

Jasper Li

摘要

由于存在电压尖峰，升压转换器的输出纹波波形通常大于计算结果。此类现象与升压电路的测量方法、工作原理以及非理想特性有关。本应用手册分析了输出纹波中出现尖峰的根本原因，并提供了解决该问题的简单解决方案。

内容

1 引言.....	2
2 工作台测试观察结果.....	3
3 根本原因分析.....	5
4 简单的解决方案.....	8
5 总结.....	10

插图清单

图 1-1. TPS61022 简化版原理图.....	2
图 1-2. 升压转换器的理想工作波形.....	2
图 2-1. 电压探针设置.....	3
图 2-2. 长接地线和全带宽条件下的电压纹波.....	3
图 2-3. 短接地线和全带宽条件下的电压纹波.....	4
图 2-4. 带宽为 20 MHz 时的电压纹波.....	4
图 3-1. 陶瓷电容器的特性.....	5
图 3-2. 具有寄生电感的升压转换器功率级.....	5
图 3-3. 低侧 MOSFET 关断时的简化模型.....	6
图 3-4. 低侧 MOSFET 导通时的简化模型.....	6
图 4-1. 铁氧体磁珠的位置.....	8
图 4-2. 铁氧体磁珠的特性.....	8
图 4-3. 具有铁氧体磁珠时的输出电压纹波.....	9

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

图 1-1 展示了 TPS61022 升压转换器电路。通过交替开关两个集成式 MOSFET，电感器会储存能量，然后在高于输入电压时释放至 VOUT。VOUT 的平均值由 FB 引脚和 R1、R2 电阻器设置。

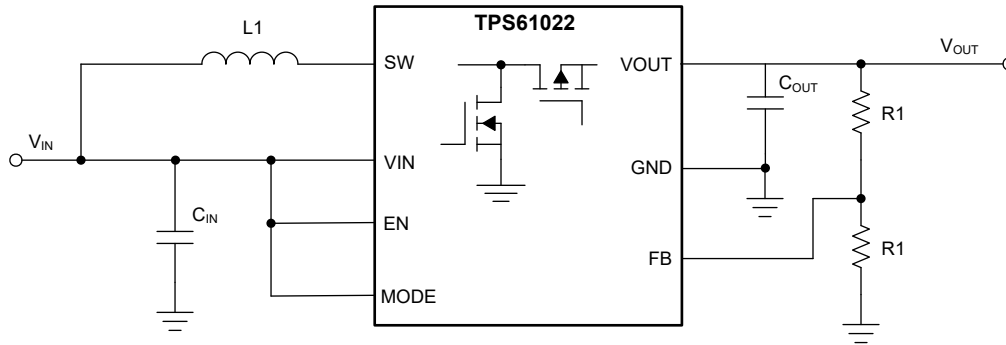


图 1-1. TPS61022 简化版原理图

图 1-2 展示了重负载条件下的理想工作波形。在图中：

- I_L 是电感电流。
- I_{OUT} 是升压转换器的输出电流。
- I_D 是流经同步整流 MOSFET 的电流。
- SW 是 SW 引脚上的电压波形。
- ΔV_{OUT} 是输出电压纹波。

电感器储存能量时，输出电压会下降，而当电感器释放能量时，输出电压则会升高。此行为会导致方程式 1 定义的输出电压纹波 ΔV_{OUT} 。此公式通常可在升压转换器数据表中找到。如果升压转换器设计合理， ΔV_{OUT} 通常小于平均输出电压的 1%。

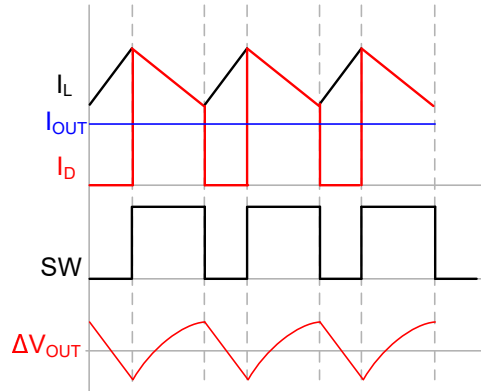


图 1-2. 升压转换器的理想工作波形

$$\Delta V_{OUT} = \frac{(V_{OUT} - V_{IN}) \times I_{OUT}}{V_{OUT} \times f_{SW} \times C_{OUT}} \quad (1)$$

在此公式中：

- C_{OUT} 是有效输出电容。
- f_{SW} 是升压转换器的开关频率。

不过，在实际电路中可能会观察到远大于计算结果的输出电压纹波。本应用手册详细说明了出现该问题的根本原因，并提供了解决该问题的解决方案。

2 工作台测试观察结果

方程式 1 假定输出电容器是理想器件，并且通过电压探针可以准确测量电容器纹波。不过，实际纹波波形与示波器带宽设置和电压探针接地方法有关。

Tektronix 示波器的带宽可设为 20 MHz 或全带宽，根据示波器型号，全带宽可为 500 MHz 或更高。电压探针接地环路可如图 2-1 所示。左侧探针具有较长的接地线，并且测试点不靠近电容器。右侧探针具有较短的接地线，并且测试点位于电容器的端子上。

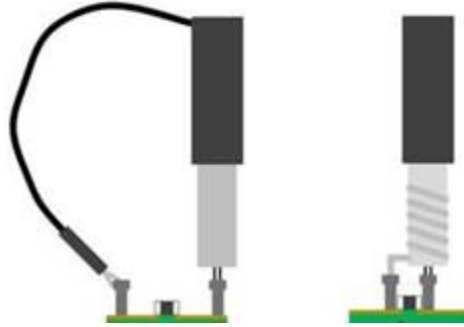


图 2-1. 电压探针设置

以 TPS61022 为例，图 2-2 至图 2-4 展示了不同设置下的输出纹波波形。从波形可以得出三个结论：

1. 探针尖端及其接地之间的环路必须尽可能小，以避免出现任何噪声耦合。
2. 除开关频率纹波之外，输出电容器上还存在较大的高频电压尖峰。
3. 当带宽设置为 20 MHz 时，电压尖峰会很小，因为这时示波器会充当低通滤波器。

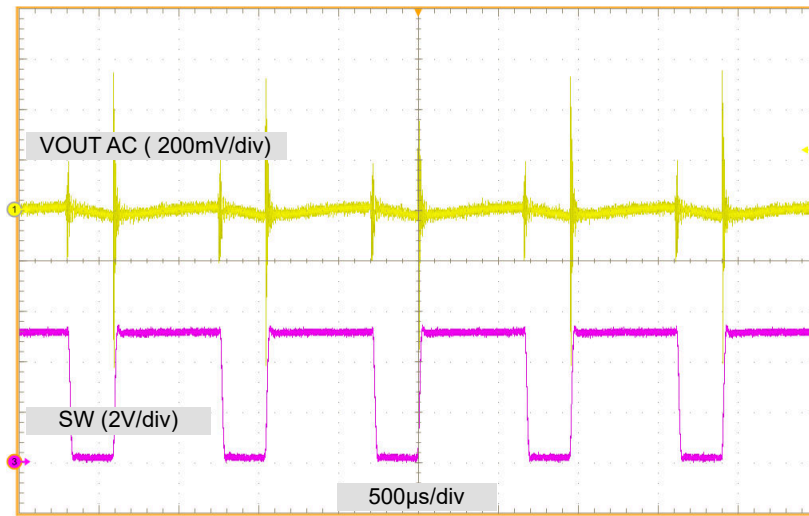


图 2-2. 长接地线和全带宽条件下的电压纹波

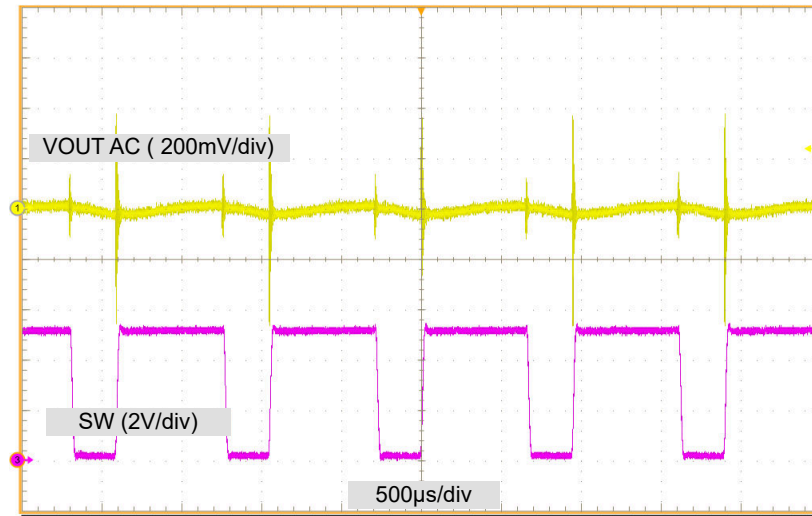


图 2-3. 短接地线和全带宽条件下的电压纹波

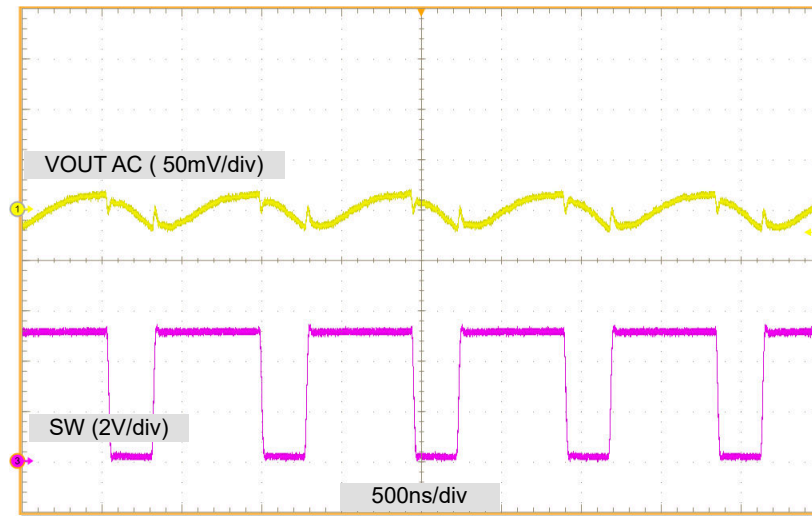


图 2-4. 带宽为 20 MHz 时的电压纹波

3 根本原因分析

图 2-3 中所示的电压尖峰是输出电容器的 ESR (等效串联电阻) 和 ESL (等效串联电感) 导致的。图 3-1 展示了 0805 封装陶瓷电容器的阻抗随频率变化的情况。A 点是 ESL 和电容器的谐振频率。

电容器的阻抗等于其 ESR，大概为 $3.5\text{ m}\Omega$ 。在频率超过 10 MHz 后，电容器的阻抗会以线性方式增加。这是 ESL 的行为。根据 B 点和 C 点的阻抗，ESL 预计为 0.27 nH 。

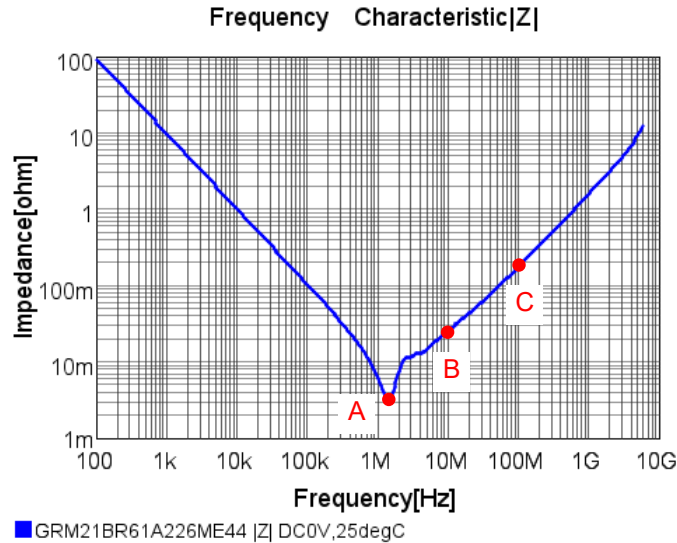


图 3-1. 陶瓷电容器的特性

ESR 上的电压与流过电容器的电流成比例。一个陶瓷电容器仅具有几毫欧的电阻，而这里通常会并联多个陶瓷电容器。因此，这个由 ESR 导致的电压纹波很小，可以忽略不计。

ESL 上的电压与其 di/dt 成比例，会很大。因为升压转换器的开关频率总会倾向于尽可能大，以便减小解决方案尺寸。 di/dt 也将随着开关频率而增加，以减少 IC 上的功率损耗。

考虑到 PCB 布线和 IC 封装的 ESL 和寄生电感，升压转换器功率级的原理图如图 3-2 中所示，其中 L_{PAR1} 是引脚排列寄生电感和 PCB 寄生电感的总和，而 L_{PAR2} 是 GND 引脚的寄生电感。

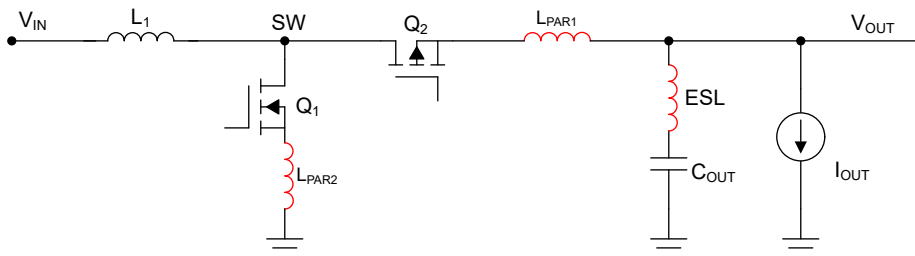


图 3-2. 具有寄生电感的升压转换器功率级

当 Q_1 关断且 SW 节点电压大于 V_{OUT} 时，电感器电流开始从 Q_1 流向 Q_2 。电流转换期间的等效电路如图 3-3 所示，其中：

- C_{Q1} 表示 Q_1 的寄生电容。 Q_1 的关断时间可以忽略。
- L_{L1} 表示电感，因为电感电流在较短的转换期间内几乎保持恒定。
- V_{COUT} 表示输出电容器理想电容部分的电压。该电压在此转换期间内几乎保持恒定。

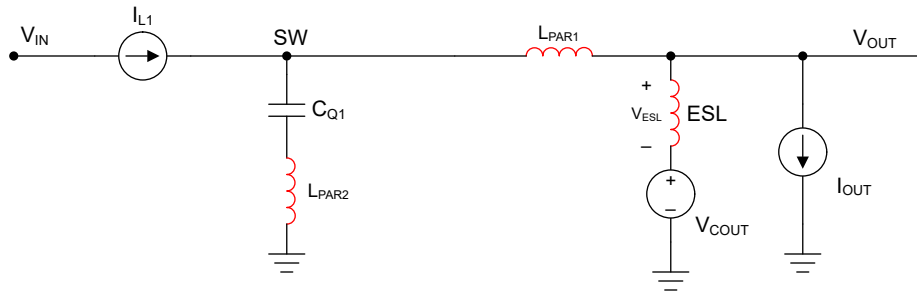

图 3-3. 低侧 MOSFET 关断时的简化模型

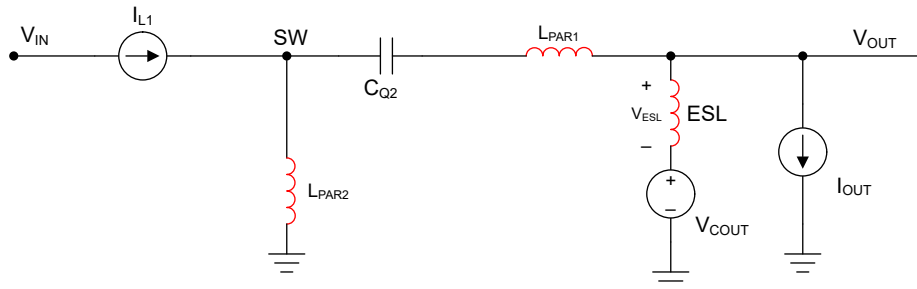
图 3-3 可以进一步简化为具有初始电感电流 I_{L1} 的 LC 电路。电感值是电路中的所有寄生电感之和。电容为 C_{Q1} 。因此，ESL 的电压尖峰可以通过方程式 2 得出。电压尖峰与电感电流成比例。

$$V_{ESL} = I_{L1} \cdot \sqrt{\frac{(L_{PAR1} + L_{PAR2} + ESL)}{C_{Q1}}} \cdot \frac{ESL}{(L_{PAR1} + L_{PAR2} + ESL)} \quad (2)$$

振荡频率可以通过方程式 3 得出。

$$f_{ESL} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{(L_{PAR1} + L_{PAR2} + ESL) \cdot C_{Q1}}} \quad (3)$$

当 Q_1 导通时，电感电流首先从 Q_2 流向 Q_1 ，然后电压 Q_1 快速降至零。此期间的简化版原理图如图 10 所示，其中 C_{Q2} 表示 Q_2 在关断时的寄生电容。


图 3-4. 低侧 MOSFET 导通时的简化模型

ESL 处的最大电压尖峰可以通过方程式 4 得出。该电路还可简化为 LC 电路。 V_{ESL} 电压电平与升压输出电压成比例，而振荡频率与方程式 3 中的相同，因为 C_{Q2} 与 C_{Q1} 类似。

$$V_{ESL} = V_{COUT} \cdot \frac{ESL}{(L_{PAR1} + L_{PAR2} + ESL)} \quad (4)$$

以 TPS61022EVM 为例， C_{Q1} 和 C_{Q2} 约为 0.4nF。 L_{PAR1} 接近 0.3 nH； L_{PAR2} 约为 0.05nH；ESL 约为 0.09nF，因为这里存在三个并联的电容器。因此，LC 振荡频率高达 300 MHz。

当 $V_{IN}=3.6V$ 、 $V_{OUT}=5V$ 且 $I_{OUT}=3A$ 时， I_{L1} 约为 $4.4A$ 。 Q_1 导通和关断条件下的 V_{ESL} 尖峰都约为 $0.75V$ 。不过，图 2-3 中的实际电压尖峰会小于该计算结果，尤其是在 Q_1 导通条件下。导致该差异出现的主要因素是 Q_1 的导通/关断时间。 Q_1 的导通/关断时间为 5 ns 。这会显著影响 300 MHz LC 振铃导致的电压尖峰。如果考虑导通/关断时间，那么很难通过公式来计算电压尖峰。更好的方法是使用 PSPICE-FOR-TI 或其他工具进行仿真。

4 简单的解决方案

实际系统电路中的实际输出纹波并不一定等于 EVM 中测量的值。而且此高频噪声并不一定会影响系统负载：

- 如果升压输出与负载之间存在 LDO，LDO 及其输入和输出电容器有助于滤除此类高频噪声。
- 如果升压输出与负载之间存在长线缆，线缆 ESR、ESL 与负载附近的旁路电容器会构成 RLC 滤波器，以减少高频噪声。
- 此类高频噪声可能不会影响系统负载的性能。

但如果负载对高频噪声敏感，或者 EMI 性能对系统至关重要，在高频条件下具有高阻抗的铁氧体磁珠可以显著降低此类噪声。图 4-1 中显示了铁氧体磁珠的位置。在频率接近 300 MHz 时，FB 的阻抗都应远大于 C_{OUT2} 。

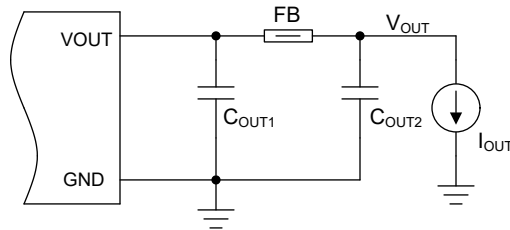


图 4-1. 铁氧体磁珠的位置

以 BLM18KG30TH1 为例，当频率位于 200 MHz 至 1000 MHz 范围内时，其阻抗高于 35Ω 。阻抗远大于电容器，如图 4-2 所示。

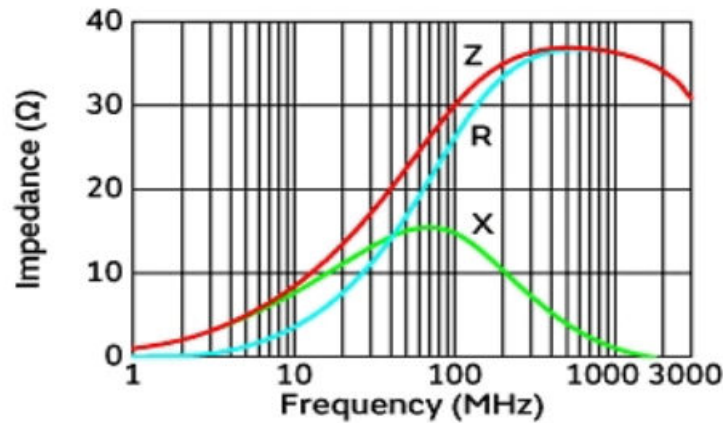


图 4-2. 铁氧体磁珠的特性

在 TPS61022EVM 中添加铁氧体磁珠并将三个电容器的其中一个移到 C_{OUT2} 位置后，输出电压纹波如图 4-3 所示。高频噪声会显著降低，并且纹波主要是开关频率纹波。

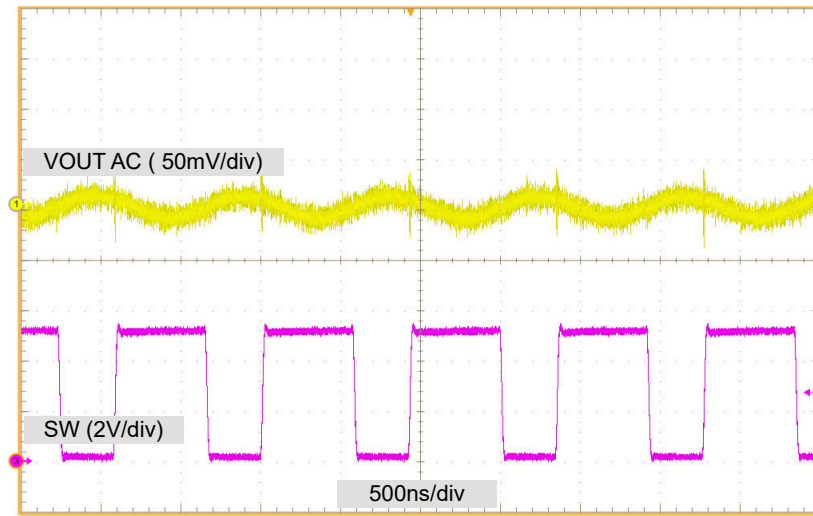


图 4-3. 具有铁氧体磁珠时的输出电压纹波

5 总结

升压转换器输出电压中的电压尖峰主要是输出电容器的 ESL 导致的。探针和示波器的设置也会影响输出电压纹波波形。本应用手册详细说明了出现电压尖峰的根本原因，并提出了可在必要时使用铁氧体磁珠来减少尖峰。

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