

不同接地方式的卫星介质深层充电研究*

黄建国† 陈 东

(中国科学院空间研究中心, 北京 100080)

(2003 年 7 月 3 日收到, 2003 年 8 月 22 日收到修改稿)

计算了几种典型的接地方式下卫星介质构件中深层充电所致的最大电场及表面电位, 并进行比较分析. 结果表明, 在同样的辐射环境条件下, 正面接地及两面同时接地时平板介质构件中最大电场比背面接地时低一个量级以上, 因此前两种接地方式中介质相对较安全, 单面接地时被充电介质与相邻金属部件或接地物体之间存在放电的可能, 而两面同时接地时则不会发生.

关键词: 卫星, 介质深层充电, 高能电子

PACC: 9480

1. 引 言

卫星介质深层充电(deep dielectric charging)是指空间高能带电粒子穿过卫星表面, 在卫星的介质材料内部传输并沉积从而建立电场的过程, 主要发生在地球同步轨道卫星上(高度 $6.6R_e$, R_e 为地球半径). 地球外辐射带($3-7R_e$)中俘获了大量的电子, 其中能量位于 $0.1-10\text{MeV}$ 范围内的高能电子具有很强的穿透能力, 它们可以穿透卫星表面敷层进入卫星构件的介质材料中, 从而产生充电效应. 当介质深层充电产生的电场超过介质材料的击穿阈值时, 就会发生放电, 所产生的电磁脉冲会干扰甚至破坏卫星内电子学系统的正常工作, 严重时使整个卫星失效. 因此, 介质深层充电效应是诱发地球同步轨道卫星故障和异常的主要因素之一.

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敷层材料, 进入卫星内部的介质材料中, 不同能量的电子沉积于介质中不同的深度, 从而在介质内部产生一定的电荷分布并建立电场; 另一方面, 因为介质本身有一定的电导率, 并且卫星构件的介质材料多为高分子聚合物, 在受到辐照时会形成所谓的辐射诱导电导率, 比没有辐照时的暗电导率大得多^[1, 2], 因此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. 当上述两个过程达到平衡时, 介质中的电场便达到最大, 如果该最大电场大于介质材料的电场击穿阈值, 就可以判定会发生放电.

介质深层充电所产生的电场主要取决于几个方面因素: 在空间环境方面主要取决于高能电子能谱, 当几 MeV 的电子通量较高时, 容易发生静电放电(ESD), 在介质方面则取决于介质的电学属性、介质厚度及屏蔽厚度等因素; 同时还与卫星在高能电子的环境中的运行时间有关. 关于充电所致最大电场与电子能谱、介质厚度及屏蔽厚度的关系在文献[3]中进行了详细讨论. 还有一个十分重要的因素, 就是介质构件所采用的接地方式. 一般情况下, 卫星介质构件都会根据需要采用一定的接地方式, 例如将平板介质构件的某一面涂上导电层并接地, 这样就为充电电荷形成一个放电回路, 而悬浮不接地的情况通常是比较危险的^[4]. 本文对几种典型的接地情况进行计算, 研究接地对充电所致最大电场以及最大电场出现位置的影响, 进而从接地的角度对卫星介质深层充电的防护对策和措施提供直接的依据和参考.

2. 计算方法

图 1 所示为卫星上平板和圆柱形介质构件通常

* 国家高技术研究发展计划(批准号: 863-2-7-7-1)资助的课题.

† E-mail: jghuang@earth.sepc.ac.cn, 电话: 82582959(O), 82627166(H).

采用的接地方式^[5],对于平板介质构件,接地方式主要有背面接地(这里定义面对辐射的一侧为正面,另一侧为背面)、正面接地和正面与背面同时接地三种

类型,对于圆柱介质构件主要有芯部接地、表面接地和芯部与表面同时接地三种方式.

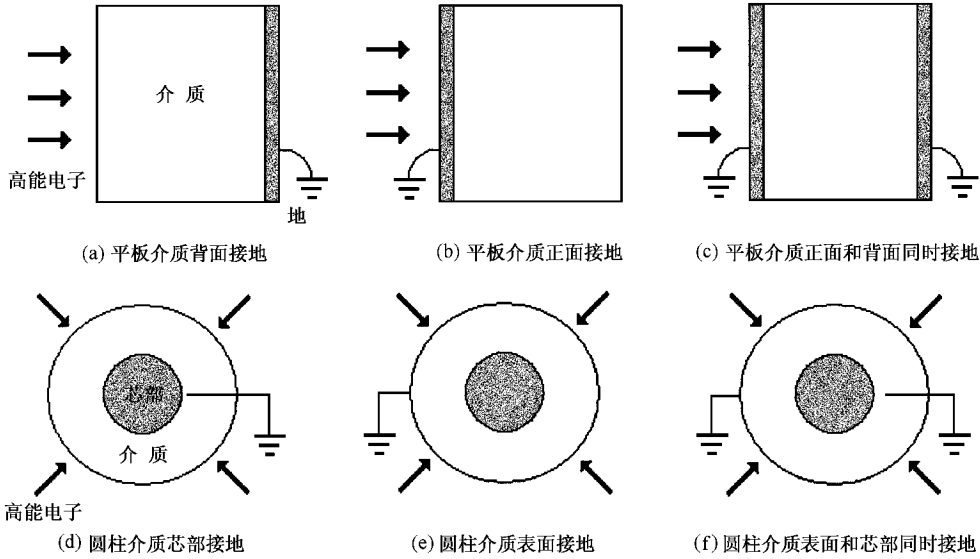


图 1 卫星介质构件的接地方式

根据前面所述的介质深层充电机理和静电场理论,可以推导出不同接地方式下的微分方程^[6],分别为

1)背面接地的平板模型(图 1(a)).

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} [e\Phi(0) - e\Phi(x) - \sigma E(x), \Phi(x)] E(x,t), \quad (1)$$

其中, E 为介质中的电场, $\Phi(0), \Phi(x)$ 分别为介质正面和深度 x 处的高能电子通量, e 为电子电荷, ϵ 为介电常数, σ 为介质电导率,它是电场和辐射剂量率(正比于电子通量)的函数^[7].

2)正面接地的平板模型(图 1(b)).

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} [e\Phi(x) - e\Phi(d) - \sigma E(x), \Phi(x)] E(x,t), \quad (2)$$

这里, d 为介质厚度, $\Phi(d)$ 为从介质背面出射的电子通量.

3)正面和背面同时接地的平板模型(图 1(c)).

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial t} = -\frac{1}{\epsilon} [e\Phi(x) + \sigma E(x), \Phi(x)] E(x,t) + \frac{1}{\epsilon d} \int_0^d [e\Phi(x) + \sigma E(x), \Phi(x)] E(x,t) dx. \quad (3)$$

4)芯部接地的圆柱模型(图 1(d)).

$$\frac{\partial E(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left[\frac{R_0}{r} \cdot e\Phi(R_0) - e\Phi(r) - \sigma E(r), \Phi(r) \right] E(r,t), \quad (4)$$

其中, $\Phi(R_0), \Phi(r)$ 分别为圆柱介质表面及半径 r 处的高能电子通量.

5)表面接地圆柱模型(图 1(e)).

$$\frac{\partial E(r,t)}{\partial t} = \frac{1}{\epsilon} \left[e\Phi(r) - e \frac{r_0}{r} \Phi(r_0) - \sigma E(r), \Phi(r) \right] E(r,t), \quad (5)$$

这里, r_0 圆柱构件芯部导体的半径.

6)表面和芯部同时接地的圆柱模型(图 1(f)).

$$\frac{\partial E(r,t)}{\partial t} = \frac{Q}{r} \left[\int_a^{R_0} Y(r,t) \ln r + 1 \ln r - \ln R_0 \int_a^r Y(r',t) dr' - \ln a \int_r^{R_0} Y(r',t) dr' \right] + \frac{1}{\epsilon} Y(r,t) - \frac{1}{\epsilon r} [R_0 Y(R_0,t) + a Y(a,t)], \quad (6)$$

其中

$$Q = \frac{1}{\epsilon (\ln R_0 - \ln a)},$$

$$Y(r,t) = e\Phi(r,t) + \sigma E(r), \Phi(r) E(r,t).$$

上面公式中,电子通量 $\Phi(x)$ 采用经验公式^[8,9]

代替繁琐的蒙特卡罗模拟,在给定入射电子能谱的情况下,即可对上述诸方程求解,得到介质中的电场 E 的分布和随时间的演变。

3. 计算结果及讨论

对平板模型和圆柱模型分别进行了计算,为了便于说明问题,这里只给出平板模型的模拟计算结果,对于圆柱模型而言结果类似。计算选用的介质材料为卫星上常用的环氧树脂(EPOXY)。计算中高能电子采用了两种形式的能谱:1)地球同步轨道典型积分能谱 GEODUR(全向入射、各向同性,持续时间 24h)^[10];2)单能电子束:能量为 0.75 MeV,通量为 $1.24 \times 10^8 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ 。分别对 EPOXY 和聚四氟乙烯(TEFLON)的圆柱和平板模型的 14 组几何尺寸(介质厚度从 0.1 到 0.5 cm)计算了最大电场^[10],并与 ESA 的 DICTAT^[11](differential internal charging treat analysis tool)计算结果进行比较,一般相对误差为 5% 左右,存在屏蔽时相对误差较大,但不超过 50%,估计和辐射电导率计算中参数的选取有关,应该说这样的结果是比较满意的。

3.1. 不同接地方式下的最大电场

图 2 为当充电过程达到平衡时,正面接地、背面接地及两面同时接地时平板介质中电场强度的分布(图中背面接地时的电场缩小到 1/10)。显然,在平板介质正面接地时,最大电场出现在介质的正面;当背面接地时,最大电场出现在介质的背面;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深度的变化,可以看出在一定的介质厚度范围内(图中该厚度约为 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。

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

$$j_{\text{total}} = -e\Phi(x) + \sigma E(x) = \text{const.} \quad (7)$$

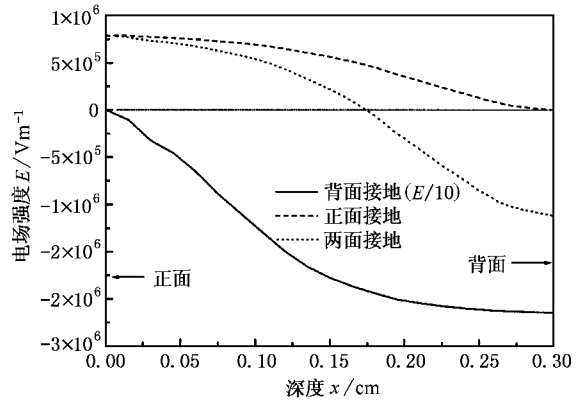


图 2 介质中电场的分布

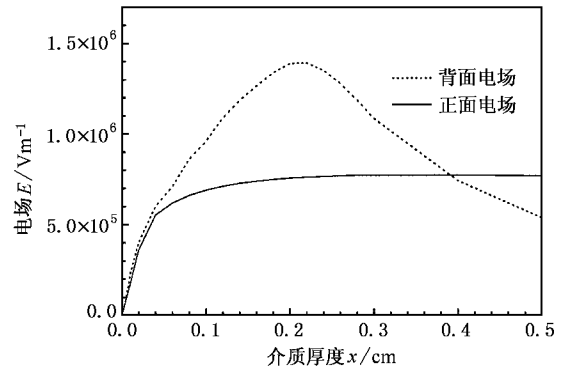


图 3 两面接地时正面电场和背面电场绝对值随深度的变化

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),流经其背部的欧姆电流为零,即电场为零,有 $j_{\text{total}} = -e\Phi(d)$,而电子通量 $\Phi(x)$ 随深度而递减,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(7)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(7)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)。可以看出,背面电场先随着介质厚度而递增,当介质超过

一定厚度(图中约为 0.22cm)时,背面电场开始随厚度而递减,而正面电场则随着介质厚度单调增加;当介质小于某一厚度(图中为 0.38cm)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.这一变化规律可以这样来解释:开始随着介质厚度的增加,介质中沉积的电荷量越来越大,因而流向正面和背面接地侧的电流也随之增大,从而导致正面和背面的电场(绝对值)随介质厚度增大;但介质厚度的进一步增加,将使得介质中沉积的电荷距背面接地侧越来越远,因此,越来越多的沉积电荷将流向正面接地侧,而流向背面接地侧的电流将减少,所以,当介质超过一定厚度时,背面电场开始衰减;当介质小于某一厚度时(图中为 0.38cm),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.

从图 2 中可见,不同接地方式下介质中最大电场的数值也有很大差别,对于图中的 0.3cm EPOXY 介质,正面接地的最大电场为 $7.5 \times 10^5 \text{ V/m}$,而背面接地时最大电场为 $2.2 \times 10^7 \text{ V/m}$,该结果与文献 [12] 中介质深层充电的最大电场范围是一致的.对于 0.3cm 的环氧树脂介质,可以计算,对于所给定的能谱,从介质背面出射的高能电子通量远远小于正面入射通量,即 $\Phi(d) \ll \Phi(0)$,在正面接地情况下,有

$$-e\Phi(0) + \sigma E(0) = -e\Phi(d) \approx 0, \quad (8)$$

$$E_{\text{max}}^{\text{front}} = E(0) \approx \frac{e\Phi(0)}{\alpha(0)}. \quad (9)$$

而当介质背面接地时,有

$$-e\Phi(0) = -e\Phi(d) + \sigma E(d) \approx \sigma E(d) \quad (10)$$

$$E_{\text{max}}^{\text{back}} = E(d) = \frac{e\Phi(0)}{\alpha(d)}. \quad (11)$$

介质中电子通量随深度而迅速衰减,导致辐射诱导电导率随介质深度而迅速减小,如图 4 所示,即 $\alpha(0) \gg \alpha(d)$,根据(9)(11)式有 $E_{\text{max}}^{\text{back}} \gg E_{\text{max}}^{\text{front}}$,即背面接地比正面接地时最大电场要大得多,这里相差一个量级以上.

当正面和背面同时接地时,介质的正面和背面电场都小于单独接地时的电场.

因此,在可能的情况下,采用适当的接地方式,可以大大减弱放电的危险性.比如对于环氧树脂介质,其电场的击穿阈值为 $5 \times 10^7 \text{ V/m}$,对于 0.3cm 的平板介质而言,采用背面接地时最大电场达到 $2.2 \times 10^7 \text{ V/m}$,接近其击穿阈值,但如果改为正面接地或

两面同时接地,则电场分别降为 $7.5 \times 10^5 \text{ V/m}$ 和 $1.3 \times 10^6 \text{ V/m}$,远小于其击穿阈值,安全性大大提高,所以,通过改变接地方式而避免深层充电的威胁是一种更为有效的防护措施.

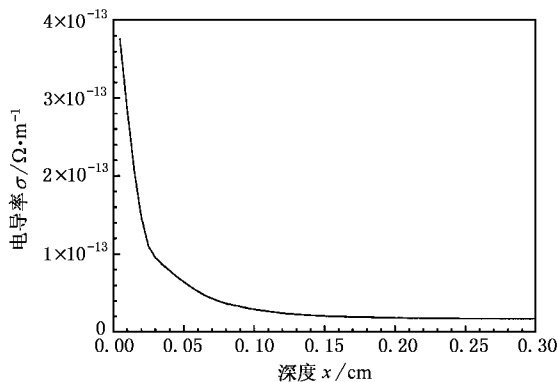


图 4 介质中电导率的分布

3.2. 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,这样,就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 5 为三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.

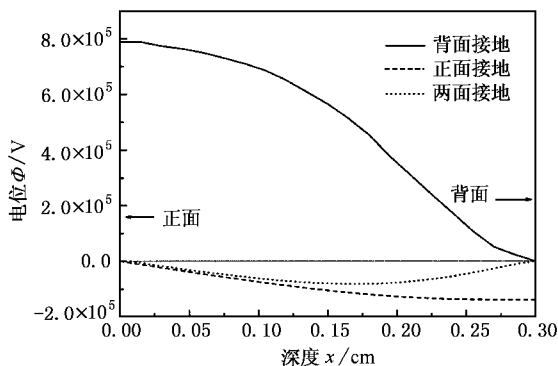


图 5 介质中的电位分布

4. 结 论

介质材料本身是否会发生击穿放电取决于介质材料中因充电而导致的最大电场是否达到该材料的击穿阈值,而介质材料表面电位则决定了介质构件与其相邻金属部件或接地物体之间的间隙的电场强度,如果该强度大于真空放电电场,则二者之间就会发生放电。两种放电是有明显区别的,比如,对于背面接地平板介质,其最大电场出现在背面接地侧,即介质构件有可能首先从背面开始击穿,而最高电位则出现在其正面,因此介质构件与相邻金属部件或接地物体的放电有可能从正面引发。两种放电对卫星的危害效果是一样的,除了对放电部件本身造成破坏之外,放电所产生的电磁脉冲会干扰卫星的电子学系统,从而干扰其正常运行。

本文分别针对三种典型的接地方式计算了由深层充电导致的介质中最大电场和介质表面电位。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。而就表面电场而言,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。

文献[3]中曾经研究了屏蔽厚度、介质厚度等因素对介质深层充电电场的影响,再结合本文的接地方式进行综合考虑,便可以在卫星设计阶段从上述各个方面对介质构件的深层充/放电危险性进行详细的计算和分析,从而筛选出一个最佳的防护设计方案,同时结合高能电子实时探测数据可以对在轨运行的卫星深层充/放电危险性进行评估、分析和预测,以便及时采取相应对策,所有这些对于保障卫星的安全可靠运行是十分重要的。

-
- [1] Fowler J F 1956 *Proc. Royal Soc. London A* **236** 464
- [2] Harrison S E , Copage F N and Snyder A W 1963 *IEEE Trans. on Nuc. Sci.* **10** 118
- [3] Huang J G and Chen D 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 961 (in Chinese)
[黄建国、陈 东 2004 物理学报 **53** 961]
- [4] Robinson P A J 1989 *Spacecraft Environmental Anomalies Handbook* , AD-A214 603
- [5] Rodgers D J 1998 *DICTAT Software : Users ' Manual* , Issue 2.0 , ERA/CIS/7/36/2/4/SUM
- [6] Huang J G 2003 *China Defense Science and Technology Final Report* (Center for Space Science and Applied Research) [in Chinese] [黄建国 2003 中国国防科学技术报告(中科院空间中心)]
- [7] Rodgers D J , Ryden K A , Latham P M , Levy L and Panabiere G 1999 *ESA Contract Final Report DERA/CIS(CIS2)7/3/36/2/4/FINAL* , p25
- [8] Weber K H 1952 *Nucl. Inst. Meth.* **25** 261
- [9] Sorensen J 1996 *ESA SP - 392* p129
- [10] Huang J G and Chen D 2004 *Chinese Journal of Geophysics* **47**(3) (in Chinese) [黄建国、陈 东 2004 地球物理学报 **47**(3)]
- [11] <http://www.spnvis.oma.be/spnvis/>
- [12] Garrett H B and Pike C P 1980 *Space Systems and Their Interactions with Earth 's Space Environment*(New York : American Institute of Aeronautics and Astronautics) p197

A study of deep dielectric charging on satellites for different grounding patterns^{*}

Huang Jian-Guo[†] Chen Dong

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

(Received 3 July 2003 ; revised manuscript received 22 August 2003)

Abstract

In this paper , the maximum electric field intensity and surface potential of a planar dielectric on satellite induced by deep dielectric charging (DDC) in typical grounding patterns are calculated and compared. It is shown that if the dielectric is grounded on the outer surface alone or on both outer and inner surfaces , the induced maximum electric field intensities are smaller than that grounded on the inner surface alone by one order or more ; thus in the former two grounding patterns , the dielectric is more immune from DDC. On the other hand , if the dielectric is grounded on one single surface , it is possible to discharge between the dielectric and other metal parts or grounded objects near enough. As for grounding on both surfaces , the situation of discharge impossible.

Keywords : satellite , deep dielectric charging , high energy electron

PACC : 9480

^{*} Project supported by the National High Technology Development Program of China(Grant No. 863-2-7-7-1).

[†] E-mail : jghuang@earth.sepc.ac.cn ; Tel : 862582959(O) 8262716(H).