

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2023.12.025

ETC 监控成像补光装置眩光调优方法

黄 强

(广东省交通集团有限公司, 广东 广州 510960)

摘要: 高速公路 ETC 门架监控成像补光装置亮度过强会造成小客车驾驶员目眩, 从而使驾驶员无法清晰识别出车辆前方的障碍物, 影响行车安全指数。基于此, 首先针对 ETC 门架补光装置的失能眩光问题进行了建模分析, 总结出了影响观察者视觉能力的两个重要参数: 目标物体与环境的亮度对比、眩光源与观察者眼睛视看方向的夹角。其次, 结合试验路段实际环境, 通过调整 ETC 门架补光装置的发光强度、照射角度等参数, 在距离 ETC 门架前方 10~150 m 范围内设置多个测试点, 并获取其亮度值与照度值数据。最后, 利用阈值增量 TI 法对本研究所提方案进行失能眩光程度分析。结果表明: 在满足 ETC 门架车辆牌照识别准确率前提下, 优化 ETC 门架补光装置的照射角度对路面亮度的弱化效果更为显著, 因此在调节路面亮度指标时宜以补光装置照射角度调整为主; 对 ETC 门架补光装置进行单一或双重参数优化调整, 均能显著降低测试点处的 TI 值, 单一参数优化对眩光阈值增量 TI 值的下调幅度可达 30% 以上, 而双重参数优化对眩光阈值增量 TI 值的下调幅度可达 88%, 所有测试点的 TI 值均满足标准规定的限制眩光阈值增量最大值要求, 可有效缓解因 ETC 门架补光装置过亮而造成驾驶员视觉能力严重下降的现象。

关键词: 交通安全; ETC 门架; 实测调优; 补光装置; 眩光

中图分类号: U491.9⁺4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2023) 12-0219-08

A Method for Glare Optimization for Fill Light Device of ETC Monitoring Camera

HUANG Qiang

(Guangdong Communications Group Co., Ltd., Guangzhou Guangdong 510960, China)

Abstract: The excessive brightness of the fill light device of the ETC gantry monitoring imaging system on expressway can cause dizziness for small car drivers, making it difficult to clearly identify obstacles in front of the vehicle, thereby affecting the driving safety index. Based on this, modeling and analysis are firstly carried out for the disability glare problem of the ETC gantry fill light device. Two important parameters affecting the observer's visual ability are summarized: the brightness contrast between the target object and the environment, and the angle between the glare source and the observer's eye viewing direction. Secondly, in combination with the actual environment of the test section, by adjusting parameters such as the luminous intensity and irradiation angle of the ETC gantry fill light device, multiple test points are set within the range of 10-150 m in front of the ETC gantry, and the brightness and illuminance values are obtained. Finally, the proposed solution is analyzed for the degree of disability glare by using the threshold increment method. The result shows that (1) On the premise of satisfying the accuracy rate of ETC gantry vehicle license plate recognition, optimizing the ETC gantry fill light device's illumination angle has more remarkable weakening effect on the road surface brightness, therefore, the adjustment of road surface brightness index should be based on the adjustment of illumination angle. (2) Single or double parameter optimization adjustment of ETC gantry can significantly reduce the value of test point, single parameter optimization can reduce the increment of glare threshold by more than 30%, the double-parameter optimization can decrease the

收稿日期: 2022-11-09

作者简介: 黄强 (1974-), 男, 广东广州人, 高级工程师. (605753854@qq.com)

increment of glare threshold by 88%, the values of all test points meet the maximum requirement of limiting the increment of glare threshold, and the utility model can effectively alleviate the phenomenon that the driver's visual ability is seriously reduced because of the too bright ETC gantry fill light device.

Key words: traffic safety; ETC gantry; field measurement and optimization; fill light device; glare

0 引言

近年来,随着全国高速公路省界收费站的撤销,以及国家对电子不停车收费(ETC)模式的大力普及,ETC门架已陆续在各大高速公路进行全线铺装并投入使用。作为ETC门架系统中的关键设备,ETC门架摄像机对驾驶员及其车辆牌照信息的清晰记录是执法人员后期进行高效、准确执法的前提。因此,为满足在夜间昏暗或雷雨阴天等光线较差的恶劣环境下拍摄功能的稳定性与可靠,ETC门架摄像机均配备了采用脉冲或持续点亮方式进行补光的监控成像补光装置。尽管增设该补光装置的初衷是为了提升摄像机拍照取证的质量,但这同时也给过路的驾驶员造成强烈的视觉干扰^[1-2]。根据规定,我国的高速公路行车速度一般设置为80~120 km/h,而由文献[3]的介绍可知,在受到不同眩光强度光线刺激后,人眼视觉的第1、第2阶段恢复时间总时长在0.87~1.71 s,即驾驶员从视觉被强光线干扰至恢复正常视力60%的这段时间里,其驾驶的车辆在视线模糊的情况下已向前行驶了20~57 m的距离。这严重影响了驾驶员的行车安全,尤其是在夜间背景光线不足的情况下。因此,有必要针对高速公路ETC门架监控成像补光装置所引发的失能眩光问题进行深入探讨研究。目前,在失能眩光方面的研究上,国内已有了一定的基础与成果。刘广波等从经济与运营养护方面考虑,提出了防眩设施的设计与安装要求^[4];林树坚基于对道路照明失能眩光原因的分析,结合实际测试提出了降低失能眩光的3种控制策略^[5];杨春宇等从道路行车安全角度出发,研究并量化了等效光幕亮度与反应时间之间的关系^[6];许巧云通过对不同曝光时间图像进行解析与融合,提出了对城市LED道路监控补光灯进行眩光危害评价的方法^[7];黄琼等以青年驾驶员为目标群体,结合模拟驾驶仿真平台,开展了夜间环境下补光灯光照强度对驾驶员行车安全的影响^[8]。与道路照明所不同的是,高速公路ETC门架监控补光装置所产生的眩光危害,主要源自于其高频闪、高亮度光线对驾驶员视觉造成的瞬时冲击,而针对上述问题如何进行实地测量与调优的研究,目前国内鲜有

文献涉及。

本研究在深入分析ETC门架监控成像补光装置眩光评价方法的基础上,针对ETC门架补光装置给机动车驾驶员造成失能眩光的问题开展了建模分析,以调整ETC门架补光装置的发光强度、照射角度等为优化手段,通过设置并获取多个测试点的试验数据,并采用TI法对其进行眩光程度分析,进而提出了能有效降低ETC门架补光装置对驾驶员造成失能眩光影响的措施和方案,同时也为ETC门架补光装置的优化安装提供必要的参考依据。

1 ETC补光装置失能眩光建模与评价分析

1.1 失能眩光建模分析

人的眼睛对可视物体形状、尺寸或动态特性的视觉感知与获取,依赖于光源投射于该物体上所形成的反馈信息。而一旦该光源的亮度过高,或光源位置安放不合理,则会在人的视野范围内产生极端的亮度对比,这种不均匀或与周边环境反差过大的亮度分布往往会引起观察者视觉上的不舒适,或给观察者造成短期或长期的视觉功能障碍,进而极大降低观察者对视野前方目标物体的辨识度^[9]。根据观察者视觉感受的不同,刺激光源对人的眼睛所产生的影响可大致划分为不舒适眩光和失能眩光^[10]。不舒适眩光指的是刺激光源对观察者造成视觉上不舒服的程度,其主要是从心理和生理层面来考究眩光的影响。失能眩光则是指刺激光源造成观察者短暂失明或视觉能力大幅下降的现象。与不舒适眩光不同的是,失能眩光由于光源发出的光线和观察者视野中目标物体的成像交织在一起形成了视野重叠,从而极大削弱了观察者对目标物体的视觉清晰度^[11]。

在高速公路中,造成ETC门架监控摄像机成像质量偏低的原因主要在于车辆牌照区域与周围环境之间存在着过大的亮度差:一种情况是部分路段缺乏照明设施,使得路面照度值在黑夜或乌云雷暴的光线不足等天气条件下损失严重,无法满足ETC门架摄像机识别车辆号牌所需的最小照度要求;另一种情况是车辆在夜间行驶时所开启前探灯的亮度过大,从而导致车灯区域过曝或车牌区域欠曝,造成

摄像机胶片密度不足或过度,进而影响 ETC 门架监控摄像机成像的清晰度。因此,针对高速公路特殊的应用环境和场景,为保障 ETC 门架监控摄像机的成像质量,必须对其配备相应的补光装置,由此不可避免地会给驾驶员视觉造成刺激。所以,为减少补光装置给驾驶员带来的视觉刺激问题,提高道路行车的安全性,就需要首先了解失能眩光产生的原理机制。

如图 1 所示,假设从眩光源 A 发出的高亮度光线进入了观察者眼睛,此时部分光线会在眼睛屈光介质的作用下发生散射,而当这部分散射光作用于目标物体 B 上时同样会在观察者的视觉范围内形成视感,即相当于在观察者所观测到的目标物体 B 的表面覆盖上一层明亮的帷幕。用亮度指标来量化这个叠加帷幕的影响,就是等效光幕亮度 L_v [12]。

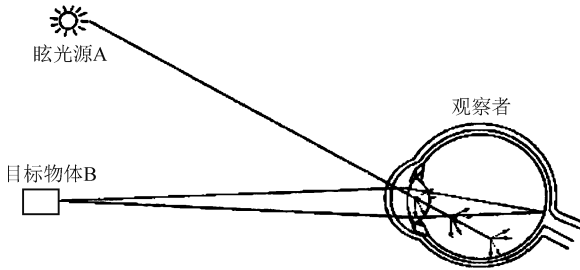


图 1 失能眩光产生原理

Fig. 1 Principle of disability glare generation

从观察者的角度出发,要想获取视野范围内目标物体的清晰图像,就需要给目标物体一定的亮度对比。假设用 L_o 表示目标物体的亮度,用 L_b 表示目标物体的背景亮度,那么,无眩光条件下的亮度对比值 C_0 可表示为:

$$C_0 = \frac{|L_o - L_b|}{L_b} \quad (1)$$

而在眩光源的作用下,此时由于等效光幕亮度的存在,目标物体的有效亮度对比 C_{eff} 值可表示为:

$$C_{eff} = \frac{|(L_o + L_v) - (L_b + L_v)|}{L_b + L_v} \quad (2)$$

结合式 (1) 和 (2),可得出在有眩光源作用下目标物体亮度对比值 C_{eff} 与无眩光条件下目标物体的亮度对比值 C_0 之间的关系式为:

$$C_{eff} = C_0 \frac{L_b}{L_b + L_v} \quad (3)$$

对于高速公路场景,当 ETC 门架补光装置工作时,就相当于往驾驶员视野范围内加入一个眩光源。与式 (1) 无眩光源下目标物体的背景亮度对比值

C_0 相比,式 (2) 由于眩光源的存在从而在视网膜产生等效光幕亮度 L_v ($L_v > 0$),使得驾驶员视野前方目标物体的有效亮度对比 C_{eff} ($C_{eff} < C_0$) 被减弱,从而降低驾驶员的视看能力,见式 (3)。由此可见,视网膜所形成的等效光幕亮度 L_v 的大小,是决定驾驶员视看能力受影响程度的关键因素之一。

在眩光影响因素的试验研究中,Hollday 发现通过测量眩光源发出光线方向与观察者眼睛视觉中心方向的夹角 θ ,以及垂直于观察者眼睛平面的垂直照度值 E_{eye} ,可以计算出目标物体的 L_v 值[13],其计算公式可表示为:

$$L_v = k \sum \frac{E_{eye}}{\theta^n} \quad (1.5^\circ < \theta < 60^\circ), \quad (4)$$

式中, n 为与眼睛视觉构造相关的一个系数; k 为与目标的大小、观察时间相关的常数,其与年龄大小呈正相关,假设 A 表示观察者的年龄,那么, k 可表示为:

$$k = 9.86 \times \left[1 + \left(\frac{A}{66.4} \right)^4 \right] \quad (5)$$

式 (4) 的等效光幕亮度 L_v 计算公式具有重要的意义,其是构成眩光阈值增量 TI 评价方法的重要部分。根据 CIE 第九届大会的提议,在进行失能眩光研究时,采用式 (5) 对 k 值的估计,宜以 23 岁的驾驶员作为标准进行计算。因此,大会推荐采用 $k=10$, $n=2$ 作为计算等效光幕亮度 L_v 的基础指标[14]。本研究也采用上述的基础指标进行 L_v 的计算和验证。

1.2 失能眩光评价方法

ETC 门架属于道路设施,且监控补光灯多为 LED 型灯具,因此可以参考我国的照明测量方法以及《道路照明设计标准》[15-16],采用眩光阈值增量 TI 作为 ETC 门架监控补光装置的失能眩光评价方法[17-18],这也是目前在高速公路 ETC 门架失能眩光研究中使用较多的评价方法之一。因此,本次试验也采用该方法对现场调优结果进行评价分析。

TI 表示在眩光源的干扰下,为消除 L_v 影响,达到与没有眩光源时相同的视觉条件,而在目标物体与其背景之间所需要增加亮度的百分比[19]。由此可知, TI 的取值不仅与 L_v 直接相关,还与道路的平均亮度 L_{av} 密切相关,其公式可表示为:

$$TI = 65 \times \frac{L_{vt}}{L_{av}^{0.8}} (\%) \quad (0.05 < L_{av} < 5), \quad (6)$$

式中 L_{vt} 为观察者视野范围内所有眩光源产生 L_v 的叠加。

结合式 (4), 可进一步将式 (6) 改写为:

$$TI = 65 \times k \times \frac{\sum \frac{E_{eye}}{\theta^n}}{L_{av}^{0.8}} = \frac{650}{L_{av}^{0.8}} \times \sum \frac{E_{eye}}{\theta^2} \circ \quad (7)$$

TI 值越大, 证明观察者受眩光源刺激的程度越高。因此, 可通过式 (7) 对 ETC 门架补光装置优化前后对驾驶员视觉造成的眩光程度进行量化, 从而得出优化方案所起作用的大小。

根据眩光阈值增量法 *TI* 的计算原理, 结合前述对失能眩光模型的分析可知, 观察者视野范围内 *TI* 值的大小主要取决于观察者视野内目标物体与其周围环境之间的亮度对比、眩光源与观察者眼睛视看方向夹角 θ 这两个参数。对于高速公路等户外应用场景, 调整 ETC 门架所处位置周围的环境亮度显然具有较高难度。出于经济性与实用性方面的考虑, 较为合理的做法是从调整 ETC 门架补光装置的方向着手, 即在不影响 ETC 门架系统自有功能 (录像、牌照) 前提下, 对 ETC 门架补光装置的参数进行调整与优化, 进而减少 ETC 门架补光装置在设备补光时段给驾驶员眼睛带来的光线刺激, 缓解驾驶员视力短时受损的程度。因此, 在本次 ETC 门架补光装置眩光调优现场试验中, 从调节装置设备参数入手, 通过调整 ETC 门架监控补光装置的亮度、调整补光装置的照射方向等角度进行现场试验。

2 ETC 门架监控补光装置的眩光调优

2.1 照度、亮度实地测量

根据对失能眩光模型下眩光原理机制的剖析, 以及对眩光阈值增量 *TI* 的分析可知, 监控补光装置 (眩光源) 对驾驶员的视觉干扰主要受到两个因素的影响: 一是监控补光装置自身的亮度, 二是监控补光装置与小客车驾驶员眼睛视看方向的夹角。对高速公路 ETC 门架补光装置的现场调优主要采用以下两种方案: 一是直接调整 ETC 门架补光装置的发光强度; 二是调整 ETC 门架补光装置的照射角度。现场调优通过软件调整与硬件调整相结合的模式, 对选取试点路段 ETC 门架补光装置的发光强度、照射角度等不同参数进行调整, 获取 ETC 门架前方补光区域范围内各测试点的光学特征数据, 并依次进行各测试点的值计算。在进行现场试验测试前, 首先应对 ETC 补光装置进行后台软件时序调整, 以确保各个车道的补光装置在频闪状态下不同时进行补光。

为更好地解决上述问题, 选取了广东省内某 3 条高速公路路段, 以各个车道的补光装置在频闪状

态下不同时进行补光为原则, 对所有试点内 ETC 门架的参数进行设置, 并在试点门架正前方 10~150 m 的范围内对其亮度及照度进行多时段、多气候条件下的实地测量。其中, ETC 门架监控成像补光装置采用常亮补光模式。为保证数据的可靠性, 在距离 ETC 门架 20~100 m 范围内等距离间隔选取了 10 个位置点, 以及距离门架约 150 m 处共 11 个测试点进行亮度的测量, 测量仪器使用 LS-100 亮度计。由于在实际应用中 ETC 门架摄像机的拍照范围大致为其正前方 23~50 m 的区域, 而监控成像补光装置的主要补光区域为 25~35 m, 因此在测量照度时, 以距离 ETC 门架 10 m 为测量起点, 按照 4 m 的间距原则选取了 9 个测试点, 采用 TES-1335 照度计沿车道中心线进行测量计算, 测量时照度计离地面的高度应为 0.5 m (模拟车辆前置车牌的位置), 所得结果分别如表 1~2 所示。

表 1 ETC 门架监控成像补光装置的实测亮度数据 (调优前)

Tab. 1 Measured brightness data of fill light device of ETC monitoring camera (before optimization)

距 ETC 门架 距离/m	亮度值/(cd·m ⁻²)		
	路段 1	路段 2	路段 3
20	85 600	35 180	70 365
30	20 350	52 830	77 580
40	8 480	35 900	42 515
50	3 804	21 000	27 515
60	2 106	15 370	17 970
70	637	10 300	12 090
80	597	9 140	10 080
90	411	7 456	8 310
100	310	5 400	5 240
150	157	1 794	1 495

表 2 ETC 门架监控成像补光装置的实测照度数据 (调优前)

Tab. 2 Measured illumination data of fill light device of ETC monitoring camera (before optimization)

检测位置/m	亮度值/(cd·m ⁻²)		
	路段 1	路段 2	路段 3
10	7.32	14.1	9.7
14	33.8	13.9	20.1
18	51.1	17.5	57.6
22	46.8	24.4	56.9
26	33.3	40.6	45.9
30	30.2	50	38.5
34	15.1	57.2	28.3
38	5.6	60.1	20.1
42	—	59.2	15.2

2.2 现场实测调优

在常亮模式下,ETC 门架补光装置未进行调优前的平均光照度一般在 50 lx 左右,而距离 ETC 门架 40 m 车牌处 (0.5 m 高) 的光照度不小于 3 lx 即可满足车辆牌照识别的照度要求。因此,对于补光装置发光强度的调优方案,主要基于不影响车辆牌照识别准确率的原则,即确保其在距离 ETC 门架 40 m 车牌处光照度不小于 3 lx 的前提下,通过对补光装置控制软件进行参数调整来实现对不同发光强度值的设置;对于补光装置照射角度的调优方案,则是基于避免补光装置光线直射入驾驶员眼睛的思想,根据 ETC 补光装置所在路段路线坡度等对补光装置的安装角度进行调整,即在确保距离 ETC 门架 25~40 m 处补光平均光照度满足要求的前提下,通过对正对车行道的补光装置进行横向距离偏置调整来实现对不同照射角度的设置。基于上述分析,本次试验对路段 1 和路段 2 进行补光装置发光强度的调整测试,对路段 3 则分别进行补光装置角度参数调整、补光装置角度与发光强度参数双重调整的不同测试方案。所得试验数据对比见图 2~4。

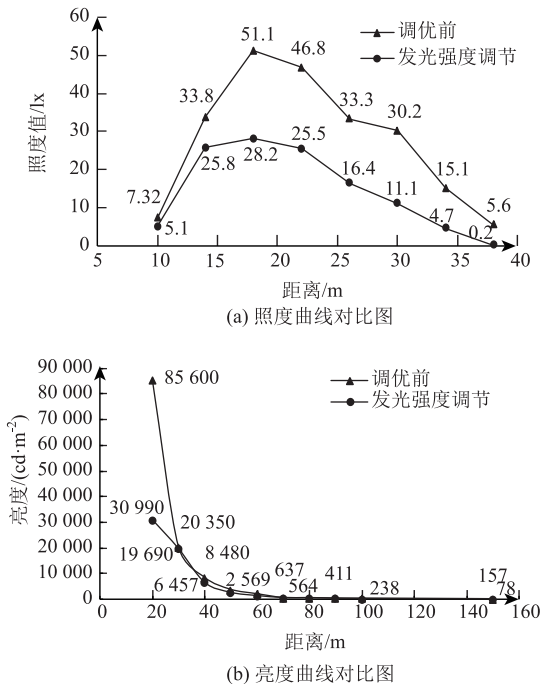


图 2 调优前后的结果对比 (路段 1)

Fig. 2 Comparison of results before and after optimization (road section 1)

由图 2 可以看出,对于路段 1,补光装置进行发光强度优化前在距离 ETC 门架 18 m 的测试点上测得最大照度值,经过优化后该点的照度值从 51.1 lx 降到了 28.2 lx,变化率为 45%;而最大亮度值发生在

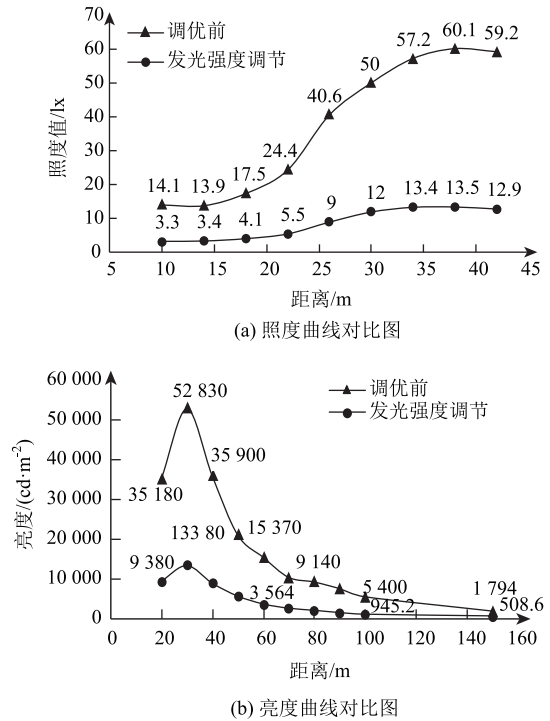


图 3 调优前后的结果对比 (路段 2)

Fig. 3 Comparison of results before and after optimization (road section 2)

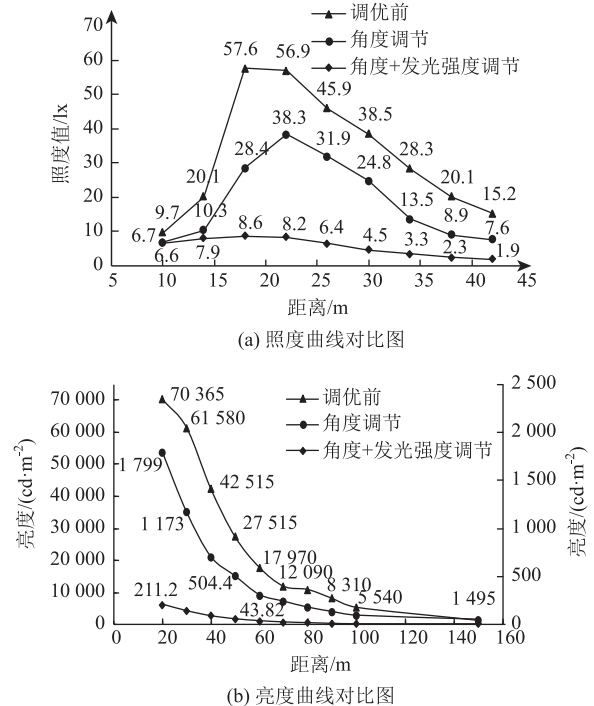


图 4 调优前后的结果对比 (路段 3)

Fig. 4 Comparison of results before and after optimization (road section 3)

距离 ETC 门架 20 m 的测试点上,优化后其亮度值从 85 600 cd/m² 减少到 30 990 cd/m²,约降低了 64%。根据图 3 可知,对于路段 2,由于其监控补光装置采

用直射方式,且补光区域集中在 35~60 m 范围内,因此优化前在距离 ETC 门架 38 m 的测试点上测得最大照度值为 60.1 lx,经过优化后其照度降到了 13.5 lx,变化率达到 78%;而最大亮度值出现在距离 ETC 门架 30 m 的测试点上,优化后该点测得的亮度值从 52 830 cd/m² 下降为 13 380 cd/m²,约减少了 75%。

由图 4 (a) 可知,在距离 ETC 门架 18 m 的位置上测得的最大照度为 57.6 lx,在仅调整补光装置照射角度的情况下,该测试点测得优化后的照度值为 28.4 lx,相比优化前下降了约 51%;而在同时调整补光装置的照射角度与发光亮度情况下,其照度值为 8.6 lx,相比优化前下降了约 85%,比单一角度参数调整多了 34% 的降幅。相应由图 4 (b) 可知,在距离 ETC 门架 20 m 的测试点上,仅调整补光装置照射角度的测试方案与同时调整补光装置照射角度与发光亮度的测试方案 2 者优化后的亮度值分别为 1 799 cd/m² 和 211.2 cd/m²,与优化前的 70 365 cd/m² 相比,下降幅度分别达到了 97% 和 99%。

综合 3 个路段的现场调优测试发现,调节补光装置的发光强度以及照射角度均能有效减少在各测试点的照度以及亮度。由图 2~4 可知,在仅进行补光装置发光强度或照射角度调节时,其优化后的照度、亮度曲线线型与优化前线型基本一致,尽管相比优化前,优化后照度曲线的幅值有着明显的下降,但其在距补光装置 15~30 m 的范围内仍可能会出现超出眩光阈值增量最大限制值的照度峰值,从而容易给驾驶员造成视觉刺激;在仅对补光装置进行单一参数调整情况下,相比于发光强度调整,照射角度调整对补光装置照度的优化差别并不大,但在亮度优化方面起到了更为明显的效果。由图 4 可看出,相比于仅进行单一参量调整,同时调整补光装置照射角度和发光强度后,各测试点的照度和亮度的幅值均有着更为明显的下降。由图 4 (b) 可以发现,在补光装置亮度优化方面,进行双重参数调整与仅进行补光装置照射角度调整二者的优化效果接近,由此说明采用双重参数调整方案对补光装置亮度进行优化时,应以调整补光装置照射角度为主。双重参数调整的优势主要体现在对补光装置的照度优化方面,由图 4 (a) 可知,双重参数调整下补光装置整体的照度曲线更趋近于平滑(绿色曲线),基本消除了单一参数调整下仍可能会出现明显波峰过程的缺点,而这种照度幅值低、平滑变化的特点也更有利于缓解驾驶员在道路行驶时面临的补光装置眩光问题。由此可见,要想达到一个较好的路面照度、

路面亮度要求,需要同时对补光装置的照射角度和发光强度进行调整,二者缺一不可。

2.3 眩光计算分析

结合 ETC 门架摄像机的拍照区间需求以及补光装置的主要补光区域,选取 22, 26, 30, 34 m 这 4 个测试点的实测数据计算补光装置对驾驶员的眩光影响。根据式 (3) 和式 (4) 可知,补光装置对驾驶员眼睛视网膜所形成等效光幕亮度 L_v 的强烈程度,与夹角 θ 的大小有着直接关系。因此,本研究以小客车为例,计算分析补光装置对驾驶员造成的眩光影响。

高速公路 ETC 门架监控成像补光装置与小客车驾驶员视线的位置关系见图 5。其中, H 为 ETC 门架距离地面的高度; L 为小客车驾驶员与 ETC 门架的直线距离; θ 为驾驶员视看前方的视觉中心方向与补光装置光线入射驾驶员眼球方向的夹角。假定在夜间行车时,驾驶员的视觉中心落于其正前方 80 m 的位置上,小客车驾驶员的视觉高度为 1.5 m,那么,根据 L 取值的不同,可利用三角函数关系分别计算出不同 L 值所对应的角度 θ ,所得结果如表 3 所示。

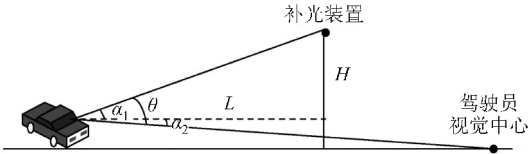


图 5 补光装置与驾驶员的视觉关系
Fig. 5 Relationship between fill light device and driver's vision

表 3 距离 L 与夹角 θ 的关系
Tab. 3 Relationship between distance L and angle θ

距离 L /m	22	26	30	34
夹角 θ /(°)	17.53	15.11	13.30	11.90

根据表 3 不同距离所对应的 θ 值,结合式 (7) 便可对 ETC 门架监控成像补光装置产生的眩光阈值增量 TI 值进行计算,所得结果如表 4 所示。其中,式 (7) 中计算 TI 时所采用道路平均亮度 L_{av} 的值,则是参考城市道路照明设计标准规范的规定选取(以道路照度最大值 50 lx 为基准,并按照沥青混凝土路面折算亮度系数 15 计算)。

由表 4 可知,在对 ETC 门架监控成像补光装置进行参数优化前,3 个测试路段的 TI 值大部分集中在 30%~50% 的区间内,远远超过了道路照明设计标准要求中限制眩光阈值增量最大值 15% 的规定,这也是 ETC 门架监控成像补光装置对驾驶员造成视觉困扰的主要原因。在对路段 1 和路段 2 进行补光装

表 4 调优前后的眩光阈值增量 TI 对比Table 4 Comparison of glare threshold increment TI before and after optimization

测试区段	参数调整	驾驶员与 ETC 门架的直线距离 L/m			
		22	26	30	34
路段 1 $TI/\%$	未调整	37.78	36.18	42.36	26.45
	发光强度调整	20.59	17.82	15.57	8.23
路段 2 $TI/\%$	未调整	19.70	44.12	70.13	100.21
	发光强度调整	4.44	9.78	16.83	23.48
路段 3 $TI/\%$	未调整	45.94	49.88	54.00	49.58
	角度调整	30.92	34.66	34.78	23.65
	角度 + 发光强度调整	6.62	6.95	6.31	5.78

置发光强度优化调整后,各测试点的 TI 值均有了超过 45% 的下降,数据集中区间也从 30%~50% 下降到了 10%~20%。尽管其中仍有部分测试点的 TI 值不达标,但相较于未调整前,优化调整后的补光装置眩光阈值增量已较为接近 15% 的规定限定值。在对路段 3 补光装置进行优化测试后发现,调整补光装置的照射角度也能收到减少眩光的效果。在只进行补光装置照射角度调节的情况下,虽然 4 个测试点的 TI 值均没有达到规定限定值,但相较于未调整前已有了较大的改善,其下降幅度均超过了 30%;而通过对补光装置进行照射角度以及发光强度的双重优化调整,眩光阈值增量 TI 最大值可以从 34.78% 降低到 6.95%,下降幅度达到 88%,满足标准对限定眩光阈值增量的规定要求。相比优化前补光装置的刺眼光线,对 ETC 门架补光装置进行优化后,其发出光线明显变得柔和,驾驶员直视补光装置时的刺眼感明显降低,视觉主观感受得到了明显改善。

为进一步验证方案的可行性,以 3 个连续自然日为试验周期,分别对多个试点路段 ETC 门架的补光装置采取不调整、进行照射角度和发光强度双重调整的测试方案,汇总统计两种不同方案下 ETC 门架摄像机图像识别的结果并取其平均值,所得结果如表 5 所示。从表 5 可以看出,对 ETC 门架进行补光装置优化调整后,3 个路段 ETC 门架摄像机的图像识别率均在 98.85%~99.24% 之间,三者也都满足规范所要求的不小于 95% 的设计指标。相比于优化前,进行补光装置优化后摄像机对车辆牌照识别的成功率变化并不大,二者误差均在 0.2% 合理浮动范围内。这是因为本研究所提出的 ETC 门架监控成像补光装置优化方案,无论是单一参数调整还是双重

参数调整,均是以不影响 ETC 门架监控摄像机自身(摄影、录像)功能为前提,因此该优化方案能在大幅降低补光装置亮度、降低驾驶员目眩程度的同时,避免会给 ETC 门架监控摄像机对车辆牌照的识别带来负面影响。

表 5 调优前后 ETC 门架车牌识别率对比

Tab. 5 Comparison of license plate recognition rates by ETC gantry before and after optimization

测试区段	优化前识别率/%	优化后识别率/%
路段 1	99.10	98.94
路段 2	99.23	99.24
路段 3	99.00	98.85

本方案以高速公路为应用场景,以小客车为目标对象开展应用研究。试验结果表明,本优化方案实施难度较低,具有较强的经济适用性以及较好的可操作性,可适用于车速为 80~120 km/h,交通量为 30 000~120 000 pcu/d 的新建高速公路 ETC 门架补光装置的防眩光设计与验收方案,亦可指导现有高速公路 ETC 门架补光装置的眩光调优,在现实中有着较高的应用价值。

3 结论

本研究提出了一种可降低高速公路 ETC 门架监控成像补光装置失能眩光影响的可行性优化方案。第一,结合高速公路 ETC 门架的特殊应用场景建立了失能眩光模型,并在分析等效光幕亮度 L_e 与驾驶员视看能力二者关系的基础上,得出了决定眩光阈值增量 TI 值大小的两个主要参数:一是目标物体与周围环境的亮度对比,二是眩光源与观察者眼睛视看方向的夹角 θ 。第二,根据 ETC 门架补光装置的现场实际运行状况,将从失能眩光模型分析出的结论用于指导 ETC 门架补光装置的优化调整,并最终确定以调整 ETC 门架补光装置照射角度、发光强度为优化手段,选取多个测试点进行实地测量试验,对 ETC 门架补光装置在优化前后的照度、亮度数据进行记录;第三,结合眩光阈值增量 TI ,对 ETC 门架补光装置在优化前后的眩光程度进行评估,进而验证了所提优化方案的可行性。

试验结果表明,在不影响 ETC 门架监控摄像机对机动车牌照识别准确率的情况下,优化 ETC 门架补光装置的照射角度对路面亮度的弱化效果更为显著,因此在调节路面亮度指标时宜以补光装置照射角度调整为主;在仅进行补光装置单一参数优化下,本方案对眩光阈值增量 TI 值的下调幅度可达 30% 以

上,而通过对补光装置进行双重参数优化,对眩光阈值增量 TI 值的下调幅度可达 88%,且优化后的照度曲线过渡平滑,没有明显的波峰过程,所有测试点的 TI 值均满足标准规定的限制眩光阈值增量最大值要求,从而能最大程度地降低补光装置补光瞬间对驾驶员视觉造成的眩光影响。由此可见,本优化方案能显著降低高速公路 ETC 门架补光装置的眩光程度,具备较好的可操作性与较高的应用价值。但基于静态环境建立的失能眩光模型受限于试验场地与条件,难以模拟驾驶员的动态视觉环境,因此接下来将对动态失能眩光模型进行建模研究,并在此基础上进一步深化探索 ETC 门架监控成像补光装置的其他优化调整策略。

参考文献:

References:

- [1] 南疆. 对高速公路夜间行车安全性的深入探讨 [J]. 黑龙江交通科技, 2019, 42 (10): 165-166.
NAN Jiang. An In-depth Discussion on the Safety of Highway Driving at Night [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2019, 42 (10): 165-166.
- [2] LIN Y D, STEVE F, WEI M C, et al. Eye Movement and Pupil Size Constriction under Discomfort Glare [J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2015, 56 (3): 1649-1656.
- [3] 李玮晟. 道路监控补光灯的眩光效应及其改善措施 [D]. 深圳: 深圳大学, 2020.
LI Wei-sheng. Glare Effect of Road Monitoring Fill Light and Its Improvement Measures [D]. Shenzhen: Shenzhen University, 2020.
- [4] 党武娟, 毛琳. 高速公路中央分隔带防眩设施设置研究 [J]. 北方交通, 2016 (6): 128-131.
DANG Wu-juan, MAO Lin. The Highway Median Anti-dazzle Facility Set up Research [J]. Northern Communications, 2016 (6): 128-131.
- [5] 林树坚. 道路照明失能眩光的评价及测试方法 [J]. 中国照明电器, 2017 (5): 42-44.
LIN Shu-jian. Evaluation and Testing Method of Road Lighting Disability Glare [J]. China Light & Lighting, 2017 (5): 42-44.
- [6] 杨春宇, 刘锡成. 失能眩光对道路照明安全影响的研究 [J]. 照明工程学报, 2007, 18 (4): 1-5.
YANG Chun-yu, LIU Xi-cheng. Research of the Influence of Disability Glare on Road Lighting Safety [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2007, 18 (4): 1-5.
- [7] 许巧云. LED 道路监控补光灯眩光危害评价方法研究 [J]. 中国照明电器, 2017 (9): 58-62.
XU Qiao-yun. Research on the Glare Evaluation Method for LED Road Monitoring Supplement Light [J]. China Light & Lighting, 2017 (9): 58-62.
- [8] 黄琼, 焦朋朋, 赵鹏飞, 等. 道路监控补光灯对青年驾驶员夜间行车安全影响研究 [J]. 交通信息与安
- 全, 2022, 40 (4): 82-91.
HUANG Qiong, JIAO Peng-peng, ZHAO Peng-fei, et al. Influences of Nighttime Supplemental Light for Road Monitoring on Driving Safety of Young Drivers [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40 (4): 82-91.
- [9] 王嘉明. 基于阈值增量的眩光测量系统研究 [D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
WANG Jia-ming. Research on Glare Measurement System Based on Threshold Increment [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2021.
- [10] CIE S 017/E, International Lighting Vocabulary [S]. 2nd Edition.
- [11] 吴杰. 常亮型 LED 交通监控补光灯夜间失能眩光研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
WU Jie. Study on the Nighttime Disability Glare of Constantly Bright LED Traffic Monitoring Fill Light [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [12] 于连栋, 刘巧云, 丁苏红, 等. 失能眩光形成机理的研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28 (8): 866-868.
YU Lian-dong, LIU Qiao-yun, DING Su-hong, et al. Study on the Theory of Generation of Disabling Glare [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2005, 28 (8): 866-868.
- [13] 刘磊实. 城市道路照明设计中失能眩光的计算与控制 [J]. 照明工程学报, 2008, 19 (1): 77-80.
LIU Lei-shi. The Control and Calculation of Disability Glare for Lighting Design on Urban Road [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2008, 19 (1): 77-80.
- [14] CIE31—1976, Glare and Uniformity in Road Lighting Installation [S].
- [15] GB/T 5700—2008, 照明测量方法 [S].
GB/T 5700—2008, Measurement Methods for Lighting [S].
- [16] CJJ45—2015, 城市道路照明设计标准 [S].
CJJ45—2015, Standard for Lighting Design of Urban Road [S].
- [17] 魏婷, 顾芳波, 钱枫, 等. LED 灯具的眩光评价与防治概述 [J]. 中国照明电器, 2015 (7): 32-35.
WEI Ting, GU Fang-bo, QIAN Feng, et al. Study and Evaluation of the Glare for LED Lighting Fixture [J]. China Light & Lighting, 2015 (7): 32-35.
- [18] 韩燕华. 防眩光交通监控 LED 补光装置的设计与开发 [D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
HAN Yan-hua. Design and Development of Anti-glare LED Fill Light Device for Traffic Monitoring [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [19] 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.
LI Yuan, NIU Sheng-nan. The Variation of Calculation System of Threshold Increment [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2019, 30 (4): 53-60, 74.