



道路照明可见度计算模型研究

翁季^{①*}, 胡英奎^②, 应文^①

① 重庆大学建筑城规学院, 重庆 400045;

② 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045

* E-mail: wengji0403@163.com

收稿日期: 2010-01-07; 接受日期: 2010-02-21

国家自然科学基金资助项目(批准号: 50878217)

摘要 在城市道路照明中, 可见度是对驾驶员的视觉可靠性起综合影响作用的评价指标, 它对道路照明安全和节能起着非常重要的作用. 本文介绍了道路照明可见度的概念及影响因素, 详细研究了可运用于道路照明可见度设计中的小目标可见度的计算模型; 从驾驶员的视功能和视觉舒适性出发, 阐述了制定城市道路照明可见度标准的重要意义.

关键词
道路照明
可见度
计算模型
设计标准

1 引言

城市道路照明的目的是在夜间为机动车、非机动车驾驶员以及行人创造良好的视觉环境, 达到交通安全, 减少交通事故, 提高交通运输效率的目的. 我国的城市机动车交通道路照明设计标准^[1]根据使用功能将道路划分为快速路、主干路、次干路和支路四类道路级别, 并给出了相应的道路路面平均亮度(或路面平均照度)、总均匀度、纵向均匀度、失能眩光限制和环境比(SR)道路照明评价指标, 同时还指出应具有良好的诱导性等.

研究表明^[2], 在路面平均亮度、环境比、失能眩光等道路照明质量的影响因素之间存在着一定的内在关系, 而且对驾驶员的视功能起综合影响作用, 即这些单项道路照明质量指标和目标亮度的共同贡献就形成了道路照明可见度好坏. 可见度是对驾驶员的视觉可靠性起综合影响作用的评价指标, 它对道路照明安全和节能起着非常重要的作用. 为了充分

发挥道路照明的功能, 我们应在认清国际道路照明标准发展趋势的基础上, 结合我国道路照明现状对道路照明的技术指标进行更为深入的研究, 得到更具实用性、前瞻性、先进性、科学性的照明标准.

可见度是人眼辨认物体存在或形状的难易程度, 它是人们观察目标物清晰程度的视力主观感觉的心理物理量, 也称为视度或能见度^[3]. 在道路照明中, 为了保证驾驶员看清路面的目标物, 仅有路面亮度是不充分的, 必须使目标物亮度和背景亮度的差别高于一个确定的最小值. 因此, 可见度常采用可见度水平表示^[2], 它表示了目标和背景的亮度差大于其阈限状态时亮度差的倍数:

$$VL = \frac{\Delta L}{\Delta L_0}, \quad (1)$$

式中, VL , 可见度水平; ΔL , 视看目标的亮度与其背景的亮度的差, 即有 $\Delta L = L_t - L_b$; ΔL_0 , 视看目标刚刚可见时目标亮度与其背景亮度的差, 即阈限亮度差为

$$\Delta L_0 = L_{t0} - L_b.$$

由上式可知, 影响可见度水平的主要因素是目标物亮度、紧邻的背景亮度和阈限亮度差. 研究表明^[4], 邻近环境的适应亮度和失能眩光, 目标物呈现的时间长短、观察者年龄和负对比(目标物亮度小于背景亮度)修正是影响阈限亮度差的重要因素. 为了进行更为合理的机动交通道路照明设计, 美国道路照明标准 RP-8-00^[5]推荐了小目标可见度 STV 设计标准. 该标准是在干燥、笔直单向车道空旷路面的条件下, 以识别时间为 0.2 s, 视角为 7.45', 驾驶员年龄为 60 岁的不利条件下, 驾驶员眼睛高度为 1.45 m, 观察正前方 83.07 m 垂直放置于路面的、大小为 0.18 m × 0.18 m, 其表面的光反射比为 0.5 的小目标漫反射板, 分别计算出两个灯杆之间均匀布置的两排共 20 个计算点处小目标的可见度水平, 最后再计算出可见度水平的加权平均值, 从而获得小目标可见度. 由于 RP-8-00 规定的小目标可见度计算模型非常复杂, 为了便于进行道路照明可见度计算, 笔者通过阈限亮度实验和广义的韦伯-费昔勒定律, 在一定的计算条件下, 简化计算模型.

2 目标物亮度和背景亮度的计算模型

2.1 目标物亮度 L_t

假设目标物表面反射遵循朗伯定律, 则由平方反比定律得^[6]:

$$L_{tp} = \frac{I(c, \gamma) \cdot \cos^2 \gamma \cdot (\sin c) \cdot \sin \gamma \cdot \rho \cdot LLF}{(H - 0.5h)^2 \cdot \pi}, \quad (\text{cd/m}^2), \quad (2)$$

式中, L_{tp} , 单个灯具贡献下的目标亮度; c, γ , 灯具与 P 点的角度关系, 见图 1; I, γ 与 c 角度的发光强度; LLF , 灯具的光折减系数; H , 灯具高度; ρ , 目标物反射系数; h , 目标物高度; 而目标亮度 L_t 为所有灯具对目标物贡献的亮度总和.

2.2 背景亮度 L_b

一个灯具在道路路面某点 P 上所产生的亮度^[7]:

$$L_{pi} = \frac{I(c_i, \gamma_i) \cdot \gamma(\beta_i, \gamma_i) \cdot LLF}{MF \cdot H^2}, \quad (\text{cd/m}^2), \quad (3)$$

数个灯具在 P 点上产生的总亮度^[7]:

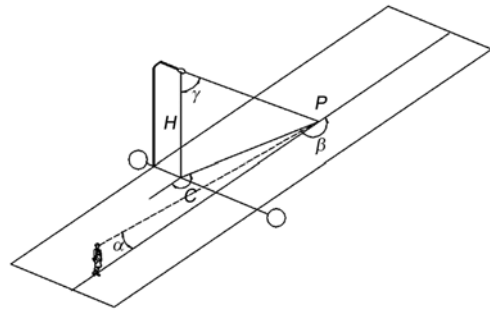


图1 亮度计算时坐标关系图解

$$L_p = \sum_{i=1}^n \frac{I(c_i, \gamma_i) \cdot \gamma(\beta_i, \gamma_i) \cdot LLF}{MF \cdot H^2}, \quad (\text{cd/m}^2), \quad (4)$$

式中, c_i, γ_i , 计算点 P 相对于第 i 个灯具的坐标; $I(c_i, \gamma_i)$, 第 i 个灯具指向计算点 P 的光强值; $\gamma(\beta_i, \gamma_i)$, 简化亮度系数, 可从实际路面相对应的标准路面的 γ 表中查出; H , 灯具的安装高度; LLF , 灯具的光折减系数; MF, r 表的乘积系数(通常为 10000).

在可见度计算中, 目标物背景亮度 L_b 应取紧邻目标物上下边界的中点的亮度 L_{b1} 和 L_{b2} (图 2)的平均值^[6], 即:

$$L_b = \frac{L_{b1} + L_{b2}}{2}, \quad (\text{cd/m}^2), \quad (5)$$

式中, L_{b1} , 目标物上边界的背景亮度, 即位于目标物后 11.77 m 处的路面亮度, 由(3)式计算; L_{b2} , 目标物下边界的背景亮度, 即目标物下方的路面亮度.

3 阈限亮度差的相关参数计算模型

3.1 等效光幕亮度 L_v

等效光幕亮度取决于眩光源在眼睛上产生的照度(E_{θ})以及观察方向和从眩光源来的光线入射方向之间的角度(θ). 并可用下面经验公式表示^[7]:

$$L_v = K \sum_{i=1}^n \frac{E_{\theta i}}{\theta^m}, \quad (\text{cd/m}^2), \quad (6)$$

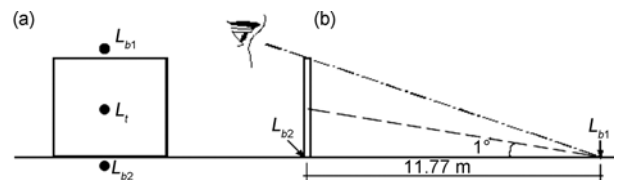


图2 目标物背景亮度的计算位置

式中, K , 10(取平均值); $E_{\theta i}$, 第 i 个灯具对观察者眼中的平面上垂直照度; θ , 视线和来自眩光源的光线入射方向之间的角度; 当 $\theta < 2^\circ$ 时, $m = 2.3 - 0.71 \lg \theta$; 当 $\theta \geq 2^\circ$ 时, $m = 2$.

θ 与灯具、观察点 A 的角度关系见图 3, 设 A, D, P 三点在道路平面上的坐标分别为: $(x_A, y_A), (x_D, y_D), (x_P, y_P)$ 可得到:

$$\cos \theta = \frac{d_1^2 + d_2^2 - d_3^2}{2d_1d_2}, \quad (7)$$

而

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{(H-h)^2 + (x_A - x_D)^2 + (y_A - y_D)^2}, \\ d_2 &= \sqrt{(1.45 - 0.09)^2 + 83.07^2}, \\ d_3 &= \sqrt{(H - 0.09)^2 + (x_P - x_D)^2 + (y_P - y_D)^2}. \end{aligned}$$

根据平方反比定律:

$$E_{\theta i} = \frac{I(c_A, \gamma_A) \cdot LLF}{d_1^2} \cos \theta, \quad (8)$$

而

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} c_A &= \frac{x_A - x_D}{y_D - y_A}, \\ \operatorname{tg} \gamma_A &= \frac{\sqrt{(x_A - x_D)^2 + (y_A - y_D)^2}}{H - h}. \end{aligned}$$

在进行等效光幕亮度计算时, CIE 假定车辆顶棚的挡光角度为 20° ^[8], 这意味着位于 20° 倾斜面以上的灯具不应包括在眩光计算中, 即图 3 中 $\theta_1 \leq 20^\circ$ 时, 才考虑灯具的眩光影响。

如图 3, $\theta_1 = \theta_a + \theta_b$, $\operatorname{tg} \theta_b = \frac{1.45 - 0.09}{83.07}$, $\theta_b = 0.938^\circ$,

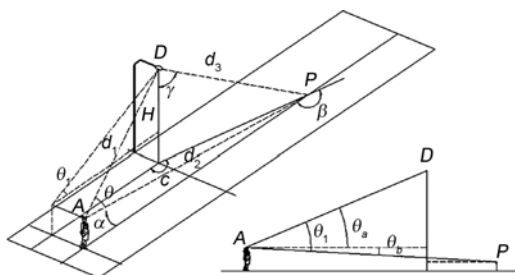


图 3 等效光幕亮度的计算图解

$$\operatorname{tg} \theta_a = \frac{H - 1.45}{y_D - y_A}.$$

3.2 人眼适应亮度 L_a

在城区机动车交通道路照明标准中, 夜晚路面平均亮度 L_b 在 $0.5 \sim 5.0 \text{ cd/m}^2$ 范围内, 此时人眼的适应亮度为目标物背景亮度和等效光幕亮度之和:

$$L_a = L_b + L_v, \quad (\text{cd/m}^2), \quad (9)$$

式中, L_a , 人眼的适应亮度; L_b , 目标物的背景亮度; L_v , 等效光幕亮度。

4 阈限亮度差的计算模型

可见度水平计算的关键在于阈限亮度差的确定。研究表明, 在一定的条件下, 阈限亮度差 ΔL_0 的大小与不同的人眼适应亮度成正比关系, 而与视角大小成反比关系^[2], RP-8-00 根据 Adrian 的计算模型, 采用下式^[4, 5]表示:

$$\Delta L_0 = k \left(\frac{F}{\alpha} + G \right)^2, \quad (\text{cd/m}^2), \quad (10)$$

式中, k , 系数, 取 $k=2.6$; α , 视角, 以角度中分(')为单位; F , 人眼适应亮度 L_a 的函数, 且有 $F=f_1(L_a)$; G , 人眼适应亮度 L_a 的函数, 且有 $G=f_2(L_a)$. 并给出了在不同人眼的适应亮度范围内 F 和 G 非常复杂的表达式^[4, 5]. 因此, 通过阈限亮度实验, 可得到具有一定精度的、简化的计算模型

4.1 阈限亮度实验

我们采用定值刺激法进行阈限亮度实验^[9], 通过计算机模拟使屏幕背景亮度和不同大小的朗道尔环的亮度可以独立和自由的调节, 选取年龄在 20~30 岁、男女各半、视力正常的 20 个测试者, 由测试者对朗道尔环开口方向的判断得到不同背景亮度 ($0.3515 \sim 11.67 \text{ cd/m}^2$)、不同识别几率 ($P=33.33\%$, 44.44% , 55.56% , 66.67% , 77.78% , 88.89%) 下阈限亮度差的实测值, 通过至少 18000 次测试得到约 6000 个实验数据. 根据笔者对城市道路的实测, 城市机动车交通道路照明路面亮度水平往往在 $0.5 \sim 5.0 \text{ cd/m}^2$ 之间, 在此条件下, 若视角 α 恒取 $7.45'$, 通过回归拟合的方法得到 $\alpha=7.45'$ 时 99.96% 识别几率下阈限亮

度差 ΔL_0 与背景亮度 L_b 之间的关系为:

$$\Delta L_{0(p=99.96\%)} = 2.6 \times \left[(1.3927 + 0.3526 \lg L_b) / 7.45 + 0.119 L_b^{0.5639} \right]^2 / n, \quad (\text{cd/m}^2), \quad (11)$$

式中, L_b , 目标物的背景亮度; n , 实验方法调整系数, 当 $L_b \geq 0.6 \text{ cd/m}^2$, $n=3.34$; $0.6 \text{ cd/m}^2 > L_b > 0.00418 \text{ cd/m}^2$, $n=3.47$.

表 1 为(10)式中 ΔL_0 的计算式与(11)式进行比较, 可以看出, 两式的计算结果非常接近, 相对误差均处在 $-1.25\% \sim +1.47\%$ 之间. 由于阈限亮度差常小于背景亮度的百分之一, 考虑测试系统误差的因素, 可认为公式(11)是可靠的, 由于 RP-8-00 标准中规定视角恒为 $7.45'$, 因此(11)式是一个非常实用的、具有一定精度的、简化的阈限亮度差计算模型.

4.2 阈限亮度差的修正系数

在实际的道路照明条件下, 也可能会发生亮背景上观察暗目标, 即在负对比条件下更利于观察目标物, 这就是说人眼更容易察觉亮背景上的暗目标, 所以要对阈限亮度差进行负对比修正.

根据 RP-8-00 中的计算负对比修正系数 K_f 的数学模型^[5], 负对比修正系数是随着人眼适应亮度增大而略有增大, 利用广义韦伯—费昔勒定律^[10]进行回归分析, 将适应亮度 L_b 视为光对人眼的刺激量, 负对比修正系数 K_f 视为对应于光刺激量的视知觉量, 当视角 α 为 $7.45'$ 时, 可以求出人眼适应亮度在 $0.5 \sim 5.00 \text{ cd/m}^2$ 范围内, 负对比修正系数 K_f 与人眼适应亮度 L_a 之间关系式如下式所示:

$$K_f = 0.7185 + 0.2052 \ln \left(\frac{L_a}{L_{a\max}} \right)^{0.2480} + 0.4036 \left(\ln \left(\frac{L_a}{L_{a\max}} \right)^{0.2480} \right)^2 + 0.2739 \left(\ln \left(\frac{L_a}{L_{a\max}} \right)^{0.2480} \right)^3, \quad (12)$$

式中, $L_{a\max}$, 适应亮度 L_a 的最大值, 本文取 5 cd/m^2 .

上式的判定系数为 0.999, 其计算结果与表 2 中 RP-8-00 中 K_f 的计算值比较更为一致, 相对误差均处在 $-0.03\% \sim +0.01\%$, 说明了负对比修正系数与人眼适应亮度之间的关系完全符合广义韦伯—费昔勒定律, 且采用(12)式可以用于道路照明计算.

由视觉实验得出: 识别时间越短人眼对目标的分辨力越差, 而(11)式的阈限亮度差的计算模型是根据 2 s 或无限制识别时间得到的, 为了采用美国道路照明标准 RP-8-00 中的识别时间 t 为 0.2 s 时的小目标可见度来评价, 就必须进行识别时间修正. 研究表明, 识别时间修正系数 K_t 与视角、人眼适应亮度有关. 根据 RP-8-00 中的识别时间修正系数的计算模型, 为简化计算, 利用古典韦伯—费昔勒定律^[10]进行回归分析. 将适应亮度 L_b 视为光对人眼的刺激量, 时间修正系数 K_t 视为对应于光刺激量的视知觉量, 当视角 α 为 $7.45'$, 观察时间 $t=0.2 \text{ s}$ 时, 可以求出人眼适应亮度在 $0.75 \sim 5.00 \text{ cd/m}^2$ 范围内, 时间修正系数 K_t 与人眼适应亮度 L_a 之间关系式如下式所示:

$$K_t = 1.6605 + 0.03415 \lg L_a. \quad (13)$$

上式的判定系数为 0.999, 其计算结果与表 3 中 RP-8-00 中 K_t 的计算值比较非常一致, 相对误差均处

表 1 阈限亮度实验的计算模型(11)式与 RP-8-00 的计算模型(10)式比较

$L_a (\text{cd/m}^2)$	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
(10)式计算值	0.0611	0.0724	0.0829	0.0929	0.1024	0.1116	0.1292	0.1461	0.1782	0.2088
(11)式计算值	0.0620	0.0729	0.0830	0.0926	0.1018	0.1107	0.1279	0.1444	0.1760	0.2064
相对误差(%)	1.47	0.63	0.07	-0.32	-0.60	-0.81	-1.07	-1.20	-1.25	-1.15

注: 表中的相对误差均以(10)式计算值为推算得的.

表 2 不同负对比修正系数计算模型的比较

$L_a (\text{cd/m}^2)$	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
RP-8-00 中的 K_f	0.6828	0.6836	0.6846	0.6860	0.6876	0.6895	0.6938	0.6985	0.7085	0.7185
(12)式计算值	0.6828	0.6835	0.6845	0.6859	0.6876	0.6895	0.6938	0.6984	0.7083	0.7185
相对误差(%)	0.00	-0.03	-0.02	-0.01	0.00	0.00	0.00	-0.01	-0.03	0.01

注: 表中的相对误差均以 RP-8-00 中负对比修正系数计算值为推算得的.

表3 不同识别时间修正系数计算模型的比较

$L_a(\text{cd/m}^2)$	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
RP-8-00 中的 K_t	1.6655	1.6609	1.6573	1.6545	1.6521	1.6500	1.6467	1.6440	1.6398	1.6367
(13)式计算值	1.6648	1.6605	1.6572	1.6545	1.6522	1.6502	1.6469	1.6442	1.6399	1.6366
相对误差(%)	-0.0	-0.0	-0.0	0.0	+0.0	+0.0	+0.0	+0.0	+0.0	-0.0

注: 表中的相对误差均以 RP-8-00 中的识别时间修正系数为准算得的。

在-0.04%~+0.01%, 说明了时间修正系数与人眼适应亮度之间的关系完全符合韦伯-费昔勒定律. 所在按美国道路照明标准条件进行照明计算时, 完全可以用(13)式来计算识别时间修正系数 K_t .

研究表明^[5], 人眼随着年龄增长, 角膜和水晶体逐渐变黄, 瞳孔收缩功能也会减弱, 60 岁时人眼对光的感受只有 20 岁时的 33%. 美国道路照明标准是以识别时间为 0.2 s, 60 岁老年驾驶员不利条件给出小目标可见度标准建议值的. 于是, 当 60 岁时, 由 RP-8-00 给出的年龄修正系数表达式中算得年龄修正系数 K_a 为 1.7682.

总之, 在人眼适应亮度 0.75~5.00 cd/m^2 范围内, 识别时间为 0.2 s, 视角为 7.45', 60 岁的阈限亮度差, 即经过识别时间修正、年龄修正和负对比修正后的阈限亮度差为:

$$\Delta L_0 = 0.07984 K_f \left(1 + 0.2532 \lg L_a + 0.6367 L_a^{0.5639} \right)^2 \times (1 - 0.02060 \lg L_a), \quad (\text{cd/m}^2), \quad (14)$$

式中, L_a , 人眼适应亮度; K_f , 负对比修正系数, 由(12)式确定, 正对比时取 K_f 为 1.

5 小目标可见度 STV 的计算模型

求得阈限亮度差后, 由(1)式可求得可见度水平. 比较 RP-8-00 推荐的计算模型和论文采用的简化模型计算可见度水平, 假定某目标物与其背景亮度差 ΔL 恒为 -0.5 cd/m^2 , 其他条件不变, 用二种方法计算目标物的可见度水平, 其结果见表 4. 改变 ΔL , 其误差

表4 二种可见度水平计算方法的结果比较

$L_a(\text{cd/m}^2)$	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.50	3.00	4.00	5.00
RP-8-00 公式计算结果	-4.0700	-3.4396	-3.0056	-2.6830	-2.4310	-2.2273	-1.9152	-1.6854	-1.3656	-1.1516
(14)式计算结果	-4.0129	-3.4196	-3.0042	-2.6917	-2.4455	-2.2451	-1.9357	-1.7059	-1.3832	-1.1650
相对误差(%)	-1.40	-0.58	-0.05	0.33	0.60	0.80	1.07	1.22	1.29	1.17

注: 本表计算条件为, 视角 α 为 7.45', 显示时间为 0.2 s, 假定某目标物与其背景亮度差 ΔL 恒为 -0.5 cd/m^2 , 表中的相对误差以 RP-8-00 公式计算值为准.

不变.

从表 4 看出, 根据论文的阈限亮度实验得到的结果, 与 RP-8-00 的计算结果比较一致, 相对误差均处在 -1.4%~+1.22%, 说明了论文对阈限亮度差的推导方法是正确的. 因此, 在道路照明设计中可以利用(14)式计算修正后的阈限亮度差.

在实际的道路照明区域内, 可见度水平的值为正值或负值均是有可能的, 为了便于在道路照明设计中应用, 应统一取正值; 此时可见度水平的绝对值越大, 说明小目标更容易被看见或能更快地发现.

于是, 求得的加权的可见度水平 $RWVL$ ^[5]为:

$$RWVL = 10^{-0.1ABS(VL)}. \quad (15)$$

同理可求得道路路面其它被研究点的可见度水平, 并计算出加权的可见度水平的平均值:

$$ARWVL = \sum_{i=1}^m RWVL_i / m, \quad (16)$$

式中, m , 被研究点的总数.

最后, 求得小目标可见度 STV 为:

$$STV = -10 \lg(ARWVL). \quad (17)$$

小目标可见度 STV 实际上就是可见度水平 VL 的加权平均值.

6 结论

从可见度计算模型可知, 小目标可见度水平首先要考虑目标物的表面亮度、背景亮度、人眼的适应亮度和等效光幕亮度的影响, 同时还要进行负对比、

观察时间(含反应时间)、驾驶员年龄的修正;其次在计算小目标可见度水平时,是对多个点分别计算出各自的小目标可见度水平后再求出加权平均值,这时可在计算时分别求出道路路面亮度的最大值、最小值和平均值三种情况的相应值,那么在小目标可见度中已涵盖了道路路面亮度的总均匀度的全部信息;此外,如果所取的背景亮度不仅是道路路面平均亮度,而且还有车行道外边 5 m 宽的带状区域内平均亮度值,那么,在小目标可见度计算值中已有环境比(SR)的贡献.因此,可见度水平是对驾驶员的视功能起综合影响作用的评价指标.

由于道路照明的首要目的是提供良好的可见度,所以采用小目标可见度进行道路照明设计,会更接近人们真实的视觉状况.采用简化的小目标可见度计算模型,可以更好地推广可见度设计在道路照明中的运用,从而可获得更好的道路路面亮度分布,确定最佳灯具位置和间距、合理的光源光谱分布,并获得最佳均匀度范围,保证道路照明安全和节能.为了大力提高我国道路照明水平,满足越来越高的安全性要求,寻找降低能耗、节约能源的途径,大力推动城区道路绿色照明发展,应尽快将可见度指标纳入城市道路照明标准中.

参考文献

- 1 CJJ 45-2006 J 627-2006. 城市道路照明设计标准. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006
- 2 柯顿 J R, 马斯登 A M, 主编. 陈大华, 等, 译. 光源与照明(第四版). 上海: 复旦大学出版社, 2000
- 3 庞蕴凡. 视觉与照明. 北京: 中国铁道出版社, 1993
- 4 Adrian W. Visibility of targets: Model for calculation. Lighting Res Tech. 1989, (4): 26—31
- 5 ANSI/IESNA RP-8-00. Roadway Lighting, 2000
- 6 Olkan C, Bugra E. Roadway Lighting Design Methodology and Evaluation. Society for Design and Process Science, 2000
- 7 胡培生, 李景色. 城市道路照明. 北京: 水利电力出版社, 1990
- 8 CIE. Recommendations for the Lighting of Road for motor and pedestrian traffic 115-1995. Technical Report, 1995
- 9 翁季. 机动车交通道路照明设计标准研究. 博士学位论文. 重庆: 重庆大学, 2006
- 10 陈仲林, 翁季, 胡英奎, 等. 照明工程中定性与定量之间的转换研究. 重庆建筑大学学报, 2006, (4): 1—3