

## 负压 Buck 电路的设计与仿真

Robin Yu, Holly Gu

Sales and Marketing/East China

### ABSTRACT

在含有负电源轨供电的电子电路当中，通常使用负压 LDO 产生绝对值更低的负压电源轨。当输入输出电压压差较大时，其转换效率较低，尤其当负载电流较大时，器件发热会成为系统设计中颇为棘手的问题。本文提出的利用现有 Boost 芯片搭建的负压 Buck 电路，可以很好的解决这一问题。最后，本文给出了基于 TI-TINA 软件所得到的仿真结果。

### Contents

|     |                            |    |
|-----|----------------------------|----|
| 1   | 开关电源 DC-DC 的基本拓扑结构 .....   | 2  |
| 2   | 开关电源 DC-DC 的拓扑结构延伸 .....   | 3  |
| 3   | 负压 Buck 电路的设计与仿真 .....     | 4  |
| 3.1 | 用仪表放大器做反馈的负压 Buck 电路 ..... | 4  |
| 3.2 | 用电流镜做反馈的负压 Buck 电路 .....   | 6  |
| 3.3 | 用三极管做反馈的负压 Buck 电路 .....   | 8  |
| 4   | 参考文献 .....                 | 10 |

### Figures

|            |   |   |
|------------|---|---|
| Figure 1.  | 降压 Buck (12V 转 5V) 电路拓扑结构 .....                       | 2 |
| Figure 2.  | 升压 Boost (5V 转 12V) 电路拓扑结构 .....                      | 2 |
| Figure 3.  | 升降压 Buck-Boost (7V 转 -5V) 电路拓扑结构 .....                | 2 |
| Figure 4.  | 负压降压 Buck (-12V 转 -7V) 电路拓扑结构 .....                   | 3 |
| Figure 5.  | 负压升压 Boost (-7V 转 -12V) 电路拓扑结构 .....                  | 3 |
| Figure 6.  | 负压升降压 Buck-Boost (-5V 转 7V) 电路拓扑结构 .....              | 3 |
| Figure 7.  | 仪表放大器反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路 (-12V 转 -7V) .....       | 4 |
| Figure 8.  | 仪表放大器反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路 (-12V 转 -7V) 的启动波形 ..... | 5 |
| Figure 9.  | 仪表放大器反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路 (-12V 转 -7V) 的稳态波形 ..... | 6 |
| Figure 10. | 电流镜反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路 (-12V 转 -7V) .....         | 7 |
| Figure 11. | 电流镜反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路 (-12V 转 -7V) 启动波形 .....    | 7 |
| Figure 12. | 电流镜反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路 (-12V 转 -7V) 稳态波形 .....    | 8 |
| Figure 13. | 三极管反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路 (-12V 转 -7V) .....         | 8 |
| Figure 14. | 三极管反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路 (-12V 转 -7V) 启动波形 .....    | 9 |
| Figure 15. | 三极管反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路 (-12V 转 -7V) 稳态波形 .....    | 9 |

## 1 开关电源 DC-DC 的基本拓扑结构

在实际电路设计当中，开关电源 DC-DC 的应用非常广泛，其中以降压 Buck 电路最为常见，以 12V 转 5V 为例，其典型拓扑结构如 Figure 1 所示。其输入电压  $V_{IN}$ ，输出电压  $V_{OUT}$  和占空比之间的关系为  $V_{OUT}=D \cdot V_{IN}$ 。

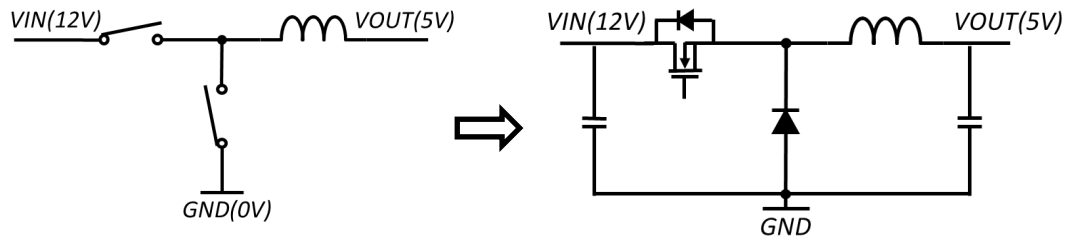


Figure 1. 降压 Buck (12V 转 5V) 电路拓扑结构

改变电感的连接方式，可以轻易得到另外两种最基本的拓扑，即升压 Boost 和升降压 Buck-Boost（正转负）电路，分别如 Figure 2 和 Figure 3 所示。其输入电压  $V_{IN}$ ，输出电压  $V_{OUT}$  与占空比之间的关系分别为  $V_{OUT}=V_{IN}/(1-D)$  和  $V_{OUT}=-V_{IN} \cdot D/(1-D)$ 。

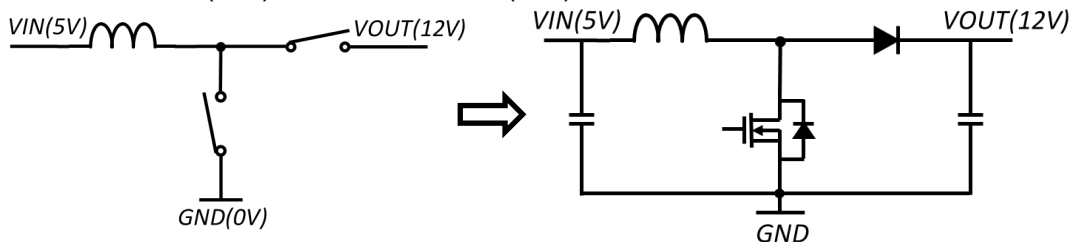


Figure 2. 升压 Boost (5V 转 12V) 电路拓扑结构

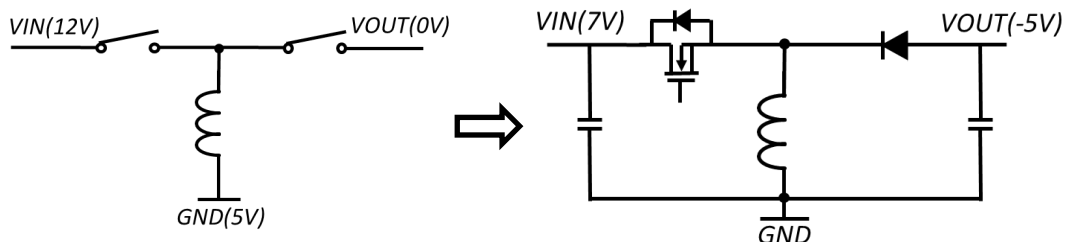


Figure 3. 升降压 Buck-Boost (7V 转 -5V) 电路拓扑结构

对于实际电路的实现，我们知道正压的 Buck 和 Boost 都有专用的芯片。而正压转负压的 Buck-Boost 电路经常会用 Buck 芯片来实现，具体电路可以参考 TIDA-01405、TIDA-01457 等资料。在该电路中需要注意芯片接地点的接法以及 UVLO 设计等问题。当然 TI 有专门的正压转负压电源芯片可以直接使用，如 TPS63710、LMR70503 等，其应用电路更为简单。

## 2 开关电源 DC-DC 的拓扑结构延伸

由第 1 节不难看出，相比于 Buck 电路，Boost 和 Buck-Boost 电路仅仅是改变了输入、输出和参考地所对应的端口。那么对于开关电源这种三端口拓扑，改变不同的端口做为输入、输出和参考地，总共可以得到 6 种拓扑结构，除了上面列出来的三种最常见的电路，还可以得到另外三种不太常见的负压输入拓扑结构，如 Figure 4、Figure 5 和 Figure 6 所示，分别是负压的 Buck、Boost 和 Buck-Boost 电路。

类似地，其输入电压  $V_{IN}$ ，输出电压  $V_{OUT}$  与占空比  $D$  的关系如下，与正压的公式完全相同。

- (1) 负压 Buck 电路:  $V_{OUT}=D \cdot V_{IN}$
- (2) 负压 Boost 电路:  $V_{OUT}=V_{IN}/(1-D)$
- (3) 负压 Buck-Boost 电路:  $V_{OUT}=-V_{IN} \cdot D/(1-D)$

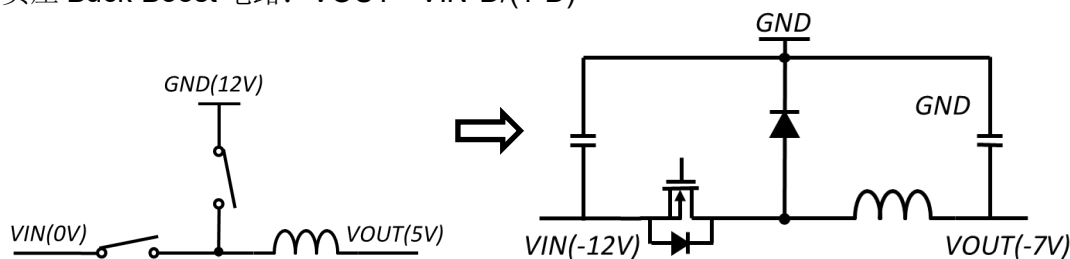


Figure 4. 负压降压 Buck (-12V 转 -7V) 电路拓扑结构

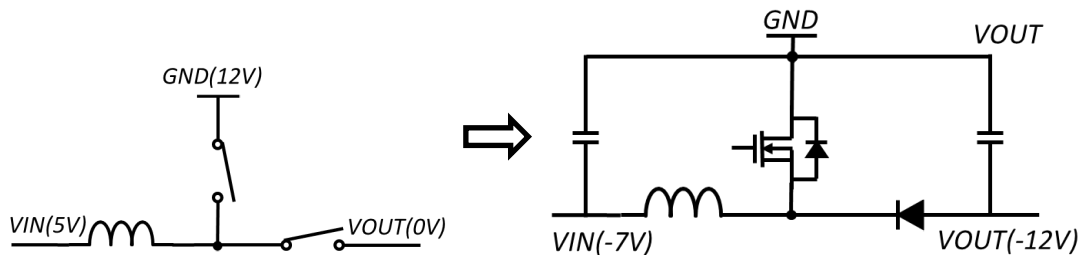


Figure 5. 负压升压 Boost (-7V 转 -12V) 电路拓扑结构

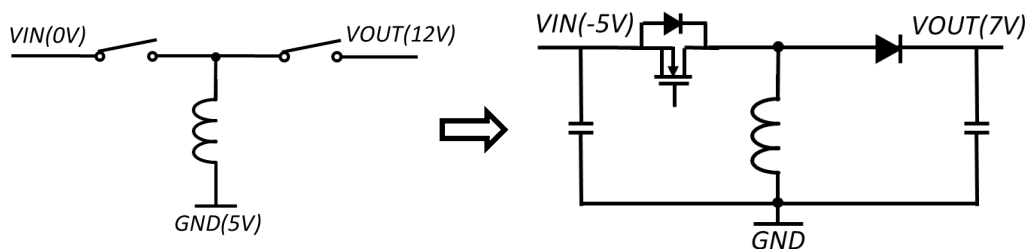


Figure 6. 负压升降压 Buck-Boost (-5V 转 7V) 电路拓扑结构

至于负压输入电路的具体实现，负压 Buck-Boost 电路很难见到实际的应用需求，因此这里不做深入讨论。关于负压 Boost 电路的实现，可以参考 LM2576 规格书中 8.1.10 节的 Figure 25。而负压 Buck 电路却鲜有文献提及，这也是本文下面要探讨的重点。

在电路设计当中，经常会用到正负电源供电的系统，如运放的供电。比较常见的做法是在 AC-DC 给过来的正负输入电源轨之后，直接用正压和负压的 LDO 进行降压，如 LM317/LM337。但是在某些应用中可能会出现 LDO 两端压降大，负载电流也大的情况，这会导致 LDO 发热严重，给电路设计带来诸多限制。在输入输出电压压差大的情况下，开关电源相比于 LDO，在转换效率方面有着更为突出的优势。前面已经提到，正压 Buck 电路有专用的芯片，非常容易实现，而负压的 Buck 电路却并没有专用的芯片，下面我们将探讨如何利用已有的芯片搭建负压的 Buck 电路。

3 负压 Buck 电路的设计与仿真

可以看到 Figure 4 中，开关 MOSFET 的源极接到的是电路的最低电位，这与正压 Boost 电路是一致的，因此可以借用正压 Boost 芯片来实现负压的 Buck 电路。那么下面本文就以常见的 Boost 芯片来完成一个负压 Buck 电路的设计。以 TPS61175 为例，设计目标如下：

|        |          |
|--------|----------|
| 输入电压   | -10~-14V |
| 输出电压   | -7V      |
| 最大负载电流 | 1A       |

针对以上设计目标，基于 TI-TINA 仿真软件，本文给出了三种负压 Buck 电路的实现方式与仿真结果。

3.1 用仪表放大器做反馈的负压 Buck 电路

用仪表放大器做反馈的负压 Buck 电路如 Figure 7 所示。芯片的 FB 引脚是以电路最低电位（浮动的地）作为参考点，而我们需要的负压输出 VOUT 又是以电路的最高电位（实际的接地点）作为参考点，这是负压电路设计中所需要解决的共性问题。此处，我们使用 INA193（20 倍固定增益）做了一个高边采样电路来实现参考点之间的转换。需要说明的是，为了保证仿真计算的收敛性，这里采用了将最低电位点作为参考接地点的方式进行仿真。

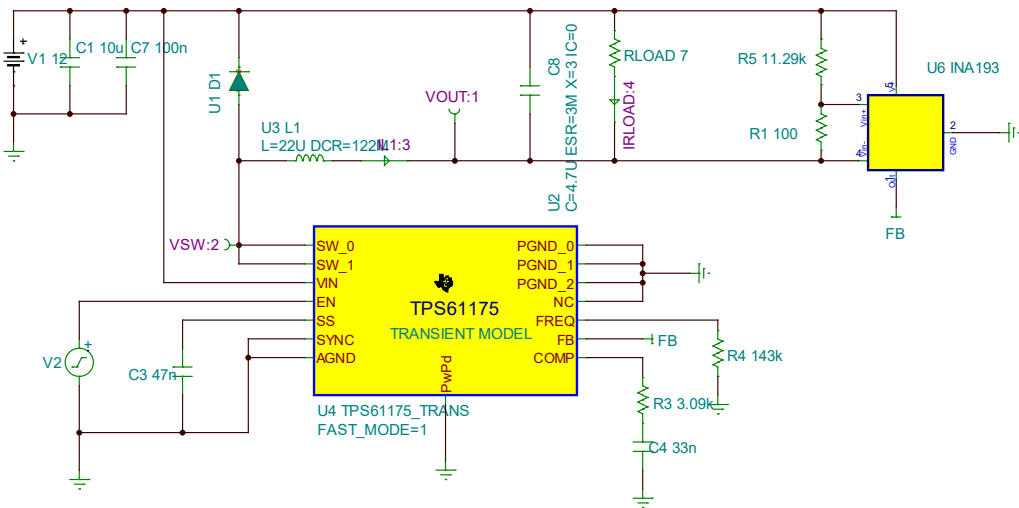
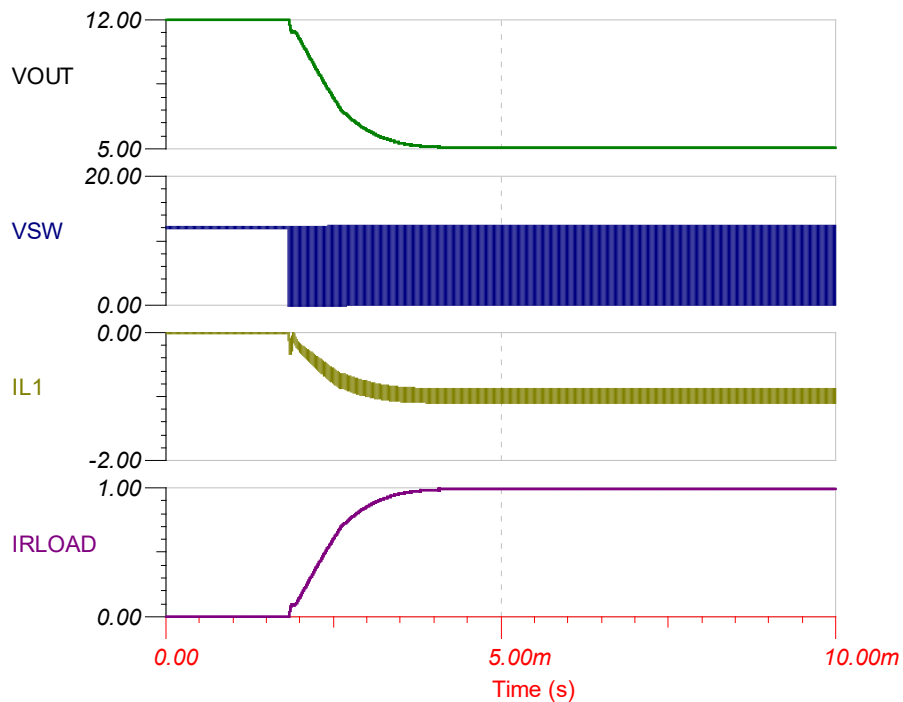
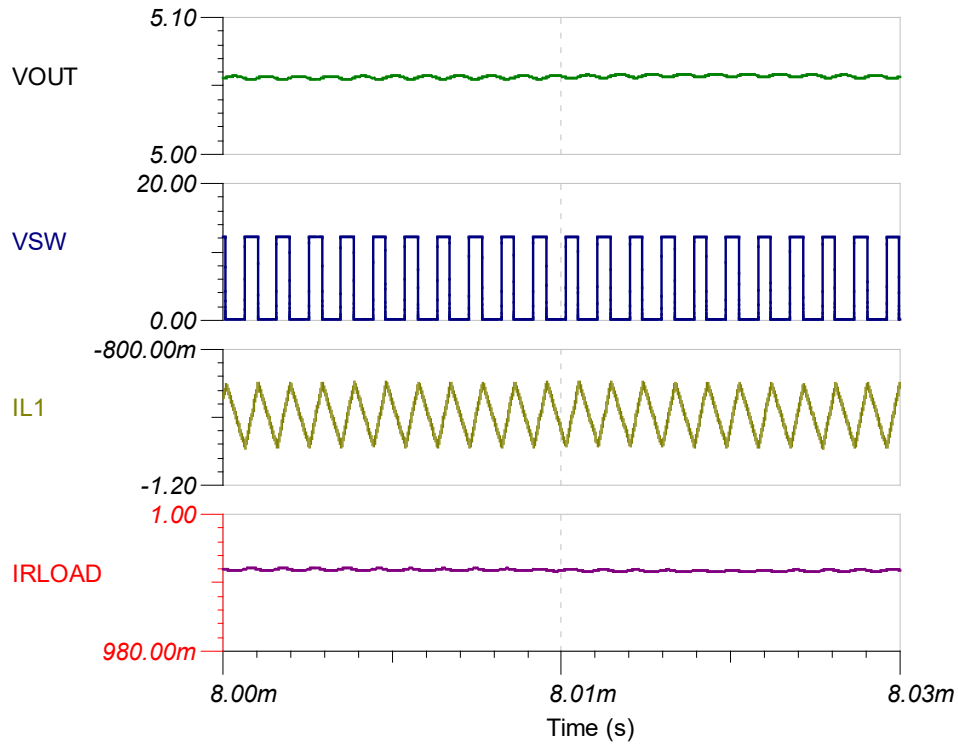


Figure 7. 仪表放大器反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路（-12V 转-7V）

Figure 8 和 Figure 9 所对应的 TINA 仿真波形分别为电路的启动以及稳态波形。其中 VOUT 对应输出电压波形，VSW 对应开关节点波形，IL1 对应电感电流波形，IRLOAD 对应负载电流波形。可以看出，以最高电位点 12V 最为参考地，该电路很好的实现了我们的设计目标，即从-12V（图中 0V）到-7V（图中 5V）的转换。



**Figure 8.** 仪表放大器反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路（-12V 转-7V）的启动波形



**Figure 9.** 仪表放大器反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路（-12V 转-7V）的稳态波形

### 3.2 用电流镜做反馈的负压 Buck 电路

对于 Figure 7 所示的电路，需要用到额外的仪表放大器 INA193，这会相应的增加电路设计的成本。也可以利用三极管构建电流镜来实现电路的反馈。如 Figure 10 所示，T1 和 T2 两个 PNP 管构成电流镜反馈电路，R2 可以用来设置输出电压大小。该电路中，稳态输出电压为-7V，因此 R2 两端电压为 7V，T2 管的集电极电流为 1mA，因此流过反馈电阻 R5 的电流会产生 1.23V 的压降，等于芯片内部参考电压。相应地，Figure 11 和 Figure 12 分别对应仿真启动波形以及稳态工作波形。需要指出的是，采用电流镜做反馈的电路，要尽量选择匹配度高的三极管对管以保证输出电压的精度。

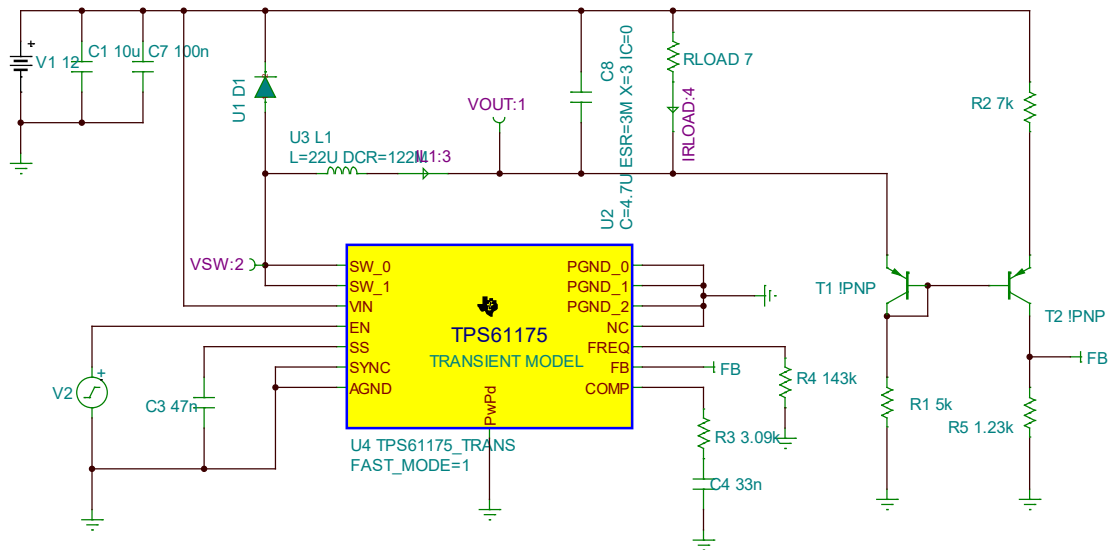


Figure 10. 电流镜反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路（-12V 转-7V）

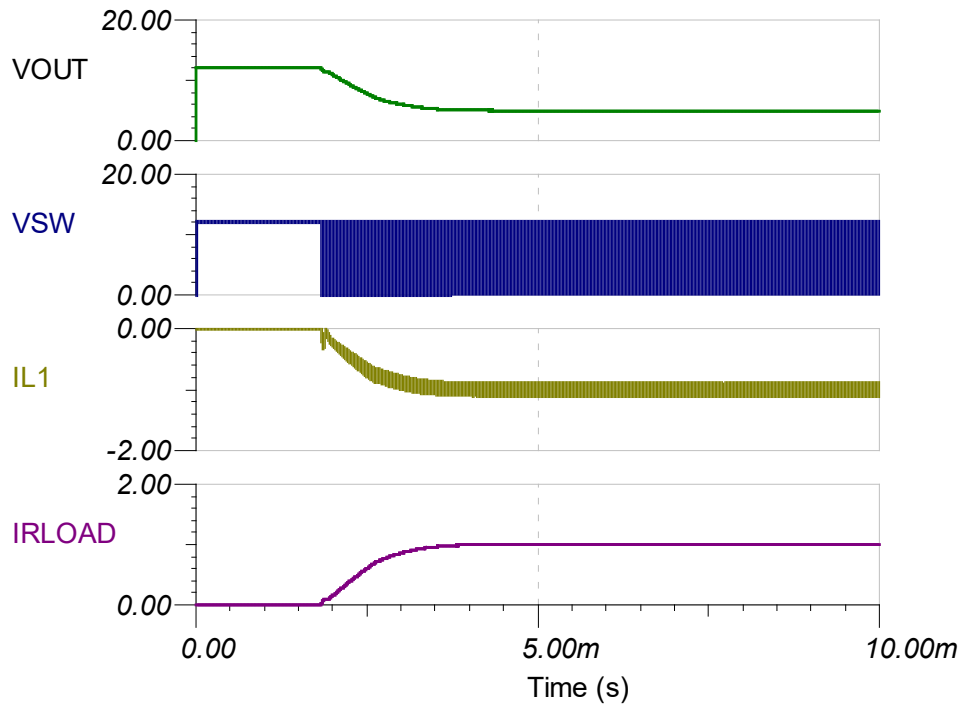
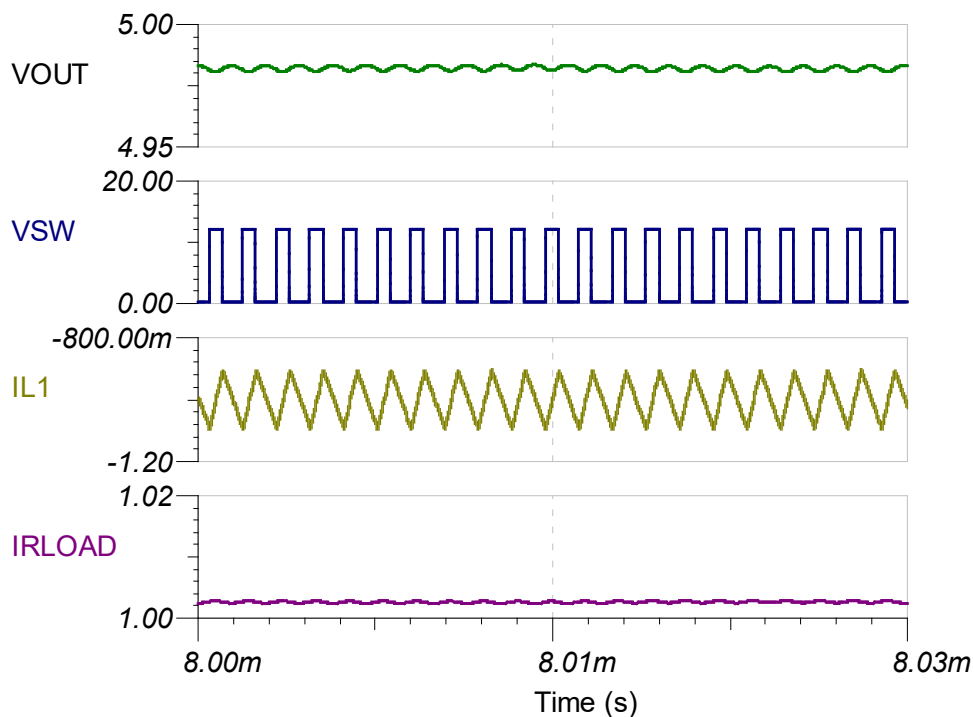


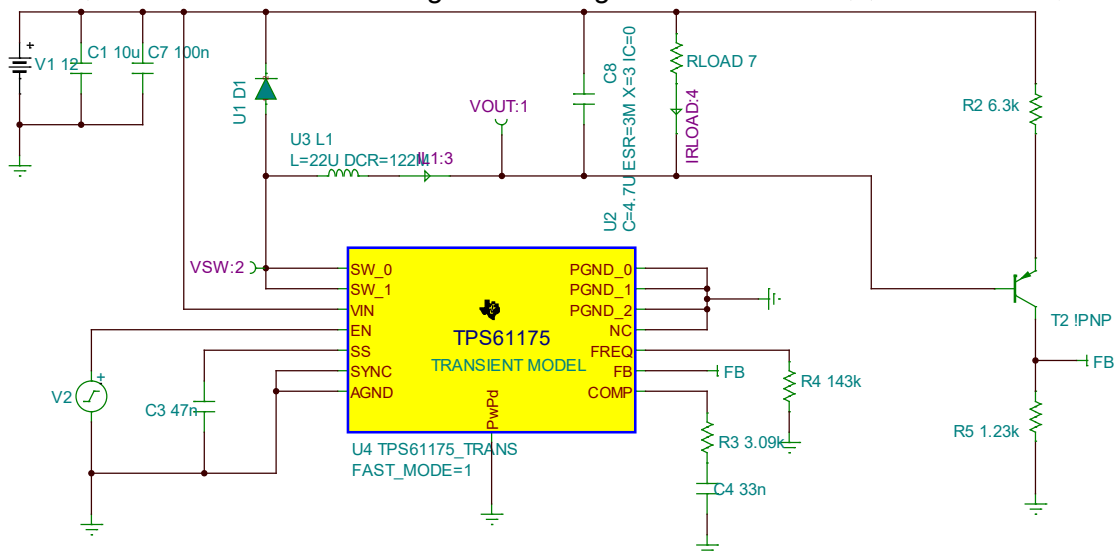
Figure 11. 电流镜反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路（-12V 转-7V）启动波形



**Figure 12.** 电流镜反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路（-12V 转-7V）稳态波形

### 3.3 用三极管做反馈的负压 Buck 电路

在 3.2 节的基础上，可继续对电路进行精简，进而得到使用单个三极管做反馈的负压 Buck 电路，如 Figure 13 所示。该电路输出需要考虑三极管的发射级与基极 PN 结的内建电势  $V_{be}$ ，因此适用于对输出电压精度要求不高，但特别关心成本的应用当中，相比于 3.2 中用电流镜做反馈的电路，可额外节省一个 PNP 管和一个电阻。相应地，Figure 14 和 Figure 15 分别对应仿真启动波形以及稳态工作波形。



**Figure 13.** 三极管反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路（-12V 转-7V）



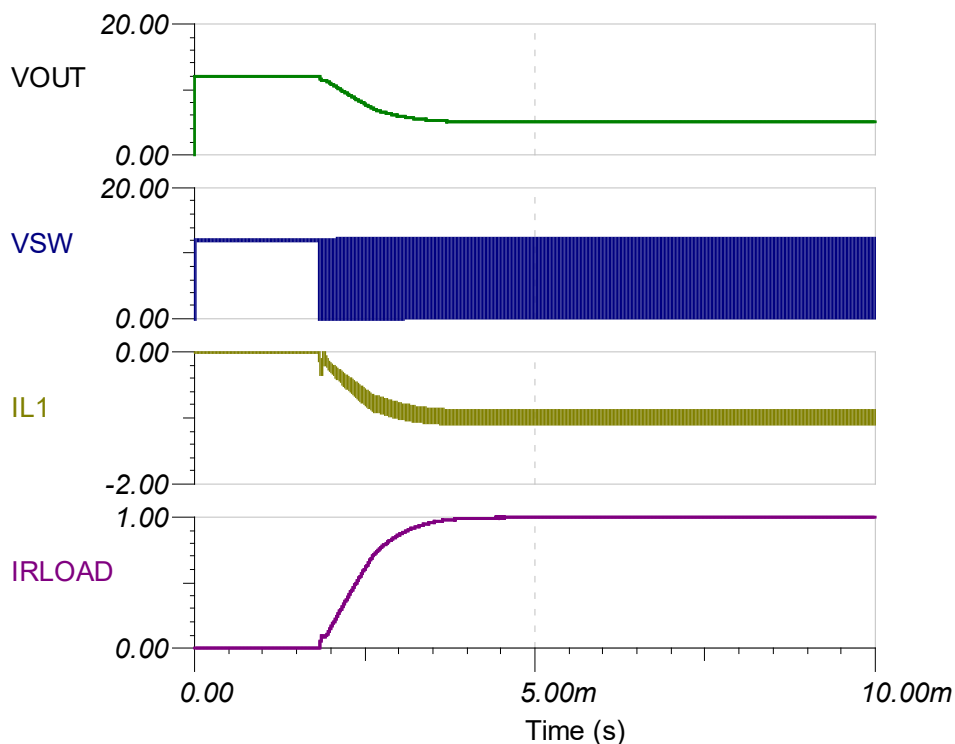


Figure 14. 三极管反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路（-12V 转-7V）启动波形

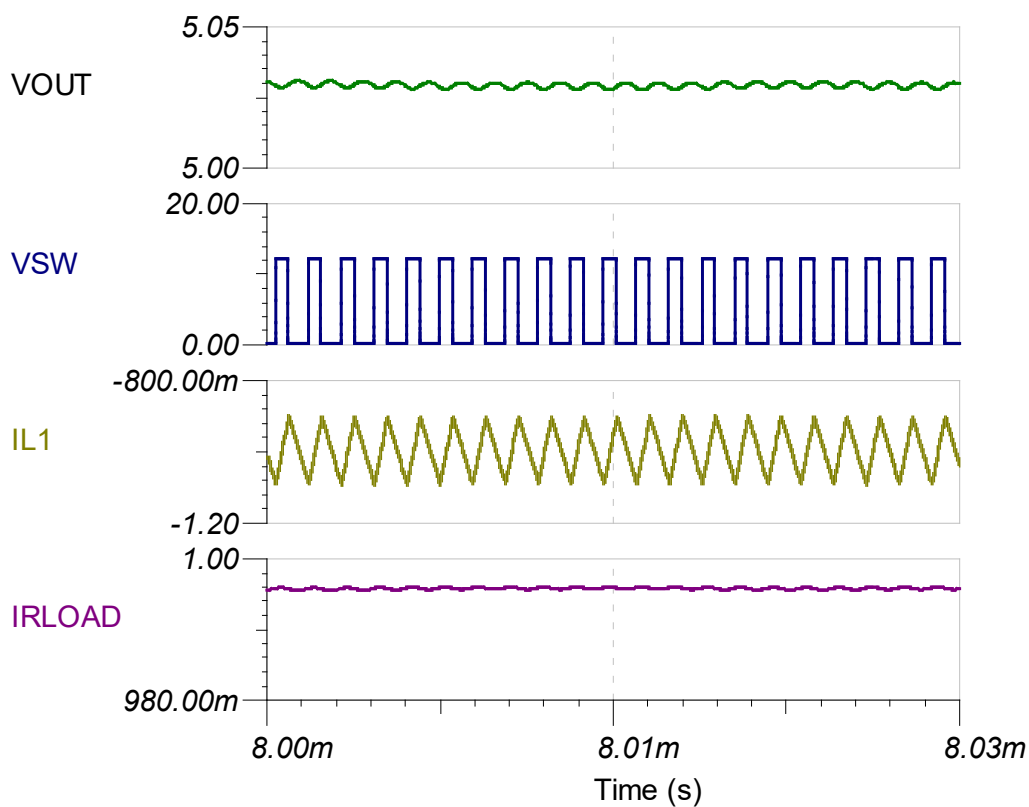


Figure 15. 三极管反馈的 TPS61175 负压 Buck 电路（-12V 转-7V）稳态波形

最后，本文讨论的负压 **Buck** 电路在实际使用中可以使用正压 **Buck-Boost** 来产生所需要的负压。但对于某些系统，从 **AC-DC** 过来会提供正负两个电源轨，这种情况下，就可以用负压 **Buck** 电路来产生所需要的负压电源轨，并实现很高的转换效率，而不必担心 **LDO** 高压降所带来的热的问题，以及过分依赖正向电源轨的带载能力。

## 4 参考文献

1. TPS61175 datasheet (SLVS892D)
2. TPS63710 datasheet (SLVSD44)
3. LMR70503 datasheet (SNVS850A)
4. INA193 datasheet (SBOS307G)
5. TPS92691 datasheet (SLVSD68)
6. TIDA-01405
7. TIDA-01457

## 重要声明和免责声明

TI 均以“原样”提供技术性 & 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，不保证其中不含任何瑕疵，且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、适合某特定用途或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

所述资源可供专业开发人员应用 TI 产品进行设计使用。您将对以下行为独自承担全部责任：(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、安保或其他要求。所述资源如有变更，恕不另行通知。TI 对您使用所述资源的授权仅限于开发资源所涉及 TI 产品的相关应用。除此之外不得复制或展示所述资源，也不提供其它 TI 或任何第三方的知识产权授权许可。如因使用所述资源而产生任何索赔、赔偿、成本、损失及债务等，TI 对此概不负责，并且您须赔偿由此对 TI 及其代表造成的损害。

TI 所提供产品均受 TI 的销售条款 (<http://www.ti.com.cn/zh-cn/legal/termsofsale.html>) 以及 [ti.com.cn](http://www.ti.com.cn) 上或随附 TI 产品提供的其他可适用条款的约束。TI 提供所述资源并不扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品所发布的可适用的担保范围或担保免责声明。

邮寄地址：上海市浦东新区世纪大道 1568 号中建大厦 32 楼，邮政编码：200122  
Copyright © 2018 德州仪器半导体技术（上海）有限公司