

## 嫦娥一号卫星太阳风离子探测器数据分析\*

石红† 田立成 杨生胜

(兰州空间技术物理研究所, 真空低温技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

(2013年10月7日收到; 2013年12月11日收到修改稿)

探月航天器与月球周围等离子体环境相互作用, 表面将出现充放电效应, 给航天器带来很多不利影响. 表面充电电位对充放电的影响至关重要. 评估探月航天器的充放电效应, 首先需获得月球周围等离子体环境数据. 嫦娥一号上搭载的两台太阳风离子探测器 SWIDA/B 是用来观测月球 200 km 轨道附近等离子体环境的探测仪器, 获得了月球附近的太阳风速度、密度和温度. 本文对 2008 年 6 月一个月内太阳风离子探测器 SWIDA 机获得的离子微分通量进行统计平均, 得到太阳风离子微分通量能谱, 并计算得到了月球 200 km 附近的太阳风速度 ( $300.00\text{--}600.00\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ )、密度 ( $1\text{--}10\text{ cm}^{-3}$ ) 和温度 ( $1\text{--}20\text{ eV}$ ). 最后采用等效电路模型的方法计算得到了探月航天器表面充电电位范围为  $-7\text{--}70\text{ V}$ .

**关键词:** 探月, 等离子体环境, 航天器充电, 充放电效应

**PACS:** 96.50.Ci, 95.55.Pe, 94.05.Jq

**DOI:** 10.7498/aps.63.069601

## 1 引言

20 世纪 60 和 70 年代发射的绕月卫星搭载的和放置在月球表面的等离子体设备观测了月球周围的低能带电粒子<sup>[1]</sup>, 在这个时期, 月球等离子体环境有了许多新发现. 尽管后来发射了很多探月卫星, 但是绝大多数用来测绘月球表面<sup>[2]</sup>, 除了美国的 Lunar Prospector (LP) 卫星进行过低能电子测量, WIND 经过月球附近时获得了月球尾区的等离子体数据. 2007 年 9 月 14 日, 日本发射的探月卫星 SELENE 搭载的 PACE 测量了距离月球表面 100 km 处的太阳风等离子体参数<sup>[3]</sup>. 2007 年 10 月 24 日, 我国发射了首颗月球探测器嫦娥一号 (Chang'E-1), 获得了大量在轨数据, 其中太阳风离子探测器数据对于分析绕月轨道的等离子体环境具有重要价值. 嫦娥二号卫星也搭载了离子探测器用来研究其在轨运行期间的太阳活动高峰年的太阳风离子的通量、成分、能谱及其随时空的变化特征.

美国发射的 LP 利用电子发射器 (electron reflectometer, ER) 测得月球附近的等离子体参数<sup>[4]</sup>. LP 为月球极轨航天器, 绕月周期为 2 h, 每月对月球实施两次全范围探测, 采集了 18 个月份, 轨道高度为 20—115 km. 1998—1999 年期间获得的 ER 数据用来计算电子密度 ( $n_e$ ) 和温度 ( $T_k$ ) 在快速太阳风 ( $650\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 中为  $5\text{ cm}^{-3}$  和 12 eV, 慢速太阳风 ( $400\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 中为  $10\text{ cm}^{-3}$  和 9 eV. WIND 搭载的 SWE 等离子体设备利用法拉第杯测量太阳风关键参数包括离子速度、密度和温度<sup>[5,6]</sup>, 1994 年 12 月 27 日, WIND 航天器经过月球尾区, 在月球后方 6.5 倍于月球半径距离处, 法拉第杯测得到的太阳风参数如下: 质子速度  $200\text{--}1250\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 质子数密度  $0.1\text{--}200\text{ cm}^{-3}$ , 热速度  $0\text{--}200\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $\alpha$  离子与质子数密度比例  $0\text{--}100\%$ . SWE 观察到尾区边缘到中心等离子体密度呈指数下降, 月球后面有两股冷离子流注入到等离子体尾区.

尽管国际上已有多多个探测计划对月球附近的等离子体环境进行了探测, 但是仍有诸多月球与周围等离子体相互作用、探月卫星处在等离子体

\* 真空低温技术与物理重点实验室基金 (批准号: 9140C550209120C5501) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: hongshi1477@163.com

中有可能遭遇的环境效应等基础问题没有得到解决. 本文选取了嫦娥一号部分太阳风离子探测器数据, 分析了月球表面 200 km 处的太阳风等离子体的主要参数, 包括太阳风等离子体密度、温度和速度, 用来研究太阳活动与地月空间及近月空间环境相互作用、近月空间太阳风环境引起的空间效应, 为后续探月工程提供环境科学数据. 最后本文利用电流平衡方程评估了探月任务可能遭遇的卫星表面充电效应.

## 2 探测原理及计算方法

Chang'E-1 搭载了两台具有相同设计、性能完全一样的太阳风离子探测器 SWIDA 和 SWIDB, 探测器采用半球形静电分析器原理<sup>[7]</sup>, 太阳风离子探测器由传感器和电子学电路两部分组成, 传感器包括准直器、半球形静电分析器和微通道板; 电子学电路包括阶梯高压电源、高压电源、前置放大器、数字采集处理系统及电源板. 基本原理为: 入射的太阳风粒子和其他低能粒子被准直器准直进入静电分析器, 满足一定能量 ( $E/q$ ) 范围的离子才可以经过分析器的通道到达微通道板入射端面, 产生电子发射, 并经过多次倍增放大输出电子流. 通过静电分析器极板上阶梯电压的扫描可以获得一定空间范围太阳风离子的  $E/q$  谱. 通过离子的  $E/q$  谱分布可以获得太阳风离子的速度、温度和数密度等参数. 传感器瞬时视场  $6.7^\circ \times 180^\circ$ , 将平面上  $180^\circ$  的方向范围分为 12 份, 能量范围为 0.04—20 keV, 近对数地划分为 48 个能道, 所以 SWID 在任一时刻接收到的数据就组成一个  $48 \times 12$  的矩阵.

纵观整个 SWIDA 探测器在 2007 年 12 月到 2008 年 8 月的在轨数据, 发现 2007 年 12 月, 2008 年 1 月和 2008 年 6 月的数据比较完整, 数据结构完全一致. 且 Chang'E-1 探测器完成一次全月覆盖的周期和月球绕地公转的周期相同, 均为 1 个月左右, 另外, 每个月的数据也基本相似. 因此, 在分析近月轨道太阳风等离子体环境时, 重点选取了 2008 年 6 月 (2008 年 6 月 1 日 04 : 08 : 18—2008 年 7 月 1 日 00 : 53 : 38) 一个月内太阳风离子探测器 SWIDA 机数据.

首先对 12 个极角内的微分通量进行平均, 得到太阳风离子微分通量能谱, 并估算太阳风参数 (速度、等离子体密度和温度). 对质子能谱进行统

计平均, 求出质子平均动能  $E_k$ , 速度由下式求得:

$$u = \sqrt{\frac{2E_k}{m_i}}. \quad (1)$$

质子温度由其对太阳风速度的拟合关系求得<sup>[8]</sup>:

$$T_p = -0.240U^2 + 836U - 213000, \quad (2)$$

其中温度单位为 K, 速度单位为 km/s.

太阳风等离子体整体呈电中性, 则  $n_e = n_i = n$ , 即电子密度  $n_e$ , 离子密度  $n_i$  一致, 都等于等离子体密度. 则太阳风等离子体密度可由下式计算给出:

$$n = \frac{J}{v} = \int_{40 \text{ eV}}^{20 \text{ keV}} \frac{F_i dE}{v_i} = \sum_{i=1}^{i=48} \frac{(F_i \times \Delta E_i)}{v_i}, \quad (3)$$

其中  $J$  为离子流密度 ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $v_i$  为太阳风速度 (km/s),  $F_i$  是离子微分通量 ( $\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{keV}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ),  $\Delta E_i$  是每个能道的宽度.

## 3 太阳风等离子体参数结果与讨论

图 1 给出了 2008 年 6 月 1 日 04 : 08 : 18—06 : 15 : 31 的离子微分通量, 这段时间内月球的 GSE 坐标约为  $(45R_E, -34R_E, 5R_E)$ , 根据地球磁层理论<sup>[9]</sup> (见图 2), 可知月球此时处于太阳风中. 图 1(a) 用不同颜色表示太阳风离子通量的大小, 04:40:36 大约 1697 eV 处出现了通量最大值约为  $4.70 \times 10^6 \text{ keV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ , 此时太阳风离子探测器 SWIDA 太阳入射角 ( $74^\circ, 164^\circ, 92^\circ$ ) 图 1(b) 是 04 : 40 : 36 太阳风离子微分通量能谱, 能量为 1697 eV 的太阳风离子微分通量最大, 对其进行统计平均计算出离子平均动能约为 1672 eV, 太阳风速度约为  $566.00 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , 等离子体温度约为  $1.80 \times 10^5 \text{ K}$  (约 6 eV), 密度约为  $1.7 \text{ cm}^{-3}$ , 符合太阳风等离子体的特征<sup>[10]</sup>.

接下来的两天内离子微分通量时间分布和微分通量能谱基本上没有变化, 等离子体温度波动不明显. 直至 6 月 3 日, 太阳风离子微分通量出现了明显的双峰分布, 如图 3 所示.

图 3 体现出了典型太阳风等离子体的特征 (月球 GSE 坐标约为  $(55R_E, -6R_E, 5R_E)$ ), 1317 eV 和 2647 eV 附近分别出现了一个峰值, 初步判断这两个峰是由质子和  $\alpha$  粒子造成的, 其平均通量分别为  $7.90 \times 10^6 \text{ keV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$  和  $1.20 \times 10^5 \text{ keV} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ ; 在太阳风等离子体

中, 质子密度比 $\alpha$ 粒子高两个量级, 占据主导地位. 通过计算可知太阳风速度约为 $498.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ , 等离子体温度约为 $1.40 \times 10^5 \text{ K}$  (约 $12 \text{ eV}$ ), 等离子体密度约为 $2.40 \text{ cm}^{-3}$ .

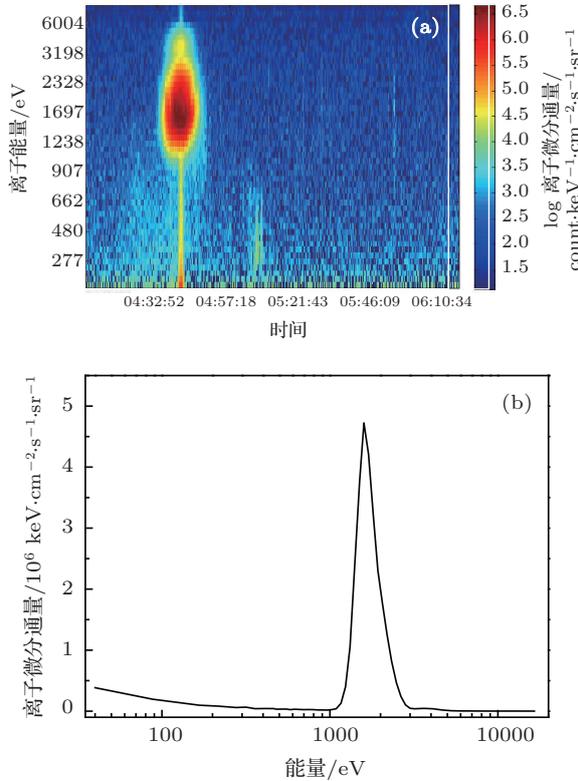


图1 (网刊彩色) 2008年6月1日04:08:18—06:15:31微分通量(a)和04:40:36微分能谱(b)

6月5日太阳风离子微分通量分布如图4(a)所示, 这段时间内离子微分通量密度增大到 $10^7 \text{ keV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ , 图4(b)中861 eV处达到峰值 $1.00 \times 10^7 \text{ keV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ , 在1593 eV附近达到峰值 $3.30 \times 10^5 \text{ keV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ . 计算得到太阳风速度约为 $406.00 \text{ km/s}$ , 等离子体温度约为 $8.58 \times 10^5 \text{ K}$  (约 $7.40 \text{ eV}$ ), 太阳风等离子体密度是 $3.90 \text{ cm}^{-3}$ .

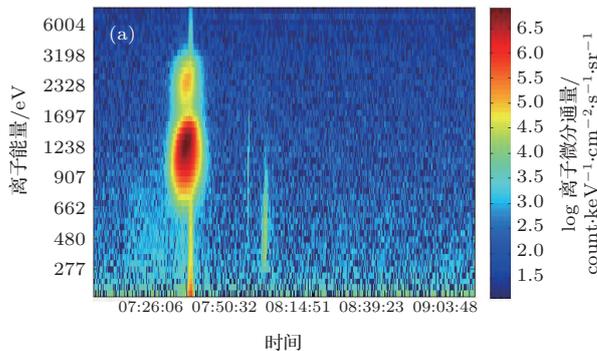


图3 (网刊彩色) 2008年6月3日07:01:42—09:08:53微分通量(a)和07:33:00微分能谱(b)

随后等离子体温度继续降低, 如图5所示, 至6月13日17:14:38等离子体温度降为 $1.97 \times 10^5 \text{ K}$  (约 $1.70 \text{ eV}$ ), 密度约为 $4.50 \text{ cm}^{-3}$ , 太阳风速度约为 $305.00 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ .

2008年6月13日19:21:53时间段内太阳风离子分布明显展宽, 21:58:25的能谱如图6(b)所示, 在358 eV处达到峰值 $1.70 \times 10^7 \text{ keV}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{sr}^{-1}$ , 经计算得太阳风速度约为 $296.00 \text{ km/s}$ , 等离子体温度约为 $1.30 \text{ eV}$ , 密度约为 $9.50 \text{ cm}^{-3}$ . 此后太阳风离子微分通量逐渐降低, 其速度一直增大, 到图7所示的2008年6月15日15:53:55达到 $587.00 \text{ km/s}$ , 等离子体温度为 $2.0 \times 10^5 \text{ K}$  (约 $17 \text{ eV}$ ), 密度约为 $1.40 \text{ cm}^{-3}$ . 月球GSE坐标 $(-52R_E, 35R_E, 5R_E)$ , 处于地球磁鞘中.

自17日12:25:37开始, 太阳风离子微分通量分布发生了显著变化, 图8给出了14:32:52—16:40:03微分通量, 这段时间内月球的GSE坐标约为 $(-62R_E, 13R_E, -5R_E)$ , 处在地球磁尾中. 这样的图形结构一直持续到20日14:38:43, 之后恢复到如图8所示的太阳风等离子体特征.

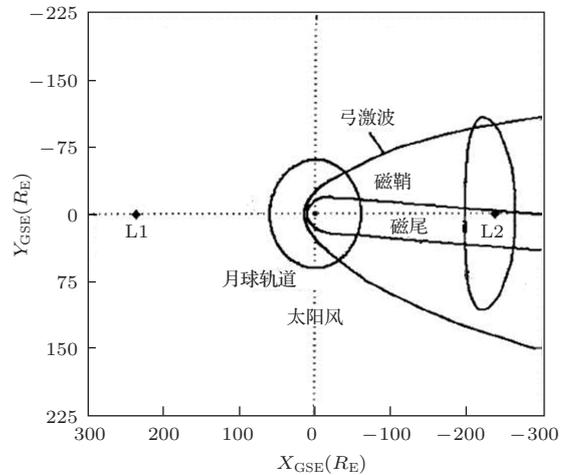
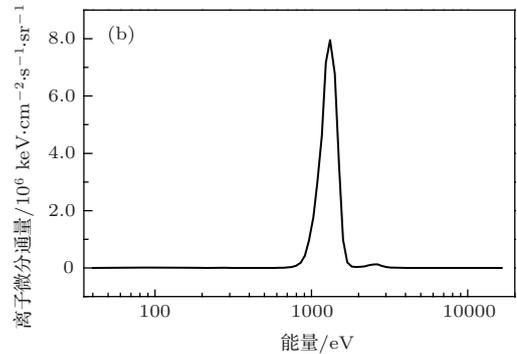


图2 月球在GSE坐标中的位置



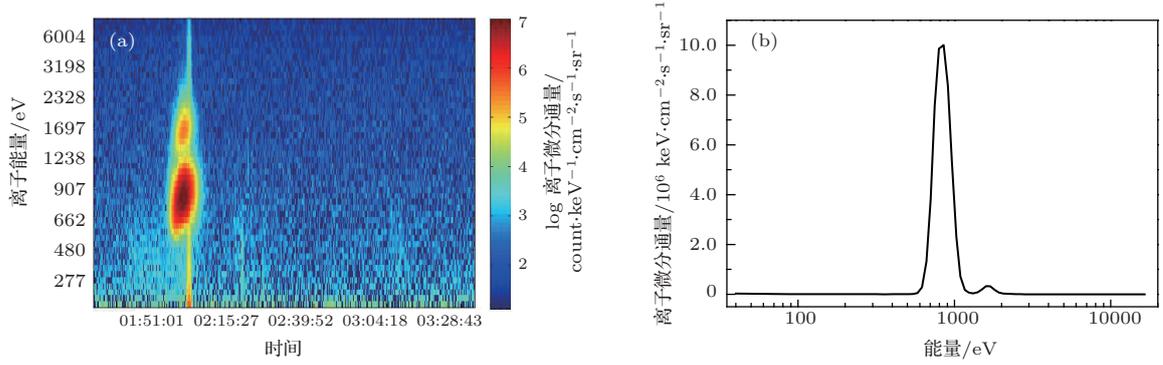


图4 (网刊彩色) 2008年6月5日01:26:34—03:33:17微分通量(a)和01:56:24微分能谱(b)

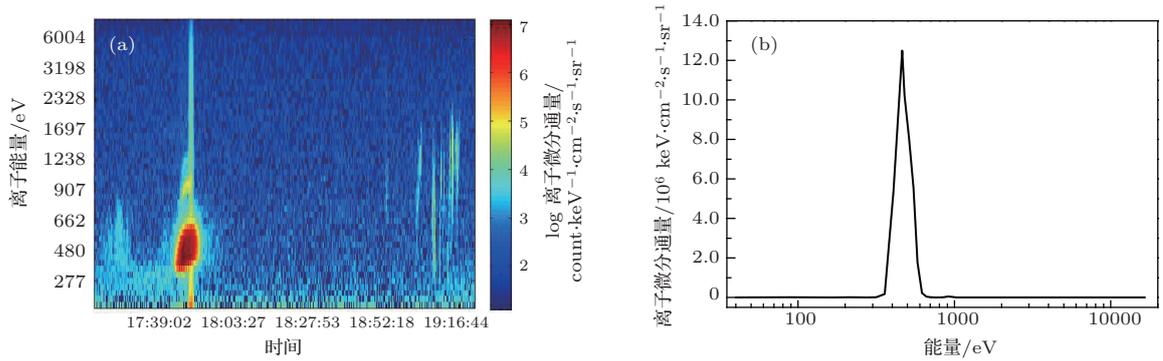


图5 (网刊彩色) 2008年6月13日17:14:38—19:21:52微分通量(a)和17:44:39微分能谱(b)

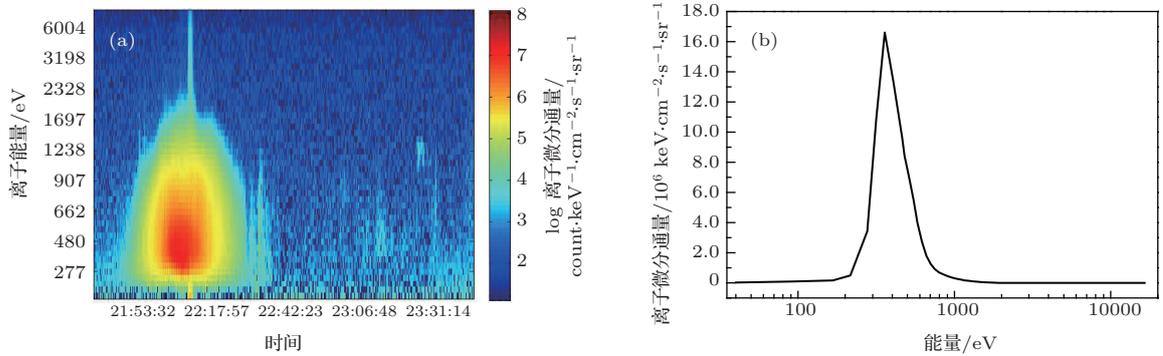


图6 (网刊彩色) 2008年6月13日21:29:07—23:36:20微分通量(a)和21:58:25微分能谱(b)

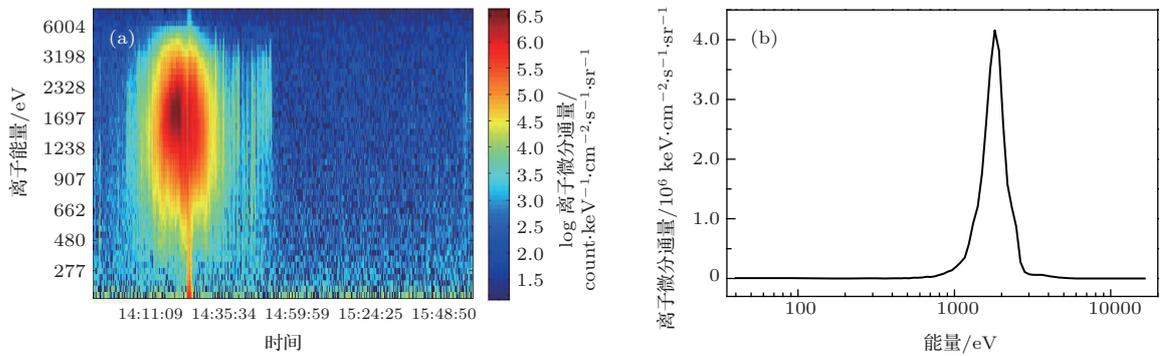


图7 (网刊彩色) 2008年6月15日13:46:41—15:53:55微分通量(a)和14:14:05微分能谱(b)

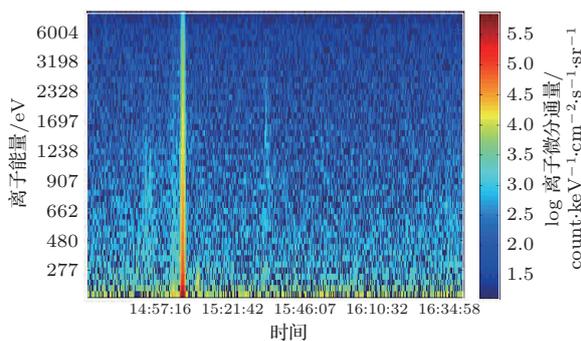


图8 (网刊彩色) 2008年6月17日14:32:52—16:40:03微分通量

Chang'E-1 离子探测器探测得到的月球附近太阳风等离子体参数与 LP 和 WIND 航天器探测得到的结果在同一个数量级, Chang'E-1 探测得到的月球附近太阳风等离子体参数与国外探测数据基本一致, 详见引言部分 LP 和 WIND 航天器探测数据, 这验证了太阳风离子探测器可以达到获得月球附近太阳风速度、密度和温度的科学目标, 同时也验证了计算方法的可行性.

#### 4 探测器表面充电电位计算

表面带电是探测器在轨运行期间与空间等离子体环境相互作用而发生的静电电荷积累的现象. 探测器运行在空间等离子体辐射环境中时, 等离子体与探测器表面材料相互作用, 将使探测器出现不同程度的表面充/放电效应<sup>[11]</sup>. 探测器表面充电电位的计算可以采用等效电路模型、气体动力学模型和 Poisson-Vlasov 模型的方法进行求解<sup>[12,13]</sup>, 其中, 等效电路模型的方法处理问题较为直观, 本文以此方法估算月球探测器表面电位. 太阳风等离子体中探测器表面充电过程如图 9 所示.

根据电流平衡方程<sup>[12,14]</sup>

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{d\sigma}{dt} A = C \frac{dV}{dt} = \sum_k I_k = 0,$$

即

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dt} &= \sum_k I_k \\ &= I_{\text{入射离子}}(V) - I_{\text{入射电子}}(V) + I_{\text{反射离子}}(V) \\ &\quad + I_{\text{传导电流}}(V) + I_{\text{离子二次电子}}(V) \\ &\quad + I_{\text{光电子}}(V) + I_{\text{人为电流源}}(V), \end{aligned} \quad (4)$$

假设等离子体为热平衡中性等离子体, 即  $T_e \sim T_i$ ,  $n_e \sim n_i$ ,  $m_e/m_i \sim 1800$ , 忽略二次电子发射、光

电子发射和迎风面通量, 则平衡条件下充电电位约为

$$\begin{aligned} V &= -\frac{kT_e}{e} \ln \left[ \left( \frac{T_e}{T_i} \frac{m_i}{m_e} \right)^{1/2} \left( \frac{n_e}{n_i} \right) \right] \\ &\sim -\frac{kT_e}{e} \times 3.74. \end{aligned} \quad (5)$$

根据 Chang'E-1 数据分析得到 2008 年 6 月份 Chang'E-1 轨道等离子体温度在 1.8—20 eV 之间, 在忽略二次电子发射、光电子发射和迎风面的情况下, 粗略估算太阳风等离子体对探测器的充电电位在 -7 V—70 V 之间, 月球尾区充电这类复杂的细节问题还需要建立更加完善的模型进行详细研究.

太阳风等离子体的能量不足以对材料产生体损伤, 但是可以降低表面热控涂层的性能以及绕月卫星、着陆器等结构的热控系统薄膜材料的完整性<sup>[15]</sup>, 在探测器表面产生溅射和吸附化学活性粒子造成表面污染, 导致探测器表面性能恶化, 使太空望远镜等外露环境中的光学部件受到损伤而导致成像能力显著下降.

这样的充电水平会影响航天器上科学仪器的测量, 月球探测器表面充电产生干扰粒子、干扰信号污染测量环境, 影响科学任务的正常进行, 导致测量数据不准确, 探月卫星充电造成几十伏的浮动电位会使离子探测器难以探测到周围等离子体的冷组分 (几个 eV).

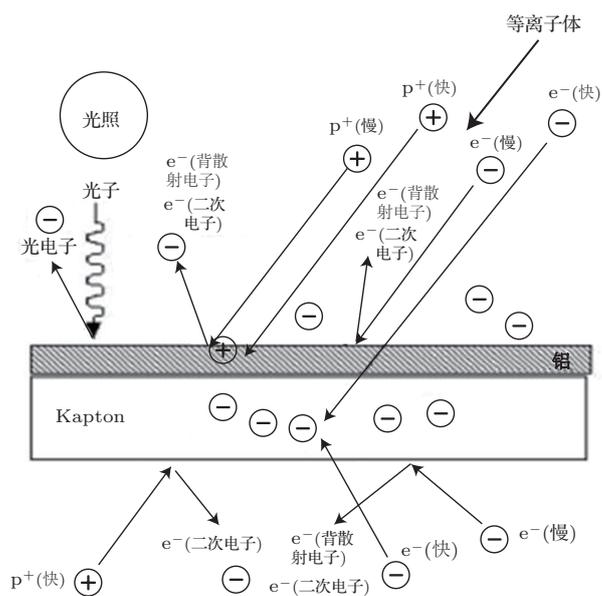


图9 探测器表面充电过程示意图

## 5 结 论

通过分析2008年6月份太阳风离子体探测器SWIDA机在轨数据可知, Chang'E-1探测轨道上2008年6月的太阳风速度在300.00—600.00 km/s之间, 行星际空间和地球磁鞘层中等离子体温度范围约为1—20 eV, 密度范围约1—10 cm<sup>-3</sup>, 太阳风离子包含质子和 $\alpha$ 粒子, 质子微分通量比 $\alpha$ 粒子高两个数量级.

2008年6月内Chang'E-1遭遇的等离子体微分通量随着时间和空间位置的变化呈现出三种不同的结构, 分别对应着三种空间位置, 即行星际空间、磁鞘和磁尾. Chang'E-1探测器处在行星际空间太阳风中时间最长(先后超过20天), 大约从2008年6月13日开始到6月17日和20日到23日Chang'E-1探测器处在地球磁鞘中, 大约从6月17日到20日Chang'E-1探测器处在地球磁尾中.

在行星际空间和地球磁鞘中探月航天器充电电位约在-7—-70 V之间, 这样的充电水平可能会影响表面热控材料的性能和离子探测器探测低能带电粒子, 在今后的探月任务中应该予以考虑.

## 参考文献

- [1] Zelenyi L M, Zakharov A V, Zakutnyaya O V 2011 *Solar Syst. Res.* **45** 697
- [2] Zhu M H, Liu L G, Xu A A 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 490
- [3] Saito Y, Yokota S, Asamura K, Tanaka T, Akiba R, Fujimoto M, Hasegawa H, Hayakawa H, Hirahara M, Hoshino M, Machida S, Mukai T, Nagai T, Nagatsuma T, Nakamura M, Oyama K, Sagawa E, Sasaki S, Seki K, Terasawa T 2008 *Earth Planets Space* **60** 375
- [4] Stubbs T J, Halekas J S, Farrell W M 2007 *45th AIAA Aerospace Science Meeting* Reno NV, January 8–11, 2007 p37
- [5] Ogilvie K W, Chornay D J, Fritzenreiter R J, Hunsaker F, Keller J, Lobell J, Miller G, Scudder J D, Sittler E C, Torbert R B, Bodet D, Needell G, Lazarus A J, Steinberg J T, Tappan J H, Mavretic A, Gergin E 1995 *Space Sci. Rev.* **71** 55
- [6] Ogilvie K W, Steinberg J T, Fritzenreiter R J, Owen C J, Lazarus A J, Farrell W M, Torbert R B 1996 *Geophys. Res. Lett.* **23** 1255
- [7] Yu D J, Liu Y, Ren Q Y 2001 *Chin. J. Space Sci.* **4** 359 (in Chinese) [于德江, 刘颖, 任琼英 2001 空间科学学报 **4** 359]
- [8] Chen Y 2004 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [陈耀 2004 博士学位论文(合肥: 中国科学技术大学)]
- [9] Minow J I, Diekmann A M, Blackwell W C 2007 *AIAA-2007-0910*
- [10] Ryschkewitsch M G 2011 *NASA-HDBK-4002A*
- [11] Cao H F, Liu S H, Sun Y W, Yuan Q Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 149402 (in Chinese) [曹鹤飞, 刘尚合, 孙永卫, 原青云 2013 物理学报 **62** 149402]
- [12] Tian L C, Shi H, Li J, Zhang T P 2012 *Spacecr. Environ. Engineer.* **29** 144 (in Chinese) [田立成, 石红, 李娟, 张天平 2012 航天器环境工程 **29** 144]
- [13] Cao H F, Liu S H, Sun Y W, Yuan Q Y 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 119401 (in Chinese) [曹鹤飞, 刘尚合, 孙永卫, 原青云 2013 物理学报 **62** 119401]
- [14] Li X C, Wang Y N 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2669 (in Chinese) [李雪春, 王友年 2004 物理学报 **53** 2669]
- [15] Shen Z C, Kong W J, Feng W Q, Ding Y G, Liu Y M, Zheng H Q, Zhao X, Zhao C Q 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 860 (in Chinese) [沈自才, 孔伟金, 冯伟泉, 丁义刚, 刘宇明, 郑慧奇, 赵雪, 赵春晴 2009 物理学报 **58** 860]

# Analysis of data obtained by the solar wind ion detector onboard the Chang'E-1 Lunar orbiter\*

Shi Hong<sup>†</sup> Tian Li-Cheng Yang Sheng-Sheng

(Science and Technology on Vacuum and Cryogenics Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics,  
Lanzhou 730000, China)

( Received 7 October 2013; revised manuscript received 11 December 2013 )

## Abstract

The interaction between lunar plasma and spacecraft may cause surface charging/discharging effects, and degrade the performance of spacecraft. The charging potential is a key factor for discharging process. In order to evaluate charging/discharging effects, it is necessary to obtain the Lunar plasma environment. SWIDA/B on Chang'E-1 are the two scientific instruments of solar wind ion detector which could explore the plasma environment in the 200 km Lunar orbit, thereby deducing the solar wind bulk speed, density and temperature. In this paper we select the data in June 2008 derived from SWIDA sensor. First, we figure out the solar wind ion differential flux and energy spectrum, and then calculate the solar wind parameters such as velocity (300.00–600.00 km/s), plasma density ( $1\text{--}10\text{ cm}^{-3}$ ) and plasma temperature (1–20 eV). Finally, we adopt an equivalent circuit model to compute the Lunar spacecraft surface charging voltage which is  $-7\text{--}70\text{ V}$ .

**Keywords:** Lunar mission, plasma environment, spacecraft charging, charging/discharging effects

**PACS:** 96.50.Ci, 95.55.Pe, 94.05.Jq

**DOI:** [10.7498/aps.63.069601](https://doi.org/10.7498/aps.63.069601)

---

\* Project supported by the Key Laboratory of Science and Technology on Vacuum and Cryogenics Technology and Physics Laboratory of China (Grant Nos. 9140C55020, 9120C5501).

† Corresponding author. E-mail: [hongshi1477@163.com](mailto:hongshi1477@163.com)