

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.06.006

## 团雾环境下驾驶员视觉特征与交通参数关系研究\*

周帅<sup>1,2</sup>, 张萌<sup>1,2</sup>, 娄胜利<sup>3</sup>, 安静方<sup>1,2</sup>, 丁亮<sup>4</sup>(1.山东交通学院 交通与物流工程学院, 山东 济南 250357; 2.山东省智慧交通重点实验室, 山东 济南 250357;  
3.象谱信息产业有限公司, 山东 济南 250101; 4.济南市交通运输综合行政执法支队, 山东 济南 250014)

**摘要:** 研究不同能见度团雾环境下驾驶员视觉特征与交通参数的关系,从驾驶员心理、生理角度分析交通风险点,为交通事故主动预防、提升团雾环境下交通本质安全提供理论依据。通过搭建不同能见度团雾环境下跟车和自由流仿真场景,采集驾驶员视觉特征与交通参数数据,分析瞳孔面积变化率与车辆速度、加速度等交通参数的关系,构建驾驶员在不同能见度团雾环境下视觉特征与交通参数关系模型,分析不同能见度团雾环境及不同交通状态下交通风险点。结果表明,团雾环境中驾驶员瞳孔面积变化率与速度、加速度存在相关性,跟驰状态下瞳孔面积变化率与速度、加速度呈负相关,自由流状态下瞳孔面积变化率与速度呈负相关、与加速度呈强相关。

**关键词:** 交通安全;视觉特征;交通流参数;瞳孔面积变化率;驾驶行为;团雾环境

中图分类号:U491.254

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2023)06-0033-05

近几年交通事故发生频率逐渐升高,国内外学者围绕道路交通事故成因开展研究。文献[1-5]从道路环境、道路线形、驾驶员、行车环境和车辆类型等方面分析了影响道路交通安全的因素。文献[6-9]研究发现团雾具有局地性、突发性强、能见度阶跃性变化和影响范围不确定等特征,对高速公路交通安全影响极大。但目前对团雾天气下交通安全的研究集中在团雾质量分数检测和风险概率测算。文献[10-11]利用道路视频监控设备对道路上团雾和能见度进行了检测。文献[12-13]分别利用 Koschmieder模型和视觉信息控制补偿模型,从团雾风险等级及发生概率、视觉诱导等角度分析了高速路段行车风险概率。文献[14]模拟雾天条件对驾驶行为的影响,认为团雾环境下能见度阶跃性降低会加剧驾驶员动视觉的突发性刺激,诱发驾驶员心理紧张、生理荷载和驾驶操作失误,引发交通事故。但目前对视觉特征与驾驶员生理、心理的研究集中在不同交通场景下驾驶员的视觉特征和路侧环境、驾驶任务的相关关系分析。文献[15-17]分析了环境光照度持续变化情况下视觉短暂适应、驾驶人对交通信号灯变化的反应时间、行车过程中使用手机等对驾驶员视觉特征的影响。文献[18-20]利用瞳孔面积等视觉特征,分析了道路景观、隧道群环境光

照度等参数与驾驶员生理、心理状态的相关关系。驾驶员在遇到团雾天气时心理紧张,导致驾驶负荷加重,容易产生疲劳等反应。利用团雾环境下驾驶员视觉特征表征驾驶员生理、心理,探究驾驶员生理、心理与交通参数的关系,对保障驾驶员生命和财产安全具有重要现实意义。本文通过模拟驾驶试验采集驾驶员在进入团雾的过程中的眼动特征数据及交通参数数据,构建驾驶员视觉特征与交通参数关系模型,分析驾驶员心理状态与交通流的关系,为预防团雾环境下交通事故发生、保障行车安全及研究驾驶员的不安全驾驶行为提供理论依据。

## 1 驾驶模拟试验设计与数据处理

### 1.1 驾驶模拟试验设计

采用 ANSYS 自动驾驶仿真系统验证平台,该平台包括试验车辆、影音设备、控制系统和投影装置,集成了各种道路状况、交通状况、天气环境、车辆动力学等内容,可根据不同目标要求进行试验。考虑到个体差异,选取 10 名驾驶员作为试验对象,包括男性驾驶员 5 名、女性驾驶员 5 名,驾龄为 2~13 年,身体健康且具有雾天高速公路驾驶经验。模拟试验过程中,平台以 20 Hz 的频率采集车辆实时运行数据,使用 Tobii Glasses 2 便携式眼动仪以

\* 基金项目: 全国统计科学研究项目(2021LY017); 山东省交通运输厅科技计划项目(2021B09; 2022B07); 智能系统与装备(先进车辆、机器人系统)创新团队(SDJTUC180)

50 Hz 的频率采集驾驶人在试验路段往返行车过程中的视觉特征数据。

模拟试验路段为济南国际机场高速公路中的一段,长 2 km,设计速度 120 km/h,双向六车道,车道宽度 3.75 m,设置有护栏、行道树和道路标志等设施。该路段分为入雾无雾区(0~500 m)、团雾区( $\geq 500 \sim 1\ 500$  m)、出雾无雾区( $\geq 1\ 500 \sim 2\ 000$  m)。设置 75 m、100 m、125 m、150 m、175 m、200 m 6 种能见度水平的团雾场景。

驾驶员从入雾无雾区出发,在 500 m 处驶入团雾区,在 1 500 m 处驶出团雾区,进入出雾无雾区,最后在出雾无雾区 2 000 m 处停下。试验中驾驶员的驾驶状态分为自由流行驶与跟驰行驶,自由流行驶状态下驾驶员按照个人日常驾驶习惯进行操作,跟驰行驶状态下依据不同能见度时驾驶员可视距离与驾驶员进入团雾的反应时间设置道路限速且驾驶员控制车辆跟随右侧车道前方车辆行驶。根据驾驶员的目视距离与能见度公式<sup>[21]</sup>分析不同能见度下驾驶员可视距离。

对自由流行驶状态下试验数据进行分析,驾驶员进入团雾时的反应时间为 2~3 s,取 3 s 作为反应时间。不同能见度团雾环境下道路限速见表 1。

## 1.2 试验数据处理

模拟试验过程中自动驾驶仿真平台采集的实时数据包括车辆的空间位置、速度、加速度等,眼动仪

表 1 不同能见度团雾环境下道路限速

能见度/m	限速/(km·h <sup>-1</sup> )	能见度/m	限速/(km·h <sup>-1</sup> )
75	39.508	150	79.017
100	52.677	175	92.186
125	65.847	200	105.356

采集的视觉特征数据包括驾驶员瞳孔直径和驾驶过程中的兴趣区等。依据试验采集的驾驶员瞳孔直径计算瞳孔面积,再按式(1)计算驾驶员的瞳孔面积变化率。

$$\varphi = [(S_i - S_0) / S_0] \times 100 \quad (1)$$

式中: $\varphi$  为瞳孔面积变化率(%); $S_0$  为驾驶员原始瞳孔面积(mm<sup>2</sup>); $S_i$  为驾驶员在团雾区的瞳孔面积(mm<sup>2</sup>)。

以驾驶员驶入团雾区前后 10 s 的数据为主要分析数据,从中筛选质量较高的数据,共提取 120 组行驶数据,其中自由流行驶数据 60 组、跟驰行驶数据 60 组。取其中 8 人数据共 96 组行驶数据的平均值作为训练数据。试验数据及相关指标见表 2。

考虑到驾驶模拟试验场景的局限性,选择瞳孔面积变化率表征驾驶员心理紧张程度。瞳孔面积变化率大于 20%,表明驾驶员较紧张,行车速度降低幅度较大;瞳孔面积变化率为 15%~20%,表明驾驶员心理状态较舒适;瞳孔面积变化率小于 15%,

表 2 试验数据及相关指标

行驶状态	能见度/m	瞳孔面积变化率/%	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	加速度/(m·s <sup>-2</sup> )	速度方差	速度标准差/(m·s <sup>-1</sup> )	加速度方差	加速度标准差/(m·s <sup>-2</sup> )
自由流	75	28.9	11.469	-0.471	0.664	0.815	0.017	0.129
	100	26.1	13.870	-0.420	3.094	1.759	0.032	0.178
	125	20.2	16.780	-0.346	0.365	0.604	0.225	0.475
	150	12.3	17.317	0.099	1.627	1.276	0.059	0.243
	175	6.3	17.487	0.395	1.551	1.246	0.052	0.229
	200	4.7	18.055	0.494	1.748	1.322	0.024	0.156
跟驰行驶	75	39.5	10.034	-0.594	0.915	0.957	0.044	0.211
	100	32.3	13.663	-0.403	1.493	1.222	0.049	0.222
	125	11.7	17.773	-0.195	0.115	0.338	0.075	0.273
	150	4.3	21.470	-0.292	0.414	0.643	0.081	0.284
	175	9.8	22.816	-0.377	0.322	0.567	0.059	0.242
	200	7.4	22.405	-0.174	0.870	0.933	0.354	0.595

表明驾驶员过于放松,行车速度较快<sup>[22]</sup>。不同行驶状态下团雾能见度与驾驶员瞳孔面积变化率的关系见图 1。

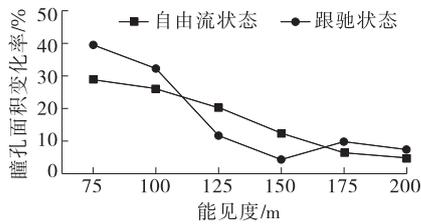


图 1 不同团雾能见度下驾驶员瞳孔面积变化率

从图 1 可以看出:自由流行驶状态下,团雾能见度 $\leq 125$  m 时,驾驶员进入团雾时处于紧张状态;能见度 $> 150$  m 时,团雾对驾驶员心理状态的影响较小。跟驰行驶状态下,能见度 $\leq 100$  m 时,驾驶员进入团雾时处于紧张状态;能见度 $> 125$  m 时,团雾对驾驶员心理状态的影响较小。综上,团雾能见度 $> 150$  m 时,团雾对驾驶员不会造成较大的行车压力,驾驶员的心理状态与晴天环境下相似;团雾能见度 $\leq 150$  m 时,团雾对驾驶员心理状态的影响较大。为保障行车安全,交通管理部门应采取限速、限流等辅助安全措施。

## 2 瞳孔面积变化率与单一交通参数的关系模型

### 2.1 瞳孔面积变化率与单一交通参数的相关性分析

对自由流行驶状态和跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率与速度、加速度进行单因素皮尔逊相关性分析,以  $P$  值作为相关性评价指标。 $P \leq 0.01$  时,各参数之间具有极显著的统计学意义,参数之间产生较强的影响; $P = 0.01 \sim 0.05$  时,各参数之间具有显著的统计学意义,参数之间产生影响; $P \geq 0.05$  时,各参数之间不具有显著的统计学意义,参数之间不

产生影响。

跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率与速度、加速度的单因素皮尔逊相关性分析结果见表 3。由表 3 可知:跟驰行驶状态下,瞳孔面积变化率与速度的  $P$  值为 0.003,与加速度的  $P$  值为 0.043,说明跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率受速度、加速度单一交通参数影响,其中速度对瞳孔面积变化率的影响更显著;自由流行驶状态下,瞳孔面积变化率与速度的  $P$  值为 0.015,与加速度的  $P$  值为 0.001,说明自由流行驶状态下瞳孔面积变化率受速度、加速度单一交通参数影响,其中加速度对瞳孔面积变化率的影响更显著。

表 3 不同行驶状态下瞳孔面积变化率与单一交通参数的皮尔逊相关性分析

行驶状态	交通参数	皮尔逊相关性	$P$ 值
跟驰行驶	速度	-0.954	0.003
	加速度	-0.826	0.043
自由流	速度	-0.897	0.015
	加速度	-0.982	0.001

### 2.2 瞳孔面积变化率与单一交通参数关系模型的构建

对自由流行驶状态和跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率与速度、加速度进行单因素回归分析,构建瞳孔面积变化率与速度、瞳孔面积变化率与加速度关系模型。利用 SPSS 软件进行曲线模拟,以可决系数  $R^2$  评价拟合程度,选择拟合程度较好的关系模型。 $R^2$  越接近 1 时,拟合效果越好,关系模型的拟合程度越好。不同行驶状态下瞳孔面积变化率与速度、加速度关系拟合结果见图 2、图 3。

由图 2 可知:跟驰行驶状态下,对数函数对瞳孔面积变化率与速度关系的拟合程度较好, $R^2 =$

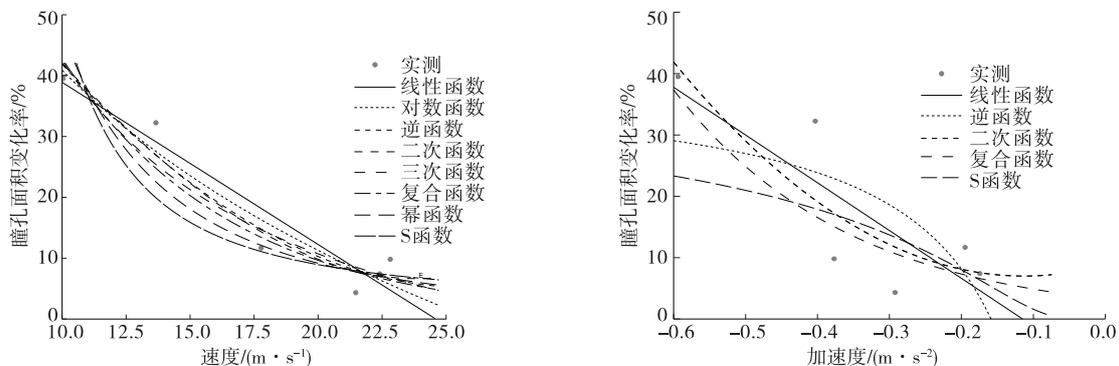


图 2 跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率与速度、加速度的关系拟合曲线

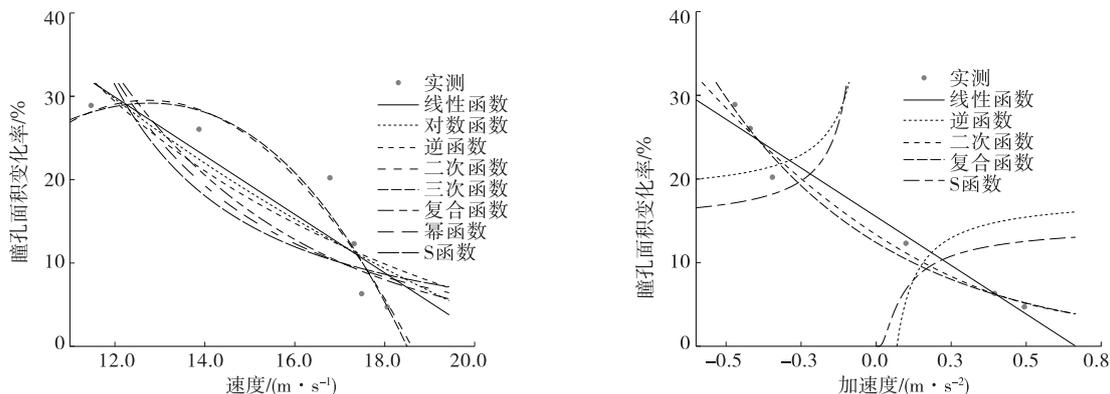


图3 自由流行驶状态下瞳孔面积变化率与速度、加速度的关系拟合曲线

0.926,瞳孔面积变化率与速度的关系公式为  $y = 1.393 - 0.427 \ln v_{gc}$  ( $y$  为瞳孔面积变化率,  $v_{gc}$  为跟驰行驶状态下速度绝对值);线性函数对瞳孔面积变化率与加速度关系的拟合程度较好,  $R^2 = 0.682$ ,瞳孔面积变化率与加速度的关系公式为  $y = -0.089 - 0.778 a_{gc}$  ( $a_{gc}$  为跟驰行驶状态下加速度绝对值)。跟驰行驶状态下,瞳孔面积变化率与速度关系模型的拟合程度优于瞳孔面积变化率与加速度关系模型。

由图3可知:自由流行驶状态下,线性函数对瞳孔面积变化率与速度关系的拟合程度较好,  $R^2 = 0.805$ ,瞳孔面积变化率与速度的关系公式  $y = 0.722 - 0.035 v_{zy1}$  ( $v_{zy1}$  为自由流行驶状态下速度绝对值);复合函数对瞳孔面积变化率与加速度关系的拟合程度较好,  $R^2 = 0.982$ ,瞳孔面积变化率与加速度的关系公式为  $y = 0.124 - 0.173 a_{zy1}$  ( $a_{zy1}$  为自由流行驶状态下加速度绝对值)。自由流行驶状态下瞳孔面积变化率与加速度关系模型的拟合程度优于瞳孔面积变化率与速度关系模型。

综上,无论是自由流行驶状态还是跟驰行驶状态,加速度对瞳孔面积变化率都有较大影响,加速度对自由流行驶状态下瞳孔面积变化率的影响比对跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率的影响大。

### 3 瞳孔面积变化率与多交通参数关系模型

对跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率与速度和加速度的关系进行拟合,构建瞳孔面积变化率与速度和加速度关系模型,得  $y = 0.467 - 0.257 a_{gc} - 0.021 v_{gc}$ ,  $R^2 = 0.944$ 。对该关系模型进行正态分布检验,结果见图4。从图4可以看出:跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率符合正态分布。

对自由流行驶状态下瞳孔面积变化率与速度和

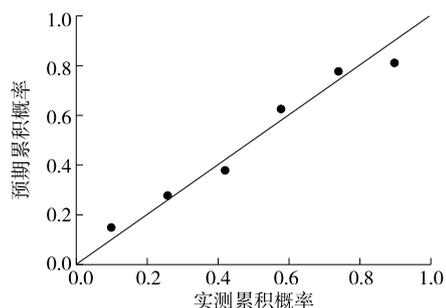


图4 跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率与加速度和速度关系 P-P 图

加速度的关系进行拟合,构建瞳孔面积变化率与速度和加速度关系模型,得  $y = 0.349 - 0.175 a_{zy1} - 0.012 v_{zy1}$ ,  $R^2 = 0.998$ 。对该关系模型进行正态分布检验,结果见图5。从图5可以看出:自由流行驶状态下瞳孔面积变化率符合正态分布。

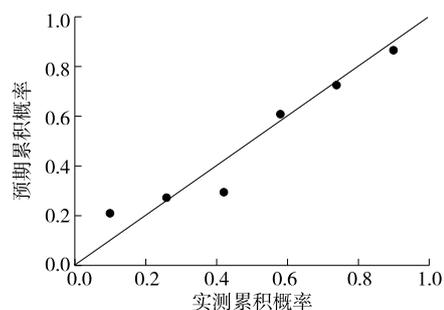


图5 自由流行驶状态下瞳孔面积变化率与加速度和速度关系 P-P 图

从模型拟合程度来看,自由流行驶状态下驾驶员瞳孔面积变化率受速度、加速度的综合影响更大,模型的稳定性更好。

### 4 模型验证

为验证不同模型的精确度,取同期试验的其余

两人的数据进行验证。在相同试验环境下,利用瞳孔面积变化率与速度关系模型、瞳孔面积变化率与加速度关系模型、瞳孔面积变化率与加速度和速度关系模型进行瞳孔面积变化率预测和误差对比,结果见图6、图7。

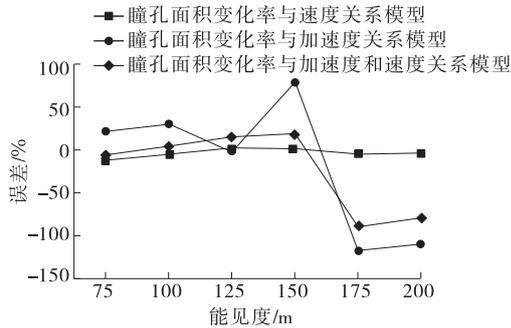


图6 跟驰行驶状态下交通参数与瞳孔面积变化率关系模型误差对比

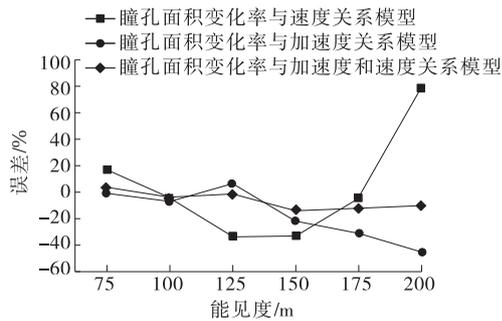


图7 自由流行驶状态下交通参数与瞳孔面积变化率关系模型误差对比

由图6、图7可知:跟驰行驶状态下,瞳孔面积变化率与速度关系模型的误差为 $-12.08\% \sim 1.56\%$ ,瞳孔面积变化率与加速度关系模型、瞳孔面积变化率与速度和加速度关系模型的误差过大,说明跟驰状态下瞳孔面积变化率受速度的影响大于加速度,速度对瞳孔面积变化率的影响十分重要;自由流行驶状态下,瞳孔面积变化率与速度和加速度关系模型的误差为 $-13.99\% \sim 3.71\%$ ,瞳孔面积变化率与加速度关系模型、瞳孔面积变化率与速度关系模型的误差过大,说明自由流状态下瞳孔面积变化率受速度和加速度叠加影响,多交通因素对瞳孔面积变化率的影响更全面。

## 5 结论

(1) 驾驶员瞳孔面积变化率在速度、加速度变化前后存在显著差异,跟驰行驶状态下瞳孔面积变化率与速度、加速度呈负相关,自由流行驶状态下瞳

孔面积变化率与速度呈负相关、与加速度呈强相关。

(2) 跟驰行驶状态下,瞳孔面积变化率与速度关系模型最优,误差为 $-12.08\% \sim 1.56\%$ ,预测精度较高;自由流行驶状态下,瞳孔面积变化率与速度和加速度关系模型最优,误差为 $-13.99\% \sim 3.71\%$ ,预测精度较高,多交通因素对瞳孔面积变化率的影响更全面。

## 参考文献:

- [1] XI J F, WANG S W, CHEN X D, et al. Accident cause analysis method based on traffic accident information system[C]//2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCSM 2010). IEEE, 2010: 230-233.
- [2] WU G F, FU J L, DONG G L. Analysis of the influencing factors of road environment in road traffic accidents[C]//2020 4th Annual International Conference on Data Science and Business Analytics (ICDSBA). IEEE, 2021: 83-85.
- [3] 裴玉龙, 马骥. 道路交通事故道路条件成因分析及预防对策研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(4): 77-82.
- [4] 李金龙, 孙晚华. 高速公路交通事故成因分析及对策研究[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(1): 59-62.
- [5] 孟祥海, 黄宝安, 宋春花. 事故多发点鉴别及其成因分析[J]. 交通信息与安全, 2009, 27(3): 108-111+128.
- [6] PAGOWSKI M, GULTEPE I, KING P. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(1): 3-16.
- [7] 潘晓东, 蒋宏, 高昂. 雾天高速公路交通事故成因分析及安全对策[J]. 交通标准化, 2006, 34(10): 200-203.
- [8] 胡思涛, 朱艳茹. 团雾天气对高速公路交通安全的影响机理研究[J]. 中外公路, 2013, 33(2): 290-292.
- [9] 傅蕾. 秋冬季节大雾团雾多发 谨防多车连环追尾相撞[N]. 人民公安报·交通安全周刊, 2015-10-20(1).
- [10] BABARI R, HAUTIERE N, DUMONT É, et al. Visibility monitoring using conventional roadside cameras-Emerging applications[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2012, 22: 17-28.
- [11] NEGRU M, NEDEVSKI S. Image based fog detection and visibility estimation for driving assistance systems[C]//2013 IEEE 9th International Conference on Intelligent Computer Communication and Processing (ICCP). IEEE, 2013: 163-168.

(下转第51页)

## 4 结语

根据沪昆高速公路贵新段原挡墙混凝土护栏的实际情况,提出将混凝土护栏座椅尺寸沿横向增加延伸入路面结构层,并采用设置锚固钢筋的方式设置座椅式基础的改造设计方案。结合现场实际和 JTG/T D81—2017 中理论计算方法,以护栏撞击变形和挡墙稳定性为指标对护栏改造方案进行分析和验证。结果表明:混凝土护栏受力后位移较小,处于弹性变形阶段;护栏与路面接触位置的应力最大;挡墙整体稳定性系数为 1.46(大于 1.35),处于稳定状态。但由于护栏碰撞力传递,挡墙顶面将产生较大位移,同时由于原浆砌片石挡墙灰浆失效,较松散,施工时应注意混凝土基础开挖,对挡墙顶部进行修复和加固,并在后期运营过程中加强监测。

### 参考文献:

- [1] 王晓勇,何江李,朱彤.基于 LS-DYNA 的车辆与临时防护设施碰撞仿真[J].交通科学与工程,2018,34(1):61—67.
- [2] 张茜.高速公路旧桥防撞护栏提升设计方案[J].公路交
- \*\*\*\*\*
- (上接第 37 页)
- [12] 李易润.基于视频分析技术的高速公路团雾预警系统设计[D].西安:长安大学,2018.
- [13] 李晓雷.山区高速公路团雾段行车风险评估与视觉诱导研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [14] BROOKS J O, CRISLER M C, KLEIN N, et al. Speed choice and driving performance in simulated foggy conditions[J]. Accident Analysis & Prevention, 2011, 43(3):698—705.
- [15] BOURDY C, CHIRON A, COTTIN C, et al. Visibility at a tunnel entrance: Effect of temporal adaptation[J]. Lighting Research & Technology, 1987, 19(2):35—44.
- [16] BIAN Z, PIERCE R, ANDERSEN G. Eye movement patterns and driving performance [C]//Driving Assessment Conference, Transportation Research Board, 2011:503—509.
- [17] FITCH G M, BARTHOLOMEW P R, HANOWSKI R J, et al. Drivers' visual behavior when using handheld

通技术,2020,36(6):120—126.

- [3] 邵永刚.公路分设型中央分隔带 SA 级混凝土护栏高度变化对防护性能影响研究[J].公路,2020,65(11):258—262.
- [4] 赵庆云,张运清,孟涛,等.基于仿真分析的桥梁组合式护栏设计优化[J].中外公路,2020,40(6):145—149.
- [5] 王智飏,王银辉,罗征,等.基于轿车撞击的跨线桥中墩波形护栏改进方案分析[J].公路与汽运,2021(2):37—42.
- [6] 交通部公路科学研究所.高速公路交通安全设施设计及施工技术规范:JTJ 074—94[J].北京:人民交通出版社,1994.
- [7] 交通部公路科学研究院.公路交通安全设施设计细则:JTJ/T D81—2006[S].北京:人民交通出版社,2006.
- [8] 交通运输部公路科学研究院.公路交通安全设施设计细则:JTJ/T D81—2017[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2017.
- [9] 袁旭阳.不同车型下 HA 级防撞混凝土护栏碰撞仿真分析[J].中外公路,2021,41(6):288—291.
- [10] 范立波.基于碰撞过程分析的混凝土护栏结构形式研究[D].北京:北京林业大学,2019.

收稿日期:2023—02—17

and hands-free cell phones[J]. Journal of Safety Research, 2015, 54:105—108.

- [18] 宫泽龙.道路景观连续性对驾驶行为影响研究[D].长春:吉林大学,2014.
- [19] 阎莹,叶飞,王晓飞,等.隧道群路段环境光照度与驾驶人瞳孔面积分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(12):89—96.
- [20] 崔洪军,由婷婷,李霞,等.高速公路隧道入口段照明动态阈值区间研究[J].交通信息与安全,2018,36(3):48—55+78.
- [21] 于乐美,张萌萌,王星月.基于跟驰模型的雾天安全限速模拟研究[J].科学技术与工程,2018,18(33):224—229.
- [22] 尚婷,唐伯明,段萌萌.基于驾驶员瞳孔面积变化率的公路视错觉减速标线横向宽度研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(1):111—116.

收稿日期:2022—12—07