

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

李远兴¹ 梁文跃² 叶湖贵¹ 龙拥兵^{3*} 申冬玲¹ 严辉章¹
谭健华¹ 叶嘉建¹

¹五邑大学应用物理与材料学院, 广东 江门 529020

²五邑大学数学与计算科学学院, 广东 江门 529020

³华南农业大学电子工程学院, 广东 广州 510642

摘要 针对光线在大角度偏转时菲涅耳损耗大、光强均匀性差等问题,提出了基于最优双偏转能量映射和贝塞尔曲线多参数优化的双自由曲面透镜设计算法,并利用该算法设计了基于板上芯片型(COB)发光二极管(LED)的双自由曲面透镜,该透镜可应用于可见光通信系统的光学发射端。以大面积发光面的 COB LED 作为光源,通过控制自由曲面透镜内外两个表面上的入射光线偏转角的比例关系(即偏转系数),可降低菲涅耳损耗。构建了出光角分别为 180°和 260°的大角度均匀光强分布的双自由曲面透镜,其光强均匀度分别为 0.92 和 0.90,其光能利用率分别为 89.4%和 85.9%。将单自由曲面透镜和双自由曲面透镜的光学性能作对比,结果表明,单自由曲面透镜可实现出光角范围为 120°~180°、光强均匀度超过 0.85 以及光能利用率超过 85%的光分布,双自由曲面透镜在达到同样的光强均匀度和光能利用率时,可实现出光角范围为 100°~260°之间的均匀光强分布。因此,利用双自由曲面透镜能够实现更大范围出光角的均匀光强分布,从而满足可见光通信系统的光学发射端的光分布要求。

关键词 光学设计; 可见光通信; 双自由曲面透镜; 菲涅耳损耗; 均匀光强

中图分类号 O435.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.1022002

COB LED Based Optical Design of Transmitting End with Uniform Luminous Intensity Distribution for Visible Light Communication Systems

Li Yuanxing¹ Liang Wenyue² Ye Hugui¹ Long Yongbing³ Shen Dongling¹
Yan Huizhang¹ Tan Jianhua¹ Ye Jiajian¹

¹ School of Applied Physics and Material, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China

² School of Mathematics and Computational Science, Wuyi University, Jiangmen, Guangdong 529020, China

³ School of Electronic Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract The large angle deflection of light causes such problems as the high Fresnel loss and the poor luminous intensity uniformity. To solve these problems, a design algorithm of double freeform surface lens, which is based on the optimal double deflection energy mapping and the multi-parameter optimized Bézier curve, is proposed. Guided by this algorithm, a double freeform surface lens based on the light emitting diode (LED) of chip on board (COB) is proposed, and it can be used for the optical transmitting end of visible light communication systems. To reduce the Fresnel loss, we use the large-emission area COB LED as light source, and control the ratio of incident light deflection angles of freeform surface lens's inner and outer surfaces. Double freeform surface lenses, with large angle uniform luminous intensity distribution and with irradiation angles of 180° and 260° respectively, are

收稿日期: 2016-04-05; 收到修改稿日期: 2016-06-02

基金项目: 广东省自然科学基金杰出青年基金(2014A030306005)、广东省高等学校人才引进专项(粤教教[2013]246,江财教[2014]10)、广东省高等学校优秀青年教师培养计划(粤教师函[2014]108)、江门市科技计划(江财工[2012]156,江科[2014]145)、广东省科研创新团队(2015KCXTD027)、大学生创新创业训练计划(教高司函[2014]58,粤教高函[2014]132)

作者简介: 李远兴(1979—),男,硕士,实验师,主要从事光学设计方面的研究。E-mail: liyngx@sina.com

* 通信联系人。E-mail: yongbinglong@126.com

constructed. The luminous intensity uniformity of the lenses reaches up to 0.92 and 0.90 respectively, and the light utilization efficiency of the lenses reaches up to 89.4% and 85.9% respectively. The optical properties of the single freeform surface lens and the double freeform surface lens are compared. For the single freeform surface lens, light distribution with high luminous intensity uniformity over 0.85 and high light utilization efficiency over 0.85 can be achieved when the irradiation angle varies in the range from 120° to 180° . For the double freeform lens with the same luminous intensity uniformity and light utilization efficiency, the irradiation angle varies in a broader range from 100° to 260° . This study indicates that the double freeform surface lens can realize uniform light intensity distribution with broad irradiation angle, and it can satisfy the light distribution requirements of optical transmitting end in visible light communication systems.

Key words optical design; visible light communication; double freeform surface lens; Fresnel loss; uniform luminous intensity

OCIS codes 220.4298; 220.2945; 220.1250; 060.4510

1 引 言

随着发光二极管(LED)的广泛应用,基于LED的可见光通信技术成为国内外研究的热点。作为新兴的通信技术,可见光通信技术具有抗电磁干扰能力强、信息安全性高、环保以及宽带光谱等优点。1999年,香港Pang等^[1]提出了基于LED的室外可见光通信系统;2000年,日本Tanaka等^[2]提出了基于白光LED的室内可见光通信系统;2004年,日本Komine等^[3]系统分析了基于白光LED的室内可见光通信系统的基本原理,对光分布、信道、码间串扰和噪声来源进行了研究,发现白光LED照明系统具有照明与通信双重功能。近年来,可见光通信系统中发射端光学部件的设计成为国内外研究的一个重要课题。根据不同的应用场合,可见光通信的发射端需实现均匀照度分布^[4-5]、均匀光强分布^[6]、准直型定向分布^[7-10]等光分布。针对室内可见光通信中对发射端均匀照度光分布的要求,刘浩杰等^[11]提出了LED光源阵列发射端模型的设计方案,Shen等^[12]提出了利用半球型排布LED光源阵列实现均匀照度光分布。上述两种方案均采用数目较多的小功率LED光源作为发射端,增加了发射端光学部件设计的复杂性。为了设计结构简单的发射端光学元件,陈琛等^[13]运用反馈支撑抛物线法设计了基于表面贴装型(SMD)LED光源的单自由曲面透镜(SFS),该透镜内曲面为半球面,外曲面为自由曲面。利用该自由曲面透镜实现了出光角为 160° 的大角度均匀光强分布,并应用于水下可见光通信系统。

在上述LED可见光通信系统发射端的研究中,通常以小面积、小功率的LED作为光源。然而,大面积发光的板上芯片型(COB)LED光源具有装配难度低、光学系统小型化等优点。因此设计基于COB LED、紧凑的可见光通信系统的发射端具有重要的意义。COB LED光源的发光面积较大,在透镜内曲面尺寸与其发光面尺寸相近的情况下,不能简单地将COB LED光源作为理想的朗伯型点光源处理。传统基于点光源的光学透镜设计算法(包括裁剪法^[14]、能量映射法^[15-17]等)不再适用,必须在这些算法的基础上进行反馈优化^[18-19]或多参数优化^[20-21],以构建用于COB LED的光学透镜。但在目前的自由曲面透镜设计算法中,透镜的内曲面通常为半球面或者半椭球面,在此基础上设计外曲面以实现特定光分布,该类透镜被称为单自由曲面透镜。该类设计方法由于固定了透镜的内表面,降低了设计的自由度,在大角度光束控制时,产生较大的菲涅耳损耗误差^[22]。

本文提出了基于最优双偏转能量映射和贝塞尔曲线多参数优化的双自由曲面透镜(DFS)设计算法,并利用该算法设计了两款基于COB LED光源的双自由曲面透镜,实现了出光角分别为 180° 和 260° 的大角度均匀光强分布。通过对比单自由曲面透镜和双自由曲面透镜的光学性能,发现双自由曲面透镜能够实现更大范围出光角的均匀光强分布,从而满足可见光通信系统对光学发射端的光分布要求。

2 自由曲面透镜设计原理

根据均匀光强分布的设计要求,双自由曲面透镜的设计过程如下。

1) 构建光源与目标光分布的能量映射关系。通过选择使光强均匀度和光能利用率均为最优的偏转系数,分配透镜内外曲面的光线偏转角度,并应用几何法构建轴对称双自由曲面透镜的初始模型。

2) 采用贝塞尔曲线将内外自由曲面轮廓线参数化。

3) 将贝塞尔曲线对应的多边形的边长模量和倾角作为优化变量,根据透镜的可加工性给出相应的约束条件,构建评价光强分布的评价函数。

4) 引入 COB LED 光源的近场光学数据进行光线追迹,并运用下山-单纯形法、阻尼最小二乘法、模拟退火法等局部或全局优化算法进行优化,直到评价函数出现极小值,即得到最优的自由曲面透镜模型。

整个轴对称自由曲面透镜的设计流程如图 1 所示。

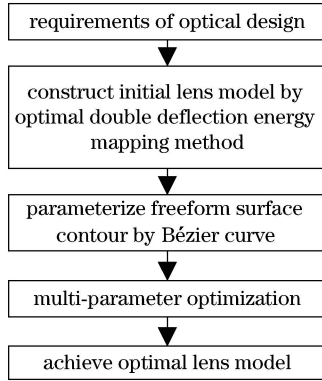


图 1 透镜设计流程

Fig. 1 Flow chart of lens design

2.1 最优双偏转能量映射法构建透镜初始模型

由于设计的双自由曲面透镜为轴对称结构,只需构建其剖面轮廓线,然后旋转剖面即可得到双自由曲面透镜的三维模型,其剖面可取 XZ 平面或 YZ 平面,如图 2 所示。

由图 3 可知,从光源出射的光线 L 通过双自由曲面透镜发生 T_1 、 T_2 两次透射偏转以及 R_1 、 R_2 两次反射偏转,两次反射偏转光线最后落在散热器等吸光物质上,从而产生损耗,其损耗能量由菲涅耳公式^[23]决定,称为菲涅耳反射损耗。

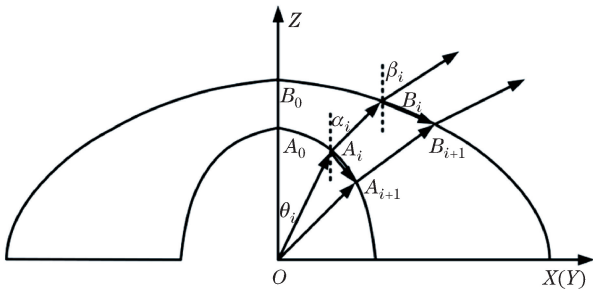


图 2 初始模型设计原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of initial model design

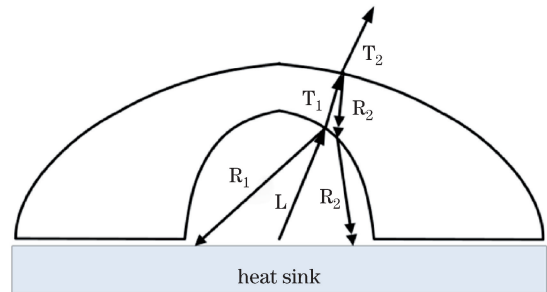


图 3 菲涅耳反射损耗示意图

Fig. 3 Diagram of Fresnel reflection loss

假设光源为理想的朗伯点光源,在不考虑菲涅耳反射损耗的情况下,当出光角为 $2\beta_{\max}$ (β_{\max} 为半出光角) 时,根据能量守恒定律,得到光源与均匀光强分布目标的光通量之间的映射关系为

$$\frac{2\pi \int_0^\theta I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta}{2\pi \int_0^{\pi/2} I_0 \cos \theta \sin \theta d\theta} = \frac{2\pi \int_0^\beta I_T \sin \beta d\beta}{2\pi \int_0^{\beta_{\max}} I_T \sin \beta d\beta}, \quad (1)$$

式中 θ 为光源出射光线与光源光轴(Z 轴)的夹角(即入射角), β 为经过透镜外曲面后的偏转光线与光源光轴的夹角(即外曲面出射角), I_0 为光源在光轴方向的光强, I_T 为均匀光强分布目标的光强值。由(1)式可得外曲面出射角 β 与入射角 θ 的映射关系为

$$\sin^2 \theta = (1 - \cos \beta) / (1 - \cos \beta_{\max}). \quad (2)$$

如图 2 所示,光线经过两次透射偏转后的总偏转角 $\delta = \beta - \theta$,其值由(2)式确定。假如光线经过透镜内曲面的出射角为 α ,则光线经过内曲面时偏转角 $\delta_{\text{inner}} = \alpha - \theta$,光线经过外曲面时偏转角 $\delta_{\text{outer}} = \beta - \alpha$ 。为方便后续讨论,定义偏转系数为 k ,使得 $\delta_{\text{inner}} = k\delta$ 且 $\delta_{\text{outer}} = (1 - k)\delta$,得到内曲面出射角 α 与入射角 θ 的映射关系为

$$\alpha = \theta + k(\beta - \theta). \quad (3)$$

假定 k 为与入射角 θ 无关的常量。当 $k=0$ 时,透镜的内曲面为球面,即透镜为单自由曲面透镜,此时对于点光源来说,只有外曲面具备偏转光线的能力;当 $k=1$ 时,透镜内外表面均为自由曲面,此时对于点光源来说,外曲面不具备偏转光线的能力。

假设光源为点光源,根据菲涅耳公式计算光线经过自由曲面透镜后的能量分布,并结合映射关系(2)式和(3)式,得到光强均匀度、光能利用率与半出光角 β_{\max} 、偏转系数 k 的关系,如图 4 所示。图 4(a)中实线为光强均匀度等于 0.9 的等值线。图 4(b)中实线为光能利用率等于 0.85 的等值线,点划线为光强均匀度等于 0.9 的等值线。透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)光学塑料(折射率为 1.493),入射端和出射端的环境材料均为空气。从图 4 可以看出,当偏转系数 k 和半出光角 β_{\max} 位于光强均匀度为 0.9 的区域内时[图 4(a)],透镜的光能利用效率超过 0.85[图 4(b)],则该区域称为偏转系数 k 的最优取值范围。

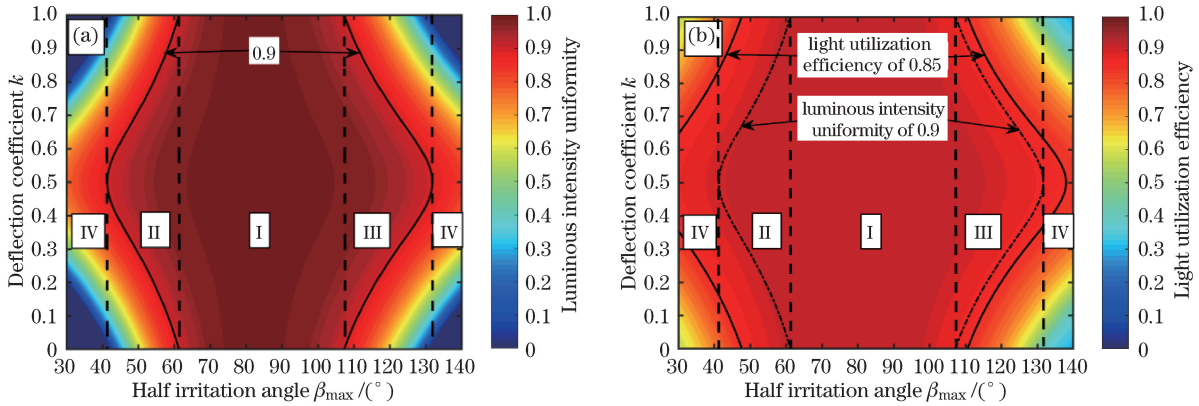


图 4 光强均匀度(a)和光能利用率(b)随半出光角和偏转系数的变化

Fig. 4 Variation in (a) luminous intensity uniformity and (b) light utilization efficiency with half irradiation angle and deflection coefficient

为方便讨论,将 k 值的最优取值范围分为图 4 所示的 4 个区域(区域 I~IV),其分区数据如表 1 所示。其中左侧光强均匀度为 0.9 的等值线的近似拟合表达式为 $k = 0.5 \pm 0.0264 \times (\beta_{\max} - 42)$,右侧光强均匀度为 0.9 的等值线的近似拟合表达式为 $k = 0.5 \pm 0.02 \times (\beta_{\max} - 132)$ 。从图 4(b)和表 1 可以看出,当 β_{\max} 在区域 I 时,对任何 k 值均可实现光强均匀度高于 0.9、光能利用效率高于 0.85 的光分布;当 β_{\max} 在区域 II、III 时,只有当 k 值满足一定条件时,才能实现上述光分布。特别地,当 k 取值为 0.5 时,在上述三个区域内,采用双自由曲面透镜均可实现均匀光强分布。因此,以下讨论中以 $k=0.5$ 构建双自由曲面透镜。

表 1 最优偏转系数与半出光角的对应关系

Table 1 Correspondence of optimal deflection coefficient and half irradiation angle

Zone	Half irradiation angle $\beta_{\max} / (^{\circ})$	Optimal deflection coefficient k	Satisfied condition
I	61~107	0~1	
II	42~61	$0.5 \pm 0.0264 \times (\beta_{\max} - 42)$	Luminous intensity uniformity is higher than 0.9
III	107~132	$0.5 \pm 0.02 \times (\beta_{\max} - 132)$	Light utilization efficiency is higher than 0.85
IV	0~42 or 132~180	None	

为了进一步获得自由曲面透镜的初始模型,将入射角 θ 离散化,使光以等光通量或等角度的方式入射,离散化的入射角记为 $\theta_i (i=0, 1, \dots, N)$ 。根据上述映射关系(2)式和(3)式计算光线在内曲面和外曲面的出射角 α_i 和 $\beta_i (i=0, 1, \dots, N)$,进而得到入射光线及其经过内外两次偏转后光线的单位矢量。

根据折射定律^[24]可得

$$n_0 \mathbf{O} - n_1 \mathbf{I} = \sqrt{n_0^2 + n_1^2 - 2n_0 n_1 (\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})} \cdot \mathbf{N}, \quad (4)$$

式中 n_1 和 n_0 分别为入射光和出射光所在介质的折射率, \mathbf{N} 为自由曲面上光线入射点处法线的单位矢量, \mathbf{I} 和 \mathbf{O} 分别为入射光线和出射光线的单位矢量。

内曲面轮廓线上任一点的切线与该点的法线垂直,即

$$(\mathbf{OA}_{i+1} - \mathbf{OA}_i) \cdot \mathbf{N}_i = 0, \quad (5)$$

式中 \mathbf{OA}_i 和 \mathbf{OA}_{i+1} 分别为如图 2 所示的第 i 条入射光线和第 $i+1$ 条入射光线的矢量, \mathbf{N}_i 为自由曲面上第 i 条光线入射点处的法线单位矢量。

联合(4)式和(5)式,计算内自由曲面轮廓线上所有离散点的位置数据集 $\{(x_{A_i}, z_{A_i})\}$ 。同理可得外自由曲面轮廓线上离散点的位置数据集 $\{(x_{B_i}, z_{B_i})\}$ 。根据内、外自由曲面轮廓线上所有离散点的位置数据集即可构建基于点光源的自由曲面透镜初始模型。

2.2 贝塞尔曲线多参数优化法构建透镜最优模型

为了进一步获得适用于扩展光源的透镜模型,利用贝塞尔曲线多参数优化法对初始模型进行优化。首先,利用最优双偏转能量映射法得到透镜初始模型内、外自由曲面的位置数据集 $\{(x_{A_i}, z_{A_i})\}$ 和 $\{(x_{B_i}, z_{B_i})\}$;然后使用三阶贝塞尔曲线将自由曲面轮廓线参数化,获得拟合曲线,如图 5 所示。

贝塞尔曲线的函数表达式为^[25]

$$\mathbf{p}(t) = \sum_{j=0}^n \mathbf{b}_j B_{j,n}(t), \quad (6)$$

式中 \mathbf{b}_j 为贝塞尔曲线的控制顶点,为绝对矢量; n 为贝塞尔阶数; $B_{j,n}(t)$ 为伯恩斯坦基函数; t 为参数,且 $0 \leq t \leq 1$ 。

贝塞尔曲线对应的多边形的边矢量表达式为

$$\mathbf{a}_0 = \mathbf{b}_0, \mathbf{a}_j = \mathbf{b}_j - \mathbf{b}_{j-1}, j = 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

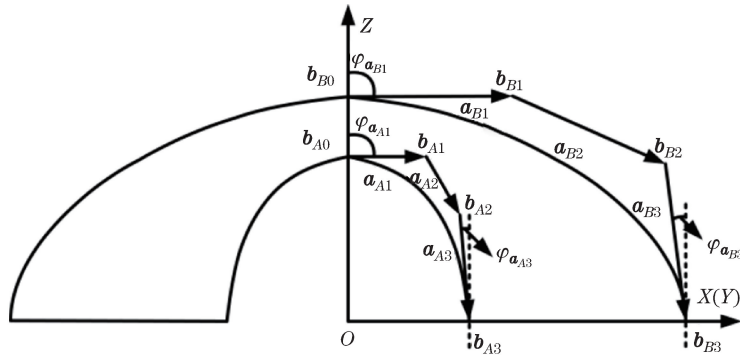


图 5 采用三阶贝塞尔曲线参数化的自由曲面轮廓线

Fig. 5 Freeform surface contour parameterized by the third-order Bessel curve

在贝塞尔曲线参数化的自由曲面轮廓线中,控制顶点 \mathbf{b}_{A0} 、 \mathbf{b}_{B0} 和 \mathbf{b}_{B3} 的 z 分量调节内外曲面的高度;控制顶点 \mathbf{b}_{A3} 和 \mathbf{b}_{B3} 的 x 分量调节内外曲面的最大直径;边矢量 \mathbf{a}_{A1} 和 \mathbf{a}_{A3} 联合调节内曲面的形状;边矢量 \mathbf{a}_{B1} 和 \mathbf{a}_{B3} 联合调节外曲面的形状。

以上参数为优化变量,采用下山-单纯形算法或阻尼最小二乘法等优化算法进行优化计算。为了评价优化变量取值的优劣,以各个采样角度的实际光强和期望光强的方差构建的评价函数为

$$M_F = \sqrt{\sum_{i=1}^m (I_i - I_{Ei})^2}, \quad (8)$$

式中 m 为采样角度的数量, I_i 和 I_{Ei} 分别为采样角度方向上的实际光强与期望光强。在优化时, M_F 值越小,实际光强分布越接近期望光强分布。随着优化次数的增加,评价函数的取值不断变小并趋向一个定值;优化结束时获得最优的模型。

3 光学发射端设计实例与分析

3.1 180°均匀光强分布双自由曲面透镜设计

利用上述的自由曲面透镜设计算法,设计了一款基于 COB LED 光源的双自由曲面透镜,将其作为可见光通信系统的光学发射端,实现出光角为 180°的大角度均匀光强分布。透镜材料为 PMMA 光学塑料,折射率为 1.493。LED 光源使用大功率 COB LED(CXA1816, Cree 公司),如图 6(a)所示,其光束角为 116°,发光

面的直径为 12 mm,此光源发光不均匀,为非理想扩展光源。与透镜的尺寸相比,COB LED 光源的面积效应和光出射分布不可忽视,因此不能当作理想的点光源或面光源处理。在贝塞尔曲线多参数优化过程中,采用 LED 光源近场光学数据进行计算。设计目标光分布的半出光角为 90° (即出光角为 180°),属于 I 区,其最优偏转系数 k 的取值范围为 $0 < k < 1$,本实例中 k 取 0.5。利用最优双偏转能量映射法构建透镜的初始模型并利用贝塞尔曲线多参数优化法获得最优模型透镜的优化参数,如表 2 所示。根据易加工性,约束条件为内曲面边矢量 \mathbf{a}_{A3} 的方向角 $\varphi_{a_{A3}} \leq 0$ 和外曲面边矢量 \mathbf{a}_{B3} 的方向角 $\varphi_{a_{B3}} \leq 0$,以保证透镜能够从模具顺利出模;同时,注塑工艺要求光学塑料透镜的最薄处不小于 0.8 mm,即约束条件为 $z_{b_{B0}} - z_{b_{A0}} \geq 0.8$ mm。图 6(a)为最优模型的三维图(其中蓝色部分为透镜的剖面视图),图 6(b)为初始模型和最优模型的轮廓线。将图 6(a)中的散热器表面作氧化发黑工艺处理。由图 6 可以得到,透镜尺寸为 COB LED 光源发光面尺寸的 2.7 倍,比实现相同光学效果的基于小尺寸 SMD LED 的透镜(以 Cree XLamp XP-E2 LED 作为光源)紧凑。

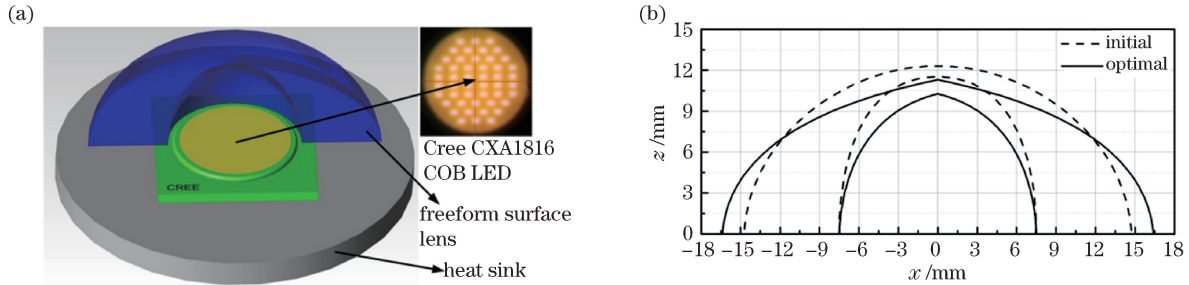


图 6 (a)最优模型三维图;(b)初始模型和最优模型的轮廓线

Fig. 6 (a) Three-dimensional diagram of optimal model; (b) contour lines of initial model and optimal model

表 2 初始模型和最优模型的透镜参数

Table 2 Lens parameters of initial model and optimal model

Model	Parameter											
	$z_{b_{A0}} /$ mm	$z_{b_{B0}} /$ mm	$x_{b_{A3}} /$ mm	$x_{b_{B3}} /$ mm	$ \mathbf{a}_{A1} /$ mm	$\varphi_{a_{A1}} /$ ($^\circ$)	$ \mathbf{a}_{A3} /$ mm	$\varphi_{a_{A3}} /$ ($^\circ$)	$ \mathbf{a}_{B1} /$ mm	$\varphi_{a_{B1}} /$ ($^\circ$)	$ \mathbf{a}_{B3} /$ mm	$\varphi_{a_{B3}} /$ ($^\circ$)
Initial	11.50	12.30	7.50	14.74	5.90	89.3	5.10	0	6.90	89.1	7.25	-3.3
Optimal	10.27	11.30	7.50	16.39	5.61	103.3	4.35	-2.2	6.26	101.2	7.33	-4.7

运用蒙特卡罗方法对初始模型和最优模型进行光线追迹,得到的配光曲线如图 7(a)所示。结果表明,光强均匀度由 0.74(初始模型)提高至 0.92(最优模型),且最优模型的光能利用率为 89.4%,出光角为 180° ,满足可见光通信系统发射端的大角度均匀光强分布要求^[17]。采用具有相同发光面积和远场配光曲线的扩展面光源代替 CXA1816 COB LED 光源,得到的配光曲线如图 7(b)所示,其光强均匀度降低为 0.84,可见不能简单地用扩展光源代替复杂光分布的实际光源。

3.2 260° 均匀光强分布双自由曲面透镜设计

设计了一款基于 COB LED 光源的双自由曲面透镜作为可见光通信系统的光学发射端,实现出光角为 260° 的大角度均匀光强分布。透镜材料为 PMMA 光学塑料,LED 光源为 CXA1816 COB LED。设计目标光分布的半出光角为 130° (即出光角为 260°),属于 II 区,其最优偏转系数 k 的取值范围为 $0.46 < k < 0.54$,本实例取 0.5。利用最优双偏转能量映射法构建透镜的初始模型,并利用贝塞尔曲线多参数优化法获得最优模型透镜的优化参数,如表 3 所示。注塑工艺要求光学塑料透镜的最薄处不小于 0.8 mm,即约束条件为 $z_{b_{B0}} - z_{b_{A0}} \geq 0.8$ mm。图 8(a)为最优模型的三维图(其中蓝色部分为透镜的剖面视图),图 8(b)为初始模型和最优模型的轮廓线。将图 8(a)中的散热器表面作氧化发黑工艺处理。

运用蒙特卡罗方法对初始模型和最优模型进行光线追迹,得到的配光曲线如图 9 所示。结果表明,光强均匀度由 0.73(初始模型)提高至 0.90(最优模型)。最优模型的光能利用率为 85.9%,出光角为 260° ,满足可见光通信系统发射端的大角度均匀光强分布要求。

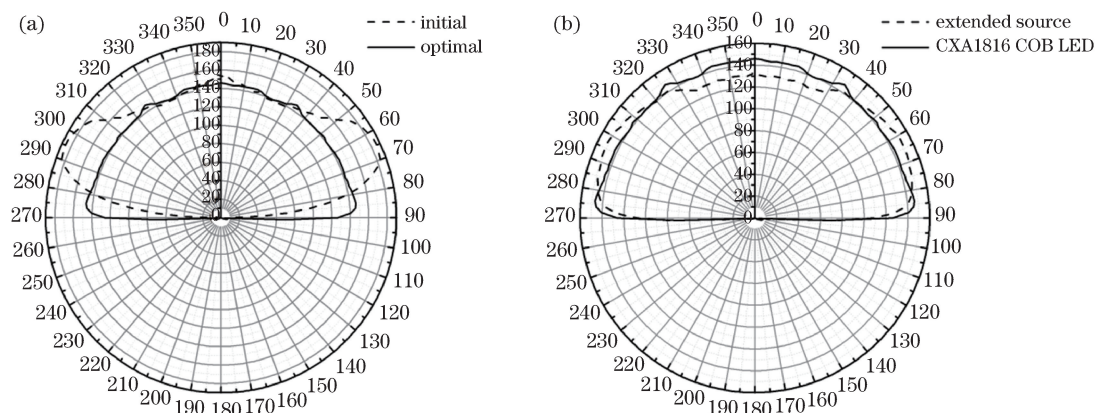


图 7 (a)初始模型和最优模型的配光曲线;(b)基于扩展光源和 CXA1816 COB LED 的配光曲线(光强单位为 cd/klm)

Fig. 7 (a) Light distribution curves of initial model and optimal model; (b) light distribution curves based on extended source and CXA1816 COB LED (the luminous intensity unit is cd/klm)

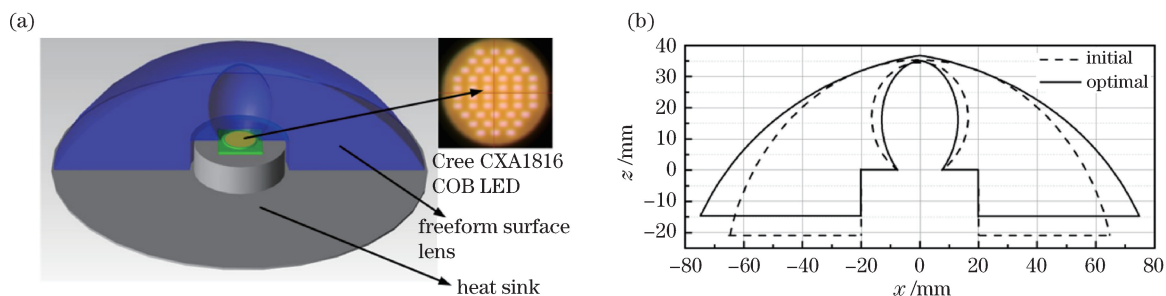


图 8 (a)最优模型三维图;(b)初始模型和最优模型的轮廓线

Fig. 8 (a) Three-dimensional diagram of optimal model; (b) contour lines of initial model and optimal model

表 3 初始模型和最优模型的透镜参数

Table 3 Lens parameters of initial model and optimal model

Model	Parameter												
	$z_{b_{A0}} /$ mm	$z_{b_{B0}} /$ mm	$x_{b_{A3}} /$ mm	$x_{b_{B3}} /$ mm	$z_{b_{B3}} /$ mm	$ a_{A1} /$ mm	$\varphi_{a_{A1}} /$ ($^{\circ}$)	$ a_{A3} /$ mm	$\varphi_{a_{A3}} /$ ($^{\circ}$)	$ a_{B1} /$ mm	$\varphi_{a_{B1}} /$ ($^{\circ}$)	$ a_{B3} /$ mm	$\varphi_{a_{B3}} /$ ($^{\circ}$)
Initial	34.5	35.3	7.6	64.5	-20.8	18.0	89.8	16.5	59.4	31.6	89.3	30.5	-12.3
Optimal	35.1	36.8	7.6	74.6	-14.4	11.3	96.8	18.5	36.5	27.3	98.6	35.4	-26.5

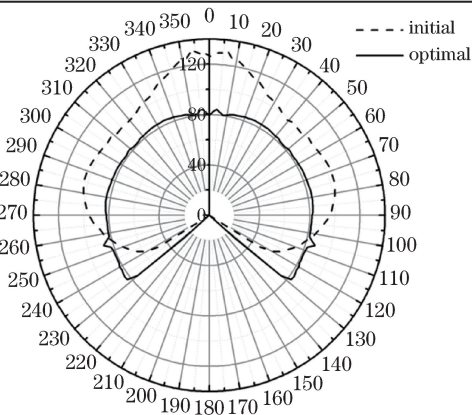


图 9 初始模型和最优模型的配光曲线(光强单位为 cd/klm)

Fig. 9 Light distribution curves of initial model and optimal model (the luminous intensity unit is cd/klm)

图 8 中透镜的内曲面为内凹形状,无法进行单一透镜形式的注塑加工,通过透镜组合方式可实现透镜的装配。图 10 为透镜组合的 2 种方式,其中图 10(a)的蓝色部分为外部透镜的剖面视图。图 10(a)将外部透

镜和内部透镜进行上下装配;图 10(b)将两个对称的半边透镜进行左右装配。

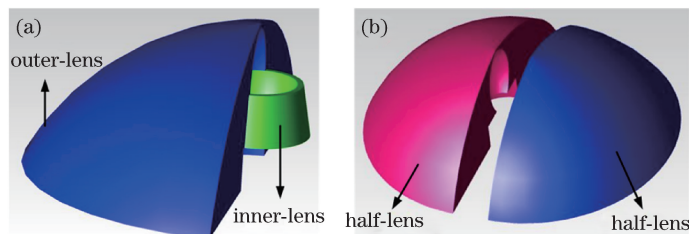


图 10 (a)内外透镜组合;(b)两个半边透镜组合

Fig. 10 (a) Combination of inner-lens and outer-lens; (b) combination of two half-lenses

3.3 最优偏转系数取值合理性分析

为了验证表 1 所示的基于点光源的最优偏转系数取值范围的合理性,分别选取 I 区半出光角为 90° 和 II 区半出光角为 120° 的均匀光强分布作为设计目标,设计了 22 组双自由曲面透镜。设计过程中,以 CXA1816 COB LED 作为光源;偏转系数 k 的取值范围为 $0 < k < 1$,取值间隔为 0.1,其中 $k=0$ 对应内曲面为半球面的单自由曲面透镜。图 11 为设计的双自由曲面透镜的光强均匀度和光能利用率。图 11(a)表明,对于半出光角为 90° 的均匀光强分布而言,所有透镜的光强均匀度基本保持在 0.82 以上,其中 k 为 0.1,0.5,0.6 时光强均匀度高于 0.9,同时所有透镜的光能利用率均高于 85%。这表明,根据表 1 给出的 I 区的最优偏转系数取值范围($0 < k < 1$)设计的基于 COB LED 的双自由曲面透镜同时具有高光强均匀度和高光能利用效率。图 11(b)表明,对于半出光角为 120° 的均匀光强分布而言,当 k 的取值范围为 $0.3 < k < 0.8$ 时,透镜光强均匀度高于 0.87,同时光能利用率高于 84%,获得高光强均匀度、高光能利用效率的 k 值区间与表 1 给出的 II 区的最优偏转系数取值范围($\beta_{\max}=120^\circ, 0.26 < k < 0.74$)基本一致。结果表明,表 1 列出的最优偏转系数的取值范围及其分区可用于指导基于 COB LED 的双自由曲面透镜的设计。

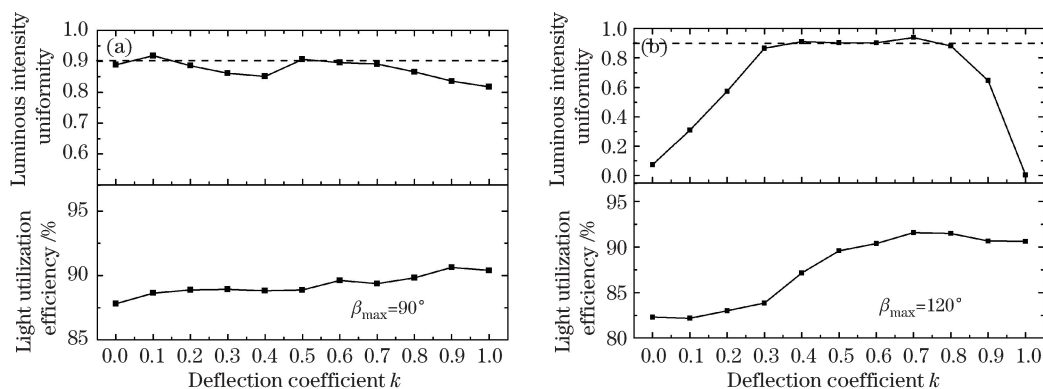


图 11 光强均匀度和光能利用率随偏转系数的变化。(a)半出光角为 90° ;(b)半出光角为 120°

Fig. 11 Variation in luminous intensity uniformity and light utilization efficiency with deflection coefficient.

(a) Half irradiation angle of 90° ; (b) half irradiation angle of 120°

3.4 双自由曲面透镜与单自由曲面透镜对比研究

为了对比研究双自由曲面透镜和单自由曲面透镜的光学性能,选取出光角为 $60^\circ \sim 280^\circ$ 的均匀光强分布作为设计目标,以 CXA1816 COB LED 作为光源,构建了 12 组单自由曲面透镜($k=0$)和 12 组双自由曲面透镜($k=0.5$)进行光线追迹并计算了光强均匀度和光能利用率,结果如图 12 所示。

对于单自由曲面透镜而言,当出光角的范围为 $120^\circ \sim 180^\circ$ 时,其光强均匀度高于 0.85,光能利用率高于 85%。对于双自由曲面透镜而言,当出光角范围为 $100^\circ \sim 260^\circ$ 时,其光强均匀度高于 0.85,光能利用率高于 85%;特别地,当出光角范围为 $140^\circ \sim 240^\circ$ 时,光强均匀度高于 0.9,光能利用率接近或者高于 90%。因此,与单自由曲面透镜相比,双自由曲面透镜具有在大出光角(超过 180°)时实现高光强均匀度和高光能利用率的的优势。

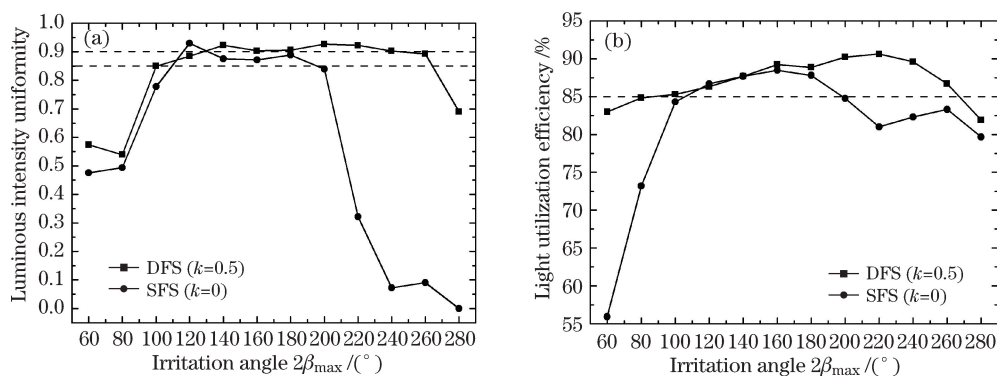


图 12 光强均匀度(a)和光能利用率(b)随出光角的变化关系

Fig. 12 Variation in (a) luminous intensity uniformity and (b) light utilization efficiency with irradiation angle

4 结 论

提出了基于最优双偏转能量映射和贝塞尔曲线多参数优化的双自由曲面光学透镜设计算法,并利用该算法设计了两款用于可见光通信系统光学发射端的基于 Cree CXA1816 COB LED 光源的双自由曲面透镜。这两款透镜通过内外自由曲面的两次最优光线偏转降低了菲涅耳反射损耗,分别实现出光角为 180° 和 260° 的大角度均匀光强分布。仿真结果表明,这两款透镜的光强均匀度分别达到 0.92 和 0.90,光能利用率分别达到 89.4% 和 85.9%。根据菲涅耳公式和能量映射关系得到高光强均匀度、高光能利用率时最优偏转系数的取值范围并且验证其合理性。双自由曲面透镜能够在出光角范围为 $100^{\circ}\sim 260^{\circ}$ 内实现均匀光强分布,并具有较高的光强均匀度和高光能利用率,满足可见光通信系统光学发射端的光分布要求。

参 考 文 献

- Pang G, Kwan T, Chan C H, *et al.* LED traffic light as a communications device [C]. 1999 IEEE/IEEJ/JSAI International Conference on Intelligent Transportation Systems, 1999: 788-793.
- Tanaka Y, Haruyama S, Nakagawa M. Wireless optical transmissions with white colored LED for wireless home links [C]. The 11th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2000, 2: 1325-1329.
- Komine T, Nakagawa M. Fundamental analysis for visible-light communication system using LED lights [J]. IEEE Transactions on Consumer Electronics, 2004, 50(1): 100-107.
- Hao H G, Zhang D D, Tang S. Analysis of the LED lamp arrangement for uniformity of illumination in indoor VLC system [J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2014, 18(6): 663-671.
- Wang Z X, Yu C Y, Zhong W D, *et al.* Performance of a novel LED lamp arrangement to reduce SNR fluctuation for multi-user visible light communication systems [J]. Optics Express, 2012, 20(4): 4564-4573.
- Farr N, Bowen A, Ware J, *et al.* An integrated, underwater optical/acoustic communications system [C]. OCEANS 2010, 2010: 11595850.
- Doniec M, Vasilescu I, Chitre M, *et al.* AquaOptical: a lightweight device for high-rate long-range underwater point-to-point communication [C]. OCEANS 2009, 2009: 11155029.
- Wang Y Q, Wang Y G, Chi N, *et al.* Demonstration of 575-Mb/s downlink and 225-Mb/s uplink bi-directional SCM-WDM visible light communication using RGB LED and phosphor-based LED [J]. Optics Express, 2013, 21(1): 1203-1208.
- Li J F, Huang Z T, Zhang R Q, *et al.* Superposed pulse amplitude modulation for visible light communication [J]. Optics Express, 2013, 21(25): 31006-31011.
- Yang Wenning, Song Lu, Yu Lintao. Research of emergency communication system by LED Flashlight and visible light [J]. Optical Communication Technology, 2014, 9: 28-30.
杨文宁, 宋 路, 于林韬. LED 强光手电可见光应急通信系统研究 [J]. 光通信技术, 2014, 9: 28-30.
- Liu Haojie, Lan Tian, Ni Guoqiang. Research on the light emitting diode array launching performance for indoor visible light communication [J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(23): 238503.
刘浩杰, 蓝 天, 倪国强. 室内可见光通信发光二极管阵列发射性能的研究 [J]. 物理学报, 2014, 63(23): 238503.

- 12 Shen Y X, Ji Z C, Su Z P. Optimizing spherical light-emitting diode array for highly uniform illumination distribution by employing genetic algorithm[J]. Journal of Photonics for Energy, 2013, 3(1): 034594.
- 13 Chen C, Zhang X H, Rao J H. Optical design for an LED-based handheld underwater wireless optical communication system[J]. Chinese Optics Letters, 2015, 13(2): 020801.
- 14 Ries H, Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces[J]. J Opt Soc Am A, 2002, 19(3): 590-595.
- 15 Ding Y, Liu X, Zheng Z R, *et al.* Freeform LED lens for uniform illumination[J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12958-12966.
- 16 Luo Y, Feng Z X, Han Y J, *et al.* Design of compact and smooth free-form optical system with uniform illuminance for LED source[J]. Optics Express, 2010, 18(9): 9055-9063.
- 17 Fournier F R, Cassarly W J, Rolland J P. Fast freeform reflector generation using source-target maps [J]. Optics Express, 2010, 18(5): 5295-5304.
- 18 Mao X L, Li H T, Han Y J, *et al.* Polar-grids based source-target mapping construction method for designing freeform illumination system for a lighting target with arbitrary shape[J]. Optics Express, 2015, 23(4): 4313-4328.
- 19 Qian Keyuan. 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.
- 20 Wu R M, Zheng Z R, Li H F, *et al.* Optimization design of irradiance array for LED uniform rectangular illumination [J]. Applied Optics, 2012, 51(13): 2257-2263.
- 21 Xu Chao, Gao Shumei, Qian Weiying, *et al.* A optimization design of compact uniform lens for large-size LED[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 042201.
徐 超, 高淑梅, 钱维莹, 等. 大面型 LED 紧凑型匀透镜优化设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 042201.
- 22 Yan Wenping, Guo Zhenning, Lin Jieben, *et al.* Design of double freeform-surface lens with large view angle for uniform illumination of the near-field[J]. Acta Photonica Sinica, 2015, 44(1): 0122002.
颜稳萍, 郭震宁, 林介本, 等. 实现近场均匀照明的双自由曲面大角度透镜设计[J]. 光子学报, 2015, 44(1): 0122002.
- 23 Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering optics[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011: 300-313.
郁道银, 谈恒英. 工程光学[M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011: 300-313.
- 24 Chaves J. Introduction to nonimaging optics[M]. Boca Raton: CRC Press, 2008: 403-413.
- 25 Shi Fazhong. Computer aided geometric design and non-uniform rational B-spline[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013: 114-116.
施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013: 114-116.