

下面,我们将主要讨论自然空气冷却(自然对流)、强制空气冷却以及仅含一种冷却介质的水冷系统。其它更为复杂的冷却方式,象热管或蒸发冷却,一般来说需要针对具体的应用做特别的设计。另外,在功率模块中油冷也几乎很少被用到。

在材料费用和加工费用允许的情况下,散热器材料应该具有尽可能好的导热系数 λ 。因此,金属铝(纯铝 $\lambda = 247\text{W/K}\cdot\text{m}$)通常是优先被采用的材料。在要求特别高的场合有时也可以采用铜($\lambda = 398\text{W/K}\cdot\text{m}$)。

值得注意的是导热系数与制造工艺以及所采用的合金有很大的关系。在实际应用中,多数散热器的导热系数 λ 大致在 $150\text{W/K}\cdot\text{m}$ (铸造铝合金)和 $220\text{W/K}\cdot\text{m}$ (AlMgSi挤压成型)之间。

热量的扩散对散热器的散热效率有着可观的影响。因此,对散热器根部厚度的优化、翼片的数目、翼片的高度以及翼片的厚度之间比例的合适选取显得相当重要:

1. 散热器的根部是用于安装功率模块的、不含分岔的平面区域。该处与模块底板之间的温度梯度相对较小,有着明显的热扩散作用。
2. 对于空冷散热器来说,其大部分热量是通过翼片以辐射和传导的方式传递到周边环境的。而对于水冷散热器来说,这一作用是或多或少地由具有特定结构的水通道来实现的。

$$\text{由 } R_{\text{thja}} = \Delta T / P_{\text{tot}} = 1 / (\alpha * A)$$

$$\text{可得到 } Q = \alpha * A * \Delta T = P_{\text{tot}}$$

(以上 Q 为散发的热量, α 为传导系数, A 为传热面积, ΔT 为与环境温度之间的温度差, P_{tot} 为需要带走的损耗, R_{thja} 为散热器的热阻)。

如果采用较多的翼片,便可以增大传热面积,但前提是能够保证流体的顺畅流动,否则 α 会超比例下降。

从这一结论出发,自然冷却和强制冷却的优化条件便有所不同。

当功耗增加时,散热器温度增高,受热也就更加均匀。也就是说,有效热交换的面积在增加。在图 3.16 中还可以看到,增加散热器的长度也可以增加热交换的面积。

3.3.2 冷却装置的传热模型

在 1.4.2.2 节中介绍功率模块的热性能时,等效热路中的散热器是由一个 RC 元件来描述的(R_{thja} , Z_{thja})。

然而,当功耗在 $t = 0$ 时刻从 $P = 0$ 跳跃到 $P = P_m$ 时,散热器的动态热抗 Z_{thja} 随时间 t 而变化的特性曲线显示出其具有多个时间常数,如图 3.16 举例所示。系统总热抗的特性曲线 $Z_{\text{thja}}(t)$ 可以通过将功率模块的热抗与模块一散热器的热抗相迭加而得到。

根据下列公式，热抗曲线可以表达为一系列指数函数之和：

$$\Delta T(t) = P_m \cdot \sum_{\nu} R_{th\nu} \left[1 - \exp(-t/\tau_{th\nu}) \right]$$

和 $Z_{thha}(t) = \Delta T(t)/P_m$

即 $Z_{thha}(t) = \sum R_{th\nu} \left[1 - \exp(-t/\tau_{th\nu}) \right]$

元件的数目 ν 及 $R_{th\nu}$ 与 τ_{ν} 数值的选取与具体的物理结构无关。在计算工作量允许的前提下，它们应该尽可能地逼近曲线的走势。在 [266] 中介绍了一个迭代方法。

为了方便用户进行仿真计算，SEMIKRON 的技术手册给出了具有四个时间常数的热路模型 ($\nu=4$)。在下面的章节中，它们还将会被提到。

3.3.3 自然空冷（自然对流）

自然空冷多用于功耗低于 50W 的系统，以及不允许应用风扇或者器件的散热面积特别大的大功率系统。

一般来说，在自由对流时散热器的热阻往往大于功率模块的内部热阻。所以，芯片 (125°C) 与冷却空气 (45°C) 之间的温度差大部分降落在散热器上。在接近模块的散热器处，温度常常高于采用强制风冷时，例如，在 90°C 到 100°C 之间。由于功耗通常比较小，所以根部和翼片相对较薄，而且材料的传导系数对热性能的影响不是十分重要。翼片之间的距离应当足够地大，以便在空气的升力 (温度差/密度) 和空气的摩擦之间取得较好的折衷。将散热器黑化可以有效地改善热辐射性能。在安装面和环境空气之间的温差为 50K 时，黑化后的散热器热阻约降低 15% [266]。值得注意的是，上述表面处理并不影响模块底板和散热器之间的传热界面。

3.3.4 强制风冷

与自然空冷相比较，强制风冷时散热器的热阻可降低到 1/5 至 1/15。图 3.16 比较了两种冷却方式下的热抗曲线 $Z_{thha}(t)$ 。图中采用的 SEMIKRON 散热器为不同长度的 P16 型，稳态值为 R_{thha} 。