

智能网联环境下改进的自主换道决策模型

洪博文, 杜胜品

武汉科技大学汽车与交通工程学院, 湖北 武汉

收稿日期: 2024年11月2日; 录用日期: 2024年12月10日; 发布日期: 2024年12月16日

摘要

为了提高城市道路中的运行效率, 避免频繁的换道, 减少交通拥堵和交通事故的发生, 改进了传统的MOBIL自主性换道决策模型, 并与相应的IDM跟驰模型结合。在智能网联环境中考虑不同车辆类型换道后对原车道与目标车道多辆后随车影响程度的不同, 加入不同车辆类型换算系数并构建权重因子表达式。利用MATLAB软件进行数值仿真实验, 通过定量分析将改进的自主换道决策模型与传统换道模型进行比较。实验结果表明: 与传统模型相比, 加权MOBIL换道决策模型能够减少交通流延误、降低车辆换道次数。这表明, 改进的MOBIL自主换道决策模型能提高交通流的运行效率和稳定性。

关键词

MOBIL模型, 车辆类型, 跟驰模型, 网联自动驾驶, 换道

Improved Autonomous Lane-Change Decision Model in Intelligent Connected Environments

Bowen Hong, Shengpin Du

School of Automotive and Traffic Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan Hubei

Received: Nov. 2nd, 2024; accepted: Dec. 10th, 2024; published: Dec. 16th, 2024

Abstract

To improve the operational efficiency on urban roads, avoid frequent lane changes, reduce traffic congestion and the occurrence of traffic accidents, the traditional MOBIL lane-changing decision-making model has been improved and integrated with the corresponding Intelligent Driver Model (IDM) car-following model. In the intelligent connected environment, considering the different impacts of various vehicle types on the original and target lanes after changing lanes on multiple

following vehicles, different vehicle type conversion coefficients are added and a weight factor expression is constructed. Numerical simulation experiments were conducted using MATLAB software, and the improved autonomous lane-changing decision model was compared with the traditional lane-changing model through quantitative analysis. The experimental results show that compared with the traditional model, the weighted MOBIL lane-changing decision model can reduce traffic flow delays and decrease the number of vehicle lane changes. This indicates that the improved MOBIL autonomous lane-changing decision model can enhance the operational efficiency and stability of traffic flow.

Keywords

MOBIL Model, Vehicle Type, Following Model, Connected Automatic Driving, Lane Change

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着传感技术、车辆技术和互联网技术的快速发展,网联环境下的自动驾驶车辆将成为未来交通发展的焦点和趋势。实行换道时需要对两条甚至多条道路上的交通流状态进行判断,并且控制着车辆的纵向运动状态。频繁的换道容易导致交通流混乱和行车延误。智能网联环境下相较于人工驾驶环境更容易获得周围车辆的信息,传统的人工驾驶模型在车辆和互联网技术的不断发展下将不适用于智能网联环境,因此为了提高公路的运行效率,减少交通拥堵和交通事故的发生,研究网联自动驾驶环境下的公路换道模型有着至关重要的意义。

网联环境下自动驾驶车辆换道时不能只考虑对自身的影响,而是需要考虑换道后对原车道及目标车道前后多辆车的影响,从个体最优转变为整体最优。KESTINGA [1]提出一种基于激励准则和安全准则的换道模型 MOBIL (minimizing overall braking induced by lane changes),该模型以加速度作为效用函数,整体制动最小化为换道准则;MONTEILJ 等[2]通过分析和仿真研究了车车协作对交通拥堵发生的影响并利用新一代仿真场数据集对全速度差跟车模型进行标定并与 MOBIL 模型结合,实现了移动变道模型;Turri, Valerio 等[3]提出了一种用于重型车辆队列的两层控制体系结构,旨在安全高效地协调队列中的车辆。这些层分别负责包含道路地形的预览信息和车辆的实时控制,并建立分布式模型预测控制框架,实现车辆的实时控制提高运行安全和效率;秦严严等[4]基于人工驾驶环境和智能网联驾驶环境下混合的交通情况,提出了混合环境下不同比例的元胞交通流传输模型;林彦涛等[5]基于北京城市快速路的大环境下,通过分析交通需求、交通组成等分别引导不同车辆类型进入不同路段来改善城市快速路的交通现状;康海洋等[6]基于车间距和车速的平衡对 MOBIL 模型进行改进,使其具备更好的快速性、稳定性和舒适度更适合后续的换道场景;柳祖鹏等[7]在 MOBIL 模型的基础上利用动态博弈分析建立自主换道决策模型,并通过逆向归纳法求解,使其换道次数和整体制动幅度明显减少;丁婉婷[8]在智能网联环境下改进传统的 MOBIL 模型,考虑了目标车在换道时对原车道和目标车道上所有后随车的影响;聂建强[9]在智能网联驾驶环境下,提出了基于 MOBIL 模型改进的单车期望换道决策模型,考虑了车辆换道后对多辆后随车的影响,但是该研究对多辆后随车的影响是均匀的,且没有考虑不同类型车辆换道对后随车的影响,不符合实际情况。

因此,对于以上提出的问题,本文在智能网联环境下传统换道决策模型基础上,考虑不同类型车辆

换道后对原车道及目标车道后随车的不同影响, 通过不同车辆类型的换算系数和后随车与目标车的相对运动状态关系, 对 MOBIL 模型及相结合的 IDM 模型进行改进, 从而减少交通流的延误、降低车辆换道次数, 更加实际的模拟换道行为。

2. 换道决策模型

2.1. 换道模型前提假设与场景设定

为了便于研究, 场景设定为全智能网联环境下的城市路段。并提出以下假设: 1) 处于全智能网联环境下不考虑信息传递及接收的延误。2) 不考虑传递或接收信息时受到干扰产生错误。3) 不考虑横向速度以及横向加速度。

图 1 是智能网联车辆的换道驾驶场景, 其中, V 是有换道意图的目标车辆, 所在车道为原车道; LV_i (Leading Vehicle) 为目标车辆的第 i 辆前导车; FV_i (Following Vehicle) 为目标车辆的第 i 辆后随车; 目标车辆 V 要换道的车道为目标车道; 目标车辆换入的间隙称为目标间隙; HLV_i 为目标车道的第 i 辆前导车; HFV_i 为目标车道的第 i 辆后随车。

目前, DSRC (Dedicated Short Range Communications, 专用短程通信技术) 是车-车、车-路侧设施通信的主流技术之一, 在全智能网联环境下, DSRC 的通信距离最大可达到 300 m。

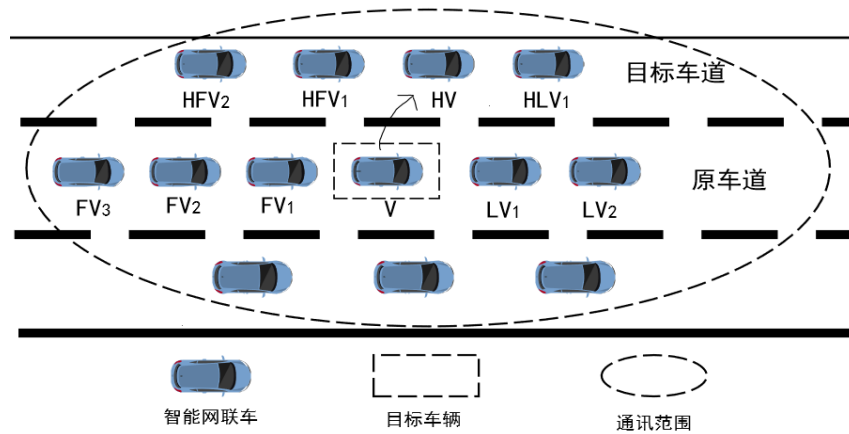


Figure 1. Vehicle lane changing scenarios in intelligent connected environments

图 1. 智能网联环境下车辆换道场景

2.2. 确定模型中的后随车数量范围

模型中的后随车应都能在高速行驶的过程中与目标车保持无误、通畅的信息通信。假设在原车道上有 n_c 辆车在目标车 V 的通讯范围内, 记为集合 N_c ; 在目标车道上有 n_t 辆车在目标车 V 的通讯范围内, 记为集合 N_t 。则通讯范围内的车辆和目标车辆的位置关系应满足下式:

$$\forall FV_i \in N_c, 0 \leq \|X_V - X_{FVi}\| \leq L$$

$$\forall HFV_j \in N_t, 0 \leq \|X_V - X_{HFVj}\| \leq L$$

式中: X_V ——目标车辆的当前纵向位置(m);

X_{FVi} ——在原车道上, 目标车辆通讯范围内的第 i 辆后随车的纵向位置(m);

X_{HFVj} ——在目标车道上, 目标车辆通讯范围内的第 j 辆后随车的纵向位置(m);

L -DSRC 稳定通讯距离, 文中取 300 m;

综上, 本文所研究的目标车道以及原车道通讯范围内的车在 DSRC 范围内均可与目标车进行及时、稳定、无误的信息共享。

3. 改进 MOBIL 模型

MOBIL 模型既适用于人工驾驶环境也适用于智能网联环境, 并且可以与跟驰模型相结合, 更好的反应换道决策场景。在目前的研究中, MOBIL 模型可以很好的反应目标车辆换道对后随车的影响, 但结合实际情况, 在城市等一系列的道路环境中有许多不同类型的车辆, 它们换道时因为车距或者视野等因素对于后随车的影响是不同的, 而且距离目标车辆不同位置的后随车受到的影响也不尽相同, 因此, 本文研究不同类型车辆换道时对于不同位置后随车的影响, 使其更加符合实际情况。

3.1. 传统的 MOBIL 模型

传统的 MOBIL 换道模型与其他模型类似, 在评估合理的换道行为之前, 先确保换道环境的安全, 因此模型的第一个准则便是安全准则, 用来评估目标车辆换道时是否安全, 是否会对其他车辆产生恶劣的影响从而影响交通流, 导致交通事故。第二个准则是评估目标车辆换道的收益情况, 评估在换道后是否可以有更加自由的驾驶空间, 或者可以更快的驾驶以节约时间成本等。且 MOBIL 模型不仅考虑了目标车辆本身换道后的收益, 也考虑了目标车辆换道后对与局部交通流的影响。因此该模型包括安全准则模型和激励准则模型。

3.1.1. 安全准则模型

安全准则模型如下:

$$\begin{aligned}\tilde{a}_v &\geq -b_{safe} \\ \tilde{a}_{HFV} &\geq -b_{safe}\end{aligned}$$

式中, $\tilde{a}_v$ 为目标车辆换道后的加速度, m/s^2 ; $\tilde{a}_{HFV}$ 为目标车换道后在目标车道上后随车的加速度, m/s^2 ; b_{safe} 为最大安全减速度, m/s^2 。

3.1.2. 激励准则模型

激励准则模型如下:

$$U_v = \tilde{a}_v - a_v + \rho[(\tilde{a}_{HFV} - a_{HFV}) + (\tilde{a}_{FV} - a_{FV})] > \Delta a_{th}$$

式中: U_v ——目标车辆的换道总收益;

a_v ——目标车辆当前加速度, m/s^2 ;

a_{FV} ——原车道后随车的当前加速度, m/s^2 ;

$\tilde{a}_{HFV}$ ——目标车辆换道后目标车道后随车的加速度, m/s^2 ;

$\tilde{a}_{FV}$ ——目标车辆换道后原车道后随车的加速度, m/s^2 ;

ρ ——礼让系数;

Δa_{th} ——换道效益阈值, m/s^2 。

3.1.3. IDM 跟驰模型及改进

MOBIL 模型是以加速度做为输入变量, 利用目标车换道前后, 目标车和周围车辆的加速度变化做出换道决策, 因此需要一个跟驰模型来准确的预估目标车和周围车辆的加速度变化。该模型必须适用于智能网联环境下车辆的跟驰行为, 且也以加速度为表现形式, 因此选择 IDM 跟驰模型。

跟驰模型如下:

$$a_V = a_{\max} \left[1 - \left(\frac{v_V}{v_0} \right)^\delta - \left(\frac{S^*(v_V, \Delta v_V)}{S_V} \right)^2 \right]$$

式中: a_V ——目标车辆的加速度, m/s^2 ;
 v_V ——目标车辆的速度, m/s^2 ;
 S_V ——目标车辆的实际跟车距离, m ;
 Δv_V ——目标车辆与前导车的速度差, m/s^2 ;
 $a_{\max}$ ——目标车辆最大加速度, m/s^2 ;
 δ ——加速度指数;
 v_0 ——目标车辆的期望速度, m/s ;
 上式中的 $S^*(v_V, \Delta v_V)$ 为期望跟车距离, 表达式如下:

$$S^*(v_V, \Delta v_V) = S_0 + v_V T + \frac{v_V \Delta v_V}{2\sqrt{a_{\max} b}}$$

式中: S_0 ——静止安全距离参数;
 T ——安全车头时距, s ;
 b ——车辆的舒适减速度, m/s^2 ;
 此外, 还有目标车辆与前导车的车间距与速度差如下:

$$S_V = \|X_{V-1} - X_V\| - l_V$$

$$\Delta v_V = v_V - v_{V-1}$$

式中: X_V ——目标车辆的纵向位置, m ;
 X_{V-1} ——目标车辆前导车的纵向位置, m ;
 l_V ——目标车辆的长度, m ;
 v_{V-1} ——目标车辆前导车的速度, m/s ;

为了使 IDM 模型可以适用于智能网联环境并且更加符合实际情况, 对模型进行改进, 考虑三辆前导车对不同类型的目标车跟驰的影响, 不同类型车辆换算系数参考《城市道路交通规划设计规范》[10]如下表 1。

Table 1. Conversion factors for different vehicle types

表 1. 不同车辆类型换算系数

车辆类型	换算系数
小客车或小于 3 t 的货车	1.0
旅行车	1.2
大客车或小于 9 t 的货车	2.0
9 t~15 t 货车	3.0

$$a_V = f_{IDM} \left(v_V, \sum_{k=0}^2 m_k S_{V-k}, \sum_{k=0}^2 m_k \Delta v_{V-k} \right)$$

$$S_{V-k} = \|X_{V-(k+1)} - X_V\| - l_{Vg}$$

$$\Delta v_{V-k} = v_V - v_{V-(k+1)}$$

式中: $X_{V-(k+1)}$ 表示目标车辆 V 的第 $k+1$ 辆前导车的纵向位置, m ;

$v_{V-(k+1)}$ 表示目标车辆 V 的第 $k+1$ 辆前导车的速度, m/s ;

由于场景设定在城市道路, 车辆类型仅考虑标准小客车、旅行车、大客车和货车, 为了方便后续仿真标准车取长度为 4 m , 则 l_{Vg} 有不同的系数分别为 1.2 , 2.0 及 3.0 。

权重系数 m_k 由车辆的运动相近程度和信息可靠度构成如下:

$$m_k = \rho_k T_k$$

式中: ρ_k 表示目标车辆与其 $k+1$ 辆前导车的运动相近程度;

T_k 表示目标车辆与其 $k+1$ 辆前导车的信息可靠程度。

智能网联环境下不考虑信息及传递产生的误差, 因此信息可靠度 $T_k = 1$ 。

$$\sigma_k = \frac{|\Delta v_{V+k}|}{\sqrt{S_{V+k}}}, \rho_k = \frac{\sigma_k}{\sum_{k=0}^2 \sigma_k}$$

运动相近程度的基本思想是: 与其前导车的距离越近、相对速度差越大的车辆权重值越高。

3.2. 权重因子的设置

车辆在换道后会对后随车产生影响, 但是由于不同后随车与目标车的距离问题和速度问题, 产生的影响是不同的, 因此要设定一个权重系数来体现对后随车的不同影响。根据上面提到的跟驰原理, 在不考虑横向速度影响的情况下, 目标车辆对后随车的影响因素主要为相对速度差和车间距, 相对速度差越大影响越大, 成正比, 车间距越小影响越大, 成反比。这两部分可以统称为车辆运动的相近程度, 因此权重因子就由运动的相近程度和信息可靠度组成。如下:

在原车道上:

$$S_{Vi} = \|X_{V(i+1)} - X_V\| - l_{Vg}$$

$$\Delta v_{Vi} = v_V - v_{V(i+1)}$$

$$h_i = \beta_i T_i$$

$$\sigma_i = \frac{|\Delta v_{Vi}|}{\sqrt{S_{Vi}}}$$

$$\beta_i = \frac{\sigma_i}{\sum_{i=0}^{n_c} \sigma_i}$$

式中: $X_{V(i+1)}$ 表示目标车辆 V 的第 $i+1$ 辆后随车的纵向位置;

$v_{V(i+1)}$ 表示目标车辆 V 的第 $i+1$ 辆后随车的速度;

β_i 表示目标车辆与第 $i+1$ 辆后随车的运动相近程度;

T_i 表示目标车辆与第 $i+1$ 辆后随车的信息可靠程度;

h_i 为原车道内对车辆影响的权重;

目标车道同理, i 表示原车道, j 表示目标车道。

n_c 为在智能网联环境下原车道内稳定通讯距离里的车辆数。

n_l 为在智能网联环境下目标车道内稳定通讯距离里的车辆数。

3.3. 完整的换道决策模型

考虑了城市道路中不同类型车辆换道时对后随车的不同影响程度, 结合改进的 MOBIL 模型与 IDM 模型整合成完整模型。

$$a_V = f_{IDM} \left(v_V, \sum_{k=0}^2 m_k s_{V-k}, \sum_{j=0}^2 m_k \Delta v_{V-k} \right)$$

$$\tilde{a}_V, \tilde{a}_{HFVj} \geq -b_{safe}$$

$$U_V = \tilde{a}_V - a_V + \rho \left[\sum_{i=1}^{n_c} h_i (\tilde{a}_{FVi} - a_{FVi}) + \sum_{j=1}^{n_h} h_j (\tilde{a}_{HFVj} - a_{HFVj}) \right] > \Delta a_{th}$$

加速度阈值可以代表车辆在换道过程中期望达到的最小加速度增益, 如果预计通过换道能够得到的加速度收益超过了这个阈值, 那么车辆可能会决定进行换道, 以期获得更好的行驶性能和效率。

4. 仿真验证

本文基于 MATLAB 软件进行仿真实验, 构建城市基本路段为仿真实验场景, 对不同模型的组合分别进行分析和比较。

4.1. 仿真参数的设置

模拟城市道路的仿真实验场景, 应用 MATLAB 软件进行仿真实验, 设置四个换道模型和跟驰模型的不同组合来模拟智能网联车的换道场景。组合一: 传统的人工换道决策模型(MOBIL)和传统的跟驰模型(IDM); 组合二: 传统的人工换道决策模型和改进的跟驰模型(改进的 IDM 模型); 组合三: 改进的换道决策模型(改进的 MOBIL 模型)和传统的跟驰模型(IDM); 组合四: 改进的换道决策模型(改进的 MOBIL 模型)和改进的跟驰模型(改进的 IDM 模型)。

在进行仿真时, 如果车辆的速度都一致, 则会导致交通流形成固定的运动状态。结合城市道路中, 正常行驶的车辆速度大约为 60 km/h, 在拥堵状态或车流量较大时可能会降到 20 km/h 左右, 为了更加符合实际情况, 车辆的速度要有不均匀性, 范围设定在 20%。因此将第一类快车的期望速度设置为 17 m/s, 均匀分布在 14 m/s 到 20 m/s。将第二类慢车的期望速度设置为 5 m/s, 均匀分布在 3 m/s 到 7 m/s, 两类车辆的比例为 8: 2。为了研究四个组合模型对城市道路不同时间段交通流的影响, 设置输入的交通流量分别对应于城市道路的四个时间段: 深夜时段: 300 辆/h、夜间时段: 600 辆/h、平峰时段: 1200 辆/h 和早晚高峰时段 1800 辆/h。

车辆的最大安全减速度为 9 m/s², 但考虑到城市道路车辆速度普遍不快, 而且过大的减速度也会对行车舒适性产生很大影响, 因此设定安全减速度 b_{safe} 为 4 m/s²。礼貌系数 $\rho \in [0, 1]$ 。礼貌系数越大表示利他主义越强, 但安全驾驶要兼顾自身和其他车辆, 因此选取礼貌系数为 0.1。其他的参数设置参考现有文献[11]-[13]如下表 2。

Table 2. Simulation environment parameter settings

表 2. 仿真环境参数设置

参数	取值	参数	取值
仿真时长	300 s	更新时间步长	0.1 s
a_{max} (最大加速度)	1.5 m/s ²	δ (加速度指数)	4
S_0 (静止安全距离)	2.0 m	T (安全车头时距)	1.2 s

续表

b (车辆舒适减速度)	2.0 m/s ²	l_v (标准车长度)	4.0 m
ρ (礼貌系数)	0.1	Δa_{th} (换道效益阈值)	0.3 m/s ²
b_{safe} (最大安全减速度)	4 m/s ²		

4.2. 仿真结果分析

在 MATLAB 中实现 MOBIL 和 IDM 模型，通过定义换道决策逻辑(模型的换道总收益和换道效益阈值的比较)和周围车辆的交互规则，设置模拟的交通场景，运行模拟，让车辆在模拟环境中行驶，触发换道事件，分析模拟结果，计算换道导致的延误和换道次数等。

4.2.1. 延误

图 2 是在不同车流量下各个组合的总延误。从图 2 可以看出：在车流量为 300 辆/h 和 600 辆/h 时，行车较为顺畅，延误很小，因此组合二、三、四模型与组合一模型相对比延误有所降低但不明显。当车流量从 600 辆/h 增加到 1200 辆/h 和 1800 辆/h 时，延误呈上升趋势明显增加。在车流量达到 1800 辆/h 时，此时道路为拥堵状态，已接近道路最大通行能力，延误达到最大。当车流量从 300 辆/h 增加到 1800 辆/h 时，组合一的总延误从 1049 s 变化到 21,566 s，增加了 20,517 s；但组合四的总延误从 710 s 变化到 14,264 s，增加了 13,554 s，这表明改进的换道决策模型在车流量增加的情况下可以有效减少延误时间的增加。

在城市道路不同时间段对应的车流量下，组合二、组合三相较于组合一的延误均有所下降，表明单一改进的 MOBIL 模型或 IDM 模型相较于传统的换道决策模型可以有效的减少行车延误。在 300 辆/h 时，组合四相较于组合一延误下降了 33%；在 600 辆/h 时，组合四相较于组合一延误下降 36%；在 1200 辆/h 时，延误显著下降了 48%；在 1800 辆/h 时，延误下降了 31%，这表明改进的换道决策模型相较于传统的换道模型可以较大幅度的减少行车延误，并且当车流量为 1200 辆/h 时延误减少的最明显，说明改进的换道决策模型在车流量较大的情况下效果更好。

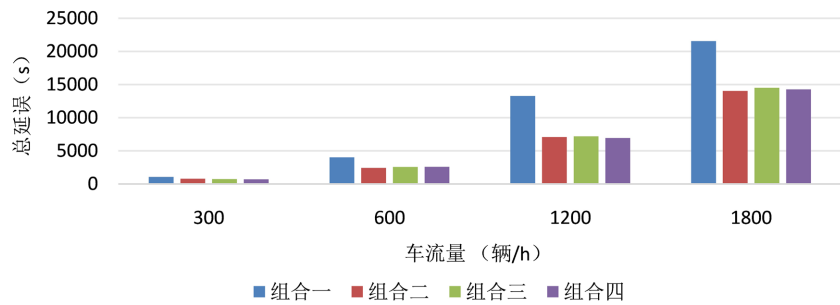


Figure 2. Total delay under different combinations

图 2. 不同组合下的总延误

4.2.2. 换道次数

换道次数也是体现交通流效率和安全性的一个重要指标，频繁的换道会扰乱交通秩序，危害公共安全。图 3 是在不同城市道路时间段对应的车流量下不同组合的换道次数统计图。从图中可以看出：当车流量为 300 辆/h 时，行车很顺畅，换道次数很少，组合一到四的换道次数都在 25 以下。当车流量从 600 辆/h 增加到 1200 辆/h 时，此时交通流由自由流向拥堵流变化，组合一的换道次数由 87 次显著增加到 278

次, 在 1200 辆/h 时达到顶峰。当车流量达到 1800 辆/h 时, 由于此时道路已经达到拥堵状态, 换道次数相较于 1200 辆/h 时反而呈下降趋势, 为 146 次。

在车流量为 300 辆/h 时, 组合二、三模型相较于组合一模型换道次数略有增加, 表明在自由流状态下, 单一改进的 MOBIL 模型或 IDM 模型相较于传统的换道模型效果不明显, 但组合四模型相较于组合一模型下降了 2 次; 在车流量为 600 辆/h 时, 组合四模型相较于组合一模型下降了 39 次; 在车流量为 1200 辆/h 时, 组合四模型相较于组合一模型下降了 146 次; 在车流量为 1800 辆/h 时, 组合四模型相较于组合一模型下降了 82 次。且组合四模型对比组合二和组合三模型在不同车流量下的换道次数都是最少的, 这表明改进的换道决策模型可以显著的减少车辆的换道次数, 提高交通流的均质性和稳定性, 从而提高行车安全。当车流量为 1200 辆/h 和 1800 辆/h 时, 此时道路为平峰时段和早晚高峰时段, 组合四模型相较于组合一模型的换道次数均在 50% 以下, 表明改进的换道决策模型在车流量较大的情况下效果更好。

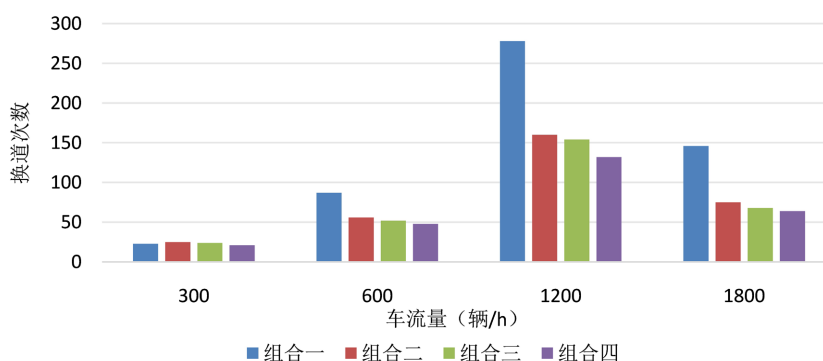


Figure 3. Number of lane changes in different combinations
图 3. 不同组合下的车辆换道次数

5. 结语

本文基于城市道路在智能网联环境下对车辆的换道模型进行分析和改进, 考虑城市道路中不同类型车辆换道时对不同位置的后随车产生不同影响, 将不同车辆类型的换算系数和对后随车影响的权重加入到模型中进行改进, 最后利用 MATLAB 进行仿真实验。在仿真时首先选取延误和换道次数为评价指标。其次, 对仿真情景和参数进行分析和设定。最后将传统模型和改进的模型分成四组进行仿真, 表明在城市道路不同时间段的交通状态下, 改进的换道决策模型均可以降低车辆延误、减少车辆换道次数, 从而提高交通流效率和稳定性, 节省出行时间。且改进的换道决策模型在城市道路车流量较大的情况下效果更好。

由于本文是在智能网联环境下进行讨论, 涉及的车辆数、车道数较少, 实用性和适用性均有限, 后续研究可以进一步对不同环境和复杂的车辆环境进行分析改进, 以提高模型的适用性和广泛性。

参考文献

- [1] Kesting, A., Treiber, M. and Helbing, D. (2007) General Lane-Changing Model MOBIL for Car-Following Models. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, **1999**, 86-94. <https://doi.org/10.3141/1999-10>
- [2] Monteil, J., Nantes, A., Billot, R., Sau, J. and El Faouzi, N. (2014) Microscopic Cooperative Traffic Flow: Calibration and Simulation Based on a Next Generation Simulation Dataset. *IET Intelligent Transport Systems*, **8**, 519-525. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2013.0035>

-
- [3] Turri, V., Besselink, B. and Johansson, K.H. (2017) Cooperative Look-Ahead Control for Fuel-Efficient and Safe Heavy-Duty Vehicle Platooning. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **25**, 12-28.
<https://doi.org/10.1109/tcst.2016.2542044>
 - [4] 秦严严, 张健, 陈凌志, 等. 手动-自动驾驶混合交通流元胞传输模型[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(2): 229-238.
 - [5] 林彦涛, 韩凤春. 城市快速路车辆换道影响仿真分析及策略研究[J]. 中国人民公安大学学报(自然科学版), 2022, 28(2): 51-57.
 - [6] 康海洋. 自动驾驶车辆高速公路换道模型研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023.
 - [7] 柳祖鹏, 孟林秀, 何雅琴. 智能网联环境下车辆自主换道决策模型与仿真[J]. 交通运输研究, 2023, 9(2): 12-21.
 - [8] 丁婉婷. 智能网联汽车高速公路自主性换道决策模型研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
 - [9] 聂建强. 高速公路车辆自主性换道行为建模研究[D]: [博士学位论文]. 南京: 东南大学, 2017.
 - [10] 中华人民共和国建设部. GB50220-95 城市道路交通规划设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 1995.
 - [11] Nie, J., Wan, X., Zhang, J., et al. (2017) Modelling of Vehicle Interaction Behavior during Discretionary Lane-Changing Preparation Process on Freeway. *Journal of Southeast University*, **34**, 524-531.
 - [12] Nie, J., Zhang, J., Wan, X., et al. (2016) Modeling of Decision-Making Behavior for Discretionary Lane-Changing Execution. 2016 *IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, Rio de Janeiro, 1-4 November 2016, 707-712.
 - [13] 丁洁云, 党睿娜, 王建强, 等. 驾驶人换道决策分析及意图识别算法设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2015(7): 769-774.