

Application Note

重离子轨道环境单粒子效应估算



摘要

本文档讨论了用于计算在轨单粒子效应 (SEE) 事件发生率的方法。

内容

1 简介.....	2
2 参考资料.....	4
3 修订历史记录.....	5

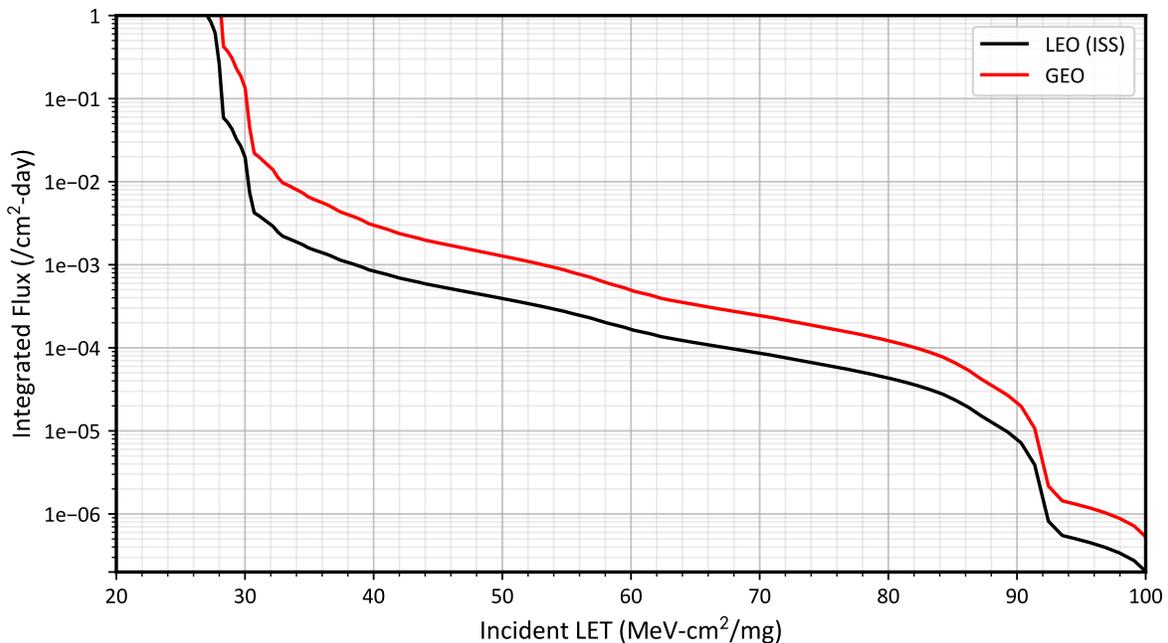
插图清单

图 1-1. 根据 CREME96 的计算，LEO-ISS (黑色曲线) 和 GEO (红色曲线) 环境的积分粒子通量与入射 LET 间的关系，假设铝屏蔽层最坏周和 100mil (2.54mm).....	2
图 1-2. 器件截面与入射 LET 间的关系，显示了如何使用方形近似 (红色虚线) “简化” 威布尔拟合 (黑色).....	3

1 简介

要计算 SEE 在轨事件发生率，需要使用器件 SEE 截面和特定轨道中所遇粒子的通量。器件 SEE 截面通常通过实验确定，而轨道中粒子的通量使用基于经验数据的各种软件算法计算。为了获得具有代表性的事件发生率，使用“微电子器件宇宙射线效应 96 模型”（Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics 96, CREME96）计算了近地轨道 (LEO) 和对地静止轨道 (GEO) 环境中的示例。请注意，创建这些轨道速率的目的是作为一个品质因数，用于比较多种电器件子的事件速率计算，并不能直接适用于国际空间站 (ISS) 上看到的全向通量。CREME96 模型是一套可用于估算近地轨道中的辐射环境的程序^[1, 2]。CREME96 是航空工业中用于提供精确空间环境计算的多种工具之一。自推出以来的几年里，CREME 模型与在轨数据进行了比较，并证明了准确性。特别是，CREME96 整合了现实中的“最坏情况”太阳粒子事件模型，其中通量在短时间内会增加几个数量级。

为了获得保守的事件发生率，选择了最坏周模型（基于在过去 45 年中持续一周的最强太阳粒子事件）。此事件等同于 99% 置信度的最坏情况事件^[3, 4]。综合通量包括来自太阳和银河系的质子和重离子。假设在 100 密耳（2.54 毫米）铝材上采用最小屏蔽配置。评估了两种轨道环境：国际空间站 (ISS) 的轨道环境，它位于 LEO 和 GEO 环境中。图 1-1 显示了这两种环境的综合通量（从高入射 LET 到低）。请注意，y 轴表示从较高 LET 到较低 LET 的通量积分。任何特定 LET 值处的积分通量值实际上是该特定 LET 值处所有离子事件与所有较高 LET 值的积分值。这些轨道速率最能代表大于 30MeV 的 LET，因为低于 30 MeV 的事件速率计算可能会被高估。



请注意，y 轴表示从较高 LET 到较低 LET 的通量积分。任何特定 LET 值处的积分通量值实际上是该特定 LET 值处所有离子事件与所有较高 LET 值的积分值。这些轨道速率最能代表大于 30MeV 的 LET，因为低于 30 MeV 的事件速率计算可能会被高估。

图 1-1. 根据 CREME96 的计算，LEO-ISS（黑色曲线）和 GEO（红色曲线）环境的积分粒子通量与入射 LET 间的关系，假设铝屏蔽层最坏周和 100mil (2.54mm)

图 1-1 显示了根据 CREME96 的计算，LEO-ISS（黑色曲线）和 GEO（红色曲线）环境的积分粒子通量与入射 LET 的关系，假设铝屏蔽层最差周和 100mil (2.54mm)。请注意，y 轴表示从较高 LET 到较低 LET 的通量积分。任何特定 LET 值处的积分通量值实际上是该特定 LET 值处所有离子事件与所有较高 LET 值的积分值。

使用此数据，您可以为任意感兴趣的 LET 提取积分粒子通量。为了简化事件发生率的计算，假设所有截面曲线均为正方形，这意味着在低于起始 LET 时，截面等于零，而在高于起始 LET 时，截面均等于饱和截面。图 1-2 用绿色曲线表示近似值，绿色曲线表示实际的威布尔值与数据的拟合度，“方形”近似值显示为红色虚线。这样，您可以使用单个乘法来计算事件发生率，即事件发生率为起始 LET 处积分通量与饱和截面的乘积。显然，这会导致

事件发生率高估，因为方形近似下方的面积大于实际截面曲线，但为了计算上限事件发生率估算值，这种修改避免了在通量和截面曲线上执行积分。

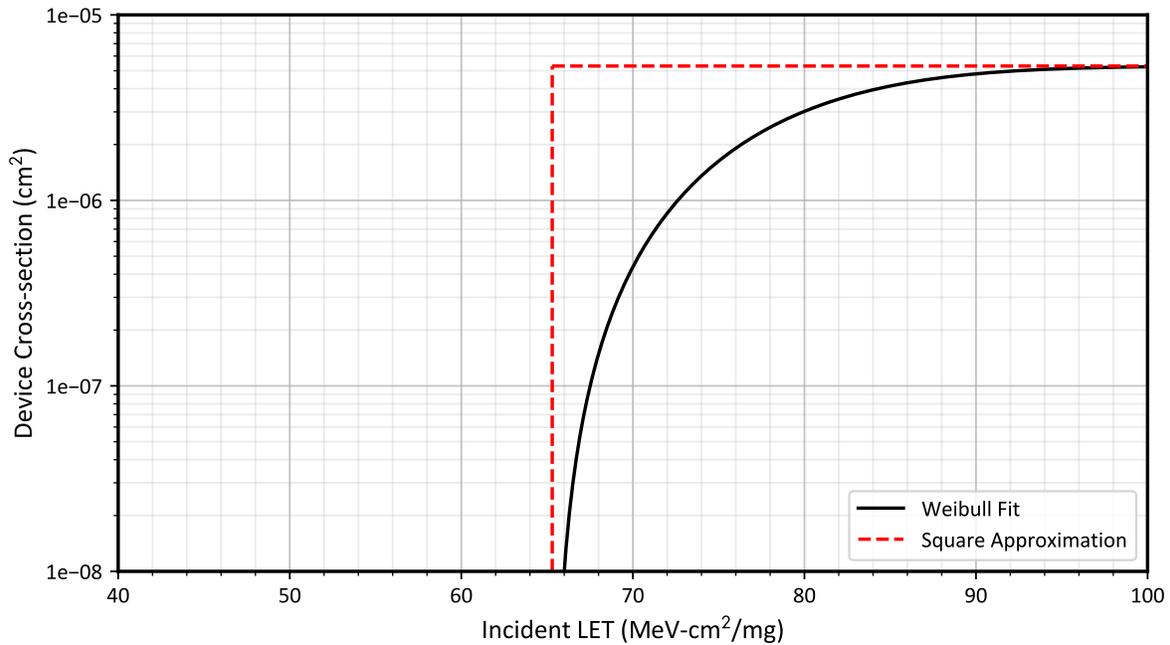


图 1-2. 器件截面与入射 LET 间的关系，显示了如何使用方形近似（红色虚线）“简化”威布尔拟合（黑色）

图 1-2 显示了器件截面与入射 LET 间的关系，其中显示了如何使用方形近似（红色虚线）“简化”威布尔拟合（黑色）。

为了演示如何计算事件发生率，假设您希望为截面如图 1-2 所示的器件计算 GEO 轨道的事件发生率。使用图 1-1 中的红色曲线和从图 1-2 获得的起始入射 LET 值（约为 $65 \text{ MeV-cm}^2/\text{mg}$ ），您会发现 GEO 积分通量约为 3.24×10^{-4} 个离子/ $\text{cm}^2/\text{天}$ 。事件发生率是积分通量和图 1-2 中饱和截面的乘积（约为 $5.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2$ ）：

$$GEO \text{ Event Rate} = \left(3.24 \times 10^{-4} \frac{\text{ions}}{\text{cm}^2 \times \text{day}} \right) \times (5.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^2) = 1.71 \times 10^{-9} \frac{\text{events}}{\text{day}} \quad (1)$$

$$GEO \text{ Event Rate} = 0.71 \times 10^{-10} \frac{\text{events}}{\text{hr}} = 0.071 \text{ FIT} \quad (2)$$

$$MTBF = 1,607,820 \text{ Years} \quad (3)$$

2 参考资料

1. Vanderbilt University, [Crème-MC](#), webpage.
2. A. J. Tylka, and others, "CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code" , IEEE Trans.Nucl.Sci., 44(6), 1997, pp. 2150-2160.
3. A. J. Tylka, W. F. Dietrich, and P. R. Boberg, "Probability distributions of high-energy solar-heavy-ion fluxes from IMP-8: 1973-1996" , IEEE Trans. on Nucl.Sci., 44(6), Dec. 1997, pp. 2140 - 2149.
4. A. J. Tylka, J. H. Adams, P. R. Boberg, and others, "CREME96: A Revision of the Cosmic Ray Effects on Micro-Electronics Code" , Trans. on Nucl.Sci, 44(6), Dec. 1997, pp. 2150 - 2160.

3 修订历史记录

Changes from Revision A (November 2022) to Revision B (June 2025)	Page
--	-------------

- 更新了文本和图表，以反映所有计算都是根据入射 LET 确定的.....2
 - 更新了网站参考.....4
-

Changes from Revision * (May 2020) to Revision A (November 2022)	Page
---	-------------

- 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....1
-

重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司