

面向全矢量线控车辆极限运动的分层式协同控制

郑凯¹, 吴晓东¹, 应东平², 苏建业², 许敏¹

(1. 上海交通大学 智能汽车研究所, 上海 200240;
2. 联合汽车电子有限公司, 上海 201206)

摘要: 装配四轮分布式驱动-转向 (4WID-4WIS) 底盘的全矢量线控车辆具备多可控自由度、高速稳定性强的特点, 是极限工况稳定裕度和安全性较高的理想车型。为了解决全矢量线控车辆在极限工况下纵横向控制冲突危害行车安全的问题, 提出一种基于模型预测控制 (MPC) 的分层式车辆纵向和横向运动协同控制方法。建立基于单轨模型的期望运动状态识别方法, 设计模型预测控制器转换动力学目标, 采用泰勒展开和前向欧拉方法对预测模型进行线性离散化处理; 设计基于负荷率的轮胎力优化分配方法, 利用反正切轮胎逆模型求解控制执行量。仿真结果表明, 协同控制方法能显著提高车辆在不同路面下的极限运动稳定性, 更精准地跟踪期望运动状态, 扩大稳定裕度, 保障行车安全。

关键词: 全矢量线控车辆; 极限工况; 分层式协同控制; 模型预测控制; 负荷率

中图分类号: U461.6 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2024.02.05

Hierarchical Coordinated Control for Extreme Motion of Full-Vector Wire-Controlled Vehicles

ZHENG Kai¹, WU Xiaodong¹, YING Dongping², SU Jianye², XU Min¹

(1. Institute of Intelligent Vehicle, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2. United Automotive Electronic Systems Co., Ltd., Shanghai 201206, China)

Abstract: The four-wheel independent drive-steering (4WID-4WIS) chassis architecture for full-vector wire-controlled vehicles features multiple controllable degrees of freedom and superior stability at high speeds, which is an ideal solution to improve stability margin under extreme conditions and ensure driving safety. To address the issue of driving safety concerns arising from control conflicts under such conditions, a hierarchical coordinated control method for both longitudinal and lateral vehicle motions was proposed based on model predictive control (MPC). An expected motion state recognition method based on the single-track model was established, and the model prediction controller was designed to transform the dynamic target. The prediction model was linearized and discretized using Taylor expansion and the forward Euler method. Then the optimal tire force distribution method based on load rate was designed and the arctangent tire inverse model was used to solve the control execution values. The simulation results show that the proposed coordinated control method significantly improves the vehicle's extreme motion stability under different road conditions. It achieves more accurate tracking of the expected motion state, expands the stability margin, and

收稿日期: 2023-02-27 改稿日期: 2023-04-01

参考文献引用格式:

郑凯, 吴晓东, 应东平, 等. 面向全矢量线控车辆极限运动的分层式协同控制[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(2): 205-216.

ZHENG Kai, WU Xiaodong, YING Dongping, et al. Hierarchical Coordinated Control for Extreme Motion of Full-Vector Wire-Controlled Vehicles[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2024, 14(2): 205-216. (in Chinese)



ensures driving safety.

Keywords: full-vector wire-controlled vehicle; extreme conditions; hierarchical coordinated control; model predictive control; load rate

随着车辆电子控制技术的发展,越来越多的驾驶辅助系统例如防抱死制动系统 (ABS)、直接横摆转矩控制 (DYC)、主动前轮转向 (AFS) 等应用于车辆运动改善,通过优化调控轮胎的纵向和横向力来提高车辆运动的安全性、稳定性和舒适性。然而车辆动力学是一个非线性多耦合的复杂系统,各个辅助系统对于轮胎纵向或横向单方向力的调控和改进不能保证车辆的全局运动最优,潜在的控制冗余和冲突不利于车辆处于极限运动状态时地面附着的最优利用,使车辆行驶存在安全隐患。因此,从纵向与横向全局优化角度出发的驱动-转向协同运动控制是当前的研究热点。

DAI Yifan 等^[1]提出了一种面向四轮独立驱动车辆的轮胎纵横力优化分配方法,考虑拓宽稳定裕度和满足转矩指令等控制目标,提高车辆操纵稳定性的同时维持电机输出转矩稳定,其对于车辆合力的考虑依赖于踏板标定和经验模型,未对高速极限行驶性能进行验证。张紫薇等^[2]在纵横向鲁棒控制器组合控制的基础上,考虑了轮胎侧偏刚度和道路曲率等车辆状态和路面参数变化对控制目标的影响,车辆运动控制更能适应各种极限工况,但缺少了对极限裕度的验证说明。JALALI 等^[3]基于预测控制算法构建了主动前轮转向与差速制动器协同稳定性控制架构,在车辆非稳态状态时协同干预,然而其稳态边界判定方法对于极限运动工况适应性缺乏验证。为改善基于模型的纵横向子系统协同控制鲁棒性和适用性不强的缺陷, FU Zhijun 等^[4]提出了一种基于近似动态规划理论的无模型最优跟踪控制方法,利用递归神经网络辨识器和批评神经网络辨识未知动态和最优值函数,求解 HJB 方程得到自适应最优控制律,但没有考虑车辆极限运动状态时侧偏特性等参数辨识修正和稳定裕度提升性能。

纵横向协同控制对车辆底盘的可控自由度以及执行实现精度提出了更高的要求,具备四轮分布式驱动-转向 (4WID-4WIS) 底盘架构的全矢量^[5]线控车辆是协同控制算法的重要载体,其驱动-转向一体化集成电动轮结构涵盖了车辆最大独立输入集合,能实现所有车轮纵横向作用力独立可控。具体来说,其采用 4 个轮毂电机作为纵向驱动源,与传统发动机驱动相比,轮毂电机分布式纵向控制具有传动效率高、执行精度好、控制响应平稳的特点,同时纵向差动可以弥补横摆跟踪偏差。四轮独立转向的实现依赖于集成在各车轮之上由电机驱动的转向模块,其摆脱了传统转向机械结构限制,丰富了车辆运动控制的可控自由度,是多目标优化控制的重要载体^[6]。

在面向全矢量线控底盘车辆的纵横向协同控制研究中,主要有两类思路:第 1 类是通过经验/半经验方法划分纵横向子系统控制权重参数^[7-9],其依赖于神经网络预测模型^[7]、模糊控制理论^[8]或经验边界条件^[9],虽对某些场景下车辆运动调控具有较好的效果,但面对复杂车辆运动工况的鲁棒性能不佳,在极限行驶工况下难以实现附着最优利用和轮胎力最优分配,影响行车安全;第 2 类是基于复杂运动模型^[10-11],从轮胎力优化分配角度出发的协同优化研究,控制稳定性和工况鲁棒性依赖于模型精细度和参数辨识精度,而过于复杂的模型带来了实时性挑战,存在控制精度与实时性的矛盾。鉴于此,本文以全矢量线控车辆为研究对象,为保障车辆处于极限工况时具有良好的操纵稳定性以及控制算法鲁棒性,从纵横向轮胎力多目标优化分配的思路出发,开展协同运动控制研究。考虑到车辆动力学模型以及特性参数修正轮胎模型的复杂耦合性,为协调控制精度和实时性矛盾,基于模型预测控制 (MPC) 算法建立了分层式纵-横向协同运动控制架

构，逐层分解运动控制目标以减轻计算负担，保证车辆在迅速准确跟随驾驶员期望运动状态的同时，获得最大运动稳定裕度，提升极限工况行驶性能。

1 车辆动力学模型

1.1 全矢量线控车辆动力学与轮胎模型

全矢量线控车辆具备四轮分布式驱动-转向(4WID-4WIS)底盘动力学分布，纵横向的动力学耦合关系是设计的核心。本文建模过程中忽略车辆的俯仰、侧倾和垂向运动，侧重于纵横向动力学耦合关系，建立纵向、横向和横摆动力学模型^[12]，如图1所示。

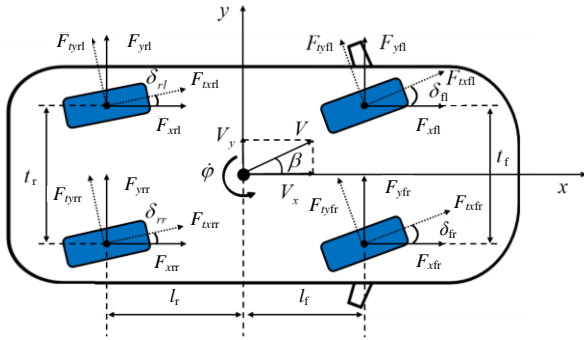


图1 车辆纵横向与横摆动力学模型

车辆纵向运动方程为：

$$F_x = m(\dot{V}_x - V_y\dot{\phi}) = \sum_{i=f}^{r} \sum_{j=l}^{r} F_{xij} \quad (1)$$

车辆横向运动方程为：

$$F_y = m(\dot{V}_y + V_x\dot{\phi}) = \sum_{i=f}^{r} \sum_{j=l}^{r} F_{yij} \quad (2)$$

车辆横摆运动方程为：

$$M_z = I_z\ddot{\phi} = l_f(F_{yfl} + F_{yfr}) - l_r(F_{yrl} + F_{yrr}) + 0.5t_f(-F_{xfl} + F_{xfr}) + 0.5t_r(-F_{xrl} + F_{xrr}) \quad (3)$$

式中： F_x 、 F_y 、 M_z 分别为车身坐标系下车辆纵向合力、横向合力、横摆力矩； m 为车辆质量； I_z 为横摆转动惯量； l_f 和 l_r 分别为质心到前后轴的距离； t_f 和 t_r 分别为前后轴轮距； V_x 和 V_y 分别为质心纵向与横向速度； $\dot{\phi}$ 和 $\ddot{\phi}$ 分别为横摆角速度和横摆角加速度； F_{xij} 和 F_{yij} ($ij=fl, fr, rl, rr$) 分别为车辆左前轮、右前轮、左后轮、右后轮在车身坐标系下的轮胎纵向力和横向力， F_{xij} 和 F_{yij} 与轮胎坐标系下轮胎

力 F_{txij} 和 F_{tyij} 的关系如式(4)所示。

$$\begin{bmatrix} F_{txij} \\ F_{tyij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_{ij} & -\sin \delta_{ij} \\ \sin \delta_{ij} & \cos \delta_{ij} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{xij} \\ F_{yij} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： δ_{ij} 为各轮转向角。

考虑纵横向耦合关系影响的轮胎模型是获得动力学控制目标的关键。利用高精度魔术轮胎公式^[13]作为纵横向滑移特性和侧偏特性参数辨识参考，其描述如式(5)所示。

$$F = D \sin(C \arctan(B(X + S_h) - E(B(X + S_h) - \arctan B(X + S_h)))) + S_v \quad (5)$$

式中： F 为轮胎坐标系纵向力 F_{tx} 或横向力 F_{ty} ； X 为滑移率 λ 或侧偏角 α ； B 、 C 、 D 、 E 、 S_h 、 S_v 均为魔术公式系数。

滑移特性和侧偏特性受到载荷偏移影响的同时，路面附着系数对两者特性曲线的幅值分布也有影响，因此，本文对魔术公式系数进行修正^[14]。

$$\begin{cases} *B = (2 - \mu)B, \\ *C = (1.25 - 0.25\mu)C, \\ *D = \mu D. \end{cases} \quad (6)$$

通常轮胎处于滑移与侧偏联合工况，滑移率和侧偏角对特性刚度以及纵横向力的分布均有影响^[15]，考虑滑移与侧偏耦合影响的轮胎纵横向力 F_{txp} 和 F_{tvp} 表述为：

$$\begin{aligned} F_{txp} &= \frac{\lambda}{\sqrt{\lambda^2 + \tan^2 \alpha}} F_{tx}, \\ F_{tvp} &= \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\lambda^2 + \tan^2 \alpha}} F_{ty}. \end{aligned} \quad (7)$$

1.2 运动学状态识别模型

驾驶员对车辆的控制输入体现了整车运动学状态期望，在纵横向目标状态上主要包括纵向车速 V_x 、横向车速 V_y 以及横摆角速度 $\dot{\phi}$ 。本文基于单轨模型解析识别方向盘转角输入下的横向运动意图，能准确地描述横向稳态运动状态，如图2所示。

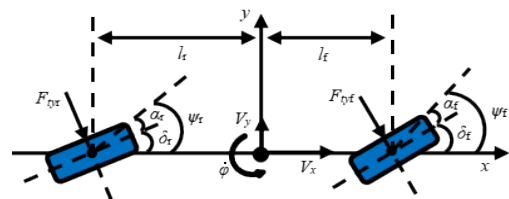


图2 单轨模型描述

忽略纵向车速变化、模型瞬态变量以及后轮小转角输入, 得到方向盘转角输入下横摆角速度和质心侧偏角的稳态期望值, 如式 (8) 所示。

$$\begin{aligned}\dot{\varphi}_d &= \frac{V_x / (l_f + l_r)}{1 + K_g V_x^2} \cdot \frac{\delta}{r_{steer}}, \\ \beta_d &= \frac{-C_{af}(l_r(l_f + l_r)C_{ar} + l_f m V_x^2)}{(l_f + l_r)^2 C_{af} C_{ar} + m V_x^2 (l_f C_{af} + l_r C_{ar})} \cdot \frac{\delta}{r_{steer}}.\end{aligned}\quad (8)$$

式中: $\dot{\varphi}_d$ 和 β_d 分别为横摆角速度和质心侧偏角的稳态期望值; C_{af} 和 C_{ar} 分别为前后轴侧偏刚度; δ 为方向盘转角输入; r_{steer} 为转向传动比; K_g 为转向不足度, 由式 (9) 表示。

$$K_g = \frac{m}{(l_f + l_r)^2} \left(\frac{l_f}{C_{ar}} - \frac{l_r}{C_{af}} \right).\quad (9)$$

单轨模型中, 可将期望横向车速 V_{yd} 看作质心纵向车速关于质心侧偏角的分量。期望纵向车速 V_{xd} 的求解依赖于期望纵向加速度 a_{xd} , 其与驾驶员油门和制动踏板输入相关, 本文不对加速度与踏板开度的关系进行深入研究, 假设期望纵向加速度为被控输入。综上所述, 由驾驶员方向盘转角和期望纵向加速度可以得到运动识别参考模型, 描述如式 (10) 所示。

$$\begin{cases} V_{xd} = V_x + \int_0^t a_{xd}(\Gamma) d\Gamma, \\ V_{yd} = V_x \tan \beta_d, \\ \dot{\varphi}_d = \frac{V_x / (l_f + l_r)}{1 + K_g V_x^2} \cdot \frac{\delta}{r_{steer}}.\end{cases}\quad (10)$$

2 全矢量底盘分层式协同控制架构

考虑到被控系统的非线性多耦合特性, 本文设计了一种面向全矢量线控底盘车辆的分层式纵-横向轮胎力优化协同控制架构。

控制系统框图如图 3 所示, 上层模型预测 (MPC) 控制器根据驾驶员输入和运动识别参考模型识别期望车辆运动学状态, 依据线性离散化动力学状态方程滚动预测系统状态并将运动学目标转换为动力学控制目标。中层轮胎力优化分配控制器根据轮胎负荷率优化目标以及约束判据, 生成各轮轮胎力执行控制目标。下层执行控制器利用轮胎逆模型转化执行控制目标, 结合纵横向执行器工作执行

约束, 获得各车轮纵横向的转矩和转角等广义控制量。逐层分解转换控制目标, 综合协调车辆纵向运动与横向运动, 获得基于驾驶员期望运动状态的车辆最优运动控制。

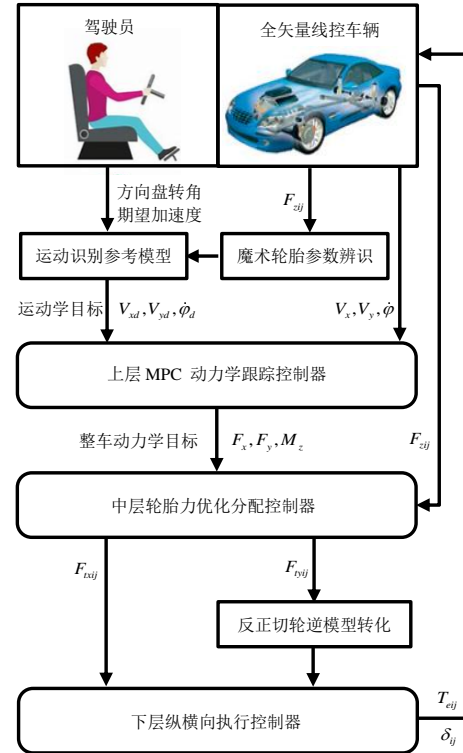


图 3 协同控制系统框图

2.1 基于离散线性预测模型的 MPC 控制器

模型预测 (MPC) 控制器以精确预测模型为基础^[16], 在整个预测时域内完成状态量滚动预测和控制量闭环求解。本文基于式 (1) ~ (3) 的合力和合转矩动力学方程构建预测模型, 实现运动学期望目标 (期望纵向车速 V_{xd} 、期望横向车速 V_{yd} 、期望横摆角速度 $\dot{\varphi}_d$) 到动力学目标 (车身坐标系下的纵向合力 F_x 、横向合力 F_y 、横摆转矩 M_z) 转化, 非线性系统状态方程可以表述为:

$$\dot{x} = f(x, u).\quad (11)$$

式中: 系统状态变量 $x = [V_x, V_y, \dot{\varphi}]^T$; 系统控制变量 $u = [F_x, F_y, M_z]^T$ 。

为了后续预测模型设计, 对式 (11) 的系统状态方程进行前向欧拉离散化和泰勒公式展开线性化处理。基于前向欧拉方法, 利用初始 k 时刻的状态变量 $[V_{xk}, V_{yk}, \dot{\varphi}_k]^T$ 与控制变量 $[F_{xk}, F_{yk}, M_{zk}]^T$, $k + 1$ 时刻的系统状态描述为:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} \frac{1}{m} F_{xk} + V_{yk} \dot{\phi}_k \\ \frac{1}{m} F_{yk} - V_{xk} \dot{\phi}_k \\ \frac{M_{zk}}{I_z} \end{bmatrix} T + \begin{bmatrix} V_{xk} \\ V_{yk} \\ \dot{\phi}_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中： T 为离散时间常数。

忽略泰勒展开式的高阶多项式，得到离散化系统的雅各比矩阵：

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 1 & \dot{\phi}_k T & V_{yk} T \\ -\dot{\phi}_k T & 1 & -V_{xk} T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} \frac{T}{m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{T}{m} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{T}{I_z} \end{bmatrix} \quad (13)$$

假定预测时域长度为 N ，在预测时域内各时刻系统状态量由其前一时间状态量和控制量预测。得到基于初始 k 时刻展开的MPC控制器状态量预测模型表述为：

$$\begin{cases} x(k+1) = x(k) + \bar{A}(x(k) - x(k)) + \bar{B}(u(k) - u(k)), \\ x(k+2) = x(k+1) + \bar{A}(x(k+1) - x(k)) + \bar{B}(u(k+1) - u(k)), \\ x(k+3) = x(k+1) + \bar{A}(x(k+2) - x(k)) + \bar{B}(u(k+2) - u(k)), \\ \dots \\ x(k+N) = x(k+1) + \bar{A}(x(k+N-1) - x(k)) + \bar{B}(u(k+N-1) - u(k)). \end{cases} \quad (14)$$

车辆按照驾驶员的期望状态行驶是MPC控制的首要目标，在整个预测域内车辆实际运动状态与期望状态的误差应尽可能小^[17]，本文采用二次项式来惩罚与期望状态的偏差，如式(15)所示。

$$J_1 = \sum_{k=1}^{N+1} \|x(k) - x_d(k)\|_Q^2 \quad (15)$$

式中： $x_d(k) = [V_{xdk}, V_{ydk}, \dot{\phi}_{dk}]^T$ ，为 k 时刻驾驶员期望状态，依据驾驶员 k 时刻控制输入，由式(10)运动识别参考模型获得； Q 为 J_1 的权重系数， $Q = \text{diag}([Q_{V_x}, Q_{V_y}, Q_{\dot{\phi}}])$ ， Q_{V_x} 、 Q_{V_y} 、 $Q_{\dot{\phi}}$ 分别表示纵向车速、横向车速、横摆角速度跟踪期望状态差值的控制权重， diag 表示对角阵。

此外，动力学控制量拥有较大变化率时不利于车辆的操纵稳定性，对驾乘舒适性也有较恶劣影响，因此，引入式(16)所示的目标函数约束纵横向控制量变化。

$$J_2 = \sum_{k=1}^N \|\Delta u(k)\|_R^2 \quad (16)$$

式中： $\Delta u(k)$ 为 k 时刻控制量变化量； R 为 J_2 的权重系数， $R = \text{diag}([R_{F_x}, R_{F_y}, R_{M_z}])$ ， R_{F_x} 、 R_{F_y} 、 R_{M_z} 分别表示纵向合力、横向合力、横摆力矩变化量的控制权重。

本文从系统状态量预测模型等式约束和系统控制量幅值约束等方面限制优化目标求解，以最大值的形式对控制变量进行物理限制，MPC控制器的目标优化问题描述为：

$$\begin{aligned} \min J &= J_1 + J_2, \\ \text{s.t.} & \\ x(k+1|t) &= f(x(k|t), u(k|t)), \quad k \in [1, N+1], \\ F_{x\min} &\leq F_x \leq F_{x\max}, \\ F_{y\min} &\leq F_y \leq F_{y\max}, \\ M_{z\min} &\leq M_z \leq M_{z\max}. \end{aligned} \quad (17)$$

由于轮胎具有显著的快速动力学响应，所以采用短的离散时间常数 T 以满足控制需求。另一方面，系统使用复杂模型进行状态量与控制量的预测求解，较短的预测时域 N 能有效节省计算时间，提升算法效率。相比于纵向速度跟踪偏差，横向速度和横摆角速度跟踪偏差会对车辆运动稳定性产生较大影响，因此，采用较大的 Q_{V_y} 、 $Q_{\dot{\phi}}$ 使MPC控制器所求控制量优先保证车辆稳定性。

2.2 考虑轮胎负荷率的多约束轮胎力优化分配

轮胎与地面的相互作用是车辆动力学调控关键，以MPC控制器解算的整车动力学目标为基础，考虑各个轮胎力的附着极限限制，将纵向合力 F_x 、横向合力 F_y 以及横摆转矩 M_z 分解为各个车轮轮胎坐标系下的纵横向轮胎力，获得各轮轮胎力的执行控制目标。

在一定路面附着系数 μ_{ij} 和垂直载荷 $F_{z_{ij}}$ 下，轮胎纵向和横向力满足以下条件：

$$\sqrt{F_{txij}^2 + F_{tyij}^2} \leq \mu_{ij} F_{zij} \quad (18)$$

为了对地面附着的利用情况有较好表征, 本文引入轮胎负荷率 τ_{ij} 这一变量描述, 其表达式为:

$$\tau_{ij} = \frac{\sqrt{F_{txij}^2 + F_{tyij}^2}}{\mu_{ij} F_{zij}} \quad (19)$$

轮胎负荷率 τ_{ij} 的数值越小且四轮负荷率分布越均匀, 表征车辆整体稳定裕度和地面附着利用情况越好, 是车辆行驶稳定的保障。鉴于此, 本文在分解整车动力学目标时综合考虑了各轮轮胎负荷率的平均值 (E) 与方差 (Var), 优化分配控制器的优化目标函数描述为:

$$\min J = \text{Var}(\tau_{ij}) + wE(\tau_{ij}) \quad (20)$$

式中: w 为负荷率均值的权重系数。

优化分配的纵向与横向力需满足实际轮胎力执行条件, 本文主要从动力学方程约束、路面附着约束以及执行器执行特性约束三方面限制轮胎力优化分配结果。

动力学约束是保障轮胎力优化分配结果满足上层 MPC 控制器动力学目标的首要条件, 各轮轮胎坐标系下的纵向力 F_{txij} 和横向力 F_{tyij} 需满足基本合力与合力矩方程约束, 其描述如式 (1) ~ (4) 所示。

式 (18) 是路面附着约束的不等式表述, 但不等式约束的引入将占用轮胎力优化分配的求解时间, 是计算资源的极大消耗。因此, 本文采用多边形化简方法对附着圆约束进行线性化处理, 将原附着边界缩短至 0.9 倍取得安全附着圆后, 利用外接八边形得到原约束的线性化描述, 如图 4 所示。

线性化路面附着约束满足八边形边界条件, 其描述如式 (21) 所示。

$$\begin{aligned} -0.9\mu_{ij}F_{zij} &\leq F_{txij} \leq 0.9\mu_{ij}F_{zij}, \\ -0.9\mu_{ij}F_{zij} &\leq F_{tyij} \leq 0.9\mu_{ij}F_{zij}, \\ -\sqrt{2} \cdot 0.9\mu_{ij}F_{zij} &\leq F_{txij} + F_{tyij} \leq \sqrt{2} \cdot 0.9\mu_{ij}F_{zij}, \\ -\sqrt{2} \cdot 0.9\mu_{ij}F_{zij} &\leq -F_{txij} + F_{tyij} \leq \sqrt{2} \cdot 0.9\mu_{ij}F_{zij}. \end{aligned} \quad (21)$$

轮胎力分配需要考虑执行器特性参数, 轮胎纵向力幅值及变化率受电机输出转矩和制动执行的限

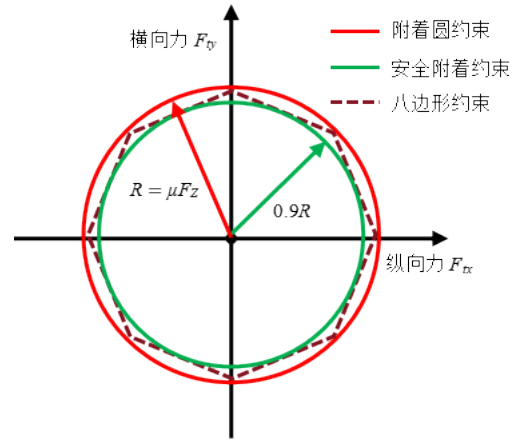


图 4 附着圆约束的多边形化简线性化

制, 横向力也被轮胎最大侧偏角等参数所局限, 所以附加执行特性约束如下:

$$\begin{aligned} -T_{ij, \max} &\leq F_{txij} \cdot r_{ij} \leq T_{ij, \max}, \\ -k_{xij, \max} &\leq \frac{\Delta F_{txij} \cdot r_{ij}}{\Delta t} \leq k_{xij, \max}, \\ -F_{tyij, \max} &\leq F_{tyij} \leq F_{tyij, \max}, \\ -k_{yij, \max} &\leq \frac{\Delta F_{tyij}}{\Delta t} \leq k_{yij, \max}. \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $T_{ij, \max}$ 和 $k_{xij, \max}$ 分别为电机执行约束下各轮最大纵向转矩及其最大变化率; Δt 为控制步长; $F_{tyij, \max}$ 和 $k_{yij, \max}$ 分别为各轮最大横向力及其最大变化率; ΔF_{txij} 和 ΔF_{tyij} 分别为纵横向轮胎力变化量。

综上所述, 式 (1) ~ (4) 与式 (20) ~ (22) 构成轮胎力多目标优化分配问题描述, 通过非线性规划求解, 得到纵横向轮胎力执行控制目标 F_{txij} 和 F_{tyij} 。

2.3 基于轮胎逆模型转化的执行控制

轮胎力执行控制目标 F_{txij} 和 F_{tyij} 的实现依托于纵横向执行器的执行控制。本文中纵向轮胎力 F_{txij} 的广义实现为轮胎纵向转矩; 横向轮胎力 F_{tyij} 的广义实现依赖于轮胎逆模型的转化。基于转矩平衡方程, 轮胎纵向执行控制量为:

$$T_{eij} = J_{ij} \dot{w}_{ij} + F_{txij} r_{ij} \quad (23)$$

式中: T_{eij} 为纵向转矩; J_{ij} 为轮胎转动惯量; w_{ij} 为轮胎转速; r_{ij} 为滚动半径。

横向轮胎力控制目标 F_{tyij} 无法直接求解转向角数值, 需利用轮胎逆模型转化为侧偏角控制量 α_{ij} 。由于魔术公式逆模型求解繁琐, 本文选用反正切轮

胎模型^[18]作为转化参考模型，描述如式(24)所示。

$$\alpha_{ij} = -\frac{\mu_{ij}}{\varepsilon_{ij}} \tan\left(\frac{\varepsilon_{ij}}{\mu_{ij} C_{aj}} \frac{F_{yij}}{\sqrt{1 - (F_{xij}/\mu_{ij} F_{zij})^2}}\right) \quad (24)$$

式中： C_{aj} 为轮胎侧偏刚度；系数 ε_{ij} 表述为 $\varepsilon_{ij} = (C_{aj}\pi)/(pF_{zij})$ ； p 为垂向载荷系数，本文取 $p=2.9$ 。

为确保试验验证准确，在路面附着 $\mu = 0.8$ 和 $\mu = 0.3$ 条件下，垂向载荷 F_z 分别为1 000~5 000 N时，对反正切轮胎模型与魔术轮胎模型的拟合精度进行验证，其结果如图5~6所示。本文认为轮胎力处于非线性区域时车辆发生滑移失稳，线性区域和非线性区域的侧偏角临界点为车辆稳定极限边界，因此，只关注线性区域侧偏角辨识转化，忽略非线性失稳区域拟合结果，反正切模型较好地贴合了魔术公式特性曲线。

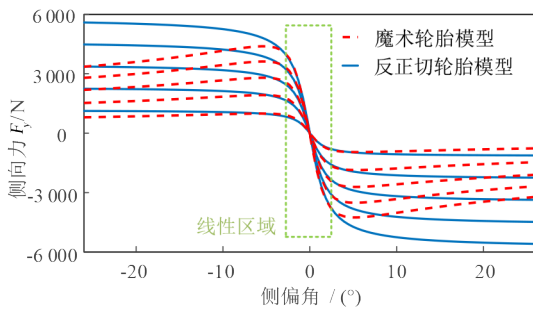


图5 路面附着系数0.8时反正切模型拟合结果

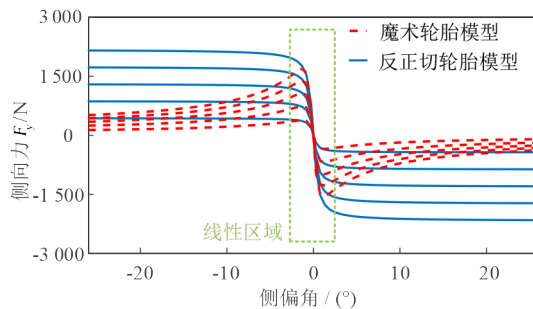


图6 路面附着系数0.3时反正切模型拟合结果

由1.2节中单轨模型，轮胎行驶方向与车身坐标系的夹角 ψ_{ij} 可表示为：

$$\begin{aligned} \psi_{fl, fr} &= \arctan\left(\frac{V_y + l_f \dot{\phi}}{V_x \mp \frac{l_f \dot{\phi}}{2}}\right), \\ \psi_{rl, rr} &= \arctan\left(\frac{V_y - l_r \dot{\phi}}{V_x \mp \frac{l_r \dot{\phi}}{2}}\right). \end{aligned} \quad (25)$$

由此，利用反正切轮胎逆模型转化后得到的 α_{ij} ，将各轮转向角 δ_{ij} 表示为：

$$\delta_{ij} = \psi_{ij} - \alpha_{ij} \quad (26)$$

3 算法验证

验证所提出的协同控制算法对车辆处于极限工况时稳定性能的提升，本文基于Simulink和CarSim搭建联合仿真平台，采用四轮分布式驱动和四轮独立转向的车辆底盘架构，车辆及控制算法主要参数分别见表1和表2。

表1 仿真车辆参数

参数	值
整车质量 m/kg	1 234
前轴轴距 t_f/mm	1 560
后轴轴距 t_r/mm	1 560
前轴轴距 l_f/mm	1 040
后轴轴距 l_r/mm	1 560
横摆惯量 $I_z/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	1 343.1
转向传动比 $r_{\text{steer}}/[(^\circ)/(^^\circ)]$	16
轮胎滚动半径 r/mm	374

表2 控制算法参数

参数	值
离散时间常数 T/s	0.02
预测时域 N	3
纵向车速跟踪权值 Q_{V_x}	10^7
横向车速跟踪权值 Q_{V_y}	10^9
横摆角速度跟踪权值 $Q_{\dot{\phi}}$	10^9
电机转矩最大值 T_{max}/Nm	1 250
四轮转角最大值 $\delta_{\text{max}}/(^^\circ)$	45

分别在附着系数0.8的高附路面和附着系数0.3的低附路面开展极限车速双移线轨迹跟随测试。以稳定边界条件划分的极限车速以及车辆极限车速行驶时的性能表现，来说明在常见干燥沥青路面（平

均附着系数 0.7~0.8) 和危险湿滑雨雪路面 (平均附着系数 0.2~0.4) 环境下, 协同控制算法在超车和避障等常见行驶工况时对于车辆极限稳定裕度的提升。双移线路径设置参考 ISO 3888-1:2018 国际标准, 如图 7 所示。

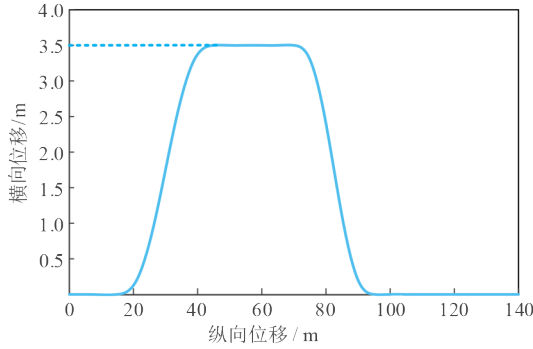


图 7 双移线路径

为表征所提出的协同控制算法的优势, 与传统预瞄控制算法和电子稳定控制 (ESC) 算法^[19] 进行对比, 算法描述见表 3。

表 3 对比算法说明

控制算法	纵向控制方法	横向控制方法
传统预瞄控制	PID	驾驶员预瞄
ESC 控制	PID+横摆制动调节	驾驶员预瞄

利用驾驶员模型^[20] 模拟方向盘操纵输入, 本文基于固定预瞄时间的单点预瞄算法搭建, 算法首先基于预瞄时间计算相对坐标系下的目标点坐标描述, 进而获得全局坐标系的预瞄点纵横向位置偏差, 以此计算方向盘转动角度作为横向运动控制依据, 3 种算法驾驶员模型参数一致, 见表 4。

表 4 驾驶员模型参数

参数	值
预瞄时间/s	0.8
方向盘最大转角/(°)	720
方向盘最大转角变化率[(°)/s]	1 200

表 5 高附路面极限车速双移线测试结果统计

控制方法	速度偏差峰值/(km/h)	横向偏差峰值/m	方向盘转角峰值/(°)	横摆角速度偏差峰值[(°)/s]
传统预瞄控制	0.07	0.60	79.98	30.25
ESC 控制	1.88	0.54	63.91	19.58
协同控制	0.07	0.48	35.35	9.66

3.1 高附路面极限双移线测试

本文以车辆匀速稳定通过期望路径时的车速^[21] 来表征极限通过性能, 基于图 5 和图 6 中的特性曲线, 设定以下稳定边界条件:

1) $\alpha_{ij} \leq 4^\circ$, 轮胎侧偏角 α_{ij} 超过 4° 边界时轮胎特性进入饱和非线性区, 车辆发生侧滑;

2) $\Delta y \leq 0.5 \text{ m}$, 车辆横向位移偏差参数 Δy 幅值大于 0.5 m 时车辆失去期望路径跟随能力。

结合侧偏角与横向偏差的边界条件, 3 种运动控制算法在附着系数 0.8 的高附路面的极限双移线通过车速如图 8 所示, 高附路面极限车速双移线测试结果统计见表 5。

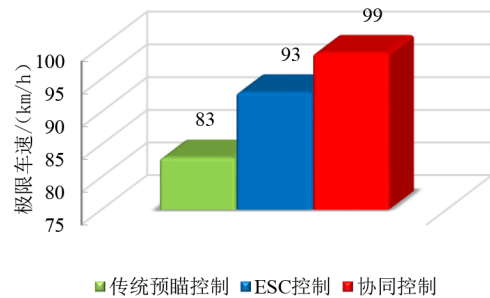


图 8 高附路面双移线测试极限车速对比

传统预瞄控制下, 车辆纵向控制与横向控制相互独立, 其极限车速最低, 达到失稳边界最快。ESC 控制通过制动介入调整转向稳定, 极限车速有一定提升。本文的协同控制算法在考虑纵横向耦合基础上优化分配轮胎力, 借助纵向差动补偿横向运动状态, 在极限运动状态下能保持较高通过车速。为进一步说明协同控制算法对稳定裕度提升和跟踪驾驶期望的优越性, 以协同控制极限车速 99 km/h 作为纵向跟踪目标, 使车辆分别在 3 种控制算法下以 99 km/h 匀速跟随高附路面双移线路径, 其响应结果如图 9~12 所示。

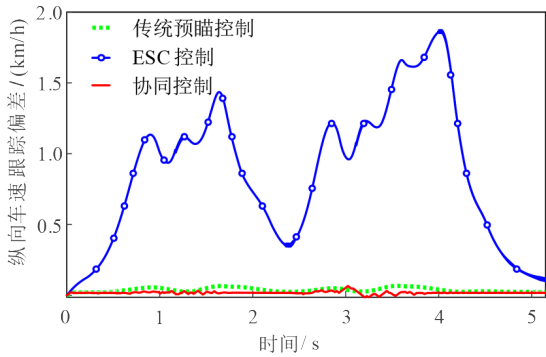


图 9 高附路面双移线测试速度跟踪偏差

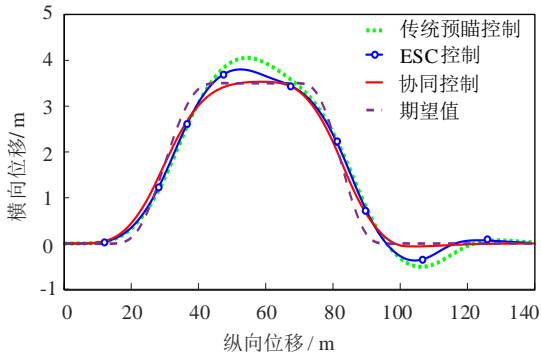


图 10 高附路面双移线测试横向位置跟踪响应

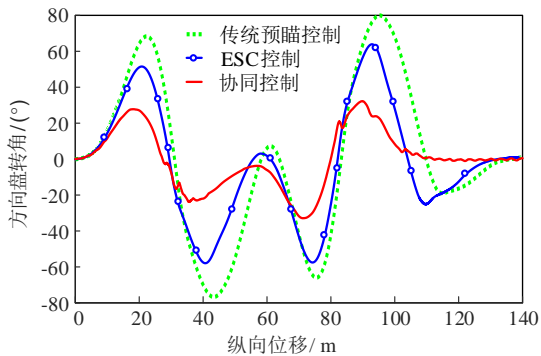


图 11 高附路面双移线测试方向盘转角响应

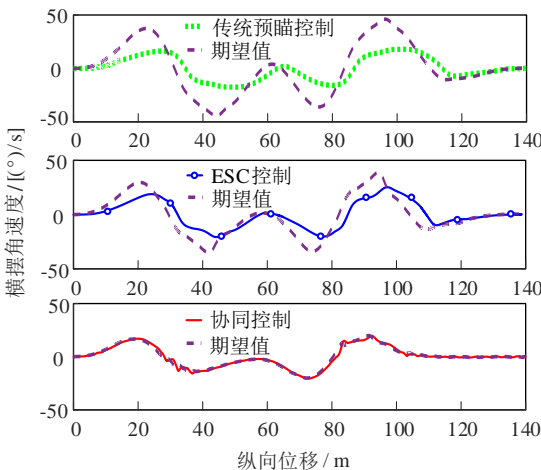


图 12 高附路面双移线测试横摆角速度跟踪响应

由图 9 的车速跟踪偏差响应结果可知，制动介入的 ESC 控制使车速波动幅度明显增加，轮毂电机能效性和驾乘舒适性较差。相比于传统预瞄控制和 ESC 控制，本文的协同控制算法能更稳定地跟踪期望车速，偏差控制在 0.1 km/h 以内。图 10 是 3 种控制算法下车辆的横向位移响应，传统预瞄控制和 ESC 控制算法下横向偏差均超过 0.5 m，影响行车安全。协同控制下车辆位移偏差明显缩小且收敛更快，车辆运动更加平稳。图 11 的方向盘转角响应反映了驾驶操作负担，传统预瞄控制和 ESC 控制的方向盘变化率大，驾驶员负担重，这与两种算法的横向跟踪偏差较大有关，驾驶员需要产生更大的方向盘输入来跟踪理想横向运动。而协同控制的方向盘变化更平缓且幅值最小，对行车稳定最为有利。如式 (8) 所示，3 种控制算法车辆跟踪同一路径时的方向盘转角响应不同造成了图 12 中横摆角速度期望值存在差异。图 12 中传统预瞄控制下车辆跟踪驾驶员期望横摆状态较差，车辆横摆稳定性不佳。ESC 控制依靠制动介入改善了横摆跟踪响应，但牺牲了车辆动力性能。协同控制在保证平稳纵向车速跟踪之外，横摆状态跟踪更加精确，做到了纵向与横向运动期望跟踪的协同优化。

3.2 低附路面极限双移线测试

本节探究协同控制在附着系数为 0.3 的低附路面环境下，极限双移线行驶性能的优化表现。与高附路面双移线工况的稳定边界条件相同，综合考虑轮胎侧偏角和横向位移偏差，3 种算法下车辆的低附极限车速如图 13 所示。

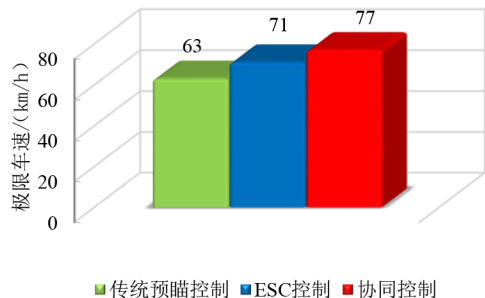


图 13 低附路面双移线测试极限车速对比

由于低附路面提供了较少的可利用附着力, 相比于高附路面环境, 3种算法极限车速均有所降低。协同控制算法依靠纵向差动补偿横摆姿态跟踪, 极限车速仍得到大幅改善。为进一步探究协同控制在低附路面环境下对于车辆运动性能的优化, 以协同控制极限车速 77 km/h 作为纵向跟踪目标, 使车辆分别在 3种算法控制下以 77 km/h 匀速跟随高附路面双移线路径, 其响应结果如图 14~17 所示。

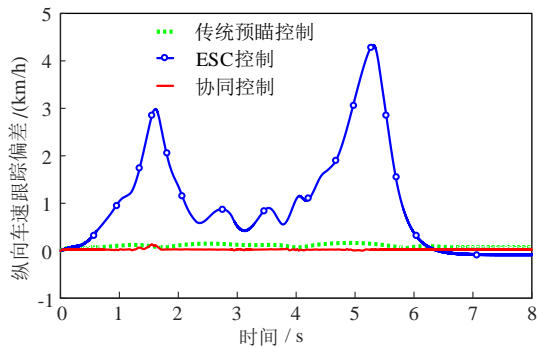


图 14 低附路面双移线测试速度跟踪偏差

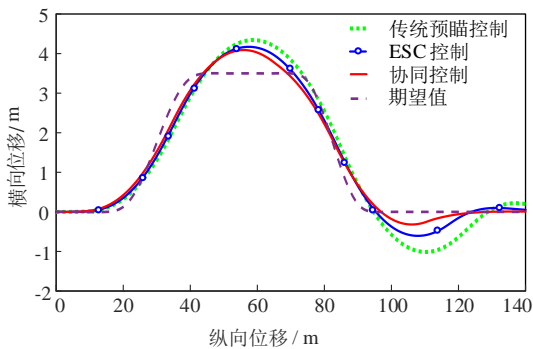


图 15 低附路面双移线测试横向位置偏差响应

由图 14 的速度跟踪偏差结果可知, 协同控制算法在低附路面环境下仍能取得更精确稳定的速度跟踪结果, 偏差在 0.1 km/h 内。由图 15 与图 17 的横向位置偏差和横摆角速度偏差可知, 在当前低附着路面下 3种算法控制车辆均有一定横向位移偏差。传统预瞄控制算法车辆失稳程度较大, 严重偏离期望路径。ESC 控制虽能减少车辆横向位移偏

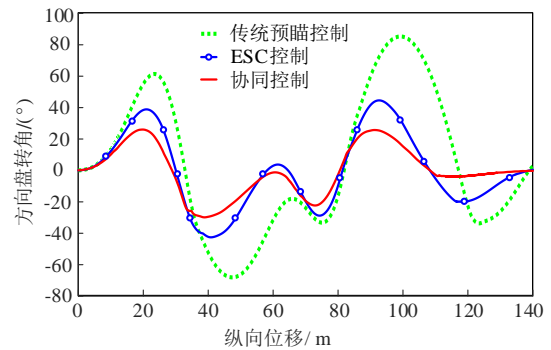


图 16 低附路面双移线测试方向盘转角响应

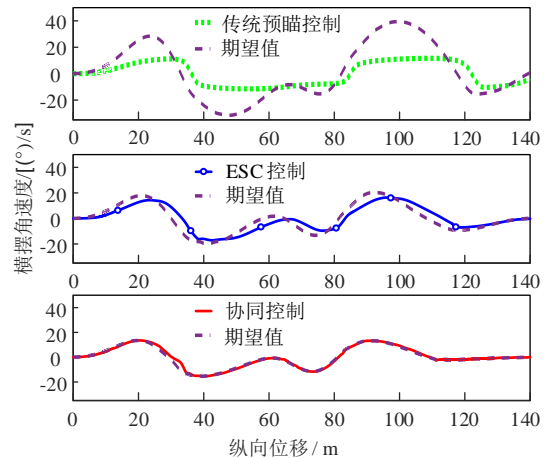


图 17 低附路面双移线测试横摆角速度偏差响应

差, 但频繁制动给车辆动力性和舒适性带来恶劣影响, 速度波动大。结合表 6 中的数据对比, 协同控制在保证纵向车速跟踪的同时, 期望路径和横摆状态跟踪得到了大幅优化, 在 80~120 m 弯道时横向运动优化效果尤其明显, 极大提升了车辆极限运动状态的稳定裕度。与高附路面类似, 3种算法横摆角速度期望值不同是受到图 16 方向盘转角响应差异的影响。由图 16 可知, 在低附路面环境下, 协同控制将转角峰值控制在 40° 以内, 能有效降低驾驶员负担。

4 结论

针对全矢量线控车辆极限行驶工况下易发生侧

表 6 低附路面极限车速双移线测试结果统计

控制方法	速度偏差峰值/(km/h)	横向偏差峰值/m	方向盘转角峰值/(°)	横摆角速度偏差峰值/[(°)/s]
传统预瞄控制	0.06	0.97	85.30	28.52
ESC 控制	4.34	0.59	44.59	11.17
协同控制	0.07	0.50	32.06	7.50

滑失稳和路径偏移等危险事故,本文提出了一种分层式纵横向协同运动控制算法,开展了以下研究。

1) 采用模型预测控制(MPC)理论转化多目标运动学需求,利用附着修正魔术轮胎模型辨识修正极限运动状态时车辆侧偏特性参数变化,基于前向欧拉离散化和泰勒展开线性化系统模型建立MPC动力学跟踪控制器,获得极限运动状态时最优动力学期望。

2) 考虑轮胎力耦合关系,基于轮胎负荷率方差及均值优化方法分配纵横向轮胎力广义控制量,保障极限工况下地面附着最大利用,采用反正切轮胎模型分解转换控制目标,实现纵横向运动解耦的

最优动力学控制。

3) 搭建Simulink-CarSim联合仿真平台,分别在高附路面和低附路面环境下开展极限工况试验测试。结果表明,所提出的协同控制算法能精准跟踪驾驶员期望运动状态,保证车辆运动稳定性和充足的动力性能,扩展车辆极限工况下的稳定裕度,得到车辆运动稳定性、通过安全性以及操纵性的全局优化,是行车安全的重要保障。

本研究认为执行器能立即响应执行控制量,欠缺了执行器动态特性的考虑,将在后续工作中展开深入研究。

参考文献 (References)

- [1] DAI Yifan, LUO Yugong, CHU Wenbo, et al. Optimum Tyre Force Distribution for Four-Wheel-Independent Drive Electric Vehicle with Active Front Steering [J]. International Journal of Vehicle Design, 2014, 65(4): 336-359.
- [2] 张紫微, 郑玲, 李以农, 等. 基于环境不确定性的智能车辆纵横向协同鲁棒控制[C]//2021中国汽车工程学会年会论文集. 2021: 111-118.
ZHANG Ziwei, ZHENG Ling, LI Yinong, et al. Longitudinal and Lateral Coordinated Robust Control of Intelligent Vehicle Based on Environmental Uncertainty [C]//ChinaSAE Congress Proceedings. 2021: 111-118. (in Chinese)
- [3] JALALI M, KHOSRAVANI S, KHAJEPOUR A, et al. Model Predictive Control of Vehicle Stability Using Coordinated Active Steering and Deferential Brakes [J]. Mechatronics, 2017, 48: 30-41.
- [4] FU Zhijun, LI Bin, NING Xiaobin. Model Free Adaptive Optimal Tracking Controller Design for AFS/DYC Based Integrated Chassis Control System [C]//2017 9th International Conference on Modelling, Identification and Control (ICMIC), July 10-12, 2017, Kunming, China. Piscataway NJ: IEEE, c2017: 359-364.
- [5] 李亮, 王翔宇, 程硕, 等. 汽车底盘线控与动力学域控制技术[J]. 汽车安全与节能学报, 2020, 11(2): 143-160.
LI Liang, WANG Xiangyu, CHENG Shuo, et al. Technologies of Control-by-Wire and Dynamic Domain Control for Automotive Chassis [J]. Automotive Safety and Energy, 2020, 11(2): 143-160. (in Chinese)
- [6] 杭鹏, 陈辛波, 张榜, 等. 四轮独立转向-独立驱动电动车主动避障路径规划与跟踪控制[J]. 汽车工程, 2019, 41(2): 170-176.
HANG Peng, CHEN Xinbo, ZHANG Bang, et al. Path Planning and Tracking Control for Collision Avoidance of a 4WIS-4WID Electric Vehicle [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(2): 170-176. (in Chinese)
- [7] LEI Yulong, WEN Guanzheng, GENG Xiaohu, et al. Comprehensive Control of Steering and Braking via a 4WIS-4WID Vehicle [J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2022, 43(1): 303-313.
- [8] XU Lijun, YANG Yankun, CHEN Qinhan, et al. Path Tracking of a 4WIS-4WID Agricultural Machinery Based on Variable Look-Ahead Distance [J]. Applied Sciences, 2022, 12(17): 1-13.
- [9] 赵林峰, 高晓程, 谢有浩, 等. 汽车主动转向与直接横摆力矩协调控制[J]. 汽车工程学报, 2019, 9(1): 61-67.
ZHAO Linfeng, GAO Xiaocheng, XIE Youhao, et al. Coordination Control of Active Steering and Direct Yaw Moment Control for Steer-by-Wire Vehicles [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2019, 9(1): 61-67. (in Chinese)
- [10] 李聪, 景晖, 黄好, 等. 基于MPC的独立驱动电动汽车稳定性集成控制[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(6): 759-772.
LI Cong, JING Hui, HUANG Hao, et al. Integrated Stability Control for Independently Driven Electric Vehicles Based on MPC [J]. Chinese Journal of Automotive Engi-

- neering, 2022, 12(6):759-772.(in Chinese)
- [11] HANG Peng, XIA Xin, CHEN Xinbo. Handling Stability Advancement with 4WS and DYC Coordinated Control: A Gain-Scheduled Robust Control Approach [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2021, 70(4):3164-3174.
- [12] 靳立强, 王庆年, 岳巍强, 等. 基于四轮独立驱动电动汽车的动力学仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005(12):3053-3055.
JIN Liqiang, WANG Qingnian, YUE Weiqiang, et al. Dynamic Model for Simulation of EV with 4 Independently-Driving Wheels [J]. Journal of System Simulation, 2005(12):3053-3055.(in Chinese)
- [13] 郑香美, 高兴旺, 赵志忠. 基于“魔术公式”的轮胎动力学仿真分析[J]. 机械与电子, 2012(9):16-20.
ZHENG Xiangmei, GAO Xingwang, ZHAO Zhizhong. Simulation Analysis of Tire Dynamic Based on “Magic Formula” [J]. Machinery & Electronics, 2012(9):16-20.(in Chinese)
- [14] VAN DER JAGT P, PARSONS A W. Road Surface Correction of Tire Test Data [J]. Vehicle System Dynamics, 1996(25):147-165.
- [15] 尹力, 于江江. 轮胎动力学特性仿真分析研究[J]. 汽车实用技术, 2012(9):1-4.
YIN Li, YU Jiangjiang. Simulation Analysis Research on Tire Dynamic Characteristics [J]. Automobile Applied Technology, 2012(9):1-4.(in Chinese)
- [16] 龚建伟, 姜岩, 徐威. 无人驾驶车辆模型预测控制[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2014:45-59.
GONG Jianwei, JIANG Yan, XU Wei. Model Predictive Control for Self-Driving Vehicles [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014:45-59.(in Chinese)
- [17] 陈龙, 邹凯, 蔡英凤, 等. 基于NMPC的智能汽车纵横向综合轨迹跟踪控制[J]. 汽车工程, 2021, 43(2):153-161.
CHEN Long, ZOU Kai, CAI Yingfeng, et al. Longitudinal and Lateral Comprehensive Trajectory Tracking Control of Intelligent Vehicles Based on NMPC [J]. Automotive Engineering, 2021, 43(2):153-161.(in Chinese)
- [18] SAKAI S I, SADO H, HORI Y. Dynamic Driving/Braking Force Distribution in Electric Vehicles with Independently Driven Four Wheels [J]. Electrical Engineering in Japan, 2002, 138(1):79-89.
- [19] 韩伟, 熊璐, 李彧. 基于集成式电子液压制动系统的横摆稳定性控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(24):161-169.
HAN Wei, XIONG Lu, LI Yu. Yaw Stability Control Strategy Based on Integrated-Electro-Hydraulic Brake System [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(24):161-169.(in Chinese)
- [20] 汪若尘, 魏振东, 叶青, 等. 视觉预瞄式智能车辆纵横向协同控制研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(7):763-770, 830.
WANG Ruochen, WEI Zhendong, YE Qing, et al. A Research on Visual Preview Longitudinal and Lateral Cooperative Control of Intelligent Vehicle [J]. Automotive Engineering, 2019, 41(7):763-770, 830.(in Chinese)
- [21] 陈龙, 解云鹏, 蔡英凤, 等. 极限工况下无人驾驶车辆稳定跟踪控制[J]. 汽车工程, 2020, 42(8):1016-1026.
CHEN Long, XIE Yunpeng, CAI Yingfeng, et al. Stable Tracking Control of Autonomous Vehicles at Extreme Conditions [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(8):1016-1026.(in Chinese)

作者简介



郑凯 (1998-), 男, 山东招远人, 硕士研究生, 主要研究方向为车辆协同运动控制。

Tel: 15367215415

E-mail: zhengkai9@sjtu.edu.cn

通信作者



吴晓东 (1984-), 男, 安徽舒城人, 博士, 副教授, 主要研究方向为车辆底盘和运动控制技术。

Tel: 18721170911

E-mail: xiaodongwu@sjtu.edu.cn