航天飞行器与空间等离子体环境的相互作用*

王柏懿　徐燕侯　吴清松

（中国科学院力学研究所）（中国科学技术大学）

文摘　本文阐述了航天飞行器与空间等离子体环境相互作用研究的背景和意义，评论了这一研究的历史与现状，并着重介绍了空间环境对航天飞行器作用的三种不同类型（辐射、充电、耦合电流）及其机制。

主题词　航天飞行器，空间等离子体，环境效应。

一、前　言

1957年第一颗人造地球卫星上天，标志着人类进入了空间时代。经过30余年的发展，当前空间事业正处在一个新的转折时期。航天技术将进入对近地空间进行大规模经济开发和军事利用的新阶段。因此，提高空间技术的水平、确保航天飞行器的正常运行并最大限度地提高其效益，便成为航天技术和空间科学发展的当务之急。

近地空间航天器飞行高度范围从低地球轨道(约200～500公里)到地球同步轨道(约36000公里)。这个运行范围大体和地球磁层相当。当航天飞行器在磁层等离子体中运动时，将与空间环境之间发生各种相互作用。一方面，航天器会干扰自然界存在的空间等离子体性态。例如，航天器可以收集或发射带电粒子，其周围将形成空间电荷包鞘和等离子体尾迹；航天器携带的各类火箭排气将与环境等离子体发生化学反应，而离子助推器的喷射物可能造成所谓的“电荷交换”等离子体；航天器泄放的气态物质将构成空间环境的污染源。另一方面，等离子体环境会影响航天飞行器的运行，这包括带电效应、辐射效应、动力效应、污染效应和辉光效应等等。一般而言，这些效应都是有害的，它们在地磁亚暴条件下更为严重，因此被称作空间灾害。开展航天飞行器与空间等离子体环境相互作用的研究可以为提高空间设计的可靠性、避免或控制空间环境的有害效应提供理论依据。

* 国家自然科学基金资助课题。
本文1989年1月26日收到

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

二、航天飞行器与空间等离子体环境相互作用研究的历史和现状

1971年DeForest[1]首先发现了航天飞行器运行中的许多异常现象是由于同步轨道上的地磁亚暴及其相应的飞行器带电现象造成的。从此航天器的带电问题，以及从更广阔意义上讲的航天飞行器与空间等离子体环境的相互作用问题，引起了空间科学和航天工程界的广泛重视，从70年代初期起开展了一系列的研究[2,3]，到70年代中期达到了第一个高潮并获得相当大的进展[4-6]。尤其是通过SCATHA计划的实施，对于地球同步轨道上卫星的充电问题有了较成熟的认识并发展了通用计算程序[7-9]。80年代以来，随着航天飞机的出现和大型空间站计划的酝酿，人们对这一问题的兴趣有增无减[10,11]。而且随着飞行任务使命的演化，空间环境与飞行器相互作用研究又增添了崭新的物理内容，如辉光现象、法拉第效应、瞬态效应、磁场效应以及尾迹影响等，都有待人们进一步分析与探索。

我国从事航天技术和空间物理研究方面的科技工作者亦一直关注着这个领域的工作[12,13]。但是全面系统的研究尚不多，除了在日地空间物理方面的若干文章外，主要是关于飞行器表面材料导电性能的实验研究[14-16]。相对而言，关于高速飞行器与空间等离子体环境相互作用机制方面的研究还比较薄弱。而作为一个完整的航天飞行器与空间环境相互作用问题的研究，必须包括下述方面：（1）确定空间等离子体环境[17]；（2）研究飞行器与环境相互作用的机理[18,19]；（3）探讨减少或控制有害效应的途径[20-22]；（4）发展地面模拟设备并进行必要的飞行试验[23,24]；（5）提供设计准则与技术规范[25,26]。显然，这是一个“全方位”课题，涉及面很广，相互关联密切，构成一个有机整体。

三、空间等离子体对航天飞行器作用的三种类型

本文着重介绍和分析空间环境对飞行器的影响，特别注意揭示那些与流体物理和等离子体动力学相关的各种过程。按照空间中带电粒子能量的不同，我们将分别讨论辐射损伤、表面充电和电流耦合三种不同类型作用的机理。

1. 辐射效应

这是高能粒子（能量等于或大于100KeV）所产生的效应。空间高能辐射的来源主要是[27]：（1）地球磁场内捕获的高能带电粒子；（2）太阳辐射粒子；（3）银河系宇宙线。空间高能辐射的作用可分为辐射剂量作用和单粒子翻转事件两种，但它们同飞行器材料相互作用的过程基本类似。当高能粒子撞击到表面后，进入结构材料之中并发生各种分子的、原子的甚至原子核的碰撞过程。其部分能量便转移并存留在材料中，它可以作为激励能量继续引起一系列物理化学变化。航天飞行器中许多材料、仪表和设备对于辐射相当敏感。例如，摄影感光材料、生物样品、光敏元件、太阳电池、场致电子器件、粒子计数器以及一些微电子装置等都会因高能辐射而受到损伤从而导致故障或失效。因此，研究高能带电粒子对物质作用的机制，包括原子/分子碰撞模型、碰撞激励以及原子核中能量传递过程等问题，是十分重要的。

一般而言，入射粒子与原子/分子的相互作用需要求解一个多体量子力学系统。到目前为

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

止人们只能利用摄动理论给出一阶近似解。但是，有的作者在研究材料的激励谱时引进局部等离子体模型。即认为材料介质是由等量的正离子和电子组成，然后利用等离子体动力学理论，由电子密度分布来计算材料的介电常数，从而将材料的激励谱和等离子体的吸收谱关联起来。这样可使问题大大简化。图1给出从氢到氪之间各种元素的平均碰撞激励能量，其中比较了两种方法所得的结果，两者相符很好。

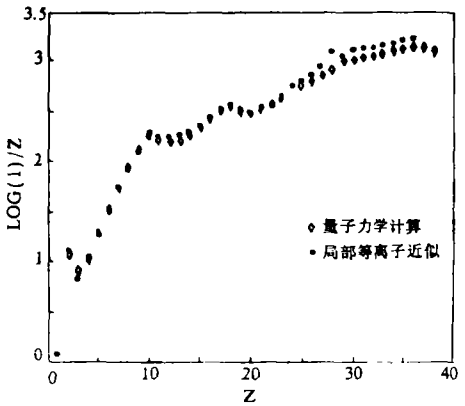

图1　高能粒子与原子碰撞的平均激励能量

2．充电效应

这是中等能量(在1KeV到50KeV之间)带电粒子对航天器作用而产生的效应。在太阳感应的地磁亚暴期间，地球同步轨道上出现能量为千电子伏特量级的质子和电子。它们可以使飞行器绝缘表面充电到几百伏（在阳光中）到几十千伏(在背阴区)。当充电电位超过材料的击穿阀值时便可能导致放电。这种充放电过程将对航天器产生电磁干扰，并引起一系列电功能异常，诸如逻辑电路的非指令复位、电源的非程序切换、探测器的非正常响应以及传感器的伪噪声等。此外，它还可能加剧表面的污染效应，促使防热材料的蜕化，干扰某些科学探测和环境遥感任务的执行，甚存造成元器件破坏、仪表失灵以至整个系统运行的中断和航天器的整机摧毁[28]。

图2给出航天器/等离子体环境体系中存在的四个区域。航天飞行器充电现象理论模式研究的目的是提供一个正确的理论框架来描述飞行器周围的等离子体场，从而计算流入表面的带电粒子通量并最终确定飞行器的表面电位。这里的关键是合理地给定空间电荷包鞘的模型。

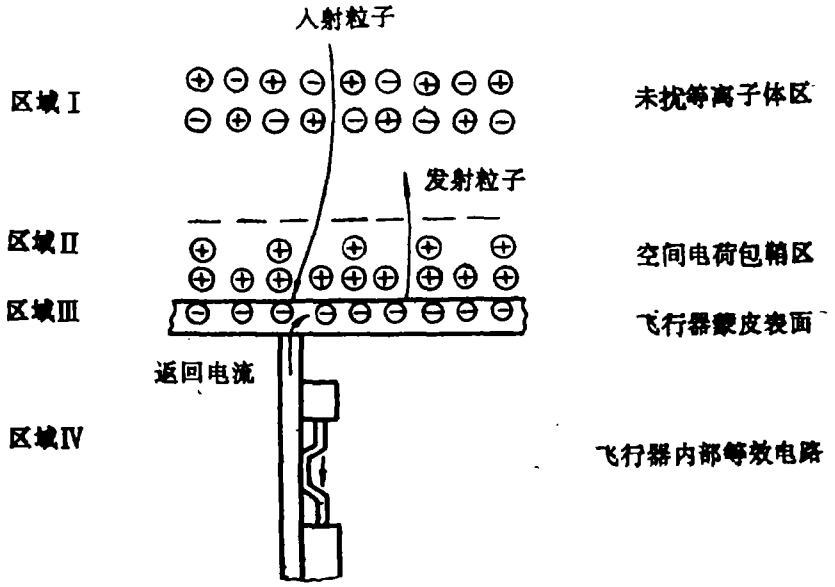

图2　航天飞行器充电模式中的相关区域

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

相对而言，国外对于同步轨道上卫星充电问题的研究比较深入并且已经有象NASCAP一类较成熟的通用程序。但是这些研究仍限于等离子体静电理论的范畴，在改进的充电模式中应当考虑动态效应。至于象航天飞机、空间平台及空间站等大型复杂的多功能飞行器与空间环境的相互作用，诸如等离子体尾迹、空洞及电荷交换等离子体等各种现象（参见图3）[20]，尚待流体物理领域的大量工作才能达到全面定量的了解。

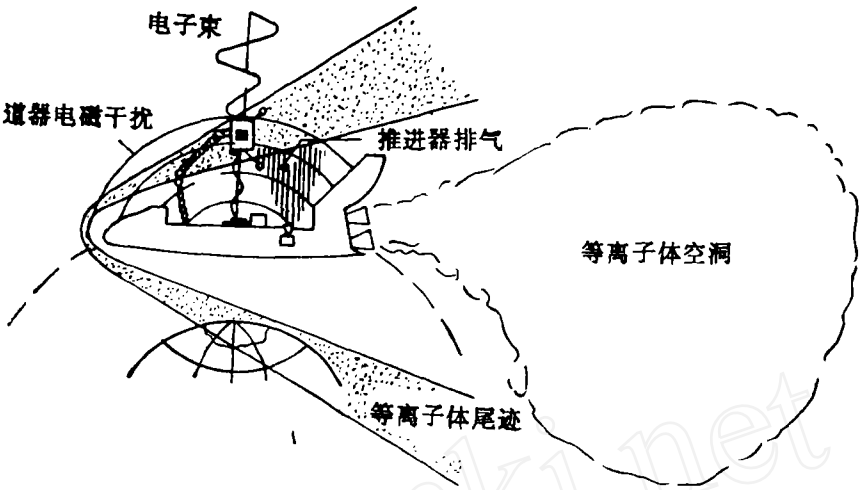

图3　复杂航天器与空间环境相互作用现象

3. 耦合效应

低地球轨道上的航天飞行器主要是在等离子体层中运行，其中带电粒子的能量很低（小于2eV）但数密度较高。这样，当暴露的电源系统的工作电压较高时就可能出现等离子体耦合电流效应。根据简单模型估算，当电源工作电压达到10kV时，耦合电流造成的功率损耗将为10%[30]。由于未来航天飞行器的发展趋势是大结构、高功率，而提高电源系统的工作电压（千伏量级以上）则是改善效率、减轻重量的有效途径。因此研究空间环境的耦合效应是十分有意义的。

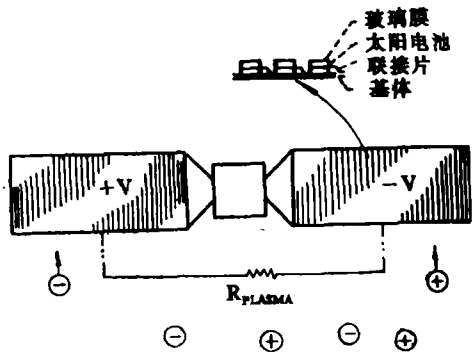

图4　高电压航天器与环境相互作用示意图

现以直接驱动的太阳能推进系统为例来讨论耦合作用的机理(参见图4)。当太阳电池的金属联接片处于一定的偏置电位时便从等离子体中收集净电流。这种在空间环境中导致的寄生耦合电流与航天器自身的电负载相并联，代表一种功率消耗。

当太阳电池工作电压低于100V以下时，联接片所收集的耦合电流可根据静电探针理论来估算。但是当工作电压很高时，联接片周围的大面积绝缘复盖膜会显著地影响耦合效应。这便是电流收集问题中所谓的“针眼现象”。图5给出三种不同结构的金属表面从同样的等离子体环境中收集电流的实测结果：（1）直径为3.5cm的平盘；（2）同样的平盘放置在绝缘板

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

上；（3）太阳电池帆板，其中联接片的总暴露面积为 4.8cm²。实验数据表明围绕着偏置导体的绝缘表面强烈地影响着导体与等离子体间的耦合过程。目前还没有一个完整的理论来处理这种现象；此外，发展一种正确的相似规则以便将小样品的实验结果外延到大型结构亦是很重要的任务。

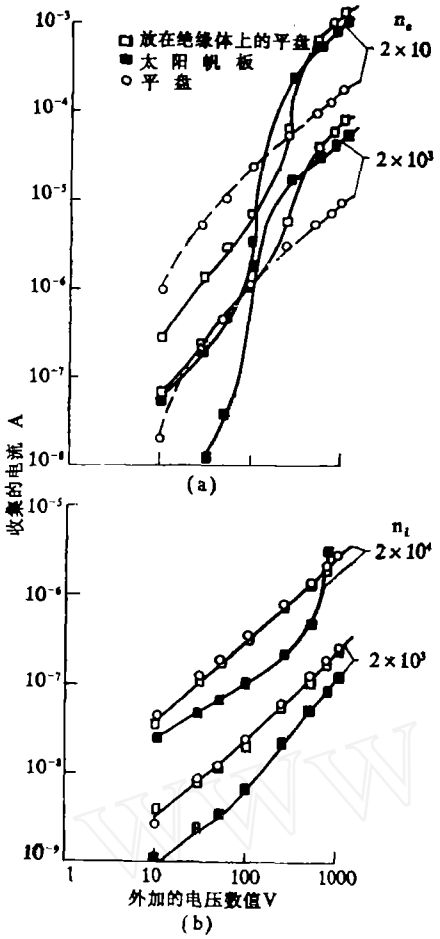

图 5　不同结构表面所收集的耦合电流。
(a)正偏置电压；(b)负偏置电压。

四、结　　语

航天器与空间等离子件相互作用的研究具有强烈应用背景和丰富科学内涵，它要求流体物理、等离子体动力学和航天工程等方面科技工作者的通力合作，才能得到有意义的成果。

参　考　文　献

[1] DeForest, S.E.: Spacecraft Charging at Synchronous Orbiter, JGR, 77, 1972, pp. 651.
[2] Grard, R.J.L. (Ed.): Sixth ESLAB Symposium on Photon and Particle Interactions with Surfaces in Space, D. Reidel, 1973.
[3] Rosen, A. (Ed.): Spacecraft Charging by Magnetospheric Plasmas, MIT Press, 1976.
[4] Finke, R.C. and Pike, C.P. (Eds.): Spacecraft Charging Technology-1978, NASA CP-2071.
[5] Stevens, M.J. and Pike, C.P. (Eds.): Spacecraft Charging Technology-1980, NASA CP-2181.
[6] Goodman, J.M. (Ed.): Proceedings of 1978 Symposium on Effects of the Ionosphere on Space and Terrestial Systems, Washington, D.C., 1978.
[7] Katz, I. et al.: A Three-Dimensional Dynamic Study of Electrostatic Charging in Materials, NASA CR-13556.
[8] Katz, I. et al.: Extension, Validation and Application of the NASCAP Code, NASA CR-159595...
[9] Stannard, P.R. et al.: Validation of the NASCAP Model Using Spacecraft Flight Data, AIAA Paper 82-0269.
[10] Roux, J.A. and McCay, T.D. (Eds.): Spacecraft Contamination: Sources and Prevention, 1984.
[11] Frederickson, A.R. et al. (Eds.): Spacecraft Dielectric Material Properties and Spacecraft Charging, 1986.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[12] 张永维：卫星的电磁干扰及其防护，《世界导弹与航天》，第10期，1987年，第32页
[13] 陈国珍：地球同步卫星充/放电对电子设备的危害及其防护措施，《中国空间科学技术》，第5期，1988年，第44页
[14] 王碧云、冯贵英：几种材料的磁层亚暴环境试验，《中国空间科学技术》，第1期，1986年，第40 页
[15] 卢榆孙：航天器两种常用涂层的电导性能实验研究，《中国空间科学技术》，第1—2期，1987年，第 27 页
[16] 宋佑浩：卫星表面充电空间环境及其模拟方法，《宇航学报》，第1期，1988年，第89页
[17] Garrett, H.B. and Spitale, G.C.: Magnetospheric Plasma Modeling (0—100kev). JSR, 22, 1985, pp. 231.
[18] Garrett, H.B.: The Charging of Spacecraft Surfaces, Reviews of Geophysics and Space Physics, 19, 1981, pp. 577.
[19] Hill, J.R. and Whipple, E.C. Jr.: Charging of Largy Structure in Space with Application to the Solar Sail Spaceeraft, JSR, 20, p.245, 1983.
[20] Lehn, W.L.: SCATHA Conductive Spacecraft Materials Development, JSR, 20, p. 182, 1983.
[21] Olsen, R.C.: Experiments in Charge Control at Geosynchronous Orbit—ATS-5 and ATS-6, JSR, 22, p.254, 1985.
[22] Stevens, N.J.: Design Practices of Controlling Spacecraft Charging Interactions, AIAA Paper 82—0115.
[23] Stevens, N.J. et al.: Testing of Typical Spacecraft Materials in a Similated Substorm Environment, NASA TMX-73537.
[24] Shawhan, S.D. et al.: Plasma Diagnostics Package Initial Assessment of the Shuttle Orbiter Plasma Environment, AIAA Paper 83-0253.
[25] Purvis, C.K. et al.: Design Guidelines for Assessing and Controlling Spacecraft Charging Effects, NASA TP-2631.
[26] Elkman, W.R. et al.: Electrostatic Charging and Radiation Shielding Design Philosophy for a Synchronous Satellite, JSR, 20, p.417, 1983.
[27] Wilson, J.W.: Space Radiation Interaction Mechanisms in Materials , AIAA Paper 83-0588.
[28] Rosen, A.: Spacecraft Charging: Environment Induced Anomalies, AIAA Paper 75—91.
[29] Shawhan, S.D. et al.: Subsatellite studies of Wake, Plasma and Chemical Injections from Spacelab, AIAA paper 82-0085.
[30] Stevens, N.J. et al.: Investigation of High Voltage Spacecraft System Interactions with Plasma Environments, AIAA Paper 78—672.

INTERACTIONS BETWEEN SPACECRAFT AND SPACE PLASMA ENVIRONMENT

Wang Boyi
(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Xu Yanhou Wu Qingsong
(University of Science and Technology of China)

ABSTRACT The studies of interactions between spacecraft and space plasma environment (including their background, significance, development history and current status) are summarized. Three types of interactions, which are radiation, charging and plasma-coupling current effects, are discussed in detail.

SUBJECT TERMS Spacecraft, Space Plasma, Environmental Effects.

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net