

文章编号:1671-6833(2026)03-0029-09

考虑道路附着系数的智能车辆主动避撞

林国庆¹,熊浩成¹,徐浩²,秦宇¹,郭岩¹

(1. 长安大学 陕西省交通新能源开发、应用与汽车节能重点实验室,陕西 西安 710064;2. 比亚迪汽车工业有限公司,广东 深圳 518100)

摘要:为提高主动避撞策略的有效性,提出了一种碰撞时间裕度风险评估方法。建立三自由度车辆模型和 Dug-off 轮胎模型并对状态参数进行计算得到归一化轮胎力。基于无迹卡尔曼滤波算法设计路面附着系数估计器,并通过仿真验证附着系数估计器的有效性。在安全距离模型中加入了道路附着系数,以解决传统避撞模型只考虑位置和车辆运动状况的问题。使用五次多项式生成主动避撞路径,计算所需的安全转向距离。基于风险评估方法设计了避撞模式选择策略,使智能车辆可根据与障碍物之间的运动学关系选择适合的避撞模式。采用基于车辆逆动力模型的纵向控制与使用 MPC 的横向控制对智能车辆进行解耦控制。通过 Carsim-Simulink 联合仿真实验和实车实验验证了避撞策略的有效性。

关键词:主动避撞;无迹卡尔曼滤波;附着系数;解耦控制;联合仿真

中图分类号:U461.91 **文献标志码:**A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2026.03.001

随着智能汽车主动安全技术的快速发展,越来越多的车辆配备了高级驾驶辅助系统(advanced driver-assistance system, ADAS),其中主动避撞系统是其核心功能之一^[1]。研究表明,如果采用自动紧急刹车系统(automatic emergency braking, AEB)介入驾驶行为,可以有效避免 27% 的交通事故发生^[2]。然而当车速过高,两车距离过短时 AEB 也难以保证行车安全^[3]。目前,对于主动避障系统的研究多集中于纵向制动或转向避障等单一场景。然而,在复杂的实际驾驶环境中,将纵向制动与转向避障策略相结合是实现主动避障技术的关键。

为实现避撞,需要进行风险评估,根据风险评估内容的不同,可以把评价模型分为安全距离模型和安全时间模型^[4]。Honda 模型^[5]是最常见的安全距离模型,其关注的是车辆采用最大程度制动时车辆的最小间距。Hiroka 等^[6]根据实际驾驶场景对时间阈值进行调整,降低了 AEB 对正常驾驶行为的干涉。

主动碰撞技术根据实现方法可以分为制动避撞和换道避撞。目前,制动避撞控制算法主要有自主

学习驱动算法、逆模型补偿控制方法和经典控制方法^[7]。Shakouri 等^[8]采用纵向分层控制策略,通过非线性模型进行计算求得目标避撞速度,并通过执行器实现制动避撞。Werling 等^[9]针对驾驶道路情况,建立 Frenet 坐标系,基于高次多项式规划换道避撞轨迹,该算法有着很强的适应性。

车辆在行驶过程中的加速度不仅由车辆的性能决定,路面附着系数也是限制加速度的重要因素。Taniguchi 等^[10]设计的路面检测系统能检测前方道路情况,测量路面附着系数,有效降低危险路况给驾驶员带来的事故发生概率。Alonso 等^[11]设计的系统则通过在车辆上配备地面状态测量设备,对路面状态进行分类识别并估算路面附着系数。Wang^[12]等在路面识别中加入了模糊控制,得到了关于附着系数函数的权重系数,同时通过汽车的转向驾驶行为验证了算法的准确性。Nishihara 等^[13]根据轮胎受力和力矩之间的关系设计了一种针对低附着系数地面的附着系数估计器,该方法对低附着系数路面估算效果良好。

综上,兼具制动和换道两种避撞方法,在保证有

收稿日期:2025-11-12;修订日期:2025-12-30

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2023-YBGY-117)

作者简介:林国庆(1978—),男,山东潍坊人,长安大学副教授,博士,主要从事智能网联汽车与汽车测试技术方面的研究,E-mail:lqg@chd.edu.cn

引用本文:林国庆,熊浩成,徐浩,等.考虑道路附着系数的智能车辆主动避撞[J].郑州大学学报(工学版),2026,47(3):29-37.(LIN G Q, XIONG H C, XU H, et al. Vehicle active collision avoidance considering road adhesion coefficient[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2026, 47(3): 29-37.)

效性的前提下,以较低成本考虑不同地面附着条件的主动避撞策略,可以有效提高行车安全性。

1 道路附着系数的估计

行驶过程中,道路附着系数通常难以使用车载传感器直接进行测量且测量设备价格昂贵。因此,采用间接测量方式对道路附着系数进行测量。间接测量方法相对于直接测量方法具有价格低廉的优势。本研究采用无迹卡尔曼滤波算法对道路附着系数进行估算。

1.1 车辆模型

三自由度车辆模型如图 1 所示,为简化车辆模型,对模型进行如下假设:①车辆行驶在没有坡度的平直地面上;②车辆的四个车轮的物理特性相同;③进行转向时前轮的转角与方向盘转角呈线性关系。

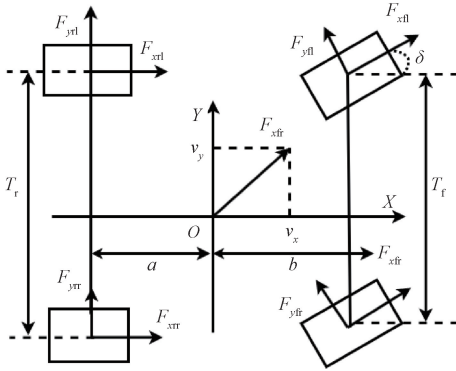


图 1 三自由度车辆模型

Figure 1 Three degrees of freedom vehicle model

通过分析三自由度车辆模型得到简化后的力学方程为

$$a_x = [\mu_{fl}(F_{xfl}^0 - F_{yfl}^0 \delta) + \mu_{fr}(F_{xfr}^0 - F_{yfr}^0 \delta) + \mu_{rl}F_{xrl}^0 + \mu_{rr}F_{xrr}^0] / m; \quad (1)$$

$$a_y = [\mu_{fl}(F_{xfl}^0 \delta + F_{yfl}^0) + \mu_{fr}(F_{xfr}^0 \delta + F_{yfr}^0) + \mu_{rl}F_{yrl}^0 + \mu_{rr}F_{yrr}^0] / m. \quad (2)$$

式中: a_x 、 a_y 分别为车辆在两个方向上的加速度, m/s^2 ; δ 为前轮转角, rad ; μ_{ij} 为附着系数; F_{ijk}^0 为归一化的轮胎力, i 代表坐标轴方向, j 表示前后轮, k 表示左右轮; m 为整车质量, kg 。

1.2 轮胎模型

本研究主要针对地面附着系数,并不包含力矩的计算,而且后文要进行的是利用无迹卡尔曼滤波对附着系数进行计算,所以选择使用 Dugoff 轮胎模型^[14],模型受力如图 2 所示。

为了方便对地面附着系数的计算,将轮胎受力归一化为

$$F_x = \mu F_z C_x \frac{\lambda}{1 - \lambda} f(D); \quad (3)$$

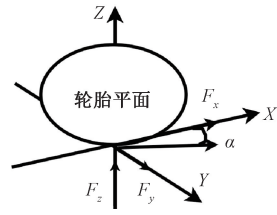


图 2 轮胎受力图

Figure 2 Tyre force diagram

$$F_y = \mu F_z C_y \frac{\tan \alpha}{1 - \lambda} f(D); \quad (4)$$

$$f(D) = \begin{cases} D(2 - D), & D < 0; \\ 1, & D \geq 0. \end{cases} \quad (5)$$

$$D = \frac{(1 - \lambda)(1 - \varepsilon v_x \sqrt{C_y^2 \lambda^2 + C_x^2 \tan^2 \alpha})}{2\sqrt{C_y^2 \lambda^2 + C_x^2 \tan^2 \alpha}}. \quad (6)$$

式中: F_x 为轮胎在纵向的受力, N ; F_y 为轮胎在横向的受力, N ; μ 为附着系数; C_x 、 C_y 分别为轮胎在纵横两个方向上的侧偏刚度, N/rad ; α 为侧偏角, rad ; λ 为滑移率; v_x 为沿 x 方向上的速度, m/s ; ε 为速度影响因子,与轮胎结构有关。

1.3 基于无迹卡尔曼滤波的附着系数计算

无迹卡尔曼滤波是一种递归估计算法^[15],该算法能够在噪声干扰的情况下对系统状态进行实时预测与校正,具有较高的精度和鲁棒性。

具体估计过程为通过前文得到简化后的三自由度车辆力学表达式以及归一化后的轮胎力,进而利用智能车辆状态参数值表达轮胎力与附着系数的函数关系,建立的无迹卡尔曼滤波算法道路附着系数估计器的表达式为

$$\dot{x}(t) = f(x(t), n(t), m(t)); \quad (7)$$

$$y(t) = h(x(t), g(t)). \quad (8)$$

其中: $n(t)$ 、 $m(t)$ 为过程中的干扰噪声; $g(t)$ 为测量噪声; $x(t)$ 为状态变量; $y(t)$ 为测量变量。

接下来根据无迹卡尔曼滤波算法对附着系数进行估计,根据附着系数和经过归一化的方程可得出:

$$y(t) = \begin{bmatrix} \frac{F_{xfl}^0 - F_{yfl}^0 \delta}{m} & \frac{F_{xfr}^0 - F_{yfr}^0 \delta}{m} & \frac{F_{xrl}^0}{m} & \frac{F_{xrr}^0}{m} \\ \frac{F_{xfl}^0 \delta + F_{yfl}^0}{m} & \frac{F_{xfr}^0 \delta + F_{yfr}^0}{m} & \frac{F_{yrl}^0}{m} & \frac{F_{yrr}^0}{m} \\ H(3,1) & H(3,2) & H(3,3) & H(3,4) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mu_{fl} \\ \mu_{fr} \\ \mu_{rl} \\ \mu_{rr} \end{bmatrix}; \quad (9)$$

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{fl} \\ \mu_{fr} \\ \mu_{rl} \\ \mu_{rr} \end{bmatrix} + w(t). \quad (10)$$

式中: $w(t)$ 为干扰噪声。

$$H(3,1) = [a(F_{xfl}^0 \sin \delta + F_{yfl}^0 \cos \delta) - 0.5T_f(F_{xfl}^0 \cos \delta - F_{yfl}^0 \sin \delta)]/I_z; \quad (11)$$

$$H(3,2) = [a(F_{xfl}^0 \sin \delta + F_{yfl}^0 \cos \delta) + 0.5T_f(F_{xfl}^0 \cos \delta - F_{yfl}^0 \sin \delta)]/I_z; \quad (12)$$

$$H(3,3) = (-0.5T_f F_{xrl}^0 - bF_{yfl}^0)/I_z; \quad (13)$$

$$H(3,3) = (-0.5T_f \cdot F_{xrl}^0 - bF_{yfl}^0)/I_z。 \quad (14)$$

式中: T_f 为前轮轮距,m; b 为后轴到质心的距离,m; a 为前轴到质心的距离,m; I_z 为绕Z轴的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; d 为前轮转角,rad。

算法递推如图 3 所示,通过车辆动力学模型、轮胎模型将状态参数计算成状态变量和测量变量,再通过循环计算,得到道路附着系数的估计值。

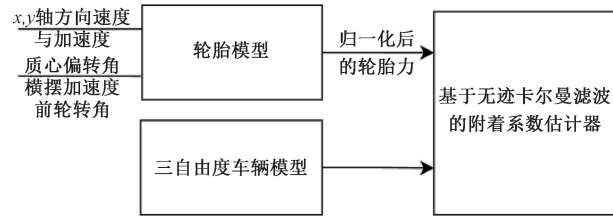


图 3 附着系数估计流程

Figure 3 Adhesion coefficient estimation process

1.4 仿真验证

为验证本节提出的附着系数算法,使用 Carsim 与 Simulink 进行联合仿真。车辆参数见表 1,附着系数为 0.8,车辆以 90 km/h 的速度行驶,随后以 6 m/s^2 的加速度进行制动。

表 1 车辆参数

Table 1 Carsim simulation parameters

参数名称	数值
整车质量 m/kg	1 200
发动机功率 P/kW	130
质心距前轴距离 a/m	1.14
质心距后轴距离 b/m	1.46
轴距 L/m	2.6
质心高度 h/m	0.41
车辆转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1 301.4
前轮侧偏刚度 $C_1/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-74 600
后轮侧偏刚度 $C_2/(\text{N} \cdot \text{rad}^{-1})$	-62 700

仿真结果如图 4 所示,以左前轮为例,在 0~0.8 s 计算得到的附着系数在真实值附近震荡,在 0.8 s 以后,附着系数从下方逼近真实值,并趋于稳定,最大误差为 2.6%。而使用卡尔曼滤波算法对路面附着系数估计经过 17 s 后才得到稳定的附着系数结果^[16]。相比较而言,本研究使用的无迹卡尔曼滤波算法能够更加迅速、准确地得到估算值。

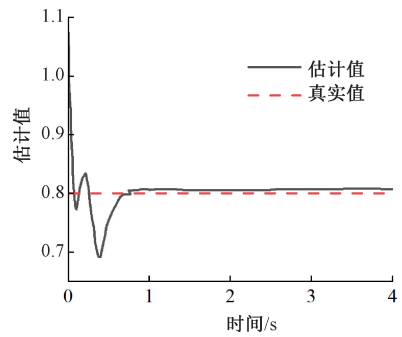


图 4 附着系数仿真结果

Figure 4 Adhesion coefficient simulation results

2 车辆碰撞风险评估

避撞方式包括制动避撞和换道避撞。下文阐述车辆纵横两方向上的避撞风险评估,并根据评估参数确定车辆避撞方式。

2.1 车辆纵向碰撞风险评估

在传统的安全时间阈值模型^[17]中,主要是通过后车与前车的距离 S_r 和前后两车的相对速度 v_r 之比来计算实际碰撞时间,并根据实际碰撞时间设定阈值区间,从而避免发生碰撞。此算法未考虑前后两车的相对加速度,得出的安全时间阈值区间并不精确。本研究考虑前后两车的相对加速度,构建了强化安全时间模型 ETC(enhanced time to collision),避撞触发时间 t_{ETC} 如式(15)所示。

$$t_{ETC} = \begin{cases} \frac{S_r}{v_r}, a_r = 0; \\ -\frac{v_r}{a_r} + \frac{\sqrt{v_r^2 - 2a_r S_r}}{a_r}, a_r \neq 0. \end{cases} \quad (15)$$

式中: a_r 为前后车的相对加速度, m/s^2 。

为了更加客观地反映碰撞风险,将 ETC 模型与安全距离模型^[18]结合使用,并考虑道路附着系数,进行纵向避撞风险评估。驾驶员制动过程如图 5 所示。

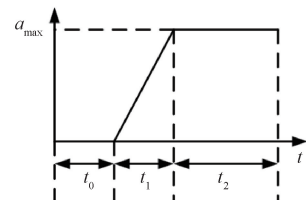


图 5 制动过程中加速度变化

Figure 5 Acceleration changes during braking

图 5 中 t_0 为从驾驶员发现碰撞风险并踩下制动踏板到制动器产生制动液压的时间; t_1 为制动器产生减速到减速达到最大值的时间; t_2 为减速速度达到最大到汽车完全刹停的时间; a_{max} 为最大减

速度。

制动距离计算式如下式所示:

$$X = v_{c0} \left(t_0 + \frac{t_1}{2} \right) + \frac{v_{c0}^2}{2a_{\max}} \quad (16)$$

式中: X 为制动过程中车辆移动的距离,m; t_0 、 t_1 分别为图5中所对应的时间,s; v_{c0} 为车辆制动的初速度,m/s; a_{\max} 为车辆最大制动减速度,m/s²。

车辆最大制动减速度会受到制动器的最大制动力以及地面附着系数约束,所以在计算最大减速度时需要参考式(17):

$$a_{\max} = \begin{cases} k\mu g, k\mu g < 6; \\ 6, k\mu g \geq 6. \end{cases} \quad (17)$$

式中: k 为安全因子; g 为重力加速度,m/s²; μ 为地面附着系数。

如图6所示,在行驶过程中,当车辆检测到前后车的相对速度小于零,且两车之间的距离小于安全距离 S_a 时,制动系统开始制动,为了避免碰撞,只需要使车辆的相对速度大于等于零且保持一定距离 d (d 取3 m^[19])。

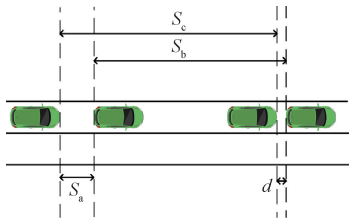


图6 制动过程车辆位置关系

Figure 6 Vehicle position relationship during braking process

在实际行驶过程中还可能出现前车刹车的情况。假设前车的速度为 v_q ,且前后两车的制动性能一致,即 a_{\max} 相等,则最小安全距离为

$$S_a = (v_{c0} - v_q) \left(t_0 + \frac{t_1}{2} \right) + \frac{v_{c0}^2 - v_q^2}{2a_{\max}} + d \quad (18)$$

从ETC和制动距离的角度对纵向风险评估得

$$\begin{cases} t_{\text{ETC}} > t_{\text{ETCs}}; \\ S_a > S_r. \end{cases} \quad (19)$$

式中: t_{ETCs} 为避撞触发阈值,取3 s^[19]。当车辆运动状态符合式(19),可判断车辆没有碰撞风险。

2.2 车辆横向碰撞风险评估

2.2.1 基于多项式的轨迹规划

换道避撞需考虑车辆横向碰撞风险。五次多项式^[20]结构简单且易于计算,求解过程中计算量较低,还能在转向时对横向速度和横向加速度施加约束条件,下文使用五次多项式对换道轨迹进行规划。

车道为单向双车道,且宽度为3.6 m,以本车作

为坐标原点建立坐标系,前车为障碍物,曲线为本车的避撞运动轨迹。

按照避撞要求建立五次多项式:

$$f(y, x) = \sum_{i=0}^5 a_i x^i \quad (20)$$

对式(20)进行求导并带入边界条件,整理可得换道轨迹关于时间的函数关系:

$$f(y, t) = \left(\frac{y_b}{t_b^5} \right) (6t^5 - 15t_b t^4 + 10t_b^2 t^3) \quad (21)$$

式中: $0 \leq t \leq t_b$, t_b 为本车完成换道的总时间,s。

式(20)中的最高项为三次项,在取值区间中存在极值点,求得

$$a_{y\max} = \frac{10y_b}{\sqrt{3}t_b^2} \quad (22)$$

通过地面能提供的最大附着力来确定车辆的最大横向加速度 $a_{y\max}$,进而计算出换道所需的时间。然后通过五次多项式规划方法得到理想的避撞换道轨迹,并进一步计算出在当前道路条件下,车辆通过转向避撞实现安全避撞所需的安全距离。

$$S_{ys} = (v_0 - v_q) t_b + d \quad (23)$$

根据式(22),通过计算横向加速度,同时考虑地面能提供的最大加速,以约束最大横向加速度。当横向加速度取0.33g时,计算出避撞的时间为2.55 s,取初速度为85 km/h,车辆横向位移为车道宽3.6 m进行仿真。结果如图7示,在整个过程中,横向位移和横向加速度的变化是平滑的。

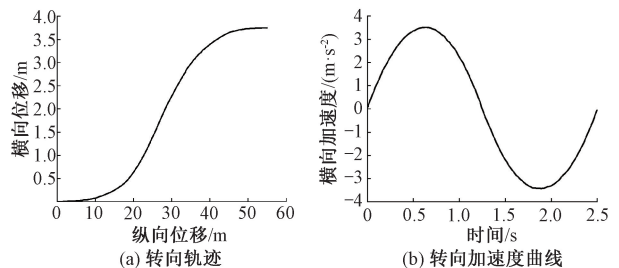


图7 风险评估仿真结果

Figure 7 Risk assessment simulation results

2.2.2 换道可行性分析

(1)碰撞约束。如图8示,在执行转向避撞时,为简化分析将车辆模型抽象为矩形。其中,A车表示刚开始转向的位置;B车表示车辆碰撞临界位置;C车则代表前车; H 为道路宽度,取值为3.6 m。

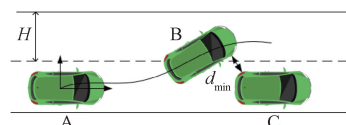


图8 转向避撞

Figure 8 Steering collision avoidance process

在换道的过程中,车在 B 点位置可能会因为距离过近而导致自身车辆的右前角与前车的左后角发生碰撞,计算车辆在换道过程中,在保证不发生碰撞的情况下后车横向位移 y_h 为

$$y_h = \frac{c_b + c_q}{2} + d_{\min} \quad (24)$$

式中: c_b 为本车车宽,m; c_q 为前车车宽,m; d_{\min} 横向安全距离,m。

假设在转向过程中,两车出现碰撞的极限距离的时间为 t_j ,可得到避撞过程中为避免发生碰撞的最小安全距离应为

$$y_h = (v_{c0} + v_q) t_j \quad (25)$$

(2)地面附着极约束。在避撞时需要通过摩擦圆对纵横耦合力进行约束。摩擦圆约束是指轮胎与地面接触运动时,其纵向和横向的合力必须保持在摩擦圆的范围内,如式(26)所示。

$$\sqrt{a_x^2 + a_y^2} \leq \mu g \quad (26)$$

2.3 避撞模式决策

车辆通过雷达获得周围车辆位置信息后,进行如图 9 所示决策流程:根据 ETC 判断碰撞风险,若 $t_{ETC} > t_{ETCs}$,则没有碰撞风险;若 $t_{ETC} < t_{ETCs}$,则进一步决策;若 $S_r > S_a$ 则进行制动避撞; $S_r < S_a$ 则进入换道避撞判断,若 $S_r > S_{ys}$ 且同时满足转向约束,则进行换道避撞,如果不能同时满足两条件,则车辆将发生碰撞。

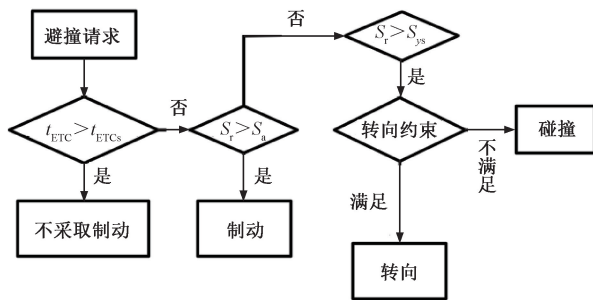


图 9 避撞决策流程

Figure 9 Collision avoidance decision process

3 避撞控制系统构建

3.1 基于车辆逆动力学模型的纵向控制

在纵向控制中进行速度跟踪时,执行机构无法同时运行,因此采分层控制策略。根据车辆运行情况,上层通过 LQR 控制器^[21] 计算所需加速度;下层则利用控制器控制执行机构对车辆运行状态进行调整,结合上层规划输出的目标加速度选择合适的加速度调节执行装置。

3.2 使用 MPC 的横向控制

本研究采用 MPC 算法实现对车辆的横向控

制^[22]。系统以横向位移和角偏差作为误差参考变量,选择前轮转角作为控制量,通过目标函数将状态量和控制量及其变化量最小化,状态量和控制量的增量作为二次型优化目标,并对控制量及其增量进行约束,使滞后权重增加,并补偿模型简化而带来的误差。

4 车辆主动避撞仿真实验

4.1 仿真平台的搭建

车辆仿真参数如表 1 所示。仿真道路在 Carsim 中进行设置,设置为无坡度,长度为 800 m,车道宽度为 3.6 m 的单向直线双车道。

4.2 仿真分析

4.2.1 高附着条件下前车静止

地面附着系数为 0.7^[23] 的单向直线双车道,前方存在一辆静止的车辆,与主车的初始相对距离为 90 m,自车的初始车速设定为 90 km/h。

仿真结果如图 10 所示。两车之间的相对距离逐渐缩小,碰撞风险不断增加。如图 10(a) 所示, t_{ETC} 在 1.4 s 时下降到 1.31 s,且主车与前车的相对距离为 39.00 m,纵向安全距离为 31.00 m,选择通过制动进行避撞。如图 10(b) 所示,制动过程中相对距离始终保持大于设定的安全距离,当主车车速减至 0 时,与前车的最终距离为 4.41 m,大于设定的安全距离 3 m,完成避撞操作。结果表明避撞模式选择合理且有效。

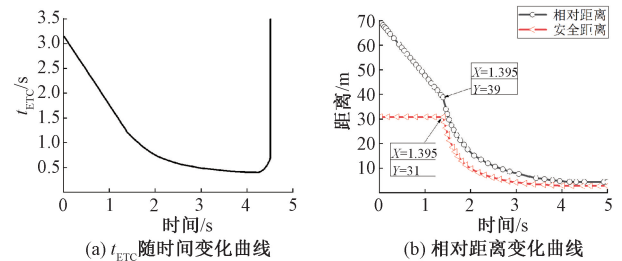


图 10 高附着条件下仿真结果

Figure 10 Simulation results with high adhesion conditions

4.2.2 低附着条件下前车静止

地面附着系数设为 0.2^[23],其他设置与本文 4.2.1 节一致。 t_{ETC} 降至 1.31 s,如图 11 所示,主车与前车的相对距离为 39.00 m。由于路面附着系数过低。纵向制动的安全距离达到 86.51 m,远远大于两车的相对距离;横向避撞的安全距离为 37.50 m,因此选择换道避撞。由图 11 可知:在换道过程中,侧向位移变化平稳,相对距离始终大于安全距离。

4.2.3 高附着条件下前车运动

实验地面附着系数为 0.7^[23],前车车速

50 km/h,并以 4 m/s^2 的加速度进行制动,本车初速度为 90 km/h。

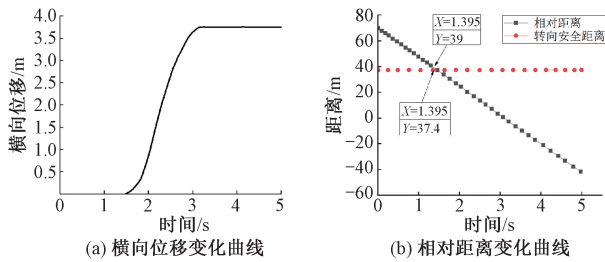


图 11 低附着条件下仿真结果

Figure 11 Simulation results with low adhesion conditions

如图 12 所示时两车相距 40 m,当 $t = 0$ 时前车制动, t_{ETC} 降至 1.2 s,前车速度降低,此时纵向制动安全距离为 24.7 m,小于两车的相对距离,因此采用纵向制动避撞,两车始终保持一定距离,当两车完成制动时,两车相距 3.3 m 大于安全距离 3 m,车辆完成了避撞。

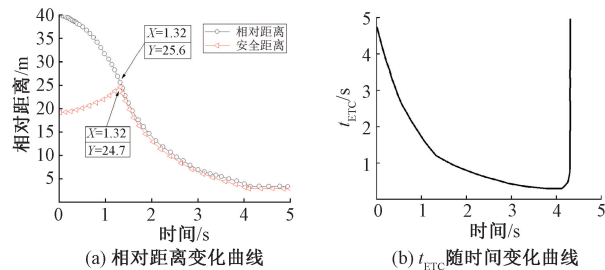


图 12 高附着条件下仿真结果

Figure 12 Simulation results with high adhesion conditions

4.2.4 低附着条件下前车运动

仿真设置同 4.2.3 节,附着系数设置为 $0.2^{[23]}$ 。 t_{ETC} 降至 1.2 s,由于附着系数过小,纵向制动安全距离为 72.1 m,但相对距离为 24.86 m,显然不能进行纵向制动,而转向避撞的安全距离为 21.65 m,故进行转向避撞,由图 13 可知车辆在安全距离内进行了转向避撞,且没有发生碰撞,由仿真结果可知避撞系统有效地完成了避撞。

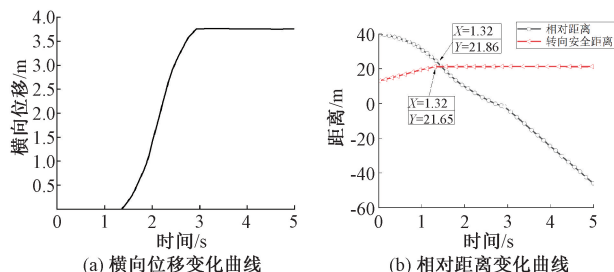


图 13 低附着条件下仿真结果

Figure 13 Simulation results with low adhesion conditions

5 实车实验验证

5.1 实车与实验场地介绍

实验场地选择长安大学汽车实验场,如图 14 所示。实验地面选择干燥水泥路面(附着系数约为 0.7)和较为光滑的瓷砖路面(地面附着系数约为 0.2)。

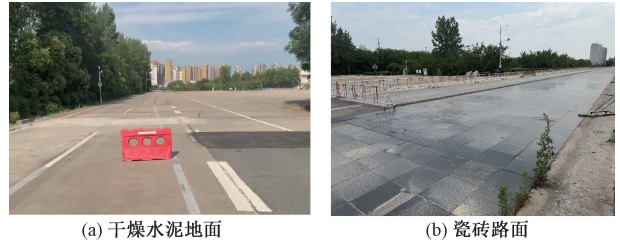


图 14 实验场地

Figure 14 Experimental sites

实验车长 \times 宽 \times 高为 453 cm \times 187 cm \times 150 cm,前后轮轴距为 4.6 m,质量 1 610 kg,轴距 2.9 m,驱动电机额定功率 100 kW。实验车辆通过车载传感器获取车辆的速度、加速度等运动学参数,同时通过激光雷达获取车辆与障碍物之间的位置信息,将获取的车辆信息输入研华 MIC-770V2 工业控制计算机,经过数据处理后通过控制器执行车辆控制。

5.2 实验与结果分析

分别在两种地面情况进行实车实验。出于安全考虑,只进行了静止障碍物的避撞实验。

(1)高附着条件下的实车实验。如图 15 所示,实验车辆距离障碍物的初始距离 60 m,地面条件为粗糙的水泥地面。车辆以 90 km/h 驶向静止障碍物,安全员全程无制动操作。车辆首先沿直线匀速行驶,随着车辆与障碍物的距离缩短, t_{ETC} 不断降低,随后车辆进行制动,最后在障碍物前完成制动,没有发生碰撞,避撞系统较为理想地完成了避撞行为。

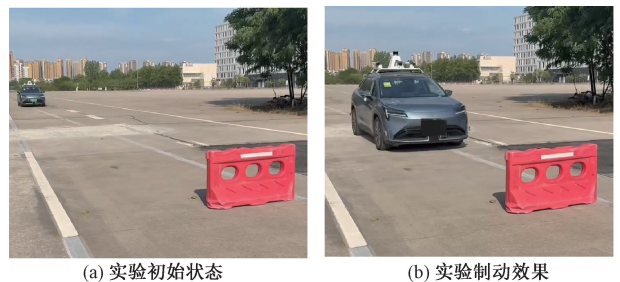


图 15 实验过程

Figure 15 Experimental procedures

实验结果如图 16 所示。在高附着条件下,车辆的制动避撞安全距离约为 31 m,实验场地地面附着系

数可能小于 0.7,导致实际安全距离变大,车辆在距离障碍物 41.7 m 处进行制动,相对于 4.2.1 中的仿真实验,车辆在距离障碍物 39 m 处车辆进行制动,实车实验误差为 6.9%,制动完成后与障碍物之间的相对距离为 4.15 m,相对于仿真实验,实车制动误差为 5.8%,考虑到实际实验情况与仿真存在差异,可以判断该避撞系统的有效性。

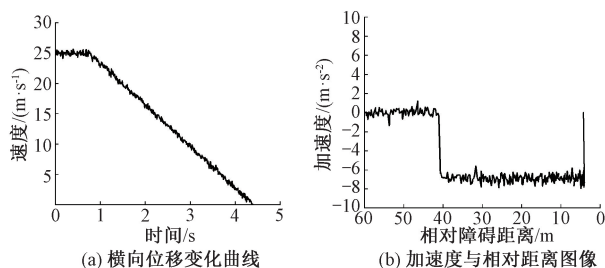


图 16 高附着条件下的实车实验结果

Figure 16 Real vehicle test results with high adhesion conditions

(2) 低附着条件下的实车实验。实验车辆距离障碍物的初始距离 60 m,地面条件为较光滑的地面,附着系数约为 0.2。车辆以 90 km/h 驶向静止障碍物,安全员全程无制动操作。首先车辆沿直线驶向障碍物,随着车辆与障碍物的相对距离不断减小,车辆在距离障碍物 41 m 处进行转向避让,安全员评价转弯较为柔和,没有产生不适,实验车辆与障碍物没有发生碰撞,车辆较为平滑地完成了转向避让。

实验结果如图 17 所示。在低附着条件下,车辆的制动安全距离约为 72 m,大于两车的相对距离 60 m,但换道避撞安全距离为 37 m,故车辆选择进行转向避让,根据安全员评价可知车辆转向较为平缓,根据最终结果可知车辆没有发生碰撞,实车实验结果达到了 4.2.2 中仿真期望,验证了该避撞系统的有效性。

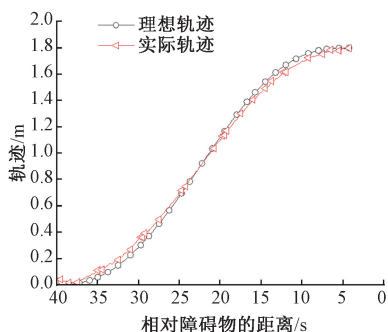


图 17 低附着条件下的实车实验结果

Figure 17 Real vehicle test results with low adhesion conditions

避撞实验。由实验结果可知所研究的避撞系统能够根据障碍物距离,结合地面附着条件选择合适的避撞方案,并完成避撞操作,进一步验证了所述避撞系统的有效性。

6 结论

(1) 建立了 Dugoff 轮胎模型和三自由度车辆模型,并通过模型获得归一化后的轮胎力。选用无迹卡尔曼滤波作为道路附着系数的估计方法。通过仿真验证了估计方法的有效性。

(2) 对于制动避撞,在安全距离计算过程中加入道路附着系数对最大制动加速度进行约束,优化了避撞安全距离模型并与安全时间模型共同参与纵向风险评估。

(3) 对于换道避撞,利用五次多项式对避撞路径进行规划,根据附着系数确定最大侧向加速度,计算换道所需时间及换道避撞的最小安全距离,并针对最大侧向加速度进行约束。

(4) 进行了仿真实验和实车实验。实验结果验证了避撞策略的有效性。

参考文献:

- [1] ANTONY M M, WHENISH R. Advanced driver assistance systems (ADAS) [M]//Automotive Embedded Systems. Cham: Springer International Publishing, 2021: 165-181.
- [2] 刘福聚,王鹏,陈吉光. 基于 CIDAS 乘用车行人事故的 AEB 系统参数研究[J]. 中国汽车, 2018, 28(9): 26-29.
LIU F J, WANG P, CHEN J G. Research on the AEB system parameters based on passenger car-pedestrian accidents in CIDAS[J]. China Auto, 2018, 28(9): 26-29.
- [3] 吴斌,朱西产,沈剑平,等. 基于自然驾驶数据的危险评估算法研究[J]. 汽车工程, 2017, 39(8): 907-914.
WU B, ZHU X C, SHEN J P, et al. A study on risk assessment algorithm based on natural driving data[J]. Automotive Engineering, 2017, 39(8): 907-914.
- [4] 王建强,迟瑞娟,张磊,等. 适应驾驶员特性的汽车追尾报警-避撞算法研究[J]. 公路交通科技, 2009, 26(增刊1): 7-12.
WANG J Q, CHI R J, ZHANG L, et al. Study on forward collision warning-avoidance algorithm based on driver characteristics adaptation[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2009, 26(S1): 7-12.
- [5] 房观甄. 基于毫米波雷达的整车在环自动紧急制动测试系统开发[D]. 北京:北京交通大学, 2023.

综上所述,在不同附着系数地面情况下进行了实车

- FANG G L. Development of vehicle in-loop automatic emergency braking test system based on millimeter wave radar[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2023.
- [6] HIROKA T, TANAKA M, KUMAMOTO H, et al. Collision risk evaluation index based on deceleration for collision avoidance (first report) - proposal of a new index to evaluate collision risk against forward obstacles[J]. *Review of Automotive Engineering*, 2009, 30(4): 439-447.
- [7] 王祎男, 王迪, 关瀛洲. 智能网联汽车主动避撞系统发展综述[J]. *汽车技术*, 2023(3): 1-9.
- WANG Y N, WANG D, GUAN Y Z. Development overview of active collision avoidance system for intelligent and connected vehicles [J]. *Automobile Technology*, 2023(3): 1-9.
- [8] SHAKOURI P, ORDYS A, LAILA D S, et al. Adaptive cruise control system: comparing gain-scheduling PI and LQ controllers[J]. *IFAC Proceedings Volumes*, 2011, 44(1): 12964-12969.
- [9] WERLING M, ZIEGLER J, KAMMEL S, et al. Optimal trajectory generation for dynamic street scenarios in a Frenét Frame [C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway: IEEE, 2010: 987-993.
- [10] TANIGUCHI Y, NISHII K, HISAMATSU H. Evaluation of a bicycle-mounted ultrasonic distance sensor for monitoring road surface condition [C]//2015 7th International Conference on Computational Intelligence, Communication Systems and Networks. Piscataway: IEEE, 2015: 31-34.
- [11] ALONSO J, LÓPEZ J M, PAVÓN I, et al. On-board wet road surface identification using tyre/road noise and Support Vector Machines[J]. *Applied Acoustics*, 2014, 76: 407-415.
- [12] WANG F, FAN X B, ZHANG Y M, et al. Fuzzy identification based on tire/road adhesion feature[J]. *Computer Aided Drafting, Design and Manufacturing*, 2015, 25(1): 62-67.
- [13] NISHIHARA O, MASAHIKO K. Estimation of road friction coefficient based on the brush model[J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2011, 133(4): 041006.
- [14] 邓浩楠, 赵治国, 赵坤, 等. 四驱车辆交互式多模型自适应无迹卡尔曼滤波路面附着系数估计[J]. *汽车工程*, 2024, 46(8): 1357-1369.
- DENG H N, ZHAO Z G, ZHAO K, et al. Estimation of road adhesion coefficient using interactive multiple model adaptive unscented Kalman filter for 4WID vehicles[J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(8): 1357-1369.
- [15] 杨一鹏. 考虑前车制动意图的自动驾驶 AEB 控制策略与测试评价研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- YANG Y P. Research on AEB control strategy and test evaluation of automatic driving considering the braking intention of the preceding vehicle[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [16] 张磊, 董翔宇, 姚余磊. 基于路面附着系数的道路识别算法研究[C]//第三十一届中国汽车工程学会年会暨展览会(SAECCE 2024). 上海: 中国汽车工程学会, 2024: 349-353.
- ZHANG L, DONG X Y, YAO Y L. Research on Road Recognition Algorithm Based on Road Surface Adhesion Coefficient[C]//The 31st Annual Conference of the Chinese Society of Automotive Engineers and Exhibition (SAECCE 2024). Shanghai: Chinese Society of Automotive Engineers, 2024: 349-353.
- [17] WANG H B, CHEN L, ZHANG W H. Lane-keeping control based on an improved artificial potential method and coordination of steering/braking systems[J]. *IET Intelligent Transport Systems*, 2019, 13(12): 1832-1842.
- [18] GUO C, WANG X L, SU L L, et al. Safety distance model for longitudinal collision avoidance of logistics vehicles considering slope and road adhesion coefficient[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2021, 235(2/3): 498-512.
- [19] 范文兵, 张璐璐. 基于核相关滤波和卡尔曼滤波预测的混合跟踪方法[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2024, 45(2): 20-26.
- FAN W B, ZHANG L L. Hybrid tracking method based on kernel correlation filter and Kalman filter prediction [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2024, 45(2): 20-26.
- [20] 张三川, 马啸. 基于轨迹加权预测的主动避撞安全距离模型及算法[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2022, 43(3): 104-110.
- ZHANG S C, MA X. A safe distance model and algorithm for active collision avoidance based on weighted prediction of trajectory[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2022, 43(3): 104-110.
- [21] 桑楠, 魏民祥, 白玉. 基于随机线性最优控制的汽车主动悬架控制器设计[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2012, 33(3): 56-60.
- SANG N, WEI M X, BAI Y. Design of active suspension controller based on stochastic linear optimal control theory [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2012, 33(3): 56-60.
- [22] 刘志强, 张晴. 自适应时域参数 MPC 的智能车辆轨迹跟踪控制[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2024, 45(1): 47-53.
- LIU Z Q, ZHANG Q. Intelligent vehicle trajectory track-

ing control based on adaptive time domain parameter MPC [J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2024, 45(1): 47-53.

[23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 乘用车制动系统技术要求及试验方法: GB 21670—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Technical requirements and testing methods for passenger car braking systems: GB 21670—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

Vehicle Active Collision Avoidance Considering Road Adhesion Coefficient

LIN Guoqing¹, XIONG Haocheng¹, XU Hao², QIN Yu¹, GUO Yan¹

(1. Chang'an University, Key Laboratory of Transportation New Energy Development, Application and Automotive Energy Conservation of Shanxi Province, Xi'an 710064, China; 2. BYD Automobile Industry Company Limited, Shenzhen 518100, China)

Abstract: To improve the effectiveness of the active collision avoidance strategy, a risk assessment method for collision time margin was proposed. The three-degree-of-freedom vehicle model and the Dugoff tire model were established, and the state parameters were calculated to obtain the normalized tire force. The pavement adhesion coefficient estimator was designed based on the traceless Kalman filtering algorithm, and the effectiveness of the adhesion coefficient estimator was verified through simulation. The road adhesion coefficient was added to the safety distance model to address the limitations of the traditional collision avoidance model, which only considered the position and the vehicle movement conditions. The active collision avoidance path was generated by using a five-degree polynomial, and the required safe steering distance was calculated. Based on the risk assessment method, a collision avoidance mode selection strategy was designed, enabling intelligent vehicles to select the appropriate collision avoidance mode according to the kinematic relationship with obstacles. The longitudinal control based on the vehicle inverse dynamic model and the lateral control using MPC were adopted to decouple the control of intelligent vehicles. The effectiveness of the collision avoidance strategy was verified through the joint simulation experiment of Carsim and Simulink and the real vehicle test.

Keywords: active collision avoidance; unscented Kalman filter; adhesion coefficient; decoupling control; joint simulation