

doi: 10. 3788/gzxb20174605. 0523003

高均匀度超薄直下式 LED 平板灯混光元件的设计与研究

庞培元¹, 文尚胜^{1,2}, 黄雅琪¹, 张帅¹, 陈心雅¹, 陈浩伟^{1,2}, 马丙戌^{1,2}, 康丽娟³

(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 发光材料与器件国家重点实验室, 广州 510640)

(3 华南师范大学 美术学院, 广州 510631)

摘 要: 为了设计更好的 LED 平板灯光学结构, 解决现存的直下式 LED 平板灯厚度大, 光源密度大的缺点, 提出了两种兼具反射、投射作用的混光元件结构: 椎台结构和半球型结构, 并将其应用于超薄直下式 LED 平板灯的设计, 以增加光线的耦合距离来提高出光均匀度。借助 Tracepro 软件研究两种不同结构混光元件应用于 LED 平板灯时的出光均匀度和光效率, 运用 Taguchi 方法设计实验进行研究。结果表明, 带有棱锥型结构元件的灯具均匀度达到 95.42%, 光效率达到 92.72%, 而带半球型结构元件灯具均匀度达到 97.67%, 光效率达到 92.65%, 其均匀度高于棱锥结构的原因是棱锥形状混光元件反射面的定向反射导致光线方向过于集中。

关键词: 混光元件; 平板灯; LED; Tracepro; Taguchi; 光均匀度; 几何光学

中图分类号: O439

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)05-0523003-10

Design and Research of the Light Mixing Component for High-uniformity and Ultra-thin Direct-down LED Panel Light

PANG Pei-yuan¹, WEN Shang-sheng^{1,2}, HUANG Ya-qi¹, ZHANG Shuai¹,
CHEN Xin-ya¹, CHEN Hao-wei^{1,2}, MA Bing-xu^{1,2}, KANG Li-juan³

(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)

(3 Academy of Fine Arts South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

Abstract: In order to design better optical structure of LED panel light and solve the existing direct-down LED panel light's shortcomings of large thickness and high light source density, this paper puts forward two mixed optical components including vertebral structure and half spherical structure that have both reflection and projection and are applied to the design of ultra-thin direct-down LED panel light to increase the coupling distance of light to improve the light uniformity. The light uniformity and light efficiency are researched when two optical components with different structure are applied to LED panel light by Tracepro software, and further experiments were carried out by Taguchi method. The results show that the light uniformity of the lamps with vertebral structure's components is 95.42% and its energy

基金项目: 教育部国家级大学生创新创业训练计划项目 (No. 201610561075)、广东省科技计划项目 (Nos. 2013B090600048, 2015B010127004)、广东省应用型科技研发专项 (No. 2015B010134001)、广东省扬帆计划引进创新创业团队专项 (No. 2015YT02C093)、广州市科技计划项目 (No. 2013J4300021) 和广州市产学研协同创新重大专项 (No. 201604010006) 资助

第一作者: 庞培元 (1995-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为 LED 二次光学设计。Email: pypscut@163.com

导师 (通讯作者): 康丽娟 (1977-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为 LED 灯具设计。Email: kanglijuan@senu.edu.cn

收稿日期: 2016-12-21; **录用日期:** 2017-03-03

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

efficiency is 92.72% while the light uniformity of the lamps with half spherical structure's components is 97.67% and its energy efficiency is 92.65%, the reason why its light uniformity is higher than vertebral structure's is that the optical component with vertebral structure results in too concentrated light direction due to the directional reflection of the reflecting surface.

Key words: Light mixing component; Panel light; LED; Tracepro; Taguchi; Light uniformity; Geometrical optics

OCIS Codes: 230.0230; 230.2090; 230.3120; 220.2740

0 引言

在照明领域,LED作为新型绿色照明光源,具有直流无频闪、高效节能、低碳、体积小等系列特点,可以提供环保、稳定、高效的照明^[1].与传统光源相比较,LED光源的光能分布(光型和发光角度等)可控制,针对不同的照明场合能够设计出最适合的照明灯具,进一步地,相较于传统光源,LED光源具有更长的使用寿命,能实现无眩光照明,提高了照明质量,有效节省能源.因此LED光源正逐步取代传统光源并向着高亮度、低成本、平民化的方向飞速发展.

近年来,由于人们生活水平的不断提高,对照明灯具的要求也逐步提高,传统灯具(白炽灯、钠灯、卤素灯等)无法完全满足室内照明对于高均匀度,小体积和美观等方面需求,LED平板灯应运而生.相较于传统灯具,LED平板灯具有光照均匀,体积小,节能美观等优点.随着导光板生产技术的进步和LED亮度的与时俱增,LED平板灯正向超薄方向发展^[2].

目前,LED平板灯的入光结构主要分为直下式与侧入式两种,侧入式LED平板灯具有厚度更小的优点,但同时由于采用了导光板进行混光,增加了成本和重量,且光损较大.直下式LED平板灯相对于侧入式而言,由于不需要导光板,结构简单,成本较低且光效率高.由于直下式LED平板灯光源直接安装在底板上,要想得到理想的均匀度,必须提升厚度以增加混光距离,且现阶段的直下式LED平板灯光源阵列多采用矩形网格阵列,光源密度大而导致功耗较大,在追求轻薄节能的市场大环境下,这两个缺点限制了直下式LED平板灯的发展.对此,赖稳萍^[12]等基于边缘光学理论和网格划分法,通过Snell公式计算得到一种双自由曲面大角度透镜,减小了直下式LED平板灯的光源密度,提高了均匀度;刘晓博^[13]探究了有无微结构扩散板、不同光学性能的微结构扩散板对LED灯具的光学性能的影响;陈浩伟^[4]等提出了一种带有圆锥台混光元件的超薄直下式平板灯,利用漫反射背板和混光元件的反光增加了混光距离从而降低直下式平板灯的厚度.本文在总结前人研究的基础上,设计了两种结构不同的混光元件,并将其应用到超薄直下式LED平板灯的设计中,以期在超薄的前提下达到高均匀度的效果,并对两种不同结构的最终效果进行比较和分析.

本文以15 mm厚度作为理想目标设计超薄直下式LED平板灯,提出半球和棱锥两种结构的混光元件的设计方案,并对其进行理论推导,借助Tracepro软件进行分析,并结合taguchi方法设计并进行实现优化最终的效果.为超薄直下式LED平板灯的设计提供了新的思路和新的方法,具有一定的借鉴指导意义.

1 物理模型和理论基础

1.1 灯具模型设计

添加混光元件的直下式LED平板灯的整体结构如图1所示.主要结构有LED芯片,外壳,混光元件,反光板和出光面板.根据预期设计,平板灯内部高度设定为15 mm.LED芯片采用常用的1W白光LED,在LED阵列设计上,传统的直下式平板灯一般采用矩形排布方式,但由于LED是类朗伯光源,在受照面上以圆形进行照度叠加,矩形的排布方式存在混光盲区比例较大的问题,有碍于均匀度的提升.三角形的排布方式可以有效地减小混光盲区,但相比矩形排布而言增加了光源密度,提高了成本^[3].

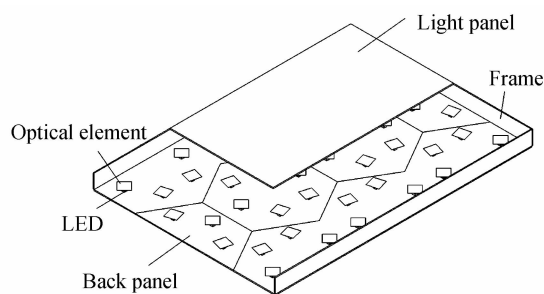


图1 整灯模型

Fig. 1 Structure of the light

本文采用的是一种六边形的排布方式,相比传统的矩形排布,具有更高的均匀度且能够实现更低的光源密度,提高了光利用率.最后通过六边形的拼接构成整灯结构.

1.2 理论推导

现有的直下式LED平板灯为了得到合适的均匀度,必须控制其厚度以增加混光距离,使光线充分耦合,这也是阻碍直下式LED平板灯向更薄的方向发展的主要原因.陈浩伟^[4]等提出了利用反射来增加混光距离,在传统的直下式LED平板灯中加入了含反射面圆锥台混光元件,此方法实现了在不增加灯具厚度的条件下,增加了混光距离,在对混光元件结构进行优化改良后,甚至达到了提高均匀度并减小灯具厚度的效果.但是,该圆锥台模型由于厚度较小,锥度较大,加大了工艺难度,且旋转对称的圆锥台对光线存在反射方向较为集中的问题,容易出现局部亮区和局部暗区.通过对几何光学的分析以及根据现阶段注塑技术的发展情况^[14-16],本文设计了一种工艺难度较低棱锥形结构混光元件和反射方向更广的半球形混光元件,通过数学理论推导,对比采用两种不同混光元件的直下式LED平板灯的出光均匀度,寻找更优的光学架构.

1.2.1 棱锥型元件结构

设计的棱锥形混光元件结构如图2所示,整个元件材料为PMMA,上下表面透光,侧面为反光镜面.

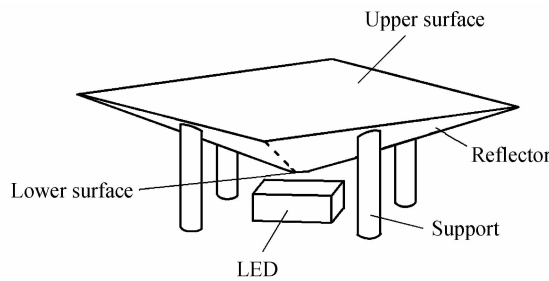


图2 棱锥形混光元件结构
Fig. 2 Structure of the pyramid component

由于灯具内部各参量的尺寸均为小尺寸,因此此时的LED不可以当作点光源处理,而应采用扩展光源的设计方法.陈俄振^[5,13]等提出了一种对于旋转对称透镜元件,可以把扩展光源近似为点光源的方法,用以简化推算过程.

如图3所示,光线路径主要分为直射路径,折射路径和反射路径,除直接照射到出光面的直射光线外,照射到元件侧面的光线通过多次反射增加混光距离以达到充分耦合,而从元件底部通过折射到达出光面的光线用于弥补由于元件遮光造成的暗区,三者结合以达到出光面的高均匀度.

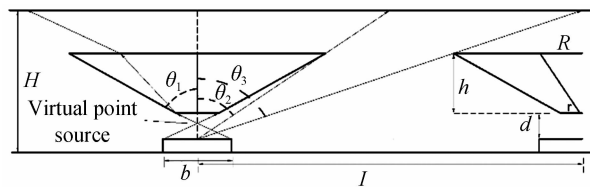


图3 灯具光线分析
Fig. 3 Ray analysis of the light

影响灯具出光均匀度的主要参量有棱锥台元件上表面内接圆半径 R 、下表面内接圆半径 r 、厚度 h 、下表面与光源的距离 d 、两个元件的间距 l 以及灯具内部高度 H ,本文设定灯具内部目标高度为15 mm.光学路径分为三个部分,即直射路径、透射路径和反射路径,因此可以分类讨论三部分光线.对于直射部分的光线,取光源中心为坐标原点,则其在出光面的照度为^[6]

$$E_s(\theta) = \frac{I_0 \cos^3 \theta}{H^2} \quad \theta_2 < \theta < \theta_3 \quad (1)$$

其中 I_0 为光源面法线方向的光照强度, θ 为光线方向与 z 轴的夹角,即光线的偏向角, $\theta_2 = \arctan \frac{R}{h+d}$, $\theta_3 = \arctan \frac{l-R}{h+d}$.

对于透射部分的光线,拟采用陈俄振^[5,13]提出的方法,但由于棱锥台不是旋转对称形,不可直接将扩展

光源近似为点光源. 结合边缘光线理论分析, 棱锥台上下表面最长直线长度为矩形对角线长度, 最短长度为中线长度, 分别讨论两种极限情况可以知道, 其两个虚拟点光源坐标接近, 可近似为一点. 取该点作为坐标原点, 根据 Snell 定律, 当光线入射角为最大入射角 θ_1 时, 设 α 为折射角, n 为透镜的折射率, 空气折射率取 1, 有 $\sin \theta_1 = n \sin \alpha$.

进一步得到透射部分光线在出光面的照度为

$$E_t(\theta) = \frac{l_0 \cos^3 \theta}{\left\{ H - \left(d - \frac{2rd}{b+2r} \right) - \left[H \times 1 - \frac{\tan \theta_1}{\tan \alpha} \right] \right\}^2} \quad \left(0 < \theta < \theta_1, \theta_1 = \arctan \frac{b+2r}{2h} \right) \quad (2)$$

对于反射部分的光线, 光学入射到高漫反射面上, 可近似为一个次朗伯光源^[7]. 又式(1)与式(3)中的坐标系原点可近似重合, 对于 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 的光线, 经棱锥形元件反光面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 为出射光线与反光面交点的横坐标, β 为元件上表面与反光面的夹角, $x_0 = \frac{d}{1 - \tan \theta \tan \beta}$, $\tan \beta = \frac{h}{R}$.

则在 $\theta_1 < \theta < \theta_2$ 角度变化范围内, 对应有 x 的变化范围 $x_1 < x < x_2$, 在该变化范围内, 有连续的次朗伯光源, 设次朗伯光源的法线方向发光强度为 I_f , 出射方向与法线的夹角为 ω , 则该连续次朗伯光源在受照面上造成的照度为

$$E_f = \int_{x_1}^{x_2} \frac{h I_f \cos^3 \omega}{H^2} dx \quad (3)$$

对于受照面上某点的照度, 是按照式(4)线性叠加的

$$E(x, y) = \sum_{i=1}^n E_i(x_i, y_i) \quad (4)$$

结合式(1)~(4), 可以得到 N 个光源在出光面上某点所造成的照度为

$$E(\theta) = \sum_N E_s(\theta) + \sum_N E_t(\theta) + \sum_N E_f = \sum_N \frac{I_0 \cos^3 \theta}{H^2} + \sum_N \frac{l_0 \cos^3 \theta}{\left\{ H - \left(d - \frac{2rd}{b+2r} \right) - \left[H \times \left(1 - \frac{\tan \theta_1}{\tan \alpha} \right) \right] \right\}^2} + \sum_N \int_{x_1}^{x_2} \frac{h I_f \cos^3 \omega}{H^2} dx \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 组成棱锥形混光元件结构的参量 R 、 r 和 h 均对出光面照度产生影响, 进一步影响出光面照度均匀度. 又由于棱锥形混光元件不是旋转对称元件, 可知其旋转角度也会对均匀度造成一定的影响, 因此把棱锥形混光元件的上表面内接圆半径 R 、下表面内接圆半径 r 、厚度 h 以及旋转角度作为考察变量进行进一步实验.

1.2.2 半球型元件结构

设计的半球型混光元件结构如图 4 所示, 设计思路与棱锥型类似. 由于半球形混光元件为旋转对称元件, 可以采用虚拟点光源方法进行处理. 与棱锥形结构相比较, 采用半球形结构的灯具其光线路径亦可分为直射路径、透射路径和反射路径三类, 将光线分为直射光线、透射光线和反射光线三部分. 其中直射部分光线和透射部分光线在受照面上造成的照度与式(1)、式(3)相同, 反射部分光线在受照面上造成的照度分析思路采用次朗伯光源思路, 虽然在公式推导上与式(3)有所不同, 但可以预知最终影响均匀度的参量为半球型混光元件的上表面半径 R 、下表面半径 r 以及元件厚度 h . 因此不再对公式进行累述.

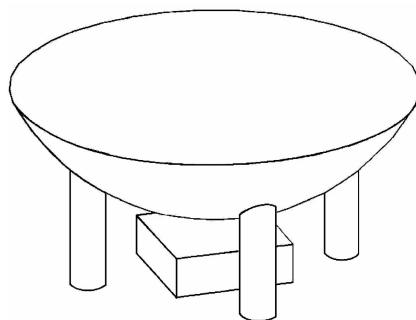


图 4 半球型混光元件结构
Fig. 4 Structure of the halfball component

2 实验与讨论

由公式推导可以看出,无论是棱锥形元件还是半球形元件,其上下表面尺寸与元件厚度均对灯具出光面均匀度产生影响.为了比较两种结构的最终效果,需求出两种结构的最优尺寸.本文首先针对 R, r 和 h 三个变量进行预实验,通过控制变量法观察变量对均匀度的影响.

2.1 单一变量分析

为了给下一步 Taguchi 实验取基准值,首先对两种元件结构的三个变量对灯具均匀度的影响进行单一变量分析,每个变量取 7 个水平,通过 Tracepro 软件进行仿真并计算其出光面照度均匀度.其结果如图 5 至图 7 所示,用图例来说明曲线含义,横坐标为水平,同一个变量用方点圆点来表示棱锥或者半球.

由图 5 至图 7 可以看出,对于棱锥型,其最高均匀度分别分布在 $R=6.0, r=0.35$ 和 $h=2.8$ 处,而对于半球型,其最高均匀度分别分布在 $R=5, r=0.45$ 和 $h=2.7$ 处.由此可以进一步利用 Taguchi 实验设计方法求取最优解.值得注意的是,由于棱锥体不同的旋转角度对反光效果有一定的影响,因此把棱锥的旋转角度也引入为一个变量.

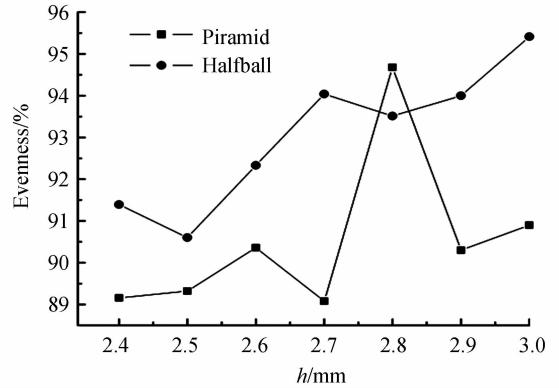


图 5 均匀度随元件厚度 h 的变化曲线
Fig. 5 The variation curves of the evenness with the component thickness h

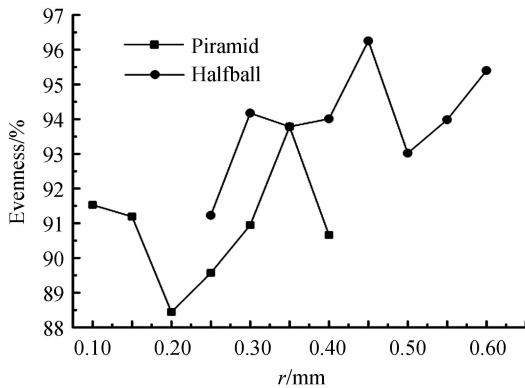


图 6 均匀度随元件下表面半径 r 的变化曲线
Fig. 6 The variation curves of the evenness with the lower surface radius r of component

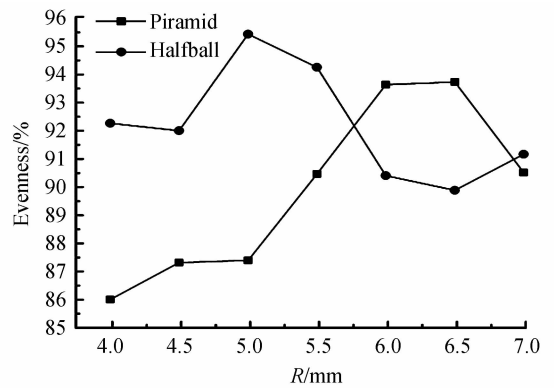


图 7 均匀度随元件上表面半径 R 的变化曲线
Fig. 7 The variation curves of the evenness with the upper surface radius r of component

2.2 Taguchi 实验设计优化

由 2.1 节的单一变量分析,分别得到两种结构的混光元件尺寸设计基准值,进一步地,需要设计实验求出两种混光元件结构的最佳结构尺寸.传统的实验方法是将被所取的基准值中的变量与水平进行组合一一实验,对于本次实验中的 4 变量 3 水平和 3 变量 3 水平,分别需要进行 4^3 和 3^3 组实验,实验次数较多.为了提高实验效率,减少实验次数,采用 Taguchi 实验设计方法

Taguchi 方法是由日本田口玄一提出的一种实验设计方法.在设计含有多变量多水平的实验中,通过结合正交表,计算方差值等,可有效减少实验次数,提高实验效率.

在本次实验中,使用 Taguchi 方法进行实验设计,首先要选定品质特性及判定品质特性的理想机能^[8-10].对于灯具结构的优化问题,要求得各元件结构的最优尺寸,首先确定出光面板上的照度均匀度为品质特性,对棱锥型元件,设定 R, r, h 和旋转角度为影响因子,对半球型元件,设定 $R, r,$ 和 h 为影响因子,由预实验的结果,取最高均匀度对应的变量值及上下两个水平,共 3 个水平.特别对于棱锥型元件的旋转角度变量,设定为 6 个棱角指向中心(下文简称角 Corner),6 个侧面指向中心(简称 Side)和 3 棱角 3 侧面指向中心

(简称 Half)3 个水平. 根据变量和水平数, 选取 $L_9(3^4)$ 直交矩阵, 每中元件结构只需进行 9 次实验. 除均匀度外, 光效率对于 LED 灯具也是非常重要的指标, 因此在下面的实验中同时考察均匀度与光效率两个品质特性.

2.2.1 Taguchi 试验方法

根据理论推导和预实验, 分别为两种元件结构选定因子和水平如表 1 和表 2 所示. S/N 值是将品质特性数量化的处理方法, 根据品质特性的需求, 可以分为望大特性和望小特性两种, 通俗地讲, 望大特性即品质特性越大越好, 望小特性即品质特性越小越好, 本文中均匀度属于望大特性, 其 S/N 值的计算公式为^[11]

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

将确定的因子和水平分别代入 $L_9(3^4)$ 直交矩阵中重新建立模型进行实验, 利用 Tracepro 软件仿真并计算出光面的照度均匀度, 光效率及其对应的 S/N 值, 如表 3 和表 4. 各因素水准对应的 S/N 值如图 8~图 11 所示, S/N 值越大, 对应的均匀度和光效率则越高.

表 1 棱锥型元件影响因子及其控制水准
Table 1 The effect of factors and its control levels of pyramid

Symbol	Name of factors	Quantity of levels	Level 1	Level 2	Level 3
A	h	3	2.6 mm	2.8 mm	3.0 mm
B	R	3	5.5 mm	6.0 mm	6.5 mm
C	r	3	0.3 mm	0.35 mm	0.4 mm
D	Rotation angle	3	Corner	Half	Side

表 2 半球型元件影响因子及其控制水准
Table 2 The effect of factors and its control levels of halfball

Symbol	Name of factors	Quantity of levels	Level 1	Level 2	Level 3
A	h	3	2.4 mm	2.7 mm	3.0 mm
B	R	3	4 mm	5 mm	6 mm
C	r	3	0.3 mm	0.45 mm	0.6 mm

表 3 采用 $L_9(3^4)$ 直角表实验设计(棱锥型)
Table 3 $L_9(3^4)$ orthogonal array (pyramid)

Symbol	A	B	C	D	Evenness/%	Energy efficiency/%	Evenness S/N	Energy efficiency S/N
1	1	1	1	1	97.25	93.59	39.76	39.42
2	1	2	2	2	95.79	92.93	39.63	39.36
3	1	3	3	3	93.83	92.31	39.45	39.31
4	2	1	2	3	96.07	93.97	39.65	39.46
5	2	2	3	1	95.22	93.22	39.57	39.40
6	2	3	1	2	94.10	92.55	39.47	39.33
7	3	1	3	2	93.56	94.27	39.42	39.49
8	3	2	1	3	95.51	93.59	39.60	39.42
9	3	3	2	1	95.52	92.92	39.60	39.36

表 4 采用 $L_9(3^4)$ 直角表实验设计(半球型)
Table 4 $L_9(3^4)$ orthogonal array (halfball)

Symbol	A	B	C	Evenness/%	Energy efficiency/%	Evenness S/N	Energy efficiency S/N
1	1	1	1	96.97	93.92	39.73	39.46
2	1	2	2	92.44	92.55	39.32	39.33
3	1	3	3	89.21	91.37	39.01	39.22
4	2	1	2	97.10	94.26	39.74	39.49
5	2	2	3	89.63	93.07	39.05	39.38
6	2	3	1	97.47	90.99	39.78	39.18
7	3	1	3	92.75	94.50	39.35	39.51
8	3	2	1	96.14	92.77	39.66	39.35
9	3	3	2	95.92	91.57	39.64	39.24

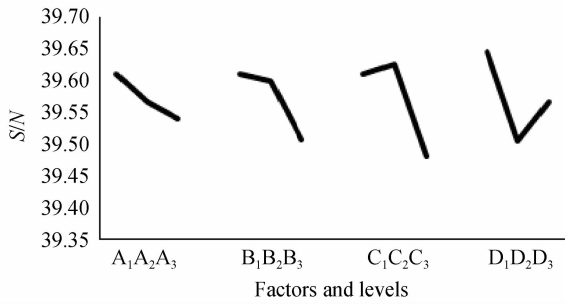


图8 棱锥型结构元件各因素水准对应均匀度的 S/N 值
Fig. 8 S/N of evenness of different factors at different levels

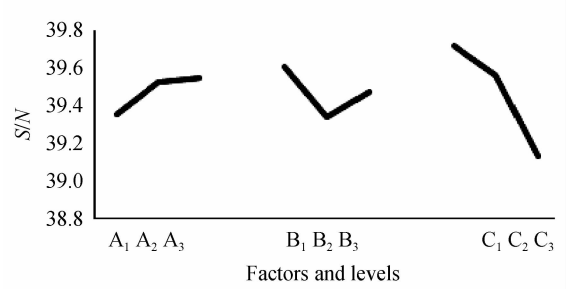


图9 半球型结构元件各因素水准对应均匀度的 S/N 值
Fig. 9 S/N of evenness of different factors at different levels

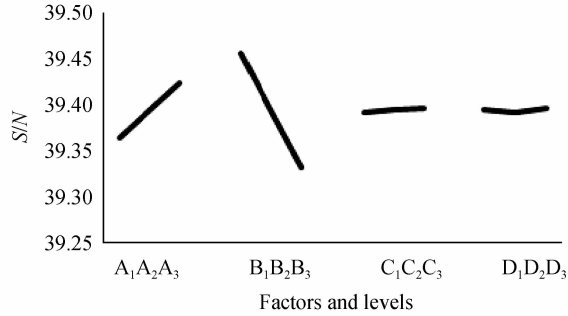


图10 棱锥型结构元件各因素水准对应光效率的 S/N 值
Fig. 10 S/N of energy efficiency of different factors at different levels

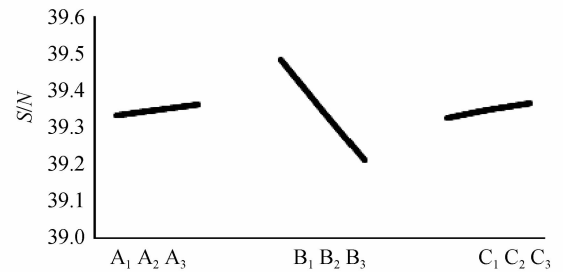


图11 半球型结构元件各因素水准对应光效率的 S/N 值
Fig. 11 S/N of energy efficiency of different factors at different levels

2.2.2 取最优解

由图8和图10可知,对棱锥型,均匀度的最优尺寸组合为 A1B1C2D1,即元件厚度 $h=2.6$ mm,上表面内接圆半径 $R=5.5$ mm,下表面内接圆半径 $r=0.35$ mm,棱锥6个棱角指向中心;光效率的最优尺寸组合为 A3B1C3D3,即元件厚度 $h=3$ mm,上表面内接圆半径 $R=5.5$ mm,下表面内接圆半径 $r=0.4$ mm,棱锥6个侧面指向中心;由图9和图11可知,对半球型,均匀度的最优尺寸组合为 A3B1C1,即元件厚度 $h=3.0$ mm,上表面半径 $R=4$ mm,下表面半径 $r=0.3$ mm;光效率的最优尺寸组合为 A3B1C3,即元件厚度 $h=3.0$ mm,上表面半径 $R=4$ mm,下表面半径 $r=0.6$ mm.对均匀度与光效率进行权衡,对比图8和图10可见,因素C和D对于光效率的影响不大,而对均匀度有较大的影响,而因素A对于均匀度的影响效果大于

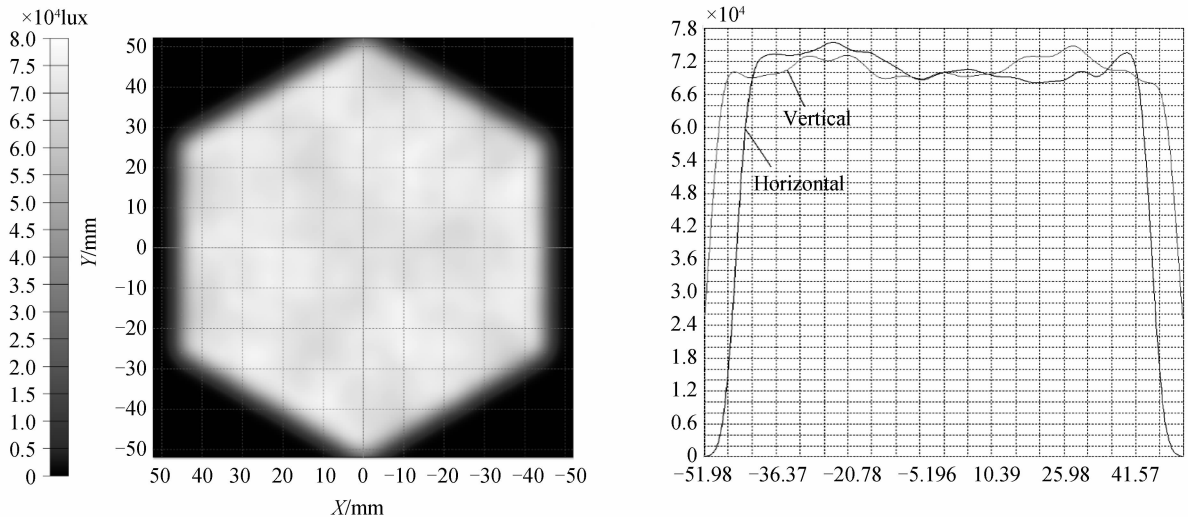


图12 棱锥型结构元件最优解
Fig. 12 Optimum solution of pyramid component

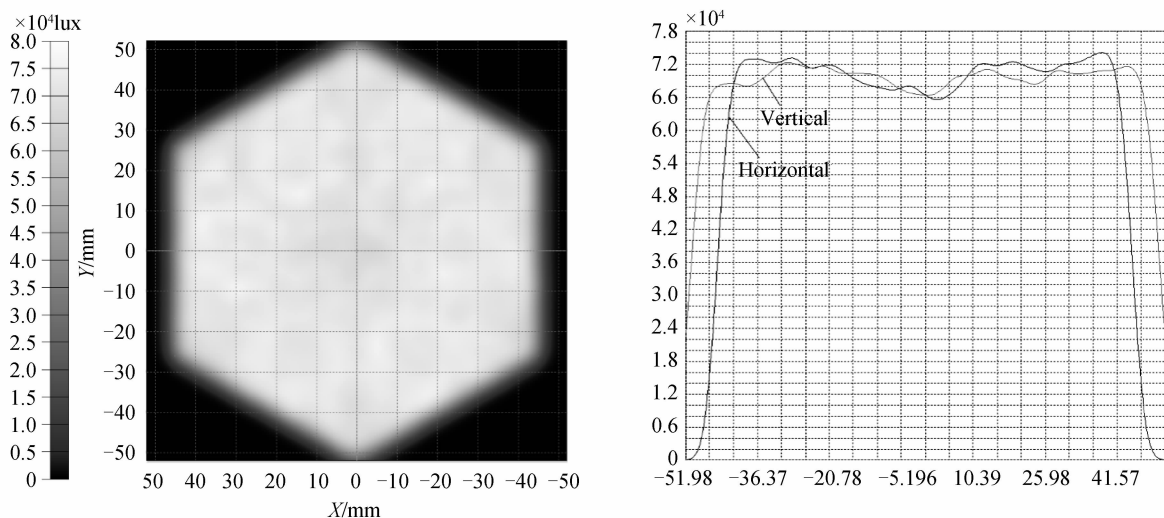


图 13 半球型结构元件最优解
Fig. 13 Optimum solution of halfball component

对光效率的影响效果,经权衡后取棱锥型最优尺寸组合为 $A_1B_1C_2D_1$. 同理,对比图 9 和图 11 可取半球型最优尺寸组合为 $A_3B_1B_1$.

利用 Tracepro 对两组最优解进行仿真得出,棱锥型结构元件灯具均匀度为 95.79%,光效率为 92.93%;半球型结构元件灯具均匀度为 97.47%,光效率为 92.97%. 如图 12 和图 13 所示,图中右方两条曲线分别为经过中心点的横截面和纵截面两个方向的照度曲线,可以看出两种结构均能得到较高的照度均匀度和光效率. 相比较而言实验半球型结构元件的灯具均匀度更高. 由理论推导可知,半球由于其侧面为抛物曲面,光的反射方向更广,光线在灯具内部的路径也更为分散;棱锥体侧面为一斜平面,光的反射方向较为集中,容易出现局部亮区和局部暗区,影响其均匀度.

通过几何光学分析可以知道,由于光线在灯具内部是沿直线传播,且主要路径分为直射路径、折射路径和反射路径,而对提高混光距离起最主要作用的是反射路径的增长. 影响光线反射路径的是混光元件的侧面反射面,对比两种混光元件的反射面. 对于棱锥型的混光元件,光线照射到棱锥体的侧面时,无论光源为虚拟点光源还是漫反射面上的次朗伯光源,其出射光线方向均与入射光线相对于斜平面法线对称,而斜平面上的法线均相互平行,入射角度与出射角度范围较窄,导致出射光线的方向较为集中. 对于半球型的混光元件,由于其反射面为曲面,其法线方向不再是相互平行的,而是垂直于各个切面,虚拟点光源和次朗伯光源的光线照射到该反射面上,其入射角度与出射角度的范围较宽,可以得到方向更广的出射光线.

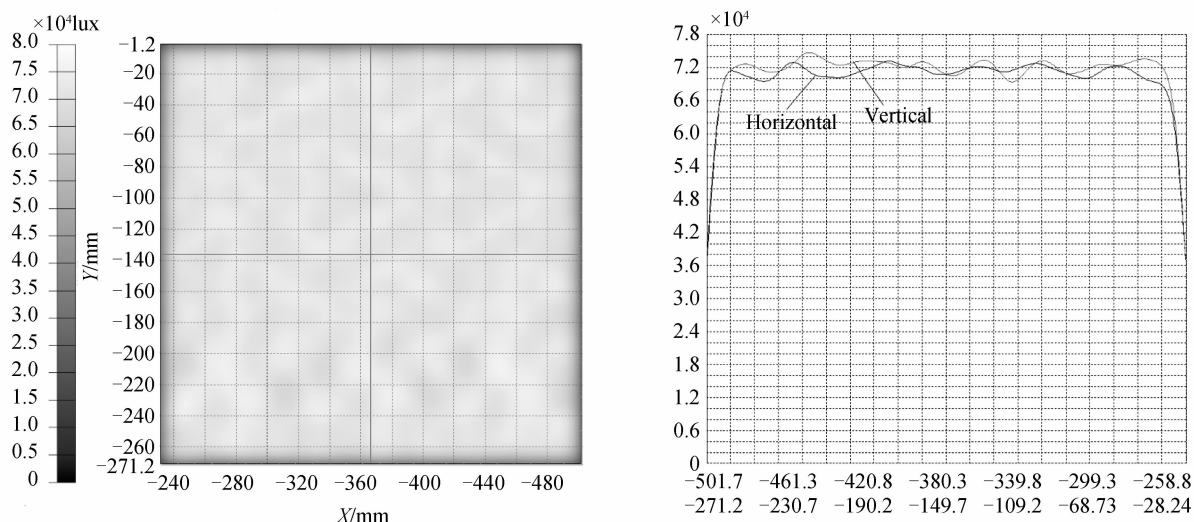


图 14 棱锥形结构元件灯具仿真最终结果
Fig. 14 Final illumination map of the light with pyramid component

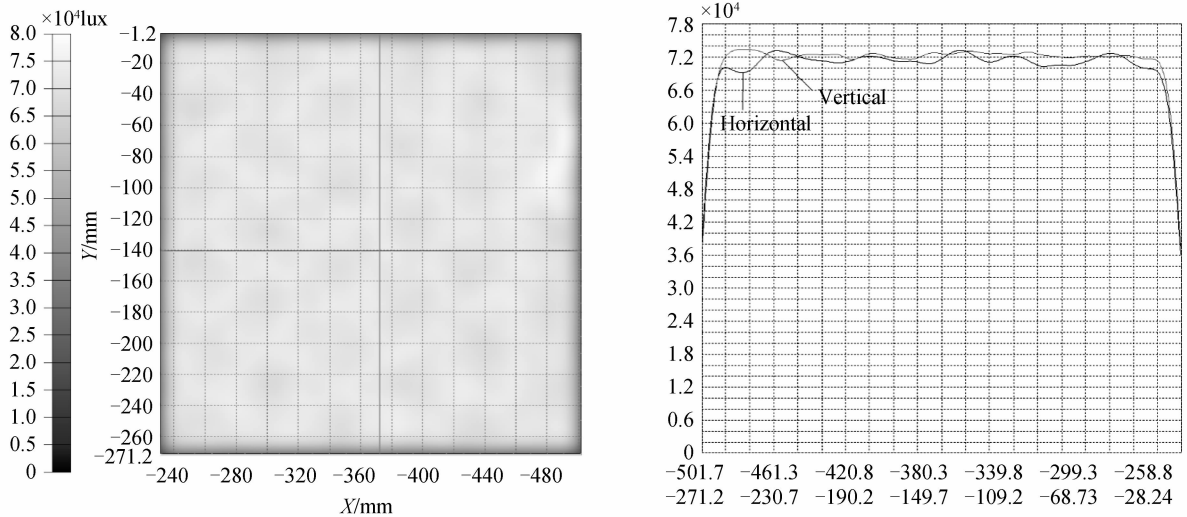


图 15 半球型结构元件灯具最终结果

Fig. 15 Final illumination map of the light with halfball component

把灯具看作一个封闭空间,光线在其内部不断进行反射.可以知道,若光线在该空间内走过的空间越大,则其混光距离越大,相应的,灯具的均匀度越高.因此两种混光元件相比较而言,能够使反射光线的出射方向更广的半球型混光元件相对于棱锥型混光元件,其灯具的混光距离更大,均匀度更高.

通过最优元件结构制得整灯模型,经分析得到,使用棱锥形混光元件的灯具均匀度为 95.42%,光效率为 92.72%;使用半球形混光元件的灯具均匀度为 97.67%,光效率为 92.65%,如图 14 和图 15 所示,与采用六边形单元测量计算结果差别不大.

3 结论

本文以 15mm 灯具厚度为目标,重新设计了棱锥型和半球型两种结构的混光元件,用于提高直下式 LED 平板灯的出光照度均匀度.通过理论推导得出影响出光均匀度的主要因素为元件厚度,上表面半径和下表面半径,再利用 Tracepro 软件模拟仿真,首先对两种元件的三个变量分别进行单一变量分析实验,对每种元件每个变量取 7 个水平,仿真并计算其出光面照度均匀度.进一步地,由单一变量分析实验的结果,利用 Taguchi 方法重新设计了实验求取两种结构的最优尺寸组合.对棱锥型结构元件取 4 变量 3 水平,对半球型结构元件取 3 变量 3 水平,利用 $L_9(3^4)$ 直交矩阵,各进行 9 组实验,仿真并计算均匀度和光效率及其对应的 S/N 值,分别求得两种结构元件的最优尺寸组合.棱锥型结构元件灯具均匀度达到 95.42%,光效率达到 92.72%;半球型结构元件灯具均匀度达到 97.67%,光效率达到 92.65%,符合理论推导和预实验结果.比较两种结构,发现半球型结构元件对提升直下式 LED 平板灯均匀度效果更优,而光效率相差不大.其原因是棱锥形状混光元件由于反射面的定向反射导致光线方向过于集中,而半球形状混光元件因为其侧面反射面为曲面,可以为反射光线提供更广的出射方向.本文在试验过程中,通过分割平板灯单元,引入 Taguchi 实验设计方法等,减少了实验工作量,提高了实验效率,具有参考价值.对两种结构元件分别进行了理论推导,分析其对均匀度产生影响的机理,为设计更轻薄、均匀度更高的直下式 LED 平板灯提供理论指导与参考依据.

参考文献

- [1] GAO Pei-li. The study of optical design for limited shape lighting[D]. Jiangnan University, 2015.
高培丽. 光形限定的照明光学设计研究[D]. 江南大学, 2015.
- [2] YAN Chong-guang, SHENG Yu-lin. Overview of a new generation of ultra-thin LED flat lamp[J]. *Advanced Materials Industry*. 2015, (07): 58-60.
颜重光, 盛玉林. 新一代超薄 LED 平板灯概述[J]. *新材料产业*, 2015, (07): 58-60.
- [3] 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.
- [4] CHEN Hao-wei, WEN Shang-sheng, MA Bing-xu, et al. Design of super slim direct-down LED panel with tapered

- optical elements based on Taguchi method[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015(10): 1022003.
- 陈浩伟,文尚胜,马丙戌,陈颖聪,黄诗敏. 基于 Taguchi 法设计带有圆锥台元件的超薄直下式 LED 平板灯[J]. *光子学报*, 2015(10): 1022003.
- [5] CHEN E-zhen, GUO Zhen-ning, ZHI Jia-jun. Lens design with uniform illumination of the LED extended sources[J]. *Journal of Huaqiao 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.
- [6] SUN Zhi-hui, CHANG Jun, ZHAO Nan, *et al.* A novel LED for LCD backlight[J]. *Optical Technique*, 2007, **33**(suppl): 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**(suppl): 282-284.
- [7] 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.
- [8] 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 阵列照度问题研究[J]. *发光学报*, 2015, **36**(3): 348-354.
- [9] SHI Chen-yang, WEN Shang-shen, CHEN Ying-cong. Study of surface LED array multi-shadow problem based on Taguchi method[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015(06): 651-656.
- 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(06): 651-656.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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,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.
- [13] CHEN E-zhen, GUO Zhen-ning, ZHI Jia-jun, *et al.* Study on dot shape for the light guide plate of back-light[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, **50**(3): 161-166.
- 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): 161-166.
- [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] ZHANG Sheng-gui. Study on control mechanism and equipment of precision injection molding based on polymer PVT property[D]. Beijing University of Chemical Technology, 2013.
- 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] LI Tian-liang, TAN Yue-gang, ZHANG Xiang, *et al.* Strain transfer factors of pasted FBG on bending part surface[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1254-1264.
- 李天梁,谭跃刚,张翔,等. 受弯件上粘贴型光纤布拉格光栅的应变传递规律[J]. *光学精密工程*, 2015, **23**(5): 1254-1264.

Foundation item: National Undergraduate Innovative and Entrepreneurial Training Program (No. 201610561075), Guangdong Science and Technology Project (Nos. 2013B090600048, 2015B010127004), Guangdong Applied Science and Technology Research and Development (No. 2015B010134001), Guangdong Yangfan Plans to Introduce Special Team of Innovation and Entrepreneurship (No. 2015YT02C093), Guangzhou Science and Technology Program Key Projects (No. 2013J4300021), Guangzhou Industry University Research Collaborative Innovation Major Projects (No. 201604010006)