

基于多智能体模型预测(AMPC)的车辆 横摆稳定性控制*

赵柯帆^{1,2}, 裴晓飞^{1,2}, 陈祯福^{1,2}, 项鸿博^{1,2}

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学, 现代汽车零部件湖北省重点实验室, 武汉 430070)

[摘要] 随着汽车主动安全技术的快速发展, 现代电动汽车底盘电控单元迎来爆炸式增长。为提高底盘主动安全控制的实时性与准确性, 针对底盘电控单元的快速增长以及控制系统集成化程度低、多目标协同优化的耦合冲突问题, 本文首先建立了基于多智能体(multi-agent based, MAB)的底盘系统集成控制架构, 提出一种集成前、后轮主动转向系统和差动制动系统的控制体系; 其次在此基础上, 建立了每个智能体的状态方程以及其对车辆质心的贡献度模型, 并结合模型预测控制考虑约束的特点, 设计了包含全局状态跟踪误差和局部控制努力的代价函数, 同时考虑执行器约束与地面摩擦椭圆约束; 最后, 每个智能体通过各自贡献度的动态信息交互实现其协同控制。研究表明: 本文所提出的基于多智能体模型预测的车辆稳定性控制方法, 在高低路面附着和大曲率弯道的行驶工况下, 相比于各主动安全单元独立控制在横摆稳定性方面有明显的提升, 具有一定的工程应用价值。

关键词: 多智能体; 模型预测控制; 稳定性控制; 主动转向; 差动制动

Vehicle Yaw Stability Control Based on Multi-agent Model Prediction Control

Zhao Kefan^{1,2}, Pei Xiaofei^{1,2}, Chen Zhenfu^{1,2} & Xiang Hongbo^{1,2}

1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070;

2. Wuhan University of Technology, Hubei Key Laboratory of Modern Auto Parts, Wuhan 430070

[Abstract] With the rapid development of automotive active safety technology, the chassis electronic control unit of modern electric vehicles has seen explosive growth. In order to improve the real-time performance and accuracy of chassis active safety control, for the rapid growth of chassis electronic control units and the coupling conflict problems of low integration degree of control system and multi-objective co-optimization, in this paper firstly a chassis system integration control architecture based on multi-agent is established, and a hierarchical control system integrating the front and rear wheels' active steering system and the differential braking control system is proposed. Secondly, based on this, the state equations of each agent and its contribution to the vehicle's center of mass model are established and combined with the model predictive control to consider the characteristics of constraints. The cost function containing global state tracking error and local control effort is designed considering both the actuator constraints and the ground friction ellipse constraints. Finally, each agent realizes its collaborative control through the interaction of dynamic information of its respective contribution. The results show that the vehicle stability control method based on multi-agent model prediction proposed in this paper has obvious improvement in terms of traverse stability compared with independent control of each active safety unit under the driving conditions of high and low road attachment and large curvature curves, which has certain value for engineering application.

Keywords: multi-agent; model predictive control; stability control; active steering; differential braking

* 国家自然科学基金(52272426)和广西科技重大专项(桂科AA22068094)资助。

原稿收到日期为2024年05月20日, 修改稿收到日期为2024年09月16日。

通信作者: 裴晓飞, 副教授, 博士, E-mail: peixiaofei7@whut.edu.cn。

前言

近年来,工业界和学术界高度重视开发先进的车辆主动安全控制系统,以保障车辆行驶的稳定性^[1-3],高效稳定的主动安全控制技术可以在某些工况下通过强制控制介入防止车辆失稳^[4-5]。但随着主动安全技术的不断发展,底盘中布置的与主动安全相关的子系统数量不断增加,当子系统为了各自的控制目标而发生冲突时,控制效果可能会受到显著影响,因此通过底盘子系统的集成控制可以避免控制单元“各自为政”的问题,从而进一步提升车辆的整体性能^[6]。

目前比较典型的研究是主动转向控制与差动制动控制的集成。主动转向系统可以快速响应转向盘的变化,为车辆提供额外的转向角度,同时差动制动系统自适应地对车轮施加制动力,用以产生横摆力矩,从而调整车辆的横摆运动以达到预期的动力学响应特性。例如,Ahmadian等^[7]开发了一种集成自适应控制策略,通过分层控制架构协调主动前转向和直接横摆力矩控制单元,以保持车辆操纵性并改善横摆稳定性;Mashadi等^[8]通过组合滑模面的滑模控制获取所需的主动前轮附加转角和直接横摆力矩,同时在电机转矩分配控制中考虑车轮打滑的问题;Khelladi等^[9]提出了一种基于监督控制的主动转向与直接横摆力矩控制的集成方案;Shuai等^[10]提出了一种基于鲁棒控制的线性二次调节(LQR)控制方法,通过多胞体形式将时延问题转化为显式数学表达,控制器的反馈增益通过求解一系列线性矩阵不等式(LMI)获得。

但以上所述算法无法考虑执行器以及地面附着条件的约束,因此模型预测控制(MPC)由于其可以考虑约束的特点,在车辆集成控制方面获得了越来越广泛的应用^[11]。然而,MPC控制依赖精确的预测模型对预测时间步长内的系统状态进行预测,从而进一步进行滚动优化的求解,因此对被控对象进行准确的建模对MPC控制至关重要^[12]。文献[13]和文献[14]中,复杂的车辆参考模型及其对车辆驾驶行为的影响保证了模型预测控制器的精度,但对模型的高度依赖限制了其可扩展性和可重用性。

对此,Ataei等^[15]提供了一种可能的解决方案即建立通用动力学模型,以涵盖所有执行器,然后在运算过程中将不使用执行器的输出限制为零,从而使

模型适应特定平台,如图1(a)所示。然而,这种方法在求解过程中带有大量冗余执行器的复杂参考模型,增加了计算难度从而降低实时性^[16]。同时由于通用模型具有固定的拓扑结构和维度,随着新执行器的不断集成,这种方法在纳入新的状态或控制输入方面也面临挑战。

另一个可能的方案是为不同的执行器建立动力学模型^[17]或将整车动力学适当分解为执行器模型^[18]并为其匹配MPC控制算法,将每个不同的MPC控制单元视作一个智能体,然后对多个智能体进行协同控制,如图1(b)所示。此方法可以大幅度降低对系统进行动力学建模的难度,消除方法一中由于冗余执行器对求解运算量的影响,提高算法的实时性。同时,此方法也便于执行器的更新与增加,可重用性与可拓展性更强。

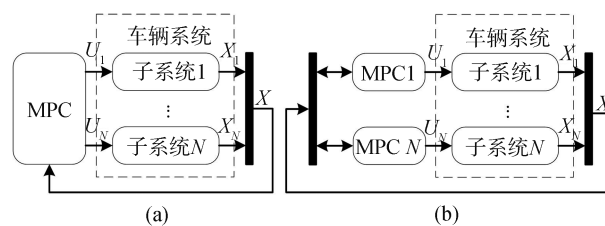


图1 集中式与分布式MPC架构

基于此,本文将基于第二种方法进行多智能体MPC的车辆横摆稳定性控制研究。本文的结构安排如下:第1节介绍基于前、后轮主动转向和差动制动的多智能体MPC控制的整体框架。第2节首先设计车辆质心的预测模型和每个智能体的贡献度模型,然后推导出每个智能体的预测模型并对其进行MPC优化求解,最后介绍多智能体间的协同控制算法。第3节基于CarSim和MATLAB/Simulink平台,分别在高、低附着路面进行S-turn和U-turn测试,并与独立MPC控制且直接叠加的前、后轮主动转向和差动制动控制器进行对比,验证本文所提出的AMPC车辆稳定性控制的可行性。

1 总体控制结构

多智能体MPC控制系统的结构如图2所示,上层为驾驶员输入层,中层为多智能体协作层,下层为执行器响应层。

对于多智能体MPC控制算法,首先应基于车辆动力学方程建立车辆质心的预测模型,再根据前、后

轮主动转向和差动制动执行器的动力学特性推算其在车辆质心动力学模型中的分量,并确定其贡献度模型,如对应图2中的 \bar{Y}_{FSTR} 、 \bar{Y}_{RSTR} 和 \bar{Y}_{DB} 。

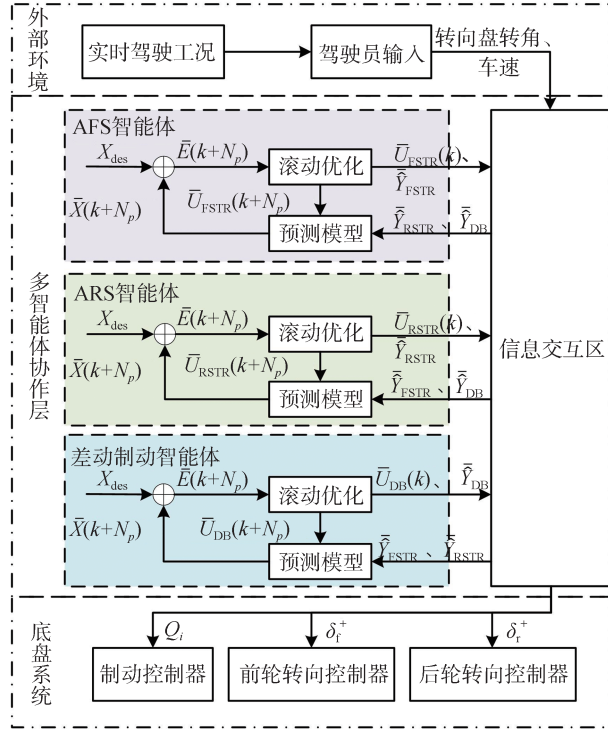


图2 多智能体MPC控制结构

其次,分别根据主动前轮转向(AFS)、主动后轮转向(ARS)和差动制动执行器的动力学特性,建立每个智能体的动力学模型作为MPC控制的预测模型,并将除本智能体外其它智能体的贡献度模型作为对本智能体的干扰加入其中。依据理想侧向车速、横摆角速度和前、后轮车偏角等理想状态量 X_{des} 与预测状态序列 \bar{X} 的差值 \bar{E} 以及最小控制输入构建滚动优化的目标函数,考虑执行器约束与地面摩擦椭圆约束并将优化问题转化为标准二次规划问题求解。

同时,所有MPC控制器都需要进行多次迭代求解,以在所有智能体之间就其在整体控制工作中的贡献度达成共识。在第 q 次迭代中,每个节点 k 根据优化目标函数与约束条件求解其最优控制序列 \bar{U}_k^q ,并报告其贡献度序列 \bar{Y}_k^q 。在下次迭代中,所有智能体将共享 \bar{Y}_k^q ,以更新各自的干扰项 W_k ,直至贡献度模型不再变化,即达成共识。

最后,将完成迭代后求解出的差动制动力矩和前、后轮的附加转角输入到各执行器的控制器。

2 控制器设计

2.1 车辆质心预测模型及智能体贡献度模型设计

不同于传统前轮转向汽车,本文建模对象为如图3所示的四轮转向车辆,在MPC控制器设计中预测模型采用2自由度车辆模型。

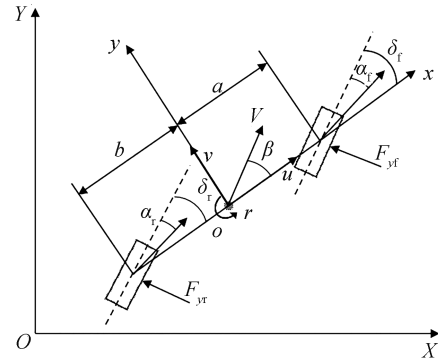


图3 四轮转向2自由度模型

根据牛顿-欧拉方程,2自由度汽车运动微分方程式为

$$\begin{cases} m(\dot{v} + r) = (k_f + k_r)\frac{v}{u} + \frac{r}{u}(ak_f - bk_r) - (k_f\delta_f + k_r\delta_r) \\ I_z\dot{r} = (ak_f - bk_r)\frac{v}{u} + \frac{1}{u}(ak_f + bk_r)r - ak_f\delta_f + bk_r\delta_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: k_f, k_r 分别为前后轴的侧偏刚度; δ_f, δ_r 分别为前后轮转角; a, b 分别为质心到前后轴的距离; r, β 分别为横摆角速度和质心侧偏角; m 为簧载质量; I_z 为车辆绕 z 轴的转动惯量; v 为横向车速; u 为纵向车速。

为了进一步改善车辆的侧偏特性,本文将前、后轮的侧偏角 $\hat{\alpha}_f, \hat{\alpha}_r$ 加入2自由度模型的状态空间,接下来将计算前、后轮侧偏角对时间的导数,侧偏角定义为

$$\hat{\alpha}_i = -\arctan \frac{v + \xi_i l_i r}{u}, \quad i = f, r \quad (2)$$

式中: $\xi_f = \xi_r = 1$; $l_i = \begin{cases} +a, & \text{前轴} \\ -b, & \text{后轴} \end{cases}$ 。 $\hat{\alpha}_i$ 的时间导数可以表示为

$$\dot{\hat{\alpha}}_i = \frac{\partial \hat{\alpha}_i}{\partial r} \Big|_{r_0} \dot{r} + \frac{\partial \hat{\alpha}_i}{\partial v} \Big|_{v_0} \dot{v} + \frac{\partial \hat{\alpha}_i}{\partial u} \Big|_{u_0} \dot{u} \quad (3)$$

由于车轮侧偏角对纵向车速的变化率远小于其

对横摆角速度和质心侧偏角的变化率,因此对于式(3)忽略最后一项,从而可得前、后轮侧偏角对时间的导数为

$$\dot{\hat{\alpha}}_i \approx k_{i,v} \dot{v} + k_{i,r} \dot{r} \quad (4)$$

$$\text{其中: } k_{i,v} = \frac{1}{u_0 + (v_0 + \xi_i l_i r_0)^2 / u_0}$$

$$k_{i,r} = \frac{-\xi_i l_i}{u_0 + (v_0 + \xi_i l_i r_0)^2 / u_0}$$

从而得到车辆质心的预测模型为

$$\dot{X}_{CG} = AX_{CG} + BU_{CG} \quad (5)$$

$$\text{其中: } X_{CG} = [r \ v \ \hat{\alpha}_f \ \hat{\alpha}_r]^T; U_{CG} = [F_{xCG} \ F_{yCG} \ M_{zCG}]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} ak_f - bk_r & a^2 k_f + b^2 k_r & ak_f \cos \delta_f & -bk_r \cos \delta_r \\ I_z & u I_z & & \\ \frac{k_f + k_r}{mu} & \frac{ak_f - bk_r}{mu} - u & \frac{1}{m} k_f \cos \delta_f & \frac{1}{m} k_r \cos \delta_r \\ k_{f,r} & k_{f,v} & 0 & 0 \\ k_{r,r} & k_{r,v} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_z} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

根据本文第1节中所描述的架构,式(5)中的输入 U_{CG} 由3个智能体共同贡献,分别为

$$U_{CG} = U_{CGFSTR} + U_{CGRSTR} + U_{CGDB} \quad (6)$$

式中 U_{CGFSTR} 、 U_{CGRSTR} 和 U_{CGDB} 分别表示前轮主动转向、后轮主动转向和差动制动智能体的输入分量。每个智能体产生的轮胎力都可以以一般形式映射到它们的分力上,从而确定每个智能体对整体的贡献度:

$$\hat{Y}_{FSTR} = BU_{CGFSTR} = \sum_{i=fl,fr} B [0 \ \frac{a}{L} \ a]^T F_{y_i} \quad (7)$$

$$\hat{Y}_{RSTR} = BU_{CGRSTR} = \sum_{i=rl,rr} B [0 \ \frac{-b}{L} \ -b]^T F_{y_i} \quad (8)$$

$$\hat{Y}_{DB} = BU_{CGDB} = \sum_{i=fl,fr} BB_{Qf} Q_i + \sum_{i=rl,rr} BB_{Qr} Q_i \quad (9)$$

式中: \hat{Y}_{FSTR} 、 \hat{Y}_{RSTR} 、 \hat{Y}_{DB} 为智能体的贡献度模型; Q_i 为 t 时刻差动制动智能体所计算出的车轮制动力矩;

$$B_{Qf} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\delta}_f) & \sin(\hat{\delta}_f) & -T_w \cos(\hat{\delta}_f) + a \sin(\hat{\delta}_f) \\ R_w & R_w & R_w \end{bmatrix}^T;$$

$$B_{Qr} = \begin{bmatrix} \cos(\hat{\delta}_r) & \sin(\hat{\delta}_r) & T_w \cos(\hat{\delta}_r) - b \sin(\hat{\delta}_r) \\ R_w & R_w & R_w \end{bmatrix}^T。$$

2.2 智能体预测模型设计

在确定了车辆质心的预测模型与各智能体的贡献度模型后,需要根据其进一步确定各智能体的预测模型,从而对其进行MPC的滚动优化求解。

(1) 前轮主动转向预测模型

$$\dot{X}_{CG} = A_{FSTR} X_{CG} + B_{FSTR} U_{FSTR} + W_{FSTR} \quad (10)$$

式中: $U_{FSTR} = \delta_f^*$, δ_f^* 为前轮主动转向附加转角; $A_{FSTR} = A|_{\delta_i=0}$; $W_{FSTR} = \hat{Y}_{RSTR} + \hat{Y}_{DB}$;

$$B_{FSTR} = \begin{bmatrix} ak_f \cos \delta_f & \frac{1}{m} k_f \cos \delta_f & 0 & 0 \end{bmatrix}^T。$$

(2) 后轮主动转向预测模型

$$\dot{X}_{CG} = A_{RSTR} X_{CG} + B_{RSTR} U_{RSTR} + W_{RSTR} \quad (11)$$

式中: $U_{RSTR} = \delta_r^*$, δ_r^* 为后轮主动转向附加转角; $A_{RSTR} = A|_{\delta_i=0}$; $W_{RSTR} = \hat{Y}_{FSTR} + \hat{Y}_{DB}$;

$$B_{RSTR} = \begin{bmatrix} -bk_r \cos \delta_r & \frac{1}{m} k_r \cos \delta_r & 0 & 0 \end{bmatrix}^T。$$

(3) 差动制动预测模型

$$\dot{X}_{CG} = A_{DB} X_{CG} + B_{DB} U_{DB} + W_{DB} \quad (12)$$

其中: $U_{DB} = [Q_{fl} \ Q_{fr} \ Q_{rl} \ Q_{rr}]^T$; $A_{DB} = A$

$$B_{DB} = B \cdot [B_{Qf} \ B_{Qf} \ B_{Qr} \ B_{Qr}]$$

$$W_{DB} = \hat{Y}_{FSTR} + \hat{Y}_{RSTR}$$

2.3 模型预测控制求解

模型预测控制器包括预测模型、在线校正和滚动优化3个部分。预测模型根据系统在控制时域内的输出状态量,对预测时域内的状态进行估计。在线校正模块根据 t 时刻的系统状态估计值计算 $t+1$ 时刻的系统状态估计值。滚动优化模块则根据 $t+1$ 时刻的估计误差求解 $t+1$ 时刻被控系统的最优控制序列 U_k^{t+1} 。同时,模型预测控制还可以直接处理执行器约束与地面附着约束。为了降低计算的复杂度,并提高实时性,还需要将连续时间模型进行离散化: $A_d = I + A \cdot \Delta T$, $B_d = B \cdot \Delta T$ 。

根据式(10)~式(12)各智能体的预测模型估计预测步长 N_p 内系统的状态空间:

$$\bar{X} = S_X X^{(0)} + S_U \bar{U} + S_W \bar{W} + S_{U0} U^{(0)} + S_{W0} W^{(0)} \quad (13)$$

$$\text{其中: } \bar{X} = \begin{bmatrix} X^{(1)} \\ X^{(2)} \\ \vdots \\ X^{(N_p)} \end{bmatrix}; \bar{U} = \begin{bmatrix} U^{(1)} \\ U^{(2)} \\ \vdots \\ U^{(N_p)} \end{bmatrix}; \bar{W} = \begin{bmatrix} W^{(1)} \\ W^{(2)} \\ \vdots \\ W^{(N_p)} \end{bmatrix}$$

式中: \bar{X} 、 \bar{U} 、 \bar{W} 分别表述相应智能体在未来离散步骤 $i \in \{1, \dots, N_p\}$ 时的状态序列、控制输入序列和干扰序列。

系统矩阵 S_X, S_U, S_W, S_{U0} 和 S_{W0} 可由离散系统矩阵 A_d 和 B_d 推导出:

$$S_X = \begin{bmatrix} A_d \\ A_d^2 \\ \vdots \\ A_d^{N_p} \end{bmatrix}; S_{W0} = \begin{bmatrix} I \\ A_d \\ \vdots \\ A_d^{N_p-1} \end{bmatrix}; S_{U0} = \begin{bmatrix} B_d \\ A_d B_d \\ \vdots \\ A_d^{N_p-1} B_d \end{bmatrix}$$

$$S_W = \begin{bmatrix} O & \cdots & \cdots & \cdots & O \\ I & O & \cdots & \cdots & O \\ A_d & I & O & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ A_d^{N_p-2} & A_d^{N_p-3} & \cdots & I & O \end{bmatrix}$$

$$S_U = \begin{bmatrix} O & \cdots & \cdots & \cdots & O \\ B_d & O & \cdots & \cdots & O \\ A_d B_d & B_d & O & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ A_d^{N_p-2} B_d & A_d^{N_p-3} B_d & \cdots & B_d & O \end{bmatrix}$$

为了提高车辆的操纵稳定性,可根据驾驶员的转向输入和路面附着条件,从线性2自由度模型中推导出理想的横摆角速度,理想侧向车速为0。理想的侧偏角可由理想横摆角速度和侧向车速导出。所需的状态可表述为

$$X_{des} = \begin{bmatrix} v_{des} \\ r_{des} \\ \hat{\alpha}_{fdes} \\ \hat{\alpha}_{rdes} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \text{sign}(\delta_d) \cdot \min\left(\left|\frac{u/L}{1 + K_{us} u^2} \delta_d\right|, \frac{\mu g}{u}\right) \\ -\arctan \frac{ar_{des}}{u} \\ -\arctan \frac{-br_{des}}{u} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中: K_{us} 为稳定性因数; $L = a + b$ 表示前后轴距; δ_d 表示驾驶员输入的前轮转角。

对于每个智能体,都可以构建分布式最优控制问题,以最小化全局状态跟踪误差和局部控制努力,同时在求解最优的过程中考虑执行器约束与地面摩擦椭圆约束,本文所设计的优化目标函数与约束条件为

$$\begin{cases} \min_U J = \sum_{i=1}^{N_p} \left(\|X^{(i)} - X_{des}\|_{R_x}^2 + \|U^{(i)}\|_{R_U}^2 \right) \\ \text{s. t. } U_{\min}^{(i)} \leq U^{(i)} \leq U_{\max}^{(i)} \\ \|F_{xi}\| \leq F_{xi}^{\max} = \sqrt{\mu F_{zi}^2 - F_{yi}^2} \end{cases} \quad (15)$$

式中: R_X 为全局状态跟踪误差的权重矩阵; R_U 为局部控制的权重矩阵。优化目标函数综合考虑了全局状态跟踪误差和局部控制努力,在全局状态趋近理

想值的同时,使制动转向的控制输入变化平滑,避免剧烈的控制动作,提高乘客的舒适性; $U^{(i)}$ 为每个智能体的最优控制输入,应当满足执行器约束 $U_{\min}^{(i)} \leq U^{(i)} \leq U_{\max}^{(i)}$; 车轮纵横垂向力 F_{xi}, F_{yi}, F_{zi} 可由 Dugoff 轮胎模型得出,应当满足地面摩擦椭圆约束。将上式转化为二次规划问题的标准形式:

$$J = \frac{1}{2} \bar{U}^T H \bar{U} + f^T \bar{U} \quad (16)$$

其中: $H = R_U + S_U^T R_X S_U$

$$f = (S_X X^{(0)} + S_W \bar{W} + S_{U0} U^{(0)} + S_{W0} W^{(0)} - \bar{X}_{des})^T R_X S_U$$

转化为二次规划标准形式后即可用 MATLAB 中处理二次规划问题的 quadprog 函数进行求解。

2.4 多智能体协同求解

多智能体协同求解问题可表述为多个参与者(即前、后轮主动转向控制器与差动制动控制器)之间的博弈。

如图1和图2所示,所有智能体都有自己的计算单元并以2.3节所述形式求解各自的分布式MPC问题。智能体 k 通过与其余 $N-1$ 个 (N 为智能体总数) 智能体的通讯更新各自的干扰项 W_k , 智能体 k 的干扰项 W_k 即为其余智能体的贡献度之和 $\sum \bar{Y}_i (\forall i \neq k)$ 。所有 MPC 控制器都需要进行多次迭代求解,以在所有智能体之间就其在整体控制工作中的贡献度达成共识。在第 q 次迭代中,每个节点 k 根据优化目标函数与约束条件,即式(16)求解其最优控制序列 $\bar{U}_k^q = [U_k^{1,q} \cdots U_k^{N_p,q}]^T$, 并报告其贡献度序列 $\bar{Y}_k^q = [Y_k^{1,q} \cdots Y_k^{N_p,q}]^T$ 。在下一迭代中,所有智能体将共享 \bar{Y}_k^q , 以更新各自的干扰项 W_k , 直至其贡献度序列不再变化,即达成共识。协同求解算法总结如下:

协同求解算法

对每个智能体 k , 初始化 $\bar{X}_{CC}^0, \bar{U}_k^0$;

根据 $\bar{X}_{CC}^0, \bar{U}_k^0$ 计算 $\bar{Y}_k^0 (\forall i)$, 令 $q=0$;

do

q. 1: 根据2.3节内容使用 $\bar{Y}_i^{q-1} (\forall i \neq k)$ 求解出 \bar{U}_k^q ;

q. 2: 根据式(7)~式(9)使用 \bar{U}_k^q 求解出 \bar{Y}_k^q ;

q. 3: 根据更新率 α , 更新 $\bar{Y}_k^q = \alpha \bar{Y}_k^{q-1} + (1 - \alpha) \bar{Y}_k^{q-1}$;

q. 4: 发送 \bar{Y}_k^q , 接收 $\bar{Y}_i^q (\forall i \neq k)$;

q. 5: if $q > q_{\max}$ then break;

q. 6: $q++$

while $\|\bar{Y}_k^q - \bar{Y}_k^{q-1}\| > \epsilon, \forall k$ (未达成共识);

应用最优控制序列 \bar{U}_k^q 中的首项元素作为控制输入。

3 仿真结果分析

3.1 仿真工况

相较于传统独立控制的汽车主动安全系统,差动制动与四轮主动转向的集成控制在作曲线行驶时可以很大程度地减小车辆的质心侧偏角,使车身与行驶轨迹方向基本保持一致,所以这种控制方法更适用于大曲率转弯道路、中高速下的低附着路面等工况^[19]。因此本文分别在高附着与低附着的大曲率转弯道路上,通过S-turn和U-turn工况,验证本文所设计的基于多智能体模型预测控制(AMPC)的底盘稳定性集成控制器的有效性。

所采用的S-turn和U-turn工况如图4所示^[20],使用Simulink与CarSim软件进行底盘集成控制的联合仿真。采用车型为CarSim中的E级厢式轿车。对于E级厢式轿车一般不考虑其在对开路面或非结构化道路上的行驶工况,因此本文所采用的验证工况均为确定路面附着系数。高附着和低附着路面的附着系数分别设为0.9和0.3,采用车型的具体参数如表1所示。试验设计如下。

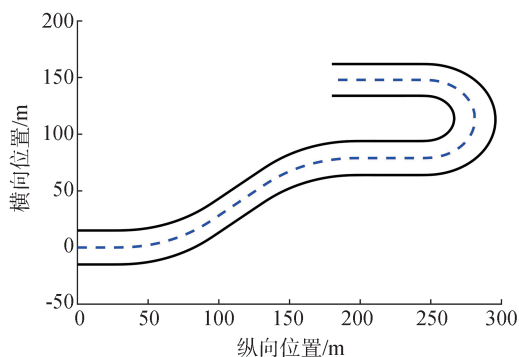


图4 仿真试验工况轨迹

表1 车辆参数

车辆参数	数值
整车质量/kg	1 650
质心到前轴距离/m	1.4
质心到后轴距离/m	1.65
绕Z轴转动惯量/(kg·m ²)	3 234
左右轮距/m	1.48
车轮半径/m	0.353
前轮轮胎侧偏刚度/(N·rad ⁻¹)	43 160
后轮轮胎侧偏刚度/(N·rad ⁻¹)	29 210

在上述工况下对比基于多智能体MPC的AFS、ARS和差动制动集成控制方法与基于独立MPC控

制的AFS、ARS和差动制动控制简单叠加的方法,两者行驶稳定性指标,验证本文所提出的多智能体MPC车辆稳定性控制器。独立MPC控制的预测模型、优化目标函数、约束条件与多智能体MPC相同,区别在于不考虑子系统的贡献度对其余子系统的干扰,只做简单叠加。

3.2 高附着路面仿真结果对比

图5和图6分别为多智能体MPC控制与独立MPC控制在高附着路面下所求解出的制动力矩。可以看出,在进行U-turn转向时,由于侧向力增加,AMPC的前、后轮主动转向智能的贡献度序列 \bar{Y}_{FSTR} 和 \bar{Y}_{RSTR} 随之增大,因此对差动制动智能体的干扰增加,所求解的差动制动力矩相较于独立控制的MPC要更大。

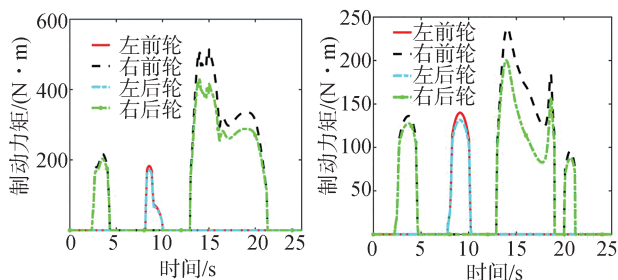


图5 高附着AMPC制动力矩 图6 高附着MPC制动力矩

两种控制算法的行车轨迹和驾驶员转向盘输入如图7和图8所示,黑色虚线为道路中心线,AMPC相较于MPC可以在S-turn工况下将车辆质心与道路中心线最大距离减小0.04m,在U-turn工况下减小1.95m(表2)。其车速对比如图9所示,基于AMPC控制的车辆在过U型弯时由于所输入的制动力矩较大,车速会率先降低,以改善操纵稳定性。

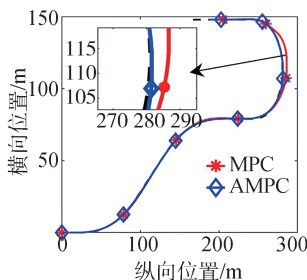


图7 高附着行车轨迹

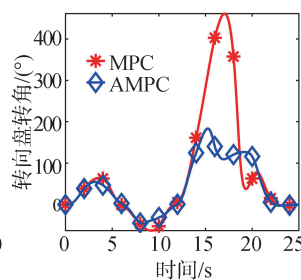


图8 高附着转向盘转角

侧向车速、质心侧偏角、横摆角速度以及前、后轮侧偏角对比如图10~图14所示。AMPC算法相较于独立MPC,可将进入U型弯时的侧向车速从

表2 高附着下车辆质心与道路中心线最大距离

S-turn		U-turn	
AMPC	0.34 m	AMPC	0.82 m
MPC	0.38 m	MPC	2.77 m

0.50 减小到 0.08 m/s, 减小 84%; 质心侧偏角从 0.029 减小到 0.008 rad, 减小 72.4%; 前轮侧偏角峰值由 0.48 减小到 0.15 rad, 减小 68.8%, 横摆稳定性显著提升。

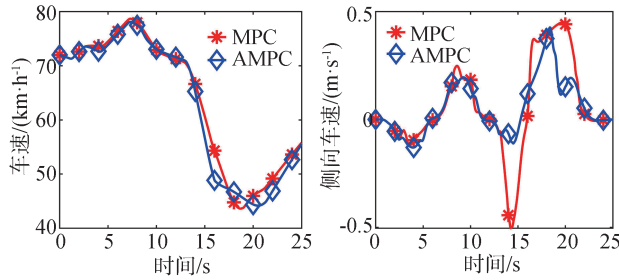


图9 高附着车速

图10 高附着侧向车速

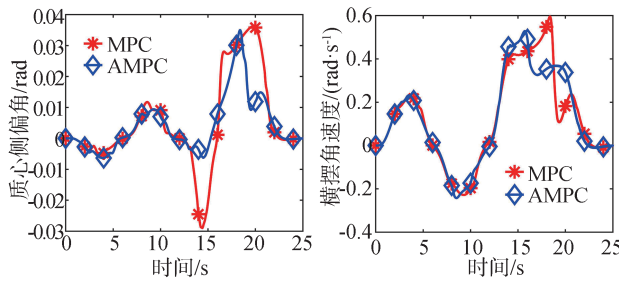


图11 高附着质心侧偏角

图12 高附着横摆角速度

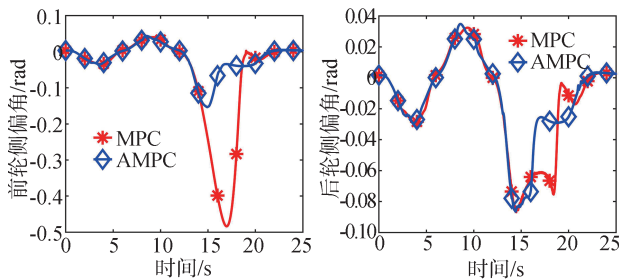


图13 高附着前轮侧偏角

图14 高附着后轮侧偏角

3.3 低附着路面仿真结果对比

图 15 和图 16 分别为多智能体 MPC 控制与独立 MPC 控制在低附着路面下, 所求解出的制动力矩。与高附着路面类似, 在进行 U-turn 转向时, AMPC 所求解的差动制动力矩要更大。

两种控制算法在低路面附着的行车轨迹和驾驶

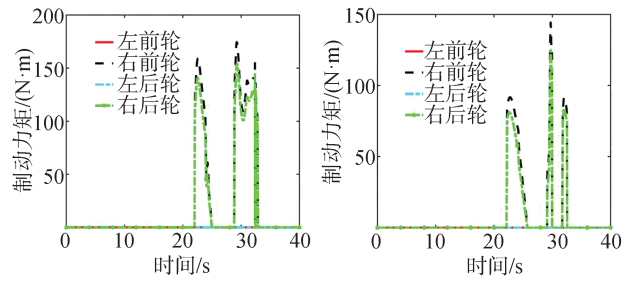


图15 低附着AMPC制动力矩

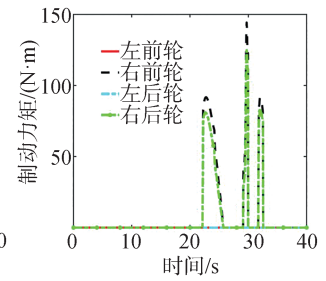


图16 低附着MPC制动力矩

员转向盘输入如图 17 和图 18 所示, 黑色虚线为道路中心线, AMPC 相较于 MPC 可以在 U-turn 工况下车辆质心与道路中心线最距离减小 0.61 m (表 3)。其车速对比如图 19 所示。

表3 低附着下车辆质心与道路中心线最大距离

S-turn		U-turn	
AMPC	0.21 m	AMPC	0.64 m
MPC	0.21 m	MPC	1.25 m

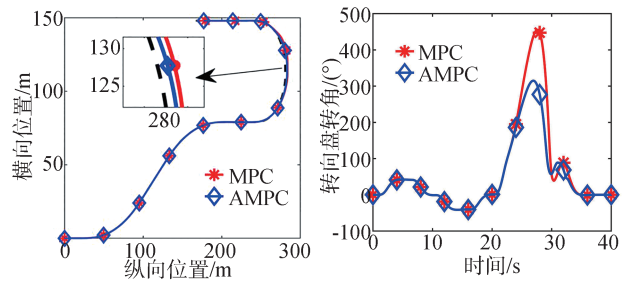


图17 低附着行车轨迹

图18 低附着转向盘转角

侧向车速、质心侧偏角、横摆角速度以及前、后轮侧偏角对比如图 20~图 24 所示。AMPC 算法相较于独立 MPC, 可将通过 U 型弯时的侧向车速从 0.40 减小到 0.26 m/s, 减小 35%; 质心侧偏角从 0.046 减小到 0.028 rad, 减小 47.8%; 前轮侧偏角峰值由 0.47 减小到 0.25 rad, 减小 46.8%, 侧向稳定性在低附着路面上也有明显提升。

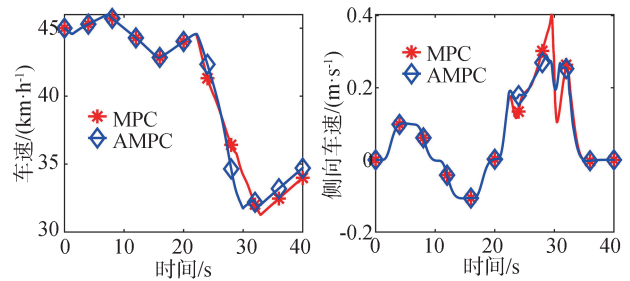


图19 低附着车速

图20 低附着侧向车速

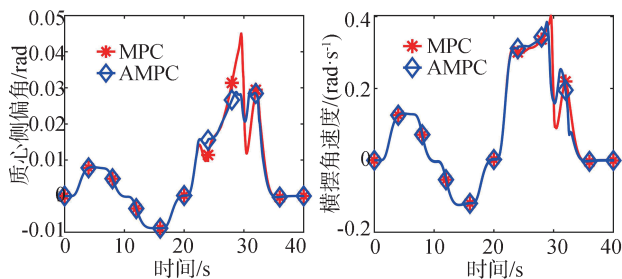


图21 低附着质心侧偏角

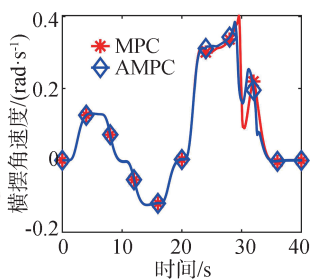


图22 低附着横摆角速度

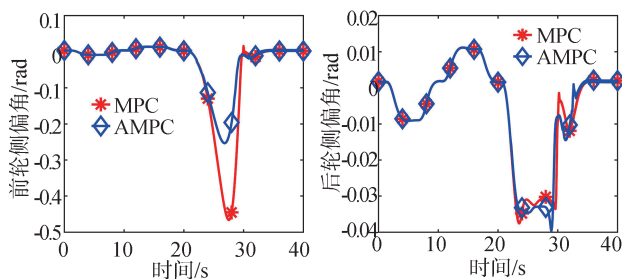


图23 低附着前轮侧偏角

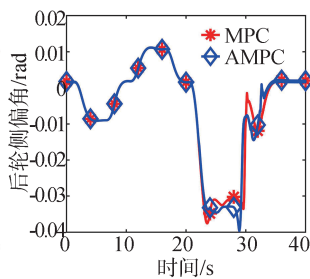


图24 低附着后轮侧偏角

4 结论

(1) 本文提出了一种基于多智能体MPC的底盘稳定性控制方法,集成了前、后轮主动转向与差动制动功能。首先根据车辆2自由度动力学模型建立了多智能体的预测模型与贡献度模型;其次依据MPC优化求解的方法对多智能体进行求解;最后设计了基于贡献度模型迭代的多智能体间协同优化求解方法。

(2) 研究表明:本文所设计的基于多智能体MPC的底盘稳定性控制相较于独立MPC控制的前、后轮主动转向和差动制动简单叠加的方法,在高附着的S-turn加U-turn工况下,可将峰值侧向车速减小84%,将峰值质心侧偏角减小72.4%;在低附着路面上,将峰值侧向车速和质心侧偏角分别减少35%和47.8%。

(3) 在实际应用中,可进一步考虑引入车辆的侧倾自由度,加入悬架智能体,从而减小商用车的侧翻风险。同时,通过实车试验在极限工况下验证所提出控制方法的实时性。

参考文献

[1] DALBONI M, et al. Nonlinear model predictive control for integrated energy efficient torque-vectoring and anti-roll moment dis-

tribution[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2021, 26(3): 1212-1224.

[2] ZHU X, ZHANG H, WANG J, et al. Robust lateral motion control of electric ground vehicles with random network-induced delays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(11): 4985-4995.

[3] MOUSAVINEJAD E, HAN Q L, YANG F, et al. Integrated control of ground vehicles dynamics via advanced terminal sliding mode control[J]. Vehicle System Dynamics, 2017, 55:268-294.

[4] JING H, WANG R, WANG J, et al. Robust H_∞ dynamic output-feedback control for four-wheel independently actuated electric ground vehicles through integrated AFS/DYC[J]. Journal of the Franklin Institute, 2018, 355(18): 9321-9350.

[5] CHENG S, LI L, LIU C Z, et al. Robust LMI-based H_∞ -infinite controller integrating AFS and DYC of autonomous vehicles with parametric uncertainties [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2020, 51(11): 6901-6910.

[6] 梁晋豪. 分布式驱动电动汽车侧向稳定控制关键技术与转矩优化策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.

LIANG J H. Research on key technology and torque optimization strategy for lateral stability control of distributed-drive electric vehicles[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.

[7] AHMADIAN N, KHOSRAVI A, SARHADI P. Driver assistant yaw stability control via integration of AFS and DYC[J]. Vehicle System Dynamics, 2022, 60(5): 1742-1762.

[8] MASHADI B, MAJIDI M. Integrated AFS/DYC sliding mode controller for a hybrid electric vehicle[J]. International Journal of Vehicle Design, 2011, 56(4): 246-269.

[9] KHELLADI F, ORJUELA R, BASSET M. Coordinated AFS and DYC for autonomous vehicle steerability and stability enhancement[J]. IFAC-Papers Online, 2020, 53(2): 14248-14253.

[10] SHUAI Z, ZHANG H, WANG J, et al. Combined AFS and DYC control of four-wheel-independent-drive electric vehicles over CAN network with time-varying delays[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014, 63(2): 591-602.

[11] BEAL C E, GERDES J C. Model predictive control for vehicle stabilization at the limits of handling[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013, 21(4): 1258-1269.

[12] FALCONE P, BORRELLI F, ASGARI J, et al. Predictive active steering control for autonomous vehicle systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2007, 15(3): 566-580.

[13] WANG J, LONGORIA R G. Coordinated and reconfigurable vehicle dynamics control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(3): 723-732.

[14] ZHAO H, CHEN W, ZHAO J, et al. Modular integrated longitudinal, lateral, and vertical vehicle stability control for distributed electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(2): 1327-1338.

[15] ATAEI M, SOO Jeon, et al. Development of a novel general reconfigurable vehicle dynamics model [J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 156, No. 104147.

(下转第507页)

- [8] DENG T, TANG P, SU Z, et al. Systematic design and optimization method of multimode hybrid electric vehicles based on equivalent tree graph [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2020, 35(12): 13465–13474.
- [9] 秦兆博. 混合动力履带车辆机电复合传动系统优化设计方法 [D]. 北京: 清华大学, 2018.
QIN Z. Optimal design methodology of the electro-mechanical transmission system for hybrid tracked vehicles [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [10] WEI C, HOFMAN T, CAARLS E I, et al. Optimal control of an integrated energy and thermal management system for electrified powertrains [C]. *IEEE 2019 American Control Conference* (ACC), 2019: 322–327.
- [11] 王泽兴, 何洪文, 彭剑坤, 等. 并联混合动力系统构型筛选及参数优化设计 [J]. *汽车工程*, 2024, 46(3): 464–475.
WANG Z, HE H, PENG J, et al. Configuration screening and parameter optimization design for parallel hybrid power systems [J]. *Automotive Engineering*, 2024, 46(3): 464–475.
- [12] 王军年, 张春林, 赵圆梦, 等. 轮毂电机两挡变速器协同无动力中断换挡控制 [J]. *汽车工程*, 2023, 45(10): 1885–1896.
WANG J, ZHANG C, ZHAO Y, et al. Coordinated shift control of hub-motor two-speed transmission without power interruption [J]. *Automotive Engineering*, 2023, 45(10): 1885–1896.

(上接第488页)

- [16] TANG C, ATAEI M, KHAJEPOUR A. A reconfigurable integrated control for narrow tilting vehicles [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(1): 234–244.
- [17] NEGENBORN R R, MAESTRE J M. Distributed model predictive control: an overview and roadmap of future research opportunities [J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2014, 34(4): 87–97.
- [18] TANG C, KHAJEPOUR A. Agent-based model predictive controller (AMPC) for flexible and efficient vehicular control [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2021, 70(10): 9877–9885.
- [19] 赵轩, 王姝, 马建, 等. 分布式驱动电动汽车底盘集成控制技术综述 [J]. *中国公路学报*, 2023, 36(4): 221–248.
ZHAO X, WANG S, MA J, et al. A review of integrated control technologies for distributed drive electric vehicle chassis [J]. *Chinese Journal of Highway*, 2023, 36(4): 221–248.
- [20] 张放. 极限工况下自动驾驶车辆的轨迹规划与运动控制 [D]. 北京: 清华大学, 2018.
ZHANG F. Trajectory planning and motion control of self-driving vehicles under extreme conditions [D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.

(上接第518页)

- [20] DRIDI I, HAMZA, BEN Y N. A new approach to controlling an active suspension system based on reinforcement learning [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2023, 15(6).
- [21] ZHANG M H, JING X J. Energy-saving robust saturated control for active suspension systems via employing beneficial nonlinearity and disturbance [J]. *IEEE Transaction on Cybernetics*, 2022, 52(10): 10089–10100.
- [22] AZMI R, MIRZAEI M, HABIBZADEH-SHARIF A. A novel optimal control strategy for regenerative active suspension system to enhance energy harvesting [J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 291.
- [23] FU Z J, DONG X Y. H^∞ optimal control of vehicle active suspension systems in two time scales [J]. *Automatika*, 2021, 62(2): 284292.