

卫星介质深层充电中的主要物理问题^{*}

黄建国 陈 东 师立勤

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要

卫星介质深层充电效应是诱发地球同步轨道卫星运行故障和异常的重要因素之一, 通过计算机模拟对介质深层充电的时间常数、电场特征、以及屏蔽、介质厚度和接地方式对充电所致最大电场的影响等主要物理问题进行了详细的分析, 并给出了初步的防护措施。

关键词 卫星; 介质深层充电; 高能电子; 计算机模拟

1 引言

地球同步轨道卫星经常会受到能量为 0.1—10 MeV 的高能电子威胁, 这些电子具有很强的穿透能力, 可以穿透卫星表面数层而对星内的构件进行充电, 通常称作内部充电 (Internal Charging)。内部充电包括两种, 一种是对星内的孤立导体进行充电, 另一种是对星内介质充电。对孤立导体的充电计算比较复杂, 因为电荷分布在导体表面, 在边缘、棱角处电场最强, 计算这些位置的电场是比较困难的, 但防护措施比较简单, 即尽量将孤立导体接地。

本文主要研究高能电子对星内介质的充电效应, 即介质深层充电 (Deep Dielectric Charging), 相对前者而言, 其存在更加普遍。

介质深层充电过程主要包括两个方面: 一方面高能电子穿透卫星表面的薄层而进入其内部的介质材料中。电子与介质材料相互作用的中间过程是复杂的, 主要方式是 Rutherford 散射和核相互作用, 最终结果是不同能量的电子沉积于介质材料的不同深度并建立电场; 另一方面, 因为介质本身有一定的电导率, 在电场作用下会形成泄漏电流, 该过程与电荷沉积过程的作用是相反的。但是, 电介质在没有受到辐射的情况下电导率 (暗电导率) 是很低的, 而卫星上所用的介质大多数为高分子聚合物, 大量实验证明聚合物在受到辐射情况下电导率有显著增加, 由辐射引起的介质电导率称为辐射感应电导率^{[1]—[3]}, 其影响使得电介质中的电荷泄漏过程大大增加。当电荷的沉积和泄漏过程达到平衡时, 介质中的电场达到最大。

判断是否产生放电的惟一依据是介质中充电所致最大电场, 当最大电场大于该种介质材料的击穿阈值时, 就会产生静电放电。放电不仅直接破坏介质构件本身, 所产生的电磁脉冲还会干扰星内的电子学系统, 严重时甚至导致整个卫星失效。我们根据介质深层充电的物理机制建立物理模型, 对特定高能电子能谱下的卫星介质构件中电场的演变、分布等进行了数值模拟, 结果与欧空局的深层充电分析软件 DICTAT (DERA Internal Charging

^{*} 国家 863 青年基金项目资助 (863-2-7-7-1)

2003-10-30 收到原稿, 2004-05-06 收到修定稿

Threat Assessment Tool) 吻合得很好^[4]. 卫星介质构件形态一般有两种, 即平板形 (如集成电路板、热敷层、光学窗等) 和圆柱形 (如电缆外套、玻璃纤维、光缆等), 每种构件又可以采取不同的接地方式. 高能电子在介质中的传输和沉积采用了经验公式^{[5],[6]} 进行计算, 与蒙特卡洛方法相比简单省时、实用性强, 其精度虽然不如蒙特卡洛法, 但相对于空间高能电子能谱的不确定性而言, 所产生的误差要小得多. 本文中采用的能谱为是型外辐射带高能电子能谱 GEODUR.

以下将以环氧树脂平板介质为例, 从最大电场入手分析充电时间、电场分布、以及介质厚度、屏蔽厚度、电子能谱和接地方式的影响等.

2 充电时间

图 1 所示为介质中不同深度的电场强度 E 随时间 t 的演变情况. 可以看出, 在不同的深度, 电场达到平衡的时间也不同, 充电时间常数随着深度的增加而增大. 因此, 并非整个介质同时达到平衡, 而是较前的位置首先达到平衡, 然后逐步向后推进, 直至整个介质达到平衡状态. 这里, 充电时间大约为 1 h.

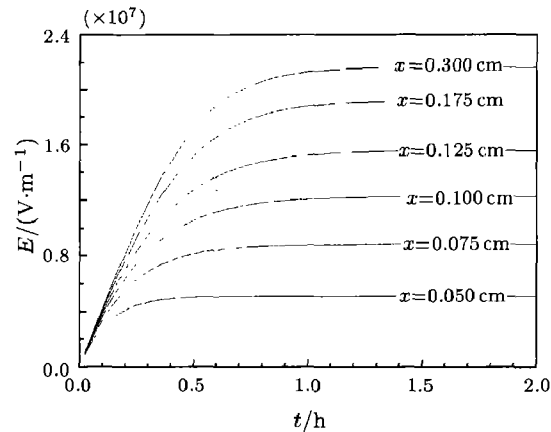


图 1 介质内不同深度的电场随时间的变化 (x 为介质深度)

Fig.1 Electric field in different depths as a function of time (x is depth in the dielectric)

如果将介质深层充电过程简单地等效为 RC 回路的充电过程 (R 、 C 分别为等效电路的电阻和电容), 可以得到如下方程:

$$E = \frac{e\Phi(0)}{\sigma} \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]. \quad (1)$$

其中, $\Phi(0)$ 为电子入射通量, e 为电子电量, σ 为介质电导率, $\tau = RC \propto 1/\sigma$ 为充电时间常数, 根据辐射感应电导率的 Fowler 方程^[1] 可以得到

$$\tau \propto \frac{1}{\sigma_0 + k\Phi}. \quad (2)$$

式中, σ_0 为介质的暗电导率, k 是依赖于材料属性的参量. 介质的物理参数需要实验测定, 对于环氧树脂介质, 可参阅相关文献. 从方程 (1)、(2) 可知, 对于给定厚度的介质,

深层充电所能达到的最大电场取决于高能电子通量;而充电时间常数不仅取决于介质本身的参数,还与高能电子通量有关,通量越大,达到平衡所用的时间越短,这一点与一般的充电过程不同.由方程(1)可知,应当尽量选用电导率高的介质,以避免产生高的充电电场.

3 电场分布

介质中电场的分布取决于介质构件的接地方式,对于平板介质而言,有正面接地、背面接地及两面同时接地三种方式(某一侧接地即在该侧刷上导电层并与卫星的地接在一起),对于圆柱介质则为表面接地、芯部接地及表面和芯部同时接地三种方式.图2所示为三种接地方式下环氧树脂平板介质充电达到平衡时的电场分布(图中背面接地时的电场缩小到1/10).显然,对于不同的接地方式,介质中最大电场的值和所出现的位置都有很大区别:对于图中的0.3 cm 环氧树脂介质,在平板介质正面接地时,最大电场为 7.5×10^5 V/m,出现在介质的正面;当背面接地时,最大电场为 2.2×10^7 V/m,出现在介质的背面;而在两面接地的情况下,电场的两个极大值分别出现在平板介质的正面和背面,但方向相反,而最大电场究竟出现在哪一侧,还取决于介质的厚度.

图3分别给出了两面接地时正面电场和背面电场绝对值随介质厚度的变化,可以看出,在一定的介质厚度范围内(对于图中环氧树脂该厚度约为0.38 cm),背面电场强度大于正面电场,但当介质超过这一厚度时,最大电场便出现在介质的正面.

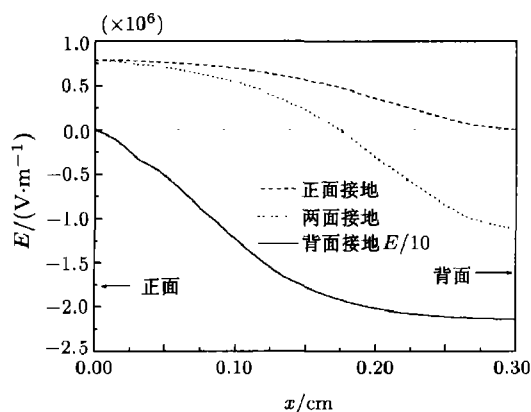


图2 不同接地方式下介质中的电场分布
Fig.2 The distribution of electric field in dielectric for different grounding patterns

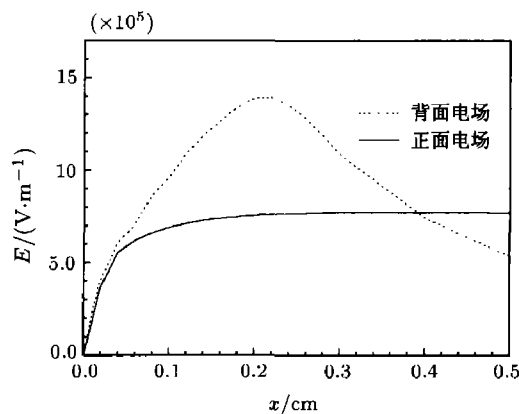


图3 两面接地时正面电场和背面电场绝对值随介质厚度的变化
Fig.3 Absolute values of front and back electric field as a function of dielectric thickness for double-grounded case

不同接地方式下最大电场出现的位置可以用欧姆定律来解释.电子从正面入射,定义电子的入射方向为正方向.介质中的传导电流密度包含两个分量:一个是入射电子通量 Φ 形成的电流 $j_{\text{beam}} = -e\Phi$, 取决于入射电子的通量,而与介质的电导率和电场无关;另一个分量即欧姆电流 $j_{\Omega} = \sigma E$, 是由介质电导率 σ 和电场 E 决定的.当充电达到平衡状态时,有

$$j_{\text{total}} = -e\Phi(x) + \sigma E(x) = \text{const.} \quad (3)$$

为便于分析, 这里假定介质中电导率 σ 为常数. 对于正面接地的平板介质 (厚度为 d), 流经其背面的欧姆电流为零, 即电场为零, 有 $j_{\text{total}} = -e\Phi(d)$, 而电子通量 $\Phi(x)$ 随深度递减, 容易判断介质中电场为正值, 且随着深度而减小, 最大电场出现在平板介质的正面, 即接地侧.

对于背面接地的平板介质, 其正面欧姆电流为零, 即正面电场为零, 有 $j_{\text{total}} = -e\Phi(0)$, 由 (3) 式可知, 介质中电场为负值, 且电场绝对值随深度而增大, 因此最大电场出现在平板介质的背面接地侧.

对于正面和背面同时接地的情况, 介质中电子形成的欧姆电流分别流向正面和背面的两个地, 在平板介质正面电场为正, 背面电场为负, 而 $\Phi(x)$ 随入射深度衰减, 由 (3) 式可知电场由介质正面的正极大值单调地减小为背面的负极大值, 而在介质中某一深度存在一个零电场位置. 但正面和背面的电场哪一个更大, 还取决于介质的厚度, 如图 3 所示 (图中对电场取了绝对值, 背面电场实际为负值), 当介质小于某一厚度 (图中为 0.38 cm) 时, 背面电场大于正面电场, 超过这一厚度后, 正面电场便大于背面电场. 这是因为当介质小于某一厚度时, 沉积电荷重心距背面更近, 大部分电荷流向介质背面, 使得背面电场大于正面电场, 而当介质超过这一厚度时, 大部分电荷开始流向介质正面的地, 从而使得正面电场大于背面电场.

因此, 若要降低乃至避免介质深层充电的威胁, 应当对介质构件采取适当的接地方式, 可能的情况下应该优先考虑两面同时接地, 其次是正面接地, 再次是背面接地; 同样, 对于圆柱形介质构件, 优先次序是表面和芯部同时接地、表面接地、芯部接地. 应该尽量避免介质构件悬浮而不接地, 这样介质中只沉积电荷而不泄漏电荷, 很容易导致放电, 是很危险的.

4 最大电场与介质厚度的关系

图 4 所示为介质中最大电场随介质厚度的变化关系, 可以看出, 最大电场随着介质厚度的增加而增大, 当介质厚度到达一定值 (此处约为 0.25 cm) 时, 电场基本达到饱和. 当高能电子能谱确定时, 对于较薄的介质, 部分电子会穿出介质层, 沉积的电荷量有限, 因而所达到的最大电场较小; 随着介质变厚, 沉积的电荷量逐渐增加, 介质内最大电场也随之增加, 当介质厚度超过高能电子的射程时, 电子无法穿越介质层, 从而介质中沉积的电荷量达到最大, 此时最大电场便不再随介质厚度而增大. 因此, 要想减小甚至避免深层充电危险性, 应在允许的条件下尽量选用薄的介质材料.

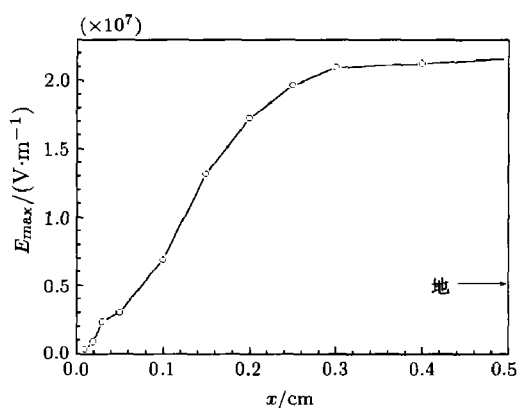


图 4 最大电场随介质厚度的变化
Fig.4 Maximum field as a function of dielectric thickness

5 最大电场与屏蔽厚度的关系

图 5 给出了厚度为 0.1 cm 的环氧树脂介质在 GEODUR 能谱下, 内部最大电场随屏蔽层 (Al) 厚度的变化关系. 随着屏蔽的增厚, 电场单调下降, 但开始下降很快, 当屏蔽层超过一定厚度之后, 再增加屏蔽层作用就十分有限了, 因此在实际应用中, 应该通过计算选择适当的屏蔽厚度, 这样既能够有效地屏蔽, 又能够节约资源.

6 最大电场与电子能谱的关系

图 6 中给出了厚度为 0.3 cm 的环氧树脂介质在无屏蔽和有屏蔽两种情况下内部最大电场随电子能量的变化关系. 在未加屏蔽的情况下, 当电子能量 $E_e < 1.05$ MeV 时, 介质内最大电场 $E_{\max}$ 保持不变; 当电子能量 $1.05 \text{ MeV} < E_e < 2.5 \text{ MeV}$ 时, $E_{\max}$ 随 E_e 迅速衰减; 当 $E_e > 2.5 \text{ MeV}$ 时, $E_{\max}$ 基本趋于零.

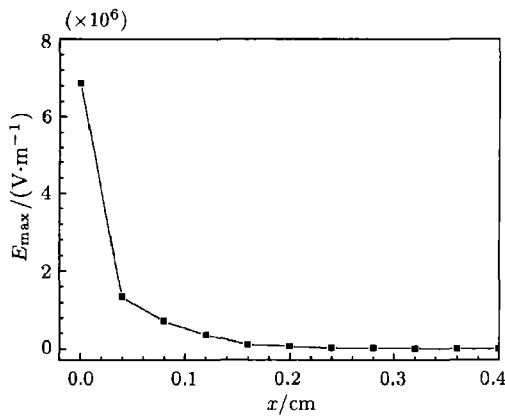


图 5 最大电场随屏蔽厚度的变化
Fig.5 Maximum field as a function of shield thickness

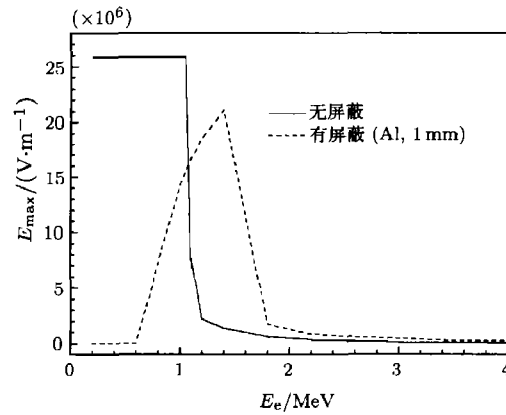


图 6 介质中最大电场随高能电子能量的变化
Fig.6 Maximum field as a function of electron energy

前面已经论述, 对于背面接地的平板介质而言, 最大电场 $E_{\max}$ 位于背面接地侧. 当充电过程达到平衡时, 根据 (3) 式, 有

$$e(\Phi_i - \Phi_b) = j_b = \sigma_b E_{\max}, \quad (4)$$

$$E_{\max} = \frac{e(\Phi_i - \Phi_b)}{\sigma_b}. \quad (5)$$

其中, Φ_i 、 Φ_b 分别为平板介质正面的入射电子通量和背面出射电子通量, σ_b 为背面接地侧的电导率. 因此 Φ_b 决定于介质厚度 d 和电子能量 E_e .

在电子入射通量 Φ_i 确定的情况下, 当电子能量 $E_e < 1.05 \text{ MeV}$ 时, 计算可知此时电子全部沉积在介质中, 因此 $\Phi_b = 0$, 介质背面的辐射感应电导率等于其暗电导率, 即 $\sigma_b = \sigma_0$, 由 (5) 式可知, $E_{\max}$ 仅决定于电子的入射通量 Φ_i , 而不随电子能量改变; 当 $E_e > 2.5 \text{ MeV}$ 时, 根据计算可知入射电子全部穿出介质层, $\Phi_b = \Phi_i$, 由 (5) 式可知,

$E_{\max} = 0$; 当 $1.05 \text{ MeV} < E_e < 2.5 \text{ MeV}$ 时, 部分入射电子穿出介质层, Φ_b 随着 E_e 的增加而增加, 同时由于辐射感应电导率的影响 σ_b 随着 E_e 的增加而增大, 由 (5) 式可知, $E_{\max}$ 在上述两种因素的共同作用下随着 E_e 的增加而很快衰减.

当存在屏蔽时, 在低能端因电子被屏蔽层阻挡使得介质内部电场很小; 随着电子能量的增加越来越多的电子穿过屏蔽层而沉积于介质中, 最大电场也随之增加, 而后随着能量的进一步增大越来越多的电子开始穿过介质层, 使得沉积的电荷量减小, 同时接地侧的辐射感应电导率也迅速增加, 从而最大电场迅速衰减. 可见, 当存在屏蔽的情况下, 存在一个能量值, 使得介质中的电场达到极大.

7 不同接地方式下的电位分布

介质深层充电不仅会导致介质本身被击穿, 在适当条件下也会导致介质构件与相邻的金属部件或接地物体之间产生放电, 因为深层充电使得介质表面达到一定的电位后会在介质构件和相邻金属部件之间的间隙形成电场, 当这一电场达到一定的强度时, 就会击穿间隙的真空而产生放电, 形成电磁脉冲. 图 7 为 3 种接地方式下平板介质中电位的分布, 正面接地时, 介质背面的电位达到 $1.3 \times 10^5 \text{ V}$, 而当背面接地时, 其正面电位则达到 $8 \times 10^5 \text{ V}$, 因此, 背面接地更容易导致被充电介质与相邻金属部件或接地物体之间发生放电, 而当两面同时接地时, 表面电位为零, 是最安全的.

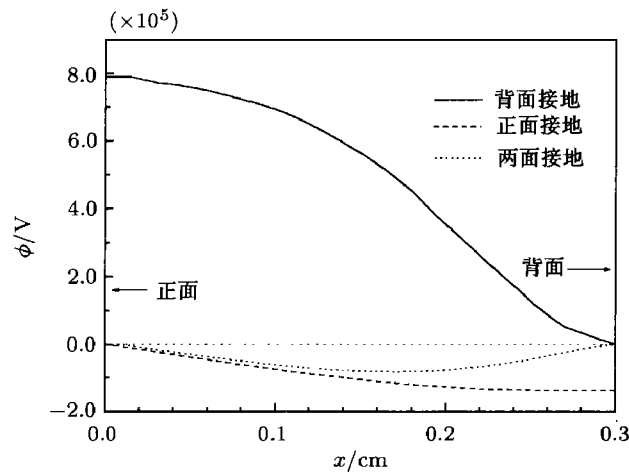


图 7 介质中的电位分布
Fig.7 Potential distribution in dielectric

8 结论及讨论

深层充电所致的介质内最大电场随介质厚度的增加而增大, 随屏蔽厚度增加而减小, 因此在允许的情况下采用薄的介质层和增加屏蔽厚度可以防止发生放电, 但要有效地实施防护, 应该选用适当的介质厚度及屏蔽厚度, 比如对于屏蔽而言, 超过一定厚度时, 所

起的作用是十分有限的. 因此, 通过计算卫星介质构件中最大电场与介质厚度及屏蔽厚度的变化关系, 再结合构件本身的功能需求等条件, 可以帮助选取最佳的设计参数, 满足抗辐射加固的需求.

深层充电导致的介质中最大电场和介质表面电位因接地方式不同而不同. 对于正面接地的平板介质构件, 最大电场位于正面接地侧; 对于背面接地情况, 最大电场则位于背面接地侧, 但后者的电场要比前者大一个量级以上; 对于两面同时接地的情况, 介质中的两个电场极大值分别位于前后两个接地侧, 并且比相应的单独接地时的电场都要小, 至于最大电场位于前面还是背面则取决于介质厚度, 介质很薄时背面接地侧的电场较强, 对于较厚的介质则正面电场最强. 因此从介质本身的安全性考虑, 在可能的情况下尽量选择正面接地或两面同时接地更妥当. 而就表面电位而言, 背面接地时介质表面电位最高, 正面接地次之, 最安全的是正面和背面同时接地, 此时两面的电位都是零, 不会和周围金属部件或接地物体之间发生放电.

本文的模拟计算是在给定高能电子能谱的条件下进行的, 如果在程序中嵌入高能电子环境模式, 即可对在轨卫星的深层充电效应进行分析, 目前模式的建立工作正在进行之中. 但至今已有的 AE8 模式不能反映诱发深层充电的能量在 100 keV—10 MeV、以高能电子通量增强事件为特征的外辐射带高能电子环境, 欧空局基于大量的空间高能电子探测数据建立了 FLUMIC 模式^[6], 这将对建立模式高能电子环境起到很好的借鉴和参考作用.

参 考 文 献

- [1] Fowler J F. Analytic expression for electrons transmission in dielectrics. *Proc. Royal Soc.*, 1956, **236A**:464—475
- [2] Harrison S E, Copage F N, Snyder A W. Gamma-ray and neutron-induced conductivity in insulating materials. *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, 1963, **10**:118—128
- [3] Ahrens T J, Wooten F. Electrical conductivity induced in insulators by pulsed irradiation. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1976, **23**: 2134—2139.
- [4] Huang Jianguo, Chen Dong. A study of deep dielectric charging on satellites by computer simulation. *Chin. J. Geophys.*, 2004, **47**(3):392—397. in Chinese (黄建国, 陈东. 卫星深层充电的计算机模拟研究. 地球物理学报, 2004, **47**(3):392—397)
- [5] Weber K H. Eine einfache reichweite-energie-beziehung for elektronen in energiebereich von 3 keV bis 3 MeV. *Nuc. Inst. Meth.*, 1952, **25**:261—270
- [6] Sorensen J. Environment modelling for space-based applications. ESA SP-392, 1996, 129

KEY PHYSICAL PROBLEMS IN DEEP DIELECTRIC CHARGING ON SATELLITES

HUANG Jianguo CHEN Dong SHI Liqin

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

Deep dielectric charging (DDC) is one of the key factors inducing malfunctions and failures on geo-synchronous satellites. In this paper, the main problems such as charging time, electric field distribution, as well as influences on DDC-induced maximum field by shield, dielectric thickness and grounding patterns are studied in detail, and some results of computer simulation are introduced for the planar model. In the meantime, some preliminary measures for DDC protection are recommended accordingly.

The charging time depends on both dielectric parameters and flux of high energetic electrons in the space environment. For epoxy, a kind of usually used dielectric material on satellites, the charging time is in the order of hours. The electric field distribution in the dielectric is determined by the grounding pattern. For the case grounded on single side, the maximum field generally appears on the grounded side with the other side having zero field. While for the case grounded on both sides, both sides have maximum fields, with values smaller than single-grounded case. Moreover, the maximum field in the dielectric is related to the thickness of the dielectric itself and the applied shield. The maximum field increases with the dielectric thickness to a saturated value, and decreases with the shield thickness, however, contribution of the shield over a certain thickness is negligible.

Key words Satellite, Deep dielectric charging, High energy electron, Computer simulation