

基于空间路权的高速公路隧道轮廓带系统评价

黄婷¹, 靳如平¹, 倪玉丹^{2*}, 杜志刚²

(1. 贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司, 贵州 贵阳 550000; 2. 武汉理工大学)

摘要:轮廓带系统广泛应用于现有高速公路隧道内,但其布设方案、形状、尺寸有较大差异,存在名称不统一、空间路权不明晰等问题。该文基于对中国大量高速公路隧道轮廓带调研分析,将轮廓带按其形式统一名称,划分为大反光环、小反光环、反光条、多点轮廓带。从横向路权、竖向路权、纵向路权的角度,构建了基于空间路权的高速公路隧道轮廓带评价体系,并对几种典型的轮廓带系统:无轮廓带方案、大反光环方案、大反光环与反光条组合方案进行了比选。结果表明:大反光环与反光条组合方案在高速公路隧道中部视线诱导中路权更清晰、明确,推荐在高速公路隧道中采用。

关键词:高速公路隧道; 轮廓带; 空间路权; 评价体系; 方案对比

1 引言

根据《2020年交通运输行业发展统计公报》权威发布:截止到2020年底,中国公路隧道为21 316处/2 199.93万延m,比2019年末增加2 249处/303.27万延m。中国是世界上公路隧道规模最大、数量最多、地质条件和结构形式最复杂、发展速度最快的国家。以贵州省为例,贵州地处崇山峻岭,受地形限制,高速公路建设桥隧比大,截至2020年底,已建成高速公路7 606.919 km,贵州省高速公路共有隧道230.864/2 178座。受经济、自然条件限制,高速公路运营过程中低照度、低流量、低养护现象长期存在,低照度隧道光环境常常诱发不良的视觉心理反应——隧道中部的“时空隧道”效应、隧道进出口的“白洞效应”与“黑洞效应”,驾驶人出现严重的视错觉,对车速、车距、方向等发生较大误判,导致超速、车距不足、视觉不适等现象,易诱发追尾、撞(侧)墙的交通事故。

为了解决公路隧道照明节能与交通安全之间的矛盾,JTG D81—2017《公路交通安全设施设计规范》、JTG/T D81—2017《公路交通安全设施设计细则》中提出应该在隧道中设置视线诱导设施(突起路标、轮廓标、轮廓带等)。杜志刚等研究表明,视线诱导设施能

够以低成本改善隧道光环境,预防事故的发生,但实际应用中存在视认性差、诱导性不足等问题;李海光等研究表明,反光环等设施有助于提升驾驶人对隧道入口的注意力和方向感;马兆有等指出,现有公路隧道视线诱导系统的有效性缺乏评价研究。

公路隧道轮廓带系统主要是由轮廓带(含大反光环、小反光环、反光条、多点轮廓带几种形式)和突起路标、轮廓标等组成的用于诱导驾驶人视线、改善行车环境的综合系统。轮廓带系统能够辅助照明,清晰勾勒隧道轮廓,提升驾驶人空间感,诱导效果好,尤其有利于大货车驾驶人,同时能降低隧道照明用电量。近几年,随着蓄能自发光技术和逆反射材料的不断创新发展,轮廓带系统在中国贵州、浙江、江西、四川等地得到广泛应用,但其布设理论依据不足,应用中较为混乱(表1),主要问题如下。

(1) 隧道轮廓带种类较多,缺少统一的分类。轮廓带主要是在构件的表面张贴反光膜的设施,安装于隧道侧壁,根据在隧道侧壁的安装范围又可分为大反光环、小反光环、反光条3种。其中大反光环由隧道检修道路面延伸至隧道洞顶;小反光环从距离检修道路面约2 m的高度开始延伸至隧道洞顶;反光条则是由隧道检修道路面沿侧壁延伸3 m左右,不延伸至隧道顶部。在中国行业标准以及各地应用中其名称、设置

收稿日期:2020-05-25(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51578433);贵州省交通运输厅科技项目(编号:2017-123-031)

作者简介:黄婷,女,硕士,高级工程师。E-mail:284594815@qq.com

* 通信作者:倪玉丹,女,硕士研究生。E-mail:nininiif@163.com

表 1 各规范、标准、指南中轮廓带设施相关内容统计

该文名称	设施形式	标准、指南	间距/m	图例
大反光环/ 反光环	环形轮廓带,由隧道检修道路面延伸 至隧道洞顶	《贵州省高速公路勘察设计指导意见》(交建设[2015]46号)	10~200	图 1(a)
反光条	条形轮廓带,由隧道检修道路面沿侧 壁延伸不大于 3 m	暂无,部分省市隧道已开展实际应 用,拟采用反光条命名	5~20	图 1(b)
多点轮廓带	由隧道轮廓方向多个轮廓标组成的 反光设施	JTG D81—2017《公路交通安全设施 设计规范》	(推荐) 500	图 1(c)
小反光环/ 反光构件	环形轮廓带,从距离检修道底面约 2 m 的高度开始延伸至隧道洞顶	浙江用法,但是已为实际产品,已有 相关公司以反光构件命名销售	10~30	图 1(d)

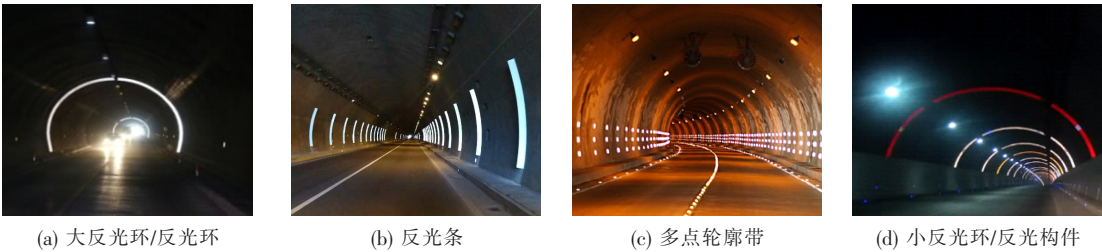


图 1 各规范、标准、指南中轮廓带设施

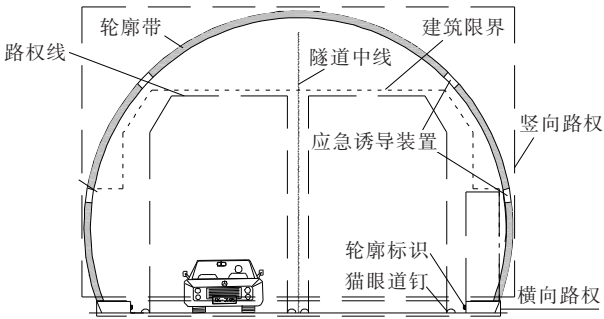
方案等极为混乱。

(2) 在实际工程案例中轮廓带系统设置方案混淆杂乱,其诱导设施的种类、组合布设方案、设施间距及色彩等均存在显著的差异,缺乏统一标准。

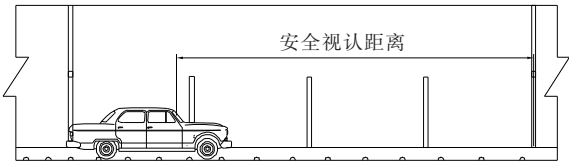
(3) 实际工程中轮廓带系统有效性缺乏评价方法。目前轮廓带系统在高速公路隧道中应用广泛,不少方案存在诱导信息设置间距不合理、位置过高等问题,进而导致驾驶人视距视区改善效果不佳、视觉负荷过大等一系列后果。

因此,亟需针对现在的隧道轮廓带系统提出一种合理的评价体系,对于建立和优化隧道视线诱导技术标准,提高隧道行车环境具有重要的意义。

不明确或设置不当将会导致驾驶人对路权的困惑。考虑到高速公路隧道相对普通道路有着特殊的行驶环境,更应提供给驾驶人良好的空间路权感知环境,主要要求有:



(a) 高速公路隧道横向路权与竖向路权



(b) 高速公路隧道纵向路权

图 2 高速公路隧道内空间路权示意图

2 高速公路隧道空间路权评价准则

空间路权是指道路交通主管部门为了提升道路使用效率、确保用路者的通行安全,根据道路交通工程与管理的原理,由道路交法规、交通控制设施,在一定空间内,规范道路使用者使用道路的权利,是保障道路安全行车功能正常发挥的首要条件。

隧道空间路权,即在有通行路权的前提下,车辆可以合法行驶的长度(即距离)、宽度与高度,如图 2 所示。但是,拥有路权不代表绝对安全,交通设施缺失、

(1) 清晰明确。空间路权系统完整,需要向驾驶人提供清楚明确的车道信息(横向),防止行车轨迹偏移过大,造成交通冲突或碰撞侧壁。同时给驾驶人提

供明确的隧道内部轮廓信息(竖向),防止车辆碰撞侧壁或者超高碰撞洞顶。

(2) 一致性。所有明确空间信息的视线诱导设施必须保持全路线(纵向,即行车方向)的连续性、一致性。

(3) 给予驾驶人充足的视认—反应时间。必须保障所有诱导设施的可视性、诱导性以及与隧道环境的协调性。

因此高速公路隧道内诱导信息的设置应该为驾驶人提供清晰明确的空间路权,降低低照度环境下驾驶人对路权边界及空间轮廓认知难度,使驾驶人能遵循诱导设施的指引安全行车。

3 基于空间路权的轮廓带系统评价

3.1 评价体系及评价标准

空间路权评价主要针对高速公路隧道轮廓带系统中的各类型设施在前进方向、竖向以及横向空间位

置的设置情况进行评价分析。黄静研究发现:在隧道内行驶时驾驶人 80%以上注视点分布在隧道的车道内,注视点主要分布在视野内右下方位置,且视认概率右下>左下>上方。因此,隧道内空间路权信息显著度及重要度为道路边线位置(右下)>检修道路缘位置(右下)>隧道侧壁位置(左下)>洞顶位置(上方)。依据路权信息显著度及重要度等对指标进行排序,提出如图 3 所示的空间路权评价体系,各评价指标对应的行车空间路权评价方法如表 2 所示。

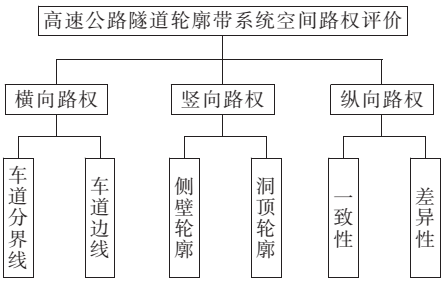


图 3 高速公路隧道轮廓带系统空间路权评价

表 2 公路隧道轮廓带系统空间路权评价标准

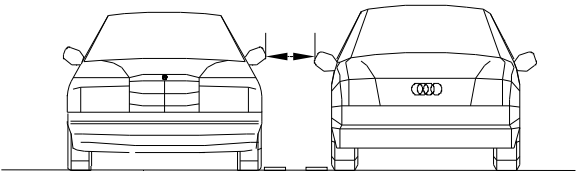
评价 指标	评价 内容	评价标准及依据			
		A	B	C	D
横向 路权	车道 分界线	双排突起路标+双白线: 有路中净区,逆反射系数 高,路权清晰	单排突起路标+双白线: 逆反射系数高、路权清晰	单排突起路标+单白线: 低照度下路权较清晰	单白线:逆反射系数低, 低照度下路权不清晰
	车道 边线	检修道轮廓标+突起路 标:有路侧净区、逆反射 系数高、路权清晰	检修道轮廓标:逆反射系 数高、反光面积大、路权 清晰	突起路标:有路侧净区, 反光面积小,路权较清晰	道路边线:逆反射系数低
竖向 路权	侧壁轮廓	大反光环:侧壁轮廓清 晰,整体性好	反光条:大部分侧壁轮廓 清晰	小反光环+侧壁轮廓标: 小部分侧壁轮廓清晰	多点轮廓带:侧壁轮廓不 清晰
	洞顶轮廓	大反光环:洞顶轮廓清 晰,整体性好	小反光环:洞顶轮廓较清 晰,整体性一般	反光条:洞顶轮廓一般	多点轮廓带/侧壁轮廓 标:洞顶轮廓差
纵向 路权	一致性	突起路标与轮廓标、反光 环、反光条对齐且成比例	连续设置,成比例但是没 有对齐	连续设置,没有对齐,也 不成比例	没有连续设置
	差异性	道路边线/检修道、侧壁、 洞顶特征信息均有显著差 异性(含频率、尺寸、形状)	道路边线/检修道与侧壁 特征信息有显著性差异	洞顶与侧壁特征信息有 显著性差异	道路边线/检修道、侧壁、 洞顶特征信息均无显著 性差异

注:① A 优,B 良,C 及格,D 不及格;② 一致性指各种信息频率成比例,且相互对齐,无相互干扰;③ 道路边线、检修道因距离很近,可在纵向路权评价中统一评价,其中突起路标/检修道路缘轮廓标与侧壁反光条、轮廓标、反光环等应有显著性差异;④ 如检修道路缘轮廓标与侧壁轮廓标一致(尺寸、形状、频率),可认为缺乏差异,在纵向路权上则不够清晰,易混淆检修道与侧壁。

3.2 评价指标说明

3.2.1 横向路权评价指标

(1) 车道分界线(图4):双排突起路标或双白线的形式能避免并排车辆均接近道路边线时发生碰撞危险,保障行车安全,同时突起路标逆反射系数优于道路标线。故双白线+双排突起路标>单排突起路标+双白线>突起路标+单白线(低照度条件)>双白线>单白线。



(a) 双排突起路标为车辆预留容错空间



(b) 双白线+猫眼道钉提升车道边界线辨析度

图4 车道分界线

(2) 车道边线:检修道侧壁轮廓标反光面积更大,设置位置更高,不易被遮挡,空间感更强。设置检修道轮廓标加突起路标,可分隔出路侧净区,且逆反射系数高,路权更清晰,此为最佳方案(评价分级见表2)。

3.2.2 竖向路权评价指标

隧道轮廓诱导见图5。

(1) 侧壁轮廓:隧道内部交通事故主要为追尾和撞击侧壁,其中撞壁事故占20.1%。明确隧道的竖向路权旨在给驾驶人提供明确的隧道内部轮廓信息,防止车辆碰撞侧壁,主要通过设置隧道轮廓带实现,能勾勒隧道形状,明确空间路权,提升空间感与方向感;与

轮廓标、突起路标协同设置,能起到更好的效果。具体评价分级见表2。

(2) 洞顶轮廓:高速公路隧道交通事故中的主要车型以小型客车和大型货车为主。隧道内部光线昏暗,洞顶轮廓的凸显有助于大货车驾驶人明确隧道高度,同时便于后方被大货车遮挡视线的车辆辨识前方车辆运行状况。



图5 隧道轮廓诱导

3.2.3 纵向路权评价指标

(1) 一致性:在考察行车道的纵向路权时,要求隧道及相邻路段各种设施都应连续设置、成比例且无相互影响。具体评价分级见表2。

(2) 差异性:研究表明,多频率多尺度信息共同组合能改善驾驶人的视错觉效应,使反应时间显著缩短。轮廓带系统应当使隧道内各部分具有显著区分度,因此不同位置的诱导信息应当具备差异性,如隧道路面与检修道、侧壁及洞顶可分别采用点状、条状和环状信息,具体评价分级见表2。

4 工程应用实例

贵州某高速公路隧道左右洞长度分别为4 060、4 048 m双向四车道的分离式隧道,设计车速为80 km/h,改善前方案如表3和图6所示。应当地隧道管理部门要求,对该隧道进行提质升级,并在隧道中以200 m的设置间距加装反光环,改善后方案图7所示。

表3 改善前隧道轮廓带系统设置情况

位置	设施名称	长×宽	材料类型	设置位置
路面	双白线	宽15 cm,间距20 cm	热熔标线	车道分界线
	突起路标	圆形,直径10 cm	五类反光膜	纵向间距8 m/道,设置于车道边线外侧
路侧	检修道轮廓标	18 m×4 m	五类反光膜	纵向间距14 m/道,安装于隧道检修道外缘
	侧壁轮廓标	18 m×4 m	五类反光膜	纵向间距14 m/道,安装于隧道侧壁距地面1 m高处

注:仅设有高频信息。

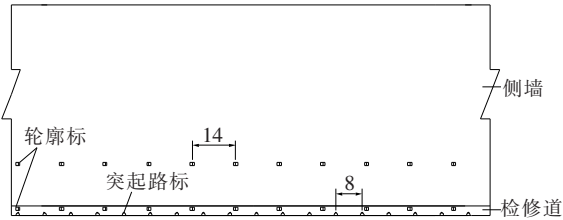


图 6 改善前隧道无轮廓带方案设置情况(单位:m)

改善后该隧道内部轮廓信息通过反光环与侧壁诱导标实现,但侧壁诱导标与检修道诱导标频率无差异,且反光面积小,对于侧壁轮廓诱导效果不佳。针对这

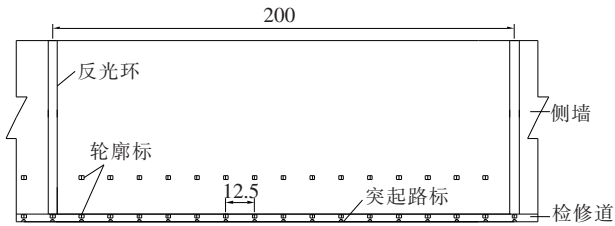


图 7 改善后隧道轮廓带系统设置情况(单位:m)

一问题,将侧壁轮廓标改为反光环,具体方案及设施信息如表 4 和图 8 所示。通过视线诱导设施构成多频率、多尺度信息系统。

表 4 隧道轮廓带系统推荐方案设置情况

位置	设施名称	长×宽	材料类型	设置位置
路面	双排突起路标+双白线	圆形,直径 10 cm	五类反光膜	纵向间距 12.5 m/道,设置于车道分界线
	突起路标	圆形,直径 10 cm	五类反光膜	纵向间距 12.5 m/道,设置于车道边线外侧
路侧	检修道轮廓标	18 m×4 m	五类反光膜	与突起路标对齐安装于隧道检修道外缘
	反光环	宽 18 m	四类反光膜	纵向间距 200 m/道,沿隧道轮廓设置
	反光条	250 m×18 m	四类反光膜	纵向间距 50 m/道,安装于隧道侧壁

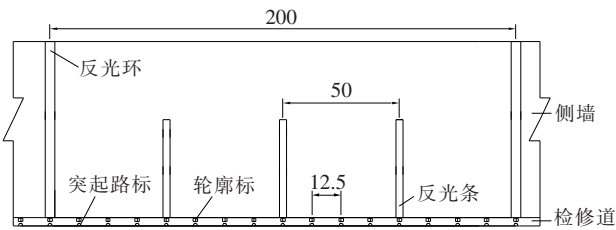


图 8 隧道轮廓带系统推荐方案设置情况(单位:m)

依据所提出的评价体系及评价标准对改善前的无轮廓带方案(含突起路标、检修道轮廓标、侧壁轮廓标)、改善后大反光环方案(含突起路标、检修道轮廓标、侧壁轮廓标、大反光环)及推荐的大反光环与反光条组合方案(含突起路标、检修道轮廓标、大反光环、反光条)进行评价并汇总,结果见表 5。

从图 6 和表 5 可以看出:改善前该隧道为无轮廓带方案,突起路标的设置可保障车道边线清晰明辨。车道分界线为双白线,在低照度隧道环境中辨识性较低,安全性不足。改善前侧壁轮廓标无法凸显隧道空间形状,同时视线诱导设施设置连续但不协调,轮廓标过于集中于隧道底部,不利于路侧及洞顶障碍物的发现及提醒,竖向及纵向路权不明确,改善前轮廓带系统空间路权总体评价为 C⁻ 级。

综合图 7 及表 5 可以看出:改善后的反光环方案,

表 5 隧道轮廓带系统改善前后及推荐方案评分情况

评价指标	评价内容	评分		
		无轮廓带方案	大反光环方案	大反光环与反光条组合方案
横向路权	车道分界线	C	C	A
	车道边线	A	A	A
竖向路权	侧壁轮廓	D	A	A
	洞顶轮廓	D	A	A
纵向路权	一致性	C	A	A
	差异性	D	C	A
总体评分		C ⁻	B ⁺	A

添加隧道侧壁及洞顶轮廓参照信息,竖向路权由 D 级提升至 A 级。路侧突起路标及轮廓标设置间距对齐,实现行车方向上诱导设施的连续与一致性,避免视线的突然性跳跃,一致性由 C 级提升为 A 级;由改善前单一高频信息变为高频与低频信息结合,信息类型更加丰富,侧壁与洞顶有差异,但是侧壁与检修道无显著性差异,差异性由 D 级提升至 C 级。综上所述,改善后轮廓带系统空间路权为 B⁺ 级。

综合图 8 和表 5 可以看出:反光环与反光条结合在道路分界线上设置突起路标,提升了车道分界线的

可视性,实现隧道断面平顺过渡,使车道分界线由最初的C级提升至A级;轮廓带利用反光条替换改善方案中的侧壁轮廓标,与反光环结合,视距范围内可见轮廓信息增加,设置高度更加合理,较改善前后均有显著提升,轮廓诱导效果更优。诱导信息为高、中、低频信息组合,大中小尺寸信息互补的综合信息系统,推荐方案在可视性、连续性、导向性以及视觉调控方面均有较大提升,空间路权综合评价为A级。

综上所述,反光环与反光条以及其他视线诱导设施结合组成的轮廓带系统更能明确空间信息,保障隧道空间路权的明确性、可视性及可辨认性。因此,推荐在高速公路隧道内部使用该方案。

5 结论

(1) 提出了基于空间路权的高速公路隧道轮廓带系统评价体系,在复杂的隧道安全系统中能反映隧道交通工程设施设置的合理性。该方法较为简便,可操作性强,以贵州某高速公路隧道为实例,利用该评价体系对轮廓带系统进行评价,为评估隧道轮廓带系统的有效性提供了可靠依据。

(2) 车道分界线建议采用双排突起路标与双白线的形式,与现有的单/双白线相比,其表达的路权信息更加明确且视认效果更佳。

(3) 现状设置了轮廓带的隧道往往也设置了高频侧壁轮廓标,与检修道路缘的轮廓标在形状、尺寸和间距方面均缺乏差异性。纵向视距范围内很难辨识,容易混淆,导致空间路权不清晰,侧壁轮廓标的轮廓诱导效果低于反光条诱导效果,建议不设置侧壁轮廓标。

(4) 在高速公路隧道中,反光环、反光条结合,与其他交通工程设施共同组成的轮廓带系统其空间轮廓更好,路面及检修道的点状信息、侧壁的条状信息、洞顶的环状信息在形状、尺寸、频率上有显著差异,能提供更明确的空间路权,推荐在高速公路隧道中采用该方案。

参考文献:

[1] 交通运输部. 2018年交通运输行业发展统计公报[J]. 交

通财会,2021(20).

- [2] 戴学臻,李昆华,邢磊. 泰赣高速杨公山隧道事故分析与对策研究[J]. 中外公路,2010(6).
- [3] 倪洪亮,戴忧华,赵庆鑫. 高速公路隧道事故分布研究[J]. 公路,2010(4).
- [4] 赖金星,张鹏,周慧,等. 高速公路隧道交通事故规律研究[J]. 隧道建设,2017(1).
- [5] Pan, X., Z. Du, Z. Yang. Safety Research during Entrance and Exit of Highway Tunnel Based on Drivers' Eye Movement Experiment [C]. 7th International Conference of Chinese Transportation Professionals Congress 2007: Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructures in China, American Society of Civil Engineers (ASCE), 2008:381-388.
- [6] JTJGD81—2017 公路交通安全设施设计规范[S].
- [7] JTJGT/TD81—2017 公路交通安全设施设计细则[S].
- [8] 杜志刚,徐弯弯,向一鸣. 基于视线诱导的公路隧道光环境优化研究框架[J]. 中国公路学报,2018(4).
- [9] 李海光,周土瑶,杜志刚,等. 基于安全感的高速公路隧道入口轮廓带系统[J]. 交通科技,2018(1).
- [10] 马兆有,华文龙,杜志刚. 公路隧道视线诱导设施规范符合性问题分析与对策[J]. 交通科技,2019(2).
- [11] 贵州省交通运输厅. 贵州省高速公路勘察设计指导意见(交建设[2015]46号)[Z],2015.
- [12] 吕宁生,李海光,万毅红,等. 公路隧道低碳照明诱导技术研究[J]. 中国公路,2017(3).
- [13] 黄静. 高速公路隧道驾驶人注视点分布特征分析[J]. 交通科技,2010(1).
- [14] 孟爽,杜志刚,郑展骥,等. 隧道内多频多尺寸信息对车速感知的影响[J]. 中国安全科学学报,2016(5).
- [15] Rose E, Carlson P. Spacing Chevrons on Horizontal Curves[J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board,2005,1918(1):84-91.
- [16] 杨理波,杜志刚,徐弯弯,等. 隧道内不同组合信息条件下驾驶人视错觉研究[J]. 中国安全科学学报,2018(1).
- [17] 李长俊,陈卫忠,李明,等. 加权距离判别分析法在隧道健康监测预警中的应用[J]. 中外公路,2019(6).
- [18] 吕纪云,陈瑾,章坤鹏. 互通式立交与隧道出入口安全净距研究[J]. 中外公路,2019(2).