

驱动参数对IGBT开关性能的影响

郑姿清，周益铮

英飞凌科技（中国）有限公司，英飞凌科技（德国）

摘要：对于电压型驱动器件的IGBT而言，主要的驱动参数包括驱动电压、驱动电路输出功率、栅极电阻、栅极至发射极电容和栅极回路电感等参数。本文主要是探讨这些参数如何影响IGBT开关性能，由此选择出合适的驱动参数，从而优化IGBT开关性能。

关键词：IGBT，栅极驱动参数，开关性能

Influence of Driving Parameters to IGBT Switching Performance

Zheng Zi qing, Zhou Yi zheng

Infineon Technologies China Co. Ltd., Infineon Technologies AG Warstein

1 引言

如今，IGBT已被广泛应用于工业电源领域。与MOSFET相同，它也是一种压控型器件。其开关性能可通过IGBT驱动设置加以控制或影响。优化IGBT开关性能对于系统设计而言十分重要，因为不同的开关损耗会影响散热设计和IGBT使用寿命，而且如果驱动参数配置的不好会导致IGBT超过安全工作限值，使器件失效。

IGBT的栅极驱动电路看似很简单，就是一个电压源和一个栅极电阻。通过改变栅极电阻值，可以影响IGBT开关性能。但在现实系统应用中，会有许多杂散因素有意或无意地产生，比如电压支撑电容到功率放大电路之间的杂散电感(L_b)、栅极线缆电感(L_c)、芯片至辅助发射极的杂散电感(L_e)和外置栅极电容(C_{ge})等等，就如图1

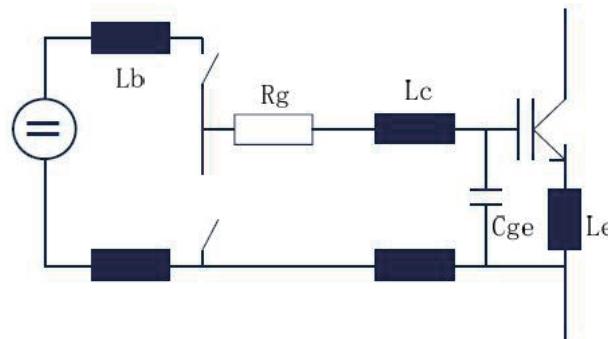


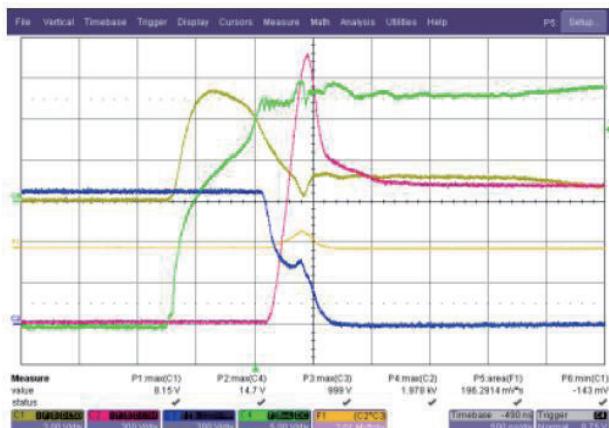
图1 IGBT栅极电路

所示的那样。所以实际的IGBT栅极回路非常复杂，仅利用一个简单的电压源及栅极电阻是无法完全说明驱动参数对IGBT开关性能的影响的。

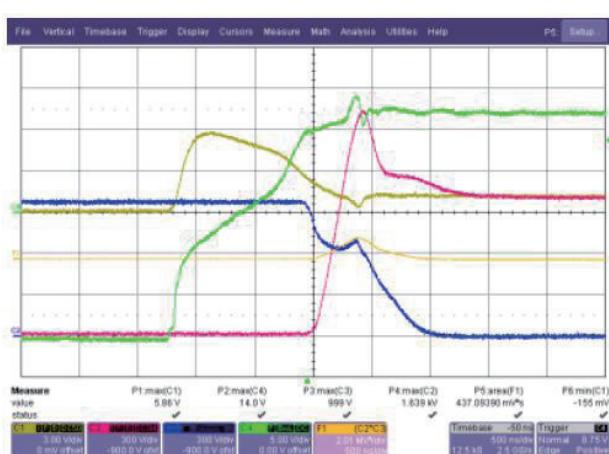
对于一个选定的IGBT模块而言，芯片至辅助发射极的杂散电感是固定的。因此可控的主驱动参数只包括：栅极电阻(R_g)、栅极等效电感 L_g (包含 L_b 和 L_c)和栅极电容(C_{ge})。选用英飞凌的IGBT模块PrimePACK™ FF1000R17IE4作为一个样本，来研究这些栅极参数对IGBT开关性能的影响。测试所用的驱动核是英飞凌的EiceDriver™ 2ED300C17-ST，其具备30A的峰值输出电流功能。

2 开通性能

就IGBT开通性能而言，有两个比较重要的表现指标：一个是开通时桥臂电流的变化率 di/dt ，另一个是器件从关断状态到导通状态所产生的开通损耗。如果IGBT开通的 di/dt 太高，续流二极管(FWD)也会有一个很快的反向恢复过程，这可能会导致反向恢复电流出现振荡引起二极管的失效。影响 di/dt 的因素很多，在一个驱动电路中主要有栅极电阻，栅极电容和栅极电感。优化这些参数，才能获得理想的开通过程。而开通损耗则是直接关系到IGBT的工作效率及其对散热器的设计需求。这对成本



a)



b)



c)

图 2 a) 0.9 欧姆 R_{gon} 、 di/dt :6128A/us、 E_{on} :196mJ；
b) 2.6 欧姆 R_{gon} 、 di/dt :4270A/us、 E_{on} :437mJ；c) 4.7 欧姆 R_{gon} 、 di/dt :3283A/us、 E_{on} :650mJ。红色曲线：IGBT 桥臂电流；蓝色曲线：IGBT 集电极至发射极电压；绿色曲线：栅极电压；黄色曲线：栅极电流。

控制和器件的可靠性非常有意义。

2.1 导通栅极电阻 (R_{gon}) 的影响

从图 2 中可以看出，随着 R_{gon} 的增大，无论是开通 di/dt 还是 dv/dt 都会相应地减小，而开通特性就会变软。这意味着反向恢复的电流变化率也在减小，二极管的应力降低。但另一方面，开通损耗却迅速增大，达到 3 倍之多。所以在选择栅极开通电阻的时候不能一味地用大的电阻值以减小电流尖峰，而是要尽量地用小只要不对二极管带来损伤，比如低温小电流的时候二极管反向恢复的时候不能出现明显的振荡。

2.2 栅极电容 (C_{ge}) 的影响

对于一个开关器件的使用，快速交变的电压或者电流可能会对周围的电子设备和元器件造成干扰，所以就会限制 IGBT 开通时的 di/dt 。用增加栅极电阻值的方法可以减小 di/dt ，但同时会使开通的 dv/dt 也变慢，这样开通损耗就明显地增加了。为了降低这种 di/dt 和 dv/dt 之间的联动效应，可以添加一个栅极电容 (C_{ge})，并适当地减小栅极电阻。图 3 显示的是典型的 IGBT 开通过程。一般认为开通的 di/dt (图 3 中从 t_1 至 t_2 时间段) 由 R_{gon} 和 C_{ge} 决定；而开通的 dv/dt (从 t_2 到 t_3) 则主要由 R_{gon} 和 C_{gc} 决定。因为在此期间，IGBT 工作在线性区，栅极电压处于米勒电压平台，栅极的驱动电流流入 IGBT 的 C_{gc} 。

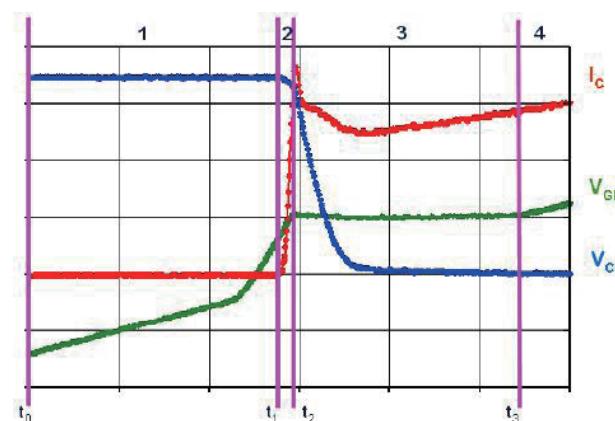


图 3 典型的 IGBT 导通过程

图 4 是采用不同的 R_{gon} 和 C_{ge} 组合实现相同导通损耗的两组测试结果。其中图 a 是无 C_{ge} 和较高 R_{gon} 的开通波形，图 b 是采用 200nF 的 C_{ge} 和更低 R_{gon} 组合的测试结果。

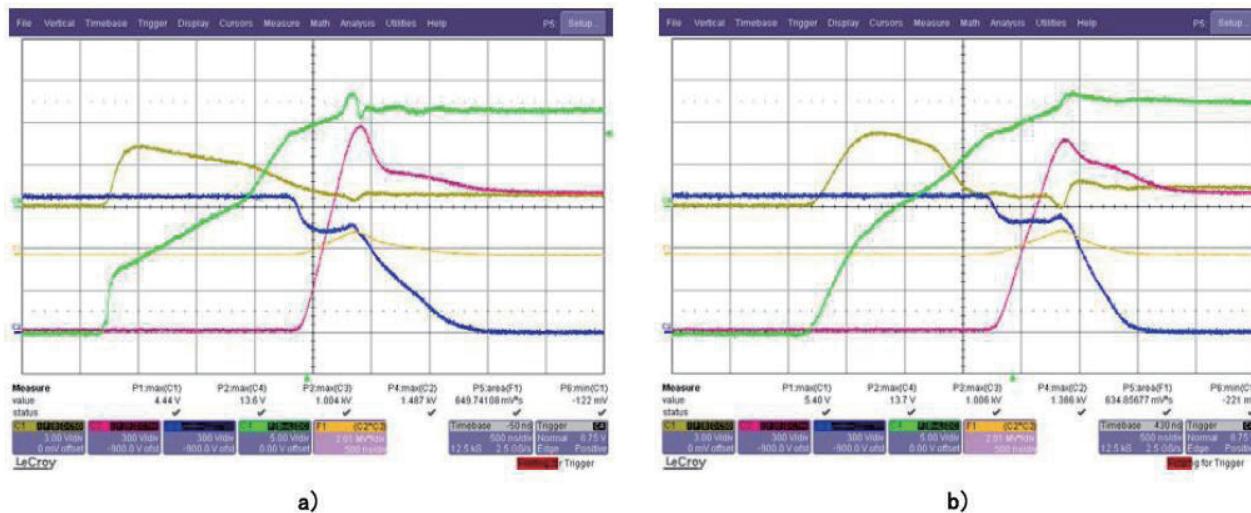


图 4 a) 4.6 欧姆 R_{gon} 、无 C_{ge} 、 di/dt :3283A/us、 E_{on} :650mJ b) 1.7 欧姆 R_{gon} 、200nF C_{ge} 、 di/dt :2492A/us、 E_{on} :635mJ

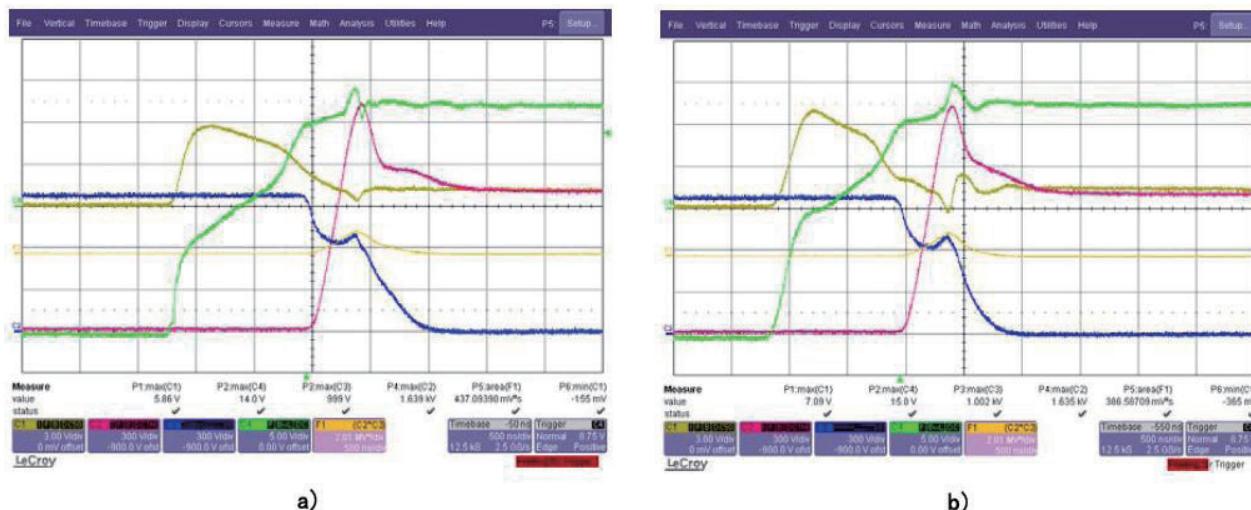


图 5 a) 2.6 欧姆 R_{gon} 、无 C_{ge} 、 di/dt :4270A/us、 E_{on} :437mJ b) 1.7 欧姆 R_{gon} 、46nF C_{ge} 、 di/dt : 4324A/us、 E_{on} :386mJ

在开通损耗相似的条件下，图 b 中开通 dv/dt 升高，但开通 di/dt 降低，这样符合 IGBT 开通优化的目标。

图 5 展示采用不同的 R_{gon} 和 C_{ge} 组合以实现相近的开通 di/dt 的两组测试波形，这意味着两者开通软度相同。从结果可以看出，采用 C_{ge} 并减小 R_{gon} 的开通损耗更低，因为其 dv/dt 更高。

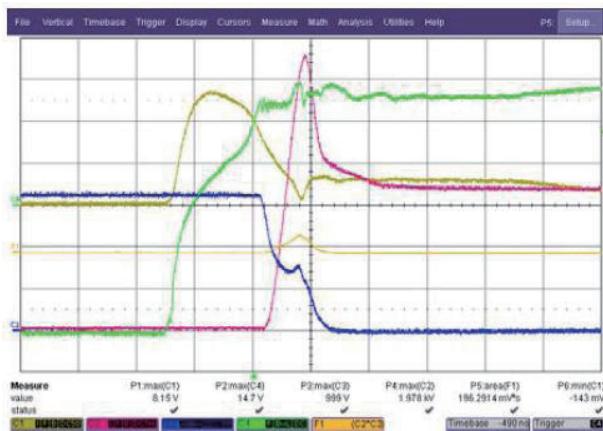
但是值得注意的是，如果采用 C_{ge} 优化 IGBT 开通性能，增加的栅极电容需要更大的驱动器峰值电流，这就要更高的驱动功率。另外，这个电容要选择精度好，温漂小的一类介质电容，那么即使在 IGBT 并联应用中，也可以避免

因驱动不对称导致的电流不均匀。而且这类电容容值往往不大，几百 nF 的封装较大，可选范围不广。

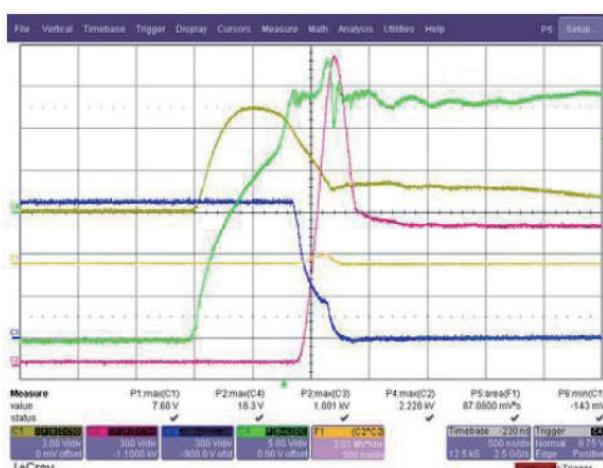
2.3 栅极回路电感 (L_g) 的影响

由于系统结构的问题，有时驱动板不能直接焊在或是螺丝拧在 IGBT 上，而是通过线缆连接到 IGBT 的辅助端子。连同驱动电路本身的杂散电感和 IGBT 内部的栅极绑定线杂散电感一起，构成了栅极回路电感 L_g 。它会显著影响 IGBT 的开关性能，尤其是开通性能。

图 6 显示两种采用不同栅极线缆长度的测试结果。栅极线缆越长，IGBT 开通的速度越快，开通损耗越小。以



a)



b)

图 6 a) 0.9 欧姆 R_{goff} 、无 C_{ge} 、8cm
栅极线、 $di/dt:6128A/us$ 、 $E_{on}:196mJ$ ；
b) 0.9 欧姆 R_{goff} 、无 C_{ge} 、100cm 栅极
线、 $di/dt:6920A/us$ 、 $E_{on}:87mJ$

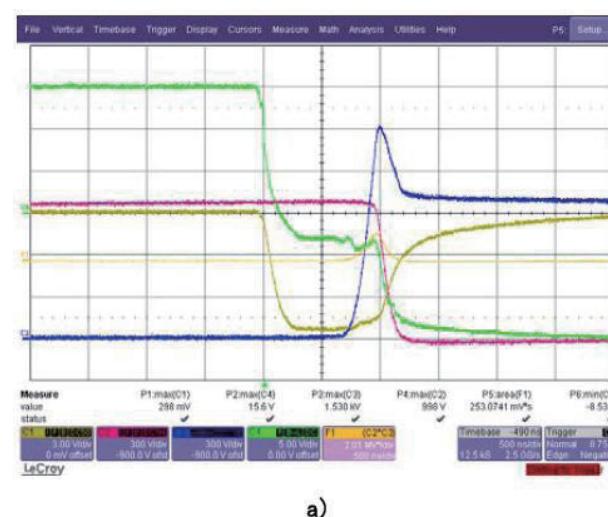
示波器 1 通道的栅极电流来看，它在 IGBT 开启时（也就是桥臂电流上升段）逐渐变小，如果栅极电感越大那么栅极电流减少的速度就越慢，从而加速了 IGBT 的开通。尽管这和减小栅极电阻的情况非常相似，但在实际应用中还是应当避免采用长栅极线且尽量降低栅极驱动回路的杂散电感。因为栅极回路电感大可能会导致栅极电压振荡和系统不稳定。所以最好是用一块杂散电感小的栅极适配板直接与 IGBT 模块相连，这样做会让 IGBT 开通损耗增大，但是可以考虑采用更小的栅极电阻来较小开通损耗。

3 关断性能

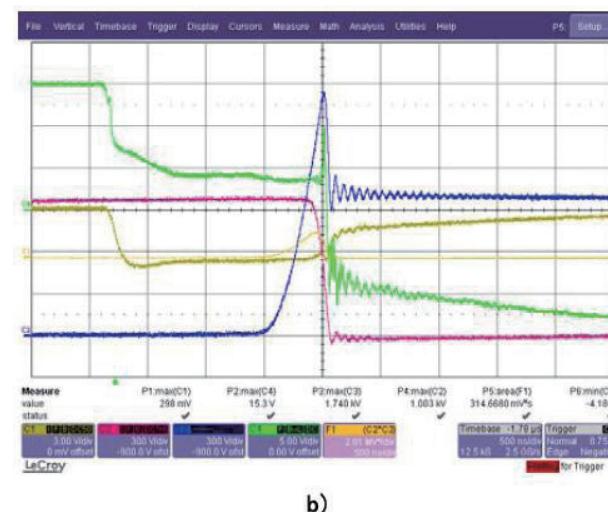
就 IGBT 关断而言，最关键的参数莫过于关断峰值电压以及关断损耗。由于换流回路杂散电感的存在，IGBT 关断时的 di/dt 可引起 C、E 间的过电压。这会导致 IGBT 振荡甚至超出安全工作区的范围。而且因此造成的关断损耗增大还关系到 IGBT 的总损耗和热性能。

3.1 关断栅极电阻 (R_{goff}) 的影响

由于 IGBT 芯片工艺不同， R_{goff} 对关断峰值电压的影响也随之改变。比如英飞凌的第二代 IGBT 芯片，关断峰值电压会随着关断栅极电阻的升高而降低。这时选择大的栅极电阻就可以使 IGBT 关断变软，从而抑制关断过压。



a)



b)

图 7 a) 0.9 欧姆 R_{goff} 、 V_{ce} 峰值：1.53kV、 $E_{off}: 253mJ$ ；
b) 4.6 欧姆 R_{goff} 、 V_{ce} 峰值：1.74kV、 $E_{off}: 315mJ$

但是从英飞凌的第三代芯片开始，用的是场终止技术。它可以使芯片做得更薄，从而获得更小的导通损耗和关断损耗。不过这样一来，IGBT 电流的关断出现在了栅极低于弥勒电压的时候，栅极驱动很难控制 di/dt ，自然也就无法控制 V_{ce} 的过电压。尤其是第四代产品，IGBT 的关断峰值电压不仅不会随着关断栅极电阻的增大而降低，甚至还可能升高。只有在采用非常大的关断栅极电阻时，才能使关断电压再次随着关断栅极电阻的增大而降低。但在这种情况下，关断损耗会变大得难以接受。图 7 是选用英飞凌第四代 IGBT 模块 FF1000R17IE4 的测试波形。随着 R_{goff} 的增大，关断峰值电压升高，而且有振荡现象。所以针对英飞凌的第四代 IGBT，使用大一点的关断栅极电阻没有什么必要。再者，关断电阻大对 IGBT 米勒寄生开通也是不利的。

事实上，基于场终止技术的芯片，它的 R_{goff} 对关断损耗的影响很小，从图 8 中可以看到随着 R_{goff} 的升高，关断损耗也会相应地稍微增大。但其升高的斜率远低于 E_{on} 相对于 R_{gon} 的升高斜率。

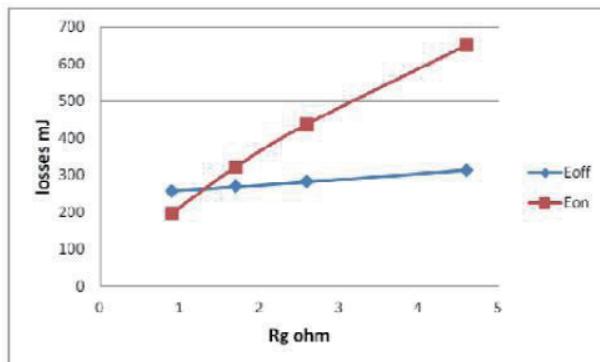


图 8 采用 R_g 的开关损耗

3.2 C_{ge} 和 L_g 的影响

相对于 R_{goff} 对关断峰值电压和关断损耗的影响， C_{ge}

和 L_g 对 IGBT 的关断表现几乎没有影响，在此不作讨论。总体来说栅极驱动各参数对关断性能所产生的影响十分有限，IGBT 的关断特性更多是芯片本身的表现，还有就是主回路总的杂散电感的影响。因此根据系统应用环境和功率范围选择合适的 IGBT 芯片是十分重要的。

4 总结

本文主要论述了栅极电阻、栅极电容和栅极回路电感对 IGBT 开关性能的影响，主要结果归纳如图 9 所示。只有综合考虑这些参数，才能获得理想的 IGBT 开关性能，尤其是开通性能。对于关断性能而言，更需要注意的是芯片自身和整个系统的杂散电感。而栅极驱动电路对 IGBT 关断性能影响不大，因为现在场终止层的添加已成为主流。

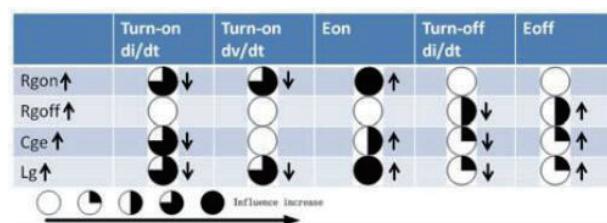


图 9 驱动参数对 IGBT 开关性能的影响

参考文献

- [1] Piotr Luniewski, et. al.: Unsymmetrical gate voltage drive for high power 1200V IGBT4 modules based on coreless transformer technology driver, EPE 2008.
- [2] H. Husken, et. al.: Balancing losses and noise – considerations for choosing the gate resistor, PCIM Europe 2006
- [3] Infineon, AN2003-03: switching behavior and optimal driving of IGBT3 modules
- [4] Eupec, AN: Effect of gate-emitter capacitor C_{ge}