

doi:10.3788/gzxb20154407.0722002

# 侧入式无导光板自然光平板灯

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>

(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)

**摘要:**提出了一种侧入式无导光板自然光平板灯的设计方法,利用有机玻璃光纤将收集的自然光传导至平板灯里,为达到均匀的自然光出光效果,通过柱面透镜将光纤的输出光会聚并掠射在带有自由曲面的反光背板上.借助 Tracepro 软件设计不同投射角下的自由曲面反光背板并仿真,结果表明:设计的灯具照度均匀度达到 94.1%.该灯具不仅可以解决 LED 的蓝光危害问题而且制作流程简单.该设计对阳光转化为功能性照明和绿色照明具有借鉴意义.

**关键词:**光学设计;平板灯;Tracepro;自由曲面;有机玻璃光纤

中图分类号:O439

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)07-0722002-8

## Edge-lighting Natural Light Flat Panel Light without Light Guide Plate

MA Bing-xu<sup>1</sup>, WEN Shang-sheng<sup>1,2</sup>, CHEN Ying-cong<sup>1,2</sup>, LIU Lei<sup>1</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:** An edge-lighting natural light flat panel light without light guide plate was designed. The collector collects the nature-light, then the light is transported to the panel lights with the help of PMMA optical fiber. In order to obtain uniform illumination, the beam from the fiber was converged by using a cylindrical lens and grazed through the reflective back panel with freeform surface. Furthermore, the effect of the flat panel light was simulated by using the Tracepro software. And different illumination maps for different angles which between optical fiber and the reflective back panel were get after further simulation. The simulation shows that the uniformity of illumination can reach 94.1% after optimizing the parameters of the flat panel light. This light not only can solve the danger of LED blue light, but also simpler the production process, which has a good reference for converting sunlight into the green lighting and functional lighting.

**Key words:** Optical design; Flat panel light; Tracepro; Freeform surface; PMMA optical fiber

**OCIS Codes:** 220.4298;080.1753;080.2740;220.2740;220.2945

## 0 引言

随着经济的发展,建筑能耗在国家的能源消费中所占的比例越来越大.而在各国的建筑能耗中照明能耗又占有相当大的比重<sup>[1]</sup>.据统计我国发达地区的照明能耗占总能耗的 6%~9%<sup>[2]</sup>.因此照明有着巨大的节能潜质.开发利用太阳光照明技术不仅表现在节能

上,同时在天然光下人们在心理和生理上感到舒服,有利于身心健康,提高视觉功效,符合人类追求生活质量和生活环境的要求<sup>[3]</sup>.光导照明是目前普遍流行的一种新型照明装置<sup>[4]</sup>,比较成熟的是利用光导管技术为建筑内部提供照明.传统的光导照明系统由采光装置、光导管和漫射装置组成,但是这种应用光导管的自然光照明系统很难保证室内的照明质量,并且较为

**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:**马丙戌(1994-),男,硕士研究生,主要研究方向为 LED 灯具设计及背光源. Email: mbxscut@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. Email: shshwen@scut.edu.cn

**收稿日期:**2015-01-27; **录用日期:**2015-03-31

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

笨重.因此急需一种更为轻薄的自然光照明系统对传统系统进行替代.

近年,高照度 LED<sup>[5-8]</sup>照明技术迅猛发展,LED 平板灯<sup>[9]</sup>也应运而生.目前,侧入式 LED 平板灯<sup>[10]</sup>以其轻薄、出光均匀、光线柔和等特点受到一致的好评,但蓝光危害仍然是 LED 照明领域不容忽视的问题.而引入自然光照明可以很好地解决蓝光危害,因此平板灯的优缺点与传统自然光照明的优缺点互补能很好地解决两者现存的问题.

本文利用有机玻璃 (Polymethy Methacrylate, PMMA) 光纤导入自然光作为光源设计了一种带有自由曲面反光背板的无导光板侧入式平板灯.该灯具符合实际需求,无导光板的设计进一步减轻了灯具重量,并且具有更加简单的结构,简化了侧入式平板灯的生产工序.该设计对自然光照明系统和平板灯的改良和发展具有一定地借鉴指导意义.

## 1 灯具结构与工作原理

### 1.1 结构模型

本文设计的侧入式无导光板自然光平板灯结构如图 1(a),由采光系统、导光系统和出光系统组成.并且在实际应用中采光系统配备有自动跟踪系统.

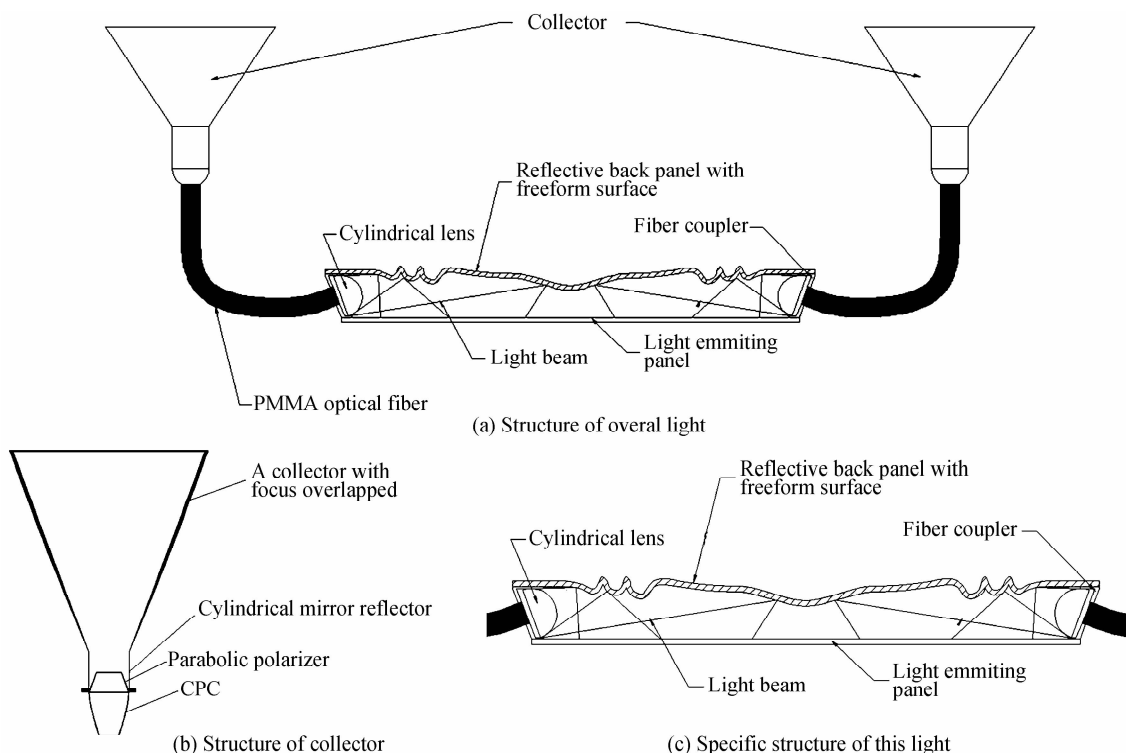


图 1 无导光板自然光平板灯结构  
Fig. 1 Structure model of this light

### 1.2 光学模型的设计

#### 1.2.1 光源模型的构建

该平板灯的光源是光纤导出的自然光,为了准确构建出光源模型首先必须知道光纤出光端的光通量.

#### 1.1.1 采光系统及自动跟踪系统

采光系统为一种由镜像焦点重叠式聚光器、圆柱镜反射器、抛物面偏振器和复合抛物面聚光器 (Compound Parabolic Concentrator, CPC) 四部分组成的多曲面复合采光器,如图 1(b)<sup>[11]</sup>.该系统能大幅度地提高自然光照明系统的采光效果.采光器中当太阳直射时照明效果最好,故需要太阳能自动跟踪系统<sup>[11]</sup>.

#### 1.1.2 导光系统

PMMA 光纤具有孔径角大、便于太阳光聚焦介入、孔径远超过通讯石英光纤,可用作能量传输的优点,同时为了保证灯具的轻薄化设计,导光系统选用直径为 12 mm 的 PMMA 光纤.

#### 1.1.3 出光系统

出光系统为侧入式无导光板平板灯结构如图 1(c) 所示,该结构包括光纤耦合器、柱面透镜、出光面板 (为一种透射型扩散板) 以及带有自由曲面的反光背板.光纤阵列末端的光束通过柱面透镜会聚并掠射在反光背板上;自由曲面进一步对掠射在背板上的光线进行重新分配使得到达出光面板上的光更加均匀,并且削减了混光暗区.这种设计由于光线没有在导光板内多次耦合,因此一定程度上减小光损.

自然光平板灯的总光学效率计算公式为

$$\eta_{\text{total}} = \eta_1 \times \eta_2 \times \eta_3 = \frac{\Phi_{\text{out}}}{\Phi_{\text{in}}} \quad (1)$$

式中,  $\eta_1$  为集光器耦合效率,  $\eta_2$  为光纤导光效率,  $\eta_3$  为

输入光耦合效率.

唐国富等通过照度测量仪等仪器实验测得外界平

均日照和单根 PMMA 光纤输入输出端光通量、光纤导入系统总效率( $\eta_1 \times \eta_2$ )之间的关系如表 1<sup>[12]</sup>.

表 1 外界平均日照和单根 PMMA 光纤输入输出端光通量、光纤导入系统总效率的关系

Table 1 The relationship of outside's illumination, the fiber system and the luminous flux on input and output

The average outside illumination/lx	The input luminous flux for optical fiber/lm	Fiber import system overall efficiency	The output luminous flux for optical fiber/lm
90000	706	21.2%	149.6
40000	314	21.2%	66.5

在 Tracepro 中建立光源模型, 光纤尺寸 12 mm, 在光纤的入光侧设立一个直径同为 12 mm 的圆形面光源, 由于聚光器通过收集自然光并进一步输出发散光, 因此将光源模型的输出光近似为朗伯光源并设定光源类型为朗伯型. 设定光源光线数目 20000 条, 40 条光纤共计 800000 条, 光通量为 67 lm.

### 1.2.2 柱面透镜设计

平凸柱面透镜<sup>[13]</sup>对光线聚散度的改变如图 2, 由图可见, 竖直入射面的光线不会产生会聚, 而水平入射面的光线经过柱面透镜后产生会聚. 这样光纤导出的发散光束通过柱面透镜后投射在垂直于出射光轴的平面上, 呈现为细长条形光斑, 如图 3(a) 为 20 根 PMMA 光纤紧密排列投射在垂直于出射光轴的平面上的照度分布; 而掠射在几乎平行于出射光轴的平面上呈现为矩形光斑, 如图 3(b). 由于光纤出光面光束角较小, 即使掠射在背板上的矩形区域很小, 也会直接影响出光面上光线的区域分布, 因此必须对掠射到反光背板上的光线进行二次配光, 使得反射光线均匀的分布在整

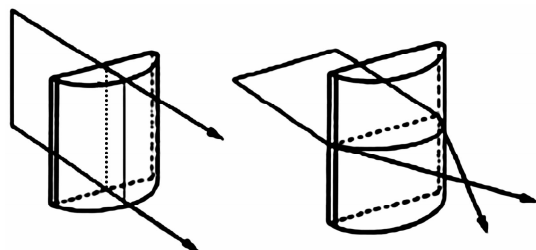
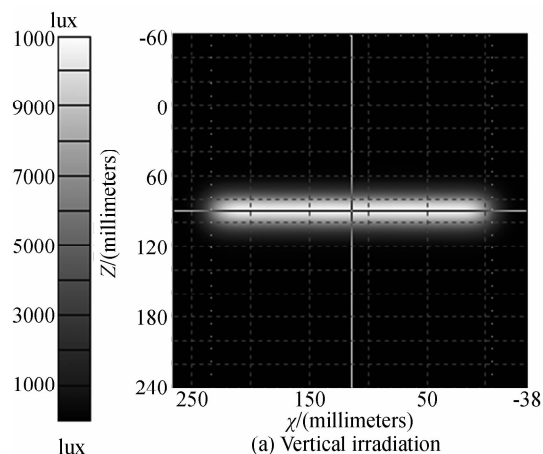
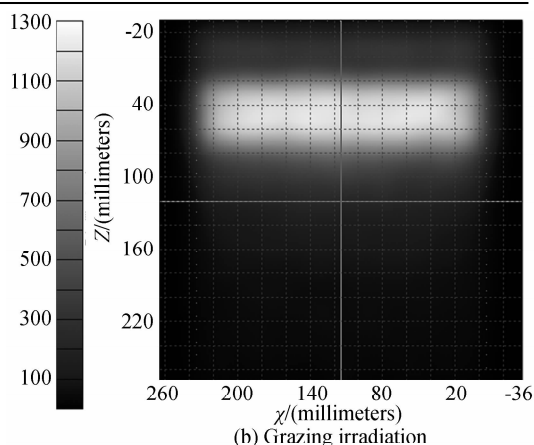


图 2 柱面透镜传输原理

Fig. 2 Optical transmission principle of cylindrical lens



(a) Vertical irradiation



(b) Grazing irradiation

图 3 柱面透镜输出光斑

Fig. 3 The output beam spot of cylindrical lens on the output surface.

### 1.2.3 自由曲面反光背板的设计

在不带有自由曲面的反光背板中, 光纤输出的光线经过柱面透镜会聚并掠射在反光背板上, 再经反光背板将光线反射到出光面板, 简单的光学构架很难在很短的混光距离内实现较好的出光均匀性, 同时也会使出光面板上出现大面积的混光暗区, 如图 4, A、C 区域位于混光暗区, 整灯的照度均匀性较差. 采用带有自由曲面的反光背板可以达到如图 5 所示的效果, 经过自由曲面反光背板对反射光线进行分配后, 反射到区域 B 的光线减少, 削弱了 B 区域的光强, A、C 区域由于有反射光线分布, 而不再处于混光暗区. 利用自由曲

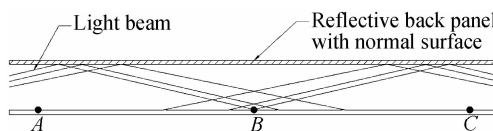


图 4 采用普通反光背板时反射光线的分布情况  
Fig. 4 The map for reflection lights by using ordinary reflective back panel

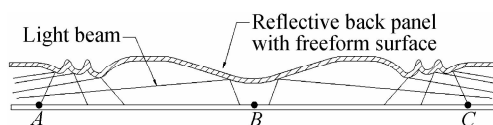


图 5 采用带有自由曲面的反光背板时反射光线的分布情况

Fig. 5 The map for reflection lights by using reflective back panel with freeform surface

面对光强极大值处进行重新分配,使光线反射向不同的方向,有利于消除混光暗区、提高均匀性。

在设计过程中,借助如图 6 的简易模型分析并确定背板上的光强极大值区域。

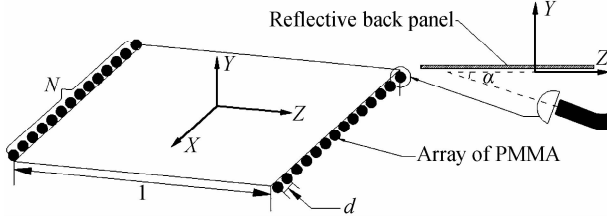


图 6 灯具简易理论分析模型  
Fig. 6 This light's simple model to analysis

将光纤输出光线的辐照度近似为朗伯分布进行处理

$$E(r, \theta) = E_0(r) \cos(\theta) \quad (2)$$

经过柱面透镜后,在  $x-z$  平面辐照度分布仍保持朗伯分布

$$E(x, y_0, z, \theta) = E_0(x, y_0, z) \cos\theta \quad (3)$$

在  $y-z$  平面辐照度分布为压缩的朗伯分布

$$E(x_0, y, z, \theta) = E_0(x_0, y, z) \cos\left(\frac{\pi}{2\theta_{\max_2}}\theta\right) \quad (4)$$

式中,  $\theta_{\max}$  为柱面透镜输出光束在  $y-z$  平面上的发散角。根据叠加原理,可得背板上任一点  $(x, y, z)$  的辐射照度  $E(x, y, z)$  公式为

$$E(x, y, z) = \frac{A_{\text{PMMA}} L_{\text{PMMA}} \left| y \sin\alpha + z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} \cos\alpha \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ \left[ x - (N+1-2n) \left( \frac{d}{2} \right) \right]^2 + \left[ y \cos\alpha - z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} \sin\alpha \right]^2 + \left[ y \sin\alpha + z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} \cos\alpha \right]^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} + \frac{A_{\text{PMMA}} L_{\text{PMMA}} \left| y \sin(\pi-\alpha) + \left[ z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} - 1 \right] \cos(\pi-\alpha) \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ \left[ x - (N+1-2n) \left( \frac{d}{2} \right) \right]^2 + \left[ y \cos(\pi-\alpha) - \left[ z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} - 1 \right] \sin(\pi-\alpha) \right]^2 + \left[ y \sin(\pi-\alpha) + \left[ z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} - 1 \right] \cos(\pi-\alpha) \right]^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

式中,  $L_{\text{PMMA}}$  是 PMMA 光纤的出光辐射照度,  $A_{\text{PMMA}}$  是 PMMA 光纤的出光面的发光面积。为了保证灯具的亮

度,灯具的设计遵循光纤紧密排列( $d=0$ )的原则。此时背板上任意一点  $(x, y, z)$  的辐射照度  $E(x, y, z)$  公式为

$$E(x, y, z) = \frac{A_{\text{PMMA}} L_{\text{PMMA}} \left| y \sin\alpha + z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} \cos\alpha \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ x^2 + \left[ y \cos\alpha - z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} \sin\alpha \right]^2 + \left[ y \sin\alpha + z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} \cos\alpha \right]^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} + \frac{A_{\text{PMMA}} L_{\text{PMMA}} \left| y \sin(\pi-\alpha) + \left[ z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} - 1 \right] \cos(\pi-\alpha) \right|}{\sum_{n=1}^N \left\{ x^2 + \left[ y \cos(\pi-\alpha) - \left[ z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} - 1 \right] \sin(\pi-\alpha) \right]^2 + \left[ y \sin(\pi-\alpha) + \left[ z \frac{\pi}{2\theta_{\max}} - 1 \right] \cos(\pi-\alpha) \right]^2 \right\}^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

令  $\frac{\partial E}{\partial z} = 0$ , 求得在  $z_0$  处取得  $E_{\max} = E(z_0) = E_0$ , 进一步的令  $E = 0.5E_0$  求得反光背板光强最大区域的边界,确定反光背板上光强最大区域的具体位置,并在此处设计自由曲面。

其次,需要对自由曲面的形状进行设计。本设计中,自由曲面背板设计的核心思想是通过控制自由曲面每一处的曲率半径以实现对光线的反射方向的调整与控制,使得图 4 中的部分反射光线落在 A、C 两处。如图 7,利用自由曲面调整反射光线的反射方向,使得有足够多的反射光线到达出光面板上的 C 点(与图 4 中 C 点为同一点)进而消除混光暗区提高均匀度。图 7 中,入射光线与曲面交于 A(x, 0)处,过 A 点做此处曲面的切线,从而根据反射定律确定法线和反射角  $\theta$ ,法线交 y 轴于点 B 并以 B 为圆心做圆,半径  $AB=R$ ,取该圆为自由曲面的内切圆,则此处曲面的曲率半径为 R。O、C 两点的距离为 D。

在三角形 AOB 中,由勾股定理可得

$$OB = \sqrt{R^2 - x^2} \quad (7)$$

对于三角形 AOC,

$$AC = \sqrt{x^2 + D^2} \quad (8)$$

$$\sin\angle ACO = \frac{x}{AC} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + D^2}} \quad (9)$$

在三角形 ABC 中,由三角形的正弦定理可得

$$\frac{R}{\sin\angle ACB} = \frac{R}{\frac{x}{\sqrt{x^2 + D^2}}} = \frac{D + \sqrt{R^2 - x^2}}{\sin\theta} \quad (10)$$

在该设计方案中,  $d$  为已知,由于光线数量趋近于无穷,并且考虑到工业过程中实现的可能性和简便性,设计时只针对具有代表性的光线进行研究并计算设计曲面,因此  $x$  和  $\theta$  可认为是已知量。因此可将式(10)等价对式(11)<sup>[14]</sup>求解零点,借助 Matlab 软件可计算出曲面在该点的曲率半径。

$$F(R) = \left[ \frac{(x^2 + D^2)(\sin\theta)^2}{x^2} - 1 \right] R^2 - \frac{2D\sqrt{x^2 + D^2}\sin\theta}{x} R + D^2 + x^2 \quad (11)$$

带有自由曲面的反光背板的设计流程如图 8。

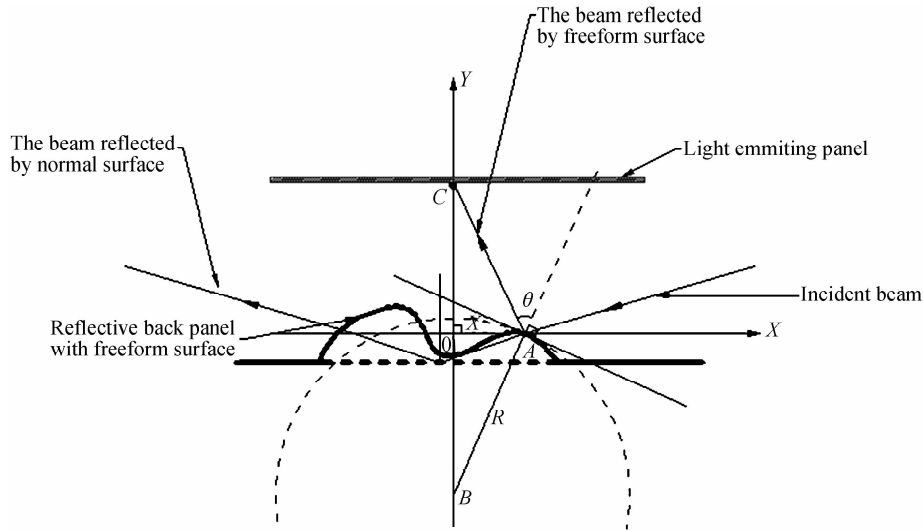


图 7 自由曲面反光背板理论分析

Fig. 7 The diagram to analyze the reflective back panel with freeform surface

在设计反光背板时添加自由曲面的区域可以借助式(6)而唯一确定,但是在设计自由曲面的形状时,需要充分考虑工程应用中的可操作性和可实现性,由于不可能选遍所有光线,因此选取的光线不同,在计算自由曲面的曲率半径时将得出不同的数值,构建出的自由曲面背板的形状也就不是唯一的,但是在整个设计过程中应始终遵循出光尽可能均匀,混光暗区尽可能小的原则。

## 2 参数优化与模拟仿真

根据 1.2.3 节的分析,并结合式(6)可知,在光纤紧密排列的情况下,自由曲面的位置与光纤阵列的间距  $l$ , 光纤投射角  $\alpha$  有关,因此为了简化研究过程,需要进一步进行参数优化. 根据式(6),结合 Tracepro 软件仿真,进行参数优化. Tracepro 仿真模型如图 9.

初始模型各项参数为:灯具反射背板尺寸 240 mm × 300 mm,出光面板尺寸 240 mm × 80 mm,控制灯具厚度在 27 mm 范围内,光纤出光面中心距离反光背板  $y=10$  mm,光纤数量为 40 根,平均分布在平板灯两侧且紧密排列,光纤直径为 12 mm,平凸柱面透镜直径为 20 mm,与光纤出光面的间距为 5 mm,光源模型的构建如 2.2.1 所述.

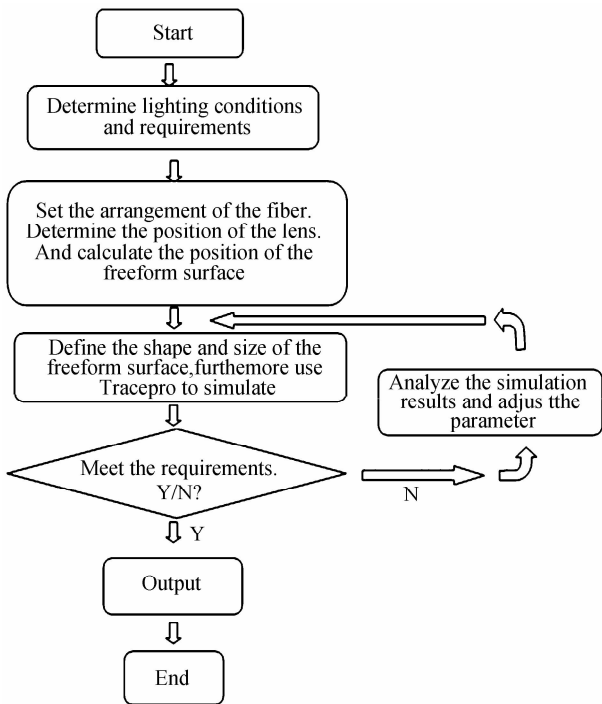


图 8 带有自由曲面的反光背板的设计流程

Fig. 8 The flow chart of designing the reflective back panel with freeform surface

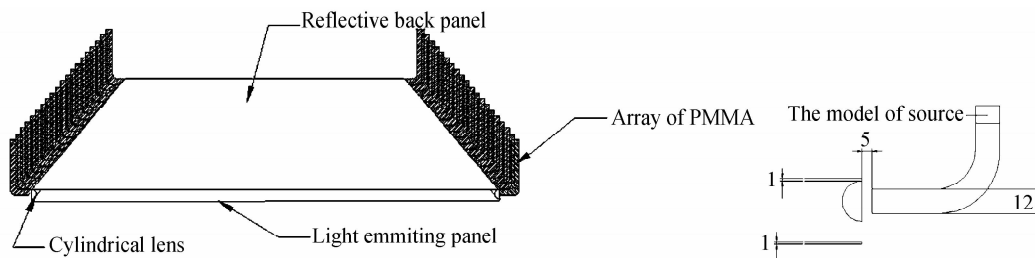


图 9 平板灯仿真模拟初始模型

Fig. 9 Initial simulation model of this panel light

为了保证灯具具有较大的光强,并且还要便于自由曲面背板的设计,掠射光线在反光背板上的掠射效果不仅应该有较大的峰值照度,而且掠射光斑面积也应该尽量大,峰值照度和光斑面积均受到投射角 $\alpha$ 的影响.借助 Tracepro 软件得出,在反光背板的一侧,投射角和峰值照度与光斑面积的关系分别如图 10 和图 11 所示.从图中可见 $8^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $11^\circ$ 时,在掠射光斑面积衰减并不明显的前提下具有较大的峰值照度.优化后的投射角参数仅取 $8^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $11^\circ$ ,此时,反光背板上自由曲面的设计区域分别为距离两侧边框 $21\sim 45$  mm、 $24\sim 42$  mm、 $33\sim 51$  mm、 $30\sim 42$  mm 的范

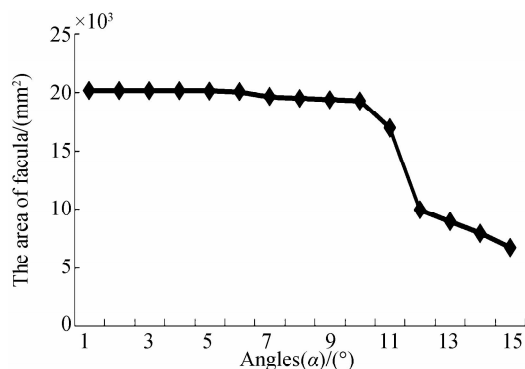


图 10 掠射光斑面积与投射角之间的关系  
Fig. 10 The relationship between facula's area and different angles

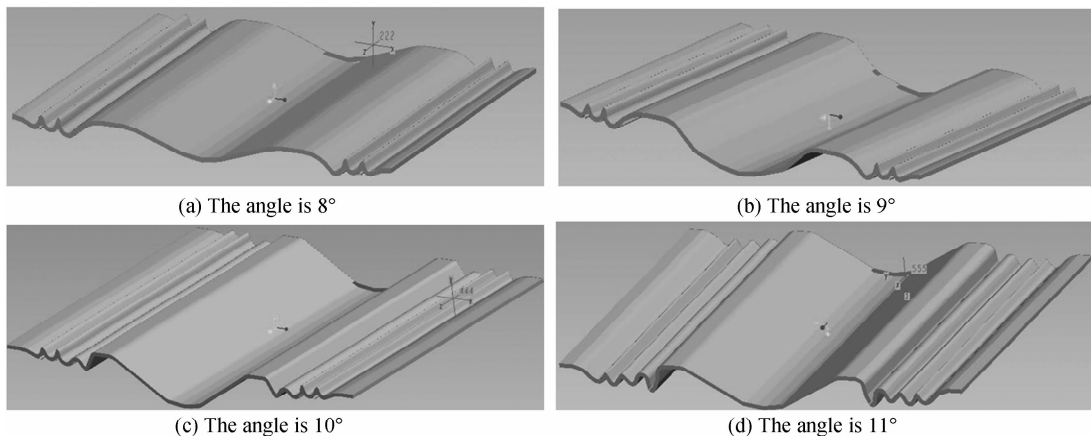
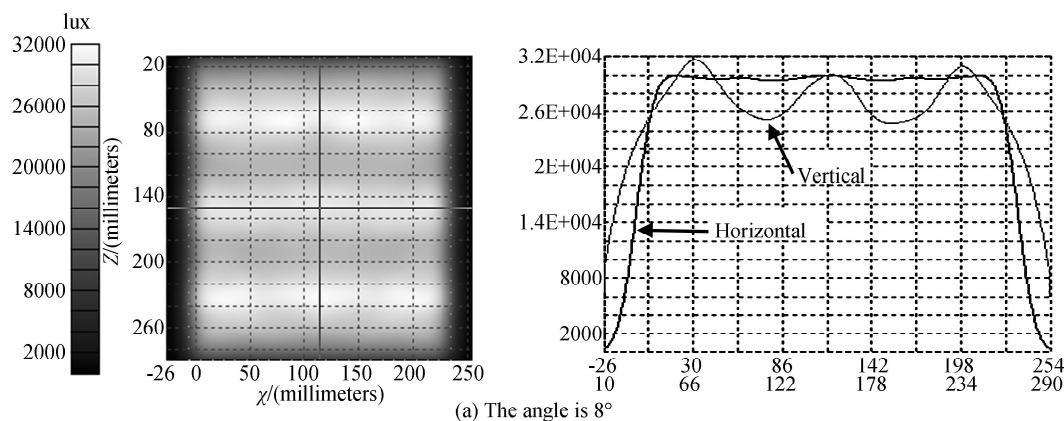


图 12 不同投射角下对应设计出的自由曲面反光背板三维模型  
Fig. 12 3D maps of reflective back panel with freeform surface for different angles



(a) The angle is  $8^\circ$

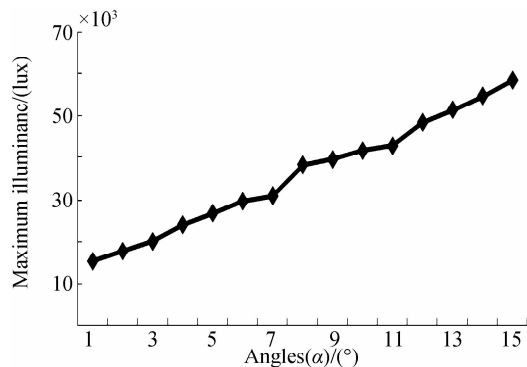


图 11 反光背板上峰值照度与投射角之间的关系  
Fig. 11 The relationship between maximum illumination and different angles

围内以及每个角度下放光背板的中央.通过 Pro/ENGINEER 软件设计所得的自由曲面反光背板如图 12,并将设计所得反光背板导入 Tracepro,并根据 1.2 的分析设立光源模型及其他光学元件,进行模拟并输出模拟结果如图 13.

最终设计得到一个长 $\times$ 宽为 $300$  mm $\times$  $240$  mm,厚度不超过 $27$  mm 的无导光板自然光平板灯,当投射角分别为 $8^\circ$ 、 $9^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $11^\circ$ 时,设计不同的自由曲面反光背板,借助 Tracepro 软件进行仿真得到灯具的九点照度均匀度(九点最小照度/九点平均照度)分别可以达

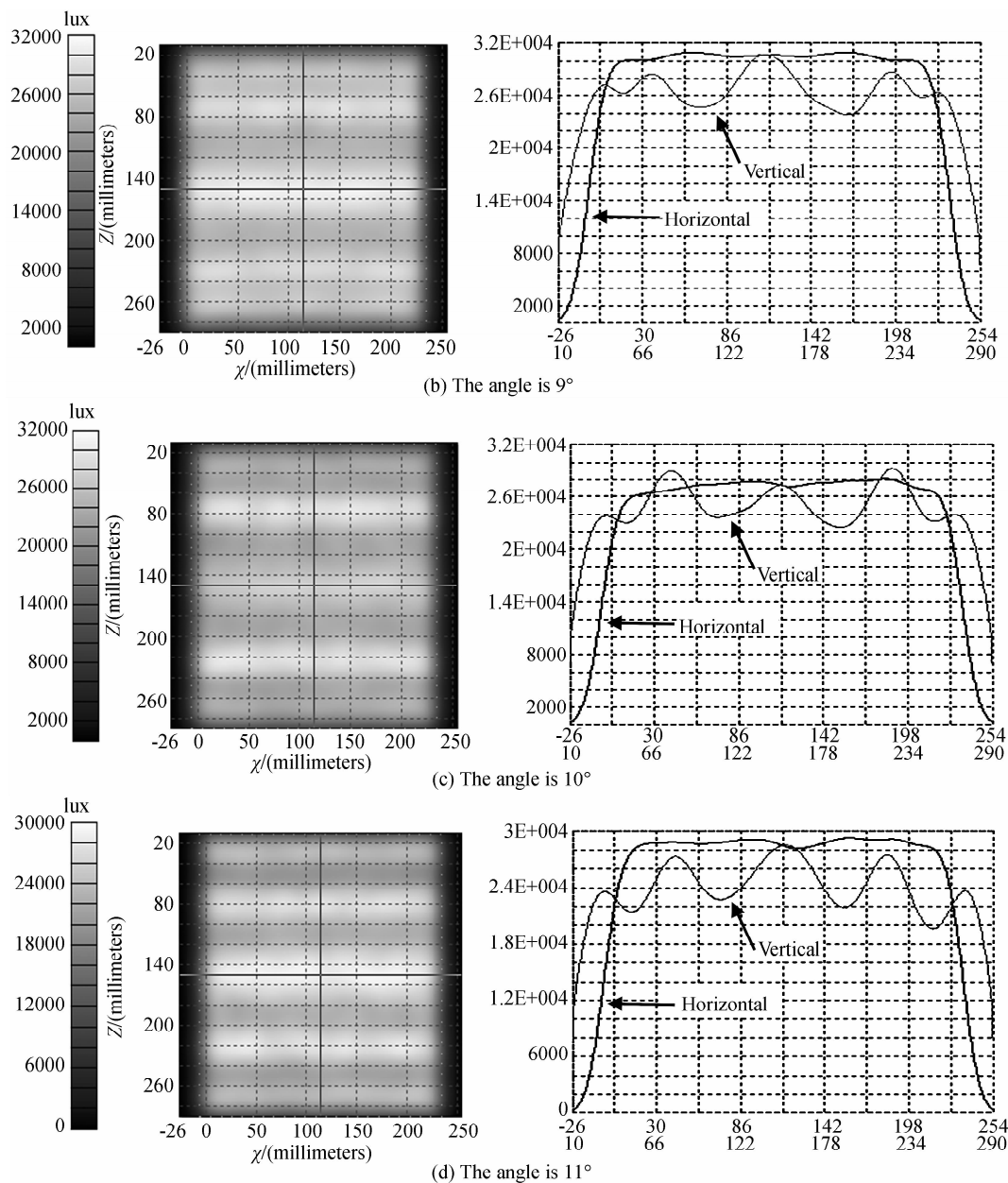


图 13 不同投射角下出光面板的照度均匀度

Fig. 13 Illumination maps for different angles between optical fiber and the reflective back panel

到 92.5%、92.9%、94.1%、86.9%，完全可以满足普通室内照明的需求。

### 3 结论

以光学设计为基础,理论分析并采用 Tracepro 软件进行模拟仿真,设计了一个长×宽为 300 mm×240 mm,厚度不超过 27 mm 的侧入式无导光板自然光平板灯。当光纤和内部柱面透镜的投射角分别为 8°、9°、10°、11°时,设计不同的自由曲面反光背板,仿真得到的灯具的照度均匀度分别达到 92.5%、92.9%、94.1%、86.9%,满足普通室内照明的需求。在普通室内照明领域,该灯具有较为广阔的应用前景。

#### 参考文献

[1] PENG Peng, ZHENG Jie, ZHOU Yu-li, et al. The energy

efficient analysis of top daylighting system [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2007, **18**(1): 9-20.

彭鹏,郑洁,周玉礼,等. 顶部采光的节能分析[J]. *照明工程学报*, 2007, **18**(1): 9-20.

[2] ZHANG Yao-ming. Research on sunlight collecting and illuminating system [J]. *Engineering Science*, 2002, **4**(9): 63-68.

张耀明. 采集太阳光的照明系统研究[J]. *中国工程科学*, 2002, **4**(9): 63-68.

[3] PENG Peng, ZHENG Jie. The influence of daylighting on building energy consumption [J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2007, **12**(28): 1375-1379.

彭鹏,郑洁. 天然采光对建筑能耗影响的研究[J]. *太阳能学报*, 2007, **12**(28): 1375-1379.

[4] MA Xin-hui. The applications on architectural lighting of tubular skylight [J]. *Building Electricity*, 2007, **26**(4): 15-18.

马新慧. 自然光光导照明在建筑采光中的应用[J]. *智能建筑*

- 与城市信息,2007,**26**(4):15-18.
- [5] WANG Hong, YE Fei-fei, HUANG Hua-mao, *et al.* Design and realization of reflective current barrier for high brightness LED chips[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2012, **23**(6):1077-1081.  
王洪,叶菲菲,黄华茂,等. 高亮度LED芯片的反射型电流阻挡层设计与实现[J]. *光电子·激光*, 2012,**23**(6):1077-1081.
- [6] SONG Guo-hua, MIAO Jian-wen, JIAN Bin, *et al.* White LEDs from near - ultraviolet chip pre coated with RGB phosphors[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(12):1779-1783.  
宋国华,缪建文,姜斌,等. 近紫外芯片激发三基色荧光粉制作的白光LED[J]. *光电子·激光*, 2011,**22**(12):1779-1783.
- [7] YAN Xing-tao, YANG Jian-feng, XUE Bin, *et al.* Design of a novel LED collimating element based on freeform surface[J]. *Optoelectronics Letters*, 2013, **9**(1):9-12.
- [8] YU Gui-ying, ZHU Xu-ping, HU Shu-hong, *et al.* Thermal simulation and optimization design on a high-power LED spot lamp[J]. *Optoelectronics Letters*, 2011, **7**(2):117-121.
- [9] LEE Hsiao-wen, LIN Bor-syih. Improvement of illumination uniformity for LED flat panel light by using micro-secondary lens array[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(6):788-798.
- [10] LI Wei-jun. The present situation analysis of LED flat panel light [C]. 2012 (Hang zhou) China Yangtze River Delta Lighting Technology Forum, 2012, 32-34.  
李为军. LED平板灯现状分析[C]. 2012(杭州)中国长三角照明科技论坛论文集, 2012, 32-34.
- [11] XUE Xiao-di, ZHENG Hong-fei, MA Yan-yan, *et al.* Study on properties of a novel fiber guiding light solar illumination system[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2010, **30**(11):1321-1325.  
薛晓迪,郑宏飞,马燕燕,等. 一种新型光纤导光照明系统的性能研究[J]. *北京理工大学学报*, 2010,**30**(11):1321-1325.
- [12] TANG Guo-fu. The design of LCD backlighting system using sunshine[D]. South China University of Technology, 2014  
唐国富. 用于LCD显示的太阳光背光系统设计[D]. 华南理工大学, 2014.
- [13] HUANG C C, ALDALALI B, JIANG H. A bio-inspired cylindrical lens based on reflection from an array of micro-mirrors fabricated on a cylindrical flexible substrate [C]. *IEEE. Optical MEMS and Nanophotonics*, 2012, 222-333.
- [14] 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.