

伸杆对星载电场探测仪的影响研究

杨集^{①②} 陈贤祥^① 周杰^{①②} 任仁^① 夏善红^①

^①(中国科学院电子学研究所传感技术国家重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 通过一定长度的伸杆使电场探头与卫星本体保持一定的距离, 可以减小卫星本体鞘层对电场测量的影响。但卫星在运行时伸杆与电场探头之间可能存在电位差, 从而为电场测量引入误差。该文利用卫星与等离子体相互作用模拟软件(SPIS)并结合法国 DEMETER 卫星的伸杆和电场探头模型, 模拟了伸杆与探头之间不同电位差对电场探头收集电子流的影响, 模拟表明当伸杆电位低于探头电位时, 对电场测量影响较小, 当伸杆电位高于探头电位时, 对电场测量影响较大, 且电位差越大, 影响越显著。当等离子体浓度增大即德拜长度减小时, 伸杆电位形成的鞘层减小, 因此伸杆对电场测量的影响比低浓度时有所减小。

关键词: 电场传感器; 伸杆; 卫星充电; SPIS

中图分类号: TP212; V520

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)04-1010-03

Study of the Influence of Booms on Spaceborne Electric Field Sensors

Yang Ji^{①②} Chen Xian-xiang^① Zhou Jie^{①②} Ren Ren^① Xia Shan-hong^①

^①(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Electronics,
Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract: The electromagnetic interferences generated by the spacecraft or other payloads to the spaceborne electric field sensor can be significantly reduced by introduction of booms. However, the boom potential may differ from the sensor; so the boom sheath may extend over the sheath of the sensor probe and affect the electric field measurement. In order to evaluate the amount of disturbance, SPIS (Spacecraft Plasma Interaction System) and Particle in Cell method are used to compute the collected current of the sensor probe under the condition of different potential between the sensor probe and the boom. The plasma parameters, boom and electric field sensor models are got from the DEMETER satellite. The results indicate that when the boom potential is lower than the sensor probe, it introduces small disturbances on the sensor operation, when boom potential is higher than the sensor probe, there is a noticeable change in the sensor current collected. And the higher potential difference between the boom and sensor, the more disturbances will be introduced. With the enlarging of the plasma density, the disturbance is reduced because of the small Debye length.

Key words: Electric field sensor; Boom; Satellite charging; SPIS

1 引言

卫星在太空中运行时, 会与周围的等离子体发生相互作用而带上一悬浮电位, 同时由于尾迹效应的影响, 使得卫星周围的等离子体环境受到扰动^[1], 从而为星上的电场探测仪带来干扰, 因此电场探头通过一定长度的伸杆与卫星本体相连, 并使探头远离卫星本体, 可以减小卫星本体鞘层对电场测量的影响。但是, 伸杆的悬浮电位以及形成的尾迹也会影响电场探头周围的等离子体参数^[2], 进而影响电场探头的收集电流特性及最终的平衡电位, 为电场的测量引入误差。特别

是在等离子体浓度稀薄的区域, 德拜长度大, 伸杆对探头的影响将更加显著。例如法国 DEMETER 卫星在 2004 年 11 月 10 日地磁亚暴发生时测得的等离子体的离子浓度从 $10^5/\text{cm}^3$ 急剧降低到 $2 \times 10^2/\text{cm}^3$, 而在磁暴时的准直流电场小于 $\sim 10\text{mV}/\text{m}$ ^[3]。在上述区域直流电场非常小, 这对星载电场探测仪的测量精度提出很高的要求, 而磁暴时等离子体浓度的降低又加大了伸杆对电场探头的扰动, 因此通过数值模拟来估算伸杆对电场传感仪的影响, 对于提高电场探测仪的测量精度有重要的实际意义。对于此类工作的研究, 瑞典 ERIK ENGWALL 等人利用 PICKUP3D 软件分析了 CLUSTER 卫星上的伸杆尾迹对电场传感仪的影响, 并通过模拟估算了伸杆尾迹对电场测量引入的误差, 为 CLUSTER 卫星电场数

据处理提供了很好的帮助^[4]；在国内还没有发现相关研究的报道。

伸杆的尾迹会为电场传感仪引入测量误差，同时，伸杆与电场探头之间存在的电位差也会影响电场的测量。因此本文采用法国 DEMETER 卫星的电场探测仪和伸杆模型，并结合 DEMETER 卫星的测量参数，采用卫星与等离子体相互作用模拟软件 SPIS(Spacecraft Plasma Interaction System)^[5,6]重点分析了伸杆与探头之间不同电位差对电场测量的影响。

2 DEMETER 卫星上的电场探测仪简介

DEMETER 卫星采用的是双探针式电场探测仪，探测仪的探头通过与等离子环境之间的阻容耦合，把等离子体的电位耦合到探头上，为了减小耦合电阻，一般还需要加上一定的偏置电流。通过两个探头之间的电位差除以探头之间的距离得到需要探测的电场强度。探测仪都通过长约 4m 的伸杆使得远离卫星本体鞘层的扰动，4 个探头保证了电场三分量的测量。电场测量频带从 DC-3.25MHz。图 1 示出了 4 个探头 E1, E2, E3, E4 在卫星上的布置，卫星沿-Z 方向运动^[7]。

3 仿真模型

所用的模型结构主要根据 DEMETER 卫星电场探测仪的结构，图 2 示出了建立的结构模型，为了节省计算时间，把伸杆从实际的 4m 缩短为 0.5m，电场球形探头的直径为 0.06m，圆柱形冒顶 C₁ 与 C₂ 的长度为 0.03m。其中 C₂ 是为了减小伸杆对探头的影响，C₂ 与伸杆相互绝缘，并通过自举电路使得其与探头的电位相同。C₁ 主要是考虑到磁场以及尾迹效应的影响而与 C₂ 保持结构对称。在星上金属伸杆的电位和卫星本体的电位保持一致，但是，在高纬度运行时 4m 长的伸杆切割磁力线会形成感生电动势^[8]，或者在低等离子浓度区域卫星本体和探头之间电位差增大，这些都会使得伸杆与探头之间有可能存在一个显著的电位差，从而对电场测量带来扰动。

4 模拟参数及模拟结果

等离子参数根据 DEMETER 卫星在上述地磁亚暴时测量的一组参数为： $n_e = n_i = 2 \times 10^8 / \text{m}^3$, $KT_e = 0.3\text{eV}$, $KT_i = 0.1\text{eV}$, $V_{s/c} = 7.5\text{km/s}$ ，其中， n_e 和 n_i 分别表示等离子体电子和离子的浓度， K 为玻耳兹曼常数， T_e 和 T_i 分别表示等离子体电子温度和离子温度， V_{SC} 表示卫星运行速度。电

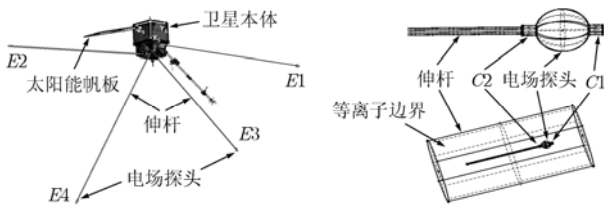


图 1 DEMETER 卫星上电场探测仪布置^[7] 图 2 仿真模型结构

场探头和圆柱形冒顶 C₁ 与 C₂ 的电位相对未扰动的等离子体固定为 +0.25V，在上述等离子条件下通过 SPIS 软件计算出此电位下电场探头的收集电流为 -53nA，负号表示电子电流。等效于电场探测仪在太空运行并加上 53nA 的偏置电子流时探头的平衡电位为 +0.25V。设 ΔV 为伸杆电位减去探头电位的差值。并模拟了 ΔV 分别设置为 0V, -2V, -4V, +2V, +4V 时的收集电流特性，模拟结果示于图 3 中。

从图 3 中可以看出探头的收集电流都为负，即主要是电子电流。当 ΔV 分别为 0V, -2V 时，电场探头的收集电流基本不变，为 -53nA；当 ΔV 为 -4V 时，收集电流略为减小，为 -45nA；当 ΔV 为 +2V 和 +4V 时，探头的收集电流显著减小，分别为 -32nA 和 -21nA。即当伸杆电位相对探头电位为负时，伸杆上的电位变化对探头收集电流特性影响很小，但当负的很多时，伸杆形成的负电位鞘层会阻止探头对周围电子的收集，进而减小了探头的收集电子电流。当伸杆电位相对探头电位为正时，伸杆的电位对探头收集电流特性影响较大，探头收集电流显著减小。设电场探头的电位为 V_{SC} ，则其收集电流大约满足下式方程^[9]：

若 $V_{SC} > 0$,

$$I = A \left[J_{e0} \left(1 + \frac{eV_{SC}}{KT_e} \right) - J_{i0} \exp \left(\frac{-eV_{SC}}{KT_i} \right) \right] \quad (1)$$

若 $V_{SC} < 0$,

$$I = A \left[J_{e0} \exp \left(\frac{-e|V_{SC}|}{KT_e} \right) - J_{i0} \left(1 + \frac{e|V_{SC}|}{KT_i} \right) \right] \quad (2)$$

式中 $J_{e0} = en_e \sqrt{\frac{KT_e}{2\pi m_e}}$, $J_{i0} = -en_i \sqrt{\frac{KT_i}{2\pi m_i}}$, A 为探头的面积。

当 ΔV 从 0 到 +4V 时，电场探头收集电流从 -53nA 到 -21nA，根据式(1)，可以大致计算出相应的电场探头平衡电位会漂移 310mV，对于相距约 8m 的两个探头，会为电场的测量引入 39mV/m 的误差，可见在上述等离子稀薄区域，当 ΔV 大于零时引入的误差是非常大的。

为了比较不同等离子浓度下的扰动特性，还模拟了 $n_e = n_i = 10^{10} / \text{m}^3$, $KT_e = 0.3\text{eV}$, $KT_i = 0.1\text{eV}$, $V_{s/c} = 7.5\text{km/s}$ 时探头的收集电流特性。电场探头电位固定为 -0.6V，从图 4 中可以看出 ΔV 分别设置为 0V; -2V; -4V 时，探头电流基本不变，为 170nA，当 ΔV 为 +2V 和 +4V 时，探头的收集电子电流分别显著减小为 150nA 和 110nA。当 ΔV 从 0 到 +4V 时，探头的收集电流从 170nA 到 110nA 时，根据方程(2)可求出相应的探头平衡电位漂移 130mV，从而会为电场探测仪的测量引入 16mV/m 的误差。和浓度为 2×10^8 时相比，影响有所降低，主要是因为随着等离子浓度的增加，德拜长度减小，所以此时伸杆对探头的影响有所减小。

5 结论

从以上仿真结果可以看出，伸杆与电场探头之间的电位

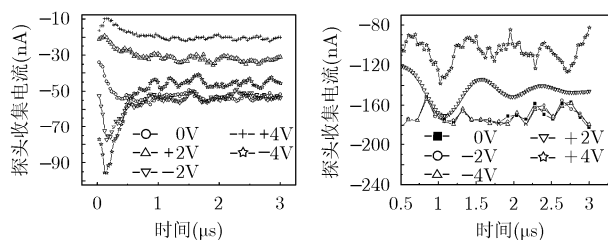


图3 不同 ΔV
下探头收集电流

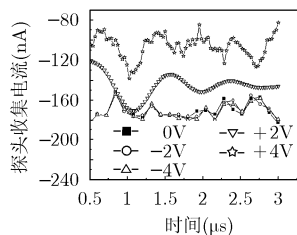


图4 浓度为 $10^{10}/\text{m}^3$ 时不同
 ΔV 下探头的收集电流

差对探头的收集电流特性有显著的影响,当伸杆电位低于探头电位时,对电场测量影响较小;当伸杆电位高于探头电位时,对电场测量影响较大;当两者之间的电位差较大时,引入的干扰信号也越大。在等离子浓度较低即德拜长度较大的区域,伸杆电位形成的鞘层增大,因此对电场探头的影响比高浓度时显著增大。特别是在等离子稀薄区域,当伸杆与探头之间电位差较大时,引入的干扰信号甚至可能大于太空中实际的准直流电场信号。因此,充分理解伸杆对电场传感仪的影响对于伸杆在卫星上的安装布置,电场探头的设计等都有重要的实际意义,比如通过对伸杆实行主动电位控制使得其电位低于探头电位,可以减小对电场测量的影响,也为将来进行数据处理提供帮助,提高电场测量的精确度。

致谢 感谢法国 DEMETER 地震电磁卫星 ICE 和 IAP 首席科学家 J.J.Berthelier 教授提供了 DEMETER 卫星轨道的等离子参数以及对本课题提供的很多指导和帮助。

参 考 文 献

[1] Hastings D E. A review of plasma interactions with spacecraft in low Earth orbit. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(A8): 14457-14483.

- [2] Engwall E and Eriksson A I. Double-probe measurements in cold tenuous space plasma flows. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2006, 34(5): 2071-2077.
- [3] <http://demeter.cnrs-orleans.fr>.
- [4] Engwall E. Numerical studies of spacecraft-plasma interaction: simulations of wake effects on the cluster electric field instrument EFW, IRF scientific report 284. 2004.
- [5] Forest J, Eliasson L, and Hilgers A. A new spacecraft plasma interactions simulation software, PicUp3D/SPIS. 7th Spacecraft charging conference, Noordwijk, the Netherlands, April 2001, 5: 515-520.
- [6] Forest J, Hilgers A, and Thiébaud B, *et al.* An open-source spacecraft plasma interaction simulation code PicUp3D: tests and validations. *IEEE Trans. on Plasma Science*, 2006, 34(5): 2103-2113.
- [7] Berthelier J J, Godefroya M, and Leblanca F, *et al.* ICE, the electric field experiment on DEMETER. *Planetary and Space Science*, 2006, 54(5): 456-471.
- [8] Ferguson D C and Hillard G B. Low earth orbit spacecraft charging design guidelines. NASA/TP-2003-212287, 2003.
- [9] Deshmukh S H. Controlled spacecraft charging for coulomb force control of spacecraft formations. [Master dissertation], Michigan technological university, 2002.

杨 集: 男, 1981 年生, 博士生, 研究方向为星载电场传感仪及卫星充电模拟。

陈贤祥: 男, 1979 年生, 博士, 助理研究员, 研究方向为传感器及其信号处理。

夏善红: 女, 1958 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微传感器与微系统技术。