

正确理解 IGBT 模块规格书参数

本文将阐述 IGBT 模块手册所规定的主要技术指标，包括电流参数、电压参数、开关参数、二极管参数及热学参数，使大家正确的理解 IGBT 模块规格书，为器件选型提供依据。本文所用参数数据以英飞凌 IGBT 模块 FF450R17ME3 为例。

一、电流参数

1. 额定电流 (IC nom)

Kollektor-Dauergleichstrom DC-collector current	T _C = 80°C, T _{vj} = 150°C T _C = 25°C, T _{vj} = 150°C	I _{C nom} I _C	450 605	A A
--	--	--------------------------------------	------------	--------

大功率 IGBT 模块一般是由内部并联若干 IGBT 芯片构成，FF450R17ME3 内部是 3 个 150A 芯片并联，所以标称值为 450A

额定电流可以用以下公式估算：

$$T_{jmax}-T_C = V_{CEsat} \cdot I_{C nom} \cdot R_{thJC}$$

V_{CEsat} 是 I_{C nom} 的函数，见规格书后图 1，采用线性近似 V_{CEsat}=(I_{C nom}+287)/310

$$T_{jmax}=150^{\circ}C, T_C=80^{\circ}C, R_{thJC} = 0.055K/W$$

计算得：I_{C nom}=500A

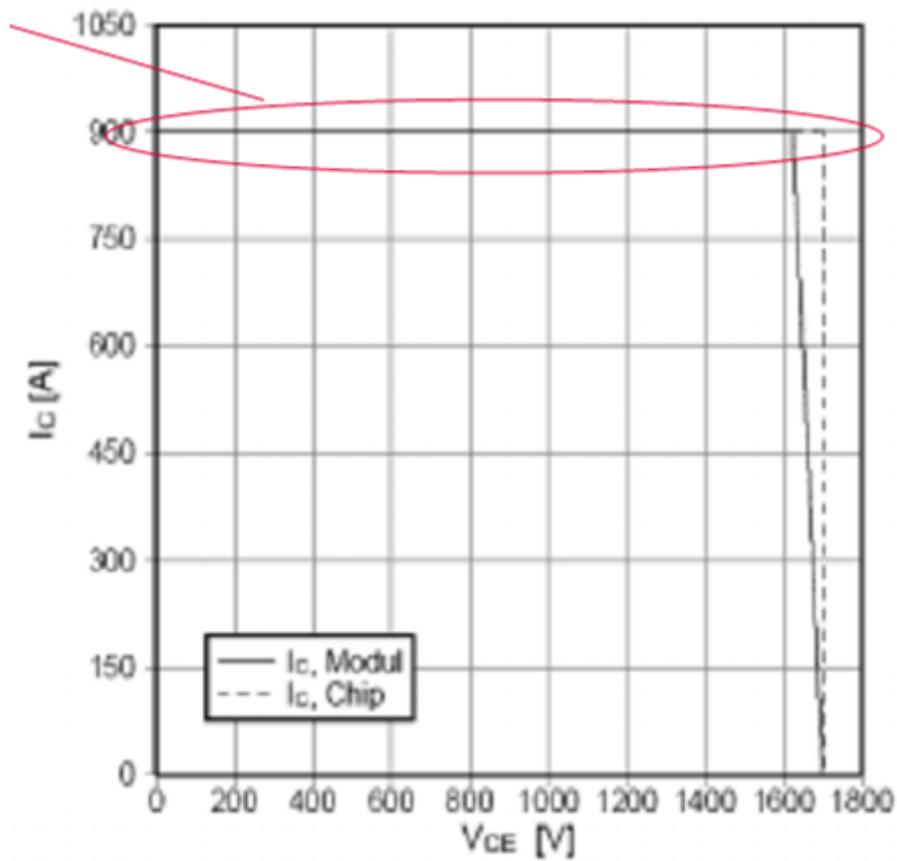
2. 脉冲电流 (I_{crm} 和 I_{rbsoa})

Periodischer Kollektor Spitzenstrom repetitive peak collector current	t _p = 1 ms	I _{CRM}	900	A
--	-----------------------	------------------	-----	---

I_{crm} 是可重复的开通脉冲电流（1ms 仅是测试条件，实际值取决于散热情况）

I_{rbsoa} 是 IGBT 可以关断的最大电流

所有模块的 I_{crm} 和 I_{rbsoa} 都是 2 倍额定电流值



3. 短路电流 ISC

短路条件: $t < 10 \mu s$, $V_{ge} < 15V$, $R_g > R_{gnom}$ (规格书中的值), $T_j < 125^\circ C$

Kurzschlussverhalten SC data	$V_{GE} \leq 15\text{ V}, V_{CC} = 1000\text{ V}$ $V_{CEmax} = V_{CES} \cdot L_{sCE} \cdot di/dt$	$t_p \leq 10\ \mu\text{s}, T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	I_{sc}	1800	A
---------------------------------	--	--	----------	------	---

短路坚固性

ØIGBT2 为平面栅 IGBT:5-8 倍 IC

ØIGBT3/IGBT4 为沟槽栅 IGBT:4 倍 IC

二、电压参数

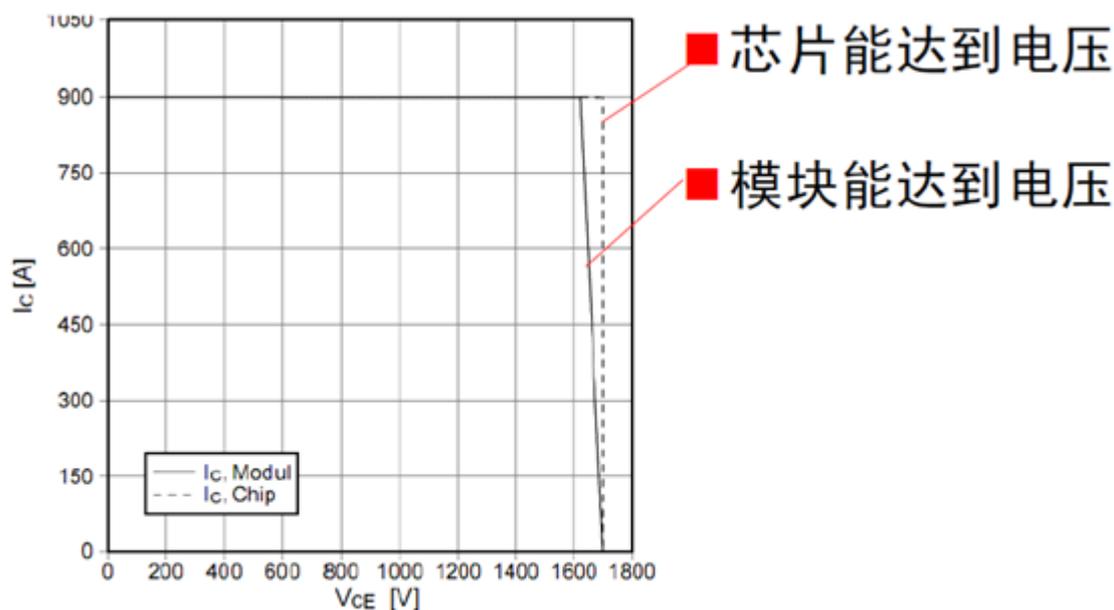
1. 集电极-发射极阻断电压 V_{ces}

Kollektor-Emitter-Sperrspannung collector-emitter voltage	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$	V_{ces}	1700	V
--	-----------------------------	-----------	------	---

测量 V_{ces} 时，G/E 两极必须短路

V_{ces} 为 IGBT 模块所能承受的最大电压，在任何时候 CE 间电压都不能超过这一数值，否则将造成去器件击穿损坏

V_{ces} 和短路电流 I_{sc} 一起构成了 IGBT 模块的安全工作区：RBSOA 图



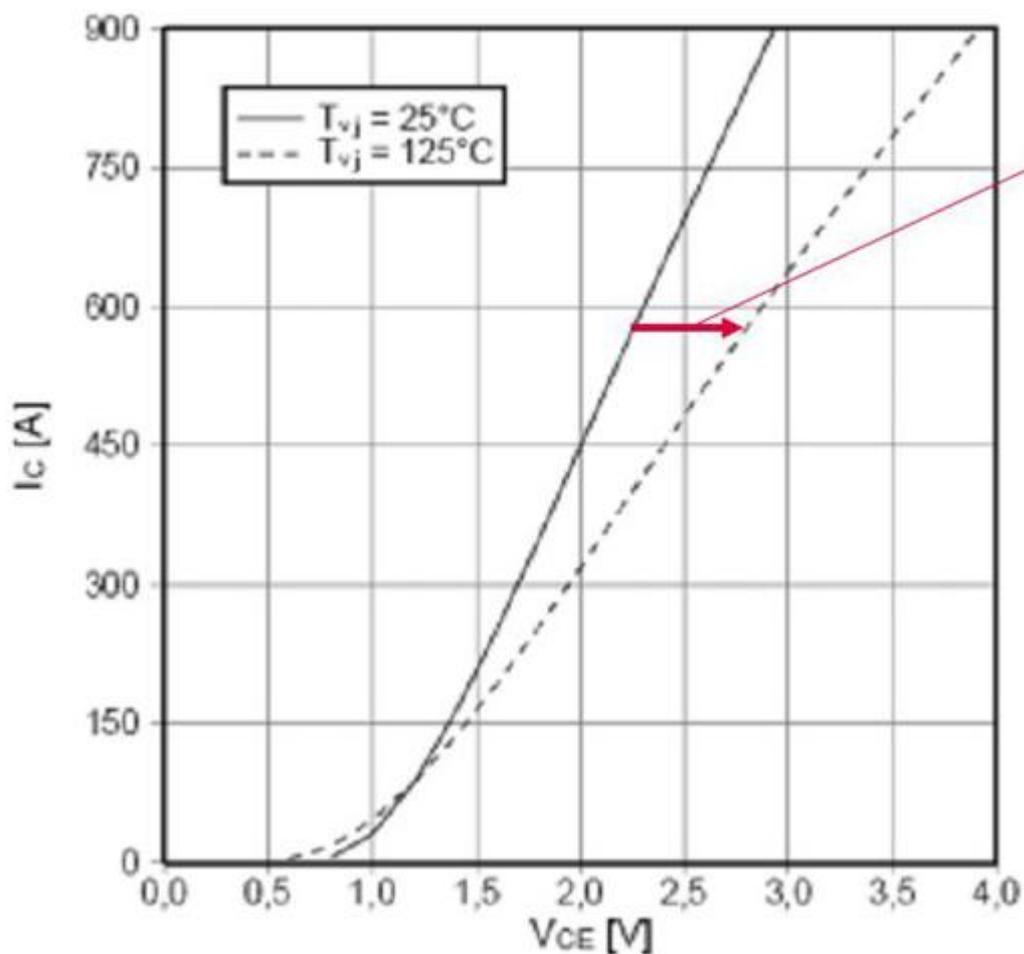
由于模块内部寄生电感 $\Delta V = di/dt \cdot L_{in}$ 在动态情况下，模块耐压和芯片耐压有所区别

2. 饱和压降 V_{CEsat}

Kollektor-Emitter Sättigungsspannung collector-emitter saturation voltage	$I_c = 450 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$ $I_c = 450 \text{ A}, V_{GE} = 15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	$V_{CE sat}$	2,00	2,45	V
--	--	---	--------------	------	------	---

IFX IGBT 的 V_{CEsat} 随温度的升高而增大，称为 V_{CEsat} 具有正温度系数，利于芯片之间实现均流

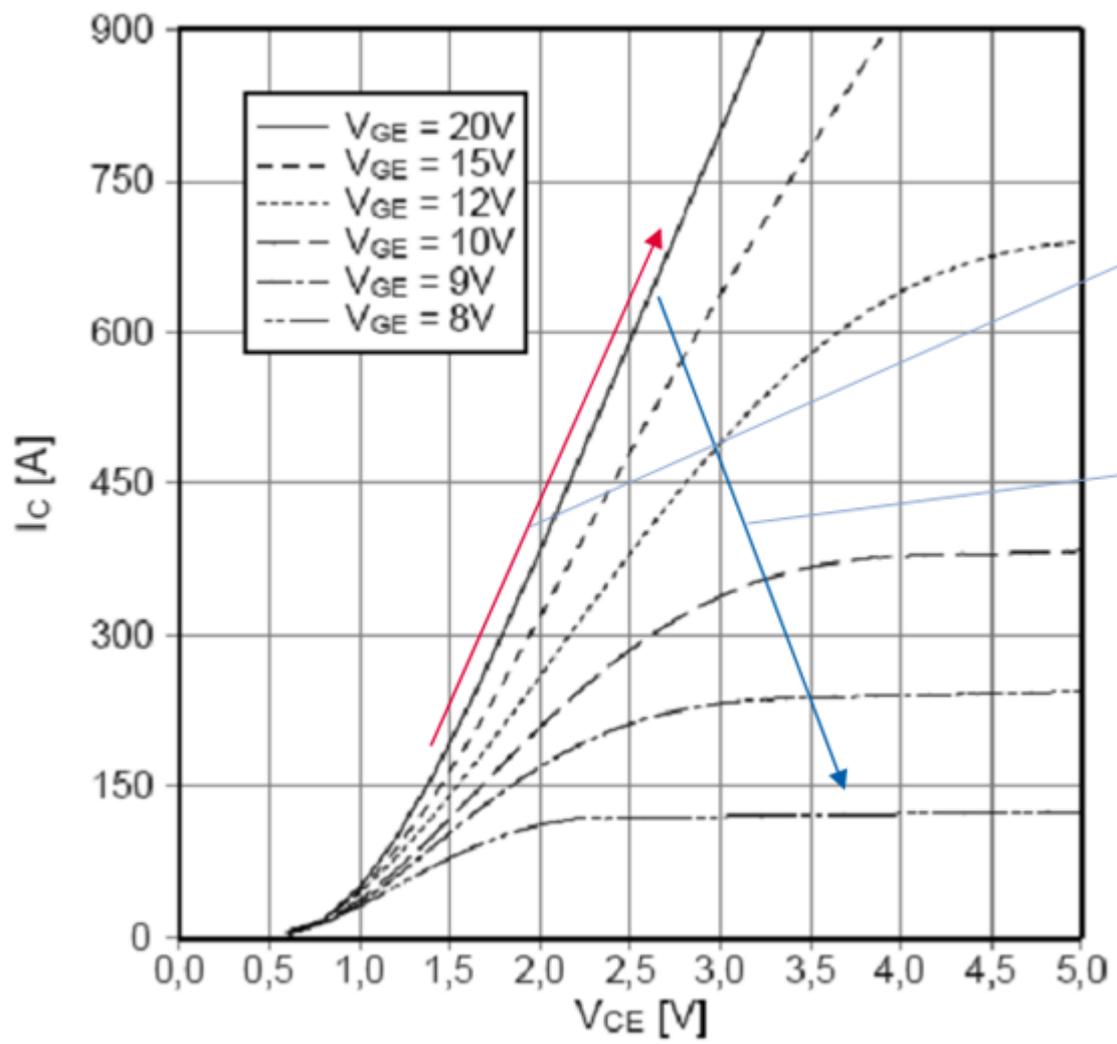
V_{CEsat} 是 I_C 的正向函数，随增大而增大 I_C

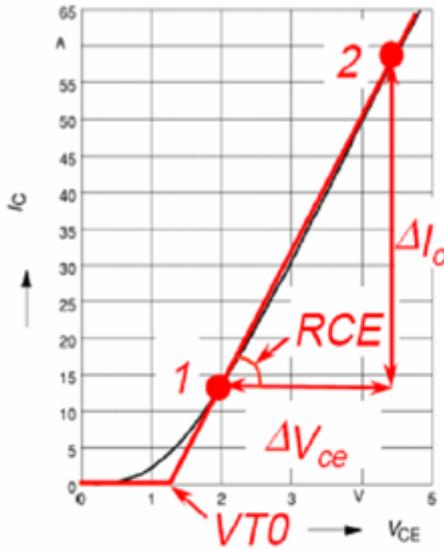


V_{CEsat} 的变化

V_{CEsat} 随 I_C 的增大而增大

V_{CEsat} 随 V_G 的减小而增大





$$V_{ce} = V_{T0} + R_{CE} \cdot I_c$$

$$R_{CE} = \frac{\Delta V_{ce}}{\Delta I_c} = \frac{V_{ce(2)} - V_{ce(1)}}{I_{c(2)} - I_{c(1)}}$$

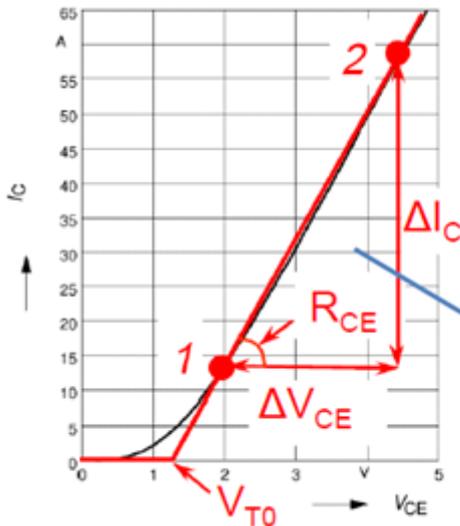
Basic data for simulation

$$P_{cond,IGBT} = \frac{1}{T_0} \int_0^{T_0/2} (V_{CE0} + r \hat{i} \sin(\omega t)) \cdot \hat{i} \sin(\omega t) \cdot \left(\frac{1}{2}(1 + m \sin(\omega t + \varphi))\right) dt$$

$$= \frac{1}{2} \left[V_{CE0} \cdot \frac{\hat{i}}{\pi} + r \cdot \frac{\hat{i}^2}{4} \right] + m \cdot \cos \varphi \cdot \left[V_{CE0} \cdot \frac{\hat{i}}{8} + \frac{1}{3\pi} r \hat{i}^2 \right]$$

-07

V_CEsat 值可以用来计算导通损耗



$$R_{CE} = \frac{\Delta V_{CE}}{\Delta I_C} = \frac{V_{CE(2)} - V_{CE(1)}}{I_{C(2)} - I_{C(1)}}$$

是计算功耗的基础数据

$$V_{CE} = V_{T0} + R_{CE} \cdot I_C$$

切点应该选择在工作点附近

对于 SPWM 控制, 导通损耗是:

$$P_{cond,IGBT} = \frac{1}{2} \left(V_{T0} \cdot \frac{I_P}{\pi} + R_{CE} \cdot \frac{I_P^2}{4} \right) + m \cdot \cos \varphi \cdot \left(V_{T0} \cdot \frac{I_P}{8} + \frac{1}{3\pi} R_{CE} \cdot I_P^2 \right)$$

m: 调制因子; I_P: 输出电流; cosφ: 功率因数

三、开关参数

1. 内部门极电阻 R_{Gint}

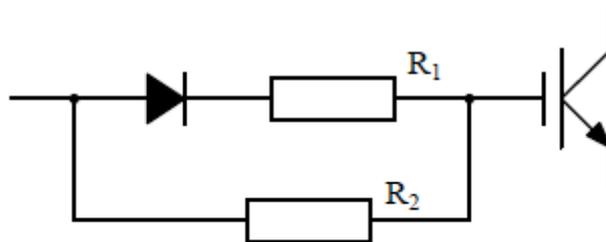
Interner Gatewiderstand internal gate resistor	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$	R_{Gint}	1,7	Ω
---	-------------------------------	------------	-----	----------

为了实现模块内部芯片的均流，模块内部集成了内部门极电阻。在计算驱动器峰值电流的时候，这个电阻值应算为门极总电阻的一部分。

外部门极电阻是客户设定的，它影响 IGBT 的开关速度。

$I_C = 450 \text{ A}, V_{CE} = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{Gon} = 3,3 \Omega$	$T_{vj} = 25^{\circ}\text{C}$ $T_{vj} = 125^{\circ}\text{C}$
--	---

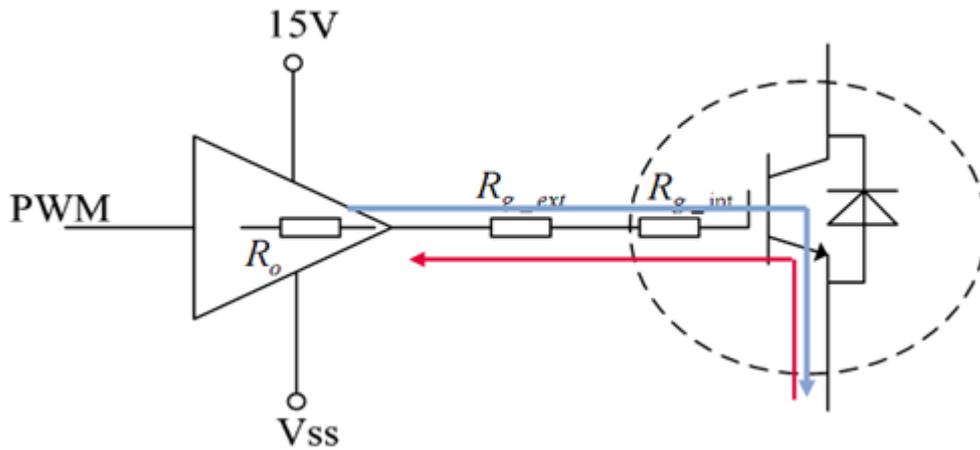
推荐的 R_{Gext} 最小值在开关参数测试条件中给出客户可以使用不同的 R_{Gon} 和 R_{Goff}



$$R_{Gon} = R_1 // R_2, R_{Goff} = R_2$$

最小 R_{gon} 受限于开通 di/dt , R_{Goff} 最小受限于关断 dv/dt 。RG 过小会引起震荡而损坏 IGBT

R_{Gext} 的取值



IGBT 要求的 R_{Gext} 的最小值

驱动器要求的 R_{Gext} 的最小值

$$\frac{15 - V_{ss}}{R_o + R_{g_ext} + R_{g_int}} \leq \frac{15 - (-15)}{R_{g_datasheet} + R_{g_int}}$$

$$\frac{15 - V_{ss}}{R_o + R_{g_ext} + R_{g_int}} \leq I_{o\max}$$

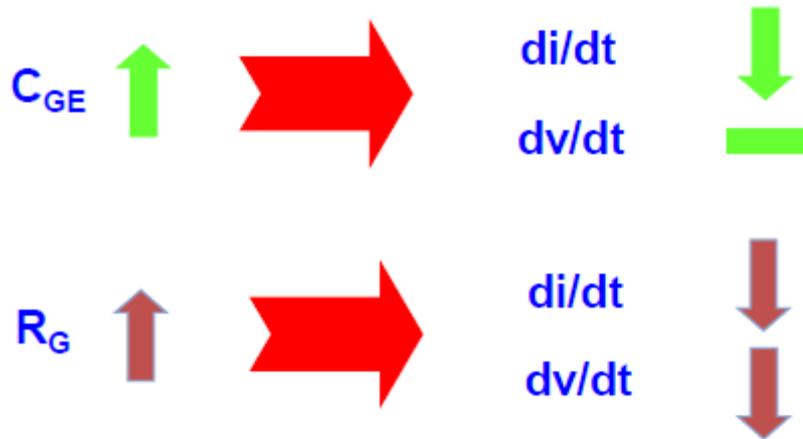
2. 外部门极电容(CGE)

为了控制高压 IGBT 的开启速度，推荐使用外部门极电容 CGE

$I_C = 800 \text{ A}$, $V_{CE} = 1800 \text{ V}$, $di/dt = 4200 \text{ A}/\mu\text{s}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $L_S = 60 \text{ nH}$ $R_{Gon} = 3,0 \Omega$, $C_{GE} = 220 \text{ nF}$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$
---	---

有了 CGE，开启过程的 di/dt 和 dv/dt 可以被分开控制，即可以用更小的 RG；

从而实现了低的开关损耗和较低的开通 di/dt



3. 门极电荷(QG)

Gateladung gate charge	$V_{GE} = -15 \text{ V} \dots +15 \text{ V}$	Q_g	5,10	μC
---------------------------	--	-------	------	---------------

QG 用来计算驱动所需功率，为 V_{GE} 在 +/-15V 时的典型值

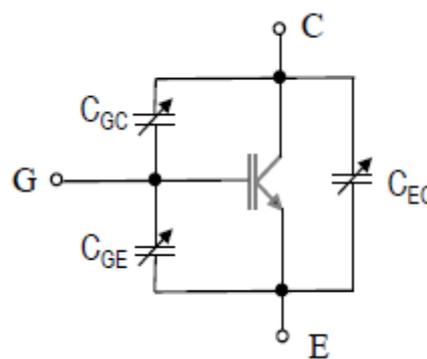
4. Cies, Cres

Eingangskapazität input capacitance	$f = 1 \text{ MHz}, T_{vj} = 25^\circ\text{C}, V_{CE} = 25 \text{ V}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	C_{ies}	40,5	nF
Rückwirkungskapazität reverse transfer capacitance	$f = 1 \text{ MHz}, T_{vj} = 25^\circ\text{C}, V_{CE} = 25 \text{ V}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	C_{res}	1,30	nF

$C_{ies} = C_{GE} + C_{GC}$: 输入电容 (输出短路) $C_{oss} = C_{GC} + C_{EC}$: 输出电容 (输入短路)
 $C_{res} = C_{GC}$: 反向转移电容(米勒电容) 频率 f , 所需的驱动功率:

$$P = Q_g \cdot \Delta V_{GE} \cdot f$$

$$P = C_{ies} \cdot 5 \cdot \Delta V_{GE}^2 \cdot f$$



5. 开关时间(tdon, tr, tdoff, tf)

Einschaltverzögerungszeit (ind. Last) turn-on delay time (inductive load)	$I_C = 450 \text{ A}, V_{CE} = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{D(on)} = 3,3 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	$t_{d(on)}$	0,28 0,30	μs μs
Anstiegszeit (induktive Last) rise time (inductive load)	$I_C = 450 \text{ A}, V_{CE} = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{D(on)} = 3,3 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	t_r	0,08 0,10	μs μs
Abschaltverzögerungszeit (ind. Last) turn-off delay time (inductive load)	$I_C = 450 \text{ A}, V_{CE} = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{D(off)} = 3,3 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	$t_{d(off)}$	0,81 1,00	μs μs
Fallzeit (induktive Last) fall time (inductive load)	$I_C = 450 \text{ A}, V_{CE} = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$ $R_{D(off)} = 3,3 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	t_f	0,18 0,30	μs μs

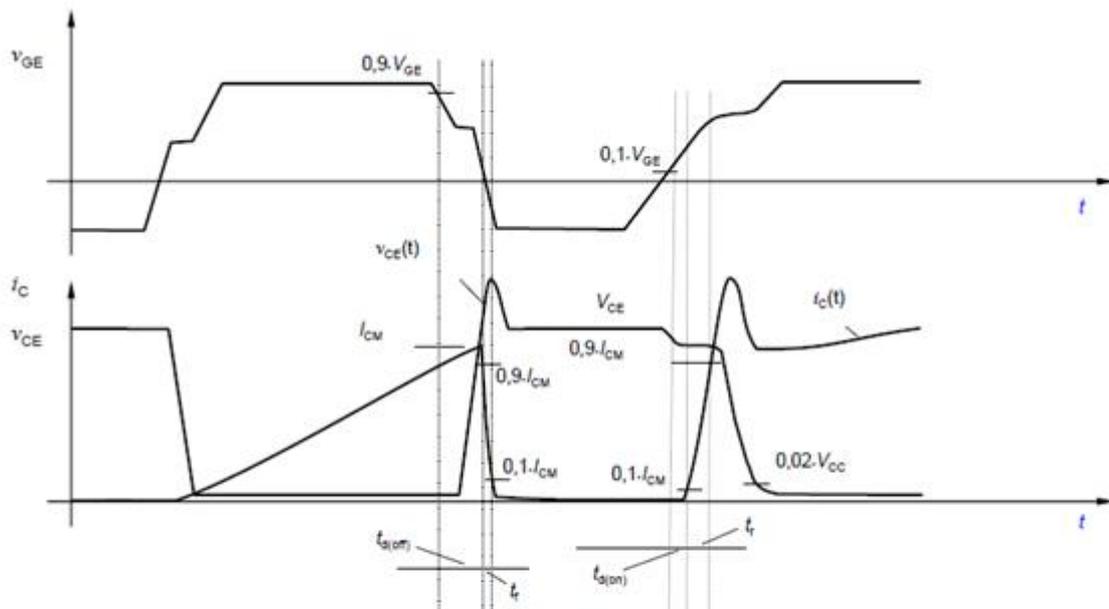
开关时间很大程度上受 $I_G(RG)$ 、 I_C 、 V_{GE} 、 T_j 等参数影响，这些值可用来计算死区时间。

$$t_{DT} = (((t_{doff\ max} + t_{f\ max}) - t_{don\ min}) + t_{PHL\ max} - t_{PLH\ min})) * 1.5$$

$t_{PHL\ max}$: driver output high to low delay
 $t_{PLH\ min}$: driver output low to high delay

$t_{PHL\ max}$: 驱动输入高到低的延时

$t_{PLH\ min}$: 驱动输入低到高的延时



• $t_{d(off)}$:
90% V_{GE} to 90% I_{CM}

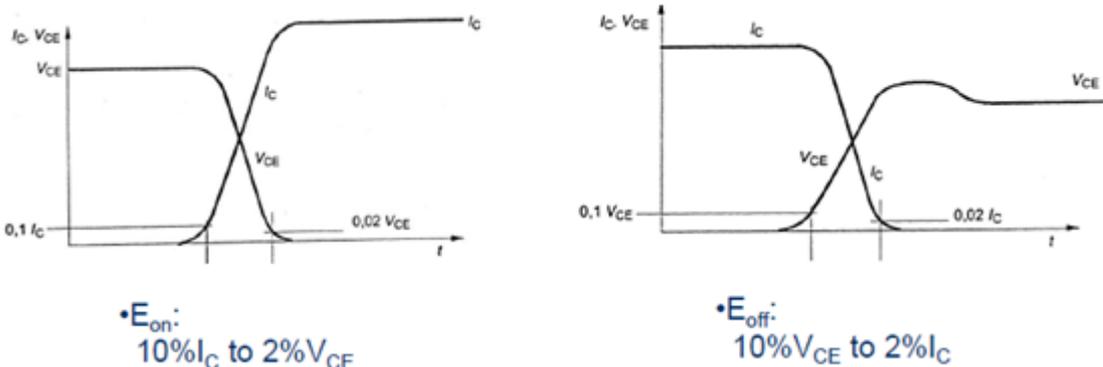
• t_f :
90% I_{CM} to 10% I_{CM}

• t_r :
10% I_{CM} to 90% I_{CM}

• $t_{d(on)}$:
10% V_{GE} to 10% I_{CM}

6. 开关参数(Eon, Eoff)

Einschaltverlustenergie pro Puls turn-on energy loss per pulse	$I_C = 450 \text{ A}$, $V_{CE} = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $L_S = 80 \text{ nH}$ $R_{Gon} = 3,3 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	E_{on}	96,5 140	mJ mJ
Abschaltverlustenergie pro Puls turn-off energy loss per pulse	$I_C = 450 \text{ A}$, $V_{CE} = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$, $L_S = 80 \text{ nH}$ $R_{Goff} = 3,3 \Omega$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	E_{off}	96,0 140	mJ mJ



英飞凌按照“10%-2%”积分限计算开关损耗,而有些其他厂商按照“10%-10%”计算,后者结果比前者会小 10 -25%

E_{on} , E_{off} 受 I_C , V_{CE} , 驱动能力(V_{GE} , I_G , R_G), T_j 和分布电感影响我们假设 E_{on} 和 E_{off} 正比于 I_C ,在 V_{CE_test} (900V)的 20%范围内正比于 V_{CE} , 则有:

$$E_{on} = E_{on_nom} * \frac{I_C}{I_{C_nom}} * \frac{V_{CE}}{V_{CE_test}}$$

$$E_{off} = E_{off_nom} * \frac{I_C}{I_{C_nom}} * \frac{V_{CE}}{V_{CE_test}}$$

IGBT 开关损耗:

$$P_{SW} = f_{SW} * (E_{on} + E_{off})$$

四、二极管参数

1. 阻断电压(VRRM)

Periodische Spitzenspannung repetitive peak reverse voltage	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$	V_{RRM}	1700	V
--	-----------------------------	-----------	------	---

类似于 V_{CES} at $T_j 25^\circ\text{C}$

2. 额定电流(IF)

Dauergleichstrom DC forward current		I_F	450	A
--	--	-------	-----	---

$$T_c = T_{jmax} - (V_{F,max} * I_F * R_{thjc})$$

3. 脉冲电流(ICRM)

Periodischer Spitzenstrom repetitive peak forward current	$t_p = 1 \text{ ms}$	I_{FRM}	900	A
--	----------------------	-----------	-----	---

类似于 I_{CRM} , 2倍 I_F .

4. 抗浪涌能力(I²t)

Grenzlastintegral I ² - value	$V_R = 0 \text{ V}, t_p = 10 \text{ ms}, T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	Pt	20000	A ² s
---	--	----	-------	------------------

这个值定义了二极管的抗浪涌电流的能力,用于选择输入熔断器。熔断器数值应该小于二极管的 I²t 值,熔断器的熔断速度应该小于 10ms,否则应该选择 I²t 值更大的二极管。我们在 125 °C定义 I²t 值,在 25 °C下它会大得多,通过 I²t 值可判断二极管容流能力。

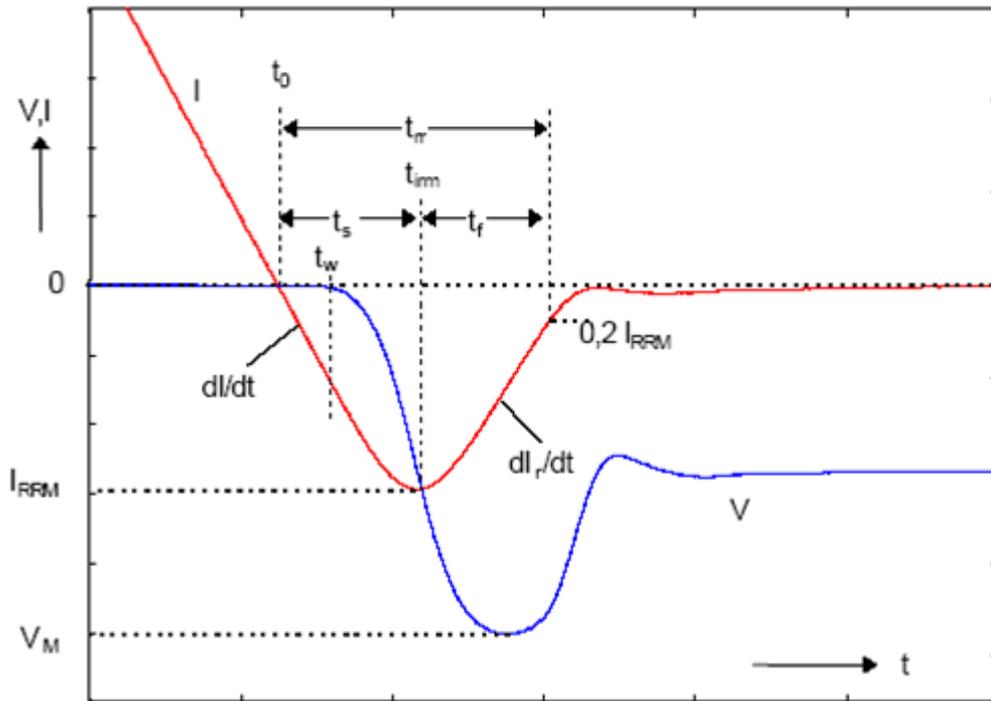
5. 正向压降(VF)

类似于 VCEsat 的定义,给出了 T_j=25°C 和 125°C时的值,用来计算二极管的导通损耗和普通的二极管不同,一些英飞凌二极管在电流大于一定数值区域显现电压正温度系数,这有利于二极管均流。

Durchlassspannung forward voltage	$I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$	V_F	1,80	2,20	V
	$I_F = 450 \text{ A}, V_{GE} = 0 \text{ V}$	$T_{vj} = 125^\circ\text{C}$		1,90		

6. 开关参数(IRM, Qr, Erec)

Rückstromspitze peak reverse recovery current	$I_F = 450 \text{ A}, -di/dt = 4450 \text{ A}/\mu\text{s}$ $V_R = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	I_{RM}	525 570		A A
Sperrverzögerungsladung recovered charge	$I_F = 450 \text{ A}, -di/dt = 4450 \text{ A}/\mu\text{s}$ $V_R = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	Q_r	115 195		μC μC
Abschaltenergie pro Puls reverse recovery energy	$I_F = 450 \text{ A}, -di/dt = 4450 \text{ A}/\mu\text{s}$ $V_R = 900 \text{ V}$ $V_{GE} = -15 \text{ V}$	$T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 125^\circ\text{C}$	E_{rec}	60,5 110		mJ mJ

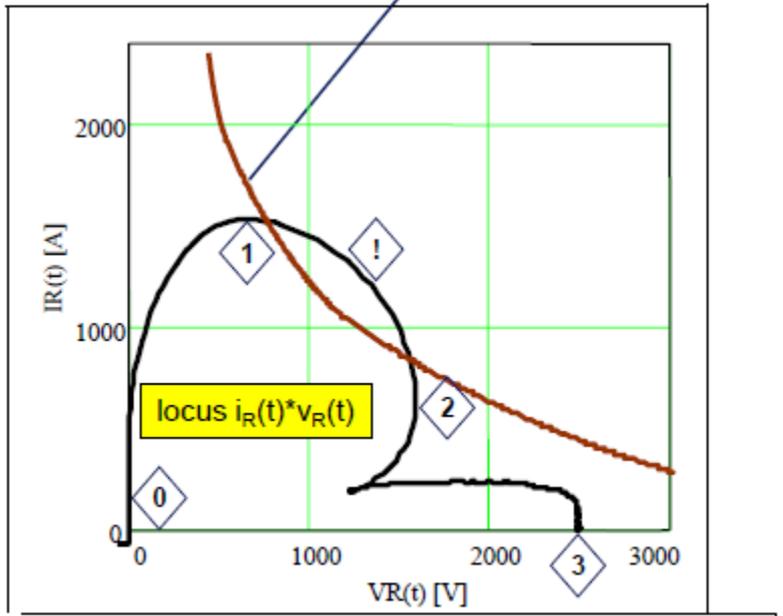
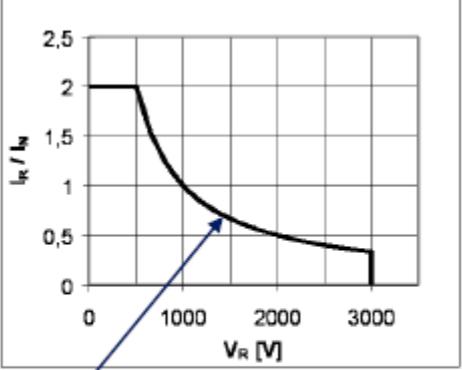
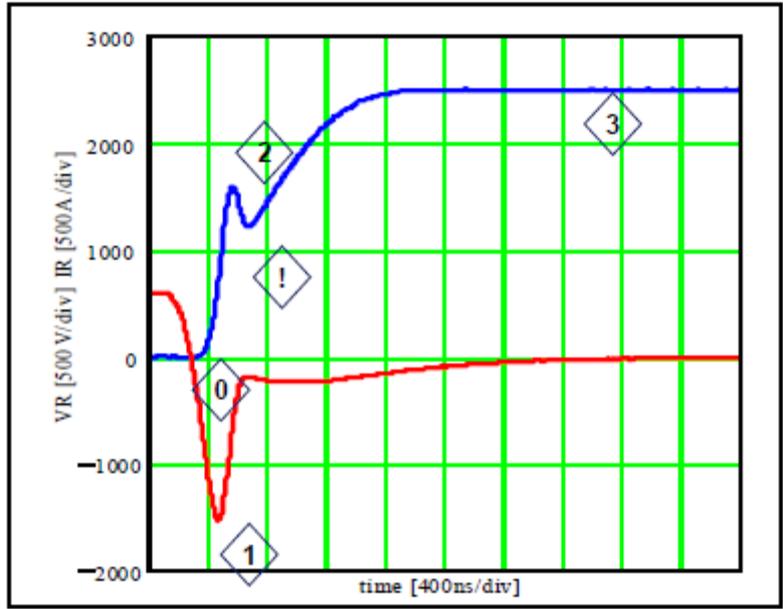


二极管反向恢复受 IGBT 的开通 di/dt , I_C , T_j 等因素影响很大 I_{RM} 和 Q_r 仅为测试典型值, E_{rec} 用来计算二极管的开关损耗

$$E_{rec} = E_{rec_nom} * \frac{I_C}{I_{C_nom}} * \frac{V_R}{V_{R_test}}$$

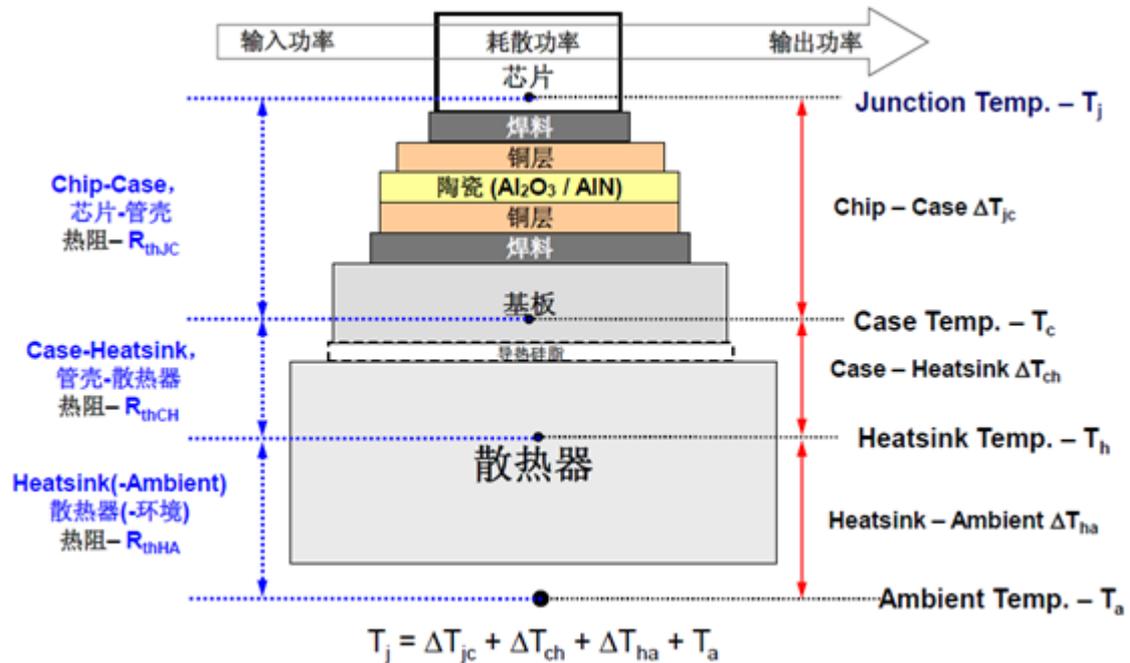
7. 二极管 SOA

高压模块定义了二极管的安全工作区(SOA), 不仅是峰值电流和电压, 还包括峰值功率。瞬时峰值功率一定不能超过安全工作区曲线限定的最大值。



五、热学参数

1. 热阻



2. 每个 IGBT 的 Rth

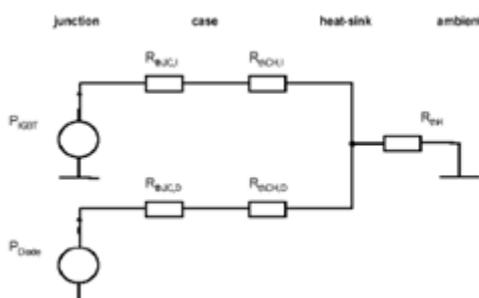
Innerer Wärmewiderstand thermal resistance, junction to case	pro IGBT per IGBT	R_{thJC}			0,055	K/W
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro IGBT / per IGBT $\lambda_{Paste} = 1 \text{ W/(m·K)} / \lambda_{Grease} = 1 \text{ W/(m·K)}$	R_{thCH}		0,028		K/W

3. 每个二极管 Rth

Innerer Wärmewiderstand thermal resistance, junction to case	pro Diode per diode	R_{thJC}			0,10	K/W
Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro Diode / per diode $\lambda_{Paste} = 1 \text{ W/(m·K)} / \lambda_{Grease} = 1 \text{ W/(m·K)}$	R_{thCH}		0,05		K/W

4. 模块 Rth

Übergangs-Wärmewiderstand thermal resistance, case to heatsink	pro Modul / per module $\lambda_{Paste} = 1 \text{ W/(m·K)} / \lambda_{Grease} = 1 \text{ W/(m·K)}$	R_{thCH}		0,009		K/W
---	--	------------	--	-------	--	-----

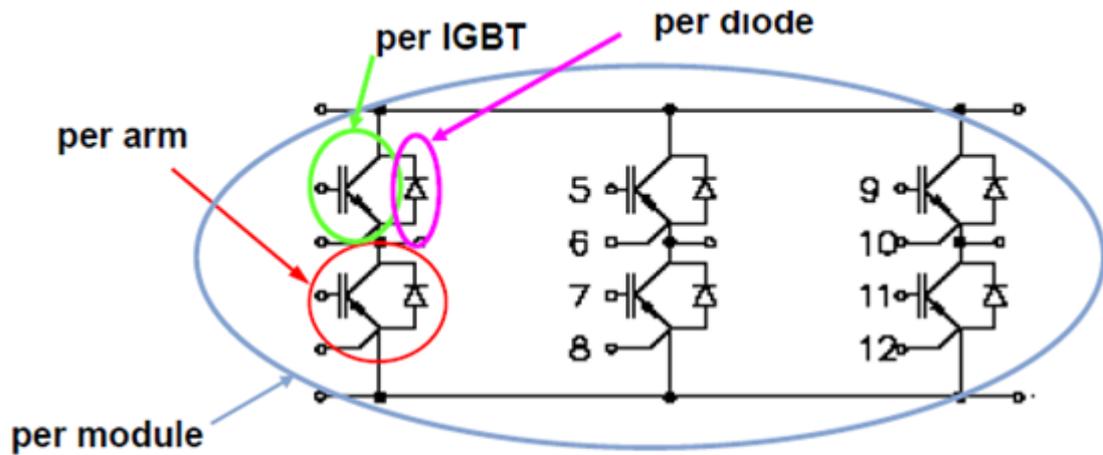


假设散热器是等温的:

$$T_h = T_a + P_{tot} * R_{thHA}$$

$$T_{j_IGBT} = T_h + P_{IGBT} * (R_{thJC_IGBT} + R_{thCH_IGBT})$$

$$T_{j_Diode} = T_h + P_{Diode} * (R_{thJC_Diode} + R_{thCH_Diode})$$



$$R_{thCH_arm} = R_{thCH_module} * n$$

$$R_{thCH_arm} = R_{thCH_IGBT} // R_{thCH_Diode}$$

n 是一个module 中的 arms 数量

可以看出内部各器件的热阻之间是并联关系，如果给出每个模块的热阻 R_{thCH} ，我们可以计算每个 IGBT 和二极管的热阻：

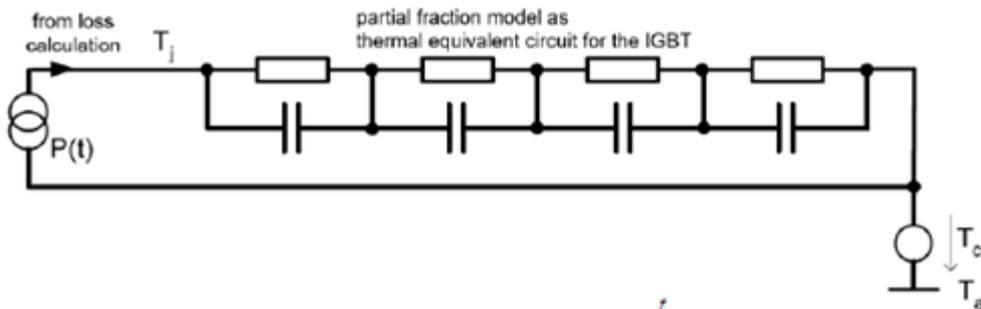
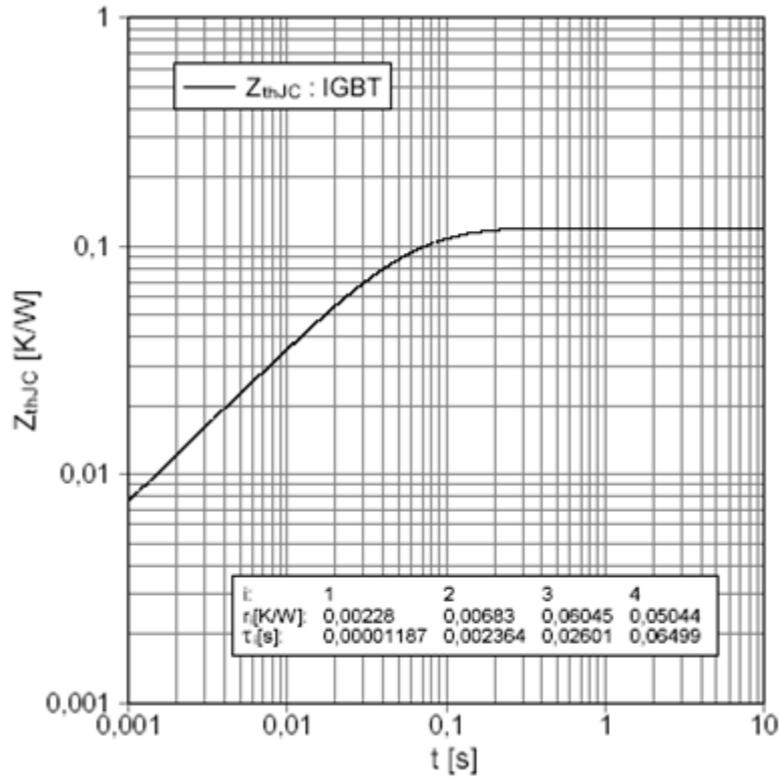
$$R_{thCH_IGBT} = \frac{R_{thJC_IGBT} + R_{thJC_Diode}}{R_{thJC_Diode}} * R_{thCH_module}$$

$$R_{thCH_Diode} = \frac{R_{thJC_IGBT} + R_{thJC_Diode}}{R_{thJC_IGBT}} * R_{thCH_module}$$

5. 瞬态热阻抗(Z_{thJC})

瞬态热阻抗用来计算瞬时结温 T_j ，如果 IGBT 模块有短时的开关动作，则需要用瞬态热阻抗计算其温度分布。

我们把芯片的瞬态热阻抗模型分为四个部分，每部分用一个表达式表示。四部分的系数在规格书中列出。



$$Z_{th,RCi} = R_{th,i} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}}\right)$$

$$Z_{thJC} = Z_{th,RC1} + Z_{th,RC2} + Z_{th,RC3} + Z_{th,RC4}$$

6. 绝缘测试

除了工业应用的 1200V 模块，其余所有 IGBT 模块都通了 IEC1287 标准的绝缘测试，1200V 模块符合 VDE0160/EN50178 标准。绝缘测试对模块来说是十分严峻的考验，以上标准规定：如果客户重复绝缘测试，绝缘耐压应降为原耐压值的 85%。

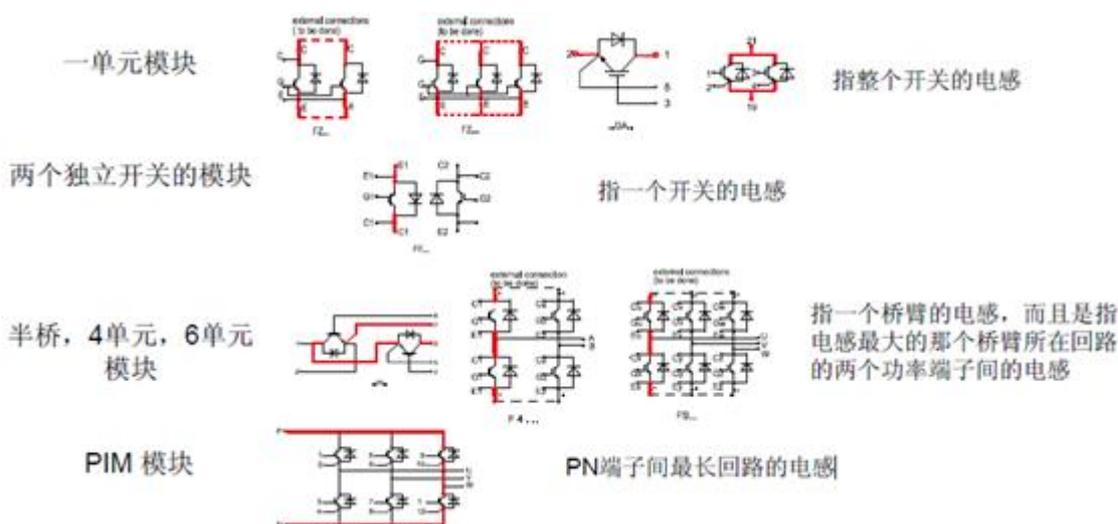
Isolations-Prüfspannung insulation test voltage	RMS, f = 50 Hz, t = 1 min.	V _{isol}	2,5	kV
--	----------------------------	-------------------	-----	----

高压模块应用基于 IEC1287 标准的局部放电测试。这确保模块的长期可靠性。

7. 内部分布电感

Modulinduktivität stray inductance module		LsCE		20		nH
--	--	------	--	----	--	----

LsCE 是指模块功率端子间的内部分布电感，不同拓扑结构内部寄生电感的定义如下图：



8. 引线电阻(RCC' + EE')

Modulleitungswiderstand, Anschlüsse - Chip module lead resistance, terminals - chip	Tc = 25°C, pro Schalter / per switch	Rcc'+EE'		1,10		mΩ
--	--------------------------------------	----------	--	------	--	----

这个值是功率端子和芯片间连接引线的阻值，是一个桥臂在 Tc = 25°C时的典型值，大功率 IGBT 模块工作时，该电阻上也会产生相应的功耗，并产生一定的压降。