

Technical White Paper

为新时代高性能 航天级 Xilinx FPGA 供电



Javier Valle, Adrian Helwig, Daniel Hartung, and Kurt Eckles. Written in collaboration with Xilinx and Alpha Data.

摘要

当今航天工业的各领域正以空前的速度蓬勃发展。部署在近地球轨道、中地球轨道或地球同步轨道上的航天器数量迅速增加。越来越多的航天器包含先进的架构，这些架构催生了大量新的科学仪器。

对于许多系统而言，电源对设计产生了最大的约束力，因为要向更高性能级别和更小外形转变，致使在相同或甚至更低的功率预算下进行设计更具挑战性。

Xilinx 的 20nm Kintex UltraScale™ XQRKU060 抗辐射现场可编程门阵列 (FPGA) 功能强大，足可实现全新的系统架构。借助 XQRKU060 支持的机载可重复编程系统，卫星运营商可以重新配置卫星的基本功能，而这一点在当今的固定功能实现中无法做到。除了提高灵活性之外，XQRKU060 还可提高数据吞吐量，这有助于降低数据传输成本。这些新的架构还能够支持人工智能应用，使卫星能够在本地处理图像或雷达数据，而无需进行常规要求的地面审查，从而提高任务响应能力和实时处理能力。

内容

1 为 XQRKU060 供电：主要挑战.....	2
2 直流调节.....	2
3 交流调节.....	4
4 辐射效应.....	5
5 ADA-SDEV-KIT2 平台.....	5
6 结论.....	7
7 主要撰稿人.....	8

插图清单

图 2-1. XQRKU060 至 TPS7H4001-SP 的感应连接.....	2
图 2-2. 感应引脚导致的 XQRKU060 引脚上的电压.....	3
图 2-3. 采用两个不同 R_{GND_SENSE} 值时 XQRKU060 上的差分电压.....	4
图 3-1. 负载瞬变引起的交流调节响应.....	4
图 5-1. 用于 KU060 的 ADA-SDEV-KIT2 平台.....	5
图 5-2. 使用 ADA-SDEV-KIT2 中的 1 号位流时，VCCINT 的瞬态响应（以 GND 为基准）。左侧的响应表示增加的负载阶跃，右侧的响应表示减少的负载阶跃。.....	7
图 5-3. 使用 ADA-SDEV-KIT2 中的 1 号位流时，VCCINT_SENSE 的瞬态响应（以 GND_SENSE 为基准）。左侧的响应表示增加的负载阶跃，右侧的响应表示减少的负载阶跃。.....	7

表格清单

表 5-1. 用于在 ADA-SDEV-KIT2 中评估 XQRKU060 的位流.....	6
表 5-2. ADA-SDEV-KIT2 中使用的 VCCINT 去耦电容器.....	6

商标

UltraScale™ is a trademark of UltraScale.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 为 XQRKU060 供电：主要挑战

由于 FPGA 具有高性能，根据其编程的功能（时钟频率、逻辑使用率），它所需的片上总功率可高达 30W。芯片的内核电压 VCCINT 将占用此功率的很大一部分。当标称电压约为 0.95V 时（请参阅 [XQRKU060 数据表](#) 和 [Xilinx 功耗估算器 \[XPE\]](#) 以了解确切值），根据所部署的位流，此功率可以转化为超过 25A 的电流。此外，由于 XQRKU060 采用先进的工艺节点技术，VCCINT 电压的电气容差要求相当严格；此容差包括电气性能和辐射效应。因此，为 XQRKU060 等此类器件供电需要采用不同的方法，以满足器件成功运行的公差要求。我们将这些挑战分为直流和交流调节。

2 直流调节

与直流调节相关的一个明显因素是为 VCCINT 供电的转换器的直流设定点精度。此直流精度取决于转换器内部基准的精度、转换器使用的无源器件（如反馈电阻器）和印刷电路板的布局（如电阻压降）等因素。在这些因素中，转换器的内部基准很大程度上代表着 FPGA 制造商指定的电压精度。但是，您应该以满足实际应用需要的方式计算内部基准的精度。

例如，温度严重影响基准的电压漂移；因此，您应该针对器件在执行任务期间将在何种温度范围内暴露来计算此精度。通常，该范围为 -40°C 至 $+90^{\circ}\text{C}$ ，小于用于表征航空级器件的 -55°C 至 $+125^{\circ}\text{C}$ 标准军用级温度范围。德州仪器 (TI) 的 [TPS7H4001-SP](#) 在整个军用级温度范围以及各种电气和辐射条件下的内部基准精度为 $\pm 1.5\%$ 。对温度系数 ($0.1\text{mV}/^{\circ}\text{C}$) 的简单计算表明，在实际应用中 (-40°C 至 $+90^{\circ}\text{C}$)，内部基准的精度约为 $\pm 1.1\%$ 。此外，还必须考虑可能影响直流调节的辐射效应。

直流调节通常仅指为 VCCINT 供电的转换器的直流设定点精度。由于用于航天应用，XQRKU060 以及为其供电的转换器采用陶瓷封装。虽然陶瓷封装可提供气密性，但它们也面临商业级器件未遇到的独特挑战，包括考虑到封装中使用的材料，尺寸会更大且电阻会更高。对于 XQRKU060，陶瓷封装电阻对直流调节的影响随着电流增加而增大，而电流将取决于所使用的位流。为了减轻这一较大电阻所带来的影响，XQRKU060 提供了两个引脚：VCCINT_SENSE 和 GND_SENSE。[图 2-1](#) 显示了 TPS7H4001-SP 和 XQRKU060 感应引脚之间所需的连接，并简单展示了 VCCINT 和 GND 的内部封装电阻。

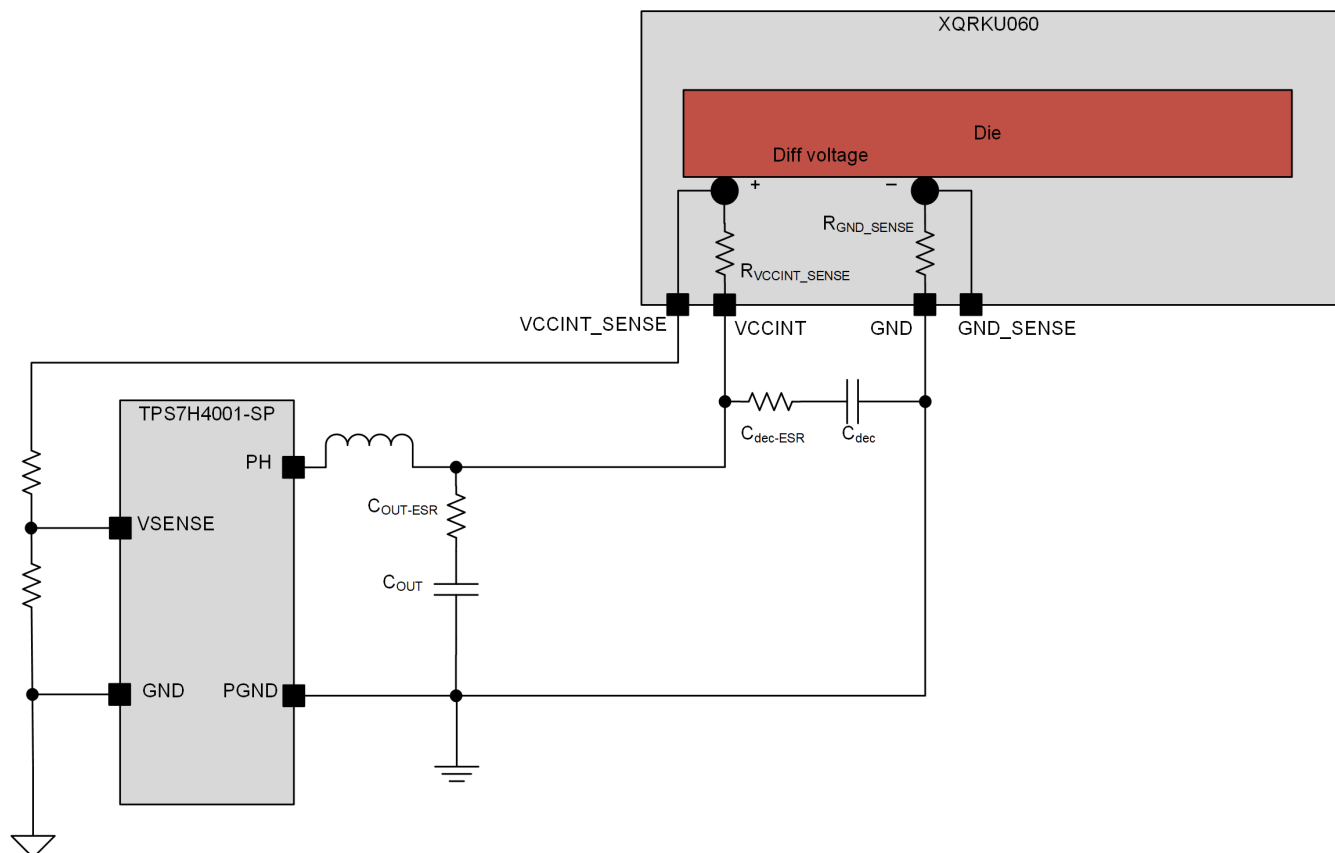


图 2-1. XQRKU060 至 TPS7H4001-SP 的感应连接

TPS7H4001-SP 不提供 GND 感应引脚，因此，仅使用 XQRKU060 中用于反馈信号 (VSENSE) 的 VCCINT_SENSE 引脚就可以补偿由封装电阻 RVCCINT_SENSE 产生的压降，如图 2-1 所示。如果不使用 GNDSENSE 引脚进行调节，则需要考虑使用一个小电阻。XPE 提供了 VCCINT 的精确值来计算这个小电阻。如果未使用这个小电阻，您可以将 GNDSENSE 引脚布线到可选的测试点或使其保持悬空状态，如 XQRKU060 数据表中所示。

随着 TPS7H4001-SP 提供的电流的增加，XQRKU060 裸片上的内部差分电压可能会降低，具体取决于内部 RGND_SENSE 电阻。图 2-2 显示了两个不同的内部封装电阻假设值下 VCCINT 电流和不同引脚电压之间的关系。这两种情况均假定标称 VCCINT 电压为 0.95V。

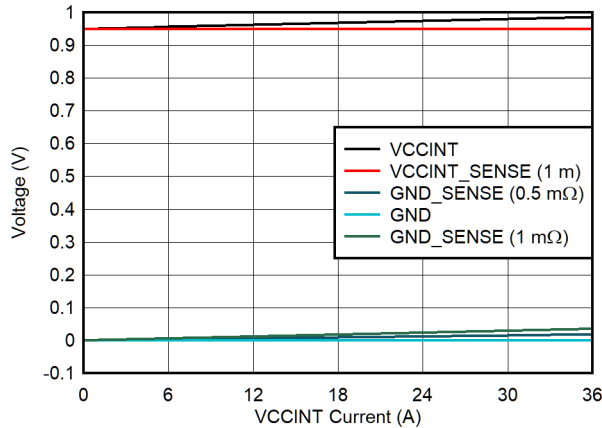


图 2-2. 感应引脚导致的 XQRKU060 引脚上的电压

图 2-2 中的第一种情况假设 R_{VCCINT_SENSE} 和 R_{GND_SENSE} 的电阻值均为 $1\text{m}\Omega$ 。在这种情况下，您可以看到 VCCINT_SENSE 电压如何在 0.95V (红色虚线) 下保持恒定，而 GND_SENSE 电压 (黑色虚线) 随着 VCCINT 电流的增加而增加。

采用陶瓷封装时，所使用的引脚和层面数量较多，GND 信号和层面通常具有极其小的电阻。因此，图 2-2 也显示了一个示例，其中 $R_{VCCINT_SENSE} = 1\text{m}\Omega$ ，但 $R_{GND_SENSE} = 0.5\text{m}\Omega$ 。在本例中，随着 VCCINT 电流增加，GND_SENSE 电压 (蓝色虚线) 的增加值远小于 $R_{GND_SENSE} = 1\text{m}\Omega$ 时的增加值。务必再次强调，使用 XPE 时，即使是这个低的 R_{GND_SENSE} 值也会以所示的确切 VCCINT 值进行补偿。

图 2-3 显示了这两种情况对 XQRKU060 裸片上差分电压的影响。可以看出，在 $R_{VCCINT_SENSE} = R_{GND_SENSE} = 1\text{m}\Omega$ 的情况下，当 VCCINT 电流达到 36A 时，XQRKU060 裸片上的差分电压会降至 0.914V 。但是，在 $R_{VCCINT_SENSE} = 1\text{m}\Omega$ 而 $R_{GND_SENSE} = 0.5\text{m}\Omega$ 的情况下，当 VCCINT 电流达到 36A 时，差分电压仅降至 0.932V 。虽然这两种情况下 18mV 的差异似乎很小，但这意味着直流调节容差 (与 0.95V 标称值相比) 分别为 3.7% ($VCCINT_{diff} = 0.914\text{V}$) 与 1.9% ($VCCINT_{diff} = 0.932\text{V}$)，而在需要满足 VCCINT 电压容差要求的情况下这种差异会非常显著。

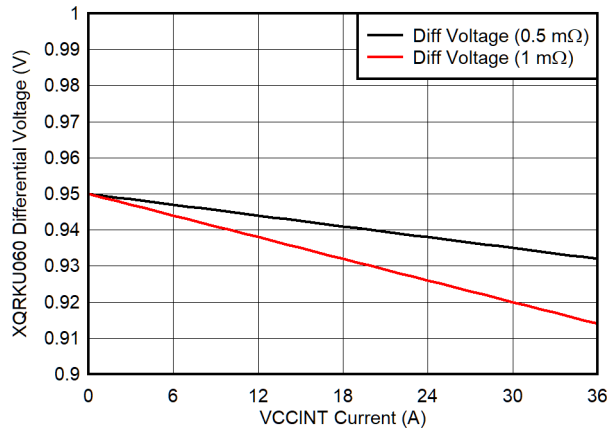


图 2-3. 采用两个不同 R_{GND_SENSE} 值时 XQRKU060 上的差分电压

3 交流调节

交流调节与 VCCINT 轨中的负载瞬变相关联。这些负载瞬变在很大程度上取决于 FPGA 中使用的编程代码。因此，我们建议编写代码时应尽可能避免严重瞬变，换句话说，要避免在 FPGA 中同时启用大量逻辑。负载瞬变始终存在，但是，您需要正确地处理它们以满足调节要求。

考虑到其中某些瞬变的性质（某些瞬变的压摆率在安培/纳秒范围内较高），转换器可能无法足够快地对瞬变引起的压降做出响应。此时，Xilinx 推荐的去耦电容器就变得至关重要了（有关不同瞬变情况下的去耦电容器的详细信息，请参阅 XQRKU060 数据表）。这些去耦电容器是对 FPGA 封装中通常包含的任何内部去耦电容器的补充。

图 3-1 显示了微秒范围内 7A 左右负载瞬变的示例。

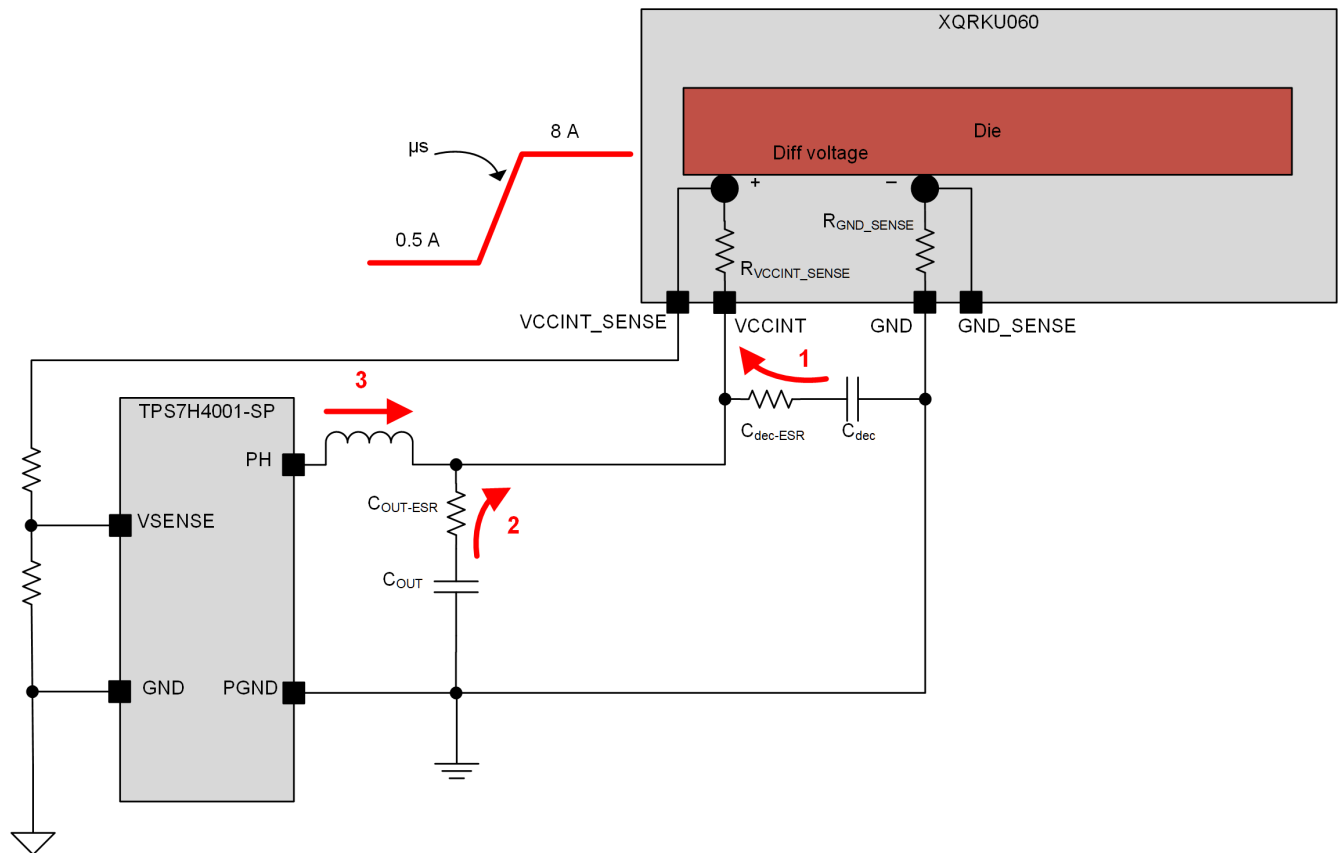


图 3-1. 负载瞬变引起的交流调节响应

最初，内部和外部去耦电容器将对电流的增加进行响应。根据 XQRKU060 数据表建议，外部去耦电容器的大小应与最坏情况下的预期瞬变相匹配，以便这些电容器可以正确地处理瞬变。如果 FPGA 在去耦电容器耗尽后仍需要额外的电流，则在转换器能够响应之前由转换器的输出电容器提供电流。因此，您必须为每个应用选择转换器的交叉频率和相应的反馈补偿。

4 辐射效应

除了直流和交流调节，我们还建议您考虑任何由转换器引入的辐射效应，以满足 XQRKU060 的容差要求。这些辐射效应包括总电离剂量 (TID) 和单粒子瞬变 (SET)。

TID 会给转换器的内部基准引入漂移，从而影响直流调节。TPS7H4001-SP 的额定值高达 100krad(Si)，德州仪器 (TI) 在暴露于 100krad(Si) 的情况下测试每种规格以与数据表限值相符。TPS7H4001-SP 的内部基准受 TID 影响非常小，在 100krad(Si) 下的最大漂移量为 2mV (~0.3%)。

由重离子引起的瞬变 (SET) 不像 TID 那样可预测，会对调节产生非常不利的影 响。如果转换器对关闭转换器输出或超过 XQRKU060 最大调节要求的瞬变较为敏感，则它会严重影响 FPGA 的性能。此外，较大的正瞬变可能会损坏 FPGA。

TPS7H4001-SP 可完全应对线性能量传递 (LET) 高达 75MeV-cm²/mg 的 SET；在通量为 1000 万个离子/cm² 的情况下输出电压超过 ±3% 时，此转换器具有弹性性能且 SET 数量 (当 PVIN=5V 且 VIN=5V 时，此数量 <10) 较低 (相关详细信息，请参阅 [TPS7H4001-SP 单粒子效应测试报告](#))。这可以转换成非常低的 SET 横截面，即 2.18 × 10⁻⁷cm²/器件 (PVIN = 5V, VIN = 5V)。由于具有此 SET 性能及 100krad(Si) 的 TID 额定值，TPS7H4001-SP 转换器可为 XQRKU060 可靠供电。

5 ADA-SDEV-KIT2 平台

借助 Alpha Data Parallel Systems 提供的 ADA-SDEV-KIT2 平台，您可以评估 KU060 (商用封装) 以及德州仪器 (TI) 提供的航天级电源解决方案。借助该平台，还可以通过 KU060 的 FPGA 夹层卡连接器测试 KU060 与其他器件 (如高速模数转换器) 的交互情况。图 5-1 显示了 ADA-SDEV-KIT2 的图片。

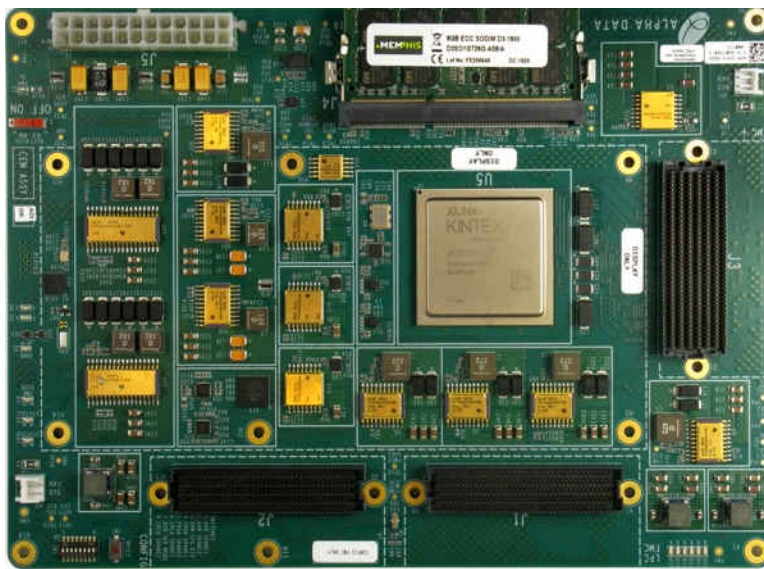


图 5-1. 用于 KU060 的 ADA-SDEV-KIT2 平台

为了在 ADA-SDEV-KIT2 平台上测试基于 TI 的电源的性能，德州仪器 (TI) 和 Alpha Data Parallel Systems 使用 ADA-SDEV-KIT2 套件的修改版本进行了大量测试，该套件使用 XQRKU060 (陶瓷封装) 而不是 KU060 (商用封装)。

测试重点关注两个方面：

- 评估 XQRKU060 陶瓷封装的性能，并将其与本文所讨论的 GND 引脚电阻的预期值相关联。
- 在直流和交流条件下验证表 5-1 所示的方法 (不使用 GND_SENSE 引脚)。

为了验证第一个方面，该测试的侧重点是使用两个不同的位流测量 GND_SENSE 引脚电压，以计算 RGND_SENSE。这两个位流在以下情况下生成：FPGA 要求来自 VCCINT 轨的电流足够大，以便在 GND_SENSE 引脚处生成电压。表 5-1 列出这两个位流的主要特性。所有测量均在直流条件下进行。

表 5-1. 用于在 ADA-SDEV-KIT2 中评估 XQRKU060 的位流

		1 号位流	2 号位流
时钟速率		13%，150MHz	7%，200MHz
逻辑使用率		81%	24%
块随机存取存储器使用率		0	47%
数字信号处理器使用率		0	19%
千兆收发器使用率		0	0%
峰值 VCCINT 内核电流		≈9A	≈25A
XPE VCCINT 电压	最小值	0.917V	0.922V
	最大值	0.993V	0.998V

对于电阻计算，TPS7H4001-SP 中的 COMP 引脚电压值近似为表 5-1 中所示的每个位流对应的电流值，约为 9A 和 25A。COMP 引脚电压与来自器件功率级的峰值输出电流相关。这些电流近似值也与从 XPE 获得的 VCCINT 和 VCCINT_IO 电流非常接近（如数据表所示，VCCINT 和 VCCINT_IO 在 XQRKU060 中内部连接）。

此测试后的数据得出的 RGND_SENSE 值为 0.25mΩ 和 0.36mΩ，分别对应于大概 9A 和 25A 位流。这与预期相符，即采用陶瓷封装时，所使用的引脚和层面数量较多，GND 信号和层面通常具有极其小的电阻。

经 XPE 和 Vivado 软件验证，所有测试案例均满足 XQRKU060 中 VCCINT 的直流调节要求。

1 号位流写入 ADA-SDEV-KIT2 的外部配置闪存即验证了满足交流调节要求。清除 FPGA，然后在恒定回路中通过闪存对其进行配置。FPGA 中与二极管相连的 DONE 信号用作捕捉交流瞬变的触发器。

捕获的信号为 VCCINT、GND、VCCINT_SENSE 和 GND_SENSE。前两个信号通过 FPGA 下的去耦电容器捕获。SENSE 信号是使用 FPGA 下用于连接 VCCINT_SENSE 和 GND_SENSE 引脚的 0Ω 电阻占用区（对于 KU060 的陶瓷封装版本未装入）捕获的。为便于参考，表 5-2 列出了 ADA-SDEV-KIT2 中使用的 VCCINT 去耦电容器。该电容不包括用于 TPS7H4001-SP 的去耦电容器。

表 5-2. ADA-SDEV-KIT2 中使用的 VCCINT 去耦电容器

电容器值 (μF)	数量
680	3
100	5
47	13
4.7	10
1	16
0.22	55

在未编程状态下，ADA-SDEV-KIT2 FPGA 中的 VCCINT 轨消耗约 0.5A 电流。这意味着每次配置或清除 FPGA 时，会发生大概 8.5A 的瞬变。

图 5-2 显示了 VCCINT 响应（以 GND 为基准）的示波器屏幕截图，而图 5-3 显示了 VCCINT_SENSE 响应（以 GND_SENSE 为基准）的示波器屏幕截图。在这两种情况下，负载阶跃响应均满足 XPE 中的 ±38mV 调节要求，如表 5-1 所示 (0.917V - 0.993V)。

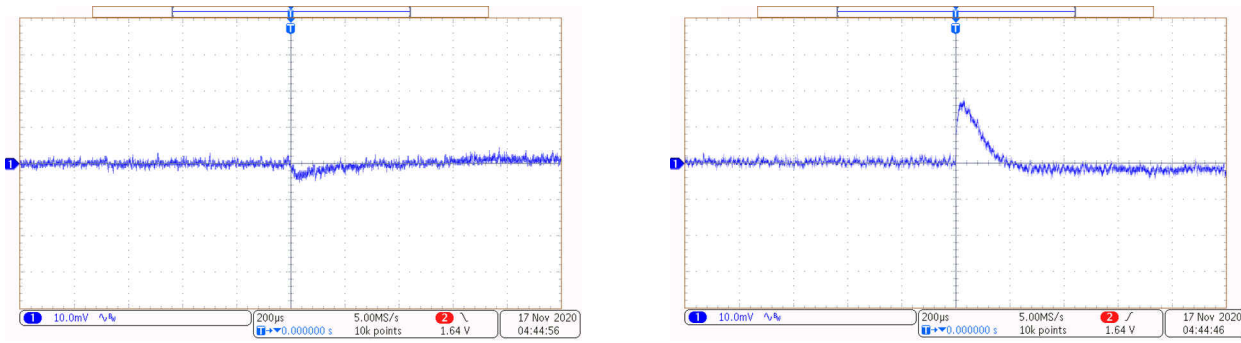


图 5-2. 使用 ADA-SDEV-KIT2 中的 1 号位流时，VCCINT 的瞬态响应 (以 GND 为基准)。左侧的响应表示增加的负载阶跃，右侧的响应表示减少的负载阶跃。

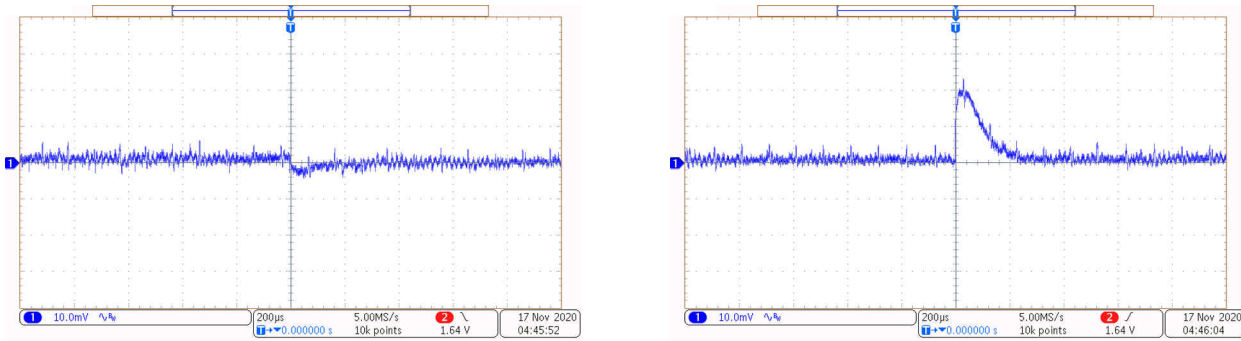


图 5-3. 使用 ADA-SDEV-KIT2 中的 1 号位流时，VCCINT_SENSE 的瞬态响应 (以 GND_SENSE 为基准)。左侧的响应表示增加的负载阶跃，右侧的响应表示减少的负载阶跃。

6 结论

XQRKU060 是一款面向航天应用的高性能 FPGA，可在快速发展的市场中实现新的系统架构。鉴于其先进的计算能力，为 XQRKU060 供电需要考虑多种情形和约束条件，以满足其电压调节要求。这些情形包括直流和交流调节以及辐射效应。通过将 TPS7H4001-SP 的输出电压配置为由 XPE 指示的特定电压以及使用 VCCINT_SENSE 引脚连接，您可以对获得可靠且经验证的耐辐射电源充满信心。

7 主要撰稿人

德州仪器 (TI) :

- Javier Valle , 航天电源产品部系统经理
- Adrian Helwig , 首席现场应用工程师
- Daniel Hartung , 航天电源产品部应用工程师
- Kurt Eckles , 航天电源产品部产品营销工程师

Xilinx :

- John Heslip , 技术营销主任工程师
- Troy Jones , 空间系统架构师

Alpha Data Parallel Systems :

- Stephen McKeown , 高级设计工程师

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司