

摘要

LED的应用范围日趋广泛，其相应的二次光学设计也越来越显出重要性。本文介绍了一种光学设计的思路和方法。

一、引言

LED (Light Emitting Diode) 从二十世纪六十年代问世以来，已有30多年的发展历史。随着近几年半导体芯片技术的不断改进及封装技术的迅速提高，其光效从最初不到1lm/W，发展至今红色、橙色为100lm/W和绿色50lm/W，已大大超过了传统的白炽灯。同时，LED具有体积小、重量轻、耗能少、寿命长、响应时间短及抗震性能好等优点。因此，LED的应用已不仅仅限于信号指示光源，而已逐步从室内走向诸如交通信号灯、车灯、户外屏等室外应用领域。

二、信号灯基本光学系统

以信号灯为例。传统的交通信号灯采用白炽灯作为光源，其灯具基本光学构成可视为：光源、反射器及用于形成光分布的透镜组成（如图1所示）。由于白炽灯的光辐射几乎占据整个空间，因此需要用反射器将其它方向上的光收集起来，投向要求的区域。通常采用的是抛物面反射器，形成近似于平行的光束，然后用有色还透镜的外罩对光束进行偏折、扩散，产生期望的光分布和颜色。

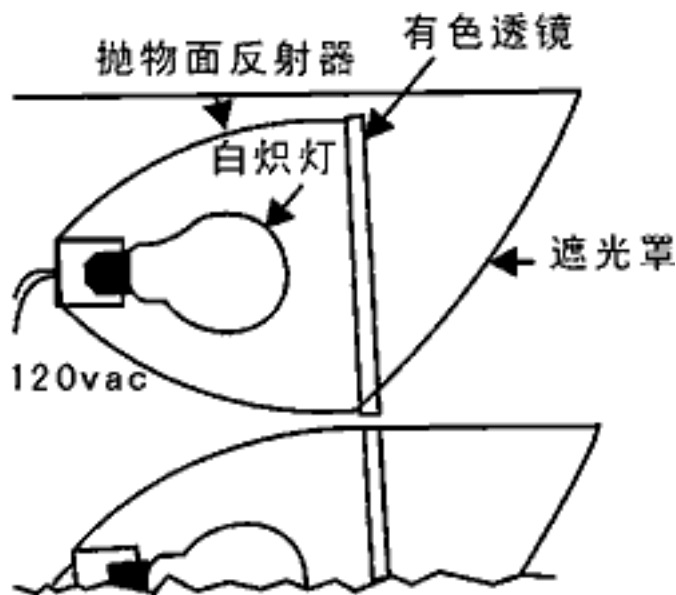


图1 白炽灯交通信号灯结构示例

一般，单颗LED发出的光能量较小，一个交通信号灯往往需要几十至几百颗LED。随着LED技术的发展，单颗LED流明数的提高，一个灯具内使用的LED数目会明显减少。例如目前飞利浦的一款交通信号灯仅用了十颗左右LED，此类灯具的光学结构与本文所讨论的有所不同。目前广泛使用的LED交通信号灯，通常用100-300颗LED，基本均匀分布于整个发光面上，每颗LED对应一个或一组透镜单元。

由于某些LED发出的光相对集中于一个较小的立体角范围内，反射器就不再是必要的光学组件，而往往用透镜作为准直光学组件。例如，用凸透镜或菲涅耳透镜产生平行光束。然后，用枕形透镜、楔形棱镜等使光束重新扩散、偏折产生满足标准要示光分布（如图2所示）。

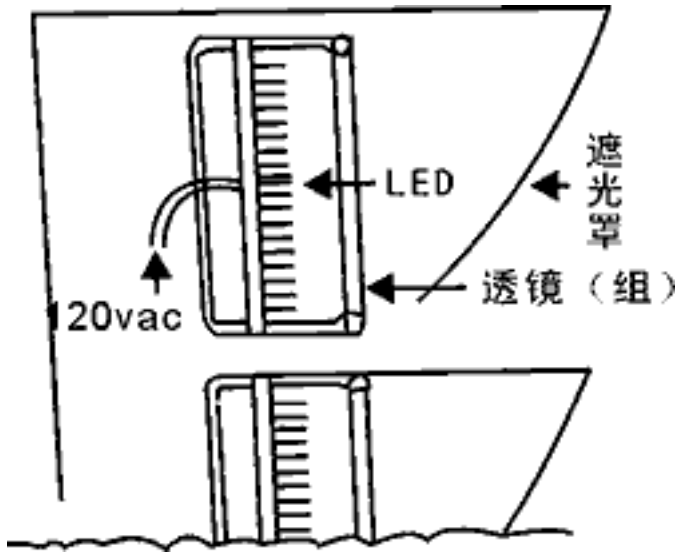


图2 LED交通信号灯结构示例

三、设计思想

1.光通量的估算

无论是欧洲的ECE、美国的ITE还是我国的国家标准，对于信号灯光分布的要求大多体现为H-V系统内的光强分布（如图3所示）。因此，可以根据下式计算出达到标准要求的最小光通量：

$$\Phi = \sum_i \Phi_i = \sum_i I_i \cdot (\sin H_{i+\frac{1}{2}} - \sin H_{i-\frac{1}{2}}) \cdot (V_{i+\frac{1}{2}} - V_{i-\frac{1}{2}}) \quad (1)$$

其中 Φ_i --第i个立体角区域内的光通量

I_i --第i个立体角区域内要求的（平均）光强

$H_{i+1/2}$, $H_{i-1/2}$, $V_{i+1/2}$, $V_{i-1/2}$ --第i个立体角区域的水平角和垂直角的边界

此计算所得的光能量是一个理想值，实际要满足标准要求的光分布，还需考虑透镜的透过率、溢出光损失等因素。因此，需要对 进行修正，得到的才是实际要求光能量的估量值。

几何轴 向下 (0°)	光强分布%						
	几何轴左右 (0°)						
	0	5	7.5	10	15	20	25
0	100	100		50			
3	100	—	50	—	—	—	—
5	50	—	—	—	—	7.5	—
7.5	—	—	—	—	12.5	—	—
10	12.5						
15	—	—	—	—	—	—	7.5
20	7.5	—	—	—	—	—	—

图3 LED交通信号灯国家标准(送审稿)光分布要求

LED的光强分布通常是旋转对称的，因此，可以根据生产厂家给出的光分布（如图4所示），由下式估算单颗LED所发出的光能量：(3)

$$\Phi_{LED} = 2 \pi \sum_j I_j \cdot (\cos \theta_{j-\frac{1}{2}} - \cos \theta_{j+\frac{1}{2}}) \quad (2)$$

其中 I_j --第 j 个环带区域内平均光强

$\theta_{j-1/2}$, $\theta_{j+1/2}$ --第 j 个环带区域的边界

同样，在这里计算出也是一个理想值，需考虑温度影响、光通有效利用率等因素进行修正。

利用两个修正后的光能量可以估算出要用的LED的数目。

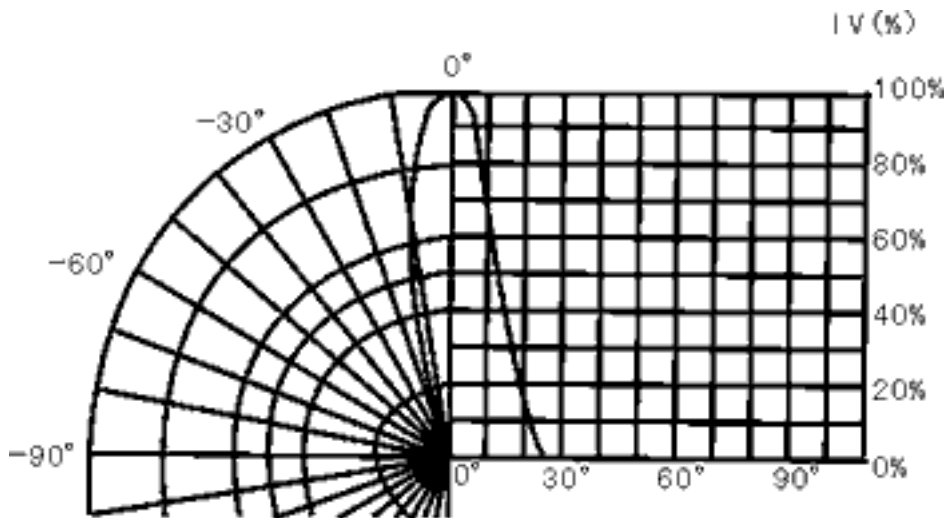


图4 LED光强分布示例

2.透镜单元

为了能实现对光通量更有效的利用，我们先用准直系统，将LED发出的光校正为平行光。通常采用凸面的曲率半径：(4)

$$1/r_1 - 1/r_2 = 1/f * (n_l - 1)$$

其中f-透镜焦距

r1, r2-分别为透镜两表面的曲率半径。当该表面为平面时，曲率半径为无穷大

nL-透镜材料的折射率

但是，正如图5所示，对于同样尺寸、同样焦距的凸透镜和菲涅耳透镜而言，其厚度相差可以很大。并且随着透镜尺寸增加，其厚度差距也随之增加。透镜越厚，意味着光在经过透镜过程中损失越多。并且，计算中用薄透镜近似而引入的误差也越大。

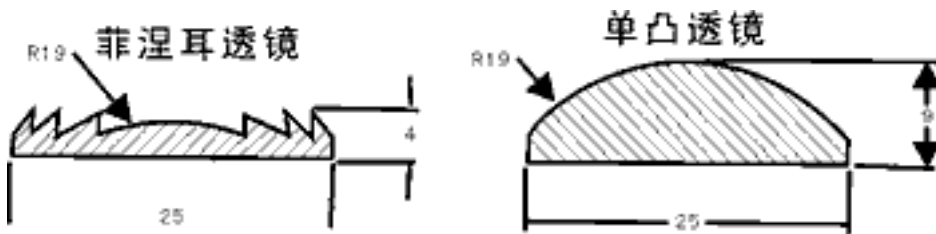


图5 菲涅耳透镜与凸透镜厚度比较

菲涅耳透镜（如图6所示）其实是一种“大孔径”的消球差透镜，其光学作用和普通凸透镜相当，但比凸透镜薄、重量轻。虽然，设计时，菲涅耳透镜环数越多，有助于减小球差和透镜厚度，使光斑更均匀。设计时，环带环数的选择至关重要。

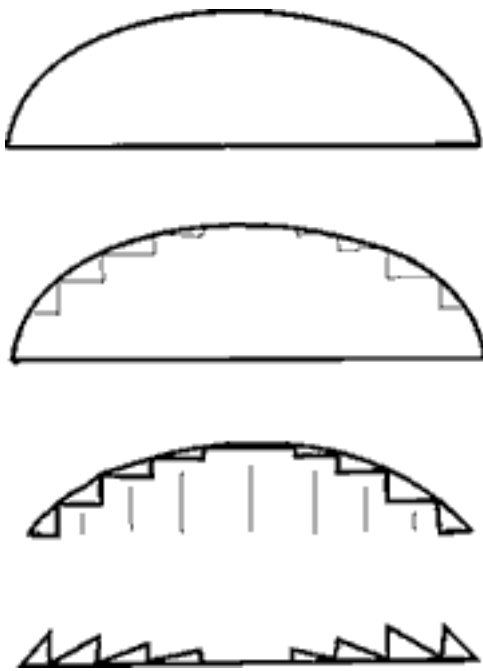


图6 菲涅耳透镜的形成

之后，需要用透镜将平行光束扩散处理，来满足标准的要求。我们将灯具外罩分割成矩形小单元，用来打碎光波的波面，有利于产生均匀的外观效果。在每个小单元中，我们用柱面透镜使光束水平扩散，在确定单元宽度及要求的扩散角度之后，柱面的曲率半径为：

$$r = (b \cdot n^2 - 2n \cos \theta + 1) / 2 \sin \theta \quad \dots\dots\dots(4)$$

其中r--柱面透镜的曲率半径

b--单元宽度

n--透镜材料折射率

θ --期望的半扩散角度（如图7所示）

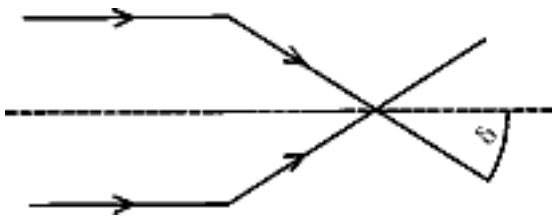


图7 柱面透镜示意图

在确定扩散角度时，应考虑平行光束可能会有一不定期h的发散角度，因此，若我们要求灯具总扩散角度为 50° ，则应该取 $2\theta = 50^\circ$ 。否则可能会导致扩散角度过大。

根据标准，在垂直方向上也有一梯度的光强分布要求，且基本是在水平面之下。我们考虑用楔形透镜将光向下偏，并借助于模拟软件，使光通量在垂直方向上合理分布。单元透镜的结构如

图8所示。

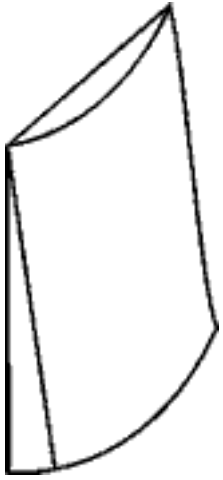


图8 透镜单元示例

或者，也可采用如椭球面或轮胎面等具有水平和垂直两个方向的弧度，从而可以在两个方向上用不同的曲率半径达到不同的扩散效果。由于交通信号灯的标准一般要求光分布于水平之下，因此，在垂直方向上只需用上半段圆弧，产生向下扩散的效果（如图9所示）。

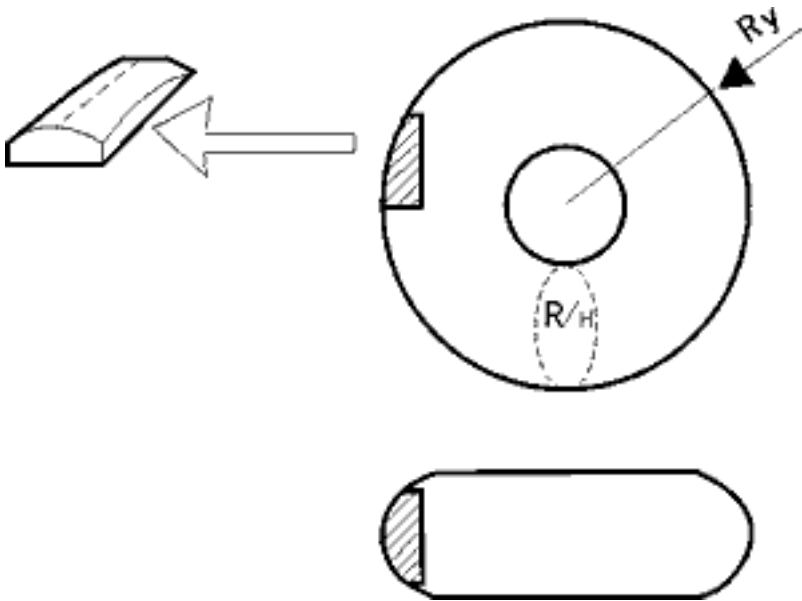


图9 有双向曲率透镜的示意图

四、讨论

我们的设计方案采用了两层透镜，虽然能对光通量分布有良好控制，但是两层透镜的透过率损失始终较大。另外，要获得较理想的平行光，焦点的对准很重要，但LED自射带有的装透镜，使实际发光不在晶片所在位置。因此，要得到理想的设计效果，发光点位置的确定很重要。

其次，对于发光角度较大的LED，若用菲涅耳透镜作为准直系统的话，建议在边缘部位采用内部全反射（TIR）结构。因为，对于菲涅耳透镜，越靠近边缘，光线入射至透镜的角度越大，反射损失成分也越大，若采用TIR结构（如图10所示），可使入射角度接近00，大大减少了透镜

边缘光的反射损失，有利于使透镜呈现均匀照亮的外观。

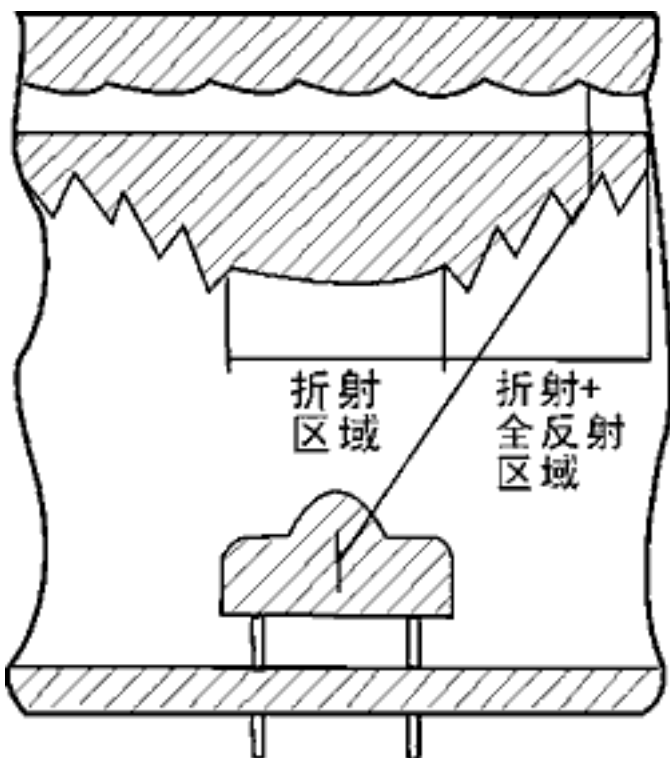


图10 带有TIR结构的透镜示意

五、结论

LED作为一种新型的光源，其潜在的应用价值正受到人们越来越多的关注，因此LED的二次光学系统设计也日益受到人们的重视。本文介绍的工作是在这一领域里的尝试。我们将进一步开展这方面的研究开发工作，设计出更为高效的光学系统。