. Sin.* **38** 376 (in Chinese) [王兰炜, 申旭辉, 张宇, 张兴国, 胡哲, 颜蕊, 袁仕耿, 朱兴鸿 2016 地震学报 **38** 376]
- [8] Yan R 2010 *Ph. D. Dissertation* (Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration) (in Chinese) [颜蕊 2010 博士学位论文 (哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所)]
- [9] Ding J H, Shen X H, Pan W Y, Zhang J, Yu S R, Li G, Guan H P 2006 *Chin. J. Radio Sci.* **21** 791 (in Chinese) [丁鉴海, 申旭辉, 潘威炎, 张晶, 余素荣, 李纲, 关华平 2006 电波科学学报 **21** 791]

- [10] Jiao Q S, Yan R, Zhang J F 2011 *Earthquake* **31** 68 (in Chinese) [焦其松, 颜蕊, 张景发 2011 地震 **31** 68]
- [11] Yang F, Shen X H, Wu Y, Zhuo L 2008 *Spacecraft Eng.* **17** 68 (in Chinese) [杨芳, 申旭辉, 吴云, 卓林 2008 航天器工程 **17** 68]
- [12] Shen X H, Wu Y, Shan X J 2007 *Rec. Dev. World Seismo.* **8** 38 (in Chinese) [申旭辉, 吴云, 单新建 2007 国际地震动态 **8** 38]
- [13] Shen X H, Zhang X M 2009 *The 2nd Space Weather Symposium* (in Chinese) [申旭辉, 张学民 2009 第二届全球华人空间/太空天气科学大会]
- [14] Berthelier J J, Godefroy M, Leblanc F, Seran E, Peschard D, Gilbert P, Artru J 2006 *Planet Space Sci.* **54** 487
- [15] Park J, Min K W, Kim V P 2008 *Adv. Space Res.* **41** 650
- [16] Jiao W X 2002 *Space Exploration* (Beijing: Peking University Press) p217 (in Chinese) [焦维新 2002 空间探测 (北京: 北京大学出版社) 第 217 页]
- [17] Rich F J 1994 *Users Guide for the Topside Ionospheric Plasma Monitor (SSIIES, SSIIES-2 and SSIIES-3) on Spacecraft of the Defense Meteorological Satellite Program* (Massachusetts: Air Force Phillips Laboratory, Hanscom AFB)
- [18] Heelis R A, Hanson W B 1998 *Measur. Tech. Space Plasmas: Geophys. Monogr. Ser.* **102** 61
- [19] Marrese C M, Majumdar N, Haas J M 1997 *Proceedings of the 25th International Electric Propulsion Conference* Cleveland, OH, August 24–28, 1997, p24
- [20] Dahl D A 2000 *SIMION 3D version 70 user's manual, INEEL-95/0403* (Idaho: Idaho national engineering and environment laboratory)
- [21] Feng Y B 2011 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: University of Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [冯宇波 2011 博士学位论文 (北京: 中国科学院大学)]

Research on retarding potential analyzer aboard China seismo-electromagnetic satellite*

Zheng Xiang-Zhi^{1)2)3)†} Zhang Ai-Bing¹⁾²⁾ Guan Yi-Bing¹⁾²⁾ Liu Chao¹⁾²⁾
Wang Wen-Jing¹⁾²⁾ Tian Zheng¹⁾²⁾ Kong Ling-Gao¹⁾²⁾ Sun Yue-Qiang¹⁾²⁾

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

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

3) (University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

(Received 10 October 2016; revised manuscript received 26 December 2016)

Abstract

China seismo-electromagnetic satellite (CSES) is the first space-based platform of three-dimensional earthquake monitoring system in china. Plasma analyzing package (PAP) is one of scientific payloads aboard on CSES, which is the first application to the field of Chinese satellite. The main scientific objective of PAP is to measure ion density, ion temperature, ion composition and ion drift velocities (parallel and perpendicular to the direction of the satellite flight on orbit), and ion density fluctuation in the ionosphere. The PAP payload is composed of four parts, including retarding potential analyzer (RPA), ion drift meter, ion capture meter, and metal plate. The RPA is used to test ion density, ion temperature, ion composition and ion drift velocity (parallel to the direction of the satellite flight on orbit).

The detailed design process of the sensor of RPA is described in this paper. The grid of RPA sensor is made of Beryllium copper, plated with gold to ensure uniform surface work function, and to prevent space atomic oxygen from eroding. The design value of the transmission rate of grid is $82.64\% \pm 1.4\%$, with taking into account the Debye length on the orbit of satellite. And the total transmission rate of multilayer grid for RPA is verified by SIMON simulation experiment. To ensure the accuracy of RPA, the radii of sensor window and sensor collector are designed to be 20 mm and 50 mm respectively, and the height of sensor is 20 mm. The sweeping voltage ranges from -2 V to 20 V. And the step of sweeping voltage is adjustable between 0.056 and. 179 V.

In this paper electronic design of RPA is also discussed. The electronic box is composed of preamplifier circuit, digital logical circuit, satellite interface circuit, etc. The sweeping voltage and the signal acquisition are controlled by field-programmable gate array. The design of three measurement ranges in digital logical circuit improves RPA measurement accuracy, which is better than 1.3% in the full range.

In addition, the method of testing the plasma environment and the testing results are introduced. The plasma environment test of the RPA payload is carried out in INAF-IAPS. The performance of ion density measurement is validated by testing different ion densities in a vacuum tank, through changing three different distances between RPA and the plasma source. And the ion drift velocity measurement is verified by testing three different ion energies of the plasma source. Furthermore, the RPA test data are consistent with the test data from the INAF-IAPS reference RPA. The experimental results show that the detector has good performances and will contribute much to monitoring the space plasma parameters.

Keywords: plasma analyzing package, retarding potential analyzer, seismo-electromagnetic satellite, ion density, ionospheric disturbances

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

DOI: 10.7498/aps.66.079401

* Project supported by the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. Y26604AG90).

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