

一种全反射型的 LED 路灯透镜光学设计

二次光学是直接决定 LED 路灯的输出效率、配光分布、均匀度及眩光程度的重要环节。绿色环保的城市道路照明要求 LED 路灯产生正好覆盖马路的长方形的光斑,对马路之外的其他地方譬如居民楼和建筑物的光污染尽量少的。XY 非轴对称的自由曲面二次光学的配光设计,是实现此目标的最好的方法。使得在单个透镜模组上就可以完成高效率长方形的输出光斑、蝙蝠翼形的远场角度分布、以及实现截光设计。整个灯头的结构变得非常的简洁,只要将这些完成配光设计的 LED 透镜模组,按照同一个方向排列在一块平面的 PCB 板上即可,简化了 LED 路灯的机械结构、散热管理、以及电源控制的排布。本文介绍了一种全反射型的二次光学透镜的设计,该透镜可以实现很高的输出光效率、蝙蝠翼形的配光曲线分布、以及较均匀的长方形光斑。

1、技术背景

LED 固态半导体照明技术被认为是 21 世纪的战略节能技术。中国、欧洲和北美的许多国家和城市都已经进行了 LED 道路照明技术的开发和大力推广,相比于金属卤素灯 (MH) 和高压钠灯 (HPS),LED 路灯拥有更长的寿命 (大于 5 倍);除此之外,LED 路灯还具有更好的可控性和光效,可以节能 50%之多。LED 路灯的另一个绿色能源的特征是光源本身不含有害物质汞。光学方面,LED 芯片的小光源特性可以比较容易实现精确的配光和二次光学的优化设计,准确控制光线的方向,把光充分的分配到所需要照明的马路上,防止光污染和眩光。

二次光学设计是决定 LED 路灯的配光曲线、输出光效、均匀度、以及眩光指数的一项重要技术。现有市场上大部分的高功率白光 LED 的光度分布是郎伯分布,光斑是圆形的,峰值光强一半位置处的光束角的全宽度约为 120° 。LED 路灯如果没有经过二次光学的配光设计,那么照在马路上的光斑会是一个“圆饼”,如图 1 (a) 所示,大约 1 半左右的光斑会散落到马路之外而浪费掉,并且光斑的中间会比较亮,到周围会逐渐变暗。这种灯装在马路上之后,路灯之间会形成很明显的明暗相间的光斑分布,对司机造成视觉疲劳,引发事故。这种情况下的 LED 路灯就不能叫做“节能”和“绿色照明”了。

国家城市道路照明设计标准要求 LED 路灯的光斑如图 1 (b) 所示,光斑为长方形,正好可以覆盖马路,并且有很好的均匀性。LED 的二次光学技术,不同于其他的学科,是一门涵盖非成像光学和 3 维曲面建模的交叉学科,二次光学的设计可以有效解决 LED 路灯的出光效率、均匀性、配光角度、眩光和安全性等问题,提供符合于国家标准所要求的配光,真正实现环保和绿色的照明。另外 LED 路灯有较好的显色指数 (CRI),根据需要可以调节不同的色温使其可以满足白天、晚上、晴天和雨天等不同的环境。

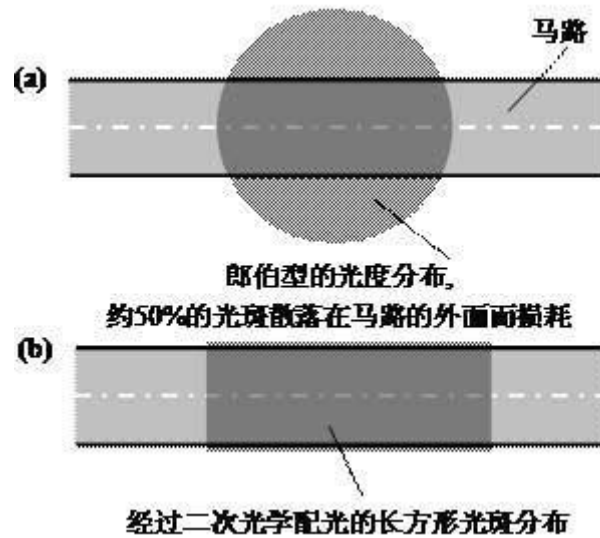


图 1(a) 没有经过二次光学设计的 LED 路灯的光斑，(b) 经过二次光学配光设计的 LED 路灯的光斑

全反射式二次光学透镜可以收集从 LED 芯片发出的全部 180° 的光，并重新分配到指定的区域，是个很好的解决方案。自由曲面的配光可以使 LED 路灯光强的远场角度分布呈蝙蝠翼分布，使光斑成长方形，并且光斑的中间和边缘比较均匀，利用边缘光线原理，透镜还可以实现截光设计，消除眩光。以下为一种全反射式二次光学透镜的设计方法。

2、全反射式二次光学透镜的设计

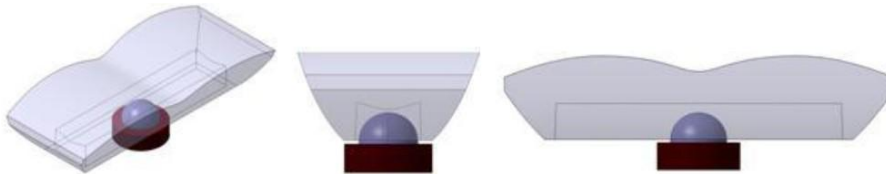


图 2：全反射式二次光学透镜的 3D 模型

图 2 为一种全反射式二次光学透镜的 3 维模型。透镜由 4 部分组成，中间内凹的非球面柱面镜部分、侧面的全反射棱镜部分、两端的全反射棱镜部分、以及上表面“W”型的自由曲面组成。透镜将郎伯型 LED 的光配成沿 X 方向 120° （沿着道路方向）以及 Y 方向 60° （垂直于道路的方向）的光度分布。透镜的设计遵循“边缘光线原理”[1]，即在 X 方向，输出光线的边缘光线的与光轴的夹角为 $\pm 60^\circ$ ，其他所有的输出光线都分布在这一角度之内，在 Y 方向，输出光线的边缘光线的角度为 $\pm 30^\circ$ 。

透镜的设计原理如图 3 所示。其中 Y 方向的配光原理如左图，从 LED 发出的中间部分的光，由内凹的柱面镜进行会聚，会聚后所有输出光线的反向延长线交于一虚焦点“F”，“F”与柱面镜边缘组成的这部分光线，再经过上表面之后，分布在角度 $\pm 30^\circ$ 之内。剩下从 LED 发出的往侧面部分的光，则由侧面的全反射棱镜进行配光。经入射面入射到外侧全反射面的光线，从下到上，其反射角是渐变的，再经过上面的输出面折射之后，这部分光也分布均匀

在 $\pm 30^\circ$ 之内。沿 X 方向的配光原理如图 3 的右图，内凹的柱面镜覆盖了从 LED 发出的中间部分的 $\pm 76^\circ$ 之内的光线，上表面“W”形状的曲面将这部分的光线均匀分配在发散角为 $\pm 60^\circ$ 之内，并形成蝙蝠翼的配光曲线分布。透镜两端各有一全反射棱镜，用来起截光的作用，收集剩下从 LED 发出的 $\pm 76^\circ \sim 90^\circ$ 的光（这部分光如果不经过配光，直接射出后会造成眩光），经过透镜两端外侧的全反射面反射和上表面“W”曲面的折射之后，重新分布在光束角 $\pm 30^\circ$ 之内。两部分的光叠加一起后形成一光束角为 $\pm 60^\circ$ 的光度分布，其光强的远场角度分布（配光曲线）为蝙蝠翼形。

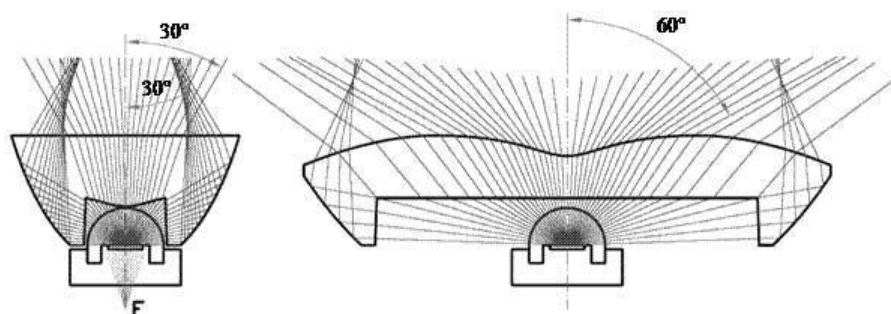
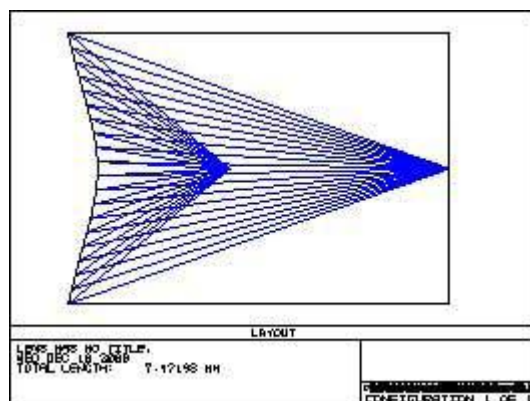
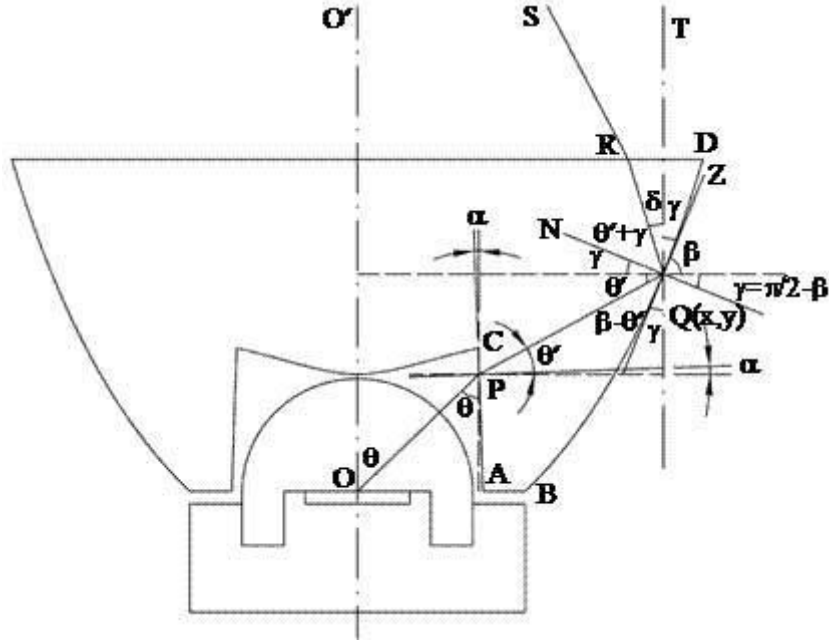


图 3: Y 和 X 剖面的设计原理

在透镜的 Y 方向，内凹的非球面柱面镜的设计和外侧全反射面轮廓线的设计如图 4 的(a)和(b)所示。图 4(a)为 Zemax 中的光路图，从 LED 射出的 $\pm 40^\circ$ 以内这部分光线，经过柱面镜折射之后，所有光线的反向延长线交于虚焦点“F”，经过点“F”和柱面镜的边缘所形成的边缘光线，其与光轴的夹角为 $\pm 19.6^\circ$ ，经过上表面折射后，形成 $\pm 30^\circ$ 的出射光线。图 4(b)为用来计算外侧全反射轮廓线上各点坐标值的数学模型。其中 q 为 LED 出射光线 OP 与光轴 OO' 的夹角； $Q(x, y)$ 为外侧全反射轮廓线上一点 Q 的坐标值，其反射线 QR 与光轴的夹角为 d ； a 为全反射棱镜入射面的拔摸角，以利于中间柱面镜模芯的拔出，这里设置为 2° 。



(a)



(b)

图 4(a)内凹柱面镜 Y 方向剖面在 Zemax 中的光路图, (b)全反射棱镜部分 Y 方向剖面的数学建模

当 α 角从 90° 变化到 40° 时, 反射角 d (即反射光线 QR 和竖直线 QT 之间的夹角) 从 0° 变化到 19.6° 。从点 $Q(x, y)$ 的角度关系, 可以得出以下的式子:

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - \beta \quad (1)$$

以及:

$$(\theta' + \gamma) + \delta + \gamma = \frac{\pi}{2} \quad (2)$$

从公式 (1) 及 (2), 可得出以下的式子:

$$\beta = \frac{1}{2} \left[\frac{\pi}{2} + \theta' + \delta \right] \quad (3)$$

其中, b 为曲线 BD 在点 $Q(x, y)$ 处的切线角, g 为切线 QZ 与竖线 QT 的夹角, PQ 为 P 点位置的折射光线, α 为 PQ 与水平线之间的夹角。曲线 BD 的导数和切线角 b 的正切函数之间有如下的关系:

$$\tan \beta = \frac{dy}{dx} \quad (4)$$

其中，dy 和 dx 为曲线 BD 在 Y 和 X 方向的微元。

根据在 P 点位置的斯涅尔定律[3][4]，有如下关系：

$$n \sin(\theta' - \alpha) = \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta - \alpha\right)$$

因此：

$$\theta' = \alpha + \frac{1}{n} \sin^{-1}[\cos(\theta + \alpha)] \quad (5)$$

当 α 角从 90° 变化到 40° 时， d 从 0° 渐变到 19.6° ，假设 AB 的初始值为 1mm，联合公式 (1)、(3)、(4)、和 (5)，Q(x, y) 点的坐标值可以通过数学模型的积分迭代法依次算出。

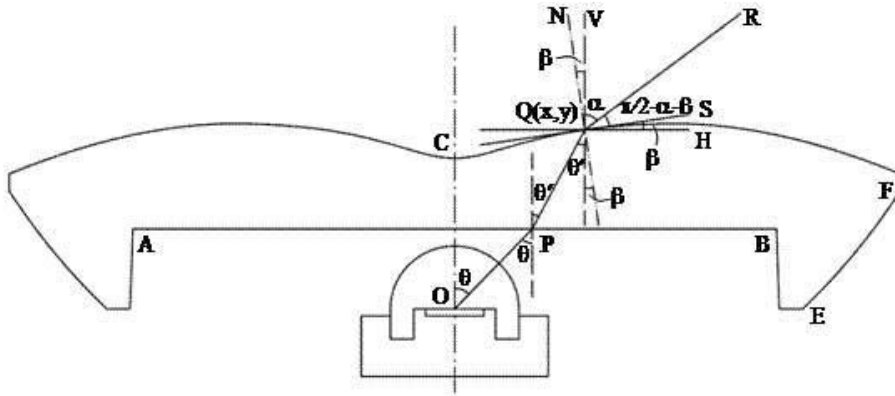


图 5: X 剖面，上表面配光设计的数学模型

针对上表面在 X 方向上的配光，其数学模型如图 5 所示。根据柱面镜底部 AB 轮廓线上 P 点位置的斯涅尔定律，有

$$\sin \theta = n \sin \theta' \quad (6)$$

再根据 Q(x, y) 点位置的斯涅尔定律，有如下关系式：

$$\begin{aligned}
n \sin(\theta' + \beta) &= \sin(\alpha + \beta) \\
n \sin \theta' \cos \beta + n \cos \theta' \sin \beta &= \sin \alpha \cos \beta + \cos \alpha \sin \beta \\
\sin \beta [n \cos \theta' - \cos \alpha] &= \cos \beta [\sin \alpha - n \sin \theta'] \\
\tan \beta &= \frac{-n \sin \theta' + \sin \alpha}{n \cos \theta' - \cos \alpha}
\end{aligned} \tag{7}$$

式中， α 为竖直线 QV 与出射光线 QR 的夹角， β 为法线 QN 与竖直线 QV 之间的夹角， q 为 LED 的出射角， q_c 为 P 点位置的折射角， n 为透镜材料的折射率。为了配成蝙蝠翼状的光强的远场角度分布，当 LED 的出射角 q 从 0° 变化到 76° 时，输出光线满足以下的关系：

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{\theta}{60^\circ} \cdot \tan 60^\circ \right], \text{ if } q \leq 60^\circ \tag{8}$$

以及

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{120^\circ - \theta}{60^\circ} \cdot \tan 60^\circ \right], \text{ if } 60^\circ < q < 90^\circ$$

再根据以下曲线 CF 的微分和切线 QS 的正切角函数之间的关系：

$$\tan \beta = \frac{dy}{dx} \tag{10}$$

联合公式 (6) 至 (10)，上表面的马鞍形曲线 CF 的数值坐标可以用积分迭代法一一计算出来。

在 X 方向剩余从 LED 射出的角度 q 为 76° 至 90° 的这部分光线，如果不经过配光直接射出，则会对远处的车辆产生眩光，这部分的光需要进行截光设计，所谓截光设计，并不是把这部分的光遮挡，而是将这部分的光重新分配到所需要的地方。这里采用透镜两端的全反射面 EF 将这部分光进行收集并重新分配，计算方法同上述图 4 的算法一样，重新分布后的光束角为 $\pm 30^\circ$ 。

3、全反射式二次光学透镜的计算机模拟

透镜所有的透射面和反射面的轮廓线计算完成之后，数据点可以输入到 3D 建模软件(如 CATIA 或者 Unigraphics) 中进行 3 维实体模型的建立。将二次光学透镜实体连同 LED 的实体模型输入到 LightTools[5] 中进行光线追迹，如图 6 所示。LED 芯片的发光面赋予 $1'1\text{mm}$ 的郎伯型的发光特性，输出光通量设置为 80 流明/瓦，单颗为 1 瓦，透镜的短边方向为垂直于马路的方向 (Y 方向)，透镜的长边的方向为沿着马路的方向 (X 方向)。

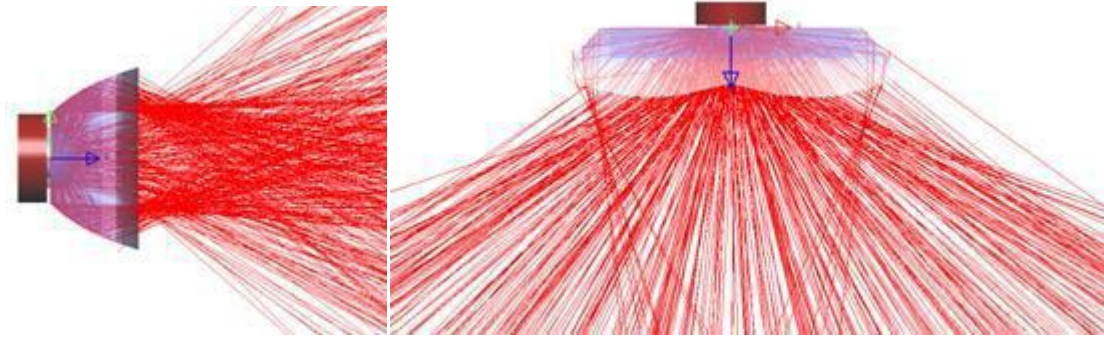


图 6：全反射式二次光学透镜的光线追迹

图 7 为单颗透镜在 12 米远处的照度分布，光斑最大照度值为 0.167 勒克斯，在 36 米² 14 米范围内的其均匀度超过了 50%。屏幕总共收集到的光通量为 78.7151 流明，换算成透镜的出光效率，为 98.39375%，考虑到透镜材料本身的透过率，假设透镜材料本身的透过率为 92%，实际注塑出来的透镜产品的效率将超过 90%。单颗透镜光强的远场角度分布（配光曲线）如图 8 所示，图中实线为 Y 方向的远场角度分布，其峰值光强一半位置处的光束角宽度约为 $\pm 30^\circ$ ；虚线为 X 方向的远场角度分布，其峰值光强一半位置处的光束角宽度约为 $\pm 60^\circ$ 。透镜在 X 方向的配光曲线为很好的蝙蝠翼分布。

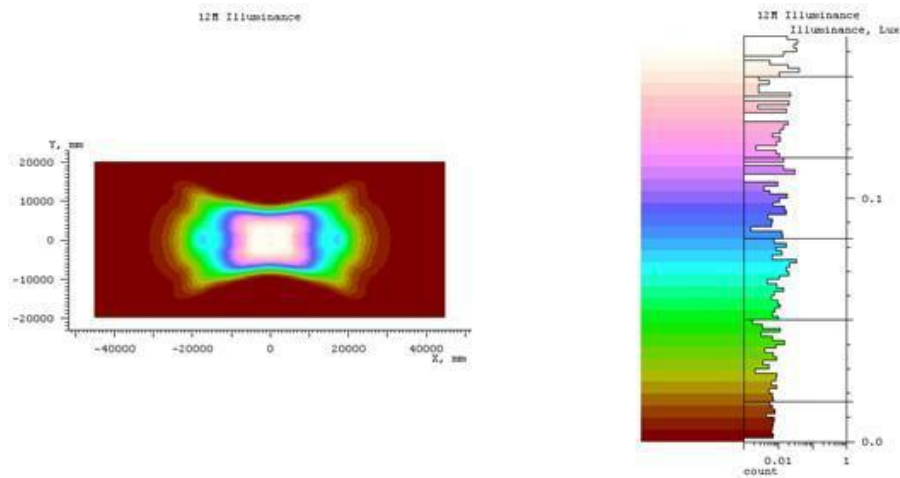


图 7：单颗透镜在 12 米远处的照度分布

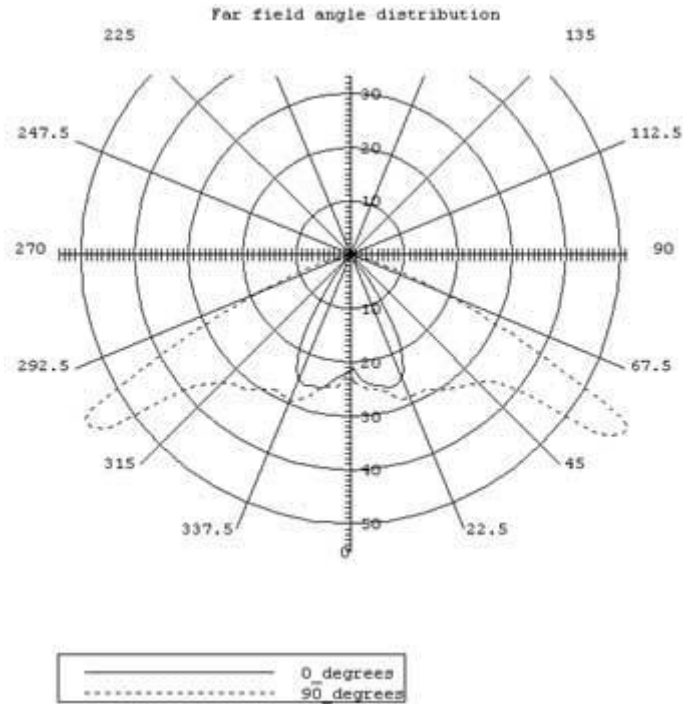


图 8：单颗透镜光强的远场角度分布

4、LED 路灯的整灯的计算机模拟

由于一般的道路照明要求路面照度的平均值超过 20 勒克斯，采用单颗的高功率 LED 来实现道路的照明，其照度是远远不够的。一盏 LED 路灯往往需要由很多颗 LED 组成，才能达到所需的照度。根据不同路面、灯杆高低、以及灯距的要求，可以分别采用不同数量的高功率 LED，LED 路灯往往有 30 瓦、60 瓦、90 瓦、120 瓦、160 瓦等不同的规格。由于单颗二次光学透镜已经实现了长方形光斑的配光设计，整个路灯只需要将这些 LED 透镜按照相同的方向排列起来装配在一个平的散热板上即可，透镜排列的间距和排列形状对配光没有影响。图 9 为 LED 路灯整灯的建模及在 LightTools 中的光线追迹。这里总共排列了 160 颗、单颗 1W、每瓦 80 流明的 LED。

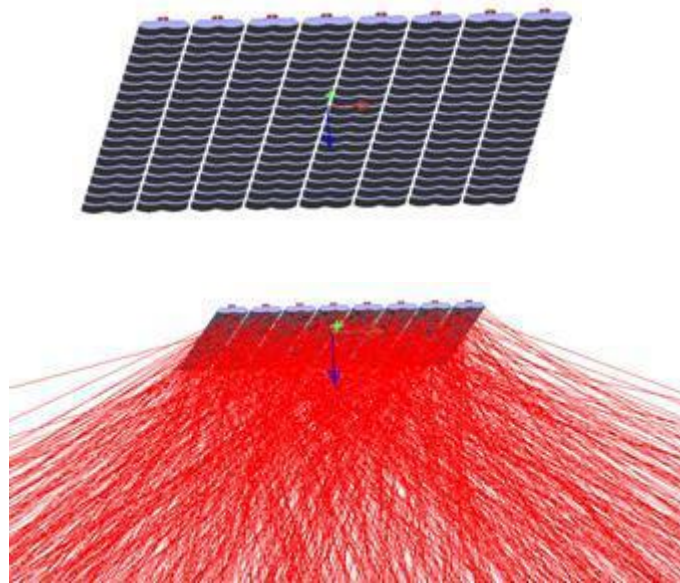


图 9：整灯的建模及光线追迹

假设接收屏放置于 12 米远，由于所有的透镜都是按照一个方向排列的，整灯的光斑形状和光强的远场角度分布与单颗透镜的完全相同，唯一不同的是照度值和配光曲线的发光强度值按照 LED 的数量乘了一个倍数，如图 10 和图 11 所示。在 36 米长、14 米宽的范围，平均照度超过 20 勒克斯，照度均匀度超过了 50%，光斑最强的照度值为 26.7 勒克斯。整灯的光强的远场角度分布为蝙蝠翼分布，图中实线为 Y 方向的远场角度分布，其峰值光强一半位置处的光束角宽度约为 $\pm 30^\circ$ ；虚线为 X 方向的远场角度分布，其峰值光强一半位置处的光束角宽度约为 $\pm 60^\circ$ 。在 X 方向，配光曲线中心的发光强度值约为 4,000Cd(坎德拉)， $\pm 60^\circ$ 的位置约为 8,000Cd。光斑宽度超过 14 米，大约可以覆盖 4 车道。

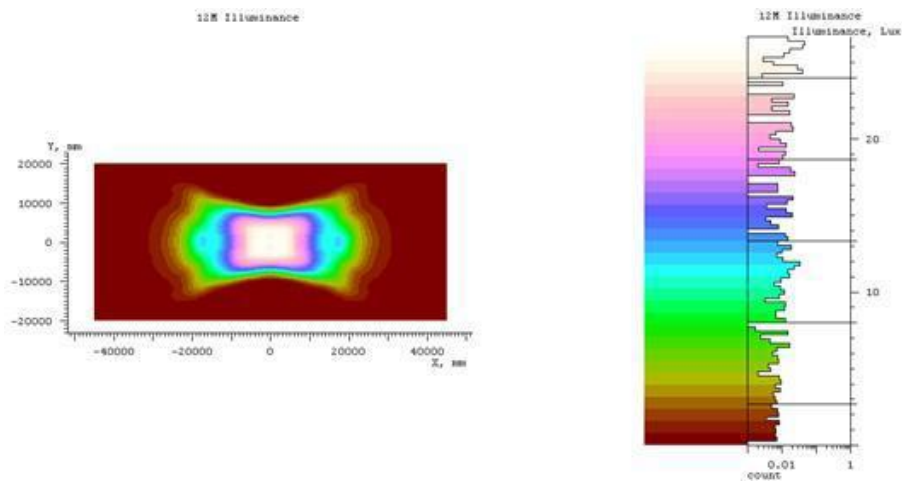


图 10：整灯在 12 米远处的照度分布

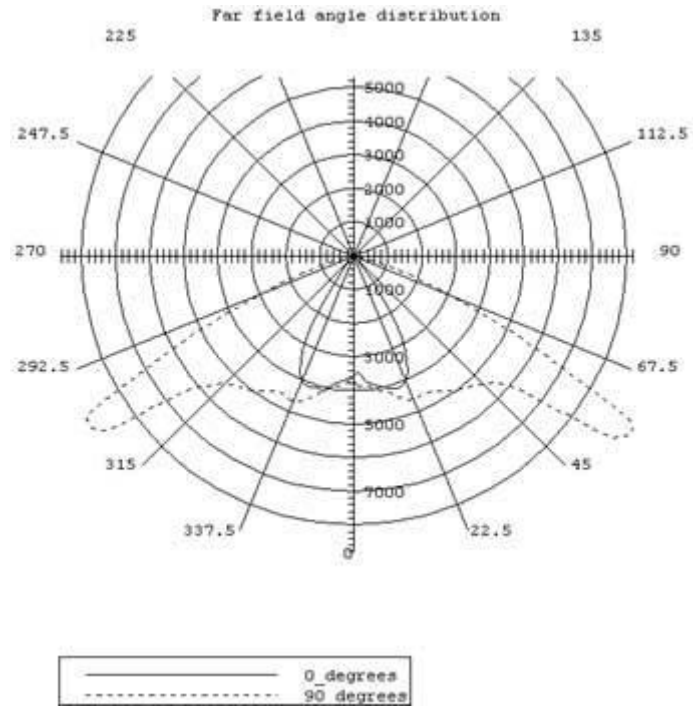


图 11: 整灯光强的远场角度分布

5、结论:

由于大部分出厂的高功率白光 LED 为郎伯型的光度分布，利用 XY 方向非轴对称的自由曲面二次光学的配光设计可以有效解决路灯的光型、出光效率、均匀性、配光角度、眩光和安全性等问题，提供符合于国家标准所要求的配光，真正实现环保和绿色的照明。全反射二次光学透镜的采用可以实现很高的配光效率，得到超过 90%的输出效率。全反射透镜上表面的“W”型自由曲面，可以将道路方向的配光曲线设计成蝙蝠翼形，实现很好的均匀度。透镜底部用来聚光的非球面柱面镜由 Zemax 完成设计，外侧的全反射面和上表面的自由曲面则通过数学模型精确计算而成。本设计结合了光学设计、数学建模、以及 3 维曲面造型，以及边缘光线理论。是 LED 非成像二次光学的一个典型的设计方法。