

用蒙特卡罗方法研究卫星内部带电问题^{*}

高炳荣 郝永强 焦维新

(北京大学地球物理系 北京 100871)

摘 要

由高能电子引起的卫星内部带电,是危害地球同步轨道卫星主要的空间环境效应之一.内部带电的物理机制和相应的卫星设计规范研究,近年来受到国际空间界的高度重视.本文用蒙特卡罗方法,通过模拟高能电子对电介质轰击后在介质中产生电荷沉积,计算了轰击后电介质内部最大电场强度,并进而分析了电介质内部电场与电子能量、屏蔽厚度及介质厚度的关系.该结果对卫星设计有重要参考价值.

关键词 卫星内部带电;蒙特卡罗方法;沉积电荷;电场强度

1 引言

卫星内部带电是由能量范围为 0.1—10 MeV 的高能电子引起的,它们穿透卫星的屏蔽层沉积在电介质内,当电荷的积累率高于电荷的泄漏率时,这些电荷产生的电场不断增加,有可能超过介质的击穿阈值,引起静电放电.这种放电直接或间接地耦合到卫星其他灵敏的或未加防护的电路,引起不同程度的损坏,特别易受损坏的是屏蔽比较差的电缆、印刷电路板和热防护层,严重时甚至导致卫星完全失效.表 1 给出了 1991—1998 年间发生的几次比较严重的内部充电事件^{[1]—[4]},每次事件都造成严重的经济损失和不良的社会影响.由此可见,高能电子对卫星构成了严重的威胁.因此,高能电子被称为卫星的杀手.

表 1 高能电子诱发卫星内部带电典型事件

Table 1 Satellite internal charging events caused by energetic electrons

时 间	卫 星	影 响
1991-03-25	美国地球同步卫星 Marecs-1	卫星完全受损,停止工作
1994-01-20	加拿大通信卫星 Intelsat-K	动量轮转动系统受损,姿态控制失灵
1994-01-20	加拿大通信卫星 Anik E1	动量轮转动系统受损,姿态控制失灵.电视、广播、电话和科学探测数据传输停止数天
1994-01-21	加拿大通信卫星 Anik E2	动量轮转动系统受损,姿态失灵,数月营救后恢复功能,损失数千万美元
1996-03-26	加拿大通信卫星 Anik E1	动量轮转动系统受损,姿态控制失灵
1997-01-01	美国通信卫星 Telstar 401	卫星失控受损,停止工作,报废
1998-05-01	德国科学卫星 Equator-S	星上在工作的备份计算机芯片发生锁定,直到 1998 年 8 月 17 日仍停止工作,卫星受损报废
1998-05-19	美国通信卫星 Galaxy 4	卫星控制系统失控,不能正常工作,完全报废

^{*} 国家 863 计划项目资助 (2002AA732130-01)

2003-05-18 收到原稿, 2004-04-15 收到修定稿

近年来高能电子环境引起的卫星内部带电问题,越来越受到人们的重视,目前已进行了大量的统计分析和数值模拟研究工作. Wrenn 通过对同步轨道通信卫星 DRA δ 发生异常前后高能电子环境的分析,得到了引起卫星异常的结论性证据是高能电子流量^[2]. 类似这样的研究工作还有许多,结论也很相近^[3]. 上述研究工作的共同特点是对高能电子环境与发生的异常做统计相关分析,这对确认内部带电的空间环境因素是非常必要的. 但这只是内部带电研究的一个方面,为了定量地确定内部带电与高能电子环境的关系,必须深入研究引起卫星内部带电的物理机制. 由于高能电子在介质材料内部产生的最大电场强度决定了介质是否有被击穿的危险,所以本文利用蒙特卡罗方法,在定量了解电介质内部最大电场强度与高能电子能量、流量以及与屏蔽厚度和介质厚度的关系方面作些尝试.

2 蒙特卡罗方法简介

蒙特卡罗 (Monte Carlo, MC) 方法又称随机抽样或统计试验方法^[5], 属于计算数学的一个分支, 它是在 20 世纪 40 年代中期为了适应当时原子能事业的发展而发展起来的. MC 方法的基本原理及思想是当所求解的问题为某种事件出现的概率, 或是某个随机变量的期望值时, 它们可以通过某种试验的方法, 得到这种事件出现的频率, 或者这个随机变量的平均值, 并用它们作为问题的解. MC 方法通过抓住事物运动的几何数量和几何特征, 利用数学方法来加以模拟, 即进行一种数字模拟实验. 它以一个概率模型为基础, 按照这个模型所描绘的过程, 将模拟实验的结果作为问题的近似解.

MC 方法用于解决多维或因素复杂的问题更能显示出其优越性, 因为它能直接追踪粒子, 物理思路清晰, 易于理解; 它采用随机抽样的方法, 能比较真切的模拟粒子输运的过程, 反映了统计涨落的规律.

我们所研究的问题属于粒子输运问题, 高能粒子打到介质上, 碰撞点位置、输运长度、碰撞核种类及反应类型都是随机的. 这就很难用精确的数值方法来求解, 而用 MC 方法可以给每一个过程一个分布函数, 即建立一个概率空间, 在该概率空间上, 选取一个随机变量, 使得该变量的数学期望为所求的量. 这样虽然每一次的计算只能得到一个服从某种分布的随机的值, 但是上万上亿次计算却可以得出所需要的期望值.

目前, 用 MC 方法处理电子与其他物质相互作用的问题已有专门的软件包, 如 EGS4 和 GEANT 软件包, 本文使用 GEANT 软件包. GEANT 是一个用蒙特卡罗方法模拟在任意几何形状中, 粒子传输过程的通用程序包. GEANT 可以模拟在任何元素、化合物、或混合物中的电子 (正电子和负电子) 传输过程, 粒子输运方式是随机的. GEANT 允许用户自己编写程序完成对源粒子特征的定义、与粒子作用的物体的位形和材料的定义、结果的记录和对 GEANT 系统程序的调用.

我们在使用 GEANT 软件包研究内部带电问题时, 通过编写定义入射粒子特性、介质参数设定以及操作具体输运过程和输出结果的程序, 可直接得到电介质中的电荷沉积的模拟结果, 进而计算出电介质内部的最大电场强度.

3 内部带电问题的模拟计算方法

当高能电子(快电子)打到介质上, 部分可能穿透介质, 部分沉积其中. 对于导体或半导体, 随着高能电子的进入, 导带中会产生一个补偿电流, 将与捕获的快电子产生的电场抵消掉; 但是在绝缘物质中, 因为没有这样的导带电子产生的电流, 电子无法排出, 这些电子会保留下来, 并存在很长时间, 连续的辐射会使捕获电子连续增加, 直到其产生的电场拒绝电子的进入.

3.1 模型

本文使用图 1 所示的简化模型, 外壳用一平板形金属屏蔽代替(本文用铝), 内部电介质也是平板形(本文用聚乙烯). 入射的高能电子通过屏蔽层时损失一定的能量, 然后射到电介质上.

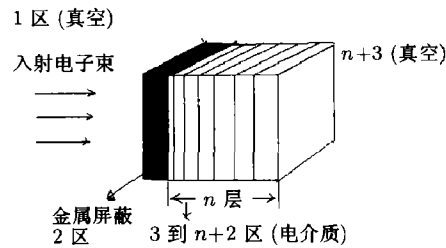


图 1 模拟计算的模型示意图

Fig.1 The model of the simulative calculation

程序中将计算空间分为 $n+3$ 个区: 1 区和 $n+3$ 区为真空; 2 区为屏蔽铝; 3 到 $n+2$ 区为电介质聚乙烯. 一定分布的高能电子束从 1 区垂直于铝平面入射, 然后计算电介质中的电荷沉积.

3.2 最大电场的计算公式

对于介质材料中累积的静电荷, 可由高斯定律得到内部电场. 而在空间环境中, 带电粒子连续地流进和流出介质材料, 所以通过欧姆定律计算内部电场强度是一个比较合适的办法.

$$E = J/\sigma. \quad (1)$$

其中, J 为电流密度, σ 为介质材料的电导率. 若将 $n+2$ 区接地, 则沉积在电介质中的入射粒子, 又经 $n+2$ 区流出, 当达到动态平衡后, $n+2$ 区的电流密度 J 则由入射粒子在介质中的沉积率决定, 并且在所有区的电流密度中, $n+2$ 区的电流密度最大.

电导率 σ 由暗电导率和辐射感应电导率两部分组成,

$$\sigma = \sigma_0 + k_p \dot{D} \Delta. \quad (2)$$

其中, σ_0 为暗电导率, $\dot{D}$ 为辐射剂量率, k_p 和 Δ 都是与介质材料相关的系数. 对聚乙烯材料取 $k_p = 1.6 \times 10^{-16} (\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s})$, $\Delta = 0.60$. 辐射剂量率近似取与电流密度正比关系, 即 $\dot{D} = 1.92 \times 10^{11} (\text{s}^{-1} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{rad} \cdot \text{J})$.

对不同的入射能量、不同的屏蔽厚度以及不同的介质厚度分别进行了模拟计算,得到这3个参量取不同值时电荷沉积的情况,进而分析所引起的介质内部最大电场强度分别与这3个参量的依赖关系。

4 主要结果

4.1 入射能量对内部带电的影响

图2给出内部最大电场与入射电子能量的关系,取入射电子能量范围为0.7—6.5 MeV,屏蔽铝的厚度为0.1 cm,电介质聚乙烯的厚度为0.3 cm,入射粒子通量为 10^{10} cm^{-2} 。

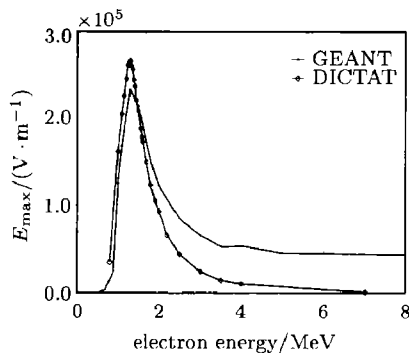


图2 内部最大电场与入射电子能量的关系
Fig.2 Internal charging versus the energy of incident electrons

由图2可以看出,对确定的电解质和屏蔽厚度,内部最大电场在某一个能量(这里约为1.3 MeV)达到峰值。当入射电子能量比较低时,很多电子被铝屏蔽掉,不能穿过铝而到达电介质。随着能量的增加,穿过铝的电子数也增加,所以内部电荷积累增加,内部最大电场增大。当电子能量增大到某一数值时,电子开始穿透介质,随着能量增加,穿透介质的电子也越多,能够在介质中沉积的电子就越少,所以内部电荷沉积及内部最大电场会下降。

另外,图2中将本文计算结果与欧洲空间局的深层充电分析软件 DICTAT (DERA Internal Charging Thread Assessment Tool) 的计算结果相对比,吻合较好。

4.2 屏蔽厚度对内部带电的影响

取入射能量为单一能量2 MeV,电介质聚乙烯的厚度为0.4 cm,入射粒子通量仍为 $10^{10}/\text{cm}^2$,屏蔽铝的厚度从0.2 mm一直取到2.7 mm,计算各种厚度下的带电情况。图3给出计算结果。

从图3可以看出,内部最大电场并不是一直随着屏蔽厚度的增加而减小的,在屏蔽比较薄时,最大电场随屏蔽厚度增加而增大。在某一屏蔽厚度,内部最大电场达到峰值,以后,随着屏蔽厚度的增加,内部最大电场反而变小。这种情况与图2所示的变化规律是相关联的。对于2 MeV的电子,本来有较强的穿透能力,但是加了一个薄屏蔽层后,电子能量在通过

屏蔽层时减弱了,本来能够穿透聚乙烯的电子现在却沉积在其中,这样沉积电荷就增多了。随着屏蔽层的增厚,越来越多的电子沉积在聚乙烯中,屏蔽达到一定厚度(这里约为

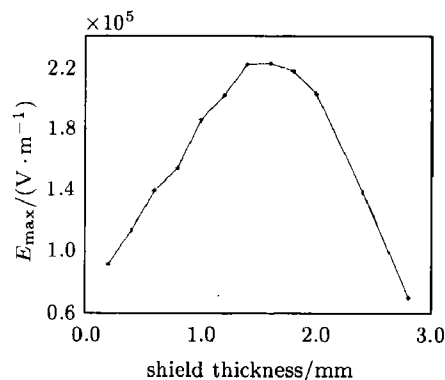


图3 内部最大电场与屏蔽厚度的关系
Fig.3 Internal charging versus the thickness of shielding

1.5 mm) 时, 沉积的电子数最多, 内部最大电场最强. 随着屏蔽厚度进一步增大, 电子能量衰减严重, 能射入电介质中的电子数越来越少, 因此内部最大电场随之减小. 可见, 如果屏蔽厚度的选择不当, 会带来相反的效果.

4.3 电介质厚度对内部带电的影响

电介质材料的高分子结构、材料的密度和导电性等都是影响内部带电的重要因素, 但本文只定性地讨论电介质厚度对充电的影响.

计算中取入射电子能量为 2 MeV, 屏蔽铝的厚度为 0.1 cm, 入射粒子通量仍为 10^{10} cm^{-2} , 电介质厚度从 0.1 mm 一直取到 9 mm.

由图 4 给出的计算结果可以看出, 内部最大场强起初随介质厚度的增加而增大, 到达一定厚度时, 最大电场基本保持一个定值不变. 这是因为当介质比较薄时, 大多数电子可以穿透它, 沉积的只有少数, 而当介质厚度增加时, 越来越多的电子沉积其中, 内部最大电场增大, 而厚度增加到一定值时 (这里大约是 8 mm), 所有的电子都沉积其中, 厚度再增加, 沉积电荷已不会再增加了, 电场基本保持不变.

由此得到, 越厚的电介质越容易发生内部带电, 所以在卫星仪器的设计中, 在保证对电介质基本要求的前提下, 要尽量使用比较薄的电介质.

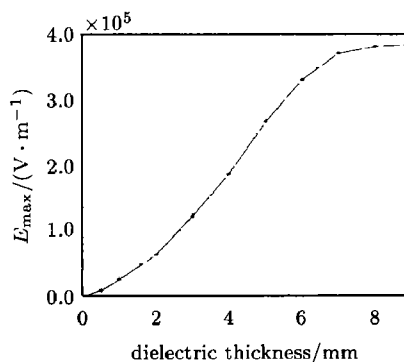


图 4 内部最大电场与介质厚度的关系

Fig.4 Internal charging versus the thickness of dielectric

5 讨论和结论

目前在研究内部带电问题时, 一般采用的分析方法是先确定高能电子在电介质中射程的经验公式, 然后计算这些电子在电介质中产生的电流, 再结合电导率的经验公式, 最终确定电介质中的电场. 目前有关高能电子在电介质中射程的公式, 只对铝和聚异丁烯酸树脂等少数材料比较适用, 在能量变化比较大和使用其他一些材料时有较大的误差. 而本文使用的 MC 方法适用于任意材料和任意能量范围, 因此避免了经验公式所带来的误差. 另外, 目前辐射感应电导率^[6]的经验公式也有许多不确定性, 但这个量是准确地描述内部带电的关键参数之一, 将在今后的工作中进一步研究这个问题.

为了减轻内部带电的效应, 在选择介质材料和屏蔽层时下列建议可作为参考.

(1) 在保证电介质基本功能的前提下, 尽可能减小电介质的厚度.

(2) 屏蔽材料的厚度对屏蔽效果有很大影响, 如果屏蔽不当, 反而加重内部带电. 因此, 在选用屏蔽材料时, 应根据材料所处环境的高能电子频谱特征, 用上述方法计算, 以选择合适厚度的材料.

(3) 选择合适的材料. 在保证电介质材料绝缘性能基本要求的前提下, 选用绝缘电阻比较小的电介质, 以便使积累的电荷能更快泄漏.

参 考 文 献

- [1] Baker D N, Allen J H, Kanekal S G, Reeves G D. Disturbed space environment may have been related to pager satellite failure. *EOS Trans. AGU*, 1998, **79**:477—482
- [2] Wrenn G L. Conclusive evidence for internal dielectric charging anomalies on geosynchronous communications spacecraft. *J. Spacec. Rock.*, 1995, **32**(3):514—520
- [3] Wrenn G L, Smith R J K. Probability factors governing ESD effects in geosynchronous orbit. *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, 1996, **43**(6):2783—2789
- [4] Love D P, Toomb D S, Wilkinson D C, Parkinson J B. Penetrating electron fluctuations associated with GEO spacecraft anomalies. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2000, **28**(6):2075—2084
- [5] Xu Shuyan. Application of Monte Carlo method in nuclear physics. Beijing: Atomic Energy Press, 1996. in Chinese (许淑艳. 蒙特卡罗方法在试验核物理中的应用. 北京: 原子能出版社, 1996)
- [6] Ahrens T J, Wooten F. Electrical conductivity induced in insulators by pulsed radiation. *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, 1976, **NS-23**(3):1268—1272

A STUDY ON SPACECRAFT INTERNAL CHARGING WITH MONTE CARLO METHOD

GAO Bingrong HAO Yongqiang JIAO Weixin

(Department of Geophysics, Peking University, Beijing 100871)

Abstract

Dielectric internal charging caused by energetic electrons will cause anomalies in Geosynchronous satellites, so it is an important problem faced by satellite designer. In recent years, many statistical studies have been conducted in this area. In this paper, Monte Carlo method has been used to simulate the charge deposition in the dielectric caused by energetic electrons. The electric field in the dielectric was calculated as the function of injected electron energy, thickness of shielding and dielectric. It is found that the electric field induced by the deposited charges in the dielectric has significant correlation with these three factors.

Key words Satellite internal charging, Monte Carlo method, Deposited charge, Electric field