

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.05.012

## 高速公路现行照明方式解析

赵海天<sup>1</sup>, 赖冠华<sup>1</sup>, 胡艳鹏<sup>1</sup>, 王少健<sup>2</sup>

(1. 深圳大学 建筑与城市规划学院, 广东 深圳 518060; 2. 郑州市城乡规划局, 郑州 450000)

**摘要:**基于舒适性、照明效率和可见度3个方面对现行照明方式从路面照明、空间照明方面进行分析,揭示了现行照明方式存在的缺欠。分析发现,目前以LED光源对HPS光源进行简单替代,并不能对上述缺欠进行有效改善,因而不是参与道路照明的恰当形式;消除路灯眩光的必要条件是路灯位于驾驶员与路面之间;提高可见度水平的必由之路是重新进行光分布设计和提高有效照明比例;道路照明方式的创新性研发方向是将路面照明、空间照明、雾天照明三重任务分解,采用各自独立的小功率、高效能光源,组合运用,分别控制,独立运行。

**关键词:**城市交通;道路照明;可见度;眩光;LED;节约能源

**中图分类号:**TU 113.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)05-0071-05

## Analysis of Current Highway Lighting Type

Zhao Haitian<sup>1</sup>, Lai Guanhua<sup>1</sup>, Hu Yanpeng<sup>1</sup>, Wang Shaojian<sup>2</sup>

(1. School of Architecture and Urban Planning, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong, P. R. China;  
2. Zhengzhou Urban and Rural Planning Bureau, Zhengzhou 450000, P. R. China.)

**Abstract:** Current mainstream lighting type from three aspects including comfort, energy efficiency and visibility was analyzed as well as the shortcomings of the lighting type. The LED fails to improve the current condition effectively and the replacement of HPS with LED is not advisable. To avoid glare, it is necessary to locate road lamp between driver and road surface. Light distribution should be redesigned and the increased proportion of effective lighting is required to improve the visibility level. A new method is proposed by employing separate, low-power and high efficacy LED and customized control system to satisfy the requirement of various functions including road surface lighting, space lighting and lighting in the fog condition

**Key words:** urban traffic; road lighting; visibility level; glare; LED; energy reserving

多数高速公路并不设置照明,如果是处于城市范围之外周围更是一片漆黑,时速不小于60 km/h的汽车行驶在高速公路上,当前方发生交通事故有车停驶在路上时很可能发生二次事故,近年来,在一些车流密集的重要高速公路(如机场高速路)及收费站等特殊路段开始安装照明设施,CIE曾根据数据统计出道路亮度与车速的对应关系,车速越高要求路面亮度越大,当对比度增加时,可以降低亮度值<sup>[1]</sup>。

目前,中国高速公路路灯照明是按《公路照明技术条件》(GB/T 24969-2010)<sup>[2]</sup>规定的照明方式进行设计,与美国及日本高速公路照明相比,中国规定的标准值明显偏高,同时在照明方式上,称之为现行(主流)照明方式,它有3个主要特点:高(高度 $\geq 10$  m)、大(单灯功率 $\geq 250$  W)、远(灯距 $\geq 30$  m),光源为HPS、MH或两者混光。高速公路照明的宗旨就是保障道路在各种条件下车辆行驶的安全。其主

收稿日期:2014-03-21

基金项目:国家自然科学基金(51278309);深圳市科技创新资助项目(CXC201006040018A)。

作者简介:赵海天(1957-),男,教授,博士,主要从事建筑与城市光环境研究,(E-mail) arphlb2006@126.com。

要功能为:夜间在路面上提供充分而均匀的照度和亮度,避免自身的眩光和提高前方物体的可见度。眩光是评价道路照明的重要指标,驾驶员处在强烈的眩光之下,会导致视觉疲劳甚至危险。提供路面亮度是道路照明的基础,高效的路面照明不但提供舒适的驾驶环境,而且是节能的主要途径。可见度表征驾驶员对于前方物体的辨识能力<sup>[3]</sup>。高速公路现行照明方式是随着高压气体放电光源的应用而产生的<sup>[4]</sup>,已有几十年历史。白光光源与钠灯相比在中间视觉上存在着优势<sup>[5]</sup>,总结、分析现行照明方式的弊端,对于白光 LED 光源参与道路照明以及新型照明方式的研发是必要的基础性工作。笔者从舒适度、照明效率和可见度 3 个方面对现行照明方式进行分析。

## 1 现行照明方式的舒适度

### 1.1 眩光

现行照明方式采用截光型路灯来减少眩光。这一措施,可以限制眩光但无法消除眩光。在截光型灯具约束下,光源辐射并不主要投射到机动车驾驶员眼中,从而避免了主要的直接眩光。但是,该型灯具存在一个高亮度发光面,由于该发光面与驾驶员之间存在高度差  $H$ ,则必然存在一个视角  $\alpha$  使得驾驶员可直视该发光面,感觉到来自前上方的路灯发光面的眩光(见图 1)。

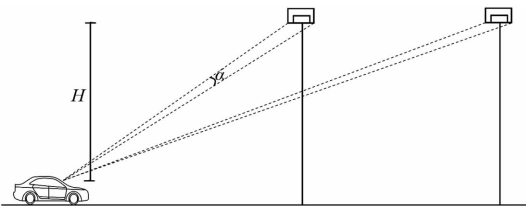


图 1 现行主流照明方式眩光来源示意图

把灯具倾斜放置可改变这一条件,使灯具的发光面与驾驶员向前上方的视线平行,从而使  $\alpha$  角为 0 (见图 2)。但机动车在运动时  $\alpha$  角的大小在时刻变化,故这种方法无法消除本行车方向但处于不同位置的车辆的眩光;同时,这一倾斜的“发光面”会照射到对面行车方向,反而加强了对面行车方向的眩光,因此不可取。

在高灯位照明方式下,高于驾驶员人眼及以上  $60^\circ$  范围内的所有光源均为眩光光源(如图 3 所示)。分析直接眩光区,不难发现,产生直接眩光的根本原因是光源的发光面与工作面(路面)位于观察者(驾驶员)非同侧。这样,观察者在观察工作面的同时,不可避免的要看到光源的发光面,产生眩光;反之,

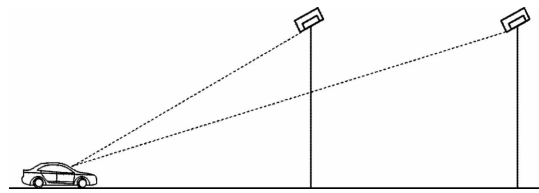


图 2 眩光改进示意图

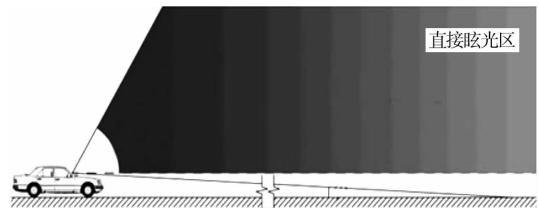


图 3 快速道路直接眩光示意图

若光源发光面与工作面位于观察者同侧,那么观察者在观察工作面时,看到的则是光源的非发光面,不能产生眩光。因此,消除高速公路路灯眩光的必要条件是使路灯发光面与路面位于驾驶员同侧,即路灯位于驾驶员与路面之间。将大功率气体放电路灯高度降至驾驶员眼高以下显然不可行<sup>[6]</sup>。因此,现行照明方式下,直接眩光不可避免。同时,现行照明方式下,后视镜内也不可避免存在眩光。

### 1.2 亮度纵向均匀度

道路照明的亮度均匀度对于行车安全是一个重要参数。而对于驾驶员来说,路面纵向亮度均匀度同样是一个直接感受的重要参数。纵向亮度均匀度是描述单条车道上的亮度均匀情况。事实上,对于行驶较长时段的驾驶员来说,驾驶舒适性最直接、最主要的感受是所在车道的纵向亮度均匀情况,而非整个路面其它车道的亮度及其均匀度情况<sup>[7]</sup>。从这个意义来说,纵向亮度均匀度比整个道路的亮度均匀度对于驾驶舒适性的影响更为重要。现行路灯的安装间距 30 m 左右,难以提高以车道为计算单位的纵向亮度均匀度。

## 2 现行照明方式的照明效率

### 2.1 路面照明中的无效照明

2.1.1 无效照明区域 现行照明方式为提高照度均匀度,将路灯以下的空间尽可能均匀照亮。结果是在道路前方断面形成 12 m 高的光幕区,如图 4 所示。但对于封闭的快速道路,机动车驾驶员仅需观察路面及前方障碍物(限高 5.3 m)情况而不需要同时观察道路以外目标以及上方 12 m 高目标的情况。事实上,高速公路照明并不需要将公路以外和路面上方 12 m 高的空间照亮。据此,路面上方光幕

区可降低至一半甚至更低,我们将这一高度内的光幕空间称为有效光幕区域,驾驶员识别公路路面和前方障碍物主要依靠这一光幕空间内的照明,其余为无效光幕区域。图 4 中,无效光幕区域为 I、II、III、IV 区,有效光幕区域为 V 区。显然,只有有效光幕区内的照明才有意义。

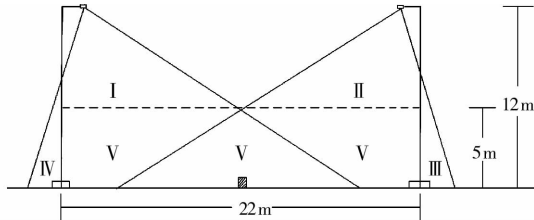


图 4 现行高灯位照明方式存在大比例的无效光幕区

由图 4 可大致推断出,无效光幕区域接近全部照明光幕区域近一半,这将导致高速公路路面照明的能量密度大大增加。

根据平方反比定律,在现行(高灯位)照明方式下,照度在垂直方向的分布规律是上亮下暗。这使得处于上部的无效光幕区的照度会高于位于下部的有效光幕区的照度。这表明高速公路现行照明方式在照度分布上同样不合理。

2.1.2 有效照明区域内的无效分量 现行高速公路照明采用蝙蝠型配光<sup>[8]</sup>,如图 5(a)所示。图 5(a)由相互垂直的截面组成,如图 5(b)与(c)。图 5(c)中的光强矢量可分解为向左、向右两部分光强,如图 5(d)。

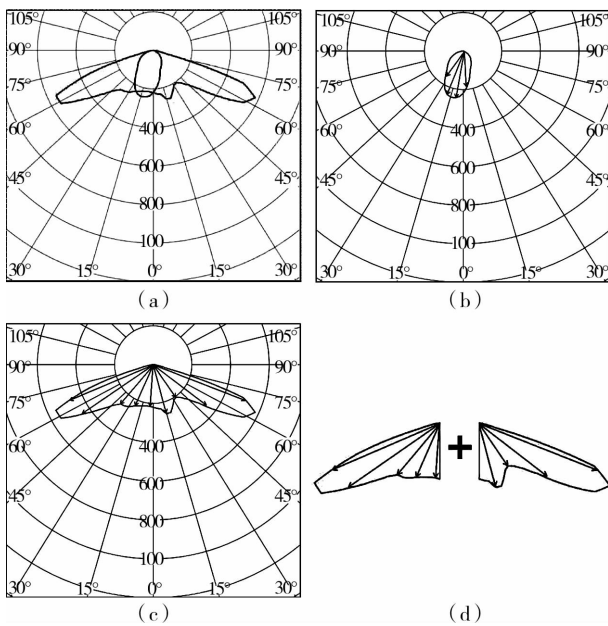


图 5 典型路灯配光曲线及其分解

在高速公路照明中,图 5(d)中的两部分光强分

别对应与机动车行驶方向相同的照射方向(图 6(a))和与机动车行驶方向相反的照射方向(图 6(b))。

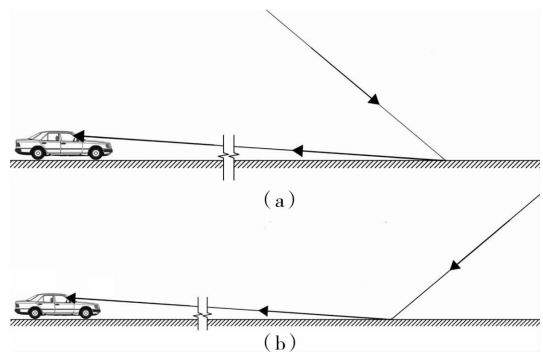


图 6 不同照射方向示意

光源入射方向与机动车行驶方向相同的照明方式为“顺向照明”,与机动车行驶方向相反的照明称为“逆向照明”。现行主流道路照明方式是由高灯位顺向照明方式与高灯位逆向照明两种照明方式的组合。

1)规则反射条件下,顺向照射方式下的视网膜照度与比较

在二维平面上,设  $E_i$  为光源的入射照度矢量, $E_r$  为反射照度矢量,视轴为  $V_e$ ,投光入射角为  $\alpha$ ,视轴方向与反射照度矢量之间的夹角为  $\beta$ ,与工作面之间的夹角为  $\varphi$ ,则  $\beta=90^\circ-(\varphi-\alpha)$ ,如图 7。

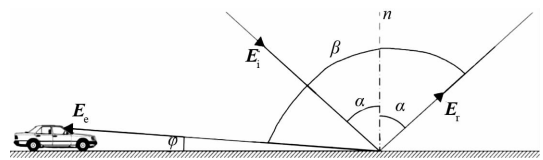


图 7 来自于地面反射的驾驶员视网膜照度分量

根据配光曲线与投光角可确定该方向光强,由余弦定律,可求出该点光源与计算点上形成的照度  $E_i$ 。对于规则反射,在数值上  $E_r = E_i$ 。采用顺向投光照明时,机动车驾驶员视线方向接收到的视网膜照度  $E_{r..e}$ 。如式(1)所示。

$$E_{r..e} = E_r \sin(\varphi - \alpha) \tag{1}$$

由式(1)可得到:当  $\alpha \rightarrow 0$  时,  $E_{r..e} \rightarrow 0$ 。

其物理意义是:路灯以“高灯位顺向照明”方式向路面投射与路面近乎垂直的光,驾驶员视网膜照度分量趋于 0。

在三维道路空间模型下,同向照明方式见图 8,也可得到上述结论。既在顺向照明情况中,若路面反射辐射量不考虑漫反射作用,驾驶员视网膜照度分量趋于 0。这说明,即使在有效照明区域内,顺向

照明也不能为驾驶员视网膜提供有效的照度,只有逆向照明方式才可能提供有效的照明。

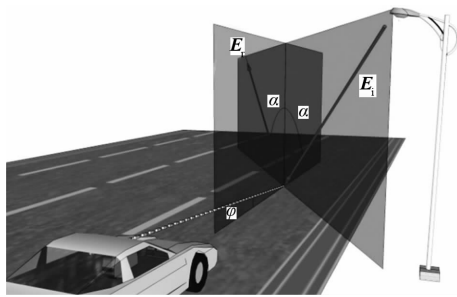


图 8 三维道路空间驾驶员视网膜照度分量

2)规则反射条件下,逆向照射方式下的视网膜照度与比较

在三维道路空间模型下,逆向照明的各照度分量如式(2)~(4)所示。

$$E_{r,v} = E_r \cos \alpha \quad (2)$$

$$E_{r,t} = E_r \sin(\alpha + \varphi) \sin \theta \quad (3)$$

$$E_{r,e} = E_r \sin(\alpha + \varphi) \cos \theta \quad (4)$$

其中,  $E_{r,e}$  是视网膜照度,为有效辐射量,  $E_{r,v}$  和  $E_{r,t}$  是无效分量。

在道路照明计算模型中,取  $\varphi = 1^\circ$ ,可比较上述 3 个分量的大小。

当  $\alpha \rightarrow 0^\circ$  时,

$$E_{r,v} > E_{r,e} > E_{r,t} \quad (\theta < 45^\circ) \quad (5)$$

$$E_{r,v} > E_{r,t} > E_{r,e} \quad (\theta > 45^\circ) \quad (6)$$

上两式表明,在高灯位条件下,无效照明分量  $E_{r,v}$  在数值上最大,而在  $\theta > 45^\circ$  时,有效照明分量  $E_{r,e}$  最小,两种情况下无效照明分量均大于有效照明分量。

事实上,不但无效照明区域内的照明为无效照明,即使在有效区域内,也仅仅有效分量可提供有效照明,但在现行照明方式下,有效照明区域内存在大量的无效照明。

### 2.2 空间照明中的无效照明

现行高速公路照明方式中,对于空间照明是通过路灯的顺向照明分量进行的,如图 9 所示。  $E_i$  为入射照度,  $E_s$  为反射照度,  $E_{s,e}$  为驾驶员视网膜照度,  $\omega$  为  $E_{s,e}$  与  $E_s$  之间的夹角。

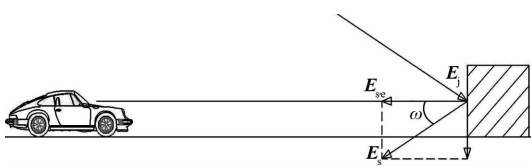


图 9 来自于障碍物反射的驾驶员视网膜照度分量

由余弦定律,当路灯照射前方物体时,反射矢量在驾驶员视网膜照度分量为  $E_{s,e} = E_s \cos \omega$ 。

$\omega \rightarrow 0^\circ$  时,  $E_{s,e} \rightarrow E_s$ , 物理意义是,当光源以投光角度接近平行于路面、照射方向与车行方向相同照射前方空间时,驾驶员视网膜照度将取得最大值。

现行照明方式主要以水平照度进行评价未能全面反映这一事实。原因在于,人视条件与车视条件的不同。正常工作时(比如读书、写字),人眼视轴近于垂直于工作面,故工作面照度通常为水平照度,照度越高,人感受到工作面越亮,这就是针对人视条件的照明;极端条件是,入射光轴与人眼均垂直于工作面,人眼感受到工作面“最亮”<sup>[9]</sup>。

车视条件则不同,驾驶员视线为向前,几乎与路面平行,感受到的是视网膜照度,与之对应的是垂直照度,在光源光强一定的条件下,空间垂直面照度与水平照度的关系是:水平照度越高,垂直照度越小。对应人视条件与车视条件,前方物体亮度的有效与无效分量恰恰相反。现行照明方式强调水平照度,忽视垂直照度,使得仅有的有效照明也含有大比例的无效分量。

综上所述,现行的高速公路照明方式下,对于路面照明和空间照明均存在大量无效照明,其照明效率很低。而光源以低灯位、与车行同方向照射前方物体时,照明效率较高。

### 3 现行照明方式的可见度

现行的高速公路路灯同样使得机动车行进方向的垂直照度难以均匀。有研究指出,在部分区域的垂直照度非常弱,甚至接近于零<sup>[10]</sup>,垂直照度不均匀将导致行车方向前方空间亮度不均匀(忽明忽暗),这将降低前方物体的可见度 RP 值,严重影响在道路上对于前方物体的辨识<sup>[11]</sup>。

前方物体表面亮度与空间垂直照度存在正相关关系,而亮度与前方物体可见度在中间视觉范围亦分段的呈现正相关关系<sup>[12]</sup>,见图 10。

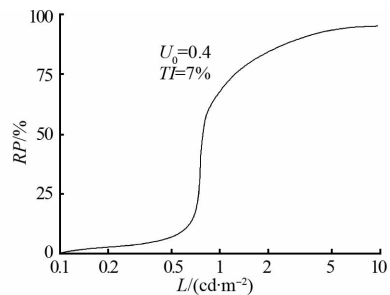


图 10 亮度与可见度关系 ( $U_0 = 0.4, TI = 7\%$ )

从图10中可以看出,当前方物体表面亮度降至 $0.1\sim 0.5\text{ cd/m}^2$ 时,可见度将降至20%以下。这表明高灯位路灯照明方式下,存在可见度特别低的区域,从而引起整体可见度的降低。因此,要解决可见度问题,应重视垂直照度以及垂直照度均匀度,也就是改变现行路灯的配光分布方式,有效的保证垂直照度。

上述分析表明,现行的高速公路照明方式(高灯位照明方式)是存在这3个问题的根本原因,该方式不可能解决眩光、无效照明和可见度低下问题。

#### 4 现行照明方式与LED路灯照明

现行的高速公路照明方式是随着气体放电光源的应用而诞生的,并已暴露出明显的弊端;随着LED等新型光源的出现也必然会产生新的更为先进的照明方式。

LED具有亮度高、体积小、显色性高、低压安全和可分散安装等特点,这为从另一途径解决上述3个问题提供了合适的光源。

目前,LED应用与研发主要是用LED与传统光源进行简单的替换,几乎所有LED厂家统统沿用传统路灯的设计思路,追求几十瓦、上百瓦的大功率LED路灯以求与目前的HPS灯造型、安装方式完全相同或兼容,导致当前LED路灯及安装方式几乎全部以适用于HPS光源的“蛇头(平板蛇头)灯”为标准进行设计和制造,而非以LED发光规律为出发点进行研发。

小功率的LED光源适宜分散安装,也没有突出的散热问题。但大功率LED路灯的集中、高灯位照明则带来了散热不良、耐久性不好和维修不便等本不该出现的问题,由此引发了一系列的功能与质量问题,导致LED路灯在照明工程界受到质疑。

以LED光源替换HPS光源并不是照明方式的改变,也不可能解决高灯位照明方式存在的上述3个问题。以简单替换为特征的上百瓦、高灯位的LED路灯照明没有解决传统HPS路灯存在的问题。事实上,LED在节能方面最大的潜力就是它的光分布设计的可塑性<sup>[13]</sup>。

#### 5 结论

1) 现行的高速公路照明方式下,光源位于驾驶员视平线之上并向下投光,因而直接暴露于驾驶员前方视域内。蝙蝠形配光的逆向投光分量会导致行车方向上驾驶员前上方的直接眩光,顺(同)向投光分量则导致对面行车方向上驾驶员前上方的直接眩

光。消除眩光的必要条件是使光源与路面位于驾驶员视线同侧。

2) 有效照明为有效光幕区内的有效照明分量。现行照明方式下,无效照明分量大于有效照明分量。因此,提高有效照明比例是提高高速公路照明效率的关键。现行照明方式下,路面亮度纵向均匀度低,存在可见度特别低的区域,这也导致可见度总体水平降低。因此,重新进行光分布设计是提高可见度总体水平的必由之路。

3) 简单替换HID光源绝非LED参与道路照明的合理形式。利用LED光分布设计的可塑性特性,走出简单替代的模式,进行基于LED自身规律、发挥LED优点的创新性研发,是LED道路照明的根本途径。

4) 现行照明方式在本质上是一个灯同时承担了路面照明、空间照明、复杂天气照明三重任务,它们在空间、时间上相互制约,必然失去“均好性”;因此,将上述任务分解,由各自独立的小功率、高效能光源来完成,分别控制,独立运行是进行道路照明方式的创新性研发的发展方向。

#### 参考文献:

- [1] 姚凯,万淑云. 高速公路照明设计探讨[J]. 灯与照明, 2003,27(4):20-22.  
Yao K, Wan S Y. Discuss on highway lighting [J]. Light and Lighting, 2003,27(4):20-22.
- [2] GB/T 24969—2010 公路照明技术条件[S]. 北京:中国标准出版社,2010.
- [3] 李景色. 我国道路照明的展望[J]. 照明工程学报, 1992(Sup1):113-121.  
Li J S. Expect on road lighting [J]. China Illuminating Engineering Journal, 1992(Sup1):113-121.
- [4] 李景色,李铁楠. 修订我国城市道路照明设计标准中的几个问题之一 [J]. 照明工程学报,2004,3(1):38-42.  
Li J S, Li T N. Several issues for amending China's urban road lighting design standards [J]. China Illuminating Engineering Journal,2004,3(1):38-42.
- [5] Scott A. 白光光源在英国的评价[J]. 中国照明电器, 2007(2):28-30.  
Scott A. Evaluation of white light source in England [J]. Chinese Lighting Appliance, 2007(2):28-30.
- [6] 汪建平,邓云塘,钱公权. 道路照明[M]. 上海:复旦大学出版社,2004.
- [7] Ohno Y. Dynamic roadway lighting measuring system with split type photocells [J]. Journal of the Illuminating Engineering Society, 1987, 16(2):137-151.