

低空飞行器的 μ 子单粒子效应风险评估

邱子健 林苏杰 崔昱东 刘奕含 杨莉莉[†]

(中山大学物理与天文学院, 珠海 519082)

(2025 年 10 月 23 日收到; 2025 年 11 月 14 日收到修改稿)

随着低空经济的快速发展, 无人机、电动垂直起降飞行器 (eVTOL) 等低空飞行器的辐射环境安全问题日益凸显. 传统研究多聚焦于中子、质子等粒子的影响, 而对 μ 子诱发的单粒子效应 (SEE) 风险, 尤其是在极端太阳事件下的影响, 尚缺乏系统评估. 本文采用本地化大气模型, 利用 CORSIKA 蒙特卡罗程序模拟了不同城市上空的大气簇射过程, 并结合其他先进半导体器件的电子学模拟工作, 量化评估了我国不同地区低空飞行器在静态宇宙射线背景及地面增强事件 (GLE) 下的 μ 子 SEE 风险. 结果表明, 在静态情况下, 采用先进制程 (≤ 45 nm) 体硅 (bulk) 工艺芯片的飞控系统 (1 MB 内存) 在我国所有城市均面临不可忽视的 μ 子 SEE 风险; 相比之下, 采用全耗尽硅绝缘体 (FD-SOI) 晶体管的系统则能有效规避该风险. 而对于内存较大的系统 (1 GB), 无论选用何种工艺, 都必须采用冗余等加固措施. 针对地面增强事件 (GLE), 本文创新性地提出了 μ 子危害等级概念以评估区域风险差异, 结果显示, GLE 期间, 中低纬度地区的 μ 子 SEE 风险加剧可忽略, 但高纬度地区风险显著增加.

关键词: 单粒子效应, 低空飞行器, μ 子, 地面增强事件

DOI: 10.7498/aps.75.20251448

CSTR: 32037.14.aps.75.20251448

1 引言

长期以来, 学界普遍认为浓密的低层大气可有效屏蔽宇宙线辐射. 因此宇宙线和太阳风粒子的辐射危害研究主要集中于航天航空领域, 对低空飞行场景下的相关风险关注较少. 高能粒子 ($E > 1$ GeV) 在穿透大气层时会与大气原子核发生相互作用, 通过大气簇射过程产生大量的 μ 子、质子、电子、中子和重离子等次级粒子. 这些次级粒子 ($E > 1$ MeV) 的通量远高于原初宇宙线粒子, 在撞击电子器件内部时会沉积电荷, 进而引发器件功能异常或损坏. 这种由单个粒子撞击引起的电子系统异常的现象被称为单粒子效应 (single event effect, SEE), 目前已被确认为影响商用电子系统可靠性的主要问题^[1].

近年来, 随着无人机物流、低空观光飞行器等设备的普及, 在高度 3 km 以下运行的低空飞行器

数量呈爆发式增长. 得益于集成电路技术的进步, 这些飞行器通常配备了精密的电子系统, 有效降低了体积和能耗. 然而, 伴随着晶体管制程的缩小, 改变晶体管状态所需的最小沉积电荷量 (即临界电荷) 也随之减小. 这使得像 μ 子这样能量沉积率不高的粒子也能引发 SEE, 该现象已由 μ 子束流辐射实验所验证^[2,3], 且其影响随着工艺节点的缩小而加剧^[2]. μ 子是海平面附近数量最多的带电粒子. 多项电子学模拟研究表明, 在海平面附近, 当晶体管制程小于 45 nm 时, μ 子可能会成为其 SEE 的主要来源^[4,5]. 因此, 研究评估不同城市地区所面临的 μ 子 SEE 风险, 是保障低空交通运行安全, 促进低空经济发展的新兴议题.

SEE 电子学模拟评估的准确性在很大程度上依赖于对 μ 子流强的精确估计, 尤其是在 MeV 能量范围内的 μ 子能谱^[6,7]. 目前, 大多数相关研究采用基于实测数据和蒙特卡罗模拟建立的解析辐射

[†] 通信作者. E-mail: yanglli5@mail.sysu.edu.cn

模型(如 QARM^[8,9] 和 PARAM^[10]) 来推算 μ 子的能量微分谱。

然而, 这些模型存在两方面局限. 首先, 这些模型对 μ 子的预测难以可靠地延展至 MeV 能段. 目前仅有少数实验在特定地区和海拔条件下测量了 1 GeV 以下的大气 μ 子微分谱^[11-14], 而在 400 MeV 以下仅有一个实验数据集^[14]. 在实验数据整体匮乏的 MeV 能段, 必须依赖物理模拟来预测次级 μ 子能谱. 然而, QARM 和 PARAM 等模型在蒙特卡罗模拟中未考虑不同地区大气模型的差异, 因此会在 μ 子 MeV 流强预测中引入系统偏差.

其次, 现有模型难以有效评估太阳活动期间 SEE 风险的升高情况. 在太阳活动期, 一些极端的太阳高能粒子 (solar energetic particle, SEP) 事件可将粒子加速至 GeV 以上能量, 进入地球大气后会产生延伸至地面的次级粒子簇射, 此类事件被称为地面增强事件 (ground level enhancement, GLE). GLE 产生的次级粒子最初由地面中子监测器探测到^[15]; 随后, 少数 μ 子探测实验也观测到 GLE 期间 μ 子流强的增长^[16,17]. 然而, 对于 MeV 能段的 μ 子, 目前尚无观测或模拟研究给出其在 GLE 期间的流强增长率.

为应对上述问题, 本文引入广延大气簇射模拟软件包 CORSIKA^[18], 通过系统模拟不同大气条件与太阳活动情景下的大气簇射过程, 全面估计 MeV 能段的 μ 子能谱, 从而为 μ 子 SEE 风险评估提供可靠的数据支持.

本文考虑了太阳平静期和活动期两种情况, 并针对不同城市配置了不同的大气模型, 进行了完整的蒙特卡罗模拟, 以评估低空飞行器在不同城市地区低空环境中所面临的 μ 子 SEE 风险. 本文结构安排如下: 第 2 节详细介绍低空 μ 子流强的蒙特卡罗模拟方法与验证; 第 3 节结合电子学模型, 评估不同城市与情景下的 μ 子 SEE 风险; 第 4 节对研究的不确定性与局限性进行讨论; 第 5 节总结全文.

2 低空 μ 子流强模拟

2.1 模拟设置

本文采用广延大气簇射四维模拟的软件包 CORSIKA^[18] (版本号 7.7500), 以获取低空环境下的 μ 子能量微分谱. CORSIKA 提供了多种强相互作用模型. 本文选用 EPOS-LHC^[19] 与 UrQMD^[20,21]

的组合模型进行模拟. EPOS-LHC 模型考虑了 LHC 对撞实验数据的约束, 被普遍用于高能宇宙线簇射的模拟工作^[22], 但在低能端 (<80 GeV) 不具有适用性. 因此, 低能端强相互作用模拟采用 UrQMD 模型进行替代. 高能与低能模型之间的转换阈值设置为默认值, 即 $E_{\text{Lab}} = 80 \text{ GeV}/n$ (n 为粒子核子数).

确定相互作用模型后, 模拟结果的不确定度主要来源于原初粒子注入谱和大气模型. 针对不同地区的大气模型, 本文选取中国境内几个不同气候类型的典型城市作为样本, 分别为深圳 (亚热带)、青岛 (中纬度沿海)、呼和浩特 (中纬度内陆) 和拉萨 (高原), 并选取北极点作为高辐射区域进行对比. 相关的经纬度和地磁场信息如表 A1 所列, 其中地磁场信息由第十四代国际地磁参考场 (IGRF) 计算得到^[23]. 需要注意的是, 由于各城市的平均海拔不同 (如表 A1), 同一海拔高度在不同城市中的实际距地高度有显著差异. 因此, 本文定义的低空环境指当地地面以上 3000 m 以内的区域.

2.2 原初粒子谱

地面 μ 子均源于高能粒子的大气簇射过程, 本文将入射大气层的粒子能量微分谱定义为原初粒子谱. 尽可能减小原初粒子谱的不确定度是提高模拟精度的关键. 本节介绍静态 (仅高能宇宙线注入) 和太阳活动期 (静态基础上叠加 SEP 注入) 两种情景下原初粒子谱的选取方式.

尽管宇宙线包含多种高能粒子, 为节省计算资源, 本文仅考虑贡献最大的 5 种元素: 氢 (H)、氦 (He)、碳 (C)、氧 (O)、铁 (Fe). 对于 SEP 注入, 仅考虑其主要成分质子. 针对不同的大气模型配置, 各原初粒子在不同能段的模拟数量如表 A2 所列, 每个能段内, 粒子能量按幂律谱 (谱指数为 -1.5) 抽样, 并通过为事例赋予权重的方式模拟目标能谱.

2.2.1 高能宇宙线能谱

国际空间站上的阿尔法磁谱仪 2 (AMS-02) 已精确测量 GeV—TeV 能段多种宇宙线粒子的能谱^[24]. 尽管太阳磁场对宇宙线存在调制效应, 且该效应随时间变化, 但对于能量足以产生次级粒子簇射的高能宇宙线, 太阳调制影响可忽略. 因此, 本文直接采用 AMS-02 的观测结果及其不确定度 (1σ) 作为 GeV—TeV 能段的原初宇宙线谱.

对于 TeV 以上能段, 空间卫星和地面观测实验均存在较大不确定度和系统偏差, 无法直接作为原初注入谱. Gassier 等^[25]在 2013 年的工作中考虑当时所有的高能观测实验, 基于简单的物理假设提出了高能宇宙线解析能谱模型. 该模型可以有效减小单一实验和真实能谱间的系统偏差, 故本研究采用 Gassier 模型作为高能端的原初注入谱(图 1). 由于 Gassier 模型未提供不确定度, 本文假设其相对误差为 30%(1 σ).

2.2.2 SEP 能谱

尽管 GLE 事件已被观测逾 50 年, 但太阳活动将质子加速至 GeV 能段的机制仍存争议. 因此, 本文采用基于观测数据的 SEP 能谱进行注入模拟. SEP 的 MeV 能谱通常由卫星直接观测, 而 GeV 以上能谱则主要依赖地面中子监测器间接观测. Tylka 和 Dietrich^[26]在 2009 年开发了分析全球中子监测网络数据的方法, 他们结合卫星和中子监测器数据, 推导了 1956 年至 2009 年间发生的 66 次

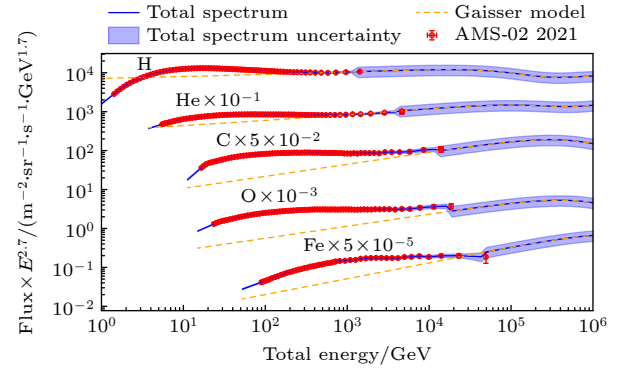


图 1 高能宇宙线的原初粒子谱. 蓝线和阴影区: 本文原初注入能谱及不确定性; 红点: AMS-02 数据; 橙色虚线: Gassier 模型. 所有非质子能谱均已缩放

Fig. 1. Primary cosmic ray spectra. Blue line/shade: primary injection spectrum & uncertainty (this work); red points: AMS-02 data; orange dashed line: Gassier model. All non-proton spectra are scaled.

GLE 事件中 53 次事件的积分质子能谱. 结果表明, GLE 事件期间注入大气层的 SEP 积分刚度谱可用双幂律函数(即 Band 函数^[27])描述:

$$J(> R) = \begin{cases} J_0 \left(\frac{R}{1 \text{GV}} \right)^{-\gamma_1} \exp\left(-\frac{R}{R_0}\right), & R < R_1, \\ J_0 \left(\frac{R_1}{1 \text{GV}} \right)^{-\gamma_1} \exp\left(-\frac{R_1}{R_0}\right) \left(\frac{R}{R_1} \right)^{-\gamma_2}, & R \geq R_1, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $J(> R)$ 表示刚度大于 R 的质子总通量; $R_1 = (\gamma_2 - \gamma_1)R_0$; $J_0, \gamma_1, \gamma_2, R_0$ 分别为积分谱的归一化系数, 两段幂律谱对应的谱指数和幂律转折处对应的刚度.

Raukunen 等^[28]在 2018 年的工作中采用相同方法, 拟合得到 1956—2012 年期间 59 次 GLE 事件的积分质子谱参数. 本文采用 Raukunen 等的结果作为 GLE 事件期间的 SEP 注入谱, 并假设粒子在 1800 s 的积分时间窗口内均匀入射. 需注意, SEP 能谱的方位依赖性和最大能量上限仍是未解问题. 本文假设 SEP 的能量上限为 100 GeV, 并将其角度分布简化为两种情况: 1) 各向同性注入; 2) 极端各向异性注入(粒子集中从天顶角 $< 20^\circ$ 方向注入). 第二种情况作为风险上限估计.

2.2.3 地磁屏蔽

地球磁场使带电粒子(如 SEP 和宇宙线)受洛伦兹力偏转和屏蔽, 导致到达近地空间的粒子

通量减小. 地磁屏蔽效果因地而异, 通常用截止刚度(cut-off rigidity, R_c)量化: 仅刚度大于 R_c 的带电粒子能穿透磁场屏蔽. 鉴于 CORSIKA 模拟中粒子从接近 100 km 海拔高度注入, 本文采用 IGRF 计算各研究地点 100 km 高度的截止刚度(表 A1)^[29], 以量化地磁屏蔽强度.

2.3 大气模型

本文关注能量低于 1 GeV 的 μ 子能谱, 此时大气模型的地区差异不可忽略. 大气簇射中的粒子碰撞和能量损失等过程主要取决于气体密度, 故主要影响因素为大气密度分布函数(即密度随高度的变化). 本文利用 CORSIKA 软件的 *gdastool*, 基于全球数据同化系统(global data assimilation system, GDAS)数据库, 生成不同地区的大气密度分布函数.

该分布存在天气短期波动和季节长期变化. 为评估大气模型引入的不确定度, 本文针对每个城市,

在 2024 年全年均匀选取 300 个时间点生成对应的大气密度分布函数. 为节省完整模拟所需的大量计算资源, 需从中选取两个具有代表性的大气密度分布函数进行完整的模拟, 以估计大气密度模型带来的不确定度. 为此, 在 (2) 式中引入物理量 H , 用以表征大气的整体“厚度”, 并预期其与低能 μ 子积分流强 (10—100 MeV) 存在显著的相关性.

$$H = \frac{1}{5 \times 10^4} \sum_{i=0}^{i < 5 \times 10^4} \rho(h_0 + i \times 1\text{m}), \quad (2)$$

式中, $\rho(h)$ 为海拔 h 处的大气密度值, h_0 为观测地点的海拔. 在模拟过程中, 由于低能 μ 子穿透性有限, 平流层和对流层所在的低层大气 ($h < 50000$ m) 是影响其流强的主要因素, 因此在低层大气选取多个点进行密度求和可以有效地评估整体的大气“厚度”. 为验证 H 的有效性, 对每一个大气模型进行小型模拟 (注入 3×10^5 个 100 GeV 的质子, $h_0 = 50$ m, $R_c = 9.71$ GV), 以获得不同 H 值对应的低能 μ 子积分流强, 结果如图 2 所示. 作为对比, 在相同的模拟中, 考虑了直接使用观测地点处的大气密度 $\rho(h_0)$ 作为“厚度”参数 H 的情况 (图 2 蓝点), $\rho(h_0)$ 与低能 μ 子积分流强的分布表现出明显的弥散特征, 无法作为衡量低能 μ 子积分流强大小的“厚度”参数.

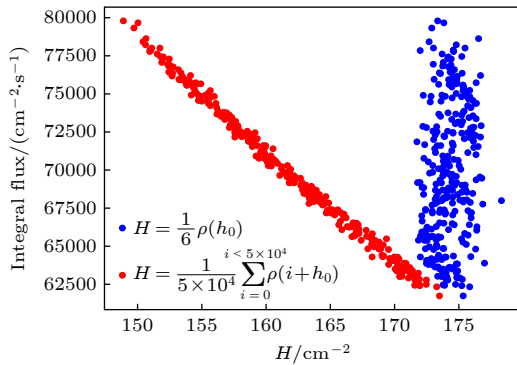


图 2 低能 μ 子积分流强 (10—100 MeV) 随“厚度”参数 H 的变化. 红点代表 (2) 式定义的“厚度”参数, 蓝点代表对照参数 $H = \frac{1}{6} \rho(h_0)$.

Fig. 2. Integrated flux of low-energy muons (10–100 MeV) as a function of the “thickness” parameter H . Red points represent the ‘thickness’ parameter defined by Eq. 2, while blue points represent the parameter $H = \frac{1}{6} \rho(h_0)$.

由图 2 可见, 低能 μ 子积分流强与 H 值存在显著单调关系. 因此, 将各大气模型按 H 值排序, 选取 16% 和 84% 分位数对应的大气模型进行完整模拟, 结果可作为低能 μ 子积分流强不确定度的

1σ 上下限估计.

通过完整的模拟, 得到了静态情况下不同城市的低能 μ 子积分流强. 为了直观地展现不同大气模型给模拟结果带来的影响, 本文使用 1976 年美国标准大气模型作为输入进行完整模拟, 并将其与其他城市的模拟结果 (使用对应城市的大气模型) 进行对比 (图 3). 两者之间的差异表明, 使用对应地区的大气模型进行模拟是必要的. 另外, 除深圳外的其他地区会由于大气模型变化而带来约 15% 的不确定度, 而深圳地处亚热带, 全年对流强烈, 平流层和对流层的季节性变化不大, 因此大气模型带来的不确定度较小.

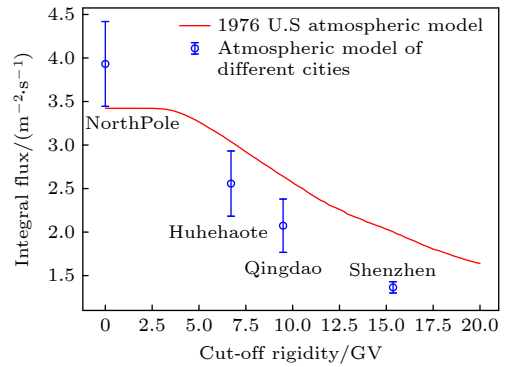


图 3 低能 μ 子积分流强 (10—100 MeV) 随地磁截止刚度 R_c 的变化. 红线表示用 1976 年美国标准大气模型的模拟结果, 蓝点表示用对应城市大气模型的模拟结果.

Fig. 3. Integral flux of low-energy muons (10–100 MeV) as a function of the geomagnetic cutoff rigidity (R_c). The red line shows the simulation results using the 1976 U.S. Standard Atmosphere model, while the blue dots represent the results from simulations with the corresponding urban atmospheric model.

2.4 模拟与实验对比

为验证模拟准确性, 本文对比了 BESS 能谱仪 (balloon-borne experiment with a superconducting spectrometer) 的 μ 子测量结果 (图 4). BESS 能谱仪的 μ 子探测能段下限达 0.5 GeV, 并曾在林恩湖 [11]、乘鞍山 [12]、筑波 [13] 三个地点 (具有不同海拔和地磁截止刚度) 进行了高精度的测量, 可对低于 10 GeV 的 μ 子能谱进行严格约束. 三个测量地点信息见表 A1, 本文将对应测量条件应用于模拟以复现观测数据.

大气模型是主要的不确定度来源, 由于 GDAS 数据库缺少实验期间的观测数据, 无法直接获取 BESS 观测时的大气密度分布函数. 因此, 本文基于 2014 年的大气密度分布样本, 筛选出满足以下

条件的大气模型作为模拟参考:

$$|\rho(h_0) - \rho_0| \leq \sigma_\rho, \quad (3)$$

其中 $\rho(h_0)$ 为样本中测量地点的大气密度; ρ_0 为 BESS 记录的大气密度, σ_ρ 为其标准差. 对于乘鞍山和筑波实验, 相关参数已在对应文献中给出; 而林恩湖实验包含三次独立测量, 每次的大气密度有所不同. 为此, 我们根据每次测量对应的 μ 子数量对大气密度进行加权平均 (得到 $\rho_0 \approx 994 \text{ g/cm}^2$), 并取标准差 $\sigma_\rho = 5 \text{ g/cm}^2$, 在此基础上执行 (3) 式对应筛选过程.

进一步, 根据 (2) 式中定义的“厚度”对筛选出的参考样本进行排序, 选取对应于 1σ 上下限的大气密度模型进行完整模拟计算, 获得 μ 子模拟流量的 1σ 不确定度范围. 图 4 展示了模拟得到的 μ 子流强与 BESS 实测结果的对比.

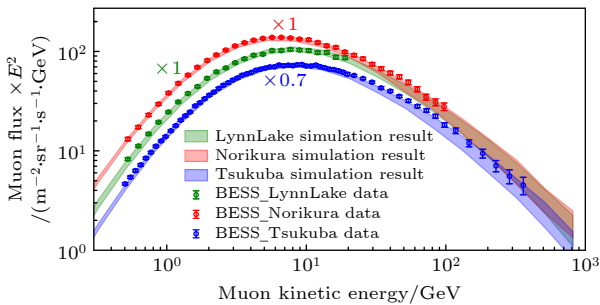


图 4 不同地区的 μ 子能谱测量结果和模拟结果对比. 阴影区为模拟结果 (1σ 不确定度), 数据点为 BESS 的测量结果. 不同颜色代表不同地区的模拟和测量结果, 绿色: 林恩湖; 红色: 乘鞍山; 蓝色: 筑波. 注: 筑波地区的数据和模拟结果被缩放

Fig. 4. Comparison of measured and simulated muon energy spectra from different geographical locations. The shaded areas represent the simulation results with 1σ uncertainty, while the data points are the measurements from the BESS experiment. Different colors correspond to different locations: green for Lynn Lake, red for Norikura, and blue for Tsukuba.

本文的模拟结果能准确复现 BESS 的 μ 子探测结果. 不同地区 μ 子能谱的差异主要受截止刚度、海拔和大气模型影响. μ 子流强的不确定度源于大气模型和原初粒子谱: 前者在低能端起主导作用, 后者在 10 GeV 以上高能端主导.

3 μ 子 SEE 风险评估

3.1 单粒子事件碰撞截面

μ 子在介质中能量沉积率较低, 其引发的 SEE

通常为非破坏性, 最常见的是单粒子翻转 (single event upset, SEU), 即存储单元或逻辑单元状态从“0”意外翻转为“1”或反之, 重启或修正后可恢复. SEU 事件通常可通过纠错码技术检测并修复, 实际影响有限. 然而, 随着晶体管制程缩小, SEU 事件更易演变为多位翻转 (multiple-cell upset, MCU), 即多个相邻存储/逻辑单元同时发生状态翻转. 即使采用纠错码, MCU 仍可能导致器件故障. 因此, 在 μ 子 SEE 风险评估中, MCU 是关键考量因素.

通过完整的大气簇射模拟, 获得了不同城市地区的低空 μ 子能谱. 为评估相应的 μ 子 SEE 风险, 需获取 μ 子诱发 MCU 事件的碰撞截面 (对应 μ 子产生 MCU 事件的概率). 目前, 仅少数辐照实验测量了特定静态随机存取存储器 (SRAM) 的 μ 子 MCU 碰撞截面 [30,31], 不足以支撑对不同制程和工艺电子器件 μ 子 SEE 风险的系统研究.

本文参考了 Hubert 等 [4] 在 2018 年的工作, 该工作基于多尺度单事件现象预测平台 (MUSCA SEP3) [32], 通过电子学模拟, 给出了特定 μ 子流强下纳米级芯片中的 MCU 事件率. 结果涵盖三种主流晶体管工艺 (体硅工艺晶体管 Bulk、鳍式场效应晶体管 FinFET、全耗尽硅绝缘体晶体管 FD-SOI) 及多种制程 (14—45 nm). 结合此工作, 本文可全面评估不同晶体管工艺和制程在低空飞行场景下面临的 μ 子 SEE 风险.

Hubert 等的工作仅给出了 MCU 的事件率, 我们需要从中估计 μ 子的 MCU 事件碰撞截面. 带电粒子在介质中主要通过电离沉积能量, 并且大部分能量沉积集中在射程末端, 形成能量沉积的“布拉格峰”. 布拉格峰前能量损失率较低, 峰后能量迅速耗尽. 对于 μ 子, 仅当其布拉格峰恰好位于器件敏感区附近时, 才可能沉积足够能量引发 SEE, 这主要对应于大约 10 MeV 的低能 μ 子 [4]. 考虑到芯片封装和飞行器外壳的屏蔽作用 (动能为 10 MeV 的 μ 子在铝中的传播距离约 0.4 cm, 而当动能为 1 MeV 时, 这一距离将缩短至约 1 μm), 并结合 μ 子辐射实验结果 [6,7], 本文假设 μ 子 SEE 主要集中于 10—100 MeV 能段. 据此, 可从 Hubert 等的工作中估算 μ 子入射纳米级芯片产生 MCU 事件的碰撞截面:

$$\sigma = \frac{R}{\int_{10 \text{ MeV}}^{100 \text{ MeV}} f_\mu(E) dE}, \quad (4)$$

式中, σ 为低能 μ 子诱发 MCU 事件的碰撞截面, $f_{\mu}(E)$ 为 μ 子微分流强, R 为电子学模拟给出的 MCU 事件率 (单位: FIT/Mbit, $1 \text{ FIT} = 10^{-9} \text{ h}^{-1}$, 即每 10^9 h 发生一次). 计算得到的 MCU 事件碰撞截面将用于后续错误率的计算, 结果如图 5 所示. 在这里, 为了验证该电子学模拟工作的可靠性, 图中亦展示了近期 μ 子辐照实验结果^[30,31] 进行对比 (假设正负 μ 子流强比为 1:1). 需注意, μ 子辐照实验表明 μ^- 子更容易产生 SEE, 但该结果具有较大的不确定度, 在本文中, 我们未考虑正负 μ 子的差异性, $f_{\mu}(E)$ 为正负 μ 子总流强.

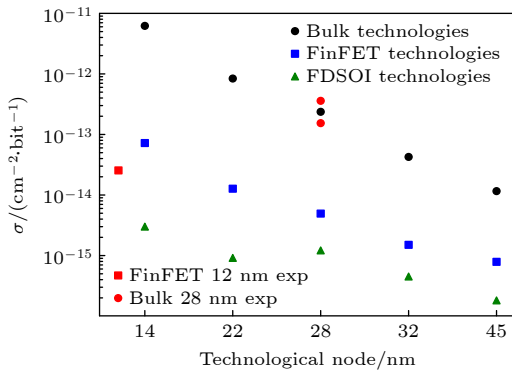


图 5 不同制程和工艺的晶体管的 MCU 碰撞截面. 黑色圆点: Bulk; 蓝色方框: FinFET; 绿色三角: FDSOI. 红色方框为 12 nm FinFET 晶体管测量结果^[31], 红色圆点为 28 nm Bulk 晶体管测量结果^[30,31]. 注: FD-SOI 晶体管在 14 nm 制程的数据为基于趋势外推的假设值

Fig. 5. MCU cross-section for various transistor technologies and process nodes. Symbols: black dots for Bulk, blue squares for FinFET, and green triangles for FD-SOI. Red symbols denote experimental data: squares for 12 nm FinFET^[31] and dots for 28 nm Bulk^[30,31]. Note: The 14 nm FD-SOI data point is an extrapolated value.

3.2 静态低空 μ 子 SEE 风险

在电子系统安全评估中, 软错误率 (单位时间内设备发生可恢复故障的概率) 是衡量系统可靠性的关键指标, 而 SEE 是软错误的主要来源. 因此, 可采用现行软错误率标准评估低空飞行器的 μ 子 SEE 风险. 如 3.1 节所述, 在采用纠错码的实际系统中, 仅 MCU 事件可能导致功能异常, 故本文使用 MCU 事件率代替软错误率作为评估指标.

目前尚无针对低空飞行器的软错误率标准. 考虑到低空飞行器在避障、航路飞行等操作中, 其飞控系统需执行大量自动控制, 在功能安全需求和辐射环境方面与汽车自动驾驶高度相似. 因此, 本文

参照汽车功能安全国际标准 ISO 26262^[33]. 该标准定义了汽车安全完整性等级 (ASIL) 及其要求, 明确规定电子系统须满足足够低的软错误率. 其中, 最高安全等级 ASIL-D 要求软错误率 $\leq 10 \text{ FIT}$.

在此, 本文计算了不同制程和工艺芯片满足 ASIL-D 等级 ($\leq 10 \text{ FIT}$) 所容许的低能 μ 子积分流强上限 (图 6), 并分别考虑两种典型系统内存容量: 1 MB (对应当前低空飞行器飞控系统 SRAM 典型容量) 和 1 GB (对应机载计算机典型容量).

图 6 展示了不同城市在静态条件下, 低能 μ 子积分流强 (10—100 MeV) 随海拔高度的变化. 图中黑色虚线代表不同内存容量与芯片工艺组合下, 满足 ASIL-D 安全等级 ($\leq 10 \text{ FIT}$) 所对应的流强上限. 由此可直观评估不同地区、不同芯片工艺和制程下的 μ 子 SEE 风险.

对于飞控系统 (1 MB 内存): 若采用 45 nm 及以下先进制程 Bulk 工艺, 则在所有地区均面临显著 μ 子 SEE 风险, 尤其在高纬度 (北极点) 和高海拔 (拉萨) 地区, μ 子流强已超过 45 nm Bulk 工艺对应的 ASIL-D 流强限值, 需采用更大制程晶体管或额外防护措施. FinFET 和 FD-SOI 工艺抗辐射能力显著更强, 特别是 FD-SOI 工艺, 即使采用 14 nm 先进制程, 在高纬度地区仍能满足 ASIL-D 要求; 而在 FinFET 工艺中, 则应考虑使用 28 nm 及以上的制程.

对于机载计算机等大内存系统 (1 GB 内存): 即使采用抗辐射能力最强的 FD-SOI 工艺, 使用 45 nm 制程的 MCU 事件率也远高于 ASIL-D 限值. 因此, 应尽量避免在关键系统中使用小制程芯片, 或需采取三模冗余等额外加固措施.

3.3 GLE 事件低空 μ 子 SEE 风险

目前, 人们主要通过卫星和地面中子监测网络来观测 GLE 事件, 从 1956 年到 2012 年, 一共有 67 个 GLE 事件被记录. 其中, 1956 年 2 月 23 日爆发的 GLE 事件是近百年来规模最大的一次. 为了验证模拟结果是否能够准确复现 GLE 事件, 在图 7 中展示了 1956 年 GLE 事件各个中子监测站点记录的中子流强增长率^[34] 与大气簇射模拟结果的对比 (积分时间保持一致, 大气模型均选用了 1976 年美国标准大气模型, 各站点的地磁截止刚度见文献^[34] 的表 1). 对比结果显示, 本文对 GLE 事件的模拟基本能够复现中子监测器的观测结果.

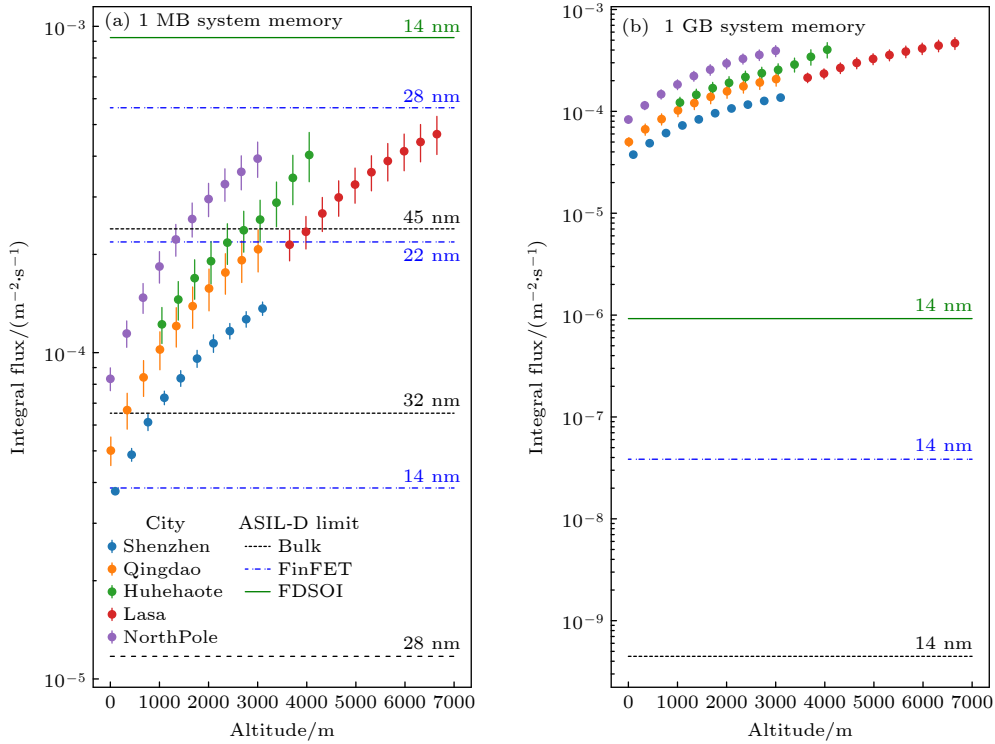


图 6 模拟得到的不同城市低能 μ 子积分流强 (10—100 MeV) 随海拔高度的变化, 以及 ASIL-D 安全等级所容许的流强上限 (不同制程、工艺和系统内存). 左图和右图分别表示系统内存为 1 MB 和 1 GB 的情况, 绿色实线、蓝色虚线、黑色点线分别代表 FDSOI 晶体管、FinFET 晶体管和 Bulk 晶体管的安全流强上限 (对应的制程大小已在图中标注)

Fig. 6. Variation of the simulated low-energy muon (10–100 MeV) integral flux with altitude for different cities, in comparison with the ASIL-D permissible flux limits. (Left panel: 1 MB system memory; Right panel: 1 GB system memory). The safe flux limits for FD-SOI (green solid line), FinFET (blue dashed line), and Bulk (black dotted line) transistors are shown, with their corresponding process nodes labeled.

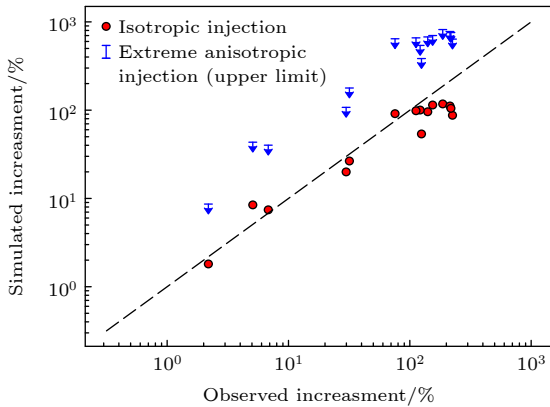


图 7 1956 年 GLE 事件期间, 中子监测器观测到的流强增量和模拟结果对比. 红点表示各向同性注入的模拟结果, 蓝点为极端各向异性注入的模拟结果, 作为模拟的上限估计. 虚线表示模拟结果与观测完全一致, 在此用于辅助对比

Fig. 7. Comparison of the observed neutron monitor count rate increase with simulation results for the 1956 GLE event. Red dots indicate the simulation for an isotropic injection, while blue dots represent the simulation for an extreme anisotropic injection, which is provided as an upper-limit estimate. The dashed line shows a perfect match between simulation and observation for comparison.

而对于 2006 年 12 月 13 日发生的 GLE 事件, 有 μ 子探测实验观测到事件期间 μ 子流强增长了 0.61% (积分时间为 10 min)^[17], 根据该研究给出的观测地点信息, 我们通过模拟得到该事件中 μ 子的流强增长率为 0.78% (各向同性注入), 与观测结果相匹配.

相比于中子对 GLE 事件的常态监测, μ 子的流强增长则很少有实验观测到. 这是因为 SEP 的能谱非常陡峭, 10 GeV 以上的高能粒子数量少, 故在 GLE 事件期间, 低能 μ 子的流强显著增加, 而 10 GeV 以上的 μ 子流强基本不变. 该现象在高纬度地区十分明显 (图 8). GLE 事件期间低能 μ 子流强激增, 电子器件所面临的 μ 子 SEE 风险也随之加剧, 而地区间的显著差异也意味着不同地区的风险程度不同.

不同 GLE 事件期间, 低空 μ 子流强增长率差异非常大. 为量化评估 GLE 事件期间的 μ 子 SEE 风险, 本文选取了 μ 子积分流强 (10—100 MeV)

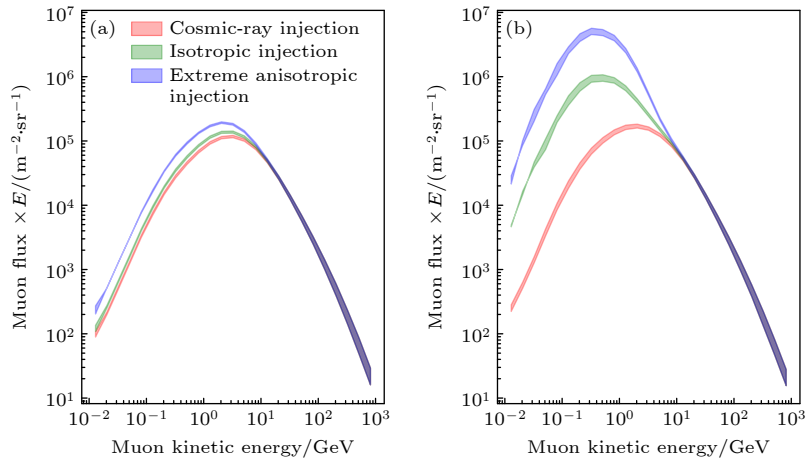


图 8 1956 年 GLE 事件期间, 不同地区 3000 m 海拔高度处的 μ 子能谱与只有宇宙线注入的静态情况对比 (a) 深圳; (b) 北极点
Fig. 8. Muon energy spectra at an altitude of 3000 m for different regions during the 1956 GLE event, compared with the steady-state background from only cosmic-ray injection: (a) Shenzhen; (b) the North Pole.

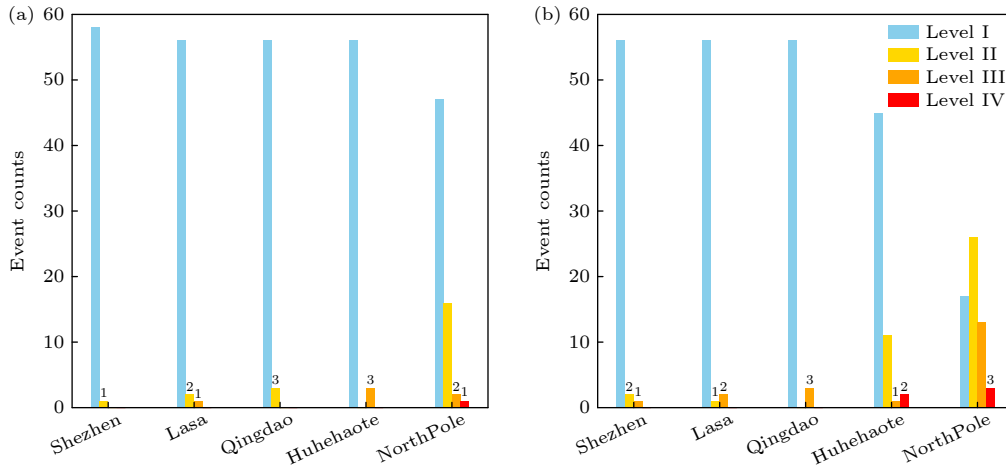


图 9 1956—2012 年期间各城市的 GLE 事件等级计数 (a) 各向同性注入的情况; (b) 极端各向异性注入的情况
Fig. 9. Count of GLE events for different cities from 1956 to 2012: (a) The case of isotropic injection; (b) the case of extreme anisotropic injection.

$I_0 = 4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为基准值, 依照 SEP 在离地 3000 m 处产生的 μ 子积分流强 I_{GLE} 与 I_0 的比值定义 GLE 事件的 μ 子危害等级:

- 1) $I_{GLE}/I_0 < 1$, 定义为 I 级事件;
- 2) $1 \leq I_{GLE}/I_0 < 10$, 定义为 II 级事件;
- 3) $10 \leq I_{GLE}/I_0 < 100$, 定义为 III 级事件;
- 4) $I_{GLE}/I_0 \geq 100$, 定义为 IV 级事件.

基准值 I_0 具有两重意义: 一是在系统内存为 1 MB 的情况下, I_0 对应着 14 nm FinFET 晶体管的 ASIL-D 流强上限, 若 $I_{GLE} < I_0$, GLE 事件产生的 μ 子 SEE 风险不会对抗辐射的 FinFET 和 FDSOI 晶体管产生风险; 二是 I_0 对应着低纬度地区 (深圳) 在地面的静态 μ 子积分流强, 若 $I_{GLE} < I_0$, 则说明 GLE 事件产生 μ 子积分流强低于任意地区

的低空静态流强, 不会导致地区的 μ 子 SEE 风险较静态情况激增. 因此, 对于 μ 子危害等级为 I 级的 GLE 事件, 其产生的 μ 子 SEE 风险可以忽略; II 级事件期间, μ 子 SEE 风险将明显增长; 对于 III 级事件, μ 子 SEE 风险将显著增加, 需谨慎对待期间的低空飞行任务; 对于 IV 级的极端事件, 可能会导致 μ 子 SEE 风险超出常规设计范畴, 对电子系统构成严重威胁.

图 9 展示了不同城市在 1956—2012 年期间 59 个 GLE 事件的 μ 子危害等级计数, 可直观评估不同地区由于 GLE 事件所引起的 μ 子 SEE 风险加剧情况. 可以看到 GLE 事件的 μ 子危害等级明显依赖于地磁截止刚度.

对于低纬度城市 (深圳), 在各向同性注入的情

况下,除 1956 年的 II 级事件外,其余事件的 μ 子危害等级都为 I 级,这意味着 GLE 事件不会加剧 μ 子 SEE 风险;即使在极端各向异性注入的情况下,在 68 年期间只发生 2 次 II 级事件和 1 次 III 级事件.因此 GLE 事件带来的 μ 子 SEE 风险基本可以忽略.

对于中纬度城市,拉萨和青岛即使在考虑极端各向异性注入的情况下,在 68 年期间总共只发生了 2/3 次 III 级事件,GLE 事件带来的 μ 子 SEE 风险基本可以忽略,高原海拔(拉萨)也并不会带来明显的风险加剧.而纬度较高的呼和浩特(R_c 较小),在极端各向异性注入的情况下,68 年间总共发生 2 次 IV 级事件,需要警惕 GLE 事件期间的 μ 子 SEE 风险加剧.

而对于高纬度地区(北极点),情况则不容乐观,若考虑极端各向异性注入的情况,约 3 年就会发生一次 III 级及以上的事件(且在太阳活跃期间密集发生),因此在高纬度地区需要预防 GLE 事件期间的 μ 子 SEE 风险加剧.

由于中国境内大部分城市都位于中低纬度地区,因此,若只考虑现有记录的 GLE 事件(积分时间 1800 s),中国境内大部分城市(少数纬度较高的城市除外)基本可以忽略 GLE 事件对低空飞行器(1 MB 系统内存)带来的 μ 子 SEE 风险.

4 讨论

本文的风险评估依赖于 Hubert 等^[4]的电子学模拟工作,以估计不同工艺和制程下的 μ 子单粒子事件碰撞截面,但从图 5 不难看出,不同实验和模拟之间给出的碰撞截面具有很大的不确定度,这将给进一步定量评估造成困扰.另一方面,近期的 μ 子辐照实验指出,负 μ 子在电子器件中会发生俘获反应,产生质子和 α 粒子并沉积电荷,从而比正 μ 子具有更大的单粒子碰撞截面^[30,31].正负 μ 子行为的差异性会给碰撞截面的计算带来较大的不确定度.因此,更精确的定量评估需要更多的辐照实验和电子学模拟工作支撑.

目前,仅 Sato 等^[14]利用全吸收 μ 子能谱探测器(full-absorption muon energy spectrometer, FAMES)给出了低能 μ 子的能谱(20—400 MeV).该测量结果在 100 MeV 处比本文模拟结果高出约 50%.这一差异可能源于实验中未能有效扣除的质

子与中子本底,有待更多实验验证.若将此差异视为额外的不确定性来源,则本文对 μ 子 SEE 的风险评估可能存在一定程度的低估.未来更多低能 μ 子能谱的实测实验的实施,可有效降低当前的不确定性.

在前文的讨论中,只评估了固定积分时间窗口的情况下,GLE 事件带来的 μ 子 SEE 风险.但是需注意的是,GLE 事件中次级粒子会集中在一个较短的时间窗口内到达地面,并且在事件初期可能具有高度的各向异性^[34],这意味着真实情况可能更接近极端各向异性注入所给出的结果.并且在次级粒子集中注入的时间窗口中, μ 子 SEE 风险可能会比预估结果更高.另外,Navia 等^[16]曾报告过与太阳耀斑事件成协的 μ 子流强增强(没有观测到 neutron 流强增长且耀斑强度不高).若该现象真实存在,那么需要建立新的模型以评估在耀斑等太阳活动期间 μ 子 SEE 的风险.

5 总结

本文系统评估了低空飞行器在不同城市及太阳活动情景下面临的 μ 子单粒子效应风险.主要结论如下.

利用 CORSIKA 软件包,采用了本地化的大气模型和精确的原初粒子谱,获得了不同城市地区的 MeV—GeV 的大气 μ 子能谱,并通过与 BESS 实验数据对比验证了其可靠性.

在只有宇宙线注入的静态情况下,对于采用先进制程(≤ 45 nm) Bulk 工艺芯片的飞控系统(1 MB 内存),我国所有城市的低空环境均面临显著的 μ 子 SEE 风险,尤其在拉萨等高海拔地区.而对于使用 FD-SOI 工艺芯片的飞控系统则不存在明显风险.

在静态情况下,对于大内存系统(1 GB),即使采用抗辐射能力最强的 FD-SOI 工艺,小制程芯片的 MCU 事件率也远超汽车功能安全最高等级(ASIL-D)的要求,必须采取冗余等加固措施.

提出了 GLE 事件的 μ 子危害等级划分方法,并评估了不同地区在 GLE 事件期间的 μ 子 SEE 风险.评估表明,对于中国境内大部分中低纬度城市,历史记录中的 GLE 事件带来的 μ 子 SEE 风险可忽略;但在高纬度地区,强 GLE 事件可能导致风险显著增加,需予以警惕.

附录 A

表 A1 不同城市的海拔、经纬度和地磁场参数

Table A1. Altitude, longitude, latitude, and geomagnetic field parameters of different cities.

城市(经纬度)	地磁场强度			截止刚度
	海拔 <i>H/m</i>	$B_x/\mu\text{G}$	$B_z/\mu\text{G}$	ϕ/GV
深圳(Lat.22°40'N, Lon.113°12'E)	100	37.7	26.0	15.36
青岛(Lat.36°12'N, Lon.120°15'E)	50	30.5	42.4	9.49
呼和浩特(Lat.40°49'N, Lon.111°39'E)	1050	27.2	49.0	6.71
拉萨(Lat.29°36'N, Lon.91°06'E)	3650	34.4	36.8	12.49
北极点(Lat.90°00'N, Lon.0°0'E)	0	1.8	56.9	0
林恩湖(Lat.56°30'N, Lon.101°0'W)	360	10.4	59.4	0.27
乘鞍山(Lat.36°06'N, Lon.137°33'E)	2770	30.3	36.1	10.54
筑波(Lat.36°12'N, Lon.140°06'E)	30	30.0	35.5	9.07

表 A2 各能段的初级宇宙线模拟数量, 其中 n 为原子核中的核子数

Table A2. The number of simulated primary cosmic rays in each energy range, where n is the nucleon number of the corresponding particle.

粒子类型	$E_{\text{tot}}/n / (\text{GeV} \cdot n^{-1})$					
	0.938— 10^1	10^1 — 10^2	10^2 — 10^3	10^3 — 10^4	10^4 — 10^5	10^5 — 10^6
H	4×10^7	8×10^6	5×10^5	1×10^5	2×10^4	1×10^3
He	2×10^7	1×10^6	1×10^5	2×10^4	4×10^3	1×10^3
C	3×10^5	5×10^4	1×10^4	2×10^3	1×10^3	1×10^3
O	3×10^5	5×10^4	1×10^4	2×10^3	1×10^3	1×10^3
Fe	1×10^5	1×10^4	3×10^3	1×10^3	1×10^3	1×10^3

参考文献

[1] Ziegler J F 1996 *IBM J. Res. Dev.* **40** 19

[2] Sierawski B D, Reed R A, Mendenhall M H, Weller R A, Schrimpf R D, Wen S J, Wong R, Tam N, Baumann R C 2011 *2011 International Reliability Physics Symposium* Monterey, USA April 10–14, 2011 pp3C.3.1–3C.3.6

[3] Kato T, Tampo M, Takeshita S, Tanaka H, Matsuyama H, Hashimoto M, Miyake Y 2021 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **68** 1436

[4] Hubert G, Artola L, Regis D 2015 *Integr. VLSI J.* **50** 39

[5] Infantino A, Alfa R G, Brugger M 2017 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **64** 596

[6] Liao W, Hashimoto M, Manabe S, Watanabe Y, Abe S I, Nakano K, Sato H, Kin T, Hamada K, Tampo M, Miyake Y 2018 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **65** 1734

[7] Deng Y, Watanabe Y, Manabe S, Liao W, Hashimoto M, Abe S I, Tampo M, Miyake Y 2024 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **71** 912

[8] Lei F, Hands A, Clucas S, Dyer C, Truscott P 2006 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **53** 1851

[9] Lei F, Clucas S, Dyer C, Truscott P 2004 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **51** 3442

[10] Sato T 2015 *PLOS ONE* **10** 1

[11] Sanuki T 2002 *Phys. Lett. B* **541** 234

[12] Motoki M, Sanuki T, Orito S, Abe K, Anraku K, Asaoka Y, Fujikawa M, Fuke H, Haino S, Imori M, Izumi K, Maeno T, Makida Y, Matsui N, Matsumoto H, Matsunaga H, Mitchell J, Mitsui T, Moiseev A, Nishimura J, Nozaki M, Ormes J, Saeki T, Sasaki M, Seo E S, Shikaze Y, Sonoda T, Streitmatter R, Suzuki J, Tanaka K, Ueda I, Wang J Z, Yajima N, Yamagami T, Yamamoto A, Yamamoto Y, Yamato K, Yoshida T, Yoshimura K 2003 *Astropart. Phys.* **19** 113

[13] Haino S, Sanuki T, Abe K, Anraku K, Asaoka Y, Fuke H, Imori M, Itasaki A, Maeno T, Makida Y, Matsuda S, Matsui N, Matsumoto H, Mitchell J W, Moiseev A A, Nishimura J, Nozaki M, Orito S, Ormes J F, Sasaki M, Seo E S, Shikaze Y, Streitmatter R E, Suzuki J, Takasugi Y, Tanaka K, Tanizaki K, Yamagami T, Yamamoto A, Yamamoto Y, Yamato K, Yoshida T, Yoshimura K 2004 *Phys. Lett. B* **594** 35

[14] Sato H, Kin T, Giammanco A 2022 *JINST* **17** P08009

[15] Simpson J A, Fonger W, Treiman S B 1953 *Phys. Rev.* **90** 934

[16] Navia C E, Augusto C R A, Robba M B, Malheiro M, Shigueoka H 2005 *Astrophys. J.* **621** 1137

[17] Timashkov D, Balabin Y, Barbashina N, Kokoulin R, Kompaniets K, Mannocchi G, Petrukhin A, Saavedra O, Shutenko V, Trincherro G, Vashenyuk E, Yashin I 2008 *Astropart. Phys.* **30** 117

[18] Heck D, Knapp J, Capdevielle J N, Schatz G, Thouw T 1998 *CORSIKA: a Monte Carlo Code to Simulate Extensive Air Showers*

[19] Pierog T, Karpenko I, Katzy J M, Yatsenko E, Werner K 2015 *Phys. Rev. C* **92** 034906

[20] Bass S A, Belkacem M, Bleicher M, et al. 1998 *Prog. Part. Nucl. Phys.* **41** 255

[21] Bleicher M, Zabrodin E, Spieles C, et al. 1999 *J. Phys. G* **25** 1859

[22] Aab A, Aglietta M, Ahn E J, et al. 2014 *Phys. Rev. D* **90** 122005

[23] International Geomagnetic Reference Field (IGRF), 14th

- Generation Calculator: <https://geomag.bgs.ac.uk>
- [24] Aguilar M, Ali Cavazonza L, Ambrosi G, et al. 2021 *Phys. Rep.* **894** 1
- [25] Gaisser T K, Stanev T, Tilav S 2013 *Front. Phys.* **8** 748
- [26] AJ T, WF D 2009 *Proceedings of the 31st International Cosmic Ray Conference*
- [27] Band D, Matteson J, Ford L, Schaefer B, Palmer D, Teegarden B, Cline T, Briggs M, Pacias W, Pendleton G, Fishman G, Kouveliotou C, Meegan C, Wilson R, Lestrade P 1993 *Astrophys. J.* **413** 281
- [28] Raukunen O, Vainio R, Tylka A J, Dietrich W F, Jiggins P, Heynderickx D, Dierckxens M, Crosby N, Ganse U, Siipola R 2018 *JSWSC* **8** A04
- [29] GeoMagSphere Online calculator (version 1.8) website currently supported within the space radiation environment activities of ASIF (ASI—Italian Space Agency -Supported Irradiation Facilities) www.geomagsphere.org [2025-9-29]
- [30] Liao W, Hashimoto M, Manabe S, Watanabe Y, Abe S I, Nakano K, Takeshita H, Tampo M, Takeshita S, Miyake Y 2019 *IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS)* Monterey, USA March 31–April 4, 2019 pp1–5
- [31] Gomi Y, Takami K, Mizuno R, Niikura M, Deng Y, Kawase S, Watanabe Y, Abe S I, Liao W, Tampo M, Umegaki I, Takeshita S, Shimomura K, Miyake Y, Hashimoto M 2023 *23rd European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems (RADECS)* Toulouse, France Sept. 25–29, 2023 pp1–4
- [32] Hubert G, Duzellier S, Inguibert C, BoatellaPolo C, Bezerra F, Ecoffet R 2009 *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **56** 3032
- [33] ISO 26262-9: 2018 Road vehicles —Functional safety Part 9: Automotive safety integrity level (ASIL)-oriented and safety-oriented analyses <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:26262:-9:ed-2:v1:en> [2025-9-29]
- [34] Hayakawa H, Koldobskiy S, Mishev A, Poluianov S, Gil A, Usoskina I, Usoskin I 2024 *Astron. Astrophys.* **684** A46

Risk assessment of muon single-event effects for low-altitude aircraft

QIU Zijian LIN Sujie CUI Yudong LIU Yihan YANG Lili[†]*(School of Physics and Astronomy, Sun Yat-Sen University, Zhuhai 519082, China)*

(Received 23 October 2025; revised manuscript received 14 November 2025)

Abstract

Motivation: With the rapid development of low-altitude economy, the radiation environment safety of low-altitude aircraft such as drones and electric vertical take-off and landing (eVTOL) aircraft has attracted increasing attention. Traditional views hold that the dense lower atmosphere is an effective barrier against cosmic radiation, but the reduced feature sizes of modern integrated circuits (ICs) significantly increases their susceptibility to single-event effects (SEEs). Most traditional studies have focused on the effects of particles such as neutrons and protons, while systematic assessments of the risks induced by muons — the most abundant charged particles at sea level— are still scarce, especially during extreme solar events. Therefore, this study quantitatively evaluates the muon-induced SEE risk for low-altitude aircraft in different regions of China under static cosmic-ray background and ground level enhancements (GLEs), aiming to provide key insights for the operational safety of the next-generation low-altitude aviation platforms.

Methods: This study employs city-specific atmospheric model to simulate the atmospheric shower processes in different cities within the CORSIKA framework, yielding reliable energy spectra of low-energy muons (10–100 MeV) in different regions. This study utilizes electrical simulation data from other research groups to estimate muon-induced SEE cross sections in transistors with different process nodes, covering bulk, FD-SOI, and FinFET processes. Subsequently, by integrating solar energetic particle (SEP) energy spectra related to ground level enhancement (GLE) events, we evaluate the muon-induced SEE risks for systems of different sizes under static conditions (only cosmic-ray injection) and GLE event scenarios.

Results: Our results indicate that under static conditions, flight control systems (with 1 MB of memory) containing advanced process nodes (≤ 45 nm) and bulk transistors face non-negligible muon-induced SEE risks in all cities in China. In contrast, the systems utilizing FD-SOI transistors can effectively alleviate such risks. For systems with large memory capacity (1 GB), redundancy and other radiation-hardening measures must be taken regardless of the process technology used. Regarding GLE events, this study innovatively introduces the concept of muon hazard levels to assess regional changes in risk. Specifically, during GLEs, the aggravation of muon-induced SEE risks in mid-to-low latitude regions is negligible, whereas such risks significantly increase in high-latitude regions.

Keywords: single event effect, low-altitude aircraft, muons, ground level enhancement

DOI: [10.7498/aps.75.20251448](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251448)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251448](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251448)

[†] Corresponding author. E-mail: yangli5@mail.sysu.edu.cn



低空飞行器的 μ 子单粒子效应风险评估

邱子健 林苏杰 崔昱东 刘奕含 杨莉莉

Risk assessment of muon single-event effects for low-altitude aircraft

QIU Zijian LIN Sujie CUI Yudong LIU Yihan YANG Lili

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 050201 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251448

CSTR: 32037.14.aps.75.20251448

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251448>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

N阱电阻的单粒子效应仿真

Simulation research on single event effect of N-well resistor

物理学报. 2023, 72(2): 026102 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20220125>

质子辐照下正照式和背照式图像传感器的单粒子瞬态效应

Single event transient effect of frontside and backside illumination image sensors under proton irradiation

物理学报. 2022, 71(5): 054206 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211838>

SiGe BiCMOS低噪声放大器激光单粒子效应研究

Investigation of laser-induced single event effect on SiGe BiCMOS low noise amplifiers

物理学报. 2024, 73(4): 044301 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231451>

中国散裂中子源大气中子辐照谱仪的大气中子能谱及单粒子效应评估

Evaluation of neutron energy spectrum, fluence and single event effects of atmospheric neutron irradiation spectrometer at China spallation neutron source

物理学报. 2025, 74(19): 192901 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250975>

近存计算架构AI芯片中子单粒子效应

Neutron induced single event effects on near-memory computing architecture AI chips

物理学报. 2024, 73(13): 138502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240430>

基于塑料闪烁体探测器的宇宙线缪子与太阳调制效应观测

Observation and research on cosmic ray muons and solar modulation effect based on plastic scintillator detector

物理学报. 2025, 74(5): 059201 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20241704>