

激光与光电子学进展

基于光电热理论和 BP 神经网络的 LED 阵列 光功率计算方法

洪哲扬*, 薛凌云, 钱依凡

杭州电子科技大学自动化学院, 浙江 杭州 310018

摘要 LED阵列光功率受热学、电学影响:LED芯片的光电热(PET)参数耦合,而且LED阵列中热耦合关系复杂,给大功率光源的结构设计带来困难。基于PET理论提出了一个光功率计算模型:首先根据LED芯片的工作机理,构建其电功率、结温、热功率之间的耦合关系;其次,将LED阵列的热耦合仿真结果,作为训练样本,获得输入为布局间距和热功率,输出为LED结温的BP神经网络;最后,将神经网络获得的结温作为PET方程的温度条件,计算LED阵列的光功率。为验证该模型的准确性,进行实验验证,最大误差为7.6%。该模型可分析LED阵列在不同布局参数及热沉温度下的最大光功率工作点,解决LED阵列布局及热沉结构的优化设计问题。

关键词 LED阵列; 光电热理论; BP神经网络; 光功率

中图分类号 TN202

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202259.0523002

Calculation Method of LED Array Optical Power Based on Photoelectric Thermal Theory and BP Neural Network

Hong Zheyang*, Xue Lingyun, Qian Yifan

School of Automation, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract The optical power of the LED array was affected by thermology and electricity. The photo-electric-thermal (PET) parameters of the LED chip were coupled, and the thermal coupling relationship in the LED array was complicated, which makes it difficult to design the structure of the high-power light source. This paper proposes an optical power calculation model based on PET theory. Firstly, according to the working mechanism of the LED chip, the coupling relationship between its electrical power, junction temperature and thermal power was constructed. Secondly, by using the thermal coupling simulation result of the LED array as the training sample of the BP neural network, we obtain a BP neural network with input as layout spacing and thermal power and output as LED junction temperature. Finally, the junction temperature obtained by ANN was used as the temperature condition of the PET equation to calculate the optical power of the LED array. In order to verify the accuracy of the model, the experimental verification was performed. The maximum error was 7.6%. This model can analyze the maximum optical power operating point of the LED array under different layout parameters and heat sink temperatures. The optimization design problem of the LED array layout and heat sink structure was solved.

Key words LED array; photo-electric-thermal theory; BP neural network; optical power

收稿日期: 2021-04-30; 修回日期: 2021-05-25; 录用日期: 2021-05-28

基金项目: 国家重大科研仪器研制资助项目(61427808)

通信作者: *191190002@hdu.edu.cn

1 引言

发光二极管(LED)作为新一代光源,因其高效、宽调节范围、良好的可控性等优异的性能^[1-2],在显示、照明等领域中正在逐步取代白炽灯、荧光灯等传统光源^[3-4]。LED阵列在实现大功率光输出的同时也存在热问题:LED布置在同一热沉上,芯片之间存在相互热作用,即热耦合效应^[5]。由于热量的耦合,LED阵列中的工作温度比单芯片LED中的LED高得多;并且即使同一类型的LED,其物理位置的不同,工作结温也不同。较高的结温不仅会降低LED的光学和电气性能,还会缩短预期寿命。

人工神经网络不需要知道输入输出之间的确切关系,不需大量参数,适用于信息不明确的系统^[6-7]。虽然LED工作机理清晰、模型明确,包含电致发光与热耗散过程^[8],但是LED阵列中热耦合过程复杂,与每一个LED产生的热量相关。并且LED阵列中的热耦合影响还与LED的布局参数有关,计算LED阵列的结温存在困难。人工神经网络对LED阵列进行结温计算,可以根据样本数据进行训练,不需要分析具体的传热过程,简化热分析。

LED的光学参数、电学参数和热学参数,三者紧密相连,在LED系统的光电热(PET)理论中已经数学描述了光学,电学和热学方面的相互作用^[9]。LED阵列中的每个LED都是一个热源,芯片的温度不仅是由于自身发热造成的,而且还取决于芯片之间的相互传热^[10],热耦合效应会严重影响芯片的温度和热分析。文献^[11]通过等效热阻电路模拟LED阵列横向传热的热耦合效应,对LED阵列进行热耦合详细描述,通过热耦合矩阵预测LED阵列的结温分布。为了对LED系统中的热、光和功率的复杂相互作用进行更准确的研究,通常使用3-D有限元方法来模拟温度分布^[12-13]。将有限元分析单一传热物理场的优势与人工神经网络计算时间短、计算资源需求低的优势相结合,得到高效的LED阵列热模型^[14]。

本文提出了一个LED阵列在不同电学、热学工作条件下的光功率计算模型。首先基于PET理论,

获得LED芯片电功率、结温、热功率三者关系方程中的系数。将有限元分析得到的LED阵列结温作为训练数据,训练得到一个可分析LED阵列在不同布局与热功率下的结温的人工神经网络。将神经网络分析获得的结温作为LED阵列工作的热学环境,利用光电热方程,计算得到LED阵列的光功率。为计算模型的准确性,进行实验验证,最大误差为7.6%。该模型通过分析不同工作条件下LED阵列的光输出,可用于预测最大光输出点,对光源的结构紧凑化结构设计和驱动设计提供帮助。

2 LED光电热分析

2.1 LED的光电热关系

LED的光电转换效率取决于结温和驱动功率,已经证明光电转换效率与p-n结温度的变化是线性的,而光电转换效率与电功率的变化是二次型的。首先,通过将电功率 P_e 固定为一定值 P_i 上,将结温 T_j 视为自变量,光电转换效率 η 与 T_j 在某一定值 P_e 下的线性关系,可以表示为:

$$\eta = \alpha T_j + \beta, \quad (1)$$

式中 α 是一个表示结温与光电转换效率的线性斜率常数, β 为结温等于零时光电转换效率的常数。保持结温 T_j 在一定值 T_i ,将电功率 P_e 视为自变量,由于光电转换效率随电功率的变化呈二次型,那么当LED的工作结温固定不变时,两者之间的关系可表示为:

$$\eta = \delta P_e^2 + \gamma P_e + \epsilon, \quad (2)$$

式中 δ, γ, ϵ 是表示电功率与光电转换效率二次关系的常数。在基于(1)式和(2)式两个表达式的基础上,通过引入常数 θ ,将(1)式和(2)式统一为一个公式表达,同时包含一次与二次的关系。光电转换效率 η 关于结温 T_j 、电功率 P_e 的一般形式可以表示为^[15]:

$$\eta = \frac{(\alpha T_j + \beta)(\delta P_e^2 + \gamma P_e + \epsilon)}{\theta}. \quad (3)$$

电功率 $P_e = IV$, I 为LED的正向电流, V 为LED的正向电压。设LED的光功率为 P_o ,则光电转换效率 $\eta = P_o/P_e$,LED的热功率 $P_t = P_e - P_o$,那么在LED结温已知的情况下,热功率与电功率之间呈三次关系:

$$P_t = (1 - \eta) P_e = \frac{(-\alpha T_j - \beta) \left[\delta P_e^3 + \gamma P_e^2 + \left(\frac{\theta}{-\alpha T_j - \beta} \right) P_e \right]}{\theta}. \quad (4)$$

光电转换效率 η 是电功率和结温的函数, 作为商品的 LED, 根据产品数据手册中, 厂商给出的 LED 特征参数及少量的测试数据就能够确定该函数。本实验中采用的 LED 为 GREE 提供的 XPEBTT-01-0000-00T80, 根据 LED 厂商给出的数据, 在不同的电功率和热沉温度下, 通过计算光电转化效率, 获得上述参数: $\alpha = -0.000672$, $\beta = 0.118$, $\delta = -0.00226$, $\gamma = 0.0365$, $\epsilon = 0.00732$, $\theta = 0.111$ 。

2.2 LED 阵列热耦合分析

在 LED 单独工作时, PET 理论能很好地表达 LED 光电热三个物理域的状态, 但是 LED 阵列工作时的热传输过程比单芯片 LED 独立工作时的热传输过程更复杂。特别是在大功率 LED 阵列系统中, 由于热耦合因素的存在, 并不能直接使用单芯片 LED 的光电热方程, 为使光电热方程中的热参数与 LED 阵列的热传输过程相对应, 需要对 LED 阵列的热耦合传热过程分析。

当多个 LED 芯片安装在同一热沉上工作时, 其中的热传输过程既包含每个芯片的垂直散热, 也包含芯片之间的横向热传递。随着芯片数量的增加, 相互热耦合的影响增加, 导致比单芯片更高更复杂的温度分布。如图 1 所示为 LED 阵列的等效热学模型示意图, N 个相同的 LED 芯片安装在共同热沉, P_1, P_2, \dots, P_n 为各 LED 产生的热功率, R_j 为第 i LED 与第 j LED 之间的热阻。对于第 i 个芯片, 由

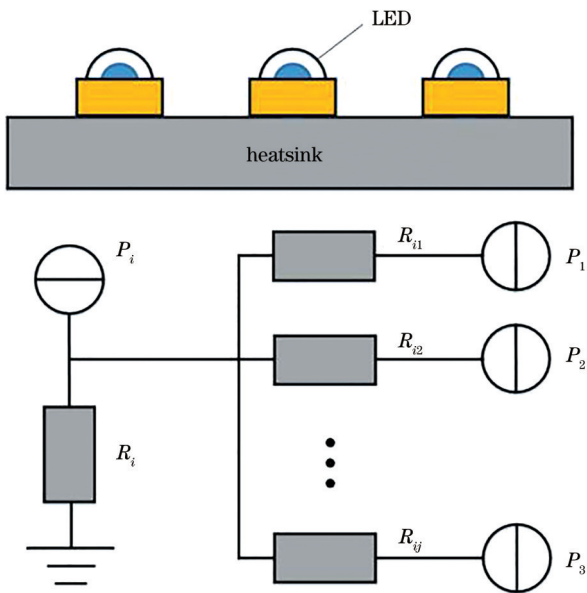


图 1 LED 阵列传热模型

Fig. 1 LED array heat transfer model

自身产生的热量引起的温升 $\Delta T_{ii} = R_i P_i$ 。

若第 j 芯片对第 i 芯片的传热量为 $\chi_{ij} P_j$, 其余 $N-1$ 个芯片对第 i 个芯片的热耦合引起的温升 $\Delta T_{ij} = R_{ij} \chi_{ij} P_j$ 。因此第 i 芯片的总温升为:

$$\Delta T_i = \Delta T_{ii} + \sum_{j=1, j \neq i}^N \Delta T_{ij} = \sum_{j=1}^N \mu_{ij} P_j, \quad (5)$$

式中引入的参数 $\mu_{ij} = \chi_{ij} R_{ij}$, 且 $\chi_{ij} = 1$, 该公式可以通过一个矩阵表示, 称之为热耦合矩阵

$$\begin{pmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \Delta T_3 \\ \vdots \\ \Delta T_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_1 & \mu_{12} & \mu_{13} & \cdots & \mu_{1N} \\ \mu_{21} & R_2 & \mu_{23} & \cdots & \mu_{2N} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & R_3 & \cdots & \mu_{3N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{N1} & \mu_{N2} & \mu_{N3} & \cdots & R_N \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ P_N \end{pmatrix}. \quad (6)$$

热耦合矩阵是一个对角矩阵, 矩阵中 $\mu_{ij} = \mu_{ji}$ ^[16]。热耦合矩阵描述了阵列中每个芯片的热功率和温度之间的关系。利用这种方法, 可以根据芯片的热功率中得到结温分布, $T_j = T_a + \Delta T$, 其中 T_a 为热沉温度。要获得 LED 阵列模块的热耦合矩阵, 最重要的是要获得热耦合矩阵的系数 μ , 在 LED 阵列的结构与材料确定时, 系数 μ 为定值, LED 的温升与热功率呈线性关系^[16]。如果热耦合矩阵的矩阵系数 μ 已知, 只需要知道每个芯片单独亮时的热功率 P 就可以计算出多芯片 LED 模块每种情况下每个芯片的温升值。

3 LED 阵列结温神经网络计算

LED 阵列结温的获取往往需要先对光源进行热学实验测试, 例如 LED 阵列系统的热耦合矩阵的获取, 关键在于获得其矩阵系数, 热耦合矩阵系数的获取是根据每个芯片单独工作的条件下, 得到每个芯片的温升值, 热耦合矩阵中每个矩阵系数数值是对应的每个芯片的温升值比上该芯片工作时产生的热功率。此外, 在相同的电功率和热沉温度下, LED 阵列热功率受布局间距影响, 需要考虑光功率输出与布局间距之间非线性关系。

研究对象为一个中心对称结构的 3×3 正方形布局的 LED 阵列, 如图 2(a) 所示, 其包含横轴、纵轴和对角线三条对称轴, 根据热耦合矩阵理论, 经过三次对称后, 只需进行热学测试的芯片数量为 3 颗, 如图 2(b) 所示, 就可获得 LED 阵列中每一个芯片的结温^[16]。

为获得神经网络的训练数据, 使用 ANSYS 有限元仿真软件对 LED 阵列的热学测试, 通过稳态热

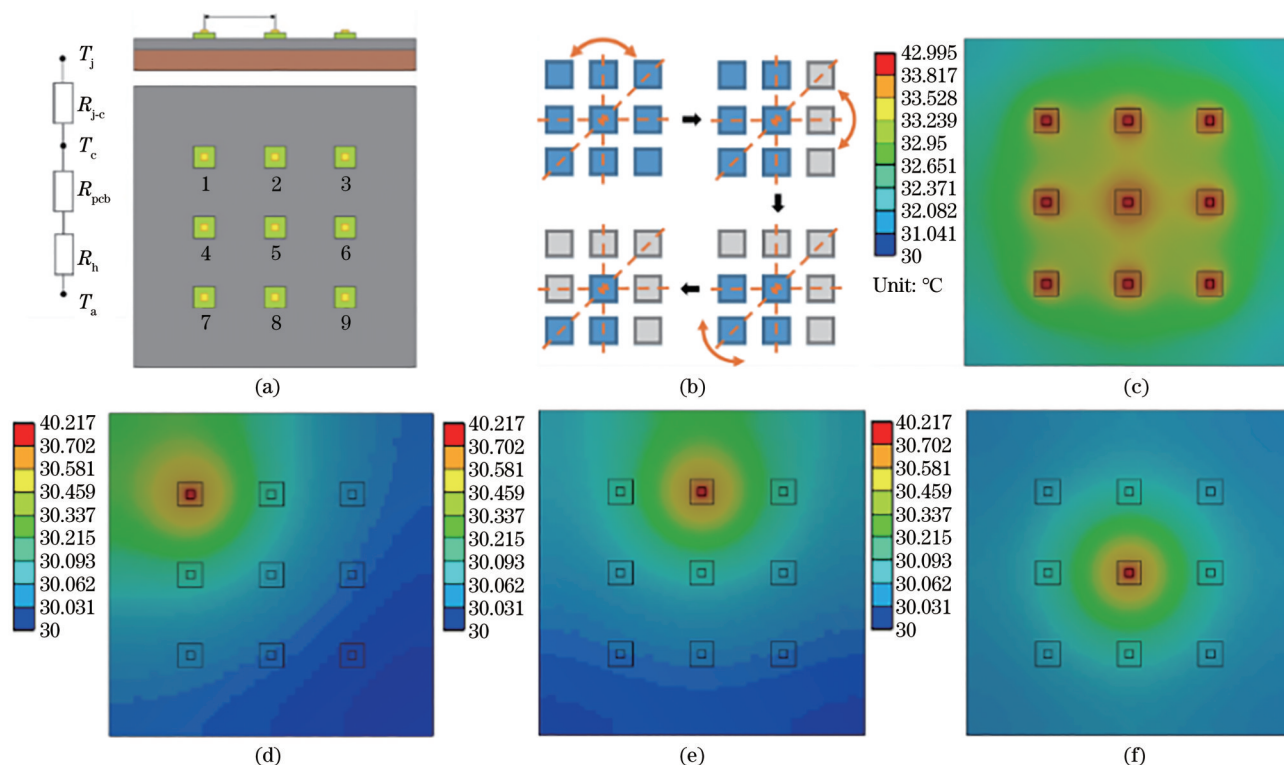


图 2 LED 阵列热仿真测试。(a) 布局结构; (b) 简化测试原理; (c)、(d)、(e)、(f) 仿真结果

Fig. 2 LED array thermal simulation test. (a) Layout structure; (b) simplified test principle; (c), (d), (e), (f) simulation results

分析模块,模拟仿真 LED 阵列工作时的温度分布,如图 2(c), (d), (e), (f)。由 3×3 LED 组成的方形阵列安装在一个铝基 PCB 上,铝基 PCB 通过一金属热导体扩散热量,金属热导体的另一端连接帕尔贴器件以控制恒温。具体结构尺寸:芯片层 1.0 mm×1.0 mm×0.2 mm,芯片基底 3.0 mm×3.0 mm×0.5 mm,铝基板层 40.0 mm×40.0 mm×1.6 mm,热导体层 40.0 mm×40.0 mm×10.0 mm,相邻 LED 之间的布局间距为 d 。

仿真实验为获取 LED 阵列在不同布局参数下工作时的温度分布情况,将 LED 芯片的热功率设置为 1 W,改变 LED 之间的布局间距,布局间距 d 的变化范围设置为 4.0~10.0 mm,变化间隔为 0.5 mm。在获得 13 组不同布局间距的 LED 阵列结温分布后,根据热耦合矩阵方程式(6)可计算得到不同布局间距下的 LED 阵列热耦合矩阵系数。在不同间距对应的热耦合矩阵中使用不同的热功率计算 LED 的温升,热功率的变化范围设置为 1~5 W,变化间隔为 0.1 W,得到 533 组训练数据。

LED 的温升与布局间距和热功率之间存在复杂的非线性关系,而利用神经网络可以对 LED 阵列的温度分布进行有效分析。神经网络不需要知道输入与输出之间的映射关系,在 LED 阵列

的热学分析中,神经网络不用详细分析 LED 之间相互的传热关系与 LED 的热耗散过程,利用获得的输入和输出参数的数据,便可以进行神经网络训练,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。

对于热耦合矩阵,其在热阻系数已知的条件下,输入参数为热功率,输出参数为温升。对于不同布局参数的 LED 阵列,其热耦合矩阵系数与布局间距的关系未知,使用神经网络对不同布局参数下的热耦合矩阵的输入输出训练,可以得到一个输入为 1 个布局间距 d 和 3 个特征位置 LED 热功率 P_i ,输出为 3 个特征位置 LED 结温 T_j 的人工神经网络。

图 3 为误差反传人工神经网络结构图, P_{i1} 、 P_{i2} 、 P_{i3} 、 d 为人工神经网络的输入向量,是该问题中的自变量;圆形图案代表神经元; ω_{ij} 表示连接两个神经元之间的权值,权值的大小通过网络训练确定; T_{j1} 、 T_{j2} 、 T_{j3} 为人工神经网络的输出向量,是该问题中的因变量。

神经网络的 4 个输入为 LED 阵列的布局间距 d 和第 1、2、5 芯片 LED 的热功率 P_i , 3 个输出为第 1、2、5 芯片三个 LED 的结温 T_j , 隐含层神经元个数为 20。70% 的数据为训练集, 15% 的数据为验证

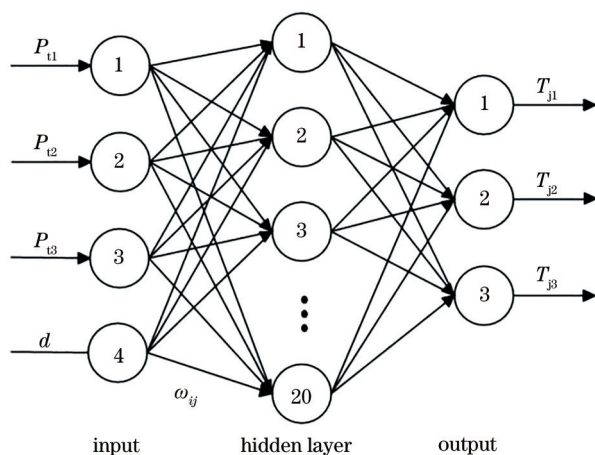


图 3 神经网络结构图

Fig. 3 Neural network structure diagram

集, 15% 的数据为测试集。

当训练误差小于 10^{-5} , 证明训练结果达到一定高精度, 可以利用建立的 ANN 预测任一热功率下的 LED 阵列温度分布。为验证热分析的准确性, 使用 FLIR 的热成像仪 A325SC 获得实际的 LED 阵列工作时的温度, 如图 4 所示, 与 ANN 预测 LED 阵列温度进行比较。

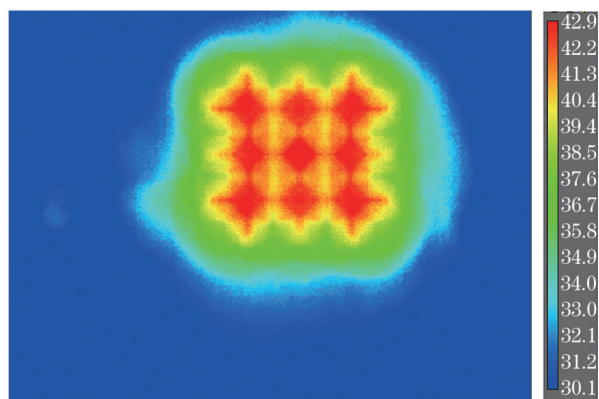


图 4 LED 阵列温度分布结果图

Fig. 4 LED array temperature distribution result

为验证神经网络结温预测的有效性, 将布局间距 d 分别为 5.0 mm、8.0 mm, 每个 LED 热功率 P_i 分别为 2 W、4 W 时每个 LED 预测的结温, 与实验结果进行比较。计算两者相对误差, 结果如表 1 所示, T_v 为实验验证值, T_p 为神经网络预测值。根据表 1 可以得出, 训练完成的人工神经网络能够在较高的精度下预测任一工作条件下特征位置 LED 的结温值。

表 1 LED 阵列结温预测与验证结果

Table 1 LED array junction temperature prediction and verification results

Location	P_i / W	d	T_p / W	T_v / W	Relative error / %
1	2	5	53.9	51.9	3.7
2	2	5	54.4	51.2	5.9
5	2	5	55.0	52.3	4.9
1	2	8	52.8	51.3	2.8
2	2	8	53.2	51.0	4.1
5	2	8	53.6	51.9	3.2
1	3	5	73.9	72.1	2.4
2	3	5	74.4	71.8	3.5
5	3	5	75.0	72.6	3.2
1	3	8	72.8	70.7	2.9
2	3	8	73.2	70.3	4.0
5	3	8	73.6	71.4	3.0

4 LED 阵列光电热模型和验证

在前两节中分析了 LED 的光电热三参数之间的关系, 对 LED 阵列的热过程使用人工神经网络分析。为解决单芯片 LED 与阵列 LED 热传递过程不一致的问题, 通过将 LED 的光电热方程与 LED 阵列的热耦合分析相结合, 得到与 LED 阵列的光电热模型, 用以计算 LED 阵列的光功率输出, 该方法的流程图如图 5 所示。

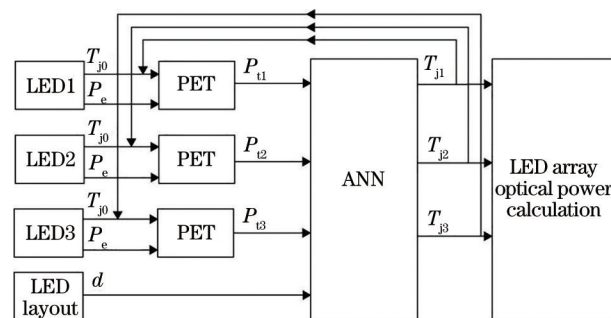


图 5 LED 阵列光电热模型流程图

Fig. 5 LED array photoelectric thermal model flow chart

图 5 可知, LED 阵列光功率输出计算方法的第一步为获取 LED 芯片的结温、电功率和热功率这三个参数之间的定量关系, 其中 LED 初始的结温 T_{j0} 为热沉温度, 根据 LED 的工作热沉温度和电功率, 使用 PET 方程式 (4) 式计算该条件下 LED 产生的热功率。第二步, 使用训练好的 LED 阵列热耦合神经网络, 输入第一步中各 LED 产生的热功率 P_i 和

LED 阵列的布局间距 d , 输出为各 LED 在自热和热耦合作用下的结温, 神经网络的训练数据通过有限元热分析获得。第三步, 由于 LED 阵列在工作热稳定后结温将高于室温, 使用最初的热沉温度计算热功率与实际值存在偏差, 将神经网络得到的 LED 阵列结温反馈到每个 LED 的结温输入, 修正计算的热功率值, 通过不断循环, 当修正的热功率值与前一次计算的热功率值的差小于一个小量时, 就得到 LED 阵列光源准确的温升及结温。根据 LED 输入的电

功率、布局间距, 在循环稳定后通过式 (3) 计算得到光功率, 获得不同结构下 LED 阵列的光电热关系。

根据 LED 阵列的光电热关系, 可以获得不同结构、不同热沉温度下, 光输出随电功率的变化关系, 用以确定 LED 阵列的最优工作点。为验证本文所提出的 LED 阵列光电热模型的有效性, 搭建实验平台, 如图 6 所示, 通过一温控平台, 使用积分球对实际光功率输出进行测试, 测试不同电功率和布局间距下 LED 阵列的光功率值。

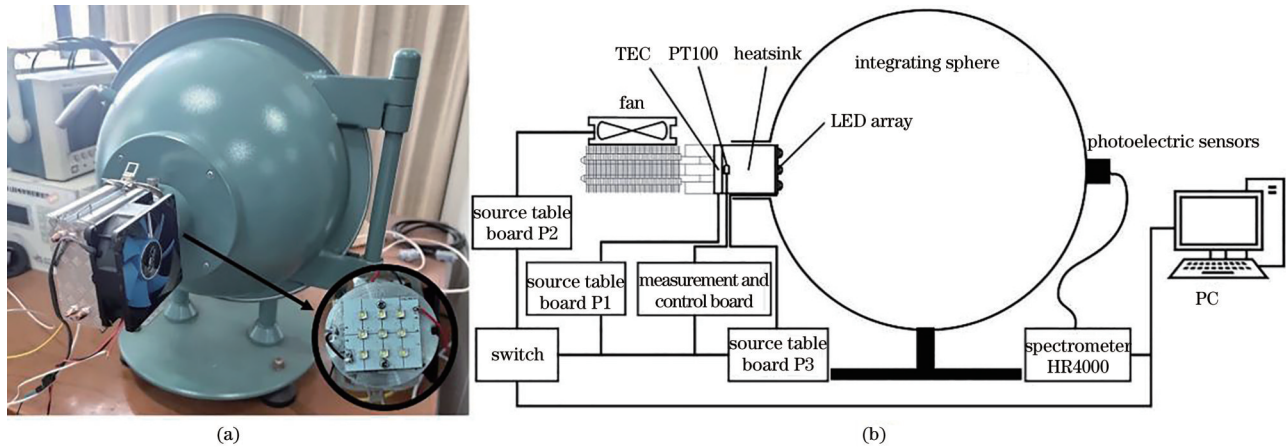


图 6 实验装置图。(a)实物图;(b)示意图

Fig. 6 Experimental setup. (a) Physical drawing; (b) schematic drawing

图 7 为 LED 布局间距 d 为 8.0 mm, 热沉温度 T_h 设置在不同条件下, LED 阵列的光功率与电功率之间的关系曲线。随着工作温度的升高, LED 的发光效率降低, 并且随着电功率的提高, 光功率先增大后降低, 光功率输出最大时的电功率随温度的上升而减小。图 8 为 LED 工作在热沉温度为 23 °C 时, LED 阵列的电功率在不同条件下, LED 阵列的光功率与布局间距之间的关系曲线。在相同的电功率

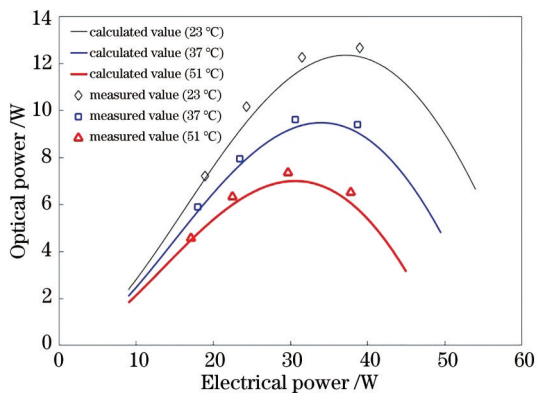


图 7 不同热沉温度下 LED 阵列光功率与电功率的关系
Fig. 7 Relationship between LED array optical power and electrical power under different heat sink temperatures

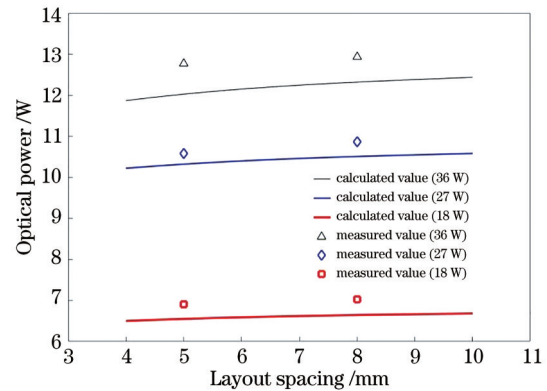


图 8 不同电功率下 LED 阵列光功率与布局间距的关系
Fig. 8 Relationship between LED array optical power and layout spacing under different electrical powers

和工作温度下, LED 阵列输出的光功率与布局间距之间存在非线性关系。在布局间距较小时, 光功率受布局间距的影响较大, 随着布局间距的增大, 其对光功率的影响逐渐减小。

通过积分球测得实际光功率输出, 与所提出的 LED 阵列光电热模型预测结果相比, 将模型预测值与实验验证值进行比较和验证。预测结果与验证结果在整体上具有较好的匹配, 尤其在较低的工作

温度和较小的电功率下一致性较好,并且在工作温度和电功率均较大时,最大的误差也在 7.6% 以内。

5 结 论

本文基于 LED 的光电热理论和 LED 阵列热学的神经网络,提出一种 LED 阵列的光电热模型,用以确定 LED 阵列不同工作条件下的光功率输出。利用有限元软件的热学分析获得 LED 阵列的温度分布,并通过神经网络训练得到 LED 阵列的结温模型,在得到 LED 阵列的结温后,根据光电热方程计算 LED 阵列的光功率输出,最终得到输入为环境温度、电功率,输出为光功率的 LED 阵列光电热模型。该计算模型和方法不依赖大量的实验测试,仅需仿真数据,即可快速有效地分析 LED 阵列光源,在光源的设计的初期阶段,能在短时间内提供参考和依据。该模型可以用于估计不同环境温度和布局参数下 LED 阵列光功率与电功率的关系,对于光输出功率具有需求的大功率 LED 光源的设计,能够为最低的散热条件和最小的热沉尺寸提供参考。

参 考 文 献

- [1] Zhou M X, Zhu D Q, Liao X Y. Relationship between spectrum and color gamut area of LED light sources[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(23): 232302.
周孟欣,朱大庆,廖欣怡. LED 光源的光谱与色域面积关系[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(23): 232302.
- [2] Gao H, Xue L Y. Back propagation neural network based on improved genetic algorithm fitting LED spectral model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 072302.
高航,薛凌云. 基于改进遗传算法的反向传播神经网络拟合 LED 光谱模型[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 072302.
- [3] Lu Y L, Wen S S, Ma B X, et al. Highly uniform LED plant light source with curved reflective surface[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2020, 41(4): 468-479.
卢允乐,文尚胜,马丙戌,等. 具有曲面反射面的高均匀度 LED 植物光源[J]. 发光学报, 2020, 41(4): 468-479.
- [4] Zhao T F, Ma Z, Li X S. Optimal layout of light source based on LED with small divergence angle[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(1): 0106002.
赵太飞,马壮,李星善. 基于小发散角 LED 的光源优化布局[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(1): 0106002.
- [5] Chen H T, Chen F C, He Y, et al. Analysis of thermal characteristics of a multichip light-emitting diodes device[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2018, 39(5): 751-756.
陈焕庭,陈福昌,何洋,等. 多芯片 LED 器件热学特性分析[J]. 发光学报, 2018, 39(5): 751-756.
- [6] Liu C J, Xiao C D, Liu W D. Life prediction of LED lamps based on ant colony neural networks[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2016, 37(5): 649-655.
刘春军,肖承地,刘卫东. 基于蚁群神经网络的 LED 灯管寿命预测[J]. 半导体光电, 2016, 37(5): 649-655.
- [7] Hu J, Liu Y D, Sun X D, et al. Quantitative determination of benzoic acid in flour based on terahertz time-domain spectroscopy and BPNN model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 073002.
胡军,刘燕德,孙旭东,等. 基于 BP 神经网络的太赫兹时域光谱对面粉中苯甲酸的定量检测研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 073002.
- [8] Hui S Y R, Qin Y X. A general photo-electro-thermal theory for light emitting diode (LED) systems [C]//2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 15-19, 2009, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2009: 554-562.
- [9] Huang M L, Chen H T, Zhou X F, et al. Optimization spectrum of white light emitting diodes based on correlated color temperature and luminous flux[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(10): 1030001.
黄马连,陈焕庭,周小方,等. 利用相关色温和光通量优化白光 LED 光谱[J]. 光子学报, 2015, 44(10): 1030001.
- [10] Shi D, Feng S W, Zhang Y M, et al. Thermal investigation of LED array with multiple packages based on the superposition method[J]. Microelectronics Journal, 2015, 46(7): 632-636.
- [11] Chen H T, Lin D Y, Tan S C, et al. Chromatic, photometric and thermal modeling of LED systems with nonidentical LED devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(12): 6636-6647.
- [12] Lu X Y, Dai L, Lu F, et al. Design and heat dissipation research of micro heat pipe automobile LED headlamp[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(11): 112301.
鲁祥友,戴林,鲁飞,等. 微热管式汽车 LED 大灯的

- 设计与散热研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(11): 112301.
- [13] Yan Q X, Zhang S F, Long X M, et al. Simulation and optimization of micro-channel Al MCPCB for high-power LED heat dissipation[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2015, 36(3): 417-420, 424.
闫泉喜, 张淑芳, 龙兴明, 等. 大功率LED散热用微通道铝基板的有限元仿真[J]. 半导体光电, 2015, 36(3): 417-420, 424.
- [14] Liu H W, Yu D D, Niu P J, et al. Multi-physics analysis of multi-chip LED light source based on finite element method and artificial neural network[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2019, 40(6): 795-802.
刘宏伟, 于丹丹, 牛萍娟, 等. 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[J]. 发光学报, 2019, 40(6): 795-802.
- [15] Chen H T, Tao X H, Ron Hui S Y. Estimation of optical power and heat-dissipation coefficient for the photo-electro-thermal theory for LED systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(4): 2176-2183.
- [16] Lu H L, Lu Y J, Zhu L H, et al. Efficient measurement of thermal coupling effects on multichip light-emitting diodes[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12): 9280-9292.