

文章编号: 2095-2163(2022)01-0053-06

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

多车道纵向避障控制算法研究

徐鑫, 王孝兰, 郭晨

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘要: 随着多车道的出现, 高速公路匝道数目的增加以及道路特点, 使车辆行驶环境变得尤为复杂, 导致行驶事故极易发生。考虑到行车场景的复杂性, 本文分析车辆间关系, 推导邻车关联性及碰撞机理, 充分考虑邻车状态对本车的影响, 建立多车道车辆运行碰撞风险模型, 并计算危险度。以前车相对速度和相对距离为输入, 建立隶属度函数以及对应规则, 定义各参数的论域范围, 利用模糊控制方法求解出合理的期望加速度, 结合安全距离模型建立纵向避障控制策略, 实现纵向避障。

关键词: 纵向避障; 邻车关联性; 碰撞风险; 控制策略

Research on multi-lane longitudinal obstacle avoidance control algorithm

XU Xin, WANG Xiaolan, GUO Chen

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

[Abstract] With the emergence of multi-lane, the increasing number of freeway ramp and road characteristics make the vehicle driving environment more complex, which leads to the occurrence of driving accidents easily. Considering the complexity of the driving scenario, the multi-lane vehicle state and the complex road condition collision types are described, the vehicle correlation and collision mechanism of adjacent lanes are deduced, and the influence of the neighboring vehicle state on the vehicle is fully considered. The collision risk is determined by considering the threat posed by different vehicles, the threat of lane change risk, and the threat of driver attributes.

[Key words] longitudinal obstacle avoidance; correlation of adjacent vehicles; collision risk; control strategy

0 引言

车辆避障技术是提升行车安全的重要手段, 可以有效降低事故损失, 甚至避免碰撞的发生, 成为现代汽车安全技术领域研究的重点^[1]。然而, 现有技术仍存在复杂环境下的目标识别准确性和实时性差、避障方式单一、减轻损伤效果有限等不足^[2], 其原因在于复杂环境中基于自车传感器的目标识别难度大、实时性差, 未能分析建立综合的避障决策模型, 未充分利用多车道跟车间距等。

在纵向避障控制策略研究中, Yang 等和 Stelle 等描述车辆在避碰阶段和横向运动阶段的转向行为, 能够较好地解释真实的转向行为^[3-4]; Mingming 等应用特定的 PI 控制器, 有效解决了参数变化问题, 减轻了车辆碰撞程度^[5]。Sherony 和 Hahn 在纵向避障策略的基础上, 考虑车辆横向问题, 进而丰富车辆避障系统^[6-7]; 杨郑等和 WANGH 主要计算了避障策略中的性能界限, 同时优化了整个纵向避障系统中重要参数, 并对制动效能进行了评估^[8-9]; 王超等人提出了基于动态避障预警的侧向避障鲁棒

控制策略, 可以自动接管人车共驾智能汽车, 进行侧向避障控制, 提高了人车共驾智能汽车安全性和横摆稳定性^[10]; Marin 等设计了嵌入视觉导航系统的 PID 转向控制器, 能完善避障功能^[11]; Wang 等利用鲁棒自适应性滑膜控制器, 能进行车辆的横向控制^[12]; Antonelli 等和 Hajjaji 等结合 PID 方法和模糊控制方法的优势, 设计了自适应模糊 PID 控制器, 以改善避障性能^[13-14]。

本文针对多车道车辆协同避障所涉及的理论方法和关键技术进行研究, 分析多车道车辆避障机理, 提出车辆纵向碰撞风险描述方法, 构建车道车辆运行碰撞风险模型; 考虑多车道复杂环境下多车辆的综合风险, 提出了基于模糊控制的纵向避障算法, 并进行了仿真验证。

1 碰撞风险模型

1.1 侧碰机理分析

对于复杂场景下行驶的车辆在前后距离满足上述条件之外, 在纵向行驶过程中还会发生侧向碰撞, 发生侧向碰撞的比例占 6.64%^[15]。多车道避障需

作者简介: 徐鑫(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 车辆避障。

通讯作者: 王孝兰 Email: xiaolanwang@sues.edu.cn

收稿日期: 2021-09-22

要考虑前方障碍车辆的影响和旁边两车道对本车道车辆的影响。如图1所示,车辆C与车辆M存在临界碰撞的可能性,但只要确保车辆M相对于车辆C行驶的距离小于车辆C行驶过的距离,车辆就能安全行驶,公式(1)。

$$S_{\min} = \int_0^t \int_0^{\rho} (a_c(t) - a_M(t)) dp dt + (v_c(0) - v_M(0)) t \quad (1)$$

其中, S_{\min} 表示行车安全距离的最小值; $a_c(t)$ 为 t 时刻车辆 C 的加速度大小; $a_M(t)$ 为 t 时刻车辆 M 的加速度大小; $v_c(0)$ 为车辆 C 开始换道时刻的 C 车的速度; $v_M(0)$ 为车辆 C 开始换道时刻的 M 车的速度。

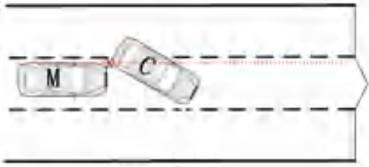


图1 车辆侧碰示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vehicle side collision

由于侧向距离的恒定所以侧向碰撞时间一定, 自车在纵向方向上的行驶速度决定了碰撞的位置, 碰撞位置存在两个极限位置, 即车头和车尾, 碰撞时间也存在一个时间间隔。假设纵向碰撞时间设为 T_y , 侧面碰撞时间为 T_x , 则碰撞位置的时间间隔为 $(T_{x_{\min}}, T_{x_{\max}})$ 。若两车能够发生侧面碰撞, 需要在满足侧向车距为 0 的前提下, 纵向碰撞时间应该满足 $T_y \in (T_{x_{\min}}, T_{x_{\max}})$, 在即将有可能发生碰撞前, 两车的相对位置以及车间距离关系如图2所示, 这里考虑前车在本车前方并汇入本车车道时所发生的碰撞。

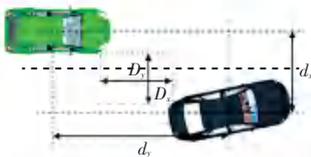


图2 前车汇入本车车道时所发生的碰撞

Fig. 2 The collision of the preceding car into the lane of the next car

碰撞位置不同, 得到侧向碰撞的时间范围, 式(2)和式(3):

$$T_{x_{\min}} = \frac{D_x}{v_{fx}} = \frac{d_x - \frac{L}{2} \tan \theta + \frac{H}{2} \dot{\theta} \cos \theta - \frac{H}{2}}{v_f \cdot \sin \theta} \quad (2)$$

$$T_{x_{\max}} = \frac{D_x}{v_{fx}} = \frac{d_x - \frac{H}{2} \dot{\theta} - \frac{L}{2} \tan \theta \dot{\theta} \sin \theta - \frac{H}{2}}{v_f \cdot \sin \theta} \quad (3)$$

其中, v_{fx} 表示前车在侧向方向上的分速度; d_x 为两车之间的质心横向距离; d_y 为质心间纵向距离; D_x 为横向边缘间距离; D_y 为纵向边缘间距离; H 为车辆宽度; L 为车辆长度。

同理可得, 碰撞位置不同纵向碰撞的时间范围为公式(4)和公式(5):

$$T_{y_{\min}} = \frac{d_y - \frac{L}{2} \cos \theta + \frac{B}{2} - \frac{L}{2} \tan \theta \dot{\theta} \sin \theta}{v - v_f \cdot \cos \theta} \quad (4)$$

$$T_{y_{\max}} = \frac{d_y - \frac{L}{2} \cos \theta - (B - L \cdot \tan \theta) \sin \theta + \frac{L}{\cos \theta}}{v - v_f \cdot \cos \theta} \quad (5)$$

纵向碰撞与侧向碰撞存在的函数关系为式(6):

$$T_y = \begin{cases} \uparrow \inf T_y > T_{x_{\max}} \text{ or } T_y < T_{x_{\min}} \\ \downarrow \frac{D_y}{\Delta v} & T_{x_{\min}} < T_y < T_{x_{\max}} \end{cases} \quad (6)$$

对于车辆前方两侧车道都存在车辆的情况, 假设本车在主车道行驶, 车道宽为 a , 两侧车辆 B 和 C, 假设此时两车进入自车雷达识别范围, 相对位置如图3所示, 危险临界条件为式(7):

$$-\arcsin \frac{a}{2l} \leq \theta \leq \arcsin \frac{a}{2l} \quad (7)$$

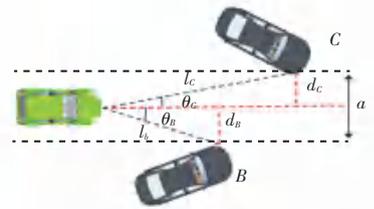


图3 两侧车道车辆汇入自车车道路场景

Fig. 3 The scene of vehicles flowing from the two lanes

当两侧车辆开始并道至本车道时, 会存在一定的潜在危险, 此时潜在危险临界条件为式(8):

$$2\arcsin \frac{a}{2l} \leq \theta \leq 2\arcsin \frac{a}{l} \quad (8)$$

1.2 纵向碰撞风险

MTC (Margin to Collision) 指标可以同时潜在危险和速度变化多端的危险情况进行评价, 故采用 MTC 指标对当前场景有无碰撞的可能性进行分析。

MTC 利用前方车辆制动距离与两车间实际距离之和, 与自车制动距离之比来评估两车都紧急制动时碰撞的可能性, 式(9):

$$MTC = (D + v_p^2/19.6\mu) / (v_f^2/19.6\mu) \quad (9)$$

其中, v_p 为前车的车速; v_f 为本车的车速; D 为车间距离; μ 为摩擦因子。

在考虑侧向碰撞问题时, 两车之间存在威胁的

最大距离也偏小(1.5 m 左右),且前方车辆的行驶角度 θ 变化也较小,因此在整个相对距离和质心关系之间存在式(10)的关系。

$$d_{x_{min}} = d_{y_{min}} \cdot \tan\theta \quad (10)$$

考虑到车辆之间侧向存在的安全距离余量 Δd ,则自车的最小安全侧向距离为式(11):

$$D_{x_{min}} = d_{x_{min}} - \frac{H}{2} - \frac{L}{2} \tan\theta \sin\theta - \frac{H}{2} + \Delta d \quad (11)$$

碰撞风险可以总结为式(12):

$$Q = \begin{cases} \frac{D_{x_{min}}}{D_x}, & D_x \geq D_{x_{min}} \\ 1, & D_x \leq D_{x_{min}} \end{cases} \quad (12)$$

基于对本车前方可能,发生风险的评价,可以构成前方障碍物以及纵向两侧车道有车汇入时的风险评价体系,如图 4 所示。

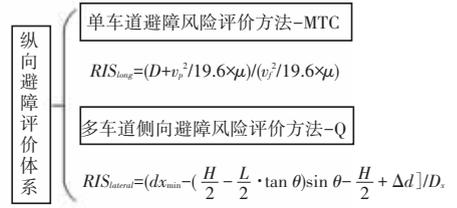


图 4 纵向避障风险评价体系

Fig. 4 Vertical obstacle avoidance risk assessment system

2 纵向避障控制

纵向避障控制算法根据自车周围环境,对自车在纵向方向上做出加速、跟驰或制动的决策,如图 5 所示。模糊控制算法将决策信息转化为执行机构可以直接识别的参数,执行机构将算法计算出的控制变量转化为制动、加速或跟驰等动作。

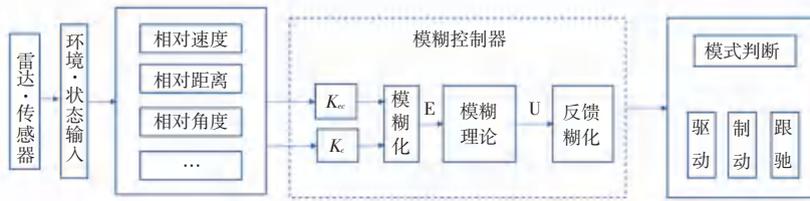


图 5 纵向避障控制算法结构图

Fig. 5 Longitudinal obstacle avoidance control algorithm structure diagram

模糊避障控制器主要组成部分包括:

- (1) 模糊化。即将系统输入的外部参考系、系统的状态等精确量转化为模糊化量进行输出;
- (2) 模糊推理。即利用推理的规则和逻辑关系模仿人类进行推理;
- (3) 清晰化。即通过模糊推理得到的结果转化为准确清晰的数字量;
- (4) 知识库。即由模糊控制规则库和数据库共同组成,规则库包含模糊语言表示的控制规则,数据库包含模糊空间分级数、尺度变换因子和隶属函数。

3 仿真验证

3.1 危险度评估

为综合考虑多车道复杂环境下多车辆的综合风险,进行仿真验证,主要参数设置与步骤如下。

(1) 车道参数:车道数为 n ,道宽度为 3.5 m,道路长度为 200 m;

(2) 车辆参数:车辆数量为 M ,初始车道 $m_{(i)} = \text{randsrc}(1:n)$,限速为 70 km/h,目标车道 $o_{(i)} = \text{randsrc}(1:n)$,车辆随机速度和当前车辆密度相关;

(3) 驾驶员参数:驾驶习惯指数 $h =$

$\text{rand}[-1,1]$,驾驶技术指数 $t = \text{rand}[0,2]$,疲劳程度指数 $f = \text{rand}[1,2] \frac{1}{2}$ 。

当 $M = 16$ 时车辆速度分布如图 6 所示,黑色方块表示本车,表示所处不同车道不同路段长度车辆的速度大小。

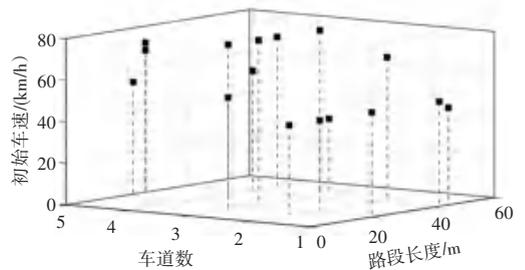


图 6 车辆速度分布图

Fig. 6 Vehicle velocity profile

图 7 为 16 辆车辆的 4 种随机分配位置的情况,以这 4 种分配方式下的场景为仿真场景进行实验,得到 4 种情况下本车所受周围车辆的威胁程度评价曲线,如图 8 所示。

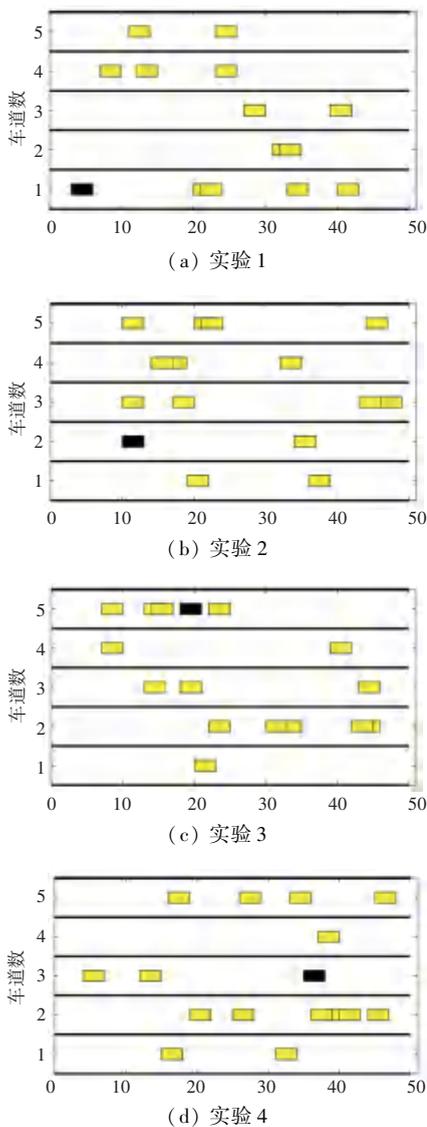


图7 车辆的4种随机分配位置情况

Fig. 7 Four random position assignments for vehicles

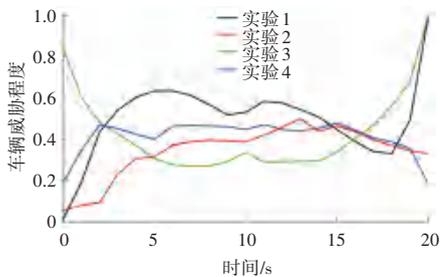


图8 车辆威胁程度结果

Fig. 8 Diagram of vehicle threat level

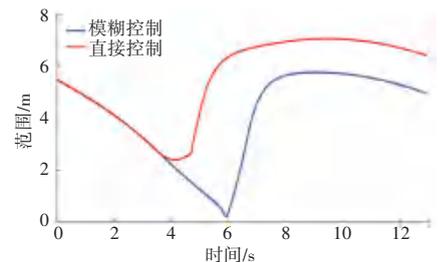
实验1中,由于自车初始位置处于1车道始端且周围车辆少距离远,所以其初始时刻周围车辆带来的威胁程度较低,为0.01,如图7(a)所示,对应黑色曲线;相反,实验3中,由于本车初始时刻所处位置较复杂,距离前方和后方车辆距离较近,且临近车道也有车辆存在,所以其初始时刻周围车辆带来的

威胁程度较高,可达0.84,如图7(c)所示,对应绿色曲线。

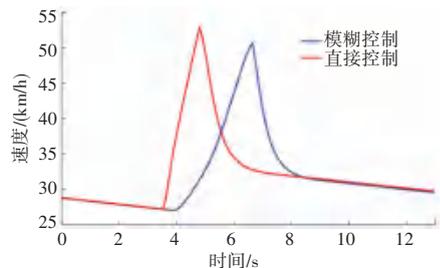
3.2 验证分析

为验证处于单向两车道的车辆避障情况,因左右情况一致,故只对一侧车辆与本车的交汇情况进行分析。实验I为两侧车辆汇入避障实验,道路类型设置为单向两车道,自车以30 km/h的速度在道路左侧匀速行驶,右车道车辆以36 km/h的速度行驶,并在道路中间合适位置向本车所在车道汇入。

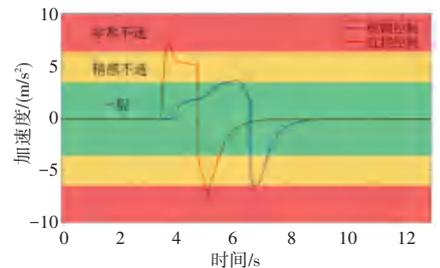
利用模糊控制方法对控制效果进行验证,并与直接控制进行对比,如图9所示。可以看出模糊控制下踏板压力更为平缓,避免了较大的减速度产生的不良影响。在制动过程中,模糊控制下造成的驾驶员舒适度比直接控制的驾驶员舒适度更轻,驾驶员并没有非常不适的感觉。



(a) 范围对比曲线



(b) 速度对比曲线



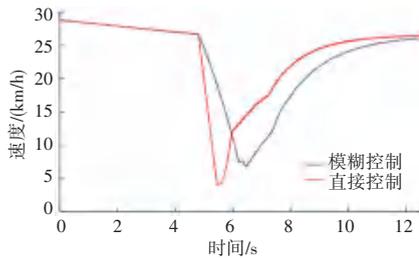
(c) 加速度及乘坐舒适性

图9 不同控制器下纵向加速避障仿真

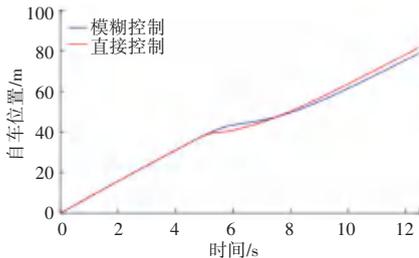
Fig. 9 Simulation of longitudinal acceleration obstacle avoidance under different controllers

实验II为两侧车辆超车避障实验,实验场景和实验I中所设置仿真场景类似。道路类型设置为双车道,自车以8 m/s匀速行驶,右车道车辆以9 m/s

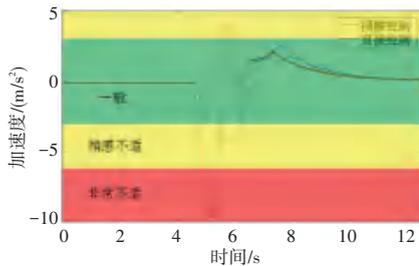
的速度以及 2 m/s^2 的加速度行驶,并在道路适当位置对本车进行超车行为。仿真结果如图 10 所示,蓝色所代表的模糊控制其波动范围更小,在整个避障中产生的加速度更小,速度的涨幅影响较小,说明了行车状态更为稳定,且在整个过程中直接控制给驾驶员更为严重的不舒适性,而模糊控制下的加速度大部分处在了较小数值区间,表明了该控制算法下具有良好的乘坐舒适性。



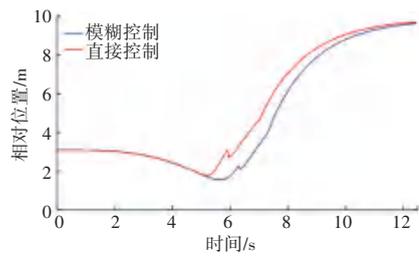
(a) 速度对比



(b) 自车位置对比



(c) 加速度及舒适性



(d) 相对位置

图 10 不同控制器下纵向减速避障仿真

Fig. 10 Simulation of longitudinal deceleration and obstacle avoidance under different controllers

图 10 显示了此次仿真工况的结果,图中曲线中,蓝色所代表的模糊控制其波动范围更小,在整个避障中产生的加速度大小更小,速度的涨幅影响较小,说明了行车状态更为稳定,且在整个过程中直接控制带

给驾驶员更为严重的不舒适性,而蓝色曲线所代表的模糊控制下的加速度大部分处在了较小数值区间,表明了该控制算法下具有良好的乘坐舒适性。

4 结束语

本文围绕车辆纵向避障展开了研究,将车辆行驶环境扩展到复杂的多车道环境下。对双车道车辆侧碰进行机理分析,分别计算车辆运行碰撞风险和威胁程度;基于模糊理论的控制方法,对纵向避障控制算法进行设计;对多车道的纵向避障进行验证;对多车道危险度进行了评估;在纵向避障算法中采用模糊控制方法,建立上层控制器,以本车和前车之间的相对物理量如距离和速度为输入,以期望制动压力(期望油门压力)为输出。为验证所设计算法的有效性,对前车静止、匀速和减速以及多车道工况进行仿真。结果表明,所设计的纵向避障算法可以满足安全性和乘坐舒适性的要求。

参考文献

- [1] 中国产业经济信息网. 2020 年 10 月汽车工业经济运行情况 [EB/OL]. http://www.cinic.org.cn/xw/tjsj/9_72612.html, 2020-11-24.
- [2] 郑杰. 车辆自动紧急制动系统建模与仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [3] YANG W, ZHENG L, LI Y, et al. A Trajectory Planning and Fuzzy Control for Autonomous Intelligent Parking System [C]// Wcx 17; Sae World Congress Experience. 2017.
- [4] STELLET J E, VOGT P, SCHUMACHER J, et al. Analytical derivation of performance bounds of autonomous emergency brake systems [C]// Intelligent Vehicles Symposium. IEEE, 2016.
- [5] MINGMING Z, HONGYAN W, JUNYI C, et al. Method to Optimize Key Parameters and Effectiveness Evaluation of the AEB System Based on Rear - End Collision Accidents [J]. SAE International Journal of Passenger Cars - Electronic and Electrical Systems, 2017, 10(2): 1-112.
- [6] LOPEZ A, SHERONY R, CHIEN S, et al. Analysis of the Braking Behaviour in Pedestrian Automatic Emergency Braking [C]// IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems. IEEE, 2015.
- [7] HAHN J O, RAJAMANI R, ALEXANDER L. GPS-based real-time identification of tire - road friction coefficient [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, 10(3): 331-343.
- [8] 杨郑. 预碰撞安全系统解读 [EB/OL]. <http://www.wtoutiao.com/p/106RnoU.html>, 2016-05-18.
- [9] WANG H, HUANG Y J, KHAJEPOUR A, et al. Crash mitigation in motion planning for autonomous vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(9): 3313-3323.
- [10] 赛迪顾问. 我国车辆主动安全技术发展研究 [J]. 中国计算机报, 2018 (14).