

doi: 10.3788/gzxb20154410.1022003

基于 Taguchi 法设计带有圆锥台元件的超薄直下式 LED 平板灯

陈浩伟¹, 文尚胜^{1,3}, 马丙戌¹, 陈颖聪^{1,3}, 黄诗敏²

(1 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640)

(2 华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510640)

(3 华南理工大学 发光材料与器件国家重点实验室, 广州 510640)

摘要:针对直下式 LED 平板灯厚度大、光源密度大的缺点,设计了一种带有圆锥台光学元件的超薄直下式 LED 平板灯,利用漫反射背板和反光圆锥台结构增加 LED 的混光距离,提高平板灯均匀度,应用划分单元的思想,以一个六角形光源为单元进行研究,采用 Taguchi 实验方法设计正交试验组并借助 Tracepro 软件仿真;考量六角形光源的圆锥台元件上下表面半径、厚度、距 LED 高度以及 LED 间距 5 个因子对该灯具均匀度和光效率的影响,并运用 ANOVA 理论分析出因子对品质的影响程度,进而优化灯具的各项结构参量,最终设计出一款厚度仅 15 mm,均匀度达 95.3%,光效率达 92.97% 的直下式 LED 平板灯。

关键词:平板灯;非成像光学;LED;Taguchi;ANOVA

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)10-1022003-9

Design of Ultra-thin Direct-down LED Panel with Tapered Optical Elements Based on Taguchi Method

CHEN Hao-wei¹, WEN Shang-sheng^{1,3}, MA Bing-xu¹, CHEN Ying-cong^{1,3}, HUANG Shi-min²

(1 School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

(2 School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

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

Abstract: An ultra-thin direct-down LED panel model with tapered optical elements was proposed to cover the shortcomings of large thickness and light density of the direct-down LED panel light. The diffuse reflection backboard and the reflective cone structure in this model can increase the LED light mixing distance and improve light uniformity. Using the idea of dividing unit, a hexagonal light source is used as a unit to study in Taguchi method by designing orthogonal experimental group. With the Tracepro software simulation, the five factors influencing light uniformity and efficiency are taken into consideration, including the radius on upper and lower surfaces of the truncated cone element, thickness, height and LED spacing of the hexagonal light source. Apply ANOVA theory to analyze the impact of those factors on the quality, then optimize the structure parameters of the light. And ultimately, a direct-down LED panel light with the thickness of only 15 mm, the light uniformity up to 95.3% and the light

基金项目:广东省科技厅重大科技专项(No. 2011A080801016)、广东省战略性新兴产业专项(Nos. 2011A081301017, 2012A080304012, 2012A080304001)和广州市科技计划项目(No. 2013J4300021)资助

第一作者:陈浩伟(1995-),男,硕士研究生,主要研究方向为 LED 灯具设计及背光源. Email: chwsct@163.com

导师(通讯作者):文尚胜(1964-),男,教授,博导,主要研究方向为 LED 及 OLED 等. Email: shshwen@scut.edu.cn

收稿日期:2015-06-04; **录用日期:**2015-08-25

<http://www.photon.ac.cn>

efficiency up to 92.97%, are designed.

Key words: Panel lights; Non-imaging optics; LED; Taguchi; ANOVA

OCIS Codes: 220.3620; 220.4298; 080.1753; 080.2720

0 引言

目前,室内照明所用的LED平板灯分为侧入式和直下式两种出光方式^[1].相对于侧入式平板灯,直下式平板灯不需要导光板,因而成本较低,重量轻,光损少,容易制作大尺寸的面板.位于背板的LED阵列直接照射到目标平面上的光强分布是不均匀的,所以,解决LED阵列光照强度均匀化问题对提升照明系统的性能有至关重要的意义^[7].LED阵列需要有足够的混光距离才能达到均匀的效果^[1],此时厚度一般会达到20~50 mm^[6],在薄型化方面市场竞争力远不及厚度可达到15 mm左右的侧入式LED平板灯.此外,直下式平板灯还有光源密度较大的缺点^[1,6].上述几点严重限制了直下式平板灯的应用以及发展.现有超薄直下式平板灯方案通常采用带有自由曲面透镜的LED灯^[2]或者自由曲面底板^[3-5]来完成,其要求的制作准确度较高,工序复杂,成本较高,实际生产过程中很少使用.

在平板灯设计生产过程中,常采用设计周期长,繁冗复杂的试错法,在很大程度上降低了设计效率和灵活性.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高效能、系统的实验设计工具.这种实验方法实用性强,广泛应用于各种多参量优化设计的实验中^[5-6],在保证实验准确性的同时大大减少实验工作量.同时使用ANOVA分析方法,找出对该平板灯光学参量影响最大的因子,有助于更快捷地达到预期目标^[5].

本文以15 mm为目标厚度,结合非成像光学的设计思路设计了一种超薄直下式平板灯的光学构架,采用Taguchi实验方法以及ANOVA分析方法设计实验并做进一步分析,设计出一种采用圆锥台光学元件的尺寸为300 mm×300 mm×15 mm(长×宽×厚)的超薄直下式平板灯.

1 设计原理

1.1 整灯模型介绍

带有圆锥台元件的超薄直下式LED平板灯的整体结构如图1.主要包括LED芯片、圆锥台光学元件、背板、边框以及出光面板.其中,内部空间高度为15 mm.LED芯片采用正六边形排布方式,经多个六边形单元堆砌得到图1中的布局(图中六边形仅作示意).LED所发出的光束,经过其上方圆锥台光学元件,分成透射、反射、直射三部分,最后汇合于出光面

板.背板为高漫反射面板,出光面板为透射型扩散板.由于大部分光线经过了反射-漫反射过程,光程大大增加,光线间的耦合也大大加强,最终达到均匀出光的目的.

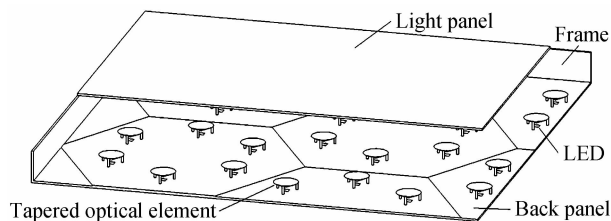


图1 整灯结构

Fig. 1 Structure of the lamp

1.2 LED的排布方式设计

传统的直下式LED平板灯均采用矩形网格的排布方式.但是受照面上某点 (x, y) 的照度是依照式(1)线性叠加的^[7](其中 E_i 是第 i 个灯在 (x, y) 处产生的照度).

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^n E_i(x_i, y_i) \quad (1)$$

单个类朗伯光源在受照面的照度等高线是同心圆,因此LED阵列是采用照度圆的叠加方式进行混光.不同排列方式影响均匀度的主要因素是混光“盲区”所占比例,三角阵列与矩形阵列方式相比,混光“盲区”所占比例较小,能够提升均匀性^[8].但在两者LED芯片间隔相同的情况下,三角阵列排布方式将会大大增加LED的密度.因此,本文在三角阵列的基础上,提出一种六边形阵列的排布方式,在保证均匀度劣化不大的前提下,达到比三角形甚至矩形排布方式更低的布灯密度.

如图2所示,假设三种布灯方式的LED间距均为 a (图中圆圈表示LED所在位置).对于直下式平板灯,

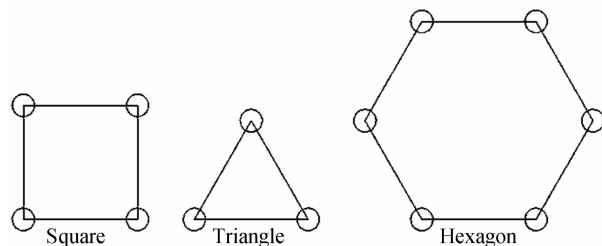


图2 LED间隔相同时的三种排布方式

Fig. 2 Three types of LED arrangement with same interval 光源密度可以由每个LED所支配的面积,即光源密度的倒数来表征.该值越大,则光源密度越小.四边形、三角形、六边形排布方式的密度分别为 $a^2/\text{个}$ 、 $(\sqrt{3}a^2/2)/\text{个}$ 、 $(3\sqrt{3}a^2/4)/\text{个}$.可见在LED间距相等时,六边形排

布可以获得更低的排布密度,也就是说,在构建相同面积的平板灯时所需的 LED 更少.相比其它两种排布方式的均匀度劣化不大的时候是可以接受的.

1.3 模型的理论构建

现有直下式平板灯的厚度较大,其根本原因是当灯具厚度下降时,光线在较短的传播路径中不能充分耦合,导致均匀度的劣化,而提高光线的耦合程度可以通过增加传播路径来实现.因此,本文通过在 LED 上方的对应位置引入反射面,在 LED 的下方引入漫反射背板的方法使光线多次反射进而增加光线传播的距离,使得光线得以充分耦合,从而达到提高均匀度的目的.但是在应用反射面时,会导致受照面被遮光处的照度急剧下降,因此需要在反射面上开孔来弥补这种暗区.

所设计的圆锥台光学元件结构如图 3,元件上下两平面为透光面而侧面设置为反光面且具有旋转对称性.

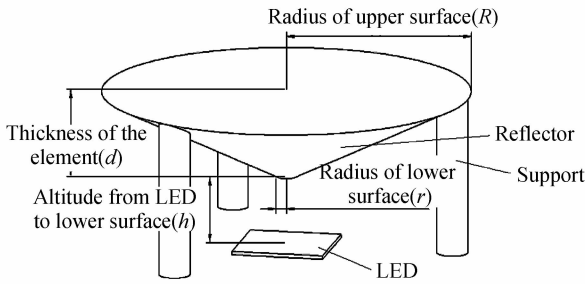


图 3 圆锥台光学元件结构及参量

Fig. 3 Tapered optical element structure and its parameters

由于 LED 芯片离光学元件的距离较小,此时并不能当做点光源处理,必须采用扩展光源的设计方法.采用陈俄振等提出的适用于旋转对称透镜元件的处理方法^[11],结合边缘光线理论,可以把扩展光源近似为点光源处理.并且把三维空间近似为二维空间,大大减小了计算的复杂性.而对于 LED 直接投射到出射面板的部分,因距离较远而采用点光源近似,以简化计算.

如图 3 和图 4 所示,灯具设计中所涉及的参量主要有圆锥台光学元件的上表面半径 R 、下表面半径 r 、厚度 d 、下表面距 LED 上表面高度 h 、两元件间的间距 l ,灯具内部高度 H (本文中设定的目标高度 $H = 15 \text{ mm}$).

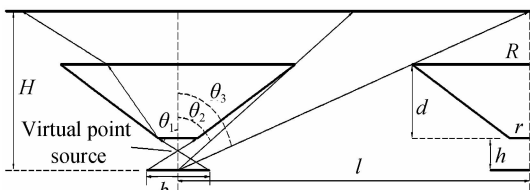


图 4 灯具局部剖面图与涉及的参量

Fig. 4 Local section and parameters involved of the lamp

首先对单个朗伯型 LED 光源在出射面板产生的照度进行分析.在此可以把光线分为三部分即透射部分、反射部分、直射部分.对于直射部分,取 LED 中心作为坐标原点,在出光面板内表面的照度为^[3]

$$E_s(\theta) = \frac{I_0 \cos^3 \theta}{H^2}, \theta_2 < \theta < \theta_3 \quad (2)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{R}{d+h}, \theta_3 = \arctan \frac{l-R}{d+h}$$

式中, I_0 为 LED 的法向发光强度, θ 为偏向角.

对于透射部分,采用陈俄振等提出的处理方法^[11]可以得出如图 4 所示的虚拟点光源,取该点作为坐标原点,根据 Snell 定律,假设入射角为最大入射角,即 θ_1 ,此时有

$$\sin \theta_1 = n \sin \varphi \quad (3)$$

式中 φ 为折射角,空气折射率取 1, n 为透镜的折射率.进而推导出透射部分在出光面上照度为

$$E_t(\theta) = \frac{l_0 \cos^3 \theta}{\left\{ H - \left(h - \frac{2rh}{b+2r} \right) - \left[H \times \left(1 - \frac{\tan \theta_1}{\tan \varphi} \right) \right] \right\}^2} \quad (4)$$

$$\left(0 < \theta < \theta_1, \theta_1 = \arctan \frac{b+2r}{2d} \right)$$

对于反射部分,根据祝振敏等的研究^[9-10],光线入射高漫反射表面后可以近似为一个次朗伯光源.式(2)与(4)中的坐标系原点在实际中几乎重合,故可以近似看作位于同一点.对于 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 的光线,经过圆锥台元件反射后与漫反射底板的交点横坐标为

$$x = \frac{x_0 + \tan(\theta + 2\beta)}{\tan \theta} + 2x_0$$

式中 X_0 为出射光线与圆锥台元件交点的横坐标, β 为元件上表面与侧面的夹角. $x_0 = \frac{h}{1 - \tan \theta \tan \beta}$, $\tan \beta = \frac{d}{R}$.由此可得 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 范围内 x 的变化范围为 $x_1 < x < x_2$,即在这个变化范围内,有一连串连续的次朗伯光源,因此在受照面上造成的照度为

$$E_r(\theta) = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dI_f \cos^3 \omega}{H^2} dx \quad (5)$$

式中 I_f 为次朗伯源的法向发光强度, ω 为次朗伯源出射光线与法线的夹角.

由式(1)、(2)、(4)、(5)可得出 N 个光源在出光面上某点所产生的照度 $E(\theta)$ 为

$$E(\theta) = \sum_N E_t(\theta) + \sum_N E_s(\theta) + \sum_N E_r(\theta) = \sum_N \frac{l_0 \cos^3 \theta}{\left\{ H - \left(h - \frac{2rh}{b+2r} \right) - \left[H \times \left(1 - \frac{\tan \theta_1}{\tan \varphi} \right) \right] \right\}^2} + \sum_N \frac{I_0 \cos^3 \theta}{H^2} + \sum_N \int_{x_1}^{x_2} \frac{dI_f \cos^3 \omega}{H^2} dx \quad (6)$$

1.4 相邻单元照度分析与仿真单元的设计

考虑到在使用六边形单元进行拼接时相邻单元之间的光线会互相影响,进一步根据图 5 对相邻单元之间的相互影响进行分析,图 5 中垂直虚线为划分单元的边界面,点划线为单元的中心轴线.在此称左边单元为单元 1,右边为单元 2.

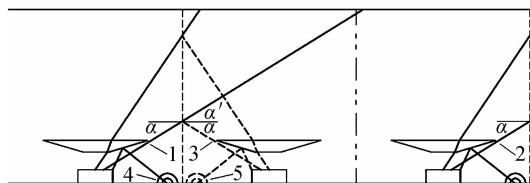


图 5 对相邻单元的分析
Fig. 5 Analysis of near units

对直射光线进行分析.假设单元 1 内某光源发出光线 1,其与水平面夹角为 α .由于单元 1、2 等价,因此单元 2 内必有一方向、强度均一致的光线 2.又因六边形单元有中心对称性,故有一与光线 2 中心对称的光线 3,其水平夹角仍为 α .可见光线 1、3 呈镜面对称关系,而单元分界面为其对称面.

对于折射光线,情况与直射时一致,故不再累述.对于反射光线,根据祝振敏等的研究^[9-10],光线经高漫反射表面反射后可以近似为一个次朗伯光源.假设单元 1 中某光线经反射后到达底板,形成图中的次朗伯光源 4,可证明光源 5 与之成镜面对称关系.则现在情形与直射时一致,只是光源位置不同.此时若放置一镜

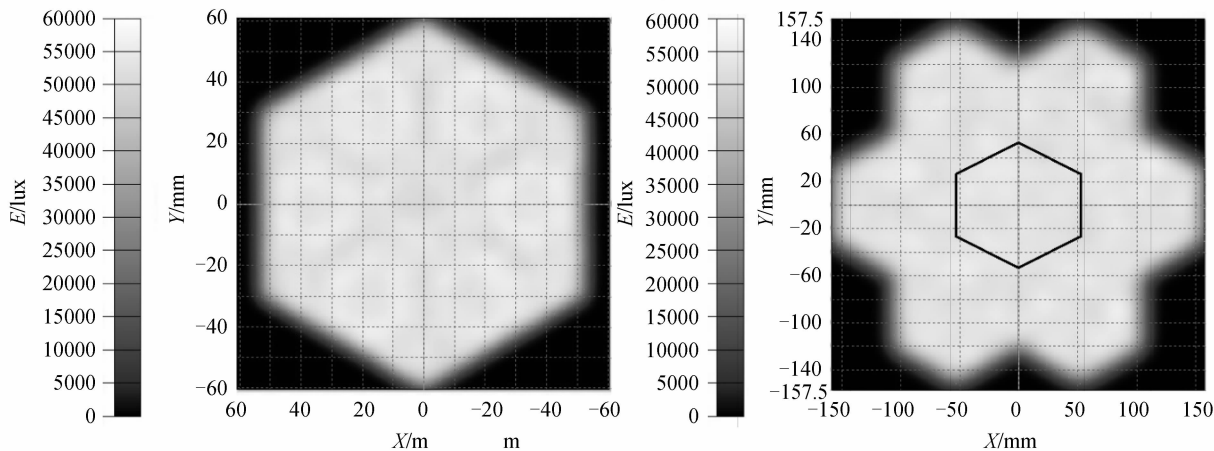


图 7 镜面挡板作用的验证
Fig. 7 Verification of mirror baffle's influence

2 仿真与分析

2.1 Taguchi 试验方法

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.对于平板灯,其主要的品质特性有亮度均匀度、总光通量等.在设计实验时,需要先对这些品质特性设定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.

面于分界面,对顶角 $\alpha = \alpha'$.可见光线 3 的反射光线将代替原光线 1.折射、反射的情况也类同.

所以为了充分考虑其他相邻单元对研究单元的照度影响,在建立单一六边形单元模型时,可以通过添加反射镜面构成如图 6 所示的结构(其中单元分界的挡板为镜面),利用反射研究单元照在镜面上的光线来代替相邻单元照到研究单元的光线.为了证明上述分析与模型建立的正确性,经过 Tracepro 进行进一步验证,其中图 7 中左图中设置了镜面挡板的单个单元的均匀度为 96.46%,光效率 94.03%.经多个单元无挡板拼合以后得到了图 7 右图所示照度图,右图中黑框范围内为研究单元,其均匀度为 96.58%,光效率为 93.79%,两者近乎相等.由此,认为该镜面可以起到代替相邻单元的作用.下文的实验将在图 6 的基础上进行,设定单个 LED 光通量为 90 lm,追击光线数为 20000 线.

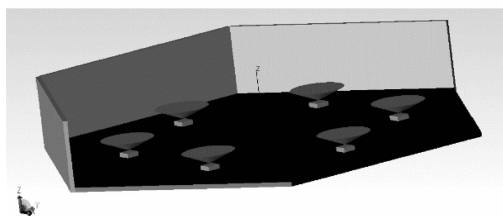


图 6 仿真单元
Fig. 6 Simulation unit

在选定好品质特性后,要列出影响此品质的控制因子,并定出它们的水准^[5-6].对于亮度均匀度,可以用出光面板的内表面上的照度均匀度表征.考虑到灯具可能会因选用 LED 芯片的不同而有不同的总光通量,故定义光效率来表征总光通量.光效率的计算为

$$\text{光效率} = \frac{\text{出光面板内表面接收到的光通量}}{\text{所有 LED 芯片发出的总光通量}}$$

本文选取出光面板的内表面上的照度均匀度(简

称均匀度)、光效率来作为平板灯的两个品质特性. 通过前文的理论分析,再结合式(6)可得影响出光效果的是上表面半径 R 、下表面半径 r 、厚度 d 、下表面距 LED 上表面高度 h 、两元件间的间距 l . 然后根据实际应用要求,制定出合适的水准. 选定因子和水准后,依照因子及其水准的数目制定适当的正交表,在本设计中影响背光源亮度的因子有 5 个,每个因子选定 3 个水准,故采用 $L_{18}(3^7)$ 正交矩阵^[12],其中 6、7 因素空置处理. 完成实验后,通过计算 S/N 比例以及 ANOVA 数据分析,辨别各因子对品质特性的影响,并应用贡献度来弥补实验无法辨别各实验参量对品质特性的影响力及误

差程度等方面的不足. 最后,对新的设计值作确认实验.

若采用已有的试错法进行测试,对于本设计,需要进行 $5^3=125$ 次试验. 采用 Taguchi 试验方法,则仅需要 18 次试验即可,大大减少了试验次数,提高效率.

2.2 Taguchi 试验设计

通过式(6)的分析及预实验,初步选定的因子和中值水准为:下表面半径(r)0.3 mm、上表面半径(R)6 mm、元件厚度(d)2.5 mm、元件距 LED 高度(h)0.5 mm、LED 间距(l)30 mm. 为简化实验,不考虑元件支架,根据式(6)选取各因子的水准如表 1.

表 1 出光效果影响因子及其控制水准

Table 1 Factors and its control levels

Symbol	Name of factors	Quantity of levels	Level 1	Level 2	Level 3
A	Radius of lower surface r /mm	3	0.25	0.3	0.35
B	Radius of upper surface R /mm	3	5	6	7
C	Thickness of the element d /mm	3	2	2.5	3
D	Altitude from LED to lower surface h /mm	3	0.3	0.5	0.7
E	Distance between LEDs l /mm	3	25	30	35

S/N 值是将品质特性数量化的处理手段. 根据品质特性的形态,分为两种计算方法:1)望大特性,即品质因数越大越好,也就是品质特性的理想机能无限大;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零.

此采用望大特性进行计算,具体公式为^[13]

$$LTB(S/N) = - \frac{10 \lg \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}}{n} \quad (6)$$

式中 y_i 表示第 i 个品质特性, n 为实验次数.

根据式(6)及实验结果,计算出各项 S/N 值,见表 2. 各水准对应的均匀度和光效率的 S/N 值见图 8.

两个品质特性,即均匀度和光效率,越大越好,因

表 2 采用 $L_{18}(3^7)$ 正交表实验设计及结果

Table 2 $L_{18}(3^7)$ orthogonal test table and results

Code	A	B	C	D	E	Illumination uniformity/%	Energy efficiency/%	S/N of illumination uniformity	S/N of energy efficiency
1	1	1	1	1	1	91.12	92.16	39.19	39.29
2	1	2	2	2	2	95.85	92.87	39.63	39.36
3	1	3	3	3	3	89.52	93.30	39.04	39.40
4	2	1	1	2	2	91.48	93.24	39.23	39.39
5	2	2	2	3	3	96.02	93.63	39.65	39.43
6	2	3	3	1	1	92.18	91.27	39.29	39.21
7	3	1	2	1	3	94.84	93.64	39.54	39.43
8	3	2	3	2	1	96.85	93.59	39.72	39.42
9	3	3	1	3	2	93.64	91.04	39.43	39.18
10	1	1	3	3	2	91.38	95.45	39.22	39.60
11	1	2	1	1	3	87.37	92.86	38.83	39.36
12	1	3	2	2	1	89.83	91.05	39.07	39.19
13	2	1	2	3	1	92.57	94.63	39.33	39.52
14	2	2	3	1	2	93.18	93.08	39.39	39.38
15	2	3	1	2	3	88.07	90.28	38.90	39.11
16	3	1	3	2	3	92.18	95.14	39.29	39.57
17	3	2	1	3	1	87.21	94.72	38.81	39.53
18	3	3	2	1	2	91.20	90.44	39.20	39.13

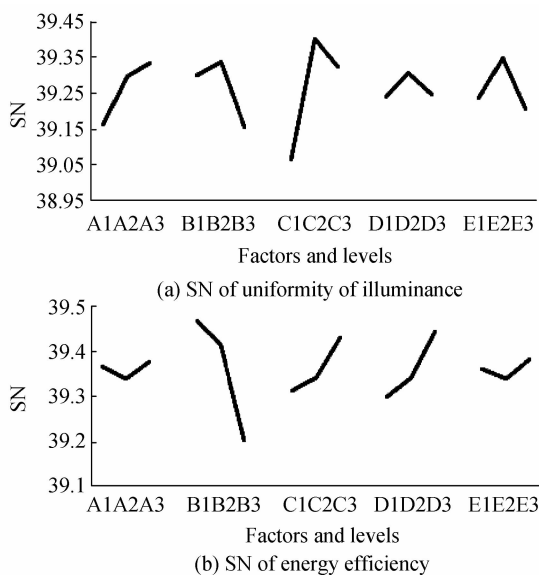


图 8 各因素的水准对应的 S/N 值

Fig. 8 S/N of different levels of different factors

如图 8, 图中的 S/N 值越大, 所对应的均匀度或光效率越高. 对于均匀度, 最优解为 A3B2C2D2E2, 即下表面半径 0.35 mm、上表面半径 6 mm、元件厚度 2.5 mm、元件距 LED 高度 0.5 mm、LED 间距 25 mm. 这与前期理论推导与预实验的预测基本相符.

对于光效率, 最优解为 A3B1C3D3E3, 即下表面半径 0.35 mm、上表面半径 5 mm、元件厚度 3 mm、元件

距 LED 高度 0.7 mm、LED 间距 35 mm. 这与实际也大致相符: 光的衰减主要是由于元件的镜面反射时的吸收以及透射时的吸收, 而下表面半径的增加与上表面半径的减小都将会导致反射面面积的下降, 因此会提高光效率. 减小元件的厚度可以减少光通过元件的距离从而减少能量的损失, 但是下表面半径同时影响着反射面面积与透射通过元件的光通量两个参量, 且是负相关, 因此两者制衡之下光效率对下表面半径并不敏感.

考虑到均匀度与光效率之间的取舍, 以及当 LED 灯的间距越大, 做成的灯具所需的 LED 和元件的数量将会大大减少从而降低生产成本, 因此取 A2B2C2D3E3 作为 Taguchi 方法得出的最优解. 即下表面半径 0.35 mm、上表面半径 6 mm、元件厚度 2.5 mm、元件距 LED 高度 0.7 mm、LED 间距 35 mm. 此时均匀度达到 95.60%, 光效率 93.68%. 最优解的仿真结果如图 9. 图右方两条曲线分别为经过单元中心的纵横两个截面的照度曲线(下同). 此时均匀度以及光效率都处于一个较高的水平, 考虑到当上元件支架以后均匀度有可能劣化, 因此需要探求更高的均匀度, 本文采用 ANOVA 分析方法来观察各个因素与均匀度以及光效率的关系, 从而得到更加优化的输出结果.

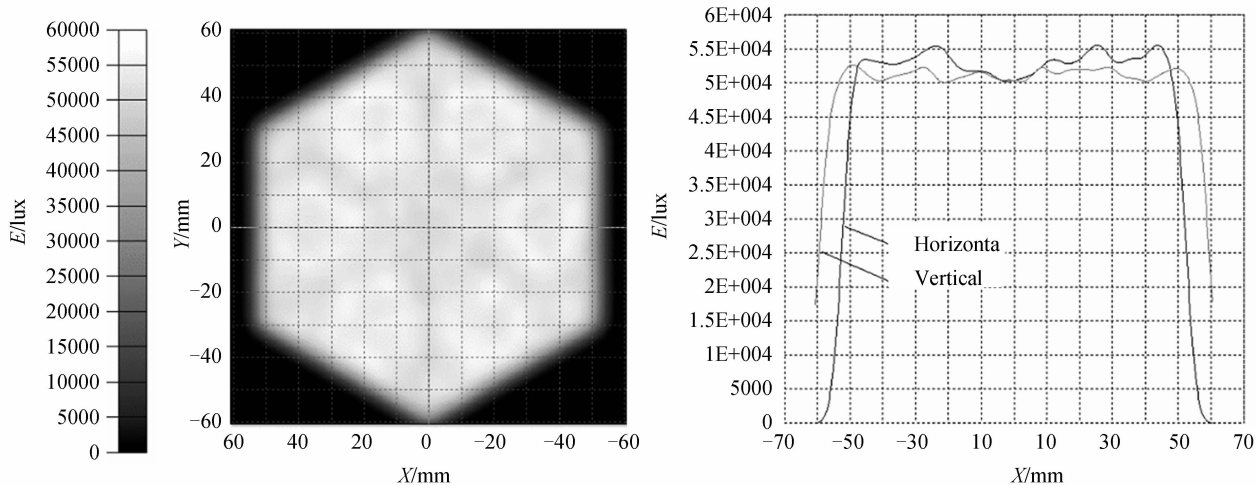


图 9 Taguchi 方法所得的仿真结果

Fig. 9 Simulation result based on Taguchi method

2.3 变数分析 (Analysis of Variance, ANOVA)

ANOVA 方法是用于评估各个影响因子的变化对品质特性变化的贡献度. 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, 才认定此因子效应为“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”的强弱通过参量 ρ 表示^[5-6]

$$\rho = \frac{SS_d}{SS_T}, \quad SS_T = SS_d + SS_e \quad (7)$$

式中 SS_d 与 SS'_d 表示方差和, SS_e 表示错误的方差和. (由于仿真具有高度可重复性, 误差可以忽略, 故 SS_e 近似取为 0). 方差 SS_d 由 S/N 比的方差和为

$$SS_d = \sum_{i=1}^m (\eta_i - \bar{\eta})^2 \quad (8)$$

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

根据式(8), 可以得到各因子分别对均匀度和光效率产生影响的贡献度, 见表 3.

表 3 各因子对均匀度、光效率的贡献率

Table 3 Contribution of different factors to illumination uniformity and energy efficiency

Symbol	Contribution to illumination uniformity	Contribution to energy efficiency
A	14.37%	1.24%
B	16.79%	65.87%
C	56.35%	12.55%
D	2.45%	18.78%
E	10.03%	1.56%

由表 3 可知, 元件厚度对于均匀度的影响最大(56.35%), 其余参量的贡献率并不大. 因此, 需要针对透镜厚度进行微调优化. 而对于光效率, 影响贡献度最大的是上表面半径(65.87%). 将在 Taguchi 方法得到的最优解的基础上, 对透镜厚度进行微调, 结果如图 10.

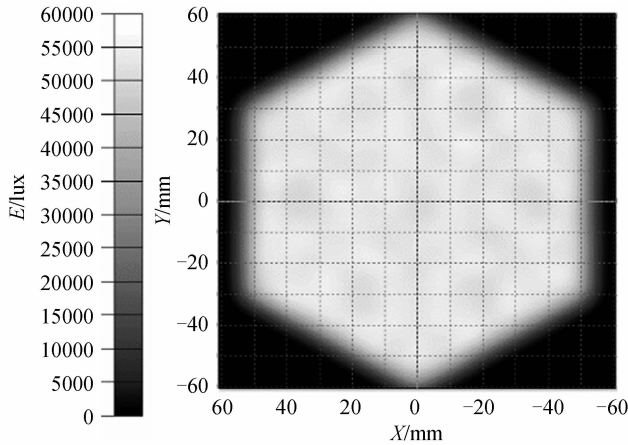


图 11 仿真单元最终优化结果

Fig. 11 Final illumination map of the unit after optimization

得到单元的结构参量以后, 把每个六边形单元按照图 1 所示的方式拼合得到一个 $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 厚) 大小的直下式平板灯, 并进行仿真, 仿真结果如图 12. 从图 2 可知, 此时均匀度为 95.3%, 光效率为 92.97%, 实验结果已符合预期需求, 超薄直下式平板灯性能优良照明质量高. 整灯仿真结果与单个单元的仿真结果基本吻合, 进一步证明了利用划分的单元代替整灯仿真的合理性.

另外, 本文所提到的圆锥台形结构的光学元件厚

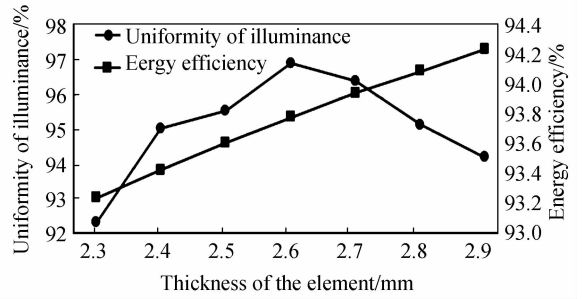
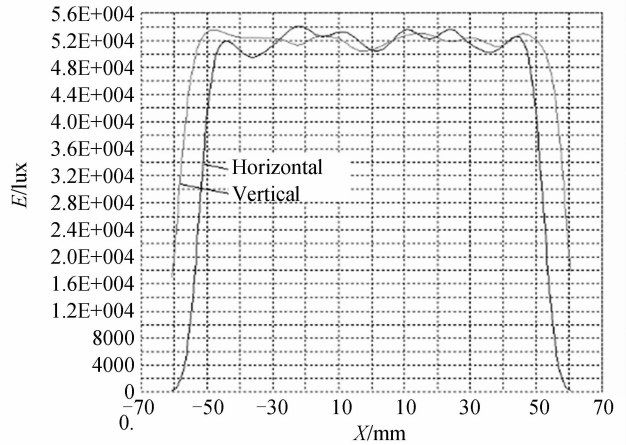


图 10 元件厚度与均匀度和光效率之间的关系

Fig. 10 Relationship between thickness of the element and illumination uniformity or energy efficiency

由微调结果可以看出, 当光学元件的厚度为 2.7 mm、下表面半径 0.35 mm、上表面半径 5 mm、元件距 LED 高度 0.7 mm、LED 间距 35 mm 时, 均匀度达到了最大值(96.46%). 此时光效率为 94.03%, 也达到了较高水平.

分析中使光学元件均处于悬空状态, 而实际上该元件必须使用支架来固定, 故取加上支架以后的元件的仿真结果来作为单元设计的最终结果, 结果如图 11. 此时均匀度达到 95.12%, 光效率为 93.09%.



度较小并且具有较大的锥度, 在加工过程中对模具有一定准确度要求. 但是根据现有的注塑技术与研究进展^[14-16], 可知现有技术注塑准确度可达 0.01~0.001 mm. 设计中所用元件属于非球面光学元件, 按照王晓梅^[17]等提出的 PMMA 非球面透镜零件成型工艺优化方法可以较高准确度地加工出大锥度的元件. 故对于本文提出的圆锥形光学元件, 在此认为加工难度并不大.

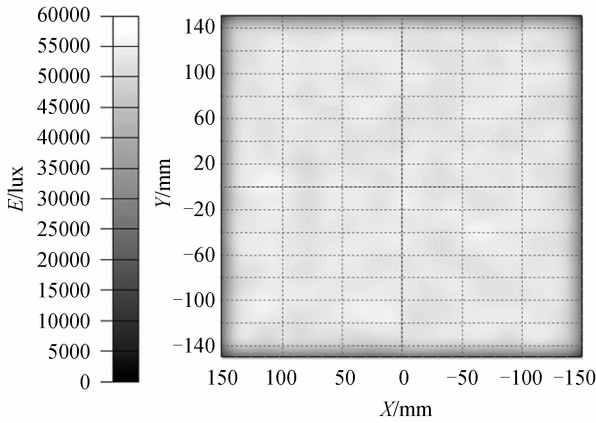


图 12 灯具最终结果

Fig. 12 Final illumination map of the lamp

3 结论

本文设计了一种圆锥台结构的光学元件并用该元件实现了厚度为 15 mm 超薄直下式平板灯。在实验过程中引入单元化思想进行分析与研究,利用该平板灯对称性的特点,对单一单元的优化设计就可实现整灯的优化设计,将其分割为若干具有完美镜面边框的六边形单元进行分析。利用 Taguchi 方法对影响单一单元均匀度和光效率的因子进行实验研究,利用 ANVOA 分析方法对各因子的影响程度进行分析,并通过 Tracepro 软件模拟仿真。结果表明,圆锥台光学元件的厚度对均匀度影响最大(56.35%),上表面半径对光效率的影响最大(65.87%)。通过进一步的调整,得到单一单元的最优参量并拼合出 300 mm×300 mm×15 mm(长×宽×厚)的直下式平板灯,其均匀度达到 95.3%,光效率为 92.97%。该灯符合当前绿色高效、轻薄化的趋势,并有元件通用化,生产难度低的特点。

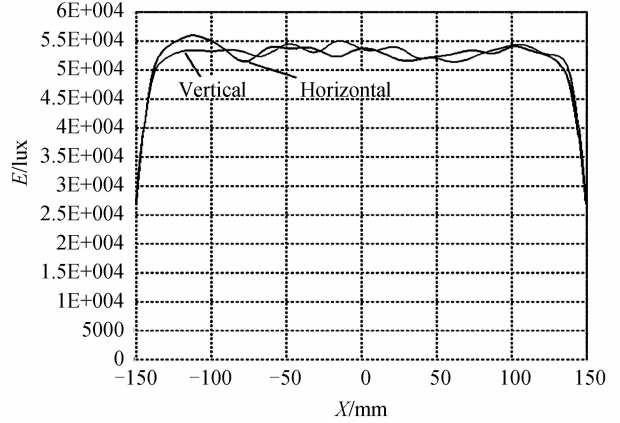
参考文献

[1] YAN Wen-ping, GUO Zhen-ning, LIN Jie-ben, *et al.* Direct down LED panel light design for uniform illumination [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2014, **25**(10): 1878-1885.
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.

[2] DING Yi, ZHENG Zhen-rong, GU Pei-fu. Freeform lens design for LED illumination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(6): 1486-1490.
丁毅, 郑臻荣, 顾培夫. 实现 LED 照明的自由曲面透镜设计 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(6): 1486-1490.

[3] SUN Zhi-hui, CHANG Jun, ZHAO Nan, *et al.* A novel LED for LCD backlight [J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(S1): 282-284.
孙智慧, 常军, 赵楠, 等. 一种新的用于直下式 LCD 背光源的 LED [J]. *光学技术*, 2007, **33**(S1): 282-284.

[4] CHEN Ying-cong, WEN Shang-sheng, LUO Wan-xia, *et al.* Design of LED optical system based on the substrate with freeform surface [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, **43**(9): 2947-2953.
陈颖聪, 文尚胜, 罗婉霞, 等. 自由曲面底板的 LED 光学设计



[J]. *红外与激光工程*, 2014, **43**(9): 2947-2953.

[5] SHI Chen-yang, WEN Shang-shen, CHEN Ying-cong. Study on curved surface LED array illumination problem based on Taguchi method [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(3): 348-354.
史晨阳, 文尚胜, 陈颖聪. 基于 Taguchi 方法的曲面 LED 阵列照明问题研究 [J]. *发光学报*, 2015, **36**(3): 348-354.

[6] CHEN Ying-cong, WEN Shang-sheng, SONG Peng-cheng. Design of a backlight module with a freeform surface by applying the Taguchi method [J]. *Chinese Optics Letters*, 2015, **13**(3): 1671-1674.

[7] ZHAO Zhi-pu, JI Ling-yan, SHEN Yan-xia, *et al.* Research of illumination uniformity for LED arrays based on PSO algorithm [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2013, **34**(12): 1677-1682.
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): 1677-1682.

[8] XIAO Xiao, WEN Shang-sheng, CHEN Jian-long, *et al.* Optical performance of secondary lightguide-diffusive component in direct LED backlight module [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, **24**(4): 679-686.
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.

[9] ZHU Zhen-min, QU Xing-hua, JIA Guo-xin, *et al.* Uniform illumination design by configuration of led array and diffuse reflection surface for color vision application [J]. *Journal of Display Technology*, 2011, **7**(2): 94-89.

[10] ZHU Zhen-min, QU Xing-hua, LIANG Hai-yu, *et al.* Uniform illumination study by light-emitting diode ring array and diffuse reflection surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0115001.
祝振敏, 曲兴华, 梁海昱, 等. 基于发光二极管环形阵列与漫反射表面的均匀照明光源研究 [J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0115001.

[11] CHEN E-zhen, GUO Zhen-ning, ZHI Jia-jun. Lens design with uniform illumination of the LED extended sources [J]. *Journal of Hua Qiao University (Natural Science)*, 2013, **34**(6): 632-633.
陈俄振, 郭震宁, 智佳军. LED 扩展光源均匀照明的透镜设计 [J]. *华侨大学学报(自然科学版)*, 2013, **34**(6): 632-633.

[12] LAN Zhi-yong, YANG Xiang-yu, WANG Fang-yuan, *et al.* Application for optimal designing of sinusoidal interior permanent magnet synchronous motors by using the Taguchi

- method[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2011, **26**(12): 37-42.
- 兰志勇, 杨向宇, 王芳媛, 等. Taguchi 方法在内嵌式正弦波永磁同步电机优化设计中的应用[J]. *电工技术学报*, 2011, **26**(12): 37-42.
- [13] FANG Yi-chin, TZENG Yih-fong, LI Si-xian. 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.
- [14] PENG Xiang-fang, LIU Ting, CHEN Jin-wei. Recent development of precision injection molding technology [J]. *Plastics*, 2004, **33**(6): 79-83.
- 彭响方, 刘婷, 陈金伟. 精密注塑成型技术的最新进展[J]. *塑料*, 2004, **33**(6): 79-83.
- [15] SONG Man-cang, YAN Ke-hui. Present situations of numerical simulation technology for this wall injection molding [J]. *Plastics Science and Technology*, 2006, **34**(1): 51-54.
- 宋满仓, 颜克辉. 薄壁注塑成型数值模拟技术的发展现状 [J]. *塑料科技*, 2006, **34**(1): 51-54.
- [16] 张盛桂. 基于 PVT 特性的精密注塑成型控制机理及设备的研究 [D]. 北京化工大学, 2013
- [17] WANG Xiao-mei, KONG De-yang. An optimization research on PMMA aspheric lens parts molding process [J]. *Machinery*, 2014, **52**(604): 68-70.
- 王晓梅, 孔德杨. 一种 PMMA 非球面透镜零件成型工艺优化研究 [J]. *机械制造*, 2014, **52**(604): 68-70.