

·2024 中国汽车工程学会年会优秀论文专题·

基于 MPC 的智能车辆换道重规划研究*

李耀华¹ 种国臣¹ 范吉康¹ 翟登旺¹ 兰奋龙²

(1. 长安大学, 汽车学院, 西安 710064; 2. 重庆大学, 机械与运载工程学院, 重庆 400044)

【摘要】为解决智能车辆换道过程中,由于其他车辆的行驶状态发生改变导致碰撞风险的问题,需对主车进行实时局部路径规划。基于模型预测控制(MPC)提出换道轨迹重规划策略,根据碰撞风险将其划分为换道轨迹修正策略、换道折返策略及前向主动避障策略,建立基于MPC的横向控制和基于双比例积分微分控制器(PID)的纵向控制,并以纵向车速为联合点的横纵向综合轨迹跟踪控制器。将轨迹规划模块、轨迹重规划模块及轨迹跟踪模块分层集成,对换道轨迹重规划策略进行仿真验证。仿真结果表明:基于MPC的换道轨迹重规划和轨迹跟踪控制可在不同场景下实现车辆安全避撞。

关键词:智能车辆 换道重规划 模型预测控制 轨迹跟踪

中图分类号:U463.3 文献标志码:A DOI: 10.19620/j.cnki.1000-3703.20240704

Study on Lane-Change Replanning for Intelligent Vehicle Based on Model Predictive Control

Li Yaohua¹, Chong Guochen¹, Fan Jikang¹, Zhai Dengwang¹, Lan Fenlong²

(1. School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064; 2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

【Abstract】To address the issue of collision risk during lane changing of intelligent vehicles caused by changes in the driving status of other vehicles, real-time local path planning is required for the host vehicle. Based on Model Predictive Control (MPC), a lane change trajectory replanning strategy is proposed, which is divided into lane change trajectory correction strategy, lane change reentry strategy, and forward active collision avoidance strategy according to the collision risk. A lateral control based on MPC and a longitudinal control based on dual PID are established, and a comprehensive lateral-longitudinal trajectory tracking controller is designed with the longitudinal speed as the joint point. The trajectory planning module, trajectory replanning module, and trajectory tracking module are integrated in layers, and simulations are conducted to verify the lane change trajectory replanning strategies. The simulation results show that the lane change trajectory replanning and trajectory tracking control based on MPC can achieve safe collision avoidance for vehicles in different scenarios.

Key words: Intelligent vehicle, Lane-change replanning, Model predictive control, Trajectory tracking

【引用格式】李耀华, 种国臣, 范吉康, 等. 基于 MPC 的智能车辆换道重规划研究[J]. 汽车技术, 2024(10): 20-27.

LI Y H, CHONG G C, FAN J K, et al. Study on Lane-Change Replanning for Intelligent Vehicle Based on Model Predictive Control[J]. Automobile Technology, 2024(10): 20-27.

1 前言

换道轨迹规划要求智能车辆根据周围的交通环境及自车运动状态,规划出从换道起始点到换道目标点的安全无碰撞路径,并且要兼顾换道效率和换道舒适性^[1]。文献[2]提出基于碰撞风险评估的局部路径规划算法,在

多种道路场景中实现对静态和移动障碍物的有效规避,但未对规划轨迹进行跟踪控制研究。文献[3]提出基于代价函数的局部路径规划算法,使用一元三次方程对路径进行曲线拟合,未考虑实际场景中其他车辆行驶状态改变的情形。文献[4]仅考虑跟车和换道两种策略,提出具有两层结构的协同控制策略,建立了基于五次多项式

*国家重点研发计划项目(2022YFE0102700);西安市碑林区科技计划项目(GX2252)。

通信作者:李耀华(1980—),男,博士,副教授,研究方向为电机电控与新能源汽车技术, nuaaliyaohua@126.com。

换道轨迹模型和固定车头时距跟车模型。文献[5]采用模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)实现静态下换道轨迹规划,但对换道策略的场景研究较少。

目前对车辆换道的研究中大多假定换道过程中其他车辆行驶状态不变,但这与实际交通情况不符。换道过程中,若其他车辆行驶状态发生改变,则将增大与本车碰撞风险,因此应根据碰撞风险进行换道轨迹重规划,以实现安全避撞。

本文针对多车交通环境场景,考虑其他车辆行驶状态变化,提出基于模型预测控制的换道轨迹重规划策略,并设计包含换道轨迹规划层和轨迹跟踪控制层的集成控制器。并对该策略的性能进行仿真验证。

2 智能车辆换道轨迹规划

结构化道路条件下,车辆换道环境模型如图1所示。图中,车辆 M 为目标车, F_0 和 R_0 为原车道前方和后方车辆, F_1 和 R_1 为目标车道前方和后方车辆。

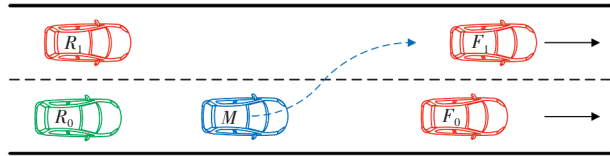


图1 车辆换道环境模型

对模型进行适当简化,假设车辆 F_0 、 R_0 、 F_1 和 R_1 均始终沿所在车道的中心线行驶;车辆 M 在换道开始前和换道结束后均沿车道中心线行驶;换道过程中,车辆 M 航向角变化较小,车辆横向速度变化不会导致纵向车速发生变化。按照相关法规要求,车辆 M 车道后方相邻行驶车辆 R_0 需主动保持与本车的纵向安全距离,换道安全距离模型中不考虑 R_0 。

定义车辆 M 与 F_0 的换道安全系数 U_{L1} 为:

$$U_{L1} = \frac{S_1(t_s)}{S_{\text{safe1}}} \quad (1)$$

式中: t_s 为车辆 M 换道的初始时刻, S_1 为两车初始纵向距离, S_{safe1} 为 M 与 F_0 之间的最小换道安全距离^[6]。

车辆 M 与 F_1 的换道碰撞安全系数 U_{L2} 为:

$$U_{L2} = \frac{S_2(t_s) - S_s}{S_{\text{safe2}}} \quad (2)$$

式中: S_2 为换道初始时刻两车的纵向距离, S_s 为换道完成后发生追尾事故的安全跟车距离, S_{safe2} 为 M 与 F_1 之间的最小纵向安全距离。

车辆 M 与 R_1 的换道碰撞安全系数 U_{L3} 为:

$$U_{L3} = \frac{S_3(t_s) - S_s}{S_{\text{safe3}}} \quad (3)$$

式中: S_3 为换道初始时刻两车的纵向距离, S_{safe3} 为车辆 M 与 R_1 之间的最小纵向安全距离。

当前道路环境的换道安全系数 U_L 为:

$$U_L = \min \{U_{L1}, U_{L2}, U_{L3}\} \quad (4)$$

若 $U_L < 1$,表示换道操作不可行,需放弃换道; $U_L > 1$ 表示满足换道可行性。

基于五次多项式进行换道轨迹规划^[7],考虑换道安全、换道效率和换道舒适性,构造基于五次多项式换道轨迹优化问题:

$$\begin{aligned} \min J = & \omega_1 \left(\frac{|a_{ym}|}{a_{y\max}} + \frac{|j_{ym}|}{j_{y\max}} \right) + \omega_2 \left(\frac{t_L}{t_{L\max}} + \frac{L_x}{L_{x\max}} \right) \\ \text{s.t. } & a_{ym} \leq a_{y\max} \\ & 0 < t_L \leq t_{L\max} \\ & \omega_1 + \omega_2 = 1 \end{aligned} \quad (5)$$

式中: J 为成本函数, ω_1 为换道舒适性权重, ω_2 为换道效率权重, a_{ym} 为选定换道轨迹的侧向加速度最大值, $a_{y\max}$ 为换道轨迹簇中最大侧向加速度值, j_{ym} 为选定换道轨迹的冲击度最大值, $j_{y\max}$ 为换道轨迹簇中最大冲击度; t_L 为选定换道轨迹的换道时长, $t_{L\max}$ 为换道轨迹簇中的最长换道时长; L_x 为当前换道过程纵向位移, $L_{x\max}$ 为换道轨迹簇中最长换道纵向位移。

由式(5)求解出最优换道时长,将其代入基于五次多项式的车辆换道轨迹,即可得到车辆最优换道轨迹。

3 基于模型预测控制的换道重规划

3.1 换道重规划策略

上文换道轨迹规划算法基于换道开始时刻至换道终止时刻的一段时间内,周围的交通车行驶状态均不发生变化的理想条件。在实际换道过程中,存在其他车辆紧急制动的可能,导致规划路径存在碰撞的风险。因此,在换道过程中需对周围车辆行驶状态进行监测。当其他车辆做出可能导致碰撞的驾驶行为,需进行换道重规划,以保证车辆行驶安全。

根据前方车辆具体行驶情况,设计换道重规划策略如下。

策略一:换道轨迹修正,即原车道前车 F_0 制动,目标车道前车 F_1 行驶状态不变。

若 F_0 制动减速后仍满足原规划轨迹的安全条件,则依然采用原规划轨迹;若不满足原规划轨迹的安全条件,按原规划轨迹行驶可能会导致与 F_0 发生碰撞的情况,此时目标车道车辆 F_1 行驶状态未改变,目标车道仍有足够的纵向空间供本车驶入,只需对本车进行横向运动重规划即可安全进入目标车道完成换道,如

图2所示,其中 v_M 为初始车速, t_s 为换道起始时刻, t_{re} 为重规划起始时刻, t_{r1} 为原换道结束时刻, t_{r2} 为重规划换道结束时刻。

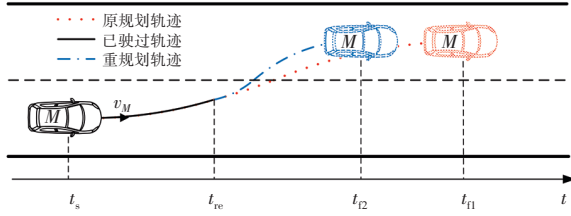


图2 换道轨迹修正

策略二:换道折返,即原车道前车 F_0 行驶状态不变,目标车道前车 F_1 制动。

若 F_1 制动减速后仍满足原规划轨迹的安全条件,则依然采用原规划轨迹;若不满足原规划轨迹的安全条件,此时原车道前车行驶状态不变,原车道车辆行驶状态的不确定性小于目标车道;若此时原车道满足折返所需的安全条件,则折返回原车道更安全,如图3所示。

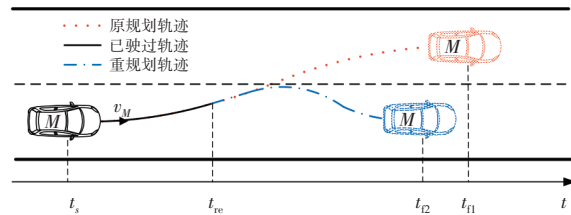


图3 换道折返

若此时不满足折返安全距离条件,因换道轨迹规划预留本车与目标车道前车的跟车安全距离,车辆进入目标车道同时与前车相同的制动减速度进行制动,可避免与前车的碰撞,将其定义为前向主动避撞,如图4所示,其中 a_M 为制动减速度。

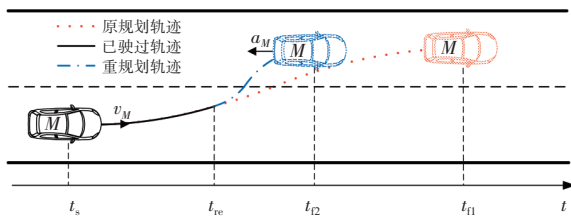


图4 前向主动避撞

策略三:前向主动避撞,即原车道和目标车道前车均制动。

若行驶状态改变后,原车道和目标车道均满足原规划轨迹的安全条件,则依然采用原规划轨迹;若行驶状态改变后,目标车道仍满足原规划轨迹的安全条件,原车道不满足原规划轨迹的安全条件,则进行换道轨迹修正;若行驶状态改变后,目标车道不满足原规划轨迹的安全条件,由于此时原车道和目标车道前车均采取制动减速,两车道车辆行驶状态均有较大的

不确定性,碰撞风险较大,需进行前向主动避撞策略确保安全。

综合上述情况可得智能车辆换道重规划策略,如图5所示。

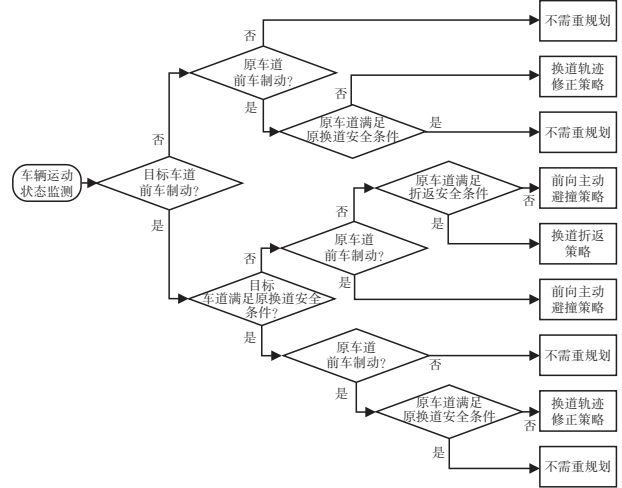


图5 换道重规划策略

由于换道重规划需要在其他车辆行驶状态发生改变时规划出安全换道轨迹,交通环境呈现强不确定性,此时基于五次多项式的轨迹规划效力减弱,需根据时变的障碍物车辆状态信息及本车状态信息,在线动态规划出安全换道轨迹。模型预测控制可对未来一段时间的车辆状态进行预测,具有较强的多约束处理能力,并可在每个控制时刻动态求解多目标优化问题。因此,基于模型预测控制实现换道重规划策略。

3.2 基于MPC的换道轨迹修正

车辆换道过程中,当原车道前车进行制动导致与本车纵向距离急剧减小,使得原车道不满足原换道安全条件,而目标车道仍有充足的换道空间时,需对原换道轨迹进行修正,重规划出安全轨迹完成换道,以避免碰撞事故的发生。

对于轨迹规划阶段,可采用车辆点质量模型将车辆简化为质点,以提升系统的实时性。基于车辆点质量模型及大地、车身坐标系转换关系,可得:

$$\begin{cases} \ddot{x} = a_x \\ \ddot{y} = a_y \\ \dot{\varphi} = \frac{a_y}{\dot{x}} \\ \dot{X} = \dot{x} \cos \varphi - \dot{y} \sin \varphi \\ \dot{Y} = \dot{x} \sin \varphi + \dot{y} \cos \varphi \end{cases} \quad (6)$$

式中: (x, y) 为车辆在车身坐标系下的位置, (X, Y) 为车辆在大地坐标系下的位置, a_x 和 a_y 为车辆纵向和横向加速度, $\dot{\varphi}$ 为车辆横摆角速度。

由此可建立非线性状态空间模型:

$$\dot{\xi}(t) = f(\xi(t), u(t)) \quad (7)$$

式中:状态量 $\xi = (\dot{x}, \dot{y}, \varphi, X, Y)^T$, 控制量 $u = [a_y]$ 。

采用前向欧拉法对其进行离散化,可得:

$$\xi(k+i+1) = \xi(k+i) + T_s f(\xi(k+i), u(k+i)), \quad (8)$$

$$i = 0, 1, \dots, N_p - 1$$

式中: k 为当前时刻, i 为预测时域的步长, T_s 为轨迹重规划时的采样周期, N_p 为预测时域, N_c 为控制时域。

定义系统输出量为 $\eta = (Y, \varphi)^T$, 则有:

$$\eta = C\xi, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据系统状态量和输出量的关系可推导出系统离散输出量:

$$\eta(k+i+1) = C\xi(k+i) + CT_s f(\xi(k+i), u(k+i)), \quad (10)$$

$$i = 0, 1, \dots, N_p - 1$$

将车辆外包络矩形的左、右轮廓线及其延长线分别向外平移一定的横向距离,使平移后的两条直线之外的空间中的障碍物与本车碰撞风险较小。定义该横向距离为横向安全距离 S_y 。定义车辆前方和两条直线之间的区域为碰撞风险区^[8]。只有在碰撞风险区的障碍物与本车存在碰撞风险。横向安全距离 S_y 的取值与本车车速相关:

$$S_y = \begin{cases} 0.5, & 0 \text{ km/h} \leq v_M < 50 \text{ km/h} \\ 0.01v_M, & 50 \text{ km/h} \leq v_M < 100 \text{ km/h} \\ 1, & v_M \geq 100 \text{ km/h} \end{cases} \quad (11)$$

式中: S_y 为横向安全距离, v_M 为本车车速。

假设在碰撞风险区内共有 N 个障碍物点,定义 N 个障碍物点中与本车质心之间纵向距离最小的障碍物点为最大碰撞风险障碍物点,该点与本车质心的纵向距离可表示为:

$$x_{ob, \min} = \min \{x_{ob, i}\}, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (12)$$

由此,提出碰撞风险函数如下:

$$J_{ob} = \frac{\omega_{ob} \cdot v_M}{x_{ob, \min} - l_a + \zeta} \quad (13)$$

式中: J_{ob} 为碰撞风险函数; ω_{ob} 为碰撞风险系数; ζ 为较小的正数,作用是防止分母为0。

根据换道轨迹修正要求可知,重规划的轨迹需避开障碍物点,以减小碰撞风险;与原换道轨迹间差值应尽可能小,接近原规划轨迹;施加的控制量应尽可能小,以满足舒适性要求。因此,目标函数需包含碰撞风险函数项包含重规划轨迹与原规划轨迹的偏差项及控制量项。综上可得,换道轨迹修正的目标函数为:

$$J[\xi(t), \xi_{ob}(t), U(t)] = \sum_{i=1}^{N_p} J_{ob}(t+i|t) + \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(t+i|t) - \eta_{ref}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c} \|u(t+i-1|t)\|_R^2 \quad (14)$$

式中: $J_{ob}(t)$ 为 t 时刻碰撞风险函数值; $U(t)$ 为控制量序列; h_{ref} 为原规划轨迹的相关信息, $h_{ref} = (Y_{ref}, j_{ref})^T$; Q 为输出量偏差权重矩阵; R 为控制量权重矩阵。

为使重规划的换道轨迹可以保证车辆的行驶稳定性以及驾乘舒适性,需对目标函数添加约束条件。此时,求解的优化问题为寻找多约束条件下的目标函数最小值对应的控制量序列:

$$\min_{U(t)} J = \sum_{i=1}^{N_p} J_{ob}(t+i|t) + \sum_{i=1}^{N_p} \|\eta(t+i|t) - \eta_{ref}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_c} \|u(t+i-1|t)\|_R^2, \quad (15)$$

$$\text{s.t. } \eta_{\min} \leq \eta(i|t) \leq \eta_{\max}, \quad i = t+1, t+2, \dots, t+N_p$$

$$u_{\min} \leq u(i|t) \leq u_{\max}, \quad i = t+1, t+2, \dots, t+N_c$$

求解目标函数最小值及其对应的最优控制序列,将求解得到的最优控制量代入式(5),即可获得未来一段时间的重规划轨迹离散点。使用五次多项式对重规划轨迹离散点进行拟合,将拟合后的重规划轨迹曲线输入至车辆轨迹跟踪控制模块对车辆进行控制,在下一个轨迹重规划时刻将车辆实际状态量输入至轨迹重规划模块,从而实现滚动重规划。

3.3 基于MPC的换道折返

换道过程中,若目标车道前车制动减速,按原规划路线无法完成换道,而原车道前车行驶状态未改变,此时目标车道相比原车道不确定性更大,进入目标车道可能会使行驶效率降低,甚至导致碰撞事故。因此,如果满足折返原车道的安全条件,则折返原车道更加安全,可返回原车道行驶一段时间后再寻找合适时机换道。

基于碰撞时间(Time to Collision, TTC)模型建立车辆跟车安全距离模型:

$$S_s = \begin{cases} (v_r - v_f)t_{TTC} + S_{s0}, & v_f \leq v_r \\ S_{s0}, & v_f > v_r \end{cases} \quad (16)$$

式中: S_s 为纵向安全跟车距离; v_r 为后车车速; v_f 为前车车速; $t_{TTC}=3$ s为碰撞时间; S_{s0} 为两车车速相同时需保持的静态跟车安全距离,本文取为2 m。

返回原车道通常可在7 s内完成。在返回原车道的过程中,若原车道前车车速低于本车车速,则可能会对本车产生影响;若原车道前车车速大于本车车速或者轨迹重规

划起始时刻本车与原车道前车距离 $S_{re} \geq 10 \times (v_r - v_f) + S_{s0}$, 则换道折返完成后仍可满足最小安全跟车距离, 认为此种工况折返过程中原车道无碰撞风险。换道折返重规划中本车保持原车速, 待折返完成后再调整与前车的跟车间距。如果轨迹重规划起始时刻本车与原车道前车距离 S_{re} 满足 $3 \times (v_r - v_f) + S_{s0} \leq S_{re} < 10 \times (v_r - v_f) + S_{s0}$, 则折返途中如本车保持原车速行驶会导致碰撞风险增加, 需要适当减速, 以保持与前车跟车安全距离。

3.3.1 原车道无碰撞风险

此种工况下, 保持本车车速不变, 规划出一条折返轨迹返回原车道。由于目标车道中车辆行驶不确定性和碰撞风险大于原车道, 因此希望尽快驶出目标车道, 进入原车道并沿原车道中心线行驶; 折返轨迹需尽量远离障碍物, 减小碰撞风险; 同时规划出的路线应尽量满足舒适性要求, 尽可能施加较小的控制量。因此, 目标函数需重规划折返轨迹与原车道中心线偏差项、碰撞风险函数项和控制量项。综上可得目标函数为:

$$J[\xi(t), \xi_{ob}(t), U(t)] = \sum_{i=1}^{N_f} \|\eta(t+i|t) - \eta_{c0}(t+i|t)\|_Q^2 + \sum_{i=1}^{N_f} J_{ob}(t+i|t) + \sum_{i=1}^{N_c} \|\mathbf{u}(t+i-1|t)\|_R^2 \quad (17)$$

式中: η_{c0} 为原车道中心线的 Y 坐标, $\eta_{c0} = [Y_{c0}]$ 。

约束条件及求解函数与上文相同。获得折返轨迹离散点后, 同样采用五次多项式进行拟合, 将拟合后的轨迹曲线输入至车辆轨迹跟踪控制模块对车辆进行控制, 实现换道折返重规划。

3.3.2 原车道有碰撞风险

此种工况下, 在控制车辆横向运动的同时需进行适当减速直至与原车道前车速度一致。

设计折返过程中的纵向速度变化为匀减速, 初速度为重规划开始时刻 t_{re} 的本车车速 v_{Ms} 、末速度为原车道前车车速 v_{F0} 、加速度为 a_x , 且为负数、减速时长为 t_a , 则有:

$$v_{F0} - v_{Ms} = a_x t_a \quad (18)$$

减速折返过程中, 需保证实际纵向距离始终大于纵向跟车安全距离, 以应对原车道前车紧急制动等特殊状况。

设重规划初始时刻两车之间的纵向距离为:

$$S(t_{re}) = (v_{Ms} - v_{F0}) \cdot t_{s0} + S_{s0} \quad (19)$$

式中: t_{s0} 为两车均按照 t_{re} 时刻状态行驶时自 t_{re} 时刻至后车到达与前车后方距离 S_{s0} 位置的时长。

减速开始后, t 时刻时两车之间的纵向距离和纵向跟车安全距离为:

$$S(t) = S(t_{re}) + v_{F0} \cdot (t - t_{re}) - [v_{Ms} \cdot (t - t_{re}) + \frac{a_x \cdot (t - t_{re})^2}{2}], \quad t_{re} \leq t \leq t_{re} + \frac{v_{F0} - v_{Ms}}{a_x} \quad (20)$$

$$S_s(t) = [v_{Ms} + a_x \cdot (t - t_{re}) - v_{F0}] \cdot 3 + S_{s0}, \quad t_{re} \leq t \leq t_{re} + \frac{v_{F0} - v_{Ms}}{a_x} \quad (21)$$

在 $t_{re} \leq t \leq t_{re} + \frac{v_{Ms} - v_{F0}}{a_x}$ 条件下, 考虑极限情况, 即

换道重规划开始时刻本车与原车道前车的纵向距离恰好等于纵向跟车安全距离, 即 $t_{s0} = 3$ s, 解得使 $S(t) \geq S_s(t)$

恒成立的加速度绝对值的最小值为 $a_x = \frac{v_{F0} - v_{Ms}}{t_{s0}}$ 。在

$t_{s0} \geq 3$ s 后, 以该减速度减速, 可保证两车之间实际纵向距离恒大于纵向跟车安全距离阈值, 满足安全条件。

换道开始至折返结束本车的纵向加速度为:

$$a_x = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_{re} \\ \frac{v_{F0} - v_{Ms}}{t_{s0}}, & t_{re} \leq t < t_{re} + t_a \\ 0, & t \geq t_{re} + t_a \end{cases} \quad (22)$$

将纵向加速度带入至纵向加速度时变条件下的车辆状态预测模型。目标函数、约束条件、优化问题的构建与求解、离散点拟合方式均与上文一致。将拟合后的重规划轨迹输入至车辆轨迹跟踪控制模块对车辆进行横纵向控制, 则可实现对减速折返轨迹的重规划。

3.4 基于MPC的前向主动避撞

车辆换道过程中, 若目标车道前车紧急制动, 使得原规划轨迹不能安全完成换道, 同时原车道不满足折返安全距离条件或原车道前车此时也制动减速, 则进行前向主动避撞。与初始时刻保持安全距离的前提下, 若前车紧急制动, 则本车以相同加速度制动, 可避免碰撞。因此, 规划出本车的纵向加速度为:

$$a_x = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_{re} \\ a_{F1}, & t_{re} \leq t < t_{re} + t_a \\ 0, & t \geq t_{re} + t_a \end{cases} \quad (23)$$

式中: a_{F1} 为目标车道前车的制动减速度, t_{re} 为换道重规划的开始时刻, t_a 为本车开始减速至完全停车的时长。

前向主动避撞时, 目标车道和原车道车辆均制动, 两车道均具有较大碰撞风险, 应尽量减少本车横跨两条车道的的时间, 即尽快进入目标车道并尽量贴近目标车道中心线; 重规划的轨迹需尽量远离障碍物, 减小碰撞风险; 规划出的路线尽可能施加较小的控制量, 满足舒适性要求。因此, 目标函数中应包含重规划轨迹与目标车道中心线偏差项、碰撞风险函数项和控制量项。综上, 提出目标函数为:

前车行驶状态改变后,若不进行换道重规划,自车与原车道前车之间的纵向距离由于前车紧急制动而急剧减小,在换道开始1.96 s后两车纵向距离将减小为0,发生斜向碰撞。此时,车辆位置关系图如图9所示。

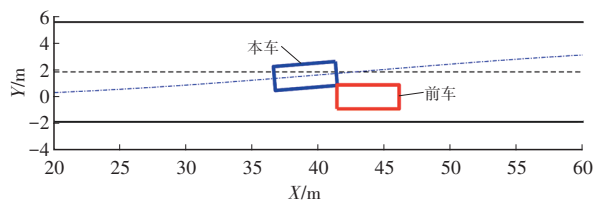


图9 原换道轨迹车辆位置关系

为了避免碰撞,进行换道重规划。根据换道重规划选择策略,换道开始0.5 s后,原车道前车开始以 -3 m/s^2 的减速度减速,此时原车道仍满足换道安全条件,无需重规划。换道开始1 s后,原车道前车加大制动强度,以 -5 m/s^2 的减速度制动,此时原车道不满足换道安全条件,触发换道重规划。由于目标车道满足换道安全条件,进行换道轨迹修正。

利用车辆质心位置及航向角信息,计算出车辆4个角点的坐标。换道轨迹修正后车辆完全跨过与原车道前车左侧重合的碰撞风险辅助线 Line1 的时刻 $t_{c1}=1.82 \text{ s}$,此时本车与原车道前车的位置关系如图10所示。

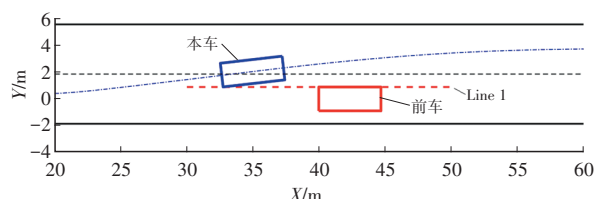


图10 换道轨迹修正后车辆位置

图10表明: t_{c1} 时刻前,两车纵向距离始终大于0,不会发生碰撞; t_{c1} 时刻后,本车完全越过碰撞风险辅助线 Line1,不存在碰撞风险。仿真验证换道轨迹修正可重规划出避免碰撞的安全换道轨迹,同时轨迹跟踪控制保证车辆行驶状态稳定。

5.2 换道折返验证

换道折返试验场景采用目标车道前车进行制动,同时根据原车道前车的速度和位置参数,又分为原车道无碰撞风险和原车道有碰撞风险。

5.2.1 原车道无碰撞风险

仿真条件设置:路面附着系数0.8,自车以 20 m/s 的速度行驶,目标车道前车以 22 m/s 的速度行驶,与本车纵向距离为 10 m 。换道开始 1.5 s 后,目标车道前车以 -5 m/s^2 的减速度制动直至停车。

换道起始时刻,目标车道前车车速大于本车且初始纵向距离充足,若前车保持当前行驶状态与本车不存在碰撞风险,换道安全系数 $U_L=3$,换道时间 $t_L=5.31 \text{ s}$ 。换

道开始 1.5 s 内,车辆跟踪原规划轨迹行驶。换道开始 1.5 s 后,两车之间纵向距离因目标车道前车制动而减小。如本车仍跟踪原规划轨迹行驶,将在 4.22 s 发生追尾碰撞,如图11所示。

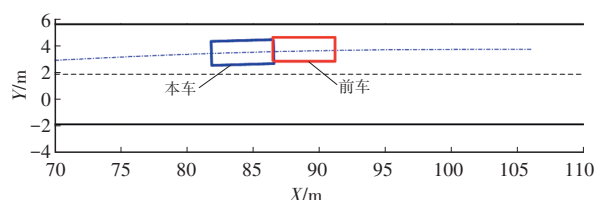


图11 原换道轨迹车辆位置关系

为了避免碰撞,需要进行换道重规划。根据换道重规划策略,换道开始 1.5 s 后,目标车道前车紧急制动,导致目标车道不满足换道安全条件。此时原车道满足折返安全条件,采取换道折返,换道折返轨迹如图12所示。

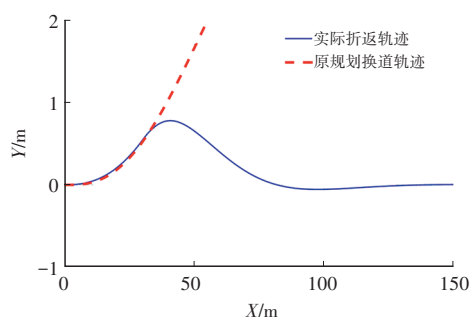


图12 换道折返轨迹重规划

5.2.2 原车道有碰撞风险

仿真条件设置:路面附着系数0.8,原车道前车行驶车速为 15 m/s ,与本车初始纵向距离为 25 m ,本车以及目标车道前车速度和位置参数与上文中原车道无碰撞风险工况相同。

换道开始 1.5 s 后,目标车道不满足换道安全条件,折返安全距离为 17 m ,而此时本车与原车道前车纵向距离为 17.5 m ,满足折返安全条件,换道折返轨迹与上文相同。但由于折返原车道有碰撞风险,需要在返回途中进行适当减速。本车与原车道前车的纵向距离曲线如图13所示,表明换道开始至折返结束,本车与原车道前车的纵向距离始终大于零,与原车道前车也不会发生碰撞。

5.3 前向主动避撞验证

前向主动避撞试验场景采用目标车道前车以及原车道前车均减速制动直至停车。

仿真条件设置:在附着系数0.8的路面上,自车以 20 m/s 的车速行驶;目标车道前车以 22 m/s 的速度行驶,与本车纵向距离为 10 m ;原车道前车行驶车速为 16 m/s ,与本车纵向距离为 12 m 。换道开始 1.5 s 后,目标车道前车以及原车道前车均以 -4 m/s^2 的减速度制动直至停车。

根据换道初始条件求得换道安全系数 $U_L=2.36$,换

道时间 $t_t=4.27$ s。换道开始后1.5 s内,车辆跟踪原规划轨迹行驶;换道开始1.5 s时因目标车道前车制动,导致按原规划轨迹不能安全完成换道,同时原车道也不满足折返条件。此时执行前向主动避障,车辆进行减速同时尽快并入目标车道以尽量减少本车横跨两条车道的的时间。前向主动避障规划轨迹如图14所示,表明验证在原车道和目标车道前车同时制动的工况下,前向主动避障可以避免发生碰撞。

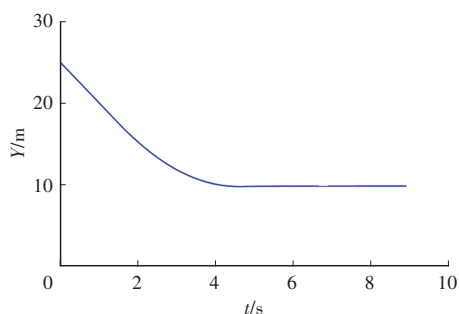


图13 本车与原车道前车纵向距离

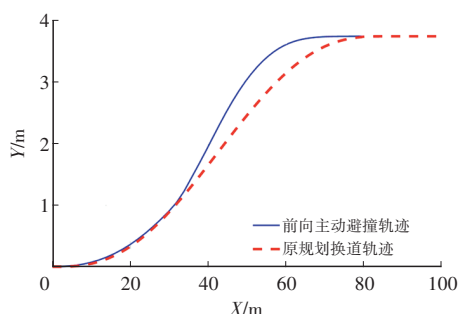


图14 前向主动避障轨迹重规划

6 结束语

本文针对智能车辆换道过程中由其他车辆的行驶状态发生改变导致增大碰撞风险的问题,基于模型预测控制实现换道重规划,根据不同交通情况,进行换道轨迹修正、换道折返和前向主动避障操作,并根据不同策略的具体要求设计不同的目标函数,以获取不同工况下的最优控制量,基于五次多项式拟合出重规划轨迹,将其输入至轨迹跟踪控制模块,并在下一重规划时刻继续求解最优控制量,实现滚动重规划。仿真结果表明,基于MPC的换道轨迹重规划可在不同场景下实现车辆安全避障。

参 考 文 献

[1] GONZALEZ D, PEREZ J, MILANES V, et al. A Review of Motion Planning Techniques for Automated Vehicles[J].

IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 17(4): 1135-1145.

[2] 王明强,王震坡,张雷. 基于碰撞风险评估的智能汽车局部路径规划方法研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(10): 28-41.

WANG M Q, WANG Z P, ZHANG L. Local Path Planning for Intelligent Vehicles Based on Collision Risk Evaluation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(10): 28-41.

[3] 郭蓬,吴学易,戎辉,等. 基于代价函数的无人驾驶汽车局部路径规划算法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(6): 79-85.

GUO P, WU X Y, RONG H, et al. Local Path Planning of Driverless Cars Based on Cost Function[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(6): 79-85.

[4] 周亚洲,汪若尘,丁仁凯. 汽车自适应巡航与换道过程多目标协同控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 108-115.

ZHOU Y Z, WANG R C, DING R K. Multi-Objective Coordinated Control for Vehicle During Adaptive Cruise and Lane Change Process[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022, 50(3): 108-115.

[5] WANG Z, LI G, JIANG H, et al. Collision-free Navigation of Autonomous Vehicles Using Convex Quadratic Programming-Based Model Predictive Control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2018, 23(3): 1103-1113.

[6] 刘志强,贾海江,汪彭,等. 基于减速度的车辆主动避障模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(11): 76-80.

LIU Z Q, JIA H J, WANG P, et al. A Study on Active Collision Avoidance Model Based on Deceleration[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(11): 76-80.

[7] 闫尧,李春书,唐风敏. 基于五次多项式模型的自主车辆换道轨迹规划[J]. 机械设计, 2019, 36(8): 42-47.

YAN Y, LI C S, TANG F M. Lane-Changing Trajectory Planning of The Autonomous Vehicle Based on the Quintic Polynomial Model[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(8): 42-47.

[8] 熊升华,赵海良. 基于矩形安全邻域的智能车移动仿真研究[J]. 计算机应用研究, 2013, 30(12): 3593-3596+3621.

XIONG S H, ZHAO H L. Simulations on Movement of Intelligent Vehicle Based on Rectangular Safe Neighborhood[J]. Application Research of Computers, 2013, 30(12): 3593-3596+3621.

(责任编辑 王 一)

修改稿收到日期为2024年8月12日。