

*Application Note*

# 使用正电源生成负电源



Bill Xu

## 摘要

虽然在所有电子系统中正电源占主导地位，但负电源在医疗成像系统和其他电子系统中同样是必不可少且广泛使用的。与正电源不同，负电源的设计对初级工程师来说往往更具挑战性，也不那么直观。此外，与正电源设计相比，市面上适用于负电源设计的优质方案选择也相对较少。本应用手册介绍了几种将正电源转换为负电源的方法，可帮助工程师在面对复杂性、性能以及封装限制等多样化要求时，找到合适的解决方案。

## 内容

<b>1 简介</b>	<b>2</b>
<b>2 使用正电压设计负电源的方法</b>	<b>3</b>
2.1 使用电荷泵生成负电源	3
2.2 使用逆变器稳压器生成负电源	5
2.3 使用降压稳压器生成负电源	6
2.4 使用 Cuk 稳压器生成负电源	7
2.5 使用反激式转换器生成负电源	9
<b>3 总结</b>	<b>10</b>
<b>4 参考资料</b>	<b>10</b>

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

在偏置晶体管电路的电子系统的发展历程中，负电源通常与正电源搭配使用。与过去的系统相比，电子系统中对负电源的使用已大幅减少。但仍有许多电子系统需要使用负电源。例如，在超声成像系统中，发射器需要三个负电源用于偏置并产生对称波形以激励传感器。在 MRI 系统中，工程师可以通过正电源生成负电源以偏置射频开关。在光纤通信和光学系统中，工程师需要使用负电源来偏置光电二极管。在通信系统中，-48V 电源是系统总线电压。在一些高精度电子系统中，放大器需要双电源。

在现代电子系统中开关电源得到广泛采用之前，负电源的获取通常依赖变压器：先将高压交流电变换为低压交流电，再通过整流转换为直流电压。最后，经过稳压处理后，得到稳定的负电压，为电子系统供电。请参阅 [图 1-1](#)。

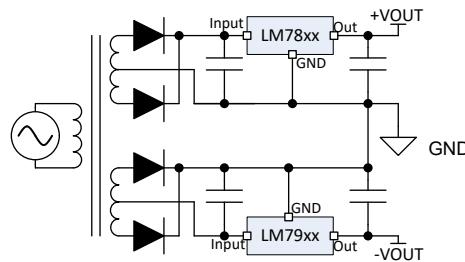


图 1-1. 生成负电源的传统方法

这种传统的设计方式仍在一些对成本敏感的电子系统中使用。缺点是变压器体积大、效率低。

现代电子工程师通常需要在成本、效率和体积的限制下，为特定应用设计紧凑的负电源方案。本应用手册的以下各节讨论了几种从正电源生成负电源的设计，以满足实际应用的多样化要求。

## 2 使用正电压设计负电源的方法

理论上，任何隔离式电源都可以通过将高电平输出电压端接地，低电平输出端作为负电源输出，从而实现负电源的功能。这种方法有时会导致成本较高、技术较复杂且体积较大。设计人员需要具备与开关模式电源相关的专业技能。本应用手册讨论了几种适用于小功率输出、体积紧凑且成本低廉的方案，用于将正电源转换为负电源。

### 2.1 使用电荷泵生成负电源

使用正电源生成负电源的第一种方法是使用电荷泵。负电源电荷泵的原理如图 2-1 所示。电荷泵中的电压逆变器部分包含四个大型 CMOS 开关，这些开关按顺序切换，从而实现输入电源电压的逆变。能量的传输与储存则由外部电容器 C1 完成。在第一个时间间隔内，开关 S2 和 S4 处于断开状态，如图 2-1 所示。而 S1 和 S3 则处于闭合状态。然后，输入能量将传输到外部电容器 C1。在第二个时间间隔内，S1 和 S3 处于断开状态。同时，S2 和 S4 处于闭合状态，C1 为 COUT 充电。经过多个周期后，COUT 上的电压会被转换并叠加到 VIN 上。由于 COUT 的阳极接地，因此当没有负载电流时，COUT 阴极的输出等于  $-(V_{IN})$ 。添加负载后，输出压降由寄生电阻（MOSFET 开关的  $R_{DS\_ON}$  和电容器的等效串联电阻 (ESR)）和电容器之间的电荷传输损耗决定。因此，电荷泵转换器便可将正输入电压转换为负输出电压。显然，在无负载的情况下，输出电压的振幅等于输入电压。

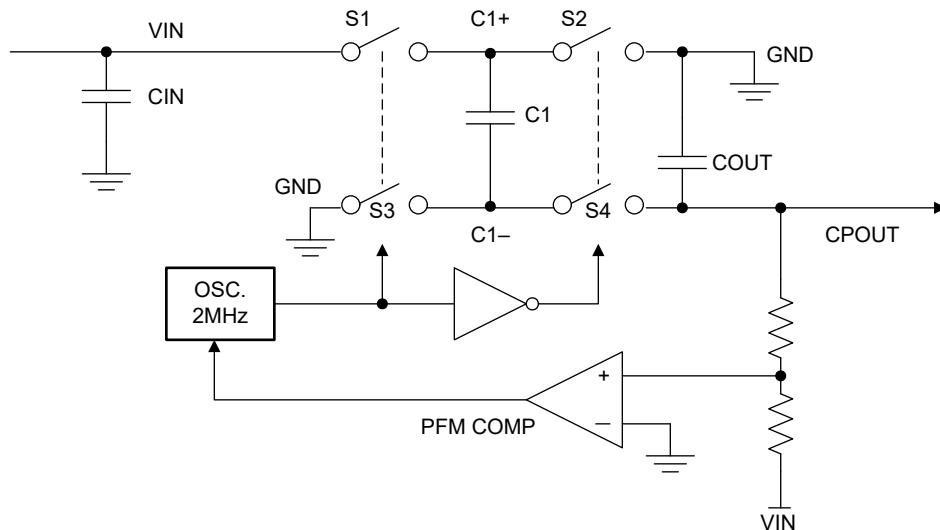


图 2-1. 正电压输入和负输出电荷泵的原理

电荷泵的输出特性可通过与电阻串联的电压源来近似计算。电压源等于  $-(V_{IN})$ 。输出电阻  $R_{OUT}$  是内部 MOSFET 开关的导通电阻、振荡器频率、电容以及 C1 和 COUT 的 ESR 的函数。由于对 C1 进行充电和放电的开关电流大约是输出电流的两倍，泵电容器 C1 的 ESR 在输出电阻中的影响被放大了四倍。电荷泵输出电容器 COUT 以大约等于输出电流的电流进行充电和放电；因此，ESR 在输出电阻中只计算一次。电荷泵  $R_{OUT}$  的一个良好近似如方程式 1 所示：

$$R_{out} = 2R_{SW} + \frac{1}{f_{SW} \times C_1} + 4ESR_{C1} + ESR_{COUT} \quad (1)$$

其中， $R_{SW}$  是内部 MOSFET 开关导通电阻的总和。使用高电容、低 ESR 的陶瓷电容器能够降低输出电阻。借助此公式，设计人员可以估算在特定输出电流和输入电压下的最大输出电压。

TI 提供多款满足特定应用需求的负输出电荷泵。LM27761 不仅集成了负电荷泵，还集成了 LDO，以提升电源性能并降低噪声。请参阅 图 2-2。图 2-3 展示了典型的应用框图。LM27761 的优势包括性能更优、设计简单、成本低廉且尺寸紧凑。方程式 2 展示了输出电压。

$$V_{output} = - \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \times V_{REF} = - 1.22 \times \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \quad (2)$$

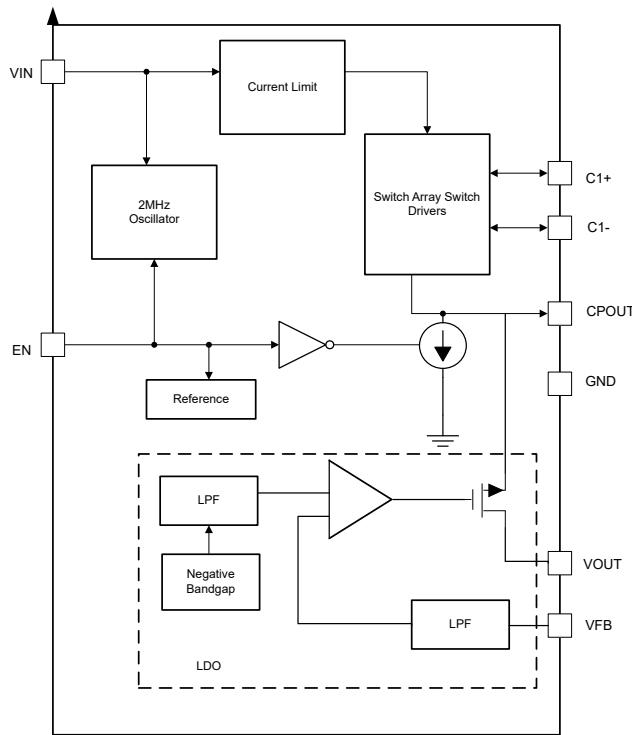


图 2-2. LM27761 方框图

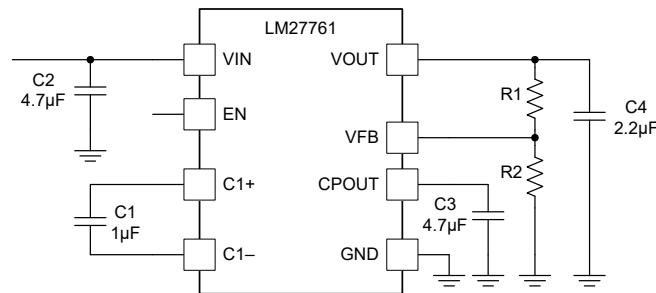


图 2-3. LM27761 的典型应用电路

市面上电荷泵的最大输出电流通常低于 300mA。LM27761 的最大输出电流为 250mA，能够满足许多应用的要求。电荷泵的第二个限制是输出电压振幅不得大于输入电压，并且必须留有一定的裕度。例如，设计人员无法通过 5V 输入电压获得 -5V 输出电压。根据数据手册，要在 250mA 输出电流下获得 -5V 输出电压，LM27761 的输入电压必须高于 5.5V。

## 2.2 使用逆变器稳压器生成负电源

使用正电源生成负输出电压的第二种方法是使用逆变器稳压器。该逆变器的拓扑如 图 2-4 所示。在第一个时间间隔内，Q1 导通，Q2 关断，在输入电压的驱动下，电感器的电流增加。负载由输出电容器 C 供电。在第二个时间间隔内，Q1 关断，Q2 导通，电感器通过 Q2 对输出电容 C 进行反向充电。输出电压为负电源。

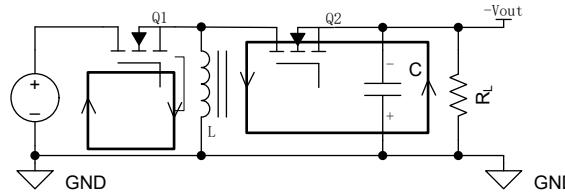


图 2-4. 逆变器转换器的拓扑

当 Q1 导通时，电感器 L 的平均电流等于平均输入电流。当 Q2 导通时，电感器的平均电流等于输出电流。假设电路的效率为  $\eta$ 、输出电压振幅为  $V_o$ 、输入电压为  $V_{in}$ ，那么电感器的平均电流如 方程式 3 所示

$$I_{L\_avg} = I_{input\_avg} + I_O = \frac{|V_o| \times I_O}{V_{input} \times \eta} + I_O = I_O \left( 1 + \frac{|V_o|}{V_{input} \times \eta} \right) \quad (3)$$

Q1 和 Q2 的最大电压为  $V_{in} - V_o$ 。请记住，此处的  $V_{out}$  为负电压。然后，客户可以将电感器的峰值电流配置为平均电流的 1.2 倍。电感器的值如 方程式 4 所示

$$L = \frac{V_{input} \times D \times T}{\Delta I_L} = \frac{V_{input} \times D}{0.4 \times f \times I_{L\_avg}} \quad (4)$$

在这里， $f$  是开关频率， $D$  是占空比，如 方程式 5 所示

$$D \approx \frac{|V_o|}{V_{input} + |V_o|} \quad (5)$$

结合前述所有公式，设计人员可以设计出满足特定应用需求的逆变器转换器。

TI 提供多款逆变器稳压器，具备 300mA 到 1A 的输出电流能力和多种输入电压范围，能够满足客户的大多数实际应用需求。在这些逆变器稳压器中，TPS63700 是一款输入电压范围为 2.7 至 5.5V、输出电压可调范围为 -1.213 至 -15V 的负电源稳压器，最大输出电流为 360mA。TPS63700 采用 3mm × 3mm 封装，开关频率为 1.4MHz，是一种紧凑型设计，可通过正电源生成负电源，满足大多数应用需求。典型应用如 图 2-5 所示。

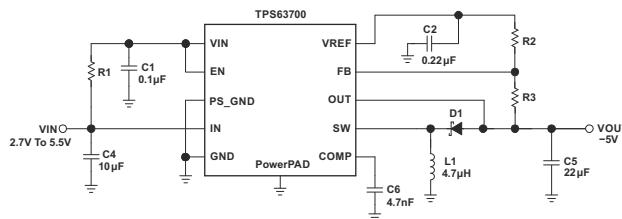


图 2-5. TPS63700 的典型应用电路

可使用 方程式 6 配置 TPS63700 的输出电压

$$V_O = - \frac{R_3}{R_2} \times V_{REF} = - 1.213 \times \frac{R_3}{R_2} \quad (6)$$

该转换器的输入电流和输出电流为非连续模式。因此，逆变器转换器通常具有较大的纹波，需要在输入和输出中配备良好的滤波器。另一个问题是，市面上可满足多样化客户应用需求的逆变器转换器较少。

## 2.3 使用降压稳压器生成负电源

与逆变器稳压器相比，市场上的逆变器转换器数量较少。这意味着设计人员可能无法找到合适的逆变器转换器来满足多样化的特定要求，例如大输入电压或更大的输出电流。在这种情况下，设计人员可以通过重新配置普通的降压稳压器来构建逆变器稳压器。图 2-6 展示了降压拓扑和逆变器拓扑。设计人员可以看到，降压稳压器和逆变器之间的拓扑完全相同，唯一的区别是电感器的一端接地，且低端 MOSFET 作为输出端。这意味着通过重新配置，降压稳压器可配置为逆变器转换器。图 2-7 展示了如何使用传统 LMR33640 降压稳压器构建逆变器转换器。

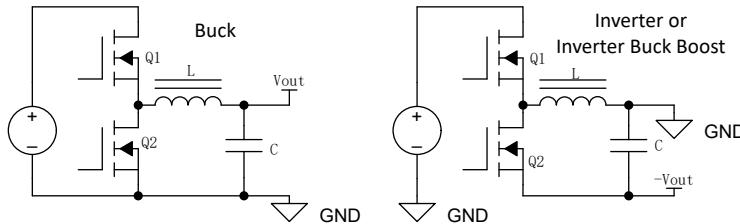


图 2-6. 降压转换器拓扑与逆变器降压/升压转换器拓扑

连接更改如下表所示：

1. 将降压正输出重新分配为系统接地。
2. 将降压稳压器接地节点重新分配为负输出电压节点。
3. 正输入保持不变。
4. 反馈输入端始终以稳压器芯片的 GND 为基准。

通过遵循前面提到的四个规则，设计人员可以使用任意降压稳压器来构建逆变器转换器，以满足特定应用的要求。

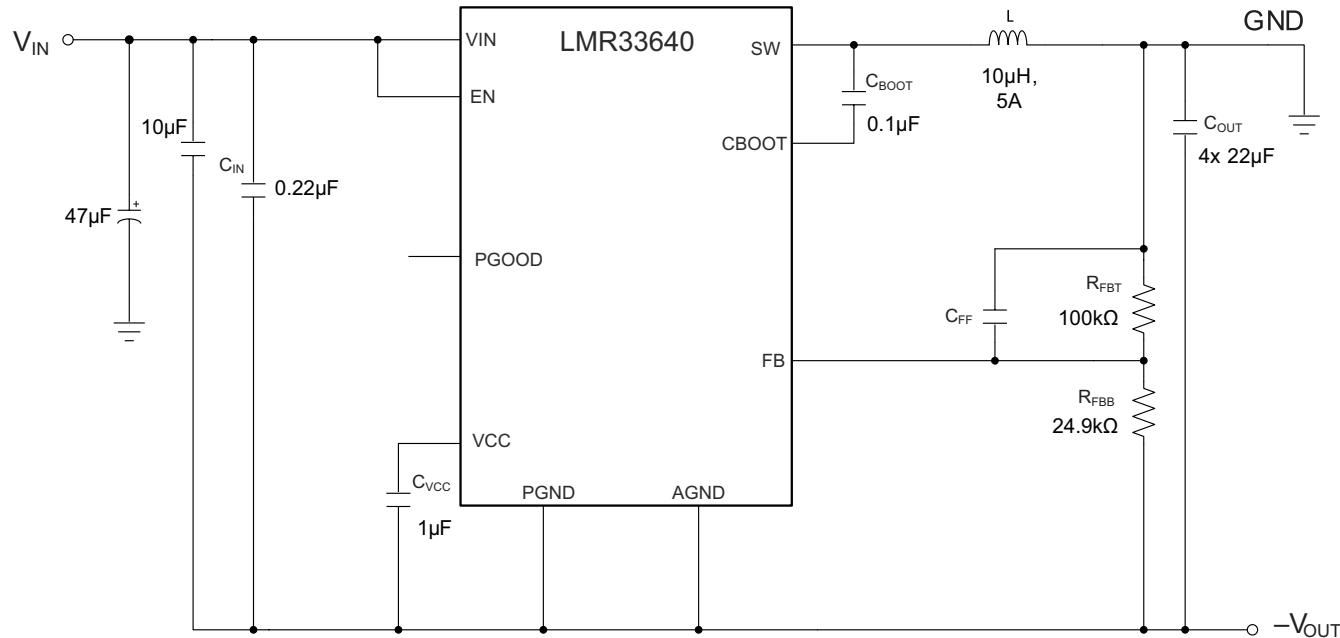


图 2-7. 基于 LMR33640 的逆变器降压/升压转换器

设计人员在实际设计过程中还需注意以下列表。

1. 现在，降压稳压器中 MOSFET 的最大可承受电压需要大于  $V_{in} - V_{output}$ 。
2. 电感器的饱和电流需大于  $1.2I_o(1+V_o/(V_{in} \times \eta))$
3. 输出电压的设定方式与降压稳压器相同，但需注意参考电压始终以芯片的 GND 为基准。输出电压如 方程式 7 所示

$$V_{output} = - \left( 1 + \frac{R_{FBT}}{R_{FBB}} \right) \times V_{REF} \quad (7)$$

## 2.4 使用 Cuk 稳压器生成负电源

Cuk 稳压器也可以利用正输入电压电源生成负电源。Cuk 稳压器的拓扑如 图 2-8 所示。

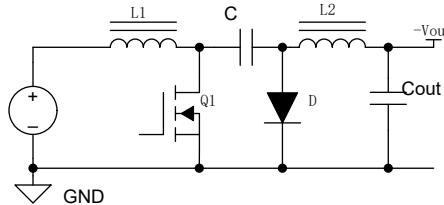


图 2-8. Cuk 转换器拓扑

在第一级，开关 Q1 导通，二极管 D 关断。电感器 L1 的电流呈线性上升，耦合电容器 C 向输出电容器 Cout 放电，并通过电感器 L2 加载。由于 C 足够大，电感器 L2 的电流也呈线性上升。在第二级，开关 Q1 关断，二极管 D 导通。电感器 L1 和输入电源共同为耦合电容器 C 充电。耦合电容器 C 的电压会增加。电感器 L2 通过二极管 D 为输出电容器 Cout 和负载充电。方程式 8 展示了 Cuk 转换器的 Q1 和二极管 (D) 的占空比和应力电压。客户可以根据 方程式 8、方程式 9、方程式 10、方程式 11 和 方程式 12 选择 MOSFET 和二极管。

$$D = \frac{|V_{output}| + V_F}{|V_{output}| + V_{input} + V_F} \quad (8)$$

$$V_{Q1} = V_{input} + |V_{output}| + V_f + \frac{V_{C\_ripple}}{2} \quad (9)$$

$$V_D = V_{input} + |V_{output}| + V_f + \frac{V_{C\_ripple}}{2} \quad (10)$$

$$I_{L1\_avg} = \frac{|V_{output}| \times I_{output}}{V_{input} \times \eta} \quad (11)$$

$$I_{L2\_avg} = I_{output} \quad (12)$$

LM2611 是一款电流模式 Cuk 稳压器，可在 2.7V 至 14V 范围内运行，具有 1.4MHz 开关频率，客户可以使用前述公式来估算特定输入电压下的最小输出电压。可根据 方程式 13 配置输出电压

$$V_{output} = - \left( 1 + \frac{R_T}{R_B} \right) \times V_{REF} = - 1.23 \times \left( 1 + \frac{R_T}{R_B} \right) \quad (13)$$

由于市面上的 Cuk 转换器较少，无法满足客户的多样化应用，因此客户还可以使用升压稳压器构建 Cuk 转换器。但是，由于大多数升压转换器的反馈都需要正输入反馈电压，因此设计人员必须添加外部逆变器放大器以将负输出转换为正反馈电压。例如，设计人员可以使用 LM5158 和 TLV171 来构建 Cuk 转换器，如 图 2-9 所示。输出电压如 方程式 14 所示

$$V_{output} = - \frac{R_f}{R_1} \times V_{REF} \quad (14)$$

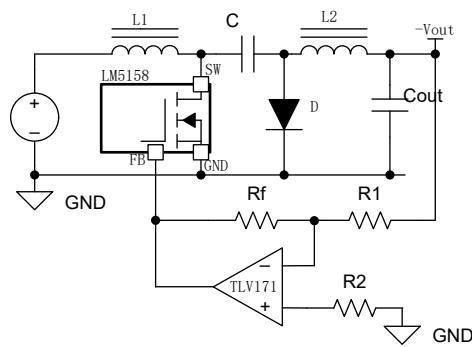


图 2-9. 使用升压转换器构建 Cuk 转换器

## 2.5 使用反激式转换器生成负电源

理论上，任何隔离式电源都可以用作负电源。只需将其高电平端连接到系统地，并将低电平端视为负电源即可。但是，隔离式电源通常具有复杂的拓扑，并且需要具备与电力电子相关的专业技能。在此拓扑中，初级侧调节(PSR)反激式转换器是一种简单的隔离式拓扑，适合作为负电源使用。与传统反激式拓扑不同，PSR 反激式不需要光耦合器来传送反馈信号。在关断阶段，反馈会直接进入初级侧线圈中，因此该电路结构简单，成本低廉、尺寸紧凑。

TI **LM25184** 是一款初级侧调节(PSR)反激式转换器，在 4.5V 至 42V 的宽输入电压范围内具有高效率。

LM25184 是一款具有成本效益的高密度设计，适用于工业系统中功率低于 10W 的隔离式 DC/DC 电源。

LM25184 集成了一个 65V、2.5A N 通道功率 MOSFET。在 MOSFET 导通期间，变压器初级电流以  $V_{IN} / L_{MAG}$  (其中  $L_{MAG}$  是变压器初级参考励磁电感) 的斜率从零开始增加，同时输出电容器为负载提供电流。当 MOSFET 由控制逻辑关断时，开关(SW)电压  $V_{SW}$  摆动至大约  $V_{IN} + (N_{PS} \times V_{OUT})$ ，其中  $N_{PS} = N_p / N_s$  是变压器的初级/次级匝数比。磁化电流通过反激式二极管流入次级侧，对输出电容器充电并向负载提供电流。为了最大限度地减小输出电压调节误差，LM25184 在次级电流达到零时检测反射的次级电压。在 MOSFET 关断期间，输出电压通过初级侧和次级侧  $N_{PS}$  ( $V_{out} + V_D$ ) 之间的匝数比反映到初级侧。该电压通过 FB 引脚和 SW 引脚之间的电阻与 RSET 引脚上的电阻的比例进行衰减，从而设置输出电压。可根据 [方程式 15](#) 配置输出电压。

$$R_{FB} = (|V_{output}| + V_f) \times N_{PS} \times \frac{R_{SET}}{V_{REF}} \quad (15)$$

图 2-10 展示了典型的应用电路。如需了解更多信息，请参阅 **LM25184** 数据表。

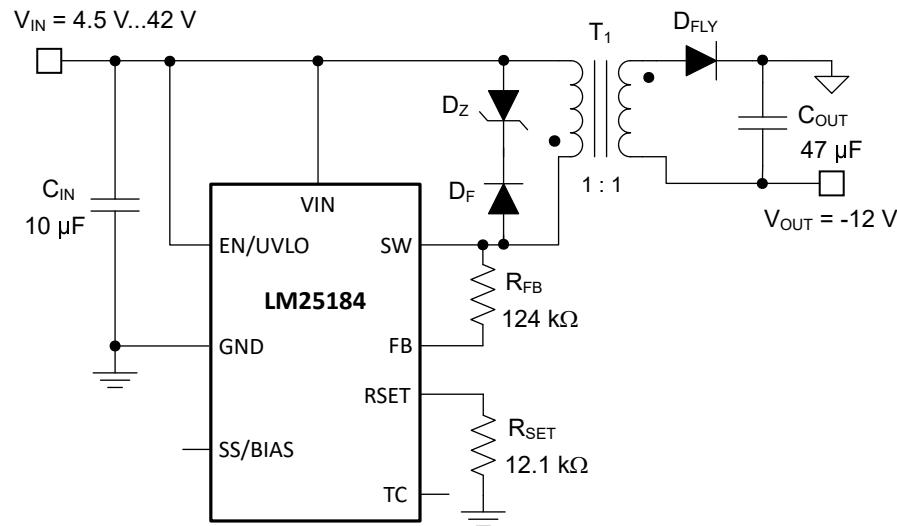


图 2-10. 通过初级侧反馈反激式转换器生成负电源

PSR 反激式转换器的缺点是设计人员必须自行设计或采购定制的反激式变压器。对于大多数工程师而言，这并不方便。另一个缺点是输出电压精度较低，因为二极管存在正向压降。

### 3 总结

本文介绍了几种使用正输入电源生成负电源的方法。电荷泵的电路非常简单。但缺点是输出电压大多数情况下无法调节，且最大输出电流低于 300mA。逆变器转换器可以输出大电流，并且只需要一个指示器。电路简单，但缺点是输入和输出必须具有良好的滤波器才能获得良好的性能。市面上可选的逆变器转换器型号较少。逆变器降压/升压转换器在拓扑中与逆变器转换器完全相同，且设计人员有更多选择。然而，逆变器降压/升压转换器并不简单，如果设计人员希望获得良好的性能，则需配备良好的输入和输出滤波器。Cuk 拓扑的输入和输出性能良好，但需要两个电感器。第二个缺点是市面上的 Cuk 变换器比较少。设计人员可以使用升压转换器构建 Cuk 转换器，并且必须在反馈环路中添加逆变器放大器。PSR 反激式拓扑的缺点是设计人员需要针对特定变压器进行设计。在实际设计中，设计人员可根据电路尺寸等具体需求选择合适的设计。

### 4 参考资料

1. 德州仪器 (TI) , [使用反相降压/升压转换器](#) 应用手册。
2. 德州仪器 (TI) , [LM63615-Q1 的反相降压/升压应用](#) 应用手册。
3. 德州仪器 (TI) , [LM27761 低噪声、稳压开关电容器电压逆变器](#) 数据表。
4. 德州仪器 (TI) , [TPS63700 DC-DC 逆变器](#) 数据表。
5. 德州仪器 (TI) , [LM2611 1.4MHz Cuk 转换器](#) 数据表。
6. 德州仪器 (TI) , [LMR33640 Simple Switcher 3.8V 至 36V、4A 同步降压转换器](#) 数据表。
7. 德州仪器 (TI) , [LM25184 具有 65V、4.1A 功率 MOSFET 的 42VIN PSR 反激式 DC/DC 转换器](#) 数据表。
8. 德州仪器 (TI) , [LM5158x 采用双随机展频技术的 2.2MHz 宽 VIN 85V 输出升压/SEPIC/反激式转换器](#) 数据表。
9. 德州仪器 (TI) , [适用于成本敏感型系统的 TLVx171 36V 单电源、低功耗运算放大器](#) 数据表。

## 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出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。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

版权所有 © 2025, 德州仪器 (TI) 公司