航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Jun. 15 2018 Vol. 29 No.06 07-14

民用航空发动机适航审定对单粒子效应的考虑

綦蕾*，周燕佩

中国民用航空适航审定中心，北京 100102

摘　要：大气中子环境单粒子效应（SEE）对航空发动机电子设备的影响与飞行安全息息相关。随着集成电路组件几何尺寸的逐渐减小、飞机飞行高度的不断增加以及越来越多的飞行航线经过极地，航空发动机电子控制（EEC）系统对大气环境中子的敏感性也随之增大。本文主要总结了航空电子领域单粒子效应的研究历程和现状，阐述了民用航空局方对航空发动机适航审定中单粒子效应影响的立场，可为民用航空发动机控制技术研究、民用航空发动机适航审定中考虑单粒子效应的影响提供一定的指导。

关键词：大气辐射；单粒子翻转；单粒子效应；航空发动机；适航审定

中图分类号：V233.7　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2018.06.007

20 世纪 80 年代末，大气中子环境引起的单粒子效应（Single Event Effect，SEE）对航空器系统电子设备在空中的影响已被人们所发现并引起重视。单粒子效应是指集成电路 PN 结受到高能粒子碰撞，发生逻辑状态翻转或电路失效导致系统故障的现象[1]，它得名于单个粒子的作用就可以产生这种效应。电子发动机控制系统对大气环境中的中子具有一定敏感性，大气中子可能改变电子发动机控制系统中数字存储电路或其他数字电路的状态，如果状态的变化未被探测并及时修正或防护，有可能导致发动机系统功能失常，从而影响飞行安全。

随着电子技术的不断进步，电子设备朝着更小的特征尺寸、更高的密度、更低的电压值趋势发展，因此，对大气辐射环境的敏感度更高；内存的位数和寄存器数量均显著增加；同时，更高效的航空器设计使得飞行高度不断增加，且越来越多的飞行航线经过极地。上述几方面原因共同导致航空电子系统受单粒子效应影响的风险也随之增大。为此，国外先进民用航空发动机厂商已经在发动机电子控制系统设计、安全分析及试验验证过程中考虑了大气中子引起的单粒子效应影响；美国联邦航空局（FAA）和欧洲航空安全局（EASA）已在民用航空发动机适航审定中明确提出了考虑单粒子效应的要求。

本文主要总结了航空电子领域单粒子效应的国内外研究现状，阐述了民用航空局方对航空发动机适航审定中单粒子效应影响的立场，强调了在发展民用航空发动机控制技术、开展民用航空发动机适航审定时考虑单粒子效应影响的必要性。

1 国内外研究现状

单粒子效应最早发现于航天领域。1962 年，Walkmark 首次提出了单粒子效应中的单粒子翻转（SEU）现象[2]。1975 年，Binder 等首次研究了应用卫星系统中出现的单粒子效应[3]。1978—1980 年，Pickel 和 Blandford 通过对某卫星的电子学异常现象的系统分析，进一步确定了故障本身是由单粒子效应引起的[4, 5]。人们逐渐认识到单粒子效应是影响航天器可靠性和运行寿命的重要因素，据美国国家地理物理数据中心统计，1971—1986 年，美国发射的 39 颗同步卫星，由于各种辐射效应引起的故障占故障总数的 71%，其中仅单粒子翻转引起的故障就占故障总数的 39%[6, 7]。为此，国内外在航天领域的单粒子效应机理、故障模式与特性、模拟方法、试验方法及其防护技术等方面开展了大量的研究工

收稿日期：2018-01-31；　退修日期：2018-05-03；　录用日期：2018-05-23

* 通信作者 . Tel.：010-58172961　E-mail：qilei_acc@caac.gov.cn

引用格式：Qi Lei , Zhou Yanpei. Single event effect in airworthiness certification of civil aircraft engines[J]. Aeronautical Science & Technology, 2018, 29 (06)：07-14. 綦蕾,周燕佩 . 民用航空发动机适航审定对单粒子效应的考虑 [J]. 航空科学技术, 2018, 29 (06)：07-14.

作，并已取得一系列重要成果[8~18]。

单粒子效应在航空领域的研究相对较晚。20 世纪 80 年代开始出现航空电子设备发生单粒子翻转事件的报道[19, 20]。1992 年，Normand 和 Taber 在飞行中的静态随机存取存储器（SRAMs）中记录了单粒子翻转现象的发生[21]。1988—1989 年，IBM 公司在三个不同的航空器上进行了专门的飞行试验，发现在 64k 大数组 SRAMs 中发生翻转现象。随后由美国国防核机构（DNA）和海军研究实验室（NRL）发起，IBM 公司与波音公司联合进行了研究，专门收集实际航班在飞行中的翻转数据以及军用飞机飞行计算机中的翻转记录，这项研究证实了航空电子设备中确实存在单粒子翻转，并且发现飞行中单粒子翻转发生概率与大气中子通量相关[22]。之后，Normand 等研究了单粒子效应与航空电子设备的使用高度、纬度等环境因素的关系，并建立了单粒子效应翻转的模型[23~29]。国内在航空发动机电子控制系统单粒子效应研究方面，目前仍处于起步阶段。

2 单粒子效应的基本原理

2.1 大气辐射环境

在大气辐射环境中，影响电子设备的高能粒子主要有中子、质子和重离子。重离子通常存在于天然宇宙射线或太阳耀斑中，它的带电量较多，主要通过电离效应直接产生电子－空穴对。质子的带电量少，它一般不能直接引起单粒子效应，而是通过与半导体材料的核反应，通过二次过程在敏感区内产生足够大的能量沉积，进而引发单粒子效应。中子主要存在于地球大气层以内，它产生于空间高能质子进入大气层后与氮和氧等原子相互作用产生的二次辐射粒子；中子的单粒子效应也不是以直接引起单粒子效应为主，而是通过中子次级过程产生重离子，进而通过电离效应产生电子－空穴对[1]。研究发现，大气中子是引起航空电子设备高空单粒子效应的最主要因素[21]。

1992 年，IBM 公司的研究证实，飞行中的航空电子设备发生 SEU 的概率主要取决于大气中子通量密度大小[22]，而影响中子通量密度大小的三个最重要的参数为：海拔高度、地球纬度和中子能量[25]，这三个参数与中子通量的关系被引用最多的是 Normand 定义的大气中子分布简化模型，如图 1~ 图 3 所示。

图 1 给出了 Normand 试验测得的中子通量随高度的变化关系[21]。图中显示，中子通量大约在 18.288km 高度时达

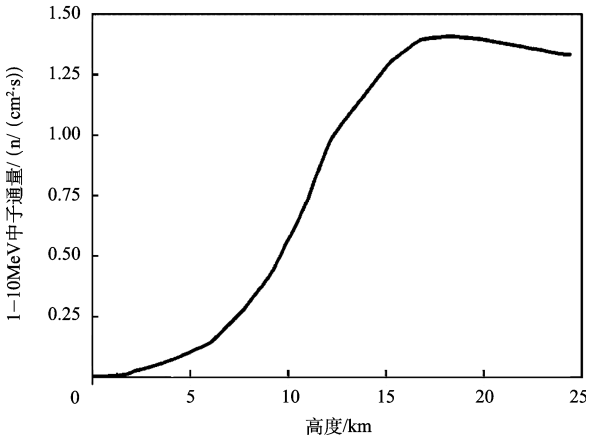

图 1 大气中子通量随高度变化简化模型

Fig.1 Simplified model of atmospheric neutron flux variation with altitude

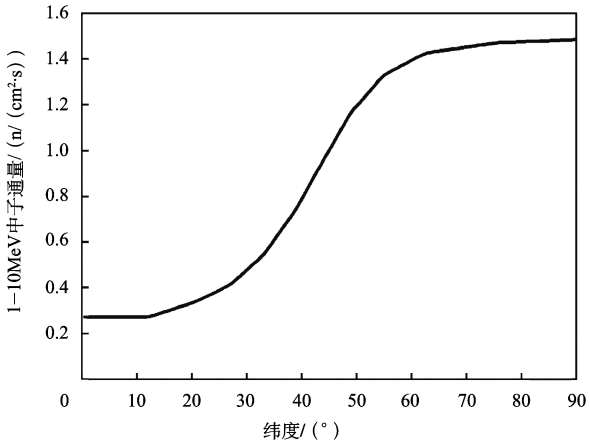

图 2 大气中子通量随纬度变化简化模型

Fig.2 Simplified model of atmospheric neutron flux variation with latitude

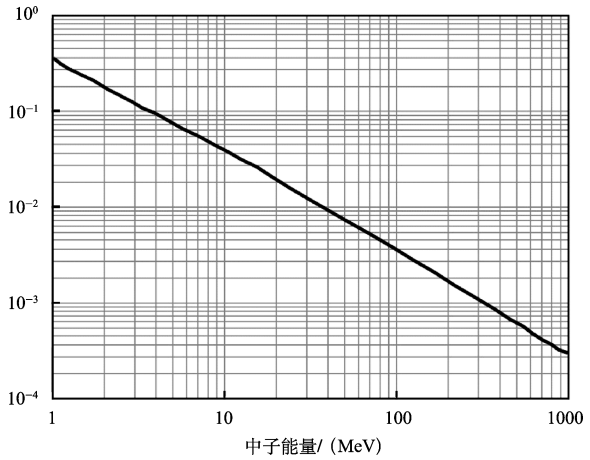

图 3 大气中子平均差分通量能谱图

Fig.3 Spectrum of average differential atmosphere neutron flux

到最大值，该值被称为“Pfotzer 最大值”。当前典型商用飞机的飞行高度可达 12.192km，这一高度上的通量密度比海平面的通量密度高 300~450 倍，因此，高空单粒子效应对航空设备的影响远大于海平面条件。

地球纬度也对大气中子通量大小有重要影响，该影响来自于地球磁场作用导致的粒子运行轨迹的偏转。图 2 为 Normand 试验测得的中子通量随纬度的变化关系[21]。图中显示，高纬度极地附近的中子通量大小是赤道附近的近 6 倍。

除了高度和纬度之外，大气辐射水平还取决于中子的能量大小，图 3 给出了 Hewitt 等[19] 测得的大气中子平均差分通量能谱图（即中子平均差分通量与中子能量的函数关系）。太阳活动会影响中子能量大小，在低太阳活动周期，大气中产生的二次中子较少；在高太阳活动周期（如发生大型太阳耀斑），大气中产生大量的高能太阳粒子，导致单粒子效应发生率增加，由于该现象的发生概率极小，因此相对于高度和纬度影响，太阳活动的影响很小。

除图 1~ 图 3 定义的大气中子分布简化模型外，Wilson 等还提出了一个更精确的模型，称为 Wilson–Nealy 模型[30]。该模型不把纬度和高度视为独立因素进行考虑，而是采用大气深度和刚度截止描述大气中子的分布，其中大气深度是高度的函数，刚度截止是纬度的函数；同时，Wilson–Nealy 模型还考虑了太阳活动对大气中子通量的影响。

2.2 单粒子效应的类型

航空电子设备中单粒子效应的产生机理是，大气中子与微电子设备或集成电路中的硅材料相互作用，并向周围的原子释放电离能量进而转换为额外的电荷，电荷被附近的电极收集产生瞬态电流，导致设备中相关数位的逻辑状态发生改变。由于随机存取存储器（RAM）微电子设备包含最大数量的字节，最易于发生翻转，因此在航空电子设备中，单粒子效应主要关注的是 RAM，包括静态随机存取存储器（SRAM）和动态随机存取存储器（DRAM）。

单粒子效应具有不同的类型，导致电子系统发生不同的失效模式。目前发现的最常见的单粒子效应类型见表 1[31]。在单粒子栅穿或单粒子烧毁的情况下，可能导致硬件的损坏，其他大多数时候单粒子效应的影响并非破坏性的。研究发现，单粒子翻转是单粒子效应中最常发生的类型。

表 1　单粒子效应的类型
Table 1　SEE types

单粒子效应类型	电路响应
单粒子翻转（SEU）	高能粒子的能量沉积导致设备的存储和锁定状态发生改变
多位翻转（MBU）	单个电离粒子引起的电子元件硅材料能量沉积，导致相同逻辑代码的多位翻转
多单元翻转（MCU）	单个电离粒子引起的电子元件硅材料能量沉积，导致集成电路中若干位同时失效
单粒子锁定（SEL）	由单粒子诱导的高电流状态，导致设备的功能或控制损失。可能造成永久性损坏，未损坏时应使集成电路返回到正常工作状态
单粒子脉冲（SET）	一个周期内通过电路的虚假的信号或电压传送
单粒子功能中断（SEFI）	复杂设备中单粒子翻转破坏了控制路径，导致集成电路中正常功能被终止
单粒子栅穿（SEGR）	在功率 MOSFETs（金属氧化物半导体场效应晶体管）中，单粒子诱导引起栅氧化物中形成导电路径
单粒子烧毁（SEB）	在功率晶体管中，单粒子诱导的高电流状态导致设备的损坏

3 当前工业标准和分析方法

国际上一些标准协会制定了一系列 SEE 有关的工业规范和技术标准。如国际电子技术委员会（IETC）的 IEC TS/62396（第 1~5 部）技术规范，该规范中给出了航空器电子设备可能遭遇的电离辐射环境类型、大气中子诱导航空电子设备单粒子效应的敏感度测试方法、辐射环境对电子设备的潜在影响以及处理这些影响的方法等[32~35]。固态技术协会（JEDEC）也有 SEE 试验有关的标准，如加速光束的软错误率测试方法的技术标准 JESD89–A、实时软错误率测试方法的技术标准 JESD89–1A[36]。

汽车工程师协会（SAE）给出了大气中子单粒子效应分析流程的建议，用于在系统安全评估过程中嵌入对 SEE 的评估过程，如图 4 所示[31]。目前，SAE 已成立专门的工作组，讨论和编写《大气中子单粒子效应分析在安全评估中的应用》（SAE AIR 6219）标准，将建议的单粒子效应分析流程纳入系统安全分析过程，为评估航空电子系统的中子单粒子效应提供指导。

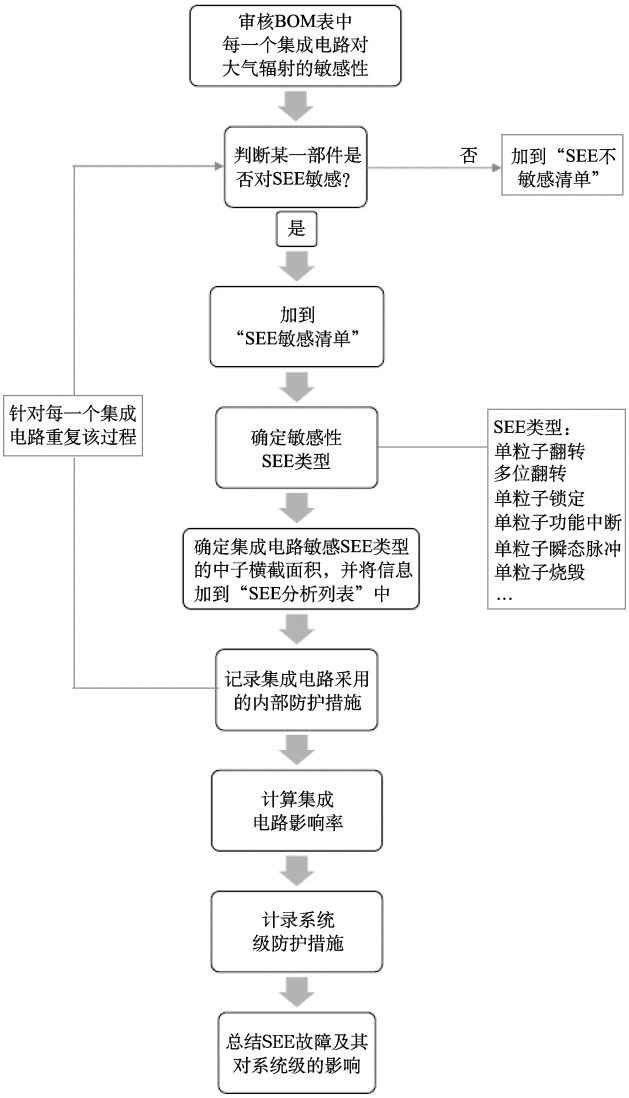

图 4 SEE 分析过程

Fig.4 SEE analysis process flow

4 单粒子效应防护技术

单粒子效应防护设计包括单粒子效应故障检测和单粒子效应加固设计两个方面。故障检测结合高效的故障修复、隔离等措施可以提高部件的抗单粒子效应能力，而单粒子效应加固设计可以对单粒子效应故障起到过滤和减缓的作用，降低单粒子效应产生部件功能故障的概率[1]。单粒子效应的防护技术都会带来相应的不利影响，如运行速度的延迟、尺寸或重量（质量）的增加、电源的超负荷等；并且不存在一个适用于所有对象、所有类型的单粒子效应防护手段，防护技术的选择和有效性主要依赖于单粒子效应的类型、需要防护的部件或系统功能。因此，单粒子效应的防护技术是用于平衡安全性目标和不利影响的多种防护设计类型的组合。防护设计的合理性最终需要经过系统安全分析结果进行判定，如果不满足安全性目标，则需要重新进行防护设计[37]。

当前航空电子系统中单粒子效应防护技术主要分为三类，即布局技术（如布局晶体管、防护环、沟槽隔离等）、电路技术（如加固单元设计、双余度或三余度模块化冗余、纠错编码等）、昂贵的技术变革（如半导体材料的改进等）。由于当前航空市场的规模还不足以接受昂贵技术变革所需要的成本，因此第三类技术目前使用的较少。第一类和第二类又包括增强抗辐射技术、冗余防护技术、内存块保护技术、可重新编程的现场可编程门阵列（FPGA）技术、可容错专用集成电路（ASIC）设计技术等，具体可参见 FAA 发布的《单粒子效应防护技术报告》（DOT/FAA/TC-15/62）[37]。

以某型民用运输飞机用的航空涡扇发动机为例，其电子控制系统包括电子控制器单元（EECU）、数据存储单元（DSU）和健康监测单元（HMU），设计人员分别从电子硬件方面和软件方面对这些控制系统单元进行了单粒子效应的防护设计。电子硬件的防护策略如下：

（1）对 SEE 不敏感的电子元器件进行配置。如 PLD 和 FPGA 配置逻辑采用对 SEU 不敏感的 Flash 技术。

（2）处理器和存储器设计选择具备“错误探测和纠正”（EDAC）保护的芯片，EDAC 提供单位错误纠正和双位错误探测功能。如访问存有操作系统软件代码的闪存时，闪存将被检查。

（3）缓存设计具备实时“奇偶校验保护”。缓存使用“直写”模式，使得写入内部和外部 RAM 的数据一致，当奇偶校验出错时，使得缓存无效，CPU 从程序闪存或内部 / 外部 RAM 中重新读取数据。

（4）采用纠错编码（ECC）进行保护。

软件的防护策略如下：

（1）对于某些外部存储器和处理器，采用“循环冗余编码（CRC）”校验数据的完整性，如果检测到故障，则重新初始化。

（2）在应用软件（AS）和操作系统软件（OSS）中使用“分块检查字符”。存储过程中根据存储的数据计算出校验码并和数据一起存储，之后在每次读取时进行数据有效性的确认，如果检查发现数据无效，则不使用该数据。

（3）在应用软件（AS）和操作系统软件（OSS）中使用“写后读”的校验功能，在写完数据后读取数据进行验证，

如果读取的数据与写入的数据不匹配，则视为系统故障并记录。

其中，EECU 和 HMU 采用了对 SEE 不敏感的电子元器件配置，电子硬件采用了 EDAC 保护、奇偶校验保护、ECC 保护等防护策略；EECU 的软件采用分块检查字符、写后读校验等防护策略；HMU 的软件则采用了 CRC 校验的方式等进行防护；DSU 的电子硬件没有采用上述防护设计，仅软件采用分块检查字符、写后读校验等进行防护。

5 适航审定

FAA 在其发动机适航审定重点关注问题清单[38]中，明确提出需考虑大气中子敏感性的安全性影响。在航空发动机适航审定过程中，当发动机 EEC 系统有可能对大气中子单粒子效应敏感时，FAA 通过签署问题纪要的方式，提出单粒子效应适用的 14 CFR 33 部条款要求，与申请人讨论并确定相应的符合性方法以表明对纪要中要求的符合性。如在已取证的 LEAP-1A、LEAP-1B、PW1100G-JM 等系列航空涡扇发动机适航审定中，FAA 均通过问题纪要与申请人确定了单粒子效应相关的适航要求和符合性验证思路。

EASA 通常不在问题纪要中直接提出考虑单粒子效应的要求，而是通过签署问题纪要的方式，间接引用包括单粒子效应要求在内的《机载电子硬件开发保证》（EASA CM-SWCEH-001）审定备忘录[39]和《软件方面的审定》（EASA CM-SWCEH-002）审定备忘录[40]，要求申请人在表明对发动机复杂电子硬件和软件的符合性时，考虑和解决单粒子效应对机载电子硬件的影响和飞机 / 发动机级潜在的安全性影响。复杂电子硬件的审定备忘录中提出，针对申请人采用与系统架构和分配 DAL/FDAL 相关的“自上而下”法，针对系统 / 设备供应商采用元件级防护设计相关的“自下而上”法。软件的审定备忘录则提出，在程序的执行过程中需要考虑单粒子翻转引起意外堆栈溢出的潜在风险。如 Arriel 2E 涡轴发动机适航审定中，在表明对控制系统适航要求的符合性时，均考虑了单粒子效应的安全性影响。

在表明对航空发动机适航规章 33 部第 33.28 条发动机控制系统的符合性，尤其是对于 33.28（d）条发动机控制系统失效和 33.28（e）条系统安全评估的符合性时，申请人需考虑电子元器件对大气中子的敏感性，将单粒子效应的分析流程纳入系统安全评估过程，以验证：（1）失去推力（或功率）控制（LOTC/LOPC）事件的发生率与预期应用的安全目标一致；（2）对于 LOTC/LOPC 事件相关的电子和电气的失效，系统能容忍“单点故障”；（3）发动机控制系统部件的单点失效不会导致危害性发动机后果。在控制系统安全评估中，需包含受大气中子影响可能导致的推力或功率改变、错误数据传输，或影响发动机工作特性从而产生喘振或失速的故障或失效，并确定这些故障或失效预期的发生频率。申请人还应记录发动机控制系统所实施的任何防护特征，并在安装手册中声明发动机控制系统安全评估中飞机级防护的相关假设，以明确对飞机级防护设计的要求。

虽然我国在航空发动机电子控制系统单粒子效应影响的研究方面仍处于起步阶段，但是在适航审定过程中仍然需要考虑单粒子效应的安全影响。在民用航空发动机型号合格审定中，审查方应对单粒子效应影响给予高度重视，明确提出考虑单粒子效应的适航要求；申请人应针对相关适航要求确定符合性验证思路并制定详细的符合性验证方案，如在控制系统安全分析中纳入单粒子效应的专门分析流程，以充分表明对相关适航要求的符合性。

6 结论

本文总结和梳理了国内外航空电子领域单粒子效应的研究现状，分析了民用航空发动机控制技术研究和适航审定中考虑单粒子效应的必要性。通过分析，可以得出以下结论：

（1）大气中子环境单粒子效应对民用航空发动机控制系统安全性有着十分重要的影响，相关设计人员在航空发动机电子控制系统研制过程中必须充分考虑单粒子效应这一影响因素。

（2）国内航空发动机相关企业应充分重视单粒子效应的影响，加强相关的基础研究和国际交流，对航空发动机中单粒子效应的基本机理、故障模式及类型、模拟手段、试验方法、安全分析和防护技术等开展系统和深入的研究。

（3）国内航空发动机相关企业应学习和借鉴国外已有的成熟工业标准，制定国内行业和企业的相关标准，建立单粒子效应设计、分析、试验和验证等方面的标准体系，为单粒子效应相关的研制和取证活动提供标准化的指导文件。

（4）在民用航空发动机适航审定中，审查方应明确提出考虑单粒子效应的适航要求；申请人应在控制系统安全分析中纳入单粒子效应的专门分析流程，包括集成电路大气辐射的敏感性分析、确定中子影响的敏感类型、计算集成电路的影响率、确定和记录集成电路防护措施、总结单粒子效应

故障和系统级影响等方面，为表明对相关适航要求的符合性提供充分的证据。

参考文献

[1] 王跃科，邢克飞，杨俊，等 . 空间电子仪器单粒子效应防护技术 [M]. 北京：国防工业出版社，2010.
Wang Yueke，Xing Kefei，Yang Jun，et al. Single event effect mitigation techniques for space electronic instrument [M]. Beijing：National Defense Industry Press，2010.（in Chinese）

[2] Walkmark J T，Marcus S M. Minimum size and maximum packing density of nonredundant semiconductor devices [J]. Proceedings of the IRE，1962，50（3）：286–298.

[3] Binder D，Smith E，Holman A. Satellite anomalies from galactic cosmic rays [J]. IEEE Transaction on Nuclear Science，1975，22（6）：2675–2680.

[4] Pickel J C，Blandford J T. Cosmic–Ray–Induced errors in MOS devices [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1980，27（2）：1006–1015.

[5] 刘必慰 . 集成电路单粒子效应建模与加固方法研究 [D]. 长沙：国防科技大学，2009.
Liu Biwei. Modeling and hardening of single event effect in integrate circuit [D].Changsha：National University of Defense Technology，2009.（in Chinese）

[6] 王长河 . 单粒子效应对卫星空间运行可靠性影响 [J]. 半导体情报，1998，35（1）：1–8.
Wang Changhe. The Influence with reliability of motional satellite by the single–event phenomena[J].Semiconductor Information，1998，35（1）：1–8.（in Chinese）

[7] 丁义刚 . 空间辐射环境单粒子效应研究 [J]. 航天器环境工程，2007，24（5）：283–290.
Ding Yigang. Single event effects in space radiation environment [J]. Spacecraft Environment Engineering，2007，24（5）：283–290.（in Chinese）

[8] 贺朝会，李永宏，杨海亮 . 单粒子效应辐射模拟实验研究进展 [J]. 核技术，2007，30（4）：347–351.
He Chaohui，Li Yonghong，Yang Hailiang. Progress in simulation experiments of single event effects [J]. Nuclear Techniques，2007，30（4）：347–351.（in Chinese）

[9] 刘必鎏，杨平会，蒋孟虎，等 . 航天器单粒子效应的防护研究 [J]. 航天器环境工程，2010，27（6）：693–698.
Liu Biliu，Yang Pinghui，Jiang Menghu，et al. The protection against single event effects for spacecraft[J]. Spacecraft Environment Engineering，2010，27（6）：693–698.（in Chinese）

[10] 薛玉雄，田恺，曹洲，等 . 激光模拟单粒子效应设备及试验研究进展综述 [J]. 航天器环境工程，2010，27（3）：304–312.
Xue Yuxiong，Tian Kai，Cao Zhou，et al. An overview of pulsed laser simulation facility for single event effects and testing [J]. Spacecraft Environment Engineering，2010，27（3）：304–312.（in Chinese）

[11] 宋凝芳，秦姣梅，潘雄，等 . SRAM 型 FPGA 单粒子效应逐位故障注入方法 [J]. 北京航空航天大学学报，2012，38（10）：1285–1289.
Song Ningfang，Qin Jiaomei，Pan Xiong，et al. Evaluating SEU effects in SRAM–based FPGA with bit–by–bit upset fault injection [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2012，38（10）：1285–1289.（in Chinese）

[12] 杜守刚，范隆，岳素格，等 . SRAM 型 FPGA 单粒子效应敏感性分析研究 [J]. 核电子学与探测技术，2012，32（3）：272–278.
Du Shougang，Fan Long，Yue Suge，et al. Study the single event effect sensitivity of SRAM–based FPGA [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology，2012，32（3）：272–278.（in Chinese）

[13] 王忠明 . SRAM 型 FPGA 的单粒子效应评估技术研究 [D]. 北京：清华大学，2011.
Wang Zhongming. Techniques for evaluating single–event effect in SRAM–based FPGA [D]. Beijing：Tsinghua University，2011.（in Chinese）

[14] 周婉婷，靳丽娜，叶世旺 . 单粒子瞬态效应硬件注入模型实现和仿真 [J]. 微电子学与计算机，2014，31（9）：84–87.
Zhou Wanting，Jin Lina，Ye Shiwang. A single event transient fault injection model for emulation [J]. Microelectronics & Computer，2014，31（9）：84–87.（in Chinese）

[15] 刘健波，刘远，恩云飞，等 . 集成电路单粒子瞬态效应与测试方法 [J]. 微电子学，2014，44（1）：135–140.
Liu Jianbo，Liu Yuan，En Yunfei，et al. Single event transients in integrated circuits and test methods [J]. Microelectronics，2014，44（1）：135–140.（in Chinese）

[16] 肖尧 . 郭红霞，张凤祁，等 . 累积剂量影响静态随机存储器单粒子效应敏感性研究 [J]. 物理学报，2014，63（1）：1–6.

Xiao Yao，Guo Hongxia，Zhang Fengqi，et al. Synergistic effects of total ionizing dose on the single event effect sensitivity of static random access memory [J]. Acta Physica Sinica，2014，63（1）：1-6.（in Chinese）

[17] 杨善潮，齐超，刘岩，等．中子单粒子效应研究现状及进展 [J]. 强激光与粒子束，2015，27（11）：1-7.
Yang Shanchao，Qi Chao，Liu Yan，et al. Review of neutron induced single event effects on semiconductor devices [J]. High Power Laser and Particle Beams，2015，27（11）：1-7.（in Chinese）

[18] Hewitt J，Hughes J，Baum J W，et al. Ames collaborative study of cosmic ray neutrons：mid-latitude flights [J]. Health Physics，1978，34（4）：375.

[19] May H. A new enemy：Homotrons[R]. IFALPA，1980.

[20] Taber A，Normand E. Single event upset in avionics [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1993，40（2）：120-126.

[21] IBM. Investigation and characterization of SEU effects and hardening strategies in avionics [R]. IBM Report 92-L75-020-2，1995.

[22] Normand E，Baker T J. Altitude and latitude variations in avionics SEU and atmospheric neutron flux [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1996，40（6）：1484-1490.

[23] Normand E，Oberg D L，Wert J L，et al. Single Event Upset and charge collection measurements using high energy protons and neutrons [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1994，41（6）：2203-2209.

[24] Normand E. Single-event effects in avionics [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1996，43（2）：461-474.

[25] Normand E. Extensions of the burst generation ate method for wider application to proton/neutron-induced single event effects [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，1998，45（6）：2904-2914.

[26] Normand E. Correlation of inflight neutron dosimeter and seu measurements with atmospheric neutron model [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，2001，48（6）：1996-2003.

[27] Normand E. Extensions of the FOM method：Proton SEL and extensions of the FOM method：Proton SEL and atmospheric neutron SEU [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，2004，51（6）：3494-3504.

[28] Normand E，Vranish V，Sheets A，et al. Quantifying the double-sided neutron SEU threat，from low energy（thermal）and high energy（>10MeV）neutrons [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science，2006，53（6）：3587-3595.

[29] Wilson J W，Townsend L W，Schimmerling W，et al. Radiation safety in the earth's atmosphere [R]. NASA RP-1257，Transport Methods and Interactions for Space Radiations，1991.

[30] Dion M，Dominik L. Incorporation of atmospheric neutron single event effects analysis into a system safety assessment [J]. Arthritis & Rheumatology，2011，4（2）：619-632.

[31] IEC/TC-62396-1 Process management for avionics：Atmospheric radiation effects：Part 1 Accommodation of atmospheric radiation effects via single event effects within avionics electronic equipment [S]. IETC，2006.

[32] IEC/TC-62396 Guidelines for single event effects testing for avionics systems process management for avionics [S]. IETC，2008.

[33] IEC/TC-62396 Optimising system design to accommodate the Single Event Effects（SEE）of atmospheric radiation [S]. IETC，2008.

[34] IEC/TC-62396 Guidelines for designing with high voltage aircraft electronics and potential single event effects [S]. IETC，2008.

[35] IEC/TC-62396 Guidelines for assessing thermal neutron fluxes and effects in avionics systems [S]. IETC，2008.

[36] JESD89A Measurement and report of alpha particle and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductor devices [S]. JEDEC，2006.

[37] Mutuel L H. Single event effects mitigation techniques report [R]. DOT/FAA/TC-15/62，2016.

[38] FAA. Engine & propeller issues list[Z]. FAA，2017.

[39] CM-SWCEH-001 Development assurance of airborne electronic hardware[S]. EASA，2012.

[40] CM-SWCEH-002 Software aspects of certification [S]. EASA，2012.

作者简介

綦蕾（1981- ）女，博士，高级工程师。主要研究方向：民用航空发动机适航审定。

Tel：010-58172961

E-mail：qilei_acc@caac.gov.cn

Single Event Effect in Airworthiness Certification of Civil Aircraft Engines

Qi Lei*, Zhou Yanpei

Airworthiness Certification Center, CAAC, Beijing 100102, China

Abstract: Atmospheric Neutron Single Event Effect (SEE) are widely known to cause failures in avionics equipment, and influence flight safety. The risk of SEE in Electronic Engine Control (EEC) system is increasing, due to the decreasing size of integrated circuit components, flight at increasing altitudes for better efficiency, and more common flight over the Earth's poles. The paper summarized the previous research history and current research status of SEE. It pointed out the positions of civil aviation authorities to SEE in airworthiness certification of civil aircraft engines. It can provide certain guidance in considering SEE effect during the development of civil aviation engine control technology and engine airworthiness certification.

Key Words: atmospheric radiation; Single Event Upsets; Single Event Effect; aircraft engine; airworthiness certification

Received: 2018-01-31; **Revised:** 2018-05-03; **Accepted:** 2018-05-23

***Corresponding author.Tel.:** 010-58172961 **E-mail:** qilei_acc@caac.gov.cn