

高速公路分流区智能网联货车换道演化博弈机制

刘风华¹ 贺玉龙¹ 李 卓¹
LIU Fenghua HE Yulong LI Zhuo

摘 要

为研究高速公路分流区混合流中智能网联货车车队的换道博弈机制,缓解换道过程中的冲突,文章分析了下匝道智能网联货车车队A与目标车道后方车辆B的协同换道场景。从博弈参与者、策略集、信息交互及收益函数等核心要素出发,构建由安全收益、效率收益和距离收益组成的综合收益矩阵,其中收益通过权重融合。基于收益矩阵建立双方的复制动态方程,描述策略演化过程,并通过雅可比矩阵分析系统均衡点的稳定性,识别出(0,0)(0,1)(1,0)(1,1)和 (p^*,q^*) 均衡点,进一步分析表明,初始决策倾向和效用差对演化结果影响显著,通过权重灵敏度分析确定最优配置($\alpha=0.6, \beta=0.2, \gamma=0.2$),此时演化过程快速且集中收敛于(换道、避让)策略。

关键词

智能网联货车车队;出口匝道分流区;演化博弈;行为决策

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2026.03.049

0 引言

货车编队作为可持续交通系统的重要技术,在正常行驶、故障应对和混行交通等方面已有较多研究,但针对其换道行为,尤其是在分流区这一冲突高发场景下的研究仍较为缺乏。在此区域,智能网联货车车队需要与目标车道后方车辆进行协同换道,涉及复杂的博弈互动,因此对该博弈行为进行深入分析十分必要。

鉴于现有研究的不足,本文借鉴其他车型的换道策略,针对下匝道分流区展开研究。董长印^[1]比较了阶梯、全域及混合控制策略,以换道间隙、通行能力等为评价指标,精准确定了阶梯控制策略的最优地位。王振^[2]开发的动态协同换道策略兼顾效率与安全舒适性,并考虑了换道失败应对机制。刘迪^[3]发现增大车队规模可缩短平均换道时间,Zhao等^[4]综合分析交通流量、驶入下匝道车辆占比及车队行驶速度等因素,构建了基于交通环境信息的车队最优规模确定方法,并通过仿真试验证实了该方法的准确性。曲大义等^[5]结合博

1. 北京工业大学城市交通学院 北京 100124

参考文献:

- [1] 梁雪,冯全,杨森,等.基于高光谱和卷积神经网络的大田马铃薯早疫病严重程度分级方法[J].江苏农业学报,2024,40(10):1854-1862.
- [2] 蒋清健,姚勇,王亚玲,等.基于多尺度卷积神经网络算法的番茄叶片病害识别[J].江苏农业科学,2023,51(15):211-216.
- [3] 胡政,张艳.降维降噪处理对番茄早疫病潜育期高光谱识别效果的影响[J].光谱学与光谱分析,2023,43(3):744-752.
- [4] 苏斐,王光辉,史艳霞,等.融合通道注意力机制的ResUnet作物病斑分割模型[J].中国农机化学报,2024,45(8):228-233.
- [5] 孟祥国,冯全.大田环境下的马铃薯早疫病叶片检测和严重程度评估[J].林业机械与木工设备,2024,52(9):44-53.
- [6] 张楷文,张艳.猕猴桃软腐病潜育期的红外图像识别研究[J].贵阳学院学报:自然科学版,2023,18(1):74-79.
- [7] 沈梦姣,鲍浩,张艳.辣椒早疫病潜育期的光谱特性判别

方法[J].光谱学与光谱分析,2024,44(10):2923-2931.

- [8] 王磊,袁英,高玲.基于改进多元宇宙算法的番茄病害图像识别[J].中国农机化学报,2023,44(5):176-181.
- [9] 王雨萌,吴呈瑜.基于位置编码和BAM注意力机制的马铃薯叶部病害识别方法[J].软件,2024,45(5):1-6.
- [10] 黄乾峰,董琴,韦静.改进MobileNetV2算法的番茄叶片病害种类识别[J].计算机系统应用,2023,32(1):385-391.

【作者简介】

宋小芹(1983—),女,河南开封人,硕士,副教授,研究方向:计算机应用、网络技术。

肖露(1997—),女,河南南阳人,硕士,研究方向:图像处理。

邓锴(1997—),男,河南南阳人,硕士,研究方向:算力网络、意图网络等新型网络。

(收稿日期:2025-08-21 修回日期:2026-03-17)

博弈理念建立智能网联车辆换道行为模型，经与传统间隙模型的对比仿真验证，该博弈换道模型能够显著提升车道利用率与安全稳定性。而 Li 等^[6]提出的智能网联卡车车队控制策略，通过协同调整速度和二维非线性 MPC 算法实现有效换道，为本文研究提供了参考。

本文从安全、效率和距离收益三方面构建智能网联货车车队与协同车辆的博弈效用函数，据此建立分流换道演化博弈模型，分析系统均衡及稳定性，并通过数值仿真揭示初始决策倾向和收益差对演化过程的影响，以深入解析换道行为的动态演化机理。

1 分流区下匝道智能网联货车换道演化博弈模型

1.1 博弈场景

在高速公路分流区，由智能网联卡车车队(A)、人工卡车、人工小汽车组成的混合流中，智能网联卡车车队与相邻车道上的协同车辆进行博弈，根据协同车辆 B 的不同类型，存在 3 种协同换道场景。场景 1：与智能网联货车车队协同换道；场景 2：与人工货车协同换道；场景 3：与人工小汽车协同换道，如图 1 所示。

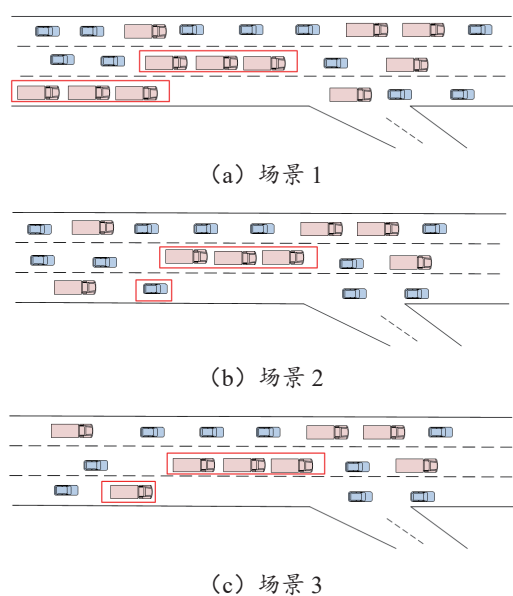


图 1 分流区下匝道智能网联货车车队换道博弈场景

1.2 博弈要素

在分流区智能货车车队换道过程中，博弈行为的核心要素可分解为：

(1) 博弈参与者

换道主体为下匝道智能网联货车车队 A。博弈对象为目标车道的后方车辆 B。

(2) 策略集

下匝道智能网联货车车队 A 策略集记为 $S=\{\text{换道, 不换道}\}$ 。目标车道的后方车辆 B 策略集记为 $S=\{\text{避让, 不避让}\}$ 。

智能网联车辆可通过 V2X 明确策略，人工驾驶车辆的策略需基于历史数据预判。4 种博弈策略分别是 $S_1=(\text{换道, 避让})$ 、 $S_2=(\text{换道, 不避让})$ 、 $S_3=(\text{不换道, 避让})$ 、 $S_4=(\text{不换道, 不避让})$ 。

(3) 信息

智能网联货车车队 A 与智能网联车辆通过 V2X 实时共享速度、加速度及换道意图；智能网联货车车队 A 对人工驾驶车辆仅能通过传感器获取实时状态，其决策意图需通过历史轨迹数据估算策略概率。

(4) 收益

收益函数融合了分流区特性与货车物理约束，本文的收益函数由安全收益、效率收益以及距离收益三部分组成。

① 安全收益是基于两者之间的相对距离和速度比值计算得出，当下匝道货车车队 A 选择不换道时，安全收益取值为 1。当两车选择的策略组合为 $S_1=(\text{换道, 避让})$ 时，下匝道货车车队 A 与目标车道后车 B 的安全收益^[7]用公式表示为：

$$S_A^1 = S_B^1 = \frac{(L_A + L_B + s_0 + G)}{|\bar{v}_A - \bar{v}_B|} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_A = n_A \times (L_{\text{truck}} + d_{\text{gap}}) \\ L_B = n_B \times (L_{\text{truck}} + d_{\text{gap}}) \end{cases} \quad (2)$$

式中： L_A 和 L_B 分别表示货车车队长度； s_0 表示车长基值； n_A 和 n_B 分别表示车队 A、B 的规模（车辆数）； G 表示车队间安全间隙； d_{gap} 表示队内安全距离。

当两车选择的策略组合为 $S_2=(\text{换道, 不避让})$ 时，下匝道货车车队 A 与目标车道后车 B 的安全收益用公式表示为：

$$\begin{cases} S_A^2 = \frac{(L_A + s_0 + x_m)}{|\bar{v}_A - \bar{v}_B|} \\ S_B^2 = \frac{(L_B + s_0 + x_m)}{|\bar{v}_A - \bar{v}_B|} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $\bar{v}_A$ 和 $\bar{v}_B$ 分别表示货车车队 A 和 B 的平均速度，当协同换道车辆为单车时，则 $\bar{v}_B$ 表示单车的行驶速度。

② 效率收益则是以车辆到达最迟换道点的时间作为衡量标准，当两车选择的策略组合为 $S_1=(\text{换道, 避让})$ 时，下匝道货车车队 A 与目标车道后车 B 的效率收益^[7]用公式表示为：

$$\begin{cases} T_A^1 = \frac{\Delta t \times (x_A - x_{0,A}(n_A))}{\sum_{t_b} \bar{v}_A(t)} \\ T_B^1 = \frac{\Delta t \times (x_B - x_{0,B}(n_B))}{\sum_{t_b} \bar{v}_B(t)} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x_{0,A}(n_A) = x_{0,\text{base}} + n_A \cdot 100\text{m} \\ x_{0,B}(n_B) = x_{0,\text{base}} + n_B \cdot 100\text{m} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $x_{0,A}(n_A)$ 和 $x_{0,B}(n_B)$ 分别表示车队 A 和车队 B 会随规模提前的最迟换道点, 车队规模越大, 效率收益越低。

当两车选择的策略组合为 $S_2=(\text{换道}, \text{不避让})$ 时, 下匝道货车车队 A 与目标车道后车 B 的效率收益用公式表示为:

$$T_B^2 = \frac{(x_B - x_{0,B}(n_B))}{\bar{V}_B} \quad (6)$$

当两车选择的策略组合为 $S_1=(\text{换道}, \text{避让})$ 时, 下匝道货车车队 A 与目标车道后车 B 的距离收益^[7]用公式表示为:

$$\begin{cases} D_A = \exp\left(\frac{x_{0,A}(n_A) - x_A}{x_{0,A}(n_A)}\right) \times \alpha_d(n_A) \\ D_B = \exp\left(\frac{x_{0,B}(n_B) - x_B}{x_{0,B}(n_B)}\right) \times \alpha_d(n_B) \end{cases} \quad (7)$$

当两车选择的策略组合为 $S_1=(\text{换道}, \text{避让})$ 时, 下匝道货车车队 A 与目标车道后车 B 的距离收益^[7]用公式表示为:

$$\begin{cases} U = \alpha S_{Ai} + \beta T_{Ai} + \gamma D_{Ai} \\ V = \alpha S_{Bi} + \beta T_{Bi} + \gamma D_{Bi} \end{cases}, i=1,2,3,4 \quad (8)$$

式中: U 、 V 分别表示下匝道货车车队 A 和目标车道后车 B 的总收益; S 表示安全收益; T 表示效率收益; i 表示选择的策略集合; D 表示距离收益; α 、 β 和 γ 分别表示不同收益的权重, 其中 $\alpha+\beta+\gamma=1$, 整理可得博弈综合收益矩阵, 如表 1 所示。

表 1 博弈综合收益矩阵

博弈对象及其策略	协同车辆 B 避让	协同车辆 B 不避让	概率
A 换道	(U_1, V_1)	(U_2, V_2)	p
A 不换道	(U_3, V_3)	(U_4, V_4)	$1-p$
概率	q	$1-q$	

1.3 复制动态方程

由表 1 收益矩阵分别计算下匝道车队选择换道和不换道时的期望收益用公式表示为:

$$\begin{cases} U_A^c = q(\alpha S_{A1} - \beta T_{A1} + \gamma D_{A1}) + (1-q)(-\alpha S_{A2} - \beta T_{A2} + \gamma D_{A2}) \\ = qU_1 + (1-q)U_2 \\ U_A^{nc} = q(\alpha S_{A3} - \beta T_{A3} + \gamma D_{A3}) + (1-q)(\alpha S_{A4} - \beta T_{A4} + \gamma D_{A4}) \\ = qU_3 + (1-q)U_4 \end{cases} \quad (9)$$

得到下匝道车队 A 以 p 概率选择换道, 以 $1-p$ 概率选择不换道时的平均期望收益如式 (10) 所示, 并据此得到下匝道车队 A 的复制动态方程, 如式 (11) 所示。

$$\begin{aligned} \bar{U}_A &= pU_A^c + qU_A^{nc} \\ &= pq(U_1 - U_2 - U_3 + U_4) + p(U_2 - U_4) + q(U_3 - U_4) + U_4 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} f_A(p, q) &= \frac{\partial p}{\partial t} \\ &= p(U_A^c - \bar{U}_A) = p(1-p)(q(U_1 - U_2 - U_3 + U_4) + U_2 - U_4) \end{aligned} \quad (11)$$

同理, 可得目标车道后车 B 的复制动态方程, 用公式表示为:

$$f_B(p, q) = \frac{\partial q}{\partial t} = q(1-q)(p(V_1 - V_3 - V_2 + V_4) + V_3 - V_4) \quad (12)$$

2 演化稳定策略分析

2.1 均衡点的相关计算

本文建立的智能网联卡车车队微分方程组描述了智能网联卡车车队在不同的下匝道换道策略中的传播与演化过程, 根据微分方程的稳定性定理^[8], 对复制动态方程进行稳定性分析, 从而确定演化博弈的稳定性策略。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_A}{\partial p} & \frac{\partial f_A}{\partial q} \\ \frac{\partial f_B}{\partial p} & \frac{\partial f_B}{\partial q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1-2p)(qC_1 + D_1) & p(1-p)C_1 \\ q(1-q)C_2 & (1-2q)(pC_2 + D_2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: C_1 、 C_2 、 D_1 和 D_2 均为参数, 且 $C_1 = U_1 - U_2 - U_3 + U_4$, $D_1 = U_2 - U_4$, $C_2 = V_1 - V_3 - V_2 + V_4$, $D_2 = V_3 - V_4$ 。

行列式:

$$\det(J) = (1-2p)(qC_1 + D_1)(1-2q)(pC_2 + D_2) - [p(1-p)C_1][q(1-q)C_2]$$

迹:

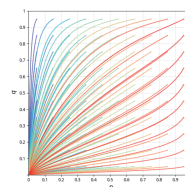
$$\text{tr}(J) = J_{11} + J_{22} = (1-2p)(qC_1 + D_1) + (1-2q)(pC_2 + D_2)$$

令式 (11) 和式 (12) 等于 0, 求得所构建的动态演化博弈局势中存在 5 个均衡点, 分别是 $(0,0)$ 、 $(0,1)$ 、 $(1,0)$ 、 $(1,1)$ 、 (p^*, q^*) 。只有当 p^* 、 q^* 同时落在 $(0,1)$ 区间时, 存在混合策略均衡点, 否则仅存在纯策略均衡点。

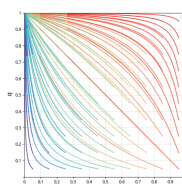
3 灵敏度分析

3.1 初始决策倾向影响

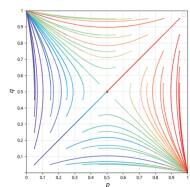
为了分析不同稳定解对应的博弈演化情况, 设 p 和 q 初始值分别取值 0.1、1.0, 通过 Python 进行赋值分析, 结果如图 2 所示。



(a) 稳定点 (0,0)



(b) 稳定点 (0,1)



(c) 稳定点 (1,0)

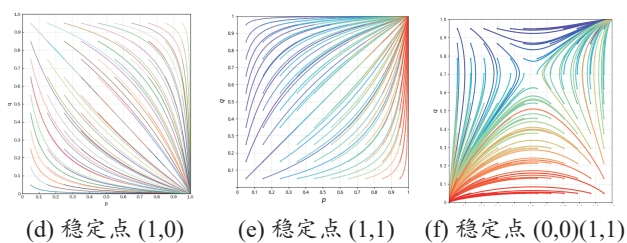


图2 动态博弈演化路径图

图2展示了在不同的初始状态下, (p, q) 随着时间变化的演化路径, 分流区换道博弈局势状态的初始值 (p, q) 可以对应图中某一点位置, 从该点发散的线条表示策略组合随时间的演化过程^[9]。

由图2(f)的博弈演化结果可知, 下匝道车队选择换道的初始比例 p 和协同车辆选择避让的初始比例 q 较小时, 演化博弈的稳定策略为不换道和不避让; 当 p 和 q 较大时, 演化博弈的稳定策略为换道和避让。这也说明不同于其他强制换道场景, 在该场景下所提与出口匝道的距离收益对策略组合 $S_1 = (\text{换道}, \text{避让})$ 有促进作用。

3.2 收益权重影响

设定不同的权重大小计算得到不同初始状态下换道概率 p 和避让概率 q 随时间变化的演化结果, 旨在使得演化结果尽量收敛于策略组合 $S_1 = (\text{换道}, \text{避让})$, 从而获取下匝道智能网联货车车队换道时的最优策略组合。动态仿真生成策略演化轨迹图如图3所示。

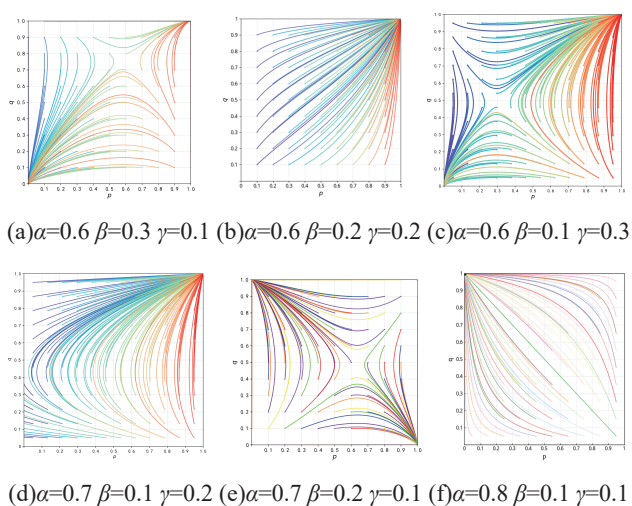


图3 不同权重下换道概率的演化结果

图3(a)~(c)设定安全权重为0.6, 通过调整效率权重与距离收益权重探究换道概率的演化规律。结果显示, 随着距离收益权重的提升, 模型中车辆的距离收益增加, 换道紧迫度随之上升, 车辆换道意愿随之增强, 汇出车辆的策略选择更倾向于换道。但距离收益权重并非越大越优, 从图3(c)的变化趋势可见, 此时距离收益权重最高而效率收益最低, 致使两车出现选择策略 S_4 的现象。

图3(d)和(e)将安全收益权重设为0.7, 由图3(e)可知, 因距离收益权重较小, 距离对综合收益的影响减弱, 车辆换道紧迫度不高, 概率开始向“不换道”方向演化。从图3(f)可观察到, 随着安全收益权重增大, 车辆换道意愿降低, 目标车道后车选择避让策略的意愿上升, 这是一种较稳定的博弈对局, 但并非本实验中的最优行驶策略。由图3(b)可见, 当 $\alpha=0.6$ 、 $\beta=0.2$ 、 $\gamma=0.2$ 时, 博弈对局的概率演化结果均趋向于(换道, 避让), 且演化过程更快速集中, 故选取该组权重值作为仿真实验的输入参数。

3.3 收益差的影响

当均衡点向(0,0)和(1,1)演化时, 为本文研究的协同换道策略, 令 $U_1-U_3=10$, $U_2-U_4=-10$, $V_1-V_2=6$, $V_3-V_4=-6$, 通过Python进行对 p 和 q 赋值分析, 演化结果如图4所示, 初始比例使博弈双方易发生冲突时, 策略演化机制将更有利于保证驾驶安全, 当均衡点最终收敛于(0,0)时, 智能网联货车车队和协同车辆保持原车辆状态运行, 当均衡点最终收敛于(1,1)时, 智能网联货车车队为实现换道做准备, 协同车辆选择避让为智能网联卡车车队换道提供安全换道间距。

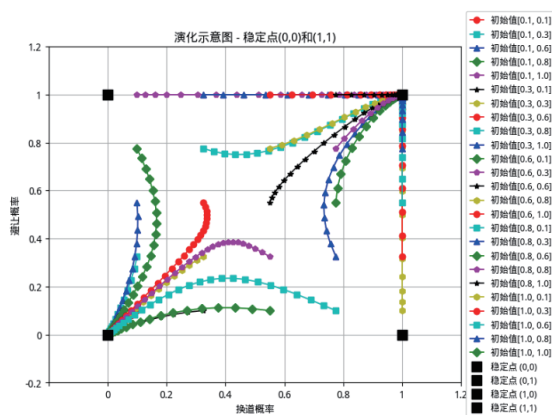


图4 演化示意图—稳定点(0,0) & (1,1)

如图5所示, 当选取初始值为(0.8, 0.3)时, 即A的初始决策倾向于换道而B相对中立, 车辆策略向(1,1)点演化并最终收敛于(换道, 避让)策略。

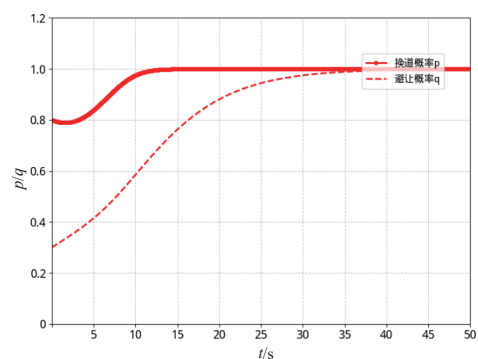


图5 初始状态为(0.8, 0.3)时 p 和 q 的演化路径

为了更加直观地看出不同效应差对演化结果的影响,本文选取(0.8, 0.3)的初始比例为基准,使用控制变量法对效应差进行灵敏度分析。

U_1-U_3 分别取 3、8、13 对演化博弈结果进行模拟仿真,演化结果如图 6(a) 所示。 U_2-U_4 分别取 -3、-8、-13 对演化博弈结果进行模拟仿真,演化结果如图 6(b) 所示。

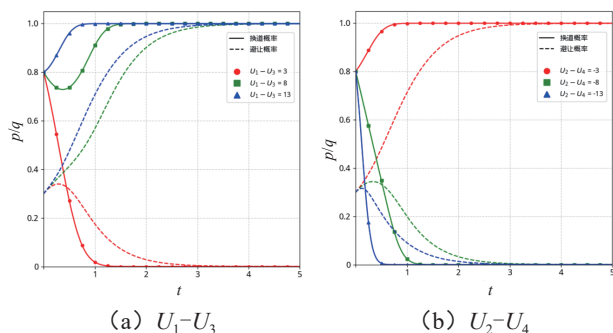


图 6 不同受益差下换道概率的演化结果

当 $U_1-U_3=3$ 时,演化结果收敛于(0, 0);当 $U_1-U_3=8$ 或 13 时,演化结果收敛于(1, 1),说明在 B 避让的情况下, A 选择换道的收益更高,换道策略更具优势。

当 $U_2-U_4=-8$ 或 -13 时,演化结果收敛于(0, 0),当 $U_2-U_4=-3$ 时,演化结果收敛于(1, 1),说明在 B 不避让的情况下,随着 A 选择不换道的收益增高,不换道策略更具优势。

V_1-V_2 分别取 2、6、10 对演化博弈结果进行模拟仿真,演化结果如图 7(a) 所示。 V_3-V_4 分别取 -2、-6、-10 对演化博弈结果进行仿真,演化结果如图 7(b) 。

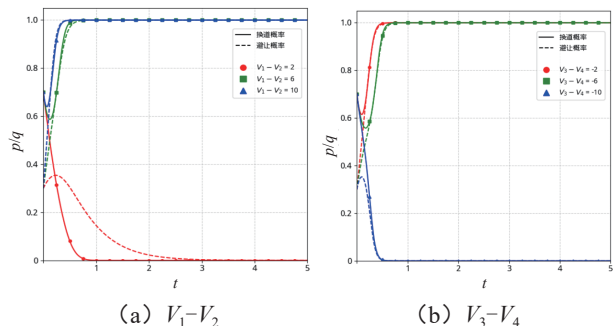


图 7 不同受益差下换道概率的演化结果

当 $V_1-V_2=2$ 时,演化结果收敛于(0, 0),当 $V_1-V_2=6$ 或 10 时,演化结果收敛于(1, 1),说明在 A 换道的情况下, B 选择避让的收益越高,避让策略越有优势,该差距影响策略 S_1 的稳定性。

当 $V_3-V_4=-10$ 时,演化结果收敛于(0, 0),当 $V_3-V_4=-2$ 或 -6 时,演化结果收敛于(1, 1),说明在 A 不换道的情况下, B 选择不避让的收益越高,不避让策略越有优势。

4 结论

(1) 通过对均衡点的稳定性分析,该博弈系统有两种演化稳定策略即(换道,让行)和(不换道,不让行)、两

种不稳定演化策略(换道,不让行)和(不换道,让行)。其中给博弈双方造成较大安全风险的(换道,不让路)策略永远不可能是稳定点。

(2) 设定智能网联货车车队的不同初始状态并分析演化结果,发现决策收敛方向受初始策略倾向的影响。

(3) 设定不同的权重大小计算得到不同初始状态下换道概率 p 和避让概率 q 随时间变化的演化结果,确定了初始状态(0.8, 0.3)时智能网联环境下货车车队的最优权重配置为 $\alpha=0.6$ 、 $\beta=0.2$ 、 $\gamma=0.2$ 。

(4) 本研究在车辆决策与控制过程、车辆动态交互机制的细节探究上尚有欠缺,且后续建模需进一步纳入节能效益、经济效益等因素,以更全面地分析其对下匝道货车车队换道博弈行为的影响。

参考文献:

- [1] 董长印. 高速公路智能网联汽车下匝道换道控制与评价研究[D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [2] 王振. 面向混合交通流的智能网联汽车换道策略研究与实现[D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [3] 刘迪. 高速公路多车协同驾驶控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- [4] ZHAO C, LI L, LI J W, et al. The impact of truck platoons on the traffic dynamics around off-ramp regions[J]. IEEE access, 2021, 9:57010-57019.
- [5] 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.
- [6] LI M, LI Z B, ZHOU Y, et al. A cooperative energy efficient truck platoon lane-changing model preventing platoon decoupling in a mixed traffic environment[J]. Journal of intelligent transportation systems, 2022, 28(20): 174-188.
- [7] 牛圣平. 智能网联环境下出口匝道分流区车辆协同换道方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [8] 吴付科, 张维海. 随机微分方程的稳定性理论: 方法概述[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2017, 9(3):274-283.
- [9] 戴守晨, 曲大义, 王其坤, 等. 信号交叉口上游路段网联车换道博弈特性及模型[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(10): 4408-4416.

【作者简介】

刘凤华(2000—), 女, 河南周口人, 硕士研究生, 研究方向: 交通流模型、高速公路交通管控, email: liufenghua0621@163.com。

(收稿日期: 2025-08-25 修回日期: 2026-03-23)