

功率器件

# 计算驱动阻性负载 IGBT 的开关损耗

在使用 IGBT 的大多数应用中，器件都会对感性负载进行开关。Datasheet 和仿真模型都是根据这种工作方式设计的。然而，以电动汽车中的高压 (HV) 加热器市场为中心，人们对使用驱动电阻性负载 IGBT 的兴趣日渐提高。高压加热器使用 IGBT 来调节加热功率。IGBT 主要用于切换阻性负载的开通和关断。为避免设备故障，需要正确计算开通和关断期间的损耗，但常见的损耗计算方法并不适用于这种情况。本应用笔记将这些工作条件考虑在内，介绍了一种可靠的方法来评估开关损耗和瞬时结温。

## 理想开关的开关动作 – 感性负载和阻性负载

为了便于理解感性负载和阻性负载之间的差异，这里的开关动作被视为理想状态下的开关和二极管。考虑到这一点，感性负载开关开通工作时的电压  $V$  和电流  $I$  波形如图1 (a) 所示。该工作模式的主要特点是电压  $V$  在达到负载电流  $I_L$  后开始下降。相反，在关断期间，电压  $V$  必须达到 DC 电压  $V_{dc}$  电流才开始下降。在这种情况下，瞬时功率峰值为  $P_{max} = V_{dc} I_L$ 。

阻性负载开关波形差异很大，如图1 (b) 所示。根据欧姆定律，系数  $V/I$  必须恒定且等于负载电阻  $R$ 。器件的最大应力发生在开关动作中， $P_{max} = \frac{1}{4} V_{dc} I_L$ 。总开关功率可表示为：

$$E_{id} = \frac{1}{6} V_{dc} I_L t_{sw} \quad (1)$$

## 驱动阻性负载的 IGBT 的开关波形

众所周知，IGBT 并不是理想的开关。在感性负载开关中，IGBT 关断时的拖尾电流就是一个很好的例子。使用 IGBT 驱动阻性负载时，其损耗比理想情况下更高：

$$E_{on} = E_{off} = \frac{1}{6} V_{dc} I_L t_{sw} + E_{cm} \quad (2)$$

$E_{cm}$  表示 IGBT 电导率调制过程中的损耗。在 IGBT 中，从集电极到器件漂移区的载流子注入提高了器件开通时的导通率。这是每次打开器件时发生的动态过程。在此过程中，器件表现为与时间相关的可变电阻。有关于此的详细说明，请参阅[1]。

开通时 IGBT 波形的如图2所示。理想开关与实际器件之间的主要区别可以在发生电导率调制的第三阶段发现。该阶段依赖于 IGBT 技术，其持续时间与栅极电流成反比。

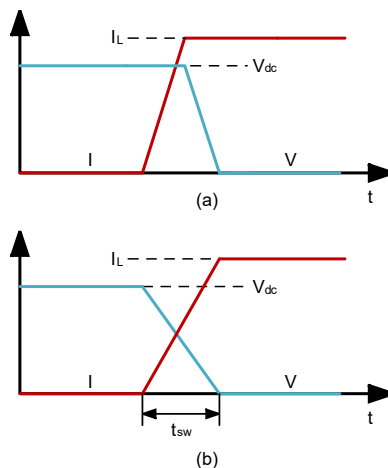


图 1. (a) 感性负载开关和 (b) 阻性负载开关的理想开通波形

根据所选器件及其工作条件，附加损耗  $E_{cm}$  可能变得相当大。对于 Figure 3 的情况，根据公式(1)计算的理想损耗  $E_{id}$  为 83mJ，而总损耗  $E_{on}$  为 142mJ。可以得出， $E_{cm}$  比  $E_{id}$  少 20% (59mJ)。但是，请注意，这是在 470V 电压下，驱动 1200V IGBT 的一个极端的例子。

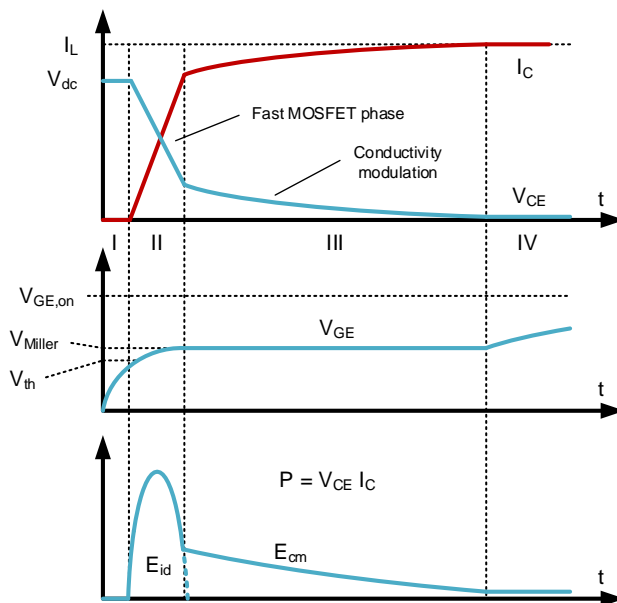


图 2. IGBT 抗性负载的导通波形 (简略图)

### SPICE 模型：是否足以验证阻性负载驱动？

在了解了理想波形不能准确地反映 IGBT 开关动作,来计算开关损耗的前提下, 需要评估 ROHM 提供的基于 SPICE 的 IGBT 模型在电阻负载驱动方面的准确性如何。比较实测波形和仿真波形时, 第一个问题是, 在设置相同  $R_G$  的情况下, 仿真中的 IGBT 开关速度比实测快:  $38\mu\text{s}$  (仿真) vs.  $45\mu\text{s}$  (实测)。如果不采取任何修正措施, 算出的损耗将过小:  $82\text{mJ}$  (仿真, 没有图示) vs.  $142\text{mJ}$  (实测)。

仿真模型的  $R_G$  设定值从  $23\text{k}\Omega$  增加到  $34\text{k}\Omega$  时, 两个开关时间 (实测和仿真) 将一致 (参考图3)。由于 SPICE 模型无法精确再现电导调制阶段,  $E_{on}$  损耗降低了19%。虽然调整开关时间比用理想波形思考更准确, 但仍不足以进行的准确的损耗计算。标准 IGBT 模型阻性负载驱动的这种不准确性是已知的限制, 并在[1]被讨论。

### 计算开关损耗的方法的提案

由于理想波形和仿真波形都不能正确地反映准确计算开关损耗所需的 IGBT 的动作。我们提出一种复合方法, 从测试值中抽取器件损耗, 并使用等效 RC 热网络模型, 根据最差情况下的工作条件再现温度摆动。

#### Part 1：获取实测波形

为了获取像图4一样在开通和关断期间的  $V_{CE}$  和  $I_C$  波形, 对驱动阻性负载的 IGBT 进行单脉冲测试。为了反映器件工作的温度, IGBT 必须从外部加热。通常选择  $100 - 150\text{C}^\circ$  的温度。如果  $R_G$  设定值较大, 且温度设置接近绝对最大额定结温, 则可能会在开通或关断期间因过大的温度变动而损坏器件。

这里要考虑的另一个重要条件是  $V_{dc}$ , 必须根据应用中的 IGBT 最差条件进行选择。对于 HV 加热器, 在图 5 的功率/电压平面上提供最高  $T_j$  的工作点如下:

1. 在无降额条件下允许的最高电压下最大功率动作 ( $P_{max}, V_{max,FP}$ )。
2. 绝对最大额定电压和该电压允许的最大功率 ( $P_{max2}, V_{max}$ )。
3. 绝对最大额定电压和最小 Duty 周期 ( $P \rightarrow 0, V_{max}$ )。

这意味着必须考虑至少两个不同的  $V_{dc}$ 。根据 IGBT 的指定工作条件, 还需确认其他相关电压条件。

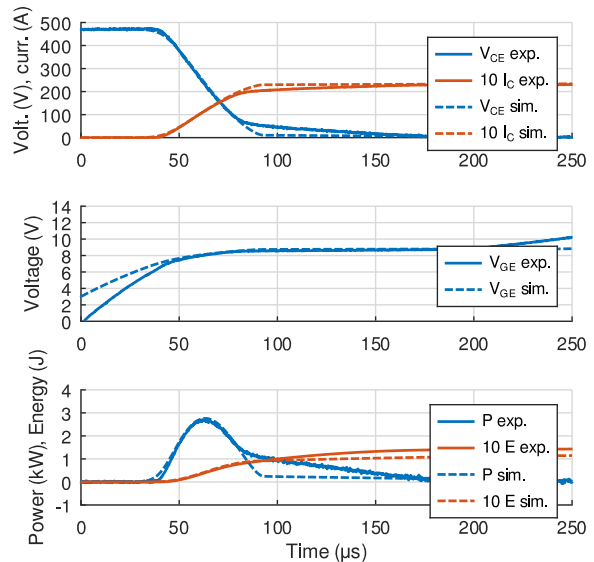


图 3. IGBT RGS80TSX2DHRC11 在 470V、23.5A、 $t_{sw}=45\mu\text{s}$  时的导通波形  $R_G=23\text{k}\Omega$  的实测值と  $R_G=34\text{k}\Omega$  的仿真值为参考, 算出损耗  $E_{on}=142\text{mJ}$  (实测) vs.  $E_{on}=115\text{mJ}$  (仿真)

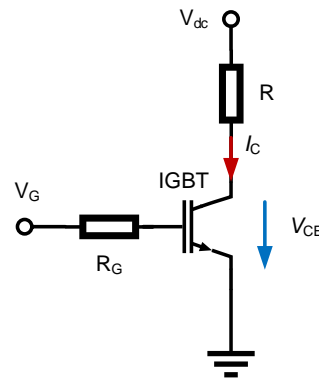


图 4. 阻性负载开关特性评估电路图

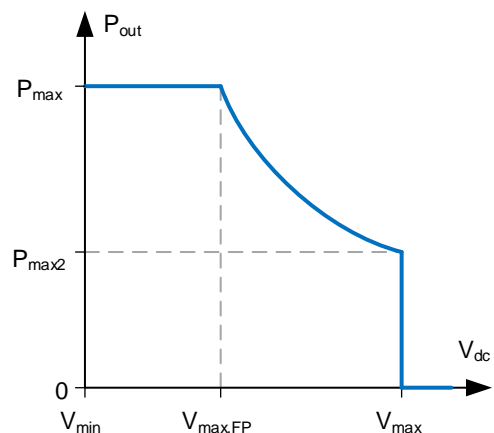


图 5. HV 加热器中使用的输出功率  $P_{out}$  vs.DClink 电压  $V_{dc}$  示意图

Part 2：取得开关波形后的处理

不是使用代表典型器件的数据，而是推荐根据实测波形，进行相应调整，以反映 worst case 条件。具体步骤如下：

1. 从获得的波形中提取开通和关断的开关过程。
2. 将电压和电流相乘，求出瞬时功率波形：

$$P(t) = V_{CE}(t) I_C(t) \quad (3)$$

3. 在  $P_{on(t)}$  和  $P_{off(t)}$  期间增加20%的安全裕量，以包含开关损耗较大的个别器件存在的可能。

Part 3：最坏工作条件下的瞬时功率波形的合成

通常，估计器件最大结温的方法是计算开通损耗、关断损耗和导通损耗，然后根据冷却条件计算结温  $T_j$ 。然而，在 HV 加热器等应用中，栅极电阻常使用的 kΩ 范围的阻值，上述方法不适用于此条件下 IGBT 的开关。如果使用总损耗，则会忽略器件温度的变动，而只得到平均的  $T_j$  值。但是这种温度变动很大，不该被忽视。

实现此目的的一个更好的方法是将上一节中获得的功率波形  $P_{on}$  和  $P_{off}$  与导通损耗相结合来估计瞬时  $T_j$  波形。

$$P_{cond} = V_{CE,sat}(I_{max}, T_{j,cond}) \cdot I_{max} \quad (4)$$

其中， $V_{CE,sat}$  是器件在最大负载电流  $I_{max}$  和导通期间最大结温  $T_{j,cond}$  下的 C-E 间饱和电压。为简化该步骤，可以将数据手册中列出的  $T_j=175^\circ\text{C}$  下的  $V_{CE,sat}$  值用作最坏情况的参考值使用。

合成瞬时功率波形的最后一步是结合  $P_{on}$ 、 $P_{cond}$  和  $P_{off}$  以反映如本节 part1所说的器件最坏情况下的工作条件。

最终的  $P(t)$  波形类似于图6，该波形还考虑了器件在下一个循环开始之前的关断阶段。

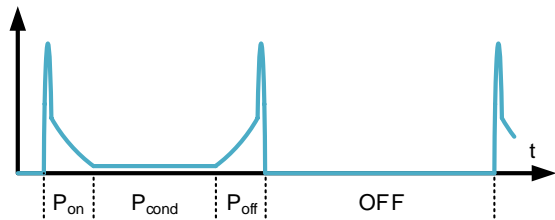


图 6. 根据测量的开通和关断过程和导通损耗计算值合成的瞬时功率波形

Part 4：将功率波形输入到 RC 热网络

得到瞬时功率波形  $P(t)$  后，将其周期性地施加在由器件和冷却条件所决定的热网络模型中。对应的仿真电路及其结果的  $P$  和

$T_j$  波形示例如图7所示。它是根据 IGBT RGS50TSX2DHRC11 的测量值所作成的，条件的详细信息如图中说明。

Part 5：仿真结果的评价

观测瞬时温度  $T_j$  则可以轻松评估器件是否工作在规格范围内。ROHM 制造的 IGBT 的绝对最大额定  $T_j$  为  $175^\circ\text{C}$ 。包括开关过程，必须始终遵守此温度上限。有一个经验法则，将峰值温度保持在  $160^\circ\text{C}$  以下可以在安全裕度和设备利用率之间取得良好的平衡。

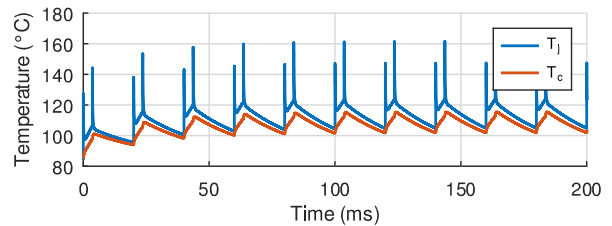
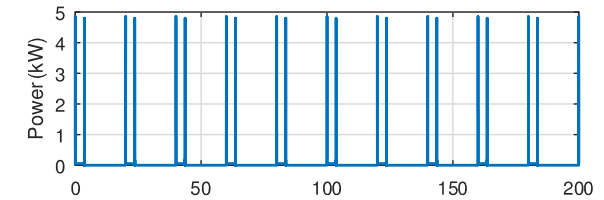
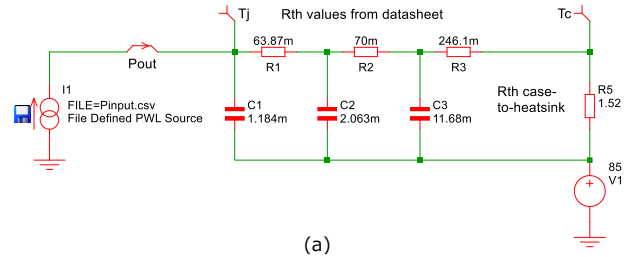


图 7. 提出方法的结果例: (a) SIMetrix-SIMPLIS 仿真回路、(b) 功率  $P$  和温度  $T_c$  和  $T_j$  波形 (IGBT RGS50TSX2,  $R_G=5.6\text{k}\Omega$ ,  $V_{dc}=865\text{V}$ ,  $R=50\Omega$ ,  $f_{sw}=50\text{Hz}$ , duty cycle  $D=0.18$ ,  $R_{th,c-h}=1.52\text{K/W}$ ,  $T_h=85^\circ\text{C}$ )

总结

本应用笔记表明，正确计算驱动电阻负载的 IGBT 开关损耗并非易事。有一些问题会导致损失和温度的值过小。为了克服这个问题，提出了一种基于测量的方法。我们希望该技术能帮助设计人员选择合适的 IGBT 并相应地设计冷却电路。

ROHM 还有许多关于功率器件热设计的文档，值得查看和了解。其中[2]是相关性最高的文档。

## 参考文献

- [1] A. T. Bryant, L. Lu, E. Santi, J. L. Hudgins and P. R. Palmer, "Modeling of IGBT Resistive and Inductive Turn-On Behavior," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, no. 3, pp. 904-914, May-june 2008, doi: [10.1109/TIA.2008.921384](https://doi.org/10.1109/TIA.2008.921384)
- [2] 「成功实现功率器件热设计的4大步骤」、ROHM CO., LTD.、日本、White paper 64WP009J、2022年  
[\[online\]](#)

## 注 意 事 项

- 1) 本资料中的内容旨在介绍ROHM集团(以下简称“ROHM”)的产品。在使用ROHM产品之前,请务必另行确认最新版的技术规格书或产品规格书。
- 2) ROHM的产品是面向普通电子设备(AV设备、OA设备、通信设备、家电产品、娱乐设备等)或技术规格书中指定的应用领域而设计和制造的。因此,如果要在要求极高可靠性、产品故障或误动作可能会危及人的生命、造成人身危害或损害,或可能造成其他严重损害的设备或装置(包括医疗设备、运输设备、交通设备、航空航天设备、核电控制装置、燃料控制、含汽车配件在内的车载设备、各种安全装置等)(以下简称“特殊用途”)中使用ROHM产品,请事先咨询ROHM销售部门。如果未经ROHM事先书面同意而将ROHM产品用于特殊用途,因此造成的客户或第三方的任何损害,ROHM不承担任何责任。
- 3) 含有半导体的电子产品存在一定的误动作或故障概率。客户有责任采取Fail Safe设计等安全对策,来避免万一发生误动作或故障时对人的生命、身体或财产造成危害或损害。
- 4) 本资料中出现的应用电路示例和常数等信息仅用于说明ROHM产品的标准工作和使用方法,并非明示保证或默示保证在实际应用设备中的工作。因此,在客户设备的设计过程中使用这些电路、常数以及相关信息时,请结合各种外部条件自行判断并对自己的判断负责。对于因使用这些数据和信息造成的客户或第三方的任何损害,ROHM不承担任何责任。
- 5) 向海外出口或提供ROHM产品和本资料中的技术时,请遵守《外汇及外国贸易法》、《美国出口管制条例》等适用的出口相关法律法规,并根据这些法律法规中的规定办理必要的手续。
- 6) 本资料中的应用电路示例等技术信息和各种数据仅为示例,并非保证不侵犯与这些内容相关的第三方的知识产权及其他权利。另外,对于本材料中的信息,ROHM并未明示或默示同意客户可以实施、使用或利用ROHM或第三方拥有或管理的知识产权以及其他权利。
- 7) 未经ROHM事先书面同意,严禁转载或复制本资料的全部或部分内容。
- 8) 本资料中的内容为截至本资料发行之时的信息,如有更改,恕不另行通知。在购买和使用ROHM产品之前,请通过ROHM销售部门确认最新信息。
- 9) ROHM不保证本资料中的信息无误。万一客户或第三方因本资料中的信息错误而受损,ROHM不承担任何责任。



Thank you for your accessing to ROHM product informations.  
More detail product informations and catalogs are available, please contact us.

## ROHM Customer Support System

<https://www.rohm.com.cn/contactus>