



Harish Ramakrishnan, Salil Chellappan

摘要

增加开关器件的驱动电流是大功率转换器的一项常见要求。随着开关器件 (IGBT、MOSFET) 的尺寸增加, 需要用更大的电流驱动它们以加快开关速度。还需要并联驱动多个器件, 以减少较大电流下的导通损耗。TI 提供具有典型 10A 驱动强度的大电流栅极驱动器 (如 UCC5390 和 UCC21732) , 足以满足许多大功率模块的需求。在某些情况下, 需要 20A 以上的峰值电流, 在此类情况下, 应使用外部缓冲器。这会将负载与驱动器集成电路 (IC) 分离, 除了优化电源开关的开关效率外, 还提供了散热优势。

内容

1 引言.....	2
2 使用 BJT 图腾柱级进行电流升压.....	2
3 使用饱和 MOSFET 图腾柱级进行电流升压.....	3
4 实现详情.....	3
5 执行效果的结果.....	5
6 两种方法的比较.....	8
7 结论.....	8
8 参考文献.....	9
9 修订历史记录.....	9

插图清单

图 2-1. 使用 ISO5852S 和 BJT 的高电流栅极驱动器.....	2
图 3-1. 使用 LM5106 和 MOSFET 的高电流栅极驱动器.....	3
图 4-1. 使用 ISO5852S 和 BJT 的高电流栅极驱动器电路板 (俯视图和仰视图)	4
图 4-2. 使用 LM5106 和 MOSFET 的高电流栅极驱动器电路板 (俯视图和仰视图)	4
图 5-1. 驱动电流波形 (电路板 1)	5
图 5-2. 驱动电流波形 (电路板 2)	5
图 5-3. 电路板 1 传播延迟: V_{IH} 至 V_{TH}	5
图 5-4. 电路板 1 传播延迟: 输入开始到输出开始.....	5
图 5-5. 电路板 2 传播延迟: V_{IH} 至 V_{TH}	5
图 5-6. 电路板 2 传播延迟: 从开始到开始.....	5
图 5-7. 电路板 1 热分布.....	6
图 5-8. 电路板 2 热分布.....	6
图 5-9. 频率为 1kHz 时的自举电压.....	7
图 5-10. 频率为 100Hz 时的自举电压.....	7
图 5-11. 自举电压充电时间.....	7
图 5-12. 米勒钳位电流.....	7
图 5-13. DESAT 在没有 R16 和 C20 的情况下关闭.....	8
图 5-14. DESAT 在有 R16 和 C20 的情况下关闭.....	8

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

本文分析了两种可提高集成栅极驱动器 IC 的驱动电流的方法。通过构建电路板和在不同条件下进行测试来比较这两种方法的执行效果。这些电路将在后续章节中进行更详细的讨论。

2 使用 BJT 图腾柱级进行电流升压

最常见的电流升压方法是使用 NPN-PNP 晶体管对。集成驱动器中的栅极驱动输出用作该晶体管对的基极驱动装置。图 2-1 显示了使用隔离式栅极驱动器 ISO5852S 的此类电流升压电路的原理图。

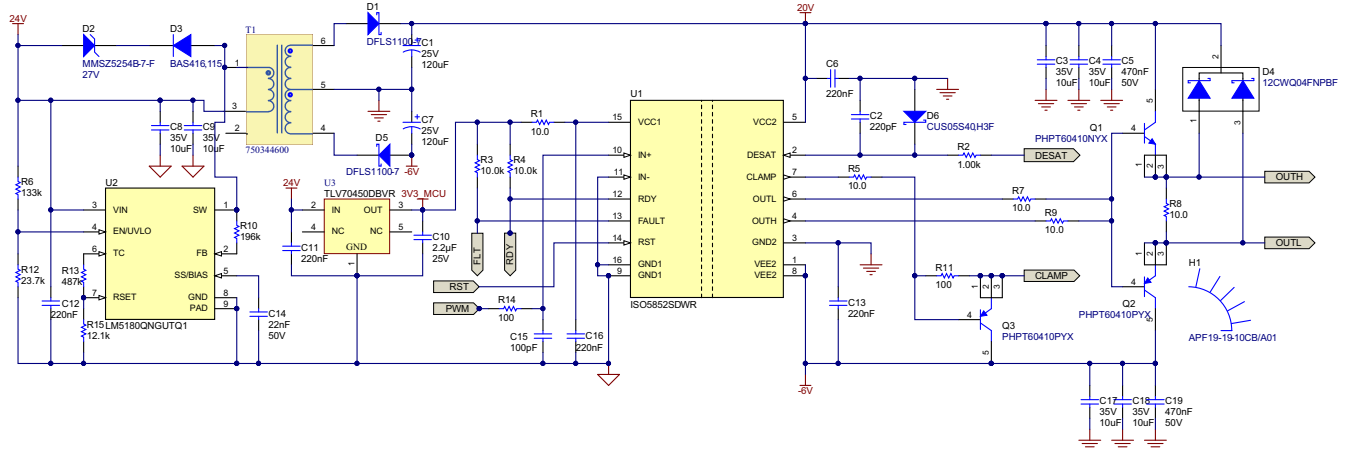


图 2-1. 使用 ISO5852S 和 BJT 的高电流栅极驱动器

来自 MCU 的 PWM 输入的信号隔离由驱动器 IC 本身提供。栅极驱动器 IC 提供 $5.7kV_{RMS}$ 的隔离，并可分别提供 2.5A 和 5A 的拉电流和灌电流。电源隔离是通过围绕 LM5180 器件构建的隔离式反激电源实现的，该器件是一种集成了 100V MOSFET 的初级侧调整反激式转换器。对于输入侧到输出侧隔离，使用 Wurth Elektronik 的反激式变压器（器件型号：750344600）。使用该控制器将使该栅极驱动器电路与 24V、15V 或 12V 辅助电源兼容。ISO5852S 的初级 (MCU) 侧可以通过 MCU 电源本身供电（通过取消装配 U3 并将 MCU 电源连接到 3V3_MCU 输入），也可以经由 TLV70450 LDO 从辅助电源产生的 5V 电源供电。反激式功率级生成的栅极驱动电源同时适用于 IGBT 和 SiC MOSFET，因为它具有 +20V 和 -6V 的双路输出。RST 和 PWM 信号来自 MCU，其中 PWM 是驱动信号，而 RST（低电平有效）用于在清除 DESAT 引脚检测到电源开关短路导致的故障事件后重置栅极驱动器。PWM 输入端提供约 10ns 的噪声滤波。FLT 和 RDY 信号是返回到 MCU 的状态指示信号，其中 FLT 通过低电平有效指示栅极驱动器检测到的故障情况，而 RDY 通过高电平有效指示驱动器已准备好接收 PWM 输入。

在输出端，NPN 和 PNP 图腾柱级进行电流放大。用于电流放大的 BJT 为 PHPT60410NYX 和 PHPT60410PYX，峰值电流额定值为 20A。由于在有源区域中使用晶体管，驱动输出电压将比电源轨电压低 0.7V - 0.8V。对于这样高的驱动电压，这不是一个重大问题。此外，在外部晶体管的基极和发射极之间添加一个电阻器将使输出电压达到电源轨电压。ISO5852S 器件具有内部米勒钳位，可提供典型值为 2.5A 的灌电流。该引脚还可以配置为驱动外部钳位的外部 PNP 晶体管。通过使用外部钳位并将其放在非常靠近电源开关栅极的位置，可以提高有效性。-6V 的负偏置足够大，因此不一定要使用米勒钳位，但可以加入它作为额外的安全措施，也可用于证实米勒钳位输出的电流升压。D4 中的二极管防止输出晶体管在瞬态情况下出现过压。

在此栅极驱动器中保留 ISO5852S 中的 DESAT 过流保护功能，而不对建议的检测电路进行任何改动。然而，由于输出驱动上存在电流升压，如果不对该电路进行一些修改，慢速关闭 DESAT 保护功能可能无法正常发挥作用。R16 - C20 网络将确保在所需的关闭时间内，DESAT 事件期间的驱动电流将从 Q2 的基极转移。可以使用方程式 1 和方程式 2 计算这些元件的值：

$$C = (I \times T_{off}) / (V_P - V_N) \quad (1)$$

其中

- I 是内部电流源的值，为 130mA
- T_{off} 是所需的关闭时间

- V_P 是正驱动电压
- V_N 是负驱动电压

可以使用 [方程式 2](#) 中的不等式估算 R16 的值：

$$R > (V_P - V_N) / 5 \quad (2)$$

3 使用饱和 MOSFET 图腾柱级进行电流升压

驱动电流升压的替代方案如 [图 3-1](#) 所示。两个 N 沟道 MOSFET 用作电流升压器件。由于它们作为饱和和开关工作，驱动电流仅受导通时的电阻的限制，因此可以实现高得多的电流电平。

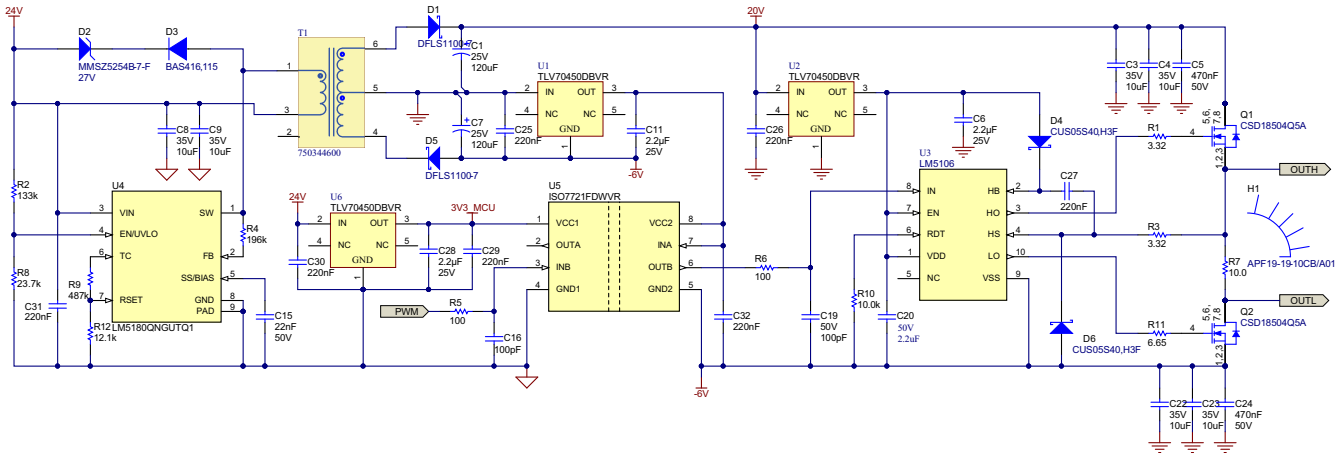


图 3-1. 使用 LM5106 和 MOSFET 的高电流栅极驱动器

在该电路中，信号隔离由数字隔离器 (ISO7721) 提供。为了驱动 MOSFET 驱动器，使用了低电压半桥驱动器 IC (LM5106)。电源与前一个电路相同。然而，另外需要几个 LDO 为数字隔离器的次级侧和半桥驱动器供电。数字隔离器的次级侧指的是 -6V 负极驱动电源。因此，为了给这一侧供电，需要一个与此电平相对应的 5V 电源。该电源由连接到次级回路的 5V LDO 提供。对于驱动器 MOSFET (和半桥驱动器) 的栅极驱动电压，需要约 10V 的电压 (指负极驱动电源)。该电压由另一个 5V LDO (被称为次级回路) 生成。这将提供总计 11V (LDO 提供 5V，负极驱动电源提供 6V) 的负极驱动电源。

对于半桥驱动器，通常需要两个 PWM - 上部 MOSFET 的主 PWM 和下部 MOSFET 的辅助 PWM。然而，LM5106 半桥驱动器可以在内部生成互补信号，死区时间由编程电阻器确定。这样就不再需要 MCU 生成互补信号。然而，半桥驱动器将需要一个电平转换的驱动电压来处理上部 MOSFET。在该电路中，该电压由自举电路提供，而自举电路由 D4、C27 和 R3 组成，前提是下部 MOSFET 有足够的导通时间进行充电。根据该电路中使用的元件值，典型充电时间低于 1μs。这意味着，对于关断时间小于 1μs 的 PWM 输入，自举电容器可能无法充电至完整电源电压。此外，对于低 PWM 频率 (低于数百赫兹)，自举电容器将无法在整个周期内保持电荷。如果预计会出现此类情况，建议使用额外的隔离电源为高侧供电 - 这可以通过在使用的反激式电源上另行增加一个绕组来轻松实现。这样甚至可以实现 100% 占空比运行。

上部 MOSFET 根据 PWM 输入进行切换，而下部 MOSFET 根据 PWM 输入的互补性进行切换，从而产生与输入 PWM 极性相同的输出驱动。驱动电流可高达 100A，因此正极和负极驱动电源轨需要充分去耦。如果需要，可以在外部添加额外的电容器。大多数功率器件不需要这种高峰值电流驱动能力，但通过利用这种功率级的 FET，在峰值电流为 20A 或更高的情况下进行驱动时，可以大大降低散热。可以通过使用外部栅极电阻器来限制峰值电流，因为峰值电流过高会导致栅极出现不必要的振铃，并导致电源开关的压摆率失控。

4 实现详情

这两个电路的尺寸相同：长 50mm，宽 30mm，总高度 13mm。它们具有相同的外部引脚排列，允许在相同的条件下进行测试。电路板上连接了 10mm 高的散热器，用于冷却驱动器 BJT 和 MOSFET。这些电路板在制造过程中经过专门处理，可以安装在非常靠近所驱动器件的位置。这些电路板的图片如下：

[图 4-1](#) 中的电路板在下文中被称为 [电路板 1](#)。

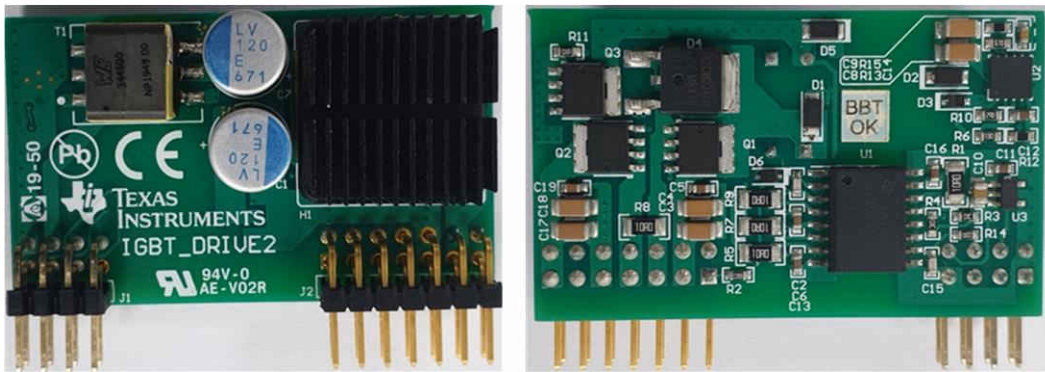


图 4-1. 使用 ISO5852S 和 BJT 的高电流栅极驱动器电路板 (俯视图和仰视图)

图 4-2 中的电路板在下文中被称为电路板 2。

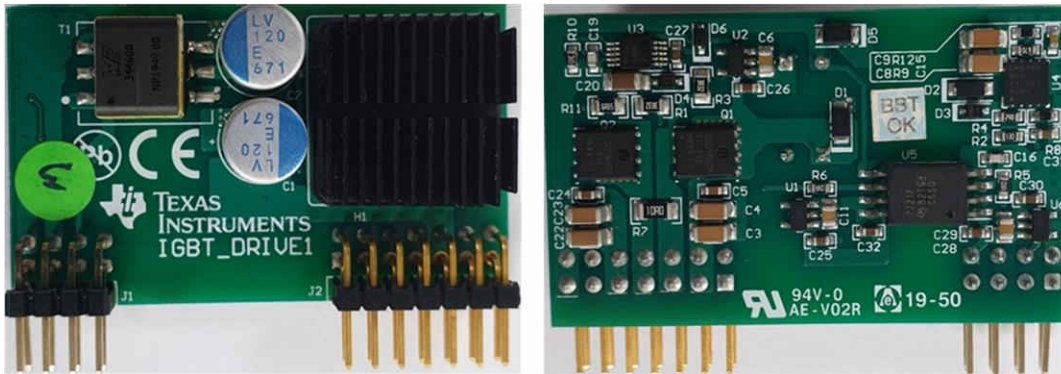


图 4-2. 使用 LM5106 和 MOSFET 的高电流栅极驱动器电路板 (俯视图和仰视图)

5 执行效果的结果

驱动电流：驱动的总负载约为 1 μ F。洋红色 - 驱动电流，绿色 - 驱动电压。

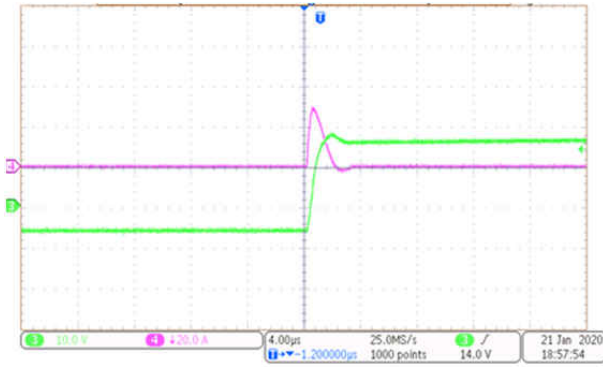


图 5-1. 驱动电流波形 (电路板 1)

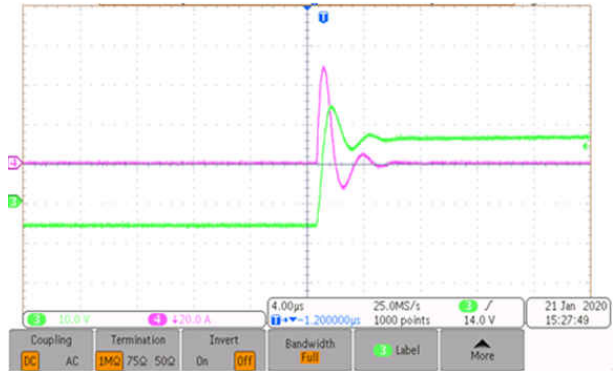
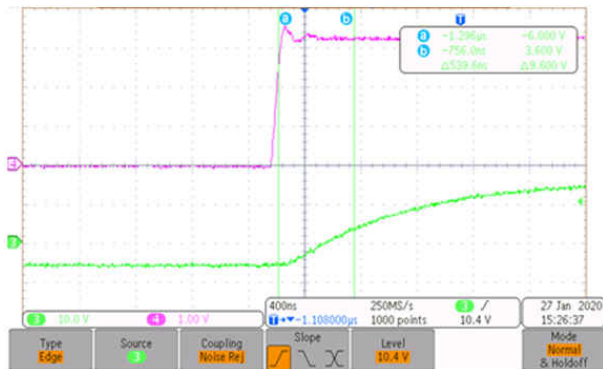


图 5-2. 驱动电流波形 (电路板 2)

电路板 1 提供大约 30A 的驱动电流，电路板 2 能够提供 50A 以上的驱动电流。

电路板 1 传播延迟：驱动的总负载为 470nF。洋红色 - PWM 输入，绿色 - 驱动电压。



V_{IH} 是输入 PWM 的逻辑阈值， V_{TH} 是 FET 的典型阈值。

图 5-3. 电路板 1 传播延迟： V_{IH} 至 V_{TH}

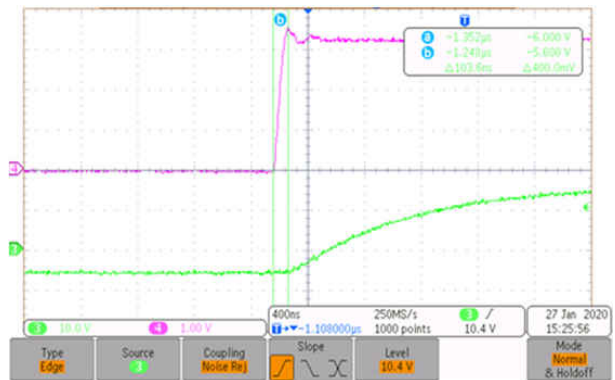


图 5-4. 电路板 1 传播延迟：输入开始到输出开始

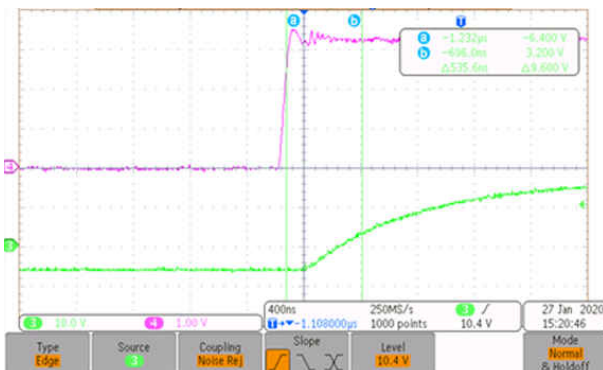


图 5-5. 电路板 2 传播延迟： V_{IH} 至 V_{TH}

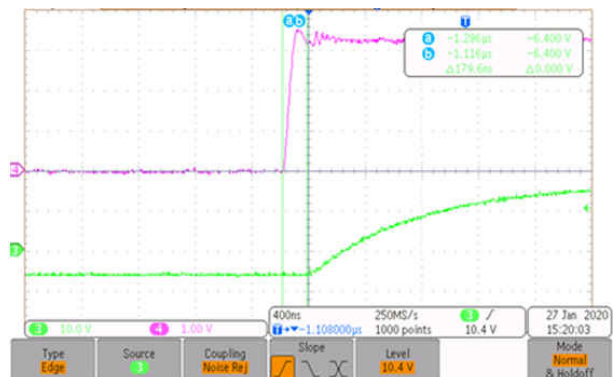


图 5-6. 电路板 2 传播延迟：从开始到开始

这两个电路板从 V_{IH} 到 V_{TH} 的传播延迟约为 540ns。然而，从波形开始处测量，电路板 1 的延迟为 100ns，相比之下，电路板 2 的延迟为 180ns。

图 5-7 和图 5-8 显示了在 10kHz 频率下驱动 1 μ F 电容时，没有气流时电路板的热性能。

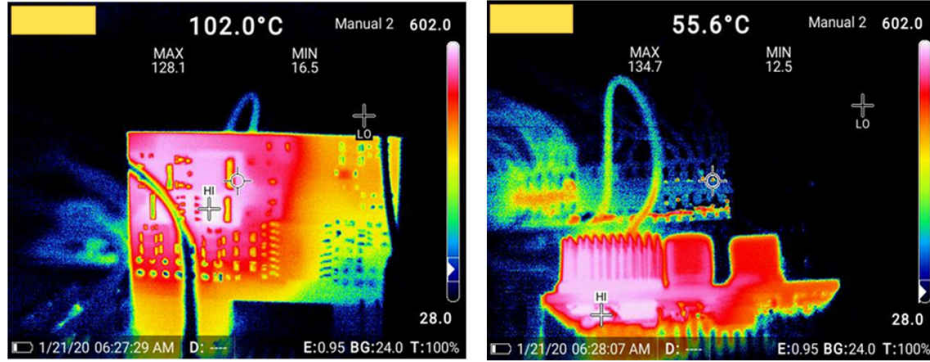


图 5-7. 电路板 1 热分布

图 5-7 显示了驱动器晶体管是最热的元件，温度高达 135°C。

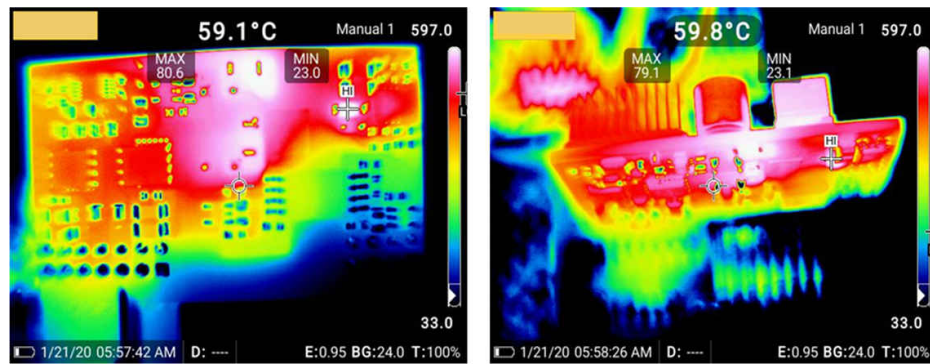


图 5-8. 电路板 2 热分布

图 5-8 显示了反激式转换器 IC 是最热的元件，温度约为 80°C。

驱动 1 μ F 电容时 电路板 2 自举 (C27) 电压变化。红色 - PWM 输入，蓝色 - C27 电压，绿色 - 1 μ F 电容器上的输出电压。

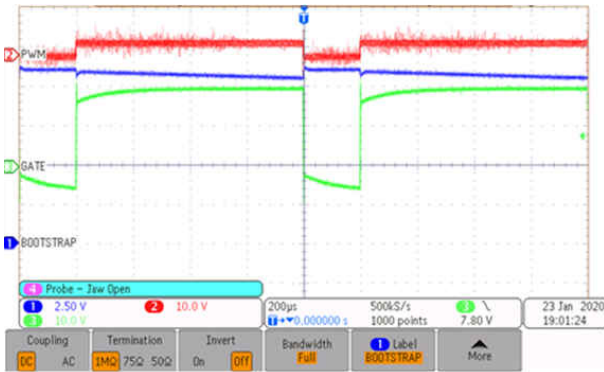


图 5-9. 频率为 1kHz 时的自举电压

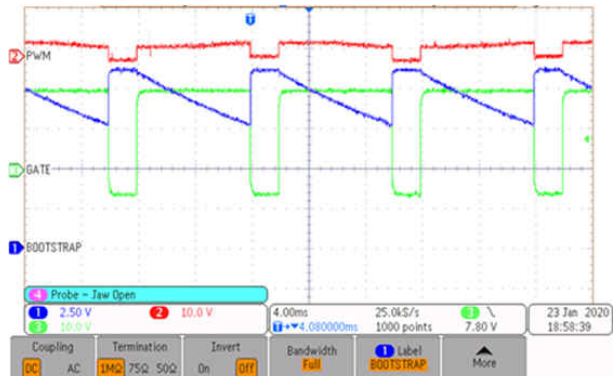


图 5-10. 频率为 100Hz 时的自举电压

频率为 1kHz 时，电压下降非常小。即使频率为 100Hz 时，在 80% 的占空比下，最小电压仍保持在 7.5V 以上，因此对输出波形没有明显影响。

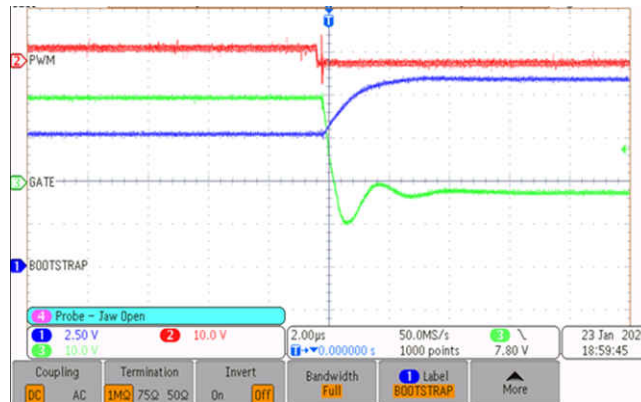


图 5-11. 自举电压充电时间

自举电容器的充电时间约为 1 μ s。

电路板 1 米勒钳位：使用 18 Ω 电阻驱动 470nF 电容。洋红色 - 钳位电流，绿色 - 驱动电压。

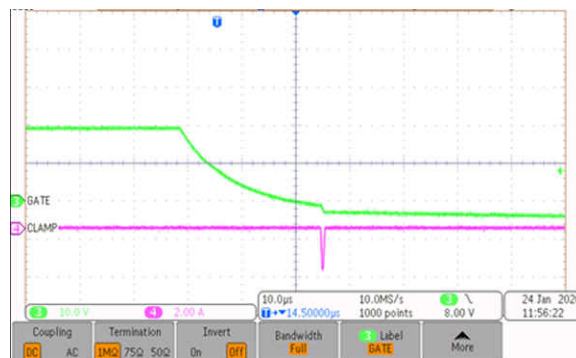


图 5-12. 米勒钳位电流

尽管栅极驱动阻抗较高，但米勒钳位能够将栅极电压保持为接近负极总线的水平。栅极驱动电阻特意设置为 18 Ω 左右，以将一些电流推入钳位。为了让米勒钳位发挥效用，晶体管必须尽可能靠近栅极和源极端子放置。

电路板 1 DESAT 慢速关闭操作，同时使用 $1\ \Omega$ 驱动电阻驱动 470nF 电容。蓝色 - PWM 输入，绿色 - 输出电压，洋红色 - DESAT 输入。

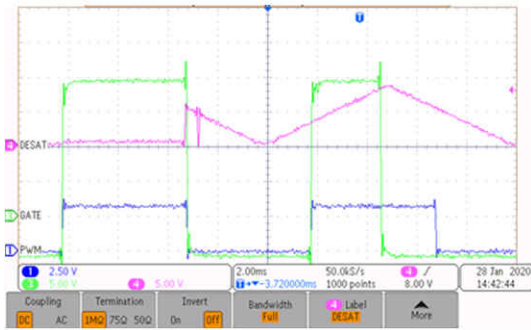


图 5-13. DESAT 在没有 R16 和 C20 的情况下关闭

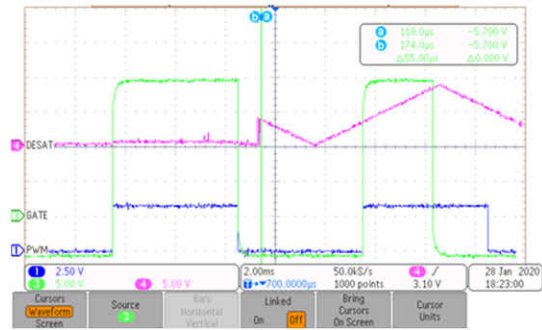


图 5-14. DESAT 在有 R16 和 C20 的情况下关闭

OUTL 引脚上的 R-C 网络有助于通过外部电流升压来还原慢速关闭操作。

6 两种方法的比较

这两种方法都能够提供电流升压的驱动输出。然而，饱和 MOSFET 提供的阻抗较低，因此，基于饱和 MOSFET 的驱动器可实现的驱动电流要高得多。BJT 驱动器的阻抗相对较高，因为它们在有源区域中工作，因而与另一种方法相比，使用同等尺寸的器件时其驱动电流电平较低。此外，与高电流 MOSFET 相比，高电流 BJT 器件的可用性要低得多。在驱动类似器件时，由于 BJT 的阻抗相对较高，基于 BJT 的驱动器将比基于 MOSFET 的驱动器消耗更多的功率。相对较低的工作温度可提高基于 MOSFET 的驱动器的可靠性。

基于 BJT 的驱动器的主要优点是电路简单。它的元件数较少，且电源方案要简单得多。它还允许轻松扩展在驱动器 IC 内部构建的功能，如 DESAT 保护、米勒钳位等。对于基于 MOSFET 的驱动器，这些功能应根据需要在外部构建。由于在外部增加了 DESAT 保护和钳位电路，栅极驱动器的总体尺寸将增加。然而，基于 MOSFET 的驱动器可提供更大的隔离灵活性，因为它只依赖于变压器和数字隔离器。对于特定的隔离要求，有更多器件可供选择。

7 结论

为基于 BJT 和基于 MOSFET 的电流升压栅极驱动器设计和制造了电路板，并对它们的可比性能进行了评估。已发现基于 MOSFET 的饱和驱动器能够提供更大的驱动电流，并且在驱动类似负载时发热相对较少。BJT 驱动器更简单，并能够扩展由所用栅极驱动器 IC 提供的保护功能。BJT 驱动器还提供更程度的集成。

8 参考文献

- 德州仪器 (TI), [具有可编程死区时间的 LM5106 100V 半桥栅极驱动器数据表](#)
- 德州仪器 (TI), [具有分离输出和有源保护功能的 ISO5852S 高 CMTI 2.5A 和 5A 增强型隔离式 IGBT、MOSFET 栅极驱动器数据表](#)

9 修订历史记录

Changes from Revision * (February 2020) to Revision A (February 2022)	Page
• 更新了整个出版物中的表格、图和交叉引用的编号格式。.....	1

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司