

白光 LED 汽车前照灯的光学设计探讨

陈文成 陈大华 译

(复旦大学电光源研究所 上海 200433)

摘 要

基于近年来白光 LED 的发展,应用 LED 光源来设计汽车前照灯已成为可能。虽然 LED 的输出光通量在逐步提高,但它仍不能完全满足汽车前照灯的特殊要求。本文主要讨论了汽车前照灯的光学特性、光学设计原则、光强分布和集中性的要求,以及驾驶安全和客户需求,同时通过与传统的卤钨灯泡的比较,分析了在汽车前照灯中应用 LED 光源时的一些特殊问题,尤其是光学径角性(Etendue)的定义,最后提出了汽车前照灯应用 LED 光源的一些准则。

关键词 光学径角性(Etendue) 半导体发光二极管(LED) 汽车前照灯

引言

近年来,LED 光源技术有了很大的发展,随着单个彩色 LED 输出光通量的不断提高,LED 在汽车照明中的推广应用有了更大的发展空间,例如高位刹车灯(CHMSL)、信号灯等。另外,涂敷荧光粉工艺制作成的白光 LED 的光效已达到 30lm/W,这使得白光 LED 在汽车前照灯中的应用前景令人乐观。

过去的 20 年里,汽车前照灯和透雾灯中应用的光源,虽然目前已有一些产品中应用了 HID(高强度气体放电)光源,但主要还是白炽灯或卤钨灯。卤钨灯和 HID 光源的发光体尺寸都很小,其光强分布符合郎勃定律。由于安全的原因,汽车前照灯的光强分布在美国联邦政府、州政府和国际上都有着严格的法规。根据这两种光源的不同技术特性,人们就必须设计不同的光学系统和光型分布。而白光 LED 跟卤钨灯或 HID 灯相比具有不同的光学特性,单个 LED 的光通量远低于单个卤钨灯或 HID 灯,这就需要采用多个 LED 光源来组成一个汽车前照灯,从而对汽车前照灯光学系统的设计提出了不同的要求。为了更好地理解汽车前照灯所用的光源给光学系统设计所带来的限制,本文也简要回顾一下汽车前照灯系统的一些光学特性。

对于任何的系统设计,总会存在一些设计上的限制。例如,在一个通信系统中,数据的传输就依赖于系统频率的带宽,所要传输的数据的带宽必须小于等

于系统的带宽。与之类似,在一个光学成像系统中,存贮在系统里的图像数据的带宽也取决于系统的空间频率带宽,亦即它必须等于或小于系统的空间频率带宽。本文将应用相同的分析方法,来讨论在非图像系统中光能传输上的限制和系统的光学径角性。在进行汽车前照灯光学系统的设计时,认识系统的光学径角性对汽车前照灯设计人员来说是有益的。

1 汽车前照灯的光学径角性

目前被推荐用于汽车前照灯的白光 LED 是一种扩展面光源。若 LED 的朗伯光强分布假定已被认知,那么在给定方向上的光强为:

$$I(\theta) = I_0 \cos(\theta) \quad (1)$$

式(1)中 I_0 是 LED 发光平面法线方向上的光强, θ 是观察方向与法线方向的夹角。这样在一个 α 立体角锥内的光通量 $\Phi(\alpha)$ 可表示为(见图 1 所示):

$$\Phi(\alpha) = \int_0^\alpha \int_0^{2\pi} I(\theta) d\varphi \sin\theta d\theta = I_0 \pi \sin^2 \alpha \quad (2)$$

如果 LED 发出的光覆盖半个球面,则 $\alpha = 90^\circ$, 这个 LED 的总光通量就可表示为:

$$\Phi(90^\circ) = I_0 \pi = \Phi, \quad (3)$$

由于 LED 光源是朗伯光源,所以其各方向的亮度是一个常数,如式(4)所示。

$$L(\theta) = \frac{I(\theta)}{A_s \cos(\theta)} = \frac{I_0}{A_s} = L, \quad (4)$$

所以

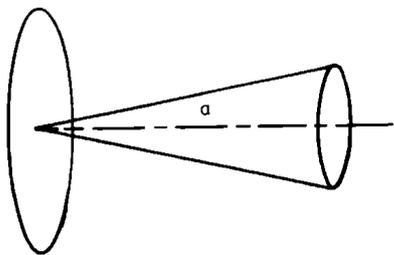


图1 观察立体角为 α 的锥体

$$I_0 = A_s L_s \quad (5)$$

对一个带反射器光源的照明系统来说,其内孔径可以划分成一系列的环带,如图2所示。

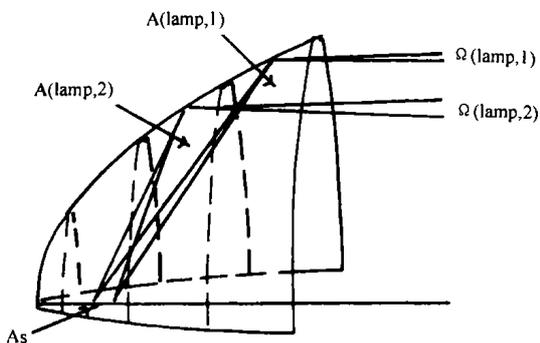


图2 发光面积为 A_s 的光源所发出的环带孔径为 $A_{(lamp,i)}$, 其扩散角为 $\Omega_{(lamp,i)}$ 的光路示意图

这样,这个照明系统的总光通量为

$$\Phi_{lamp} = \sum_i L_{(lamp,i)} A_{(lamp,i)} \Omega_{(lamp,i)} \quad (6)$$

若假设该光学系统没有光损失,那么亮度 L 就是一个常数,如式(7)所示。

$$L_{(lamp,i)} = L_{lamp} = L_s \quad (7)$$

然后式(6)可化为式(8)所示。

$$\Phi_{lamp} = L_{lamp} \sum_i A_{(lamp,i)} \Omega_{(lamp,i)} \quad (8)$$

任何无源光学系统,如汽车前照灯,其对输入的光都没有放大作用,考虑到能量的守恒,故实际这类照明系统的总输出光通量要小于输入的总光通,或小于其内光源所辐射的总光通量,见式(9a)和(9b)。

$$\Phi_{lamp} \leq \Phi_s \quad (9a)$$

或

$$\Phi_{lamp} = \eta \Phi_s \quad (9b)$$

其中 $\eta \leq 1$ 。对于一个发光面积为 A_s ,发光立体角为 Ω 的 LED 光源,汽车前照灯的孔径为 A_{lamp} ,那么式(8)可写为:

$$\begin{aligned} \Phi_{lamp} &= L_{(lamp)} \sum_i A_{(lamp,i)} \Omega_{(lamp,i)} \\ &= \eta L_s A_s \Omega_s \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $A_{(lamp,i)}$ 是反射器第 i 个环带的孔径, $\Omega_{(lamp,i)}$ 是第 i 个环带的立体角。如果我们假定汽车前照灯系统的光学径角性值不变,那么:

$$\sum_i A_{(lamp,i)} \Omega_{(lamp,i)} = A_s \Omega_s \quad (11)$$

即系统的损耗仅引起亮度的下降,那么:

$$L_{lamp} = \eta L_s \quad (12a)$$

或

$$L_{lamp} \leq L_s \quad (12b)$$

即系统的损耗引起了亮度的下降。当前照灯中应用多个 LED 光源时,式(11)应写成:

$$\sum_i A_{(lamp,i)} \Omega_{(lamp,i)} = N A_s \Omega_s \quad (13)$$

其中, N 是 LED 光源的数目。再假设前照灯的光学径角性值保持不变,那么式(10)可写为:

$$\Phi_{lamp} = L_{lamp} \sum_i A_{(lamp,i)} \Omega_{(lamp,i)} = \eta N L_s A_s \Omega_s \quad (14)$$

式(14)说明当一个汽车前照灯由多个光学器件构成时,每个光学器件的光学径角性值可能会不同,即也可能提供不同的光强和扩散立体角。那么整个灯具的总输出光通量会小于 N 个 LED 光源的光通量之和,也就是说,所用 LED 的个数并不需要跟前照灯结构中的子孔径的数目相同。

2 LED 前照灯光型的形成

任何一种前照灯光型,无论是近距灯还是远距灯,都需要符合一定的光强分布。采用测试点、测试线和测试面的方式可以确定在不同的垂直角度和水平角度上的用坎德拉为单位的的光强值。这些参数已被制定为国家标准或工业推荐值。例如对于一个汽车近距灯,其光型分布要求需要基于以下几点来确定:

a) 足够的路面照度,给驾驶员提供必需的可见度及安全性。

b) 对迎面而来的驾驶员的眩光限制。

c) 灯具的瞄准性能。

d) 为驾驶员的舒适提供一定的发散光及前沿光。

由于这些要求,前照灯的光型分布必须是明显各向异性的,其光强的变化范围是从几百到 20000cd,甚

至更高的数值。在某些角度的区域需要很高的光密度,光线被聚焦后瞄准在某一区域,这个高光强的区域被称为热点。在该热点的上边缘,光强急剧减小,从而形成一个截止线,该截止线主要有两个功能:控制眩光和辅助瞄准。与热点相反的是,扩散到左右或

前沿的光强要小得多,并分散至一个很大的角度。图 3 演示了一个近光灯的光强分布。区域 1 用来形成热点,区域 2 有一定的扩散,而区域 3 扩散得更厉害,区域 2 和 3 用来形成光型分布的其他部分。

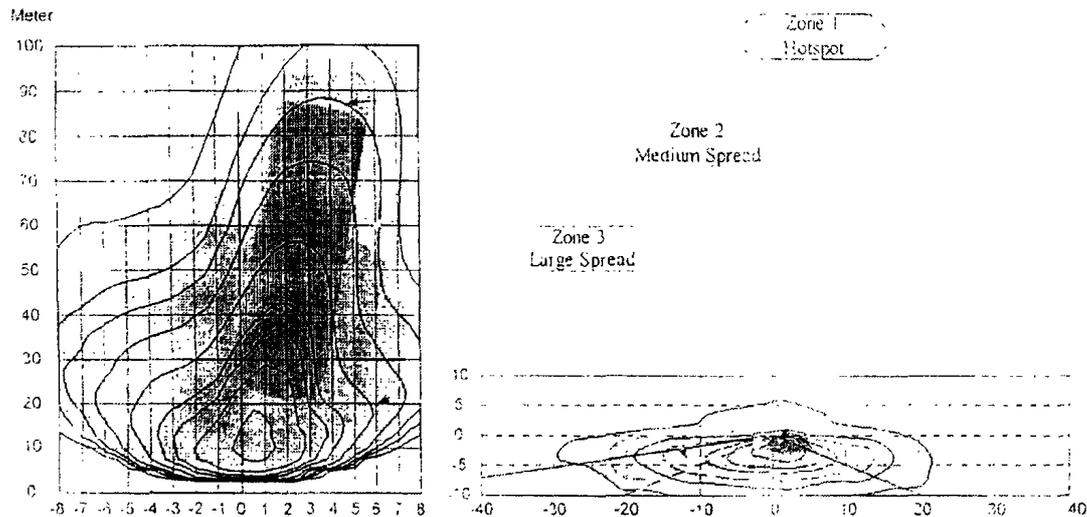


图 3 近距光光型的光强区域。左边的图是随着距离变化的路面等照度曲线,右边的图是投射在测试屏上时的等光强线,坐标的单位是度

形成前照灯光型的一个主要困难是:当灯具的总孔径是有限值时,要在热点上得到足够的光强。而对于远光灯的设计就要更困难些,因为其热点上的光强要达到 40000cd。每一种设计规范,如果 $I_{hotspot}$ 是所需的光强值,热点的扩散角是 $\Omega_{hotspot}$,则热点的总光通为:

$$\Phi_{hotspot} = I_{hotspot} \Omega_{hotspot} \quad (15)$$

如果 N_l 是形成热点的 LED 数目,每个 LED 具有相同的 L_s 和 A_s ,对于一个给定的灯具孔径 A_{lamp} ,采用式(4),由 LED 所得到的热点的光强值为:

$$I_{hotspot} = \frac{1}{\Omega_{hotspot}} \eta N_l L_s A_s \Omega_s = A_{lamp} \eta N_l L_s \quad (16)$$

式(16)提供了要得到所需的热点光强值的基线。影响热点光强值的因素主要有以下 3 个:

(1) 灯具样式设计上的限制。灯具孔径的尺度 A_{lamp} 主要由汽车外形设计所决定的,前照灯设计人员可建议汽车外型设计人员稍微地扩大孔径。很明显,灯具的孔径越大,就越容易达到所需的热点光强值,但这种要求并不符合众多产品的设计。

(2) 灯具构造上的限制。显然所有的灯具光学系统都具有一定的损失(即 $\eta < 1$):反射损失、吸收损失

和光线聚焦时的损失等等。对于一给定的汽车前照灯系统,虽然增加 LED 的数目可以增大热点光强的数值,但 LED 数目的最大值通常受到灯具物理结构的限制。

(3) LED 的亮度 L_s 的限制。由于上述的一些基本限制,从式(16)可知,热点光强的值与单个 LED 的亮度 L_s 成正比。灯具的孔径越大,单个 LED 的亮度 L_s 越高,LED 的数目越多,则热点的光强值越大。

除了孔径外,形成适宜光型的另一个限制是光学系统的总体尺寸及深度。由于汽车外形和包装的需要,汽车前照灯的深度往往是受限制的。这样,通过光学系统投射到规定区域的光通量可能并不能满足设计要求。

3 汽车前照灯的设计趋势

式(16)显示的是当灯具孔径 A_{lamp} 完全用来形成热点的这一理想条件。然而在实际情况中,整个灯具的孔径不可能都用来形成热点。作为简化,可假定汽车前照灯是一个无象差的光学系统。从点光源发出来的光线,经无象差的光学系统如反光镜或透镜而形成所需的平行光。当采用实际的光源时,如 LED,通

常具有一定的发光面积 A_s , 从扩展光源发出来的光线经光学系统后被分散。准直的程度取决于光源的尺寸和光学系统的特性, 如焦距和孔径。如果光源的大小为 A_s , 扩散的立体角为 Ω_s , 给定某一灯具孔径 A_{lamp} 时, 焦距越短, 光线汇聚的效率就越高, 但准直的性能会下降。另外, 在一个反射器中, 光线准直的程度随着反射带孔径的不同而有些差异; 但在一个透镜系统中, 整个孔径对光线的准直性是一致的。如图 4a 所示, 如果给定光源的面积是 A_s , 则在离光源较远

的部分或在反射器边缘附近时, 光线的扩散立体角较小, 反射器的这个特性可被应用于形成热点。图 4a、4b 和图 5a、5b 显示了当焦距变化时相对应的反射系统和透射系统的光损失和扩散立体角。

利用反射器系统的特性, 系统的孔径可被分成一系列子孔径, 而每个子孔径可形成不同的光型, 如热点或扩散。该方法已成为目前汽车前照灯光学设计的趋势。这种设计趋势的实例将在下文中讨论。

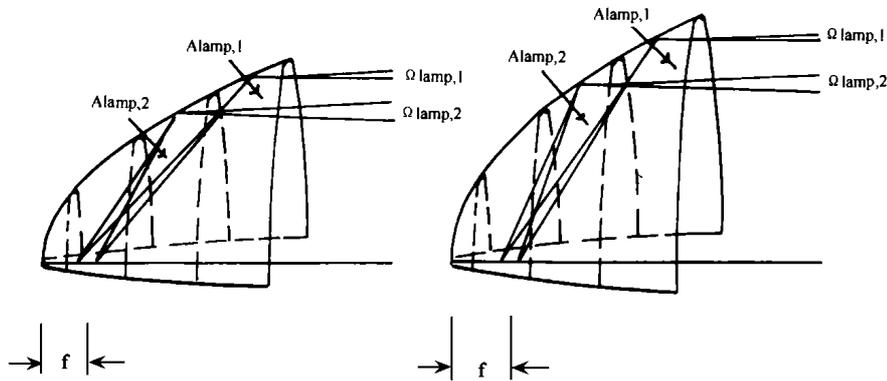


图 4a 短焦距反射器

图 4b 长焦距反射器

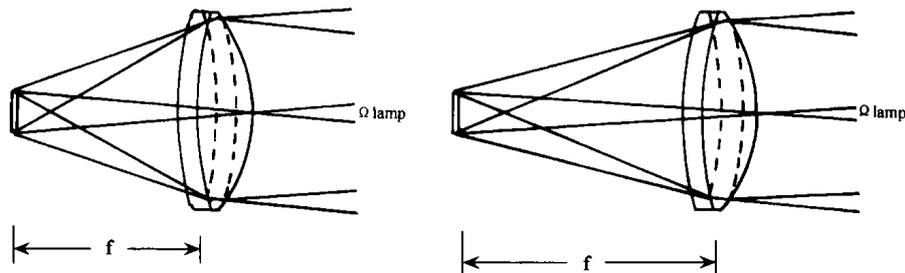


图 5a 短焦距透镜

图 5b 长焦距透镜

4 汽车前照灯光学设计中 LED 的限制

为了设计合适的汽车近光灯, 需满足以下几点设计性能:

- a) 在所要求的光型分布区域内的总光通在 420lm 左右。
- b) 热点的光强值在 25000cd 左右。
- c) 要有很大的扩散角度, 在左右各 35° 时的光强需达到 1000cd。

在所要求的光型分布区域内, 总光通可被分成 3 个带状区域, 即表示成:

区域 1: 水平 2°, 垂直 1° 的立体角或水平 4°, 垂直 2°, 光强为 25000cd。

$$\Phi_{(lamp,1)} \cong 50lm \quad (17)$$

区域 2: 水平 20° (即从左 100° 到右 10°), 垂直 4°, 光强为 10000cd。

$$\Phi_{(lamp,2)} \cong 200lm \quad (18)$$

区域 3: 水平 70° (即从左 35° 到右 35°), 垂直 10°, 光强为 1000cd。

$$\Phi_{(lamp,3)} \cong 170lm \quad (19)$$

$$\Phi_{lamp} = \Phi_{(lamp,1)} + \Phi_{(lamp,2)} + \Phi_{(lamp,3)} \cong 420lm \quad (20)$$

若采用一个典型的卤钨灯光源来设计近光灯, 光源的输出光通量是 1000lm。若进一步假定光线的收集效率是 60%, 总的系统损失为 30%, 为了达到式

(17)至式(19)中所描述的设计性能,光学系统的有效孔径需要达到 12000mm²。采用所需要的性能进行测试,我们可以比较采用 LED 或卤钨灯时系统的有效孔径。如果 LED 的有效发光面积为 A_s = 1.5mm × 1.5mm(由于圆柱封装的原因,要比 LED 芯片的面积略大)。每个 LED 的总输出光通量为 Φ_s = 100lm,且 LED 是朗伯光源,扩散角为 Φ_s = π,所以光源的亮度为 L_s = 14.15cd/mm²。为了形成热点,我们首先需要平衡孔径和焦距之间的矛盾(详见上节讨论),由于存在灯具孔径、光学系统的焦距和 LED 的面积大小等限制,假设整个系统的效率为 η = 0.42,即包含了反射损失、透射损失、折射损失和聚光损失。因此热点上的总光通量为:

$$\begin{aligned} \Phi_{(lamp,1)} &= L_{(lamp,1)} A_{(lamp,1)} \Omega_{(lamp,1)} \\ &= \eta L_s \Omega_{(lamp,1)} A_{(lamp,1)} \end{aligned} \quad (21)$$

在式(21)中,光学系统是假定为光学径角性守恒的系统,即光线在经光学系统会聚时没有扩散。如前所述,形成热点所需的区域 1 的光通量为 50lm,若采用亮度为 14.15cd/mm² 的 LED,则形成热点所需的孔径为:

$$A_{(lamp,1)} = \frac{\Phi_{(lamp,1)}}{\eta L_s \Omega_{(lamp,1)}} \cong 8\,000\text{mm}^2 \quad (22)$$

类似地,区域 2 和区域 3 所需孔径为:

$$A_{(lamp,2)} = \frac{\Phi_{(lamp,2)}}{\eta L_s \Omega_{(lamp,2)}} \cong 8\,200\text{mm}^2 \quad (23)$$

$$A_{(lamp,3)} = \frac{\Phi_{(lamp,3)}}{\eta L_s \Omega_{(lamp,3)}} \cong 1\,200\text{mm}^2 \quad (24)$$

这样

$$A_{lamp} = A_{(lamp,1)} + A_{(lamp,2)} + A_{(lamp,3)} \cong 18\,000\text{mm}^2 \quad (25)$$

式(25)显示,为了达到近光灯的光型分布要求(光型分布区域内的光通量为 420lm,热点的光强为 25000cd),采用 LED 时的有效孔径要比采用卤钨灯时大了 50%。虽然有多种典型的光学系统可以形成汽车前照灯所需的光型,如反射器系统、透镜系统、投影系统等,但为了达到所需的光度学参数,都需要一定的有效孔径。为了保证应用 LED 设计前照灯时得到与应用卤钨灯时相同的性能,并具有相同的孔径,主要有以下几种方式。

(1)由于卤钨灯的发光面积(灯丝的大小)与 LED(芯片大小)接近,而 LED 是半球面发射的,为了得到

卤钨灯的近光灯性能,一个简单的方法就是在不改变发光面积的条件下将单个 LED 的输出光通量提高到 500lm。这样只需采用两个 LED,每个 LED 对应半个灯具孔径。这种方式可简单地解决问题:在光型内有相同的光通(420lm),并具有相同的孔径大小(12000mm²),但每个 LED 的亮度必须提高 5 倍。

(2)将单个 LED 的输出光通量增加到 150lm,这样只需 10 个 LED,其有效孔径的大小将缩小到与采用卤钨灯时相同。但是这样该灯具的总光通为 1500lm,这将导致系统效率的进一步下降。

(3)在单个 LED 的亮度不能满足时,为了克服孔径的限制,另一个方法就是采用多个 LED 共用一个孔径。如果我们假定采用 N_i 个 LED 来共用一个孔径,那么

$$\Phi_{(lamp,1)} = \eta N_i L_s A_{(lamp,1)} \sum_i \Omega_{(lamp,LED_i)} \quad (26)$$

由于反射系统或透射系统都存在物理结构上的限制,多个 LED 的复合立体角总要比原始要求的大一点(见图 6),所以如果光线扩散到所设计的立体角外时就要考虑额外的损失。

$$\sum_i \Omega_{(lamp,LED_i)} > \Omega_{(lamp,1)} \quad (27)$$

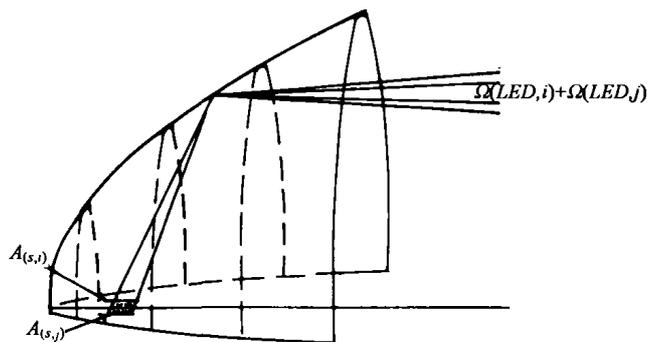


图 6 多个 LED 共用相同的环带

以上分析说明当多个 LED 共用一个孔径时,需要考虑额外的损失。但是在不能明显地增加 LED 的亮度和改变 LED 结构的情况下,共用孔径是目前将 LED 应用于汽车前照灯唯一的方法。主要有以下两种典型的方法来共用孔径:

a) 在一个大的反射杯里安装多个 LED。

b) 让一些 LED 使用其他 LED 专用的部分孔径。

方法 a 受单个 LED 物理包装的限制,方法 b 总体上有较大的灵活性,可以重新分配孔径每个部分的功能。

如上所述(见图 2),光线在反射器的不同位置有不同程度的扩散。在汽车前照灯设计中,扩散较小的反射器部分通常被用来形成热点,其他区域所对应的扩散角太大,不能形成热点,主要用于形成光型的其他部分,如侧光、前沿光等,在这些区域的光线会聚效率非常重要。当共用孔径时,部分 LED 主要通过扩散角较小的部分来形成热点,而其他的 LED 主要设计为高会聚效率。

虽然目前 LED 在汽车前照灯的应用中还存在一定的障碍,但如何灵活地去共用孔径,为光学设计工程师们指出了一条希望之路。总之,经验告诉我们共用孔径会带来额外的光损失,故需要采用更多的 LED 来满足汽车灯的光型分布和总孔径的需求。例如,由 15 个 LED(每个 LED 的光通为 100lm,即总光通为 1500lm)构成的汽车前照灯,可能会符合我们前面所讨论的性能和孔径的需求。但是,系统的总体效率会比卤钨灯系统的低。

5 结论

采用 LED 光源来设计汽车近距灯时所存在的限制主要基于无成像光学系统的两条准则:

a)系统不能改变(增加)光源的亮度。

b)系统输出的光学径角性值总是大于等于输入的值。

由于这两条准则,为了满足汽车近距灯光型分布的要求和灯具孔径的限制,LED 的亮度必须跟现有的卤钨灯可以比拟,甚至要更高。通过比较,为了达到与应用卤钨灯时的近距灯相同的光度学参数和孔径大小,可以有以下 3 个解决方案:

a)单个 LED 需要提供 500lm 的光通量,有效发光面积为 $1.5\text{mm} \times 1.5\text{mm}$,即只需有 2 个 LED 就可满足

汽车近距灯的设计要求。

b)单个 LED 的光通量增加到 150lm,即采用 10 个 LED,总光通量为 1500lm。

c)不增加 LED 的亮度,只增加 LED 的数目来达到 1500 左右的光通量。

在灯具孔径相同时,方案(b)跟(c)的系统效率要比卤钨灯系统低。

在设计汽车前照灯时,LED 光源跟卤钨灯光源相比存在一些缺陷。前面提到,汽车前照灯的光型是高度各向异性的。虽然垂直扩散角很小,但水平扩散角却要大得多,这两个方向的光学径角性值是不同的。正是由于这个不对称的性质,虽然整个系统的扩散在垂直方向和水平方向相平衡,但总体的光学径角性值不能被抵消,这就是细长型的光源可以更有效地被利用的原因。在我们以后的文章中,将会对有关 LED 在设计汽车前照灯中的优越性进行相关的讨论。

参考文献

- 1 W. T. Welford, R. Winston, High Collection Non-imaging Optics, Academic Press, New York, 1989
- 2 H. A. E. Keita, Light Calculation and Measurements, Macmillan and Co Ltd., Netherlands, 1971
- 3 P. Albou, LED Module for Headlamp, Lighting Technology SAE SP-1787 pp65-70, 2003
- 4 W. Falicoff, Optical Design Consideration for LED Automotive Lighting, Strategies in light 2003
- 5 D. Pelka, Novel Optical Architectures Workshop, Strategies in light 2002
- 6 Luxeon Star Power Light Source, Technical data, Lumileds' publication, 2003
- 7 SAE Ground Vehicle Lighting Standards Manual, HS-34, 2002 Edition.

译自北美照明有限公司技术资料

(本文编辑 江姗)

中国取得 LS-11 会议主办权

2004 年 7 月 18~22 日,第 10 届国际电光源科技研讨会(LS-10)在法国的 Toulouse 召开。会议期间,委员会多次开会讨论并通过了 2007 年由中国上海复旦大学主办 LS-11 的决议。在 7 月 22 日的闭幕式上,委员会主席正式宣布了此项决议。

(本刊)