

大气中子诱发复杂航电系统SEE的试验评价与防护设计

Test Evaluation and Protective Design of Atmospheric Neutron Radiation Effects via Single Event Effects for Complex Avionics

王群勇^{1,2,3} 刘燕芳^{1,2} 陈宇^{1,2} 白桦^{1,2} 阳辉^{1,2,3}

1 北京圣涛平试验工程技术研究院有限责任公司

2 北京圣涛平北科检测技术有限公司 3 湖南大学电气工程学院

摘要:研究了国外单粒子效应对航电系统影响的历史进展,介绍了航电系统单粒子效应试验评价中子辐射源、试验硬件、试验方法、试验程序及评估方法5个方面。国际航空标准根据航电系统的重要程度将其定义为A、B、C、D、E五级。为了确保A、B和C级航电系统的可靠性,提出了涉及顶层项目管理至元器件控制各个层面的防护过程,优化系统设计,以适应大气辐射环境中子单粒子效应,最后给出了系统防护设计的措施和流程。

关键词: 大气中子; 复杂航电系统; 单粒子效应; 试验评价; 防护设计

Keywords: atmospheric neutron; complex avionics; single event effect; test evaluation; protective design

0 引言

初级宇宙射线与地球大气中的氧、氮等原子发生核反应生成的次级粒子构成了大气中子环境^[1]。据国外资料显示,中子入射将会诱发航电系统发生单粒子效应(SEE),引起单粒子翻转(SEU)、单粒子瞬态(SET)、单粒子锁定(SEL)、单粒子功能中止(SEFI)等多种失效类型,导致航电系统功能故障,严重时使其可靠性降低几个数量级^[2]。随着半导体工艺技术的飞速发展,复杂航电系统所使用器件的特征尺寸越来越小,芯片上集成的存储结构单元越来越多,如目前应用于航电系统中特征尺寸为90nm的300万门FPGA。试验数据表明^[3],在6000英尺北纬40°飞行时,器件发生SEU率为 1.85×10^{-2} 次/天·器件,假设一块航电板上有4个FPGA,航电系统

含有4块板,则此航电系统的平均翻转间隔时间(MTBU)为9h,远达不到可靠性要求。SEE对航电系统的危害已引起业内广泛重视,依据国际航电系统故障经验,商用航电系统不能复现的故障中约20%归因于SEE^[4]。

目前国内尚未开展航电系统SEE的研究,但随着我国航空业的快速发展,为实现航电系统的高可靠性,迫切需要开展大气中子SEE的试验评价与防护设计研究。

1 航电系统SEE的发展历程

1992年,A. Taber 和 E. Normand^[5]利用三架飞机开展了系列飞行试验,结果表明,飞机飞行期间SRAM会发生SEE,这是首次证实大气中子诱发航电系统SEE的飞行案例。1996年,DOT/

FAA/AR-95/31文件对复杂集成电路的设计、试验及认证原则进行了阐述,并要求航电系统考虑大气中子SEE问题。1998年,E. Normand^[6]公布C-17运输机项目的SEE研究情况,指出SEE对未防护器件有较大影响,采用错误探测与纠正(EDAC)等适当的防护措施,可以有效降低SEE对航电系统的影响。2001年,美国电子工业联盟(EIA)与固态技术协会(JEDEC)联合发布了JESD89,规定了 α 粒子、地面宇宙射线(高能中子)和热中子引发的半导体器件SEE软错误的测量方法。2002年,法国THALES公司^[8]提出了SEU的影响危害应纳入设计因素,现场可替换模块不可发现的错误率应小于 10^{-5} 次/小时,CPU应小于 10^{-6} 次/小时,总线应小于 10^{-7} 次/小时。2005年,日本电子信息技术工业

协会(JEITA)出版发行了EIAJ EDR-4705,介绍了热中子、高能中子和 α 粒子的SEE试验设备和试验方法。同年,FAA发布的AC20-152中将RTCA/DO-254作为民用航电系统供应商的官方要求,针对系统中使用的复杂电子硬件,尤其是新型复杂电子器件,包括ASIC、可编程逻辑器件(PLD)、FPGA或类似电子器件,要求强制执行RTCA/DO-254文件的要求。2006年,国际电工委员会(IEC)发布了IEC/TS 62396-1,提出了大气辐射环境诱发航电系统SEE的类型及其防护措施要求。2007年至2011年间,FAA、NASA、IEC等组织都发布了许多相关文件,从SEE试验、系统升级、防护等各个方面,提出了多种方案。

2 航电系统SEE的试验评价

航电系统的SEE试验评价需要考虑多种试验影响因素,这些因素包括辐射源(中子或质子)、试验硬件(单个的器件或整块板),试验方法(静态或动态)的选择等。ASTM F1192、JESD57等标准提供了重离子的SEE试验程序,这些试验程序并非均适用于中子或质子的SEE试验,IEC/TS 62396-1、JESD89和JESD89A提供了适用于中子的SEE试验。

2.1 试验辐射源的选择

为了模拟大气中子辐射环境,可使用以下3种中子辐射源^[1]:

1) 散列中子源(10MeV~1000MeV):提供全能谱中子,其分布谱与大气中子辐射环境比较相似,非常适合开展中子SEE试验。

2) 单能中子源(1MeV~14MeV):提供单一能量中子,比较适合开展中子SEE试验,若需获得器件抗中子单粒子能力的连续谱,需要在不同的中子辐射源上开展试验。

3) 热中子源(<1eV):一般诱发SEE的中子能量>1MeV,且随着能量减小、影响降低,但是当中子能量小于1eV时,在造成器件软错误率(SER)中热中子占据主导地位。

2.2 试验硬件的选择

SEE试验通常是在特定设计的包含多类器件的试验板或者是针对某一类型器件的试验夹具上进行的。针对航电系统,可以开展器件级SEE试验,也可开展板级SEE试验,它们各有优缺点。对某一类型器件

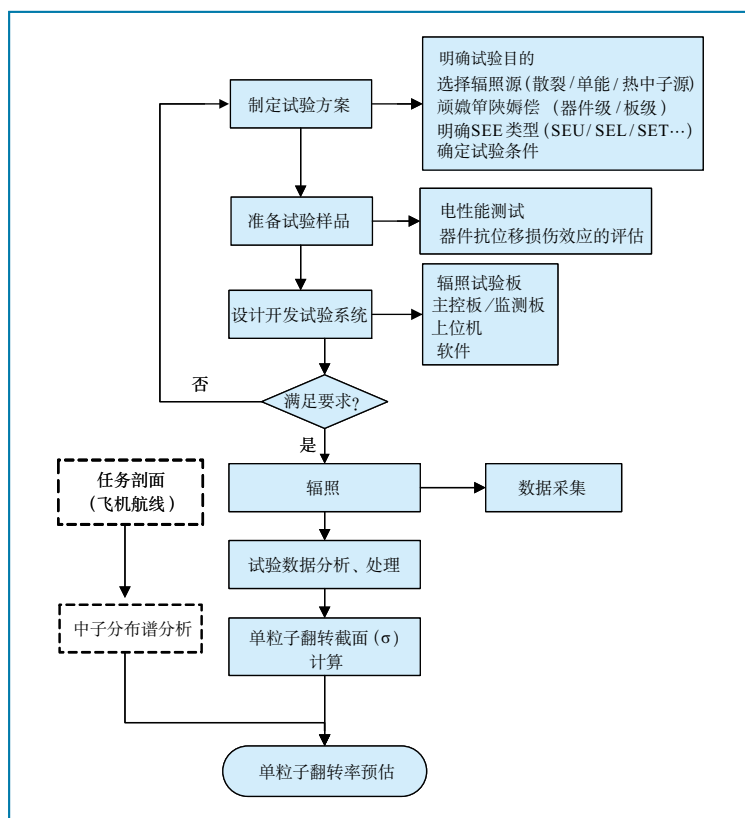


图1 中子SEE试验流程

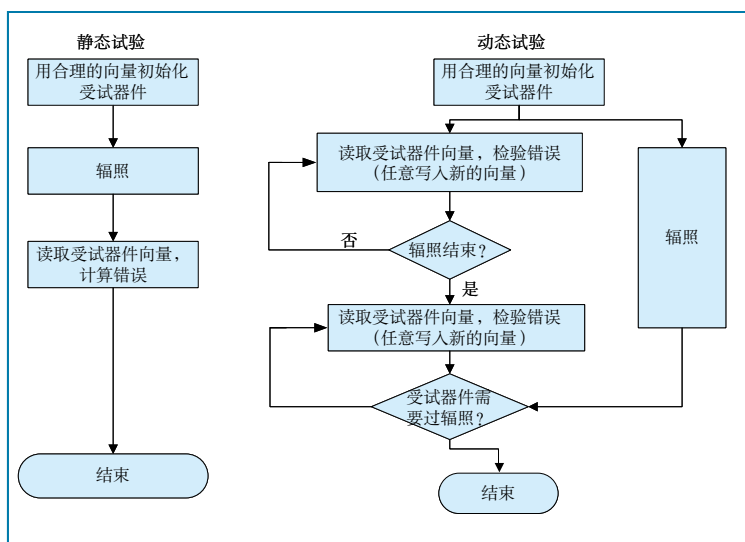


图2 静态和动态试验

开展SEE试验比较容易实现,但是,一块航空板包含多个不同类型的器件,这些器件对高能中子有潜在的SEE敏感性,为了快速达到试验目的,许多机构倾向于整块板子进行SEE试验,对于此种试验模式,整块试验板和板上的潜在敏感器件均被中子或质子束流辐照。

如果开展器件级SEE试验,有三类器件对大气中子诱发的SEE

表1 系统故障严重程度和概率要求

等级	失效后果	失效状态	概率要求/(FH)
A	灾难性	阻碍持续安全飞行与着陆	$<10^{-9}$
B	严重重大/危害性	大大减少安全余量或功能性能,物理损伤或较高负荷使机组人员不能可靠、精确、完备地执行任务,对乘客产生恶劣影响,并且对少数乘客产生严重或潜在致命伤害	$<10^{-7}$
C	重大	显著减少安全余量或功能性能,机组人员工作负荷显著增加或降低机组人员的效率,让乘客感觉不舒服,可能有受伤	$<10^{-5}$
D	微小	轻微减少安全余量或功能性能,轻微增加机组人员工作负荷,例如日常飞行计划更改,对乘客产生一些不便	$<10^{-3}$
E	无影响	失效状态不影响飞机的工作能力或增加机组人员工作负荷	无要求

表2 不同防护过程的防护设计原则

防护过程	设计原则
项目管理	需要从总体上广泛强调SEE问题
系统总体	需要强调SEE问题,并提供如何开展设计过程以及在开发过程中沟通、反馈的具体指导,这种过程是不断循环渐进迭代的更改过程
可靠性分析	需要根据安全危害等级强调SEE问题,开发正式的机构强调以前没有的迭代设计部分
器件管理计划	需要根据安全危害等级强调SEE问题,要求在初始器件选用以及制造厂更改器件及器件工艺时,开展完善措施强调SEE问题,确保SEE问题受控

表3 防护设计方法

等级	故障类别	防护设计方法
A	硬故障	恢复:硬故障要求替换器件以确保完全恢复系统功能或具备冗余能力。此类故障可以在系统架构、电子设备或器件选用三个层面减缓 系统架构:主要采取冗余方法,发生故障能够恢复 电子设备:主要采取冗余方法,发生故障能及时恢复 电子器件:采取禁/限用易产生破坏性单粒子效应(包括SEL、SEB、SEGR)的器件,选用抗辐射器件
	软故障	恢复:软故障不要求替换器件来完全恢复系统功能。此类故障可以在系统架构、电子设备或器件选用三个层面减缓 系统架构:主要采取冗余方法 电子设备:在电子设备这一层面优化设计收效最大。只要硬件仍然工作,软件减缓措施就可以有效,可采用EDAC、比较、表决、信息冗余等措施 电子器件:选用0.25 μm 工艺以上的大特征尺寸器件,选用抗辐射器件,EDAC、TMR等
B	/	参照A级 采用类似器件的SEE试验数据开展系统架构
C	/	参照B级 运用历史试验数据,采用SEE失效/故障模型推算SEE失效/故障

最为敏感,分别是RAM、微处理器和FPGA。器件级SEE试验的优点在于可以识别不同的SEE类型。不论何种效应,若在受试器件中出现,会影响翻转错误数的计算,因此识别不同的SEE

类型非常重要。在板级试验中,如果某一器件发生了SEFI,可能会导致整块试验板功能失效,此种效应的传递就如故障从一个器件传递至另一个器件,而在器件级SEE试验中,故障的传

递效应是无法检测出来的。

2.3 试验方法

试验方法取决于试验器件和试验工具,包括单个器件的试验夹具或实际的航空用电路板。若要测试RAM、微控制器或FPGA,则需识别受试器件和试验夹具发生SEE的类型。为了识别SEL,需要监测电流。多数情况下,锁定状态的结果会导致电流的增加。SEFI的出现,使得动态随机存取存储器(DRAM)、微控制器或FPGA这类器件的试验更加困难。为了监测SEFI,器件或评估板中运行的测试程序应具有检测的能力,通常使用器件的评估板需在各种模式下工作,以识别不同类型的错误。SEE试验设计方法可从许多报道SEFI试验结果的文章中获得^[9-10]。

整块板子或系统的SEE试验更加复杂,试验板上器件的SEE会相互影响,测试是动态的,某一器件的单个故障会传递给其他器件,导致板子功能失效。由于板子上的所有器件在同一时间内接受照射,这种试验的现实意义更大。但是只有经过仔细分析,深入理解SEE机理后,才能开展板级SEE试验。

2.4 试验程序

在参考重离子、质子和中子SEE试验报告的基础上,提出中子SEE试验程序。由于试验过程中会引入总剂量效应和位移损伤效应,因此试验前应进行样品准备及抗总剂量效应能力和位移损伤效应能力的评估,在评估通过的条件下开展中子SEE辐照试验,具体试验流程如图1所示。

确定试验流程后,对航电系统的关键器件进行静态和动态试验,试验流程如图2所示。

2.5 评估方法

利用地面中子试验所获得器件的SEE数据可以预估航电系统的单粒子翻转率(SEE rates)。预估公式如式(1)所示。

$$\text{器件单粒子翻转率} = \text{Flux} \times \sigma \quad (1)$$

其中,Flux为大气中子注量率($\text{n}/\text{cm}^2 \cdot \text{h}$),

σ 为SEE截面积(cm^2)。

式(1)中的Flux可以采用中子注量率的国际典型值 $6000\text{n}/\text{cm}^2\cdot\text{h}$,因此

$$\text{器件单粒子翻转率} = 6000 \times \sigma \quad (2)$$

如果评估航电系统的单粒子效应概率,则可将对中子SEE敏感器件的 σ 按照航电系统的架构构成组合计算而得。将航电系统的 σ 值代入公式(1)或公式(2)即可获得航电系统的单粒子翻转率。

3 航电系统SEE的防护设计

为了实现航电系统的高可靠性,国际上已明确提出在可靠性设计中应考虑中子SEE的危害。ARP4754根据航电系统的重要程度将其定义为A、B、C、D、E级,各等级的可靠性要求不同,失效后果和需控制的概率如表1所示。

由于中子辐射诱发复杂航电系统SEE是一种瞬态效应,具有随机性,其潜在危害的防护目前仅需在A、B和C级中考虑。系统工程师可根据系统架构防护设计流程,优化系统设计,使中子SEE对复杂航电系统的影响降低到可接受的水平。

为获得高置信度的系统可靠性,国际上制定了一系列规范强制定义了防护设计过程和原则,以识别、减少设计错误,并能提供恰当的反馈以确保持续的闭环开发过程。防护过程可能涉及到顶层项目管理至器件控制各个层面,防护设计需在多个防护过程共同推进下才能保证系统的可靠性,不同防护过程的设计原则如表2所示。

中子SEE的防护设计主要是采取减缓措施,是一种故障探测与纠正的过程。在防护设计中需要恰当地考虑系统架构、架构中的特殊电子设备、设备中的组件和器件三个方面的SEE问题,不同等级不同故障类别的防护设计方法略有不同,如表3所示。

4 结束语

本文通过调研国外中子SEE对航电系统的危害案例,总结了航电系统中子SEE研究发展历程,分别从SEE试验中使用的辐射中子源、试验硬件、试验方法、试验程序以及评估方法五个方面阐述了航电系统SEE试验评价方法,掌握了国外大型军用运输机中子SEE的试验评价思路。为了实现航电系统的高可靠性,归纳总结了顶层项目管理至元器件控制各个层面的设计防护原则,给出了针对A、B和C级的防护设计方法及防护设计流程。中子诱发的SEE严重降低了航电系统的可靠性,应将其列为影响复杂航电系统安全的重要环境危害。

AST

参考文献

- [1] IEC/TS 62396 Part1-2006, Process management for avionics-Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionics electronic equipment[S].
- [2] Ken Vranish, KVA Engineering. Atmospheric Radiation Effects Whitepaper: The Growing Impact of Atmospheric Radiation Effects on Semiconductor Devices and the Associated Impact on Avionics Suppliers[EB/OL]. 2007. http://www.kva-engineering.com/pdf/SEU.Whitepaper_FAA_Con.pdf.
- [3] Effects of Neutrons on programmable logic[EB/OL].2002. <http://www.actel.com/documents/SERWP.pdf>
- [4] 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

[5] A. Taber and E. Normand. 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>

[6] Dr. Eugene Normand, "Single Event Effects in Avionics; Presented to C-17 Program[EB/OL]. 1998.<http://www.solarstorms.org/SEUavionics.pdf>

[7] Dr. Eugene Normand. "Radiation Effects in Spacecraft and Aircraft[EB/OL]. 2000. http://www.esa-spaceweather.net/spweather/workshops/SPW_WS/PROCEEDINGS_W3/Solspal.pdf

[8] Neutrons atmosphériques en avionique[EB/OL]. Présentation au RIS le 20/11/2002. <http://www2.laas.fr/RIS/Ateliers/NATP/03-Colas.pdf>

[9] IROM, F., Farmanesh, 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.

[10] HADDAD, N., Brown, R., Ferguson, R., et al, SOI: Is it the Solution to Commercial Product SEU Sensitivity[J]. proceedings of RADECS 2003 Conference, 2003:231-234.

作者简介

王群勇,研究员,主要从事微电子失效分析和可靠性技术研究。

刘燕芳,硕士,主要从事微电子失效分析和可靠性技术研究。