高压太阳能电池阵与电子设备在等离子体 环境中的毁伤机理

施维,郑步生,刘少斌

(南京航空航天大学,南京 210016)

摘要:目的 通过研究高压太阳能电池阵与电子设备在等离子体环境中气体放电的毁伤机理,从而 可运用于军事上的电子对抗、干扰及隐身技术。方法 通过分析气体放电的几种基本形式,研究太 阳能电池阵和电子设备在等离子体射流或等离子体环境下可能发生的放电过程。结果 高压太阳 能电池阵在等离子体环境下易产生电弧放电现象,而电子设备在此环境下的毁伤主要是通过内部 充电与外部充电产生的。结论 在等离子体环境中,气体放电会对高压太阳能电池阵和电子设备 产生严重的影响,可以利用这种影响对空间邻域的探索提供帮助。 关键词: 气体放电; 高压太阳能电池阵; 电子设备; 等离子体; 毁伤机理 DOI:10.7643/issn.1672-9242.2015.06.003 中图分类号: TJ97; V416.4 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2015)06-0020-06

Damage Mechanism of High Voltage Solar Arrays and Electronic Equipment in the Plasma Environment

SHI Wei, ZHENG Bu-sheng, LIU Shao-bin (Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: Objective To research the damage mechanism of gas discharge of high voltage solar arrays and electronic equipment in the plasma environment in order to apply in electronic warfare, interference and military stealth technology. **Methods** By analysis of several basic forms of gas discharge, the discharge process of high voltage solar arrays and electronic equipment which may occur in the plasma jet or the plasma environment was researched. **Results** High voltage solar arrays were likely to generate arc discharge, and the damage of the electronic equipment was mainly caused by internal and external charging in this environment. **Conclusion** Gas discharge may have a serious effect on high voltage solar arrays and electronic equipment in the plasma environment. This effect may help to explore the spatial neighborhood.

KEY WORDS: gas discharge; high voltage solar arrays; electronic equipment; plasma; damage mechanism

收稿日期: 2015-08-29; 修订日期: 2015-09-14

Received: 2015–08–29; **Revised:** 2015–09–14

基金项目:南京航空航天大学研究生开放基金项目(kfjj20150412);江苏省普通高校专业学位研究生创新计划项目(SJLX15_0117)

Fund: Supported by the Fundation of Graduate Innovation Center in NUAA (kfjj20150412) and Funding of Jiangsu Innovation Program for Graduate Education (SJLX15_0117)

作者简介:施维(1989—),女,南京人,硕士研究生,主要研究方向为人工电磁材料。

Biography: SHI Wei(1989-), Female, from Nanjing, Master, Research focus: artificial electromagnetic materials.

物质通常以固态、液态、气态普遍存在于自然界中,也就是通常所指的物质的三态,且随着温度的上升它们之间可相互转化^[1]。在宇宙中,99.9%的物质处于等离子体(Plasma)状态,因此称之为物质的第四态^[2]。

将等离子体的电磁特性运用于军事上的电子对 抗、干扰及隐身技术已经受到广泛关注。因此在等离 子体与电子设备的相互作用方面,可以利用等离子体 的独特特征,运用于电子对抗、空天攻防等军事领 域。随着信息科学技术的发展,21世纪军事对抗势必 是高信息化、高技术的军事对抗,而等离子体作为一 种尚未充分开发的物质,将对世界军事信息技术产生 革命性的影响。

1 气体放电的基本构成

气体放电是指在电场作用下气体被击穿而导电 的物理现象,生活中常见的闪电与日光灯就是气体放 电现象的典型例子,由气体放电所产生的等离子体叫 做气体放电等离子体^[3]。鉴于地球是一个冷球体,在 此环境中难以获得稳定的等离子体,因此需要靠人工 方式来产生,可以被用于不同的电力系统,比较常见 的放电形式有以下四种:电晕放电^[4-5]、辉光放电^[6-7]、 介质阻挡放电^[8-9]、滑动弧放电^[10]。

1.1 电晕放电

电晕放电(Corona Discharge, CD)是一种因电极 周围的电场极不均匀,且压强较高情况下产生的微 弱的自持放电现象。一般发生在物体尖端、边缘或 细丝附近的强电场区。电晕放电产生的条件是:电 极两端施加较高电压,气体压强较高以及电场分布 极不均匀^[11]。电晕放电发生时能看见明显的亮光,并 听见咝咝声,电极间仅有数微安的微弱电流,如图1所 示。图1a是在放电实验中发生的现象,当施加较高电 压时,在电阻连接处尖端会发生电晕放电现象;图1b 是某工业废气处理系统中电晕丝放电时的现象^[12]。

电晕放电可受直流电压的影响产生在大气压下, 但为了提高电晕部位的电场,一般需要相当高的电 压。通常在高气压和强电场的影响下,会产生部分的 电弧放电和波动的电晕放电。为了避免此现象,可考 虑将反应器的电极形式做成非对称形式。

1.2 辉光放电

辉光放电(Glow Discharge, GD)是在低气压条件下



a 电阻连接处尖端发生电晕放电



b 电晕丝放电



发生的一种稳定而复杂的自持放电过程。平时生活中 所用的日光灯管就是利用了辉光放电现象的基本原 理,具体说是运用了等离子体发光特性,如图2所示。

1.3 介质阻挡放电

介质阻挡放电(Dielectric Barrier Discharge, DBD) 是在电极间至少插入一块绝缘介质的气体放电现 象¹¹³,又称无声放电,如图3所示。介质阻挡放电通常 产生在高气压条件下,分布在整个放电空间范围内。 为了有效阻碍电流的增加,可在放电空间加入绝缘介 质,阻隔流光击穿通道,否则易形成电弧放电和火花 放电。

1.4 滑动弧放电

滑动弧放电(Gliding Arc Discharge, GAD)是在2 个或多个电极间施加电压并通过电流,使之在电极间 最窄处击穿气体形成电弧,气流吹动电弧向下游移 动,与此同时电极间距增加,电弧长度也随之增加^[10], 电弧长度到达临界长度时电弧熄灭,此时在最窄电极







b 放电管

图 2 辉光放电现象 Fig.2 Schematic diagram of the phenomenon of glow discharge





b 空心阴极放电

图3 介质阻挡放电产生低温等离子

Fig.3 Schematic diagram of low temperature plasma produced by dielectric barrier against discharge

处形成新电弧,这个过程不断重复。滑动弧放电装置 如图4a所示,两个分开的电极连接高压电源,沿反应 器的轴线有持续的气流,沿电极推动向外扩散,间距 最小处放电产生电弧,直到电弧断开,与此同时产生 新的电弧,这样持续地产生等离子体流。滑动弧放电 现象如图4b所示。



图4 滑动弧放电 Fig.4 Schematic diagram of gliding arc discharge

2 毁伤机理研究

高压太阳能电池阵 HVSA (High Voltage Solar Array)是指工作在100 V以上的太阳能电池阵。对高 压太阳能电池阵中的电弧放电的说明,有两种观点为 此方面的研究奠定了基础。一种是1987年 Park等^[14] 提出的,他们认为绝缘杂质薄层存在于每一金属互连 片上,等离子体中的离子不停地被带负电的金属互连 片吸引,使汇聚在这些薄层中的等离子体形成一个层 内电场。此电场随离子充电时间的增大而增大,当到 某一稳定值时,便向空间等离子体发射电子,最后这 些电子流薄层受热而被电离。另一种是1990年 Hastings^[15]提出的,认为是击穿前电流分离出了吸附在 太阳能电池玻璃盖片边缘的中性气体分子,使之汇集 在互连片表面,而存在于互连片表面上的中性气体分 子产生层内电弧,如火花放电。

1991年 Cho和Hastings¹¹⁶将上述两位专家的观点 与实验现象综合,得出玻璃盖片表面的充电来自三 个方面:环境离子、离子诱导的二次电子和场致增 强电子发射(Enhanced Field Electron Emission, EFEE)。当有电弧发生时,环境离子便会给玻璃盖 片充电,玻璃盖片、金属互连片和等离子体构成的 "三结合部"(Triple Junction,TJ)的电场增加,从而产 生电弧放电。

2.1 高压太阳能电池阵

卫星和航天器等电子设备暴露在等离子体环境 和太阳黑子等宇宙辐射下也许会导致毁伤,特别是裸 露的高压太阳能电池阵。当其相对于周围的等离子 体具有高负电位时,太阳能电池阵表面会出现放电, 放电严重时,甚至会出现电弧放电。

半导体材料、上下电极、减反射膜和石英玻璃盖 片构成了一片太阳能电池。在电池阵上,每片电池的 电极以串并方式连接^[17]。其中一个电极极性为正,覆 盖整个电池的背表面;另一个电极极性为负,为栅线 状金属互连片,暴露于空间环境^[17]。其电弧放电的主 要机理描述如图5所示。





Fig.5 Schematic diagram of arc discharge mechanism of solar array under the effect of plasma

对于太阳能电池阵在等离子体作用下的电弧放 电机理,具体解释如下所述。

等离子体中的离子为玻璃盖片的上表面充电,但四周侧面没充电。因为上表面电势接近于0,于是在金属互连片、玻璃盖片和等离子体构成的"三结合部" (Triple Junction,TJ)与上表面建立了强电场。随着导 体表面电场的增加,此强电场会导致一个击穿前电流 场增强电子发射,同时由于离子撞击导体表面,从而 导致电子被释放。带负电的互连片吸引等离子体中 的离子,发出的离子碰撞互连片表面,导致二次电子 释放^[20]。二次电子撞击玻璃盖片的侧面,也发生二次 电子释放。若二次电子发射系数大于1,且电子有逃脱 路径,玻璃盖片侧面便会被充正电,以致通过正反馈机 制更深地增大导体表面电场^[18]。带负电的互连片与玻 璃盖片表面及侧面所形成的电场导致了互连片的二次 电子发射,即场致增强电子发射(Enhanced Field Electron Emission, EFEE)^[18],它的发射会引起从玻璃盖 片解吸出的中性物碰撞电离,从而产生电弧放电。

综上所述,电弧放电又分为触发放电和二次放 电,特别出现于太阳能电池阵电池片的连接处。一般 的触发放电会干扰电子设备等,正常不会发生系统性 的大影响,但它却会引起二次放电,尤其是电弧放电 和等离子体射流引起的二次放电,影响太阳能电池的 正常工作。二次放电通常发生于相邻电池串之间,其 能量远远大于触发放电的能量,其结果可导致材料热 解、熔化,进而造成电源系统硬件破坏,可能会对太阳 能电池有致命影响。二次放电原理如图6所示。



图6 太阳能电池阵在等离子体作用下二次放电

Fig.6 Schematic diagram of secondary discharge of solar array under the effect of plasma

目前解释电弧放电现象的理论模型有两个。

1) 假设带负电的导体表面形成一层薄的绝缘层, 当电场强度足够高时,它会被静电击穿^[19];

2) 考虑到强电场形成于金属、绝缘体和等离子体的接合处^[19]。

第二个模型尚不充分,因为该理论的不足之处是 根据Fowler-Nordheim冷发射机理假设导体发射一次 电子,这个假设只适合高压放电,而太阳能电池阵中 电场强度较之要低两三个数量级。有一种说法解释 了电弧放电的阈值特征,并预示放电速率是随着到达 电池阵离子流的增加而增加。这个说法似乎解释了 此模型的合理性,但也还是不能解释诱发离子雪崩能 维持大的电弧流。

2.2 电子设备

航天近地空间中,除了太阳风等离子体外,还存 在着电离层、核爆炸区、等离子体片集中分布的等离 子体区域等,因此部分太阳能电池阵裸露在等离子体 环境中,必将会和背景等离子体产生相互作用^[20]。空 间等离子体主要通过两种方式对电子设备产生毁伤: 表面充电和内部充电。

2.2.1 表面充电

表面充电是由电子设备表面粒子的运动与迁移 所造成的,能级通常在eV到keV之间。当电子设备暴 露在等离子环境中时,周围存在大量的电子和离子, 因此电子设备易与其产生相互作用或发生反应。电 子的热速度大于离子,因此带负电位的电子先于离子 到达设备表面,使其带负电位。当负电位数值逐渐增 大时,静电场不断吸引离子排斥电子,最终达到平衡 状态。

浮动电位是衡量电子设备准确性的最主要因素 之一,约1/3的电子设备异常或被破坏是由浮动电位 引起的^[21]。浮动电位是一相对电位,是设备表面相对 于空间等离子体而言的。当不同浮动电位的电子设 备相互接触时可能会导致放电现象的发生。理论估 计,浮动电位可高达工作电压的90%左右,因此显然 需要降低浮动电位,避免由于大量电荷转移而造成破 坏^[22-23]。

由于浮动电位的存在导致电子设备储存能量很 小,以及放电的时间^[23]通常在微秒级左右,因此尽管总 的放电能量很低,但仍然可能会产生较大电流和电磁 辐射。电子设备的浮动电位可能会导致以下后果:自 身充电,从而使储存的能量及电源的功率流失;降低 低能粒子探测器的准确度;破坏电子设备的表面材 料,从而改变其性能;影响或破坏附近电子器件,产生 误操作,从而干扰其正常工作。

为降低风险,接触部位一般具有较高的电阻,以 控制较大电流的产生,有效地防止大电流或弧光放电 的产生。目前,国际空间站上安装了等离子体接触器 装置(Plasma Contact Unit, PCU),在有航天员出舱及 外力碰撞的情况下都会开启^[20]。

2.2.2 内部充电

当能量大于10⁵ eV的高能电子穿透绝缘介质材料 表面,并入射至电子设备内部一定深度,而质子和其 他粒子只停留在表面^[24],且电子在内部聚集,从而使内 部和表面形成电位差,此过程称为内部充电效应。内 部充电一般发生在电子设备内部,其诱发机理较为复杂,特别是在高能电子增强条件下,例如太阳的周期 活动。

设备的内部充电主要由到达设备表面的高能电 子流密度决定,此外设备表面的屏蔽材料及其厚度、 设备的防充电加固措施等也会影响设备的内部充电 电位。内部充电是内部电子不断聚集的过程,充电 达到电位平衡所需的时间主要取决于介质的电导率 和高能电子通量水平^[25]。放电是个瞬间过程,时间极 短,由充电水平的高低和外界触发条件决定^[25]。内部 充电过程包括充电和电荷流失两个过程,充电时间 的快慢由电子通量决定,而电荷流失的速率由介质 电导率决定。

等离子体射流直接通过孔、缝或微波天线进入电 子设备内部,并在电子设备内部产生电弧,使电子元 器件烧毁。等离子体流引起的放电电弧会产生的强 烈电磁辐射脉冲,使电子元器件失效、烧毁、产生扰动 与翻转等。此外,等离子体射流对整个电子设备的工 作也会产生严重影响。如影响电子设备与外界的无 线电联系,包括军事情报收集、信息安全、电子通信侦 察、监视、导航以及对空对地作战等。等离子体流会 改变电子设备隔热层的电磁特性,从而改变天线和整 个通信、电子对抗系统的特性。

3 结语

随着我国乃至全世界对空间资源的不断探索和 开发,等离子体的研究已成为全世界重点研究领域之 一。在分析气体放电基本构成时,发现在等离子体环 境中高压太阳能电池阵与电子设备由于放电而容易 被毁伤,通过研究其毁伤机理,得出这种毁伤会对高 压太阳能电池阵与电子设备产生严重影响。可以利 用等离子体射流产生的影响,对未来空间领域的探索 研究工作提供理论支持和技术帮助。

参考文献:

- 杨幼桐,杜凯,张菲,等. 等离子体的诊断方法[J]. 哈尔滨学 院学报,2005,26(10):132—135.
 YANG You-tong, DU Kai, ZHANG Fei, et al. The Diagnosis Approach for Plasma[J]. Journal of Harbin University, 2005, 26(10):132—135.
- [2] 杨小平,戴乐阳,曾美琴,等.介质阻挡放电等离子体及其 在材料制备中的应用[J].材料导报,2010,24(S1):320— 324.

YANG Xiao-ping, DAI Le-yang, ZENG Mei-qin, et al. Di-

electric Barrier Discharge Plasma and its Application in Materials Preparation[J]. Materials Review, 2010, 24 (S1) : 320— 324.

[3] 贺胜. 等离子体定向隐身天线的理论与技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
 HE Sheng. Research on Theory and Technology of Plasma Directivity Stealth Antennas[D]. Nanjing: Nanjing University

of Aeronautics and Astronautics, 2008. [4] 肖冬萍,何为,谢鹏举,等. 高压输电线路电晕放电特性及 其电磁辐射场计算[J]. 电网技术, 2007, 31(21):52—55. XIAO Dong-ping, HE Wei, XIE Peng-ju, et al. Study on Corona Discharge Characteristic of High Voltage Transmission Line and Calculation of Its Electromagnetic Radiation Field

[J]. Power System Technology, 2007, 31(21):52—55.

- [5] 隋晓杰,宋守信. 高压输电线路电晕放电分析[J]. 电力建设,2006,27(3):37—38.
 SUI Xiao-jie, SONG Shou-xin. Analysis on Corona Discharge of HV Transmission Lines[J]. Electric Power Construction, 2006,27(3):37—38.
- [6] 李成榕,王新新,詹花茂,等.等离子体表面处理与大气压下的辉光放电[J].高压电器,2003,39(4):46—51.
 LI Cheng-rong, WANG Xin-xin, ZHAN Hua-mao, et al. Plasma Surface Treatment and Atmospheric Pressure Glow Discharge[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(4):46—51.
- [7] 孙岩洲,邱毓昌,谢建民.大气压下辉光放电的产生[J].高 压电器,2003,39(6):41—46.
 SUN Yan-zhou, QIU Yu-chang, XIE Jian-min. Generation of Glow Discharge at Atmospheric Pressure[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(6):41—46.
- [8] 杨芸,张冠军,杨国清,等.空气条件下介质阻挡放电影响因素的研究[J].高电压技术,2007,33(2):37—41. YANG Yun, ZHANG Guan-jun, YANG Guo-qing, et al. Study on Influential Factors of Dielectric Barrier Discharge in Air[J]. High Voltage Engineering,2007,33(2):37—41.
- [9] 徐旭,欧琼荣,舒兴胜,等.大气压介质阻挡放电三种模式的电学特征[J].高电压技术,2006,32(1):63—118. XU Xu, OU Qiong-rong, SHU Xing-sheng, et al. Electrical Characteristics of Three Models of Dielectric Barrier Discharges Under Atmospheric Pressure[J]. High Voltage Engineering,2006,32(1):63—118.
- [10] 倪明江,余量,李晓东,等. 大气压直流滑动弧等离子体工 作特性研究[J]. 物理学报,2011,60(1):15101—015101.
 NI Ming-jiang, YU Liang, LI Xiao-dong, et al. Characterization of Atmospheric Pressure Dc Gliding Arc Plasma[J]. Acta Phys Sin,2011,60(1):15101—015101.
- [11] 阮鹏. 放电引发非链式脉冲DF激光机理研究[D]. 长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2014.

RUAN Peng. Research on Mechanism of Non-chain Pulsed Electric-discharge DF laser[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2014.

[12] 赵会超. 低温等离子体技术应用研究[D]. 南京:南京航空 航天大学,2013.

ZHAO Hui-chao. Research on Application of Low Temperature Plasma Technology[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

- [13] 邵先军,马跃,李娅西,等. 大气压短间隙 Ar 介质阻挡辉光放电的模拟分析[J]. 高电压技术,2010,36(8):2047—2052.
 SHAO Xian-jun, MA Yue, LI Ya-xi, et al. Simulation Analysis on Dielectric Barrier Glow Discharge in Short Ar Gap under Atmospheric Pressure[J]. High Voltage Engineering, 2010,36(8):2047—2052.
- [14] PARK D E, JONGEWARD G, KATE I, et al. Threshold-Determining Mechanisms for Discharges in High Voltage Solar Arrays[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1987, 24 (4): 367—371.
- [15] HASTINGS D E, WEYL G, KAUFMAN D. The Threshold Voltage for Arcing on Negatively Biased Solar Arrays [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1990, 27(5):539-544.
- [16] HASTINGS D E, CHO M. KUNINAKA H. Arcing Rate for a High Voltage Solar Array-theory, Experiment and Predictions
 [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1992, 29 (4): 538— 554.
- [17] 杨涓,苏维仪,毛根旺,等.等离子体干扰低轨道侦察卫星的计算分析[J].西北工业大学学报,2005,23(1):93—97.
 YANG Juan, SU Wei-yi, MAO Gen-wang, et al. On Calculating Effectiveness of Plasma Defense against Low-orbit Spy Satellite[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2005,23(1):93—97.
- [18] 贾瑞金,童靖宇.低地球轨道等离子体环境引起的高压太 阳电池阵电弧放电现象的研究[J]. 航天器环境工程,2006, 23(3):150—154.

JIA Rui-jin, TONG Jing-yu. A Study on Arc Discharge of HVSA in LEO Plasma Environment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2006, 23(3):150—154.

- [19] 李冬梅.太阳电池阵在低密度等离子体中的电弧诱发机理
 [J]. 航天器环境工程,2004,21(1):57—61.
 LI Dong-mei. Arc Inception Mechanism a Solar Array Immersed in a Low-density Plasma[J]. Spacecraft Environment Engineering,2004,21(1):57—61.
- [20] 杨昉,师立勤.航天器浮动电位的初步分析[J]. 宇航学报, 2010,31 (10):2422-2426.

YANG Fang, SHI Li-qin. Preliminary Analysis of Floating Potentials of Spacecraft[J]. Journal of Astronautics, 2010, 31 (下转第 30页)

954—956.

REN Zi-zhao, XU Jian-cheng, YAN Yong-peng. A Adaptive Filtering Algorithm and Performance for an Improved Variable Step Size LMS Analysis[J]. Computer Applications and Research, 2011, 28 (3):954—956.

- [3] 周胜增,选民.快速收敛最小方差无畸变响应算法研究及应用[J]. 声学学报,2009,34(6):515—520.
 ZHOU Sheng-zeng, XUAN Min. Increase Voter Rapid Convergence Minimum Variance Distortion Response Algorithm Research and Application[J]. Acoustics Sinica, 2009,34(6): 515—520.
- [4] ARENAS-Garcia J, RFIGUEIRAS-Vidal A, SAYED A H. Steady Stateperformance of Convex Combinations of Adaptive Filters[C]// Proceedings of IEEE International Conference Acoustics, Speech, and Signal Processing. The Fleming Singapore: IEEE Press, 2005.
- [5] PAPOULIS E V, STATHAKI T. A Normalized Robustmixed Norm Adaptive Algorithm for System Identifi-cation[J]. IEEE Signal Processing, 2004, 1(11):56–59.
- [6] 田文科,王剑,山秀明. PCMA 自适应自干扰对消算法与仿 真[J]. 电迅技术,2011,51(9):778—82
 TIAN Wen-ke, WANG Jian, SHAN Xiu-ming. PCMA Adaptive Interference Cancellation Algorithm and Simulation[J].
 Electric Fast Technology,2011,51(9):778—782
- [7] 李梅,李文杰,姚善化.改进的变步长LMS 自适应滤波算法及仿真[J].电测与仪表,2010,47(554):15—17.
 LI Mei,LI Wen-jie,YAO Shan-hua. Improved Variable Step Size LMS Adaptive Filter Algorithm and Simulation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(554):15—17.
- [8] 虞晓,胡光锐. 自适应噪声对消中的 ELMS 算法及其变步

长算法[J]. 上海交通大学学报,1998,32(4):92-95.

YU Xiao, HU Guang-rui. Adaptive Noise Cancellation in ELMS Algorithm and Variable Step Algorithm[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 1998, 32 (4):92-95.

[9] 吕春英,敖伟.一种新的变步长LMS算法[J]. 通信技术, 2011,44(3):11-14.

LYU Chun-ying, AO Wei. A New Variable Step Size LMS Algorithm[J]. Communications Technology, 2011, 44(3):11-14.

[10] 曾召华,刘贵忠,赵建平.LMS和归一化LMS算法收敛门限 与步长的确定[J]. 电子与信息学报,2003,25(11):1469— 1474.

ZENG Zhao-hua, LIU Gui-zhong, ZHAO Jian-ping. LMS and Normalized LMS Algorithm Convergence Threshold and the Step of Determining[J]. Electronics & Information Technology, 2003, 25(11): 1469—1474.

- [11] 赵慧霞,许从方. 短波自适应跳频技术的研究[J]. 通信技术,2011,44(6):1—3.
 ZHAO Hui-xia, XU Cong-fang. Research from Shortwave Adaptive Frequency Hopping Technique[J]. Communications Technology,2011,44(6):1—3.
- [12] 刘艳. 基于 FPGA 和 LMS 算法的系统建模[J]. 现代电子技术,2010(2):76—79.
 LIU Yan. Modeling and FPGA Based Systems LMS Algorithm
- [J]. Modern Electronic Technology, 2010(2):76—79.
 [13] 胡琳静,孙政顺. SIMULINK 中自定义模块的创建与封装
 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3):488—451.
 HU Lin-jing, SUN Zheng-shun. SIMULINK Created and

Package Custom Module[J]. System Simulation, 2004, 16 (3): 488–451.

(上接第25页)

(10):2422-2426.

- [21] 吴汉基,蒋远大,张志远,等. 航天器表面电位的主动控制
 [J]. 中国航天,2008(6):36—40.
 WU Han-ji, JIANG Yuan-da, ZHANG Zhi-yuan, et al. Active Control of Spacecraft Surface Potential[J]. Aerospace China,2008(6):36—40.
- [22] STEVENS N J. Environmentally-induced Voltage Limitations in Large Space Power System[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1984, 31:1381—1386.
- [23] FERGUSON D C, GARDNER B. Modeling International Space Station (ISS) Floating Potentials, 2002. 03: 03736[R]. NASA STI / Recon Technical Report N, 2002.
- [24] CHRISTOPHOROUS L G. Electron-molecule Interactions and Their Applications[M]. New York : Academic, 1984.

[25] 黄建国,韩建伟. 航天器内部充电效应及典型事例分析[J]. 物理学报,2010,59(4):2907—2913.

HUANG Jian-guo, HAN Jian-wei. Analysis of a Typical Charging Included Spacecraft Anomaly[J]. Acta Phys Sin, 2010,59(4):2907—2913.