

## 2.3 IGBT 模块 [264]、[265]

### 2.3.1 最大定额

#### IGBT／模块

##### 集电极—发射极电压 $V_{CES}$ 或 $V_{CE}$

在栅极—发射极回路为短路 ( $V_{GE} = 0$ ) 的情况下, 集电极—发射极之间的最大允许电压。

参数: 壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

##### 集电极—栅极电压 $V_{CGR}$

在集电极和栅极之间的最大允许电压。

参数: 栅极—发射极之间的外接电阻  $R_{GE}$ 、壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

##### 集电极直流电流 $I_C$

通过集电极端子的最大允许直流电流。

参数: 壳温, 例如  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$ :  $I_C @ 25^{\circ}\text{C}$ 、 $I_C @ 80^{\circ}\text{C}$

##### 可重复的集电极电流峰值 $I_{CM}$ 或集电极脉冲电流 $I_{Cpuls}$

在脉冲运行状态下通过集电极端子的最大允许峰值电流。

参数: 脉宽  $t_p$ 、壳温 (例如  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$ )、脉冲占空比

##### 栅极—发射极电压 $V_{GES}$ 或 $V_{GE}$

栅极和发射极之间的最大允许电压。

参数: 壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

##### 最大耗散功率 $P_{tot}$

单个晶体管／二极管或整个模块的最大允许损耗功率。

$$P_{tot} = (T_{jmax} - T_{case})/R_{thjc}$$

参数: 壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

##### 运行温度范围 $T_{vj}$ 或 $T_j$ 、 $T_{j(min)}$ - $T_{j(max)}$

芯片温度的允许范围, 在该范围内模块可以持续运行。

##### 储藏温度范围 $T_{stg}$ 、 $T_{stg(min)}$ - $T_{stg(max)}$

在该温度范围内, 元件在无电气连接的情况下允许被储藏或运输。

### 绝缘测试电压 $V_{isol}$ 或 $V_{is}$

当所有的输入端子和控制端子短接时 (所有端子相互连接), 该端与模块底板之间的允许测试电压的有效值。

参数: 测试时间 (1 分钟或 1 秒)。若有特殊要求, 还需要记录测试电压的上升速度。

根据 IEC146-1-1(1991)、EN60146-1-1(1993) 的第 4.2.1 节 (同 VDE0558 第 1-1 卷(1993-04)) 以及 DIN VDE 0160 (1988-05) 的第 7.6 节 (同 EN50178(1994)/E VDE 0160(1994-11)), 测试电压只能逐步上升至最大值。

### 湿度等级

表示了由 DIN 40 040 所规定的环境参数 (大气湿度)。

### 气候等级

表示了由 DIN IEC 68-1 所规定的环境参数 (气候)。

### 反向二极管 / 续流二极管

#### 通态电流 $I_F$

反向或续流二极管通态直流电流的最大允许值。

参数: 壳温, 例如  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$

#### 可重复的正向电流峰值 $I_{FM}$ 或正向脉冲电流 $I_{Fpuls}$

在脉冲运行状态下二极管的最大允许峰值电流。

参数: 脉宽  $t_p$ 、壳温, 例如,  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$ 、 $80^{\circ}\text{C}$

## 2.3.2 特性参数

### IGBT / 模块

#### 集电极 — 发射极击穿电压 $V_{(BR)CES}$

在栅极—发射极回路为短路 ( $V_{GE} = 0$ ) 的情况下, 集电极与发射极之间的击穿电压。

参数: 集电极截止电流  $I_C$ 、壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

#### 栅极 — 发射极开启电压 $V_{GE(th)}$

当栅极—发射极电压大于该值时, 集电极电流有明显的流动迹象。

参数: 集电极—发射极电压  $V_{CE} = V_{GE}$ 、集电极电流  $I_C$ 、壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

#### 集电极 — 发射极截止电流 $I_{CES}$

在栅极—发射极回路为短路 ( $V_{CE} = 0$ ) 及集电极电压为最大定额 ( $V_{GE} = V_{GES}$ ) 的情况下, 集电极与发射极之间的截止电流。

参数: 壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$  和  $125^{\circ}\text{C}$

### 栅极 — 发射极漏电流 $I_{GES}$

在集电极—发射极回路为短路 ( $V_{CE} = 0$ ) 及栅极—发射极电压为最大定额 ( $V_{GE} = V_{GES}$ ) 的情况下, 栅极—发射极之间的漏电流。

参数: 栅极—发射极电压  $V_{GE}$ 、壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

### 集电极 — 发射极饱和电压 $V_{CEsat}$

在给定集电极电流 (额定电流, 见 2.3.3 节或最大允许集电极电流) 的情况下, 集电极与发射极电压的饱和值 (IGBT 在导通状态下的电压降)。在额定电流区域内, PT 型 IGBT 的  $V_{CEsat}$  随温度增加而下降, 而 NPT 型 IGBT 的  $V_{CEsat}$  则随温度上升而上升。

参数: 集电极电流  $I_C$ 、栅极—发射极电压  $V_{GE}$ 、芯片温度, 例如  $T_j = 25^{\circ}\text{C}$  或  $125^{\circ}\text{C}$

为了便于通态损耗的计算, 在参数表中往往还给出等效电路的参数  $V_{CE(TO)}$  (开启电压) 和  $r_{CE}$  (等效通态电阻)。换句话说, 在计算过程中, 饱和电压的曲线可以用一条二极管的特性曲线来近似:

$$V_{CEsat} = f(I_C) = V_{CE(TO)} + r_{CE} * I_C$$

### 转移电导 $g_f$

在给定集电极电流  $I_C$  的情况下, 集电极电流的增量与栅极—发射极电压的增量之比。

参数: 集电极—发射极电压  $V_{CE}$ 、集电极电流  $I_C$  (额定值)、壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

### 芯片与管壳间的电容 $C_{CHC}$

元件的某个子单元与外壳底板或散热器之间的电容。

参数: 壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

### 输入电容 $C_{iss}$

在集电极—发射极回路对交流短路以及栅极—发射极电压为零 ( $V_{GE} = 0$ ) 时, 栅极—发射极之间的电容。

参数: 集电极—发射极直流电压  $V_{CE}$ 、测量频率  $f$ 、壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

### 输出电容 $C_{oss}$

在栅极—发射极电压为零 ( $V_{GE} = 0$ ) 的情况下, 集电极与发射极之间的电容。

参数: 集电极—发射极直流电压  $V_{CE}$ 、测量频率  $f$ 、壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

### 反馈电容 (米勒电容) $C_{rss}$ 、 $C_{mi}$

在集电极—发射极回路对交流短路以及栅极—发射极电压为零 ( $V_{GE} = 0$ ) 时, 集电极与栅极之间的电容。测量时发射极应同测量桥的屏蔽端相连接。

参数: 集电极—发射极直流电压  $V_{CE}$ 、测量频率  $f$ 、壳温  $T_{case} = 25^{\circ}\text{C}$

集电极－发射极寄生电感  $L_{CE}$

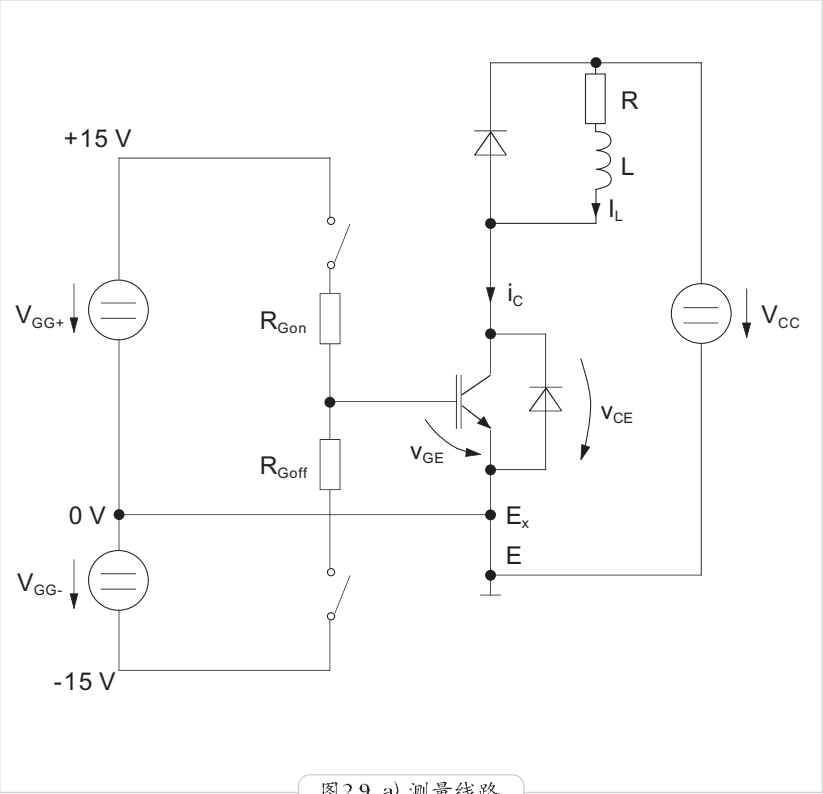
集电极与发射极之间的电感

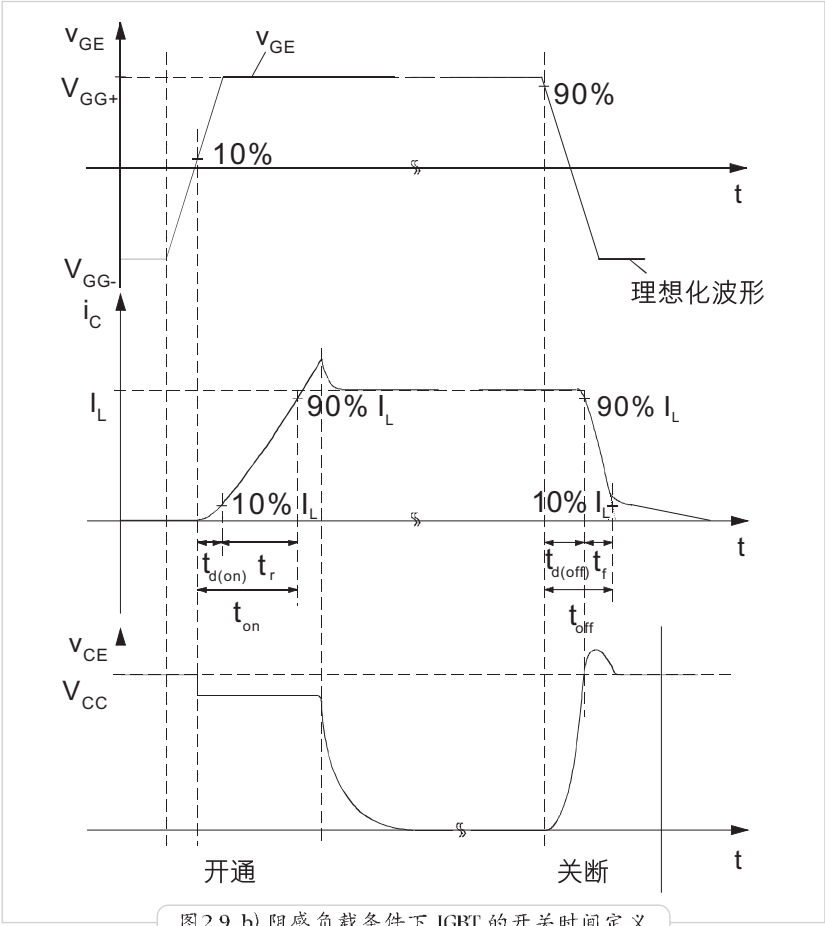
开关时间

对于 IGBT 来说，在参数表中所给出的开关时间比 MOSFET 的开关时间更为接近实际。它们是在阻感性负载下通过图 2.9a 所示的测量线路而测得的。相对于开关频率的周期  $T = 1/f$  来说，负载的时间常数  $L/R$  应该足够大，以使得负载电感的电流能够连续。

和 MOSFET 一样，IGBT 的开关时间在开关期间和栅极－发射极电压的曲线紧密相关，见图 2.9b。

开关时间与实际电流以及电压的特性曲线由器件内部的，以及栅极－发射极回路的电容、电感和电阻所决定。因此，参数表中的参数及其特性曲线只能作为大致的参考。





下列参数和开关时间的定义有关:

测量线路、集电极-发射极工作电压  $V_{CC}$ 、栅极-发射极驱动电压  $V_{GG+}$ 、 $V_{GG-}$  以及  $V_{GE}$ 、集电极电流  $I_C$ 、栅极串联电阻 (驱动回路的开通和关断电阻  $R_{Gon}$ 、 $R_{Goff}$ )、芯片温度  $T_j = 125^{\circ}\text{C}$ 。

**开通延迟时间  $t_{d(on)}$**

如前面已提到过的, 在 IGBT 开通之前, 全部电流流经负载电感。

当栅极和发射极之间被加上一个阶跃式的正向驱动电压后, 栅极-发射极电压便开始上升。上升过程的时间常数由输入电容和栅极驱动回路的电阻所决定。一旦栅极-发射极电压达到开启电压  $V_{GE(th)}$  后, 集电极电流  $I_C$  则开始上升。

从栅极-发射极电压达到其最终值的10%开始,直到集电极电流  $i_C$  上升至负载电流的10%为止,这一段时间被定义为开通延迟时间。

### 上升时间 $t_r$

上升时间紧接在开通延迟时间之后。在此期间内,集电极电流  $i_C$  由负载电流的10%上升到 90%。在上升过程中,只要  $i_C$  小于负载电流  $I_L$ ,则部分负载电流仍由续流二极管来维持,从而使得集电极-发射极电压在此期间内没有明显的下降。因此,开通损耗的主要部分便产生于这一时间。

在图 2.9 所示的  $t_r$  时期内,由于换流回路内部的寄生电感引起了一部分压降,从而导致了  $V_{CC}$  与  $v_{CE}$  的不同。

开通延迟时间  $t_{d(on)}$  与上升时间  $t_r$  之和被称为开通时间  $t_{on}$ 。

因为在  $t_{on}$  之末尾,集电极-发射极电压还没有达到其饱和压降值  $V_{CEsat}$ ,所以在  $t_{on}$  结束之后,器件的损耗仍然大于通态损耗。

### 开通电流峰值

在全部的负载电流  $I_L$  切换至 IGBT 后,续流二极管截止,同时释放其反向恢复电荷  $Q_{rr}$ 。因此在续流二极管关断期间( $t_{rr}$ ),IGBT 的集电极电流  $i_C$  首先会上升,其幅度刚好为续流二极管的反向恢复电流峰值  $I_{RRM}$  (开通电流峰值,见图 2.10)

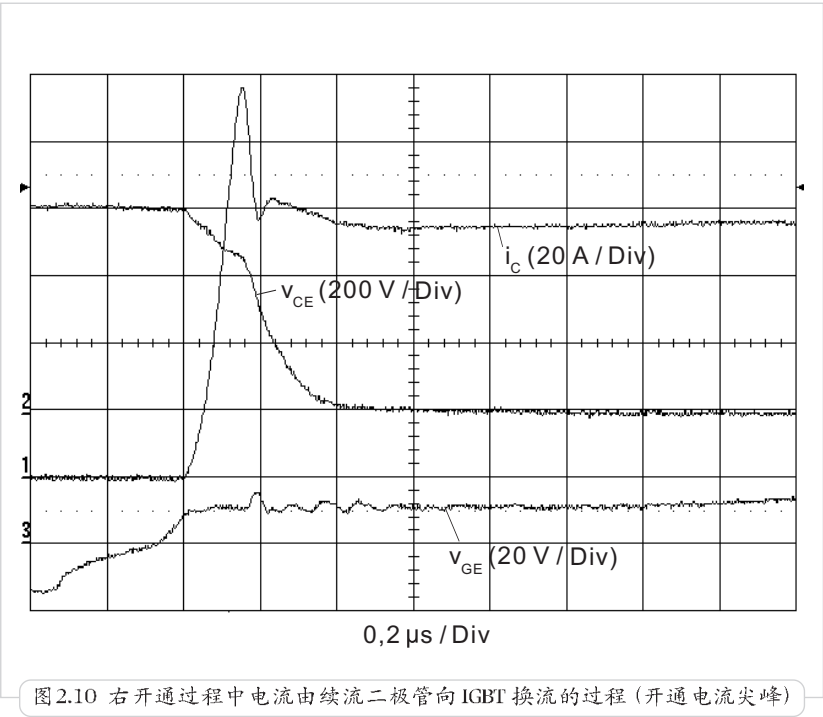


图2.10 右开通过程中电流由续流二极管向 IGBT 换流的过程 (开通电流尖峰)

### 动态饱和电压

在开通过程中,紧接着  $v_{CE}$  的快速下降后,集电极-发射极电流会进入一个相对较慢(微秒级)的下降过程,最终逼近其静态值  $V_{CEsat}$ ,这一过程被称为动态饱和过程。IGBT 需要这一段时间来使宽的  $n^-$  区充溢(双极)少子(电导调制)。

### 关断延迟时间 $t_{d(off)}$

当栅极和发射极之间的正向电压被突然撤消并同时被加上一个负压后,栅极-发射极电压便开始下降。下降过程的时间常数由输入电容和栅极驱动回路的电阻所决定。同时,IGBT 的  $V_{CE}$  电压开始上升。但只要  $V_{CE}$  小于  $V_{CC}$ ,则续流二极管处于截止状态且不能接续电流。所以,IGBT 的集电极电流  $i_C$  在此期间并没有明显的下降。

因此,从栅极-发射极电压降落至其开通值的 90% 开始,直到集电极电流下降至负载电流的 90% 为止,这一段时间被定义为关断延迟时间。

### 下降时间 $t_f$

一旦上升的 IGBT 的集电极-发射极电压超过工作电压  $V_{CC}$  时,续流二极管便处于正向偏置的状态下,负载电流便可以换流至续流二极管,集电极电流也因此下降。

下降时间  $t_f$  便为集电极电流  $i_C$  由负载电流  $I_L$  的 90% 下降至 10% 之间的时间。

在图 2.11 中,  $V_{CE}$  超出  $V_{CC}$  的部分主要由换流回路内部的寄生电感所导致的电压降所引起,其幅度与 IGBT 的关断速度呈线性关系。

关断延迟时间  $t_{d(off)}$  与下降时间  $t_f$  之和合并称为关断时间  $t_{off}$ 。

因为在  $t_{off}$  之末尾,集电极电流  $i_C$  还没有达到其截止漏电流值,而只是到达其通态电流值的 10%,所以在  $t_{off}$  结束之后,器件的损耗仍然大于截止损耗。

### 拖尾时间 $t_t$ 、拖尾电流 $I_t$

与 MOSFET 相比较,通过向  $n^-$  区注入少子的方式而使得 IGBT 的通态损耗明显降低。但这一设计同时引发了拖尾电流  $I_t$ ,如图 2.11 所示。

按照定义,拖尾时间  $t_t$  并不包括在关断时间  $t_{off}$  之内,但它却在相当程度上影响了关断损耗,原因是在这一期间内集电极和发射极已处于工作电压  $V_{CC}$  之下。

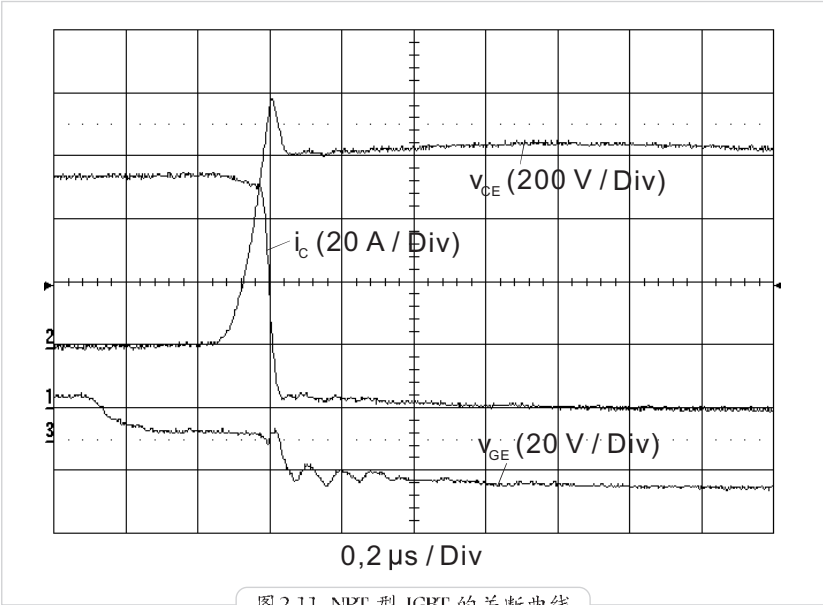


图 2.11 NPT 型 IGBT 的关断曲线

**单脉冲的开通能耗  $E_{on}$  和关断能耗  $E_{off}$**

由特性曲线图的“IGBT 单脉冲的开通能耗  $E_{on}$  和关断能耗  $E_{off}$  与集电极电流  $I_C$  的关系”可以得到  $E_{on}$  和  $E_{off}$  的典型值。

将该值与开关频率相乘，便可以得到相应的开关功率损耗：

$$P_{on} = f * E_{on} \text{ 以及 } P_{off} = f * E_{off}$$

在开通能耗  $E_{on}$  里已经考虑到了集成于功率模块内的续流二极管反向恢复电流尖峰的影响。如果将开通过程的功率曲线  $P_{on}$  对时间进行积分，直到电压  $V_{CE}$  达到工作电压  $V_{CC}$  的 3% 为止，便可以得到开通能耗。

关断能耗则包括了根据关断时间  $t_{off} = t_{d(off)} + t_r$  所对应的损耗以及在拖尾时间内（即集电极电流从负载电流的 10% 降到 1%）的拖尾电流损耗。

参数：工作电压、芯片温度  $T_j = 125^\circ\text{C}$ 、驱动电压、栅极串联电阻。

**IGBT 开关的芯片热阻  $R_{thjc}$**

芯片热阻  $R_{thjc}$  描述了 IGBT 芯片（下标 j）和模块底板（下标 c）之间的传热界面，表征了 IGBT 模块系统（通常由多个芯片并联而成）的静态散热能力。芯片热阻的大小与芯片的几何尺寸以及模块的封装形式有关。

在功耗一定时，芯片和外壳底板之间的温差  $\Delta T_{jc}$  可以由下式得出：

$$\Delta T_{jc} = T_j - T_{case} = P * R_{thjc}$$



### IGBT 模块的接触热阻 $R_{thch}$

接触热阻  $R_{thch}$  描述了模块底板（下标 c）和散热器（下标 h）之间的传热界面。它表征了 IGBT 模块（可能由数个 IGBT 开关所组成）的静态散热能力。它的大小取决于模块的几何尺寸、模块底板和散热器的表面状况、模块与散热器之间的导热层（导热脂、导热膜、压印）的厚度与性能、以及紧固螺栓的上紧力矩。

在功耗一定时，外壳底板与散热器之间的温差  $\Delta T_{ch}$  可以由下式得出：

$$\Delta T_{ch} = T_{case} - T_h = P_n * R_{thch}$$

如果模块不含底板（例如 SEMITOP、SKiiPPACK、MiniSKiiP），则  $R_{thjc}$  和  $R_{thch}$  便无法分开测量。因此对于这一类模块来说，可以用模块的每个 MOSFET 单元的  $R_{thjh}$  来代替。温差的计算则可参考上述公式。

### 机械参数

除了封装形式以外，在参数表中通常还给出了下列机械参数：

**紧固螺栓的上紧力矩  $M_1$** （最小值和最大值），单位为 Nm 或 lb.in.；

**主回路端子的上紧力矩  $M_2$** （最小值和最大值），单位为 Nm 或 lb.in.；

**模块的重量  $w$** ，单位为 g；

**允许的振动加速度  $a$** ，单位为  $m \cdot s^{-2}$ 。

### 续流二极管／反向二极管

#### 反向二极管的通态电压 $V_F$ （反向的发射极—集电极电压 $V_{EC}$ ）

当栅极—发射极回路短路时（ $V_{GE} = 0$ ），发射极与集电极之间的电压降（截止方向）。 $V_{EC}$  描述了与 IGBT 反向并联的续流二极管的通态特性。

参数：通态电流  $I_F$ 、壳温  $T_{case} = 25^\circ C$

#### 反向二极管的开启电压 $V_{(TO)}$ 与反向二极管的等效电阻 $r_T$

二极管的导通特性可以简单地用两个特征量，即开启电压和等效电阻，来近似地描述。开启电压表达了特性曲线与电压轴的交点，而等效电阻则表达了特性曲线的上升斜率。

#### 反向二极管的反向恢复时间 $t_{rr}$

在续流工作状态下，即在高的  $di_F/dt$  和高的截止电压  $V_R = V_{CC}$  条件下，集电极电流  $-I_C = I_F$  进行换流时，IGBT 的反向二极管的反向恢复时间。

注意： $t_{rr}$  对温度的依赖性极大（从  $25^\circ C$  到  $150^\circ C$  时约增加一倍）。

参数：通态电流  $I_F$ 、反向电压  $V_R$ 、换流速率  $-di_F/dt$ 、芯片温度  $T_J = 25^\circ C$  或  $150^\circ C$

#### 反向二极管的反向恢复电荷 $Q_{rr}$

在续流工作状态下，即在高的  $di_F/dt$  和高的截止电压  $V_R = V_{CC}$  条件下，集电极电流  $-I_C = I_F$  进行换流时，IGBT 的反向二极管的反向恢复电荷。

注意:  $Q_{rr}$  对温度的依赖性极大 (从 25°C 到 150°C 时约增加一倍)。

参数: 通态电流  $I_F$ 、反向电压  $V_R$ 、换流速率  $-di_F/dt$ 、芯片温度  $T_j = 25^\circ\text{C}$  或  $150^\circ\text{C}$

二极管的芯片热阻  $R_{thjc}$

芯片热阻  $R_{thjc}$  描述了二极管芯片 (下标 j) 和模块底板 (下标 c) 之间的传热界面。

2.3.3 特性曲线图

在这一节里, 我们将按照参数表的顺序, 介绍在 IGBT 模块参数表中所包含的特性曲线的一些要点。如果其中某些图在其他章节中还会被更详细地涉及, 则在此节中将只给出索引。

IGBT 模块耗散功率的最大定额  $P_{tot}$  与壳温  $T_{case}$  的关系

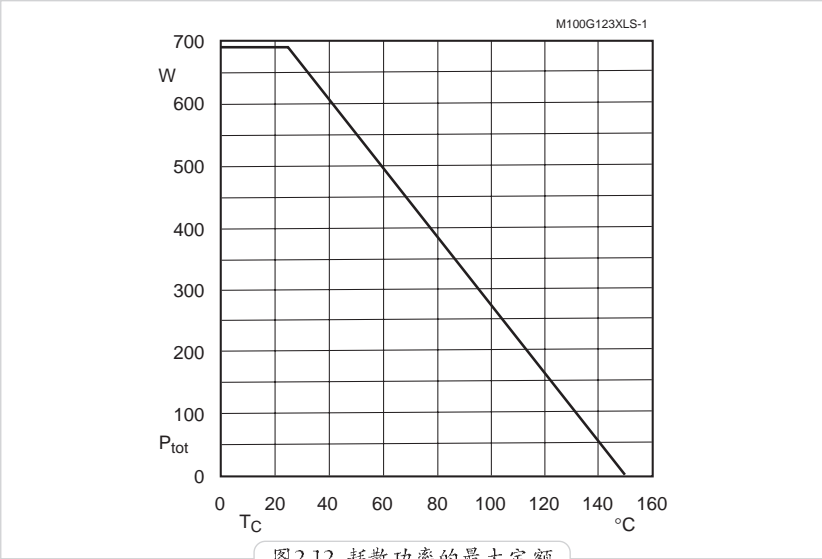


图2.12 耗散功率的最大定额

以  $T_{case} = 25^\circ\text{C}$  时所给定的临界值为起点, 该曲线描述了 IGBT (或续流二极管) 的耗散功率的最大定额随壳温增加而下降的关系:

$$P_{tot(25^\circ\text{C})} = (T_{jmax} - 25^\circ\text{C}) / R_{thjc}$$

IGBT 单脉冲的开通能耗  $E_{on}$ 、关断能耗  $E_{off}$  与集电极电流  $I_c$  的关系

图 2.13 显示了开通和关断能耗与不同的集电极电流的关系。这些值是在给定驱动参数的情况下, 通过一个带有阻感性负载的测量电路测得的。测量时, IGBT 处于高负荷状态 (例如, 芯片温度  $T_j = 125^\circ\text{C}$ 、工作电压  $V_{cc} = 600$  V)。

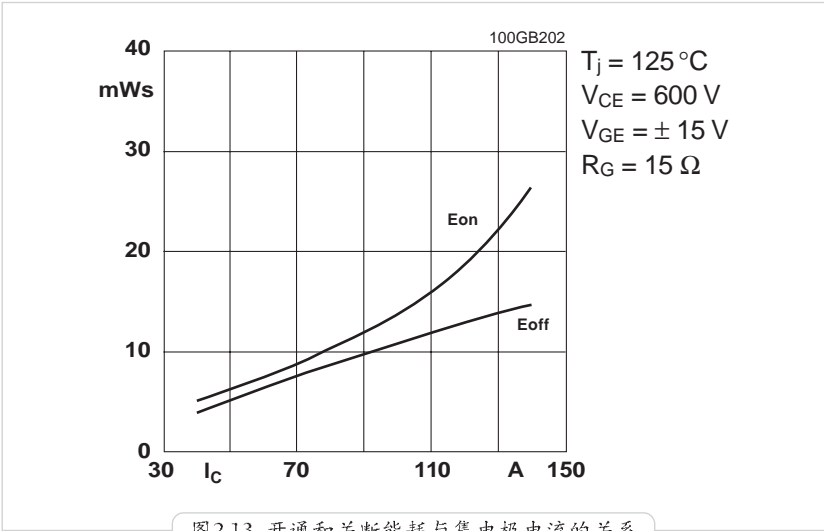


图2.13 开通和关断能耗与集电极电流的关系

此参数与开关频率相乘便可以得到相应的开关损耗：

$$P_{on} = f * E_{on}$$

$$P_{off} = f * E_{off}$$

在 IGBT 的特性参数值中给出了额定电流 ( $I_C@T_{case} = 80^{\circ}C$ ) 下的开通和关断能耗。

**IGBT 单脉冲的开通能耗  $E_{on}$ 、关断能耗  $E_{off}$  与栅极电阻  $R_G$  ( $R_{Gon}$ ,  $R_{Goff}$ ) 的关系**  
见 3.5.2 节

**开关工作状态下的最大安全工作区域 (SOA)**

如 1.2.3 节中所提到的，在硬开关工作状态下，IGBT 需要提供一个准正方形的安全工作区域  $i = f(u)$ 。

SOA (安全工作区域) 的曲线描述了各种临界的、不导致模块损坏的运行状态：

- 1. SOA 限定了开关运行、通态运行、单脉冲运行的状态；
- 2. RBSOA (反向偏置 SOA) 限定了周期性关断的运行状态；
- 3. SCSOA (短路 SOA) 限定了非重复性的短路关断 (见 3.6.2 节)。

SOA 的边界曲线为：

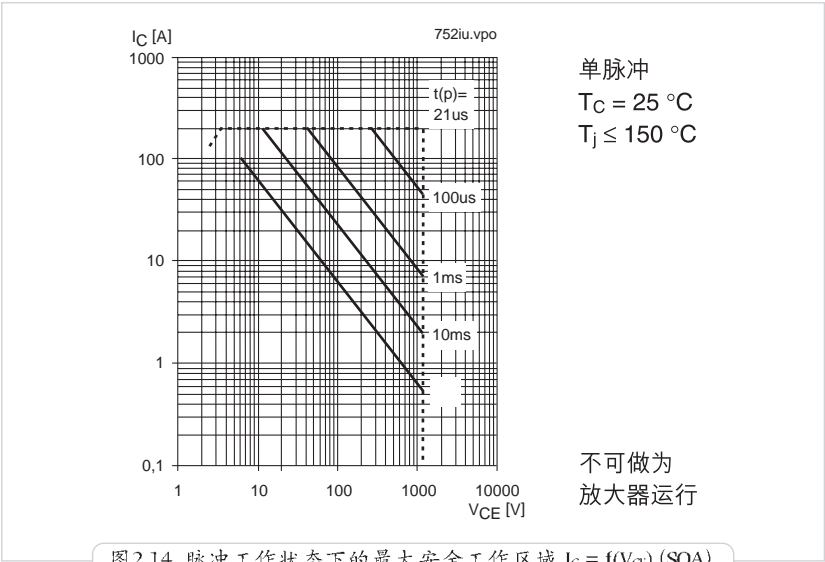
- 1. 最大允许的集电极电流 (水平边界)；
- 2. 最大允许的集电极－发射极电压 (垂直边界)；
- 3. 最大允许功耗或最高允许的芯片温度 (对角线)，见图 2.14。

脉冲工作状态下的最大安全工作区域 (SOA)

针对不同的脉冲宽度  $t_p$ , 图 2.14 以双对数图的形式显示了 IGBT 在开关和通态工作状态下的安全工作图  $I_C = f(V_{CE})$ 。

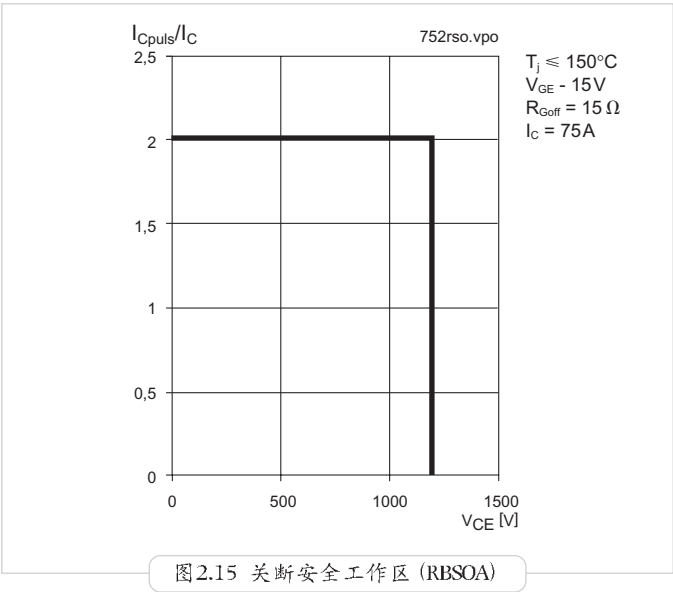
必须指出的是, 图中的临界值只适用于单脉冲和壳温  $T_c = 25^\circ\text{C}$  时。在这一单脉冲的作用下, IGBT 的芯片温度不得超过最高允许值  $T_j = 150^\circ\text{C}$ 。

安全工作区域图中的最下面一条对角线代表了最大允许的静态功耗。尽管如此, IGBT 模块也只能在开关期间被允许经过线性放大区 ( $V_{CE} > 20\text{V}$  或  $V_{GE} < 9\text{V}$ )。因为由芯片之间的制造偏差而引起的不对称和开启电压的负温度系数可能会引起系统发热的失衡, 所以不允许长时间运行在放大区域。



周期性关断运行时的最大安全工作区域

图 2.15 显示了 IGBT 在周期性关断运行时的最大允许工作区域。



在周期性关断运行时，IGBT 应该能够在最高结温  $T_{jmax}$  以及给定的驱动条件下硬性关断  $I_{CM}@T_C = 80^\circ\text{C}$ 。此时，芯片的  $V_{CE}$  不得超过  $V_{CES}$ （寄生电感以及驱动条件的影响见 3.4.1 节和 3.5.2 节）。

短路状态下的最大安全工作区域

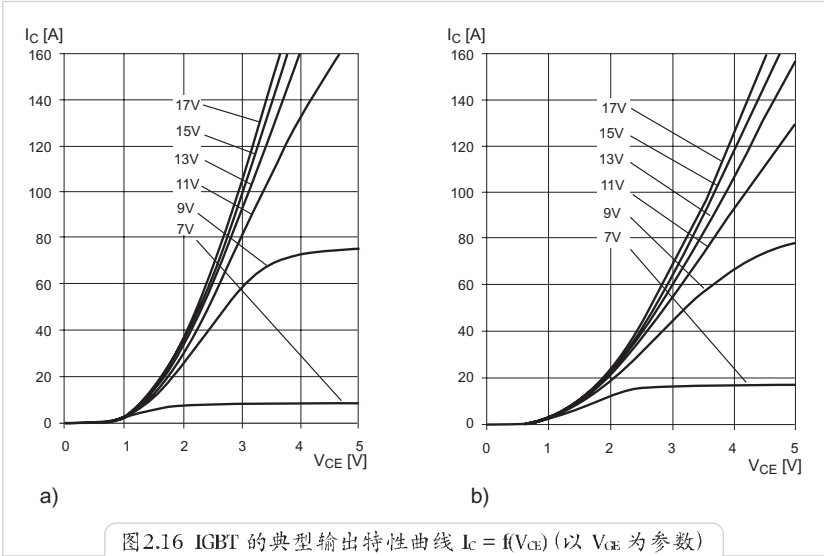
见 3.6.2 节

集电极电流的最大定额与芯片温度的关系。

见 3.6.2 节，类同图 2.23b

正向输出曲线  $I_C = f(V_{CE})$

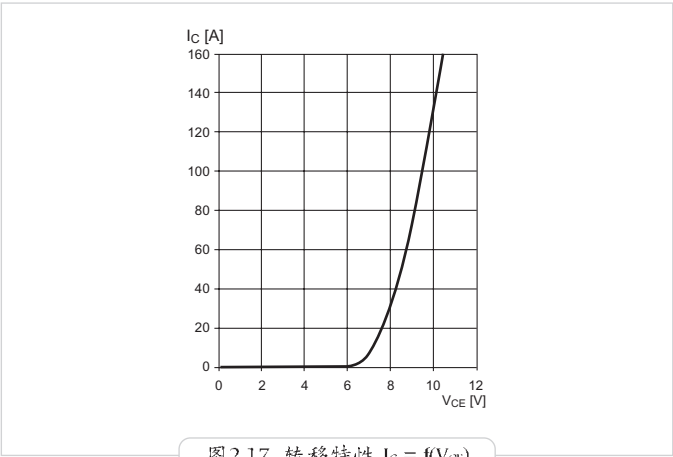
以  $V_{GE}$  为参数，图 2.16 显示了  $T_j = 25^\circ\text{C}$  和  $125^\circ\text{C}$  时 IGBT 的输出特性曲线（典型值），参阅 1.2.2.2 节和 2.6 节。



**转移特性  $I_C = f(V_{GE})$**

转移特性 (图 2.17) 描述了 IGBT 在主动区域 (线性工作区域) 内当  $V_{CE} = 20\text{V}$  和  $t_p = 80\mu\text{s}$  时的特性。此时, 集电极电流通过转移电导与栅极-发射极电压相耦合。

$$I_C = g_{fs} * (V_{GE} - V_{GE(th)})$$



栅极电荷特性

见 1.2.3 节

寄生电容与集电极 — 发射极电压的关系

见 1.2.3 节

开关时间与集电极电流的关系

图 2.18 包含了各种开关时间 (开通延迟时间  $t_{d(on)}$ 、上升时间  $t_r$ 、关断延迟时间  $t_{d(off)}$ 、下降时间  $t_f$ ) 与集电极电流  $I_C$  的典型关系曲线。此时的负载为感性, IGBT 工作在硬开关条件下。

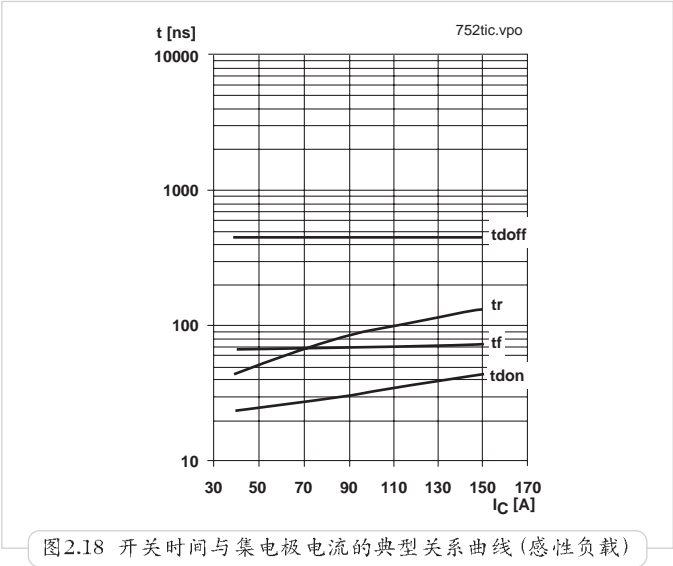


图2.18 开关时间与集电极电流的典型关系曲线(感性负载)

与  $I_C$  相比,  $t_r$  的增长略为快一些, 这表明了  $di_C/dt$  的增长小于  $I_C$  的增长。

开关时间与栅极电阻的关系

见 3.5.2 节

CAL 型续流二极管的通态特性

见 1.3.1.1 节

续流二极管的关断能耗

当续流二极管向 IGBT 换流时 (硬开关), 二极管的关断能耗  $E_{offD}$  与它关断前的电流  $I_F$  以及 IGBT 的开通速度有关, 图 2.19 显示了这一关系。IGBT 的开通速度由栅极电阻  $R_G$  所决定。

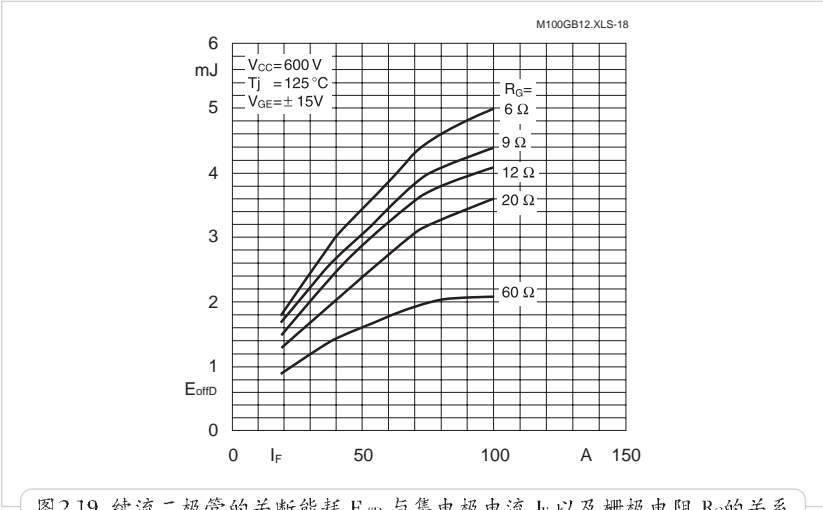


图2.19 续流二极管的关断能耗  $E_{off}$  与集电极电流  $I_F$  以及栅极电阻  $R_G$  的关系

正如所预期的那样，续流二极管的关断能耗随通态电流与换流速率的增加而增加，原因是存储电荷与反向恢复电流峰值都会增加(见1.3.1.3节)。

### IGBT 和续流二极管的动态热抗

见 3.2.2.3 节

### 续流二极管的反向恢复电流与通态电流的关系

图 2.20 显示了反向恢复电流的峰值  $I_{RRM}$  与关断前的通态电流  $I_F$  以及换流速率的典型特性。换流速率由栅极电阻  $R_G = R_{Gon}$  所决定。

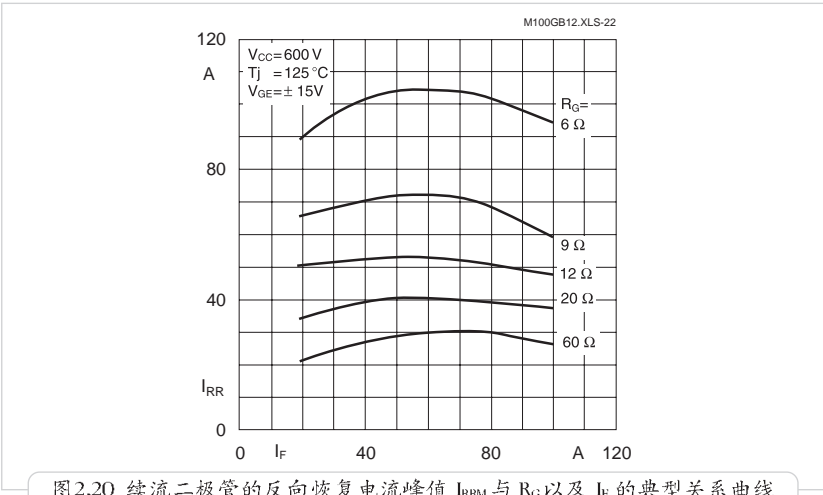


图2.20 续流二极管的反向恢复电流峰值  $I_{RRM}$  与  $R_G$  以及  $I_F$  的典型关系曲线



正如所预期的那样, IGBT 开通越快 (栅极开通电阻 $R_{Gon}$ 愈低), 则反向恢复电流的峰值越大。

当通态电流增加时, 反向恢复电流的峰值首先是增加。但当集电极电流已经较高时, 随着换流时间的延长, 使得 CAL 二极管内漂移区的载流子被逐渐中和。因此, 在大电流时,  $I_{RRM}$  反而重新下降。

续流二极管的反向恢复电流与  $di_F/dt$  的关系

图 2.21 显示了续流二极管的反向恢复电流与  $di_F/dt$  的典型特性。在图中所给定的条件下,  $di_F/dt$  的变化是由调节 IGBT 的栅极电阻  $R_G = R_{Gon}$  来实现的。

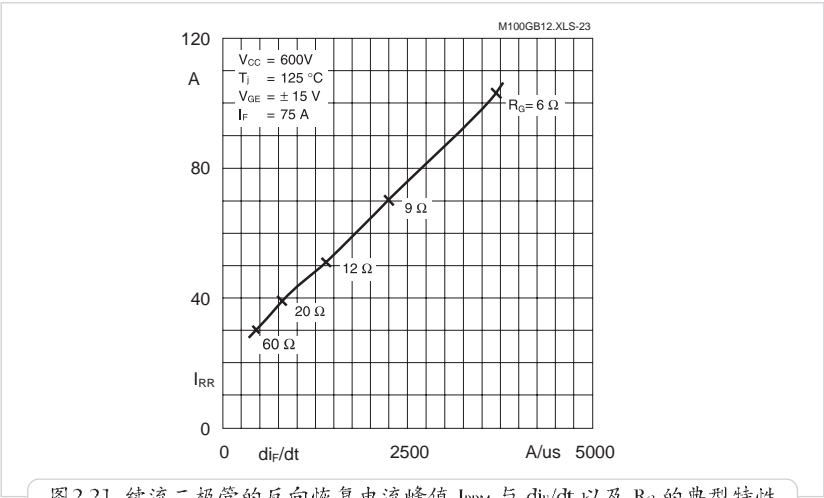


图2.21 续流二极管的反向恢复电流峰值  $I_{RRM}$  与  $di_F/dt$  以及  $R_G$  的典型特性

反向电流峰值与换流速率  $di_F/dt$  几乎呈线性关系。

续流二极管的反向恢复电荷与  $di_F/dt$  的关系

图 2.22 显示了不同集电极电流  $I_C$  下续流二极管的反向恢复电荷  $Q_{rr}$  与  $di_F/dt$  的典型特性曲线。另外, 图中还标出了栅极的开通电阻, 它被用来控制测量过程中的  $di_F/dt$ 。

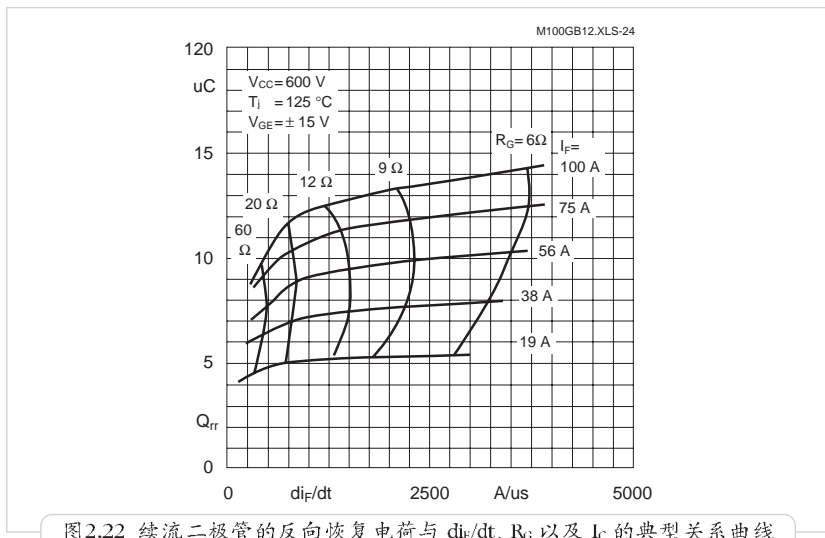


图2.22 续流二极管的反向恢复电荷与  $di_F/dt$ 、 $R_G$  以及  $I_C$  的典型关系曲线

与反向恢复电流的峰值一样，续流二极管的反向恢复电荷也是随着集电极电流和  $di/dt$  的增加而增加。在集电极电流较大时，这一增长要比在集电极电流较小时更快一些。

**负载短路状态下的集电极电流与栅极—发射极电压以及温度的关系**

见 3.6.2 节