自由曲面 LED 汽车前照灯光学透镜设计方法

王 洪,陈赞吉,吴 衡,葛 鹏

(华南理工大学 理学院 广东省光电工程技术研究中心, 广东 广州 510640)

摘 要:由于 LED 配光特性不同于传统光源,为了将 LED 应用于汽车照明中需对 LED 进行二次光学设计。文中根据 LED 汽车前照灯的配光特性,提出了一种自由曲面 LED 汽车前照灯光学透镜的设计方法。首先由能量守恒原理,在接收屏上的坐标和透镜自由曲面上的坐标之间建立能量的一一对应关系,基于非成像光学理论,采用照度优化设计法,运用数值计算求解出光学透镜曲面各个点坐标的坐标值,并使用三维模型软件制作出透镜光学模型。通过蒙特卡洛模拟法来追迹光线仿真,最后的配光效果完全满足《汽车用 LED 前照灯》(GB25991-2010)标准,系统的光学效率得到显著提高,可达到 91%。

关键词:LED; 前照灯; 数值计算; 自由曲面

中图分类号:O434.19 **文献标志码**:A **文章编号**:1007-2276(2014)05-1529-06

Design method of LED headlamp freeform optical lens

Wang Hong, Chen Zanji, Wu Heng, Ge Peng

(Engineering Research Center for Optoelectronics of Guangdong Province, School of Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Different from the light distribution characteristics of the traditional light source, LED light characteristics are more complex, the second optical design for LED used in automotive lighting needs to be done. According to the light distribution characteristics of LED automobile headlamp, a freeform optical lens design method for LED headlamp was presented in this paper. By establishing one-to-one relationship between the coordinates of point on the receiving surface and the coordinates of point on the freeform surface of lens according to energy conservation principle, determining the mapping relationship between the energy and the lens, and applying the illumination optimization method, the coordinates of point on the freeform surface of lens was solved out with numerical methods based on non-imaging optics theory, then modeling software was used to establish an optical model for the freeform optical lens. Through tracing the light with Monte Carlo simulation method, the final effect of light distribution fully meets the Automotive headlamps with LED light sources and/or LED modules (GB25991-2010) standards. The simulation results show that the optical efficiency is improved greatly and can be up to 91%.

Key words: light emitting diode; headlamps; numerical calculation; freeform surface

---

收稿日期:2013-09-10; **修订日期**:2013-10-22

基金项目:广东省重大科技专项计划(2009A080301013,2010A080402009);广东省战略性新型产业专项资金 LED 产业项目(2011A081301004,2012A080302003,2012A080304015);广州市重大科技专项计划(2010U1- D00221, 2011Y5-00006)

作者简介:王洪(1964-),男,教授,博士生导师,主要从事光学系统设计,微纳光电材料与器件,光通信网络与器件方面的研究。Email: phhwang@scut.edu.cn

0 引 言

汽车前照灯系统主要用于夜晚或恶劣环境下的道路照明，对汽车的行驶安全至关重要。夜间行车时,前照灯不仅要照亮前方道路,为驾驶员提供一个明亮开阔的视野，还要避免给迎面来车的驾驶员造成眩光[1]。因此,一种性能良好的前照灯系统对减少夜间交通事故的发生和促进行车安全具有十分积极的作用。

与传统的前照灯光源相比,发光二极管(LED)具有寿命长、体积小、响应快、耗电量低、色温更接近自然光、抗震能力强和高效节能等优点[2]。近年来,随着半导体材料及封装工艺的发展，大功率白光 LED 的光通量得到了快速提高,使 LED 在汽车照明领域的应用也在逐渐扩大，从信号指示灯到现在的汽车前照灯,这反映了 LED 将会成为汽车照明领域的新型光源主流的发展趋势[1,3-5]。

LED 芯片的发光模型为朗伯体,其发光特性与传统光源不同，另外根据国家汽车行业相应标准，对汽车前照灯的光斑也有特别的要求，导致 LED 汽车前照灯的光学设计与以往的光源光学系统设计不同[2,6]。文中从最新出台的《汽车用 LED 前照灯》(GB25991-2010)国家标准出发,在分析 LED 前照灯设计方法的基础上,提出了 LED 汽车透镜的设计方法,该设计方法是基于数值计算的。在透镜的设计和计算过程中,先能量守恒定理,将 LED 芯片的发光立体角和照明面上的照明区域进行划分，从而在照明面和透镜的自由曲面间建立起了对应关系，再基于非成像光学理论，通过数值计算求解出自由曲面光学透镜的实体模型，最后建立光学系统进行光学仿真并对仿真结果进行分析。

1 设计原理

LED 汽车前照灯主要包括近光灯和远光灯。国家标准要求近光灯不会使道路上其他车辆的驾驶者产生炫目的感觉,它要求有良好的明暗截止线,同时能提供良好的路面照明；远光灯是指当车辆前方无其他道路使用者时,所使用的远距离照明光束。近光灯主要用于城市街道或乡间小道的照明，远光灯主要用于野外或高速公路照明[1,3-5]。

1.1 近光灯自由曲面透镜设计

如图 1 所示，在近光灯透镜的设计中，将 LED 芯片出射的光分成三束，一束光在面 1 发生折射后出射到目标面；另一束光在面 2 发生折射和在出射平面发生折射后出射到目标面；还有一束光在面 3 发生反射和在入、出射平面发生两次折射后出射到接收屏。通过这三个自由曲面的作用,将 LED 芯片发出的光合理地分配到接收屏上，从而达到国家汽车照明标准规定的光斑分布。

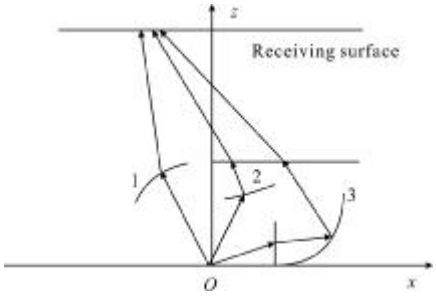

图 1 近光灯透镜配光示意图

Fig.1 Light distribution schematic diagram of low-beam lens

1.1.1 光源立体角均匀划分

相对于整个光学系统 LED 体积是很小的，建立光学模型的时候可以把 LED 设成点光源,该发光模型为半球型发光,近似为朗伯余弦体,光强分布可描述如下：

$$I(\varphi)=I_0\cdot\cos\varphi \tag{1}$$

光学系统坐标系如图 2 所示，其中以 LED 的位置为光学系统坐标的原点,LED 中心光强的方向为

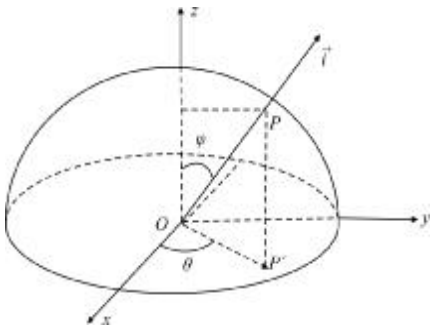

图 2 LED 光源空间坐标图

Fig.2 LED lighting source space coordinate

Z 轴的正方向,φ 是 **Z** 轴与 LED 发出的光线的夹角,θ 为 **X** 轴与出射光投射在 **XOY** 面的夹角。因此，对于任意的由 $\theta_1,\theta_2,\varphi_1,\varphi_2$ 所决定的立体角内能量,有：

$$E=\int_{\theta_1}^{\theta_2}\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} I_\theta\cdot\cos\varphi\cdot\sin\varphi\cdot d\varphi d\theta \qquad (2)$$

考虑到具体设计,θ 的取值范围为 0~π,φ 的取值范围为 0~π/2。

然后对 LED 发光立体角进行划分, 在 φ 方向按角度 λ 等分成 i 份,对于每一个 φ,都在 θ 方向按角度λ等分成 j 份,形成一系列环带区域,这样就得到了 $\varphi(i)$和 $\theta(i,j)$的数组[3-4]。

1.1.2 接收屏上能量分配

文中根据国家标准(GB25991-2010)来进行光学系统的设计。这里把该标准的要求简化为图 3 所示(以车辆右行标准为例):

(1) ZONE Ⅰ的配光要求是照明宽度要广阔和照度要均匀,主要是用于照明近距离的路面。

(2) ZONE Ⅲ的配光要求是照度要较小,具有左边水平右边向上 15°的截至线。

(3) ZONE Ⅳ的配光要求是照度要较大,主要是用于照明远距离的路面[5,7]。

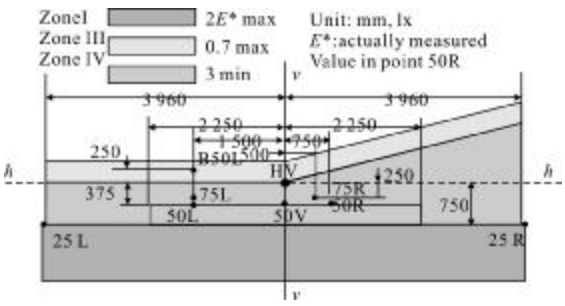

图 3 简化的汽车前照灯近光配光要求

Fig.3 Simplified standard of automotive headlamp low-beam light distribution

根据图 3 的光型特征, 对应于光源立体角的环带划分方式, 接收屏的直角坐标也相应地划分为椭圆形环带区域,如图 4 所示,分别将椭圆的长轴 **a**、短轴 **b** 在 **x**、**y** 方向上分成 i 份,$\mathbf{a}_i$ 和 $\mathbf{b}_i$ 分别表示长轴 **a** 的第 i 份和短轴 **b** 的第 i 份,分别以 $\mathbf{a}_i$ 为长轴、$\mathbf{b}_i$ 为短轴作椭圆,形成的椭圆可以表示为:

$$\begin{cases}\mathbf{x}=\mathbf{a}_i\cdot\cos\alpha\\ \mathbf{y}=\mathbf{b}_i\cdot\sin\alpha\end{cases} \qquad (3)$$

式中:α 的取值范围为 $0\sim\pi+\frac{15}{180}\pi$。

在目标面的坐标系中,对应每份 i,将 α 分成 j 份,从而得到与 LED 发光角中 $\varphi(i)$和 $\theta(i,j)$数组一一对应的 $\mathbf{x}(i,j)$和 $\mathbf{y}(i,j)$数组[2-3,7]。

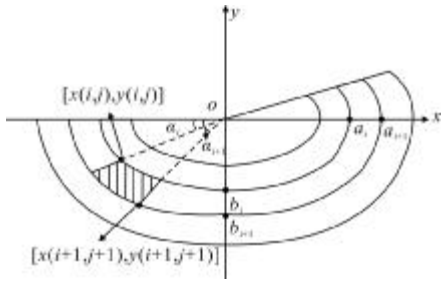

图 4 接收屏平面坐标图

Fig.4 Flat coordinates of receiving surface

图 1 中的面 1、2 是用来形成截止线, 对应图 4 中目标面的划分; 而图 1 中面 3 是用来对截止线下方形成照明,对应于图 4 中 $\mathbf{a}_i=\mathbf{b}_i$ 时,α 的取值范围为 0~π。

1.1.3 透镜轮廓计算

设 LED 芯片的光通量为 **Q**,且为朗伯体光源,利用能量守恒定律,可以得到:

$$\mathbf{Q}=\int I(\varphi)d\Omega=2\pi\int_0^{\varphi_{max}} I_\theta\cdot\sin\varphi\cdot\cos\varphi\cdot d\varphi \qquad (4)$$

对每一份 φ 角内的每一份角 θ 内光源的光通量进行计算,可得到该立体角内光通量为:

$$\mathbf{E}_{total}=\int_{\theta(i,j)}^{\theta(i,j+1)}\int_{\varphi(i)}^{\varphi(i+1)} I_\theta\cdot\cos\varphi\cdot\sin\varphi\cdot d\varphi d\theta \qquad (5)$$

由公式(4)和(5)可以得出中心光强为 I_θ 和光源每一小份立体角内的能量值大小。

对于自由曲面 1、2,光源每一小份立体角内所对应在接收屏上的网格区域总能量为:

$$\mathbf{E}_i=\mathbf{E}_c\int_{\alpha_j}^{\alpha_{j+1}}\frac{1}{2}[(\mathbf{a}_{i+1}^2-\mathbf{a}_i^2)\cos^2\alpha+(\mathbf{b}_{i+1}^2-\mathbf{b}_i^2)\sin^2\alpha]d\alpha \qquad (6)$$

式中:$\mathbf{E}_c$ 为照度值。由于接收屏上不同区域的照度值不完全相同,故预设置照度 **E**,照度控制因子 ξ,对于不同区域有

$$\mathbf{E}_c=\mathbf{E}\cdot\xi(\mathbf{k}) \quad \mathbf{k}=1,2,3,4 \qquad (7)$$

$\xi(\mathbf{k})$在大于 0 区间内取值,且 **k** 的取值与 Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ 区域一一对应[7-8]。

对于自由曲面 3,每一小份立体角内所对应在接收屏上的网格区域总能量为:

$$\mathbf{E}_r=\mathbf{E}_c[\mathbf{S}(i+1,j+1)-\mathbf{S}(i,j+1)+\mathbf{S}(i+1,j)-\mathbf{S}(i,j)] \qquad (8)$$

式中:$\mathbf{S}(i,j)$长短轴分别为 $\mathbf{a}_i$ 和 $\mathbf{b}_i$ 角度范围为 $0\sim\alpha_j$ 的部分椭圆区域面积,设计时假设从 LED 芯片发出的

光全部出射到接收屏上,由能量守恒定律,则接收屏上的环带区域与 LED 芯片发光立体角间的关系为:

$$\mathbf{E}_{total}=2\mathbf{E}_{l}+\mathbf{E}_{r} \tag{9}$$

光线通过透镜各个面时发生了折射和反射,该折反定律的矢量形式可表示为:

$$\sqrt{1+\mathbf{n}^{2}-2\cdot\mathbf{n}\cdot(\overrightarrow{\mathbf{Out}}\cdot\overrightarrow{\mathbf{In}})}\cdot\vec{\mathbf{N}}=\overrightarrow{\mathbf{Out}}-\mathbf{n}\cdot\overrightarrow{\mathbf{In}} \tag{10}$$

其中,$\mathbf{n}$ 为透镜折射率,$\mathbf{n}$ 的具体值由透镜材料决定,光线经过自由曲面 3 时发生全反射,这种情况 $\mathbf{n}$ 取值为 1,$\vec{\mathbf{N}}$为单位法向量,$\overrightarrow{\mathbf{In}}$为入射光线单位向量,$\overrightarrow{\mathbf{Out}}$为出射光线单位向量[9-10]。

计算过程为:先对每个面确定相应的计算初始点,再以各个初始点各自计算出相应的边界曲线,最后自由曲面上的点就可通过以边界曲线上的点为初始点计算得出。

计算方法:由 1.1.1 中划分好所确定的 $\varphi(i)$和 $\theta(i,j)$值可以求出入射光线的单位向量,将公式(5)、(6)和(8)代入到公式(9)中,通过确定的 $\varphi(i)$和 $\theta(i,j)$可以迭代求出对应的 $\mathbf{a}_i$、$\mathbf{b}_i$ 和 α_j,进而通过公式(3)计算得出 $\mathbf{x}(i,j)$和$\mathbf{y}(i,j)$,即得到了接收屏上与出射光线对应的坐标序列,出射光的向量就可由接收屏的坐标和初始点的坐标来确定,初始点的法向量可通过初始点坐标和该位置出射光的向量来确定,进一步可确定此位置的切平面,由该切平面与下一点的入射光相交从而确定下一点。类似地,利用计算机循环计算可得全部点的坐标值[3]。

1.2 远光灯自由曲面透镜设计

此处还是采用 1.1 中的原理,设计出两条边界曲线,将边界曲线分别绕中心轴旋转一周,形成对应的自由曲面 2、3,从光源发出的光线经过透镜配光后可在接收屏上产生一个圆形光斑。

2 模型构建及其仿真

把第 1 章中的计算结果导入到三维模型软件中,对曲线进行拟合放样获得曲面,旋转至获得实体。图 5 所示的是拟合后的近光灯透镜实体。

设定汽车前照灯距离地面的高度为 0.8 m,其光学系统平面与地面平行,然后使用光学仿真软件对近光灯 LED 透镜模组进行光线追迹。在距离前照灯前 25 m 的垂直平面接收屏上进行光线仿真的追迹,然后利用追迹的结果,调试公式(7)中的照度值和照度控制

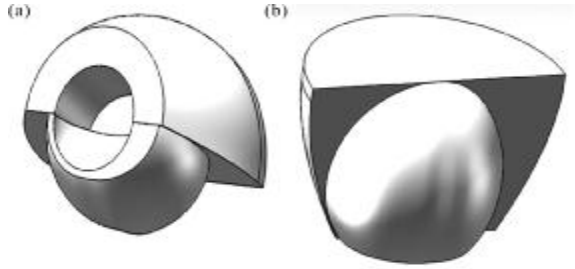

图 5 LED 近光灯透镜实体

Fig.5 LED low-beam lens entity

因子,形成理想的照度分布结果。图 6 是经过多次调整后近光灯在接收屏上得到的仿真追迹结果。

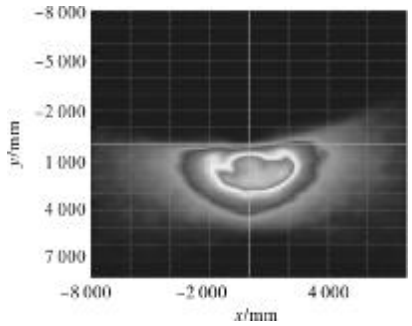

图 6 近光透镜配光照度图

Fig.6 Illumination distribution of low-beam lens

在配光屏上划分网格,统计到达每一单元中的光线数,将网格内所有光线所携带的光通量相加除以网格单元面积作为该网格的照度值。各测试点、区域的照度值如表1 所示。

表 1 近光的配光要求及模拟结果

Tab.1 Stardard and result of low-beam light distribution

Tested points or areas	Required illumination/lx	Simulated results /lx
HV	≤0.7	0.175 2
25R	≥2	12.814
25L	≥2	8.637
50R	≥12	37.94
50L	≤15	11.36
50V	≥6	28.356
B50L	≤0.4	0.131 7
75R	≥12	25.73
75L	≤12	10.53
Any point in ZONE Ⅰ	≤2E*	≤75.87
Any point in ZONE Ⅲ	≤0.7	≤0.25
Any point in ZONE Ⅳ	≥3	≥10.64

利用蒙特卡罗方法对近光灯光学系统进行光线追迹,所使用的 LED 芯片光通量为 300 lm。从照度分布图可以得到:光能主要分布在设定的照明区域内,该区域内接收到的有效光通量为 273.25 lm,系统的光效大于 90%,目标面上有形成截止线,各测试点、区域的照度值在国标范围内,适应国家标准 GB25991-2010 对近光灯的配光要求。

图 7 所示的是远光灯透镜实体。通过光线追迹,根据接收屏上的仿真结果,反复调整公式(7)中照度值和照度控制因子 ξ,图 8 是多次调整后远光灯在接收屏上得到的仿真测量结果。

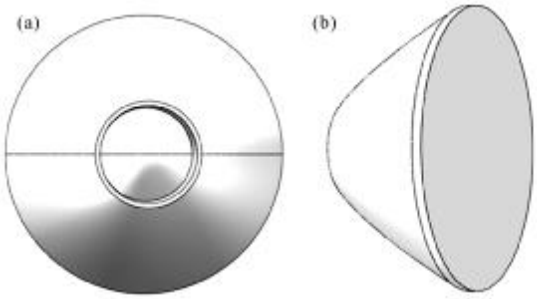

图 7 LED 远光灯透镜实体

Fig.7 LED high-beam lens entity

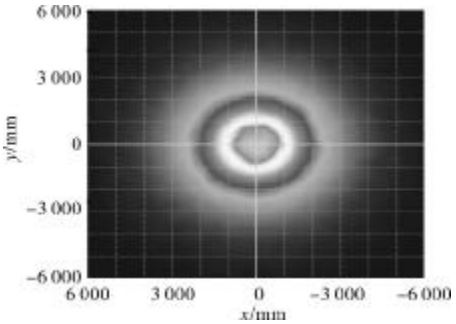

图 8 远光透镜配光照度图

Fig.8 Illumination distribution of high-beam lens

对远光灯进行光线追迹时使用的 LED 总光通量设为 800 lm,从照度分布图可以得到:LED 辐射出的光基本上被出射到半径为 4 m 的圆形照明区域中,该区域内接收到的有效光通量为 737.69 lm,系统的光效大于 90%,配光屏上各测试点和各测试区域的照度值如表 2 所示。

由表 2 可知各测试点、区域的照度值在国标范围内,适应国家标准 GB25991-2010 对远光灯的配光要求。

表2 远光的配光要求及模拟结果

Tab.2 Stardard and result high-beam light distribution

Tested points or areas	Required illumination /lx	Simulated results /lx
E_{max}	≥48 and ≤240	66.808
HV	≥0.80E_{max}	61.542
HV to 1 125L/R	≥24	52.38
HV to 2 250L/R	≥6	37.49

3 结　论

文中根据国家标准 GB25991-2010 的配光要求,以数值计算为基础,采用程序化设计构建自由曲面,设计出了 LED 汽车前照灯远、近光灯透镜,并对其进行了光线追迹仿真,仿真结果完全满足国标的配光要求。与常规前照灯相比,不仅在光源利用效率上大于 90%,并有效防止眩目,达到行车安全的目的。文中设计流程简单,且容易形成预定光型、截止线和照度分布,但是由于设计时涉及控制参数的调整、自由曲面的准确拟合等问题,整个透镜光学系统还有待进一步的优化改进。

参考文献:

[1] Wang Hong, Wang Lijun, Ye Feifei, et al. Design method of LED headlight low-beam freeform lens based on projector system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 40(9): 2463-2467. (in Chinese)
王洪, 王丽君, 叶菲菲, 等. 投射式 LED 汽车近光灯自由曲面透镜设计 [J]. 红外与激光工程, 2012, 40 (9): 2463-2467.

[2] Tetsuaki Inaba, Sbinya Watanabe, Yuji Yamada. LED headlamp development for mass production [C]//SAE, 2008-01-0339.

[3] Wang Hong, Zhang Xiaofan, Wang Haihong, et al. Design for optical freeform reflector of LED streetlight [J]. Infrared and Laser Engineering, 2010, 39(4): 728-731. (in Chinese)
王洪, 张小凡, 王海宏, 等. 自由曲面 LED 路灯反射器设计 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 728-731.

[4] Wang Lin, Qian Keyuan, Luo Yi. Nover LED navigation lamp design [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34 (12): 124-128. (in Chinese)
王霖, 钱可元, 罗毅. 新型 LED 航标灯光学系统 [J]. 光电

工程, 2007, 34(12): 124-128.

[5] Zhu Xiaodong. Research on application of high-power white LED to automobile headlamps [D]. Hubei: Wuhan University of Technology, 2007. (in Chinese)
朱晓东. 大功率白光 LED 在汽车前照灯设计中的应用研究[D]. 湖北: 武汉理工大学, 2007.

[6] Stephanie Specht. Cut-off generation for LED-headlamps[C]//Darmstadt University Technology, International Symposium on Automotive LightingGermany: Darmstadt University of Technology Laboratory of Lighting Technology, 2007: 105-109.

[7] Fei Chen, Kai Wang, Zong Qin. Design method of high-efficient LED headlamp lens [J]. Optics Express, 2010, 18(20): 20926-20938.

[8] Luo Yi, Feng Zexin, Han Yanjun, 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.

[9] Ding Yi, Liu Xu, Zheng Zhenrong, et al. Freeform LED lens for uniform illumination [J]. Optics Express, 2008, 16(17): 12958-12966.

[10] Wang Hong, Wang Haihong, Du Naifeng, et al. Study on optical design methods for LED extended sources[C]//SPIE, 2010, 7655: 765536.