

Andy Chen, Pin Tsai, Daniel Li

### 摘要

随着电源效率变得越来越重要，需要更快的开关速度来降低效率损失。但是，随着开关速度的提高，必须考虑一些权衡因素，例如显著的过冲、开关节点上的振铃电压和电磁干扰 (EMI)。振铃的幅度是高边 NFET 的开关速度以及布局和器件封装中的寄生电感的函数。有多种方法可以减少振铃，使 MOSFET 开关保持在安全工作区域内，并减少因此造成的 EMI 噪声，例如使用自举电阻器、高边栅极电阻器或 RC 缓冲器。

本应用手册重点介绍了使用自举电阻器控制开关节点振铃和优化 EMI 时的设计注意事项。

### 内容

1 引言.....	2
2 瞬时开关引起的 EMI 噪声.....	3
3 优化电路和布局设计.....	4
4 使用自举电阻器.....	4
5 关于 RBOOT 的设计注意事项.....	5
5.1 BT-SW UVLO.....	5
5.2 刷新自举电容器.....	5
5.3 热性能.....	6
6 具有专用 RBOOT 引脚的转换器.....	7
7 总结.....	7
8 参考文献.....	7

### 插图清单

图 1-1. 功率级元件.....	2
图 1-2. 开关节点振铃.....	2
图 2-1. SW 节点电压的频谱.....	3
图 4-1. 通过 RBOOT 减少 SW 振铃.....	4
图 5-1. BT-SW 压降.....	5
图 5-2. 刷新 CBOOT.....	6
图 5-3. 具有 RBOOT 的并联二极管.....	6
图 6-1. 显示 RBOOT 引脚功能的简化电路.....	7

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

图 1-1 中的电路显示了同步降压转换器的功率级元件。此模型中包含导致开关节点振铃的寄生电感和电容。

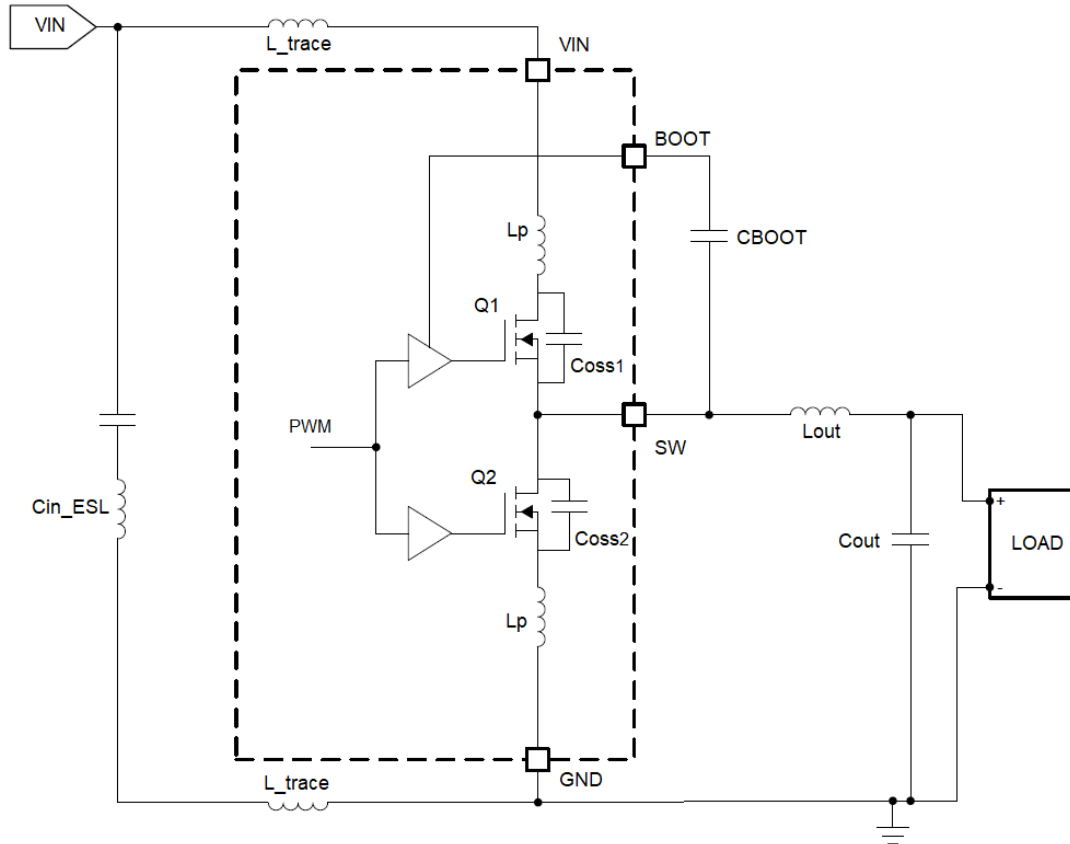


图 1-1. 功率级元件

当 LS 栅极信号变为低电平时，低边 MOSFET 关断，电感器电流流经低边 MOSFET 的体二极管。在短暂的死区时间后，高边 MOSFET 导通，电流将强制低边 MOSFET 的体二极管关断。当体二极管反向恢复时，SW 上的电压开始上升，振铃波形由寄生电感和开关节点电容的相互作用而产生。这种相互作用主要由低边 MOSFET 的 Coss2 组成，如图 1-2 所示。

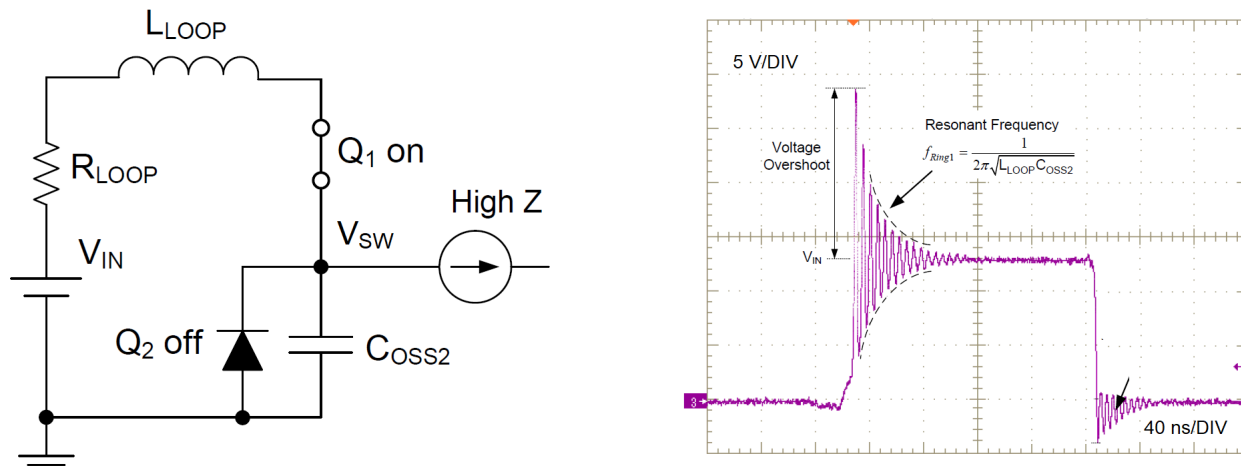


图 1-2. 开关节点振铃

这种振铃不仅会增加 MOSFET 开关损耗和峰值漏源电压尖峰，而且还会影响 50MHz 至 300MHz 范围内的宽带 EMI。必须在数据表中的器件额定电压限制范围内监控振铃，以保持可靠运行。

## 2 瞬时开关引起的 EMI 噪声

图 2-1 的左侧显示了简化的梯形波，其中包括周期  $T_{sw}$ 、脉冲宽度  $t_1$ 、上升时间  $t_R$  和下降时间  $t_F$ 。通过傅里叶分析可以发现，频域由基频和多个高次谐波组成。谐波振幅包络是一种双正弦函数，转角频率为  $f_1$  和  $f_2$ ，具体取决于时域波形的脉冲持续时间以及上升和下降时间。辐射 EMI 问题通常发生在 50MHz 至 300MHz 范围内，并且上升和下降时间的增加会使  $f_2$  点的频率降低，而高频会以 40dB/DEC 的斜率更快地滚降。在较低的频率范围内，上升和下降时间增加的影响是有限的。

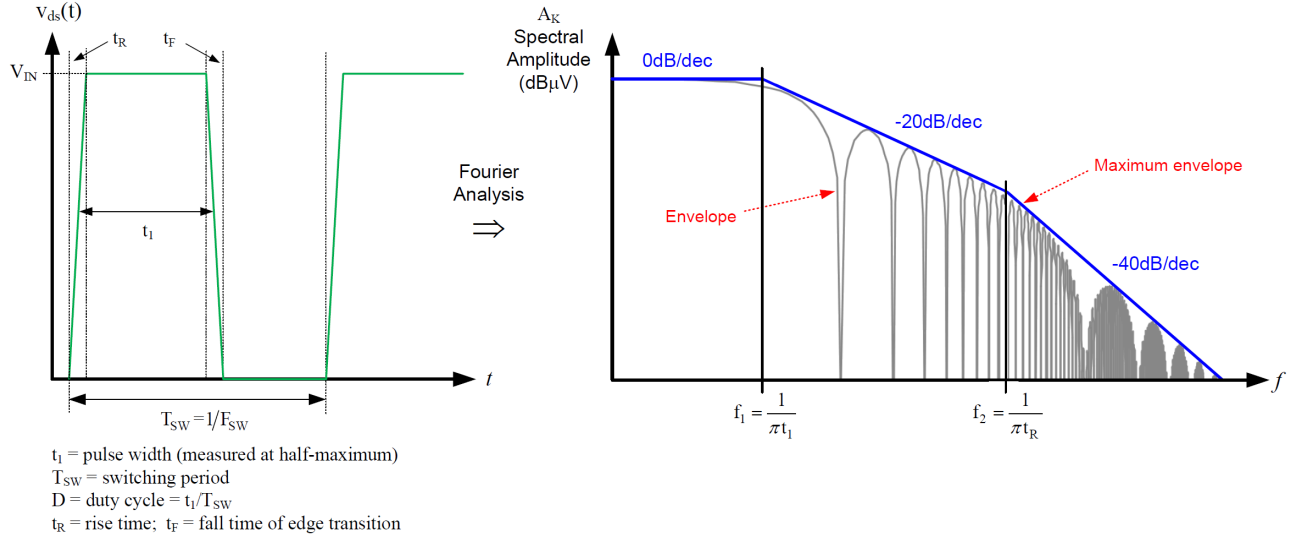


图 2-1. SW 节点电压的频谱

### 3 优化电路和布局设计

有多种方法可以减少振铃，使 MOSFET 开关和控制器引脚保持在安全工作区域内，并减少因此造成的 EMI 噪声，例如使用自举电阻器、高边栅极电阻器或 RC 缓冲器。然而，第一种方法是优化电路设计、元件选择和 PCB 布局，以最大限度地减小关键路径的寄生电感和环路面积。TI 提供了许多有关如何优化电路和布局设计以降低 EMI 的支持文档。

如果降压转换器电路的 EMI 水平超过要求水平，并且无法改善布局或滤波，则通过自举电阻降低降压转换器开关速度有助于降低 EMI 水平。

### 4 使用自举电阻器

图 1-1 中的电荷泵电路使用 CBOOT 将高边栅极电源升压到高于功率级的电源电压。减少振铃的一种方法是与自举电容器串联一个自举电阻器，这会减慢高边 NFET 的导通速度，如图 5-2 所示。这种方法让寄生网络有更多的时间可以放电，从而最终限制图 4-1 中所示的振铃。确定自举电阻值的方式是从 0 开始增加电阻值，直到达到所需的振铃或 EMI 水平。

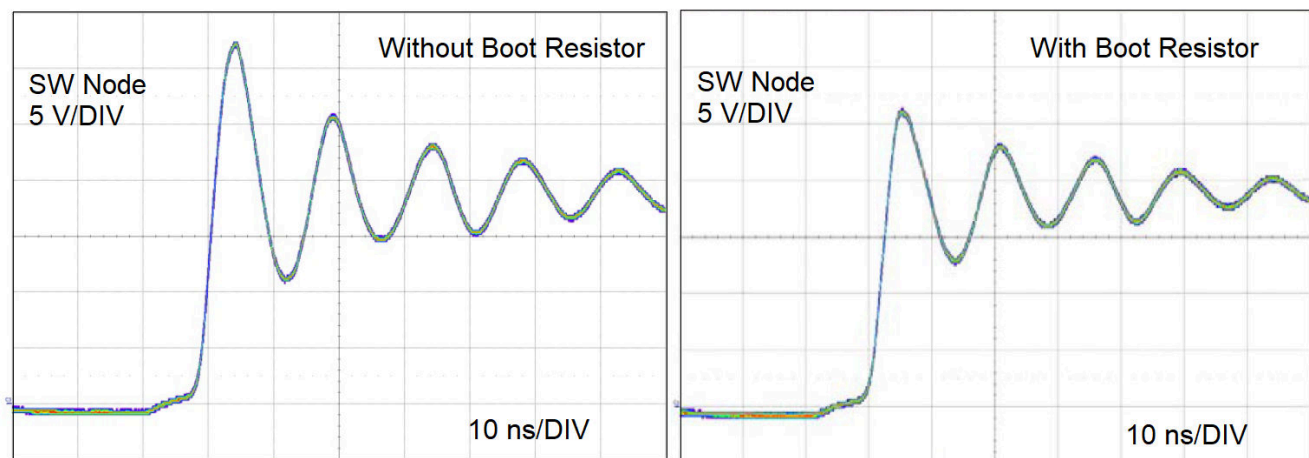


图 4-1. 通过 RBOOT 减少 SW 振铃

## 5 关于 RBOOT 的设计注意事项

RBOOT 引脚与 CBOOT 电容器串联，该电容器不仅会限制 HS 驱动电流，还会影响放电和刷新周期内 BT-SW 引脚上的电压。BOOT 和 SW 引脚之间的电压用作 HS 驱动器的辅助电源，而 HS 驱动器是在控制器和 HS 栅极驱动器之间传输控制信息的电平转换电路。必须注意的是，添加一个与自举电容器串联的电阻器不仅会增加高边 MOSFET 转换时间，还会产生电路影响。

### 5.1 BT-SW UVLO

当 HS MOSFET 导通时，从自举电容器流经 RBOOT 的电流会导致从 BOOT 到 SW 引脚的电压下降。如果该压降较大，则 HS MOSFET 栅源极上的电压会降低，从而可能导致器件导通速度减慢或触发 BOOT UVLO 电路。

LM53602 是一款 36V、2A 同步降压转换器。BT-SW 电压 UVLO 阈值为 2.5V (典型值)，延迟时间为 50ns (典型值)。图 5-1 显示了 LM53602 应用电路在 2MHz 和 FWPM 模式下进行 12V 至 3.3V 转换时测得的 BT-SW 电压。当 RBOOT 值为 20Ω 时，BT-SW 电压会下降到 2.5V 以下并保持 44ns，这有可能达到 UVLO 阈值。

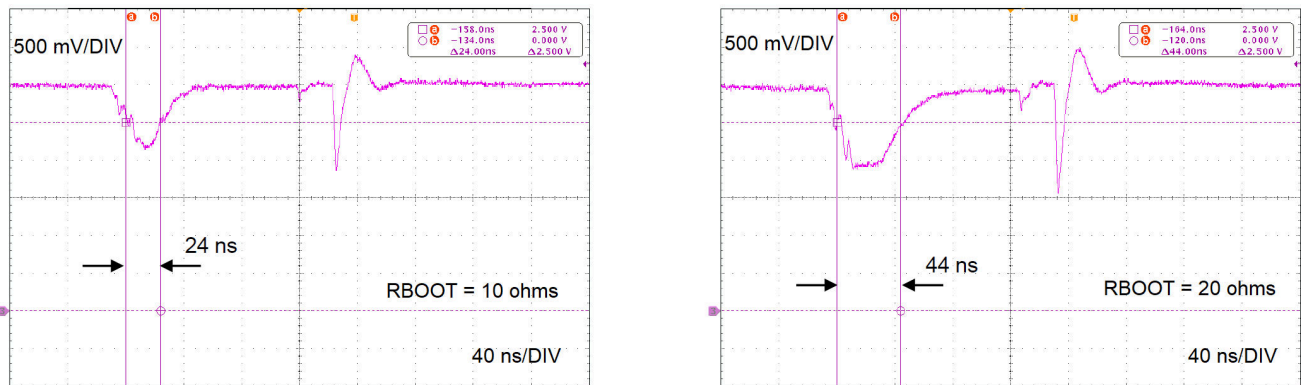


图 5-1. BT-SW 压降

通常情况下，当触发 BOOT UVLO 时，HS FET 会立即关断，直到下一个周期为止，但如果还有其他异常情况，可能会出现意外的开关行为，因此必须在各种工作条件下仔细检查 BT-SW 电压，避免达到 UVLO 阈值。

### 5.2 刷新自举电容器

在由高占空比应用或高开关频率导致关断时间较短的应用中，如果自举电阻器过大，则自举电容器无法在每个周期中充满电。出于这些原因，自举电阻器必须保持低阻值，并且必须在所有 Vin、Vout、Iout 和工作温度条件下进行全面测试和评估，以便实现稳健的性能。

充电电流不仅受到 RBOOT 的限制，而且还受到充电回路上的寄生电感限制。图 5-2 显示了 LM53602 的 CBOOT 充电环路的简化方框图。Lparasitic 占总寄生电感的比例很小。由于开关频率为 2MHz，CBOOT 永远不会向 VCC 充电。仿真结果表明，当 Lparasitic 仅为几 nHs 且 RBOOT 为 10Ω 时，V1 会随着时间的推移而变得越来越低，并在最坏的情况下会达到 UVLO。当 LM53602 在 2MHz 频率下运行时，建议使用 6.8Ω 或更小的 RBOOT。

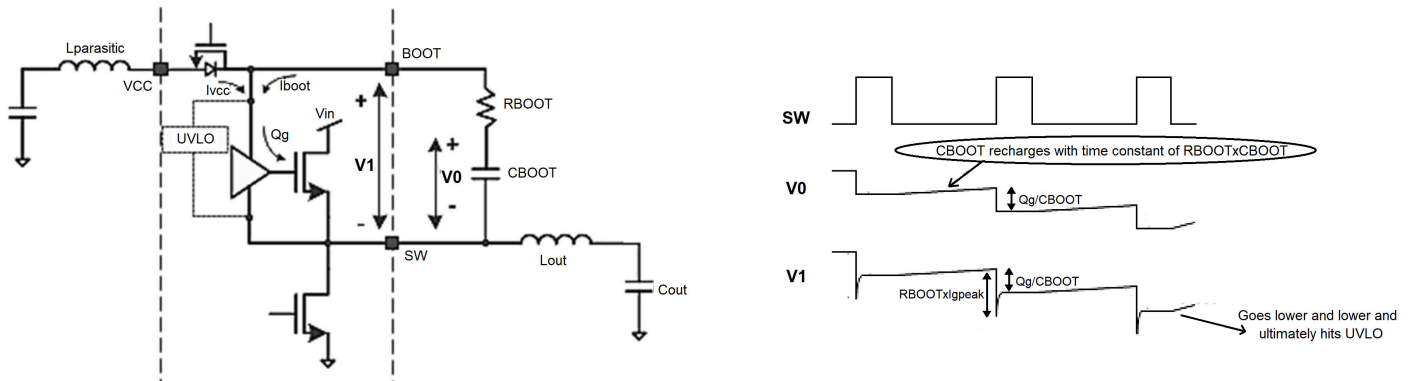


图 5-2. 刷新 CBOOT

如果在 CBOOT 充电期间将小型肖特基二极管与绕过 RBOOT 引脚的 RBOOT 并联，则可以使用更大的 RBOOT，如图 5-3 所示。CBOOT 电容器的充电时间最长为 10ns，这短于大多数降压转换器 100ns 至 200ns 的典型 T-off\_min。

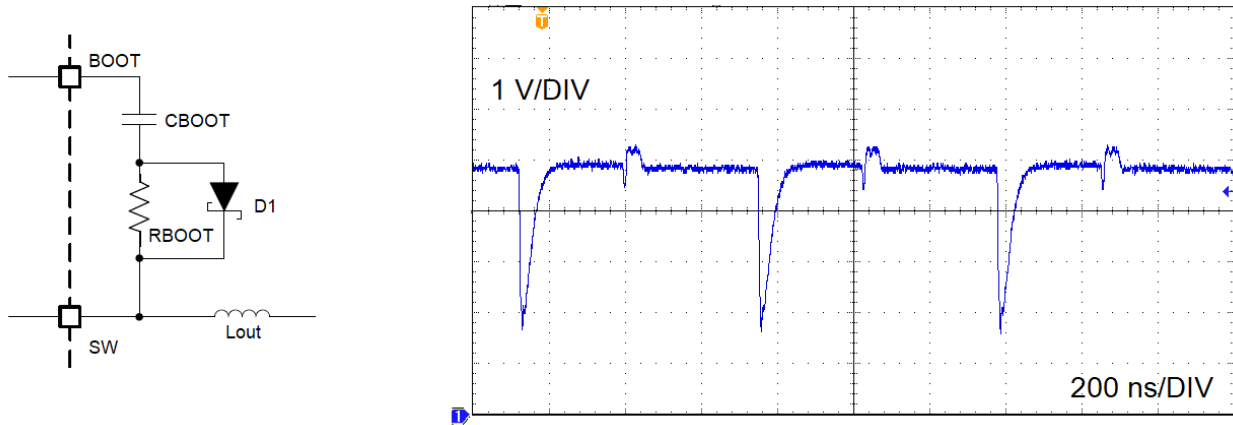


图 5-3. 具有 RBOOT 的并联二极管

### 5.3 热性能

增加自举电阻会减慢 MOSFET 导通时序并增加开关功率损耗，从而导致效率降低。请注意优化该电阻以降低 EMI，同时不会产生过多热量，尤其是在高 Vin、高 Fsw 和最大负载电流条件下。

## 6 具有专用 RBOOT 引脚的转换器

RBOOT 的值取决于高边 MOSFET 的大小。大多数应用中使用大约  $5\ \Omega$  至  $10\ \Omega$  的值。如果自举电阻值过大，则自举电容器无法在每个周期中充满电。当自举电阻值过大时，栅极驱动器没有足够的电压来保持高边 FET 导通，并可能在周期中间关闭。此栅极驱动器行为限制了可通过自举电阻方法减少的振铃量。为了更灵活地优化 EMI，LM61440/60 和 LM61480/95 系列采用专用的 RBOOT 引脚设计，允许通过电阻器在导通期间选择高边 FET 驱动器的强度。图 6-1 显示了集成的 RBOOT 引脚。通过 RBOOT 引脚消耗的电流（图 6-1 中的虚线环路）被放大并通过 CBOOT 消耗（图 6-1 中的虚线）。此功能允许使用各种 RBOOT 值来优化 EMI。

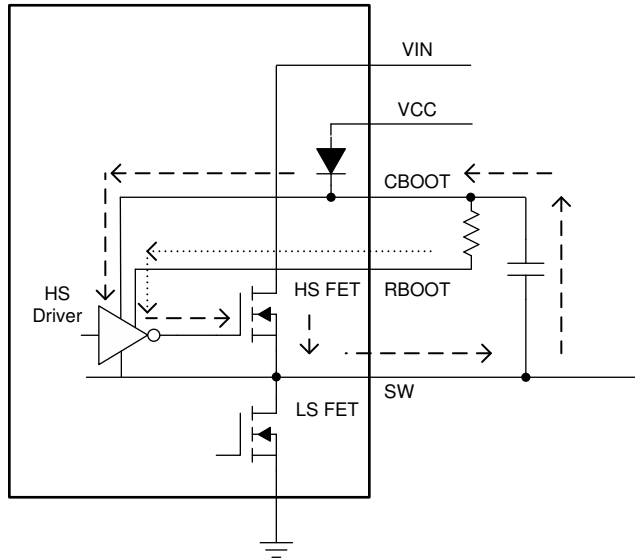


图 6-1. 显示 RBOOT 引脚功能的简化电路

## 7 总结

自从开关模式电源采用半导体器件以来，业内一直需要控制功率半导体开关产生的振铃。值得注意的是，自举电阻器仅影响高边 FET 的导通速度，因此该方法是一种减少振铃的高效方法，并且对总体解决方案效率的影响很小。使用这种自举电阻器法可以显著降低整个系统中的噪声，因此是一种很好的权衡措施。

解决 EMI 问题需要降低开关节点振铃频率，但 RBOOT 不会降低。在需要额外开关节点振铃控制的情况下，可以添加缓冲器来降低 SW 节点上的振幅和振铃频率。

## 8 参考文献

1. 德州仪器 (TI)，[更大限度地减少 TPS53355 和 TPS53353 系列器件的开关振铃](#) 应用手册。
2. 德州仪器 (TI)，[AN-2155 关于降低直流/直流转换器 EMI 的布局提示](#) 应用手册。
3. 德州仪器 (TI)，[控制同步降压转换器的开关节点振铃](#) 模拟设计期刊。

## 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