

国家安全地球物理丛书（十）



地球物理环境与国家安全

中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会
陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会

编

刘代志 主编



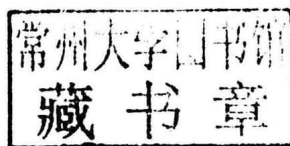
西安地质出版社

《国家安全地球物理丛书》(十)

地球物理环境与国家安全

中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会 编
陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会

刘代志 主编



 西安地图出版社

©刘代志 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

地球物理环境与国家安全/刘代志主编. —西安:
西安地图出版社, 2014

ISBN 978-7-5556-0079-4

I.①地… II.①刘… III.①地球物理场—军事
物理学 IV.①E912

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 226128 号

著作人及著作方式: 刘代志 主编

责任编辑: 王淑敏

书 名 地球物理环境与国家安全

出版发行 西安地图出版社

地址邮编 西安市友谊东路 334 号 710054

印 刷 西安地质矿产研究所印刷厂

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 27

印 数 200

版 次 2014 年 12 月第 1 版 2014 年 12 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5556-0079-4

定 价 60.00 元

版权所有 侵权必究

《国家安全地球物理丛书》(十) 编辑委员会

主 编: 刘代志

副 主 编: 李夕海 刘怀山 刘志刚

编 委: (以姓氏笔划为序)

王仕成 龙 凡 刘代志 刘怀山

刘志刚 李夕海 张金城 曾小牛

《国家安全地球物理丛书》编审委员会

顾 问: 刘光鼎 (院士) 何继善 (院士) 刘振兴 (院士)

许绍燮 (院士) 魏奉思 (院士) 游光荣 (总工)

徐文耀 (研究员)

主 任 委 员: 刘代志

副主任委员: 龙 凡 靳 平 王仕成 刘怀山 张金城

秘 书 长: 李夕海

委 员: (以姓氏笔划为序)

王仕成 王晓航 龙 凡 边少锋 刘 刚 刘代志 刘光斌

刘怀山 刘志刚 刘 波 刘新学 孙中任 孙凤华 孙更文

孙新利 朱培民 杜爱民 李夕海 李艾华 李学正 吴时国

何 彬 余志勇 张玉兔 张全虎 张金生 张金城 陈 洁

查石祥 周坚鑫 高增勇 郭有光 顾左文 徐白山 陶 勇

童思友 曾新吾 韩天成 韩吉民 靳 平 慕晓冬 滕云田

前 言

所谓地球物理环境(geophysical environment),是地球各圈层的物理特性(如密度、弹性、磁性、电性、放射性等等)及所产生的各种物理场(如重力场、地磁场、电离场、弹性波场、电磁场、热场等等),而各种军事活动所涉及的地球物理环境,即军事地球物理环境(military geophysical environment),则包括军事空间物理环境、军事大气物理环境、军事海洋物理环境、国防工程物理环境等等。因此,地球物理环境与国家安全密切相关,研究地球物理环境及地球物理环境研究理论与方法技术,是国家安全(军事)地球物理学的重要研究领域。

2013年8月下旬,在武汉市召开的主题为“防灾减灾与国家安全”的第九届国家安全地球物理学术讨论会上,主要研讨了各种防灾减灾中的地球物理问题。今年即将在美丽的海滨城市——青岛召开的第十届国家安全地球物理学术讨论会,仍将聚焦“地球物理环境与国家安全”。本论文集所收录的67篇论文,均选自第十届国家安全地球物理学术研讨会与会论文,内容主要涉及空间环境与气象、地震(弹性波场)、高光谱(电磁辐射环境)、重磁场、次声、工程保障(如找水)、自然灾害等方面的理论、方法技术及应用研究。

十年来,我国著名地球物理学家、中国科学院院士刘光鼎先生,大力倡导和支持军事地球物理学科建设与研究,为我们作出了榜样。国家安全地球物理专业委员会和军事地球物理专业委员会的挂靠单位——第二炮兵工程大学持续资助《国家安全地球物理丛书》的公开出版,王耀鹏校长、李永生政委和科研部首长给予了诸多指导、关心与支持。丛书第十辑的出版还得到了专业委员会各位委员与同行专家的有力支持和指导。我们将继续出版好全部《国家安全地球物理丛书》,促进国家安全(军事)地球物理学科不断向前发展。

值此丛书第十辑出版之际,谨向各位领导、专家和同志们表示诚挚的谢意。

刘代志

2014年9月30日

目 录

裸露在地球同步轨道下卫星介质参数对其深层充电的影响	强 鹏, 魏志勇, 方美华 (1)
结合空间辐射探测技术的航天电子元器件验证方法	邵思需, 李璟璟, 刘 泳, 张玉兔 (6)
核电磁脉冲信号沿地——电离层波导传播数值计算	范启雄, 杨 威, 李永红, 詹 翔 (14)
临近空间大气环境探测技术综述	王胜国, 许丽人, 何亿强, 谢志辉, 陈润强 (19)
地空双基联合探测大气参量技术研究	孙海洋, 许丽人, 王胜国 (26)
阵列式地雷探测传感器技术研究	吴燕民, 彭正辉 (33)
短波差分跳频技术分析	祁树锋 (36)
强电磁脉冲与腔体孔缝耦合共振特性研究	倪 勤, 魏志勇, 强 鹏, 方美华, 王 静, 韩梦涛 (40)
农作物产量对夏季累积高温的气候响应——以南京市为例	姚雪峰, 陶 勇, 李 旺, 高 超 (46)
多普勒雷达资料同化及其在数值模式中的应用	李国静, 陶 勇, 高 超, 莫 毅 (53)
阵地侦察的遥感预测模型构建	王大庆, 邓正栋, 于德浩, 龙 凡, 许春华 (61)
高光谱遥感的发展与人防工程目标探测	范启雄, 张卫兵, 周家丹, 韩若飞 (71)
高光谱图像目标检测算法性能研究	王艺婷, 黄世奇, 刘代志, 王红霞 (76)
一种基于 Curvelet 变换的图像边缘增强方法	陈 炜, 张阳阳, 孟庆勋 (84)
CTBT 核查中的地震监测技术	靳 平, 潘常周, 王红春 (89)
海洋混合采集邻船干扰压制技术研究	张汉羽, 刘怀山, 尉 佳, 刘雪芹 (99)
基于频谱抗泄露 Fourier 变换方法的地震数据重建	孙传禧, 童思友, 李唐律 (108)
非连续地震数据存储与归档	王 娟, 张 波, 王小明, 邱宏茂, 朱国富, 李 健, 许 进, 石建芳 (114)
基于蚁群算法的海洋油气管网抗震拓扑优化设计	张金城, 范启雄, 李永红 (118)
分频解释技术在 ZW 地区薄储层预测中应用	李 倩, 张 进, 田建华 (124)
基于 JAVA 的地震数据实时格式转换程序的设计	崔甲甲, 沈旭峰, 张诚蓼, 王敏超 (129)

子波分解重构技术在辨别精细地层中应用 刘雪芹, 刘怀山 (134)

基于 RabbitMQ 的核查地震交互分析软件的调度设计
..... 李 健, 王小明, 邱宏茂, 许 进, 张 波, 王 娟 (142)

拟声波曲线在天然气水合物识别中的应用 许马光, 刘怀山 (149)

强震水氡异常变化与时空分布 李学正, 潘常周, 沈旭峰 (155)

有限差分波动方程数值模拟中优化最佳匹配层 (PML) 边界条件
..... 王文峰, 刘怀山 (164)

海洋立体震源激发特性研究 许达贞, 童思友 (171)

基于谷歌地球的地震事件可视化技术
..... 张 波, 王小明, 王 娟, 刘琳琳, 邱宏茂, 李 健 (178)

多判据综合识别方法在核爆炸地震事件识别中的应用
..... 刘哲函, 唐恒专, 王小明, 王海军, 唐 伟, 王 燕, 李 靓, 王 媛 (183)

高分辨率反演技术在 LN 区储层预测的应用 谢 晨, 刘怀山 (189)

海洋地震资料线性相干噪声剔除方法研究 张博伦, 王林飞 (196)

基于共聚焦点技术的成像研究 刘思雨, 徐秀刚, 王鹏飞 (203)

煤矿瓦斯防治中微地震监测技术应用研究 陈 飞, 徐白山, 丁宏毅 (209)

走航式拖缆施工对海底定位的影响 陈 璐, 童思友, 张一鸣 (213)

浅谈海上垂直缆地震勘探 陈晓琦, 张 进, 邢 磊 (220)

钻井干扰的特征分析及去噪方法浅析 安玲芳, 张 进 (226)

基于小波变换和短时傅里叶变换的混合时频分析方法研究 石旭亮, 刘怀山 (233)

基于复地震道技术的子波旁瓣压制研究 蔡正辉, 刘怀山 (238)

航磁数据在地层岩性、地质构造解译中的应用
..... 王 康, 于德浩, 何俊仕, 龙 凡, 李 航, 石卿志 (246)

基于航磁与高分影像信息的无人机海上侦察系统探讨
..... 丁宏毅, 徐白山, 陈 飞, 刘永新 (253)

重力场和地磁场对军事武器装备作战运用的影响探析 刘 菲, 韩若飞 (259)

海洋环境在潜艇作战中的应用 唐 莉 (264)

周至地磁台数字化技术改造运行与维护概述 彭玉柱 (270)

卫星测高技术海洋重力场和海底地形探测中的应用研究 翟振和 (273)

质量体重力梯度张量及变化特征
..... 王庆宾, 马国元, 王永收, 吴 亮, 贾 鲁, 常 岑 (278)

次声信号检测技术的进展分析 孟 亮, 李夕海, 闫双卡, 姜 楠, 李 妍 (287)

核爆次声监测和次声台站选址环境 王晓航 (292)

基于 IMF 分量比的次声信号特征提取 姜楠, 李夕海, 闫双卡, 孟亮 (298)

化学爆炸与天然地震事件的次声和地震特性分析
..... 马彦, 郑毅, 范江兵, 李鹏, 韩超 (305)

次声台站背景噪声建模技术现状与展望 李妍, 李夕海, 姜楠, 孟亮 (312)

瞬态光电信号监测系统 李鹏, 郑毅, 范江兵, 梁睿 (319)

MNDWI 与 NDWI 应用于 Landsat8 OLI 数据提取水体信息定性与定量对比分析
..... 郑璞, 于德浩, 邓正栋, 龙凡 (323)

电法勘探技术在找水中的综合应用 李永红, 范启雄, 李天河 (331)

基于 C5.0 决策树分类法的浅层地下水富集性模型研究
..... 段化杰, 邓正栋, 郑璞, 于德浩 (336)

地下水富集性遥感评估研究进展 许春华, 邓正栋, 郑璞, 于德浩, 邓非凡 (344)

水源地遥感勘察方法在工程选址初勘中的应用 ... 于德浩, 王康, 杨彤, 李航 (350)

综合电法应用于找水的一个典型案例 孙中任, 徐英奎, 赵雪娟 (356)

浅阻隔 ET 封顶层孔隙水运移影响因素分析 杨彤, 杨清雷, 张金利, 王睿 (364)

基于分布式光纤传感的特殊山区公路山体防护墙安全监测技术
..... 张卫兵, 范启雄, 刘军 (371)

滑坡预报预测研究现状述评 范启雄, 詹翔, 刘军, 张卫兵 (376)

RS 和 GIS 在滑坡泥石流防灾减灾中的应用 范启雄, 谢大风, 段成君, 李天河 (381)

隧道火灾安全的“FAD”综合评价模型及其工程应用
..... 李天河, 杨威, 范启雄, 张卫兵, 刘军 (387)

基于数据挖掘的工程选址模型 李霞, 于德浩, 陈伟涛, 龙凡 (395)

液体推进剂泄露风险评估模型研究 杨威, 唐莉, 范启雄, 熊磷 (403)

森林防火信息管理系统的构建 王淑萍, 张卫兵, 李锐 (409)

重金属离子在改良黏土中迁移的土柱试验研究 ... 杨清雷, 张金利, 杨彤, 王睿 (414)

共轭梯度及改进算法反演精度探究 张琪 (420)

附录: 第九届国家安全地球物理专题研讨会会议纪要 (426)

裸露在地球同步轨道下卫星介质参数对其深层充电的影响

强 鹏 魏志勇 方美华

(南京航空航天大学, 南京 210016)

摘 要 对于评价卫星深层充电危险性来说, 首先要知道的是卫星所处轨道以及其轨道的最恶劣电子环境。目前在太空中工作的航天器主要处于磁层以内及其边缘地带, 所以研究 GEO 轨道具有重要的现实意义。基于 FLUMIC 建立了外辐射带高能电子模型, 得到了地球同步轨道最恶劣高能电子环境通量水平及能谱分布; 在没有任何挡板的情况下, 介质材料裸露在 GEO 轨道最恶劣电子环境中, 分别使用经验公式和 Geant4 模拟了在该环境下卫星典型材料内部电子输运过程及能量分布; 进而利用 RIC 解析模型求解了背面接地时介质材料内电场分布, 改变了材料的参数, 分析了介质材料的性能对其深层带电的影响: 介质材料密度对于材料深层带电有影响, 但是影响不大; 本征电导率对内电场的影响有很大关系, 当本征电导率高于 $10^{-14} \Omega^{-1} m^{-1}$ 时, 不易发生介质深层带电问题; 针对 TEFLON 这种材料厚度大于等于 5mm 时, 裸露在 GEO 轨道上, 背面接地达到平衡时, 最大电场能达到 $7.8 \times 10^7 V/m$, 能被击穿。

关键词 地球同步轨道 高能电子谱 介质深层充电 内电场 材料参数

The Material Parameters' Effects on Deep Charging of Satellite Exposed in GEO Orbit

Qiang Peng, Wei Zhi-yong, Fang Mei-hua

(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: To evaluate the risk of deep charge, the first thing to know is the orbit the satellites in and the worst electronic environment the orbit has. Currently, most of the spacecraft's work in the magnetosphere and its main edge, so it is important to study GEO orbit. The paper has established high-energy electron model based FLUMIC and has got the worst geosynchronous energetic electron flux levels. Exposed in GEO orbit, electron transport processes inside the material and energy distribution have been shown in different ways. Using the model of RIC to get the electric field distribution within the dielectric material and change the parameters of the material to analyze the material parameters' effects on deep charging of satellite. To conclude, material density dose have effect but a little; When the conductivity is higher than $10^{-14} \Omega^{-1} m^{-1}$, deep dielectric charging is no easy to happen; For the material of TEFLON being exposed in GEO orbit, when its thickness gets to 5mm and the electric field can be $7.8 \times 10^7 V/m$, finally it can be broken.

key words: Geosynchronous orbit; High energy electron spectroscopy; Deep dielectric charging; Internal electric field; Material parameters

1 引言

航天器在轨运行中会遇到各种空间环境, 由于目前大多数发射任务都位于中低轨道, 尤

其是地球同步轨道最容易受到高能粒子环境的辐射效应,使得航天器及其组件材料尤其是关键部位屏蔽较弱的介质材料受到损伤,最终导致航天器在轨寿命降低甚至导致任务失败,因此研究卫星在空间辐射环境下的介质材料辐射损伤尤为重要。

卫星中介质深层充电^[1] (deep dielectric charging) 是指高能量粒子在介质材料中沉积时,由于粒子的迁移率很小,电荷将很难泄放,随着时间的推移在材料内积累成为空间电荷,建立电场的过程。介质深层充电效应是导致地球同步轨道 ($L=6.6\text{Re}$) 卫星故障和异常的主要原因^[2],这种效应主要是由地球外辐射带 ($3\sim7\text{Re}$) 的高能电子引起的,这些高能电子的能量主要位于 $0.1\sim10\text{MeV}$ 范围内,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电介质中,从而产生充电效应^[3]。

2 基于 FLUMIC 的真实地球同步轨道最恶劣电子环境的建立

介质深层充电的威胁程度与高能电子通量大小相关,所以标准的平均通量模型是不适用的^[3],因此研究介质深层充放电的最大威胁时需要最大通量下的电子环境模型。空间环境中,电子能量需要根据相应的介质深层带电空间电子环境模型进行定义,本文基于 ESA 的 FLUMIC 模型计算高能电子谱^[4]。所得最恶劣电子环境能谱如下,也是下面用来计算介质深层带电的能谱图:

由图 1 可以看出文章计算得出的能谱比 NASA 提供的“建议最恶劣环境”略大,所以可以作为介质深层带电模型使用。

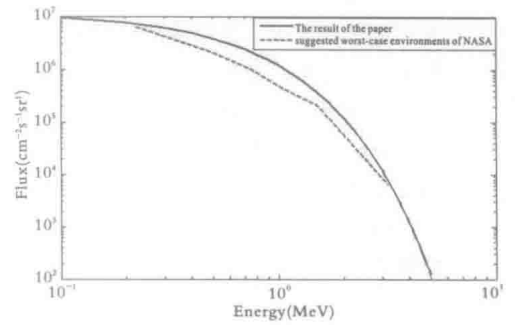


图 1 文章使用最大电子注量能谱与 NASA 建议最恶劣环境能谱比较

3 介质深层充电的 RIC 模型建立

针对于真实的 GEO 情形,便于研究计算采用典型的平板模型,背面介电时,当充电过程达到平衡时,建立 RIC 差分模型,用迭代法可以求得电荷密度、电场、电势分布^{[6]~[6]}:

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

$$\rho_t(x, t + \Delta t) = \rho_t(x, t) + \frac{\rho_f(x, t)}{\tau_T} (1 - \frac{\rho_t(x, t)}{\rho_m})$$

$$\rho_f(x, t + \Delta t) = \epsilon \frac{E(x, t + \Delta t) - E(x, t)}{\Delta x} - \rho_t(x, t + \Delta t)$$

$$\varphi(x - \Delta x, t + \Delta t) = \varphi(x, t + \Delta t) + \Delta x E(x, t + \Delta t)$$

其中,电场强度 E , 自由电荷密度 ρ_f , 束缚电荷密度 ρ_t 和辐射感应电导率 σ 均为时间和空间分布函数, ϵ 为介电常数, J_0 为入射到平板表面的电流密度, J_f 为入射电子在介质内沉积电流的空间分布函数, μ 为迁移率, τ_T 为电荷平均束缚时间, ρ_m 为材料空穴浓度与电子电量的乘积。

由辐射诱发的电导率为:

$$\sigma = \sigma_0 + k_p D^\Delta [\Omega^{-1} \text{cm}^{-1}]$$

其中 D 为辐射剂量率, Δ 是一个依赖于介质材料性能的无量纲指数, 取 $0.6 \sim 1$ 之间, k_p 为与材料性能相关的系数。 D 可以用高能电子辐射通量所产生的电流表示:

$$D(x) = k_r \cdot J(x) = k_r \cdot \gamma \cdot e \cdot \varphi(x) [\text{rads}^{-1}]$$

其中 $k_r = 1.92 \times 10^{11} \text{rad}^{-1} \text{A}^{-1} \text{cm}^2$, $J(x) = \gamma \cdot e \cdot \varphi(x)$ 为介质内 x 处的电流密度, γ 是几何因子, 对于平板模型:

$$\gamma = \int_0^{\pi/2} 2\pi \sin\theta \cdot \cos\theta d\theta = \pi$$

4 介质内部电场数值计算

早在 20 世纪 80 年代中期, 美国就开始了用 Monte Carlo 方法研究电子/光子在材料中的输运过程, 目前已形成了一个 TIGER 系列。Weber 等人通过研究电子在铝中的输运过程给出一个经验公式, 该公式能够近似描述能量低于 10MeV 的电子在介质材料中的沉积, 能量为 E_e 的电子的最大射程 R [7]:

$$R = 0.55E_e(1 - \frac{0.9841}{1 + 3E_e}) [\text{g/cm}^2]$$

其中电子能量 E_e 的单位为 MeV 。

严格地说, 高能电子在介质材料一定的深度呈高斯分布, 但 Sorenson 将电子分布近似为在深度为 a 的范围内的均匀线性分布 [8]:

$$a = 0.283E_e [\text{g/cm}^2]$$

那么, 介质材料内任意深度 x 处的电子辐射通量为:

$$\varphi(x) = \begin{cases} \varphi(0) & x < R - a \\ \varphi(0) \frac{R - x}{a} & R - a \leq x < R \\ 0 & x \geq R \end{cases}$$

模拟对象为 1.5mm 厚的聚四氟乙烯 (TEFLON) 平板采用背面接地时最大通量下 GEO (无 Al 板屏蔽) 能谱计算结果比较如下:

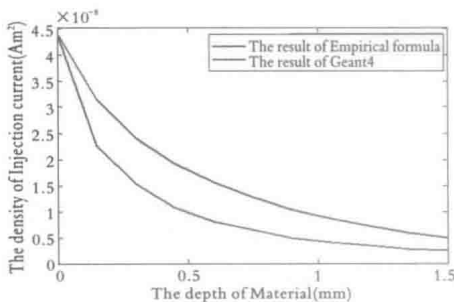


图 2 经验公式与 geant4 模拟得出注入电流密度随介质位置分布

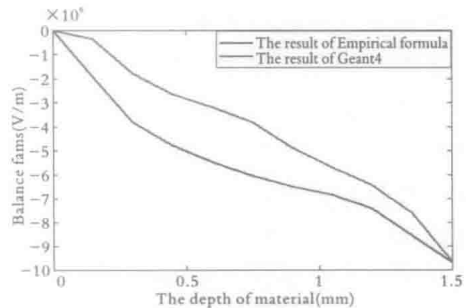


图 3 经验公式与 geant4 模拟得出平衡电场随介质位置分布

由图 2 可以看出由经验公式算出来的注入电流密度要比 Geant4 模拟的大, 这是因为在

Geant4 编程中对电子位置分布进行均匀分布, 电子方向为 360 度, 在穿透介质板的过程中由于电子跟分子作用由于能量不同有沉积的部分, 有向前前进的部分, 也有碰撞后路径改变向后运动的部分, 而经验公式中只考虑到沉积与前进的部分, 所以在数值上要比 Geant4 模拟的大, 由于沉积电流密度大, 达到平衡时, 所造成的平衡电场也更大如图 3, 根据实际情况可知, 蒙特卡罗工具 Geant4 更为可信。

5 介质材料参数对其深层充电的影响

5.1 电导率对介质深层充电的影响

本节研究的介质材料为 FR4, 考虑到 FR4 的辐射诱导电导率变化非常小, 可以忽略不计, 根据合成工艺的不同, 能得出不同电导率的 FR4, 可以用来研究本征电导率对介质深层带电的影响。辐射条件为: 裸露在地球同步轨道最恶劣电子环境中背面接地达到电场平衡。

如图 4 所示, 当电导率达到 $1 \times 10^{-14} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ 时平衡电场已经达到很小, 电导率越大, 平衡电场越小, 而 NASA-HDBK-4002 认为, 材料电导率为 $1 \times 10^{-12} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$ 时, 材料几乎不受介质深层带电的影响, 由上图可以看出电导率为 $1 \times 10^{-12} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$, 最大平衡电场为 0, 符合规定。

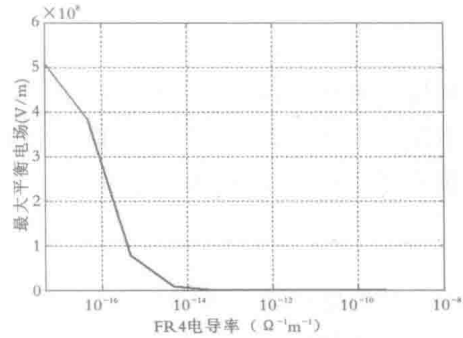


图 4 FR4 最大平衡电场 (绝对值) 随其电导率的变化

5.2 密度对介质深层充电的影响

本节研究的介质材料为 FR4, 取其电导率为 $4.72 \times 10^{-16} \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$, 辐射诱导电导率忽略不计, 可以研究其密度变化对介质深层带电的影响。辐射条件为: 裸露在地球同步轨道上, 最恶劣电子环境中背面接地达到电场平衡。

如图 5 所示, 随着 FR4 密度的增加, 最大平衡电场略有变大, 密度的小幅度变化几乎不引起电场的明显变大。具有一定能量的电子入射到介质材料中, 沿着其轨道穿行时, 所受的碰撞次数和每次碰撞转移的能量都是随机的, 使得电子在介质中的沉积更接近高斯分布, 所以密度是影响其分布的一个因素, 密度的增大, 使得在相同位置电荷沉积的越多, 导致平衡电场最大, 但是总体影响不大。

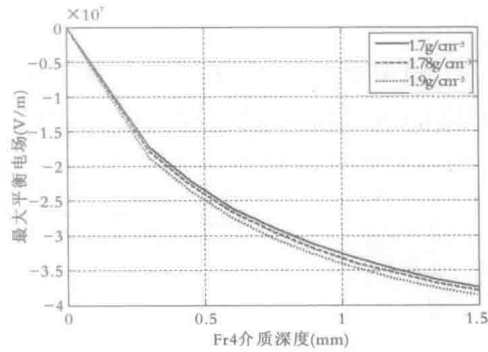


图 5 FR4 最大平衡电场随其密度的变化

5.3 厚度对介质深层充电的影响

本节研究的介质材料为 FLEFLON, 辐射条件为: 裸露在地球同步轨道上, 最恶劣电子

环境中选用背面接地达到电场平衡。

由如图 6 所示, 最大电场随介质厚度的增加而增加, 针对于 TEFLON 这种介质材料, 在地球同步轨道最恶劣环境作用时, 在无屏蔽的情况下, 厚度大约达到 5mm 时, 最大电场达到 $7.8 \times 10^7 \text{ V/m}$ 就可能被击穿。当介质较薄时, 能量大的电子穿出介质层, 使得沉积的电荷量有限, 所以达到的最大电场较小; 随着厚度的增加, 最大电场不断增加, 当厚度超过高能电子的最大射程时, 电子全部沉积, 从而介质中的电荷量达到最大, 厚度继续增加时最大电场不再增加, 因此, 要想减小甚至避免深层充放电危险性, 应在允许条件下尽量选用薄的介质材料。

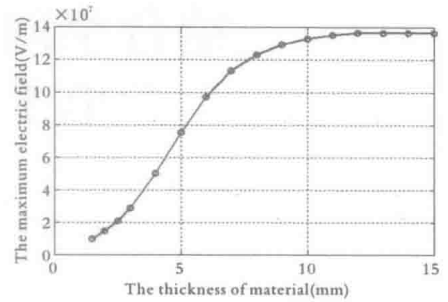


图 6 最大电场随介质厚度的变化关系

6 结论

基于 FLUMIC 建立了外辐射带高能电子模型, 得到了地球同步轨道最恶劣高能电子环境, 分别使用经验公式和 Geant4 计算了在该环境下航天器典型材料 TEFLON 内部能量沉积, 进而利用 RIC 解析模型求解了背面接地时介质材料裸露在真实 GEO 轨道中的内部电场分布。最后讨论了介质材料参数对介质深层带电的影响, 采用背面接地, 裸露在 GEO 轨道最恶劣电子环境中的 FR4 和 TEFLON 的介质深层带电规律:

1. 本征电导率对内电场的影响很大, 当本征电导率低于 $10^{-14} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ 时, 电导率对电场分布有明显的影 响, 当本征电导率高于 $10^{-14} \Omega^{-1} \text{ m}^{-1}$ 时, 不易发生介质深层带电问题。

2. 介质材料密度对于材料深层带电有影响, 但是影响不大, 随着密度的增加, 介质内沉积的电荷密度增加, 产生的平衡电场增加。

3. 介质厚度对电荷密度和电场的影响非常显著, 与电子射程密切相关, 介质厚度大于电子射程时最大内电场稳定在一数值, 不随厚度变化而变化, 可以得出要想减小甚至避免深层充放电危险性, 应在允许条件下尽量选用薄的介质材料。

参考文献

- [1] Garrett, H. B., and A. C. Whittlesey, Spacecraft Charging, an Update, IEEE Trans. on Plasma Phys., Special Issue On Space Plasmas, 2000, 28 (6): 2017-2028.
- [2] 黄建国, 陈东. 卫星中介质深层充电特征研究 [J]. 物理学报, 2003, 53 (3): 961-966.
- [3] Gussenhoven M S, Mullen E G. Geosynchronous environment for severe spacecraft charging [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1983, 20 (1): 26-34.
- [4] D. J. Rodgers, K. A. Hunter, G. L. Wrenn. The FLUMIC Electron Environment Model.
- [5] 秦晓刚. 介质深层带电数值模拟与应用研究 [D]. 兰州大学, 2010.
- [6] 秦晓刚, 贺德衍, 王骥. 基于 Geant4 的介质深层充电电场计算 [J]. 物理学报, 2009, 58 (1): 684-689.
- [7] Weber K H. Eine einfache reichweite-energie-beziehung fur elektronen im energiebereich von 3 keV bis 3 MeV [J]. Nuclear Instruments and Methods, 1964, 25: 261-264.
- [8] Sorensen J. An Engineering Specification of the Internal Charging [C] // Environment Modeling for Space-Based Applications. 1996, 392: 129.

结合空间辐射探测技术的航天 电子元器件验证方法

邵思霁 李璟璟 刘 泳 张玉兔

(山东航天电子技术研究所, 烟台 264000)

摘 要 为了提高航天器设计制造自主可控能力, 开展国产元器件的在轨验证非常必要。国外已经开展了大量针对元器件验证评估的空间辐射效应探测与研究。我国对部分电子元器件进行了在轨搭载验证, 取得了一定的效果。本文介绍了一种结合空间辐射探测技术的元器件在轨单粒子定量预计方法, 提出了辐射参数与单粒子验证试验单元方案与在轨测试方法, 为国产元器件在轨辐射效应评估提供支持。

关键词 国产元器件 辐射效应 预计方法

Electronic Component Validation Method Based on Space Radiation Detect Technology

SHAO Si-pei, LI Jing-jing, LIU Yong, ZHANG Yu-tu

(Shandong Aerospace Electro-Technology Institute, Yantai 264003, China)

Abstract: Domestically produced electronic component on-orbit radiation effect test is an important way to achieve independence and controllable spacecraft design and manufacture. Many researches about space radiation effect on electronic component have been done overseas. Different component have been on-orbit validated and obtained good effects in the domestic. An Single Effect quantified estimation method is introduced based on space radiation detect technology, the Radiation Parameter and Single Effect Test instrument scheme and on-orbit test method are presented to give support to domestically produced electronic component on-orbit radiation effect test.

Key Words: Domestically produced electronic component; radiation effect; estimate method

1 引言

空间辐射环境对航天器电子元器件性能有重要的影响, 直接关系到航天器的可靠性与安全性, 甚至关系到国家重大航天活动的成败。随着航天器设计制造自主可控的需求, 国产电子元器件将越来越多的应用在航天任务中。这就对国产电子元器件的在轨验证提出了迫切需求。国产元器件在轨验证是航天器自主可控的重要手段, 辐射环境效应参数是国产元器件在轨验证评估的重要因素。国产元器件在轨验证的相关性分析、量化评价, 都需要空间环境辐射效应参数的配合^[1]。元器件实验装置可以通过卫星、空间站、货运飞船等进行在轨搭载。为了研究空间辐射环境对元器件的辐射效应与损伤机理, 需要通过空间辐射探测仪器获取器件所在位置的辐射粒子环境及效应参数信息。

2 国内外研究现状

2.1 国外研究现状

20 世纪 50 年代，随着首颗人造地球卫星的成功发射，范艾伦辐射带被发现，由其导致的卫星辐射剂量效应引起当时工程界的广泛关注。20 世纪七八十年代，集成电路开始广泛应用，元器件的单粒子效应问题成为人们关注的焦点，并深入开展了相关的理论与试验研究。随后，科学家又发现了导致卫星在轨异常的另一个重要因素—深层充电效应。随着越来越多的新器件、新材料在卫星上应用，电子元器件单粒子效应、总剂量效应和深层充电效应得到进一步的深入研究。

20 世纪 90 年代初，美国军方和 NASA 联合进行了 CRRES 项目的研究与实施，研究空间环境对微电子器件的效应^{[2]~[4]}。实施该项目的航天器装载了空间环境及效应探测仪器，包括表面充电探测、器件效应试验、深层介质放电等实验仪器。针对微电子效应的试验包括单粒子测试传感器和剂量探测器，单粒子测试以航天应用电子元器件为对象，包括高速集成电路器件如 VHSIC 和 GaAs 材料的 RAM 等器件，对其单粒子翻转性能进行在轨测试，同时配合高能质子、银河宇宙线等粒子辐射环境参数的探测，进行器件单粒子性能的在轨评估和验证。剂量探测利用 PMOS 传感器进行测量。

美国在 APEX、MPTB、STRV-1c/d 以及 HEO 系列卫星上进行了大量的单粒子效应、剂量效应以及充放电效应的探测及飞行试验，获得了大量成果，为新器件的应用提供了基础参数，探测器件类型、辐射参数和应用卫星统计见表 1。

表 1 元器件验证情况	
测试对象	元器件
器件类型	RAM、VHSIC、SRAM、EPROM、FPGA
辐射参数	LET 谱、质子谱、总剂量
应用卫星	CRRES DSX、APEX、MPTB、STRV-1c/d 以及 HEO 卫星

在第 24 周太阳活动峰年期间，美国积极开展空间环境及其效应的试验验证工作，包括演示与科学卫星 DSX，在辐射危害严重的 GPS 卫星轨道区域开展空间环境及其效应试验探测^{[5]~[6]}。DSX 包含了波粒相互作用试验、空间天气试验、空间环境效应试验 3 类载荷，共 13 台单机。其中的空间环境效应测试设备 SET 的试验目的是研究空间环境效应机制，减少空间环境及其效应的不确定性，验证卫星异常和故障的诊断和处理规程，改进卫星工程设计和在轨管理。SET 设备包含了辐射剂量、低剂量效应、LET 谱、充电效应等效应测试，开展了 EPROM、FPGA 等器件的在轨试验。

2.2 国内研究现状

我国在空间环境及其效应探测等方面的研究取得了一定的成果，在载人、探月、导航、气象以及多个应用系列卫星上开展了航天器轨道环境的探测研究。在相关卫星及航天器上开展了关于粒子辐射环境和元器件辐射效应的探测研究，探测对象包括轨道辐射环境参数，器

件单粒子效应和辐射剂量效应。辐射环境参数包括了电子、质子和重离子成分等空间辐射粒子特性的探测,单粒子效应的测试包括单粒子门锁、单粒子翻转、单粒子软件防护、单粒子综合防护、单粒子屏蔽防护等,辐射剂量效应主要针对总剂量的探测。

我国在某些卫星上开展了国产宇航器件的在轨试验,测试和验证国产宇航器件的空间环境适应性。这些国产元器件验证单元涵盖了国产 DSP、FPGA、DC/DC、1553B 总线控制器、国产 CPU、接口芯片、运放、模拟电路、存储器、基准源、光电器件等。其中,某些试验装置搭载了辐射效应探测器,包括国内首发的 LET 探头(5 个能档,0.5~37MeVcm²/mg),质子探测器(4~16 MeV)和总剂量探测器(25rad~5krad/年,50rad~10krad/年),结合星地对比试验,一方面全面评估国产元器件功能、性能及可靠性,为后续型号工程设计提供可靠性数据,另一方面研究和探索科学有效的空间环境地面模拟试验方法和评估系统,推动了空间元器件试验评估技术的发展。此外,某空间辐射效应试验单元,主要验证国产元器件加固算法的空间环境适应性,定量检测在不同加固算法下(EDAC、TMR、定时刷新及其组合),国产 FPGA 运行典型程序的抗辐射能力,验证空间辐射环境可靠性评估技术,试验器件包括国产 FPGA、国产处理器、DAC、熔断器等。

3 元器件单粒子定量预计方法和在轨验证方法

3.1 单粒子定量预计方法

空间辐射环境对元器件会产生总剂量效应、位移损伤效应和单粒子效应等,损害元器件的性能,影响航天器在轨安全。其中,单粒子效应具有很强的随机性,并且有单粒子翻转、单粒子锁定、单粒子烧毁等多种故障模式,对单粒子的定量预计是一项充满挑战性的课题。

元器件在轨飞行时的单粒子效应,需要了解航天器任务运行期内的空间粒子辐射情况,包括粒子辐射的强度、能谱、空间分布,特别是粒子在器件单位长度内沉积的能量即 LET 值。这些空间粒子辐射参数提供了单粒子预计基本的外部输入。同时也要研究空间粒子穿越到器件前所经历的各种屏蔽,需要考虑卫星蒙皮、设备壳体以及其它设备的屏蔽效应,确保仿真计算给出元器件所在位置的辐射源情况。此外,元器件单粒子辐射参数需要构建器件的单粒子敏感结构建模方法,敏感结构和辐射源敏感参数的仿真或者地面试验的测试方法,器件参数的仿真分析法等。单粒子发生概率的计算方法研究包括重粒子诱发和质子诱发单粒子效应的计算方法。单粒子效应预计包括重离子诱发单粒子效应预计和质子诱发单粒子效应预计。单粒子效应预计的基本原理如下:

$$R = \int_0^{\infty} \Phi(L) \sigma(L) dL \quad (\text{重离子翻转预计})$$
$$R = \int_0^{\infty} \Phi(E) \sigma(E) dE \quad (\text{质子翻转预计})$$

R 为单粒子效应发生概率, Φ 为辐照到器件的辐射粒子谱函数, σ 为器件的单粒子效应函数。

3.2 方法验证

单粒子预计方法验证的总体思路是采用准确的输入参数，包括准确的辐射源参数和器件的辐射参数，并在轨开展器件的单粒子效应测试，比对在轨实测数据和在轨预计结果，对预计方法进行验证。

粒子辐射源参数的获取采取在轨实测和模拟仿真结合的方式给出，器件单粒子参数的获取通过地面测试和器件结构仿真的方式获取，器件在轨表现通过在轨测试完成。构建数学统计模型，分析单粒子效应实测和预计比对数据，给出定量预计方法的验证结果。验证方法的核心是方法的有效性和可实施性，因此，验证方法需要采取在轨实测的方式实现。单粒子预计验证方法流程如图 1 所示。

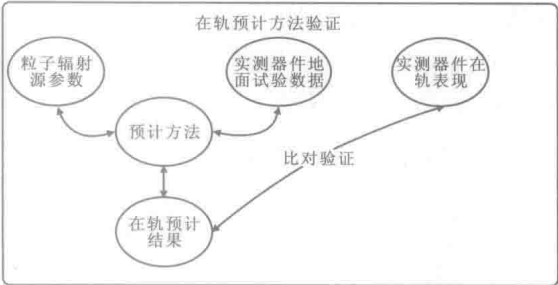


图 1 单粒子预计验证方法流程图

4 辐射参数与单粒子验证试验单元方案研究

4.1 技术方案

基于上述单粒子定量预计方法，提出一种辐射参数与单粒子验证试验单元的方案。辐射参数与单粒子验证试验单元从功能区分包括两部分，验证器件和元器件辐射参数的在轨监测，其中辐射参数监测包括单粒子效应和累积剂量效应，单粒子效应参数包括辐射 LET 谱和质子谱的探测，如图 2 所示。

试验单元从功能上又分为 LET 探测器、质子探测器、剂量探测器、单粒子验证探测单元四个探测部分和控制电路、电源模块两个功能部分。

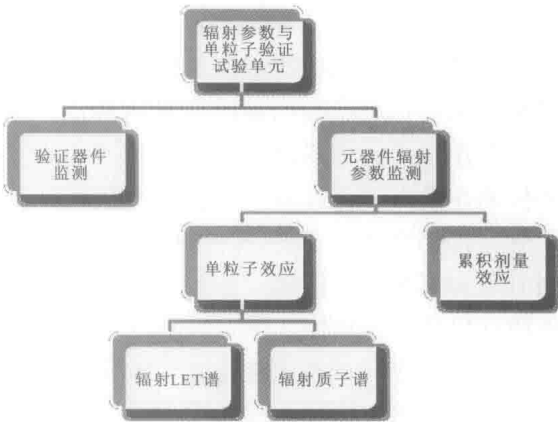


图 2 辐射参数与单粒子验证试验单元方案

LET 探测器、质子探测器都由探头和电子学部分组成，每个探头均是由半导体传感器组成的望远镜系统。当高能带电粒子通过准直器进入传感器时，由于带电粒子的电离作用，带电粒子损失能量并在半导体材料内部产生电子空穴对，电子空穴对在半导传感器上加的高压偏置电场的作用下，被收集在传感器的输出端产生电荷脉冲，传感器产生的电荷脉冲大小与带电粒子在传感器中损失的能量成正比，不同能量的粒子在传感器中损失的能量不同，因此产生的电荷脉冲的输出也不同，通过对传感器输出的电荷脉冲大小进行比对，就可确定入射的粒子种类和能量。探测的基本原理采用幅度分析法，仪器采用了磁场偏转和多层屏蔽去除背景粒子的干扰，同时配合符合与反符合技术实现粒子成份和能谱的鉴别。