

驾驶人跟驰避撞控制决策影响因素

祝学亮, 刘卫旗, 柴荣军

(延安大学西安创新学院, 陕西 西安 710100)

摘要: 为了分析影响驾驶人跟驰过程中避撞操纵行为的因素, 建立了一个简化的跟驰模型, 并设置了模型参数, 使用雷达、视频监控系统、传感器、试验车搭建了一个试验平台。使用 Matlab 截取测试数据, 然后使用过滤算法处理数据以获得有效数据。通过统计分析, 研究驾驶个体行为指标的分布特征, 发现跟车时距 (THW, time headway warning) 和规避碰撞时间 (TTC, time to collision) 这两个指标在松开油门踏板和踩下刹车踏板这两个动作时刻变化较小, 说明 THW 和 TTC 比较符合驾驶人对追尾风险的主观判断。分析 40 名样本的驾驶行为 THW 和 TTC 参数分布特征, 发现个体与总体指标的分布特征基本一致, 说明了不同驾驶人人都具有相似的驾驶行为。进行相关性分析, 结果表明车距与两车相对速度相关程度最高, 两个动作时刻的相关程度分别达到了 0.81 和 0.76, 显然 TTC 更加符合驾驶人对追尾风险的判断意志。分析了紧急程度对驾驶行为的影响, 发现前方车辆减速越紧急跟驰车辆驾驶人的反应时间越短。天气条件也会影响驾驶人对追尾风险的判断, 雨雾天气下跟车距离显著增大, 表明驾驶人在天气不利的条件下会增加跟车距离以应对追尾风险。除此之外, 道路条件也会影响驾驶人的跟车行为。

关键词: 跟驰模型; 驾驶操纵行为; 相关性分析; 避撞决策; 影响因素

中图分类号: U491.2+54

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-3750.2025.00463

Factors influencing the decision-making of drivers in car-following collision avoidance control

ZHU Xueliang, LIU Weiqi, CHAI Rongjun

Xi'an Innovation College of Yan'an University, Xi'an 710100, China

Abstract: In order to analyze the factors that affect the driver's collision avoidance control behavior during the car following, a simplified car following model was set up with model parameters, and a test vehicle was built using radar and video monitoring systems and sensors for testing. Recruiting test personnel to conduct tests, Matlab was used to capture test data, and then filtering algorithms were employed to process the data in order to obtain valid data. Studying the distribution characteristics of individual driving behavior indicators, it was found that THW and TTC showed relatively small changes in the timing of releasing the accelerator pedal and pressing the brake pedal, indicating that THW and TTC were more in line with drivers' subjective judgment of rear end collision risk. Analyzing the distribution characteristics of THW and TTC parameters in 40 samples of driving behavior, it was found that the distribution characteristics of individual and overall indicators were basically consistent, indicating that different drivers mostly had similar driving behaviors. Correlation analysis is conducted, and the results show that the distance between vehicles is most closely related to the relative speed of the two vehicles. The correlation between the two action moments reached 0.81 and 0.76, respectively, indicating that TTC is more in line with the driver's judgment of rear end collision risk. The impact of urgency on driving behavior is analyzed, and it is found that the more urgent the deceleration of the vehicle ahead, the shorter the re-

收稿日期: 2024-11-21; 修回日期: 2025-01-06

通信作者: 祝学亮, zxlxxy.163.com

基金项目: 延安大学西安创新学院校级科研项目 (No. 2024XJKY16)

Foundation Item: Xi'an Innovation College of Yan'an University School-level Scientific Research Project (No. 2024XJKY16)

action time of the following vehicle driver. Weather conditions can also affect drivers' judgment of rear end collision risk. In rainy and foggy weather, the following distance significantly increases, indicating that drivers will increase the following distance to cope with rear end collision risk under unfavorable weather conditions. In addition, road conditions can also affect drivers' following behavior.

Key words: car-following model, driving operation behavior, correlation analysis, anti collision decision-making, influencing factor

0 引言

在驾驶过程中, 车辆跟驰^[1]是一种比较常见的跟车行为, 它刻画了车辆在单行道上前车与后车之间的相互影响和动态关系。跟驰避撞决策行为是指驾驶人在跟驰过程中, 面对前车突然减速或紧急制动时所采取的避撞策略和操作。驾驶人的决策行为在这个过程中起着至关重要的作用, 正确决策可以有效避免事故的发生, 而错误决策则可能导致严重的后果。车辆跟驰作为最基本的微观驾驶行为, 对于交通安全和交通效率具有重要影响。跟车追尾事故在城市交通事故中频繁出现, 驾驶人应对追尾风险行为研究是研究追尾预警的重要方面^[2]。因此, 驾驶人的安全跟驰行为是, 驾驶人在跟车过程中意识到追尾危险后松开油门踏板, 开始制动车辆直到与前车保持安全车距^[3]。

驾驶人在车辆跟驰中的决策行为对于保证行车安全、提高行车效率具有重要意义。研究发现, 不同个体特征的驾驶人在跟驰行为上存在显著差异^[4]。追尾预警系统的开发重点考虑影响驾驶人对追尾风险判断决策的因素, 据此设计出的预警系统才能兼顾不同驾驶风格驾驶人的驾驶特性。Quintero等^[5]提出了驾驶人的驾驶行为对行车安全的影响, 表明了驾驶人特性在追尾预警系统中的重要作用。张晖等^[6]基于随机效应的线性模型, 研究了不同驾驶行为的个体差异。孙博华等^[7]则通过构建纵向驾驶能力评估模型评估了跟车追尾碰撞风险。张旭欣^[8]利用回归分析算法分析驾驶人的行为数据, 建立了碰撞风险预测模型。王鑫^[9]通过网格搜索方法优化了支持向量机(SVM)算法, 开发了一个模型, 用于识别和预测驾驶人在跟车时的风险。

汽车在紧急情况下的避撞主要受车间距、车速和前车减速度等因素影响。徐嘉伟^[10]将驾驶人在跟车过程中避免碰撞的决策依据分为两个主要类别: 一是基于车辆运动状态的紧急程度判断, 二是基于

视觉感知线索的紧急程度判断。研究表明, 驾驶人的减速反应时间与车头间距正相关^[11], 随着车速的提高, 驾驶人的反应时间会相应缩短^[12]。前车减速度主要受减速度大小影响, 研究者发现, 当前车减速度增加时, 驾驶人的反应时间也会相应减少^[13]。除此之外当前跟车紧急程度和天气因素也会影响驾驶人避撞操纵行为。研究发现, 视距每减少50 m, 车速大约下降15%^[14]。雨雾天气环境会影响驾驶人的感知判断, 一定程度上加重驾驶人的心理和生理负担, 雾天行车大多数驾驶人会感到紧张, 较大的心理压力会增加驾驶疲劳^[15-18]。赵亮等^[19-22]研究发现, 有效视距也是影响复杂道路上驾驶人应激反应的重要因素。

然而, 由于驾驶行为的复杂性和个体差异性^[23-24], 目前对于驾驶人跟车避撞决策行为的认识仍然有限。此外, 现有研究多集中于理论分析和模拟实验, 缺乏实际交通环境下的实证研究。本文旨在通过实证研究, 探讨驾驶人在跟车避撞过程中的决策行为特征及其影响因素。通过实车试验, 采集驾驶人在不同工况下的跟车避撞决策行为数据, 运用统计学方法对数据进行处理和分析。探讨驾驶人个体特征、总体特征、不利天气等因素对跟车避撞决策行为的影响, 为提高驾驶人安全意识和驾驶技能提供理论依据。

1 汽车跟驰模型

汽车追尾事故经常是在前车紧急制动时, 后车没有及时制动或者来不及制动而导致的。为了便于研究, 对追尾模型进行简化, 只考虑前车紧急制动时的情况。模型中前行车辆为前车, 后行车辆为自车, 自车速度为 v_1 , 前车速度为 v_2 , 自车驾驶人采取制动动作前两车行车间距设为 D , 自车刹车距离设为 L_1 , 前车刹车距离设为 L_2 , 两车之间额定安全距离为 d_0 (一般为2~5 m), 简化后的汽车跟驰模型如图1所示。

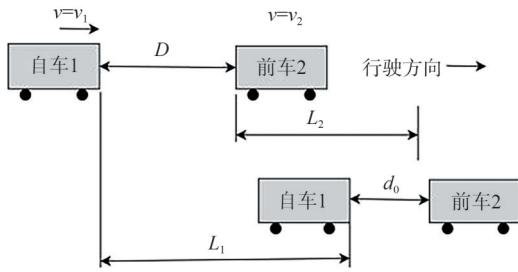


图1 汽车跟驰模型

$$\tau^{-1} = \frac{\dot{\theta}}{\theta} \quad (3)$$

当前车制动减速后，前方车辆在后车驾驶人眼中的成像速率增大，当 $\dot{\theta}$ 逐渐增大到后车无法忍受的时刻，后车驾驶人意识到危险会采取紧急制动措施避免发生追尾事故。

2 试验方案

2.1 被试人员

不同驾驶人反应时间不同，松开油门踏板和踩下刹车踏板动作时刻不同导致的刹车距离也不一样，必须权衡这一因素。选择不同驾驶风格特征的被试驾驶人，在城市道路（试验道路选取西安市南三环中段）通过实车试验获取试验数据序列。选择40名被试驾驶人，其中男性30名，占比75%；女性10名，占比25%。另外，被试驾驶人配2名辅助人员，分别负责试验指令下达和被试车辆及周围环境的观察。40名被试驾驶人年龄分布从20岁至55岁，平均年龄为41.5岁，标准差为9.66。驾龄分别从2年至30年不等，平均驾龄为15.5年，标准差为8.23。近3年驾驶违章扣分超过6分的驾驶人只有2名，占比10%。所有驾驶人拥有2年以上实际驾龄，驾驶总里程超过50 000 km以上，视力（或矫正视力）均在5.0以上，试验前24 h内无酗酒等不良行为。试验开始之前，驾驶人提前驾车熟悉试验环境和车辆性能，签订试验知情告知书，进行30 min的驾驶操作基本动作（油门踏板、刹车踏板、方向盘的操作）强化训练。

2.2 试验设备

试验主要获取两车瞬时速度、车距、相对速度等数据。安装在后方被试车辆相应位置上的传感器采集车速、刹车踏板位置、油门踏板位置等信息。前向毫米波雷达装置在车辆前牌照的上方位置，毫米波雷达实时测量前后两车距离和相对速度等信息，能够精准地探测到车辆前方250 m范围内的物

前车制动后，跟驰车（自车1）驾驶人发现这个信号并开始进行自车制动，直到两车保持安全距离。危险距离^[6]指的是后车跟车距离达到碰撞危险的距离。跟驰模型参数见表1。

分析最危险的情况，前车制动后立刻处于静止状态（模型中假设前车制动时间 $t = 0$ ，即 $L_2 = 0$ ），跟驰车发现前车停下后采取制动措施，制动距离为

$$L_1 = v_1 \left(t_1 + t_2' + \frac{t_2''}{2} \right) + \frac{v_1^2}{2a_1} \quad (1)$$

假设此时最小安全距离 D_s ，则

$$D_s = L_1 + d_0 = v_1 \left(t_1 + t_2' + \frac{t_2''}{2} \right) + \frac{v_1^2}{2a_1} + d_0 \quad (2)$$

其中， d_0 为两车相对速度为零时两车距离，一般取为5 m。

跟车距离和车速等变量在一定程度上表征了当前跟车状态的紧急程度^[25]，在低能见度条件下，驾驶人在判断车速和车头距离时常常会出现较大偏差，驾驶人可能低估实际车速。研究表明，紧急情况下视觉输入的刺激信号更容易引起驾驶人的注意。当前方车辆与后方车辆的距离逐渐缩小，前车在后车驾驶人视网膜上的投影会逐渐增大，给驾驶人带来紧张感，这种由视觉刺激变化引起的现象，被称为视觉变化刺激^[10]。

前方车辆在驾驶人眼中成像模型如图2所示， W 为前车宽度， d 为前车与后车之间的距离， θ 为前方目标在驾驶人眼中成像^[10]的角度，驾驶人跟车紧急程度可以用成像大小随时间的变化率 $\dot{\theta}$ 与 θ 的比值来表征，如式(3)所示

表1 跟驰模型参数

| 序号 | 参数中文名称 | 符号 | 单位 | 序号 | 参数中文名称 | 符号 | 单位 |
|----|-----------|---------|------------------|----|----------|-------|-----|
| 1 | 自车速度 | v_1 | m/s | 6 | 自车制动距离 | L_1 | m |
| 2 | 自车制动减速度 | a_1 | m/s ² | 7 | 前车制动距离 | L_2 | m |
| 3 | 驾驶反应时间 | t_1 | s | 8 | 两车相对速度 | v_r | m/s |
| 4 | 制动器反应时间 | t_2' | s | 9 | 两车额定安全距离 | d_0 | m |
| 5 | 制动减速度增长时间 | t_2'' | s | 10 | 两车实时间距 | D | m |

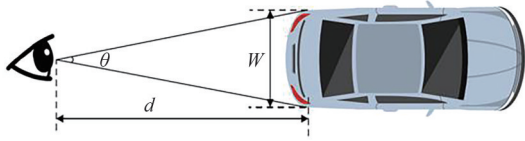


图2 驾驶人眼中成像示意图

体，最大监测角度为45°，同时追踪64个移动目标。3台摄像机分别采集脚部图像、手部图像、前方道路图像。主控单元通过CAN总线收集采集到的数据和图像。另外，全球定位系统（GPS, global positioning system）设备负责记录车辆在整个行驶过程中的经纬度坐标和时间数据。数据采集系统结构如图3所示。

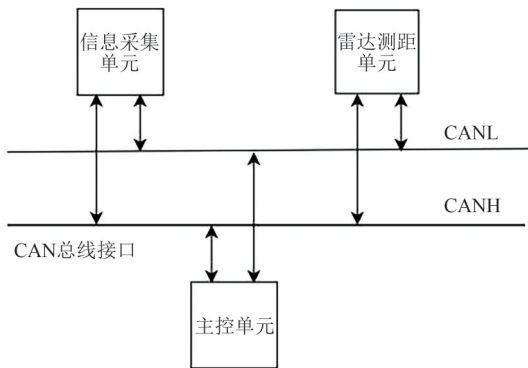


图3 数据采集系统结构

2.3 数据采集与处理

驾驶人松开油门踏板和踩下刹车踏板这两个动作时刻能够有效地反映驾驶人的跟驰行为^[26]，驾驶人在紧急情况下的操作时间对研究驾驶行为也有重要意义，驾驶人操作时间示意图如图4所示。

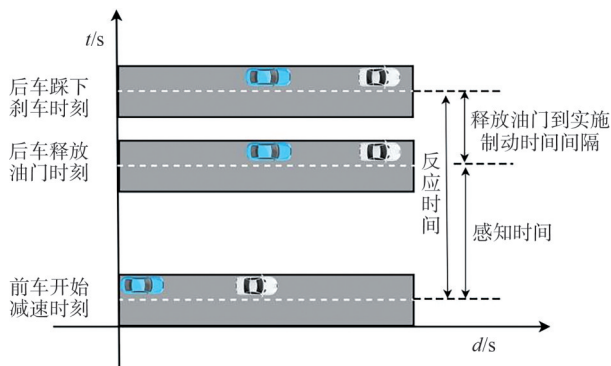


图4 驾驶人操作时间示意图

跟车特性的试验数据序列用式(4)记录

$$\begin{cases} v_r(j) > 0 \\ T \geq 4 \end{cases} \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中， v_r 表示两车相对速度， T 为试验时间序列。驾驶人跟车参数由式(4)记录试验数据序列导出。驾驶人跟车行为特性通过车距、车速、相对速度等参数之间的相互关系来表征，THW和TTC已经被广泛作为驾驶人跟车行为特性的重要指标^[9]。跟车时距的定义：车距与自车车速的比值，用THW表示。规避碰撞时间的定义：车距与两车相对车速的比值，用TTC表示。计算定义式如式(5)所示

$$\begin{cases} THW = \frac{D}{v_1} \\ TTC = \frac{D}{v_r} \\ TTC_i = \frac{1}{TTC} \end{cases}, \quad (5)$$

其中， TTC_i 为TTC的倒数，是为了处理 v_r 为零而导致TTC无穷大时采用的一个技术指标。

提取变量及符号表示见表2。为了有效处理主控单元采集的数据和图像信息，借助Matlab环境下的数据处理软件截取实验数据，再通过滤波算法处理得到有效数据。依据预先设定的驾驶行为标准，筛选出符合特定行驶状况的数据片段，并通过统计学方法对这些数据进行深入分析，从而获取能够表征驾驶人特征的关键参数指标。为了对驾驶人的驾驶行为进行分类，采用k-means聚类算法实现驾驶人驾驶风格特征识别。

表2 提取变量及符号表示

| 序号 | 提取变量 | 符号 |
|----|---------------------------|-------|
| 1 | 前车车速/(m·s ⁻¹) | v_2 |
| 2 | 自车车速/(m·s ⁻¹) | v_1 |
| 3 | 相对速度/(m·s ⁻¹) | v_r |
| 3 | 车头间距/m | D |
| 4 | 车头时距/s | THW |
| 5 | 减速反应时间/s | t_1 |

3 影响驾驶操纵行为内因分析

3.1 驾驶人个体特征

在试验数据中筛选出驾驶员两个动作时刻（松开油门踏板和踩下刹车踏板）的驾驶数据进行统计分析，选取1号驾驶人作为例子，1号驾驶人松开油门踏板时刻试验数据见表3，1号驾驶人踩下刹车踏板时刻试验数据见表4。显然，驾驶人踩下刹车踏板时刻对应的车速、车距、跟车时距THW、规避碰撞时间TTC要比松开油门踏板时刻的小得多，其

中 THW 少了 0.3 s, TTC 少了 2.7 s, 跟车过程的追尾风险明显上升。松开油门踏板时刻的最大车距是 50.89 m, 最小车距是 8.71 m, 标准差达到了 12.42; 踩下刹车踏板时刻的最大车距是 12.77 m, 最小车距是 7.65 m, 标准差是 6.13。两个时刻的车距变化范围都较大, 这就表明车距并不是驾驶人判断追尾危险的唯一指标。松开油门踏板时刻和踩下刹车踏板时刻 THW 和 TTC 变化不论是数值变化还是波动情况, 都不是很显著。相较而言, 两个时刻的跟车时距及规避碰撞时间总体变化不大, 说明 THW 和 TTC 更符合 1 号驾驶人判断追尾危险的意志, 当这两个指标偏离驾驶人的预期判断, 1 号驾驶人会采取措施防止碰撞。

表3 1号驾驶人松开油门踏板时刻试验数据

| 对比项 | 均值 | 标准差 | 最大值 | 最小值 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| 自行车速/(m·s ⁻¹) | 18.03 | 4.38 | 24.26 | 9.58 |
| 车距/m | 19.86 | 12.42 | 50.89 | 8.71 |
| 相对速度/(m·s ⁻¹) | 1.55 | 0.67 | 2.82 | 0.37 |
| THW/s | 1.37 | 0.38 | 2.58 | 0.71 |
| TTC/s | 13.23 | 0.13 | 15.86 | 11.27 |

表4 1号驾驶人踩下刹车踏板时刻试验数据

| 对比项 | 均值 | 标准差 | 最大值 | 最小值 |
|---------------------------|-------|------|-------|------|
| 自行车速/(m·s ⁻¹) | 11.37 | 3.56 | 19.26 | 6.79 |
| 车距/m | 12.77 | 6.13 | 19.81 | 7.65 |
| 相对速度/(m·s ⁻¹) | 1.08 | 0.59 | 1.87 | 0.56 |
| THW/s | 1.07 | 0.31 | 1.87 | 0.66 |
| TTC/s | 10.13 | 0.19 | 13.18 | 8.41 |

由表3可知, THW 最大值为 2.58 s, 最小值为 0.71 s, 标准差是 0.38。TTC 最大值为 17.86 s, 最小值为 11.27 s, 标准差是 0.13。显然 THW 和 TTC 都有波动, 两个动作时刻的 TTC 方差较小, 波动相对稳定。1 号驾驶人松开油门踏板时刻 THW 和 TTC 变化如图 5 所示, 可以看出同一驾驶人同一动作的驾驶行为也不完全一致, 而是呈现出一定的波动性, 这是因为每次操作时的驾驶环境和人的状态都不完全相同。从图 5 也可以看出, TTC 值基本在 15.4~17.1, 比较稳定。

3.2 驾驶人总体特征

试验结果表明, 不同驾驶人的驾驶特性不同(个体差异), 同一驾驶人不同环境下的驾驶行为也有差异(环境、心理等因素)。为了找出驾驶人的普遍特征, 合并试验人员样本数据, 进而分析研究总

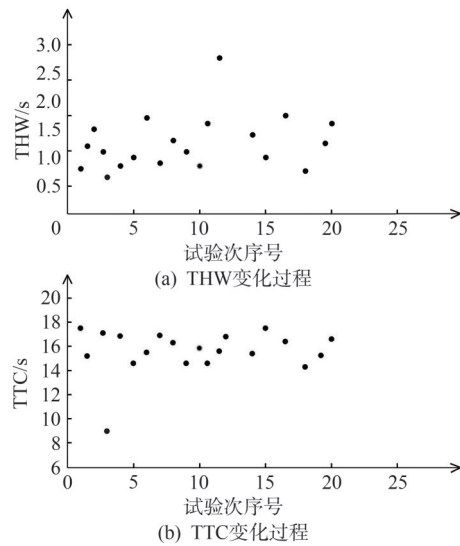


图5 1号驾驶人松开油门踏板时刻 THW 和 TTC 变化

体特性, 驾驶人松开油门踏板时刻 THW 和 TTC 数据统计分析见表 5, 驾驶人踩下刹车踏板时刻 THW 和 TTC 数据统计分析见表 6。对比分析, 不难看出个体与总体 THW 和 TTC 数据特征保持一致, 因此, THW 和 TTC 用在跟车追尾风险判断中能够反映出驾驶人的普遍驾驶特征^[27]。

表5 驾驶人松开油门踏板时刻 THW 和 TTC 数据统计分析

| 对比项 | 均值 | 标准差 | 最大值 | 最小值 |
|-------|-------|------|-------|------|
| THW/s | 1.32 | 0.32 | 2.12 | 0.53 |
| TTC/s | 14.26 | 0.13 | 17.79 | 9.13 |

表6 驾驶人踩下刹车踏板时刻 THW 和 TTC 数据统计分析

| 对比项 | 均值 | 标准差 | 最大值 | 最小值 |
|-------|-------|------|-------|------|
| THW/s | 1.04 | 0.29 | 1.57 | 0.68 |
| TTC/s | 13.76 | 0.09 | 16.33 | 8.37 |

进一步分析驾驶人松开油门踏板和踩下刹车踏板时刻的车辆状态参数的相关性^[28], 可以看出车距与相对速度的相关性比车速与车距的相关性高, 两个动作时刻的相关程度分别达到了 0.81 和 0.76, 说明驾驶人踩下刹车踏板时两车距离受相对速度的影响最大, 显然 TTC 指标更加符合驾驶人的判断意志。驾驶人松开油门踏板时车辆状态参数相关程度见表 7, 驾驶人踩下刹车踏板时车辆状态参数相关程度见表 8。

3.3 不同驾驶风格的影响

通过驾驶人跟车过程中前后两车相对速度聚类分析, 研究不同驾驶人的驾驶风格。根据两车之间相对速度和加速度的平均值变化, 将跟随驾驶情境

表 7 驾驶人松开油门踏板时车辆状态参数相关程度

| 对比项 | 车距 | 车速 | 相对速度 |
|------|------|------|------|
| 车距 | 1.00 | 0.59 | 0.81 |
| 车速 | 0.59 | 1.00 | 0.61 |
| 相对速度 | 0.81 | 0.61 | 1.00 |

表 8 驾驶人踩下刹车踏板时车辆状态参数相关程度

| 对比项 | 车距 | 车速 | 相对速度 |
|------|------|------|------|
| 车距 | 1.00 | 0.54 | 0.76 |
| 车速 | 0.54 | 1.00 | 0.51 |
| 相对速度 | 0.76 | 0.51 | 1.00 |

划分为3种模式：第一种是持续接近模式，其中相对速度持续低于-1.87 m/s；第二种是相对稳定跟随模式，相对速度大致维持于-1.87 m/s至2.82 m/s之间；第三种是逐渐远离模式，此时相对速度超过2.82 m/s。由于第三种模式不存在追尾碰撞的风险，不在考虑范围内。

仅从前两种跟随模式的数据集中筛选出试验数据，将驾驶人分为3个类别：第一类—谨慎型驾驶人，第二类—稳定型驾驶人，第三类—激进型驾驶人。提取两个动作时刻TTC分布数据，3种驾驶风格的TTC时刻分布见表9。从表9中不难看出，不同类型驾驶人的TTC时刻分布有较大差异，激进型驾驶人TTC值最大，谨慎型最小，平稳型居中，这种差异是由驾驶人自身的驾驶风格决定的。

表 9 3种驾驶风格的TTC时刻分布

| 对比项 | 松开油门踏板TTC ₁ /s | 踩下刹车踏板TTC ₂ /s |
|-----|---------------------------|---------------------------|
| 谨慎型 | 5 | 3.5 |
| 平稳型 | 7.5 | 4 |
| 激进型 | 8 | 4 |

4 影响驾驶操纵行为外因分析

4.1 τ^{-1} 对跟车行为的影响

稳定跟车时，反应时间与跟车时距和跟车间距的相关性分析见表10，驾驶人的反应时间与前车减速时的车距和跟车时距呈正相关，与前车减速时刻的 τ^{-1} 呈负强相关，这与徐嘉伟^[10]所得结论保持一致，表明 τ^{-1} 是影响后方车辆驾驶人减速决策的主要因素，且前方车辆减速越紧急，跟驰车辆驾驶人的反应时间越短，这与王雪松等^[27]的结论一致。

在跟车临近碰撞的情况下，驾驶人的感知时间通常在0.9~2.5 s^[28]。接近跟车时，通过视频监控，

表 10 反应时间与跟车时距和跟车间距的相关性分析

| 对比项 | 跟车时距 | 跟车间距 | τ^{-1} | |
|------|---------|---------|-------------|----------|
| 反应时间 | 皮尔逊分析 | 0.514** | 0.314* | -0.601** |
| | Sig(双尾) | 0.000 | 0.016 | 0.000 |

注：*表示在0.05的显著性水平下

**表示在0.01的显著性水平下

注意到这种接近跟车情况主要在交叉口和交通繁忙的路段出现。收集了196段接近跟车的数据，提取相关变量进行统计学分析。发现后车驾驶人反应时间与前方车辆减速时刻的前后车距明显正相关，而与 τ^{-1} 明显负相关，表明前车减速制动越紧急，后车驾驶人的反应时间越短。

4.2 天气因素的影响

(1) 跟车距离分析

对总体的跟车间距进行方差分析，天气条件和速度都显著影响驾驶人在稳定跟车状态下的跟车距离，而速度与天气的交互作用并不显著。不同速度下跟车间距如图6所示，跟车距离随着车速的提高而增大，且在晴好天气下，车头间距显著小于雨天，表明驾驶人在雨天会增加跟车距离以应对安全风险，这与薛晴婉等^[29]所得结论保持一致。

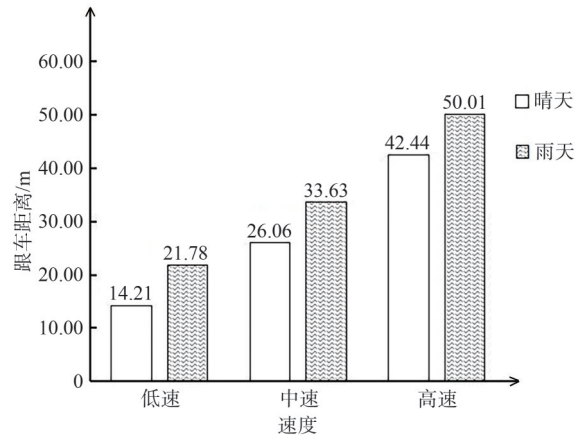


图 6 不同速度下跟车间距

对前后两车跟车时距进行方差分析，天气因素显著影响驾驶人保持的车头时距。在不同速度等级下，晴天环境中驾驶人保持的车头时距都显著小于雨天环境，因为雨天环境下的驾驶人选择了更大的跟车间距以确保安全。尽管车速增加时跟车时距有所增大，但这种变化并不显著，表明在3种速度区间下前后两车跟车时距基本保持一致，没有明显差异。

(2) 纵向跟车稳定性分析

分析纵向跟车稳定性，无论是天气条件、行车

速度，还是天气与速度之间的二次交互作用，这些因素对驾驶人维持跟车距离的稳定性都没有产生显著影响。这表明，在城市道路上，驾驶人在稳定的跟车状态下，不论天气和速度如何变化，他们保持纵向跟车距离的能力是相对恒定的。

(3) 反应时间分析

从后方跟随车辆驾驶人意识到前方有碰撞风险到采取制动动作所用时间长短也会影响行车安全^[30]。对反应时间进行方差分析，发现天气因素对反应时间影响显著。不同天气条件下驾驶人反应时间均值对比如图7所示，晴天条件下驾驶人的反应时间均值为2.84 s，明显短于雨天的3.92 s。进行相关性分析，发现驾驶人的反应时间与前车减速时的车距和车头时距呈正相关，与前车减速时刻的 τ^{-1} 呈负相关。这表明 τ^{-1} 是影响后方车辆驾驶人减速决策的主要因素，且前方车辆减速越紧急，后方跟随车辆驾驶人的反应时间越短。

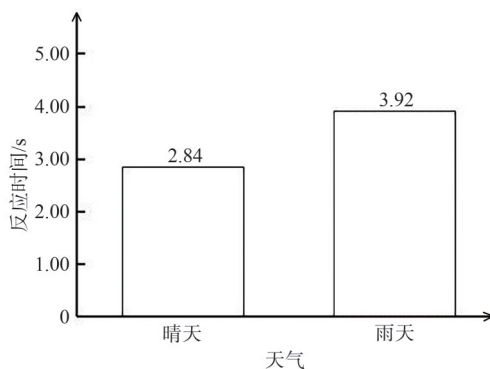


图7 不同天气条件下驾驶人反应时间均值对比

4.3 道路条件的影响

清晰的道路标志和信号可以有效地指导驾驶人行驶方向和安全距离^[31]。有交通标志和没有交通标志的路口，行车速度和跟车距离都会受到影响。如果这些标志不清晰或者缺失，驾驶人会采取相应措施降低不明风险。提取了76段路口交通标识不明路段的跟车数据，发现跟车距离明显增大，平均增加了13.5%，这说明驾驶人对路口环境不确定时，会适当增大跟车距离以降低追尾风险。

交通拥挤程度也会影响驾驶人跟车状态。在高峰时段或者拥堵路段，由于车辆密度大，驾驶人需要频繁进行加减速操作，增加了操作的复杂性和危险性^[32]。提取了135段交通拥挤路段的跟车距离，发现跟车距离明显减小，道路通畅程度对跟车距离

影响如图8所示。在低速时跟车距离平均减少了2.03 m，减幅达17.49%；在中速时平均减少了5.63 m，减幅达22.47%；在高速时平均减少了6.43 m，减幅达16.30%。这说明在交通拥堵路段，驾驶人会提前采取制动动作以应对追尾风险。

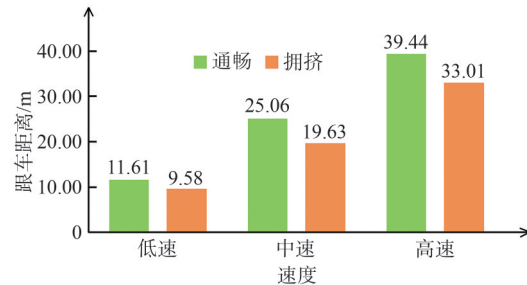


图8 道路通畅程度对跟车距离影响

5 结束语

车距并不是驾驶人判断追尾风险的唯一指标，THW和TTC这2个指标比较符合驾驶人对追尾风险的主观判断标准。

车距与相对速度的相关性比车速与车距的相关性高，两个动作时刻的相关程度分别达到了0.81和0.76，说明驾驶人采取制动动作受相对速度的影响最大，显然TTC指标更加符合驾驶人对追尾风险的判断意志。

3种驾驶风格的TTC也不尽相同，谨慎型松开油门踏板和踩下刹车踏板历经时间最短，激进型松开油门踏板和踩下刹车踏板历经时间最长，平稳型居中，说明不同驾驶风格的驾驶人对追尾风险的判断有区别。未来将引入基于机器学习的驾驶风格预测模型，深入研究不同性格特征驾驶人的驾驶特性。

驾驶人的反应时间与前车减速时的车距和跟车时距呈正相关，与前车减速时刻的 τ^{-1} 呈负强相关。这表明 τ^{-1} 是影响后方车辆驾驶人减速决策的主要因素，且前方车辆减速越紧急，跟车车辆驾驶人的反应时间越短。

雨天环境下跟车距离显著增大，表明驾驶人在天气不利的条件下会增加跟车距离以应对追尾风险，但是他们保持纵向跟车距离的能力是相对恒定的。且雨雾天气会显著影响跟车避撞反应时间。

道路标志和信号模糊，跟车距离也明显增加；随着道路通畅程度的提高，跟车距离也会明显增加，这说明道路条件也是影响驾驶人判断追尾风险

的重要因素。

把这些研究结果用于自动驾驶辅助系统和驾驶安全预警系统, 针对不同的天气条件和道路条件自动调整跟车距离, 对提高自动驾驶的安全性具有重要意义。

参考文献:

- [1] 王媚, 朱兴林. 基于车载激光雷达设备的跟驰数据采集方法[J]. 中国科技论文, 2017, 12(19): 2176-2180.
WANG M, ZHU X L. Data acquisition method of car-following model for urban expressway[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(19): 2176-2180.
- [2] 刘通, 付锐, 马勇, 等. 考虑驾驶人风格的跟车预警规则研究[J]. 中国公路学报, 2020, 33(2): 170-180.
LIU T, FU R, MA Y, et al. Car-following warning rules considering driving styles[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020, 33(2): 170-180.
- [3] 金辉, 李昊天. 基于驾驶风格的前撞预警系统报警策略[J]. 汽车工程, 2021, 43(3): 405-413.
JIN H, LI H T. Alarm strategy for frontal crash warning system based on driving style[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(3): 405-413.
- [4] DENG Q, WANG J, SOFFKER D. Prediction of human driver behaviors based on an improved HMM approach[C]//Proceedings of the 2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV). Piscataway: IEEE Press, 2018: 2066-2071.
- [5] QUINTERO M C G, LÓPEZ J O, CUERVO PINILLA A C. Driver behavior classification model based on an intelligent driving diagnosis system[C]//Proceedings of the 2012 15th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. Piscataway: IEEE Press, 2012: 894-899.
- [6] 张晖, 刘永杰, 吴超仲, 等. 考虑行车安全事件严重程度和个体差异的驾驶行为风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(7): 24-31.
ZHANG H, LIU Y J, WU C Z, et al. A risk assessment method of driving behavior considering severity of safety-critical events and individual heterogeneity[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(7): 24-31.
- [7] 孙博华, 邓伟文, 吴坚, 等. 驾驶人纵侧向驾驶能力评价方法研究[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(11): 1149-1154.
SUN B H, DENG W W, WU J, et al. Evaluation method for driving capability in the longitudinal and lateral scenarios[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2019, 39(11): 1149-1154.
- [8] 张旭欣. 能见度影响下跟驰车辆驾驶行为研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
ZHANG X X. Study on driving behavior of car-following vehicle under the influence of visibility[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2018.
- [9] 王鑫. 不同分心工作负荷下跟车风险辨识研究[D]. 西安: 长安大学, 2020.
WANG X. Research on risk identification of car following under different distracted workloads[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [10] 徐嘉伟. 不利天气条件下驾驶人跟车行为特性及车载预警方案研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2022.
XU J W. Research on driver following behavior characteristics and on-board early warning scheme under adverse weather conditions[D]. Beijing: North China University of Technology, 2022.
- [11] 孟凡兴, 张良, 张伟. 驾驶员车头时距研究[J]. 工业工程与管理, 2013, 18(2): 131-135, 140.
MENG F X, ZHANG L, ZHANG W. A study on drivers' time headway[J]. Industrial Engineering and Management, 2013, 18(2): 131-135, 140.
- [12] AUST M L, ENGSTRÖM J, VISTRÖM M. Effects of forward collision warning and repeated event exposure on emergency braking[J]. Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour, 2013, 18: 34-46.
- [13] 刘宁伟, 梁波, 肖尧, 等. 基于驾驶员反应时间特性的特长隧道行车安全[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(26): 10927-10933.
LIU N W, LIANG B, XIAO Y, et al. Driving safety of extra-long tunnel based on reaction time characteristics of drivers[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(26): 10927-10933.
- [14] LEE J D, MCGEHEE D V, BROWN T L, et al. Collision warning timing, driver distraction, and driver response to imminent rear-end collisions in a high-fidelity driving simulator[J]. Human Factors, 2002, 44(2): 314-334.
- [15] 李长城, 刘小明, 荣建, 等. 不同能见度条件下高速公路车辆速度特性研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(6): 213-218.
LI C C, LIU X M, RONG J, et al. Characteristics of vehicle speed for expressway under different visibility condition[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(6): 213-218.
- [16] 陈秀锋, 武帅, 宋著贺, 等. 雾天环境下S形弯道驾驶行为特性[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 344-348.
CHEN X F, WU S, SONG Z H, et al. Driving behavior characteristics of S-curve section in foggy environment[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(29): 344-348.
- [17] 武帅, 陈秀锋, 高艳艳, 等. 雾天环境下驾驶行为特性研究[J]. 青岛理工大学学报, 2019, 40(5): 101-105.
WU S, CHEN X F, GAO Y Y, et al. Study on driving behavior characteristics in foggy environment[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2019, 40(5): 101-105.
- [18] 王佳丽. 雾天高速公路连环追尾事故风险产生机理研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
WANG J L. A study on the risk mechanism of multiple rear-end collision accident on fog-day expressway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.
- [19] 赵亮, 刘浩学, 石保同. 复杂道路环境中驾驶人应激反应能力研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(4): 105-109.

- ZHAO L, LIU H X, SHI B T. Stress response ability of drivers in complex road environment[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(4): 105-109.
- [20] 刘振华, 张志懿, 罗后跟. 前车制动工况下自车避撞策略研究[J]. 汽车测试报告, 2024(13): 152-154.
LIU Z H, ZHANG Z Y, LUO H G. Study on collision avoidance strategy of self-propelled vehicle under braking condition of front vehicle[J]. Car Test Report, 2024(13): 152-154.
- [21] 谭子胡, 龚贤武, 刘峰云, 等. 弯道制动工况下车辆参数估计[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(3): 178-185.
TAN Z H, GONG X W, LIU F Y, et al. Estimation of vehicle parameters under steering and braking condition[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(3): 178-185.
- [22] 孙彦军. 智能车主动避撞控制策略研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
SUN Y J. Research on control strategy of active collision avoidance of intelligent vehicle[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [23] 魏田正. 城市道路追尾风险场景驾驶行为分析及预警策略功效评估[D]. 西安: 长安大学, 2023.
WEI T Z. Analysis of driving behavior and assessment of early-warning strategies in rear-end collision risk scenarios on urban roads[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [24] 杨少阳. 城市道路行车安全距离及追尾预警研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2018.
YANG S Y. Research on driving safety distance and rear-end collision warning of urban roads[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2018.
- [25] 杨澜, 马佳荣, 赵祥模, 等. 基于车路协同的高速公路车辆碰撞预警模型[J]. 公路交通科技, 2017, 34(9): 123-129.
YANG L, MA J R, ZHAO X M, et al. A vehicle collision warning model in expressway scenario based on vehicle-infrastructure cooperation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34(9): 123-129.
- [26] 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): 571-579.
GUO J H, LI W C, LUO Y G, et al. Driver car-following model based on deep reinforcement learning[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(4): 571-579.
- [27] 王雪松, 朱美新, 陈铭. 工况紧急程度对驾驶员避撞行为的影响[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 876-883.
WANG X S, ZHU M X, CHEN M. Impacts of situational urgency on drivers' collision avoidance behaviors[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(6): 876-883.
- [28] 吕能超, 郑梦凡, 郝威, 等. 基于客观风险感知特性的前向碰撞预警算法优化与标定[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 172-183.
LYU N C, ZHENG M F, HAO W, et al. Forward collision warning algorithm optimization and calibration based on objective risk perception characteristic[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(2): 172-183.
- [29] 薛晴婉, 徐嘉伟, 闫学东, 等. 雾天驾驶人车辆操纵行为特性及其与追尾风险相关性分析[J]. 交通信息与安全, 2022, 40(1): 19-27.
XUE Q W, XU J W, YAN X D, et al. A study on the correlation between vehicle control behaviors and rear-end collision risk under foggy conditions[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(1): 19-27.
- [30] KATRINIOK A, ABEL D. Adaptive EKF-based vehicle state estimation with online assessment of local observability[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(4): 1368-1381.
- [31] DOUMIATI M, GHANDOUR R, CHARARA A, et al. Design, experimental validation, and comparison of two model-based EKF observers for lateral vehicle dynamics estimation[C]//Proceedings of the 21st Mediterranean Conference on Control and Automation. Piscataway: IEEE Press, 2013: 311-316.
- [32] LI L, JIA G, RAN X, et al. A variable structure extended Kalman filter for vehicle sideslip angle estimation on a low friction road[J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(2): 280-308.

[作者简介]



祝学亮(1986-), 男, 延安大学西安创新学院讲师, 主要研究方向为车联网、汽车安全与计算机等。



刘卫旗(1969-), 男, 延安大学西安创新学院高级工程师, 主要研究方向为机械设计与制造、物联网等。



柴荣军(1972-), 男, 延安大学西安创新学院工程师, 主要研究方向为信息计算与智能系统、大数据等。