

行星际粒子统计特征及其在深空探测用 器件失效概率预估中的应用

王建昭, 张庆祥, 汪中生, 郑玉展, 朱安文, 邱家稳, 马继楠
(北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094)

摘要: 文章针对深空探测任务高能粒子辐射及所致器件失效定量评估问题, 利用 IMP-8 在 1973 年—2001 年的电子探测数据, 统计了太阳电子事件通量的特征, 证明事件通量符合对数正态分布。假设事件发生概率符合泊松分布, 构建了行星际电子通量模型, 再结合太阳质子通量模型、探测器轨道、行星际粒子在日球层的传播规律, 得到不同置信度下空间粒子通量及其剂量。进一步结合器件累计失效剂量的试验数据, 可定量评估器件失效概率。以一种典型的商用数据采集功能模块器件 TL084 和火星环绕探测任务为例, 7 个月转移轨道和 3 年火星轨道的任务期内, 1 mm 铝屏蔽下 TL084 的失效概率仅为 1.01%。

关键词: 深空探测; 行星际空间; 粒子通量; 统计特征; 失效概率

中图分类号: V520.5

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2019)03-0211-07

DOI: [10.12126/see.2019.03.002](https://doi.org/10.12126/see.2019.03.002)

Statistical characteristics of interplanetary particles and their application in estimating failure probability of devices for deep space missions

WANG Jianzhao, ZHANG Qingxiang, WANG Zhongsheng, ZHENG Yuzhan, ZHU Anwen,
QIU Jiawen, MA Ji'nan

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

Abstract: The energetic protons and electrons pervading the interplanetary space constitute the main source of radiation in the deep space missions, especially in the transfer orbits. Using the historical data of the IMP-8's electron detection during 1973 through 2001, the statistical characteristics of the flux of the solar electron events are analyzed. It is shown that they follow a lognormal distribution. Assuming that the electron event occurs in a Poisson distribution, we establish an interplanetary electron flux model. By integrating the solar proton flux model, the orbit of the deep space mission, and the propagation law of the electron event in the heliosphere, the particle fluxes and the doses at different confidence levels are obtained. Then the failure probability of a certain device can be evaluated quantitatively based on its cumulative failure dose record. Taking the TL084 data acquisition module in the Mars mission with 8 month transfer orbit and 3 year Mars orbit as an example, the calculated failure probability is 1.01%.

Keywords: deep space mission; interplanetary space; particle flux; statistic characters; failure probability

收稿日期: 2018-11-19; 修回日期: 2019-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目 (编号: 11675013)

引用格式: 王建昭, 张庆祥, 汪中生, 等. 行星际粒子统计特征及其在深空探测用器件失效概率预估中的应用 [J]. 航天器环境工程, 2019, 36(3): 211-217

WANG J Z, ZHANG Q X, WANG Z S, et al. Statistical characteristics of interplanetary particles and their application in estimating failure probability of devices for deep space missions[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(3): 211-217

0 引言

空间电离辐射总剂量效应引起的元器件性能衰退是制约航天器在轨安全运行的重要因素。辐射主要来源于太阳宇宙射线,尤其是由耀斑等太阳爆发活动引起的太阳高能粒子事件对转移段的总剂量有重要贡献。在太阳高能粒子事件中,质子占通量绝大部分(90%以上)抗辐射设计中。在目前的深空探测(如月球探测器),通常假设探测器在全寿命周期内遭遇1次极端恶劣事件(如1989年太阳粒子事件)。这种设计方法可覆盖短期任务的恶劣情况,而对于长期探测任务,则需要利用可靠的行星际粒子通量模型进行精细化设计。

目前,对太阳质子通量模型的研究较多,已有的模型包括King模型^[1]、JPL模型^[2]、ESP模型^[3]等。这些模型均可提供一定在轨周期和一定置信度的太阳质子通量。另外,根据预报周期不同,还可分为长期预报模型(1年以上)、中期预报模型(几个月)^[4]和短期预报模型(1~3天)^[5]。其中,中长期模型多用统计方法构建;短期模型以实测因子(如10 cm射电流量、太阳活动区位型参量、磁场参量等)为输入,多用人工智能方法构建。然而,关于行星际电子通量模型的研究较少,Taylor等^[6]构建的模型中未给出各个参数的值。电子虽不是行星际任务总剂量的主要来源,但作为辐射环境要素,有必要详细研究行星际电子的分布特征,利用行星际质子和电子模型,评估深空探测的总剂量风险。

在抗辐射设计中,需要为辐射造成的总剂量的不确定性留有余量。一般工程上采用辐射设计余量(RDM)进行控制和设计^[7],根据RDM控制要求确定是否需进行额外的辐射防护,如增加屏蔽层厚度等。RDM是基于工程规范的设计方法,其数值选择具有一定主观性。空间辐射环境是动态变化的,具有一定的不确定性;不同批次及不同器件的失效剂量也具有一定的不确定性和随机性^[8]。如果器件失效剂量和空间环境辐射剂量的不确定范围相近,器件特性对辐射环境变化十分敏感,则需要特别考虑特定器件的辐射失效特性。Xapsos等^[9]提出了一种将空间环境不确定性和器件失效总剂量不确定性相结合的方法,可定量评估一定屏蔽厚度下特定器件的失效概率。

本文试图通过统计行星际电子通量特征,构建工程可用的行星际电子通量模型,结合已有的太阳质子通量模型以及粒子在日球层内的传播特征,得到深空探测任务所承受的辐射剂量,再结合器件失效剂量的分布来定量评估器件的失效概率。

1 行星际粒子模型

1.1 太阳质子通量模型

最早太阳质子通量模型为King模型^[1],该模型采用1966年—1972年的观测数据,假设太阳黑子数和年均累计太阳质子通量线性相关。目前较为常用的是JPL模型^[2],该模型采用1963年—1991年近3个太阳活动周期的太阳质子事件数据,假设太阳质子事件随机发生,其爆发概率服从泊松分布,事件通量服从对数正态分布。但是,JPL模型只考虑太阳质子事件发生在太阳活动高年,而忽略了太阳活动低年的事件。

本文参考的是李婷婷等人^[10]开发的改进太阳质子通量模型,该模型基于1964年—2007年近5个太阳活动周期的太阳质子事件数据,以太阳黑子年平均数为判据,将太阳活动周期分为活动高、中、低年,在1个太阳活动周期中,3个时期所占时间之比约为3:3:4。该模型对10 MeV和30 MeV能量的质子积分通量进行了统计。

1.2 行星际电子通量模型

1.2.1 数据源

为了满足未来的任务设计需要,所选择数据的时间覆盖范围应该足够大,能反映行星际电子通量的长周期变化。相比于质子,电子环境更容易受到扰动,并大量存在于地球外辐射带,因此模型数据应避开俘获电子的影响。综合考虑以上因素,数据源选择IMP-8探测数据。IMP-8于1973年发射并持续运行至2001年,数据覆盖近3个太阳活动周期,轨道为高度为 $25R_E \sim 45R_E$ 近黄道面圆轨道,不受地球辐射带影响。IMP-8的探测数据已应用于太阳质子模型^[2]和宇宙射线模型^[11]。

本文选用搭载于IMP-8的带电粒子探测装置(CPME)和戈达德中能探测装置(GME)的电子探测数据。CPME可同时对高能离子、质子、电子进行原位探测,其中电子探测能档如表1所示,其平均

数据时间分辨率为 327.3 s, 可通过 JHU/APL 实验室网站^[12] 获得。GME 通过 $\Delta E-E$ 方法测量不同种类粒子的通量, 其中高能电子能档为 0.3~18 MeV, 数据时间分辨率为 30 min, 可通过 NASA/CDAWeb 网站^[13] 获得。

表 1 CPME 电子探测能档
Table 1 Electron detection channels of CPME

能档	能量段/MeV
E4	0.22~2.5
E5	0.5~2.5
E6	0.8~2.5

1.2.2 太阳电子事件

定义电子通量超过一定阈值时为太阳电子事件。一般而言, 太阳电子和质子共同产生于太阳粒子事件, 根据机制的不同, 存在 2 种太阳粒子事件: 富含质子的事件和富含电子的事件。前者多为渐进型太阳粒子事件, 常伴随大的耀斑、渐进型 X 射线爆发、快速日冕物质抛射, 持续时间通常为数天; 而后者为瞬时型太阳粒子事件, 常伴随瞬时型 X 射线暴、III 型射电暴等太阳爆发过程, 其持续时间多为数小时。因此, 太阳质子事件和电子事件对应不同的物理过程, 并非同时发生, 有必要统计得到太阳电子事件的发生判据。

GME 的电子探测能档宽, 且数据时间分辨率高, 可用其数据判定太阳电子事件。1973 年—2001 年 GME 测得的 30 min 平均电子通量统计数据如图 1 所示, 共约 49 万个数据点。若 30 min 平均电子通量大于阈值, 则认为该天发生了太阳电子事件。选择图中曲线高通量部分斜率转折点为是否发生太阳电子事件的标志, 则对于 0.3~18 MeV 电子, 阈值通量为 $10^{-2}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{MeV})$ 。另外, 阈值通量的选取具有一定主观性, 统计得到的太阳电子事件发生天数会因此改变, 但统计规律和模型结果基本不变。

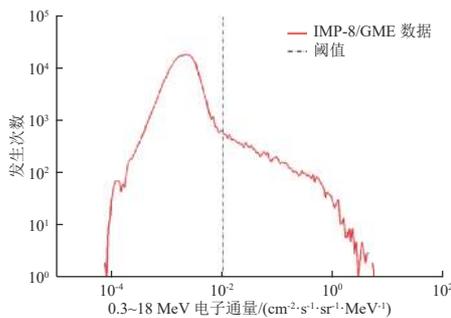


图 1 IMP-8/GME 的 30 min 平均电子通量发生次数
Fig. 1 Histogram of IMP-8/GME's 30 min averaged electron flux

以该阈值为判据, 1973 年—2011 年太阳电子事件发生天数为 820 d。分别考虑太阳活动高年和低年, 一般认为 1 个太阳活动周期中极大年的前 2.5 年到后 4.5 年为太阳活动高年, 其余为太阳活动低年。具体而言, 1977 年—1983 年、1987 年—1993 年、1998 年—2001 年为太阳活动高年, 共有 664 天发生太阳电子事件, 年均 37.3 天; 1973 年—1976 年、1984 年—1986 年、1994 年—1997 年为太阳活动低年, 共有 156 天发生太阳电子事件, 年均 15.3 天。用年均太阳黑子数表示太阳活动强度, 统计年均太阳黑子数和年均太阳电子事件数的关系, 如图 2 所示。可以看到, 太阳活动强度和太阳电子事件数具有很好的正相关性, 这与太阳质子事件与太阳活动强度正相关的结论相同。进一步统计年均太阳质子事件数和电子事件数的相关性, 如图 3 所示。可以看到, 两者相关系数为 0.65, 即太阳质子事件和电子事件可能相伴而生, 但并不完全相关(如前所述, 对应 2 种不同类型的太阳粒子事件)。另外, 太阳电子事件阈值通量选择的不同, 对其与太阳质子事件相关性的影响不大。

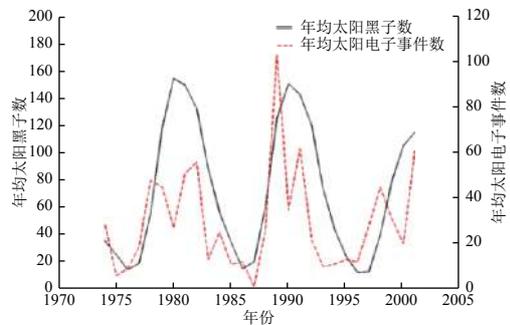


图 2 年均太阳黑子数与太阳电子事件数相关性
Fig. 2 The number of solar electron events vs. annual sunspot number

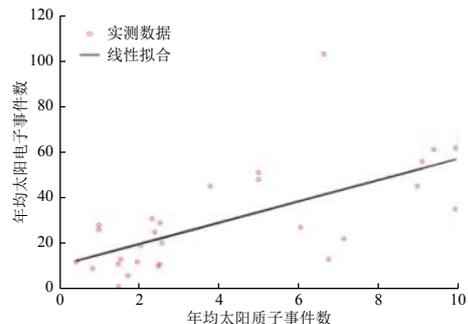


图 3 年均太阳质子事件与太阳电子事件相关性
Fig. 3 Correlation between the number of annual solar proton events and solar electron events

1.2.3 构建方法

行星际电子通量模型的构建方法和李婷婷等^[10]关于太阳质子通量模型的构建方法相似。非电子事件对电子通量贡献很小,故只统计太阳电子事件通量。认为电子事件的通量符合对数正态分布(这一假设在太阳质子事件^[2]中成立), f_p 为电子事件的日均通量, $f_p=10^F$,则 F 符合正态分布,

$$f(E) = \frac{\sigma}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{(F-\mu)^2}{\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中: f 为概率密度函数; μ 为通量对数期望值; σ 为标准差。因为CPME的电子探测能档划分较细,且各能档之间的相互验证性好,所以利用其数据进行建模。以E4能档为例,太阳电子事件日均通量与对数正态分布的关系如图4所示。横坐标为对数坐标下的事件日均通量,纵坐标为正态分布坐标下该通量在所有事件通量中所占的百分比,即累计发生概率。如果电子事件通量符合对数正态分布,则数据分布在一条直线上。对于0.22~2.50 MeV电子,相对而言对小事件的拟合偏差较大,而小事件对于长期任务评估的影响较小,因此该拟合误差可接受。对数正态分布拟合参数如表2所示。

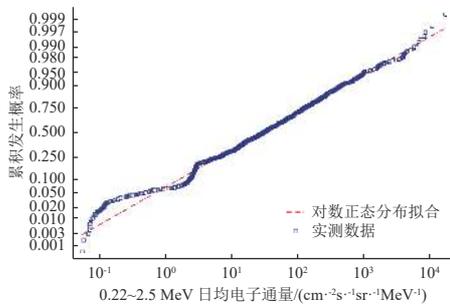


图4 太阳电子事件0.22~2.50 MeV电子通量分布
Fig. 4 0.22~2.50 MeV flux distribution for solar electron event

表2 对数正态分布参数拟合参数

电子能量/MeV	0.22~2.50	0.5~2.5	0.8~2.5
期望值 μ	1.425	1.012	0.596
标准差 σ	1.001	0.982	1.006

采用组合概率表示在一段时间 τ 内电子通量超过 f_p 的概率,

$$P(> F, \tau) = \sum_{n=1}^{\infty} p(n, \omega\tau) Q(F, n) \quad (2)$$

式中: $p(n, \omega\tau)$ 为时间 τ 内发生 n 次电子事件的概率, ω 为太阳电子事件的年平均发生次数; $Q(F, n)$

为 n 次事件通量之和超过 10^F 的概率。

假设太阳电子事件是相互独立的,其发生概率可以用泊松分布描述,

$$p(n, \omega\tau) = \exp(-\omega\tau) \frac{(\omega\tau)^n}{n!} \quad (3)$$

ω 按太阳活动水平高低取值。若 τ 内跨越不同太阳活动强度等级,则通过时间加权得到

$$\omega\tau = \omega_h\tau_h + \omega_l\tau_l \quad (4)$$

式中: $\omega_h=37.3$ 、 $\omega_l=15.3$ 分别为太阳活动高、低年平均电子事件发生次数; τ_h 、 τ_l 分别为 τ 内处于不同太阳活动水平的的时间。模型中, $Q(F, n)$ 的计算采用蒙特卡罗方法,具体步骤和细节参考文献[10]。

1.2.4 模型结果

利用行星际电子通量模型,得到1 AU处不同任务期和不同太阳活动水平下的电子通量概率分布,0.22~2.5 MeV电子通量结果如图5所示。相对于太阳质子,电子通量很小。图中每个通量值对应一定概率 P ,含义为此种情况下空间遭遇的电子通量超过该值的概率。用 $1-P$ 表示置信度,可应用于空间探测任务的评估。一般来说,对于相同的发生概率,任务期越长,太阳活动强度越大,电子通量越大;而对于特定的电子通量,任务期越长,太阳活动强度越大,超过该通量的概率越大。

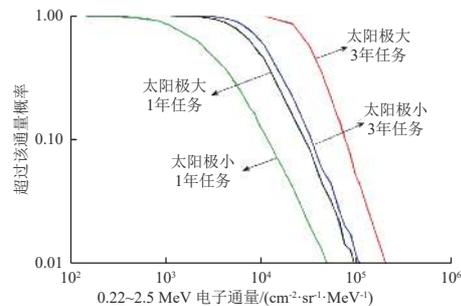


图5 太阳活动高年/低年0.22~2.5 MeV电子通量
Fig. 5 Fluence probability curves of 0.22~2.5 MeV electron in solar maximum/minimum

1.3 模型扩展

构建太阳质子和电子模型的数据源均来自地球附近(1 AU)的探测器,而对于深空探测任务,探测器将到达不同日球层位置,因此有必要将模型结果扩展到不同行星际空间。由于探测数据受限,关于太阳质子和电子在行星际径向传播规律的研究较少。一般用径向距离的指数关系简化太阳粒子传播规律。Feynman等^[2]用日心距离 R 的平方反比规

律描述行星际的太阳粒子通量随距离的变化。Taylor等^[6]认为,当 $R < 1$ AU时,粒子通量正比于 $1/R^3$;当 $R > 1$ AU时,粒子通量正比于 $1/R^{3.3}$ 。本文采用该简化方法。

另外,模型只提供特定能量段的通量,需要扩展到全能谱的情况。假设太阳粒子通量微分能谱满足能量指数线性关系,即 $f_d = A \times \exp(-E/E_0)$,其中 f_d 为能量为 E 的粒子微分通量, A 和 E_0 为拟合参数。为了获得拟合参数的值,至少需要2个能档的粒子通量数据。

对于质子模型,通过

$$\begin{cases} E_0 = \frac{20}{\ln(f_{10}/f_{30})} \\ A = f_{10} \frac{\exp(10/E_0)}{E_0} \end{cases} \quad (5)$$

可得到 A 和 E_0 的值。式(5)中 f_{10} 和 f_{30} 分别为能量 > 10 MeV和 > 30 MeV的质子积分通量。

对于电子模型,以E4和E5能档的通量为例,通过

$$\begin{cases} E_0 = F(f_1/f_2) \\ A = \frac{f_1}{\int_{0.22}^{2.5} \exp(-E/E_0) dE} \end{cases} \quad (6)$$

可得到 A 和 E_0 的值。式(6)中 f_1 和 f_2 分别为 $0.22 \sim 2.5$ MeV和 $0.5 \sim 2.5$ MeV的电子积分通量。 E_0 为 f_1/f_2 的函数,可通过读图(见图6)或查表获得。

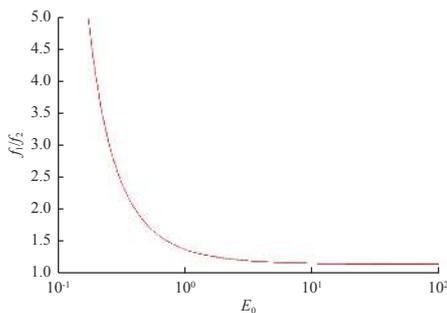


图6 E_0 与 f_1/f_2 的关系
Fig. 6 E_0 as a function of f_1/f_2

2 模型的应用方法和结果

对于深空探测任务,一般轨道转移阶段时间较长,该阶段的电离总剂量主要来自行星际带电粒子。本文采用Xapsos等^[9]的方法,基于器件总剂量辐照试验数据、太阳粒子通量模型,将器件失效点剂量不确定性与辐射环境不确定性结合,可定量评估特定任务一定屏蔽状态下的器件失效概率,以此

实现任务中器件指标、屏蔽厚度和失效概率之间的权衡和优化。辐照试验研究对象选择一种典型的商用数据采集功能模块器件TL084,以正偏置电流指标判断器件工作状态。在辐照过程中,当正偏置电流增加为未辐照时的1000倍($1 \times 10^{-3} \mu\text{A}$)时,认为器件失效。

2.1 计算方法

在总剂量辐照试验中,同时对多个相同器件进行辐照,得到的失效累计分布函数(CDF)为 $G(x)$,表示在剂量点 x 已失效器件占总数的比例,对应的概率密度函数(PDF)为 $g(x)$ 。对于空间环境的不确定性,用一定置信度下任务周期内所受空间辐射剂量表示,其CDF为 $H(x)$,表示器件在空间中所受辐射剂量小于 x 的概率。将空间辐射和器件失效剂量不确定性结合,得到一定屏蔽条件下器件由于总剂量效应而失效的概率

$$P_f = \int [1 - H(x)]g(x)dx. \quad (7)$$

2.1.1 器件失效剂量不确定性

利用 ^{60}Co - γ 射线辐射源进行总剂量效应试验。同时对8个相同的TL084器件进行辐照,正常工作电压下,测量TL084正偏置电流随总剂量的变化,辐照试验剂量率为 50 rad(Si)/s ,最大辐照剂量为 100 krad(Si) 。试验得到8个器件的失效剂量,通过威布尔分布拟合得到累计失效概率分布函数 $G(x)$,结果如图7所示。

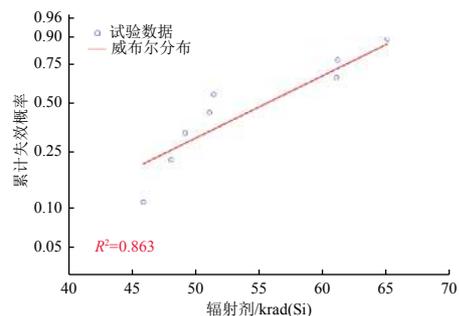


图7 TL084辐射累计失效概率的威布尔拟合
Fig. 7 The Weibull fitting of cumulative failure probability of TL084

图7中横轴为对数坐标轴,纵轴为非线性坐标轴,在该坐标轴下威布尔分布为直线。对应的概率密度函数为

$$g(x) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{x}{\lambda}\right)^{k-1} \exp[-(x/\lambda)^k]. \quad (8)$$

式中: $\lambda=55.5$; $k=8.3$ 。

2.1.2 空间环境不确定性

利用行星际质子和电子通量模型,可计算轨道转移段航天器经受的总剂量,具体步骤如下:

1)设置相应的置信度,以及转移轨道开始及终止时间,得到在 1 AU 处无地球磁场屏蔽时航天器经历的总质子和电子通量。

2)太阳质子和电子通量随航天器与日心距离 R 的增加而减小,以日心黄道惯性系下的转移轨道坐标为输入,得到转移轨道的总通量

$$f_t = \begin{cases} \int \frac{f_E(t)}{R^3(t)} dt, & \text{if } R < 1\text{AU} \\ \int \frac{f_E(t)}{R^{3.3}(t)} dt, & \text{if } R > 1\text{AU} \end{cases} \quad (9)$$

式中 $f_E(t)$ 为单位时间内 1 AU 处的粒子通量。

3)如前所述,根据能谱满足的能量指数线性关系,得到质子和电子的能谱,以此为输入,利用 SHIELDOSE-2 模型可得到轨道转移段经受的总剂量。

2.2 火星任务计算结果

以火星探测为应用场景,该任务主要辐射来源为行星际质子和电子,任务轨道为霍曼转移轨道(如图 8 所示),起始时间为 2020 年 7 月 23 日,2021 年 2 月 10 日到达火星;之后,轨道器环绕火星轨道飞行 3 年。即火星探测任务由 202 天转移段和 3 年绕火飞行段组成。

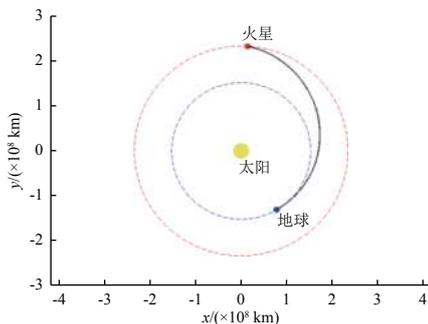


图 8 黄道面火星任务转移轨道

Fig. 8 Earth-to-Mars transfer orbit in ecliptic plane of solar system

该任务经历的不同置信度下 1 AU 处的质子和电子通量能谱如图 9 所示。在行星际中,太阳质子通量远大于太阳电子通量,探测器的辐射剂量来源主要是太阳质子。随着置信度的增加,质子和电子的通量也显著增加。

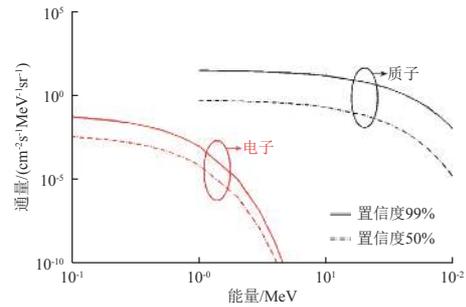


图 9 不同置信度 1 AU 处质子和电子能谱

Fig. 9 Proton and electron spectra in different confidence levels at 1 AU

按照前文所述方法,考虑轨道设计,以质子和电子能谱为输入,利用 SHIELDOSE-2 程序^[14]得到不同置信度下火星任务所经受的总剂量如图 10 所示。图中每条曲线表示该屏蔽厚度下不同剂量对应的累计发生概率,即 $H(x)$ 。一般而言,随着屏蔽厚度的增加,辐射剂量迅速减小。在高置信度下(90% 以上),随着置信度的增加,辐射剂量的增加幅度更大。

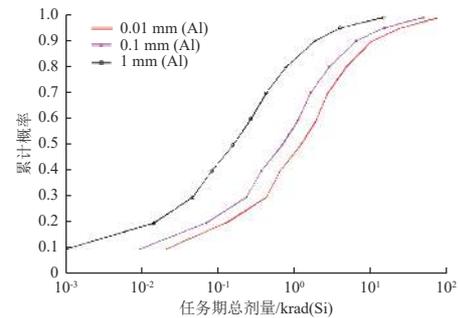


图 10 火星任务期间总剂量累计概率分布

Fig. 10 Total dose CDF during Mars mission

利用式 (7) 得到器件 TL084 随转移轨道的航行时间的失效概率,结果如表 3 所示。总体而言,火星探测任务中,器件遭受的空间辐射剂量远低于地球轨道,器件由于总剂量效应而失效的概率较低。

表 3 不同屏蔽厚度下 TL084 的失效概率

Table 3 Failure probability of TL084 for different shielding thicknesses

屏蔽厚度/mm(Al)	0.01	0.1	1
失效概率/%	1.89	1.07	1.01

3 结束语

本文利用 IMP-8 约 28 年的电子探测数据,构建了行星际电子通量模型。利用 GME 仪器 30 min 平均电子通量数据确定了太阳电子事件的发生通量阈值,在此基础上,统计了 CPME 仪器日均电子通量数据,证明太阳电子事件通量符合对数正态分

布;假设事件发生符合泊松分布并分太阳高、低年进行统计,得到了行星际电子通量模型,该模型可提供不同置信度和不同太阳活动强度下的电子通量。利用行星际质子和电子模型,结合粒子行星际传播规律以及器件失效剂量分布,即可定量评估特定深空任务(尤其是转移轨道阶段)的剂量和器件失效概率。计算得到,对于 TL084 器件,火星探测任务(7个月转移轨道,3年火星轨道)中,1 mm 铝屏蔽下的失效概率仅为 1.01%,行星际粒子对总剂量贡献不大。但是,由于低剂量率辐射增强效应(ELDRS),实际情况应比这一计算结果恶劣。对于 ELDRS 还需借助试验手段进行进一步的研究。作为比较,对于相同器件,地球同步轨道 0.8 mm 铝屏蔽下,TL084 器件的平均寿命仅为 0.1 a^[15]。可见,地球辐射带环境远比行星际辐射环境恶劣。另外,对于深空探测,除太阳宇宙射线,银河宇宙射线也是辐射来源之一,但其通量比太阳宇宙射线小 4 个数量级以上,因此在深空探测的总剂量评估中可不予考虑。

参考文献 (References)

- [1] KING J H. Solar proton fluences for 1977-1983 space missions[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1974, 11(6): 401-409
- [2] FEYNMAN J, SPITALE G, WANG J. Interplanetary proton fluence model: JPL 1991[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, 98: 13281-13295
- [3] XAPSOS M A, BARTH J L, STASSINOPOULOS E G, et al. Probability model for cumulative solar proton event fluences[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1999, 47(3): 22-26
- [4] 崔延美, 师立勤, 刘四清. 太阳质子事件中短期预报模型研究 [J]. *空间科学学报*, 2017, 37(3): 262-269
CUI Y M, SHI L Q, LIU S Q. Study on the short to medium term forecast model of solar proton event[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, 37(3): 262-269
- [5] 李蓉, 崔延美. 应用机器学习方法的太阳质子事件短期预报模型 [J]. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2010, 40(7): 938-944
LI R, CUI Y M. SPE short-term prediction model with machine learning method[J]. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2010, 40(7): 938-944
- [6] TAYLOR B, VACANTI G, MADDOX E, et al. The Interplanetary Electron Model(IEM)[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2011, 58(6): 2785-2792
- [7] POIVEY C. Radiation hardness assurance for space systems[C]//*Proc IEEE Nuclear & Radiation Effects Conference*. Phoenix, 2002: 1-57
- [8] LADBURY R, GORELICK J L, MCCLURE S S. Statistical model selection for TID hardness assurance[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2009, 56(6): 3354-3360
- [9] 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*, 2017, 64(1): 325-331
- [10] 李婷婷, 师立勤, 刘四清. 太阳质子通量模型研究 [J]. *空间科学学报*, 2010, 30(3): 205-210
LI T T, SHI L Q, LIU S Q. Research on the solar proton fluence model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2010, 30(3): 205-210
- [11] TYLKA A J, DIETRICH W F, BOBERG P R. Probability distributions of high-energy solar-heavy-ion fluxes from IMP-8: 1973-1996[J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1997, 44(6): 2140-2149
- [12] DECKER R B, MITCHELL D G. IMP-8 charged particle measurement experiment (CPME) & energetic particle experiment[EB/OL][2018-05-01]<https://sd-www.jhuapl.edu/IMP/#traj>
- [13] KOVALICK T. Coordinated data analysis web of goddard spaceflightcenter[EB/OL].[2018-11-15]<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/>
- [14] SELTZER S M. Updated calculations for routine-shielding radiation dose estimates SHIELDOSE-2: NISTIR-5477[R], 1994
- [15] 王建昭, 张庆祥, 郑玉展. 基于辐射环境不确定性的导航卫星总剂量效应分析 [C]//*第三届全国辐射物理学术交流会*. 伊宁, 2018: 1-5

(编辑:冯露漪)