

DOI:10.11918/202405013

超视距预警对混驾编队人驾领航车的安全影响

付强¹,赵晓华¹,陈晨¹,初高峰²

(1.北京工业大学 城市交通学院,北京 100124;2.北京市首都公路发展集团有限公司,北京 100071)

摘要:为评估高速公路前方车辆急减速事件下超视距预警对人驾领航车行驶安全的影响,设计了领航车为人工驾驶车辆的网联混驾编队模式,开发了具有超视距预警功能的网联人机交互界面,招募了36名被试开展考虑单车/编队的车队模式和有无网联超视距预警的驾驶模拟实验。通过选取驾驶人行为特征指标、安全替代指标和车辆运行指标,从驾驶人纵向避险能力、动态碰撞风险和混驾编队整体安全性维度分析超视距预警的影响。结果表明:超视距预警能够提升驾驶人纵向避险能力,降低车辆碰撞风险;其中,网联混驾编队模式下的人驾领航车行驶安全性表现最佳,其表现亦有助于提升混驾编队整体安全性。研究结果可为超视距预警信息优化、领航辅助系统研发、网联混驾编队推广实施等提供数据支持。

关键词:混驾编队;超视距预警;人驾领航车;纵向避险特性;驾驶模拟技术;安全替代指标

中图分类号:U491.7

文献标志码:A

文章编号:0367-6234(2025)07-0052-09

Safety impact of predictive-forward-collision-warning on human-driven leading vehicle in mixed platoon

FU Qiang¹, ZHAO Xiaohua¹, CHEN Chen¹, CHU Gaofeng²

(1. College of Metropolitan Transportation, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Beijing Capital Highway Development Group Co., Ltd., Beijing 100071, China)

Abstract: To evaluate the impact of predictive-forward-collision-warning (PFCW) on the driving safety of the human-driven leading vehicle during rapid deceleration of the preceding vehicles on freeways, this study designed a connected mixed platoon featuring a human-driven leading vehicle and developed a connected human-machine interface (HMI) with PFCW functionality. Thirty-six participants were recruited for driving simulation experiments that considered platoon configuration (single vehicle or platoon) and connectivity condition (with or without). By selecting driver behavior characteristic indicators, surrogate safety measures, and vehicle operation indicators, the impact of PFCW was analyzed in terms of drivers' longitudinal risk avoidance behavior, dynamic collision risk, and overall safety of the mixed platoon. The results indicated that PFCW enhances drivers' longitudinal risk avoidance capabilities and reduces the collision risk of the leading vehicle. The leading vehicle in the connected mixed platoon mode demonstrated the best performance in terms of driver safety, ultimately improving the overall safety of the mixed platoon. The findings provide valuable insights for optimizing PFCW information, developing navigate on autopilot system, and promoting the implementation of connected mixed platoons.

Keywords: mixed platoon; predictive-forward-collision-warning (PFCW); human-driven leading vehicle; longitudinal risk avoidance characteristics; driving simulation technology; surrogate safety measures

当前,自动驾驶积极开展开放道路应用,预期在未来较长时间内将呈现人工驾驶和自动驾驶车辆混行状态^[1]。自动驾驶编队是提升道路运输效率的有效方式,然而受限于技术尚未完全成熟,人工和自动驾驶混行条件下的全自动驾驶编队仍然难以保证行驶安全性。为解决此问题,以领航车为人工驾驶车辆、跟驰车为自动驾驶车辆的混驾编队模式成为当前阶段的过渡选择,并在实际应用中初步验证

了其在改善交通运输效率方面的积极影响^[2]。领航车负责引导和协调车队内部各个车辆的运行状态,其驾驶表现将直接影响编队整体的运行效能。Khan等^[3]和Atmaca等^[4]研究表明当领航车不具备处置紧急事件的能力时,其驾驶决策和操控行为会严重损害车辆编队的行驶安全性。因此,针对领航车及混驾编队整体开展紧急事件下的行驶安全影响分析具有重要意义。

收稿日期:2024-05-08;录用日期:2024-08-15;网络首发日期:2025-07-10

网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250711.1033.002

基金项目:国家自然科学基金(52072012);国家自然科学基金青年科学基金(52102411)

作者简介:付强(1995—),男,博士研究生;赵晓华(1971—),女,教授,博士生导师

通信作者:陈晨,chenchen@bjut.edu.cn

超视距预警能够利用网联通信技术为驾驶人提供视野之外的周围车辆运行状态信息^[5-6]。典型如道路前方发生紧急事件,超视距预警通过提前感知前方视觉盲区内的第2辆车(下文简称“前前车”^[6])的急减速行为,使驾驶人有较为充足的时间反应决策,提前采取驾驶操作规避潜在碰撞事故。特别是在混驾编队条件下,面向领航车驾驶人提供超视距预警功能,有望提升领航车驾驶避险能力,进而提升编队整体的运行安全性。当前,针对前车碰撞预警功能的安全效益已有相关研究^[7-8]。然而,作为网联技术在交通领域的一种新型技术应用,针对超视距预警功能对驾驶安全影响的研究仍然较少。特别是对超视距预警作用下人驾领航车纵向避险操作过程的精细化刻画以及对其碰撞风险的综合评测鲜少研究,遑论其对提升混驾编队整体运行安全的功效分析。

现阶段,受制于技术成熟度、实验成本、实施难度等因素,驾驶模拟技术凭借网联环境易复现、实验变量可控制、数据细粒度高等优势,能够更好地揭示超视距预警作用下人驾领航车行为特征,并利用其集成的数值仿真功能呈现后方跟驰车辆的行驶状态。因此,为明晰超视距预警对混驾编队人驾领航车纵向行驶安全的影响,本文依托驾驶模拟技术搭建的网联混驾编队测试平台,以高速公路前前车急

减速事件为例,开展超视距预警对混驾编队人驾领航车纵向避险能力及碰撞风险的分析,并依此评估混驾编队整体的运行安全性,以期掌握超视距预警作用机理以及人驾领航车行为特征,为后续超视距预警信息优化、领航驾驶辅助系统研发、网联混驾编队推广实施等提供参考。

1 实验

1.1 实验设备

本研究依托驾驶模拟技术搭建的网联混驾编队测试平台开展混驾编队人驾领航车行驶安全性实验测试。平台主要包括驾驶模拟仿真软件、驾驶模拟器和网联人机交互界面(human machine interface, HMI)三部分(图1)^[9]。其中,驾驶模拟仿真软件用于营造虚拟驾驶环境,实现混驾编队模式构建、静态交通场景搭建、动态交通事件开发等功能。驾驶模拟器为丰田 Yaris 实车座舱,结合 130°环绕式幕布及相关影音设备为驾驶人提供逼真的驾驶体验;鉴于驾驶模拟器物理结构,本实验选取乘用车作为编队研究对象。网联 HMI 与驾驶模拟软件运行于同一服务器,以 10.1 英寸显示器为媒介,通过 UDP 协议和仿真软件提供的 API 接口实时接收交通信息,采用语音提示和图片提示结合的形式将超视距预警信息传达至领航车驾驶人。

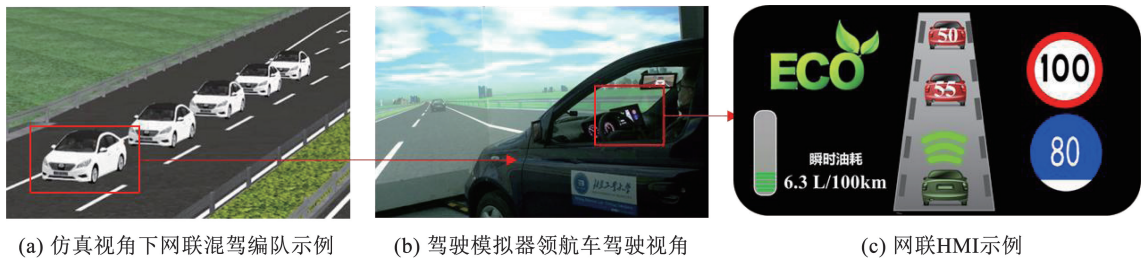


图1 网联混驾编队测试平台主要组成

Fig. 1 Composition of the connected mixed platoon test platform

1.2 实验方案

为探究高速公路前方车辆急减速事件下超视距预警对混驾编队人驾领航车行驶安全的影响,本实验采用双因素双水平(2×2)实验设计,分析车队模式(单车/编队)和网联超视距预警(有/无)条件下混驾编队人驾领航车的行驶安全特性,实验方案如图2所示。

1.3 网联混驾编队模式

实验设计以人工驾驶车辆为领航车的混驾编队模式,共由5辆车组成。其中,领航车在网联条件下通过网联 HMI 实现人车信息交互,无网联条件下网联 HMI 呈息屏状态。跟驰车利用跟驰模型模拟自动驾驶模式,跟驰模型为仿真软件提供的 ACC 跟驰

模型,如式(1)所示。为区别跟驰车在有/无网联条件下的行为特征,本实验参考文献[10-11]将跟驰车在无网联条件下的期望车头时距设定为 1.1 s,网联条件下的期望车头时距设定为 0.6 s。

$$ACC = 1.12(\Delta x - T \cdot v) + 1.70\Delta v \quad (1)$$

式中:ACC 为跟驰车期望加速度,Δx 为两车车头间距,T 为期望车头时距,v 为跟驰车当前速度,Δv 为两车速度差。

跟驰模型稳定性是实现车辆稳定编队的基础,参考文献[12]验证跟驰模型的局部稳定性和渐进稳定性。将 ACC 跟驰模型参数代入局部稳定性判别式(式(2))和渐进稳定性判别式(式(3))可证明所标定的 ACC 跟驰模型均满足上述稳定性要求。

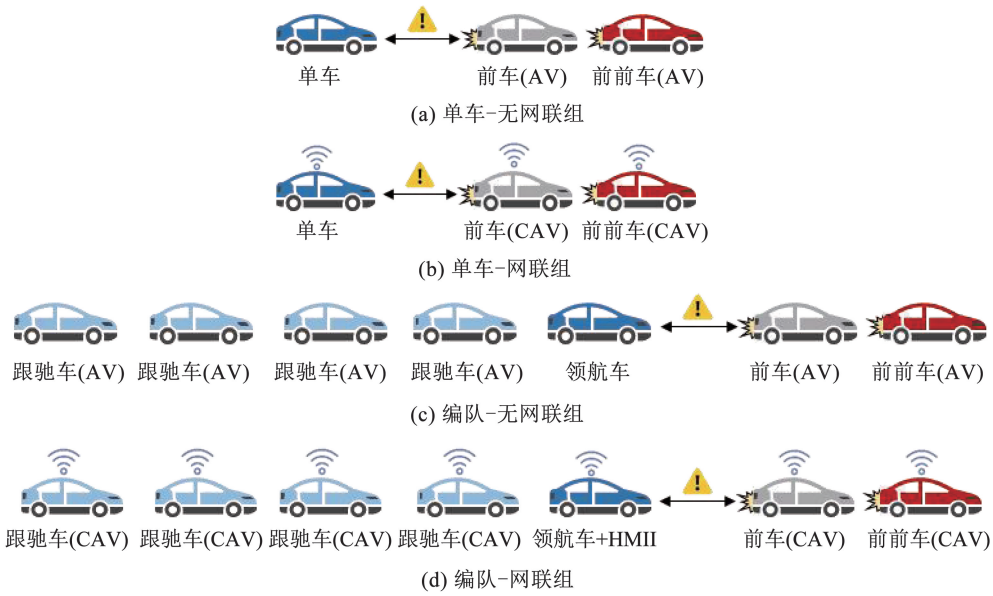


图 2 实验方案设计

Fig. 2 Experimental scheme design

$$f_v - f_{\Delta v} < 0 \tag{2}$$

$$\frac{1}{2}(f_v)^2 - f_v f_{\Delta v} - f_{\Delta x} > 0 \tag{3}$$

式中： f_v 、 $f_{\Delta v}$ 、 $f_{\Delta x}$ 分别为跟驰模型的跟驰车当前速度、两车速度差和车头间距的偏微分项。

1.4 道路条件及交通事件

驾驶模拟实验选取高速公路直线路段作为实验场景,道路条件为双向四车道,限制速度为 100 km/h,交通标志标线参考《道路交通标志和标线》(GB 5768—2009)进行设计^[13]。为模拟真实驾驶环境,双向道路均设有自由流车辆,混驾编队行驶于高速公路最外侧车道。

本实验参照汽车行业对超视距预警功能的应用案例^[5-6],选取前前车急减速作为典型超视距预警事件开展研究。参考自然驾驶数据集中驾驶行为统计特征^[14],将急减速触发阈值设定为 -3 m/s^2 。超视距事件具体触发流程:1)前前车以 80 km/h 车速

匀速行驶;2)混驾编队(或单车)跟驰前车匀速行驶;3)当前前车行驶至减速触发点时,以 -3 m/s^2 的减速度减速,将速度降至 50 km/h 后继续匀速行驶。当前前车行驶至减速触发点,以 20 Hz 数据采样频率采集领航车及周围车辆行驶 500 m 内的实验数据。

1.5 超视距预警功能设计

具备超视距预警功能的网联 HMI 以自动驾驶人因设计指南和用户为中心的原则为依据^[15],通过图片提示和语音提示结合的方式将碰撞预警提示、前方车辆行驶速度和加减速状态等信息传递给驾驶人。超视距预警功能效果如图 3 所示。图 3(a)为领航车正常跟驰行驶时的界面效果,此时前车和前前车以 80 km/h 速度匀速行驶(棕色);图 3(b)为急减速事件触发时的界面效果,此时前车和前前车显示减速状态(红色)。



图 3 网联 HMI 设计

Fig. 3 Design of connected HMI

1.6 实验被试

本实验共招募 36 名被试参加正式实验(表 1), 样本数满足实验样本量要求^[16]。被试主要通过被试资料库以及微信朋友圈等形式招募, 招募原则为被试需具有有效期内驾驶执照且无生心理疾病。为使得被试性别比例贴合中国实际男女驾驶人 1.97:1 的性别比例^[17], 本实验含 24 名男性被试和 12 名女性被试。男性被试平均年龄 38.6 岁, 平均驾龄 11.7 a; 女性被试平均年龄 32.8 岁, 平均驾龄 5.5 a。

表 1 被试基本属性信息

Tab.1 Basic information of participants

性别	人数	年龄均值/岁	年龄标准差/岁	驾龄均值/a	驾龄标准差/a
男性	24	38.6	14.0	11.7	10.5
女性	12	32.8	13.8	5.5	7.4

1.7 实验流程

实验流程分为实验前准备、正式实验、实验后调查 3 个阶段:

1) 实验前准备阶段, 实验人员首先向被试介绍网联自动驾驶技术和车辆编队等相关概念; 其次, 邀请被试熟悉驾驶模拟操作, 并观察被试是否出现眩晕恶心等症状; 期间, 实验人员会向被试介绍网联 HMI 使用方法; 然后, 通过问卷采集被试基本信息。

2) 正式实验阶段, 被试需完成 4 组驾驶模拟实

验。为避免被试产生记忆效应, 实验分为两次完成, 间隔时间为 3 d。

3) 实验后调查阶段, 所有被试填写实验后主观问卷, 调查被试对网联 HMI 的使用感受。问卷基于技术接受度设计, 分为主观态度、感知有用性、感知易用性、系统信任度 4 个维度, 采用 5 级李克特量表进行评分, 分数越高表示被试对网联 HMI 的使用感受越积极。本实验中, 4 项得分分别为 4.32、4.29、4.02、4.23, 说明被试对网联 HMI 持积极态度。

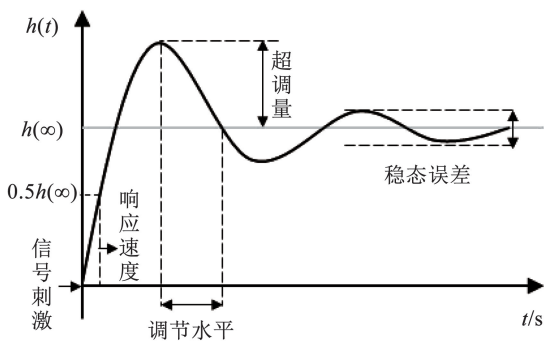
2 指标体系与分析方法

2.1 指标体系

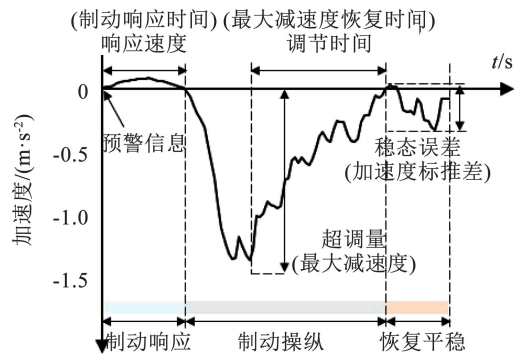
本文从领航车行驶安全性和混驾编队整体安全性维度分析超视距预警对人驾领航车纵向行驶安全性的影响。

2.1.1 领航车纵向避险能力指标

如图 4 所示, 驾驶人在前方车辆急减速事件下的驾驶避险操作过程贴合控制系统的信号响应过程^[18]。具体地, 可将驾驶人思考过程视为控制装置, 驾驶人避险操作视为被控对象, 前前车急减速事件视为输入变量, 加速度视为输出变量。因此, 驾驶人在不同实验条件下的驾驶避险操作可看作控制系统对不同信号刺激的响应, 而优秀的控制系统能够更准确地响应信号变化并更快速的恢复稳态。



(a) 控制系统信号响应过程



(b) 驾驶人避险操作过程

图 4 控制系统信号响应过程与驾驶人避险操作过程示例

Fig.4 Examples of control system signal response process and driver's risk-avoidance operation process

参照控制系统中响应速度、超调量、调节时间、稳态误差等评价维度, 将驾驶人避险操作划分为制动响应、制动操纵、恢复平稳 3 个阶段, 选取制动响应时间、最大减速度、最大减速度恢复稳定时间、加速度标准差和速度标准差作为驾驶人避险能力指标, 刻画领航车驾驶人在不同避险阶段的行驶风险。其中, 制动响应时间定义为前前车减速至主车首次踩下制动踏板所用时间, 反映驾驶人操纵行为的紧

迫程度; 最大减速度定义为主车在制动操纵过程中的最大减速度, 反映当前驾驶场景的紧急程度; 最大减速度恢复稳定时间定义为主车从最大减速度恢复至 0 m/s² 所用时间, 反映驾驶人调节能力; 加速度标准差和速度标准差定义为主车在制动平稳阶段(最后 100 m)的速度和加速度波动趋势, 反映稳态下的驾驶行为波动性。

2.1.2 领航车碰撞风险指标

由于驾驶环境复杂多变,单一指标很难精准评估车辆碰撞风险^[19],因此选取时间类指标车头时距(time headway, THW)、距离类指标安全裕度(safety margin, SM)、加速度类指标制动威胁次数(brake threat number, BTN)综合评测领航车碰撞风险。车头时距是常见的时间类安全替代指标,表示主车以当前速度到达前车当前位置所需的时间(式(4)),车头时距越小表明发生事故的可能性越大。安全裕度表示前后两车采取最大减速度制动时所需要最小安全车距,通过主车到碰撞点的距离来评价碰撞风险(式(5)),安全裕度越小表明发生事故的可能性越大^[20]。制动威胁次数表示主车为避免碰撞所需的纵向减速性能和主车的极限纵向减速性能之比(式(6)),能够从车辆为避免碰撞所需的减速度性能维度评价碰撞风险,制动威胁次数越大意味着发生事故的可能性越大^[21]。

$$\text{THW} = \frac{d_x}{v_n} \quad (4)$$

式中: d_x 为主车与前车间的纵向距离, v_n 为主车速度。

$$\text{SM} = 1 - \frac{0.15v_n}{D_n} + \frac{(v_n - v_{n-1})(v_n - v_{n+1})}{1.5gD_n} \quad (5)$$

式中: v_n 为主车速度, v_{n-1} 为前车速度, D_n 为两车的车间距, g 为重力加速度。

$$\text{BTN} = \frac{\ddot{x}'_h + \ddot{x} - \frac{\dot{x}}{2x}}{-a_{x,\max}} \quad (6)$$

式中: \ddot{x}'_h 和 \ddot{x} 分别为主车纵向减速度以及主车和前车的纵向相对减速度, \dot{x} 和 x 分别为主车和前车的相对纵向速度和相对纵向距离, $-a_{x,\max}$ 为主车可实现的纵向最大减速度。

2.1.3 混驾编队整体安全性评价指标

变异系数能够消除不同组别间数据量级的差异,在结合数据均值特征的基础上反映数据的离散程度,因此选取加速度变异系数(式(7))和速度变异系数(式(8))评价混驾编队整体的运行安全性。变异系数越大,表明车辆的行驶状态变化越频繁,混驾编队运行状态越混乱,混驾编队运行安全风险越大^[22]。

$$C_{\text{acc}} = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\bar{a}} \cdot \sqrt{\frac{1}{F} \sum_{i=1}^F (a_i - \bar{a})^2} \quad (7)$$

$$C_v = \frac{1}{N} \cdot \frac{1}{\bar{v}} \cdot \sqrt{\frac{1}{F} \sum_{i=1}^F (v_i - \bar{v})^2} \quad (8)$$

式中: C_{acc} 为加速度变异系数, C_v 为速度变异系数, N

为编队车辆数, F 为数据样本量, a_i 为第*i*个样本加速度值, \bar{a} 为平均加速度值, v_i 为第*i*个样本速度值, \bar{v} 为平均速度值。

2.2 分析方法

为直观掌握超视距预警对人驾领航车的行驶安全影响,文中选用熵权法分别计算领航车纵向避险能力、领航车碰撞风险及混驾编队整体安全性等维度的综合得分。熵权法作为一种重要的信息权重模型,能够根据指标的信息熵值确定其客观权重,可为多指标综合评价提供依据。熵权法最大的优势便是能够避免干扰因素对指标权重的影响,增加综合评价结果的客观性,目前该方法已在诸如电力工业、环境保护、交通运输等领域得到广泛应用^[23]。其具体计算步骤如下:

1) 数据标准化,标准化处理可以消除不同指标之间的量纲差异和数量级差异,便于所有指标在同一尺度上进行比较。针对正向化指标,即值越大越好的指标,可采用式(9)进行计算;针对负向化指标,即值越小越好的指标,可采用式(10)进行计算。

$$m_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (9)$$

$$m_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (10)$$

式中: x_i 为第*i*个样本数, x_j 为第*j*个指标, $\max x_j$ 和 $\min x_j$ 分别表示指标*j*的最大值和最小值。

2) 比重计算,即计算第*j*个指标中第*i*个样本的数值比重 P_{ij} ,如式(11)所示。

$$P_{ij} = \frac{m_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_{ij}} \quad (11)$$

式中 P_{ij} 为概率矩阵。

3) 计算各指标信息熵 E_j ,如式(12)所示。

$$E_j = -k \sum_{i=1}^h P_{ij} \ln P_{ij} \quad (12)$$

考虑到 $P_{ij} = 0$ 时, $\ln P_{ij}$ 无意义,则将 P_{ij} 替换为 0.0001 ; k 可通过 $\frac{1}{\ln h}$ 计算得到,其中*h*为样本数,本文研究条件下*h*=4。

4) 计算信息熵权重 w_j ,如式(13)所示。

$$w_j = \frac{1 - E_j}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)} \quad (13)$$

式中*n*为指标数量。

5) 计算各维度综合评分,如式(14)所示。

$$Z_j = \sum_{j=1}^n w_j \times P_{ij} \quad (14)$$

3 结果分析

3.1 领航车行驶安全性

3.1.1 领航车驾驶人纵向避险能力

领航车驾驶人避险能力指标结果表2和表3所示,结合图5的领航车制动功效、加速度和速度的空间变化曲线(横坐标轴刻度值表示每5 m行驶距离内的采样数据均值)可以发现,在制动响应阶段,网联组的制动响应时间显著长于无网联组;相较单车-无网联组,单车-网联组、编队-无网联组、编队-网联组的制动响应时间分别增加33.9%、

-27.5%、48.6%。在制动操纵阶段,网联组的最大减速度显著大于无网联组;相较单车-无网联组,其余3组的最大减速度分别提升34.8%、-8.7%、50.0%。网联组的最大减速度恢复稳定时间显著长于无网联组;相较单车-无网联组,其余3组的最大减速度恢复稳定时间分别增加48.1%、-22.2%、51.9%。在制动平稳阶段,网联组的速度标准差和加速度标准差显著低于无网联组;相较单车-无网联组,其余3组的速度标准差分别减少25.0%、-3.8%、52.4%,加速度标准差分别减少31.9%、-25.5%、59.6%。

表2 领航车驾驶操作指标描述性分析结果

Tab.2 Descriptive analysis results of driving operation indicators for the leading vehicle

实验组	制动响应时间/s	最大减速度/($m \cdot s^{-2}$)	最大减速度恢复稳定时间/s	速度标准差/($km \cdot h^{-1}$)	加速度标准差/($m \cdot s^{-2}$)
单车-无网联	10.9	-4.6	2.7	0.208	0.047
单车-网联	14.6	-3.0	4.0	0.156	0.032
编队-无网联	7.9	-5.0	2.1	0.216	0.059
编队-网联	16.2	-2.3	4.1	0.099	0.019

表3 领航车驾驶操作指标统计检验结果

Tab.3 Statistical results of driving operation indicators for the leading vehicle

实验因素	显著性				
	制动响应时间	最大减速度	最大减速度恢复稳定时间	速度标准差	加速度标准差
车队形式	0.610	0.749	0.695	0.000***	0.927
网联条件	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***	0.000***
交互效应	0.044**	0.111	0.077*	0.041	0.125

注:当 $0.05 \leq P < 0.1$,用“*”表示;当 $0.01 \leq P < 0.05$,用“**”表示;当 $P < 0.01$,用“***”表示。

为使所得结果更加清晰易读,本文选用熵权法计算领航车驾驶人纵向避险能力得分。具体地,制动响应时间、最大减速度、最大减速度恢复稳定时间、速度标准差和加速度标准差的权重分别为16.3%、21.7%、17.7%、26.8%、17.5%,4组实验的领航车驾驶人避险能力得分分别为0.2、0.7、0和1.0。结果表明,超视距预警能够降低超调水平,减少驾驶人急减速行为,有助于提升系统稳定性水平,使驾驶人在避险过程结束后驾驶车辆更为平稳。不难发现,网联组的制动响应时间和最大减速度恢复稳定时间要长于无网联组,这可能是因为驾驶人凭借超视距预警信息提前感知前方交通情况,不急于采取制动操作,能够根据当前车速和前车距离更为自如的操控车辆。需要关注的是,编队-无网联组的领航车驾驶表现在急减速事件中表现不佳,甚至

驾驶安全性不如单车驾驶模式。这体现了超视距预警信息对提升编队行驶安全性的重要性,但也需要重视无网联条件下此混驾编队模式所带来的行驶安全风险。

3.1.2 领航车碰撞风险

结合领航车碰撞风险指标统计分析结果(表4和表5)和领航车碰撞风险空间变化曲线(图6)可以发现,相较单车-无网联组,单车-网联组、编队-无网联组、编队-网联组领航车的车头时距分别增加44.7%、22.2%、46.7%,安全裕度分别增加3.8%、-0.09%、4.3%,制动威胁次数减少12.3%、-6.1%、17.7%。根据熵权法所得结果,车头时距、制动威胁次数和安全裕度的权重分别为25.2%、27.3%、47.5%,4组实验的领航车碰撞风险得分分别为0、0.9、0.2和1.0。结果表明,超视距预警能

够显著降低领航车碰撞风险。特别是在急减速避险过程中,网联组领航车驾驶人在超视距预警信息的作用下的动态碰撞风险更低,车辆行驶更为安全。

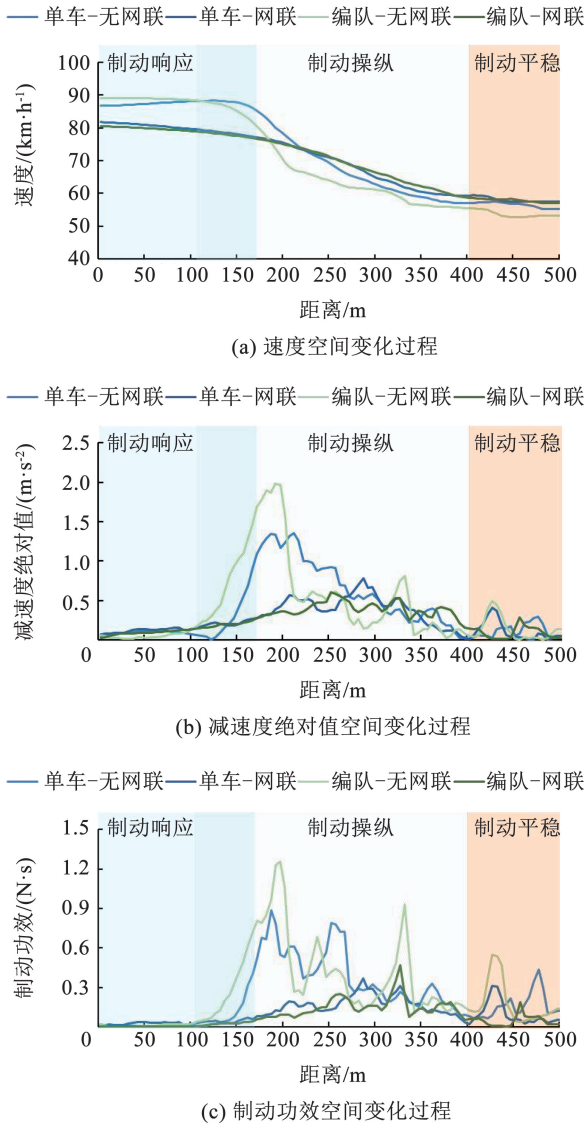


图 5 领航车制动功效、减速度绝对值和速度指标的空间变化过程

Fig. 5 Spatial changing processes of brake power, absolute of deceleration and speed indicators for the leading vehicle

表 4 领航车碰撞风险指标描述性分析结果

Tab. 4 Descriptive analysis results of collision risk indicators for the leading vehicle

实验组	车头时距/s	制动威胁次数	安全裕度/m
单车-无网联	4.0	0.598	0.855
单车-网联	5.8	0.437	0.887
编队-无网联	4.9	0.529	0.854
编队-网联	5.9	0.410	0.891

表 5 领航车碰撞风险指标统计检验结果

Tab. 5 Statistical results of collision risk indicators for the leading vehicle

实验因素	显著性		
	车头时距	制动威胁次数	安全裕度
车队形式	0.752	0.941	0.777
网联条件	0.017 **	0.000 ***	0.000 1 ***
交互效应	0.965	0.257	0.629

注:当 $0.05 \leq P < 0.1$, 用“*”表示;当 $0.01 \leq P < 0.05$, 用“**”表示;当 $P < 0.01$, 用“***”表示。

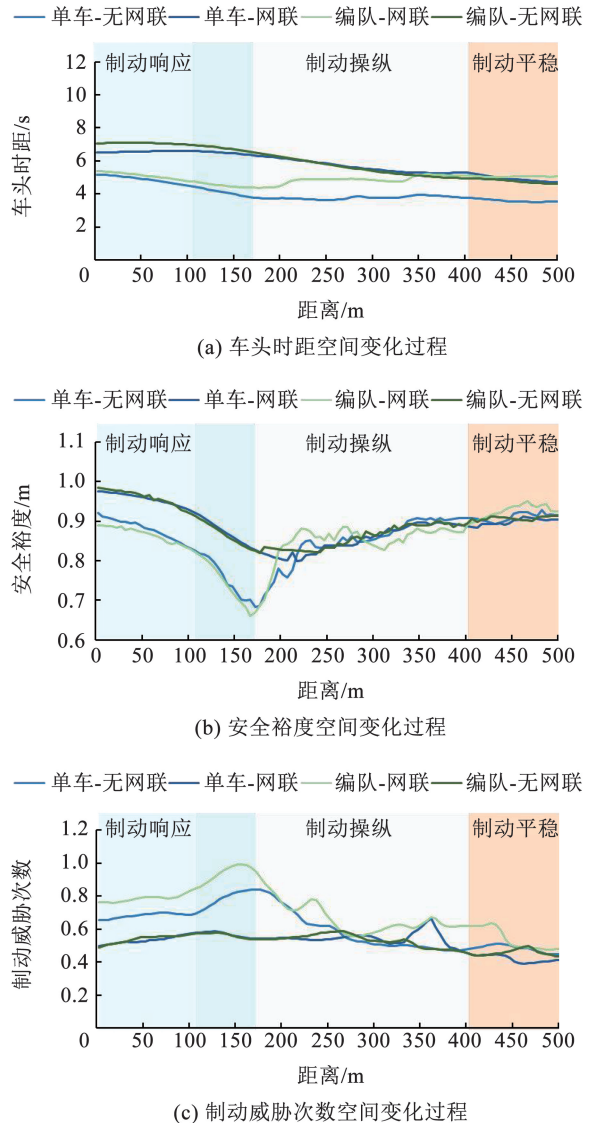


图 6 领航车车头时距、安全裕度和制动威胁次数指标的空间变化过程

Fig. 6 Spatial changing processes of time headway, safety margin and brake threat number for the leading vehicle

3.2 混驾编队整体安全性

4 组实验的加速度变异系数和速度变异系数结果如图 7 所示。相较单车-无网联组,其余 3 组的加速度变异系数分别降低 12.9%、-91.6%、96.8%,速度变异系数分别降低 25.53%、10.27%、

72.80%。其中,网联组的速度变系数显著低于无网联组($P < 0.001$)。根据熵权法所得结果,加速度变异系数和速度变异系数的权重分别为37.8%和62.1%,4组实验的混驾编队整体运行安全性得分

分别为0.2、0.4、0.1和1.0。综合以上结果可知,超视距预警即能够提升领航车行驶安全性,亦有助于提升混驾编队整体的运行安全性。

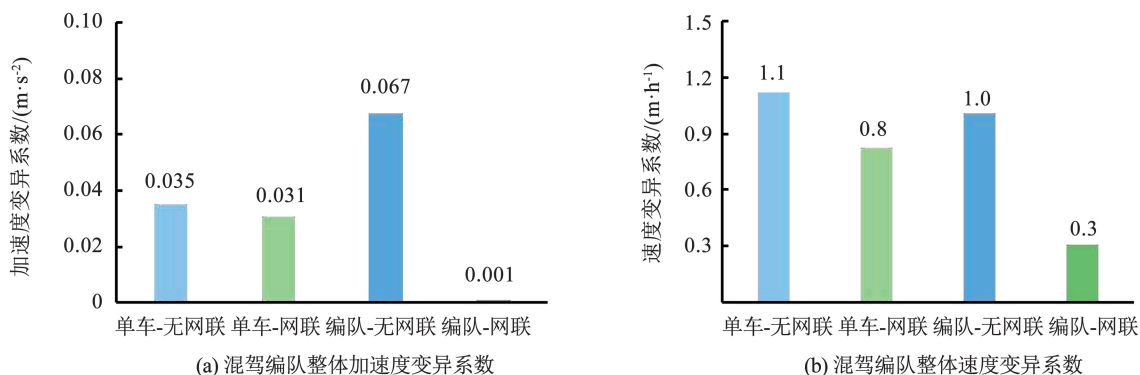


图7 混驾编队整体安全性结果

Fig.7 The safety result of the mixed platoon

4 结论

1)选取制动响应时间、最大减速度、最大减速度恢复稳定时间、速度标准差、加速度标准差指标评价领航车驾驶人避险能力。根据熵权法计算单车-无网联组,单车-网联组、编队-无网联组、编队-网联组的驾驶人避险能力得分分别为0.2、0.7、0和1.0。结果表明超视距预警能够提升驾驶人避险能力,网联混驾编队模式下领航车驾驶人避险表现最佳。

2)选取车头时距、安全裕度、制动威胁次数评价领航车碰撞风险。4组实验的领航车碰撞风险得分分别为0、0.9、0.2和1.0,表明超视距预警能够降低领航车碰撞风险。

3)选取加速度变异系数和速度变异系数评价混驾编队整体运行安全性。4组实验的混驾编队整体运行安全性得分分别为0.2、0.4、0.1和1.0,表明超视距预警在提升领航车行驶安全性的同时,亦有助于提升混驾编队整体的运行安全性。

参考文献

[1] 马艳丽,董方琦,秦钦,等.基于行车风险场的自动驾驶接管风险评估模型[J].哈尔滨工业大学学报,2024,56(9):106
MA Yanli, DONG Fangqi, QIN Qin, et al. Risk evaluation model of autonomous driving takeover based on driving risk field[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(9): 106

[2] ORKI O, BOROWSKY A, AROGETI S. Human driving centered gain scheduling control of mixed platoons[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 24(3): 3312

[3] KHAN M A, SAYED H E, MALIK S, et al. Level-5 autonomous driving—are we there yet? A review of research literature[J]. ACM Computing Surveys (CSUR), 2022, 55(2): 1

[4] ATMAGA U I, MAPLE C, EPIPHANIOU G, et al. Human factors for vehicle platooning; a review[J]. Competitive Advantage in the Digital Economy (CADE 2021), 2021, 2021: 33

[5] NISSAN. Predictive forward collision warning (PFCW) [EB/OL]. (2016-03-11) [2024-05-05]. <https://usa.nissannews.com/en-US/releases/predictive-forward-collision-warning-2>

[6] Infiniti. Predictive forward collision warning technology [EB/OL]. (2014-05-04) [2024-05-05]. <https://www.infiniti.com/infiniti-news/technology/predictive-forward-collision-warning.html>

[7] HANG J, YAN X, LI X, et al. An improved automated braking system for rear-end collisions; a study based on a driving simulator experiment[J]. Journal of Safety Research, 2022, 80: 416

[8] LYU N, DENG C, XIE L, et al. A field operational test in China: exploring the effect of an advanced driver assistance system on driving performance and braking behavior[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2019, 65: 730

[9] 付强,赵晓华,李海舰,等.跟驰事件下网联混驾编队的运行特征及生态安全影响[J].华南理工大学学报(自然科学版),2024,52(8):65
FU Qiang, ZHAO Xiaohua, LI Haijian, et al. Operational characteristics and eco-safe influence of connected mixed platoon in car-following event [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(8): 65

[10] 梁国华,石权,李瑞,等.高速公路合流区主要参数对自动驾驶车辆的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(9):62
LIANG Guohua, SHI Quan, LI Rui, et al. Impact of main parameters of merging area in highway on autonomous vehicles[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(9): 62

[11] RAD S R, FARASH H, TAALE H, et al. The impact of a dedicated lane for connected and automated vehicles on the behaviour of drivers of manual vehicles [J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2021, 82: 141

[12] 王昊,金城杰.交通流理论及应用[M].北京:人民交通出版社,2020
WANG Hao, JIN Chengjie. Traffic flow theory and application [M]. Beijing: China Communications Press, 2020

[13] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 道路交通标志和标线:GB 5768—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Road traffic signs and markings: GB 5768—2009 [S]. Beijing: China Standards Press, 2009

[14] 郭景华, 李文昌, 罗禹贡, 等. 基于深度强化学习的驾驶员跟车模型研究[J]. 汽车工程, 2021, 43(4): 571
GUO Jinghua, LI Wenchang, LUO Yugong, et al. Driver car-following model based on deep reinforcement Learning [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(4): 571

[15] International Organization for Standardization. Ergonomics of human-system interaction—Part 210: human-centered design for interactive systems: ISO 9241-210[P]. 2010-03-03

[16] ZHAO X, CHEN H, LI H, et al. Development and application of connected vehicle technology test platform based on driving simulator: case study[J]. Accident Analysis & Prevention, 2021, 161: 106330

[17] 中华人民共和国公安部. 2021 年全国机动车保有量达 3.95 亿, 新能源汽车同比增 59.25% [EB/OL]. (2022-01-12) [2024-05-05]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/12/content_5667715.htm
Ministry of Public Security of the People's Republic of China. The country's motor vehicle population reached 395 million, with new energy vehicles experiencing a year-on-year growth of 59.25% in 2021[EB/OL]. (2022-01-12) [2024-05-05]. https://www.gov.cn/xinwen/2022-01/12/content_5667715.htm

[18] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 5 版. 北京: 科学出版社, 2007
HU Shousong. Automatic control principle[M]. 5th ed. Beijing: Science Press, 2007

[19] 郭延永, 刘佩, 袁泉, 等. 网联自动驾驶车辆道路交通安全研究综述[J]. 交通运输工程学报, 2023, 23(5): 19
GUO Yanyong, LIU Pei, YUAN Quan, et al. Review of research on road traffic safety of connected and automated vehicles [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(5): 19

[20] LU G, CHENG B, LIN Q, et al. Quantitative indicator of homeostatic risk perception in car following[J]. Safety Science, 2012, 50(9): 1898

[21] NILSSON J, ÖDBLOM A C E, FREDRIKSSON J. Worst-case analysis of automotive collision avoidance systems [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 65(4): 1899

[22] 赵晓华, 刘畅, 亓航, 等. 高速公路交通事故影响因素及异质性分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(4): 987
ZHAO Xiaohua, LIU Chang, QI Hang, et al. Influencing factors and heterogeneity analysis of highway traffic accidents[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(4): 987

[23] 张芷寒, 高亮, 郭志鹏, 等. 基于熵权法的 CA 砂浆脱空位置对单元式无砟轨道动力状态影响评价研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2025, 22(1): 125
ZHANG Zhihan, GAO Liang, GUO Zhipeng. Evaluation of the impact of ca mortar void position on the dynamic state of unit ballastless track based on entropy weight method [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(1): 125

封面图片说明

封面图片来自本期论文“超视距预警对混驾编队人驾领航车的安全影响”,为网联混驾编队效果图。以领航车为人工驾驶车辆的混驾编队模式是完全自动驾驶编队普及前的过渡方式。超视距预警利用网联技术为驾驶人提供视野外的周围车辆运行信息,有望提升领航车驾驶避险能力,进而提升了编队整体安全性。为评估高速公路前方车辆急减速事件下超视距预警对人驾领航车行驶安全的影响,设计了领航车为人工驾驶车辆的网联混驾编队模式,开发了具有超视距预警功能的网联人机交互界面,开展了考虑单车/编队的车队模式和有/无网联超视距预警的驾驶模拟实验,并从驾驶人纵向避险能力、动态碰撞风险和混驾编队整体安全性维度分析了超视距预警的影响。通过熵权法计算单车-无网联组、单车-网联组、编队-无网联组、编队-网联组的驾驶人避险能力得分分别为 0.2、0.7、0 和 1.0,领航车碰撞风险得分分别为 0、0.9、0.2 和 1.0,混驾编队整体安全性得分分别为 0.2、0.4、0.1 和 1.0。分析结果表明,超视距预警能够提升驾驶人纵向避险能力,降低车辆碰撞风险;其中,网联混驾编队模式下的人驾领航车行驶安全性表现最佳,其表现亦有助于提升混驾编队整体安全性。研究成果可为超视距预警信息优化、领航辅助系统研发、网联混驾编队推广实施等智能交通新兴技术提供数据支持。

(图文提供:付强、赵晓华、陈晨、初高峰,北京工业大学城市交通学院)