

# 模块电源的热处理

## 引言

一向以小体积著称的模块电源,随着向低电压输入大电流输出,以及大的功率密度方向发展。电源的高集成度、高功率密度,会使得单位体积上的温升越来越成为系统可靠工作、性能提升的最大障碍。根据温度和障碍率的关系式有:  $F = Ae^{-E/KT}$

其中:

**F** = 故障率,

**A**=常数

**E** = 功率

**K** =玻尔兹曼常量( $8.63e^{-5}eV/K$ )

**T** = 结点温度

从上面的关系式可以看出:失效率随温度的增加呈指数上升。并且温度过高会使一些元器件如电阻的阻值降低;会加快电解电容的电解液的蒸发,还会使得变压器,扼流圈的绝缘材料的性能降低;使晶体管的电流放大倍数迅速增加,从而导致集电极电流的增加,使得温升进一步升高,最终导致元器件的实效。

统计资料 [1]表明电子元器件温度每升高  $2^{\circ}C$ , 其可靠性下降  $10\%$ ; 温升  $50^{\circ}C$  时的寿命只有温升  $25^{\circ}C$  时的  $1/6$ 。所以热设计的目的就是要把这些热量及时地排出并使之处于一个合理的水平以至于元器件的热应力在最坏的环境温度条件下依然不会超出规定值,否则将会影响模块电源的正常工作,严重时损坏模块电源。为提高模块电源工作的可靠性,热处理在模块电源设计中是必不可少的一环。

## 1 热量的产生

想要探讨热设计方法,首先要清楚模块电源温升是如何产生的。根据能量守恒定律,产品输入的总功率应该是等于其输出的总功率,也即我们产品的转换效率 ( $\eta$ ) 恒为  $100\%$ ,但是实际的情况是转换效率 ( $\eta=1-P_{loss}/P_{总}$ ) 一般都是小于  $100\%$ 的。也就是说会有一部分能量 ( $P_{loss}$ ) 有损失掉了,那么损失的这一部分能量消耗在哪里呢,除了很小的一部分变成电磁波向空中散播外。其余的都由自身首先消耗了,消耗了的能量变成了热能,促使自身温度的提升,而后由传导的方式,使得周围元器件的温度增加,并且如果这种热点 (hot points) 比较多且分布不均的话,那么传导到外壳表面的温升就十分明显了。由此可见(在一定的条件下)转换效率和其温升是呈反比的,也就是说效率越低则温升就越高。过高的温度会使电源设备内部元器件失效,整个设备的可靠性降低。所以说在大力推行环保能源的今天,关键一个目标就是要降低损失功率。

然而损失的功率转换成热量还需要热阻的功劳,热力学中,热阻 (thermal resistance) 被定义为发热器件向周围热释放的"阻力",正是由于这种"阻力"的存在,使得热点 (hot points) 和四周就产生了一定的温差,就像电流流过电阻会产生电压降一样。并且不同的材质热阻也是不一样的,热阻越小,散热就越强,热阻的单位为  $^{\circ}C/W$ 。

## 2 热量产生的处理

### 2.1 建模分析法

从上面的分析我们可以得到计算温升的第一种方法:建模分析法即分别建立各部分元器件的损失功率和热阻的模型,然后根据下面的公式就可以求出该功率器件的温升值。

计算温升的一个基本表达式:  $\Delta T=R_{thj-x} * P_{loss}$

其中:

$\Delta T$ =温度差值或者温升;

$R_{thj-X}$  =功率器件从结点到X的热阻;

$P_{loss}$  =功率器件的损失功率

可以看出: 既然元器件的损失功率( $P_{loss}$ )是产生热量的根本原因,损失的功率最后以热量的方式释放出来,那么找出各个功率器件的损耗就成了解决热处理的关键。现在以金升阳公司的一个 12W 效率为 91%的产品为例说。

对于基于 PWM 的自驱同步整流正激变换器, 一般应用电路原理如下图所示:

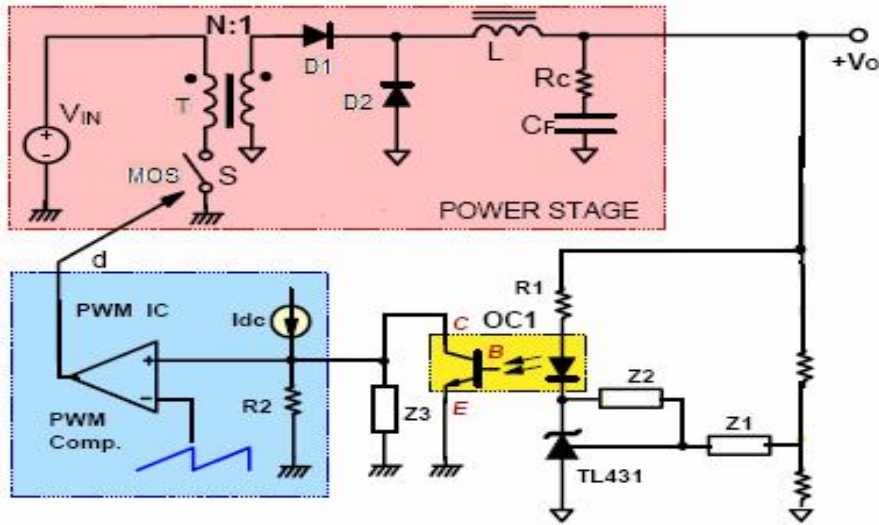
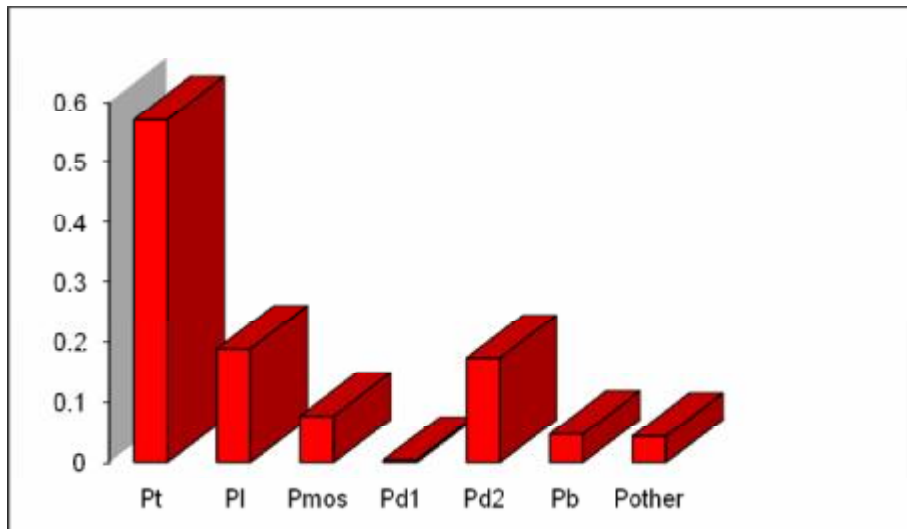


图 1 原理图

各功率器件的损耗见下图:

表 1 功率器件损耗表



其中: Pt: 原边变压器损耗

Pl: 输出滤波电感的损耗

Pmos: mos 管的损耗

Pd1: 整流二极管的损耗

Pd2: 续流二极管的损耗

Pother: 其它器件的损耗和

现在一些半导体器件的厂商都能给出比较详细的有关损耗的参数,而电源研发人员,也能在实际的工程中计算出功率器件实际的损耗,进而不断地修正这些值,使得这些元器件的损耗能非常近似为真实值。所以说要求出各功率器件在消耗一定功率产生的实际温升,现在的

关键就要考虑热阻了。但是热阻的值一般会受到以下因数的影响很大，如功率元器件的损耗，空气流动的速度、方向、扰动的等级，邻近功率元器件的影响，PCB 板的方向等。所以一般热测量的条件是很严格的。现在先看看对于一个用于自然风冷，但四周有密封且不用风机的功率元器件的热测试方法，JEDEC 标准中[2]给出元器件放置的外观尺寸的结构图分别入下面所示（元器件的引线部本图中隐去）：

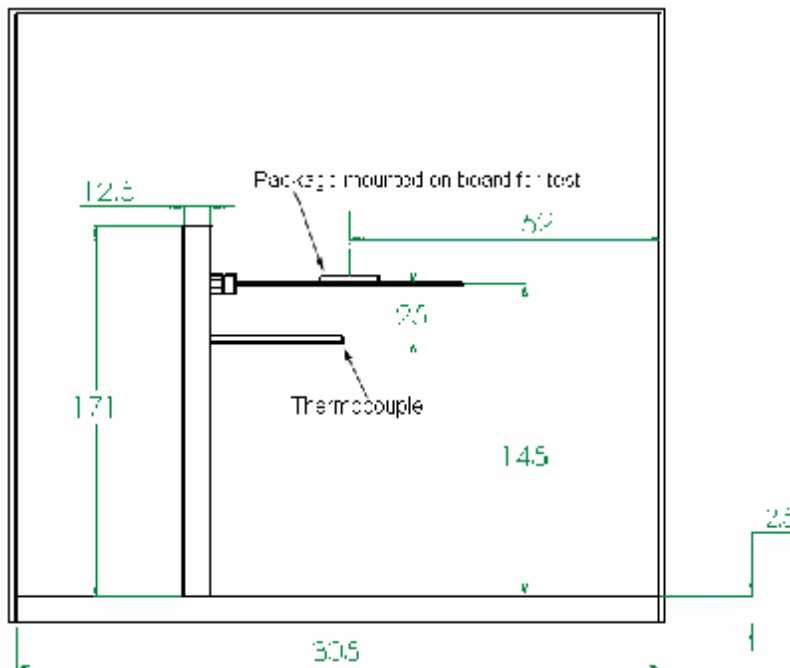


图 2 右视图

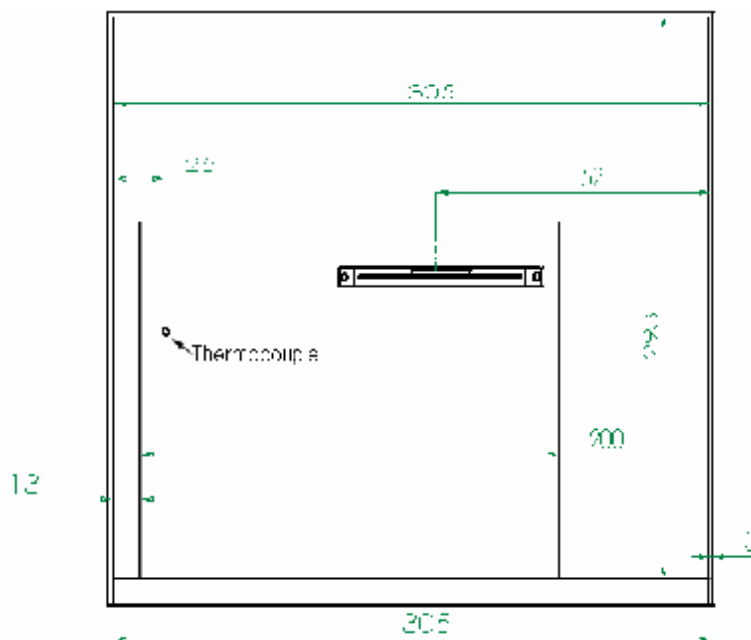


图 3 正视图

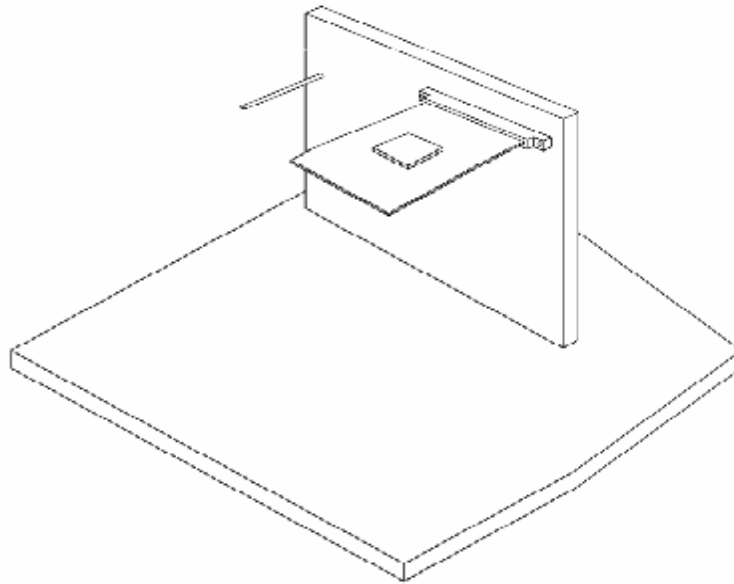


图 4 结构图（除去密封面）

如果我们把上图中功率元器件的位置放大，得到的放大图片如下图所示：

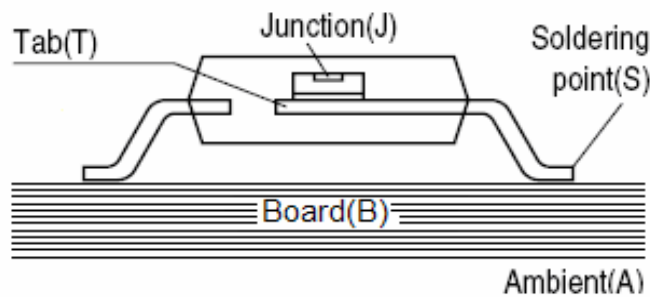


图 5 功率器件结构图

这样的话，我们就可以根据公式  $R_{JX} = (T_J - T_X) / P_{loss}$  [3] 是可以求出结点到环境的热阻  $R_{thJA}$  ( $R_{thJA} = R_{thJS} + R_{thSA}$ )。有关  $R_{thJA}$  的计算，这里只介绍一种简单的热模型（Compact thermal model）--2R 法即 Two-Resistor Model。其理论依据如下图所示[4]：

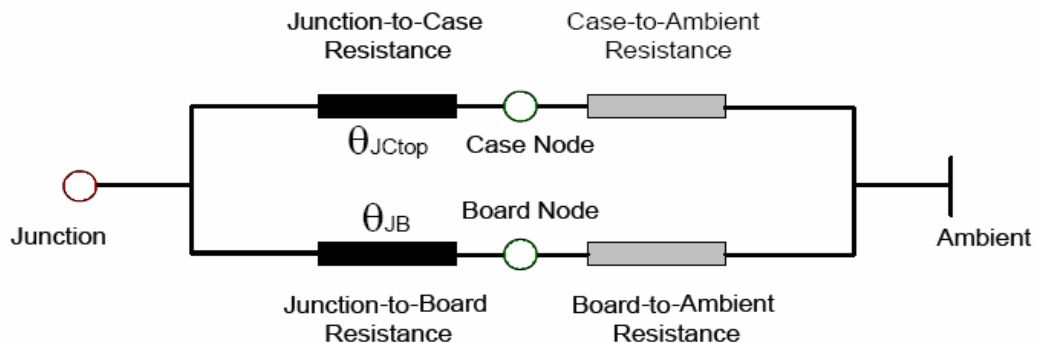


图 6 2-R 模型

$$R_{thJA} = \frac{(R_{thJC} + R_{thCA}) * (R_{thJS} + R_{thSB} + R_{thBA})}{(R_{thJC} + R_{thCA}) + (R_{thJS} + R_{thSB} + R_{thBA})}$$

但是相对于模块电源来说，我们一般把半成品封装在外壳里，简要图形如下图所示：

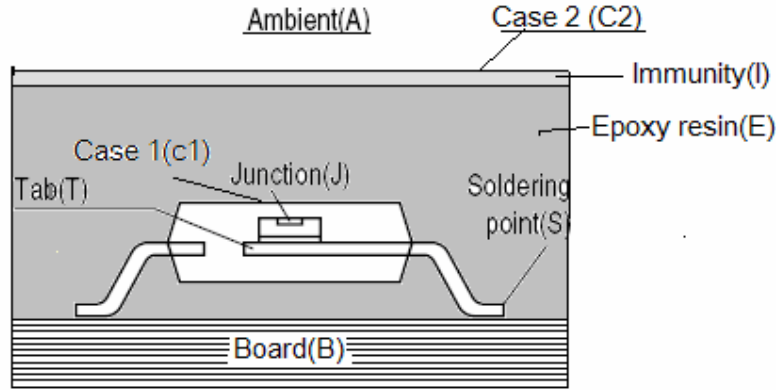


图 7 产品中功率器件结构图

图中阴影部分为硅胶、树脂等灌封料，其作用主要有两个：一方面用于固定半成品；另一方面用于传导功率器件表面的温度（散热）。所以从结点到环境的热阻  $R_{thJA}$  就可以表示为：

$$R_{thJA} = \frac{(R_{thJC1} + R_{thC1E} + R_{thEI} + R_{thIC2} + R_{thC2A}) * (R_{thJT} + R_{thTS} + R_{thSB} + R_{thBA})}{(R_{thJC1} + R_{thC1E} + R_{thEI} + R_{thIC2} + R_{thC2A}) + (R_{thJT} + R_{thTS} + R_{thSB} + R_{thBA})}$$

那么对应于消耗了功率  $P_{loss}$  时结点所对应的温升就可以求出来了：

$$T_J = T_A + P_{loss} * R_{thJA}$$

其中： $T_A$ ：功率元器件几何中心在上表面的投影所点所对应的温度值；

$P_{loss}$ ：功率元器件所消耗的功率；

$R_{thJA}$ ：结点到外壳的热阻

而上表达式成立还需要满足以下条件：这个产品只有一个热点(hot points)或者说如果存在多个热点 (hot points) 彼此之间的热传导造成的影响很小或者可以忽略不计；该功率器件的热量只参与向上或者向下传递，而不考虑其他方向即满足 2-R 法；为减小计算的复杂度，本例  $R_{thJB}$  中忽略了部分热阻。

尽管这样，但从实际的角度来看，上面的条件依然很难成立，因为从上面所算的功率元器件的损失功率上来看，不可能认为只有一个器件产生热量，而其它器件产生的热量可以不计。当存在多个热点 (hot points) 时， $R_{thJA}$  的计算就显得很复杂，且  $T_c2$ 、 $T_b$  也不再是单个功率器件所对应的温度值了，所以上面更多的是一种思考问题的方法。参考资料[6]中有推导 3 个热点的热阻等效算法，这里不再赘述，直接引用其结论：当存在多个热点并且温度分布不均时，这时候考虑更多的就是靠经验公式了。而经验公式也需要下面的方法来加以修正和完善。

## 2.2 直接测量法

对温升的测量，还有一种测量方法也是现在比较简单且常用的方法：直接测量法即温度的变化量或者温差值就是功率器件工作前以及达到热平衡后对应的两种温度的差值，如下公式所表述：

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

其中： $\Delta T$ ：温度差值或者温升；

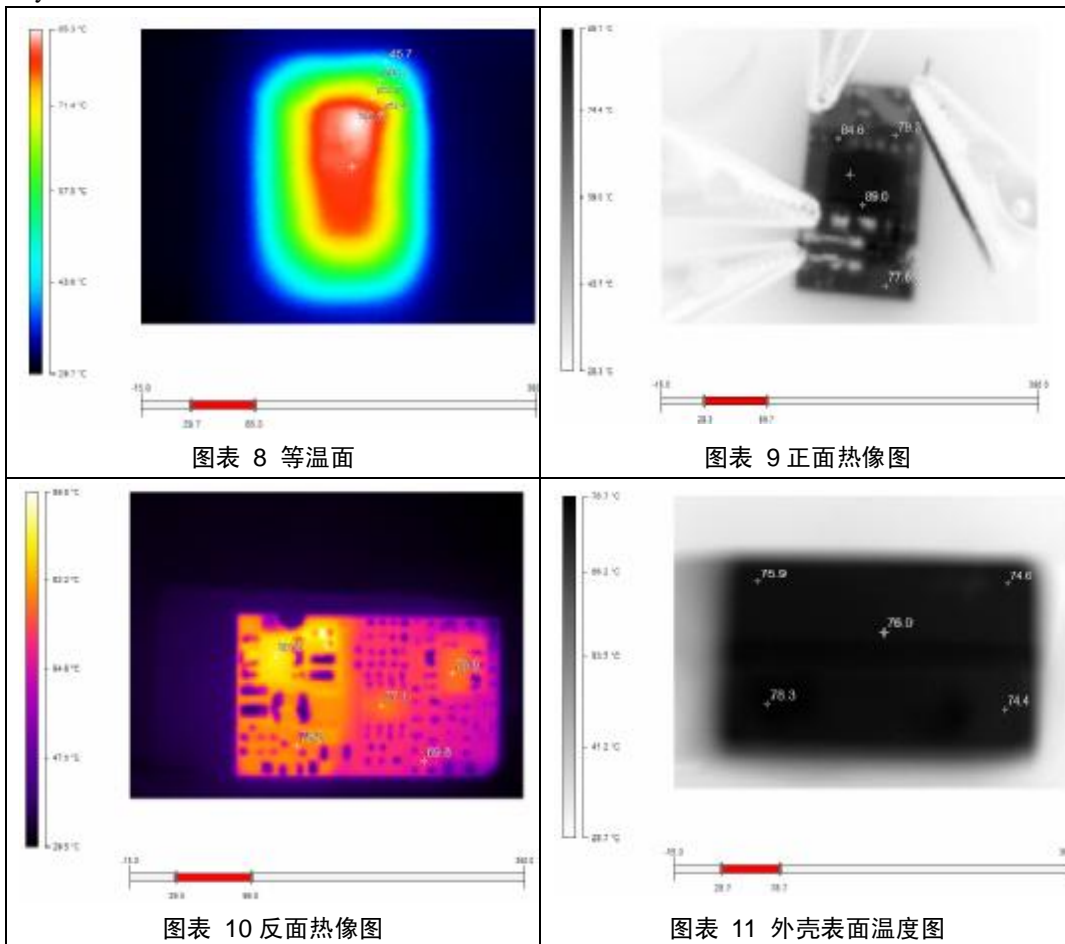
$T_2$ ：功率器件消耗了一定的功率，达到热平衡时所对应的温度值；

T1: 功率器件在工作以前所对应的实际温度值。

理论上我们只需要保证芯片附近的环境温度 ( $T_A$ ) 不超过结点温度 ( $T_J$ ) 就可以保证芯片可以正常工作.但是实际并非如此.  $T_A$  这个参数是按照 JEDEC 标准测试而得.参考图 2、3、4 所示, 但是实际上我们产品几乎不可能满足这种测试条件.因此,  $T_a$  在这里对我们来说,没什么意义.在这种情况下保守的做法是:保证芯片的壳体温度  $T_c < T_{a-max}$ ,一般来说芯片还是可以正常工作的.但从可靠性的角度上来时, 我们最好要求  $T_c$  小于  $T_{j-max}$  按一定等级降额后的值, 对  $T_c$  的测量现在常用的做法有三种[7]:

一是热指示法 (Temperature indicators): 直接用以热试纸 (Thermopaper) 贴于功率器件的 case 处, 根据热试纸表面的颜色读出此时对应的  $T_c$  值.这种方法比较简单, 但是对于自然风冷的产品来说, 贴上热试纸则不利于散热, 实际测出的值应该是偏高的。

二是红外成像法(Thermal Imagine): 利用红外成像的原理 (一种将红外图像转换成辐射图像的技术) 直接测量元器件在热平衡的条件下的表面温升.如 Fluke 公司的 Ti20 或者 FLIR Systems 公司的产品等。



上图是利用 Ti20 拍摄的上面所提到的金升阳公司 12W 产品的热图像, 通过这些图片, 我们不仅可以清晰地看出整体的热分布 (相同的温度, 所用的颜色是一致的), 还可以借助其提供的软件分析每一个元器件此时对应的温度值, 如几个温度相对较高的元器件的温度值分别如下表所示:

表 2 功率器件损耗表

元器件的名称	温度值 (°C)
变压器	88.3

输出滤波电感	84.6
续流二极管	90.5
Mos 管	76.9

这种方法比较直观的分析各功率器件的温升，以及温度的区域分布，通过 PCB 板上整体温度分布图，我们可以根据热点（hot points）调整不同元器件的分布，如发热量大的器件在 pcb 板上的布局应尽可能远离对温度敏感的元器件，像电解电容等，并且发热量大的元器件之间要有一定的距离，这样不至于形成新的热点(hot points)。由于不同材料的发射率（ $\epsilon$ ）不同，所以在实际的应用中面对不同的材料需要重新调整  $\epsilon$  值，必要时还要调整反射温度补偿（RTC），由于是利用红外成像的原理，所以不能透射玻璃，也不能透过表面测出内部元器件的温度值。

三是热电偶法(Thermocouple): 上面也有提到过实际的产品的功率器件并不是直接裸露在空气中,而是灌封或者塑封在一个金属外壳或者塑料外壳里，这样的话元器件的温升值就不能通过上面的两种方式来测得，此时我们可以采用热电偶法,如 Agilent 公司的 34970。具体做法如下：利用点温胶将热电偶固定在功率器件的节点较近的外壳上，但是不要接触到金属外壳。然后将半成品连同热电偶一起封装起来，分别测量 T1，T2 值。这种方法可以直接透过模块电源测量其内部功率器件的实际温度值，但是由于用了点温胶，热电偶与功率器件的壳（c1）形成一个新的热阻，并且粘住的热电偶会传导壳（c1）部分热量，排除仪器的测量误差，实测温度值会比真实值小。

所以说这三种温度测量方法是各有其优缺点的，实际使用过程中还要具体问题具体分析，但是直接测量法是有助于完善建模分析法中考虑欠佳的地方。

#### 4 结束语

本文阐述了高温对模块电源造成的危害性，讨论其产生的原因，再介绍了热设计的一般方法首先是利用设计者的经验确定出设计方案，然后利用经验公式进行估算如建模分析法，再通过试验进行验证如直接测量法，并根据试验结果进行优化经验算法，但是往往由于没有足够的热设计的经验，使得热设计的周期会比较长。如果这时能够借助于热方针的技术---利用计算流体力学技术（Computer fluid dynamics）的 Ice-pack 软件等，很短的周期就有可以实现更精确的建模（detailed model）。能设计出较为理想的结果。

参考文献:

- [1] MIL-HDBK-217F
- [2] JEDS-51-2A
- [3] JEDS-51-1
- [4] JESD51-3
- [5] JESD51-12
- [6] MIL-HDBK-251
- [7] Infineon application note No.077