

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。

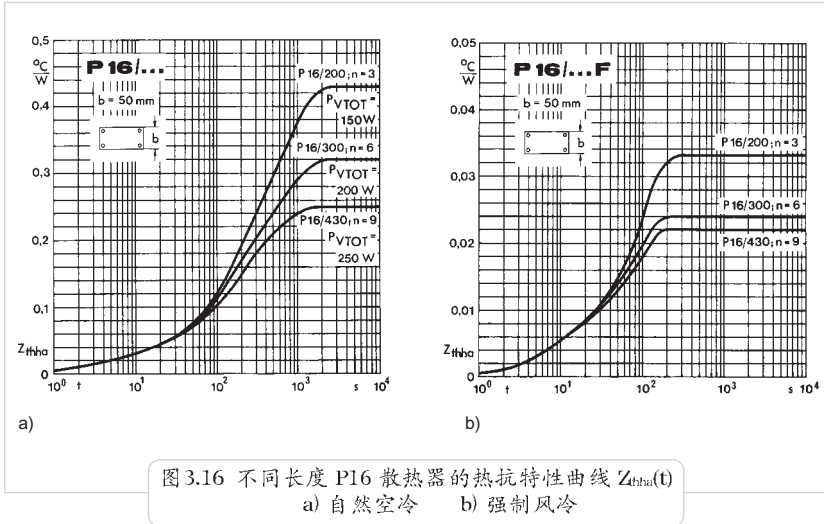
3.3.3 自然空冷（自然对流）

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} 。



同自由对流相比,强制风冷时的 α 明显要大许多。当空气的入口温度为 35°C 时(参数表中的额定环境温度),强制风冷散热器的表面温度在额定运行时不应该大于 80°C 到 90°C 。

散热器材料的传导系数对冷却的效果影响极大。因此,建议选择较厚的根部 and 尽可能多的翼片数目。由于热量主要通过对流而散发,所以对于强制空冷来说,对散热器进行黑化处理几乎没有什么效果。

热阻 R_{thha} 主要由单位时间内通过的气流量 V_{air}/t 所决定。而气流量则依赖于冷却介质的平均速度 v_{air} 和流通截面 A :

$$V_{air}/t = v_{air} * A$$

在这里假定气体的流动为层流。实际上,如果翼片表面的设计合适,在翼片表面附近的空气涡流会在翼片中形成紊流,从而进一步改善热传导的效果。

当翼片数目和翼片宽度进一步增加时,散热器的流通面积减小,冷却介质的压力降 Δp 增加。这同增加散热器的长度(翼片长度 L)是一样的。因此,传热的效果还与风扇的性能有关。图 3.17 给出了风扇的特性 $\Delta p = f(V_{air}/t)$ 。

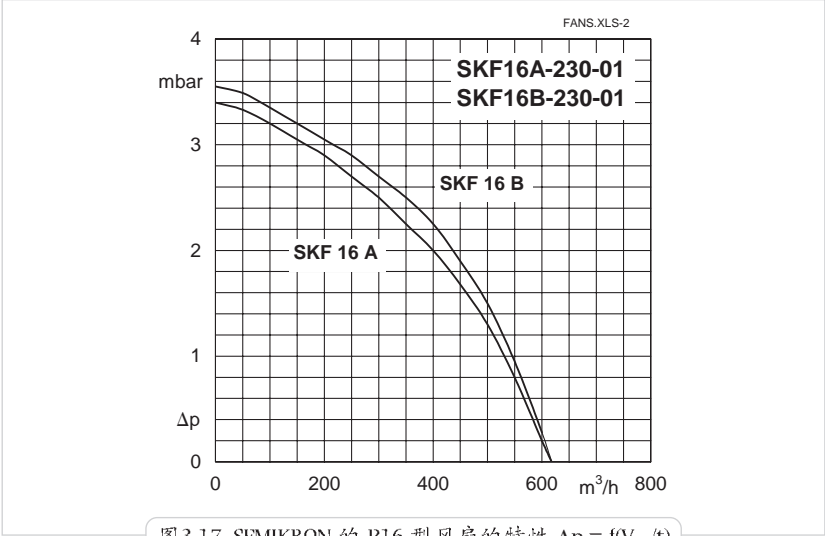


图 3.17 SEMIKRON 的 P16 型风扇的特性 $\Delta p = f(V_{air}/t)$

由风扇的特性和散热器的压差曲线 $\Delta p = f(V_{air}/t, L)$ 或 $\Delta p = f(V_{air}, L)$ 可以得到空气的流量, 如图 3.18 所示。它们的交点决定了散热器装置的热阻。

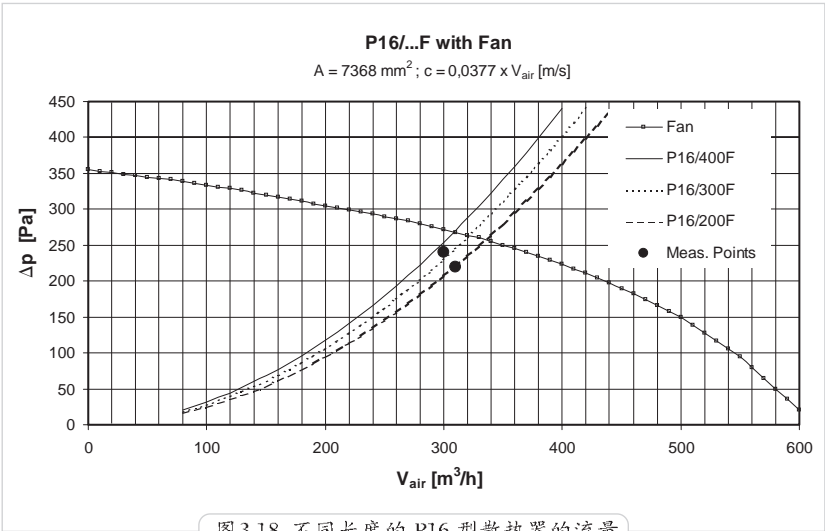


图 3.18 不同长度的 P16 型散热器的流量

除了空气的流量以外, R_{thha} 还取决于散热器上热源 (功率模块) 的分布及其位置。图 3.19 以 SKiP 装置为例显示了这一关系。

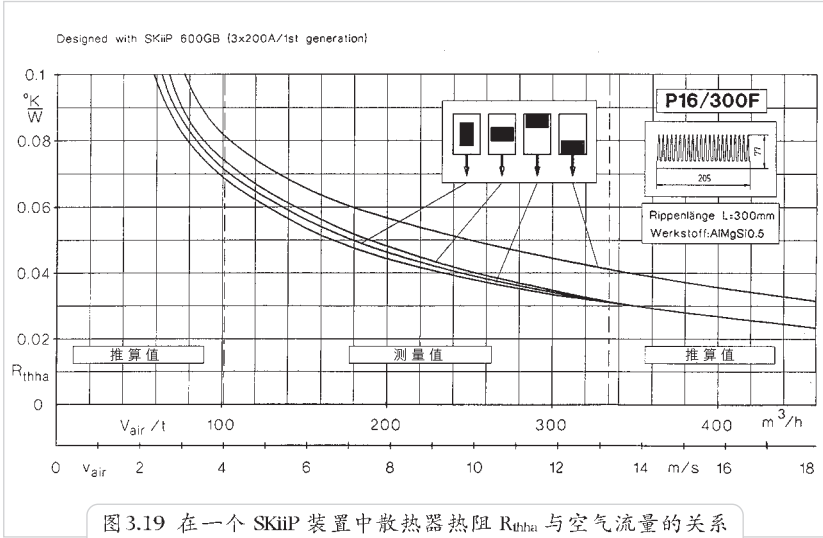
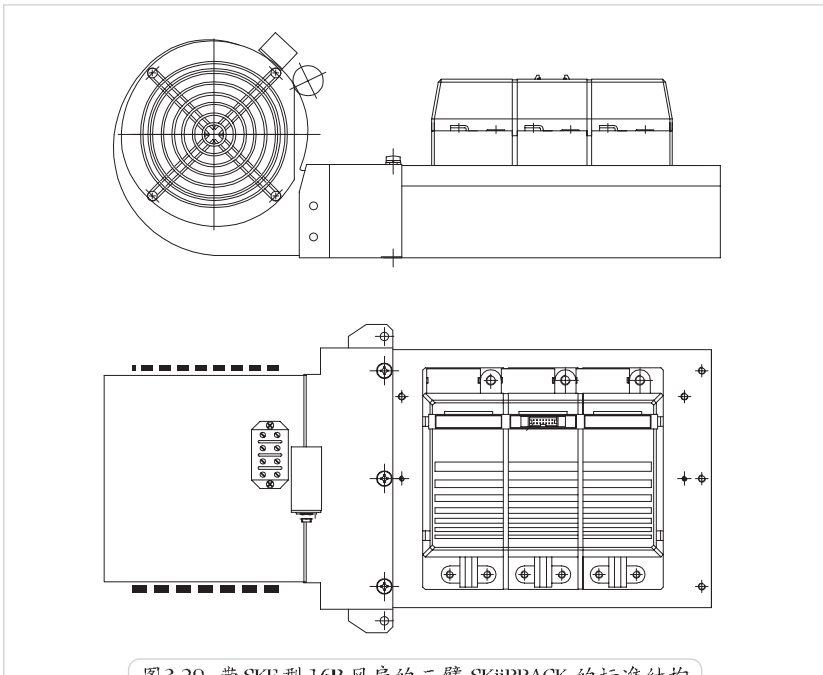


图 3.19 在一个 SKiiP 装置中散热器热阻 R_{thha} 与空气流量的关系 (参数: SKiiPPACK 的位置)

图 3.20 显示了安装在 P16 散热器上的三臂 SKiiPPACK 的标准结构。



如果需要对强制风冷的散热器剖面进行优化,则可以将其热传导与热对流的函数对翼片的高度进行积分。在一番简化后可以得到下列公式:

$$R_{thfa} = \frac{1}{n \cdot \sqrt{\alpha \cdot U \cdot \lambda \cdot A} \cdot \left[\frac{1}{1 + \exp - 2\kappa h} - \frac{1}{1 + \exp - 2\kappa h} \right]}$$

$$\text{其中 } \kappa = \sqrt{\frac{\alpha \cdot U}{\lambda \cdot A}}$$

(以上 α 为对流系数, U 为翼片的周长, λ 为散热器的热传导系数, A 为翼片的截面, h 为翼片的高度)。

常常有数个散热器共用一个风扇的情形。在此情形下,散热器既可以并联(散热器左右相邻),又可以串联(散热器在空气流动方向上前后相接)。

尤其是在热串联的情形下,例如,用标准 GB 电路(半桥模块)的 SKiiPACK 构成三相逆变器时,需要在传热设计中特别注意冷却空气会被前置的 SKiiPACK 所加热。

作为经验值,在空气流量为 $300\text{m}^3/\text{h}$ 时,每千瓦功耗所导致的进出口气温差可达 10 度左右。更详细的细节可见 3.3.6.1 节。

3.3.5 水冷

对于功率模块进行水冷既可以用于特大功率的变流器(兆瓦级),又可以用于较小的功率,条件是系统本身已经提供了循环水的装置(例如,汽车驱动、电解装置、感应加热等)。

如果冷却介质的热量被直接释放到环境大气中,则冷却介质的进口温度多为 $50-70^\circ\text{C}$ 。在具有主动制冷的工业装置中也可以是 $15-25^\circ\text{C}$ 。

和空冷相比,散热器的表面和冷却介质之间的温差比较小。它可以从两方面来加以利用:

1. 提高功率,在负载循环变化时允许芯片产生更大的动态温差 ΔT_j (有关寿命的限值见 3.2.3 节);
2. 降低芯片的温度,延长寿命。

由于水具有较大的热容量(热容 $c_p = 4.187\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$),所以它原则上优于其他液体介质,如油、乙二醇等

图 3.21 显示了 SEMIKRON 采用水冷散热板的三臂 SKiiPACK 的标准结构。