

DOI:10.16356/j.1005-2615.2019.03.008

基于危险评估的自动紧急避撞控制策略

项楚勇 魏民祥 张佳佳 邢德鑫 吴树凡

(南京航空航天大学能源与动力学院,南京,210016)

摘要: 基于车辆危险评估机制,设计了一种集成制动和转向的汽车自动紧急避撞控制策略。首先结合车辆安全性和最优换道轨迹,分析了在紧急工况下车辆制动和转向避撞临界纵向距离,然后建立了基于模糊推理的危险评估模型,该模型输出的危险因子反映车辆发生碰撞的危险程度,并以此建立汽车自动紧急避撞控制策略。最后基于 PreScan 和 MATLAB/Simulink 的虚拟平台仿真验证该控制策略的有效性。结果表明自车在跟车行驶时,对比基于碰撞时间倒数(TTC^{-1})单一全制动无法有效避开障碍物的危险工况,该避撞策略能够通过制动和自主换道来避免车辆发生碰撞,提高了车辆安全性。

关键词: 危险评估;主动安全;最优换道轨迹;控制策略;模糊推理

中图分类号: U461.91 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2019)03-0319-08

Automatic Emergency Collision Avoidance Control Strategy Based on Risk Assessment

XIANG Chuyong, WEI Minxiang, ZHANG Jiajia, XING Dexin, WU Shufan

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: Based on the vehicle risk assessment mechanism, an automatic emergency collision avoidance control strategy integrating braking and steering is designed. Firstly, considering combining vehicle safety and optimal lane change, the minimum longitudinal distance of vehicle braking and steering collision avoidance is analyzed in emergency. Then, establishing risk assessment model based on fuzzy reasoning, the vehicle collision avoidance control strategy is proposed based on the risk coefficient that reflects the risk degree of vehicle collision, and the coefficient is sent by the model. Finally, the joint simulation platform based on PreScan and MATLAB/Simulink is to verify the effectiveness of the control strategy. The results show that the control strategy of single full brake based on inverse of time-to-collision (TTC^{-1}) cannot avoid obstacles effectively while the proposed collision avoidance control strategy is able to avoid the collision between vehicles through braking and autonomous lane changing, which improves vehicle safety.

Key words: risk assessment; active safety; optimal lane changing trajectory; control strategy; fuzzy reasoning

交通安全事故不仅造成直接经济损失,而且导致人员伤亡,交通事故的分析显示:车辆追尾碰撞占交通事故总量的 30%~40%^[1]。车辆主动避撞系统利用现代信息技术和传感技术获取的外界信

息(如车速、障碍物距离等)判断车辆是否存在安全隐患,给驾驶员提供相应的预警信息。在紧急情况下驾驶员没有及时采取措施时,车辆避撞系统将自动接管车辆,使车辆能够自动避开危险,保证车辆

基金项目: 江苏省研究生培养创新工程(KYLX16_0328)资助项目。

收稿日期: 2018-12-14; **修订日期:** 2019-01-01

通信作者: 魏民祥,男,教授,博士生导师, E-mail: weimx@nuaa.edu.cn。

引用格式: 项楚勇,魏民祥,张佳佳,等. 基于危险评估的自动紧急避撞控制策略[J]. 南京航空航天大学学报,2019,51(3):319-326. XIANG Chuyong, WEI Minxiang, ZHANG Jiajia, et al. Automatic Emergency Collision Avoidance Control Strategy Based on Risk Assessment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2019, 51(3): 319-326.

安全行驶,从而避免交通事故的发生^[2-3]。自动紧急避撞控制策略在不断改善,文献[4]通过采集实际交通工况数据对基于距离的危险估计算法与碰撞时间(Time-to-collision, TTC)进行了评价和比较。文献[5]提出了一种融合制动和转向控制的自动紧急避撞策略,该策略包含驾驶员模型、车辆模型和道路环境模型信息,通过协调制动和转向控制输入对驾驶员的行为进行纠正。文献[6]建立了危险评估模型,引入车间时距作为TTC的补充来确定危险等级,从而进行相应的制动或者转向避撞。基于安全距离模型反映车辆跟驰过程中的安全状态,如Mazda模型、Honda模型、伯克利模型、Jaguar模型和NHSTA模型等,虽然在制定纵向碰撞策略中具有广泛的适用性,但对于驾驶员主观感受考虑不够,且无法兼容换道避撞的可行性。现有的模型算法未充分考虑前车制动减速度对于两车危险状态评估的影响,尤其是两车距离相近,前车强制动会明显增加车辆发生碰撞的风险。

本文考虑高附着路面的非极限紧急避撞工况,结合车辆安全性和最优换道轨迹,模拟驾驶员在危险工况下的制动和转向行为,同时考虑前车制动减速度提出一种危险评估模型,通过模糊推理方法评估当前车辆发生碰撞的危险程度,并依据该模型输出的危险因子建立集成制动和转向的车辆自动紧急避撞控制策略。搭建MATLAB/Simulink-PreScan虚拟仿真平台,选取典型工况验证自动紧急避撞控制策略下车辆避撞的安全性。

1 制动与转向避撞纵向距离分析

为设计集成自动紧急制动和转向避撞策略,本文从车辆动力学模型出发,基于车辆安全性,对制动和转向避撞的临界纵向距离进行定量分析,以此作为危险评估的基础。

如图1所示的双车道,以路面为坐标系, O 点为坐标原点,本文考虑车体长宽,将其视作矩形,设自车和前车的质心坐标分别为 (x_r, y_r) 和 (x_f, y_f) ,取自车右前端为参考点 $A(x_1, y_1)$,取前车左后端为参考点 $B(x_2, y_2)$ 。

轮胎力受轮胎摩擦圆的约束,车辆的加速度应满足^[5]

$$\left(\frac{a_x}{a_{x,\max}}\right)^2 + \left(\frac{a_y}{a_{y,\max}}\right)^2 \leq 1 \quad (1)$$

式中: a_x, a_y 分别为车辆的纵向和侧向加速度; $a_{x,\max}, a_{y,\max}$ 分别为车辆最大纵向加速度和最大侧向加速度; μ 为路面附着系数; g 为重力加速度。 $a_{x,\max} = \mu g, a_{y,\max}$ 受到道路摩擦和车辆抗侧翻性能

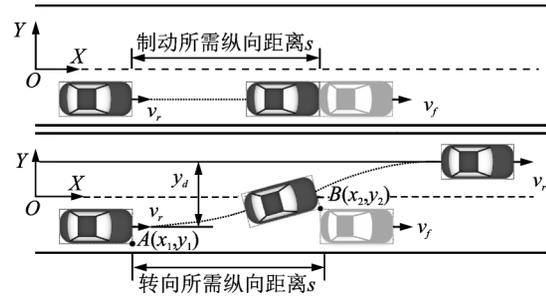


图1 制动与转向避撞示意图

Fig.1 Sketch of braking and steering collision avoidance

要求的影响,一般情况下, $a_{y,\max} < \mu g$ 。为了描述车辆的相对状态,引入变量

$$R = \begin{bmatrix} x_2 - x_1 \\ y_2 - y_1 \\ v_{xr} - v_{xf} \\ v_{yr} - v_{yf} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_f - l_f - x_r - l_r \\ y_r + w_r/2 - y_f + w_f/2 \\ v_{xr} - v_{xf} \\ v_{yr} - v_{yf} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: l_f, l_r 分别为前车质心到后端距离和自车质心到前端距离; w_f, w_r 分别为前车和自车的车宽; v_{xr}, v_{yr} 分别为自车沿X轴和Y轴的速度; v_{xf}, v_{yf} 分别为前车沿X轴和Y轴的速度。

$a_{xr} = \dot{v}_{xr} = \ddot{x}_1, a_{yr} = \dot{v}_{yr} = \ddot{y}_1, a_{xr}, a_{yr}$ 分别为自车沿X轴和Y轴的加速度; $a_{xf} = \dot{v}_{xf} = \ddot{x}_2, a_{yf} = \dot{v}_{yf} = \ddot{y}_2, a_{xf}, a_{yf}$ 分别为前车沿X轴和Y轴的加速度,车辆的相对状态方程为

$$\dot{R} = \begin{bmatrix} v_{xf} - v_{xr} \\ v_{yf} - v_{yr} \\ a_{xr} - a_{xf} \\ a_{yr} - a_{yf} \end{bmatrix} \quad (3)$$

系统输入 $a_r = [a_{xr}, a_{yr}]^T$,车辆在零时刻开始避撞,在T时刻完成避撞。在零时刻,前车和自车的状态为

$$\begin{cases} x_f(0) = x_{f0}, y_f(0) = y_{f0} \\ v_{xf}(0) = v_{xf0}, v_{yf}(0) = v_{yf0} \\ x_r(0) = x_{r0}, y_r(0) = y_{r0} \\ v_{xr}(0) = v_{xr0}, v_{yr}(0) = v_{yr0} \end{cases} \quad (4)$$

在T时刻,前车和自车的状态为

$$\begin{cases} x_f(T) = x_{fT}, y_f(T) = y_{fT} \\ v_{xf}(T) = v_{xfT}, v_{yf}(T) = v_{yfT} \\ x_r(T) = x_{rT}, y_r(T) = y_{rT} \\ v_{xr}(T) = v_{xrT}, v_{yr}(T) = v_{yrT} \end{cases} \quad (5)$$

在T时刻,车辆制动避撞成功的条件为 $v_{xrT} = 0$ 且 $x_2 - x_1(T) \geq 0$,车辆转向避撞成功的条件为 $x_2 - x_1(T) \geq 0$ 且 $y_2 - y_1(T) \geq 0$ 。设置车辆初始状态: $x_{f0} = 0, v_{xf0} = 0, v_{yf0} = v_{yr0} = 0, y_{f0} = y_{r0}$,在系统输入 a_r 使车辆完成避撞,为获得避撞所需纵向距离应求零时刻的 $x_2 - x_1$ 最小,即求解目

标函数 $\min_{a_r} [x_2 - x_1](0)$, 其中 $x_2 \geq x_1$ 。

本文采用两种方式进行避撞,即制动和转向。

(1) 制动避撞,即输入 $a_r = [a_{xr}, 0]^T$, 车辆在 T 时刻状态为 $v_{xrT} = 0, y_{rT} = 0, x_2 - x_1(T) = 0$ 。

(2) 转向避撞,即输入 $a_r = [0, a_{yr}]^T$, 车辆在 T 时刻状态为 $x_2 - x_1(T) = 0, y_1 - y_2(T) = 0$ 。

1.1 制动避撞

车辆制动减速度对行车安全状态等级有着很大影响,根据人机工程学的理论和制动减速度大小将制动强度分成 4 个等级^[7]。制动避撞极限工况下,在纵向路面附着条件允许情况下一般采用最大制动减速度,而本文研究车辆在紧急工况下的避撞,应选择合适的制动减速度,既能使纵向制动距离满足紧急工况下的需求,又能符合驾驶员操作特性。NHTSA 通过对 83 名驾驶员的避撞试验,统计平均制动减速度^[8],得到以下结论:绝大多数驾驶员的平均制动减速度不会超过 $0.55g$ 。基于驾驶员操作特性,本文将汽车制动强度限制在“中等强度”^[7],设置 a_{xr} 为 -5m/s^2 。

车辆在水平路面上减速行驶,由制动逆动力学模型^[9],求出期望制动压力 $P_{\text{des}}(\text{bar})$ 为

$$P_{\text{des}} = \frac{|-ma_x - (\frac{1}{2}C_D A \rho v_x^2 + mgf)|}{mK_d} \quad (6)$$

式中: m 为整车质量; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度; v_x 为自车纵向车速; f 为空气阻力系数; K_d 为制动力和制动压力比值。

1.2 转向避撞

车辆的行驶轨迹对换道安全性具有重要影响。由于多项式曲线求解速度快,且能够保证算法的效率,因此,本文采用一元五次多项式^[10]来拟合车辆的换道轨迹。

如图 2 所示为车辆坐标系下的换道轨迹,以车辆换道初始时刻的质心位置为坐标原点,以行驶方向为 x 轴建立坐标系,假设换道时汽车纵向速度 v_x 恒定,横向速度 v_y 很小,忽略不计。车辆换道结束

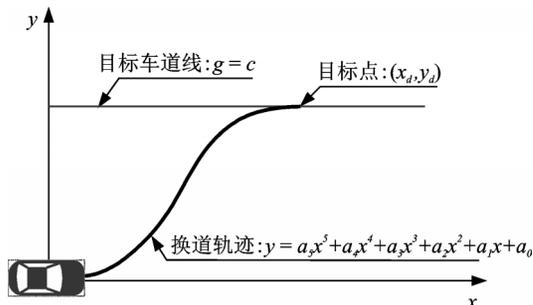


图 2 车辆坐标系下的换道轨迹

Fig.2 Lane changing trajectory in vehicle coordinate system

目标点为 (x_d, y_d) , 目标车道线和换道轨迹方程分别为

$$\begin{cases} g=c \\ y(x) = a_5x^5 + a_4x^4 + a_3x^3 + a_2x^2 + a_1x + a_0 \end{cases} \quad (7)$$

车辆在换道初始位置 $x=0$ 和结束位置 $x=x_d$ 满足

$$\begin{cases} y(0)=0 \\ y'(0)=0 \\ k(0) = \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} = \frac{\omega}{v_x} \\ y(x_d)=g(x_d)=c \\ y'(x_d)=g'(x_d)=c \\ k(x_d) = \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} = \frac{g''}{(1+g'^2)^{3/2}} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: k 为换道轨迹曲率, ω 为横摆角速度。

根据式(9),目标车道线方程以及车辆换道结束目标点确定车辆换道轨迹方程为

$$y(x) = y_d [10(x/x_d)^3 - 15(x/x_d)^4 + 6(x/x_d)^5] \quad 0 \leq x \leq x_d \quad (9)$$

若在不同目标曲线上取不同的 x_d 点,则规划出不同的换道轨迹。为选择最优换道轨迹,如式(10)所示,建立评价函数 J ,通过 MATLAB 编程计算得到 J_{min} 对应的 x_d ,详细求解过程不再赘述。

$$J = \omega_1 \frac{\max(a_y(t))}{a_{y\text{max}}} + \omega_2 \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^n a_{y\text{pi}}^2\right)/n}}{a_{y\text{pmax}}} + \omega_3 \left| \frac{l_d}{l_{d\text{max}}} \right| \quad (10)$$

式中: $a_y(t)$ 为换道过程中任意时刻的侧向加速度,与轨迹的曲率成正比; $a_{y\text{pi}}$ 为在某一方向上的侧向加速度值; l_d 为换道轨迹长度, $a_{y\text{max}}, a_{y\text{pmax}}$ 和 $l_{d\text{max}}$ 分别为满足约束的所有换道轨迹中最大侧向加速度、最大侧向加速度平均值以及最大轨迹长度; ω_1, ω_2 和 ω_3 为权值系数, $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ 。前两项反映换道轨迹的舒适性,第 3 项反映换道效率。

设定自车纵向速度 $v_x = 20 \text{ m/s}$, $y_d = 3.75$, 权值系数 $\omega_1 = 0.2, \omega_2 = 0.2, \omega_3 = 0.6$, 计算得到车辆换道轨迹和最优换道轨迹如图 3 所示。设置不同车速,计算求解得到最优换道轨迹的纵向距离 x_d 如图 4 所示。

通过建立车辆转向逆动力学模型^[11],如式(11)所示,求得期望的方向盘转角 δ_{sw} 为

$$\begin{cases} \delta_{sw} = a_y L / u^2 + a_y i L K \\ K = m / L^2 (l_1 / k_2 - l_2 / k_1) \end{cases} \quad (11)$$

式中: K 为稳定性因素; L 为车辆轴距; i 为转向系

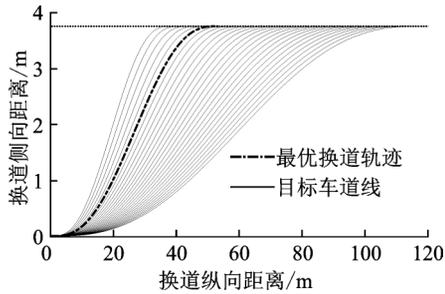


图3 $v_x = 20$ m/s 的车辆换道轨迹与最优换道轨迹
Fig.3 Vehicle lane changing trajectory and optimal lane changing trajectory under $v_x = 20$ m/s

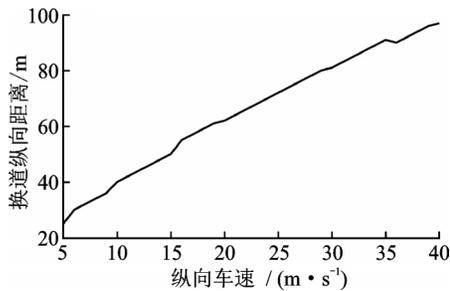


图4 不同车速下的最优换道纵向距离 x_d
Fig.4 Optimal longitudinal distance of lane change x_d at different speeds

传动比; l_1 和 l_2 分别为质心到前轴和后轴距离; k_1 和 k_2 分别为前、后轮胎侧偏刚度。

车辆在转向避让过程中,为验证其满足稳定性约束,依据文献[12]的相关研究,引入式(12)作为判断稳定性依据,则

$$\begin{cases} \omega \leq \left| \mu \frac{g}{v_x} \right| \\ -10^\circ < \beta < 10^\circ \end{cases} \quad (12)$$

式中: β 为质心侧偏角。

1.3 制动和转向避让纵向距离

以上给出了车辆在避让时的纵向加速度和侧向加速度输入并建立了制动与转向逆动力学模型,设置路面附着系数 μ 为 0.8, 自车和前车分别采用 PreScan 的 Mazda_RX8 和 Fiat_Bravo C 级车型,整车参数如表 1 所示,在不同车速下,采取制动和转向两种方式避让,记录避让所需的临界纵向距离仿真测试样本,结果如图 5 所示。在高附着路面,随着车速减小,制动和转向避让所需纵向距离减小,当车速较大时,制动避让所需的纵向距离要远远大于转向避让,车速在小于 15.5 m/s 的区域范围内,转向避让所需的纵向距离更大。

2 基于模糊推理的危险评估模型

在紧急避让工况下,车辆之间的相对位置和相对运动关系对执行避让操作具有直接影响^[13]。驾

表 1 整车参数

参数	车型	
	Mazda_RX8	Fiat_Bravo
整备质量 m /kg	1 480	1 330
车长 l /m	4.425	4.331
车宽 w /m	1.86	2.06
质心到前轴距离 l_1 /m	1.080	0.980
质心到后轴距离 l_2 /m	1.620	1.750
后轴到车后端距离 l_3 /m	0.9	0.7
前轮总侧偏刚度 k_1 /(N·rad ⁻¹)	-62 191	-60 010
后轮总侧偏刚度 k_2 /(N·rad ⁻¹)	-98 727	-95 263

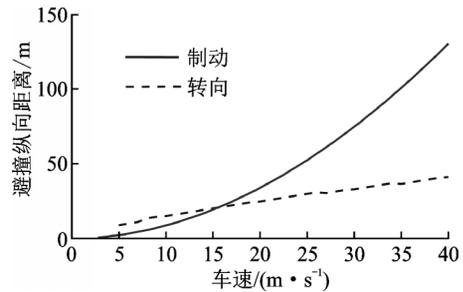


图5 制动和转向避让所需的纵向距离
Fig.5 Longitudinal distance required for braking and steering collision avoidance

驶员可以通过视觉判断自车与前车的相对距离和相对速度来决定是否进行制动或转向避让操作。驾驶员用视觉获取自车与前车相对距离和相对速度不够精确,而且前车制动减速度作为自车避让操作重要参数,很难通过驾驶员视觉进行判断,且当前车制动减速度较大时,会增加碰撞的风险,尤其是在两车相对距离较小的工况下,容易发生碰撞,因此,由车载传感器获取两车距离参数以及车辆行驶状态参数,并通过专用短程通信技术(Dedicated short range communications, DSRC)进行信息交互。基于模糊推理建立危险评估模型,将相对距离、相对速度以及前车制动减速度作为模糊推理系统的输入量,输出量为危险因子,其用来评估当前状态下车辆发生碰撞的危险程度。

根据实际驾驶经验,在自车速度大于前车的情况,相对距离、相对速度以及前车制动减速度与危险因子三者之间满足如下关系:

(1) 相对距离、相对速度一定时,前车制动减速度越大,危险因子越大。

(2) 相对距离、前车制动减速度一定时,相对速度越大,危险因子越大。

(3) 相对速度、前车制动减速度一定时,相对距离越小,危险因子越大。

模糊规则作为模糊推理系统的核心,根据上述

的驾驶经验,并结合车辆制动与转向避撞临界纵向距离分析结果来制定,保证对车辆的危险评估具备实时性和准确性。车辆在行驶过程中,在某车速下,相对距离接近或低于制动和转向曲线对应的阈值,模糊推理系统分别输出中高位和高位危险因子。

为简化计算,本文所设计的模糊推理系统将相对距离 D 、相对速度 V 和前车制动减速度 A 作为 3 个输入量,以危险因子 DE 作为输出。 D, V 和 A 的论域分别为 $[0, 150]$ m, $[0, 40]$ m/s 和 $[0, 5]$ m/s², DE 的论域为 $[0, 1]$,相应的比例因子设置为 $1/30, 1/8$ 和 1 ,因此输入输出的模糊论域均为 $[0, 5]$ 。对输入和输出变量模糊集分别定义为

$$D = \{PVS, PS, PSM, PBM, PB, PVB\}$$

$$V = \{PVS, PS, PSM, PBM, PB, PVB\}$$

$$DE = \{PVS, PS, PSM, PBM, PB, PVB\}$$

$$A = \{PS, PM, PB\}$$

其中, PVS 为正极小, PS 为正小, PSM 为正的中等偏小, PBM 为正的中等偏大, PB 为正大, PVB 为极大, PM 正中。

模糊子集隶属度函数均采用三角函数均匀分布形式,清晰化采用重心法方式。表 2—4 分别给出了 A 在不同状态时,相对距离 D 和相对速度 V 可能出现的状态和相应输出的危险因子 DE ,构成了模糊推理系统的全部规则。规则库采用 “If-Then” 的推理形式,则第 1 行可用两条语句来表示,以此类推。

(1) If $D = PVS$ and $V = PVB$ or PB or PBM or PSM or PS and $A = PS$, then $DE = PVB$ 。

(2) If $D = PVS$ and $V = PVS$ and $A = PS$, then $DE = PBM$ 。

表 2 模糊控制规则 ($A=PS$)
Tab.2 Fuzzy control rules ($A=PS$)

D	V					
	PVS	PS	PSM	PBM	PB	PVB
PVS	PBM	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB
PS	PS	PB	PB	PVB	PVB	PVB
PSM	PS	PSM	PBM	PB	PB	PVB
PBM	PS	PS	PSM	PBM	PB	PVB
PB	PVS	PS	PSM	PSM	PBM	PB
PVB	PVS	PS	PS	PSM	PSM	PBM

定义 k 时刻相对距离为 D_k 、相对速度为 V_k 、前车减速度为 A_k ,模糊推理系统计算得到危险因子 DE_k ,反映当前 k 时刻车辆发生碰撞的危险程度。

表 3 模糊控制规则 ($A=PM$)

Tab.3 Fuzzy control rules ($A=PM$)

D	V					
	PVS	PS	PSM	PBM	PB	PVB
PVS	PBM	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB
PS	PVS	PBM	PB	PVB	PVB	PVB
PSM	PVS	PS	PSM	PB	PB	PVB
PBM	PVS	PS	PS	PBM	PBM	PVB
PB	PVS	PS	PS	PSM	PBM	PBM
PVB	PVS	PS	PS	PSM	PSM	PSM

表 4 模糊控规则 ($A=PB$)

Tab.4 Fuzzy control rules ($A=PB$)

D	V					
	PVS	PS	PSM	PBM	PB	PVB
PVS	PBM	PVB	PVB	PVB	PVB	PVB
PS	PVS	PBM	PB	PB	PVB	PVB
PSM	PVS	PBM	PSM	PBM	PB	PVB
PBM	PVS	PS	PS	PSM	PBM	PVB
PB	PVS	PVS	PS	PSM	PSM	PBM
PVB	PVS	PVS	PS	PS	PSM	PSM

3 基于危险评估的避撞控制策略

3.1 车辆避撞控制基本框架

车辆避撞控制基本框架如图 6 所示,根据车载传感器获取和 DSRC 交互的车辆状态信息,危险评估模型输出危险因子,通过判断危险因子的大小,建立自动紧急避撞控制策略,车辆避撞底层器控制包括制动与转向,其输入为理想加速度与实际加速度的偏差,经过 PID 控制^[14]调节后输出到制动或转向逆动力学模型,由逆动力学模型计算得到期望压力 P_{des} 和期望方向盘转角 δ_{sw} ,从而实现车辆制动和转向避撞闭环控制。

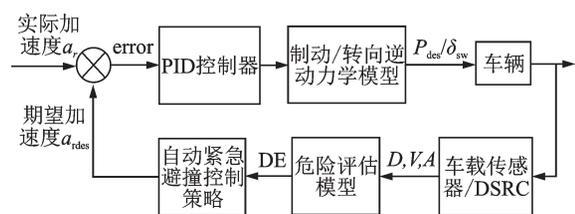


图 6 车辆避撞控制基本框架图

Fig. 6 Basic framework diagram of vehicle collision avoidance control

3.2 自动紧急避撞控制策略

综合考虑驾驶员警示系统与主动避撞系统,本文提出基于危险评估的自动紧急避撞控制策略,如表 5 所示。

制动和转向信号均取值 0 或 1,其中,0 代表不

表5 自动紧急避撞控制策略

Tab.5 Automatic emergency collision avoidance strategy

危险等级	条件判断	操作内容
0级	$0 \leq DE < 0.4$	不预警
1级	$0.4 \leq DE < 0.6$	驾驶员预警(红灯)
2级	$0.6 \leq DE < 0.8$	主动触发 -5 m/s^2 制动
3级	$0.8 \leq DE \leq 1$	停止制动,主动触发转向

触发,1代表触发。当危险因子小于0.4时,车辆处于安全行驶状态,不报警;当危险因子大于0.4且小于0.6时,车辆处于安全行驶状态,但存在潜在的碰撞风险,开启红灯,警示驾驶员做好制动准备;当危险因子大于0.6且小于0.8时,车辆处于危险工况下,制动信号为1,转向信号为0,主动触发 -5 m/s^2 制动,当危险因子大于0.8时,车辆处于极度危险工况,制动信号为0,转向信号为1,车辆停止制动,主动触发转向,根据车速查表规划出最优换道轨迹,跟踪该五次多项式轨迹进行换道避撞。

4 基于虚拟试验的策略验证

为验证避撞控制策略,在MATLAB/Simulink和PreScan的环境下建立联合仿真平台。自车和前车选择第1节提到的C级轿车车型,仿真验证三维场景模型如图7所示,道路为双车道,右车道有前后两辆车,假设左车道无车辆行驶,设置路面附着系数为0.8,设计两种典型工况进行仿真验证。



图7 三维场景建模

Fig.7 3D scene modeling

4.1 静止障碍物工况

初始时刻,前车静止,与自车的相对距离为150 m,自车速度为120 km/h,仿真结果如图8—12所示。

由图8和图9可知,当自车以高速120 km/h接近静止的前车时,随着距离减小,危险因子不断增大,当时间为1.73 s时,危险因子大于0.6,车辆触发 -5 m/s^2 制动,自车车速开始下降,两车相对速度减小,但两车距离迅速减小,危险因子继续增大,当时间为4.1 s时,危险因子大于0.8,车辆停止制

动,触发换道避撞,当时间为5.2 s时,前车目标丢失,车载传感器无法检测到自车与前车的相对状态信息。由图10可知,基于PID控制的实际侧向加速度较好地跟随理想侧向加速度,且在 $-0.3 \sim 0.3g$ 合理值范围内。

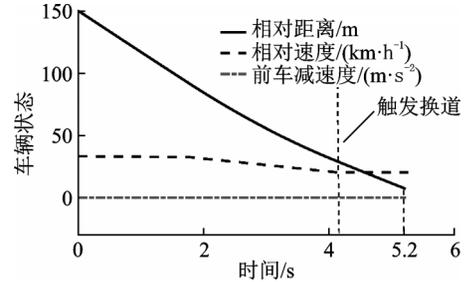


图8 前车静止工况下车辆状态

Fig.8 Vehicle state under static condition of front car

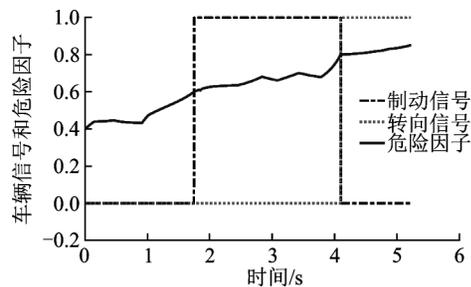


图9 前车静止工况下危险评估状态

Fig.9 Risk assessment state under static condition of front car

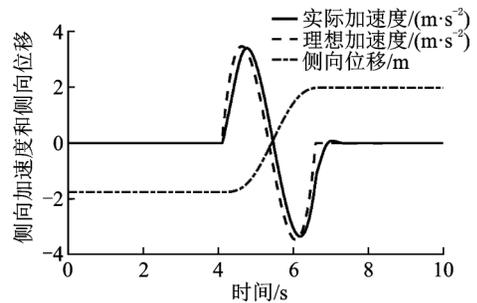


图10 前车静止工况下侧向加速度和侧向位移

Fig.10 Lateral acceleration and lateral displacement under static condition of front car

图11,12中的曲线代表自车参考点A和前车参考点B的运动轨迹。基于碰撞时间倒数(Inverse of time-to-collision, TTC^{-1})单一制动的自车采取适中的紧急避撞策略^[15],即在 TTC^{-1} 大于0.9时采取最大制动力,整个避撞过程没有转向。由图11可知,当时间为4.8 s,基于 TTC^{-1} 单一制动的自车与前车纵向距离曲线相交,表示两车发生碰撞,基于 TTC^{-1} 单一制动避撞失效。基于危险评估避撞控制的自车曲线虽然也与前车相交,但由图12可知,此时自车的参考点A纵坐标数值略大于前车参考点B,表明自车触发换道并成功避撞。

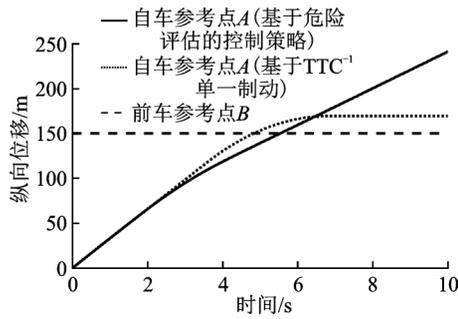


图 11 前车静止工况下纵向位移

Fig. 11 Longitudinal displacement under static condition of front car

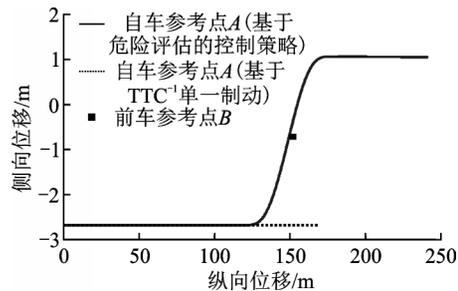


图 12 前车静止工况下纵横向位移曲线

Fig. 12 Longitudinal and lateral displacement under static condition of front car

4.2 前车紧急减速工况

右车道的自车与前车的初始距离为 40 m, 前车初始速度为 120 km/h, 在零时刻以 -5 m/s^2 紧急制动, 自车以初始车速 120 km/h 匀速行驶, 仿真结果如图 13—15 所示。

由图 13 和图 14 可知, 初始时刻, 自车以高速 120 km/h 接近前车, 前车以 -5 m/s^2 紧急制动, 虽然相对距离缓慢减小, 但是前车制动减速度阶跃增加, 两车相对速度增加, 危险因子迅速增大, 当时间为 1.3 s 时, 危险因子大于 0.6, 车辆触发 -5 m/s^2 制动, 自车车速下降, 两车的相对速度小且保持不变, 距离继续减小, 危险因子保持在 0.6 左右。当时间为 6.5 s 时, 前车停止, 两车相对速度和相对距离绝对值小且均在减小, 危险因子始终小于 0.8, 最后自车制动并停止在距离前车 1 m 的位置。由图 15 可

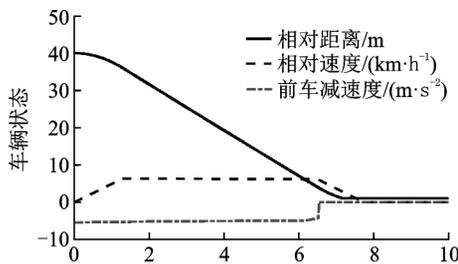


图 13 前车紧急减速工况下车辆状态

Fig. 13 Vehicle state under emergency deceleration of front car

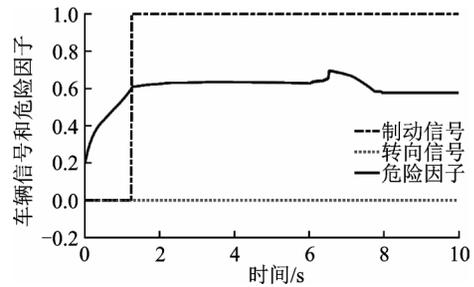


图 14 前车紧急减速工况下危险评估状态

Fig. 14 Risk assessment state under emergency deceleration of front car

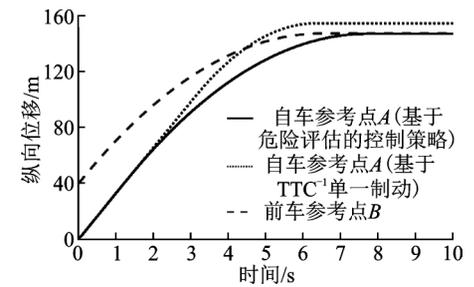


图 15 前车紧急减速工况下纵向位移

Fig. 15 Longitudinal displacement under emergency deceleration of front car

知, 基于 TTC^{-1} 单一制动的自车在达到安全阈值后, 在制动过程中与前车发生碰撞。

综上所述, 本文提出的避撞控制策略在车辆高速接近静止障碍物以及前车紧急制动工况都能避免交通事故发生, 而基于 TTC^{-1} 单一制动的避撞策略不能有效避免碰撞, 且相较于单一全制动, 该控制策略避撞的加速度在更理想范围内。

5 结 论

本文基于车辆安全性和最优换轨迹, 提出车辆危险评估机制, 并以此设计一种集成制动和转向的汽车自动紧急避撞控制策略, 考虑左车道无车情况, 右车道行驶的车辆在不同危险工况下, 选取相应的主动避撞介入时机和方式来完成避撞。

基于模糊推理的危险评估模型融合制动和转向的临界避撞距离分析结果、车辆运动状态和驾驶员驾驶经验, 能准确反映当前车辆状态的危险程度, 以此制定的车辆自动紧急避撞控制策略在紧急危险工况下, 通过制动和跟踪最优换道轨迹有效地完成避撞, 而基于 TTC^{-1} 单一全制动控制在避撞过程中失效, 因此该自动紧急避撞控制策略提高了车辆的安全性。

参考文献:

[1] GONG P, YANG J, MA C, et al. Research on multipoint monitoring anti-collision system for vehicle

- auxiliary driving [J]. *Optik -International Journal for Light and Electron Optics*, 2016, 127(18): 712.
- [2] 宋晓琳, 冯广刚, 杨济匡. 汽车主动避撞系统的发展现状及趋势[J]. *汽车工程*, 2008, 4(30): 285-290.
SONG Xiaolin, FENG Guanggang, YANG Jikuang. The current state and trends of automotive active collision avoidance system [J]. *Automobile Engineering*, 2008, 4(30): 285-290.
- [3] 侯德藻, 李国强. 汽车主动避撞系统中的报警方法及其关键技术[J]. *汽车工程*, 2002, 24(5): 438-441.
HOU Dezhao, LI Keqiang. The warning algorithm and some key technologies of vehicle collision avoidance [J]. *Automotive Engineering*, 2002, 24(5): 438-441.
- [4] LEE K, PENG H. Design and evaluation of forward collision warning / collision avoidance algorithms [J]. *Review of Automotive Engineering*, 2005, 26 (2) : 227-235.
- [5] 李霖, 朱西产. 智能汽车自动紧急控制策略[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(11): 1735-1742.
LI Ling, ZHU Xichan. Autonomous emergency control algorithm for intelligent vehicles [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(11) : 1735-1742.
- [6] 刘志强, 张春雷, 张爱红, 等. 基于驾驶行为的追尾避撞控制策略研究[J]. *汽车工程*, 2017, 39(9) : 1068-1073.
LIU Zhiqiang, ZHANG Chunlei, ZHANG Aihong, et al. A study on the control strategy for rear-end collision avoidance based on drivers' behavior [J]. *Automotive Engineering*, 2017, 39(9) : 1068-1073.
- [7] 李朋. 汽车主动防撞系统控制模式的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
LI Peng. Research of the control mode of automotive active collision avoidance system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [8] 裴晓飞, 齐志权, 王保锋, 等. 汽车前向主动报警/避撞策略[J]. *吉林大学学报(工)*, 2014, 44(3) : 599-604.
PEI Xiaofei, QI Zhiquan, WANG Baofeng, et al. Vehicle frontal collision warning / avoidance strategy [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2014, 44(3): 599-604.
- [9] 黄丽琼. 基于制动/转向的汽车主动避撞控制系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
HUANG Liqiong. Research on automobile active collision avoidance control system based on braking /steering [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [10] NELSON W. Continuous-curvature paths for autonomous vehicles [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. [S. l.] : IEEE, 2002: 1260-1264.
- [11] PACEJKA HANS B. Tyre and vehicle dynamics [M]. 2nd ed. New York: Elsevier, 2006: 101-117.
- [12] 张金柱, 张洪田. 基于GPS的汽车稳定性控制系统研究[J]. *测绘工程*, 2009, 18(5): 1-4.
ZHANG Jinzhu, ZHANG Hongtian. Research on vehicle stability control system based on GPS [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2009, 18 (5) : 1-4.
- [13] XIONG H, LING Z, YUE R, et al. Research on control strategy of automatic emergency brake system based on prescan [C]//Iet International Conference on Intelligent & Connected Vehicles. Chongqing: IET, 2006: 1-6.
- [14] 桑楠, 魏民祥. 基于ESO与NTSM的汽车主动前轮转向控制[J]. *南京航空航天大学学报*, 2018, 50(4): 521-527.
SANG Nan, WEI Minxiang. Design of ESO and NTSM controller for vehicle active front steering [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2018, 50(4): 521-527.
- [15] 裴晓飞, 刘昭度, 马国成, 等. 汽车主动避撞系统的安全距离模型和目标检测算法[J]. *汽车安全与节能学报*, 2012, 3(1): 26-33.
PEI Xiaofei, LIU Zhaodu, MA Guocheng, et al. Safe distance model and obstacle detection algorithms for a collision warning and collision avoidance system [J]. *Journal of Automotive Safety and Energy*, 2012, 3 (1): 26-33.

(编辑:陈璐)