

LED 菲涅耳透镜光纤束耦合器设计

赖丽萍¹, 王文法², 庄其仁^{3*}

¹厦门工学院电子信息与电气工程学院, 福建 厦门 361021;

²漳州立达信灯具有限公司厦门分公司, 福建 厦门 361010;

³华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021

摘要 为了解决现有照明光纤束的发光二极管(LED)透镜耦合器的厚度和均匀性问题,根据菲涅耳光学理论和全反射原理设计了一款新型菲涅耳透镜耦合器。利用菲涅耳旋转曲面和自由曲面全反射旋转面,将LED朗伯光源发出的光束整形得到平顶光束,再耦合到光纤束中实现均匀照明。采用1 W的3535白光LED作为光源,在TracePro软件中对所设计的菲涅耳透镜耦合器模型进行光线追迹仿真。结果表明,当菲涅耳透镜最大直径为14.9 mm、厚度为7.8 mm、输出光束发散角度为60°时,在耦合距离为2 mm的接收屏上得到直径10 mm、照度均匀性达92%的均匀光场。

关键词 光学设计; 发光二极管; 菲涅耳透镜; 耦合器; 照度均匀度; 非球面设计

中图分类号 TN312+.8

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.022201

Design of LED Fresnel Lens Fiber Bundle Coupler

Lai Liping¹, Wang Wenfa², Zhuang Qiren³

¹College of Electronic Information and Electrical Engineering, Xiamen Institute of Technology, Xiamen, Fujian 361021, China;

²Zhangzhou Leedarson Lighting Co., Ltd., Xiamen Branch, Xiamen, Fujian 361010, China;

³College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract In order to solve the problem of the thickness and uniformity of the light emitting diode (LED) lens coupler for the existing lighting fiber bundle, a new type of Fresnel lens coupler according to the Fresnel theory and the total reflection principle is designed. The Fresnel rotating surface and the free-form surface total reflection rotation surface are used to shape the light beam emitted by the LED Lambert light source to obtain a flattened light beam, which is then coupled to the fiber bundle for uniform illumination. Using 1 W 3535 white LED as the light source, TracePro software is used to simulate the Fresnel lens coupler model. The results show that when the maximum diameter of the Fresnel lens is 14.9 mm, the thickness is 7.8 mm and the output beam divergence angle is 60°, a uniform light field with diameter of 10 mm and luminance uniformity of 92% is obtained on a receiving screen with a coupling distance of 2 mm.

Key words optical design; light emitting diode; Fresnel lens; coupler; illumination uniformity; aspheric design

OCIS codes 220.2945; 080.2740; 080.3620; 080.4298

1 引言

发光二极管(LED)光纤照明是近年来兴起的新颖室内和车内照明产品,具有节能、轻便、可装饰等优点。常见的LED与照明光纤的耦合方式有直接

耦合和透镜耦合两种^[1-3]。直接耦合方式直接将光源照射至光纤入射端面,结构简单,无需特别设计,成本低,但缺点也很突出,即耦合效率低;对于透镜耦合方式,目前市面上的LED光纤照明基本上都采用凸透镜耦合,耦合效率较高。当采用光纤束照明

收稿日期: 2017-08-28; 收到修改稿日期: 2017-09-11

基金项目: 福建省科技计划(高校产学合作)重大项目(2016H6016)

作者简介: 赖丽萍(1988—),女,硕士,助教,主要从事光电技术应用方面的研究。E-mail: lplai78@163.com

*通信联系人。E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn

时,凸透镜耦合无法实现均匀的配光,光纤束中心光纤亮度大于边缘光纤,配光效果差,因此需要专门设计的透镜耦合器。能实现均匀照明的 LED 透镜耦合器的透镜类型主要有反射式透镜^[4]、折射式透镜^[5]、复眼式透镜和折射反射复合式透镜^[6-7]等,上述透镜作为耦合器时,均匀配光耦合长度均较长,透镜厚度大,如同兴涛等^[8]研究的上开口半径为 15 mm,下开口半径为 11.2 mm 的铝材质反光杯,电镀铝材料的成本为普通聚碳酸酯/聚甲基丙烯酸甲酯的 3~5 倍;王子仪等^[9]基于全反射研究的发光二极管照明光纤耦合器最大直径为 17 mm,系统耦合效率为 60.74%;吴仍茂等^[10]根据能量守恒定律和折射-全反射设计的 LED 均匀照明的投射器有较好的透光率,但是只适用于远距离照明,无法满足光纤均匀配光的要求,这些耦合器体积较大,材料成本高,均不利于 LED 与光纤束的装配及实际应用。

本文根据全反射原理^[11-13]和非涅耳透镜基本原理^[14-16]提出了一种新型 LED 菲涅耳透镜光纤束耦合器,通过自由曲面全反射旋转面和非涅耳旋转曲面对 LED 发出的光线进行聚焦光束整形,使入射到光纤束的光线角度小于光纤束的数值孔径角,并实现入射面上光线能量的均匀分布。菲涅耳透镜耦合器采用片状的薄形透镜,与传统菲涅耳透镜的等差半径同心圆结构不同,本文设计了一种能获得精确配光的超薄锯齿形菲涅耳透镜耦合器,采用等厚度的特殊菲涅耳锯齿状透镜设计,利用小锯齿之间的间距变化、形状变化及锯齿数量的合理安排,实现光线能量的均匀分布,并解决了一般菲涅耳透镜存在的光能量浪费问题,即透过一般菲涅耳透镜的光线理论上有一部分不能到达设计目的地^[17-18],使所设计的菲涅耳透镜能满足光纤束均匀照明的要求。

2 基本原理

LED 光线入射到光纤束,要求入射光在光纤中满足全反射条件,即入射光角度不能大于光纤束的数值孔径角才可实现全光传输;而通过光纤束传输要求每根光纤的能量相同才能实现均匀照明。由此要求所设计的透镜耦合器对 LED 光束能进行较好的聚光,使光纤束入射光线角度小于数值孔径角,并且入射光线要尽可能均匀分布^[19-21]。

LED 菲涅耳透镜耦合器系统模型如图 1 所示,菲涅耳透镜的左边为 LED 光源,右边为光纤束,菲涅耳透镜出射面到光纤束端面的距离为耦合长度,设计的菲涅耳透镜耦合器系统部分包括菲涅耳透镜

及其与光纤束的耦合长度。LED 发出的光线经过菲涅耳透镜的自由曲面全反射旋转面和非涅耳旋转曲面的作用,对 LED 光源发出的朗伯光进行光束整形,自由曲面全反射旋转面的作用是聚集 LED 光源发出的发散光线,使所有聚集的光线接近于平行光,有利于使光纤束入射光线的角度小于数值孔径角;菲涅耳旋转曲面则对光线进行均匀分配,使目标面(光纤束端面)的光能量分布均匀。故所设计的菲涅耳透镜为全内反射型菲涅耳透镜。利用全内反射结合特殊等厚度锯齿状菲涅耳透镜设计,可实现耦合器体积小、高效低耦合损耗地将光线均匀耦合到光纤束。通过减小透镜厚度,节省材料,降低成本。另一方面,由于厚度减小,光吸收也减少,提高了光的利用率。

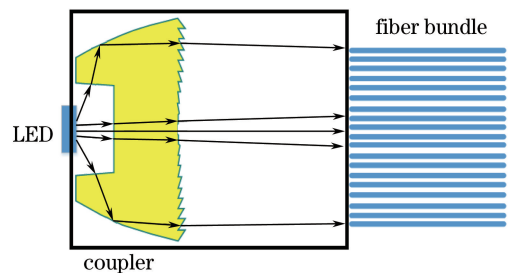


图 1 菲涅耳透镜耦合器系统模型

Fig. 1 System model of the Fresnel lens coupler

全内反射型菲涅耳透镜的二维设计示意图如图 2 所示,由于 LED 具有旋转对称性,菲涅耳透镜沿 OA 轴旋转 360° 即可得到相应的三维模型。如图 2 所示, AB 段和 BC 段为菲涅耳透镜耦合器的入射面, DE 段为自由曲面全反射旋转面, EF 段为菲涅耳旋转曲面,即光线经过耦合器后的出射面。LED 光源发出的朗伯型发散光束经过 AB 旋转面折射后出射,成为平行光或近似平行光;或者从 DE 面全反射后出射,再经过 EF 菲涅耳旋转曲面进入到光纤束。 AB 段为直线段, BC 段与 OA 段稍微倾斜 β 角度,有利于模具制造。所以,菲涅耳透镜耦合器主要针对自由曲面全反射旋转面和非涅耳旋转曲面进行设计。

2.1 菲涅耳透镜耦合器的自由曲面全反射旋转面设计原理

设材料的折射率为 n ,如图 3 所示,将 BC 段按角度均分为 N 等份,每份的角度为 $B_i = B_{\max} - iB_{\max}/N, 0 < i < N$,其中 B_{\max} 为分界角。 B_{\max} 点坐标为 $(r-h \tan \theta, h)$,光线在自由曲面全反射旋转面发生全反射,根据反射定律, Q_n 点所在的切线方程为

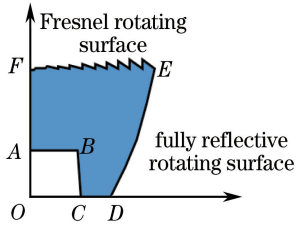


图2 菲涅耳透镜耦合器设计示意图

Fig. 2 Design diagram of the Fresnel lens coupler

$$y = \tan \left[\frac{\pi/2 + \arcsin(\cos B_n/n)}{2} \right] (x - x_n) + z_n, \quad (1)$$

式中 $B_n = B_{\max} - n \cdot B_{\max}/N$ 。当曲面分割足够细时, 可认为 Q_n 的后一点 Q_{n+1} 也在该切线上。

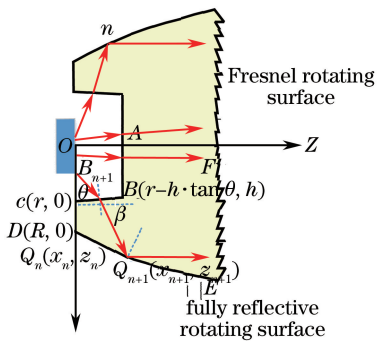


图3 自由曲面全反射旋转面设计原理图

Fig. 3 Design diagram of the fully reflective rotating surface of the free-form surface

Q_{n+1} 点所在的入射光线方程为

$$y = \tan \left[\arcsin \left(\frac{\cos B_{n+1}}{n} \right) \right] (x - r) + r \cdot \cot B_{n+1}, \quad (2)$$

式中 r 为图3中 c 点的横坐标。

曲线上任意点 Q_{n+1} 的坐标位于由(1)式和(2)式确定的两直线的交点上, 可通过求解方程组的方法获得。如图3所示, 将图3中的角度 B 细分为 $B_0, B_1, \dots, B_{\max}$ 。将 Q_0 点坐标 $x_0 = R, z_0 = 0$ 和 $B_0 = 90^\circ$ 代入(1)式, 将 $B_1 = 89^\circ$ 代入(2)式, 可求出 $Q_1(x_1, z_1)$ 的坐标, 以此类推, 求出一系列 Q 点坐标。用 MATLAB 编程求解, 再导入到 SolidWorks 中画出 3D 模型。其中投射器的折射率需大于 1.414, 才能满足全反射条件。

2.2 菲涅耳旋转曲面设计原理

如图4所示, 菲涅耳透镜上的菲涅耳旋转曲面在厚度方向按相等距离划分成若干份, 每一份的宽度为 d , 这种设计方法的优点是等厚度锯齿菲涅耳旋转曲面可以使透镜耦合器的杂散光减少, 在实际

加工过程中, 锯齿的尖端和底部不可能做到无限小, 而是有一定圆角, 这个圆角将会使光线不能到达应该到达的地方, 造成杂散光。锯齿宽度为 d , 锯齿尖端的圆角半径为 r , 并粗略认为在 r 范围内的光变成了杂散光, 光损失的比例为 r/d , 例如 $d = 1 \text{ mm}$, 加工精度造成的 $r = 0.05 \text{ mm}$, 则光损失为 5%, 这是菲涅耳透镜不可避免的光损失, 也是菲涅耳透镜的缺点。但相对于其他方法设计的菲涅耳透镜而言, 选用等厚度的菲涅耳锯齿宽度可以相对减少这种损失, 因为同样厚度的条件下可灵活减少锯齿数目, 平均宽度更宽, r/d 相对更小, 因此光损失更少, 可增大透镜的强度, 进一步减少由于加工误差引起的杂散光。因此, 设计等厚度的菲涅耳锯齿形状, 并选取较少的锯齿数目, 可以有效提高光利用效率。

设计时, 首先将理想的光学表面分割, 沿光线方向等厚度划分菲涅耳锯齿表面。将 LED 光源的光强分布分为两部分, 一部分经自由曲面全反射旋转曲面反射的光线平行入射到菲涅耳旋转曲面的边缘部位, 另一部分没有经自由曲面全反射旋转曲面反射的光线以较小的发散角入射到菲涅耳旋转曲面的中心部位。将 LED 光源发出的光线按角度分为 M 等份, 每一等份对应的光线通过等间距划分的菲涅耳表面的一个锯齿, 宽度为 d , 根据朗伯光源模型, 可得菲涅耳旋转曲面中心部位每一个锯齿的光强度为

$$I_m = I_0 \cos \left(\frac{m\pi}{2M} \right), m \leq m_R, \quad (3)$$

式中 m 为每份光线与图3中的中心光轴 OF 所成角度的位置, m_R 为介于 OF 与 OE 之间的 m 的取值。如图4(a)所示, 菲涅耳旋转曲面的边缘部位每一个锯齿的光强度为

$$I_m = I_0 \left\{ \cos \left(\frac{m\pi}{2M} \right) + \cos \left[\frac{(M - m - m_R)\pi}{2M} \right] \right\}, \quad m_R \leq m \leq m_E, \quad (4)$$

式中 m_E 为菲涅耳旋转曲面边缘所对应 m 的取值。(3)式和(4)式表明通过菲涅耳透镜每一个锯齿的光强度是不相等的。为了在目标面获得均匀分布的光强度, 将通过不同锯齿的光线进行不同程度的会聚, 设光纤束的接收半径为 ρ , 则 LED 光源发出的光线按角度 M 等分后经过宽度为 d 锯齿状透镜作用后每份在光纤束接收端面上形成圆环宽度为 $\Delta\rho$ 内的光强度为 I_t 。菲涅耳透镜锯齿与中心距离为 x , 宽度为 d , 根据能量守恒, 可得关系式

$$2\pi\rho\Delta\rho I_t = 2\pi x d I_0 \cos \left(\frac{m\pi}{2M} \right), m \leq m_R, \quad (5)$$

$$2\pi\rho\Delta\rho I_t = 2\pi x d I_0 \left\{ \cos\left(\frac{m\pi}{2M}\right) + \cos\left[\frac{(M-m-m_R)\pi}{2M}\right] \right\},$$

$$m_R \leq m \leq m_E. \quad (6)$$

根据光线映射关系式[(5)式和(6)式]和折射定律,可计算得到在光纤束目标面上获得光强度均匀分布的非涅耳透镜锯齿形状,如图4(b)所示。所设

计非涅耳旋转曲面在保持透镜理想光学性能的同时,令锯齿垂直于光源,使光学损失减少到最小,相对倾斜和弯弧可以得到更高的效率。LED光源在光轴部分的发光强度大、边缘部分发光强度小,等厚度法划分得到的锯齿采用中间部分锯齿高度比在边缘部分的锯齿高度小,有效减少了光在锯齿透镜中传播所产生的光损耗率,提高了光的利用率。

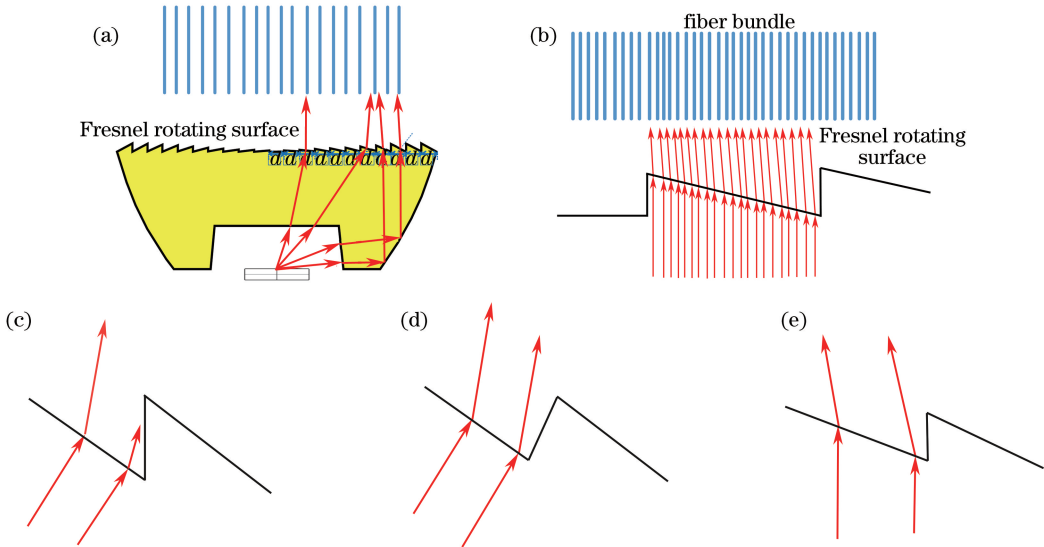


图4 菲涅耳旋转曲面示意图。(a)曲面结构图;(b)单个锯齿设计原理;(c)一般菲涅耳透镜锯齿形状与光线;(d)中心锯齿形状与光线;(e)边缘锯齿形状与光线

Fig. 4 Schematic diagram of the Fresnel rotating surface. (a) Structural diagram of the curved surface; (b) design principle of the single indentation; (c) rays and the indentation shapes of the normal Fresnel lens; (d) rays and the indentation shapes of the centrality; (e) rays and the indentation shapes of the edge

所设计的菲涅耳透镜锯齿形状与一般菲涅耳透镜锯齿形状的比较如图4(c)~(e)所示,图4(c)所示一般菲涅耳透镜由于锯齿形状单一,存在光线遮挡,无法使光线全部到达设计的目的地;图4(d)所示中心锯齿形状的垂直部分有一定倾斜,厚度高;此处设计的菲涅耳透镜锯齿形状[图4(e)]是变化的,较好地控制了锯齿的倾斜度,消除了光线遮挡缺陷。

3 仿真结果及分析讨论

根据上述设计原理设计了菲涅耳透镜耦合器。菲涅耳透镜采用 Polycard 材料,折射率为 1.59,菲涅耳透镜剖面最大直径为 14.9 mm,高度为 7.8 mm (包括最高的菲涅耳锯齿状模型),设计后的菲涅耳透镜 3D 模型如图 5 所示,将设计好的模型导入 TracePro 软件中,采用 1 W 的 3535 型、光通量为 100 lm 的白光 LED 作为光源,裸光源 LED 的配光曲线如图 6 所示,发光近似服从朗伯分布,光源发散角度较大,为 120° 。耦合光纤每根直径为 0.5 mm,

光纤束为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 。按照图 1 所示系统模型,在 TracePro 软件中建立相应模型;3535 型 LED 光源模型上表面正中心定为坐标中心点 $(0,0,0)$, z 轴正方向为 LED 发光方向;菲涅耳透镜耦合器顶部 CD 段和 LED 光源上表面发光面水平相切,光纤束接收屏的位置先建立在 $(0,0,10)$,即与菲涅耳透镜耦合器出射面的距离为 2.2 mm。设置各参数后,对系统进行光线追迹仿真。首先仿真 3535 型 LED 光

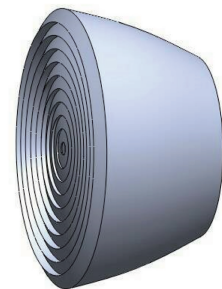


图5 菲涅耳透镜耦合器 3D 模型图
Fig. 5 3D model of the Fresnel lens coupler

源光线直接入射到光纤束接收屏上的能量分布,如图 7(a)所示,光源发出的光线配光角度大、中心光强较强,在接收屏上的能量分布不均衡;其次,仿真 3535 型的 LED 光源在所设计的菲涅耳透镜耦合器作用下光线直接入射到光纤束接收屏上的能量分

布,如图 7(b)所示,可以看出光线发散角得到聚集并且对光束重新整形分布,在接收屏范围内,光线能量均匀性较好。光线束接收屏的均匀性为归一化后接收屏区域内的最小光照度值与最大光照度值之比^[22-23]。

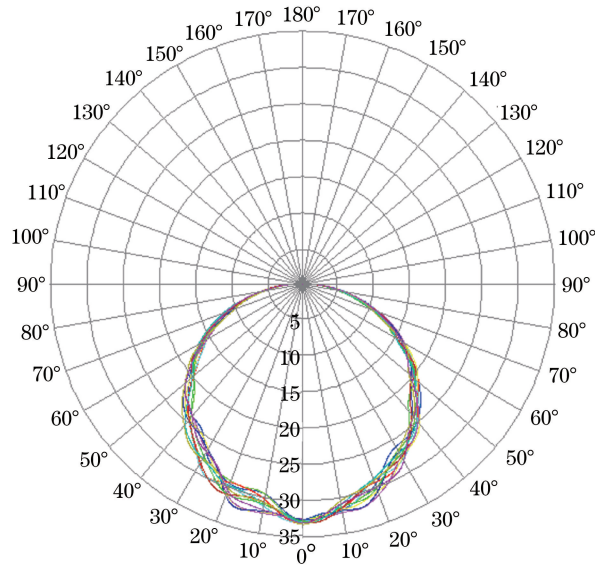


图 6 裸光源 LED 配光曲线

Fig. 6 Light distribution curves of naked LED

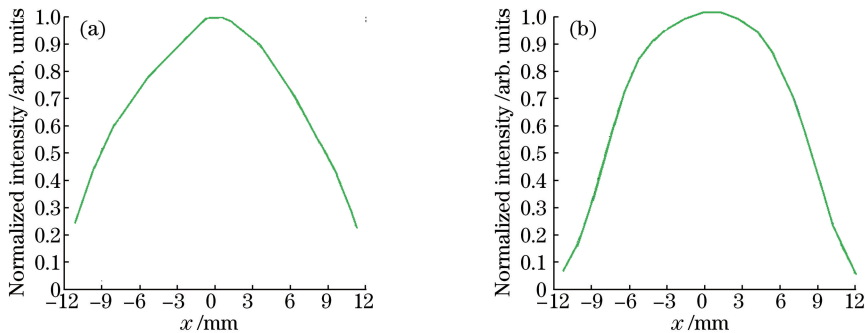


图 7 (a) 3535 型 LED 光源直接入射在接收屏上的能量分布图;

(b) 3535 型 LED 光源在菲涅耳透镜耦合器作用下入射在接收屏上的能量分布图

Fig. 7 (a) Energy distribution of 3535 LED on the receiving screen; (b) energy distribution of the 3535 LED on the receiving screen with Fresnel lens coupler

3.1 菲涅耳透镜和光纤束最佳耦合间距仿真

菲涅耳透镜用于 LED 光线重新整形分配能量,使到达光纤束入射面的光线具有平顶特性,实现能量均匀分布,光纤束与菲涅耳透镜之间距离 H 对光纤束入射面的光强度均匀性也会产生影响。依照上述所提光线束接收屏均匀性的计算方式,模拟仿真菲涅耳透镜耦合器与光纤束接收屏的最佳耦合间距。如图 8 所示,可以看到不同的耦合间距对光纤束接收面的照度均匀性影响很大,当耦合间距为

1 mm 时,LED 光纤在面积为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的光纤束耦合接收面范围内均匀性只有 88%,而当耦合距离为 2 mm 时,其均匀值达 92%。考虑到光的利用率,LED 光源与光纤束耦合距离不宜太远,以避免造成光损失。所以所设计的菲涅耳透镜与光纤束最佳的耦合间距 $H = 2 \text{ mm}$ 。

3.2 菲涅耳透镜耦合器配光及光利用率仿真

在确定了所设计的菲涅耳透镜耦合器的耦合器与光纤束最佳耦合间距后,对 LED 光源的配光及利

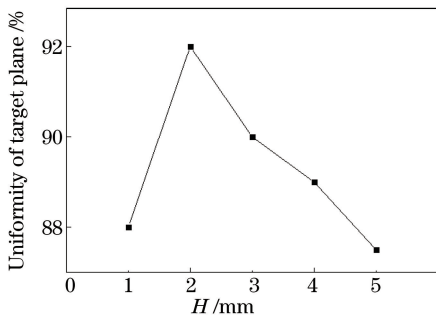


图 8 不同耦合间距 H 对光纤束接收面均匀性的影响

Fig. 8 Effect of different coupled distance H on the uniformity of receiving surface of the fiber bundles

用率进行仿真。首先,在 TracePro 软件中分别仿真单独 LED 光源的光通量、LED 光源直接耦合到光纤束的光通量和 LED 光源在非涅耳透镜耦合器的作用下耦合到光纤束的光通量。如表 1 所示,1 W 的 3535 型白光 LED 裸光源的光通量为 100 lm; LED 光源直接耦合到光纤束接收屏上,光纤束接收屏的光通量为 57.54 lm; LED 光源在非涅耳透镜耦合器的作用下,耦合到光纤束接收屏上的光通量为 75.18 lm,可见所设计的菲涅耳透镜耦合器能较好地将光束聚集,并有效地耦合到光纤束中。

表 1 LED-菲涅耳透镜耦合器的光通量对比

Table 1 Comparison of the luminous flux of LED-Fresnel lens coupler

Order	Test item	Total luminous flux /lm
1	Naked LED	100.00
2	Naked LED coupled with the fiber bundle	57.54
3	Naked LED with the coupler and the fiber bundle	75.18

综上,所设计的菲涅耳透镜耦合器,在光纤束入射面的照度分布图和配光曲线如图 9 所示。图 9(a)为 LED 光线在非涅耳透镜耦合器作用下,耦合距离为 2 mm 入射到光纤束接收屏上得到直径 10 mm、照度均匀性达到 92% 的均匀光场。横坐标,纵坐标所表示的是接收屏上光斑的尺寸,单位为 mm。优化后的菲涅耳透镜与光纤束的最佳耦合距离为 $H=2$ mm。可以看到光线在光纤束接收屏上 10 mm×10 mm 面积内均匀分布,配光曲线由原来的朗伯光源整形为 60° 的平顶光束。

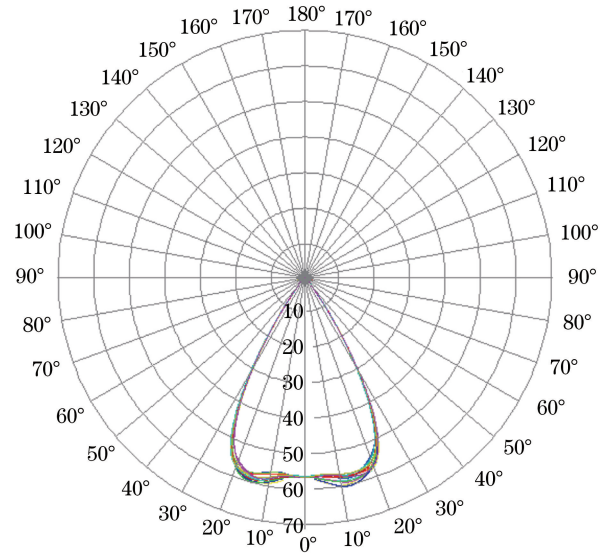
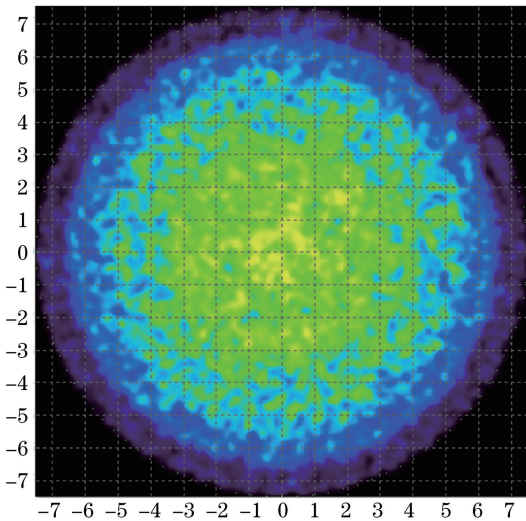


图 9 菲涅耳透镜耦合器的 (a) 侧入式耦合平面照度分布图和 (b) 配光曲线

Fig. 9 (a) Illumination distribution diagram of side-entry coupling plane and (b) light distribution curves of the Fresnel lens coupler

4 结 论

基于全反射原理和菲涅耳基本原理,对自由曲面全反射旋转面和菲涅耳旋转曲面进行设计,所设

计的菲涅耳透镜锯齿旋转曲面将光源的光强分布与照明目标面的照度分布加以匹配,实现了光强的均匀分布和光纤束入射光线能量的均匀分配。在 TracePro 软件中对所设计模型进行光线追迹模拟,

结果表明,所设计的耦合器在光纤束 $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 入射面上的均匀性能达到 92% ,耦合到光纤束入射面的耦合效率达 75% 。该耦合器具有耦合效率高、体积小、材料成本低等优点,是一种能够有效提升 LED 光纤束耦合效率和耦合均匀性的方式。

参 考 文 献

- [1] Shi K R, Zhu C Q. Design of coupling system between LED and optical fiber based on ZEMAX[J]. Optical Technique, 2016, 42(5): 474-477.
石科仁, 朱长青. 基于 ZEMAX 的 LED 光源与光纤的耦合系统设计[J]. 光学技术, 2016, 42(5): 474-477.
- [2] Zan Q B, Hao X J, Zhou H C. Design of laser light path of optical fiber coupling lens based on Zemax [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 102201.
笄清波, 郝晓剑, 周汉昌. 基于 Zemax 光纤耦合透镜激光光路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102201.
- [3] Huang B Y, Lin Z X, Chen E G, *et al.* Design and implementation of optical coupling module in side-LED backlight system[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(2): 0222003.
黄碧云, 林志贤, 陈恩果, 等. 侧入式 LED 背光模组中光耦合模块的设计与实现[J]. 光学学报, 2016, 36(2): 0222003.
- [4] Zhao H F, Liu H, Sun Q, *et al.* Design of RIXR LED collimate system [J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(7): 1472-1479.
赵会富, 刘华, 孙强, 等. 基于折射/全反射/反射/折射结构的 LED 准直系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(7): 1472-1479.
- [5] Zhang K, Sun C Y, Wang W J. Freeform surface lens design for uniform illumination with square spot [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2014, 25(1): 82-88.
张康, 苏成悦, 王维江. 均匀照明方形光斑的 LED 自由曲面透镜设计[J]. 照明工程学报, 2014, 25(1): 82-88.
- [6] Wang P P, Yang X B, Zhu J F, *et al.* Design and analysis on large area uniform illumination with fly-eye lens [J]. Journal of Applied Optics, 2014, 35(5): 771-778.
王沛沛, 杨西斌, 朱剑锋, 等. 基于复眼透镜的大面积均匀照明方案研究[J]. 应用光学, 2014, 35(5): 771-778.
- [7] Feng Q B, Li Y N, Li Q G, *et al.* Design of double freeform surface lens based on LED radiation characteristics[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(8): 1884-1893.
冯奇斌, 李亚妮, 李其功, 等. 基于发光二极管配光曲线设计自由曲面透镜[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1884-1893.
- [8] Yan X T, Yang J F, Zhang G Q, *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.
闫兴涛, 杨建峰, 张国琦, 等. 基于补偿法的均匀照明自由曲面 LED 反光杯设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 718-723.
- [9] Wang Z Y, Zhang R J, Xu W, *et al.* A light emitting diode-lighting fiber coupler based on total reflection [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(9): 0922007.
王子仪, 张荣君, 徐蔚, 等. 基于全反射的发光二极管照明光纤耦合器的设计与研制[J]. 光学学报, 2012, 32(9): 0922007.
- [10] Wu R M, Tu Da W, Huang Z H. Design of uniform illumination projector with high power LED [J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(3): 372-376.
吴仍茂, 屠大维, 黄志华. 一种实现大功率 LED 均匀照明的投射器设计[J]. 应用光学, 2009, 30(3): 372-376.
- [11] Hao J, Liu H, Sun Q, *et al.* Optimization of freeform surface lens for collimating illumination of LED [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2014, 51(3): 032302.
郝剑, 刘华, 孙强, 等. LED 自由曲面准直透镜的优化设计方法[J]. 激光与光电子学进展, 2014, 51(3): 032302.
- [12] Zhao H, Li C G, Chen Z T, *et al.* Design of collimating lens with uniform illumination for LED based on double freeform surface [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(4): 0422001.
赵欢, 李长庚, 陈志涛, 等. 基于双自由曲面的 LED 均匀照明准直透镜设计[J]. 光学学报, 2017, 37(4): 0422001.
- [13] Li Y X, Liang W Y, Ye H G, *et al.* COB LED based optical design of transmitting end with uniform luminous intensity distribution for visible light communication systems [J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(10): 1022002.

- 李远兴, 梁文跃, 叶湖贵, 等. 基于 COB LED 的均匀光强分布可见光通信系统发射端的光学设计[J]. 光学学报, 2016, 36(10): 1022002.
- [14] Sun Y J, Liu J, Lin H B, *et al.* Fresnel lens of freeform surface for realizing uniform light distribution on general LED light sources[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(6): 062201.
- 万运佳, 刘杰, 林浩博, 等. 一般 LED 光源均匀配光的自由曲面菲涅耳透镜[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(6): 062201.
- [15] Wang J J, Wang X, Ning D. Off-axis non-rotationally symmetric superposition square spot uniform concentration Fresnel Lens [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(6): 0622003.
- 王进军, 王侠, 宁铎. 离轴非旋转对称叠加方形光斑均匀聚光菲涅耳透镜[J]. 光子学报, 2017, 46(6): 0622003.
- [16] Qian K Y. Near field optical modeling of LED and design optimization for direct-type backlight optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35 (5): 0522001.
- 钱可元. LED 近场光学模型与直下式背光源透镜的设计优化[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0522001.
- [17] Liu Y Q, Shen Z C, Lu Y, *et al.* Design and performance research of uniform concentrating Fresnel lens[J]. *Optoelectronic Technology*, 2012, 32(4): 263-266.
- 刘永强, 申作春, 芦宇, 等. 均匀会聚菲涅耳透镜设计及性能研究[J]. 光电子技术, 2012, 32(4): 263-266.
- [18] Yang M H, Tian Z S, Yin T T, *et al.* Design of Fresnel lens with high efficiency short focal length and large size [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(11): 98-101.
- 杨茂华, 田兆硕, 尹田田, 等. 高效大尺寸短焦距菲涅耳透镜设计[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(11): 98-101.
- [19] Tian Z H, Wang R G, Chen Y, *et al.* Optical design and research of high optical efficiency and high filling ratio of LED display screen[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(2): 251-256.
- 田志辉, 王瑞光, 陈宇, 等. LED 显示屏高光效高画面填充比光学设计与研究[J]. 发光学报, 2014, 35(2): 251-256.
- [20] Liu H, Sun C W, Li J, *et al.* Optical design of side-lighting WLED for LCD backlight [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 012201.
- 刘红, 孙传伟, 李伽, 等. 液晶边光式白色 LED 背光源的光学设计[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(1): 012201.
- [21] Zeng S S, Liu J, Lu L G, *et al.* Experimental research on improving uniformity of fiber-optical irradiation device[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(4): 0422004.
- 曾珊珊, 刘建, 卢利根, 等. 改善光纤照射装置均匀性的实验研究[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0422004.
- [22] Chen S J, Hsu R Q. Study on the optical coupling efficiency of LED and light luide plate in side light source backlight module [D]. Hsinchu: National Chiao Tung University, 2015.
- 陈士杰, 徐瑞坤. 侧入光源式背光模组中发光二极体与导光板之光耦合效率研究[D]. 新竹: 国立交通大学, 2015.
- [23] Bai W J, Li F S, Luo FG, *et al.* Brightness uniformity judgement method of side entering type LED backlight's simulation[J]. *Video Engineering*, 2015, 39(7): 64-68.
- 白王静, 李福山, 罗福根, 等. 侧入式 LED 背光源仿真中亮度均匀性的判定方法[J]. 电视技术, 2015, 39(7): 64-68.