

矩形阵列LED均匀配光的对称性分析

张 航 吴梦莹 马宇飞 苏泽宇 刘 超 周海波

浙江工业大学光电子智能化技术研究所, 浙江 杭州 310023

摘要 针对直下式发光二极管(LED)平板光源,在矩形阵列排布条件下,通过照度图的对称性分析,采用一种基于分段式配光曲线生成折射率为1.4935的配光透镜的方法,从而实现整体照度均匀。设置距高比为4.1,以方形阵列排布的直下式LED平板光源为例,通过能量分配设计方法完成配光透镜的设计,仿真结果表明,目标面上照度的均匀度高于0.85,光效达到0.9以上,并适用于扩展光源。利用对称性分析可得到上述直下式LED平板光源出光面所能达到的均匀度上限,这对LED平板光源的光学设计具有指导意义。

关键词 光学设计;LED阵列;对称性;均匀度;照度

中图分类号 O439;O435

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.102205

Symmetrical Analysis of Uniform Illumination Design for Rectangular Arrayed Light Emitting Diode Sources

Zhang Hang Wu Mengying Ma Yufei Su Zeyu Liu Chao Zhou Haibo

*Institute of Intelligent Optoelectronic Technology, Zhejiang University of Technology,
Hangzhou, Zhejiang 310023, China*

Abstract In a rectangular light emitting diode (LED) array, by symmetry analysis of illuminance, a segmented illuminance profile of a light unit is presented to build free-form lenses for direct panel lights' uniform illuminance. Each light unit is composed of an LED element and a rotationally symmetrical free-form lens, whose refraction index is 1.4935. A square array of LED direct panel light with a distance-height ratio of 4.1 is given as a goal, then the free-form lenses are built by energy distribution design methodology, and the optical simulation results show that the uniformity on the target screen is greater than 0.85, and the optical effect is higher than 0.9. This method can be applied to the extend light sources. The limit of illuminance uniformity of the direct LED panel lights mentioned above can be achieved by using the symmetrical analysis method which is useful for the optical design of LED panel lights.

Key words optical design; light emitting diode arrays; symmetry; uniformity; illuminance

OCIS codes 220.4298; 220.2945; 220.2740; 080.4295; 080.4298

1 引言

发光二极管(LED)因具有体积小、能耗低、寿命长、可控性强等特征,已经成为最有发展前景的绿色照明光源,正逐渐取代白炽灯和节能灯的位置^[1-3]。单颗LED有发散角大、光强相对弱和眩光等不利因素,故多采用几个或几十个LED阵列排布方式形成面光源^[4-7]。LED平板光源就是其中一个比较典型的应用,其以出光均匀、柔和、照射角度大等优点,已经被广泛用于显示屏幕与照明领域^[8]。LED平板光源分为直下式和侧入式^[9]两种,与侧入式相比直下式更具有封装简单和成本低廉的优势。在直下式LED平板光源中,当距高比(LED间距 L 与LED平板光源到接收面的距离 H 的比值)较小时,才能取得较好的照明效果^[10],此时LED的排布会很紧密,存在热积聚现象,且成本很高。为了在保证均匀度的前提下降低成本,就需要配合适当的光学器件来提高LED平板光源的距高比。LED平板光源主要通过设计光学自由曲面来进行二次配光以实现均匀照明^[11]。

收稿日期: 2015-04-90; 收到修改稿日期: 2015-05-27; 网络出版日期: 2015-09-15

基金项目: 国家自然科学基金(C10912152,C10914292)、浙江省公益性技术应用研究计划项目(2014C31106)

作者简介: 张 航(1970—),男,博士,副教授,主要从事非成像光学、LED照明和量子点LED等方面的研究。

E-mail: physzhang@zjut.edu.cn

孙英杰等^[12]采用多个LED矩形排列作为光源,利用高反射梯形混光筒,使进入混光筒内部的光线无吸收地被反射后混合输出,照度均匀度在0.9以上,但是光效较低。Wu等^[13]设计一个可以单独实现矩形均匀配光的透镜,LED平板光源由这些独立的单元阵列产生,均匀度和光效均比较理想,但也在两个方面增加了难度,一是配光透镜的加工,二是平板光源的装配(因为引入了方向性)。Qin等^[14]提出一个大角度LED均匀出光透镜,计算出不同高度下实现目标面上均匀照明的LED间距,但随着距高比的增大,均匀度却显著降低。因此设计一种旋转对称的均匀配光透镜成为现实的工业需求。

本文在方形阵列与距高比确定的条件下,通过对称性分析,提出一种分段式配光曲线,由此构造出旋转对称的自由曲面配光透镜,实现整体照度均匀。主要工作包括对称性分析、配光曲线类型选择和透镜光学曲面构造等3个方面工作。特色在于利用对称性分析得到直下式矩形阵列LED平板光源出光面所能达到的均匀度上限,最后通过光学软件仿真验证了该方法对扩展光源的有效性。

2 理论分析

直下式平板光源通常采用矩形阵列方式,其中每个LED单元包含一颗LED芯片和一个配光透镜。为简化分析,采用方形阵列。这种排布方式具有显著的周期性特征,可以借鉴固体物理的分析方法。不失一般性,在方形阵列中选取相邻的4个LED单元($P_1 \sim P_4$)为顶点的正方形区域 Γ 作为对象来分析其照度分布等光学特征,如图1所示。LED单元中的配光透镜是旋转对称结构,其底面为基准平面,也就是 xoy 平面,LED芯片位于透镜底面中心。LED芯片的发光特性先以朗伯型点光源处理,而后讨论扩展光源情形。目标面到透镜底面的距离为 H ,正方形 Γ 的边长为 L (一款平板光源的 H 与 L 给定后即不变),4个光源坐标为 $P_1(0,0)$ 、 $P_2(L,0)$ 、 $P_3(L,L)$ 、 $P_4(0,L)$,各自在目标面上的照度分布为 E_1 、 E_2 、 E_3 、 E_4 。

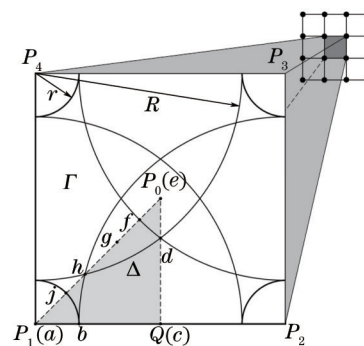


图1 照度叠加原理图

Fig.1 Schematic of illumination superposition

由于配光透镜是旋转对称结构,LED单元在目标面上的照度图也是旋转对称分布,而LED单元是按方形排布,这种对称性上的不一致造成目标面上照度分布的不均匀,因此需要对LED单元的配光曲线进行设计,以求达到目标面上均匀度的最大值。

2.1 对称性分析

LED为朗伯光源,光能比较集中,所以提出一种分段式配光曲线。该配光曲线由一段斜率为0的线段 S_1 和一段具有一定斜率或曲率的线段 S_2 构成,其可以是多项式、三角函数等不同类型的线段,并交 x 轴于 l_2 处。令 $S_1(l_1 < L/2)$ 对应的照度值为1,那么只要将几个光源在 S_2 对应区域的照度相互叠加,总和趋近于1,就可以实现整体的照度均匀。

当 S_2 为二次多项式曲线,对称轴位于 $l_1 + l_2$ 时二次项系数取得最大值,位于 l_1 时二次项系数为负值,即为最小值。在此范围内,利用直接代入法,取精度 $t=0.1$, $l_1=20$ mm, $l_2=L-l_1=95$ mm, $H=28$ mm,利用Matlab软件进行计算并经过TracePro软件验证后发现,只有当高次项系数为0时,均匀度取得最大值0.83,即 S_2 是斜率为 $-1/l_2$ 的直线。当 S_2 为三角函数曲线,使用同样的处理方法,最终能达到的均匀度最大值为0.78。综上,选择二次项系数为0时的配光曲线——分段线性衰减曲线,具体表示如下:

$$E_i(\rho_i) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \rho_i \leq r \\ \frac{\rho_i - R}{r - R}, & r < \rho_i \leq R \end{cases}, \quad (1)$$

其中 ρ_i 是照度检测点 (x, y) 到第 i 个 LED 单元中心的水平距离, r 为拐点半径, R 为零点半径。依据上述照度分布曲线, 整体照度分布 E 由 4 个 LED 单元在目标面上的照度叠加而成, 即有 $E = E_1 + E_2 + E_3 + E_4$ 。

显然在方域 Γ 内的照度分布具有关于水平中线、竖直中线和对角斜线等的 4 个轴对称性, 所以只需讨论由 P_0P_1Q 所围成的区域 Δ 内的照度均匀度即可得到整个方域 Γ 内的照度均匀度。通过对 Δ 区域内的照度表达式求极值可知, 所有的拐点和极点均在三角区域 Δ 内的边界上, 因此接下来对三段边界线进行逐段分析:

1) 线段 P_1Q 上的照度分布有 3 个拐点(如图 1 中的点 a, b, c)。由(1)式可知方域 Γ 边线上的照度值均为 1, 即有 $E_a = E_b = E_c = 1$, 所以不存在其他极值点。

2) 线段 P_0Q 上的照度值可表示为:

$$E(x, y) = \begin{cases} \sum_{i=1}^2 E_i, & 0 \leq y \leq d_y \\ \sum_{i=1}^4 E_i, & d_y < y \leq \frac{L}{2} \end{cases}, \quad (2)$$

这里 $x = L/2$, (x, y) 为目标面上的照度检测点坐标, d_y 是点 d 的 y 分量。由图 1 分析可知, d 是拐点, e 是极值点, 令点 d 、点 e 处的照度值分别为 E_d 、 E_e 。

3) 线段 P_0P_1 上有 $x = y$, 其照度值为:

$$E(x, y) = \begin{cases} 1, & 0 \leq y \leq j_y \\ \sum_{i=1} E_i, & r \leq y \leq h_y \\ \sum_{i=1,2,4} E_i, & h_y < y \leq f_y \\ \sum_{i=1}^4 E_i, & f_y < y \leq e_y \end{cases}, \quad (3)$$

式中 j_y 、 h_y 、 f_y 、 e_y 分别是点 j 、 h 、 f 、 e 的 y 分量。通过极值分析得到线段 P_0P_1 上存在另一个极值点 g , 另外还有 3 个拐点 j 、 h 和 f 。令这几个点处的照度值分别为 E_f 、 E_g 、 E_h 、 E 。

由于点 a, b, c, j 处的照度值均为 1, 所以仅以点 a 代表其他 3 个点参与接下来的分析。综上, 拐点与极值点数据如表 1 所示。

表 1 照度分布的拐点与极值点列表

Table 1 Breakpoints and extreme points of illumination distribution

Extreme point	Coordinate	Illumination
a	(0,0)	E_a
d	$\left(\frac{L}{2}, L - \sqrt{r_2^2 - \frac{L^2}{4}}\right)$	E_d
e	($L/2, L/2$)	E_e
f	$\left(L - \frac{\sqrt{2}}{2}r_2, L - \frac{\sqrt{2}}{2}r_2\right)$	E_f
g	$\left(\frac{3 - \sqrt{3}}{6}L, \frac{3 - \sqrt{3}}{6}L\right)$	E_g
h	$\left(\frac{L - \sqrt{2r_2^2 - L^2}}{2}, \frac{L - \sqrt{2r_2^2 - L^2}}{2}\right)$	E_h

2.2 均匀度分析

计算均匀度的方法有很多, 利用在有效照射范围区域(边长为 L 的方形区域)中, 照度的最小值 E_{\min} 与最大值 E_{\max} 的比来衡量照度的均匀性。找到了代表性区域 Δ 内所有的极值点和拐点, 也就得到了所有可能是

照度最大值或最小值存在的点,就可以估算出整体的照度均匀度:

$$\eta = E_{\min}/E_{\max}. \quad (4)$$

为了方便均匀度讨论,代入实际数值: $H = 28 \text{ mm}$, $L = 115 \text{ mm}$, 距高比为 4.1。由于 $r + R = L$, 所以只需讨论 R 与均匀度的关系即可。图 2(a) 表示各点照度随 R 的变化关系, 显然各点照度值的变化趋势具有不同的形态。 d 、 f 和 g 点照度值在 R 变小时趋于一致, 在 R 增大时 e 点的增长率要高于其他两点, 主要原因在于 e 点受到 4 个 LED 单元的照度叠加, 而其他两点只受 P_1 、 P_2 和 P_4 等 3 个单元的叠加。 h 点只受 1 个单元照射, 因此在后段增长率最低, 但由于它离 P_1 单元最近, 所以在前段增长比较快。 g 点是个极大值, 受 3 个 LED 单元作用, 所以其照度一直高于周边的 d 、 f 和 h 三点。

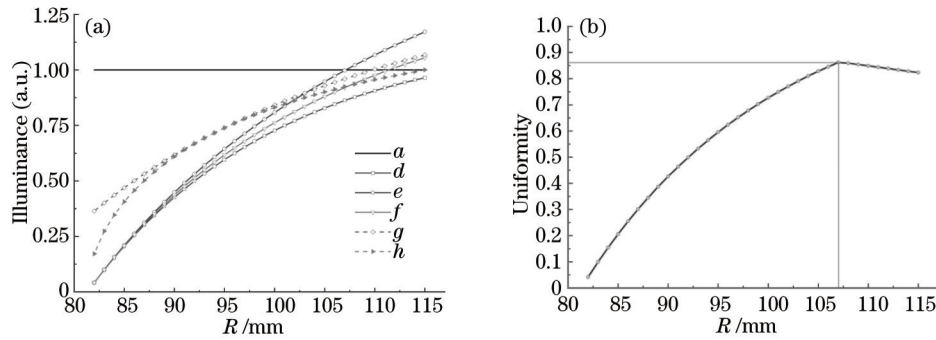


图 2 (a) 照度与 R 的关系; (b) 均匀度与 R 的关系

Fig.2 (a) Relationship between illuminance and R ; (b) relationship between uniformity and R

R 为不同值时, 照度均匀度的大小取决于这些曲线上照度值的最大值和最小值。最小值全段落在 d 点的照度值曲线上, 而最大值需要分段描述, 当 $R < 107 \text{ mm}$ 时最大值在 a 点的照度值曲线上; 当 $R \geq 107 \text{ mm}$ 时则在 e 点的照度值曲线上。均匀度采用最小值除以最大值的定义, 计算所得的均匀度与 R 的关系由图 2 (b) 表示。显然, 均匀度在 $R < 82 \text{ mm}$ 时接近为零, 而在 $R = 107 \text{ mm}$ 处达到了极大值, 随后逐渐减小。在距高比为 4.1, 以及单个 LED 经配光后照度分布为旋转对称结构的情况下, 采用分段线性衰减配光曲线的直下式方形阵列 LED 平板光源出光面所能达到的均匀度上限为 $\eta \approx 0.86$ 。

此外, 计算了透镜配光曲线为余弦曲线时的最高均匀度为 0.78, 当配光曲线为二次多项式曲线, 仅当二次项系数为零时 (即退化成线性) 达到最高均匀度 0.86, 其他情况的均匀度都低于这个值, 所以选用由 (1) 式表示的分段线性配光曲线。同时也期待有数学工作者能证明使用分段线性配光曲线所得到的均匀度是直下式方形阵列 LED 平板光源所能达到的最高值。

3 曲面生成

前面通过对称性分析确定了 R 值, 也就确定了由 (1) 式描述的配光曲线, 接下来由配光曲线计算透镜的光学表面 (曲线), 这部分算法相对比较成熟^[13,15], 仅作简单介绍。

LED 光源是朗伯光源, 其光强分布为:

$$I = I_0 \cos \theta. \quad (5)$$

LED 光源在 2π 立体角空间内的辐射通量与照射到目标面上的辐射通量应满足能量守恒。由于模型中的照度分布是旋转对称结构, 所以只需讨论二维空间内光源的辐射通量 Φ_s 与目标面上的辐射通量 Φ_t 即可。具体表达式如下:

$$\begin{cases} \Phi_s = \int_0^{\frac{\pi}{2}} I_0 \cos \theta \, d\theta \\ \Phi_t = \int_0^R E(\rho) \, d\rho \end{cases}, \quad (6)$$

其中 $E(\rho)$ 为 $E_i(\rho_i)$ 的简写。求解自由曲面上坐标点的原理如图 3 所示。

已知角 θ_1 与 $D_1(x_1, z_1)$, 求 D_2 点的坐标。透镜折射率 n_1 , 空气折射率 n_2 , 过 D_1 点的入射光 $\hat{i}_1(\cos \theta_1, \sin \theta_1)$, 出射光 $\hat{o}_1(\rho - x_1, H - z_1)$ 。根据矢量折射率定律可以写出点 D_1 处的法线 \hat{N}_1 的表达式:

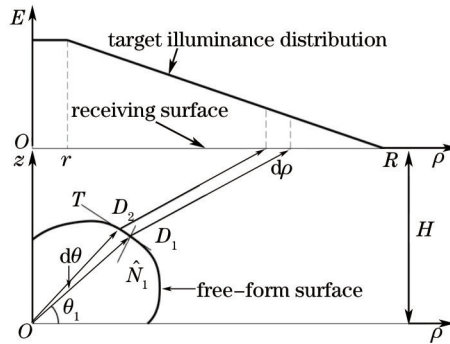


图3 透镜自由曲面求解原理图

Fig.3 Method to build the free-form surfaces

$$\hat{N}_1 = \frac{n_2 \hat{o}_1 - n_1 \hat{i}_1}{\sqrt{n_1^2 + n_2^2 - 2n_1 n_2 (\hat{o}_1 \cdot \hat{i}_1)}} \quad (7)$$

由 D_1 点坐标与该点的法线 \hat{N}_1 可以求出该点切线 T 的直线方程。由能量守恒可知, $d\theta$ 范围内的辐射通量等于 $d\rho$ 范围内的辐射通量 $d\Phi$, 即:

$$d\Phi = \int E(\rho)d\rho = \int I_0 \cos \theta d\theta \quad (8)$$

因此可以求出 $d\theta$, 由 $\theta_2 = \theta_1 + d\theta$ 又可解出 θ_2 , 那么 D_2 点的入射光方向即可知。再通过联立过 D_2 点入射光的直线方程与 D_1 点切线 T 的直线方程即可求出点 D_2 的坐标。给定起始点 $D_0(7,0)$, 透镜所用材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)的折射率为 1.4935, 按上述原理可以依次求出 D_1 、 D_2 、 \dots 、 D_n , 最终得到一条完整的自由曲面剖面, 如图 4(右)所示。

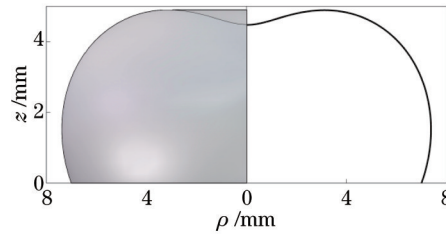


图4 透镜表面

Fig.4 Surface of the lens

4 仿真验证

将前面所得光学表面曲线导入三维(3D)软件生成透镜模型, 透镜的直径为 15 mm, 高为 5 mm。为方便放置 LED 芯片, 在配光透镜底面中心挖一半径为 3.5 mm 的半球, 并导入 TracePro 光学仿真软件。将 LED 芯片放置到配光透镜底面中心, 芯片尺寸为 0.02 mm, 设置单颗 LED 光源功率为 1 W, 光线条数为 1.0×10^6 , 入射光波长为 546.1 nm。经仿真, 该透镜的光效达到了 0.9 以上, 但是所得的照度曲线(sphere)与目标配光曲线(target)的吻合情况不是很理想, 如图 5 所示。其主要原因是, 投射在 $L = 40 \sim 80$ mm 范围内的光线在透镜的出射面发生全反射。可以将透镜底面的入射面由半球面改为半椭球面, 将近轴区域的一部分光量分配到远轴区域。该椭球面的三条轴均位于直角坐标系的轴上, 与 z 轴交点的 z 分量记为 a , 保持 $a = 3.5$ mm 不变; 与 xoy 平面的交线是一个圆, 半径长度记为 b 。当 $b = 3$ mm 时, 通过仿真与数据的归一化处理后发现实际照度普遍大于目标照度, 而当 $b = 3.5$ mm 时则相反。所以利用二分法, 寻找合适的值, 使实际照度曲线尽可能地与实际照度曲线吻合, 间隔为 0.1 mm。在仿真所得的实际照度曲线与目标照度曲线上等间距取点, 第 i 个点分别对应的照度值为 E_{e_i} 、 E_{t_i} , 偏离幅度可表示为:

$$\beta = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|E_{e_i} - E_{t_i}|}{E_{t_i}} \quad (9)$$

当 $b = 3.1$ mm 时, 实际照度曲线(ellipsoid)偏离幅度最小, 为 4.39%。

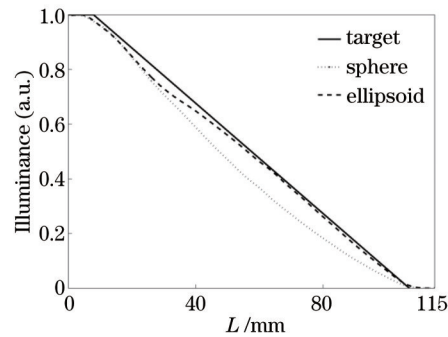


图5 光学仿真配光曲线

Fig.5 Illuminance curves of optical simulation

接下来把LED单元按图1阵列放置,并进行整体光学仿真,光学参数保持不变,仿真结果如图6(a)所示。相邻LED单元连线上的照度均匀度可以达到0.95以上,整体均匀度达到0.85,这与对称性分析得到的均匀度0.86非常接近,从而验证了对称性分析方法的有效性。

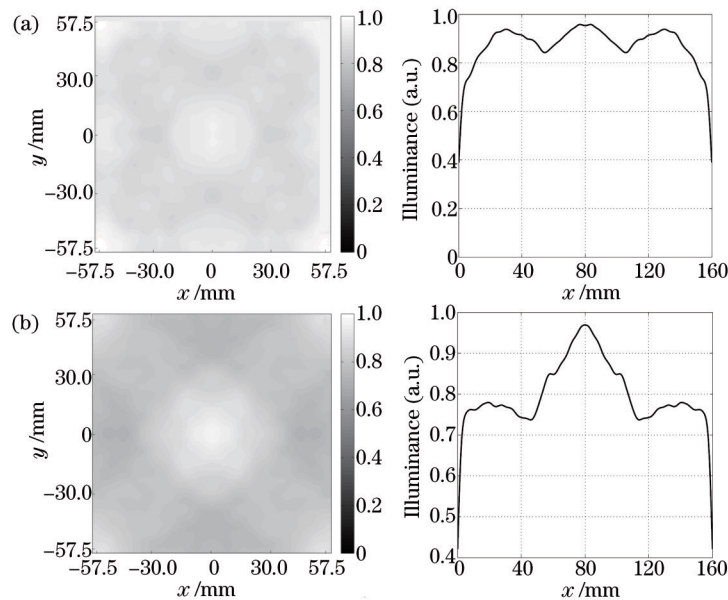


图6 照度分布图。(a)点源;(b)扩展光源

Fig.6 Distribution of illuminance. (a) Point sources; (b) extend sources

进一步,将LED芯片设置成3030芯片的尺寸以考察该方法对扩展光源的适用性,仿真结果如图6(b)所示,其均匀度达到了0.75,这对于透镜直径仅为15 mm而距高比高达4.1的均匀配光来说实属不易,由此可见对称性分析方法对扩展光源也具有较好的适用性。

5 结 论

直下式矩形阵列LED平板光源中,在距高比确定的条件下,通过对称性分析,提出一种分段式配光曲线,由此构造出旋转对称的自由曲面配光透镜,实现整体照度均匀。以方形阵列为例,设置目标距高比为4.1,依据对称性深入讨论了LED平板光源出光面所能达到的均匀度上限,并依此生成了配光透镜,最后通过光学软件仿真验证了该方法的有效性。仿真结果表明光效高于0.9,目标面上整体照度均匀度大于0.85,与对称性分析得到的均匀度0.86十分吻合,而且对3030LED芯片尺寸的扩展光源也具有较好的适用性。设计的旋转对称透镜具有体积小、距高比高、方便加工和装配等优点,设计方法对直下式矩形阵列LED平板光源设计具有指导意义。

参 考 文 献

- 1 Yeh N, Chung J. High-brightness LEDs—energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation

- [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(8): 2175–2180.
- 2 Hu Run, Gan Zhiqiang, Luo Xiaobing, *et al.*. Design of double freeform-surface lens for LED uniform illumination with minimum fresnel losses[J]. *Optik*, 2013, 124(19): 3895–3897.
- 3 Zhang Qiaofen, Gao Jian, Chen Xin. Influence of optical aspheric parameters on obtaining uniform rectangular illumination [J]. *Optik*, 2013, 125(11): 2577–2581.
- 4 Chen Xinrui, Han Jinghua, Li Hongru, *et al.*. Optimal design of LED arrays for near-field uniform illumination[J]. *Journal of Applied Optics*, 2014, 35(1): 122–127.
陈新睿, 韩敬华, 李洪儒, 等. 基于近场均匀照明的LED阵列的优化设计[J]. *应用光学*, 2014, 35(1): 122–127.
- 5 Wang Jiawen, Su Zhouping, Zhu Yiqing, *et al.*. Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(8): 22–28.
王加文, 苏宙平, 朱益清, 等. LED阵列模组化中的照度均匀性问题[J]. *光子学报*, 2014, 43(8): 22–28.
- 6 Wu Fengtie, Hang Qilu. A precise model of LED lighting and its application in uniform illumination system[J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(5): 334–336.
- 7 Wu Dinghui, Wang Jiawen, Su Zhouping. Optimization and integration of LED array for uniform illumination distribution [J]. *Optoelectronics Letters*, 2014, 10(5): 335–339.
- 8 Chen C C, Chen C H, Chen Bosyun, *et al.*. Thermal Deformation of Micro-Structure Diffuser Plate in LED Backlight unit[M]. Springer International Publishing, 2013: 67–77.
- 9 Lai Liping, Zhuang Qiren, Liang Dejuan, *et al.*. Investigation of uniform illumination of the near-field on the lateral panels using led projectors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 3(34): 228–234.
赖丽萍, 庄其仁, 梁德娟, 等. 基于近场侧面均匀照明的LED投射器研究[J]. *光学学报*, 2014, 3(34): 228–234.
- 10 Moreno I, Avenda O M, Tzonchev R I. Designing light-emitting diode arrays for uniform near-field irradiance[J]. *Appl Opt*, 2006, 45(10): 2265–2272.
- 11 Mueller-Mach R, Mueller G O. White light emitting diodes for illumination[C]. Symposium on Integrated Optoelectronics. International Society for Optics and Photonics, 2000: 30–41.
- 12 Sun Yingjie, Bu Wenbin. The study of illumination uniformity for LED[J]. *Natural Sciences Journal of Harbin Normal University*, 2008, 24(3): 49–52.
孙英杰, 卜文斌. LED照明的照度均匀性研究[J]. *哈尔滨师范大学自然科学学报*, 2008, 24(3): 49–52.
- 13 Wu Rengmao, Zheng Zhenrong. Optimization design of irradiance array for LED uniform rectangular illumination[J]. *Optical Society of America*, 2012, 51(13): 2257–2261.
- 14 Qin Zong, Wang Kai, Chen Fei, *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.
- 15 Zhang Hang, He Yemei, Li Dong, *et al.*. Design for Fresnel reflectors of uniform light LED tubes based on ellipse flow-line methods with equipartition and foci map[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2012, 41(4): 421–424.
张航, 贺叶美, 李栋, 等. 基于均分配焦椭流线的LED匀光管菲涅尔反射器设计[J]. *光子学报*, 2012, 41(4): 421–424.

栏目编辑: 韩峰