环境效应与防护

卫星元器件抗辐射指标优化分析

王义元,韩冬梅,赵志明,柳征勇

(上海宇航系统工程研究所,上海 201109)

摘要:目的 在航天器设计中对选用的电子元器件提出了抗辐射指标要求。随着航天器设计寿命增加,对元 器件提出的抗辐射指标越来越高,因此需要优化对元器件的抗辐射指标要求,以降低因辐射指标不满足而 限制元器件的选择范围。方法 通过对国内外抗辐射指标体系的对比分析和典型轨道、典型器件的数据分析, 探讨总剂量指标的优化方法。对在轨翻转概率的影响因素进行分析,并采用典型数据的单粒子翻转概率评 估,明确采用单一 LET 阈值指标的局限。结果 总剂量效应和单粒子效应指标均有优化的方法和空间。结论 通过对辐射环境的细化分析,降低辐射设计裕度,可降低总剂量的辐射指标要求。结合单粒子效应的应用 需求以及防护设计,降低对器件 LET 阈值要求。

关键词:抗辐射元器件;总剂量效应;单粒子效应 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.11.018 中图分类号:TJ01 文献标识码:A 文章编号: 1672-9242(2017)11-0089-05

Optimization of Radiation-hardening Device for Spacecraft

WANG Yi-yuan, HAN Dong-mei, ZHAO Zhi-ming, LIU Zheng-yong (Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

ABSTRACT: Objective Design of spacecraft has requirements on radiation resistance indexes of electronic components. With the increase of spacecraft design life, the components requires higher radiation resistant index, so it is needed to optimize the radiation resistance index for components, in order to reduce the limit of components due to insufficient radiation indicators. **Methods** Through comparative analysis on domestic and foreign systems of anti radiation indicators and date analysis of typical orbit and typical device, optimization method of total dose indicators were discussed. Factors affecting the rollover probability of orbit were analyzed. Typical data of single particle rollover probability was assessed. The limit of single LET threshold indicators was identified. **Results** There were methods and space for optimization of indexes for both total dose effect and single particle effect. **Conclusion** Through detailed analysis of the radiation environment and reduction of the radiation design margin, requirements on the total dose radiation index might be reduced. The requirement on LET threshold might be reduced in combination with the application requirement of single particle effect and protection design.

KEY WORDS: radiation-hardening device; total ionizing dose effect; single event effect

空间多种带电粒子与航天器上的电子元器件相 互作用,形成电离总剂量效应、位移效应和单粒子效 应,引起电子器件参数退化、功能异常等,从而影响 航天器在轨正常工作,甚至威胁其在轨安全^[1-3]。因 此,在航天器设计中对选用的电子元器件提出了抗辐射设计要求。随着长寿命航天器设计需求以及由于空间辐射导致的在轨故障的案例增加,型号中对元器件 提出的抗辐射指标也越来越高,导致产品设计中元器

收稿日期: 2017-06-14; 修订日期: 2017-06-24

• 89 •

作者简介:王义元 (1982—),男,河南正阳人,博士,高级工程师,主要研究方向为航天器环境与可靠性。

件的选择范围受限,且元器件的费用较高。文中通过 典型轨道的环境数据分析,结合无加固指标器件的抗 总剂量能力调研和单粒子翻转率的评估结果,分析不 同指标要求下器件选用的灵活性,提出了优化元器件 抗辐射指标的建议。

1 元器件空间辐射效应及其防护措施

由于空间辐射环境中带电粒子成分、能量和通量 多样性,且航天型号所用电子元器件种类繁多,因此 空间辐射粒子与宇航用元器件相互作用,形成各种空 间辐射效应。在航天器的设计过程中,形成了多种的 防护方案或措施。

1.1 元器件空间辐射效应

1.1.1 总剂量效应

电离总剂量效应是带电粒子在半导体器件内产 生电子空穴对,形成氧化物陷阱电荷和界面陷阱电 荷,从而导致电参数发生漂移,引起器件功能失效。 一般半导体器件均受电离总剂量的辐射影响。入射粒 子与半导体中周期性晶格原子发生碰撞,形成空位-间隙对缺陷,造成位移损伤,会导致半导体的器件参 数退化或永久性失效。敏感元器件主要有双极晶体管 和太阳能电池、CCD、CMOS 图像传感器、光耦、 LED 等光电器件。

电离总剂量效应和位移损伤效应统称为累积剂 量效应,即辐射剂量对电子元器件和材料的损伤并非 是瞬时产生的,而是经过长时间的积累而逐渐加重。 其指标要求和防护方法很多是相通的,文中主要讨论 电离总剂量效应。

1.1.2 单粒子效应

单粒子效应是空间单个高能质子和重离子穿越 单元电路敏感区时,产生的电子-空穴对被器件内部 的电场收集,引起器件存储、输出的变化。根据电子 器件类型以及高能粒子与器件相互作用机理的差异, 单粒子效应可分为单粒子翻转(SEU)、单粒子锁定 (SEL)、单粒子烧毁(SEB)、单粒子栅击穿(SEGR)、单 粒子瞬态效应(SET)等多种类型。主要影响 SRAM、 PROM、EEPROM、Flash、DSP、FPGA、数据总线 等大规模集成单路以及 A/D、D/A、DC/DC、功率 MOS 管、运放等模拟或数模混合电路。

1.2 电子系统辐射效应防护措施

电子系统抗辐射加固归纳起来有两种途径,一是 通过元器件的设计、工艺、材料等进行器件抗辐射加 固,生产出具有较高抗辐射能力的器件。由于其设计 结构、工艺条件可能均与未加固器件不同,导致加固 器件性能、价格与未加固器件有一定差异。二是在器 件使用过程中,采取抗辐射加固措施,使各种辐射效 应及其影响减至最小,即应用抗辐射加固。

1)总剂量效应系统防护。总剂量辐射防护主要 依据随着屏蔽质量面密度的增加,辐射总剂量呈下降 趋势的原理,在局部范围内附加一层屏蔽材料(如钽 等),或通过设备内部布局优化调整等方法,使该敏 感区域的空间辐射屏蔽得到局部增强,以降低敏感区 域内电子器件的辐射总剂量水平。同时,采用容差设 计也可适当提高整个电子系统在电离辐射环境下的 适应性^[1]。

2)单粒子效应系统防护。航天电子系统的单粒 子效应防护设计目标:保证系统不因单粒子效应导致 任务失败(即系统的可用性);在单粒子效应影响下 满足航天器对工程或有效载荷数据完整性的要求。可 从器件选用、电路设计、整机设计三个层面上进行防 护设计,通常采用硬件、软件、容错技术等多种方式 来进行防护设计。

选用具有抗单粒子效应加固能力的器件,可以从 根本上大幅度提高航天电子系统的单粒子效应防护 能力,如 SOI 或 SOS 工艺器件不存在单粒子闩锁效 应。虽然采用单粒子效应加固器件进行单粒子效应防 护,可以取得良好的防护效果,但抗单粒子效应加固 器件的价格非常昂贵,而且器件类型有限。因此,只 采用抗单粒子效应加固器件不能满足型号工程的需 求。目前已发展了多种单粒子效应防护措施,如硬件 设置检错纠错功能块、设置硬件计数器、软件的指令 重启、三取二表决等多种方法^[1]。

2 元器件抗辐射指标要求

为满足电子元器件在空间应用的需求,目前型号 中提出了元器件抗辐射的指标要求,主要是电离总剂 量和单粒子效应的指标要求。

2.1 辐射设计裕度

由于辐射环境分析的不确定性和元器件辐射敏 感度的离散性,因此在航天器研制过程中,对电子元 器件进行防护设计中提出了最小辐射设计裕度 (RDM)的要求。美国和欧洲的标准对最小辐射设计裕 度有明确要求。

美国标准规定:当 RDM<2 时,是不可接受的; 2<RDM<10,需要进行辐射评定,开展元器件批次性 试验验证; RDM>10 时,可以使用。欧洲标准中规定, 基于 AE-8 模型计算出的 GEO 轨道环境,可采用 1.2 的辐射设计裕度,其他轨道建议采用 1.2~2。国内暂 无具体的标准或规范,工程中一般采用 2~3。

2.2 电离总剂量效应的指标

电离总剂量效应指标一般是指元器件敏感区域

的吸收剂量。分析中一般将航天器简化为一个具有一 定半径的实心球,根据飞行器轨道参数,对球心处的 辐射剂量与球的半径(屏蔽厚度)之间的关系进行计 算,提供航天器在轨寿命期间的辐射剂量随屏蔽厚度 (一般采用等效铝厚度)的变化曲线。型号中一般选 取典型屏蔽厚度后(一般 2~3 mm Al)的剂量,乘以 辐射设计裕度得到航天器的抗总剂量指标要求^[1,3]。

由于辐射剂量一维分析不能体现飞行器实际复杂结构,未反映设备间的屏蔽作用,因此可结合飞行器总体布局,建立用于辐射剂量分析的三维模型。由于其充分考虑了飞行器自身的屏蔽效果,可以有效降低对飞行器内部元器件的抗辐射指标的要求。通过三维分析与一维分析的对比可以发现,对元器件的指标可以降低 2~25 倍^[3]。

2.3 单粒子效应指标

单粒子效应的描述通常采用 LET 值(线性能量 传输)和单粒子效应截面 σ(如翻转截面、锁定截面、 烧毁截面等)两个参数。因空间辐射环境中带电粒子 的 LET 值对单粒子效应具有较大的影响,型号总体 为便于对器件选用控制,一般通过分析空间粒子的类 型及其 LET 值的变化,提出器件抗单粒子效应 LET 阈值要求。

对于采用了单粒子防护措施的空间电子设备,则 通常关心导致需要地面干预、数据丢失的单粒子效应 发生的次数或概率。因此单粒子效应有时还会提出单 粒子效应周期或概率的要求。

对于器件的单粒子指标,国外 NASA 和 ESA 均 给出了相关给定,见表 1、表 2。国内暂无相关标准 对单粒子效应提出明确要求,通常采用的有 15,37, 75 MeV·cm²/mg^[1,3]。空间辐射环境中高能质子是引起单 粒子效应的主要环境因素,而空间高能质子与元器件材 料的核反应产物的 LET 值一般小于 15 MeV·cm²/mg。 因此当器件单粒子效应阈值大于 15 MeV·cm²/mg 时, 可不考虑空间质子的单粒子效应。对空间高能粒子 LET 谱进行分析,其在 37 MeV·cm²/mg 处粒子通量急剧下 降,因而产生单利子效应的概率急剧减少。若保留一定 的余量,采用 2 倍裕度,提出 75 MeV·cm²/mg 的要求^[3]。

表	1	NASA	对器件单	地子效	应指标	的规定

线性能量传递阈值 (LET _{th})/(MeV·cm ² ·mg ⁻¹)	要求
LET _{th} >100	单粒子效应风险可忽略, 无需进一步分析
15 <let <sub="">th<100</let>	单粒子效应风险低, 应分析重离子诱发的SEE
LET _{th} <15	SEE 风险高,应分析重 离子和质子诱发的 SEE

表 2 ESA 对器件单粒子效应指标的规定

线性能量传递阈值	再步	
$(\text{LET}_{\text{th}})/(\text{MeV}\cdot\text{cm}^2\cdot\text{mg}^{-1})$	安水	
>60	可忽略重离子引发的单粒子效应	
≥15	可忽略质子引发的单粒子效应	
<15	需重离子和质子诱发的单粒子效应	

3 辐射指标的应用分析

3.1 电离总剂量指标对器件选择的约束

采用 Space radiation 6.0 对 450 km 圆轨道的 15 年的电离总剂量进行一维分析。3 mm 等效铝厚度的剂量只有 2.1 krad(Si),采用 2 倍的辐射设计裕度,则提出的总剂量指标为 5 rad(Si)。考虑在轨时间较长,空间环境变化因素较多,采用 4~10 的辐射设计裕度时,则对元器件的总剂量指标则提高到 10~20 krad(Si)。

元器件的抗辐射性能有别于常规可靠性的要求, 属于航天产品的特殊要求。因此元器件的质量等级中 不含抗辐射性能指标,即使是特军级、宇航级或 883 级的产品对抗辐射指标也不做强制要求^[4-6]。未加固、 无抗辐射指标的器件一般也具有一定的抗辐射能力, 可以通过试验或历史数据分析器件的抗辐射能力。从 国外的数据库中随机找 FPGA、ADC、DAC、运放、 DC/DC、存储器等 20 个未加固器件的试验数据,抗 辐射能力统计如图 1 所示。



图 1 无抗辐射指标器件的抗辐射能力分布

由此,对航天器制定不同的电离总剂量指标要 求,对未加固无加固指标器件的选择制约也就越大。 当要求为 10 krad(Si),90%的未加固器件均可满足要 求;当要求为 20 krad(Si)时,只有 50%的未加固器件 可满足要求。如果采用 2 倍的辐射设计裕度,并结合 器件所处位置的具体分析,抗辐射能力只有 5 krad(Si) 的器件也满足低轨的实际应用需求,元器件的选择范 围更大。因此,应该重视型号对电离总剂量效应指标 要求。

3.2 单粒子效应指标优化需求

单粒子效应属于瞬时、概率性事件,抗辐射能力

不同的器件,其在轨发生单粒子效应的几率有较大差 异^[3,7-8]。为直观显示器件 LET 阈值与单粒子效应的关 系,采用 space radiation 软件,通过改变器件的 LET 阈值,获得在轨重离子单粒子翻转率随 LET 阈值的 变化关系,如图 2a 所示。可以看出,器件翻转率随 LET 阈值的增加而显著减小,即使器件的 LET 阈值达到 100 MeV·cm²/mg 时,仍存在发生单粒子翻转的可能。

由于空间高能粒子能量很高,形成的单粒子效应 影响一般很难通过提高器件 LET 阈值而彻底消除, 因此在选择具有抗辐射指标的器件后,一般也应采取 相应的防护措施。即在电路、整机设计中采取系统的 防护措施,降低单粒子效应影响。



图 2 器件单粒子翻转率随器件的 LET 阈值、 翻转截面的变化

对于特定轨道,影响器件单粒子效应的还有器件 的单粒子效应截面、器件厚度等参数。图 2b 是对器 件单粒子翻转率随器件的翻转截面变化的规律。在其 他条件保持不变时,单粒子翻转率随翻转截面线性增 加。从器件单粒子翻转率对比发现,LET 阈值为 10 MeV·cm²/mg、翻转截面为 10⁻⁶ cm²/bit 的器件的翻转 率与 LET 阈值为 100 MeV·cm²/mg、翻转截面为 10⁻⁴ cm²/bit 的器件相当。单独提高器件的 LET 阈值不能 完全反映器件抗单粒子能力,反而减少了器件选择范 围,增加了器件获得的难度。

器件单粒子效应的 LET 阈值是通过实验获得, 且在试验中可以同时获得器件的 LET 阈值和单粒子 效应截面。因此,对器件提单粒子效应时,可参考器 件的单粒子效应发生概率指标。考虑到单粒子效应发 生概率的计算评估方法以及环境参数选取的差异,总 体可以采用设定的翻转概率需求,通过统一的模型, 分析计算不同 LET 阈值与翻转截面的关系,从而明 确器件 LET 阈值和单粒子效应截面两个参数的要求。 如图 3 所示,设定器件的单粒子翻转概率要求,采用 通用的器件厚度、漏斗区长度等参数,通过设定不同 的 LET 阈值,分析所允许的最大翻转截面,形成 LET 阈值与翻转截面的曲线。则器件的 LET 阈值和翻转 截面处于图 3 中阴影区时,均可满足在轨翻转概率的 要求。在轨应用时 LET 阈值较高的 B 区器件的翻转 概率可能会大于 LET 阈值较小的 A 区器件。单独提 出器件单粒子效应的 LET 阈值,不能完全反应器件 抗单粒子效应的能力。



图 3 设定翻转率下,所需器件 LET 阈值与翻转 截面的关系

另外,一般有无抗辐射性能指标的器件的价格差 异较大。调研某空间系统中采用的部分元器件的价 格,发现有抗辐射指标的器件价格是无加固指标器件 的 2~20 倍。由于系统中采用的电子元器件种类、数 量较多,则对型号经费影响可能很大。因此,在航天 型号设计中,应结合实际环境和型号设计需求,提出 具体的抗辐射指标,可在保证在轨应用需求的条件 下,降低对元器件抗辐射性能的要求,既可以扩大设 计中器件的选择范围,还可以降低型号元器件经费。

4 结语

空间辐射环境在元器件中引起电离总剂量效应、 位移损伤效应以及单粒子效应。各类元器件对其辐射 损伤敏感性不同。在航天型号设计中需要根据不同轨 道环境分析,并结合航天器结构分析,对元器件提出 抗辐射指标要求。随着在轨长寿命的要求,只采用一 维分析方法的总剂量指标要求将限制型号元器件的 选择,制约新技术的发展,应该结合航天器的布局开 展三维分析,降低总剂量指标的要求。

单粒子效应种类较多,不同类型器件对单粒子效 应的响应具有较大差异。目前仅从单粒子效应阈值提 出较高要求,限制了元器件的选择,且由于各类轨道 阈值无差异,使得不同轨道最后的应用效果可能不 同。应根据型号任务的特点,结合单粒子效应的应用 需求以及防护设计方法,从多个角度提出单粒子效应 指标。

参考文献:

- [1] 王立, 郭树玲, 徐娜军, 等. 卫星抗辐射加固手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [2] ECOFFET R. On-orbit Anomalies: Investigations and Root Cause Determination[C]// IEEE NSRC 2011Short Course Notes. Section IV, 2011.
- [3] 于庆奎, 唐民, 孙毅. 宇航用器件抗辐射加固指标需求

分析[C]// 2013 年航天元器件专题论坛论文集. 北京: 中国航天科技集团公司, 2013.

- [4] 国产陆地观测卫星 2016 年绝对辐射定标系数正式发布 [J]. 环境技术, 2016, 34(5): 2.
- [5] 王健安, 谢家志, 赖凡. 微电子器件抗辐射加固技术发 展研究[J]. 微电子学, 2014, 44(2): 225-236.
- [6] 贾文远, 安军社. COTS 器件的空间辐射效应与对策分 析[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(11): 1-4.
- [7] 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.
- [8] 张战刚,雷志锋,恩云飞.典型卫星轨道辐射环境及在 轨软错误率预计模型分析[J].强激光与粒子束,2015, 27(9):207-213.