

基于 Flotherm 的散热器的优化设计

摘要: 本文对电子设备中常用散热器的分类、矩形肋散热器的设计准则及设计方法进行了介绍,并给出了矩形肋散热器的设计经验公式和参考数据。论文还介绍了多款可对散热器进行辅助设计的计算机软件,并详细介绍了利用Flotherm软件中的Command Center(优化设计模块)来对散热器进行优化设计。

关键词: 电子散热 散热器 Flotherm 优化设计

1 引言

随着电子组件发热密度的不断增加,散热需求也日益增加,散热设计的困难度也越来越高,所花费的成本也越来越多。在电子设备中,气冷散热器是最经济、最可靠的散热方式,利用散热器来增加散热面积也是热管理技术中最常见最基本的方式,因此如何提升散热器效率成了很重要的研究课题。

近年来,为了满足电子散热的需求,散热器在形状、材料及制作工艺上都有了长足的发展,此外,还通过整合其它散热组件(如热管)的设计方式来增加其在应用时的效率。这样,对于同一个散热问题,散热器的设计会在其形状、材料等方面出现多种解决方案,如何快速在众多方案中做出合理选择,并能够降低设计和制造成本就显得尤为重要。本文介绍了利用热分析软件Flotherm中的Command Center模块来对散热器进行优化设计。

2 散热器相关理论

2.1 散热器的分类

散热器的种类通常以其制作工艺的不同来分。由于散热器的制作工艺多种多样,散热器可分为如下几类:压印(Stampings)、挤型(Extrusion)、铸造(Casting)、接着(Bonding)、折迭(Folding)、改良式的铸造(Modified die-casting)、锻造(Forging)、切削(Skiving)、机械加工(Machining)等。图1显示了其中几种不同工艺情况下的散热器。可以看出,各种散热器都由两部分组成:肋片和基板。肋片有鳍片状,称为直肋散热器;圆柱或矩形柱状,称为针肋散热器。制造散热器的材料通常为铝和铜,有时也会根据其材料类型来命名散热器。



图1 不同工艺下的散热器

在电子设备中,直肋散热器应用最多。根据肋片的截面形状不同,直肋通常分为矩形肋、梯形肋、三角肋和抛物线肋等。对这几种散热器进行比较,矩形肋散热器的散热效果较差,但加工方便,经济性最好;其它几种散热器加工难度都比较大,尤其是抛物线肋散热器,因此在工程中也比较少见。本文中主要介绍的是对矩形肋散热器的优化设计。

2.2 散热器的设计方法

2.2.1 散热器的设计准则

热传递的方式有三种：传导、对流和辐射^[1]。散热器内部的热藉由对流及辐射进行耗散，对流部分所占的比例非常大。基板与热源接触，将热从热源传导给肋片；肋片增大了热源与空气的接触面积，从而增强了其通过对流和辐射方式的散热能力。

散热器基板的厚度参数是影响散热器效率的重要因素之一。散热器基板较薄时，向远离热源肋片传递的热阻较大，会导致散热器上温度分布不均匀，且抗热冲击能力较弱。基板厚度增加可以改善温度不均问题，并能提高散热器的抗热冲击能力，但太厚的基板除了浪费材料增加散热器自重外，也会造成热的累积，反而使热传导能力降低。因此，良好的基板厚度设计应该由热源部分厚向边缘部分薄，可使散热器由热源部分吸收足够的热向周围较薄的部分迅速传递^[2]，如图2所示。

散热器肋片的间距、厚度和高度是确定散热器肋片数量、分布以及散热器展开面积的重要因素。不论采用自然散热还是强制冷却，散热器肋片的间距都是决定流过其表面空气换热系数的重要因素。在自然散热情况下，散热器壁面会因为表面的温度变化而产生自然对流，造成肋片壁面的空气层（边界层）流，边界层的厚度约2mm，肋片间距需在4mm以上才能确保自然对流顺利。在强制冷却情况下，肋片壁面边界层厚度被压缩，肋片间距则可以取4mm以下，但受到加工手段和动力元件驱动力的影响，并不能太小。对于上述冷却方式，肋片间距变大均会导致肋片数量减少，肋片的展开总面积减少。此外，肋片厚度与高度的平衡也非常重要。

由此可以看出，散热器的设计就是来确定散热器基板的长、宽、厚度、肋片厚度、肋片间距等参数，从而得出众多不同的组合，散热器的优化则是在众多组合中得到一组最优的。在下面的章节中，将分别介绍散热器各参数的计算方法以及优化过程。

2.2.2 散热器参数的粗略确定

目前，已经有许多经验公式和图表可以用来对在自然对流情况下散热器的各参数进行粗略的确定，这里将对散热器的设计步骤进行一下简单介绍：

(1) 散热器包络体积

所谓包络体积是指散热器所占的体积，如图3所示。如果发热功率大，所需的散热器体积就比较大。散热器的设计可就包络体积做初步的设计，然后再对散热器的细节部分（如肋片及基板尺寸）做详细设计。发热瓦数和包络体积的关系如式（1）^[3]。

$$\log V = 1.4 \times \log Q - 0.8 \quad (1)$$

式中， Q 为散热器总耗散功率，W； V 为散热器包络体积， cm^3 ，最小值为1.5。散热器使用时，通常会对其长、宽或高参数进行限制，根据限制条件就可以确定出某一参数，其它两个参数的成积也就确定。

(2) 散热器基板厚度

如图2所示的变截面基板固然散热效率较大，其加工性比较差，使用中并不常见。实际应用中使用的普遍是等厚度的基板，基板厚度与散热功率之间的关系如式（2）^[3]：

$$t = 7 \times \log Q - 6 \quad (2)$$

式中， t 为基板厚度，mm，最小值为2。对于自然对流，肋片厚度 T （mm）、基板厚度 t （mm）与肋片高度 h （mm）参考值如表1所示^[3]。

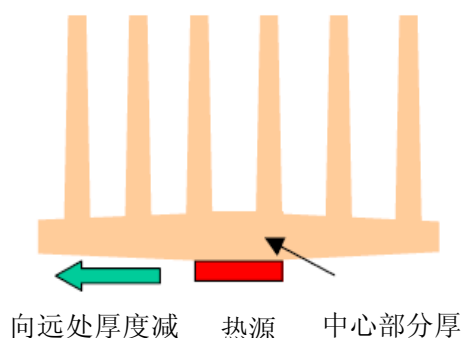


图2 理想基板形状

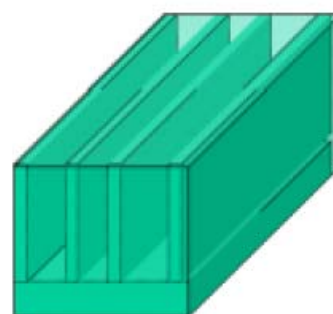


图3 散热器的包围体积

表1 肋片形状参考值

$T(\text{mm})$	2~4	4~6	6~8	8~10	≥ 10
$t(\text{mm})$	1.5	2	2.5	3	4
$h(\text{mm})$	≥ 6	≥ 8	≥ 8	≥ 10	≥ 10

(3) 散热器肋高与肋间距

考虑到自然冷却时温度边界层较厚，如果肋间距太小，两个肋的热边界层交叉，影响肋表面的对流，所以一般情况下间距大于6mm。如果散热器肋高低于10mm，可以按照肋间距不小于1.2倍肋高来确定散热器的肋间距。对于强制冷却，肋间距可以根据流过其空气流速的大小来调整肋间距。表2给出了流速与散热器肋间距的关系^[3]。

表2 不同流速与散热器肋间距的关系

空气流速	流向长度(mm)			
	75	150	225	300
1.0m/s	4	5	6	7
2.5m/s	2.5	3.3	4	5
5.0m/s	2	2.5	3	3.5

2.2.3 散热器的软件辅助设计

目前，散热器的设计可以利用计算机软件来辅助实现，并可以对其各参数进行优化。这样的软件可以分为如下三类：

- (1) Qfin、Cool-CAT等，专用散热器设计软件；
- (2) Flotherm、IcePak等，专业电子设备热仿真软件；
- (3) Fluent、CFX等，专业的CFD（Computational Fluid Dynamics）商用软件。

对于这三类软件，第一类软件功能比较单一，简单易用，只能使用于单个且形状规则的散热器的设计。第二类软件是专门的电子设备热设计软件，可以在其内对散热器进行建模，利用其数字风洞技术计算流阻，对包含散热器的整个电子设备系统进行分析，在模拟散热器实际工况下进行仿真优化，同时也可以对复杂形状的散热器进行设计与优化。第三类软件则是通用的CFD软件，此类软件功能强大，但操作起来比较复杂。由此可知，第二类软件比较适合电子设备中散热器的设计需要，本文就是采用了Flotherm软件来对散热器进行设计与优化。

3 散热器设计与优化的实现

3.1 设计对象介绍

本文解决的是在自然散热情况下散热器的优化设计，设计出一个能在环境温度为45° C情况下，

使封装为CBGA_FC、尺寸为27×27mm、双热阻模型（热阻 R_{Case} 为0.447K/W，热阻 R_{Pcb} 为3.755 K/W）、工耗5W的芯片工作节温低于85° C并尽量低的散热器，散热器采用铝材质并使其重量尽量小。

为了解决该问题，需要进行一些假设与初始化。假设印制板的尺寸为100×100×1.6mm，芯片位于印制板的中央。直接给定散热器一组尺寸作为其初始尺寸，包括基板长(50mm)、基板宽(50mm)、基板厚度(3mm)、肋片数量(13)、肋片高度(8mm)以及肋片厚度(1mm)。由此，可以在Flotherm中建立一个包含有上述的印制板+芯片+散热器模型的工程，进行模型中器件材质定义、工程环境初始化、划分网格等必要操作，然后提交软件计算。利用软件的Table可以得出芯片与散热器接触面的表温、与印制板接触面的表温、节温等数据，如表3所示。可以看出，如果使用当前所设计的散热器，无法满足节温低于85° C的设计要求，需要对散热器参数进行优化设计。

表3 优化前芯片的壳温、节温和散热器质量

Compact Model	T_{Case} (deg C)	T_{Pcb} (deg C)	Junction Temperature (deg C)	Heatsink Mass (g)
U1[CBGA_FC 27x27mm_2R]	96.305	89.878	97.619	36.59

3.2 Command Center模块中的优化算法

Flotherm软件中的Command Center模块采用了当前世界上优秀的多目标优化算法，是一种在具有多个变量参数中确定最佳方案的途径。优化算法包括两部分：实验设计（DOE，Design of Experiment）和方案优化。方案优化是以实验设计数据为依据，又分为循序优化（SO，Sequential Optimization）和反应面优化（RSO，Response Surface Optimization）。

实验设计包括输入变量设置和目标输出变量设置。输入变量设置包括优化参数对象选择和参数范围的设定，软件中可供优化的参数对象众多，既可以是重力加速度、辐射、环境压力、温度等环境属性，还可以是优化对象的位置、材质与几何尺寸等，可以通过直接输入变量方式和图形方式输入进行参数设置。目标输出变量就是用来监视输入变量组合方案优劣的变量。为了避免优化设计中出现局部最优代替全局最优，软件引入了代价函数（Cost Function）

$$\text{Cost Function} = W_1 R_1 + W_2 R_2 + K W_N R_N \quad (3)$$

式中，W为代价权重（Cost Weighting），R为目标输出变量。输入变量通常为一定范围内的离散或连续值，由这些数据可以形成数量可观的输入变量组合，每一个输入变量组合就对应一个实验。对实验进行求解，就会得出对应输入变量组合的目标输出变量。实验就是为优化算法提供样本，样本的数量越大越有利于确定最优方案，同时运算量与耗时也会越大。

实验求解后，可以直观地确定所设计实验中的最佳方案。循序优化以该最佳方案为基点，进行连续小步长自动优化，最终找到最优方案。反应面优化则是将实验的输入与输出构建成一个超平面，称为反应面，再根据该超平面来确定最优方案。两种方法比较，反应面优化速度快于循序优化，并且在给出优化方案的同时给出了优化过程中的计算误差，通过该误差的大小来判断该次优化方案结果是否可靠。本文中采用的就是反应面优化算法。算法更详细介绍可以参考Flotherm软件的帮助文档。

3.3 利用Command Center对散热器进行优化

单击Command Center图标默认进入的是输入变量设置界面，根据上述散热器设计准则来对输入参数进行设置，采用给定其变化的最小与最大值方式。输入变量设置完成后，进入目标输出变量设置界面，选择芯片的节温和散热器的质量作为优化目标，并将它们都加入到代价函数中。此后，就是要对实验数量和处理器数量进行设置。在采用反应面优化算法时，为了达到好的优化效果，实验的数量应该是输入变量数量的10~15倍，且越多越好，本文设定为150。如果计算机的CPU是多核或者是多CPU的工作站，可以根据实际情况设置处理器数量，从而能够较大地提高实验计算与优化的

速度，每增加一个处理器，处理速度将提高30%~50%。

所有参数设置完成后，就可以提交给软件对所设计的各实验进行计算。由于实验中的输入变量组合是由软件自动生成，难以避免会出现个别方案不收敛的情况，会以红色的Solved-Unconverged显示，而其余为收敛结果，都以绿色的Solved-Converged显示。不收敛的实验会影响优化计算，需要在优化计算前将它们删除。接下来就是利用实验数据来进行参数优化，点击优化（Optimize）图标进入优化对话框，选择反应面优化作为优化类型，再点击Optimize按钮即可。最终，在所有实验结果的后面，会以蓝色显示出最优方案及优化误差。最优方案为：基板长(50mm)、基板宽(50mm)、基板厚度(4.857mm)、肋片数量(5)、肋片高度(16.71mm)以及肋片厚度(1.664mm)。优化误差为： $\pm 5.9\%$ ，满足设计要求。如果优化误差高于10%，可以通过对优化结果多次计算或者增加实验的数量来提高精度。在最优方案下，芯片的壳温、节温和散热器的质量如表4所示。

表4 优化后芯片的壳温、节温和散热器质量

Compact Model	T _{Case} (deg C)	T _{Pcb} (deg C)	Junction Temperature (deg C)	Heatsink Mass (g)
U1[CBGA_FC 27x27mm_2R]	77.23	72.124	78.685	59.63

比较优化前后的结果，虽然散热器的质量有所增加，芯片的节温则有明显的降低，对于在热设计中希望尽量降低芯片节温的情况非常适合。

4 结束语

本文以一个简单的矩形肋片式散热器的几何参数的优化设计为例子，详细介绍了其优化过程在热分析软件Flotherm的Command Center模块中的实现。由于该软件模块具有强大的多参数优化功能，必将在电子设备热设计中得到广泛的应用。