

视野范围变化对动态眩光评价的影响分析

张恒¹, 乔卫东^{1*}, 王嘉明¹, 李奕²¹西安理工大学机械与精密仪器工程学院, 陕西 西安 710048;²陕西省计量科学研究院光学计量测试中心, 陕西 西安 710100

摘要 针对阈值增量在评价动态眩光方面存在的不足之处, 从人眼视觉特性出发, 提出一种基于亮度对比分析原理的动态眩光评价方法, 建立动态眩光评价模型。以人眼视野范围的变化为切入点, 研究驾驶员行驶速度的改变对其感受自身所处照明环境等效光幕亮度的影响因子, 利用多种数学模型对行驶速度与对应行驶速度下动、静态等效光幕亮度比率之间的关系进行曲线估算, 探索动、静态眩光差异系数。实验结果表明, 动、静态眩光差异系数与驾驶员行驶速度呈正相关; 从拟合优度和方差检验等方面分析, 动静态眩光差异系数与行驶速度之间的关系用指数型函数模型描述效果最佳。该评价方法可为动态眩光评价体系的建立奠定基础, 为我国道路照明设计提供设计依据与解决方案。

关键词 视觉光学; 视野范围; 动态眩光; 亮度对比分析; 等效光幕亮度

中图分类号 TM923

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1733001

Analysis of Influence of Change in Field of View on Dynamic Glare Evaluation

Zhang Heng¹, Qiao Weidong^{1*}, Wang Jiaming¹, Li Yi²

¹*School of Mechanical and Precision Instrument Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;*

²*Optical Metrology and Test Center, Shaanxi Institute of Metrology Science, Xi'an, Shaanxi 710100, China*

Abstract In light of the shortcomings of threshold increments in evaluating dynamic glare, starting from the visual characteristics of human eyes, this paper proposes a dynamic glare evaluation method based on the principle of brightness contrast analysis and builds a dynamic glare evaluation model. With the change in the field of view of human eyes as the starting point, the influence factor of the change in driving speed on the driver's perception of the equivalent light curtain brightness in the lighting environment is studied. A variety of mathematical models are used to determine the relationship of driving speed with the ratio between dynamic and static equivalent light curtain brightness at the corresponding driving speed to explore the dynamic and static glare difference coefficient. The experimental results show that the difference coefficient is positively correlated with the driving speed of the drivers. From the analysis of goodness of fit and variance test, the relationship between the dynamic and static glare difference coefficient and the driving speed can be best described with an exponential function model. This evaluation method can lay a foundation for the establishment of a dynamic glare evaluation system and provide design basis and solutions for road lighting design in China.

Key words visual optics; field of view; dynamic glare; brightness contrast analysis; equivalent light curtain brightness

OCIS codes 330.7326; 330.4595; 220.2945; 330.1800

收稿日期: 2020-12-24; 修回日期: 2021-02-23; 录用日期: 2021-03-23

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFF0212105)、陕西省重点研发计划(2020ZDLGY10-04)

通信作者: *qwd@xaut.edu.cn

1 引言

动态眩光是指在运动状态下由于视野中不适宜的亮度分布,或者在时间或空间上存在极端的亮度对比,以致引起人眼产生不舒适感和降低物体对比度的一种视觉条件^[1-2]。动态眩光的存在不仅对驾驶人员的视看工作带来严重影响,甚至直接引发交通事故^[3],而且不合理的道路照明也会带来巨大的电能浪费^[4-5]。

动态眩光的研究,目前主要分为技术突破和理论研究两大方向,当前国内外众多专家学者主要从技术层面展开研究,例如采用多靶面曝光合成^[6-8]、单像素集成多个感光单元^[9-10]、自适应像素曝光^[11-12]、SVE (Spatially Varying Pixel Exposures)^[13]、数字微镜阵列技术^[14]和 CMOS 对数变换法^[15-16]等技术手段改进图像获取设备,提升眩光测量仪的测量效率,实现瞬变环境下的动态眩光测量。但是在动态眩光理论研究方面,至今鲜有公开的研究成果,因此本文基于人眼视觉特性^[17-18],进行瞬变环境下动态眩光评价指标的研究,其不仅可为动态眩光测量技术以及该技术进一步的研究提供理论依据,而且能够为我国道路照明设计提供设计依据与解决方案,为保障广大机动车驾驶员的生命财产安全提供关键技术支撑。

2 户外道路照明眩光评价指标

阈值增量(TI)是国际照明委员会(CIE)推荐使用的户外道路照明眩光评价指标^[19]。TI 指当出现眩光源时,为了达到相同良好的视看条件,物体与背景之间对比度需要提高的百分比,其定义为

$$f_{TI} = 65 \frac{L_v}{L_b^{0.8}}, \quad (1)$$

$$L_v = \sum_{k=1}^n L_{v,k}, \quad (2)$$

式中: L_b 是路面的平均初始亮度(cd/m^2); L_v 是初始等效光幕亮度(cd/m^2); $L_{v,k}$ 是第 k 个眩光源产生的初始等效光幕亮度(cd/m^2); n 是考虑的眩光源数量。

阈值增量仅与静止状态下的眩光源亮度、背景亮度和目标与观测点之间的相对位置有关。但是当汽车处于高速运动状态时,驾驶员的视野范围会受到自身速度的影响,因此动态眩光相对静态眩光而言,不仅与观察者和目标车辆前照灯或者路灯之间的相对位置、道路两边路灯的亮度、发光面积以及与

观察者视线之间的夹角有关,而且与驾驶员的动态视觉特性息息相关。因此需要在考虑目标光源亮度、背景环境亮度和相对位置等客观因素的基础上,兼顾运动速度的变化对驾驶人员视野范围的影响因子,建立动态眩光评价模型。

3 动态眩光评价方法研究

3.1 动态眩光影响因素

视野分为静视野和动视野。静视野是指当人的眼睛注视前方,头部固定不动时所能看到的范围,动视野是指仅将头部固定,眼球自由转动时能够看到的全部范围^[20-21]。在通常的静止状态下,人眼水平视野范围约为 160° ,但是随着车速的变化,上述视野范围会逐渐变窄,视野缺损面积随之逐渐增大^[22]。交通心理学研究指出,当车速为 60 km/h 时,注视点在车前 180 m 处左右,视野范围变为 70° 左右;当车速达 80 km/h 时,注视点在车前 300 m 处左右,视野范围则缩小到 60° ;当车速达 100 km/h 时,注视点在车前 420 m 处左右,视野范围只有 40° ;如车速提高到 120 km/h ,注视点在车前 530 m 处左右,视野范围就只有 24° ^[23-24],车速与视野范围以及注意力的关系图如图 1 所示。随着车速的提高,驾驶员的视野范围不断缩小,注意力逐渐集中于视野正前方,驾驶员感受到的动态眩光源亮度值相比静态值发生了明显的变化。

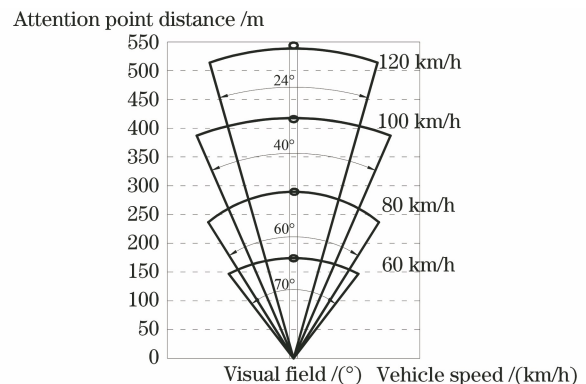


图 1 车速与视野范围以及注意力的关系图

Fig. 1 Relationship between vehicle speed, field of view, and attention

驾驶员运动速度的改变导致其视野范围和感受到的眩光源等效光幕亮度发生变化,运动速度的差异是人眼感受动态眩光或者静态眩光的根本原因,因此建立动态眩光评价模型的技术路线图如图 2 所示。

如图 2 所示,首先分析国际照明委员会提供的

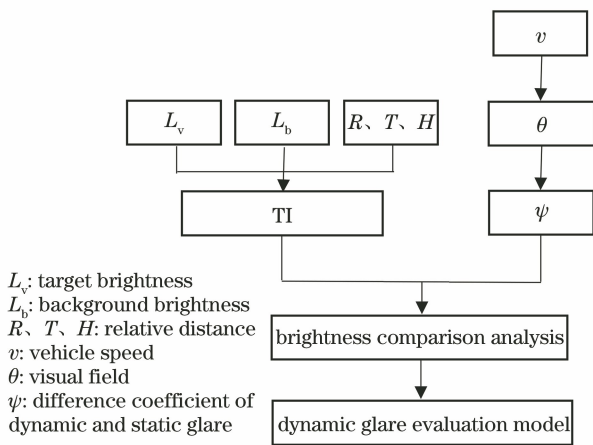


图 2 动态眩光评价模型技术路线框图

Fig. 2 Block diagram of technical route of dynamic glare evaluation model

静态眩光评价指标——阈值增量,其主要考虑目标亮度、背景亮度和相对位置三大要素。其次当驾驶人员处于运动状态时,其运动速度的改变导致自身视觉特性发生巨大的变化,例如视野范围变小。因此需要在静态眩光评价指标的基础之上重点考虑运动速度的变化对人眼察觉到的动态眩光的影响,运用亮度对比分析原理搭建动态眩光评价模型^[25]。

3.2 动态眩光评价模型

动态眩光与静态眩光的本质区别在于观察者的运动速度是否发生变化,当观察者运动速度为零时,动态眩光评价模型应与静态眩光评价模型保持一致。因此在静态眩光评价指标——阈值增量的基础上,考虑动、静态眩光差异系数(ψ),建立动态眩光评价指标(DG)。

$$D_{DG} = 65 \frac{L_{dv}}{L_{db}^{0.8}}, \quad (3)$$

$$L_{dv} = \sum_{k=1}^n \left[9.86 \times \left(1 + \frac{A}{66.4} \right)^4 \right] \cdot \frac{L_k \cdot S_k \cdot \cos^2 \theta_k}{R_k^2} \cdot \psi, \quad (4)$$

式中: D_{DG} 为动态眩光值; L_{dv} 为动态等效光幕亮度值(cd/m^2); L_{db} 为动态路面平均亮度值(cd/m^2); A 为驾驶员年龄(岁); L_k 为视野范围内第 k 个眩光源产生的动态等效光幕亮度值(cd/m^2); S_k 为视野范围内第 k 个眩光源的发光面积(m^2); θ_k 为观测点和视野范围内第 k 个眩光源中心的连线与观测者水平视线之间的夹角($^\circ$); R_k 为观测点与视野范围内第 k 个眩光源在视线方向上的投影面积之间的距离(m); ψ 为动、静态眩光差异系数。

动、静态眩光差异系数 ψ 反映了在不同行驶速

度下,驾驶员感受到的照明环境亮度与其在静止状态下感受到的照明环境亮度之间的差异,是动态眩光评价指标与阈值增量的本质区别之处。作为建立动态眩光评价模型的关键参数,求解动、静态眩光差异系数 ψ 将是后续工作的重中之重。

4 动态眩光评价模型关键参数测量实验

4.1 实验条件

针对户外道路照明环境中存在的眩光现象,目前广泛采用的测量方式有布点式和成像式两种,布点式即在待测区域合理布置测量点,再依次测量每个待测点的相关数据,最终得到眩光值,该方法不仅操作复杂,而且测量效率低;成像式则采用高清摄像设备通过拍照、录像等方式采集观测点的光学参数,后期仅需处理数字图像数据即可获得当前眩光值,测量效率大大提高。传统的静态眩光测量,仅需准确测量眩光源亮度信息和位置信息,对测量速率要求不高,因此多采用布点式测量方法;然而在动态眩光测量过程中,除了需要准确测量眩光源亮度信息和位置信息以外,由于人眼的余晖效应,动态眩光测量仪器的响应频率必须高于 24 Hz 时才能准确测量人眼感受到的动态眩光,因此本文中采用成像式眩光测量方法,通过行车记录仪采集不同道路照明环境中的相关光学参数,为求解动、静态眩光差异系数提供数据支撑。

由于动态眩光测量的特殊性,本文采用海康威视的 F6 Pro 行车记录仪采集道路照明环境中的光学参数,其具有自动曝光功能,而且为了实现更高质量的影像,运用了宽动态(WDR)影像技术,对视野范围内过亮或过暗的位置均可以实现清晰拍摄,解决了拍摄过程中由于过曝光或者欠曝光影响采集数据可靠性的问题。F6 Pro 配备了 F1.6 超大光圈,夜视效果良好,非常适合夜间道路照明环境光学参数测量;同时其拍摄频率为 25 Hz,满足动态眩光测量过程中的动态要求;其内置的全球定位系统(GPS)模块可以在拍摄界面实时显示当前车速,方便我们后期分析运动速度与入眼感受的光学参数之间的关系,建立动态眩光评价模型;最后其搭载华为海思 3516D-V300 处理器,仪器不死机、不卡顿、不漏秒断帧,保证了动态眩光的测量效率与采集数据的准确性。

为了保证实验的可靠性,选择 10 段道路照明条件不同的路段作为实验对象,实验时间为 20:00 到 22:00 之间。

4.2 实验步骤

为了确定动、静态眩光差异系数 ψ , 本文选择在户外道路照明环境中进行相关光学参数测量实验。实验时, 首先设置好实验设备参数, 行车记录仪的分辨率设置为 1600P(2560×1600), 采集频率 25 Hz, 水平视角 130°, 垂直视角 50°, 其内置 GPS 模块, 保证速度的准确性; 其次实验过程中同一路段的照明环境光学参数采集分为静态采集与动态采集, 静态采集为在该路段每间隔 10 m 拍摄一张图片, 得到



图 3 不同行驶速度下部分路段道路照明环境截图。(a) 40 km/h; (b) 89 km/h

Fig. 3 A screenshot of road lighting environment of some road sections at different driving speeds.

(a) 40 km/h; (b) 89 km/h

4.3 数据处理

阈值增量的测量条件要求水平视野范围为 120°, 垂直视野范围为 40°, 均小于行车记录仪的拍摄视角, 因此分别按照两者的水平、垂直视野范围比率等比例截取拍摄图片中的部分画面, 分别提取其中的亮度信息作为当前照明环境下静止状态时驾驶员感受到的等效光幕亮度数据。随着速度的增加, 人类的动视野范围在逐渐缩小, 导致人眼感受到的

一组静止状态下道路照明环境光学参数数据; 动态采集时车辆在该路段的速度变化范围为 30~120 km/h, 等间距分为 10 个速度等级, 每个速度等级的相对误差为 $\pm 5\%$, 分别在每个速度等级下录制视频, 得到运动状态下道路照明环境光学参数数据; 最后采用 Adobe Premiere Pro 2020 对录制的视频进行处理, 包括截取不同速度等级的视频片段, 并逐帧截图。图 3 为不同行驶速度下某一实验路段道路照明环境截图。

等效光幕亮度信息与静止状态下感受到的等效光幕亮度信息存在明显差异。根据不同速度下人眼视野范围与行车记录仪拍摄视角的比率等比例截取逐帧截图中的部分画面, 分别提取其中的平均亮度信息作为当前照明环境下运动状态时驾驶员感受到的等效光幕亮度数据。表 1 为 10 个实验路段静态情况下采集的部分等效光幕亮度数据, 表 2 为 10 个实验路段 80 km/h 时采集的部分等效光幕亮度数据。

表 1 10 个实验路段静态情况下采集的部分等效光幕亮度数据

Table 1 Part of equivalent light curtain brightness data collected under static conditions on 10 experimental road sections

No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
47878	49762	39873	51513	48331	48263	43755	38502	49261	56252
48190	50467	39112	51577	49133	48425	44012	38877	49459	55752
48188	50444	38649	51066	49668	47778	43823	38938	49536	55711
47967	50452	37793	51182	49892	47096	44099	38819	50115	55505
48022	50721	37897	51071	49709	45724	44170	38977	49631	55376
50137	51220	37752	50089	50415	43404	44112	41513	49897	55366
50497	51669	37679	50439	50310	43657	44420	54519	49900	55263
50564	51848	37894	50234	50575	43218	44405	53887	49423	55603

(Note: all the brightness data in Table 1 are replaced by the gray value of the intercepted picture, no unit)

为了研究人眼在运动状态与静止状态下对相同环境等效光幕亮度的感知差异, 分别计算出在 10 个实验路段以 80 km/h 的速度行驶时采集的最大等效光幕亮度数据与静止状态下采集的最大等效光幕亮度数据比率, 结果如图 4 所示。

同理, 计算出其他 9 个速度等级下 10 个实验路段采集的最大等效光幕亮度数据分别与静态情况下采集的最大等效光幕亮度数据之间的比率, 最终得到速度范围在 30~120 km/h 时, 10 个实验路段采集的动、静态等效光幕亮度平均比率表如表 3 所示。

表 2 10 个实验路段 80 km/h 时采集的部分等效光幕亮度数据

Table 2 Part of the equivalent light curtain brightness data collected at 80 km/h on 10 experimental road sections

No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 2	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
47977	52644	44989	51713	59169	52007	52608	47640	54384	64183
48291	52699	44506	51581	59816	52437	53079	48059	54139	63475
48696	52039	44451	50895	59968	52043	52923	48257	53758	63642
49065	51581	43884	50883	59398	51896	53247	48616	53765	64010
48825	51202	44128	50685	58814	51472	53564	49359	53133	63540
50421	51145	44645	49827	58208	50195	53334	50759	53258	63832
50786	51275	44566	50397	57332	50246	53780	60909	52958	63830
50579	51074	44919	50509	56948	50154	53609	60722	52351	64009

(Note: all the brightness data in Table 2 are replaced by the gray value of the intercepted picture, no unit)

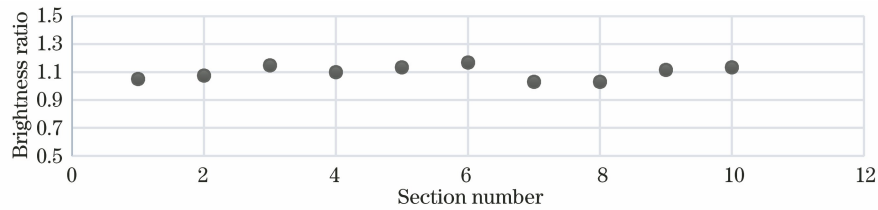


图 4 不同路段动、静态亮度比率(80 km/h)

Fig. 4 Dynamic and static brightness ratio of different road sections (80 km/h)

表 3 10 个实验路段不同行驶速度下动、静态等效光幕亮度平均比率表

Table 3 Table of average ratio of dynamic and static equivalent light curtain brightness at different driving speeds on 10 experimental road sections

Vehicle speed / (km · h ⁻¹)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
Average ratio	1.00	1.02	1.03	1.04	1.07	1.10	1.13	1.14	1.15	1.16

4.4 分析与讨论

分析表 3 可知,随着运动速度的变化,人眼感知到的动、静态等效光幕亮度差异也随之改变,并且动、静态等效光幕亮度平均比率与行驶速度呈正相关。这主要是因为随着运动速度的提高,驾驶员的视觉关注点不断集中,人眼视野范围逐渐缩小,进而导致眩光源在驾驶员视野中的占比逐步增大,驾驶员感受到的动态眩光也因此更为强烈。

为了建立动态眩光评价模型,需要求解出动、静态眩光差异系数。根据不同行驶速度下动、静态等效光幕亮度平均比率表,拟合行驶速度与动、静态等效光幕亮度平均比率之间的关系,分别利用对数函数型模型、幂函数型模型、逆函数型模型、S 曲线函数型模型和指数函数型模型对表 3 中的数据进行曲线拟合,拟合图形如图 5 所示,5 种函数模型拟合结果参数对比表如表 4 所示。

分析表 4,从 5 种函数模型拟合曲线的拟合优度与方差检验结果可知,指数型函数模型的拟合效果最佳,因此选用指数型函数模型对行驶速度与对行驶速度下动、静态等效光幕亮度平均比率之间的关系进行曲线拟合,拟合方程为

$$\phi = \exp\left(\frac{-97}{2000} + \frac{17}{10000} \cdot v\right) \quad (5)$$

表 4 5 种函数模型拟合结果对比表

Table 4 Comparison table of fitting results of five functional models

Equation	Goodness of fit R^2	Variance analysis F
Logarithmic type	0.94	124.18
Power function type	0.95	137.58
Inverse function type	0.83	38.54
S-curve type	0.84	41.64
Exponential type	0.97	298.76

将(5)式代入(4)式后,最终可得动态眩光评价模型为

$$D_{DG} = 65 \frac{L_{dv}}{L_{db}^{0.8}}, \quad (6)$$

$$L_{dv} = \sum_{k=1}^n \left[9.86 \times \left(1 + \frac{A}{66.4} \right)^4 \right] \cdot \frac{L_k \cdot S_k \cdot \cos^2 \theta_k}{R_k^2} \cdot \exp\left(\frac{-97}{2000} + \frac{17}{10000} \cdot v\right), \quad (7)$$

式中: v 为当前驾驶员行驶速度(km/h)。

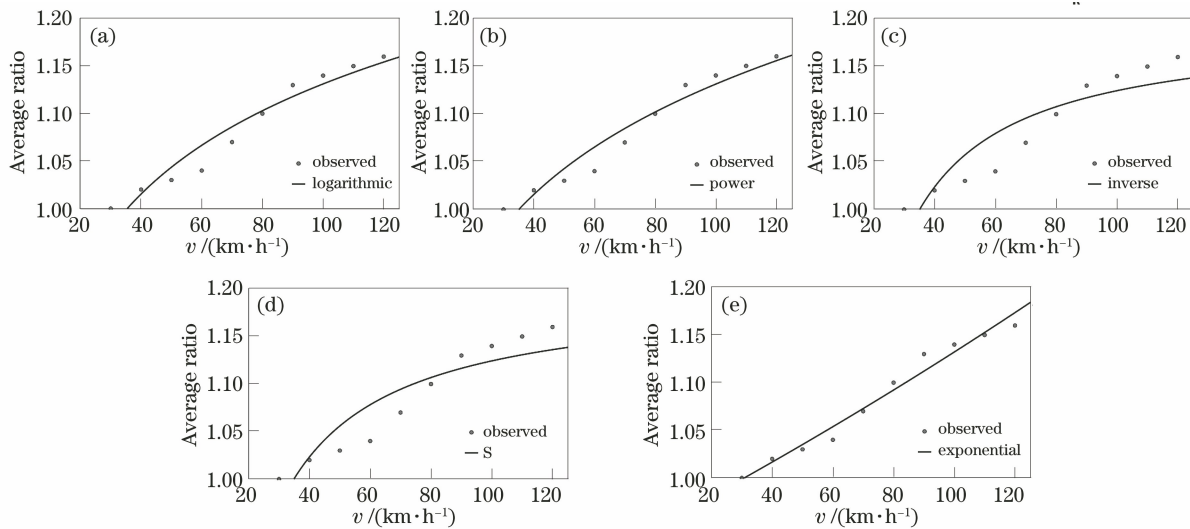


图 5 5 种函数模型拟合图形。(a)对数型;(b)幂函数型;(c)逆函数型;(d) S 曲线型;(e)指数型

Fig. 5 Five kinds of function model fitting graphs. (a) Logarithmic type; (b) power function type; (c) inverse function type; (d) S-curve type; (e) exponential type

5 结 论

CIE 通过阈值增量参数评价静态时道路照明眩光对驾驶员的影响,但其无法评价驾驶员高速行进时遭遇动态眩光影响的重要场景,为了解决此问题,本文从人眼视觉特性出发,以人眼视野范围为切入点展开研究,探索驾驶员行驶速度对其感受自身所处照明环境等效光幕亮度的影响规律,最终建立瞬变环境下动态眩光评价模型。研究发现,相同照明条件下,处于运动状态时受到的眩光影响大于静止状态下的眩光影响,并且动、静态眩光差异系数与行驶速度呈正相关。分别利用对数函数型模型、幂函数型模型、逆函数型模型、S 曲线函数型模型和指数函数型模型对动、静态眩光差异系数与行驶速度之间的关系进行曲线估算,从拟合优度和方差检验方面考虑,选择指数型函数描述二者之间关系效果最佳。

瞬变环境下动态眩光评价模型的建立,不仅可为动态眩光测量技术以及该技术的进一步研究提供理论依据,而且为动态眩光评价体系的建立奠定了基础、拓展了眩光评价的适用场景,进而为我国道路照明设计提供设计依据与解决方案,为保障广大机动车驾驶员的生命财产安全提供关键技术支撑。

参 考 文 献

- [1] Suk J Y, Schiler M, Kensek K. Absolute glare factor and relative glare factor based metric: predicting and quantifying levels of daylight glare in office space[J]. Energy and Buildings, 2016, 130: 8-19.
- [2] Mangkuto R A, Kurnia K A, Azizah D N, et al. Determination of discomfort glare criteria for daylight space in Indonesia [J]. Solar Energy, 2017, 149: 151-163.
- [3] Li Y, Niu S N. The variation of calculation system of threshold increment [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2019, 30(4): 53-60, 74. 李媛, 牛盛楠. 道路照明阈值增量计算方法的演化 [J]. 照明工程学报, 2019, 30(4): 53-60, 74.
- [4] Lin Y, Fotios S, Wei M, et al. Eye movement and pupil size constriction under discomfort glare [J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2015, 56(3): 1649-1656.
- [5] Zhan Z X, Guo B Y, Fang W N. Lighting glare evaluation method for the driving interface design of high-speed train [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(8): 170-178. 詹自翔, 郭北苑, 方卫宁. 高速列车驾驶界面设计中的照明眩光评估 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(8): 170-178.
- [6] Lin Y D, Liu Y H, Sun Y J, et al. Model predicting discomfort glare caused by LED road lights [J]. Optics Express, 2014, 22(15): 18056-18071.
- [7] Huan G K, Weng J. A video image analysis system for tunnel lighting automatic control [J]. International Journal of Applied Mathematics and Statistics, 2013, 51(23): 246-253.
- [8] Akashi Y, Muramatsu R, Kanaya S. Unified glare rating (UGR) and subjective appraisal of discomfort glare [J]. Lighting Research and Technology, 1996, 28(4): 199-206.

- [9] Chen P L, Liao C H, Li H C, et al. A portable inspection system to estimate direct glare of various LED modules[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9524: 95241X.
- [10] Yang Y, Luo R M, Huang W J. Assessing glare, part 3: glare sources having different colours [J]. Lighting Research & Technology, 2018, 50(4): 596-615.
- [11] Yang Y, Luo R M, Ma S N. Assessing glare, part 2: modifying unified glare rating for uniform and non-uniform LED luminaires [J]. Lighting Research & Technology, 2017, 49(6): 727-742.
- [12] Brajovic V, Kanade T. A sorting image sensor: an example of massively parallel intensity-to-time processing for low-latency computational sensors[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, April 22-28, 1996, Minneapolis, MN, USA. New York: IEEE Press, 1996: 1638-1643.
- [13] Brajovic V, Kanade T. A VLSI sorting image sensor: global massively parallel intensity-to-time processing for low-latency adaptive vision[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1999, 15(1): 67-75.
- [14] Feng A Y, Li L, Zhou L, et al. Validation and optimization of discomfort glare model for white LED [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(7): 0733001. 冯阿阳, 李乐, 周莉, 等. 白光 LED 不舒适眩光模型的验证和优化 [J]. 光学学报, 2017, 37(7): 0733001.
- [15] Nayar S K, Branzoi V. Adaptive dynamic range imaging: optical control of pixel exposures over space and time[C]//Proceedings Ninth IEEE International Conference on Computer Vision, October 13-16, 2003, Nice, France. New York: IEEE Press, 2003: 1168-1175.
- [16] Nayar S K, Branzoi V, Boulton T E. Programmable imaging using a digital micromirror array [C] // Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004, June 27-July 2, 2004, Washington, DC, USA. New York: IEEE Press, 2004.
- [17] Liu D, Li Y C. Quality assessment of remote sensing images based on deep learning and human visual system[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(6): 061101. 刘迪, 李迎春. 基于深度学习和人眼视觉系统的遥感图像质量评价 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(6): 061101.
- [18] Liu Y, Jiang R Q, Yu H J, et al. Subjective image quality assessment for large samples [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(13): 131103. 刘阳, 姜润强, 于洪君, 等. 大样本图像质量主观评价方法 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(13): 131103.
- [19] Kavadias S, Dierickx B, Scheffer D, et al. A logarithmic response CMOS image sensor with on-chip calibration [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2000, 35(8): 1146-1152.
- [20] Awuti A. Study on cardiac and physiological characteristics of plateau highway drivers based on driving suitability detection [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2015: 9-15. 阿布都克依木·阿吾提. 基于驾驶适宜性检测的高原公路驾驶员心、生理特性研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2015: 9-15.
- [21] Tian H J, Hong Z, Hao T T, et al. Method for glare measurement based on a digital camera image in interior lighting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2019, 56(2): 022201. 田会娟, 洪振, 郝甜甜, 等. 基于数码相机图像的室内照明眩光测量方法研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(2): 022201.
- [22] Zhang C Y. Visual safety study of highway landscape planning and design in moving state: taking Pintan island road as an example [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017: 11-19. 张昌岳. 移动状态下的公路景观视觉安全性规划设计研究: 以平潭综合试验区环岛路为例 [D]. 福州: 福建农林大学, 2017: 11-19.
- [23] van den Wymelenberg K, Inanici M. Evaluating a new suite of luminance-based design metrics for predicting human visual comfort in offices with daylight[J]. LEUKOS, 2016, 12(3): 113-138.
- [24] Huang K, Weng J. Contrast threshold research of small target visibility in road or tunnel lighting environment [J]. Biotechnology-An India Journal, 2014, 10(23): 14269-14274.
- [25] Shi C Y, Lin Y D. LED ring array design for uniform illumination imaging in machine vision [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(20): 2011003. 史晨阳, 林燕丹. 机器视觉中均匀照明成像的 LED 环形阵列设计 [J]. 光学学报, 2020, 40(20): 2011003.