

## 自由曲面底板的 LED 光学设计

陈颖聪<sup>1,2</sup>, 文尚胜<sup>1,2</sup>, 罗婉霞<sup>3</sup>, 陈津桥<sup>1,2</sup>, 谢嘉宁<sup>4</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;

3. 广州广日电气设备有限公司, 广东 广州 511447;

4. 佛山科学技术学院 光电子与物理学系, 广东 佛山 528000)

**摘要:** 提出了一种基于自由曲面底板的 LED 配光新方法, 采用 TracePro 软件设计自由曲面并进行仿真分析。结果表明: 将 LED 芯片直接贴装在带有自由曲面的底板上, 可以获得较大的出光角度, 半光强角达到  $60^\circ$ , 比传统反光杯的配光方式获得的半光强角增大  $25^\circ$ 。此外, 通过这种新方法可获得高光效和高均匀照度的照明模式, 在实现相同的目标平面平均照度时, 总光通量比传统配光方式减少 25%, 照度的衰减减少了 60%。通过调节自由曲面底板的形状进行配光, 可根据需要获得不同的照明效果, 实现高品质的 LED 照明。

**关键词:** 非成像光学; 自由曲面; 一次配光; TracePro

**中图分类号:** O439 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2014)09-2947-07

## Design of LED optical system based on the substrate with freeform surface

Chen Yingcong<sup>1</sup>, Wen Shangsheng<sup>2</sup>, Luo Wanxia<sup>3</sup>, Chen Jinqiao<sup>1,2</sup>, Xie Jianing<sup>4</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;

3. Electricity Facilities Guangri Guangzhou Co., Ltd., Guangzhou 511447, China;

4. Department of Optoelectron and Physics, Foshan University, Foshan 528000, China)

**Abstract:** A novel method for light distribution based on the substrate with freeform surface is proposed. The freeform surface substrate is designed and simulated by using the TracePro software. The simulation results show that a large luminous intensity angle can be achieved by adjusting the LED chips directly onto the substrate with freeform surface. The half-intensity angle is  $60^\circ$ ,  $25^\circ$  bigger than using the tradition reflection cup. Furthermore, a lighting with high light efficiency and uniform illumination can be achieved by using this method. When a same average horizontal illuminance is created, it costs 25% less luminous flux and avoids 60% less luminous decay than using the traditional method. By adjusting the

收稿日期: 2014-01-05; 修订日期: 2014-02-10

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); 广州市科技计划项目(2013J4300021)

作者简介: 陈颖聪(1991-), 男, 主要从事 LED 封装及其散热技术方面的研究。Email: cyc\_scut@163.com

导师简介: 谢嘉宁(1971-), 女, 副教授, 博士, 主要从事 LED 配光设计与检测等方面的研究。Email: xiejianingfs@126.com

shape of the freeform surface to distribute the LEDs' light, not only the other patterns of luminous effects are conveniently get, but also a high quality of LED lighting can be achieved.

**Key words:** non-imaging optics; freeform surface; first optical design; TracePro

## 0 引言

LED 是一种直接将电转化为光的半导体固体发光器件,它具有明显的发光方向性,因此在照明应用中容易出现光斑中间极亮,随半径增大方向光强急速衰减的不均匀现象。在实际照明应用领域中为了实现良好的照明效果,必须对 LED 芯片进行二次、甚至三次光学处理<sup>[1-2]</sup>。另外,在大多数应用场合,还需要将数量众多的 LED 小型点光源通过各种组合方式,形成能满足现实照明需要的产品或部件。

目前,LED 点光源主要是封装于平面基板上,而曲面光学主要应用于设计曲面透镜,或者给 LED 灯具增加曲面反光杯。反光杯对 LED 发出的光起到会聚作用,但如果想得到发散的照明效果,则需要通过反光杯三维空间排布来实现,从而使得整个 LED 照明系统体积增大,安装与维护不方便。

上述提到的二次配光均需通过各种反光材料或者光学扩散材料的光学透镜或者反光杯来实现,光学材料的特性极大地影响了照明器件的系统光效。因为芯片发出的光经过 LED 光学系统的光学透镜之后,光强损失严重(通常达到 10%~30%左右)。此外,目前二次配光的光学器件多使用 PC、瓦克力、硅胶、环氧树脂等材料,其耐候性和耐高温特性比较差,往往成为 LED 光源系统达到超长寿命目标的主要障碍。

文中提出一种采用自由曲面底板实现一次配光的方法。将 LED 光源直接贴装于曲面底板上,一次形成三维光学系统,可以直接实现发散的照明效果。由于不需要光学透镜及反光杯的二次配光,透光率理论上可达 100%。

根据实际需要的照明效果,笔者对曲面结构和 LED 位置进行模拟设计,通过表面上的弧度对 LED 光源进行配光,克服了 LED 光源发光角度小和光损大的问题,改善了由于 LED 与传统光源不同的配光分布带来的照明系统能量利用率低下的问题。为了证明这种方法的有效性,采用 TracePro 软件对不同

形状的自由曲面进行模拟,仿真结果表明:运用自由曲面进行一次配光,不仅在出光角度的可调范围、照度均匀性和光效等方面优于传统的配光方式,而且容易实现不同的照明效果。

## 1 理论分析

在二次配光的反射杯设计中,通常会在反光面镀涂反光性能良好的金属材料,以减少反射杯对光的吸收。表 1 是几种常见金属材料在波长为 546 nm 的光线垂直入射时测得的反射比。可见,采用铝反射杯进行二次配光,假设光线只通过一次反射,光损也会达到 15%。而通过自由曲面进行配光,只需要对曲面进行适当的设计,如图 1 所示,通过将 LED 芯片

表 1 常见金属的光学特性

Tab.1 Optical property of common metals

Material	Silver	Gold	Aluminum	Platinum	Copper
Reflectance scale	0.99	0.95	0.83	0.80	0.95

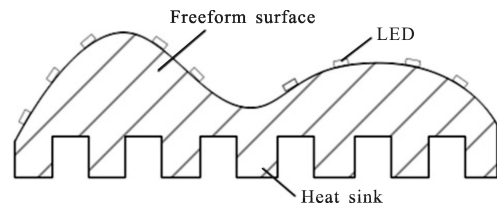


图 1 自由曲面配光底板结构

Fig.1 Structure of the substrate with freeform surface

直接贴装于自由曲面底板上。根据不同的光斑效果,可以推算出 LED 芯片的具体排布位置,从而确定自由曲面的形状和金属线路层的设计要求。由于这种一次配光的设计,光源不需要经过反射杯的反射,理论上没有光衰。此外,通过采用最近备受关注的高导热塑料作为底板材料,通过注塑成型工艺,在加工自由曲面底板的同时可以在底板下形成散热翅片,即一次加工就生产出带自由曲面的塑料散热器。这种新方法的提出,不仅为 LED 的配光带来方便,同时大大减少了 LED 基板与散热器之间的热阻和简化

了生产工序。

对反光杯进行二次配光设计来实现均匀照明的主要方法有重叠法和裁剪法<sup>[3-4]</sup>。一般来说,要设计出出光角度大、照明范围广的灯具,其求解比较复杂且难以得到连续的自由曲面。然而,采用自由曲面底板对光源进行一次配光,通过调节各个芯片的角度,采用逐点计算法,只考虑光源在远场的配光曲线的叠加计算,按照需要直接计算出某点的照度来进行设计,不需要对反射杯的外形做复杂的偏微分方程组求解。因此,采用自由曲面底板对光源进行一次配光不仅容易设计出大角度均匀照度的灯具,而且能够根据需要,产生聚光、散光等模式的照明效果。

只要测量点与光源的距离达到光源最大尺度的 5 倍以上,就可以认为所有的光线都来自空间中某个确定的点,即将光源理想化,忽略它的尺寸,这称为“点光源近似”<sup>[5-6]</sup>。在对光学系统设计的时候,运用“点光源近似”简化模型,简化在二维平面上进行计算,如图 2 所示。设 LED 芯片位于直角坐标系 A(x,0)处,其某一特定光强对应 LED 芯片出光的光强角为  $\theta_1$ ,以 LED 的法线在 y 轴上交点 B 为圆心作圆,使圆经过 LED 芯片,设其半径为  $AB=R$ ,取该圆为自由曲面的内切圆,则自由曲面的曲率半径为 R。另外,远场上放置一块接收屏,与芯片所在平面的距离为  $OC=d$ 。

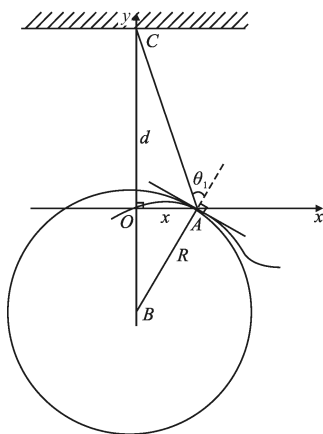


图 2 “点光源近似”简化模型

Fig.2 Simplified model of approximate LED point source

在  $\angle AOB$  中,由勾股定理可得:

$$OB = \sqrt{R^2 - x^2}$$

对于  $\angle AOC$ ,

$$AC = \sqrt{x^2 + d^2}$$

$$\sin \angle ACO = \frac{x}{AC} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + d^2}}$$

在  $\angle ABC$  中,由三角形的正弦定理可以得到 LED 芯片、接收屏距离和曲率半径的关系:

$$\frac{R}{\sin \angle ABC} = \frac{R}{\frac{x}{\sqrt{x^2 + d^2}}} = \frac{d + \sqrt{R^2 - x^2}}{\sin \theta_1}$$

一般情况下,在设计照明系统时,  $d$ 、 $x$  和  $\theta_1$  是给定,因此,通过求解上式,既可以得到 R。为了方便计算,可以将上式等价于对以下方程求解零点,将函数式导入 matlab 软件,输入数据,就可以计算出芯片在该点的曲率半径。

$$f(R) = \left( \frac{(x^2 + d^2)(\sin \theta_1)^2}{x^2} - 1 \right) R^2 - \frac{2d\sqrt{x^2 + d^2} \sin \theta_1}{x} R + d^2 + x^2$$

基于自由曲面进行光学设计,通常运用多个芯片进行光强叠加来进行配光设计。对于多芯片的照明系统,不可避免的会引入重影现象,许健敏<sup>[7]</sup>等人通过 TracePro 仿真得到了重影宽度与芯片排布的关系为:芯片的布局越聚拢,重影的宽度越小,同时还证实了芯片呈圆形排布时,重影的宽度更小。在照明系统设计过程中,芯片的出光角度和远场距离是固定不变的,所以在设置自由曲面时要考虑芯片间的距离与出光角度之间的制衡关系。

图 3 为自由曲面底板的设计流程图<sup>[8]</sup>,以设计一

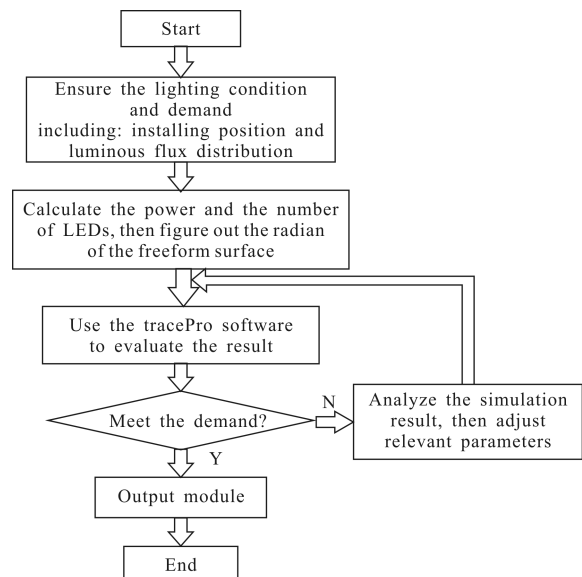


图 3 自由曲面底板的设计流程图

Fig.3 Flow chart of designing the substrate with freeform surface

个如图 4 所示的蝴蝶型光斑<sup>[9]</sup>为例,先假设整个系统取 5 块功率不同的芯片来实现功能。将 2 块功率最大的 LED 芯片对准配光曲线光强最大处 1,2 块功率中等的芯片对准光强次极大处 2,将功率最小的 LED 芯片对准配光曲线中心位置 3 作为光强补偿,再根据前文的推导计算,得到自由曲面底板关键点的弧度,将模型导入 TracePro 光学软件进行仿真,与预设的光分布要求进行对比,修正芯片数量、功率以及排布方式,从而达到预设目标。

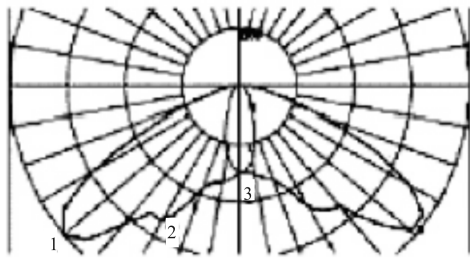


图 4 蝴蝶型光斑的配光曲线图

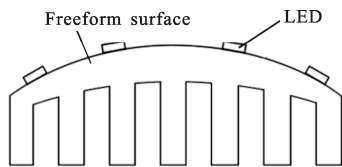
Fig.4 Candela distribution plot of a butterfly type

## 2 仿真模拟分析

TracePro 是工程人员广泛使用的光学设计与分析软件,可对照明系统进行辐照度分析、光度分析和光线模拟。借助 TracePro 对所设计的自由曲面配光模型与传统反光杯模型进行对比,通过导入封装模型、建立配光模型、定义各表面属性和芯片出光等参数,模拟得到两种配光模型的 candela 分布图和照度图,对两种封装方式的出光角度和出光均匀性等结果进行对比和分析。进一步,模拟仿真出不同自由曲面形状达到的不同配光效果。

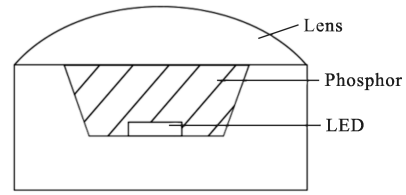
### 2.1 自由曲面配光与传统反光杯配光对比模拟分析

与传统反光杯不同,通过自由曲面进行配光,我们将多块 LED 芯片贴装在带一定弧度的凸面自由曲面底板上,如图 5 所示。根据理论计算,贴装在自由曲面的相邻 LED 芯片光强互补叠加,可以实现出



(a) 大角度均匀出光的 LED 配光底板简化模型

(a) Simplified model of the LED substrate with big light angle and uniform lumination



(b) 传统封装简化模型

(b) Simplified model of the traditional package

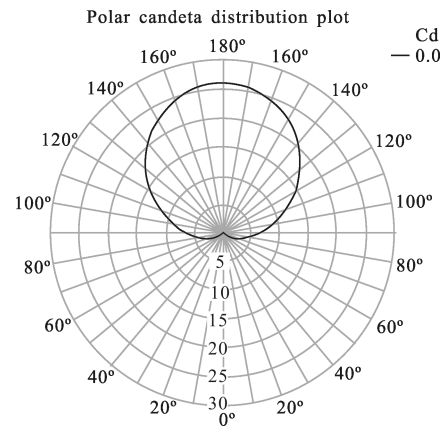
图 5 不同封装结构的简化模型

Fig.5 Simplified of different packages

射光强均匀的效果。而且,通过自由曲面对各个 LED 芯片的位置直接调节,可以达到更大的出光角度。

介质中光强随传播距离呈指数形式衰减的规律称为朗伯特定律。设计中对 LED 芯片做如下假设: (1) 从芯片发出的光线能量没有损失且满足朗伯特分布。(2) 对于二次配光的反射杯结构,反射杯采用铝材质,反射率为 83%,芯片发光面出射光线 100 000 条,光通量为 100 lm,波长为 546 nm。(3)自由曲面也采用铝覆盖,并采用 4 块 LED 芯片进行配光,定义各芯片发光面出射光线为 100 000 条,光通量为 25 lm,波长为 546 nm。

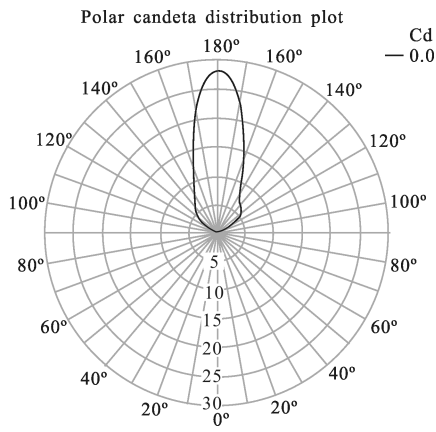
图 6 为上述两种模型的仿真光强分布图。从图 6(a)可以看出,光强角度分布较宽,发光强度随角度均匀变化,中心发光强度最大,半光强度角为 60°。而传统的反光杯配光的光强分布图(见图 6(b)),发光强度随着角度变化较大,半光强角只有 35°。另外,自由曲面配光方式只要调整芯片的倾斜度即可对出光角度进行直接调节,而不需要通过复杂计算设计反射杯来调节出光角度。



(a) 自由曲面底板

(a) Substrate with freeform surface





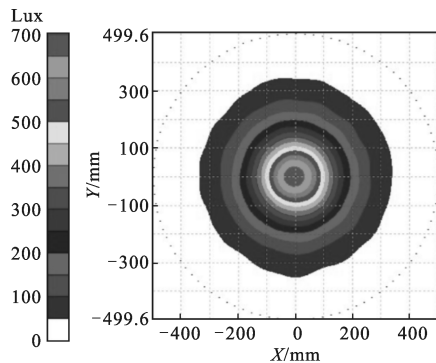
(b) 传统反光杯

(b) Traditional reflection cup

图 6 不同配光方式的 candela 分布图

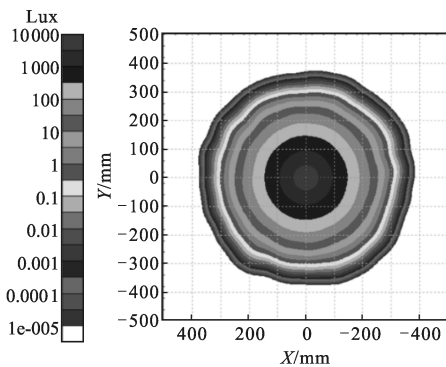
Fig.6 Candela distribution plot of different types

图 7 为上述模型对应的照度分布图。模拟中,在距离 LED 为 100 mm 处放置一块接收屏,屏幕尺寸为 1 000 mm×1000 mm×1 mm,朝向 LED 光线入射一



(a) 自由曲面底板

(a) Substrate with freeform surface



(b) 传统反光杯

(b) Raditional reflection cup

图 7 不同配光方式获得的照度图

Fig.7 Luminance map of different type

面设置为完全吸收,得到屏幕上显示的照度图。从图中可以看出,照度呈阶梯状均匀分布,取接收屏上距离零点 200 mm 处为参考点进行计算,对于自由曲面底板的配光方式,如图 7(a)所示,光衰只有 30.8%,而如图 7(b)所示的传统配光方式则衰减了 90%。对于自由曲面底板的配光方式,由于出射光线角度大,未能被接收屏完全接收,导致总光通量比传统配光方式少 25%,但是平均的照度却比传统配光方式高,具有更高的光效。可以看出,无论是出光角度、光效,还是照度的均匀性,自由曲面的配光方式都比传统的配光方式优胜。

另外,传统封装时在 LED 芯片上覆盖了荧光粉(如图 5(b)所示),芯片工作产生大量的热使得荧光粉老化变黄,严重影响光衰<sup>[10]</sup>。而采用自由曲面底板进行一次配光,免除了透镜等结构(如图 8 所示),直接装上一个扩散外壳,外壳上涂有均匀的荧光粉,即可达到传统封装方式的白光照明,而且荧光粉与芯片分开,有效地防止了荧光粉老化降低光效的问题。

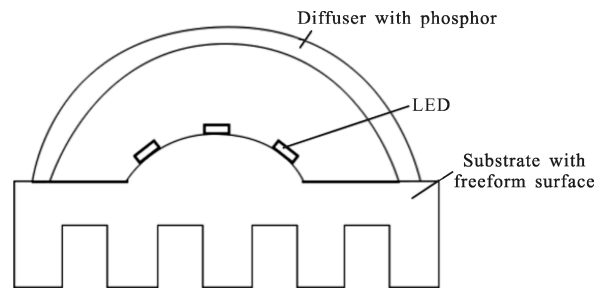


图 8 隔离荧光粉的自由曲面底板封装简化模型

Fig.8 Simplified model of the package of the free form surface substrate withse parating fluore scent powder

## 2.2 基于自由曲面的聚光模型设计

进一步,通过设计,将 LED 芯片贴装在凹面自由曲面底板上,每块 LED 芯片光强最大的地方对准远场同一个点,得到聚光的照明模式,其简化模型如图 9 所示。

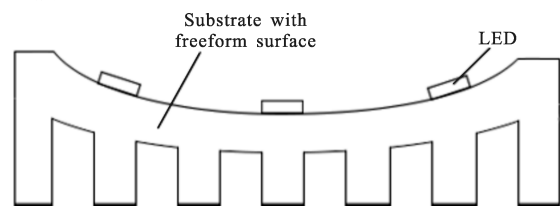


图9 实现聚光效果的自由曲面底板简化模型

Fig.9 Simplified model of the substrate with freeform surface achieving light concentration

设置 8 块 LED 芯片光强最高的地方对准 100 mm 处接收屏的同一个点, 每块芯片出光为 25 lm, 且满足朗伯特分布, 得到如图 10 所示的仿真照度图。通过自由曲面进行聚光, 其光斑中心亮度很高, 光斑半径只有 150 mm, 且当半径为 100 mm 时, 光斑衰减达到 77.3%, 呈现出高度聚光的效果。由于每块芯片符合朗伯特分布, 因此, 运用越多芯片进行聚光, 可以得到衰减率更高, 聚光效果更好的配光模型。另外, 多芯片的封装能够减轻器件散热的负担<sup>[11]</sup>, 因此, 通过应用自由曲面来聚光, 能够更加容易地制作出大功率高度聚光效果的灯具。

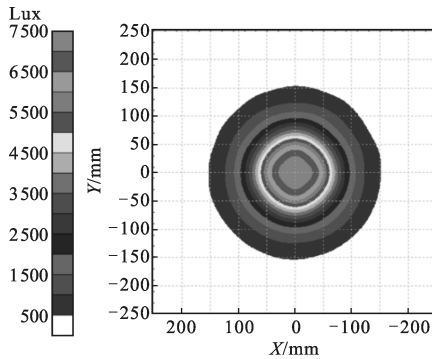


图 10 基于自由曲面的聚光模型照度图

Fig.10 Luminance map of the concentrator based on the freeform surface

### 2.3 基于自由曲面的均匀光照度模型设计

通过改变图 9 中自由曲面凹面的弧度, 使芯片光强最大的地方不是对准同一个点, 而是通过各 LED 芯片的光强叠加, 在目标平面上, 实现半径为 25 mm 的圆内照度均匀, 其照度图如图 11 所示。在有效范围内, 将最低照度与最高照度的比值定义为均匀

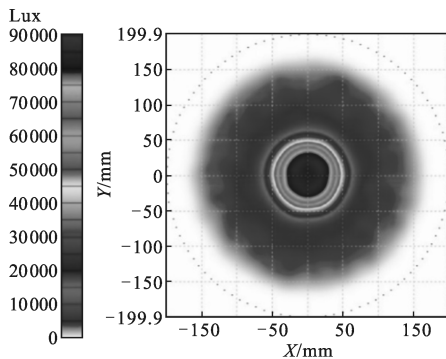


图 11 通过自由曲面实现均匀照度的照度图

Fig.11 Luminance map of the substrate with freeform surface achieving the uniform illumination

性, 则目标照度的均匀性为 94.1%, 均匀性在 90% 以上, 满足国家照明标准 GB50034-2004 的要求<sup>[12]</sup>。不过, 由于芯片发光属于朗伯特分布, 而自由曲面对芯片一次配光, 并不能很好的约束 LED 芯片在大角度范围的光, 而实际情况, 照射的目标区域远远大于 25 mm, 这时光斑边缘的衰减相对于照明系统的面积是很少的, 对照明系统的均匀性影响很少, 可以忽略。

## 3 结论

以非成像光学为基础, 在总结前人采用的自由曲面光学器件设计方法的基础上, 提出了一种基于自由曲面底板的 LED 配光新方法。通过理论分析和采用 TracePro 软件仿真模拟, 结果表明, 通过自由曲面对 LED 光源进行一次配光, 不仅克服了 LED 光源发光角度小的局限, 而且改善了由 LED 与传统光源不同的配光分布带来的照明系统能量利用率低下的问题, 得到传统光学设计难以实现的照度均一性。另外, 采用高导热塑料为自由曲面底板的材料, 可以一次加工形成带有自由曲面底板的塑料散热器, 大大简化了散热结构。基于自由曲面底板进行一次光学配光具有适用范围广泛, 计算简单, 加工方便, 系统光效高、光型可控等优点, 为实现 LED 的高质量照明提供了一条新的途径。

### 参考文献:

- [1] Jiang J B, To S. LED secondary optics design[D]. Shenzhen: 5th China International Forum on Solid State Lighting, China, 2008.
- [2] Wang Kai. Freeform optics for high power LED packages and applications[D]. Huhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [3] Yu Guiying, Jin Ji, Ni Xiaowu, et al. Design for LED uniform illumination reflector based on etendue [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, 29(8): 2297-2301. (in Chinese)
- [4] Luo Yi, Zhang Xianpeng, Wang Lin, et al. Non-imaging optics and its application in solid state lighting [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(7): 963-971. (in Chinese)
- [5] Yan Xingtao, Yang Janfeng, Zhang Guoqi, et al. Design of freeform surface LED reflectors for uniform illumination based on compensation method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 718-723. (in Chinese)
- [6] Zhang Jiuhong, Zhuang Jinxun. How to use luminous

- intensity distribution curve in lighting calculation[J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science)*, 2007, 23(6): 941–945. (in Chinese)
- [7] Xu Jianmin, Gui Yuchang, Wen Shangsheng, et al. Multi-shadow of multiple LED chips illumination [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40: 90–94. (in Chinese)
- [8] Wang Shang. Freeform optical and control system for LED array [D]. Huhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] Huang Xiang. Discussion on how to design the optical angle of LED roadway luminaries [J]. *Light and Lighting*, 2013, 36(3): 48–54. (in Chinese)
- [10] Liu Ronghui, He Huangqiang, Huang Xiaowei, et al. New progress in study and application on phosphors for white LED [J]. *Semiconductor Materials and Equipment*, 2012, 3: 221–227. (in Chinese)
- [11] Chen Jianlong, Wen Shangsheng, Yao Rihui, et al. Thermal analysis of high-power LED without aluminum substrate [J]. *Chinese J Lumin*, 2012, 33(12): 1362–1367. (in Chinese)
- [12] GB 50034–2004, Standard for lighting design of buildings [S]. Beijing: China State Construction Department, 2004. (in Chinese)