

转移轨道航天器深层充放电效应仿真分析

苏京,张丽新,刘刚,周博,潘阳阳,曹康丽

(上海卫星装备研究所,上海 200240)

摘要:为研究转移轨道卫星介质深层动态充电规律特征,针对卫星动态辐射环境的特点,基于 FLUMIC 思想,建立辐射带动态电子环境模式。针对动态辐射环境下星上介质深层充电的特征,使用辐射诱导电导率(RIC)模型和 Geant4 建立了适用于转移轨道卫星动态环境下的介质深层充电应用模型。首次对地球同步转移轨道(GTO)和嫦娥一号卫星调相轨道运行过程中介质深层充电情况进行了仿真分析。结果表明:转移轨道卫星在运行时曾多次穿越辐射带区域,电子通量存在明显波动,这种波动性反映在材料的充电电位变化中。材料峰值充电电位分别为 $-2\ 846\ \text{V}$ 和 $-4\ 110\ \text{V}$,介质内部平衡电场均超过 $10^6\ \text{V/m}$,存在内放电风险,需要在工程设计中进行针对性防护。

关键词:转移轨道卫星;地球同步转移轨道;调相轨道;高能电子;深层充放电;电子通量

中图分类号: V250.3; V524.3

文献标志码: A

DOI: 10.19328/j.cnki.1006-1630.2018.03.012

Simulation of Deep Dielectric Charging for Transfer Orbit Satellite

SU Jing, ZHANG Lixin, LIU Gang, ZHOU Bo, PAN Yangyang, CAO Kangli

(Shanghai Institute of Satellite Equipment, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to acquire the charging characteristics and assure the long-period stability of electronic devices in transfer orbit satellites, a model is established based on FLUMIC model of ESA about electrons in radiation belt, which is used in dynamic electron environment evaluation. A model based on RIC model and Geant4 is also provided in computer simulation to analyze the mechanism and physical process of internal charging. The features of GTO and phasing orbit internal charging are analyzed for the first time. It can be concluded that transfer orbit satellites experience severe environment change when passing through the radiation belt, while instantaneous flux shows obvious fluctuations. This fluctuation can increase the charged potential and the risk of internal charging. It is shown that the internal charging risk in the center of radiation belt is higher than that in other areas in normal case.

Keywords: transfer orbit satellite; geostationary transfer orbit; phasing orbit; energetic electrons; deep dielectric charging; electron flux

0 引言

航天器深层带电又称内带电,当空间环境中的高能粒子穿透航天器结构材料和外壳防护入射到内部电介质时就会引发介质深层充电。统计表明:介质深层放电是造成中高轨道航天器电子设备运行故障或失效的重要原因之一。我国探测二号卫星的异常和故障最终被确定为介质深层带电^[1],风云二号卫星天线消旋失锁故障和跳变故障也被认为是由高能电子导致的介质深层充电引起的^[2-3]。因此,对转

移轨道卫星深层充放电的研究有利于保障航天器高可靠性,延长其使用寿命。

现阶段,对卫星介质深层充电研究最主要的难点在于其动态性,主要如下:

- 1) 受太阳活动的影响,地球辐射带本身处于动态变化中。
- 2) 转移轨道卫星在轨运行时,会多次穿越地球辐射带,造成周围环境的动态变化。
- 3) 星上介质材料经高能粒子辐照后,其深层充

收稿日期:2018-01-28;修回日期:2018-02-07

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFA0204600);国家自然科学基金(51603123)

作者简介:苏京(1993—),男,硕士研究生,主要研究方向为空间环境效应。

电过程本身具有动态性。

4) 卫星运行时的昼夜更替,载荷工作状态的变化导致材料温度的动态变化影响深层动态充电过程。

目前,关于深层充放电的研究方法包括在轨试验、地面模拟和仿真分析^[4-8]。仿真分析因其成本低,能反映空间辐射环境的动态变化等优势,被广泛用于设计评估和定性分析等场合,形成了 NASA 最恶劣电子模型等工程应用模型和 DICTAT 等深层充放电计算软件^[9-10]。国内关于卫星深层充放电动态性的研究如下:王子凤等^[11]利用欧空局 DICTAT 计算了 MEO(中地球轨道)卫星动态深层充电情况,并用地面模拟设备进行了实验;王松等^[12]研究了温度动态对介质深层充电的影响。

本文针对转移轨道卫星动态辐射环境的特点,基于 FLUMIC 思想,建立辐射带动态电子环境模式,以及随季节、太阳活动、卫星轨道变化的动态粒子环境模型。针对动态辐射环境下星上介质深层充电的特征,使用辐射诱导电导率(RIC)模型和 Geant4 建立了适用于转移轨道卫星动态环境下的介质深层充电应用模型。利用上述模型对典型转移轨道卫星深层充放电情况进行了分析,并给出了防护设计建议。

1 中高地球轨道辐射环境分析

卫星运行在中高地球轨道区域时,会穿越内辐射带、槽区和外辐射带。内辐射带电子主要来源于外辐射带电子扩散和宇宙线漫散射中子,分布稳定,能量为 1 MeV 电子在内带中心处达到峰值^[13]。槽区处于内外辐射带之间,粒子环境相对平静,不需要考虑深层带电影响。外辐射带主要由高能电子和少量质子组成^[14],是一个电子带,区域范围和分布受太阳活动和地球磁场影响。

距离地面 22 000 km 附近的 MEO 会穿越外辐射带中心区域,是高能电子环境最恶劣的区间^[3],由于大多数导航卫星在此区域运行,故 MEO 电子环境渐渐为人们所关注。美国最早在其 GPS 卫星上搭载了高能电子探测器,我国也在北斗卫星上搭载高能电子探测器实现了自主观测。图 1 给出了 2007 年 5 月到 2008 年 5 月北斗卫星高能电子探测器观测结果^[15]。可以看出,电子环境极为恶劣,高能电子($E > 2$ MeV)通量较大,能穿透卫星蒙皮和防护层,进入星内介质材料,是最容易发生深层放电的区域。

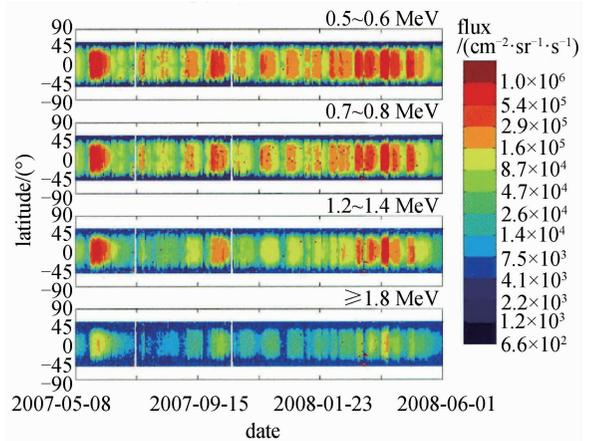


图 1 2007 年 5 月到 2008 年 5 月北斗卫星高能电子通量观测结果

Fig. 1 Observation results of electron flux from Beidou satellite(2007-05—2008-05)

高地球轨道特别是地球同步轨道(GEO)处于外辐射带边缘,运行卫星较多,NASA 的 HDBK-4002A(减缓空间带电效应指南)中给出了 GEO 建议最恶劣电子环境,如图 2 所示。可以看出建议最恶劣电子环境模型比 AE8 模型高一个量级,适合用于内带电评估,此区域运行卫星有较大介质深层放电风险。

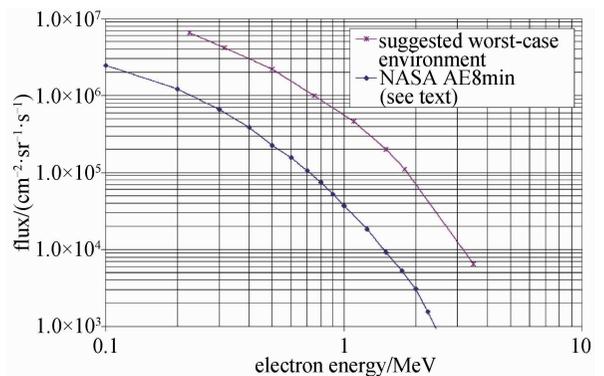


图 2 NASA-HDBK-4002A 给出的 GEO 建议最恶劣电子环境

Fig. 2 Worst-case GEO environment provided in NASA-HDBK-4002A

同时,HDBK-4002A 指南中也给出了圆轨道卫星在不同高度及不同轨道倾角内带电风险评估,如图 3 所示。指南中指出,中高轨道卫星内带电风险大,需要适当防护。

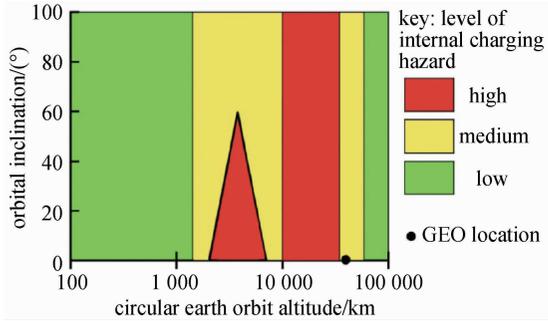


图 3 NASA-HDBK-4002A 给出的不同轨道区域内带电风险示意图

Fig. 3 Level of internal charging hazard

2 模型建立

2.1 辐射带电子环境模型

卫星深层充放电多为瞬态过程,当高能粒子沉积在材料中建立电场超过击穿阈值时就会发生放电,故模型应反映环境的动态变化。目前,空间高能电子较普遍的能谱描述采用指数形式,即假定

$$F_E = F_0 \cdot \exp(-E/E_0) \quad (1)$$

式中: E 为电子能量; F_E 为能量大于 E 的电子通量; E_0 为电子折合能量或称为谱硬度。

据此,综合考虑轨道电子环境随太阳活动及季节影响的规律等,可得到外辐射带能谱计算表达式为

$$F_E(> E, L, f_{sc}, f_{oy}) = F(> E, L) \cdot F_{sc} \cdot F_{oy} \quad (2)$$

式中: L 为磁壳参数,是磁力线与赤道面的焦点到地心的距离; f_{sc} 为从太阳活动低年开始的太阳周期阶段; f_{oy} 为从每年 1 月 1 日开始占整年的系数; $F(> E, L)$ 为 L 处能量大于 E 的电子的积分通量,其表达式为

$$F(> E, L) = 8 \times 10^8 \cdot \exp[(2 - E)/E_0] \cdot 16 \tanh[0.6(L - 2.5)] / \cosh[1.5(L - 4.3)] \quad (3)$$

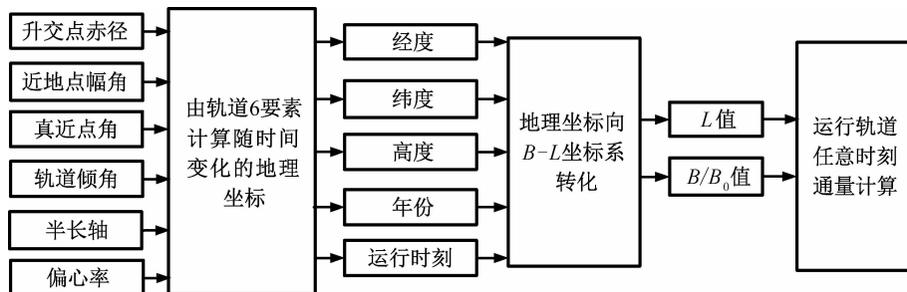


图 4 轨道电子通量计算程序流程

Fig. 4 Flowchart of electron flux computation

$$F_{sc} = 0.615 + 0.375 \sin[2\pi \times (f_{sc} - 0.7)] + 0.125 \sin[4\pi \times (f_{sc} - 0.15)] \quad (4)$$

$$F_{oy} = 0.625 - 0.375 \cos[4\pi \times (f_{oy} + 0.03)] - 0.125 \cos[2\pi \times (f_{oy} + 0.03)] \quad (5)$$

以 $L=2.5$ 为内带和外带的边界,内辐射带环境模型按此建立,连接后的模型计算流程如图 4 所示。其核心是将轨道六要素转化为地球磁坐标参数,并输入模型计算实时电子通量。

2.2 介质深层充电动态应用模型

对转移轨道卫星而言,当所处环境高能电子通量值处于高位(如辐射带中心位置)时,介质中电荷沉积率大于泄放速度,其内建电场持续升高,当电场增大并超过材料的击穿阈值时会发生深层放电;环境电子通量较小时,电荷沉积率小于泄放速度,电场降低。总的来说,高能电子不断入射并在介质内沉积后建立电场,与介质产生泄露电流二者间的动态平衡过程是转移轨道卫星介质深层充电的基本物理过程。

航天器介质多为 Teflon, Kapton, FR4 等高聚物,未受辐照时,其本征电导率很小,电荷泄放速度较慢。当航天器在轨运行时,受环境电子入射影响,介质内部电子发生跃迁并产生远大于载流子数量的电子空穴对,造成星上介质电导率明显上升, RIC 指星上介质受环境电子影响而发生的电导率变化。本文通过引入辐射诱导电导率的方式,反映介质辐照过程中电导率的动态变化,实现介质深层带电的动态分析。

利用迭代方法求解电流密度连续性方程、泊松方程和深层俘获方程可得差分方程为

$$E(x, t + \Delta t) = E(x, t) + \frac{\Delta t}{\epsilon} \{-[\sigma(x) + \mu\sigma_f(x, t)]E(x, t) + J_f(x) - J_0(t)\} \quad (6)$$

$$\rho_i(x, t + \Delta t) = \rho_i(x, t) + \frac{\Delta t}{\tau} \rho_f(x, t) (1 - \frac{\rho_i(x, t)}{\rho_m}) \quad (7)$$

$$\rho_m(x, t + \Delta t) = \frac{\epsilon}{\Delta x} [E(x + \Delta x, t + \Delta t) - E(x, t + \Delta t)] - \rho_i(x, t + \Delta t) \quad (8)$$

式中: ϵ 为材料的介电常数; μ 为自由电荷迁移率; ρ_m 为最大俘获电荷密度; $\rho_f(x, t)$ 和 $\rho_i(x, t)$ 分别为介质 t 时刻 x 深度上的自由电荷密度和束缚电荷密度; τ 为自由电荷俘获时间常数; $E(x, t)$ 为电场强度; $J_f(x)$ 为入射带电粒子在介质中产生的电流密度; $J_0(x)$ 为介质表面注入电流密度; $\sigma(x)$ 是材料受辐照时的电导率。计算过程为

$$\sigma = \sigma_d + \sigma_r = \sigma_d + kD^\Delta \quad (9)$$

式中: σ_d 为介质本征电导率或暗电导率; σ_r 为辐射诱导电导率; k 和 Δ 分别为辐射诱导电导率的系数和指数; \dot{D} 为介质中沉积剂量率。文献[16]给出了本模型选用的卫星常用介质材料参数,见表 1。

表 1 Teflon 电介质材料特征参数
Tab. 1 Characteristic parameters of Teflon

| 特征参数 | 值 |
|--|-----------------------|
| 相对介电常数 ϵ_r | 2.15 |
| 暗电导率 $\sigma_0 / (\Omega^{-1} \cdot m^{-1})$ | 1.0×10^{-16} |
| $K_p / (\Omega^{-1} \cdot m^{-1} \cdot rad^{-1} \cdot s^{-1})$ | 8.8×10^{-15} |
| Δ | 0.7 |

空间动态辐射环境下材料中沉积剂量由 Geant4 获得,采用离散序列随机抽样算法对辐射电子环境模型给出的电子谱进行抽样,电子谱抽样能量间隔区间为 0.1 MeV,抽样能量范围为 0.1 ~ 5 MeV,采样时间间隔为 50 s。将卫星的介质材料分为 200 层进行蒙特卡罗计算,仿真获得各层的沉积能量和注入电量密度,并利用公式计算介质材料内部剂量率随运行时间变化关系,最终得材料充电电位随时间变化关系。

3 仿真结果与分析

3.1 地球同步转移轨道深层充电情况分析

本节利用该环境模式针对地球同步轨道(GEO)进行了计算,取 IGRF 为磁场模型, L 值为 6.6,将计算结果与 NASA-HDBK-4002A《减缓空间

带电效应指南》建议的 GEO 最恶劣电子谱进行比较,结果如图 5 所示。二者计算的高能电子通量在能量低于 0.6 MeV 的区间内处于同一量级,在能量高于 0.6 MeV 时几乎完全吻合。因 1 mm 等效铝屏蔽能够有效阻挡 $E < 0.6$ MeV 的电子, $E > 3$ MeV 的相对论电子在空间中的实际通量极低,对分析结果影响不大,故本模型适合用于介质深层带电风险评估。

图 5 还给出了 NASA 建立的 AE8 模型计算的 GEO 结果,可以看出 AE8 模型较本模型和最恶劣电子模型低 1~2 个数量级,为平均环境模型。而航天器介质深层充放电往往与瞬时高能电子环境有关,故本模型可用于动态电子环境下介质深层带电风险分析。

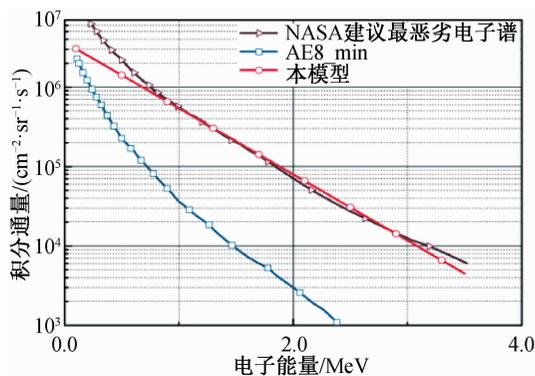


图 5 恶劣情况下 GEO 高能电子通量与其他模型对比
Fig. 5 Integral electron spectra in self-built model compared with that in worst-case GEO environment provided by NASA

GEO 卫星定点前先停留于停泊轨道,后经地球同步转移轨道(GTO)变轨至高度为 35 786 km 的地球同步轨道,取停泊轨道高度为 200 km, GTO 参数见表 2,轨道高度随时间变化关系如图 6 所示,卫星运行于转移轨道时间大约为 5 h。

表 2 典型 GTO 参数
Tab. 2 Typical GTO parameters

| 轨道要素 | 值 |
|----------|--------|
| 近地点高度/km | 200 |
| 远地点高度/km | 35 786 |
| 半长轴/km | 24 580 |
| 偏心率 | 0.732 |
| 轨道周期/h | 10.5 |

利用模型计算表 2 中转移轨道的电子能谱,如

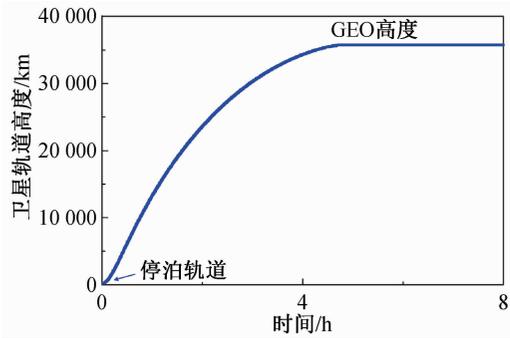


图 6 转移轨道卫星轨道高度随运行时间变化关系

Fig. 6 Transfer orbit satellite altitude changing with time

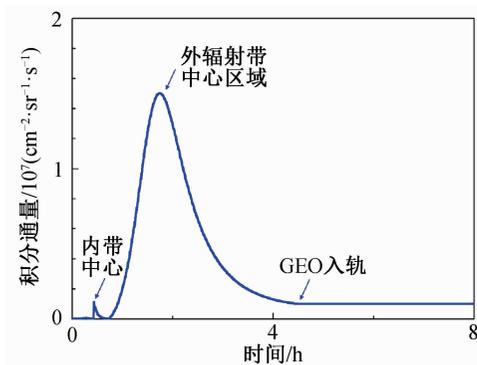
图 7 转移轨道高能电子 ($E > 0.6$ MeV) 积分通量随运行时间变化关系Fig. 7 Transfer orbit satellite's electron flux changing with time ($E > 0.6$ MeV)

图 7 所示。卫星经由转移轨道入轨 GEO 的过程中先后穿越内辐射带中心区域、槽区、外辐射带中心区域,最终到达位于外辐射带外围的 GEO 区域。卫星在穿越辐射带中心区域时高能电子通量达到峰值,当运行在外辐射带中心区域时,所处环境能量 > 0.6 MeV 的高能电子通量最大值可达 $1.6 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$;而当运行在辐射带区域之外

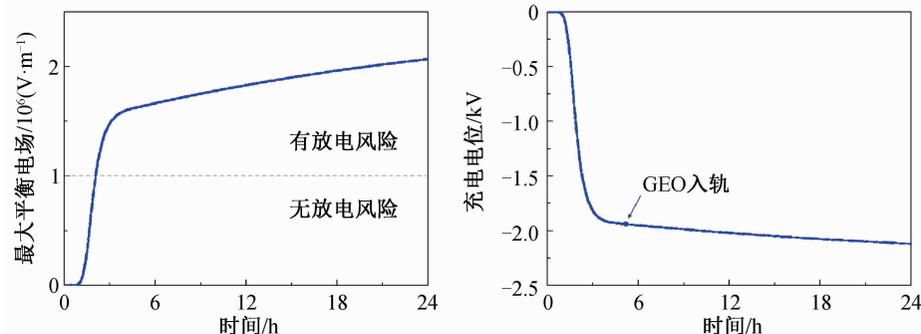


图 8 GEO 入轨过程星上 Teflon 材料内部电场和充电电位随时间变化关系

Fig. 8 Maximum electric field and charged potential of Teflon changing with time

时,高能电子通量近似降为 0,呈现明显的波动。

将能谱输入深层充电应用模型,对动态环境下的 GEO 卫星入轨过程中内带电情况进行分析。电介质材料为 Teflon,厚度设置为 2 mm,铝屏蔽厚度为 1 mm(折合卫星蒙皮厚度),接地方式为背面接地,最终得到入轨过程星上 Teflon 材料内部最大平衡电场和充电电位随时间变化关系,如图 8 所示。

由图 8 可知:卫星由停泊轨道开始转移时,位于 LEO 区域,且不飞越极区,充电电位极低,不存在放电风险;随后卫星在 3 h 内先后穿越内辐射带、槽区、外辐射带,此时周围环境中高能电子通量达到最大值,介质充电电位迅速上升,表现为图中曲线斜率达到最大,同时内部电场在 $t=2$ h 处超过 10^6 V/m ,存在内放电的风险;当卫星逐渐离开外辐射带中央区域,变轨至 GEO 高度时,充电电位继续上升趋于稳定;卫星介质充电电位在开始变轨 72 h 后达到平衡,平衡时充电电位为 $-2\ 846 \text{ V}$,内部电场为 $3.14 \times 10^6 \text{ V/m}$ 。

3.2 嫦娥一号卫星调相轨道深层充电情况分析

嫦娥一号卫星在奔月前经历了周期为 16, 24, 48 h 的三段调相轨道,卫星首先由长征三号甲运载火箭送入超 GTO,星箭分离后在此轨道上运行 3 圈,期间在远地点进行第 1 次机动,将近地点高度抬高至 600 km;随后进行第 2 次机动,轨道周期变为 24 h,运行 3 圈;接着进行第 3 次机动,轨道周期变为 48 h,运行 1 圈。可见,卫星入轨后共运行 7 d,以满足变轨能量小、发射窗口可调的要求,轨道参数^[17]见表 3。

卫星轨道高度与运行时间变化关系如图 9 所示。卫星在 $t=0$ h 入轨后,分别在第 24, 48, 120 h 点火,最后在第 $t=168$ h 点火调整至奔月轨道。

表 3 调相轨道参数

Tab. 3 Phasing orbit parameters

| 轨道要素 | 入轨后 | 第 1 次机动后 | 第 2 次机动后 | 第 3 次机动后 |
|-----------|------------|------------|-----------|------------|
| 升交点赤经/(°) | 181.283 | 181.064 | 180.866 | 180.618 |
| 近地点幅角/(°) | 178.750 | 179.093 | 179.401 | 179.789 |
| 真近点角/(°) | 16.186 4 | 180 | 0 | 0 |
| 轨道倾角/(°) | 30.989 | 30.989 | 30.989 | 30.989 |
| 半长轴/km | 31 840.442 | 32 040.414 | 42158.240 | 66 928.771 |
| 偏心率 | 0.793 | 0.782 | 0.834 | 0.896 |
| 轨道周期/h | 16 | 16 | 24 | 48 |
| 运行时间/h | 24 | 24 | 24 | 48 |

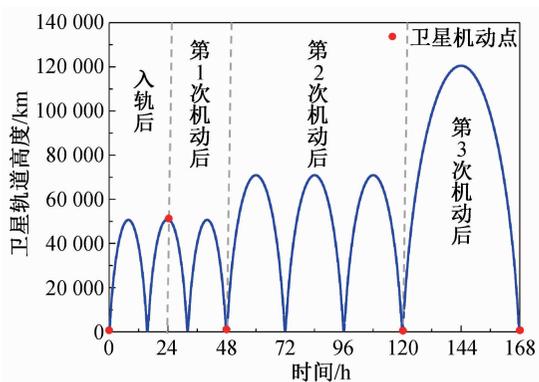


图 9 调相轨道高度与运行时间变化关系

Fig. 9 Phasing orbit altitude changing with time

将调相轨道参数输入模型即可得到卫星在调相轨道运行时周围粒子环境情况和内部充电电位,如图 10 所示。卫星在抵达和离开近地点时会两次进出辐射带,轨道周期越小,穿越辐射带时间越长,电位上升越明显,卫星到达外辐射带中心时能量 $> 0.6 \text{ MeV}$ 的高能电子通量最大值为 $1.5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 。

卫星在周期为 16 h 轨道运行时,共计 5 次穿越辐射带,在 $t=34.2 \text{ h}$ 和 $t=49.5 \text{ h}$ 时 TEFLON 材料充电电位达到峰值,约 -4.110 kV ,此时内部最大电场为 $4.26 \times 10^6 \text{ V/m}$,有一定的放电风险。随后卫星变轨至周期为 24 h 调相轨道,稳定运行 3 d,期间充电电位呈现周期性波动,但峰值电位逐渐降低。最后卫星变轨至周期为 48 h 轨道,充电电位大幅降低至 -2 kV 以下。

总的来说,当卫星穿越辐射带时,内部电位迅速上升数千伏,与环境电子通量关联明显。运行至辐射带区域外时,电位缓慢下降,此时材料的充电电位越高,下降速度越快。

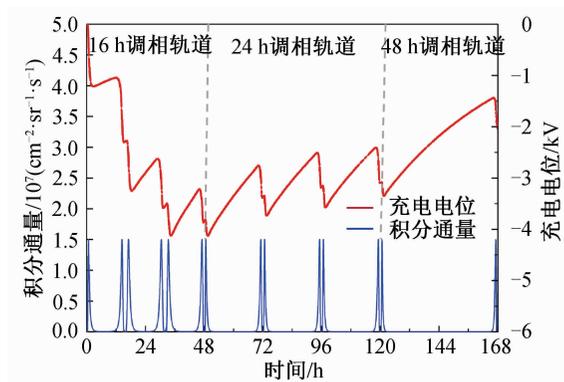


图 10 调相轨道电子通量和星上 Teflon 材料充电电位随时间变化关系

Fig. 10 Charged potential of dielectric material changing with time

4 结束语

本文针对 GTO 卫星运行过程中周围辐射环境动态变化的特点,基于 FLUMIC 模型建立辐射带电子环境模式,利用该模式分析了 GTO 和嫦娥一号卫星调相轨道高能电子辐射环境,并利用介质动态深层充电应用模型分析了两种条件下星内介质材料内带电情况。结果表明:GTO 卫星在运行时会多次穿越辐射带区域,电子通量存在明显波动,这种波动性反映在材料的充电电位变化中。在航天器穿越外辐射带中心区域时,电子峰值通量达到 $10^7 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}$ 量级,此时航天器的充电电位和内部电场迅速上升,离开辐射带区域后充电电位缓慢下降。在 1 mm 铝屏蔽下,GTO 卫星与调相轨道卫星 TEFLON 材料峰值电位分别为 -2.846 kV 和 -4.110 kV ,介质内部平衡电场均超过 10^6 V/m ,存在内放电风险,需要在工程设计中进行针对性防护。介质材料温度是影响转移轨道航天器深层充电

的重要参数之一,后续将温度变量纳入轨道动态环境的评估中,以提高结论的准确性并筛选薄弱环境进行改进。同时,不同电子器件对深层放电脉冲的响应各不相同,针对特定敏感电子器件的介质深层放电效应研究具有重要意义。

参考文献

- [1] 韩建伟,张振龙,黄建国,等. 卫星介质深层充放电模拟实验装置研制进展[J]. 航天器环境工程, 2007, 24(1): 47-50.
- [2] 郑昊,焦维新,魏彩英.“风云二号”卫星天线消旋失锁故障原因初步分析[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(4): 424-427,403.
- [3] 闫小娟,陈东,黄建国,等. 诱发卫星深层充电的高能电子环境模式研究[J]. 航天器环境工程, 2008(2): 120-124,97.
- [4] FREDERICKSON A R, HOLEMAN E G, MULLEN E G. Characteristics of spontaneous electrical discharging of various insulators in space radiations [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 1992, 39(6): 1773-1782.
- [5] JUN I, GARRETT H B, KIM W, et al. Review of an internal charging code, NUMIT [J]. Plasma Science, IEEE Transactions on, 2008, (5): 2467-2472.
- [6] 黄建国,陈东. 卫星介质深层充电的计算机模拟研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(3): 392-397.
- [7] 张振龙,韩建伟,全荣辉,等. 空间材料深层充放电效应试验研究[J]. 航天器环境工程, 2009, 26(3): 210-213,197.
- [8] 郑汉生,韩建伟,张振龙. 高能电子辐照下聚合物介质深层放电实验研究[J]. 航天器环境工程, 2017, 34(3): 295-300.
- [9] SORENSEN J, RODGERS D J, RYDEN K A, et al. ESA's tools for internal charging [J]. European Conference on Radiation and Its Effects on Components & Systems, 1999, 47(3): 27-33.
- [10] 沈自才. 空间辐射环境工程[M]. 北京:中国宇航出版社, 2013:1-467.
- [11] 王子凤,张振龙. MEO卫星内部充电环境及典型材料充电特征分析[J]. 航天器环境工程, 2016, 33(4): 382-386.
- [12] 王松,唐小金,孙永卫,等. 考虑温度梯度的卫星外露介质深层充电[J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1429-1435.
- [13] 全荣辉. 航天器介质深层充放电特征及其影响[D]. 北京:中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2009.
- [14] 黄本诚,童靖宇. 空间环境工程学[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2010:367-377.
- [15] 杨晓超,朱光武,符养,等. 中地球轨道高能电子辐射环境特性分析[J]. 空间科学学报, 2015, 35(5): 581-587.
- [16] 秦晓刚. 介质深层带电数值模拟与应用研究[D]. 兰州大学, 2010.
- [17] 杨维廉.“嫦娥一号”卫星的调相轨道设计[J]. 中国空间科学技术, 2010, 30(1): 18-24.

(本文编辑:姚麒伟)