

基于光纤照明技术的光纤端头灯的设计与实现

陈嘉鸿^{1,3**}, 单孝忍^{1,3}, 丁攀峰^{2,3*}

¹ 华侨大学信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

² 华侨大学工学院, 福建 泉州 362021;

³ 福建省光传输与变换重点实验室, 福建 厦门 361021

摘要 为了将光纤束端头发光应用于均匀照明场景,设计了一种基于光纤照明技术的光纤端头灯并制作了样灯模型。基于光纤导光特性设计 LED 光源与光纤束的耦合装置,通过公差分析得到代数多项式拟合配光曲线的最佳拟合阶次为 10;并结合裁剪法设计光纤束端头的配光透镜,将光纤束与透镜进行装配得到灯具。仿真得到灯具在 300 mm 远接收平面上的光斑垂直照度均匀度为 90.99%,水平照度均匀度为 89.59%,耦合装置的耦合效率为 87%。最后经过误差实验分析得到系统的最佳耦合距离为 2 mm,透镜与发光端面的距离为 50 mm,灯具的实际光斑照度均匀度为 81.54%。理论和实验结果表明光学透镜明显改善了光纤端头光束的发散特性和均匀性,该光纤端头灯设计方案为将光纤端头发光应用于均匀照明设计提供了一种可行方案。

关键词 光学设计; 光纤照明技术; 耦合装置; 光学透镜; 塑料光纤; 非成像光学

中图分类号 O439

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.032204

Design and Realization of Fiber End Lamp Based on Fiber Optic Lighting Technology

Chen Jiahong^{1,3**}, Shan Xiaoren^{1,3}, Ding Panfeng^{2,3*}

¹ College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen, Fujian 361021, China;

² Engineering Institute, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China;

³ Fujian Key Laboratory of Optical Beam Transmission and Transformation, Xiamen, Fujian 361021, China

Abstract To apply fiber bundle end illumination to a uniformly illuminated scene, a fiber end lamp based on fiber optic lighting technology is designed, and a principle model lamp is presented. Based on the light-guiding characteristics of the fiber, a coupling device between an LED and fiber bundle is designed. Through an error analysis, the best-fitting order of the algebraic polynomial fitting distribution curve is taken as 10, and the optical lens of the fiber bundle end is designed by the clipping method. The fiber bundle and lens are then assembled into a lamp. The simulations show that the vertical uniformity of illumination of a map placed on a receiving plane 300 mm away is 90.99%, the horizontal uniformity of illumination is 89.59%, and the coupling efficiency of the device is 87%. Finally, the error analysis shows that the best coupling distance of the system is 2 mm, the distance between the lens and light-emitting end face is 50 mm, and the uniformity of illumination of the lamp is 81.54%. The theoretical and experimental results show that the optical lens significantly improves the divergence characteristics and uniformity of the fiber end beam. The design method for the fiber end lamp provides a practicable solution for the application of fiber end illumination in uniform illumination design.

Key words optical design; fiber optic lighting technology; coupling device; optical lens; polymer optical fiber; non-imaging optics

OCIS codes 220.4830; 220.3630; 060.2350

收稿日期: 2019-07-31; 修回日期: 2019-08-09; 录用日期: 2019-08-16

基金项目: 中央高校培育型科技创新人才资助(ZQN-PY306)、华侨大学研究生科研创新基金(17013082002)

* E-mail: dingpanfeng@163.com; ** E-mail: chenjhofficial@163.com

1 引言

发光二极管(LED)是第四代照明光源,具有绿色环保、体积小、寿命长等诸多优点,应用范围广泛。从手电筒、平板灯到大型广告灯、路灯照明^[1-3],多数都采用LED作为光源。使用多个LED灯珠时,一般需要将其安装在同一块特制的电路板上,这限制了灯珠位置;平板灯、广告灯等的电路板体积较大,需要较大的平整安装空间,这给特殊场景的使用带来不便。随着蓝光和白光LED技术的不断成熟,LED的应用场景相应地扩展到了医用照明、防爆照明、光纤照明等。光纤照明技术是指一种利用光的全反射原理将光源的光通过光纤引导到较远的位置上以代替传统光源的照明方式,是一项绿色安全的照明技术。相比较LED照明,聚合物光纤(POF)端发光技术有诸多优点:POF比较柔软,不易折损,能应用在比较特殊复杂的空间;POF端头发光面积小,方便光学设计;POF发光端头与光源隔离,本身无导电性,热量低,是一种安全的照明设计。

研究人员对光纤照明技术进行研究并取得了许多成果。张晓婷等^[4]设计并优化了一款带有两个折射面、两个反射面以及一个环形柱透镜面的塑料光纤耦合器,折射面和反射面分别控制小角度和大角度的光线,使塑料光纤束端面发光均匀性得到提高。谈卫等^[5]提出一种基于光纤照明技术的新型矿灯。该设计整体上分为电路和光学两部分:1)驱动电路(恒流输出,工作稳定),以及充电电路(元器件少,简单方便);2)带反光杯的耦合装置,其耦合效率高,结构紧凑巧妙,最后借助菲涅耳透镜实现了较均匀的光导照明圆形均匀光斑。马亚运等^[6]提出一种用于激光三维成像的均匀光照明系统。该系统借助一个光纤阵列,实现了均匀的照明效果,并由此改善了传统照明系统光强分布不均匀和能量利用率低的问题。但是,目前对光纤照明的研究,内容较多的是讨论自然光的耦合收集并由特殊光纤传导^[7-8],而基于塑料光纤束收集LED光能量并重新设计光纤束端头发光分布的研究相对较少。塑料光纤端头灯相较于传统LED光源,照明模块无需电路板,光电分离使安全性更高;塑料光纤端头灯借助了柔软的光纤束,将光波引导到其他狭小复杂的区域,应用场景更加丰富,这也是其区别于LED的显著优点之一。可见该研究具有较大的科研和现实意义。

为将光纤端头照明应用到均匀照明设计,本文对设计公差对系统照明效果(包括光照度和光斑均

匀性)的影响进行分析,设计并制作自由曲面透镜,最后通过误差测试将系统公差控制为理论值,并成功实现了光纤端头的均匀照明设计。

2 理论分析

设计要求光纤芯径大小要适合,方便光纤与LED光源耦合,光纤应具有较高的数值孔径以增加光耦合效率,且应具有较低的杨氏模量以实现光波的柔性传输,故本设计使用阶跃型塑料光纤,其外径为3 mm,数值孔径NA为0.5。

2.1 光纤束装配与耦合装置的设计理论分析

为了探究芯径大和柔韧性较好的光纤在照明场景的应用前景,采用1×7光纤束将光从LED光电模块引至应用端,光纤束及其端面简图如图1所示。光纤束以1根光纤为中心轴,由6根相同的光纤包围,光纤的柱面依次紧密贴合中心光纤,光纤端面中心间距为3 mm。端面保持平整以使端头入光面积达到最大。

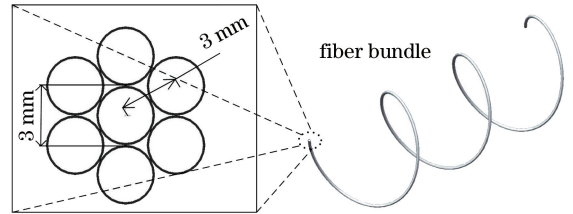


图1 光纤束及端头示意图

Fig. 1 Diagram of fiber bundle and its end

在LED发光面与光纤束入光端面添加一个耦合装置以使LED发散光耦合进光纤束。耦合装置如图2所示。图中:耦合装置长度为 l_c ; ϕ_x 表示耦合装置的直径,内部中空;B端为底面,是一个圆面缺口,衔接反射底座与LED光源。光纤束A端接入耦合装置,端面宽度最大值为9 mm。耦合装置A端的横截面上除光纤端面以外的阴影区域为耦合装置的失配面^[9]。

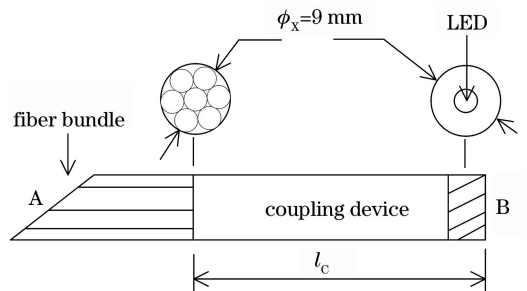


图2 耦合装置示意图

Fig. 2 Schematic of the coupling device

在本文设计中,耦合装置的耦合效率^[9-10] η 主要由三个效率因子组成,即

$$\eta = P_0/P_1 = \eta_G \eta_L \eta_1, \quad (1)$$

式中: P_0 和 P_1 分别为耦合装置的输出和输入光功率; η_G 表示耦合装置中光纤束及光源发光面的面积匹配效率; η_L 与耦合长度 d 有关, d 为光源发光面到光纤束入光端面的垂直距离; η_1 与耦合装置和纤芯接触界面的菲涅耳反射率有关。可见,提高耦合效率的根本在于提高三个耦合因子。效率因子 η_G 、 η_L 与光源以及耦合装置的拼接式结构有关。设计采用普通的标准朗伯体 LED 作原始光源,其发光面是半径 $\phi_s=1$ mm 的圆面,发光模式为朗伯余弦型,即

$$I = I_0 \cos \theta, \quad (2)$$

式中: I_0 为光轴上 LED 的发光强度; θ 为光线与光轴的夹角,即光发散角。其最大光发散角是 180° ,而光强半值角 $\theta_{1/2}=60^\circ$,光能量集中分布在立体角为 π_{sr} 对应的空间内,因此当发光面中心与光纤端面的垂直距离 $d = \frac{(\phi_x - 2\phi_s)/2}{\tan 60^\circ} \approx 2.0207$ mm 时,从 LED 中心发射的发散角为 60° 的边缘光线会到达光纤端面的边缘,根据边缘光线理论,发散角小于 60° 的光线将会直接到达光纤端面,并且入射角都小于该光纤束的最小入射角 ($\theta_{\min} = \arcsin NA = 60^\circ$),即光能够在纤芯中全反射传输。设置耦合长度为 2.0207 mm,能使 LED 的主要光能量耦合进入光纤束,提高了效率因子 η_L 。而光源发散角大于 60° 的光线,大部分将在耦合装置的内壁多次来回反射,无法进入光纤束,形成菲涅耳损耗,为了提高发光面与光纤束的面积匹配效率 η_G ,本文设计了一个反射基座,对 LED 中心发射的大角度光线进行准直,基座结构如图 3 所示。

基座直径 $\phi_x=9$ mm,与耦合装置 B 端口径相同,基座刚好可以嵌入 B 端开口,将 LED 放置在该

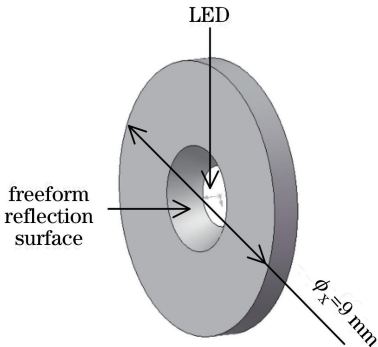


图 3 反射基座示意图

Fig. 3 Reflection base diagram

缺口中,整体结构紧凑,有利于提高耦合效率。基座的反射面为自由曲面,发散角为 θ_i 的光线在曲面上发生全反射,根据平面解析几何学与几何光学理论,点 $K_i(x_i, y_i)$ 所在的切线方程为

$$y = (x - x_i) \tan\left(\frac{\pi - \theta_i}{2}\right) + y_i. \quad (3)$$

当曲面取点数足够多(大于 200)时,可以认为点 K_i 的下一点 K_{i+1} 也在该切线上。而点 K_{i+1} 所在的入射光线方程为

$$y = x \tan \theta_{i+1}. \quad (4)$$

曲线上任意一点 K_{i+1} 是(3)式、(4)式两条直线的交点,由 MATLAB 编写程序,输入初值 $K_0(x_0, y_0) = K_0(1, 0)$ 和角度大小,求解所有坐标点,完成反射面设计。此时,LED 发射的任意角度光线将在该耦合结构作用下进入光纤束传播,效率因子 η_G 得到提高。

关于拼接结构,选材光纤的芯径较大,包层较薄,失配面较小,光纤端面保持平整,故纤芯的面积占界面总面积的比率较高,降低了发光面与端面的面积匹配损耗,提高了效率因子 η_G 和 η_1 。

2.2 光纤束端头发光特性与透镜的设计理论分析

LED 光源的发散光被光纤束引导传输到其他区域中,为了分析光纤端头的照明效果,使用试用版光学仿真软件 Lighttools 探究光纤端头的光线传播模式,得到了 300 mm 远处接收平面上的光斑效果,如图 4 所示。

光纤束端头发光特性整体上表现为光线的发散角较小,近轴光线密集,光通量与光照度成正比。由照度图可知:发散光束的大部分能量集中在光轴附近,即图中 B 区域;离轴光线比较稀疏,光斑圆周边缘能量较低,即图中 A、C 区域。由图 4 的光斑特性效果可以看到,照明光斑亮度不均匀,表现为中心过亮、圆周偏暗,照度落差值大,主要照明范围较小,这可能会导致眩光,从而无法达到普通照明场景的照明指标。一种提高光斑均匀度的有效方法是在光纤束末端配置一个光学透镜,该透镜能够扩大有效照明范围,并使光斑比较均匀,从而可达到普通照明的指标。

在误差允许范围内,设出光端口的径向表面外形是圆形,光学设计时当作点光源处理。透镜采用剪裁法设计,如图 5 所示。建立光纤束端头光线与透镜后出射光线的共轭关系,从端头 S 发出的光线 I 入射到光学透镜外表面上一点 $P(x_1, y_1, z_1)$ 处,经透镜折射后折射光线 O 照射到目标平面上点

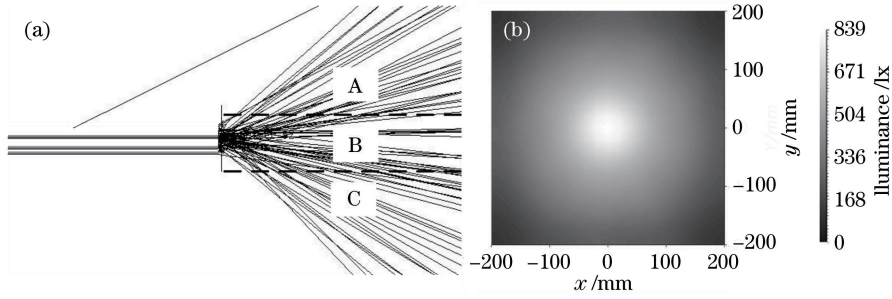


图 4 (a) 光纤端头光线传播及(b)光斑效果示意图

Fig. 4 Schematics of (a) light propagation of fiber bundle end and (b) illuminance distribution

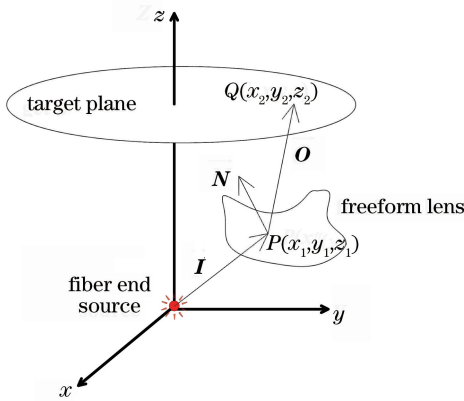


图 5 透镜设计原理图

Fig. 5 Schematic of lens design

$Q(x_2, y_2, z_2)$ 处,采用多项式拟合法得到光纤端头的配光曲线,再根据斯涅尔定律和平面解析几何理论,编程求解透镜轮廓点 P 的坐标。

首先,建立光纤端头发光模式的数学模型。LED 光能经过 1×7 光纤束传播,由图 4 得知光纤端头的发散光为各向同性,即端头能量空间关于光轴呈中心对称,故在端头极坐标系中,将其发光能量空间划分为多个环形小能量单元。设圆环的光通量为光源总光通量的 $1/N$,即

$$2\pi \int_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}} I(\alpha) \sin \alpha d\alpha = \frac{2\pi}{N} \int_0^{\pi/2} I(\alpha) \sin \alpha d\alpha, \quad (5)$$

式中: $i=0, 1, \dots, N-1$; α 为光线与光轴夹角; α_i 为能量环对应的边缘光线的孔径角, $\alpha_0=0$,考虑到该等式可能出现非解析解的情况,实际编程中,应该设置较大分区数目 $N(N \geq 100)$; $I(\alpha)$ 为端口光源的配光曲线表达式。根据光纤的导光特性,显然端头光源的配光曲线与一般朗伯体光源的余弦型配光曲线是不同的,对于非朗伯型的配光曲线,可以用 $\{1, \alpha, \alpha^2, \dots, \alpha^n\}$ 作为基函数的代数多项式来拟合^[11],由于代数多项式可以拟合多种类型的配光曲线,因此其对于光纤束端头发光这种新型的发光模式更合适。具体地,本设计采用:

$$I(\alpha) = I'_0 \sum_{i=0}^j \omega_i \alpha^i, \quad (6)$$

来拟合配光曲线。(6)式中: j 为代数多项式的阶次; I'_0 为单位光强。单位光强大小需要根据实验结果修正,而设计中是先通过软件模拟仿真来获取相对光强的空间分布特性,该特性可以运用于光学设计,故没有实验修正 I'_0 。接着利用最小二乘曲线拟合方法^[12]对相对光强分布进行精确拟合,计算出系数 ω_i ,得到配光曲线 $I(\alpha)$ 的数学模型。最后通过 MATLAB 编写计算程序,求解得到每个角度 α_i 的数值。

同样,将照明接收面也划分为 N 份等照度的面积单元以达到均匀照明的目的。设光线经过透镜时没有产生材料的吸收损耗和菲涅耳损耗,根据能量守恒定律和边缘光线理论,接收面的光通量等于光源的辐射量,光源每个能量环发射的边缘光线会入射到对应的接收环边界,所以由接收面的平均照度可以求解每个接收单元的外半径。

最后,求解子午平面内透镜外轮廓曲线的坐标数据。当轮廓被分割得很细小时,可认为点 P_i 的单位法向量与 $P_{i-1}P_i$ 连线垂直,根据斯涅尔定律^[13-14],求解得 P_i 点的法向量满足

$$\sqrt{n_0^2 + n_1^2 - 2n_0n_1(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})} \mathbf{N} = n_1\mathbf{O} - n_0\mathbf{I}, \quad (7)$$

式中: n_0 为空气折射率; n_1 为透镜材料折射率; \mathbf{I} 为点 P_i 处入射光线单位向量; \mathbf{O} 为点 P_i 处的折射光线向量; \mathbf{N} 为该点的法向量。通过 MATLAB 编程,首先给定初始轮廓曲线坐标 P_1 和对应的法向量,基于点 P_i 坐标与法向量求解的程序,完成子午平面内整个外曲面轮廓坐标点的计算;最后将坐标导入专业建模软件 Solidworks,得到透镜的仿真模型。

3 模拟仿真分析

3.1 光耦合的模拟仿真与分析

为了探讨光纤导光的照明应用,验证耦合装置理

论模型的正确性,使用试用版 Lighttools 软件进行仿真模拟。考虑到实际照明情况,设置光通量为 100 lm、光线数量为 100 万条等光源参数,将光源置于光纤束端面前 $d \approx 2$ mm 的位置,以 1000 mm 长的光纤束为仿真模型,在光纤束出光端口平面垂直距离 300 mm 远处设置方形接收平面,运行仿真程序。

图 6 所示为耦合装置内部的光线追迹线框图。由图 6 可见, yz 平面上 LED 发射的大部分光线都进入了光纤束,在光纤出光端口处接收到的光线的

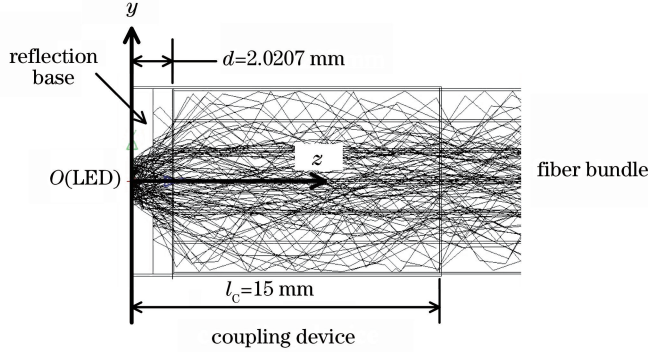


图 6 LED 光波耦合进入光纤束示意图

Fig. 6 Schematic of LED light wave coupling into the fiber bundle

3.2 光纤出光端头的配光设计与模拟仿真

光导照明系统的照明质量主要体现在光斑大小、照度均匀度、光照度、光效、色温和显色指数等系统参数。仿真模拟中,因为光纤束发光端口的亮度与接收平面的照度值成正比^[15],故通过计算预设范围内的照度均匀度来评价系统照明质量;而光效、色温和显示指数由最后的实验测试获取。定义照度均匀度 U_E 为照明区域内最小照度 E_{\min} 与最大照度 E_{\max} 的比值,用于描述目标平面上的分布特征,定义式为

$$U_E = \frac{E_{\min}}{E_{\max}} \times 100\% \quad (8)$$

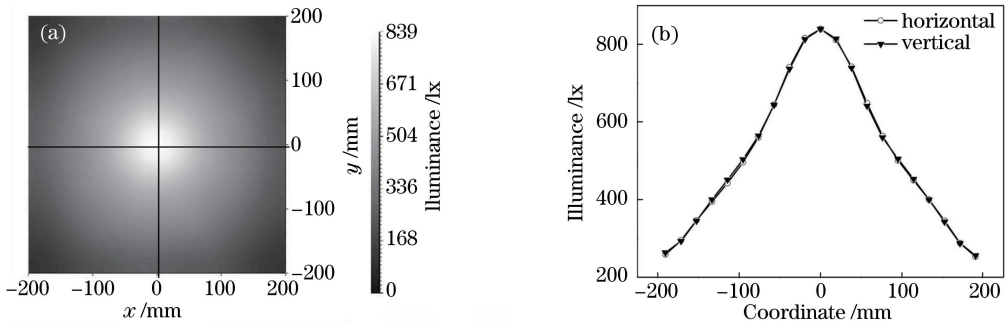


图 7 接收平面上的 (a) 照度分布图与 (b) 照度曲线

Fig. 7 (a) Illuminance distribution and (b) illuminance curves on the target plane

光通量为 87.078 lm,因为光通量与发光功率成正比,故根据(1)式可得装置的耦合效率 $\eta = \frac{P_o}{P_i} = \frac{87.078 \text{ lm}}{100 \text{ lm}} \times 100\% \approx 87\%$ 。结果显示该装置依然存在损耗,包括失配面的菲涅耳反射损耗和光纤本身的传输损耗;但大部分光能量都耦合进了光纤束并传导到了发光端头,即实现了较高的能量利用率,同时验证了理论分析的正确性。

通过光线追迹得到光纤端头裸发光的照度分布图及其曲线,如图 7 所示。接收平面上,水平和垂直两个方向都表现为中心较亮、四周较暗的非均匀光斑。观察照度曲线,可以看到水平和垂直两个方向的曲线基本重合,验证了光纤端口的空间照明是关于中心轴对称的。由于曲线中没有明显的照明范围,无法计算在预设照明接收区域内的照度均匀度。在普通照明应用场景中,该系统的光斑效果无法达到照明要求。

3.3 设计公差分析

由理论分析可知,光纤发光端口的配光决定了配光透镜的外形与照明光斑效果,故需要准确拟合

配光曲线。以(6)式中的代数多项式的阶次 j 为参数,分析该数值对拟合配光效果的影响。

使用 MATLAB 编程求解 j 阶代数多项式的拟合曲线和透镜的轮廓曲线坐标。设透镜外曲面顶点与端头发光面的垂直距离为 50 mm,因为光纤束发

光端面的最大直径为 9 mm,即透镜顶点高度大于 5 倍的光源发光面直径,故此时可以将发光端面看成点光源。内外曲面坐标点计算个数均为 200。将坐标建模后进行光线追迹并计算不同 j 值的光斑照度均匀度。

表 1 参数 j 对配光曲线拟合效果的影响

Table 1 Influence of parameter j on fitting effect of distribution curve

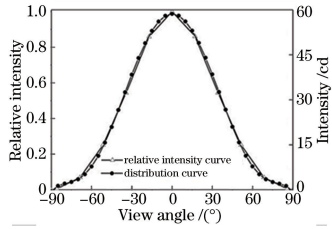
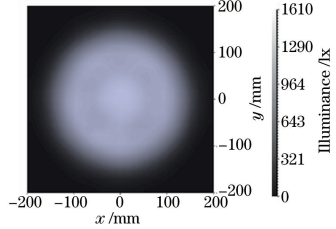
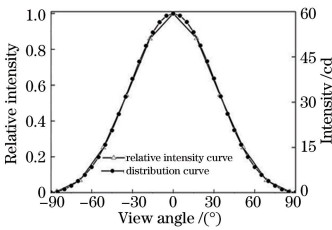
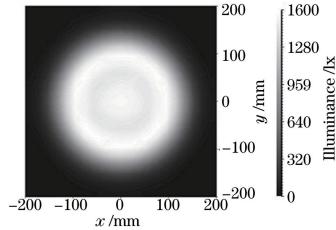
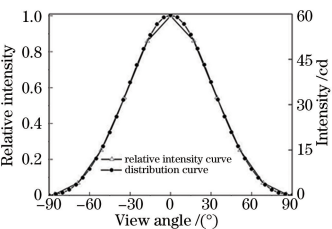
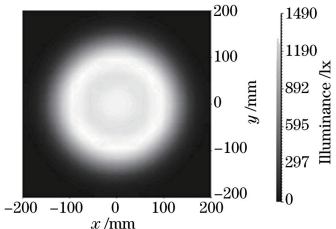
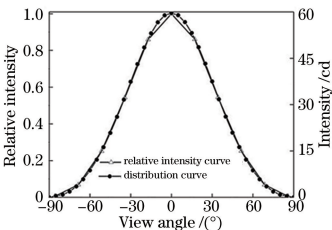
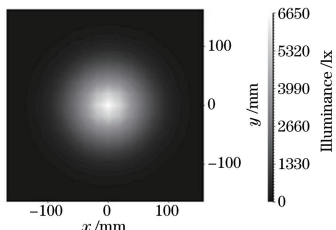
Standard deviation; uniformity of illumination ($U_{E_m}, m=6,8,10,11$)		Curve comparison	Illuminance distribution
6	$s=0.9386;$ $U_{E_6}=85.60\%$		
8	$s=0.4349;$ $U_{E_8}=88.16\%$		
10	$s=0.0007;$ $U_{E_{10}}=90.99\%$		
11	$s=0.0656;$ $U_{E_{11}}=9.51\%$		

表 1 中 s 表示相对光强值与拟合配光曲线的数据间标准差。分析表 1 可知:拟合阶次 j 由 6 增加到 11,对应的配光曲线与光纤端口出射光线的相对光强分布吻合度也逐渐增加;当 $j=8$ 时,吻合度较高,但标准差继续减小,光斑的照度均匀度继续增大;当 $j=10$ 时,标准差已达到最小值,光斑照度均匀度为 90.99%,已经达到最大值;而 $j=11$ 时,标准差变大,照度均匀度骤降,这是因为高阶配光曲线表达式较繁杂,角度越大,分割区内的光通量计算误差越大,导致得到的透镜外轮廓坐标值包含虚部的非解析解,故光斑中心照度与边缘照度差别巨大,当

$j=10$ 时已经达到拟合阈值。整体仿真结果如图 8 所示。

结合表 1 与图 8 的分析结果,本文设计时采用 10 阶代数多项式表示配光曲线模型,采用最小二乘曲线拟合方法进行拟合,拟合结果为

$$I(\alpha) = 59.673 + 0.206598\alpha - 101.476\alpha^2 - 0.450\alpha^3 + 85.759\alpha^4 + 0.357\alpha^5 - 45.451\alpha^6 - 0.126\alpha^7 + 13.738\alpha^8 + 0.017\alpha^9 - 1.726\alpha^{10} \quad (9)$$

当 $j=10$ 时,系统的光照度分布与照度图的剖面曲线如图 9 所示。

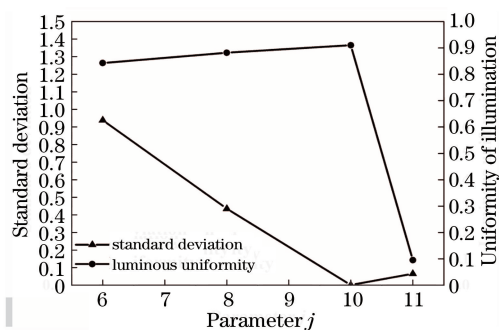
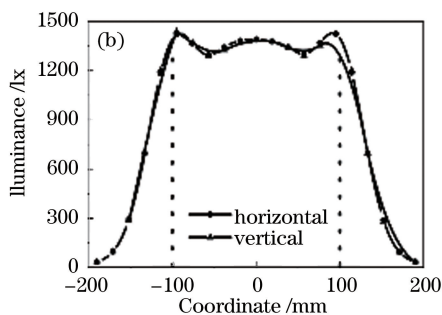
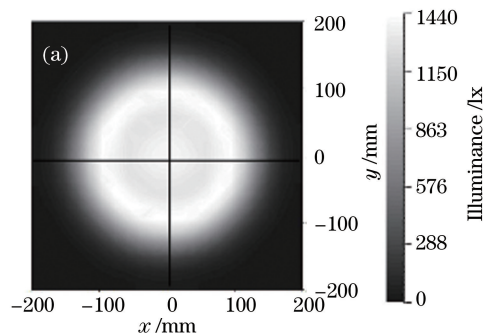
图8 参数 j 对照明效果的影响Fig. 8 Influence of parameter j on illumination effect

图9 装配透镜后,光纤端头的(a)光斑分布图与(b)照度曲线

Fig. 9 (a) Light spot distribution and (b) illuminance curves of the fiber bundle end with lens

发光端头相对于透镜是一个点光源,故光源形状对配光效果几乎没有影响。该系统的光斑最大照度值为 1440 lx,平均照度为 1365.5 lx,均符合国际照明委员会照明标准(S008-2001)对一般室内照明场景的照明要求^[16]。

同时,装配透镜后,光斑边缘不可避免地出现了一小圈弥散斑,这是因为光纤端头发射的大角度光线在透镜外曲面上发生了菲涅耳反射,造成了损耗,角度越大,菲涅耳反射越严重,故边缘的照度会有所下降,有效半径也有所减小。整体上,最后光斑有效半径为 100 mm,两个方向的照度均匀度都远大于 70%,比较完整地实现了光电分离,将 LED 发散光引导到 1000 mm 远的场景实现均匀照明,仿真结果表明拟合自由曲面透镜将光导照明应用于普通照明设计的一种有效途径。

4 实验测试与结果分析

实验测试该照明系统的制作公差对实际照明效果和系统的最大照度、显示指数、色温等基本参数的影响规律。为了排除杂光对接收平面照度的干扰,实验在暗室内进行。透镜采用 PMMA 材料,尺寸公差为 ± 0.03 mm;LED 光源采用原装 CREE-XPL-HI-3535 白光灯珠。系统从左往右依次是接收平

对比图 7 和图 9 中的照度图可知:显然图 7 中原本较发散的光线在透镜作用下,被约束在半径 100 mm 圆形区域内,圆形光斑的亮度比较均匀;而图 9 中存在两个方向的照度均匀度。水平方向上,在半径为 100 mm 的圆形有效照明区域内的最小照度 $E_{h-min} = 1295.98$ lx,最大照度 $E_{h-max} = 1424.24$ lx,因此 $U_E \approx 90.99\%$;垂直方向上,最小照度 $E_{v-min} = 1288.21$ lx,最大照度 $E_{v-max} = 1437.96$ lx,故 $U_E \approx 89.59\%$ 。两个方向上的照度均匀度不相等,虽然光纤束端头的形状不是严格的中心对称,但光纤束的

板、光学透镜、光纤、光源与耦合装置,如图 10 所示。

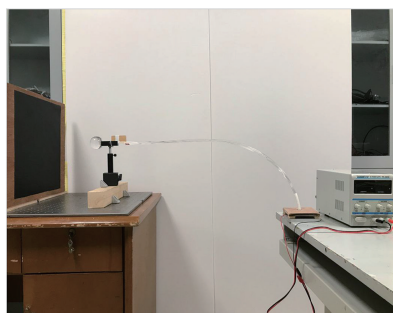


图10 实验系统实物图

Fig. 10 Physical diagram of the experimental system

为获得较良好的照明效果,实验测试光纤长度为 1000 mm 时不同耦合距离误差 Δd 对照明效果的影响。 Δd 是指发光面到光纤入光端面的实际距离和理论值的差值,即 $\Delta d = d_{r_i} - d$ ($i = 1, 2, 3, 4$)。实验使用杭州远方彩色照度计 SPIC-200 测试了系统照度、色温和显色指数,其中系统的光斑照度均匀度用五点法计算,结果如表 2 和图 11 所示。

由表 2 可见,光斑最大照度值在 $\Delta d = -2$ mm 时达到最大,此时光纤束入光端面与 LED 发光面紧密贴合,但 LED 的光能量集中在中心光纤内,导致光纤束的出光端口发光模式与理论值存在偏差,故光斑整体的均匀性并不高;当耦合距离达到理论值,

表2 耦合距离误差对照明效果的影响

Table 2 Influence of coupling distance error on illumination effect

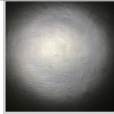
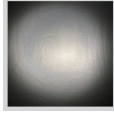
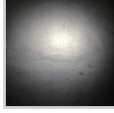
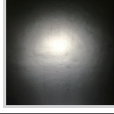
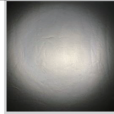
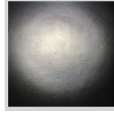
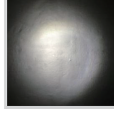
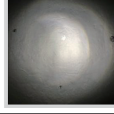
Δd /mm	Maximum irradiance /lx	Uniformity of illumination /%	Irradiance map
-2	844.4	71.12	
0	810.3	81.54	
2	759.8	67.72	
4	661.8	52.01	

表3 透镜关于发光端面的距离误差对照明效果的影响

Table 3 Effect of the distance error between the luminous face and lens on the illumination effect

Δz /mm	Maximum illuminance /lx	Uniformity of illuminance /%	Illuminance distribution
0	810.3	81.54	
2	824.5	71.58	
4	816.2	67.46	
6	942.2	40.58	

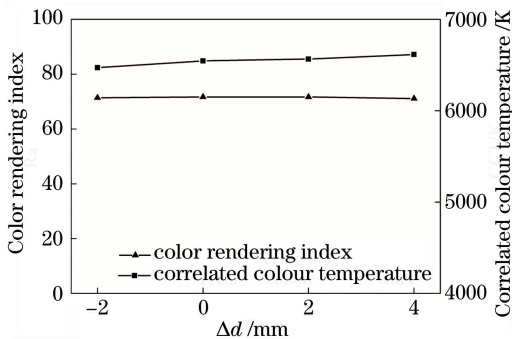


图11 耦合距离误差对系统显色指数和相关色温的影响曲线图

Fig. 11 Influence of coupling distance error on the color rendering index and correlated colour temperature

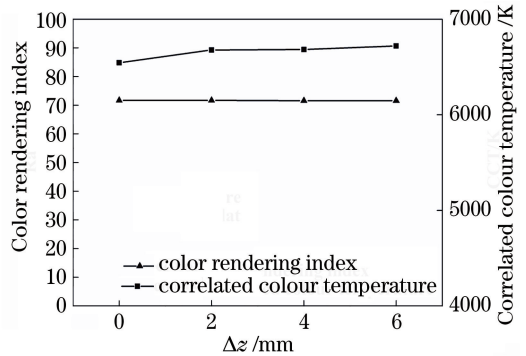


图12 透镜关于发光端面距离偏差对系统显色指数和色温的影响曲线图

Fig. 12 Influence of the distance deviation between the end face and the lens on the color rendering index and correlated colour temperature

LED 的能量比较均匀地耦合到光纤束,光斑中心最大照度值减小,但整体的照度均匀度达到最大;随着耦合距离误差的增大,端面与 LED 发光面的距离增大,出光端口发光模式的偏差增大,所以最大光照度值和照度均匀度均减小。

如图 11 所示,在耦合距离偏离理论值的过程中,在大部分 LED 光能量经过透镜并照射到接收面的过程中,该系统的显色指数和相关色温基本不变,显色指数稳定在 71,相关色温稳定在 (6500 ± 200) K。

当控制耦合距离 $d=2$ mm 不变,光纤发光端面与透镜的垂直距离偏离理论值沿光轴正方向移动时,以 Δz 作为透镜顶点与光纤发光端面的距离偏差量,测试系统的照明效果,包括系统的光照度、光照均匀度、色温和色差,结果如表 3 和图 12 所示。

从表 3 看出,随着透镜相对于光纤发光端头的垂直距离 Δz 的增加:透镜的顶点与光纤的出光端头间距离随之增加,出光端头的大角度光线偏离预期入射点越严重,光斑的照度均匀度越小;而光斑的中心最大照度先减小后增大,光斑中心与边缘的照度值差别越大,配光效果越差。

显然,透镜顶点与光纤出光端面的距离变化对系统的显色指数和色温无明显影响,距离偏差变化过程中,该系统的显色指数和色温基本不变,显色指数稳定在 71,相关色温稳定在 (6500 ± 100) K,这与上述耦合距离误差对照明系统的影响是相同的。通过上面对耦合距离偏差和透镜关于发光端面距离偏差的分析,系统的光斑均匀度对上述两个误差量都比较敏感,而制作误差对系统的色温和显色指数几

乎没有影响。故安装照明系统时,其允许的公差范围较小,位置精度要求更高。最后控制偏差量最低,将其设置为理论值,即 $d = 2 \text{ mm}$ 、 $\Delta z = 0 \text{ mm}$,安装整个照明系统并测试照明效果,如图 13 所示。

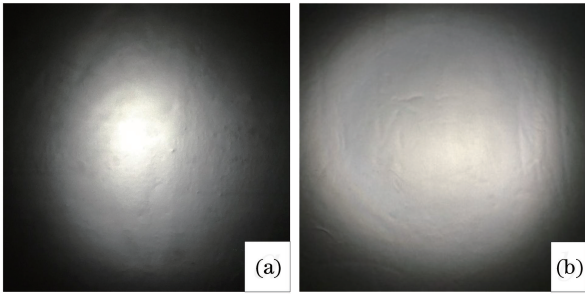


图 13 系统照明效果图对比。(a)未装配透镜;(b)装配透镜
Fig. 13 Comparison of system illumination effects.

(a) Without lens; (b) with lens

显然,未装配透镜时,图 13(a)照明区域中央出现了一个较亮的光斑块,该光斑块对照明效果存在较大干扰,随着照明半径的增大,亮度锐减。采用杭州远方 SPIC-200 彩色照度计测得光斑块的中心照度值为 827 lx ,边缘照度平均值为 314 lx ,实际数值均接近模拟值,可见实际光耦合效率较好,而中心区域与边缘区域的照度值落差较大,有效照明范围较小,光斑均匀性差,与仿真结果基本一致。装配透镜后,相较图 13(a),图 13(b)中消除了亮度特别突出的光斑块,照明区域为一个类似圆形的均匀光斑。采用 5 点法计算得到系统光斑的均匀度 $U_E = 81.54\%$,其最大光照度为 810.3 lx 。再测试系统的相关色温和显色指数,其结果分别为 6545 K 和 71.7 。根据国际照明委员会照明标准(S008-2001),该光纤灯的光学参数均满足一般建筑区域的照明标准,包括休息室、餐馆等区域。

与模拟结果相比,光斑每个区域的实际照度值都有所下降,这是因为实验透镜存在材料的吸收损耗,光能减少,接收平面的照度值相应降低;而实际照度均匀度略低于理论值,其主要原因是 3D 打印的透镜精度误差超过理论公差值,特别是透镜轮廓曲线中控制光斑边缘区域的曲线段,曲率变化较快,实际难以达到理论值,造成光斑边缘照度低于理论值。但相比于未装配透镜的光纤照明均匀性实验,装配透镜的光纤照明均匀性效果显然比较理想, $U_E = 81.54\%$ 的均匀度在误差允许范围内,与模拟仿真结果差别不大。

5 结 论

基于光纤照明技术,设计获得了一种光纤束端

头灯。该灯具是通过塑料光纤束将 LED 光能引导到其他区域,且在光纤束端头装配一款光学透镜。对光导照明系统进行模拟仿真得到了接收平面上亮度较均匀的圆形光斑,并且光斑照度均匀度垂直方向为 90.99% ,水平方向是 89.59% ,均匀度均符合光学设计指标。最后进行实验测试,得到了该灯具的实际光斑均匀度 $U_E = 81.54\%$,耦合效率较好,均匀性在误差允许范围内且与模拟结果基本吻合。该设计隔开了电路模块与灯具模块,实现了光电分离,使用安全性高,在未来加工技术得到发展后,该灯具将能够获得更好的照明效果,应用场景将更加广泛,可见该设计方法和结果对光导照明技术应用到普通照明设计具有一定的实际意义。

参 考 文 献

- [1] Yang F, He C, Zhang X S. Design and analysis of a primary-secondary system for LED collimating illumination[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 082201.
杨帆,何川,张旭升.一种主次镜组合 LED 准直照明系统设计与分析[J].激光与光电子学进展,2018,55(8): 082201.
- [2] Zhu M, Lou J, Pan Y J, et al. Design of freeform surface with uniform illumination based on new LED collimation system[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(4): 0422002.
朱民,楼俊,潘玉珏,等.基于新型 LED 准直系统的自由曲面均匀照明设计[J].光学学报,2018,38(4): 0422002.
- [3] Xiang C M, Wen S S, Shi C Y, et al. Design of direct-down type LED panel light with curved surface plate[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(7): 0718004.
向昌明,文尚胜,史晨阳,等.一种带有曲面底板的直下式 LED 平板灯设计[J].红外与激光工程,2017,46(7): 0718004.
- [4] Zhang X T, Liu C J, Qi Y, et al. Design of lens coupler with uniform energy distribution based on LED source and polymer optical fiber bundle [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(2): 0208001.
张晓婷,刘楚嘉,漆宇,等.基于 LED 光源与聚合物光纤束的能量均匀透镜耦合器设计[J].光学学报,2018,38(2): 0208001.
- [5] 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.
- [6] Ma Y Y, Han S K, Zhai Y, et al. An illumination method based on fiber array[J]. Optical Technique, 2018, 44(2): 201-205.
马亚运, 韩绍坤, 翟宇, 等. 一种基于光纤阵列的激光照明方法[J]. 光学技术, 2018, 44(2): 201-205.
- [7] Chen H F, Jin Y H, Guo J J, et al. Study on integration of light guide illumination and ventilation with CPC solar collector[J]. Journal of Changzhou University (Natural Science Edition), 2018, 30(3): 77-83.
陈海飞, 金懿豪, 郭晶晶, 等. CPC 聚光光导照明系统的应用研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2018, 30(3): 77-83.
- [8] Meng H, Li Y J, Wang F, et al. Spectrum split solar lighting optical fiber transmission system[J]. Optical Technique, 2015, 41(6): 563-566.
孟惠, 李雅静, 王芳, 等. 分光型太阳光光纤传输照明系统[J]. 光学技术, 2015, 41(6): 563-566.
- [9] Yang C, Sun X H, Wang Y M, et al. 1×7 cylindrical mixing-rod plastic optical fiber coupler[J]. Acta Optica Sinica, 2001, 21(9): 1116-1122.
杨春, 孙小菡, 王云明, 等. 1×7 圆柱形混合棒塑料光纤耦合器[J]. 光学学报, 2001, 21(9): 1116-1122.
- [10] Ai J, Li Y. Mixing-rod power coupling for large-core polymer optical fibers [J]. Optical Engineering, 1999, 38(6): 1024-1028.
- [11] Wang K, Liu S, Chen F, et al. Freeform LED lens for rectangularly prescribed illumination[J]. Journal of Optics A: Pure and Applied Optics, 2009, 11(10): 105501.
- [12] Li H. Numerical analysis [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2003: 67-70.
李红. 数值分析 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003: 67-70.
- [13] Lu J N, Yu J, Tong Y Z, et al. Secondary optical design for light emitting diodes lens with wide range and high uniformity illumination[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2012, 33(3): 334-337.
芦佳宁, 余杰, 童玉珍, 等. 实现大范围均匀照明的 LED 透镜二次光学设计[J]. 半导体光电, 2012, 33(3): 334-337.
- [14] Li J P. Optical design and research of direct-lit LED lamps[D]. Xiamen: Huaqiao University, 2018: 1-6.
李建鹏. 直下式 LED 灯具的光学设计与研究[D]. 厦门: 华侨大学, 2018: 1-6.
- [15] Huang B L, Guo T L, Chen E G, et al. Study on optimal scale of average netted dot density for light guide plate[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(5): 0522002.
黄炳乐, 郭太良, 陈恩果, 等. 导光板网点平均密度范围的最优化研究[J]. 光学学报, 2015, 35(5): 0522002.
- [16] Yuan Q. International lighting commission lighting standard (S008-2001)-indoor workplace lighting (continued) [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2003, 14(1): 55-62.
袁樵. 国际照明委员会照明标准(S008-2001): 室内工作场所照明(续上期)[J]. 照明工程学报, 2003, 14(1): 55-62.