

时刻  $t_2$  时的结温增量:

$$\Delta T_{j2} = P_1 \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} \left[ 1 - \exp\left(-t_2/\tau_{thv}\right) \right] + (P_2 - P_1) \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} \left[ 1 - \exp\left(-\left(t_2 - t_1\right)/\tau_{thv}\right) \right] \quad (3.14)$$

时刻  $t_m$  时的结温增量:

$$\Delta T_j(t_m) = \sum_{\mu=1}^m (P_{\mu} - P_{\mu-1}) \cdot \sum_{v=1}^n R_{thv} \left[ 1 - \exp\left(-\left(t_m - t_{\mu-1}\right)/\tau_{thv}\right) \right] \quad (3.15)$$

以上公式中, 采用恒定的壳温作为参考点。

### 3.2.2.3 脉冲调制时的结温

处于周期性脉冲功耗负载下的平均和最大结温, 可由参数表中所给出的晶体管 and 二极管的用于周期性脉冲运行的  $Z_{thjC}$  曲线来计算。

图 3.11 以 SKM100GB123D 为例, 显示了模块中 IGBT 和二极管的相应曲线和在脉冲运行条件下电流和结温的曲线。

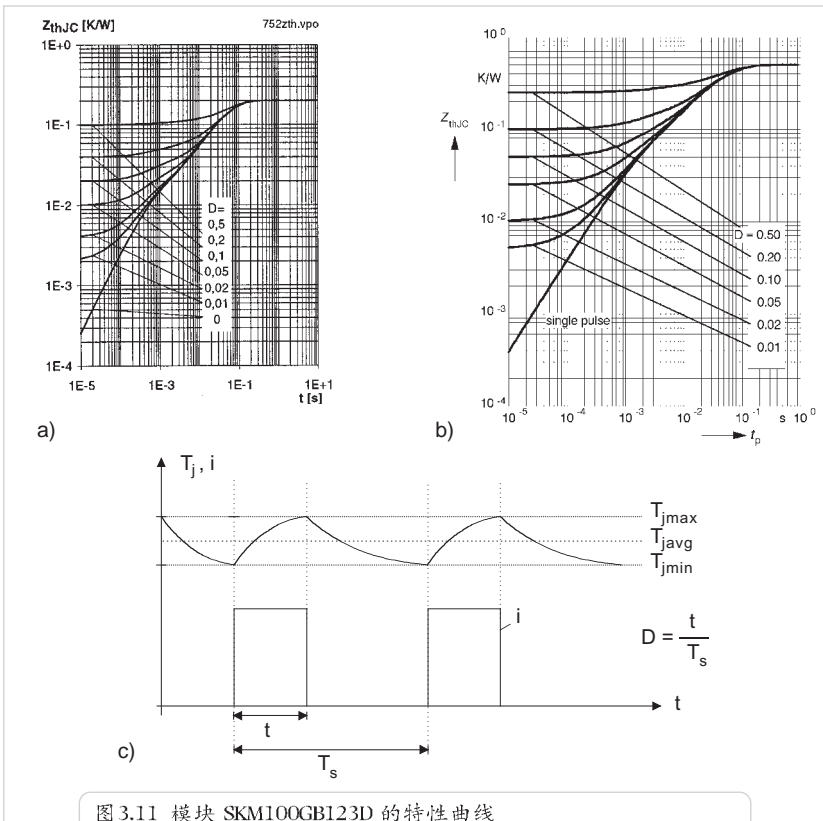


图 3.11 模块 SKM100GB123D 的特性曲线  
 a) IGBT 的动态热抗 b) 二极管的动态热抗 c) 电流和结温

平均结温  $T_{j\text{avg}}$  可以由静态热阻  $R_{\text{thjc}}$  与平均总功耗  $P_{\text{totavg}}$  相乘而得到。平均总功耗又可通过对一个周期  $T_s$  内每一个脉冲的能耗进行平均而得到。

$$P_{\text{totavg}} = f_s * (E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{fw}})$$

$$T_{j\text{avg}} = T_c + P_{\text{totavg}} * R_{\text{thjc}}$$

最大结温  $T_{j\text{max}}$  则可由脉冲运行时的热抗值  $Z_{\text{thjc}}$  与最大功耗  $P_{\text{totmax}}$  相乘而得到。最大功耗又可以通过对一个周期  $T_s$  内每一个脉冲的能耗就其开通时间  $t$  进行平均而得到：

$$P_{\text{totmax}} = (E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{fw}})/t$$

$$T_{j\text{max}} = T_c + P_{\text{totmax}} * Z_{\text{thjc}}$$

以 IGBT 模块 SKM100GB123D 为例：

例一：  $f_s = 10 \text{ kHz}$ ;  $T_s = 100 \mu\text{s}$ ;  $D_T = 0.2$ ;  $t = 20 \mu\text{s}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}; E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{fw}} = 25 \text{ mJ}$$

$$R_{\text{thjc}} = 0.2^\circ\text{C/W}, Z_{\text{thjc}} = 0.04^\circ\text{C/W} \text{ (见图 3.11a)}$$

结果：  $P_{\text{totavg}} = 250 \text{ W}$ ;  $P_{\text{totmax}} = 1250 \text{ W}$

$$T_{j\text{avg}} = 80^\circ\text{C} + 250 \text{ W} * 0.2^\circ\text{C/W} = \mathbf{130^\circ\text{C}}$$

$$T_{j\text{max}} = 80^\circ\text{C} + 1250 \text{ W} * 0.04^\circ\text{C/W} = \mathbf{130^\circ\text{C}}$$

例二：  $f_s = 2 \text{ kHz}$ ;  $T_s = 500 \mu\text{s}$ ;  $D_T = 0.2$ ;  $t = 100 \mu\text{s}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}; E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{fw}} = 25 \text{ mJ}$$

$$R_{\text{thjc}} = 0.2^\circ\text{C/W}, Z_{\text{thjc}} = 0.042^\circ\text{C/W} \text{ (见图 3.11a)}$$

结果：  $P_{\text{totavg}} = 50 \text{ W}$ ;  $P_{\text{totmax}} = 250 \text{ W}$

$$T_{j\text{avg}} = 80^\circ\text{C} + 50 \text{ W} * 0.2^\circ\text{C/W} = \mathbf{90^\circ\text{C}}$$

$$T_{j\text{max}} = 80^\circ\text{C} + 250 \text{ W} * 0.042^\circ\text{C/W} = \mathbf{90.5^\circ\text{C}}$$

例三：  $f_s = 2 \text{ kHz}$ ;  $T_s = 500 \mu\text{s}$ ;  $D_T = 0.2$ ;  $t = 100 \mu\text{s}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}; E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{fw}} = 125 \text{ mJ}$$

$$R_{\text{thjc}} = 0.2^\circ\text{C/W}, Z_{\text{thjc}} = 0.042^\circ\text{C/W} \text{ (见图 3.11a)}$$

结果：  $P_{\text{totavg}} = 250 \text{ W}$ ;  $P_{\text{totmax}} = 1250 \text{ W}$

$$T_{j\text{avg}} = 80^\circ\text{C} + 250 \text{ W} * 0.2^\circ\text{C/W} = \mathbf{130^\circ\text{C}}$$

$$T_{j\text{max}} = 80^\circ\text{C} + 1250 \text{ W} * 0.042^\circ\text{C/W} = \mathbf{132.5^\circ\text{C}}$$

例四：  $f_s = 50 \text{ Hz}$ ;  $T_s = 20 \text{ ms}$ ;  $D_T = 0.5$ ;  $t = 10 \text{ ms}$

$$T_c = 80^\circ\text{C}; E_{\text{on}} + E_{\text{off}} + E_{\text{fw}} = 5 \text{ J}$$

$$R_{\text{thjc}} = 0.2^\circ\text{C/W}, Z_{\text{thjc}} = 0.12^\circ\text{C/W} \text{ (见图 3.11a)}$$

结果：  $P_{\text{totavg}} = 250 \text{ W}$ ;  $P_{\text{totmax}} = 500 \text{ W}$

$$T_{j\text{avg}} = 80^\circ\text{C} + 250 \text{ W} * 0.2^\circ\text{C/W} = \mathbf{130^\circ\text{C}}$$

$$T_{j\text{max}} = 80^\circ\text{C} + 500 \text{ W} * 0.12^\circ\text{C/W} = \mathbf{140^\circ\text{C}}$$

在例一中采用了 IGBT 常用的开关频率 10kHz。由于 IGBT 在高频时的热抗较小，所以结温的平均值和最大值没有明显的不同。

在例二和例三中，开关频率降为 2kHz，但在例二中保持能耗不变，而在例三中则保持平均功耗和最大功耗不变。两个例子的计算结果显示出平均结温和最大结温有所不同。

可以简单地认为，当开关频率大于 3kHz 时，采用平均功耗与静态热阻所做出的计算已经足够精确。

例四显示了在很低的开关频率下，平均结温和最大结温有着明显的差异。

### 3.2.2.4 基波频率下的结温

器件的结温实际上是随着变流器输出电流的基波而变化的，但它的计算只有借助于计算机才能够有效地进行。

在计算中，先必须对每一个脉冲周期的电路和热路进行详细计算，然后才有可能对一个正弦半波进行积分，进而得到 IGBT 和续流二极管的结温。

图 3.12 显示了在 [194] 中介绍过的此类计算方法的原理方框图。

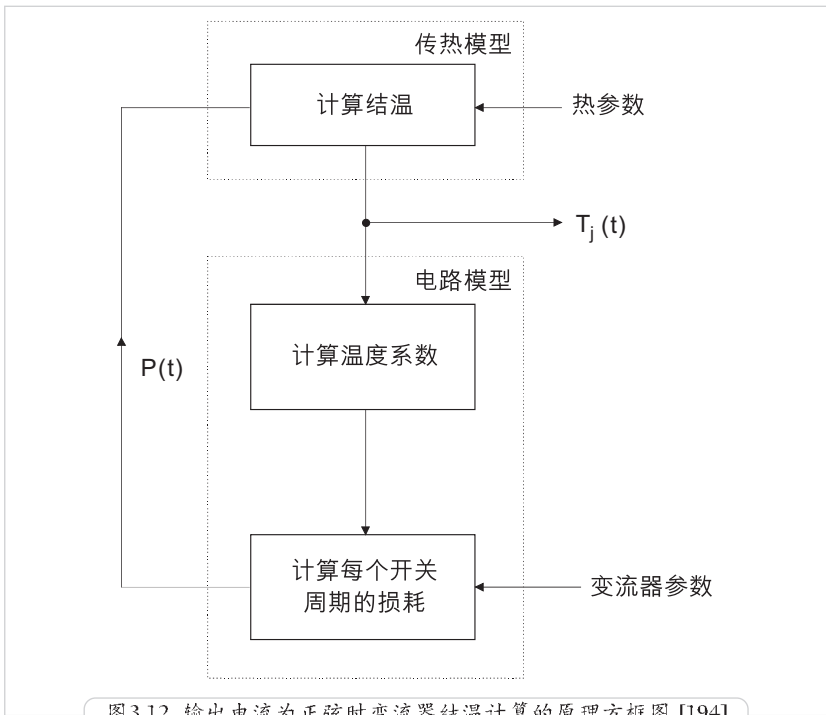


图 3.12 输出电流为正弦时变流器结温计算的原理方框图 [194]