



电力电子设备自然冷却热设计

中兴通讯股份有限公司 李高宝

摘要 介绍了在自然冷却条件下, 电力电子设备热设计的基本原则、功耗计算、设计方法和设计过程中应该注意的问题。

关键词 热设计 自然冷却 电力电子设备 机柜 机箱 PCB

1. 前言

热设计是电力电子设备设计的一项重要内容, 热设计的好坏直接关系到产品运行的稳定性和可靠性, 在当前市场要求产品小型化和高功率密度的情势下, 很好地解决产品的散热问题是设计人员应充分考虑和重视的内容。产品热设计要达到的目的就是在工作环境温度下, 保证设备内的元器件温度不超过规定允许的降额温度, 保证设备的可靠性。本文对电力电子设备在自然冷却条件下的热设计进行综述。

2. 遵循的基本原则

(1) 热设计应与结构设计及造型设计紧密结合, 使散热效果达到最佳状态。

(2) 根据可靠性的温度降额要求, 确定每个元器件的最高允许温度。

(3) 根据元器件的体积功率密度及温升要求, 确定是否加装散热器。一般体积功率密度超过 $0.12\text{W}/\text{cm}^3$, 应当加装散热器散热。

(4) 按元器件和散热器的安装形式及计算的热流密度, 确定采用自然冷却方式还是强迫风冷方式。一般热流密度小于 $0.08\text{W}/\text{cm}^2$, 采用自然冷却方式。

(5) 在进行热设计时, 应考虑设计冗余, 自然冷却散热, 按 10% 的余量考虑。

(6) 整流器的热设计应与系统的热设计同时

进行, 整流器的热设计要兼顾系统的热设计。

(7) 热设计应考虑产品的成本指标, 在满足散热要求的情况下, 尽量使体积最小, 成本最低。

(8) 在进行热设计的同时, 还应考虑产品的可靠性、可维修性及电磁兼容性设计等。

3. 机柜的热设计

1) 风道设计

为避免层与层之间整流器散热的相互影响, 层与层之间应加隔热板, 隔热板要倾斜放置。见图 1:

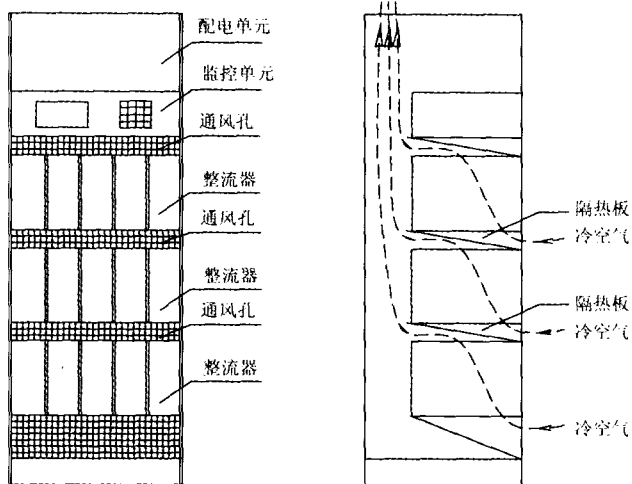


图 1



2) 进出风口面积计算

机柜的散热主要是通过空气对流带走热量，为了增加机柜内的空气对流，机柜顶部的出风口面积和前部或底部的进风口的通风面积可按下式计算：

$$S = \frac{P}{2.4 \times 10^{-3} \cdot H^{0.5} \cdot \Delta t^{1.5}}$$

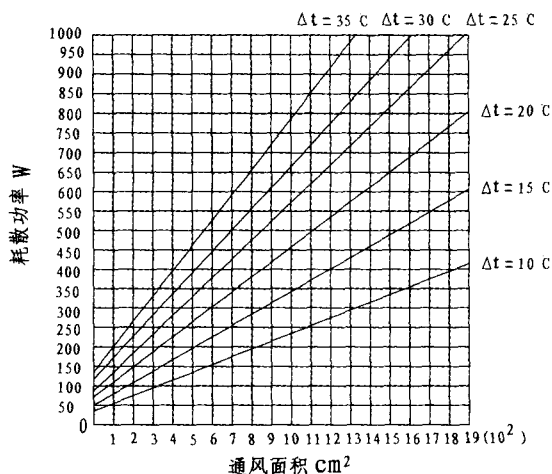
S——通风口面积，cm²
 P——机柜内的耗散功率，W
 H——机柜的高度，cm
 Δt——温升（机柜内外的），℃

为了增加烟囱效应，机柜的出风口最好开在顶部，考虑到空气在机柜里加热会膨胀，出风口面积要比进风口面积略大。

4. 整流器的热设计

1) 机箱的开孔设计

机箱上下开通风孔，通风孔面积可从下列图表中查得：



2) 机箱表面散热

机箱表面散热由两部分组成：辐射散热和对流散热。

(1) 机箱表面辐射散热

辐射散热的大小与表面温度、形状、表面粗糙度、材料、涂层材料、颜色等因素有关。若发热体将热量全部转化为辐射线辐射出去，其辐射能力最大，辐射率 e=1。

其关系式为： $P = \rho \cdot e \cdot A (T_1^4 - T_2^4)$

P——辐射出的热量，卡/秒 (1卡/秒=4.18W)

A——机箱的表面积，cm²
 T₁——机箱表面温度，K (绝对温度 0℃=273K)
 T₂——环境温度，K
 ρ——波尔兹曼常数 1.355×10⁻¹² 卡/秒.cm².K⁴
 e——辐射率，参见下表：

材料	辐射率 e (100℃)
铝 (工业薄板)	0.09
铁 (磨光)	0.14~0.38
铁 (喷黑漆)	0.8
钢 (磨光)	0.06
黄铜 (磨光)	0.06
铝 (磨光)	0.06
铝 (喷砂)	0.81
铝 (氧化)	0.33
黑漆、白漆	0.8~0.95

(2) 机箱表面的自然对流散热

机箱的对流散热可用下式表示：

$$P = 2.5CA \Delta t^{1.25} / D^{0.25}$$

P——散热量，W
 A——散热面积，m²
 C——系数 0.54
 Δt——机箱表面与空气的温差，℃
 D——特征尺寸，(长+宽)/2，m

3) 元器件的布置

(1) 机箱内的铝型材散热器的安装，应保证散热器的齿槽方向是垂直的。

(2) 机箱内有多块 PCB 板时，PCB 板应与进风方向平行，两块印制板的距离应不小于：

$$w = 0.74 \left[\frac{h}{\frac{t}{t_A} - 1} \right]^{0.25}$$

h——印制板的高度，m
 t——印制板表面的平均温度，K (绝对温度 0℃=273K)

t_A——环境温度，K

(3) 在布置元器件时，应将受热影响大的元器件 (如电解电容) 放在进风口的位置。

(4) 在 PCB 上安装的元器件，功耗大的器件应放在出风口的位置。

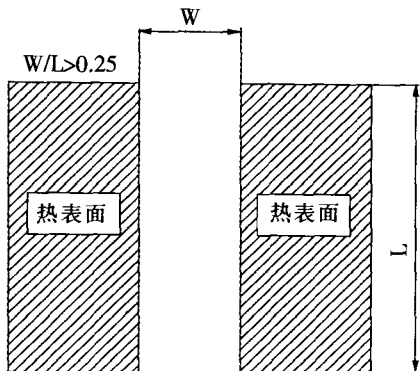
(5) 变压器、电感等电磁元件可通过适当结构形式与散热器连接，通过散热器散热。



(6) 有大规模集成电路的 PCB 板, 为了降低器件的温度, 器件的下面应有导热铜箔, 即铜导热条, 可用导热绝缘胶直接将器件粘到 PCB 板的导热条上。若不粘接时, 应尽量减小元器件与 PCB 板铜导热条的间隙。

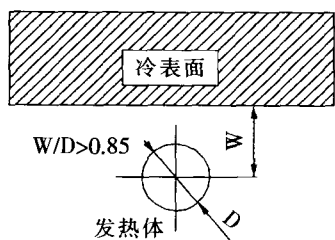
(7) 相邻热体之间, 热体与冷体之间的距离要求。

a) 对相邻的两垂直发热面的距离要求见下图:

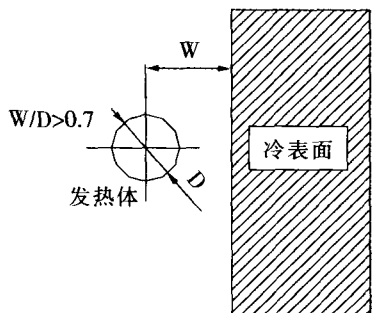


b) 对相邻的垂直发热面与冷表面的距离, 要求不小于 2.5mm。

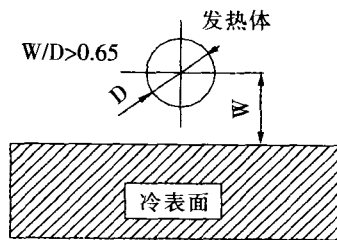
c) 对相邻的发热圆柱体与冷上表面, 距离要求见下图:



d) 对相邻的发热圆柱体与冷垂直表面, 距离要求见下图:



e) 对相邻的发热圆柱体与冷下表面, 距离要求见下图:



4) 散热器散热设计

(1) 材质选择。一般推荐使用, λ 为导热系数。

铸铝散热器: $\lambda=210\text{W/m.K}$

铝型材散热器: $\lambda=180\text{W/m.K}$

紫铜: $\lambda=380\text{W/m.K}$

(2) 为了扩大散热效果, 避免对流层的气流相互干扰, 产生阻力, 自然对流散热器齿间距一般在 10~15mm。

(3) 散热器的基板应保证有一定厚度, 以减小传导热阻, 一般在 6~10mm 之间。

(4) 对于散热器的流向长度大于 300mm, 应把散热器的齿片从中间断开, 以增加空气扰动, 提高对流换热效果。

(5) 散热器的对流散热表达式为:

$$P=h_c A \Delta t$$

$$h_c=1.07 \times 10^{-4} \left(\frac{\Delta t}{l} \right)^{0.25}$$

P ——散热器对流散掉的热量, 卡/秒 (1 卡/秒=4.18W)

h_c ——对流换热系数, 卡/秒. $\text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

A ——散热器总散热面积, cm^2

Δt ——散热器表面温度与环境温度之差, $^\circ\text{C}$

l ——散热器的特征长度, 等于齿的长度, cm

(6) 核算散热器表面的热流密度应在 0.08W/ cm^2 之内, 否则, 不合要求, 应重新选择。

5) 整流器损耗的计算方法

$$(1) \text{ 整流器总损耗: } P_{\text{diss}} = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \cdot P_{\text{out}}$$

η ——整流器的效率

P_{out} ——整流器的输出功率



(2) 元器件的损耗计算

a) 开关管损耗

开关管的损耗包括开关损耗和通态损耗两部分。

通态损耗: $P_c = I_D^2 \cdot R_{DS(on)}$

I_D ——漏极电流

$R_{DS(on)}$ ——通态电阻, 可通过下式计算:

$$R_{DS(on)} = R_0 [1 + \alpha (T_j - 25)]$$

R_0 ——25℃额定值, 可从器件数据手册中查到

α ——温度系数为 0.01

T_j ——工作结温

开通过程损耗: $P_r = \frac{V_{DS(max)} \cdot I_{D(max)} \cdot t_r \cdot f_s}{6}$

关断过程损耗: $P_f = \frac{V_{DS(max)} \cdot I_{D(max)} \cdot t_f \cdot f_s}{6}$

t_r ——管压降下降时间, 从 V_{ds} 初始值的 90% 降到 10% 的时间间隔, ms

t_f ——管压降上升时间, 从 V_{ds} 关断值的 10% 上升到 90% 的时间间隔, ms

f_s ——开关频率, KHz

开关管的总损耗 $P = P_c + P_r + P_f$

b) 输出整流二极管的损耗

通态损耗: $P_c = V_F \cdot I_F \cdot D$

V_F ——正向导通压降

I_F ——正向导通电流

D ——占空比

开通损耗: $P_{on} = \frac{1}{2} V_{FRM} \cdot I_F \cdot t_{fr} \cdot f$

V_{FRM} ——正向恢复电压

t_{fr} ——正向恢复时间

f ——开关频率

关断损耗: $P_{off} = \frac{1}{2} V_R \cdot I_{RM} \cdot t_{rr} \cdot f$

V_R ——反向稳态电压

t_{rr} ——反向恢复时间

I_{RM} ——反向恢复电流

f ——开关频率

输出整流管的总损耗 $P = P_c + P_{on} + P_{off}$

c) 高频变压器的损耗

变压器的损耗包括铜耗和铁耗两部分。

铜耗计算:

$$\text{原边 } P_{copper} = I_p^2 \cdot N_p \cdot \rho \cdot \frac{l}{S}$$

$$\text{副边 } P_{copper} = I_s^2 \cdot N_s \cdot \rho \cdot \frac{l}{S}$$

I_p ——原边电流有效值 A

I_s ——副边电流有效值 A

N_p ——原边匝数

N_s ——副边匝数

ρ ——铜的电阻率 $1.72 \times 10^{-5} \Omega \cdot \text{mm}$

l ——每匝的长度 mm

S ——每匝铜线的截面积 mm^2

铁耗的计算:

根据 $\Delta B = \frac{V \Delta t}{NA_e} = \frac{V \cdot t_{on}}{NA_e}$ 的值, 可以从产品手

册中查到单位体积铁耗 P_v , 根据下式可求出铁耗

$$P_{iron} = P_v \cdot V_e$$

P_v ——单位体积铁耗, W/cm^3

V_e ——铁芯体积, cm^3

变压器的总损耗: $P = P_{copper} + P_{iron}$

5. 结束语

通过以上总结我们可以看到, 电力电子设备自然冷却热设计是比较繁杂的, 有它自己的科学设计方法, 虽然如此, 设计计算经常与实际情况存在一定误差, 最终要经过后续的试验或软件仿真加以验证。

参考文献

- [1] GJB/Z 27-92 《电子设备可靠性热设计手册》.
- [2] SJ/Z 2808-87 《印制板组装件热设计》.
- [3] 稳定电源实用手册. 电子工业出版社, 1994.
- [4] 开关电源的原理与设计. 电子工业出版社, 1998.

