

LED 灯具的热传导计算模型

刘必成 深圳市海洋王投资发展有限公司

摘要

本文对灯具的热传导计算方法进行了讨论, 提出对于灯具的散热计算方法使用等效电路的热阻法计算, 可以直接算出灯具内温度关注点与环境温度的温差。有利于判断导热结构是否可行。文中还用了一个 LED 灯具散热计算实例说明了这种计算过程。

关键词: 灯具、热传导、热阻、LED

Abstract

This paper includes the discussion about the calculation methods of the lighting's heat transfer. Also the usage of the calculation method of heat resistances in equivalent electrical circuits, by which the difference between the temperature of the attention point inside the lighting and environment temperature can be directly obtained. Such a method is advanced on estimating the feasibility of a heat transfer's structure. The calculation process has been demonstrated by an example of cooling of an LED lighting in this paper.

Key word: lighting, heat transfer, heat resistance, LED

Luxeon 大功率 LED 在散热性能方面大大地优于普通的小功率 LED, 电通道和热通道分离开, 它的 LED 芯片都连接在一个金属的嵌片上, 散热性能得到很大的改善。

但是, 大功率 LED 用于特种灯具, 或用于恶劣环境使用的灯具, 这些灯具的外壳防护等级一般都在 IP65 以上, 如果外壳为非金属(如塑胶)材料, 尽管 LED 连接上了铝基板(MCPCB), 但铝基板上的热量如果不能被有效地传导至外壳表面, 则聚集的热量会使铝基板的温度急剧上升, 导致温度过高, 增加了 LED 失效的可能性, 造成 LED 光衰加剧, 寿命缩短。

理论上计算灯具散热的情况, 灯具的导热理论有许多困难, 主要的困难是传导和对流同时对热传导起着作用, 而对流是在密闭空腔内的对流, 边界条件十分复杂; 传导也是要通过多层导热物质、多层界面, 截面积通常又是不等的, 导致热流线分布的情况很难在计算之前就能通过分析得到。

由于灯具是在开启后逐渐升温, 最后达到热稳定状态, 也就是说, 热稳定状态时各点的温度最高, 所以灯具的散热计算一般只考虑稳态的情况, 瞬态的温度分布情况并不重要。对于稳态含热源在各向同性的单一介质中的导热服从 Poisson 方程^[1]:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q'''}{k} = 0$$

式中 k 为介质的导热系数, q''' 为热源的发热功率。

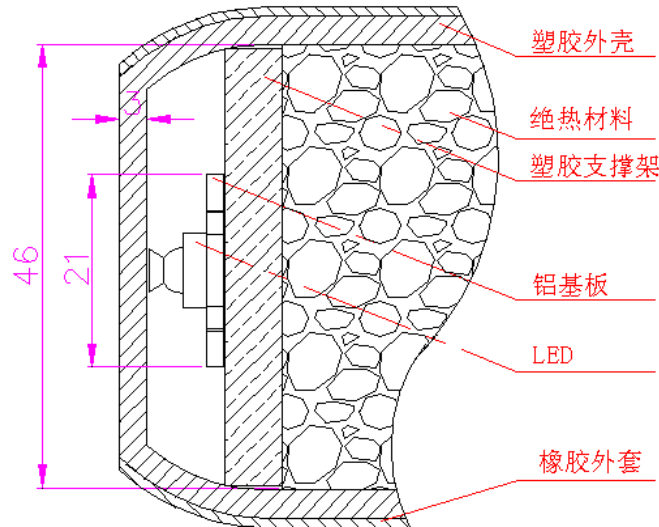
由于灯具的结构是多种介质, 所以在实际计算中, 必须对每一种介质逐一求解上式, 计算灯具内的温度场分布是十分困难, 而且是没有必要的。实际上, 我们所关心的是某些部位的温度是否在可以容忍的温度范围之内, 只要计算出这些部位在达到热稳定时的温度即可。

本文对等效电路的热阻算法进行了探讨, 热阻算法的好处是无需知道确切的环境温度, 也不必求解灯具内的温度场, 直接计算灯具内关注点的温升, 困难是热流线的分布必须

通过分析而不是计算得到，而这一过程往往又是很复杂的。

下面以一个实例的计算来说明等效电路的热阻算法。

灯具要求的基本结构如下图，LED 处于密闭的塑胶外壳内，右侧的绝热层较厚，比起其他部分导热，其导热基本可以忽略不计，热量主要通过支撑架、塑胶外壳、橡胶外套，然后通过外部空气对流散到空气中。



1. 简化模型:

- (1) 铝基板视为一个等温热源;
- (2) 支撑板与铝基板之间有一个附加导热层;
- (3) 由于塑胶的热导率比空气的热导率高得多，所以，空气的导热可以忽略不计;
- (4) 支撑板与塑胶外壳之间有一层附加导热层
- (5) 塑胶外壳与橡胶外皮之间为紧密接触
- (6) 铝基板与外壳之间的对流导热可以忽略不计^[2]

所以总热阻

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6$$

其中

R_1 为支撑板与铝基板之间的附加导热层的热阻;

R_2 为支撑板的热阻;

R_3 为散热板与塑胶外壳之间的附加导热层的热阻;

R_4 塑胶外壳的热阻;

R_5 为橡胶外皮的热阻;

R_6 为橡胶外皮处于空气中对流换热的热阻^[1]。

2. 计算

下面分别计算各部分热阻:

$$R_1 = \frac{1}{k_1} \frac{d_1}{A_1} = \frac{1}{0.7} \frac{1.5 \times 10^{-4}}{\pi \times 0.0105^2} = 0.619 \quad (\text{K/W})$$

$$R_2 = \frac{1}{k_2} \frac{1}{2\pi d_2} \ln \frac{23}{10.5} = \frac{1}{0.33} \frac{1}{2\pi \times 0.006} \times 0.7841 = 63.03 \quad (\text{K/W})$$

$$R_3 = \frac{1}{k_3} \frac{d_3}{A_3} = \frac{1}{0.7} \frac{0.0001}{2\pi \times 0.023 \times 0.006} = 0.1648 \quad (\text{K/W})$$

$$R_4 = \frac{1}{k_4} \frac{d_4}{A_4} = \frac{1}{0.33} \frac{0.003}{2\pi \times 0.0245 \times 0.006} = 9.841 \quad (\text{K/W})$$

$$R_5 = \frac{1}{k_5} \frac{d_5}{A_5} = \frac{1}{0.33} \frac{0.001}{2\pi \times 0.0265 \times 0.006} = 3.033 \quad (\text{K/W})$$

上述各式中, $k_i (i=1,2,3,4,5)$ 为各介质的导热系数;

$A_i (i=1,2,3,4,5)$ 为各介质的导热等效截面积;

$d_i (i=1,2,3,4,5)$ 为各介质的导热长度;

$$R_6 = \frac{1}{\bar{h}_6 A_6} = \frac{L}{k_6 C (Gr_L Pr)^{1/4} A_6} = \frac{0.054}{20.67 \times 10^{-6} \times 0.53 \times 10^5 \times 2\pi \times 0.027 \times 0.03} = 9.685$$

(K/W) [1]

上式中, $\bar{h}_6 = \frac{C (Gr_L Pr)^{1/4} k_6}{L}$ 为平均换热系数;

L 为定性长度, 在大圆柱对流换热情况下, 通常取圆柱直径;

Gr_L 和 Pr 分别为无量纲的格拉晓夫数和普朗特数, 不同情况下的数值可以查表

获得;

C 为适配系数, 在层流的情况下通常取 0.53~0.54;

A_6 为对流换热的有效面积;

k_6 为空气的导热系数。

于是总热阻为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 = 86.37 \quad (\text{W/K})$$

LED 约有 1W 的功率变成热量则铝基板的温升为

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = qR = 86.37 \quad (\text{K})$$

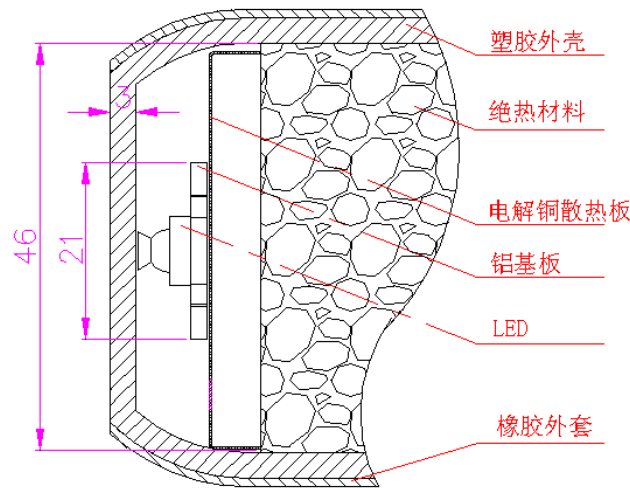
其中 T_2 为铝基板温度, T_1 为环境温度。

若环境温度为 40°C , 则铝基板的温度将要达到 126°C , 此时 LED 的结温达到 166°C , 根据 Lumileds 公司的 “Luxeon Reliability” 一文中介绍, Luxeon LED 的失效与温度的关系为:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \exp\left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right]$$

这样高的温度 Luxeon 的失效几率比结温 120°C 时失效几率大 92854 倍, 接近 10 万倍。这种温度下运行可靠性很差, 所以这种导热结构不可行。从各个热阻分量看, 主要的热阻是支撑板的传导热阻, 改进必须是针对它的结构改进。

若采用另一种热传导结构, 取消塑胶的支撑架, 换成 0.3mm 厚的电解铜散热板, 如下图所示



其它部分不变, 电解铜散热板的热阻为

$$R_2' = \frac{1}{k_2} \frac{1}{2\pi d_2} \ln \frac{23}{10.5} = \frac{1}{386} \frac{1}{2\pi \times 0.0003} \times 0.7841 = 1.078 \quad (\text{K/W})$$

电解铜散热板的折边有 6mm , 这部分的等效热阻为

$$R_7 = \frac{1}{k_7} \frac{d_7}{A_7} = \frac{1}{386} \frac{0.003}{2\pi \times 0.023 \times 0.0003} = 0.1793 \quad (\text{K/W})$$

于是, 总热阻变为:

$$R = R_1 + R_2' + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 = 24.60 \quad (\text{W/K})$$

$$\Delta T = (T_2 - T_1) = qR = 24.60 \quad (\text{K})$$

若环境温度为 40°C , 则铝基板的温度将要达到 64.6°C , 此时 LED 的结温达到 104.6°C , 从理论上说, 这种热传导结构是可行的。

下表是两种结构温度试验与理论计算结果对照

	支撑架结构		电解铜散热板结构	
	环境温度 (°C)	铝基板温度 (°C)	环境温度 (°C)	铝基板温度 (°C)
理论计算	40	126	40	64.6
试验	39.5	127.3	39.8	72.3

3. 讨论

从上面计算可以看出，采用等效于电路的热阻计算法，选取合适的简化模型，对于不同热传导结构中，温度关注点的温升进行计算，可以在开模具之前判断热传导结构的优劣，同时可以根据各部分热阻的计算结果判断主要的结构改进方向，这对于指导和改进结构设计具有实际的意义。

参考文献

- [1] Donald Pitts, Leighton Sissom: Schaum's Outline of Theory and Problems of Heat Transfer, Secnd Edition Copyright c 1998 by the McGraw-Hill Companies, Inc (中译本, 葛新石等翻译),
- [2] A. F. Emery: Trans. ASME, J. Heat Transfer, 91: 361(1969)