

基于模型预测控制的滑移率控制方法

李寿涛^{1,2}, 杨路², 屈如意², 孙鹏鹏², 于丁力³

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 长春 130022; 2. 吉林大学通信工程学院, 长春 130022;
3. 利物浦约翰摩尔大学工程与技术学院, 利物浦 L33AF)

摘要:为了解决汽车控制中的安全问题,提高四轮轮毂电动汽车紧急制动时的纵向稳定性,本文提出一种基于模型预测控制的滑移率控制方法。首先,基于扩展卡尔曼滤波的车辆纵向速度估计器对车辆纵向速度进行准确估计,再利用基于限定记忆的递推最小二乘法辨识得到紧急制动工况下车辆的最佳滑移率。其次,上层模型预测控制器跟踪最佳滑移率,在满足安全约束条件下优化求解前后轮在不同路面附着条件下所需的制动力矩,下层转矩分配控制器在电机转矩和电池荷电状态约束条件下分配液压和再生制动力矩,提高能量回收效率。最后,在不同工况下进行仿真实验,实验结果表明本文控制系统能保证紧急制动过程中车辆的安全性和可靠性。

关键词:车辆工程;滑移率控制;模型预测控制;最佳滑移率辨识;纵向速度估计

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2024)09-2687-10

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20221401

Slip rate control method based on model predictive control

LI Shou-tao^{1,2}, YANG Lu², QU Ru-yi², SUN Peng-peng², YU Ding-li³

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Communication Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. School of Engineering and Technology, Liverpool John Moores University, Liverpool L33AF, UK)

Abstract: In automotive electronic controls, safety issues are always of paramount importance. Therefore, this paper proposes a slip rate control method based on MPC to improve the longitudinal stability of four-wheel-wheel electric vehicles during emergency braking. Firstly, the vehicle longitudinal velocity estimator based on extended Kalman filter accurately estimates the longitudinal speed of the vehicle, and then the recursive least squares method based on limited memory is used to identify the optimal slip rate of the vehicle under the emergency braking condition. Secondly, the upper model predicts that the controller tracks the optimal slip rate, optimizes the braking torque required by the front and rear wheels under different road surface attachment conditions to meet the safety constraints, and the lower torque distribution controller distributes hydraulic and regenerative braking torque under the constraints of battery state of

收稿日期:2022-11-03.

基金项目:吉林省科技厅自然科学基金项目(20190201099JC);汽车仿真与控制国家重点实验室自由探索项目(asclzytsxm-202022).

作者简介:李寿涛(1975-),男,教授,博士.研究方向:车辆动力学及仿真控制,智能机械与机器人控制技术.

E-mail: list@jlu.edu.cn

charge to improve the energy recovery efficiency. Finally, simulation experiments are carried out under different working conditions and it is shown that the proposed control system can ensure the safety and reliability of the emergency braking process.

Key words: vehicle engineering; slip rate control; model predictive control; optimal slip rate identification; longitudinal velocity estimation

0 引言

安全和环保是车辆研究领域中的关键问题,四轮轮毂电动汽车因其车身更轻,能更好地对车轮进行独立控制,在车辆研究领域越发得到重视^[1]。车辆紧急制动过程中受到车轮滑移率的影响,在不同路面条件下保持最佳滑移率可以有效利用路面的附着能力,避免失去方向控制,缩短制动时间。研究紧急制动过程中的滑移率控制问题和保障能量回收效率,对提升车辆的安全性和能效性具有重大意义。

国内外学者在车辆滑移率控制方面做了大量研究。Chere等^[2]提出了两种基于滑模的滑移率控制算法,在过程变化和控制参数选择中减少了调谐参数数量。Dash等^[3]将模糊逻辑与滑膜控制相结合设计了一种模糊控制策略,较好地解决了道路中的不确定性问题。Mokarram等^[4]采用模糊逻辑控制设计滑移率控制器,将车轮滑移率控制在最佳滑移率附近,实现了最大的车轮制动力和最大的车辆减速度。以上控制策略较好地完成了最佳滑移率的跟踪,提升了系统的鲁棒性,但以上策略更侧重对车辆滑移率的跟踪,忽略了对车辆下层转矩分配的控制。Zhang等^[5]研究了电动客车上的混合动力ABS系统,提出了计算总制动扭矩的性能指标和制动扭矩分布的优化策略,然而提出的策略未能充分利用再生制动系统。苑磊等^[6]提出了基于自抗扰控制的滑移率控制方法,使制动力矩对滑移率进行跟踪时具有一定的鲁棒性,但执行器的响应速度和精度难以保证。Wang等^[7]针对四轮轮毂电动汽车设计了一种鲁棒滑移率控制器,基于控制器所需的制动转矩,提出一种新的液压制动与再生制动转矩分配控制策略,保障了系统的能量回收效率,但难以保证对最佳滑移率的持续跟踪。郭兆松等^[8]采用模型预测控制(Model predictive control, MPC)跟踪了滑移率,并用复合制动系统进行能量回收,但该控制策

略仅考虑单一路面附着系数下的情况,无法证明其在极端工况下的有效性。刘刚等^[9]结合模糊PID原理进行车轮最佳滑移率控制方面的研究。Yuan等^[10]提出基于非线性MPC的滑移率控制策略。

针对车辆紧急制动工况下难以在多种路面附着系数下对最佳滑移率进行持续有效跟踪控制的问题,本文综合考虑车辆最佳滑移率的持续跟踪和转矩分配优化问题,基于分层设计,协调控制的原则,提出了一种新的基于MPC的四轮轮毂电动汽车滑移率控制策略。扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman filter, EKF)可以简单快速地准确估计出车辆纵向速度。为了对滑移率与路面利用附着系数之间的函数关系进行拟合,本文设计了基于限定记忆的递推最小二乘法(Recursive fixed memory least square, RFMLS)的滑移率辨识算法,可以更加高效准确地对数据进行辨识处理,得到不同路面条件下的最佳滑移率,以保证数据的实时性,增加了车辆紧急制动时的安全性。基于MPC的滑移率控制器通过构建并求解全局目标函数,对最佳滑移率进行了持续准确的跟踪,得到车轮的期望制动力矩。依据液压制动和再生制动的不同工作特性,同时考虑电机转矩和电池容量的约束,本文设计的转矩优化分配方案可以有效地跟踪期望制动力矩,满足了车辆制动稳定性的同时提升能量回收效率。

1 滑移率控制系统结构模型

本文设计了基于MPC的滑移率控制策略,总体结构如图1所示。首先,构建四轮轮毂电动汽车模型,对车辆进行纵向速度估计,并利用最佳滑移率辨识算法决策出最佳滑移率作为滑移率控制器的跟踪目标值。其次,通过模型预测控制器对控制量进行滚动优化,在保证安全性的前提下跟踪最佳滑移率。最后,通过转矩分配控制器对控制量进行转矩优化分配,保障制动效果的同时提升能量回收效率。

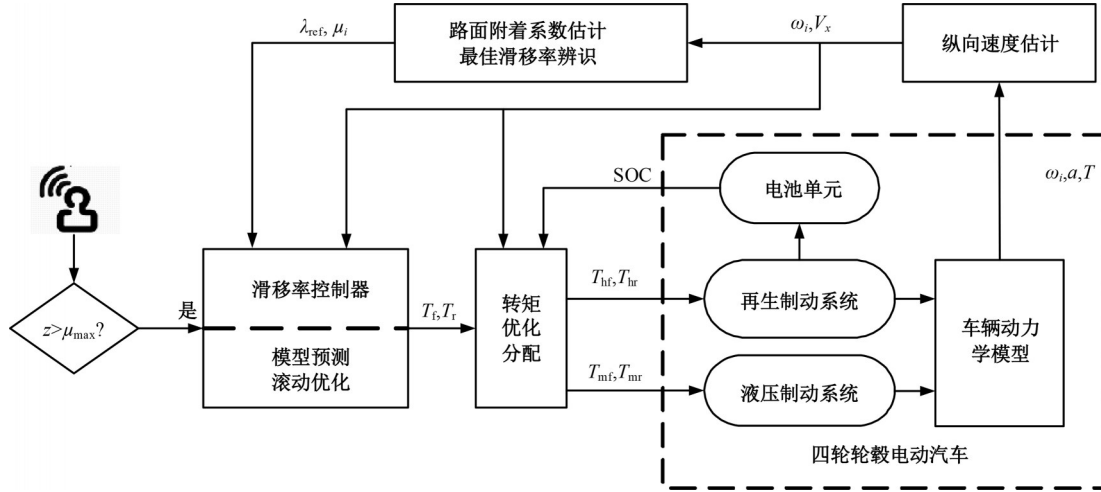


图 1 滑移率控制策略总体结构

Fig. 1 Overall structure of slip rate control strategy

1.1 车辆动力学模型

紧急制动工况下车辆滑移率控制研究中需要考虑纵向及车轮对车辆动力学的影响,因此建立七自由度车辆动力学模型。假设车辆始终保持纵向行驶且忽略俯仰运动和侧倾运动,则紧急制动工况下车辆的纵向运动方程如下:

$$m\ddot{x} = -(F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} + f_a) \quad (1)$$

式中: x 、 m 分别为车辆的纵向位移和质量; \ddot{x} 为车辆加速度; F_{x1} 、 F_{x2} 、 F_{x3} 、 F_{x4} 分别为车辆前后4个轮的纵向力; f_a 为车辆行驶过程中受到的空气阻力。

车辆的等效空气阻力 f_a 可表示为:

$$f_a = \frac{1}{2} C_a A_F \rho v_x^2 \quad (2)$$

式中: C_a 为风阻系数; A_F 为车辆的正面迎风面积; ρ 为空气质量密度。

每个车轮旋转运动的微分方程为:

$$J_w \dot{\omega}_i = -T_{br} - F_{xi} R_i, \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

式中: J_w 为车轮的转动惯量; $\dot{\omega}_i$ 为车辆的角加速度; T_{br} 为制动力矩; F_{xi} 和 R_i 分别为轮胎的纵向力和滚动半径。

车轮的纵向力可表示为:

$$F_{xi} = \mu_i(\lambda_i) F_{zi} \quad (4)$$

式中: μ_i 为路面利用附着系数,是关于滑移率 λ_i 的非线性函数; F_{zi} 为车轮的垂直载荷。

车辆滑移率的表达式为:

$$\lambda_i = \frac{v_x - \omega_i R_i}{\max(v_x, \omega_i R_i)} \quad (5)$$

1.2 制动系统模型

1.2.1 电控液压制动系统模型

本文中使用时盘式制动器产生制动力矩完成液压制动过程^[11],实际制动状态可描述为:

$$T = \mu P \cdot A \cdot R \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (6)$$

式中: μ 为盘式制动器的摩擦因数; P 为轮缸输出的压力; A 为活塞的有效横截面积; R 为制动器中心与摩擦作用点的距离; τ 为延迟时间。

1.2.2 再生制动系统模型

本文选取永磁同步电机建立轮毂电机模型,具体方程为:

$$T_{out} = \frac{1}{1 + \tau_S} T_{ref} \quad (7)$$

式中: T_{ref} 为系统所跟踪的目标值; T_{out} 为电机制动模型的输出转矩。

电机在进行驱动或制动时,还会有自身最大输出转矩的限制,再生制动系统的输出特性可表示为:

$$T_m = \frac{1}{\tau_S + 1} \cdot \min(T_{ref}, T_{mmax}(\omega)) \quad (8)$$

1.2.3 电池模型

车载电池当前状态的荷电状态 SOC(State of charge)可以表示为:

$$I_i = T_{out} / K_m \quad (9)$$

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{c_N} \int_0^T \eta I_i dt \quad (10)$$

式中: K_m 为电机转矩系数; I_i 、 SOC_0 、 c_N 、 η 分别为电池的电流、起始状态、额定容量和放电效率。

2 纵向速度估计和最佳滑移率辨识

2.1 纵向速度估计器的设计

本文在 LuGre 轮胎模型^[12]和车辆动力学模型的基础上设计基于 EKF 的车辆纵向速度估计器,联立的系统方程如下:

$$\begin{cases} J\dot{\omega}_i = T_i - F_{xi}r \\ m\dot{v}_x = F_{x1} + F_{x2} + F_{x3} + F_{x4} + f_a \\ \dot{z} = v_r - kr\omega z - \frac{\sigma_0|v_r|}{\theta_\varphi(v_r)}z \end{cases} \quad (11)$$

式中: v_r 为车轮的相对速度; F_{xi} 为轮胎的纵向力。

$$F_{xi} = (\sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 v_r) F_{zi} \quad (12)$$

由于路况是未知的,因此可以将未知路面摩擦项 $\frac{\sigma_0|v_r|}{\theta_\varphi(v_r)}z$ 视为有界的不确定项。建立的扩展卡尔曼方程的非线性表达式为:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{z}_i \\ \dot{v}_x \\ \dot{\omega}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_i r - v_x - kr\omega_i z_i \\ \frac{1}{m} \sum F_{xi} + \frac{C_D A_\rho}{2m} v_x^2 \\ \frac{1}{J} T_i - \frac{r}{J} F_{xi} \end{bmatrix} + \Omega \omega \quad (13)$$

$$y = [\omega_1 \omega_2 \omega_3 \omega_4]^T + \Gamma \quad (14)$$

$$\mu(\lambda; t) = \frac{T_b(t) \{ [1 - \lambda(t)] / [J\omega(t)] \} - \dot{\lambda}(t)}{[1 - \lambda(t) / \omega(t) R] \{ (1 - \lambda(t) / m + R^2 / J) F_z(t) \}} \quad (18)$$

2.2.2 基于 RFMLS 的最佳滑移率辨识算法

运用 RFMLS 辨识最佳滑移率可以避免最小二乘法计算复杂和递推最小二乘法中存在的“数据饱和”问题^[13,14]。RFMLS 递推辨识算法具体公式为:

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k+1, k+L) = \hat{\theta}(k, k+L-1) + \\ \mathbf{K}(k, k+L) [\mathbf{y}(k+L) - \boldsymbol{\varphi}^T(k+L) \hat{\theta}(k, k+L-1)] \\ \mathbf{K}(k, k+L) = \mathbf{P}(k, k+L-1) \boldsymbol{\varphi}(k+L) \cdot \\ [1 + \boldsymbol{\varphi}^T(k+L) \mathbf{P}(k, k+L-1) \boldsymbol{\varphi}(k+L)]^{-1} \mathbf{P}(k, k+L) = [\mathbf{I} - \\ \mathbf{K}(k, k+L) \boldsymbol{\varphi}^T(k)] \mathbf{P}(k, k+L-1) \\ \hat{\theta}(k+1, k+L) = \hat{\theta}(k, k+L) - \\ \mathbf{K}(k+1, k+L) [\mathbf{y}(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \hat{\theta}(k, k+L)] \\ \mathbf{K}(k+1, k+L) = \mathbf{P}(k, k+L) \mathbf{x}(k) \cdot \\ [1 - \mathbf{x}^T(k) \mathbf{P}(k, k+L) \boldsymbol{\varphi}(k)]^{-1} \\ \mathbf{P}(k+1, k+L) = [\mathbf{I} + \mathbf{K}(k+1, \\ k+L) \mathbf{x}^T(k)] \mathbf{P}(k, k+L) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\dot{z}_i, \dot{\omega}_i, T_i$ 和 $F_{xi}(i=1, 2, 3, 4)$ 分别为轮胎的内部摩擦状态、车轮转速、车辆制动力矩和垂直载荷。

2.2 最佳滑移率辨识

2.2.1 路面利用附着系数的估计

滑移率可以通过车速和轮速进行计算,本文通过车辆动力学模型进行推导可得:

$$\dot{\lambda} = -\frac{1}{v_x} \left(\frac{(1-\lambda)}{m} + \frac{R^2}{J} \right) F_z \mu(\lambda) + \frac{R}{v_x J} T_b \quad (15)$$

假设信号 $\omega, v_x, \lambda, T_b$ 是已知的,通过转换公式(12)可得:

$$\mu(\lambda) = \mu(\omega, v_x, T_b, \lambda) \quad (16)$$

已知车轮轮速 ω , 由式(6)和式(9)可得制动力矩 T_b , 滑移率 λ 可由车速和轮速计算。

将 $v = \omega R / (1 - R)$ 代入式(15)可得:

$$\dot{\lambda} = -\frac{1-R}{\omega r} \left(\frac{(1-\lambda)}{m} + \frac{R^2}{J} \right) F_z \mu(\lambda) + \frac{R}{J} T_b \left(\frac{1-R}{\omega R} \right) \quad (17)$$

由式(17)可得路面利用附着系数的估计值为:

式中:每次新增一组第 $k+L$ 数据序列所提供的信息,前三式用于计算第 k 至 $k+L$ 数据序列的量测数据参数估计 $\hat{\theta}(k, k+L)$ 、协方差矩阵 $\mathbf{P}(k, k+L)$ 和增益矩阵 $\mathbf{K}(k, k+L)$ 。

用 RFMLS 消除第 k 数据序列所提供的信息,并计算第 $k+1$ 至 $k+L$ 数据序列的量测数据参数估计 $\hat{\theta}(k+1, k+L)$ 、协方差矩阵 $\mathbf{P}(k+1, k+L)$ 和增益矩阵 $\mathbf{K}(k+1, k+L)$ 。这样不断地进行迭代,保持每次估计只有最新一组的观测方程数据,对参数进行更准确的估计。

为了辨识得到最佳滑移率,只需得到路面峰值附着系数。通过对纵向速度估计和路面利用附着系数估计,可以实时得到每个车轮的滑移率和路面利用附着系数,利用已得到的路面附着系数,通过 RFMLS 辨识 Burckhardt 轮胎模型参数即可得到车辆的最佳滑移率。

首先,将 Burckhardt 轮胎模型线性化,表达式为:

$$\hat{\mu}(\lambda) = a_1 + a_2 \lambda + a_3 e^{-b_1 \lambda} + \dots + a_n e^{-b_n - z \lambda} \quad (20)$$

式(20)可表示为线性回归形式:

$$\hat{\mu}(\lambda) = \varphi(\lambda)^T \theta \quad (21)$$

式中: $\varphi(\lambda) = [1, \lambda, e^{-b_1 \lambda}, \dots, e^{-b_{n-2} \lambda}]^T$; $\theta = [a_1, a_2, \dots, a_n]^T$ 。

Burckhardt 模型为经验模型, 经过验证取指数的数量为 3, 且当 $b_1 = 4.99, b_2 = 18.43, b_3 = 65.62$ 时能保证算法的实时性和准确性。

然后, 将 RFMLS 应用在最佳滑移率辨识中, 具体流程如图 2 所示。

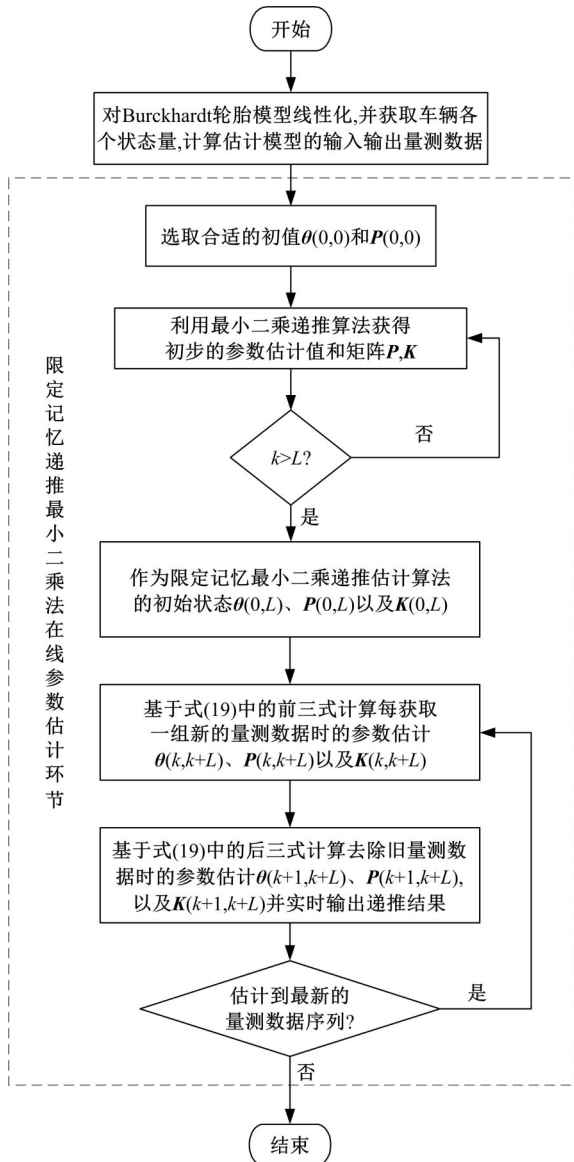


图 2 基于 RFMLS 的最佳滑移率辨识算法流程图

Fig. 2 Flow chart of optimal slip rate identification algorithm based on RFMLS

通过不断地更新量测数据, 实时辨识线性化后的 Burckhardt 模型参数, 即可计算得到相对应的最佳滑移率。

3 基于模型预测控制的滑移率控制系统设计

3.1 滑移率控制器设计

3.1.1 面向滑移率控制的离散模型设计

本文利用 MPC 实现紧急制动时滑移率的控制, 通过在控制量、控制增量、输出量约束条件下, 优化求解前后轮的制动力矩需求。

在车辆进行制动时, 对式(5)定义的滑移率动态方程求导可得:

$$\dot{\lambda} = \frac{\dot{v}_x}{v_x} (1 - \lambda) - \frac{\dot{\omega}_i R_i}{v_x}, \quad i = f, r \quad (22)$$

将车轮的旋转运动公式(3)代入式(22)可得:

$$\dot{\lambda} = \frac{F_{xi} + f_{ai}}{m_i} \lambda + \frac{R_i}{J_i v_x} T_{bi} - \frac{F_{xi} + f_{ai}}{m_i} - \frac{F_{xi} R_i^2}{J_i v_x} \quad (23)$$

式中: m_i 和 f_{ai} 分别为分配到每个车轮上的车辆质量和空气阻力; $i = f, r$ 分别是指前后车轮。

考虑连续系统的状态空间方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_c x(t) + B_{cu} u(t) + B_{cd} d(t) \\ \dot{y}_c(t) = C_c x(t) \end{cases} \quad (24)$$

设定车辆行驶过程中的滑移率为状态空间中状态变量, 前后轮的制动力矩为控制量, 同时认为在直线行驶的工况下车辆的左右性能无差异。

状态空间方程其余矩阵可利用式(23)推导, 如下所示:

$$\begin{cases} A_c = \begin{bmatrix} \frac{F_{xf} + f_{af}}{m_f} & 0 \\ 0 & \frac{F_{xr} + f_{ar}}{m_r} \end{bmatrix}, B_{cu} = \begin{bmatrix} \frac{R_f}{J_f v_x} & 0 \\ 0 & \frac{R_r}{J_r v_x} \end{bmatrix} \\ B_{cd} = \begin{bmatrix} -\frac{F_{xf} + f_{af}}{m_f} & -\frac{F_{xf} R_f^2}{J_f v_x} & 0 \\ 0 & -\frac{F_{xr} + f_{ar}}{m_r} & -\frac{F_{xr} R_r^2}{J_r v_x} \end{bmatrix} \\ C_c = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (25)$$

由七自由度车辆动力学模型经过一系列的线性离散化之后得到状态空间离散化模型如下:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1) = A \Delta \mu(k) + B_d \Delta d(k) \\ y_c(k) = C_c \Delta x(k) + y_c(k-1) \end{cases} \quad (26)$$

式中: T_c 为采样时间; $A = e^{A \cdot T_c}$; $B_d = \int_0^{T_c} e^{A \cdot \tau} d\tau \cdot B_{cd}$; $B_u = \int_0^{T_c} e^{A \cdot \tau} d\tau \cdot B_{cu}$; 干扰项 $d(k)$ 为可观测的外部干扰量。其中:

$$\begin{cases} \Delta x(k) = x(k) - x(k-1) \\ \Delta \mu(k) = \mu(k) - \mu(k-1) \\ \Delta d(k) = d(k) - d(k-1) \end{cases} \quad (27)$$

根据预测控制理论, 选取当前的测量值作为初始条件, 基于模型预测未来的动态, 选取合适的预测时域 p 和控制时域 m 且 $m \leq p$, 并假设:

(1) 控制量在控制时域之外无变化, 即:

$$\Delta \mu(k+i) = 0, \quad i = m, m+1, m+2, \dots, p-1$$

(2) 干扰项在 k 时刻之后不发生变化, 即:

$$\Delta d(k+i) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, p-1$$

之后, 根据式(24), 利用当前时刻测量值 $x(k)$ 求得 $\Delta x(k)$, 可以得到预测时域 p 之内的状态, 如下所示:

$$\begin{cases} \Delta x(k+1|k) = A\Delta x(k) + B_u\Delta u(k) + B_d\Delta d(k) \\ \vdots \\ \Delta x(k+m|k) = A^m\Delta x(k) + A^{m-1} \cdot \\ B_u\Delta u(k) + \dots + B_u\Delta u(k+ \\ m-1) + A^{m-1}B_d\Delta d(k) \\ \vdots \\ \Delta x(k+p|k) = A^p\Delta x(k) + A^{p-1} \cdot B_u \\ \Delta u(k) + \dots + A^{p-m}B_u \cdot \Delta u(k+ \\ m-1) + A^{p-1}B_d\Delta d(k) \end{cases} \quad (28)$$

整理可得未来 p 步输出预测方程为:

$$\begin{aligned} Y_p(k+1|k) &= S_x\Delta x(k) + S_y y_c(k) + \\ &S_u\Delta U(y) + S_d\Delta d(k) \end{aligned} \quad (29)$$

3.1.2 目标函数优化及约束条件设计

为保证前后轮滑移率准确跟踪最佳滑移率, 可定义模型预测控制器参考输入序列 $R(k)$ 为前后轮最佳滑移率 λ_{ref} , 如下所示:

$$R(k+1) = \begin{bmatrix} r(k+1) \\ \vdots \\ r(k+m) \\ \vdots \\ r(k+p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{ref}(k+1) \\ \vdots \\ \lambda_{ref}(k+m) \\ \vdots \\ \lambda_{ref}(k+p) \end{bmatrix} \quad (30)$$

同时考虑对最佳滑移率的跟踪效果以及制动过程的平顺性, 设计如下的目标函数:

$$\begin{aligned} J &= \|\vartheta_y [Y_p(k+1|k) - R(k+1)]\|^2 + \\ &\|\vartheta_u \Delta U(k)\|^2 = \sum_{i=1}^p \|\vartheta_y [y_c(k+i|k) - \\ &r(k+i)]\|^2 + \sum_{i=1}^m \|\vartheta_u \Delta u(k+i-1)\|^2 \end{aligned} \quad (31)$$

式中: $r(k+i)$, $i = 1, 2, \dots, p$ 为目标状态变量的离散值; ϑ_y 和 ϑ_u 为输出误差和控制增量的加权因子。

为保障控制系统的安全性, 根据滑移率和制动力矩的特性引入控制量、控制增量和输出量约束:

$$\begin{cases} u_{\min}(k+j) \leq u(k+j) \leq u_{\max}(k+j) \\ \Delta u_{\min}(k+j) \leq \Delta u(k+j) \leq \Delta u_{\max}(k+j) \\ y_{\min}(k+j) \leq y(k+j) \leq y_{\max}(k+j) \end{cases} \quad (32)$$

式中: $u(k+j) = \sum_{i=0}^j \Delta u(k+i) + u(k-1)$, $j = 0, 1, \dots, m-1$ 。

根据以上优化目标函数和约束条件将优化问题转化为二次规划的形式, 如下式所示:

$$\begin{cases} \min_{\Delta u(k)} J [y_c(k), \Delta u(k)] = \min_{\Delta u(k)} \frac{1}{2} \Delta u(k)^T \cdot \\ H\Delta u(k) + G^T \Delta u(k) \\ \text{s.t. } A_c \Delta u(k) \leq b_c \end{cases} \quad (33)$$

系统在预测控制的每一步更新状态, k 时刻得到最优解的转矩控制序列 U_k , 下层控制器的输入项如下所示:

$$u_{opt}(k) = [1, 0, \dots, 0] U_k(k) \quad (34)$$

同时在下一时刻重复上述步骤完成优化问题的更新, 并再次进行求解, 达到滚动优化的效果。

3.2 制动力矩分配控制器设计

为了在保障车辆稳定性和安全性的前提下兼顾能量回收效率和制动踏板的感觉, 在电池 SOC 约束条件下, 设计的再生制动与液压制动分配控制策略如下所示:

$$\begin{cases} T_{mi} = k \cdot T(\omega_{mi})_{mi, \max} \\ T_{bi} = T_{br} - T_{mi} \end{cases} \quad (35)$$

式中: T_{bi} 为上层滑移率控制器优化得到每个车轮的总制动力矩; T_{bi} 和 T_{mi} 分别为液压执行器和轮毂电机执行器分配的力矩大小; ω_{mi} 为电机转速; $T(\omega_{mi})_{mi, \max}$ 为轮毂电机不同转速对应的最大制动力矩; k 为定义的电机补偿参数。

当 $T_{bi} \leq T_{mi, \max}$, $0.2 \leq \text{SOC} \leq 0.9$, 且车速正常时, 由电机提供所有的制动力矩, $k =$

$\frac{T_{bi}}{T(\omega_{mi})_{mi,max}}$ 。当 $T_{bi} > T_{mi,max}, 0.2 \leq SOC \leq 0.9$, 且车速正常时,由电机提供基础制动力矩,由液压制动作为补偿,此时 $k=1$ 。当 $SOC < 0.2, SOC > 0.9$,采用纯液压制动, $k=0$ 。

4 仿真验证及结果分析

本文基于 Carsim 和 Matlab/Simulink 进行联合仿真。首先,验证了本文车辆纵向速度估计和最佳滑移率辨识算法的可靠性。然后,在湿沥青和冰雪路面下对本文滑移率控制算法进行了仿真分析。

4.1 车辆纵向速度估计仿真验证

本文在 Carsim 中设置进行车辆左右附着系数不同的情况下进行仿真,纵向初速度为 70 km/h,将路面附着系数左侧设置为 0.5,右侧设置为 0.2。车辆纵向速度估计仿真结果如图 3 和图 4 所示,图 3 为真实值与估计值的对比,图 4 为估计误差。

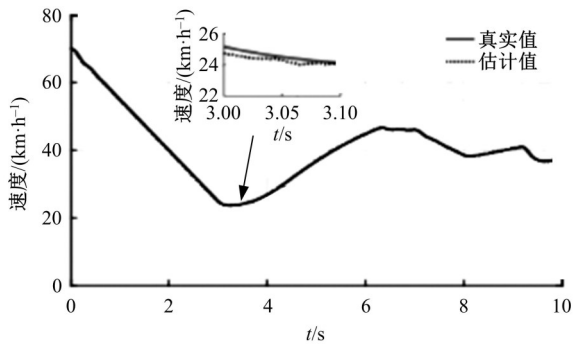


图 3 真实值与估计值对比

Fig. 3 Comparison of actual value and estimated value

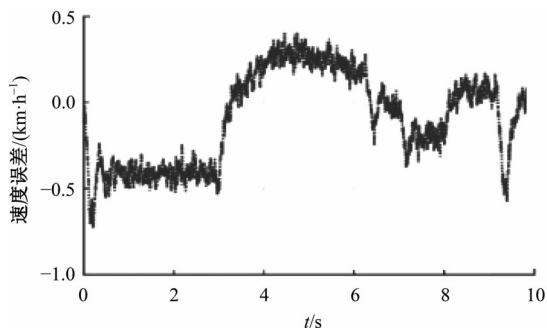


图 4 估计误差

Fig. 4 Estimation error

由图 3 可以看出,在左右路面附着系数不同的条件下,基于 EKF 的纵向速度估计器能够实时精确地估计纵向速度,且对测量噪声和不确定的参数具有一定的鲁棒性。

由图 4 可以看出,在 0~2.9 s 由于车辆速度发生剧烈变化,此时的估计误差在 -0.5 附近,而在 2.9 s 之后估计误差明显减小,可知在 0~2.9 s,由于速度的剧烈变化导致估计误差较高,而后逐渐保持在较低范围。

4.2 最佳滑移率辨识仿真验证

设置 RFMLS 算法限定记忆步长 $L=300$,车辆初始速度为 120 km/h,路面附着系数为上半段 0.85,下半段 0.5。最佳滑移率辨识仿真如图 5 所示。

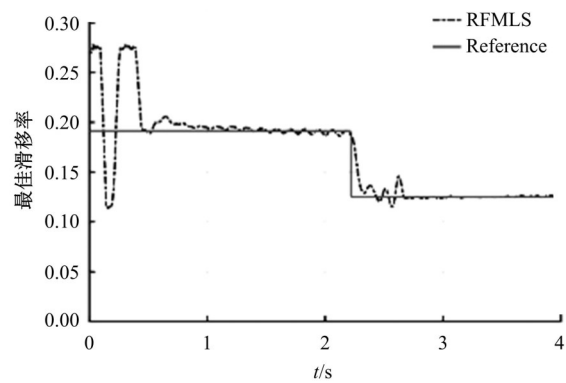


图 5 最佳滑移率辨识

Fig. 5 Slip rate identification

由图 5 可以看出,RFMLS 辨识得到的参数在约 0.5 s 达到理想最佳滑移率后出现一定波动,之后逐渐调整至目标值。车辆在行驶后道路条件变化中附着路面 RFMLS 辨识得到的参数在 2.5 s 左右达到理想最佳滑移率,体现了基于 RFMLS 的最佳滑移率辨识算法可以解决辨识过程中的“数据饱和”问题,充分发挥新数据对最佳滑移率辨识的作用,证明了最佳滑移率辨识算法的实时性和准确性。

4.3 滑移率控制系统仿真验证

4.3.1 湿沥青路面条件下仿真验证

设置湿沥青路面条件下,车辆初始纵向速度为 80 km/h,路面附着系数为 0.6,最佳滑移率辨识算法得到前轮的最佳滑移率为 0.126 2,后轮最佳滑移率为 0.132 6。仿真结果如图 6 所示。

图 6(a)(b)表明在湿沥青路面条件下,未控制车辆的前后轮滑移率产生剧烈波动,而本文滑移率控制策略能在 0.23 s 内有效跟踪最佳滑移率到稳定区域。图 6(c)(d)(e)表明本文基于 MPC 优化后得到的控制量可以维持更小的力矩波动。下层力矩分配控制器能根据分配规则及时调整,

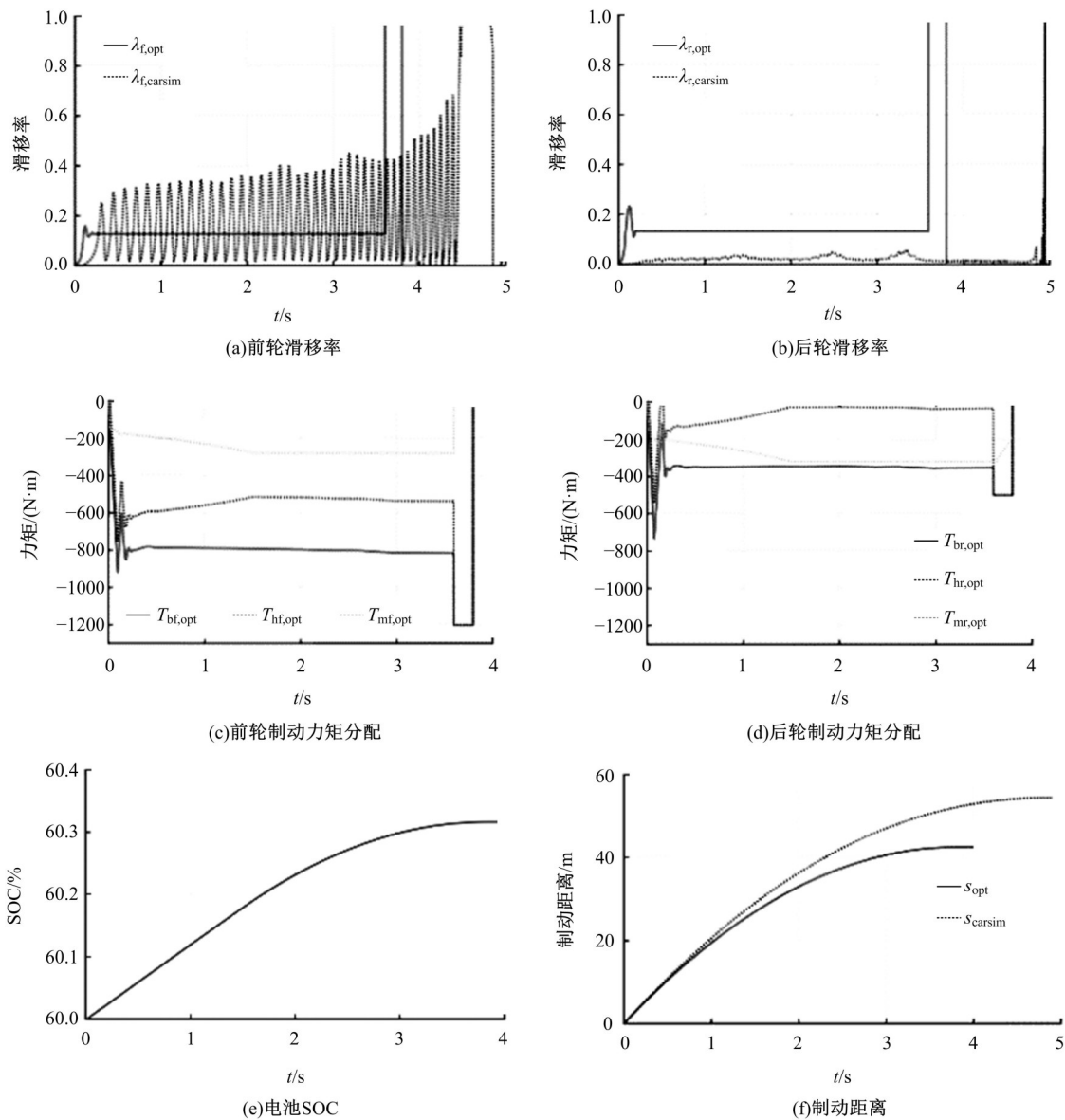


图 6 湿沥青路面条件下仿真验证

Fig. 6 Simulation under wet asphalt pavement conditions

后轮基本可以使用再生制动力矩完成制动任务,直到车辆速度过低后,采用纯液压制动完成最后的制动任务,电池 SOC 不再增加,最终为 60.32%。由图 6(f)可知,本文控制策略制动距离为 42.52 m,与控制前的制动距离 54.42 m 相比,减少了 21.81%。

4.3.2 冰雪路面条件下仿真验证

设置冰雪路面条件下,车辆初始纵向速度为 40 km/h,路面附着系数为 0.2,最佳滑移率辨识算法得到的前轮最佳滑移率为 0.045 1,后轮最佳滑移率为 0.043 6,仿真结果如图 7 所示。

图 7(a)(b)表明在冰雪路面等恶劣条件下,本文控制策略仍能在极短时间内跟踪最佳滑移率

到稳定区域,同时图 7(c)(d)(e)表明在恶劣的冰雪路面下紧急制动时,本文控制策略能有效减小制动力矩的波动,在保障电机的约束情况下提高能量回收效率。由图 7(f)知本文控制策略最终制动距离为 31.48 m,与未施加控制时的 35.18 m 相比,减小了 10.52%。

在紧急制动工况下需要尽可能保持车辆制动减速度的稳定,制动减速度仿真结果如图 8 所示。

仿真结果表明,在湿沥青路面下制动减速度稳定在 -5.9 m/s^2 附近,冰雪路面下制动减速度可维持在 -1.97 m/s^2 附近,体现了本文设计的滑移率控制策略可以在多种路面条件下降低车身的振动,提升了制动过程中的安全性和舒适性。

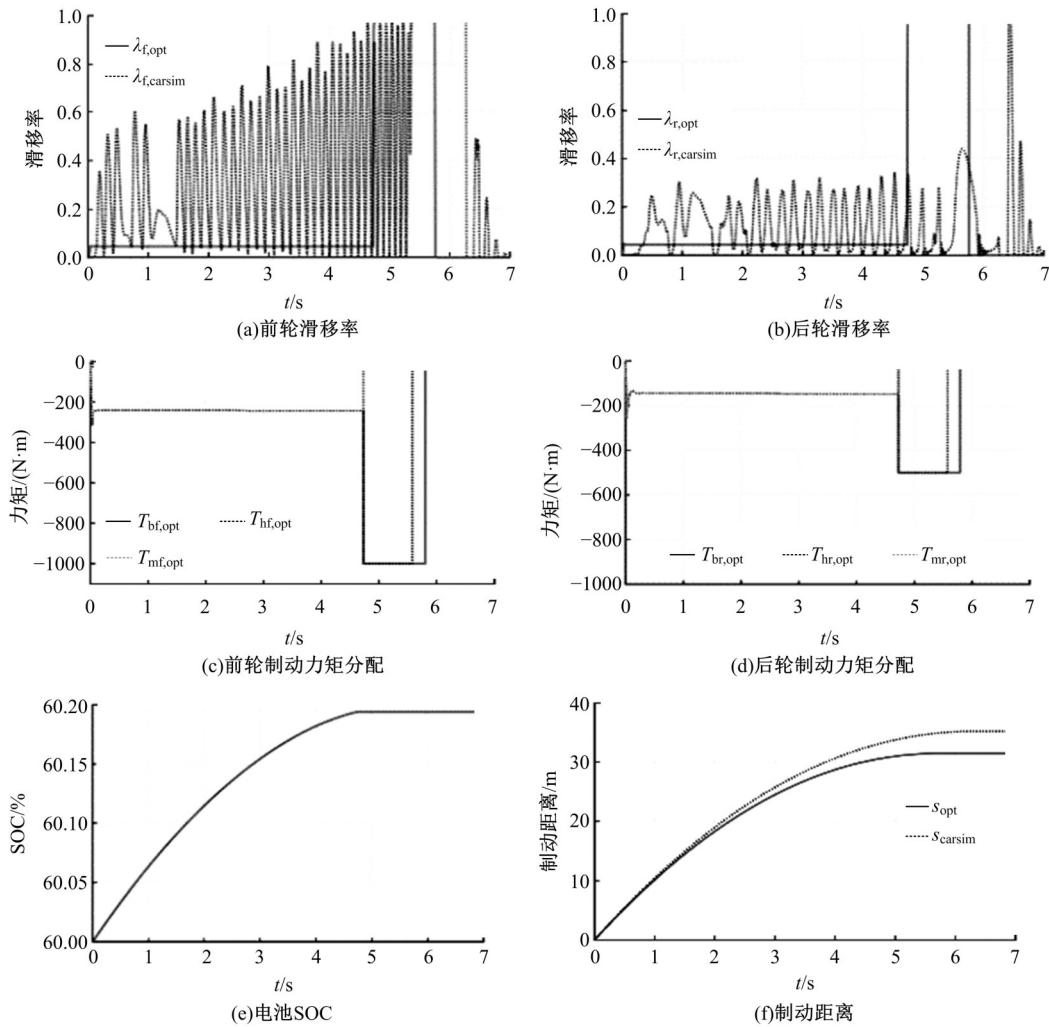


图 7 冰雪路面条件下仿真验证

Fig. 7 Simulation under ice and snow road conditions

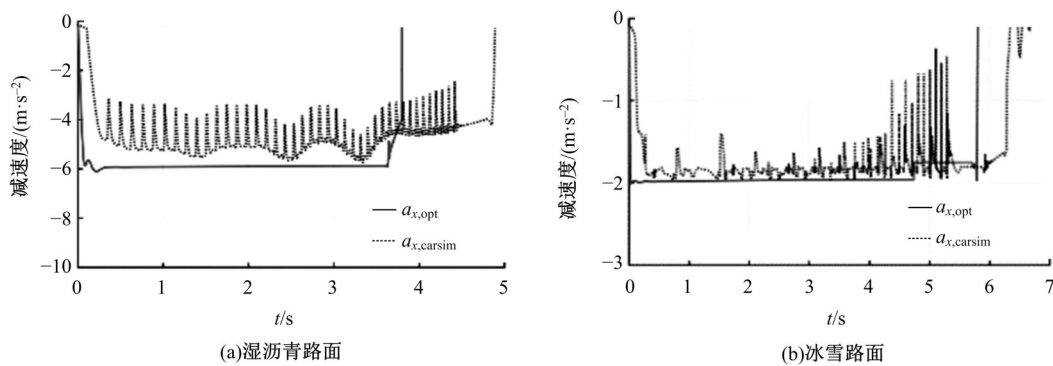


图 8 车辆制动减速度

Fig. 8 Simulation results of vehicle braking deceleration

5 结束语

本文利用EKF进行车辆纵向速度的估计,减少了轮胎-路面摩擦条件和车辆参数的不确定性以及传感器噪声的影响。采用RFMLS对Burckhardt轮胎模型线性化后的函数关系进行拟合,能

及时更新数据准确辨识得到不同路面条件下的最佳滑移率。

通过在湿沥青及冰雪路面条件下的仿真验证,证明了本文基于MPC的滑移率控制策略可在多种路面条件下跟踪车辆的最佳滑移率,有效地缩短了制动时间和制动距离,快速完成车辆的紧

急制动,并在减小制动减速度和制动力矩波动的同时提高能量回收效率。由此表明了本文控制策略可以有效提升车辆紧急制动过程中的安全性、能效性以及舒适性。

参考文献:

- [1] 柴凤,于雁磊,裴宇龙.电传动车辆永磁轮毂电机技术现状及展望[J].兵工学报,2021,42(10):2060-2074.
Chai Feng, Yu Yan-lei, Pei Yu-long. State-of-the-art technology and prospects of permanent magnet in-wheel motors for electric drive vehicles[J]. Acta Armamentarii, 2021, 42(10): 2060-2074.
- [2] Chere J E, Radac M B, Szedlak-Stinean A I. Sliding mode control algorithms for anti-lock braking systems with performance comparisons[J]. Algorithms, 2020, 14(1): No. 2.
- [3] Dash B K, Subud H B. A fuzzy adaptive sliding mode slip ratio controller of a HEV[C]//2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Hyderabad, India, 2013: 1-8.
- [4] Mokarram M, Khoei A, Hadidi K. A fuzzy Anti-lock braking system (ABS) controller using CMOS circuits[J]. Microprocessors and Microsystems, 2019, 70: 47-52.
- [5] Zhang J, Kong D, Chen L, et al. Optimization of control strategy for regenerative braking of an electrified bus equipped with an anti-lock braking system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering, 2012, 226(4): 494-506.
- [6] 苑磊,何仁.基于线性自抗扰控制的汽车ABS滑移率控制研究[J].汽车工程,2021,43(9):1367-1374,1393.
Yuan Lei, He Ren. Research on ABS slip ratio control of vehicle based on linear active disturbance rejection control[J]. Automotive Engineering, 2021, 43(9): 1367-1374, 1393.
- [7] Wang B, Huang X, Wang J, et al. A robust wheel slip ratio control design combining hydraulic and regenerative braking systems for in-wheel-motors-driven electric vehicles[J]. Journal of the Franklin Institute, 2015, 352(2): 577-602.
- [8] 郭兆松,吴士力,文爱民.纯电动汽车机电复合制动的模型预测分配策略[J].机械设计与制造,2020(7):156-160.
Guo Zhao-song, Wu Shi-li, Wen Ai-min. Electrical vehicle electro-mechanical hybrid Braking torques distribution strategy based on model predicting control[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(7): 156-160.
- [9] 刘刚,靳立强,陈鹏飞.复杂工况下基于最佳滑移率的汽车牵引力控制算法[J].吉林大学学报:工学版,2016,46(5):1391-1398.
Liu Gang, Jin Li-chang, Chen Peng-fei. Vehicle traction control algorithm based on optimal slip ratio under complicated road conditions[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5): 1391-1398.
- [10] Yuan L, Zhao H, Chen H, et al. Nonlinear MPC-based slip control for electric vehicles with vehicle safety constraints[J]. Mechatronics, 2016, 38: 1-15.
- [11] 丁辉.混合动力汽车制动协调及稳定性控制策略研究[D].长春:吉林大学通信工程学院,2017.
Ding Hui. Research on braking coordination and stability control strategy of hybrid electric vehicle[D]. Changchun: College of Communications Engineering, Jilin University, 2017.
- [12] Liang K, Tu Q Z, Xin M, et al. An improved LuGre model for calculating static steering torque of rubber tracked chassis[J]. Defence Technology, 2022, 18(5): 797-810.
- [13] Zhang J, Sun W, Jing H. Nonlinear robust control of antilock braking systems assisted by active suspensions for automobile[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 27(3): 1352-1359.
- [14] Khodaparast J, Khederzadeh M. Least square and kalman based methods for dynamic phasor estimation: a review[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(1): 1-18.