

卫星光通信系统中单粒子翻转计算方法研究

侯睿, 赵尚弘, 李勇军, 吴继礼, 胥杰, 占生宝
(空军工程大学电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:高能带电粒子造成的单粒子翻转是影响卫星光通信系统性能的重要因素,给出了单粒子翻转的物理机制及主要研究方法。利用 OMERE 3.4 软件对星载 CMOS 2164 器件进行了单粒子翻转率计算,结果表明,通过对轨道倾角和轨道高度的优化设计可以有效减小卫星光通信系统中电子器件的单粒子翻转率。为了有效克服单粒子辐射效应,除了简单的增加屏蔽层厚度等防护方法外,还应考虑通过电子器件的选择来提高抗辐射性能。

关键词:卫星光通信;高能带电粒子;单粒子翻转;抗辐射

中图分类号:TN929 **文献标识码:**A

Calculation methods analysis of the single event upset ratio of satellite-borne CMOS 2164 equipment

HOU Rui, ZHAO Shang-hong, LI Yong-jun, WU Ji-li, XU Jie, ZHAN Sheng-bao
(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: High energy particle induced single event upset (SEU) is one of the most important factors affecting the laser satellite communication system. Its physical mechanism and main research methods are given out. The OMERE 3.4 software is used to calculate the SEU ratio of satellite-borne CMOS 2164 device. The calculation results have proved that optimizations of the orbit altitude and orbit inclination could effectively decrease the SEU ratio of electronic device in satellite optical communication system. To further reduce the single event effect, besides some simple protection methods like enhancing the shield, the device selection should be considered to improve the anti-radiation performance.

Key words: satellite optical communication; high energy particles; single event upset; anti-radiation

1 引言

随着卫星光通信技术的发展与成熟,空间辐射环境对其工作性能的影响成为新的研究热点。外层空间中存在众多的高能带电粒子,主要来自于地球辐射带、银河宇宙射线和太阳宇宙线。空间高能粒子(质子、重离子或中子)轰击微电子器件,在器件内部极短路径(仅几微米)上产生大量的电子-空穴对,在器件电场作用下迅速集结,形成密集电荷,将造成电子器件工作状态的瞬时翻转,使大规模和超大规模集成电路系统产生错误甚至暂时性失效,造成严重的卫星通信系统故障。据统计,空间环境诱发的卫星故障占卫星总故障的40%,其中仅仅是

高能带电粒子导致的单粒子翻转事件(SEU),就可达到故障总数的40%以上^[1-2]。随着卫星光通信系统中电子器件集成度的不断提高,单粒子翻转事件对系统可靠性的影响就显得尤为重要^[3-7]。预估空间轨道上半导体器件的单粒子翻转率,对正确选取电子系统中的半导体器件和卫星的轨道参数,提高在轨卫星光通信系统的可靠性和整体寿命具有现

基金项目:国家高技术研究发展计划“863”项目(No. 2007AA01Z294);中国博士后科研基金项目(No. 20090461466)资助。

作者简介:侯睿(1983-),女,博士研究生,研究方向为卫星光通信技术。E-mail:houruirachel@yahoo.com.cn

收稿日期:2010-09-16; **修订日期:**2010-10-27

实意义。

2 SEU 的物理机制

以 CMOS SRAM 存储单元为例,它由两个反相器构成双稳态电路。当 T_1, T_4 管导通, T_2, T_3 管截止时, $A=0, \bar{A}=1$, 表示该单元存储“0”; 当 T_1, T_4 管截止, T_2, T_3 管导通, $A=1, \bar{A}=0$, 表示该单元存“1”。写入读出控制管 T_5, T_6 由字线 W 控制。

设输出节点 $A=0, \bar{A}=1$, 当单个高能带电粒子打中截止管漏区反偏 PN 节中的一个, 如节点 A 的 T_3 , 在其路径上, 质子或中子与硅相互作用产生 α 粒子、反冲核等较重的带电粒子, 重离子的能量一部分被硅原子吸收并在硅中产生电子-空穴对。电子-空穴对被 T_3 的 PN 节中的电场分离, 经过漂移运动和扩散运动, 电荷被收集, 诱发出一个瞬时光电流脉冲, 空穴将会流入漏极, 由此进入节点 A , 光电流脉冲使节点 A 的电容 C 充电。节点 A 的电压大小在聚集电荷的作用下改变一个 $+\Delta V$ 值, 这个值足够大时可以使输出节点的值由 0 变为 1, 发生一次翻转。能引起 CMOS SRAM 发生翻转的最小电荷值称为临界电荷 Q_c , Q_c 的大小正比于器件敏感区的尺寸大小。图 1 为单粒子穿透 CMOS SRAM 存储单元的 SEU 损伤机理示意图。

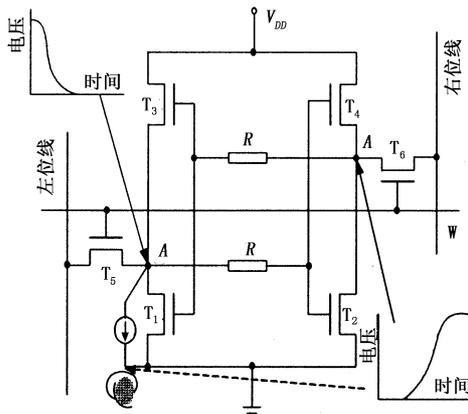


图 1 单粒子穿透 CMOS SRAM 存储单元的 SEU 损伤机理示意图

3 SEU 的主要研究方法

SEU 的主要研究方法包括实验测量和理论预估, 关于实验测量这里不再赘述, 主要介绍 SEU 的理论预估方法。SEU 的理论预估是实验数据、器件假设和空间辐射环境三者的有机结合, 它在地面模拟实验的基础上, 利用测得的器件单粒子翻转截面或位单粒子翻转截面, 结合空间轨道上的高能带电粒子能谱, 预估空间轨道上电子器件的 SEU 率。SEU

率是指单位时间内出现的 SEU 个数, 通常用 SEU 个数/(bit · d) 或者 SEU 个数/(device · d) 表示。

卫星在厚度为 t 的铝屏蔽下, 其内部的粒子微分能谱 $f(E)$ 可表示为^[8]:

$$f(E) = f'(E')(S(E')/S(E)) \exp(-ct) \quad (1)$$

$$E' = R^{-1}(R(E) + t) \quad (2)$$

$$c = 5 \times 10^{-26} \eta (A^{1/3} + 8.6)^2 / 27 \quad (3)$$

其中, $f'(E')$ 为卫星外表面的微分能谱 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{MeV}^{-1}$); E 为卫星内部粒子能量 (MeV); $R(E)$ 为具有能量 E 的粒子射程; $S(E)$ 为具有能量 E 的粒子的阻止能; A 为粒子质量; η 为阿伏加德罗常数。

理论预估 SEU 的方法有 RPP 弦长模型计算重离子 SEU 率、利用重离子试验数据计算质子 SEU 率、品质因数 (FOM) 法以及 Weibull, Bendel 参数拟合法等^[9-11], 这里着重介绍品质因数 (FOM) 法以及 Weibull 参数拟合法。

3.1 FOM 法

Peterson 等人通过对大量实验数据分析处理得到了 FOM 方法, 该方法可以计算几乎所有轨道上的 SEU 率^[12]。选用量纲一参数 FOM (figure of merit) 计算 SEU 率, 比 LET 阈值和临界电荷更能准确地反映器件的单粒子翻转敏感度。FOM 可由重离子实验数据计算得到, 也可由质子实验数据计算得到。FOM 法的 SEU 率计算公式为^[12]:

$$\begin{aligned} R &= R_p + R_h = (C_p + C_h) \times \text{FOM} \\ &= (C_p + C_h) \times \sigma_{hl} / L_{0.25}^2 \\ &= (C_p + C_h) \times 4.5 \times 10^4 \times \sigma_p(\infty) \end{aligned} \quad (4)$$

其中, C_p, C_h 分别为质子和重离子的轨道翻转率系数, 表示器件在某一给定轨道翻转的可能性, 单位为 upsets/(device · d); σ_{hl} 为重离子单粒子翻转饱和截面 (cm^2/bit 或 cm^2); $L_{0.25}$ 为单粒子翻转饱和截面的 25% 处所对应的重离子的线性能量转换 LET 值, $L_{0.25} = L_0 + 0.288^{1/5} \times W$; $\sigma_p(\infty)$ 为质子翻转饱和截面 (cm^2/bit 或 cm^2)。值得注意的是, 对于低能质子在质子能谱中占很大比例的轨道和抗单粒子能力很强的器件, 采用该方法的计算结果精确度稍差。

3.2 Weibull 参数拟合法

地面重离子加速器模拟研究表明, 器件芯片中敏感单元单粒子翻转与离子辐射的关系具有 Weibull 函数的分布^[13]:

$$\sigma_{hi}(L_d) = \begin{cases} \sigma_0 \left\{ 1 - \exp \left[- \left[\frac{L_d - L_0}{W} \right]^S \right] \right\} & L_d \geq L_0 \\ 0 & L_d < L_0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, σ_{hi} 为重离子致翻转截面; L_d 为入射粒子沉积于灵敏单元 (sensible volume, SV) 中的能量; L_0 为引起翻转所需的最小能量; σ_0 称为饱和截面; W 和 S 分别为 Weibull 函数的宽度和形状因子; L_0, σ_0, W 和 S 通常由实验决定。此式反映的是器件本身的特性, 对于给定器件, 翻转截面仅取决于 SV 内沉积的

能量 L , 而与能量沉积方式、辐射粒子种类以及入射能量无关。

Weibull 参数拟合法假设所研究的器件中包含 N_0 个相同尺寸的敏感体积, 利用高能粒子的 LET 谱线以及 W, S, L_0 等参数拟合估计出单粒子翻转率, 其算法流程如图 2 所示。

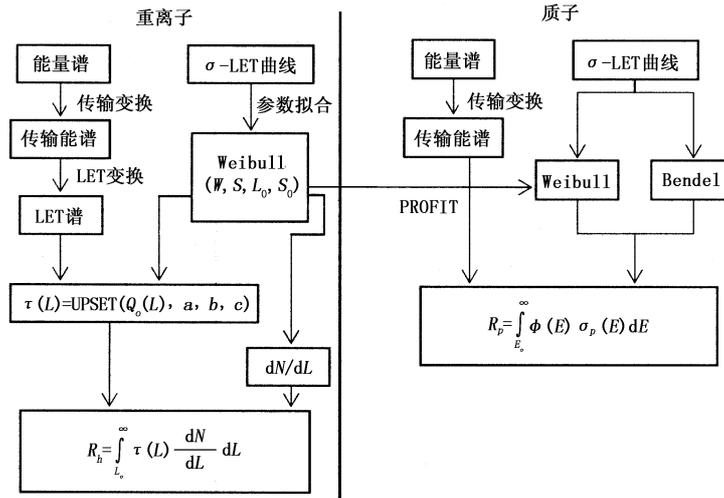


图2 Weibull 参数拟合法流程图

4 计算实例及分析

4.1 软件可靠性验证

OMERE 3.4 软件的核心就是 Weibull 参数拟合法, 其能够完成对不同空间轨道、倾角以及不同器件的 SEU 率计算。利用已有实验数据及 FOM 方法预估值对软件可靠性进行了验证, 软件计算结果与测量结果如表 1 所示。比较结果表明, 软件计算值与

测量值有一定的误差, 但是误差很小, 计算结果较为理想, OMERE 3.4 软件具有较高的可靠性。

4.2 SEU 率随轨道高度的变化关系

在 100 miles 铝屏蔽下, 选取常用的 CMOS2164 星载存储控制器件作为研究对象, 其对应参数如表 2 所示, 分析其在不同空间环境下的单粒子翻转率。

表 1 器件的 OMERE 软件计算结果与在轨实测值比较

SEU 率 \ 器件	HM6116	IDT71256	HM6516	2164	82S212	93422
软件模拟值 R_j SEU/(bit · d)	4.38×10^{-7}	2.2×10^{-7}	4.35×10^{-7}	8.80×10^{-5}	8.99×10^{-3}	4.61×10^{-3}
在轨实测值 R_c SEU/(bit · d)	4.00×10^{-7}	2.00×10^{-7}	4.00×10^{-7}	8.10×10^{-5}	8.29×10^{-3}	4.20×10^{-3}

表 2 CMOS2164 器件参数

轨道	器件	型号	L_0	W	S	σ_{hL}	A	σ_{pL}	c
			MeV/(mg · cm ⁻²)			μm ² /bit	MeV	cm ² /bit	μm
CRESS 33500 × 348 km/18.2°	2164	MOS	0.487	4.95	1.42	170	3.5	7.2×10^{-12}	2

虽然低轨道的宇宙射线和辐射带中的高能质子和重离子的通量比其他轨道上的小, 但低轨道的 SEU 仍是影响星载器件可靠性的重要因素, 主要发生在高纬区及南大西洋异常区。分析 CMOS2164 器件在不同倾角 (0°, 30°, 60°) 质子、重离子单粒子翻转率随轨道高度的变化, 计算结果如图 3、图 4 所示。从图 3 可以看出, 轨道高度在 200 ~ 1200 km 范围内变化时, 60° 轨道倾角的质子单粒子翻转率最

大, 其次是 30° 轨道倾角, 0° 轨道倾角的最小, 但是 0° 轨道倾角的质子单粒子翻转率变化幅度最快; 当轨道高度高于 1200 km 时, 0° 倾角轨道的单粒子翻转率增加至最大。图 4 中的重离子 SEU 率在 200 ~ 1200 km 范围内很小并且变化较为缓慢, 不会对器件造成较大的威胁, 与 FOM 方法的计算结果相符合^[14]。此外, 可以预计随着轨道高度的增加, 质子单粒子翻转率将逐渐增至饱和状态, 甚至出现逐步

下降的可能,该预计得到了计算结果的验证,如图5所示。质子单粒子翻转率呈现出快速增加、快速下降再缓慢增加的“波浪式”变化过程。

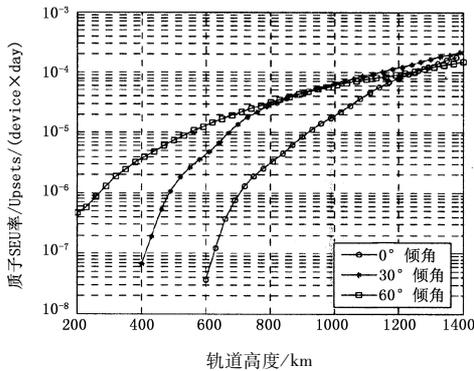


图3 0°,30°,60°轨道倾角质子单粒子翻转率随轨道高度的变化

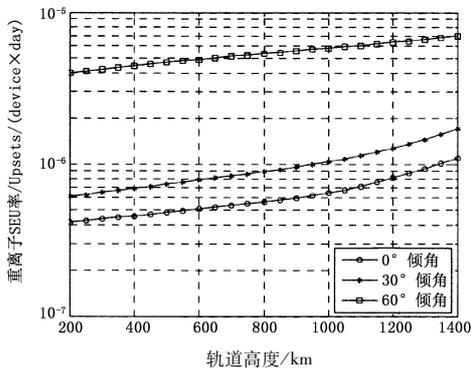


图4 0°,30°,60°轨道倾角重离子单粒子翻转率随轨道高度的变化

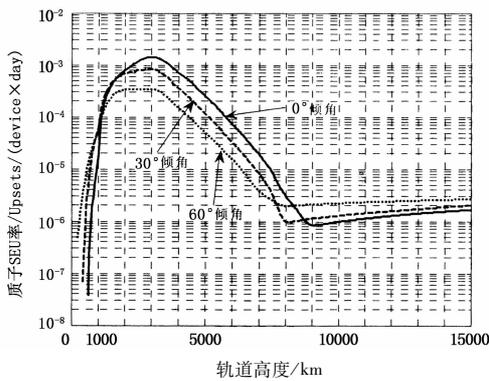


图5 质子SEU率随轨道高度的变化关系

同时对低轨道(200~1400 km)和高轨道(10000~20000 km)质子、重离子单粒子翻转率进行了计算,计算结果如图6、图7所示。计算结果表明,在低轨道空间质子SEU率增加较快,是影响器件可靠性的决定性因素,重离子造成的影响几乎可以忽略;在高轨道空间质子SEU率下降很快,而重离子SEU率有所增加,此时重离子成为影响器件可靠性的关键因素。

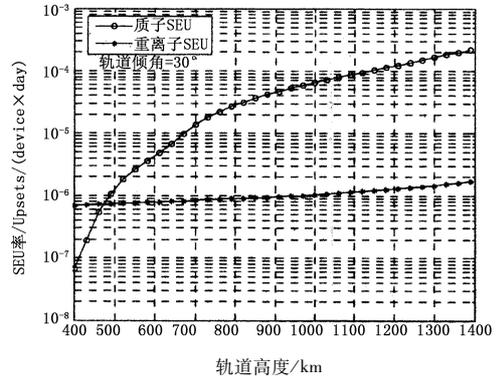


图6 低轨道单粒子翻转率随轨道高度的变化

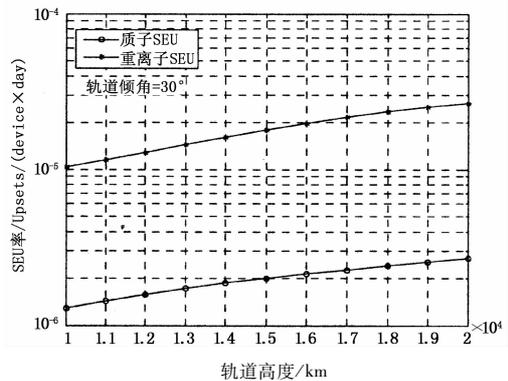


图7 高轨道单粒子翻转率随轨道高度的变化

4.3 SEU率随轨道倾角的变化关系

选取典型轨道高度为200 km,1000 km和2000 km,计算单粒子翻转率随轨道倾角的变化情况,计算结果如图8、图9所示。从图8可以看出,对于200 km和1000 km轨道,质子单粒子翻转率呈现出先增大后减小的缓慢的变化过程,对应翻转率最大的轨道倾角出现在20°~30°。对于2000 km轨道,质子单粒子翻转率呈现出较快的增大过程,并且在0°~90°轨道倾角范围内尚未出现最大的翻转率。由于其在80°~90°范围内出现了近似饱和状态,可以预计其对应翻转率最大的轨道倾角将会很快出现,继而呈现出下降态势。这就说明对于给定的空间轨道高度,随着轨道倾角的变化存在质子翻

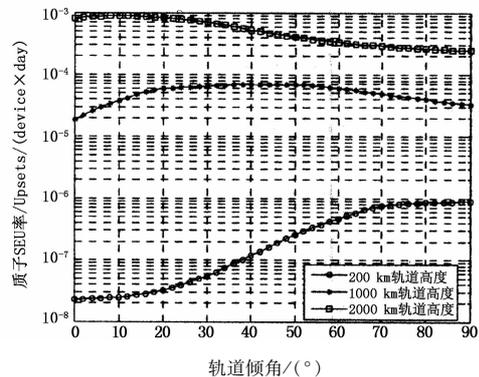


图8 质子单粒子翻转率随轨道倾角的变化

转率最大的点^[15],在系统设计时应尽量避免位于此种轨道倾角附近。从图9可以看出,重离子翻转率并不存在这样的特征,它随着轨道倾角的增大而增大,变化态势较为类似,并且都在70°~90°范围内趋于稳定。

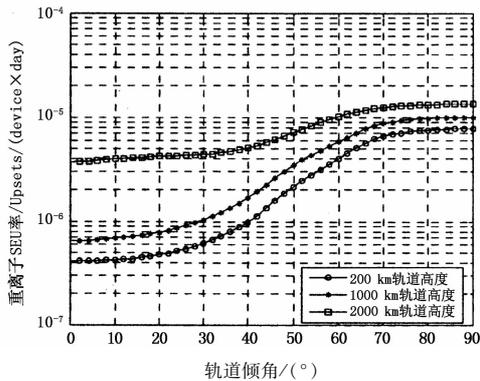


图9 重离子单粒子翻转率随轨道倾角的变化

4.4 SEU率随屏蔽层厚度的变化关系

上述计算结果均是在100 miles铝屏蔽下获得的,通过改变屏蔽层的厚度,OMERE 3.4软件能够提供更直观的对器件加固效果的认识。分别选取屏蔽层厚度 t 为100 miles,200 miles以及500 miles,得到了同种空间环境不同屏蔽层厚度条件下的质子SEU率,计算结果如图10所示。从图中可以看出,屏蔽层厚度的增加起到了一定的器件保护效果,降低了器件的质子单粒子翻转率,但是效果并不明显。同时,由于屏蔽层厚度的增加必将带来在轨卫星通信系统体积、质量的限制,屏蔽层厚度受到限制不可能无限增大,因而依靠增加屏蔽层厚度来获得对器件的保护并不是明智的选择。

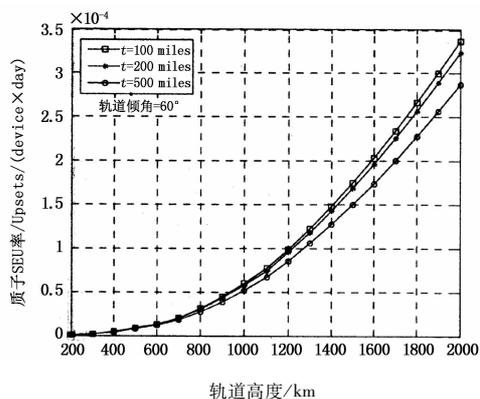


图10 质子单粒子翻转率随屏蔽层厚度的变化关系

5 结论

空间环境中的高能带电粒子能够造成卫星光通信系统中电子器件的错误和失效,从而影响通信系统的可靠性。通过对CMOS2164器件单粒子翻转效应的深入研究分析,得到了SEU率随轨道高度以及

轨道倾角的变化关系。在低轨道空间质子SEU率是影响器件可靠性的决定性因素,而在高轨道空间重离子SEU率成为影响器件可靠性的关键因素。所得数据可以作为后期对在轨卫星通信系统设计的重要参考。而为了有效克服空间单粒子辐射效应,除了简单的增加屏蔽层厚度等防护方法外,还应考虑通过电子器件的选择来提高抗辐射性能,此外还需考虑温度交变环境、太阳辐射环境等复杂空间环境因素对通信系统的影响。

参考文献:

- [1] Zhao Shanghong. Introduction to laser satellite communications [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2005. (in Chinese)
赵尚弘. 卫星光通信导论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2005.
- [2] Huang Benli, Ma Youli. Space environment test technology of spacecraft [M]. Beijing: Academic Press, 2002. (in Chinese)
黄本诚, 马有礼. 航天器空间环境实验技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
- [3] Hou Rui, Zhao Shanghong, Li Yongjun, et al. Analysis of space environment effects on satellite optical communication system [J]. Optical Communication Technology, 2008, 38(3): 35-39. (in Chinese)
侯睿, 赵尚弘, 李勇军, 等. 空间环境对卫星光通信系统的影响因素分析[J]. 光通信技术, 2008, 38(3): 35-39.
- [4] He Chaohui. Study of methods for predicting SEU rate in space orbits [J]. Chinese Journal of Space Science, 2001, 21(3): 266-273. (in Chinese)
贺朝会. 空间轨道单粒子翻转率预估方法研究[J]. 空间科学学报, 2001, 21(3): 266-273.
- [5] Xue Yuxiong, Cao Zhou, Yang Shiyu. Calculation high-energy proton-induced SEU rate of electronic devices [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2005, 22(8): 192-200. (in Chinese)
薛玉雄, 曹洲, 杨世宇. 星载电子系统高能质子单粒子翻转率计算[J]. 航天器环境工程, 2005, 22(8): 192-200.
- [6] Feng Yanjun, Hua Gengxin, Liu Shufen. Radiation hardness for space electronics [J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(5): 1071-1080. (in Chinese)
冯彦君, 华更新, 刘淑芬. 航天电子抗辐射研究综述[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1071-1080.
- [7] Liu Zhenxing. Space physics [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005. (in Chinese)

- 刘振兴. 太空物理学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [8] Robert A Reed, James Kinnison, Jim C Pickel, et al. Single-event effects ground testing and on-orbit rate prediction methods: the past, present, and future [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci. , 2003, 50(3) : 622 – 634.
- [9] Yu Qingkui, Zhao Dapeng, Tang Min. prediction of single event upset(SEU) rates induced by heavy ions [J]. Chinese Space Science and Technology, 1998, (6) : 56 – 61. (in Chinese)
于庆奎, 赵大鹏, 唐民. 空间辐射粒子引起单粒子翻转率预计 [J]. 中国空间科学技术, 1998, (6) : 56 – 61.
- [10] B Doucin, Y Patin, J P Lochard, et al. Characterization of proton interactions in electronic components [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci. , 1994, 41(3) : 587 – 699.
- [11] James C Pickel. Single-event effects rate prediction [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci. , 1996, 43(2) : 483 – 495.
- [12] E L Petersen. The SEU figure of merit and proton upset rate calculations [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci. , 1998, 45(6) : 2550 – 2562.
- [13] E L Petersen. Predications and observations of SEU rates in space [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci. , 1997, NS – 44 : 2174.
- [14] E L Petersen. SEE rate calculation using the effective flux approach and generalized figure of merit approximation [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci. , 1995, NS – 42 : 1995 – 2003.
- [15] J Barak, R A Reed, K A LaBel. On the figure of merit model for SEU rate calculations [J]. IEEE Trans. Nucl. Sci. , 1999, 46(6) : 1504 – 1510.