

**LMZ10503,LMZ10504,LMZ10505,LMZ12001,
LMZ12001EXT,LMZ12002,LMZ12002EXT,
LMZ12003,LMZ12003EXT,LMZ14201,
LMZ14201EXT,LMZ14201H,LMZ14202,
LMZ14202EXT,LMZ14202H,LMZ14203,
LMZ14203EXT,LMZ14203H,LMZ22003,LMZ22005,
LMZ23603,LMZ23605**

Application Note 2020 Thermal Design By Insight, Not Hindsight



Literature Number: ZHCA383

热设计 - 前瞻而非后顾

美国国家半导体
应用说明2020
Marc Davis-Marsh
2010年6月14日



简介

一切电子领域都涉及半导体器件、电容器等会由于热设计不良而加速失效的元件。热设计在改善任何产品的可靠性方面也尤为为重要。不幸的是热设计十分困难，因为针对复杂几何结构的流体动力学分析非常困难。尽管在可预见的将来这种情况不会改变，但是本应用说明将利用热传输的简化电阻模型来讲述直流到直流转换器的热设计基础知识。我们将关注半导体器件的热设计，所有这些方法都适用于其他元件。电阻模型在快速估计设计要求时非常有用，比如印刷电路板尺寸和是否需要空气流动。之后可以利用有限元分析软件对设计进行更详细的分析。在所列的参考材

料中可以找到其他数据和许多有用的热力学计算工具，但其中的知识超过了本应用说明的范围。

我们在热设计讨论之初将首先给出数据表中一些参数的定义，比如 θ_{JA} 和 θ_{JC} ，最后将给出直流到直流转换器设计中的一些经验法则，包括它们的推导。补充表单(见"参考文献")利用这些推导，对设计产品的热性能给出了大致估计。

定义

热学术语描述

关注的参数： θ_{JA} , θ_{JC} , θ_{CA} , θ_{JT}

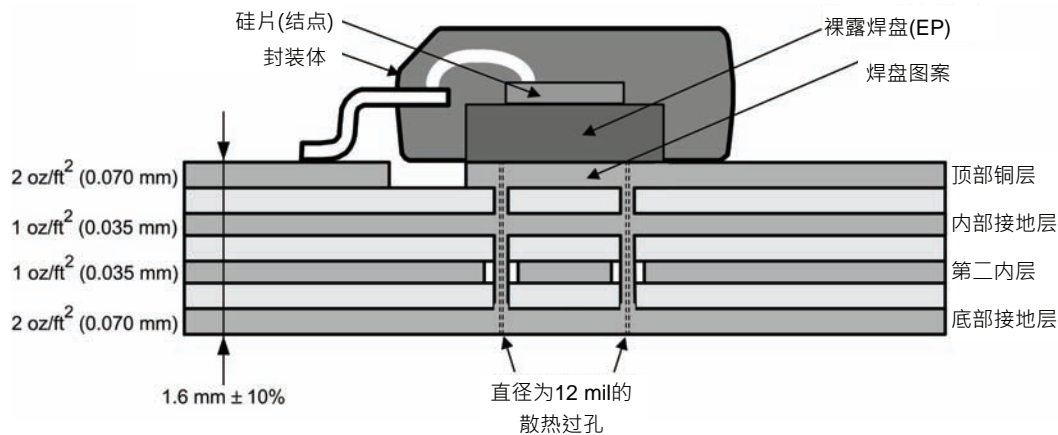


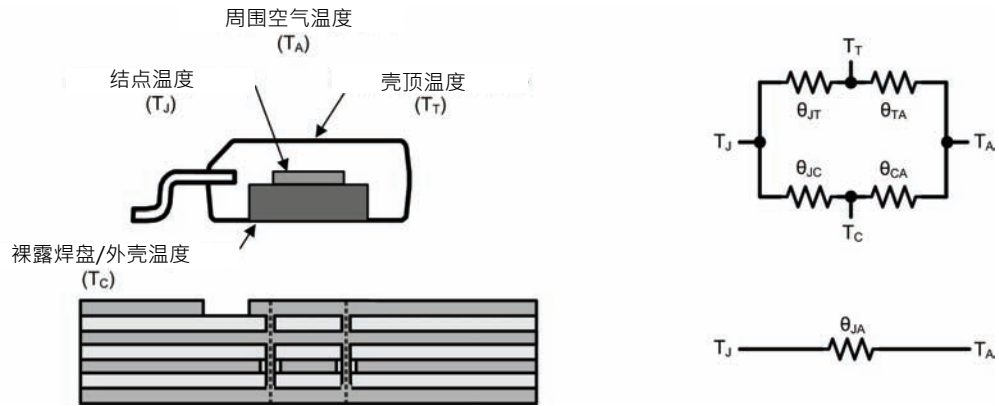
图1. 置于四层印刷电路板上的IC

数据表中最常见的表征热性能的参数是 θ_{JA} 。 θ_{JA} 定义为所测试集成电路的结点到周围环境的热阻。如果我们用电阻模型来描述，就是将热量从IC结点带到周围空气的所有路径的并联。该热阻计算方程为：

$$\theta_{JA} = \frac{T_{\text{结点}} - T_{\text{周围环境}}}{\text{电源消耗}}$$

在我们的电阻模型中，用瓦特度量的热量传输代替了用安培度量的电荷传输，结点和周围温度之间的温度势代替了电势。需要从结点导走的热量也就是IC的功耗。

30110901



30110903

图2. 典型印刷电路板的简化热阻模型

直流到直流转换器有两条最主要的热量路径，由它们相关的热阻来表示。第一条路径从IC的结点到壳顶的塑料(θ_{JT})，然后再通过对流/辐射(θ_{TA})到周围空气。第二条路径从IC的结点到裸露焊盘(θ_{JC})。这个裸露焊盘然后连接到印刷电路板，热量通过对流/辐射(θ_{CA})传递到印刷电路板表面和周围空气。

在定义 θ_{JC} 时有一点会经常混淆。

对于没有裸露焊盘的直流到直流转换器， θ_{JC} 定义为结点到壳顶的热阻。这与我们之前对 θ_{JC} 的定义(从结点到裸露焊盘的热阻)直接不相符合。之所以出现这种状况，是因为多年以来直流到直流转换器有许多不同的封装形式。随着更新型的具有裸露焊盘的封装投放市场， θ_{JC} 也就应该代表从IC的结点到外界的最低热阻路径。既然已经理清了这个概念，我们就能讨论不同参数的实用性。

数据表中 θ_{JA} 的值可用来比较不同的封装，还可和IC功耗一起进行设计的完整性检查。塑料封装的高热阻确保了大部分热量从裸露的铜焊盘传到印刷电路板，这种情况下热阻会大大降低。可以在封装的顶部加一个散热片，或者将其直接加在印刷电路板背面的裸露焊盘下。同样，由于塑料的高热阻，当将散热片直接或通过热过孔连接到裸露金属焊盘时，效果会更好。

因为大部分热传递是通过裸露焊盘到印刷电路板的，显然 θ_{JA} 的值与印刷电路板密切相关。换句话说，任何设计中需要确定的最关键的值就是印刷电路板的热阻(θ_{CA})。那么精确地讲 θ_{CA} 到底是什么？它又是如何计算的？ θ_{CA} 是一个热阻格子的等效电阻，这个格子以IC为中心，终止于印刷电路板的表面。您需要回顾本科一年级期末的知识 - 电路101课程。下面的图3给出了详细介绍。

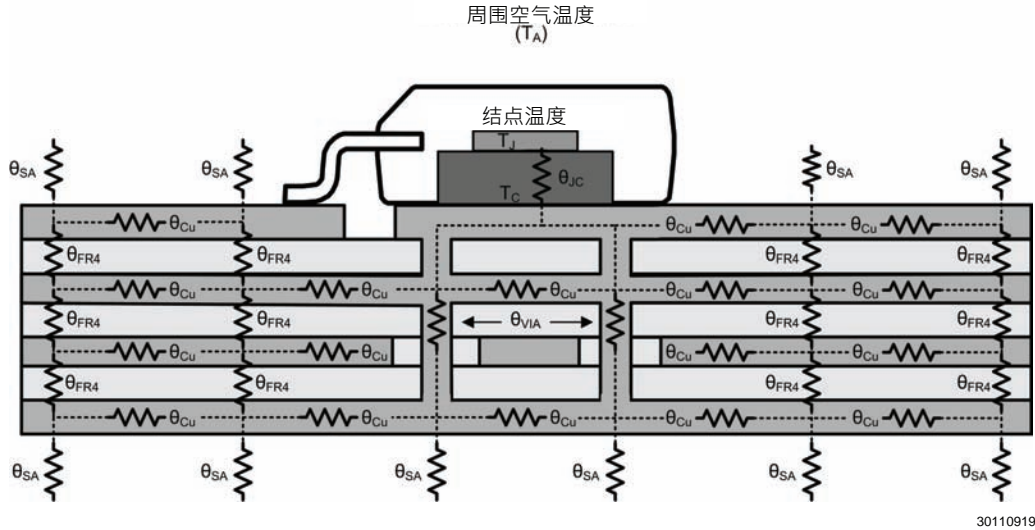


图3. 典型印刷电路板的扩展热阻模型

一些新的术语也在加入不断扩大的 θ 词典。 θ_{Cu} 是板上的铜到横向热传递的热阻。 θ_{FR4} 是铜平面之间的热阻，由FR-4垫片的纵向电阻提供。 θ_{VIA} 是直接置于裸露焊盘下的热过孔的热阻。 θ_{SA}

是从印刷电路板表面到周围空气的热阻。它是对流和辐射热传递的总和。如果我们将印刷电路板分解为边长为1cm的正方形，这些电阻的典型值如下表所示。

典型热阻值

| 名称 | 值 | 描述 | 工作条件 | 方程 |
|----------------|------------|---------------------------------------|---|--|
| θ_{Cu} | 71.4°C / W | 铜平面的横向热阻。 | 长度 = 1cm · 宽度 = 1cm · 1盎司铜厚度 = 0.0035cm · 铜的热导率 (λ_{Cu}) = 4W / (cm °C) | $\theta_{Cu} = \frac{1}{\lambda_{Cu}} \times \frac{\text{长度}}{\text{面积}} = \frac{0.25 \frac{^{\circ}\text{C cm}}{\text{W}} \times 1 \text{ cm}}{1 \text{ cm} \times 0.0035 \text{ cm}}$ |
| θ_{VIA} | 261°C / W | 典型12 mil过孔的热阻。 | 过孔长度 = 0.165cm(65mil) · 0.5盎司镀铜厚度 = 0.00175cm · 钻孔半径 = 6mil (0.01524cm) · 铜的热导率 (λ_{Cu}) = 4W / (cm °C) | $\theta_{VIA} = \frac{1}{\lambda_{Cu}} \times \frac{\text{长度}}{\text{面积}} = \frac{0.25 \frac{^{\circ}\text{C cm}}{\text{W}} \times 0.165 \text{ cm}}{\pi \times [(0.01524 \text{ cm})^2 - (0.01524 \text{ cm} - 0.00175 \text{ cm})^2]}$ |
| θ_{SA} | 1000°C / W | 自然对流引起的从印刷电路板上边长为1 cm的正方形的表面到周围空气的热阻。 | 边长为1cm的正方形，自然对流条件下印刷电路板到空气的热传递系数的一阶近似值(h) = 0.001W / (cm ² °C) | $\theta_{SA} = \frac{1}{h} = \frac{1000 \frac{^{\circ}\text{C cm}^2}{\text{W}}}{1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}}$ |
| θ_{FR4} | 13.9°C / W | FR-4垫片的纵向热阻。 | 边长为1cm的正方形 · FR-4厚度 = 0.032cm(12.6mil) · FR-4热导率(λ_{FR4}) = 0.0023W / (cm °C) | $\theta_{FR4} = \frac{1}{\lambda_{FR4}} \times \frac{\text{厚度}}{\text{面积}} = \frac{435 \frac{^{\circ}\text{C cm}}{\text{W}} \times 0.032 \text{ cm}}{1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}}$ |

印刷电路板设计中可变性非常重要。你会发现热阻与电路板尺寸、空气流动、印刷电路板厚度和许多其他的参数都有关系。基于这个原因，制定了一系列JEDEC标准(从JESD51-1到JESD51-11)，它们规定了用以测试不同类型封装下 θ_{JA} 值的印刷电路板尺寸和布

局。进行标准测试的直流到直流转换器之间可以直接相互比较。务必查看数据表以确定哪些印刷电路板参数可用于度量 θ_{JA} 。之后我们将讨论一些设计印刷电路板的提示，但是最终的设计和 θ_{JA} 则要取决于终端用户。

例子：计算需要的 θ_{JA}

计算直流到直流转换器所需的 θ_{JA} 值。输出电压 V_{OUT} 为2.5V，输出电流 I_{OUT} 为4A。转换器效率 η 为91.4%。环境温度 T_A 为50°C。你选择的电容器额定温度可达100°C，而且因为它们跟直流到直流转换器很靠近，你确定转换器可达到的最大结点温度 T_J 为90°C。转换器功耗 P_D 很容易计算。

$$P_D = V_{OUT} \times I_{OUT} \times \left(\frac{1}{\eta} - 1\right)$$

$$P_D = 2.5V \times 4A \times \left(\frac{1}{0.914} - 1\right) = 0.94W$$

假设所有功率都由IC在内部消耗(如果使用LDO或模块，这种假设是合理的)，我们现在可以计算出 θ_{JA} 的最大值。

$$\theta_{JA} \leq \frac{90^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}}{0.94W} \leq 42.5^\circ\text{C/W}$$

因为你的设计需要 θ_{JA} 的值低于42.5°C/W，你不想使用SOT-23，因为它的 θ_{JA} 值接近179°C/W。你需要选择14脚eMSOP之类的封装，其 θ_{JA} 值在40°C/W左右。如果你想提高设计的热裕度，那就选TO-PMOD-7或TO-263之类的封装，其 θ_{JA} 值在20°C/W左右。记住， θ_{JA} 与电路板有关，所有这些值都源于3" x 4"的JEDEC标准测试板。如果你的电路板不同于JEDEC板（一般也是这种情况），你就需要利用 θ_{JC} 对其热性能做出更好的估计，得到 θ_{CA} 值。低 θ_{JC} 值的封装向外壳的热传递性能非常好，通常是传到一个裸露焊盘上。 θ_{JC} 可以很好地表征封装的热性能。低 θ_{JA} 意味着低 θ_{JC} 值。用于耗散大量热量的封装的 θ_{JC} 值可以低于2°C/W。通常，没有裸露焊盘的封装的 θ_{JC} 值会高于100°C/W。那意味着封装内每消耗一瓦热量，IC结点和外壳之间的温差将升高100°C。如果数据表中不包括 θ_{JC} 值，可以询问制造商获得资料。

经验法则

满足所给 θ_{CA} 值的印刷电路板设计

关注的参数： θ_{CA}

开始设计时可以选择低 θ_{JC} 值(小于10°C/W)，但是我们仍需要设计一个印刷电路板或散热片，把热量从外壳传到周围空气。这部分给出一些简单的设计指导原则，那样我们就可避免计算整个电阻模型。这些经验法则的推导将稍后讨论。

规则1：电路板尺寸

a)

$$\text{电路板面积 (cm}^2\text{)} \geq 15.29 \frac{\text{cm}^2}{\text{W}} \times P_D$$

$$\text{电路板面积 (in}^2\text{)} \geq 2.37 \frac{\text{in}^2}{\text{W}} \times P_D$$

在只有自然对流(意即没有空气流动)及没有散热片的情况下，一个两面都填充固体铜的典型双面印刷电路板，当温度升高40°C时需要至少15.29cm² (约为2.37in²) 的面积来耗散1W的热量。增加空气流动通常会将此尺寸降低为原来的一半。要进一步降低电路板面积就需要散热片。

这里做了若干假设。首先，任何印刷电路板外壳都不会限制印刷电路板任何一面的自然对流。其次，印刷电路板提供了从IC到电路板边缘的低热阻。这可以通过将裸露焊盘连接至延伸到印刷电路板边缘的铜接地平面来实现。对于一个四层板，内部接地层也可用于将热量传递到板边缘。即使是一个设计良好的两层板，这也可以将其热性能提高30%。

b) 如果 θ_{JC} 已知，下面的方程可用于估计最小板尺寸。

$$\text{电路板面积 (cm}^2\text{)} \geq \frac{500 \frac{^\circ\text{C} \times \text{cm}^2}{\text{W}}}{\theta_{JA} - \theta_{JC}}$$

$$\text{电路板面积 (in}^2\text{)} \geq \frac{77.5 \frac{^\circ\text{C} \times \text{in}^2}{\text{W}}}{\theta_{JA} - \theta_{JC}}$$

其中 θ_{JC} 可从数据表查得， θ_{JA} 根据功耗、环境温度和最大结点温度计算得到，如前例所示。

例子：计算需要的板尺寸，得到目标 θ_{JA}

使用我们之前的直流到直流转换器例子， $V_{OUT} = 2.5$ ， $I_{OUT} = 4A$ ， $P_D = 0.94W$ ，我们得出设计需要的 θ_{JA} 值为42.5°C/W。

a) 根据经验法则，在没有空气流动的情况下印刷电路板至少需满足

$$\text{电路板面积 (in}^2\text{)} \geq 2.37 \frac{\text{in}^2}{\text{W}} \times 0.94W = 2.23 \text{ in}^2$$

b) 将此数值与将 θ_{JC} 代入方程得到的结果进行对比。我们确定一个14脚eMSOP封装非常适用于本设计，因为在JEDEC板上它的 θ_{JA} 值大约为40°C/W。14脚eMSOP封装的 θ_{JC} 值约为7.3°C/W。用此公式我们可以计算出最小的印刷电路板面积

$$\text{电路板面积 (in}^2\text{)} \geq \frac{77.5 \frac{^\circ\text{C} \times \text{in}^2}{\text{W}}}{42.5 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} - 7.3 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}} = 2.2 \text{ in}^2$$

如果我们选了一款不合适的封装，比如 θ_{JC} 约为 $100^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 的SOT-23，结果将不尽人意，因为已没有可用的电路板面积可对设备进行散热并达到要求。

不过，如果选了 θ_{JC} 约为 $1.9^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 的TO-PMOD-7封装，则可减少电路板面积，或者说获得一些设计裕度。

$$\text{电路板面积 (in}^2\text{)} \geq \frac{77.5 \frac{^{\circ}\text{C} \times \text{in}^2}{\text{W}}}{42.5 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} - 1.9 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}} = 1.91 \text{ in}^2$$

规则2：热过孔

$$\theta_{\text{VIAS}} \approx \frac{261 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}}{\text{热过孔的数量}}$$

对于一个典型的具有0.5盎司铜侧壁的12 mil直径通孔，其热阻为 $261^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。在焊盘下面置入尽可能多的过孔形成阵列，间隔为1 mm。将这些过孔连接到尽可能多的铜层，以此耗散封装内的热量，同时也将孔连到印刷电路板表面，将热量传递到周围空气。对于许多直流到直流转换器，裸露焊盘是电气接地，因此内部接地层和底部接地层通常是最方便的进行热量传递的铜平面。底部接地层要尽可能坚实，这样会显著降低热阻。

用以下方程可以计算一个过孔的热阻

$$\theta_{\text{VIA}} = \frac{\frac{1}{\lambda_{\text{Cu}}} \times \text{长度}}{\pi \times [(\text{半径})^2 - (\text{半径} - \text{镀层厚度})^2]}$$

其中 $\lambda_{\text{Cu}} = 4 \text{ W/cm K}$ ，长度是电路板的厚度(典型值为0.1561 cm)，半径是钻孔的半径(典型值为0.1524 cm)，镀层厚度为0.0035 cm乘以铜重量(以盎司为单位)。

例子：过孔阵列的热阻

使用14脚eMSOP封装。裸露焊盘尺寸为 $3.1 \times 3.2 \text{ mm}$ 。这允许在器件裸露焊盘下面钻16个热过孔，间隔为1 mm。将过孔和铜接地层连在一起进行散热。 4×4 阵列的热阻为大约为 $261/16 = 16.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

许多人主张完全电镀以封闭热过孔，从而改善热性能。一个典型的8 mil直径的电镀封闭过孔的热阻为 $128^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。16个过孔并联的热阻为 $128/16 = 8^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。向封装底部散热的性能也可得到显著改善，但成本太高。通过电镀来封闭热过孔会使印刷电路板设计的成本变为原来的2倍或3倍。更经济的做法是在标准的12 mil过孔上进行1盎司电镀，成本增加约为10到20%。单过孔的热阻降至 $140^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，对于 4×4 的阵列，热阻仅为 $8.75^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

另外一种做法是使用裸露焊盘更大的封装，比如TO-PMOD-7。裸露焊盘尺寸为 $5.35 \times 8.54 \text{ mm}$ 。这样过孔的数量可增至40个。过孔直径为12 mil的阵列的热阻仅为 $261/40 = 6.525^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。

规则3：铜厚度

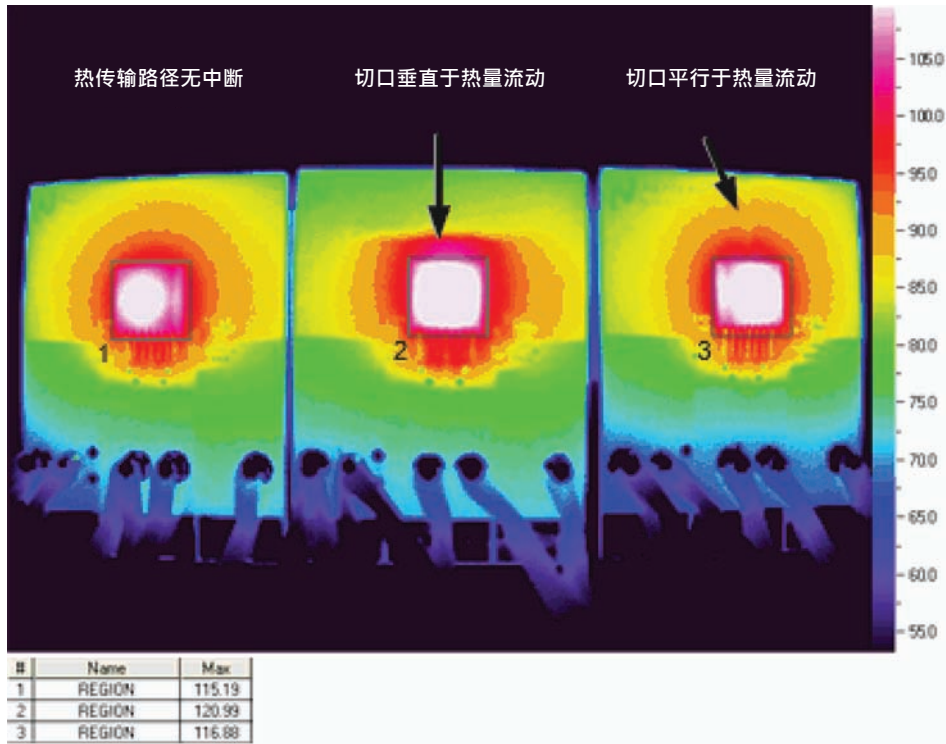
电路板上铜厚度增加，热量更容易从IC散走。一个铜平面到横向热传递的热阻计算方程为

$$\theta_{\text{Cu}} = \frac{\frac{1}{\lambda_{\text{Cu}}} \times \text{长度}}{\text{宽度} \times \text{厚度}}$$

其中 $\lambda_{\text{Cu}} = 4 \text{ W/cm K}$ ，长度和宽度的单位都是厘米，铜厚度为0.0035厘米乘以铜重量(以盎司为单位，典型值为0.5盎司)。对于所有直流到直流转换器设计，推荐至少使用1盎司铜。对于需要耗散的热量超过3W的情况，推荐使用2盎司铜。对于需要耗散的热量超过6W的情况，推荐使用4盎司铜。为真正了解设计中铜厚度的价值，我们看一下两个“几乎”完全相同的两层板的结果。二者唯一的区别是铜的厚度。第一个板的铜为1盎司，第二个为2盎司。两个电路板都为 3×3 ”，在放置元件的顶层的铜也都最少，底层完全是铜，用来散热。第一个板 $\theta_{\text{JA}} = 28.3^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ，铜较厚的板为 $21.2^{\circ}\text{C}/\text{W}$ 。仅仅通过改变铜的重量，板的热性能可改善25%。

规则4：避免散热路径中断

在铜层顶部或底部的铜接地平面中尽可能减少中断，形成一个印刷电路板上的散热片。使热量扩散穿过印刷电路板可提供到印刷电路板表面的低阻抗路径，改善了对流热量传递。垂直于热量流动的走线将产生高热阻(减速带)和过热点(交通拥堵)。如果穿过铜散热器的走线不可避免，那就尽量使它们互相平行于从热源开始并沿半径方向辐射开来的热传递路线。下面图4中的热图像给出了三个具有相同功耗且几乎完全一样的电路板。唯一的区别是在顶部铜上的宽切口，它中断了热传输路径。在中间的板内，切口垂直于热量流动，相对于没有切口的板而言，这会带来 5.5°C 的温升。在右侧的板上，切口平行于热量流动，温升仅为 1.5°C 。当板子接近于设计的热极限时，这会带来显著的区别。



30110914

图4. 当热传输路径中断时会产生一个过热点

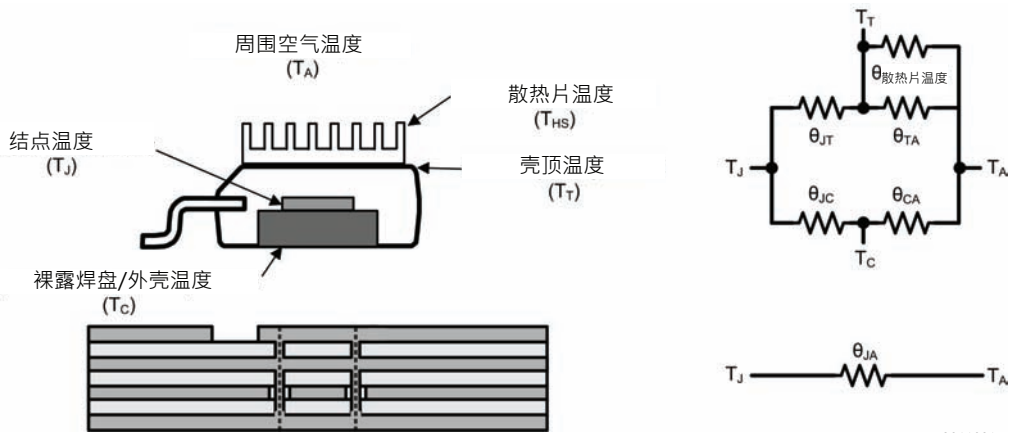
规则5：散热片的放置跟其选择一样重要

散热片选择必须确保从IC结点到散热片连接点的热阻是有效的。为实现最优性能，散热片必须连至到IC结点的最低阻抗路径上。

例子：不同位置的散热片性能

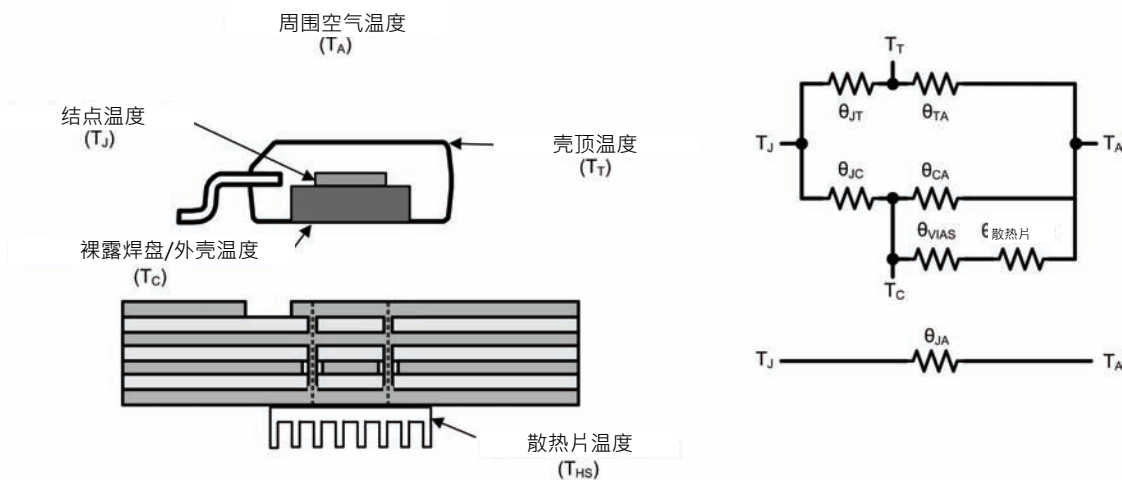
为理解规则5，我们将在两个位置观察一下散热器的性能。如果我们再次回到TO-PMOD7，此封装的 θ_{JC} 值很小，为 $1.35\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ 。

由于塑料接触面的原因，到封装顶部的热阻会显著提高。对于有塑料顶的封装， θ_{JT} 值在 50 到 $200\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ 之间。封装顶部的散热片与塑料的高热阻串联，降低了散热片的性能。电路板底部的散热片与裸露焊盘的低热阻以及相对较低的过孔热阻相串联，提高了散热片的性能。我们比较其电阻模型以确定两个位置散热片的性能。



30110915

图5. 散热片位于封装顶部的热阻模型



30110916

图6. 散热片位于电路板底部的热阻模型

更新的MOSFET封装正在通过在顶部安装裸露金属片来改善到封装顶部的热导率。这种封装为用户提供了若干散热选择。

规则6：多种热源：叠加大致可用

如果你的设计有多个热源，你如何解决这个问题？可喜的是叠加大致可用。大致？我们将热环境作为有电流源的电阻网络(热阻和功耗)进行建模，所以我们可以运用叠加理论。但是，因为其中的一些电阻与温度呈非线性关系，我们的最终结果会有一些误差。为了对有多个热源的系统应用叠加原理，一次只解关于一个热源的方程，将系统中的其他热源视为开路。在所有热源的位置都计算由其他热源引起的温升。之后可以把这些结果相加，可估计得到不同位置的总温升。

总结

对任何设计而言确定热性能都是非常重要的，应当在其出现问题之前就予以考虑。我们已经看到如何将一些经验法则(源自对热力学原理的深入认识)用于初期的设计过程，从而避免大刀阔斧的重新设计。尽管这不能代替现代有限元分析软件的精确性，但它能引导你开始进行系统的热设计。

法则1推导(从印刷电路板表面到周围空气的热阻)

从电路板到周围空气的热传递主要是通过通过对流和辐射。对于从印刷电路板表面(h)到空气的热传递系数，广泛采用的值是 $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 。我们按此数值开始设计，之后研究热传递系数的推导。

为将h变为从板表面到周围空气的热阻值 θ_{SA} ，我们取其倒数，然后从平方米转换到平方英寸，最后除以表面积。

$$\theta_{SA} = \frac{1}{h} = \frac{0.1 \frac{\text{m}^2 \text{K}}{\text{W}}}{\text{表面积}} \times \frac{1550 \text{ in}^2}{1 \text{ m}^2} = \frac{155 \frac{\text{in}^2 \text{K}}{\text{W}}}{\text{表面积}}$$

如果我们假设从IC结点到印刷电路板表面的热阻相对于 θ_{SA} 很小的话，规则1中用的估计就很容易从这推出。电阻模型简化为 $\theta_{JA} = \theta_{JC} + \theta_{SA}$ 。如果电路板的两面都有对流传热，则 θ_{SA} 减半。典型14脚eMSOP封装的 θ_{JC} 约为7.3。所以，为了在功耗为1W时将IC结点温度升高限制在 40°C ，这要求从板表面到周围空气的热阻为

$$\begin{aligned} \theta_{SA} &= \frac{\theta_{JA} - \theta_{JC}}{P_D} = \frac{40^\circ\text{C} - 7.3^\circ\text{C}}{1\text{W}} \\ &= 32.7 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}} \end{aligned}$$

所以需要的板面积为

$$\text{电路板面积} = \frac{155 \frac{\text{in}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}}{2 \times \theta_{SA}} = \frac{155 \frac{\text{in}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}}}{2 \times 32.7 \frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}} = 2.37 \text{ in}^2$$

计算h

既然你已经了解了板面积的推导过程，我们将再次回到热传递系数的推导上。

强制对流的热传递系数可用下式进行计算。

$$h = \frac{Nu \times \lambda_{AIR}}{\text{电路板的长度}}$$

其中空气的热导率 λ_{AIR} 约等于0.024 W/m K。努赛尔数**Nu**(以威廉 努赛尔命名)是垂直于边界层的对流热传递和传导热传递的比值。在我们的例子中，边界就是我们正在用来对直流到直流转换器进行散热的印刷电路板表面。下面的关系式可用于计算层流状况下的努赛尔数。

$$Nu = 0.664 \times Re^{1/2} \times Pr^{1/3} \quad \text{若 } Pr \geq 0.6$$

普朗特数**Pr**(以路德维格 普朗特命名)，是粘性扩散和热扩散的比值。其数值越高，流体的对流热传递就越优于传导热传递。所以，汞等液态金属的普朗特数就非常低(为0.015)，机油的普朗特数则可高达40,000。空气的普朗特数在0.7到0.8之间。

雷诺数**Re**是在给定流体情况下惯性力与粘滞力的比值。雷诺数可用于确定流体流动的类型。由较低雷诺数表征的层流很平稳。由较高雷诺数表征的湍流的惯性力要强于粘滞力，容易表现出漩涡和其他流动不稳定性。下述公式可以用于计算雷诺数。

$$Re = \frac{\text{流体速度} \times \text{密度} \times \text{长度}}{\text{粘度}}$$

其中密度 = 1.184 kg/m³，

粘度 = 1.98e-5 kg/m s。

严格意义上讲，雷诺数不应当用来度量自然对流的湍流。应当使用格拉斯霍夫数(计算如下)。不过，我发现对于自然和强制对流，如果都仅用一个方程，由此带来的简单程度要优于使用格拉斯霍夫方程改进精度带来的优势。

对于一个简单的垂直板，自然对流引起的空气速度是

$$\begin{aligned} V_{NC} &= 0.65 \times [g \times \text{长度} \times \frac{T_{\text{电路板}} - T_A}{T_A}]^{1/2} \\ &= 0.65 \times [9.8 \frac{m}{s^2} \times 0.0254m \times \frac{338K - 298K}{298K}]^{1/2} \end{aligned}$$

对于许多印刷电路板，自然对流引起的空气速度在0.1到0.7 m/s之间，本计算中为0.118 m/s。根据我的经验，使用一个相对较高的速度 $V_c = 0.5 \text{ m/s}$ 进行初始设计是不错的选择，我们可以整体考虑热传递，而不仅仅是辐射，在无需额外计算的情况下用格拉斯霍夫数估计结果。

最后，经过计算我们发现，对于一个0.0254m x 0.0254m(1英寸 x 1英寸)的电路板，在没有强制空气流动和自然对流引起的空气速度为0.118 m/s的情况下，从印刷电路板表面到周围空气的热传递系数为

$$h = 7.484 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$$

一旦辐射参与了热传递(计算如下)，这个值就与规则1推导中用到的常用公布值(10 W/m²K)非常接近。

利用格拉斯霍夫数计算热传递系数。用于自然对流计算

| 名称 | 值 | 描述 | 工作条件 | 方程 |
|------------------------|--|----------------------|--|--|
| Gr | 8.77×10^4 | 格拉斯霍夫数简化方程。假设理想气体特性。 | $T_a = 298^\circ\text{K}$; $T_{\text{board}} = 338^\circ\text{K}$; 重力加速度 = 9.8 m/s ; 25°C 空气的运动粘度 = $15.68 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$; 电路板长度 = 0.0254 m 。 | $\text{Gr} = \frac{g \times [T_{\text{电路板}}^4 - T_A^4] \times \text{长度}^3}{T_A \times \text{运动粘度}^2}$ $= \frac{9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times [(338 \text{ K})^4 - (298 \text{ K})^4] \times (0.0254 \text{ m})^3}{298 \text{ K} \times (15.68 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2})^2}$ |
| Nu | 14.39 | 水平板两个表面的努赛尔方程。 | 空气温度为 25°C 时 $\text{Pr} = 0.7$ 。 | $\text{Nu} = 0.54 \times (\text{Gr} \times \text{Pr})^{1/4} + 0.15 \times (\text{Gr} \times \text{Pr})^{1/3}$ $= 0.54 \times (8.77 \times 10^4 \times 0.7)^{1/4} + 0.15 \times (8.77 \times 10^4 \times 0.7)^{1/3}$ |
| $h_{\text{radiation}}$ | $0.78 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$ | 辐射引起的热传递 | $T_a = 298^\circ\text{K}$; $T_{\text{board}} = 338^\circ\text{K}$; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$; $e = 0.9$; 电路板长度 = 0.0254 m ; 电路板宽度 = 0.0254 m 。 | $h_{\text{RAD}} = \frac{e \times \sigma \times [T_{\text{电路板}}^4 - T_A^4]}{T_{\text{电路板}}}$ $= \frac{0.9 \times 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4} \times [(338 \text{ K})^4 - (298 \text{ K})^4]}{338 \text{ K}}$ |
| h_{total} | $14.38 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$ | 热传递系数 | 空气的热导率(λ_{AIR})= $0.024 \text{ W}/(\text{m}^\circ\text{C})$ · 板长度 = 0.0254 m | $h = \frac{\text{Nu} \times \text{热导率}}{\text{长度}} + h_{\text{RAD}}$ $= \frac{14.39 \times 0.024 \frac{\text{W}}{\text{m} \text{K}}}{0.0254 \text{ m}} + 0.78 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$ |

参考文献

http://www.national.com/vcm/NSC_Content/Files/en_US/Power/Thermal_Resistance_Estimate.xls

<http://www.national.com/an/AN/AN-1520.pdf>

http://www.coolingzone.com/design_corner.php

<http://www.wbabin.net/mathis/mathis64.pdf>

<http://www.novelconceptsinc.com/calculators-forced-convection-heat-sink-thermal-resistance.cgi>

<http://www.frigprim.com/articels3/NatConvMax.html>

Kollman, Robert. "Constructing Your Power Supply- Layout Considerations" <http://focus.ti.com/lit/ml/slup230/slup230.pdf>

注释

欲了解有关美国国家半导体的产品和验证设计工具的更多信息，请访问以下站点：

www.national.com

| 产品 | | 设计支持工具 | |
|-------------------|--|-----------------|--|
| 放大器 | www.national.com/amplifiers | WEBENCH® 设计工具 | www.national.com/webench |
| 音频 | www.national.com/audio | 应用注解 | www.national.com/appnotes |
| 时钟及定时 | www.national.com/timing | 参考设计 | www.national.com/refdesigns |
| 数据转换器 | www.national.com/adc | 索取样片 | www.national.com/samples |
| 接口 | www.national.com/interface | 评估板 | www.national.com/evalboards |
| LVDS | www.national.com/lvds | 封装 | www.national.com/packaging |
| 电源管理 | www.national.com/power | 绿色公约 | www.national.com/quality/green |
| 开关稳压器 | www.national.com/switchers | 分销商 | www.national.com/contacts |
| LDOs | www.national.com/lido | 质量可靠性 | www.national.com/quality |
| LED 照明 | www.national.com/led | 反馈及支持 | www.national.com/feedback |
| 电压参考 | www.national.com/vref | 简易设计步骤 | www.national.com/easy |
| PowerWise® 解决方案 | www.national.com/powerwise | 解决方案 | www.national.com/solutions |
| 串行数字接口 (SDI) | www.national.com/sdi | 军事 / 宇航 | www.national.com/milaero |
| 温度传感器 | www.national.com/tempsensors | SolarMagic™ | www.national.com/solarmagic |
| 无线通信解决方案(PLL/VCO) | www.national.com/wireless | PowerWise® 设计大学 | www.national.com/training |

本文内容涉及美国国家半导体公司(NATIONAL)产品。美国国家半导体公司对本文内容的准确性与完整性不作任何表示且不承担任何法律责任。美国国家半导体公司保留随时更改上述电路和规格的权利，恕不另行公司通知。本文没有明示或暗示地以禁止反言或其他任何方式，授予过任何知识产权许可。

美国国家半导体公司按照其认为必要的程度执行产品测试及其它质量控制以支持产品质量保证。没有必要对每个产品执行政府规定范围外的所有参数测试。美国国家半导体公司没有责任提供应用帮助或者购买者产品设计。购买者对其使用美国国家半导体公司的部件的产品和应用承担责任。在使用和分销包含美国国家半导体公司的部件的任何产品之前，购买者应提供充分的设计、测试及操作安全保障。

除非有有关该产品的销售条款规定，否则美国国家半导体公司不承担任何由此引出的任何责任，也不承认任何有关该产品销售权与/或者产品使用权的明示或暗示的授权，其中包括以特殊目的、以营利为目的的授权，或者对专利权、版权、或其他知识产权的侵害。

生命支持策略

未经美国国家半导体公司的总裁和首席律师的明确书面审批，不得将美国国家半导体公司的产品作为生命支持设备或系统中的关键部件使用。特此说明：

生命支持设备或系统指：(a)打算通过外科手术移植到体内的生命支持设备或系统；(b)支持或维持生命的设备或系统，其在依照使用说明书正确使用，有理由认为其失效会造成用户严重伤害。关键部件是在生命支持设备或系统中，有理由认为其失效会造成生命支持设备或系统失效，或影响生命支持设备或系统的安全性或效力的任何部件。

National Semiconductor和National Semiconductor标志均为美国国家半导体公司的注册商标。其他品牌或产品名称均为有关公司所拥有的商标或注册商标。

美国国家半导体公司2010版权所有。

欲了解最新产品信息，请访问公司网站：www.national.com



美国国家半导体美洲区技术支持中心

电子邮件: support@nsc.com
电话: 1-800-272-9959

美国国家半导体欧洲技术支持中心

电子邮件: europe.support@nsc.com

美国国家半导体亚太区技术支持中心

电子邮件: ap.support@nsc.com

美国国家半导体日本技术支持中心

电子邮件: jpn.feedback@nsc.com

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权在不事先通知的情况下, 随时对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权随时中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的硬件产品的性能符合TI 标准保修的适用规范。仅在TI 保证的范围内, 且TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非政府做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了TI 产品或服务的组合设备、机器、流程相关的TI 知识产权中授予的直接或隐含权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于TI 的产品手册或数据表, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。在复制信息的过程中对内容的篡改属于非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。

在转售TI 产品或服务时, 如果存在对产品或服务参数的虚假陈述, 则会失去相关TI 产品或服务的明示或暗示授权, 且这是非法的、欺诈性商业行为。TI 对此类虚假陈述不承担任何责任。

TI 产品未获得用于关键的安全应用中的授权, 例如生命支持应用(在该类应用中一旦TI 产品故障将预计造成重大的人员伤亡), 除非各方官员已经达成了专门管控此类使用的协议。购买者的购买行为即表示, 他们具备有关其应用安全以及规章衍生所需的所有专业技术和知识, 并且认可和同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由TI 提供, 但他们将独力负责满足在关键安全应用中使用其产品及TI 产品所需的所有法律、法规和安全相关要求。此外, 购买者必须全额赔偿因在此类关键安全应用中使用TI 产品而对TI 及其代表造成的损失。

TI 产品并非设计或专门用于军事/航空应用, 以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品属于“军用”或“增强型塑料”产品。只有TI 指定的军用产品才满足军用规格。购买者认可并同意, 对TI 未指定军用的产品进行军事方面的应用, 风险由购买者单独承担, 并且独力负责在此类相关使用中满足所有法律和法规要求。

TI 产品并非设计或专门用于汽车应用以及环境方面的产品, 除非TI 特别注明该产品符合ISO/TS 16949 要求。购买者认可并同意, 如果他们在汽车应用中使用任何未被指定的产品, TI 对未能满足应用所需要求不承担任何责任。

可访问以下URL 地址以获取有关其它TI 产品和应用解决方案的信息:

| | 产品 | | 应用 |
|---------------|--|--------|--|
| 数字音频 | www.ti.com.cn/audio | 通信与电信 | www.ti.com.cn/telecom |
| 放大器和线性器件 | www.ti.com.cn/amplifiers | 计算机及周边 | www.ti.com.cn/computer |
| 数据转换器 | www.ti.com.cn/dataconverters | 消费电子 | www.ti.com/consumer-apps |
| DLP® 产品 | www.dlp.com | 能源 | www.ti.com/energy |
| DSP - 数字信号处理器 | www.ti.com.cn/dsp | 工业应用 | www.ti.com.cn/industrial |
| 时钟和计时器 | www.ti.com.cn/clockandtimers | 医疗电子 | www.ti.com.cn/medical |
| 接口 | www.ti.com.cn/interface | 安防应用 | www.ti.com.cn/security |
| 逻辑 | www.ti.com.cn/logic | 汽车电子 | www.ti.com.cn/automotive |
| 电源管理 | www.ti.com.cn/power | 视频和影像 | www.ti.com.cn/video |
| 微控制器 (MCU) | www.ti.com.cn/microcontrollers | | |
| RFID 系统 | www.ti.com.cn/rfidsys | | |
| OMAP 机动性处理器 | www.ti.com/omap | | |
| 无线连通性 | www.ti.com.cn/wirelessconnectivity | | |
| | 德州仪器在线技术支持社区 | | www.deyisupport.com |

邮寄地址: 上海市浦东新区世纪大道 1568 号, 中建大厦 32 楼 邮政编码: 200122
Copyright © 2011 德州仪器 半导体技术 (上海) 有限公司