

雾天高速公路车辆跟驰安全分析与控制策略

秦严严¹, 肖腾飞¹, 罗钦中¹, 王宝杰²

(1. 重庆交通大学 交通运输学院, 重庆 400074; 2. 生态安全屏障区交通网设施管控及循环修复技术交通运输行业重点实验室(长安大学), 西安 710064)

摘要: 针对雾天环境高速公路车辆跟驰安全进行了研究, 并提出了基于车车通信 (Vehicle-to-vehicle, V2V) 环境的雾天跟驰安全提升策略。首先, 选取雾天跟驰模型描述雾天车辆跟驰行为, 设计数值仿真实验, 分析不同雾天浓度和限速条件对车辆追尾碰撞风险的影响。然后, 对仿真实验中的碰撞时间阈值 TTC^* , 车队初始速度 v 和头车刚观测到事故发生点时头车与事故点的距离 L 进行参数敏感性分析。最后, 基于雾天 V2V 环境, 考虑速度差对跟驰行为的影响作用, 提出雾天场景下的高速公路跟驰安全控制策略。研究结果表明: 轻雾场景和浓雾场景分别在限速 60 km/h 和 100 km/h 时车辆追尾碰撞风险最高, 轻雾场景在限速 40 km/h 和 80 km/h 时车辆追尾碰撞风险最低, 浓雾场景在限速 60 km/h 时车辆追尾碰撞风险最低。车辆追尾碰撞风险与车队初始速度 v 和碰撞时间阈值 TTC^* 呈正相关, 与头车刚观测到事故发生点时头车与事故点的距离 L 呈负相关。本文控制策略能有效降低雾天高速公路车辆追尾碰撞风险, 在置信水平为 95% 的情况下, 车辆追尾碰撞风险降低幅度显著, 在不同雾天浓度和限速条件下, 车辆追尾碰撞风险可降低 36.70%~45.14%。

关键词: 交通运输系统工程; 交通安全; 跟驰模型; 雾天场景; 控制策略

中图分类号: U491 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)04-1241-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20230634

Car-following safety analysis and control strategy for foggy freeway

QIN Yan-yan¹, XIAO Teng-fei¹, LUO Qin-zhong¹, WANG Bao-jie²

(1. School of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Key Laboratory of Transport Industry of Management, Control and Cycle Repair Technology for Traffic Network Facilities in Ecological Security Barrier Area (Chang'an University), Xi'an 710064, China)

Abstract: This paper studies the freeway car-following safety in foggy weather. Then a control strategy for freeway car-following safety in foggy weather is proposed based on vehicle-to-vehicle (V2V) communications. Firstly, a foggy car-following model was selected to describe the car-following behavior in foggy weather. Numerical simulation was designed to analyze the influence of different foggy scenes and speed limit conditions on the risk of rear-end collision. Then we conducted sensitivity analyses on the

收稿日期: 2023-06-20.

基金项目: 生态安全屏障区交通网设施管控及循环修复技术交通运输行业重点实验室(长安大学)开放基金项目(300102343505); 国家自然科学基金项目(52002044); 重庆交通大学研究生科研创新项目(CYS240478).

作者简介: 秦严严(1989-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通流理论与应用. E-mail: qinyanyan@cqjtu.edu.cn

通信作者: 王宝杰(1987-), 男, 副教授, 博士. 研究方向: 交通管理与控制. E-mail: wangbj2@163.com

collision time threshold TTC^* , the initial speed v of the fleet and the distance L between the lead vehicle and the accident point when the lead vehicle just observed the accident point. Finally, considering the influence of speed difference between the vehicle and preceding vehicle on car-following behavior, a car-following safety control strategy was proposed based on foggy V2V conditions. The results show that the speed limit values of 60 km/h and 100 km/h will lead to the maximum risk of rear-end collision under light fog and heavy fog conditions, respectively. The light fog has the minimum risk of rear-end collision when 40 km/h and 80 km/h are selected as the speed limit value. The heavy fog has the minimum risk of rear-end collision when 60 km/h is selected as the speed limit value. The risk of rear-end collision is positively correlated with the initial speed v of the fleet and collision time threshold TTC^* , and negatively correlated with the distance L between the lead vehicle and the accident point when the lead vehicle just observed the accident point. The proposed control strategy can effectively reduce the risk of rear-end collision and improve the car-following safety in foggy weather. Under the confidence level of 95%, the risk of rear-end collision was significantly reduced. The risk of rear-end collision could be reduced by 36.70%~45.14% under different foggy scenes and speed limit conditions.

Key words: engineering of communication and transportation system; traffic safety; car-following model; foggy weather; control strategy

0 引言

高速公路是重要的交通基础设施,车辆追尾碰撞事故是高速公路交通事故中最主要的事故类型^[1]。雾天环境会降低道路能见度以及驾驶员的视觉辨别能力,易造成追尾事故^[2]。针对雾天环境高速公路追尾风险进行分析,具有现实意义。

Das等^[3]基于高速公路实际驾驶数据的研究发现,雾天环境下驾驶员车道位置标准偏差比晴朗天气增加了1.37倍。Hammit等^[4]研究发现,随着天气条件的恶化,驾驶行为差异性更加显著。Rosey等^[5]基于驾驶模拟器数据的研究表明:驾驶员采取的行驶速度跟能见度呈正相关。Huang等^[6]的研究进一步表明:驾驶行为差异性和平均跟车距离随着雾浓度的降低而增加。高坤等^[7]则发现雾天对不同跟驰状态的影响规律不同并且存在显著差异。Das等^[8]引入碰撞时间、后侵入时间和避免碰撞的减速率3个安全评价指标研究了雾天等恶劣天气对交通安全的影响。Zhai等^[9]的研究结果表明:车辆碰撞风险与能见度和下游观测站点所观测的车辆速度标准差呈负相关,与上游观测站点所观测的平均车辆数、上游观测站点所观测的车辆数标准差和下游交通量呈正相关。Wu等^[10]研究了不同雾天浓度和车道对车辆追尾碰撞风险的影响,研究结果表明:雾天低能见度会增加追尾碰撞风险。

通过分析众多学者的研究发现,以往的研究

成果主要集中在雾天和晴天环境下驾驶行为及跟驰安全的差异性分析。然而,较少有文献综合考虑不同雾天浓度和限速条件的相互作用对跟驰安全的影响。鉴于此,本文基于雾天跟驰模型,选取碰撞时间作为安全评价指标,设计雾天场景高速公路数值仿真试验,探索不同雾天浓度和限速对高速公路跟驰安全的影响,并提出雾天场景高速公路跟驰控制策略。

1 跟驰模型

黄岩等^[11]利用驾驶模拟器车辆跟驰轨迹数据从雾天浓度和交通限速两个方面对Gipps跟驰模型进行了参数标定,经验证,标定后的Gipps模型在局部精确度和整体轨迹方面都具有良好的鲁棒性和拟合能力,能够较好地描述雾天环境下高速公路车辆跟驰行为。因此,本文选取该模型作为雾天场景高速公路车辆跟驰模型,模型表达式如下:

$$v_n(t+T_n) = \min\{v_{i,n}(t+T_n), v_{c,n}(t+T_n)\} \quad (1)$$

$$v_{i,n}(t+T_n) = v_n(t) + 2.5 \cdot a_n \cdot T_n \times \left[1 - \frac{v_n(t)}{v_{\max}}\right] \times \sqrt{0.025 + \frac{v_n(t)}{v_{\max}}} \quad (2)$$

$$v_{c,n}(t+T_n) = b_n \cdot T_n + \sqrt{b_n^2 \cdot T_n^2 + b_n \left[v_n(t) \cdot T_n + \frac{v_{n-1}^2(t)}{b_{n-1}} + 2d - 2s_n(t) \right]} \quad (3)$$

式中: $v_{f,n}(t)$ 为自由流状态下第 n 辆车在 t 时刻的速度; $v_{c,n}(t)$ 为跟驰状态下第 n 辆车在 t 时刻的速度; $v_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻的速度; A_n 为第 n 辆车期望的最大加速度; v_{max} 为高速公路限速值; b_n 为第 n 辆车在紧急制动时所能达到的最大减速度;

b_{n-1} 为第 n 辆车预计第 $n-1$ 辆车在紧急制动时所能达到的最大减速度; T_n 为驾驶员反应时间; $s_n(t)$ 为第 n 辆车与第 $n-1$ 辆车的车头间距; d 为前后两车之间的有效距离。不同雾天浓度和限速情况下模型参数取值如表 1 所示^[11]。

表 1 Gipps 模型参数标定结果

Table 1 Parameter calibration results of Gipps model

雾天浓度	限速/(km·h ⁻¹)	$a_n/(m·s^{-2})$	$b_n/(m·s^{-2})$	$b_{n-1}/(m·s^{-2})$	T_n/s	d/m
轻雾 (能见度 150 m)	40	1.354	-3.718	-3.528	0.947	6.567
	60	1.792	-3.539	-3.893	1.150	5.938
	80	2.574	-3.940	-2.958	1.493	6.238
	100	2.809	-3.694	-2.867	1.636	6.153
浓雾 (能见度 60 m)	40	2.256	-3.557	-3.637	0.943	6.682
	60	2.296	-3.460	-3.644	1.064	7.188
	80	2.530	-2.967	-2.907	1.176	6.290
	100	3.330	-3.719	-3.210	1.504	5.721

2 跟驰安全分析

2.1 评价指标

碰撞时间 (Time-to-collision, TTC) 是目前评价高速公路车辆追尾碰撞风险最常用的指标之一。TTC 计算公式^[12]如下:

$$TTC_n(t) = \begin{cases} \frac{x_{n-1}(t) - x_n(t)}{v_n(t) - v_{n-1}(t)}, & v_n(t) > v_{n-1}(t) \\ \infty, & v_n(t) < v_{n-1}(t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $TTC_n(t)$ 代表 t 时刻第 n 辆车与第 $n-1$ 辆车的碰撞时间; $x_n(t)$ 为第 n 辆车在 t 时刻的所在位置。

基于 TTC 可衍生出两个新指标:碰撞时间暴露时间 (Time exposed time-to-collision, TET) 和碰撞时间整合时间 (Time integrated time-to-collision, TIT), 并引入碰撞时间阈值 (TTC^* , 一般取 2~4 s) 区分相对安全和临界状态, TET 和 TIT 计算公式^[13]如下:

$$TET = \begin{cases} \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^M \Delta t, 0 \leq TTC_n(t) \leq TTC^* \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$TIT = \begin{cases} \sum_{n=1}^N \sum_{t=0}^M [TTC^* - TTC_n(t)] \Delta t, 0 \leq TTC_n(t) \leq TTC^* \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中: N 为仿真总车辆数; Δt 为仿真步长; M 为仿真总时间。

对于 TET 和 TIT 而言,其值越小则代表追尾碰撞风险越低,安全水平越高。TET 侧重描述在仿真时间内发生追尾碰撞的次数, TIT 侧重描述在仿真时间内发生追尾碰撞的严重程度。

2.2 数值仿真实验与结果分析

急刹车行为作为雾天环境下典型的驾驶行为,极易导致车辆发生追尾碰撞事故。本文构建头车急刹车仿真场景,进行雾天环境交通安全影响分析。仿真实验中,考虑 30 辆车组成的车队,初始时刻,车队的车辆以各自的稳态速度 v 和车头间距匀速运行 50 s, 随后,头车发现前方 L 处发生交通事故,于是头车采取紧急制动措施,最终停在事故点位置,后方车辆随之减速停止。事故点可以看作一辆静止不动的虚拟车辆,头车与事故点保持跟驰运动关系,并根据雾天跟驰模型做出急刹车行为。

为分析不同雾天浓度和限速条件对追尾碰撞风险的影响,应统一基准,即不同场景下的车队初始速度 v 和头车与事故点的距离 L 应保持一致,由于雾天行驶过程中,驾驶员往往以低于限速值的速度行驶,而限速最低值为 40 km/h, 因此,本文采取 10 m/s (36 km/h) 作为车队初始速度。由于头车驾驶员主要是通过视觉获取与事故点的距离,并基于跟驰模型进行运动行驶,因此,仿真场景中头车与事故点的距离 L 应小于轻雾和浓雾场

景能见度,为体现雾天低能见度急刹车场景紧急制动特性,本文采取 25 m 作为头车与事故点的距离 L 。同时,将在第 3 小节对车队初始速度 v 以及事故地点距离 L 进行参数敏感性分析。此外,在仿真实验中,仿真时间为 500 s,仿真步长为 0.01 s, TTC^* 取 3 s。

不同雾天浓度和限速情况下的仿真计算结果如表 2 所示。由表 2 可知,轻雾场景下,限速 80 km/h 时 TET 最小,限速 40 km/h 时 TIT 最小,TET 和 TIT 均在限速 60 km/h 最大。相比于限速 40 km/h,限速 60 km/h 和 100 km/h 时对应的 TET 分别增加了 357.86% 和 8.62%,限速 80 km/h 时对应的 TET 减少了 7.25%。相比于限速 40 km/h,限速 60、80、100 km/h 时对应的 TIT 分别增加了 381.79%、5.03%、25.62%。浓雾场景下,TET 和 TIT 均在限速 60 km/h 最小,在限速 100 km/h 时最大。相比于限速 40 km/h,限速 80 km/h 和 100 km/h 时对应的 TET 分别增加了 22.56% 和 124.41%,限速 60 km/h 时对应的 TET 减少了 39.53%。相比于限速 40 km/h,限速 80 km/h 和 100 km/h 时对应的 TIT 分别增加了 33.36% 和 208.68%,限速 60 km/h 时对应的 TIT 减少了 45.87%。

表 2 TET 和 TIT 仿真结果

雾天浓度	限速/(km·h ⁻¹)	TET	TIT
轻雾	40	19.72	10.93
	60	90.29	52.66
	80	18.29	11.48
	100	21.42	13.73
浓雾	40	22.74	11.75
	60	13.75	6.36
	80	27.87	15.67
	100	51.03	36.27

由上述分析可知,轻雾场景在限速 40 km/h 和 80 km/h 追尾碰撞风险最低,在限速 60 km/h 时风险最高,浓雾场景在限速 60 km/h 追尾碰撞风险最低,在限速 100 km/h 时最高。根据 TET 和 TIT 的物理含义,轻雾场景在限速 40 km/h 时的追尾碰撞风险严重程度最小,在限速 80 km/h 时的追尾碰撞风险次数最少。浓雾场景在限速 60 km/h 时的追尾碰撞风险严重程度和次数均最

小。由此,在雾天高速公路限速管理中,如以追尾碰撞风险严重程度最小为目标,轻雾场景下可采取限速 40 km/h 的管理策略,降低轻雾场景高速公路车辆追尾碰撞风险严重程度;如以追尾碰撞风险次数最少为目标,轻雾场景下可采取限速 80 km/h 的管理策略,减少轻雾场景高速公路车辆追尾碰撞风险次数。在两种安全目标导向情况下,浓雾场景均可采取限速 60 km/h 的管理策略,减少浓雾场景高速公路追尾碰撞风险严重程度和风险次数,提高行车安全水平。

3 参数敏感性分析

3.1 碰撞时间阈值敏感性分析

对数值仿真实验中碰撞时间阈值 TTC^* 进行参数敏感性分析。相关研究结果表明^[14]: TTC^* 取值在 2~4 s 内较为合理,因此,本文采取枚举法对 TTC^* 在 2~4 s 范围内以 0.5 为间隔取值,计算在不同 TTC^* 取值下 TET 和 TIT 的变化情况,计算结果如表 3 和表 4 所示。由表 3 和表 4 可以看出,TET 和 TIT 与 TTC^* 呈正相关。轻雾场景下,当 TTC^* 从 2 s 增加到 4 s 时,TET 和 TIT 分别最大增加了 16.29 倍和 69.74 倍(限速 40 km/h 时),各个限速情况下 TET 和 TIT 分别平均增加了 10.50 倍和 43.97 倍。此外,TET 和 TIT 始终在限速 60 km/h 时最大,在限速 40 km/h 或 80 km/h 时最小。浓雾场景下,当 TTC^* 从 2 s 增加到 4 s 时,TET 和 TIT 分别最大增加了 37.57 倍和 265.66 倍(限速 60 km/h 时),各个限速情况下 TET 和 TIT 分别平均增加了 20.40 倍和 109.67

表 3 TTC^* 对 TET 的影响结果

雾天浓度	限速/(km·h ⁻¹)	TET				
		$TTC^* = 2\text{ s}$	$TTC^* = 2.5\text{ s}$	$TTC^* = 3\text{ s}$	$TTC^* = 3.5\text{ s}$	$TTC^* = 4\text{ s}$
轻雾	40	3.12	9.76	19.72	34.65	53.95
	60	15.84	44.40	90.29	119.20	141.23
	80	4.21	10.27	18.29	28.95	41.97
	100	5.00	11.87	21.42	33.79	49.16
浓雾	40	2.99	10.15	22.74	41.78	69.36
	60	1.19	5.65	13.75	26.76	45.90
	80	4.90	13.80	27.87	48.77	77.05
	100	14.22	29.17	51.03	79.34	115.49

表 4 TTC*对TIT的影响结果

Table 4 Impact results of TTC* on TIT

雾天 浓度 (km·h ⁻¹)	限速/ (km·h ⁻¹)	TIT				
		TTC* =2 s	TTC* =2.5 s	TTC* =3 s	TTC* =3.5 s	TTC* =4 s
轻雾	40	0.65	3.71	10.93	24.36	46.33
	60	4.59	18.80	52.66	105.46	170.74
	80	1.08	4.50	11.48	23.13	40.69
	100	1.40	5.53	13.73	27.40	48.03
浓雾	40	0.58	3.73	11.75	27.57	54.95
	60	0.13	1.67	6.36	16.27	34.14
	80	1.09	5.50	15.67	34.54	65.63
	100	5.89	16.58	36.27	68.29	116.28

倍。此外, TET 和 TIT 始终在限速 100 km/h 时最大, 在限速 60 km/h 时最小。由此可以看出, 轻雾场景下, TET 和 TIT 在限速 40 km/h 时对 TTC* 变化更敏感, 浓雾场景下, TET 和 TIT 在限

60 km/h 时对 TTC* 的变化更敏感。

3.2 车队初始速度及头车与事故点距离敏感性分析

针对仿真实验中车队初始速度 v 和头车刚观测到事故发生点时头车与事故点的距离 L 进行参数敏感性分析, 进行敏感性分析时, TTC* 取值为 3 s, 车队初始速度分别取 32、34、36、38 km/h, 头车与事故点的距离 L 分别取 25、30、35、40 m, 计算在不同雾天浓度和限速条件下 TET 和 TIT 变化情况, 如图 1~4 所示。

在图 1~4 中, 颜色条越深, 代表 TET 和 TIT 指标值越大, 可以看出, 图中右下角颜色最深、左上角颜色最浅, 表明随着车队初始速度的加快以及头车与事故点位置距离的缩短, 雾天高速公路 TET 和 TIT 均呈现增加趋势, 当初始车队速度为 38 km/h, 头车与事故点的距离 L 为 25 m 时, TET 和 TIT 最大, 此时发生车辆追尾碰撞风险最大。

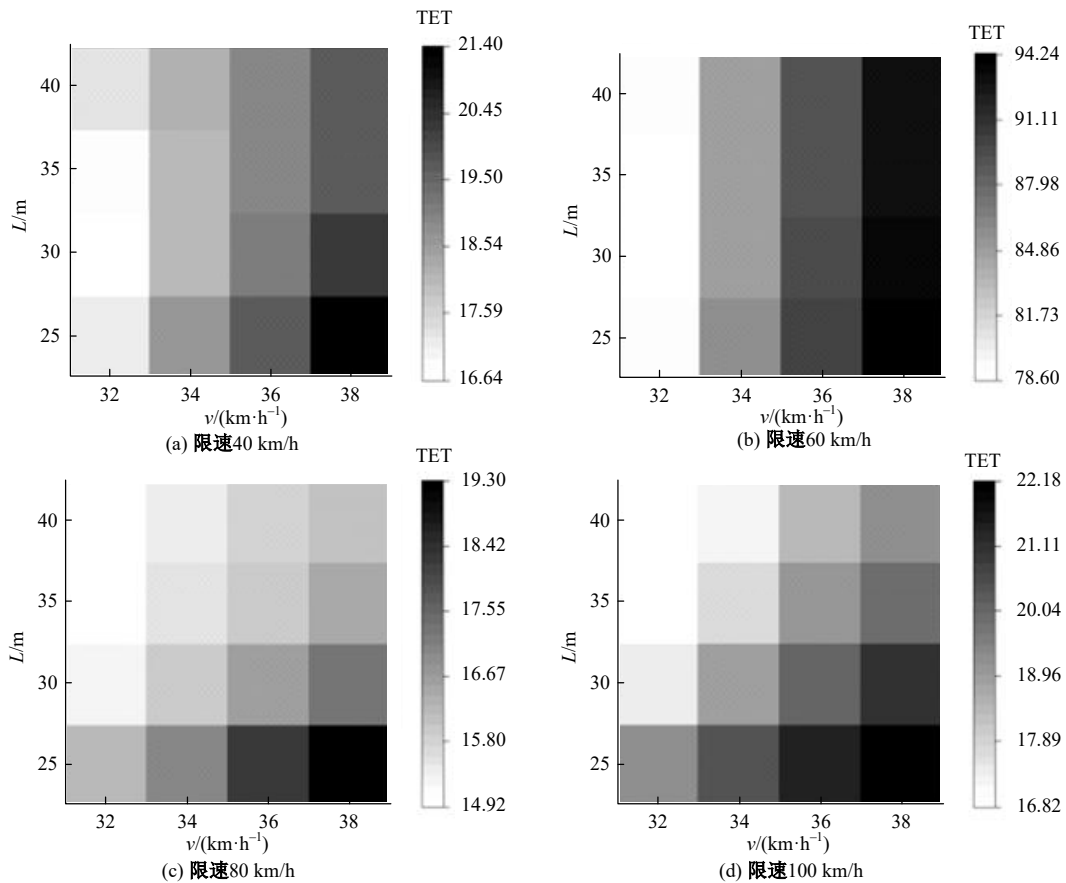


图 1 轻雾场景 TET 变化情况热力图

Fig. 1 Heat map of TET change in light fog scene

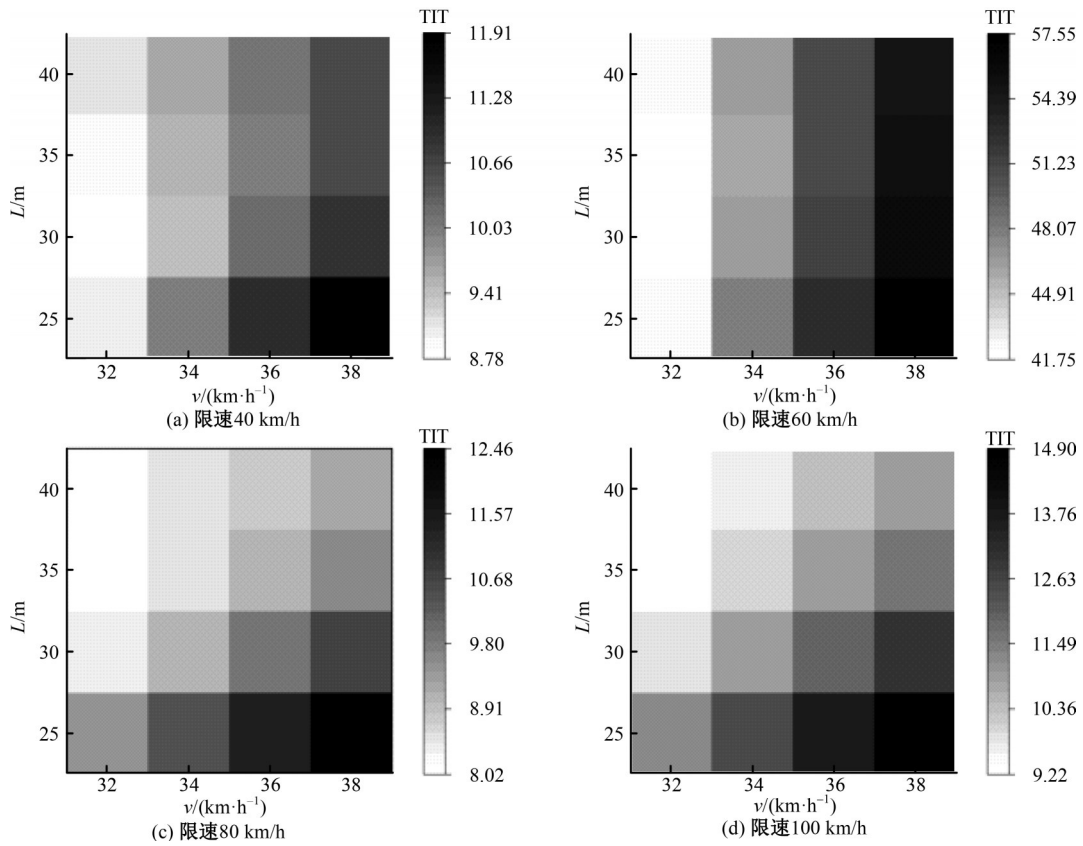


图 2 轻雾场景 TIT 变化情况热力图

Fig. 2 Heat map of TIT change in light fog scene

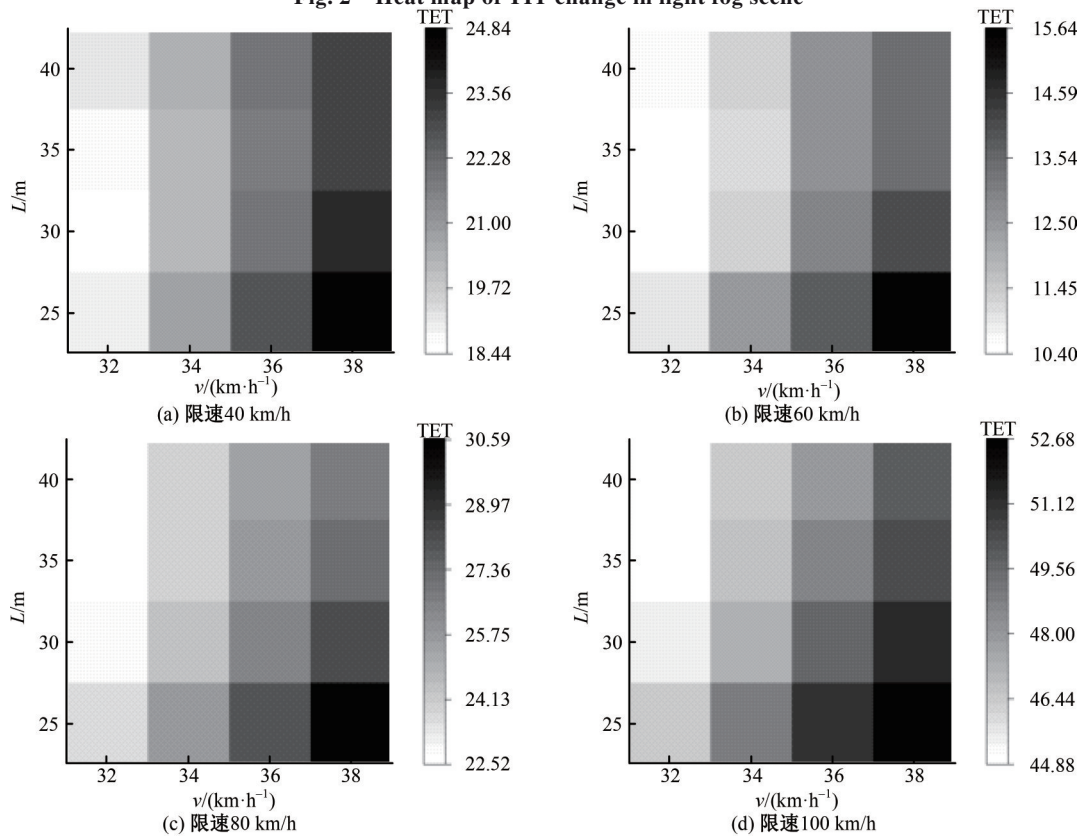


图 3 浓雾场景 TET 变化情况热力图

Fig. 3 Heat map of TET change in heavy fog scene

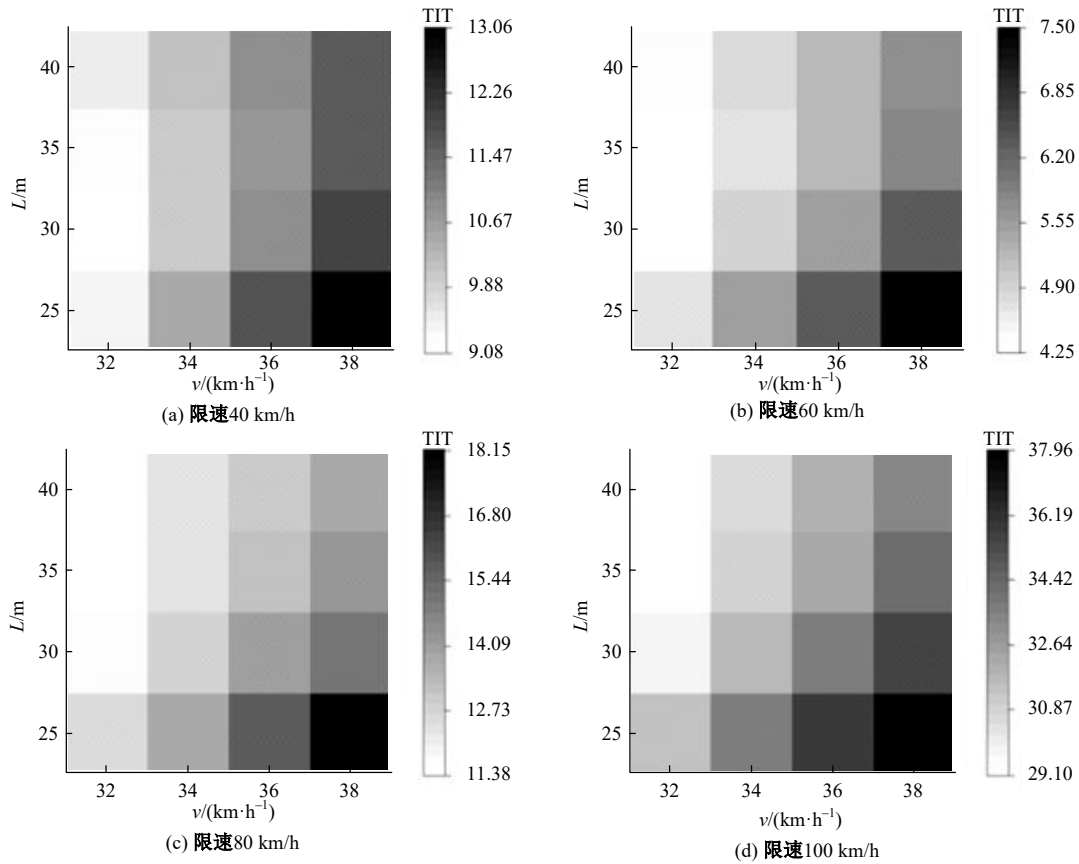


图 4 浓雾场景 TIT 变化情况热力图

Fig. 4 Heat map of TIT change in heavy fog scene

4 雾天跟驰安全控制策略及对比分析

4.1 雾天跟驰控制策略

Gipps 模型输出的速度是后车与前车不发生碰撞时的最大安全速度,在实际驾驶环境中,驾驶员很难始终保持此安全速度行驶,虽然驾驶员不可能完全保持与前车不发生碰撞的安全速度,但是驾驶员始终都将跟驰速度保持在安全速度附近,即跟驰速度不是完全等于安全速度,而是关于安全速度的函数。同时,在车辆行驶中,还遵循这样一个原则,当前车速度高于后车时,后车倾向以高于安全速度的速度行驶,当前车速度低于后车时,后车倾向以低于安全速度的速度行驶。通过分析 Gipps 模型,发现该模型未体现速度差对跟驰行为的影响^[15]。

基于雾天车车通信 (Vehicle-to-vehicle, V2V) 环境,驾驶员能够获取前车信息,起到智能辅助驾驶的作用^[16,17]。因此,本文考虑速度差对跟驰速度的影响,并引入速度差反馈强度 α (α 取

值不宜过大,防止跟驰速度偏移安全速度幅度过大,本文取 $0 \leq \alpha \leq 0.1$), 提出雾天场景下 V2V 跟驰控制策略:

$$v_{c,n}(t + T_n) = b_n \cdot T_n + \sqrt{b_n^2 \cdot T_n^2 + b_n \left[v_n(t) \cdot T_n + \frac{v_{n-1}^2(t)}{b_{n-1}} + 2d - 2s_n(t) \right]} + \alpha \Delta v_n(t) \quad (7)$$

式中: Δv 为前、后车速度差。

4.2 雾天跟驰安全对比分析

针对不同 α 取值,对比跟驰控制策略前后安全风险改善情况,将第 3.1 小节中无控制策略下的 TET 和 TIT 作为基准场景,计算本文控制策略相比基准场景 TET 和 TIT 指标降低比例,如图 5 所示。由图 5 可知,本文控制策略能有效降低雾天环境下的车辆追尾碰撞风险。当 TTC* 越小时, TET 和 TIT 降低情况也越显著,表明本文控制策略能有效降低雾天危险程度较高的追尾碰撞风险。

通过图 5 的计算, TET 和 TIT 平均降低幅度分别为 36.70% 和 45.14%, 轻雾场景 TET 和 TIT 平均降低幅度分别为 33.97% 和 44.60%, 浓雾场景 TET 和 TIT 平均降低幅度分别为 39.43% 和 46.46%。同时, 浓雾场景 TET 和 TIT 降低幅度较轻雾场景降低幅度更明显, 说明本文跟驰控制策略对浓雾场景下的追尾碰撞风险降低程度更显著。

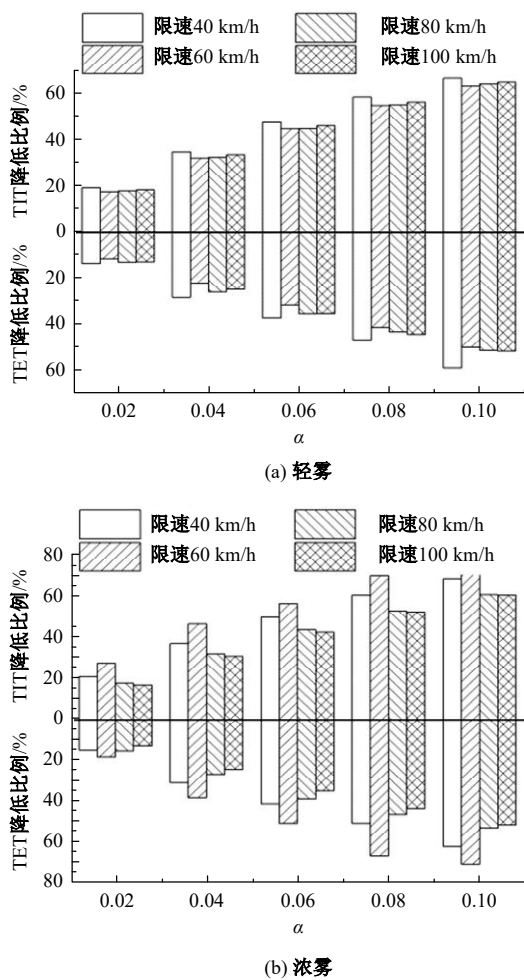


图 5 不同 α 下 TET 和 TIT 平均降低百分比
Fig. 5 Average reductions of TET and TIT under different α

为验证本文控制策略对车辆追尾碰撞风险降低程度的显著性, 基于 SPSS 软件进行统计分析, 针对 1 组基准场景安全评价指标值和 5 组不同 α 取值情况下的安全评价指标进行 K-W 检验, 分析各组安全评价指标值是否存在显著差异。统计分析中, 显著性水平为 0.05, K-W 检验结果见表 5。由表 5 可知, K-W 检验渐近显著性 P 值 = 0.002 < 0.05, 即在本文控制策略在置信水平为 95% 的情

况下, 对雾天高速公路车辆追尾碰撞风险的降低程度是显著的。

表 5 基于 SPSS 的显著性统计检验结果

Table 5 Statistical test results based on SPSS

检验对象	组数	检验统计量	自由度	渐近显著性 P 值
评价结果	6	18.75	5	0.002

5 结 论

(1) 在 2 种雾天浓度和 4 种限速条件下, 分析了雾天环境高速公路车辆追尾碰撞风险, 并基于 V2V 雾天环境提出了降低高速公路车辆追尾碰撞风险的跟驰控制策略, 且验证了本文跟驰控制策略能够有效降低高速公路车辆追尾碰撞风险, 研究成果可为雾天高速公路行车安全管理提供参考。

(2) 在限速 40、60、80、100 km/h 条件下, 轻雾和浓雾场景分别在限速 60 km/h 和 100 km/h 时的追尾碰撞风险最高, 轻雾场景在限速 40 km/h 和限速 80 km/h 时的追尾碰撞风险最低, 浓雾场景在限速 60 km/h 时的追尾碰撞风险最低。因此, 在轻雾场景下, 可采取限速 40 km/h 或 80 km/h 的管理策略, 在浓雾场景下, 可采取限速 60 km/h 的管理策略, 以降低高速公路车辆追尾碰撞风险。

(3) 雾天高速公路追尾碰撞风险与车队初始速度和碰撞时间阈值呈正相关, 与头车距事故点的距离呈负相关。SPSS 统计分析结果表明: 本文跟驰控制策略能够显著降低雾天高速公路车辆追尾碰撞风险, 在置信水平为 95% 时, TET 和 TIT 平均降低幅度分别为 39.43% 和 46.46%。

(4) 在实际条件下, 引起雾天场景高速公路车辆追尾碰撞风险变化的本质原因是雾天环境高速公路驾驶员的复杂驾驶行为。针对雾天高速公路复杂驾驶行为的机理分析是下一步的研究方向。

参考文献:

[1] Shangguan Q Q, Fu T, Liu S. Investigating rear-end collision avoidance behavior under varied foggy weather conditions: a study using advanced driving simulator and survival analysis[J]. Accident Analysis & Prevention, 2020, 139:No. 105499.

[2] 吴兵, 翟犇, 卢建涛, 等. 基于安全风险的恶劣天气下高速公路建议车速确定方法[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2020, 48(11): 1570-1578.

Wu Bing, Zhai Ben, Lu Jian-tao, et al. Determina-

- tion of freeway recommended speed based on safety risk under adverse weather conditions[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science)*, 2020, 48(11): 1570-1578.
- [3] Das A, Ghasemzadeh A, Ahmed M M. Analyzing the effect of fog weather conditions on driver lane-keeping performance using the SHRP2 naturalistic driving study data[J]. *Journal of Safety Research*, 2019, 68: 71-80.
- [4] Hammit B E, Ghasemzadeh A, James R M, et al. Evaluation of weather-related freeway car-following behavior using the SHRP2 naturalistic driving study database[J]. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 2018, 59: 244-259.
- [5] Rosey F, Aillerie I, Espie S, et al. Driver behaviour in fog is not only a question of degraded visibility—a simulator study[J]. *Safety Science*, 2017, 95: 50-61.
- [6] Huang Y, Yan X D, Li X M, et al. Improving car-following model to capture unobserved driver heterogeneity and following distance features in fog condition [J]. *Transportmetrica A: Transport Science*, 2022, 10: 1-24.
- [7] 高坤, 涂辉招, 时恒, 等. 雾霾天气低能见度对不同跟驰状态驾驶行为的影响[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2017, 47(6): 1716-1727.
- Gao Kun, Tu Hui-zhao, Shi Heng, et al. Effect of low visibility in haze weather condition on longitudinal driving behavior in different car-following stages[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2017, 47(6): 1716-1727.
- [8] Das A, Ahmed M M. Adjustment of key lane change parameters to develop microsimulation models for representative assessment of safety and operational impacts of adverse weather using SHRP2 naturalistic driving data[J]. *Journal of Safety Research*, 2022, 81: 9-20.
- [9] Zhai B, Lu J T, Wang Y L, et al. Real-time prediction of crash risk on freeways under fog conditions[J]. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 2020, 9(4): 287-298.
- [10] Wu Y N, Abdel A M, Cai Q, et al. Developing an algorithm to assess the rear-end collision risk under fog conditions using real-time data[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2018, 87: 11-25.
- [11] 黄岩, 闫学东, 李晓梦, 等. 基于多用户驾驶模拟平台的雾天高速公路跟驰模型参数标定及验证[J]. *中国公路学报*, 2022, 35(8): 320-330.
- Huang Yan, Yan Xue-dong, Li Xiao-meng, et al. Parameters calibration and validation for car-following models in freeway under foggy conditions based on multi-user driving simulator system[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2022, 35(8): 320-330.
- [12] Minderhoud M M, Bovy P H L. Extended time-to-collision measures for road traffic safety assessment [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2001, 33(1): 89-97.
- [13] Hassanin O, Wang X S, Wu X B, et al. Efficiency performance and safety evaluation of the responsibility-sensitive safety in freeway car-following scenarios using automated longitudinal controls[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2022, 177: No. 106799.
- [14] Han Y, Yu H, Li Z B, et al. An optimal control-based vehicle speed guidance strategy to improve traffic safety and efficiency against freeway jam waves[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2021, 163: No. 106429.
- [15] 秦严严, 刘小辉, 唐热情. 交通流分析理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2023.
- [16] 罗瑞发, 郝慧君, 徐桃让, 等. 考虑智能网联车队强度的混合交通流基本图模型[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2023, 53(2): 405-412.
- Luo Rui-fa, Hao Hui-jun, Xu Tao-rang, et al. Fundamental diagram model of mixed traffic flow of connected and automated vehicles considering vehicles degradations and platooning intensity[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(2): 405-412.
- [17] 秦严严, 杨晓庆, 王昊. 智能网联混合交通流 CO₂ 排放影响及改善方法[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2023, 53(1): 150-158.
- Qin Yan-yan, Yang Xiao-qing, Wang Hao. Impacts of CO₂ emissions and improving method for connected and automated mixed traffic flow[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(1): 150-158.