

风险场景驱动的次任务驾驶行为对接管绩效的影响

郭柏苍^{1,2}, 雒国凤^{1,2}, 金立生^{1,2}, 石业玮^{1,2}, 韩卓桐^{1,2}, 张洪瑜^{1,2}

(1. 燕山大学 车辆与能源学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 河北省特种运载装备重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 以高风险场景元素参数为控制权切换条件, 探究次任务对驾驶人接管绩效的影响。从NGSIM数据集中提取旁车切入高风险场景作为控制权切换条件, 使用皮尔逊相关性检验分析不同接管绩效指标间的相关性, 利用单因素方差分析比较不同次任务资源占用模式与可中断性对接管绩效指标的影响。结果表明, 接管时间与接管过程的横纵向操纵能力、安全性、接管效率相互耦合。增加视觉占用会增大0.26 s的接管反应时间并破坏车辆纵向稳定性与接管效率, 增加听觉占用会增大0.45 s的接管反应时间并降低接管效率, 增加认知占用会减小0.23 s的接管反应时间并提升接管安全性, 增加操作占用会增大0.21 s的接管反应时间并增大接管过程的最大横向加速度, 次任务可中断性会减小0.23 s的接管反应时间, 但对接管后续车辆控制相关的指标无显著影响。

关键词: 车辆工程; 人机共驾; 接管绩效; 次任务驾驶; 风险场景; 次任务可中断性

中图分类号: U491.2

文献标志码: A

Impact of Risk Scenario-driven Secondary Task Driving Behavior on Takeover Performance

GUO Baicang^{1,2}, LUO Guofeng^{1,2}, JIN Lisheng^{1,2}, SHI Yewei^{1,2}, HAN Zhuotong^{1,2}, ZHANG Hongyu^{1,2}

(1. School of Vehicle and Energy, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Hebei Key Laboratory of Special Carrier Equipment, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In this paper, high-risk scenario element parameters are used as control switching conditions to explore the impact of secondary tasks on driver takeover performance. Specifically, the high-risk scenario of adjacent vehicles entering is extracted from the NGSIM dataset as the control switching condition. The Pearson correlation test is used to analyze the correlation between

different takeover performance indicators, and one-way ANOVA is used to analyze the impact of the resource occupation mode and interruptibility of secondary tasks on takeover performance indicators. The results show that the takeover time is coupled with the lateral and longitudinal maneuverability, safety, and takeover efficiency during the takeover process. Increasing visual occupation increases the takeover reaction time by 0.26 s and undermines the vehicle longitudinal stability and takeover efficiency. Increasing auditory occupation increases the takeover reaction time by 0.45 s and reduces the takeover efficiency. Increasing cognitive occupation decreases the takeover reaction time by 0.23 s and improves the takeover safety. Increasing operational occupation increases the takeover reaction time by 0.21 s and increases the maximum lateral acceleration during the takeover process. The interruptibility of secondary tasks reduces the takeover reaction time by 0.23 s, but has no significant impact on subsequent vehicle control related indicators during the takeover.

Keywords: vehicle engineering; human-machine copilot; takeover performance; secondary task driving; risk scenario; interruptibility of secondary task

作为完全自动驾驶的过渡, 人机共驾允许驾驶人在系统设计运行范围内从事一些与驾驶无关的次任务^[1], 当超出该范围时系统需提醒驾驶人接管车辆控制权。在此过程中, 如何界定真实的控制权切换场景, 并挖掘次任务对接管绩效的影响机理, 是保障人机共驾接管安全性的关键。对于控制权切换场景而言, 现阶段大多采用本车道前方静止障碍物、道路施工区域需换道、旁车切入的车辆、车道线消失等固定场景, 该类场景对系统设计运行范围的定义仅

收稿日期: 2024-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(52202503); 河北省自然科学基金(F2022203054); 河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2023026)

第一作者: 郭柏苍, 副教授, 博士, 主要研究方向为自动驾驶人机协作与测试评价。

E-mail: guobaicang@ysu.edu.cn

通信作者: 雒国凤, 博士生, 主要研究方向为驾驶行为分析与建模。E-mail: luoguofeng1329@126.com



论文
拓展
介绍

停留在逻辑场景层面,并未细化到具体场景,难以为3级驾驶自动化系统提供准确的接管触发条件,失真的接管场景不利于分析得到合理有效的结论。

鲁光泉等^[2]以前方出现一辆抛锚车辆为自动驾驶接管触发条件,Dogan等^[3]以缺少车道标记和前方存在障碍物为自动驾驶接管的触发条件,Wu等^[4]以左侧障碍物、前方有障碍物和前方有障碍物且障碍物信息被遮挡为自动驾驶接管的触发条件,研究了驾驶人的手动跟车风险接受水平、接管时间预算、不同场景和次任务类型对接管绩效的影响并得到了一定成果。然而,上述接管触发条件多从感知系统失效角度定义系统边界,并未从车辆本身运行参数角度挖掘系统失效条件,导致接管场景真实性不足。为了从车辆运行参数角度定义系统边界,以风险场景为接管触发条件成为可行方案。

基于自然驾驶数据对场景风险进行量化和提取已有一定基础。孙剑等^[5]采用期望反应时间(DRT)指标量化跟车过程行车风险。李君羨等^[6]根据主超车的类型,结合其超车后行程速度和单车超车当量速度差量化车辆超车风险。朱西产等^[7]以驾驶人在前车突然减速时所需要的最小反应时间为评价风险的指标,完成风险场景提取。郭柏苍等^[8]将危险感知(RP)系数作为风险场景指标,根据层次聚类对数据进行预聚类,将得到的聚类簇数和聚类中心作为 K 均值聚类的聚类簇数和初始聚类中心,最后得到4种变道切入场景的场景要素数据。陈晓芸等^[9]采用修正的碰撞时间(MTTC)识别潜在冲突概率以提取高风险事件。Feng等^[10]依据安全测试指标建立场景重要性函数,并利用此函数提取风险场景。

在次任务对接管绩效影响的研究中,考虑到驾驶人参与次任务时其视觉感知力、听觉感知力、认知力、操作力被占用,相关学者对次任务资源占用模式展开研究。Zhang等^[11]对比操作任务与非操作任务后发现,操作任务会延长驾驶人的接管时间,并降低接管稳定性。Chai等^[12]对比听觉次任务与非听觉次任务后发现,听觉次任务对听觉接管请求有不利影响。Lu等^[13]认为,适度的认知次任务(非视觉)会降低驾驶人接管后的纵向碰撞风险。张辉等^[14]发现,与有大量视觉认知资源需求的次任务相比,有高度视觉操作资源需求的次任务与碰撞风险的相关性更高。Guo等^[15]研究了不同次任务资源占用模式及模式添加对接管绩效的影响,视觉和操作资源需求显著增加了参与者的响应时间,并降低了接管质量。Coyne等^[16]通过Meta分析将次任务按照资源占用模

式分为视觉与非视觉、手动与非手动,研究不同资源占用模式对接管绩效的影响。

现有研究主要对少量单模式或多模式占用次任务进行分析,资源占用模式丰富度不足。此外,并未考虑驾驶人接管车辆控制权对次任务结果的影响进而对接管绩效产生的后果。因此,以旁车切入为控制权切换逻辑场景,通过NGSIM数据集提取旁车切入风险场景数据建立控制权切换场景,将驾驶人接管控制权是否会影响次任务结果定义为次任务的可中断性。采用驾驶模拟器进行驾驶模拟实验,模拟L3级自动驾驶车辆的驾驶接管过程,提取并分析相关车辆及驾驶操作数据,以探究次任务资源占用模式与次任务可中断性对接管绩效的影响。该研究成果可为L3级自动驾驶控制权动态分配及接管绩效综合评价提供理论依据。

1 旁车切入风险场景

1.1 旁车切入场景提取

前方车辆突然切入所导致的侧面碰撞在交通事故中占有很大比例^[17]。本文采用NGSIM数据集^[18]中的Lankershim城市道路自然驾驶数据集,提取旁车切入场景数据。

(1)NGSIM数据预处理。原始数据以时间顺序存储。为了提取旁车切入数据,先按照车辆编号对单个车辆数据进行分类,接着对分类后的数据进行合并,并依据全局事件和行驶总帧数进行排序,最后依据车辆类型进行筛选。仅保留汽车类型数据,得到2 440条车辆轨迹数据。

(2)场景提取步骤。首先,根据NGSIM数据集自身具备的车辆所处车道信息确定车辆变道时刻,参考横摆角速度变化确定换道开始和结束时刻以提取换道场景数据^[19];其次,采用数据集自有的后车编号判断是否存在后车以及后车编号,合并同一时段内的换道场景数据与该场景对应后车行驶数据并作为旁车切入场景数据;接着,为了保证旁车切入行为对后车产生影响,筛选切入初始时刻两车的相对距离小于60 m的旁车切入轨迹;最后,对所提取的数据轨迹进行手动核验以保证轨迹的合理性,筛选得到93个旁车切入场景。

1.2 旁车切入场景元素确定

以每个场景中前车开始切入时刻的数据为场景元素参数,选择车头时距(t_{THW})作为车辆风险指标。由K-S正态分布检验发现, t_{THW} 不满足正态分

布($p=0.030\ 0<0.05$),故使用Spearman相关性检验评估旁车切入场景元素与车辆风险指标的相关性。两变量间的线性相关程度可用Spearman相关系数与显著性 p 值表示,当显著性小于0.05时,两变量之间的相关性显著。

(1) 自车速度。自车速度定义为后车的横纵向合速度,在旁车切入场景中自车速度与 t_{THW} 的分布如图1a所示。随着自车速度的增加, t_{THW} 值随之减小,场景的危险程度增加。经Spearman相关性检验,自车速度与 t_{THW} 显著负相关($p=0.000\ 0<0.05$)。

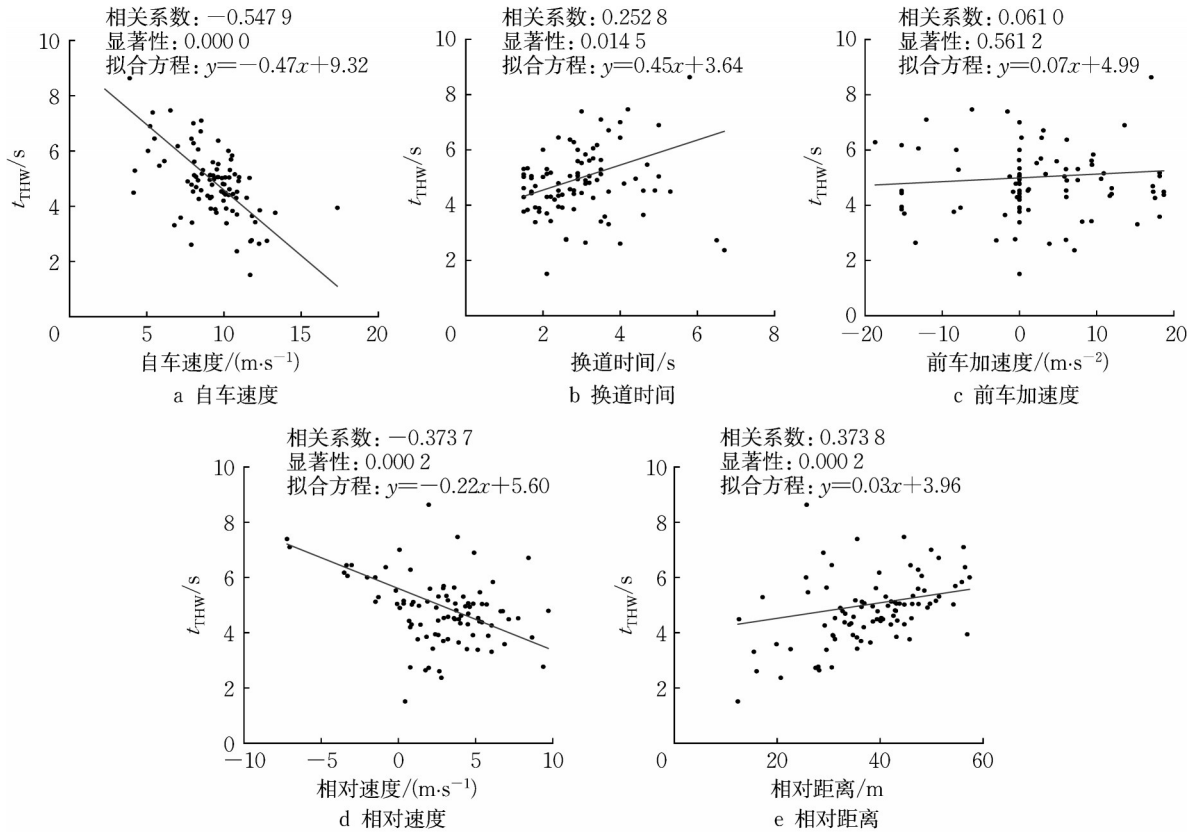


图1 场景元素与车头时距分布

Fig.1 Scenario elements and time headway distribution

(2) 换道时间。换道时间定义为前车开始换道与结束换道的时间差,在旁车切入场景中换道时间与 t_{THW} 的分布如图1b所示。随着换道时间的增加, t_{THW} 值随之增大,场景的危险程度减小。经Spearman相关性检验,换道时间与 t_{THW} 显著正相关($p=0.014\ 5<0.05$)。

(3) 前车加速度。前车加速度定义为前方变道车辆的横纵向合加速度,在旁车切入场景中前车加速度与 t_{THW} 的分布如图1c所示。随着前车加速度的增加, t_{THW} 值无明显变化趋势。经Spearman相关性检验,前车加速度与 t_{THW} 值之间的相关性不显著。

(4) 相对速度。相对速度定义为后车合速度减前方变道车辆合速度,在旁车切入场景中相对速度与 t_{THW} 的分布如图1d所示。随着相对速度的增加, t_{THW} 值随之减小,场景的危险程度增加。经Spearman相关性检验,相对速度与 t_{THW} 显著负相关

($p=0.000\ 2<0.05$)。

(5) 相对距离。相对距离定义为前方变道车辆质心位置与后方跟随车辆质心位置间的直线距离,在旁车切入场景中相对距离与 t_{THW} 的分布如图1e所示。随着相对距离的增加, t_{THW} 值随之增大,场景的危险程度减小。经Spearman相关性检验,相对距离与 t_{THW} 显著正相关($p=0.000\ 2<0.05$)。

综合上述分析,最终选定自车速度、换道时间、相对速度、相对距离4个参数作为旁车切入场景元素。

1.3 旁车切入风险场景提取

(1) 融合相对距离及车头时距的风险等级划分。为了建立二维风险等级阈值分区体系,选择相对距离为 $1\ m^{[10]}$ 、 t_{THW} 为 $2\ s^{[20]}$ 作为阈值,构建如图2所示的坐标系。最终将场景风险分为了安全(0)、低风险(1)、高风险(2)3个等级。

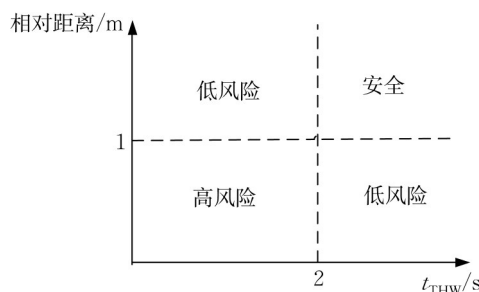


图2 场景风险等级分级

Fig.2 Risk level grading of scenarios

(2) 旁车切入风险场景提取结果。对所得到的93个场景数据计算单个场景中的两车最小相对距离与最小车头时距,依据所建立的风险等级评判标准赋值各场景风险等级,最终得到的各场景等级分布如图3所示。包含81个安全场景,9个低风险场景,3个高风险场景。3个高风险场景数据如表1所示。

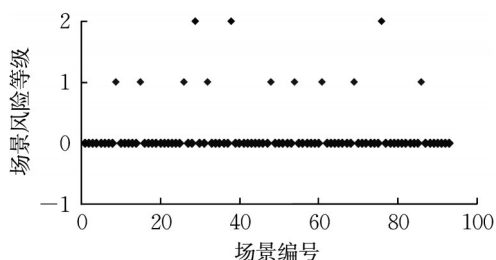


图3 各场景风险等级分布

Fig.3 Distribution of risk levels in each scenario

表1 所提取的高风险场景元素参数

Tab.1 Extracted high-risk scenario element parameters

高风险场景 编号	自车速度/ (m·s ⁻¹)	换道时间/s	相对速度/ (m·s ⁻¹)	相对距离/m
1	5.03	1.43	4.35	24.40
2	8.52	4.76	7.62	54.45
3	10.82	1.28	1.05	17.74

2 实验方法

2.1 实验对象

Gold等^[21]的研究发现,驾驶人年龄对接管绩效的影响较小。同时,在校大学生作为年轻驾驶人缺乏一定的驾驶经验,危险识别能力较弱^[22],更易出现不安全操作。因此,本研究以在校大学生为实验对象。为了在节约成本的同时获取足量的实验数据,以提高实验结果的可信度,基于容许误差与置信水平^[23]确定实验所需驾驶人的数量,计算式为

$$M = \frac{K^2 \epsilon^2}{E^2} \quad (1)$$

式中: M 为实验驾驶人数量; K 为置信水平相关系数,选取95%置信水平, $K=1.96$; ϵ 为样本标准偏差,95%置信水平下考虑实验成本等因素取4.5; E 为容许误差,95%置信水平下取2。通过式(1)计算得到的最低实验驾驶人样本量为19。招募25名被试参与驾驶实验,被试均取得机动车驾驶证,其中男性16名,女性8名,人员分布符合我国驾驶人男女分布比例^[24]。被试的年龄范围为22~28岁,平均年龄为24.5岁(标准差为1.9岁),最长驾龄为5年,最短驾龄为2年,平均驾龄为3.32年。参与实验的被试身体健康,在实验前24 h内作息正常,未有服用药物和饮酒等行为。

2.2 实验设备

实验设备包括SimEASY驾驶模拟仿真实验平台、智能手机、笔记本电脑。智能手机和笔记本电脑用于辅助次任务执行。SimEASY驾驶模拟仿真实验平台由模拟器主机、汽车座椅、驾驶场景显示屏、听觉提醒音响、罗技G29转向盘、制动加速踏板等设备组成,该平台可快速创建道路、建筑、交通流及周围环境等,以搭建真实的控制权切换场景并设定接管请求模式,采集测试人员接管过程的位置、速度、加速度、自动驾驶模式、制动力、方向盘转角等实验分析所需的数据。实验场景如图4所示。



图4 驾驶模拟仿真实验场景

Fig.4 Driving simulation experiment scenario

2.3 实验设计

(1) 道路场景。搭建双向六车道的城市道路,整个路段全长14 km,天气和道路状况良好。为了真实模拟驾驶过程,在自动驾驶车辆前方500~700 m及后方250~500 m范围内生成动态交通流。实验开始时自动驾驶车辆处于中间车道,故设置自动驾驶最高车速为80 km·h⁻¹。

(2) 接管场景。接管场景为自动驾驶过程中执行非驾驶任务时,与自车同向行驶的前方车辆突然

紧急切入,具体场景元素参数从所提取的高风险旁车切入场景数据中筛选,以自车速度 $5.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、换道时间 1.43 s 、相对速度 $4.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、相对距离 24.4 m 为控制权切换条件,当同时满足上述条件时自动驾驶发出接管请求。具体接管场景如图5所示。



图5 接管场景

Fig.5 Takeover scenario

(3)次任务。为了研究不同资源占用模式对接管绩效的影响,设置驾驶人时刻关注道路信息作为对照组,选择找不同作为视觉单模式资源占用次任务、看视频作为视觉听觉双模式资源占用次任务、与乘客交谈作为视觉听觉认知三模式资源占用次任务、玩游戏作为视觉听觉认知操作四模式资源占用次任务;为了研究次任务可中断性对接管绩效的影响,细化玩游戏次任务,将跳一跳等中断后不会影响任务成绩的次任务作为玩游戏1,将贪吃蛇等中断后影响任务成绩的次任务作为玩游戏2,对比玩游戏1和玩游戏2间的接管绩效差异。在实验过程中,根据被测者喜好调整看视频、与乘客交谈、玩游戏1、玩游戏2的具体内容,保证良好的任务参与度。在进行与乘客交谈次任务时,强制驾驶人关注前方,并与驾驶人互动提问,以保证视觉听觉认知占用。在玩游戏时,打开游戏声音,以保证听觉占用。同时,驾驶人从事次任务时双手离开方向盘且双脚不放置于踏板上。

(4)接管请求方式。实验过程中采用“语音+文字”形式进行接管提示,语音提示为“自动驾驶即将失效,请及时接管”,文字提示的具体内容为“请求接管”。文字和语音信息显示时间值设定为 2 s 。同时,在接管过程中有“超速”语音提示,具体为“您已超速,请降低车速”。

2.4 实验过程

人机接管实验可分为3步:首先,对被试进行培训并收集年龄、性别、驾龄等个人信息;其次,进行预实验,让被试熟悉驾驶及接管操作并有意识地进行加减速和变道,避免实验过程中出现不规范的驾驶

行为;最后,进行正式实验,在正式实验开始时被试从事当前所需从事的次任务,直至自动驾驶发出接管请求,被试的注意力转移至接管事件上并通过按下手动驾驶按钮接管控制权,接管过程中被试自主应对接管事件并判断接管完成情况后立即切换至自动驾驶模式,一次正式实验完成。重复上述步骤,采集25个被试在同一接管场景下的基准与5个次任务下的接管数据。

2.5 接管绩效指标

从接管过程中驾驶人的反应能力、高效性、横向操纵能力、纵向操纵能力、安全性5个维度出发,选择接管时间、任务完成时间、最大横向加速度、纵向速度标准差、最小碰撞时间(t_{TTC})作为接管绩效指标对接管过程进行度量。

(1)接管时间。接管时间一般指当接管请求(TOR)发出时,驾驶人为了避免发生交通事故而采取的制动或换道行为,从接到TOR到驾驶人采取适当的驾驶行为这段时间即为接管时间。有效的驾驶行为通常定义为制动踏板弧度大于 10% 或方向盘转角大于 2° ^[25]。

(2)任务完成时间。任务完成时间是指自动驾驶发出接管请求时刻到再次切换控制权至自动驾驶模式的时间。该指标可以反映驾驶人应对该接管场景的效率。

(3)最大横向加速度。最大横向加速度是指驾驶人接管车辆控制权进行避障操作过程中车辆横向加速度的最大值。车辆横向加速度越大,驾驶人的横向操作越紧急。

(4)纵向速度标准差。纵向速度标准差是指驾驶人接管车辆控制权进行避障操作过程中车辆的纵向速度标准差。车辆纵向速度标准差越大,驾驶人的纵向操作越不稳定,表明接管质量越差。

(5)最小碰撞时间。最小碰撞时间是指自车与前方障碍车辆之间的最小碰撞时间。最小碰撞时间可以表征驾驶人控制车辆避障过程的安全性,最小碰撞时间越小,驾驶人接管后避障过程安全性越低。最小碰撞时间计算式为

$$t_{\text{TTC}} = \frac{d}{v_s - v_L} = \frac{d}{v_r} \quad (2)$$

式中: d 为自车与前车的相对距离; v_s 、 v_L 分别为自车速度、前车速度; v_r 为自车与前车的速度差。

2.6 数据预处理

每次实验输出的数据中包含1次接管数据。在数据列表中可以通过自车、前车速度位置参数确定

接管请求时刻,根据车辆驾驶模式参数提取任务完成时间点,并依据接管时间定义提取接管时间,同时计算接管过程的最大横向加速度、纵向速度标准差、最小碰撞时间。如果被试忘记接管,就会造成一些次任务接管数据缺失,导致次任务样本不均。对于此类情况,在该被试完成其余次任务接管后对缺失任务进行补充,但对于被试正常接管控制权后不能快速理解场景并做出正确合理的响应措施而导致发生碰撞的数据不视为接管异常,对该类数据保留。

3 实验结果与分析

3.1 接管绩效指标统计及方差齐性检验

驾驶人接管时间、任务完成时间、最大横向加速度、纵向速度标准差、最小碰撞时间的统计结果如表2所示。图6为各指标的统计直方图。可以看出,各

指标都近似满足正态分布。通过统计产品和服务解决方案软件(SPSS)对各指标进行方差齐性检验。接管时间($p=0.234>0.05$)、任务完成时间($p=0.304>0.05$)、纵向速度标准差($p=0.528>0.05$)、最大横向加速度($p=0.346>0.05$)、最小碰撞时间($p=0.153>0.05$)的数据分布满足方差齐性。

3.2 碰撞接管过程分析

由表2所知,最小碰撞时间取值范围为0~6 s。最小碰撞时间为0 s(接管发生碰撞)的接管数据有2个,分别为视觉听觉占用次任务下的接管、视觉听觉认知操作不可中断性次任务下的接管。统计2个碰撞接管实验开始请求时刻至发生碰撞时刻的制动力、方向盘转角、相对距离,如图7所示。虚线代表方向盘转角为 2° 或 -2° ,方向盘逆时针转动为正。由图7可见,视觉听觉占用次任务下接管碰撞中的接管时间为3.33 s,该场景碰撞是因驾驶人接管反

表2 接管绩效指标统计

Tab.2 Statistics of takeover performance indicators

项目	接管时间/s	任务完成时间/s	最大横向加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	纵向速度标准差/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最小碰撞时间/s
平均值	1.65	7.99	1.15	3.72	2.70
标准偏差	0.65	1.35	0.45	1.35	1.25
最小值	0.15	4.74	-0.21	0.01	0.00
最大值	3.73	12.70	2.64	7.14	6.00

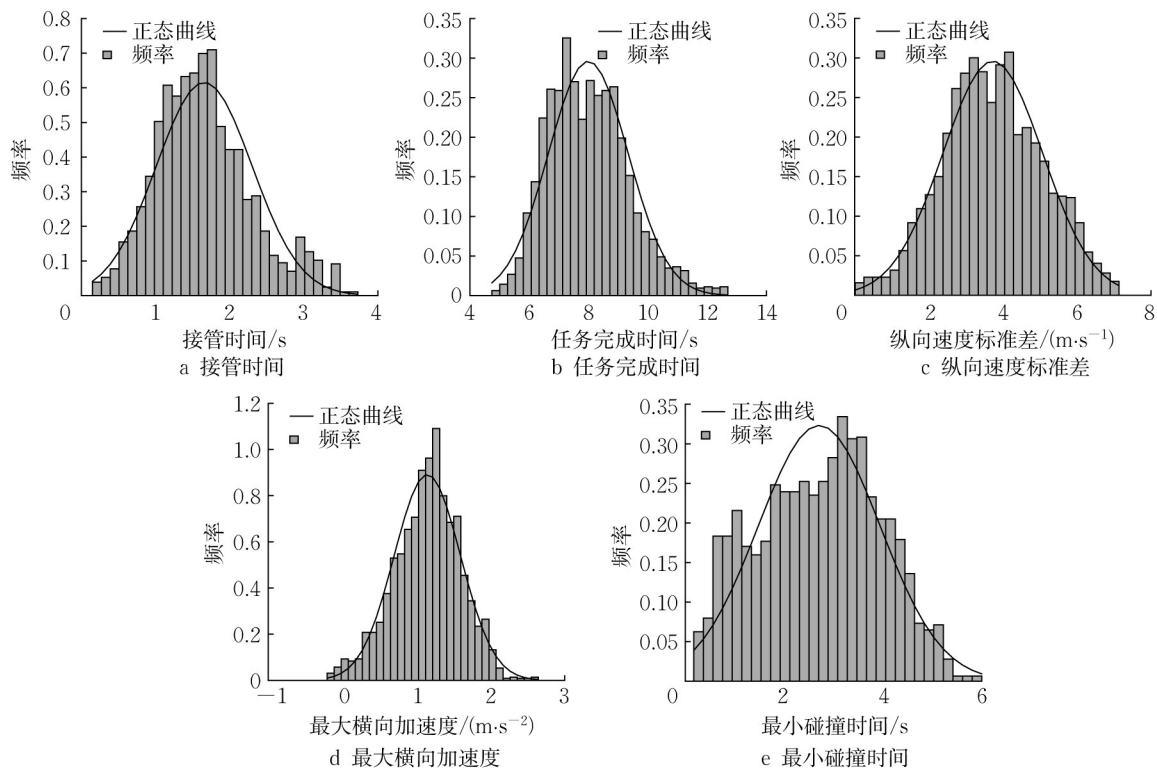


图6 接管绩效指标直方图

Fig.6 Histogram of takeover performance indicators

应过慢而导致驾驶人接管车辆时两车相对距离为5.73 m,此时由于自身慌乱驾驶人并未控制车辆减速而是采用转向避障,因此产生了两车相撞。在视觉听觉认知操作占用不可中断性次任务下的碰撞中,驾驶人接管时间为3.73 s,驾驶人在接管车辆控制权时两车相对距离不足5 m,此时驾驶人采取制动转向避障也难以应对该场景。上述2个碰撞事件中的接管时间都较长,在此条件下留给驾驶人可操作的空间越小,驾驶安全性越低。

3.3 接管绩效指标相关性分析

所选的接管时间、任务完成时间、纵向速度标准差、最大横向加速度、最小碰撞时间5个指标中,接管时间属于接管控制权前接管反应的度量,纵向速度标准差、最大横向加速度、最小碰撞时间、任务完成时间是对后续接管过程接管质量的评估标准。在接管过程中,次任务对前期被试接管反应的影响可能影响后续接管过程,而且接管过程车辆横纵向操纵能力与安全性和高效性之间也可能出现耦合关系。基于此,采用皮尔逊相关性检验对各指标进行相关性分析,结果如表3所示。可以看出,接管时间与任务完成时间、最大横向加速度、最小碰撞时间为正相关,与纵向速度标准差为负相关;任务完成时间与纵向速度标准差、最小碰撞时间为正相关;纵向速度标准差与最大横向加速度、最小碰撞

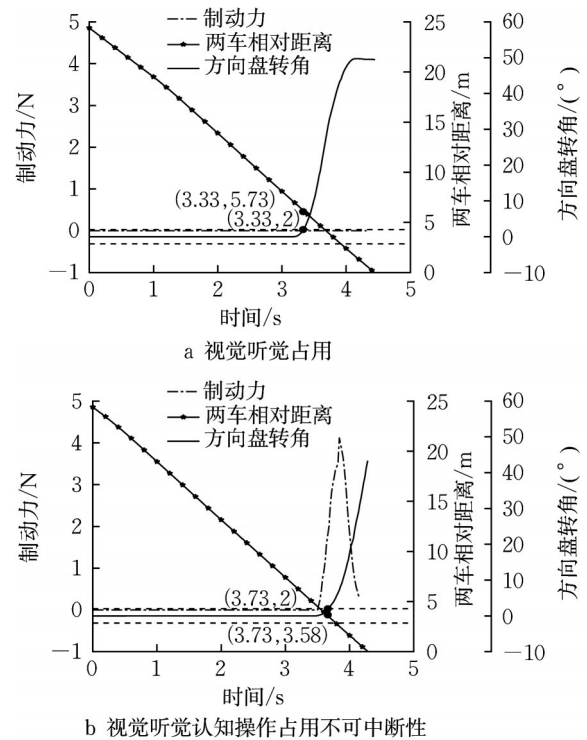


图7 碰撞接管的制动力、方向盘转角与两车相对距离分布

Fig.7 Distribution of braking force, steering wheel angle and relative distance between two vehicles of collision nozzle

时间为正相关;最大横向加速度与最小碰撞时间不相关。

表3 接管绩效指标相关性分析

Tab.3 Correlation analysis of takeover performance indicators

接管绩效指标	接管时间	任务完成时间	纵向速度标准差	最大横向加速度	最小碰撞时间
接管时间	1.000	0.585**	-0.100**	0.094**	0.109**
任务完成时间	0.585**	1.000	0.044**	0.000	0.112**
纵向速度标准差	-0.100**	0.044**	1.000	0.103**	0.110**
最大横向加速度	0.094**	0.000	0.103**	1.000	0.028
最小碰撞时间	0.109**	0.112**	0.110**	0.028	1.000

注:**表示 $p < 0.01$,相关性极显著。

3.4 资源占用模式及次任务可中断性对接管绩效指标的影响分析

采用单因素方差分析对比各组间接管绩效指标的差异,结果如图8所示。其中,*代表 $0.01 < p \leq 0.05$,**代表 $0.001 < p \leq 0.01$,***代表 $p \leq 0.001$ 。

3.4.1 资源占用模式对接管绩效指标的影响

由图8a可知:基准((1.42±0.61) s)与视觉占用((1.68±0.63) s)、视觉占用与视觉听觉占用((2.13±0.76) s)、视觉听觉占用与视觉听觉认知占用((1.50±0.32) s)、视觉听觉认知占用与视觉听觉认知操作占用可中断次任务((1.71±0.74) s)间的驾驶人接管时间都具有显著差异,这表明次任务会

显著增加驾驶人的接管时间;资源占用模式会显著影响驾驶人的接管时间,增加视觉占用后接管时间平均增加0.26 s,增加听觉占用后接管时间平均增加0.45 s,增加认知占用后接管时间平均减小0.63 s,增加操作占用后接管时间平均增加0.21 s。当自动驾驶系统发出接管请求时,驾驶人需识别接管请求指令后指挥眼睛、手脚进行场景理解与控制权接管,但当驾驶人从事次任务时会影响其对接管请求的反应,导致接管时间增大。视觉占用导致接管时间增加是由于在接管时驾驶人的视觉感兴趣区域发生变化,驾驶人需转移注意力至屏幕,导致接管时间增大。听觉占用导致接管时间增加是由于驾驶人对

听觉刺激更为敏感^[26],实验过程中自动驾驶系统发出接管请求时,接管请求信息和次任务的听觉信息产生资源争夺,导致驾驶人反应变慢。认知占用使接管时间减小是由于在该次任务下驾驶人具备一定的认知水平,当自动驾驶系统发出接管请求时驾驶

人认知响应更快,表现在接管反应上即为接管时间减少。操作占用使接管时间增加是由于驾驶人在听到接管请求后需要先放下手中的设备,再按下接管按钮以控制车辆,因此该条件下接管时间有所增加。

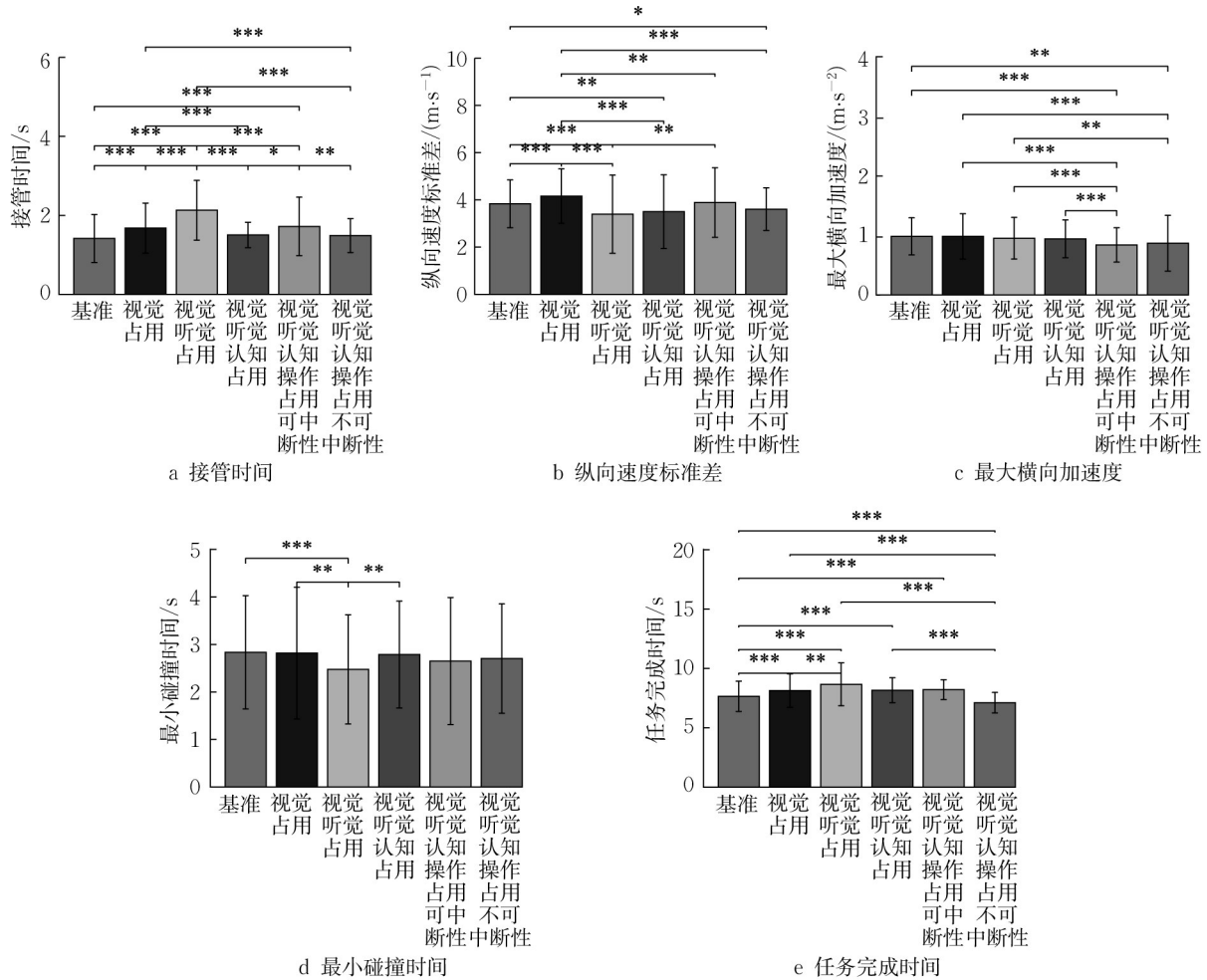


图8 资源占用模式及次任务可中断性对接管绩效的影响

Fig.8 Effect of resource occupation mode and interruptibility of secondary tasks on takeover performance

由图8b可知:基准($(3.83 \pm 1.01) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)与视觉占用($(4.16 \pm 1.15) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、基准与视觉听觉占用($(3.39 \pm 1.65) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、基准与视觉听觉认知占用($(3.51 \pm 1.56) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)间的纵向速度标准差都存在显著差异,该现象说明次任务占用对纵向速度标准差影响显著;此外,逐个对比单个资源占用模式,仅视觉占用与视觉听觉占用间的纵向速度标准差存在显著差异,该现象表明听觉占用对纵向速度标准差影响显著,视觉听觉占用比视觉占用下的速度标准差小 $0.77 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这是由于增加听觉占用后,驾驶人的反应变慢,接管车辆后的行车风险较大。研究表明,驾驶人在面对高风险场景时驾驶风格更偏

保守^[20],故纵向速度标准差较小,行驶稳定性更好,该结果与表3的接管时间与纵向速度标准差负相关的结论一致。

由图8c可知:视觉听觉认知操作占用可中断性($(1.33 \pm 0.36) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)与基准($(1.22 \pm 0.39) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)、视觉占用($(1.22 \pm 0.47) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)、视觉听觉占用($(1.18 \pm 0.43) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)、视觉听觉认知占用($(1.16 \pm 0.40) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)间的最大横向加速度都存在差异,但基准、视觉占用、视觉听觉占用、视觉听觉认知占用两两间的最大横向加速度没有显著差异,该现象表明操作占用对接管过程的最大横向加速度影响显著。对比视觉听觉认知操作可中断性($(1.33 \pm$

$0.36) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)与视觉听觉认知占用($(1.16 \pm 0.40) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)下的最大横向加速度,增加操作占用后最大横向加速度增大 $0.17 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。综合接管绩效指标相关性分析,增加操作占用后最大横向加速度增大是操作占用导致的接管时间变长和纵向速度标准差变大的综合作用。

由图8d可知:基准($(2.83 \pm 1.19) \text{ s}$)与视觉占用($(2.82 \pm 1.39) \text{ s}$)、视觉听觉认知占用($(2.77 \pm 1.14) \text{ s}$)与视觉听觉认知操作可中断性($(2.61 \pm 1.37) \text{ s}$)间的最小碰撞时间都无显著差异,但视觉占用与视觉听觉占用($(2.48 \pm 1.15) \text{ s}$)、基准与视觉听觉占用、视觉听觉占用与视觉听觉认知占用间的最小碰撞时间都存在显著差异,该现象表明听觉占用会显著降低驾驶人接管过程的行车安全性,添加认知占用会显著改善驾驶人的接管安全性。综合接管绩效指标相关性分析,增加听觉占用导致最小碰撞时间减小是听觉占用导致的接管时间变长和纵向速度标准差变大的综合作用,增加认知占用导致最小碰撞时间增大是认知占用导致的接管时间减小的作用。

由图8e可知:基准($(7.65 \pm 1.28) \text{ s}$)与视觉占用($(8.13 \pm 1.41) \text{ s}$)、基准与视觉听觉占用($(8.66 \pm 1.81) \text{ s}$)、基准与视觉听觉认知占用($(8.18 \pm 1.05) \text{ s}$)、基准与视觉听觉认知操作占用可中断性($(8.19 \pm 0.85) \text{ s}$)间的任务完成时间都存在显著差异,即次任务占用会显著增加任务完成时间。逐个对比单视觉占用,仅视觉占用($(8.13 \pm 1.41) \text{ s}$)与视觉听觉占用($(8.66 \pm 1.81) \text{ s}$)间的任务完成时间存在显著差异,其余占用模式增加对任务完成时间无显著影响,该现象表明听觉占用对任务完成时间影响较大。由接管绩效指标相关性分析可知,任务完成时间与接管时间和纵向速度标准差正相关,由图8a、b可以看出,增加听觉占用会使接管时间、纵向速度标准差增大,两者综合作用导致任务完成时间增大。

3.4.2 次任务可中断性对接管绩效指标的影响

对比可中断次任务与不可中断次任务发现:不可中断次任务的接管时间($(1.48 \pm 0.43) \text{ s}$)显著小于可中断次任务的接管时间($(1.71 \pm 0.74) \text{ s}$),可中断次任务($(8.19 \pm 0.85) \text{ s}$)与不可中断次任务($(7.11 \pm 0.86) \text{ s}$)间的任务完成时间无显著差异,可中断次任务($(3.87 \pm 1.50) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)与不可中断次任务($(3.58 \pm 0.93) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)间的纵向速度标准差无显著差异,可中断次任务($(1.33 \pm 0.36) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)与不可中断次任务($(1.32 \pm 0.58) \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)间的最大横向加速度无显著差异,可中断次任务($(2.61 \pm 1.37) \text{ s}$)

与不可中断次任务($(2.67 \pm 1.18) \text{ s}$)间的最小碰撞时间也无显著差异。该现象表明,次任务不可中断性使驾驶人的接管时间减小,但对后续的接管质量无显著影响,这是由于当自动驾驶系统发出接管请求后,正在从事不可中断次任务的驾驶人急于完成接管任务,因此对接管请求有较快的响应,但这种影响的持续时间不长,致使与后续车辆控制相关的指标无显著差异。

4 结论

(1)基于NGSIM数据集提取了93个旁车切入场景,采用Spearman相关性检验分析了5个场景要素与车头时距之间的相关性,基于车头时距和相对距离建立了场景分级标准,得到了3个高风险旁车切入场景。

(2)统计分析了接管时间、任务完成时间、纵向速度标准差、最大横向加速度、最小碰撞时间5个接管绩效指标的分布,2起接管碰撞事件分析结果表明,接管时间过长时驾驶人即使采用制动转向也不能避免碰撞事故的发生。

(3)5个接管绩效指标间的相关性分析结果表明:接管时间对接管过程的横纵向操纵能力、安全性、接管效率都有显著影响,接管安全性与接管时间和接管过程的纵向操纵能力显著相关,接管效率与接管时间有较强的相关性,但同时也受车辆纵向操纵能力与接管过程安全性的影响。

(4)不同次任务资源占用模式对5个接管绩效指标影响的分析结果表明:视觉、听觉、操作占用都会使驾驶人的接管时间增大,其中听觉占用更加明显,增加认知占用会减小驾驶人的接管时间;增加视觉占用前后的车辆纵向速度标准差、任务完成时间存在显著差异,增加听觉占用前后车辆纵向速度标准差、最小碰撞时间、任务完成时间存在显著差异,增加认知占用前后车辆最小碰撞时间存在显著差异,增加操作占用前后车辆最大横向加速度存在显著差异。

(5)次任务可中断性会显著减少驾驶人的接管时间,但对接管效率、横纵向操纵能力、接管安全性、最大横向加速度无显著影响。

受限于实验环境,仅在模拟软件上进行了驾驶仿真模拟,后续研究需要在更真实的驾驶环境中采集样本数据,以获得更真实的接管数据。

作者贡献声明:

郭柏苍:项目负责人,研究思路指导,论文修改。

雒国凤:数据采集与参数分析,论文撰写。

金立生:结果论证,论文修改。

石业玮:论文构思、修改与核对。

韩卓桐:数据采集,论文修改。

张洪瑜:数据采集,论文修改。

参考文献:

- [1] YU Zhenhua, XU Gerui, JIANG Kang, *et al.* Constructing the behavioral sequence of the takeover process-TOR, behavior characteristics and phases division: a real vehicle experiment [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2023, 186(6): 107040.
- [2] 鲁光泉,陈发城,李鹏辉,等.驾驶人跟车风险接受水平对其接管绩效的影响[J]. *汽车工程*, 2021, 43(6): 808.
LU Guangquan, CHEN Facheng, LI Penghui, *et al.* The influence of drivers' risk acceptance level on their takeover performance [J]. *Automotive Engineering*, 2021, 43(6): 808.
- [3] DOGAN E, HONNET V, MASFRAND S, *et al.* Effects of non-driving-related tasks on takeover performance in different takeover situations in conditionally automated driving [J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 62: 494.
- [4] WU C, WU H, LYU N, *et al.* Take-over performance and safety analysis under different scenarios and secondary tasks in conditionally automated driving [J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 136924.
- [5] 孙剑,张一豪,王俊骅.基于自然驾驶数据的分心驾驶行为识别方法[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(9): 225.
SUN Jian, ZHANG Yihao, WANG Junhua. Distracted driving behavior identification method based on natural driving data [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(9): 225.
- [6] 李君羨,王浩,沈宙彪,等.城市道路超车特征分析与高风险超车识别[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(9): 1312.
LI Junxian, WANG Hao, SHEN Zhoubiao, *et al.* Analysis of overtaking characteristics of urban roads and identification of high-risk overtaking [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2022, 50(9): 1312.
- [7] 朱西产,魏昊舟,马志雄.基于自然驾驶数据的跟车场景潜在风险评估[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(4): 169.
ZHU Xichan, WEI Haozhou, MA Zhixiong. Potential risk assessment of car-following scene based on natural driving data [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2020, 33(4): 169..
- [8] 郭柏苍,雒国凤,金立生,等.面向自动驾驶虚拟测试的变道切入场景库构建方法[J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(11): 3130.
GUO Baicang, LUO Guofeng, JIN Lisheng, *et al.* Construction method of lane-changing cut-in scene library for autonomous driving virtual test [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(11): 3130.
- [9] 陈晓芸,叶颖俊,余荣杰,等.低渗透率智能网联环境下高风险事件预警方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2023, 51(10): 1595.
CHEN Xiaoyun, YE Yingjun, YU Rongjie, *et al.* Early warning method of high-risk events in low-permeability intelligent networking environment [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2023, 51(10): 1595.
- [10] FENG S, FENG Y, YU C, *et al.* Testing scenario library generation for connected and automated vehicles. Part I: methodology [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2021, 22(9): 1573.
- [11] ZHANG B, DE WINTER J, VAROTTO S, *et al.* Determinants of take-over time from automated driving: a meta-analysis of 129 studies [J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2019, 64: 285.
- [12] CHAI C, LEI Y, WEI H, *et al.* The effects of various auditory takeover requests: a simulated driving study considering the modality of non-driving-related tasks [J]. *Applied Ergonomics*, 2024, 118: 104252.
- [13] LU G, ZHAI J, LI P, *et al.* Measuring drivers' takeover performance in varying levels of automation: considering the influence of cognitive secondary task [J]. *Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2021, 82: 96.
- [14] 张辉,钱大琳,邵春福,等.模拟驾驶环境下驾驶人分心状态判别[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(4): 43.
ZHANG Hui, QIAN Dalin, SHAO Chunfu, *et al.* Discriminating drivers' distracted state in simulated driving environment [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(4): 43.
- [15] GUO L, XU L, GE P, *et al.* How resource demands of nondriving-related tasks and engagement time affect drivers' physiological response and takeover performance in conditional automated driving [J]. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2023, 53(3): 600.
- [16] COYNE R, RYAN L, MOUSTAFA M, *et al.* Assessing the physiological effect of non-driving-related task performance and task modality in conditionally automated driving systems: a systematic review and meta-analysis [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2023, 192: 107243.
- [17] LYU N, WEN J, DUAN Z, *et al.* Vehicle trajectory prediction and cut-in collision warning model in a connected vehicle environment [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2022, 23(2): 966.
- [18] US Department of Transportation. NGSIM: next generation SIMulation [EB/OL]. [2023-10-30]. <https://data.gov/Automobiles/Next-Generation-Simulationtransportation.NGSIM-Vehicle-Trajectory/8ect-6jqj>.
- [19] WANG Q, LI Z, LI L. Investigation of discretionary lane-change characteristics using next-generation simulation data sets [J]. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 2014, 18(3): 246.
- [20] 金辉,吕明.基于得分系数的跟车工况驾驶风格识别研究[J].

- 北京理工大学学报, 2021, 41(3): 245.
- JIN Hui, LÜ Ming. Research on the recognition of driving style in car-following working conditions based on score coefficient [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2021, 41(3): 245.
- [21] GOLD C, HAPPEE R, BENGLER K. Modeling take-over performance in Level 3 conditionally automated vehicles [J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 116: 3.
- [22] 徐筱秦, 冯忠祥, 李靖宇. 驾驶员接管自动驾驶车辆研究进展 [J]. 交通信息与安全, 2019, 37(5): 1.
- XU Xiaoqin, FENG Zhongxiang, LI Jingyu. Research progress of drivers taking over autonomous vehicles [J]. Traffic Information and Safety, 2019, 37(5): 1.
- [23] 赵晓华, 鞠云杰, 李佳, 等. 基于驾驶行为和视觉特性的长大隧道突起路标作用效果评估 [J]. 中国公路学报, 2020, 33(6): 29.
- ZHAO Xiaohua, JU Yunjie, LI Jia, *et al.* Effect evaluation of protruding road signs in long tunnels based on driving behavior and visual characteristics [J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(6): 29.
- [24] 王首硕, 杜志刚, 冯守中, 等. 高速公路隧道入口区域视线诱导系统有效性研究 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 267.
- WANG Shoushuo, DU Zhigang, FENG Shouzhong, *et al.* Study on the effectiveness of line-of-sight guidance system at the entrance of expressway tunnel [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 267.
- [25] PAN H, HE H, WANG Y, *et al.* The impact of non-driving related tasks on the development of driver sleepiness and takeover performances in prolonged automated driving [J]. Journal of Safety Research, 2023, 86: 148.
- [26] 姚荣涵, 祁文彦, 郭伟伟. 自动驾驶环境下驾驶人接管行为结构方程模型 [J]. 交通运输工程学报, 2021, 21(2): 209.
- YAO Ronghan, QI Wenyan, GUO Weiwei. Structural equation model of driver's takeover behavior in the autonomous driving environment [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(2): 209.

(上接第874页)

- [16] CHONG I, MIRCHI T, SILVA H I, *et al.* Auditory and visual peripheral detection tasks and the lane change test with high and low cognitive load [C]//Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. Los Angeles: SAGE Publications, 2014: 2180-2184.
- [17] REDENBO S J, LEE Y-C. Effects of cognitive and perceptual loads on driver behavior [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2009, 2138(1): 20.
- [18] RECARTE M A, NUNES L M. Mental workload while driving: effects on visual search, discrimination, and decision making [J]. Journal of Experimental Psychology: Applied, 2003, 9(2): 119.
- [19] LI P, MARKKULA G, LI Y, *et al.* Is improved lane keeping during cognitive load caused by increased physical arousal or gaze concentration toward the road center? [J]. Accident Analysis & Prevention, 2018, 117: 65.
- [20] MERAT N, JAMSON A H, LAI F C H, *et al.* Highly automated driving, secondary task performance, and driver state [J]. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2012, 54(5): 762.
- [21] 彭丹丹, 田伟, 石京. 手机导航方式对驾驶行为的影响研究 [J]. 中国安全科学学报, 2017, 27(9): 39.
- PENG Dandan, TIAN Wei, SHI Jing. Research on the influence of mobile phone navigation mode on driving behavior [J]. China Safety Science Journal, 2017, 27(9): 39.
- [22] 李扬. 驾驶行为安全性多属性评价方法及应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- LI Yang. Research on multi-attribute evaluation method and application of driving behavior safety [D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [23] 李坤宸, 袁伟, 李舒欣, 等. 听觉-言语认知负荷下工作记忆容量对跟车行驶影响 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2024, 24(1): 93.
- LI Kunchen, YUAN Wei, LI Shuxin, *et al.* Effects of working memory capacity on vehicle following under auditory and verbal cognitive load [J]. Transportation Systems Engineering and Information, 2024, 24(1): 93.
- [24] HE X, STAPEL J, WANG M, *et al.* Modelling perceived risk and trust in driving automation reacting to merging and braking vehicles [J]. Transportation Research, Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2022, 86: 178.