

文章编号: 1000-7032(2015)03-0348-07

基于 Taguchi 方法的曲面 LED 阵列照度问题研究

史晨阳^{1,2}, 文尚胜^{1,2*}, 陈颖聪^{1,2}

(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东 广州 510640;
2. 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 为了分析曲面底板配光的 LED 阵列照明照度的影响因子, 采用 Taguchi 实验方法设计实验, 并运用 TracePro 软件进行仿真模拟, 再通过 ANOVA 理论分析出因子对 LED 阵列品质的影响程度, 优化曲面底板 LED 阵列的各项结构参数。结果表明: LED 芯片数量对于照度均匀度及最大照度的影响最大, 分别占有 81.84% 和 91.58% 的影响地位。进一步地, 通过微调芯片与光轴的夹角可以得到更好的照度均匀度。以上研究结果为解决曲面底板照明的照度问题提供了理论依据。

关键词: Taguchi 方法; 曲面底板; LED; 照度; ANOVA

中图分类号: O435 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20153603.0348

Study on Curved Surface LED Array Illumination Problem Based on Taguchi Method

SHI Chen-yang^{1,2}, WEN Shang-sheng^{1,2*}, CHEN Ying-cong^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. State Key Laboratory of Luminescence Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

* Corresponding Author, E-mail: shshwen@scut.edu.cn

Abstract: In order to analyze the control factors of LED array illumination on the curved surface plate, some experiments were designed by using Taguchi method and simulated *via* TracePro software. Then, ANOVA theory was integrated to evaluate the influence of the control factors on the illumination, so that the control factors could be optimized efficiently. The experiment results show that the number of LEDs is the main influence on both illuminance uniformity (81.84%) and maximum illumination (91.58%). Furthermore, the best combination of the control factors can be obtained by adjusting the angle between the LED chips and the optical axis. This paper provides a theoretical basis to solve the illumination problem of the curved surface lighting.

Key words: Taguchi method; curved surface; LED; illumination problem; ANOVA

1 引 言

LED 现已广泛应用于投影灯、阅读灯、汽车前照灯等^[1]方面, 正逐渐取代传统光源成为新一

代照明光源。LED 是一种有着明显方向性的半导体发光器件。传统的光学设计基于非成像光学, 一般包括一次光学设计^[2]和二次光学设计^[3]。二次光学设计包括反光杯和透镜设

收稿日期: 2014-11-24; 修订日期: 2015-01-07

基金项目: 广东省战略性新兴产业专项(2011A081301017, 2012A080304012, 2012A080304001); 广州市科技计划(2013J4300021)资助项目

计^[4-8], 因反射和透射材料的影响, 不可避免地会造成光强度的极大损失(通常达到 20% ~ 30% 左右)。照明系统的照明面(近场照明)的照度均匀度对于提高照明品质具有重要意义, 同时照明面的最大照度也很重要^[9-12]。

曲面作为二次光学设计的一种手段, 常见方式为设计曲面透镜或者给 LED 灯具增加曲面反射杯。文献[13]提出一种利用曲面底板进行配光的方法, 该方法克服了 LED 光源发光角度小和光损大的缺点, 同时阵列^[14-15]排布的光源可增大发光亮度和发光面积, 改善了由于 LED 与传统光源不同的配光分布带来的照明系统能量利用率低下的问题。

目前曲面底板设计较为繁琐和耗时, 尚难以获得实际应用。Taguchi 实验是 Taguchi 和 Konishi 为了解决表现、质量、成本或工艺等工程问题的优化, 而提出的一种比试错法更高效能、更系统的实验设计工具。因为实用性强, Taguchi 方法已广泛应用于多参数优化设计的实验上^[16]。本文采用 Taguchi 方法对曲面 LED 阵列进行设计和优化, 利用 TracePro 软件进行模拟仿真, 最后通过 ANOVA 方法分析得出对曲面照度均匀度及最大照度影响最大的因子, 获得最佳的参数组合^[17]。

2 曲面照度公式推导

图 1 是曲面配光底板模型。为方便计算, 我们建立了曲面底板照明简化模型, 用来推导照度分布函数。当照度测量点与光源的距离达到光源最大尺度的 5 倍以上时, 就可以认为所有的光线都来自空间中某个确定的点, 即将光源理想化, 忽略它的尺寸, 这称为“点光源近似”^[1,18], 如图 2(a) 所示。

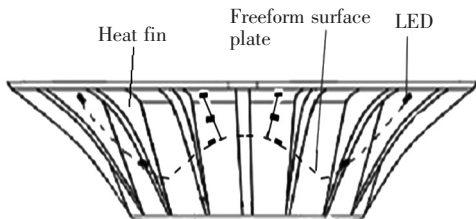


图 1 曲面配光底板结构

Fig. 1 Simplified model of the substrate with curved surface

$$E(x, y, z) = \frac{z^{m+1} I_0}{\left[\left(x - R \cos\left(\frac{2n\pi}{N}\right) \right)^2 + \left(y - R \sin\left(\frac{2n\pi}{N}\right) \right)^2 + z^2 \right]^{(m+3)/2}}, \quad (4)$$

根据式(3)和(4), 可推出曲面上单颗 LED 在接

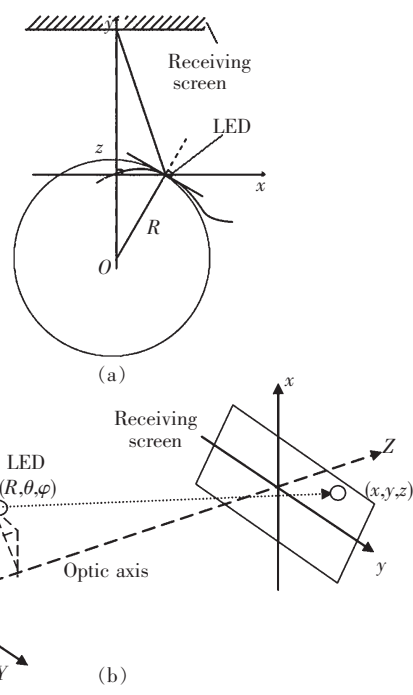


图 2 (a) “点光源近似”简化模型; (b) 曲面上单颗 LED 照明示意图。

Fig. 2 (a) Simplified model of approximate LED point source. (b) Schematic diagram of single LED lighting on the curved surface.

在介质中光强随传播距离呈指数形式衰减的规律称为朗伯特定律。对 LED 芯片做如下假设: 从芯片发出的光线没有损失, 且满足朗伯特分布, 其光强分布满足余弦分布, 即:

$$I(\theta) = I_0 \cos^m(\theta), \quad (1)$$

式中, I_0 为轴线方向上的光强, θ 为出光方向与轴线的夹角^[10-11,19], m 值由半角 $\theta_{1/2}$ (光照强度达到光轴光强一半时的夹角, 通常由生产商提供) 决定, 其关系式^[20-21]如下:

$$m = -\ln 2 / \ln(\cos \theta_{1/2}), \quad (2)$$

位置在 (X, Y, Z) 处平面排布的单颗 LED 在接收屏 (x, y, z) 处的照度^[22-23]为:

$$E(x, y, z) = \frac{z^{m+1} I_0}{\left[(x - X)^2 + (y - Y)^2 + z^2 \right]^{(m+3)/2}}, \quad (3)$$

N 颗 LED 芯片、半径为 R 的平面上环形阵列上第 n 颗 LED 在接收屏 (x, y, z) 处的照度^[12]为:

$$E(x, y, z) = \frac{z^{m+1} I_0}{\left[\left(x - R \cos\left(\frac{2n\pi}{N}\right) \right)^2 + \left(y - R \sin\left(\frac{2n\pi}{N}\right) \right)^2 + z^2 \right]^{(m+3)/2}}, \quad (4)$$

收屏 (x, y, z) 处的照度:

$$E(x, y, z, R, \theta, \varphi) = I_0 \frac{[(x - R\sin\theta\cos\varphi)\sin\theta\cos\varphi + (y - R\sin\theta\sin\varphi)\sin\theta\sin\varphi + (z - R\cos\theta)\cos\theta]^{m+1}}{[(x - R\sin\theta\cos\varphi)^2 + (y - R\sin\theta\sin\varphi)^2 + (z - R\cos\theta)^2]^{(m+3)/2}}, \quad (5)$$

其中 R, θ, φ 为 LED 芯片球坐标位置, 由式 (5) 可知影响照度分布的各参数。曲面上单颗 LED 照明示意图如图 2(b) 所示。接收屏上的照度均匀度可表示为:

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^P \sum_{n=1}^N E / (M \cdot N \cdot P)}{E_{\max}}, \quad (6)$$

式中, α 定义为照度均匀度, E_{\max} 为接收屏照度最大值, M 和 P 为接收屏的取样照度点, N 为总的 LED 数。

3 实验设计

使用 Taguchi 方法实验设计, 首先是要选定品质特性及判定品质特性的理想机能。对于照度问题, 其品质特性有照度均匀度及最大照度。在设计实验时, 一定要对品质特性定立合适的目标值来指导控制因子水准的调试, 否则, 将无法评判

实验的结果。因此, 在选定好品质特性后, 要列出影响该品质的控制因子, 并定出它们的水准。例如, 对于曲面底板配光的 LED 阵列, 直接影响接收屏照度的因子有曲面的曲率半径、芯片的排布方式、芯片数和芯片与光轴的夹角。然后根据当前一些参数, 制定合适的水准。选定因子和水准后, 依照因子及其水准的数目制定适当的直交表。本设计中影响照度的因子有 4 个, 每个因子有 3 个水准, 采用 $L_9(3^4)$ 直交矩阵, 如表 1 所示。采用普通方法完成这种实验需要 3^4 次, 而利用 Taguchi 方法设计实验只要 9 次即可, 大大减少了实验时间。完成实验后, 通过计算 S/N 比例 (品质特性数量化) 以及 ANOVA 数据分析, 辨别各因子对品质特性变异的效应, 并应用贡献度来弥补实验无法辨别各实验参数对品质特性的影响力及误差程度等方面的不足。最后, 对新的设计值做确认实验。

表 1 照度影响因子及其控制水准

Table 1 Effect of factors and its control levels

代号	因子名称	水准数	水准一	水准二	水准三
A	曲面半径/mm	3	50	70	90
B	芯片排布方式	3	线形	单环形	单环圆心加点
C	芯片数/颗	3	4	6	9
D	芯片与光轴夹角/(°)	3	20	25	30

建立如图 3 所示的模型, 定义芯片是立方体, 大小为 $0.1 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$ 。每个芯片发光功率效率为 90 lm/W , 功率为 1 W , 发光面出射光线为 $50\,000$ 条。在距离 LED 为 20 cm 处放置一块接收屏 (即 $z = 20 \text{ cm}$), 屏幕尺寸为 $5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 0.1 \text{ cm}$ (即 $d = 5 \text{ cm}$), 朝向 LED 光线出射一面设置为完全吸收 (Perfect absorber)。各因子的水准

设置如表 1 所示。曲面半径分别为 $50, 70, 90 \text{ mm}$, 芯片排布方式为线形、单环形、单环圆心加点 (图 3), 芯片数为 $4, 6, 9$, 芯片与光轴夹角为 $20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$ 。选取好因子及其水准后, 使用 TracePro 软件, 根据直交表的组合进行模拟仿真, 各组合对照度品质的效果、直交表与实验数据如表 2 所示。

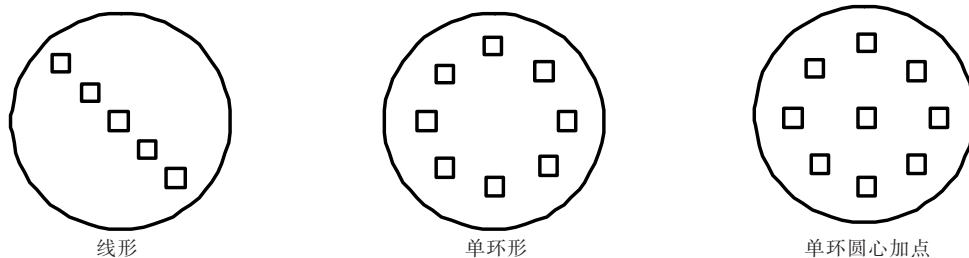


图 3 曲面上芯片的 3 种排布方式

Fig. 3 Three arrangements of the chips on curved surface

表2 采用 $L_9(3^4)$ 直角表的实验设计
Table 2 $L_9(3^4)$ orthogonal array

实验序号	A	B	C	D	照度均匀度/%	最大照度/lx	照度均匀度的 S/N	最大照度的 S/N
1	1	1	1	1	79.53	5 125.90	38.01	74.20
2	1	2	2	2	80.40	9 274.20	38.11	79.35
3	1	3	3	3	80.97	15 669.00	38.17	83.90
4	2	1	2	3	81.09	8 676.60	38.18	78.77
5	2	2	3	1	81.74	14 490.00	38.25	83.22
6	2	3	1	2	77.75	6 639.40	37.81	76.44
7	2	1	3	2	81.58	17 995.00	38.23	85.10
8	2	2	1	3	77.89	4 659.20	37.83	73.37
9	2	3	2	1	82.16	12 380.00	38.29	81.85

4 照度模拟与分析

4.1 实验数据分析

如上文所述,曲面底板 LED 阵列的照度由 4 个因子所控制,每个因子有 3 个水准,因此,使用 $L_9(3^4)$ 直交矩阵(表 2)。表 2 还包括实验得出的照度均匀度和最大照度,另外,对应的 S/N 值也在表格中列出。根据品质特性形态,S/N 值可分两种类型进行计算^[16]:

(1) 望大特性,其品质特性是越大越好,也就是品质特性的理想机能无限大。其 LTB(S/N) 公式为:

$$LTB = -10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n}, \quad (7)$$

(2) 望小特性,其品质特性是越小越好,也就是品质特性的理想机能为 0。其 STB(S/N) 公式为:

$$STB = -10 \lg \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n}, \quad (8)$$

其中 y_i 表示第 i 个品质特性, n 为实验次数。

本试验的品质特性为照度均匀度及最大照度,对于该品质特性,希望机能是越大越好,所以采用望大特性计算 S/N 值,具体数值见表 2,同时图 4 给出了各水准的 S/N 值的统计图。通过统计图,可以很清晰地分析出不同水准影响照度均匀度及最大照度的效果。

由图 4 可知,S/N 值越大,所对应的照度均匀度及最大照度越大。按照图 4(a) 结果,照度均匀度最优化的组合解是 A3B1C3D1,其中 A3 表示曲

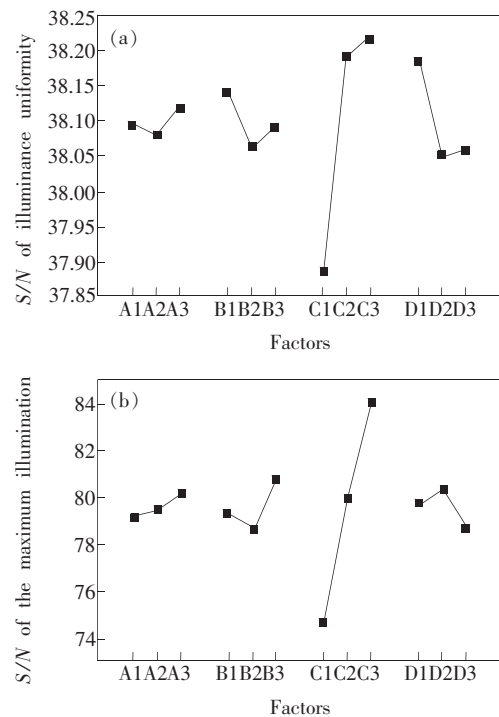


图4 各水准对应的照度均匀度(a)和最大照度(b)的 S/N 值

Fig. 4 S/N of the illuminance uniformity (a) and the maximum illumination (b) at different levels of different factors

面半径为 90 mm, B1 表示芯片排布采用线形, C3 表示芯片数为 9 颗, D1 表示芯片与光轴夹角为 20°。得到的照度均匀度为 82.34%, 最大照度为 19 116 lx。按照图 4(b) 结果, 最大照度最优化的组合解是 A3B3C3D2, 其中 A3 表示曲面半径为 90 mm, B3 表示芯片排布采用单环圆心加点, C3 表示芯片数为 9 颗, D1 表示芯片与光轴夹角为 25°。得到的最大照度值为 19 198 lx, 照度均匀度

为 72.38%。照度均匀度及最大照度最优化组合的照度图如图 5 所示。综上,由于组合 A3B1C3D1

的照度均匀度更大,且最大照度值差值很小,所以最好的组合选择是 A3B1C3D1。

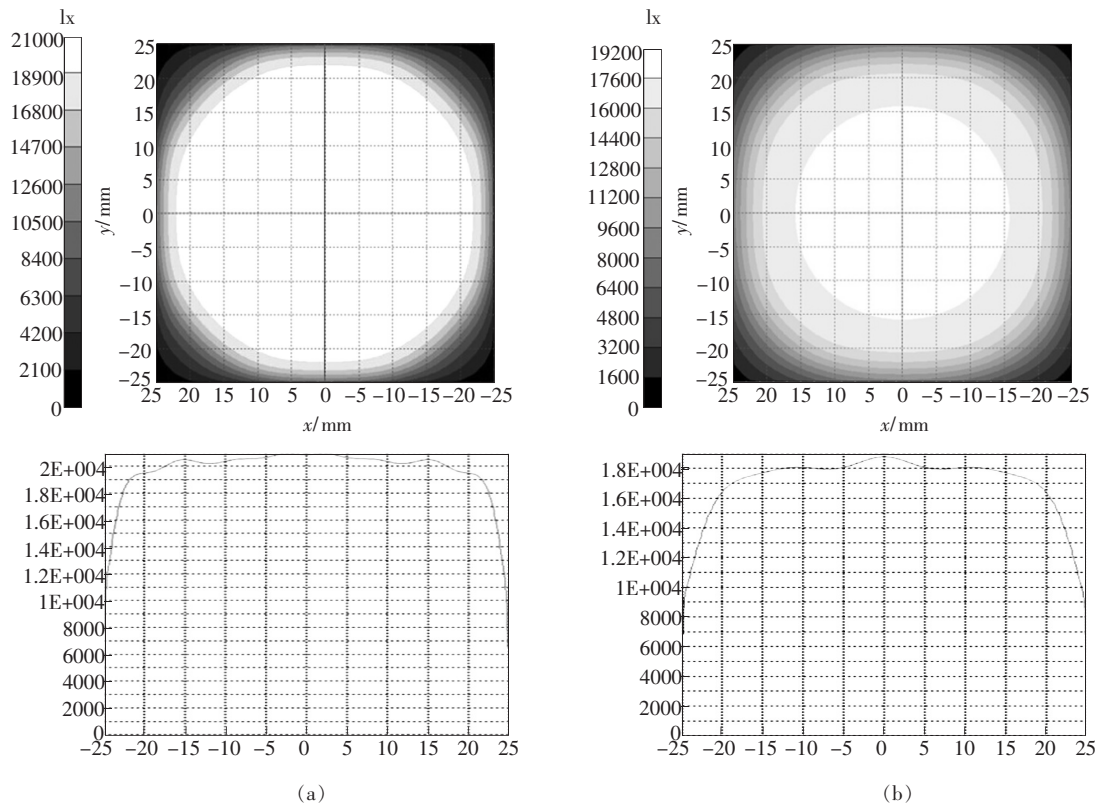


图 5 (a) 照度均匀度最优化组合照度图;(b) 最大照度最优化组合照度图。

Fig. 5 Illumination figure of the illuminance uniformity (a) and the maximum illumination(b) of the best combination

但是,为进一步验证通过最优解得出的组合设计的品质要求,还要通过对参数进行合理的调整达到目标值。

4.2 变异数分析

为了估量各因子对品质影响的贡献度,将采用变异数分析(Analysis of variance, ANOVA)方法进一步分析。ANOVA 的首要目的是评估实验误差并以百分比的方式来协助判断。在 Taguchi 方法中,常将交互作用视为误差的一部分,当因子效应和实验误差比较起来足够大时,才认定该因子效应为“有意义的”或是“重要的”。有了实验误差后,可以评估每一个因子效应相对于实验误差的“重要性”。只有“重要性”达到某一程度的因子效应,才会被用在预测的公式中,其他“重要性”不足以达到该程度的因子效应则视为可能只是实验误差造成的偶发现象。“重要性”的强弱通过采用参数 ρ ^[24] 表示:

$$\rho = \frac{SS_d}{SS_T}, \quad (9)$$

$$SS_T = SS_d + SS_e, \quad (10)$$

其中 SS_d 表示方差和, SS_e 表示错误的方差和。在本次分析中, SS_e 接近为 0, 因为仿真的错误率极低, 具有可重复性。方差 SS_T 由 S/N 比的方差和给出:

$$SS_d = \sum_{i=1}^{m_i} (\eta_i - \eta_m)^2, \quad (11)$$

其中, m 是实验数, η_i 是每个因子第 i 次实验的 S/N 比, η_m 为 S/N 值的平均值, 在本实验中 $\eta = LTB(S/N)$ 。

表 3 和表 4 为各因子分别对照度均匀度及最

表 3 各因子对照度均匀度的贡献率

Table 3 Contribution of different factors for the illuminance uniformity

因子	贡献率/%
A	0.87
B	3.81
C	81.84
D	13.48

大照度产生影响的贡献度。结果表明,芯片数对于照度均匀度及最大照度都是最大因素,且远远大于其他因子。因此,确定最终组合中 C 因子芯片数为 9 颗。A 因子和 B 因子贡献度过小,基本不改变照度均匀度及最大照度,所以确定曲面半径为 70 mm,芯片排布方式为线形。D 因子对于照度均匀度的影响程度远大于 A 因子和 B 因子,但 D 因子对于最大照度的影响程度也很小。可以通过微调芯片与光轴的夹角获得更好的照度均匀度,该结果即为最后结果。微调后夹角大小为

19°,照度均匀度为 83.21%,如图 6 所示。

表 4 各因子对最大照度的贡献率

Table 4 Contribution of different factors for the maximum illumination

因子	贡献率/%
A	0.98
B	4.64
C	91.58
D	2.80

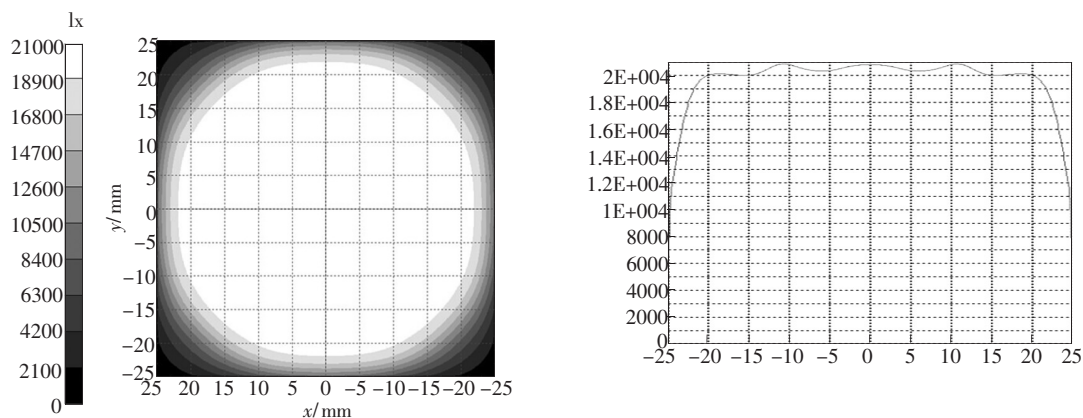


图 6 微调后得到的照度图

Fig. 6 Illumination figure after trimming

5 结 论

采用 Taguchi 方法对影响曲面底板配光 LED 阵列照度的因子进行实验设计,通过 TracePro 软件进行仿真模拟,利用 ANOVA 方法对因子的影响程度进行分析。结果表明:LED 芯片数量对照度均匀度占有 81.84% 的影响地位,对于最大照度占有 91.58% 的影响地位,两个数值都远大于

其他因子。进一步地,微调芯片与光轴的夹角可以得到照度效果最好的组合。综上,通过 Taguchi 方法研究曲面底板配光的 LED 阵列照度问题,不仅可以了解曲面底板各参数对于照度均匀度及最大照度的影响程度,还能在短时间内设计出重影最小的曲面配光的 LED 阵列排布,为解决此类问题提供理论根据。

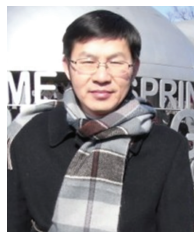
参 考 文 献:

- [1] Yan X T, Yang J F, Zhang G Q, et al. Design of freeform surface LED reflectors for uniform illumination based on compensation method [J]. *Infrared Laser Eng.* (红外与激光工程), 2012, 41(3):718-723 (in Chinese).
- [2] Xia X T, Yu B H, Liang L F. Design of LED lens for rectangular light field [J]. *Semicond. Optoelectron.* (半导体光电), 2010, 31(5):690-693 (in Chinese).
- [3] Liang S Y. Design of Secondary Opticl with LED [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008 (in Chinese).
- [4] Yu G Y, Jin J, Ni X W, et al. Design for LED uniform illumination reflector based on etendue [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2009, 29(8):2297-2301 (in Chinese).
- [5] Luo Y, Zhang X P, Wang L, et al. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. *Chin. J. Laser* (中国激光), 2008, 35(7):963-971 (in Chinese).
- [6] Yang Y, Qian K Y, Luo Y. A novel LED uniform illuminance system based on nonimaging optics [J]. *Opt. Technol.* (光

- 学技术), 2007, 33(1):110-115 (in Chinese).
- [7] Smith W J, Betensky E, Williamson D, *et al.* The past, present, and future of optical design [J]. *SPIE*, 2006, 6342: 63422Y-1-10. .
- [8] Jacobson B A, Gengelbach R D. Lens for uniform LED illumination: An example of automated optimization using monte carlo ray-tracing of an LED source [J]. *SPIE*, 2001, 4446:121-128.
- [9] Yang H, Bergmans J W M, Schenk T C W, *et al.* Uniform illumination rendering using an array of LEDs: A signal processing perspective [J]. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2009, 57:1044-1057.
- [10] Whang A J W, Chen Y Y, Teng Y T. Designing uniform illuminance systems by surface-tailored lens and configurations of LED arrays [J]. *J. Dispersion Technol.*, 2009, 5:94-103.
- [11] Qin Z, Wang K, Chen F, *et al.* Analysis of condition for uniform lighting generated by array of light emitting diodes with large view angle [J]. *Opt. Express*, 2010, 18(16):17460-17476.
- [12] Wang J W, Su Z P, Yuan Z J, *et al.* Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane [J]. *Acta Photon. Sinica* (光子学报), 2014, 43(6):919-924 (in Chinese).
- [13] Chen Y C, Wen S S, Luo W X, *et al.* Design of LED optical system based on the substrate with freeform surface [J]. *Infrared Laser Eng.* (红外与激光工程), 2014, 43(9):2947-2953 (in English).
- [14] Zhao Y H, Fan C J. Design of combined reflectors used in LED street lamps [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2012, 5(5): 520-524 (in Chinese).
- [15] Lu H Y, Liu Y, Xue X C. Different auto-focusing based on particle swarm optimization searching and wavelet evaluation [J]. *Chin. Opt.* (中国光学), 2011, 4(3):283-292 (in Chinese).
- [16] Fang Y C, Tzeng Y F, Li S X. Multi-objective design and extended optimization for developing a miniature light emitting diode pocket-sized projection display [J]. *Opt. Rev.*, 2008, 15(5):241-250.
- [17] Shen M, Li H F, Lu W, *et al.* Method of reflective flyeye lens design for LED illuminating projection system [J]. *Acta Photon. Sinica* (光子学报), 2006, 35(1):93-95 (in Chinese).
- [18] Zhang J H, Zhuang J X. How to use luminous intensity distribution curve in lighting calculation [J]. *J. Shenyang Jianzhu Univ.* (沈阳建筑大学学报), 2007, 23(6):941-945 (in Chinese).
- [19] Zheng Z R, Hao X, Liu X. Freeform surface lens for LED uniform illumination [J]. *Appl. Opt.*, 2009, 48(35): 6627-6634.
- [20] Moreno I, Avendano-Alejo M, Tzonchev R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance [J]. *Appl. Opt.*, 2006, 45(10):2265-2272.
- [21] Su Z P, Xue D L, Ji Z C. Designing LED array for uniform illumination distribution by simulated annealing algorithm [J]. *Opt. Express*, 2012, 20(6):843-855.
- [22] Zhao Z P, Ji L Y, Shen Y X, *et al.* Research of illumination uniformity for LED arrays based on pso algorithm [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2013, 34(12):1677-1681 (in Chinese).
- [23] Li S D, Zhou R H, Tian X Y, *et al.* Analysis of illumination distribution with different view LED [J]. *Laser J.* (激光杂志), 2011, 32(2):41-45 (in Chinese).
- [24] Lin C F, Wu C C, Yang P H, *et al.* Application of taguchi method in light-emitting diode backlight design for wide color gamut displays [J]. *J. Disp. Technol.*, 2009, 5(8):323-329.



史晨阳(1991 -),男,安徽寿县人,硕士研究生,2013年于安徽师范大学获得学士学位,主要从事半导体器件光学设计方面的研究。
E-mail: scyscut@163.com



文尚胜(1964 -),男,湖北黄冈人,教授,2001年于华南师范大学获得博士学位,主要从事有机及无机半导体材料与器件方面的研究。
E-mail: shshwen@scut.edu.cn