

用于道路均匀照明的 LED 自由曲面透镜设计

贺志华, 董前民, 王少雷, 李 敏

(中国计量学院光学与电子科技学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 鉴于 LED 在道路照明应用中的复杂性和特殊性, 以非成像光学为基础, 提出了一种新颖的用于道路均匀照明透镜设计方案。运用微分几何原理, 建立自由曲面面型的一阶拟线性双曲型偏微分方程, 并在 matlab 中进行数值求解, 将所得面型数据导入 SolidWorks 中建立透镜模型, 该透镜将 LED 朗伯分布转化为道路照明所需的蝙蝠翼分布。通过 Tracepro 对所建透镜进行光线追迹, 结果表明 10m 处目标面的整体均匀度在 85% 以上, 能量利用率为 89.2%。在对扩展光源配光时, 该光学系统仍保持较好的照明效果, 不仅有效照明区域符合预期, 且照度均匀度优于 0.80。用 DIALux 模拟该透镜组成的 5×10 式模组的路灯系统的照明效果, 结果显示路面照度均匀度达 0.83, 符合国家标准。

关键词: 偏微分方程; LED 光学设计; 均匀度; 道路照明

中图分类号: O439 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1004-440X.2014.04.016

LED Freeform Lens Design for Street Uniform Illumination

He Zhihua, Dong Qianmin, Wang Shaolei, Li Min

(College of Optical and Electronic Technology, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Given the complexity and particularity of the LED in the application of street lighting, this paper presents a new lens design method for street uniform lighting based on non-imaging optics. Using the theory of differential geometry to set up the first-order quasi-linear hyperbolic partial differential equations of the freeform lens surface, and solve it by numerical solution in matlab, using the data of the lens profile, the lens model is established in SolidWorks. The designed lens can convert the Lambert distribution of the LED into the bat wing distribution for street lighting. The designed optical system simulated with ray-tracing in TracePro, the results show that the overall uniformity of the 10m distance target plane is above 85%, and the efficiency is 89.2%. This optical system still maintains good lighting effect when point at extended light source. Not only is the effective illumination area in line with expectations, but also can keep the uniformity above 80%. The street lighting system, which uses the designed lens consisting of 5×10 -in modular, simulated the lighting effects in DIALux. The results show that the uniformity achieves 83% on road surface, which conform the national standard.

Key words: partial differential equations; LED optical design; uniformity; street lighting

引言

随着 LED 技术的发展, LED 长寿命、环保和节能等优点使得它的应用领域越来越广, 在道路照明上正逐步代替传统高压钠灯, 具有巨大的发展潜

力^[1-2]。基于 LED 的发光特性, 如将其发出的光直接照在地面上, 将形成照度极不均匀的大圆斑, 不仅光能利用率低, 还对远处的行人和车辆易造成眩光, 增加交通事故的发生率, 因此在照明系统中进行必要的二次光学设计才能充分合理地利用 LED 发出的光。由于二次光学设计关注的是能量的分配问

题, 因此非成像光学是设计的理论基础^[3-5]。

从原理来看, 自由曲面设计方法归结为试错法^[6]和剪裁法^[7]。试错法多凭设计人员经验, 耗时过长; 剪裁法于 2002 年由 H. Ries 和 J. Muschaweck^[8]提出, 但该方法仍有多限制, 不仅不能形成所需高配光效果的面型, 且计算时间很长。根据我国《城市道路照明设计标准》的要求^[9], 为将光尽量均匀投射到路面上, 道路所需的理想配光是蝙蝠翼的矩形配光。目前常见的“花生米”路灯透镜常基于网格法^[3,10]建模, 该法虽较直观, 但所得透镜要使配光的均匀度保持 0.8 以上, 前提条件必须是 LED 发光面尺寸相对透镜本身尺寸小 5 倍以上, 即点光源, 若尺寸大了, 其均匀度和有效照明区域均明显变小, 而现在大功率 LED 多芯片集成封装多采用板上芯片封装形式 (COB), 其尺寸已不能忽视。本文将采用精度更高的偏微分方程法, 为解决该方法的求解性问题, 这里引入合适的差分格式数值求解自由曲面面型的偏微分方程, 其配光范围和尺寸大小可根据需要自由设定, 且所得透镜在对大尺寸面光源配光时仍能保持较好的配光效果, 应用上采用模块化阵列^[11], 合理排列灯具, 增加了其真实性。

1 自由曲面的构建原理与求解

本文采用偏微分方程法求解自由曲面透镜, 其思路如下: 首先推导光线与自由曲面间的相互关系, 建立面型的偏微分方程, 其次建立光源空间与被照面间的能量映射关系, 进而化为一阶拟线性偏微分方程, 最后采用有限差分法数值求解透镜面型, 所得面型数据导入 SolidWorks 建立实体模型。

1.1 光线与自由曲面的偏微分方程推导

如图 1 所示, T 为所求透镜表面上的任一点, φ 为入射光线 OT 与 z 轴夹角, θ 为 OT 在 $x-y$ 平面上投影与 x 轴的夹角, 因此入射光线的矢径为:

$$\begin{cases} \rho_\varphi = \rho \frac{\sin\varphi(n_0 O_z - n_l I_z) - \cos\varphi[\sin\theta(n_0 O_y - n_l I_y) + \cos\theta(n_0 O_x - n_l I_x)]}{\cos\varphi(n_0 O_z - n_l I_z) + \sin\varphi[\sin\theta(n_0 O_y - n_l I_y) + \cos\theta(n_0 O_x - n_l I_x)]} \\ \rho_\theta = \rho \sin\varphi \frac{\sin\theta(n_0 O_x - n_l I_x) - \cos\theta(n_0 O_y - n_l I_y)}{\cos\varphi(n_0 O_z - n_l I_z) + \sin\varphi[\sin\theta(n_0 O_y - n_l I_y) + \cos\theta(n_0 O_x - n_l I_x)]} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 能量映射关系的推导

为使光源发出的光投射到路面形成矩形光斑,

$$OT = \rho(\varphi, \theta) \mathbf{I} = \rho(\varphi, \theta) (\sin\varphi \cos\theta, \sin\varphi \sin\theta, \cos\varphi) \quad (1)$$

式中 $\rho(\varphi, \theta)$, $\mathbf{I}$ 分别为矢径 OT 的大小和方向。

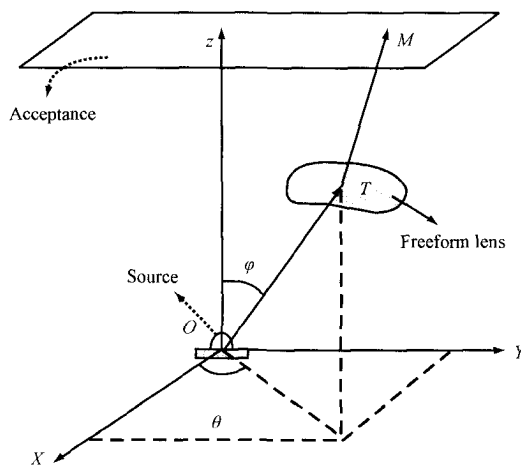


图 1 折射原理图

Fig. 1 Refraction schematics

由微分几何原理, 自由曲面在 T 点的法向的单位矢量应是 OT 分别在 θ 和 φ 方向上的切矢量的叉乘, 即:

$$\mathbf{N} = \frac{\rho_\theta \times \rho_\varphi}{|\rho_\theta \times \rho_\varphi|} = \frac{(\rho_\theta \mathbf{I} + \rho \mathbf{I}_\theta) \times (\rho_\varphi \mathbf{I} + \rho \mathbf{I}_\varphi)}{|(\rho_\theta \mathbf{I} + \rho \mathbf{I}_\theta) \times (\rho_\varphi \mathbf{I} + \rho \mathbf{I}_\varphi)|} \quad (2)$$

式中, ρ_θ , ρ_φ 分别为矢径大小在 θ 和 φ 方向上偏微分; $\mathbf{I}_\theta$, $\mathbf{I}_\varphi$ 分别为矢径方向在 θ 和 φ 方向上偏微分。

令出射光线的单位矢量为 $\mathbf{O} = \mathbf{TM}/|\mathbf{TM}|$, n_l , n_0 为入射和出射环境介质的折射率, 再结合 Snell 定律的矢量式:

$$\sqrt{n_l^2 + n_0^2 - 2n_l n_0 (\mathbf{I} \cdot \mathbf{O})} \cdot \mathbf{N} = n_0 \mathbf{O} - n_l \mathbf{I} \quad (3)$$

得到各分量间的关系式如下:

$$\begin{cases} \frac{N_z}{N_x} = \frac{n_0 O_z - n_l I_z}{n_0 O_x - n_l I_x} \\ \frac{N_z}{N_y} = \frac{n_0 O_z - n_l I_z}{n_0 O_y - n_l I_y} \end{cases} \quad (4)$$

由式(1)、式(2)、式(4)化简得:

需建立光源空间和照明面间的映射关系。设光源发出的总光通量为 Φ , 预形成的均匀矩形照明面的长

(道路方向)为 L ,宽(垂直道路方向)为 W 。由能量守恒,理论上在照明面上的平均照度 $E_v = \Phi / LW$ 。如图2所示,对光源辐射角和照明面的网格划分建立相应的映射关系,即图中的黑影的一一对应关系。因此要形成矩形光斑,经相同 φ 角和矢径大小下的环带射出的光线应恰好落在矩形的边上。设该矩形在第一象限的顶点坐标为 (X, Y) ,且 $X/Y = W/L$,则由能量守恒关系式

$$\int_0^{2\pi} \int_0^{\varphi} I(\varphi, \theta) \sin \varphi d\varphi = 2X \cdot 2Y \cdot E_v \quad (6)$$

得到:

$$\begin{cases} X = \frac{W}{2} \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_m} \\ Y = L/2 \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_m} \end{cases} \quad (7)$$

式中 φ_m 为光源最大半发光角。

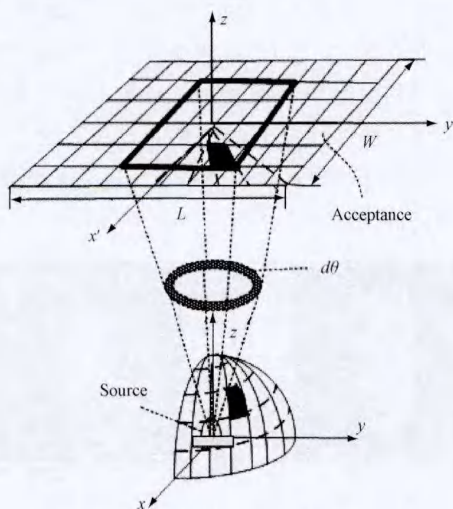


图2 LED光源与照明面能量映射关系

Fig. 2 Energy mapping between LED source and lighting surface

在第一象限内,对路面上的点 M 有,当 $\theta \in [0, \pi/4]$ 时,光应投射到矩形的长上,即 $x = X, y/Y = \theta/(\pi/4)$;当 $\theta \in [\pi/4, \pi/2]$ 时,光应投射到矩形的宽上,即 $y = Y, x/X = [(\pi/2) - \theta]/(\pi/4)$ 。综合得在第一象限内LED发出的光线在投射到路面上点 M 的坐标为:

$$\begin{cases} \left(\frac{W}{2} \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_m}, \frac{2\theta L}{\pi} \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_m}, z \right), \theta \in [0, \pi/4] \\ \left[\frac{2W \cdot \sin \varphi / \sin \varphi_m}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right), L/2 \cdot \frac{\sin \varphi}{\sin \varphi_m}, z \right], \\ \theta \in [\pi/4, \pi/2] \end{cases} \quad (8)$$

令 $f[\varphi, \theta, \rho(\varphi, \theta)] = \rho_\varphi + \rho_\theta$,则化成一阶拟线性双曲型偏微分方程:

$$\begin{cases} f[\varphi, \theta, \rho(\varphi, \theta)] = \rho_\varphi + \rho_\theta \\ \rho(0, 0) = \rho_0 \end{cases} \quad (9)$$

将 φ 和 θ 分别划分成 J 份和 K 份,组成 (φ_j, θ_k) 网格线,运用Runge-Kutta法和Lax-Wendroff^[12]差分格式(其截断误差只有 $o[\Delta \theta^2 + \Delta \varphi^2]$)即可求得其余矢径大小,再通过球坐标和直角坐标的转换便得到所求面型的数据。

2 仿真结果与分析

2.1 结果仿真

我国城市路灯的安装为尽量避免眩光,一般采用12m左右的高杆灯。这里预在10m高下形成道路方向 120° 配光,垂直道路方向 75° 配光的均匀照明区域。根据以上原理,透镜材料选用PMMA,经matlab编程求出1/4路灯透镜的面型(如图3(a)所示),计算时间低于1s。再通过SolidWorks三维建模软件构建透镜的实体模型(如图3(b)所示),其长×宽×高的尺寸为28.1mm×14.8mm×10.6mm。

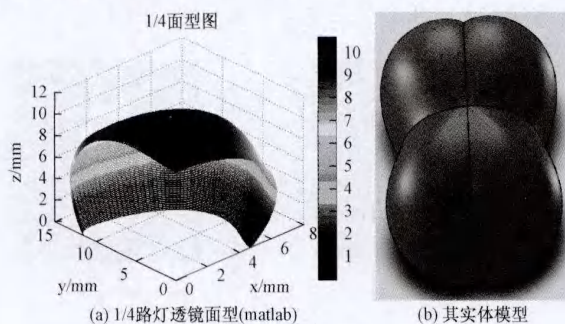


图3 路灯透镜模型

Fig. 3 Model of road lamp lens

将所得透镜模型导入到Tracepro光学仿真软件中进行系统仿真分析,采用朗伯体光源,发光面尺寸 $S_{LED} = 1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$,对该透镜而言可视为点光源,光通量设为100lm,光线为50万条进行追踪,仿真结果如图4所示。

由仿真结果知,有效照明区域基本呈矩形分布,约 $37\text{m} \times 15\text{m}$,即道路方向和垂直道路方向上配光角分别约 122° 和 74° ,且其照度均匀度分别 $U_{\parallel}$ 约为84%和 $U_{\perp}$ 约为92%,整个区域照度均匀度 U_{all} 也在85%以上,且被照面接收的光通量为89.2lm,即能

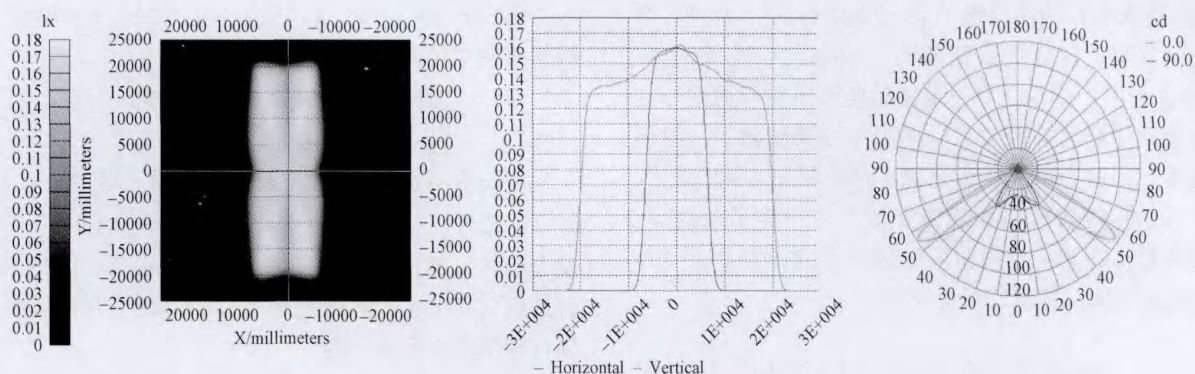


图4 基于1.3mm×1.3mm点光源的仿真照度图和光强分布图

Fig. 4 Illuminance distribution & Intensity distribution of the system based on 1.3mm×1.3mm point source

量利用率 $E = 89.2\%$ 。由于放样和计算过程不可避免地带入些许误差,至其在对角方向上出现最大值,但其值仅仅比平均值高出约1%,对均匀度的影响几乎可以忽略。

2.2 适用性分析

为比较本方法与网格法的优劣,用图3(b)透镜和基于网格法的“花生米”透镜(中心高10mm)分别对点光源系统($S_{LED} = 1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$)和面光源系统($S_{LED} = 6.5\text{mm} \times 6.5\text{mm}$)配光,并比较前后的配光效果,效果如图5所示。结果显示,图

3(b)透镜对于点光源和面光源系统配光后,照明效果均较好,二者有效照明区域前后变化较小,且 U_{all} 均在80%以上;而“花生米”透镜对点光源和面光源系统配光后,尽管前者的配光效果也较好($U_{all} > 80\%$),但是,后者的有效照明区域明显缩小(缩小近一半),且 U_{all} 也明显降低,效果明显较差。因此,相对基于网格法而言,基于本文方法得到的透镜对光源系统配光时,光源尺寸对配光效果的影响程度要小得多,这也使得基于此方法的透镜,更具有实用价值。

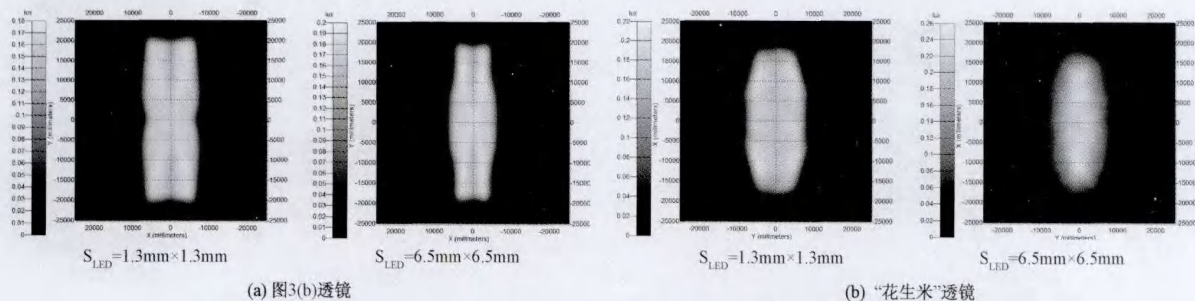


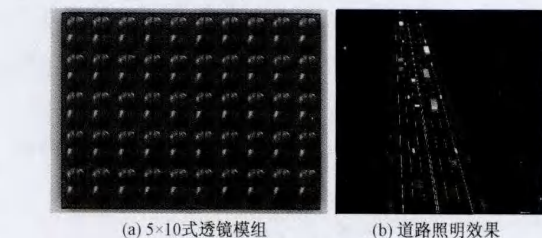
图5 与“花生米”透镜的配光效果比较

Fig. 5 Compared with “peanuts” lens in the light distribution effect

2.3 照明方案分析

因单颗光源能量有限,这里灯具采用50颗 5×10 式透镜模组[图6(a)],单颗光通量100lm的LED光源($1.3\text{mm} \times 1.3\text{mm}$),将上述光强分布的ies文件导入场景仿真软件DIALux中,设置双柏油路面共有6机动车道、2非机动车道和中间隔离带,共16m宽,路灯模组以双列并排式安装,安装高度为10m,其模拟效果如图6(b)所示。

图7等照度图显示路面最小照度、最大照度、平均照度分别为6.37lx、9.91lx、7.67lx,均匀度



(a) 5×10式透镜模组 (b) 道路照明效果

图6 透镜模组及道路照明效果

Fig. 6 Lens modular and the road lighting effect

0.83,且路边边缘也有一定亮度,因此周边照度系数为1,均符合《标准》要求。

街道 1/评估区域 道路 1/等照度图(照度)

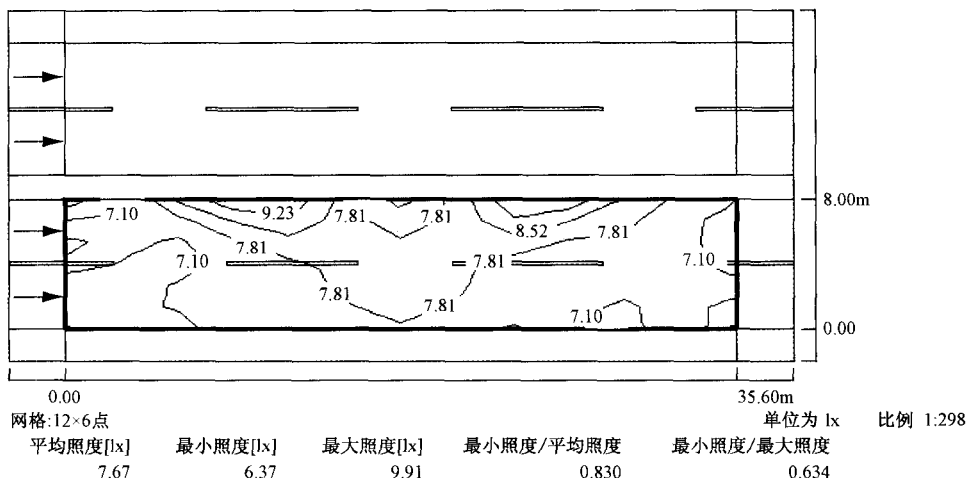


图 7 路面的等照度图

Fig. 7 Equiluminous on road surface

3 结论

本文运用偏微分方程法解决 LED 道路照明复杂的二次配光问题,充分利用光源空间和被照面间的能量映射关系,结合 Snell 定律和微分几何原理建立透镜模型的偏微分方程,基于 Lax-Wendroff 差分格式数值求解自由曲面面型,且所建透镜配光范围和尺寸可根据需要自由设定。建立的透镜模型在 Tracepro 中对 LED 照明系统仿真。结果显示,10m 远处得到的矩形照明区域,与预设范围吻合度很高,且整体均匀度优于 0.85,能量利用率高达 89.2%;在对 LED 扩展光源照明系统配光时,其被照区域和整体均匀度 (>0.80) 均未见明显减小,较基于网格法的“花生米”透镜,基于本文方法的透镜对 LED 照明系统配光时,对光源尺寸要求要宽松得多,因此,可适用性更广。用所得透镜组成的 5×10 式模组路灯系统在 DIALux 中模拟实际道路照明情形,结果显示路面的均匀度为 0.83,周边照度系数为 1,均高于《城市道路照明设计标准》要求。因此,本方案在保持偏微分方程法精度高,速度快等优势的同时,也解决了偏微分方程法的可解性问题,且降低了设计难度和复杂度,增加了结果的通用性,这对提高 LED 在道路照明上的应用水平具有现实的参考意义。

参考文献

[1] 赖伟,陈伟民,刘显明,等.自由曲面光学系统设计中

目标面照度分布的优化[J].照明工程学报,2012,22(6):82-87.

[2] 汪飞佳.LED 路灯目前存在的问题及未来的发展前景[J].照明工程学报,2012,23(4):97-99.

[3] 蒋金波,杜雪,李荣彬.LED 路灯透镜的二次光学设计介绍[J].照明工程学报,2008,19(4):59-65.

[4] 吴仍茂,屠大维,黄志华,等.LED 照明系统的光照均匀性设计[J].光学技术,2009,35(1):74-76.

[5] 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.

[6] Jacobson B A, Gengelbach R D. Lens for uniform LED illumination: an example of automated optimization using Monte Carlo ray-tracing of an LED source [C] // International Symposium on Optical Science and Technology. International Society for Optics and Photonics, 2001: 121-128.

[7] Parkyn B, Pelka D. Free-form illumination lenses designed by a pseudo-rectangular lawnmower algorithm [C] // Optics & Photonics. International Society for Optics and Photonics, 2006: 633808-633808-7.

[8] Ries H, Muschaweck J. Tailored freeform optical surfaces [J]. JOSA A, 2002, 19(3): 590-595.

[9] CJJ 45—2006 城市道路照明设计标准[S].中华人民共和国建设部,2006.

[10] 史永胜,买迪,宁磊.实现道路均匀照明的 LED 自由曲面透镜设计方法综述[J].照明工程学报,2010,21(5):73-77.

[11] 杨光.LED 道路灯具模块化的设计及应用[J].中国照明电器,2013(002):20-23.

[12] 徐长发,李红.偏微分方程数值解法[M].华中理工大学出版社,2000.