

文章编号: 1000-7032(2019)06-0795-08

## 基于有限元算法和人工神经网络结合的多芯片 LED 光源多物理场分析

刘宏伟<sup>1,2\*</sup>, 于丹丹<sup>1,2</sup>, 牛萍娟<sup>1,2</sup>, 张赞允<sup>1,2</sup>, 郭 凯<sup>1</sup>,  
王 迪<sup>1</sup>, 张建新<sup>1</sup>, 郝成奎<sup>1</sup>, 王 闯<sup>3</sup>, 吴超瑜<sup>4</sup>

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 天津市光电检测与系统重点实验室, 天津 300387;  
3. 飞利浦(中国)投资有限公司, 天津 300010; 4. 天津三安光电有限公司, 天津 300384)

**摘要:** 多芯片 LED 光源的可靠性分析涉及到光、电、热多个物理场, 高精度的多场分析结果会导致计算资源过多、计算时间过长、计算难度大等问题。为解决上述问题, 本文分别利用传统的有限元算法(FEM)和高效的人工神经网络方法(ANN)进行 LED 光源温度分析, 并讨论两种方法的优劣性。最后, 通过将 FEM 分析单一传热物理场的优势与 ANN 计算时间短、计算资源需求低的优势相结合, 归纳出一种更为高效的方法来进行多芯片 LED 光源的散热分析。利用该方法, ANN 的预测数据与训练数据之间的相关系数达到了 0.997 79, 预测结果与实际热分布图有良好的匹配, 计算资源相比传统的 FEM 方法节约了 59%。该方法的应用能够在满足精度的前提下耗费更少的计算资源和时间, 同时提高了分析的灵活性。除此之外, 该方法对求解大功率 LED 光源寿命等可靠性问题也具有一定的参考价值。

**关键词:** 多芯片 LED 光源; 多场耦合; 散热分析; 有限元算法; 人工神经网络

中图分类号: O472+.3 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20194006.0795

## Multi-physics Analysis of Multi-chip LED Light Source Based on Finite Element Method and Artificial Neural Network

LIU Hong-wei<sup>1,2\*</sup>, YU Dan-dan<sup>1,2</sup>, NIU Ping-juan<sup>1,2</sup>, ZHANG Zan-yun<sup>1,2</sup>, GUO Kai<sup>1</sup>, WANG Di<sup>1</sup>,  
ZHANG Jian-xin<sup>1</sup>, JIA Cheng-kui<sup>1</sup>, WANG Chuang<sup>3</sup>, WU Chao-yu<sup>4</sup>

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China;

2. Tianjin Key Laboratory of optoelectronic detection and system, Tianjin 300387, China;

3. Philips(China) Unvestment Co. LTD, Tianjin 300010, China; 4. Sanan Optoelectronics, Tianjin 300384, China)

\* Corresponding Author, E-mail: huli@foxmail.com

**Abstract:** The reliability analysis of multi-chip LED light sources involves multiple physical fields of light, electricity and heat. The high-precision analysis results will lead to too many calculation resources, too long calculation time and difficult calculation. To solve the above problems, the traditional finite element method(FEM) and efficient artificial neural network(ANN) method are used to analyze the temperature of LED light source, and the advantages and disadvantages of both are discussed. Finally, by combining the advantages of FEM analysis in a single heat transfer physics field with the advantages of ANN in little calculation time and low computational resource requirements, a

收稿日期: 2018-08-16; 修订日期: 2018-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(61575144,61504093); 天津市科技计划(16YFXTGX00230,18JCYBJC85400); 天津市教委科研计划(2017ZD06); 天津市高等学校创新团队培养计划(TD13-5035)资助项目  
Supported by National Natural Science Foundation of China(61575144,61504093); Science and Technology Program of Tianjin(16YFXTGX00230,18JCYBJC85400); Scientific Research Program of Tianjin Education Committee(2017ZD06); Program for Innovation Team of Tianjin Institution of Higher Learning(TD13-5035)

more efficient method for heat dissipation analysis of multi-chip LED light sources is summarized. Using this method, the correlation coefficient between the prediction data and the training data of ANN reaches 0.997 79, and the prediction result has a good match with the actual heat distribution. The computational resource saves 59% compared with the traditional FEM method. The application of this method can consume fewer computing resources and time based on satisfying the accuracy, while improving the flexibility of analysis. In addition, this method has certain reference value for solving the reliability problems such as the lifetime of high-power LED light source.

**Key words:** multi-chip LED light source; multiphysics field coupling; thermal analysis; finite element method; artificial neural network

## 1 引 言

LED 作为新一代固体照明光源,具有亮度高、功耗低、寿命长、可靠性高等优点<sup>[1-2]</sup>,在屏幕背光、交通信号灯、医疗设备改善等领域得到了广泛应用<sup>[3-6]</sup>。大功率 LED 光源是指比普通 LED 具有更大额定工作功率的 LED 光源,通常由多个 LED 芯片组成。由于大功率 LED 在成本、发光效率、显色指数、结构散热等方面存在问题,使得大功率 LED 在生产和应用方面受到了制约<sup>[7]</sup>。其中,结构散热好坏对 LED 的发光质量和寿命影响非常大<sup>[8]</sup>。LED 光源的发光机理是在施加一定的电功率情况下,电子和空穴通过电场驱使在 PN 结区域发生复合并释放能量,其中一部分能量通过辐射性复合转化为光子,另一部分则因非辐射复合转化为热能。产生的热量如果未能及时散发出 LED,会造成器件的老化或者永久性损坏。因此,大功率 LED 光源的可靠性分析涉及到电、光、热物理场,3 个物理场在其工作过程中相互联系,共同影响其可靠性。由此可知,建立更为高效准确的 LED 多物理场分析系统来分析散热分布是十分必要的。

有限元方法(FEM)起源于土木工程和航空工程的结构力学分析。自 20 世纪 50 年代起逐渐开始大规模应用,现如今,FEM 已经应用于材料、建筑、传热等领域,通常用于解决单场或多个物理场相互作用的问题,是一种十分有效的分析计算方法<sup>[9-11]</sup>。然而,FEM 同时存在着计算时间过长、占用资源过多等问题<sup>[12-13]</sup>。利用 FEM 进行大功率 LED 光源模型的光、电、热多物理场分析,计算结果的收敛性往往非常差。

人工神经网络(ANN)是一种十分高效的数

据处理方法<sup>[14]</sup>。ANN 通常被定义为由大量类似于生物神经元的人工神经元互相连接、形成一种具有数据处理能力的网络,人工神经元是该网络的基本处理单元。ANN 作为一种适应性很强的算法,被广泛应用于模式识别、信号处理、人工智能控制等研究领域<sup>[15-18]</sup>。

本文将 ANN 高效的数据处理能力与半导体光源领域相结合,结合 FEM 算法在计算传热等单场方面的优势,探究一种更为高效的分析大功率多芯片 LED 光源可靠性的方法。

## 2 基于 FEM 的 LED 光源温度分析

FEM 是一种求解偏微分方程边值问题近似解的数值方法。基本思想是将连续的求解域划分成有限多个单元,单元与单元之间通过节点相互连接,之后利用在每一个单元内假设的近似函数,列出每个节点上待求的偏微分方程并联立,通过适当的数值方法求解因变量的值。在 FEM 中,计算的时间和资源大小与自由度(DOF)数量密切相关。自由度是控制物理场空间变化的参量。由于近似函数是由待求因变量或其导数值在单元的各个节点的数值和其插值函数的表达,因此,自由度可表示为每个单元节点上因变量数量的总和。某一求解域的自由度数量  $C_{\text{DOF}}$  可表示为:

$$C_{\text{DOF}} = C_{\text{nod}} \cdot C_y, \quad (1)$$

$$C_{\text{nod}} = A \cdot C_{\text{ele}}, \quad (2)$$

其中, $C_{\text{nod}}$ 表示求解域的节点数, $C_y$ 表示节点上待求解的因变量个数, $C_{\text{ele}}$ 表示求解域网格的单元数。 $A$ 表示一个参数,大小与待求解系统的形状、物理场的类型、网格的形状以及形函数的选择有关。

多芯片 LED 光源的散热分布通常利用 FEM

进行计算。图 1(a) 为一个单芯片 LED 的简化模型, 1、2、3、4 分别代表环氧树脂外壳、SiC 衬底、GaN 芯片、陶瓷热沉。以单芯片 LED 为例, 根据 FEM 对其散热分布进行如下步骤的简要分析。

第一步, 确定涉及的物理场和待求解的因变量。为了对比 FEM 求解单场与多场的差别, 本节模拟了两种情况: (一) 光、电、热物理场参数值全部未知, 求解多物理场耦合的单芯片 LED 散热分

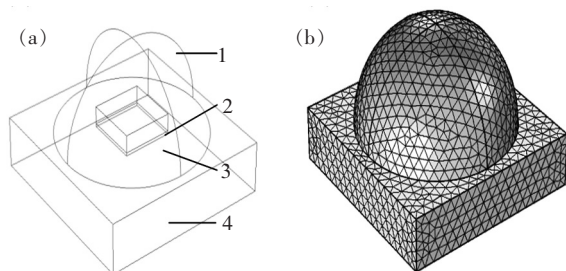


图 1 单芯片 LED 的简化模型(a)和 FEM 网格剖分图(b)

Fig. 1 Simplified model(a) and FEM meshing(b) of a single-chip LED

表 1 基于 GaN 芯片的自由度及其相关参数的多物理场与单一传热场之间的比较

Tab. 1 Comparison between multiphysics field and single heat transfer field based on GaN chip's degree of freedom and its related parameters

	物理场个数	因变量个数 $C_y$	网格单元个数 $C_{ele}$	自由度 $C_{DOF}$
PET	3	5	175 106	1 604 726
$T_b$	1	1	175 106	415 775
$T_c$	1	1	20 483	49 373

布; (二) 已知光、电物理场参数值并以此算得芯片热源值, 只需求解单芯片 LED 散热场。第二步, 建立模型并进行网格划分, 划分结果如图 1(b) 所示。由公式(1)、(2)可知, 自由度的大小与网格划分有关, 而网格的大小和疏密程度与待求解的物理场和几何结构有关。当需求解电场时, 由于半导体异质结的存在, 往往需要在内部边界设置更为精细的网格才能获得满足要求的结果; 同样, 在求解光场时, 网格的最大单元尺寸应与发光波长数量级相近 (GaN 的发光波长在 450 nm 左右), 否则结果难以收敛。由此可见, 当考虑到光场、电场后, 网格需要划分得更精细。为了进行(一)与(二)的计算资源统计对比, 我们将多物理场的网格划分应用到单物理场计算中, 使两者的网格数量保持一致。但显而易见, 求解单一传热场使用相对更少的网格就可获得满足精度的结果。第三步, 进行计算和结果后处理。计算时间和计算资源与网格划分密切相关, 网格数目增加, 计算精度会有所增加, 但同时计算规模也会增加。

在图 1 所示模型中, 由于只有 GaN 芯片涉及到了光、电、热 3 个物理场, 且又由于 GaN 芯片在实际情况中与陶瓷热沉尺寸相差很大, 即网格单元数量相差很多, 为了更好地说明单场与多场间计算的差别, 观察 GaN 芯片位置的自由度及其相关参数, 如表 1 所示。在表 1 中, PET 和  $T_b$  所在列为当网格划分相同时多场与单场之间的参数;  $T_c$  所在列为在能够得到精确解的情况下, 当不使用多物理场的网格划分时, 单一传热场在优化网格后的相关参数。由表 1 可以看出, 利用公式(1)、(2)可得 PET 条件下, 参数平均值为  $A_{PET} = 1.83$ , 节点数平均值  $C_{nod} = 320\ 945.2$ ; 在  $T_b$  条件下, 参数  $A_T = 2.37$ , 节点数  $C_{nod} = 415\ 775$ ; 在  $T_c$  条件下, 参数  $A_T = 2.41$ , 节点数  $C_{nod} = 49\ 373$ 。可以看出, 当网格划分相同时, 使用 FEM 分析 LED 芯片的光电热多物理场会增加待求解的因变量个数,

自由度数是  $T_b$  的 3.86 倍、 $T_c$  的 32.50 倍, 因此占用的内存与计算时间随之显著增加; 由  $T_c$  可以看出,  $T_c$  需要更少的网格自由度。因此当只使用单一传热场计算 LED 散热分布时, 计算时间和占用的计算资源更少。

在实际情况中, 大功率 LED 光源通常包括了 10 个及以上的芯片、保护外壳以及散热片等部件。散热片的形状通常是由多层薄片排列而成。因此, 当利用 FEM 计算多芯片 LED 光源时, 由于芯片与散热器等部件尺寸相差过大、光源整体形状复杂, 会导致网格划分难度大、网格数量非常多, 因此求解多芯片光源的多物理场时, 自由度数量会增大, 计算资源和计算时间也会呈指数增长。

图 2 所示为一多芯片 LED 光源的多物理场网格划分。在满足一定求解精度时, 划分的网格数量为 5 879 121, 自由度数达到了 14 259 390, 因

此计算所需占用的计算资源非常大,计算时间也会非常长。

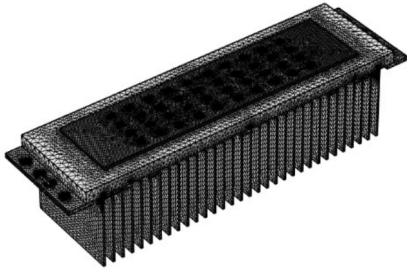


图2 多芯片 LED 光源的多物理场网格划分

Fig. 2 Mesh generation of multi-chip LED light source

### 3 基于 ANN 的 LED 光源温度分析

ANN 不需要提前知道输入与输出之间的映射关系,利用具体实验测得输入和输出参数的数据值,便可进行 ANN 训练,训练好的网络可以根据给定的输入值预测出满足精度要求的输出结果。一个  $n$  输入、 $m$  输出的 ANN 如图 3 所示。

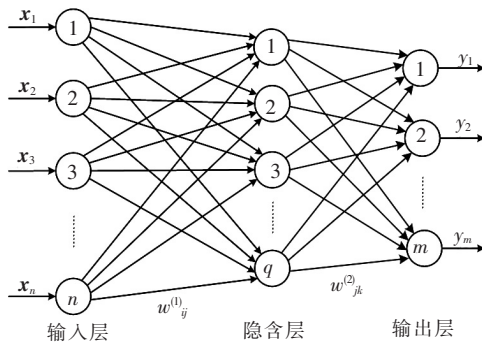


图3 一个  $n$  输入、 $m$  输出的 ANN。

Fig. 3 An  $n$  input,  $m$  output artificial neural network.

在图 3 中,  $x_1 \sim x_n$  表示 ANN 的输入向量,代表所研究问题的自变量;圆形图案代表神经元;  $w_{ij}^{(1)}$  表示连接第  $i$  个输入层神经元与第  $j$  个隐含层神经元的权值,  $w_{jk}^{(2)}$  表示连接第  $j$  个隐含层神经元与第  $k$  个输出层神经元的权值,其中,权值大小通过网络训练进行确定。输出与输入的关系可表示为:

$$h_j = w_{1j}^{(1)} x_1 + w_{2j}^{(1)} x_2 + \cdots + w_{nj}^{(1)} x_n + w_{0j}^{(1)}, \quad (3)$$

$$g_k = \sum_{j=1}^q w_{jk}^{(2)} \gamma(h_j) + w_{0k}^{(2)}, \quad (4)$$

$$y_k = \delta(g_k) = \delta\left(\sum_{i=1}^q w_{ik}^{(2)} \gamma(h_i) + w_{0k}^{(2)}\right), \quad (5)$$

其中,  $j = 1, 2, \dots, q$ ,  $h_j$  表示一个  $1 \times q$  的向量,为

ANN 隐含层的输入;  $w_{0j}^{(1)}$  表示 ANN 第  $j$  个隐含层神经元的阈值;  $k = 1, 2, \dots, m$ ,  $g_k$  表示隐含层的输出向量;  $\gamma(h_j)$  是隐含层的激励函数;  $w_{0k}^{(2)}$  表示输出层第  $k$  个神经元的阈值;  $\delta(g_k)$  表示输出层的激励函数;  $y_k$  表示 ANN 的第  $k$  个输出。

本节利用 ANN 对多芯片 LED 光源的散热分布进行分析。首先,根据实验收集训练数据。多芯片 LED 光源及其区域划分,如图 4(a) 所示。当处于某一稳定状态时,光源的热场分布应为上下对称、左右对称,因此选择图 4(a) 中 A 区进行实验分析。实验过程包括:选取 A 区所包括的 10 个 LED 芯片,如图 4(b) 所示,分别记为 L1 ~ L10;将多通道温度测试仪的通道 1 ~ 10 分别与 L1 ~ L10 相连,将通道 11 置于光源所处的外部环境中;将电源与多芯片 LED 光源正负极相连,电源为其提供电流;开启电源和多通道温度测试仪,记录输入电流(500 ~ 800 mA,梯度为 20 mA)情况下 10 个测试点的表面温度,此外,将电流为 750 mA 时的测试点表面温度作为验证样本。所有测试均在相同环境条件下进行。测试点表面温度随输入电流变化如图 5 所示。

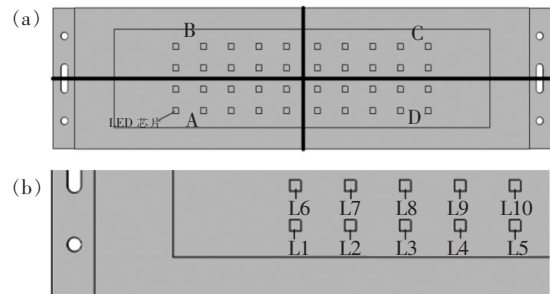


图4 (a)多芯片 LED 光源的区域划分;(b)测试点 L1 ~ L10 的选择。

Fig. 4 Zone division (a) and selection of test point L1 - L10 (b) of the multi-chip LED light source

图 5 中横坐标表示输入电流,纵坐标为各个测试点的表面温度。由图 5 可知,随着输入电流的增加,各个测试点的表面温度都随之增加,这是由于当输入电流增加时,非辐射复合效率随之增加,并以热能的形式释放出来。得到相关数据后,建立并训练人工神经网络,如图 6 所示。

ANN 的输入为多芯片 LED 光源的输入电流值,隐含层神经元个数为 15,输出为 10 个测试点的表面温度。为了达到精确的预测结果,将网络的训练误差设置为 10 ~ 5,训练次数设置为 20 000



次, 训练结果如图 7 所示。

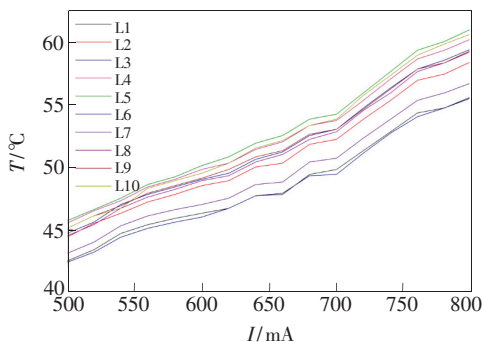


图 5 多芯片 LED 光源测试点 L1 ~ L10 的表面温度随输入电流的变化曲线

Fig. 5 Variation curve of surface temperature with input current at the test point L1 - L10 of multi-chip LED light source

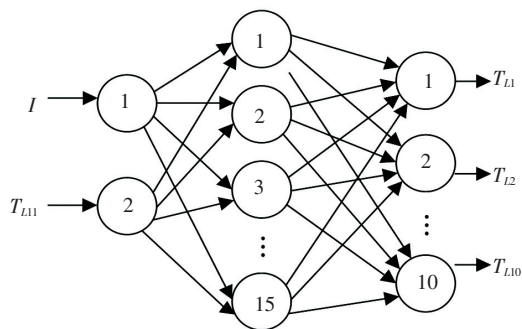


图 6 输入为电流和环境温度(L11)、输出为 10 个测试点(L1 ~ L10)温度的 ANN。

Fig. 6 ANN that the input is current and ambient temperature(L11) and the output is the temperatures of 10 test points(L1 - L10)

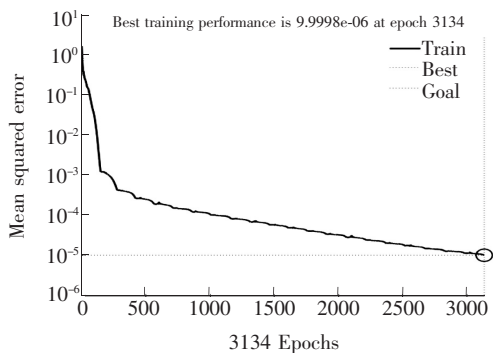


图 7 ANN 的误差训练

Fig. 7 Error training of the ANN

由图 7 可知, 当训练次数到达 3 134 次时, 训练误差为  $9.9998 \times 10^{-6}$ , 小于设定值  $10^{-5}$ , 证明了训练误差和训练次数的设置合理、训练结果达到一定高精度, 可以利用建立的 ANN 预测任一电

流下的光源热分布。通过 ANN 预测输入电流为 750 mA 时 10 个预测点的表面温度, 与实验测量输入 750 mA 电流时得到的测试点温度进行比较, 并计算其相对误差, 结果如表 2 所示。

表 2 输入电流为 750 mA 时多芯片 LED 光源预测点的测试温度和 ANN 预测温度

Tab. 2 Experimental test temperatures and ANN predicted temperatures of the prediction points L1 - L11 of multi-chip LED light source when the input current was 750 mA

预测点	测试温度/°C	预测温度/°C	相对误差
L1	48.9	48.175 0	0.014 9
L2	50.7	49.206 3	0.029 5
L3	51.9	51.081 2	0.015 8
L4	52.6	51.325 0	0.024 2
L5	52.9	52.062 5	0.015 8
L6	49.3	48.356 3	0.019 1
L7	51.0	50.600 0	0.007 8
L8	52.3	51.293 7	0.019 2
L9	52.8	51.960 8	0.015 9
L10	53.3	52.437 5	0.016 2

由表 2 可以看出, 训练的 ANN 能够在很小的相对误差范围内预测任一电流下测试点的表面温度值。通过代码实现的 ANN, 计算所需要的内存资源非常小, 计算时间只需几分钟甚至在 1 min 之内即可完成。利用 ANN 也能轻松实现 LED 的光电热多场耦合, 只需利用光谱仪、积分球、多通道温度检测仪等仪器, 测试出需要的光、电、热场相关参数数据, 将其作为 ANN 的输入或输出进行训练, 便可以实现场与场之间的强耦合。但是显而易见, ANN 的训练十分依赖实验测试数据, 尤其在光源热场的应用中, 不能体现整个光源的热场分布, 局限在只能体现所有测试点的表面温度; 除此之外, 在光源寿命测试等可靠性分析上, 相关数据采集的实验会更加繁琐, 因此灵活度很低。

#### 4 基于 FEM 和 ANN 结合的 LED 光源温度分析

本文在上述两节中分别利用了 FEM 和 ANN 对多芯片 LED 光源进行计算, 并分析了两种方法在大功率 LED 光源中的优劣性。通过将 FEM 分

析单一传热物理场的优势与 ANN 计算时间短、计算资源需求低的优势相结合,总结了一种更为灵

活、高效的方法来得到 LED 光源的散热分布,该方法的过程如图 8 所示。

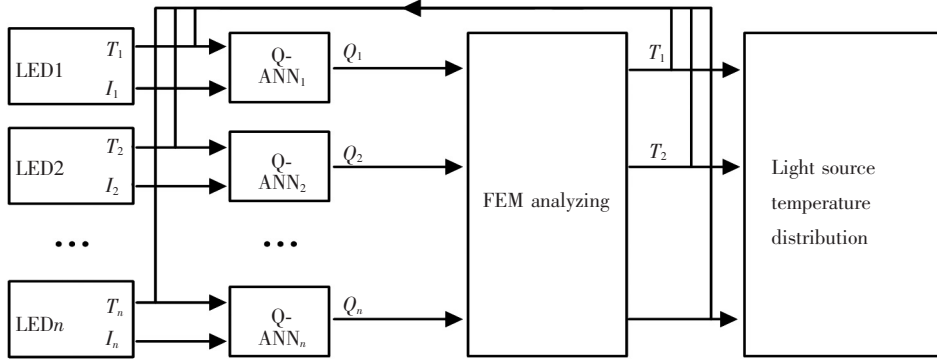


图 8 ANN 与 FEM 结合的多芯片 LED 光源散热分布的分析方法流程图

Fig. 8 Flow chart of analysis method for heat dissipation distribution of multi-chip LED light source combined with ANN and FEM

由图 8 可知,ANN + FEM 方法的第一步为训练单芯片 LED 的 Q-ANN,ANN 输入为芯片的输入电流  $I$  和表面温度  $T$ ,输出为热源值  $Q$ ,ANN 训练所需数据通过实验测得;第二步,利用 FEM 建立多芯片 LED 光源模型,将  $Q$  值作为光源系统的热源代入到模型中,运行 FEM 进行分析散热分析;第三步,将得到的每个 LED 的温度  $T$  反馈到 Q-ANN 的输入,当循环趋于稳定时,得到准确的多芯片 LED 光源的散热分布。

工作时,芯片发出的光会在积分球中经过多次散射和漫散射,最终形成均匀的光线分布,经由光谱仪采集和分析后,在计算机上显示处测试样品的光功率  $P_L$ 、电功率值  $P_E$ ,热源  $Q$  可由下列公式表示:

$$Q = \frac{P_E - P_L}{V}, \quad (6)$$

其中  $V$  表示 LED 芯片的体积。通过实验获取了输入与输出的相关数据后,进行 Q-ANN 的训练。为了研究训练好的 Q-ANN 能够预测一般工作条件下的 LED 芯片热源  $Q$  的准确性,分析 ANN 预测结果与训练值数据之间的相关性曲线,如图 10 所示。

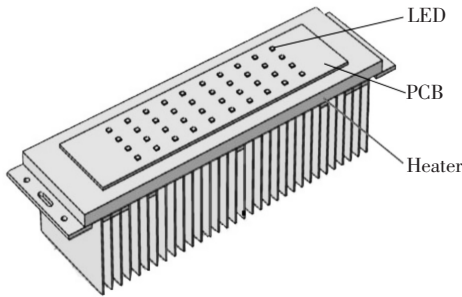


图 9 多芯片 LED 光源的模型图

Fig. 9 Model of the Multi-chip LED light source

通过对多芯片 LED 路灯光源来验证这一方法的可行性。实验所用光源含有 40 个 LUXEON 3030-2D LED 芯片、铝散热片,如图 9 所示。实验仪器包括小积分球、多通道温度测试仪、光谱仪、计算机、恒流源。实验过程为:首先将 LED 芯片放置于小积分球中,通过多通道温度测试仪实时监控测试样品的表面温度,当监控到芯片表面温度不随时间变化时,打开恒流源为芯片提供驱动电流(0 ~ 450 mA,梯度 10 mA);当 LED 芯片正常

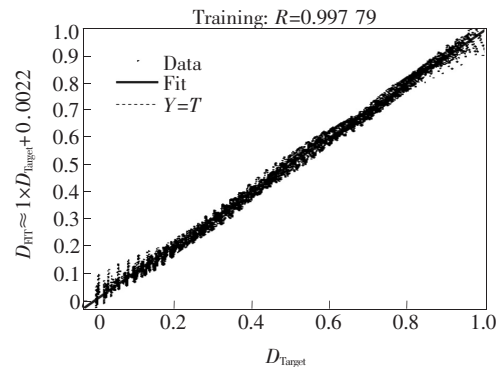


图 10 人工神经网络的预测结果与实验数据之间的关系  
Fig. 10 Relationship between artificial neural network prediction results and experimental data

图 10 的结果表明,网络的预测结果与实验数据之间的关系可以表示为  $D_{FIT} \approx 1 \times D_{Target} + 0.0022$ 。由于预测结果与训练数据之间的相关系数达到

0.997 79,表明Q-ANN预测结果与训练数据之间拟合度非常高,ANN预测结果准确可信。利用图8所示方法,通过ANN和FEM得到了LED光源的热分布,同时通过热成像仪对LED光源的热分布进行了实测,结果如图11所示。

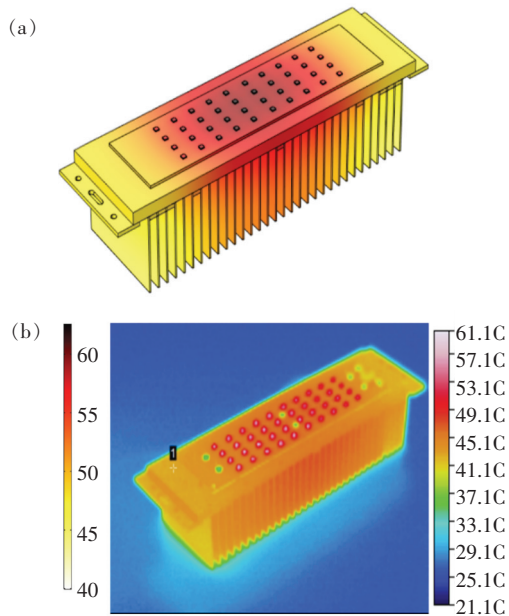


图11 LED光源散热分布结果。(a)模拟计算结果;(b)测试结果。

Fig. 11 Simulation results (a) and test results (b) of heat dissipation distribution of the multi-chip LED light source

图11(a)为通过基于ANN的LED光电热分析方法仿真得到的LED光源热分布结果,仿真结果显示LED光源表面最高温度为61.43℃,最低温度在39.9℃左右。图11(b)是实测结果,测试结果显示LED光源表面最高温度为61.1℃,最

低温度在38.9℃左右。实测结果与仿真结果相比较,温度偏低,但从整体的热分布结果来看,实测结果与仿真结果有很好的匹配。其中,利用FEM单一传热场计算LED光源散热分布时,网格划分数量为4 031 998,自由度为5 818 355,与图2的多物理场计算所需要的自由度相比,减少了59%。由于ANN的运行代码所占的计算资源十分小,结合方法所需的计算资源约等于计算FEM传热场所需资源,即计算资源节约了59%。

## 5 结 论

众多研究表明大功率LED产品的散热设计是影响其产品质量的重要因素,散热性能的好坏成为影响LED进一步发展的关键因素,不适当的散热设计会严重影响LED产品的亮度、色度、寿命等性能。

多芯片LED光源的散热分析通常使用FEM算法。FEM算法具有一定程度的灵活性,能够建立各种复杂模型,精度可以依据网格进行控制。相比于求解光、电、热三场,FEM在求解单一传热物理场时更为高效。训练完备的ANN能够快速得到任一电流、温度条件下的多芯片LED光源热源值。为了优化多芯片LED光源散热分析的计算方法,通过将FEM分析单一传热物理场的优势与ANN计算时间短、计算资源需求低的优势相结合,总结出一种更为高效的多芯片LED光源散热分析方法,利用该方法得到的预测温度分布与实测结果有良好的匹配,其中计算资源节约了59%。此外,该方法对求解大功率LED光源寿命等可靠性问题也具有一定的参考价值。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] KRAMES M R, SHCHEKIN O B, MUELLER-MACH R, *et al.*. Status and future of high-power light-emitting diodes for solid-state lighting [J]. *J. Disp. Technol.*, 2007, 3(2):160-175.
- [ 2 ] KIM J K, SCHUBERT E F. Transcending the replacement paradigm of solid-state lighting [J]. *Opt. Express*, 2008, 16(26):21835-21842.
- [ 3 ] 王明亮,程广斌,郑志满,等. 心电监护仪显示屏幕采用LED背光的改造与应用[J]. *医疗卫生装备*, 2016, 37(7):163-164.  
WANG M L, CHENG G B, ZHENG Z M, *et al.*. The retrofit and application of LED backlight in display screen of ECG monitor [J]. *Chin. Med. Equip. J.*, 2016, 37(7):163-164. (in Chinese)
- [ 4 ] CHUIN L H, OMAR A F, ABDULLAH M Z, *et al.*. Characterization and evaluation of PIV illumination system using high power light emitting diodes for watertank applications [J]. *Instrum. Exp. Tech.*, 2018, 61(3):436-444.
- [ 5 ] BOROWIK B, BOROWIK B, KARPINSKYI V, *et al.*. Microcontroller PIC based traffic light system with collision detection

- [C]. *Proceedings of The 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Bucharest, Romania*, 2017:118-123.
- [6] KUKHTA M S, SIDORENKO E V, SIMUTKIN G G, *et al.*. LED-technologies for bright light therapy [J]. *J. Phys. : Conf. Ser.*, 2018, 1015:032075-1-5.
- [7] 杨凯. 大功率 LED 及其灯具的光热结构设计和环境可靠性分析 [D]. 杭州:浙江大学, 2016.  
YANG K. *Optical and Thermal Structure Design and Environmental Reliability Analysis of High Power Light-emitting Diodes* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [8] 晏建宇, 王双喜, 刘高山, 等. 大功率 LED 散热技术研究进展 [J]. *照明工程学报*, 2013, 24(5):84-89.  
YAN J Y, WANG S X, LIU G S, *et al.*. Development of cooling technology for high-power light emitting diode [J]. *China Illum. Eng. J.*, 2013, 24(5):84-89. (in Chinese)
- [9] LEI W D, LIU C, QIN X F, *et al.*. Iterative coupling of precise integration FEM and TD-BEM for elastodynamic analysis [J]. *Struct. Eng. Mech.*, 2018, 67(4):317-326.
- [10] MIYAZAKI T, INOUE T, NODA N A. Practical method for analyzing singular index and intensity of singular stress field for three dimensional bonded plate [C]. *Proceedings of Material Strength and Applied Mechanics, Kitakyushu City, Japan*, 2018:1-8.
- [11] ALBERDI-PAGOLA M, POULSEN S E, LOVERIDGE F, *et al.*. Comparing heat flow models for interpretation of precast quadratic pile heat exchanger thermal response tests [J]. *Energy*, 2018, 145:721-733.
- [12] 陈锡栋, 杨婕, 赵晓栋, 等. 有限元法的发展现状及应用 [J]. *中国制造业信息化*, 2010, 39(11):6-8.  
CHEN X D, YANG J, ZHAO X D, *et al.*. The status and development of finite element method [J]. *Manuf. Inf. Eng. China*, 2010, 39(11):6-8. (in Chinese)
- [13] OSORIO J C, CERROLAZA M, PEREZ M. Optimising the stiffness matrix integration of  $n$ -noded 3D finite elements [J]. *Int. J. Comput. Sci. Eng.*, 2018, 16(2):173.
- [14] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用 [M]. 北京:化学工业出版社, 2002.  
HAN L Q. *Artificial Neural Network Theory, Design and Application* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002. (in Chinese)
- [15] SHIN B R, SON H S, LEE S P, *et al.*. A gesture recognition system using a flexible epidermal tactile sensor based on artificial neural network [C]. *Proceedings of The 2017 International Conference on Robotics and Automation Sciences, Hong Kong, China*, 2017:195-198.
- [16] DEY R, GHOSHAL A, TUDU B. Electromyogram (EMG) signal categorization in parkinson's disease tremor detection by applying MLP (Multilayer perceptron) technique; a review [M]. KONKANI A, BERA R, PAUL S. *Advances in Systems, Control and Automation*, Singapore: Springer, 2018:693-699.
- [17] NADIRI A A, GHAREKHANI M, KHATIBI R, *et al.*. Groundwater vulnerability indices conditioned by Supervised Intelligence Committee Machine (SICM) [J]. *Sci. Total Environ.*, 2017, 574:691-706.
- [18] NAJAFI B, ARDABILI S F, MOSAVI A, *et al.*. An Intelligent artificial neural network-response surface methodology method for accessing the optimum biodiesel and diesel fuel blending conditions in a diesel engine from the viewpoint of exergy and energy analysis [J]. *Energies*, 2018, 11(4):860-1-18.



刘宏伟(1980 - ),男,辽宁朝阳人,博士,副教授,2010年于中国科学院半导体研究所获得博士学位,主要从事半导体光电材料及器件的研究。

E-mail: hwliu@foxmail.com