

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201909019



带半圆柱微透镜的超薄直下式 LED 平板灯设计

单孝忍^{1,2}, 陈嘉鸿^{1,2}, 丁攀峰^{2,3}

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 华侨大学 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021;
3. 华侨大学 工学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 为了解决传统直下式发光二极管(LED)平板灯厚度大、均匀度较低的缺点,设计一种带半圆柱微透镜的超薄平板灯.该透镜上半部分是竖放的圆柱,下半部分是横放的半圆柱阵列.以一个正六棱柱作为单元模块,通过 Tracepro 软件及 Taguchi 实验法进行模拟仿真,对带半圆柱微透镜的半圆柱半径、圆柱厚度、透镜半径及透镜距 LED 的高度进行优化.结果表明:当半圆柱半径为 0.2 mm,透镜半径为 1.5 mm,透镜距 LED 高度为 2.5 mm,圆柱厚度为 0.5 mm 时,其显示效果最好,并设计出一款厚度为 15 mm,照度均匀度为 95.53%,光效率为 95.99% 的超薄直下式 LED 平板灯,该平板灯符合现代超薄、节能的发展要求.

关键词: 照明设计; 发光二极管; 半圆柱微结构; Taguchi 法; 均匀度

中图分类号: O 439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2020)05-0647-07

Design of Ultra-Thin Straight-Down LED Panel Lamp With Semi-Cylindrical Microlens

SHAN Xiaoren^{1,2}, CHEN Jiahong^{1,2}, DING Panfeng^{2,3}

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
3. College of Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In order to solve the shortcomings of the traditional straight-down light emitting diode (LED) plate lamp with large thickness and low uniformity, an ultra-thin plate lamp with a semi-cylindrical microlens was designed. The upper part of the lens is an vertically placed cylinder and the lower part is a horizontally placed semi-cylindrical array. Taking a regular six-prism as the unit module, the simulation was carried out by Tracepro software and Taguchi experimental method, and the half-cylinder radius, cylindrical thickness, lens radius and lens distance LED height with half-cylinder microlens were optimized. The results show that: when the half-cylinder radius is 0.2 mm, the lens radius is 1.5 mm, the lens distance from the LED height is 2.5 mm, the cylindrical thickness is 0.5 mm, the display effect is the best, meanwhile design a thickness of 15 mm, illumination uniformity of 95.53%, light efficiency of 95.99% ultra-thin straight-down LED plate lamp, this panel lamp meet the requirement with the modern ultra-thin, energy-saving development.

收稿日期: 2019-09-17
通信作者: 丁攀峰(1980-),男,教授,博士,主要从事光束传输及光纤应用技术方面的研究. E-mail: dingpanfeng@163.com.
基金项目: 中央高校培育型科技创新人才资助项目(ZQN-PY306);福建省自然科学基金对外合作资助项目(2015I0005);华侨大学研究生科研创新基金资助项目(18013082005)

Keywords: lighting design; light emitting diode; semi-cylindrical microstructure; Taguchi method; uniformity

发光二极管(LED)是第四代发光光源,具有光效高、体积小、寿命长等优点,已被广泛用于生活照明、医疗照明、植物照明等领域^[1-3].与传统平板灯相比,LED 平板灯可有效控制光源的光型及发光角度.另外,LED 平板灯的照度更加均匀、柔和,且无炫光.根据 LED 平板灯的优势,可在不同照明场合设计出较为合适的照明灯具,不仅可以提高照明质量,也符合现代发展需求.目前,LED 平板灯可分为直下式和侧光式两种类型^[4-5].侧光式 LED 平板灯主要依靠导光板对光线进行再次分布.陈俄振等^[6]通过对导光板散射网点形状的研究,找出最适合导光板的网点形状.然而,不管如何设计导光板形状,都避免不了其导光效率低、成本高的缺点.直下式 LED 平板灯则不需要导光板,直接将光源安装在底板上,可使光效显著提高.由于 LED 是类朗伯型光源,只有当 LED 灯珠之间的距离 D 与混光高度 H 的比值(D/H)为 1 时,才能得到理想的均匀度^[4,7].为了降低成本且同时满足 $D/H=1$,传统直下式 LED 平板灯通常会做得很厚,不利于向着超薄、节能的方向发展.

为了减小传统直下式 LED 平板灯厚度,可为 LED 光源添加配光透镜,以此增加光线的出射角度.庞培元等^[8]设计两种兼具反射、透射作用的混光元件结构,即棱台结构和半球型结构,并将其应用于超薄直下式 LED 平板灯中以提高出光均匀度.此设计虽可提高照度均匀度,但透镜尺寸较大,不利于光源散热,影响光源寿命.王雪娇^[9]设计了 3 种不同面型的自由曲面透镜,但是设计过于复杂,且将 LED 当作点光源处理,误差较大.基于此,本文设计一种带半圆柱的微透镜,该微透镜结构较为小巧,有利于光源散热,且照度均匀度较高.

1 结构设计与理论分析

1.1 结构设计

传统直下式 LED 平板灯结构,如图 1 所示,一般包括 LED 灯珠、反射膜、扩散膜等.为了得到较高的照度均匀度,一般将 LED 灯珠的间距设置较小、混光高度设置较大以保证光线充分耦合,因此,制作的 LED 平板灯较厚.为了解决传统光源的不足,一般在 LED 灯珠正上方加入透镜,对 LED 光源的光强极大处进行再次分配^[10-12],即对光进行二次分配,使光源中心部分的光线以大角度发散到周围,从而弥补周围光线的不足,最终提高整个 LED 平板灯的照度均匀度.

文中设计的半圆柱微透镜结构,如图 2 所示.该微透镜上半部分是圆柱,下半部分是半圆柱阵列,材料均为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA,透射率为 94%,折射率为 1.49).为了使透镜对光有更好的分配作用,将透镜按照不同方向摆放,以 7 个透镜作为一个模块,六棱柱模块图,如图 3 所示.

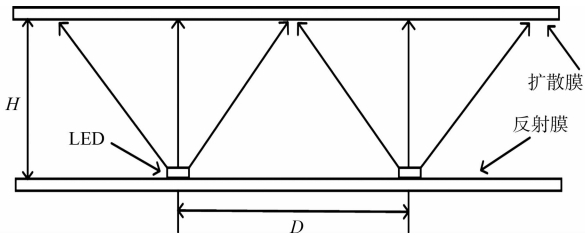


图 1 传统直下式 LED 平板灯结构
Fig. 1 Structure of traditional straight down LED flat lamp

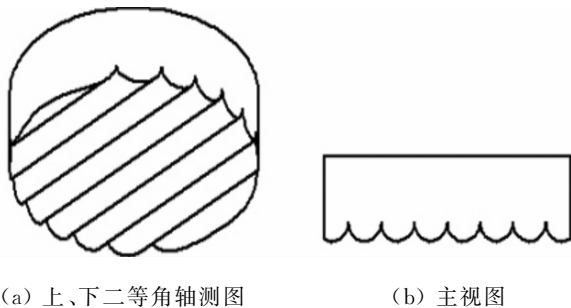


图 2 半圆柱微透镜结构
Fig. 2 Structure of semi-cylindrical microlens

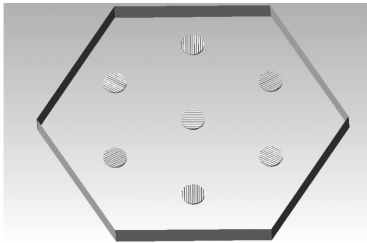


图 3 六棱柱模块图
Fig. 3 Six prism module diagram

1.2 理论分析

LED 光源可近似为朗伯型发光体^[13],将定轴线方向设为 0° ,标准的朗伯体光源在 60° 处的光强仅

有 0° 处的一半, 其发光强度近似满足余弦分布^[14], 即

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta. \tag{1}$$

式(1)中: θ 是光源法线和出射光束的夹角; $I(\theta)$ 为 θ 角方向出射光束的发光强度; I_0 为轴向光强.

半圆柱微透镜扩散原理图, 如图 4 所示. 由图 4 可知: LED 经过单个透镜的光线路径只有折射和直射两种(忽略菲涅尔反射和吸收), 而影响其照度均匀度的因子主要是带半圆柱微透镜的半径(R)、透镜上半部分圆柱的厚度(d)、透镜下半部分的半圆柱半径(r)和透镜下表面距 LED 光源的高(h).

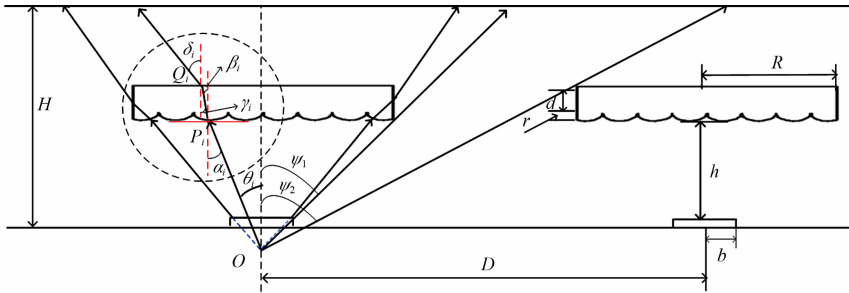


图 4 半圆柱微透镜扩散原理图

Fig. 4 Diffusion schematic diagram of semi-cylindrical microlens

由于所设计透镜是轴对称的, 所以只需分析透镜横截面一半即可^[15-16]. 将图 4 中虚线圈内原理图放大, 并建立直角坐标系, 半圆柱微透镜部分扩散原理图, 如图 5 所示. 图 5 中: M_n 为半圆柱阵列的圆心, 其坐标为 $(-(2n-1)r, r)$, n 表示第 n 个半圆, 且 $n=1, 2, 3, \dots$, 则相应的半圆方程为

$$[x + (2n-1)r]^2 + y^2 = r^2, \quad 0 \leq y \leq r. \tag{2}$$

由边缘光线理论^[17]可知, 当 LED 光源光线打在透镜边缘时, 其光线的反向延长线交于点 O , 因此, 可以将光线看作是 O 点发出的. 设点光源 O 到 LED 的距离为 a , 由几何光学可得

$$a = \frac{bh}{R-b}. \tag{3}$$

式(3)中: b 为 LED 元件的半宽. O 点坐标为 $(0, -h-a)$. 将点光源 O 发出的光线分为 i 条, 第 i 条光线打到透镜的点记为 $P_i(x_{i,P}, y_{i,P})$, 折射出去的点记为 $Q_i(x_{i,Q}, y_{i,Q})$.

对于直射部分光线, 以角度 ψ_1 和 ψ_2 为出射角, 其中, ψ_1 为光源中心与透镜边缘的最大直射角, $\psi_1 = \arctan \frac{R}{h}$; ψ_2 为光源中心与相邻透镜边缘的直射角, $\psi_2 = \arctan \frac{D-R}{r+d+h}$.

对于折射部分光线, 当光线以角度 θ_i 打在透镜上时, 联立点 O 和点 P_i , 可得直线 OP_i 的方程为

$$y_i = -\frac{1}{\tan \theta_i} x_i - a - h. \tag{4}$$

又因为点 P_i 在第 n 个半圆柱上, 联立式(2)和式(4), 即可求出点 P_i 的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_{i,P} &= \sin^2 \theta_i \left[(1-2n)r - \frac{a+h}{\tan \theta_i} - \sqrt{\frac{4nr^2(1-n)}{\tan^2 \theta_i} - (a+h)^2 + r^2} + \frac{2r(a+h)(2n-1)}{\tan \theta_i} \right], \\ y_{i,P} &= -\frac{1}{\tan \theta_i} x_{i,P} - a - h. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

点 P_i 处的入射角 α_i 为

$$\alpha_i = \left| \theta_i - \arctan \frac{(2n-1)r - x_{i,P}}{r - y_{i,P}} \right|. \tag{6}$$

根据 Snell 公式可知, $\sin \alpha_i = \eta \sin \beta_i$, η 为透镜的折射率. 设空气的折射率为 1, 由几何关系可知, Q_i 的坐标为

$$\left. \begin{aligned} x_{i,Q} &= (d+r-y_{i,P}) \tan \left(\beta_i + \arctan \frac{(2n-1)r - x_{i,P}}{r - y_{i,P}} \right), \\ y_{i,Q} &= d+r, \end{aligned} \right\} \tag{7}$$

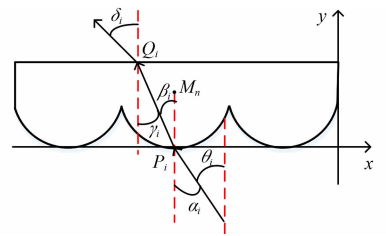


图 5 半圆柱微透镜部分扩散原理图
Fig. 5 Schematic diagram of partial diffusion of semi-cylindrical microlens

$$\gamma_i = \arctan \frac{x_{i,Q} - x_{i,P}}{y_{i,Q} - y_{i,P}}.$$

(8)

最后,由 Snell 公式可求得 $\delta_i = \arcsin(\eta \sin \gamma_i)$.

联立上述公式可知,以 θ_i 发出的光线经过透镜后出射的地方和角度,从而建立发射点和出光点之间的联系.由以上分析可知,光源边缘处的光线以直射方式出射,越靠近光源中心,其直射的光线越少,即越靠近光源中心,其折射的光线越多.折射的光线向着四周发散,从而达到弥补周边光强的目的,最终使整个照度更加均匀,并且能有效避免光影的产生.

2 仿真实验与分析

为了模拟各个 LED 光源之间的作用效果,采用正六棱柱结构(图 3)对透镜的半径、圆柱厚度、半圆柱半径和透镜距 LED 的高度进行分析.单个光源尺寸(长×宽×高)设置为 1.0 mm×1.0 mm×0.1 mm,光通量设置为 100 lm,追击光线数设为 100 万条.

2.1 单一因子分析

对上述 4 个影响因子进行单一分析,将照度均匀度(即出射面中照度的最小值与整个出射面的平均照度的比值)作为衡量标准,通过 Tracepro 软件进行仿真测试,并计算出相应的照度均匀度.4 个影响因子对照度均匀度(η_E)的影响,如图 6 所示.

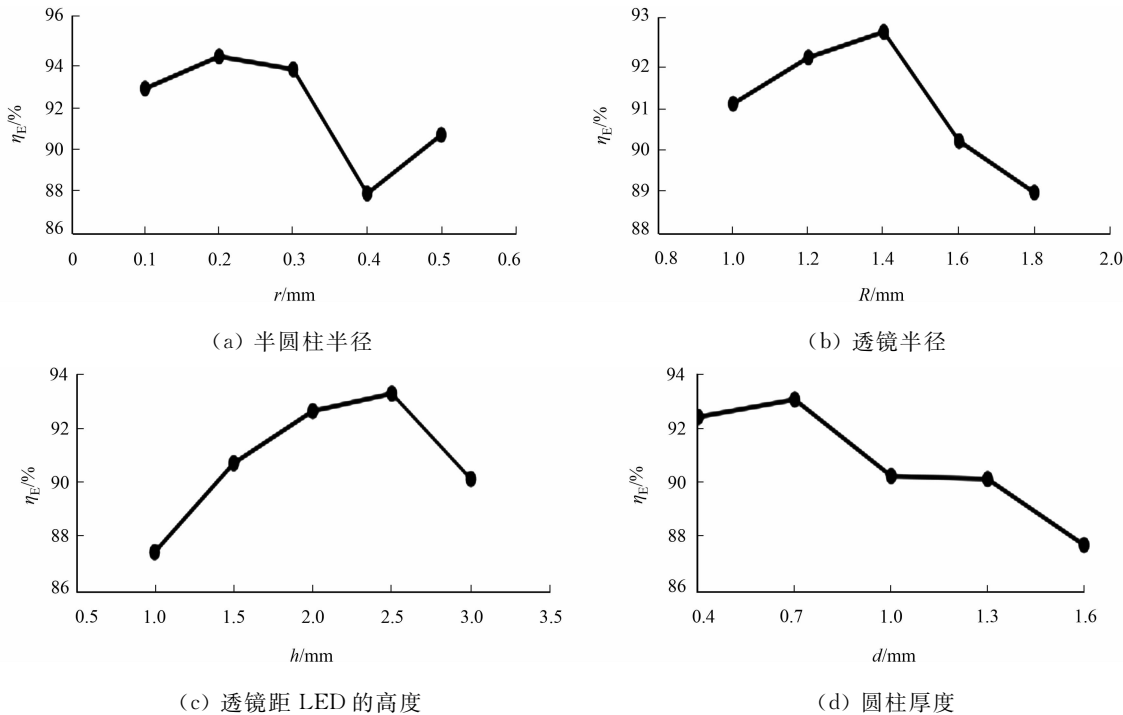


图 6 4 个影响因子对照度均匀度的影响

Fig. 6 Influence of four factors on uniformity of illumination

由图 6 可知:随着半圆柱半径、透镜半径和透镜距 LED 高度的变大,照度均匀度都呈现先变大后变小的趋势,但随着圆柱厚度的增大,照度均匀度却呈递减趋势;当 $r=0.2\text{ mm}$, $R=1.4\text{ mm}$, $h=2.5\text{ mm}$, $d=0.7\text{ mm}$ 时,正六棱柱结构的均匀度最高.

表 1 半圆柱微透镜影响因子及参数

然而,以上只是单一因子变化时的最佳值,并不能说明各个参数组合在一起就是最佳的.

Tab. 1 Influence factors and parameters of semi-cylindrical microlens

2.2 Taguchi 实验分析

基于上述测试结果可知,每个影响因子都有一个较佳的值,根据这个值选取其上、下两个值为待测值,最终得到 4 个影响照度因子,每个因子有 3 个水平.半圆柱微透镜的影响因子及参数,如表 1 所示.

编号	影响因子			
	r/mm	R/mm	h/mm	d/mm
1	0.1	1.3	2.3	0.5
2	0.2	1.4	2.5	0.7
3	0.3	1.5	2.7	0.9

按照传统实验方法需要做 34 次实验, 实验次数较多、效率低. 为了减少实验次数, 提高效率, 采用 Taguchi^[18-20] 实验法, 结合 L_9 正交表, 只需进行 9 次实验. 同时, 将照度均匀度作为品质特性参数, 信噪比(R_{SN})作为衡量标准. R_{SN} 值是采用特定的处理方法, 将品质特性参数进行数量化, 一般可分为望小特性和望大特性. 望小特性是指品质特性越小越好, 而望大特性是品质特性越大越好. 文中的均匀度属于望大特性, 其 R_{SN} 值的计算式^[21]为 $R_{SN} = -10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} / n \right)$.

采用 Taguchi 的实验设计及结果, 如表 2 所示. 通过 Tracepro 软件, 计算出相应的照度均匀度, 并计算 R_{SN} 值. 各因素优化值对应的 R_{SN} , 如图 7 所示.

由图 7 可知: 均匀度最优的组合是 $r_2R_3h_2d_1$, 即半圆柱半径 r 为 0.2 mm, 透镜半径 R 为 1.5 mm, 透镜距 LED 高度 h 为 2.5 mm, 圆柱厚度 d 为 0.5 mm.

表 2 采用 Taguchi 的实验设计及结果

Tab. 2 Taguchi experimental design and results

编号	r_k	R_k	h_k	d_k	$\eta_E / \%$	R_{SN}
1	r_1	R_1	h_1	d_1	92.68	39.34
2	r_1	R_2	h_2	d_2	93.01	39.37
3	r_1	R_3	h_3	d_3	92.37	39.31
4	r_2	R_1	h_2	d_3	93.57	39.42
5	r_2	R_2	h_3	d_1	94.12	39.47
6	r_2	R_3	h_1	d_2	96.04	39.65
7	r_3	R_1	h_3	d_2	89.93	39.08
8	r_3	R_2	h_1	d_3	90.45	39.13
9	r_3	R_3	h_2	d_1	95.78	39.63

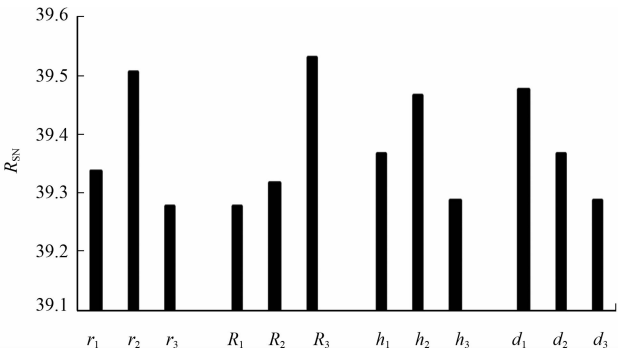
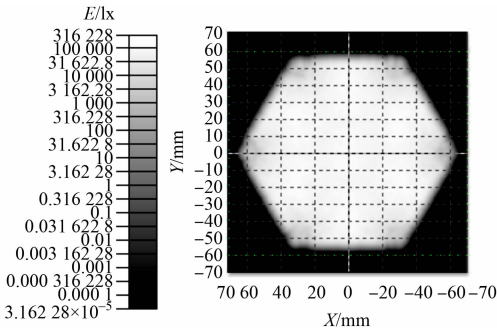


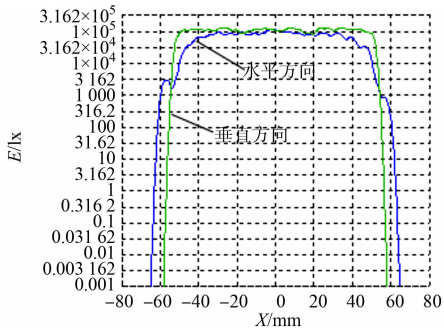
图 7 各因素优化值对应的 R_{SN}

Fig. 7 Optimization value of each factor corresponds to R_{SN}

由于透镜并非旋转对称结构, 因此, 透镜的摆放位置会对照度产生一定的影响. 透镜未旋转的单元结构仿真结果, 如图 8 所示. 对相邻透镜逆时针旋转 60° 后, 得到的单元结构仿真结果, 如图 9 所示. 图



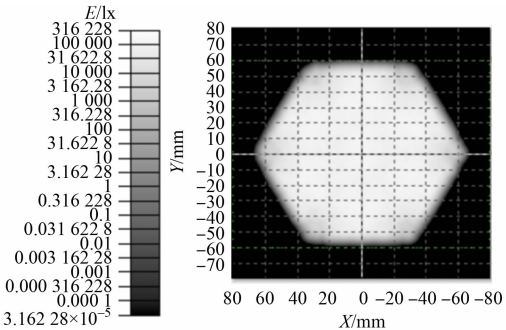
(a) 照度仿真图



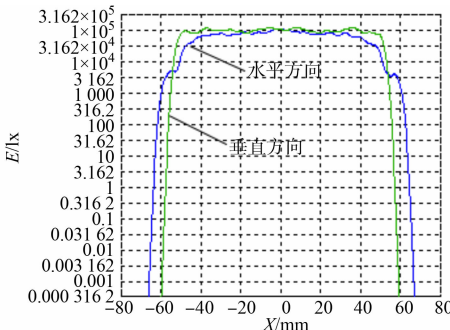
(b) 照度曲线图

图 8 透镜未旋转的单元结构仿真结果

Fig. 8 Simulation results of unrotated lens unit structure



(a) 照度仿真图



(b) 照度曲线图

图 9 透镜旋转的单元结构仿真结果

Fig. 9 Simulation results of unit structure of lens rotation

8,9 中; E 为照度; X,Y 为封装后灯具的长度和宽度. 由图 8,9 可知:旋转后的透镜照度曲线较为平缓,其照度均匀度达到了 95.20%,而未旋转透镜的照度均匀度为 94.50%,因此,旋转透镜可提高透镜的照度均匀度.

将多个单元结构(图 3)组合在一起,单元模块组成的平板灯,如图 10 所示. 平板灯整体包括 5 个完整的六棱体单元结构及 9 小块被分割的单元结构.

由于每相邻的两个单元结构公用 1 个反射板,且 3 个反射板的交点部分光线最弱,容易出现黑点,故将单元模块的反射板去掉,并在原反射板交点处再添加一个透镜,每个透镜都被玻璃柱固定在底板上,最终组合成尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 302 mm \times 285 mm \times 15 mm 的超薄 LED 平板灯. 带半圆柱微透镜超薄 LED 平板灯的结构,如图 11 所示. 该 LED 平板灯的仿真结果,如图 12 所示. 由图 12 可知:该 LED 平板灯的照度均匀度达到 95.53%,光效率达到 95.99%,符合照明发展要求.

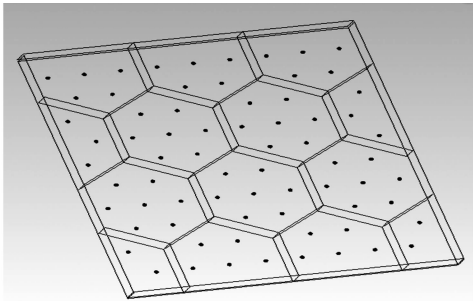


图 10 单元模块组成的平板灯
Fig. 10 Unit module consists
of panel lamp

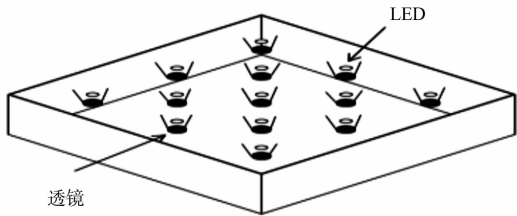
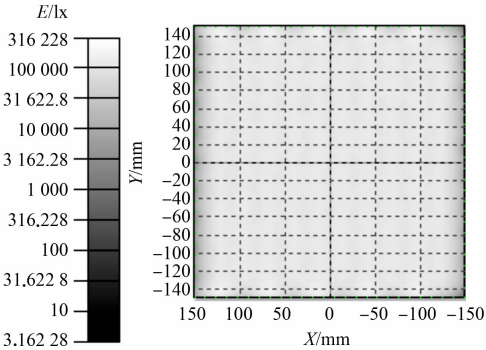
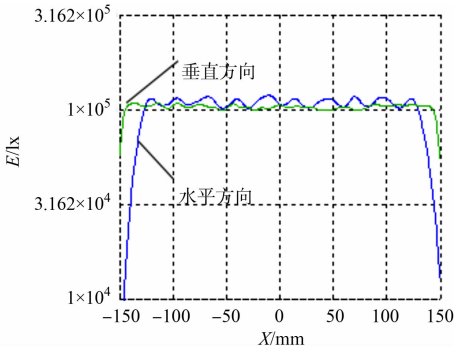


图 11 带半圆柱微透镜超薄 LED 平板灯结构
Fig. 11 Structure of ultra-thin LED panel lamp
with semi-cylindrical microlens



(a) 照度仿真图



(b) 照度曲线图

图 12 LED 平板灯仿真结果

Fig. 12 Simulation results of LED panel lamp

3 结束语

设计一种基于半圆柱微结构透镜的直下式 LED 平板灯,实现了以 15 mm 厚度的高均匀度照明. 在实验过程中,将正六棱柱作为测试单元,首先,对透镜 4 个影响因子进行单个预处理测试,分别得到各自较为合适的参数;然后,结合 Taguchi 实验法进行综合测试,得到一组较好的参数. 将测试单位进行组合得到尺寸(长 \times 宽 \times 高)为 302 mm \times 285 mm \times 15 mm 的超薄 LED 平板灯,其均匀度达到 95.53%,光效率达到 95.99%,符合现在超薄节能发展. 尽管该透镜的实现效果较好,但是它不具有旋转对称作用,只能靠调整透镜不同的摆放位置进行弥补. 接下来的工作主要针对这个不足进行更深一步的研究,寻找更好的解决方案.

参考文献:

[1] WU Rengmao, HUA Hong. Direct design of aspherical lenses for extended non-Lambertian sources in three-dimen-

- sional rotational geometry[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 1017-1030. DOI: 10.1364/OE.24.001017.
- [2] 潘浩,陈国庆,杜伯钧.基于三次样条的双自由曲面LED匀光透镜设计[J].激光与光电子学进展,2016,53(3): 032201. DOI: 10.3788/LOP53.032201.
- [3] 颜稳萍,郭震宁,林介本,等.基于逆向优化设计的高能量利用率LED路灯透镜[J].光学学报,2015,35(4): 0422008. DOI: 10.3788/AOS201535.0422008.
- [4] 颜稳萍,郭震宁,林介本.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. DOI: 10.16136/j.joel.2014.10.035.
- [5] 王能获,赵韦人,陈均华,等.一种新型LED平面光源的研究[J].广东工业大学学报,2017,34(1): 65-70, 77. DOI: 10.12052/gdutxb.160033.
- [6] 陈俄振,郭震宁,智佳军,等.背光源导光板散射网点形状的研究[J].激光与光电子学进展,2013,50(3): 032203. DOI: 10.3788/LOP50.032203.
- [7] 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]. Optics Express, 2010, 18(16): 17460-17476. DOI: 10.1364/OE.18.017460.
- [8] 庞培元,文尚胜,黄雅琪,等.高均匀度超薄直下式LED平板灯混光元件的设计与研究[J].光子学报,2017,46(5): 0523003. DOI: 10.3788/gzxb20174605.0523003.
- [9] 王雪娇.LED自由曲面配光镜的设计及应用[D].杭州:中国计量大学,2015.
- [10] 丛晓东,刘卫东,乔明胜,等.直下式LED背光模組的超薄化设计研究[J].现代显示,2012(142): 15-19. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6268.2012.11.004.
- [11] CHANG Rongsen, TSAI J Z, LI T Y, *et al.* LED backlight module by lightguide-diffusive component[J]. Journal of Display Technology, 2012, 8(2): 79-86. DOI: 10.1109/JDT.2011.2163792.
- [12] 向昌明,文尚胜,史晨阳,等.一种带有曲面底板的直下式LED平板灯设计[J].红外与激光工程,2017,46(7): 0718004. DOI: 10.3788/IRLA201746.0718004.
- [13] WU Heng, ZHANG Xianmin, GE Peng. Design method of a light emitting diode front fog lamp based on a freeform reflector[J]. Optics and Laser Technology, 2015, 72: 125-133. DOI: 10.1016/j.optlastec.2015.02.004.
- [14] 王先盛,朱向冰,吴康康,等.带有圆台的超薄直下式LED背光设计[J].光学与光电技术,2018,16(5): 26-32. DOI: 10.19519/j.cnki.1672-3392.2018.05.005.
- [15] 任百川.偏轴光学系统矢量像差理论研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
- [16] 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,2014,34(3): 220-226. DOI: 10.3788/AOS201434.0322002.
- [17] 李澄,李农.非成像光学应用LED照明的研究[J].照明工程学报,2011,22(5): 95-99, 107. DOI: 10.13223/j.cnki.ciej.2011.05.007.
- [18] CHEN Yingcong, WEN Shangsheng, SONG Pengcheng. Design of a back light module with the freeform surface by applying the Taguchi method[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(3): 032302. DOI: 10.3788/col201513.032302.
- [19] 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. DOI: 10.3788/fgxb20153603.0348.
- [20] 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. DOI: 10.3788/fgxb20153606.0615.
- [21] FANG Y C, TZENG Y F, LI Sixian. 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. DOI: 10.1007/s10043-008-0038-4.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)