自发光反光公路隧道轮廓带设计研究

张 野，段绍飞，丁 胜，吴胜兴

（贵州泓阳交通建设工程有限责任公司，贵阳 550081）

摘要：为解决现有轮廓带设计中视觉整体范围较小、视觉点聚集的问题，对自发光反光公路隧道轮廓带展开设计研究。在公路两侧以对称排列方式布设多点轮廓带，安装高度与驾驶人视线高度相同，并结合驾驶人员的注视点分布特性进行诱导设定。根据隧道类型，以光环境优化为目标，对隧道轮廓带设施的具体间距取值进行修正，并使用发光二极管（LED）多点轮廓带进行组合，提升隧道检修道的路侧边界轮廓。试验结果表明，设置反光环后，测试人员视觉点分散，当反光环间距为250 m时，测试人员最远能看见850 m左右的反光环，对视区改善效果较好。通过优化设计，实现了自发光反光公路隧道轮廓带的良好效果，为公路隧道的安全和舒适行驶提供了保障。

关键词：公路；隧道；轮廓带；设计

中图分类号：TU924 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2024)22－0358－05

随着现代化社会的飞速发展，公路隧道的照明和安全问题日益凸显。为解决公路隧道照明的问题，国内外学者进行了广泛研究。赵辰龙[1]设计了高速公路隧道照明智能控制系统，通过集成多种先进技术，实现对隧道照明设备的智能控制和优化管理，但在极端天气条件下，系统的调节效果可能受到一定影响。许伟锋和黄培庭[2]设计了高速公路隧道照明节能与智能控制系统，通过智能化手段实现隧道照明的节能降耗、提高照明效率、增强行车安全性和智能管理水平，但是可能会导致隧道内光污染问题加剧，影响行车安全。李明等[3]对山区公路隧道照明能耗特征及影响因素实例进行了统计分析，通过实例统计分析，提供了大量详实的数据支持，有助于准确了解山区公路隧道照明能耗的实际情况，但是该方法不完全适用于其他地区的隧道情况。袁飞云等[4]研究了公路隧道照明布灯参数优化的模型构建与适用性，通过数学建模和仿真分析，对隧道照明布灯参数进行优化，但是不同隧道之间的物理特性和环境条件存在差异，优化模型需要根据具体情况进行调整和修正。为解决车辆在隧道内行驶时的视线诱导问题，设计轮廓带来改善隧道的光环境，从而有效预防事故的发生。首先对公路隧道中的照明和安全问题进行了整体分析，并探讨了轮廓带设计在解决这些问题中的作用。通过安装反光环等设计，能够提升驾驶人对隧道内环境的注意力，增强方向辨别能力，从而保证行车安全。此外，合理的设计还能增加在车辆行驶过程中的照明效果，清晰地展示隧道轮廓，提升驾驶人的方向感，达到更好的诱导效果。为了验证设计的有效性，进行了一系列试验。试验结果表明，通过优化轮廓带设计，不仅能在一定程度上降低隧道照明用电量，还能显著提升驾驶人的视认性，降低交通事故发生的概率。

1 公路隧道轮廓带设计

1.1 自发光反光多点轮廓带间距选取

轮廓带是一种特殊的设施，其主要作用是提高驾驶人员在隧道中的行车安全性。它由反光膜和基板组成，反光膜被粘贴在基板上，然后整个结构被固定在隧道的洞壁上。通常安装范围不同，其轮廓带的形状与颜色也不同，如图1所示。

由图1可知，安装范围不同，轮廓带的形状与颜色也不同。在遵守国家标准和规定的前提下，隧道轮廓带的高度应选取驾驶员能够清晰识别和辨认的高度，以便在进入隧道前就能够注意到并做出相应的驾驶调整。同时，必须考虑到不同类型车辆的高度，并确保轮廓带不会阻碍驾驶员的视线，特别是对于较高

收稿日期：2024-06-17

作者简介：张野（1975—），男，贵州安顺人，高级工程师，研究方向为路基工程、隧道工程、桥梁工程技术等；段绍飞（1985—），男，贵州贵阳人，高级工程师，研究方向为路基工程、隧道工程、四新技术研究等；丁胜（1985—），男，贵州贵阳人，高级工程师，研究方向为道路交通工程、四新技术研究等；吴胜兴（1984—），男，贵州六枝人，工程师，研究方向为道路交通工程、四新技术研究、隧道反光轮廓带技术应用于研究等。

(a) 白色条形轮廓带　(b) 彩色环形轮廓带

(c) 白色大环形轮廓带　(d) 条形与环形结合

图 1　不同形状的轮廓带

的车辆如卡车等。小环形轮廓带一般从距检修道 2.5 m 处开始安装,而条形轮廓带则从隧道底部沿侧墙外 2.5 m 处进行安装。多点轮廓带布设在公路两侧,并按照对称排列。考虑到驾驶人在正常行驶时更容易注意到反光胶带的存在和反光效果,自发光轮廓带安装高度通常与驾驶人视线高度相同。立面标记使用黄黑特殊材料,为相间的平行线,倾斜角度为 45°。线形诱导标布设在受限的小半径弯道路段,以防止出现遮挡物导致视距变小。为使隧道轮廓带能够清晰显示隧道边界轮廓,提升隧道局部亮度并改善道路诱导过程,需要对轮廓带进行合理布设。彩色环形轮廓带应适当设置,以免驾驶人过度关注。不同隧道轮廓带设施的名称应进行规范处理。针对不同隧道环境,应设置合理的隧道轮廓带布设高度,并结合驾驶人员的注视点分布特性进行诱导设定。建立视觉参照系,结合公路隧道中的环境特征以及个人特点,满足不同形式的需求类型。在夜间环境下,驾驶人对速度感知的影响频率范围主要在 0.1～32 Hz。根据小尺度设施的闪现率对驾驶人速度错觉程度的影响,运用边缘率公式计算得到不同速度下的频次信息对应的轮廓带设置间距。具体隧道轮廓带间距信息如表 1 所示。

表 1　间距取值信息

设施类型	尺寸	频率/Hz	间距/m
多点轮廓带	小	6	5～15
线性诱导标	中	0.5	22～25
条形轮廓带	中	0.3	30～35
环形轮廓带	大	0.125	88～100

由表 1 可知,在隧道轮廓带设施的布设中,具体的间距取值需要进行一定的修正,以避免在组合过程中出现过于复杂的操作[5]。为了确保驾驶人在行车过程中的安全,特别是在遇到紧急情况时,需要利用决策视距来提供必要的安全距离。在车辆行驶过程中,公路隧道的决策视距长度计算公式为:

$$S = 0.275VT \tag{1}$$

式中:V 为设计速度;T 为操作时间。当隧道长度小于 150 m 时,不需要在照明设计中加入过度照明段。在隧道内部,通过设置环形轮廓带来完善照明。此外,检修道路缘应设置高密度的轮廓带设施,以完成对不同轮廓段的初步设计。

1.2　隧道入口光环境改善

驾驶员在隧道路段行驶时,需要注意设置隧道的光环境。根据隧道的类型,以优化光环境为目标[6]。在隧道的识别段中,需要提前明确隧道洞门

的方向，并规划车辆的行驶方向。在入口段，增加方向感，使得隧洞口内外道路能够清晰地指引交通。这样可以减少隧洞内部安全事故发生。为了防止驾驶人员在经过洞口时出现安全问题，进行了标准化的诱导措施[7]。在入口处，隧道反光带被设置在足够远的距离，以确保驾驶员能够清晰地看到并做出相应的驾驶调整。同时，在适当的距离内设置了警示标识，提醒驾驶员注意减速和行车注意事项。为了使得车辆能够正常通行，添加了接近段的诱导标识。此外，还设置了防撞桶和猫眼道钉等设备来提高驾驶员的安全意识。这些措施的目的是增加隧道外的整体方向感，防止车道发生偏移，并确保车辆在车道中控速有序行驶[8]。最后，设置了环形黄色立面，按照50 cm的宽度延伸到洞定，并在洞门方向出提升其轮廓感。这种设计有助于提高驾驶员的视觉效果，并为他们提供更好的驾驶体验。诱导装置示意图如图2所示。

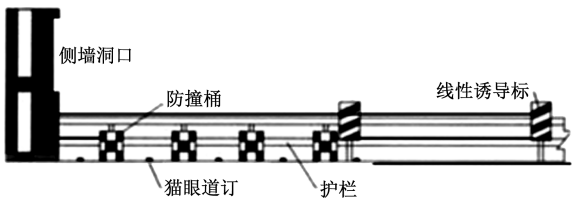


图2　诱导装置安装示意图

由图2可知，在入口段，隧道洞内外的光环境变化会给驾驶人员带来强烈的感官刺激[9]，导致视觉参数发生错位。为了解决这一问题，设定洞内交通设施的逆反射系数 k，通过调整洞内与洞外系数 k 的大小，优化进入隧道诱导效果。这一举措有助于提升驾驶人员在行驶过程中的方向感知能力，从而建立一个安全的行驶环境。在入口段的隧道接近段，设置了视线诱导设施。为了更好地提升隧道检修道路侧边界轮廓的可见度，使用发光二极管(light emitting diode，LED) 多点轮廓带进行组合，以提升隧道检修道的路侧边界轮廓[10]。

2　实例分析

为了验证设计效果，对公路隧道内的测试人员进行了注意力敏感视域范围的试验。当反光环的间距发生变化时，观察到测试人员的注意力被分散，反光环的数量在他们的视距范围内发生变化，导致视觉整体范围域面积也随之发生变化。在未设置任何诱导设施的隧道环境中，测试人员的视觉点分布相对集中，其视觉整体范围为6 500 m^2。通过运用本文提出的设计方案，测试了驾驶人员的视觉整体范围域面积，并获得了最终的试验结果。

2.1　试验准备

试验场景设定在某高速公路隧道的中部路段。该路段设计时速为90 km/h，拥有来回双向车道，且检修道宽度为0.95 m。

为了确保试验的准确性，试验选择6位具有驾照的测试人员，这些测试人员裸眼视力均高于4.2，且没有色盲或色弱问题。在试验开始前，测试人员进行了充分的休息，确保他们没有进行剧烈运动。在试验中，设置了不同的反光环间距，范围为150～550 m。同时，根据与至少可见环数的对应关系，设置了相应的试验场景。具体间距设计结果如表2所示。

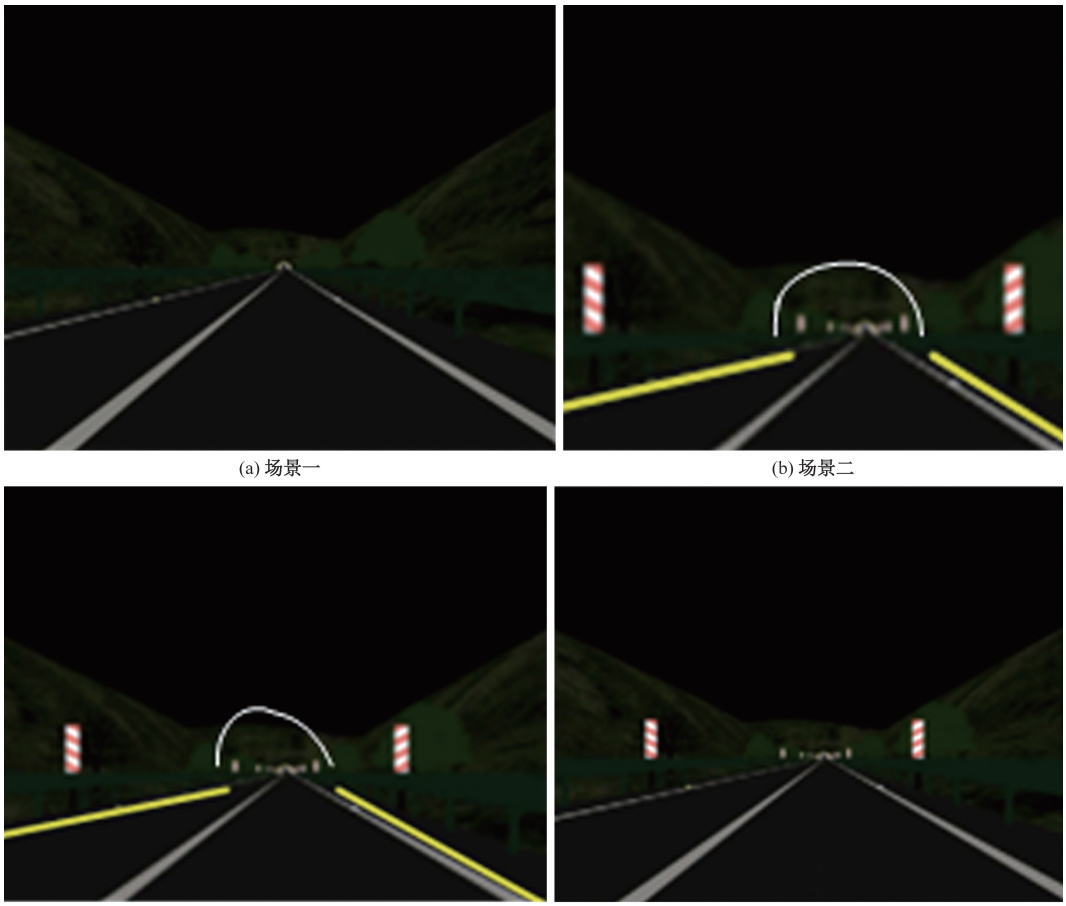
表2　反光环间距设计

变量	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5	场景6
反光环间距/m	—	150	250	350	450	550
至少可见反光环数/个	—	5	4	3	2	1

由表2可知，设置了不同的反光环间距，范围为150～550 m。为了更全面地测试设计效果，设置了4个试验场景，场景1为改善前的隧道中环境；场景2、场景3为设置反光环的隧道中环境；场景3为设置路标和轮廓标的隧道中环境。通过在大屏幕上投影3D Max制作的场景视频，测试人员坐在距屏幕2 m的位置进行观察。在适应环境后进行试验。试验过程中，测试人员需要中场休息3 min，并进行多轮场景试验。具体场景如图3所示。

由图3可知，在隧洞中，选择高压灯作为照明灯具，其功率为125 W，不同灯之间的距离为10 m。由于公路在夜间的照明程度较低，所以选择标准照明45%的布置方式，并仅在一侧开灯，以构建所需的灯光环境。在隧道内部，设置最外侧行车道边线，间距为10 m。此外，为了增强车辆前照灯的逆反射亮度，放置了3盏功率均为120 W、色温为890 K的车灯。

同时，根据上述描述构建了实验场景。其中，场景2～场景4设置了外侧车道边线外突起路标、检修道侧壁轮廓标，间距都为10 m，并且采用左黄右白的设置方式。反光环的间距为150～550 m，宽度为10 cm。运用DbIIFs Pro眼动设备采集视觉点坐标，并从场景摄像头所采集的1024×1024图像中获取相关信息。然后，设置图像的长和宽并建立对应的像素坐标系。在这个坐标系中，图像的长作为



(a) 场景一　(b) 场景二

(c) 场景三　(d) 场景四

图 3　不同场景示意图

水平坐标,宽作为垂直坐标。设定 o 为坐标原点,单位为像素。将眼动设备采集到的垂直坐标为 $1080-y$ 进行赋值处理。在每个场景中,测试人员可以进行 n 次视觉点停留。设定不同视觉点在视觉平面的坐标为 (X,Y),用圆心为 $\left(\frac{X_{11}-X_1}{2},\frac{Y_{11}-Y_1}{2}\right)$ 的图形表示视觉点的停留位置。由于视点在坐标轴的不同方向,从而得到视觉点变动范围。在图形区域内,分布的视觉点数量较多。将视觉点范围设定为视觉整体范围。通过该区域能够得到测试人员的有效视区。当视觉点落在视觉整体范围域内时,测试人员更容易辨认目标。视觉整体范围面积 s 计算公式为

$$s=\frac{\pi(X_{11}-X_1)(Y_{11}-Y_1)}{4} \tag{2}$$

式中:X_{11} 为坐标方向的 11%分值位;Y 为坐标方向中的 1%分值位。测试人员能够对目标物进行深加工处理,当目标物落在视觉整体范围之外时,测试人员的视角会变大,导致目标物的识别难度增加。在这种情况下,测试人员通常只会进行快速扫视,而不会进行深加工处理。测试人员视觉整体范围越大,他们识别和关注的范围越广,并能一定程度上提高驾驶安全。根据不同的场景模型分别制作仿真视频,被试者通过观看这些仿真视频进行模拟驾驶体验。当驾驶员在视频中看到前方的车辆并意识到要刹车时,可以按下 J 键,系统会自动记录下这一时刻。

2.2　结果与分析

根据上述操作,统计 6 个测试人员在不同间距下能看见的最远反光环的距离,绘制视觉整体范围统计表,如表 3 所示。

表 3　视觉整体范围统计

测试人员	反光环间距/m				
	150	250	350	450	550
1	720	840	720	700	680
2	700	820	710	680	650
3	680	800	690	670	650
4	730	850	740	660	650
5	640	760	650	630	620
6	680	780	680	660	620

如表3所示，在设置反光环后，随着测试距离的增加，由于测试人员视觉环境中参照物的增多，视觉点变得分散。导致视觉点横纵坐标标准差增大，进而使视觉整体范围保持在600 m以上。运用本文设计方法能够提升测试人员在纵向上的视区范围。其中，当反光环间距为250 m时，测试人员的视觉整体范围提升最为显著，测试人员最远能看见850 m远的反光环。这一设置帮助测试人员更好地感知隧道的整体空间，从而显著改善了他们的视区效果。

综上所述，通过增大视觉整体范围进行，成功优化了隧道中间段测试人员视区优化目标。根据不同反光环对测试人员敏感区域视觉的影响，得到了一个提升隧道中间段视觉整体范围的结果，在一定程度内增加了测试人员对隧道中心区的关注。同时，建议将反光环的间距设置为250 m。通过优化间距，能够提升测试人员对隧道的视认效果，让他们更好地感受到空间分布，从而减少测试人员对隧道顶部注视的时间，在测试人员视线范围内构建一个理想的安全区域。此外，设置导标可以减少测试人员对路侧信息的过度关注，降低测试人员驶入隧道时视觉整体范围面积受到的影响。满足了识别视距要求，实现了自发光反光公路隧道轮廓带设计方法的良好应用。

3 结语

为了保障隧道内车辆的通行安全，扩大轮廓带设计中视觉整体范围，本文通过对隧道轮廓带设计的改进和创新，设计一种自发光轮廓带。

(1)设计轮廓带安装间距、高度等，改善进入隧道诱导效果，有效改善了视区效果，实现了自发光反光公路隧道轮廓带优化设计。

(2)经实验验证，当反光环间距为250 m时测试人员视觉整体范围提升最大，测试人员最远能看见850 m左右的反光环，实现测试人员对隧道整体空间的感知，对视区改善效果较好。有助于增强驾驶员对隧道环境变化的感知能力，提高行车安全。

参考文献

[1] 赵辰龙. 高速公路隧道照明智能控制系统设计[J]. 交通世界，2024(7)：175-177.

[2] 许伟锋，黄培庭. 高速公路隧道照明节能与智能控制系统[J]. 中国交通信息化，2023(1)：139-141.

[3] 李明，王亚琴，唐明旭，等. 山区公路隧道照明能耗特征及影响因素实例统计分析[J]. 公路交通技术，2023，39(3)：137-144.

[4] 袁飞云，史玲娜，文森，等. 公路隧道照明布灯参数优化模型构建与适用性研究[J]. 隧道建设(中英文)，2023，43(2)：240-247.

[5] 方忠强，张鹏，涂齐亮，等. 太湖隧道智能运营设施设计方案研究[J]. 地下空间与工程学报，2023，19(1)：220-228.

[6] 李国良，李宁，丁彦杰，等. 挤压性围岩隧道判识及设计方法研究[J]. 铁道学报，2022，44(3)：24-38.

[7] 肖明清，徐晨，郑强，等. 荷坳隧道四洞小净距段支护结构设计研究[J]. 现代隧道技术，2022，59(2)：1-10.

[8] 王明卓，王寿生. 灵武至银川供热项目穿越黄河盾构隧道设计研究[J]. 人民黄河，2022，44(S1)：118-120.

[9] 熊文威，汪波，蒙伟，等. 高水压水下隧道合理涌水量限排设计研究[J]. 铁道标准设计，2022，66(12)：104-110.

[10] 李梅，邵港先，韩高升，等. 隧道光纤安全监测系统设计及布设优化研究[J]. 武汉理工大学学报，2022，44(6)：78-83.

Design and Research on the Contour Strip of Self luminescent Reflective Highway Tunnel

ZHANG Ye, DUAN Shaofei, DING Sheng, WU Shengxing

(Guizhou Hongyang Transportation Construction Engineering Co. Ltd., Guizhou 550081, China)

Abstract: To solve the problem of small visual overall range and concentrated visual points in the existing contour strip design, the design of self luminous reflective highway tunnel contour strips was studied. Multi-point contour strips on both sides of the highway in a symmetrical arrangement were set up, same installation height with the driver's line of sight height, and combining with the distribution characteristics of the driver's gaze points for guidance setting. Based on the type of tunnel, with the goal of optimizing the lighting environment, the specific spacing values of the tunnel contour strip facilities were modified, and LED multi-point contour strips were combined to improve the roadside boundary contour of the tunnel maintenance track. The experimental results show that after setting up the reflective ring, the visual points of the testers are dispersed. When the distance between the reflective rings is 250 m, the testers can see the reflective ring as far as about 850 m, which has a good effect on improving the visual area. By optimizing the design, a good effect of self luminous reflective highway tunnel contour strip has been achieved, providing assurance for the safety and comfortable driving of highway tunnels.

Keywords: highway; tunnel; contour strip; design