

# 量测 IGBT 传导损耗，将效能最大化

## 白皮书

### 介绍

对绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 的性能和效能，可以透过其在导通(ON) 和截止 (OFF) 状态之间转换时的开关损耗及传导损耗来进行量化。典型性能较高的 IGBT 由同一个半导体封装中的 IGBT 和二极管构成。IGBT 和二极管都会产生组合损耗，需要考虑它们的相互作用。

IGBT 和二极管的传导损耗是电流流过集电极的结果，或传导周期中导通状态电压（饱和电压和阳极电压）的结果。本白皮书介绍其中一个最有效的方法，可在转为 ON 和转为 OFF 阶段，透过控制 IGBT 的电压和电流波形来减低开关损耗。本文亦说明此方法如何显著减少、甚至消除重迭时间内所发生的损耗。

### IGBT 的基本知识

IGBT 的构造值得探索，以为了分析奠定基础。几十年前，当 IGBT 首次推出时，它们被开发成一款开关组件，其栅极有电压控制的 MOSFET，其集电极和发射极 (emitter) 有电流控制的双极性晶体管。这种设计有效地结合了两个经过验证的开关组件的优点，产生了电压控制的双极组件。图 1 显示 IGBT 等效电路，其中栅极是 MOSFET，输出级为 PNP 双极少数载流子组件。此外，图 2 中的测试电路有一个 IGBT，其被标示了有关参数。

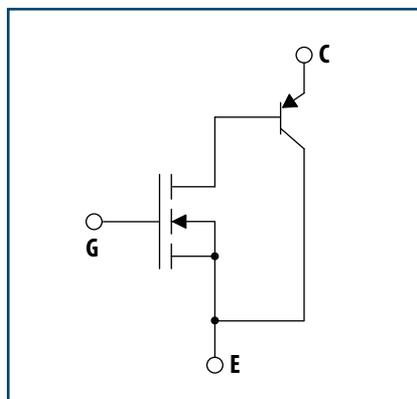


图 1 | IGBT 等效电路

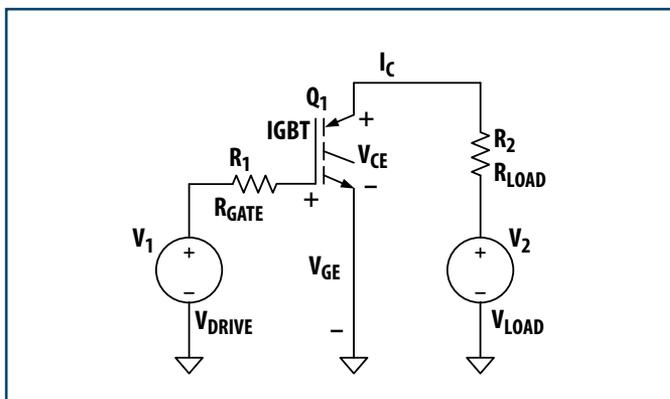


图 2 | IGBT 测试电路

# 量测 IGBT 传导损耗，将效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

## 控制压降

有一个固定的压降，该压降与它所传导的电流不成比例。这异于 MOSFET；MOSFET 的压降是可以量测的，为它的通道电阻乘以电流。由于 MOSFET 是一种多数载流子组件，它使用由其自身类型的载流子实现的一个传导通道—典型是一个与电子传导的 N 通道功率组件。MOSFET 透过改变通道的电阻来控制电流，而双极晶体管则透过改变注入的载流子来控制电流。

在设计半导体结和单独区域的掺杂浓度时，这些效应在内部被优化。尤其是 MOSFET 通道电阻被减少，以增加 PNP 基极电流，而这之后减少了在 IGBT 上实现相同压降所需要的 P 电荷量。这亦会减少所储存的电荷和尾电流。此外，减少 PNP 基底的厚度有助产生这些正面结果。

## 克服缺点和尾电流

[IGBT](#) 是中高电流和高电压应用的首选组件。在硬开关应用和逆变器驱动中，相较于封装尺寸类似的独立 MOSFET，IGBT 可以通过更多电流。这点的附带好处是输入电容减低，外加成本降低。一般来说，跟 MOSFET 相比，IGBT 提供增强的传导损耗，原因在于 IGBT 集极电流，对照之下，MOSFET 则是平方漏极电流。

但是，已知道 IGBT 的开关损耗比 MOSFET 来得更大。也就是说，IGBT 比较适合开关频率较低的应用，原因在于少数载流子双极输出。具体来说，状态之间的转换不是瞬时的。内部 BJT 所储存的电荷会在很短的「尾时间」产生「尾」电流，直到所有的少数载流子都被移除。在优化组件以提高效能时，前述的「尾时间」决定最大允许开关频率，以让开关损耗维持合理。二极管的前向压降和尾时间之间存在着权衡。我们希望的是减少尾时间和前向压降，以允许 IGBT 有效率地运作—更接近常见的 4 kHz 至 20 kHz 这个范围的高端。

在许多白色大型家电应用中，所渴望的频率是 20 kHz，主要是因为组件会产生人耳无法听到的声频噪声。在不需要隔离变压器的马达驱动和硬开关应用中，超出可听范围是没有优点的，因为更高的频率不会提高马达设计的效能。这使得 IGBT 在马达驱动和硬开关应用中是最佳的选择。

# 量测 IGBT 传导损耗，将效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

## 重迭导致开关损耗

芯片设计的稳健性、转为 OFF 的开关损耗以及 ON 状态的电压损耗是 IGBT 设计中的主要权衡。重要的是量测和了解电压、电流和损耗波形在正常 IGBT 运作期间的相互作用，以操作参数，因而将 IGBT 在各种应用中的效能予以最大化。

在使用 IGBT 作为硬开关的应用中，每次从 OFF 转变成 ON，或从 ON 转变成 OFF 时，均有一段定义的功率损耗期。这是因为电流流过 IGBT 时，开关集电极-发射极的连接处会出现电压。图 3 说明在每转换中，所经历的电压、电流和损耗。

将每一点的电压和电流波形相乘，以得到瞬时功率损耗波形。值得注意的是开关期间内的功率损耗的大脉冲。因为每个开关转换的功率损耗是恒定的，且开关转换是恒定的，因此开关功率损耗随着开关频率而增加。因此，较低频率会减低总开关损耗。Bourns® IGBT 的建构使用「沟槽栅场截止」(TGFS) 技术。沟槽栅极 (TG) 结构使组件的 MOSFET 部位的通道密度更高。此外，相较于平面 IGBT 结构，TGFS 技术有助减少 ON 状态的压降。这有助减少传导损耗。场截止 (FS) 层的存在亦有助于减少总开关能量。FS 亦有助于增加增益并缩短少数载流子寿命，这会导致尾电流在 IGBT 关闭时猝熄。与尺寸类似但没有 FS 层的组件相比，这亦有助于提高组件的速度。

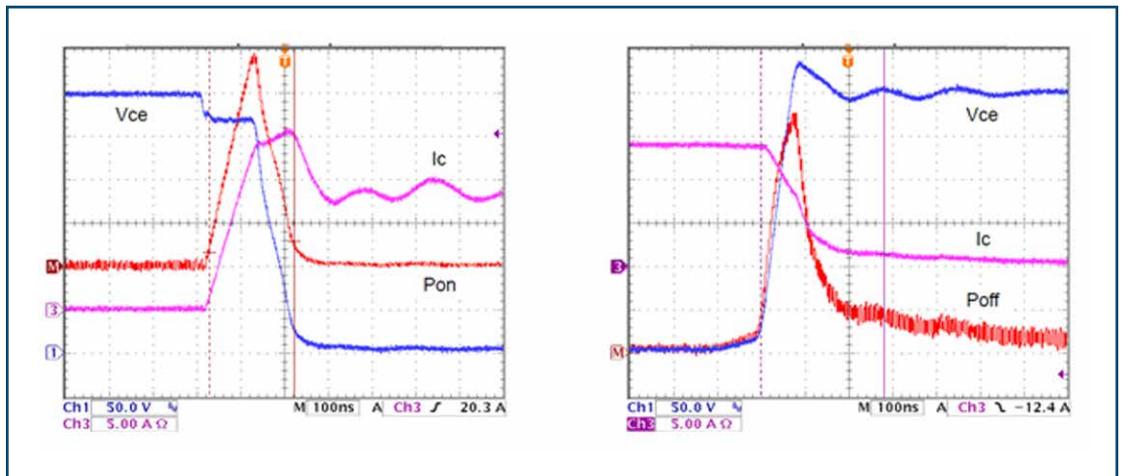


图 3 | 图示是 IGBT 转为 ON 和转为 OFF 的电压及电流波形，蓝色是电压集极-射极，粉红色是集极电流，红色是功率损耗。

# 量测 IGBT 传导损耗，将效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

## 计算传导损耗

每次当 IGBT 或它的共同封装的快速恢复二极管导通且在传导电流时，都会发生传导损耗。这个损耗的特征是功率耗散，计算方式是将 ON 状态的电压乘以 ON 状态的电流。在采用脉冲宽度调制 (PWM) 技术作为基础的应用中，必须将占空因子 (duty factor) 纳入计算之中，作为乘数，以算出平均耗散功率。

对传导损耗的近似值，第一个要检视的是 IGBT 和续流二极管数据表。IGBT 有一个额定电压 ( $V_{CE(sat)}$ )，这个额定电压的数值依据温度而定；将这个数值乘以应用的预期平均组件电流即可算出 IGBT 的大概耗散功率。类似地，续流二极管数据表有一个前向压降 ( $V_f$ )，可以跟预期的平均二极管电流相乘后算出其对总耗散功率的贡献。必须思考占空比以取得 PWM 应用的最佳近似值。这些估算往往是保守的，因为当电流小于额定电流 ( $I_C$ ) 时，在实务上， $V_{CE(sat)}$  会低于数据表中的数值。

在低于 10 kHz 的开关频率下，大部分的总功率损耗来自传导损耗。低传导损耗产生自传导机制，这个传统机制是负-正-负 (NPN) 双极型功率晶体管的特色，其在集电极电流下几乎是恒定的  $V_{CE}$ 。这与 MOSFET 中的低电阻通道是相反的，在 MOSFET 中，压降的计算是将电流乘以电阻。IGBT 阻断损耗的一个计算方法是将 IGBT 关断时的阻断电压与漏电流相乘，但传统上，由于其对总功率损耗的贡献是微不足道的，因此可予忽略。

在马达控制应用中，因传导损耗决定了总损耗，因此饱和电压和前向压降成为设计中的关键变量。由于马达应用的低开速度特性，应尽可能减少  $V_{CE(sat)}$ 。受欢迎的应用权衡常在前向压降和开关速度之间，主要目的是用来增强短路能力。

## 低和慢

因此，问题的重点在如何减低  $V_{CE}$ 。答案是更难的栅极驱动、更高的电压 ( $V_{CC}$ )、更低的工作电流，以及减低的栅极驱动阻抗。

如本文件所讨论的，由于组件的尾时间，IGBT 有开关速度限制。如果组件的  $V_{CE(sat)}$  较高，则尾时间会减少。但是，这样的交易可能不值得。一般来说，「载流子」与「 $V_{CE(sat)}$  和开关频率」之间存在反向关系。更多载流子的存在会导致开关频率减慢及  $V_{CE(sat)}$  变低。相反地，较少的载流子会产生更高的  $V_{CE(sat)}$  和开关频率。若干技术已被开发，试图优化开关时间和前向压降，且在同时提供坚固耐用的短路能力。

# 量测 IGBT 传导损耗，将效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

## 目视损耗

图 4 显示一个完整开关周期的开关损耗和传导损耗的基本参数。请注意，转换在  $V_{GE}$ 、 $I_C$  和  $V_{CE}$  的 10% 和 90% 水平上被认为是有效的。当栅极到射极的电压 ( $V_{GE}$ ) 达到 10% 的水平时，转为导通 (ON) 的转换开始。当波形跨越 10% 和 90% 的水平时，量测时间的延迟。

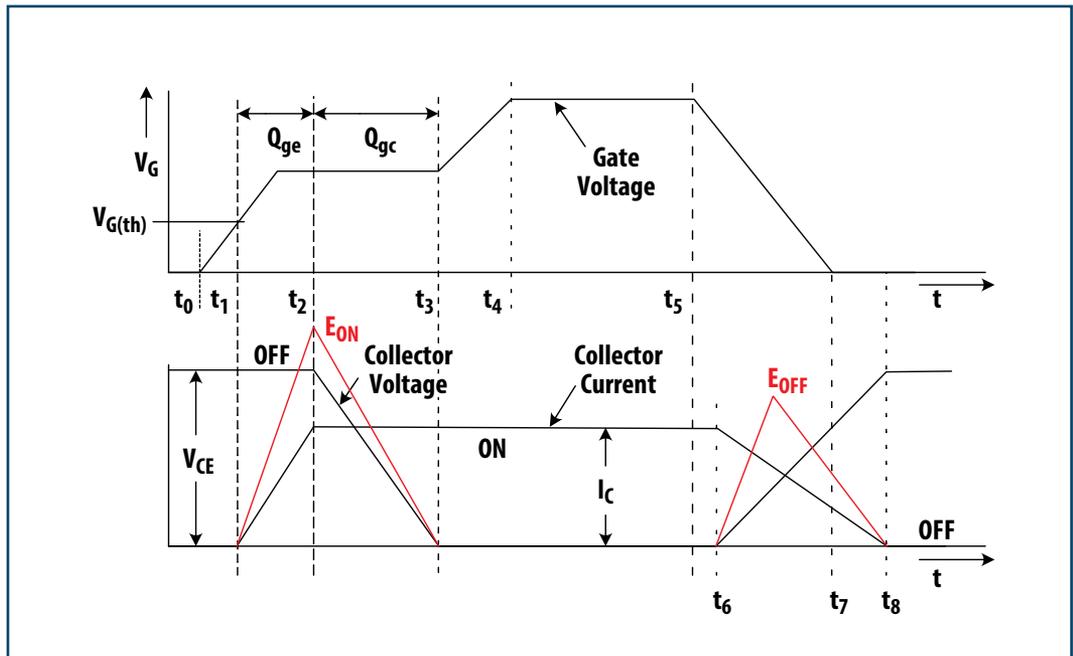


图 4 | 图示是一个完整开关周期的开关损耗和传导损耗

IGBT 切换到 ON 所花的时间以  $t_3-t_0$  表达。从  $V_{GE}$  达到 10% 到  $I_C$  达到 10% 的时间延迟以  $t_1-t_0$  表达。上升时间是  $I_C$  从 10% 上升到 90% 所花的时间，以  $t_2-t_1$  表达。

$E_{on}$  是转为 ON 的能量损耗，是 10%  $I_C$  上升「 $t_1$ 」到 90%  $V_{CE}$  下降「 $t_3-t_1$ 」的功率损耗波形下的面积。功率损耗波形的计算是将每个时间点的  $I_C$  和  $V_{CE}$  相乘，然后依据  $E_{on}$  和  $E_{off}$  下的阴影区得到近似值。 $E_{off}$  是转为 OFF 的能量，为 10%  $V_{CE}$  上升「 $t_6$ 」到 90%  $I_C$  下降「 $t_7$ 」的曲线下方的面积。

将 IGBT 转为 OFF 所发生的电压转换为高水平的延迟以  $t_6-t_5$  表达。检视 90%  $V_{GE}$  到 10%  $I_C$  的转变，以  $t_7-t_5$  表达时间。 $I_C$  从 90% 下降到 10% 的时间延迟是下降时间，以  $t_7-t_6$  表达。最后，以  $I_C$  下降到 10% 标记的时间点所存在的拖尾集极电流来显示尾时间，直到所有电荷都被消除且电流到达零。在量测上，这可以量测  $t_8$  到  $t_7$  的差。

# 量测 IGBT 传导损耗，将效能最大化



Bourns® BID IGBT 系列

## 结论

总结来说，对功率开关组件，所要考虑的功率损耗包括：传导损耗、转为 ON 的开关损耗、转为 OFF 的开关损耗，以及阻断损耗。本文所介绍的计算和波形，其目的是帮助设计人员了解各种 IGBT 参数的影响及其对功率损耗和整体效能的影响。对于实际操作或特定应用分析，可使用测试台来评估性能，量测 IGBT 典型所遇到的波形。随着 IGBT 的内建技术在效率和稳健性上不断成熟，IGBT 的应用范围预期将扩大。权衡将依然是一致的，位居支配地位的功率损耗将继续是开关损耗或传导损耗。量测和操作 IGBT 参数可使设计人员将组件的实用性和应用优势予以最大化。

[www.bourns.com](http://www.bourns.com)

**BOURNS®**

**Americas:** Tel +1-951 781-5500  
Email [americus@bourns.com](mailto:americus@bourns.com)

**EMEA:** Tel +36 88 885 877  
Email [eurocus@bourns.com](mailto:eurocus@bourns.com)

**Asia-Pacific:** Tel +886-2 256 241 17  
Email [asiacus@bourns.com](mailto:asiacus@bourns.com)