

### 摘要

在半桥配置中驱动 MOSFET 为设计人员带来了许多挑战。其中一个挑战是为高侧 FET 产生偏置。如果设计得当，自举电路可以解决此问题。

本文档使用 UCC27710 (即 TI 具有互锁功能的 620V 半桥栅极驱动器) 来介绍自举电路中的不同元件，以及如何正确选择这些元件才能确保实现可预测的功率 FET 开关。

### 内容

1 引言.....	2
2 自举电路的基本操作.....	2
3 自举元件选择.....	2
3.1 自举电容器.....	3
3.2 VDD 旁路电容器.....	3
3.3 外部自举二极管.....	4
3.4 自举电阻.....	6
4 自举元件的布局注意事项.....	7
5 总结.....	8
6 参考文献.....	8
7 修订历史记录.....	8

### 插图清单

图 2-1. 自举充电路径.....	2
图 2-2. 自举电容器放电路径.....	2
图 3-1. 自举二极管反向恢复时间引起的反向恢复损耗.....	4
图 3-2. 自举二极管反向恢复时间引起的反向恢复损耗 (缩小图).....	5
图 3-3. HB_HS 对开关节点的振铃影响.....	5
图 3-4. VDD/HB-HS 快速斜升 ( $R_{boot} = 0 \Omega$ ).....	6
图 3-5. VDD/HB-HS 快速斜升 ( $R_{boot} = 2.2 \Omega$ ).....	7
图 4-1. 使用 UCC27710 的布局示例.....	7

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 引言

使用半桥配置时，必须产生高侧偏置来驱动以开关节点为基准的高侧 FET 的栅极。为了实现这一目标，对于设计人员来说，最常用且具有成本效益的方法之一是使用由电容器、二极管、电阻器和旁路电容器组成的自举电路。

本应用手册将说明此电路的工作原理、自举电路的关键元件及其对栅极驱动的影响。本应用手册将重点介绍使用不带内置自举二极管的驱动器的半桥栅极驱动器，这为设计人员提供了灵活性并降低了栅极驱动器 IC 中的功耗。此外，本应用手册还将讨论该电路中不同元件的布局注意事项。

## 2 自举电路的基本操作

自举电路采用半桥配置来为高侧 FET 提供偏置。图 2-1 展示了采用简化半桥配置的自举电路的充电路径，该配置使用了 TI 具有互锁功能的 620V 半桥驱动器 UCC27710。当低侧 FET 导通（高侧 FET 关断）时，HS 引脚和开关节点被拉至地；VDD 辅助电源通过旁路电容器经由自举二极管和电阻器为自举电容器充电。

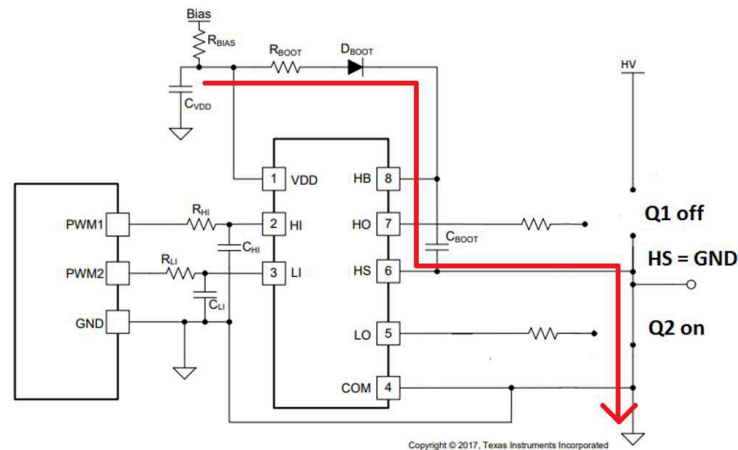


图 2-1. 自举充电电路

当低侧 FET 关断且高侧导通时，栅极驱动器的 HS 引脚和开关节点被拉至高压总线 HV；自举电容器通过栅极驱动器的 HO 和 HS 引脚将一些存储的电压（在充电序列期间累积的电压）放电至高侧 FET，如图 2-2 所示。

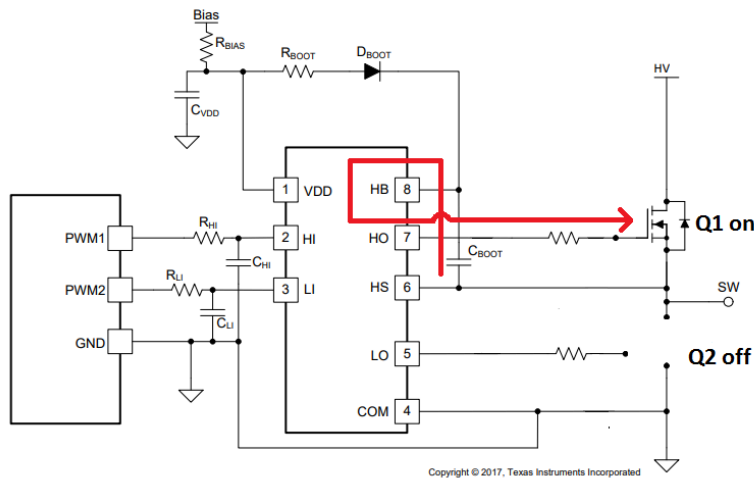


图 2-2. 自举电容器放电路径

## 3 自举元件选择

本节讨论了每个元件的作用及其对栅极驱动的影响。

### 3.1 自举电容器

从设计角度来看，这是最重要的元件，因为它提供了低阻抗路径来提供高峰值电流，从而为高侧开关充电。根据一般的经验法则，该自举电容器的大小应确保能够提供足够的能量来驱动高侧 MOSFET 的栅极，而不会导致损耗超过 10%。该自举电容器应至少比高侧 FET 的栅极电容大 10 倍。其原因是需要考虑直流偏置和温度导致的电容变化，另外还有负载瞬态期间跳过的周期。栅极电容可以使用 [方程式 1](#) 来确定：

$$C_g = \frac{Q_g}{V_{Q1g}} \quad (1)$$

其中  $Q_g$ ：栅极电荷（MOSFET 的数据表）

$$V_{Q1g} = V_{DD} - V_{BootDiode}$$

其中  $V_{BootDiode}$ ：自举二极管上的正向压降。

确定栅极电荷后，可以使用 [方程式 2](#) 来估算自举电容的最小值：

$$C_{boot} \geq 10 \times C_g \quad (2)$$

或者，可以使用 [方程式 3](#) 来更准确地计算最小自举电容值：

$$C_{boot} \geq \frac{Q_{total}}{\Delta V_{HB}} \quad (3)$$

$$Q_{total} = Q_G + I_{HBS} \times \frac{D_{max}}{f_{sw}} + \frac{I_{HB}}{f_{sw}}$$

其中：

·  $Q_G$  = 总 MOSFET 栅极电荷（MOSFET 的数据表）

·  $I_{HBS}$  = HB 到 VSS 漏电流（栅极驱动器的数据表）

·  $D_{max}$  = 最大占空比

·  $I_{HB}$  = HB 静态电流（栅极驱动器的数据表）

和

$$\Delta V_{HB} = V_{DD} - V_{DH} - V_{HBL}$$

其中：

·  $V_{DD}$  = 栅极驱动器 IC 的电源电压

·  $V_{DH}$  = 自举二极管正向压降（自举二极管数据表）

·  $V_{HBL}$  = HB UVLO 下降阈值（栅极驱动器数据表）

需要注意的是，如果值低于所需的最小自举电容值，可能会激活驱动器的 UVLO，从而过早关断高侧 FET。另一方面，较高的自举电容值会在某些情况下（在对自举电容器进行初始充电时或具有较窄的自举充电周期）导致较低的纹波电压和较长的反向恢复时间，以及较高的峰值电流流过自举二极管。[方程式 4](#) 展示了自举电容与流经自举二极管的峰值电流之间的关系。

$$I_{peak} = C_{boot} \times \frac{Dv}{dt} \quad (4)$$

通常建议使用具有良好额定电压 ( $2 \times V_{DD}$ )、温度系数和电容差的低 ESR 和低 ESL、表面贴装型多层陶瓷电容器 (MLCC)。

### 3.2 VDD 旁路电容器

为自举电容器充电的电荷必须来自某个较大的旁路电容器，通常为 VDD 旁路电容器。根据经验，此旁路电容器的大小应至少比自举电容器大 10 倍，以便它不会在自举电容器充电期间完全耗尽电荷。这样便可以在充电序列期间正确地自举电容器充电。在最坏的情况下，该 10 倍的比率会在 VDD 电容器上产生 10% 的最大纹波。

$$C_{VDD} \geq 10 \times C_{Boot} \quad (5)$$

### 3.3 外部自举二极管

为了尽可能地降低与二极管反向恢复特性和接地噪声反弹相关的损耗，建议使用具有低正向压降和低结电容的快速恢复二极管或肖特基二极管。使用肖特基二极管可降低从自举电容器向栅极驱动器电源回馈电荷的相关风险，并更大限度地降低漏电流。图 3-1 展示了在 HB-HS(Ch1) 上使用具有反向恢复时间的二极管时的反向恢复损耗。我们可以观察到 HB-HS 引脚上存在大量过冲和下冲，这可以触发驱动器的 UVLO 并关闭栅极驱动器。

当 HS 引脚（开关节点）被拉至更高的电压时，二极管必须能够足够快地反向偏置，以阻止从自举电容器到 VDD 电源的任何电荷。应仔细选择该自举二极管，使其能够处理启动期间的峰值瞬态电流，并使其额定电压高于系统直流链路电压且具有足够的裕度。

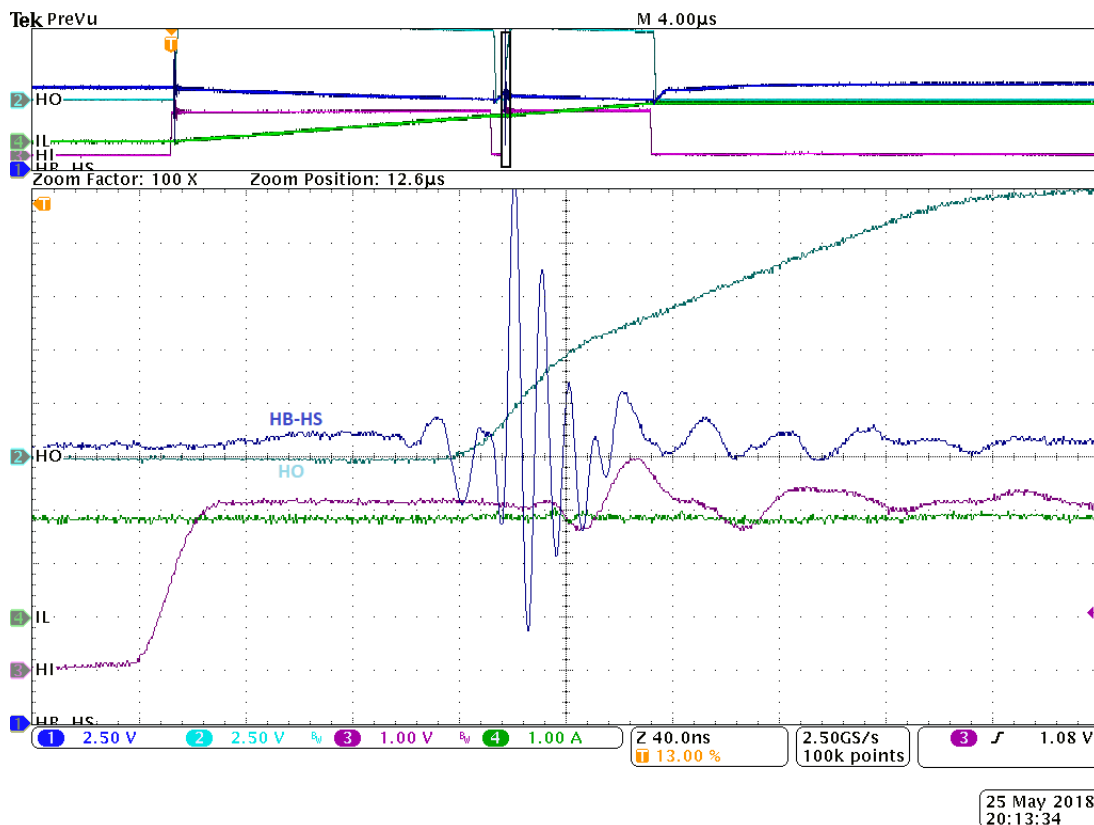


图 3-1. 自举二极管反向恢复时间引起的反向恢复损耗

下面的图 3-2 展示了通过设置时序专门在二极管电流的情况下将开关节点强制为高电平而形成的反向恢复条件（通道 1）。

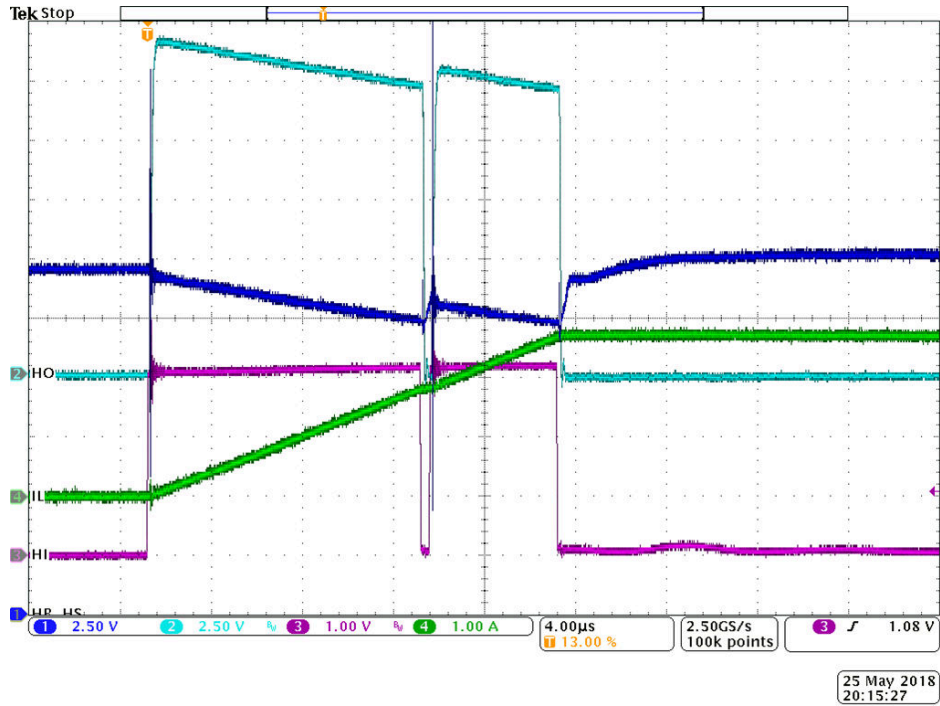


图 3-2. 自举二极管反向恢复时间引起的反向恢复损耗 ( 缩小图 )

图 3-3 展示了 HB-HS 引脚上损耗的影响，这可能会触发开关节点并可能损坏驱动器。

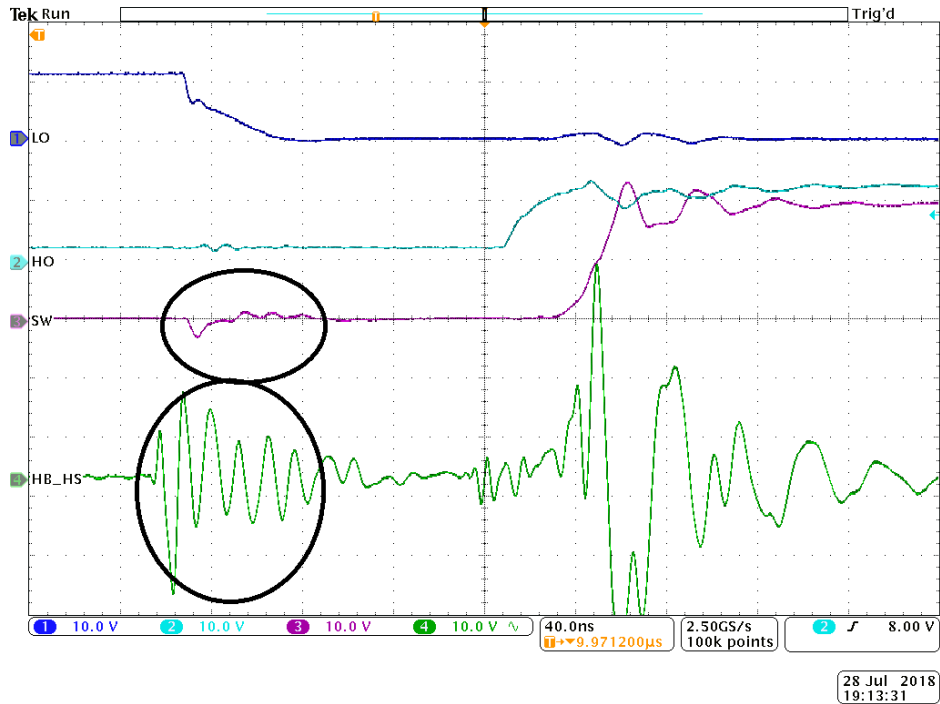


图 3-3. HB\_HS 对开关节点的振铃影响

### 3.4 自举电阻

自举电阻的作用是限制启动期间自举二极管上的峰值电流，因此应仔细选择该电阻，因为它会通过自举电容器引入一个时间常数，如**方程式 6**所示：

$$\tau = \frac{R_{\text{Boot}} \times C_{\text{引导}}}{\text{占空比}} \quad (6)$$

这个时间常数出现在高侧关断时间内，解释了与占空比的依赖关系。由于该占空比是恒定的，因此应适当调整自举电阻器和自举电容器以实现所需的启动时间。增加自举电阻值将增加时间常数，从而导致启动时间延长。

此外，选择的自举电阻器必须能够承受自举电容器的第一次充电过程中出现的高功耗。该功耗可以通过**方程式 7**进行估算：

$$\frac{1}{2} \times C_{\text{boot}} \times V_{\text{Cboot}}^2 \quad (7)$$

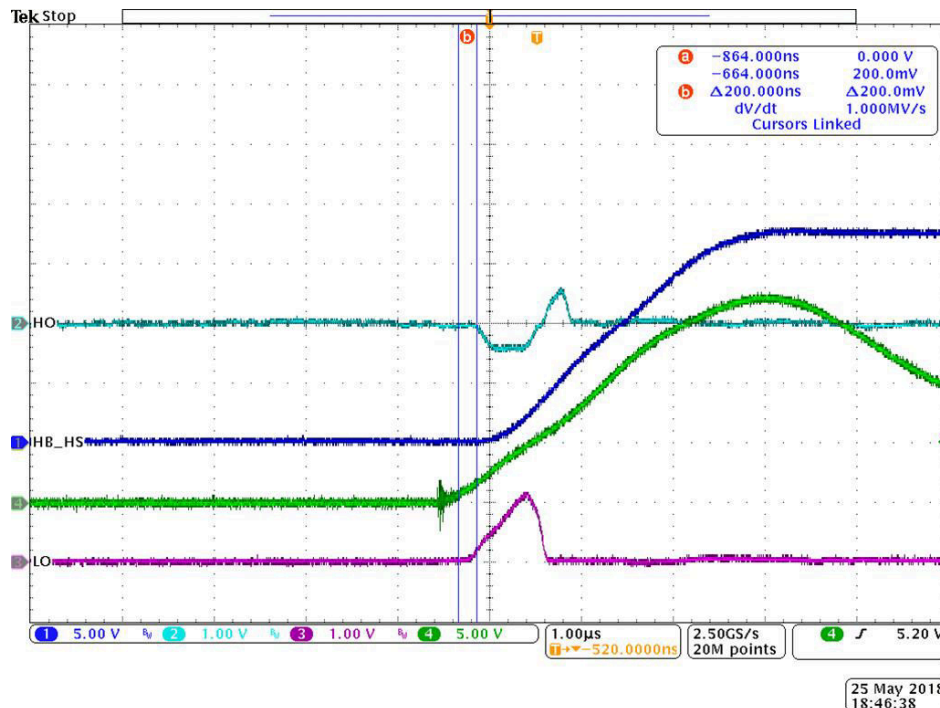
该功耗在自举电容器的充电期间产生，并可使用**方程式 8**进行估算：

$$E \cong 3 \times C_{\text{boot}} \times R_{\text{boot}} \quad (8)$$

该电阻器对于限制启动时流经自举二极管的峰值电流以及限制 HB-HS (高侧浮动电源到返回高侧浮动电源) 的 dv/dt 至关重要。通过此电阻器的峰值电流可以使用**方程式 9**进行计算：

$$I_{\text{pk}} = \frac{V_{\text{DD}} - V_{\text{BootDiode}}}{R_{\text{boot}}} \quad (9)$$

**图 3-4** 展示了使用  $0 \Omega$  电阻时 VDD (CH4) 和 HB-HS (CH1) 的快速斜升，这会导致 LO (CH3) 和 HO (CH2) 上的电压发生意外变化。



**图 3-4. VDD/HB-HS 快速斜升 ( $R_{\text{boot}} = 0 \Omega$ )**

**图 3-5** 展示了使用略大的电阻值 ( $R_{\text{boot}} = 2.2 \Omega$ ) 如何解决此问题。需要注意的是，在**图 3-5** 中观察到的偏置上升速率并非适用于所有驱动器。

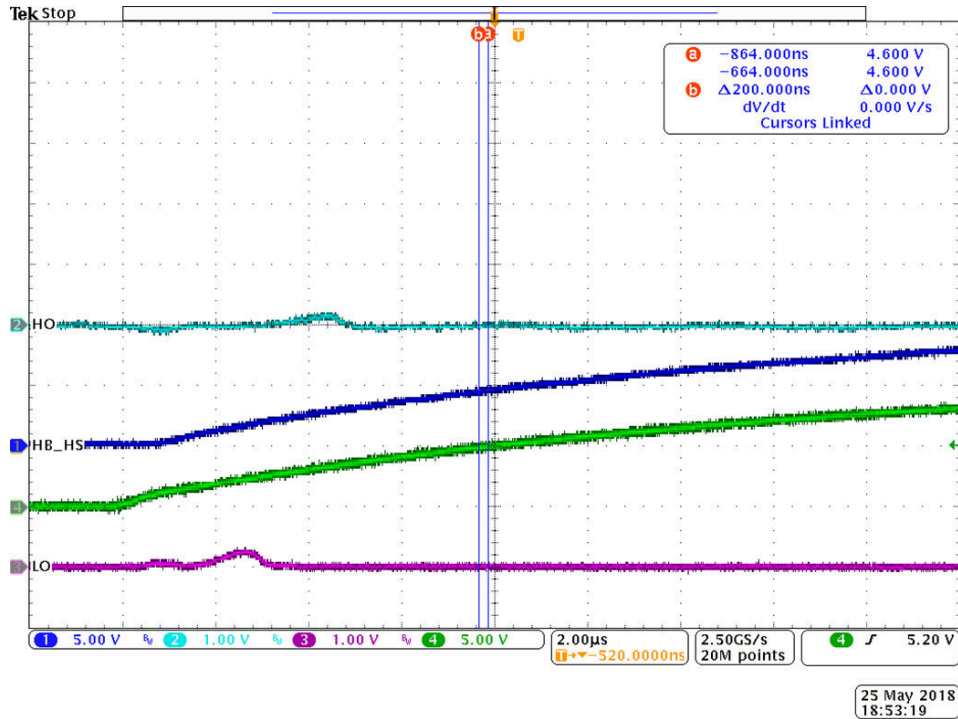


图 3-5. VDD/HS 快速斜升 ( $R_{boot} = 2.2 \Omega$ )

#### 4 自举元件的布局注意事项

正确选择所有自举元件后，务必要仔细放置这些元件，从而更大限度地减小寄生电感并缩短大电流布线长度。这个大电流路径包括自举电容器、自举二极管、驱动器以地为基准的 VDD 旁路电容器和低侧电源开关。因此，缩短该路径并使该环路尽可能小非常重要。自举电容器和旁路电容器应尽可能靠近栅极驱动器电源引脚放置。下面的图 4-1 展示了一个使用 UCC27710 的良好布局示例，其中所有自举元件都位于栅极驱动器 IC 附近，可更大限度地减小寄生电感的影响并减小自举电路的高峰值电流路径。将高压电源布线与低压信号布线分开也很重要。

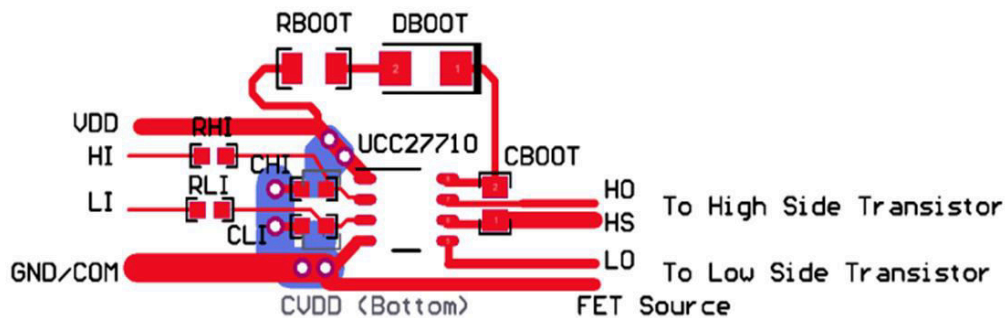


图 4-1. 使用 UCC27710 的布局示例

## 5 总结

本应用报告使用 TI 的 600V 系列半桥驱动器 UCC27710 讨论了自举电路在半桥配置中的基本操作。本文档还讨论了在半桥配置中为高侧 FET 生成偏置所需的每个自举元件的作用和重要性。本文档展示了自举电容值的详细计算方法以及估算该电容值的一般经验法则。此外，还讨论了在正确选择所有元件后，如何在 PCB 布局中正确放置这些元件。

## 6 参考文献

- [UCC27710 产品文件夹](#)
- [UCC27710 数据表](#)
- [UCC27710 评估模块](#)
- [半桥驱动器产品](#)
- [MOSFET 和 IGBT 栅极驱动器电路的基本原理](#)

## 7 修订历史记录

<b>Changes from Revision * (August 2018) to Revision A (September 2023)</b>	<b>Page</b>
• 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式.....	<b>1</b>



## 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