

## 侧入式无导光板 LED 平板灯设计

马丙戌<sup>1</sup>, 文尚胜<sup>1,2</sup>, 陈颖聪<sup>1,2</sup>, 刘磊<sup>1</sup>, 史晨阳<sup>1,2</sup>

(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:** 针对侧入式 LED 平板灯出光效率低、导光板(LGP)制造成本高、设计流程繁琐等缺点设计了一种无导光板的 LED 平板灯。利用复合抛物面反光杯(CPC)将 LED 阵列发出的光束汇聚并投射在出光面板上, 并通过掠射和叠加的方法实现了出光面板的照度均匀性。进一步采用 Taguchi 实验方法进行设计, 并借助 Tracepro 软件仿真分析, 将影响该灯具最大照度和照度均匀度的因子进行研究与分析, 同时运用 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数, 设计出一款均匀度 95.87%、最大照度 39 870 lx 无导光板 LED 平板灯。结果表明: 该平板灯的效果达到甚至超过目前市面上的 LED 平板灯, 并且其无导光板的设计可以在很大程度上降低 LED 平板灯的生产成本; 此外, 将 Taguchi 方法引入平板灯的设计简化了设计流程。

**关键词:** 光学设计; 平板灯; Tracepro; Taguchi; ANOVA

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0418001

## Design of edge-lighting LED flat panel light without light guide plate

Ma Bingxu<sup>1</sup>, Wen Shangsheng<sup>1,2</sup>, Chen Yingcong<sup>1,2</sup>, Liu Lei<sup>1</sup>, Shi Chenyang<sup>1,2</sup>

(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)

**Abstract:** A LED flat panel light without light guide plate was designed to solve the disadvantages of low luminous efficiency and the high cost of Light Guide Plate (LGP) in edge-lighting LED flat panel light. The beam launched from the LED arrays was converged by the compound parabolic reflective cup (CPC) and was gazed on light emitting panel. In this way, the uniform luminous can be obtained on light emitting panel. Then, Taguchi method was used to design the experiment and analyzed the factors that affected maximum and uniformity of illumination by the software of Tracepro simultaneously. Furthermore, the influence of quality was studied by the theory of ANOVA to optimize structural parameters. Finally, the LED flat panel light without light guide plate after optimizing was designed with the illumination uniformity of 95.87% and the maximum illumination of 39 870 lx. These results show that the flat panel light that designed has achieved the general or even better effects of LED flat lights. It can also largely reduce the production cost of LED flat panel lights owing to the design of removing

收稿日期: 2015-08-09; 修订日期: 2015-09-14

基金项目: 广东省科技厅重大科技专项(2011A080801016);

广东省战略性新兴产业专项(2011A081301017, 2012A080304012, 2012A080304001)

作者简介: 马丙戌(1994-), 男, 硕士生, 主要从事 LED 灯具设计及背光源方面的研究。Email: mbxscut@163.com

导师简介: 文尚胜(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事 LED 及 OLED 等方面的研究。Email: shshwen@scut.edu.cn

LGP. Besides, the applying of Taguchi method greatly simplified the design processes.

**Key words:** optical design; flat panel light; Tracepro; Taguchi; ANOVA

## 0 引言

近年来,LED 平板灯因其光线柔和、发光面积大、光照均匀和节能环保等优点,逐步成为室内大面积照明的主流产品<sup>[1-2]</sup>。

目前,LED 平板灯分为直下式和侧入式两种类型。但是混光距离极大地限制了直下式平板灯的厚度<sup>[3]</sup>;相比之下侧入式 LED 平板灯利用导光板将侧边框的 LED light bar 发出的光线进行混光,不存在混光距离的限制,具有轻薄化的优点,但是光线经过导光板多次耦合之后光损大,而且导光板质量较大,制作成本高,工艺难度也较大,在很大程度上限制了侧入式 LED 平板灯的发展。赖丽萍等<sup>[4]</sup>研究并设计了一种 LED 投射器,利用该投射器实现了一种均匀出光的无导光板 LED 平板灯,虽然无导光板的设计提高了光效,但是该投射器结构复杂,设计精度要求较高,工序复杂,并且由于光线依旧经过了投射器的耦合,因此该无导光板平板灯的光效依旧有很大的上升空间。

另外,侧入式平板灯在设计时受多个参数影响,所以通常采用试错法进行设计,而这种方法不仅设计周期长,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 实验因为其实用性强,广泛应用于多个套中多参数优化设计的实验中。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。因此,将该方法应用于侧入式平板灯的设计可以很好地解决由于参数较多带来的设计繁琐、设计周期长的问题。基于上述提出的几点问题,文中的研究立足于解决侧入式平板灯导光板设计繁琐、价格昂贵、生产设计周期长等问题。设计了一种无导光板的自然光平板灯,该设计方案采用 CPC 反光杯将 LED 发出的发散光束汇聚并均匀掠射叠加在出光面板上,出光面板为透射型扩散板,后面板为漫反射板。因为光线没有经过在导光板内部的多次耦合和多次反射,所以无

导光板的 LED 平板灯比一般平板灯的出光效率高。在设计过程中采用 Taguchi 方法对平板灯进行试验,并优化设计方案。通过分析该设计方案的影响因子及直交表设计实验,并借助 Tracepro 软件进行模拟仿真,最后通过 ANOVA 理论分析得出对该平板灯光学影响最大的因子,并优化出一款性能符合要求并达到了文中目的的产品。

## 1 设计原理

### 1.1 结构模型

侧入式无导光板 LED 平板灯的内部结构如图 1 所示,主要包括 LED 灯珠、复合抛物面反光杯(CPC)、出光面板及后面板。

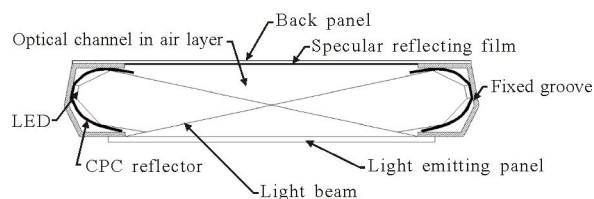


图 1 整灯结构图

Fig.1 Structure model of this light

### 1.2 CPC 的设计原理

CPC 两反射面的焦点不一定在同一点上,即 CPC 并非共焦系统<sup>[5]</sup>,对于 CPC 而言,其关键参数主要有最大接收角、聚光比、焦距、聚光器高度等。为了便于在 Tracepro 中构建 CPC 的光学模型,首先借助图 2 对 CPC 建模的几个重要参数进行推导,图 2 中

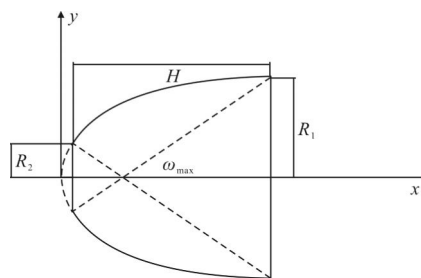


图 2 CPC 理论分析图

Fig.2 Diagram to analyze CPC

$\omega_{\max}$  为最大接收角,  $H$  为 CPC 高度,  $R_1$  为出口半径,  $R_2$  为入口半径。

定义接收角<sup>[6]</sup>为边缘光线被反射器反射一次后出射在接收器边缘时的入射光线与垂直方向的夹角  $\omega$ , 最大接收角  $\omega_{\max}$ 。

对于一个聚光器, 设定  $A_i$  为入射光束的截面积,  $A_o$  为出射光束的截面积, 则该聚光器的聚光比  $C$  定义为:

$$C = \frac{A_i}{A_o} = \frac{1}{\sin \omega_{\max}} \quad (1)$$

由公式(1)可知:  $C$  越大, 聚光效果越好, 减少接收角  $\omega$  也就增大了聚光比  $C$ 。

CPC 高度为 CPC 出口处到入口处之间的距离  $H$ , 刘灵芝等<sup>[7]</sup>推导出了高度  $H$  与聚光比  $C$  和入射口半径  $R_2$  之间的关系:

$$H = (R_1 + R_2) \cot \omega_{\max} = \left( \frac{C+1}{2} \sqrt{C^2 - 1} \cdot 2R_2 \right) \quad (2)$$

进一步, 汪乐等<sup>[8]</sup>给出了各关键参数之间的关系式( $f$  为 CPC 的焦距):

$$f = \frac{\sqrt{H^2 + (R_1 + R_2)^2} - 1}{2} \quad (3)$$

$$\omega_{\max} = \arcsin \left( \frac{f}{R_1} - 1 \right) \quad (4)$$

在已知出口半径  $R_1$ 、入射口半  $R_2$ 、并根据实际情况设定高度  $H$  的前提下, 可以根据公式(3)、(4)计算出焦距  $f$  和最大聚光角  $\omega_{\max}$ , 进一步通过公式(1)完成对聚光比的计算。另外也可先设定想要达到的聚光效果(即确定聚光比), 借助公式(2)推导出  $H$  值, 进而完成相关关键参数的计算。至此完成了 CPC 关键参数的计算, 并根据计算结果在 Tracepro 中建立 CPC 的光学模型。

### 1.3 整灯出光效果分析

设计出的 CPC 对光线的改变如图 3 所示。设定一个反光杯与一个 LED 芯片构成一个光源模块, 整个光源模块的光轴方向与 LED 光轴方向相同, 反光杯对 LED 的发散光线进行汇聚后投射在垂直于出光轴的平面上, 呈现为细长条形光斑如图 4(a)所示, 而掠射在几乎平行于出光轴的平面上呈现为矩形光斑, 如图 4(b)所示。

形光斑, 如图 4(b)所示。

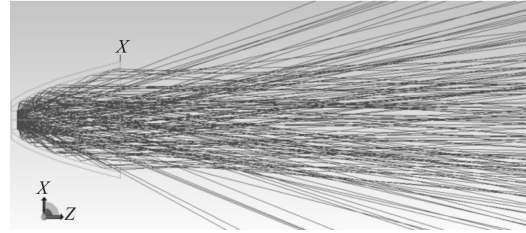
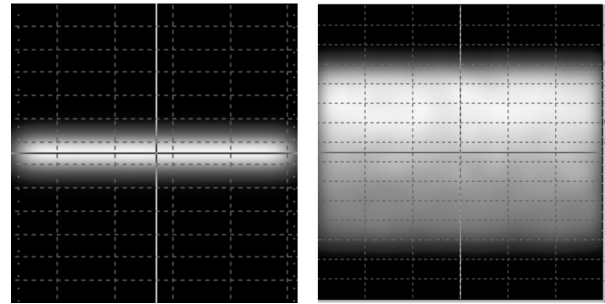


图 3 CPC 对光线的改变效果图

Fig.3 Beam's output situation of CPC



(a) 垂直照射

(b) 掠射

(a) Vertical irradiation

(b) Grazing irradiation

图 4 CPC 输出光斑图

Fig.4 Output beam spot of CPC

该灯具设计的一个重要要素是光源模块的排列, 光源模块发出的光线以照度圆的形式叠加合适的排列方式可以消除混光暗区提高均匀度。本灯具设计采用光源模块对称双边线形排列的方式, 如图 5 所示, 根据图 5 进行整灯出光效果的分析。

将 LED 辐射照度分布近似朗伯分布处理<sup>[9]</sup>( $\theta$  为发射角度):

$$E(r, \theta) = E_0(r) \cos \theta \quad (5)$$

经过 CPC 反光杯汇聚后, 在  $xz$  平面和  $yz$  平面照度分布均为压缩的朗伯分布

$$E(x, y_0, z, \theta) = E_0(x, y_0, z) \cos \left( \frac{\pi}{2\theta_{\max_1}} \theta \right) \quad (6)$$

$$E(x_0, y, z, \theta) = E_0(x_0, y, z) \cos \left( \frac{\pi}{2\theta_{\max_2}} \theta \right) \quad (7)$$

式中:  $\theta_{\max_1}$  和  $\theta_{\max_2}$  为光源模块在  $xz$ 、 $yz$  平面上的发散角。根据叠加原理, 可得面板上任一点  $(x, y, z)$  的照度  $E(x, y, z)$  公式为:

$$E(x, y, z) = \frac{A_{LED} L_{LED} \left| y \sin \alpha + z \frac{\pi}{4\theta_{\max_1} \theta_{\max_2}} \cos \alpha \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ \left[ x - (N+1-2n) \left( \frac{d}{2} \right) \right]^2 + \left( y \cos \alpha - z \frac{\pi}{4\theta_{\max_1} \theta_{\max_2}} \sin \alpha \right)^2 + \left( y \sin \alpha + z \frac{\pi}{4\theta_{\max_1} \theta_{\max_2}} \cos \alpha \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}$$

$$A_{LED}L_{LED} \left| y \sin(\pi - \alpha) + \left( z \frac{\pi}{4\theta_{max_1}\theta_{max_2}} - l \right) \cos(\pi - \alpha) \right| \tag{8}$$

$$\sum_{n=1}^N \left\{ \left[ x - (N+1-2n) \left( \frac{d}{2} \right) \right]^2 + \left( y \cos(\pi - \alpha) - \left( z \frac{\pi}{4\theta_{max_1}\theta_{max_2}} - l \right) \sin(\pi - \alpha) \right)^2 + \left( y \sin(\pi - \alpha) + \left( z \frac{\pi}{4\theta_{max_1}\theta_{max_2}} - l \right) \cos(\pi - \alpha) \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}$$

式中： $L_{LED}$  为 LED 芯片的辐射照度； $A_{LED}$  为 LED 芯片的发光面积； $N$  为灯具一侧光源模块的数量，光源模块沿  $x$  方向等间距排列； $d$  为光源模块间距； $\alpha$  为投射角即光源模块光轴方向与  $z$  轴夹角； $l$  为灯具宽度。

由公式(8)可见，模块间距  $d$ 、投射角  $\alpha$ 、灯具宽度  $l$ 、光源模块数量  $N$  等都将对出光面板上的照度产生影响，随着光源模块间距  $d$  和灯具宽度  $l$  的增大，出光面板上某一点  $(x, y, z)$  的照度将减小，进一步地将会影响面板上的平均照度和最大/最小照度，而根据均匀度的计算公式：均匀度=最小照度/平均照度， $d$  和  $l$  的变化同时也将对均匀度造成影响。另外，从图 4 可以直观地看出：通过控制掠射角度可以控制掠射光斑的大小，因此  $\alpha$  的变化首先会带来光斑大小的变化，这就带来了出光面板上混光暗区大小的变化，进而影响了均匀度，公式(8)也指出了  $\alpha$  对于每一点处照度的影响，因此  $\alpha$  的变化同样会带来照度和均匀度的变化。

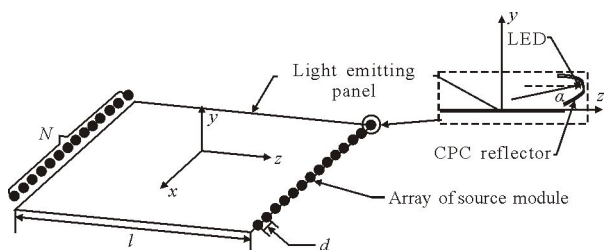


图 5 灯具简易理论分析模型图

Fig.5 This light's simple model to analysis

## 2 使用 Taguchi 方法设计实验

使用 Taguchi 方法设计实验，首先是要选定品质特性及判定品质特性的理想机能。对于平板灯的出光效果问题，其品质特性有出光面板上的照度均匀度及最大照度。在设计实验时，为了有效评判实验的结果，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。因此，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。由公式(8)分析可知，直接影响该平板灯出光效果的因子有相邻光源模块之间的间距  $d$ 、投射角  $\alpha$ 、灯具宽度  $l$ ，进一步的，灯具厚度  $h$  也将对整灯出光效果产

生影响。然后根据当前的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。该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。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，对新的设计值作确认实验。

根据第 1 节的理论分析，Tracepro 中实验初始模型如图 6 所示，其中定义 LED 为  $4\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 1.5\text{ mm}$ ，每个芯片发光功率效率为  $90\text{ l m/W}$ ，功率为  $1\text{ W}$ ，发光面出射光线 20 000 条，在灯具设计过程中，设定光源模块数量一定，为 30 个，灯具两侧每侧各 15 个，在光源模块阵列的下侧设置接收面板即整灯出光面板。各因子的水准设置如表 1 所示。由于

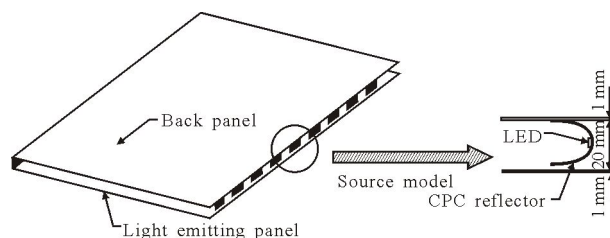


图 6 实验初始模型图

Fig.6 Initial simulation model of this panel light

表 1 出光效果影响因子及其控制水准

Tab.1 Effect of factors and its control levels

Symbol	Parameter discription	Number of levels	Level 1	Level 2	Level 3
A	Distance between these light source modules, $d/\text{mm}$	3	0	5	10
B	Width of the lamp, $l/\text{mm}$	3	180	220	260
C	Projection angle, $\alpha/(\text{°})$	3	2	4	6
D	Thickness of the lamp, $h/\text{mm}$	3	20	24	28

CPC 将 LED 的输出光进行了汇聚,若光源模块间距过大会使得由于混光暗区的加大降低整灯均匀性,使得实验数据失去一定的参考价值,因此光源模块间距  $d$  为 0、5、10 mm;灯具宽度  $l$  为 180、220、260 mm,以避免产生局部过亮或过暗;投射角选择

$2^\circ$ 、 $4^\circ$ 、 $6^\circ$  以保证获得较大的掠射光斑;灯具厚度  $h$  (mm) 为 20 mm、24 mm、28 mm。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。

表 2 采用  $L_9(3^4)$  直交表实验设计

Tab.2  $L_9(3^4)$  orthogonal array

Experiment number	A	B	C	D	Uniformity	Maximum illumination/lx	S/N of uniformity	S/N of maximum illumination
1	1	1	1	1	98.16%	35 350	39.84	90.97
2	1	2	2	2	91.64%	34 000	39.24	90.63
3	1	3	3	3	88.47%	30 400	38.94	89.66
4	2	1	2	3	75.97%	31 630	37.61	90.00
5	2	2	3	1	74.13%	32 890	37.40	90.34
6	2	3	1	2	90.91%	21 090	39.17	86.48
7	3	1	3	2	82.61%	28 790	38.34	89.18
8	3	2	1	3	76.99%	20 580	37.73	86.27
9	3	3	2	1	92.25%	20 270	39.30	86.14

### 3 模拟与分析

#### 3.1 实验数据分析

表 2 中所述 S/N 值,根据品质特性形态,可分两种类型进行计算<sup>[10]</sup>:

(1) 望大特性,其品质特性越大越好,也就是品质特性的理想机能无限大。其 LTB(S/N)公式为<sup>[13]</sup>:

$$LTB(S/N) = -10 \log \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i}}{n} \quad (9)$$

(2) 望小特性,其品质特性越小越好,也就是品质特性的理想机能为零。其 STB(S/N)公式为<sup>[10]</sup>:

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

公式(9)、(10)两式中; $y_i$ 表示第  $i$  个品质特性; $n$  为实验次数。

该实验的品质特性为照度均匀度及最大照度,对于该品质特性,希望机能越大越好,所以采用望大特性计算 S/N 值(详见表 2)。同时,图 7 给出各水准

的 S/N 值的统计图。从图中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 7 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 7(a)中的结果,照度均匀度最优化的组合解是 A1B3C1D2,其中 A1 表示光源模块间距为 0,B3 表示灯具宽度 260 mm,C1 表示投射角为  $2^\circ$ ,D2 表示灯具厚度 24 mm。得到照度均匀度为 98.87%,最大照度为 29 472 lux。最大照度最优化的组合解是 A1B1C3D1,其中 A3 表示光源模块间距为 10 mm,B1 表示灯具宽度 180 mm,C3 表示投射角为  $6^\circ$ ,D1 表示灯具厚度 20 mm。最大照度值为 42 587 lux,照度均匀度为 88.43%。优化组合较符合第 1 节的理论分析,随着光源模块间距  $d$  和灯具宽度  $l$  的增大,出光面板上某一点  $(x, y, z)$  的照度将减小,因此对于 A、B 两因子最大照度的取得应在  $d$  和  $l$  最小处,也即 A1、B1 处,但是由于坐标值不同,导致  $d$  和  $l$  变化,每一点处照度的变化量  $\Delta E$  不同,因此根据均匀度的计算公式:均匀度=最小照度/平均照度,在  $d$  和  $l$  增大的过程中出现了如图 7 所示的均匀度先减后增的情形,A、B 因子若要取得照度均匀度的

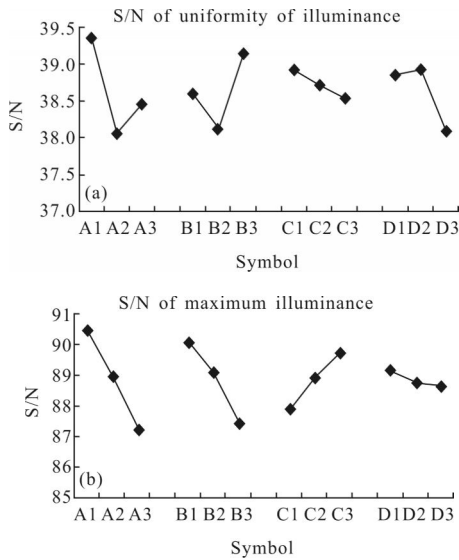


图 7 各水准对应的照度均匀度(a)和最大照度(b)的 S/N 值

Fig.7 S/N of uniformity of illumination (a) and maximum illumination (b) at different levels of different factors

最大值就应在图中所示 A1、B3 处取得。另外,在  $d$  和  $l$  一定的情况下,在出光面板上任一点处的照度也受到  $\alpha$  和坐标值  $(x,y,z)$  的控制,其中  $y$  值受灯具厚度  $h$  控制并随  $h$  的增大而增大,同样,对于出光面板上不同的点(即不同的  $x,y,z$  值)照度的变化是不同的,这就使得其均匀度的变化存在一个复杂的过程,但是其最大照度可以根据公式(8)分析得:随着  $\alpha$  的增大而逐渐增大,随着  $h$  的增大而逐渐减小,使得 C、D 因子最大照度在 C1 和 D2 处取得。均匀度的变化可定性分析为在一定的厚度  $h$  下随着  $\alpha$  增大,更多的光线以大角度投射在出光面板上,即导致掠射并叠加在出光面板上的照度圆面积减小,从而带来了出光面板中央部分由于叠加面积小而照度下降,靠近光源一侧由于叠加面积大而照度增大,进而导致两侧过亮、中央过暗而产生均匀度降低,因此要在投射角  $\alpha$  最小值处取得均匀度的最大值,即 C 因子要在 C1 处取得均匀度的最大值;而对应一定的角度  $\alpha$  在厚度  $h$  增大的过程中出光面板上照度圆的叠加面积将会出现先增大后减小的过程,因此叠加面积最大的位置将在  $h$  变化过程中的某一中间值处取得,对应该分析过程应在 D2 处取得均匀度最大值。

综上所述,为了兼顾灯具的照度及均匀度,进一步分析图 7(a)和(b),B1、B3 主要影响最大照度,D1、D2 相比较之下对于均匀度的影响较大,而 C1、C3

对于均匀度和最大照度的影响程度差别不大,综上所述选择 A1B1C2D2 为最优解,其中 A1 表示光源模块间距为 0,B1 表示光源阵列间距 180 mm,C2 表示投射角为  $4^\circ$ ,D2 表示灯具厚度 24 mm,得到最优解仿真结果如图 8 所示。

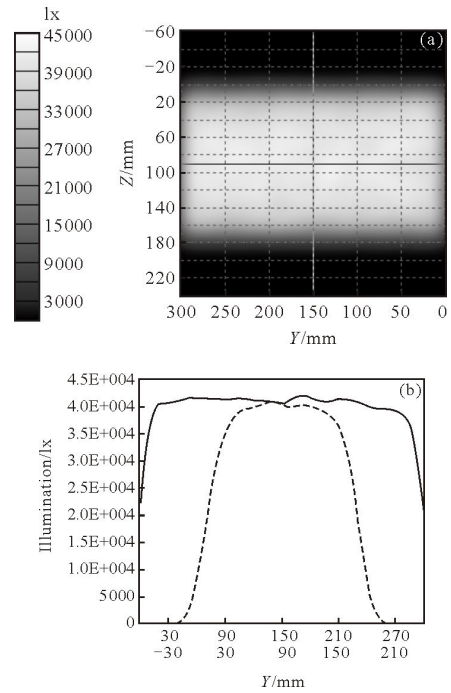


图 8 组合 A1B1C2D2 的效果图

Fig.8 Illumination maps for A1B1C2D2

此最优解模拟出来的平板灯中,最大照度 42 418 lx,均匀度 92.28%,最大照度接近最大但均匀度仍有待提高,这是因为在最优解选择时更倾向于照度的提升。可见,通过最优解得出的组合距离设计的品质要求还有差距,因此,还要通过对参数进行合理的调整达到目标值。

### 3.2 变异数分析(Analysis of Variance, ANOVA)

采用 ANOVA 方法进一步分析估量各因子对品质影响的贡献度。ANOVA 分析要求因变量必须是定距变量,随机样本,各个组的总体是正态分布,子总体的方差相等。ANOVA 的首要目的是评估实验误差并以百分比的形式来协助判断。ANOVA 分析的基本思想就是根据实验设计的类型将全部测量值总的变异分解成两个或多个部分,每个部分的变异可由某个因素的作用加以解释,通过比较各部分的均方与随机误差项均方的大小来进一步推断各研究因素对实验结果有无影响。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”的强弱通过采用参数  $\rho$  表示<sup>[10]</sup>:

$$\rho = \frac{SS_d}{SS_T} \quad (11)$$

$$SS_T = SS_d + SS_e \quad (12)$$

式中: $SS_d$ 表示方差和; $SS_e$ 表示错误的方差和(考虑到在此次分析中, $SS_e$ 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<sup>[10]</sup>:

$$SS_d = \sum_{i=1}^m (\eta_i - \eta_m)^2 \quad (13)$$

式中: $m$ 为实验数; $\eta_i$ 为每个因子第  $i$  次实验的 S/N 比; $\eta_m$ 为 S/N 值的平均值,在实验中  $\eta = LTB/(S/N)$ 。

表 3 和表 4 为各因子分别对均匀度和最大照度产生影响的贡献度。结果表明,光源模块间距对于均匀度影响最强烈(因子 A, 42.00%);但是灯具宽度(因子 B)以及灯具厚度(因子 D)对于均匀度的影响因子均在 20% 以上,因此仍然需要通过调整灯具的宽度和厚度对均匀度进行优化。影响到最大照度的因素主要是光源模块的间距(因子 A, 49.43%),灯具宽度

表 3 各因子对照度均匀度的贡献率

Tab.3 Contribution rate of different factors of uniformity of illumination

Factor	Contribution rate
A	42.00%
B	25.41%
C	11.92%
D	20.67%

表 4 各因子对最大照度的贡献率

Tab.4 Contribution rate of different factors of maximum illumination

Factor	Contribution rate
A	49.43%
B	33.40%
C	15.82%
D	1.35%

的影响次之(因子 B, 33.4%)。

由于光源模块发出的光线都以压缩的照度圆的叠加方式进行混光,随着光源模块间距的加大,会造成两个照度圆交叠面积下降,进一步影响灯具的照度与均匀度。为了获得最大的照度和均匀度,应使得照度圆具有最大的交叠面积,所以光源模块间距选择 0 mm,即光源模块紧密排列。由于 B 因子对于均匀度和照度均有较大的影响程度,需进一步研究 B 因子与二者之间的关系,在 3.1 节分析所得最优组合的基础上修改 B 因子得到如图 9 所示的 B 因子与照度和均匀度的关系。根据图 9,当灯具宽度为 200 mm 时照度均匀度以及最大照度值均已满足设计需求,因此选取灯具宽度为 200 mm。通过微调灯具厚度到 22 mm 使得最终达到了如图 10 所示的优化效果,其中照度均匀度为 95.87%,最大照度为 39 870 lux。

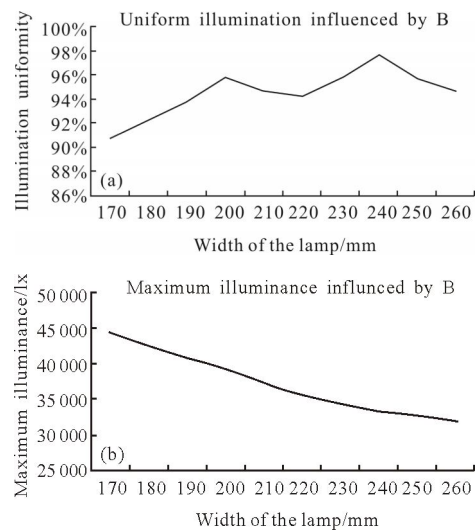
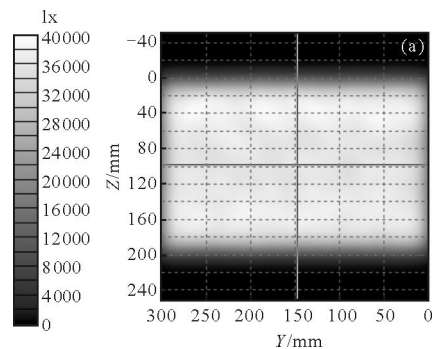


图 9 灯具宽度(因子 B)与照度均匀度(a)和最大照度(b)之间的关系

Fig.9 Curves of the relationship between the width of lighting (factor B) and the uniformity of illumination (a) the maximum of illumination (b)



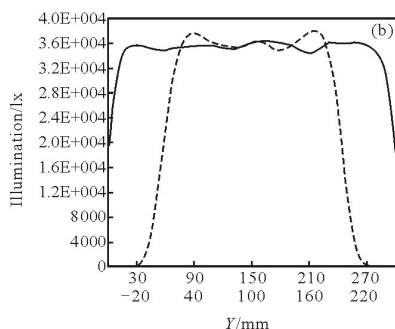


图 10 灯具最终优化效果

Fig.10 Final illumination map after optimization

### 4 结 论

文中设计了一种无导光板的 LED 平板灯,在设计过程中通过 Taguchi 方法对影响灯具照度和均匀度的因子进行实验研究,并通过 Tracepro 软件模拟仿真。经过 ANOVA 分析方法对因子的影响程度进行分析,分析表明:光源模块间距对该平板灯的均匀度影响最大,占有 42.00% 的影响地位;而对于最大照度,主要影响因子同为光源模块间距,占 49.43%,灯具宽度次之,占 33.40%。进一步,调节灯具宽度,得到灯具宽度与均匀度和最大照度的关系,为了兼顾最大照度和均匀度,选取灯具宽度 200 mm。最后,微调灯具厚度至 22 mm。最终优化所得均匀度 95.87%,最大照度 39 870 lux。综上,文中提出一种侧入式无导光板 LED 平板灯,并将 Taguchi 方法引入该灯具设计,最终在短时间内设计出一款 300 mm×200 mm、厚度 22 mm、功率 30 W 均匀度、照度达到目标值的侧入式平板灯,大幅度简化了设计流程。

### 参考文献:

[1] Chen Haowei, Wen Shangsheng, Ma Bingxu, et al. Design of

ultra-thin direct-down LED panel with tapered optical elements based on taguchi method [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(10): 1022003. (in Chinese)

[2] Ma Bingxu, Wen Shangsheng, Chen Yingcong, et al. Edge-lighting natural light flat panel light without light guide plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, 44(7): 0722002. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 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 Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0322002. (in Chinese)

[5] Su Zhouping, Que Lizhi, Zhu Zhuowei, et al. Optical system design of the compact collimator for LED source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 022203. (in Chinese)

[6] Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu, et al. Design for LED uniform illumination reflector based on tendue[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2297–2301. (in Chinese)

[7] Liu Lingzhi, Li Jihong. The optical performance of compound parabolic concentrators (CPC)[J]. *Energy Technology*, 2006, 27(2): 52–59. (in Chinese)

[8] Wang Le, Zhang Shusheng, Zhai Jing. Modeling of LED reflector cup based on compound parabolic concentrator[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(2): 1–6. (in Chinese)

[9] Wu Fengtie, Huang Qilu. A precise model of LED lighting and its application in uniform illumination system [J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, 7(5): 334–336. (in Chinese)

[10] 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.