

Application Brief

如何进行电源设计 - 第 8 部分



Markus Zehendner

本应用简报重点介绍了半桥和推挽式转换器。这些拓扑的输出功率范围通常介于 250W 到 500W 之间。如果输出功率高于此级别，可以使用硬开关全桥、相移全桥或者 LLC 半桥或全桥拓扑来提高效率，从而让设计更出众。这些拓扑将是本系列后续部分的主题。

推挽式转换器

推挽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 或 Q2 中任意一个导通时，能量从初级侧转移到次级侧。此外，二极管 D1 和 D2 在开关 Q1 和 Q2 均未导通时也能提供续流路径。下图是非同步推挽式转换器的原理图。

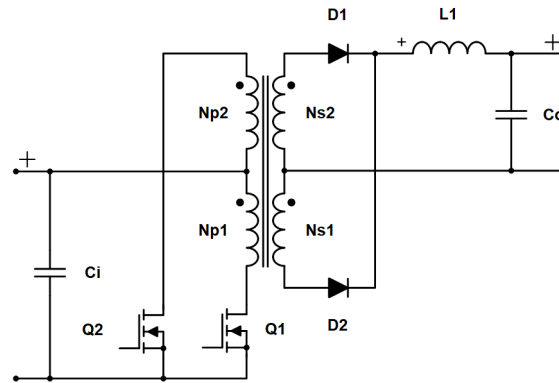


图 1. 非同步推挽式转换器原理图

公式 1 用于计算连续导通模式 (CCM) 下的占空比：

$$D = \frac{1}{2} \times \frac{V_{out} + V_f}{V_{in} \times \frac{n_s}{n_p}} \quad (1)$$

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 是初级绕组与次级绕组之间的匝数比。每个金属氧化物半导体场效应晶体管 (MOSFET) 桥臂的最大占空比限制为 50%。

公式 2 用于计算最大 MOSFET 应力：

$$V_{Q1/2} = 2 \times V_{in} \quad (2)$$

其中， V_{in} 是输入电压。由于初级 MOSFET 上的电压应力较大，因此最好将推挽式转换器与较低的输入电压搭配使用。此外，与其他拓扑相比，具有中心抽头的变压器结构将导致较大的过冲和响铃，这就要求设计人员在选择 MOSFET 时留出合理的裕度。

公式 3 用于计算最大整流器二极管应力：

$$V_{D1/2} = 2 \times V_{in} \times \frac{n_s}{n_p} - V_f \quad (3)$$

其中， V_{in} 是输入电压， V_f 是二极管正向电压， n_p/n_s 是初级绕组与次级绕组之间的匝数比。

任何正向拓扑本质上都相当于隔离式降压转换器，因此该转换器系列会因输出 LC 滤波器和通过次级侧任一二极管形成的续流路径而具有连续电流。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。如果该转换器需要为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。

您可以使用支持两个交流栅极驱动信号的通用脉宽调制 (PWM) 控制器集成电路 (IC) 来构建推挽式转换器。同一个控制器通常也可用于半桥拓扑。

就动态行为而言，隔离式反馈路径中的光耦合器是推挽式转换器可达到的调节带宽的主要限制因素。如果需要高调节带宽，可选择将 PWM 控制器放置在转换器的次级侧。

下图展示了非同步推挽式转换器中 FET Q1、初级变压器绕组 N_p 、整流器二极管 D1 和电感器 L1 在 CCM 下的电压和电流波形。

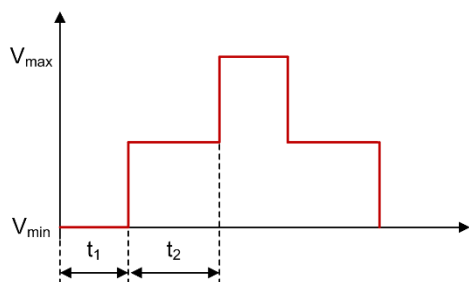


图 2. CCM 下的推挽式 FET Q1 电压波形

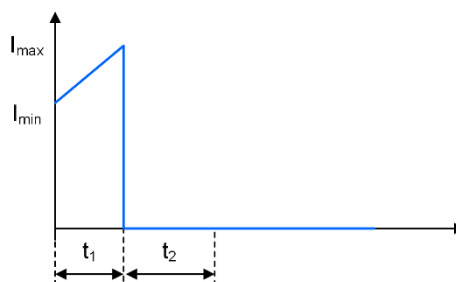


图 3. CCM 下的推挽式 FET Q1 电流波形

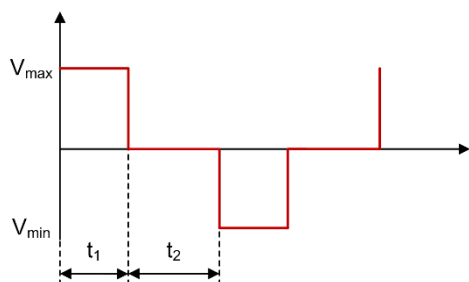


图 4. CCM 下的推挽式初级变压器绕组 N_{p1} 电压波形

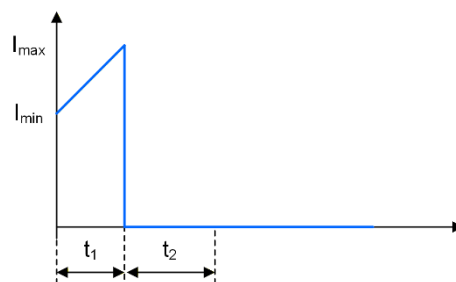


图 5. CCM 下的推挽式初级变压器绕组 N_{p1} 电流波形

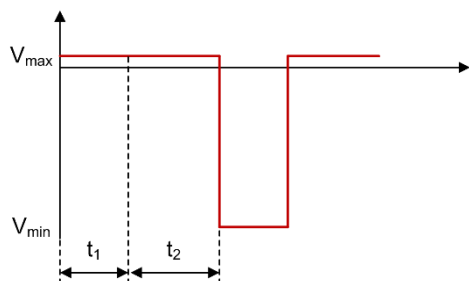


图 6. CCM 下的推挽式整流器二极管 D1 电压波形

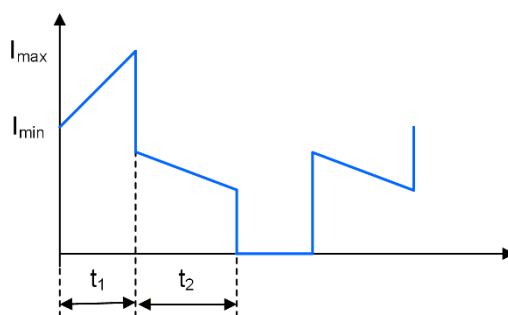


图 7. CCM 下的推挽式整流器二极管 D1 电流波形

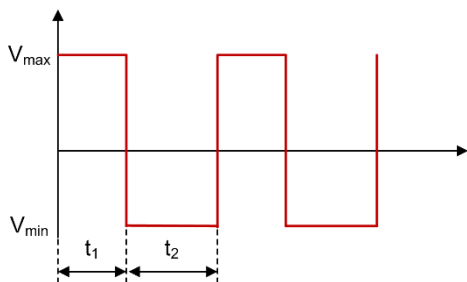


图 8. CCM 下的推挽式电感器 L1 电压波形

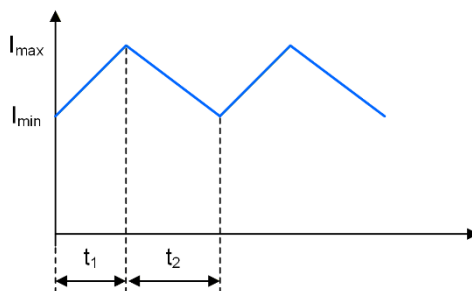


图 9. CCM 下的推挽式电感器 L1 电流波形

半桥转换器

如果输入电压水平较高，最好使用半桥转换器，而非推挽式转换器，这样就能使用具有更低击穿电压和更优性能参数的 MOSFET，原因是半桥转换器的总电压应力只有推挽式转换器的一半。

与推挽式转换器类似，半桥转换器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 或 Q2 中任意一个导通时，能量从初级侧转移到次级侧。此外，二极管 D1 和 D2 在开关 Q1 和 Q2 均未导通时也能提供续流路径。半桥转换器的原理图如下图所示。

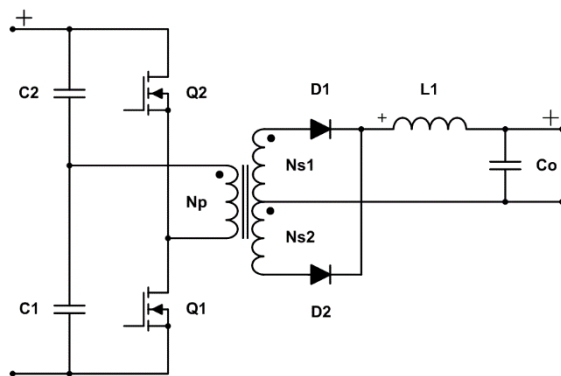


图 10. 非同步半桥转换器原理图

公式 5 用于计算连续导通模式 (CCM) 下的占空比：

$$D = \frac{V_{out} + V_f}{V_{in} \times \frac{n_s}{n_p}} \quad (5)$$

公式 6 用于计算半桥转换器中的最大 MOSFET 应力：

$$V_{Q1/2} = V_{in} \quad (6)$$

其中， V_{in} 是输入电压。

公式 6 用于计算最大整流器二极管应力：

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

因此在采用半桥配置时，最大 MOSFET 桥臂占空比限制为 50%。

下图展示了非同步双开关半桥转换器中 FET Q1、初级变压器绕组 N_p 、整流器二极管 D1 和电感器 L1 在 CCM 下的电压和电流波形。

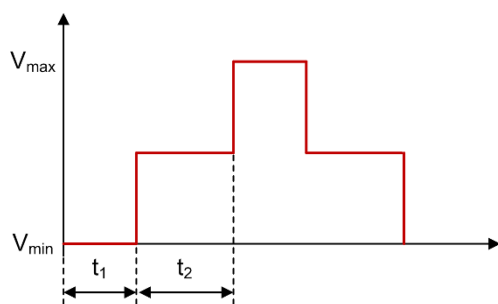


图 11. CCM 下的半桥 FET Q1 电压波形

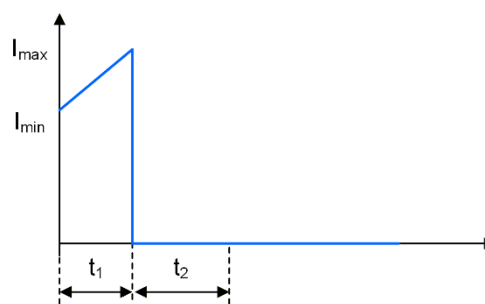


图 12. CCM 下的半桥 FET Q1 电流波形

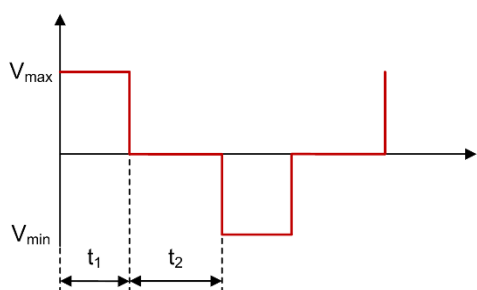


图 13. CCM 下的半桥初级变压器绕组 N_p 电压波形

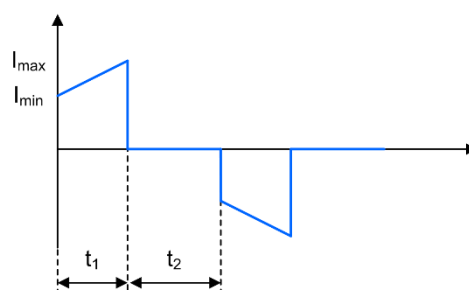


图 14. CCM 下的半桥初级变压器绕组 N_p 电流波形

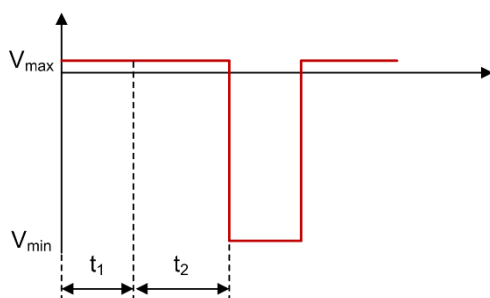


图 15. CCM 下的半桥整流器二极管 D1 电压波形

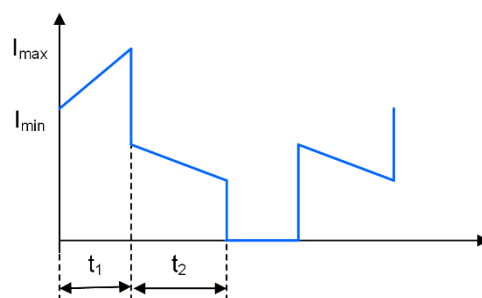


图 16. CCM 下的半桥整流器二极管 D1 电流波形

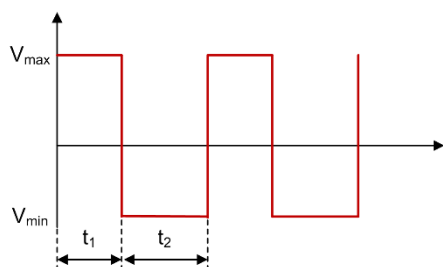


图 17. CCM 下的半桥电感器 L1 电压波形

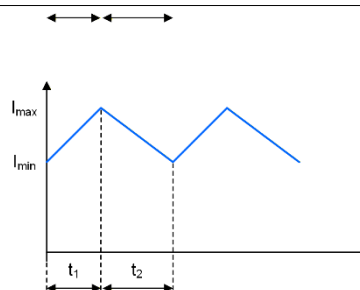


图 18. CCM 下的半桥电感器 L1 电流波形

半桥转换器通常采用电压模式控制，这是因为转换器输入端设有电容分压器：如果采用在峰值电流模式控制，该电容分压器上的电荷即使有细微不平衡，也会导致两个电荷之间的差距逐渐扩大，从而使情况随每个开关周期而愈发糟糕，这是因为通常没有部署任何机制，来根据检测到的电流信息确保两个开关桥臂能实现伏秒平衡。因此，每个桥臂所传输能量的差异会越来越大，并最终导致变压器磁芯饱和，因为磁芯在每个开关周期都无法正确复位。

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。

第三种方法是不调节输出：

- 具有 50% 恒定占空比的开环推挽运行，是低功耗隔离式偏置电源的常见实现方式。这些偏置电源通常不会在输出端使用 LC 滤波器，原因是输出纹波小到可以忽略不计。可支持此类应用的器件包括 [SN6505B](#) 或 [SN6507](#)。

对于较大负载电流，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

- [观看视频“拓扑教程：什么是推挽式？”](#)
- [观看视频“拓扑教程：什么是半桥？”](#)
- 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](#)。

商标

所有商标均为其各自所有者所有。

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月