

文章编号: 2095-4980(2016)02-0241-04

屏蔽厚度对电路板充电防护仿真分析

于向前¹, 陈鸿飞¹, 王建昭², 宗秋刚¹, 邵思霈³, 邹 鸿¹,
施伟红¹, 贾向红⁴, 邹积清¹, 仲维英¹, 陈 哲¹

(1.北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2.中国空间技术研究院 总体部, 北京 100094; 3.中国航天科技集团 第513研究所, 山东 烟台 264003; 4.中国航天员科研训练中心 航天医学基础与应用国家重点实验室, 北京 100094)

摘 要: 卫星深层介质充放电是造成卫星异常的主要空间环境效应之一。本文基于地球同步轨道(GEO)为目标防护设计轨道, 以NASA4002A上提出的GEO轨道最恶劣电子能谱作为环境输入参数, 采用Geant4-RIC方法计算了不同屏蔽层厚度下, 双面覆铜接地的厚度为2.0 mm的电路板介质的深层介质充电电场。计算结果表明, 随着屏蔽层厚度的增加, 介质内最大充电电场呈指数降低, 当屏蔽层厚度大于1.4 mm等效Al时, 充电电场小于 10^6 V/m, 没有深层介质放电风险。

关键词: 卫星深层介质充放电; 双面覆铜接地电路板; 地球同步轨道; Geant4-RIC方法

中图分类号: TN124

文献标识码: A

doi: 10.11805/TKYDA201602.0241

Simulation of the influence of shielding layer's thickness on charging hazard of circuit board

YU Xiangqian¹, CHEN Hongfei¹, WANG Jianzhao², ZONG Qiugang¹, SHAO Sipei³, ZOU Hong¹, SHI Weihong¹,
JIA Xianghong⁴, ZOU Jiqing¹, ZHONG Weiyang¹, CHEN Zhe¹

(1.Institute of Space Physics and Applied Technology, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;
2.China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China; 3.513 of CAST, Yantai Shandong 264003, China; 4.Space Medicine and Medical Engineering Institute, Beijing 100094, China)

Abstract: Deep dielectric charging and discharge is one of the most harmful factors for spacecraft. In this paper, by using GEANT4-RIC method, the deep dielectric charging electric field of 2.0 mm thickness circuit board is calculated under the worst-case internal spectrum in Geostationary Earth Orbit(GEO) from NASA4002A. The simulation result shows that the maximum dielectric charging electric field decreases exponentially with the increasing of the thickness of the shielding layer. When the thickness of the shielding layer is above 1.4 mm Al, the maximum electric field is below 10^6 V/m, which shows no deep dielectric discharge hazard.

Key words: deep dielectrics charge and discharge hazards; double grounded circuit board; Geostationary Earth Orbit; Geant4-RIC method

卫星深层介质充电是指空间中的高能带电粒子穿透卫星的蒙皮、结构和仪器设备外壳, 嵌入印刷电路板、同轴电缆绝缘层等绝缘介质或者孤立导体并在其中建立电场的过程。当充电电场超过介质所能承受的最大电场(即阈值电场)时就会发生放电。放电所产生的电磁脉冲或等离子体云可以耦合进电子系统中, 对其产生干扰, 乃至发生故障, 甚至威胁卫星安全^[1]。卫星深层介质充放电危害比表面充放电危害更严重, 主要是由于深层充放电更可能发生在敏感电路或者部件附近^[1]。卫星深层介质充放电危险等级和卫星的轨道高度有关, 其中, GEO(地球同步轨道, 35 800 km)轨道是受深层介质充放电效应危害的严重区域^[1]。对1973年至1997年卫星故障进行分类统计, 在总的299例故障中, 由充放电引起的异常有162例, 其中, 由深层介质充放电造成的异常已确定的有74例, 约占总充放电异常事件的45.7%, 占环境造成卫星异常的25%^[2]。深层充放电效应比较严重, 主要是对深层充放电的过程认识不够, 使得设计师不能采取合适的防护^[3]。因此, 卫星深层介质充放电研究对于保障卫星安

收稿日期: 2015-01-19; 修回日期: 2015-03-03

基金项目: 国家自然科学基金面上资助项目(41374181); 国家重大科学仪器设备开发专项资助项目(2012YQ03014207)

全运行至关重要。

1 GEANT4-RIC 方法

卫星深层介质充电主要是由空间中的高能电子所致，CRRES(Combined Release and Radiation Effects Satellite)卫星的在轨测量数据也验证了深层介质充放电效应与高能电子辐射通量呈近似的正相关性^[1,4-5]。高能电子穿透卫星的蒙皮和仪器外壳，在介质中的沉积是一个动态过程，一方面，电子由于射程的离散性在介质中沉积形成内建电场；另一方面，电荷在内建电场的作用下形成泄漏电流，当电荷的泄漏率和沉积率相等的时候，就达到了动态平衡。Geant4-RIC(Radiation Induced Conductivity)方法是目前进行深层介质充放电模拟研究的重要方法。首先对介质和屏蔽层进行建模，并选取典型轨道电子辐射能谱作为环境输入，然后用 Monte Carlo 软件包 Geant4 模拟空间高能电子在物质中的输运过程，得到介质中的辐射剂量率和电子束电流，再用辐射诱导电导率模型(RIC 模型)模拟介质中电场等物理量随时间的变化，得到介质内部的深层充电图像^[6-8]。

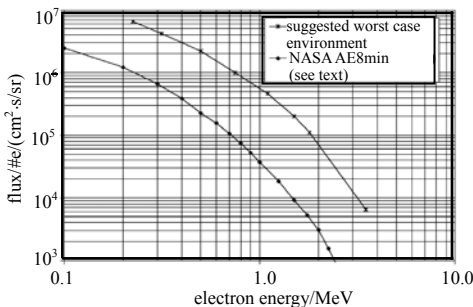


Fig.1 Input internal spectrum of GEO
图 1 GEO 轨道最恶劣情况下和平静时期的积分电子能谱

2 仿真分析

2.1 输入参数的选取

以 GEO 轨道为目标设计轨道，选取美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)4002A 上指出的 GEO 轨道最恶劣情况下的电子能谱作为环境输入参数，其积分能谱如图 1 所示，为了对比，图中标出了代表平静时期的电子通量 AE8min。输出能谱假定各向同性分布。

表 1 FR4 的元素组成
Table1 Elements and their mass percentage of FR4

elements	H	O	C	Si
mass percentage	36.3%	43.1%	14.8%	5.8%

表 2 FR4 物理特性

Table2 Physical characteristics of FR4

$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	$\rho_l/(\text{m}^2\cdot\text{V}^{-2}\cdot\text{s}^{-2})$	$\rho_m/(\text{C}\cdot\text{m}^{-2})$	$\sigma_d/(\Omega^{-2}\cdot\text{m}^{-2})$	$\varepsilon/(\text{F}\cdot\text{m}^{-2})$	$K/(\text{s}\cdot\Omega^{-2}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rad}^{-2})$	τ/s	Δ
1.78×10^2	5×10^{-15}	4×10^3	5×10^{-16}	4.2×10^{-22}	3×10^{-16}	1	1

等效屏蔽厚度取为 0 mm,0.5 mm,1.0 mm,1.5 mm 和 2.0 mm 等效 Al。电路板材料采用 FR4 介质，厚度选取空间用电路板的典型厚度 2.0 mm。电路板采用双层电路板，底层覆金属板和顶层覆金属板的厚度都取为 30 μm ，且接地。实际 2 层电路板一般底层和顶层都铺铜接地，即使不铺铜接地，其对地电阻一般小于 100 k Ω ，空间中高能电子的充电电流一般为 pA 量级^[1]，在 100 k Ω 电阻上的压降小于 1 μV 。与绝缘介质的电阻相比，其对地电阻可以忽略。因此，在模拟计算中，假定电路布线层接地是合理的^[9]。采用的 FR4 介质的组成元素如表 1 所示，物理特性如表 2 所示。其中，暗电导率采用电荷衰减法测得。

2.2 模拟结果及讨论

图 2 为无屏蔽状态下，介质内部最大电场随辐照时间的变化，表明充电过程是一个快速上升，逐步达到饱和的过程。

图 3 为无屏蔽状态下，介质内部饱和电势随介质深度的变化。由图 3 可以看出，饱和电势为负值，绝对值最大值在中间位置附近。图 4 为无屏蔽状态下，介质内部饱和

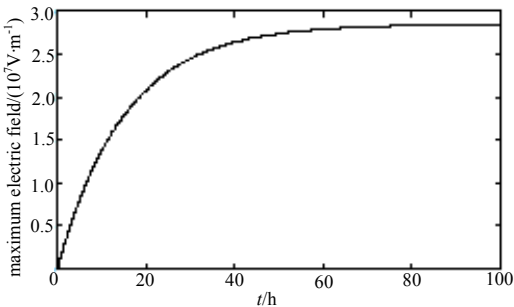


Fig.2 Max electric field vs. time without shielding
图 2 无屏蔽状态下介质内部最大电场随时间的关系

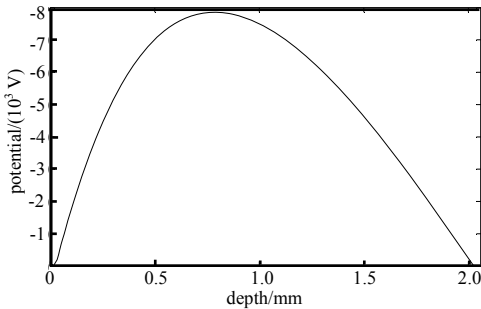


Fig.3 Saturated potential vs. depth of FR4 without shielding
图 3 无屏蔽状态下介质内部饱和电势与介质深度的关系

电场随介质深度的变化,反映了在典型的输入能谱条件下,介质随深度的充电特性。由图4可以看出,饱和电场有正有负,绝对值最大值集中在介质厚度的2端,零点位置在中间位置附近。

在有屏蔽厚度状态下,介质内部最大电场强度与屏蔽厚度的关系趋势基本相同,只是数值会有所变化。由图5和图6可以看出,随着屏蔽层厚度的增加,介质内部最大电场强度和电势都降低。对其进行数据拟合,可以得到介质内部最大电场强度 $E_{\max}$ 和最大电势 $U_{\max}$ 与介质屏蔽层厚度 d 的关系:

$$E_{\max} = 10^{-1.0359d+7.4484} \quad (1)$$

$$U_{\max} = 10^{-1.0573d+3.9297} \quad (2)$$

NASA 预防卫星深层介质充放电的指导手册—NASA4002A 建议:为了预防深层介质放电发生,介质内部电场要低于 $4 \times 10^6 \text{ V/m}$ [1]。欧洲航天局(European Space Agency, ESA)预防卫星深层介质充放电的指导手册指出,当介质内部电场 $E < 10^6 \text{ V/m}$ 时没有放电风险, $10^6 \text{ V/m} < E_{\max} < 10^7 \text{ V/m}$ 时具有潜在的放电风险, $E_{\max} > 10^7 \text{ V/m}$ 时则会发生放电 [10]。以 $E_{\max} = 10^6 \text{ V/m}$ 作为是否存在深层介质放电风险的标准。将 $E_{\max} = 10^6 \text{ V/m}$ 代入式(1)可得,当等效屏蔽厚度 $d > 1.4 \text{ mm}$ 等效 Al 时,2 mm 双面接地电路板不存在深层介质放电风险。此时,介质内最大电势 $U_{\max} < 282 \text{ V}$ 。

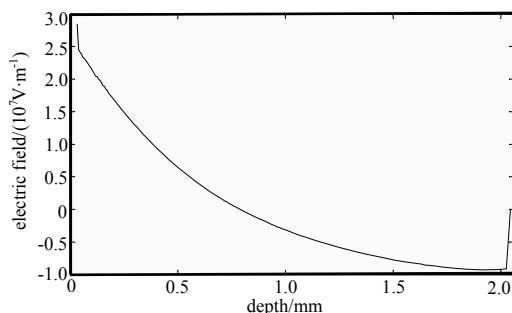


Fig.4 Saturated electric field vs. depth of FR4 without shielding

图4 无屏蔽状态下介质饱和电场与介质深度的关系

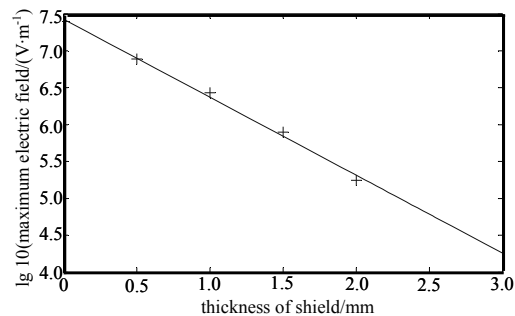


Fig.5 Saturated electric field vs. different thicknesses of shielding layer

图5 不同屏蔽厚度下,介质内部最大电场强度与屏蔽厚度的关系曲线

3 结论

本文以 GEO 轨道为目标防护设计轨道,以 NASA4002A 上提出的 GEO 轨道最恶劣电子能谱作为环境输入参数,采用 Geant4-RIC 模型计算了无屏蔽厚度、0.5 mm、1.0 mm、1.5 mm 和 2 mm 等效 Al 屏蔽条件下,双面接地的厚度为 2.0 mm 的电路板的深层介质充电电场和充电电势。计算结果表明,随着屏蔽厚度的增加,介质内最大电场和最大电势 $U_{\max}$ 与屏蔽厚度 d 有如下关系:

$$E_{\max} = 10^{-1.0359d+7.4484}$$

$$U_{\max} = 10^{-1.0573d+3.9297}$$

当屏蔽层厚度大于 1.4 mm 等效 Al 时,充电电场小于 10^6 V/m ,没有深层介质放电风险。此时介质内最大电势 $U_{\max} < 282 \text{ V}$ 。

参考文献:

- [1] NASA-HDBK-4002A, Mitigating in space charging effects—a guideline[Z]. National Aeronautics and Space Administration, Washington, DC 20546-0001, 2011.
- [2] KOONS H C, MAJUR J E, Selesnick R S, et al. The impact of the space environment on space systems[C]// Spacecraft Charging Technology Conference, September, 2000.
- [3] KIM W, JUN I, KOKOROWSKI M. Internal electrostatic discharge monitor (IESDM)[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 2010, 57(6): 3143–3147.
- [4] FREDERICKSON A R, MULLEN E G, KERNS K J, et al. The CRRES IDM spacecraft experiment for insulator discharge pulses[J]. IEEE Trans. Nucl. Sci., 1993, 40(2): 233–241.
- [5] GREEN N W, FREDERICKSON A R, DENNISON J R. Experimentally derived resistivity for dielectric samples from the

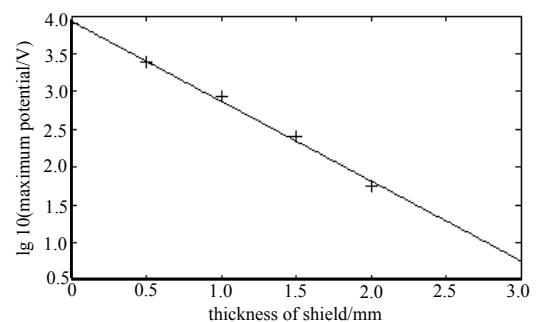


Fig.6 Saturated potential vs. different thicknesses of shielding layer

图6 不同屏蔽厚度下,介质内部最大电势与屏蔽厚度的关系曲线

- CRRES internal discharge monitor[J]. in Proc. 9th aircraft Charg. Technol. Conf., Tsukuba, 2005,34(5):1973-1978.
- [6] TANG X J,YI Z,MENG L F,et al. 3-D internal charging simulation on typical printed circuit board[J]. IEEE Trans. Plasma Sci., 2013,41(12):1-5.
- [7] KATZ Ira,KIM Wousik. A 3-D model of circuit board internal electrostatic charging[C]// 11th Spacecraft Charging Technology Conference. 2010:20-24.
- [8] LI X C,CHEN H F,HAO Y Q,et al. Investigation of electrons inside the satellite by the Geant4 simulation[J]. Sci. China Ser. E, 2011,54 (9):2271-2275.
- [9] 王建昭,陈鸿飞,于向前,等. 多层电路板的深层充电研究[J]. 技术科学, 2014,44:1-8. (WANG Jianzhao,CHEN Hongfei, YU Xiangqian,et al. Study on internally dielectric charging of multilayer circuit board(in Chinese)[J]. Sci. Sin. Tech., 2014,44:1-8.)
- [10] SØRENSEN J. ESA technology research programme space environment and effects major axis[Z]. Engineering Tools for Internal Charging-Final Report, 1999.

作者简介:



于向前(1983-), 男, 河南省南阳市人, 在读博士研究生, 工程师, 主要研究方向为空间探测技术研究.email:yuxiangqian@126.com.

(上接第240页)

- [9] JENN D C. Radar and Laser Cross Section Engineering[M]. Virginia:The American Institute of Aeronautics and Astronautics Press, 2005.

作者简介:



梁洪灿(1984-), 男, 安徽省阜阳市人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为宽带天线、反射面天线、相控阵天线.email:lianghongcan@sina.com.

贺友龙(1988-), 男, 江苏省泰州市人, 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为共形天线、阵列天线.

潘 伟(1980-), 男, 江苏省南通市人, 本科, 工程师, 主要研究方向为无源器件、馈电网络.

蒋凡杰(1969-), 男, 江苏省南通市人, 本科, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为天馈、微波与射频系统及其工程应用.

倪文俊(1981-), 男, 湖北省荆州市人, 本科, 高级工程师, 主要研究方向为宽带天线、相控阵天线.