

一种带有曲面底板的直下式 LED 平板灯设计

向昌明¹, 文尚胜^{1,2}, 史晨阳^{1,2}, 陈颖聪¹

(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: 针对直下式 LED 平板灯均匀度低且厚度大的缺点, 提出了一种带有曲面底板的直下式 LED 平板灯, 采用 Taguchi 方法设计, 并通过 TracePro 软件进行仿真模拟, 对影响直下式 LED 平板灯照度均匀度和平均照度的参数因子进行分析, 并运用 ANOVA 理论分析出各因子对品质的影响程度, 优化各项结构参数, 以设计出符合要求的产品, 并通过实验对模拟结果进行验证。结果表明: LED 芯片排布方式对照度均匀度和平均照度的影响程度都最大, 分别有 47.4% 和 50.2% 的贡献度。当芯片选择正六边形排布, 倾斜角度为 30°, 平板灯无微结构, 混光距离为 25 mm, 得到最优化照明效果。扩散板照度均匀度达到 88.3%, 与实验结果基本一致, 厚度相对于目前直下式平板灯减少 37.5% 以上。模拟得到的会议室照明效果满足国家建筑照明设计标准, 所得结果为设计直下式平板灯提供理论依据。

关键词: 直下式平板灯; 曲面底板; Taguchi 方法; 照度; ANOVA

中图分类号: O435 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0718004

Design of direct-down type LED panel light with curved surface plate

Xiang Changming¹, Wen Shangsheng^{1,2}, Shi Chenyang^{1,2}, Chen Yingcong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Tehnology, Guangzhou 510640, China

2. State Key Laboratory of Luminescence Materials and Devices, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: According to the high thickness and low illuminance uniformity of traditional direct-down type LED panel light, a design of direct-down type LED panel light with the curved surface plate was proposed. Some experiments were designed by applying the Taguchi method and simulated via the TracePro software. After that, the ANOVA theory was integrated to evaluate the influence of the control factors on the illumination, so that the control factors can be optimized efficiently, and the simulation results were verified by experiments. The results show that the arrangement of LEDs has most influence on the uniformity of illumination and the average illumination, which account for 47.4% and 50.2% respectively. When the optimized parameters were set as hexagonal chips arrangement, inclination angle was 30°, there was no microstructure and light mixing distance was 25 mm, the uniformity of illumination on the diffusion plate was 88.3%, which were consistent with the experimental results, and the thickness

收稿日期: 2016-11-05; 修订日期: 2016-12-03

基金项目: 国家文化科技提升计划(GJWHKJTSXM20154464); 广东省应用型科技研发专项(2015B010134001);

广东省扬帆计划引进创新创业团队专项(2015YT02C093); 广州市产学研协同创新重大专项(201604010006)

作者简介: 向昌明(1990-), 男, 硕士生, 主要从事 LED 光学设计及散热技术方面的研究。Email: xcmscut@163.com

通讯作者: 文尚胜(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事有机及无机半导体材料与器件等方面的研究。Email: shshwen@scu.edu.cn

of panel light was reduced by more than 37.5% compared with the current one. After simulating the illumination of conference room, the results completely conform to the national building lighting standards. This paper provides a theoretical basis to design a direct-down type LED panel light.

Key words: direct-down type panel light; curved surface plate; Taguchi method; illumination; ANOVA

0 引言

传统照明光源因其能耗高、污染环境等缺点,逐渐被淘汰。而 LED 以其寿命长、节能环保等特点成为新一代照明光源,得到政府的大力支持,广泛应用各种照明领域^[1-3],如室内照明、道路照明等。LED 平板灯发出的光要比其他灯具发出的光柔和,且重影较小,在室内照明领域很受欢迎^[4]。平板灯根据光源的位置,一般分为“侧光式”和“直下式”两类。侧光式的 LED 光源安装在导光板的侧面,通过导光板进行混光、混色,混光效果受到尺寸的限制,同时导光板尺寸增大会增加灯具的重量和成本。与之相比,直下式平板灯将 LED 光源直接安装在底部,工艺简单稳定,但为了实现均匀的混光,必须提供一定的混光距离,平板灯的厚度也随之增加。目前,直下式平板灯厚度一般大于 40 mm^[5]。

为了实现直下式 LED 平板灯轻薄化设计,可采用多颗 LED 密排的方式缩短混光距离,但是散热问题和成本明显上升。近年来研究人员通过设置光学透镜^[5],实现发光均匀性,但这种光学透镜是自由曲面的,设计及其加工精度成本较大,同时也大大增加了平板灯的重量,而且光线通过光学透镜必定会造成光能损耗。于是,提出了一种带有曲面底板的平板灯,不需要采用光学透镜,将光学透镜的曲面转移到底板上,不仅实现了短距离混光均匀的效果,也减轻了平板灯的重量。

因为平板灯的出光特性受多个参数影响,所以应选取合适的方法进行设计。通常采用的试错法不仅设计周期长,而且过分依赖设计师的经验,在生产设计中显得十分不实用。最近,Taguchi 实验设计方法因其设计周期短、实用性强等特点,广泛应用于各种优化设计实验上^[6-9]。因此,文中采用 Taguchi 方法设计实验,分析平板灯光学特性的影响因子,并采用 TracePro 软件进行模拟仿真,最后通过 ANOVA 理

论分析得出影响最大的因子,得到最佳的参数组合,获得最好的照明效果^[10],并通过实验对模拟结果进行了验证。

1 参数分析

传统直下式 LED 平板灯的结构如图 1 所示,LED 芯片竖直贴放,光线通过长度为 H' 的混光距离,再经过扩散板的作用,形成均匀亮度。由于直下式 LED 平板灯在很短的混光距离下基于普通的光学构架很难实现较好的均匀性,尤其是很难避免 LED 灯影的产生,通常要对 LED 增加二次光学设计,或者应用第二导光板实现出光的均匀性。而采用这些办法,其主要的思想是令 LED 中间光强极大处的光重新分配,弥补 LED 中间光强极亮且光强衰减快的缺点^[11-13]。基于这种思想,提出通过改变 LED 贴装基板的形状,避免 LED 光强极大值处竖直出射,其结构如图 2 所示,LED 芯片贴装在带有曲面的基板上,通过曲面的弧度,调节 LED 芯片光强极大处的指向,增大光强极大方向的光程,从而达到削减竖直方向上光强的效果。同时为避免过多光线平行射出,可添加微结构改变光线传播方向。该结构不仅免去二次配光元件,减少二次光损,有效避免灯影,还可以实现直下式平板灯的轻薄化。

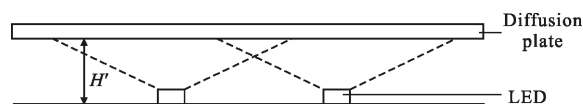


图 1 传统直下式 LED 平板灯结构

Fig.1 Traditional structure of the direct-down type LED panel light module

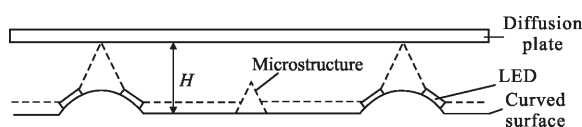


图 2 带有曲面底板的直下式 LED 平板灯结构

Fig.2 Direct-down type LED panel light module with curved surface plate

如图 3 所示,曲面底板可以用精确的方程表示,取 LED 芯片所在平面(曲面底板平面)法向量为 $\vec{n}=(x_0, y_0, \tan \sqrt{x_0^2+y_0^2})$, 则底板平面上任意一条直线都与底板平面法线垂直,利用它们向量之积为 0,得到

$$\begin{cases} x_0\left(\frac{R}{\cos\theta\cos\varphi}-x_0\right)+y_0\left(\frac{R}{\cos\theta\sin\varphi}-y_0\right)+\tan\theta_0\sqrt{x_0^2+y_0^2}\left(\frac{R}{\sin\theta}-z_0\right)=0, \theta \in (\theta_1, \theta_2), \varphi \in (\varphi_1, \varphi_2) \\ R, \theta \in (0, \theta_1) \cap (\theta_2, \pi), \varphi \in (0, \varphi_1) \cap (\varphi_2, \pi) \end{cases} \quad (2)$$

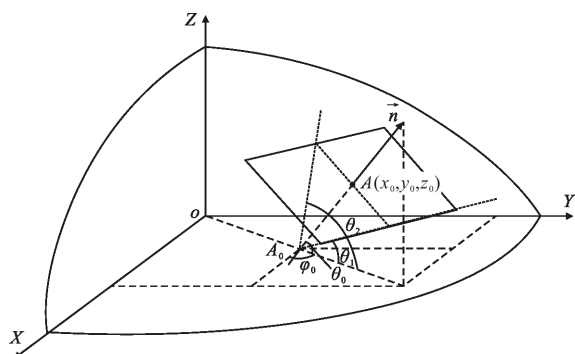


图 3 曲面底板数学模型

Fig.3 Mathematical model of curved surface plate

曲面底板方程如公式(1)所示,曲面底板形状可根据实际情况而定。把平面上点的坐标用球坐标表示后得到曲面底板方程如公式(2)所示,其中 R, θ, φ 为 LED 芯片球坐标位置。

$$x_0(x-x_0)+y_0(y-y_0)+\tan\theta_0\sqrt{x_0^2+y_0^2}(z-z_0)=0 \quad (1)$$

公式(2),可推出曲面底板上单颗 LED 在接受屏(x, y, z)处的照度,如公式(3)所示,可知影响照度分布的各参数,有 R, θ, φ, n, z 等,其示意图如图 4 所示。

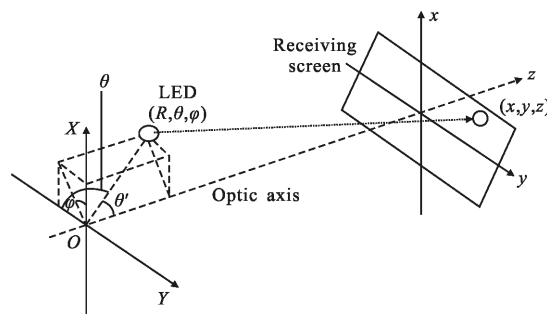


图 4 曲面底板单颗 LED 照明示意图

Fig.4 Schematic diagram of curved surface plate of single LED lighting

根据参考文献[3]和[14]中的照度分布公式以及

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

定义接收面照度均匀度为 α , 其中 \bar{E} 为平均照度, E_{\max} 为最大照度。则

$$\alpha = \frac{\bar{E}}{E_{\max}} \quad (4)$$

2 实验设计

用 Taguchi 方法设计试验,首先是要选定品质特性及判定品质特性的理想机能,平板灯最重要的品质特性分别为照度均匀度和平均照度;其次是找出品质特性的主要控制因子,并定出合适的水准。由公式(3)可知,对于带有曲面底板的直下式平板灯,直接影响照度的因子有 4 个,分别为有微结构、混光距离、芯片排布方式及芯片倾角。其中,微结构分别为无微结构、圆锥、圆柱(圆锥和圆柱底面半径及高分分别为 5 mm 和 12 mm);芯片排布方式如图 5 所示,芯片处在顶点,图中圆圈为微结构位置,尺寸单位为 mm。各因子的水准设置如表 1 所示。

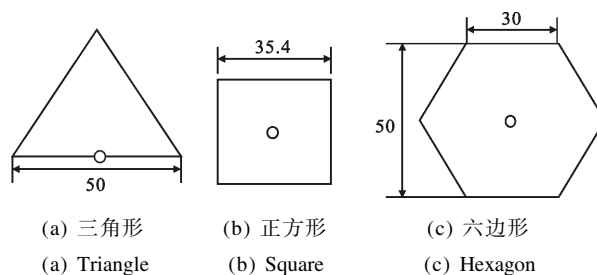


图 5 芯片 3 种排布方式

Fig.5 Three arrangements of the chips

表 1 照度影响因子及其控制水准

Tab.1 Influence factors of illumination and its control levels

Symbol	Influence factors	Number of the level	Level 1	Level 2	Level 3
A	Microstructure	3	No	Cone	Cylinder
B	Light mixing distance/mm	3	35	30	25
C	Arrangement of LEDs	3	Triangle	Square	Hexagon
D	Mounting angle of LEDs/(°)	3	30	60	90

采用几何尺寸为 1 mm×1 mm×0.25 mm 的 LED 芯片,每个芯片光通量为 50 lm(散热问题可忽略),发光面出射光线 20 000 条,光型为朗伯分布。设计平板灯大小为 150 mm×150 mm×H,为忽略边缘光线损失,只考虑中间 100 mm×100 mm 区域的照度^[15],设置光线入射面为完全吸收(perfect absorber)。由表 1

得影响平板灯照度的因子有 4 个,每个因子有 3 个水准,因此选择 L₉(3⁴)直交表,只需 9 次实验,使用 TracePro 软件,根据直交表的组合进行模拟仿真,得到各组合对照度品质的影响效果,直交表如表 2 所示。表中,S/N 表示品质特性数量化^[16],通过 ANOVA 理论对表中数据进行分析,并用贡献度来衡量因子对

表 2 采用 L₉(3⁴)直交表设计

Tab.2 L₉(3⁴) orthogonal array

Experiment number	A	B	C	D	Uniformity of illumination	Average illumination/lux	S/N of uniformity of illumination	S/N of the average illumination
1	1	1	1	1	86.5%	22 955.0	38.7	87.2
2	1	2	2	2	78.3%	23 847.0	37.9	87.5
3	1	3	3	3	88.1%	38 853.0	38.9	91.8
4	2	1	2	3	81.3%	14 914.0	38.2	83.5
5	2	2	3	1	86.5%	27 386.0	38.7	88.8
6	2	3	1	2	82.2%	16 723.0	38.3	84.5
7	2	1	3	2	86.9%	29 890.0	38.8	89.5
8	2	2	1	3	75.4%	9 979.8	37.5	80.0
9	2	3	2	1	83.2%	33 098.0	38.4	90.4

品质特性的影响程度。最终确立最优参数因子组合。

光距离为 35 mm,B3 表示混光距离为 25 mm,C3 表示芯片排布为六边形,D1 表示芯片倾角为 30°。因此,需进一步分析,得到最好的 B 因子水准。

3 模拟与分析

3.1 数据分析

由表 2 可得,不同的参数因子组合对应着不同的 S/N 值,S/N 表示平板灯品质特性数量化。文中的品质特性为照度均匀度及平均照度,对于此品质特性,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^[16]:

$$LTB(S/N) = -10 \times \log \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \quad (4)$$

式中:y_i表示第 i 个品质特性;n 为实验次数。

图 6 给出各水准的 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平均照度的效果。

由图 6 可知,图中 S/N 值越大,所对应的照度均匀度及平均照度越大。按照图 6 结果,最好照度均匀度的优化组合解是 A1B1C3D1,最大照度最优化的组合解是 A1B3C3D1。两个组合结果只有 B 因子不同,其他因子相同。其中 A1 表示微结构为无,B1 表示混

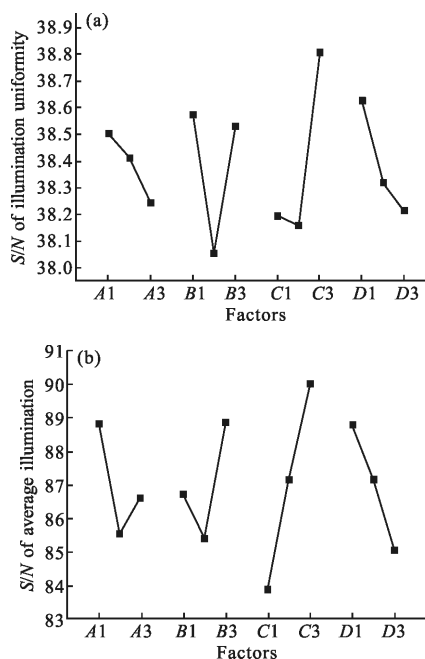


图 6 各水准对应的(a)照度均匀度和(b)平均照度的 S/N 值
Fig.6 S/N of (a) uniformity of illumination and (b) average illumination at different levels of different factors

3.2 变异数分析

ANOVA(Analysis of Variance)分析理论见参考文献[8]和[9],应用 ANOVA 分析理论可以估量各因子对品质特性的贡献度(影响程度),即评估实验误差并以百分比的方式来协助判断每个因子对实验结果的贡献度。

表 3 列举了各因子对照度均匀度及最大照度的贡献度。结果表明,对照度均匀度及平均照度影响最大的因子都是芯片排布方式,其贡献率基本达到一半,说明芯片的排布方式在设计平板灯时应重点考虑。对于照度均匀度,B 因子贡献度较 A 和 D 因子大;对于平均照度,A、B、D 3 个因子的贡献度相当,即 B 因子对于照度均匀度影响更大。结合图 6 给出的各水准的 S/N 值,B1 和 B3 的照度均匀度 S/N 值差距不大,但 B3 的平均照度 S/N 值大于 B1。因为微结构对于品质特性的贡献度较小,所以灯具设计不加入微结构。模拟得到 A1B1C3D1 组合的照度均匀度为 84.7%,平均照度为 38 639 lux,照度图如图 7(a)所示;A1B1C3D1 组合的照度均匀度为 88.3%,平均照度为 42 432 lux,照度图如图 7(b)所示。所以,B3 的照明效果更好。综上,确定最终组合是 A1B1C3D1,其中 A 因子微结构为无微结构,B 因子混光距离为 25 mm,C 因子芯片排布方式为六边形,D 因子芯片倾角为 30°,厚度相对于目前直下式平板灯^[5]减少 37.5%以上。

表 3 各因子的贡献率

Tab.3 Contribution of different factors

Factors	Contribution of uniformity of illumination	Contribution of the average illumination
A	6.3%	15.0%
B	29.9%	16.3%
C	47.4%	50.2%
D	16.4%	18.5%

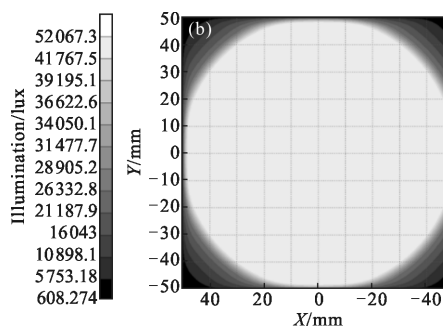
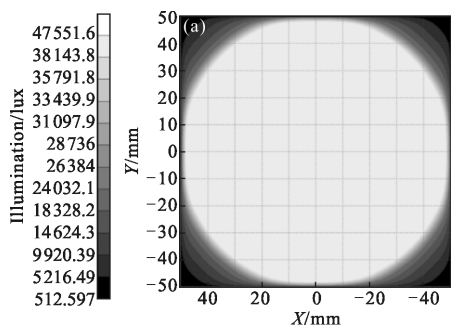


图 7 A1B1C3D1 组合所对应的照度图(a)和 A1B3C3D1 组合所对应的照度图(b)

Fig.7 Illumination distribution corresponding to A1B1C3D1 combinations (a) and Illumination distribution corresponding to A1B3C3D1 combinations (b)

进一步,模拟现实照明状况,得到 0.75 m 处的照度图(如图 8(a)所示),照度均匀度为 58.7%,平均照度为 649.1 lux。将得到配光曲线倒入 DIALux,设计大小为 5.4 m×3.5 m×2.8 m 的小型会议室,灯具呈 2×2 矩形排列,灯具间距分别为 0.6 和 1.1 m,灯具大小为 60 cm×60 cm,如图 8(b)所示。其高度 0.75 m 工作面照度结果如表 4 所示,优于参考文献[5]中直下式平板灯的模拟照明效果,且平板灯厚度更小;同时结果也满足国家建筑照明设计标准中会议室工作台的照度要求^[18]。

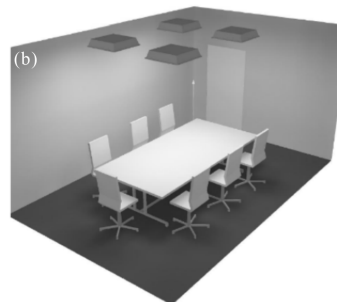
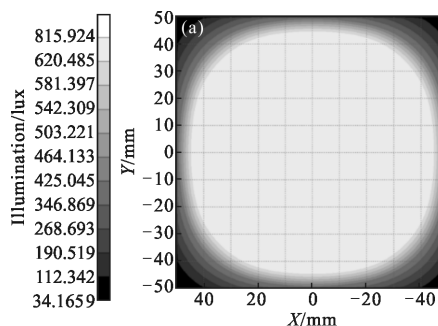


图 8 0.75 m 处接收屏的照度图和会议室照明效果图

Fig.8 Receiving screen illumination distribution at 0.75 m and simulated illumination of conference room

表 4 工作面照度值

Tab.4 Illumination of working surface

Average illumination/lux	Maximum illumination/lux	Uniformity of illumination
403	681	59.2%

4 实验验证

通过实验对最终组合 A1B3C3D1 进行验证, 采用塑料 3D 打印机打印出曲面底板, 单个模型如图 9(a)所示, 凹槽底面为设置为圆形, 以减小安装误差, 灯珠安装在圆形凹槽内。图 9(b)为实验效果图, 扩散板材料为有机玻璃, 由图可得, 芯片发出的光经扩散板后均匀出射, 光线比较柔和, 不存在亮点。采用九点测量法对光源正前方 25 mm 处的接收区域(大小为 100 mm×100 mm)进行测量, 测试使用远方 SPIC-200 照度计, 测试后的照度均匀度为 87.5%, 与模拟结果基本一致。分析其误差主要原因有:(1) 各芯片发光效率存在差异(芯片制造或散热差异造成);(2) 手工组装时, 灯珠安装角度及位置会存在误差, 测试过程测试角度、测试距离及亮度对比度的差异也会产生误差;(3) 软件仿真在数据设置和光线追踪过程中会产生一定的近似, 从而引起仿真结果与测试结果的差异。

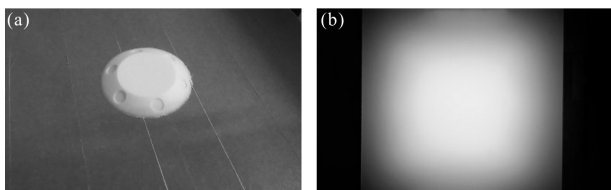


图 9 自由曲面底板模型(a)及实验效果图(b)

Fig.9 Model of curved surface plate(a) and experimental results(b)

5 结论

提出一种带有曲面底板的直下式 LED 平板灯, 采用 Taguchi 方法设计实验, 结合 ANOVA 理论分析实验数据。采用 TracePro 软件仿真模拟, 并通过实验对模拟结果进行验证。结果表明: LED 芯片排布方式对照度均匀度及平均照度都占有最大贡献度, 分别为 47.4%和 50.2%, 平板灯设计时应重点考虑。最终得到混光距离减少为 25 mm 的直下式平板灯, 模拟照度均匀度达到 88.3%, 且实验结果与模拟结果基

本一致。模拟现实照明状况, 满足国家建筑照明设计标准。综上, 通过 Taguchi 方法设计带有曲面底板的直下式 LED 平板灯, 不仅可以在短时间设计出达到要求品质特性, 得到轻薄化的 LED 平板灯, 还能了解各参数对于品质特性的影响程度, 为解决此类问题提供理论根据。

参考文献:

- [1] Yan Xingtao, Yang Jianfeng, Zhang Guoqi, et al. Design of curved surface LED reflectors for uniform illumination based on compensation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 718-723. (in Chinese)
闫兴涛, 杨建峰, 张国琦, 等. 基于补偿法的均匀照明曲面底板 LED 反光杯设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 718-723.
- [2] Xiao Xiao, Wen Shangsheng, Chen Jianlong, et al. Optical performance of secondary lightguide-diffusive component in direct LED backlight module[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013, 24(4): 679-686. (in Chinese)
肖箫, 文尚胜, 陈建龙, 等. 直下式 LED 背光源模组第二扩散导光板光学特性分析 [J]. 光电子·激光, 2013, 24(4): 679-686.
- [3] Wang Jiawen, Su Zhouping, Yuan Zhijun, et al. Study on uniformity of LED array illumination distribution on target plane[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(6): 919-924. (in Chinese)
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(6): 919-924.
- [4] Liang Dejuan, Zhang Qiren, Zhi Jiajun, et al. Design and realization of edge lighting LED panel panel light with no LGP [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(3): 465-471. (in Chinese)
梁德娟, 庄其仁, 智佳军, 等. 侧入式无导光板 LED 平板灯的设计与实现[J]. 光电子·激光, 2014, 25(3):465-471.
- [5] Yan Wenping, Guo Zhenning, Lin Jieben, et al. Direct-down LED panel light design for uniform illumination[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2014, 25(10): 1878-1885. (in Chinese)
颜稳萍, 郭震宁, 林介本, 等. 直下式 LED 平板灯的均匀照明设计[J]. 光电子·激光, 2014, 25(10): 1878-1885.
- [6] 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]. *Optical Review*, 2008, 15(5): 241-250.

- [7] Chen Y C, Wen S S, Song P C. Design of a backlight module with the freeform surface by applying the taguchi method[J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, 13(3): 032302.
- [8] Shi Chenyang, Wen Shangsheng, Chen Yingcong. Study on curved surface LED illumination problem based on Taguchi method [J]. *Chinese Journal of Illuminance*, 2015, 36(3): 348–354. (in Chinese)
史晨阳, 文尚胜, 陈颖聪. 基于 Taguchi 方法的曲面 LED 阵列照度问题研究[J]. *发光学报*, 2015, 36(3): 348–354.
- [9] Shi Chenyang, Wen Shangsheng, Chen Yingcong. Study of cured surface LED array multi-shadow problem based on Taguchi method [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, 36(6): 651–656. (in Chinese)
史晨阳, 文尚胜, 陈颖聪. 基于 Taguchi 方法的曲面底板 LED 阵列重影问题研究[J]. *发光学报*, 2015, 36(6): 651–656.
- [10] Shen Mo, Li Haifeng, Lu Wei, et al. Method of reflective fly eye lens design for LED illuminating projection system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(1): 93–95. (in Chinese)
沈默, 李海峰, 陆巍, 等. 用于 LED 照明的反射型复眼设计方法[J]. *光子学报*, 2006, 35(1): 93–95.
- [11] Cong Xiaodong, Liu Weidong, Qiao Mingsheng, et al. The ultra-thin design research of directtype LED backlight [J]. *Advanced Display*, 2012, 142: 1006–1008. (in Chinese)
丛晓东, 刘卫东, 乔明胜, 等. 直下式 LED 背光模组的超薄化设计研究[J]. *现代显示*, 2012, 142: 1006–1008.
- [12] Minano J C, Benitez P, Chaves J, et al. High-efficiency LED backlight optics designed with the flow-line method [C]//SPIE, 2005, 5942: 594202.
- [13] Chang R S, Tsai J Z, Li T Y. LED backlight module by lightguide-diffusive component [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, 8(2): 79–86.
- [14] Zhao Zhipu, Ji Lingyan, Shen Yanxia, et al. Research of illumination uniformity for LED arrays based on PSO algorithm [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, 34(12): 1677–1681. (in Chinese)
赵芝璞, 季凌燕, 沈艳霞, 等. 基于 PSO 粒子群算法的 LED 照明系统光照均匀性研究[J]. *发光学报*, 2013, 34(12): 1677–1681.
- [15] Wang K, Wu D, Qin Z, et al. New reversing design method for LED uniform illumination [J]. *Optical Express*, 2011, 19(104): A830–A840.
- [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]. *Optical Review*, 2008, 15(5): 241–250.
- [17] 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]. *Journal of Display Technology*, 2009, 5(8): 323–329.
- [18] GB 50034–2004. Standard for lighting design of buildings [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2013. (in Chinese)
GB50034–2004. 建筑照明设计标准[S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2013.