

复杂路况下自动紧急制动系统控制策略

刘哲¹, 程硕², 王树凤¹

(1. 山东科技大学交通学院, 山东青岛 266590; 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

摘要:为了解决复杂道路状况下车辆防碰撞及保持侧向稳定性的问题,提出一种自动紧急制动控制策略。采用碰撞时间(time-to-collision, TTC)模型评估车辆碰撞风险,利用名义和实际横摆角速度偏差判别车辆侧向稳定性,结合反向传播(back propagation, BP)神经网络和增量式比例-积分-微分(proportion-integral-derivative, PID)求解维持车辆侧向稳定性的附加横摆力矩,进而计算同时满足车辆防碰撞所需期望减速度及避免侧向失稳所需附加横摆力矩的四轮制动力。仿真结果表明,车辆紧急制动过程中,其横摆角速度及质心侧偏角大幅度减小,所提控制策略能够在防止车辆碰撞的同时避免其侧向失稳。

关键词:自动紧急制动;侧向稳定性;BP神经网络;PID

中图分类号:U461

文献标志码:A

文章编号:2095-2783(2022)02-0221-07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Control strategy of automatic emergency braking system under complex road conditions

LIU Zhe¹, CHENG Shuo², WANG Shufeng¹

(1. College of Transportation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to solve the problem of vehicle collision avoidance and maintaining lateral stability under complex road conditions, the time-to-collision (TTC) model was used to assess the risk of vehicle collision, and the deviation of the nominal and actual yaw rate was utilized to judge the lateral stability of the vehicle. The back propagation (BP) neural network combined incremental proportion-integral-derivative (PID) was employed to obtain the additional yaw moment maintaining the lateral stability of the vehicle, and then the four-wheels braking force that met the desired deceleration required for vehicle collision avoidance and the additional yaw moment required to avoid lateral instability were calculated. The simulation results show that the yaw rate and the side slip angle vehicle are greatly reduced during the emergency braking process. The automatic emergency braking control strategy proposed in this paper can prevent the vehicle from colliding and avoiding its lateral instability.

Keywords: automatic emergency braking; lateral stability; BP neural network; proportion-integral-derivative (PID)

近年来,随着汽车数量的逐年上升,交通拥堵加剧,交通事故增加,行车安全受到人们的广泛关注^[1]。对此,许多学者展开了行车安全相关研究,自适应巡航(adaptive cruise control, ACC)^[2]、变道辅助(lane change assist, LCA)^[3]、自动紧急制动(autonomous emergency braking, AEB)^[4]等高级驾驶辅助系统(advanced driver assistance system, ADAS)因能显著提高车辆的行驶安全而成为了研究热点。

AEB系统能够有效避免或减轻碰撞,是ADAS的关键技术之一,学者们从多维度对AEB系统进行了系统的研究。目前,AEB系统一般通过安全时间和安全距离模型来判断车辆碰撞风险^[5],进而指导车辆进行避撞。此外,考虑多变的道路状况对AEB系统的影响,Lian等^[6]提出了一种能适应不同路面附着的安全距离模型。考虑驾驶员个性特征的多样化,姜顺明等^[7]基于驾驶状态识别对安全距离模型进行了修正,使其更能适应驾驶员需求。复杂的交

通场景给AEB系统带来挑战, Lee等^[8]提出一种适用于多车场景的AEB系统,利用阻抗控制的概念实现多车避撞。考虑自动紧急制动过程中自车与后车可能发生碰撞,Shin等^[9]通过预测自车与前、后车碰撞风险,自适应计算了避免前、后向碰撞的制动减速度。李卓等^[10]建立AEB系统两级优化模型,提升了AEB系统在雨天的工作效能。

道路状况复杂多变,AEB系统可能在极恶劣的道路条件(如雨雪等原因造成的较差路面附着状态)下工作。上述文献着重关注车辆纵向的防碰撞能力,对紧急制动过程中因侧向失稳而产生的危险考虑较少。而诸如雨雪天气造成的复杂道路条件往往给车辆的纵向防碰撞及保持侧向稳定性带来严峻挑战,车辆的自动紧急制动系统能否在这种复杂道路条件下保持车辆安全稳定极为重要。因此,复杂道路条件下,在车辆纵向防碰撞的同时保证其紧急制动过程中的侧向稳定性成为了AEB控制策略需要考虑的问题。

收稿日期: 2020-09-11

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2019MF056)

第一作者: 刘哲(1994—),男,硕士研究生,主要研究方向为高级驾驶辅助系统

通信作者: 王树凤,副教授,主要研究方向为车辆系统动力学,shufengwang@sdust.edu.cn

本文综合考虑车辆行驶过程中防碰撞及保持侧向稳定性的需求,从运动学角度采用碰撞时间(time-to-collision, TTC)模型评估车辆的碰撞风险,从动力学的角度,依据名义和实际横摆角速度的偏差判别车辆的侧向稳定状态,进而全面评估车辆行驶状态的安全性。并采用增量式比例-积分-微分(proportion-integral-derivative, PID)求解保持车辆侧向稳定性的附加横摆力矩;考虑车辆模型结构参数易发生变化,利用反向传播(back propagation, BP)神

$$\text{TTC} = \begin{cases} -\frac{d_{\text{rel}}}{v_{\text{obj}} - v_{\text{ego}}}, & a_{\text{obj}} = 0; \\ -\frac{(v_{\text{obj}} - v_{\text{ego}}) - \sqrt{(v_{\text{obj}} - v_{\text{ego}})^2 - 2(a_{\text{obj}} - a_{\text{ego}})d_{\text{rel}}}}{a_{\text{obj}} - a_{\text{ego}}}, & a_{\text{obj}} \neq 0. \end{cases} \quad (1)$$

式中: d_{rel} 为两车间距; v_{obj} 为目标车速度; v_{ego} 为自车速度; a_{obj} 为目标车加速度; a_{ego} 为自车加速度。两车相对距离、相对速度及相对加速度由雷达传感器获得。

依据 C-NCAP 中的 AEB 追尾测试项目,自车在不同车速下进行前车静止、慢行、制动 3 种工况测试,进而确定 1 组与速度相关的 TTC 阈值 ($\text{TTC}_{\text{threshold}}$),见表 1。

表 1 TTC 阈值

Table 1 Threshold value of TTC

车速/(km · h ⁻¹)	TTC _{threshold}
10	1.2
20	1.7
30	2.1
50	2.3
60	2.5

通过比较 TTC 及 $\text{TTC}_{\text{threshold}}$ 评估车辆碰撞风险,当 $\text{TTC} < \text{TTC}_{\text{threshold}}$ 时,即判定车辆有碰撞风险并输出期望制动减速度。依据文献[5]中选取的 100 起轻微碰撞事故得到的平均制动减速度,确定期望制动减速度为 -7 m/s^2 。

1.2 车辆侧向稳定性判别

丁海涛等^[12]对横摆角速度跟随及质心侧偏角抑制 2 种车辆稳定性控制策略进行了分析,得出 2 种控制策略单独使用时均能保持极限工况下的车辆稳定性;同时指出,质心侧偏角难以通过传感器直接获取,需要对其进行精确估计。而横摆角速度能够由传感器直接测得并能在一定程度上反映车辆侧向稳定状态,故选择横摆角速度作为衡量车辆侧向稳定性的指标。通过车辆二自由度模型计算稳态横摆角速度(ω_{nom0})^[13],计算公式为

$$\omega_{\text{nom0}} = \frac{v_x(l_f + l_r)}{1 + K \cdot v_x^2} \delta, K = \frac{m}{L^2} \left(\frac{l_f}{k_2} - \frac{l_r}{k_1} \right). \quad (2)$$

式中: v_x 为车辆纵向速度; l_f 为前轴到质心距离; l_r 为后轴到质心距离; K 为稳定性因数; δ 为前轮转角; m 为整车质量; L 为轴距; k_1 、 k_2 分别为前、后轮

经网络在线调整 PID 控制器参数,通过对四轮制动力进行分配,满足防碰撞所需期望制动减速度及避免侧向失稳所需附加横摆力矩,进而保证车辆的行驶安全。

1 车辆行驶安全状态判断

1.1 车辆碰撞风险评估

为避免车辆发生碰撞,从运动学角度采用 TTC 模型衡量车辆的碰撞危险, TTC 计算公式^[11]为

胎的侧偏刚度。

考虑道路附着条件及横摆角速度响应延迟特性,名义横摆角速度(ω_{nom})^[14]修正为

$$\omega_{\text{nom}} = \frac{1}{\tau s + 1} \min \left\{ |\omega_{\text{nom0}}|, \left| \frac{\mu g}{v_x} \right| \right\} \cdot \text{sgn}(\delta). \quad (3)$$

式中: τ 为一阶滞后的时间常数; s 为拉普拉斯算子; μ 为路面附着系数; g 为重力加速度。

进而从动力学角度利用车辆实际与名义横摆角速度差值判别侧向稳定性,公式^[14]为

$$|\omega - \omega_{\text{nom}}| < \epsilon. \quad (4)$$

式中: ω 为实际横摆角速度; ϵ 为横摆角速度偏差阈值(表 2)。

表 2 横摆角速度偏差阈值

Table 2 Threshold value of yaw rate deviation

车速/(km · h ⁻¹)	ϵ
50	0.024
60	0.025
70	0.026

2 复杂道路状况下的 AEB 系统控制策略

2.1 复杂道路状况下 AEB 控制策略整体架构

车辆可能在复杂多变的道路条件(如低附着路面、由雨雪造成的两侧附着差异路面)下行驶,而这些路面条件往往给行车安全带来严峻挑战。因此本文对复杂道路状况下 AEB 控制策略进行研究,着重解决复杂路况下车辆通过紧急制动进行避撞时可能出现的侧向失稳问题。

复杂道路状况下 AEB 控制策略整体架构如图 1 所示。首先,依据车辆运动学及动力学信息综合判断其行驶安全状态,从运动学角度采用 TTC 模型评估车辆碰撞风险并输出期望制动减速度;从动力学角度依据实际和名义横摆角速度偏差判别其在复杂道路状况下紧急制动时的侧向稳定性。其次,考虑车辆模型的非线性及不确定性特征,结合 BP 神经网络和增量式 PID 求解维持车辆稳定性所需附加横摆

力矩。最后,综合期望制动减速度及附加横摆力矩,压力。对四轮制动力进行分配,并进一步求解各轮缸制动

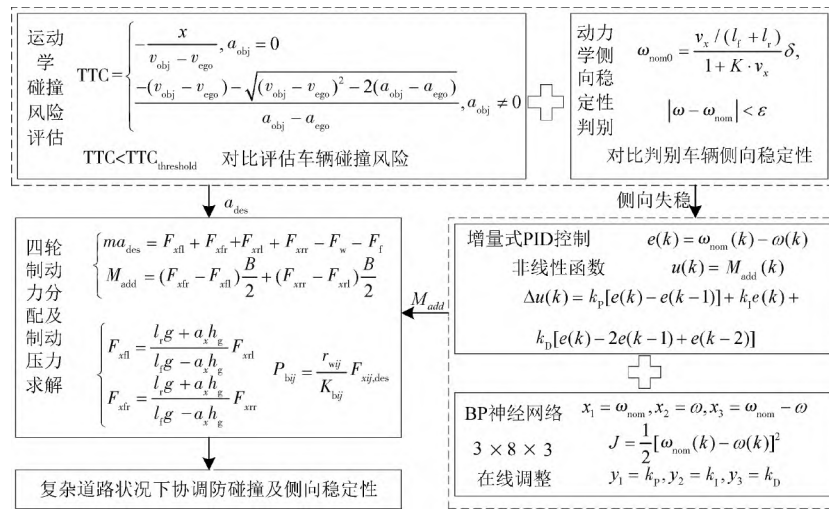


图1 AEB控制策略整体架构

Fig. 1 Overall structure of AEB control strategy

2.2 基于BP神经网络和PID的附加横摆力矩求解

车辆在复杂路况下进行紧急制动,当判定车辆失去侧向稳定性时,通过附加横摆力矩纠正车身姿态,避免车辆因侧向失稳而发生危险。依据当前时

$$\begin{cases} e(k) = \omega_{nom}(k) - \omega(k), \\ u(k) = M_{add}(k) = u(k-1) + \Delta u(k), \\ \Delta u(k) = k_p[e(k) - e(k-1)] + k_i e(k) + k_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)]. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $e(k)$ 为横摆角速度名义值与实际值的偏差; $u(k)$ 为当前时刻控制量; $M_{add}(k)$ 为当前时刻的附加横摆力矩; k_p 为比例系数; k_i 为积分系数; k_D 为微分系数。

PID的核心是对其3个参数的调整,对于简单的线性系统,通过调试确定好PID控制器参数后能够取得较好的控制效果,而对于非线性及复杂的系统,固定的PID参数往往难以取得理想的效果。在车辆控制中,车辆模型具有较强的非线性特征,且其结构参数易发生变化,单纯使用PID控制,固定的 k_p 、 k_i 、 k_D 值难以应对复杂的车辆运行状态。神经网络具有逼近任意非线性函数的能力^[15],为更好地适应复杂多变的车辆运行状态,在增量式PID基础上附加神经网络,对 k_p 、 k_i 、 k_D 值进行在线调整。

BP神经网络结构如图2所示,输入层有3个节点,输出层有3个节点,隐含层节点数经多次调试设置为8。

1)神经网络输入量(x)

$$x_1 = \omega_{nom}, x_2 = \omega, x_3 = \omega_{nom} - \omega. \quad (6)$$

2)神经网络输出量(y)

$$y_1 = k_p, y_2 = k_i, y_3 = k_D. \quad (7)$$

3)隐含层

输入 $net_n^2(k)$:

刻 $\omega_{nom}(k)$ 与 $\omega(k)$ 的差值决策当前附加横摆力矩 ($M_{add}(k)$),以维持车辆侧向稳定性。

采用增量式PID控制算法求解附加横摆力矩:

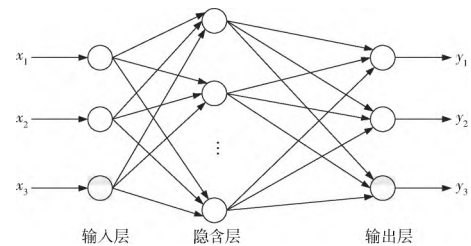


图2 BP神经网络结构

Fig. 2 BP neural network structure

$$\begin{aligned} net_n^2(k) &= \sum_{m=1}^3 w_{nm}^2(k) x_m(k); \\ m &= 1, 2, 3; n = 1, 2, \dots, 8. \end{aligned} \quad (8)$$

式中, w_{nm}^2 为输入层与隐含层神经元节点之间的权值。

输出 $o_n^2(k)$:

$$\begin{cases} o_n^2(k) = f(net_n^2(k)), \\ f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}. \end{cases} \quad (9)$$

式中, $f(x)$ 为隐含层神经元的激励函数。

4)输出层

输入 $net_l^3(k)$:

$$net_l^3(k) = \sum_{n=1}^8 w_{nl}^3(k) o_n^2(k), l = 1, 2, 3. \quad (10)$$

式中, w_{nl}^3 为隐含层和输出层神经元节点之间的权值。

输出 $y_l(k)$:

$$\begin{cases} y_l(k) = g(\text{net}_l^3(k)), \\ g(x) = \frac{e^x}{e^x + e^{-x}}. \end{cases} \quad (11)$$

式中, $g(x)$ 为输出层神经元的激励函数。

采用输出误差二次方作为性能指标函数,有

$$J(k) = \frac{1}{2} [\omega_{nom}(k) - \omega(k)]^2. \quad (12)$$

通过改变神经元各节点之间的权值达到在线调整 PID 控制器参数的目的,依据上述性能指标采用梯度下降法对各神经元节点间加权系数进行修正,并附加惯性项加快收敛速度。输出层加权系数修正公式为

$$\begin{cases} w_{nl}(k) = w_{nl}^3(k-1) + \Delta w_{nl}^3(k), \\ \Delta w_{nl}^3(k) = -\eta \frac{\partial J(k)}{\partial w_{nl}^3(k)} + \alpha \Delta w_{nl}^3(k-1). \end{cases} \quad (13)$$

式中: η 为学习率; α 为惯性系数。

$$\begin{aligned} \frac{\partial J(k)}{\partial w_{nl}^3(k)} &= \frac{\partial J(k)}{\partial \omega(k)} \cdot \frac{\partial \omega(k)}{\partial \Delta u(k)} \cdot \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial o_l^3(k)} \cdot \\ &\quad \frac{\partial o_l^3(k)}{\partial \text{net}_l^3(k)} \cdot \frac{\partial \text{net}_l^3(k)}{\partial w_{nl}^3(k)}. \end{aligned} \quad (14)$$

由于 $\frac{\partial \omega(k)}{\partial \Delta u(k)}$ 未知,近似用符号函数

$\text{sgn}\left(\frac{\partial \omega(k)}{\partial u(k)}\right)$ 代替,则修正后的输出层加权系数为

$$\begin{aligned} w_{nl}^3(k) &= w_{nl}^3(k-1) + \eta e(k) \cdot \text{sgn}\left(\frac{\partial \omega(k)}{\partial u(k)}\right) \cdot \\ &\quad \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial o_l^3(k)} \cdot g'(\text{net}_l^3(k)) + \alpha \Delta w_{nl}^3(k-1). \end{aligned} \quad (15)$$

类似可得修正后的隐含层加权系数为

$$\begin{aligned} w_{nm}^2(k) &= w_{nm}^2(k-1) + \eta f'(\text{net}_n^2(k)) \sum_{l=1}^3 e(k) \cdot \\ &\quad \text{sgn}\left(\frac{\partial \omega(k)}{\partial u(k)}\right) \cdot \frac{\partial \Delta u(k)}{\partial o_l^3(k)} \cdot g'(\text{net}_l^3(k)) w_{nl}^3(k) + \\ &\quad \alpha \Delta w_{nm}^2(k-1). \end{aligned} \quad (16)$$

2.3 四轮制动力分配及缸缸压力控制

车辆同时具有防碰撞及侧向稳定性需求时,通过四轮制动力分配实现防碰撞及保持侧向稳定性的目标。4 个车轮纵向力需同时满足附加横摆力矩及期望制动减速度要求,即

$$\begin{cases} ma_{des} = F_{xfl} + F_{xfr} + F_{xrl} + F_{xrr} - F_w - F_f, \\ M_{add} = (F_{xfr} - F_{xfl}) \frac{B}{2} + (F_{xrr} - F_{xrl}) \frac{B}{2}. \end{cases} \quad (17)$$

式中: F_{xfl} 、 F_{xfr} 、 F_{xrl} 、 F_{xrr} 分别为 4 个车轮的纵向力; F_w 为空气阻力; F_f 为路面滚动阻力; B 为左右车轮之间的轮距。

前后制动器制动力分配能够影响车辆制动稳定性及路面附着的利用程度,根据理想的前后制动器

制动力分配曲线^[16],推导前后车轮制动力关系为

$$\begin{cases} F_{xfl} = \frac{l_r g + a_{ego} h_g}{l_f g - a_{ego} h_g} F_{xrl}, \\ F_{xfr} = \frac{l_r g + a_{ego} h_g}{l_f g - a_{ego} h_g} F_{xrr}. \end{cases} \quad (18)$$

式中, h_g 为质心高度。

结合式(17)和式(18)可得各个车轮期望的轮胎力 ($F_{xij,des}$, $ij \in \{fl, fr, rl, rr\}$), 轮胎力同时受限于路面附着,因此,对各车轮期望轮胎力作如下修正:

$$F_{xij,des} = \min(F_{xij,des0}, \mu F_{zij}). \quad (19)$$

车轮垂向力 (F_{zij}) 计算公式^[14]为

$$\begin{cases} F_{zfl}, F_{zfr} = \frac{mg}{2} \left(\frac{l_r}{L} - \frac{h_g \dot{v}_x}{gL} \mp \frac{2l_r h_g \dot{v}_y}{gL B} \right), \\ F_{zrl}, F_{zrr} = \frac{mg}{2} \left(\frac{l_r}{L} + \frac{h_g \dot{v}_x}{gL} \mp \frac{2l_r h_g \dot{v}_y}{gL B} \right). \end{cases} \quad (20)$$

其中, v_y 为车辆侧向速度。

在得到各车轮期望轮胎力后,计算实现该轮胎力所需车轮缸缸制动压力 (P_{bij}) 实现,计算公式^[17]为

$$P_{bij} = \frac{r_{wij}}{K_{bij}} F_{xij,des}. \quad (21)$$

式中: r_{wij} 为有效车轮半径; K_{bij} 为制动力矩与制动压力比值为常数。

3 仿真分析

为验证本文所提 AEB 控制策略的有效性,搭建仿真平台,测试车辆在左右附着差异较大的对开路面这一复杂道路进行紧急制动。同时以传统 AEB 控制策略和本文控制策略进行对比,传统 AEB 控制策略通过 TTC 确定主动制动时机,当 TTC 小于其阈值时,以 -7 m/s^2 为目标制动减速度进行减速。仿真设置如下:左、右两侧的道路附着系数分别为 0.8、0.4,自车初始速度为 55 km/h,目标车静止,两车相距 100 m。仿真结果分别如图 3~图 8 所示。

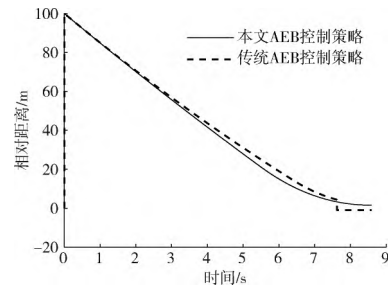


图 3 相对距离变化对比

Fig. 3 Comparison of relative distance's variety

由图 3 和图 4 可知:在传统 AEB 控制策略指导下,自车在 6.3 s (6.3 s 之前的轻微减速现象,是放松油门后受空气及滚动阻力作用造成的) 评估到有碰撞风险而进行主动制动,在 7.6 s 由于自车发生严重偏转,使得目标车辆超出自车雷达探测角度,相对距离及速度发生突变,相对距离变为 -1 m,相对速

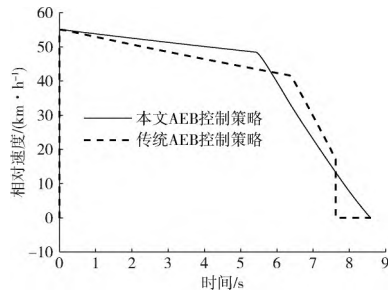


图4 相对速度变化对比

Fig. 4 Comparison of relative velocity's variety

度变为0 (Carsim中雷达失去检测目标, 相对距离输出-1, 相对速度输出0); 在本文AEB控制策略指导下, 自车在5.5s评估到有碰撞风险(因考虑保持紧急制动过程中的侧向稳定性, 本文AEB控制策略相比于传统AEB控制策略更为保守, 以保证车辆在恶劣道路环境下的安全性), 车辆主动制动并在8.6s刹停, 整个过程持续3.1s, 两车间最小相对距离为1.57m。

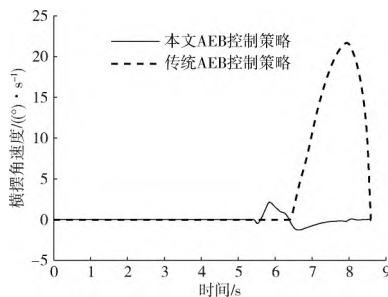


图5 横摆角速度变化对比

Fig. 5 Comparison of yaw rate's variety

由图5可知, 在传统和本文AEB控制策略下, 横摆角速度峰值分别为21.7 (°)/s和2.1 (°)/s。由图6可知, 在传统和本文AEB控制策略下, 质心侧偏角峰值分别为-131.5°和-0.67°。结果表明, 本文提出的AEB控制策略在紧急制动过程中能够有效防止侧偏, 避免侧向失稳。

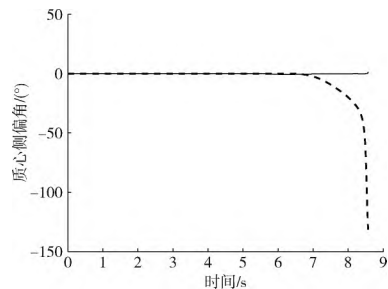


图6 质心侧偏角变化对比

Fig. 6 Comparison of side-slip angle's variety

由图7可知: 在传统AEB控制策略下, 侧向加速度峰值为2.1 m/s²; 而在本文AEB控制策略下, 侧向加速度峰值为0.2 m/s²。本文AEB控制策略

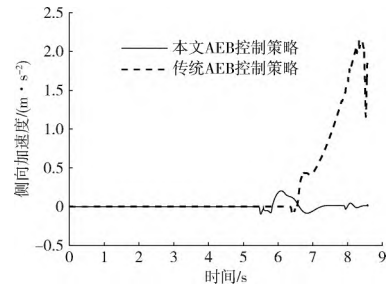


图7 侧向加速度变化对比

Fig. 7 Comparison of lateral acceleration's variety

下, 4个车轮的轮缸制动压力变化如图8所示, 可见, 通过对四轮制动压力进行调节, 在满足避免碰撞的同时避免了侧向失稳。

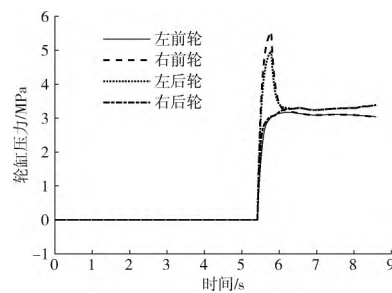


图8 轮缸制动压力变化

Fig. 8 Variation of wheel cylinder brake pressure

为进一步验证本文提出的AEB控制策略的控制效果, 将右侧道路附着系数改为0.3, 其他参数设置不变, 验证在更为恶劣的道路条件下控制策略的有效性, 结果如图9和图10所示。由图9可知, 传统和本文AEB控制策略下, 横摆角速度峰值分别为35.9 (°)/s和2.0 (°)/s。由图10可知, 传统和本文AEB控制策略下, 质心侧偏角峰值分别为-164.5°和-0.57°。

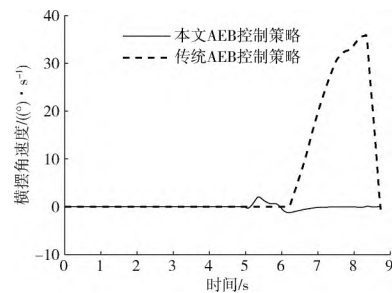


图9 路况恶化时的横摆角速度变化对比

Fig. 9 Comparison of yaw rate's variety under deteriorating road conditions

与图5和图6对比可知: 当道路条件更为恶劣时, 传统AEB控制策略下, 车辆横摆角速度峰值增大14.2 (°)/s, 质心侧偏角峰值增大33°, 车辆极易失去侧向稳定性而发生危险; 本文控制策略下, 横摆角速度峰值略有减小, 质心侧偏角峰值也进一步减小。

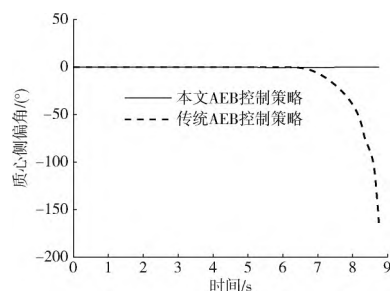


图 10 路况恶化时的质心侧偏角变化对比
Fig. 10 Comparison of side-slip angle's variety under deteriorating road conditions

结果表明,本文提出的 AEB 控制策略能够在保证避免碰撞的前提下有效防止车辆因侧向失稳发生危险。

上述仿真分析验证了本文控制策略相对于传统 AEB 控制策略的优越性。此外,设置与图 9 和图 10 相同的道路条件及车辆参数,进行紧急制动情景下转向制动协同作用仿真,对比本文提出的控制策略与转向制动协同作用的控制策略,结果如图 11~图 14 所示。

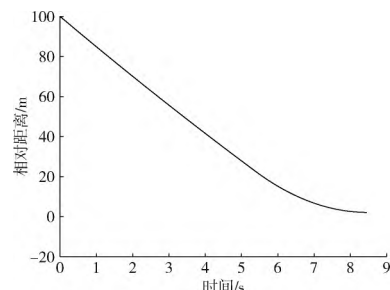


图 11 相对距离变化
Fig. 11 Variation of relative distance

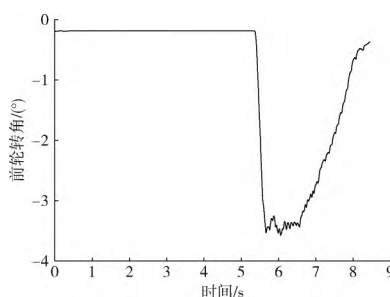


图 12 前轮转向角变化
Fig. 12 Variation of front wheel steering angle

由图 11 和图 12 可知,车辆静止后两车距离为 2.2 m,前轮主动转向的最大修正角为 3.5° 。由图 13 和图 14 可知,横摆角速度峰值为 $5.4 (^{\circ})/\text{s}$,质心侧偏角峰值为 -3.7° 。与图 9 和图 10 相比可知,转向制动协同控制策略下的横摆角速度峰值及质心侧偏角峰值均大于本文控制策略下两者的峰值。进而表明,紧急制动工况下,本文提出的控制策略在维持车

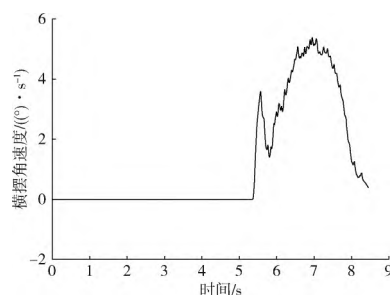


图 13 横摆角速度变化
Fig. 13 Variation of yaw rate

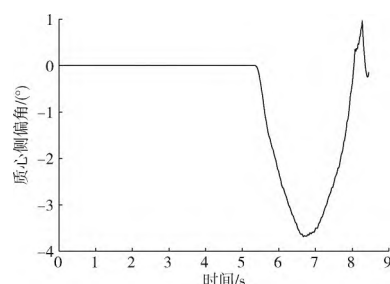


图 14 质心侧偏角变化
Fig. 14 Variation of side slip angle

辆稳定性方面比通过主动前轮转向避免侧向失稳的策略更具优势。

4 结 论

本文针对复杂道路状况下车辆处于紧急情况面临防碰撞与保持车辆侧向稳定性协调问题,提出了综合考虑车辆防碰撞及避免侧向失稳的 AEB 控制策略。

1) 综合车辆行驶的运动学及动力学信息全面判断车辆安全状态,从运动学角度依据 TTC 模型评估车辆碰撞危险,从动力学角度依据横摆角速度实际值与名义值的偏差判别其侧向稳定性。

2) 针对车辆模型结构参数易发生变化的特点,运用 BP 神经网络优化增量式 PID 控制器参数,进而求解避免车辆失稳所需附加横摆力矩。

3) 通过四轮制动力分配,同时满足车辆防碰撞所需期望制动减速度及保持车辆侧向稳定性所需附加横摆力矩。

此外,不同驾驶员对于 AEB 系统的需求不同,AEB 系统应尽可能符合驾驶员的特性,下一步将在处理好动力学稳定性的基础上,通过数据分析进一步将驾驶员行为特征考虑进 AEB 系统的设计。

(由于印刷关系,查阅本文电子版请登录:<http://www.paper.edu.cn/journal/zgkjlw.shtml>)

[参考文献] (References)

- [1] 何仁, 冯海鹏. 自动紧急制动(AEB)技术的研究与进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2019, 10(1): 1-15.
HE R, FENG H P. Research and development of au-

- tonomous emergency brake (AEB) technology [J]. Journal of Automotive Safety and Energy, 2019, 10(1): 1-15. (in Chinese)
- [2] 姜顺明, 吴陶然, 解建, 等. 适应行驶工况的节能自适应巡航模型预测控制[J]. 中国科技论文, 2020, 15(8): 900-905.
JIANG S M, WU T R, XIE J, et al. Energy-saving adaptive cruise model predictive control for driving conditions [J]. China Sciencepaper, 2020, 15(8): 900-905. (in Chinese)
- [3] BUTAKOV V A, IOANNOU P. Personalized driver/vehicle lane change models for ADAS [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(10): 4422-4431.
- [4] PARK M K, LEE S Y, KWON C K, et al. Design of pedestrian target selection with funnel map for pedestrian AEB system [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017, 66(5): 3597-3609.
- [5] 兰凤崇, 余蒙, 李诗成, 等. 考虑预碰撞时间的自动紧急制动系统分层控制策略研究[J]. 汽车工程, 2020, 42(2): 206-214.
LAN F C, YU M, LI S C, et al. Research on hierarchical control strategy for automatic emergency braking system with consideration of time-to-collision [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(2): 206-214. (in Chinese)
- [6] LIAN Y F, ZHAO Y, HU L L, et al. Longitudinal collision avoidance control of electric vehicles based on a new safety distance model and constrained-regenerative-braking-strength-continuity braking force distribution strategy [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4079-4094.
- [7] 姜顺明, 杨哈, 吴陶然, 等. 基于驾驶状态识别的自动紧急制动控制策略[J]. 汽车技术, 2019(10): 53-57.
JIANG S M, YANG H, WU T R, et al. Autonomous emergency braking control strategy based on driving state recognition [J]. Automobile Technology, 2019(10): 53-57. (in Chinese)
- [8] LEE I H, LUAN B C. Design of autonomous emergency braking system based on impedance control for 3-car driving scenario [C]// SAE 2016 World Congress & Exhibition. New York: SAE International, 2016: 1453-1458.
- [9] SHIN S G, AHN D R, BAEK Y S, et al. Adaptive AEB control strategy for collision avoidance including rear vehicles [C]// 2019 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC). New York: IEEE, 2019: 2872-2878.
- [10] 李卓, 刘福聚, 唐芳, 等. 提升雨天情况下 AEB 系统效能的方法研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2020, 34(7): 75-80.
LI Z, LIU F J, TANG F, et al. Research on the method of improving the efficiency of AEB system under rainy conditions [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2020, 34(7): 75-80. (in Chinese)
- [11] 徐杰, 李博, 霍克, 等. 基于 Euro-NCAP 的自动紧急制动系统算法开发[C]// 第十七届汽车安全技术学术会议论文集. [出版地不详: 出版者不详], 2014: 142-148.
XU J, LI B, HUO K, et al. Development of autonomous emergency braking systems algorithm based on Euro-NCAP [C]// Proceedings of the 17th Automotive Safety Technology Conference. [S. l.: s. n.], 2014: 142-148. (in Chinese)
- [12] 丁海涛, 郭孔辉, 张建伟, 等. 两种汽车稳定性控制策略的分析与比较[C]// 2010 中国汽车工程学会年会论文集. 北京: 机械工业出版社, 2010: 547-551.
DING H T, GUO K H, ZHANG J W, et al. Analysis and comparison of two kinds of vehicle stability control strategy [C]// Proceedings of 2010 Annual Meeting of China Society of Automotive Engineering. Beijing: China Machine Press, 2010: 547-551. (in Chinese)
- [13] CHENG S, LI L, GUO H Q, et al. Longitudinal collision avoidance and lateral stability adaptive control system based on MPC of autonomous vehicles [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 21(6): 2376-2385.
- [14] 陈佳瑶. 线控制动车辆弯道制动力优化分配控制策略研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019: 14-21.
CHEN J Y. Optimal braking force allocation for vehicles with the brake-by-wire system during a braking-in-turn maneuver [D]. Changsha: Hunan University, 2019: 14-21. (in Chinese)
- [15] 吴世浩, 孟亚峰, 王超. 基于神经网络的 Volterra 频域核辨识方法[J]. 电光与控制, 2019, 26(2): 38-43.
WU S H, MENG Y F, WANG C. Identifying of volterra frequency-domain kernels based on neural network [J]. Electronics Optics & Control, 2019, 26(2): 38-43. (in Chinese)
- [16] 余志生. 汽车理论[M]. 6 版. 北京: 机械工业出版社, 2018: 132-137.
YU Z S. Automobile theory [M]. 6th ed. Beijing: China Machine Press, 2018: 132-137. (in Chinese)
- [17] YIM S. Integrated chassis control with adaptive algorithms [J]. Journal of Automobile Engineering, 2016, 230(9): 1264-1272.