

中文引用格式:梅家林,杜志刚,贺世明,等. 基于车距保持的公路隧道反光条设置及驾驶模拟研究[J]. 中国安全科学学报,2025, 35(1):171-177.

英文引用格式:MEI Jialin, DU Zhigang, HE Shiming, et al. Study on reflective strip configuration and driving simulation in highway tunnels based on vehicle distance maintenance [J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(1):171-177.

基于车距保持的公路隧道反光条设置及驾驶模拟研究*

梅家林^{1,2}, 杜志刚^{1,2}教授, 贺世明^{1,2}, 王首硕³

(1 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063; 2 交通信息与安全教育部
工程研究中心, 湖北 武汉 430063; 3 广州航海学院 智能交通与工程学院, 广东 广州 510712)

中图分类号: X951

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.01.0176

基金项目: 国家自然科学基金资助(52072291, 52402423)。

【摘要】 为减少驾驶人在公路隧道中追尾风险, 首先根据隧道反光条提供深度知觉信息的特性, 建立隧道反光条设置间距的计算模型; 其次通过驾驶模拟试验, 探讨隧道反光条设置间距对车距保持的影响; 然后选取制动车头时距、最小车头时距、跟驰车头时距和最小碰撞时间作为评价指标。结果表明: 前车以 40~80 km/h 速度行驶, 而后车以高于前车 20 km/h 的速度接近时, 若让后车驾驶人在与前车的距离小于最小安全距离之前, 接受 3~4 次来自反光条的视觉刺激, 制动车头时距能提高 27.6%~56.6%, 最小车头时距能提升 54.2%~60.3%, 并且跟车稳定条件下车头时距能提升 20.1%~31.6%。此外, 前车一旦出现紧急制动, 最小碰撞时间能提升 34.7%~60.5%, 降低追尾概率。即隧道反光条可提高驾驶人的速度感知和距离感知能力, 降低追尾风险。

【关键词】 车距保持; 公路隧道; 反光条; 驾驶模拟; 车头时距

Study on reflective strip configuration and driving simulation in highway tunnels based on vehicle distance maintenance

MEI Jialin^{1,2}, DU Zhigang^{1,2}, HE Shiming^{1,2}, WANG Shoushuo³

(1 School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430063, China; 2 Engineering Research Center of the Ministry of Transportation Information and Safety Education, Wuhan Hubei 430063, China; 3 School of Intelligent Transportation and Engineering, Guangzhou Maritime University, Guangzhou Guangdong 510712, China)

Abstract: To reduce the risk of rear-end collisions in highway tunnels, a tunnel reflective strip space model was proposed based on the tunnel reflective strip characteristics with depth perception information. The effects of spacing between tunnel reflective strips on vehicle distance maintenance were examined through driving simulation tests. Braking headway, minimum headway, following headway, and minimum collision time were selected as evaluation indicators. The results indicated that when the leading vehicle traveled at speeds between 40-80 km/h and the following vehicle approached at a speed 20 km/h higher than the leading vehicle, if the following driver received 3-4 visual stimulations from the reflective strips

before the distance between the leading and following vehicles was less than the minimum safe distance, the braking headway, minimum headway, and the time headway under stable car-following conditions was improved by 27.6%–56.6%, 54.2%–60.3%, and 20.1%–31.6%, respectively. Furthermore, the minimum collision time was increased by 34.7%–60.5% once the leading vehicle braked urgently, reducing the probability of a rear-end collision. Therefore, tunnel reflective strips enhance drivers' perception of speed and distance perception ability, reducing the risk of rear-end collisions.

Keywords: vehicle distance maintenance; highway tunnels; reflective strips; driving simulation; time headway

0 引言

在公路隧道中,由于疲劳驾驶和未能保持适当安全距离所引发的事故风险相比普通道路驾驶会显著增加,这类事故在隧道内发生的可能性是普通道路的2.373和2.482倍^[1]。公路隧道的交通事故数据表明:追尾事故和碰撞事故分别占总事故的37%和23%^[2]。追尾碰撞的发生主要归因于隧道内空间的有限性,导致驾驶人的视线受限,躲避空间减小,同时,由于车速较快和制动时间有限,如果前车在行驶中出现故障,后车可能来不及停车,从而撞上前车。

隧道侧壁视线诱导信息被视为有效改善驾驶行为的手段。隧道侧壁条状信息能有效提高驾驶人的速度感知^[3],如侧墙装饰可缓解视觉信息单调的现象^[4];隧道内设置韵律图案并向进出口适度倾斜,在进口下坡段能促使驾驶人主动降速以提升交通安全,在出口上坡段能促使驾驶人合理加速以保障通行效率^[5];竖向条纹和发光二极管(Light-Emitting Diode, LED)环灯拱可为驾驶人提供隧道内壁的形态信息,提高驾驶人对隧道内空间的整体感知,可有效调控车速^[6]。此外,隧道内布设黄黑立面标记、反光立柱和韵律型标记组合等,都可提升驾驶人的速度感知能力和距离感知能力^[7]。这些都说明隧道侧壁诱导信息是提供速度感和距离感的重要信息来源,有利于车距保持。

隧道轮廓带是一种安装在隧道内部边缘、表面覆盖有反光材料的线条形装置,可分为反光环和反光条。当前的研究主要集中于隧道内的反光环。研究发现,反光环之间的间隔与瞳孔的面积呈负相关关系^[8];同时,反光环的颜色也与瞳孔面积呈现负相关性^[9]。对于隧道弯道,反光环比常用的线形诱导标更能优化曲率感知^[10]。针对隧道反光条,杨理波等^[11]研究表明:反光条的布置角度和间隔对于驾驶员对坡度的感知有显著的影响。现有研究聚焦于验证反光

环突出隧道轮廓和减轻驾驶疲劳的效果,并且设置间距多考虑驾驶心理,而针对反光条研究较少,也未探究隧道侧壁竖向条状设施对发现前车、控制车辆间距的作用机制,缺少对车距保持的深入探索。

考虑到反光环和反光条都能提供竖向条状信息,但反光环顶部因积灰难以维护,导致反光性能下降,逐渐变成反光条的形式。因此,笔者拟选用隧道反光条作为研究对象,探究其对车距保持的作用机制,从而进一步推动和优化反光条作为控制车速和调节跟车间距的改善措施。

1 公路隧道反光条设置方法

1.1 隧道反光条对车距保持的作用

在隧道这种光线较暗的环境中,如果某些车辆的尾部反光标识不达标或已经损坏,那么跟随其后的驾驶人将难以清楚地识别前方车辆的轮廓和状态。隧道内设置反光条后,随着后车逐渐接近前车,驾驶人可能会注意到,远处的反光条被前方车辆遮挡,或之前被遮挡的反光条开始变得可见(临界时刻为后车驾驶人视点、前车车尾、反光条在一条直线上),这种由远及近的反光条明暗变化效果,能够有效帮助后车驾驶人察觉到前车的存在,并且这种视觉提示促使驾驶人适时调整自己的行车速度和车距保持,如图1所示。



图1 隧道反光环和反光条有利于发现前车
Fig.1 Tunnel reflective rings and strips are beneficial for detecting vehicles ahead

1.2 隧道反光条间距计算方法

在车辆行驶过程中,最危急的状况之一是当前

车突然停车时,后车驾驶人在反应时间内仍保持原来速度不变,然后车辆才出现减速,此外还需要与前车保持安全距离。为避免发生追尾碰撞,后车在行驶过程中还应与前车保持足够的最小安全距离。最小安全距离计算如下式,结果见表 1。

$$S = v \left(t_0 + t_1 + \frac{t_2}{2} \right) + \frac{v^2}{2a_{\max}} + d \quad (1)$$

式中: S 为最小安全距离, m; v 为后车减速前的速度, m/s; t_0 为驾驶人反应时间, 取 1.0 s; t_1 为制动器协调时间, 一般取值为 0.2~0.4 s, 本文取 0.3 s; t_2 为减速度的增长时间, 一般取值为 0.1~0.2 s, 本文取 0.2 s; d 为前车与后车最低要求的距离, 一般为 2~5 m, 本文取 5 m; a_{\max} 为后车最大减速度, 一般取值为 6~8 m/s², 本文取 6 m/s²。

表 1 隧道内最小安全车距和简单识别视距

Table 1 Minimum safe distance and simple identification sight distance in tunnels

| 设计速度/(km·h ⁻¹) | 40 | 60 | 80 | 100 |
|----------------------------|-----|-----|-----|-----|
| 安全跟车距离/m | 31 | 52 | 78 | 108 |
| 简单识别视距/m | 110 | 170 | 230 | 290 |

注:考虑到公路隧道直线段信息量少,服务水平较高,为简单识别视距。

隧道反光条的视认性会受到多种因素的影响,包括反光膜的材质、车辆灯光、隧道照明等。同时为保障其视认性,反光条可采用蓄能自发光型或 LED 发光型主动提供照明,能满足《公路工程技术标准》^[12]中简单识别视距要求。然而,当反光条与驾驶人相隔距离过远时,即使造成视觉刺激,也不会对驾驶人的减速行为产生影响。因此,假设后车驾驶人在简单识别视距处才会注意反光条带来的视觉刺激,并可能采取相应的制动减速措施,如图 2 所示。

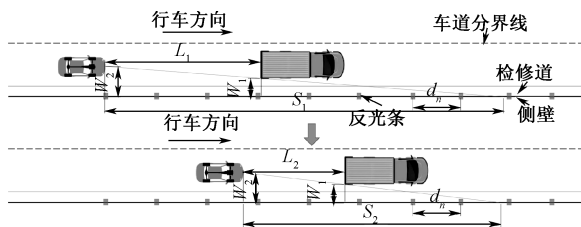


图 2 后车接近前车的过程

Fig. 2 Rear vehicle approaching front vehicle

以 2 车之间的距离从简单识别视距逐渐减少到最小安全车距的范围内,将后车驾驶人注意到隧道反光条交替出现的明暗变化次数作为自变量,计算反光条的设置间距,计算如下式:

$$t = \frac{L_1 - L_2}{v_2 - v_1} \quad (2)$$

$$\frac{S_2 - L_2}{S_2} = \frac{S_1 - L_1}{S_1} = \frac{W_1}{W_2} \quad (3)$$

$$S_2 - S_1 = \frac{W_2}{W_2 - W_1} (L_2 - L_1) \quad (4)$$

$$d_n = \frac{v_2 t + S_2 - S_1}{n} \quad (5)$$

式中: v_1 为前车速度, m/s; v_2 为后车速度, m/s; L_1 为简单识别视距, m; L_2 为最小安全车距, m; t 为 2 车车距从简单识别视距减少至最小安全车距的时间, s; S_1 为简单识别视距时,后车驾驶人能看到最近墙壁的可见距离, m; S_2 为最小安全车距时,后车驾驶人看到最近墙壁的可见距离, m; W_1 为前车尾部到隧道侧壁的最小距离, m; W_2 为驾驶人视点 to 隧道最近墙壁的距离, m; n 为后车观察到前车与反光条明暗变化的刺激次数; d_n 为反光条至少满足 n 次刺激时的间距, m。

2 基于隧道反光条的驾驶模拟试验

2.1 隧道场景设计及反光条设置间距

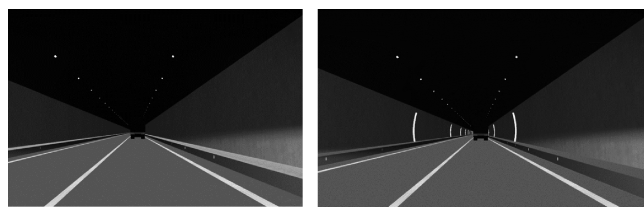
隧道外的限速通常比隧道内高 20 km/h,小型车辆可能会以较快的速度进入隧道,而大型货车在隧道内的速度通常低于小型车辆。因此,设计 3 种不同的速度场景:场景 1:前方货车速度为 40 km/h,后方小车速度为 60 km/h;场景 2:前方货车速度为 60 km/h,后方小车速度为 80 km/h;场景 3:前方货车速度为 80 km/h,后方小车速度为 100 km/h。本文试验设计涵盖一个控制组和 5 个改进组。控制组(方案 a)未安装反光条,而改进组(方案 b—方案 f)则应用不同刺激次数的反光条,见表 2。其中,由于在左、右车道中 a 和 b 的值存在差异,因此在式(4)中, $W_2/(W_2 - W_1)$ 的计算采用 2 个车道结果的平均值。

表 2 隧道反光条的设置间距

| Table 2 Spacing of tunnel reflective strips | | m | | |
|---|------|------|------|------|
| 试验方案 | 刺激次数 | 场景 1 | 场景 2 | 场景 3 |
| a | 0 | — | — | — |
| b | 1 | 94 | 228 | 437 |
| c | 2 | 47 | 114 | 218 |
| d | 3 | 31 | 76 | 146 |
| e | 4 | 24 | 57 | 109 |
| f | 5 | 19 | 46 | 87 |

注:刺激次数为后车驾驶人视点、前车车尾、反光条在一条直线上的次数。

隧道基础模型为中部直线路段,单洞2车道。为模拟真实情况并考虑潜在危险,设定前方货车尾部为黑色,并在行驶中开启车灯。前车定位在距离后车启动起点前800 m处,2车在同一个车道内行驶。图3描绘有无反光条的对比效果。后车接近前车的过程可划分为3个主要阶段,并提出相应的评价指标,见表3。



(a) 无反光条

(b) 有反光条

图3 试验场景

Fig.3 Test scenario

表3 后车接近前车的阶段及指标描述

Table 3 Stage and indicator description of rear vehicle approaching front vehicle

| 阶段 | 描述 | 指标 | 指标描述 |
|------|---|--|--|
| 减速阶段 | 随着距离的缩短,后车驾驶人发现前车并开始减速,逐渐接近前车速度 | 初始速度/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) | 后车开始减速时刻(突然松下油门或采取刹车时)前3 s内的速度,越小说明速度控制越好 |
| | | 制动车头时距/s | 后车开始减速时刻与前车的车头时距,越短表明采取减速措施越迟 |
| | | 最小车头时距/s | 后车接近前车的过程中,与前车的车头时距的最小值,越小表明风险程度越高 |
| 跟驰阶段 | 后车速度与前车速度基本一致 | 跟驰车头时距/s | 后车速度与前车接近一致且近似稳定时,2车车头距离与后车速度的比值,越小说明越危险。 |
| 避碰阶段 | 前车实施紧急制动并停止时,后车驾驶人会立即响应,执行制动操作以防止发生追尾事故 | 最小碰撞时间/s | 后车避碰过程中2车碰撞时间的最小值。碰撞时间是指后车与前车继续运动直到发生碰撞所需要的时间,越小说明碰撞风险越大 |

2.2 驾驶模拟试验设备及驾驶人

驾驶模拟器由驾驶舱和曲面屏幕组成,能够提供沉浸式的道路环境仿真体验。被试共计32名,其中,21名男性和11名女性,均持有C1驾照,具备正常或矫正至5.0及以上的视力,且身体状况良好。被试年龄分布:20~30岁16人,30~40岁11人,40~50岁5人。

2.3 驾驶模拟试验步骤

- 1) 试验事项告知,被试签订试验知情同意书。
- 2) 被试进行至少5 min的适应性驾驶练习,如无任何不适情况,该被试可参与正式试验。
- 3) 记录被试个人相关信息,包括性别、年龄和驾龄等。
- 4) 试验指导者指示被试维持在当前车道,并在未察觉前车的情况下,尽量维持设定的速度。

5) 试验正式启动,每位被试需完成18个路段的驾驶(3种场景×6种方案),每路段结束后至少休息3 min。

2.4 数据处理

Shapiro-Wilk检验表明:各组数据服从正态分布($p > 0.05$),分析指标数据的单因素重复测量方差。如果违反Mauchly's球度假设,则方差分析结果采用

Greenhouse Geisser进行校正。此外,显著性设定在5%的水平。

3 基于反光条的驾驶模拟试验结果

3.1 初始速度

不同方案的初始速度情况如图4所示。相较于方案a,方案b—方案f的初始速度都有所降低,表明反光条有利于控制速度,且反光条间距越小,控速效果越好。然而,在3个场景中,方案e和方案f的初始速度无显著差异,说明当反光条间距减小到一定程度,进一步减小间距对减速效果不再显著。

3.2 制动车头时距

不同方案的制动车头时距情况如图5所示。在场景1,方案b—方案f的制动车头时距相较于方案a增加1.21~3.19 s。针对场景2,方案b—方案f的制动车头时距相较于方案a增加0.70~1.89 s。针对场景3,除方案b,方案c—方案f的制动车头时距都高于方案a,增加1.11~1.90 s。此外,在3个场景中,方案d—方案f的制动车头时距之间都没有显著性差异。场景1的制动车头时距高于场景2和场景3,而场景2和场景3没有显著性差异($p = 1.191$)。

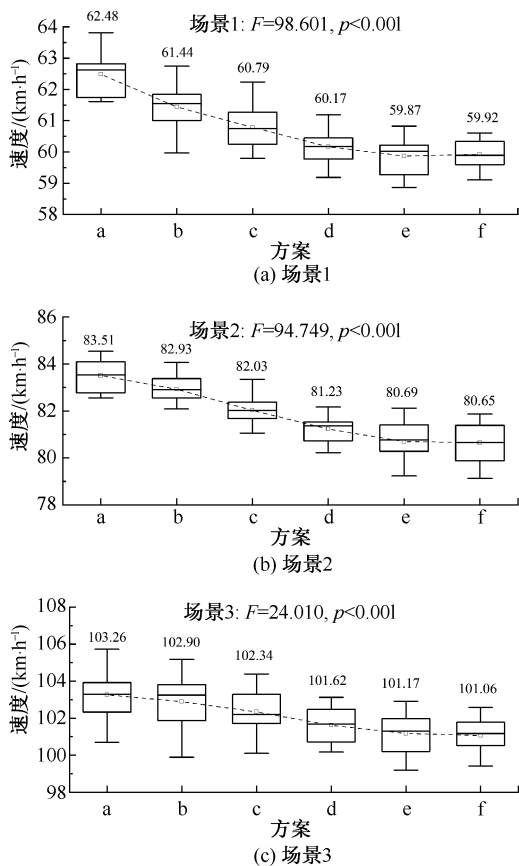


图 4 各方案的初始速度

Fig. 4 Initial speed for each scheme

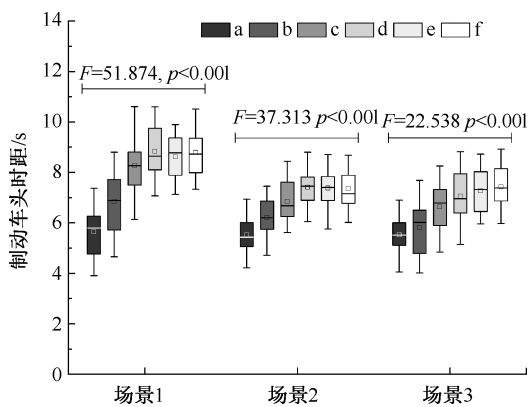


图 5 各方案的制动车头时距

Fig. 5 Braking headway of each scheme

3.3 最小车头时距

不同方案的最小车头时距如图 6 所示。在场景 1 中,方案 b—方案 f 的最小车头时距比方案 a 增加 0.68~1.89 s。在场景 2 中,方案 b—方案 f 的最小车头时距比方案 a 增加 0.51~1.85 s。在场景 3 中,方案 b—方案 f 的最小车头时距比方案 a 增加 0.44~1.61 s。此外,在场景 1 中,方案 c—方案 f 之间没有显著性差异,而场景 2 和场景 3 中方案 d—

方案 f 之间没有显著性差异。

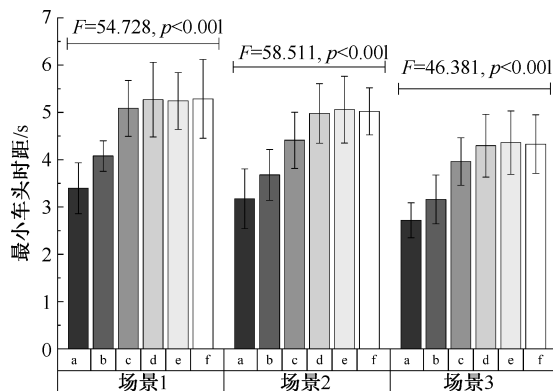


图 6 各方案的最小车头时距

Fig. 6 Minimum headway of each scheme

场景对最小车头时距的主效应也是显著的 ($F=123.628, p<0.001$)。场景 1 (4.73 s) > 场景 2 (4.37 s) > 场景 3 (3.80 s), 说明 3 种场景的前后车的速度差都近似 20 km/h, 但后车速度越高, 相应的最小车头时距就越低, 存在更大的追尾风险。

3.4 跟驰车头时距

不同方案的跟驰车头时距情况如图 7 所示。场景 1 中,方案 b—方案 f 的跟驰车头时距比方案 a 增加 0.38~1.54 s。场景 2 中,方案 b—方案 f 的跟驰车头时距比方案 a 增加 0.29~1.25 s。场景 3 中,方案 b 与方案 a 跟驰车头时距没有显著性差异 ($p=0.573$), 但方案 c—方案 f 的跟驰车头时距都大于方案 a, 分别增加 0.34~0.94 s。此外,在 3 种场景中,方案 d—方案 f 之间都没有显著性差异。

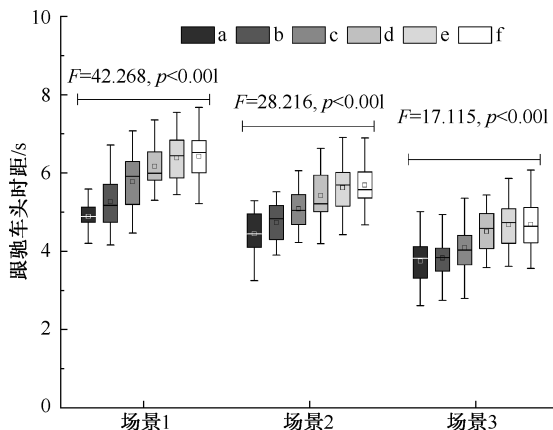


图 7 各方案的跟驰车头时距

Fig. 7 Following headway of each scheme

场景对最小车头时距的主效应也是显著的 ($F=216.108, p<0.001$)。场景 1 (5.82 s) > 场景 2 (5.17 s) > 场景 3 (4.25 s), 说明行驶速度越高, 相应跟驰车头时距就越小。

3.5 最小碰撞时间

不同方案的最小碰撞时间如图 8 所示。在场景 1—场景 3 中,方案 b—方案 f 相较于方案 a 均能显著增加最小碰撞时间。此外,在 3 种场景中,方案 e 和方案 f 的最小碰撞时间都没有显著差异,均能有效增加最小碰撞时间,在场景 1 中至少提升 48.7%,在场景 2 中至少提升 42.9%,在场景 3 中至少提升 60.5%。

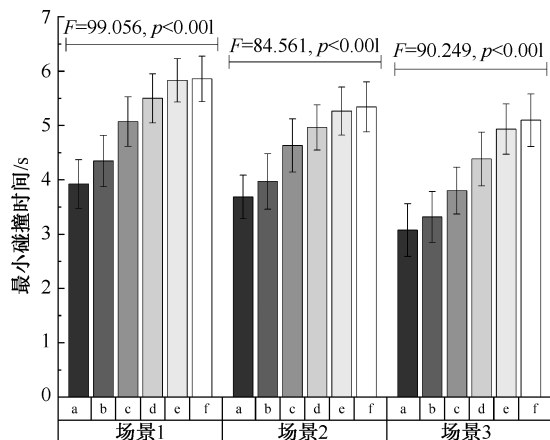


图 8 各方案的最小碰撞时间

Fig. 8 Minimum collision time of each scheme

场景对最小碰撞时间的主效应也是显著的 ($F=250.392, p<0.001$)。场景 1 (5.09 s) > 场景 2 (4.64 s) > 场景 3 (4.07 s), 说明行驶速度越高, 相应的最小碰撞时间就越小, 行车安全性越低。

4 结论

1) 隧道反光条的间距对驾驶人的速度感知和车距保持具有重要影响。随着反光条间距减小 (刺激次数增多), 后车的初始速度降低, 接近前车时的车头时距及稳定跟驰状态下的车头时距增加。此外, 当前车急刹车时, 2 车的最小碰撞时间也随反光条间距减小而增大。然而, 当刺激次数达到 3 或 4 次时, 这些参数的增加趋于平稳。

2) 为保持安全车距, 公路隧道内反光条的间距应确保让后车驾驶人在与前车的距离小于最小安全距离之前, 接受 3~4 次来自反光条的视觉刺激。因此, 隧道反光条设置在 40 km/h 时应为 24~31 m, 在 60 km/h 时应为 57~76 m, 在 80 km/h 时应为 109~146 m。

3) 为更全面地提升隧道内行驶的安全性和舒适性, 后续的研究将考虑引入驾驶人心理、生理指标, 以便优化和验证隧道反光条的间距设置。

参考文献

- [1] 张璇, 唐进君, 黄合来, 等. 山区高速公路隧道路段与开放路段的事故影响因素分析[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(3): 10-18.
ZHANG Xuan, TANG Jinjun, HUANG Helai, et al. An analysis of influential factors of crashes at tunnels and open sections of mountainous freeways [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40 (3): 10-18.
- [2] 申艳军, 杨阳, 邹晓龙, 等. 国内公路隧道运营期交通事故统计及伤亡状况评价[J]. 隧道建设: 中英文, 2018, 38(4): 564-574.
SHEN Yanjun, YANG Yang, ZOU Xiaolong, et al. Statistics on traffic accidents occurred in operating highway tunnels in China and their casualties evaluation [J]. Tunnel Construction, 2018, 38 (4): 564-574.
- [3] MANSER M P, HANCOCK P A. The influence of perceptual speed regulation on speed perception, choice, and control: tunnel wall characteristics and influences [J]. Accident Analysis and Prevention, 2007, 39(1): 69-78.
- [4] 万利, 张长安, 李璟, 等. 隧道彩色路面和侧墙设计对驾驶行为的影响分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(增 1): 25-34.
WAN Li, ZHANG Chang'an, LI Jing, et al. Analysis of effect of colored pavement and sidewall design on driving behavior in tunnels [J]. China Safety Science Journal, 2023, 33 (S1): 25-34.
- [5] 罗浩顺, 徐良杰, 杜志刚, 等. 城市长隧道导向视觉参照系安全改善效果研究[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(4): 154-159.
LUO Haoshun, XU Liangjie, DU Zhigang, et al. Safety improvement effect of guiding visual reference system in long urban tunnels [J]. China Safety Science Journal, 2020, 30 (4): 154-159.
- [6] JIAO Fangtong, DU Zhigang, DIEW Y W, et al. Influence of different visual guiding facilities in urban road tunnel on

- driver's spatial right-of-way perception [J]. *Accident Analysis and Prevention*, 2022, 172; DOI: 10.1016/J. AAP. 2022. 106688.
- [7] 孙建明,张婧,杜志刚,等. 城市水下特长隧道中部光环境优化设计方法[J]. *中国安全科学学报*, 2019, 29(2): 106-111.
SUN Jianming, ZHANG Jing, DU Zhigang, et al. Light environment optimization design for middle of super-long urban underwater tunnel [J]. *China Safety Science Journal*, 2019, 29 (2): 106-111.
- [8] 段萌萌,陶盼盼. 隧道反光环设置间距对驾驶员视觉的影响研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2016, 38(2): 50-56.
DUAN Mengmeng, TAO Panpan. Research on the impact of tunnel's aura interval setting on the driver's visual [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2016, 38 (2): 50-56.
- [9] 尚婷,张勃,朱汉容. 按驾驶员瞳孔变化的隧道导行反光环色彩设置研究[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(22): 276-281.
SHANG Ting, ZHANG Bo, ZHU Hanrong. Research on tunnel's aura color setting based by changing rate of drivers' pupil [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16 (22): 276-281.
- [10] DU Zhigang, WANG Shoushuo, YANG Libo, et al. Experimental study on the efficacy of retroreflective rings in the curved freeways tunnels[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 110(3): DOI:10.1016/J. TUST. 2021. 103813.
- [11] 杨理波,杜志刚,孟爽,等. 高速公路隧道长大下坡路段驾驶员视错觉改善研究[J]. *公路*, 2019, 64(3): 169-175.
YANG Libo, DU Zhigang, MENG Shuang, et al. Rectification of drivers visual illusion on long steep downgrade section of highway tunnel [J]. *Highway*, 2019, 64 (3): 169-175.
- [12] JTG B01—2014, 公路工程技术标准[S].
JTG B01-2014, Technical standard of highway engineering[S].

作者简介: 梅家林 (1998—),男,湖北黄冈人,博士研究生,研究方向为隧道交通安全和道路交通规划。E-mail:1473506436@qq.com。

