

公路隧道入口彩色路面设计现状与分析

叶 飞, 温小宝, 翁效林, 李 林, 张兴冰

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 公路隧道入口处彩色路面的合理铺设对提高视觉警示、保证驾驶安全有重要意义。从公路隧道入口处的交通特性出发,通过大量调研总结了目前隧道入口常见的彩色路面铺设型式,根据速度过渡需求,考虑驾驶知觉-行为模型、透视原理和闪现率原理给出了彩色路面铺设位置、长度以及条纹间距等参数的设计建议,并从亮度过渡角度提出了增大安全距离和设计方案理论验证两种考量方式。最后,从隧道入口处彩色路面的铺设需求出发,讨论了当前隧道入口彩色路面设计面临的主要问题,以为彩色路面的设计与进一步的研究提供参考。

关键词: 公路隧道;隧道入口;彩色路面;参数设计;速度过渡;亮度过渡

中图分类号: U453.1

文献标志码: A

Review and Analysis of Colored Pavement Design at Entrance of Highway Tunnel

YE Fei, WEN Xiaobao, WENG Xiaolin, LI Lin, ZHANG Xingbing

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: The reasonable laying of colored pavement at the entrance of highway tunnel is significantly important for improving visual warning and ensuring driving safety. Based on the traffic characteristics at the entrance of the highway tunnel, the current common laying types of colored pavement at the entrance of the tunnel are summarized after a large number of investigations. According to the requirements of speed transition, and based on the model of driving perception-behavior, perspective principle, and the flash rate principle, the design suggestions of colored pavement laying position, length, and stripe spacing are given. From the perspective of brightness transition, two methods of increasing safety distance and theoretical verification of design scheme are

proposed. Finally, starting from the laying requirements of the color pavement at the entrance of the tunnel, the main problems faced by the current colored pavement design at the entrance of the tunnel are discussed in order to provide reference for the design and further research of colored pavement scheme.

Key words: highway tunnel; tunnel entrance; color pavement; parameter design; speed transition; brightness transition

为了提高急弯、桥隧、陡坡等特殊路段的行驶安全,减少由于行车速度较快、疲劳驾驶等诱发的交通事故,各地区相继出台了多种道路安全保障措施,其中彩色路面因其美观、诱导性强、夜间可视性高、可增强注意力、缓解疲劳、提高路面亮度和减少黑色路面热岛效应等优点受到了广泛的关注^[1-3]。李佳辉等^[4]结合实车及驾驶仿真试验,验证了学校区域红色路面标线的有效性。刘冬生^[5]依托昌九高速探讨了彩色路面在小半径反向曲线路段的应用方式。高伟等^[6]针对寒区收费站处路面易滑的现象,验证了彩色路面在控制减速方面的良好作用。Xi等^[7]为提高驾驶员通过路口时的安全性,借鉴视错觉原理提出了一种采用渐窄式条纹的彩色路面设计方法。许世勇等^[8]通过实车试验,探究了山区高速公路长下坡路段彩色路面对驾驶员的视觉影响。钱华信^[9]依托蓝商高速介绍了彩色路面在平曲线、视距不良处、长直线、长大下坡等路段的广泛应用。Autelitano^[10]研究了彩色路面在自行车道路线导向方面的作用。Ando^[11]通过统计调研发现,居住区非信号交叉路口彩色路面的铺设能够显著提高行人和驾驶员的交通安全意识。

从上述文献可知,坡道、自行车道、急弯、十字交

收稿日期: 2023-02-04

基金项目: 国家自然科学基金(52078046)

第一作者: 叶飞(1977—),男,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为山岭隧道景观,盾构壁后注浆等。

E-mail: xianyefei@126.com



论文
拓展
介绍

叉口等各种交通情况复杂处对彩色路面的应用和设计一般只需考虑减速警示的需求,但隧道入口处则更为特殊。张生瑞等^[12]在统计京珠高速公路韶关段的隧道交通事故后发现,隧道出入口处的交通事故频数显著更高,这是从沥青路面行驶至水泥路面时材料工况的改变和黑洞效应造成的短暂弱视导致。除此之外,过渡区(由较高的速度限制变化为较低的速度限制)^[13]的速度变化往往也是导致交通事故的主要原因之一,尤其是在长时间高速行驶后,驾驶员可能会高估其减速的效果^[14-15]。而隧道入口处通常会存在 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 以上的速度适应过程,这也是隧道入口处交通事故频发的原因之一。因此,路面材料的过渡、行驶速度的过渡和亮度水平的过渡成为了隧道入口彩色路面设置应考虑三大因素。

但是,目前国内还未对隧道入口处彩色路面的设计型式进行统一的规定,对上述三点因素的考虑尚不全面,经验设计占据主导,很难判定设计型式的科学性。因此本文从视觉警示的角度出发,调研了目前隧道入口彩色路面的主要铺设型式,从速度过渡和亮度过渡两个方面探讨了彩色路面铺设参数的选取原则,以期为实际工程中隧道入口彩色路面的设计提供一定的参考。

1 隧道入口彩色路面铺设型式

1.1 铺设色彩

1.1.1 单一色彩

目前隧道路段的彩色路面多采用单一色彩。考虑色彩的生理学和心理学,从人眼对色彩的敏感角度看,黄色>红色>绿色>蓝色,而从色彩的辨识远近程度看,红色>绿色>黄色>白色^[16]。据此赵岩^[17]提出了警示路面的用色标准,如表1所示。对于功能需求复杂的隧道路段,路面色彩的确定仍应通过实车或仿真试验以及相应的问卷调查等方式,以充分考虑驾驶员本身对彩色路面的心理生理反应。黄莹^[18]、卓曦^[19]、袁景玉^[20]、林志^[21]等分别从驾驶视觉舒适性、视觉诱导性、改善疲劳和驾驶员反应时间的角度对隧道内路面的色彩进行了对比研究,

得出了绿色路面最有利于驾驶舒适,黄色、红色路面环境下隧道视觉诱导性更优,黄色路面反应时间较短,更有利于驾驶安全的结论。此外,驾驶员主观角度则认为红色路面的预警效果较其他颜色更好^[22]。可见,即使只考虑隧道内部环境,当从不同角度分析时也无法得到统一的结论,这对驾驶负荷的综合评价体系提出了更高的要求。而对于隧道入口处彩色路面色彩的选取,目前则最为推荐红色、黄色^[23-24],但由于最优色彩尚未明确,混合色橙色也许能够继承两者的优点,其在加拿大、新西兰、美国等地区的道路标志标线上正受到较多应用^[25]。

1.1.2 组合色彩

除单色以外,近年来组合色也逐渐成为彩色路面的常用方案^[3,26]。本文将组合色区分为两种类型:

(1)隧道不同照明区段的色彩组合过渡。在该方面,朱沁茹^[24]考虑了隧道内不同区段色彩组合带给驾驶员的视觉负荷,从大到小得出色彩组合顺序为:蓝黄、黄红、红黄、黄灰、蓝灰、红灰、灰红、黄蓝、灰蓝、灰黄,并认为入口段红色、过渡段灰色、中间段黄色、出口段蓝色为最优组合。

(2)隧道相同照明区段的组合相间色。在该方面,Wu等^[22]进行了社会调查,结果表明受试者普遍认为红色和红黄相间色沥青路面最利于道路交通安全,此外也可以考虑红绿组合,但应避免纯绿色路面。

1.1.3 特殊工况

研究表明,在雪季,黄色是驾驶员最希望使用的防止视觉疲劳的色彩,其次是绿色、红色和蓝色^[22]。而对于夜间行车,亦有研究表明在使用近光灯和远光灯时黄色都更易被识别^[27]。从色彩学角度解释,黄波的波长为 580 nm ,处于可见光波长的中心位置^[28],具有更高的感知度,因此考虑夜晚、雪季的情况,黄色应是隧道出入口路面色彩的最优选择。

当然,各地的特殊工况不尽相同,不同性别、驾龄、年龄的驾驶员对事物的感知也不同^[29],在路面色彩选定时是否将夜晚、雨天、雪季等恶劣天气及驾驶员差异特征等不利工况纳入考虑仍值得探讨。

表1 警示路面的用色标准^[17]

Tab. 1 Color standards for warning pavements

警示路面功能类型	适用路段类型	色彩	备注
警示类(前置)	长大下坡、弯道、隧道入口、长直线、匝道	红、黄、白	可单色或多色组合
舒缓类	长直线	蓝、绿	可增加铺设长度
防滑类	长大下坡、弯道、隧道入口、匝道	红、黄、白	可增加面积铺设度
增加亮度类	隧道入口	黄、白	配合照明、遮光棚使用

1.2 铺设样式

彩色路面的铺设样式包含其设置位置、长度以及条纹宽度和间距等参数,早期国内大体将其分为全铺式和间隔式两种^[1,30],随着铺设样式的多样化,有学者从耦合仿生的原理出发给出了隧道入口处彩色路面的三种常见方案:红色全铺、浅色铺装辅以白色条纹、等间距条纹^[17]。但目前来看,这些分类显得较为笼统,因此本节将各种铺设样式进行系统分析后重新分类,主要归纳为块状全铺式、横向条纹式、条块相接式以及特殊样式4种。

1.2.1 块状全铺式

全铺式可分为洞外全铺和洞内外均铺两种形式,有时也会将彩色路面沿横向向内收缩一定宽度,从而给驾驶员提供一定诱导性以保持车道稳定(图1)。针对洞外全铺式的设置参数,目前尚未有规范进行规定或建议,因此实际中设置较为随意。而洞内外均铺式则由于其洞内外衔接相对舒缓等原因在一些地方性规范中被推荐使用,有内外各铺50 m的设置建议^[31],如图2所示。



图1 块状全铺式彩色路面

Fig. 1 Block fully - paved colored pavement

此种铺设样式施工简单、视觉刺激强烈、整体性好,但相较于其他铺装方式,在等长度铺装情况下成本较高,与道路整体连接突兀,容易使驾驶员产生慌乱,且设置长度较长时警示效果可能会降低。

表2 《公路彩色警示路面施工技术规范》^[32]推荐值

Tab. 2 Recommended values in Technical Specification for Construction of Highway Colored Warning Pavement

功能类型	单元宽度 e	单元间距 s	组间距 d	备注
警示类	振动警示	$0.3 \leq e \leq 1.0$	$s = e$	单元长度不小于20 m
	视觉警示	$2.0 \leq e \leq 5.0$	$e \leq s \leq 5e$	

(2)等间距细标线组形式。该形式结合了减速标线和彩色路面的特性,一般具有振动警示效果,以两道及以上标线为一组,每组间隔一定距离,其设置参数常借鉴减速警示标线的布置,标线宽一般取20、45或60 cm等,组间距可按表2取值。

(3)变宽变间距横向条纹形式。不同于等宽等间距条纹的设置形式,有学者考虑到动态视错觉的原理,通过渐变条纹间距和宽度的方式给驾驶员车

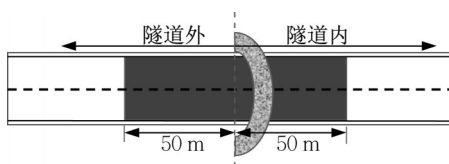


图2 内外均铺50 m方案^[31]

Fig. 2 Scheme of laying a colored pavement of 50 m both inside and outside the tunnel

1.2.2 横向条纹式

横向条纹式可分为等宽等间距条纹形式、等间距细标线组形式、变宽变间距条纹形式、变间距细标线组形式等,如图3所示。这种方式具有较好的驾驶诱导效果和道路整体协调感,且造价相对较低,但施工较复杂。

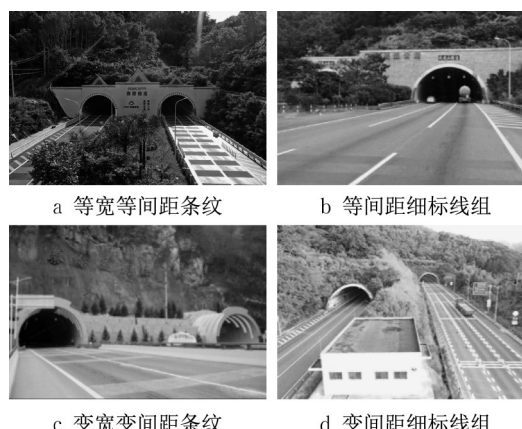


图3 横向条纹式彩色路面

Fig. 3 Horizontal stripe colored pavement

(1)等宽等间距横向条纹形式。该形式的设置参数在部分地方性规范中有相关要求^[32],如表2所示。同时,也存在相邻两条彩色标线的间距以降低车速 $3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 为计算依据的设置建议^[3]。

速变快的诱导性感知,从而降低车速,如图4所示。该形式的布置参数需考虑舒适减速度原理、透视原理和闪现频率的要求^[7,33]。

(4)变间距细标线组形式。该形式为《道路交通标志和标线 第三部分》^[34]中所推荐的警示标线布置方式,如图5所示。目前也有将其附上其他色彩进行优化的案例,其设置间隔考虑使车辆通过各标线间隔的时间大致相等,以利于行驶速度逐步降低。

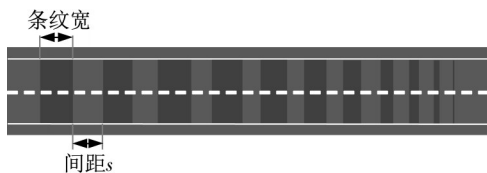


图4 变宽变间距横向条纹形式

Fig. 4 Horizontal stripe with variable width and spacing

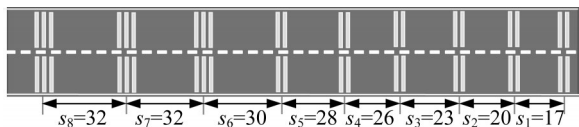
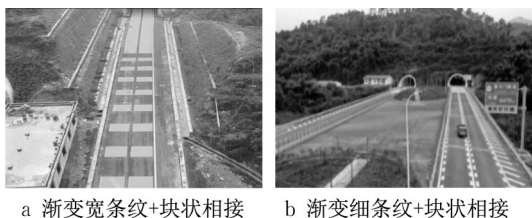


图5 变间距细标线组形式

Fig. 5 Fine line group form with variable spacing

1.2.3 条块相接式

条块相接式即在隧道入口处将横向条纹与全铺式结合起来,如图6所示。这种样式按条块位置可分为洞外条块相接、外条内块相接和洞外横条纹与洞内外均全铺相接三种。其中,王润寿等^[30]曾举例介绍了外条内块相接形式的设置参数,而洞外横条纹+洞内外均全铺相接的方案则在《公路交通安全设施设计细则》^[35]中受到推荐。



a 渐变宽条纹+块状相接 b 渐变细条纹+块状相接

图6 条块相接式

Fig. 6 Connection of stripe block

这种方式可结合前两者的优点,通过横向条纹考虑视错觉等原理,同时缓解全铺式的突兀刺激感,又能够相对减少成本,有研究表明,相对全铺和条纹式,驾驶员更愿意接受条块相接的铺设样式^[36-37]。

1.2.4 特殊样式

在常见样式之外,还存在许多特殊形状和样式,如鱼刺状标线、臂章状标线、彩色减速带、点阵式标线、块状交错相间式、双(多)色对比式、三维色块等,这些特殊样式能够借助视错觉原理或采用高视认性的对比色等提高彩色路面的警示作用,但选取时务必注意警示过度的问题。

针对上述铺设样式,目前已有众多学者进行了不同样式的对比研究。刘晓健^[38]选取了等间距条块相接(164 m)、渐变条块相接(134.6 m)、臂章形状渐

变(168.45 m)三种样式建立隧道出入口彩色路面模型进行虚拟行驶视频研究,结果发现矩形图案优于臂章式图案。杨萌^[33]根据透视原理和闪现率原理,对隧道进出口等间距、变间距条块相接样式进行了优化设计,并利用虚拟驾驶试验对驾驶员眼动数据进行分析,结果认为变间距的方案更合理。胡晓^[39]在隧道入口前红色路面的基础上提出了鱼刺状减速标线、纵向菱形标线、横向细条纹、红黄块状4种设置方案,并通过问卷调查方式得出“红色路面+鱼刺状减速标线”更合理的结论。潘福全等^[40]设计了三种隧道入口视觉减速标线方案,通过驾驶仿真和主观问卷调查,发现白色鱼刺形减速标线更为合理。

然而,由于彩色路面色彩与样式的多样性,采用相互对比的研究手段虽然能够在样式推荐方面给出一些指导,却无法说明长度、间距以及色彩之间的相互影响,也无法涵盖全面,进一步的研究应从隧道入口的应用需求角度出发,对其设置参数的选取进行探讨,确定主要参数后减少变量的维数,从而对铺设型式进行优化。

综上所述,将目前公路隧道入口处彩色路面的铺设型式汇总如图7所示。

2 考虑速度过渡的参数设计

虽然目前彩色路面的铺设型式不一,但均应满足隧道入口处速度过渡的需求,即在隧道入口之前完成高速度限制到低速度限制的减速过程。

2.1 设置长度及位置

2.1.1 减速度原理

隧道入口处彩色路面应从视觉方面起减速警示的作用,例如山区高速公路一般限速 $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,隧道内限速 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,存在 $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度差值,因此需要在进入隧道前进行减速过渡,而人体所感到舒适的减速度为 $0 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ^[41],按照减速度公式(1)可计算出彩色路面大致的铺设长度范围。

$$R = (V_1^2 - V_0^2) / 2a \quad (1)$$

式中: R 为减速距离; V_0 为初始速度; V_1 为目标速度; a 为减速度。

2.1.2 驾驶知觉-行为模型

由于驾驶员并非行驶到彩色路面时才开始减速,而是当他看见彩色路面后经过警觉、认知后开始进行减速操作,所以彩色路面的长度并不完全由减速度原理进行确定。借鉴有关警示标志前置距离计算的行驶-警觉-认知-操作模型来考虑彩色路面的

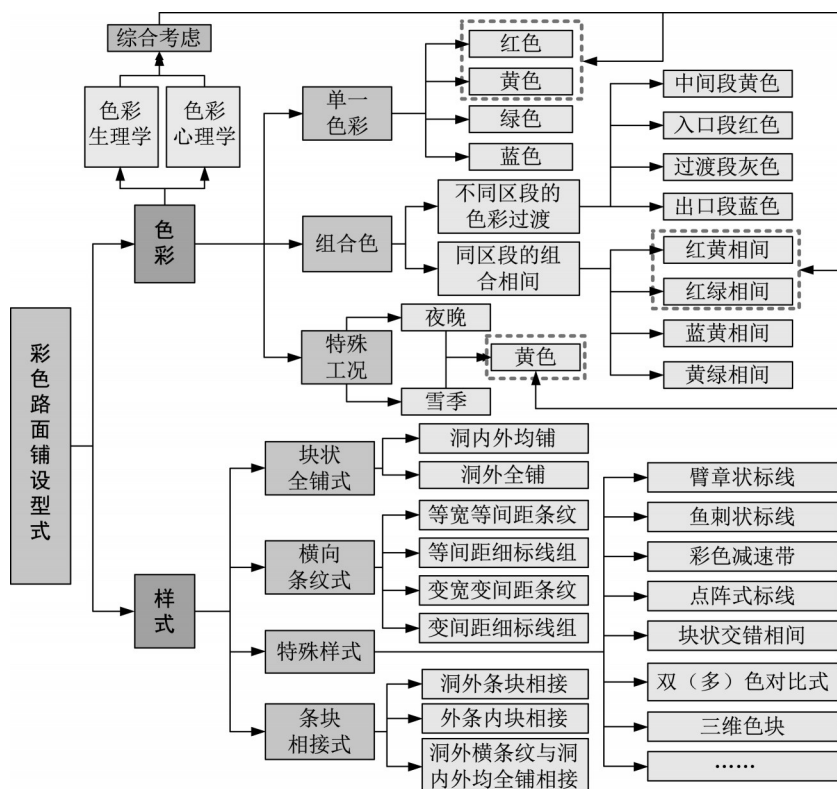


图7 隧道入口处彩色路面铺设型式

Fig. 7 Laying types of colored pavement at entrance of the tunnel

设置位置及长度^[2,17,42],模型见图8,其中假设认知时间为 t_1 ,决策与操作时间为 t_2 ,则有式(2)—(4)对彩色路面长度进行计算。

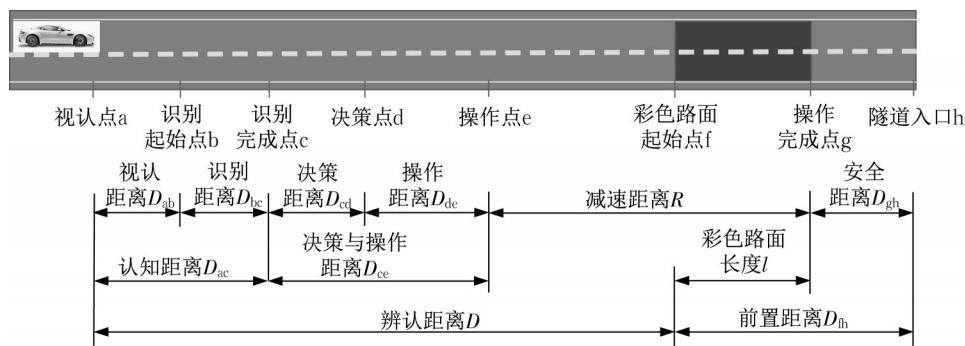


图8 驾驶知觉-行为模型

Fig. 8 Driving perception-behavioral model

$$D_{ac} = V_0 \cdot t_1 \quad (2)$$

$$D_{ce} = V_0 \cdot t_2 \quad (3)$$

$$l = D_{ac} + D_{ce} + R - D \quad (4)$$

据研究数据表明,驾驶员的认知时间为 $t_1=2\text{ s}$,决策与操作时间为 $t_2=2.5\text{ s}$,故当彩色路面进入视野后,驾驶员从感觉、识别、开始操作至操作产生效果一般需要花费 4.5 s ^[42]。此时假设辨认距离 D 为 $110\sim 140\text{ m}$,从 $100\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 减速至 $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,取减速度为 $3\text{ km}\cdot\text{h}^{-2}$,则可计算出彩色路面最短设置长

度为 $31\sim 51\text{ m}$ 。

2.1.3 关于辨认距离的考虑

由上述驾驶知觉-行为模型可求得彩色路面的最短设置长度,但是其最短长度却与所选择的减速度 a 以及辨认距离 D 相关,减速度 a 可按舒适的减速度范围进行取值,但对于辨认距离 D 的取值却未有明确规定。在进行计算时,杨波等^[2]曾假定 D 为 220 m ,赵岩^[17]曾假定 D 为 200 m ,而潘兵宏^[42]则考虑了夜间行车工况,以远光灯照射距离作为辨认距离进

行计算,如图9所示,将远光灯发光强度 $I=30\ 000$ cd,标志上照度 $E=2.8$ lux及几何可见度 $\epsilon=5^\circ$ 代入式(5)~(7)计算即可得到辨认距离^[42]。

$$E = \frac{I \cdot \cos \epsilon}{\rho^2} \quad (5)$$

$$r = \rho \cdot \sin \epsilon \quad (6)$$

$$D = \rho \cdot \cos \epsilon \quad (7)$$

式中: r 为远光灯在某一光束垂直面上的光圈半径; ρ 为远光灯照射下的可见视线距离。

不可否认,从最不利工况角度出发,潘兵宏对于

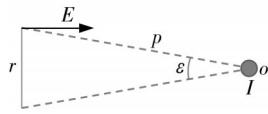


图9 夜间远光灯照射标志示意图

Fig. 9 Illumination sign of high beam lamp at night

夜间行车的考虑更为安全且保守。但是,潘兵宏所研究的是警告类标志的夜间视认特性,对于彩色路面是否契合还需进一步考虑。本文借鉴交通标志的可视距离公式(8)^[43],将平铺的彩色路面投影为垂直面,如图10所示,此时垂直面上的彩色路面即可认为是一个图案标志,其高度 h 即为标志的竖向尺寸,

则有三角形相似关系如式(9),此处认为整个彩色路面无论是全铺、条纹或其他型式均为一种整体标志,那么较长的彩色铺装其可辨认性就会更好,辨认所需距离更长,相反,较短的彩色铺装远处难以识别,其辨认所需视距就更短,即彩色路面长度和辨认距离是相互影响的关系。此时联立式(4)、式(8)、式(9)即可对 l 、 h 、 D 进行计算。其中 α 从容易视读角度考虑取值为10~15分^[43]。

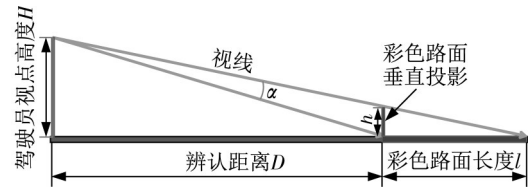


图10 辨认距离计算模型

Fig. 10 Calculation model of distance identification

$$D = \frac{h}{\alpha} \cdot 57.3 \quad (8)$$

$$\frac{1.5}{D+l} = \frac{h}{l} \quad (9)$$

考虑较不利情况本文取 α 为10分,将不同速度过渡情况和不同减速度设计情况下的辨认视距和彩色路面设置长度的最小值进行计算,统计结果如表3所示。

表3 彩色路面最短设置长度值推荐表

Tab. 3 Recommendation for shortest setting length of colored pavement

$a/(m \cdot s^{-2})$	100~120 km·h ⁻¹			80~100 km·h ⁻¹			60~80 km·h ⁻¹			40~60 km·h ⁻¹		
	l/m	D/m	总长/m	l/m	D/m	总长/m	l/m	D/m	总长/m	l/m	D/m	总长/m
3	59	148	207	43	129	172	28	108	136	17	84	101
2	74	161	235	54	142	196	35	119	154	21	83	104
1	123	197	320	60	148	208	60	148	208	35	117	152

当然,彩色路面的长度并非越长越好,长时间的适应会使得驾驶员逐渐接受刺激,降低路面的警示作用,同时过长的铺装也会大量增加成本。然而,目前的研究一般都关注于设置长度的下限值,对于考虑警示路面有效性的上限值却鲜有报道。

2.2 间距和宽度

2.2.1 考虑透视原理的理论间距值

在使用横向条纹样式彩色路面时,宜满足驾驶员在高速行驶时视野范围内条纹的可区分条件,因此采用透视原理进行考虑^[38,44],如图11所示。其中 H 为驾驶员视点高度, D_1 为驾驶员视点到条纹1的水平距离, s 为相邻段间距, β 为驾驶员与条纹1的视线夹角, θ 为条纹1与条纹2之间的视线夹角。由于横向条纹是一种对比色,其宽度和间距可以同等进行考虑,则可由式(10)~(14)计算出横向条纹的理论间距值。

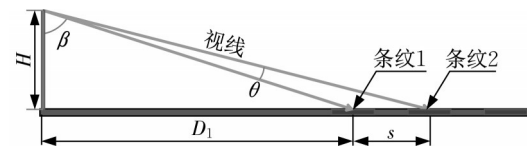


图11 透视原理图

Fig. 11 Schematic diagram of perspective

$$\tan \beta = \frac{D_1}{H} \quad (10)$$

$$\tan(\beta + \theta) = \frac{D_1 + s}{H} \quad (11)$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{D_1 + s}{H} - \tan^{-1} \frac{D_1}{H} \quad (12)$$

$$\tan \theta = \frac{Hs}{H^2 + D_1^2 + D_1 s} \quad (13)$$

$$s = \frac{\tan(H^2 + D_1^2)}{H - D_1 \tan \theta} \quad (14)$$

考虑驾驶员观察到事物的静动态视力与视角,一般取 H 为1.5 m, θ 为1.3~1.5分,而对于视点到临近标线的水平距离 D_1 ,则多选择为修正后的停车视距^[33]。取隧道设计速度为 $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$,隧道入口处的速度应在 $80\sim 100 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 取值,对应 D_1 的取值范围是 $40\sim 190 \text{ m}$ ^[45-46],按式(14)即可计算出间距的取值范围为 $5.1226\sim 11.1161 \text{ m}$ 。

2.2.2 考虑闪现率原理的间距渐变

为了使驾驶员在隧道入口降低车速,彩色路面的条纹间距和宽度可采用渐窄设计,使相同时间内驾驶员视野范围中的条纹数目逐渐增多,形成一种车速变快的视错觉,从而促使驾驶员降低车速^[47]。因此,可在透视原理所计算得到的理论间距范围内进行渐窄的取值,但还需考虑闪现率的要求,以免造成驾驶的视觉不适感。研究表明,当闪现率 f 取值为 $4 \text{ 帧}\cdot\text{s}^{-1}$ 时不会影响驾驶舒适感^[48]。设从第1道条纹行驶到第 n 道条纹的时间为 n/f ,则考虑闪现率原理的相邻条纹间距值 s_n 可如图12所示进行计算, X_0 表示第1条彩色路面的位置,将其定位初始位置为零, X_1 到 X_n 表示第二条到第 n 条彩色路面的位置,假设初始车速为 $v_0, \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,行驶时间为 $t_n(\text{s})$,汽车加速度为 $a, \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ 。计算过程如式(15)~(17)。

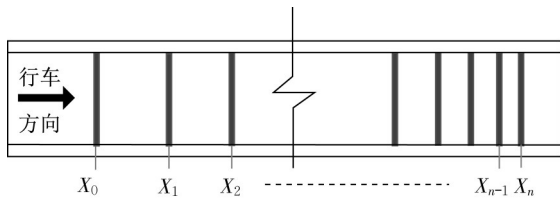


图12 间距渐变示意图

Fig. 12 Diagram of pacing gradient

$$x_n = \frac{1}{2} a \left(\frac{n}{f} \right)^2 + v_0 \left(\frac{n}{f} \right) + x_0 \quad (15)$$

$$x_{n-1} = \frac{1}{2} a \left(\frac{n-1}{f} \right)^2 + v_0 \left(\frac{n-1}{f} \right) + x_0 \quad (16)$$

$$s_n = x_n - x_{n-1} \quad (17)$$

3 考虑亮度过渡的设计与验证

Autelitano^[10]通过实验证明,在道路交通领域恰当的采用某些色彩,应结合路面材料和道路照明统一考虑。徐良杰等^[49]发现不同色彩对驾驶员的光学和心理影响不同,且该影响与驾驶速度成正比。因此,对于亮度变化显著的隧道入口路段,彩色路面的铺设更应考虑其对亮度过渡的影响。黄莹^[18]、朱沁

茹^[24]、陈俊^[50]等对不同色彩的路面光学参数进行了测量,验证了彩色铺装对路面反射率的显著提高。王家主^[26]对松毛岭隧道洞内不同距离的彩色路面进行了照度测量,得出了距洞口越远,彩色路面对照度提升效果越好的结论。Xu等^[27]提出一种掺加玻璃微珠的薄层防滑彩色路面,能够使得隧道出入口的路面亮度提高 $40\% \sim 60\%$ 。Hussain^[15]借助驾驶模拟实验,研究了光学路面处理对过渡区速度和横向位置的影响。

上述研究均为基于隧道内部环境或室内环境进行的测量,并未考虑隧道入口处剧烈的亮度变化,国内隧道照明设计一般采用 k 值法,洞内外亮度差甚至高达100倍^[51]。而彩色路面的铺设将对隧道洞内外亮度均产生增幅,形成新的亮度过渡段,彩色路面对洞外亮度和洞内亮度的提升量均应进行考虑。张晓坚等^[52]认为,考虑洞外亮度 $L_{20}(S)$ 值(S 为规范中照明区段划分的一个分段点)对公路隧道照明设计的影响时,应选择RGB(三原色)叠加之和小的颜色作为沥青表层颜色,使洞外亮度 $L_{20}(S)$ 值尽可能减小。据此,本文提出两种考量思路:

(1)加大安全距离 D_{gh} (图8)。

将彩色路面结束点置于亮度过渡的范围之前(图13),避免其对洞内外亮度过渡的影响。对于安全距离的取值,本文总结4种取值方式。

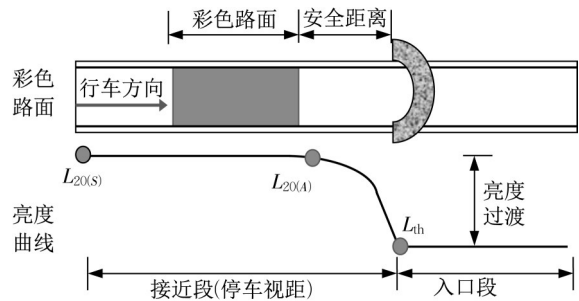


图13 亮度过渡与安全距离示意图

Fig. 13 Diagram of brightness transition and safe distance

①考虑洞外亮度 $L_{20}(S)$ 值对公路隧道照明设计的影响,将洞外至少1倍停车视距范围内路面面层改为RGB值较小的深暗色,以降低 $L_{20}(S)$ 值,从而利于隧道内的照明节能^[52];

②根据隧道入口处事故主要范围为洞内外 100 m ^[33]进行取值,即以洞外 100 m 为安全距离,该值较为保守;

③根据隧道暗适应起点取值, $80 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 速度下即进洞前 $2\sim 4 \text{ s}$,具体为 $44\sim 89 \text{ m}$ 行程距离^[33],而根据Xu等^[27]的研究,考虑白天与黑夜,该值大致在 $30\sim 40 \text{ m}$ 左

右。由于该值是隧道入口亮度变化的起始位置,因此采用该值更为合理;

④根据潘兵宏对远光灯照射能力和驾驶员夜间视距的考虑取值,具体取值为 20~50 m,大小与速度相关^[42]。

(2)对彩色路面方案的亮度合理性进行试验或理论验证。

大量研究表明,瞳孔大小的变化与外界亮度的变化呈现一定关系^[53],且一定程度反映出人体的疲劳程度和心理负荷的大小^[54],因此可利用瞳孔直径的变化表征道路环境亮度变化对驾驶安全性的影响。一般认为,当瞳孔面积变化速度超出 $-6\sim 4\text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$ 范围,且持续时间大于 0.2 s 时,行车不安全;瞳孔面积变化率保持恒定时,驾驶员心理生理负荷最小^[55]。由于试验验证成本较高,因此理论计算成为了更为实用的方式。然而亮度测量并非易事,目前对于驾驶员瞳孔面积与公路隧道入口环境亮度的关联性尚未有明确结论,但已有研究针对瞳孔面积与路面照度的关系进行了讨论,其结果呈现幂函数关系^[56],如式(18)和(19)所示:

$$\lg(EY) = u\lg E + w \tag{18}$$

$$Y = 10^w E^{u-1} \tag{19}$$

式中: u 、 w 均为常数,根据路面材料、进口与出口、驾驶员视觉特性取值; Y 为驾驶员瞳孔面积, mm^2 ; E 为路面照度, lux 。

因此,设彩色路面铺装前洞外原照度为 E_1 ,洞口原照度为 E_2 ,彩色路面铺装后,洞外照度为 E'_1 ,洞口照度为 E'_2 ,亮度过渡所需时间为 t ,则可按照式(20)进行验证计算:

$$-6 \leq \frac{Y_1 - Y_2}{t} = \frac{10^w \cdot E_1^{u-1} - 10^w \cdot E_2^{u-1}}{t} \leq 4 \tag{20}$$

但实际上彩色路面的铺设型式不一,不同色彩、不同样式的路面铺装对亮度的改变必然不同,且路面材料的变化对环境亮度的改变剧烈,却对路面照度的改变较小,因此认为彩色路面铺装后洞内外照度不变,将对亮度变化的考量转化为对不同材料的考量。设洞外的彩色路面材料参数为 u_1 、 w_1 ,洞内的彩色路面材料参数为 u_2 、 w_2 ,则可按式(21)进行验证计算:

$$-6 \leq \frac{Y_1 - Y_2}{t} = \frac{10^{w_1} \cdot E_1^{u_1-1} - 10^{w_2} \cdot E_2^{u_2-1}}{t} \leq 4 \tag{21}$$

关于计算中参数 u 、 w 的取值,目前杜志刚等^[56]已根据实车试验对部分情况进行了拟合,而对于彩色路面则还需通过大量实测进行确定。因此,进一步研究应将亮度过渡的变化理论化、实用化,以便于在考虑速度过渡的设计基础上能够从亮度过渡的角度进一步验证设计方案的合理性。

至此,将隧道入口处彩色路面铺设方案的设计原则汇总如图 14 所示。

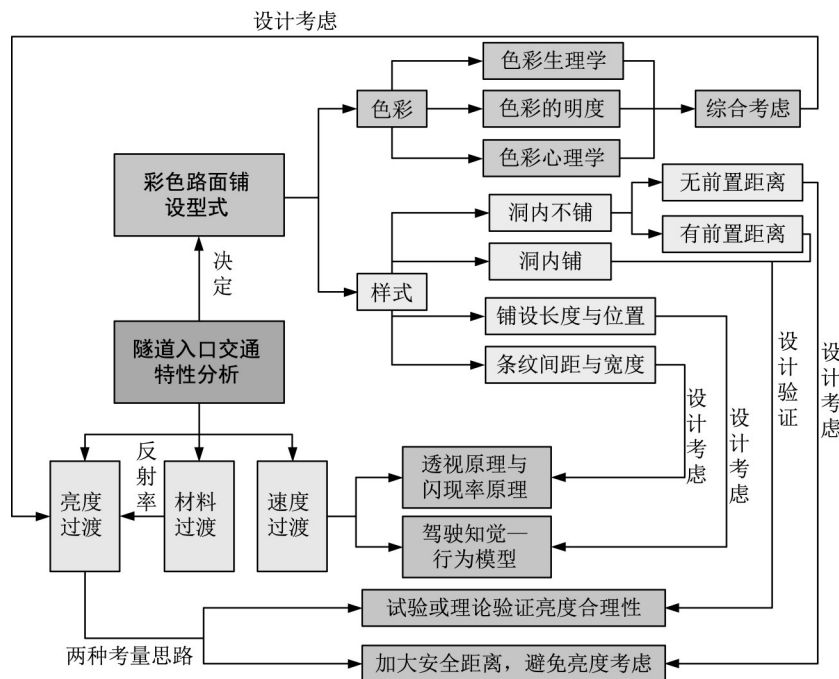


图 14 隧道入口彩色路面设计原则

Fig. 14 Design principles of colored pavement at entrance of the tunnel

4 结论

本文以隧道入口处铺设彩色路面的需求为导向,总结了目前隧道入口处常见的彩色路面铺设色彩与样式,并从速度过渡和亮度过渡两个方面梳理了其长度、位置、条纹间距等参数的选取原则,得到以下结论:

(1)隧道入口处警示路面的色彩选取以红色、黄色为优。当考虑夜晚、雪季等特殊工况时宜选择视认性更好的黄色;此外组合相间色的应用也逐渐成为了一种发展趋势,其中红黄相间、红绿相间的接受程度更高。

(2)将隧道入口处彩色路面的常见铺设样式归纳为块状全铺、横向条纹、条块相接及特殊样式4类,其中条块相接样式更加舒适合理。目前各种铺设样式的参数选取原则并不统一,视错觉理念的应用和研究逐步增多。

(3)从速度过渡角度对隧道入口处的彩色路面铺设参数进行分析,在驾驶知觉-行为模型的基础上对彩色路面辨认距离的取值方式进行了优化,给出了最短设置长度的参考取值,并应用透视原理和闪现率原理推导了横向条纹的间距取值原则。

(4)从亮度过渡角度提出了增加安全距离和理论验证两种彩色路面设置参数的有效性考量方法。

针对目前隧道入口处彩色路面的设计和研究现状,本文提出了如下建议与思考:

(1)路面色彩的确定应进一步考虑真实交通中的诸多复杂情况,如夜晚、雨天、多季节等环境下的醒目度问题以及不同性别、驾龄、年龄等驾驶员的感知差异性,以不利情况进行设计从而保证隧道入口处彩色路面的有效性,因此能够借助色彩对比保证不同情况均具备较好可视性的组合色应是设计和研究中进一步考虑的方向。同时,色彩的选择也应考虑与隧道洞口环境及隧道洞门装饰的协调性。

(2)隧道入口彩色路面铺设样式的选定应对长度、位置、样式、条纹宽度和间距等参数进行统一考虑,由于参数及其水平较多,宜先对理论模型推荐取值进行针对性试验,再对其他参数逐步优化。

(3)不同型式彩色路面的铺设对隧道洞口处亮度过渡的改变宜进行大量实测,且需与其他洞内装饰、洞外遮光设施等进行统一考虑,从而保证彩色路面铺设型式在隧道入口亮度方面的合理性。

(4)本文研究只从速度过渡和亮度过渡两个方面对隧道入口处彩色路面分别进行了理论考虑,进

一步应结合理论计算、虚拟仿真和实车试验对路面材料过渡、速度过渡和亮度过渡进行统一探讨,得到更为合理有效的隧道入口处彩色路面铺设颜色、样式等的选取方法。

作者贡献声明:

叶飞:提出研究命题与论文思路。

温小宝:负责文献调研与论文撰写。

翁效林:负责把控研究思路与论文框架。

李林:负责理论计算与论文撰写。

张兴冰:负责论文撰写与修订。

参考文献:

- [1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通工程学术研究综述·2016 [J]. 中国公路学报, 2016, 29(6): 1.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on china's traffic engineering research progress: 2016 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2016, 29(6): 1.
- [2] 杨波, 闫旭亮, 吴平, 等. 基于驾驶员行为模型的彩色安全路面设计方法研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2019, 15(10): 276.
YANG Bo, YAN Xuliang, WU Ping, *et al.* Research on color safe pavement design method based on driver behavior model [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2019, 15(10): 276.
- [3] 王晓琴, 赵岩. 警示防滑路面设计与应用研究[J]. 交通标准化, 2011(10): 76.
WANG Xiaoqin, ZHAO Yan. Research on design and application of warning anti-skid pavement [J]. Communications Standardization, 2011(10): 76.
- [4] 李佳辉, 赵晓华, 万钰涵. 前方学校红色路面标线的有效性研究[J]. 中国安全科学学报, 2016, 26(10): 157.
LI Jiahui, ZHAO Xiaohua, WAN Yuhuan. Research on effectiveness of school crossing ahead pavement markings [J]. China Safety Science Journal, 2016, 26(10): 157.
- [5] 刘冬生. 彩色防滑路面在昌九高速公路技改项目小半径反向曲线路段的应用[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2008, 4(S2): 137.
LIU Dongsheng. Application of color antiskid pavement in small radius reverse curve section of changjiu expressway technical reconstruction project [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2008, 4(S2): 137.
- [6] 高伟, 徐明. 寒区公路路面增摩阻彩色薄层的材料技术指标与铺设方案探讨[C]//第四届全国公路科技创新高层论坛. 北京: 人民交通出版社, 2008: 241-244.
GAO Wei, XU Ming. Discussion on material technical index and laying scheme of color thin layer for increasing friction

- resistance of highway pavement in cold region [C]// The Fourth National Highway Science and Technology Innovation Forum. Beijing: China Communications Press, 2008: 241-244.
- [7] XI S, XU L, DONG C. Study of colored pavement application design based on visual perception information [C]// International Conference on Advances in Mechanical Engineering & Industrial Informatics. [S.l.]: Atlantis Press, 2015: 1494-1499.
- [8] 许世勇, 杨运兴, 张咏富, 等. 基于视觉行为的长下坡路段彩色路面设置有效性研究[J]. 科学技术与工程, 2017, 17(33): 349.
XU Shiyong, YANG Yunxing, ZHANG Yongfu, *et al.* Research on the effectiveness of colorful pavement based on driver's visual behavior in long downhill [J]. Science Technology and Engineering, 2017, 17(33): 349.
- [9] 钱华信. 蓝商高速公路长大下坡路段安全性评价[D]. 西安: 长安大学, 2010.
QIAN Huaxin. Research on safety evaluation of lan shang expressway's long and steep downgrade section [D]. Xi'an: Chang'an University, 2010.
- [10] AUTELITANO F, GIULIANI F. Daytime and nighttime color appearance of pigmented asphalt surface treatments [J]. Construction and Building Materials, 2019, 207(20): 98.
- [11] ANDO R, INAGAKI T, MIMURA Y. Does colored pavement make non-signalized intersections safer? A case study in Japan [J]. Procedia—Social and Behavioral Sciences, 2011, 20(1): 741.
- [12] 张生瑞, 马壮林, 徐景翠. 高速公路隧道内交通事故分布规律[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2008, 28(4): 74.
ZHANG Shengrui, MA Zhuanglin, XU Jingcui. Traffic accidents distribution law in freeway tunnel [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2008, 28(4): 74.
- [13] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Speed reduction techniques for rural high-to-low speed transitions [M]. Washington, DC: The National Academies Press, 2011.
- [14] DENTON G G. A subjective scale of speed when driving a motor vehicle [J]. Ergonomics, 1966, 9(3): 203.
- [15] HUSSAIN Q, ALHAJYASEEN W, REINOLSMANN N, *et al.* Optical pavement treatments and their impact on speed and lateral position at transition zones: A driving simulator study [J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 150(2): 105916.
- [16] 胡江碧, 任仁, 管桂平. 公路隧道光环境技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
HU Jiangbi, REN Ren, GUAN Guiping. Light environment technology of highway tunnel [M]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [17] 赵岩. 公路路面警示耦合仿生研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
ZHAO Yan. Study on coupling bionic of road warning pavement [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [18] 黄莹. 基于虚拟现实的隧道内彩色路面视觉舒适研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2018.
HUANG Ying. VR-based research on the visual comfort of colored pavement in tunnel [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2018.
- [19] 卓曦, 唐璐璐, 王家主, 等. 彩色路面环境下隧道视觉诱导性评价[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2019, 47(3): 417.
ZHUO Xi, TANG Lulu, WANG Jiazhu, *et al.* Visual inductivity evaluation for tunnels with colored pavements [J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2019, 47(3): 417.
- [20] 袁景玉, 焦墨雪, 姚胜, 等. 公路隧道内路面色彩适宜性研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(7): 1099.
YUAN Jingyu, JIAO Moxue, YAO Sheng, *et al.* Suitability of pavement colors in highway tunnels [J]. Tunnel Construction, 2021, 41(7): 1099.
- [21] 林志, 李佳奇, 赵耀, 等. 隧道路面颜色对行车安全的影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(7): 34.
LING Zhi, LI Jiaqi, ZHAO Yao, *et al.* Influence of tunnel pavement color on driving safety [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2022, 41(7): 34.
- [22] WU Y N, HAN Y Z, CHEN Z. Traffic safety evaluation of asphalt pavement based on color information [C]// 2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT). Nanchang: IEEE, 2020: 469-473.
- [23] 袁景玉, 刘晓健, 姚胜, 等. 高速公路隧道进出口彩色路面视觉特征研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(9): 60.
YUAN Jingyu, LIU Xiaojian, YAO Shen, *et al.* Visual characteristics of color pavement at entrance and exit of expressway tunnel [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science Edition), 2021, 40(9): 60.
- [24] 朱沁茹. 彩色路面环境下公路隧道照明设施优化技术研究[D]. 福州: 福州大学, 2018.
ZHU Qinru. Research on optimization technology of highway tunnel lighting facilities under color pavement environment [D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2018.
- [25] SHAW J W, CHITTURI M V, NOYCE D A. Special-color pavement marking for highway work zones literature review of international practices [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2017, 2617(1): 78.
- [26] 王家主. 彩色抗滑超薄铺装在高速公路隧道沥青路面的应用[J]. 公路, 2016, 61(12): 24.
WANG Jiazhu. Application of colored anti-slide ultra-thin layer to asphalt pavement in highway tunnel [J]. Highway, 2016, 61(12): 24.
- [27] XU M, PAN X, DENG Q. Setting method of thin-layer antiskid colored pavement in tunnel based on increasing

- luminance of pavement [C]// Twelfth Cota International Conference of Transportation Professionals. Beijing: ASCE, 2012: 3073-3083.
- [28] TILLEY R J. Colour and the optical properties of materials: an exploration of the relationship between light, the optical properties of materials and colour [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.
- [29] CANTIN V, LAVALLIÈRE M, SIMONEAU M, *et al.* Mental workload when driving in a simulator: Effects of age and driving complexity [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2009, 41(4):763.
- [30] 王润寿,余文科,吴进良,等.彩色防滑警示路面在山区道路的工程应用[J].石油沥青,2011,25(3):46.
WANG Runshou, YU Wenke, WU Jinliang, *et al.* Engineering of colorful antiskid warning pavement on mountain road [J]. *Petroleum Asphalt*, 2011, 25(3): 46.
- [31] 四川省交通运输厅.公路彩色防滑路面设置规范:DB51/T 2427—2017[S].成都:四川省交通运输厅,2017.
Department of Transportation of Sichuan Province. Specification for highway color anti-skid pavement setting: DB51/T 2427—2017 [S]. Chengdu: Department of Transportation of Sichuan Province, 2017.
- [32] 陕西省交通运输厅.公路彩色警示路面施工技术规范:DB61/T 1152—2018[S].西安:陕西省交通运输厅,2018.
Department of Transportation of Shaanxi Province. Technical specifications for construction of highway colored warning pavement: DB61/T 1152-2018 [S]. Xi'an: Department of Transportation of Shaanxi Province, 2018.
- [33] 杨萌.基于行车安全的高速隧道口彩色抗滑层设计与仿真研究[D].天津:河北工业大学,2020.
YANG Meng. Research on design and simulation of color anti-sliding layer in import and export of highway tunnel based on the safety [D]. Tianjin: Hebei university of technology, 2020.
- [34] 中华人民共和国交通运输部.道路交通标志和标线第3部分:道路交通标线:GB 5768.3—2009[S].北京:中国标准出版社,2009.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Road traffic signs and markings—Part 3: Road traffic markings: GB 5768.3—2009[S]. Beijing: Standards press of China, 2009.
- [35] 中华人民共和国交通运输部.公路交通安全设施设计细则:JTG/T D81—2017[S].北京:人民交通出版社,2017.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guidelines for highway safety facilities: JTG/T D81—2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- [36] 龙瑛.高速公路彩色沥青路面行车安全的影响研究[D].成都:西南交通大学,2018.
LONG Ying. Research on influence of colored asphalt pavement on driving safety of highway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [37] 陶盼盼,于海臣,赵晓华,等.高速公路隧道入口段减速标线与红色警示路面减速效果及舒适性研究[J].公路,2019,64(1):157.
TAO Panpan, YU Haichen, ZHAO Xiaohua, *et al.* Research of the deceleration effect and comfort of deceleration marking and red alert pavement on expressway tunnel entrance section [J]. *Highway*, 2019, 64(1): 157.
- [38] 刘晓健.基于视觉评价的高速公路隧道进出口路面色彩研究[D].天津:河北工业大学,2019.
LIU Xiaojian. Research on the color of expressway tunnel entrance and exit based on visual evaluation [D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [39] 胡晓.越江隧道入口段优化设计[J].综合运输,2020,42(9):106.
HU Xiao. Optimal design of river crossing tunnel entrance section [J]. *Comprehensive Transportation*, 2020, 42(9): 106.
- [40] 潘福全,梁雪,王琳,等.基于驾驶仿真的海底隧道出入口段视觉减速标线有效性[J].科学技术与工程,2022,22(21):9372.
PAN Fuquan, LIANG Xue, WANG Lin, *et al.* Effectiveness of visual deceleration marking at the entrance and exit of undersea tunnel based on driving simulation [J]. *Science and Technology and Engineering*, 2022, 22(21): 9372.
- [41] 中国公路学会《交通工程手册》编委会.交通工程手册[M].北京:人民交通出版社,1998.
Editorial Board of 'Traffic engineering handbook' of China Highway Society. Traffic engineering handbook [M]. Beijing: China Communications Press, 1998.
- [42] 潘兵宏,陈天幸.保证夜间视距的警告类标志前置距离研究[J].中外公路,2014,34(2):326.
PAN Binghong, CHEN Tianxing. Study on the leading distance of warning signs to ensure horizon in nighttime [J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2014, 34(2): 326.
- [43] 李中原,李爽爽.基于人因工程学的交通信息显示屏设计方案研究[J].智能建筑与城市信息,2010(2):85.
LI Zhongyuan, LI Shuangshuang. Study on design of traffic information display based on human factors engineering [J]. *Journal of Intelligent Building and Urban Information*, 2010 (2): 85.
- [44] 张冬梅.高速公路中长隧道出入口段视错觉减速标线设置研究[D].西安:长安大学,2015.
ZHANG Dongmei. Study on design of optional illusion deceleration markings in section on highway long tunnel entrance and exit [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [45] 杜志刚,潘晓东,杨轶,等.高速公路隧道进出口视觉震荡与行车安全研究[J].中国公路学报,2007(5):101.
DU Zhigang, PAN Xiaodong, YANG Zhen, *et al.* Research on visual turbulence and driving safety of freeway tunnel entrance and exit [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2007(5): 101.
- [46] 中华人民共和国住房和城乡建设部.城市道路工程设计规

- 范: CJJ 37—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of urban road engineering: CJJ 37—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [47] MEYER E. A new look at optical speed bars [J]. Institute of Transportation Engineers, ITE Journal, 2001, 71(11): 44.
- [48] KATZ B J. Peripheral transverse pavement markings for speed control [D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007.
- [49] 徐良杰, 铁文君, 奚少新. 基于路面色彩信息的驾驶员视觉心理效应分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(4): 592.
- XU Liangjie, TIE Wenjun, XI Shaoxin. Analysis of driver visual psychological effect based on road color information [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2016, 40(4): 592.
- [50] 陈俊, 周政, 孙志林, 等. 彩色路面反射率和内部温度的室内测试分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(9): 159.
- CHEN Jun, ZHOU Zheng, SUN Zhilin, *et al.* Laboratory measurement for albedo and internal temperature of color pavement [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(9): 159.
- [51] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道照明设计细则: JTG/T D70/2-01—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guidelines for design of lighting of highway tunnels: JTG/T D70/2-01—2014 [S]. Beijing: China Communications Press, 2014.
- [52] 张晓坚, 梁波, 钟升明. 环境因素对公路隧道洞外亮度 $L_{20}(S)$ 值的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2021, 58(3): 70.
- ZHANG Xiaojian, LIANG Bo, ZHONG Shengming. Study on the influence of environmental factors on the brightness value $L_{20}(S)$ outside the highway tunnel [J]. Modern Tunnel Technology, 2021, 58(3): 70.
- [53] 李帅, 张宇宁, 王坚, 等. 瞳孔直径估算模型[J]. 光学学报, 2019, 39(1): 494.
- LI Shuai, ZHANG Yuning, WANG Jian, *et al.* Pupil diameter estimation model [J]. *Acta Optica Sinica*, 2019, 39(1): 494.
- [54] 李勇, 阴国恩, 陈燕丽. 阅读中疲劳、心理负荷因素对瞳孔大小的调节作用[J]. 心理与行为研究, 2004(3): 545.
- LI Yong, YIN Guoen, CHEN Yanli. The regulating effect of fatigue and mental load on pupil size in text reading [J]. Study of Psychology and Behavior, 2004(3): 545.
- [55] DRAKOU D, BURATTINI C, BISEGNA F, *et al.* Study of a daylight 'filter' zone in tunnels [C]//2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). [S.l.]:IEEE, 2015: 649-652.
- [56] 杜志刚, 潘晓东, 郭雪斌. 高速公路隧道进出口视觉适应实验[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2007, 39(12): 1998.
- DU Zhigang, PAN Xiaodong, GUO Xuebin. Experiment studies of visual adaptation on driving through freeway tunnel's entrance and exit [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2007, 39(12): 1998.