

# Cree® XLamp® LED 的热管理

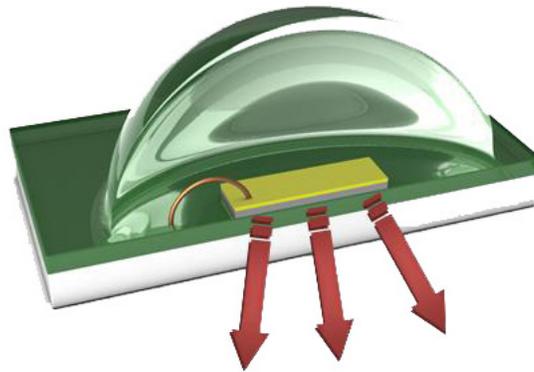


图 1: Cree XLamp LED 的散热路径

## 目录

- 简介..... 1
- 正确热管理的重要性..... 2
  - 光输出..... 2
  - 颜色..... 2
  - 电压..... 3
  - 可靠性..... 3
  - Cree 产品参数工具..... 4
  - 性能示例..... 4
- 生热..... 5
- 热传递的基本知识..... 5
  - 传导..... 5
  - 对流..... 6
  - 辐射..... 6
- 热路径/模型..... 7
- 热堆栈..... 9
  - XLamp LED 组件..... 9
  - 印刷电路板..... 10
  - 热界面材料..... 10
  - 散热器..... 11
  - 风扇/主动冷却..... 12
- 热测量..... 13
  - 热电偶..... 14
  - 红外热像仪..... 15
- 热模拟..... 16
- 结论..... 18
- 资源..... 19

## 简介

Cree XLamp 功率型 LED 在亮度和可靠性方面处于业界领先地位，以高能效和环保的光源实现了 LED 照明的革新。要充分利用 Cree XLamp LED 的优势，必须理解和应用正确的热管理。本应用说明解释了热管理的重要性，讨论了热学基本知识，详细描述了一些通用准则和设计建议。同时还对衡量和模拟热性能的方法作了基本概述。

### 正确热管理的重要性

LED 失效的一个主要原因就是热管理不当。LED 组件的许多性能特征都会受到工作温度的影响，因此 LED 系统设计人员需要对热设计和性能有基本的了解。所有 Cree XLamp LED 产品技术数据表都详细描述了受温度影响的性能特征。而且，Cree 的内部开发软件，产品参数工具 (PCT)<sup>1</sup>，<sup>1</sup>可用来计算对热效应的具体反应。某些性能特征经历的变化是可恢复的，比如光输出、颜色和电压，而其他性能特征，比如使用寿命，因工作温度过高而出现的性能降低，则是不可恢复的。不过，若超过最大工作温度规格（通常为 150°C 结温），则可能对 XLamp LED 造成永久性和/或灾难性损坏，因此，必须小心，使 LED 在低于该限值的温度下工作。

### 光输出

高结温会造成光输出下降，这种下降是可恢复的，如各 Cree XLamp LED 技术数据表的图形所示。随着结温升高，LED 的光输出降低，但当 LED 冷却后又会恢复。下面图 2 中，显示了 Cree XLamp XB-D LED 技术数据表中光通量与结温的相对关系。<sup>2</sup>XB-D LED 与许多其他新型 Cree XLamp LED 一样，在 85°C 温度条件下分档，因此，相对光通量数据是基于 85°C 结温下的光输出为 100% 确定的。

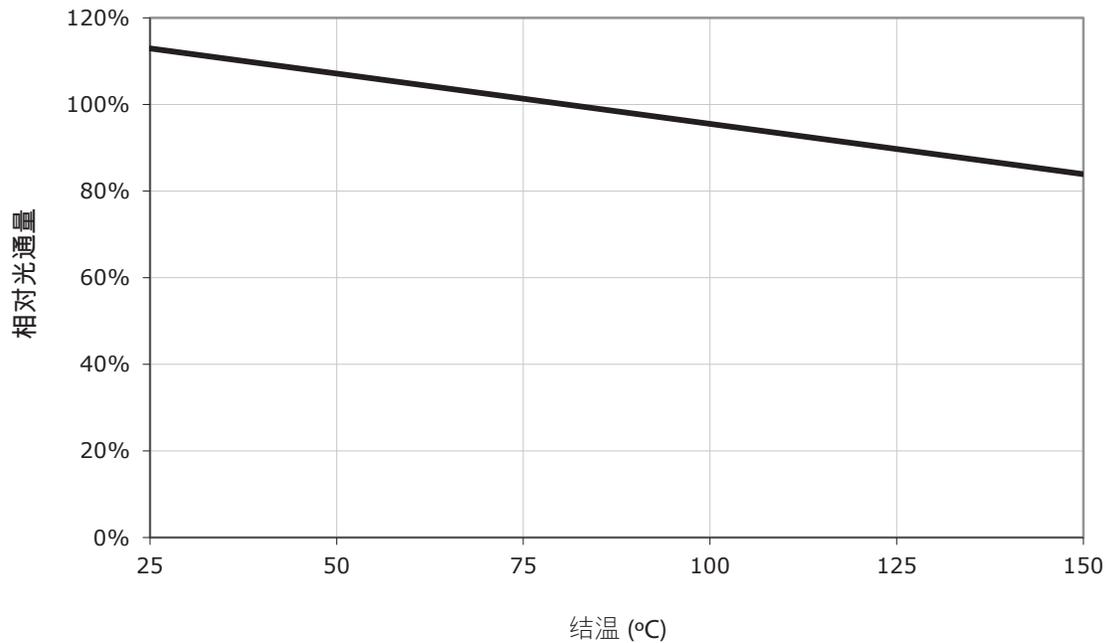


图 2: XLamp XB-D 相对通量与稳态结温的关系

1 Cree 的 PCT 可从以下网址获取: [pct.cree.com](http://pct.cree.com)  
 2 Cree XLamp XB-D 技术数据表, [www.cree.com/xlamp\\_data\\_sheets/xbd](http://www.cree.com/xlamp_data_sheets/xbd)

### 颜色

随着结温升高，所有 LED 的颜色都会偏移。尽管 Cree 制造的元器件业界最佳，偏色最小，但为了确保系统设计的正确，仍需理解这种效应。图 3 同样来自 XB-D 技术数据表，它显示了色度 CCx 和 CCy 相对于焊点温度 ( $T_{sp}$ ) 发生的偏移。<sup>3</sup>值得注意的是，该图中的数据表明，在整个工作温度范围内，两个方向的偏移均不到 0.004。市面上大多数 Cree 竞争对手的产品都做不到这点，它们的偏移通常比这要大得多。

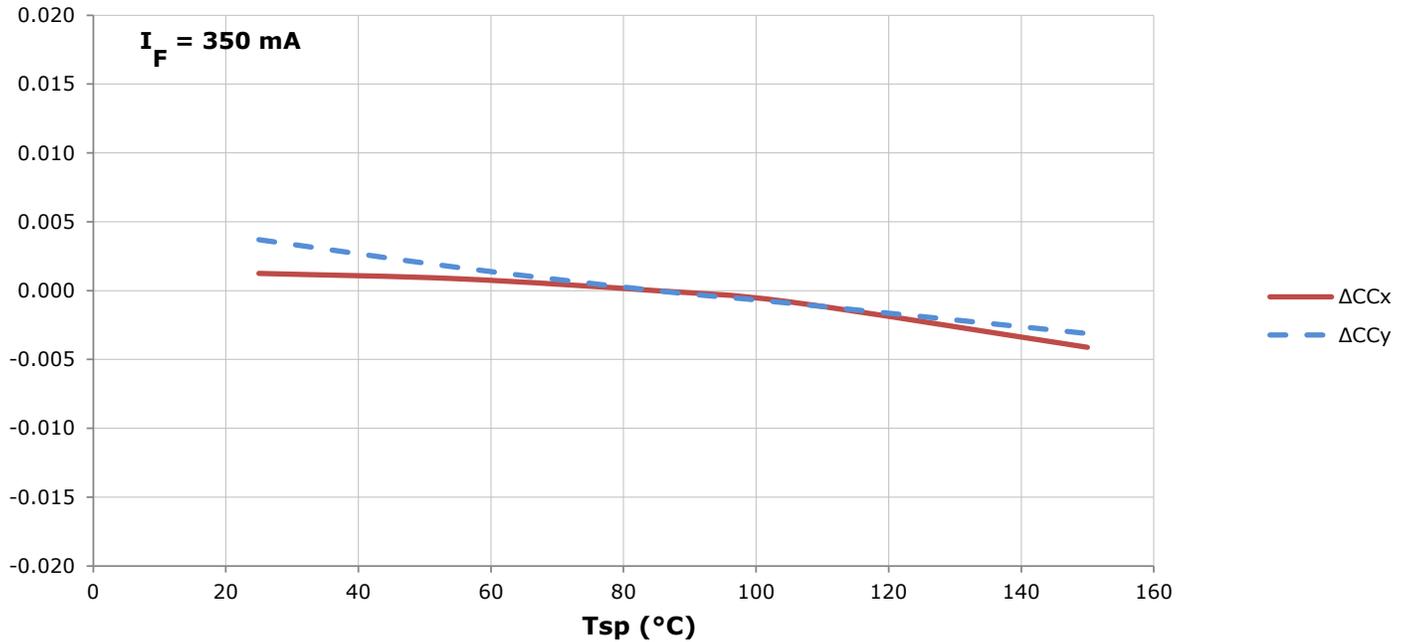


图 3: XLamp XB-D 颜色偏移与焊点温度的关系

### 电压

随着 LED 结温的升高，正向电压降低。这在 Cree XLamp 技术数据表中以电压温度系数表示，该系数随颜色和封装类型的不同而略有不同。这个值为每颗 LED 大约 -1 到 -4 mV/°C 不等。必须理解 LED 系统的全部工作条件，以便驱动器能满足系统工作温度下潜在的驱动电压范围。本文后面将显示它的一个示例。

3 Ibid.

### 可靠性

任何 LED 的可靠性都与结温直接相关。结温越高，LED 的寿命越短。IES LM-80-08 报告中的数据可用来预测在各种温度和驱动电流工作环境下，LED 的流明维持率。Cree 已为其 XLamp LED 发布了 LM-80 摘要<sup>4</sup>，完整的 LM-80 数据可以联系销售代表获取。

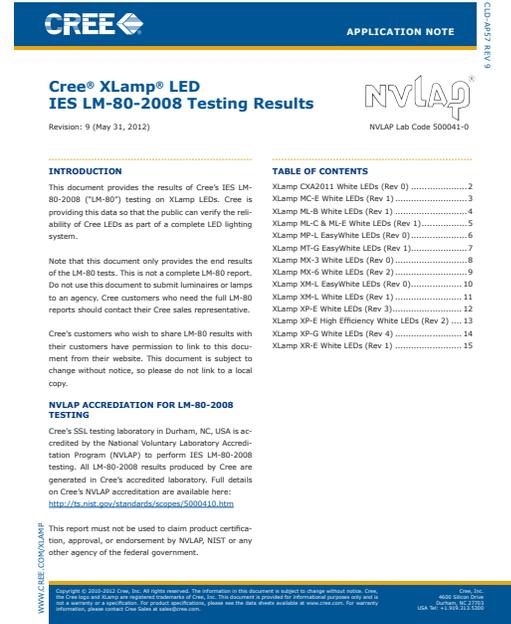


图 4: Cree XLamp LED LM-80 摘要

美国环境保护署 (EPA) 的 TM-21 计算器可以使用 LM-80 数据来预测特定工作条件下的流明衰减和预期寿命。<sup>5</sup>

### Cree 产品参数工具

除了使用来自 Cree 技术数据表中图形的数据以外，还有一种非常有用和精确的方法可用来确定性能与结温和焊点温度之间的关系，就是使用 Cree 开发的 PCT。下面图 5 中所示的是 PCT 的输出，显示了流明和电压在三种不同结温条件下的变化。图 5 中用黄色突出显示的是显示屏上设置温度输入的字段。

<sup>4</sup> Cree XLamp LED IES LM-80-2008 测试结果, AP57, [www.cree.com/xlamp\\_app\\_notes/LM80\\_results](http://www.cree.com/xlamp_app_notes/LM80_results)  
<sup>5</sup> ENERGY STAR (能源之星) TM-21 计算器: [www.energystar.gov/TM-21calculator](http://www.energystar.gov/TM-21calculator)

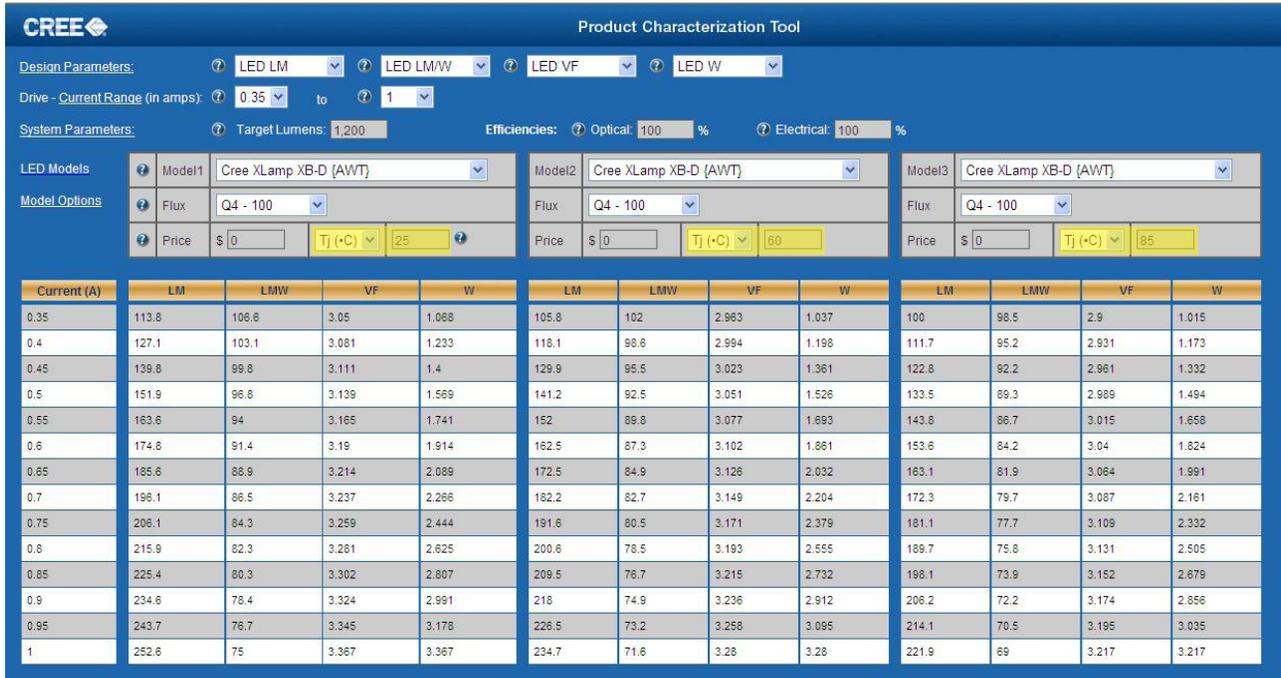


图 5: Cree PCT

### 性能示例

一颗 Q4 通量分档（在 350 mA，85°C 条件下光通量为 100 lm）的 XLamp XB-D LED，其驱动电流为 700 mA，初始环境温度 25°C，并升温到 60°C 结温。灯在开始和结束时的流明输出和电压各为多少？

这可以从上面的 PCT 输出方便地确定，并显示在下面表 1 中。

温度	光通量 (lm)	电压 (V)	光效 (Lm/W)
85°C (分档)	172.3	3.087	79.7
25°C (初始室温)	196.1	3.237	86.5
60°C (稳态)	182.2	3.149	82.7

表 1: 性能特征与温度的关系

从该示例中可学到几点知识，包括流明和光效随着温度的升高而下降。另外，当系统中包含大量的 LED 时，电压下降可能会变得显著，尤其是在初始环境温度非常低的情况下。在设计灯具系统时，所有这些都需要考虑，才能确保最终设计的正确。

## 生热

当电流流过半导体芯片的结时，LED 会产生可见光。不过，LED 效率达不到 100%；大量流经 LED 的功率都以热的形式输出，从而需要散热。Cree 深蓝光 XLamp LED 的效率超过 50%，白光 XLamp LED 效率超过 40%。也就是说，在正常工作条件下，大约 50% 到 60% 的输入功率以热的形式输出，而剩余的输入功率则转换成光。为保守起见，假定 LED 将输入功率的 25% 转换成光，将输入功率的 75% 以热的形式输出。这个估计随电流密度、亮度和元器件的不同而不同，不过对于热设计是一个较好的估计。下面方程式 1 显示了如何计算热功率。

$$P_t = 0.75 V_f I_f$$

方程式 1: 热功率计算

其中：

- $P_t$  是热功率 (W)
- $V_f$  是 LED 的正向电压 (V)
- $I_f$  是 LED 的源电流 (A)

$V_f$  和  $I_f$  可直接测得，或者通过 PCT 计算得出，因此可以方便地算出热功率。这是系统/散热器必须散发的功率大小。

## 热传递的基本知识

热传递有三种基本模式：传导、对流和辐射。每种都在 LED 性能和最终系统设计中扮演一定角色，要正确进行热管理，必须理解它们。

### 传导

传导是以直接接触方式通过固体材料来传递热量。这是将热功率从 LED 结传至散热器的第一种传热方式。金属通常是热的最佳导体。所有材料的热传导势能可以用热导率表示，通常缩写为  $k$ 。下面方程式 2 显示了如何计算通过传导传递的热量。

$$Q_{\text{cond}} = -k A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

方程式 2: 傅立叶热传导定律

其中：

- $Q_{\text{cond}}$  是通过传导传递的热量 (W)
- $k$  是材料的热导率 (W/m K)
- $A$  是热量流过的材料的横截面积 ( $\text{m}^2$ )
- $\Delta T$  是材料的温度梯度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\Delta x$  是热必须经过的距离 (m)

## 对流

对流是通过流体和气体的运动进行传热。在 LED 系统中，这通常是从散热器向周围空气传热。对流可分成两种子类别：自然对流和强制对流。自然对流发生时没有人为的场运动源，它是由流体和固体之间热梯度导致的浮力而引起的。强制对流发生时，是使用诸如风扇、泵或其他设备之类的外部器具，来人为地使流体或气体运动。在 LED 冷却系统中，对流是将生成的热量从 LED 系统和散热器排出的主要传热模式。下面方程式 3 显示了如何计算通过对流传递的热量。

$$Q_{\text{conv}} = h A \Delta T$$

方程式 3: 牛顿冷却定律 (对流)

其中:

$Q_{\text{conv}}$  是通过对流传递的热量 (W)

$h$  是传热系数 ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ )

$A$  是表面积 ( $\text{m}^2$ )

$\Delta T$  是材料的温度梯度 ( $^{\circ}\text{C}$ )，通常是表面温度与周围空气温度之差

在计算通过对流传递的热量时，难点在于确定和计算传热系数 ( $h$ )。典型的  $h$  值可能会随边界条件、几何形状以及许多其他因素的不同而显著不同。不过，对于自然对流， $h$  通常在  $5\text{--}20 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  范围内，而对于强制对流，空气的  $h$  值可高达  $100 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ ，水的  $h$  值可高达  $10,000 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ 。通常，对于空气中的自然对流，在初步粗略计算中， $10 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$  就是一个不错的假定值。

## 辐射

热能通过电磁场传递是第三种传热方式，称为辐射。辐射传热的量取决于材料的辐射系数，即表面与黑体的近似程度比率。在 LED 系统中，辐射通常对系统本身的传热影响非常小，因为表面积通常相当小，且表面温度也相对较低，以便保持 LED 结温低于最大额定温度  $150^{\circ}\text{C}$ 。下面方程式 4 显示了如何计算通过辐射传递的热量。

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A (T_s^4 - T_f^4)$$

方程式 4: 辐射传热方程式

其中:

- $Q_{\text{rad}}$  是通过辐射传递的热量 (W)
- $\varepsilon$  是表面的辐射系数 (无量纲)
- $\sigma$  是斯忒藩-玻耳兹曼常数 ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )
- $A$  是表面积 ( $\text{m}^2$ )
- $T_s$  是材料的表面温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_f$  是介质的流体温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 通常以周围环境空气温度作为参考

### 热路径/模型

LED 系统的热路径可以用一个类似于电路的简单电阻器网络来说明。热阻用电阻器表示, 热流近似于电流, 而系统中相应的温度则对应电压。下面图 6 是用电阻器网络来表示一个位于印刷电路板 (PCB) 上的 LED 系统, 而电路板安装在一个处于环境空气中的散热器上。

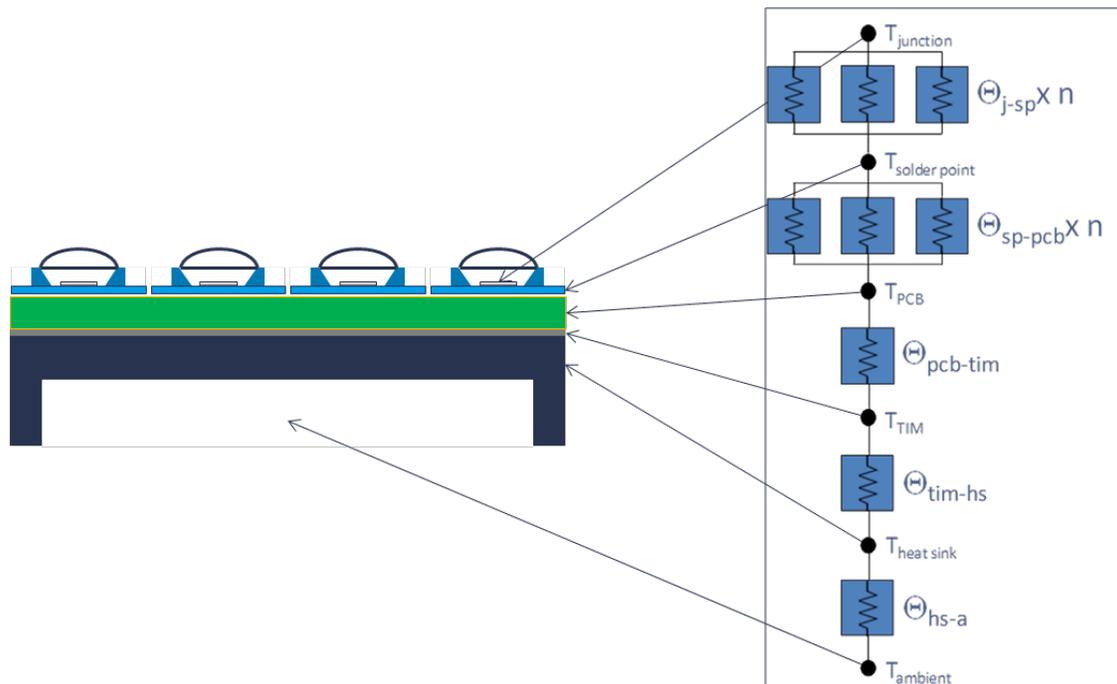


图 6: LED 阵列的热回路 (不按比例)

其中:

- $T$  是各相应位置的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $\Theta_{a-b}$  是 a 点到 b 点的热阻 ( $^{\circ}\text{C/W}$ )
- $n$  是单块 PCB 上 LED 组件的数量

上面图 6 中所示的热路径，概括地说，热量从 LED 结通过 LED 组件传导到 PCB，通过热界面材料 (TIM) 传导到散热器，然后对流和辐射到周围环境空气中。

回路中的节点代表系统中的各个部分，以及可以测量温度的各个位置。例如，焊点温度 ( $T_{\text{solder point}}$ ) 代表板上的某个位置，如每个 Cree XLamp LED 相应技术数据表中所指定，在该位置，可以测量 PCB 上表面的温度。这可用于计算结温，该内容将在稍后部分中详细描述。

电阻器代表各部分的热阻。例如， $\Theta_{\text{J-SP}}$  代表 LED 组件从结到焊点的热阻。

系统可以分成由多个 LED 并联和单个组件串联形成的网络。如果系统只包含一颗 LED，或者图 5 中  $n=1$ ，那么整个热路径就是简单的串联。

上述各个热阻可以通过以下方程式 5 计算而得。

$$\Theta_{\text{a-b}} = \frac{T_{\text{a}} - T_{\text{b}}}{P_{\text{t}}}$$

方程式 5: 单个热阻计算

其中:

$\Theta_{\text{a-b}}$  是 a 点到 b 点的热阻 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )

$T_{\text{a}}$  是 a 点的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{\text{b}}$  是 b 点的温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$P_{\text{t}}$  是方程式 1 中计算得到的热功率

整个系统的热阻也可以与串联电路类比，其中，系统热阻可按下面方程式 6 所示计算。

$$\Theta_{\text{sys,a-z}} = \Theta_{\text{a-b}} + \Theta_{\text{b-c}} + \dots + \Theta_{\text{y-z}}$$

方程式 6: 系统热阻计算

其中:

$\Theta_{\text{sys,a-z}}$  是 a 点到 z 点的系统热阻 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )

$\Theta_{\text{a-b}}$  是 a 点到 b 点的热阻 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )

$\Theta_{\text{b-c}}$  是 b 点到 c 点的热阻 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )

$\Theta_{\text{y-z}}$  是 y 点到 z 点的热阻 ( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )

在 LED 系统中，总的系统级热阻通常定义为“结到环境”，或者  $\Theta_{\text{J-A}}$ 。这定量地表示了每个组件传输热功率的效果如何。每款 Cree XLamp LED 在其技术数据表中都有一个电流降额曲线，该曲线为几个系统热阻或  $\Theta_{\text{J-A}}$  给出了最大驱动电流与环境温度的关系。下面图 7

中所示的是 XLamp XB-D LED 来自 XB-D 技术数据表的电流降额曲线。<sup>6</sup>

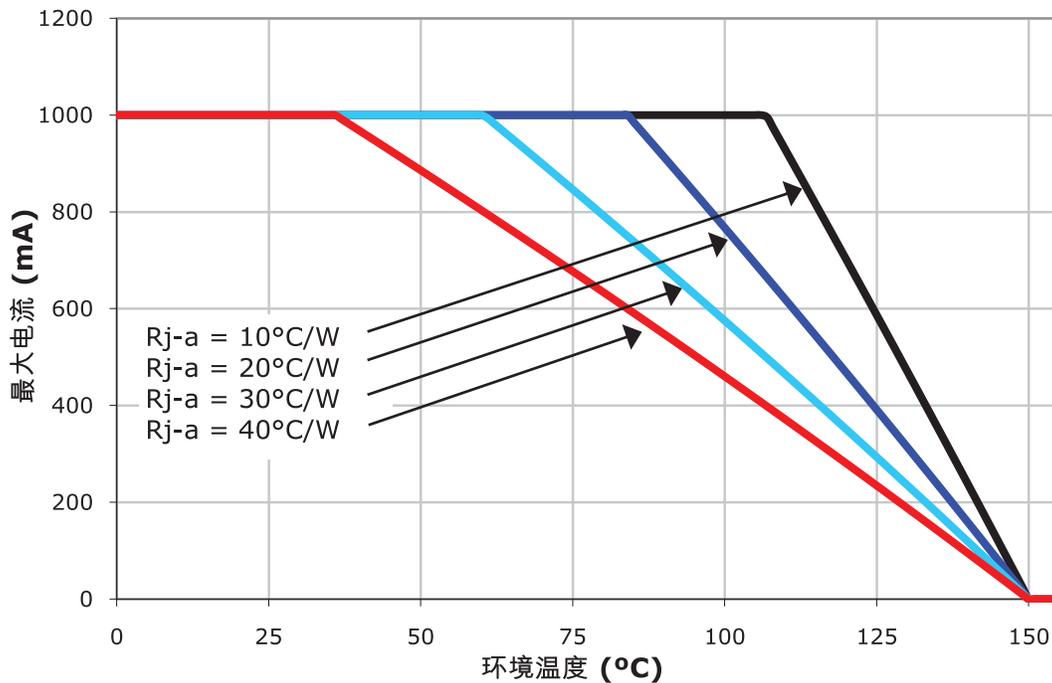


图 7: XB-D 电流降额曲线

要使用图 7 中的电流降额曲线，必须计算系统级热阻，如上面方程式 6 中所详细描述。环境温度也必须是已知的，基于此，就可以通过图 7 中的图形来确定热设计的最大驱动电流。

## 热堆栈

出于热分析的目的，LED 系统通常由一个包含多个组件的结构组成，该结构称为热堆栈，其中的所有组件都不同程度地对整体系统热性能产生影响。在一个典型系统中，LED 焊接到金属核心或 FR4 的 PCB，而 PCB 通常装在散热器上。使散热器和 PCB 之间的传热最大化是非常关键的，因此需要一种很好的热界面材料 (TIM) 来填充所有空隙。增强热路径的最佳方法，就是尽量减少热堆栈中材料的种数，并使用可用的热传导性最好的材料。下面是这种典型 LED 系统的描述，并附有一些意见和建议，供考虑每个要素时参考。

## XLamp LED 组件

热量在 XLamp 组件内 LED 芯片的结处生成。可以根据测得的  $T_{sp}$  以及技术数据表中所述的 LED 热阻，通过下面的方程式 7 来计算热量。

<sup>6</sup> Cree XLamp XB-D 技术数据表，op.cit.

$$T_J = T_{SP} + \Theta_{th} P_{total}$$

方程式 7: 结温计算

其中:

- $T_J$  是结温 (°C)
- $T_{SP}$  是测得的焊点温度 (°C)
- $\Theta_{th}$  是组件的热阻 (°C/W)
- $P_{total}$  是 LED 的输入总功率 (W) ( $I_f \times V_f$ )

如各技术数据表所规定, 所有 Cree XLamp LED 都不能超过其最大结温 150°C。

### 印刷电路板

大多数 Cree XLamp LED 都需要安装在 PCB 上, 以提供到诸如驱动器和散热器之类其他组件的电气和机械连接。PCB 的热效应可能会很明显, 因此在选择或设计 PCB 时必须谨慎。Cree 发布过一篇技术文章“Optimizing PCB Thermal Performance (优化 PCB 热性能)”, 该文详细描述了 PCB 设计建议, 并提供了一些提示。<sup>7</sup>请参看此文, 了解进一步的信息和建议。

### 热界面材料

根据所选的设计, 热界面材料可能会在系统热性能中扮演重要的角色。TIM 对于将散热器和 PCB 之间的气隙减到最小非常重要。TIM 不仅提供了 PCB 和散热器之间的热界面, 而且取决于应用, 它们还可以有其他功能, 比如电气绝缘或进行机械连接。LED 系统中使用了多种类型的 TIM, 包括油脂、胶带、垫片和环氧树脂。根据应用的不同, 每种都有各自的优点和缺点。下面表 2 显示了各种材料的一些优点和缺点。

TIM	属性					
	电导率	热阻	胶层厚度	生产自动化	再加工性	应力释放
胶膜	好	差	一般	一般	差	一般
粘接	好	好	优	优	差	一般
化合物	好	优	优	优	好	优
灌封胶	优	好	好	优	好	好
填缝垫片	优	一般	差	一般	优	好
凝胶	好	好	好	优	好	优
相变材料	优	优	一般	优	好	优

表 2: TIM 的相对属性<sup>8</sup>

选择 TIM 时, 必须考虑许多特征, 而不能只考虑热导率。常被忽视的是材料的胶层厚度, 如下面方程式 8 中所示, 材料的热阻很大程度上取决于该厚度。TIM 制造商将在它们自己的数据表上提供这些基本特征数据, 并且必须理解所有这些特征是如何共同起作用的, 以及确定对于每种特定应用, 哪个特征最为重要。

<sup>7</sup> 优化 Cree XLamp LED 的 PCB 热性能, AP37, [www.cree.com/xlamp\\_app\\_notes/PCB\\_Thermal](http://www.cree.com/xlamp_app_notes/PCB_Thermal)

<sup>8</sup> [www.dowcorning.com/content/etronics/etronicswet/relativepropertiespop.asp?popup=true](http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicswet/relativepropertiespop.asp?popup=true)

有时，热导率较差但厚度较薄的 TIM，其热阻要比热导率较好但较厚的 TIM 更低。在选择 TIM 时，必须同时考虑这两个属性，且能通过下面的方程式 8 来定量分析它们的相对影响。不过，尽管 TIM 的热导率可能要优于空气，但也不会好到金属的那种程度，因此正确的做法不是在金属组件之间添加材料，而是填充通常由空气占据的空隙。请记住，越薄越好！

$$\Theta_{\text{TIM}} = \frac{L}{k A}$$

方程式 8: TIM 热阻计算

其中：

$\Theta_{\text{TIM}}$  是 TIM 的热阻

L 是 TIM 的厚度 (m)

k 是 TIM 的热导率 (W/m K)

A 是接触面积 (m<sup>2</sup>)

## 散热器

散热器是热堆栈中最后也是最具影响力的部件，它首先需要将热量从 LED 传导出，然后将热量对流和辐射到周围大气中。因此，散热器的第一项任务就需要散热器是用高热导率材料制成的，以便将热量传导出。第二项任务则需要散热器具有较大的表面积，以便将热量对流到环境中，而且还要有较好的辐射系数，以便能将热量辐射出去。在某些情况下，散热器会耦合到诸如机架、外壳之类的其他散热器件上。在本文档中，我们将这些器件也归并到通用术语“散热器”下，但是，在系统设计中也不能忽视这种情况，因为它对整个 LED 系统的性能会产生重大影响。

下面表 3 显示了某些常见材料的热导率，以及它们辐射系数的粗略范围，辐射系数随材料表面光洁度的不同可能会有很大不同。选择最高热导率和/或辐射系数显然并不总是可行，因为还有其他必须考虑的因素，例如重量、成本和可制造性。对于每种应用，必须考虑以上每项因素，来确定最佳的材料和制造工艺。

通常将铸造铝或锻造铝用来制作散热器。阳极氧化铝可使散热器的辐射系数比普通铝高得多（达到大约 0.8），这有助于与环境之间的辐射传热。

材料	热导率 (W/m K)	大致辐射系数
丙烯酸	0.2	0.94
空气	0.024	不适用
铝	120 - 240	0.02 - 0.9 (取决于表面光洁度)
陶瓷	氧化铝: 15 - 40 氮化铝: 100 - 200	0.4 - 0.7 0.9
导热聚合物	3 ~ 20	不适用
铜	401	0.05 - 0.8 (取决于表面光洁度)
钻石	2000	1.0
FR4	0.2	0.7 - 0.8
玻璃	1.05	0.6 - 0.97
硅	150	0.6
碳化硅	350	0.85
银	429	0.02 - 0.074
不锈钢	16	0.1 - 0.9 (取决于表面光洁度)
热脂/环氧树脂/垫片	0.1 ~ 10	不适用
水	0.58	0.85 - 0.99
木材	0.17	0.8 - 0.9

表 3: 各种材料在 25°C 时的热导率和辐射系数

散热器的设计可能非常复杂，而且受到很多约束条件的限制，比如空间大小、成本、重量、可制造性以及无数其他要求。散热器的设计没有唯一正确答案，不同应用必须按具体情况进行分析，但以下通用准则可在设计流程中提供帮助。

- 尽量增大散热器表面积，从而尽量提高将热量通过对流从 LED 光源排出的能力。
- 每瓦热量大约 5-10 in<sup>2</sup> 的散热器表面，这一粗略估计值可用作散热器尺寸的第一次近似法估算。
- 不要限制散热翅片之间的空气流动。理解散热器在所用应用中的方向，尽量提高通过散热器的空气流量，以及尽可能提高空气流经的表面积。
- 选择具有良好热导率的材料，以将热量从 LED 散发出去。
- 使用表面辐射系数较高的散热器，尽量提高辐射传热。阳极氧化可显著提高铝制散热器的辐射系数。
- 出于众多原因，总是首选被动（自然对流）散热器，但如合适，主动冷却的散热器可以显著提高性能。
- 使用热建模，可简化重复的原型设计过程，并在设计流程的早期阶段找出设计缺陷和潜在的改进区域。

散热器设计要考虑的一个关键方面是即将使用的制造方法。这些方法相互之间差别很大，可以生产出完全不同的散热器，以用于不同的应用，满足它们的特定需要。下面表 4 中对较常见工艺的一些方面进行了比较。

散热片方面	粘结	铸造	挤压	折叠	锻造	线切	冲压
最大翅片高度	6.0 in	3.0 in	3.0 in	2.0 in	5.0 in	1.5 in	2.0 in
最小翅片厚度	0.032 in	0.070 in	0.040 in	0.010 in	0.020 in	0.016 in	0.007 in
最大长宽比	60:1	10:1	10:1	40:1	35:1	16:1	4:1
类型	直片	任何	直片 条状	直片	任何	不完全平直	直片
冷却系数	0.8x	1.4x	x	0.7x	1.5x	1.2x	1.4x
基座成本系数	1.3x	0.8x	x	1.2x	1.3x	1.2x	0.7x
模具成本系数	1.5x	4.0x	x	1.8x	3.0x	1.2x	2.8x
材料类型	Al6063 Cu1100	Al356	Al6063	Al6063 Cu1100	Al6063 Cu1100	Al6063 Cu1100	Al6063 Cu1100

表 4: 散热器制造工艺比较

### 风扇/主动冷却

如果 LED 系统的热负荷过高，通过被动方式已无法恰当地散热，那么主动冷却可能就是唯一的解决方案。主动冷却系统的类型有许多，从风扇到液冷，再到导热管，还有其他非常规方法。需要将这些设备的有效性、可靠性、噪音、成本、增加的功率（因此也降低了系统效率）以及维护，来与主动冷却系统带来的好处做综合衡量。极少有主动冷却设备的使用寿命能达到 LED 数千乃至数十万小时的长寿命水平，因此必须谨慎，不能因不适当的主动冷却解决方案而缩短了系统使用寿命。LED 系统是否可靠，取决于它最薄弱的环节，若不仔细选择，主动冷却就可能成为这一环节。下面表 5 简要总结了四种主动冷却系统的各个方面。

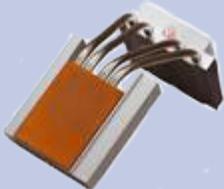
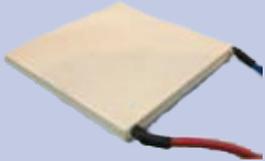
类型	散热功率	详细信息	示例图
风扇散热器	< 40 W	风扇直接安装在散热器上。需要额外功率，因此会减小 $lm/W$ 。一个重大缺点：如果风扇损坏，必须更换整个单元。	
导热管	< 140 W	导热管不散热，而是将热量转移到别处，因此在别处仍需要安装散热器。	
液冷	< 200 W	高热通量应用。昂贵，通常是导热管解决方案成本的 10 倍。	
珀尔帖装置	< 80 W	效率低、冷却能力有限、昂贵。需要额外功率，因此会减小 $lm/W$ 。	
合成射流冷却	< 80 W	冷却能力与风扇相当，但噪音较低，可靠性较好。要最好地利用该技术，需要专门设计散热器。	

 表 5: 主动冷却示例<sup>9</sup>

## 热测量

要合理地设计热系统，以及评估和评价现有设计，需要精确地测量温度。不管是对最终设计还是对原型设计，测量流程都是相同的，都需要审慎调查，以确保测量结果真实而精确。与传统光源相比，可靠性是 LED 的一个主要优势，因此，必须使用正确和切合实际的测量程序，以免削弱这个优势。

<sup>9</sup> [www.vettecorp.com/support/downloads/presentations/HeatSink\\_Basics\\_Cisco\\_Core\\_v6.pdf](http://www.vettecorp.com/support/downloads/presentations/HeatSink_Basics_Cisco_Core_v6.pdf)  
[qats.com/cms/2011/06/22/how-to-use-synthetic-jets-for-local-thermal-management/](http://qats.com/cms/2011/06/22/how-to-use-synthetic-jets-for-local-thermal-management/)

当执行热测量时，要将测试对象设置得尽可能接近现实生活中系统可能遭受的最坏情况。确保测量设置考虑到了类似的气流、材料属性、方向、周围条件和所有额外热源，比如电源或有影响的热负荷。这确保了测得的温度符合现实生活中最坏的情况，并能找出在最好的情况下可能会遗漏的潜在问题。

另一个要注意的因素是系统达到热稳定所需要的时间。取决于热负荷的大小，以及散热器的质量和有效性，某些系统只需几分钟就能稳定，而另一些则可能需要几小时。对于每项热测量，最好是监测热稳定性，并等待至少一小时。同时建议监测环境温度，并专门关注测量点和环境温度之间的差异，因为环境的任何改变都会在测得数据中反映出来。

测量温度有各种方法，对于 LED 系统，最常见的方法是简易热电偶、红外 (IR) 显微镜，以及脉冲电压/瞬态响应监测。后两种方法都需要昂贵、精确的专用工具，不在本文的讨论范围之内。简易热电偶是获取精确数据最常见，以是最简单的方法，建议采用该方法来精确地测量 LED 系统的绝对温度。

### 热电偶

Cree 为每款 XLamp LED 发布的“焊接和处理”应用说明详细描述了安装热电偶的位置和过程。下面图 8 中是摘自 XLamp XB-D 焊接和处理文档的一幅图像，显示了热电偶的正确位置。<sup>10</sup>安装热电偶的通用准则是，使热电偶尽可能靠近 LED，如有可能，直接安装在与中性热迹线相连的金属垫片上。建议使用导热环氧树脂或焊料，以确保从板到热电偶良好的传热效果。所有热电偶都必须位于光路径之外，否则光子将干扰读数，得到极其不准确的结果。

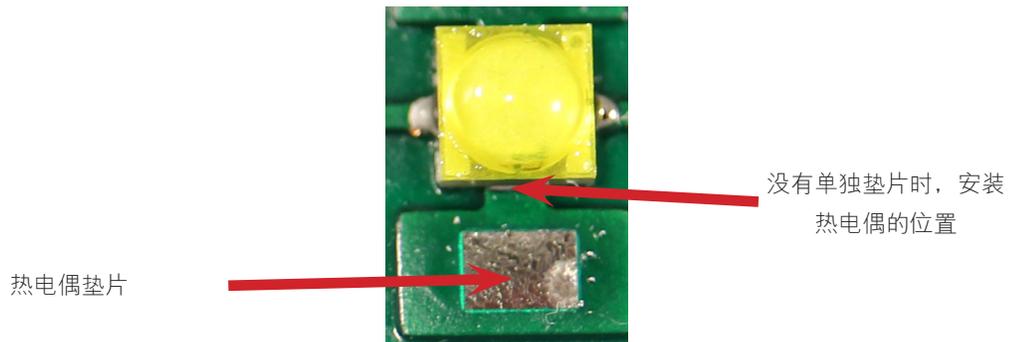


图 8: XB-D  $T_{sp}$  测量位置

<sup>10</sup> Cree XLamp XB-D LED 焊接和处理，AP90。www.cree.com/xlamp\_app\_notes/XBD\_SH

### 红外热像仪

红外热像仪测量可以快速、直观地显示 LED 系统中的散热情况，以查看有无潜在的热点，并用于其他相对比较。不过，将红外成像仪用于测量绝对温度可能非常复杂，而且会导致结果不精确。了解材料的确切辐射系数对于获得精确结果很关键，而辐射系数通常无法精确得知。获取精确辐射系数的一种方法是，用电偶进行测量，然后调整在红外成像仪上设置的辐射系数，以匹配这些结果。

图 9 显示了用四个不同的辐射系数值捕获的相同红外热像，它们都位于典型材料的一个正常小范围内。左上图的辐射系数设置值为 0.95，右上图为 0.8，左下图为 0.7，右下图为 0.5。LED 板上的同一点，温度分别为 86.0°C、95.7°C、104°C 和 129°C。因此，辐射系数的微小差别就会造成温度的很大差别。

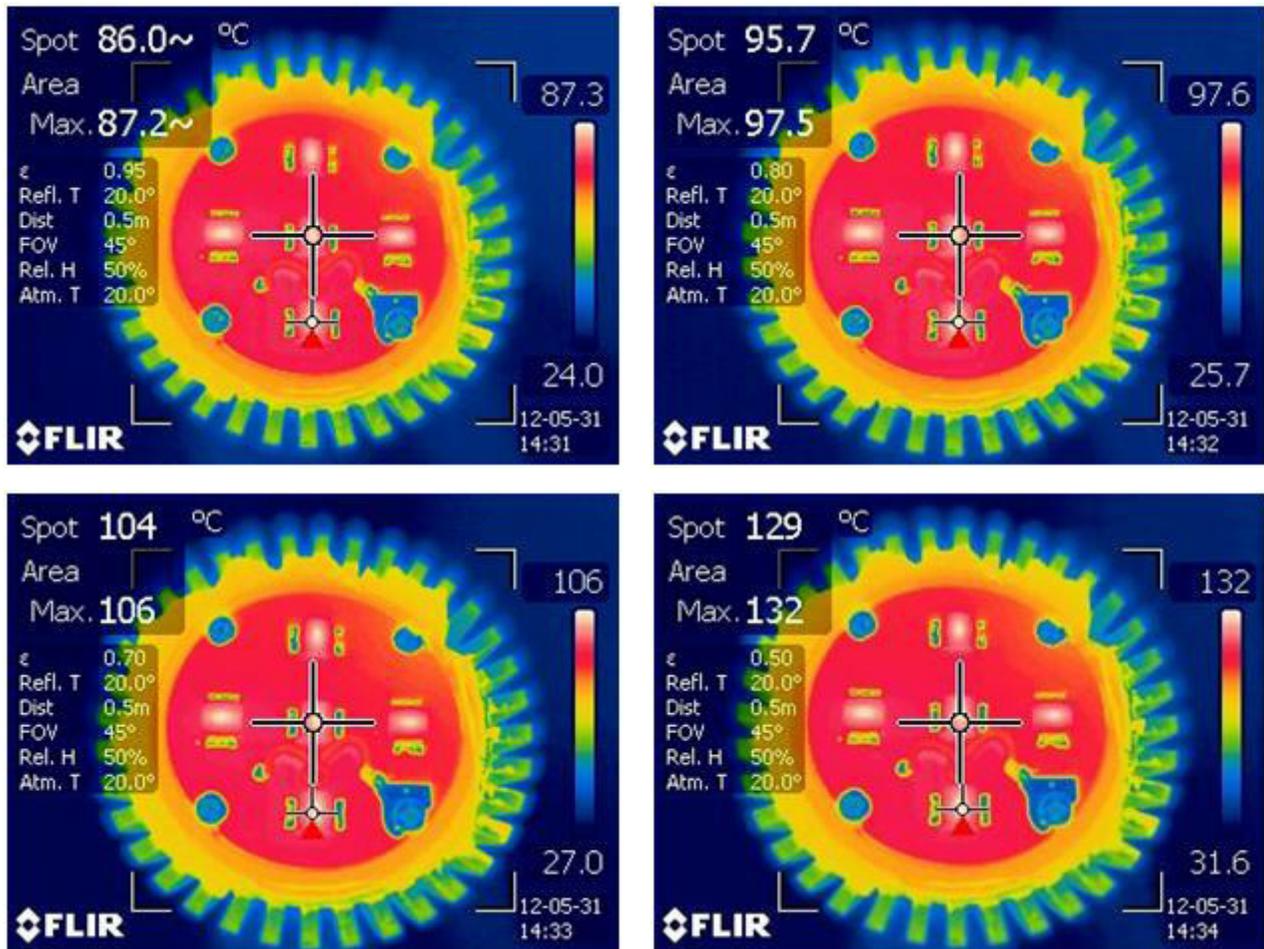


图 9：不同辐射系数值下的同一红外热像  
 左上角：0.95，右上角：0.8，左下角：0.7，右下角：0.5

## 热模拟

为了在投资昂贵的原型设计和进行多次设计修订之前尽早进行设计确认，强烈建议执行热模拟。Cree 服务中的热学、电气、机械、光度和光学 (TEMPO) 服务选项中包含了热模拟。<sup>11</sup>热模拟可以显示设计中的问题区域和热点，并允许采用迭代设计调整来解决问题和优化系统。计算流体动力学 (CFD) 分析可进一步增强热模拟，因为它能解决传导、对流（无论是自然对流还是强制对流）和辐射，完整地评估整个系统设计，以及系统周围流体流动的影响。模拟有利于以较低的成本快速地进行设计调整，并能非常直观地显示散热情况及可能存在的瓶颈，从而找到可能改进的地方。

执行热模拟时必须小心，因为必须进行许多假设，且必须知道和理解运行条件。模拟总会得到答案：不过，取决于所采用的方法，答案并非总是正确的。在模拟了系统并优化了设计之后，总是建议您构建一个最终原型，以准确地衡量其性能。不过，热模拟可用来尽可能减少看似无休止的原型设计迭代步骤，因为它能提前介入，减少选项数量，将注意力放在设计工作上，而非投入于原型、测试和重复工作上。

下面表 6 是性能相当的两种不同散热器在不同方向时的 CFD 模拟结果。挤压成型散热器在散热翅片的方向与重力方向垂直时（水平 - 90° 情况），表现出相当低下的性能，但在水平 - 0° 和垂直 - 向下情况中，由于气流不受限制，允许沿着散热翅片向上流动离开光源，此时性能相当不错。由于对称性，径向散热器在水平安装时表现的性能完全一样，而在垂直安装时，由于散热翅片周围空气能向上流动，性能要好得多。记住，热空气是上升的，因此始终要注意散热器散热翅片的方向，使其不会阻碍气流向上朝重力相反方向运动。

<sup>11</sup> [www.cree.com/tempo](http://www.cree.com/tempo)

光源方向	挤压散热器		径向散热器	
	热阻 (根据光源方向“水平 - 0°”确定比例)	图像	热阻 (根据光源方向“水平 - 0°”确定比例)	图像
水平 - 0°	1.00 x		1.00 x	
水平 - 90°	2.15 x		1.00 x	
垂直 - 向上	1.23 x		0.74 x	
垂直 - 向下	1.03 x		0.74 x	

表 6: 通过热模拟计算散热器方向的影响

## 结论

---

LED 的热管理极其重要，在设计和开发 LED 系统时，要理解其重要性。为延长使用寿命和改善性能，在所有驱动和工作条件下，都必须保持 LED 冷却。要正确地设计 LED 系统，需要掌握热传递的基础知识，并完全理解热路径和热堆栈知识。应使用热模拟和测试，来优化和衡量每个 LED 系统的性能。

---

## 资源

下面是各种热管理资源的一些网站链接。Cree 没有明确推荐它们，并且这个清单也没有包含所有内容，而只是提供了一些协助热设计的资源。

散热器公司	
Aavid Thermalloy	<a href="http://www.aavid.com/">www.aavid.com/</a>
Advanced Thermal Solutions, Inc.	<a href="http://www.qats.com/">www.qats.com/</a>
Asia Vital Components Co. (AVC)	<a href="http://www.avc-europa.de/">www.avc-europa.de/</a>
Cooler Master Ltd., Inc.	<a href="http://odm.coolermaster.com/">odm.coolermaster.com/</a>
Cooling Source Inc.	<a href="http://www.coolingsource.com/">www.coolingsource.com/</a>
Huizhou Taisun Precision Parts Co., Ltd.	<a href="http://www.hztaisun.com/en/index.asp">www.hztaisun.com/en/index.asp</a>
Nuventix, Inc.	<a href="http://www.nuventix.com/">www.nuventix.com/</a>
Wakefield Solutions, Inc.	<a href="http://www.wakefield.com/">www.wakefield.com/</a>
Wisefull Technology Ltd.	<a href="http://www.wisefull.com/">www.wisefull.com/</a>

热界面材料 (TIM) 公司	
3M	<a href="http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/AdhesivesForElectronics/Home/Products/ThermalSolutions/">solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/AdhesivesForElectronics/Home/Products/ThermalSolutions/</a>
Arctic Silver, Inc.	<a href="http://www.arcticsilver.com/">www.arcticsilver.com/</a>
Bergquist Company	<a href="http://www.bergquistcompany.com/thermal_materials/index.htm">www.bergquistcompany.com/thermal_materials/index.htm</a>
Chomerics	<a href="http://www.chomerics.com/products/thermal.htm">www.chomerics.com/products/thermal.htm</a>
Dow Corning Corporation	<a href="http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicspadsfilm/">www.dowcorning.com/content/etronics/etronicspadsfilm/</a> <a href="http://www.dowcorning.com/content/etronics/etronicswet/default.asp">www.dowcorning.com/content/etronics/etronicswet/default.asp</a>
GrafTech International Ltd.	<a href="http://www.graftech.com/MARKETS/Lighting-Thermal-Management.aspx">www.graftech.com/MARKETS/Lighting-Thermal-Management.aspx</a>
Indium Corporation	<a href="http://www.indium.com/TIM/">www.indium.com/TIM/</a>
Laird	<a href="http://www.lairdtech.com/Products/Thermal-Management-Solutions/Thermal-Interface-Materials/">www.lairdtech.com/Products/Thermal-Management-Solutions/Thermal-Interface-Materials/</a>
Shin-Etsu Chemical Co., Ltd.	<a href="http://www.silicone.jp/e/products/notice/heat/index.shtml">www.silicone.jp/e/products/notice/heat/index.shtml</a>
TIMtronics	<a href="http://www.timtronics.com/">www.timtronics.com/</a>

印刷电路板 (PCB) 公司	
Bergquist Company	<a href="http://www.bergquistcompany.com/thermal_substrates/index.htm">www.bergquistcompany.com/thermal_substrates/index.htm</a>
Copper Wave, Inc.	<a href="http://www.copperwavepcb.com/">www.copperwavepcb.com/</a>
Milplex Circuit Inc.	<a href="http://www.milplexcircuit.com/">www.milplexcircuit.com/</a>
Multilayer Prototypes, Inc.	<a href="http://www.mpi-pcb.com/">www.mpi-pcb.com/</a>
Saturn Electronics Corporation	<a href="http://saturnelectronics.com/thermalmanagement.htm">saturnelectronics.com/thermalmanagement.htm</a>

热模拟公司	
Advanced Thermal Solutions, Inc.	<a href="http://www.qats.com/">www.qats.com/</a>
ANSYS, Inc.	<a href="http://www.ansys.com/">www.ansys.com/</a>
Autodesk, Inc.	<a href="http://www.autodesk.com/simulation-cfd">www.autodesk.com/simulation-cfd</a>
Informative Design Partners (IDP)	<a href="http://www.informativedp.com/">www.informativedp.com/</a>
ThermoAnalytics, Inc.	<a href="http://www.thermoanalytics.com/">www.thermoanalytics.com/</a>