

隔离式栅极驱动器揭秘

作者: Sanket Sapre



摘要

IGBT/功率MOSFET是一种电压控制型器件,可用作电源电路、电机驱动器和其它系统中的开关元件。栅极是每个器件的电气隔离控制端。MOSFET的另外两端是源极和漏极,而对于IGBT,它们被称为集电极和发射极。为了操作MOSFET/IGBT,通常须将一个电压施加于栅极(参考器件的源极/发射极)。专用驱动器被用来向功率器件的栅极施加电压并提供驱动电流。本文讨论栅极驱动器是什么,为何需要栅极驱动器,以及如何定义其基本参数,如时序、驱动强度和隔离度。

需要栅极驱动器

IGBT/功率MOSFET的结构使得栅极和源极/发射极之间形成一个非线性电容。给栅极电容充电会使功率器件导通,并允许电流在其漏极和源极引脚之间流动,而放电则会使器件关断,漏极和源极引脚上就可以阻断大电压。当栅极电容充电且器件刚好可以导通时的最小电压就是阈值电压(V_{th})。为将IGBT/功率MOSFET用作开关,应在栅极和源极/发射极引脚之间施加一个充分大于 V_{th} 的电压。

考虑一个具有微控制器的数字逻辑系统,其I/O引脚之一上可以输出一个0V至5V的PWM信号。这种PWM将不足以使电源系统中使用的功率器件完全导通,因为功率器件的驱动电压一般超过标准CMOS/TTL逻辑电压。因此,逻辑/控制电路和高功率器件之间需要一个接口。这可以通过驱动一个逻辑电平n沟道MOSFET,其进而驱动一个功率MOSFET来实现,如图1a所示。

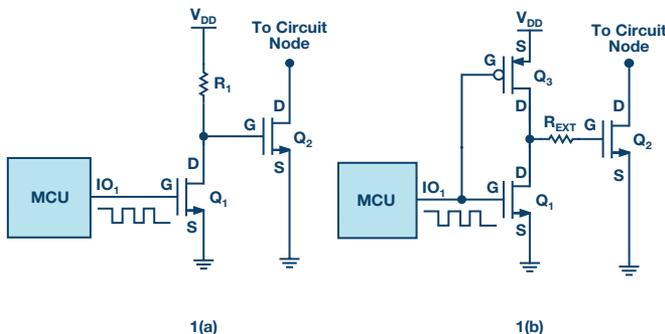


图1. 用反相逻辑驱动功率MOSFET

如图1a所示,当 IO_1 发出一个低电平信号时, $V_{GSQ1} < V_{THQ1}$,因此MOSFET Q_1 保持关断。结果,一个正电压施加于功率MOSFET Q_2 的栅极。 Q_2 的栅极电容(C_{GSQ2})通过上拉电阻 R_1 充电,栅极电压被拉至 V_{DD} 的轨电压。

如果 $V_{DD} > V_{THQ2}$,则 Q_2 导通,可以传导电流。当 IO_1 输出高电平时, Q_1 导通, C_{GSQ2} 通过 Q_1 放电。 $V_{DSQ1} \sim 0V$,使得 $V_{GSQ2} < V_{THQ2}$,因此 Q_2 关断。这种设置的一个问题是 Q_1 导通状态下 R_1 的功耗。为了解决此问题,pMOSFET Q_3 可以作为上拉器件,其以与 Q_1 互补的方式工作,如图1b所示。PMOS具有较低导通电阻和非常高的关断电阻,驱动电路中的功耗大大降低。为在栅极转换期间控制边沿速率, Q_1 的漏极和 Q_2 的栅极之间外加一个小电阻。使用MOSFET的另一个优点是其易于在裸片上制作,而制作电阻则相对较难。这种驱动功率开关栅极的独特接口可以单片IC的形式创建,该IC接受逻辑电平电压并产生更高的功率输出。此栅极驱动器IC几乎总是会有其他内部电路来实现更多功能,但它主要用作功率放大器和电平转换器。

栅极驱动器的关键参数

驱动强度:

提供适当栅极电压的问题通过栅极驱动器来解决,栅极驱动器执行电平转换任务。不过,栅极电容无法瞬间改变其电压。因此,功率FET或IGBT具有非零的有限切换间隔时间。在切换期间,器件可能处于高电流和高电压状态,这会产生功耗并转化为热量。因此,从一个状态到另一个状态的转换需要很快,以尽可能缩短切换时间。为了实现这一点,需要高瞬变电流来使栅极电容快速充电和放电。

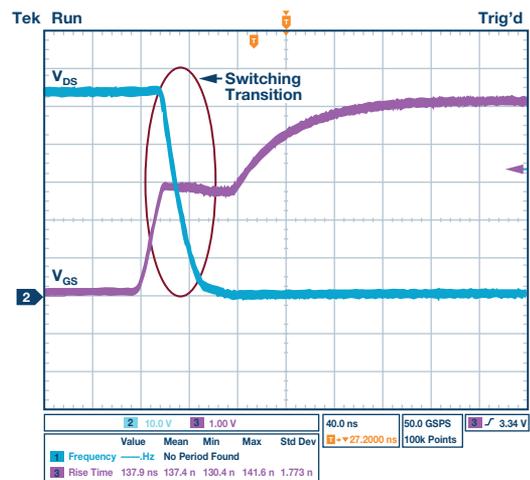


图2. 无栅极驱动器的MOSFET导通转换

能够在更长时间内提供/吸收更高栅极电流的驱动器,切换时间会更短,因而其驱动的晶体管内的开关功耗也更低。

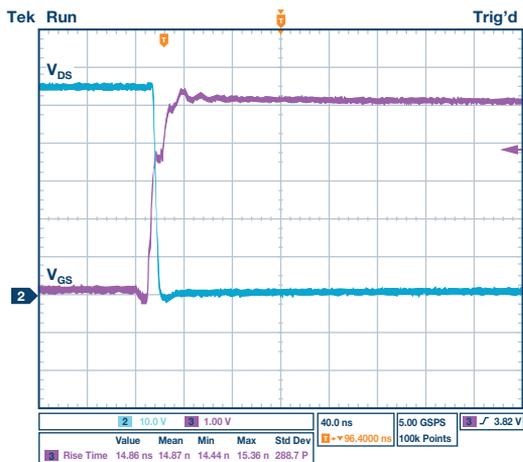


图3. 有栅极驱动器的MOSFET导通转换

微控制器I/O引脚的拉电流和灌电流额定值通常可达数十毫安，而栅极驱动器可以提供高得多的电流。图2中，当功率MOSFET由微控制器I/O引脚以最大额定拉电流驱动时，观察到切换时间间隔较长。如图3所示，采用ADuM4121隔离式栅极驱动器时，转换时间大大缩短；当驱动同一功率MOSFET时，该驱动器相比微控制器I/O引脚能够提供高得多的驱动电流。很多情况下，由于数字电路可能会透支电流，直接用微控制器驱动较大功率MOSFET/IGBT可能会使控制器过热，进而受损。栅极驱动器具有更高驱动能力，支持快速切换，上升和下降时间只有几纳秒。这可以减少开关功率损耗，提高系统效率。因此，驱动电流通常被认为是选择栅极驱动器的重要指标。

与驱动电流额定值相对应的是栅极驱动器的漏源导通电阻($R_{DS(ON)}$)。理想情况下，MOSFET完全导通时的 $R_{DS(ON)}$ 值应为零，但由于其物理结构，该阻值一般在几欧姆范围内。这考虑了从漏极到源极的电流路径中的总串联电阻。

$R_{DS(ON)}$ 是栅极驱动器最大驱动强度额定值的真正基础，因为它限制了驱动器可以提供的栅极电流。内部开关的 $R_{DS(ON)}$ 决定灌电流和拉电流，但外部串联电阻用于降低驱动电流，因此会影响边沿速率。如图4所示，高端导通电阻和外部串联电阻 R_{EXT} 构成充电电路中的栅极电阻，低端导通电阻和 R_{EXT} 构成放电电路中的栅极电阻。

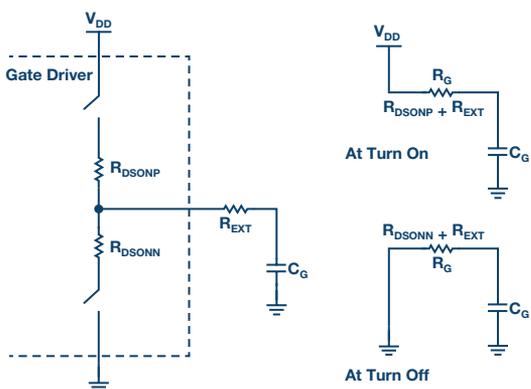


图4. 具有MOSFET输出级和功率器件作为电容的栅极驱动器的RC电路模型

$R_{DS(ON)}$ 也会直接影响驱动器内部的功耗。对于特定驱动电流， $R_{DS(ON)}$ 值越低，则可以使用 R_{EXT} 值越高。功耗分布在 R_{EXT} 和 $R_{DS(ON)}$ 上，因此 R_{EXT} 值越高，意味着驱动器外部的功耗越多。所以，对于给定芯片面积和尺寸的IC，为了提高系统效率并放宽驱动器内的热调节要求， $R_{DS(ON)}$ 值越低越好。

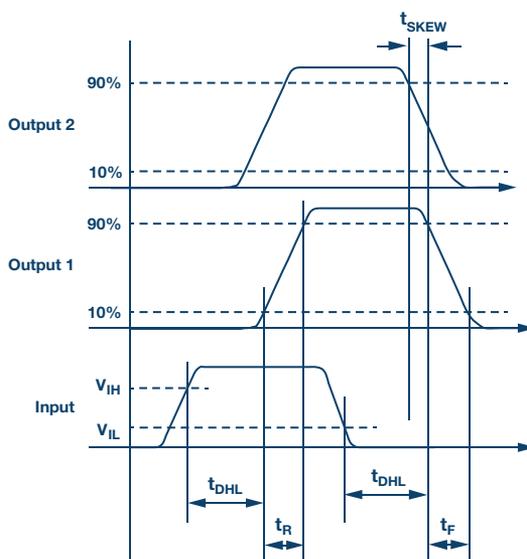
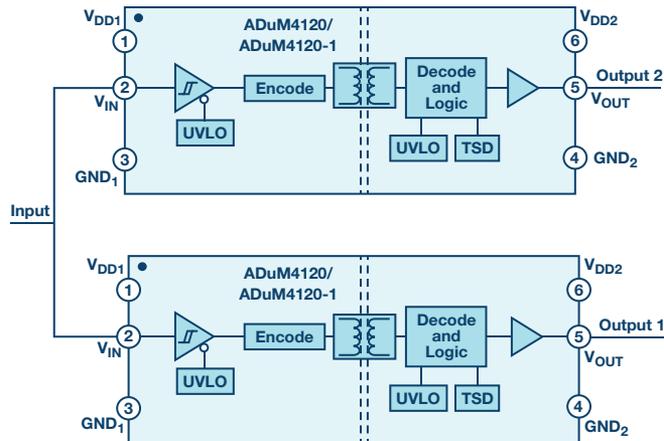


图5. ADuM4120栅极驱动器和时序波形

时序:

栅极驱动器时序参数对评估其性能至关重要。包括ADuM4120在内的所有栅极驱动器的一个常见时序规格(如图5所示)是驱动器的传播延迟(t_b)，其定义为输入边沿传播到输出所需的时间。如图5所示，上升传播延迟(t_{DHL})可以定义为输入边沿升至输入高阈值(V_{IH})以上到输出升至最终值10%以上的时间。类似地，下降传播延迟(t_{DHL})可以表述为从输入边沿降至输入低阈值 V_{IL} 以下到输出降至其高电平90%以下的时间。输出转换的传播延迟对于上升沿和下降沿可能不同。

图5还显示了信号的上升和下降时间。这些边沿速率受到器件可提供的驱动电流的影响，但它们也取决于所驱动的负载，这在传播延迟计算中并未考虑。另一个时序参数是脉宽失真，其为同一器件的上升和下降传播延迟之差。因此，脉宽失真(PWD) = $t_{DHL} - t_{DHL}$ 。

EMI是指任何破坏电子器件预期操作的电气噪声或磁干扰。EMI（其会影响栅极驱动器）是高频开关电路的结果，主要由大型工业电机的磁场造成。EMI可以辐射或传导，并且可能耦合到附近的其他电路中。因此，EMI或RF抗扰度是衡量栅极驱动器抑制电磁干扰并保持稳健运行而无差错的能力的指标。若具有高抗扰度，驱动器便可在大型电机附近使用，而不会引起数据传输故障。

如图6所示，隔离栅预期可在不同电位的接地点提供高电压隔离。但是，高频切换导致次级端电压转换的边沿较短。由于隔离边界之间的寄生电容，这些快速瞬变而从一侧耦合到另一侧，这可能导致数据损坏。其表现可能是在栅极驱动信号中引入抖动，或者将信号完全反转，导致效率低下，甚至在某些情况下发生直通。因此，栅极驱动器的一个决定性指标是共模瞬变抗扰度(CMTI)，

其定量描述隔离式栅极驱动器抑制输入和输出间大共模瞬变的能力。如果系统中的压摆率很高，则驱动器需要有很高的抗扰度。因此，当在高频和大总线电压下工作时，CMTI数值特别重要。

结语

本文旨在简单介绍栅极驱动器，因此，到目前为止讨论的参数并未全面详尽地反映隔离式栅极驱动器特性。驱动器还有其他指标，如电源电压、容许温度、引脚排列等，这些是每个电子器件的共同考虑因素。一些驱动器，如ADuM4135和ADuM4136，也包含保护功能或先进的检测或控制机制。市场上的隔离式栅极驱动器种类众多，系统设计人员必须了解所有这些规格和特性，以便在相关应用中就使用适当的驱动器作出明智的决定。

Sanket Sapre [sanket.sapre@analog.com]是ADI公司的应用工程师。他在接口与隔离技术组工作，职责范围包括使用*iCoupler*®技术实现隔离的隔离式栅极驱动器。他拥有孟买大学电子工程学士学位和科罗拉多大学博尔得分校电气工程硕士学位。



Sanket Sapre