

转移轨道空间辐射环境及效应研究

周悦琦

哈尔滨师范大学物理与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2024年1月5日; 录用日期: 2024年3月4日; 发布日期: 2024年3月11日

摘要

在各种类型的在轨任务中, 转移轨道任务是最复杂的, 在任务期间会遭遇复杂的空间环境, 对于航天器和航天员都存在巨大的危险。本文针对转移轨道任务中涉及到的四种典型轨道进行模拟, 使用MULASSIS程序计算各轨道总电离剂量和非电离剂量。结果表明: 转移轨道为高椭圆轨道时卫星需要抵抗超高累积辐射剂量, 当屏蔽厚度达到9 mm时对电子的屏蔽效能显著降低。当屏蔽厚度达到3 mm时对质子的屏蔽效能显著降低。本文相关计算结果可以有针对性的对不同类型的轨道任务采取有效的防护措施提供依据。

关键词

辐射效应, 空间环境, GTO

Study on the Space Radiation Environment and Effects for Transfer Orbit

Yueqi Zhou

School of Physics and Electronic Engineering, Harbin Normal University, Harbin Heilongjiang

Received: Jan. 5th, 2024; accepted: Mar. 4th, 2024; published: Mar. 11th, 2024

Abstract

Among various types of in orbit missions, transfer orbit missions are the most complex, encountering complex space environments during the mission, posing great risks to both spacecraft and astronauts. This article simulates four typical orbits involved in transfer orbit missions and uses the MULASSIS program to calculate the total ionizing dose and non ionizing dose for each orbit. The results indicate that when the transfer orbit is a high elliptical orbit, the satellite needs to resist ultra-high accumulated radiation dose. When the shielding thickness reaches 9 mm, the

shielding effectiveness of electrons is significantly reduced. When the shielding thickness reaches 3 mm, the shielding efficiency for protons significantly decreases. The relevant calculation results in this article can provide a basis for taking effective protective measures for different types of orbital missions with targeted measures.

Keywords

Radiation Effects, Space Environment, GTO

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

轨道环境中存在大量的带电粒子,与航天器中的电子元器件及材料发生作用,从而产生单粒子效应、总剂量效应和位移损伤效应等,其影响会使航天器的寿命和可靠降低,甚至严重的会使航天器的电子元器件等产生不可逆的损伤与错误,致使航天任务的失败。其中,最值得注意的是电离损伤和非电离损伤。电离损伤会导致 MOS 器件的阈值电压漂移和击穿电压变化[1] [2] [3] [4]。非电离能量损失会导致双极性器件退化和光电器件损坏,如太阳能阵列[5] [6]。计算卫星在轨的总电离剂量和非电离剂量是航天器防护设计的关键。同时,分析不同轨道的空间辐射环境也是非常重要的。分析空间环境是提高航天器在轨环境适应性、保证航天器在轨稳定运行的基础。近年来,研究人员还通过蒙特卡洛模拟方法和地面实验研究了用于航天器辐射防护的铝、聚合物、复合材料和多层屏蔽材料[7] [8] [9] [10] [11]。然而,这些研究主要集中在单能粒子或一种轨道的屏蔽能力上[12]。很少有人研究转移轨道任务中电子和质子的屏蔽效应,缺乏对不同轨道辐射环境的比较。

本文考虑最恶劣情况,模拟转移轨道任务中涉及的地球转移轨道(GTO)、地球同步轨道(GEO)、中地球轨道(MEO)以及低地球轨道(LEO),并通过 MULASSIS 程序计算各轨道的总电离剂量和非电离剂量,对其主要环境特征和辐射效应进行分析和讨论,旨在为航天器的防护设计提供依据,可以有针对性的对不同类型的轨道任务采取有效的防护措施。

2. 程序介绍及模型设置

2.1. MULASSIS 计算程序

MULASSIS (multi-layered shielding simulation software)计算程序是运用的蒙特卡洛方法,模拟跟踪大量入射粒子在靶材料中的运动,粒子在靶材料中的各种能量损失、位置信息以及所产生的次级粒子等参数都会被记录下来并储存,根据相关公式计算能得到所需物理量的期望值和相应的误差[13]。

使用 MULASSIS 程序可以对屏蔽材料的屏蔽效果进行评估。MULASSIS 计算程序能选择屏蔽材料、屏蔽结构以及入射粒子的入射类型,对输出提供脉冲能量沉积谱、多层屏蔽材料边界层的粒子通量、屏蔽材料中的总电离剂量以及界面的非电离剂量一系列选项。

2.2. 辐射环境及屏蔽结构设计

转移轨道任务设计中涵盖多种轨道形态,从低轨到高轨,辐射环境较为复杂。其中涉及的地球转移轨道(GTO)、地球同步轨道(GEO)、中地球轨道(MEO)和低地球轨道(LEO)具有重要的空间应用价值。因

此选用这四类轨道进行仿真与计算,轨道具体参数如表 1 所示。本文考虑极端环境通量,选用 AE8MAX (太阳活动高年)和 AP8MIN (太阳活动低年)模型,磁场为 Jensen-Cain 1960 模型。

计算四类轨道的总电离剂量和非电离剂,仿真建立平板模型,如图 1 所示,第一层为不同厚度的铝,第二层定义了 0.1 mm 厚的硅探测器结构,透过铝板的辐射由 0.1 mm 厚的硅探测器记录。物理列表选择为辐射防护专门创建的 QBBC,包含强和电磁相互作用,有 BIC、BIC-Ion、BERT、QGSP 和 FTFP 模型,比较适合描述 1 GeV 以下薄层靶实验,空间辐射效应评估领域常推荐使用。

Table 1. Parameters of typical satellite orbits

表 1. 典型卫星轨道参数

轨道	GTO1	GTO2	GTO3	GEO	MEO	LEO
近地点	188 km	10,188 km	33,194 km	42,162 km	23,222 km	7178.137 km
远地点	35,790 km	35,810 km	35,828 km	42,162 km	23,222 km	7178.137 km
轨道倾角	28.7	28.7	28.7	0	56	51.5

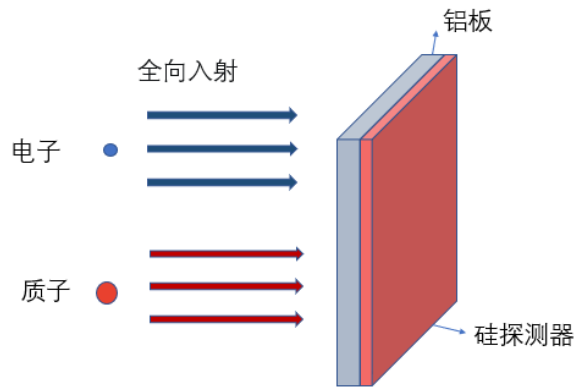


Figure 1. Schematic diagram of the shielding model

图 1. 屏蔽模型示意图

3. 计算结果与分析

3.1. 辐射环境分析

不同轨道的电子和质子微分通量如图 2 所示,随着电子和质子能量的增加,通量逐渐减小。由图 2(a)可知俘获电子的能量范围为 0 至 7 MeV,其中 GTO1 轨道电子和质子环境最为恶劣,电子和质子微分通量较大。地球辐射带分为内辐射带和外辐射带,内外辐射带的电子通量在磁壳层参数 $L = 1.5 R_E$ 至 $2.0 R_E$ 和 3.0 至 $5.0 R_E$ 处达到峰值(R_E 为地球半径)。GTO1 和 GTO2 是高度椭圆轨道,因此,GTO1 和 GTO2 轨道上的卫星会反复穿越内外辐射带,高能电子(>1 MeV)的辐射环境非常恶劣。MEO 位于外辐射带的核心区域,电子通量与 GTO1 和 GTO2 相似。LEO 的高度最低,因此电子通量最低。

图 2(b)可知 GTO1 和 LEO 的俘获质子能量范围为 0 至 300 MeV, GEO、GTO3 质子能量范围在 0 至 1 MeV, MEO 质子能量最大 15 MeV, GTO2 质子能量最大 100 MeV。高能质子集中在赤道 20,000 km 以下($L < 3.5 R_E$)。在相同的能量下,质子通量随磁壳层参数 L 的变化而变化。当 L 降低时,高能质子的通量增加。GTO3 和 GEO 的高度相对较高,因此质子通量主要由低能质子(<1 MeV)组成。LEO、GTO1 和 GTO2 轨道会经过高能质子聚集区,高能质子环境较其余轨道恶劣。LEO 轨道的低能质子通量较其余轨道低 3 至 4 倍。

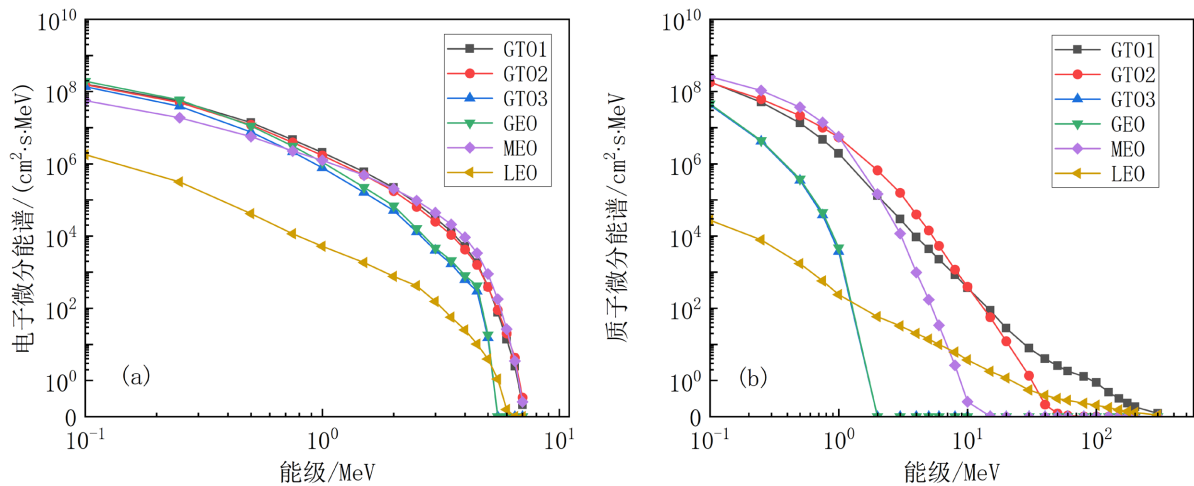


Figure 2. (a) Differential electron fluxes of different orbits; (b) Differential proton fluxes of different orbits
图 2. (a) 不同轨道的微分电子通量; (b) 不同轨道的微分质子通量

3.2. 辐射效应分析

图 3 为使用不同厚度的铝屏蔽后硅探测器所吸收的总电离剂量和非电离剂量变化图。俘获电子和质子所造成的屏蔽后总电离剂量和非电离剂量的变化趋势相同，随着屏蔽厚度的增加剂量减小，其中 GTO1 轨道环境诱发的总电离剂量和非电离剂量最为恶劣。总电离剂量是由电离损伤所引起的能量损失，是带电粒子碰撞导致靶原子电离和激发，形成电子 - 空穴对，需要的能量较低，通过电离作为损失能量。非电离剂量也称位移损伤剂量，是带电粒子与靶核碰撞导致原子核的位移，形成稳定的缺陷，需要的能量高。

图 3(a)、图 3(c)为屏蔽后电子和质子所造成的总电离剂量，总电离剂量和非电离剂量与入射能谱的微分通量有关。其中，LEO 轨道的电子通量较其余轨道低，穿过屏蔽材料后电子总电离剂量最低，而其余轨道的电子通量因为电子微分通量相差不大，其屏蔽后总电离剂量相差不大。当屏蔽厚度达到 9 mm 后对俘获电子的屏蔽效能显著降低，这是由于粒子穿过屏蔽材料时考虑了剩余粒子和韧致辐射对硅探测器总剂量的贡献。在屏蔽厚度较低时总剂量的产生主要来源于剩余电子，但随着厚度的增加，韧致辐射成为总剂量的主要贡献者。入射电子在弹性和非弹性碰撞的作用下射程和能量快速下降，造成总剂量快速下降，而韧致辐射产生的光子随厚度增加衰减很小，产生的光子不易被屏蔽。图 3(c)可知质子引起的总电离剂量比电子所引起的总电离剂量小。这是因为，质子质量较大，受到靶原子核库仑场的制动作用较小，难以诱发较强的韧致辐射，空间高能电子辐射是诱发韧致辐射的主要机制。对于低能质子为主的 GTO3 和 GEO 轨道使用 0.5 mm 就能很好防护。LEO 和 GTO1 的总电离剂量随屏蔽厚度达到 3 mm 后剂量降低变化缓慢，并且 GTO2 的总电离剂量能被屏蔽掉，即 3 mm 铝能屏蔽掉能量大于 100 MeV 的质子总电离剂量。

图 3(b)、图 3(d)为电子和质子所造成的非电离剂量。位移损伤实际上是带电粒子与靶材料原子发生弹性碰撞，可以多次与靶材料原子发生弹性碰撞，反冲的靶材料原子获得的能量较高时，也可以与其他原子碰撞，产生二次、三次和更高次的反冲原子(级联碰撞)。这种级联碰撞过程成为造成靶材料位移辐射损伤的重要原因。电子由于质量小，质子造成非电离损伤比电子容易。因此，有高能质子的 LEO 和 GTO，当屏蔽厚度达到 3 mm 后非电离剂量随屏蔽厚度变换较小，并且，3 mm 厚的铝同样也能屏蔽掉能量大于 100 MeV 的质子非电离剂量。由图 3(b)、图 3(d)可知电子造成的非电离剂量的 2 倍左右。低能质子为主的 GTO3 和 GEO 轨道所造成的非电离剂量 0.5 mm 铝就能防护，非电离剂量主要由质子引起。计算屏蔽

后的非电离剂量时与入射粒子的通量有关。LEO 轨道的电子通量最低，穿过屏蔽材料后电子非电离剂量最低，而其余轨道的由电子造成的非电离剂量因为电子微分通量相差不大，其屏蔽后总电离剂量相差不大。当屏蔽厚度达到 9 mm 后对俘获电子的屏蔽效能显著降低。本文工作与中国科学院微小卫星工程中心的蔡毓龙等[14]进行了对比，变化趋势一致，随着屏蔽厚度的增加屏蔽效能逐渐降低。

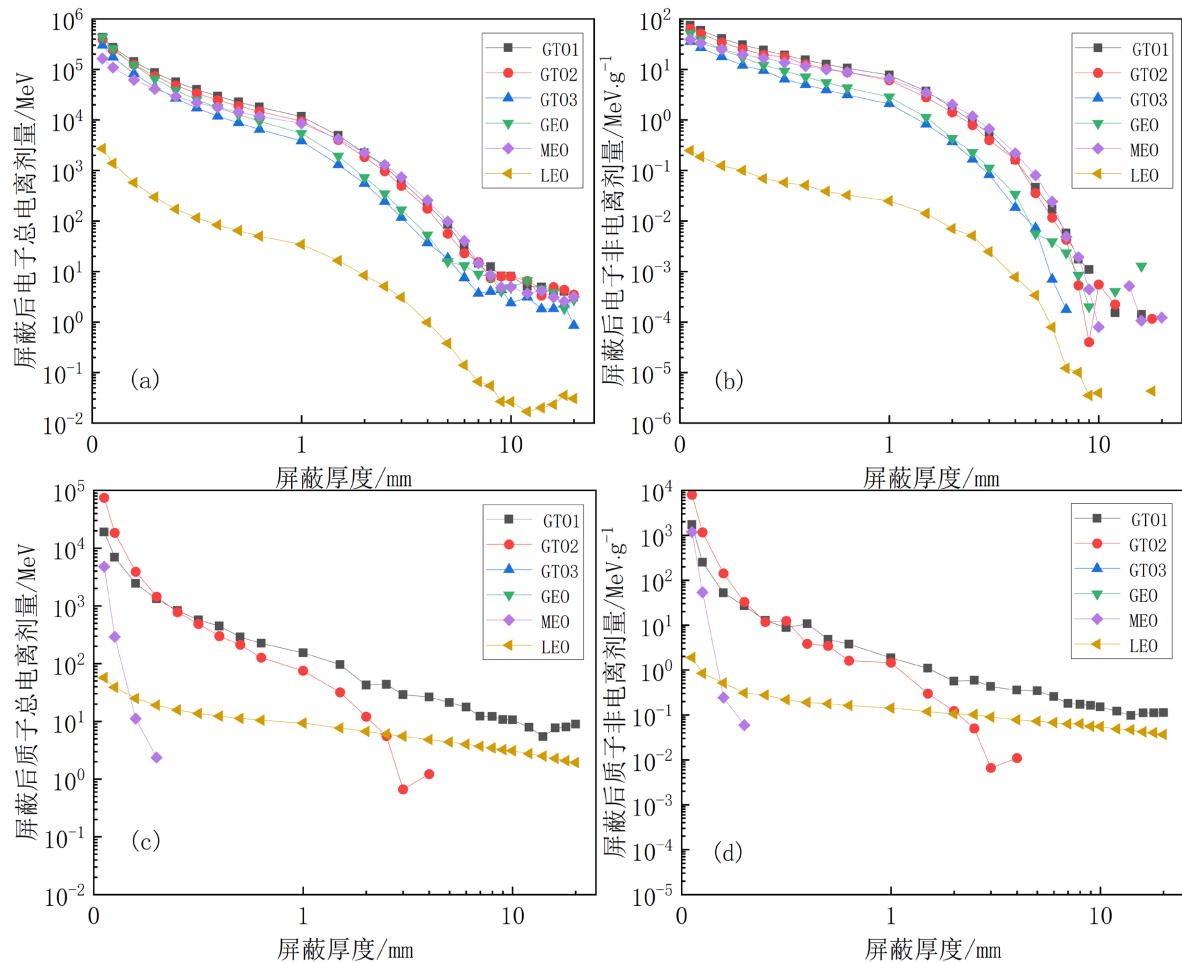


Figure 3. (a) Total ionizing dose of electrons after shielding; (b) Non-ionizing dose of electrons after shielding; (c) Total ionizing dose of protons after shielding; (d) Non-ionizing dose of protons after shielding

图 3. (a) 屏蔽后电子总电离剂量; (b) 屏蔽后电子非电离剂量; (c) 屏蔽后质子总电离剂量; (d) 屏蔽后质子非电离剂量

4. 结论

本文模拟了转移轨道任务所涉及的 GTO、GEO、MEO 以及 LEO 轨道，并用 MULASSIS 程序计算了不同厚度铝的屏蔽效果。对各类轨道辐射环境及效应进行了分析，穿过内部辐射带的 GTO 卫星暴露在高能和高通量的俘获质子和电子中，因此，卫星需要抵抗超高累积辐射剂量。使用不同厚度的铝屏蔽后硅探测器所吸收的总电离剂量和非电离剂量变化趋势相同，随着屏蔽厚度的增加剂量减小。当屏蔽厚度达到 9 mm 之后对电子的屏蔽效能显著降低，当屏蔽厚度达到 3 mm 之后对质子的屏蔽效能显著降低。相关的计算结果可以有针对性的对不同类型的轨道任务采取有效的防护措施提供依据。同时也能对航天器在轨寿命预测、故障诊断、防护以及新材料研究等提供理论和技术支持。

参考文献

- [1] Zhou, X., Zhang, L.F., Qiao, M., Yuan, Z., Luo, P., Shu, L., Li, Z. and Zhang, B. (2018) Investigation on Total-Ionizing-dose Radiation Response for High Voltage Ultra-Thin Layer SOI LDMOS. *Proceedings of the 2018 IEEE 30th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD)*, Chicago, 13-17 May 2018, 64-67. <https://doi.org/10.1109/ISPSD.2018.8393603>
- [2] Shu, L., Wang, L., Zhou, X., Li, T.D., Yuan, Z.Y., Sui, C.L., Li, Y., Wang, B., Zhao, Y.F. and Galloway, K.F. (2019) Numerical and Experimental Investigation of TID Radiation Effects on the Breakdown Voltage of 400-V SOI NLD MOSFETs. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **66**, 710-715. <https://doi.org/10.1109/TNS.2019.2905218>
- [3] Shu, L., Zhao, Y.F., Galloway, K.F., Wang, L., Wang, X.S., Yuan, Z.Y., Zhou, X., Chen, W.P., Qiao, M. and Wang, T.Q. (2020) Effect of Drift Length on Shifts in 400-V SOI LDMOS Breakdown Voltage Due to TID. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **67**, 2392-2395. <https://doi.org/10.1109/TNS.2020.2970743>
- [4] Sajid, M., Chechenin, N.G., Sill Torres, F., *et al.* (2018) Analysis of Total Ionizing Dose Effects for Highly Scaled CMOS Devices in Low Earth Orbit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **428**, 30-37. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.05.014>
- [5] Gruginskie, N., *et al.* (2021) Proton Irradiation Induced GaAs Solar Cell Performance Degradation Simulations Using a Physics-Based Model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **223**, 110971. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.110971>
- [6] Mazouz, H., *et al.* (2019) Numerical Simulation of GaAs Solar Cells Aging under Electron and Proton Irradiation. *IEEE Journal of Photovoltaics*, **9**, 1774-1782. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2939886>
- [7] Steffens, M., *et al.* (2017) Characterization of Novel Lightweight Radiation Shielding Materials for Space Applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **64**, 2325-2332. <https://doi.org/10.1109/TNS.2017.2703312>
- [8] Naito, M., *et al.* (2020) Investigation of Shielding Material Properties for Effective Space radiation protection. *Life Sciences in Space Research*, **26**, 69-76. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2020.05.001>
- [9] Cheraghi, E., *et al.* (2023) Enhanced Electron Radiation Shielding Composite Developed by Well Dispersed Fillers in PDMS Polymer. *Radiation Physics and Chemistry*, **211**, 110994. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110994>
- [10] Chen, S., Nambiar, S., Li, Z., *et al.* (2019) Bismuth Oxide-Based Nanocomposite for High-Energy Electron Radiation Shielding. *Journal of Materials Science*, **54**, 3023-3034. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-3063-0>
- [11] Toyen, D., Rittirong, A., Poltabtim, W., *et al.* (2018) Flexible, Lead-Free, Gamma-Shielding Materials Based on Natural Rubber/Metal Oxide Composites. *Iranian Polymer Journal*, **27**, 33-41. <https://doi.org/10.1007/s13726-017-0584-3>
- [12] Zhang, Z., *et al.* (2023) Study on Radiation Shielding of Inner Radiation Belt Protons. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **70**, 701-706. <https://doi.org/10.1109/TNS.2023.3255205>
- [13] Truscott, P., Lei, F., Dyer, C., *et al.* (2000) Geant4—A New Monte Carlo Toolkit for Simulating Space Radiation Shielding and Effects. 2000 *IEEE Radiation Effects Data Workshop. Workshop Record. Held in Conjunction with IEEE Nuclear and Space Radiation Effects Conference*, Reno, 24-28 July 2000, 147-152.
- [14] 蔡毓龙, 崔帅, 刘洋, 等. 内辐射带质子和电子被动屏蔽[J]. *核技术*, 2023, 46(2): 63-69.