

大气中子单粒子效应 (NSEE) 对机载电子设备影响的评估方法讨论

陈宇¹, 李明¹, 张峰²

(1.中国航空综合技术研究所, 北京 100028; 2.中航工业第一飞机设计研究院, 西安 710089)

摘要: 针对中子单粒子效应 (NSEE) 对机载电子设备的影响进行了深入研究, 明确了对 NSEE 敏感的器件类型、失效模式以及典型机载电子设备受 NSEE 影响诱发的故障现象。在此基础上, 初步提出 NSEE 影响评估方法及程序, 进一步对 NSEE 影响评估的目的、评估过程中的内容及输入和输出信息进行深入探讨。

关键词: 机载电子设备; 中子单粒子效应; NSEE 影响评估

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.06.009

中图分类号: TJ01

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)06-0038-05

Assessment Methods for Influences of Atmospheric Neutron Single Event Effect (NSEE) on Airborne Electronic Equipment

CHEN Yu¹, LI Ming¹, ZHANG Feng²

(1.AVIC China Aero Polytechnolgy Establishment, Beijing 100028, China;

2.AVIC The First Aircraft Design and Research Institute, Xi'an 710089, China)

ABSTRACT: The effect of neutron single event effect (NSEE) on airborne electronic equipment was investigated in the paper. Type and failure mode of device that is susceptible to NSEE and faults of typical airborne electronic equipment induced by NSEE equipment were defined. On this basis, assessment method and procedure of NSEE effect evaluation were proposed to have in-depth discussion on the purpose of NSEE effect evaluation as well as content, information input and output in evaluation.

KEY WORDS: airborne electronic equipment; neutron single event effect; NSEE effect evaluation

飞机在适航高度会遭遇恶劣的大气辐射环境, 使机载设备出现数据错误、功能异常及死机等故障, 而大气辐射环境中对机载电子设备影响最大的成分是大气中的高能中子^[1]。大气中子入射半导体器件将诱发各种扰动或损伤现象, 这种现象被称为中子单粒子效应 (NSEE)。NSEE 严重影响机载电子设备的可靠性、维修性, 甚至危及飞机的安全性这一事实已经受到国内外航空界广泛关注和重视。如美国、澳大利亚及欧洲等国家已在相关适航认证文件^[2-4]中增加了关于 NSEE 不能危及飞机安全的要求, 美军用飞机的

适航认证标准^[5]中也明确规定了关于 NSEE 的减缓要求。针对机载电子设备如何开展试验以确定其对 NSEE 的敏感程度, 国外已经形成较为完善的试验方法^[6], 国内机载电子设备生产厂家和飞机总体单位也逐步认识到 NSEE 的影响危害。在某型号飞机上针对关键核心共 40 多件机载电子设备开展了 NSEE 试验, 试验结果表明, 80% 受试机载电子设备对单粒子效应非常敏感, 但是 NSEE 对设备的影响评估方法相关报道较少, 同时也缺少 NSEE 试验考核定量要求的制定方法。文中给合某型飞机开展 NSEE 工作的实际情

况,对 NSEE 的影响进行深入研究,初步提出了 NSEE 影响评估方法及程序。

1 NSEE 对机载电子设备的影响

1.1 受 NSEE 影响的器件和机载电子设备

由于器件结构及工艺特点的不同,发生单粒子效

应的类型也不同,受 NSEE 影响的器件及其失效模式见表 1^[7—10]。

机载电子设备大量采用表 1 所述的 CPU、FPGA、DSP、光耦、存储器、MOSFET 以及模拟线性电路等器件,导致机载电子设备受 NSEE 诱发各种故障,易受 NSEE 影响的典型机载电子设备及其失效现象见表 2^[11—15]。

表 1 受 NSEE 影响的器件及失效模式

序号	NSEE类型	受影响的器件	失效模式
1	单粒子翻转	存储器、锁存器、寄存器、CPU、DSP、FPGA、ASIC	逻辑状态发生非预期的改变,可能是“1”变成“0”、或“0”变成“1”
2	单粒子多位翻转	存储器、锁存器、寄存器、CPU、DSP、FPGA	在一个高能粒子作用下,多个存储单元发生逻辑非预期改变
3	单粒子瞬态	模拟电路、混合电路、光子学器件、电源器件	电路输出端产生一个具有一定脉宽和幅度的畸变电压。该畸变电压会沿电路传播。如光耦器件在“关”状态受到高能粒子入射,原本应该输出低电压的端口可能会产生一个高电平脉冲生成一个假信号而影响下一级逻辑电路
4	单粒子功能中止	CPU、DSP、FPGA等复杂器件	非正常工作状态。如CPU中的状态寄存器受高能粒子入射发生逻辑错误则可能导致CPU程序挂起或功能异常
5	单粒子锁定	CMOS、BiCMOS器件	非正常的大电流状态。器件一旦发生单粒子锁定,则必须断电重启才可以消除这种大电流状态恢复正常,如果电路设计中没有限流措施,单粒子锁定诱发的大电流会烧毁电路
6	单粒子烧毁	双极型三极管、N沟道MOSFET	器件烧毁
7	单粒子栅穿	MOSFET	栅极电介质的断裂

表 2 受 NSEE 影响的机载电子设备及故障模式

序号	受影响的机载电子设备	故障模式
1	电传操纵系统	总线传输错误,误动作,不动作等
2	自动驾驶仪	复位重启、冗余策略被破坏等
3	飞行告警设备	虚警,误报,不报,死机等
4	通讯设备	调制、解调失效,语音质量下降,死机等
5	导航系统	位置、速度解算错误,总线传输错误等
6	全权限数字式发动机控制器 (FADEC)	复位重启、冗余策略被破坏等
7	其它任何含有电子元器件的机载设备	数据错误、丢帧、自动复位、功能丧失及死机

1.2 NSEE 敏感性的定量表征

器件 NSEE 敏感性是指器件在单位粒子注量照射下发生单粒子效应的概率,其表征参数是截面,一般用 σ 表示,单位为 $\text{cm}^2/\text{device}$ 或 cm^2/bit 。器件 SEU 的截面计算公式分别为式 (1) 和 (2)。

$$\sigma = \frac{N}{n_{\text{fluence}}} \tag{1}$$

式中: σ 为 NSEE 截面; N 为发生 SEU 的数量; n_{fluence} 为中子注量 (单位面积内法线方向上通过中子的个数)。

$$\sigma = \frac{N}{n_{\text{fluence}} \times b_{\text{total}}} \tag{2}$$

式中: b_{total} 为器件中比特位的总数量。

SEE 率是指在飞行任务期间器件单位时间内发生 NSEE 的次数。IEC 航空电子系统大气辐射效应系列标准^[1,6]中推荐了一种计算过程较为简单但结果偏保守的 SEE 率计算公式,见公式 (3):

$$r_{\text{SEE}} = \sigma \times \overline{n_{\text{flux}}} \tag{2}$$

式中: r_{SEE} 为 SEE 率; $\overline{n_{\text{flux}}}$ 为任务期间中子平均注量率 (单位时间、单位面积内法线方向上通过中子的个数)。

1.3 影响机载电子设备 NSEE 敏感性的因素

机载电子设备 NSEE 敏感性除了与入射粒子在半导体材料中沉积的能量及数量相关外,还取决于器件特征尺寸、单元密度、Bit 数量、工作电压、工作电流、时钟频率、环境温度等因素。例如随着器件特征尺寸的减小,器件对 SEU 越来越敏感。相关研究表明^[7]:特征尺寸为深亚微米级的器件 SEU 特别敏感。表 3 给出了工艺结构、工作条件及环境温度等因素对机载电子设备 NSEE 敏感性的影响规律。

表 3 影响因素及其对机载电子设备 NSEE 的影响规律

因素	SEU	MBU	SET	SEFI	SEL	SEB	SEGR
特征尺寸↘	↗		↗				↗
单元密度↗	↗	↗					
Bit 数量↗	↗	↗					
工作电压↘	↗	↗					↗
工作电流↗							↗
开关速度↗	↗		↗				
时钟频率↗		↗					
脉冲宽度↗			↗				
温度↘					↘		↗

1.4 NSEE 影响的特点

与传统失效故障相比,NSEE 最突出且值得引起注意的特点是不可复现性^[7]。在飞行任务期间,机载电子设备受 NSEE 影响诱发的故障大多数为软故障,

这类故障可通过复位或断电重启恢复正常。一般在地面检修过程中不易复现飞行期间发生的这类故障现象,但是 NSEE 诱发的故障却严重影响机载电子设备的可靠性、维修性及安全性指标要求。

2 NSEE 的影响评估方法

2.1 目的

开展 NSEE 影响评估工作的目的是验证系统抗 NSEE 的能力或采取的防护/减缓措施是否可以满足相关要求,该要求来自于可靠性、维修性或安全性等定量指标要求。通过 NSEE 影响评估与设计改进的反复迭代,最终确保 NSEE 不会对系统的可靠性、维修性或安全性等指标要求造成影响。NSEE 减缓措施可以是架构层设计考虑、软件设计考虑、元器件选择、或组合等措施。

2.2 程序

NSEE 的影响评估一般在产品的详细设计与试验验证阶段进行。由于在详细设计阶段,此时的设计架构策略、器件选型等详细信息已经明确,可开展器件 NSEE 敏感性分析、设备 NSEE 率定量计算等工作。通过比较 NSEE 率与分配的允许最大故障发生概率,验证系统抗 NSEE 的能力或采取的防护/减缓措施是否可满足相关要求。NSEE 的影响评估的程序如图 1 所示。

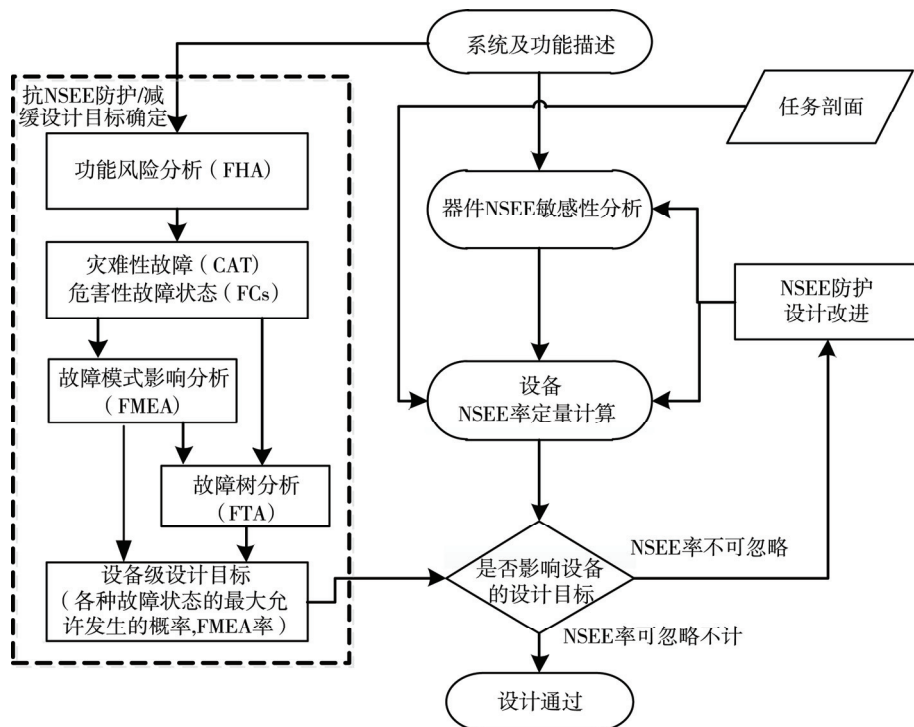


图 1 NSEE 的影响评估流程

2.3 主要工作内容

1) 抗 NSEE 防护/减缓设计目标确定。设备抗 NSEE 防护/减缓设计目标是确保 NSEE 不会对设备的可靠性、维修性或安全性等指标要求造成影响。一般认为,设备 NSEE 率小于各种故障状态最大允许发生故障概率(FEMA 率)的 1/10,即达到 NSEE 防护/减缓设计目标,该目标也作为验证试验考核的依据。图 1 中的虚线框内给出了从系统至设备各种故障状态最大允许发生概率的分析程序及常用方法,涉及的常用方法包括功能危害分析(FHA)、故障树分析(FTA)、故障模式影响分析(FMEA)等。

2) 器件 NSEE 敏感性分析。收集设备选用的器件清单,针对表 1 提及的器件种类,检索相关标准^[1,6]推荐的数据或 NASA 辐射中心等权威机构发布的试验数据,填写表 4 中的“NSEE”和“截面”列。如果没有历史试验数据,按照表 4 中的第 2 列至第 10 列的项目内容收集相关信息,再参考同类器件试验数据,按照表 3 规定的原则进行 NSEE 敏感性分析,给出会

发生的 NSEE 类别及其截面的保守估计值。

3) 设备 NSEE 率定量计算。设备 NSEE 率是所选用器件发生 NSEE 率的总和,NSEE 率的计算见式(3),其中截面值由表 4 提供,大气中子注量则需根据任务剖面(飞行高度、纬度等参数)代入大气中子分布模型中计算求得。由于架构层设计考虑、软件设计、元器件选择或组合等 NSEE 减缓措施的应用,器件 NSEE 有可能不会传递至设备层表现出故障,所以计算设备 NSEE 率时应考虑器件级和架构层次上的 NSEE 减缓措施,并对其有效性进行评估。评估工作可实现两个目的:其一,明确设计中的薄弱环节;其二,比较各种减缓措施的优劣,为设计改进提供输入。器件级 NSEE 减缓措施的选用视器件类别而定,如 FPGA 可采用刷新、校验码、重要位保护、冗余、表决等,架构层次上的减缓措施一般包括冗余、电流保护、复位重启等。针对所采用的减缓措施的具体应用,结合电路信息码流的实际情况,综合评估措施的有效性,按表 5 规定的内容进行填写。

表 4 器件 NSEE 敏感性分析

类别	型号	工艺	特征尺寸	工作电压	Bits 总数	工作电压	工作电流	开关速度	工作频率	脉冲宽度	工作温度	NSEE 类别	截面
SRAM													
FPGA													
.....													

表 5 设备 NSEE 定量计算

类别	型号	使用数量	NSEE 类别	截面	大气中子注量	器件级减缓措施	器件级减缓措施有效性评估	架构层次的减缓措施	架构减缓措施有效性评估	NSEE 率
SRAM										
FPGA										
.....										

3 结语

机载电子设备选用的器件功能越来越复杂,集成度越来越高,工艺尺寸越来越小,导致 NSEE 已成为诱发机载电子设备故障发生的主要因素。在研的新型机载电子设备及现场故障反馈信息中已经存在不可复现故障类型的应开展 NSEE 影响评估,明确并消除设计中的 NSEE 防护薄弱环节,必要时根据 NSEE 评估工作中确定的 NSEE 防护设计要求开展验证试验。

参考文献:

[1] IEC 62396-1, Process Management for Avionics: Atmospheric Radiation Effects. Part 1: Accommodation of At-

mospheric Radiation Effects Via Single Event Effects within Avionics Electronic Equipment[S].

[2] EASA Proposed CM-SWCEH-001 Issue: 01. Development Assurance of Airborne Electronic Hardware[EB]. EASA, 2012.

[3] EASA Proposed CM-AS-004 Issue: 01. Single Event Effects (SEE) Caused by Atmospheric Radiation[EB]. EASA, 2014.

[4] Advisory Circular 21-50. Approval of Software and Electronic Hardware Parts[EB]. CASA, 2014.

[5] MIL-HDBK-516B, Airworthiness Certification Criteria [S].

[6] IEC 62396-2, Process Management for Avionics: Atmospheric Radiation Effects. Part 2: Guidelines for Single Event Effects Testing for Avionics Systems[S].

[7] VRANISH K. KVA Engineering, “Atmospheric Radiation

- Effects Whitepaper: The Growing Impact of Atmospheric Radiation Effects on Semiconductor Devices and the Associated Impact on Avionics Suppliers[R]. NASA: U.S, 2007.
- [8] Effects of Neutrons on Programmable Logic[EB/OL]. 2002. <http://www.actel.com/documents/SERWP.pdf>.
- [9] Presented to Reusable Space Systems Group. Experience and Capabilities of Boeing Radiation Effects Laboratory (BREL-Seattle) to Support RSS Programs [EB/OL]. 1998. <http://www.boeing.com/assocproducts/radiationlab/publications/BREL-Space-Exp-Rss.pdf>.
- [10] TABER A, NORMAND E. Investigation and Characterization of SEU Effects and Hardening Strategies in Avionics[EB/OL]. IBM Report 92-L75-020-2, August, 1992, Republished as DNA-Report DNA-TR-94-123, Defense Nuclear Agency, Feb, 1995. <http://www.stormingmedia.us/85/8501/A850192.html>
- [11] EUGENE N. Single Event Effects in Avionics: Presented to C-17 Program[EB/OL]. 1998. <http://www.solarstorms.org/SEUavionics.pdf>.
- [12] EUGENE N. Radiation Effects in Spacecraft and Aircraft[EB/OL]. 2000. http://www.esa-spaceweather.net/spweather/workshops/SPW_WS/PROCEEDINGS_W3/Solspal.pdf.
- [13] Neutrons atmosphériques en avionique[EB/OL]. Présentation au RIS le 20/11/2002. <http://www2.laas.fr/RIS/Ateliers/NATP/03-Colas.pdf>.
- [14] IROM F, FARMANESH F F, JOHNSTON A H, et al. Single-Event Upset in Commercial Silicon-on-Insulator PowerPC Microprocessors[J]. IEEE Trans Nucl Soc, 2002, 49(6): 3148—3155.
- [15] HADDAD N, BROWN R, FERGUSON R, et al, SOI: Is it the Solution to Commercial Product SEU Sensitivity [C]// Proceedings of RADECS 2003 Conference, 2003.