

Markus Zehendner

本拓扑应用简报系列的第五部分介绍了反相降压/升压转换器和 Ćuk 转换器。这两种拓扑都可以从正输入电压生成负输出电压。

### 反相降压/升压转换器

反相降压/升压拓扑可以在输出电压为负时升高和降低输入电压。当开关 Q1 不导通时，能量从输入端转移到输出端。图 1 展示了非同步反相降压/升压转换器的原理图。

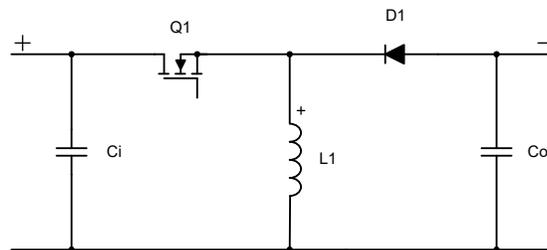


图 1. 非同步反向降压/升压转换器原理图

方程式 1 计算连续导通模式 (CCM) 下的占空比：

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

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：

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

方程式 3 计算最大二极管应力：

$$V_{D1} = V_{IN} - V_{OUT} \quad (3)$$

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
- 对于所有三个公式， $V_{OUT}$  的值需要为负。

由于没有指向反相降压/升压转换器输入端或输出端的电感器-电容器 (LC) 滤波器，因此该拓扑在转换器两端都具有脉冲电流，可产生相当高的电压纹波。为了符合电磁干扰 (EMI) 标准，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可能无法提供足够的衰减来减小输出电压纹波。在这种情况下，建议改为使用 Ćuk 转换器。

由于需要 P 沟道 MOSFET 或高侧 MOSFET 驱动器，因此可以使用降压控制器或转换器构建反相降压/升压转换器。但是，控制器或转换器集成电路 (IC) 的接地端子需要连接到负输出电压。然后，IC 调节接地信号与负输出电压。

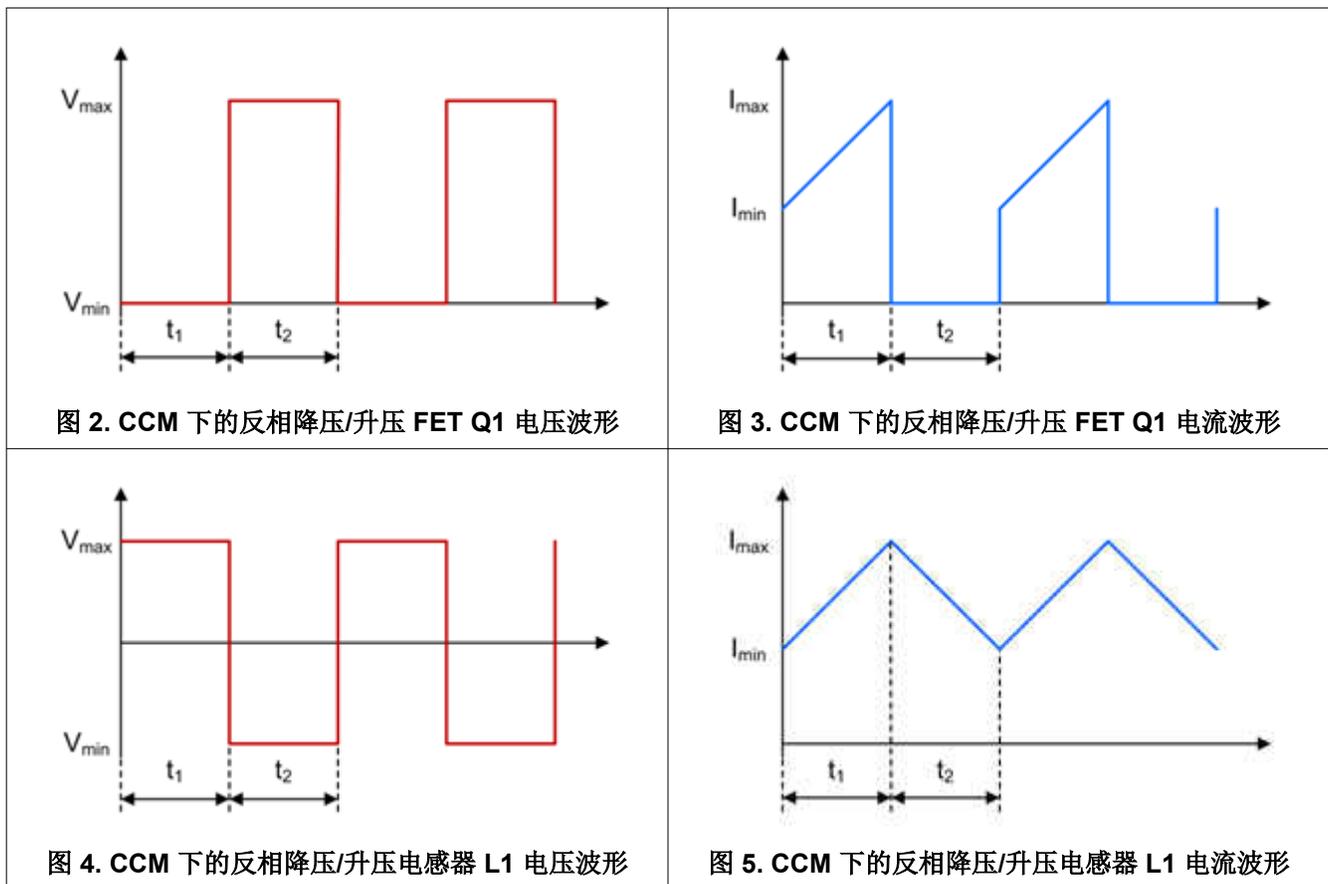
右半平面零点 (RHPZ) 是反相降压/升压转换器可达到的调节带宽的限制因素。最大带宽约为 RHPZ 频率的五分之一。方程式 4 估算反相降压/升压转换器传递函数的单个 RHPZ 频率：

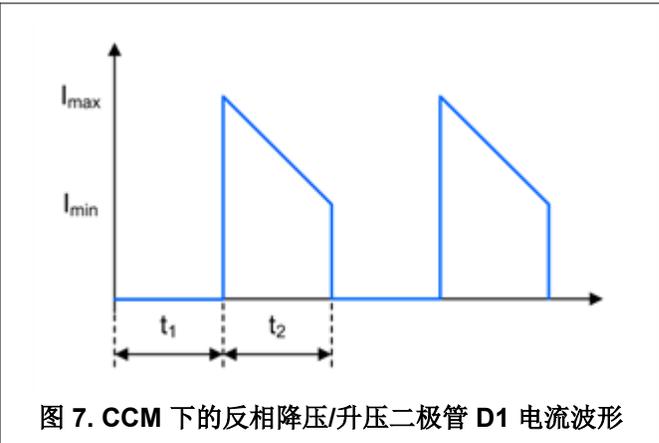
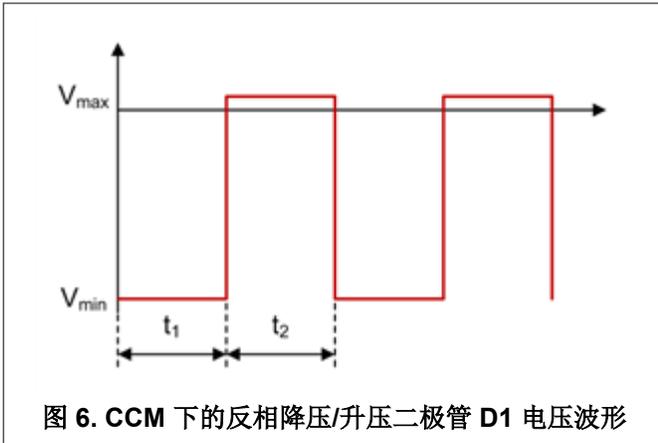
$$f_{\text{RHPZ}} = \frac{V_{\text{OUT}} \times (1 - D)^2}{2 \times \pi \times D \times L_1 \times I_{\text{OUT}}} \quad (4)$$

其中

- $V_{\text{OUT}}$  是输出电压
- $D$  为占空比
- $I_{\text{OUT}}$  是输出电流
- $L_1$  是电感器  $L_1$  的电感。
- $V_{\text{OUT}}$  和  $I_{\text{OUT}}$  的值都需要为负。

图 2 至图 7 展示了非同步反相降压/升压转换器中 FET Q1、电感器  $L_1$  和二极管  $D_1$  在 CCM 下的电压和电流波形。





### Ćuk 转换器

Ćuk 拓扑可以在输出电压为负时升高和降低输入电压。当开关 Q1 不导通时，能量从输入端转移到输出端。图 8 展示了非同步 Ćuk 转换器的原理图。

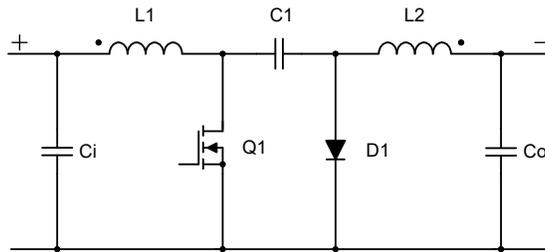


图 8. 非同步 Ćuk 转换器原理图

方程式 5 计算 CCM 下的占空比：

$$D = \frac{-V_{OUT} + V_f}{-V_{OUT} + V_f + V_{IN}} \quad (5)$$

方程式 6 计算最大 MOSFET 应力：

$$V_{Q1} = V_{IN} - V_{OUT} + V_f + \frac{V_{C1:ripple}}{2} \quad (6)$$

方程式 7 计算最大二极管应力：

$$V_{D1} = V_{IN} - V_{OUT} + \frac{V_{C1:ripple}}{2} \quad (7)$$

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
- $V_{C1,ripple}$  是耦合电容器 C1 两端的电压纹波

对于这三个公式， $V_{OUT}$  的值需要为负。

Ćuk 转换器中的 LC 滤波器 L2/Co 指向输出。由于输出电流是连续的，因此输出纹波非常小。查看输入时，有另一个具有 L1/Ci 的 LC 滤波器。因此，输入电流也是连续的，这也会导致出现非常小的输入纹波。因此，Ćuk 转换器非常适合需要负输出电压，同时对输入和输出都非常敏感的应用，例如用于电信应用的电源。

由于需要在低侧驱动 MOSFET Q1，因此使用升压控制器可以轻松构建 Ćuk 转换器。升压转换器或控制器 IC 通常仅接受反馈引脚上的正反馈电压。通过使用简单的反相运算放大器电路，负输出电压可转换为正电压信号。

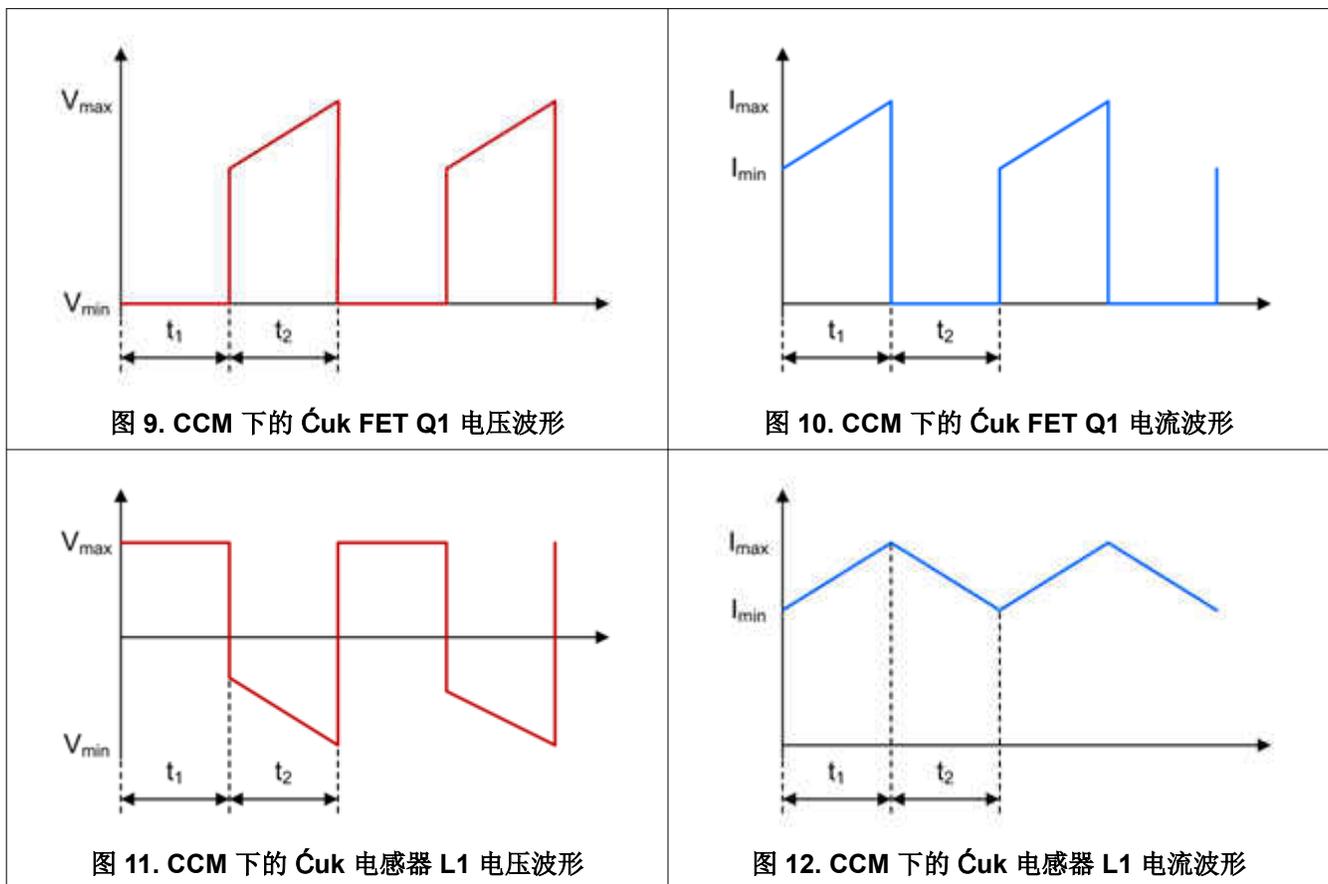
Ćuk 转换器也有 RHPZ。功率级无法立即对输出端的变化作出反应，由于当开关 Q1 关断时，能量会转移到输出端。可达到的最大交叉频率也是 RHPZ 频率的五分之一。请注意，Ćuk 转换器有多个 RHPZ。方程式 8 估算 Ćuk 转换器的其中一个 RHPZ：

$$f_{\text{RHPZ}} = \frac{1}{2 \times \pi} \times \sqrt{\frac{1-D}{L_1 \times C_1}} \quad (8)$$

其中

- D 为占空比
- $L_1$  是电感器 L1 的电感
- $C_1$  是耦合电容器 C1 的电容

图 9 至图 18 展示了非同步 Ćuk 转换器中 FET Q1、电感器 L1、耦合电容器 C1、二极管 D1 和电感器 L2 在 CCM 下的电压和电流波形。



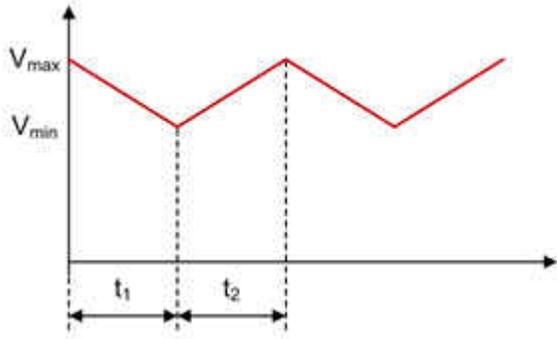


图 13. CCM 下的 Ćuk 耦合电容器 C1 电压波形

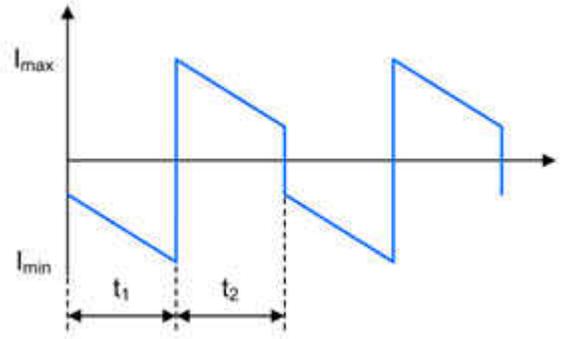


图 14. CCM 下的 Ćuk 耦合电容器 C1 电流波形

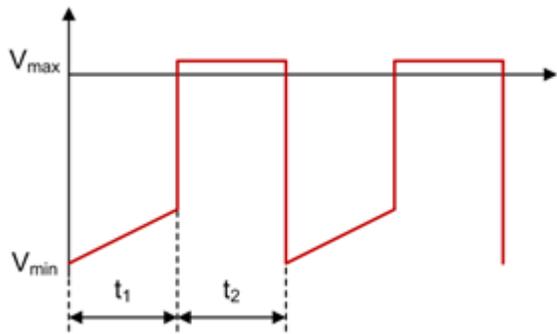


图 15. CCM 下的 Ćuk 二极管 D1 电压波形

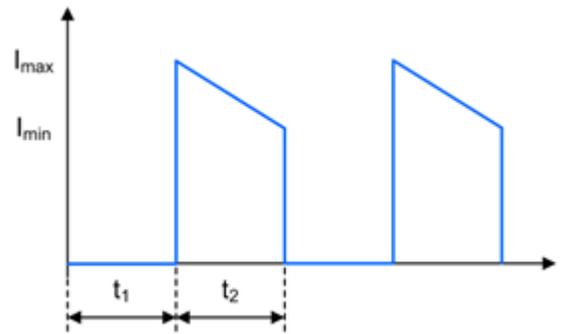


图 16. CCM 下的 Ćuk 二极管 D1 电流波形

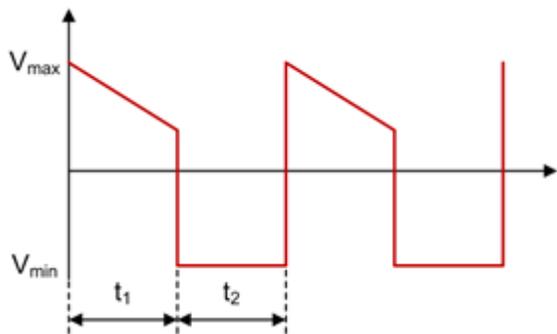


图 17. CCM 下的 Ćuk 电感器 L2 电压波形

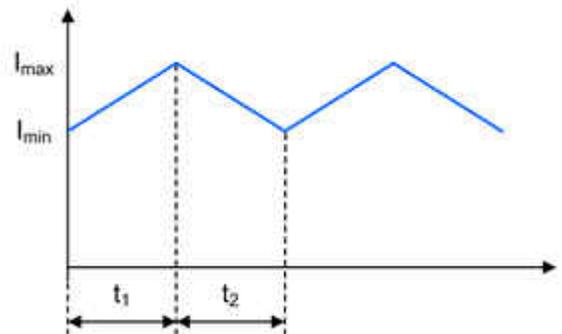


图 18. CCM 下的 Ćuk 电感器 L2 电流波形

与单端初级电感转换器 (SEPIC) 和 Zeta 转换器非常相似，对于 Ćuk 转换器，可以使用耦合电感器代替两个单独的电感器。使用耦合电感器具有两个优势：第一个优势是，由于耦合绕组会导致纹波消除，因此与双电感器设计相比，只需一半的电感即可实现类似的电流纹波。第二个优势是可以消除由两个电感器和耦合电容器引起的传递函数谐振。通常需要通过与耦合电容器 C1 并联的电阻器-电容器 (RC) 网络来抑制此谐振。

使用耦合电感器的一个缺点是两个电感器必须使用相同的电感值。耦合电感器的另一项限制通常是其电流额定值。对于具有高输出电流的应用，除了使用单个电感器之外，可能没有其他选择。

如果应用需要大于 3A 的输出电流，则将反相降压/升压和 Ćuk 转换器配置为具有同步整流功能的转换器。如果为 Ćuk 转换器实施同步整流，由于需要许多控制器将其连接到开关节点，因此需要将高侧栅极驱动信号进行交流耦合。Ćuk 转换器有两个开关节点，因此应注意避免 SW 引脚上出现负电压额定值违例。

## 附加资源

- 观看以下 TI 培训视频：
  - “[拓扑教程：什么是反相降压/升压转换器？](#)”
  - “[拓扑教程：什么是 Ćuk 转换器？](#)”
- “[在反相降压/升压拓扑中使用降压转换器。](#)”
- 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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司