

半地下枢纽互通匝道隧道出口与二次分流点间安全距离

葛洪成¹, 郭忠印¹, 宋灿灿², 王世伟³

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 201804; 2. 上海师范大学建筑工程学院, 上海 201418;
3. 中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘要: 为了确定半地下枢纽互通匝道隧道出口与二次分流点间的安全距离, 以优化线形设计并节约用地, 研究了基于驾驶行为分解与运动学方程计算了理论安全距离, 通过驾驶模拟实验收集了39名驾驶人在4种距离下的实验数据, 采用Mann-Whitney U (MWU) 检验选择了速度标准差、刹车踏板力度、车道偏移量3个指标, 进而基于因子分析法构建了行车安全风险计算模型, 并量化了不同距离下的风险分值。研究结果显示, 理论安全距离为164.8 m, 行车安全风险最低的距离为250 m。

关键词: 交通工程; 半地下枢纽互通; 高速公路隧道; 安全距离; 驾驶模拟; 驾驶行为

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)07-2223-10

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20231172

Safety distance between semi-underground hub interchange ramp tunnel exit and secondary diversion points

GE Hong-cheng¹, GUO Zhong-yin¹, SONG Can-can², WANG Shi-wei³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Civil Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 201418, China; 3. China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: This study aims to determining the safe distance between the exit of the semi-underground hub interchange ramp tunnel and the secondary diversion point, so as to optimize line design and conserve land. In this study, the theoretical safe distances were calculated based on the decomposition of driving behavior and kinematic equations. Data were gathered from 39 drivers at four different distances through driving simulation tests. Speed standard deviation, brake pedal force, and lane offset served as selected indicators via the MW test. Factor analysis was employed to construct a driving safety risk calculation model and quantify the risk scores under different distance. The results show that the theoretical safety distance was 164.8 meters, and the distance with the lowest driving safety risk was 250 meters.

Key words: traffic engineering; semi-underground hub interchanges; freeway tunnels; safety distances; driving simulation; driving behavior

收稿日期: 2023-10-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52202421).

作者简介: 葛洪成(1997-), 男, 博士研究生. 研究方向: 道路安全与环境工程. E-mail: ghc1997@tongji.edu.cn

通信作者: 宋灿灿(1988-), 女, 讲师, 博士. 研究方向: 道路安全与环境工程. E-mail: songcancan@shnu.edu.cn

0 引言

地下互通作为地下道路与地面道路贯通成网的重要连接枢纽,近年来被广泛建设于城市道路和高速公路中^[1,2]。根据互通立交埋入地下的比例,可将地下互通分为完全地下互通和半地下互通^[3]。后期修建的高速公路受密集的道路网布局、地形地势等条件限制,在与早期地面高速公路连接时往往形成半地下互通。相较于完全地下互通,半地下互通由于耦合了光环境的变化,车辆的行驶安全问题更加突出。匝道隧道出口与二次分流点(Ramp tunnel exit and secondary diversion points, RTE-SDP)的距离是控制互通立交设计规模的重要参数,但目前尚缺乏该方面的研究,因此,本研究对半地下枢纽互通 RTE-SDP 路段控制距离进行研究。

因行驶环境变化与路径选择行为的耦合,驾驶人在本研究路段的行为复杂。一方面,驾驶人从主线驶出至二次分流点时将完成主线指路标志视认、决策换道、减速、二次分流点指路标志视认及路径选择等行为^[4],驾驶人处理的信息量大、操作负荷高^[5,6]。另一方面,当驾驶人驶入狭窄的匝道隧道时,“边墙效应”导致驾驶人的心理过度紧张^[3];而在匝道隧道出口处驾驶人受到“黑白洞效应”的影响,容易发生决策犹豫、紧迫换道或紧急制动等行为^[7]。高负荷的驾驶操作与高频率变化的行车环境,使得道路技术指标与驾驶人心理因素共同决定了研究路段的长度。

国内外对受限路段间距的研究主要集中于隧道进出口与互通立交出入口研究、互通立交连续分合流点的间距研究。隧道进出口与互通立交出入口研究考虑了光环境变化与驾驶人路径选择行为对路段长度的需求,采用的方法主要有交通仿真、驾驶模拟与自然驾驶实验^[8,9]。互通立交连续分合流点的间距研究包含主线上连续分合流点的间距研究、匝道上连续分流点或合流点的间距研究,其核心聚焦于基于驾驶人路径选择行为的最小安全距离计算^[10-12]。丰富的科学研究支撑了《公路立体交叉设计细则》^[13]和《公路路线设计规范》^[14]对隧道出口与互通立交最小安全距离、互通立交连续分合流点间距的规定。

综上所述,目前国内外缺乏针对本问题的研究,《公路隧道设计规范》^[15]中仅提出了“地下立交结构”“匝道进洞”等概念,《城市地下道路工程

设计规范》^[16]对完全地下互通的变速车道长度、分流段和隧道出口距离给出了规定,但并未对 RTE-SDP 路段的间距进行规定,致使半地下枢纽互通立交的设计缺乏规范指导。

鉴于此,本研究依托深圳某半地下枢纽互通工程,首先分析了受限路段驾驶人的行为变化过程,计算了半地下枢纽互通匝道隧道出口与二次分流点间的理论安全距离。其次设置了不同的距离变量进行驾驶模拟实验,依据实验获取的驾驶行为指标确定了路段的风险区域,分析了驾驶人在不同距离下的风险区域驾驶行为特性。最后考虑驾驶行为指标建立了受限路段的行车安全风险模型,量化了路段不同距离下的风险大小,旨在为此类路段的设计及安全优化提供理论支撑和设计指导。

1 RTE-SDP 路段的理论安全距离

驾驶人从匝道隧道出口驶向地面二次分流点的过程由明适应、标志识读和决策、等待可插入间隙、换道 4 个关键步骤组成。本研究依托工程在匝道隧道顶部悬挂了一块二次分流指路标志,因此假定驾驶人在隧道出口前已完成决策,不考虑驾驶人在驶出匝道隧道后的标志识读和行为。如图 1 所示,考虑最不利情况,驾驶人未在驶出匝道隧道前行驶于目标车道,驶出匝道隧道后需在二次分流点前完成换道并驶入目标匝道。因此,安全距离的理论值是驾驶人明适应距离、换道距离、目标匝道确认距离、安全确认距离之和。假定驾驶人在该路段以设计速度匀速行驶,各部分距离分述如下。

1.1 明适应距离

明适应是指驾驶人从隧道驶出的过程中,在经历由低亮度到高亮度的光线变化时,人眼产生眩光等视觉障碍而需要不断调整瞳孔以适应高亮度环境的过程。驾驶人明适应过程中行驶的距离为明适应距离。驾驶人的明适应是从隧道内开始的,本研究所指的明适应距离为驾驶人自隧道出口之后的距离。隧道出口处驾驶人的明适应距离计算公式为:

$$L_1 = \frac{V_1}{3.6} t_1 \quad (1)$$

式中: L_1 为明适应距离; V_1 为出口处车辆行驶速度,此处取匝道设计速度,即 50 km/h; t_1 为明适应时间,基于已有研究^[9],此处取 3 s。

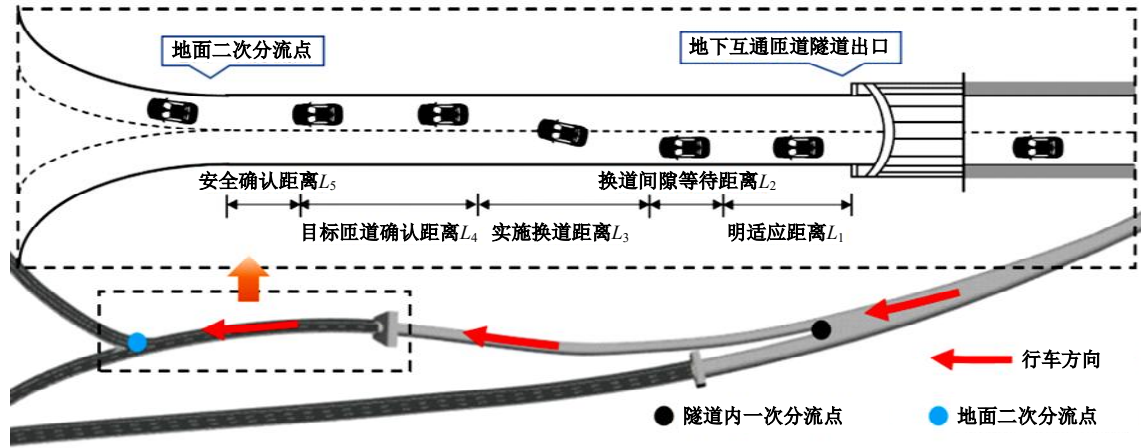


图1 RTE-SDP路段理论安全距离组成

Fig. 1 Theoretical safety distance composition for RTE-SDP sections

1.2 换道距离

(1) 换道间隙等待距离

换道间隙等待距离是指驾驶人实施换道行为之前,为了寻找目标车道适合换道的前后车可插入间隙而等待的时间内行驶的距离,其计算公式为:

$$L_2 = \frac{V_2}{3.6} t_2 \quad (2)$$

式中: L_2 为换道间隙等待距离; V_2 为等待可插入间隙时车辆行驶速度,此处取设计速度 50 km/h; t_2 为车辆平均等待可插入间隙时间。 t_2 的取值与匝道的服务水平有关,其计算公式^[17,18]为:

$$t_2 = \frac{1}{\lambda} [e^{\lambda(t_c - \tau)} - \lambda(t_c - \tau) - 1] \quad (3)$$

式中: t_c 为车辆可插入的临界最小时距,此处按车辆横移速度 1 m/s 取值,结果为 3.5 s; λ 为目标车道车辆在单位时间内的平均到达率,veh/s, $\lambda = Q/3600$,其中 Q 为单车道最大服务交通量,此处取设计速度 50 km/h 下四级服务水平对应的单车道通行能力 1000 pcu/h; τ 为最小车头时距,s,一般取 1.2 s。

(2) 实施换道距离

假定车辆换道的横移速度为 1 m/s,匝道的车道宽度为 3.5 m,则换道时间为 3.5 s。实施换道距离的计算公式为:

$$L_3 = \frac{V_3}{3.6} t_3 \quad (4)$$

式中: L_3 为实施换道距离; V_3 为换道时车辆行驶速度,此处取设计速度 50 km/h; t_3 为换道时间,此处取 3.5 s。

1.3 目标匝道确认距离

为了在换道后对是否驶入目标匝道进行确

认,驾驶人需要对二次分流点处的指路标志进行视认。驾驶人视认路侧标志的距离包括标志前置距离、阅读距离及决策距离。本研究依托工程分流点处的标志为双悬臂标志,因此不需要考虑标志前置距离;而驾驶人已在隧道内视认过指路标志且完成决策,因此,此处仅考虑驾驶人的阅读距离,其计算公式为:

$$L_4 = \frac{V_4}{3.6} t_4 \quad (5)$$

式中: L_4 为阅读距离; V_4 为阅读标志时车辆的行驶速度,此处取设计速度 50 km/h; t_4 为标志视认反应及阅读时间,此外取 3.5 s^[18]。

1.4 安全确认距离

在驾驶人完成标志阅读后,需要预留出标志消失距离 L_5 进行安全确认。由于匝道二次分流点的指路标志一般设置于分流三角区的大鼻端位置,而本研究的控制距离指匝道隧道出口距小鼻端的长度,因此此处的 L_5 应对计算得出的消失距离减去大小鼻端间 20 m 长度差进行修正,其计算公式为:

$$L_5 = \frac{\sqrt{H^2 + (B/2 - 0.3)^2}}{\tan \theta} - 20 \quad (6)$$

式中: H 为标志消失点交通标志与驾驶人视线的高差,其中驾驶人视线高度取 1.2 m,标志下边缘距路面高度取 5 m,因此 H 取 3.8 m; B 为驾驶人视点至双悬臂指路标志的水平距离,此处取一个匝道的宽度,即 3.5 m,由于驾驶人并不位于车辆中央,此处取 0.3 m 进行横向距离的修正; θ 为驾驶人视野消失点与标志间夹角,此处取 7°^[19]。

根据上述公式计算各部分的理论安全距离如表 1 所示,对各部分距离求和得到的双车道 RTE-SDP 路段理论安全总距离为 164.8 m。

表 1 理论安全距离计算值

L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	总距离
41.7	12.8	48.6	48.6	13.1	164.8

2 驾驶模拟实验

为了验证理论安全距离的合理性,并从驾驶行为角度分析驾驶人驶经 RTE-SDP 路段的安全性,本研究基于深圳某半地下枢纽互通工程设计开展了驾驶模拟实验。

2.1 实验平台

本实验依托同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,采用高逼真的 SCANeR Studio 驾驶模拟仿真平台,使用八自由度驾驶模拟器进行驾驶模拟实验。如图 2 所示,该驾驶模拟器由高清屏幕、1:1 驾驶舱、升降平台、主机、操控和监控平台构成。其中,驾驶模拟场景前景通过高清投影展现车辆前方 130° 视角范围,后视镜图像由 LCD 屏幕展示。在实验过程中,驾驶模拟器以 50 Hz 的频率采集车辆运行特征及驾驶人操作行为

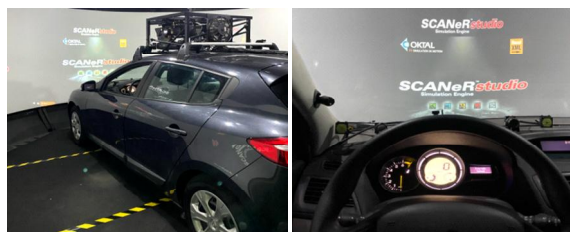


图 2 八自由度驾驶模拟器

Fig. 2 Eight-degree-of-freedom driving simulator

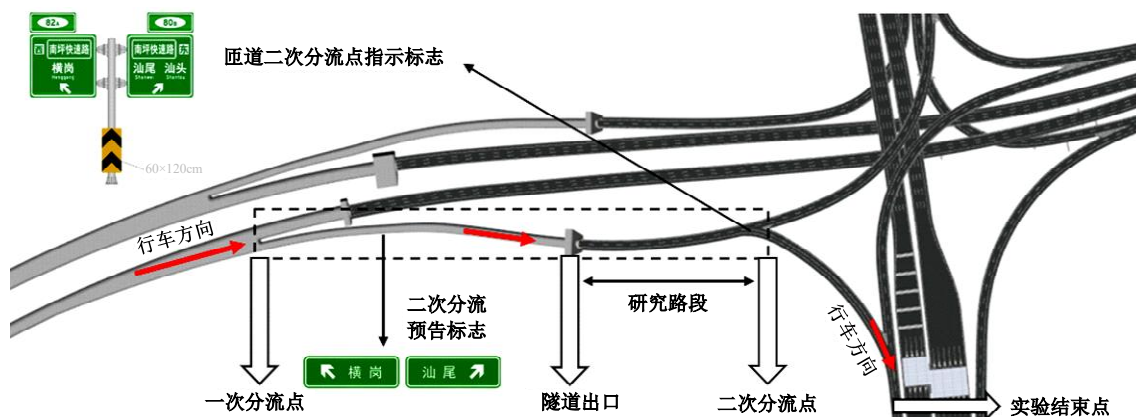


图 3 实验路段场景

Fig. 3 Experimental roadway scene

数据。

2.2 实验自变量选取

本实验将自变量定义为 RTE-SDP 路段的距离,考虑到前文通过理论分析计算得出了安全距离为 164.8 m,因此在确定 RTE-SDP 路段距离时,向上取整设置安全距离变量分别为 170、200、250、300 m。

2.3 实验场景设计

本实验场景依据深圳某半地下枢纽互通工程进行设计,场景中所涉及的交通标志和隧道模型均由 3ds Max 软件按照实际尺寸制作。隧道内外光线条件由 SCANeR Studio 软件内置的渲染引擎生成,隧道内外场景设置时间分别为 18:00 和 12:00,对应地面亮度分别为 1、13 cd/m²。

半地下枢纽互通场景主线为单向三车道,车道宽度为 3.75 m,设计速度为 80 km/h;匝道为单车道出口的双车道匝道,车道宽度为 3.5 m,设计速度为 50 km/h。为尽可能避免线形对实验变量的影响,实验路段采用平坡设计、平曲线线形设计均符合规范要求。实验设置交通量为自由流,各实验控制点及对应交安设施设置如图 3 所示。

2.4 实验人员

被试驾驶人按照我国驾驶人男女性别比例 2:1 进行校园招聘,通过发放问卷(筛选有过驾驶模拟器使用经验,且不会产生 3D 眩晕症的驾驶人)共招募驾驶人 39 人,其中 13 人为女性,26 人为男性。被试驾驶人平均年龄为 34.3 岁(标准差为 13.1 岁),平均驾龄 6.8 年(标准差 4.7 年),所有被试驾驶人均具有高速公路驾驶经验,驾驶技术熟练,身体健康,无不良嗜好。

2.5 实验过程

实验前的培训环节包括对驾驶模拟器基本操作的熟悉和对实验环境的适应,平均适应时间约为10 min。实验开始前,指令员向被试驾驶人说明实验目的并发出开始指令。被试驾驶人需按照个人驾驶习惯执行驾驶任务,依次从半地下枢纽互通主线驶入匝道,驶经匝道隧道出口、地面二次分流点后完成实验。驾驶模拟实验过程及场景示意如图4所示。单次实验时长约为30 min,实验结束后,被试驾驶人填写个人信息,以及包含路线、结构物、交通工程及沿线设施、环境4个方面的场景逼真度问卷(以0~10分李克特量表进行表征,分数越高表示场景越逼真),场景逼真度问卷结果如表2所示。



图4 驾驶模拟实验过程及场景

Fig. 4 Driving simulation experiment process and scenarios

表2 场景逼真度问卷结果

Table 2 Scene realism questionnaire results

场景	均值	标准差
路线模型	8.40	0.67
结构物模型	8.21	0.83
交通工程及沿线设施模型	7.54	0.99
环境模型	7.82	1.00

2.6 因变量指标选取

运行速度与交通事故风险呈正相关,因此通常作为安全相关指标;车道偏移量过大可能导致车辆偏离行车轨迹,增加与其他车辆或道路障碍物发生碰撞的风险;不适当的刹车踏板力度可能会导致车辆刹车不及时或刹车过猛,增加交通事故发生的风险。综上,选取运行速度、车道偏移量、刹车踏板力度及其衍生指标作为驾驶行为因变量进行分析。

3 RTE-SDP路段风险区域

为了对 RTE-SDP 路段的驾驶行为特性进行群体特征分析,鉴别风险区域是首要解决的问题。

3.1 驾驶行为特性变化

实验数据提取中发现有3名被试驾驶人的数

据丢失,即本次实验共计采集有效样本36组。此外,在4种距离条件下分别有2、5、7、7名驾驶人在驶出隧道后进行了换道,因此为保证分析结果的有效性,选择驶出隧道后未进行换道的实验样本进行分析。本研究提取了4种距离条件下未换道驾驶人(170、200、250、300 m分别对应34、31、29、29个分析样本)每行驶5 m的运行速度 V_{85} (85%分位纵向速度)、车道偏移量(正值表示相对道路中线左偏)、油门踏板力度、刹车踏板力度指标。针对每隔5 m提取的每个指标的所有分析样本,依据拉依达准则或四分位法,分别对服从正态分布或偏态分布的分析样本剔除了异常值。

为探究理论明适应距离 L_1 和理论确认距离 ($L_4 + L_5$) 与实际驾驶行为之间的关系,本研究统计了隧道出口处运行速度和 L_4 范围平均速度的 V_{85} (作为速度代表值),代入式(1)及式(5)进行计算,结果如表3所示。同时,统计了驾驶人每行驶5 m的运行速度 V_{85} 、平均车道偏移量、平均油门踏板力度、刹车踏板力度指标,绘制各指标与匝道二次分流点距离的变化曲线,如图5所示。

表3 实际安全距离计算值

Table 3 Calculated value of actual safety distance

距离变 量/m	隧道出口运行 速度/(km·h ⁻¹)	实际 L_1 /m	L_4 范围的 V_{85} / (km·h ⁻¹)	实际 L_4 /m	理论确认 距离/m
170	53.7	44.8	46.8	45.5	58.6
200	55.2	46.0	51.0	49.6	62.7
250	58.8	49.0	53.5	52.0	65.1
300	59.2	49.3	48.5	47.2	60.3

表3的统计结果表明,在 RTE-SDP 距离为170、200、250 m的条件下, L_4 范围的 V_{85} 数值逐渐升高。这表明随着距离的增加,驾驶人对于环境和即将到来的二次分流点有了更多的适应时间,继而逐渐提高了速度。在距离为300 m的条件下, V_{85} 数值出现了降低。这表明当这一距离过长时,驾驶人开始感到疲劳或注意力分散,这将导致他们在接近目标匝道时减速以维持安全驾驶。

由图5可知,在各距离工况划定的理论 $L_4 + L_5$ (确认距离)参照线前,驾驶人的运行速度和平均油门踏板力度均有所降低。其原因在于匝道路段为弯道,当隧道出口前方为弯道时,驾驶人会在驶出隧道后降低速度以适应道路条件^[20]。值得注意的是,在 RTE-SDP 距离为250、300 m两种间距较长的工况下,相较于另外两种距离下的持

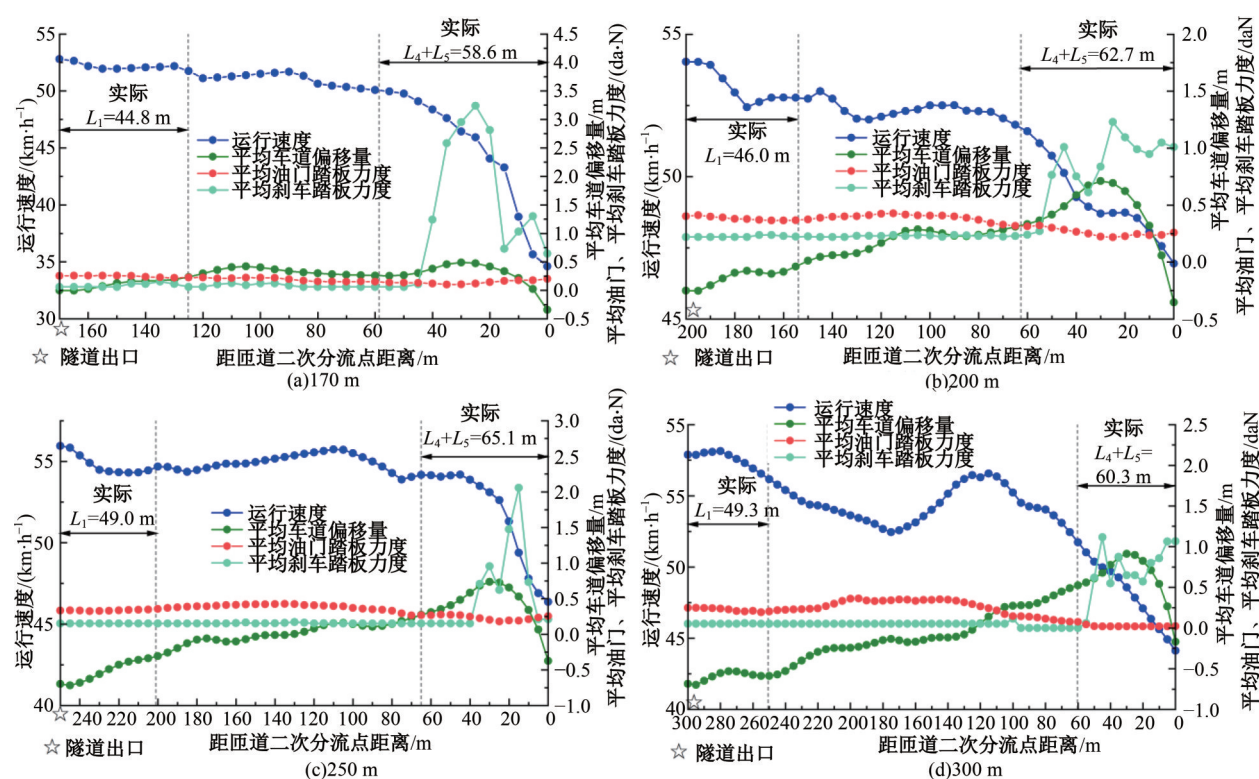


图5 不同距离条件下驾驶行为指标变化

Fig. 5 Changes in driving behavior indicators at different distances

续减速,驾驶人在明适应后的速度有一个小幅度的升高过程。这表明在较长的距离条件下,驾驶人可以从明适应的不适感中逐渐恢复,而在较短的距离条件下驾驶人倾向于持续减速以规避前方的行车风险。

在各距离工况对应的确认距离参照线前,驾驶人的各项行为指标呈现平稳趋势;在参照线后,驾驶人的各项行为指标均发生剧烈变化。对于后一阶段,从运行速度方面分析,驾驶人运行速度不断下降,表明驾驶人在标志视认阶段会降低运行速度从而更好地进行辨认;从驾驶稳定性来看,平均刹车踏板力度出现激增,平均油门踏板力度回收,表明驾驶人在二次分流点前行为稳定性较差;从车道保持能力而言,驾驶人在此阶段平均车道偏移量达到峰值,表明驾驶人该阶段车道保持能力较差,车道确认及标志视认过程增加了驾驶

人的心理行车负荷,干扰了驾驶操作行为。

3.2 风险区域确定

前文分析表明,在确认距离参照线后驾驶人的行为发生剧烈变化,即驾驶人在目标匝道确认过程中行车负荷增加。为了验证上述观点,本研究提取确认距离参照线前后两阶段驾驶人的速度标准差、刹车踏板力度、车道偏移量3项指标,并对前后两阶段的指标进行统计学检验。进行Shapiro-Wilk(SW)检验和Levene检验后表明,3项指标均不服从正态分布,不满足方差齐次性的要求,故采用Mann-Whitney U(MWU)检验对前后两阶段的指标进行非参数检验,检验后的 p 值大小如表4所示。

MWU检验结果显示,3项指标在不同RTE-SDP距离条件下前后两个阶段的 p 值均 <0.001 。这表明两阶段之间的驾驶行为存在显著性差异,

表4 前后两阶段驾驶行为指标MWU检验 p 值

Table 4 MWU test p -value for indicators of driving behavior in the pre- and post-stages

指标	170 m	200 m	250 m	300 m
速度标准差	$6.56 \times 10^{-10}***$	$6.62 \times 10^{-12}***$	$8.73 \times 10^{-9}***$	0.000 13***
车道偏移量	$3.55 \times 10^{-11}***$	$6.04 \times 10^{-12}***$	$2.30 \times 10^{-10}***$	0.000 56***
刹车踏板力度	$3.99 \times 10^{-11}***$	$4.78 \times 10^{-13}***$	$2.45 \times 10^{-8}***$	0.000 12***

注:***表示在0.1%水平下显著。

驾驶人在目标匝道确认阶段的速度标准差、车道偏移量及刹车踏板力度均显著高于在此之前的阶段。因此,本研究将计算得到的确认距离范围内的路段视为风险区域进行分析。

4 不同距离下风险区域驾驶行为分析

为综合探究风险区域各行为指标在不同 RTE-SDP 距离条件下的差异性,本研究统计了风险区域内运行速度标准差、平均车道偏移量、平均刹车踏板力度作进一步分析。

绘制 3 项指标在不同 RTE-SDP 距离条件下的箱线图和数据分布曲线,如图 6 所示。车辆的运行速度标准差随距离增加而不断减小,当距离为 250 m 时,运行速度标准差均值最低,表明在该路段范围内,驾驶人的速度选择更稳定;从数据分布情况来看,当距离为 170 m 时,该路段运行速度标准差出现了更多的较大值,此时驾驶人的运行速度变化较为剧烈。

对于平均车道偏移量而言,在此路段内表现出随 RTE-SDP 距离逐渐增大的趋势。通过图 5 绘制的驾驶行为变化指标可以推测,驾驶人在更长的距离下会在此路段维持更高的速度,而较大的速度可能导致车辆横向偏移的增加进而呈现出这种规律。

从平均刹车踏板力度指标分布变化来看,驾驶人在 RTE-SDP 路段的平均刹车踏板力度呈偏态分布,一部分驾驶人在风险区域的平均刹车踏板力度维持在 0 附近,而另一部分驾驶人的平均刹车踏板力度远离 0 点。随着 RTE-SDP 距离的不断增加,平均刹车踏板力度不断降低。这表明在更短的距离状态下,驾驶人在风险区域的刹车行为更为剧烈,目标匝道确认及标志视认的过程存在更大的行车负荷。

对 4 种 RTE-SDP 距离下的 3 项指标差异性进行检验。经 SW 检验和 Levene 检验表明,3 项指标均不同时服从正态分布及满足方差齐次性检验。因此,采用 MWU 检验对不同距离下的组别进行两两非参数检验,检验结果如表 5 所示。

表 5 的检验结果表明,各指标在不同组别间均存在显著性差异。RTE-SDP 距离为 170 m 路段的风险区域运行速度标准差显著 > 250 m 路段,这表明当距离为 250 m 时,驾驶人在风险区域

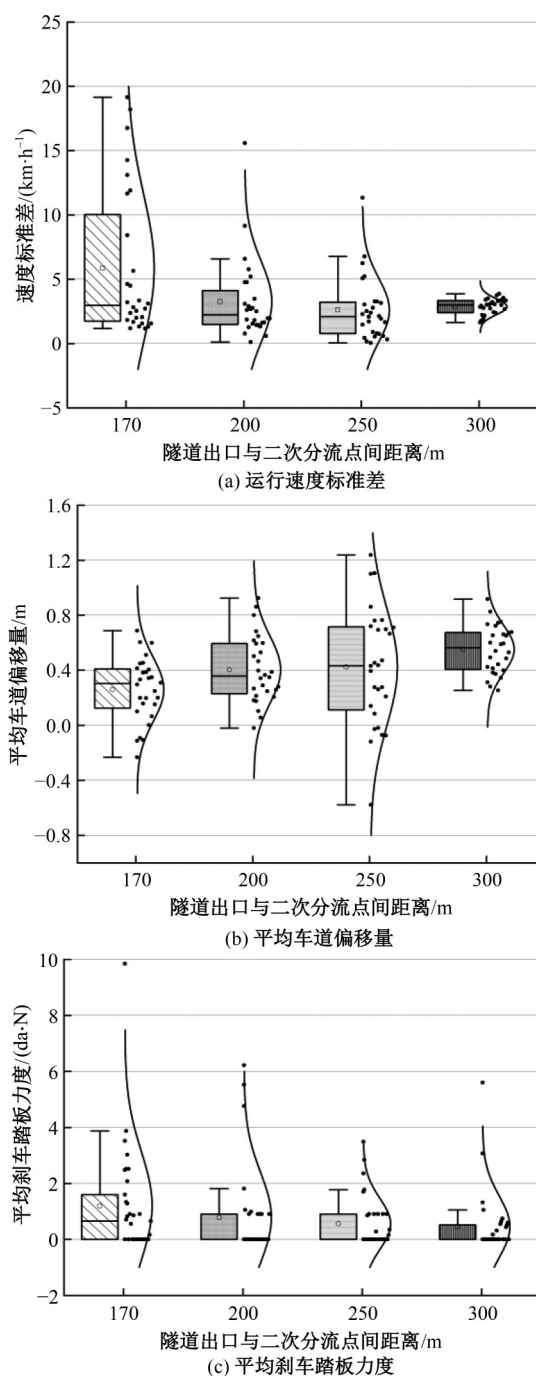


图 6 风险区域驾驶行为指标对比

Fig. 6 Comparison of driving behavior indicators in risk areas

的运行速度保持最稳为定。平均车道偏移量检验结果显示,路段长度为 300 m 的平均车道偏移量显著高于 170 和 200 m,这可能与驾驶人在更长的距离条件下会保持更高的运行速度通过该路段有关。此外,170 m 路段驾驶人在风险区域的平均刹车踏板力度显著高于 300 m 路段,这表明在 170 m 路段下,驾驶人在风险区域感知能力较差,驾驶行为变化更为剧烈。

表 5 不同距离条件下风险区域驾驶行为指标 MWU 检验 p 值Table 5 MWU test p -value for driving behavior indicators in risk areas under different distance conditions

指标 组别	运行速度标准差 MWU 检验				平均车道偏移量 MWU 检验				平均刹车踏板力度 MWU 检验			
	170 m	200 m	250 m	300 m	170 m	200 m	250 m	300 m	170 m	200 m	250 m	300 m
170 m	—	0.118	0.020*	0.774	—	0.073	0.078	0.000***	—	0.140	0.142	0.022*
200 m	0.118	—	0.456	0.125	0.073	—	0.762	0.009**	0.140	—	0.924	0.587
250 m	0.020*	0.456	—	0.028*	0.078	0.762	—	0.228	0.142	0.924	—	0.463
300 m	0.774	0.125	0.028*	—	0.000***	0.009**	0.228	—	0.022*	0.587	0.463	—

注: *表示在 5% 水平下显著, **表示在 1% 水平下显著, ***表示在 0.1% 水平下显著。

5 基于因子分析法的行车安全风险综合评价模型

为了对风险区域的多维驾驶行为指标进行综合评价, 定量评价不同 RTE-SDP 距离下风险区域的行车风险, 选取运行速度标准差、平均车道偏移量、平均刹车踏板力度 3 项指标进行因子分析。

首先对数据进行凯撒·迈耶·奥尔金(Kaiser-Meyer-Olkin, KMO)检验和 Bartlett 球形检验, 如表 6 所示, KMO 检验值为 0.689, >0.6 , 且 $\text{Sig.} < 0.01$, 说明变量之间存在相关性, 因子分析有效。为了便于评价模型量化计算, 将所有数据进行 Z-score 标准化转换后, 继续进行因子分析。公因子方差表示各变量中信息分别被提取的比例, 各变量的公因子方差如表 7 所示。

由表 7 可知, 所有公因子方差均 >0.9 , 说明

表 6 KMO 检验和 Bartlett 球形检验

Table 6 KMO test and Bartlett's test for sphericity

KMO 检验值		0.689
Bartlett 球形检验	近似卡方	94.014
	自由度	3
	显著性	0.000

表 7 公因子方差

Table 7 Common factor variance

变量	初始	提取
运行速度标准差/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	1.000	0.933
平均车道偏移量/m	1.000	1.000
平均刹车踏板力度/($\text{da}\cdot\text{N}$)	1.000	0.933

变量能被公因子合理表达。总方差解释如表 8 所示。可见, 当因子采用方差最大法正交旋转后, 可提取 2 个公因子, 累计方差贡献率为 95.506%。对旋转后的成分矩阵进行分析, 如表 9 所示。

表 8 总方差解释

Table 8 Total variance interpretation

成分	初始特征值			提取载荷平方和			旋转载荷平方和		
	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%	总计	方差百分比/%	累积/%
1	1.863	62.086	62.086	1.863	62.086	62.086	1.862	62.077	62.077
2	1.003	33.419	95.506	1.003	33.419	95.506	1.003	33.428	95.506
3	0.135	4.494	100.000						

由表 9 可知, 在第 1 个公因子中, 载荷较大值为 0.965 和 0.964, 分别对应运行速度标准差和平均刹车踏板力度, 因此可以将该因子归为速度控制水平。在第 2 个公因子中, 载荷较大值为 1.000, 对应平均车道偏移量, 因此可以将该因子归为车道保持水平。2 个公因子的总解释方差(即累计方差贡献率)为 95.506%, 可见旋转后的 2 个公因子可以很好地解释风险区域行车安全风险的两个方面。因此, 结合实际, 可以选择旋转后的 2 个公因子作为行车安全风险量化模型的基础。而后由 Thompson 回归法得到因子得分系数矩阵, 对因子得分系数矩阵进行分析, 如表 10

所示。

表 9 旋转后的成分矩阵

Table 9 Rotated component matrix

变量	成分 1	成分 2
运行速度标准差/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.965	
平均车道偏移量/m		1.000
平均刹车踏板力度/ $\text{da}\cdot\text{N}$	0.964	

表 10 因子得分系数矩阵

Table 10 Matrix of factor score coefficients

变量	成分 1	成分 2
运行速度标准差/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	0.518	0.038
平均车道偏移量/m	-0.005	0.997
平均刹车踏板力度/ $\text{da}\cdot\text{N}$	0.519	-0.043

由此,计算2个公因子的得分 F_i 为:

$$F_i = \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} V_j \quad (7)$$

式中: F_i 为第 i 个公因子的得分, $i=1,2$; α_{ij} 为第 j 个变量的第 i 个成分的得分系数,其取值如表9所示, $j=1\sim 3$; V_j 为3个变量进行标准化转换后值的大小。

由表8可知,2个公因子的方差贡献率分别为62.077%和33.428%,以其作为权重,并进行单位化处理,最终得到行车安全风险的量化值 F :

$$F = \frac{1}{0.95506} (0.62077F_1 + 0.33428F_2) \quad (8)$$

式中: F_1 、 F_2 为2个公因子的得分。

根据前文,将第1个公因子命名为速度控制风险,第2个公因子命名为车道保持风险,则风险区域的行车安全风险可由速度控制和车道保持两方面解释量化,且速度控制对于行车安全风险的量化结果的方差贡献率大于车道保持,两者分别为62.077%和33.428%。通过因子分析法分别计算所有驾驶人在不同距离路段下风险区域行车安全风险的量化值,绘制其箱线图如图7所示。从图7可以看出,当RTE-SDP距离分别为170、200、250、300 m时,行车安全风险得分均值分别为0.315、0.011、-0.154、-0.087(此处得到的分值为相对分值,负值反映结果相对于风险评估模型的基准水平是降低的,即低于风险的平均值)。其中,当距离为250 m时分数最低,表明此时模拟实验的行车风险最低。

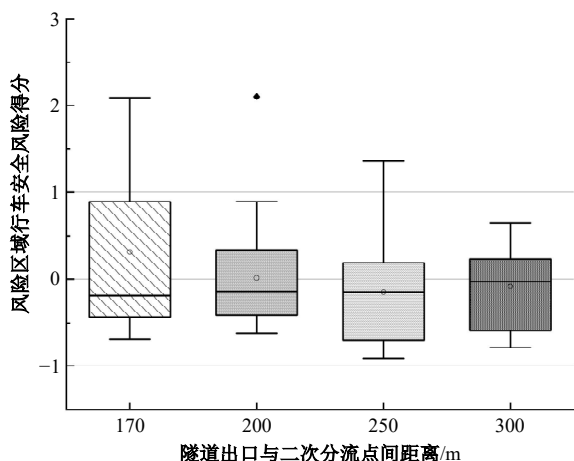


图7 不同距离条件下风险区域行车安全风险得分

Fig. 7 Safety risk scores for traveling in risk areas under different distance conditions

6 结 论

(1)驾驶人从匝道隧道出口驶出至二次分流点的过程可分为明适应、换道、目标匝道确认、安全确认4个阶段,该过程的理论安全距离为164.8 m。

(2)目标匝道和安全确认区域内的运行速度标准差、平均车道偏移量、平均刹车踏板力度等指标显著高于其他区域,因此在本研究中被确定为风险区域。

(3)不同RTE-SDP距离条件下风险区域的运行速度标准差、平均车道偏移量、平均刹车踏板力度等行为指标存在显著性差异。

(4)当RTE-SDP距离为250 m时,风险区域行车安全风险模型计算得到的风险值最低。

参考文献:

- [1] 刘斌,李刚,黄春富,等.基于可靠度的地下互通立交匝道坡度指标研究[J].公路,2022,67(10):9-17.
Liu Bin, Li Gang, Huang Chun-fu, et al. Research on the slope index of underground interchange ramps based on reliability[J]. Highway, 2022, 67(10): 9-17.
- [2] 袁胜强,景啸,史程祥.城市地下互通立交通行能力计算[J].同济大学学报:自然科学版,2021,49(2):236-442.
Yuan Sheng-qiang, Jing Xiao, Shi Cheng-xiang. Calculation of traffic capacity of urban underground interchanges[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2021, 49(2): 236-242.
- [3] 李少刚.地下互通立交隧道设计参数优化及施工技术研究[D].北京:北京交通大学土木建筑工程学院,2011.
Li Shao-gang. Optimization of design parameters and construction technology for underground interchange tunnels[D]. Beijing: School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, 2011.
- [4] 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:东南大学交通学院,2021.
Shi Ke. Analysis of the traffic capacity of the secondary separation exit ramp of the highway interchange[D]. Nanjing: School of Transportation, Southeast University, 2021.
- [5] Lyu N C, Wu C Z, Fu Q. Analysis traffic safety for highway off-ramp based on visual reaction time on traffic signs[C]//International Conference on Transportation Information and Safety(ICTIS), Piscataway, USA, 2015: 25-28.
- [6] 冯志成,雷桂荣,蒋若曦,等.苜蓿叶分离式互通立

- 交二次定向分流匝道合理长度研究[J]. 公路与汽运, 2017, 182(5): 28-32, 37.
- Feng Zhi-cheng, Lei Gui-rong, Jiang Ruo-xi, et al. Study on the reasonable length of the secondary directional diversion ramp of the alfalfa leaf-separated interchange[J]. Highways and Automotive Applications, 2017, 182(5): 28-32, 37.
- [7] Shang T, Wu P, Lian G, et al. Influences of exit advance guide signs on the trajectory and speed of passenger cars in highway tunnels[J]. Journal of Advanced Transportation, 2021(9): No. 8453439.
- [8] 孙明玲, 赵源, 葛书芳. 双车道高速公路隧道与互通式立交出口最小间距分析[J]. 公路, 2014, 59(7): 274-278.
- Sun Ming-ling, Zhao Yuan, Ge Shu-fang. Analysis of the minimum spacing between the double-lane highway tunnel and the interchange exit[J]. Highway, 2014, 59(7): 274-278.
- [9] 牛敏强, 蒲华乔, 符铎砂, 等. 基于稳定流态下隧道与主线出入口最小净距研究[J]. 中外公路, 2021, 41(4): 261-267.
- Niu Min-qiang, Pu Hua-qiao, Fu Xin-sha, et al. Study on the minimum net distance between tunnels and main line entrances and exits under stable flow conditions[J]. Journal of China and Foreign Highway, 2021, 41(4): 261-267.
- [10] 邵阳, 潘兵宏, 王云泽. 高速公路互通式立交连续出口和入口间距研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(8): 1642-1651.
- Shao Yang, Pan Bing-hong, Wang Yun-ze. Study on the spacing between continuous exits and entrances of highway interchanges[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(8): 1642-1651.
- [11] 程传乐. 基于变异型集散道模型的高速公路互通式立交最小间距研究[D]. 西安: 长安大学公路学院, 2019.
- Cheng Chuan-le. Study on the minimum spacing of highway interchanges based on the variant-type collection and distribution road model[D]. Xi'an: School of Highways, Chang'an University, 2019.
- [12] 吴文静, 战勇斌, 杨丽丽, 等. 考虑安全间距的合流区可变限速协调控制方法[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(6): 1315-1323.
- Wu Wen-jing, Zhan Yong-bin, Yang Li-li, et al. Coordinated control method of variable speed limit in on-ramp area considering safety distance[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(6): 1315-1323.
- [13] JTG/T D21—2014. 公路立体交叉设计细则[S].
- [14] JTG D20—2017. 公路路线设计规范[S].
- [15] JTG D70/2—2014. 公路隧道设计规范[S].
- [16] CJJ221—2015. 城市地下道路工程设计规范[S].
- [17] 潘兵宏, 周锡滨, 周廷文, 等. 高速公路互通式立交出口识别视距计算模型[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2020, 48(9): 1312-1318.
- Pan Bing-hong, Zhou Xi-zhen, Zhou Ting-wen, et al. Calculation model of recognition sight distance for highway interchange exits[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition), 2020, 48(9): 1312-1318.
- [18] 赵一飞, 陈敏, 潘兵宏. 隧道与互通式立交出口最小间距需求分析[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2011, 31(3): 68-71.
- Zhao Yi-fei, Chen Min, Pan Bing-hong. Analysis of the minimum spacing requirements between tunnels and interchange exits[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2011, 31(3): 67-71.
- [19] 陈湘. 公路交通标志优化设计研究[J]. 科学技术创新, 2023(6): 177-180.
- Chen Xiang. Study on optimal design of highway traffic signs[J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(6): 177-180.
- [20] 徐进, 曾粤. 高速条件下隧道出入口行驶速度特性[J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(4): 197-209.
- Xu Jin, Zeng Yue. Characteristics of driving speed at tunnel entrances and exits at high speed[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(4): 197-209.