

# 基于虚拟车道线的智能车辆换道轨迹规划方法\*

郭俊超 邵金菊 袁俊凯 韩文祥 高松

(山东理工大学, 淄博 255000)

**【摘要】**为实现智能车在无车道线或车道线不清晰的道路环境下的自主换道,提出一种基于虚拟车道线的换道轨迹规划方法。首先,通过构建虚拟车道线将道路划分成与主车朝向平行的多条车道,通过无碰撞换道最小航向角确定最佳车道。其次,根据当前车道和目标车道平均车速确定换道终点的状态,利用五次多项式并结合车辆运动学和动力学分析生成换道轨迹。最后,将所提出的算法加入自动驾驶车辆的智能规划决策模块中进行仿真和硬件在环测试,结果表明,该方法实现了无车道线环境下的自主换道功能,可提高车辆在复杂交通环境下行驶的安全性和行车效率。

**关键词:**虚拟车道线 自主换道 轨迹规划 结构化道路

**中图分类号:**U461.6 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19620/j.cnki.1000-3703.20211169

## Lane Change Trajectory Planning Method of Intelligent Vehicle Based on Virtual Lane

Guo Junchao, Shao Jinju, Yuan Junkai, Han Wenxiang, Gao Song

(Shandong University of Technology, Zibo 255000)

**【Abstract】**To make autonomous lane change for intelligent vehicles in the situations with no lane or unclear lane, this paper proposed a lane change trajectory planning method based on virtual lane lines. Firstly, a virtual lane was constructed to divide the road into lanes parallel to the vehicle orientation, the best lane was determined according to the minimum heading angle of collision-free lane change. Secondly, the lane change end state was determined according to the average vehicle speed of the current lane and the target lane. The lane change trajectory was generated using the quintic polynomial combined with vehicle kinematics and dynamics. The path planning algorithm proposed was added to the intelligent planning decision-making module of the intelligent vehicle for simulation and hardware-in-loop test. The results show that the method realizes the function of autonomous lane changing in the situations without lane and improve the safety and driving efficiency of the vehicle in complex traffic environment.

**Key words:** Virtual lane, Autonomous lane change, Trajectory planning, Structured road

**【引用格式】**郭俊超,邵金菊,袁俊凯,等.基于虚拟车道线的智能车辆换道轨迹规划方法[J].汽车技术,2023(11):19-26.

GUO J C, SHAO J J, YUAN J K, et al. Lane Change Trajectory Planning Method of Intelligent Vehicle Based on Virtual Lane [J]. Automobile Technology, 2023(11): 19-26.

## 1 前言

复杂交通环境下的智能车辆自主换道是自动驾驶领域的研究热点和难点之一。高效平稳的换道行为可在很大程度上降低交通事故发生概率并减轻驾驶员的驾驶强度,对道路交通的流通性和驾驶安全性均有重要影响。

目前,针对具有明显车道线的结构化道路的路径规

划问题已经基本解决,主要轨迹规划方法包括基于数学优化的方法<sup>[1-3]</sup>、基于采样的方法<sup>[4-6]</sup>和基于曲线拟合的方法<sup>[7-9]</sup>。在车道线不清晰或无车道线的道路条件下,合理的换道轨迹规划是相对棘手的问题。

针对上述车道线不清晰或无车道线的情况,目前主要采取短时车道保持策略或根据道路宽度进行轨迹规划。刘李漫等<sup>[10]</sup>提出一种基于虚拟车道线的车道偏离预警系统,当车道线检测不准确时,可以生成虚拟车道

\*基金项目:山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010911)。

通讯作者:邵金菊(1979—),女,山东淄博人,副教授,工学博士,主要研究方向为新能源汽车能量管理,shaojinju@sdut.edu.cn。

线,提供车道偏离预警能力。Li等<sup>[11]</sup>提出了在无车道边界、路锥改变车道、停放车辆遮挡车道标记场景中,生成虚拟道路边界完成车道跟踪的方法。宗芳等<sup>[12]</sup>提出一种基于道路横断面自动划分车道线的方法,解决了自动驾驶汽车在无车道线路段行驶时轨迹规划的问题。

本文针对车道线不清晰或无车道线的情况,提出一种基于虚拟车道线的动态环境下换道轨迹生成方法:根据环境中的车辆信息生成虚拟车道线,为自动驾驶车辆自动划分车道线,确定行驶航向;在虚拟车道内选择目标车道,利用五次多项式生成换道轨迹,同时对多项式参数进行约束,保证换道过程的舒适性和安全性。最后,将所提出的路径规划算法加入自动驾驶车辆的智能规划决策模块中进行仿真和硬件在环测试。

## 2 换道场景定义

车辆换道过程中,既要考虑主车的运动状态,又要考虑其他交通参与者的运动状态以及当前行驶道路的边界条件。

定义换道场景如图1所示。 $A$ 、 $B$ 分别为换道车辆的初始位置和目標位置,二者间的连线表示生成的换道轨迹。以换道车辆(主车)运动方向为 $x$ 轴、垂直方向为 $y$ 轴,以主车在换道起始时刻的后轴中心为原点建立坐标系。其他车辆为道路中的障碍车辆。交通环境是动态变化的,在主车换道过程中,周边车辆的车速、距离等信息可通过车载传感器测得。

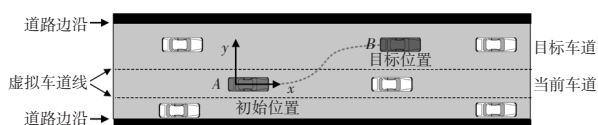


图1 换道场景示意

## 3 虚拟车道生成方法

虚拟车道线将车辆所处环境划分成与车辆朝向平行的多条车道,根据车道宽度、车辆的无碰撞距离、最小换道角度等约束条件选择无碰撞的最佳目标车道,用于引导车辆进行换道操作。

### 3.1 碰撞检测方法

在车辆创建虚拟车道线及换道的过程中,为避免碰撞,主车需要时刻与周边车辆保持一定的安全距离。通过建立车辆避障模型,结合最小碰撞距离 $R$ 实现车辆避障。连接车辆后轴中心 $P_1$ 和前轴中心 $P_2$ ,建立直线车辆模型,如图2所示。分别以 $P_1$ 、 $P_2$ 为圆心,最小碰撞距离 $R$ 为半径,将直线车辆模型膨胀为由圆弧和直线组成的图形。家用汽车宽度通常为1.8~1.9 m,为满足最窄车道

宽度要求,本文设 $R=1.0$  m。

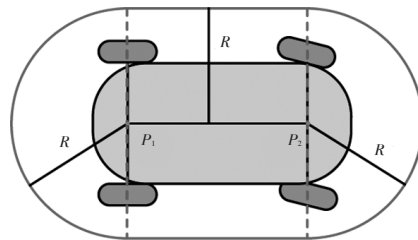


图2 车辆避障模型

### 3.2 虚拟车道构建方法

虚拟车道依据目标航向和主车与障碍车辆的最大距离构建。通过建立车辆避障模型,可将障碍物从世界坐标系转换到车体坐标系。设第 $k$ 条车道的参数包括车道宽度 $w(k)$ 、车辆的无碰撞距离 $d(k)$ 和换道最小角度 $a(k)$ 。其中: $d(k)$ 指主车在与障碍车辆发生碰撞前,从当前位置沿第 $k$ 条车道行驶的距离,如果相邻车道具有相同的无碰撞距离 $d(k)$ ,则将相邻车道进行合并; $a(k)$ 指从当前车辆位置经过无碰撞区域到第 $k$ 条车道的直线与 $x$ 轴的夹角。虚拟车道及其参数如图3所示,图中车道总数量 $N=7$ 条,将车辆开始换道时主车前方与车辆垂直的线段定义为换道起始线,车辆的可行行驶空间被障碍车辆划分为不同的车道,由于车辆正常行驶时只进行前向运动,所以在车道划分时,将后方的车辆忽略。障碍车辆与主车目标航向的角度超过预先定义的角度限值 $r_{\min}(k)$ 则被定义为后方车辆。若起始线没有障碍车辆,取 $r_{\min}(k)=90^\circ$ ,若起始线有障碍车辆,根据普通乘用车最小转弯半径及车载传感器参数特性,取 $r_{\min}(k)=\pm 60^\circ$ 。

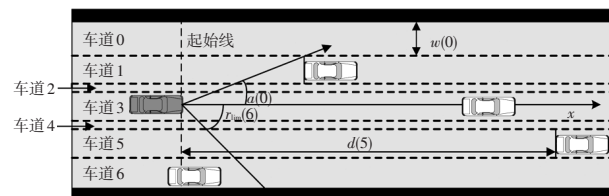


图3 虚拟车道示意

当根据障碍车辆生成的虚拟车道宽度较小时(图3中的车道2、车道4),按照如下规则合并车道:如果 $w(k)<w_{\min}$ (根据中国道路设计要求,设计宽度为3.75 m,本文取最小合并距离阈值 $w_{\min}=3.75$  m,则合并后的车道宽度必然大于3.75 m,满足道路设计所要求的车道宽度)或 $d(k)=\max[d(k+1),d(k-1)]$ 则将其合并到相邻的无碰撞距离较大的车道中。依据以上规则,将图3中的车道2与车道3合并,车道4与车道5合并,如图4所示。

### 3.3 目标车道选择方法

在进行目标车道选择时应满足以下要求:尽可能选择 $d(k)$ 、 $w(k)$ 更大的车道;为了保证换道效率及平顺性,

防止由于传感器误差造成的航向角突变,希望航向角变化尽可能小,同时目标航向角应尽可能接近当前航向角。根据上述要求,建立车道选择目标函数 $f_s(k)$ ,通过最大化 $f_s(k)$ 取值选择合适车道:

$$\begin{cases} f_s(k) = \alpha_1 D(k) + \alpha_2 W(k) + \alpha_3 H_{\min}(k) + \alpha_4 H_{nr}(k) \\ D(k) = \frac{\max[d(k), d_{\max}]}{d_{\max}} \\ W(k) = \frac{\max[w(k), w_{\max}]}{w_{\max}} \\ H_{\min}(k) = \frac{\min[a(k) - h_p, h_{c\max}]}{h_{c\max}} \\ H_{nr}(k) = \frac{\min[a(k) - h_n, h_{d\max}]}{h_{d\max}} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $h_p$ 为上一时刻的航向角命令; $h_n$ 为当前航向角; $D(k)$ 为无碰撞车道选择系数,倾向于在所有虚拟车道中选择无碰撞距离较大的车道; $W(k)$ 为车道宽度选择系数,倾向于在所有虚拟车道中选择宽度较宽的车道; $H_{\min}(k)$ 为航向角选择系数,倾向于在所有虚拟车道中选择具有较小的航向角变化值的车道; $H_{nr}(k)$ 为最小航向角变化系数,倾向于在所有虚拟车道中选择更接近车辆当前的航向角的车道; $d_{\max}$ 、 $w_{\max}$ 、 $h_{c\max}$ 、 $h_{d\max}$ 分别为最大无碰撞距离、最大车道宽度、最大航向角、最大换道角度,同时使用最大值对 $f_s(k)$ 中的每一项进行限制和归一化; $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 分别为目标函数中每一项的权重,其中, $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 为正值, $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 为负值,为满足上述目标车道选择要求,通过分析不同权重系数下的换道结果,最终选取 $\alpha_1:\alpha_2:-\alpha_3:-\alpha_4=4:1:4:1$ 。

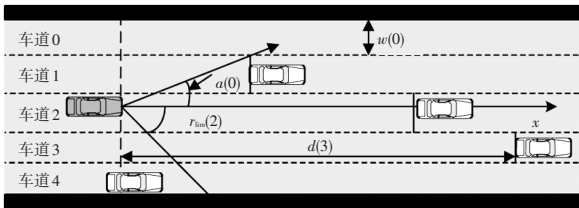


图4 车道合并示意

## 4 换道轨迹生成

车辆的轨迹可以划分为3个维度展开:车辆纵向加速度(沿道路方向)、车辆横向加速度(与道路垂直方向)、时间。本文根据虚拟车道信息、当前车道平均车速、目标车道平均车速确定换道终点状态,在考虑车辆安全性及乘坐舒适性的前提下,自动规划出满足约束的换道轨迹。

### 4.1 加/减速换道判断

加速换道场景即车辆当前车速小于目标车道平均车速,在换道过程中需要同时进行加速操作。减速换道

即车辆当前车速大于目标车道平均车速,换道过程中需要同时进行减速操作。车辆当前车速记为 $v_c$ ,目标车道平均车速 $v_l$ 为:

$$v_l = (v_{l1} + v_{l2}) / 2 \quad (2)$$

式中, $v_{l1}$ 、 $v_{l2}$ 分别为目标车道换道终点后方和前方车辆速度。

根据实际道路车辆行驶工况,如果传感器测得的目标车道两车的车速差 $|v_{l1} - v_{l2}| > 5$  km/h,说明目标车道车辆可能在超车,为保证行驶安全性,则放弃换道超车,继续在本车道行驶。

### 4.2 车辆运动学模型

在研究车辆的换道过程时,由于需要考虑道路环境中其他车辆的运动状态,通常在世界坐标系 $O_w X_w Y_w$ 中创建车辆的全局运动学模型,而研究车辆自身的运动时,一般采用车体坐标系 $O_c X_c Y_c$ 。通常以车辆质心作为车体坐标系原点,如图5所示。

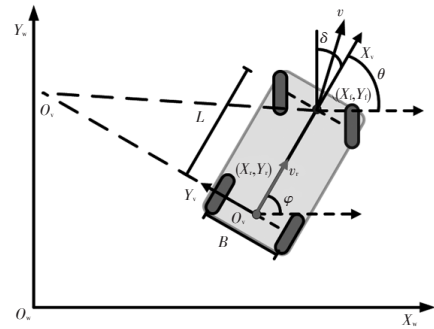


图5 车体坐标系

车辆的运动学方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v(t) \cos \theta(t) = \dot{x}(t) \cos \varphi(t) - \dot{y}(t) \sin \varphi(t) \\ \dot{y}(t) = v(t) \sin \theta(t) = \dot{y}(t) \cos \varphi(t) + \dot{x}(t) \sin \varphi(t) \\ \dot{\varphi}(t) = \dot{x}(t) \tan \delta(t) / L \end{cases} \quad (3)$$

式中, $L$ 为车辆轴距; $x(t)$ 、 $y(t)$ 为车辆质心坐标; $\dot{x}(t)$ 、 $\dot{y}(t)$ 分别为车体坐标系下纵向和横向速度; $v(t)$ 为车辆的真实速度; $\varphi(t)$ 为车身横摆角; $\delta(t)$ 为车辆的前轮转角; $\theta(t)$ 为车辆航向角。

### 4.3 换道轨迹生成

本文采用五次多项式表示换道轨迹。基于多项式的换道轨迹只需获取车辆的初始状态和终止状态作为边界条件即可求解。基于五次多项式的轨迹计算方法需要3个维度的边界条件,即车辆的位置、速度、加速度。本文的换道轨迹为:

$$\begin{cases} x(t) = A_0 + A_1 t + A_2 t^2 + A_3 t^3 + A_4 t^4 + A_5 t^5 \\ y(t) = B_0 + B_1 t + B_2 t^2 + B_3 t^3 + B_4 t^4 + B_5 t^5 \end{cases} \quad (4)$$

式中, $A_0 \sim A_5$ 、 $B_0 \sim B_5$ 为各项系数; $t$ 为时间。

换道起点的边界条件设置为时间 $t_0$ 、车辆起点坐标

$[x(t_0), y(t_0)]$ 、速度 $[\dot{x}(t_0), \dot{y}(t_0)]$ 、加速度 $[\ddot{x}(t_0), \ddot{y}(t_0)]$ ,其中位置、速度、加速度可以通过车载传感器测得。在纵向和横向可以分别得到:

$$\begin{cases} x(t_0) = A_0 + A_1 t_0 + A_2 t_0^2 + A_3 t_0^3 + A_4 t_0^4 + A_5 t_0^5 \\ y(t_0) = B_0 + B_1 t_0 + B_2 t_0^2 + B_3 t_0^3 + B_4 t_0^4 + B_5 t_0^5 \\ \dot{x}(t_0) = A_1 + 2t_0 A_2 + 3t_0^2 A_3 + 4t_0^3 A_4 + 5t_0^4 A_5 \\ \dot{y}(t_0) = B_1 + 2t_0 B_2 + 3t_0^2 B_3 + 4t_0^3 B_4 + 5t_0^4 B_5 \\ \ddot{x}(t_0) = 2A_2 + 6t_0 A_3 + 12t_0^2 A_4 + 20t_0^3 A_5 \\ \ddot{y}(t_0) = 2B_2 + 6t_0 B_3 + 12t_0^2 B_4 + 20t_0^3 B_5 \end{cases} \quad (5)$$

换道终点的边界条件设置为时间 $t_1$ 、车辆终点坐标 $[x(t_1), y(t_1)]$ 、速度 $[\dot{x}(t_1), \dot{y}(t_1)]$ 、加速度 $[\ddot{x}(t_1), \ddot{y}(t_1)]$ 。同样,在纵向和横向可以分别得到:

$$\begin{cases} x(t_1) = A_0 + A_1 t_1 + A_2 t_1^2 + A_3 t_1^3 + A_4 t_1^4 + A_5 t_1^5 \\ y(t_1) = B_0 + B_1 t_1 + B_2 t_1^2 + B_3 t_1^3 + B_4 t_1^4 + B_5 t_1^5 \\ \dot{x}(t_1) = A_1 + 2t_1 A_2 + 3t_1^2 A_3 + 4t_1^3 A_4 + 5t_1^4 A_5 \\ \dot{y}(t_1) = B_1 + 2t_1 B_2 + 3t_1^2 B_3 + 4t_1^3 B_4 + 5t_1^4 B_5 \\ \ddot{x}(t_1) = 2A_2 + 6t_1 A_3 + 12t_1^2 A_4 + 20t_1^3 A_5 \\ \ddot{y}(t_1) = 2B_2 + 6t_1 B_3 + 12t_1^2 B_4 + 20t_1^3 B_5 \end{cases} \quad (6)$$

根据车辆的初始状态 $[x(t_0), y(t_0), \theta_0, k_0]$ 和目标状态 $[x(t_1), y(t_1), \theta_1, k_1]$ ,对应的边界条件为:

$$\begin{cases} x(t_0) = x_0, x(t_1) = x_1 \\ y(t_0) = y_0, y(t_1) = y_1 \\ \begin{bmatrix} \dot{x}(t_0) \\ \dot{y}(t_0) \end{bmatrix} / \sqrt{\dot{x}^2(t_0) + \dot{y}^2(t_0)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} \dot{x}(t_1) \\ \dot{y}(t_1) \end{bmatrix} / \sqrt{\dot{x}^2(t_1) + \dot{y}^2(t_1)} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 \\ \sin \theta_1 \end{bmatrix} \\ k(t_0) = k_0 \\ k(t_1) = k_1 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$ 分别为换道起点和换道终点坐标; $\dot{x}(t_0)$ 、 $\dot{y}(t_0)$ 分别为换道起点沿 $x$ 轴和 $y$ 轴的加速度; $\dot{x}(t_1)$ 、 $\dot{y}(t_1)$ 分别为换道终点沿 $x$ 轴和 $y$ 轴的加速度; $k_0$ 、 $k_1$ 分别为换道起点和终点的曲率; $\theta_0$ 、 $\theta_1$ 分别为起点和终点的航向角。

在真实交通场景中,总换道时间 $T$ 的选择需要考虑周边的动态环境,为了保证模型的计算效率,本文没有将 $T$ 作为自由变量,而是通过换道后的跟驰行为时间 $t_f$ 和换道持续时间 $t_c$ ( $t_c = t_1 - t_0$ )的总和决定,即 $T = t_f + t_c$ 。结合换道开始时主车运动状态以及其他车辆运行状态进行计算:

$$T = y(t_1) / \min[\dot{x}(t_0), v_n] \quad (8)$$

式中, $v_n$ 为换道成功后前车的车速,若换道后的车道没有其他车辆,则 $v_n$ 设置为无穷大。

求解车辆换道轨迹实际上就是求解式(5)和式(6)中的 $A_i$ 和 $B_i$ ( $i=0,1,2,3,4,5$ )。在已知车辆换道起点和终

点运动参数的前提下,结合式(5)和式(6)即可准确求解式(4)中的参数 $A_i$ 和 $B_i$ 。

#### 4.4 目标函数约束条件

车辆换道起点和换道终点的选择决定了车辆换道过程的舒适性和安全性,通过对换道参数方程进行分析,对换道结果有影响的参数分别为 $(x_0, y_0, \dot{x}_0, \dot{y}_0, \ddot{x}_0, \ddot{y}_0, \theta_0, k_0)$ 、 $(x_1, y_1, \dot{x}_1, \dot{y}_1, \ddot{x}_1, \ddot{y}_1, \theta_1, k_1)$ 。根据换道要求,可以得到以下参数:

- 换道起点坐标取为 $(x_0, y_0) = (0, 0)$ ;
- 换道起点、终点航向角 $\theta_0 = \theta_1 = 0$ ;
- 换道起点、终点曲率 $k_0 = k_1 = 0$ ;
- 横向换道距离 $y_1$ 由虚拟车道生成模块决定。

除上述通过公式推导出的约束条件,换道轨迹模型中的未知量为 $(v_0, v_1, a_0, a_1, x_1, T)$ ,其中换道起点的速度 $v_0 = \sqrt{\dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2}$ 、换道终点的速度 $v_1 = \sqrt{\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2}$ 、起点加速度 $a_0 = \sqrt{\ddot{x}_0^2 + \ddot{y}_0^2}$ 、终点加速度 $a_1 = \sqrt{\ddot{x}_1^2 + \ddot{y}_1^2}$ 、纵向行驶距离 $x_1$ 和换道总时长 $T$ 的选择,对换道轨迹的平顺性及舒适性等都有较大影响。为了提高换道效率,通常希望以最短轨迹完成换道过程,同时保证换道的平稳性,轨迹的平均曲率 $\bar{k}$ 应尽可能小。根据以上分析,建立目标函数:

$$f(v_0, v_1, a_0, a_1, x_1, T) = \min(\beta_1 k(t) + \beta_2 s) \quad (9)$$

式中, $s = \int_0^t \sqrt{\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t)} dt$ 为换道轨迹的长度;

$$k(t) = \left| \frac{\dot{x}(t)\ddot{y}(t) - \ddot{x}(t)\dot{y}(t)}{(\dot{x}^2(t) + \dot{y}^2(t))^{\frac{3}{2}}} \right|$$

为换道轨迹的曲率; $\beta_1$ 、 $\beta_2$ 为权重系数,由于曲率的变化非常小,通过分析不同权重系数下的换道结果,本文选取 $\beta_1 = 100$ 、 $\beta_2 = 0.1$ 。

此问题属于复杂函数在约束下的极小值求解问题,本文采用梯度下降法对函数极小值进行求解。车辆在换道过程中,也会受到轮胎与地面附着力的影响,同时为了保证乘坐舒适性,需对纵向加速度 $\ddot{x}(t)$ 和横向加速度 $\ddot{y}(t)$ 进行限制。限制条件为:

$$\begin{cases} \ddot{y}_0 = 0 \\ \ddot{y}_1 = 0 \\ -2.5 \text{ m/s}^2 \leq \ddot{x}(t) \leq 2.5 \text{ m/s}^2 \\ -3 \text{ m/s}^2 \leq \ddot{y}(t) \leq 3 \text{ m/s}^2 \end{cases} \quad (10)$$

同时,横摆角速度是反映车辆横向稳定性的重要指标,由于车辆正常行驶时的横向速度远小于纵向速度,质心侧偏角约为0,所以车辆的横摆角可以近似使用横向和纵向速度计算,对横摆角求导即可得出横摆角速度。车辆横摆角及横摆角速度的约束为:

$$\begin{cases} \varphi(t) = \arctan[\dot{y}(t)/\dot{x}(t)] \\ -0.15 \text{ rad/s} < \dot{\varphi}(t) < 0.15 \text{ rad/s} \end{cases} \quad (11)$$

### 5 验证分析

为验证算法的可靠性,本文针对不同换道场景进行验证分析。根据实际驾驶中的换道行为,将换道场景分为加速换道和减速换道,车辆在匀速行驶过程中一般不考虑换道行为,所以不考虑匀速换道场景。

#### 5.1 换道场景设计

设道路总宽度为12 m,满足3辆车并排行驶需要,目的是可以在虚拟车道生成阶段生成3条虚拟车道,验证本文提出的虚拟车道法车道生成及车道选择的可行性。将换道场景设计为4类:换道至当前车道右侧车道(见图6a)的加速/减速换道场景,换道至当前车道左侧车道(见图6b)的加速、减速换道场景。由于实际行驶中车辆一般为匀速或加速度较小,换道场景中的障碍车辆为匀速运动。4类换道场景如表1所示。

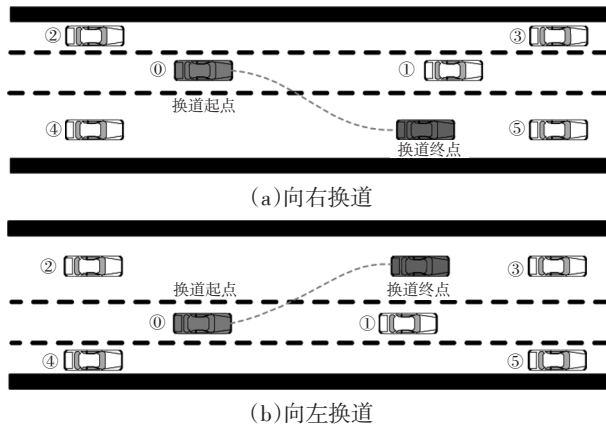


图6 换道场景示意

场景1和场景2中,主车(车辆0)和车辆1的平均

车速小于两相邻车道中车辆2、车辆3和车辆4、车辆5的平均车速,属于加速换道场景;场景3和场景4中,主车(车辆0)和车辆1的平均车速大于两相邻车道中车辆2、车辆3和车辆4、车辆5的平均车速,属于减速换道场景。

表1 4类换道场景

参数	加速换道		减速换道	
	场景1	场景2	场景3	场景4
车辆0初始位置 $x_{0,0}/m$	(0,0)	(0,0)	(0,0)	(0,0)
车辆0初始速度 $v_{0,0}/m \cdot s^{-1}$	11	11	15	15
车辆1初始位置 $x_{1,0}/m$	(0,30.0)	(0,30.0)	(0,30.0)	(0,30.0)
车辆1初始速度 $v_{1,0}/m \cdot s^{-1}$	10	10	13	13
车辆2初始位置 $x_{2,0}/m$	(-20,2.5)	(-22,2.5)	(-18,2.5)	(-21,2.5)
车辆2初始速度 $v_{2,0}/m \cdot s^{-1}$	14	14	11	11
车辆3初始位置 $x_{3,0}/m$	(30,2.5)	(28,2.5)	(32,2.5)	(29,2.5)
车辆3初始速度 $v_{3,0}/m \cdot s^{-1}$	16	16	13	13
车辆4初始位置 $x_{4,0}/m$	(-19,3.5)	(-21,3.5)	(-19,3.5)	(-22,3.5)
车辆4初始速度 $v_{4,0}/m \cdot s^{-1}$	14	14	11	11
车辆5初始位置 $x_{5,0}/m$	(51,3.5)	(49,3.5)	(51,3.5)	(49,3.5)
车辆5初始速度 $v_{5,0}/m \cdot s^{-1}$	16	16	13	13

#### 5.2 仿真验证

为验证虚拟车道生成以及换道过程的连续性,利用MATLAB编写脚本文件实现虚拟车道线生成以及换道轨迹规划,并针对不同场景的换道过程进行验证,如图7所示。从图7中可以看出,虚拟车道法根据不同的交通状况可以生成不同宽度的虚拟车道,且在换道操作过程无论向左或者向右换道均可根据车辆实际的可通行情况合理选择车道进行换道操作。

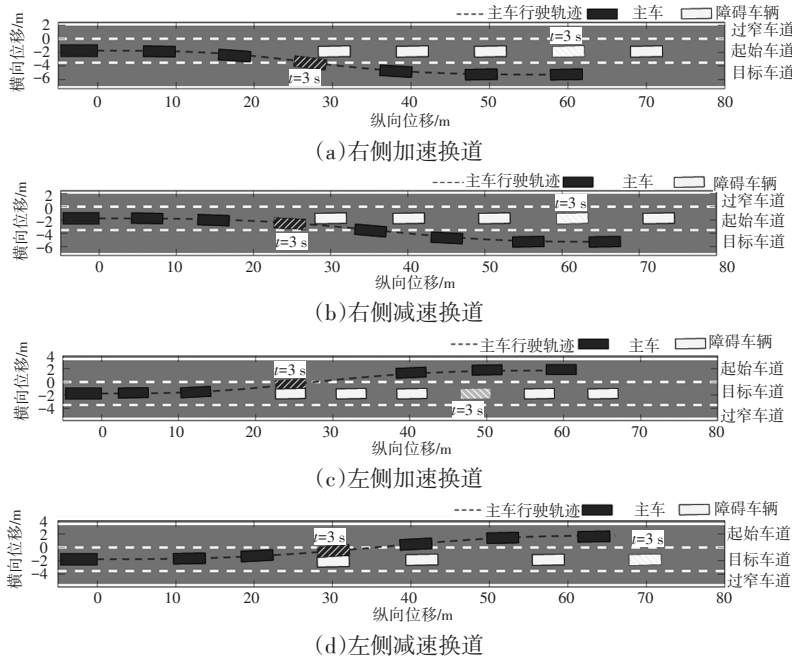


图7 不同场景下换道过程仿真结果

### 5.3 换道场景硬件在环测试

通过硬件在环(Hardware-In-the-Loop, HIL)测试对本文提出的换道轨迹规划算法进行验证。基于车辆动力学仿真软件CarSim搭建仿真场景,将MATLAB中的车道线生成以及换道轨迹规划程序编译为可执行代码,通过LabVIEW将期望换道路径的速度、加速度、航向角仿真信号发送至实时仿真机NI-PXI与转向控制硬件平台。转向硬件平台主要由转向盘、转向轴、转向横拉杆、转向电机与转向轴转角传感器等组成。实时仿真机NI-PXI输出的转向盘转角、油门踏板开度等信息分别通过CAN协议发送到相应转向控制器、油门控制器,同时,转向轴转角传感器将采集得到的信号通过板卡发送至NI-PXI中的仿真模型中。硬件在环测试平台如图8所示,测试流程如图9所示,测试结果如图10所示。硬

件在环测试中,通过本文所述算法生成换道轨迹,并基于线性二次调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)结合车辆运动学模型,对生成轨迹进行跟踪。根据式(3)车辆运动学模型,选取状态量为 $X=(x,y,\varphi)^T$ ,控制量为 $U=[\dot{x}, \delta]^T$ ,则运动学的离散状态空间方程可以表示为:

$$X(k+1)=AX(k)+BU(k) \quad (12)$$

$$\text{式中, } X = \begin{bmatrix} \dot{x} - \dot{x}_{i1} \\ \dot{y} - \dot{y}_{i1} \\ \dot{\varphi} - \dot{\varphi}_{i1} \end{bmatrix}; U = \begin{bmatrix} v - v_{i1} \\ \delta - \delta_{i1} \end{bmatrix};$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -Tv_{i1} \sin \varphi_{i1} \\ 0 & 1 & Tv_{i1} \cos \varphi_{i1} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} T \cos \varphi_{i1} & 0 \\ T \sin \varphi_{i1} & 0 \\ T \frac{\tan \varphi_{i1}}{L} & T \frac{v_{i1}}{L \cos^2 \delta_{i1}} \end{bmatrix}; v_{i1} \text{ 为}$$

生成的参考轨迹上轨迹点*i*要求的速度; $\delta_{i1}$ 为轨迹点*i*的参考前轮转角; $(x_{i1}, y_{i1})$ 为轨迹点*i*的坐标。



图8 硬件在环测试平台各组成部分

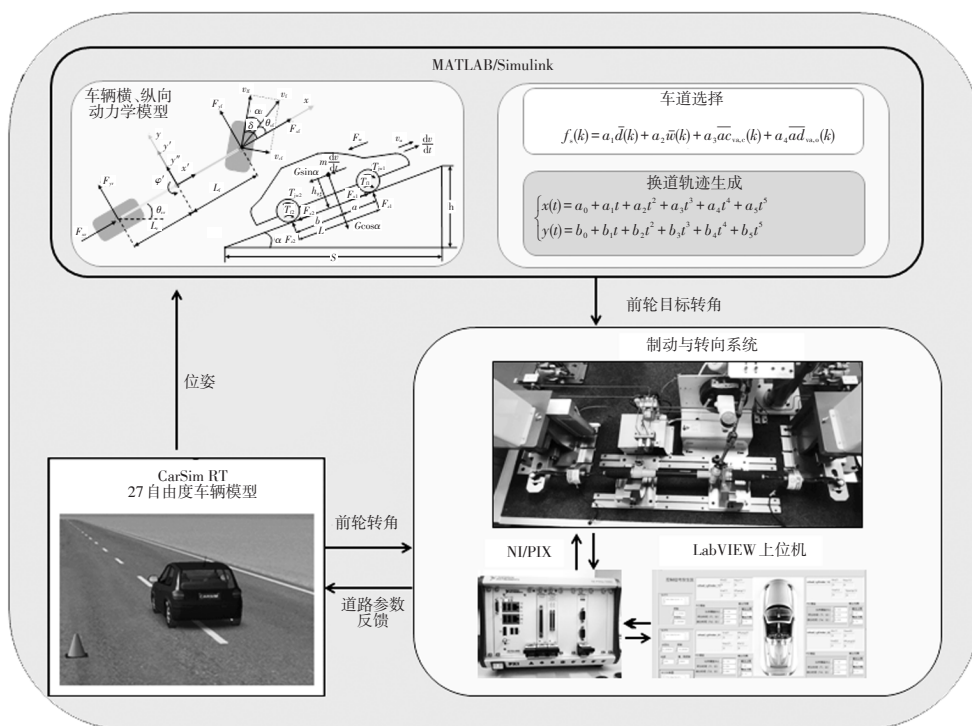
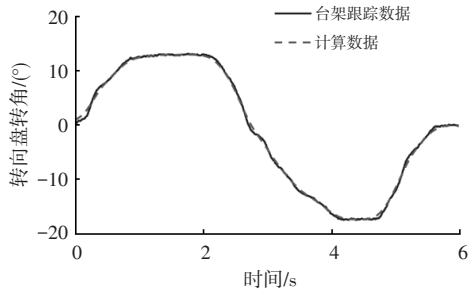
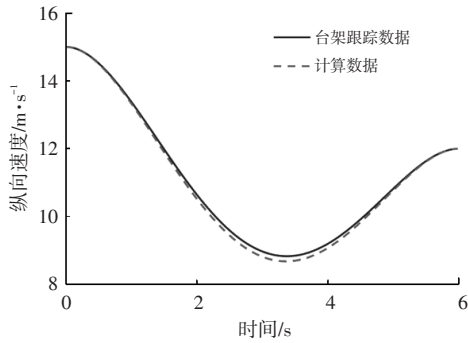


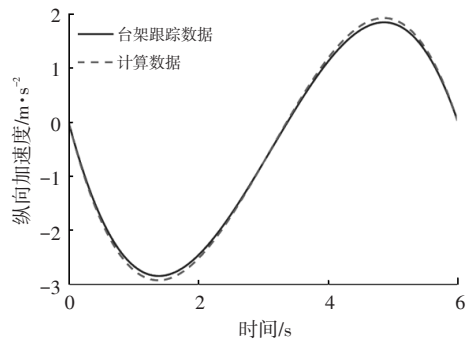
图9 硬件在环测试流程



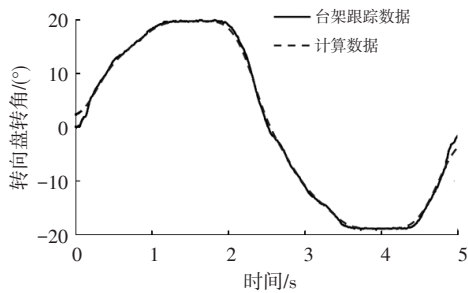
(a) 减速场景转向盘转角



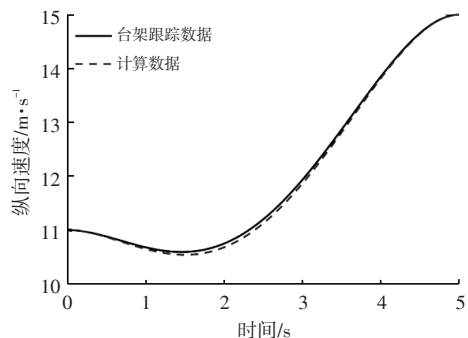
(b) 减速场景速度曲线



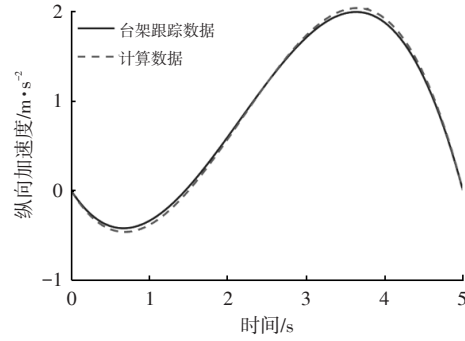
(c) 减速场景加速度曲线



(d) 加速场景转向盘转角



(e) 加速场景速度曲线



(f) 加速场景加速度曲线

图10 加速、减速场景转向盘转角、速度和加速度曲线

轨迹跟踪过程中期望系统的响应过程有如下特点:跟踪误差能够快速收敛到零,并保持稳定;车辆前轮转角 $\delta$ 尽可能小。

针对以上特征,轨迹跟踪问题为典型目标优化最优控制问题,目标函数可以通过对式(12)中累计跟踪偏差 $\mathbf{X}$ 与累计控制输入 $\mathbf{U}$ 进行加权后得出,目标函数 $J$ 可表示为:

$$J = \sum_{k=1}^N (\mathbf{X}(k)^T \mathbf{Q} \mathbf{X}(k) + \mathbf{U}(k)^T \mathbf{R} \mathbf{U}(k)) \quad (13)$$

式中, $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 分别为半正定的状态加权矩阵、正定的控制加权矩阵,需要根据实际控制需求进行选择,通常增大 $\mathbf{Q}$ 可以使跟踪偏差快速趋于零,增大 $\mathbf{R}$ 可以使控制输入尽可能小; $N$ 为跟踪过程中的控制点累计数量。

从图10a、图10d中可以看出,换道轨迹跟踪过程中,车辆转向盘转角变化平缓,换道轨迹平滑,满足车辆在实际行驶过程中的平顺性要求。图10b中,通过速度优化,车辆在减速过程中速度平稳降低,有效避免了换道过程中的顿挫感。图10e中,为了满足换道时的安全性要求,在换道初期车速逐渐降低,换道完成后车辆进行加速,以满足最终速度要求。综上所述,本文提出的虚拟车道法在满足各种车辆约束条件的基础上,可实时自动选择合理车道,并可有效地规划出平顺的换道轨迹。

## 6 结束语

本文针对车道线不明显或无车道线的交通环境,提出一种虚拟车道生成方法,根据当前道路的交通环境动态生成虚拟车道,并根据车辆自身约束选择合理的可通行车道。在确定行驶车道的基础上,利用多项式生成换道轨迹,并考虑车辆行驶的舒适性和安全性等问题,合理规划换道时的车速,满足车辆实际换道需求。此外,考虑到交通环境的动态性,在一次换道操作执行期间,车辆系统会循环调用本文提出的换道模型更新换道轨

迹,直到换道操作完成。

后续在虚拟车道生成以及换道轨迹生成过程中,需对障碍车辆的行为进行预测,结合预测结果生成车道以及换道轨迹,进一步提高车辆行驶的安全性和舒适性。

#### 参 考 文 献

- [1] SHARMA O, SAHOO N C, PUHAN N B. A Survey on Smooth Path Generation Techniques for Nonholonomic Autonomous Vehicle Systems[C]// IECON 2019- 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Lisbon, Portugal: IEEE, 2019, 1: 5167-5172.
- [2] 王莹, 卫翀, 马路. 基于二次规划的智能车辆动态换道轨迹规划研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 79-94.  
WANG Y, WEI C, MA L. Dynamic Lane- Changing Trajectory Planning Model for Intelligent Vehicle Based on Quadratic Programming[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 79-94.
- [3] WEI C, WANG Y, ASAKURA Y, et al. A Nonlinear Programing Model for Collision- Free Lane- Change Trajectory Planning Based on Vehicle- to- Vehicle Communication[J]. Journal of Transportation Safety & Security, 2019(4): 1-21.
- [4] 张利鹏, 苏泰, 严勇. 基于采样区域优化的智能车辆轨迹规划方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 276-287.  
ZHANG L P, SU T, YAN Y. Trajectory Planning Method of Intelligent Vehicle Based on Sampling Area Optimization[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 276-287.
- [5] LIM W, LEE S, SUNWOO M, et al. Hierarchical Trajectory Planning of an Autonomous Car Based on the Integration of a Sampling and an Optimization Method[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2018, 19(2): 613-626.
- [6] JEONG Y, KIM S, JO B R, et al. Sampling Based Vehicle Motion Planning for Autonomous Valet Parking with Moving Obstacles[J]. International Journal of Automotive Engineering, 2018, 9(4): 215-222.
- [7] SANG Q M, TIAN Y, JIN Q L, et al. A Path Planning Strategy for Marine Vehicles Based on Deep Reinforcement Learning and Data-Driven Dynamic Flow Fields Prediction [C]// 2021 6th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering. Dalian, China: IEEE, 2021.
- [8] 张甫城, 胡敏, 江书真. 智能汽车换道轨迹规划曲线研究[J]. 汽车实用技术, 2021, 46(1): 26-28.  
ZHANG F C, HU M, JIANG S Z. Research on the Planning Curve of Intelligent Vehicle Lane- Changing Trajectory[J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(1): 26-28.
- [9] ZHANG J X, SHI Z T, YANG X, et al. Trajectory Planning and Tracking Control for Autonomous Parallel Parking of a Non- Holonomic Vehicle[J]. Measurement and Control: Journal of the Institute of Measurement and Control, 2020, 53(9/10): 1800-1816.
- [10] 刘李漫, 刘佳, 谌先敢, 等. 一种基于不完备车道线信息的车辆偏离预警方法及系统: CN109677405A[P]. 2019-04-26.  
LIU L M, LIU J, SHEN X G, et al. A Method and System of Vehicle Departure Warning Based on Incomplete Lane Information: CN109677405A[P]. 2019-04-26.
- [11] LI B B, SONG D Z, RAMCHANDANI A, et al. Virtual Lane Boundary Generation for Human- Compatible Autonomous Driving: A Tight Coupling between Perception and Planning[C]// 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Macau, China: IEEE, 2019: 3733-3739.
- [12] 宗芳, 田勇达, 张慧永, 等. 一种在无车道线情况下自动驾驶车辆进行车道划分的方法: CN109035868A[P]. 2018-12-18.  
ZONG F, TIAN Y D, ZHANG H Y, et al. A Method of Lane Division for Autonomous Vehicles Without Lane: CN109035868A[P]. 2018-12-18.

(责任编辑 斛 畔)

修改稿收到日期为2022年6月9日。