

文章编号:1007-2780(2018)04-0326-12

实现白光 LED 阵列色温分布均匀化技术研究

胡莹^{1,2}, 苏宙平^{1,2*}, 曹晶辉^{1,2}

(1. 江南大学理学院, 江苏无锡 214122;

2. 江苏省轻工光电工程技术研究中心, 江苏无锡 214122)

摘要: 本文通过优化白光 LED 阵列的结构, 实现在目标面上产生均匀的色温分布。通过收集系统中每颗 LED 的色温坐标矩阵与照度矩阵, 根据色温叠加公式, 计算 LED 阵列在目标面上叠加后的色温分布, 构建目标面上色温均匀度评价函数, 评价函数反应目标面上色温分布的均匀性。通过优化阵列中 LED 的位置, 使得评价函数的值最小, 即目标面上色温均匀度最高。运用这种方法我们优化设计了两个实例: (1) 相同规格的 9 颗白光 LED 方形阵列; (2) 不同规格 16 颗圆形白光 LED 阵列, 优化后色温均匀度均达到了 95% 以上。利用这种方法同样可以在目标面上同时实现均匀的色温分布与照度分布, 设计 9 颗相同规格的白光 LED 以 3×3 方形阵列方式排布, 优化后色温均匀度从 78% 提升到 88.7%, 照度的均匀度从 42% 提升到 87.6%。分析实际加工制造过程产生的误差对色温均匀度的影响, 随着制造误差的增大优化后色温均匀度下降, 但均优于优化前色温分布均匀性。

关键词: 照明工程; 发光二极管阵列; 色温; 均匀化; 评价函数

中图分类号: O432 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183304.0326

Design of white LED array for uniform correlated color temperature distribution

HU Ying^{1,2}, SU Zhou-ping^{1,2*}, CAO Jing-hui^{1,2}

(1. School of Science, Jiangnan University, Wuxi 214112, China;

2. Jiangsu Provincial Research Center of Light Industrial Optoelectronic Engineering and Technology, Wuxi 214112, China)

Abstract: In this paper, an algorithm is proposed to design white LED array for uniform distribution of the correlated color temperature (CCT) on the target surface. The color temperature distribution of LED array on the target surface can be calculated by superposition of color temperature superposition from different LEDs in the array. A merit function is constructed which reflects the uniformity of CCT distribution. The value of the merit function depends on all LED positions. By optimizing all LED positions, the merit function achieves the minimal value. When merit function achieves the minimal

收稿日期: 2017-10-27; **修订日期:** 2018-01-22.

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 60908041); 上海市全固态激光器与应用技术重点实验室开放课题 (No. 2012ADL03)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60908041); Opening Project of Shanghai Key Laboratory of ALL Solid-State Laser and Applied Techniques (No. 2012ADL03)

* 通信联系人, E-mail: zpsu_optics@163.com

value, the uniformity of the CCT distribution will reaches the highest. By the method, two LED arrays are designed: (1) Square array consisting of 9 identical white LEDs (2) Circular array consisting of 16 white LEDs. After optimization, the two LED arrays both produce uniform CCT distribution with a uniformity of higher 95%. In addition, we also design another LED array which controls the uniformity of irradiance and CCT distribution simultaneously by constructing a special evaluation function. By optimizing the configuration of the LED array, the uniformity of the CCT is increased from 78% to 88.7% and the uniformity of the irradiance distribution is increased from 42% to 87.6%. Finally, the influence of the CCT errors of LEDs on the uniformity is analyzed. The results show that the uniformity of LED array will decrease with the increasing of the CCT errors of each LED. Also the algorithm is still quite effective for designing the LED array in which each LED has different CCT error.

Key words: illuminating engineering; LED array; color temperature; uniformity; merit function

1 引言

白光LED广泛应用于各种各样的照明场景中,目前实现白光LED的主要方法是蓝光LED光源通过激发黄光荧光粉生成白光^[1-2]。然而在白光LED制造的过程中,由于荧光粉涂覆厚度不均,导致蓝光转换成黄光几率不同,使得白光LED空间色温分布不均匀^[2-3],直接用于照明会影响人们的视觉感官,因此在目标面上产生均匀的白光分布,对实现LED高品质照明具有非常重要的意义。高均匀度色温分布的LED可以广泛应用于LED背光显示、阅读灯以及室内照明灯等众多领域。目前实现白光LED色温分布均匀的主要方法有两种:1)采用自由曲面透镜的方式提高LED出射光空间色温均匀度;2)通过改变荧光粉涂层的形状、结构以及涂覆方式实现LED色温均匀分布^[3-5]。由于单颗白光LED光通量较低且照射范围有限,限制了单颗LED在众多领域内的应用,在实际照明应用当中通常采用多颗LED阵列组合的方式获得高亮度大范围的照明。使用多颗LED组成LED阵列,在目标面上色温相互叠加产生均匀的色温分布,这种方法在实际应用中更具有价值^[6]。利用LED阵列可实现目标面上照度分布均匀性的优化已有报道^[7-9],但目前对于利用LED阵列实现色温分布均匀性的相关研究较少。

本文将通过构建LED阵列的方式使得阵列中每颗LED的色温分布在目标面上相互叠加,构建色温均匀度评价函数,评价函数自变量为阵列中LED的位置坐标,优化目标值为目标面上的色

温均匀度,优化评价函数为1与色温均匀度的差值,应用模拟退火的粒子群算法,优化评价函数最小值,从而获得最佳LED阵列结构,实现目标面上色温和照度均匀分布。

2 LED阵列色温叠加的理论模型及评价方法

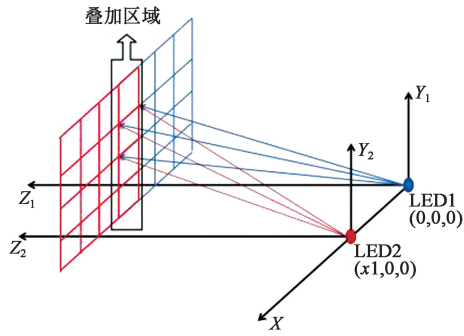
2.1 LED阵列的构建

由于单颗蓝光LED通过黄光荧光粉激发出的白光色温分布不均匀,中心色温较高,边缘色温较低,且单颗LED照度呈朗伯分布,直接用于照明会影响照明质量。为解决这一问题,首先将LED照明目标面划分为 $m \times m$ 的网格,对于单个LED照明来说,由于在照明目标面上的色温和照度分布不均匀,因此目标面每个网格点上的照度和色坐标不相同。

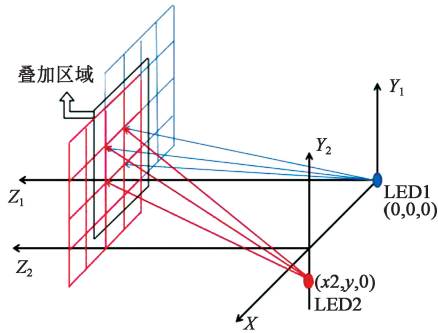
如图1(a)所示,两颗LED同时照射到目标面上,在公共区域内色温相互叠加,产生叠加后的色坐标。如图1(b)所示,将LED1保持不动,若将LED2沿 x, y 轴各移动一个单位长度,目标面上各点处的色坐标和照度值都随着LED的移动而发生变化,相应的叠加区域也发生变化,因此目标面各网格点上叠加后的色温值也会随之变化。合理调整LED阵列中各个LED的位置即可实现照明目标面上色温均匀分布。

2.2 构建评价函数

设照明目标面上一点 $Q(i, j)$ 分别由 n 种色温、照度的光同时入射,色坐标分别为 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , $(x_3, y_3) \cdots (x_n, y_n)$, 照度分别为 E_1 ,



(a) LED1、LED2 位置坐标分别为 $(0,0,0)$ 、 $(x1,0,0)$
时色温叠加示意图
(a) CCT superposition for LED1 $(0,0,0)$ and LED2
 $(x1,0,0)$



(b) LED1、LED2 位置坐标分别为 $(0,0,0)$ 、 $(x2,y,0)$
时色温叠加示意图
(b) CCT superposition for LED1 $(0,0,0)$ and LED2
 $(x2,y,0)$

图 1 色温叠加示意图

Fig.1 Process of CCT superimposed superposition

$E_2, E_3 \cdots E_n$, 根据色度学原理、格拉斯曼颜色混合定律和 CIE1931 标准可以得出混合后的色温坐标计算公式为^[10-12]:

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ \frac{1}{y_t} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_n \\ y_1 & y_2 & y_3 & \cdots & y_n \\ \frac{1}{y_1} & \frac{1}{y_2} & \frac{1}{y_3} & \cdots & \frac{1}{y_n} \\ 1 & 1 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \\ \vdots \\ l_n \end{pmatrix}, \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{E_1}{\sum_{k=1}^n E_k}; \quad l_2 = \frac{E_2}{\sum_{k=1}^n E_k}; \\ l_3 &= \frac{E_3}{\sum_{k=1}^n E_k}; \cdots; \quad l_n = \frac{E_n}{\sum_{k=1}^n E_k}. \end{aligned} \quad (2)$$

由式(1)可得出目标面 Q 点上叠加后的色坐标 (x_t, y_t) :

$$x_t = y_t \sum_{k=1}^n \left(\frac{x_k}{y_k} \times l_k \right), \quad y_t = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{l_k}{y_k}}. \quad (3)$$

通过色温计算公式^[13], 即:

$$T = 669A^4 - 779A^3 + 3360A^2 - 7047A + 5652, \quad (4)$$

其中: T 为色温, A 为等色温线斜率的倒数, 表示为^[12-13]:

$$A = \frac{x_t - 0.329}{y_t - 0.187}, \quad (5)$$

即可得出叠加后目标面 Q 点上的色温值。

定义目标面上平均色温与最大色温的比值表示色温的均匀度即:

$$\eta = \frac{\bar{T}}{T_{\max}}, \quad (6)$$

其中:

$$\bar{T} = \frac{1}{m \times m} \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m T(i, j), \quad (7)$$

(i, j) 表示目标面上网格点的坐标。构建优化目标函数 F :

$$F = 1 - \eta = 1 - \frac{\frac{1}{m \times m} \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m T(i, j)}{T_{\max}}, \quad (8)$$

用于优化 LED 阵列排布。 F 值越小, η 值越大, 目标面上色温均匀度越高。

通过式(3)可以得知, 叠加后目标面每个网格点上的色坐标与叠加前每颗 LED 在目标面每个网格点上的色坐标及照度有关系。由于 LED 阵列中每颗 LED 位置的变化都会使得 LED 照明目标面每个网格点上的照度和色温发生变化, 因此, 确定阵列中每颗 LED 的类型后, 优化函数 F 仅与各 LED 的位置有关。通过优化目标函数 F 即可得出当色温分布最为均匀时 LED 阵列中每颗 LED 的位置。

3 优化算法的设计

粒子群优化算法是通过迭代的方式搜索全局最优值, 在实际应用中范围最为广泛, 但此算法具有搜索精度较低, 容易陷入局部最优值等缺点。

模拟退火算法具有较强的全局优化能力,但此算法收敛速度较慢,运行效率低,参数设置较为复杂。为解决以上两种算法的不足,提出了基于模拟退火的粒子群算法,该算法是以粒子群优化算法为主流程,将模拟退火算法引入其中的一种优化算法。此算法有效利用了模拟退火算法在搜索过程中具有概率突跳的能力,能有效地避免陷入局部最优值,优化后的算法收敛速度和收敛稳定性均有很大的提升^[14]。

3.1 基于模拟退火的粒子群算法一般过程

基于模拟退火的粒子群算法流程如图2所示^[14-15],首先给定每个粒子随机初始化的位置 $(x_{i,j}, y_{i,j})$ 和速度 $(v_{i,j})$,根据适应度函数评价初始化粒子的适应度,将当前每个微粒的位置和适应值存放在各微粒的 P_i 中,将所有最优适应度存放在 P_g 中。算法中初始温度的设置一般为 $-fitness(p_g)/\log 0.2$, $fitness(p_g)$ 表示最优粒子的适应度值。根据轮盘赌策略确定更新粒子的速度和位置,从各个粒子中确定全局最优的某个替代值 P'_g ,根据式(9)、式(10)、式(11)更新粒子的速度和位置。

$$y_{i,j}(t+1) = \varphi\{v_{i,j}(t) + c_1 r_1 [p_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2 r_2 [p'_{g,j} - x_{i,j}(t)]\}, \quad (9)$$

$$x_{i,j}(t+1) = x_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{2}{2 - C - \sqrt{C^2 - 4C}}, C = c_1 + c_2, \quad (11)$$

其中 c_1, c_2 表示学习因子。

初始温度以及退火方式采用的参数设定为: $t_{k+1} = \lambda k, t_0 = f(p_g)/\ln 5$ 。

3.2 基于模拟退火的粒子群算法参量控制问题

基于模拟退火的粒子群算法在不同的优化问题中对优化参数有不同的要求,主要表现在以下几个方面^[14-15]:

(1)种群个数(N):不同优化问题对种群个数的设置有不同的要求,种群个数设置较小,算法的搜索空间小,会使得错过最优解;反之,会使得算法的运算时间过长。

(2)退火常数(λ):使优化具有概率突跳的能力,避免陷入局部最优。

(3)学习因子(c_1, c_2):分别决定了粒子个体经验和群体经验对粒子运行轨迹的影响,反映粒子之间的信息交流。

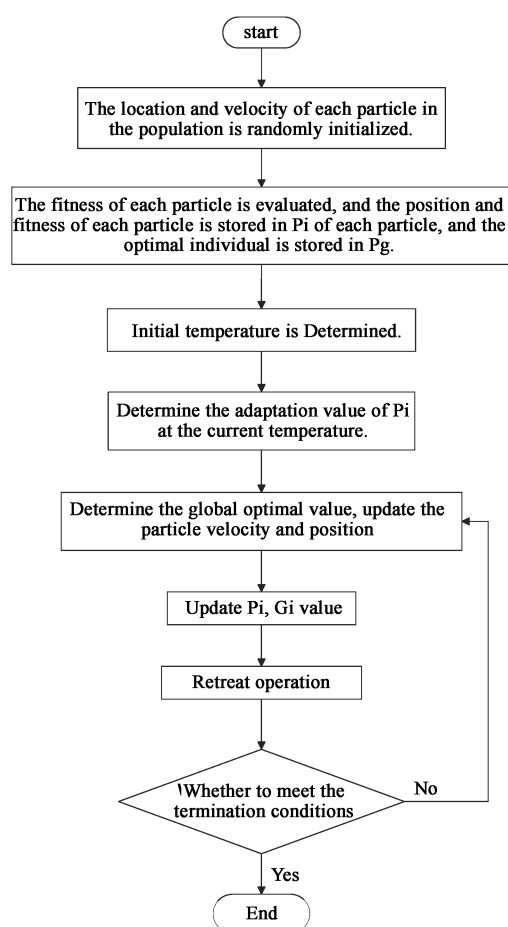


图2 基于模拟退火的粒子群算法优化流程图

Fig. 2 Flow chart of particle swarm optimization algorithms based on simulated annealing

(4)最大迭代次数(M):最大迭代次数决定算法的优化运行次数,迭代次数过小,还未找到最优解程序已经结束,迭代次数过大,会使得算法的运算时间过长。

4 设计实例

4.1 相同类型LED方形阵列排布

使用光学设计软件 Tracepro 构建白光LED,LED的光通量10 lm,荧光粉涂层的浓度为0.17 mol,通过光线追迹模拟出的LED照度、色温分布如图3所示。使用 Tracepro 软件构建白光LED,设计9颗完全相同的白光LED阵列,采用 3×3 方形阵列排布的方式,目标面选取在距离LED 100 mm的位置处,目标面选取为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的方形区域。首先,将单颗LED

照明面网格化,把照明面划分为 512×512 的网格,对于相同类型的白光 LED 阵列,仅需读取阵列中单颗 LED 在目标面每个网格上的色坐标及照度值,首先根据式(3)计算出每个网格叠加后的色坐标,其次根据式(4)、式(5)计算出每个网格点上叠加后的色温值,进而利用式(8)构建评价函数。利用基于模拟退火的粒子群算法优化目标函数,得出目标函数值最小时各个 LED 的位置。

对于 3×3 的 LED 阵列,白光 LED 阵列的排列方式及位置坐标如图 4 所示,通过改变 d 的值即可改变 9 颗 LED 的位置,从而使得评价函数 F 的值发生变化。图 5 为优化时随着迭代次数的增加优化目标函数的变化曲线,当优化次数达到最大迭代次数时停止优化,从表 1 中可以看出,在第 8 次迭代后优化函数已经达到最小值,当优化函数达到最小值时,LED 之间的距离 $d = 66.8 \text{ mm}$ 。

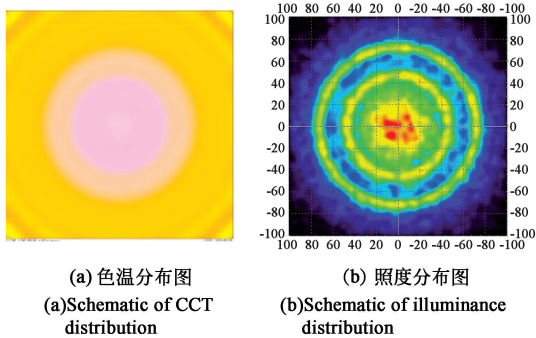


图 3 单颗 LED 色温和照度分布图
Fig.3 Schematic of distribution of CCT and illumination for single LED

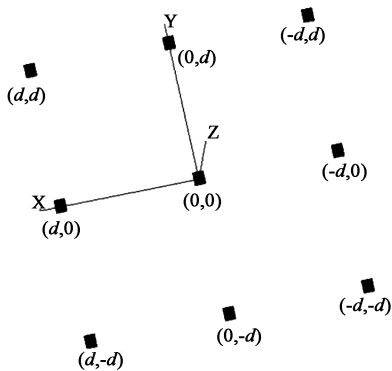


图 4 3×3 LED 阵列排布示意图
Fig.4 Arrangement of 3×3 LED array

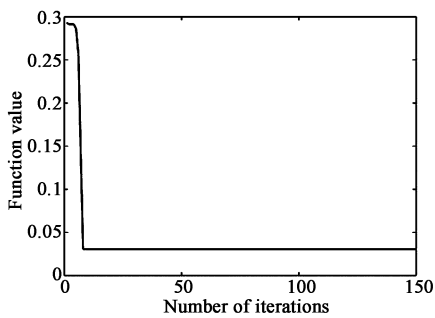


图 5 评价函数随优化次数的关系
Fig.5 Evaluation function for different optimization times

表 1 色温均匀度与评价函数随迭代次数变化
Tab.1 Color temperature uniformity and evaluation function value for different optimization times

迭代次数	目标面色温 均匀度(η)/%	评价函数(F)
1	70.703	0.292 97
2	70.858	0.291 42
3	70.858	0.291 42
4	70.858	0.291 42
5	71.363	0.286 37
6	74.306	0.256 94
7	85.757	0.142 43
8	96.923	0.030 77
9	96.923	0.030 77
10	96.923	0.030 77
20	96.923	0.030 77
30	96.923	0.030 77
50	96.923	0.030 77
70	96.923	0.030 77
120	96.923	0.030 77
150	96.923	0.030 77

优化前对阵列中 LED 之间的距离随机赋值 $d = 26 \text{ mm}$,图 6(a)为优化前所得到的色温分布图,此时色温均匀度为 78%;图 6(b)为优化后 LED 阵列在目标面上色温分布图,优化后 LED 在目标面上色温均匀度从 78%提升到 96%。图 6(c)、(d)分别为优化前后色温对比示意图,优化后目标面上色温均匀度有了明显的提高,优化前

后平均色温值分别为 3 351.5 K、3 637 K。

4.2 不同类型 LED 圆形阵列排布

设计 16 颗两种不同类型的白光 LED,采用圆形排布的方式,将目标面取在距离 LED 100 mm 的位置处,目标面大小选取为 300 mm $\times$ 300 mm 的方形区域。



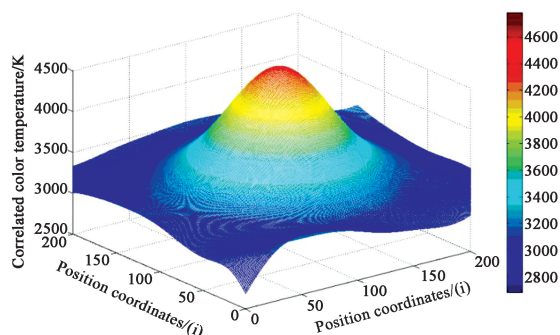
(a) 优化前色温分布

(a) Un-optimized color temperature distribution



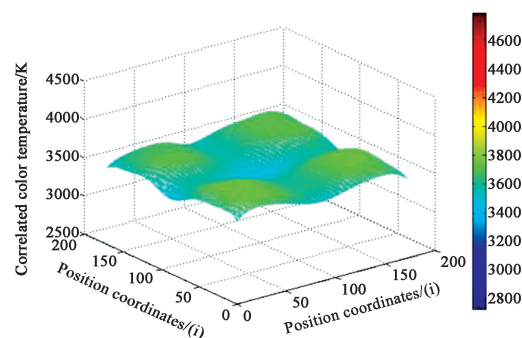
(b) 优化后色温分布

(b) Optimized color temperature distribution



(c) 优化前白光 LED 阵列色温分布 3D 示意图

(c) Color temperature distribution of the un-optimized white LEDs array



(d) 优化后 3 $\times$ 3 白光 LED 阵列色温分布 3D 示意图

(d) Color temperature distribution of the optimized 3 $\times$ 3 white LEDs array

图6 优化前后色温分布对比图

Fig.6 CCT distribution before and after optimization

蓝光激发黄光荧光粉组合形成的白光 LED 色温分布与荧光粉颗粒的大小,荧光粉涂层的厚度及浓度有关^[16]。通过改变荧光粉的颗粒大小,涂层厚度以及浓度,会使得色温分布有所变化。如图 7 所示:实线和虚线分别表示 0.17 mol 和 0.20 mol 荧光粉激发白光 LED 的色温分布图,由于 0.20 mol 的荧光粉浓度较高,蓝光转换的几率增加,与 0.17 mol 荧光粉激发出的白光相比色温偏低。

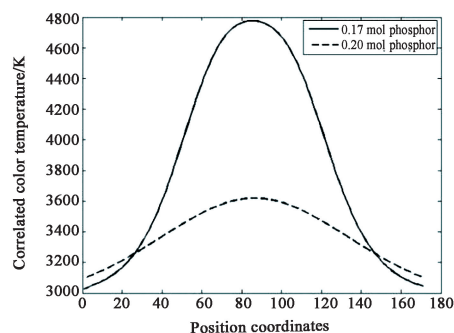


图7 0.17 mol 和 0.20 mol 荧光粉激发白光 LED 的色温分布

Fig.7 CCT distribution of 0.17 mol and 0.20 mol phosphor excited white LED

如图 8 所示,内外半径上的 LED 分别表示荧光粉浓度为 0.20 mol 和 0.17 mol 的 LED,只需改变 0.20 mol 和 0.17 mol 的白光 LED 的距坐标中心的半径 R_1, R_2 ,即可使得目标面上的色温分布发生变化。对于两种不同类型的圆形 LED 阵列需分别读取各类型的 LED 在目标面上的色坐标矩阵与照度矩阵,根据式(8)构建优化函数,利用模拟退火的粒子群算法优化 R_1, R_2 的值,优化后半径分别为

$R_1=47.4$ mm, $R_2=102.7$ mm。图 9(a)为优化前对于两种类型白光 LED 圆形阵列的半径随机赋值 $R_1=40$ mm, $R_2=90$ mm 所得到的色温分布图, 此时目标面上色温均匀度为 87%, 图 9(b)为优化后 LED 阵列在目标面上色温分布图, 优化后 LED 在目标面上色温均匀度从 87% 提升到 95.8%。图 9(c)、(d)分别为优化前后色温对比图, 优化后目标面上色温均匀度有了明显的提高, 优化前后平均色温值分别为 3 237 K、3 335 K。

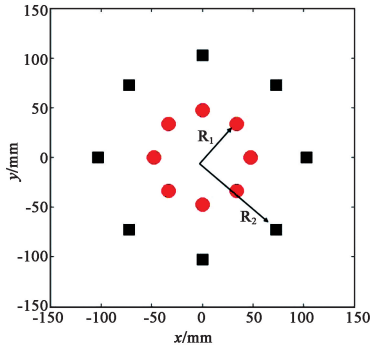
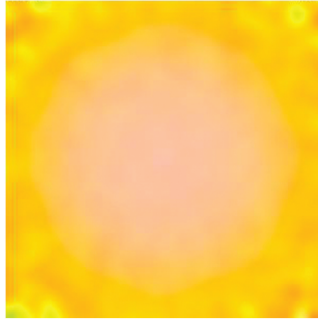


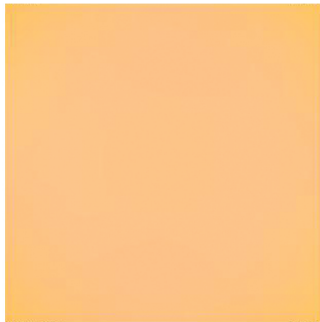
图 8 优化后 16 颗圆形 LED 阵列排布图

Fig.8 Arrangement of the 16 circular LED arrays after optimization



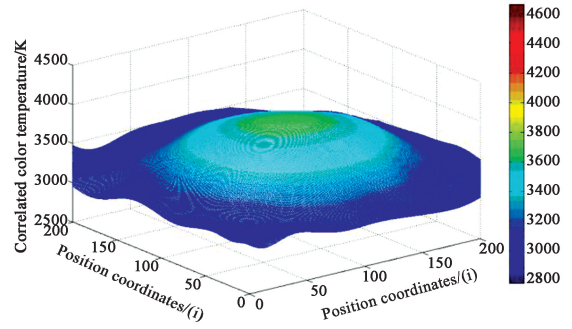
(a) 优化前色温分布

(a) Un-optimized Color temperature distribution



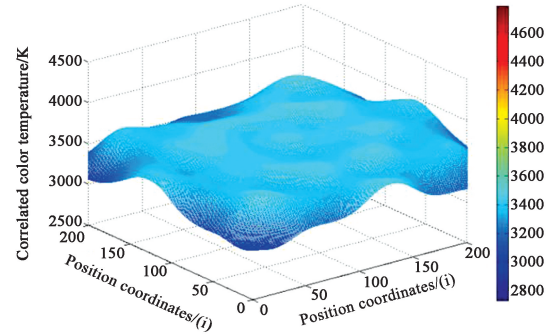
(b) 优化后色温分布

(b) Optimized Color temperature distribution



(c) 优化前白光 LED 阵列色温分布 3D 示意图

(c) Color temperature distribution of the un-optimized white LEDs array



(d) 优化后圆形白光 LED 阵列色温分布 3D 示意图

(d) Color temperature distribution of the optimized round white LEDs array

图 9 优化前后色温分布对比图

Fig.9 CCT distribution before and after optimization

5 色温和照度的同时均匀化

5.1 构建优化函数

根据格拉斯曼混色定律^[12]可知: 几种颜色的光混合后的亮度等于各颜色亮度的总和。假设目标面上一点 $P(i, j)$, 有 n 种颜色光入射, 其照度值分别为 $(E_1, E_2, E_3, \dots, E_n)$, 因此目标面上叠加后的照度值为:

$$E(i, j) = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i. \quad (12)$$

同样采用目标面照度的平均值 $\bar{E}$ 与目标面上照度最大值 $E_{\max}$ 的比值表示目标面照度的均匀度, 即:

$$\eta_1 = \frac{\bar{E}}{E_{\max}} = \frac{1}{m \times m} \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m E(i, j) \quad (13)$$

其中: $E(i, j)$ 表示目标面第 (i, j) 个网格点上的照度值。

构建照度评价函数:

$$F_1 = 1 - \eta_1 = 1 - \frac{\bar{E}}{E_{\max}} = 1 - \frac{1}{m \times m} \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m E(i, j) \quad (14)$$

根据式(6), 目标面色温的均匀度为 $\eta =$

$\frac{\bar{T}}{T_{\max}}$, 构建色温评价函数:

$$F_2 = 1 - \eta = 1 - \frac{\bar{T}}{T_{\max}}, \quad (15)$$

通过构建色温与照度的均匀度优化函数 $F = k_1 F_1 + k_2 F_2$, 其中 k_1, k_2 分别表示在优化的过程中照度均匀度及色温均匀度所占的权重比例。利用基于模拟退火的粒子群算法优化函数 F , 优化得到函数最小值即为实现色温和照度最优值时LED阵列的结构。

5.2 优化实例

相同规格的白光LED, 荧光粉涂层浓度为0.17 mol, 采用 3×3 方形阵列排布方式, 目标面选取在距离LED 100 mm的位置处, 目标面选取为 $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 的方形区域。取权重 $k_1 = 0.5, k_2 = 0.5$, 构建优化函数, 通过基于模拟退火的粒子群算法优化后, 当 d 取 87.8 mm 时, 目标面上色温均匀度与照度的均匀度能同时达到最优化, LED的排布位置如图10所示。优化前随机赋值LED阵列的位置 $d = 26 \text{ mm}$, 此时目标面上色温分布图如图11(a)所示, 色温均匀度78%、平均色温值为3637 K; 优化后目标面上色温分布

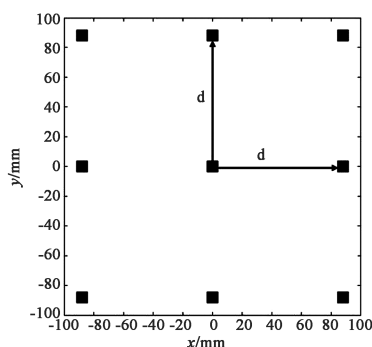


图10 优化后LED阵列排布

Fig.10 Arrangement of the LED array after optimization



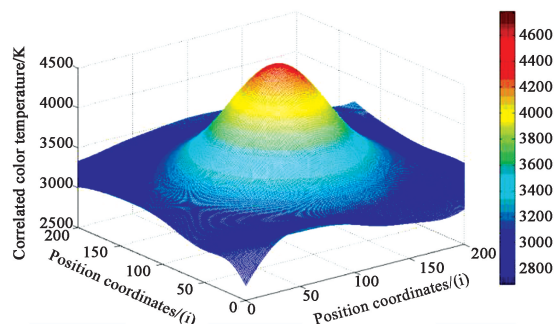
(a) 优化前色温分布

(a) Un-optimized Color temperature distribution



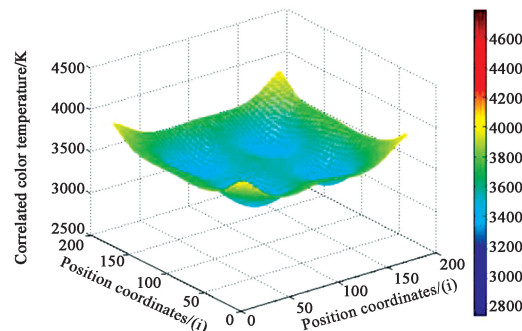
(b) 优化后色温分布

(b) Optimized Color temperature distribution



(c) 优化前白光LED色温分布3D示意图

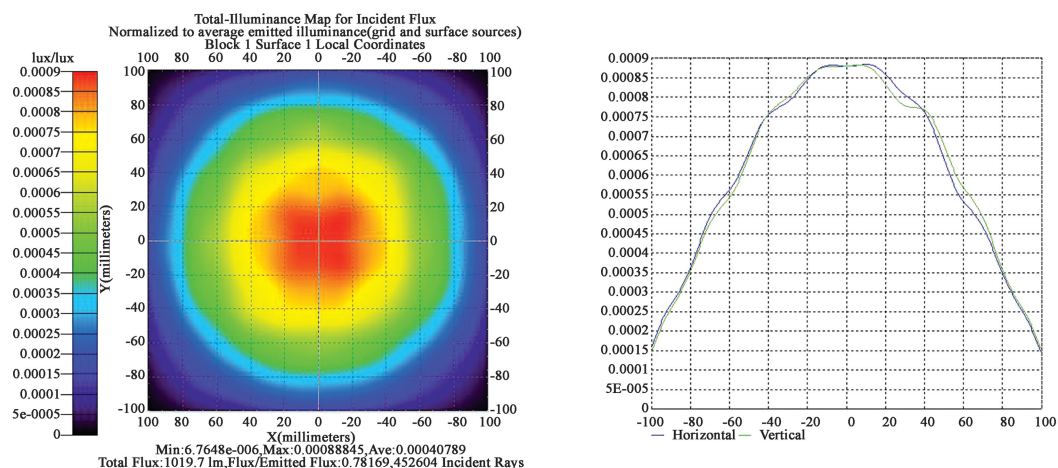
(c) Color temperature distribution of the un-optimized white LEDs array



(d) 优化后 3×3 白光LED阵列色温分布3D示意图
(d) Color temperature distribution of the optimized white LEDs array

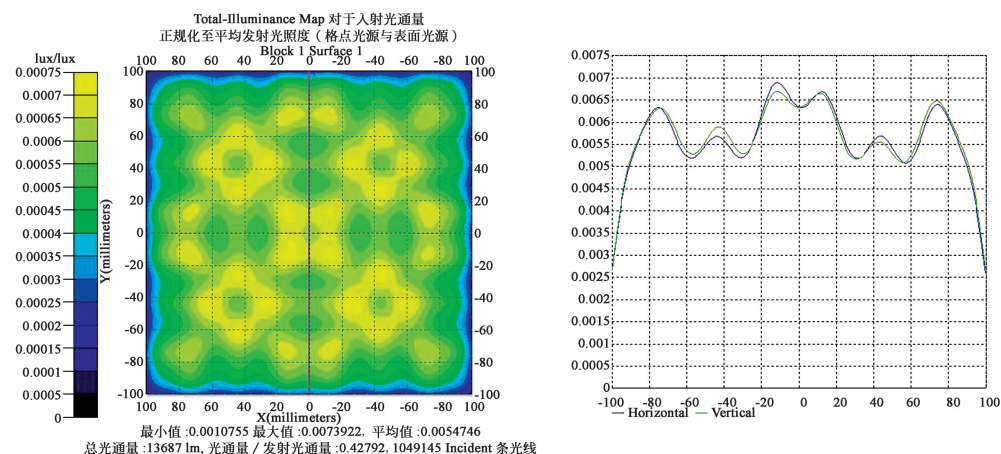
图11 优化前后色温对比图

Fig.11 CCT distribution before and after optimization



(a) 优化前照度分布及轮廓示意图

(a) Irradiance and profile distribution before optimization



(b) 优化后照度分布及轮廓示意图

(b) Irradiance and profile distribution after optimization

图 12 优化前后方形阵列的照度分布对比图

Fig.12 Irradiance distribution generated by the optimized square LED array before and after optimization

图如图 11(b)所示,色温均匀度从 78% 提升到 88.7%、平均色温值为 3 311.4 K,优化后色温均匀度提升了 10.7%。优化前目标面上照度分布图如图 12(a)所示,照度均匀度 42%、平均照度值为 3 246 lx。优化后目标面上照度分布图如图 12(b)所示,照度均匀度从 42% 提升到 87.6%、平均照度值为 2 636.6 lx,照度均匀度提升了 45.6%。

6 加工误差对白光 LED 阵列色温均匀度影响

在上述章节各优化实例当中,所采用的白光 LED 均为理想状态下的 LED 阵列,即相同类型

的 LED 出射光的色温和照度均相同。在实际加工制造过程中由于荧光粉涂层厚度、浓度及芯片制作等方面的误差会导致生产的同种类型白光 LED 出射色温和照度均有所偏差。因此在 LED 阵列排布的过程中,考虑到 LED 的制造加工误差,需要获得每颗 LED 在目标面上的色温分布矩阵及照度分布矩阵。这里将模拟带有制造误差的 LED 阵列的优化设计。构建 9 颗白光 LED 阵列,如 4.1 章节构建相同类型白光 LED 方形阵列所示,这里在设计过程中考虑制造过程中的误差,设阵列中每颗 LED 的加工误差系数 m (即实际生产加工制造过程中的误差导致实际生产的 LED 色温分布相对于理想情况下偏差),从而阵列中每

颗LED的色温分布矩阵与照度分布矩阵分别为:

$$T_n(i, j) = (1 - m) \times T(i, j), \quad (16)$$

$$E_n(i, j) = (1 - m) \times E(i, j), \quad (17)$$

其中: $T_n(i, j)$ 、 $E_n(i, j)$ 分别为阵列中第 n 颗LED在目标面上的色温分布矩阵与照度矩阵, $T(i, j)$ 、 $E(i, j)$ 为理想情况下LED在目标面上色温分布矩阵与照度矩阵。

理想状态下 0.17 mol 白光LED在目标面上平均色温为 3 375.8 K, 对阵列中 9 颗LED分别根据式(16)、(17)模拟带有误差系数的色温分布矩阵, 每颗LED的误差系数是在 $-10\% \leq m \leq 10\%$ 之间的随机数。9 颗LED色温分布平均值如图13所示。根据式(8)构建色温均匀度评价函数, 利用基于模拟退火的粒子群算法优化评价函数, 得到当评价函数最小即目标面上色温分布最为均匀时LED之间的距离 d 。

当加工误差系数 m 分别为 5%; 7%; 10%; 15%; 20%; 25% 时, 优化前对LED距离 d 随机赋

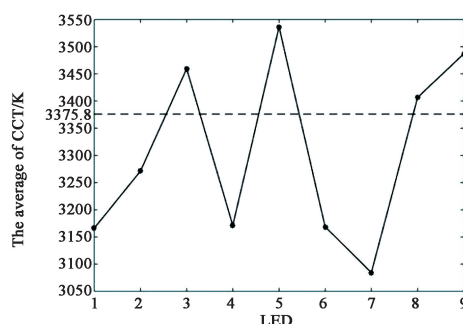


图13 阵列中LED的平均色温折线图(误差为10%)

Fig.13 Line chart of the average CCT of the LED array (error is 10%)

值所得到的目标面色温分布均匀性与优化后LED阵列之间的距离及所对应的色温均匀度如表2所示。由表2可以看出, 当LED制造误差越大, 优化后得到的色温均匀度越低, 但相比于优化前随机赋值的LED阵列, 优化后目标面上色温均匀度均有明显的提升。

表2 制造误差对优化前后色温均匀度的影响

Tab.2 Influence of manufacturing error on CCT distribution before and after optimization

制造误差 偏移量(m)/%	优化前随机赋值LED 的距离(d) ₁ /mm	优化前色温 均匀度/%	优化后得到LED 的距离(d)/mm	优化后色温 均匀度/%
5	25	59	66.9	87
7	25	57	67	86
10	25	54	65.8	83
15	25	53	61	79
20	25	51	63.8	77
25	25	51	67	72

7 结 论

本文应用基于模拟退火的粒子群算法, 对LED阵列中每颗LED的位置进行优化, 使得LED在照明目标面上光色均匀。本文对 3×3 方形阵列、16 颗圆形阵列分别进行色温优化, 优化后色温均匀度分别达到 96% 和 95.8%, 实现白光LED阵列色温的均匀化。应用优化算法对 3×3

方形阵列中目标面上色温均匀度和照度均匀度同时优化, 优化后目标面上色温均匀度到达 88.7%, 照度的均匀度达到 87.6%, 实现了白光LED色温和照度分布的均匀化。通过对实际加工过程中每颗LED制造公差对阵列均匀度影响分析, 对于具有加工误差的LED阵列排布进行优化, 优化后色温均匀度有很大提升。本方法对于LED色温和照度分布数据采用直接收集和测试的方式, 因此本方法对于扩展光源同样适用。

参 考 文 献:

- [1] MUTHU S, SCHUURMANS F J P, PASHLEY M D. Red, green, and blue LEDs for white light illumination [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2002, 8(2): 333-338.
- [2] 吴庆, 黄先, 刘丽, 等. 色坐标对白光 LED 光通量的影响[J]. 发光学报, 2007, 28(5): 736-740.
WU Q, HUANG X, LIU L, *et al.* The corresponding relation between the color coordinate and the luminous flux [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2007, 28(5): 736-740. (in Chinese)
- [3] 徐国芳, 饶海波, 余心梅, 等. 白光 LED 光斑均匀性的改进[J]. 发光学报, 2008, 29(4): 707-712.
XU G F, RAO H B, YU X M, *et al.* Improvement of optical uniformity of white LEDs [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2008, 29(4): 707-712. (in Chinese)
- [4] WANG K, WU D, CHEN F, *et al.* Angular color uniformity enhancement of white light-emitting diodes integrated with freeform lenses [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1860-1862.
- [5] 宋国华, 缪建文, 施建珍, 等. 一种提高白光 LED 相关色温分布均匀性的方法[J]. 光电子·激光, 2010, 21(7): 983-987.
SONG G H, MIAO J W, SHI J Z, *et al.* An improvement method of uniformity of color temperature of white-LED [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(7): 983-987. (in Chinese)
- [6] MORENO I, CONTRERAS U. Color distribution from multicolor LED arrays [J]. *Optics Express*, 2007, 15(6): 3607-3618.
- [7] 王加文, 苏宙平, 袁志军, 等. LED 阵列模组化中的照度均匀性问题[J]. 光子学报, 2014, 43(8): 0822004.
WANG J W, SU Z P, YUAN Z J, *et al.* Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 0822004. (in Chinese)
- [8] SU Z P, XUE D L, JI Z C. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm [J]. *Optics Express*, 2012, 20(S6): A843-A855.
- [9] WU D H, WANG J W, SU Z P. Optimization and integration of LED array for uniform illumination distribution [J]. *Optoelectronics Letters*, 2014, 10(5): 335-339.
- [10] 殷录桥, 杨卫桥, 李抒智, 等. 基于三基色的动态色温白光发光二极管照明光源[J]. 光学学报, 2011, 31(5): 0523004.
YIN L Q, YANG W Q, LI S Z, *et al.* Dynamic color temperature white lighting source based on red green and blue light emitting diode [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(5): 0523004. (in Chinese)
- [11] 刘平宇, 陈长缨, 张浩, 等. 基于红白蓝模式色温可调的 LED 照明系统[J]. 固体电子学研究与进展, 2014, 34(2): 163-169.
LIU P Y, CHEN C Y, ZHANG H, *et al.* Adjustable color temperature LED illumination system based on RWB model [J]. *Research & Progress of SSE*, 2014, 34(2): 163-169. (in Chinese)
- [12] 郝允祥, 陈遐举, 张保洲. 光度学[M]. 北京: 中国计量出版社, 2010.
HAOY X, CHEN X J, Zhang B Z. *Photometry* [M]. Beijing: Chinese Metrology Publishing House, 2010. (in Chinese)
- [13] 徐代升, 陈晓, 朱翔, 等. 基于冷暖白光 LED 的可调色温可调光照明光源[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0123004.
XU D S, CHEN X, ZHU X, *et al.* A dimming lighting source based on cold and warm white LEDs [J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(1): 0123004. (in Chinese)
- [14] 陈国飞. 基于模拟退火的粒子群算法的函数优化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
CHEN G F. Research of function optimization of PSO based on simulated annealing [D]. Changsha: Central South University, 2013. (in Chinese)
- [15] 龚纯, 王正林. 精通 MATLAB 最优化计算[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2014.
GONG C, WANG Z L. *Proficient in MATLAB Optimization* [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014. (in Chinese)

[16] 王加文.LED光源等效模型建立及均匀照度色度透镜设计[D].无锡:江南大学,2014.

WANG J W. Modeling equivalent LEDs source and designing lens for uniform illumination and color distribution [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014. (in Chinese)

作者简介:胡莹(1993—),女,安徽宿州人,硕士研究生,主要研究方向为LED照明技术。E-mail: hxy_220826@126.com

苏宙平(1978—),男,山西朔州人,博士,副教授,主要研究方向为光学设计、LED照明技术。E-mail: zpsu_optics@163.com