

LED 路灯透镜的二次光学设计介绍

蒋金波 杜雪 李荣彬

(香港理工大学, 工业及系统工程学系先进光学制造中心)

摘要: LED的二次光学元件设计对LED路灯的配光及光学输出效率至关重要。良好的道路照明要求LED路灯的配光为长方形的光型, 路灯发出的所有光刚刚可以覆盖住马路, 而马路之外的光污染几乎为零。非对称自由曲面二次光学元件的采用可以使LED路灯的长方形配光直接在单个LED模组上实现。整体路灯只需要将这些LED模组阵列按照相同方向排列即可, 从而可以简化路灯机构、散热及控制电源的设计。本文介绍了LED路灯的二次光学设计, 及一种用于LED路灯的自由曲面二次光学透镜的设计方法。

关键词: LED路灯; 自由曲面; 二次光学元件; 配光; 道路照明; 散热

Optical Design of a Freeform Lens for LED Street Light

Jiang Jinbo Sandy To W. B. Lee

(Advanced Optics Manufacturing Centre, Department of Industry and Systems Engineering, The Hong Kong Polytechnic University)

Abstract

The secondary optics design is a critical issue for the output efficiency and light distribution pattern of the LED street light. A good roadway illumination requires the LED street light to have a rectangular light distribution pattern just cover the roadway and without any light pollution out of the road. The adoption of the unsymmetrical freeform optics with a rectangular light distribution on X and Y is a necessary which makes the LED street light become very simple and highly efficient. The whole LED street light can be made up if only mounts these LED modules on a PCB plate. The mechanism, thermal management, and the power control electronics of the LED street light becomes very simple. In this paper, the optical design of the LED street light and the calculation methodology of a freeform optics for the street light is put forward.

Key words: LED street light; freeform; secondary optics; light distribution; thermal management

1 背景

LED(发光二极管)技术的发展开辟了照明技术革命的新时代。由于LED具有体积小、寿命长、电光效率高、环保节能等诸多优点。使得LED路灯照明技术在最近几年得到了迅速发展。目前, 市面上单颗LED光源的实际已经可以做到每瓦100流明, 采用传统250瓦钠灯作光源的路灯, 用LED光源代替之后, 大概只需要60多颗LED就可以产生相同的亮度, 从而极大地节省了能源的消耗。

由于大部分LED光源的辐射角分布为110度至120度的郎伯(Lambertian distribution)分布, 如果没有经过配光设计, 照在地面上的光型将会为面积较大的圆型的光斑, 约50%的光散落到马路之外没有被利用起来, 而且会对远处的车辆或行人产生眩光, 与路面照明的要求不符。《城市道路照明设计标准》要求路灯的配光为长方形的光斑, 将几乎所有的光都分布在路面上^[1]。对于主干道还需要采用截光型或半截光型的配光设计, 一方面可以提高光的利用效率, 另一方面还可以避免产生眩光。

2 LED 路灯的配光设计

关于LED路灯的配光设计有很多种,最常见的有以下两种:

第1种是弧形排列的LED路灯。单个LED模组采用轴对称的全反射透镜或反光杯进行配光,透镜配光的辐射角宽度足以覆盖道路的宽度;再将LED模组排列在一个弧面上,通过调整弧面的曲率在道路方向产生一个长方形的光型分布。图1为弧形排列的一个LED路灯的设计,路灯采用了60颗高功率OSRAM朗伯分布的Golden Dragon LED,单颗LED

的输出光通量为每瓦80流明。透镜设计采用轴对称的透射——全反射组合结构,如图2所示。透镜中间部分为一平凸非球面透镜。平凸非球面透镜将从LED出射的与光轴夹角 $\pm 64^\circ$ 内的光均匀分布在 $\pm 30^\circ$ 范围之内。剩余 $64^\circ \sim 90^\circ$ 部分的光透过透镜内部侧面的柱面之后,由外边倾斜的曲面进行全反射,这部分的反射光再经过上表面的锥面透射后也形成 $\pm 30^\circ$ 范围内的分布。透镜的透射部分和全反射部分的光束经叠加后,最后形成一个 $\pm 30^\circ$ 范围内比较均匀的光束分布(均匀度大于60%)。透镜的光线追迹和光强的远场角度分布见图3,光强的远场角度分布为蝴蝶形。

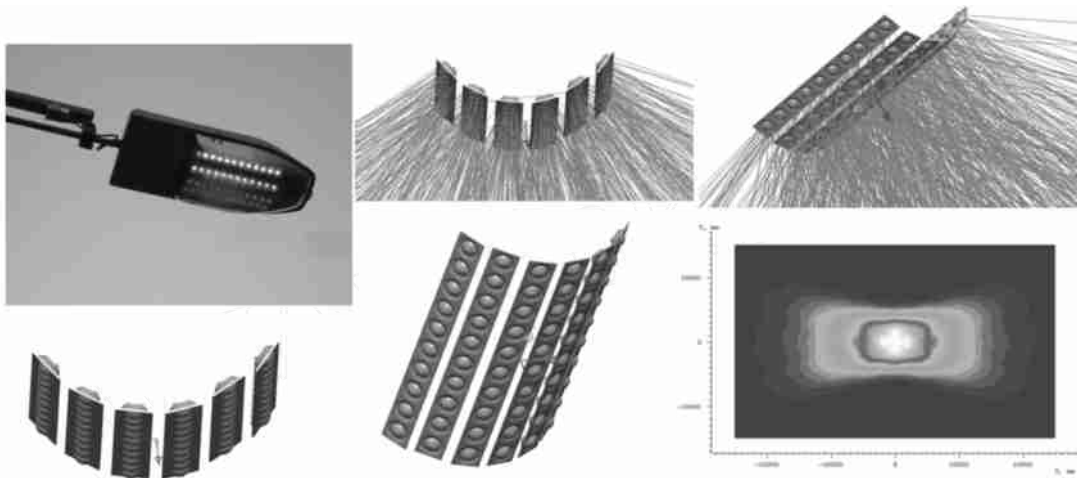


图1 采用弧形排列的LED路灯实物及设计方案

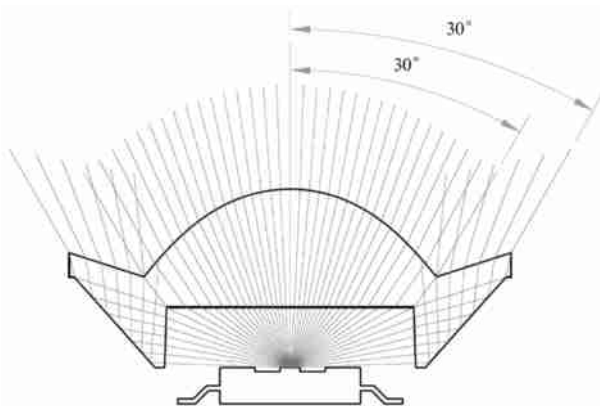


图2 发散角为60°的LED全反射透镜的设计

LED路灯的构成方法为将LED透镜模组排列在一个弧面上,通过调整弧面的曲率,使灯头在弧面方向形成 $\pm 60^\circ$ 左右的配光,于是灯头安装在10米高的时候可以在路面上产生约长度约35米,覆盖

2.5个车道宽度约为10米的方形的光型。

这种LED路灯的二次光学元件(透镜或反光杯)的设计和加工较为简单,引入全反射透镜可以最大可能地提高光的利用效率,理论计算的效率超过98%。但由于透镜材料本身的透射率约为92%,实际注塑出来的透镜效率约90%。透镜需要产生一定的角度分布以便在要求的高度位置覆盖住所需的道路宽度,而道路方向的配光则通过LED排列的弧面来调整。弧形排列的LED路灯比较美观,不利因素是弧形的排列使高功率LED的散热板设计和灯头的结构设计较为麻烦。

第2种是平面排列的LED路灯。LED路灯的设计采用了XY方向非对称的长方形配光的自由曲面光学元件(透镜或反光杯),长方形的配光直接在单个LED光学元件上完成,整体路灯只需将具有长方形配光的LED模组简单的排列在一个平板上即可,

这种 LED 路灯在机械结构、散热及电源控制方面比较简单，不同等级公路和不同灯杆高度的道路照明只需要增加不同数量的 LED 模组即可。由于配光为长方形非对称的分布，简单轴对称的全反射透镜无

法实现，需要采用非对称自由曲面的透镜，透镜的设计和加工工艺比较复杂。这里将重点介绍这种自由曲面透镜的设计。

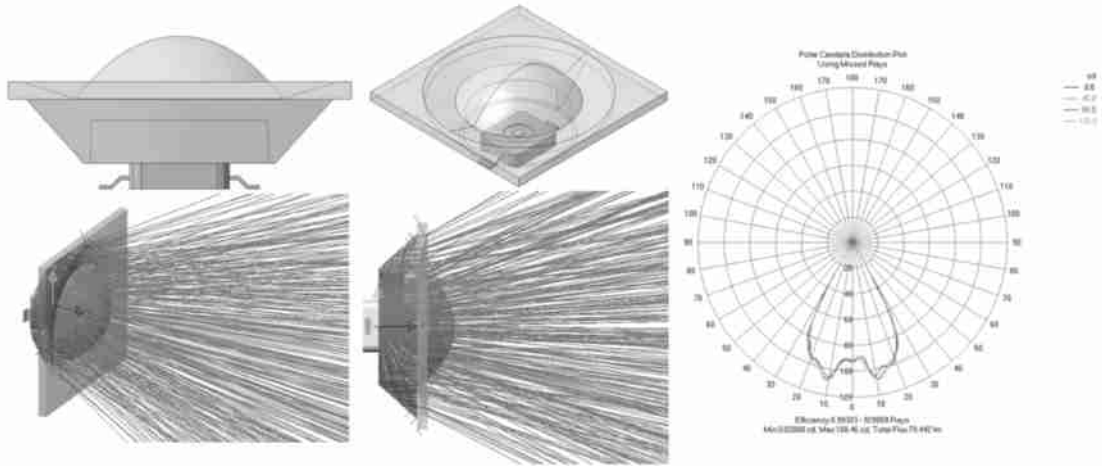


图 3 单个 LED 模组的光度分析

由于一般的光学软件（如 Zemax, CodeV 等）针对自由曲面的优化设计方法不够成熟，设计一个非对称的自由曲面需要花很多的时间用手工不断反复的调整和设置操作参数，一个比较复杂的自由曲面往往需要多达一个月甚至几个月的时间，有时所优

化出来的曲面，光学效率还不够理想。这里采用了边缘光线扩展度（Etendue）守恒的原理创建了一套自由曲面控制网格的节点矢量的精确计算方法，可以在较短时间内（一般为几个小时甚至更短）优化出具有最优效率及精确配光的自由曲面光学元件。

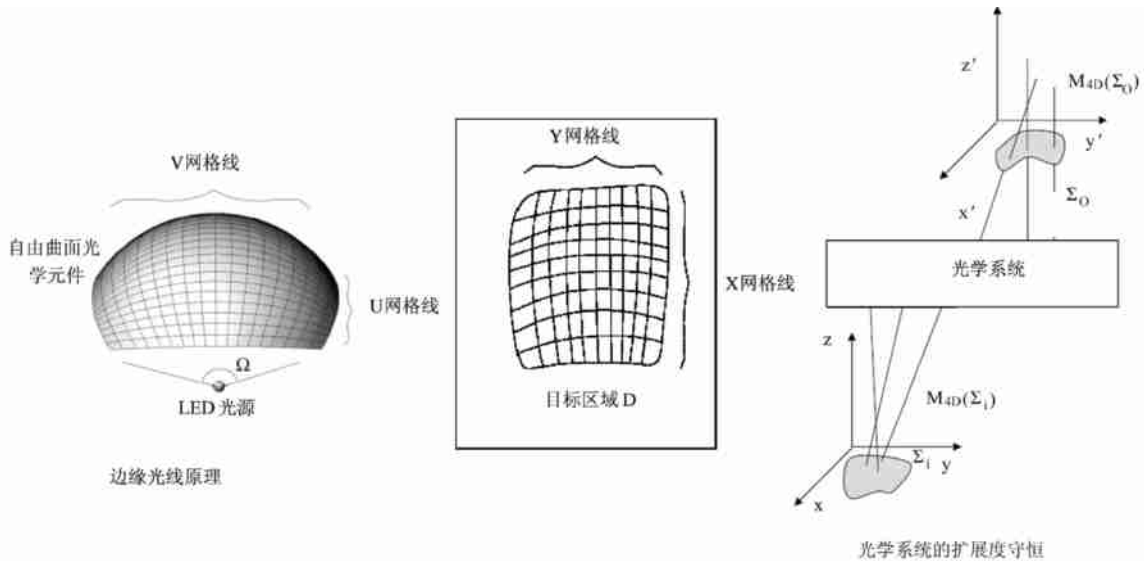


图 4 边缘光线的扩展度守恒

边缘光线的扩展度守恒原理如图 4 所示，它结合了边缘光线原理^[2]及光源的扩展度守恒（Etendue Conservation）^[3]。光源经过光学系统到达目标是个数学映射的关系。通过自由曲面的边缘的那部分光线，

经过映射后，也对应于目标的边缘，自由曲面中间连续的部分，经过映射后，也在目标中间形成连续的分布。如果光学系统没有损耗，那光学系统的光源及目标的扩展度是守恒的。扩展度为光源或目标

的面积与光线发散角所形成的立体角的乘积。根据这一原理，可将目标及自由曲面分割成等量的网格(如图 4 中的 V&U 网格及 Y&X 网格)，目标的网格节点与自由曲面的网格节点形成一一对应，再根据目标节点的位置及法矢量，就可以对应地精确计算出图 5 所示的自由曲面的控制网格的节点法矢量，从而生成所需要的自由曲面。边缘光线的扩展度守恒原理可以由以下式子来表示：

$$E = n^2 \iint A \cos \theta \, d\Omega$$

$$E = n^2 A_{O \text{ proj}} = n^2 A_o \sin^2 \theta_{1/2}$$

$$E \left[M_{4D} \left(\begin{matrix} o \\ j \end{matrix} \right) \right] = E \left[M_{4D} \left(\begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \right) \right]$$

$$= n^2 \iint A \cos \theta \, d\Omega$$

$$= \int_{M_{4D}(R)} dx dy dz + dx dz dp dr + dy dz dp dr (1)$$

式中 E —— 光束扩展度；
 θ —— 立体角；

$E \left[M_{4D} \left(\begin{matrix} o \\ j \end{matrix} \right) \right]$ —— 输出光束的扩展度；
 $E \left[M_{4D} \left(\begin{matrix} i \\ j \end{matrix} \right) \right]$ —— 输入光束的扩展度。

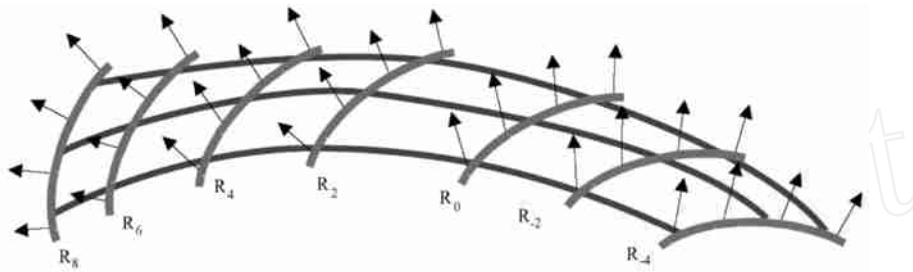


图 5 自由曲面上筋和肋的节点法线矢量

这种设计方法被用来设计 LED 路灯的自由曲面透镜，路灯安装高度为 12 米，路灯间隔 40 米，路面宽 12 米 (3 个车道)，即路灯需要在路面上产生 40 米长、12 米宽的方形光斑。根据这个要求，需要

设计在 X 方向产生 $\pm 60^\circ$ 内均匀分布的配光，在 Y 方向产生 $\pm 30^\circ$ 内均匀分布的配光的方形光斑的自由曲面透镜。图 6 为用边缘光线扩展度守恒方法设计的自由曲面透镜。

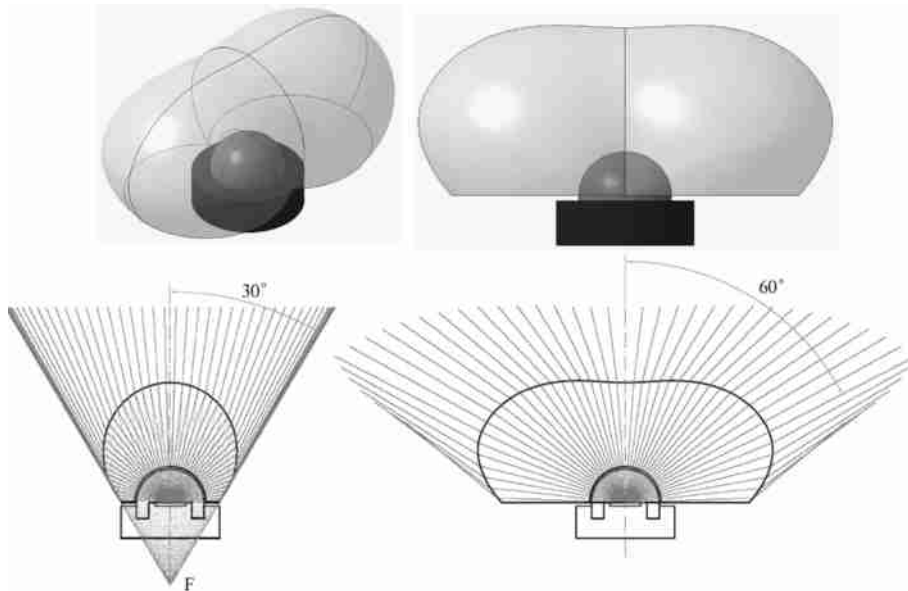


图 6 透镜形状及配光原理

透镜的控制网格的节点法线，跟据边缘光线扩展度守恒原理，以及斯涅尔（Snell）折射定律，有以下公式（2）的关系，式中 N 为法线矢量， A 为入射光线矢量， A' 为出射光线矢量。

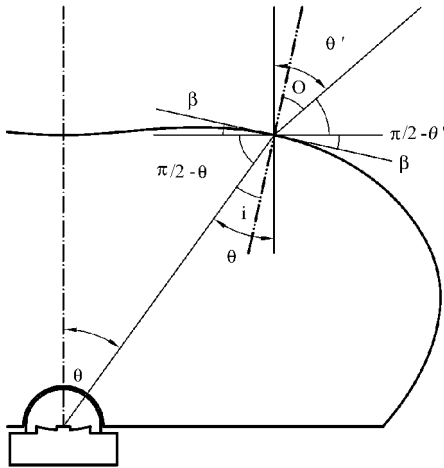


图 7 透镜控制网格的法线及入射出射光线

$$\begin{cases} N_x = \frac{A_x - B_x}{\sqrt{2} \sqrt{|\mathbf{A}| - \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}}} \\ N_y = \frac{A_y - B_y}{\sqrt{2} \sqrt{|\mathbf{A}| - \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}}} \\ N_z = \frac{A_z - B_z}{\sqrt{2} \sqrt{|\mathbf{A}| - \mathbf{A} \cdot \mathbf{A}}} \\ |\mathbf{A}|^2 = A_x^2 + A_y^2 + A_z^2 \end{cases}$$

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{A} = A_x B_x + A_y B_y + A_z B_z \quad (2)$$

将透镜曲面和目标光斑分成等量的网格，根据入射光线及出射光线的 Snell 方程，将网格的节点矢量一一对应，整个曲面的控制网格由计算机迭代法算出，最后将控制网格蒙上蒙皮形成曲面再填充后形成透镜实体。整体路灯的光效模拟由光线追迹软件 LightTools 进行光线追迹，如图 8 所示。模拟结果如图 9 至图 11 所示，当路灯高度为 12 米的时候，路灯在 40 米 × 12 米的路面上可以产生非常均匀的配光。路灯的远场角度分布为蝙蝠翼形，辐射强度 X 方向的峰值光强的一半约为 ±60°，辐射强度 Y 方向的峰值光强的一半约为 ±30°。路灯的光型如图 11 所示，实物照片如图 12 所示，路灯光形测试结果通过国家城市道路照明设计标准 CJJ 45—2006。

$$\mathbf{N} = N_x \mathbf{i} + N_y \mathbf{j} + N_z \mathbf{k};$$

$$\mathbf{A} = A_x \mathbf{i} + A_y \mathbf{j} + A_z \mathbf{k}; \mathbf{A}' = B_x \mathbf{i} + B_y \mathbf{j} + B_z \mathbf{k};$$

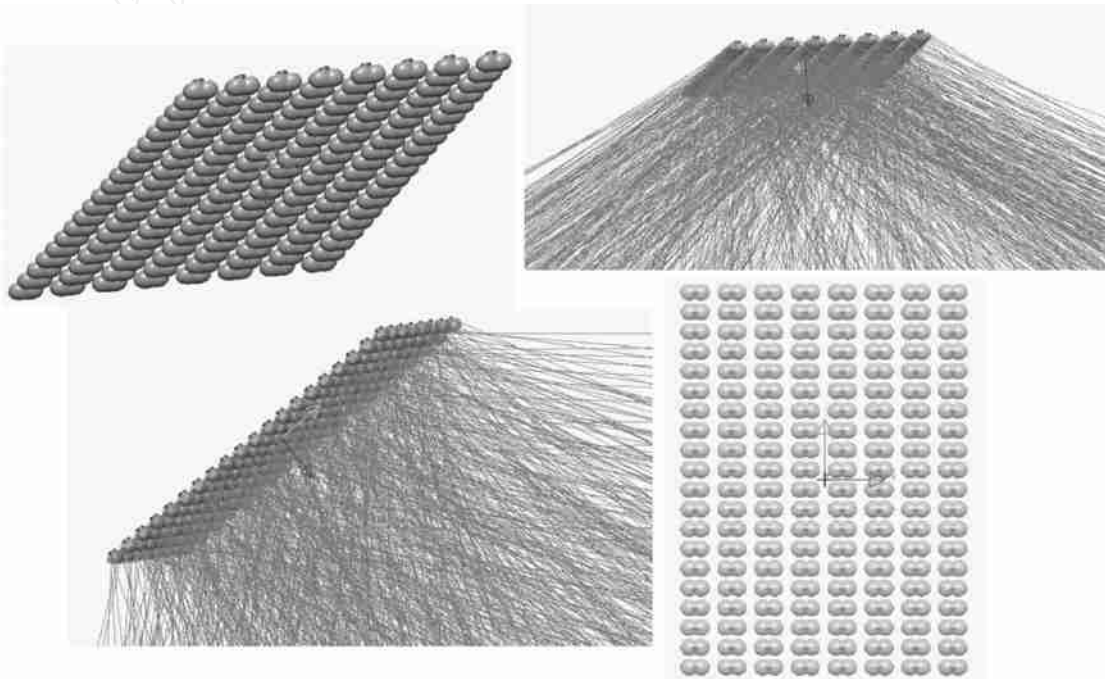


图 8 自由曲面透镜 LED 路灯的光线追迹

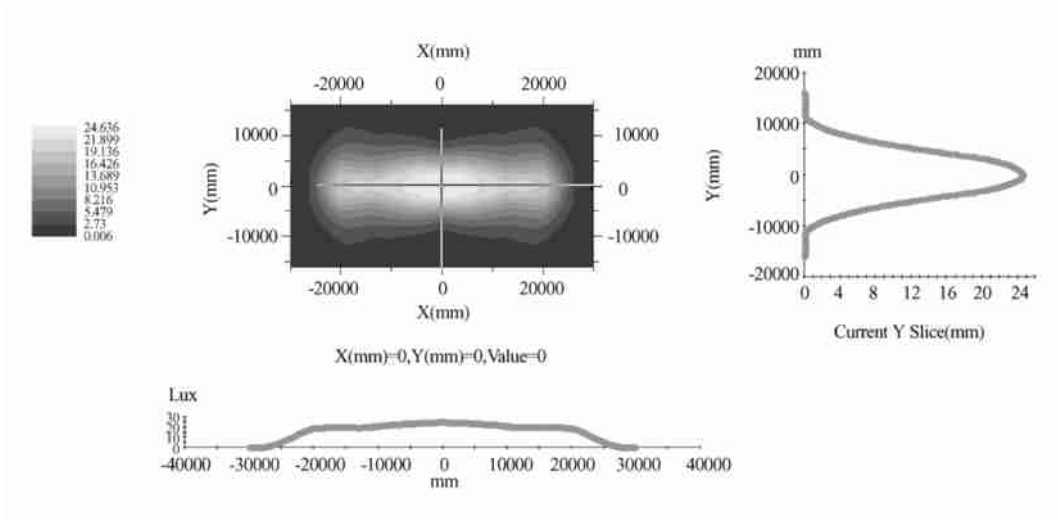


图9 12 米远处的照度分布

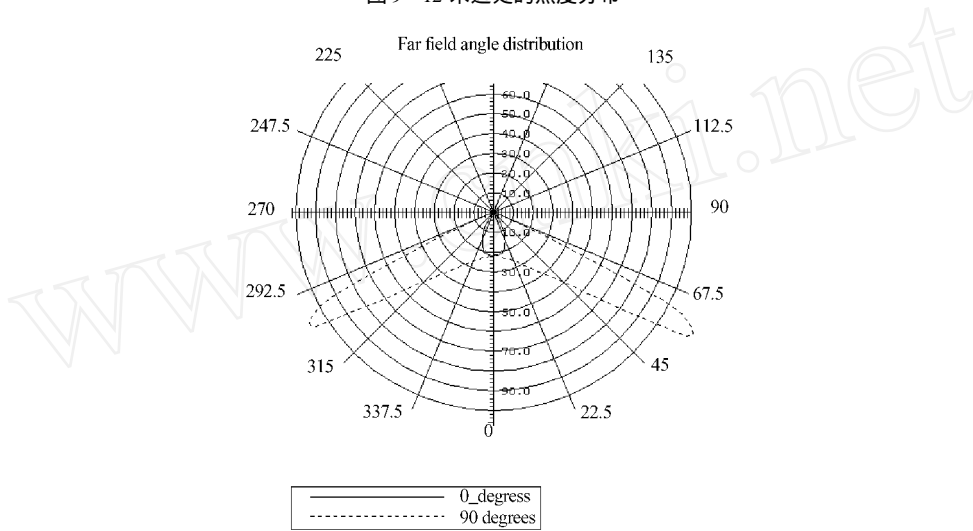


图10 LED 路灯光强的远场角度分布

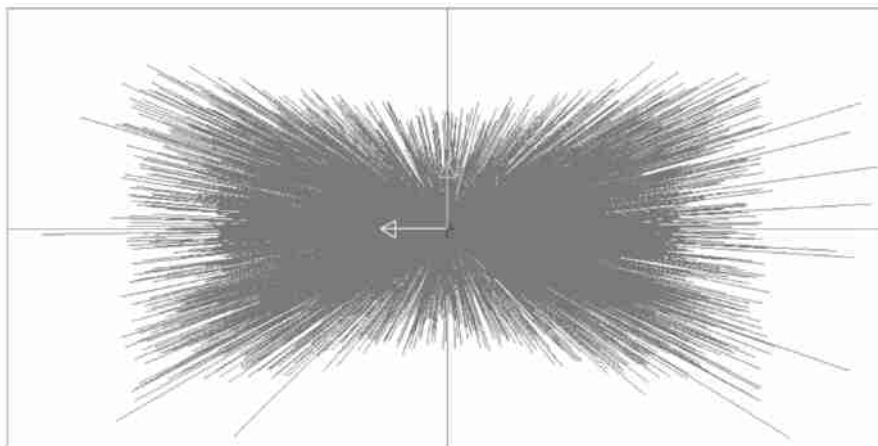


图11 LED 路灯光型图



图 12 采用自由曲面透镜的 LED 路灯实物照片

3 结论

本文主要介绍了两种 LED 路灯的配光设计并重点介绍了一种非对称配光的自由曲面透镜的光学设计。第一种 LED 路灯采用了轴对称的全反射透镜或反光杯, LED 透镜模组排列于一个弧面上以产生长方形的配光。全反射透镜的引入可以极大地提高光的利用效率, 但是弧形的 LED 模组的排列使高功率 LED 的散热板设计和机械结构较为麻烦。第二种 LED 路灯采用了非对称的自由曲面透镜, 可以将长方形的配光直接由单个 LED 光学元件完成。整体灯头只需将具有长方形配光的 LED 模组简单的排列在一个平板上即可, 这种 LED 路灯在机械结构、散热、及电源控制方面比较简单, 不同等级公路和不同灯杆高度的道路照明只需要增加不同数量的 LED

模组即可。自由曲面的设计采用了边缘光线扩展度 (Etendue) 守恒的原理, 创建了一套自由曲面控制网格的节点矢量的精确计算方法。使透镜在 X 方向产生 $\pm 60^\circ$ 内均匀分布的配光, 在 Y 方向产生 $\pm 30^\circ$ 内均匀分布的配光的方形光斑。

参考文献

- [1] 中国建筑科学研究院. CJ 45—2006 城市道路照明设计标准. 中国建筑工业出版社, 2007 年 1 月, pp. 7~12
- [2] Harald Ries and Ari Rabl. "Edge-ray principle of nonimaging optics", J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 11 (10), Oct. 1994, pp. 2627~2632
- [3] Xutao Sun et al., 2006. "Etendue analysis and measurement of light source with elliptical reflector", Displays (27), pp. 56~61

CIE 中期会议 2009 年在布达佩斯举行

全球照明界关注和期盼的国际照明委员会 (CIE) 中期会议将于 2009 年 5 月在匈牙利布达佩斯召开, CIE 中期会议每四年召开一次, 2009 年的 CIE 中期会议共将历时 10 天, 其中 5 月 27 日到 29 日的光和照明大会是本次中期会议的核心内容。中国照明学会将组团参加此次会议。本次 CIE 中期会议将特别强调 LED 和固态照明 (Light and Lighting Conference with Special Emphasis on LEDs and Solid State Lighting)。

中国照明学会参加 CIE D2 分部的代表——潘建根教授级高工被 CIE 遴选为大会的国际组委会 (IOC) (International Organizing Committee, 简称 IOC) 委员, IOC 共有 15 名成员组成。

目前光和照明大会正在论文征集阶段, 本次大会的目标在于: 召集照明界的专家和工程师们共同探讨有关光和照明的所有方面, 重点内容为: ——半导体照明; ——LED 在照明和信号方面的理论和应用; ——光的医学作用, 以 LED 照明为重点; ——现代光源的颜色特性和评价方法。详细内容可登陆 <http://www.cie.co.at/symp/Light+Lighting2009-1st-Circ-Call.pdf> 查询。

会议具体时间如下: 2009 年 1 月 31 日 提交摘要截止; 2009 年 2 月 20 日 接受摘要通告; 2009 年 3 月 10 日 酒店预订截止; 2009 年 3 月 15 日 早期优惠注册截止; 2009 年 5 月 27 - 29 日 光和照明大会。