

基于多模式轨迹和车速自适应的变道超车规划

张彬岑¹,高秀晶^{1,2},洪汉池^{1,2},曾方正¹,黄雯垠¹

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院,福建 厦门 361024;

2. 福建省客车及特种车辆研发协同创新中心,福建 厦门 361024)

摘要:针对智能汽车变道超车规划中轨迹模式和速度策略单一的问题,提出一种安全高效、多模式轨迹和车速自适应的变道超车规划方案。通过建立可调参数的三段式变道超车模型,利用五次多项式设计变道轨迹拟合算法,以安全性为要求设计侧翻约束和碰撞约束边缘条件。基于多目标优化函数进行多模式轨迹优化,得到不同模式变道轨迹的解集空间,并基于超车阶段的时间进行速度自适应规划。通过 MATLAB/Simulink 构建仿真测试试验,结果表明该方案在全速域,满足安全条件约束下,能输出3种模式(效率模式、舒适模式和综合模式)的变道超车轨迹,输出的轨迹特性稳定,在两车相对速度较小时自适应速度规划能够有效提升超车效率。

关键词:汽车工程;变道超车模型;多模式轨迹规划;约束条件;自适应速度规划

中图分类号:U461.99

文献标志码:A

文章编号:1672-4348(2023)01-0063-09

Lane-change overtaking planning based on multi-mode trajectory and vehicle velocity adaptation

ZHANG Bincen¹, GAO Xiujing^{1,2}, HONG Hanchi^{1,2}, ZENG Fangzheng¹, HUANG Wenyin¹

(1. Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Fujian Collaborative Innovation Center for R&D of Coach and Special Vehicle, Xiamen 361024, China)

Abstract: Aiming at the problem of single trajectory mode and velocity strategy of intelligent vehicle lane-change overtaking, a safe, efficient, multi-mode trajectory and velocity adaptive planning scheme for lane changing and overtaking was proposed. By establishing a three-stage lane-change overtaking model with adjustable parameters, a quintic polynomial was used to design a lane-changing trajectory fitting algorithm, and with safety as the requirement, the edge conditions of rollover constraints and collision constraints were designed. Based on the multi-objective optimization function, the multi-mode trajectory optimization was carried out, and the solution set space of different modes of lane-changing trajectories was obtained, and the velocity adaptive planning was designed based on the time of overtaking phase. A simulation test was constructed using MATLAB/Simulink. Results show that the planning scheme can output three modes (efficiency mode, comfort mode and comprehensive mode) lane-change overtaking trajectories in the full velocity range and under the constraints of safety conditions, and the output trajectory characteristics are stable. At the same time, adaptive velocity planning can significantly improve the overtaking efficiency when the relative velocity of the two vehicles is small.

Keywords: automotive engineering; lane-change overtaking model; multi-mode trajectory planning; constraint conditions; adaptive velocity planning

收稿日期:2022-12-05

基金项目:国家高端外国专家项目(G20200221011);福建省自然科学基金(2020J01273)

第一作者简介:张彬岑(1997—),男,福建莆田人,硕士研究生,研究方向:自动驾驶技术。

通信作者:高秀晶(1984—),男,福建福清人,副教授,博士,研究方向:自动驾驶技术、智能控制技术、主动安全技术、水下机器人系统研发。

错误判断变道时机和错估安全距离容易导致超车事故,科学的变道超车轨迹规划可以有效提高智能车辆的安全性能。超车规划可以看作是在限定条件下,求解一条符合要求的轨迹,变道超车轨迹规划离不开可以准确描述超车过程的物理模型。Chai 等^[1]提出了一种多目标约束最优控制模型来描述自动超车过程。许伦辉等^[2]根据车辆不同运行特性和道路限速要求,设计了双车道的超车模型。Dixit 等^[3]基于横向位置和纵向速度进行碰撞约束,生成局部风险再通过鲁棒 MPC 模型预测方法在中高速结构道路中进行超车轨迹规划。Yamada 等^[4]基于最优求解问题提出平滑无碰撞的自动超车最优轨迹生成方法。Karlsson 等^[5]利用与前车的相对距离进行采样,用速度逆矩阵代替速度状态,并利用控制变量的非线性变化求解超车问题。

上述研究在相对速度接近时的速度规划考虑甚少,导致两车并行时间过长,超车效率低;输出的轨迹单一,导致无法适应多种道路工况和乘坐需求。本研究基于改进的可调参数三阶段变道超车模型,在变道阶段使用五次多项式插值算法进行轨迹拟合,并进行侧翻约束和碰撞约束;建立综合考虑变道效率和舒适性的多目标优化函数,根据约束条件求得不同权重比值区间的多模式变道轨迹;制定自适应速度规划策略,根据超车持续时

间,判断是否需要开启加速超车,并选定合理的加速度进行加速超车。

1 变道超车模型及轨迹拟合算法

1.1 三阶段变道超车模型

1.1.1 模型整体及场景定义

将变道超车的车辆称为“主车”,被超车的车辆称为“交通车”,车辆动力学约束条件参考使用轿车的标准。假设在变道超车过程中,除被超车以外无其他障碍车辆,交通车保持速度恒定,且两车在车道中央线上行驶。主车超车行为包括换道、超车和并道,根据主车和交通车 3 个阶段的始末相对位置,将变道超车的行驶区间分别划分为:换道阶段(主车 P_0-P_1 ,交通车 C_0-C_1),超车阶段(主车 P_1-P_2 ,交通车 C_1-C_2),并道阶段(主车 P_2-P_3 ,交通车 C_2-C_3)。如图 1 所示。

定义车道线向右为 x 轴的正方向,车道线向上为 y 轴正方向,以主车初始位置 P_0 在车道中央线投影为原点建立坐标系,则 P_0 的坐标为 $(0, -\frac{d}{2})$, d 为车道宽。 S_0 是换道开始时两车相对距离($S_0 > 0$), d_1 是换道结束时或超车开始时两车相对距离(d_1 可小于 0), d_2 是超车结束时或并道开始时两车相对距离(d_2 可小于 0), d_3 是并道结束时两车相对距离($d_3 > 0$)。

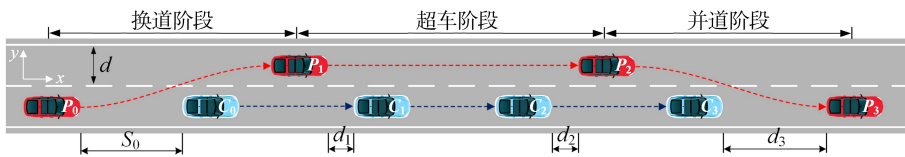


图 1 三阶段变道超车整体模型

Fig.1 Overall model of three-stage lane-change overtaking

1.1.2 换道阶段

主车从初始位置 P_0 以初速度 v_{m0} 与前方交通车距离 S_0 时开始换道,经历时间 t_c 纵向行驶距离 S_{m1} 、横向行驶距离 d (y 轴正方向)后到达位置 P_1 ,末速度为 v_{m0} 。交通车从初始位置 C_0 ,以恒速 v_{c0} 经历时间 t_c 纵向行驶距离 S_{c1} 到达位置 C_1 。换道结束时,主车和交通车纵向距离 d_1 ,如图 2(a) 所示。以主车和交通车行驶的距离为关系,得到式(1)~(3):

$$S_{m1} = S_0 + S_{c1} - d_1 = v_{m0}t_c \quad (1)$$

$$S_{c1} = v_{c0}t_c \quad (2)$$

$$t_c = \frac{S_0 - d_1}{v_{m0} - v_{c0}} \quad (3)$$

1.1.3 超车阶段

假定主车从超车起始位置 P_1 以初速度 v_{m0} 在纵向与交通车距离 d_1 时开始超车;经历时间 t_o ,纵向行驶 S_{m2} 后到达位置 P_2 ,超车过程平均加速度为 a_o ,末速度为 v_{m1} 。交通车从位置 C_1 ,以恒速 v_{c0} 经历时间 t_o 纵向行驶 S_{c2} 到达位置 C_2 。超车结束后,主车和交通车纵向距离 d_2 。其中, L_m 为主车车长, L_c 为交通车车长,如图 2(b) 所示。以主车和交通车行驶的距离为关系,得到式(4)~(7):

$$S_{m2} = d_1 + S_{c2} + L_c + d_2 + L_m = v_{m0}t_o + \frac{1}{2}a_o t_o^2 \quad (4)$$

$$a_o = \frac{v_{m1} - v_{m0}}{t_o} \quad (5)$$

$$S_{c2} = v_{c0}t_o \quad (6)$$

$$t_o = \frac{d_1 + d_2 + L_c + L_m}{\frac{v_{m0} + v_{m1}}{2} - v_{c0}} \quad (7)$$

1.1.4 并道阶段

主车从并道起始位置 P_2 , 以初速度 v_{m1} 纵向与交通车距离 d_2 时开始并道, 经历时间 t_m 纵向行驶距离 S_{m3} , 横向 (y 轴负方向) 行驶距离 d 后到达位置 P_3 , 末速度为 v_{m1} 。交通车从位置 C_2 , 假定以恒速 v_{c0} 经历时间 t_m 纵向行驶距离 S_{c3} 到达位置 C_3 。并道结束时, 主车和交通车纵向距离 d_3 , 如图 2(c) 所示。以主车和交通行驶的距离为关系, 得到式 (8) ~ (10)。

$$S_{m3} = (S_{c3} + L_c + d_3 + L_m) - (L_c + d_2 + L_m) = S_{c3} + d_3 - d_2 = v_{m1}t_m \quad (8)$$

$$S_{c3} = v_{c0}t_m \quad (9)$$

$$t_m = \frac{d_3 - d_2}{v_{m1} - v_{c0}} \quad (10)$$

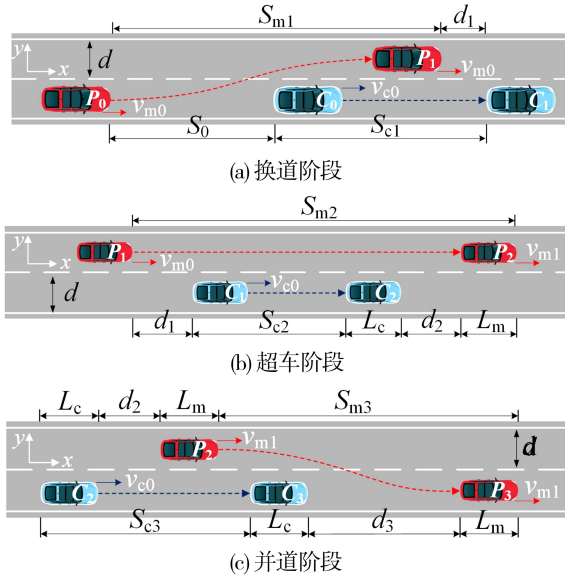


图 2 各阶段建模结果

Fig.2 Modeling results at each stage

1.1.5 三阶段变道模型总结

从上述模型计算中可以得到变道超车需要的最小安全空间是 $S_m = S_{m1} + S_{m2} + S_{m3}$, 变道超车总时间是 $t_{com} = t_c + t_o + t_m$ 。在其他条件不变下, 通过改

变 S_0, d_1, d_2, d_3 的值可以得不同性状的变道超车轨迹, 能够满足不同需求的规划。

1.2 基于五次多项式插值的轨迹拟合算法

换道和并道阶段使用五次多项式插值算法对轨迹进行拟合 (将换道和并道统称为变道)。假设车辆纵向运动和横向运动相对独立, 与变道超车模型的坐标系相同, 使用大地坐标系 (x 轴为纵向, y 轴为横向), 变道期间任意时刻 t 的纵横向位置 $x(t)$ 、 $y(t)$ 可以表示成五次多项式方程如式 (11), a_0, a_1, \dots, a_5 和 b_0, b_1, \dots, b_5 分别为纵向和横向的五次多项式方程系数。

$$\begin{cases} x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \\ y(t) = b_0 + b_1t + b_2t^2 + b_3t^3 + b_4t^4 + b_5t^5 \end{cases} \quad (11)$$

分别对位置方程进行一次和二次求导, 得到纵横向速度 $x'(t)$ 、 $y'(t)$ 和纵横向加速度 $x''(t)$ 、 $y''(t)$ 。定义变道初始时刻 t_0 的纵向状态量 $[x_0, x'_0, x''_0]$, 横向状态量 $[y_0, y'_0, y''_0]$, 变道终点时刻 t_1 的纵向状态量 $[x_1, x'_1, x''_1]$, 横向状态量 $[y_1, y'_1, y''_1]$ 。本研究用 t_g 表示变道时间 ($t_g = t_1 - t_0$)。假设变道过程纵向速度不变, 起始和终点时刻的横向速度和加速度为 0。

将纵横向始末状态量合并得到状态矩阵 $X = [x_0, x'_0, x''_0, x_1, x'_1, x''_1]$ 和 $Y = [y_0, y'_0, y''_0, y_1, y'_1, y''_1]$ 。 X 和 Y 可以用式 (12) 和式 (13) 时间矩阵 T 和系数矩阵 A 、 B 相乘来表示。最后求得纵横向系数矩阵 A 和 B , 从而确定唯一的轨迹。

$$X = \begin{bmatrix} x_0 \\ x'_0 \\ x''_0 \\ x_1 \\ x'_1 \\ x''_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0^5 & t_0^4 & t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ 5t_0^4 & 4t_0^3 & 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 20t_0^3 & 12t_0^2 & 6t_0 & 2 & 0 & 0 \\ t_1^5 & t_1^4 & t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 5t_1^4 & 4t_1^3 & 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 \\ 20t_1^3 & 12t_1^2 & 6t_1 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ a_4 \\ a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = T \times A \quad (12)$$

$$Y = \begin{bmatrix} y_0 \\ y'_0 \\ y''_0 \\ y_1 \\ y'_1 \\ y''_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_0^5 & t_0^4 & t_0^3 & t_0^2 & t_0 & 1 \\ 5t_0^4 & 4t_0^3 & 3t_0^2 & 2t_0 & 1 & 0 \\ 20t_0^3 & 12t_0^2 & 6t_0 & 2 & 0 & 0 \\ t_1^5 & t_1^4 & t_1^3 & t_1^2 & t_1 & 1 \\ 5t_1^4 & 4t_1^3 & 3t_1^2 & 2t_1 & 1 & 0 \\ 20t_1^3 & 12t_1^2 & 6t_1 & 2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_5 \\ b_4 \\ b_3 \\ b_2 \\ b_1 \\ b_0 \end{bmatrix} = T \times B \quad (13)$$

2 轨迹约束及优化

2.1 变道过程中的侧翻约束

变道过于激烈会使车辆侧向加速度过大,从而导致侧翻。车辆行驶过程中侧向加速度只需达到 0.8 倍^[6]的静态侧向加速度阈值就会侧翻,参考轿车准静态侧翻的平均阈值为 $1.41 g$ ^[7],则动态侧翻阈值 $a_{y,max}$ 为 $1.12 g$ ($g=9.8 N/m^2$),对变道过程侧向加速度进行约束:

$$|a_y(t)| < a_{y,max} \quad (14)$$

将大地坐标系下的轨迹点加速度 $x''(t)$ 和 $y''(t)$ 投影至图 3 的车辆坐标系下,得到侧向加速度 $a_y(t)$ 如式 (15), $\varphi(t)$ 是轨迹的参考航向角。

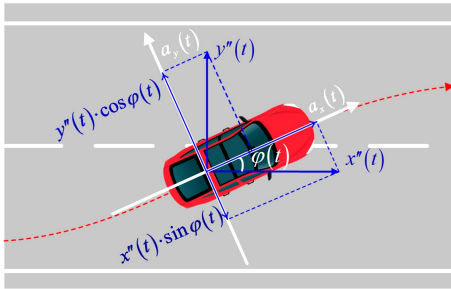


图 3 车辆坐标系

Fig.3 Vehicle coordinate system

$$a_y(t) = y''(t) \cos\varphi(t) - x''(t) \sin\varphi(t) \quad (15)$$

图 4 是侧向加速度曲线,在极值点 $t_{i,j}$ 取得极值 $a_y(t_{i,j})$,其中 $a_y(t_{i,j}) = |a_y(t_j)|$ 。因此,为避免变道侧翻需要限制极值点的加速度绝对值小于侧翻阈值,即 $|a_y(t_{i,j})| < a_{y,max}$ 。将变道过程最大侧向加速度 $a_y(t_{i,j})$ 或 $|a_y(t_j)|$ 作为 1.2 节中五次多项式拟合算法的约束条件,连同纵横向始末状态矩阵 \mathbf{X} 和 \mathbf{Y} ,可以求得满足约束条件的唯一轨迹并得到变道时间 t_g 。

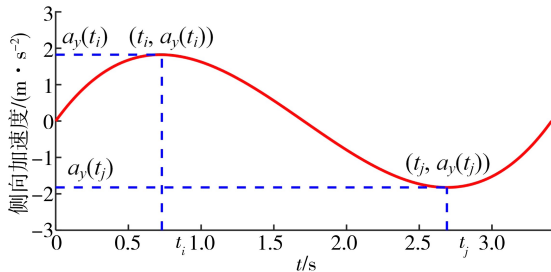


图 4 侧向加速度曲线

Fig.4 Lateral acceleration curve

2.2 变道过程中的碰撞约束

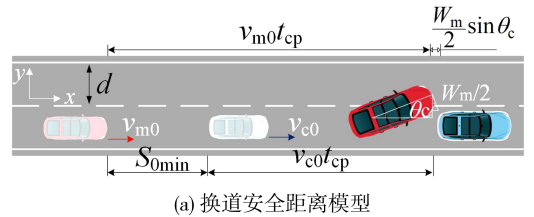
换道和并道阶段,过小的换道起始距离 S_0 和

并道起始距离 d_2 ,会导致主车和交通车在变道过程中发生碰撞。本研究通过建立变道过程的碰撞临界物理模型,求出临界状态的 $S_{0,min}$ 和 $d_{2,min}$ 来避免两车发生碰撞。换道和并道使用的碰撞约束方法相同,这里仅阐述换道。

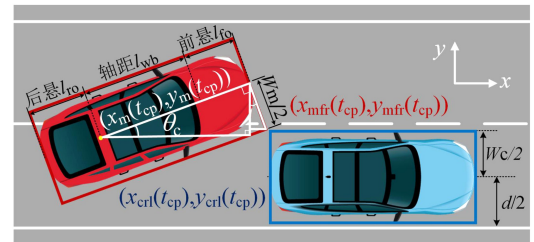
假设主车距离交通车 $S_{0,min}$ 开始换道,经历时间 t_{cp} 后,到达图 5(a) 碰撞临界状态(主车右前角刚好擦过交通车左后角,而不发生碰撞)。以后轴中心为车辆参考中心,换道碰撞临界时刻 t_{cp} 的坐标为 $(x_m(t_{cp}), y_m(t_{cp}))$,主车右前角坐标为 $(x_{mfr}(t_{cp}), y_{mfr}(t_{cp}))$,交通车左后角坐标为 $(x_{crl}(t_{cp}), y_{crl}(t_{cp}))$ 。前悬长 l_{fo} ,轴距长 l_{wb} ,后悬长 l_{ro} 。 θ_c 是换道碰撞临界角, W_m 和 W_c 是主车和交通车车宽, d 是道路宽度。用车长 L ,以及车宽 W 的矩形框对主车和交通车进行包围,如图 5(b)。用主车参考中心来表示其右前角坐标:

$$x_{mfr}(t_{cp}) = x_m(t_{cp}) + (l_{fo} + l_{wb}) \cos\theta_c + \frac{W_m}{2} \sin\theta_c \quad (16)$$

$$y_{mfr}(t_{cp}) = y_m(t_{cp}) + (l_{fo} + l_{wb}) \sin\theta_c - \frac{W_m}{2} \cos\theta_c \quad (17)$$



(a) 换道安全距离模型



(b) 换道碰撞临界细节图

图 5 换道安全距离模型及碰撞临界细节图

Fig.5 Safe distance model for lane-change and critical details of lane change collision

若换道过程不发生碰撞应满足坐标条件,当 $x_{mfr}(t_{cp}) = x_{crl}(t_{cp})$ 时, $y_{mfr}(t_{cp}) \geq y_{crl}(t_{cp})$ (当取等号时为换道碰撞临界状态)。根据坐标条件,换道碰撞临界状态时,应在横向上满足式 (18),在纵向上如图 5(a) 所示,两车不发生碰撞的最小换

道安全距离 $S_{0\min}$, 其计算如式 (19)。

$$y_m(t_{cp}) + (l_{fo} + l_{wb}) \sin\theta_c - \frac{W_c}{2} \cos\theta_c = -\frac{d}{2} + \frac{W_c}{2} \quad (18)$$

$$S_{0\min} = (v_{m0} - v_{c0})t_{cp} + \frac{W_m}{2} \sin\theta_c \quad (19)$$

2.3 综合考虑效率及舒适性的轨迹优化

由 2.1 节可知, 给定变道过程最大侧向加速度可以确定变道时间。变道时间和侧向加速度分别代表效率和乘坐舒适性, 都是数值越小越优, 但两者无法同时达到最小。上述问题总结为在一定的解空间内寻找多目标函数的最优解。定义如下轨迹评价函数:

$$f(t_g, a_y(t_i)) = \omega_1 f_{\text{efficiency}} + \omega_2 f_{\text{comfort}} = \omega_1 \frac{t_g}{t_{\max}} + \omega_2 \frac{a_y(t_i)}{a_{y\max}}$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \omega_1 + \omega_2 = 1 \\ t_{\min} \leq t_g \leq t_{\max} \\ a_{y\min} \leq a_y(t_i) \leq a_{y\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中, f 是关于自变量变道时间 t_g 和变道过程最大侧向加速度 $a_y(t_i)$ 的综合评价函数, $f_{\text{efficiency}}$ 是变道效率子目标函数, f_{comfort} 是变道舒适性子目标函数, ω_1 和 ω_2 分别为变道效率和舒适性的权重系数。根据 2.1 节的动态侧翻阈值, $a_{y\max}$ 取 $1.12g$; 根据文献[8]对变道持续时间的研究表明, 在不拥堵的非高峰道路上最长变道时间为 9.7 s , 因此 t_{\max} 取 9.7 s 。

根据式 (20) 可知, 权重比值 ω_1/ω_2 取值改变, 会导致评价函数 $f(t_g, a_y(t_i))$ 的最优解 t_g 和 $a_y(t_i)$ 不同。当考虑变道舒适性时, 根据文献[9]中的研究, 选用工作特性曲线来确定舒适性临界阈值, 最大侧向加速度 $a_y(t_i)$ 的最优解应满足小于等于 $0.186g$, 即舒适性的约束条件为:

$$\text{s.t. } a_y(t_i) \leq 1.82\text{ m/s}^2 \quad (21)$$

当考虑变道效率时, 变道时间 t_g 的最优解应小于等于平均变道时间 3.6 s ^[8]; 同时, 为保证变道安全, 需考虑假设车辆在湿滑路面上行驶不发生侧滑, 根据文献[10]的研究, 在变道计算中取峰值下的道路附着系数 $\mu = 0.5$, 因此最大侧向加速度 $a_y(t_i)$ 最优解应满足应小于等于 $0.5g$ 。即效率性约束条件为:

$$\text{s.t.} \begin{cases} t_g \leq 3.6\text{ s} \\ a_y(t_i) \leq 4.9\text{ m/s}^2 \end{cases} \quad (22)$$

当最优解满足舒适性但不满足效率性约束条件时, 将符合条件的权重比值 ω_1/ω_2 集合定义为舒适模式; 当最优解满足效率性但不满足舒适性约束条件时, 将符合条件的权重比值 ω_1/ω_2 集合定义为效率模式; 当最优解同时满足舒适性和效率性约束条件时, 将符合条件的权重比值 ω_1/ω_2 集合定义为综合模式。

根据上述定义, 得到表 1 中不同模式对应权重比值解集空间, 以及对应模式下的变道时间最优解集合和最大侧向加速度最优解集合。

表 1 不同模式对应权重比值解集空间及最优解集合

Tab.1 Solution set space and optimal solution set corresponding to weight ratio of different modes

模式	ω_1/ω_2	t_g/s	$a_y(t_i)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
效率模式	(0.94, 4.15]	[2.08, 3.41)	(1.82, 4.90]
舒适模式	[0, 0.80)	(3.60, 9.70]	[0.23, 1.64)
综合模式	[0.80, 0.94]	[3.41, 3.60]	[1.64, 1.82]

轨迹优化结果, 即 3 种模式轨迹对应的的可行区域如图 6 所示。

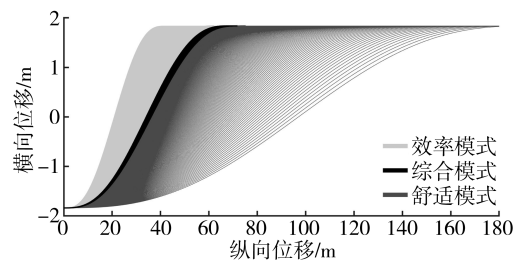


图 6 轨迹优化结果

Fig.6 Trajectory optimization results

3 超车阶段的自适应速度规划

本研究提出自适应速度规划方案, 将主车保持恒速 v_{m0} 下的超车阶段时间 t_o 作为是否开启加速超车的判断条件。当 t_o 小于换道时间 t_c 时, 不需要开启加速, 超车过程保持匀速 v_{m0} (即 $v_{m1} = v_{c0}$); 当 t_o 大于等于 t_c , 则认为超车效率过低, 开启加速超车。故 t_o 与 t_c 的比值等于 1 ($t_o/t_c = 1$) 为开启超车加速的临界条件。

以综合模式 $\omega_1/\omega_2 = 0.94$ 为例, 如图 7 是主

车初速度 v_{m0} 从 5 m/s 至 30 m/s 分别达到开启加速超车临界条件 ($t_o/t_c = 1$) 时的交通车速度 v_{c0} 和主车初速度 v_{m0} 的速度比值曲线。两车速度比值 v_{c0}/v_{m0} 在蓝色曲线上及曲线上方时,需要加速超车,此时 $v_{m1} > v_{m0}$;若比值在曲线下方则不需要加速超车,此时 $v_{m1} = v_{m0}$ 。由图 7 曲线趋势可知,两车相对速度较小时需要开启加速超车,且随着 v_{m0} 的上升,到达临界条件时的 v_{c0}/v_{m0} 也变大。因此 v_{m0} 较大时需要开启加速超车的概率小于 v_{m0} 较小时开启加速超车的概率,保证了高速下的行车安全。

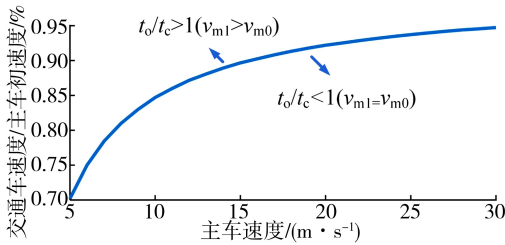


图 7 综合模式 ($\omega_1/\omega_2 = 0.94$) 下主车达到开启加速超车时的两车速度比值

Fig.7 Speed ratio of two vehicles when the main vehicle reaches the starting acceleration overtaking under the comprehensive mode ($\omega_1/\omega_2 = 0.94$)

根据文献[11],本研究设置 0.7 m/s^2 为超车过程的平均加速度。选取综合模式 $\omega_1/\omega_2 = 0.94$,主车初速度 v_{m0} 为 5、10、...、30 m/s,主车和交通车速度接近 ($0.95 \leq v_{c0}/v_{m0} \leq 0.96$) 的情况,进行有无速度规划的对比实验,结果如表 2 所示。

表 2 综合模式 ($\omega_1/\omega_2 = 0.94$) 不同车速下有无自适应速度规划对比实验结果

Tab.2 Comparison of experimental results with and without adaptive velocity planning under different vehicle velocity in comprehensive mode ($\omega_1/\omega_2 = 0.94$)

$v_{m0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{c0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	t_{o1}/s	t_{o2}/s	$v_{m1}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
5	4.75	33.43	3.31	7.34
10	9.50	15.07	2.84	12.00
15	14.25	9.90	2.61	16.84
20	19.20	9.16	2.54	21.80
25	24.00	6.84	2.29	26.61
30	28.80	5.29	2.04	31.44

表 2 中, t_{o2} 和 t_{o1} 分别是有无自适应速度规划

的超车阶段时间, v_{m1} 是经过自适应速度规划后的末速度。主车以 5 ~ 20 m/s 中低速行驶时,自适应速度规划提升的效率最为显著,最高可提升 90%;主车以 25 ~ 30 m/s 高速行驶时,自适应速度规划在小加速成本下, v_{m1} 较 v_{m0} 平均增加仅 5.6%,超车效率平均可以有效提升 63.5%。总体上,超车效率平均可提升 74%。

4 变道超车规划数值仿真

4.1 仿真参数及仿真设计

本研究使用 MATLAB/Simulink 进行轨迹规划仿真,车道宽度 3.675 m,车辆长度 4.7 m,前悬长 0.9 m,轮距 2.8 m,后悬长 1 m。首先,分别在 3 种模式下选取两个权重比值 ω_1/ω_2 代表对应模式(边界值或中间值)。其次,在每个权重比值下,选取主车低速(10 m/s)、中速(20 m/s)和高速(30 m/s)代表全速域变道超车情况,每个主车速度下再选取两个交通车速度,分别对应相对速度较大 ($v_{c0} = 1/2v_{m0}$),和相对速度较小 ($0.95 \leq v_{c0}/v_{m0} \leq 0.96$) 两种情况。最后,输出变道超车规划的相关物理量。

4.2 仿真结果分析

3 种模式下的仿真结果如表 3 ~ 表 5 所示。效率模式的平均变道超车距离 S_m 和平均变道超车时间 t_{com} 最短,分别为 121.70 m 和 5.98 s;综合模式 S_m 和 t_{com} 分别为 167.33 m 和 8.39 s;舒适模式 S_m 和 t_{com} 分别为 296.97 m 和 14.80 s。效率模式和综合模式的平均变道超车时间均小于文献[12]中超车持续时间的平均值 10.3 s,数据结果体现这两种模式的效率性。

效率模式中,在权重边界比值 4.15 时,对应最大侧向加速度 $a_y(t_i)$ 为 4.9 m/s^2 ,满足安全性约束;舒适模式和综合模式在不同权重比值下的 $a_y(t_i)$ 均小于等于 1.82 m/s^2 ,满足舒适性约束。3 种模式下的不同权重比值对应的最大侧向加速度 $a_y(t_i)$ 结果,均满足约束条件,结果验证了多模式轨迹优化算法的准确性。

根据表 3 ~ 表 5 可知,当权重比值不变时,最大侧向加速度 $a_y(t_i)$ 保持不变。由加速度、速度和曲率 3 者关系可知,当加速度恒定时,速度和曲率成反比关系,仿真结果符合这一规律,即主车车速 v_{m0} 每增加 10 m/s,轨迹的最大曲率 ρ_{max} 较之前

减小平均约 66%,保证了车辆高速变道的安全性。两车相对速度较大时,变道超车时间 t_{com} 仅由换道和并道阶段时间构成。相对速度较小和较大下的变道超车时间 t_{com} 的差值即为相对速度较

小时的超车阶段时间。在自适应速度规划的作用下,两车相对速度较小时超车阶段时间不超过 4 s,保证了超车效率。

表 3 效率模式仿真结果

Tab.3 Numerical simulation results of efficiency mode

ω_1/ω_2	$v_{m0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{c0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_m/m	t_{com}/s	ρ_{max}/m^{-1}	$a_y(t_i)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
2.55	10	5	49.58	4.96	3.38×10^{-2}	3.34
		9.5	91.28	8.19		
	20	10	99.30	4.96	8.60×10^{-3}	
		19.2	162.35	7.74		
	30	15	148.88	4.96	3.80×10^{-3}	
		28.8	220.99	7.18		
4.15	10	5	41.6	4.16	4.80×10^{-2}	4.90
		9.5	84.86	7.57		
	20	10	83.16	4.16	1.22×10^{-2}	
		19.2	150.08	7.13		
	30	15	124.79	4.16	5.40×10^{-3}	
		28.8	203.37	6.59		

表 4 舒适模式仿真结果

Tab.4 Numerical simulation results of comfort mode

ω_1/ω_2	$v_{m0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{c0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_m/m	t_{com}/s	ρ_{max}/m^{-1}	$a_y(t_i)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
0	10	5	194.00	19.40	2.30×10^{-3}	0.23
		9.5	213.93	20.58		
	20	10	388.03	19.40	5.64×10^{-4}	
		19.2	444.20	22.21		
	30	15	582.30	19.40	2.50×10^{-4}	
		28.8	582.30	19.40		
0.4	10	5	86.84	8.68	1.10×10^{-2}	1.13
		9.5	123.07	11.27		
	20	10	173.55	8.68	2.80×10^{-3}	
		19.2	219.42	10.61		
	30	15	260.35	8.68	1.30×10^{-3}	
		28.8	314.14	10.28		

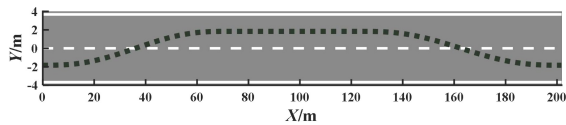
表 5 综合模式仿真结果

Tab.5 Numerical simulation results of comprehensive mode

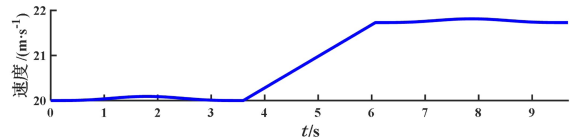
ω_1/ω_2	$v_{m0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_{c0}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	S_m/m	t_{com}/s	$\rho_{\text{max}}/\text{m}^{-1}$	$a_y(t_i)/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$
0.8	10	5	72.04	7.20	1.63×10^{-2}	1.64
		9.5	109.20	9.95		
	20	10	143.98	7.20	4.10×10^{-3}	
		19.2	201.76	9.67		
	30	15	216.00	7.20	1.80×10^{-3}	
		28.8	280.77	9.15		
0.94	10	5	68.15	6.82	1.81×10^{-2}	1.82
		9.5	106.25	9.66		
	20	10	136.40	6.82	4.50×10^{-3}	
		19.2	195.62	9.36		
	30	15	204.63	6.82	2.00×10^{-3}	
		28.8	272.18	8.86		

在综合模式下, $\omega_1/\omega_2=0.80$, 主车速度 20 m/s, 交通车速度 19.2 m/s 时变道超车轨迹信息如图 8 所示, 主车轨迹各阶段过渡平滑, 连续且特性稳定, 如图 8(a)。主车在 3.6 s 完成换道阶段, 以平均 0.7 m/s² 进行超车阶段加速超越, 结束超车阶段时车速 21.73 m/s, 符合自适应速度规划, 如图 8(b)(c)。

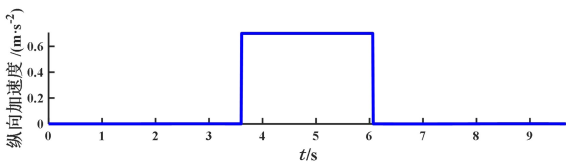
主车侧向加速度和曲率曲线, 在变道阶段满足正弦变化, 在极值处取得最大值, 为 1.64 m/s² 和 $4.1 \times 10^{-3} \text{m}^{-1}$, 变道过程最大航向角约为 5°, 三者曲线均平缓变化, 无突变, 到超车阶段时数值为 0, 如图 8(d)(e)(f), 输出轨迹满足车辆运动学和动力学约束。



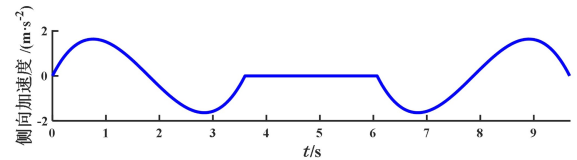
(a) 主车轨迹



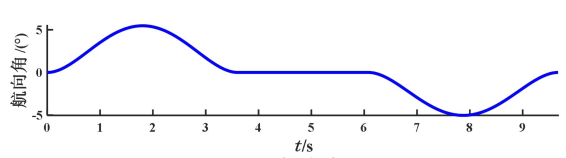
(b) 速度



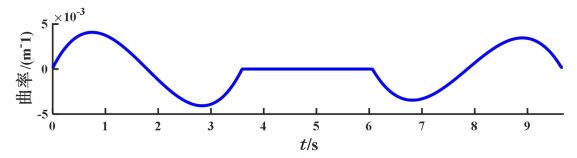
(c) 纵向加速度



(d) 侧向加速度



(e) 航向角



(f) 曲率

图 8 变道超车轨迹信息

Fig.8 Information about lane-changing overtaking trajectory

5 结语

本研究改进了三阶段变道超车模型,通过改变 S_0 、 d_1 、 d_2 、 d_3 获得不同性状的变道超车轨迹;使用五次多项式对变道轨迹进行拟合,通过限制变道最大侧向加速度进行侧翻约束。建立碰撞约束的临界模型,自适应设置最小安全距离。综合考虑变道效率和舒适性进行多目标轨迹优化,得到不同模式的权重比值范围:效率模式为(0.94, 4.15]适用于超车安全空间较小的紧急情况;舒适

模式为[0, 0.80)适用于对舒适性要求较高的乘客;综合模式为[0.80, 0.94]适用大多数变道超车情况和乘坐需求。通过自适应速度规划,提升了两车相对速度较小时的超车效率。仿真结果表明,各阶段轨迹连接平滑,曲率、侧向加速度和航向角变化连续,轨迹特性稳定。本研究为变道超车研究提供多种模式的轨迹规划参考,同时输出的变道超车距离和变道超车时间也为超车决策环节提供了重要判断依据。

参考文献:

- [1] CHAI R Q, TSOURDOS A, SAVVARIS A, et al. Multiobjective overtaking maneuver planning for autonomous ground vehicles [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(8): 4035-4049.
- [2] 许伦辉, 胡三根, 伍帅, 等. 考虑车辆运行特性的双车道超车模型[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 7-13, 27.
- [3] DIXIT S, MONTANARO U, DIANATI M, et al. Trajectory planning for autonomous high-speed overtaking in structured environments using robust MPC[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 21(6): 2310-2323.
- [4] YU Y, ABU SALEH MD B, KOTARO H, et al. Autonomous vehicle overtaking: modeling and an optimal trajectory generation scheme[J]. Sustainability, 2022, 14(3): 1807.
- [5] KARLSSON J, MURGOVSKI N, SJÖBERG J. Computationally efficient autonomous overtaking on highways[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(8): 3169-3183.
- [6] CHOI S B. Practical vehicle rollover avoidance control using energy method[J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(4): 323-337.
- [7] 余经历, 刘卡, 许利峰. 常用车辆侧翻评价标准及其发挥的作用[J]. 农业装备与车辆工程, 2016, 54(10): 51-54, 78.
- [8] TOLEDO T, ZOHAR D. Modeling duration of lane changes[J]. Transportation Research Record, 2007, 1999(1): 71-78.
- [9] 郭应时, 苏彦奇, 付锐, 等. 换道操作对智能车辆乘客舒适性的影响研究[J]. 中国公路学报, 2022, 35(5): 221-230.
- [10] 王润琪, 蒋科军. ABS汽车制动距离分析与计算[J]. 中南林学院学报, 2005, 25(2): 70-73.
- [11] 龙岩松, 吕能超, 徐进. 信号交叉口车辆纵向加速度特性[J]. 中国科技论文, 2022, 17(6): 615-622.
- [12] 戢晓峰, 戴秉佑, 普永明, 等. 基于生存分析的山区双车道公路超车持续时间模型[J]. 交通运输系统工程与信息, 2022, 22(6): 183-190.

(责任编辑:方素华)