

基于逆向优化设计的高能量利用率LED路灯透镜

颜稳萍¹ 郭震宁¹ 林介本^{1,2} 甘汝婷¹ 林木川¹ 潘诗发¹ 廖 炫¹

¹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

²福建泉州世光照明科技有限公司, 福建 泉州 362302

摘要 采用逆向优化设计的方法设计发光二极管(LED)路灯透镜,提高LED路灯道路照明质量和能量利用率。以城市道路照明标准为约束,优化出最大亮度照度比的理想配光曲线。基于得到的理想配光曲线,透镜采用分离变量法设计自由曲面,将光源和目标面进行网格划分,形成能量对映关系。同时对曲面构造误差进行控制,再利用反馈优化法对透镜进行优化,使透镜的配光曲线趋于理想。仿真实验表明:采用逆向优化设计的LED路灯透镜,能很好地符合道路照明标准,亮度照度比为0.067,同时相对于传统的对称型LED路灯配光曲线节省20.2%的能耗,使LED路灯达到了高照明质量和高能量利用率的目的。

关键词 光学设计; 路灯透镜; 道路照明; 逆向优化设计; 能量利用率

中图分类号 O439

文献标识码 A

doi:10.3788/AOS201535.0422008

LED Street Lamp Lens with High Energy Efficiency Utilization Based on Reverse Optimization Design

Yan Wenping¹ Guo Zhenning¹ Lin Jieben^{1,2} Gan Ruting¹ Lin Muchuan¹

Pan Shifa¹ Liao Xuan¹

¹College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Key Laboratory of Light Propagation and Transformation of Fujian Province, Xiamen, Fujian 361021, China

²Fujian Quanzhou SGOLED Lighting Technology Co.,ltd, Quanzhou, Fujian 362302, China

Abstract To improve the quality and energy efficiency of road lighting, the reverse optimization design method is employed to design a light-emitting diode (LED) street lamp lens. By taking the road lighting standard as constraint, an ideal light intensity distribution with maximum brightness illumination ratio is optimized and obtained. Based on the optimized ideal light intensity distribution, the freeform surface is established by using the variable separation mapping method. The light source and target plane are meshed to form the mapping relationship, and the surface structure error is controlled as well. Then the lens is optimized by using feedback optimization to make the intensity distribution of lens close to ideal light intensity distribution. Simulation experiment results show that the lens designed by the proposed method conforms to the road lighting standard well, and the brightness illumination ratio is 0.067. Compared with traditional symmetry light intensity distribution, energy consumption is reduced to 20.2%. The high quality lighting and energy utilization ratio of LED street lamp are realized finally.

Key words optical design; street lamp lens; road lighting; reverse optimization design; energy utilization efficiency

OCIS codes 220.2945; 220.3630; 230.3670

收稿日期: 2014-10-20; 收到修改稿日期: 2015-01-14

基金项目: 福建省科技计划重点项目(2013I0004)、福建省光传输与变换重点实验室开放课题(2014201)、南安市中小企业创新基金(201101)、南安市科技计划重点项目(G201212)

作者简介: 颜稳萍(1989—),男,硕士研究生,主要从事半导体照明光学设计方面的研究。E-mail: wp.yan@qq.com

导师简介: 郭震宁(1958—),男,博士,教授,主要从事半导体发光器件及光学设计与应用方面的研究。

E-mail: znguo@hqu.edu.cn(通信联系人)

1 引 言

发光二极管(LED)具有高性价比的特点,被广泛应用于室内外照明灯具^[1-3]。尤其在道路照明领域,LED路灯已经普遍替代了传统高压钠灯。由于大部分LED路灯道路照明侧重于路面的照度均匀性,往往忽略了与人眼视觉紧密相关的路面亮度均匀性、光环境要求和眩光限制阈值增量,因此容易产生“斑马效应”和眩光,存在着一定的道路安全隐患。同时,传统LED路灯照明往往采用对称性分布的光学透镜,其配光曲线呈对称性,光能量的一半照射在非机动车道上,造成了“光浪费”,大大降低了LED路灯的能量利用率和节能效果^[4-5]。传统LED路灯照明为了使更多的光照射在道路上,灯具在安装时需要与路面水平线呈 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 的仰角,才能提高能量利用率,但仰角越大人眼感受到的眩光越严重。

为了提高LED路灯的道路照明质量和能量利用率,Feng等^[6]通过结合路面材料的反射特性、LED路灯系统能量利用率、亮度均匀度和眩光限制阈值增量等参数优化设计出较高能量利用率且亮度相关指标均达到城市道路照明设计标准^[7]的LED路灯透镜。但其配光曲线仍为对称型,依旧存在着“光浪费”,所需光通量未明显下降。同时,没有将非机动车道与机动车道的环境比考虑进去,因此还不能完全满足道路照明需求。为了更好地提高LED路灯的节能效益,赖伟等^[8]根据驾驶员不同环境下所需要的光环境,通过约束路面的亮度均匀度、照度均匀度、眩光限制阈值增量、环境比等,以最小光通量为目标,优化出最佳的LED路灯配光曲线,但其衡量能量利用率的亮度照度比 Q 不高,能量利用率未达到最优。王尧等^[9]采用分离变量法将LED路灯的照度分布写成余弦多项式,结合道路照明的评价指标,优化出最大亮度照度比的LED路灯配光曲线。以上研究都是通过以道路照明评价指标进行约束,仅仅优化出理想的配光曲线,均未设计实现道路高照明质量和高能量利用率的LED路灯透镜。

本文采用逆向优化设计方法,以驾驶员所需的光视觉环境为约束条件,最优能量利用率为目标,优化出理想配光曲线。采用分离变量法构造自由曲面,并引入曲面误差控制,设计出不连续自由曲面的LED路灯透镜。同时,通过反馈优化法对透镜进行优化,减少透镜的构造误差和采用扩展光源时所引起的出射光线的偏移,使透镜的配光曲线趋近于理想配光曲线。

2 逆向优化道路照明 LED 路灯配光曲线

2.1 道路照明质量评价标准

如图1所示,在道路方向上建立直角坐标系,以路灯 $k=2$ 为直角坐标原点 O ,LED路灯灯杆方向为 Z 轴方向,道路长度方向为 X 轴,道路宽度方向为 Y 轴,其中计算区域是在路灯 $k=2$ 和路灯 $k=3$ 之间的路面。计算区域道路长为 $L=30\text{ m}$,机动车道路宽为 $W=7.5\text{ m}$,非机动车道宽为 $S=5\text{ m}$,将道路计算区域以 $M\times N$ 进行网格等分,且计算区域位置用 (x_i, y_j) , $i=1,2,\dots,M, j=1,2,\dots,N$ 进行表示。根据CIE^[10]规定观察者的位置为计算区域前 60 m ,观察者高度为 1.5 m ,且距离路宽 $1/4$ 的位置,如图1所示的 E 点。由于主干道普遍采用沥青路面,因此主要针对沥青材质的路面进行亮度计算,亮度公式可表示为^[7,10]:

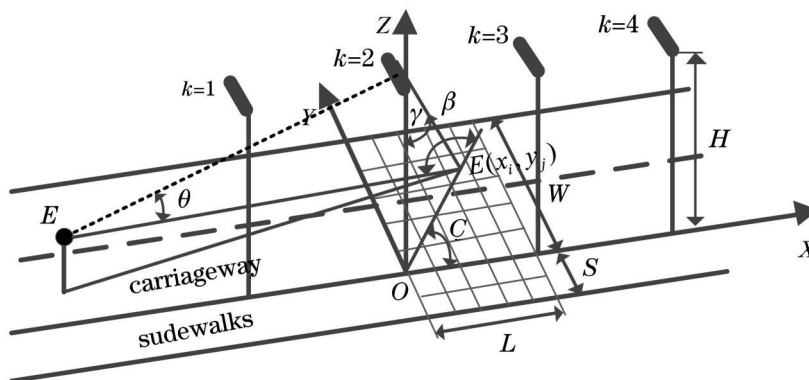


图1 道路计算区域示意图

Fig.1 Schematic diagram of road calculation area

$$L(x_i, y_j) = \sum_{k=1}^K \frac{r_k(x_i, y_j)}{10^4 \cos^3 \gamma_k(x_i, y_j)} E_k(x_i, y_j), \quad (1)$$

其中 $r_k(x_i, y_j)$ 为沥青路面的简化亮度系数, $\gamma_k(x_i, y_j)$ 为路灯入射光线与垂直线的夹角。 $E_k(x_i, y_j)$ 为第 k 个 LED 路灯在计算区域的照度值, $k = 1, 2, \dots, K$ 。

路面平均照度和影响人眼的视觉灵敏度的道路平均亮度分别表示为:

$$E_{av} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j)}{MN}, \quad (2)$$

$$L_{av} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_j)}{MN}, \quad (3)$$

路面照度均匀度和亮度均匀度分别表示为:

$$E_0 = \frac{\min \left[\sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j) \right]}{E_{av}}, \quad (4)$$

$$U_0 = \frac{\min \left[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_j) \right]}{L_{av}}, \quad (5)$$

评价是否有斑马效应的纵向亮度均匀性表示为:

$$U_L = \frac{\min \left[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_{center}) \right]}{\max \left[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_{center}) \right]}, \quad (6)$$

其中 y_{center} 为道路中心轴线的位置。对眩光进行控制的眩光限制阈值增量表示为:

$$I_T = 65 \frac{3 \times 10^{-3} \sum_{k=1}^K \frac{E_{vk}(x_i, y_j)}{\theta_k(x_i, y_j)^2}}{L_{av}^{0.8}}, \quad (7)$$

其中 $E_{vk}(x_i, y_j)$ 为观察者眼中所接收到的照度, $\theta_k(x_i, y_j)$ 为路灯的入射光线与观察者视线的夹角。为了提高道路交通安全系数, 还得提高道路周围的可见度, 用环境比表示为:

$$R_s = \frac{E_{sav}}{E_{av}}, \quad (8)$$

其中 E_{sav} 为非机动车道的平均照度。

2.2 LED 路灯配光曲线优化

采用余弦多项式表示 LED 路灯的照度分布为^[6]:

$$E(x, y) = \left[\sum_{i=1}^A a_i \cos^{m_i} \frac{\pi x}{2x_{max}} \right] \left[\sum_{j=1}^B b_j \cos^{n_j} \frac{\pi(y - \Delta y)}{2y_{max}} \right], \quad (9)$$

其中 x_{max} 为 LED 路灯沿 X 轴方向最长照射距离, y_{max} 为 LED 路灯沿 Y 轴方向最长照射距离, Δy 为位移量。 a_i 和 b_j 为多项式系数, m_i 和 n_j 为多项式的次数, $i = 1, 2, \dots, A, j = 1, 2, \dots, B$ 。

由于各项道路评价指标都与 LED 路灯的照度分布有关, 可将(9)式代入(1)~(8)式, 以主干道道路照明评价标准^[7], $E_{av} \geq 20$, $L_{av} \geq 1.5$, $E_0 \geq 0.4$, $U_0 \geq 0.4$, $U_L \geq 0.7$, $I_T \leq 10$, $R_s \geq 0.5$ 为约束条件, 以评价能量利用率的最高亮度照度比 $Q = L_{av}/E_{av}$ 为优化目标。其中沥青路面一般亮度照度比 Q 为 0.0455~0.0667^[9]。此时(1)~(8)式为约束的非线性方程, 采用最优化求解十分复杂, 且没有精确解。采用正交优化法^[11], 逼近求解 a_i 、 b_j 、 m_i 、 n_j 和 Δy 的近似解。LED 光强分布与照度分布关系为:

$$I(c, \gamma) = \frac{E(c, \gamma) H^2}{\cos^3 \gamma}, \quad (10)$$

其中 c 为路灯入射光线平面与 X 轴的夹角, γ 为入射光线与 Z 轴方向的夹角, H 为路灯安装高度。将求得的 LED 路灯照度分布(9)式代入(10)式,可得到 LED 路灯的优化配光曲线。

3 分离变量优化设计非连续自由曲面透镜

分离变量法通过对光源和目标面进行划分,并分别以角坐标和平面坐标表示,同时建立一一映射关系对自由曲面进行构建,形成对出射光线较强的控制,因此采用分离变量法对透镜进行设计^[112-13]。首先,基于优化得到的理想配光曲线,通过能量守恒定律,将目标面进行等分,利用已知目标面的照度分布求出光源出射角坐标。其次,由于构造自由曲面存在着一定的误差,需要引入误差控制,减少实际出射光线与预期出射光线的误差。最后,实际应用中 LED 光源往往为扩展光源,透镜使用扩展光源时,容易使光斑劣化,需要采用反馈优化法对光斑进行优化,使透镜配光曲线趋于理想。

3.1 建立能量对应关系

由于 LED 路灯照度分布存在着位移量,配光曲线应不再呈对称性分布,因此,计算透镜时需要考虑光源 1/2 的能量。如图 2 所示,透镜的照明目标面为 $x_{\max} \times (y_{\max} + S)$,将目标面划分为 $m \times n$ 份,目标面位置用平面坐标 (x_i, y_j) 表示, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ 。LED 光源出射光线方向以角坐标 (u_j, v_i) 表示, u_j 为入射光线与 Y 轴的夹角, v_i 为入射光线与 Z 轴的夹角。根据能量守恒定律,LED 光源与目标面的关系为:

$$\Phi_{\text{total}} = \int_0^{\pi/2} \int_0^{\pi/2} I(u_j, v_i) \sin u dv = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_j}^{y_{j+1}} E(x_i, y_j) dx dy, \quad (11)$$

其中 $I(u_j, v_i)$ 为 LED 光源的光强分布, $E(x_i, y_j)$ 为目标面照度。对目标面沿着道路长度方向等分为 m 份,长条形区域能量为:

$$\int_0^{\pi/2} \int_{v_i}^{v_{i+1}} I(u_j, v_i) \sin u dv = \sum_{j=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_j}^{y_{j+1}} E(x_i, y_j) dx dy, \quad (12)$$

联合(9)、(11)、(12)式可求解出 v_i 的值。对目标面沿着道路宽度方向等分为 n 份,长条形区域能量为:

$$\int_{u_j}^{u_{j+1}} \int_0^{\pi/2} I(u_j, v_i) \sin u dv = \sum_{i=1}^m \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_j}^{y_{j+1}} E(x_i, y_j) dx dy, \quad (13)$$

联合(9)、(11)、(13)式可求解出 u_j 。

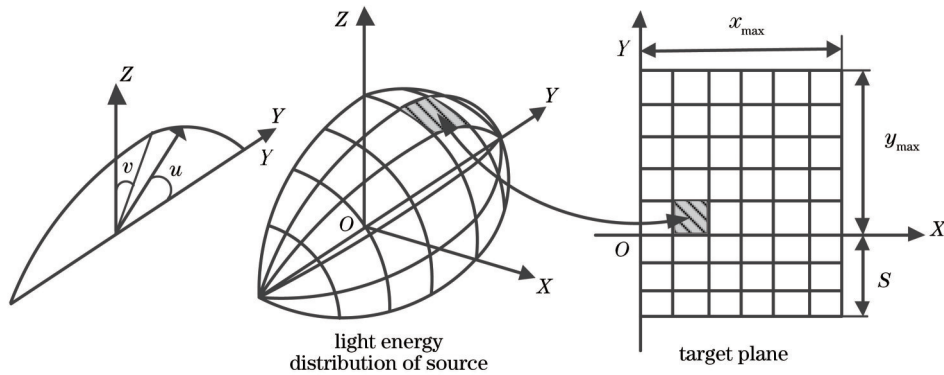


图 2 光源与目标面划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of light source and target plane

3.2 构造透镜初始模型

建立透镜初始模型需要计算表面上的点数据,以下将通过 4 个步骤建立透镜初始模型。

第一步,计算经度方向的初始母曲线。如图 3 所示,通过设置透镜侧边初始顶点 G_0 ,入射光线 I_0 ,经过透镜顶点 G_0 ,折射到目标面位置。根据斯涅耳(Snell)公式可求出该点的法向量曲线 N_0 。Snell 公式为:

$$[1 + n_m^2 - 2n_m(\mathbf{O} \cdot \mathbf{I})]^{1/2} \mathbf{N} = \mathbf{O} - n_m \mathbf{I}, \quad (14)$$

其中 \mathbf{I} 为入射单位矢量, \mathbf{O} 为出射单位矢量, \mathbf{N} 为该点的单位法向矢量, n_m 为透镜材料折射率。入射光线 I_1

将与 G_0 的切平面相交于点 G_{11} , 同时可求出该点法向量 N_{11} 。基于此方法可连续求解出初始母曲线 C_1 后续的点数据和各点法向量。

第二步, 通过初始母曲线计算其他经度方向的子曲线。曲线 C_j 主要是通过入射光线 I_{ij} 与 C_{j-1} 曲线上各点的切平面相交获得。采用此方法可连续求出其他 $m-1$ 条经度方向的子曲线。

第三步, 由于采用这种方法只能保证每条子曲线上的点 G_{ij} 与后一条曲线相邻点 $G_{i+1,j}$ 在同一个切平面上, 而曲线 C_j 方向上相邻点(即 G_{ij} 与 $G_{i+1,j}$)没有较强的约束, 因而存在曲线构造误差。曲面上点的真实法向量为

$$N'_{ij} = \frac{\overline{G_{i+1,j}G_{ij}} \times \overline{G_{ij}G_{i+1,j+1}}}{|\overline{G_{i+1,j}G_{ij}} \times \overline{G_{ij}G_{i+1,j+1}}|}, \quad (15)$$

其真实法向量与预期法向量角度误差为 $\theta_{ij} = \arccos(\overline{N_{ij} \cdot N'_{ij}} / \|N_{ij}\| \|N'_{ij}\|)$ 。当误差角度大于 3° 时, 采用第一步的方法重新计算一条初始母曲线代替误差过大的子曲线, 再进行第二步, 如此循环, 直至计算结束。

第四步, 将曲面数据导入三维(3D)软件, 对曲线进行放样建模。由于初始母曲线代替子曲线时, 不能保证曲面的连续性, 因此透镜曲面为非连续的自由曲面。

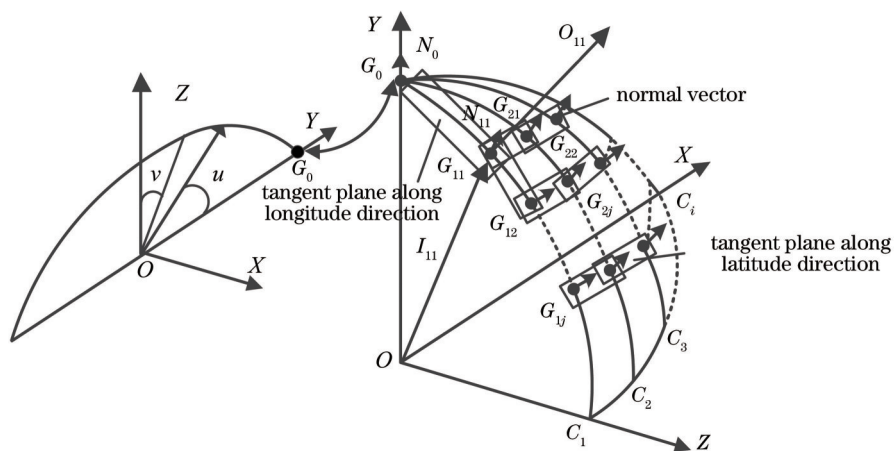


图3 构造自由曲面示意图

Fig.3 Schematic diagram of constructing freeform surface

3.3 反馈优化自由曲面

利用分离变量设计自由曲面透镜是基于点光源进行计算, 而实际应用中LED发光面尺寸均大于 $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$ 。当透镜采用扩展光源时, 容易使光斑发生劣化, 造成透镜配光曲线与理想配光曲线有较大偏差, 不利于透镜的实际生产与应用。因此需要利用反馈优化法对透镜自由曲面进行优化。

反馈优化法主要是通过模拟仿真对比目标面的照度分布与预期照度分布, 保持入射光线的方向角度不变, 反馈调整目标面网格大小, 使透镜出光效果贴近预期效果^[14]。第 k 次优化后的单元网格面积表示为:

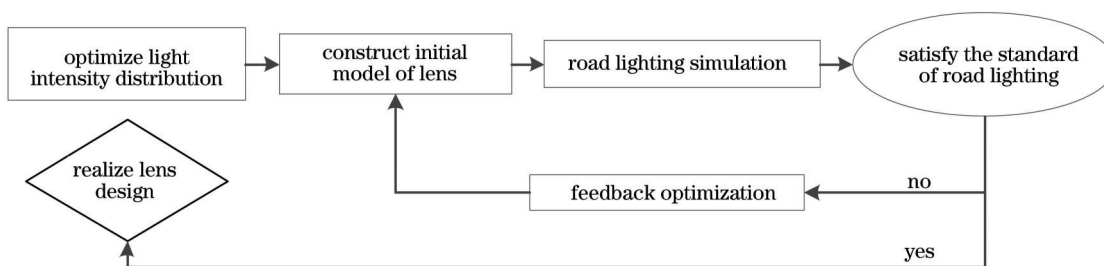


图4 设计透镜流程图

Fig.4 Flow diagram of designing lens

$$T_k(i,j) = \frac{E_{\text{sim}}^{k-1}(i,j)}{E_{\text{exp}}(i,j)} \cdot \frac{E_{\text{sim}}^{k-2}(i,j)}{E_{\text{exp}}(i,j)} \cdot \dots \cdot \frac{E_{\text{sim}}^1(i,j)}{E_{\text{exp}}(i,j)} \cdot \frac{x_{\text{max}}(y_{\text{max}} + S)}{mn}, \quad (16)$$

其中 $E_{\text{sim}}^{k-1}(i,j)$ 为第 $k-1$ 次模拟仿真目标面的照度值, $E_{\text{exp}}(i,j)$ 为目标面的预期照度值。通过多次优化, 可以使

透镜的配光曲线趋近于理想配光曲线。设计透镜流程图如图4所示。

4 设计实例与对比分析

4.1 LED 配光曲线优化结果

设置 $x_{\max} = 40 \text{ m}$, $y_{\max} = 12.5 \text{ m}$, 将道路计算区域划分为 10×10 网格, 设置 $A = 3, B = 3$, 代入(9)式优化出理想配光曲线, 如图5所示。配光曲线在 0° 平面和 180° 平面呈对称型(即道路 X 轴方向), 在 90° 和 270° 呈非对称型(即道路 Y 轴方向), 且中心光强偏向道路中间。将所得的优化配光曲线导入 Dialux 进行模拟仿真。道路照明仿真主要对四车道 $2 \times 7.5 \text{ m}$ 的沥青道路进行模拟, LED 路灯采用双侧相对的方式进行排布, 路灯间距为 30 m , 路灯安装高度 $H = 10 \text{ m}$, 路灯安装角度与路面平行即倾斜角为 0° , 并在道路中设置4个观察点。如表1所示, 由于 $E_{av}, L_{av}, E_0, U_0, U_L, I_T, R_s$ 均高于城市道路照明标准^[7](即 $E_{av} \geq 20, L_{av} \geq 1.5, E_0 \geq 0.4, U_0 \geq 0.4, U_L \geq 0.7, I_T \leq 10, R_s \geq 0.5$), 且优化出的理想配光曲线 Q 值为 0.0633 , 十分接近一般沥青路面 Q 值的最大值。因此, 该配光曲线为理想的道路高照明质量和高能量利用率的配光曲线。

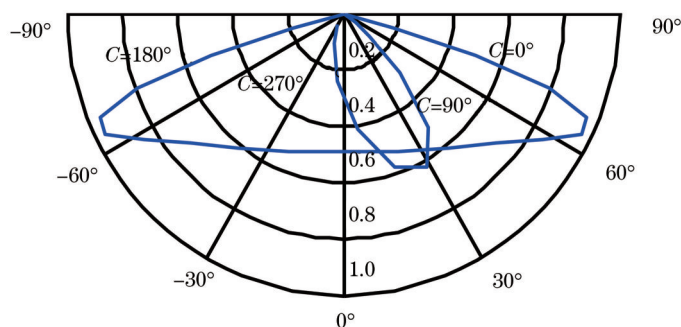


图5 归一化优化配光曲线图

Fig.5 Normalized optimized light intensity distribution

表1 优化配光曲线道路照明仿真结果

Table 1 Result of road lighting simulation with optimized light intensity distribution

E_{av} / lux	$L_{av} / (\text{cd} \cdot \text{m}^{-2})$	E_0	U_0	U_L	$I_T / (\%)$	R_s	Q
36	2.28	0.636	0.65	0.73	9	0.61	0.0633

4.2 非连续自由曲面透镜仿真与优化

设置目标面大小为 $40 \text{ m} \times 17.5 \text{ m}$, 按 100×200 进行网格划分, 目标面距离透镜 10 m , 透镜侧边初始顶点为 $G_0(0,6,0)$ 。透镜材料为聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA), 折射率为 1.493 。通过(11)~(15)式计算出透镜的初始模型, 再采用 CREE Xlamp XPE Ray 文件进行模拟仿真^[15], 并利用(16)式进行反馈优化。如图6(a)所示为通过2次反馈优化后的透镜3D模型, 透镜尺寸为 $33.8 \text{ mm} \times 16.6 \text{ mm} \times 10.2 \text{ mm}$, 透镜表面呈非连续曲面, 内曲面是半径为 1.5 mm 的半球面。

如图6(b)所示, 透镜优化后的配光曲线 0° 平面与 180° 平面呈对称型且最大发光角度为 140° , 90° 平面与 270° 平面呈非对称型且最大发光角度为 60° , 出射角度偏向机动车道。优化后的配光曲线与理想配光曲线在 90° 平面和 270° 平面有略微扩展, 主要是由于扩展光源边缘光线较难控制和构造曲面还存在着误差使接近全反射临界角的曲面发生全反射等原因造成的。如图6(c)所示, 为距离透镜 10 m 处的目标面照度分布图。

4.3 道路实例照明对比与分析

将透镜的配光曲线导入 Dialux 进行道路照明仿真。模拟仿真的道路环境参数设置和路灯排布方式均与优化配光曲线道路照明模拟设置一样。模拟结果的路面亮度分布图和路面照度分布图, 如图7所示。其亮度均匀度为 0.64 , 照度均匀度为 0.732 , 均满足道路照明评价标准。

为了更好地体现透镜的照明质量和能量利用率, 将与某厂家对称型配光曲线的LED路灯作对比。如图8所示, 配光曲线 0° 平面与 180° 平面呈对称型且最大发光角度为 140° , 90° 平面与 270° 平面呈对称型且最大

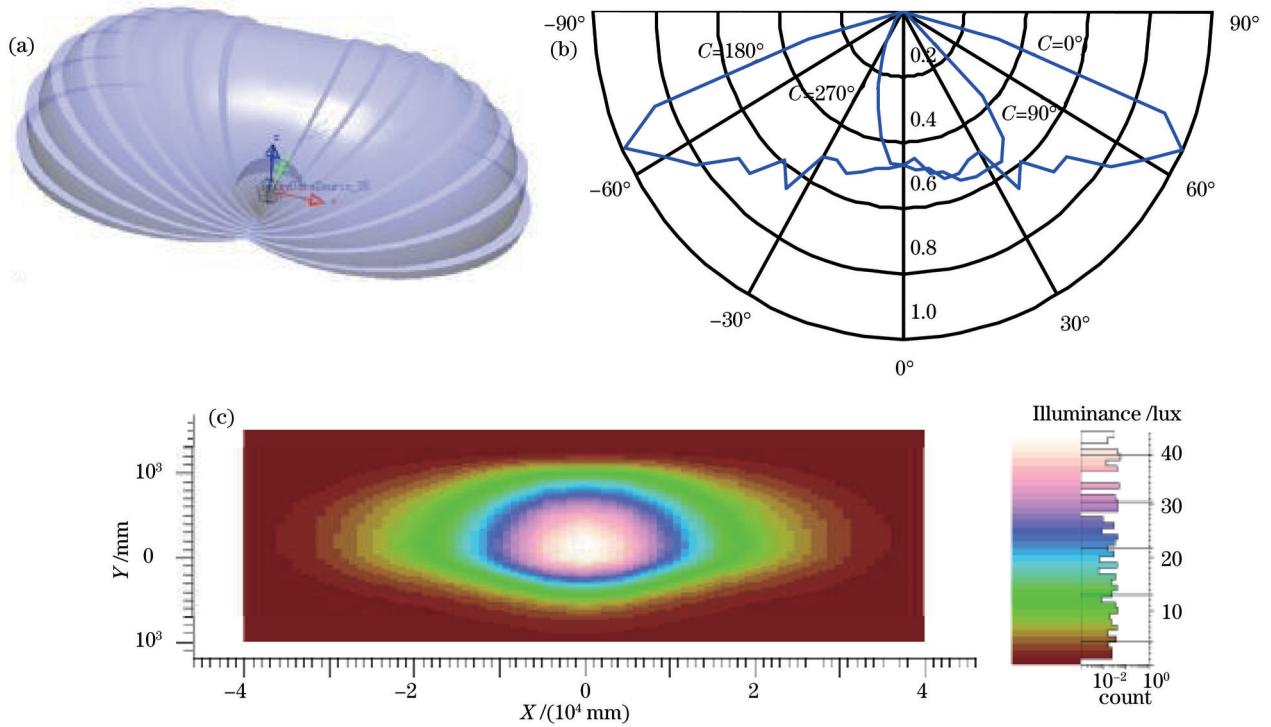


图6 透镜3D模型和仿真效果图。(a)透镜3D模型;(b)归一代光强分布;(c)目标照度分布

Fig.6 3D model of lens and result of simulation. (a) 3D model of lens;

(b) normalized light intensity distribution; (c) illumination distribution of target plane

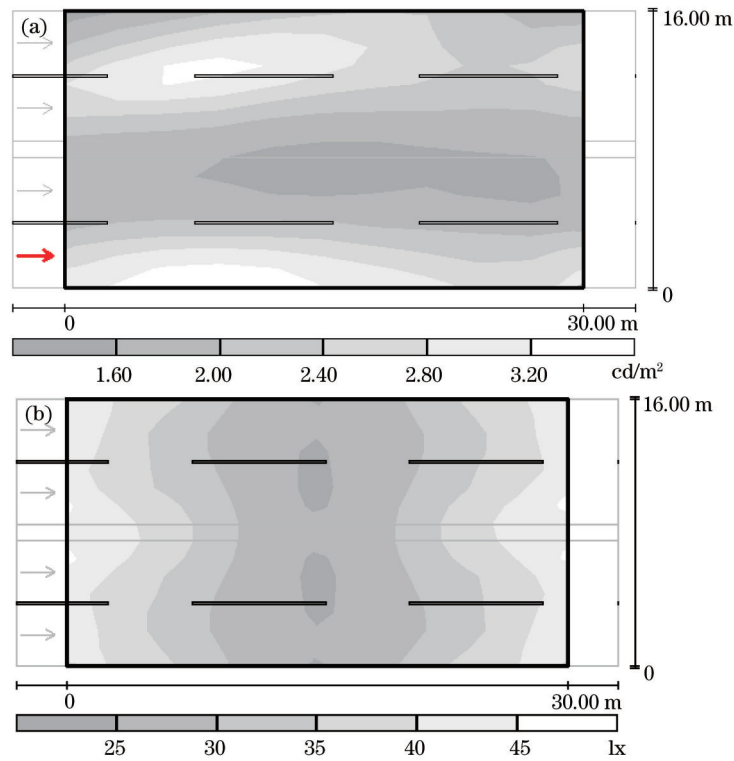


图7 道路照明仿真效果。(a)观察者在(-60 m, 1.875 m, 1.5 m)感受到的亮度分布;(b)路面照度分布

Fig.7 Road lighting simulation. (a) Luminance distribution perceived by observer at (-60 m, 1.875 m, 1.5 m);

(b) illuminance distribution of road

发光角度为 80° 。采用对称型配光曲线与透镜非对称型配光曲线进行道路照明仿真对比,模拟的道路照明参数设置不变,在相同平均亮度的条件下,其仿真结果如表2。

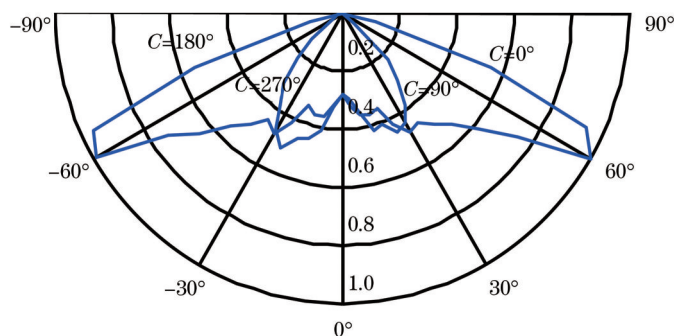


图 8 对称型配光曲线图

Fig.8 Symmetrical light intensity distribution

表 2 非对称型配光曲线与对称型配光曲线性能对比

Table 2 Performance comparison between asymmetrical light intensity distribution and symmetrical light intensity distribution

Type	E_{av} /lux	L_{av} /(cd·m ⁻²)	E_0	U_0	U_L	I_r /(%)	R_s	Q	Φ /lm
Asymmetry	33	2.22	0.732	0.64	0.73	10	0.51	0.067	15000
Symmetry	31	2.22	0.674	0.42	0.40	9	0.90	0.071	18800

仿真实验表明:传统对称型配光曲线 Q 值比非对称型配光曲线 Q 值较高,但纵向亮度均匀性仅为 0.40,不符合城市道路照明标准,会产生“斑马效应”,形成交通隐患,且存在着“光浪费”。非对称型配光曲线不仅能达到城市道路照明标准,而且 Q 值为 0.067 高于一般的沥青路面亮度照度比,能量利用率较高,相对传统对称型配光曲线减少光通量 3800 lm,即能节省 20.2% 的能耗。

5 结 论

基于道路照明标准的各项指标,优化出理想的 LED 路灯配光曲线。根据优化得到的配光曲线,逆向优化设计 LED 路灯透镜。采用分离变量法设计透镜,同时对曲面构造误差进行控制,并利用反馈优化法进行优化,使透镜的配光曲线趋于理想配光曲线。通过道路照明仿真实验表明:采用该透镜的 LED 路灯在达到道路照明标准时,亮度照度比 Q 为 0.067 高于一般的沥青路面亮度照度比,能量利用率较高,相对于传统对称型配光曲线节省 20.2% 的能耗。因此,采用逆向优化设计的 LED 路灯透镜具有高照明质量和高能量利用率的特点,可降低 LED 路灯的能耗,具有很好的实用价值。

参 考 文 献

- Xin Di, Liu Hua, Lu Zhenwu, *et al.*. Optical design of the LED illumination system with adjustable view angle[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522003.
辛 迪, 刘 华, 卢振武, 等. 可变视角 LED 照明光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522003.
- Lai Liping, Zhuang Qiren, Liang Dejuan, *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.
- Liang Dejuan, Lai Liping, Chen Chunyu, *et al.*. Research of grazing incidence diffuser with microstructure of double-sided triangular prism arrays[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(6): 0622005.
梁德娟, 赖丽萍, 陈春玉, 等. 掠射式双面三棱柱阵列微结构扩散板的研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(6): 0622005.
- Pachamanov A, Pachamano D. Optimization of the light distribution of luminaries for tunnel and street lighting[J]. *Engineering Optimization*, 2008, 40(1): 47-65.
- Wang Shang, Wang Kai, Chen Fei, *et al.*. Design of primary optics for LED chip array in road lighting application[J]. *Opt Express*, 2011, 19(54): A716-A724.
- Feng Zexin, Luo Yi, Han Yanjun. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio[J]. *Opt Express*, 2010, 18(21): 22020-22031.
- Ministry of Urban-Rural Development of the people's Republic of China. Standard for Lighting Design of Urban Road CJJ45-2006

- [S]. Beijing: China Standard Press, 2006.
中华人民共和国建设部. 城市道路照明设计标准 CJJ45-2006[S]. 北京: 国家标准出版社, 2006.
- 8 Lai Wei, Chen Weimin, Liu Xianming, *et al.*. Nonlinear optimization of Light intensity spatial distribution for LED road luminaires [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(1): 0122003.
赖 伟, 陈伟民, 刘显明, 等. 发光二极管路灯光强空间分布的非线性优化设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(1): 0122003.
- 9 Wang Yao, Liu Hua, Jing Lei, *et al.*. Light distribution optimization of LED luminaries for road lighting[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(7): 1463-1468.
王 尧, 刘 华, 荆 雷, 等. 发光二极管道路照明的配光优化设计[J]. *光学 精密工程*, 2012, 20(7): 1463-1468.
- 10 International Commission on Illumination. Road Lighting Calculations, CIE 140-2000[S]. Vienna: CIE Publication, 2000.
- 11 Liu Hong, Hu Lida, Jiang Lanfang, *et al.*. Optical design of a free-form lens for integrated package-type LED street light[J]. *Optical Technique*, 2010, 36(6): 820-824.
刘 红, 胡立大, 蒋兰芳, 等. 大功率集成封装 LED 路灯透镜的光学设计[J]. *光学技术*, 2010, 36(6): 820-824.
- 12 Wang Lin, Qian Keyuan, Luo Yi. Discontinuous free-form lens design for prescribed irradiance[J]. *Appl Opt*, 2007, 46(18): 3716-3723.
- 13 Wang Kai, Chen Fei, Liu Zongyuan, *et al.*. Design of compact freeform lens for application specific light-emitting diode packaging [J]. *Opt Express*, 2010, 18(2): 413-425.
- 14 Situ W, Han Y, Li H, *et al.*. Combined feedback method for designing a free-form optical system with complicated illumination patterns for an extended LED source[J]. *Opt Express*, 2011, 19(55): A1022-A1030.
- 15 Dong Li, Liu Hua, Wang Yao, *et al.*. Reliability of light source modeling for distribution design on compact LED[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, 43(2): 0222003.
董 丽, 刘 华, 王 尧, 等. 紧凑型 LED 配光设计中光源模型可靠性研究[J]. *光子学报*, 2014, 43(2): 0222003.

栏目编辑: 韩 峰