

Application Brief

如何进行电源设计 - 第 7 部分



Markus Zehendner

本应用简报重点介绍了正激式转换器。此拓扑的输出功率范围通常介于 100W 和 250W 之间。如果输出功率高于此级别，可以使用推挽或半桥拓扑来提高效率，从而实现更好的设计。这些拓扑是本系列后续部分的主题。

单开关正激式转换器

单开关正激式拓扑可使输入电压升高或降低，从而生成可为正或负的隔离式输出电压。当开关 Q1 导通时，能量从初级侧转移到次级侧。绕组 Nd 和二极 D3 在退磁期间提供一条复位变压器的路径。二极管 D2 在开关 Q1 未导通时提供续流路径。图 1 是非同步单开关正激式转换器的原理图。

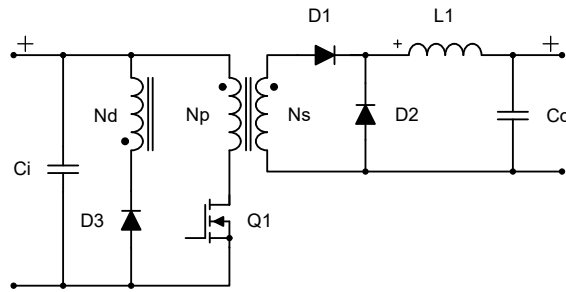


图 1. 非同步单开关正激式转换器的原理图

方程式 1 计算连续导通模式 (CCM) 下的占空比：

$$D = \frac{V_{OUT} + V_f}{V_{IN} \times \frac{n_s}{n_p}} \quad (1)$$

其中

- V_{IN} 是输入电压
- V_{OUT} 是输出电压
- V_f 是二极管正向电压
- n_p / n_s 是初级绕组和次级绕组之间的匝数比

最大占空比限制为 50%，因为变压器需要足够的时间通过退磁绕组复位。

方程式 2 计算最大金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 应力：

$$V_{Q1} = 2 \times V_{IN} + V_f \quad (2)$$

其中

- V_{IN} 是输入电压
- V_f 是二极管正向电压

如果变压器的耦合不确定，则漏电感中储存的多余能量会产生额外的电压尖峰。因此，请为 Q1 选择一个包含合理裕度的额定电压。

方程式 3 可计算最大整流器二极管应力：

$$V_{D1} = (V_{IN} + V_f) \times \frac{n_s}{n_d} - V_f \quad (3)$$

其中

- V_{IN} 是输入电压
- V_f 是二极管正向电压
- n_s / n_d 是初级绕组和次级绕组之间的匝数比

方程式 4 可计算最大续流二极管应力：

$$V_{D2} = V_{IN} \times \frac{n_s}{n_p} - V_f \quad (4)$$

其中

- V_{IN} 是输入电压
- V_f 是二极管正向电压
- n_s / n_p 是初级绕组和次级绕组之间的匝数比

由于正激式转换器可以看作是带有变压器的降压转换器，因此由于输出 LC 滤波器和通过二极管 D2 的续流路径，该转换器系列也具有连续输出电流。与降压转换器一样，正激式转换器在输入端具有脉冲电流。这种情况会导致转换器输入端产生相当高的电压纹波。为了实现电磁兼容性，可能需要额外的输入滤波。如果转换器需要给一个非常敏感的负载供电，那么输出端的第二级滤波器有助于抑制输出电压纹波。

由于单开关正激式转换器仅需要低侧栅极驱动器，因此可以使用升压或通用脉宽调制 (PWM) 控制器集成电路 (IC) 来构建该转换器。

就动态行为而言，隔离式反馈路径中的光耦合器是正激式转换器可达到的调节带宽的主要限制因素。如果需要高稳定带宽，可将 PWM 控制器放置在转换器的次级侧。

图 2 至图 11 展示了非同步单开关正激式转换器中 FET Q1、初级变压器绕组 N_p 、二极管 D1、续流二极管 D2 和电感器 L1 在 CCM 下的电压和电流波形。

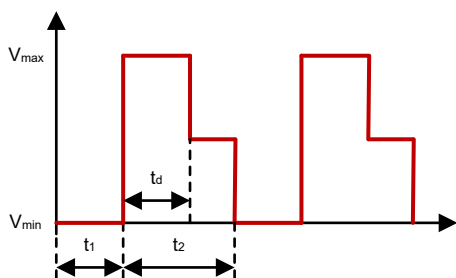


图 2. CCM 下的单开关正激式 FET Q1 电压波形

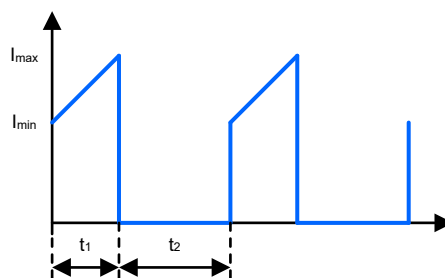


图 3. CCM 下的单开关正激式 FET Q1 电流波形

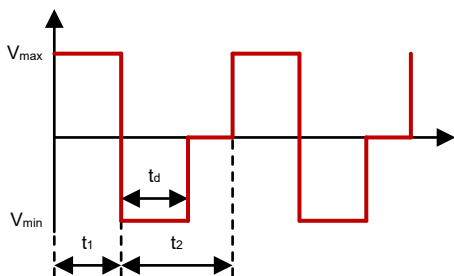


图 4. CCM 下的单开关正激式初级变压器绕组 N_p 电压波形

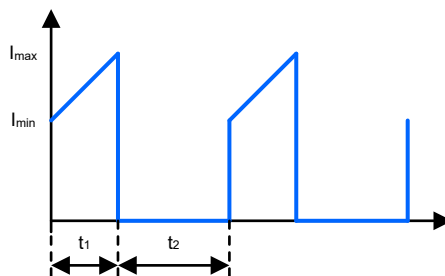


图 5. CCM 下的单开关正激式初级变压器绕组 N_p 电流波形

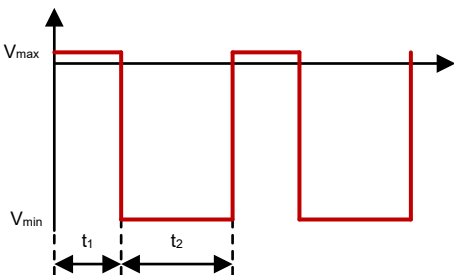


图 6. CCM 下的单开关正激式整流器二极管 D_1 电压波形

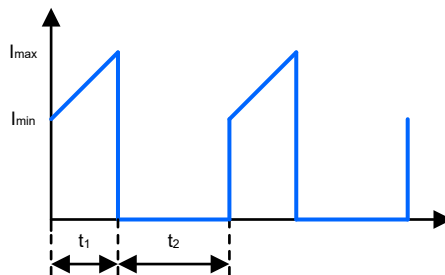


图 7. CCM 下的单开关正激式整流器二极管 D_1 电流波形

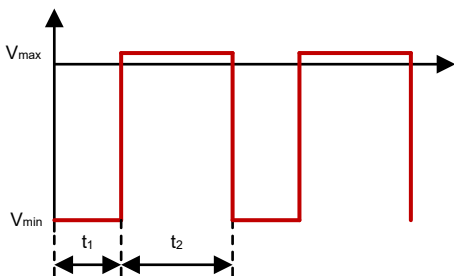


图 8. CCM 下的单开关正激式续流二极管 D_2 电压波形

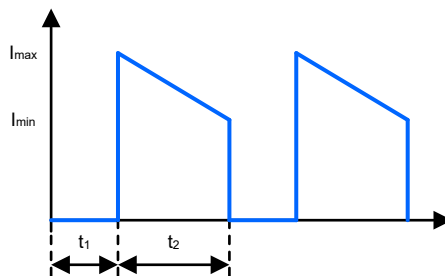


图 9. CCM 下的单开关正激式续流二极管 D_2 电流波形

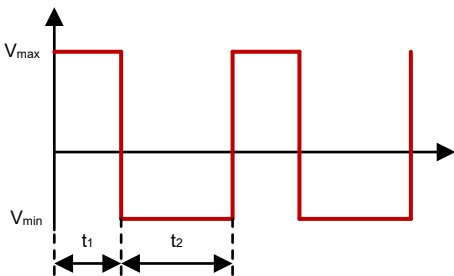


图 10. CCM 下的单开关正激式电感器 L_1 电压波形

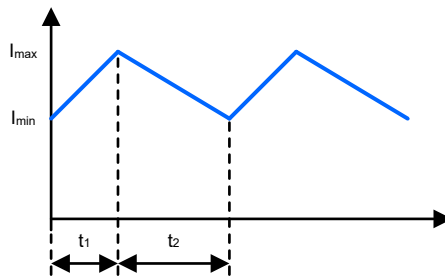


图 11. CCM 下的单开关正激式电感器 L_1 电流波形

双开关正激式转换器

对于高输入电压电平，可以利用双开关正激式配置，这样就能使用具有更低击穿电压和更好性能参数的 MOSFET，因为这些 MOSFET 会共享整体电压应力。图 12 展示了双开关正激式转换器的原理图。使用两个开关的优点在于，可以通过将两个钳位二极管连接到 VIN 和 GND 来实现退磁，从而允许移除退磁绕组。为了同时驱动两个开关（其中一个开关位于高侧），可以将不具有互锁功能的半桥栅极驱动器与标准 PWM 控制器结合使用。

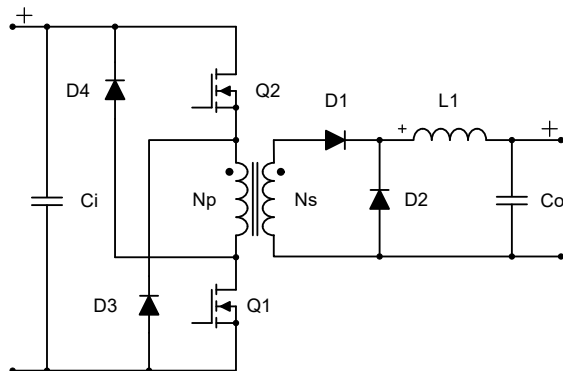


图 12. 非同步双开关正激式转换器的原理图

方程式 5 可计算双开关正激式转换器中的最大 MOSFET 应力：

$$V_{Q1/2} = V_{IN} + V_f \quad (5)$$

其中

- V_{IN} 是输入电压
- V_f 是二极管正向电压

该公式假设电压应力均匀分布在两个 MOSFET 之间。在某些情况下，由于电路板和元件寄生效应以及器件参数容差，电压应力分布不均匀。为避免致命器件故障，应选择具有足够裕度的 MOSFET 击穿电压。

方程式 6 可计算最大整流器二极管应力：

$$V_{D1} = (V_{IN} + 2 \times V_f) \times \frac{n_s}{n_p} - V_f \quad (6)$$

其中

- V_{IN} 是输入电压
- V_f 是二极管正向电压
- n_p / n_s 是初级绕组和次级绕组之间的匝数比

方程式 1 和方程式 4 也适用于双开关正激式转换器。

此外，对于双开关配置，最大占空比限制为 50%，因为变压器需要足够的时间通过退磁二极管复位。

图 13 至图 22 展示了非同步双开关正激式转换器中 FET Q1、初级变压器绕组 N_p 、二极管 D1、续流二极管 D2 和电感器 L1 在 CCM 下的电压和电流波形。

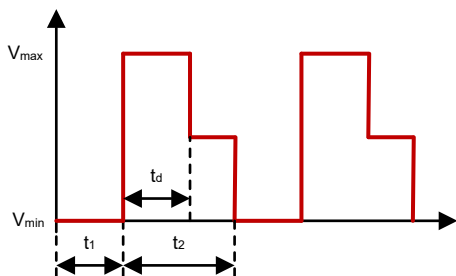


图 13. CCM 下的双开关正激式 FET Q1 电压波形

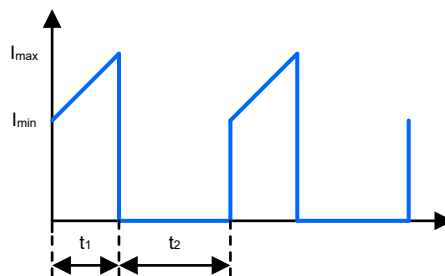


图 14. CCM 下的双开关正激式 FET Q1 电流波形

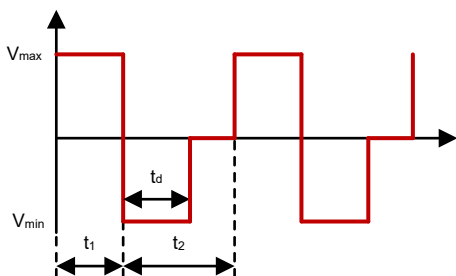


图 15. CCM 下的双开关正激式初级变压器 N_p 电压波形

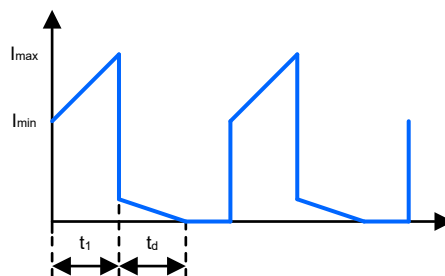


图 16. CCM 下的双开关正激式初级变压器 N_p 电流波形

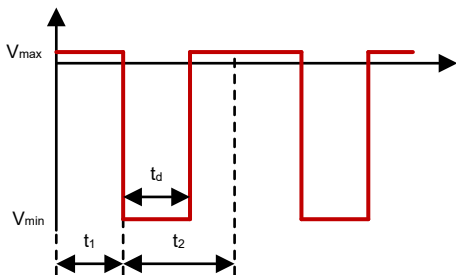


图 17. CCM 下的双开关正激式整流器二极管 D1 电压波形

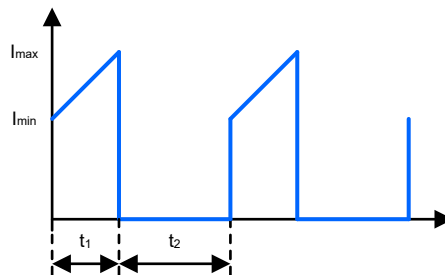


图 18. CCM 下的双开关正激式整流器二极管 D1 电流波形

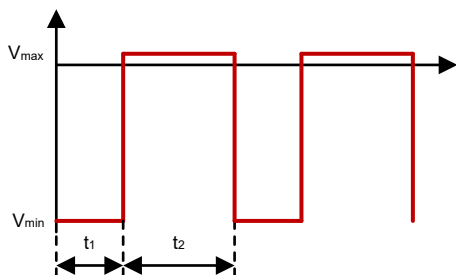


图 19. CCM 下的双开关正激式续流二极管 D2 电压波形

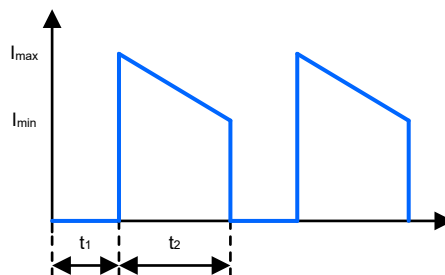


图 20. CCM 下的双开关正激式续流二极管 D2 电流波形

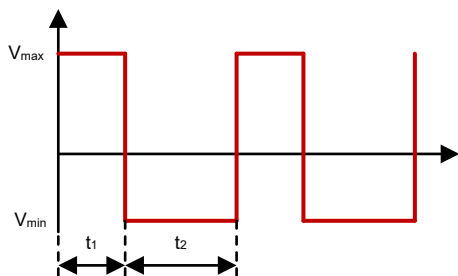


图 21. CCM 下的双开关正激式电感器 L1 电压波形

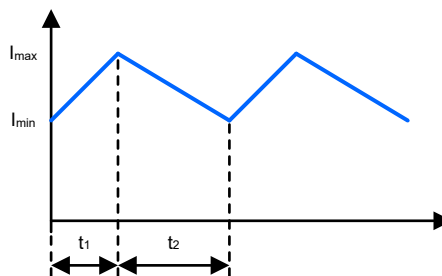


图 22. CCM 下的双开关正激式电感器 L1 电流波形

有源钳位正激式转换器

配置此拓扑的第三种选择是在初级侧使用有源钳位电路从变压器的漏电感中恢复能量，然后将能量反馈到输入电容器，从而提高效率并实现比其他两种配置更高的输出功率级别。有源钳位配置还允许占空比大于 50%。图 23 显示了在钳位电路中采用 N 沟道 MOSFET 的非同步有源钳位正激式转换器的原理图。

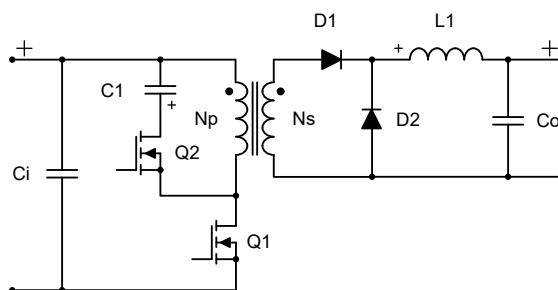


图 23. 非同步有源钳位正激式转换器的原理图

图 24 至图 35 展示了非同步有源钳位正激式转换器中 FET Q1、FET Q2、初级变压器绕组 Np、二极管 D1、续流二极管 D2 和电感器 L1 在 CCM 下的电压和电流波形。

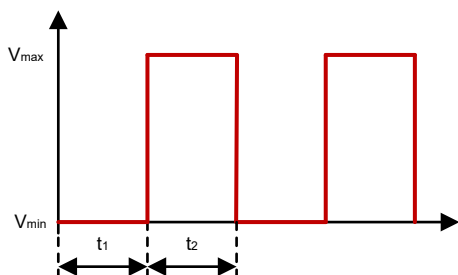


图 24. CCM 下的有源钳位正激式 FET Q1 电压波形

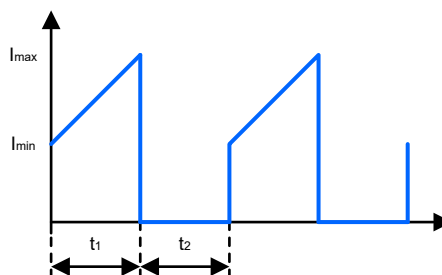


图 25. CCM 下的有源钳位正激式 FET Q1 电流波形

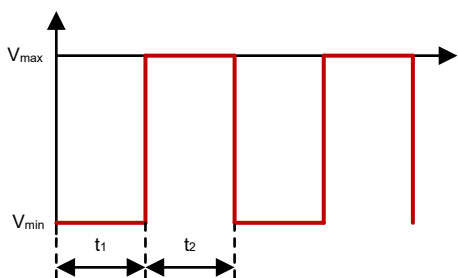


图 26. CCM 下的有源钳位正激式 FET Q2 电压波形

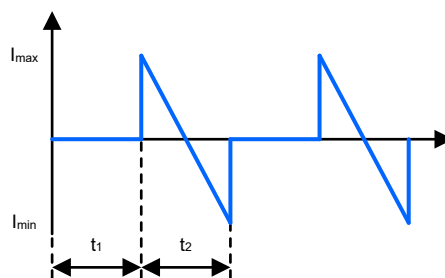


图 27. CCM 下的有源钳位正激式 FET Q2 电流波形

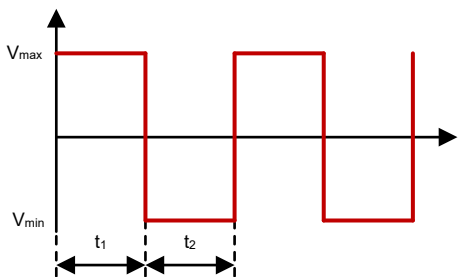


图 28. CCM 下的有源钳位正激式初级变压器 Np 电压波形

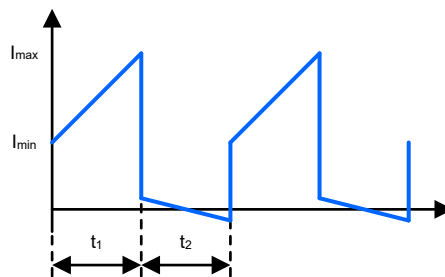


图 29. CCM 下的有源钳位正激式初级变压器 Np 电流波形

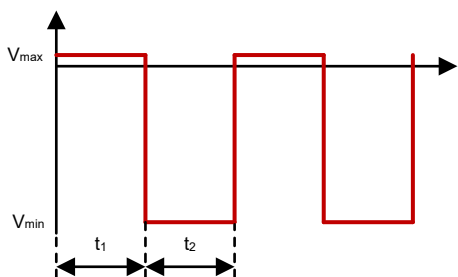


图 30. CCM 下的有源钳位正激式整流器二极管 D1 电压波形

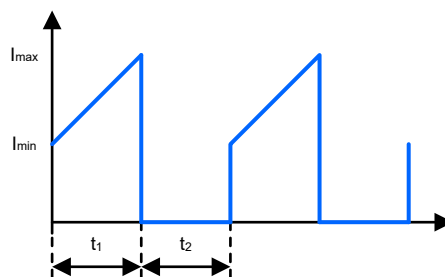


图 31. CCM 下的有源钳位正激式整流器二极管 D1 电流波形

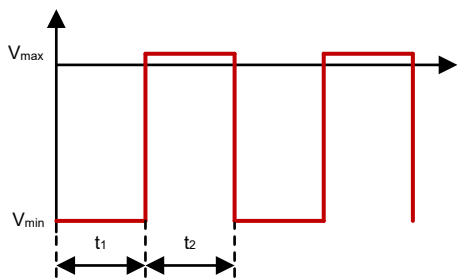


图 32. CCM 下的有源钳位正激式续流二极管 D2 电压波形

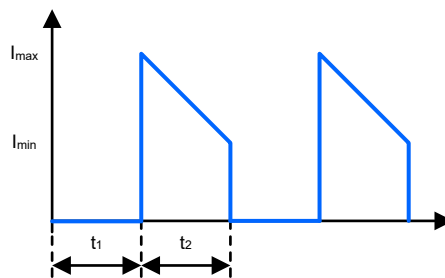


图 33. CCM 下的有源钳位正激式续流二极管 D2 电流波形

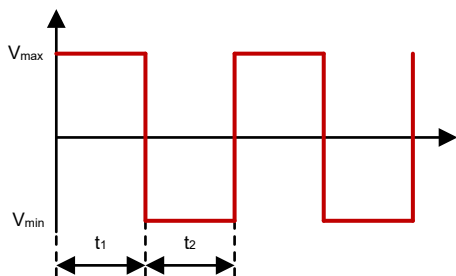


图 34. CCM 下的有源钳位正激式电感器 L1 电压波形

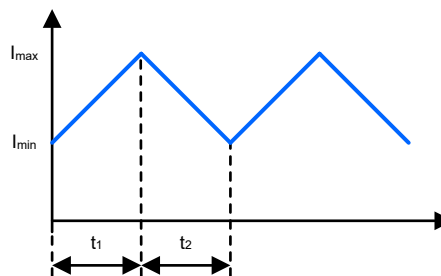


图 35. CCM 下的有源钳位正激式电感器 L1 电流波形

输出电压调节概念

根据应用的不同，有两个不同的选项可将隔离式输出电压反馈回控制器：

- 次级侧调节 (SSR)，通常使用光耦合器将反馈信息从次级侧传输到初级侧。光耦合器的带宽有限，这会影响可达到的最大调节带宽。光耦合器中玻璃钝化的老化效应在某些应用中会产生不利影响。这些应用随后需要采用光耦合器替代产品，例如隔离式放大器电路或光耦仿真器。
- 将控制器放置在次级侧可以通过消除反馈环路中的光耦合器来帮助实现更高的调节带宽。但是，需要针对启动和短路情况使用辅助电源为次级侧的 PWM 控制器供电。此外，初级侧的 MOSFET 需要由隔离式栅极驱动电路进行驱动，这一点可以通过专用的隔离式栅极驱动 IC 来实现，也可以通过采用栅极驱动变压器和非隔离式驱动器的分立式电路来实现。

对于 3A 以上的负载电流，建议使用同步整流，尤其是在需要提高效率或需要避免使用外部散热器时。同步整流器可以从初级侧进行控制，也可以使用自驱动构建进行控制，后者通常是更具成本效益的选择。

其他资源

- 观看 TI 培训视频：[拓扑教程：什么是正激式转换器？](#)
- 使用 [Power Stage Designer](#) 设计您的功率级。
- 下载 [电源拓扑手册](#) 和 [电源拓扑快速参考指南](#)。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司