木星环绕探测任务中的内带电风险评估

王建昭，田岱，张庆祥，张相宇，郑玉展，呼延奇，蔡震波
（北京空间飞行器总体设计部，北京 100094）

摘　要： 木星拥有类似地球辐射带的辐射带结构，其辐射带质子通量是地球的10倍，高能电子通量比地球高2～3个数量级，且最高能量可达1 GeV。因此木星探测任务的抗辐射设计是任务成功的关键。选择3种不同倾角大椭圆探测轨道，仿真分析了2种介质在变化能谱下的内带电过程。仿真结果表明，对于环氧树脂（Fr4），由于电阻相对较小，电子通量较大的近木点的充电电荷，会在远离辐射带时泄放，其最大充电电场取决于近木点的电子通量；对于聚酰亚胺（Kapton），由于电阻相对较大，充电电荷不能及时泄放，不同轨道间电荷逐渐累计，最大电场不断增加。另外，环木轨道倾角越大，越有利于降低充电电场。和地球GEO轨道相比，不同电阻介质在环木轨道的充电差异相对地球GEO轨道较小。

关键词： 木星；辐射带；内带电

中图分类号： V11　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 2095-7777(2017)06-0564-07

DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2017.06.010

引用格式： 王建昭，田岱，张庆祥，等. 木星环绕探测任务中的内带电风险评估[J]. 深空探测学报，2017，4（6）：564-570.

Reference format: WANG J Z，TIAN D，ZHANG Q X，et al. Internal charging evaluation in Jupiter exploration mission[J]. Journal of Deep Space Exploration，2017，4（6）：564-570.

0　引　言

近年来，针对木星系的深空探测任务逐渐成为航天领域的研究热点。中国航天在具备了自主探测月球等技术之后，下一阶段必然会向更广阔的深空迈进，对于木星探测的计划也已提上日程。与其他深空探测任务相比，木星系探测任务的难点之一是其恶劣的空间辐射环境，其中要特别考虑木星磁层内的辐射环境对探测器的影响[1]。木星磁场强度是地球的20倍，其辐射带低能质子的通量是地球的10倍，高能电子通量则比地球辐射带高2～3个数量级，电子的最高能量可达到几百MeV，而地球辐射带中的捕获电子能量一般小于10 MeV。

面对如此恶劣的辐射环境，木星探测器中的抗辐射设计至关重要。因为木星和地球差异显著的辐射效应，所以内带电效应需要特别考虑。内带电是指大量高能电子穿透探测器屏蔽层，沉积在电路板等绝缘介质中并逐步建立电场的过程，一旦电荷累积产生的电场超过绝缘材料放电阈值，便可造成材料击穿，发生深层放电，严重威胁探测器的安全。

对于木星内带电效应严重性的最早认知来自“旅行者1号”[2]，1979年3月5日在其飞越木星期间，14 h内发生了42次设备复位的异常现象，统计发现异常累计发生次数和高能粒子累计通量有很强的相关性，事后认为这些异常是由内带电效应引起的。介质的内带电过程和空间环境、屏蔽厚度、介质特性、接地条件等紧密相关，还取决于探测器运行轨道的选择，这是一个复杂的时变过程。因此，木星系探测的内带电仿真分析是抗辐射设计中的关键技术。

1　木星空间辐射环境

1.1　辐射模型

对于木星辐射带的认识始于20世纪70年代，“先驱者1号”“先驱者2号”和“旅行者1号”“旅行者2号”航天器在飞掠木星辐射带时测量到了近木辐射环境数据。基于这些有限的数据，以及利用地基射电雷达VLA（Very Large Array）测量的电子同步辐射数据而反演得到的电子通量，Divine和Garrett第一次提出了木星俘获带辐射模型——Divine-Garrett模型[3]。

1989年，“伽利略号”探测器发射升空，并最终环绕木星探测8年，收集了大量的有关木星大气以及木星辐射带的信息，补全了之前模型中的部分缺失信息。

收稿日期：2017-10-20　修回日期：2017-12-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目（11675013）

Garrett等随即建立了GIRE（Galileo Interim Radiation Environment）模型[4]。该模型在小于8个木星半径R_j时，采用Divine-Garrett模型，在大于8R_j时，利用“伽利略号”高能粒子探测器（Energetic Particle Detector，EPD）的数据构建。GIRE模型不仅可描述木星内磁层近似偶极场的结构，还可描述外磁层的盘状结构。迄今为止，GIRE模型是木星粒子辐射环境描述应用最为广泛的模型，曾为多个木星探测以及木星飞越借力深空探测任务提供支持。

1.2　辐射带粒子空间分布特征

与地球辐射带一样，木星辐射带仍然呈壳层分布。从空间分布的角度来看，赤道平面上的粒子通量随着距木星距离变远而逐渐衰减。木星辐射带与地球的不同之处在于，不存在明显的内外辐射带区分，另外，由于木星多颗卫星处在其辐射带范围内，卫星对辐射带产生影响而导致其辐射带存在微小结构。

图 1～2分别给出了不同能量（0.1 MeV、1 MeV、3 MeV、21 MeV）电子积分通量随离木星及地球中心距离的变化，横轴分别利用木星半径R_j（71 492 km）和地球半径R_e（6 378 km）作归一化，所以木星辐射带的空间分布范围比地球辐射带大100倍左右。在距离木星空间距离较近（小于3R_j）时，木星辐射带有一些独特且微小的结构，越靠近木星，电子的通量越小。对于能量大于0.1 MeV的电子，在距离木星1.06R_j的空间范围处（“Juno号”探测轨道近木点），积分通量为10^7 cm^{-2}s^{-1}，这一通量与地球GEO轨道高度上的电子积分通量接近（基于AE8MAX模型）。对于低能量的电子（0.1～3 MeV），其通量在3R_j的空间范围处达到极值，大小为10^9 cm^{-2}s^{-1}。

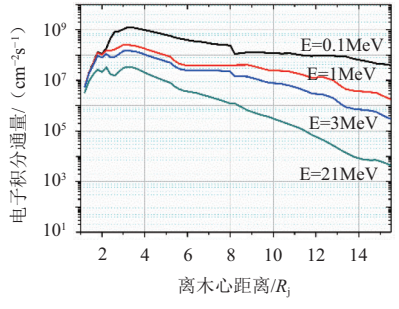

图 1　木星磁层电子积分通量随空间半径变化

Fig. 1　Integral flux of electron in Jupiter’s magnetosphere vs. R_j

1.3　辐射带粒子能量、通量特征

图 3给出了木星辐射带中4R_j处以及地球辐射带中GEO轨道高度处不同能量俘获电子的积分通量，能量范围从0.1～1 000 MeV。首先，从能量分布上，木星俘获带电子与质子和地球俘获带中的粒子大不相同。以地球GEO轨道最恶劣环境经度位置160 ° W为例，辐射带环境的主要成分是俘获带电子，能量在0.04～5 MeV之间。能量大于5 MeV的捕获电子通量很低（通量为10^2 cm^{-2}s^{-1}），在工程中可以忽略；捕获带质子能量大于1 MeV的通量较低（10^4 cm^{-2}s^{-1}）。因此，该轨道上地球辐射带的影响主要是由捕获电子造成。

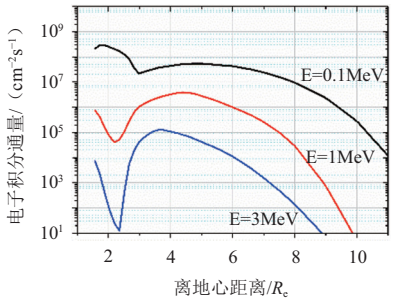

图 2　地球磁层电子积分通量随空间半径变化

Fig. 2　Integral flux of electron in Earth’s magnetosphere vs. R_e

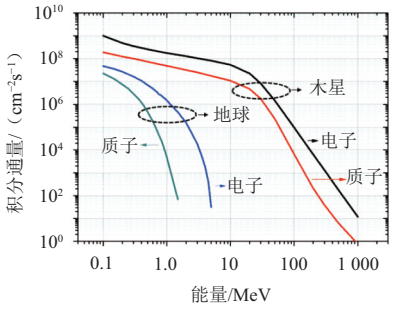

图 3　木星赤道平面4R_j处与地球GEO轨道处电子、质子积分通量能谱

Fig. 3　Comparison of electron and photon integral flux between 4R_j of Jupiter’s equator and GEO of Earth

在木星辐射带中，10 MeV的电子通量约为10^7 cm^{-2}s^{-1}，100 MeV的电子通量接近10^4 cm^{-2}s^{-1}，电子最高能量可达GeV量级。所以木星捕获电子无论是在能量上还是在通量上均远远高于地球GEO轨道。对于质子分布，与电子通量也基本相同，0.1 MeV质子的积分通量为10^5 cm^{-2}s^{-1}，10 MeV质子的积分通量为10^4 cm^{-2}s^{-1}。

综上，木星辐射带与地球辐射带相比，空间覆盖范围更大，且俘获粒子的能量更高，通量更大。在轨道设计过程中，在满足科学探测要求的前提下，应采取设计主动避开木星辐射带的高强度区域。

2　内带电仿真分析方法

2.1　物理模型及仿真方法

航天器内带电的仿真模型如图 4所示，电子穿过屏蔽层入射到电路板表面，电路板由电介质和上下表面覆铜层组成，覆铜层做接地处理。

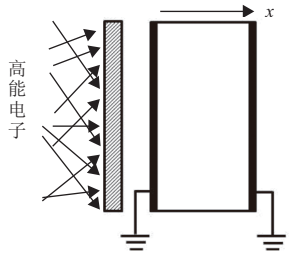

图 4 仿真物理模型示意图

Fig. 4 Physical model of simulation

内带电物理模型为

$$\nabla \cdot \vec{E} = \rho / \varepsilon \tag{1}$$

$$\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot \left(\vec{j} + \sigma \vec{E} \right) = 0 \tag{2}$$

其中：ρ为电荷密度；E为电场；ε为介电常数；j为电子束电流；σ为总电导率。

式（1）～（2）分别为Poisson方程和电流连续性方程。σ由本征电导率σ_0和辐射诱导电导率σ_r组成，若不考虑电场和温度的影响，有

$$\sigma_r = kD^{\Delta} \tag{3}$$

其中：D为辐射剂量率，单位为rad·s^{-1}；k和Δ为辐射诱导电导率的系数和指数，由实验数据获得。

仿真软件使用的是自主研发的基于解析算法的内带电快速分析工具，分析步骤流程图如图 5所示。

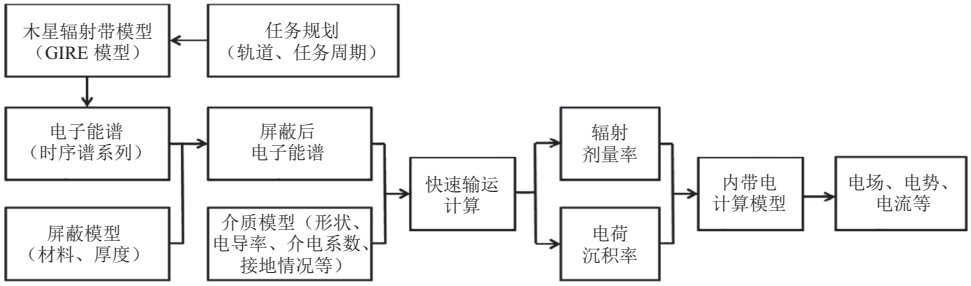

图 5 内带电效应分析步骤

Fig. 5 Computation procedure of internal charging

首先根据轨道和GIRE模型，得到电子时序能谱系列，根据屏蔽模型，利用前向近似原理[5]，得到屏蔽后的能谱序列；再分别利用基于EDEPOS算法[6]和FredBell算法[7]的解析输运算法，根据介质模型分析不同能量各向同性电子在介质不同深处的能量沉积和电荷沉积；最后利用基于有限元方法（Finite Element Method，FEM）的内带电计算模型[8]，获得电场、电势等的分布情况。

为了仿真时序各向同性能谱的内带电，需要分角度、能量点、时间循环计算。先考虑时序能谱系列中第一个能谱，计算不同能量下各入射角度的电子输运，加权求和得到此能谱的剂量和电子束电流分布；再计算该能谱作用时间下的充电电场分布等并保存结果；然后以此结果为输入计算下一时序能谱的充电情况，如此反复直至整个时序能谱系列计算完毕。

2.2 输运算法的高能端扩展

典型的EDEPOS算法只适用于100 keV～20 MeV的电子，而木星磁层中有能量高达1 GeV的电子，因此需要将EDEPOS算法进行高能端扩展，以适合分析木星的内带电情况。对于一定能量的电子，在介质中的能量沉积为

$$D(z) = D_c(z) + D_b(z) \tag{4}$$

其中：D_c（z）和D_b（z）分别是碰撞过程和韧致辐射过程产生的能量沉积。

对于较低能电子（小于2 MeV），碰撞过程占主要作用，随着电子能量的增加，韧致辐射造成的能量沉积所占的比重不断增加，从而使电子能量沉积曲线发生偏倚。本文采用文献[9]中迭代的拟合方法，获得高能（20～100 MeV）电子的能量沉积曲线，结果如图 6所示。

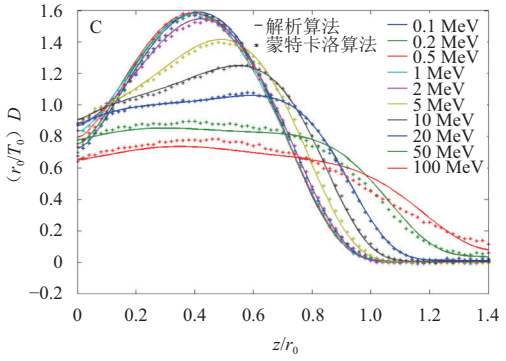

图 6 不同能量电子在C介质中的归一化能量沉积曲线

Fig. 6 Normalized energy deposition curves in carbon of different energy electron

通过入射粒子能量T_0和csda（continuous slowing-down approximation）射程r_0把能量沉积曲线进行归一

化，能量在2 MeV以下时，各条沉积曲线基本重合，此时韧致辐射对能量沉积的贡献较小。能量在2 MeV以上时，能量沉积曲线发生了明显的偏倚，而该算法和蒙特卡洛仿真结果符合度很好，即将EDEPOS算法的能量适用范围扩展到了100 keV～100 MeV。

3　木星轨道内带电结果

考虑木星恶劣的辐射环境，探测任务多选择大椭圆轨道以尽量避开木星辐射带中心区域。NASA的“Juno号”采用极轨探测方案，NASA与ESA预计2022年发射的“Juice号”拟选择赤道平面内的大椭圆环绕轨道。本文考虑3种探测轨道方案的内带电效应，即赤道面轨道（i0）、极地轨道（i90）、倾角为45°的木星椭圆环绕轨道（i45），航天器在木星辐射带内极强区（小于5Rj）停留的时间不同，从而受到的电子最大通量也不同，本节将结合具体的运行轨道讨论其对航天器内带电效应的影响。

3.1　轨道电子通量特点

图 7～8分别给出了极地轨道、赤道面轨道与木星辐射带的空间位置关系，辐射带强度由能量大于1 MeV的电子积分通量表示。

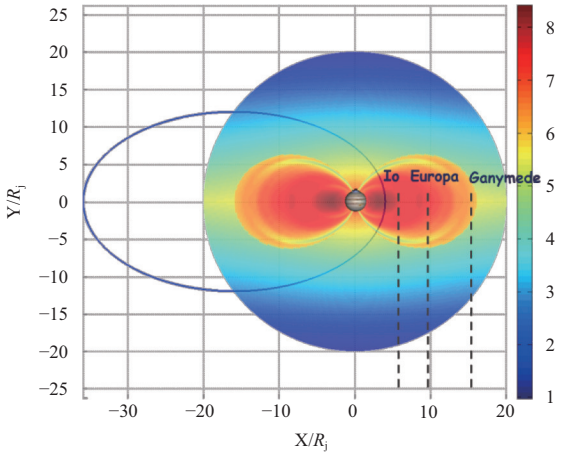

图 7　木星探测极地轨道

Fig. 7　Polar orbit in Jupiter exploration mission

以极地探测轨道为例，木星磁轴延Z轴方向，Z+方向为木星北极，X轴方向代表木星System III WLONG 110°。轨道近木点为4R_j，近木点速度为28.25 km/s，远木点为38R_j，远木点速度3.15 km/s，轨道周期为11天。临近木星辐射最强的区域时，通量达到1.7×10^8 cm^{-2}s^{-1}（作为对比，地球辐射带大于1 MeV电子积分通量最高为10^6 cm^{-2}s^{-1}），远离木星区域（>>16R_j）时，电子通量为10 cm^{-2} s^{-1}。可以看到，环木星探测轨道以较快的速度穿越木星赤道平面附近小于5R_j的空间范围（木星辐射带中极强的区域），可以在一定程度上降低航天器在轨期间受到的电子通量的影响。

赤道面探测轨道内航天器所受的电子通量最高。木星磁轴垂直纸面向上，轨道近木点和远木点分别为4R_j和38R_j。如图 8所示，航天器很长一段时间都在赤道平面内辐射较强的区域穿行。

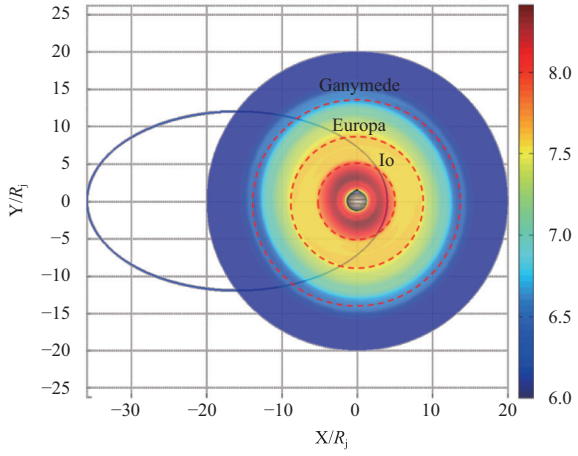

图 8　木星探测赤道面轨道

Fig. 8　Equator orbit in Jupiter exploration mission

3.2　内带电分析结果

对不同的探测轨道，不同介质的内带电特性差异很大，尤其是电导率对充电过程的影响十分显著。本文选择了两种典型的介质材料：电导率较高的环氧树脂（Fr4）及电导率较低的聚酰亚胺（Kapton），介质的物理参数如表 1所示。另外，本文选择厚度为1 mm的铝屏蔽层。为了和地球轨道进行对比，还计算了基于FLUMIC电子模型[10]的GEO轨道的内带电情况。

表 1　Fr4和Kapton的物理特性

Table 1　Physical property of FR4 and Kapton

物理特性指标	Fr4	Kapton
ρ/（g·cm^{-3}）	1.7	1.4
σ_0/（10^{-18} Ω^{-1}·cm^{-1}）	5	0.07
k/（10^{-18} s·Ω^{-1}·cm^{-1}·rad^{-1}）	3	5
Δ	1	1
ε/（10^{-11} F·m^{-1}）	4.2	3.0

沿赤道面轨道运行5圈的内带电过程如图 9所示。从上到下为：0.1 MeV电子微分通量及轨道位置离木星中心的距离随充电时间变化、Kapton和Fr4介质表面最大充电电场随充电时间变化、Kapton和Fr4介质不同深度充电电场随时间的变化。

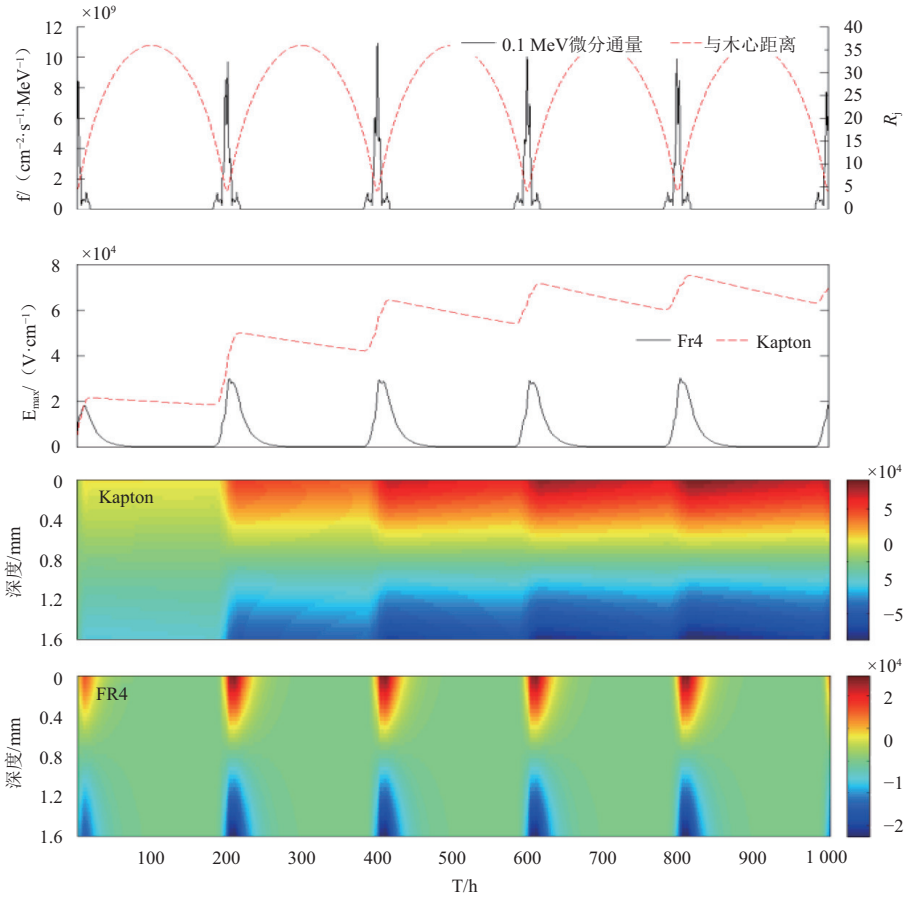

图 9 赤道面轨道的内带电过程

Fig. 9 Internal charging process along the equator orbit

当电子通量高时，介质中电荷累积速率大于泄放速率，电场增加；当电子通量低时，介质中电荷累计速率小于泄放速率，电场减小。考察1圈轨道内的充电过程，随着离木星距离的增加，电子通量急剧减少，对于Fr4介质，由于电导率较大，电荷泄放较快，其最高充电电场取决于近木点前后时间段（相对轨道周期很小）的电子通量；对于Kapton介质，由于电导率较小，在时间很长但通量很低的时间段电荷泄放很慢，当再次到达近木点时，前1圈轨道的充电电荷还未完全泄放，近木点的高电子通量将使介质充电到更高的电场，因此不同轨道间的充电电荷有累积效应，表面最大充电电场将随轨道不断增加，直至总体上电荷沉积速率和泄放速率达到平衡。

本文还研究了一个轨道周期内Fr4介质内带电过程，如图 10所示。在近木点附近，较大的电子通量导致了较高的充电电场。由于木星磁场近似偶极场，其导致的辐射带分布非对称，对于较大的轨道倾角，飞行器穿越辐射带中心的时间越少，相应的电子通量较小而导致充电电场越小。

为了和地球辐射带中的内带电过程对比，还计算了相同条件下GEO轨道内带电情况，结果如表 2所示。木星辐射带粒子通量远大于地球，但由于环木大椭圆轨道只有较短时间穿越辐射带，其内带电电场与地球GEO轨道内带电电场可比拟。

表 2 不同轨道内带电最大电场

Table 2 Saturated charging electric fields of different orbits

轨道名称	最大充电电场/（10^4 V·cm^{-1}）			
	木星赤道面轨道	木星极地轨道	木星环绕轨道	地球GEO
Fr4	3.0	1.8	1.2	0.45
Kapton	7.9	4.5	3.1	12

对于低阻介质（Fr4），地球GEO轨道内带电最大电场小于木星轨道；对于高阻介质（Kapton），地球GEO轨道内带电最大电场大于木星轨道。因为地球GEO轨道一直处于外辐射带，而该屏蔽条件下辐射诱导电导率远小于本征电导率，暗电导率对充电电场影响更大，不同的电阻介质的充电电场差异很大（本例为2个数量级）。对于环木轨道，充电电场主要取决于近木点附近电子通量，而木星辐射带电子（尤其是10 MeV

以上的高能电子）远大于地球辐射带，近木点附近辐射诱导电导率大于本征电导率，Fr4和Kapton介质（辐射诱导电导率的系数和指数相近）在近木点附近的充电行为相似，充电电场差异主要取决于时间长通量小的电荷泄放阶段，因此不同电阻介质在环木轨道的充电电场差距相对地球GEO轨道较小。

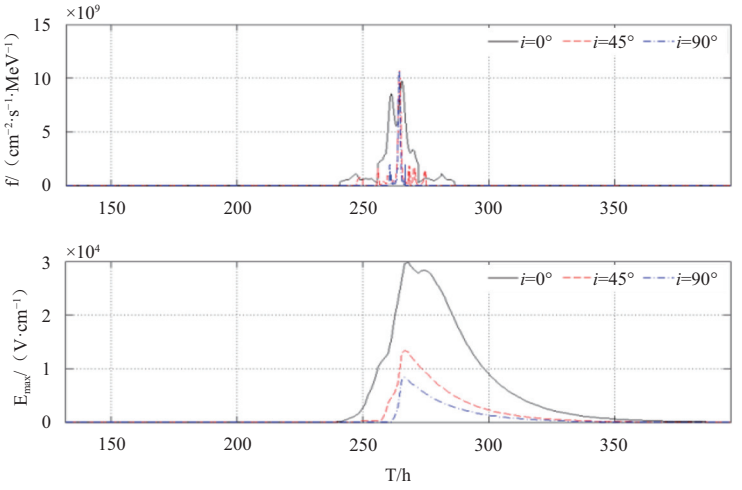

图 10　不同木星轨道的内带电过程

Fig. 10　Internal charging process of different orbits

4　结　论

通过仿真不同介质、不同轨道的木星内带电过程，可得到以下结论：

1）环木轨道偏心率越大，轨道处于辐射带区域外的时间越长，越有助于辐射带中充电电荷的泄放，以缓解在辐射带的高充电电场。

2）环木轨道倾角越大，轨道经历辐射带中心的时间越短，越有利于降低充电电场。

3）介质电阻对充电有重要影响，应尽量选用低电阻介质，与地球GEO轨道对比，因为环木轨道近地点附近电子通量强但相对时间少，在一定屏蔽条件下，不同电阻介质在环木轨道的充电差异相对地球GEO轨道小。

另外，本文还存在尚未解决的问题。因为内带电多发生在空间环境较恶劣时，所用空间环境模型一般为较恶劣模型（如地球轨道FLUMIC模型），而GIRE模型是木星平均状态空间环境模型，不能反映木星空间环境的不确定性。对木星辐射粒子环境及其不确定的研究，将作为今后的研究方向。

参　考　文　献

[1] KAYALI S，MCALPINE W，BECKER H，et al. Juno radiation design and implementation[C]//Aerospace Conference. Big Sky，MT，USA：IEEE，2012.

[2] LEUNG P，WHITTLESEY C，GARRETT H B，et al. Environment-induced electrostatic discharges as the cause of voyager 1 power-on resets[J]. Journal of Spacecraft and Rockets，1986(23)：323-330.

[3] GARRETT H B. Charged particle distributions in Jupiter's magnetosphere[J]. Journal of Geophysical Research，1983，88(A9)：6899-6903.

[4] GARRETT H B，KATZ I，JUN I，et al. The Jovian charging environment and its effects – a review[J]. IEEE Transactions on Plasma Science，2012，40(2)：144-154.

[5] BURRELL M O. The calculation of proton penetration and dose rates，NASA TM X-53063[R]. US：NASA，1964.

[6] TABATA T，ITO R. An algorithm for the energy deposition by fast electrons[J]. Nuclear Science and Engineer，1974(53)：226-239.

[7] FREDERICKSON A R，BELL J T. Analytic approximation for charge current and deposition by 0.1 to 100 MeV electrons in thick slabs[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1995，42(6)：1910-1921.

[8] 王建昭，陈鸿飞，蔡振波. 电阻接地状态下星用电路板深层充电仿真方法[J]. 航天器环境工程，2017，34(3)：258-264.
WANG J Z，CHEN H F，CAI Z B. A method for simulating internal charging of spacecraft circuit board grounded by electric resistance[J]. Spacecraft Environment Engineering，2017，34(3)：258-264.

[9] TABATA T，ANDREO P，ITO R. Energy-deposition distributions in materials irradiated by plane-parallel electron beams with energies between 0.1 and 100 MeV[J]. Atomic Data and Nuclear Data Tables，1994，56(1)：105-131.

[10] RODGERS D J，HUNTER K A，WRENN G L. The FLUMIC electron environment model[C]//The 8th Spacecraft Charging Technology Conference. Huntsville，USA：NASA，2004.

作者简介：

王建昭(1989–)，男，工程师，主要研究方向：空间环境及效应。

通信地址：北京市海淀区友谊路104号(100094)

电话：(010)68744647

E-mail：wangjz1989@126.com

Internal Charging Evaluation in Jupiter Exploration Mission

WANG Jianzhao，TIAN Dai，ZHANG Qingxiang，ZHANG Xiangyu，ZHENG Yuzhan，
HU Yanqi，CAI Zhenbo

（Beijing Institute of Spacecraft System Engineering，Beijing 100094，China）

Abstract：Jupiter has a similar radiation belt structure as Earth. The proton flux in Jupiter's magnetosphere is about 10 times of that in the Earth. The electron flux in Jupiter's magnetosphere is about 2～3 magnitude order higher than that of the Earth，and the maximum energy of electron is about 1 GeV. So，the anti-radiation design is one of the key technologies in Jupiter mission. Three elliptical orbits with different inclinations and two kinds of dielectric are selected，and the internal charging processes in time-varying electron environment are simulated. For Fr4 material，the conductivity is relatively small and the deposited charge will leak off when the spacecraft is far away from the center of radiation belt. The maximum charging field is determined by the maximum electron flux. For Kapton material，the conductivity is relatively large and the deposited charge will be accumulated between different orbits，so the charging field will grow gradually. Large inclinations of orbit will benefit in decreasing charging field. Comparing the internal charging behavior of Jupiter elliptical orbit with that of GEO orbit，it is found that the difference of charging field between Fr4 and Kapton in Jupiter orbits is smaller than that in GEO orbit.

Key words：Jupiter；radiation belt；internal charging

High lights:

- The high energy electron environment of Jupiter's radiation belt is introduced.
- The comparison of electron flux between the Jupiter（GIRE model）orbit and the Earth orbit（AE8MAX model）is made.
- The energy range of the fast dose rate simulation algorithm is extended to 0～100 MeV.
- The internal charging process of three kinds of orbits（inclination：0°，45°，and 90°）and two types of dielectrics（Fr4 and Kapton）are calculated.
- Difference of charging field between Fr4 and Kapton in Jupiter orbits is smaller than that in GEO orbit.

[责任编辑：杨晓燕，英文审校：朱恬]