

基于生物量感知的匝道隧道交通风险分析

张泓鸣

中铁第四勘察设计院集团有限公司，湖北武汉，430063；

摘要：本研究旨在准确、全面地分析匝道隧道洞口区域的交通风险。首先，以重庆马家岩匝道隧道、苏家坝匝道隧道、南山隧道以及星光隧道为研究对象，利用眼动仪和生理仪等试验设备开展现场实车试验，采集扫视、注视、心率和瞳孔等参数。其次，通过因子分析法构建驾驶员的生物量感知模型，并对模型进行验证。在此基础上，运用模糊 C 均值聚类分析不同区段的生物量感知变化。研究结果表明，驾驶员在匝道隧道行驶过程中，生物量感知受扫视影响最为严重并且在不同区段具有显著性差异。具体而言，生物量感知负荷在变道实施阶段最大，进入隧道阶段次之，而变道准备阶段则最低。在隧道行驶时，生物量感知负荷在隧道入口段达到最大值。

关键词：匝道隧道；交通风险；因子分析；模糊 C 均值聚类；生物量感知

DOI:10.69979/3041-0673.25.04.048

引言

截至 2023 年末，我国公路隧道共计 27297 处，总长度达到 3023.18 万延米，隧道交通安全一直是交通安全关注的重点。统计显示，公路隧道里程仅占我国公路总里程的 0.03%，但隧道交通事故却占 0.86%，其中隧道出入口段交通事故率是隧道中间段的 2-3 倍。在公路行驶过程中，有 30% 的高速事故发生在匝道分流区及其影响范围内^[1-3]。随着公路持续向山区延伸，隧道在工程建设中占有比例越来越高，互通式立交间距越来越小，必然有部分互通式立交匝道需要在隧道内布设，从而延伸出匝道隧道。当前，关于匝道隧道交通风险领域的学术研究尚显空白，亟待深入探索。因此，综合分

析驾驶员在匝道隧道行驶过程中的风险状态对提升隧道安全运营和交通事故的预防具有重要意义。

在无交通控制的情况下，车流分成多股驶出主线，然后驶离匝道的区域称为分流交织区^[4]。现有的匝道分流区研究主要从以下两个方面开展：（1）匝道车道、匝道车辆分布及驾驶员变道等驾驶行为方面。有关学者^[5]分析了混行条件下各个车道车辆类型的分布对交通安全的影响。研究了分流区匝道车道数对车速及换道频率的影响。评价了分合流区域不同车道风险程度，认为换道频率决定了事故的风险程度。侯佳^[6]通过微观仿真系统建立了多车道分流区驾驶员换道模型。（2）车流量及道路通行能力。吴德华^[6]构建仿真模型研究了匝道交通量对主线通行能力的影响。史科和史青阳^[7-8]利用 SUMO 软件仿真模拟分别对主线通行能力和不同类别车队混行下的主线通行能力进行研究。

行驶过程是“人-车-路”相互耦合的环境，其中既

包括物理量也包含生物量^[9]。其中，物理量是指隧道光环境下度量物质属性与描述物质在不同运动状态下所用的确定指标，亦称之为物理指标。生物量是指隧道光环境条件下驾驶者心理、心理反映指标，亦称之为生物指标。目前对于隧道洞口的生物量研究多从驾驶员感知表征方法入手，如视觉辨识能力、视觉功效及心理感知负荷^[10]。洞口的物理量研究多从亮度、照度、能见度等展开。2021 年，梁波^[11]通过对特长隧道出入口开展实车试验并利用模糊综合分析法量化出隧道出入口段的心率及瞳孔面积与中间段存在显著差异。2024 年，梁波从扫视路径及驾驶员注视出发对隧道入口段进行相关分析，并通过开展公路隧道实车试验并对驾驶员生物量进行 Topsis 综合评价，得出驾驶员在洞口和隧道接近段的视觉负荷远大于洞内和洞外^{[12][13]}。Kuriyagawa^[14]通过分析得出驾驶员心率增长率与驾驶环境安全有直接影响。

现有匝道隧道的研究多是基于明暗适应对隧道出口和分合流点距离展开研究。例如，张兴华和宋瑞华^[15-16]通过对驾驶员明暗适应时间与瞳孔震荡时间进行分析并计算洞口与分流点距离。葛洪成^[17]通过实车试验对地下互通区隧道出口与二次分流点间的数据进行分析后得出了区域行车安全风险模型。肖文兴^[18]通过仿真试验对隧道出口至互通立交分流区距离进行相关计算。

1 数据采集试验

1.1 试验工况

实车试验采取马家岩隧道、苏家坝隧道、南山隧道以及星光隧道展开试验，为简化说明，本文称南山/星光隧道为常规隧道，称马家岩/苏家坝隧道为匝道隧道，隧道工况如下表 1 所示：

表1 试验隧道工况表

Tab. 1 Test tunnel condition

隧道名称	车道数	长度	工况		洞门
			路段限速		
马家岩隧道	两车道设检修道	281m	主线 60km/h, 匝道隧道 30km/h		削竹式洞门, 隧道南北走向
苏家坝隧道	两车道设检修道	203m	主线 60km/h, 匝道隧道 30km/h		端墙式洞门, 隧道东西走向
南山隧道	两车道设检修道	2783m	40km/h		削竹式洞门, 隧道东西走向
星光隧道	两车道设检修道	2157m	40km/h		端墙式洞门, 隧道南北走向

为降低车流量对试验的干扰, 试验开展时间为早上 9:00-16:00, 避开了早晚高峰拥堵。驾驶员完成眼动仪及生理仪的校准后按照平时习惯自由驾驶。试验选用的隧道试验路线如下图 1 所示:

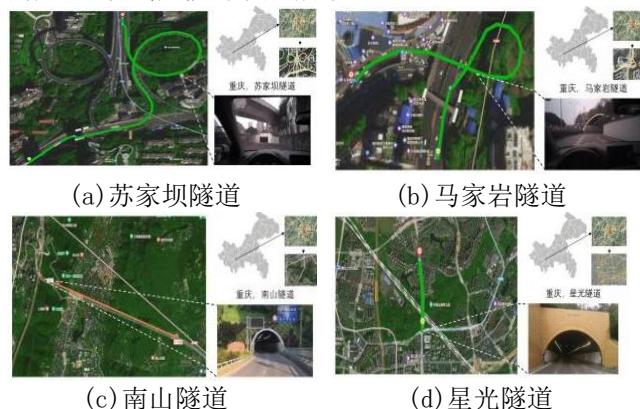


图 1 试验隧道图

Fig. 1 Test tunnel diagram

1.2 试验设备及驾驶员

1.2.1 试验设备

试验主要设备包括生理信息采集装置以及眼动仪。生理仪采集装置采用美国 BIOPAC 公司生产的 MP150 生理仪, 如图 2 (a) 所示。眼动仪采用 Tobii Pro Glasses 眼动仪, 如图 2 (b) 所示。



图 2 试验设备

Fig. 2 Test equipment

1.2.2 试验驾驶员

试验选取 16 名视力良好、无色盲、色弱并且驾驶经验 ≥ 3 年的驾驶员, 7 女 9 男。

2 驾驶员生物量感知模型构建与验证

由于上述选择的指标存在一定的关联性, 为综合不同指标对驾驶员的生物量感知进行评价, 要先对指标进

行降维, 然后提取出公因子及其影响权重再进行评价。

2.1 相关性检验及公因子提取

因子分析是在多指标间存在较强相关性的前提下, 通过降维的方法简化数据结构, 用 Thompsons 因子回归法计算每个样本的公共因子得分。

KMO 检验与 Bartlett 球形检验是因子分析的前提, 检验结果如下表 3 所示:

表 2 KMO 检验和 Bartlett 球形检验

Tab. 2 KMO test and Bartlett's test of sphericity

KMO 检验	Bartlett 球形检验			
	KMO 值	近似卡方	自由度	显著性 P 值
0.811	35.991	10	0	

KMO 取样适度测试值为 $0.811 > 0.7$, 且 Bartlett 球形检验显著, 表明变量间的相关性较强, 可以从原始变量间提取公共因子, 满足因子分析的前提。

对特征值大于或接近于 1 的公因子进行提取, 因此提取公因子数选择为 3, 下表 4 为公因子提取过程的相关计算参数, 公因子提取参数越大, 说明公因子能够很好的反映指标的原始信息。

表 3 因子分析参数

Tab. 3 Factor analysis parameters

标准化向量	公因子方差			因子荷载矩阵			因子得分矩阵		
	初量	提量	方差	公因子			F1	F2	F3
				公因子 F1	公因子 F2	公因子 F3			
Z1 心率变化率	1	0.9	0.181	0.059	0.932		0.1	0.0	0.9
		12				39	49	17	
Z2 扫视速度	1	0.8	0.953	0.117	0.211		0.4	0.1	-0.01
		79				87	01		4
Z3 扫视幅度	1	0.8	0.972	0.138	0.031		0.5	0.8	0.0
		61				32	32	17	
Z4 瞳孔面积变化率	1	0.9	0.091	0.832	0.1		0.0	0.5	-0.13
		33				2	02	13	5
Z5 注视时间	1	0.8	0.042	0.731	0.187		0.0	0.4	-0.11
		52				13	61	11	0

2.2 因子得分

根据表中的因子得分系数矩阵,得到的公因子得分函数如下所示。

$$\begin{cases} F_1=0.139Z_1+0.583Z_2+0.416Z_3+0.2Z_4+0.011Z_5 \\ F_2=0.049Z_1+0.181Z_2+0.083Z_3+0.502Z_4+0.381Z_5 \\ F_3=0.917Z_1-0.014Z_2+0.017Z_3-0.135Z_4-0.12Z_5 \end{cases} \quad (2)$$

以公因子的方差贡献率作为权重并进行归一化处理,综合线形加权模型,可以建立如式(3)的驾驶者生物量感知评价模型,其评价指标S代表了生物量感知负荷。

$$S=\frac{1}{0.9672}(0.4451F_1+0.3519F_2+0.228F_3) \quad (3)$$

对三区段生物量感知负荷聚类结果如下图所示

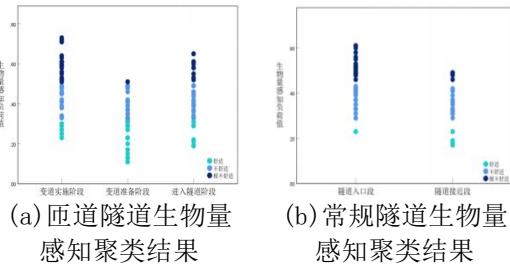


图3 不同区段驾驶员生物量感知负荷聚类结果

为解决分流区匝道隧道驾驶员行驶过程中生物量感知的变化,并于常规隧道进行对比分析,本文通过开展现场实车试验并建立生物量感知模型。得到以下结论:

(1) 驾驶员的瞳孔面积、心率及扫视在主线分流至匝道隧道洞口的不同区段具有显著性差异。瞳孔面积在入口段最大,心率及扫视速度在变道分流实施阶段达到最大。在常规隧道行驶下各生物量指标则在隧道洞口处达到峰值。

(2) 通过构建驾驶员行驶过程中的生物量感知模型,得到驾驶员生物量感知全过程变化,在匝道隧道行驶过程中扫视指标对驾驶员生物量感知影响最大。

(3) 在匝道隧道与常规隧道行驶过程中驾驶员生物量感知受到行驶区段的影响,不同于常规隧道,驾驶员在匝道隧道行驶下的生物量感知最差的区段在匝道隧道前的变道分流实施阶段。驾驶员在常规隧道下行驶的生物量感知最差区段在隧道入口段。

参考文献

- [1] 梁波,牛佳安,秦灿,等.公路隧道光环境信息感知机理与评价方法[J].现代隧道技术,2024,61(04):14-27+40.
- [2] 董澎霖.公路工程路线设计方案比选研究[D].江西理工大学,2023.
- [3] 游宝.城市隧道分流区驾驶行为特性及出口匝道优化研究[D].重庆交通大学,2024.
- [4] 梁春岩,曹帅,汤庆如.城市快速路匝道出口交织区交通冲突特性研究[J].交通科技与经济,2020,22(03):

12-16+34.

[5] 侯佳.多车道高速公路分流影响区交通特性及通行能力分析[D].东南大学,2019.

[6] 吴德华,邱志军.高速公路瓶颈路段运营通行能力研究[J].交通运输系统工程与信息,2015,15(6):147-153.

[7] 史科.高速公路互通立交二次分离出口匝道通行能力分析[D].南京:东南大学,2021.

[8] 史青阳.混行环境下城市道路通行能力研究[D].长春:吉林大学,2023.

[9] SHI Ligang, LI Yuqing, TAO Lulu, et al. Spotters' Visual Comfort Assessment in Gymnasium Based on Subjective Evaluation & Objective Physiological Response[J]. Building and Environment, 2022, 225: 109678.

[10] 何世永,周渊涛,梁波,等.长大隧道光环境下驾驶员信息感知表征方法研究现状和进展[J].隧道建设(中英文),2022,42(02):176-187.

[11] 梁波,文森,肖尧,等.特长隧道出入口驾驶员生理负荷与行车安全性研究[J].隧道建设(中英文),2021,41(09):1461-1467.

[12] 梁波,牛佳安,张红杰.基于扫视路径速度的隧道入口驾驶舒适性分析[J].地下空间与工程学报,2024,20(02):657-666+700.

[13] 梁波,秦灿,牛佳安,等.基于Topsis改进因子分析的公路隧道入口段视觉负荷研究[J].中国安全科学学报,2024,34(01):77-84.

[14] KURIYAGAWAY, SHIMAMURA M, KAGEYAMA. Estimation of driver mental states using autonomic indices[J]. Ifac Papersonline, 2016, 49(19):585-590.

[15] 张兴华,黎军,邹峻,等.城市隧道洞口与地下匝道分合流之间距离研究[J].公路与汽运,2024,40(04):132-135.

[16] 宋瑞华,马朝晖,余明星,等.高速公路隧道出口至互通入口最小净距研究[J].深圳大学学报(理工版),2024,41(04):444-452.

[17] 葛洪成,郭忠印,宋灿灿,等.半地下枢纽互通匝道隧道出口与二次分流点间安全距离[J/OL].吉林大学学报(工学版),1-11[2024-09-29].

[18] 肖文兴.隧道至互通立交小净距路段安全分距计算及仿真研究[J].交通科技与管理,2024,5(03):22-24.

作者简介:张泓鸣(1980-),男,江西人,正高级工程师,研究方向为道路交通运输