

基于多目标评价的网联汽车换道轨迹规划研究

何圭波, 刘宇, 韩旭晖, 曲大义, 宋年秀*

(青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 青岛 266525)

摘要: 为提高智能网联汽车换道轨迹规划的可靠性与稳定性, 基于城市道路双车道场景提出了多目标协同评价函数, 包括舒适性、安全性与换道效率等轨迹规划算法。通过构建五次多项式的理想换道轨迹规划模型, 筛选换道轨迹规划生成候选轨迹簇, 并进行重规划以应对突发状况下的风险问题; 根据线性化多目标协同评价函数实时选取最优换道轨迹, 构建无突发状况和突发状况两种不同场景; 运用 MATLAB 进行仿真验证算法的可行性。仿真结果表明, 对于两种不同的工况, 该算法都具备很好的鲁棒性, 舒适性、安全性与换道效率等综合性能都有所提升。

关键词: 智能网联汽车; 多目标评价; 五次多项式; 换道轨迹规划

中图分类号: U471.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4602(2025)03-0141-09

Research on lane change trajectory planning of networked vehicles based on multi-objective evaluation

HE Guibo, LIU Yu, HAN Xuhui, QU Dayi, SONG Nianxiu*

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China)

Abstract: In order to improve the reliability and stability of lane change trajectory planning of intelligent networked vehicles, this study constructs two-lane urban road scenarios and proposes a trajectory planning algorithm based on multi-objective collaborative evaluation function including comfort, safety and lane change efficiency. By constructing the ideal lane change trajectory planning model with five polynomials, the lane change trajectory planning is screened to generate the candidate trajectory clusters, and is then replanned to cope with the risk problem under the unexpected condition. The optimal lane change trajectory is selected by calculating the cost minimum in real time according to the linearized multi-performance objective co-evaluation objective function, and two different scenarios of no emergency and emergency situation were constructed. MATLAB is then used to verify the feasibility of the algorithm. The simulation results show that the algorithm has good robustness for two different operating conditions, and the overall performance of safety, comfort and lane change efficiency is improved.

Key words: intelligent networked vehicles; multi-objective evaluation; five polynomial; lane change trajectory planning

收稿日期: 2023-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(52272311)

作者简介: 何圭波(1996—), 男, 江西吉安人。硕士, 研究方向为交通规划控制。E-mail: 1912059795@qq.com。

* 通信作者: 宋年秀(1963—), 男, 山东青岛人。博士, 教授, 主要从事汽车检测技术方面的研究。E-mail: 859669835@qq.com。

智能网联汽车自动换道已被广泛应用于智能交通系统,但在很大程度上影响了道路交通的流通和安全性^[1]。安全、快速且平稳的换道行为需要安全、高效且舒适的换道轨迹^[2-5]。因此智能车辆换道轨迹规划需要考虑换道过程中车辆的舒适性、安全性与换道效率等多性能目标协同^[6-7]。换道行为是自动驾驶汽车中典型的驾驶行为,因此车辆自主换道行为是国内外智能车辆自动驾驶规划方面的研究重点之一。

常用的轨迹规划方法可分为基于多评价的轨迹规划算法^[8]、基于搜索的规划算法^[9]、基于数值优化的轨迹规划算法^[10]等。ZHOU等^[11]采用启发式避碰算法提取多个无碰撞轨迹,基于多目标采用TOPSIS算法优化得到最优轨迹。LIU等^[12]基于驾驶安全、乘客舒适度和车辆效率,提出了多目标优化设计且实时评价的换道轨迹。付晓鑫等^[13]基于安全性、舒适性、经济性和效率建立非线性规划模型,运用混合智能优化算法得到最优轨迹。ZHANG等^[14]利用五次多项式生成轨迹,利用避碰算法得到无碰轨迹,采用TOPSIS算法计算最优轨迹。

以上研究的算法在轨迹规划中具有一定的可靠性与稳定性,但未考虑多车,因此还需进一步研究城市道路场景下考虑舒适性、安全性与换道效率等多目标的协同评价换道轨迹问题。由于舒适性需要考虑加速度,因此本文采用五次多项式生成轨迹后再筛选符合车辆动力学的换道轨迹,并考虑多评价目标选出最优换道轨迹。

1 轨迹生成模块

设定换道车辆(自车)为智能网联汽车,可实时获取到附近车辆的位置信息和速度信息,且假设自车在此时有换道意图,通过五次多项式进行轨迹簇生成。

1.1 轨迹生成方法

为了产生轨迹簇,需要采用一种能够满足安全性、舒适性要求的轨迹,本文采用横纵向分别为五次多项式的方法来表述换道过程横纵向位置的离散轨迹点关系,并且生成一条光滑的曲线用来表述换道过程中横纵向位置关系。

$$\begin{cases} x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \\ y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别表示换道过程的纵向、横向位置与时间 t 的五次多项式函数关系,进而能够得到速度 $v_x(t)$ 、 $v_y(t)$ 和加速度 $a_x(t)$ 、 $a_y(t)$ 关于时间 t 的函数关系式。设定边界条件为

$$\begin{cases} x(t_0) = x_0, v_x(t_0) = v_{x0}, a_x(t_0) = 0 \\ y(t_0) = y_0, v_y(t_0) = v_{y0}, a_y(t_0) = 0 \\ x(t_e) = x_e, v_x(t_e) = v_{xe}, a_x(t_e) = 0 \\ y(t_e) = y_e, v_y(t_e) = 0, a_y(t_e) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: x_0 、 y_0 、 v_{x0} 、 v_{y0} 分别为换道过程中起始时间 t_0 的初始纵向位置、横向位置、纵向速度、横向速度; x_e 、 y_e 、 v_{xe} 分别为换道过程中终止时刻 t_e 的纵向位置、横向位置、纵向速度。

换道过程中考虑自车的纵向速度不变,且换道过程中纵向加速度恒为0。根据式(1)、式(2)可以得到

$$\begin{cases} a_0 = x_0, b_0 = y_0 \\ a_1 = v_{x0}, b_1 = 0 \\ a_2 = 0, b_2 = 0 \\ a_3 = \frac{10(x_e - x_0)}{t_e^3} - \frac{50v_{x0} + 40v_{xe}}{3t_e^2}, b_3 = \frac{10(y_e - y_0)}{t_e^3} \\ a_4 = -\frac{15(x_e - x_0)}{t_e^4} + \frac{16v_{x0} + 14v_{xe}}{t_e^3}, b_4 = -\frac{15(y_e - y_0)}{t_e^4} \\ a_5 = \frac{6(x_e - x_0)}{t_e^5} - \frac{3(v_{x0} + v_{xe})}{t_e^4}, b_5 = \frac{6(y_e - y_0)}{t_e^5} \end{cases} \quad (3)$$

为使换道轨迹更加合理、平滑,可将换道轨迹 S_{path} 转化为关于 x_e 、 y_e 和 t_e 的函数,其中考虑终点的横向坐标 $0 \leq y_e \leq 4.5$,每隔 0.5 m 采样,即

$$S_{\text{path}} = f(x_e, t_e), y_e = (3.0, 3.5, 4.0, 4.5) \quad (4)$$

式中: S_{path} 为换道轨迹; x_e 为换道纵坐标; y_e 为换道横坐标; t_e 为换道总时间。

因此,可改变 x_e 和 t_e 生成不同的换道轨迹簇。给定换道时间 t_e 和换道纵坐标 x_e 范围生成不同的换道轨迹,车辆完成一个换道周期一般行驶纵向位移 $50 \text{ m} \leq x_e \leq 100 \text{ m}$ 和所需换道总时间 $5 \text{ s} \leq t_e \leq 10 \text{ s}$ 。纵向位移每隔 10 m 采样,换道时间每隔 1 s 采样,如图 1 所示。

1.2 换道轨迹筛选

根据车辆的行驶约束和终点位置约束筛选出候选轨迹簇,其中车辆行驶约束包括道路边界约束、车速约束、加速度约束、转弯半径约束和路面附着力约束,即

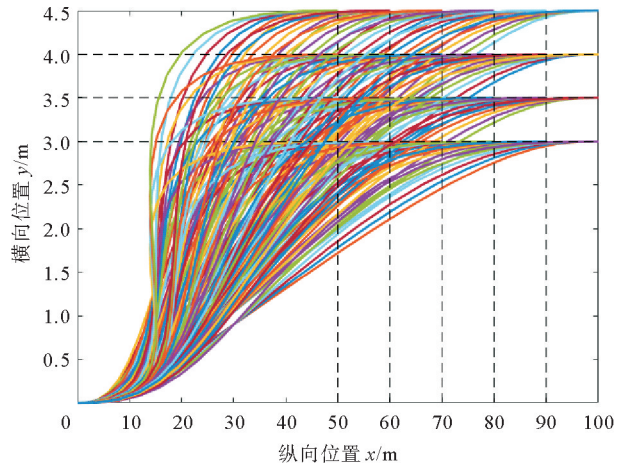


图 1 生成的轨迹簇

$$\begin{cases} b_2 + \frac{W}{2} \leq y_e \leq b_1 - \frac{W}{2} \\ v_{x\min} \leq v_{x0} \leq v_{x\max} \\ v_{y\min} \leq v_{y0} \leq v_{y\max} \\ -K_{\max} \leq K \leq K_{\max} \\ a_{x\min} \leq a_{x0} \leq a_{x\max} \\ a \leq \mu g \end{cases} \quad (5)$$

式中: W 为车宽; b_1 、 b_2 为目标车道上下边界线对应的横向坐标; v_{x0} 、 v_{y0} 分别为自车在道路上设定的纵向、横向的车速; K 为曲线曲率; a_{x0} 为自车的纵向加速度; a 为自车的总加速度,与道路的附着系数 μ 有关; g 为重力加速度。

曲率 K 可通过式(6)得到

$$K = \frac{|x'(t)y''(t) - x''(t)y'(t)|}{[x'^2(t) + y'^2(t)]^{\frac{3}{2}}} \quad (6)$$

设定自车的纵向速度为 $8 \sim 10 \text{ m/s}$, 横向速度为 $0 \sim 2 \text{ m/s}$, 曲线曲率最大值为 0.2 , 纵向加速度为 $-2 \sim 2 \text{ m/s}^2$, 总加速度为 $0.8g$, g 为重力加速度。根据以上条件筛选后的候选轨迹簇如图 2 所示。

2 轨迹选取模块

基于换道候选轨迹的舒适性、安全性与换道效率等要素构建了多目标评价函数,选取最优换道轨迹,为自车后续的方向和位置提供参考轨迹。

2.1 多目标评价函数建立

2.1.1 跟车安全距离评价函数

在换道过程中,传统的车辆换道安全距

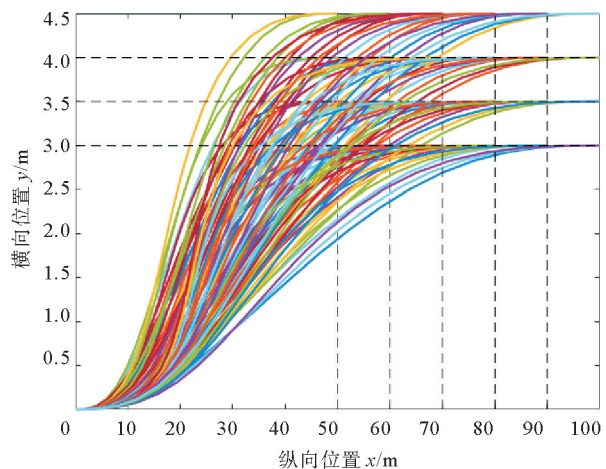


图 2 候选轨迹簇

离模型一般不考虑车辆的外形尺寸,仅仅将模型中的车辆作为质点^[15],这样往往会与实际场景有较大的

误差。三圆车形圆模型能够考虑大部分的碰撞风险,因此选择三圆车形圆模型作为换道时的车辆模型。自行车换道时, t_{r1} 时刻自行车与当前车道前车的距离为 d_1 (图 3(a)),换道后 t_{r2} 时刻自行车与目标车道的前车距离为 d_2 (图 3(b)),即

$$\begin{cases} d_1 = \sqrt{(x_{f1} - x_r(t_{r1}) + \frac{2L}{3})^2 + (y_{f1} - y_r(t_{r1}))^2} - 2\sqrt{(\frac{L}{6})^2 + (\frac{W}{2})^2} \\ d_2 = \sqrt{(x_{f2} - x_r(t_{r2}) + \frac{2L}{3})^2 + (y_{f2} - y_r(t_{r2}))^2} - 2\sqrt{(\frac{L}{6})^2 + (\frac{W}{2})^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_{f1} 、 y_{f1} 分别为当前车道前车的纵向、横向坐标; x_{f2} 、 y_{f2} 分别为目标车道前车的纵向、横向坐标; L 为车长; W 为车宽; $x_r(t_{r1})$ 、 $y_r(t_{r1})$ 分别为 t_{r1} 时刻自行车的纵向、横向坐标; $x_r(t_{r2})$ 、 $y_r(t_{r2})$ 分别为 t_{r2} 时刻自行车的纵向、横向坐标。

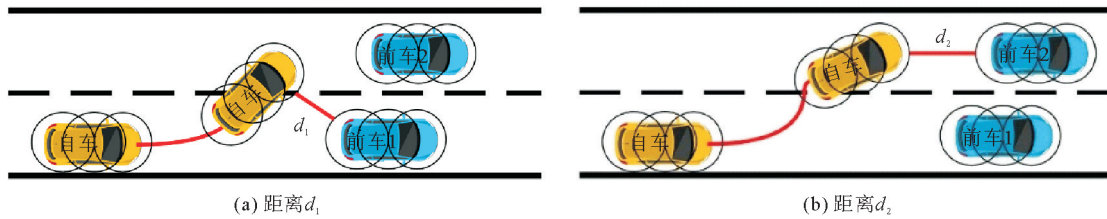


图3 换道过程距离示意

车辆模型中每个单圆半径 R 为

$$R = \sqrt{(\frac{L}{6})^2 + (\frac{W}{2})^2} \quad (8)$$

由于安全距离数值过大,为了减小数量级差异,考虑用最小安全距离来定义距离 d_1 与 d_2 的安全性函数,最小跟车安全距离 S_{min} 考虑采用三秒间距经验法来确定,即

$$S_{min} = 3\sqrt{v_{xe}^2 + v_{ye}^2} \quad (9)$$

所以考虑采用反馈函数 $g(d_\alpha)$ 减小最小安全距离的数量级差异,即标准化处理:

$$g(d_\alpha) = \begin{cases} \frac{S_{min} - d_\alpha}{d_\alpha} & 0 \leq d_\alpha \leq S_{min} \\ 1 & d_\alpha \geq S_{min} \end{cases} \quad (\alpha = 1, 2) \quad (10)$$

因此安全距离评价函数 $J_s(t)$ 为

$$J_s(t) = g(d_1) + g(d_2) \quad (11)$$

2.1.2 碰撞风险评价函数

由于 2.1.1 节只考虑了跟车距离的安全性,未考虑车辆换道过程中的碰撞风险,因此需要对每条轨迹进行碰撞风险评价,采用三圆车形圆模型,如图 4 所示,则自行车与他车的距离计算如式(12)所示。

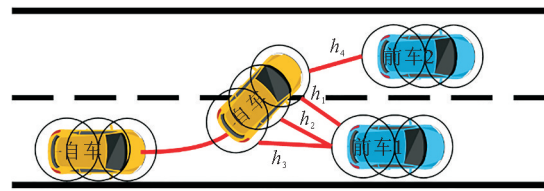


图4 碰撞检测示意

$$\begin{cases} h_1 = \sqrt{(x_{f1} - x_r(t_{r1}) + \frac{2L}{3})^2 + (y_{f1} - y_r(t_{r1}))^2} - 2R \\ h_2 = \sqrt{(x_{f1} - x_r(t_{r1}) + \frac{L}{3})^2 + (y_{f1} - y_r(t_{r1}))^2} - 2R \\ h_3 = \sqrt{(x_{f1} - x_r(t_{r1}))^2 + (y_{f1} - y_r(t_{r1}))^2} - 2R \\ h_4 = \sqrt{(x_{f2} - x_r(t_{r2}))^2 + (y_{f2} - y_r(t_{r2}))^2} - 2R \end{cases} \quad (12)$$

式中: h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 均为自行车到他车的距离。

由于自行车需要对另外两车进行轨迹的碰撞检测,定义碰撞判断函数 $H(h_\alpha)$ 为

$$H(h_\alpha) = \begin{cases} 20 & h_\alpha < 0 \\ 0 & h_\alpha \geq 0 \end{cases} \quad (\alpha = 1, 2, 3, 4) \quad (13)$$

因此碰撞风险评价函数 $J_p(t)$ 为

$$J_p(t) = H(h_1) + H(h_2) + H(h_3) + H(h_4) \quad (14)$$

2.1.3 舒适性评价函数

车辆的舒适性采用换道过程最大瞬时加速度来评价,由式(3)可得

$$J_c(t) = \max(\sqrt{a_x(t)^2 + a_y(t)^2}) = \max(\sqrt{(6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3)^2 + (6b_3t + 12b_4t^2 + 20b_5t^3)^2}) \quad (15)$$

式中: $J_c(t)$ 为舒适性评价函数; a_x 、 a_y 分别为纵向、横向加速度;系数 a_3 、 a_4 、 a_5 、 b_3 、 b_4 、 b_5 如式(3)所示。

2.1.4 效率性评价函数

换道车辆一般根据换道的纵向位移和换道时间综合考虑换道效率,由于换道位移数值与换道时间数值的数量级差异,考虑采用换道纵向位移与最优换道纵向位移的比值来表示,而最优换道纵向位移 x_{\min} 取最小安全距离 S_{\min} 的 2 倍与车长 L 的和,即

$$x_{\min} = 2S_{\min} + L \quad (16)$$

则换道纵向位移与最优换道纵向位移的比值函数为

$$K(x_e) = \begin{cases} \frac{x_e}{x_{\min}} & x_e > x_{\min} \\ 0 & x_e = x_{\min} \\ \frac{x_{\min}}{x_e} & x_e < x_{\min} \end{cases} \quad (17)$$

换道效率评价函数 $J_e(t_e)$ 为

$$J_e(t_e) = K(x_e) + t_e \quad (18)$$

2.1.5 量纲化处理

在实际问题中,各个目标函数的量纲一般都是不同的,所以需要每个目标函数进行规范化,由于构建的各目标评价函数数值均大于 0,因此本文选择最小值化处理方法进行量纲处理,如式(19)所示:

$$J_{li}(t) = \frac{J_i(t)}{\min J_i(t)} \quad (i = s, p, c, e) \quad (19)$$

式中: $J_i(t)$ 分别为换道安全距离评价函数 $J_s(t)$ 、碰撞风险评价函数 $J_p(t)$ 、舒适性评价函数 $J_c(t)$ 、换道效率评价函数 $J_e(t)$; $J_{li}(t)$ 分别为对应的量纲化后的函数。

2.1.6 多目标协同评价函数

随着换道时间的增加,车辆在纵向上的行驶距离也会越长,如果加速度偏小,舒适性就会比较好,但是换道效率与安全性就会比较差,易造成交通隐患;另一方面,长时间处于换道工况会导致汽车的操作性能变差,因此需考虑多目标协同评价函数。

设 t 时刻量纲化后的换道安全距离评价函数为 $J_{1s}(t)$ 、碰撞风险评价函数为 $J_{1p}(t)$ 、舒适性评价函数为 $J_{1c}(t)$ 、换道效率评价函数为 $J_{1e}(t)$,则多目标协同评价函数 J 为

$$J = \omega_1 J_{1s}(t) + \omega_2 J_{1p}(t) + \omega_3 J_{1c}(t) + \omega_4 J_{1e}(t) \quad (20)$$

$$\begin{cases} \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 = 1 \\ 0 < \omega_i < 1 \quad (i = 1, 2, 3, 4) \end{cases}$$

式中: ω_1 、 ω_2 、 ω_3 、 ω_4 分别为换道安全距离评价函数、碰撞风险评价函数、舒适性评价函数、换道效率评价函数的权重系数,在不同的换道场景根据经验选取不同的权重,以适应自由换道和强制换道需求。

2.2 权重系数的确定

为了适应不同换道场景,需选取不同的权重系数以满足自由换道和强制换道需求,因此对于权重系数的选择分析成为目前需要解决的问题。本文采用层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)来分析多目标评价函数中的权重系数,进而使得规划轨迹适应各种不同的换道需求。

2.2.1 建立层次结构模型

AHP 是一种多层分析工具,它根据因素之间的关系和隶属关系组合因子,并为每个因子分配相对重要性,根据判断矩阵确定其权重。将决策的目标、考虑的因素(决策准则)和决策对象按它们之间的相互关系分成最高层、中间层和最低层,绘制层次结构图,则多目标轨迹规划模型的 AHP 示意如图 5 所示。

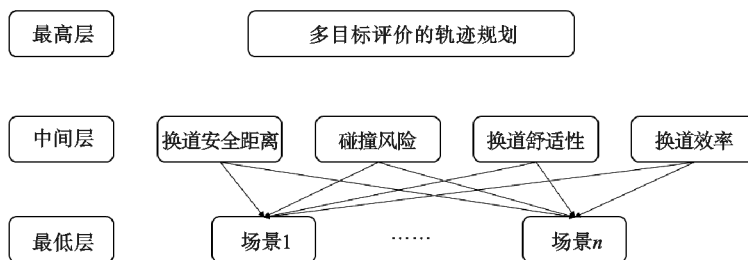


图 5 AHP 示意

2.2.2 构建判断矩阵

层次分析法中构造判断矩阵的方法是一致矩阵法,即:不把所有因素放在一起比较,而是两两相互比较,此时采用相对尺度,以尽可能减少性质不同因素相互比较的困难,以提高准确度。判断矩阵表述了分析项的相对重要性大小,选择多目标评价的轨迹规划时共有 4 个因素,分别是换道安全距离、碰撞风险、换道舒适性和换道效率,因此根据 4 个因素的相对重要性,考虑高安全性和低风险性,即换道安全距离与碰撞风险权重由式(20)可得 $\omega_1 \geq 1/4$ 、 $\omega_2 \geq 1/4$,且自由换道考虑更好的舒适性,构建出自由换道的判断矩阵如表 1 所示。

根据层次分析法得到自由换道的权重系数为: $\omega_1=0.279\ 91$ 、 $\omega_2=0.464\ 71$ 、 $\omega_3=0.115\ 64$ 、 $\omega_4=0.139\ 74$ 。

根据 4 个因素的相对重要性,其换道安全距离与碰撞风险权重更重要,由式(20)可得 $\omega_1 \geq 1/4$ 、 $\omega_2 \geq 1/4$,构建出强制换道的判断矩阵如表 2 所示。

表 1 自由换道的判断矩阵

评价指标	换道安全距离	碰撞风险	换道舒适性	换道效率
换道安全距离	1	1/2	2	3
碰撞风险	2	1	3	4
换道舒适性	1/2	1/3	1	1/2
换道效率	1/3	1/4	2	1

根据层次分析法得到强制换道的权重系数为: $\omega_1=0.279\ 91$ 、 $\omega_2=0.464\ 71$ 、 $\omega_3=0.139\ 74$ 、 $\omega_4=0.115\ 64$ 。

2.3 参考轨迹的选取与分析

2.3.1 无突发状况的轨迹选取与分析

将目标车道的前车与当前车道的前车作为静态障碍物,即障碍物无突发状况的行为,根据 2.1 节构建的多目标协同优化评价函数,得到各条换道轨迹的 J 值,选取 J 值最小的换道轨迹作为最优参考换道轨迹,如图 6 所示。

2.3.2 突发状况的轨迹选取与分析

假设目标车道的前车发生变化,根据无突发状况下选取的最优换道轨迹,选择 0.1 s 为采样步长,获取当前点的坐标,从当前点到目标点进行轨迹规划,根据获取到的前车状态信息,继续采用五次多项式改变换道初始条件进行重规划选取最优轨迹。

假设前车在 2 s 时发生突变活动,可能是突然减速,可能是突然变道后又稳定前行等,根据前车 2 s 后的变化并且以前车 2 s 时的状态作为初始条件实时进行下一步的规划参考轨迹,根据多目标协同评价函数重新评价,选取评价价值最小的最优换道轨迹,如图 7 所示。

表 2 强制换道的判断矩阵

评价指标	换道安全距离	碰撞风险	换道舒适性	换道效率
换道安全距离	1	1/2	3	2
碰撞风险	2	1	4	3
换道舒适性	1/3	1/4	1	2
换道效率	1/2	1/3	1/2	1

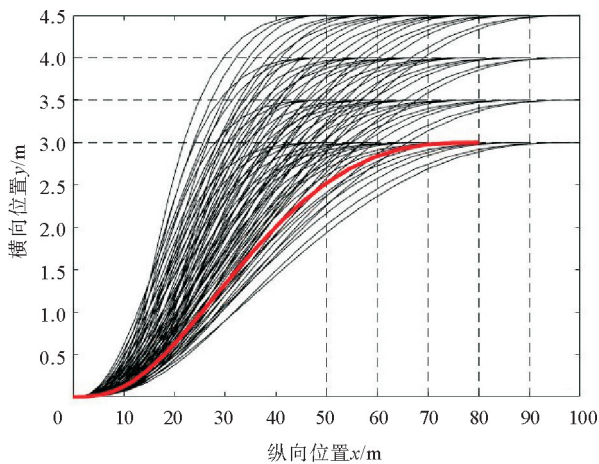


图 6 最优参考换道轨迹
—— 规划轨迹; —— 最优轨迹

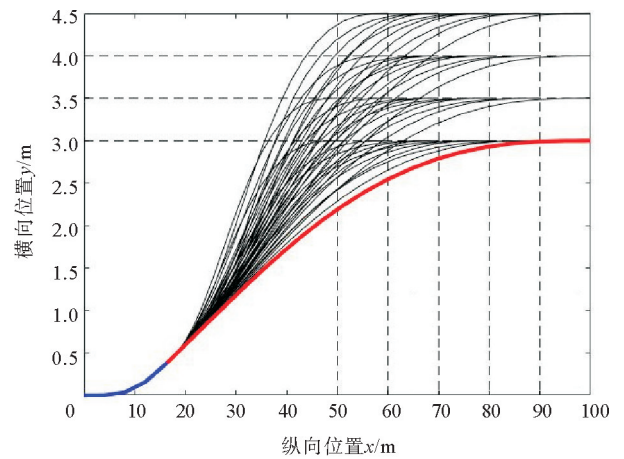


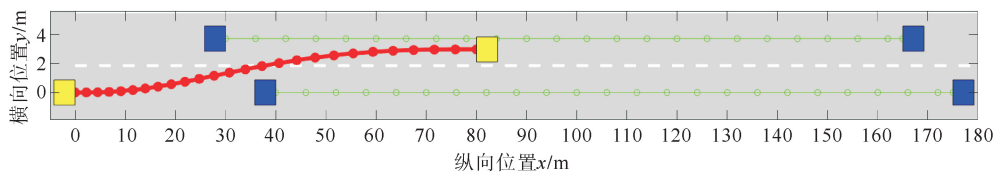
图 7 突发状况最优换道轨迹示意
—— 规划轨迹; —— 最优轨迹; —— 已行驶轨迹

3 仿真分析

通过设定无突发状况和突发状况的场景工况进行仿真分析,验证本文提出算法的合理性。使用五次多项式进行轨迹生成,设计多目标协同优化评价函数进行最优换道轨迹选取,利用 MATLAB 进行换道轨迹的算法验证,对设定的换道风险场景进行仿真验证,根据当前车道与目标车道的前车高风险场景设定,前车的位置与速度对于自车的换道轨迹的实时性与舒适性、安全性等具有很大的挑战。

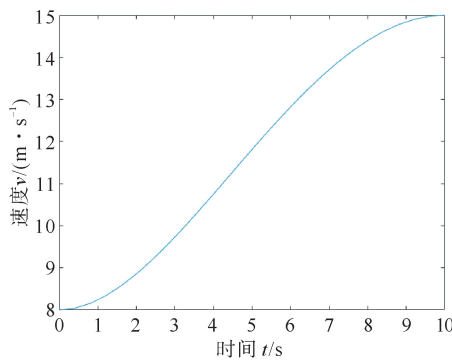
3.1 无突发状况的仿真分析

该场景下设定初始时刻前车 1 和 2 的车速为 15 m/s,自车的初始速度为 8 m/s;自车的起始位置纵向坐标为 0 m,横向坐标为 0 m;当前车道前车的纵向坐标为 40 m,横向坐标为 0 m;目标车道前车的纵向坐标为 30 m,横向坐标为 3.75 m。前面两车匀速前进,并无突发情况,假设在此时自车具有换道意图,进行换道轨迹规划,由表 1 可得自由换道的权重系数为 $\omega_1 = 0.279\ 91$ 、 $\omega_2 = 0.464\ 71$ 、 $\omega_3 = 0.115\ 64$ 、 $\omega_4 = 0.139\ 74$,在此场景中,自车的期望轨迹和周围车辆运行轨迹如图 8 所示。

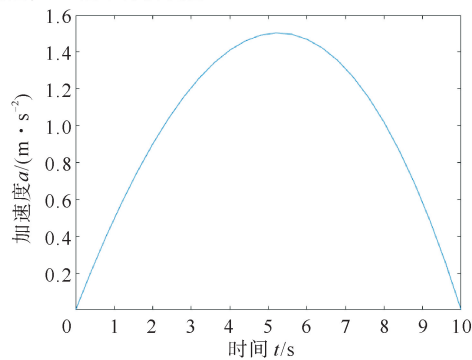


(a) 换道过程中最优轨迹示意

—— 自车换道轨迹; —— 他车行驶轨迹



(b) 换道过程中速度示意



(c) 换道过程中加速度示意

图 8 无突发状况换道轨迹规划示意

从图 8(a)中可以看出在无突发状况下,该换道轨迹规划算法可以获取到一条安全性、舒适性和鲁棒

性较好的轨迹;从图 8(b)中可以看出速度增加得比较平缓,换道安全性较好;从图 8(c)中可以看出加速度先稳定增加到最高后稳定减小至 0 m/s^2 ,即换道加速度无突变点,换道舒适性较好。

3.2 突发状况的仿真分析

该场景下设定的初始时刻各车辆状况条件同 3.1 节。假设在换道过程中,突发状况场景为 2 s 时目标车道前车突然减速直至 0 m/s ,自车的终止速度为 15 m/s 并将 2 s 时的状态作为初始条件进行换道。由表 2 可得强制换道的权重系数为 $\omega_1=0.279\ 91$ 、 $\omega_2=0.464\ 71$ 、 $\omega_3=0.139\ 74$ 、 $\omega_4=0.115\ 64$,因此根据以上场景得到的换道轨迹规划曲线如图 9 所示。

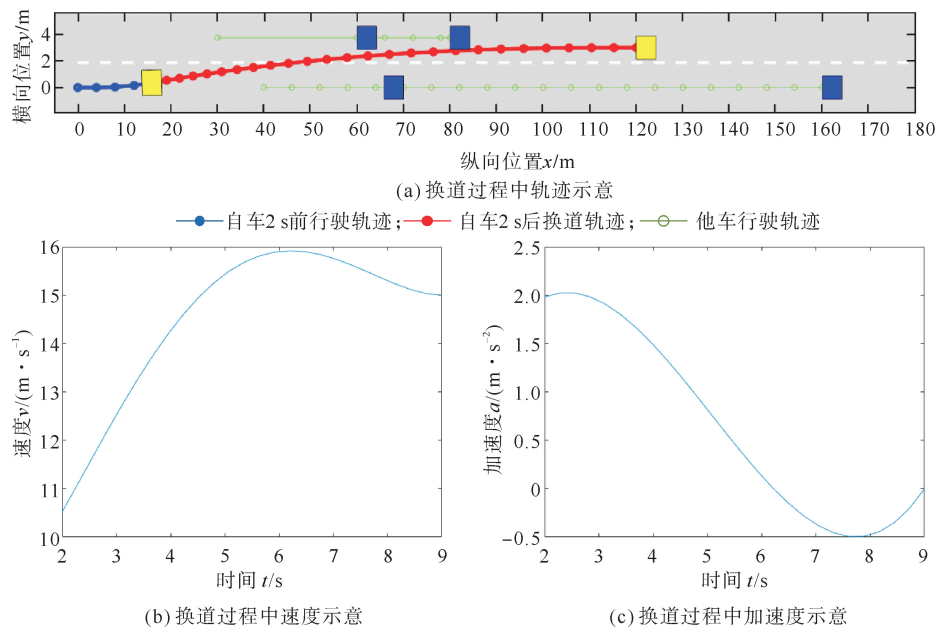


图9 突发状况换道轨迹规划示意

从图 9(a)中可以看出,即使前车突然停车使用该换道轨迹规划算法也能获取到一条安全性、舒适性和鲁棒性较好的轨迹;从图 9(b)中可以看出速度先增加后减小至 15 m/s ,换道安全性较好;从图 9(c)中可看出 2 s 时加速度增高至某值后减小至 0 m/s^2 ,即换道加速度变化平缓且数值变化不大,换道舒适性会比较好。

4 结束语

本文针对智能网联车辆换道问题,提出了基于多目标评价的换道轨迹规划方法。通过筛选出符合车辆动力学约束的轨迹簇,并考虑安全距离、碰撞风险、舒适性和换道效率等评价目标选取最优换道轨迹。仿真结果表明智能网联汽车基于多目标协同优化评价的换道轨迹规划方法能够很好提升换道过程中车辆乘坐的舒适性、安全性与换道效率。

参考文献(References):

- [1] ZHU C Q, ZHONG S Q, MA S F. Two-lane lattice hydrodynamic model considering the empirical lane-changing rate[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019, 73: 229-243.
- [2] 黑凯先, 曲大义, 周警春, 等. 基于随机森林决策树的行驶车辆换道行为识别[J]. 青岛理工大学学报, 2020, 41(1): 115-120.
HEI Kaixian, QU Dayi, ZHOU Jingchun, et al. Lane-changing behavior recognition of running vehicles based on Random Forest[J]. Journal of Qingdao University of Technology, 2020, 41(1): 115-120.
- [3] 尹晓丽, 李雷, 贾新春. 无人驾驶汽车路径跟踪模糊预测控制[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 135-138.
YIN Xiaoli, LI Lei, JIA Xinchun. Predictive fuzzy control of unmanned vehicle path tracking[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2011, 32(2): 135-138.

- [4] 邹凯,蔡英凤,陈龙,等. 基于增量线性模型预测控制的无人车轨迹跟踪方法[J]. 汽车技术,2019(10):1-7.
ZOU Kai,CAI Yingfeng,CHEN Long,et al. A path tracking method of self-driving vehicle based on incremental linear model predictive control[J]. Automobile Technology,2019(10):1-7.
- [5] 聂枝根,王万琼,赵伟强,等. 基于轨迹预瞄的智能汽车变道动态轨迹规划与跟踪控制[J]. 交通运输工程学报,2020,20(2):147-160.
NIE Zhigen,WANG Wanqiong,ZHAO Weiqiang,et al. Dynamic trajectory planning and tracking control for lane change of intelligent vehicle based on trajectory preview[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering,2020,20(2):147-160.
- [6] YANG D,ZHENG S Y,WEN C,et al. A dynamic lane-changing trajectory planning model for automated vehicles[J]. Transportation Research Part C:Emerging Technologies,2018,95:228-247.
- [7] 李立,徐志刚,赵祥模,等. 智能网联汽车运动规划方法研究综述[J]. 中国公路学报,2019,32(6):20-33.
LI Li,XU Zhigang,ZHAO Xiangmo,et al. Review of motion planning methods of intelligent connected vehicles[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(6):20-33.
- [8] 牛国臣,李文帅,魏洪旭. 基于双五次多项式的智能汽车换道轨迹规划[J]. 汽车工程,2021,43(7):978-986.
NIU Guocheng,LI Wenshuai,WEI Hongxu. Intelligent vehicle lane changing trajectory planning based on double quintic polynomials[J]. Automotive Engineering,2021,43(7):978-986.
- [9] XIONG X Y,MIN H T,YU Y B,et al. Application improvement of A* algorithm in intelligent vehicle trajectory planning[J]. Mathematical Biosciences and Engineering,2021,18(1):1-21.
- [10] 江浩,彭侠夫. 基于三次贝塞尔曲线的轨迹规划方法[J]. 数字技术与应用,2022,40(11):7-10.
JIANG Hao,PENG Xiafu. Trajectory planning method based on cubic Bezier curve[J]. Digital Technology and Application,2022,40(11):7-10.
- [11] ZHOU J,ZHENG H Y,WANG J M,et al. Multi objective optimization of lane-changing strategy for intelligent vehicles in complex driving environments[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2019,69(2):1291-1308.
- [12] LIU Y G,ZHOU B B,WANG X,et al. Dynamic lane-changing trajectory planning for autonomous vehicles based on discrete global trajectory[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2021,23(7):8513-8527.
- [13] 付晓鑫,江永亨,黄德先,等. 一种新的实时智能汽车轨迹规划方法[J]. 控制与决策,2015,30(10):1751-1758.
FU Xiaoxin,JIANG Yongheng,HUANG Dexian,et al. A novel real-time trajectory planning algorithm for intelligent vehicles[J]. Control and Decision,2015,30(10):1751-1758.
- [14] ZHANG S L,DENG G H,YANG E C,et al. Optimal vehicle lane change trajectory planning in multi-vehicle traffic environments[J]. Applied Sciences,2022,12(19):9662.
- [15] 邹旭东,贾志强,张丽霞. 基于模型预测控制的智能车辆紧急避障系统[J]. 青岛理工大学学报,2020,41(6):25-32.
ZHOU Xudong,JIA Zhiqiang,ZHANG Lixia. Intelligent vehicle emergency obstacle avoidance system based on model predictive control[J]. Journal of Qingdao University of Technology,2020,41(6):25-32.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)

(上接第 132 页)

- [12] 单际强. 乘用车转向节铝合金铸件金属型重力铸造缺陷成因及工艺优化研究[D]. 长春:长春理工大学,2020.
SHAN Jiqiang. Research on causes of defects of aluminum alloy steering knuckle in metal mould gravity casting and process optimization[D]. Changchun:Changchun University of Science and Technology,2020.
- [13] 许磊,杜彦斌,张磊. 基于拓扑分割的泵叶轮六面体网格划分方法[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2020,37(4):39-45.
XU Lei,DU Yanbin,ZHANG Lei. Hexahedron mesh generation method of pump impeller based on topological division[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University(Natural Science Edition),2020,37(4):39-45.
- [14] TAMILARASAN A,RENUGAMBAL A. AWJ parameters optimization via BBD-ISOA approach while machining NFRP composite[J]. Materials and Manufacturing Processes,2023,38(9):1130-143.
- [15] MANIKANDAN C,AMIRTHAGADESWARAN K S,GUNASEKARAN N. Experimental investigation on ductility and hardness of squeeze cast Al-Si-Cu alloy using response surface methodology and excel-solver[J]. Material Research Express,2021,8(7):076512.

(责任编辑 张晓靖;英文校审 程文华)