

## LED 交通信号灯光学设计

刘晓东<sup>1</sup>, 李湘宁<sup>1,2,3</sup>, 孙 惠<sup>1</sup>

- (1. 上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093;
2. 上海市现代光学系统重点实验室, 上海 200093;
3. 教育部光学仪器与系统工程研究中心, 上海 200093)

**摘 要:** 设计了一款在规定角度范围内光强均匀分布且直观无明显的颗粒感的 LED 交通信号灯。将高亮度 LED 的出射光用菲涅耳透镜进行准直, 利用斯涅尔定律, 设计了枕型透镜来实现指定方向上的照明, 并将之排成阵列, 以获得一定角度范围内的光强均匀分布。利用 ZEMAX 光学设计软件对设计方案进行了模拟, 分别给出了水平和竖直两个方向上角度光强均匀分布的结果。通过仿真肉眼对信号灯的成像, 呈现人眼的观察效果, 结果表明该设计满足设计要求。

**关键词:** LED 交通信号灯; 光学设计; ZEMAX

**中图分类号:** O439   **文献标志码:** A   **文章编号:** 1007-2276(2014)03-0867-04

## Optical design for an LED traffic signal light

Liu Xiaodong<sup>1</sup>, Li Xiangning<sup>1,2,3</sup>, Sun Hui<sup>1</sup>

- (1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Key Lab of Modern Optical System, Shanghai 200093, China;
3. Research Center of Optical Instruments and System Engineering, Ministry of Education, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** An LED traffic signal light without obvious granular sensation was designed, which had a uniform distribution of luminous intensity in a certain angle range. The emergent rays of the highlighted LED were collimated by a Fresnel lens. A pillow lens was designed and arrayed to achieve the specified direction lighting and a uniform distribution of luminous intensity in a certain angle range by using the Snell's Law. The design was simulated by using the optical design software ZEMAX and the results that the luminous intensity was distributed uniformly were given in both horizontal and vertical angles. The design was proved to meet the design requirement by simulating the imaging of signal light in human eyes and showing the observing effect of eyes. The applications of the design in practical engineering were analyzed in the article.

**Key words:** LED traffic signal light; optical design; ZEMAX

收稿日期: 2013-07-11; 修订日期: 2013-08-20

基金项目: 上海市重点学科项目第三期项目(S30502)

作者简介: 刘晓东(1985-), 男, 硕士, 主要从事应用光学方面的研究。Email: liuxiaodong430@163.com

导师简介: 李湘宁(1956-), 女, 教授, 主要从事应用光学方面的研究。Email: lxning@usst.edu.cn

## 0 引言

LED 作为一种新的光源,具有耗电小、亮度高、体积小、重量轻、环保和响应速度快等优点,已经被广泛地应用于各种场合的照明、广告和指示牌中。LED 在照明应用中最令人关注的问题是如何提高光能的利用率以及光能量分布来满足特定场合的配光要求<sup>[1-2]</sup>。

目前 LED 广泛地应用于交通信号灯领域,市场上大多交通信号灯采用的是普通封装的 LED 光源,封装结构形成了对 LED 的第一重光学设计,由于缺乏针对性,封装结构对出射光的控制都比较简单和单一,不能满足照射角度的要求,光能发散,只能依靠增加 LED 光源个数来提高其亮度。

其主要不足之处是:

(1) 没有经过有针对性的二次光学设计,光束的出射角不能达到要求,且光能量的利用率不高;(2) 观察者在相对较近的距离去观察信号灯的发光表面,可以发现其发光面不均匀,存在明显的颗粒感。

为了克服 LED 交通信号灯的上述不足,必须针对其技术要求进行二次光学设计。

LED 交通信号灯二次光学设计主要涉及三个方面:一是控制 LED 的发光角度,满足道路交通信号灯的国家标准;二是提高 LED 光能利用率,使 LED 光效得到最大的发挥;三是提高 LED 交通信号灯的视觉效果,消除颗粒感。

文中介绍了 LED 交通信号灯设计的国家标准要求以及设计中使用的 LED 的特征。通过利用菲涅耳透镜进行准直<sup>[3]</sup>、枕型透镜阵列来控制光线的偏折角度的方法对 LED 交通信号灯进行二次光学设计<sup>[4-6]</sup>。利用 ZEMAX 软件对设计结果进行模拟,验证了文中设计方法的有效性,实现了最大限度地利用 LED 光能,消除了明显的颗粒感,对 LED 交通信号灯的实际应用具有一定的指导意义。

## 1 LED 交通信号灯设计要求

设计要求使用三种不同颜色(红、黄、绿)的 LED 光源完成三种颜色的 LED 交通信号灯的二次光学设计。有关交通信号灯的设计,在 GB14887-2011<sup>[7]</sup>中明确提出了光强分布的要求,在规定照射区域(水平方向角度为左右 30°之间,俯仰方向角度为 0°到向下 20°之间)内,发光强度应均匀,即在该区域内任一方向上的发光强度,不应低于该方向相邻有数值规

定方向中的最小值,且不大于规定的最大值。新型的 LED 交通信号灯还要求在视觉上没有明显颗粒感。

## 2 LED 交通信号灯设计说明

### 2.1 设计思路和方法

根据 LED 交通信号灯的设计要求,应该选用发光比较集中、高亮度的、发散角度较小、性能稳定的 LED 光源。以上述的条件为基础,经过综合考虑筛选,最终选择型号为 ML-C5030CA 的 LED 作为交通信号灯的光源。该 LED 光源的配光曲线分布如图 1 所示。

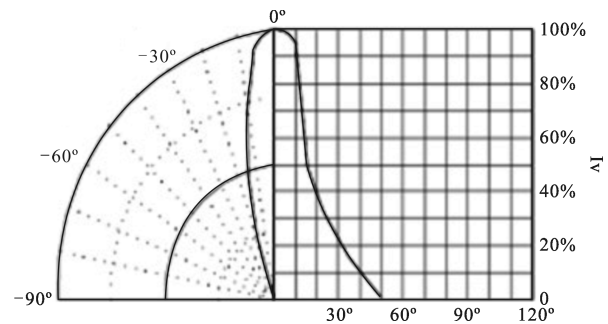


图 1 LED 光源的谱线分布图

Fig.1 Radiation characteristic of the LED

由配光曲线可以知道该 LED 发出的光以圆锥形分布,中心较强,向外逐渐减弱,发光角度基本在 30°以内,呈轴对称分布。由于 LED 灯发光在角度上呈圆锥型分布,在普通光学面罩的情况下,LED 组合的阵列显现出明显的颗粒状。

为了能够有效地消除 LED 信号灯的颗粒感,同时能够满足交通信号灯角度光强分布的要求,利用菲涅耳透镜对 LED 发光进行准直,再通过枕型透镜阵列使光线按照指定角度进行偏折。当 LED 发出的光经过菲涅耳透镜准直以后,根据光能量守恒和光扩展守恒可以知道,在菲涅耳透镜边缘处的光强会有所下降,导致菲涅耳透镜边缘区域发光不均匀,呈中间光强比较强,边缘光强比较弱的特征。为了解决这一问题可以适当地减小菲涅耳透镜的尺寸大小,同时将 LED 和菲涅耳透镜组排成蜂窝状,实现边缘光线的互补,这样可以在一定程度上消除其边缘光强较弱的现象。将准直后的光线经过枕型透镜偏折到所需要的角度,阵列分布的枕型透镜同时将每颗 LED 发出的光细分成多个小光源,当细分的小光源足够小,人眼在一定距离外观察时将不能分辨,从而实现 LED 交通信号灯的表面均匀发光,消除视觉上

的颗粒感。

图 2 为 LED 交通信号灯二次光学设计的整体结构示意图。

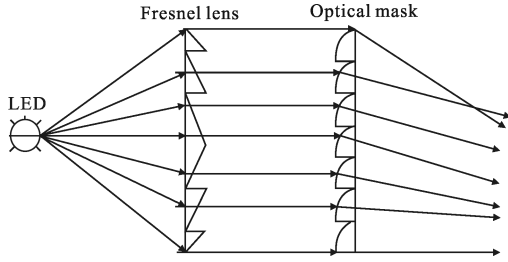


图 2 LED 交通信号灯的结构示意图  
Fig.2 Structure of the LED traffic signal light

### 2.2 结构和材料

LED 交通信号灯用枕型透镜组作为其光学面罩,考虑到光学面罩的防尘性能,将枕型透镜阵列的光滑面作为其外表面。在材料选择上,主要考虑到材料的内部应力、折射率、透光率、耐高温性、加工难易等,最终选择使用透射率较高的 PC 材料。

### 2.3 设计过程

为了使 LED 发出的光得到较好的准直效果,需要对菲涅尔透镜进行优化设计。利用 ZEMAX 软件,并结合菲涅尔透镜的统一设计方法进行设计,这里就不再赘述。在得到准直的平行光以后,需要控制光线的偏折角度,以达到设计的要求。根据设计要求,俯仰方向上光线的出射角度需在  $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$  之间,水平方向上光线的出射角度需在  $-30^{\circ}\sim 30^{\circ}$  之间。为了分别满足水平方向和俯仰方向的光线出射角度,需要分别设计这两个方向的曲面,再利用软件构造枕型透镜,最后优化以达到设计要求。如图 3 所示。

俯仰方向上建立曲线

$$x=cy^2 \tag{1}$$

式中: $c$  为曲面顶点的曲率,假设透镜的高度  $h=10\text{mm}$ ,利用斯涅耳定律:

$$n_1\sin\theta_1=n_2\sin\theta_2 \tag{2}$$

得到并利用几何关系得:

$$\sin\alpha=n\sin\beta \quad \gamma=\alpha-\beta \quad n\sin\gamma=\sin\theta \tag{3}$$

求出  $h=10\text{mm}$  处,当偏折角为  $\theta=20^{\circ}$  时的  $\alpha$ ,该点处的斜率  $k$ ,同时对曲线方程(1)进行求导,并代入斜率  $k$ ,得出  $c$ 。用同样的方法求出水平方向上曲线,通过软件放样成型,排成阵列。利用 ZEMAX 软件进行优化和仿真。

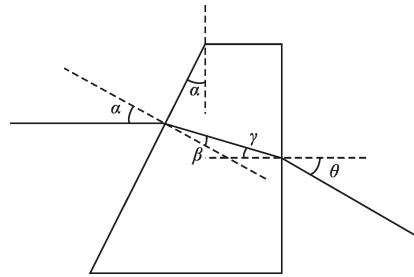


图 3 关于折射面的几何分析  
Fig.3 Geometrical analysis of the refractive surface

在对枕型透镜进行阵列时,需要确定枕型透镜单元的大小。考虑到在枕型透镜单元越小的情况下,由于枕型透镜单元边缘所产生的光线的折反射,会导致比较高的能量损失,同时也增加了机械加工的难度。当枕型透镜单元过大时,其发光表面光通量分布的均匀性也会下降。例如:在枕型透镜单元大小为  $10\text{mm}\times 10\text{mm}$  的时候,通过 ZEMAX 软件模拟发现,在  $0^{\circ}$  附近出现亮斑,不满足 GB14887-2011 中设计要求。考虑到这两种因素,并通过多组数据的对比,得出当枕型透镜单元大小为  $5\text{mm}\times 5\text{mm}$  时,效果较好。最终确定的枕型透镜单元形状和大小,以及枕型透镜阵列的形状如图 4 所示。三维效果如图 5 所示。



图 4 单个枕型透镜结构  
Fig.4 Structure of a single pillow lens

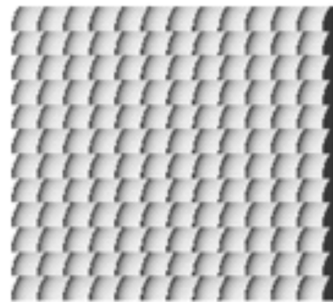


图 5 枕型透镜阵列三维效果图  
Fig.5 3-D structure of the pillow lens array

## 2.4 建立模型

在验证设计是否满足角度光通量分布要求的同时,还需要验证 LED 发光面罩的均匀性。为了能够同时有效地验证上述两个方面,建立一个由 7 个 LED 组成的正六边形作为一个交通信号灯 LED 组单元(中间一个 LED 灯,其余的 LED 分布在六边形的顶点),来模拟 LED 交通信号灯整体的发光情况。

## 2.5 模拟结果及分析

通过 ZEMAX 模拟 7 个 LED 构成蜂窝型的 LED 交通灯模型,得出的结果如图 6、图 7 所示。

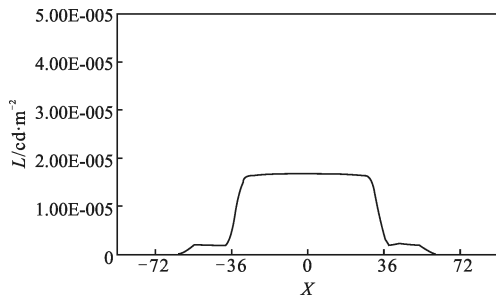


图 6 水平方向上角度光强分布

Fig.6 Luminous intensity distribution in horizontal angles

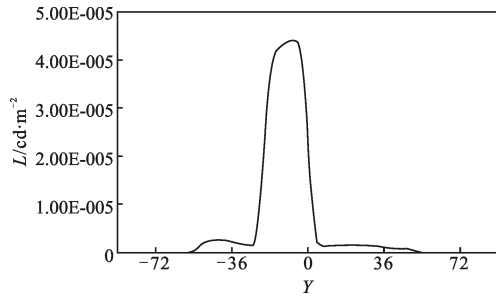


图 7 俯仰方向上角度光强分布

Fig.7 Luminous intensity distribution in vertical angles

由上面的模拟结果可以看出,在水平方向和竖直方向上角度光强均匀分布,在不考虑材料对光能量吸收的情况下,光能量利用率也可以达到 85% 以上,角度光通量分布满足国家标准的要求。

另外,在实际使用 LED 设计交通信号灯的过程中,需要根据 LED 交通信号灯要求的大小、形状,来确定 LED 单元的个数。

利用 ZEMAX 软件中的理想透镜作为模拟眼睛来分别观察不经过二次光学设计的 LED 和经过上述

交通灯模型的 LED 的发光情况,其结果如图 8 所示。

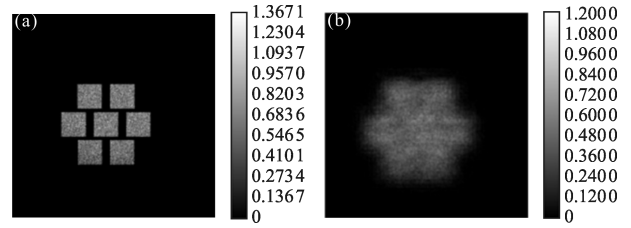


图 8 模拟眼睛观察结果

Fig.8 Simulation of eye observation

通过上图结果对比可以明显看出,经过二次光学设计的 LED 出射表面亮度分布较为均匀,无法分辨出 7 个 LED,消除了明显的颗粒感,并且计算均匀度在 80% 以上。

## 3 结论

文中利用菲涅耳透镜,并结合枕形透镜阵列,设计了一款新型 LED 交通信号灯,能够较好地利用光能量,发光角度符合设计要求,消除了视觉上的颗粒感,改善了交通信号灯的视觉效果。

## 参考文献:

- [1] Sun Shixiang. LED road lighting compared to traditional road lighting [J]. *Advanced Display*, 2010, 37(4): 37-38. (in Chinese)
- [2] Lu Qiusheng. LED lighting and its application [J]. *Lamp and Lighting*, 2009, 33(4): 24-26. (in Chinese)
- [3] Yang Li, Yin Xu, Chen Qian. Large aperture Fresnel optical lens design and manufacturing [J]. *Optical Technique*, 2001, 27(6): 499-502. (in Chinese)
- [4] Cui Zhen. Secondary optics design for LED signal lamps [J]. *Advanced Display*, 2009, 30(3): 30-32. (in Chinese)
- [5] Tu Qifei, Chen Jie, Zhou Wei. Secondary optics design for LED signal lamps [J]. *China Illuminating Engineering Journal*, 2002, 13(1): 11-14.
- [6] Li Zhimin, Zhu Xiaoqing, Wang Ran. An optical design method of LED traffic-light [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(2): 61-62. (in Chinese)
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB14887-2011, 道路交通信号灯[S], 2011.