



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

——· 中文核心期刊 中国科技核心期刊

地球内辐射带核心区环境特征分析及质子屏蔽的蒙特卡罗模拟

刘佳强 张振龙 赵班池 刘洋 王慧元 高辉

Characteristics of radiation environment of core region in inner Van Allen belt and Monte Carlo simulation of proton shielding

LIU Jiaqiang, ZHANG Zhenlong, ZHAO Banchi, LIU Yang, WANG Huiyuan, GAO Hui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2022.04.004>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[基于蒙特卡罗射线追踪的航天器空间环境因素暴露通量统一计算方法](#)

General algorithm for calculating space environmental exposure flux based on Monte-Carlo ray tracing

航天器环境工程. 2019, 36(4): 350–356 <https://doi.org/10.12126/see.2019.04.009>

[GaAs太阳电池空间质子辐射损伤的分子动力学研究](#)

Molecular dynamics simulation on radiation damages of GaAs solar cells caused by spatial protons

航天器环境工程. 2017, 34(3): 247–251 <https://doi.org/10.12126/see.2017.03.004>

[空间辐射环境危害综合监测原理样机研制](#)

Development of a space radiation hazard monitor

航天器环境工程. 2019, 36(1): 89–94 <https://doi.org/10.12126/see.2019.01.014>

[地球辐射带槽区粒子环境动态变化对中轨卫星辐射效应的影响](#)

Influence of slot region dynamics of Earth radiation belt on the radiation effect of medium-orbit satellites

航天器环境工程. 2021, 38(3): 333–343 <https://doi.org/10.12126/see.2021.03.014>

[GEO卫星结构屏蔽设计与性能分析](#)

Design of shielding for GEO satellite and analysis for its effectiveness

航天器环境工程. 2017, 34(4): 410–414 <https://doi.org/10.12126/see.2017.04.012>

[空间站舱外泄漏羽流场数值模拟](#)

Numerical simulation of plume field of leakage in space station

航天器环境工程. 2019, 36(4): 313–317 <https://doi.org/10.12126/see.2019.04.002>

地球内辐射带核心区环境特征分析及 质子屏蔽的蒙特卡罗模拟

刘佳强¹, 张振龙^{1,2*}, 赵班池¹, 刘洋³, 王慧元³, 高辉¹

(1. 中国科学院 国家空间科学中心, 北京 100190; 2. 中国科学院大学 天文与空间科学学院, 北京 101408;
3. 中国科学院 微小卫星创新研究院, 上海 201210)

摘要: 辐射带粒子是近地空间卫星总剂量辐射的主要来源。文章分析了内辐射带不同高度轨道的辐射环境特性; 并利用 Geant4 程序, 针对内辐射带质子环境进行不同材料的屏蔽效能计算。结果表明: 虽然传统的低-高-低原子序数材料三明治屏蔽结构对电子具有较高的屏蔽效能, 却并不适用于以质子环境为主的轨道; 对于工作在 3000 km 圆轨道、5 年寿命的卫星, 若要将总剂量降至 30 krad(Si) 以下, 使用 PE 屏蔽材料可比 Al 屏蔽减重 28%。

关键词: 空间辐射; 内辐射带; 质子屏蔽; 蒙特卡罗方法; 数值模拟

中图分类号: V520.6; O242.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2022)04-0355-06

DOI: [10.12126/see.2022.04.004](https://doi.org/10.12126/see.2022.04.004)

Characteristics of radiation environment of core region in inner Van Allen belt and Monte Carlo simulation of proton shielding

LIU Jiaqiang¹, ZHANG Zhenlong^{1,2*}, ZHAO Banchi¹, LIU Yang³, WANG Huiyuan³, GAO Hui¹

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408, China;

3. Innovation Academy for Microsatellites, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China)

Abstract: The radiation belt particles are the main source of the total dose radiation for satellites in near-Earth orbits. The characteristics of the radiation environment on different orbits of the inner radiation belt are analyzed, and the shielding capabilities of several materials against the protons of the inner radiation belt are compared by using the Geant4 code. It is shown that although the low-Z/high-Z/low-Z sandwich shielding structure has a better shielding effect for electrons, it is not suitable for the proton-dominated orbits. For satellites operating on the 3000 km circular orbit and with a designed lifetime of five years, the pure PE shielding can be used to reduce the total dose below 30 krad(Si), with the weight reduces by 28% as compared to Al shielding.

Keywords: space radiation; inner radiation belt; proton shielding; Monte Carlo method; numerical simulation

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-08-07

基金项目: 中国科学院国防科技创新重点部署项目(编号: KGFZD-135-20-03-02); 北京市科技重大专项(编号: Z191100004319005)

引用格式: 刘佳强, 张振龙, 赵班池, 等. 地球内辐射带核心区环境特征分析及质子屏蔽的蒙特卡罗模拟[J]. 航天器环境工程, 2022, 39(4): 355-360

LIU J Q, ZHANG Z L, ZHAO B C, et al. Characteristics of radiation environment of core region in inner Van Allen belt and Monte Carlo simulation of proton shielding[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2022, 39(4): 355-360

0 引言

空间辐射是导致航天器故障或失效的重要原因之一^[1-2]。近地空间辐射环境主要由地球辐射带粒子以及太阳宇宙线和银河宇宙线的高能质子和重离子等构成,对电子器件造成总剂量效应、位移损伤效应、单粒子效应及充放电效应等威胁^[3-5]。其中,总剂量效应是因电离辐射累积导致器件参数发生退化的现象,是最普遍的辐射效应,可对几乎所有类型的器件造成影响。相较于银河宇宙线和太阳宇宙线,辐射带粒子通量较高,是近地空间中总剂量效应的主要来源;吸收剂量大小与轨道条件直接相关,具有明显的区域分布特征,设计合适的屏蔽层保护辐射敏感器件是降低总剂量效应的有效方式之一。

以往的航天器辐射防护研究中,主要关注的是LEO、GEO等电子辐射环境为主的轨道^[6],国内外已针对这些轨道的辐射防护进行了较多研究^[7-13],但对内辐射带(2000~10 000 km高度)中轨轨道的环境分析和防护方法研究还很少。而随着对地观测等任务需求的不断上升,该轨道区域已逐渐展现出其他轨道不具备的优势和潜力^[14],如:在对地观测中,中轨卫星同时具有LEO的高分辨和GEO的长驻留等优点^[15];在通信服务中,中轨卫星的信号往返延迟较GEO显著缩短^[16]。限制该轨道区域卫星部署的重要因素是其恶劣的高能质子辐射环境,而对高能质子采用传统的屏蔽防护方式将给航天器带来很大的载荷负担。

为此,本文计算了近地空间内、不同屏蔽厚度下卫星舱内辐射剂量随轨道高度的变化,分析了2000~10 000 km内辐射带辐射环境特性;利用蒙特卡罗模拟,针对内辐射带质子进行不同屏蔽材料的屏蔽效能计算,包括总剂量、透射能谱及次级辐射情况,旨在为内辐射带中心区域卫星的辐射防护设计提供参考。

1 内辐射带环境特征分析

利用Shieldose程序^[17]计算了600~36 000 km轨道高度范围、卫星舱内5年内的Si吸收剂量。计

算时,轨道条件设置为0°倾角的圆轨道,屏蔽条件设置为1 mm、3 mm和10 mm铝屏蔽,屏蔽模型为有限平板屏蔽,粒子全向入射,辐射带环境模拟采用AE9、AP9^[18]长期平均模型,磁场为IGRF(内场)和OPQ77(外场)模型。计算结果如图1所示,可以看到:随轨道高度的增加,总剂量在约3000 km和20 000 km轨道高度上出现2个峰值,分别对应地球辐射带内带和外带的核心区;第1个剂量峰值在1 mm、3 mm和10 mm铝屏蔽条件下分别为 4.1×10^3 krad(Si)、 4.8×10^2 krad(Si)和 1.5×10^2 krad(Si),第2个剂量峰值在1 mm、3 mm和10 mm铝屏蔽条件下分别为 1.8×10^4 krad(Si)、 1.7×10^3 krad(Si)和 1.1×10^1 krad(Si)。屏蔽厚度较薄时,外辐射带剂量峰值更高,但随着屏蔽厚度增加,外辐射带剂量峰值迅速降低,减少了3个数量级,而内辐射带剂量峰值只减少了1个数量级。可见,对于内辐射带环境,单纯增加铝厚度对屏蔽效能的提升十分有限。本文重点讨论内辐射带中心区域环境。

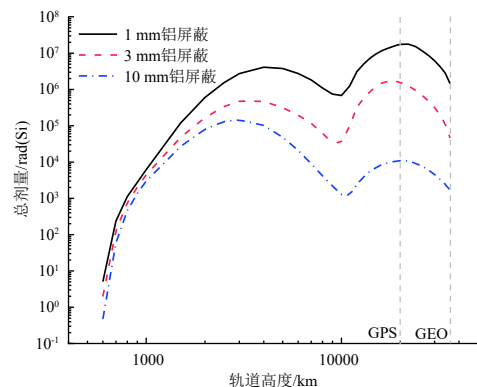


图1 总剂量-轨道高度曲线

Fig. 1 Curves of total dose vs orbital altitude

图2为内辐射带不同轨道高度下,质子、电子的积分能谱。随轨道高度的降低,高能质子通量趋于增大。在屏蔽厚度较大时,穿透能力更强的高能质子对电离剂量起主导作用,因此剂量峰值出现在高能质子通量最大的3000 km高度左右。

图3为3000 km圆轨道上电子和质子的剂量-深度曲线:当铝屏蔽厚度约0.7 mm(0.19 g/cm^2)时,电子剂量和质子剂量相等;随着铝屏蔽厚度增加,电子剂量迅速减小,质子剂量则下降缓慢;当铝屏蔽厚度超过6 mm(1.62 g/cm^2)时,总剂量由质子主导,电子剂量已小于400 rad(Si),只占总剂量的0.2%以下,可忽略不计。

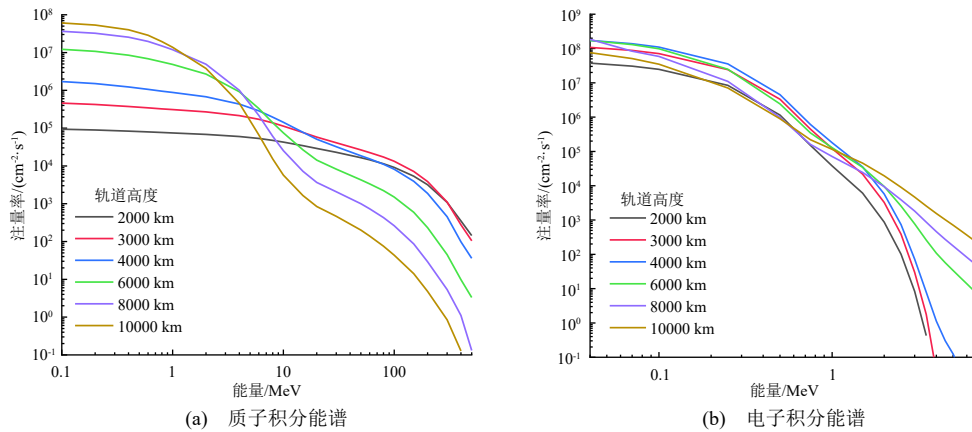


图 2 不同高度轨道的质子、电子积分能谱

Fig. 2 Integral energy spectrum of proton and electron on different orbit altitude

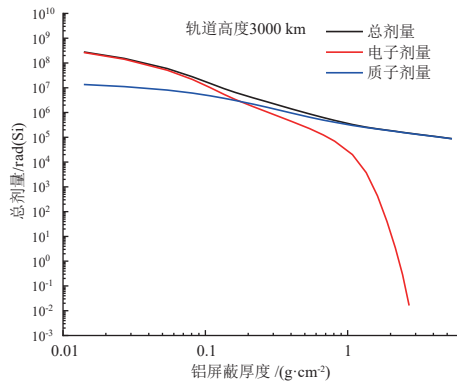


图 3 3000 km 圆轨道的剂量-深度曲线
Fig. 3 Dose-depth curves on 3000 km circular orbit

图 4 为 3000 km 圆轨道、GEO 和导航卫星轨道的剂量-深度曲线对比: 当总剂量限值为 100 krad(Si) 时, 3000 km 圆轨道所需的铝屏蔽厚度约为 GEO 的 7 倍。可见, 对于内辐射带轨道辐射环境, 使用传统的铝屏蔽效果十分有限, 须采用对质子屏蔽效率更高的材料予以替代。

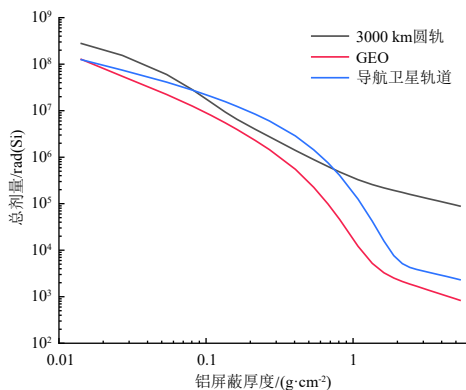


图 4 3000 km 圆轨道、GEO、导航卫星轨道的剂量-深度曲线对比
Fig. 4 Total dose-depth curves on 3000 km circular orbit, GEO, and navigation satellite orbit

2 内辐射带质子屏蔽蒙特卡罗模拟

2.1 电子、质子能量损失特点

电子、质子是近地空间中总剂量效应的主要来源, 二者与物质相互作用的规律和特点不同。

电子与物质相互作用包括弹性散射、非弹性散射及韧致辐射, 在弹性散射和非弹性散射过程中, 单位质量厚度下的能量损失大致分别与屏蔽材料的 Z^2/A 和 Z/A 成正比, 其中 Z 为屏蔽材料的原子序数, A 为屏蔽材料的原子质量数; 韧致辐射会产生次生光子, 其截面亦与屏蔽材料的 Z^2/A 正相关。对于 GEO 和导航卫星轨道, 总剂量主要由辐射带电子及次级韧致辐射光子主导, 采用低原子序数材料吸收电子辐射、高原子序数材料吸收韧致辐射是较好的屏蔽手段, 典型的屏蔽结构为 Fan 等^[10] 采用的低-高-低原子序数材料三明治屏蔽结构, 可在相同质量厚度下比单层铝的屏蔽效能提升 60%。

质子在材料中主要通过弹性散射和非弹性散射损失能量。对于能量超过 1 MeV 的质子, 非弹性散射, 即电离作用占其能量损失方式的 99% 以上。质子的电离能量损失率 S 可由 Bether 公式^[7] 表示为

$$S = -\frac{dE}{dx} = NZ \frac{4\pi z^4 e^4}{m_0 v^2} \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right], \quad (1)$$

其中: e 和 v 为入射粒子的电荷和速度; z 为入射粒子原子序数; N 和 Z 为屏蔽材料的原子密度和原子序数; m_0 为电子静止质量; I 为屏蔽材料的原子电离势。

由式 (1) 可知, S 大致与 NZ 成正比, 若将 N 转化为吸收材料的质量厚度, 则有

$$NZ = \rho N_A \frac{Z}{A}, \quad (2)$$

其中: ρ 为屏蔽材料的质量密度; N_A 为阿伏加德罗常数。由式 (1)、式 (2) 可知, 单位质量厚度下荷质比高的材料对质子的阻止能力更强, 因此应采用富含氢元素的材料对质子进行屏蔽。

2.2 不同屏蔽材料蒙特卡罗模拟

蒙特卡罗模拟程序是用于模拟粒子在材料中运输过程的工具包, 广泛应用于高能物理、加速器物理、医学及空间科学等领域^[19-21]。本文利用 Geant4 蒙特卡罗模拟程序计算了不同屏蔽材料对 3000 km 轨道质子辐射剂量的屏蔽效能, 选用的屏蔽材料分别为单层 Al、Ta、聚乙烯(PE)、环氧树脂(EP)以及 Al-Ta-Al 三明治屏蔽结构。其中: Al 为传统的卫星舱壁、单机机壳所用材料; Ta 为高密度、高原子序数屏蔽材料, 常用于恶劣环境下的辐射屏蔽; PE、EP 为高荷质比的候选屏蔽材料; Al-Ta-Al 三明治屏蔽结构中, 参照 Fan 等^[10]采用的结构, 将后 2 层的 Ta 和 Al 厚度分别固定为 0.25 mm(0.416 g/cm²) 和 0.125 mm(0.034 g/cm²)。模拟采用的粒子源通过 Geant4 内置的粒子源定义, 为全向入射的面源, 物理过程包括标准电磁相互作用过程和强子物理过程, 抽样粒子数为 10⁷ 个, 计算模型如图 5 所示。

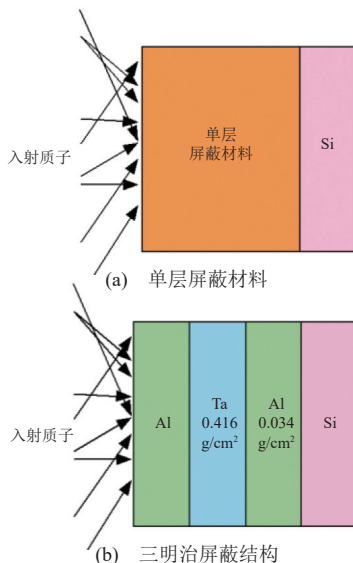


图 5 不同屏蔽材料屏蔽效能模拟计算模型
Fig. 5 Sketch map of shielding structure, (a) single-layer shielding (b) sandwich shielding structure

图 6 为上述所选不同屏蔽材料的质子剂量-深度曲线, 为直观比较相同质量下不同材料的屏蔽效率, 横轴单位采用质量厚度 g/cm²。可以看到, 对于 3000 km 高度轨道, Al-Ta-Al 三明治结构的屏蔽能力低于单层 Al 屏蔽, 含氢量最高的 PE 屏蔽能力最佳, EP 次之, 而低荷质比的单层 Ta 屏蔽能力最差。

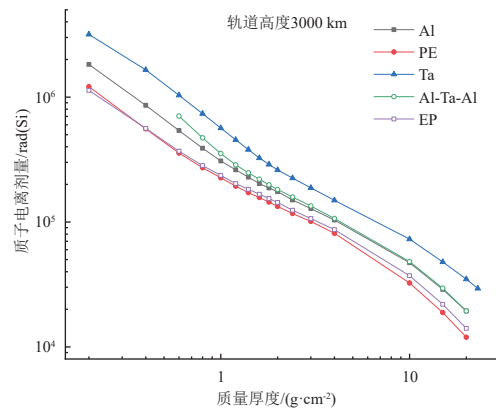


图 6 不同屏蔽材料的质子剂量-深度曲线
Fig. 6 Dose-depth curve for different shielding materials

图 7 为经 1.5 g/cm² 的不同屏蔽材料屏蔽后的质子微分能谱。可以看到, 与剂量-深度曲线类似, PE 和 EP 屏蔽条件下透射质子数最小, Ta 屏蔽条件下透射质子数最大。

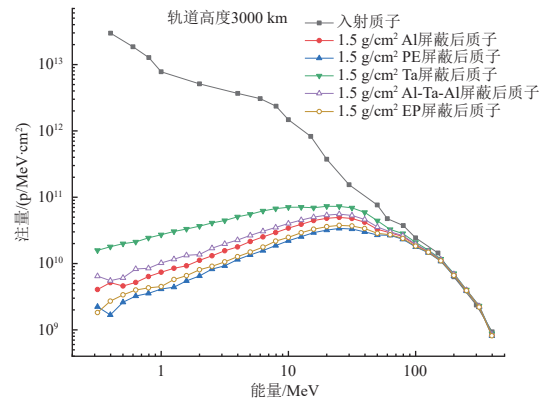


图 7 经 1.5 g/cm² 的不同屏蔽材料屏蔽后的质子微分能谱
Fig. 7 Energy spectrum of proton behind 1.5 g/cm² Al, PE, EP, Ta, Al-Ta-Al shielding

在指定剂量限值条件下, 使用 PE 屏蔽明显比其他材料节省重量。以型号任务对器件的典型抗辐射要求——30 krad(Si) 为例, 列出不同屏蔽材料将总剂量降低至 30 krad(Si) 所需的质量厚度及对应几何厚度, 如表 1 所示。由前文可知, 当屏蔽厚度大于 6 mm 等效铝时, 电子剂量小于 1 krad(Si), 因此表 1 中忽略电子剂量影响。

表1 不同屏蔽材料将总剂量降低至 30 krad(Si) 所需的厚度

Table 1 Thickness required to reduce the total dose below 30 krad(Si) with different materials

材料	3000 km轨道, 5年寿命	
	质量厚度/ (g·cm ⁻²)	几何厚度/ mm
Al	14.5	53.7
PE	10.5	109.4
Ta	23.0	13.8
Al-Ta-Al	15.0	54.3
EP	11.8	98.3

由表1可见, 对于高度 3000 km, 5年寿命的圆轨卫星, 若要将总剂量降至 30 krad(Si) 以下, 使用 PE 屏蔽可比 Al 屏蔽减重 28%。

2.3 次级辐射

次级辐射是屏蔽中需要考虑的重要因素, 对于电子屏蔽, 主要的次级辐射为韧致辐射; 对于质子屏蔽, 韧致辐射可忽略不计, 主要次生射线为中子。次生中子会引发位移损伤、单粒子效应等, 且难以屏蔽。

图8为经 1.5 g/cm² 的不同屏蔽材料屏蔽后的次生中子微分能谱。能量较高的中子更容易与高原子序数材料发生非弹性散射而快速损失能量, 因此在单层 Ta 屏蔽条件下, 高能(约 10 MeV 以上)中子注量最低, 其他屏蔽材料产生的高能中子注量相近; 能量较低的中子更容易与低原子序数材料发生弹性散射而损失能量, 因此 PE 和 EP 屏蔽产生的 10 MeV 以下次生中子最少。

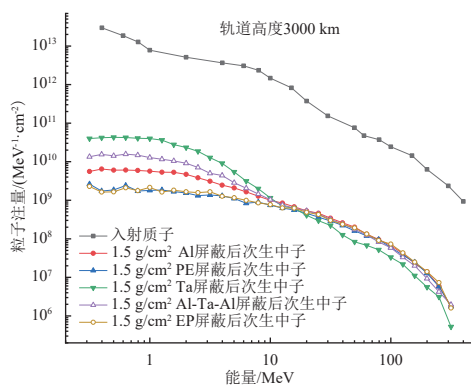


图8 经 1.5 g/cm² 的不同屏蔽材料屏蔽后的次生中子微分能谱

Fig. 8 Energy spectrum of secondary neutron produced by protons behind 1.5 g/cm² Al, PE, EP, Ta, Al-Ta-Al shielding

3 结束语

本文利用 AE9、AP9 模型计算了近地空间内不同轨道高度下的辐射带粒子环境和总剂量, 分析了

内辐射带环境特征; 利用 Geant4 蒙特卡罗计算工具, 针对地球内辐射带轨道进行了不同屏蔽材料的屏蔽效能计算。计算结果表明: 传统低-高-低原子序数材料三明治屏蔽结构对于以质子辐射为主的内辐射带环境并不适用, 且增加屏蔽厚度对总剂量的减小十分有限; 相同质量厚度下 PE 对质子剂量的屏蔽效能最高, 且产生的次级辐射最少; 对于 3000 km 圆轨道, 在总剂量限制在 30 krad(Si) 条件下, 使用 PE 材料比 Al 屏蔽可减重约 28%。

参考文献 (References)

- [1] 冯伟泉, 徐焱林. 归因于空间环境的航天器故障与异常[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(4): 375-389
FENG W Q, XU Y L. Spacecraft failures and anomalies related with space environment[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(4): 375-389
- [2] 蔡震波. 新型航天器抗辐射加固技术的研究重点[J]. 航天器环境工程, 2010, 27(2): 173-176
CAI Z B. The radiation hardening techniques for new generation spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2010, 27(2): 173-176
- [3] ZHANG Z L, LIU J Q, WANG H F, et al. Characteristics of proton radiation damage on liquid crystal variable retarder[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2020, 478: 1-4
- [4] 沈自才, 闫德葵. 空间辐射环境工程的现状及发展趋势[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(3): 229-240
SHEN Z C, YAN D K. Present status and prospects of space radiation environmental engineering[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(3): 229-240
- [5] 张振龙, 贡顶, 韩建伟, 等. 航天器内部充电风险评估模型的问题及改进[J]. 原子能科学技术, 2017, 51(1): 180-186
ZHANG Z L, GONG D, HAN J W, et al. Correction of spacecraft internal charging threat assessment model[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2017, 51(1): 180-186
- [6] XAPSOS M A, STAUFFER C, PHAN A, et al. Inclusion of radiation environment variability in total dose hardness assurance methodology[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 64(1): 325-331
- [7] MAYANBARI M, KASESAZ Y. Design and analyze space radiation shielding for a nanosatellite in Low Earth Orbit (LEO)[C]//Proceedings of 5th International Confere-

- nce on Recent Advances in Space Technologies(RAST 2011). Istanbul, Turkey, 2011: 489-493
- [8] ZEYNALI O, MASTI D, GANDOMKAR S. Shielding protection of electronic circuits against radiation effects of space high energy particles[J]. *Advances in Applied Science Research*, 2012, 3(1): 446-451
- [9] YANG J Q, MA G L, LI X J, et al. Effects of multilayer and multimaterial structures on space proton radiation protection[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2015, 365: 352-356
- [10] FAN W, DRUMM C, ROESKE S. Shielding considerations for satellite microelectronics[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1996, 43(6): 2790-2796
- [11] 曹洲, 高欣, 薛玉雄, 等. 多层材料空间辐射屏蔽优化分析[J]. *真空与低温*, 2011, 17(4): 224-229
- CAO Z, GAO X, XUE Y X, et al. The optimization analysis of the multi-layer materials for space radiation shielding[J]. *Vacuum & Cryogenics*, 2011, 17(4): 224-229
- [12] LU Y, SHAO Q, YUE H, et al. A review of the space environment effects on spacecraft in different orbits[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 93473-93488
- [13] GAO X, YANG S, FENG S, et al. Radiation damage characterization of InGaAsP laser diodes for space laser communication[J]. *Nuclear Physics Review*, 2015, 32(2): 249-253
- [14] BLUMENTHAL S. Medium Earth Orbit Ka band satellite communications system[C]//2013 IEEE Military Communications Conference(MILCOM 2013). San Diego, CA, USA, 2013: 273-277
- [15] GERBER A, TRALLI D, BAJPAI S. Medium Earth Orbit (MEO) as an operational observation venue for NOAA's post GOES-R environmental satellites[C]//Enabling Sensor and Platform Technologies for Spaceborne Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics. Hawaii, 2005, 5659: 261-271
- [16] TSUIKI A, UTASHIMA M, KOBAYASHI T, et al. A study on medium Earth orbit utilization[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2014, 12(29): 17-21
- [17] SELTZER S M. Electron, electron-bremsstrahlung and proton depth-dose data for space-shielding applications[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1979, 26(6): 4896-4904
- [18] GINET G, O'BRIEN T, HUSTON S, et al. AE9, AP9 and SPM: new models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment[J]. *Space Science Reviews*, 2013, 179(1-4): 579615
- [19] AGOSTINELLI S, ALLISON J, AMAKO K, et al. GEANT4: a simulation toolkit[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 506(3): 250-303
- [20] ALLISON J, AMAKO K, APOSTOLAKIS J E A, et al. Geant4 developments and applications[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(1): 270-278
- [21] WANG K, ZHANG Z Z, ZHU L H. Electron transportation simulation for spacecraft internal charging based on reverse Monte Carlo method[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(7): 2630-2635

(编辑: 闫德葵)

一作简介: 刘佳强 (1992—), 男, 硕士学位, 研究方向为元器件空间辐射效应。E-mail: liujiaqiang@nssc.ac.cn。

*通信作者: 张振龙 (1976—), 男, 博士学位, 研究员, 研究方向为航天器空间环境效应。E-mail: zzl@nssc.ac.cn。