

朱笑笑,姚佼,杨媛媛,等. 基于安全势场理论的高速公路大货车安全换道距离研究[J]. 智能计算机与应用, 2025, 15(2): 182-189. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24101801

基于安全势场理论的高速公路大货车安全换道距离研究

朱笑笑¹, 姚佼¹, 杨媛媛², 李佳洋¹, 杨承逸¹

(1 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2 上海城投公路投资(集团)有限公司, 上海 200335)

摘要: 针对高速公路大货车运动惯性大、受周围车辆影响明显的特点,为降低大货车换道过程中发生碰撞的风险,通过车路云协同创新的模式辅助大货车的感知与决策,本文提出了一种基于安全势场理论的大货车与周围车辆间的安全换道距离模型。首先,在分析高速公路上大货车换道的运动边界条件的基础上,分析了避免碰撞需同时满足的4种换道间距条件;其次,基于安全势场理论,分析大货车的势场空间分布,建立了其安全换道距离模型。仿真实验结果表明,随着换道加速度以及车辆间相对速度差的增加,大货车与原车道前、后车以及目标车道前车间安全距离的增长率分别减小了16.36%、23.91%和89.75%,与目标车道后车安全距离的增长率增大了28.19%。因此,高速公路上大货车安全换道时保持加速,加速度宜离开原车道时增加,进入目标车道时减小。

关键词: 换道间距条件; 安全换道距离; 安全势场理论; 大货车; 高速公路

中图分类号: U491.54 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-2163(2025)02-0182-08

Research on the safe lane changing distance of large trucks on expressway based on the theory of safety potential field

ZHU Xiaoxiao¹, YAO Jiao¹, YANG Yuanyuan², LI Jiayang¹, YANG Chengyi¹

(1 School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2 Shanghai Chengtong Highway Investment (Group) Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: In response to the characteristics of large trucks on highways, such as high inertia and significant influence from surrounding vehicles, in order to reduce the risk of collisions during lane changing, this paper proposes a safety lane changing distance model between large trucks and surrounding vehicles based on the theory of safety potential field through the collaborative innovation of vehicle road cloud mode to assist the perception and decision-making of large trucks. Firstly, based on the analysis of the boundary conditions of lane changing for large trucks on highways, four lane changing spacing conditions that need to be simultaneously met to avoid collisions were analyzed; Secondly, based on the theory of safety potential field, the spatial distribution of the potential field of large trucks was analyzed, and a safe lane changing distance model was established. The simulation experiment results show that with the increase of lane changing acceleration and relative speed difference between vehicles, the growth rate of the safe distance between the large truck and the front and rear vehicles of the original lane, as well as the front and rear vehicles of the target lane, decreased by 16.36%, 23.91%, and 89.75%, respectively, and the growth rate of the safe distance between the large truck and the rear vehicle of the target lane increased by 28.19%. Therefore, when safely changing lanes on highways, large trucks should maintain acceleration. The acceleration should increase when leaving the original lane and decrease when entering the target lane.

Key words: lane changing spacing condition; safe lane change distance; safe potential field; large trucks; expressway

0 引言

随着交通物流业的快速发展,大货车在运输方

面承担的比重逐渐增加,大货车在长距离运输的高速公路上的比重日益提高。由于交通流由不同类型的车辆组成,以大货车为代表的大型车辆与小型车

基金项目: 教育部人文社会科学规划基金(22YJAZH131); 2024年度上海理工大学研究生教学建设项目(BY202404); 2024年度上海理工大学一流本科课程建设项目(YLKC202424373, YLKC202424381)。

作者简介: 朱笑笑(2001—),女,硕士研究生,主要研究方向:智能交通管理与控制。

通信作者: 姚佼(1982—),男,博士,教授,主要研究方向:智能交通管理与控制,交通安全。Email:yaojiao@126.com。

收稿日期: 2024-10-18

辆在物理外形以及动力性能方面存在较大差异,是高速公路移动拥挤的瓶颈^[1]。随着车路协同技术发展,基于新型“车路云”融合系统,通过辅助大货车的感知与决策,节省换道时间,防止造成大范围、长时间的交通拥堵,提高高速公路的通行效率^[2]。

与小型车辆的超车换道相比,大货车本身运动惯性大、所需换道距离更长、自身加减速慢。Moridpour^[3]通过大货车的换道次数和平均运动时间两方面来研究大货车对道路交通流的影响,发现大货车物理外形以及动力性能对道路交通流影响明显;Aghabayk^[4]对比高速公路上行驶的大货车与小汽车的换道行为,研究了两者对道路上周围环境的不同影响;Yang^[5]分析大货车与小汽车在物理外形、动力性等方面的不同,研究了两者在改变加速度方面的差异性;Kong D^[6]针对不同车型之间在驾驶行为和动力性能等方面的差异,研究了高速公路上大货车与小汽车间复杂的跟驰与换道行为;Moridpour^[7]对比了高速公路上行驶的大货车与小汽车的不同换道行为,发现大货车在换道过程中需考虑更多因素,换道行为更为复杂。

目前,国内外对于换道模型的相关研究较多,随着车路协同技术的发展,学者们提出了多种智能换道模型,曲大义等^[8-9]在车路协同环境下,建立考虑传统车辆与自主车辆相互影响的动态风险模型,并且在强制换道、自由换道以及协作换道3种情况下,建立目标车辆与跟随车辆间的最小安全距离模型;Qi Y^[10]通过建立一种考虑大货车的加速度和安全间隙距离的模型,评估所需的加速行驶距离;Cheng G^[11]建立了基于多元回归分析的交通量模型,计算辅助车道上大货车在交通流中所占比例,并设计了超车换道的风险等级,来评估超车换道的风险;罗京等^[12]在混行环境下,建立高速公路上大货车和小汽车的换道模型,分析大货车混入率对整个道路上车辆行驶速度以及通行能力等影响;冯嵩等^[13]考虑曲率、横向速度与横向加速度对舒适性与安全性的影响,基于安全距离,提出了车辆的换道模型;Easa^[14]在高速公路上双车道车辆换道过程中,评估所需的换道距离和潜在的动力储备。

21世纪初期,许多学者将势场理论在交通流领域广泛推广,取得一些研究成果。Wang等^[15]提出了“行车安全势场”的概念,评估行车风险;Li等^[16]对势场模型进行改进,将道路上行驶车辆的安全势场优化成椭圆形结构的势场,更符合实际情况;洪阳^[17]基于人工势场理论,提出了针对多车协同决策

和车辆紧急障碍避让的模型;李林恒等^[18]提出了基于安全势场理论的跟驰模型,首次将加速度引入到模型中,用来评估行驶风险。

随着相关技术的发展,“聪明车+智慧路+协同云”的车路云协同创新发展模式被提出。在智慧高速环境下,实时获取与传输高速公路上数据信息成为可能。高速公路大货车在换道过程中,通过计算安全换道距离,辅助驾驶员更准确更安全地完成换道。本文基于安全势场理论,对换道过程中大货车面临的风险进行动态分析,针对其本身运动惯性大、在换道过程中易受周围车辆的影响的问题,以双向四车道为例,建立了高速公路大货车与周围车辆间的安全换道距离模型,以期降低换道过程中的潜在碰撞风险,避免大范围、长时间的交通拥堵甚至瘫痪。

1 大货车换道风险分析

1.1 大货车换道运动边界分析

大货车的换道行为分为强制换道与自由换道。在高速公路交通流低密度条件下,车辆能够自由行驶;在中等密度条件下,驾驶员选择换道行为,增大了高速公路上车辆的流量和速度,提高了通行效率;在高密度条件下,车辆的行驶空间被压缩,车辆间相互影响,选择换道超车的条件严苛。

在一个经典的大货车换道场景中,驾驶员通过评估大货车 CT(Change Truck)在高速公路上存在的换道风险,进而做出换道决策。大货车 CT在换道过程中所遇到的风险主要是大货车本身车长、质量大导致的运动惯性大、受周围车辆影响明显,其周围车辆主要包括:原车道上后车 FC(Follow Car)、前车 LC(Lead Car)、目标车道上前车 LT(Lead Truck)、后车 FT(Follow Truck),如图1所示。因此,大货车 CT本身物理外形、其周围车辆的行驶状态和空间位置直接与其换道所面临的风险有密切的关系。

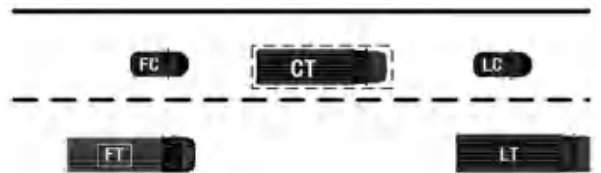


图1 换道前车辆分布位置图

Fig. 1 Map of vehicle distribution before lane change

1.2 大货车换道距离风险分析

在传统的换道环境中,由于大货车 CT本身车型尺寸和质量大导致的运行惯性大、受周围车辆影响明显的问题而产生换道风险,所以大货车 CT与

原车道后车 FC、前车 LC 和目标车道前车 LT、后车 FT 这四者之间的距离必须同时满足其做出安全换道决策的最小间隙阈值。

高速公路大货车的整个换道过程:产生换道意图、分析换道的可行性、实施换道行。理论上车辆换道的安全距离是车辆间的纯间距,大货车与周围车辆之间的纯间距需满足一定的安全阈值要求,然而车头间距相比于纯间距,不仅考虑高速公路上大货车车型尺寸大的问题,而且还反应高速公路上行驶的前后车辆间的安全距离,更适合反映换道过程中车辆的动态安全程度。因此,本文将大货车 CT 与周围车辆间的车头间距定义为安全距离。以大货车 CT 与原车道后车 FC 为例:大货车 CT 在换道过程中,将其完成安全换道的最小车头间距定义为安全换道距离 $D_{\text{TMSS}}^{\text{CT-FC}}$ (Distance of Truck Minimum Safe Spacing),如图 2 所示。

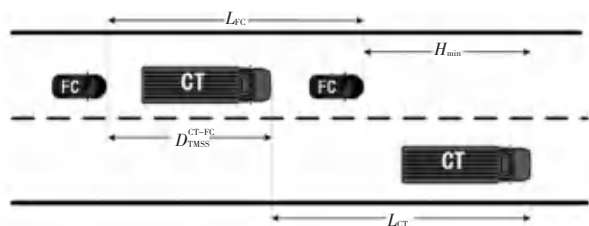


图 2 大货车 CT 与原车道后车 FC 间安全换道距离

Fig. 2 Safe lane change distance between CT of large truck and FC behind the original lane

在常规的换道研究中安全换道距离 $D_{\text{TMSS}}^{\text{CT-FC}}$ 需要满足如下式的要求:

$$D_{\text{TMSS}}^{\text{CT-FC}} \geq \omega \cdot \sin(\theta) + H_{\text{min}}^{\text{CT-FC}} + L_{\text{FC}} - L_{\text{CT}} \quad (1)$$

其中, $D_{\text{TMSS}}^{\text{CT-FC}}$ 为换道时大货车 CT 与原车道上后车 FC 需要满足的安全换道距离; L_{CT} 为大货车 CT 结束换道时的运动距离; L_{FC} 为原车道上后车 FC 结束换道时的运动距离; $H_{\text{min}}^{\text{CT-FC}}$ 为结束换道时刻两车之间最小的极限距离; ω 为大货车 CT 的车宽; θ 为大货车 CT 与高速公路水平方向的夹角。

其中, 夹角 θ 需满足下式^[19]:

$$\tan(\theta) = \frac{\delta(x(t))}{\delta(y(t))} = \frac{\delta(x(t))/\delta(t)}{\delta(y(t))/\delta(t)} = \frac{v_x}{v_y} \quad (2)$$

其中, $x(t)$ 与 $y(t)$ 为大货车的横、纵向位移, $\delta(x(t))$ 、 $\delta(y(t))$ 表示对 $x(t)$ 、 $y(t)$ 求偏导, v_x 与 v_y 为其横纵向速度。

在车路协同的背景下,高速公路上的大货车不仅能够提前进行安全的换道行为,还能够获取车辆的速度、位置等数据信息。因此,在考虑大货车运动惯性大以及受周围车辆影响的条件下,本文通过综

合诸多信息来研究大货车完成换道所需满足的最小安全换道距离。

2 车辆安全势场理论

近年来,势场理论广泛应用于在交通流领域,将普遍存在于交通流中物理势场转化为车辆在换道过程中受到车辆本身以及周围环境的影响而面临危险所产生的一种安全势场^[18]。在车路协同背景下,大货车能否安全完成换道行为不仅在于其本身,而且还受周围车辆的行驶状态与空间位置的影响。基于安全势场的相关研究,在空间坐标系中 x 轴为车辆行驶方向, y 轴为垂直于车辆行驶方向的方向,构建了安全势场模型。

首先对车辆的位置坐标进行转换,如下式所示:

$$\begin{pmatrix} \cos(\varphi) & \sin(\varphi) \\ -\sin(\varphi) & \cos(\varphi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x}^* \\ \dot{y}^* \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, (x^*, y^*) 为原始坐标; (x, y) 发生转向后的对应的坐标值; φ 为车辆发生转向的转向角(规定逆时针方向为正方向)。

计算偏移伪距离 k' , 如下式所示:

$$|k'| = \sqrt{\left[\frac{\tau}{e^{\alpha v}} (x^* - x_0) \right]^2 + [(y^* - y_0)\tau]^2} \quad (4)$$

其中: (x_0, y_0) 为车辆质心的位置空间坐标; v 为车辆的行驶速度; α 、 λ 与 β 为待定系数; τ 为安全距离的极限阈值。

计算车辆的等效质量 M_i , 如下式所示:

$$M_i = m_i \cdot (1.556 \times 10^{-14} v^{6.687} + 0.3345) \quad (5)$$

其中, m_i 为车辆 i 的质量; v 为车辆的行驶速度。

势场强度计算, E_V 为车辆 i 的安全势场强度, 如下式所示:

$$E_V = M_i \lambda \frac{e^{-\beta a \cos(\theta_0)}}{|k'|} \cdot \frac{k'}{|k'|} \quad (6)$$

其中, a 为车辆的加速度, θ_0 为车辆周围某点与车辆质点 (x_0, y_0) 的夹角。

车路协同技术环境下,通过车-车、车-路、车-云获取车辆的速度、位置、周围车辆的加速度、质量等无法直接获取的数据信息。基于车辆的安全势场理论,大货车 CT 根据本身和周围车辆的安全势场分布情况,降低换道过程中发生碰撞的可能性。

3 基于最小安全距离的换道模型

基于安全势场理论,通过大货车 CT 与周围车辆的安全势场分布情况,得到其与周围车辆在换道结束时最小的车辆间极限距离 H_{min} 。为降低在整

个换道过程中车辆之间发生碰撞的可能性, 通过车辆间极限距离 H_{\min} 与换道安全极限时间 T_s 建立适合大货车换道的安全换道距离模型。

大货车与周围车辆间的安全换道距离模型中共设计 4 种场景:

(1) 场景一: 大货车 CT 与原车道后车 FC 之间的安全换道距离。大货车 CT 与车辆 FC 换道过程如图 3 所示。

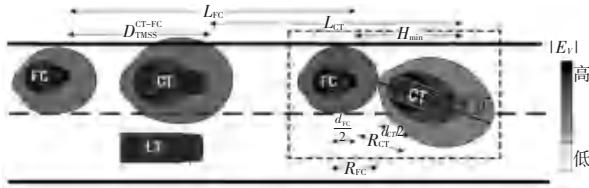


图 3 大货车 CT 与车辆 FC 换道过程

Fig. 3 Lane changing process between FC and CT of large trucks

为降低大货车 CT 与原目标车道上后车 FC 发生碰撞可能性, 将车间极限距离 H_{\min}^{CT-FC} 与换道安全极限时间 T_s 代入常规安全换道距离模型中, 得到大货车 CT 与原车道后车 FC 之间的安全换道距离 D_{TMSS}^{CT-FC} , 如下式所示:

$$D_{TMSS}^{CT-FC} \geq \omega \cdot \sin(\theta) + H_{\min}^{CT-FC} + \frac{(v_{CT} - v_{FC})}{2} \cdot T_s \quad (7)$$

其中, ω 为权重因子; θ 为偏转角度值; H_{\min}^{CT-FC} 为换道结束时车辆间最小的极限距离, 由换道结束时刻的车辆势场分布决定; v_{CT} 、 v_{FC} 为大货车 CT 与 FC 的车速; T_s 为换道安全极限时间。

车辆换道安全极限时间 T_s , 如下式所示:

$$T_s = \frac{(v_{FC} - v_{CT})}{(a_{CT} - a_{FC})} \quad (8)$$

其中, v_{FC} 、 v_{CT} 为车辆 FC 和车辆 CT 的行驶速度, a_{CT} 、 a_{FC} 为车辆 CT 和车辆 FC 的加速度。

换道结束时车辆间最小极限距离 H_{\min}^{CT-FC} , 如下式所示:

$$H_{\min}^{CT-FC} = R_{CT} \cdot \cos(\theta) + R_{FC} - \frac{d_{CT}}{2} \cdot \cos(\theta) + \frac{d_{FC}}{2} \quad (9)$$

其中, R_{CT} 为大货车 CT 完成换道时刻, 基于其势场分布的后倾距离; R_{FC} 为后车 FC 完成换道时刻, 基于其势场分布的前倾距离; d_{CT} 与 d_{FC} 分别为大货车 CT 与后车 FC 的车辆长度。

车辆 CT 和 FC 的势场分布的前倾距离 R_{CT} 、 R_{FC} : 如下式所示:

$$\begin{aligned} R_{CT} &= \frac{M_{CT} \lambda e^{-\beta \cdot a_{CT} + \alpha \cdot v_{CT}}}{E_V \tau} \\ R_{FC} &= \frac{M_{FC} \lambda e^{-\beta \cdot a_{FC} + \alpha \cdot v_{FC}}}{E_V \tau} \end{aligned} \quad (10)$$

其中, M_{CT} 、 M_{FC} 为车辆 CT、车辆 FC 的等效距离; α 、 λ 与 β 为待定系数; τ 为安全距离的极限阈值; E_V 为车辆 i 的安全势场强度。

(2) 大货车 CT 与目标车道上后方大货车 FT 之间的安全换道距离。

大货车 CT 与后车 FT 的换道过程如图 4 所示。大货车 CT 在换道过程中, 为降低大货车 CT 与大货车 FT 发生碰撞可能性, 当大货车 CT 换道结束时, 大货车 CT 与大货车 FT 的势场水平相切, 保证换道结束时车辆间距离是最小的车间极限距离, 保证安全地完成换道。通过车间极限距离 H_{\min}^{CT-FT} 与换道安全极限时间 T_s 代入常规安全换道距离模型中, 得到大货车 CT 与目标车道后车 FT 之间安全换道距离 D_{TMSS}^{CT-FT} , 如下式所示:

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{(v_{FT} - v_{CT})}{(a_{CT} - a_{FT})} \\ R_{FT} &= \frac{M_{FT} \lambda e^{-\beta \cdot a_{FT} + \alpha \cdot v_{FT}}}{E_V \tau} \\ R_{CT} &= \frac{M_{CT} \lambda e^{-\beta \cdot a_{CT} + \alpha \cdot v_{CT}}}{E_V \tau} \\ H_{\min}^{CT-FT} &= R_{FT} + R_{CT} - \frac{d_{FT}}{2} + \frac{d_{CT}}{2} \\ D_{TMSS}^{CT-FT} &\geq \omega \cdot \sin(\theta) + H_{\min}^{CT-FT} + \frac{(v_{FT} - v_{CT})}{2} \cdot T_s \end{aligned} \quad (11)$$

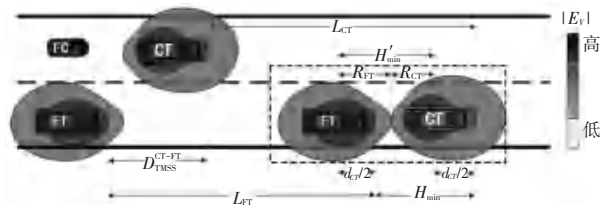


图 4 大货车 CT 与后车 FT 的换道过程

Fig. 4 Lane change process between the CT of a large truck and the FT

(3) 场景三: 大货车 CT 与目标车道上前方大货车 LT 之间的安全换道距离。

大货车 CT 与前车 LT 的换道过程如图 5 所示。大货车 CT 在换道过程中, 为降低与目标车道上大货车 LT 发生碰撞可能性, 当大货车 CT 换道结束时, 其与目标车道上大货车 LT 的势场水平相切, 保证换道结束时车辆间距离是最小的车间极限距离。通过将车间极限距离 H_{\min}^{CT-LT} 与换道安全极限时间 T_s 代入常规安全换道距离模型中, 得到大货车 CT 与目标车道上前车 LT 之间的安全换道距离 D_{TMSS}^{CT-LT} , 如下式所示:

$$\begin{aligned}
 T_s &= \frac{(v_{LT} - v_{CT})}{(a_{CT} - a_{LT})} \\
 R_{CT} &= \frac{M_{CT} \lambda e^{-\beta \cdot a_{CT} + \alpha \cdot v_{CT}}}{E_V \tau} \\
 R_{LT} &= \frac{M_{LT} \lambda e^{\beta \cdot a_{LT} + \alpha \cdot v_{LT}}}{E_V \tau} \\
 H_{min}^{CT-LT} &= R_{CT} + R_{LT} - \frac{d_{CT}}{2} + \frac{d_{LT}}{2} \\
 D_{TMSS}^{CT-LT} &\geq \omega \cdot \sin(\theta) + H_{min}^{CT-LT} + \frac{(v_{CT} - v_{LT})}{2} \cdot T_s
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

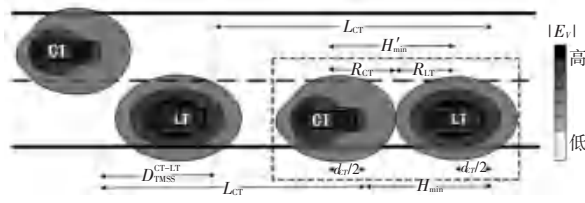


图5 大货车 CT 与前车 LT 的换道过程

Fig. 5 Lane change process between the CT of a large truck and the LT

(4) 场景四: 大货车 CT 与原车道上前方车辆 LC 之间的安全换道距离。

7 大货车 CT 与车辆 LC 换道过程如图 6 所示。大货车 CT 在换道过程中, 为降低大货车 CT 与原目标车道上的前车 LC 发生碰撞可能性, 通过将车间极限距离 H_{min}^{CT-LT} 与安全极限时间 T_s 代入常规安全换道距离模型中, 能够得到大货车 CT 与原车道前车 LC 之间的安全换道距离 D_{TMSS}^{CT-LT} , 如下式所示:

$$\begin{aligned}
 T_s &= \frac{(v_{LC} - v_{CT})}{(a_{CT} - a_{LC})} \\
 R_{CT} &= \frac{M_{CT} \lambda e^{-\beta \cdot a_{CT} + \alpha \cdot v_{CT}}}{E_V \tau} \\
 R_{LC} &= \frac{M_{LC} \lambda e^{\beta \cdot a_{LC} + \alpha \cdot v_{LC}}}{E_V \tau} \\
 H_{min}^{CT-LC} &= R_{CT} \cdot \cos(\theta) + R_{LC} - \frac{d_{CT}}{2} \cdot \cos(\theta) + \frac{d_{LC}}{2} \\
 D_{TMSS}^{CT-LC} &\geq \omega \cdot \sin(\theta) + H_{min}^{CT-LC} + \frac{(v_{CT} - v_{LC})}{2} \cdot T_s
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

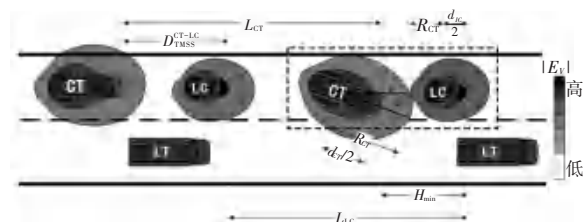


图6 大货车 CT 与车辆 LC 换道过程

Fig. 6 Lane changing process between LC and CT of large trucks

4 仿真与分析

4.1 参数与仿真场景设计

以杭州市第二绕城高速作为研究对象, 选取杭州到绍兴路段长 1.5 km 的杭州西复线路段, 设置安装了 5 处毫米波雷达, 如图 7 所示。布设路段的运营桩号为 K95+880-K96+880。



图7 仿真路段选取

Fig. 7 Selected segment for simulation

采集大货车和周围车辆的加速度、速度、车辆坐标等不少于 200 组的换道数据。基于牛顿第二定律, 设计高速公路大货车所受的安全势场力(虚拟力) F_s 和本身实际牵引力 F_p 。基于安全势场理论, 参照电场力计算公式: $F = E \cdot q$, 将安全势场中的势场强度 E_V 、大货车的属性 (m) 以及行驶状态 (v) 分别理解为电场力公式中电场强度 E 和电荷量 q , 其中车辆的属性、行驶状态、电荷量 q 都属于场中的定义属性。

通过安全势场理论刻画大货车 CT 在换道过程中与周围车辆的势场分布情况, 建立大货车 CT 的安全换道距离模型。假设大货车 CT 能够执行换道模型给出驾驶行为, 以恒定的加速度完成换道行为, 在换道过程中其纵向速度不受横向速度变化的影响。选择示范的换道场景, 设计高速公路大货车换道的仿真环境。在仿真过程中, 考虑驾驶员的舒适性和安全性, 大货车 CT 的换道加速度不需要过大, 其加速度取值为 $0.6-1.0 \text{ m/s}^2$, 换道角度取为 3° , 大货车 CT 本身车辆长度取值为 12 m, 其宽度取值为 2.5 m, 小汽车车辆长度取值为 5 m, 大货车 CT 与周围车辆的相对速度差为 $\Delta v = v_i - v_{CT}$, 并且在仿真中考虑 4 种情况:

(1) 场景 1: 原车道上后车 FC 以 1.0 m/s^2 加速行驶, 原车道上前车 LC、目标车道上前、后车 LT 和 FT 在高速公路上匀速行驶;

(2) 场景 2: 目标车道上后方车辆 FT 以 0.3 m/s^2 加速行驶, 原车道上后车 FC、前车 LC 和目标车道上

前车 LT 在高速公路上均匀速行驶;

(3) 场景 3: 目标车道上前车 LT 以 0.3 m/s^2 加速行驶, 原车道上后车 FC、前车 LC 和目标车道上后车 FT 在高速公路上均匀速行驶;

(4) 场景 4: 原车道上前车 LC 以 1.0 m/s^2 加速行驶, 原车道上后车 FC 和目标车道上前、后车 LT 和 FT 在高速公路上均匀速行驶。

4.2 结果分析

通过大货车 CT 与周围车辆间的相对速度差和其安全换道距离进行仿真, 仿真结果如图 8~图 11 所示, 图中箭头指向区域为不安全换道距离区域, 表示大货车 CT 与周围车辆间的换道距离不能满足其安全完成换道行为的条件。

4.2.1 大货车 CT 的不安全换道距离区域

(1) 大货车 CT 与原车道后车 FC 的安全距离 (场景一) 如图 8 所示。选取大货车 CT 的换道加速度分别为 $0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 \text{ m/s}^2$ 。通过仿真结果发现: 当大货车 CT 的换道加速度越大, 换道所需的安全距离越小, 不安全换道距离区域越小, 大货车 CT 与车辆 FC 越不容易发生碰撞; 大货车 CT 与车辆 FC 的相对速度差 Δv 越大, 安全换道距离逐渐增大, 从 64 m 增加到 97 m 以上。因此, 可以考虑大货车 CT 通过适当提高加速度保证安全完成换道行为。

货车 CT 与大货车 FT 的相对速度差 Δv 越大, 其安全换道距离逐渐增大, 从 55 m 增加到 80 m 以上。因此, 可以考虑通过大货车 CT 减小其加速度的方式保证安全完成换道行为。

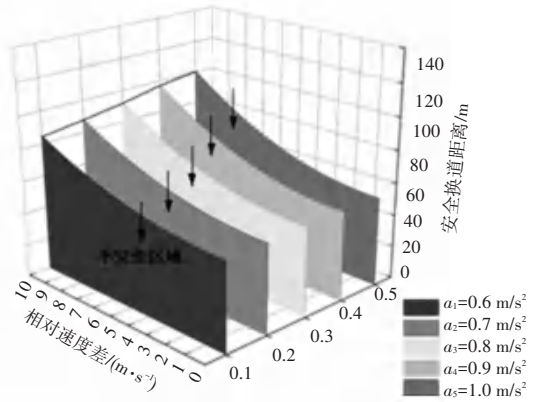


图 9 与货车 FT 间不安全换道距离区域 (场景二)

Fig. 9 Unsafe lane change distance area with FT (Scenario 2)

(3) 大货车 CT 与目标车道前车 LT 的安全距离 (场景三) 如图 10 所示。选取大货车 CT 的换道加速度分别为 $0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 \text{ m/s}^2$ 。通过仿真结果发现: 大货车 CT 的换道加速度越大时, 换道所需的安全距离值越大, 不安全换道距离区域越大, 大货车 CT 与大货车 LT 越容易发生追尾, 发生碰撞的可能性越大; 大货车 CT 与大货车 LT 的相对速度差 Δv 越大, 安全换道距离逐渐减小, 从 102 m 减小到 30 m 以下。因此, 可以考虑让大货车 CT 以较小的加速度加速, 保证安全完成换道行为。

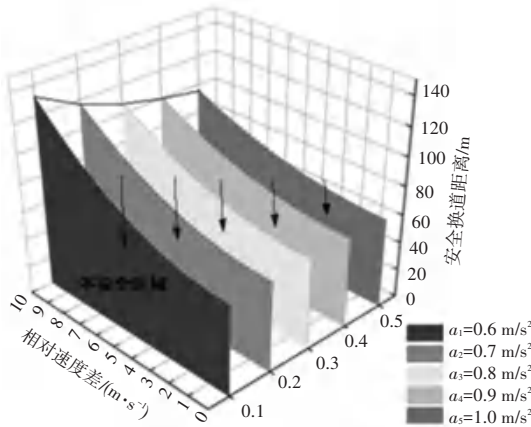


图 8 与车辆 FC 间不安全换道距离区域 (场景一)

Fig. 8 Unsafe lane change distance area with FC (Scenario 1)

(2) 大货车 CT 与目标车道后车 FT 的安全距离 (场景二) 如图 9 所示。选取大货车 CT 的换道加速度分别为 $0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 \text{ m/s}^2$ 。通过仿真结果发现: 大货车 CT 的换道加速度越大时, 其换道所需的安全距离值越大, 不安全换道距离区域越大, 大货车 CT 与大货车 FT 越容易发生碰撞; 并且随着大

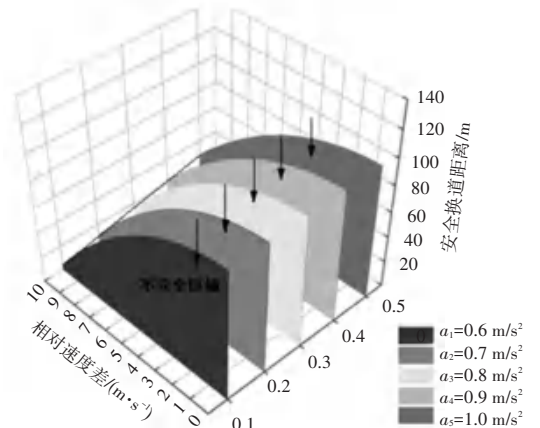


图 10 与货车 LT 间不安全换道距离区域 (场景三)

Fig. 10 Unsafe lane change distance area with LT (Scenario 3)

(4) 大货车 CT 与原车道前车 LC 的安全距离 (场景四) 如图 11 所示。选取大货车 CT 的换道加速度分别为 $0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0 \text{ m/s}^2$ 。通过仿真结果发现: 当大货车 CT 的换道加速度越大, 换道所需

的安全距离越小,不安全换道距离区域越小,大货车 CT 与车辆 LC 越不容易发生碰撞;大货车 CT 与车辆 LC 的相对速度差 Δv 越大,安全换道距离逐渐增大,从 55 m 增加到 110 m 以上。因此,可以考虑大货车 CT 通过适当提高加速度保证安全完成换道行为。

小不安全换道距离区域,考虑了大货车本身运动惯性大、以及受周围车辆影响明显的问题,与高速公路的实际换道情况更相符。

4.2.2 大货车 CT 与周围车辆间的安全换道距离

选取了 5 种大货车 CT 的换道加速度的情况,深入研究安全换道距离与车辆间相对速度差之间的关系,结果如图 12 所示。

分析大货车与原车道前、后车以及目标车道上前、后车间安全换道距离之间关系。通过图 12 发现,在换道过程中,大货车 CT 换道加速度越大,与原车道后车 FC 以及目标车道上前车 LT 间所需保证的安全距离变化越缓慢,大货车 CT 与原车道后车 FC 间安全距离增长率减小了 23.91%,与前车 LC 间安全距离增长率减少了 16.36%,二者与大货车的换道安全距离变化趋势相似;大货车与目标车道前车 LT 间安全距离增长率减小了 89.75%,受目标车道前车的影响更明显;与目标车道上后车 FT 间所需保证的安全距离变化趋势越明显,与后方大货车 FT 间安全距离增长率增大了 28.19%。随着车辆间相对速度差 Δv 从 0 m/s 增大到 10 m/s,大货车 CT 与车辆 FC、后车 FT 间所需保证的安全距离变化越相似,都增长为 100 m 左右;然而,与前方大货车 LT 间所需保证的安全距离越小,成相反的变化趋势,但受其换道加速度影响,加速度越大,与前方大货车 LT 间的安全距离越大。

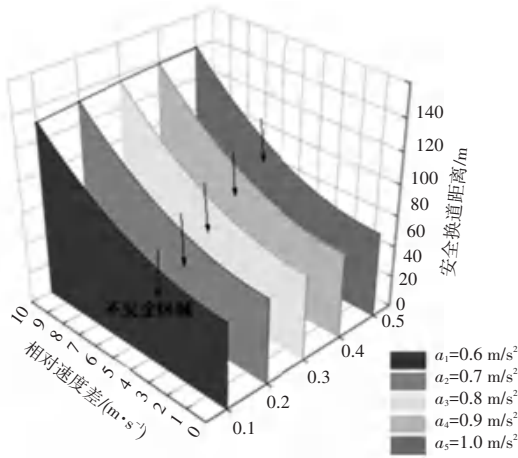


图 11 与车辆 LC 间不安全换道距离区域(场景 4)

Fig. 11 Unsafe lane change distance area with LC (Scenario 4)

综上所述发现:大货车 CT 换道过程中的加速度,可以采用离开原车道时增加,进入目标车道时减小的方式,更安全、平稳的完成大货车的换道行为。合理调整其加速度以及与周围车辆间的相对速度差来增加大货车 CT 与周围车辆间安全换道距离,减

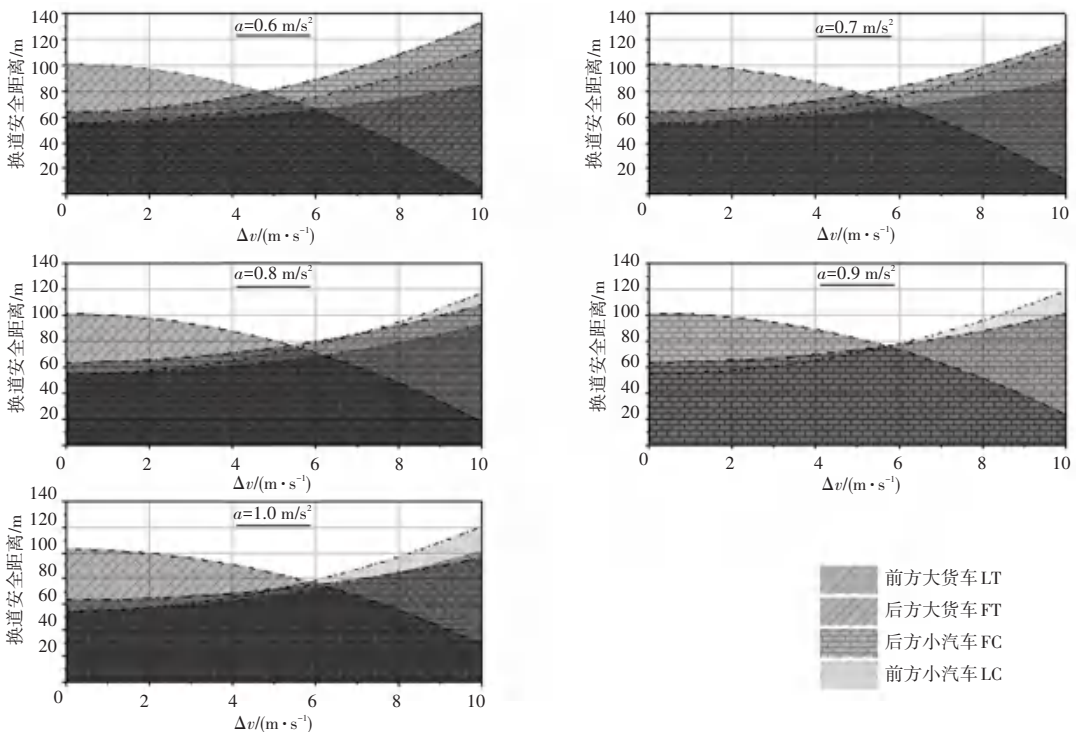


图 12 大货车 CT 的安全换道距离变化图

Fig. 12 Change of safe lane change distance of CT

5 结束语

大货车换道过程中,由于自身运动惯性大、受周围车辆影响明显等问题而产生的换道风险,本文基于安全势场理论,建立了大货车与原车道前、后车和目标车道前、后车辆间的安全换道距离模型。不仅考虑了大货车本身车型尺寸、换道过程中受周围车辆影响等明显的特点,还考虑了在换道结束时大货车与前车间安全跟驰特性,与高速公路上实际换道情况相符,保证大货车换道过程的安全平稳完成。仿真实验结果表明,大货车的安全换道距离受目标车道前车影响更明显,合理调整其加速度、与周围车辆间的相对速度差能够减小大货车的不安全换道距离区域,降低了换道碰撞的风险,建议换道过程中的加速度可以采用离开原车道时增加,进入目标车道时减小的方式。研究成果为大货车在高速公路上的安全换道与平稳行驶提供理论依据。

参考文献

[1] 杨阳,周国瑞,李石磊,等. 大型货运车辆对高速公路交通特性影响研究[J]. 交通世界,2022(21):21-22.

[2] 陈山枝. 蜂窝车联网(C-V2X)及其赋能智能网联汽车发展的辩思与建议[J]. 电信科学,2022,38(7):1-17.

[3] MORIDPOUR S, MAZLOUMI E, MESBAH M. Impact of heavy vehicles on surrounding traffic characteristics [J]. Journal of Advanced Transportation, 2015, 49(4): 535-552.

[4] AGHABAYK K, MORIDPOUR S, YOUNG W, et al. Comparing heavy vehicle and passenger car lane - changing maneuvers on arterial roads and freeways[J]. Transportation Research Record, 2011, 2260(1): 94-101.

[5] YANG D, QIU X, YU D, et al. A cellular automata model for car-truck heterogeneous traffic flow considering the car-truck following combination effect[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015(424): 62-72.

[6] KOMG D, SUN L, LI J, et al. Modeling cars and trucks in the

heterogeneous traffic based on car-truck combination effect using cellular automata [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021(562): 1-20.

[7] MORIDPOUR S, SARVI M, ROSE G, et al. Lane-changing decision model for heavy vehicle drivers[J]. Journal of Intelligent Transportation Systems, 2012, 16(1): 24-35.

[8] 曲大义,黑凯先,郭海兵,等. 车联网环境下车辆换道博弈行为及模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2022,52(1):101-109.

[9] 曲大义,陈文娇,杨万三,等. 车辆换道交互行为分析和建模[J]. 公路交通科技,2016,33(6):88-94.

[10] QI Y, ZHAO Q, LIU S, et al. Determination of freeway acceleration lane length for smooth and safe truck merging[R]. United States: Department of Transportation, University Transportation Centers (UTC) Program, 2019: 1-49.

[11] CHENG G, MU C, XU L, et al. Research on truck traffic volume conditions of auxiliary lanes on two-lane highways[J]. Sustainability, 2021, 13(23): 1-11.

[12] 罗京,连萌,李伟,等. 双前导车影响下高速公路施工路段混行交通流仿真[J]. 公路交通科技,2022,39(11),151-157.

[13] 冯嵩,钱宇彬,曲现国,等. 基于安全距离的雾天车辆换道轨迹模型[J]. 中国安全科学学报,2022,32(7):165-171.

[14] EASA S M, DIACHUK M. Optimal speed plan for the overtaking of autonomous vehicles on two-lane highways [J]. Infrastructures, 2020, 5(5): 1-44.

[15] WANG J, WU J, ZHENG X, et al. Driving safety field theory modeling and its application in pre-collision warning system[J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2016(72):306-324.

[16] LI M, SONG X, CAO H, et al. Shared control with a novel dynamic authority allocation strategy based on game theory and driving safety field [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019(124): 199 - 216.

[17] 洪阳. 智能网联环境下高速公路紧急障碍避让协同决策模型研究[D]. 南京:东南大学,2019.

[18] 李林恒,甘婧,曲栩,等. 智能网联环境下基于安全势场理论的车辆跟驰模型[J]. 中国公路学报,2019,32(12):76-87.

[19] JULA H, KOSMATOPOULOS E B, IOANNOU P A. Collision avoidance analysis for lane changing and merging [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2000, 49(6): 2295-2308.