

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2025.05.021

# 20千米级高速公路山岭隧道线形控制方法

刘继国<sup>1</sup>, 彭恩鹏<sup>2</sup>, 王琛<sup>3</sup>, 奚圣宇<sup>4</sup>, 焦昱棋<sup>4</sup>, 张驰<sup>\*4</sup>

- (1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056;
2. 南昌市城市规划设计研究总院集团有限公司, 江西 南昌 330000;
3. 中国交通建设股份有限公司总承包经营分公司, 北京 100088;
4. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:**【目标】为了提高20千米级高速公路山岭隧道的交通安全,并填补中国超特长隧道建设中线形指标规范的空白,针对国内现有特长隧道线形指标进行统计与分析。【方法】通过驾驶模拟试验采集驾驶人平均心率增长率、平均眨眼持续时间和平均瞳孔直径变化等心理生理数据,结合卡罗林斯卡嗜睡量表判断其疲劳状态,利用模糊综合评价法和多因素非线性回归方程建立了驾驶人疲劳度模型,量化了道路线形对驾驶疲劳的影响。【结果】隧道内驾驶人疲劳主要受到长直线和大半径圆曲线的影响,这是导致行车风险增加的关键因素。调整隧道内直线长度和曲线半径对缓解驾驶疲劳具有明显效果,而隧道内曲线长度的调整对行车安全的作用较小。基于驾驶人疲劳度变化特征,提出了特长隧道直线与曲线路段的行车风险等级,依据线形特征将路段划分为低、较低、中、较高、高5个风险等级,在规范值的基础上增加4个直线长度阈值分别为4.3, 6.4, 12.0, 16.1 km,增加4个曲线半径阈值分别为5.6, 6.0, 6.4, 7.5 km。【结论】建议在实际建设中,特长隧道内路段最大直线长度不宜超过6.4 km,最大曲线半径不宜超过6.0 km。

**关键词:**隧道工程;隧道线形;驾驶模拟;驾驶疲劳;疲劳度模型

中图分类号:U458.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2025)05-0195-11

## Alignment control method for 20-km scale expressway mountain tunnels

LIU Jiguo<sup>1</sup>, PENG Enpeng<sup>2</sup>, WANG Chen<sup>3</sup>, XI Shengyu<sup>4</sup>, JIAO Yuqi<sup>4</sup>, ZHANG Chi<sup>\*4</sup>

- (1. China Communications Second Highway Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430056, China;
2. Nanchang Urban Planning and Design Research Institute Group Co., Ltd., Nanchang, Jiangxi 330000, China;
3. General Contracting and Operation Branch of China Communications Construction Co., Ltd., Beijing 100088, China;
4. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** [Objective] To improve traffic safety of 20-km scale expressway mountain tunnels, and to fill the gap in linear indicator specification of ultra-long tunnels in China, this study counted and analyzed the domestic existing ultra-long tunnel alignment indicators. [Method] The heart physiological data, i. e., average heart rate growth rate, average blinking duration, and average pupil diameter variation, were collected with driving simulation tests. The fatigue state was judged by using Karolinska sleepiness scale. The

收稿日期:2024-03-04 修改日期:2025-03-17

基金项目:中交第二公路勘察设计研究院有限公司科技研发项目(KJFZ-2021-005)

作者简介:刘继国(1976-),男,湖北武汉人,博士,正高级工程师,研究方向为隧道与地下工程。(liujiguog@163.com)

\*通讯作者:张驰(1981-),男,四川宜宾人,博士,教授,研究方向为道路安全保障技术。(zhangchi@chd.edu.cn)

引用格式:刘继国,彭恩鹏,王琛,等.20千米级高速公路山岭隧道线形控制方法[J].公路交通科技,2025,42(5):195-205. LIU Jiguo, PENG Enpeng, WANG Chen, et al. Alignment control method for 20-km scale expressway mountain tunnels [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2025, 42(5): 195-205.

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

driving fatigue model was established by using fuzzy comprehensive evaluation method and multivariate nonlinear regression equation. The influence of road alignment on driving fatigue was quantified. [ **Result** ] Driver fatigue in tunnels is mainly affected by long straight lines and large radius circular curves, which are the key factors leading to increased driving risk. Adjusting straight line lengths and curves radii in tunnels has significant effects on alleviating driving fatigue, while adjusting curve lengths in tunnels has little effect on driving safety. Based on characteristics of driver fatigue variation, the driving risk levels on straight and curved sections in ultra-long tunnels are proposed. According to linear characteristics, the road sections are divided into 5 risk levels, i. e., lower, low, medium, high, and higher. On the basis of specified values, 4 straight length thresholds are added, i. e., 4.3, 6.4, 12.0, 16.1 km; and 4 curve radius thresholds are added, i. e., 5.6, 6.0, 6.4, 7.5 km. [ **Conclusion** ] It is suggested that in actual constructions, the maximum straight line length of road section in ultra-long tunnels should not exceed 6.4 km, and the maximum curve radius should not exceed 6.0 km.

**Key words:** tunnel engineering; tunnel alignment; driving simulation; driving fatigue; fatigue model

## 0 引言

当前高速公路隧道呈现出了向特长和 10 km 以上超长隧道发展的趋势<sup>[1]</sup>。与中、短隧道相比,特长隧道交通运行安全风险大,且隧道越长,交通运行安全风险越大,特长隧道中交通事故伤亡最多<sup>[2-4]</sup>。目前中国已有相关规划建设 20 千米级的高速公路山岭隧道,随即带来的交通安全形势也日趋严峻,亟需对其行车风险进行更深层次的分析研究。

大量国内外学者证明了隧道内特殊的行车环境会在一定程度上影响驾驶人操控车辆,从而提高隧道路段的行车风险。在此基础上,一方面研究针对驾驶人受隧道环境影响导致心生理变化展开,另一方面研究针对隧道内线形变化对驾驶人的影响展开。Domenichini<sup>[5]</sup>通过驾驶模拟研究发现,在进出隧道时由于环境的突变,驾驶人缺乏视觉刺激,对车速的感知能力或将缺失。梁波<sup>[6]</sup>发现在隧道洞口处,驾驶人受不同形式的控速标线影响,具体的减速效果也会存在差异。万利<sup>[7]</sup>发现大型车驾驶人心理指标会受高速公路隧道侧向余宽影响,通过增加高速公路隧道右侧侧向宽度,特别是在隧道出入口段,可有效改善大型车驾驶人的心理负荷和视觉负荷。Manser<sup>[8]</sup>发现由于隧道“侧墙效应”的存在,驾驶人多种视觉搜索能力降低甚至恶化,对车速的感知及后续驾驶操纵会受到视觉机能下降的不良影响。Peña-García<sup>[9]</sup>分析了驾驶人视觉特性受不同照明条件的影响程度,提出为降低行车风险,照明设计应与人眼球的视觉机能相适应。胡月琦<sup>[10]</sup>通过实车试验发现,驾驶人在隧道内行车时会发生“心智游移”

现象,会导致注视和扫视次数减少,注视时间缩短,增加隧道行车风险。Wang<sup>[11]</sup>通过实车试验发现当隧道纵坡增加时,驾驶人平均注视时间呈先增加、后减少趋势,而视野的变化趋势则与之相反。田晶晶<sup>[12]</sup>采用实车试验探究了驾驶人在多种隧道场景下行车时的眼动指标变化特性,发现随着隧道长度增加,注视持续时间显著降低,导致注意力下降,行车风险增加。胡顺峰<sup>[13]</sup>对高速公路隧道群事故数据进行分析发现,在隧道出入口照度发生突变条件下,驾驶人入口不减速而出口车速过快容易导致交通事故。潘福全<sup>[14]</sup>利用实车数据量化分析了隧道内平纵线形对于驾驶人及车速的影响,发现适当调整隧道内纵坡和坡度可以缓解驾驶人的疲劳。

国内外研究多基于驾驶人特性,从隧道环境及配套设施等方面进行分析并得到了较多成果,但上述研究主要是针对隧道洞口段行车环境变化带来的安全问题进行分析,较少研究聚焦于长距离隧道中间段行车风险问题。20 千米级超特长隧道相比于一般隧道拥有更长的中间段,且线形条件普遍较好,在这种单调的路域环境下,驾驶人容易产生疲劳状态而危及交通安全。因此,本研究从道路线形对驾驶人特性影响的角度出发,分析识别可能具有诱发疲劳风险的路段,提出 20 千米级高速公路山岭隧道行车风险控制方法。

## 1 20 千米级高速公路山岭隧道行车风险特征分析

### 1.1 20 千米级高速公路山岭隧道线形指标特征

考虑到中国 20 千米级高速公路山岭隧道还未建成运营通车,因此收集中国西部地区若干条高速公路特长隧道基础信息,分别从直线长度、曲线半径

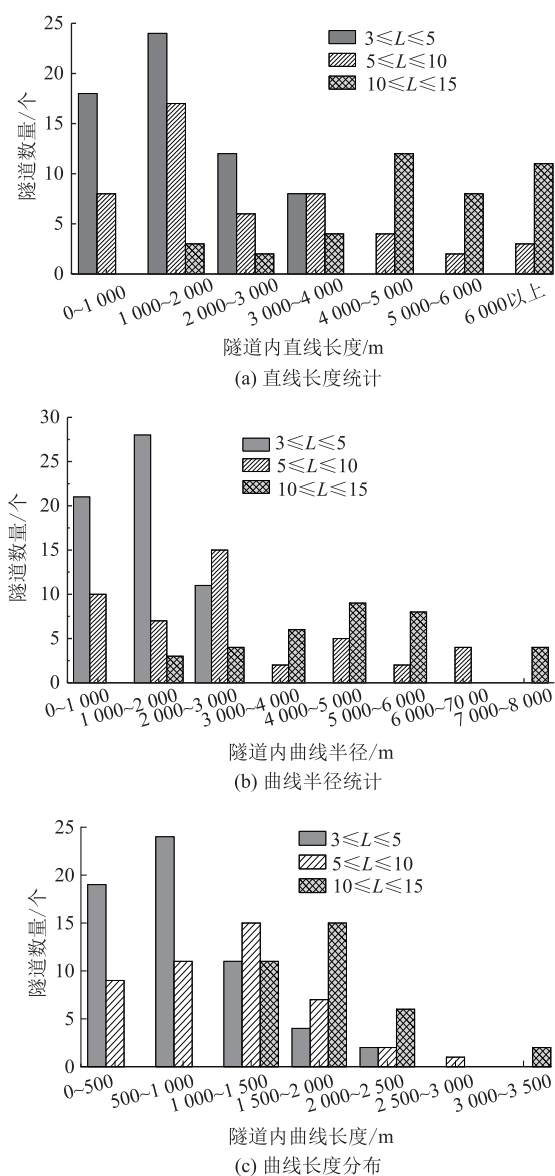


图1 特长隧道信息统计

Fig. 1 Statistics of ultra-long tunnels

及长度对3类特长隧道进行对比分析,如图1所示。图中 $L$ 为隧道长度,单位km。

通过对特长隧道的统计分析,现阶段大多数超特长隧道更倾向采用长直线、大半径的圆曲线作为隧道内的圆曲线,且隧道越长,这一特征越显著。《公路路线设计规范》(JTG D20—2017)(以下简称《规范》)建议直线的长度不宜过长。《道路勘测设计》(第6版)从国内外现状和驾驶人心理感受出发,认为在景色单调的地点直线长度不宜超过道路设计速度值的20倍。但当前实际工程中特长隧道普遍存在直线长度远超此建议值的情况,且更倾向于采用《规范》中不设超高加宽的圆曲线半径值。这一点虽然有利于特长隧道施工建设,但从行车安全角

度出发,超长直线与大半径圆曲线会给驾驶人带来相似的驾驶体验,容易导致驾驶疲劳状态产生,因而有必要进行相关研究,量化线形对驾驶疲劳状态的影响并识别可能发生的路段,通过合理的线形组合缓解驾驶人疲劳状态<sup>[15]</sup>,以保障超特长隧道中段的交通安全。

## 1.2 20千米级高速公路山岭隧道驾驶人特征

在驾驶过程中,驾驶人会受到自身与外界驾驶环境的共同影响,自身因素主要包括睡眠时长、身体素质、是否饮酒等;而隧道内由于外界驾驶环境的特殊性,对驾驶人影响较大。相关研究表明,驾驶人疲劳唤醒水平与其单调环境刺激程度紧密相关,二者存在直线正相关关系<sup>[16]</sup>。在国内外典型特长隧道建设中,主要倾向于改善道路线形与设置特殊灯光带的方法缓解驾驶人疲劳,降低事故风险<sup>[17-19]</sup>。结合第3节试验测得的驾驶人心理生理数据发现,驾驶疲劳不是即刻发生的,而是一种累积过程。在隧道出入口路段,行车环境复杂多变,驾驶人需要集中精力处理外界环境变化,而在隧道中间段,驾驶人驶离隧道洞口,有了一定的距离,对隧道环境有了一定的适应。在长直线、大半径圆曲线路段行驶,很容易获得外界环境信息,始终保持在低负荷状态,驾驶操作量逐渐下降,驾驶人注意力会进一步降低,疲劳累积也会逐渐到达临界点,从而出现反应力下降、警觉性降低、困倦等问题,易出现驾驶疲劳这一风险驾驶行为<sup>[20-21]</sup>。

## 2 20千米级高速公路山岭隧道驾驶模拟仿真试验

驾驶疲劳是20千米级山区高速特长隧道中间段行车风险的主要来源,且与直线长度、长直线后接曲线参数密切相关。据此,利用UC-win/Road软件搭建驾驶模拟场景,包括真实场景下的交通标线、检修道、灯光照明等设施的模拟;采用驾驶模拟平台进行单车试验,采集20名驾驶人在20千米级高速公路山岭隧道内不同道路条件下的心生理数据;研究驾驶人在超特长隧道内不同行车环境条件下心生理指标与线形指标的联系,通过不同线形条件下驾驶疲劳状态的变化表征行车风险大小。

### 2.1 试验路段

为更好地反映疲劳状态变化,采用驾驶模拟软件搭建长度为20 km的隧道全直路段进行试验。另外,《规范》中说明当圆曲线半径大于9 km时,视线集中的300~600 m范围内的视觉效果同直线没有区别,从长直线段驶入该路段驾驶人感受不到线形

的改变, 心生理无明显变化。结合 1.1 节中曲线参数对比分析结果, 本试验工况中直线衔接的曲线路段按照半径从 4 km 开始, 依次间隔 1 km 直至 8 km,

长度分别为 1, 2, 3 km 进行设计, 曲线前接直线长度需要通过全直路段分析结果确定 (在 3.3 节中说明), 试验路段示意如图 2 所示。

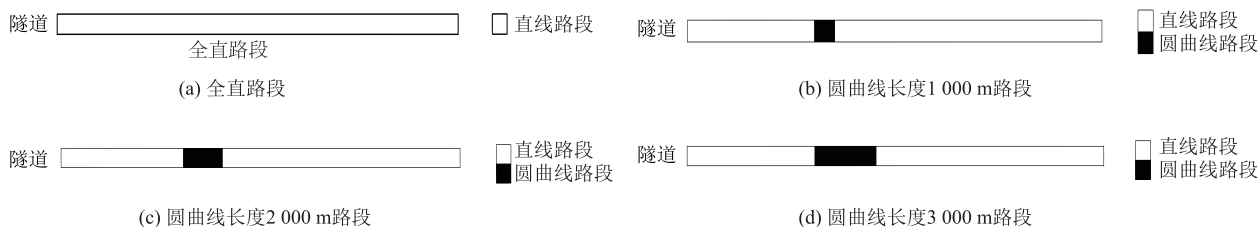


图 2 试验路段示意图 (单位: km)

Fig. 2 Schematic diagrams of test sections (unit: km)

## 2.2 试验流程

本试验共计 20 名被试人员, 在试验前, 为减小不必要的误差, 通过佩戴眼动仪及心生理仪记录被试人员 5 min 内静态生理特征指标, 并在驾驶模拟器上连续驾驶约 20 min 后通过隧道路段。试验开始后, 采集眼动仪及心生理仪的数据, 汇总收集驾驶人员的基本信息情况、心生理特征指标、眼动特征指标等各项指标数据, 并依次往复进行试验记录。

## 2.3 指标选取

国内外诸多学者已经提出了各种各样的疲劳检测方法和指标<sup>[22-23]</sup>, 其中眼动及心率指标可以较好地表征疲劳状态, 广泛应用于分析研究中, 但当前大多单独采用一种类型指标进行研究, 较少将二者结合起来进行综合考虑。由于 20 千米级高速公路山岭隧道中间段行驶时间较长且环境恶劣, 本研究选取心率增长率、眨眼持续时间、瞳孔直径 3 个经典指标, 利用多源数据进行驾驶疲劳的检测。心率增长率及眨眼持续时间的计算见式 (1) 和式 (2)。

$$N_i = \frac{n_i - \bar{n}}{\bar{n}} \times 100\%, \quad (1)$$

式中,  $N_i$  为驾驶人行车过程中某一时刻的心率增长率;  $n_i$  为驾驶人行车过程中某一时刻的心率值;  $\bar{n}$  为驾驶人静止时的平均心率。

$$\bar{T}_0 = \frac{\sum_{i=1}^{N_0} T_0^i}{N_0}, \quad (2)$$

式中,  $\bar{T}_0$  为驾驶人平均眨眼持续时间;  $T_0^i$  为驾驶人第  $i$  次眨眼持续时间;  $N_0$  为单位时间内眨眼总次数。

## 3 数据分析

### 3.1 全直路段驾驶疲劳单指标分析

以 1 km 为间隔截取整桩号前后各 5 s 的疲劳

指标数据为该桩号的驾驶人心理生理数据, 各疲劳表征指标变化如图 3 所示。

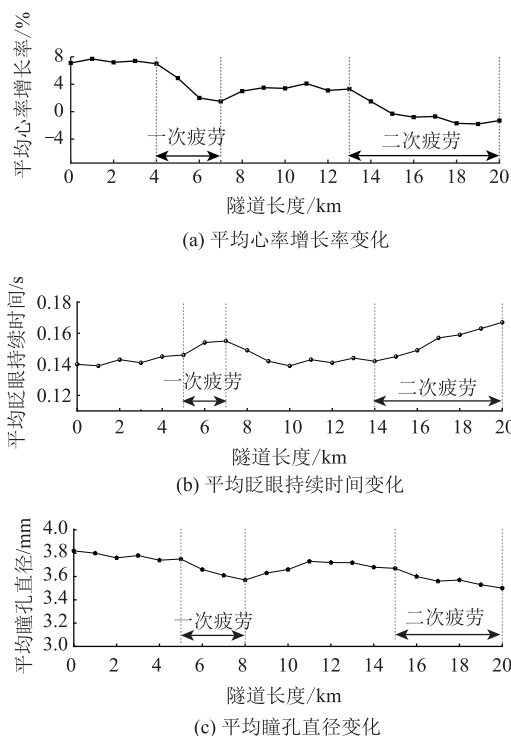


图 3 各疲劳表征指标变化

Fig. 3 Variations of various fatigue characterization indicators

不同疲劳指标随隧道直线长度增加呈现波浪形的增长或下降趋势, 在不同区段内各疲劳指标的变化表现出较大的差异性, 据此可分别提出不同的 2 类疲劳区间。以心率增长率为例, 驾驶人自驶入隧道后, 心率增长率持续缓慢下降。这说明由于单调枯燥的驾驶过程, 驾驶人警惕性降低, 整个过程心率变化平缓, 属于疲劳累积过程。经过较长时间的疲劳累积, 驾驶人出现“一次疲劳”, 心率增长率显著下降。这说明由于试验道路线形长时间不变化,



驾驶人无需进行转向等操作,快速进入疲劳状态,该过程属于“一次疲劳”区间。驾驶疲劳形成后,驾驶人意识到驾驶状态的改变,警惕性提高,驾驶人努力保持清醒状态,克服疲劳,心率增长率持续上升,疲劳程度得到缓解,但此时离隧道出口还有较长一段距离,继续长时间的单调行驶会再一次形成驾驶疲劳累积。经过较长时间疲劳累积后,驾驶人出现“二次疲劳”,心率持续缓慢下降,驾驶疲劳加重,该过程属于“二次疲劳”区间。

### 3.2 隧道直线长度行车风险分析

为进一步分析各个表征指标与驾驶疲劳程度的相互关系,本研究首先将驾驶疲劳程度分为清醒、中度疲劳、重度疲劳这3类。采用卡罗兰斯卡嗜睡量表对被试人员的试验数据进行主观的疲劳程度评价,结合心生理指标与眼动指标,对驾驶疲劳程度进行判定。将各组数据通过K-means聚类分析,确定隧道直线路段各个指标在3个疲劳等级的阈值范围,初步判定驾驶人的疲劳状态,如表1所示。3个疲劳指标可以较好地表征驾驶疲劳的变化,但由于不同指标的表征程度不一,无法准确地获取不同直线长度驾驶疲劳程度的差异性。因而本研究结合模糊领域相关理论,采用模糊综合评价方法对不同长度直线驾驶疲劳程度进行判定,得出不同长度直线的驾驶疲劳指数。

表1 驾驶疲劳度量指标阈值

Table 1 Driving fatigue metric threshold

| 度量指标       | 清醒          | 中度疲劳        | 重度疲劳        |
|------------|-------------|-------------|-------------|
| 平均心率增长率/%  | 5.156~7.70  | 0.965~5.156 | -1.30~0.965 |
| 平均眨眼持续时间/s | 0.139~0.145 | 0.145~0.155 | 0.155~0.167 |
| 平均瞳孔直径/mm  | 3.71~3.82   | 3.60~3.71   | 3.47~3.60   |

根据模糊数学理论,假定驾驶疲劳程度判定结果位于(0,1)区间,其中0表示驾驶员处在完全清醒的状态;1表示驾驶人处在睡眠状态;0~1之间的某个数值表示驾驶人处于某种疲劳状态。结合3.1节中疲劳表征指标分析结果和相关驾驶疲劳研究成果,初步确定3种驾驶疲劳等级对应的取值范围,如表2所示。

表2 疲劳等级取值范围

Table 2 Fatigue level range

| 疲劳等级 | 清醒    | 中度疲劳    | 重度疲劳     |
|------|-------|---------|----------|
| 取值范围 | 0~0.4 | 0.4~0.8 | 0.81~1.0 |
| 平均值  | 0.2   | 0.6     | 0.9      |

在划分疲劳等级取值范围的基础上,判定驾驶疲劳程度的因素集为:

$$U = \{u_1, u_2, u_3\}, \quad (4)$$

式中, $u_1$ 为平均心率增长率; $u_2$ 为平均眨眼时间; $u_3$ 为平均瞳孔直径。

基于疲劳等级取值范围和因素集,确定判定驾驶疲劳程度的评语集为:

$$V = \{v_1, v_2, v_3\}, \quad (4)$$

式中, $v_1$ 为清醒状态; $v_2$ 为中度疲劳状态; $v_3$ 为重度疲劳状态。

进一步分析各个指标表征驾驶疲劳状态的可靠性。参照层次分析法对各个指标的重要程度进行对比,确定各个指标的权重并得到因素集的权重向量为: $A = (a_1, a_2, a_3) = (0.547, 0.291, 0.162)$ , (5) 式中, $a_1, a_2, a_3$ 分别为平均心率增长率、平均眨眼持续时间、平均瞳孔直径指标的权重。

构建各个表征指标的隶属度矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $r_{ij}$ 为第 $i$ 个表征指标对第 $j$ 个评语的隶属度。根据各个疲劳表征指标在不同驾驶疲劳等级的阈值范围,确定各个疲劳表征指标对应的不同评语,即不同驾驶疲劳等级的隶属度。当数值位于对应评语的阈值范围时, $r_{ij}=1$ ,否则 $r_{ij}=0$ 。

根据隶属度矩阵,得出驾驶疲劳程度的模糊综合评价结果为:

$$B = A \times R = (a_1, a_2, a_3) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, b_3), \quad (7)$$

式中 $b_1, b_2, b_3$ 分别为平均心率增长率、平均眨眼持续时间、平均瞳孔直径指标模糊合成值。

再根据表2选取各类疲劳状态取值范围的平均值作为分值向量为:

$$W = (w_1, w_2, w_3)^T = (0.2, 0.6, 0.9)^T. \quad (8)$$

最后可得出基于模糊综合评价的不同直线长度的疲劳指数计算模型为:

$$F = W \times B = (w_1, w_2, w_3)^T \times (b_1, b_2, b_3). \quad (9)$$

式中, $b_1, b_2, b_3$ 分别为平均心率增长率,平均眨眼持续时间,平均瞳孔直径指标模糊合成值。

采用建立的驾驶疲劳评价模型对不同桩号样本数据的驾驶疲劳指数进行计算,进行非线性拟合,拟合方程见式(10),不同长度直线下驾驶疲劳指数变化如图4所示。

$$F = \frac{0.033 - 0.052L^{0.5} + 0.046L - 0.017L^{1.5} + 0.002L^2}{1 - 1.237L^{0.5} + 0.584L - 0.124L^{1.5} + 0.010L^2},$$

(10)

式中,  $F$  为驾驶疲劳指数;  $L$  为隧道内直线长度。

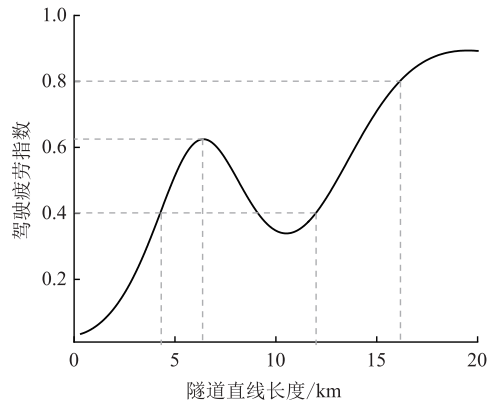


图 4 不同长度直线下驾驶疲劳指数变化  
Fig. 4 Driving fatigue indicator variation with different straight line lengths

由图 4 可知, 行车过程中疲劳累积呈梯度上升。第 1 段疲劳累积到一定程度后, 在身体机能的调节下, 驾驶员的疲劳能得到一定程度的缓解; 再开始第 2 段疲劳的累积, 然后再缓解, 依次循环直至达到人体疲劳极限。根据驾驶疲劳度指数分级及驾曲线拐点可得出隧道直线路段长度阈值为 4.3, 6.4, 12.0, 16.1 km, 据此对隧道直线长度划分为低、较低、中、较高和高 5 个风险等级, 可对不同长度直线路段行车风险进行评价, 如表 3 所示。出于保守考虑, 当直线长度风险等级处于低和较低时, 驾驶人能以较好的状态进行驾驶任务, 因此 20 千米级高速公路山岭隧道最大直线长度不宜超过 6.4 km。

表 3 基于驾驶疲劳的隧道直线长度风险评价  
(单位: km)

| Table 3 Tunnel straight line length risk assessment based on driving fatigue (unit: km) |                    |                    |                     |                      |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|----------------------|------------|
| 风险等级                                                                                    | 低                  | 较低                 | 中                   | 较高                   | 高          |
| 直线长度                                                                                    | $L^* < L \leq 4.3$ | $4.3 < L \leq 6.4$ | $6.4 < L \leq 12.0$ | $12.0 < L \leq 16.1$ | $16.1 < L$ |

注:  $L^*$  为《规范》最小值。

3.3 长直线插入曲线疲劳指标对比

根据 3.2 节可知, 驾驶人在 20 km 全直隧道路段上行驶时会产生驾驶疲劳, 且不同区间内驾驶疲劳状态不同。基于行车安全角度考虑, 需尽量提早避免驾驶疲劳的产生, 通过改变道路线形以缓解驾驶疲劳。为直观体现道路线形改变对驾驶人心理生理的影响且方便数据处理, 试验设计在隧道全直路段

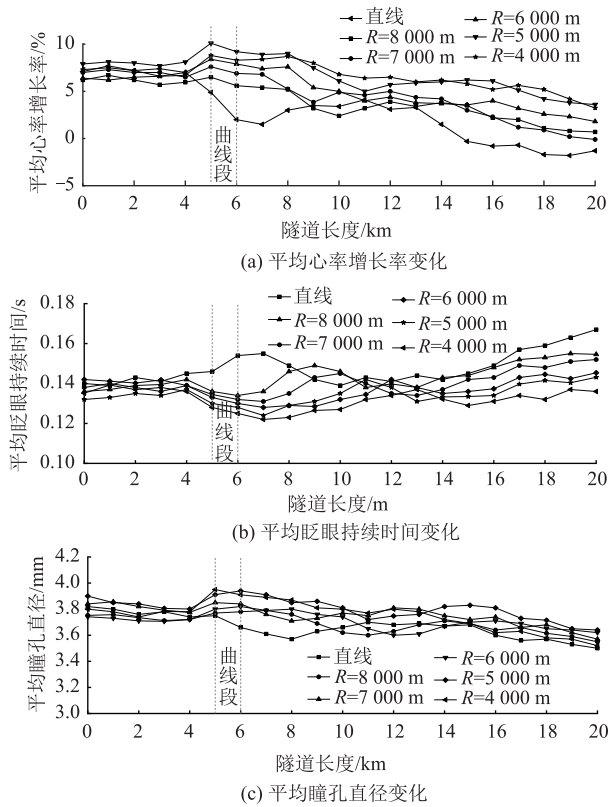


图 5 1 km 路段不同曲线半径疲劳表征指标变化  
Fig. 5 Variations of fatigue characterization indicators with different curve radii on 1 km section

桩号 K5+000 处插入不同参数圆曲线, 进行驾驶模拟试验, 以 1 km 为间隔截取整值桩号前后各 5 s 的疲劳指标数据为该桩号的驾驶人心理生理数据, 不同曲线半径疲劳表征指标变化如图 5 所示, 图中  $R$  为曲线路程半径。

同全直路段相比, 由于插入了圆曲线, 在本该形成驾驶疲劳的全直区间内, 驾驶人感知到了道路线形发生变化, 驾驶疲劳得到了缓解, 同时说明插入的曲线半径小于 8 km 时, 均能在不同程度上起到疲劳缓解的作用。驾驶人驶离曲线段进入直线段后又逐渐进入“疲劳累积—疲劳形成—疲劳缓解—疲劳累积—疲劳加剧”的疲劳演变过程, 但长直线插入的曲线参数不一, 驾驶人重新进入直线段后指标变化程度也不一样。以曲线段前后 500 m 驾驶人心理生理数据增量、眨眼持续时间增量、瞳孔直径增量来分析长直线插入不同参数曲线对疲劳的缓解程度, 如图 6 所示。

由图 6 可知, 随着插入曲线半径值的增大, 心率增长率、眨眼持续时间、瞳孔直径分别显著地减小或增大。这说明当长直线插入的圆曲线半径值较大时, 道路线形曲率变化不显著, 驾驶人感知不强烈, 即使在曲线段能起到一定的缓解疲劳作用, 但

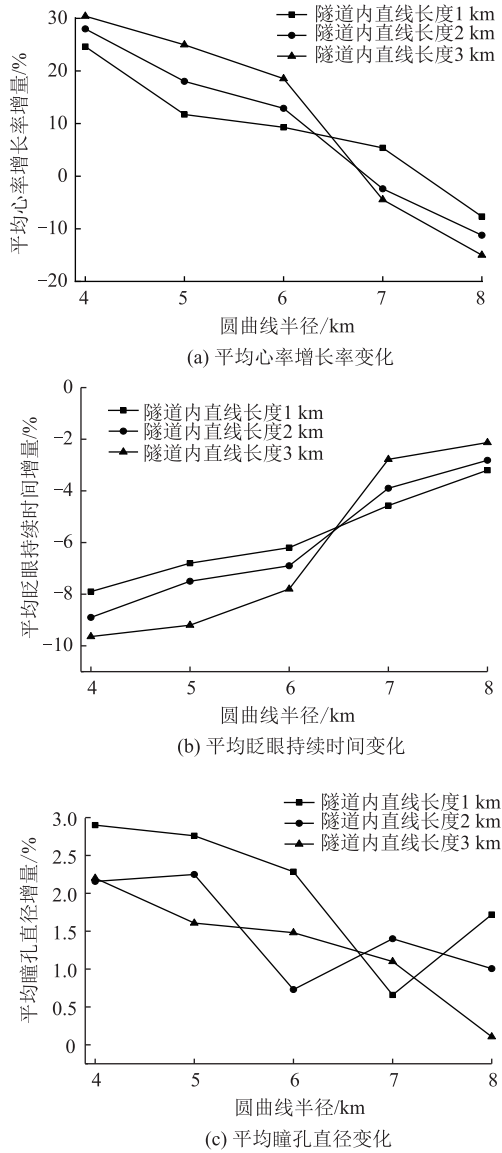


图6 不同曲线参数疲劳缓解指标变化

Fig. 6 Variations of fatigue relief indicators with different curve parameters

并不显著,驶离曲线路段后驾驶人又会较快地产生驾驶疲劳。当圆曲线半径值较小时,驾驶人对道路线形变化的感知较为强烈,疲劳缓解效果较为明显,即使驶离曲线路段后,驾驶人仍能保持较好的“唤醒”状态。插入不同长度曲线的驾驶人心理数据随曲线半径表现出一定的聚类性,以心率增长率为例,曲线半径较小时,随着曲线长度增加,驾驶人速率增长量增加;曲线半径较大时,随着曲线长度增加,驾驶人速率增长量减小。这说明长直线插入的圆曲线半径较小时,疲劳缓解效果较为显著,在此类路段行驶时间越长,疲劳程度下降越快;长直线插入的圆曲线半径较大时,在此类路段行驶时间越长,疲劳唤醒效果反而越差。

### 3.4 长直线后接曲线参数行车风险分析

根据3.3节分析,心率增长率、眨眼持续时间、瞳孔直径均能不同程度地反映长直线插入不同参数曲线路段的驾驶疲劳缓解程度,分别同疲劳缓解程度呈现正、负、正相关关系。与心率增长率和眨眼持续时间相比,不同参数曲线路段的瞳孔直径值表现出一定的随机性,因此后续分析不再讨论该指标。考虑到心率增长率与眨眼持续时间表征驾驶疲劳缓解程度的相互关系并不清晰,难以确定各指标的权重。本研究采用统计学方法确定不同表征指标的阈值来反映驾驶疲劳缓解程度的优劣,通过3.3节不同参数曲线的心率增长率和眨眼持续时间值,绘制驾驶人速率增长率与眨眼持续时间累计频率分布如图7所示。

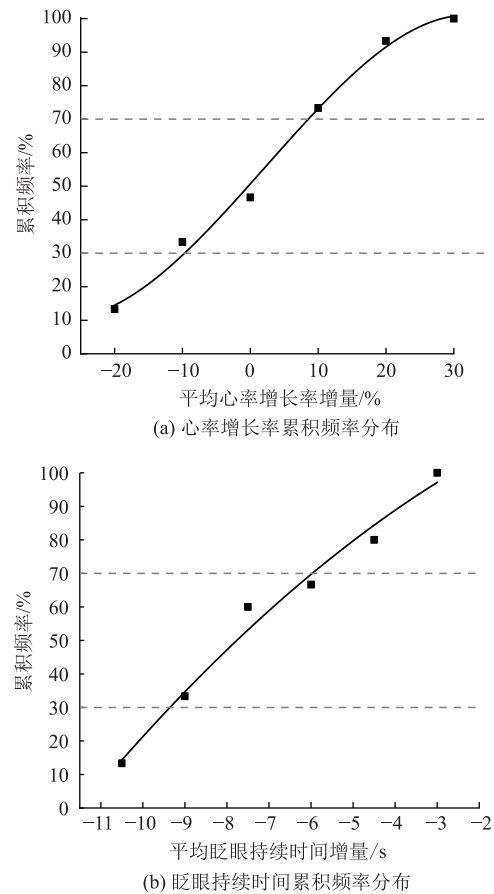


图7 驾驶人速率增长率与眨眼持续时间累计频率分布  
Fig. 7 Cumulative frequency distribution of drivers' heart rate growth rate and blink duration

根据统计学原理,分别选取心率增长率和眨眼持续时间的30%和70%分位数作为划分阈值,对驾驶疲劳缓解程度优劣进行划分。结合3.3节的分析,插入的曲线半径和长度共同影响心率增长率和眨眼持续时间的变化。总体上表现为:插入的曲线半径



越小,越有利于驾驶疲劳的缓解;当插入的曲线半径较小时,随着曲线长度增大,心率增长率值越大,眨眼持续时间越小,驾驶疲劳缓解效果越好;当插入的曲线半径较大时,随着曲线长度减小,心率增长率越小,眨眼持续时间越大,驾驶疲劳缓解效果越差,且造成上述不同指标变化的半径临界点均位于 6 000~7 000 m 范围内。这说明曲线半径值是影响驾驶疲劳缓解的关键性控制指标,对疲劳缓解的影响显著,曲线长度变化对疲劳的影响微弱,且随着曲线半径变化会表现出不同的影响效果。因此本研究需要进一步研究曲线半径与不同指标值的量化关系,提出有利于驾驶疲劳缓解的半径区间,而对曲

$$H = \frac{33 - 4.532R - 0.679\ln L}{1 - 0.073R - 0.223\ln L + 0.001(\ln L)^2},$$

(11)

$$T = \frac{-2.302 + 4.903\ln R - 3.205(\ln R)^2 + 0.673(\ln R)^3 - 0.043\ln L}{1 - 1.937\ln R + 1.217(\ln R)^2 - 0.252(\ln R)^3 + 0.008\ln L},$$

(12)

式中, $H$ 为驾驶人平均心率增长率增量; $R$ 为插入的圆曲线半径; $L$ 为插入的圆曲线长度; $T$ 为驾驶人平均眨眼持续时间增量。

综上,长直线插入圆曲线路段的曲线半径是影响驾驶疲劳缓解程度的关键控制指标,且插入的曲线半径越小,越有利于驾驶疲劳的缓解。基于疲劳缓解表征指标心率增长率和眨眼持续时间不同分位数阈值,可将插入的圆曲线半径划分为低、较低、中、较高、高 5 个等级。据此可对直线后接曲线路段行车风险进行评价,如表 4 所示。出于保守考虑,当曲线半径风险等级处于低和较低时,驾驶人能以较好的状态完成驾驶任务,即在长度 5 km 直线后接曲线半径小于 6 km 的圆曲线半径,行车风险较低,有利于行车安全,以此作为圆曲线最大半径推荐值。因此建议 20 千米级高速公路山岭隧道最大曲线半径不宜超过 6 km。

表 4 基于疲劳缓解的隧道曲线半径风险评价 (单位: km)

| Table 4 Tunnel curve radius risk assessment based on fatigue mitigation (unit: km) |                    |                    |                    |                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-----------|
| 风险等级                                                                               | 低                  | 较低                 | 中                  | 较高                 | 高         |
| 曲线半径                                                                               | $R^* < R \leq 5.6$ | $5.6 < R \leq 6.0$ | $6.0 < R \leq 6.4$ | $6.4 < R \leq 7.5$ | $7.5 < R$ |

注:  $R^*$  为《规范》最小值。

4 实例应用

基于第 3 节得到的在超特长隧道中驾驶疲劳风险量化指标体系,利用天山胜利隧道基础信息进行实例应用。天山胜利隧道全长为 22.105 km,技术标

线长度不再进行进一步的量化分析。取半径区间中值,即半径 6.5 km 为划分阈值,区分曲线长度在不同半径区间对疲劳缓解的效果,在后续研究曲线半径对驾驶疲劳缓解程度的影响,取曲线长度为 2.0 km 进行分析。

对各工况下不同参数曲线的心率增长率和眨眼持续时间进行多因素非线性回归,确定出心率增长率和眨眼持续时间的回归模型,如式 (11) 和式 (12) 所示。根据提出的心率增长率阈值分别截取剖面,取整后可得曲线半径阈值为 6.0 km 和 7.5 km。对提出的眨眼持续时间阈值分别截取剖面,取整后可得曲线半径阈值为 5.6 km 和 6.4 km。

准按设计速度为 100 km/h 的双向四车道高速公路设计。提取隧道内相关线元参数,首先根据《公路项目安全性评价规范》(JTG B05—2015)对隧道中间段道路平面线形进行检查,再结合 20 千米级高速公路山岭隧道指标阈值与行车风险度进行核查。筛选出天山胜利隧道评价路段范围内存在的 6 处长直线,根据规范要求及行车风险度划分阈值,直线长度安全性评价结果如表 5 所示。存在 6 处长直线路段超过了直线长度 20V (即 2 km) 的建议值,其中第 1 处和第 4 处路段的行车风险度为“中”,另外 4 处行车风险度均较低。

表 5 天山胜利隧道直线长度安全性评价 (单位: km)

| Table 5 Straight line length safety evaluation for Shengli tunnel in Tianshan mountain (unit: km) |       |      |      |      |      |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|------|------|------|------|
| 序号                                                                                                | 直线长度  | 规范阈值 | 规范对比 | 风险阈值 | 风险对比 | 行车风险 |
| 1                                                                                                 | 6.640 | 2.0  | 不满足  | 6.4  | 不满足  | 中    |
| 2                                                                                                 | 6.291 | 2.0  | 不满足  | 6.4  | 满足   | 较低   |
| 3                                                                                                 | 3.112 | 2.0  | 不满足  | 6.4  | 满足   | 低    |
| 4                                                                                                 | 6.710 | 2.0  | 不满足  | 6.4  | 不满足  | 中    |
| 5                                                                                                 | 6.291 | 2.0  | 不满足  | 6.4  | 满足   | 较低   |
| 6                                                                                                 | 2.885 | 2.0  | 不满足  | 6.4  | 满足   | 低    |

《规范》的最大直线长度要求是根据一般路段线形特点及行车条件进行约束的,未充分结合 20 千米级高速公路山岭隧道的道路设计特点及行车环境,对本研究的应用场景适用性较差,需要结合风险阈值做进一步判断。根据 3.1 节的研究,虽然直线长度大于《规范》要求的最大直线长度,但基于风险阈值的评价结果为低风险时,驾驶人仍能保持正常状态行驶。



天山胜利隧道中共存在6处不设超高的圆曲线,具体如表6所示。根据《规范》要求及行车风险度评价结果,6处曲线路段均满足规范要求最小值,但不满足风险要求的最大值。进一步分析发现,6处曲线半径值均位于6 000 m附近,与风险要求的最大值相差不大,且上述路段行车风险均较低,驾驶人能以较为舒适的状态完成驾驶任务。

表6 天山胜利隧道曲线半径安全性评价(单位:km)

Table 6 Curve radius safety evaluation for Shengli tunnel in Tianshan mountain (unit: km)

| 序号 | 圆曲线半径 | 规范阈值 | 规范对比 | 风险阈值 | 风险对比 | 行车风险 |
|----|-------|------|------|------|------|------|
| 1  | 6.055 | 4    | 满足   | 6    | 满足   | 较低   |
| 2  | 6.0   | 4    | 满足   | 6    | 满足   | 较低   |
| 3  | 6.0   | 4    | 满足   | 6    | 满足   | 较低   |
| 4  | 6.0   | 4    | 满足   | 6    | 满足   | 较低   |
| 5  | 6.0   | 4    | 满足   | 6    | 满足   | 较低   |
| 6  | 6.055 | 4    | 满足   | 6    | 满足   | 较低   |

综合上述分析,天山胜利隧道不存在不良线形路段,但在隧道内第1和第4处直线路段为中风险路段,驾驶人在该路段受外界环境刺激小,疲劳状态不断累积。为了缓解疲劳变化,增强操控负荷,可在长直线内增加半径小于6 km的曲线设计以提高驾驶人注意力。当只能插入大半径曲线,或因条件受限而无法改善道路线形时,可采用其他措施辅助缓解疲劳。一方面可在隧道内风险路段位置设置适当长度的景观灯光带,提高驾驶人视觉负荷,缓解驾驶人疲劳;另一方面也可在风险路段继续增加对驾驶人的感官刺激,以进一步降低行车风险,具体可采取如下措施。

(1) 在隧道内可能的风险路段中间位置设置疲劳警告标志,版面应满足《公路交通安全设施设计规范》(JTG D81—2017)对警告标志的要求。

(2) 在道路两侧车道边缘线设置震动标线,当驾驶人产生驾驶疲劳而致使车辆偏离车道时,车辆会产生震动而提醒驾驶人,降低行车风险。

(3) 隧道内可以设置较为醒目的白色反光环,既可以刺激驾驶人的视觉系统缓解疲劳状态,也可以引导驾驶人视线以增强驾驶人对距离的把控。对于长直线风险路段,可以每间隔1 km设置2处彩色环状轮廓带,结合条形轮廓带和多点轮廓带形成韵律型隧道轮廓带,以缓解驾驶疲劳。

(4) 相关研究表明基于时间和频率变化的声音可以减小驾驶员的困倦和疲劳<sup>[24]</sup>。据此可在长直线

风险路段中部设置疲劳唤醒区。利用多组不同频率、不同持续时间的音频设备,结合LED灯、交通标志等对过往的驾驶人听觉系统进行刺激,以唤醒驾驶人。为避免声音突兀影响驾驶人正常行驶,可采用常见的音频渐进设置,并在唤醒区前设置警告标志。

## 5 结论与讨论

(1) 本研究统计分析了中国多条已建成特长隧道的线形特征,明确了驾驶疲劳是20千米级山区高速特长隧道中间段行车风险的主要来源。通过驾驶模拟仿真试验,发现直线长度和圆曲线半径是隧道中间段影响疲劳的关键性指标。调整直线长度、曲线半径或长直线后接合适半径的圆曲线可以显著改善驾驶人疲劳状态,而调整曲线长度对驾驶人疲劳影响较小。基于试验所构建的直线与圆曲线路段疲劳度模型可以较好量化并识别超长隧道中间段潜在疲劳风险路段,在设计运营阶段为改善隧道内道路线形与环境提供理论依据。

(2) 基于20千米级特长隧道全直路段驾驶仿真试验,通过K-means聚类分析确定了平均心率增长率、平均眨眼持续时间、平均瞳孔直径3个心理生理指标的阈值范围,结合模糊综合评价法构建了超长隧道中间段直线路段驾驶疲劳度指数模型。通过分析疲劳曲线拐点,将20千米级特长隧道直线路段行车风险等级划分为低、较低、中、较高、高。各等级相对应的直线长度阈值分别为对应规范最小值、4.3, 6.4, 12.0, 16.1 km。同时基于行车安全角度考虑,提出最大直线长度不宜超过6.4 km。

(3) 通过将长直线插入不同参数圆曲线进行仿真试验,利用统计学方法确定平均心率增长率和平均眨眼持续时间这2个心理生理指标的阈值范围,结合多因素非线性回归模型量化了超长隧道中间段圆曲线路段的驾驶疲劳指数模型。通过分析心理生理指标变化趋势,将20千米级特长隧道曲线路段行车风险等级划分为低、较低、中、较高、高。各等级相对应的曲线半径阈值分别为对应规范最小值、5.6, 6.0, 6.4, 7.5 km。可通过在长直线中插入合适半径圆曲线来实现对20千米级山区高速特长隧道行车风险的控制,并出于行车安全角度考虑,提出最大曲线半径不宜大于6.0 km。

(4) 针对天山胜利隧道内存在可能疲劳风险路段,建议在增设疲劳警告标志和道路两侧振荡标线的常规交通安全设施外,还可增设景观灯光带、反光环和疲劳唤醒区等特殊交通安全设施缓

解驾驶人疲劳,引导驾驶人安全驾驶,对今后进一步提高超特长隧道行车安全措施有一定的参考价值。另外,基于本研究所提供的20千米级高速公路山岭隧道行车风险控制方法,可以较好地识别出隧道内具有疲劳风险的路段,为特殊灯光带的设置提供依据,其具体设置位置及长度有待进一步研究讨论。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 刘继国,崔庆龙,李丹妮,等.截至2023年底中国10 km以上特长公路隧道统计与分析[J].隧道建设(中英文),2024,44(1):189-198.  
LIU Jiguo, CUI Qinglong, LI Danni, et al. Statistics and analysis of super-long highway tunnels over 10 km in China by the end of 2023 [J]. Tunnel Construction, 2024, 44 (1): 189-198.
- [2] 刘松荣,谢晓辉,丁浩,等.隧道内事故数据统计与分析研究[J].现代隧道技术,2022,59(增1):691-697.  
LIU Songrong, XIE Xiaohui, DING Hao, et al. Statistics and analysis on tunnel accident data [J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59 (S1): 691-697.
- [3] 白建营,王不凡,夏杨于雨.公路隧道运营典型风险辨识[J].隧道建设,2019,39(增1):471-477.  
BAI Jianying, WANG Bufan, XIA Yangyuyu. Typical risk identification of highway tunnel operation [J]. Tunnel Construction, 2019, 39 (S1): 471-477.
- [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,2017,37(1):37-42.  
LAI Jinxing, ZHANG Peng, ZHOU Hui, et al. Study of rules of traffic accidents in expressway tunnels [J]. Tunnel Construction, 2017, 37 (1): 37-42.
- [5] DOMENICHINI L, LA TORRE F, VANGI D, et al. Influence of the lighting system on the driver's behavior in road tunnels: A driving simulator study [J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2017, 9 (2): 216-238.
- [6] 梁波,秦杨,张红杰,等.高速公路隧道接近段视错觉控速标线信息感知研究[J].公路交通科技,2024,41(4):146-156.  
LIANG Bo, QIN Yang, ZHANG Hongjie, et al. Study on information perception of visual illusion speed control marking in approach section of expressway tunnel [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2024, 41 (4): 146-156.
- [7] 万利,王虹婷,张长安,等.高速公路隧道侧向宽度对大型车驾驶负荷的影响[J].公路交通科技,2022,39(9):169-176.  
WAN li, WANG Hongting, ZHANG Chang'an, et al. Influence of lateral width of expressway tunnel on driving load of large vehicle [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2022, 39 (9): 169-176.
- [8] 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 & Prevention, 2007, 39 (1): 69-78.
- [9] PEÑA-GARCÍA A. The impact of lighting on drivers well-being and safety in very long underground roads: New challenges for new infrastructures [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 80: 38-43.
- [10] 胡月琦.高速公路隧道路段驾驶人心理游移及心理负荷与安全风险研究[D].西安:长安大学,2021.  
HU Yueqi. Research on driver's mental wandering and psychological load and safety risk in highway tunnel sections [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.
- [11] WANG S S, DU Z G, JIAO F T, et al. Impact of urban undersea tunnel longitudinal slope on the visual characteristics of drivers [J/OL]. Journal of advanced transportation, 2020. (2020-12-03) [2024-03-01]. <https://doi.org/10.1155/2020/2576769>.
- [12] 田晶晶,李世武,孙文财,等.高速公路隧道环境对驾驶人视觉特性的影响[J].长安大学学报(自然科学版),2015,35(增1):216-221.  
TIAN Jingjing, LI Shiwu, SUN Wencai, et al. Effects of freeway tunnel on driver's visual characteristics [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35 (S1): 216-221.
- [13] 胡顺峰.山区高速公路隧道群交通事故特征及成因机理分析[J].公路,2016,61(5):134-138.  
HU Shunfeng. Traffic accident characteristics and mechanism analysis of mountain highway tunnel group [J]. Highway, 2016, 61 (5): 134-138.
- [14] 潘福全,杨敬洲,张丽霞,等.海底隧道平纵线形对驾驶人视觉特征及车速的影响[J].交通信息与安全,2023,41(2):50-58.  
PAN Fuquan, YANG Jingzhou, ZHANG Lixia, et al. Influence of horizontal and vertical alignments of undersea tunnel on driver's visual characteristics and vehicle speed [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2023, 41 (2): 50-58.
- [15] FARAHMAND B, BOROUJERDIAN A M. Effect of road geometry on driver fatigue in monotonous environments: A

- simulator study [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2018, 58: 640-651.
- [16] 谢晓莉. 驾驶疲劳生成机理研究 [D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- XIE Xiaoli. Research on the mechanism of driving fatigue [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010.
- [17] 秦鹏程, 王明年, 包逸帆, 等. 公路隧道疲劳缓解灯光带对驾驶员眼动特征影响研究 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58 (1): 197-202.
- QIN Pengcheng, WANG Mingnian, BAO Yifan, et al. Study on drivers' eye movement characteristics affected by the fatigue mitigation light belt in highway tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2021, 58 (1): 197-202.
- [18] KVAALE J, LOTSBERG G. Measures against Monotony and Phobia in the 24.5 km long Laerdal tunnel in Norway [C] // Proceedings of Symposium on Strait Crossings. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [19] 张震, 独大勇. 秦岭终南山隧道中“蓝天白云”的灯光设计 [J]. 照明工程学报, 2007, 18 (1): 41-44.
- ZHANG Zhen, DU Dayong. Blue sky and white cloud lighting design of Qinling Zhongnanshan Mountain tunnel [J]. China Illuminating Engineering Journal, 2007, 18 (1): 41-44.
- [20] 倪娜, 杨少伟, 潘兵宏, 等. 终南山公路隧道交通事故特征及预防措施研究 [J]. 现代隧道技术, 2018, 55 (4): 25-32.
- NI Na, YANG Shaowei, PAN Binghong, et al. Traffic accident characteristics and prevention measures for the Zhongnanshan highway tunnel [J]. Modern Tunnelling Technology, 2018, 55 (4): 25-32.
- [21] 秦鹏程, 王明年, 包逸帆, 等. 超特长公路隧道驾驶疲劳致因及检测技术进展 [J]. 现代隧道技术, 2019, 56 (增2): 28-35.
- QIN Pengcheng, WANG Mingnian, BAO Yifan, et al. Causes of driving fatigue and progress in driving fatigue detection technology in extra-long highway tunnels [J]. Modern Tunnelling Technology, 2019, 56 (S2): 28-35.
- [22] DU G L, LI T, LI C Q, et al. Vision-based fatigue driving recognition method integrating heart rate and facial features [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22 (5): 3089-3100.
- [23] 马勇, 付锐. 驾驶人视觉特性与行车安全研究进展 [J]. 中国公路学报, 2015, 28 (6): 82-94.
- MA Yong, FU Rui. Research and development of drivers visual behavior and driving safety [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28 (6): 82-94.
- [24] 陈程. 基于驾驶仿真的高速催眠研究 [D]. 南京: 东南大学, 2016.
- CHEN Cheng. Research on high-speed hypnosis based on driving simulation [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.