

### 3.1.2 通态电流

在模块的静态运行过程中, 对于一个完全受控的晶体管来说, 参数表中通态电流的最大定额  $I_D$  或  $I_C$  在不同壳温  $T_{case}$  (例如, 25°C 或 80°C) 下的数值可以借助以下公式来计算出:

$$I_D = \sqrt{(T_{j(max)} - T_{case}) / (R_{DS(on)} \cdot R_{thjc})} \quad (\text{MOSFET 模块})$$

$$\text{或 } I_C = (T_{j(max)} - T_{case}) / (V_{CESat} * R_{thjc}) \quad (\text{IGBT 模块})$$

如果模块不含底板, 则可以用  $T_h$  来代替  $T_{case}$ , 以及用  $R_{thjh}$  来代替  $R_{thjc}$ 。 $R_{DS(on)}$  或  $V_{CESat}$  的数值则取自于芯片温度为最大允许值  $T_{j(max)}$  时。

以上计算仅适用于定性分析。在实际运行中, 除了通态损耗之外还有开关和 (较低的) 截止损耗, 壳温也会有所不同, 另外, 在整个导通时间内,  $R_{DS(on)}$  或  $V_{CESat}$  也不一定全为其静态值。

在壳温一定 (25°C 或 80°C) 的情况下, 参数表中给出了单脉冲的最大通态电流峰值 (脉宽 1ms), 以及周期性开关时的最大电流值 (RBSOA)。

因此, 实际可利用的通态电流可以通过如下方法来决定:

首先, 计算模块中晶体管和续流二极管的总功耗, 由特定的冷却条件 ( $R_{thca}$ ) 出发, 导出晶体管和续流二极管的芯片温度。这一温度不得超过最高结温  $T_{j(max)}$  (见 3.2.2 节)。

检查安全工作区域的边界, 见 2.2 和 2.3 章。在阻感负载以及硬开关条件下, 负载电流和续流二极管的反向恢复电流之和不得超过  $I_{DM}$  或  $I_{CM}$ , 参阅图 3.2。在这里, 基于 1.3.1.3 节中所提到的原因, 需要在晶体管的开通速度 (影响开通损耗) 和可能达到的负载电流之间做一个折衷选择。

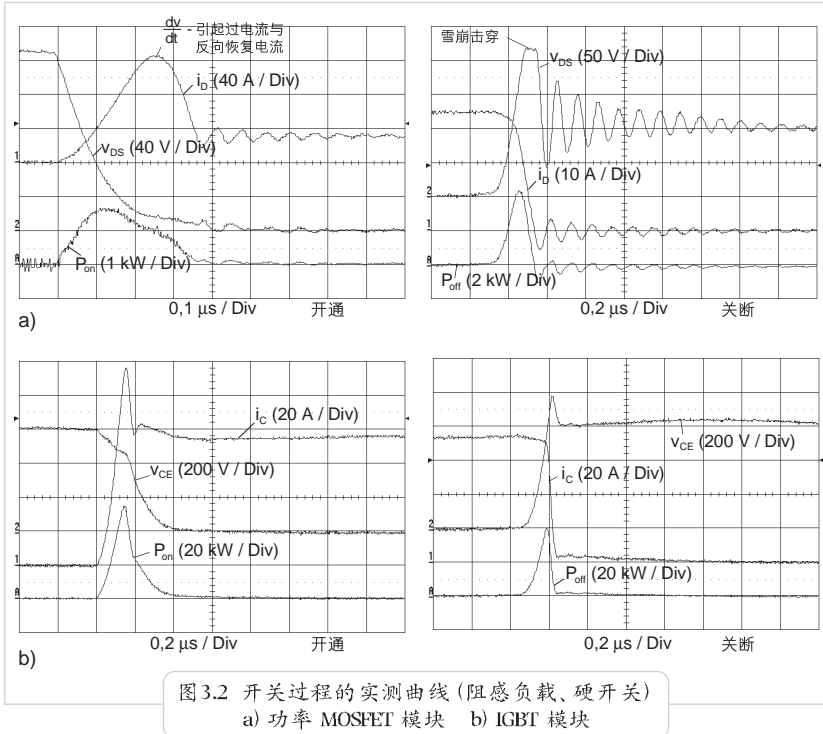
在实际使用中, 其他进一步的限制可能会源于驱动器的过电流保护装置的特性 (见 3.5 章)。

### 3.1.3 开关频率

图 3.2 显示了实际测得的功率 MOSFET 和 IGBT 模块在某一特定工作点下的开通和关断特性。

在  $v_{DS}$  或  $v_{CE}$  以及  $i_D$  或  $i_C$  特性曲线基础上, 将电流和电压的瞬时值相乘便可以得到功耗的瞬时值  $p(t)$ 。再将其对时间积分, 便可以得到 MOSFET 或 IGBT 的在这一时间内的损耗。

若要计算功率模块的总损耗, 则还需加上模块所含的续流二极管的损耗, 见 3.2.1 节。



若要定量分析电流和电压的特性曲线，请参阅 1.2.3 节中针对图 1.11 的说明。

因为开关损耗随开关频率的上升而呈比例增加，所以它成为限制开关频率的主要因素。

其他的限制性因素可以是晶体管的开通和关断延迟时间  $t_{d(on)}$ 、 $t_{d(off)}$ 、续流二极管的反向恢复时间、驱动功率（随开关频率成比例增加）、作用于驱动、互锁、测量、保护以及监视环节所需的最小开通、关断以及死区时间，见 3.5.1 至 3.5.4 节。

若采用了被动网络（吸收电路）来转移开关损耗或吸收过电压，则吸收电路在缓冲开关过程之后的反向充电时间应被视作死区时间，见 3.6 和 3.8 章。

MOSFET 和 IGBT 功率模块的开关时间大约在几十到几百纳秒之间。但尤其是在高电压和硬开关情况下，实际可达的开关频率往往小于理论值，究其原因，是因为开关速度被下列因素所决定：

1. 关断速度，由允许的开关过电压所限制；

2. 开通速度, 由允许的电流峰值 (负载电流+续流二极管依赖于  $di/dt$  的反向恢复电流) 所限制。

另外, 特别是对于大功率范围内的晶体管来说, 过于陡峭的  $dv/dt$  和  $di/dt$  值可能会引起电磁干扰, 或在某些特定的负载 (机器) 中引发  $dv/dt$  问题。

因此, 在决定开关频率和开关时间时, 无论如何都要从尽可能满足各方面的要求之中寻找一个最佳的平衡点。例如, 应用方面的考虑 (如开关频率在听力范围之外)、开关时间与开关损耗、散热条件以及抗电磁干扰的能力等。

以下为标准模块所能够采用的开关频率的推荐值, 前提是模块的性能能够被充分地利用:

<b>硬开关:</b>	MOSFET 模块	低截止电压	至 250 kHz
		高截止电压	至 100kHz
	IGBT 模块	600 V	至 30 kHz
		1200 V	至 20 kHz
1700 V		至 10 kHz	
<b>软开关:</b>	MOSFET 模块	3300 V	至 3 kHz
		低截止电压	至 500 kHz
	IGBT 模块	高截止电压	至 250 kHz
			至 150 kHz

对于为快速开关而特别设计的模块来说, 它们可以达到更高的开关频率。

## 3.2 传热性能

### 3.2.1 功耗的平衡

#### 3.2.1.1 单项功耗和总功耗

##### 导论

在 3.2 章中, 所有的讲述都是有关 IGBT 模块的。但所有的讨论和计算也同样适用于 MOSFET 模块, 前提是将所有的下标符号做相应的代换。

本章将重点讨论电压型的硬开关变流器。

在电力电子应用中, IGBT 和二极管主要工作在开关状态, 并周期性地经历各种静态和动态的状态。而在这每一个状态中, 都会产生一部分功率损耗或能量损耗。这些功率损耗相加, 即为开关器件的总功耗。它使器件发热。因此, 在应用半导体器件时, 应使变流器在任一运行状态下均不得超过由制造商所给出的最大允许结温 (对于硅元件来说  $T_j = 150^\circ\text{C}$ )。