

发光二极管路灯光强空间分布的非线性优化设计

赖 伟 陈伟民 刘显明 雷小华 胡顺仁

(重庆大学光电工程学院光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要 道路照明的首要目的是满足使用者的视觉需求,在此前提下还应尽可能降低能耗实现节能环保,这两点均与道路灯具的光强空间分布密切相关。而很难用一种通用的光强分布适用不同的道路和灯具安装条件。针对主干路、次干路、支路 3 种典型道路类型,提出了根据具体道路、安装条件以及驾驶员视觉光环境需求逆向设计灯具最节能光强空间分布的思路,并建立了以驾驶员视觉光环境需求为约束、以灯具总光通量最小为目标的非线性优化模型,将路面照度分布表述为余弦多项式并利用分级优化方法进行了求解。得到了 3 种典型道路条件下发光二极管(LED)路灯的最佳光强空间分布,相比现基于照度均匀分布设计的 LED 路灯光强分布,驾驶员视觉光环境质量显著改善,且灯具节能 30%左右。

关键词 光学设计;光强空间分布;非线性优化;发光二极管;两级优化

中图分类号 TN312 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0122003

Nonlinear Optimization of Light Intensity Spatial Distribution for LED Road Luminaires

Lai Wei Chen Weimin Liu Xianming Lei Xiaohua Hu Shunren

(Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of Ministry of Education, Department of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract The primary purpose of road lighting is to satisfy the visual requirements of road users, and then to reduce the energy consumption as possible. Moreover, these two factors are closely related to the light intensity spatial distribution of road luminaires. Only one type of light distribution is not applicable to different roads and installation conditions of road luminaires. In view of three typical roads as major road, collector road and local road, a reverse method is proposed to design the most energy-saving light distribution of LED road luminaires based on the specific road conditions, installation parameters of road luminaires and practical visual requirements for drivers. A nonlinear optimization model is established, which takes the visual requirements of drivers as the constraint conditions and the minimum total luminous flux of LED luminaires as the goal. Then a polynomial of cosine function for the illumination distribution on road is used, and a two-level optimization strategy is proposed for the nonlinear optimization. Finally, the most energy-saving light distributions are obtained at three different road conditions. Compared with the light distribution of LED road luminaires designed by equal illuminance distribution method, the LED road luminaires with the proposed nonlinear method can significantly improve the quality of visual lighting environment on the road and save energy by about 30%.

Key words optical design; light intensity spatial distribution; nonlinear optimization; LED; two-level optimization

OCIS codes 220.2945; 080.4298; 230.3670; 330.4595

收稿日期: 2011-06-22; 收到修改稿日期: 2011-08-29

基金项目: 国家 863 计划(2008AA03A193)、重庆市自然科学基金重点项目(2011BA7023)资助课题。

作者简介: 赖 伟(1986—),男,博士研究生,主要从事半导体照明设计和半导体可靠性预测等方面的研究。

E-mail: laiwei201@yeah.net

导师简介: 陈伟民(1955—),男,教授,博士生导师,主要从事光电技术、精密仪器和光纤传感等方面的研究。

E-mail: wmchen0802@126.com(中国光学学会会员号: S040111247S)

1 引 言

发光二极管(LED)光源具有定向发光、使用寿命长、功耗低和绿色环保等优势^[1~5],正逐步替代传统高压钠灯光源,广泛应用于道路照明。由于LED光源的朗伯特特性,需要进行二次配光以对其光强空间分布进行重新分配^[6],从而将其发出的光能全部会聚到路面的有效照明区域,并满足亮度、均匀性和眩光等使用者的视觉需求,以保障行车安全。但由于LED路灯的安装条件(布灯高度、布灯间距)、道路类型(主干路、次干路、支路)、道路宽度(二车道、三车道、四车道、六车道)以及道路路面的反射材质(沥青、水泥)的差异,不可能用一种通用的光强分布来适用各种条件。

为了解决这个难题,国内有人提出基于逆向设计思路的矩形配光法^[7],即利用路面均匀的照度分布以及照度和光强的转换函数,得到灯具的光强分布;但该方法忽略了与驾驶员或者行人视觉舒适性直接相关的路面亮度、亮度均匀度、环境比等光环境质量评价指标,可能导致道路路面亮度分布不均匀、产生“斑马效应”,增加交通安全隐患;同时该方法可能导致光溢出到路面较远区域,造成光能的浪费。此外还有人提出基于经验的试凑法调整LED路灯中光源的位置参数来获取需要的光分布,以适应不同的道路状况,但这种方法很难实现灯具节能和推广应用。

因此,需要提出一种能适用于不同安装条件、道路类型、道路宽度、路面反射特性的LED路灯光强分布设计方法,并建立相应的最优化数学模型,在保证驾驶员良好的视觉光环境的同时,尽量减少道路外的无效照明,以获得更为合理的灯具光强空间分布。

2 基于驾驶员视觉光环境需求的灯具光强空间分布逆向优化设计

2.1 驾驶员的视觉光环境需求

机动车驾驶员在行车过程中,80%~90%的信息是靠视觉获得的^[8],因此道路照明的首要任务是给驾驶员提供良好的视觉环境。为了保障驾驶员能看到远处的障碍物,路面需要保持一定的亮度水平。由于驾驶员视觉区域内太亮的路面可能会产生眩光,而太暗的区域则可能出现视觉暗区,人眼无法辨别其中的障碍物,因此从视觉的功能性角度考虑,需要路面有良好的整体亮度均匀度。从视觉舒适性出发,为了杜绝道路上连续出现的明显亮带和暗带,即“斑马效应”,国际照明委员会(CIE)引入了纵向亮

度均匀度^[9]的概念,即车道中间轴线上的最小亮度与最大亮度的比值需满足一定的条件。为了防止道路光源局部过高的亮度引起的人眼不舒适或降低人眼观察目标的能力,CIE采用阈值增量 X_{Tl} ^[9]作为评价与限制道路照明以及眩光控制的指标。为确保机动车驾驶员能够提前察觉道路两侧的行人或其他物体突然进入行驶车道,CIE提出利用环境比来约束道路两侧的照明环境。我国《城市道路照明设计标准》(CJJ45-2006)^[10]为从原来的照度标准评价体系向CIE推荐的亮度标准体系过渡,同时将照度评价指标和亮度评价指标都列入了照明质量评价体系。根据CJJ45-2006对道路照明质量中路面平均照度 E_{av} 、路面平均亮度 L_{av} 、照度均匀度 U_E 、亮度总均匀度 U_0 、亮度纵向均匀度 U_L 、眩光限制阈值增量 X_{Tl} 、环境比 Y_{SR} 的要求,建立驾驶员的视觉光环境需求模型为

$$E_{av} \geq E_{av}^T, \quad (1)$$

$$L_{av} \geq L_{av}^T, \quad (2)$$

$$U_E \geq U_E^T, \quad (3)$$

$$U_0 \geq U_0^T, \quad (4)$$

$$U_L \geq U_L^T, \quad (5)$$

$$X_{Tl} \leq X_{Tl}^T, \quad (6)$$

$$Y_{SR} \geq Y_{SR}^T, \quad (7)$$

其中上标T表示CJJ45-2006中的标准值。

为了对照明质量评价指标进行量化描述,根据CIE的规定,设置了如图1所示的照明参数计算区域,即道路纵向(长度方向)同一侧两灯杆之间的道路内的区域,另外沿着道路中心线且距离灯具1为60m的位置设为亮度观测点^[9]。为了方便计算,将照明计算区域划分为 $N_l \times N_j$ 个网格(图1中未显示网格)。

当LED路灯的安装条件如安装高度 H 、布灯间距 S 和道路的宽度 W 、路面材质的反射特性以及亮度观测点的位置确定后,如图1所示,第 k 个LED路灯在照明计算区域内单元面积 $P(x_i, y_j)$ 处的照度 $E_k(x_i, y_j)$,亮度 $L_k(x_i, y_j)$ 为^[9]

$$E_k(x_i, y_j) = \frac{I_k[C_k(x_i, y_j), \gamma_k(x_i, y_j)]}{H^2} \cos^3 \gamma_k(x_i, y_j), \quad (8)$$

$$L_k(x_i, y_j) = \frac{r_k(x_i, y_j)}{10^4 \cos^3 \gamma_k(x_i, y_j)} E_k(x_i, y_j), \quad (9)$$

式中 $I_k[C_k(x_i, y_j), \gamma_k(x_i, y_j)]$ 为第 k 个灯具在 $[C_k(x_i, y_j), \gamma_k(x_i, y_j)]$ 方向的光强, $C_k(x_i, y_j)$ 为入射光线的方位角, $\gamma_k(x_i, y_j)$ 为入射光线的垂直角,由灯具的安

装高度 H 、布灯间距 S 以及道路宽度 W 确定。 $r_k(x_i, y_j)$ 为简化亮度系数,由光的入射平面和观察平面之间的角度 β 和入射光线的垂直角 γ 通过查表确定,不

同的道路路面材料对应的亮度系数不同,我国 CJJ45-2006 标准根据路面材料的不同将路面分为沥青路面和水泥混凝土路面。

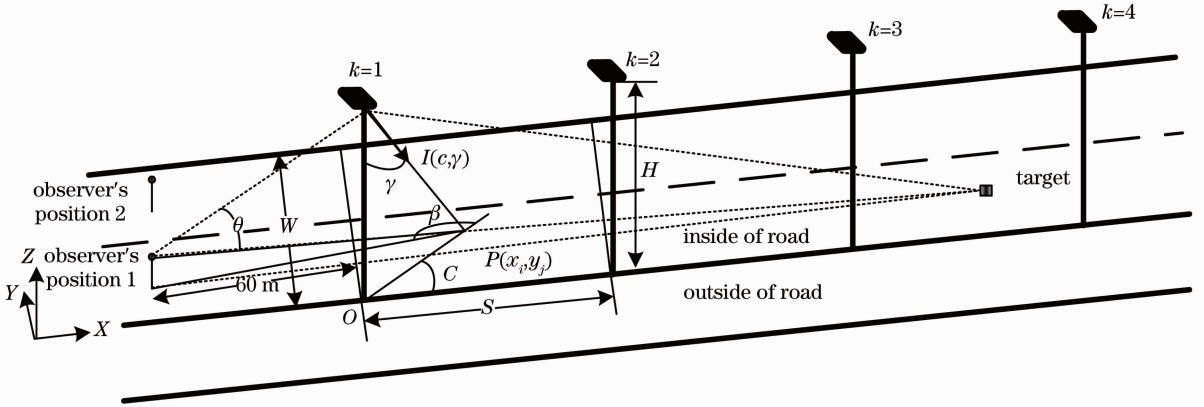


图 1 照明参数计算区域示意图

Fig. 1 Illustration of calculation region for lighting parameters

照明计算区域的平均照度 E_{av} 、平均亮度 L_{av} 是照明区域内所有单元面积 $P(x_i, y_j)$ 的照度或者亮度的平均值^[9]:

$$\left\{ \begin{aligned} E_{av} &= \frac{\sum_{i=1}^{N_I} \sum_{j=1}^{N_J} \sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j)}{N_I N_J} \\ L_{av} &= \frac{\sum_{i=1}^{N_I} \sum_{j=1}^{N_J} \sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_j)}{N_I N_J} \end{aligned} \right. , \quad (10)$$

照度均匀度 U_E 、亮度总均匀度 U_o 、纵向亮度均匀度 U_L 为^[9]

$$\left\{ \begin{aligned} U_E &= \frac{\min \left[\sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j) \right]}{E_{av}} \\ U_o &= \frac{\min \left[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_j) \right]}{L_{av}} \\ U_L &= \frac{\min \left[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_{middle}) \right]}{\max \left[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_{middle}) \right]} \end{aligned} \right. , \quad (11)$$

式中 y_{middle} 表示每条车道的中心线对应的纵坐标。

眩光限制的阈值增量 X_{TI} 由等效光幕亮度 L_v 和平均亮度 L_{av} 共同确定^[11,12],

$$X_{TI} = \frac{65L_v}{L_{av}^{0.8}}, \quad (12)$$

式中 $L_v = 3 \times 10^{-3} \sum_{k=1}^K \frac{E_{V_k}(x_i, y_j)}{\theta_k(x_i, y_j)^2}$, E_{V_k} 是表示第 k

个灯具对观察者眼中的平面上的垂直照度, θ 表示视线和来自灯具的光线入射方向之间的角度,如图 1 中虚线所示,由此可见 θ 是与灯具安装高度 H 以及道路宽度 W 相关的。

环境比 Y_{SR} 为车道外边 5 m 宽(或者半车道)区域内的平均水平照度与相邻的 5 m 宽(或者半车道)车行道上平均水平照度之比^[9,12],将车道外同一侧两灯杆间宽 5 m(或者半车道)的区域等分为 $N_{SI} \times N_{SJ}$ 个网格,

$$Y_{SR} = \frac{\sum_{Si=1}^{N_{SI}} \sum_{Sj=1}^{N_{SJ}} \sum_{k=1}^K E_{sk}(x_{si}, y_{sj}) / (N_{SI} N_{SJ})}{\sum_{i=1}^{N_I} \sum_{j=1}^{N_J} \sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j) / (N_I N_J)}, \quad (13)$$

式中 (x_{si}, y_{sj}) 表示车道外区域的坐标。

(8) ~ (13) 式表明当路灯的安装条件如安装高度 H 、布灯间距 S 和道路的宽度 W 、路面材质的反射特性确定后,路面平均照度、平均亮度、照度均匀度、亮度总均匀度、亮度纵向均匀度、眩光限制阈值增量、环境比等照明质量评价指标与 LED 路灯的光强空间分布 $I(C, \gamma)$ 息息相关。将(8) ~ (13) 式代入(1) ~ (7) 式的视觉光环境需求模型中,可以得到光强空间分布 $I(C, \gamma)$ 需要满足的一系列约束条件。利用路灯的安装条件和道路宽度 W 、路面材质的反射特性以及驾驶员的视觉光环境需求来反求灯具最节能的 $I(C, \gamma)$,即为逆向设计。然而,利用这些约束条件不能对路面以外的光强分布进行约束,且不能获得最节能的 $I(C, \gamma)$ 分布,因此需利用(1) ~ (7) 式的驾驶员视觉光环境需求建立光强空间分布 $I(C, \gamma)$ 的优化模型。

2.2 LED 路灯光强空间分布的非线性优化模型

通过前面的分析,将 CJJ45-2006^[10]中(1)~(7)式所示的驾驶员视觉光环境需求列为约束条件;对于目标函数,文献[13]中以路面光通量最低为目标函数只能实现道路路面范围内光强空间分布的局部最优,不能实现 LED 路灯光强空间分布的全局最

优,因此将路面以内的光通量和路面以外的光通量之和即灯具的总光通量最小作为目标函数,既保证了道路内的光通量最优又充分减少了道路外的无效照明,从而得到全空间最优的 LED 路灯光强分布。图标函数为

$$\min \Phi = 2 \times \sum_{Li=1}^{N_{Li}} \sum_{Lj=1}^{N_{Lj}} I[C(x_{Li}, y_{Lj}), \gamma(x_{Li}, y_{Lj})] \times d\omega(x_{Li}, y_{Lj}), \quad (14)$$

式中 $d\omega(x_{Li}, y_{Lj}) = \frac{dA \cos^3 \gamma(x_{Li}, y_{Lj})}{H^2}$,

$$s. t. \frac{\sum_{i=1}^{N_I} \sum_{j=1}^{N_J} \sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j)}{N_I N_J} \geq E_{av}^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_I, \quad j = 1, 2, \dots, N_J; \quad (15)$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{N_I} \sum_{j=1}^{N_J} \sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_j)}{N_I N_J} \geq L_{av}^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_I, \quad j = 1, 2, \dots, N_J; \quad (16)$$

$$\frac{\min \left[\sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j) \right]}{E_{av}} \geq U_E^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_I, \quad j = 1, 2, \dots, N_J; \quad (17)$$

$$\frac{\min \left[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_j) \right]}{L_{av}} \geq U_o^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_I, \quad j = 1, 2, \dots, N_J; \quad (18)$$

$$\frac{\min \left[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_{middle}) \right]}{K} \geq U_L^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_I; \quad (19)$$

$$\frac{\max \left[\sum_{k=1}^K L_k(x_i, y_{middle}) \right]}{65 \times 3 \times 10^{-3} \sum_{k=1}^K \frac{E_{vk}(x_i, y_j)}{\theta_k(x_i, y_j)^2}} \leq X_{TI}^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_I, \quad j = 1, 2, \dots, N_J; \quad (20)$$

$$\frac{\sum_{Si=1}^{N_{SI}} \sum_{Sj=1}^{N_{SJ}} \sum_{k=1}^K E_{Sk}(x_{Si}, y_{Sj}) / N_{SI} N_{SJ}}{\sum_{i=1}^{N_I} \sum_{j=1}^{N_J} \sum_{k=1}^K E_k(x_i, y_j) / N_I N_{SJ}} \geq Y_{SR}^T, \quad Si = 1, 2, \dots, N_{SI}, \quad Sj = 1, 2, \dots, N_{SJ}; \quad (21)$$

$$E(x_{Li}, y_{Lj}) \geq 0, \quad Li = 1, 2, \dots, N_{Li}, \quad Lj = 1, 2, \dots, N_{Lj}, \quad (22)$$

其中光通量计算区域为以灯杆为中心的足够大的 $L \times L(m^2)$ 的矩形区域,并等分为 $N_{Li} \times N_{Lj}$ 个网格, (x_{Li}, y_{Lj}) 为光通量计算区域的坐标, $\omega(x_{Li}, y_{Lj})$ 为由 (x_{Li}, y_{Lj}) 确定的单元面积对应的立体角, dA 为网格单位矩形的面积。

上述模型是利用一系列的 $I[C(x_{Li}, y_{Lj}), \gamma(x_{Li}, y_{Lj})]$ 确定 LED 路灯的光强空间分布,直接对上述最优化模型进行求解,需要足够大的光通量计算区域,并且网格要足够的细分才能得到准确的全空间

分布,这样将会大大降低模型的求解效率,并可能使模型找不到全局最优解^[13]。另外求解的光强分布特性在局部的分布可能不平滑,很难运用于灯具的实际设计和加工。

利用(8)式,将目标函数改写为

$$\min \Phi = 2 \times \sum_{Li=1}^{N_{Li}} \sum_{Lj=1}^{N_{Lj}} E(x_{Li}, y_{Lj}) \times dA. \quad (23)$$

约束条件(15)~(22)式对应的各道路照明评价指标和目标函数(23)式都是基于灯具的照度分布。

当 x 或者 y 趋向于无穷大, 灯具在无穷远处的照度 $E(x, y)$ 应该趋向于零, 另外为了使更多的光照射到道路路面, 道路内和道路外的照度分布应该关于道路边沿呈非对称分布, 因此引入了光偏转角常量 φ 。在文献[14]的基础上, 将灯具在道路 (x, y) 处的照度分布表述为关于 x, y 以及光偏转角常量 φ 的余弦多项式:

$$E(x, y) = \sum_{m=0}^M \sum_{n=0}^N a(m, n) \cos^m \left[\arctan \left(\frac{x}{H} \right) \right] \times \cos^n \left[\arctan \left(\frac{y}{H} \right) + \varphi \right], \quad (24)$$

式中 $a(m, n)$ 为照度系数, M 和 N 分别代表路面照度在道路横向和道路纵向的会聚程度。

将(24)式代入(15)~(23)式中, 可得到关于照度系数 $a(m, n)$ 以及 M 和 N 方幂的非线性优化模型。由于目标函数和约束条件都是离散函数, 并且 M 和 N 是与安装条件相关的变量, 对其直接求解非常复杂。采用分级优化方法^[15], 将优化模型分为内层、外层优化。外层优化确定 M 和 N 的最佳值, 内层优化确定最佳照度系数 $a(m, n)$ 。为了求解的方便, 假设 M 和 N 均为整数, 采用迭代的方式, 并结合内层优化, 当 $\Phi_{M+1, N+1} - \Phi_{M, N} \geq 0$ 或者 $0 < \frac{\Phi_{M, N} - \Phi_{M+1, N+1}}{\Phi_{M, N}} \leq 1\%$ (Φ 表示灯具的总光通量) 时,

迭代结束, 由此确定外层优化最佳的 M 和 N 值。当 M 和 N 确定后, 内层优化简化为关于照度系数 $a(m, n)$ 的线性优化模型, 运用优化软件 Lingo 的线性求解器可以对线性模型直接求解。

3 设计实例分析

根据 CJJ45-2006^[10], 不同的机动车交通道路照明根据道路的使用情况和功能分为快速路与主干路、次干路、支路 3 级, 其具体照明指标值如表 1 所示。以重庆北部新区某主干路、次干路、支路 3 条不同的道路类型为例, 进行模型的求解。其中次干路和主干路路宽 W 为四车道 2×7.5 m, 沥青路面, 双排对称布灯, 支路路宽 W 为双车道 7.5 m, 沥青路面, 单排布灯, 道路照明灯安装高度 H 为 10 m, 布灯间距 S 为 25 m, 光偏转角常量 φ 为 10° , 照明计算区域等分为 $N_I \times N_J = 15 \times 10$ 个网格, 光通量计算区域 $L \times L$ 为 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$, 等分为 $N_{L_I} \times N_{L_J} = 100 \times 100$ 个网格。

利用分级优化方法得到了沥青路面的支路、次干路和主干路 LED 路灯(LED2)的光强空间分布, 并与现有的矩形配光方法得到的 LED 路灯(LED1)光强空间分布进行了比较, 分别如图 3(a)~(c) 所示。

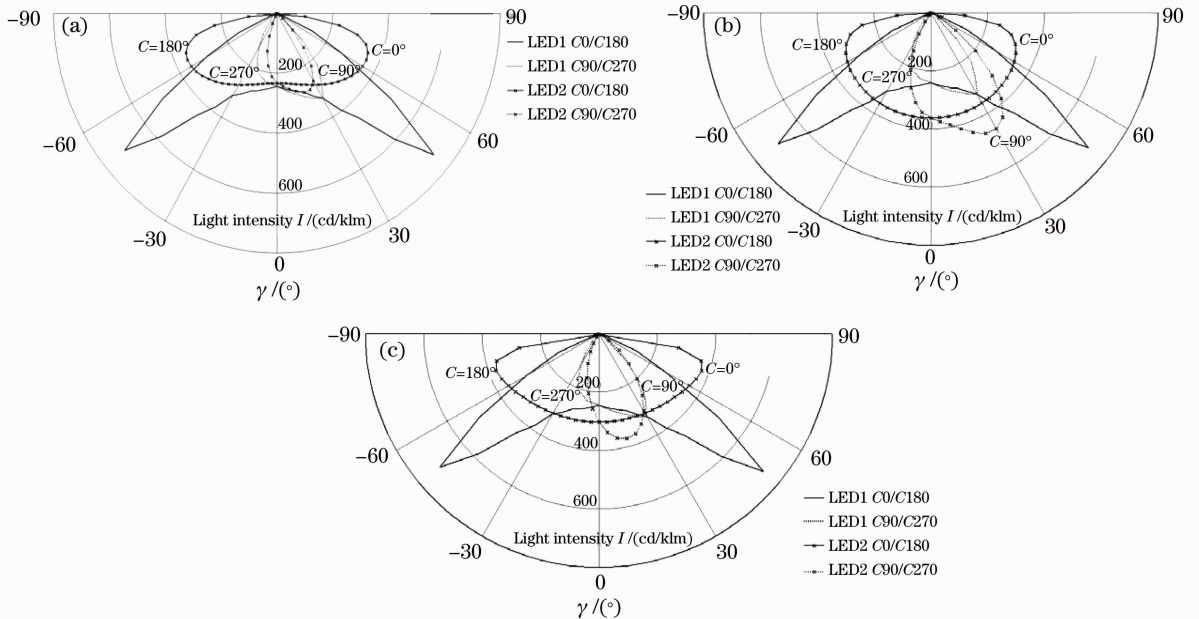


图3 不同道路 LED1, LED2 路灯光强分布曲线的比较。光通量均统一到 1000 lm。(a)主干路; (b)次干路; (c)支路
Fig. 3 Comparison of luminous intensity distribution curves of LED1, LED2 road luminaires on different roads. The flux is unified into 1000lm. (a) Major road; (b) collector road; (c) local road

从图 3(a)~(c)所示的 LED1 路灯和 LED2 路灯在主干路、次干路和支路下的光强空间分布曲线可以看出,LED1 路灯在 3 种不同的道路类型下均采用相同的光强分布曲线,然而根据表 1 所示的照明质量评价价值,LED1 路灯的照明质量值只在支路条件下符合 CJJ45-2006^[10]的要求,对于次干路和主干路,其纵向亮度均匀度均低于 CJJ45-2006^[10]标准值,因此 LED1 路灯不能满足在次干路和主干路的照明要求。而 LED2 路灯是根据具体的道路对象进

行设计的,因此对于主干路、次干路和支路其照明效果均满足表 1 所示的标准值的要求。这就说明了进行 LED 路灯光强空间分布设计时,需要结合不同的道路对象,不能用一种光强分布形式应用于各种道路。

由图 3(a)~(c)的光强分布曲线计算的次干路 LED1,LED2 路灯的路面照度分布和路面亮度分布如图 4 和图 5 所示;支路、次干路和主干路照明质量评价指标值如表 1 所示。

表 1 LED1 路灯光强分布曲线、LED2 路灯光强分布曲线计算的照明指标值以及标准值(CJJ45-2006)(NR 表示没有要求)

Table 1 Lighting parameters calculated from the luminous intensity distribution curves of LED1 road luminaires, LED2 road luminaires and standard value (CJJ45-2006) (NR means no requirement)

Type of road	Major road			Collector road			Local road		
	CJJ	LED1	LED2	CJJ	LED1	LED2	CJJ	LED1	LED2
E_{av}/lux	30	42	31	15	21	15	10	12	10
$L_{av}/(cd/m^2)$	2.0	2.0	2.0	1.0	1.0	1.0	0.75	0.75	0.75
U_E	0.4	0.8	0.6	0.35	0.8	0.5	0.3	0.8	0.5
U_o	0.4	0.6	0.6	0.4	0.6	0.4	0.4	0.5	0.4
U_L	0.7	0.4	0.9	0.5	0.4	0.7	NR	NR	NR
$X_{TI}/\%$	10	1	8	10	1	8	15	2	9
Y_{SR}	0.5	0.8	0.5	0.5	0.8	0.6	NR	NR	NR

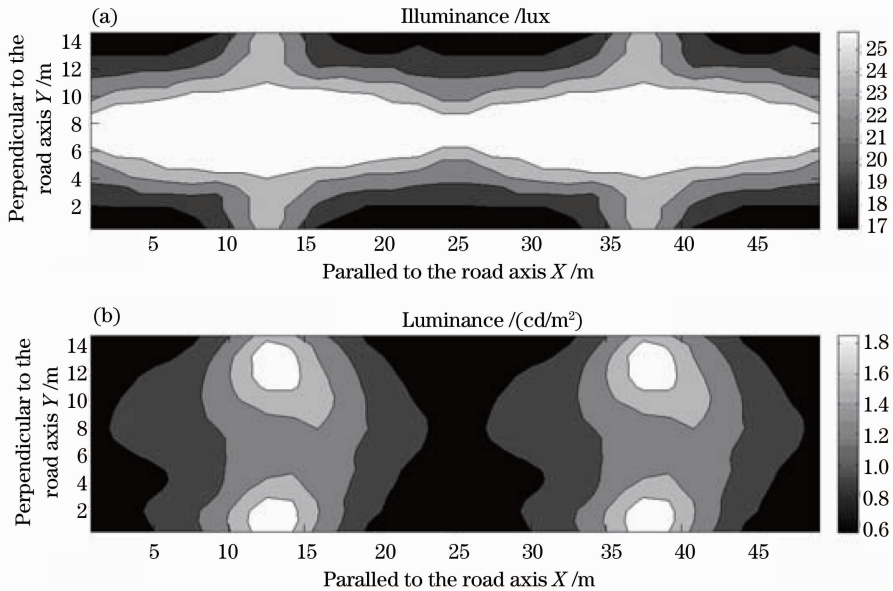


图 4 次干路 LED1 路灯的(a)路面照度分布与(b)路面亮度分布

Fig. 4 (a) Illuminance distribution and (b) luminance distribution of LED1 road luminaires on collector road

图 4 和图 5 分别为利用矩形配光设计的 LED 路灯(LED1 路灯)的照明效果及利用优化模型得到的 LED 路灯(LED2 路灯)的照明效果,对比可以发

现 LED1 路灯的照度分布的均匀度非常高,从表 1 可以看出其照度均匀度高达 0.8,然而其亮度分布的均匀度却很低,为 0.4,可以明显地看出“斑马效

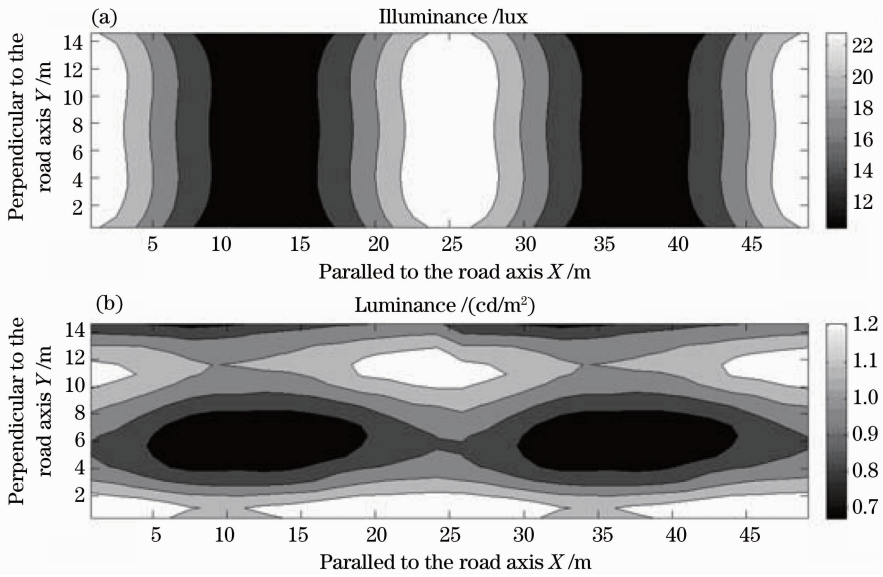


图 5 次干路 LED2 路灯的 (a)路面照度分布与 (b)路面亮度分布

Fig. 5 (a) Illuminance distribution and (b) luminance distribution of LED2 road luminaires on collector road

应”。由于人眼感受刺激直接相关的是路面的亮度，因此这样的照明方式会严重影响驾驶员的视觉舒适性，增加交通安全隐患；而 LED2 路灯的照度分布的均匀度(0.6)虽然低于 LED1 路灯(0.8)，但是其亮度分布的均匀度高于 LED1 路灯，从表 1 可以看出，LED2 路灯的亮度总均匀度为 0.6，纵向亮度均匀度为 0.7，均能较好地满足 CJJ45-2006^[10] 标准值的要求，相比于 LED1 路灯，LED2 路灯能很好地改善道路的照明质量，提高驾驶员的视觉舒适性。

图 6 为沥青路面的主干路、次干路和支路 LED1 路灯、LED2 路灯总光通量的比较。路灯的总光通量越低，在相同的驱动电源条件、相同的灯具二次光学系统效率条件下，其功耗越低，灯具也就越节能。将灯具的总光通量作为灯具节能的评判标准，则在主干路、次干路和支路下 LED2 路灯比 LED1 路灯分别节能 34%，32%和 28%。

4 结 论

基于具体道路对象、灯具安装条件以及道路使用者实际视觉光环境需求的 LED 路灯光强空间分布逆向设计思路，建立了以视觉光环境需求为约束、以灯具总光通量最小为目标的 LED 路灯光强空间分布的非线性优化模型。以重庆北部新区沥青路面四车道的主干路、次干路和两车道支路为例，计算出了 3 种不同条件下的 LED 路灯最佳的光强空间分布。相比于现有的矩形配光设计的 LED 路灯，该优化方法设计的 LED 路灯在主干路、次干路和支路的

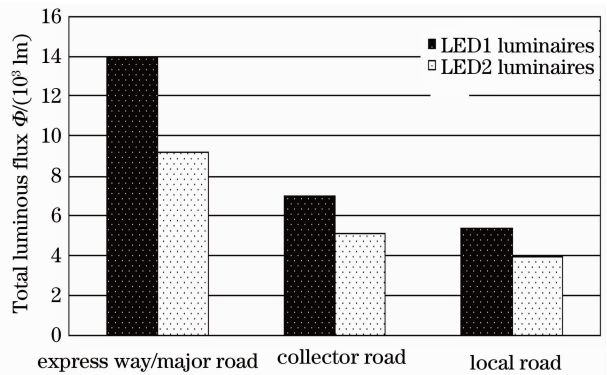


图 6 LED1 路灯、LED2 路灯总光通量比较

Fig. 6 Comparison of total luminous flux for LED1 and LED2 road luminaires

驾驶员视觉光环境质量能大幅度改善，并且所需灯具总光通量大幅度降低，能实现灯具节能 30%左右。在以后的研究工作中，将对灯具安装条件、道路类型、道路宽度以及路面反射特性等参数进行归类分析，并计算每一特定条件下的 LED 路灯最节能的配光曲线，实现 LED 路灯的光通量、功率的标准化。

参 考 文 献

- 1 Wu Haibin, Wang Changling, He Sumei. Research of color rendering of white LED based on red and green phosphors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1777~1783
吴海彬, 王昌龄, 何素梅. 涂覆红、绿荧光粉的白光 LED 显色性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(9): 1777~1783
- 2 N. Narendran, Yimin Gu. Life of LED-based white sources[J]. *IEEE J. Display Technology*, 2005, **1**(1): 167~171
- 3 Jin Ji, Yu Guiying, Lin Min. Research of high light collection efficiency of LED parabolic reflector based on non-imaging optics [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 680~684
金 骥, 余桂英, 林 敏. 基于非成像光学的 LED 高收光率的

- 抛物反射器研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(3): 680~684
- 4 Yin Jie, Qiu Yunfeng, Liu Qiao *et al.*. Design of light guide plate for large-size LED silm light box[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(12): 120801
尹 杰, 邱云峰, 刘 桥 等. 大尺寸LED超薄灯箱的导光板设计[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(12): 120801
- 5 Ding Deqiang, Ke Xizheng. Research on generalized mathematic radiation model for white LED [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2536~2540
丁德强, 柯熙政. 一种通用白光LED数学发光模型研究[J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2536~2540
- 6 Yan Xingtao, Yang Jianfeng, Zhang Guoqi *et al.*. Freeform LED lens design based on longitude-latitude division and tangent-plane iteration[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(2): 022201
闫兴涛, 杨建峰, 张国琦 等. 基于经纬划分和切面迭代的自由曲面LED透镜设计[J]. 激光与光电子学进展, 2011, **48**(2): 022201
- 7 Zou Jiping. Analysis of misunderstanding in photometric design for LED luminaries of roadway lighting [C]. The China Road Lighting Forum, 2011, 164~167
邹吉平. LED道路照明灯具配光性能的误区分析[C]. 中国道路照明论坛, 2011, 164~167
- 8 P. Raynham. An examination of the fundamental of road lighting for pedestrians and drivers [J]. *Lighting Research and Technology*, 2004, **36**(4): 307~316
- 9 International Commission on Illumination. Calculation and Measurement of Luminance and Illuminance in Road Lighting, CIE Feb-30-1982 [S]. Vienna: CIE Publication, 1982
- 10 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
- 11 International Commission on Illumination. Glare and Uniformity in Road Lighting Installations, CIE 31-1976 [S]. Paris: CIE Publication, 1976
- 12 International Commission on Illumination. Road Lighting Calculations, CIE 140-2000 [S]. Vienna: CIE Publication, 2000
- 13 Angel Pachamanov, Dessislava Pachamanova. Optimization of the light distribution of luminaries for tunnel and street lighting [J]. *Engineering Optimization*, 2008, **40**(1): 47~65
- 14 Zexin Feng, Yi Luo. Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio [J]. *Opt. Express*, 2010, **18**(21): 22020~22031
- 15 Cheng Yuansheng, You Jianjun. Optimization of docking block placement and dimensions[J]. *J. Ship Mechanics*, 2004, **8**(2): 63~70
程远胜, 游建军. 船舶坐墩墩木布局及尺寸优化设计[J]. 船舶力学, 2004, **8**(2): 63~70

栏目编辑: 谢 婧