

电子整机的 热可靠性设计

可靠性设计丛书之五

计算机通信电视等专用用

本炎 编译 曾 晓 校对

张志诚 张志健
梁满玉 李德华 审核

编 者 的 话

电子计算机专家指出：热设计是计算机设计的重要内容之一。

1981年，热可靠性问题还被列为全国电视机攻关项目之一，因为它直接关系到电视机的可靠性指标MTBF。

同样，在邮电工业的各类产品中，也普遍遇到这样一个问题。

现按照计划，在几位高级工程师指导下，根据实际工作中的研究体会和国内、外有关文献，撰写了这本设计参考书。它是电子系统可靠设计丛书之五。撰写过程中，力图使内容较新、较实用，并且适用于各种整机。

书稿曾对四机部等有关研究单位的工程师试讲，反映良好，并希望发表。现由邮电部邮电工业标准化研究所编辑、出版。

本书在编写过程中，承蒙李泽或总工程师、何国伟高级工程师、张志诚总工程师的热心指导，谨此鸣谢。

1981年10月

目 录

绪 论	(1)
§ 1 可靠性参数和元器件表面温度之间的换算方法	(6)
§ 2 整机的热设计计算方法 (计算机、通信设备、宇航电子设备、电视机等)	(10)
§ 3 插盒的热设计计算方法	(74)
§ 4 印制电路板和结构件的热设计计算方法	(83)
§ 5 元器件的热设计计算方法 (晶体管、集成电路、电阻器、变压器)	(107)

绪 论

由于电子元器件的失效率与温度有关，所以，电子整机的可靠性指标MTBF（小时）与温度也有关。这就是说，在实现规定的MTBF值时，要求作热设计。

热设计的主要内容是通过减小发热量或热阻来降低温升，从而提高可靠性。

而减小热阻的方法是多种多样的。除了以往已经普遍采用的散热器、风冷、液冷和热管之外，近几年中又出现了一些新的技术（图1～图7列举了几种）。

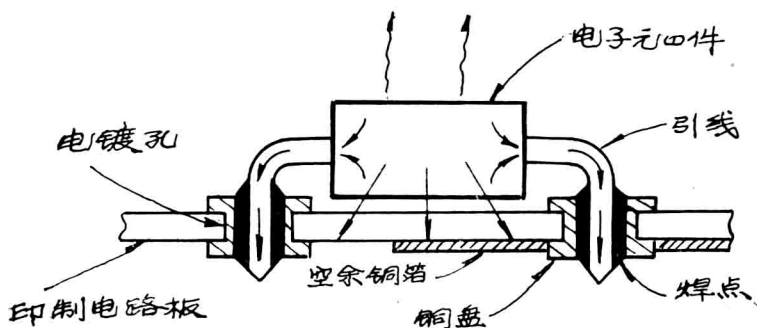
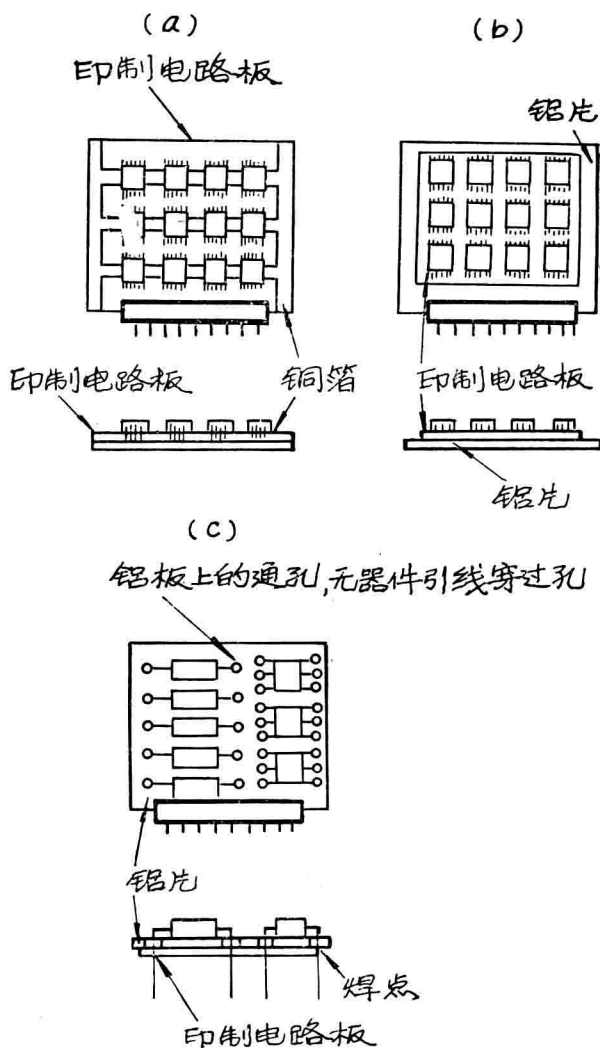


图1 热流从元件经过引线到印制电路板背面的热传导通路，从而在背面铜箔上散掉热量



- (a) 散热的铜箔放在印制电路板的上面和元器件的下面；
- (b) 散热的铝片贴在印制电路板的下面；

(c) 在印制电路板的上面，放置带孔的铝片。

铝片上有通孔，元器件引线可以穿过这些孔而仍留有间隙，注意引线不与铝片相接触。铝片起散热作用。

图2 印制电路板上安装元器件时传导冷却的几种方法

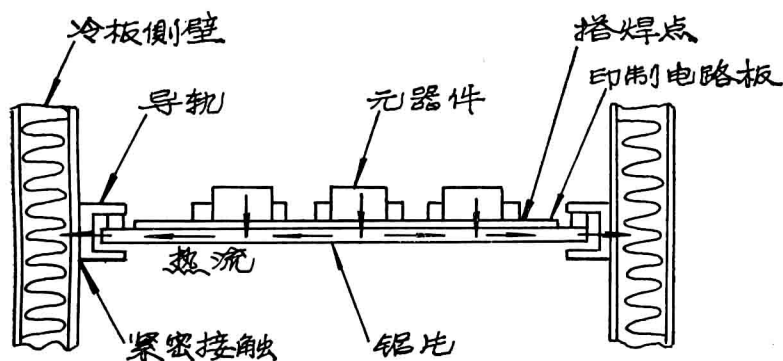


图3 从发热元器件到散热器的传导热流通道，最后由侧壁上的冷却而散热。

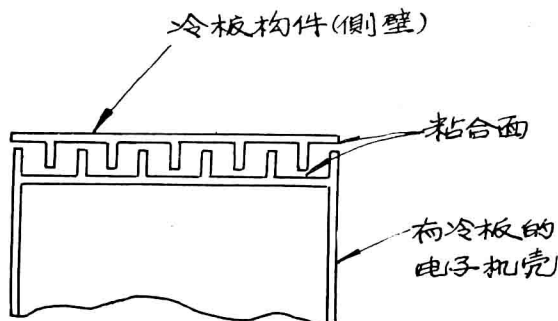


图4 有直肋片冷板的电子机壳（自然对流或风冷均可）

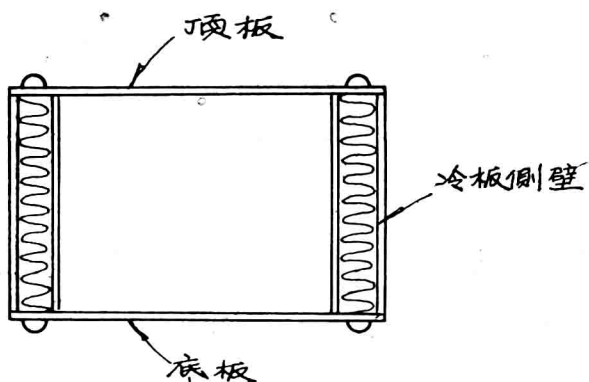


图5 有波纹肋夹芯冷板的电子机壳（自然对流或风冷都可）

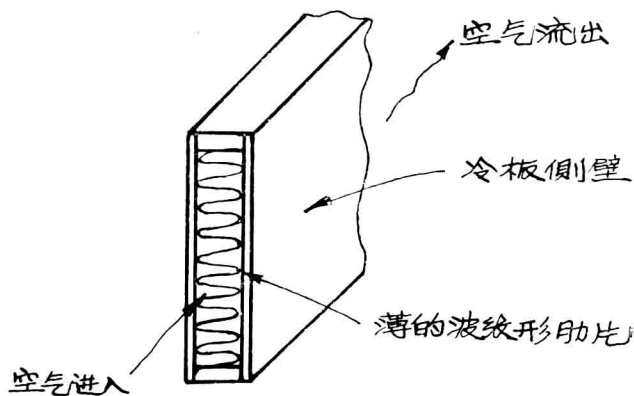


图6 风 冷 的 冷 板

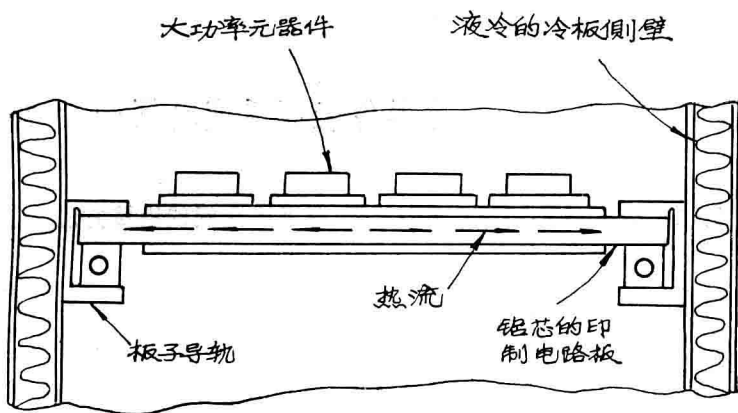


图7 液冷的冷板，对印制电路板作传导冷却

为了定量地分析和设计，需要进行热计算（例如：对可靠性参数和元器件表面温度进行换算；对整机内各点温度进行计算；对冷却设施的参数进行设计）；所以，下面将详细列举一系列设计和计算方法的实例，供设计人员参考。

§1 可靠性参数和元器件表面温度之间的换算

1. 1 元器件表面温度和等效环境温度之间的换算方法

现有的可靠性数据手册中，列出了元器件失效率 λ 和环境温度 T_a 之间关系的特性曲线或数据，而不列出元器件失效率 λ 和元器件表面温度 t_c 之间关系的特性曲线或数据。

但是，工程师常常会遇到后一种情况：对于一定的元器件表面温度 t_c 来说，其对应的失效率 λ 是多少呢？

也就是说，工程上往往需要知道元器件表面温度 t_c 所对应的可靠性指标数值大小，因为元器件表面温度 t_c 一般可以通过试验测量而得到，也可以通过计算而求得（元器件表面温度 t_c 往往是已知条件）。

所以，如果我们设法求出元器件表面温度 t_c 的等效环境温度 T_a' 数值，则可以立即查出对应的MTBF数值了。亦即利用等效环境温度 T_a' 作为MTBF—— t_c 之间的中间过渡量，从而推出两者的关系。这样的话，当已知元器件表面温度 t_c 数值时，也可以求得对应的失效率 λ 和MTBF数值。

于是，问题在于如何求出等效环境温度 T_a' 数值？其方法如下：——

$$\because T_a = t_c - \Delta T = T_a'$$

式中， T_a ——环境温度〔℃〕，未知数；

t_c ——元器件表面温度〔℃〕，已知数；

ΔT ——温升〔℃〕，待求，采用迭代法（先假设一个 ΔT 值，

以此求出对流系数 h_c 和辐射系数 h_r ，再由 $\Delta T = \frac{Q}{(h_c + h_r) \cdot A}$ 计算

式求出计算值 ΔT ，并将它与假设值 ΔT 相比较，两者接近的话则假设值适用；否则，重新假设一个 ΔT 值，直到 ΔT 的计算值与假设值接近相等为止）；

T_a' ——由迭代法求出的 ΔT 值，被元器件表面温度 t_c 减去后的等效环境温度值。

由 T_a' 值查阅可靠性手册中MTBF—— T_a 表格，则查得MTBF值。

举例如下：——

现有一个轴向引线的圆柱形电阻器，装在印制电路板上，耗散功率为 P 〔瓦〕，引线直径为 d ，电阻器圆柱体直径为 D 、圆柱体轴向高度为 H ，工作时表面温度为 t_c 。

为了确定该电阻器的失效率 λ 和MTBF，故问：其等效环境温度 $T_a' = ?$

解：

首先假设 ΔT 为某一个数值。

然后，验算 ΔT ：

$$\Delta T = \frac{Q}{(h_c + h_r) \cdot A}$$

式中， $Q = P$ 〔瓦〕，已知值；

$$A = 2 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot D^2 + \pi \cdot D \cdot H,$$

即对流和辐射表面积；

自然对流、层流、小物体时 h_c 计算式为：

$$h_c = 0.000108 \times \left(\frac{\Delta t [^{\circ}\text{C}] \cdot \frac{9}{5} + 32}{L [\text{cm}]/30} \right)^{1/4}$$

式中， $L = d$ （电阻器直径、已知值）；

h_c ——卡/秒 $\cdot\text{cm}^2\cdot^{\circ}\text{C}$

h_r ——由假设值 ΔT 查阅 h_r —— ΔT 曲线而求得；

$$\text{卡/秒} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C} \cdot 10^{-3}$$

于是,求得计算值 ΔT 。

比较 ΔT 的假设值和计算值,如果两者接近则可以采用假设值;如果不行,再重复进行。

然后,采用假设值 ΔT 来计算等效环境温度 T_a'

$$T_a' = t_c - \Delta T$$

再由 T_a' 值查阅可靠性手册中MTBF—— T_a 表格的对应失效率

λ 数据,由 $MTBF = \frac{1}{\lambda}$ 换算得可靠性数据MTBF。

1.2 从元器件环境温度求失效率和MTBF的计算方法

我们研究热设计,其根本目的是为了提高MTBF,所以要了解热参数与MTBF之间的关系。

以碳膜电阻器为例,它的失效率 λ 与环境温度 T_a 的函数关系,如下式所示:

$$\lambda = 0.2 + \left[4.8 \times \left(\frac{P_D}{P_R} \right)^2 \right] \cdot 2^{(T_a - 30)/27.5}$$

式中, λ ——失效率[fit],

P_D ——使用功率[瓦],

P_R ——额定功率[瓦],

T_a ——环境温度[$^\circ\text{C}$]。

再以固体钽电容器为例,它的失效率 λ 与环境温度 T_a 的函数关系,如下式所示:

$$\lambda = 1.6 + \left[8.8 \times \left(\frac{U_D}{U_R} \right) + 134.6 \times \left(\frac{U_D}{U_R} \right)^8 \right] \times 2^{(T_a - 30)/15}$$

式中, λ ——失效率[fit]

U_D ——使用电压[伏],

U_R ——额定电压[伏],

T_a ——环境温度[℃]。

其它元器件的失效率 λ 与环境温度 T_a 之间，也有一定的函数关系，这里不一一罗列。

至此，我们从元器件表面温度求出了对应的环境温度，又进而求出了对应的失效率和MTBF，完成了 $t_c \rightarrow \lambda \rightarrow \text{MTBF}$ 的计算。

§2 整机的热设计计算方法

(计算机、通信设备、宇宙电子设备、电视机等)

2.1 设计要求——小型计算机、微型计算机、微处理机的热设计考虑。

在各种电子计算机中，冷却技术被普遍采用，因为它关系到可靠性。

电子计算机的小型化，使得这些机器所要求的功率也降低了，所以不需要外加的和高价的技术来冷却电子部分。

一个典型的小型计算机，好象装在机柜中的一个抽斗那样的外形。

而一个典型的微型计算机比小型计算机要小得多，可以认为是一种桌面上的计算机。通常它放在一块尺寸大约为 12.70×17.78 [cm]的小印制电路插件板上，其中由微处理机作为中央处理机(CPU)，并有其它各种附属的元器件，诸如钟和晶体，以及存储器、输入、输出、接口控制等部分。

小型计算机和微型计算机都有中央处理机CPU，以控制输入和输出，并实现数学运算、译码以及使存储器送入和送出信息。过去，在小型计算机中，这种中央处理机要求采用一块印制电路插件板的面积来安装；而现在微型计算机却只要用一个简单的小片来代替即可。这一块小片，就是微处理机。

小型计算机与微型计算机相比较，小型计算机的速度比微型计算机要快；但是在使用灵活性、尺寸、成本方面，微型计算机比小型计算机要优越。

目前，微型计算机已经由大规模集成电路所取代。这些电路具

有高密度和低耗散功率的特点。

微型计算机中最重要和最贵的部份（或者说，心脏）是微处理机。

各种微型计算机根据它们不同的用途而制造成各种不同的规格。对于军用环境，那里的振动冲击与热设计要求都是同样重要的。这时，印制电路板往往做成带有铝散热板芯的型式，前面图2表示了这种型的结构。

当功率密度较高时，则可以采用强制对流冷却空气的方法，并且还常常采用成对印制电路板之间的夹芯空隙层作为风道。这种结构型式较复杂，所以也较贵，但是它把冷却空气带到发热元器件的周围、因而实质上是增高了冷却效率。

对于大多数民用用途来说，装有微处理机的这一块印制电路板通常由一块环氧玻璃纤维印制电路板所制成，板子带有电镀通孔并且在板子两面走线。

微处理机的实际典型结构是双列直插式的大规模集成电路组件，外形是矩形的块式壳体，其尺寸大约为 $6.35 \times 1.905 \times 0.508$ [cm]，并且大约有40根外接线，它可以实现中央处理机的全部功能。

微处理机必须采用存储系统。许多存储系统采用双列直插式结构(DIP)的元器件，并且是做在硅片上的。存储器有几种。半导体存储器要求的功率小于磁芯存储器；可是，磁芯存储器可以用于温度较高的场合；磁盘存储器正在迅速地推广使用，它有很大的容量，磁盘的工作功率要求7到15 [瓦]。许多存储系统采用两个磁盘，因为两个磁盘的传动机构比一个磁盘只稍微多化一些钱。

微处理机所组成的计算机系统，只要少量元器件，所以它可以减小电子计算机系统的尺寸和重量。它要求的功率较小，电连接也较少，成本也较低，适用于许多领域。

微处理机又称为“小片上的计算机”，它是以大规模集成电路

为核心的器件。因而，在热设计方面，关于集成电路和印制电路冷却方法和设计冷却方法，也可以用于微处理机。

2.2 整机参数估算——耗散功率的考虑

① 为什么研究耗散功率？

电子系统中的耗散功率大小，应当仔细估算，因为可靠性和平均无故障工作时间（MTBF）可能由于元器件温度过高而大大下降。

② 怎样估算耗散功率？

偏高地估算耗散功率是较好的，因为这样可以延长寿命。而且，还要对元件额定值和电源电压方面的偏差量作一些修正，所以应当对电子系统的耗散功率附加上一个小的安全系数。

安全系数也可以提供一个基准量，以防万一在生产中突然发现一些临界元器件不能使用时有所补救，而如果在完成设计之后再改变冷却技术的话，则是十分费钱的事了。

当然，可能太保守而使耗散功率规定值远远高于正常值。这时，将造成增大成本、重量和尺寸的结果。有些情况，因太保守而致使采用大风扇，但实际上并不需要如此。由于在耗散功率的规定方面太保守，甚至可以用一个简单的风扇来代替大而又笨重的液体冷却系统。

2.3 计算举例——整机自然对流冷却量的计算方法

已知条件：

现研究图2.1的电子机壳。

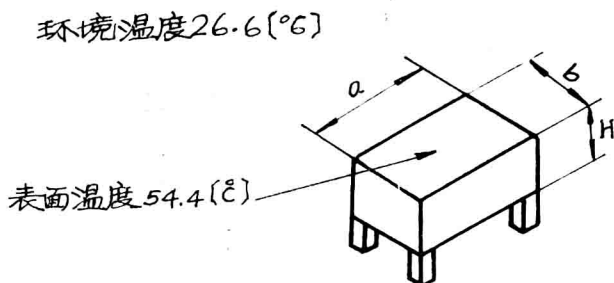


图2.1 自然对流的电子整机

此电子机壳的表面温度是 54.4°C ，在海平面情况，环境空气温度是 26.6°C 。电子机壳是铝的，表面涂复为铬酸盐，辐射率差，所以辐射热量很少，并且在这里可以忽略不计。主要依靠自然对流而冷却。 a 、 b 、 H 为已知值。

问：从电子机壳外表面通过自然对流冷却的总散热量为多少？

解：关于垂直表面的自然对流系数 $h_{\text{垂直}}$ 为：

$$h_{\text{垂直}} = 0.0004 \times \left(\frac{\Delta t \frac{a}{b} + 32}{L/30} \right)^{1/4}$$

式中： $\Delta t = 54.4 - 26.6 = 27.8 (^{\circ}\text{C})$ (温升)

$L = H[\text{cm}]$ (电子机壳垂直高度，即自然对流距离。)

$$\begin{aligned} \therefore h_{\text{垂直}} &= 0.00004 \times \left(\frac{27.8 \times \frac{a}{b} + 32}{H/30} \right)^{1/4} \\ &= 0.000124 [\text{卡/秒} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}] \end{aligned}$$

电子机壳垂直表面的冷却量 $Q_{\text{垂直}}$ 为：

$$Q_{\text{垂直}} = h_{\text{垂直}} \cdot A \cdot \Delta t$$

式中： $A = (a + b) \cdot 2 \cdot H = 1548 [\text{cm}^2]$

(四个垂直表面的面积)

$$\Delta t = 54.4 - 26.6 = 27.8 (^{\circ}\text{C}) \text{ (温升)}$$

则电子机壳垂直表面的冷却量 $Q_{\text{垂直}}$ 为：

$$Q_{\text{垂直}} = 0.000124 \times 1548 \times 27.8$$

$$= 5.34 \text{ [卡/秒]}$$

对于顶盖的水平表面，其自然对流系数 $h_{c\text{顶}}$ 为：

$$h_{c\text{顶}} = 0.000037 \times \left(\frac{\Delta t(^{\circ}\text{C}) \cdot \frac{9}{5} + 32}{L(\text{cm})/30} \right)^{1/4}$$

式中： $\Delta t = 54.4 - 26.6 = 27.8(^{\circ}\text{C})$ [温升]

$$L = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a + b)} \text{ [cm]} = 24 \text{ [cm]}$$

$$\therefore h_{c\text{顶}} = 0.000103 \text{ [卡/秒} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C]}$$

电子机壳顶盖板的对流冷却量 $Q_{c\text{顶}}$ 为：

$$Q_{\text{顶}} = h_{c\text{顶}} \cdot A_{\text{顶}} \cdot \Delta t$$

式中： $A_{\text{顶}} = a \cdot b = 620 \text{ [cm}^2\text{]}$

代入后得：

$$Q_{\text{顶}} = 0.000103 \times 620 \times 27.8$$

$$= 1.77 \text{ [卡秒]}$$

关于电子机壳底面的自然对流系数 $h_{c\text{底}}$ 为：

$$h_{c\text{底}} = 0.000018 \times \left(\frac{\Delta t(^{\circ}\text{C}) \cdot \frac{9}{5} + 32}{L(\text{cm})/30} \right)^{1/4}$$

式中： $\Delta t = 27.8(^{\circ}\text{C})$ (温升)

$$L = \frac{2 \cdot a \cdot b}{(a + b)} \text{ [cm]} = 24 \text{ [cm]}$$

代入后，得：

$$h_{c\text{底}} = 0.0000486 \text{ [卡/秒} \cdot \text{cm}^2 \cdot ^{\circ}\text{C]}$$

从电子机壳底面冷却的散热量（自然对流热量） $Q_{\text{底}}$ 为：

$$Q_{\text{底}} = h_{c\text{底}} \cdot A_{\text{底}} \cdot \Delta t$$

式中： $A_{\text{底}} = a \cdot b = 620 \text{ [cm}^2\text{]}$

$$\therefore Q_{\text{底}} = 0.0000486 \times 620 \times 27.8$$

$$= 0.84 \text{ [卡/秒]}$$