

基于 LED 光源与聚合物光纤束的能量 均匀透镜耦合器设计

张晓婷, 刘楚嘉, 漆宇, 蔡智辉, 吴逢铁, 庄其仁

华侨大学信息科学与工程学院福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 研究了以大功率发光二极管(LED)作为光源的聚合物光纤束(POFB)透镜耦合器的原理和设计方法,基于能量补偿和坐标迭代法设计了一种能量均匀分布自由曲面透镜耦合器。透镜耦合器由两个折射曲面和两个反射曲面以及一个环形柱透镜面组成,折射曲面将修正的朗伯型大功率 LED 光束中发散角度较小的光线均匀分配在 POFB 端面上;反射曲面将 LED 光束中发散角度较大的光线作为补偿光线进行能量重新分配以提高目标面的照度均匀性,并以光纤束端面的照度均匀性和有效光利用率为优化目标对透镜耦合器结构进行优化设计。光学仿真结果表明,当采用 3535 规格的 LED 作为光源时,设计的耦合器可使直径为 0.5 mm 的 20×20 根 POFB 端面照度均匀性达到 92%,有效光利用率达到 71%。

关键词 几何光学; 发光二极管; 聚合物光纤束; 自由曲面; 光学仿真

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0208001

Design of Lens Coupler with Uniform Energy Distribution Based on LED Source and Polymer Optical Fiber Bundle

Zhang Xiaoting, Liu Chujia, Qi Yu, Cai Zhihui, Wu Fengtie, Zhuang Qiren

Fujian Key Laboratory of Light Propagation and Transformation, College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract The principle and design method of polymer optical fiber bundle (POFB) lens coupler with high-power light emitting diode (LED) as light source is studied. Based on energy compensation and coordinate iteration method, a free-form lens coupler with uniform energy distribution is designed. The lens coupler consists of two refraction free-form surfaces, two reflection free-form surfaces and a circular cylindrical lens surface. The small divergence angle of the modified Lambertian high-power LED beam is quasi-uniformly distributed on the end face of POFB through refractive free-form surface. The reflection free-form surface reallocates the energy of large divergence angle of LED beam as compensation to improve the target surface illumination uniformity. Lens coupler is designed and optimized for illumination uniformity and effective light utilization of the end face of the fiber bundle. The results of optical simulation show that when the 3535 LED is used as the light source, the designed coupler can make the illumination uniformity of the 20×20 polymer fiber bundle with the diameter of 0.5 mm reach 92% and effective light utilization reach 71%.

Key words geometric optics; light emitting diode; polymer optical fiber bundle; free-form surface; optical simulation

OCIS codes 080.4298; 080.3620; 080.2740; 220.1250; 060.1810

1 引 言

随着光纤种类的不断增多,光纤照明技术已得到越来越多的应用^[1-3]。光纤照明的实现方式有端

发光、体发光、侧发光等,但无论是哪种发光方式,光源与光纤的光耦合质量都直接影响着整个系统的性能^[4]。光源和光纤的耦合一般有直接耦合、反射器耦合和透镜耦合等方法^[5-6]。由于直接耦合效率

收稿日期: 2017-07-14; 收到修改稿日期: 2017-08-20

基金项目: 福建省科技计划(高校产学研合作)重大项目(2016H6016)、华侨大学研究生科研创新能力培育项目(1400401022)

作者简介: 张晓婷(1991—),女,硕士研究生,主要从事自由立体显示方面的研究。E-mail: 251674413@qq.com

导师简介: 庄其仁(1960—),男,博士,教授,主要从事照明与显示技术和光电检测技术方面的研究。

E-mail: qrzhuang@hqu.edu.cn(通信联系人)

低^[7],反射器耦合^[8-9]固定装置较复杂,因此透镜耦合^[10-13]是被研究最多的耦合方式。用于单光纤的发光二极管(LED)光源耦合器由于不需要考虑光纤入射端面的光能量分布均匀性,因此耦合器结构相对比较简单。

聚合物光纤束(POFB)照明系统是将数量较大的聚合物光纤(POF)在入射端紧密捆绑在一起的一种特殊光纤照明系统,其中的每一根光纤传输的光能量都相等,因此要求LED光源耦合到POFB入射端面的光能量是均匀分布的,不能采用现有LED光源与大芯径POF的耦合器结构^[14]。王艳红等^[15]研究的基于微透镜阵列的光纤耦合系统,可以实现光纤束的均匀耦合,但该耦合器需要光源数量与光纤数量具有一对一关系,难以应用在光纤数量大的POFB照明系统中,其主要适合于大功率集成激光光源与光纤数量较少的光纤束的耦合。近年来,以自由曲面设计为原理的光学设计方法得到广泛的关注,均匀照明自由曲面LED反光杯和透镜,从模型设计到模拟方面都给出了多种较成熟的方案,如闫兴涛等^[16]利用补偿法设计了均匀照明自由曲面LED反光杯,模拟仿真结果表明其可用于5~10 m高度的LED灯光均匀照明,照度均匀性优于85%;孙理伟等^[17]根据Snell定律和边缘光学理论设计了用于固态照明的自由曲面微透镜,模拟仿真结果表明其可实现3 m高度的LED灯光均匀照明,照度均匀性优于92%;刘欣^[18]设计了用于LED照明的透射-全反射型复合曲面二次光学透镜,模拟结果表明可以在路面上形成均匀照明的矩形光斑,该透镜属于全内反射(TIR)透镜;余桂英等^[19]基于光学扩展量设计了LED均匀照明反射器,可用于显微镜照明系统,模拟仿真结果表明其照度均匀性优于90%,此种单反射器结构对光源的放置位置要求很高;王洪等^[20]研究了旋转轴对称LED均匀照明的自由曲面反射器和自由曲面透镜,模拟仿真结果表明其可实现3 m高度的LED灯光均匀照明,照度均匀性优于85%;赖丽萍等^[21]研究了基于近场侧面均匀照明的LED投射器,可用于侧面均匀照明平板灯的出光面,但这种LED投射器只能用于LED阵列中才能得到侧面均匀照明。可见,前人关于自由曲面反射器和自由曲面透镜的研究工作多集中于LED直接照明方面,所设计的反射器和透镜需要将光源发出的光线传输较长的距离后才能实现均匀照明,不能兼顾短距离和均匀照明,若直接用作LED与POFB的耦合器,将使耦合系统长度变得很大,因此需要研

究新型自由曲面反射器或自由曲面透镜作为LED与POFB能量均匀耦合的耦合器。

基于能量补偿和坐标迭代方法,本文研究了采用带初级透镜的大功率LED作为光源的POFB能量均匀耦合器的原理和设计方法,并设计了一种LED-POFB自由曲面透镜耦合器。为克服传统自由曲面透镜不能兼顾短距离和均匀照明这两个参数要求的缺点,所提新型结构自由曲面透镜的全反射面不同于现有TIR透镜的一次反射结构,采用二次反射结构设计,同时将LED进入反射面的光线首先通过环形柱透镜会聚,减小透镜体积并提高大角度光线的利用率。采用TracePro光学仿真软件进行仿真,以POFB端面的入射光能量均匀性和有效光利用率为优化目标对结构参数进行优化设计。

2 基本原理

2.1 透镜耦合器原理

用于大功率LED光源与POF光纤束的自由曲面透镜耦合器原理如图1所示,其中大功率LED光源为带有初级透镜的3 W以上LED,发光角度为 $120^{\circ}\sim 140^{\circ}$ 。透镜耦合器由两个折射曲面和两个反射曲面以及一个环形柱透镜面组成,折射曲面将修正的朗伯型大功率LED光束中发散角度较小的光线近乎均匀地分配在POFB端面上,为了提高照度均匀性,这时候就需要反射曲面将光线作为补偿光线进行能量重新分配,LED光束的光线经过折射曲面和反射曲面共同作用后,才能够达到较好的均匀照明效果。LED光束中发散角度较小的光线首先经过透镜耦合器中心的人射自由曲面1折射会聚为发散角较小的光束,再经过出射自由曲面2进行能量重新分配,提高光纤束入射面的光能量分布均匀性。LED光束中发散角度较大的光线经环形柱透镜3会聚到透镜耦合器两侧的自由曲面反射面4上,经过二次全反射形成会聚光束,再经过出射自由曲面2折射为能量补偿光束,能量补偿光束是对前

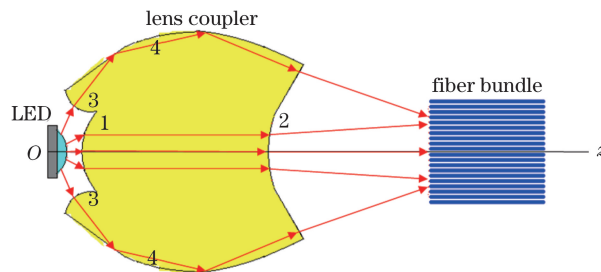


图1 透镜耦合器原理图

Fig. 1 Principle diagram of lens coupler

述透镜中心折射光束的均匀性补偿。二次反射设计的目的是减小反射面的透射损失。当会聚光束的横截面积与 POFB 的横截面积相当时,耦合器可以获得最高耦合效率。

2.2 透镜耦合器设计方法

透镜耦合器外形自由曲面的设计根据非成像光学理论中的光学扩展量守恒概念^[19],采用直接法进行设计,利用 MATLAB 工具编程,通过能量补偿法,迭代求解透镜耦合器旋转面母线上离散的点^[20],再导入到 SolidWorks 软件中对其进行曲线拟合,得到透镜耦合器旋转面的母线并旋转得到 3D 模型^[21]。根据 POFB 入射端面光能量均匀分布的特点,基于重叠法的基本思想,首先将 LED 面光源分解为若干点光源的组合,以中心点光源的半发散角度小于 45° 的光强分布与 POFB 入射端面的能量分布加以匹配,设计相应的透镜耦合器近轴折射面;然后采用光学仿真软件 TracePro 对 LED 面光源进行光线追迹仿真。由于透镜耦合器近轴折射面是根据点光源模型设计的,因此对于 LED 面光源,POFB 入射端面的能量分布均匀性会变差,根据仿真结果可计算出能量均匀分布需要补偿的部分,然后基于能量补偿法^[16]设计透镜耦合器两边的全反射面,以实现高均匀度的 POFB 入射端面光能量分布。

2.2.1 近轴折射面设计

透镜耦合器靠近轴线的折射面包括近轴入射面 1 和近轴出射面 2 两部分,如图 1 所示。

近轴入射面靠近 LED 光源,根据上述设计思路,先设定光源为点光源。以光源所在位置为原点建立坐标系,透镜耦合器中心轴线为 z 轴,径向为 x 轴,如图 2 所示。设计目标是使点光源发出的光线经过近轴入射面折射后全部变成平行于 z 轴的光线(准直光线)。

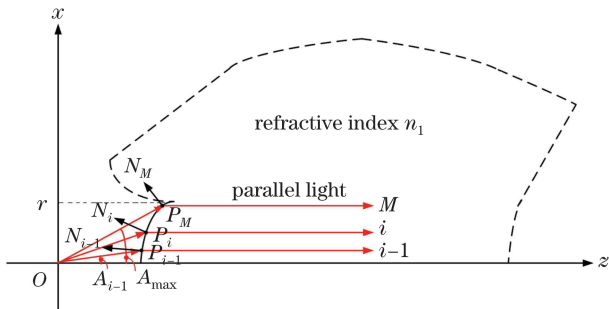


图 2 透镜耦合器近轴入射面设计原理图

Fig. 2 Design diagram of paraxial incident plane of lens coupler

首先介绍近轴入射面母线的设计方法。设 $L_{IN,P}$ 和 $L_{OUT,P}$ 分别表示入射光线和折射光线的单位矢量, N_P 表示折射点的法向矢量。透镜耦合器材料折射率为 n_1 , 在近轴入射面上的入射光线与光轴的最大夹角为 A_{max} ($A_{max}=45^\circ$), 高度为 r , 如图 2 所示。将 A_{max} 均分为 M 等份, 即 $A_i = i \cdot A_{max}/M$, ($0 < i \leq M$)。由 Snell 定律可求出 P_i 法向矢量 N_{P_i} :

$$\sqrt{1+n_1^2-2 \cdot n_1 \cdot (L_{OUT,P_i} \cdot L_{IN,P_i})} \cdot N_{P_i} = n_1 \cdot L_{OUT,P_i} - L_{IN,P_i} \quad (1)$$

P_M 点坐标为 $(r, r \times \cot A_{max})$, $P_{M-1}(x_{M-1}, z_{M-1})$ 为入射角度为 A_{max-1} 的光线与过 P_M 点的切平面之间的交点。

$$N_x x_{P_M}(x_{P_{M-1}} - x_{P_M}) + N_z z_{P_M}(z_{P_{M-1}} - z_{P_M}) = 0, \quad z_{P_{M-1}}/x_{P_{M-1}} = \cot A_{max-1} \quad (2)$$

式中 N_x 和 N_z 分别表示法向矢量 N 的两个分量。由(1)和(2)式可得 P_{M-1} 点的坐标。依此法计算曲线上后续任意点 P_{i-1} 的坐标 $(x_{P_{i-1}}, z_{P_{i-1}})$:

$$N_x x_{P_i}(x_{P_{i-1}} - x_{P_i}) + N_z z_{P_i}(z_{P_{i-1}} - z_{P_i}) = 0, \quad z_{P_{i-1}}/x_{P_{i-1}} = \cot A_{i-1} \quad (3)$$

透镜耦合器近轴出射面的作用是将近轴入射面折射后的平行光束均匀投射在 POFB 入射端面上。根据边缘光线原理^[16], 目标平面上任意一点的能量由边缘光线决定。由于 LED 光源可近似为朗伯型, 当大功率 LED 带有初级透镜时, LED 灯珠的发光角度变小, 设最大发光角度(10% 峰值功率角)为 2θ , 其发光强度角度分布曲线如图 3 所示, 可用修正的朗伯型(理论模型)近似表示为: $I(\theta) = I_0 \cos[\pi\theta/(2\theta)]$ 。其中, I_0 为发光面法线方向的发光强度, θ 为光线与法线的夹角。可见入射角度为 A_i 的光线的能量为光轴上光线能量的 $\cos[\pi A_i/(2\theta)]$ 倍, 因此近轴入射面折射后的平行光束是能量分布不均匀的光束, 不能直接投射到 POFB 入射端面上,

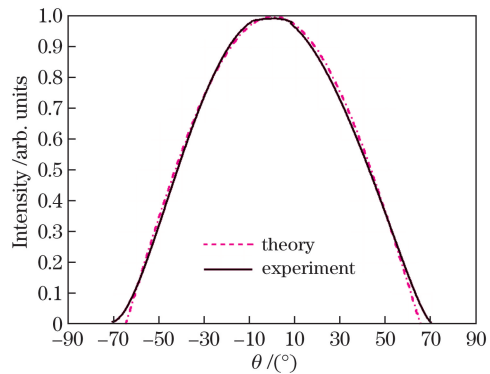


图 3 带初级透镜的 LED 光强分布曲线

Fig. 3 Intensity distribution curves of LED with a primary lens

需要设计近轴出射面,使得折射后的平行光束能量分布均匀。

然后介绍近轴出射面母线的设计方法。如图 4 所示,将平行光分为 M 等份,与上述角度 M 等份相对应。编号为 i 的光线经过近轴出射面上的点 Q_i 折射后投射到 POFB 入射端面 B_i 上,则光纤端面上每一份光的圆环面积为 $\pi(x_{B_i}^2 - x_{B_{i-1}}^2)$,该面积内光能量与对应 i 的那一份平行光的能量相等,即:

$$\begin{aligned} \pi(x_{B_i}^2 - x_{B_{i-1}}^2)I_B &= \int_{\frac{(i-1) \cdot A_{\max}}{N}}^{\frac{i \cdot A_{\max}}{N}} I_0 \cos\left(\frac{\pi\theta}{2\Theta}\right) d\theta = \\ \frac{2\Theta}{\pi} I_0 \left[\sin \frac{\pi i \cdot A_{\max}}{2\Theta N} - \sin \frac{\pi(i-1) \cdot A_{\max}}{2\Theta N} \right] &= \\ \frac{4\Theta I_0}{\pi} \sin \frac{\pi A_{\max}}{4\Theta N} \cos \frac{\pi(2i-1) \cdot A_{\max}}{4\Theta N}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 I_0 为光源法向光强度, I_B 为 POFB 入射端面上的光强度(能量密度),是一个定值,可由下式求得:

$$I_B = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{A_{\max}} I_0 \cos\left(\frac{\pi\theta}{2\Theta}\right) d\theta d\varphi = \frac{4\Theta I_0}{\pi R^2} \sin\left(\frac{\pi A_{\max}}{2\Theta}\right), \quad (5)$$

式中 R 为 POFB 的半径, φ 为球坐标系的方位角。

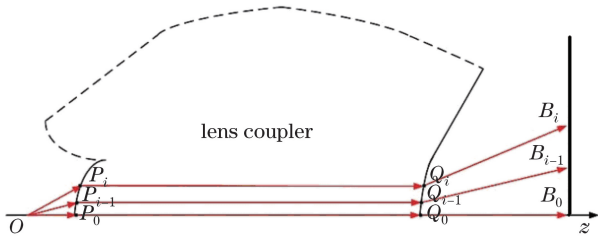


图 4 透镜耦合器近轴出射面设计原理图

Fig. 4 Design diagram of paraxial exit surface of lens coupler

在 POFB 边沿, $x_{B_M} = R$, 由(4)式可得:

$$x_{B_{M-1}} = \left[x_{B_M}^2 - \frac{4\Theta I_0}{\pi I_B} \sin \frac{\pi A_{\max}}{4\Theta N} \cos \frac{\pi(2M-1) \cdot A_{\max}}{4\Theta N} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (6)$$

依次类推可以得到 POFB 端面上所有 x_{B_i} 坐标,再根据 Snell 定律可求得 Q_i 点的坐标的相关计算式:

$$N x_{Q_i} (x_{Q_{i-1}} - x_{Q_i}) + N z_{Q_i} (z_{Q_{i-1}} - z_{Q_i}) = 0, \quad (7)$$

$$\frac{z_{B_{i-1}} - z_{Q_{i-1}}}{\left[(z_{B_{i-1}} - z_{Q_{i-1}})^2 + (x_{B_{i-1}} - x_{Q_{i-1}})^2 \right]^{\frac{1}{2}}} =$$

$$\mathbf{L}_{\text{IN}, Q_{i-1}} \cdot \mathbf{L}_{\text{OUT}, Q_{i-1}}. \quad (8)$$

根据(7)、(8)式即可迭代求解近轴出射面母线上离散点 Q_i 的坐标 x_{Q_i} 和 z_{Q_i} 。

2.2.2 全反射面的设计

全反射面位于透镜耦合器侧面,其作用是收集 LED 光源的光线与光轴夹角大于 A_{\max} ($A_{\max} = 45^\circ$)

的大角度光线,用于补偿近轴光线在 POFB 入射端面上的能量不均匀部分。根据近轴折射面的 TracePro 仿真结果,可以得到补偿光束的光强分布曲线。LED 光源的大角度光线经过全反射面转换为补偿光线的原理如图 5 所示。

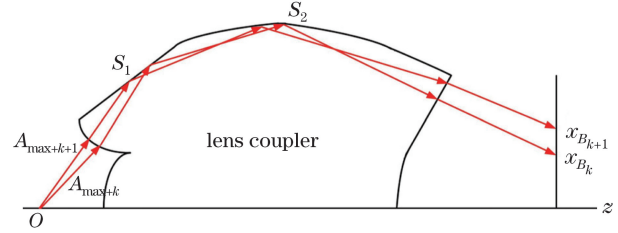


图 5 自由曲面全反射面工作原理图

Fig. 5 Working principle diagram of free-form total reflection surface

光线在全反射面 S_1 和 S_2 进行两次全反射,基于能量补偿法,设 LED 光源半径为 r ,将 LED 发光角度为 $A_{\max} \sim \Theta$ 的光线角度平均分为 k 等份,根据能量关系,有:

$$\begin{aligned} (x_{B_{k+1}}^2 - x_{B_k}^2) I_{E_k} &= r^2 \int_{A_{\max+k}}^{A_{\max+k+1}} I_0 \cos\left(\frac{\pi\theta}{2\Theta}\right) d\theta = \\ \frac{2\Theta r^2 I_0}{\pi} \left(\sin \frac{\pi A_{\max+k+1}}{2\Theta} - \sin \frac{\pi A_{\max+k}}{2\Theta} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

式中 $A_{\max+k}$ 和 $A_{\max+k+1}$ 为等分角度。 I_{E_k} 是 POFB 入射端面 B_k 处需要补偿的光能量,可以通过光源光线经过近轴入射面和近轴出射面的 TracePro 仿真光强分布 I'_{B_k} 计算:

$$I_{E_k} = I_{B_{\max}} - I'_{B_k}, \quad (10)$$

式中 $I_{B_{\max}}$ 为 I_{B_i} 中的最大光强度值。(9)式对应的初始条件为

$$x_{B_0} = 0, x_{B_1} = \left[\frac{2\Theta r^2 I_0}{\pi I_{E_1}} \left(\sin \frac{\pi A_{\max+k}}{2\Theta} - \sin \frac{\pi A_{\max}}{2\Theta} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (11)$$

由(9)~(11)式可以得到边缘光线在光纤端面上的坐标 x_{B_k} 和 $x_{B_{k+1}}$,根据反射定律并采用作图法画出反射面上反射点坐标和初始几何形状,最后利用 TracePro 仿真结果进行修正和坐标迭代逼近,使 POFB 端面光强分布达到均匀。通常带初级透镜的 LED 灯珠的发光角度 $2\Theta \approx 130^\circ$,当 $A_{\max} = 45^\circ$ 时,进入全反射面的光线角度变化范围约为 15° ,在光线进入全反射面之前设置一个环形柱透镜,将这部分发散角很小的光线会聚在 S_1 处产生一次全反射,可以简化 S_1 反射面的设计复杂性。因此全反射面的设计主要是 S_2 部分的设计, S_2 反射光线经过垂直出射平面到达 POFB 入射端面上。

3 仿真实验结果与分析

3.1 近轴入射面仿真结果

采用 TracePro 软件进行仿真实验,光源模型为朗伯型点光源,光束角度为 $2 \times 45^\circ$,元件模型为透镜耦合器近轴入射面组成的平凸透镜,透镜长度为 13 mm,透镜耦合器采用聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 材料,折射率 $n_1 = 1.49$,仿真光线数量为 100 万条,光线追迹仿真实验结果如图 6 所示。可以看到点光源发出的小于 45° 的光线经过近轴入射面折射后全部变成基本平行于 z 轴的光线(准直光

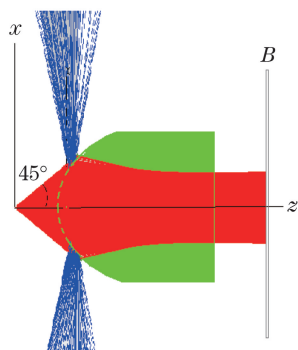


图 6 透镜耦合器近轴入射面对点光源的光线追迹光路图
Fig. 6 Ray tracing light path of paraxial incident surface of lens coupler to point light source

线),与理论结果一致。同时从图 6 还可以看到,当光源光线角度接近 45° 时,在透镜耦合器近轴入射面存在较多反射光线,这些光线将通过透镜耦合器外侧的全反射面进行收集。

将接收屏 B 置于距离平凸透镜出射面 5 mm 处(POFB 入射端面位置),得到接收屏上的光能量分布如图 7 所示。图 7(a)~(c)分别为光源和透镜耦合器近轴入射面之间的距离 s 分别为 7,8,9 mm 时,接收屏上的光能量分布变化情况。图 7 表明透镜耦合器近轴入射面已将光源的朗伯型分布变换为较均匀的双峰分布,当光源与透镜耦合器入射面的距离有微小变化时,光能量分布特性基本不变,只是光斑宽度随距离 s 的增大而减小。因此以下的设计中选择光源和透镜耦合器近轴入射面之间的距离 $s = 7$ mm,以保证 POFB 入射端面光斑面积足够大。

当点光源沿 x 轴平移一个距离时,得到的光能量分布曲线如图 7(d)所示,可见光能量分布特性基本不变,只是光斑中心位置发生了平移,这样当光源为面光源时,光源不同部位发出的光线就在接收屏上产生互补叠加,填补了点光源的能量分布曲线的凹陷部位,形成较好的平顶分布。图 8 为 3535 规格的 LED 光源的接收屏能量分布曲线,可以看到光斑中心部位比较平坦,但两边还不够陡峭,需要进一步补偿。

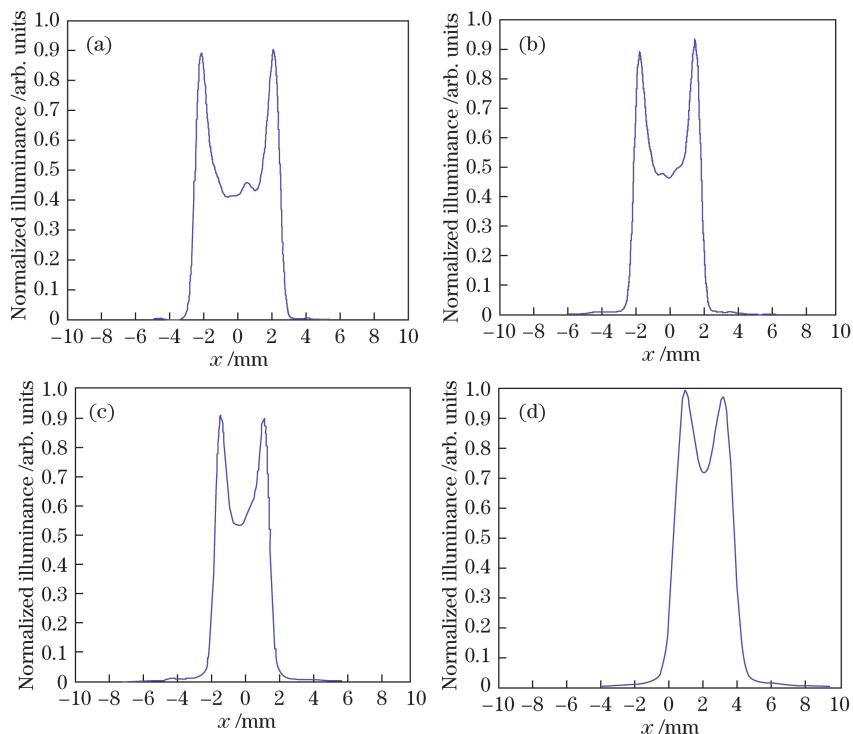


图 7 点光源光线通过近轴入射面后在接收屏上的能量分布。(a) $s = 7$ mm; (b) $s = 8$ mm; (c) $s = 9$ mm; (d) $s = 10$ mm
Fig. 7 Energy distribution of point light source on the receiving screen after passing through the paraxial incident surface.

(a) $s = 7$ mm; (b) $s = 8$ mm; (c) $s = 9$ mm; (d) $s = 10$ mm

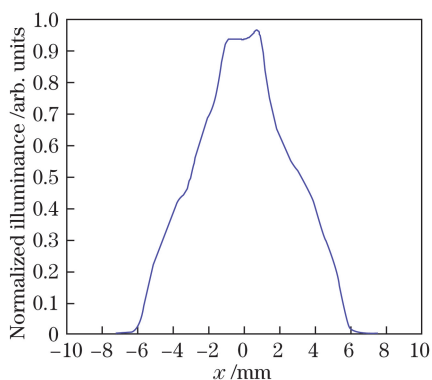


图 8 3535 规格的 LED 光源光线通过近轴入射面后
在接收屏上的能量分布

Fig. 8 Energy distribution of the 3535 LED light source
on the receiving screen after passing through the
paraxial incident surface

3.2 近轴出射面仿真结果

近轴出射面的设计目标就是进一步补偿近轴入射面输出光线在接收屏上的能量分布,根据透镜耦合器近轴出射面设计原理设计出近轴出射面,其中心曲率半径为 $r_1 = 8 \text{ mm}$ 。将光源设置成 3535 规格 LED,光源经过近轴入射面和近轴出射面后,在接收屏上的能量分布曲线如图 9(a)所示,可以看到光能量分布已基本集中在 $-4 \sim +4 \text{ mm}$ 范围内,中心部分基本是均匀的,但两边还有较大范围的不均匀部分。为了在 POFB 入射面形成均匀光能量分布,并使光能量利用率最高,需要对图 9(a)曲线两边进行能量补充。耦合器设计目标是用于直径为 0.5 mm 的 20×20 根 POFB,POFB 直径约为 10 mm 。图 9(b)给出了使图 9(a)在 $-5 \sim +5 \text{ mm}$ 范围内成为平顶光强度分布所需要的补偿光能量分布曲线,其形状是一个空心光场结构。

3.3 透镜耦合器 3D 模型仿真结果

根据光学仿真软件 TracePro 仿真结果得到的补偿光束光强分布曲线[图 9(b)]设计透镜耦合器侧面全反射面。采用逐次逼近方法,先用作图法根据反射定律画出全反射面的母线基本轮廓。将近轴入射面、近轴出射面、环形柱透镜以及全反射面的母线组合在一起旋转后就得到完整透镜耦合器 3D 模型,如图 10 所示。仿真光源模型为 3535 规格的 LED,尺寸为 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$,最大发光角度设置为 130° ,接收屏大小为 $-10 \sim 10 \text{ mm}$,接收屏距离近轴出射面 5 mm 。初始仿真结果如图 11 所示,从图中可以看到在接收屏 x 轴上 $-4 \sim +4 \text{ mm}$ 范围内光能量是均匀的。若以最低照度与最高照度的比值定义均匀性^[16],即照度均

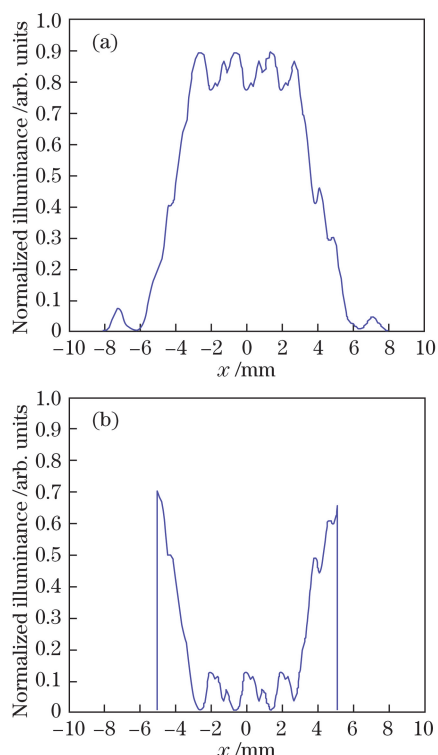


图 9 3535 型 LED 光源通过近轴折射面的
(a)输出光能量分布曲线及(b)补偿曲线

Fig. 9 (a) Output light energy distribution curve and
(b) compensation curve of the 3535 LED light source
passing through the paraxial refracting surface

匀性 E_I 可写为

$$E_I = \frac{I_{\min}}{I_{\max}}, \quad (12)$$

式中 I_{\min} 是 POFB 入射端面上归一化最低照度, I_{\max} 是 POFB 入射端面上归一化最高照度。根据图 11 可得,轴上 $-4 \sim +4 \text{ mm}$ 范围内,归一化最低照度 $I_{\min} = 0.94$,最高照度 $I_{\max} = 0.98$,所以照度均匀性达 96% ,但在轴上 $-5 \sim +5 \text{ mm}$ 范围内均匀性只有 61% 。

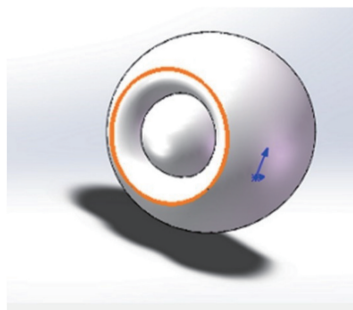


图 10 透镜耦合器 3D 模型

Fig. 10 3D model of lens coupler

从图 11 可以看到 $R = 5 \text{ mm}$ 圆周附近的光能量不足,如果要将中心补偿光能量向圆周移动,根据反射定律,微调全反射面相对透镜耦合器的张角,就

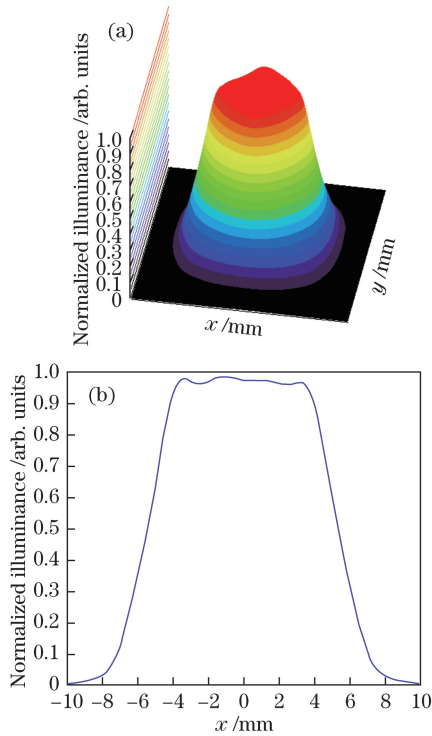


图 11 透镜耦合器输出光强分布。(a) x - y 平面;
(b) $y=0$ 截面

Fig. 11 Output intensity distribution of lens couple.

(a) x - y plane; (b) cross section at $y=0$

可以达到微调反射光线的目的,经过多次修正逼近,最后得到接收屏 x 轴上光强度分布曲线如图 12 所示。根据图 12 计算得轴上 $-5 \sim +5$ mm 范围内均匀性达到 92%。

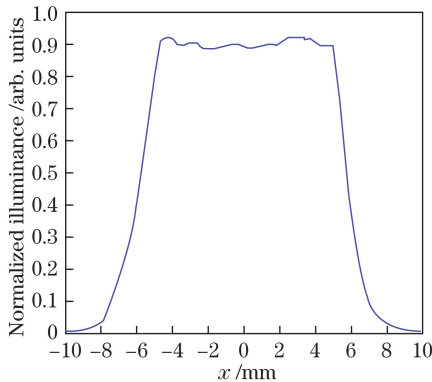


图 12 最后得到的光强度分布曲线

Fig. 12 Final light intensity distribution curve

由于 POFB 入射端面与光能量分布的平顶部分相匹配,若忽略光纤束中相邻光纤之间的空隙和光纤包层的面积,则入射到 POFB 的有效光利用率可表示为

$$U_I = \frac{\iint_{S_{\text{flap-top}}} I(x, y) dS}{\iint_{S_{\infty}} I(x, y) dS}, \quad (13)$$

式中 $S_{\text{flap-top}}$ 是光能量分布平顶部分面积 (POFB 入射端面面积), S_{∞} 是光能量分布总面积,即有效光利用率是光能量 3D 分布平顶部分的体积与总体积的比值。最后计算得半径为 $R=5$ mm 的 POFB 入射端面圆形面积的有效光利用率为 71%。

为了说明所设计的 LED-POFB 自由曲面透镜耦合器与 LED 照明用的 TIR 透镜的结构差异,表 1 给出了两者的主要性能对比。与现有的 LED 二次光学 TIR 透镜相比,所设计的 LED-POFB 耦合器的反射面为两个,TIR 透镜的反射面为一个;LED-POFB 耦合器的出射面为凹面,TIR 透镜的出射面为平面或凸面;LED-POFB 耦合器的侧面入射面为柱面,TIR 透镜的侧面入射面为平面;LED-POFB 耦合器的均匀照明距离为 5 mm,TIR 透镜的均匀照明距离为 1000 mm。可见,LED-POFB 耦合器由于结构与已有 TIR 透镜的结构不同,因此具有光能量均匀耦合距离短的明显优点。

表 1 LED-POFB 耦合器与 TIR 透镜^[18]主要性能对比

Table 1 Comparison of main performances between LED-POFB coupler and TIR lens^[18]

Item	Reflection times	Exit surface	Side incident surface	Uniform illumination distance /mm
LED-POFB coupler	2	Concave	Cylinder	5
TIR collimating lens	1	Plane	Plane	1000
TIR floodlight lens	1	Convex	Plane	1000

4 结 论

基于能量补偿和坐标迭代方法设计了 LED 与 POFB 的一种透镜耦合器。利用 MATLAB 工具编程,通过能量补偿逐次逼近方法,迭代求解透镜耦合器旋转面母线上离散的点,再导入到 SolidWorks 软件中对其进行曲线拟合得到透镜耦合器旋转面的母线并旋转得到 3D 模型。TracePro 光学仿真结果表明,设计的透镜耦合器近轴入射面可使点光源发出的小于 45° 的光线经折射后变成基本平行于 z 轴的光线(准直光线)。采用 3535 规格的 LED 作为光源时,光线经过近轴入射面和近轴出射面后光能量分布基本集中在 $-4 \sim +4$ mm 范围内,中心部分均匀但两边还有较大的不均匀范围。经过多次修正透镜耦合器的全反射面以补偿两边不均匀部分,最后得到的透镜耦合器在 POF 光纤束的端面($R=5$ mm)照度均匀性达到 92%,有效光利用率达到 71%。

参 考 文 献

- [1] Schwarz-Pfeiffer A, Mecnika V, Beckers M, *et al.* Optical fibers[M]. Singapore: Springer Singapore, 2015.
- [2] Vasylyev S V. Collimating illumination systems employing a waveguide: US20140098558[P]. 2014-04-10.
- [3] Mohr B, Beckers M, Münch P, *et al.* Textile integration of POF for lighting applications[J]. POF Plastic Optical Fiber, 2016, 26(4): 143.
- [4] Jiang P, Yang H, Mao S. Design optical antenna and fiber coupling system based on the vector theory of reflection and refraction[J]. Optics Express, 2015, 23(20): 26104-26112.
- [5] Wang Q, Loh T H, Ng D K T, *et al.* Design and analysis of optical coupling between silicon nanophotonic waveguide and standard single-mode fiber using an integrated asymmetric super-GRIN lens[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 2011, 17(3): 581-589.
- [6] Fan L W, Deng X Y, Ren H. The design and development of special high-power LED lights with fiber[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2010, 39(1): 49-51.
范力维, 邓向阳, 任毫. 大功率 LED 光纤特种照明灯的设计开发[J]. 机电工程技术, 2010, 39(1): 49-51.
- [7] 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.
- [8] Fu Q, Su C Y, Zhou Z, *et al.* LED coupled device for fiber-optic illumination[J]. Journal of Applied Optics, 2013, 34(1): 45-50.
付倩, 苏成悦, 周镇, 等. 光纤照明用 LED 耦合装置设计[J]. 应用光学, 2013, 34(1): 45-50.
- [9] Wu M L, Zhao W H, Yu D H, *et al.* Coupling research on the UV light and optic fiber in stereolithography[J]. Acta Photonica Sinica, 2001, 30(11): 1366-1371.
吴懋亮, 赵万华, 于殿泓, 等. 光固化成型中紫外光源-光纤耦合研究[J]. 光子学报, 2001, 30(11): 1366-1371.
- [10] Yan Y, Liu S S, Zhang T. Research on LED and fiber coupling technology[C]. Four municipal lighting science and Technology Forum, 2008.
严奕, 刘石神, 张涛. LED 与光纤耦合技术研究[C]. 四直辖市照明科技论坛、长三角照明科技论坛暨上海市照明学会 2008 年年会, 2008.
- [11] 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.
- [12] Li S C, Hua D X, Song Y H, *et al.* Fiber coupling system of space optical field based on aspheric lens[J]. Acta Photonica Sinica, 2012, 41(9): 1053-1058.
李仕春, 华灯鑫, 宋跃辉, 等. 基于非球面透镜的空间光场光纤耦合系统研究[J]. 光子学报, 2012, 41(9): 1053-1058.
- [13] Song G C, Quan W, Ning G B, *et al.* An umbrella shaped laser-fiber coupler[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(3): 345-348.
宋贵才, 全薇, 宁国斌, 等. 伞形端头光源-光纤耦合器[J]. 兵工学报, 2004, 25(3): 345-348.
- [14] Tan W, Liu C, Zheng Z, *et al.* Design and realization of new miner's lamp based on fiber optic technology[J]. China Illuminating Engineering Journal, 2010, 21(3): 88-92.
谈卫, 刘陈, 郑重, 等. 基于光纤照明技术的新型矿灯的设计及实现[J]. 照明工程学报, 2010, 21(3): 88-92.
- [15] Wang Y H, Wang H W, Wang G. Design of high efficiency fiber coupling system based on microlens array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041401.
王艳红, 王海伟, 王高. 基于微透镜阵列的高效率光纤耦合系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041401.
- [16] 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.
- [17] Sun L W, Jin S Z, Cen S Y. Free-form micro-lens design for solid state lighting[J]. Acta Photonica Sinica, 2010, 39(5): 860-865.
孙理伟, 金尚忠, 岑松原. 用于固态照明的自由曲面微透镜设计[J]. 光子学报, 2010, 39(5): 860-865.
- [18] Liu X. Total-internal-reflection compound secondary optical lens design of LED Illuminaton[J]. Journal of Applied Optics, 2011, 32(5): 976-980.
刘欣. LED 照明的透射-全反射型复合曲面二次光学透镜的设计[J]. 应用光学, 2011, 32(5): 976-980.
- [19] Yu G Y, Jin J, Ni X W, *et al.* Design for LED uniform illumination reflector based on etendue[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(8): 2297-2301.
余桂英, 金骥, 倪晓武, 等. 基于光学扩展量的 LED

- 均匀照明反射器的设计[J]. 光学学报, 2009, 29(8): 2297-2301.
- [20] Wang H, Wang H H, Zhang X F, *et al.* Design method for axisymmetric uniform illumination system with LED[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2010, 21(8): 1163-1166.
- 王洪, 王海宏, 张小凡, 等. 旋转轴对称LED均匀照明系统设计方法[J]. 光电子·激光, 2010, 21(8): 1163-1166.
- [21] Lai L P, Zhuang Q R, Liang D J, *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.
- 赖丽萍, 庄其仁, 梁德娟, 等. 基于近场侧面均匀照明的LED投射器研究[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0322002.