

自动驾驶车辆紧急避障的路径规划与轨迹跟踪控制

邓海鹏¹, 麻斌¹, 赵海光², 吕良¹, 刘宇¹

(1. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130025; 2. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: 为减少道路突发事故,提高车辆通行效率,需要研究车辆的紧急避障以实现自动驾驶。基于车辆点质量模型,设计了非线性模型预测控制(MPC)路径规划器;基于车辆动力学模型,设计了线性时变MPC轨迹跟踪器。在路径规划层引入避障功能函数,通过车辆与障碍物的距离调节函数值大小,综合避障函数权重和路径偏差权重,规划出一条既能避开障碍物又使路径偏差最小的临时轨迹。在轨迹跟踪层,利用该临时轨迹和航向角偏差作为车辆主动转向控制参考量,将线性时变MPC优化问题转化为二次规划问题,计算满足车辆动力学约束的前轮转向角最优解。结果表明:所设计的双层MPC紧急避障控制策略对低速(60 km/h)、中速(80 km/h)、高速(100 km/h)行驶车辆有很强的适应性,高速行驶时最大质心侧偏角不超过 1.0° ,最大航向角偏差不超过 2.5° ,车辆横向稳定性良好,随着车速增大,车辆避障响应时刻提前;在多车连续避障场景中,自动驾驶车辆的质心侧偏角和航向角偏差均能控制在较小范围内,在多目标连续避障的路径规划和轨迹跟踪问题上同样具有很好的控制效果。

关键词: 自动驾驶车辆; 紧急避障; 车辆点质量模型; 模型预测控制; 路径规划与轨迹跟踪

中图分类号: TP273⁺.1; U469.79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1093(2020)03-0585-10

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2020.03.020

Path Planning and Tracking Control of Autonomous Vehicle for Obstacle Avoidance

DENG Haipeng¹, MA Bin¹, ZHAO Haiguang², LÜ Liang¹, LIU Yu¹

(1. State Key Laboratory of Automobile Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, Jilin, China;

2. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: Emergency obstacle avoidance is one of the key points for autonomous driving system. A path planning controller based on non-linear model predictive control and a path tracking controller based on linear time-varying model predictive control are designed. In path planning controller, an obstacle-avoiding function is used to adjust the distance between the intelligent vehicle and obstacles by calculating the value of obstacle-avoiding function. A new route is supposed to be planned, which can not only keep away from obstacles but also decrease the deviations from the global course, by considering the different weights of obstacle-avoiding function and the planning error. In path tracking controller, the solution of linear time-varying model predictive control is converted into a positive-definite quadratic program. And then the desired steering angles of front wheel are calculated by using the reference trajectory and orientation angle

收稿日期: 2019-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0100300)

作者简介: 邓海鹏(1994—),男,硕士研究生。E-mail: denghp16@163.com

通信作者: 刘宇(1981—),男,副教授,博士。E-mail: liuyu1981@jlu.edu.cn

of vehicle center. The results show that the obstacle-avoiding controller has strong robustness and the path tracking controller has better performance in controlling accuracy and vehicle dynamics stability when a vehicle travels at 60 km/h, 80 km/h, or 100 km/h. The maximal side-slip angle is no more than 1° , and the maximal deviation of yaw angle is less than 2.5° . Obstacle avoiding action occurs in advance with the increase in velocity of autonomous vehicle. In addition, the dual-MPC controller is adaptive to the circumstance of multi-obstacles avoidance as well, which can be easily demonstrated by the small deviation of yaw angles and small side-slip angles.

Keywords: autonomous vehicle; obstacle avoidance; point mass model of vehicle; model predictive control; path planning and tracking

0 引言

紧急避障是车辆实现自动驾驶的关键技术,近年来,国内外学者对自动驾驶车辆的路径规划问题和轨迹跟踪问题做了大量研究。在避障路径规划问题上,许多解决方案已得到成熟应用,如Hilgert等提出的弹性约束理论,以行驶轨迹局部曲率变化率最小为约束条件,对车辆紧急避障路径进行了重新规划^[1];Schouwenaars等考虑车辆行驶过程中的安全约束,提出了非结构环境下的滚动时域自动驾驶车辆路径规划^[2];Yu等用不同半径圆弧表示不同车速下的行驶路径,并将此触须状规划算法用于未知环境的全局规划^[3];张纯刚等结合预测控制理论提出了动态未知环境下的无人小车滚动路径规划^[4]。在避障轨迹跟踪问题上,目前应用较为成熟的控制策略和方法有PID控制、滑模控制、自抗扰控制^[5]、模糊自适应控制和神经网络控制^[6]等。Marino等设计了嵌入视觉导航系统的PID转向控制器,能准确跟踪未知曲率路径^[7];Wang等利用鲁棒自适应滑膜控制器,能同时兼顾车辆的横向控制和对已知轨迹的跟踪^[8];Antonelli等^[9]和Hajjaji等^[10]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,以改善轨迹跟踪的控制响应性能。然而上述方法无一例外,控制器的自适应程度较低,控制性能过多依赖于环境和参数的设置,并且不能很好地表达和执行自动驾驶车辆在行驶过程中受到的运动学与动力学约束。

模型预测控制应用范围广泛,在车辆电子稳定控制^[11]、底盘集成控制^[12]、自适应巡航控制^[13]等方面都有比较成熟的应用。在自动驾驶车辆的路径重规划和轨迹跟踪方面,模型预测控制(MPC)能根据车辆当前的运动状态预测其未来轨迹^[14-17],实现对目标函数的在线滚动优化;同时,MPC能处理车辆在不同行驶工况下的多目标约束问题,可以很方便

地将道路前方障碍物信息以不等式约束形式或惩罚函数形式添加到目标函数的求解条件中,以实现车辆的障碍物避让功能^[18]。

本文设计了双层MPC紧急避障控制器。在路径规划层引入避障功能函数,综合考虑避障函数权重和临时路径与全局路径的偏差权重,规划出紧急避障轨迹。在轨迹跟踪层,提出以参考轨迹和车辆航向角偏差作为控制参考量的轨迹跟踪转向控制算法,采用线性时变MPC计算满足车辆动力学约束的前轮转向角最优解。

1 车辆模型

1.1 车辆点质量模型

道路环境实时多变,当车辆遇到突发情况时,自动驾驶车辆需要根据障碍物信息及时规划临时路径,并在避开障碍物后继续回到参考路线上。为了减少计算成本、提高计算速度,避障路径规划器忽略车身尺寸和轮胎受力情况,基于车辆点质量模型(见图1)规划出满足车辆运动学约束的避障路径。图1中: ψ 为车辆航向角; x 为车辆纵向位移; \dot{x} 为车辆纵向速度; y 为车辆横向位移; \dot{y} 为车辆横向速度。

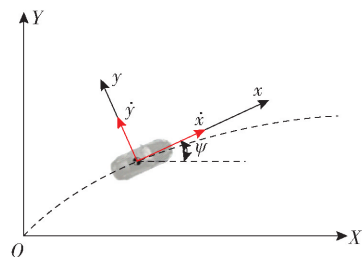


图1 车辆点质量模型

Fig.1 Point mass model of autonomous vehicle

在参考坐标系下,车辆的点质量运动学模型^[15]表示为

$$\dot{x} = a_x, \quad (1)$$

$$\ddot{y} = a_y, \quad (2)$$

$$\dot{\psi} = \frac{a_y}{\dot{x}}, \quad (3)$$

$$\dot{X} = \dot{x} \cos \psi - \dot{y} \sin \psi, \quad (4)$$

$$\dot{Y} = \dot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi, \quad (5)$$

式中： \dot{x} 为车辆纵向加速度； \dot{y} 为车辆横向加速度； \dot{X} 为车辆在惯性坐标系下的纵向速度； \dot{Y} 为车辆在惯性坐标系下的横向速度； ψ 为航向角速度。

1.2 车辆动力学模型

地面行驶的车辆通常考虑纵向、横向和横摆3个维度的运动。为了使车辆快速且准确地跟踪临时路径，需要建立精确的车辆动力学模型^[19]（见图2），以此做为线性时变模型预测控制（LTV-MPC）的基础，提高车辆的操纵稳定性。图2中： δ 为车辆前轮转向角； β 为车辆质心侧偏角； F_{lf} 和 F_{lr} 为前、后轮胎受到的纵向力； F_{cf} 和 F_{cr} 为前、后轮胎受到的侧向力； α_f 和 α_r 为车辆前、后轮侧偏角。

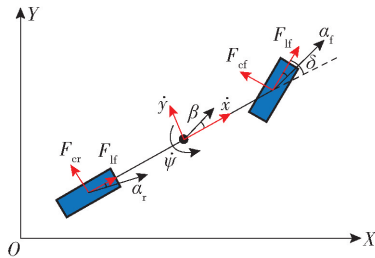


图2 车辆动力学模型

Fig. 2 Dynamic model of autonomous vehicle

如图2所示，考虑车辆横向和横摆2个维度的运动，假设车辆左右受力完全对称且 δ 足够小，根据牛顿第二定律建立的车辆动力学方程如下：

$$m(\ddot{x} - \dot{y}\dot{\psi}) = 2(F_{lf} + F_{cf}\delta + F_{lr}), \quad (6)$$

$$m(\dot{y} + \dot{x}\dot{\psi}) = 2(F_{cf} + F_{cr}), \quad (7)$$

$$I_z\ddot{\psi} = 2(l_1F_{cf} - l_2F_{cr}), \quad (8)$$

式中： m 为整车质量； I_z 为车辆横摆转动惯量； l_1 和 l_2 分别为质心到前、后车轴的距离； $\dot{\psi}$ 为航向角加速度。

1.3 轮胎模型

轮胎受到的竖直载荷、纵向力、横向力以及回正力矩对车辆的安全性和操纵稳定性至关重要。Pacejka用经验公式拟合轮胎试验数据后提出的魔术轮胎模型能正确描述轮胎纵向力、侧向力等与滑移率和侧偏角之间的关系^[20]。魔术轮胎模型的一般表达式为

$$Y(x) = D \sin \{ C \arctan [Bx + Bs_h - E(Bx + Bs_h - \arctan(Bx + Bs_h))] \} + s_v, \quad (9)$$

式中： $Y(x)$ 为轮胎受力模型； B 为刚度因子； C 为形状因子； D 为峰值因子； E 为曲率因子； s_h 为轮胎水平偏移； s_v 为轮胎垂直偏移。

当自变量 x 表示轮胎纵向滑移率时，输出量 Y 为轮胎的纵向力；当 x 表示轮胎侧偏角时， Y 为轮胎侧向力。根据(9)式，可得轮胎纵向力随滑移率 s 的变化曲线如图3所示，轮胎侧向力随轮胎侧偏角的变化曲线如图4所示。

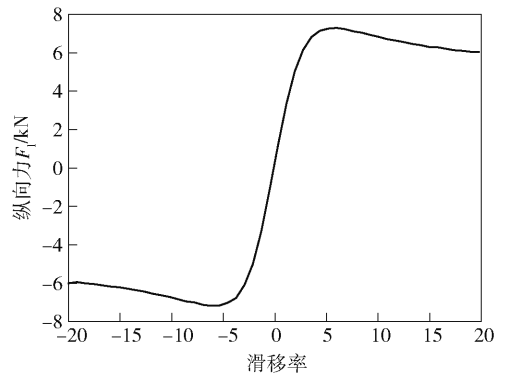


图3 轮胎纵向力与滑移率关系曲线

Fig. 3 Longitudinal tire force vs. slip rate

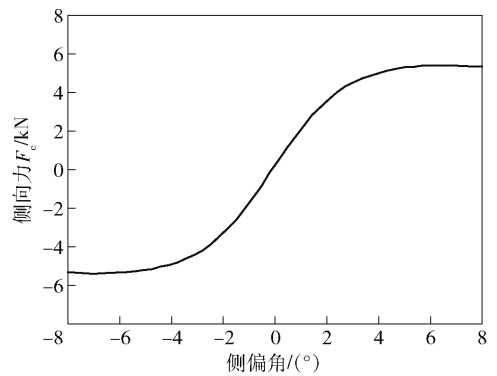


图4 轮胎侧向力与侧偏角关系曲线

Fig. 4 Lateral tire force vs. slip angle

纵向滑移率和轮胎侧偏角的变化范围通常较小，因此可以将轮胎魔术公式用线性表达式近似^[19]，线性化处理的轮胎纵向力和侧向力可以表示为

$$F_l = C_1 s, \quad (10)$$

$$F_c = C_c \alpha, \quad (11)$$

式中： C_1 为轮胎纵向刚度； C_c 为轮胎侧向刚度。当车辆侧向加速度 $a_y \leq 0.4g$ 时，可认为(10)式和(11)式线性化处理的轮胎纵向力和侧向力具有较高的拟合精度^[21-22]。

车辆前、后轮侧偏角的近似表达式为

$$\alpha_f = \delta - \frac{\dot{y} + l_1 \dot{\psi}}{\dot{x}}, \quad (12)$$

$$\alpha_r = \frac{l_2 \dot{\psi} - \dot{y}}{\dot{x}}, \quad (13)$$

(12)式和(13)式代入(10)式和(11)式,可以得到前、后轮纵向力和侧向力为

$$F_{lf} = C_{lf} s_f, \quad (14)$$

$$F_{lr} = C_{lr} s_r, \quad (15)$$

$$F_{cf} = C_{cf} \left(\delta - \frac{\dot{y} + l_1 \dot{\psi}}{\dot{x}} \right), \quad (16)$$

$$F_{cr} = C_{cr} \frac{l_2 \dot{\psi} - \dot{y}}{\dot{x}}, \quad (17)$$

式中: C_{lf} 为前轮纵向刚度; C_{lr} 为后轮纵向刚度; s_f 为前轮滑移率; s_r 为后轮滑移率; C_{cf} 为前轮侧向刚度; C_{cr} 为后轮侧向刚度。

上述简化处理的轮胎模型代入(6)式~(8)式中,结合车辆在参考坐标系下的位置信息(4)式和(5)式,即可得到基于前轮小角度转向和线性轮胎模型的车辆动力学模型如下:

$$\ddot{x} = \dot{y} \dot{\psi} + \frac{2}{m} \left(C_{lf} s_f + C_{cf} \delta^2 - C_{cf} \delta \frac{\dot{y} + l_1 \dot{\psi}}{\dot{x}} + C_{lr} s_r \right), \quad (18)$$

$$\ddot{y} = -\dot{x} \dot{\psi} + \frac{2}{m} \left(C_{cf} \delta - C_{cf} \frac{\dot{y} + l_1 \dot{\psi}}{\dot{x}} + C_{cr} \frac{l_2 \dot{\psi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right), \quad (19)$$

$$\ddot{\psi} = \frac{2}{I_z} \left[l_1 C_{cf} \left(\delta - \frac{\dot{y} + l_1 \dot{\psi}}{\dot{x}} \right) - l_2 C_{cr} \frac{l_2 \dot{\psi} - \dot{y}}{\dot{x}} \right], \quad (20)$$

$$\dot{X} = \dot{x} \cos \psi - \dot{y} \sin \psi, \quad (21)$$

$$\dot{Y} = \dot{x} \sin \psi + \dot{y} \cos \psi. \quad (22)$$

2 路径规划与跟踪控制器设计

2.1 路径规划器设计

为使路径二次规划能适应不同的避障函数形式,上层控制器采用非线性形式的模型预测控制。使用欧拉公式将(1)式~(5)式离散化,得到车辆状态量的差分方程如下:

$$\dot{x}(k+1) = \dot{x}(k) + T a_x, \quad (23)$$

$$\dot{y}(k+1) = \dot{y}(k) + T a_y, \quad (24)$$

$$\psi(k+1) = \psi(k) + T \frac{a_y}{\dot{x}}, \quad (25)$$

$$X(k+1) = X(k) + T [\dot{x}(k) \cos(\psi(k)) -$$

$$\dot{y}(k) \sin(\psi(k))], \quad (26)$$

$$Y(k+1) = Y(k) + T [\dot{x}(k) \sin(\psi(k)) + \dot{y}(k) \cos(\psi(k))], \quad (27)$$

式中: T 为离散时间; k 为离散递推整数; $x(k)$ 为车辆当前时刻的纵向位移; $y(k)$ 为车辆当前时刻的侧向位移; $\dot{x}(k)$ 为车辆当前时刻的纵向速度; $\dot{y}(k)$ 为车辆当前时刻的侧向速度; $X(k)$ 为车辆当前时刻在惯性坐标系下的纵向位移; $Y(k)$ 为车辆当前时刻在惯性坐标系下的横向位移; $\psi(k)$ 为车辆当前时刻的航向角。

假设车辆纵向速度保持恒定,即 $a_x = 0, \dot{x}(k+1) = \dot{x}(k)$ 。以车辆的侧向加速度 a_y 作为规划层的控制变量,并对侧向加速度和侧向加速度增量进行约束。已知被控对象当前时刻车辆的初始状态信息 $\dot{x}(k), \dot{y}(k), \psi(k), X(k), Y(k)$ 和控制时域内的控制输入量 $a_y(1), a_y(2), \dots, a_y(N_c)$,即可根据(23)式~(27)式计算预测时域内的控制输出量。将(23)式~(27)式整理为(28)式所示的输出函数:

$$\eta(k+ilt) = F_i[\eta(k|k), a_y(j)], \quad (28)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_p, j = 1, 2, \dots, N_c,$$

式中: $F_i(\cdot)$ 为差分方程的函数表达形式; $\eta(k|k)$ 为5个车辆初始状态量。为减少计算量、增强系统的实时性,本文取控制步长 $N_c = 3$ 。在控制步长外($N_c < i \leq N_p$),控制输入量 a_y 的值不再改变,有

$$a_y = \begin{cases} a_y(i), & 1 \leq i \leq N_c; \\ a_y(N_c), & N_c < i \leq N_p. \end{cases} \quad (29)$$

综上所述,可得非线性模型预测控制(NMPC)预测时域 N_p 内的预测表达式为

$$\begin{bmatrix} \eta(k+1|k) \\ \eta(k+2|k) \\ \eta(k+3|k) \\ \vdots \\ \eta(k+i|k) \\ \vdots \\ \eta(k+N_p|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1(\eta(k|k), a_y(1)) \\ F_2(\eta(k|k), a_y(1), a_y(2)) \\ F_3(\eta(k|k), a_y(1), a_y(2), a_y(3)) \\ \vdots \\ F_i(\eta(k|k), a_y(1), a_y(2), a_y(3)) \\ \vdots \\ F_{N_p}(\eta(k|k), a_y(1), a_y(2), a_y(3)) \end{bmatrix}, \quad (30)$$

式中: $\eta(k+i|k)$ 表示用 k 时刻车辆状态预测 $k+i$ 时刻车辆状态。

考虑到自动驾驶车辆的避障路径要求控制器尽可能缩小临时路径与全局参考路径偏差,同时实现自动驾驶车辆对障碍物的避让,因此本文设计的非线性模型预测控制的目标函数形式为

$$\min J(\eta(k), a_y(k)) =$$

$$\min \left(\sum_{i=1}^{N_p} \| \eta(k+i|k) - r(k+i|k) \|_{\mathbf{Q}_i}^2 + \sum_{j=1}^{N_c} \| a_y(j) \|_{\mathbf{R}_j}^2 + SB_{\text{obst}} \right), \quad (31)$$

$$\text{s. t. } a_{\min} \leq a_y(j) \leq a_{\max}, j=1, 2, \dots, N_c, \quad (32)$$

$$\Delta a_{\min} \leq \Delta a_y(j) \leq \Delta a_{\max}, j=1, 2, \dots, N_c. \quad (33)$$

式中: $r(k+i|k)$, $i=1, 2, \dots, N_p$ 为给定的全局参考路径; B_{obst} 为避障功能函数; \mathbf{Q}_i 为预测时域内 ($k+i$, $i=1, 2, \dots, N_p$) 控制输出的权重矩阵; \mathbf{R}_j 为控制时域内 ($j=1, 2, \dots, N_c$) 控制输入的权重矩阵; S 为避障功能函数的权重系数。

避障功能函数通过车辆与障碍物之间的距离和当前车速计算函数值的大小, 如(34)式所示, 自动驾驶车辆到障碍物的距离越近, 车速越大, 则函数惩罚值越大。

$$B_{\text{obst}} = \frac{\sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}}{(x_i - X_0)^2 + (y_i - Y_0)^2 + \varepsilon}, \quad (34)$$

式中: x_i, y_i 为障碍物在惯性坐标系下的位置坐标; X_0, Y_0 为车辆当前位置坐标; ε 为非0正数(本文取0.001以避免分母为0)。从避障功能函数惩罚值示意图(见图5)可以看出, 当车辆接近障碍物时, 惩罚值急剧增大, 使得目标函数 $\min J(\eta(k), a_y(k))$ 的求解远离障碍物的车辆坐标 X, Y , 减小避障惩罚函数的罚值, 规划出避开障碍物的行驶路径。当车辆与障碍物处于安全距离时, 避障功能函数惩罚值极小, 此时目标函数正常跟踪全局参考路径。

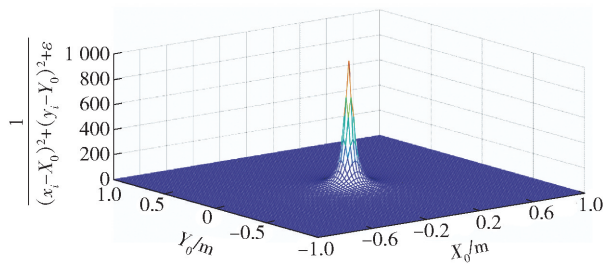


图5 避障功能函数惩罚值示意图

Fig. 5 Penalty value of obstacle avoidance function

求解得出满足约束条件的控制输入量 $a_y(1)$ 、 $a_y(2)$ 和 $a_y(3)$, 根据(25)式和(27)式, 即可得到避障路径的航向角和车辆纵向位置坐标。

由于求解得出的新轨迹是预测时域内的离散点, 控制层很难根据离散点参考轨迹完成跟踪任务, 需要对规划轨迹的离散数据点进行拟合。为得到较高的曲线拟合精度、减小路径跟踪误差, 本文选用四次多项式对预测轨迹离散点拟合。将规划路径的

纵坐标 y_r 和车辆航向角 ψ_r 随车辆纵向位移 X 的变化曲线传递至轨迹跟踪层, 作为下层轨迹跟踪控制器的参考值, y_r 和 ψ_r 的传递形式为

$$y_r = p_0 + p_1 X^1 + p_2 X^2 + p_3 X^3 + p_4 X^4, \quad (35)$$

$$\psi_r = q_0 + q_1 X^1 + q_2 X^2 + q_3 X^3 + q_4 X^4, \quad (36)$$

式中: p_0, p_1, p_2, p_3 和 p_4 分别为参考轨迹拟合系数; q_0, q_1, q_2, q_3 和 q_4 分别为参考航向角 ψ_r 拟合系数。

2.2 轨迹跟踪器设计

下层轨迹跟踪控制器根据车辆动力学模型实时调整车辆和参考轨迹之间的位姿偏差。本文跟踪器以参考轨迹 y_r 和车辆的航向角偏差 $\Delta\psi$ 作为轨迹跟随的控制参考量, 以前轮偏转角 δ 作为转向控制输入量。由于NMPC对于实时系统存在局限性, 故设计线性时变预测模型求解满足车辆动力学约束的最优前轮偏转角。如图6所示, 车辆航向角偏差为参考轨迹航向 ψ_r 和车辆实际航向之差, 计算公式如(37)式所示:

$$\Delta\psi = \psi_r - \psi. \quad (37)$$

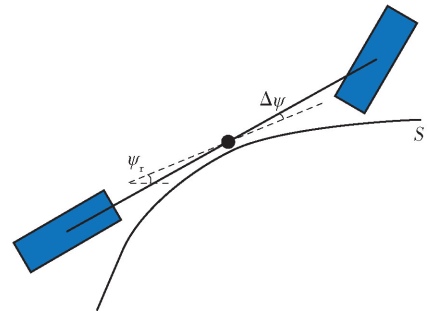


图6 车辆航向角偏差示意图

Fig. 6 Deviation of vehicle yaw angle

结合车辆动力学模型(18)式~(22)式和航向角偏差(37)式, 可将轨迹跟踪器的设计表示为如下状态空间形式:

$$\dot{\chi} = f(\chi, u), \quad (38)$$

$$y_c = C\chi, \quad (39)$$

式中: χ 为状态变量, $\chi = [\dot{x}, \dot{y}, \psi, \dot{\psi}, \Delta\psi, X, Y]^T$; u 为控制输入量; y_c 为控制输出, $y_c = [Y, \Delta\psi]^T$;

$$C \text{ 为输出矩阵, } C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

(38)式中状态变量的非线性模块难以满足轨迹跟踪控制器实时性的要求, 且在计算过程中容易引入非线性约束增加计算复杂程度, 因此需要对(38)式进行线性化处理, 以获得线性时变预测模型。将(38)式在工作点 (χ_0, u_0) 处以泰勒公式展开, 忽略高阶项, 得

$$\dot{\boldsymbol{\chi}} = f(\boldsymbol{\chi}_0, u_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\chi}} \right|_{\substack{\boldsymbol{\chi}=\boldsymbol{\chi}_0 \\ u=u_0}} (\boldsymbol{\chi} - \boldsymbol{\chi}_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{\boldsymbol{\chi}=\boldsymbol{\chi}_0 \\ u=u_0}} (u - u_0), \quad (40)$$

式中: u_0 为工作点的控制输入量; $\boldsymbol{\chi}_0$ 为工作点的状态变量,

$$\dot{\boldsymbol{\chi}}_0 = f(\boldsymbol{\chi}_0, u_0). \quad (41)$$

(41)式与(40)式相减,得到

$$\dot{\boldsymbol{\chi}} - \dot{\boldsymbol{\chi}}_0 = \left. \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\chi}} \right|_{\substack{\boldsymbol{\chi}=\boldsymbol{\chi}_0 \\ u=u_0}} (\boldsymbol{\chi} - \boldsymbol{\chi}_0) + \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{\boldsymbol{\chi}=\boldsymbol{\chi}_0 \\ u=u_0}} (u - u_0). \quad (42)$$

(42)式离散化,可得状态变量表达式为

$$\boldsymbol{\chi}(k+1) = \mathbf{A}\boldsymbol{\chi}(k) + \mathbf{B}u(k) + \mathbf{d}(k), \quad (43)$$

式中: $\boldsymbol{\chi}(k)$ 为车辆当前时刻的状态量; $u(k)$ 为当前时刻控制输入量; $\mathbf{d}(k) = \boldsymbol{\chi}_0(k+1) - \mathbf{A}\boldsymbol{\chi}_0(k) - \mathbf{B}u_0$;

$$\mathbf{A} = \left. \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\chi}} \right|_{\substack{\boldsymbol{\chi}=\boldsymbol{\chi}_0 \\ u=u_0}}; \mathbf{B} = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{\substack{\boldsymbol{\chi}=\boldsymbol{\chi}_0 \\ u=u_0}}.$$

为减小静态误差,将(43)式中的控制量改写成控制增量^[17]的形式:

$$\xi(k+1|k) = \mathbf{A}_k \xi(k|k) + \mathbf{B}_k \Delta u(k|k) + \mathbf{d}_k(k), \quad (44)$$

$$\boldsymbol{\gamma}(k|k) = \mathbf{C}_k \xi(k|k), \quad (45)$$

式中: $\xi(k|k) = \begin{bmatrix} \boldsymbol{\chi}(k|k) \\ u(k-1|k) \end{bmatrix}$, $\boldsymbol{\chi}(k|k)$ 为车辆当前时刻的状态量; $u(k-1|k)$ 为车辆前一时刻的控制输入量;

$$\mathbf{A}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \mathbf{I} \text{ 为单位矩阵}; \mathbf{B}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}; \mathbf{d}_k(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{d}(k) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}; \mathbf{C}_k = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}], \Delta u(k|k) = u(k|k) - u(k-1|k).$$

迭代(45)式,可得预测时域内 N_p 输出量的表达式为

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\gamma}(k+1|k) \\ \boldsymbol{\gamma}(k+2|k) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\gamma}(k+N_c|k) \\ \vdots \\ \boldsymbol{\gamma}(k+N_p|k) \end{bmatrix}_{N_p \times 1} = \boldsymbol{\Psi} \xi(k|k) + \boldsymbol{\Gamma} \Delta \mathbf{U} + \boldsymbol{\Omega} \mathbf{D}, \quad (46)$$

$$\text{式中: } \boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k \\ \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^2 \\ \vdots \\ \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^{N_c} \\ \vdots \\ \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^{N_p} \end{bmatrix}_{N_p \times 1};$$

$$\boldsymbol{\Gamma} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_k \mathbf{B}_k & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k \mathbf{B}_k & \mathbf{C}_k \mathbf{B}_k & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^{N_p-1} \mathbf{B}_k & \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^{N_p-2} \mathbf{B}_k & \cdots & \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^{N_p-N_c} \mathbf{B}_k \end{bmatrix}_{N_p \times N_c};$$

$$\Delta \mathbf{U} = \begin{bmatrix} \Delta u(k|k) \\ \Delta u(k+1|k) \\ \vdots \\ \Delta u(k+N_c-1|k) \end{bmatrix}_{N_c \times 1};$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_k & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k & \mathbf{C}_k & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^{N_p-1} & \mathbf{C}_k \mathbf{A}_k^{N_p-2} & \cdots & \mathbf{C}_k \end{bmatrix}_{N_p \times N_p};$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \mathbf{d}_k(k|k) \\ \mathbf{d}_k(k+1|k) \\ \vdots \\ \mathbf{d}_k(k+N_p-1|k) \end{bmatrix}_{N_p \times 1}.$$

结合车辆动力学约束条件,得到线性模型预测控制目标函数如下:

$$\min J(\boldsymbol{\gamma}(k), \Delta \mathbf{U}(k)) = \min \left(\sum_{i=1}^{N_p} \|\boldsymbol{\gamma}(k+i|k) - \mathbf{Y}_r(k+i|k)\|_{\mathbf{Q}_i}^2 + \sum_{j=1}^{N_c} \|\Delta u(j)\|_{\mathbf{R}_j}^2 \right), \quad (47)$$

$$\text{s. t. } u_{\min} \leq u(j) \leq u_{\max}, j=1, 2, \dots, N_c, \quad (48)$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u(j) \leq \Delta u_{\max}, j=1, 2, \dots, N_c, \quad (49)$$

式中: $\mathbf{Y}_r(k+i|k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_r(k+i|k) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$, $\mathbf{y}_r(k+i|k)$ 为预测时域内已知参考轨迹。

为求解方便,令 $\mathbf{E} = \mathbf{Y}_r - \boldsymbol{\Psi} \xi(k) - \boldsymbol{\Omega} \mathbf{d}(k)$, 将目标函数进一步整理为二次规划问题的一般表示形式,即带有 Hessian 正定矩阵的表达式: $\min(\Delta \mathbf{U})^T \mathbf{H} \Delta \mathbf{U} - \mathbf{f}^T \Delta \mathbf{U}$, 满足约束条件 $\mathbf{G} \Delta \mathbf{U} \leq \mathbf{b}$, 其中 \mathbf{G} 为约束矩阵, \mathbf{b} 为约束系数。

令 $\mathbf{H} = \mathbf{I}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{I} + \mathbf{R}^T \mathbf{R}$, $\mathbf{f} = 2\mathbf{I}^T \mathbf{Q}^T \mathbf{Q} \mathbf{E}$, 其中 \mathbf{Q} 为输出权重, \mathbf{R} 为输入权重。则控制量约束 $u_{\min} \leq u(j) \leq u_{\max}$, $u_{\max}(k)$ 为控制输入量上边界, $u_{\min}(k)$ 为控制输入量下边界, $j=1, \dots, N_c$ 可以转化为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{I} & \mathbf{I} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{I} & \mathbf{I} & \cdots & \mathbf{I} \\ -\mathbf{I} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ -\mathbf{I} & -\mathbf{I} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\mathbf{I} & -\mathbf{I} & \cdots & -\mathbf{I} \end{bmatrix} \Delta \mathbf{U} \leq \begin{bmatrix} u_{\max}(k) - u(k-1) \\ \vdots \\ u_{\max}(k+N_c-1) - u(k-1) \\ u(k-1) - u_{\min}(k) \\ \vdots \\ u(k-1) - u_{\min}(k+N_c-1) \end{bmatrix},$$

控制增量约束可转化为

$$\begin{bmatrix} I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & I \\ -I & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & -I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & -I \end{bmatrix} \Delta u \leq \begin{bmatrix} \Delta u_{\max}(k) \\ \vdots \\ \Delta u_{\max}(k + N_c - 1) \\ -\Delta u_{\min}(k) \\ \vdots \\ -\Delta u_{\min}(k + N_c - 1) \end{bmatrix},$$

式中： $\Delta u_{\max}(k)$ 为控制增量上边界； $\Delta u_{\min}(k)$ 为控制增量下边界。

2.3 紧急避障控制器结构

综合路径规划器和轨迹跟踪器的设计思路得到图 7 所示的双层 MPC 紧急避障控制器逻辑结构,其中,上层控制器根据前方道路障碍物信息和车辆当前运动状态进行路径二次规划,下层控制器接收临时规划的轨迹信息和车辆当前运动状态进行轨迹跟踪。

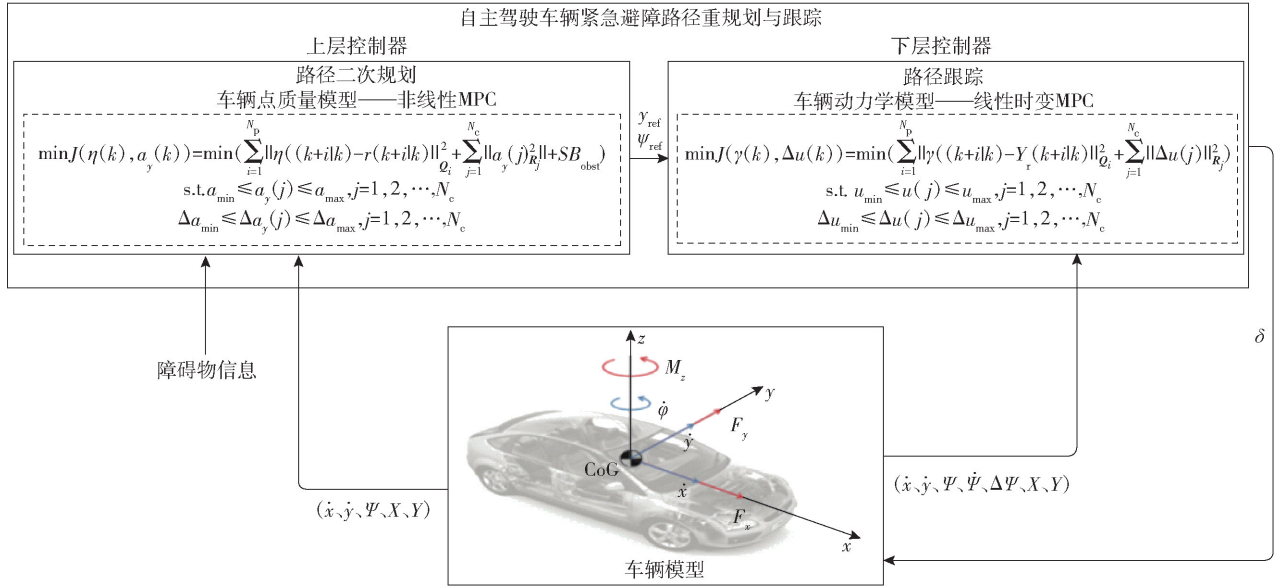


图 7 路径规划与轨迹跟踪控制逻辑图

Fig. 7 Control model of path planning and tracking

3 仿真结果与分析

为了验证双层 MPC 紧急避障控制器的有效性,利用汽车动力学仿真软件 Carsim 和 MATLAB/Simulink 联合仿真平台测试自动驾驶车辆的避障效果。仿真车辆模型参数如表 1 所示。

表 1 车辆基本参数

Tab. 1 Essential parameters of autonomous vehicle

参数名称	数值
整车质量/kg	1 769
转动惯量/(kg·m ⁻²)	3 962
质心到前轴距离/m	1.36
质心到后轴距离/m	1.58
前、后轮胎侧偏刚度/(N·rad ⁻¹)	67 400
前、后轮胎纵向刚度/(N·rad ⁻¹)	62 900
前、后轮胎滑移率	0.21

3.1 平直路面避障效果分析

全局参考路径为一段长 240 m 的直行路段,在

自动驾驶车辆正前方有一台故障车辆,分析不同车速下控制器对该静止故障车的避障性能。

根据道路前方故障车辆位置信息,双层 MPC 紧急避障控制器综合考虑车辆的行驶操纵稳定性约束条件自动规划出最适合车辆当前运动状态的轨迹。在平直城市路面,自动驾驶车辆的避障效果如图 8 所示。

图 9 所示为车辆速度分别为 60 km/h、80 km/h 和 100 km/h 时车辆的行驶轨迹。从图 9 中可以看到,车速为 60 km/h 时,自动驾驶车辆在 85 m 处开始响应路径规划层的避障功能,车速越大,避障功能响应时刻提前,车速为 80 km/h 和 100 km/h 时控制器分别在 80 m 和 75 m 处做出避障决策。这是因为本文设计的避障功能函数考虑了本车速度对二次路径规划的影响,车速越大、避障功能函数的惩罚值越大,规划控制器以牺牲规划路径与全局参考路径(Y=2 m)的跟踪精度为代价增大车辆与障碍物之间的距离,避障控制策略符合高速行驶车辆提前避

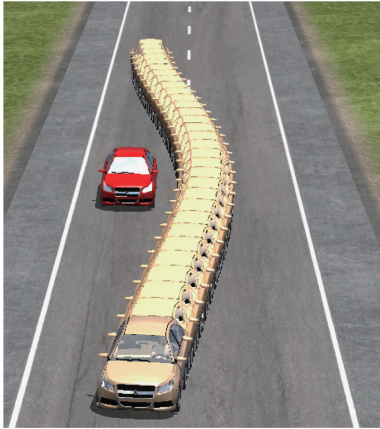


图 8 避障轨迹车辆移动幻影示意图

Fig. 8 Moving trajectory during obstacle avoidance

让的驾驶行为。

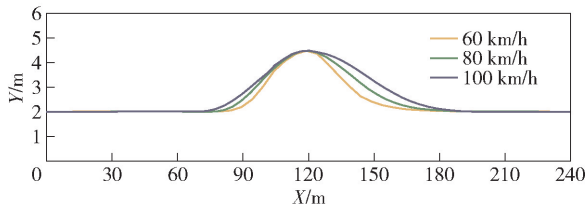


图 9 不同行驶速度下车辆轨迹

Fig. 9 Moving trajectories of vehicle at various velocities

从图 9 中也可以看出,不同车速下车辆的侧向位移最大偏差相同。图 10 和图 11 所示分别为不同车速下车辆的航向角偏差和质心侧偏角,仿真结果显示,在平直路段车辆的质心侧偏角和航向角偏差都控制在一个较小的范围内 ($|\Delta\psi| < 2.5^\circ$, $|\beta| < 1^\circ$),表明车辆在紧急避障过程中行驶稳定,设计的避障控制器对车速变化具有很强的适应性。

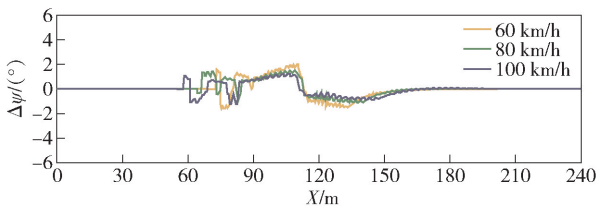


图 10 不同行驶速度下车辆航向角偏差

Fig. 10 Deviation of vehicle yaw angles at various velocities

3.2 多目标连续避障效果分析

针对行车过程中道路障碍物出现的随机突发性,本文建立贴近实际情况的自动驾驶车辆多车连续避障实验场景(在道路前方 50 m 处存在多辆需避让的目标车辆,在道路前方 190 m 处存在逆向行驶的越界车辆)。

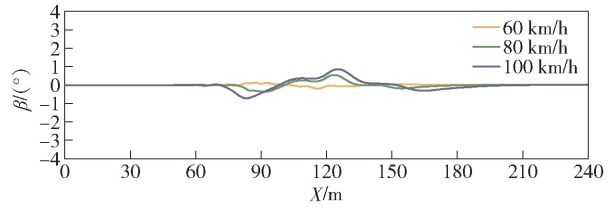


图 11 不同行驶速度下车辆质心侧偏角

Fig. 11 Side-slip angles of vehicle at various velocities

根据前方目标车辆和逆向行驶车辆的位置信息,本文设计的双层 MPC 紧急避障控制器的多车避障效果和会车避让效果如图 12 和图 13 所示。

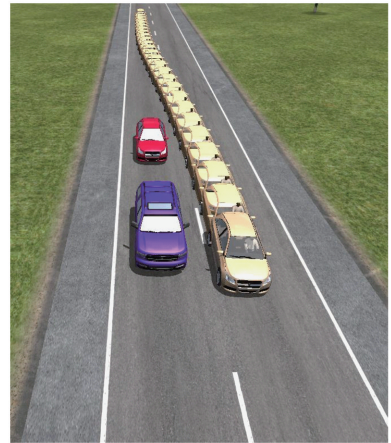


图 12 多目标避障效果示意图

Fig. 12 Moving trajectory of vehicle during multi-obstacles avoidance

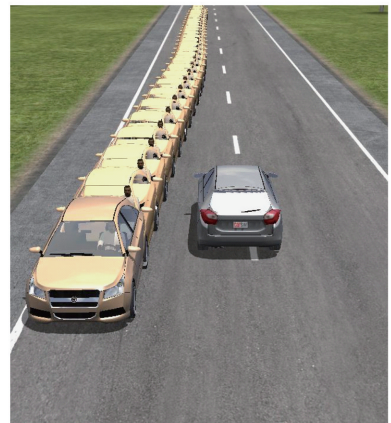


图 13 逆向越界车辆避障效果示意图

Fig. 13 Moving trajectory of vehicle during multi-obstacles avoidance

图 14 所示为 60 km/h、80 km/h 和 100 km/h 不同车速下自动驾驶车辆的多车连续避障行驶轨迹。对于正前方的目标车辆,随着行车速度的增大,自动驾驶车辆分别在 25 m、20 m 和 15 m 处响应控制器的避障功能,避障最大侧向位移约为 3 m;对于逆向

驶来的越界车辆,随着车速增加,自动驾驶车辆分别在 175 m、170 m 和 165 m 处响应控制器的避障效果,避障最大侧向位移约为 1.2 m。从避障轨迹来看,车速越大,车辆的避障响应时刻越早。

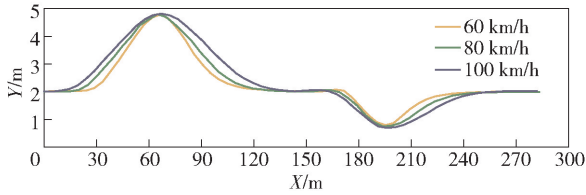


图 14 不同行驶速度下自动驾驶车辆连续避障轨迹

Fig. 14 Moving trajectories of vehicle at various velocities during multi-obstacles avoidance

图 15 和图 16 所示分别为 60 km/h、80 km/h 和 100 km/h 不同车速下多车连续避障时车辆质心侧偏角和航向角偏差的变化情况。实验结果显示,在多目标连续避障过程中,车辆最大质心侧偏角 $|\beta|$ 均不超过 1° ,表明 MPC 路径规划控制策略能保证车辆较高的行驶稳定性;车辆的最大航向角偏差 $|\Delta\psi|$ 均不超过 2.5° ,表明对于多目标连续避障情况,双层 MPC 紧急避障控制器同样具有很好的控制效果。

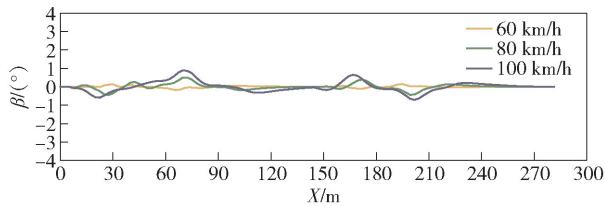


图 15 车辆连续避障质心侧偏角

Fig. 15 Side-slip angles of vehicle during multi-obstacles avoidance

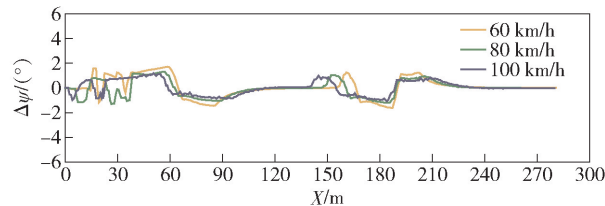


图 16 车辆连续避障航向角偏差

Fig. 16 Deviation of vehicle yaw angles during multi-obstacles avoidance

4 结论

本文根据车辆点质量模型、车辆运动学模型和魔术轮胎模型设计了双层 MPC 紧急避障控制器,通过 Carsim 和 MATLAB/Simulink 联合仿真平台验证了紧急避障控制器对车辆速度变化以及对多目标连

续避障均具有很好的控制效果。得到主要结论如下:

1) 紧急避障控制策略对低速 (60 km/h)、中速 (80 km/h)、高速 (100 km/h) 行驶车辆有很强的适应性,高速行驶时车辆的最大质心侧偏角不超过 1° ,最大航向角偏差不超过 2.5° 。

2) 在由道路前方目标车辆和逆向驶来的越界车辆组成的多车连续避障实验场景中,自动驾驶车辆的质心侧偏角 β 和航向角偏差 $\Delta\psi$ 均控制在合理的范围内。

参考文献 (References)

- [1] HILGERT J, HIRSCH K, BERTRAM T, et al. Emergency path planning for autonomous vehicles using elastic band theory [C] // Proceedings of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Kobe, Japan; IEEE, 2003: 1390 - 1395.
- [2] SCHOUWENAARS T, HOW J, FERON E. Receding horizon path planning with implicit safety guarantees [C] // Proceedings of American Control Conference. Boston, MA, US; IEEE, 2004: 5576 - 5581.
- [3] YU H, GONG J, IAGNEMMA K, et al. Robotic wheeled vehicle ripple tentacles motion planning method [C] // Proceedings of Intelligent Vehicles Symposium. Alcalá de Henares, Spain; IEEE, 2012: 1156 - 1161.
- [4] 张纯刚, 席裕庚. 动态未知环境中移动机器人的滚动路径规划 [J]. 机器人, 2002, 24(1): 71 - 75.
ZHANG C G, XI Y G. Rolling path planning of mobile robot in dynamic unknown environment [J]. Robot, 2002, 24(1): 71 - 75. (in Chinese)
- [5] 阮久宏, 李贻斌, 杨福广, 等. 高速 4WID-4WIS 自主车路径跟踪控制 [J]. 机器人, 2011, 33(4): 411 - 418.
RUAN J H, LI Y B, YANG F G, et al. Path tracking control of high-speed 4WID-4WIS autonomous vehicle [J]. Robot, 2011, 33(4): 411 - 418. (in Chinese)
- [6] 李琳辉, 伦智梅, 连静, 等. 基于卷积神经网络的道路车辆检测方法 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(2): 384 - 391.
LI L H, LUN Z M, LIAN J, et al. Convolution neural network-based vehicle detection method [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(2): 384 - 391. (in Chinese)
- [7] MARINO R, SCALZI S, NETTO M. Nested PID steering control for lane keeping in autonomous vehicles [J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(12): 1459 - 1467.
- [8] WANG R J, YIN G D, JIN X J. Robust adaptive sliding mode control for nonlinear four-wheel steering autonomous vehicles path tracking systems [C] // Proceedings of the 8th International Power Electronics and Motion Control Conference. Hefei, China; IEEE, 2016: 1 - 8.
- [9] ANTONELLI G, CHIAVERINI S, FUSCO G. A fuzzy-logic-based approach for mobile robot path tracking [J]. IEEE Transactions on

- Fuzzy Systems,2007,15(2):211-221.
- [10] HAJJAJI A E, BENTALBA S. Fuzzy path tracking control for automatic steering of vehicles[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2003,43(4):203-213.
- [11] LIANG L, LU Y S, WANG R R, et al. A 3-dimensional dynamics control framework of vehicle lateral stability and rollover prevention via active braking with MPC[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016,64(4):3389-3401.
- [12] 宗长富,陈国迎,梁赫奇,等. 基于模型预测控制的汽车底盘协调控制策略[J]. 农业机械学报,2011,42(2):1-7.
ZONG C F, CHEN G Y, LIANG H Q, et al. Vehicle chassis coordination control strategy based on model predictive control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(2):1-7. (in Chinese)
- [13] LI S B, LI K Q, RAJAMARRI R, et al. Model predictive multi-objective vehicular adaptive cruise control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2011,19(3):556-566.
- [14] 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.
- [15] BRUSCHETTA M, MARAN F, BEGHI A. A fast implementation of MPC-based motion cueing algorithms for mid-size road vehicle motion simulators[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55(6): 802-826.
- [16] 胡家铭,胡宇辉,陈慧岩,等. 基于模型预测控制的无人驾驶履带车辆轨迹跟踪方法研究[J]. 兵工学报,2019,40(3): 456-463.
- HU J M, HU Y H, CHEN H Y, et al. Research on trajectory tracking of unmanned tracked vehicles based on model predictive control[J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(3): 456-463. (in Chinese)
- [17] PRACH A, KAYACAN E. An MPC-based position controller for a tilt-rotor tricopter VTOL UAV[J]. Optimal Control Applications and Methods, 2018,39(4):343-356.
- [18] 陈虹. 模型预测控制[M]. 北京:科学出版社,2013.
CHEN H. Model predictive control[M]. Beijing: Science Press, 2013. (in Chinese)
- [19] 余志生. 汽车理论[M]. 第3版. 北京:机械工业出版社, 2000.
YU Z S. Automotive theory[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2000. (in Chinese)
- [20] PACEJKA H B, EGBERT B. The magic formula tyre model[C]// Proceedings of Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis: International Colloquium on Tyre Models for Vehicle Dynamics. London, UK: Taylor & Francis, 1991: 1-18.
- [21] GAO Y Q. Model predictive control for autonomous and semiautonomous vehicles[D]. Berkeley, CA, US: University of California, 2014: 1-10.
- [22] 雷强顺,彭友余,汪国胜,等. 车辆电控空气悬挂结构优化模型与优化设计方法研究[J]. 兵工学报,2018,39(7):1259-1267.
LEI Q S, PENG Y Y, WANG G S, et al. Study of optimal model and optimizing method for the electronically controlled air suspension system structure[J]. Acta Armamentarii, 2018,39(7):1259-1267. (in Chinese)