

---

### 备注

本文最初发表在 [EE Times](#) 上，经许可后重复使用。

---

由于符合航天标准的现场可编程门阵列 (FPGA) 的供应增加，以及这些阵列的处理能力相应地提高，为卫星有效载荷设计电源管理系统变得越来越具有挑战性。要实现这些处理能力，需要摒弃 FPGA 所需的多个电源轨，以及具有非常严格的电压调节要求的高电流、低电压内核电源轨。这些要求使得早期的电源管理设计不太实用，因为它们无法满足卫星的所有尺寸、重量和辐射性能要求。

本应用简介回顾了负载点 (POL) 电源系统架构，强调了耐辐射性能 (尤其是单粒子效应) 在满足当前 FPGA 电压调节要求方面的相关性。

### 航天器电力系统概述

航天器电力系统 (EPS) 涵盖了包括发电、能量存储、配电和调节以及控制在内的所有方面。EPS 分为两个子系统：初级子系统和次级子系统；二者的理想组合助力实现有效运行。

次级电源子系统设计过程的一部分是选择合适的 POL 转换器，其中包括开关直流/直流稳压器和低压降稳压器。开关稳压器是本文的重点，凭借较高的效率，成为低电压、高电流 FPGA 电源内核电源轨的热门选择。

上一代航天级 FPGA 的制造过程使用了更大的结构几何形状，专注于单粒子翻转 (SEU) 缓解，以及三重寄存器和双连锁存储内存单元等强化方法。此过程的一个优点是较大的寄生路由电容从本质上过滤了辐射环境中固有的单粒子瞬变 (SET)。新一代 FPGA 具有更高的逻辑密度和更小的互连。因此，SET 可能是主要的单粒子效应 (SEE)，因为空间中离子的电荷量会影响敏感节点的可能性增加。

在现代卫星中，即使负载发生巨大变化，次级配电单元也必须精确且无波动地提供各种低电压。图 1 是一个次级配电系统示例。

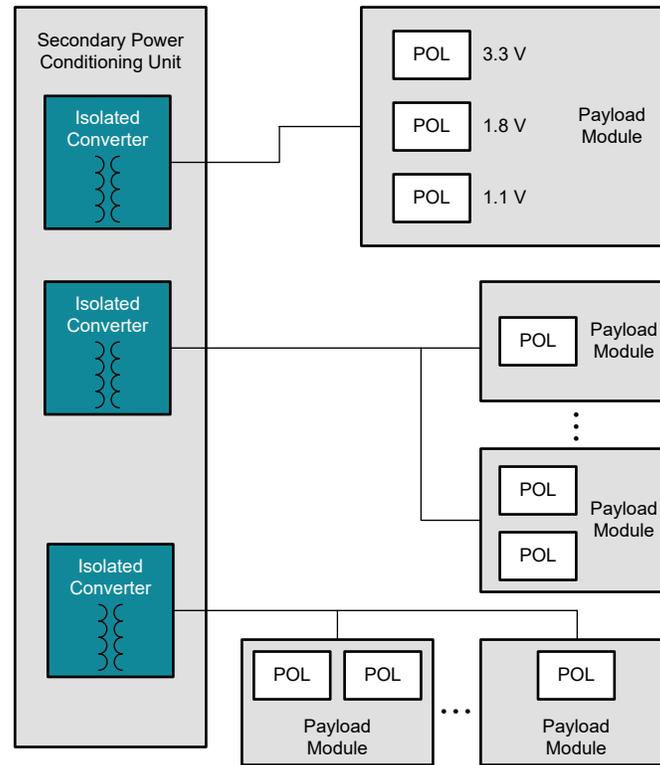


图 1. 次级配电系统

如图所示，这些模块使用 3.3V 或 5V 配电电源轨来生成负载模块所需的电源电压。这些卡的本地电压通常由有效载荷模块内的紧凑且高效的直流/直流转换器生成。各种电源电压和电流负载，以及更高的电源效率要求引发了一个新的设计问题，使得成熟的旧设计方法不太实用，更难达到设计目标。

此外，如图 2 中所示，工艺节点的缩小导致内核电压轨降至 1.0V 以下，需要直流/直流转换器来优化低电压调节性能。这种优化性能的示例包括应对工艺节点发展的低电压、高精度内部基准，用于更好地定制直流/直流转换器来满足高性能应用需求的可调节斜率补偿，以及并联转换器以提供更大电流，从而提高系统灵活性和可重复使用性的能力。

同时，随着卫星系统（例如，使用多个 FPGA 的相控阵系统的地球观测程序）越来越复杂，选择采用现代金属氧化物半导体场效应晶体管技术的直流/直流转换器可以提供更高的系统效率。更高的系统效率使设计人员能够减小光伏阵列的规模和电池重量，并实现重要的卫星设计目标之一。

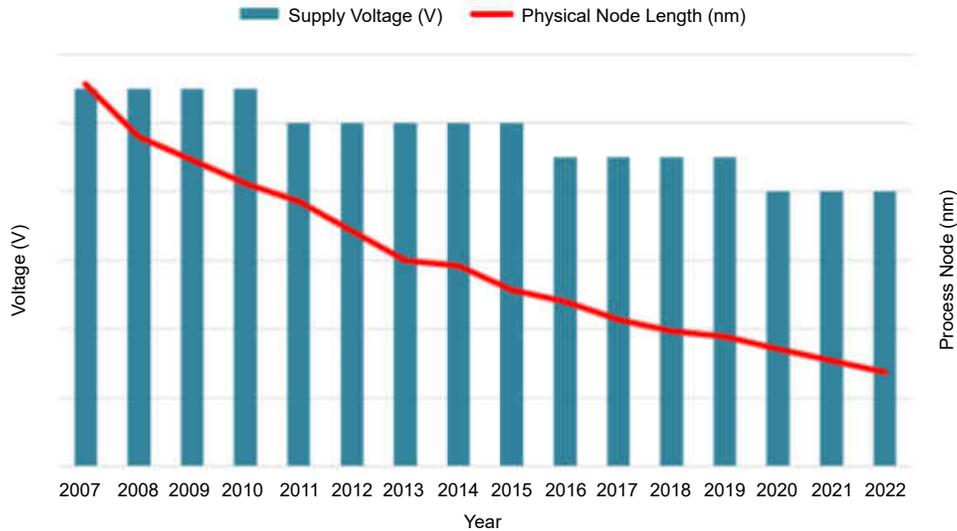


图 2. 工艺节点和内核电压变化

FPGA 技术的工艺节点发展以及处理能力的提高，需要满足更严格的电压调节要求。

随着工艺节点的演变，不同 FPGA 的调节容差也发生了变化。这种演变大幅减小了裕度，并增加了对 POL 开关稳压器的影响。严格调节内核电压可确保正常运行，而将电源靠近新 FPGA 现在对于确保寄生阻抗引起足够的电压偏移更加重要。

POL 转换器现在可以设计成精确满足以下要求：重复用作不同有效负载模块的标准电源接口。尽管该标准电源接口可显著降低成本并缩短设计时间，但它更具挑战性，因为设计人员必须在设计过程中考虑 POL 转换器的不同配置（不同输出电流下的不同输入和输出电压）。此过程包括更改功率级组件和补偿网络。

因此，选择涵盖所需输入和输出电压范围的 POL 转换器非常重要，该转换器还可以为负载提供足够的输出电流。

### 电源转换器中的辐射效应

除了现代电源调节系统中严格的电气要求外，设计人员还需要考虑辐射效应。在某些情况下，辐射效应要求可能不像电气要求那么明显。

辐射效应分为两大类：时间依赖性和时间随机性。随时间变化的效应称为剂量效应，会导致器件参数发生变化，例如超出数据表限制的规格。

剂量效应分为两类：总电离剂量和中子剂量。由于剂量效应的时间依赖性，通常能够得到非常好地量化和理解。因此，设计人员可以很容易地选择适合任务时间分布的航天级电源器件。

随机时间效应是指 SEE。考虑到它们的随机性，并且在某些情况下具有破坏性，理解 SEE 并将其置于电源调节系统环境中可能更具挑战性。有两种类型的 SEE：破坏性和非破坏性。

破坏性 SEE 包括单粒子闩锁、单粒子栅穿和单粒子烧毁。最后两种效应特别适用于功率场效应晶体管，例如直流/直流转换器输出级中使用的晶体管。破坏性 SEE 由于其破坏性质（通过或失败），在某些方面来说也相对容易评估。只要制造商在特定有效线性能量传递 (LETeff) 范围内执行并正确记录这些测试的结果，工程师就可以选择适合任务轨道的器件。

非破坏性 SEE 包括 SET、SEU 和单粒子功能中断 (SEFI)。非破坏性 SEE 的影响通常表现为器件输出误差。误差的大小和行为取决于 LETeff 以及电气测试条件。因此，非破坏性 SEE 比破坏性 SEE 更复杂一些。

SET 和 SEFI 是通常与模拟器件相关的效应；SEU 适用于数字电路中发生位翻转的数字器件。由于大多数航天电源调节系统都基于模拟器件，因此本文重点介绍 SET 和 SEFI。需要详细描述这些效应的特性，确保它们的行为不会影响正常运行，也不会潜在损坏负载。

根据负载类型，电压调节要求可能很严格。如前所述，符合航天标准的高性能 FPGA 通常需要  $\pm 4\%$  的内核电压调节精度。该百分比包括电气交流和直流调节，以及航天应用典型的老化和辐射效应。因此，对辐射效应敏感的直流/直流转换器可能会受到输出电压变化大于 FPGA 精度要求的影响，如果输出电压下降（负 SET），会触发 FPGA 上电复位，导致数据丢失并且需要对 FPGA 重新编程。

相反（甚至更令人担忧的是），输出电压增加（正 SET）可能会超出 FPGA 的绝对最大额定电压，并可能损坏器件。功率器件输出上的大幅度（ $> 4\%$ ）过冲极具挑战性，因为过冲会在下游电路中造成损坏（电过应力）。

图 3 展示了一个 TPS50601A-SP 的 SEFI 示例，TPS50601A-SP 是一个航天级 3V 至 7V 输入、6A 直流/直流转换器。SEFI 发生在  $LET_{eff} = 86 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  时，恢复时间约为 4ms。

在此示例中，无需担心超过负载的额定电压，而需要担心负载可能会停止运行，因为这可能会对系统性能产生影响。乍一看，理想解决方案似乎是选择一个满足所需  $LET_{eff}$  的无 SEFI 器件。然而，在进行此类评估之前，明确这些效应的特性至关重要。图 3 中的 62 个重叠粒子展示了 SEFI 的可重复性。

在重离子表征之后，可以计算事件发生率，来评估器件是否适合给定应用。德州仪器 (TI) 计算了近地轨道 (LEO) 应用（例如国际空间站和地球同步轨道 (GEO) 应用）的事件发生率。事件发生率表明，图 3 展示的 SEFI 行为在 LEO 应用中每 70 万年发生一次，在 GEO 应用中每 21 万年发生一次。

有关 TPS50601A-SP 的 SEE 性能的更多详细信息，请参阅完整的辐射报告：[TPS50601A-SP 同步降压转换器的单粒子效应测试报告](#)。

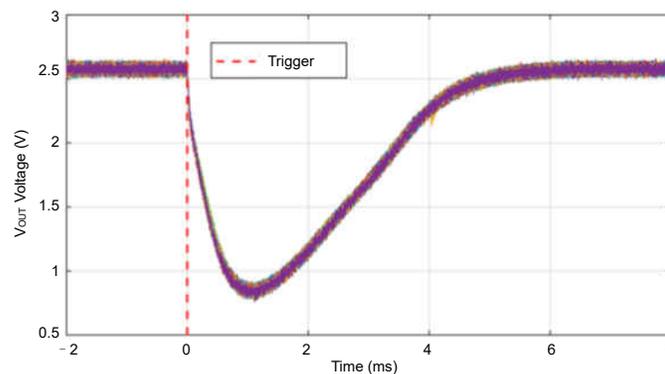


图 3.  $LET_{eff} = 86 \text{ MeV}\cdot\text{cm}^2/\text{mg}$  时的 SEFI

## 耐辐射 POL 产品系列

为了支持大多数 FPGA 有效负载设计所需的各种独特电源轨，TPS7H4001-SP 这款 3V 至 7V 输入、18A 直流/直流转换器能够并联，来支持最高 72A 电流。此外，TPS7H4002-SP 是一款 3V 至 5.5V 输入、3A 直流/直流转换器，可为低电流轨提供出色的功率密度。

## 需求增加

半导体工艺中的工艺节点显著减少，数字内核的电源电压低于 1V。随着数字内核处理能力的提高，这些变化转化为对电源电流的需求增加，以及对电源转换器的严格调节要求。

这种调节要求不仅涉及 POL 转换器的电气性能，还涉及其在辐射效应下的性能。辐射敏感型直流/直流转换器可能会对系统的下游性能产生严重影响，并可能损坏负载。因此，正确表征直流/直流转换器 SEE 特性有助于设计人员根据事件发生率计算选择正确的 POL 转换器。

## 资源

- 德州仪器 (TI) E2E™ 论坛，[2020 年航天级电源管理的 4 大趋势](#)
- 德州仪器 (TI) E2E™ 论坛，[增强型航天塑料为设计人员提供用于新兴近地轨道商业应用的全新解决方案](#)
- 德州仪器 (TI)，[TI 航天产品：使用先进的防辐射 \(RHA\) 和 QMLV 产品打造创新型航天解决方案](#)

## 重要声明和免责声明

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 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。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

Copyright © 2023，德州仪器 (TI) 公司