

文章编号: 2095-2163(2022)01-0021-07

中图分类号: U461.1

文献标志码: A

# 考虑路面状态的车辆纵向避障控制策略研究

张晓斐, 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:** 针对汽车安全避障的问题, 考虑到环境因素的必要性, 本文提出了一种基于路面附着系数估计的汽车纵向避障控制策略。首先, 分析了路面附着系数对纵向避障控制策略的影响; 给出了基于最小二乘法的路面附着系数估计算法, 建立了考虑路面状态的安全距离模型; 分析了行驶安全性和成员舒适性对避障控制策略的影响; 在此基础上, 建立了基于 MPC 的汽车纵向避障控制策略。经 Matlab/Simulink-PresSan 联合仿真结果表明, 该估计方法可准确估算路面附着系数, 建立的纵向避障控制策略能够在不同工况下有效提高避障准确性, 降低碰撞风险。

**关键词:** 路面附着系数估计; 纵向避障; 控制策略; 碰撞风险

## Research on longitudinal obstacle avoidance control strategy for vehicle considering road adhesion coefficient

ZHANG Xiaofei, WANG Xiaolan, GUO Chen

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

**[Abstract]** Aiming at the problem of safe obstacle avoidance of automobiles, considering the necessity of environmental factors, this paper proposes a vehicle longitudinal obstacle avoidance control strategy based on the estimation of road adhesion coefficient. Firstly, the influence of the road adhesion coefficient on the longitudinal obstacle avoidance control strategy is analyzed. Then the road adhesion coefficient estimation algorithm based on the least square method is given, and the safety distance model considering the road conditions is established. The influence of driving safety and occupant comfort on obstacle avoidance control strategy is analyzed. On this basis, the vehicle longitudinal obstacle avoidance control strategy based on MPC is established. Finally, the Matlab/Simulink-PresSan joint simulation is carried out. The results show that the proposed estimation method can accurately estimate the road adhesion coefficient, and the established longitudinal obstacle avoidance control strategy can effectively improve the accuracy of obstacle avoidance and reduce the risk of collision under different working conditions.

**[Key words]** road adhesive coefficient estimation; longitudinal obstacle avoidance; control strategy; collision risk

## 0 引言

近年来, 众多主动安全技术得到各汽车行业和各国学者的广泛关注<sup>[1]</sup>。特别是汽车 AEB (Autonomous Emergency Break 自动紧急制动) 系统, 该系统能在事故发生前降低事故的发生率和事故导致的受伤率。

智能车辆避障系统通过车载传感器如毫米波雷达等, 收集环境信息, 建立安全距离模型, 通过辨识路面状态, 搭建整体的避障系统。目前避障控制策略的研究主要基于传统安全距离模型进行参数改进, 没有考虑复杂的行驶环境因素, 未考虑路面条件的影响, 路面附着系数通常被设为常量, 算法只能在某种特定路面获得较好的预警效果<sup>[2]</sup>。

路面附着系数估计算法有两类: Model-based 算

法, 以固定的数学模型为基础计算附着系数; Experiment-based 算法主要应用车载传感器进行测量, 进而完成附着系数计算<sup>[3]</sup>。

在国内路面状态的研究上, 文献[4]针对不同的附着系数道路, 采取不同的混合理论估计方法; 文献[5]以杜戈夫轮胎模型为基础, 利用 BP 神经网络对路面状态进行估计, 得出了可观的结果; 文献[6]分别对不同附着系数的道路建立不同的估计模型, 来解决估计过程中出现较大波动的问题; 文献[7]利用现有的 Burckhardt 轮胎-路面数学模型, 实现了路面识别; 文献[8]以 Pacejka 及 LuGre 轮胎模型为基础, 采用递归非线性方法成功区分了不同类型的路面。

本文分析了路面附着系数对纵向避障制动效能的影响, 基于滑移率与路面附着系数的关系, 采用最

作者简介: 张晓斐(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能车辆。

通讯作者: 王孝兰 Email: jlu\_wangxiaolan@aliyun.com

收稿日期: 2021-08-03

小二乘法拟合设计路面附着系数估计算法,以保证对路面附着系数进行精确识别,建立了基于路面附着系数估计的安全距离模型,讨论了安全性要求和舒适性要求对避障控制的影响。在此基础上,建立基于 MPC 的汽车纵向避障控制策略,并选取典型工况进行 Matlab /Simulink-PreScan 联合仿真,验证算法的控制效果。

## 1 安全距离建模

### 1.1 制动过程

汽车制动过程中制动减速度的变化曲线如图 1 所示。

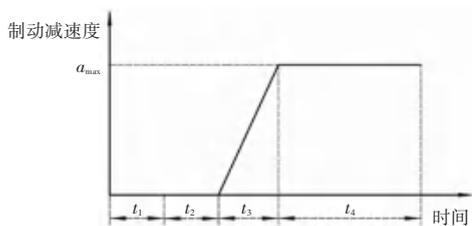


图 1 车辆制动过程制动减速度变化图

Fig. 1 Change of braking deceleration during vehicle braking

$t_1$  为驾驶员的反应时间;  $t_2$  为制动间隙时间;  $t_3$  为车辆产生制动到达到最大制动力所经过的时间;  $t_4$  为持续制动时间,此时减速度达到最大,直到制动结束。

以下公式中,  $v_0$  表示车辆初始车速;  $a_{\max}$  为最大加速度,该值为  $a_{\max} = \mu g$ ;  $\mu$  表示路面附着系数;  $g$  表示重力加速度,大小为  $9.81 \text{ m/s}^2$ 。

水平路面车辆制动过程中,考虑路面附着情况不同带来的最大减速度不同。阶段一汽车的行驶距离为式(1):

$$S_1 = v_0 t_1 \quad (1)$$

此过程初速度为  $v_0$  的匀速运动。

阶段二行驶的距离为式(2):

$$S_2 = v_0 t_2 \quad (2)$$

此过程也是初速度为  $v_0$  的匀速运动。

阶段三时间与速度的关系表示为式(3):

$$v = v_0 - \int a_i dt \quad (3)$$

其中,  $v_0$  为该阶段初速度,  $a_i$  为  $t$  时刻的加速度。

速度与距离之间的关系为式(4):

$$S_3 = \int v_i dt \quad (4)$$

将式(3)和式(4)结合得到式(5):

$$S_3 = v_0 t_3 - \frac{a_{\max}}{6} t_3^2 \quad (5)$$

此过程是加速度增大的减速运动,  $a_{\max}$  为减速度的最大值。

阶段四为持续制动阶段,减速度不变,初速度为阶段三的末速度,即式(6):

$$v_0' = v_0 - \frac{a_{\max}}{2} t_3 \quad (6)$$

此过程为加速度不变的持续制动运动,直至车辆静止。结合运动学公式,本阶段的行驶距离为式(7):

$$S_4 = \frac{v_0'^2}{2 a_{\max}} \quad (7)$$

式(6)与式(7)结合得到本阶段的行驶距离为式(8):

$$S_4 = \frac{v_0^2}{2 a_{\max}} - \frac{v_0}{2} t_3 + \frac{a_{\max}}{8} t_3^2 \quad (8)$$

得到汽车的制动总距离公式(9):

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \quad (9)$$

即式(10):

$$S = v_0 t_1 + v_0 t_2 + v_0 t_3 - \frac{a_{\max}}{6} t_3^2 + \frac{v_0^2}{2 a_{\max}} - \frac{v_0}{2} t_3 + \frac{a_{\max}}{8} t_3^2 \quad (10)$$

### 1.2 路面估计

路面与轮胎之间的摩擦力由式(11)计算:

$$F_\mu = F_\varphi = \mu F_Z \quad (11)$$

其中,  $F_\varphi$  为切向反力的极限值。

路面附着系数的大小与路面类型有很大的关系,各种路面上的平均附着系数数值见表 1。驾驶速度和车轮运动也会影响路面的附着能力,附着系数由路面和轮胎决定,其值显示出高度可变的摩擦性能。滑移率可用式(12)计算:

$$s = \frac{v_x - R \omega_w}{v_x} \quad (12)$$

其中,  $\omega_w$  为车轮转速。

表 1 各种路面的平均附着系数

Tab. 1 Average adhesion coefficient on various roads

路面状态	路面类型				
	冰路面	积雪路面	碎石路面	水泥路面	沥青路面
干路	0.1~0.2	0.1~0.4	0.5~0.7	0.65~1.0	0.65~1.0
湿路	-	-	0.25~0.50	0.45~0.85	0.45~0.85

根据上述关系,车辆运行状态可分为:线性区域(该区域的滑移率满足  $0 \leq s < 0.05$ )和饱和区域

(该区域的滑移率满足  $0.05 \leq s < 0.3$ )。车轮正常行驶时轮速约等于车速, 滑移率一般小于 0.05; 当车辆加速或紧急制动时, 车辆状态迅速从线性区域过渡到饱和区域, 其间存在的过渡区域可以忽略不计。因此, 可以在车辆制动前只考虑线性区域的求解问题。

汽车在 PreScan 模拟环境下计算的滑移率如图 2 所示。从图中数值可以看出, 滑移率很小, 通常小于 0.05。

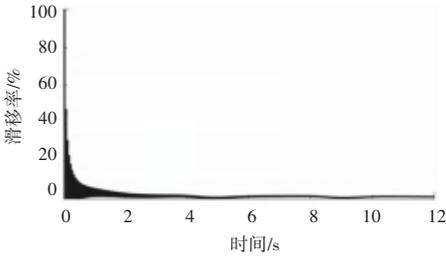


图 2 车辆滑移率

Fig. 2 Vehicle slip rate

结合滚动阻力系数, 利用滑移率与附着系数的关系来判断路面的状况。

设左前轮和右前轮的垂直载荷相等, 左后轮和右后轮的垂直载荷相等, 即式 (13) 和式 (14):

$$F_{zfl} = F_{zfr} = \frac{1}{2} \frac{\rho L_r}{L_f + L_r} mg \cos \alpha - \frac{h}{L_f + L_r} m \dot{v}_x \frac{\ddot{\phi}}{\phi} \quad (13)$$

$$F_{zrl} = F_{zrr} = \frac{1}{2} \frac{\rho L_f}{L_f + L_r} mg \cos \alpha - \frac{h}{L_f + L_r} m \dot{v}_x \frac{\ddot{\phi}}{\phi} \quad (14)$$

汽车在某些道路上以中低速行驶时, 滚动摩擦系数的近似值见表 2。

表 2 不同路面滚动摩擦系数和附着系数值

Tab. 2 The rolling friction coefficient and adhesion coefficient of different pavement

路面类型	滚动阻力系数	路面附着系数
干沥青或混凝土	0.01~0.018	0.8~0.9
湿沥青或混凝土	0.018~0.02	0.7~0.8
压实干土路	0.025~0.035	0.65~0.7
压实湿土路	0.05~0.15	0.4~0.55
压紧雪路	0.03~0.05	0.15~0.2
结冰路面	0.015~0.03	0.05~0.1

滚动阻力系数可由式 (15) ~ 式 (17) 计算:

$$F_f = \frac{T_{iq} i_g i_0 \eta_T}{r} - \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 - G \sin \alpha - \delta m \frac{du}{dt} \quad (15)$$

$$W = F_{zfl} + F_{zrl} + F_{zrl} + F_{zrr} \quad (16)$$

$$f = \frac{W}{F_f} \quad (17)$$

结合式 (12) ~ 式 (18) 采用最小二乘法进行多元拟

合, 得到了滚动阻力系数与路面附着系数的关系, 式 (18):

$$\mu = 1.044 3 - 18.758 7f + 102.884 6f^2 \quad (18)$$

通过对轮胎的滚动阻力系数估计来对路面状况进行反馈。为证明算法的可靠性和准确性, 利用仿真软件将路面的附着系数设为 0.5, 车辆速度为 36 km/h, 仿真结果如图 3 所示。

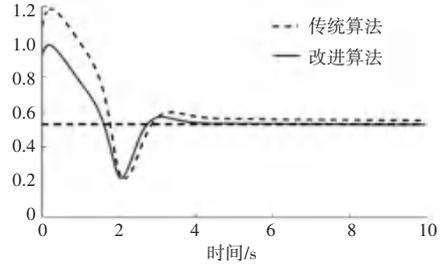


图 3 传统与改进附着系数估计结果对比

Fig. 3 The results of traditional and improved attachment coefficient estimation algorithm

由图 3 可以看出, 相比传统的估计算法, 改进后的检测算法较早达到收敛条件, 整体波动范围和局部波动范围较小; 同时, 改进后的平均误差为 0.007 31, 小于改进前的平均误差 0.021 07, 准确率为 98.63%。

### 1.3 基于路面状态的安全距离模型

安全距离模型被众多因素所影响, 包括自车车速、前车车速、驾驶员反应时间、制动间隙和制动减速度<sup>[9]</sup>。这些因素对安全距离模型的建立起到了关键性的作用, 路面附着状态变化会严重影响到车辆制动时的减速度的大小, 进而影响到车辆的制动距离。

整个制动过程自车和前车之间的距离关系如图 4 所示, 则传统的安全距离可以表述为式 (19):

$$S_A = S - S_{front} + S_0 \quad (19)$$

其中,  $S_A$  为安全距离;  $S$  为汽车制动过程中行驶的距离;  $S_{front}$  为前车行驶的距离;  $S_0$  为正常驻车时所需要的安全距离。

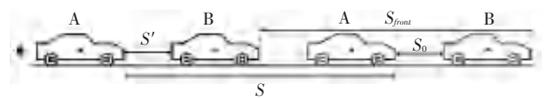


图 4 制动过程中距离变化图

Fig. 4 Distance change diagram during braking process

建立不同工况下的安全距离模型:

(1) 前车静止, 式 (12):

$$S_A = v_0 t_1 + v_0 t_2 + v_0 t_3 - \frac{a_{max}}{6} t_3^2 + \frac{v_0^2}{2a_{max}} - \frac{v_0}{2} t_3 + \frac{a_{max}}{8} t_3^2 + S_0 \quad (20)$$

(2) 前车匀速, 式(21):

$$S_A = v_0 - v_2 t_1 + t_2 + \frac{t_3}{2} + \frac{(v_0 - v_2)^2}{2a_1} + S_0$$

(3) 前车减速, 式(22):

$$S_A = v_0 t_1 + v_0 t_2 + v_0 t_3 - \frac{a_{\max} t_3^2}{6} + \frac{v_0^2}{2a_{\max}} - \frac{v_0}{2} t_3 + \frac{a_{\max} t_3^2}{8} + S_0 - \frac{v_2 t_3}{2} + \frac{v_2^2}{2a_2} \quad (22)$$

考虑路面附着系数的安全距离三维图如图5所示, 车速 80 km/h 时得到的考虑路面附着系数与否的安全距离数值对比结果见表3。容易得出, 改进后的安全距离模型随着道路因素的变化而变化, 该模型在不同因素下能较好地计算安全距离, 具有较好的动态适应性。

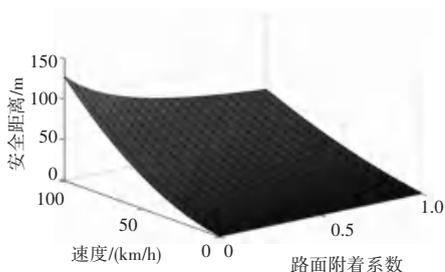


图5 不同速度下考虑路面附着系数的安全距离三维图

Fig. 5 Three-dimensional safety distance diagram considering road adhesion coefficient at different speeds

表3 80 km/h 时有无路面附着系数安全距离数值比较

Tab. 3 Numerical comparison of safety distance without road adhesion coefficient at 80 km/h

安全距离/m	不考虑附着系数		考虑附着系数	
	87.172 8		0.1-0.2	69.157 1
			0.3-0.4	57.545 3
			0.5-0.6	50.781 0
			0.7-0.8	46.352 9
			0.9	43.920 4

## 2 纵向避障控制策略的设计

采用分层控制结构, 上层控制器获得环境参数和车辆状态参数, 输出期望加速度作为下层控制器的输入; 下层控制器根据输入确定节气门开度和制动压力, 使得实际加速度能够跟踪期望加速度, 从而实现分层控制。基于 PID 算法设计下层控制策略, 并建立逆动力学模型<sup>[10]</sup>。

上层控制器需要完成针对多目标的约束优化, 因此在 MPC 理论框架的基础上进行预测、滚动优化和反馈校正<sup>[11]</sup>。在约束条件的设计中, 融入安全性和舒适性因素, 从而实现控制要求。

### 2.1 状态空间方程

将两车间距  $\Delta x(k)$ , 本车车速  $v_c(k)$ , 两车相对速度  $v_{rel}(k)$ , 本车加速度  $a_c(k)$  统一到汽车纵向运动模型中, 建立运动学模型(23)。

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + G\lambda(k) \quad (23)$$

其中,  $x(k) = [\Delta x, v_c, v_{rel}, a_c]^T$ ;

$$A = \begin{bmatrix} \hat{e}^1 & 0 & T & -\frac{1}{2}T^2 \\ \hat{e}^0 & 1 & 0 & T \\ \hat{e}^0 & 0 & 1 & -T \\ \hat{e}^0 & 0 & 0 & 1 - \frac{T}{\tau} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \hat{e}^0 \\ \hat{e}^0 \\ \hat{e}^0 \\ \hat{e}^0 \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} \hat{e}^1 \\ \hat{e}^2 \\ \hat{e}^0 \\ \hat{e}^T \\ \hat{e}^0 \end{bmatrix}$$

$u(k)$  为第  $k$  时刻的期望加速度;  $\lambda(k)$  为系统干扰量;  $a_0(k)$  为目标车辆加速度;  $T$  为系统的采样时间;  $\tau$  为控制时间常数。

为同时满足车辆的避障特性和对驾驶员的保护性能, 选取车间距离, 本车速度和本车加速度作为优化性能指标, 系统的输出方程为式(24):

$$y(k) = Cx(k) \quad (24)$$

其中,  $y(k) = [\Delta x, v_c(k), a_c(k)]^T$ ,

$$C = \begin{bmatrix} \hat{e}^1 & 0 & 0 & 0 \\ \hat{e}^0 & 1 & 0 & 0 \\ \hat{e}^0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

根据式(23)和式(24)可得到状态空间模型, 式(25):

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + G\lambda(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (25)$$

### 2.2 目标函数及约束条件

评价纵向乘坐舒适性指标主要分析纵向加速度和加速度变化率, 在现实生活中还需要考虑乘员舒适性<sup>[12]</sup>。因此车辆在保证安全的同时, 加速度变化量应在尽可能小的范围, 保证乘员的舒适度。舒适度可分为4种情况, 具体如下<sup>[13]</sup>:

(1) 正常强度制动(舒适度: 一般): 制动减速度绝对值小于  $3 \text{ m/s}^2$ ;

(2) 小强度制动(舒适度: 稍感不适): 减速度范围在  $-6 \sim -3 \text{ m/s}^2$  内, 对人员造成了轻微不适感;

(3) 中强度制动(舒适度: 非常不适): 减速度范围在  $-8 \sim -6 \text{ m/s}^2$  内, 车内乘客舒适感极低;

(4) 高强度制动(舒适度:极不舒适):加速度已经大于  $8 \text{ m/s}^2$ , 乘员无任何舒适性。

所以, 将期望加速度变化量  $\Delta u(k)$  作为第一控制目标, 设计目标函数第一项为式(26):

$$J_1 = \Gamma_u \sum_{i=1}^c \|\Delta u(k+i)\|^2 \quad (26)$$

其中,  $\Gamma_u$  为权重系数组成的对角矩阵。

将推测量与期望参考量之间的误差值作为第二控制目标, 因此目标函数第二项为式(27):

$$J_2 = \Gamma_y \sum_{i=1}^p \|y(k+i) - y_{des}(k+i)\|^2 \quad (27)$$

其中,  $y_{des}(k+i)$  为期望参考量。

由式(26)和式(27)得到目标函数, 式(28):

$$J = J_1 + J_2 = \frac{1}{2} U_c^T H U_c + g^T U_c \quad (28)$$

其中,

$$U_c = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+c-1) \end{bmatrix}; H = \begin{bmatrix} 2s & & & & \\ \hat{e}^{-s} & 2s & & & \\ \hat{e}^{-2s} & & \ddots & & \\ \hat{e}^{-3s} & & & \ddots & \\ \hat{e}^{-4s} & & & & -s & 2s & s \\ \hat{e}^{-5s} & & & & -s & 2s & \hat{e}^{-s} \end{bmatrix};$$

$$g = \begin{bmatrix} \hat{e}^{-cs} & \hat{e}^{-c} & s & \hat{e}^{-c} \\ \hat{e}^{-c} & \hat{e}^{-c} & 0 & u(k-1) \\ \hat{e}^{-c} & \hat{e}^{-c} & \vdots & \hat{e}^{-c} \\ \hat{e}^{-c} & \hat{e}^{-c} & 0 & \hat{e}^{-c} \end{bmatrix}; s \text{ 为权重系数。}$$

通常情况下, 需要对车辆进行碰撞安全的计算, 以对当前车辆的安全性做出评价。其中,  $TTC$  的计算公式(29)为<sup>[14]</sup>:

$$TTC = \frac{\Delta D}{v_f - v_r} \quad (29)$$

其中,  $\Delta D$  为相对距离;  $v_f$  为前车车速;  $v_r$  为后车车速;  $v_f - v_r$  代表前车与后车的速度差, 即  $\Delta v = v_f - v_r$ 。

纵向避障控制系统要保证的目标是两车的安全距离。为避免碰撞, 需要对车距进行限制, 式(30):

$$\Delta x(k) = x_0(k) - x_c(k) \geq d_s \quad (30)$$

其中,  $d_s$  为自车与目标车辆的实际车间距, 即安全距离。

采用  $TTC$  策略来描述安全临界距离和速度误差之间的关系, 约束条件可以表示为式(31)<sup>[15]</sup>:

$$\Delta x \geq d_s$$

$$d_s \geq \max\{-t_{TTC} * v, d_{s0}\} \quad (31)$$

其中,  $d_{s0}$  为本车与目标车之间的最小安全距离, 即安全临界距离。

对  $v_c, a_c, u$  以及期望加速度变化量  $\Delta u$  进行约束限制:

$$v_{cmin} \leq v_c(k) \leq v_{cmax}$$

$$a_{cmin} \leq a_c(k) \leq a_{cmax}$$

$$u_{min} \leq u(k) \leq u_{max}$$

$$\Delta u_{min} \leq \Delta u(k) \leq \Delta u_{max}$$

其中,  $v_{cmin}, v_{cmax}, a_{cmin}, a_{cmax}, u_{min}, u_{max}, \Delta u_{min}$  和  $\Delta u_{max}$  分别为  $v_c, a_c, u$  以及  $\Delta u$  的最小值和最大值。

综合以上各式建立如图 6 所示的纵向避障控制策略, 根据自车周围环境, 在纵向方向上做出加速、跟驰或制动的决策。上层 MPC 控制模块将决策信息转化为下层逆动力学控制模块可识别的参数, 下层控制器再将其转化为制动、加速或跟驰等动作。

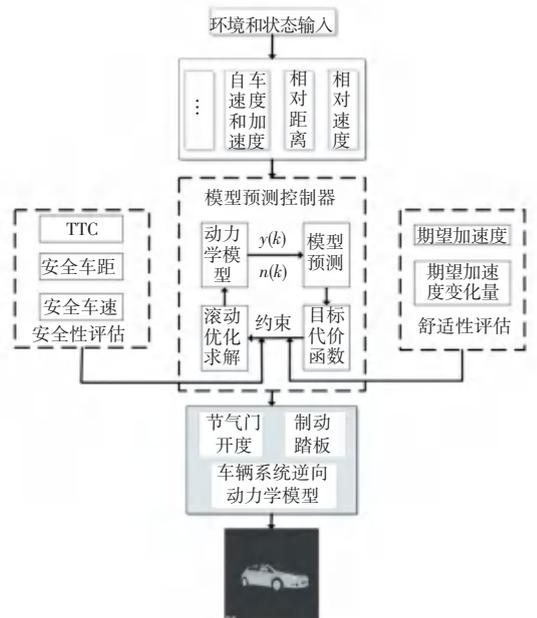


图 6 纵向避障控制策略结构图

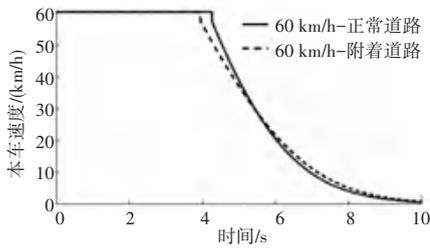
Fig. 6 Structure of Longitudinal Obstacle Avoidance Control Strategy

上层 MPC 控制器的输出即控制量为自车的期望加速度, 参考量为期望安全车间距和目标车辆的速度, 输入量即预测量为自车速度和加速度、两车相对速度、以及真实的两车距离, 干扰量为目标车辆加速度<sup>[16]</sup>。下层逆动力学控制器的输出为节气门开度和制动踏板压力, 输入为期望加速度。

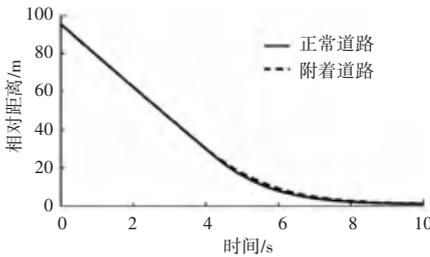
### 3 联合仿真验证和分析

利用 MATLAB/Simulink-PreScan 搭建联合仿真场景。

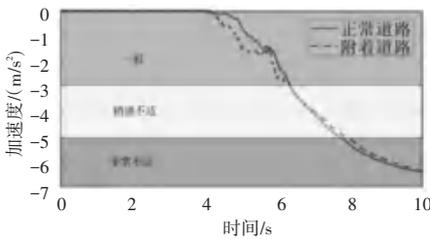
工况一:本车以 60 km/h 做匀速行驶,障碍车静止,车距 100 m,结果如图 7 所示。



(a) 本车速度对比



(b) 相对距离



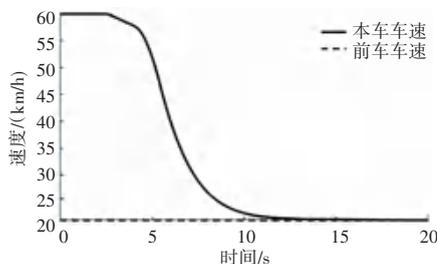
(c) 加速度及舒适性

图 7 自车速度 60 km/h 时前车静止工况仿真结果

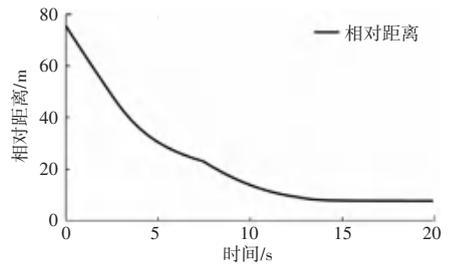
Fig. 7 Simulation results of static condition of the leading vehicle when speed is 60 km/h

初始阶段相对安全,本车保持匀速。随着距离的缩短,碰撞风险逐渐加大,此时开始制动,相对速度和相对距离持续减小,在第 10 s 时刻速度为 0,与前车的距离也达到最小值 2.36 m,成功实现避障。此过程驾驶员的主观感受先后经过了一般、稍感不适到非常不适,在驾驶员能够忍受的舒适性范围内车辆能够成功实现避障,证明了算法的有效性。

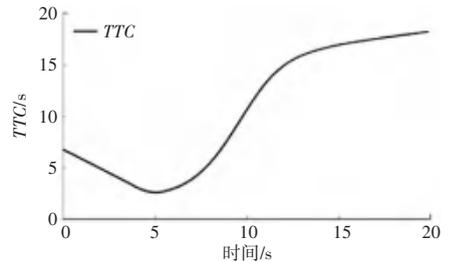
工况二:两车相距 80 m,前车以 20 km/h 速度前行,本车车速 60 km/h,结果如图 8 所示。



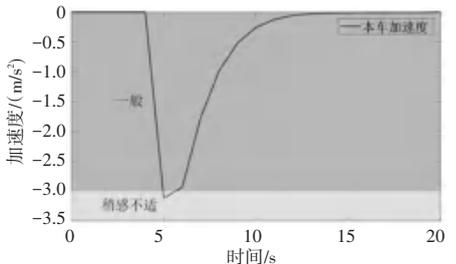
(a) 两车速度对比



(b) 相对距离



(c) TTC



(d) 加速度及舒适性

图 8 自车速度为 60 km/h 时的前车匀速工况仿真结果

Fig. 8 Simulation results of uniform speed of the leading vehicle when speed is 60 km/h

本车匀速行驶,碰撞风险较小。在 5 s 左右车辆所需安全距离大于相对距离,  $TTC$  为 2.42 s。控制器开始工作,自车迅速减速,并持续了 5 s 左右。12 s 时刻左右,自车车速已经降至 20 km/h,此后稳定跟车行驶,与前车相距 7.5 m 左右。此过程驾驶员的主观感受由一般过度到稍感不适,保证了较好的乘员舒适性,车辆成功实现避障,证明了算法的有效性。

工况三:本车车速 80 km/h,前车速度 60 km/h 且车距 60 m,前车以  $3 \text{ m/s}^2$  的减速度制动,结果如图 9 所示。

随着车距缩短,  $TTC$  不断减小到 1.5 s 左右。前车开始制动后,速度迅速下降,车距进一步缩小,相对速度增加,  $TTC$  值迅速下降到 0.6 s。随着距离减小,车距达到安全距离,车辆开始制动,同时碰撞风险逐渐增大,最终车辆实现稳定跟车,此时车距 5.84 m。在制动过程中,驾驶员的乘坐舒适性由一般到稍感不适,保证了较好的舒适性,且成功实现避障,证明了算法的有效性。

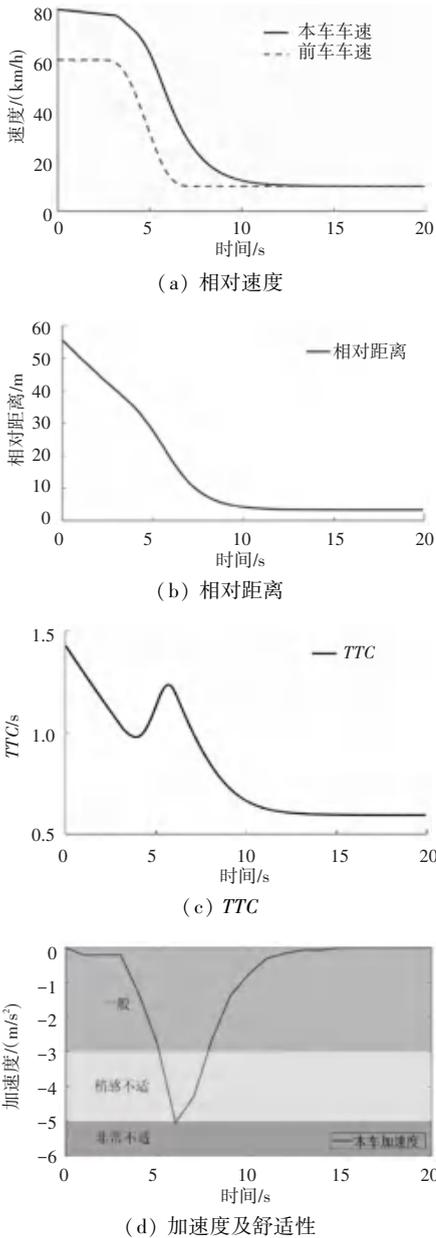


图 9 自车速度为 80 km/h 时的前车减速工况仿真结果

Fig. 9 Simulation results of deceleration condition of the leading vehicle when speed is 80 km/h

### 4 结束语

路面附着系数对智能车辆纵向避障控制有重大影响,本文利用最小二乘法提出了一种考虑滚动阻力系数和路面附着系数关系的道路附着系数估算方法,建立的基于路面状态估计的安全距离模型可以自适应确定当前路面安全距离,相比传统模型适应性更强。

结合基于路面状态估计的安全距离模型提出了

一种基于 MPC 考虑行车安全性和成员舒适性的纵向避障控制策略,利用 MATLAB/Simulink-PreScan 联合仿真验证了策略的准确性。结果表明,本文提出的策略可以在保证安全性和舒适性的基础上有效提高避障准确率。

### 参考文献

- [1] 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, 2018-12-17-014.
- [2] 李绪龙, 郑瑞, 钱立军. 基于路面附着系数的汽车纵向防撞策略研究[J]. 车辆与动力技术, 2018, 150(2):22-27.
- [3] PAUL D, VELENIS E, CAO D, et al. Optimal  $\mu$ -Estimation based Regenerative Braking Strategy for an AWD HEV [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2017, PP(1):1-1.
- [4] ZHANG X, DIETMAR GÖHLICH. A hierarchical estimator development for estimation of tire-road friction coefficient [J]. PLoS ONE, 2017, 12(2):e0171085-.
- [5] Tao, Song, Hongliang, et al. Road Friction Coefficient Estimation Based on BP Neural Network[C]//Proceedings of the 36<sup>th</sup> Chinese Control Conference. Dalian, 2017:9491-9496
- [6] 朱冰, 朴奇, 赵健, 等. 基于路面附着系数估计的汽车纵向碰撞预警策略[J]. 汽车工程, 2016, 38(4):446-452.
- [7] 袁朝春, 张龙飞, 陈龙, 等. 基于路面辨识的主动避障系统制动性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(2):407-414.
- [8] SENATORE A, SHARIFZADEH M. Estimation of tyre-road friction during ABS braking for snow and ice conditions[C]//6<sup>o</sup> Workshop dell'Associazione Italiana di Tribologia AIT - Torino Sept, 2018: 18-19.
- [9] YANG H H, PENG H. Development and evaluation of collision warning/collision avoidance algorithms using an errable driver model [J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48(sup1):525-535.
- [10] GUO C, WANG X, SU 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, 2020, 235(1):095440702095974.
- [11] Hayward J C. Near-miss determination through use of a scale of danger[J]. Highway Research Record, 1972, (384):24-34.
- [12] 任玥, 郑玲, 张巍, 等. 基于模型预测控制的智能车辆主动避障控制研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(4):48-54.
- [13] Moon, Seungwuk, Yi, Kyongsu. Human driving data-based design of a vehicle adaptive cruise control algorithm [J]. Vehicle System Dynamics, 2008, 46(8):661-690.
- [14] 夏玮, 李朝晖, 常春藤. MATLAB 控制系统仿真与实例详解 [M]. 人民邮电出版社, 2008.
- [15] VOGEL K. A comparison of headway and time to collision as safety indicators[J]. Accident Analysis and Prevention, 2003, 35(3):427-433.
- [16] GUO L, GE P, SUN D, et al. Adaptive Cruise Control Based on Model Predictive Control with Constraints Softening [J]. Applied Sciences, 2020, 10(5):1635.