

# 通过5 V至24 V输入 提供双极性、双向DC-DC流入 和流出电流

高级应用工程师Victor Khasiev

## 简介

大部分电子系统都依赖于正电压轨或负电压轨，但是有些应用要求单电压轨同时为正负电压轨。在这种情况下，正电源或负电源由同一端子提供，也就是说，电源的输出电压可以在整个电压范围内调节，并且可以平稳转换极性。例如，一些汽车和音频应用除了需要传统电压源外，还需要能够用作负载以及从输出端子吸取电流的电源。汽车系统中的再生制动就是这种应用。关于单端子双极性电源已有相关文献介绍，但是对于能够在输入有电压降期间工作（例如冷启动条件下），同时继续提供双向功能的解决方案没有看到相关资料。本文介绍一种不受输入电压变化影响，同时产生功率并实现反向电流流动（即从输出到输入）的解决方案。

## 双极性双向电源电路

图1所示为以4象限控制器（第2级）U1为中心的2级电源。这个4象限转换器由中间总线转换器 $V_{\text{INTER}}$ （第1级）提供馈电，提供12 V至24 V范围的输出电压，标称电压为12 V至16 V，与标准汽车电池电压轨的标称电压范围匹配。整个2级转换器的输出电压为 $\pm 10$  V，提供3 A负载电流。输出电压由控制器U1的CTRL引脚上的电压源CONTROL信号控制。

通过低通滤波器 $C_F$ 、 $R_F$ 缓解控制电压的急剧变化。传动系统包含两个MOSFET，分别是N沟道Q1和P沟道Q1；两个分立电感L1和L2以及一个输出滤波器。用两个分立电感替代单个耦合电感可以扩展适用的磁电范围，并且可以使用以前经过认证和测试的扼流圈。因为输出具有双极性特性，所以输出滤波器仅采用陶瓷电容组成。

整个2级转换器的输入电压范围为5 V至24 V，涵盖汽车电子的冷启动电压降和工业应用中的掉电情况。启用转换器时，基于控制器U2的升压转换器（级1）使中间总线电压保持在或高于12 V。升压转换器的动力系统包含电感L3、MOSFET Q1和Q2。2级结构支持下游的4象限转换器正常工作，在所有工作条件下向负载提供 $\pm 10$  V电压。

## 双极性电源提供电流的工作原理

图2的波形显示了图1电路的工作状态。在 $V_{\text{IN}}$ 端施加输入电压时，如果输入降至12 V以下，升压转换器会将其输出 $V_{\text{INTER}}$ 调节至12 V。如果 $V_{\text{IN}}$ 超过标称12 V汽车电轨的12 V典型值，升压转换器会进入Pass-Thru™模式。在这种模式下，顶部MOSFET Q1会在100%占空比始终导通工作，所以不会进行切换操作；施加于4象限转换器的电压 $V_{\text{INTER}}$ 相对稳定地保持在 $V_{\text{IN}}$ 。

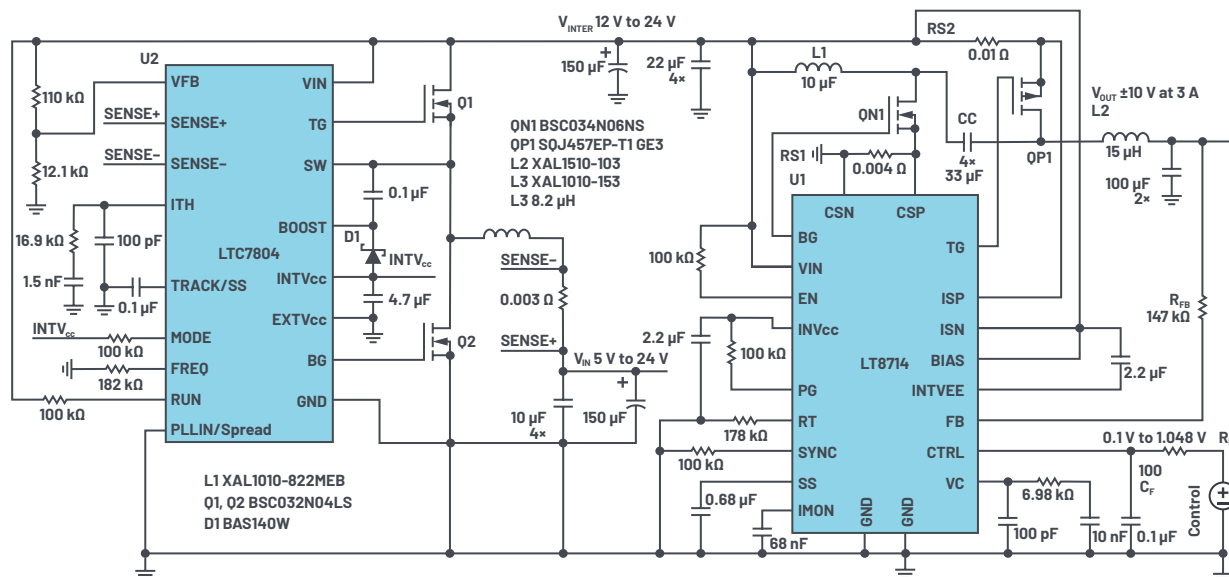


图1. 双极性、双向、双端子电源的电气原理图： $V_{\text{IN}} = 5 \text{ V}$ 至 $24 \text{ V}$ ， $3 \text{ A}$ 时 $V_{\text{OUT}} = \pm 10 \text{ V}$ 。

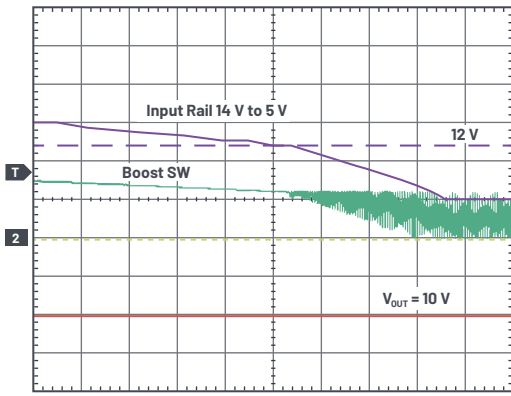


图2.  $V_{IN}$ 从14 V降低至5 V时的波形。  $V_{IN} = 5 \text{ V/div}$ ,  $V_{OUT} = 5 \text{ V/div}$ , 升压SW = 10 V/div, 时标为200  $\mu\text{s/div}$ 。

与典型的2级器件（即升压转换器后接降压/反相）相比，这种方法大幅提升了系统效率。这是因为Pass-Thru模式下（系统大部分时间都处于此模式）的效率可以接近100%，实质上将功率系统转变为单级转换器。如果输入电压降低至12 V电平以下（例如，在冷启动期间），升压转换器将切换为将 $V_{INTER}$ 调节至12 V。采用此方法，即使输入电压急剧下降，4象限转换器也能够提供 $\pm 10 \text{ V}$ 电压。

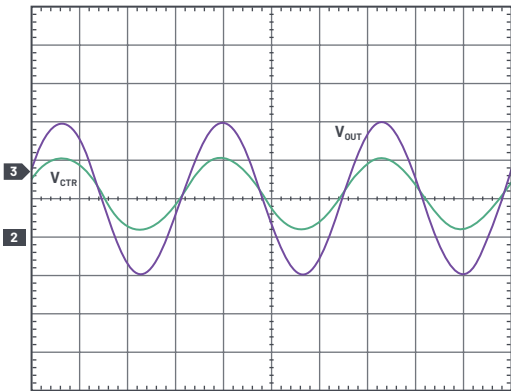


图3. 与正弦控制信号呈函数关系的正弦波输出波形。  $V_{CTRL} = 0.5 \text{ V/div}$ ,  $V_{OUT} = 5 \text{ V/div}$ , 时标为5 ms/div。

控制电压达到最大值（在本例中，为1.048 V）时，转换器输出为+10 V。控制电压达到最小值(100 mV)时，转换器输出为-10 V。控制电压与输出电压之间的关系如图3所示，其中控制电压为60 Hz正弦信号频率，峰峰值幅度为0.9048 V。由此得到的转换器输出为相应的60 Hz正弦波，峰峰值幅度为20 V。输出从-10 V平稳变化为+10 V。

在此工作模式下，4象限转换器调节输出电压。输出电压由U1通过其FB引脚上的电阻 $R_{FB}$ 来感测。将该引脚上的电压与控制电压相比较，并根据比较结果调节转换器的占空比（即Q1上的栅极信号），使输出电压保持稳定。如果 $V_{INTER}$ 、CONTROL或 $V_{OUT}$ 发生变化，会进行占空比调制，从而相应地调节输出。MOSFET QP1与QN1同步开关，以实现同步整流，进一步充分提高效率，如图4所示。

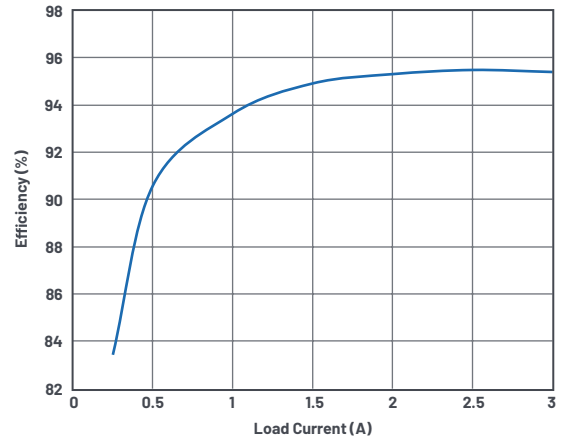


图4. 效率与负载电流的关系。

## 双极性电源变为负载的工作原理：它会吸取电流

此2级稳压器可以作为电流源或电流吸收器使用。在电流吸收模式下，电流和功率从输出 $V_{OUT}$ 反向流至输入 $V_{IN}$ 。对于汽车电子和一些音频系统来说，这一特性非常重要。在描述这种模式时，为了便于理解，我们将 $V_{OUT}$ 称为输入，将 $V_{IN}$ 称为输出。此外，本文只探讨 $V_{INTER}$ 总线电压等于或大于最低12 V电压的应用。

电流反向流动时，4象限转换器调节从 $V_{OUT}$ 流至 $V_{IN}$ 的输出电流；在这种模式下，转换器不调节电压。4象限控制器感测检测电阻（图1中为RS2）两端产生压降时的输出电流，并调节其占空比，使压降保持在设定值（在本解决方案中为50 mV）。

当4象限转换器在 $V_{INTER}$ 总线上产生的电压超过规定的最小值时，升压转换器进入Pass-Thru模式，顶部MOSFET Q1始终导通，并尽可能以最低损耗将输出电流预设值提供给 $V_{IN}$ （负载）端子。

此工作模式已经过测试和验证。为此，将图1中电路的 $V_{OUT}$ 连接至实验室电源（设置为12.5 V），将 $V_{IN}$ 连接至电子负载，将流经转换器的电流设置为4.5 A。4象限转换器的热影像如图5所示。



图5. 4象限转换器传动系统在负载（反向电流）模式下的热影像。4.5 A电流从 $V_{OUT}$ 端子流至12.5 V电源( $V_{OUT}$ )的 $V_{IN}$ 。

图6所示为转换器实物照片，它由两个焊接在一起的ADI演示电路组成：分别是DC2846A升压转换器演示电路和DC2240A 4象限转换器演示电路。

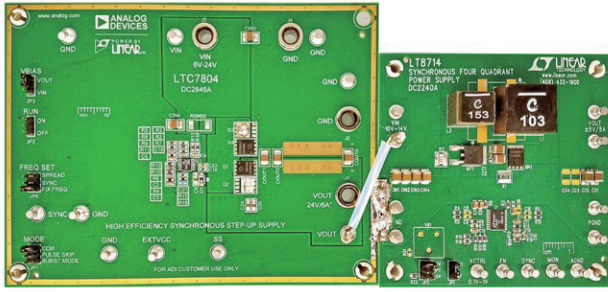


图6. 将两个现成的ADI演示板焊接在一起组成的测试电路实物照片。左侧为LTC7804 (DC2846A)。右侧为LT8714 (DC2240A)。

### 组件选择和传动系统计算

此应用选择的这两个控制器都具备高性能、高效率，并且简单易用。Power by Linear™ LT8714是一款易于使用的4象限控制器，支持高效同步整流。LTC7804同步升压转换器内置电荷泵，提供高效、无需切换的Pass-Thru 100%占空比工作模式。

接下来针对传动系统组件和初步选择的组件进行应力分析。为了更深入地了解功能详情，请参考这些器件的LTspice®模型。

表1. 4象限转换器传动系统计算

传动系统计算	
$V_{INTER} = 1.2 \times  V_{OUT} $	设置最低 $V_{INTER}$ 值
$D_{4Q} = \frac{V_{INTER} + V_{OUT}}{2 \times V_{INTER} + V_{OUT}}$	4象限占空比
$I_{AVG} = I_{OUT} \times \frac{D_{4Q}}{\eta \times (1 - D_{4Q})}$	平均L1电流 $\eta$ =效率
$I_{L1} = I_{AVG} + \frac{\Delta I}{2}$	L1的峰值电流
$I_{L2} = I_{OUT} + \frac{\Delta I}{2}$	L1的峰值电流
$V_Q = 2 \times V_{INTER} + V_{OUT}$	Q1和Q2电压应力

表2. 4象限转换器控制电路计算

传动系统计算	
$V_{CTRN} = 0.1 \text{ V}$	最低负 $V_{OUT}$ 的控制电压
$R_{FB} = \frac{[7.25 \text{ k}\Omega \times (-V_{OUT} - V_{CTRN})]}{(V_{CTRN} - 0.6065 \text{ V})}$	设置反馈电阻 $R_{FB}$ ；选择最接近的 $R_{FB}$ 标准值
$V_{CTRP} = \frac{+V_{OUT} + 83.7 \mu\text{A} \times R_{FB}}{1 + \frac{R_{FB}}{7.25 \text{ k}\Omega}}$	最高正 $V_{OUT}$ 的控制电压

表3. 升压转换器计算\*

$D_{BOOST} = \frac{V_{INTER} - V_{IN}}{V_{INTER}}$	升压占空比，( $V_{IN} < V_{INTER}$ )
--	--------------------------------

\*Q1、Q2电压应力由最大值 $V_{INTER}$ 或 $V_{IN}$ 定义。

### 数值示例

这是一个数值示例，将之前的公式应用于转换器，在3 A、200 kHz开关频率和90%效率下产生±10 V；

$$V_{INTER} = 12 \text{ V}$$

$$D_{4Q} = 0.647 \text{ V}$$

根据LT8714数据手册中的最大限流值与占空比关系图，对于给定的 $D_{4Q}$ ， $V_{CSP} = 57 \text{ mV}$ 。

$$R_{S1} = 0.63 \times V_{CSP} / I_{OUT} \times (1 - D_{4Q}) = 0.004 \Omega$$

$$R_{S2} = (50 \text{ mV} / 1.5) \times I_{OUT} = 0.01 \Omega$$

选择L1为10  $\mu\text{H}$ ，L2为15  $\mu\text{H}$

$$I_{L1} = 6.1 \text{ A}; I_{L2} = 4.3 \text{ A}$$

$$V_Q = 58 \text{ V (最大 } V_{IN} \text{ 为 } 24 \text{ V 时)}$$

$$V_{CTRN} = 0.1 \text{ V}$$

$$V_{CTRP} = 1.048 \text{ V}$$

$$R_{FB} = 147 \text{ k}\Omega$$

Q1、Q2电压应力为24 V

### 结论

本文介绍了一种可实现双极性、双向电源的高性能转换器解决方案。具有以下有助于提高解决方案整体性能的特性：同步整流可产生高效率，简单易行的专用控制方案可轻松连接各种类型的主机处理器和外部控制电路。这种解决方案解决了输入电压不稳的问题（包括快速瞬变），确保在所有工作条件下都能提供稳定的输出电压。本解决方案选择的器件可充分提高效率，简化设计。例如，利用LT8714可以轻松设计双极性、双向电源。在汽车和工业环境中，LTC7804可作为中间电源，实现接近100%的工作效率。

## 作者简介

Victor Khasiev是ADI公司的高级应用工程师，在AC/DC和DC/DC转换的电力电子领域拥有丰富的经验。他拥有两项专利，并撰写了多篇文章。这些文章涉及ADI半导体器件在汽车和工业应用中的使用，包括升压、降压、SEPIC、正到负、负到负、反激式、正激式转换器和双向备用电源。他持有高效功率因数校正解决方案和先进的栅极驱动器相关专利。Victor乐于为ADI客户提供支持，解答有关ADI产品、电源原理图设计和验证、印刷电路板布局、故障排查等问题并参与测试最终系统。联系方式：[victor.khasiev@analog.com](mailto:victor.khasiev@analog.com)。

## 在线支持社区



访问ADI在线支持社区，中文技术论坛

与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问[ez.analog.com/cn](http://ez.analog.com/cn)

