基于安全势场的车辆多维跟驰特性及驾驶决策

胡立伟，侯 智，周泽禹，刘一辰，杨秀建

（昆明理工大学 交通工程学院，昆明 650500）

摘 要：为更清晰地刻画多维环境下车辆全息感知与耦合交互所驱动的自主驾驶决策过程，提出了运用安全势场力函数定量描述车辆间相互作用关系的车辆多维跟驰模型。首先，通过道路势场和车辆作用势场描述了车-路和车-车间的动态交互特性，从安全势场的角度剖析车辆多维运行机制及其受力特征。其次，改进一维单车道跟驰模型，使用横纵向二维向量扩展维度，得到道路内任意位置、角度下两车间距离与需求安全距离变化关系，构建了三力协同作用的统一车辆多维跟驰模型。最后，采用粒子群优化算法及高速公路车辆轨迹数据对模型待定参数进行标定，并针对不同场景设计仿真实验，检验多维跟驰模型对真实车辆跟驰行为的决策效果及稳定性表现。仿真结果表明，本文模型能够有效反映车辆在不同运行状态下的动态变化趋势，在安全势场作用下可实现多维度、全过程自主决策，扩展了跟驰模型的适用范围，具有较好的实用性、稳定性和安全性，为提高行车安全性及通行效率提供了理论依据。

关键词：交通运输系统工程；多维跟驰模型；安全势场；自主驾驶决策；可变需求安全距离

中图分类号：U491.25 **文献标志码**：A **文章编号**：1671-5497(2026)06-1629-13

DOI：10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241339

Multi-dimensional car-following characteristics and driving decision-making based on safety potential fields

HU Li-wei，HOU Zhi，ZHOU Ze-yu，LIU Yi-chen，YANG Xiu-jian

（*Faculty of Transportation Engineering*，*Kunming University of Science and Technology*，*Kunming* 650500，*China*）

Abstract：To better characterize the autonomous driving decision-making process driven by holistic vehicle perception and coupled interactions in a multi-dimensional environment，a multi-dimensional car-following model adopting a safety potential field force function to quantitatively describe inter-vehicle interaction relationships was proposed.First，dynamic interaction characteristics between vehicles and roads as well as among vehicles were depicted via road potential fields and vehicle interaction potential fields. Multi-dimensional vehicle operating mechanisms and corresponding force characteristics were analyzed from the perspective of safety potential fields. Second，traditional one-dimensional single-lane car-following models were improved by the introduction of two-dimensional vectors along longitudinal and lateral directions. Variations in inter-vehicle distances and required safety distances at arbitrary road positions and angles were captured through the improvement，and a unified multi-dimensional car-following model integrating

收稿日期：2024-12-17.

基金项目：国家自然科学基金项目(42277476)；云南省基础研究专项重点项目(202401AS070065).

作者简介：胡立伟(1978-)，男，教授，博士.研究方向：道路交通安全与环境.E-mail：liweihukm@kust.edu.cn

the synergistic effects of three types of forces was constructed. Finally, undetermined parameters of the model were calibrated with particle swarm optimization algorithms and highway vehicle trajectory data. Simulation experiments covering multiple working scenarios are designed to assess the model's capacity to reproduce real vehicle following behaviors and its decision-making stability. Dynamic variations in vehicle behaviors under diverse operating states are effectively reflected by simulation results generated from the proposed model. Multi-dimensional and full-process autonomous decision-making under the action of safety potential fields is realized, and the application scope of traditional car-following models is expanded. High practicability, stability and safety are exhibited by the model, and a theoretical basis is laid for the enhancement of driving safety and traffic operation efficiency.

Key words: engineering of communication and transportation system; multi-dimensional car-following model; safety potential field; autonomous driving decision-making; variable demand safety distance

0 引 言

随着社会经济的快速发展,自主驾驶决策已成为现代交通研究的重点和难点之一。针对车道变换、速度调整、避险决策等复杂的动态交互问题,深入研究车辆的多维跟驰特性,快速、准确地模拟复杂环境中的动态决策过程,对于提升行车安全性和道路通行效率具有重要意义。

近年来,针对传统一维跟驰模型在实际应用中暴露的诸多局限性,学者们开始深入研究横向与纵向相结合的多维度车辆跟驰模型。Wang等[1]提出了考虑横向和纵向控制的车辆动力学模型,用于提高车辆在弯道中的跟驰性能;李孟凡等[2]提出了横纵向联合控制的车辆跟驰模型,利用深度强化学习方法决策跟驰车辆的加速度和转向角;Qin等[3]基于车辆动力学模型及强化学习方法构建了联合纵向和横向控制的跟驰模型,以提高侧向控制精度,减低高速车辆在直路和弯道处的侧翻风险;Ni等[4]使用强化学习实现了车辆横纵向自主决策,其中横向决策提出换道命令,纵向决策在换道或保持车道行驶时产生准确的加速度。同时,为更好地描述车辆之间的交互作用与运动规律,势场理论逐渐被应用于跟驰模型及驾驶决策研究中。李林恒等[5,6]利用车辆不同运动状态下安全势场的空间分布分析智能网联车辆的跟驰和换道行为,保证车辆执行准确、安全的运动和换道决策;贾彦峰等[7]借鉴分子间的相互作用关系建立了基于车辆相互作用势场的车辆跟驰模型,通过环境感知实现网联车辆的自主决策;Ma等[8]提出了各向异性安全势场模型,准确描述了多车道复杂环境下车辆的跟驰行为和车道交互特性;Zhang等[9]结合势场和风险脉冲理论构建了基于驾驶风险脉冲场的跟驰模型,车辆可根据风险脉冲能量变化调整车头时距及驾驶决策;Shao等[10]结合事故风险识别模型和安全势场理论下的跟驰模型,根据不同风险级别调整车辆间距和控制策略。

综上所述,虽然横纵向联合控制下的跟驰模型在一定程度上实现了多维跟驰建模,但多维度仅表现在提升单车道跟驰行驶的舒适性和安全性上,仍无法有效捕捉多车道交通环境中的车辆行为和动态变化,且横向和纵向行为表达式存在相互独立的缺陷;而基于势场理论的驾驶决策虽能有效地描述车辆间的动态交互特性,但在适用性上存在一定局限性,难以在满足安全和效率的前提下,同时兼顾跟驰和换道场景的综合决策需求。因此,本文充分考虑了真实交通环境下车辆在多车道内的跟驰和换道行为,扩展维度后利用椭圆极坐标公式推导出任意角度下的可变需求安全距离,以此建立车辆作用势场,实现了不同车道车辆间的多维动态交互;构建了可同时决策多维跟驰和换道行为的动态安全势场,首次提出了横纵向协同作用(多维度)、车辆超越前后全过程决策(全过程)的统一车辆多维跟驰模型,并选取传统一维跟驰、多维跟驰、多维换道3个场景设计仿真实验,以评估本文模型的有效性。

1 安全势场及车辆运行机制描述

交通系统安全势场是客观存在的物质和能量场,用于描述车辆之间的相互作用以及车辆与环境间的相互关系,在空间上凝聚表现为场源点及场源势场。而影响车辆行驶的各种因素可以视为

不同的场源点，产生能量大小不同的场源势场对空间中的车辆施加影响，安全势场则是这些场源势场的叠加。因此，可以根据安全势场的强度和作用方向动态调整车辆行驶路径，安全势场主要包括道路势场和车辆作用势场。

1.1　道路势场

道路势场 E_l 用于引导车辆行驶在车道中心或使其换道，在每个车道中心位置处产生一个基于道路条件和环境状况的吸引势场，无论车辆速度、数量或交通条件怎么变化，道路势场本身的作用方式和强度都不会受到影响，确保对所有车辆的引导和约束作用一致。通过人工势场法定义目标点产生的引力场，形成虚拟势场以规划车辆行驶路径，依此建立道路势场函数模型（见式(1)）[11]，势场示意图如图1所示。

$$E_l=\frac{1}{2}K\left(y-y_l\right)^2 \tag{1}$$

式中：K 为道路势场引力常数；y 为车辆的纵向位置；y_l 为目标车道的车道中心线位置。

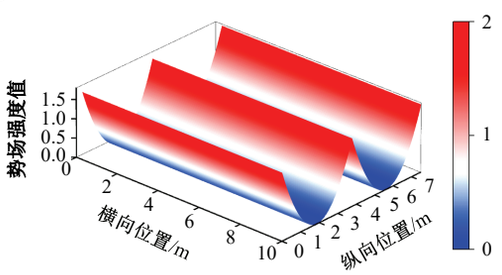


图1　道路势场图

Fig. 1　Diagram of the road potential field

1.2　车辆作用势场

车辆作用势场用于描述车辆间由于相对距离和速度而产生的交互影响，车辆间既存在吸引也存在排斥作用，跟驰行为中具体表现为：当两辆车靠近时，车辆作用势场会产生排斥作用，促使后车减速以避免碰撞；当车辆距离较远时，作用势场则产生吸引作用，使后车保持行驶效率。Lennard-Jones势是一种经典的分子间相互作用势，由分子间势能的引力部分和斥力部分共同组成，“远吸引、近排斥”的特性与交通系统中车辆的跟驰行为非常相似，因此基于Lennard-Jones势函数改进的车辆作用势场 E_r 为[12]：

$$E_r=\frac{\varepsilon}{\alpha-\beta}\left[\beta\left(\frac{r_0}{r}\right)^{\alpha}-\alpha\left(\frac{r_0}{r}\right)^{\beta}\right] \tag{2}$$

式中：ε 为势阱深度；r_0 为平衡距离；r 为车辆间距离；α、β 分别为斥力项和引力项的幂次。

势场强度 E_r 随着车辆间距离 r 变化而变化，则基于Lennard-Jones势函数的车辆作用势场如图2所示，车辆在静止状态下作为场源点，产生向四周扩散的场源势场并且可与其他车辆进行交互耦合作用，任意过原点坐标轴的剖面投影即为式(2)所示车辆作用势场函数曲线。最终，得出安全势场 E 为：

$$E=E_l+E_r \tag{3}$$

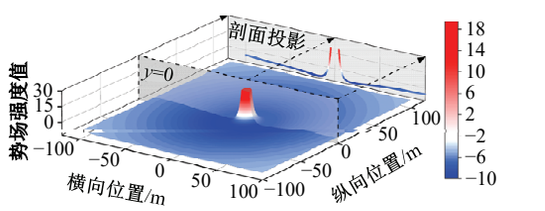


图2　车辆作用势场图

Fig. 2　Diagram of the Potential Field of Vehicle Action

1.3　车辆多维运行及受力机制

安全势场从宏观层面表征行车风险的整体分布特征，而微观层面可聚焦车辆间多维力耦合交互规律。车辆运动状态受车辆动力学性能、相邻车辆之间的相互作用力等多种动力学因素的影响，作用力变化的直观表现为车辆加速、减速及转向等动态响应。从物理机理来看，力是势场的负梯度值，当安全势场存在时可以得到作用于车辆上的力，从而实现对势场环境下车辆交互行为的精细化解析。由于力函数的改变对整体势场影响不大，能更灵活地调整模型适用范围，故本文基于车辆在安全势场中的受力情况，并引入速度、速度差等车辆动力学因素对多维跟驰模型开展研究。

车辆间复杂的力学作用关系使得车辆的运动轨迹不仅受前车影响，还受到侧向车辆的干扰和作用。车辆可以类比为在有限通道中运动的粒子，受到道路环境、交通标线和周围车辆等外部环境的全部约束作用而呈现出有序性的运动，即车辆多维跟驰运动，其运行机制如图3所示，车辆的行驶路径形成一种类似于受限粒子流的多维运动模式。由于本文所有图中车辆的前进方向均设定为向右，为便于描述，规定横向方向为车辆前进方向，纵向方向为使车辆发生车道偏移或换道的方向。

在均匀车流密度条件下，各车辆所受的合力会趋于平衡，如图3(a)所示，表现为车辆沿单一车道稳定行驶。然而，当车流密度发生变化时，后车就会受到非平衡的合力，合力方向指向车流低密度点，促使后车向低密度区域移动。如图3(b)

所示,当同一车道前方出现可用空间时,后车会受到前方车辆吸引加速启动追上前车,此时只存在横向的合力,即横向跟驰行为。现实中车辆不仅只保持在一条车道上行驶,图3(c)中后车在受到不同车道前车的作用力时,会表现出向斜前方运动的趋势,但由于后车前方存在较大空隙,车流低密度点位于当前车道的空隙处,合力方向指向车流低密度点,后车仍会保持当前车道行驶并最终超过前车;图3(d)中后车右侧车道存在较大空隙,车流低密度点位于右侧车道,合力使车辆产生纵向位移,变换车道后加速跟随前车;而图3(e)所示后车换道过程中,右侧车道后向有来车,此时车辆受右侧后车的排斥力影响,合力方向随之改变,不产生换道行为。3种情况都表现为对不同车道车辆的跟驰行为,即纵向跟驰行为。这种基于车辆合力驱动的运行机制,使得车辆的跟驰行为在实际交通中呈现出多维性。

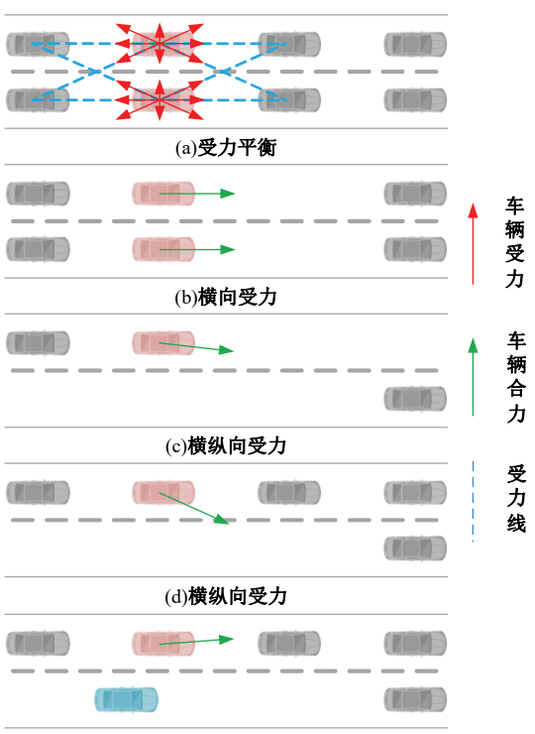


图3 多维运行机制

Fig. 3 Multi-dimensional operational mechanisms

继续深入探究多维跟驰运行机制中车辆合力的平衡过程,简化运动场景,选取后车超过前车的整个过程,两车间的受力机制如图4所示,其中箭头长度不表示明确数值、两车初始位置不在同一车道。

定义3种作用在后车上的力:加速力f_a表示达到自由流速度的趋势;作用力f_r表示受到引力或斥力影响下的加速或减速状态,其中f_{r1}为引力,f_{r2}为斥力;车道力f_l表示车辆保持在车道中心或换道的趋势。图4(a)为后车刚进入前车作用范围时(即认为两车开始发生跟驰行为)车辆相关力的简化示意图,此时后车仅受到加速力及前车吸引力作用,引力方向与受力线方向相同,车辆产生了向右侧车道位移的趋势;图4(b)显示了后车为保持在车道中心行驶,产生向外的车道力用于对抗纵向位移;图4(c)中由于两车辆间距离减小,为避免发生碰撞后车受到了向外的排斥力,故产生了向内的车道力;图4(d)中后车超过前车后,也需要向内的车道力以对抗纵向位移。后车跟驰、超车的过程会感受到不断变化的作用力,作用力的纵向分量使车辆远离车道中心,车道力进行反向动态平衡。

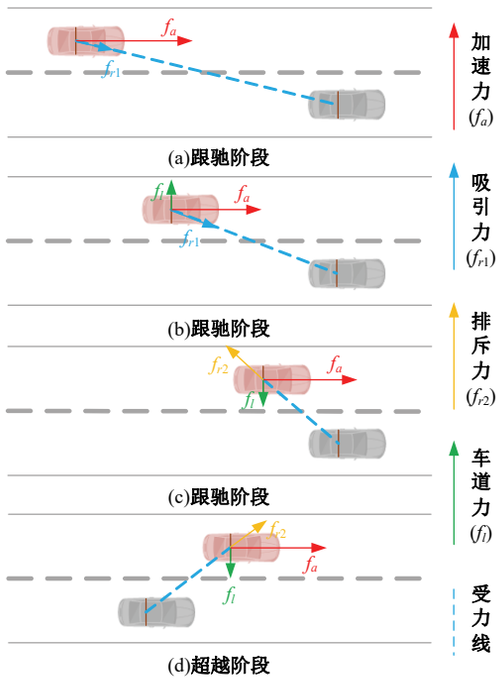


图4 多维受力机制

Fig. 4 Multi-dimensional force mechanisms

2 车辆多维跟驰模型构建

2.1 传统一维跟驰的车辆受力关系

传统一维跟驰模型用于描述单车道上车辆之间的横向跟随行为,是研究车辆之间相互作用的基础,由于一维跟驰模型仅对横向方向进行分析,车辆加速力和作用力的合力决定车辆横向速度大小。车辆加速力与横向速度为线性关系,与当前速度和最大期望速度之间的差成正比,如下所示:

$$f_a = k_1\left(v_f - v_i(t)\right) \tag{4}$$

式中：v_f为高速公路最高限制速度；$v_i(t)$为后车t时刻的横向速度；k_1为模型参数。

同时，车辆还受到引力和斥力的共同作用，车辆间会达到一种既不易靠近也不易远离的动态平衡，对式(2)所示车辆作用势场函数求负梯度值，简化模型，令参数$k_2=\dfrac{\alpha\beta\varepsilon}{\beta-\alpha}$，得到跟驰车辆作用力$f_r$为：

$$f_r=-\nabla E_r=\frac{\alpha\beta\varepsilon}{\beta-\alpha}\left(\frac{r_0^{\beta}}{r^{\beta+1}}-\frac{r_0^{\alpha}}{r^{\alpha+1}}\right)=k_2\left(\frac{r_0^{\beta}}{r^{\beta+1}}-\frac{r_0^{\alpha}}{r^{\alpha+1}}\right) \tag{5}$$

式中："∇"为梯度。

图 5 为基于 Lennard-Jones 势的车辆作用势函数曲线及受力曲线，其中，f_r对应受力曲线最低点存在最大引力；E_r对应势函数曲线最低点存在最小势能；车辆间距离为r，引力与斥力过渡的过程存在相互作用力为零的状态，既无引力也无斥力，此时车辆间的距离称为平衡距离r_0。通过间距r与平衡距离r_0的大小关系可判别车辆间相互作用效果，存在以下 3 种状态：$r<r_0$时，车辆间表现为相互排斥；$r=r_0$时，车辆间的合力为 0；$r>r_0$时，车辆间表现为相互吸引。

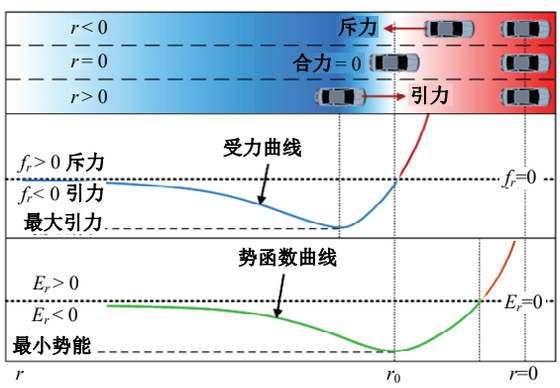


图 5　车辆间相互作用关系

Fig. 5　Interaction relationship between vehicles

车辆间的跟驰行为要满足需求安全距离，即当前车突发某些情况后，后车驾驶人能立即紧急制动避免车辆发生碰撞的距离。由分子相互作用势场知，平衡距离r_0近似等于需求安全距离时，能保证最大运行效率。则跟驰安全距离即分子平衡距离r_0为[13]：

$$r_0 = S_0 + v_i\tau \tag{6}$$

式中：S_0为适当增加的停车安全距离(一般取 2 m)；v_i为后车速度；τ为响应延迟(一般取 0.7 s)。

2.2　改进多维跟驰模型

交通流本质上是一个复杂的多维动态系统，车辆运动不仅受前车横向作用的影响，还受到邻道车辆纵向干扰、车道变化行为等多重因素的综合影响。引入作用力和车道力等动态纵向因素，建立横纵向相互耦合的车辆多维跟驰模型，可更精准地刻画复杂交通流的动态演化过程。使用二维向量(即 2×2 矩阵)将一维转变为二维，定义横向维度为第 1 个维度x(以距离为单位进行测量，方向与道路平行，向右为正)；纵向维度为第 2 个维度y(以距离为单位进行测量，方向与道路垂直，向上为正)。

2.2.1　加速力

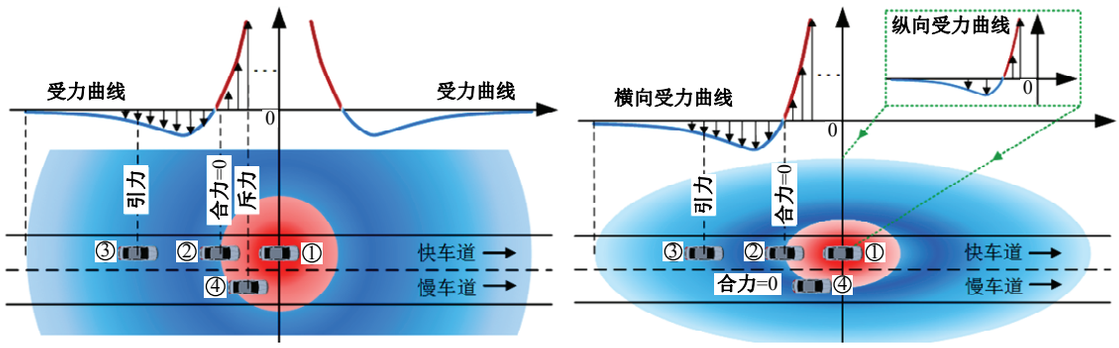
加速力$\boldsymbol{f}_i^{\,a}(t)$只取决于$t$时刻$x$方向上的横向速度，纵向维度为 0，则加速力的二维向量为：

$$\boldsymbol{f}_i^{\,a}(t)=\begin{bmatrix} k_1\left(v_f - v_i^{x}(t)\right) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

2.2.2　作用力

对于多维跟驰模型中的作用力，需要考虑车辆在纵向 1 m 处受到的作用力大小与车辆在横向 1 m 处受到的作用力大小不一样，因此，引入一个无量纲的比例因子q，其大小取决于车辆横向速度，为模型的待定参数。借助比例因子q将横向分量与纵向分量等效转换，使任何方向的受力效果都具有可比性。在此条件下，纵向距离将以一定比例缩小，横向距离不变，作用力的影响区域由圆形变换为椭圆形，改进后作用区域变换如图 6 所示(彩图参见电子版，以下同)。

在跟驰行为中，前车会产生一个作用区域，后车进入区域后与前车产生相互作用效果，在合力作用下前进。图 6(a)为快车道上前车①中心点处产生的一个圆形作用力区域，表示同一半径上所有位置的作用力都相等，作用力大小为上方受力曲线所示，其中红色区域受斥力影响，蓝色区域受引力影响，则快车道上后车②和③分别不受力和受引力作用，慢车道上后车④受斥力作用(3 辆后车表示在前车影响下的不同受力情况，之间不相互作用)，可以看出，虽然后车④与前车①不在同一车道行驶，但在圆形作用区域中会受到斥力作用从而减小横向速度，两车间横向距离越小，受到的斥力越大，表现为不允许后车④超越前车①，这与现实交通状况不符，故变换后的作用区域如图 6(b)所示。由于横向距离不变，仅对纵向距离



(a)圆形作用力影响区域 (b)纵向距离缩小后椭圆形作用力影响区域

图6 作用力影响区域变换

Fig. 6 Force-affecting region transformations

缩放,纵向受力曲线改变后与原来受力曲线组成椭圆形的作用区域,慢车道上斥力区域减小,保证不同车道上后车存在超越前车的可能;其中,快车道上两辆后车的受力情况均不改变,后车④受到的合力变为0,保持原状态行驶。因此,通过引入纵向维度并对其缩放从而改进车辆多维跟驰模型,由于缩放后椭圆的极轴(需求安全距离)会随着角度变化而变化,则根据式(6)横向需求安全距离和纵向需求安全距离建立如下关系式:

$$r_0 = q \cdot y^* \tag{8}$$

式中:y^*为车辆并排行驶时需要满足的需求安全距离,缩放后与横向需求安全距离相等。

由波良可夫模型可知,有关纵向安全距离与横向行车速度的计算公式为:

$$y^* = 0.7 + 0.02\left(V_i^x\right)^{0.75} = 0.7 + 0.02\left(3.6v_i^x\right)^{0.75} + 2.0 \tag{9}$$

式中:V_i^x为横向行车速度,km/h;v_i^x为转换单位后的横向行车速度,m/s;0.7为车辆行驶速度无限接近0时车身间的最小安全距离,由于车辆坐标数据是基于车辆中心位置,因此还需要加上车辆的平均宽度2 m;0.02为安全距离与行车速度的变化系数;0.75为调整参数。

将式(9)代入式(8)后得到q为:

$$q = \frac{S_0 + v_i^x \tau}{2.7 + 0.05\left(v_i^x\right)^{0.75}} \tag{10}$$

当两辆车发生相互作用时,作用方向为两辆车的坐标向量之差:

$$\boldsymbol{h}_{i,k}(t) = \begin{bmatrix} x_k(t) - x_i(t) \\ y_k(t) - y_i(t) \end{bmatrix} = \left(\boldsymbol{c}_k(t) - \boldsymbol{c}_i(t)\right) \tag{11}$$

式中:x为横向维度坐标;y为纵向维度坐标;c为车辆坐标向量;k、i分别代表前车和后车。

同时,根据缩放后的两车间距离及椭圆极坐标方程(以椭圆中心为极点)求出任意角度下的需求安全距离r_e为:

$$r_e = \frac{mn}{\sqrt{n^2\cos^2(\theta) + m^2\sin^2(\theta)}} = \frac{r_0\left\|\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\right\|}{\left\|\boldsymbol{g}_{i,k}(t)\right\|} \tag{12}$$

$$\boldsymbol{g}_{i,k}(t) = \boldsymbol{Q}\left(\boldsymbol{c}_k(t) - \boldsymbol{c}_i(t)\right) \tag{13}$$

式中:m为椭圆长半轴,表示横向安全距离,即$m = r_0$;n为短半轴,表示纵向安全距离,即$n = r_0/q$;$\cos(\theta) = \dfrac{\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\cdot\boldsymbol{e}_x}{\left\|\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\right\|}$;$\sin(\theta) = \dfrac{\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\cdot\boldsymbol{e}_y}{\left\|\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\right\|}$;$\boldsymbol{e}_x = (1,0)$;$\boldsymbol{e}_y = (0,1)$;$\boldsymbol{Q} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & q \end{bmatrix}$。

采用速度差在跟车方向上的投影表示后车与前车的速度变化程度,该投影值决定后车在跟车方向上应该加速还是减速,将速度向量投影到跟车方向的单位向量$\hat{\boldsymbol{h}}_{i,k}(t)$上计算速度差$\Delta\boldsymbol{v}_{i,k}(t)$:

$$\Delta\boldsymbol{v}_{i,k}(t) = \left(\boldsymbol{v}_k(t) - \boldsymbol{v}_i(t)\right)\cdot\hat{\boldsymbol{h}}_{i,k}(t) \tag{14}$$

$$\hat{\boldsymbol{h}}_{i,k}(t) = \frac{\boldsymbol{h}_{i,k}(t)}{\left\|\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\right\|} \tag{15}$$

同时,使用单位向量$\boldsymbol{h}_{i,k}(t)$将车辆受力转变为二维向量,并调整受力符号,受引力时表征正向受力,受斥力时表征反向受力,联立式(11)~式(15)得到作用力$\boldsymbol{f}_{i,k}^r(t)$为:

$$\boldsymbol{f}_{i,k}^r(t) = \hat{\boldsymbol{h}}_{i,k}(t)\left\{k_2\left(\frac{r_e^\alpha}{\left\|\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\right\|^{\alpha+1}} - \frac{r_e^\beta}{\left\|\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\right\|^{\beta+1}}\right) + k_3\cdot\Delta\boldsymbol{v}_{i,k}(t)\right\} \tag{16}$$

式中:r_e^α、r_e^β分别为需求安全距离r_e的α次幂和β次幂,α为斥力项指数,β为引力项指数,二者共同决定车辆相互作用力随需求安全距离变化的衰减特性。

2.2.3　车道力

车道力$\boldsymbol{f}_i^{l}(t)$的目的是使车辆保持在车道中心附近或提供车辆换道的力，是车辆纵向速度及其到目标车道中心的纵向距离的函数，对式(1)中道路函数求负梯度值，得车道力$f_l(t)$为：

$$f_l(t)=-\nabla E_l=-W\left(y_i(t)-y_l\right) \tag{17}$$

式中：$y_i(t)$为后车t时刻所在位置的纵坐标；y_l为目标车道中心的纵坐标。

车辆在纵向位移时还受纵向速度的影响，引入纵向速度因素，使用两个模型参数k_4和k_5分别表示车辆到车道中心纵向距离与每单位纵向速度的响应强度，得到车道力$\boldsymbol{f}_i^{l}(t)$为：

$$\boldsymbol{f}_i^{l}(t)=\begin{bmatrix}0\\-k_4\left(y_i(t)-y_l\right)-k_5v_i^{y}(t)\end{bmatrix} \tag{18}$$

车辆纵向的动态行为可以描述为一个围绕车道中心的阻尼谐振子，车道中心就像谐振子的平衡位置，车辆偏离中心时会受到一个类似弹簧的恢复力，为了确保车辆快速回到车道中心而不产生过大的振荡，可以设置临界阻尼，即k_4和k_5之间存在一定的关系，令$k_5=2\sqrt{k_4}$，将模型参数数量减少[14]。

最终由车辆加速力$\boldsymbol{f}_i^{a}(t)$、作用力$\boldsymbol{f}_{i,k}^{r}(t)$和车道力$\boldsymbol{f}_i^{l}(t)$叠加得出车辆多维跟驰行为中受到的合力$\boldsymbol{F}$，如下所示：

$$\boldsymbol{F}(t)=\boldsymbol{f}_i^{a}(t)+\boldsymbol{f}_{i,k}^{r}(t)+\boldsymbol{f}_i^{l}(t) \tag{19}$$

设车辆质量均为M，令$w=k/M$，可得多维跟驰模型加速度$\boldsymbol{a}(t)$表达式为：

$$\boldsymbol{a}(t)=\boldsymbol{F}(t)/M=\begin{bmatrix}w_1\left(v_{\mathrm{f}}-v_i^{x}(t)\right)\\-w_4\left(y_i(t)-y_l\right)-w_5v_i^{y}(t)\end{bmatrix}+\hat{\boldsymbol{h}}_{i,k}\left\{w_2\left(\frac{r_e^{\alpha}}{\left\|\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\right\|^{\alpha+1}}-\frac{r_e^{\beta}}{\left\|\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\right\|^{\beta+1}}\right)+w_3\cdot\Delta v_{i,k}(t)\right\} \tag{20}$$

式中：w_1为单位质量自由驾驶参数；w_2为单位质量车辆相互作用参数；w_3为单位质量速度差参数；w_4为单位质量位置偏移响应参数；w_5为单位质量速度响应参数。

3　多维跟驰模型参数标定

3.1　数据准备

3.1.1　研究路段概况

汕昆高速公路昆石段是昆明市交通网络的重要组成部分，高速公路地形复杂、交通流量密集且行车速度高，包含多个高风险和低风险路段，可为多维跟驰模型研究提供丰富的实测数据。因此，本文选取利用风险区段划分方法得到的昆石高速高风险区段作为研究路段(见图7)[15]，该直线路段路基宽26 m，双向4车道，每车道宽为3.75 m，设计时速为120 km/h。

3.1.2　数据采集

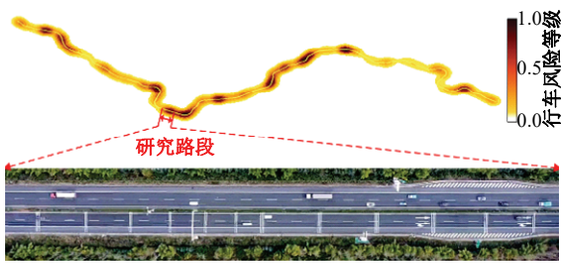


图7　研究路段示意图

Fig. 7　Schematic diagram of the research section

为获取高精度、全时段的高速公路车辆跟驰轨迹数据，在2024年3月24日早上9:00～9:30、中午12:00～12:30、晚上17:00～17:30三个时间段，使用大疆御2 Pro无人机在距离路面约200 m的高度静止悬停拍摄，路段覆盖长度约350 m，拍摄期间天气条件良好，视频满足车辆跟驰轨迹数据采集要求。

3.1.3　数据处理

本文使用Tracker软件提取车辆跟驰轨迹数据，沿应急车道线建立横向x轴，规定车流方向为x轴正方向，以研究路段起始处垂直建立纵向y轴，规定车辆向左侧行驶的方向为y轴正方向，两轴交点为原点O，Tracker软件界面及建立的平面直角坐标系如图8所示。每0.33 s提取一个车辆轨迹点，轨迹数据包括车辆ID、采样时刻、位置坐标、车辆横纵向速度等。

共计得到34 743条车辆轨迹数据，依据后车与前车的横向车身间距始终小于150 m作为跟驰行为的判别阈值，剔除车辆处于自由流情形的数据，经过人工校对，提取出387组高速公路有效跟驰车辆对，以此作为多维跟驰模型参数标定的数据集。

3.2　参数标定结果

粒子群优化算法(Particle swarm optimization，PSO)是一种基于群体智能的优化算法，通过模拟鸟群觅食行为来寻求问题的最优解。较强的全局搜索能力能够避免传统算法可能出现的局部最优解问题，适用于多参数条件下的快速求解，

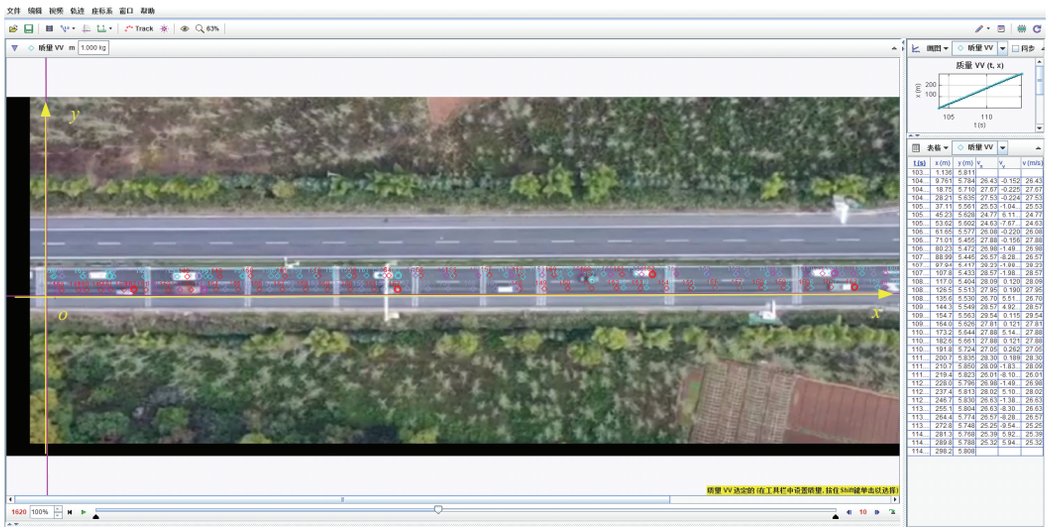


图 8 平面直角坐标系构建

Fig. 8 Plane cartesian coordinate system construction

因此本文采用此算法进行标定。设置算法种群规模为 100,最大迭代次数为 400,利用目标函数评估每组参数配置的误差,得到多维跟驰模型参数标定结果如表 1 所示。

表 1 多维跟驰模型参数标定结果

Table 1 Multi-dimensional car-following model parameter calibration results

参数	数值	参数	数值
α	0.641	w_3	0.053
β	1.866	w_4	4.468
w_1	0.582	w_5	4.228
w_2	47.051		

4 多维环境下的驾驶决策分析

在多维交通场景中,车辆的驾驶决策不仅限于单车道中前后车之间的跟驰,还涉及到换道操作和其他多维互动。因此,本文选取了传统一维跟驰、多维跟驰和跟驰换道 3 个场景,通过模拟仿真分析多维跟驰模型在不同情况下的适用性和有效性。

4.1 传统一维跟驰场景

传统一维跟驰场景主要用于验证多维跟驰模型在单车道跟驰行为中的有效性,本文选择文献[16]提出的 M-MD 模型与 IDM 模型进行对比。M-MD 模型和 IDM 模型分别如下:

$$a_{\text{M-MD}}=\lambda\left(2\frac{r_0^6}{r^7}-\frac{1}{r}\right)\left(\frac{r_0}{r}\right)^6+\mu\left(1-\frac{v_i}{v_k}\right) \tag{21}$$

$$a_{\text{IDM}}=a_{\max}\left\{1-\left(\frac{v_i}{v_{\text{f}}}\right)^{\delta}-\left[\frac{s_0+v_iT+\dfrac{v_i(v_k-v_i)}{2\sqrt{a_{\max}\cdot a_{\text{b}}}}}{r}\right]^2\right\} \tag{22}$$

式中:λ、μ 为待定参数;r_0 为平衡距离;r 为车辆间距离;$a_{\max}$ 为制动最大加速度;a_{b} 为舒适减速度;v_{f} 为最高限制速度;v_k 和 v_i 分别为前车和后车的速度;T 为安全时距;δ 为速度灵敏度(一般取 4)。

采用相同车辆轨迹数据集对 M-MD 模型和 IDM 模型的参数进行标定,结果如表 2 所示。

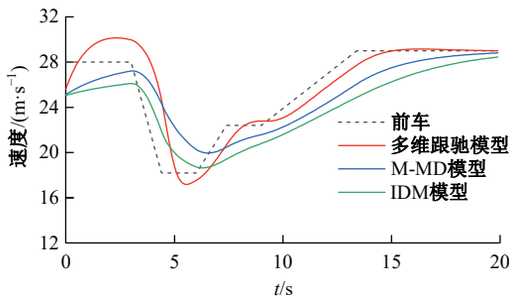
表 2 对比模型参数标定结果

Table 2 Comparison of model parameter calibration results

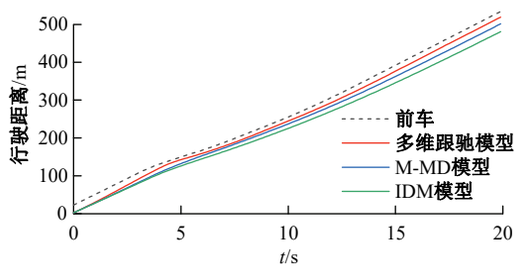
参数	数值	参数	数值
λ	2.119	a_{b}	2.571
μ	11.828	T	1.152
$a_{\max}$	1.385		

设定前后车在同一车道上依次行驶,即 y_i 均为 1.875 m,仿真初始车头间距设为 20 m,前、后车初始速度分别为 28、25 m/s,时间步长为 0.1 s,仿真 200 步(共 20 s),整个过程使前车进行一定程度的加、减速,得到不同模型的前后车速度、行驶距离曲线如图 9 所示。

对比图 9(a)中 3 个模型输出的后车速度曲线可知,IDM 模型在前车减速阶段的跟驰响应性能优于 M-MD 模型,而在前车加速阶段,M-MD 模型则表现出更好的适应性,但 IDM 模型和 M-MD 模型的跟驰响应都与多维跟驰模型存在显著差



(a)前后车速度曲线



(b)前后车行驶距离曲线

图 9　一维跟驰场景下前后车的速度和行驶距离曲线

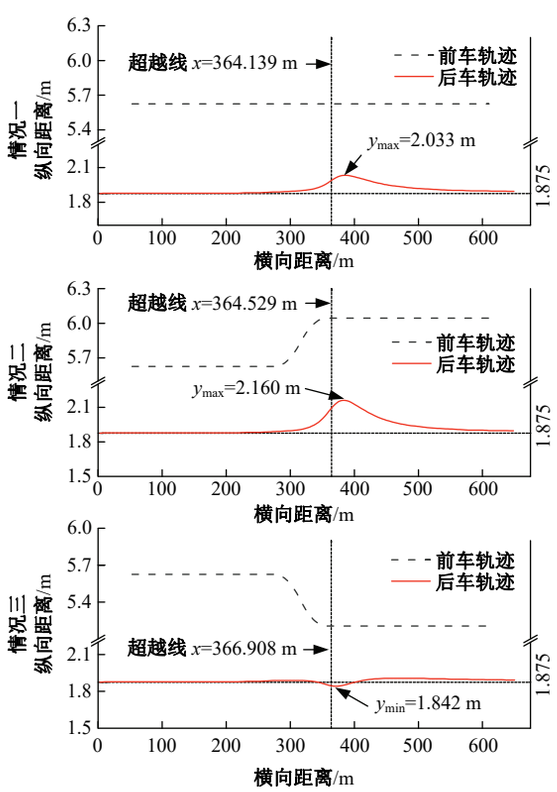
Fig. 9　Velocity and travel distances curves of the front and rear vehicles in a one-dimensional car-following scenario

异，多维跟驰模型能更好地捕捉前车的运动状态变化，产生与真实车辆相似的跟驰响应，展现了最优的适用性和有效性。其中，由于高速公路最高限制速度 v_f 为 33.3 m/s，初始阶段多维跟驰模型中的后车在加速力作用下迅速加速，两车间的距离逐渐缩小，直到小于需求安全距离后表现为斥力作用，后车停止加速并与前车同步减速；中间阶段在加速力和引力共同作用下跟随前车加速，最后两车逐渐趋于稳定。

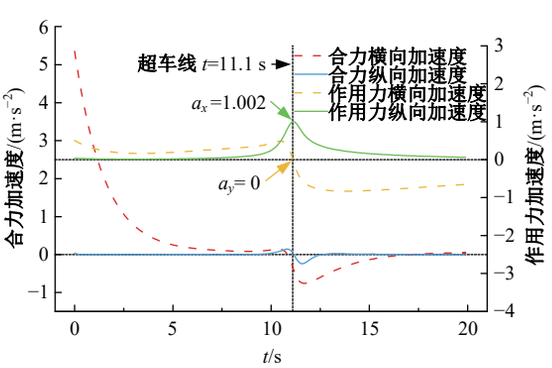
如图 9(b)所示，两车之间的相对距离始终保持在安全范围内。而多维跟驰模型能够在较短的相对距离下保持安全行驶，充分体现了安全性与行驶效率的平衡。因此，多维跟驰模型能够有效描述车辆在不同阶段的加速、减速及稳定过程，为更复杂的多维交通场景提供了基础。

4.2　多维跟驰驾驶决策

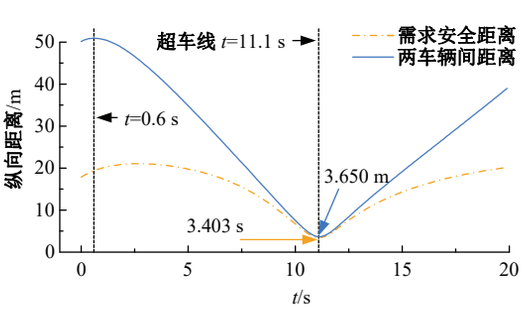
多维跟驰场景模拟了双车道情况下，后车根据不同车道前车的位置和速度变化，做出多维度上的跟驰驾驶决策。设定前车、后车的车道中心 y_l 分别为 5.625 m 和 1.875 m，初始速度分别为 28 m/s 和 25 m/s，仿真初始车头间距设为 50 m，令前车保持匀速行驶，对前车直线行驶、前车车道内左偏及右偏 3 种情况进行仿真，得到的多维跟驰轨迹、加速度和距离曲线如图 10 所示。



(a)三种情况前后车轨迹图



(b)情况一后车作用力和合力加速度图



(c)情况一需求安全距离及两车间距离

图 10　多维跟驰场景下的轨迹、加速度和距离曲线

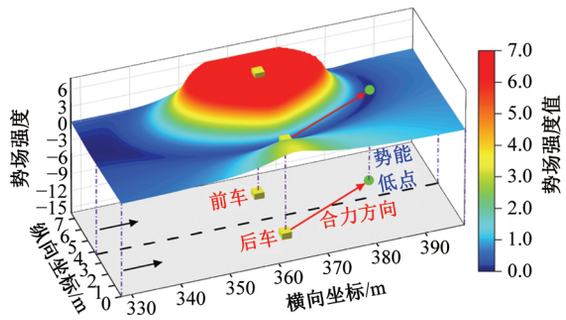
Fig. 10　Trajectory, acceleration and distance curves in multi-dimensional car-following scenarios

多维跟驰模型每个时间步计算一次后车受到的加速力、作用力和车道力,叠加形成的合力方向为后车的前进方向,用于更新下一时间步后车的初始位置和速度。由图10仿真结果可知,情况一中后车在第11.1 s(即横向距离364.139 m处)追上并开始超越前车,此时前后车横向坐标相同,两车间距离最近,所在点位直线称为超越线,左右两侧分别为超越前后车借助引力加速的超越阶段和超越后摆脱引力减速的脱离阶段。

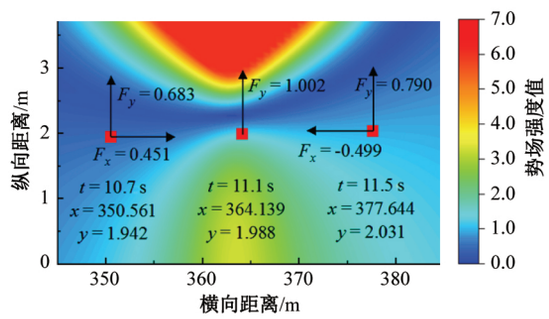
从图10(a)情况一可以看出,后车受作用力的正方向纵向分力影响,整个行驶过程中后车纵坐标先增加后减小且纵坐标都大于1.875 m,表现为被前车吸引而偏离车道中心行驶,在超越前车后逐渐达到最大值2.033 m。如图10(b)作用力加速度所示,超越阶段随着两车间距离减小,作用力影响变大,在超越线处作用力全部转变为正向的纵向加速度,此时横向加速度变为0,是后车纵坐标增加的主要原因。由于前车初始横向速度大于后车,从图10(c)可以看出,两车间距离先小幅增加,直到0.6 s时后车横向速度加速到28 m/s,此时两车间距离开始减小,到达超越线时两车间距离和需求安全距离最低分别为3.650 m和3.403 m。另外,图10(a)中情况二和情况三分别表示前车左偏和右偏行驶的情况,情况二前车左偏纵向距离增加,后车受引力作用纵坐标增大至2.160 m;情况三前车右偏纵向距离减小,后车受斥力作用纵坐标减小至1.842 m,表现为后车为避让前车右偏而采取的安全响应措施。因此,多维跟驰模型在前进方向上主要表现为车辆的行驶效率,而侧向更多表现为行驶安全。

图11(a)基于安全势场的跟驰决策可视化清晰地解释了后车超越前车后纵坐标仍然增加的原因,选取两车处于超越线时的安全势场分布,此时前车前方形成了势能低点,引导后车向该方向移动,进而形成合力的作用方向,所以纵坐标仍会增加直到趋于平衡。图11(b)为10.7 s、11.1 s和11.5 s三个时刻车辆轨迹点在安全势场中的受力情况,纵向方向由于低势能区作用一直受到正向引力,其中处于超越线时引力达到最大值,横向方向受力表现为“正引力-不受力-负引力”,对应后车超越和脱离阶段的特征。

综上所述,基于安全势场的多维跟驰模型有效刻画了车辆在高速公路多维跟驰场景中的动态



(a)跟驰决策可视化



(b)车辆轨迹与安全势场

图11 多维跟驰场景下的安全势场分布

Fig. 11 Safety potential field distribution in multi-dimensional car-following scenario

特性,通过加速力、作用力和车道力描述了不同车道车辆间的交互耦合作用,揭示了车辆超越和脱离阶段的不同受力特征,并扩展了跟驰模型在脱离阶段的适用性,不再局限于单车道中后车永远跟驰前车的情况。

4.3 多维换道驾驶决策

多维换道场景模拟了车辆在追赶或拥堵情况下,主动变更车道的决策过程。除将前车车道中心y_l改为1.875 m外,其余条件设定与多维跟驰场景相同,即在初始阶段将前后车设定在同一车道。引入车辆换道机制:①判断y_l值相同,即前后车是否处于同一车道内;②判断两车间距离$\|\boldsymbol{h}_{i,k}(t)\|\leqslant r_e$,即两车间距离小于需求安全距离,后车开始受到斥力作用;③判断前后车横向速度$v_i^x\geqslant v_k^x$,即后车速度大时,为保证行驶效率进行换道。

图12为车辆换道机制,由图可知,若不发生换道行为,则目标车道仍为当前车道,后车仍在同一车道继续跟驰前车;若发生换道,则目标车道变为相邻车道,后车开始换道。得到的多维换道轨迹、加速度和距离曲线如图13所示。

多维换道场景根据车辆的行驶状态可拆分为一维跟驰、换道决策和多维跟驰3个场景。由

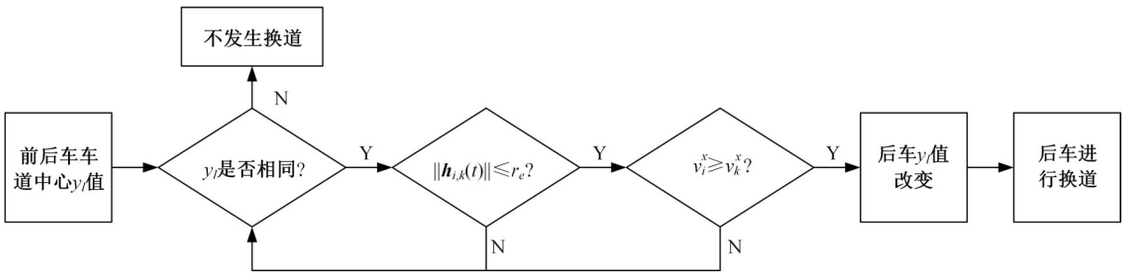


图 12　车辆换道机制

Fig. 12　Vehicle lane change mechanism

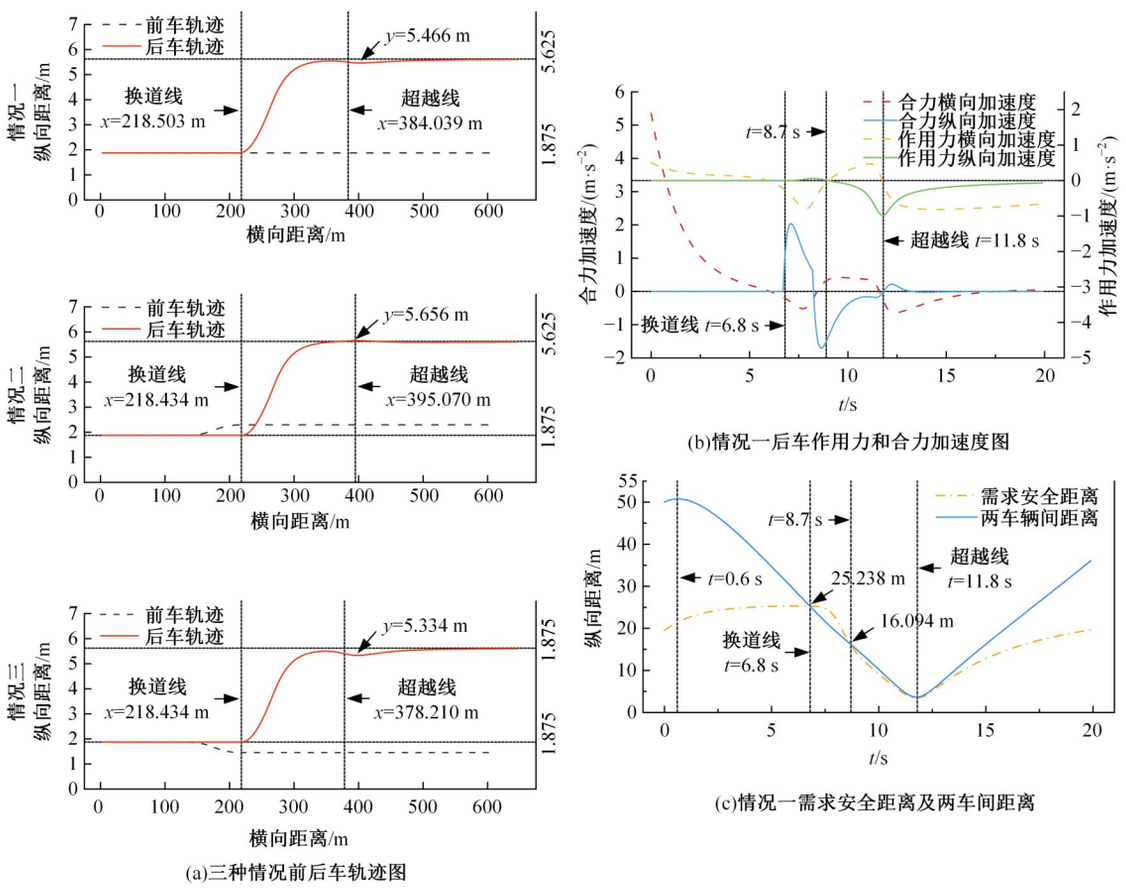
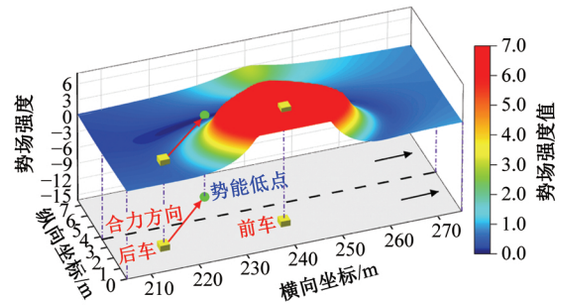


图 13 多维换道场景下的轨迹、加速度和距离曲线

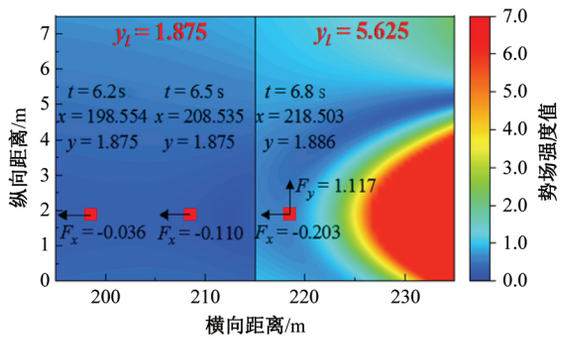
Fig. 13　Trajectory, acceleration and distance curves in multi-dimensional lane changing scenarios

图 13 可知,情况一中后车在第 6.8 s(即横向距离 218.503 m 处)追上前车并根据换道机制决策后开始换道,换道结束后车辆纵坐标在新的车道中心 5.625 m 附近的范围内变化,此时与前车构成 4.2 节中的多维跟驰场景,如图 13(a)所示,超越线处后车在前车不同运动轨迹影响下得到不同的纵坐标值。由图 13(b)(c)可知,在换道线处两车间距离为 25.238 m,开始小于需求安全距离且后车横向速度大于前车,触发换道机制,在车道力作用下表现为将后车拉向新的车道中心;在 6.8~8.7 s 时间段内两车间距离一直小于需求安全距离,作用力横向加速度始终为负,使车辆减速以提供安全足够的换道空间。

图 14(a)为换道决策后改变了车道中心值的安全势场,描述了后车是如何进行换道的,目标车道同样存在一个势能低点引导后车向该方向移动,由于车道中心值及前车运动状态不再改变,此安全势场将不会发生较大变化直到后车完成换道。图 14(b)分别为车道中心 $y_l=1.875$ 和 $y_l=5.625$ 时的安全势场,其中 6.2s 和 6.5s 两个时刻的车辆轨迹点只受横向方向斥力作用,不会发生纵向偏移;势场变化后 6.8 s 时刻的车辆轨迹点由



(a)换道决策可视化



(b)车辆轨迹与安全势场

图14 多维换道场景下的安全势场分布

Fig. 14 Safety potential field distribution in multi-dimensional lane changing scenario

于低势能区作用受到正向引力,车辆纵坐标值增加。因此,多维跟驰模型还可用于决策车辆是否换道以及利用安全势场的低势能区引导车辆完成换道,使车辆在整个行驶过程中保持稳定性、安全性,降低碰撞风险。

5 结 论

(1)针对现有多维跟驰特性及驾驶决策研究中存在的局限性和适用性问题,本文提出了基于安全势场的车辆多维跟驰模型,精准刻画了车辆在多维交通环境下的自主驾驶决策过程,为真实多车道交通环境下的智能驾驶决策研究和交通安全优化提供了理论支持和技术参考。

(2)为实现车辆间多维动态交互,深入分析了车辆多维运行及受力机制,以Lennard-Jones势函数为基础,根据二维空间中两车间的实际距离与可变需求安全距离的对应关系推导出车辆相互作用力表达式,与加速力和车道力表达式叠加后构建了统一的多维跟驰计算模型,该模型能够根据车辆间不同的行驶状态修正车辆加速度、速度和位置等参数。

(3)将本文模型应用于不同场景仿真实验中。仿真结果表明,在保证车辆行驶效率和安全的前提下,后车能够及时响应前车变化做出对应的驾驶决策,揭示了多维跟驰和换道的动态特性;相较于传统单车道跟驰模型中后车永远跟驰前车的情况,多维跟驰模型还适用于后车超越前车后的动态交互过程,扩展了跟驰模型的适用范围;最后,绘制了车辆在决策时刻道路内安全势场的可视化分布情况,直观解释了多维跟驰模型做出跟驰和换道决策的原因。

(4)本文建立的多维跟驰模型及安全势场目前仅限于较为简单的高速公路双车行驶场景,随着实际交通环境愈发多元化、复杂化,车辆的自主驾驶决策将面临更严苛的约束和挑战,接下来需要重点关注多车参与的复杂交通场景,基于多维安全势场模型实现复杂交通条件下的多车多维度动态交互。

参考文献:

[1] Wang Y L, Bian N, Zhang L, et al. Coordinated lateral and longitudinal vehicle-following control of connected and automated vehicles considering nonlinear dynamics[J]. IEEE Control Systems Letters, 2020, 4(4): 1054-1059.

[2] 李孟凡, 秦文虎, 云中华. 基于横纵向联合控制的多目标优化车辆跟驰研究[J]. 计算机应用研究, 2022, 39(8): 2409-2413.
Li Meng-fan, Qin Wen-hu, Yun Zhong-hua. Multi-objective optimal car-following model with lateral and longitudinal control[J]. Application Research of Computers, 2022, 39(8): 2409-2413.

[3] Qin P, Tan H, Li H, et al. Deep Reinforcement learning car-following model considering longitudinal and lateral control[J]. Sustainability, 2022, 14(24): No. 16705.

[4] Ni H Y, Yu G Z, Chen P, et al. An integrated framework of lateral and longitudinal behavior decision-making for autonomous driving using reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2024, 73(7): 9706-9720.

[5] 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.
Li Lin-heng, Gan Jing, Qu Xu, et al. Car-following model based on safety potential field theory under connected and automated vehicle environment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 76-87.

[6] 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换道模型[J]. 中国公路学报, 2021, 34(6): 184-195.
Li Lin-heng, Gan Jing, Qu Xu, et al. Lane-changing model based on safety potential field theory under the connected and automated vehicles environment [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(6): 184-195.

[7] 贾彦峰, 曲大义, 赵梓旭, 等. 基于安全势场的网联自主车辆跟驰行为决策及模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(1): 85-97.
Jia Yan-feng, Qu Da-yi, Zhao Zi-xu, et al. Car-following decision-making and model for connected and autonomous vehicles based on safety potential field [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 85-97.

[8] Ma H, An B, Li L, et al. Anisotropy safety potential field model under intelligent and connected vehicle environment and its application in car-following modeling[J]. Journal of Intelligent and Connected Vehicles, 2023, 6(2): 79-90.

[9] Zhang Y, Shuai B, Zhang R, et al. Modeling and simulation of driving risk pulse field and its application in car following model[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(8): 8984-9000.

[10] Shao Y, Han Z, Shi X, et al. Risk-informed longitudinal control in autonomous vehicles: a safety potential field modeling approach[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2024, 633: No. 129419.

[11] 张硕, 邝士奇, 赵轩, 等. 基于全局导向的智能车辆路径规划融合算法研究[J]. 汽车工程, 2024, 46(9): 1546-1555.
Zhang Shuo, Kuang Shi-qi, Zhao Xuan, et al. Research on global oriented path planning fusion algorithm for intelligent vehicles[J]. Automotive Engineering, 2024, 46(9): 1546-1555.

[12] 曲大义, 赵梓旭, 贾彦峰, 等. 基于 Lennard-Jones 势的车辆跟驰动力学特性及模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2022, 52(11): 2549-2557.
Qu Da-yi, Zhao Zi-xu, Jia Yan-feng, et al. Car-following dynamics characteristics and model based on Lennard-Jones potential[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2022, 52(11): 2549-2557.

[13] 曲大义, 孟奕名, 王韬, 等. 基于分子力场的网联自主车辆跟驰安全特性及模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(6): 33-41.
Qu Da-yi, Meng Yi-ming, Wang Tao, et al. Car-following model and safety characteristics of connected autonomous vehicle based on molecular force field [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(6): 33-41.

[14] Delpiano R, Herrera J C, Laval J, et al. A two-dimensional car-following model for two-dimensional traffic flow problems[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2020, 114: 504-516.

[15] 胡立伟, 侯智, 赵雪亭, 等. 基于交通事故文本挖掘的高速公路行车风险改进预测方法[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(6): 1487-1498.
Hu Li-wei, Hou Zhi, Zhao Xue-ting, et al. Improvement of highway traffic risk prediction method based on traffic accident text mining[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(6): 1487-1498.

[16] 杨龙海, 王晖, 李帅, 等. 改进分子动力学的车辆跟驰模型[J]. 重庆大学学报, 2021, 44(7): 26-33.
Yang Long-hai, Wang Hui, Li Shuai, et al. Car-following model with improved molecular dynamics[J]. Journal of Chongqing University, 2021, 44(7): 26-33.