DOI: 10.3901/JME.2020.04.115

基于不同紧急工况辨识的车辆主动避撞自适应控制*

汪 奕 殷国栋 耿可可 董昊轩 刘帅鹏 陈 南
(东南大学机械工程学院 南京 211189)

摘要: 针对车辆高速紧急工况下的主动避撞问题,提出一种基于工况辨识的自适应避撞控制策略。以实时交通环境信息与车辆状态信息为基础构建一种紧急工况避撞模式分类方法,该方法把紧急工况避撞模式分为制动避撞、转向避撞、协调避撞三种模式。对于制动避撞模式,设计一种考虑路面附着条件和驾乘人员舒适度的纵向制动避撞策略;对于转向操纵避撞模式,构建基于多项式路径规划的避撞策略;对于制动和转向协调避撞模式,设计一种基于数据驱动的自学习协调控制策略。不同控制策略的期望输出通过比例积分微分(Proportional integral differentiation, PID)下层控制器对期望值进行跟踪来完成避撞。在 Matlab/Simulink 环境中搭建 Simulink-Carsim 汽车紧急避撞控制联合仿真平台,基于该平台进行多种工况的虚拟试验来验证控制系统的实时性和有效性。结果表明,控制系统能自动有效识别当前紧急工况该采取何种避撞操纵,在完成避撞的同时也能保证车辆的稳定性。

关键词: 紧急避撞; 避撞模式分类; 自适应避撞控制

中图分类号: U461

Active Collision Avoidance Adaptive Control Based on Identification of Different Emergency Conditions

WANG Yan YIN Guodong GENG Keke DONG Haoxuan LIU Shuaipeng CHEN Nan
(School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189)

Abstract: An adaptive collision avoidance control strategy based on working condition identification is proposed to solve the problem of active collision avoidance under high-speed emergency conditions. According to the real-time traffic environment information and vehicle states information, a classification method of emergency conditions avoidance mode is constructed. The method divides the emergency mode collision avoidance mode into three modes, braking collision avoidance, steering collision avoidance, and coordinated collision avoidance. For braking collision avoidance mode, a longitudinal braking collision avoidance strategy considering road friction conditions and the comfort of the driver and passengers is designed to solve the problem of braking collision avoidance. A collision avoidance strategy based on polynomial path planning is used to solve the collision avoidance problem in the steering collision avoidance mode. For braking and steering coordination collision avoidance mode, a data-driven self-learning coordinated control strategy is designed to address the coordinate collision avoidance problem. The expected output of different control strategies is tracked by the PID lower controller to complete collision avoidance. The Simulink-Carsim vehicle emergency collision avoidance control joint simulation platform is built in Matlab /Simulink environment. Based on the platform, a virtual test of various working conditions is carried out to verify the real-time and effectiveness of the control system. The results show that the control system can automatically and effectively identify what kind of collision avoidance operation should be adopted in the current emergency conditions, and the stability of the vehicle can be ensured while completing the collision avoidance.

Key words: emergency collision avoidance; mode classification of collision avoidance; adaptive collision avoidance control

0 前言

随着人工智能技术的飞速发展,不同智能化的

汽车开始从实验室走向公共道路,智能化的汽车必须具备能实时处理紧急工况的能力。高速公路前车突然制动工况属于一种紧急工况,考虑到驾驶员反应时间和较高车速工况,一般后车驾驶员根本来不及反应也无法保证能正确操纵车辆进行避撞,这时就需要一个软件控制系统来实时接管车辆,控制车辆来完成紧急工况的主动避撞^[1]。

* 国家重点研发计划(2016YFD0700905)、国家自然科学基金(U1664258, 51575103)、江苏省自然科学基金(BK20180401)、2018 省地联合招标成果转化(BA2018023)和东南大学优秀博士学位论文培育基金(YBPY1947)资助项目, 20190223 收到初稿, 20190807 收到修改稿

汽车主动防撞控制方法从基于现代控制理论的单车主动防撞研究发展到考虑驾驶员特性的人车一体化防撞控制,近年考虑交通层面因素以及人工智能的方法的融入又进一步推动了汽车主动防撞控制的发展,未来的车辆主动防撞系统将成为智能汽车的重要组成部分,安全、清洁、高效的智能化汽车将促进智能交通的飞速发展。基于现代控制理论方法主要有二次最优控制^[2-3]、自校正比例积分微分(Proportional integral differentiation, PID)控制^[4]、鲁棒控制^[5]、滑模控制^[6]、混合变参数模型预测控制^[7]、非线性反馈控制^[8];基于驾驶员行为的方法主要有建立个性化驾驶员转向模型预测防撞过程中驾驶员操纵行为^[9]、基于汽车-自行车冲突场景驾驶员行为分析提升紧急防撞系统的性能^[10];基于交通因素与人工智能的方法主要有跟车条件下,基于交通环境感知的防撞策略^[11]、异构交通环境下变车头时距的防撞控制^[12]、提出遗传优化神经网络碰撞预测模型进行追尾碰撞预测^[13]等。

在紧急工况防撞模式分类方面,现有的一些基于运动学的方法,如依据最小安全距离的方法在防撞模式决策方面取得了一定的成果,但它们也存在一些自身的缺陷。由于主动防撞不仅能通过单一模式完成防撞(制动或者转向),也能通过制动与转向协调实现主动规避,并非制动防撞失效时采用转向模式是唯一选择且转向防撞时存在的稳定性约束也限制了转向防撞方法的应用范围。因此从推动协调防撞技术在主动防撞系统中的应用以及融合车辆运动学与动力学特性的危险工况防撞模式决策的理论方法的缺乏方面来看现有主动防撞危险工况防撞模式决策的方法论还需进一步发展^[1]。

在车辆紧急协调防撞方面,如何协调转向与制动同时执行完成防撞是第一关键要素。现有的一些基于博弈论和非线性控制的方法,如非线性模型预测控制和分级多智能体控制的方法在车辆转向与制动协同控制方面取得了令人激动的成果,但对于复杂多样的交通场景,其方法应用范围存在一定的局限性,无法做到全工况的自适应协调控制。借助人工智能的相关理论和方法,寻找改善这些问题的一些新的协调控制方法并将其引入汽车主动安全领域颇具意义^[1]。

为了提高车辆紧急工况下主动防撞控制系统的综合性能,我们提出一种汽车紧急工况防撞模式分类方法,并针对不同防撞模式设计不同防撞控制策略,以实现车辆主动防撞自适应控制。

1 基于多源信息的防撞模式分类

主动防撞控制系统的目标是设计一个控制算法让车能避开即将发生的事故。纵向控制和侧向控制是进行防撞操纵的可能选项^[14]。对于单一防撞操纵失效时,制动与转向协调防撞的方法可以很好地改善这一缺陷。不同工况防撞模式的定义如图1所示。

图1 紧急工况防撞模式分类

图1中自车处在三个不同位置分别用标号1、2、3来表示。 S_b 代表在满足路面附着约束下,自车最短制动距离, S_m 代表自车与障碍车(障碍车即为本文其他部分前车)恰好避开所需最小纵向距离,此时自车以满足稳定性约束的最大前轮转角来进行转向紧急防撞, S_{end} 表示自车无法避开的最大纵向距离,即自车以满足机械结构约束的最大前轮转角来进行转向防撞都无法避开。由此在图1中可以看到,在 S_s 段距离内,单纯转向可以有效防撞,在 S_c 段距离内必须通过协调模式来完成防撞。由此,根据自车与障碍车的相对距离可以把防撞分为制动防撞、转向防撞、协调防撞三种情况。

假设障碍车静止,则 S_b 的表达式如下

$$S_b = \frac{v^2}{2\mu g} \quad (1)$$

式中, μ 是路面附着系数, g 是重力加速度, v 是自车的速度。

自车和障碍车的轮廓用矩形框表示,如图2所示。

图2 S_m 距离的定义

根据图2中几何关系, S_m 的表达式如下

$$S_m = \frac{(\cos \theta_s + 1)H}{2\sin \theta_s} \quad (2)$$

式中, θ_s 是满足稳定性约束的最大前轮转角, H 是自行车和障碍车的宽度。

根据图3中几何关系, S_{end} 的表达式为

$$S_{end} = \frac{(\cos \theta_e + 1)H}{2\sin \theta_e} \quad (3)$$

式中, θ_e 是满足机械结构约束的最大前轮转角。

图3 S_{end} 距离的定义

由式(1)~(3)可知避撞模式分类方法所需输入信息前车宽度、自行车车速,路面附着系数、车辆稳态表征变量(横摆角速度、质心侧偏角)。车宽和速度信息可通过相机图像处理 and 速度传感器直接测量得到,路面附着系数依据纵向力与滑移率曲线^[15]运用递推最小二乘法估算得到。质心侧偏角与横摆角速度根据无迹卡尔曼^[16]滤波算法估计得出。 S_b 根据前述信息容易得到, S_m 求取依据相平面的方法求出车辆稳定域边界,找到满足稳定性约束的最大前轮转角,再依据式(2)确定具体工况下的 S_m 值。

本文以非线性二自由度^[17]车辆模型来进行车辆稳定性分析(图4)。

图4 非线性二自由度模型

二自由度汽车运动微分方程式

$$\dot{\beta} = \frac{\cos \beta}{mv} (F_{yf} \cos \delta + F_{yr}) - \frac{\sin \beta}{mv} F_{yf} \sin \delta - r \quad (4)$$

$$\dot{r} = \frac{aF_{yf} \cos \delta - bF_{yr}}{I_z} \quad (5)$$

魔术轮胎^[18]的侧向力

$$F_{yf} = \mu F_{zf} \sin[E_f \arctan(H_f \alpha_f)] \quad (6)$$

$$F_{yr} = \mu F_{zr} \sin[E_r \arctan(H_r \alpha_r)] \quad (7)$$

前后轮侧偏角可以通过式(8)、(9)求得

$$\alpha_f = \delta - \beta - \frac{ar}{v \cos \beta} \quad (8)$$

$$\alpha_r = \frac{br}{v \cos \beta} - \beta \quad (9)$$

式中, β 为质心侧偏角、 r 为横摆角速度、 F_{yf} 为前轮侧向力、 F_{yr} 为后轮侧向力、 m 为汽车总质量、 a 为前轴到质心的距离、 b 为后轴到质心的距离、 δ 为前轮转角、 F_{zf} 为前轮垂向力、 F_{zr} 为后轮垂向力、 α_f 为前轮侧偏角、 α_r 为后轮侧偏角、 I_z 为绕 z 轴的转动惯量、 E_f 和 E_r 代表前后轮形状因子, H_f 和 H_r 代表前后轮刚度因子。

依据式(4)~(9)建立质心侧偏角-质心侧偏角速度的相平面图, 基于 $|E_1 \dot{\beta} + \beta| \leq E_2$ 公式来刻画车辆稳定域。文献[19]有关结论表明速度对稳定域大小几乎没有影响, 当前轮转角较小时, 转角对稳定域的影响有限, 路面附着系数是影响稳定域大小的关键因素。在前轮转角为零, 不同路面附着系数下画出质心侧偏角-质心侧偏角速度相平面图, 稳定域边界如图5中黑色粗实线所示。

通过仿真得出 E_1, E_2 取值如表1所示。当车辆质心侧偏角和质心侧偏角速度满足式 $|E_1 \dot{\beta} + \beta| \leq E_2$

(a) $\mu=0.2, v=80 \text{ km/h}$

(b) $\mu=0.4, v=80 \text{ km/h}$

图 5 不同工况下 β - $\dot{\beta}$ 相平面图表 1 E_1, E_2 参数取值表

符号	路面附着系数	数值
E_1	0.2	0.219
E_2	0.2	0.038
E_1	0.4	0.185
E_2	0.4	0.043
E_1	0.8	0.106
E_2	0.8	0.053

约束时, 本文认为车辆处于稳定行驶状态否则处于非稳定状态。根据上述稳定性判别公式找出具体工况下车辆满足稳定性约束的最大前轮转角 θ_s , 设定自车最大前轮转角 $\theta_e = 40^\circ$, 依据前轮转角信息求出 S_m 、 S_{end} 。

2 自适应控制系统设计

首先利用递推最小二乘法和无迹卡尔曼滤波算法获得路面和车辆状态信息, 其次利用相平面方法获得车辆稳定域边界, 依据前述提出的避撞模式分类方法判断该紧急工况下, 何种避撞方式能较好完成避撞。对于单纯制动操纵可以有效避撞时, 构建考虑路面附着条件和驾乘人员舒适度的纵向制动避撞策略, 设计 PD 控制器来完成制动避撞控制。对于单纯转向操纵可以有效避撞时, 构建七阶多项式的换道路径, 建立 PID 控制器进行路径跟踪完成转向避撞控制。对于制动和转向协调避撞模式, 基于协调避撞试验数据, 构建深度神经网络的协调控制器, 协调控制器输出优化后的制动与转向操纵期望值。最后, 以上三种控制器都通过逆动力学建模得到制动压力和转向盘转角变化规律, 将其输出给执行器完成避撞操纵。自适应控制框架如图 6 所示。

2.1 基于驾驶员舒适度的纵向避撞优化控制

根据文献[20]中试验数据分析, 制动舒适等级具体定义如表 2 所示。

图 6 控制系统总体框架图

表 2 制动舒适度评价

工况	制动加速度/(m/s ²)	舒适度
1	$-2 < a < -0.5$	舒适
2	$-4 < a < -2$	较舒适
3	$a < -4$	不舒适

制动加速度在 -0.5 m/s^2 到 -2 m/s^2 认为是舒适制动, 在 -2 m/s^2 到 -4 m/s^2 认为是较舒适制动, 低于 -4 m/s^2 认为是不舒适制动。为避免制动抱死, 在 ABS 系统的基础上设计考虑驾乘人员舒适度的控制策略。整体逻辑框图如图 7 所示。

首先进行路面附着条件和制动工况判断, 图 7 中所指的安全距离即工况分类章节中的 S_b 。当自车和前车相对距离大于安全距离时, 在低附着路面时, 以满足路面附着约束的最大制动力进行制动避撞, 此时不考虑舒适性原因在于低附着路面制动距离相对较长, 成功避撞是控制器此时需要完成的首要任务。在高附着路面时, 舒适范围内的某一制动减速度被优先选取作为制动操纵的期望值, 计算该制动减速度下自车制动距离是否小于安全距离, 如果是, 则以该制动减速度进行制动, 否则, 改为以较舒适范围内制动减速度进行制动, 后续判断逻辑相同, 依次递推。

在防抱死制动系统(Antilock braking system, ABS)的控制系统的基础上, 设计基于驾乘人员舒适度的 PD 制动控制器, 如图 8 所示。

图7 制动避撞控制系统

图8 PD控制器

式中, K_p 为比例系数; τ 为微分时间常数。 R 为期望制动减速度, C 为实际制动减速度, E 为偏差, M 为控制输出。控制器的输出经过逆动力学模型^[21]转化成制动压力输出给自车的制动主缸完成制动。

2.2 转向避撞控制

基于高速双车道场景, 以道路中间分界线起始点为原点建立坐标系如图9所示。在该坐标下, 可以进行车辆轨迹精确描述, 便于后文分析。

图9 转向避撞示意图

自车和障碍车初始时都在左侧高速车道, 当障碍车突然紧急制动, 如果此时两车相对距离小于制

动安全距离, 采用转向操纵进行避撞。安全且合理的换道路径需要满足安全避撞约束、曲率连续约束、侧向加速度约束等约束条件^[22]。

本文借鉴文献[23]的路径规划方法, 采用一元七次多项式的函数进行换道路径规划。

$$y(x) = y_H \left[35 \left(\frac{x}{x_e} \right)^4 - 84 \left(\frac{x}{x_e} \right)^5 + 70 \left(\frac{x}{x_e} \right)^6 - 20 \left(\frac{x}{x_e} \right)^7 \right] \quad 0 \leq x \leq x_e \quad (10)$$

式中, y_H 为换道侧向距离, x_e 为换道纵向距离, 如图10所示。

图10 路径规划示意图

由于高速换道过程中侧向车速远远小于纵向车速, 以纵向速度 v_x 代替换道过程中的合速度, 将 x_e 用 $v_x t$ 来替换, 得到轨迹函数如下

$$y(t) = \frac{y_H}{t_e^7} [35t^4 t_e^3 - 84t^5 t_e^2 + 70t^6 t_e - 20t^7] \quad 0 \leq t \leq t_e \quad (11)$$

式中, t_e 为换道过程总时间。

对式(11)求二阶导得到侧向加速度为

$$a_y(t) = \frac{y_H}{t_e^7} [450t^2 t_e^3 - 1680t^3 t_e^2 + 2100t^4 t_e - 840t^5] \quad 0 \leq t \leq t_e \quad (12)$$

建立与图8类似结构的PID控制器, 控制器的输出经过逆动力学模型^[21]转化成转向盘转角输出给自车的转向电机完成转向。

2.3 协调避撞控制

在单一避撞模式失效的情况下, 制动和转向协调避撞是一个较优的选择。在仿真平台里搭建高速双车道避撞场景, 通过设定不同避撞工况, 首先以满足路面约束的最大纵向减速度和临界换道避撞的最大侧向加速度为初值, 将这两个值分别与介于0到1直接的数相乘得到优化后的纵向和侧向加速度, 随后检验是否成功避撞, 如果是, 将这些数据收集起来, 如果否, 改变系数直到成功避撞。通过深度神经网络寻找数据之间内部的联系, 通过训练建立起预测模型, 给定具体工况数学描述就可以自动求解转向和制度比例因子即前文0到1的两个数。

由此,将模型驱动为基础的控制问题转化为数据驱动的预测问题。

虚拟仿真试验取得 106 组训练数据,27 组检测数据。部分数据如表 3 所示。

表 3 试验数据记录表

工况(距离、车速、路面)	制动比例因子	转向比例因子
30、65、0.8	0.04	0.83
20、90、0.8	0.82	0.6
15、105、0.8	0.98	0.45
⋮	⋮	⋮
33、75、0.2	0.05	0.89
22、80、0.2	0.06	0.85
63、65、0.2	0.11	0.91

在表 3 中,左侧一栏分别表示初始两车相对距离、自车车速以及路面附着系数,例如“30、65、0.8”表示两车相距 30 m,自车车速 65 km/h,路面附着系数为 0.8。中间和右侧两栏分别表示制动比例因子和转向比例因子。

数据的输入是距离、车速、路面信息,输出是制动和转向比例因子,故深度网络的输入为 3 维矢量,输出为 2 维矢量。经过大量仿真调试,本文网络拓扑结构为 3-150-68-24-2。如图 11 所示。

图 11 神经网络拓扑结构

本文采用的深度神经网络的隐含层传递函数采用函数 $\tan \operatorname{sig}(\cdot)$, 输出层采用线性函数 $\operatorname{purelin}(\cdot)$ 。神经网络模型训练过程如图 12 所示。网络训练结束,随机权值和阈值下,最佳训练步数在 5 518,其方均根误差为 0.000 999 998,且在检验样本测试时误差满足要求,在此不再赘述。

3 基于虚拟试验的算法验证

3.1 制动避撞控制验证

制动避撞工况随机选取,设定自车车速为 16.7 m/s,障碍车车速为 0,两车相距 90 m,路面附着系

图 12 误差变化曲线

数为 0.8,在此工况下进行仿真对比分析。两车纵向位移-时间如图 13 所示。

图 13 纵向位移-时间曲线

在图 13 中,点画线表示前车纵向位移曲线,虚线表示自车紧急制动纵向位移曲线,实线表示自车舒适制动纵向位移曲线,在图中可以看到自车纵向位移曲线与前车纵向位移曲线没有相交,表明制动结束时自车与前车未发生碰撞。两种制动模式都成功避开障碍物,为更好分析避撞过程中驾驶员舒适度,给出制动加速度变化图,如图 14 所示。

图 14 制动加速度变化曲线

在图 14 中,紧急制动时,制动加速度突然从 0 增加到 -7 m/s^2 ,在前 2.5 s,制动加速度曲线毛刺是由于此时 ABS 系统起作用导致制动减速度变化波

动。在 2.5 s 时曲线值突然急剧增大, 是由于此时车刚好停下来, 车轮静止不动但由于惯性, 簧载以上质量继续向前运动导致制动加速度突变其值为正, 而后由于车辆阻尼元件的存在逐渐衰减为 0。

在舒适制动时, 制动加速度突然从 0 增加到 -2 m/s^2 , 制动加速度曲线光滑没有毛刺此时没有触发 ABS 系统起作用。整个制动过程中加速度最大值为 -3.624 m/s^2 , 如图 14 局部放大图虚线最低点坐标所示。表明在整个避撞过程中加速度最大值不超过 -4 m/s^2 , 根据表 2 舒适度评价标准此时制动属于较舒适制动范围, 驾驶员有较好驾乘舒适度。在图 14 所示舒适制动曲线在 2.4 s 到 5 s 内出现三个波谷, 主要是由于此过程制动压力发生变化所致, 如图 15 所示。

图 15 制动压力变化曲线

在图 15 中的局部放大图中可以看到第三个波峰值最大对应图 14 中制动减速度绝对值最大点两者一致。基于 ABS 的制动避撞系统不仅能进行舒适制动而且保证了车辆制动时不会出现车轮抱死等危险工况。

3.2 转向避撞控制验证

转向避撞工况随机选取, 设定自车车速为 17.2 m/s , 前车车速 22.2 m/s 进行紧急制动, 两车相距 100 m , 路面附着系数 0.2 。转向盘转角-时间如图 16 所示, 两车纵向位移-侧向位移如图 17 所示, 自车横摆角速度-时间如图 18 所示。

图 16 转向盘转角-时间曲线

图 17 纵向位移-侧向位移曲线

图 18 自车横摆角速度-时间曲线

初始两车相距 100 m , 除去车长 4.53 m , 两车实际距离为 95.47 m 。自车当前速度最短制动距离 75.47 m , 一开始可以通过制动避撞, 为模拟驾驶员反应时间, 本文设定驾驶员反应时间为 1.2 s , 在 1.2 s 内自车行驶了 20.64 m , 为简化分析和提高安全裕度, 避撞过程中始终以前车初始位置为参考点进行距离度量, 则此时两车实际相距 74.83 m , 此时实际车距小于最短制动距离, 工况分类算法判断不能进行制动避撞改成转向避撞。在图 16 中, 可以看到转向盘没有一开始就转向, 在开始时转向盘为零的阶段模拟驾驶员存在反应时间。

在图 17 中, 每条线的起点即车辆初始位置, 虚线表示前车紧急制动再经过一端时间停止, 制动距离为虚线长度, 自车避撞过程轨迹如图 17 中实线所示, 且虚线与实线没有相交, 轨迹光滑过渡平稳, 表明成功避撞且控制效果良好。

根据文献[24]的研究方法和相关研究结论, 横摆角速度应满足

$$r \leq \left| \mu \cdot \frac{g}{v_x} \right| \quad (13)$$

图 18 表示避撞过程中横摆角速度-时间的变化图, 在低附着系数路面, 横摆角速度曲线一直在临界稳定安全域内, 表明车辆避撞过程中操纵稳定性满足要求。

3.3 协调避撞控制验证

协调避撞工况随机选取, 设定前车车速 16.7 m/s 进行紧急制动, 自车车速为 20.8 m/s, 两车相距 25 m, 路面附着系数 0.2。转向盘转角-时间如图 19 所示, 制动压力-时间如图 20 所示, 两车横向位移-纵向位移如图 21 所示, 两车纵向位移-时间如图 22 所示, 自车质心侧偏角-时间如图 23 所示。

图 19 协调避撞转向盘转角-时间曲线

图 20 协调避撞制动压力-时间曲线

图 21 协调避撞纵向位移-侧向位移曲线

在图 19 中, 实线表示自车协调避撞, 虚线表示自车单一转向避撞。此时分类模式已判断处于协调避撞模式, 为验证单一转向避撞确实失效, 故将二者放在同一张图中对比说明单一转向避撞无法满足稳定性约束的条件下, 协调避撞是一种较为有效的方法。可以看到单一转向模式下自车转向盘转角幅

图 22 协调避撞纵向位移-时间曲线

图 23 协调避撞质心侧偏角-时间曲线

值和频率远远大于协调模式, 由于单一转向相对协调模式没有制动操纵介入, 车速相对较高必须通过快速转向来完成避撞。

在图 20 中, 自车协调避撞四轮制动压力如图中曲线所示。在低附着路面更容易达到附着极限, 前轮由于制动压力相对后轮较大, 前轮出现抱死倾向, 此时 ABS 系统介入工作, 出现了图 20 前轮制动压力波动较大的现象。在 6.1 s 时, 制动压力解除即完成避撞后释放制动踏板。

在图 21 中, 自车单一避撞和自车协调避撞过程轨迹如图中虚线和实线所示, 此时实线和虚线与点画线有相交, 最远交点坐标为(103.5,0), 通过图 22 纵向位移图对应坐标为(0.231,103.5), 可知此时自车在前车后方, 两车实际并没有发生碰撞。在图 21 中可以发现单一转向在避撞完成后, 即使转向盘回正了但车身依然倾斜导致车辆直接开出车道。主要是由于转向频率过快且幅值较大造成车辆发生甩尾所致。为进一步描述单一转向避撞导致车辆发生失稳, 质心侧偏角曲线如图 23 所示。

在图 23 中, 稳定域上下边界由前文相平面方法求得, 以质心侧偏角来衡量车辆稳定性。可以看到单一转向避撞其曲线最大值超过了稳定域边界值表明避撞过程中发生了失稳。协调避撞时自车能一直保证较好的稳定性。通过上述分析可知, 在处于协

调避撞工况时,即使单一转向能完成避撞但失去了稳定性即避撞也失去了意义,同时协调避撞成功避撞且能保证避撞过程中的稳定性,说明了采用协调避撞的必要性。

上述三种不同紧急工况控制器在其他不同附着路面不同车速以及不同初始距离时也有较好地有效性和实时性,限于文章篇幅,没有一一列出。通过虚拟试验验证表明,依据路面和车辆状态信息建立的避撞模式分类方法能较好的区分不同紧急工况,依据不同紧急工况建立的不同控制器能较好地主动避撞,提升了避撞工程中的舒适性且保证了避撞过程中的稳定性。

4 结论

(1) 依据交通环境信息和车辆状态信息,建立了一种融合多源信息的汽车紧急工况避撞模式分类方法;针对不同避撞模式设计了不同避撞控制策略,尤其是基于虚拟试验产生的避撞场景大数据建立了一种基于深度神经网络的协调避撞控制器;实现了紧急工况下车辆的自适应主动避撞。通过虚拟试验平台验证了分类方法和避撞控制系统的有效性。

(2) 所提出的分类方法改变了传统避撞决策量化指标不精确的缺陷,实现了不同程度紧急工况的在线实时识别。所提出的自学习协调控制算法将复杂动力学耦合控制问题转化为数据驱动的预测问题,避免了解耦带来的不精确性。

(3) 对于避撞场景尚未考虑更复杂交通场景,试验平台初步搭建完毕,下一步进行实车试验并优化自适应避撞控制算法。

参 考 文 献

- [1] 汪葵. 智能汽车紧急工况下主动避撞控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
WANG Yan. Research on active collision avoidance control of intelligent vehicle in emergency[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [2] YI K, RYU N, YOON H, et al. Implementation and vehicle tests of a vehicle stop-and-go cruise control system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2002, 216(216): 537-544.
- [3] YI K, HONG J, KWON Y. A vehicle control algorithm for stop-and-go cruise control[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2001, 215(10): 1099-1115.
- [4] PUAL V, KARL N, BARTONO A. Stop and go cruise control [J]. International Journal of Automotive Technology, 2000, 1(2): 61-69.
- [5] 侯德藻. 汽车纵向主动避撞系统的研究[D]. 北京: 清华大学, 2004.
HOU Dezao. Study on vehicle forward collision avoidance system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2004.
- [6] 王庞伟, 余贵珍, 王云鹏, 等. 基于滑模控制的车车协同主动避撞算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 268-273.
WANG Pangwei, YU Guizhen, WANG Yunpeng, et al. Cooperative active collision avoidance algorithm based on sliding mode control [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(2): 268-273.
- [7] BESSELMANN T, MORAR M. Hybrid parameter varying model predictive control for autonomous vehicle steering [J]. European Journal of Control, 2008, 14(5): 418-431.
- [8] HU Chuan, WANG Rongrong, YAN Fengjun. Integral sliding mode-based composite nonlinear feedback control for path following of four-wheel independently actuated autonomous ground vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(7): 2063-2074.
- [9] SCHNELLE S, WANG J M, SU Haijun, et al. A personalizable driver steering model capable of predicting driver behaviors in vehicle collision avoidance maneuvers[J]. IEEE Transactions on Human-Machine Systems, 2016(99): 1-11.
- [10] DUAN Jingliang, LI Renjie, HOU Lian, et al. Driver braking behavior analysis to improve autonomous emergency braking systems in typical Chinese vehicle-bicycle conflicts[J]. Accident Analysis and Prevention, 2017, 108: 74-82.
- [11] LI Li, PENG Xinyu, WANG Feiyue, et al. A situation-aware collision avoidance strategy for car-following[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(5): 1012-1016.
- [12] RAJARAM V, SUBRAMANIAN S. Heavy vehicle collision avoidance control in heterogeneous traffic using varying time headway [J]. Mechatronics, 2017, 50: 328-340.
- [13] CHEN Chen, XIANG Hongyu, QIU Tie, et al. A rear-end collision prediction scheme based on deep learning in the Internet of Vehicles[J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2018, 117: 192-204.
- [14] HASSANZADEH M, LIDBERG M, KESHAVERZ M, et al. Path and speed control of a heavy vehicle for collision avoidance manoeuvres[C]// IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 3-7, 2012, Alcalá de Henares, 2012: 129-134.

- [15] RAJAMANI R, PHANOMCHOENG G, PIYABONGKARN D, et al. Algorithms for real-Time estimation of individual wheel tire-road friction coefficients[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(6): 1183-1195.
- [16] ANTONOV S, FEHN A, KUGI A. Unscented kalman filter for vehicle state estimation[J]. Vehicle System Dynamics, 2011, 49 (9): 1497-1520.
- [17] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009. YU Zhisheng. Automobile theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [18] PACEJKA H. Tyre and vehicle dynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [19] 张晨晨, 夏群生, 何乐. 质心侧偏角对车辆稳定性影响的研究[J]. 汽车工程, 2011, 33(4): 277-282. ZHANG Chenchen, XIA Qunsheng, HE Le. A study on the influence of sideslip angle at mass center on vehicle stability[J]. Automotive Engineering, 2011, 33(4): 277-282.
- [20] 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.
- [21] 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 vehicle active collision avoidance control system based on longitudinal braking/steering lane-changing[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [22] SLEDGEN H, MARSHEK K. Comparison of ideal vehicle lane change trajectories[J]. Sae Transactions, 1997, 6(4): 233-256.
- [23] NATHANIEL H. An investigation of vehicle critical speed and its influence on lane-change trajectories[D]. Texas: Austin Univ, 1997.
- [24] RAJAMANI R. Vehicle dynamics and control[M]. New York: Springer Science, 2006.
-
- 作者简介: 汪葵, 男, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为汽车主动安全控制。
E-mail: yanwangiv@outlook.com
殷国栋(通信作者), 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为先进电动汽车, 车辆动力学与控制, 智能无人汽车, 车辆主动安全控制。
E-mail: ygd@seu.edu.cn