

文章编号:1671-6833(2026)01-0058-08

基于最佳滑移率估计的汽车 EMB 防抱死控制

潘公宇,熊浩东

(江苏大学汽车与交通工程学院,江苏 镇江 212013)

摘要:为了解决传统的逻辑门限式 ABS 控制方法存在无法充分利用路面利用附着系数以及滑移率波动较大的问题,提出了一种基于最佳滑移率估计的汽车 EMB 防抱死控制策略。首先,建立轮胎滑移率与路面利用附着系数之间的非线性模型;其次,通过一种分段式的估计算法来快速准确地跟踪最佳滑移率;最后,基于最佳滑移率的估计结果,设计了积分滑模控制器,通过精确调节 EMB 制动力矩和电机制动力矩,使前后轮的滑移率维持在各自的最佳滑移率,保证车辆在不同路面条件下的最佳制动距离。仿真结果表明:所采用的估计算法都能够快速准确识别当前路面的最佳滑移率,估计出的最佳滑移率在稳态时与实际的最佳滑移率的最大误差不超过 3%,且积分滑模控制器可以精确控制滑移率保持在最佳滑移率附近,与 CarSim 内置的 ABS 控制策略相比,单一路面工况制动总时间缩短了 10.8%,制动总距离减少了 15.8%,对接路面工况制动总时间缩短了 18.0%,制动总距离减少了 22.2%。

关键词:最佳滑移率;电子机械制动;ABS;估计算法;积分滑模控制

中图分类号:U463.5;TP273

文献标志码:A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2025.04.017

随着汽车行业的快速发展和消费者对汽车安全性和稳定性要求的不断提高,车辆制动系统的性能优化成为了研究的热点之一。电子机械制动系统(electronic mechanical braking, EMB)凭借精简设计和易集成等优势,正逐渐成为汽车制动技术发展的焦点^[1]。防抱死制动系统(anti-lock braking system, ABS)通过一套机电一体化的装置对制动系统的压力进行调节,使滑移率保持在一定范围(10%~20%),防止车轮抱死^[2]。

在 ABS 控制策略中,滑移率是一个至关重要的参数,直接反映了车轮与地面之间的摩擦状态。所以如何准确估计并控制车轮的滑移率,使其保持在最优范围内,是提高 ABS 系统性能的关键。有很多学者对最佳滑移率的识别进行了研究,常用的方法是用递推最小二乘法对最佳滑移率进行实时准确辨识,能够快速准确地识别出不同路面的最佳滑移率^[3-4]。Devadiga 等^[5]采用一种线性插值、递归和函数逼近相结合的方法,以改善现有的最佳参考滑移算法,改进后 ABS 性能得到优化。Dinçmen^[6]提出了一种基于滑模的极值搜索算法,可以在线搜索最佳滑移比以便在未知路况下获得最大制动力。

Kim 等^[7]使用超声波发射器配合深度学习卷积神经网络(D-CNN)以及反射的超声波信号来识别路面类型,从而得到最佳滑移率。Wang 等^[8]设计了一种模糊权重路面识别算法,利用设计的模糊推理逻辑将输入信息与模块中现有标准路面的路面附着系数滑移率曲线进行比较,得到当前路面与各标准路面的相似系数,从而估计出当前路面的最佳滑移率。

在很多的防抱死制动控制研究中,最佳滑移率的选择过程往往给定的是一个固定的经验值,而不考虑不同路面之间路面附着系数的差异,且传统的逻辑门限 ABS 控制方式有着控制逻辑复杂和滑移率波动大导致舒适性较差等缺点。所以本文在文献[8]的基础上,根据不同典型路面间附着系数的差异设计了一种最佳滑移率估计算法,能够比较准确地识别出典型路面间的最佳滑移率且实时计算量较少。又因为滑模控制具有响应快速、物理实现简单、鲁棒性良好等优点,是一种良好的处理非线性系统的控制方法,能够很好地实现最佳滑移率控制^[9],所以 ABS 最佳滑移率控制方法采用积分滑模控制器控制 EMB 和轮毂电机协调配合,输出适当的制动力矩,保证最佳滑移率的精确跟踪。

收稿日期:2025-01-09;**修订日期:**2025-03-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52072157)

作者简介:潘公宇(1965—),男,江苏镇江人,江苏大学教授,博士,主要从事车辆振动仿真与控制研究,E-mail:774513912@qq.com。

引用本文:潘公宇,熊浩东. 基于最佳滑移率估计的汽车 EMB 防抱死控制[J]. 郑州大学学报(工学版),2026,47(1):58-65. (PAN G Y, XIONG H D. Automotive EMB anti-lock control based on optimal slip rate estimation[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science),2026,47(1):58-65.)

1 汽车 ABS 模型建立

为了便于理解 ABS 的工作原理,需要搭建汽车 ABS 数学模型,主要包括单轮车辆动力学模型、汽车轮胎模型和 EMB 执行机构模型。

1.1 单轮车辆动力学模型

从图 1 可以看出,对车轮受力分析可以推导出车轮旋转动力学模型公式^[10]为

$$J_w \dot{\omega}_{wi} = -T_{bi} + F_{xi} R_w - F_{zi} R_w f \quad (1)$$

式中: J_w 为车轮的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω_{wi} 为各车轮的角速度, rad/s ; T_{bi} 为各车轮的制动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; F_{xi} 为各车轮受到的纵向力, N ; F_{zi} 为各车轮受到的垂向力, N ; R_w 为车轮的滚动半径, m ; f 为车轮的滚动阻力系数。

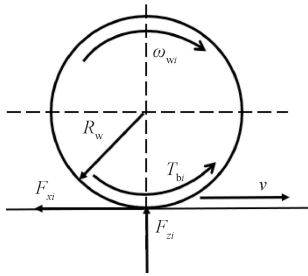


图 1 单轮受力分析图

Figure 1 Single-wheel force analysis diagram

1.2 汽车轮胎模型

在制动过程中,可以用魔术轮胎公式描述轮胎纵向力与滑移率之间的关系,魔术轮胎公式^[11]为

$$F_x = D \sin(C \cdot \arctan(B\lambda - E(B\lambda - \arctan B\lambda))); \quad (2)$$

$$C = a_0; \quad (3)$$

$$D = a_1 F_z^2 + a_2 F_z; \quad (4)$$

$$B = \frac{a_3 F_z^2 + a_4 F_z}{CD \exp(a_5 F_z)}; \quad (5)$$

$$E = a_6 F_z^2 + a_7 F_z + a_8. \quad (6)$$

式中: F_x 为纵向力; F_z 为车轮受到的垂向力; $a_0 \sim a_8$ 为不同路面轮胎与路面间关系的经验拟合参数; λ 为滑移率。

轮胎与地面的利用附着系数^[12]为

$$\mu = \frac{F_x}{F_z}. \quad (7)$$

式中: μ 为路面利用附着系数。

由式(1)可以得到纵向力为

$$F_{xi} = \frac{J_w \dot{\omega}_{wi} + T_{bi} + F_{zi} R_w f}{R_w}. \quad (8)$$

忽略载荷对地面与轮胎间纵向附着特性的影响,对魔术轮胎模型进行简化,可以得到路面利用附着系数与滑移率的关系式^[13]:

$$\mu = D \sin(C \cdot \arctan(B\lambda - E(B\lambda - \arctan B\lambda))). \quad (9)$$

1.3 EMB 执行机构模型

EMB 执行机构模型主要由电机模型、传动机构模型和负载模型组成。

1.3.1 电机模型

EMB 执行机构模型中使用的电机为无刷直流力矩电机,其动态方程^[14]为

$$U = L_a \dot{I}_a + R_a I_a + K_e \omega_m; \quad (10)$$

$$J \dot{\omega}_m = K_t I_a - T_f - T_L. \quad (11)$$

式中: U 为电枢电压, V ; L_a 为电枢电感, H ; I_a 为电枢电流, A ; R_a 为电枢电阻, Ω ; K_e 为电机反电动势系数, $\text{V}/(\text{s} \cdot \text{rad})$; ω_m 为电机转速; J 为等效转动惯量; T_f 为电机摩擦转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; T_L 为负载转矩; K_t 为电机电矩系数, $\text{N} \cdot \text{m}/\text{A}$ 。

1.3.2 传动机构模型

传动机构包括行星齿轮减速器模块和滚珠丝杠模块,其作用是按固定比例增大电机输出力矩并将行星齿轮减速器的转动转换为滚珠丝杠螺母轴向位移量。

$$x = \frac{\theta_m P_n}{2\pi i}. \quad (12)$$

式中: θ_m 为电机转角, rad ; i 为行星齿轮减速器传动比; x 为滚珠丝杠螺母轴向位移量, mm ; P_n 为滚珠丝杠导程, mm 。

1.3.3 负载模型

在活塞推动制动块压紧制动盘过程中,首先要消除制动块与制动盘间的间隙,消除间隙后,进入电机堵转状态,此时,制动夹紧力与制动盘的变形量存在非线性关系。

通过对提出的制动器方案进行实验,并设计制动间隙为 0.2 mm ,可以得到制动夹紧力 F_{cl} 与滚珠丝杠螺母轴向位移量 x 之间的关系式^[15]为

$$F_{cl} = 1\,049.2(x - 0.2)^3 + 20\,161.9(x - 0.2)^2 + 155.5(x - 0.2). \quad (13)$$

最终可以得到制动器输出的制动力矩为

$$T_b = 2F_{cl} \mu_b R_b. \quad (14)$$

式中: T_b 为输出的制动力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; μ_b 为制动盘的摩擦系数; R_b 为制动盘的有效摩擦半径, m 。

2 最佳滑移率估计算法

在积分滑模控制器的设计中,精确且快速响应的最佳滑移率估计算法至关重要。该算法需要估计车轮滑移率在最优区间,以最大化路面利用附着系

数,提升车辆的制动效能。

2.1 基于 EMB 的 ABS 工作原理

在汽车制动过程中,汽车车轮中心速度即实际车速与轮速并不一定相同,一般用滑移率来定义,其公式^[16]为

$$\lambda = \frac{v - \omega_w R_w}{v} \quad (15)$$

式中: v 为车速, m/s。

传统的 ABS 执行器一般使用液压助力,通过液压泵、电磁阀等液压元件调节制动轮缸的压力,从而控制车轮的滑移率,响应速度较慢。而基于 EMB 的 ABS 控制策略则是在接收到紧急制动信号后,由级联式 PI 控制策略将制动信号转变成电机信号,再由电机控制器驱动电机工作,经过传动机构将输出力矩放大并将旋转运动转变成水平运动,从而推动摩擦片移动产生制动力,实现制动力的精确调节,确保车轮滑移能够控制在最佳滑移率附近。EMB 省去了液压系统中的液压管路、泵、阀等复杂元件,减少了能量传递过程中的损失和延迟,从而具有更快的响应速度和更高的控制精度。

2.2 最佳滑移率估计算法的设计

本文使用文献[17]的用来描述轮胎路面利用附着系数和滑移率关系的经验公式:

$$\mu(\lambda) = C_1(1 - e^{-C_2\lambda}) - C_3\lambda \quad (16)$$

式中: C_1 、 C_2 、 C_3 均为路面的拟合参数。

如果已知 C_1 、 C_2 、 C_3 , 对式(16)求导找出导数为零的点就对应路面的最佳滑移率 λ_{opt} 和峰值路面利用附着系数 μ_{opt} 。各典型路面的曲线如图 2 所示,其拟合参数、最佳滑移率和峰值路面利用附着系数如表 1 所示。由图 2 和表 1 可知,峰值路面利用附着系数越大,对应的最佳滑移率也越大;同时还可知,在小滑移率区 $[0, 0.005]$, 各曲线的路面利用附着系数的区别不大,而在其他滑移率区间 $[0.005, 1]$, 各曲线的路面利用附着系数区别较大,而这个特点可以作为识别路面最佳滑移率的重要特征。

申超^[18]通过当前路面与模块中存在的典型路面的路面利用附着系数-滑移率(μ - λ)曲线进行对比,求出典型路面下的权重系数,进而获得当前路面下车轮最佳滑移率。为了减少此估计算法的计算量,可以先通过路面利用附着系数的大小确定当前路面处于哪两条典型路面之间,再通过当前路面的利用附着系数与两条典型路面的利用附着系数差值的关系去设计两条典型路面的权重,最后根据权重估计出当前路面的最佳滑移率。估算公式为

$$\lambda_{opt} = \frac{x_1 \lambda_{opt1} + x_2 \lambda_{opt2}}{x_1 + x_2}; \quad (17)$$

$$x_1 = \frac{1}{|\mu_1 - \mu| + \varphi}; \quad (18)$$

$$x_2 = \frac{1}{|\mu_2 - \mu| + \varphi} \quad (19)$$

式中: x_1 、 x_2 为两条相邻典型路面的权重系数; λ_{opt} 、 λ_{opt1} 和 λ_{opt2} 分别为当前路面、典型路面 1 和典型路面 2 的最佳滑移率; μ 、 μ_1 和 μ_2 分别为当前路面、典型路面 1 和典型路面 2 的路面利用附着系数; φ 为一个接近于零的极小正数。

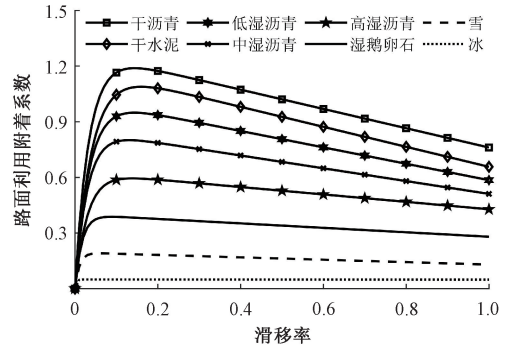


图 2 典型路面 μ - λ 曲线图

Figure 2 Typical pavement μ - λ curve

表 1 典型路面拟合参数

Table 1 Typical pavement fitting parameters

路面	C_1	C_2	C_3	λ_{opt}	μ_{opt}
干沥青路面	1.281	29.993	0.520	0.170 0	1.171
干水泥路面	1.196	25.166	0.539	0.160 0	1.092
低湿沥青路面	1.027	29.494	0.442	0.143 0	0.950
中湿沥青路面	0.856	33.821	0.345	0.131 0	0.800
高湿沥青路面	0.628	33.765	0.200	0.110 0	0.600
湿鹅卵石路面	0.400	60.010	0.120	0.088 0	0.386
雪路面	0.195	94.129	0.065	0.065 0	0.190
冰路面	0.050	306.390	0.001	0.031 5	0.050

为了验证提出的最佳滑移率估计算法的准确性,首先在 8 条典型路面任意选择相邻的 3 条典型路面,之后选取这 3 条路面中的高附着与低附着路面为估计的参考路面,中附着路面为识别目标,识别结果如图 3 所示。选择估计误差 e 和估计平均误差 \bar{e} 作为估计准确度的评价指标^[19]:

$$e(\lambda) = \lambda_{opt}(\lambda) - \lambda_{opt}^*; \quad (20)$$

$$\bar{e} = \int_0^1 |e(\lambda)| d\lambda \quad (21)$$

式中: λ_{opt}^* 为最佳滑移率的实际值,即估计目标。

各典型路面的估计平均误差和相对误差如表 2 所示。

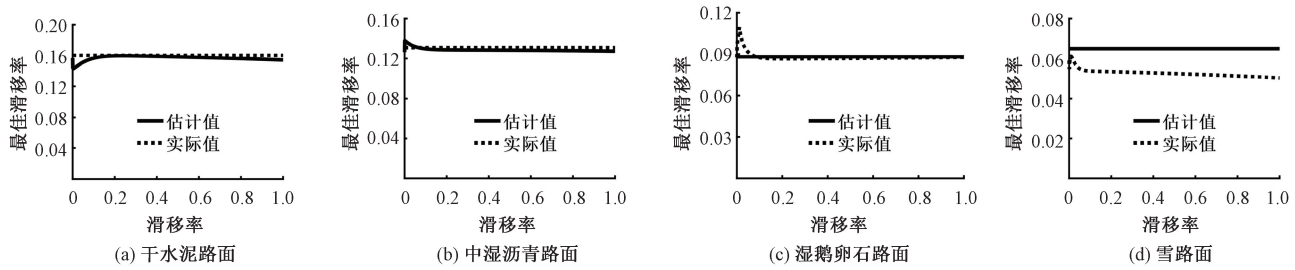


图 3 典型路面估计结果

Figure 3 Typical pavement estimation results

表 2 估计误差

Table 2 Estimation error

路面	估计平均误差	相对误差/%
干水泥路面	0.003 3	2.06
低湿沥青路面	0.003 1	2.17
中湿沥青路面	0.002 6	1.99
高湿沥青路面	0.002 6	2.36
湿鹅卵石路面	0.001 5	1.70
雪路面	0.012 3	18.92

由图 3 和表 2 可知,除雪路面之外的各路面的估计平均误差一般在 0.001~0.003 5 之间,相对误差较小。但同时可知其估计的雪路面最佳滑移率的相对误差较大,达到了 18.92%。考虑到雪路面本身的最佳滑移率较小,所以还是认为该估计算法具有较好的估计准确度。

综上所述,本文提出的最佳滑移率的估计算法在全滑移率范围内有着较好的估计准确度,虽然在雪路面中估计的最佳滑移率的相对误差相对较大,但还是能够比较正确地估计出相邻路面间的最佳滑移率,所以可以认为该估计算法对各典型路面的最佳滑移率的估计准确度较高,因此也可以认为该估计算法对典型路面之间的目标路面同样具备较高的估计准确度。

2.3 基于 CarSim-Simulink 的车辆-路面模型

本文研究对象是分布式独立驱动电动汽车,整车模型参考的是 CarSim 中的一款 B 型车,具体参数如表 3 所示。

在 2.2 节估计算法用到的路面模型是 Burckhardt 路面模型,但在仿真过程中本文使用的模型为 CarSim 软件内部的模型,所以有必要对各典型路面进行仿真数据的采集以及参数拟合,便于估计算法的实现。

首先需要在 CarSim 中设定仿真工况,因在路面数据采集过程中需要采集各路面全滑移率的 μ - λ 数据,所以设定仿真工况为初始车速 100 km/h,制动

压力在 0~5 s 上升到 10 MPa,并关闭车辆的 ABS 功能。

表 3 CarSim 车辆参数

Table 3 CarSim vehicle parameters

参数	数值
整车质量/kg	1 260
轴距/m	2.6
车轮滚动半径/m	0.325
车轮转动惯量/($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	1.5
车轮滚动阻力系数	0.003 8
(前轮制动转矩/制动压力)/($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{MPa}^{-1}$)	150
(后轮制动转矩/制动压力)/($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{MPa}^{-1}$)	100

之后 CarSim 中的路面参数设置为选择的 5 种典型路面的峰值路面利用附着系数。为了提高估计算法的准确度,在仿真过程中加入了一条峰值路面利用附着系数为 0.5 的路面,作为对 5 种典型路面的补充。考虑到前后两轮的最佳滑移率可能不同,所以由 CarSim 输出车速、左前后轮轮速、左前后轮的制动力矩、左前后轮的垂直载荷,最终得到 6 条路面的 μ - λ 曲线数据。并利用得到的数据对简化的魔术轮胎模型参数进行拟合,拟合数据如表 4 所示。

得到各典型路面的利用附着系数与滑移率的关系式后,利用式 (17)~(19) 就可以搭建最佳滑移率识别模块。但考虑到提出的最佳滑移率估计算法需要实时判断当前路面处于哪两条典型路面之间,运算量较大,同时考虑到在小滑移率区各曲线的路面利用附着系数区别不大,加上典型路面曲线样本数据有限,对于非典型路面条件下的目标路面,由于缺少相关路面信息,所以想要精确预估其最佳滑移率非常困难,因而对前后车轮的路面利用附着系数大于干沥青路面与小于冰路面的目标路面的最佳滑移率估计过程进行了简化,最终最佳滑移率估计公式如下所示:

表4 各典型路面魔术轮胎拟合参数

Table 4 Fitting parameters for each typical road surface with magic tire

路面	前轮					后轮				
	B	C	D	E	λ_{opt}	B	C	D	E	λ_{opt}
干沥青路面	17.96	1.374	1.144	0.469	0.165	13.025	1.815	1.177	0.970	0.188
干水泥路面	19.64	1.370	1.067	0.488	0.155	20.713	1.308	1.100	0.416	0.176
中湿沥青路面	26.30	1.355	0.791	0.420	0.114	27.635	1.280	0.805	0.240	0.128
0.5附着路面	43.48	1.310	0.496	0.253	0.070	47.405	1.241	0.510	0.166	0.080
雪路面	110.06	1.333	0.185	0.159	0.027	114.896	1.330	0.187	0.168	0.027
冰路面	460.21	1.316	0.049	0.222	0.007	437.550	1.319	0.049	0.057	0.009

$$\lambda_{opt}(\lambda, \mu) =$$

$$\begin{cases} \lambda_{opt1}, \mu \leq \mu_1(\lambda); \\ f(s, \mu, \mu_1, \mu_2, \lambda_{opt1}, \lambda_{opt2}), \mu_1(\lambda) < \mu \leq \mu_2(\lambda); \\ f(s, \mu, \mu_2, \mu_3, \lambda_{opt2}, \lambda_{opt3}), \mu_2(\lambda) < \mu \leq \mu_3(\lambda); \\ f(s, \mu, \mu_3, \mu_4, \lambda_{opt3}, \lambda_{opt4}), \mu_3(\lambda) < \mu \leq \mu_4(\lambda); \\ f(s, \mu, \mu_4, \mu_5, \lambda_{opt4}, \lambda_{opt5}), \mu_4(\lambda) < \mu \leq \mu_5(\lambda); \\ f(s, \mu, \mu_5, \mu_6, \lambda_{opt5}, \lambda_{opt6}), \mu_5(\lambda) < \mu \leq \mu_6(\lambda); \\ \lambda_{opt6}, \mu > \mu_6(\lambda). \end{cases} \quad (22)$$

式中:下标 1, 2, ..., 6 分别表示冰路面、雪路面、0.5 附着路面、中湿沥青路面、干水泥路面、干沥青路面;
 $f(\cdot)$ 为本文提出的最佳滑移率估计算法。

3 基于 EMB 的 ABS 控制策略设计

3.1 基于 ABS 的复合制动控制策略设计

复合制动即利用电动机的再生制动和 EMB 共同完成车辆的制动功能。电动机采用的是轮毂电机,类型为永磁同步电机,4 个轮毂电机分别安装在各个车轮的轮毂内,能够实现各轮驱动转矩独立可控。在制动过程中,可以根据峰值路面利用附着系数(μ_{opt})和制动强度 Z 的大小关系,将制动工况分为常规制动工况($Z \leq \mu_{opt}$)和紧急制动工况($Z > \mu_{opt}$),二者有着不同的复合制动控制策略^[20]。在常规制动工况,路面提供的附着力可以满足制动需求,车轮一般不会抱死,ABS 一般不启动。复合制动控制策略的目标一般是在保持制动稳定性的同时尽可能提高再生制动的占比,从而提高能量回收量。而在紧急制动工况中,因为路面所能提供的附着力已经不能满足制动需求,车轮极易发生抱死,所以此时 ABS 启动,使滑移率能够尽可能维持在最佳滑移率附近。EMB 有着响应速度快,控制精度高等优点,能够很好地与轮毂电机进行制动力的协调配合。为了在紧急制动过程中充分发挥轮毂电机的制动力矩,提高能量回收量,制动力矩优先由电机制动力矩提供,不足的部分由 EMB 制动力矩提供。

因为本文主要考虑的是 ABS 的功能,所以以紧

急制动工况为研究对象,具体控制策略如图 4 所示。

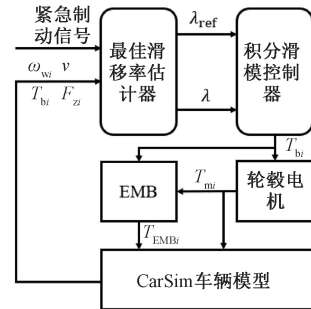


图4 CarSim-Simulink 联合仿真模型

Figure 4 CarSim-Simulink co-simulation model

首先在接收到紧急制动信号后,ABS 开始工作,最佳滑移率估计器是由第 2 节最佳滑移率估计算法搭建的估计模型,可以通过 CarSim 提供的车速、轮速、制动力矩、垂直载荷等信号估计出当前路面的最佳滑移率,并将实际滑移率信号和估计出的最佳滑移率信号输入到积分滑模控制器中,积分滑模控制器输出需要的单轮总制动力矩(T_{bi})。当轮毂电机产生的电机制动力矩能够满足总制动力矩需求时,单轮制动力矩完全由电机制动力矩提供,EMB 制动系统不工作,此时为纯电机制动;当最大电机制动力矩不能满足总制动力矩需求时,不足部分由 EMB 制动力矩补充。考虑到当车速过小时,再生制动的能量回收效果不好,所以车速 $v \leq 3$ m/s 时,电机不进行制动工作,由 EMB 提供制动力,且因为此时车速较低,需要关闭 ABS,此时采用常规制动控制方法,将 EMB 输出的制动力矩都设置为 10 MPa,能让车辆比较平稳地停下。

3.2 积分滑模控制器的设计

积分滑模控制器需要实现的功能是让实际滑移率能够跟踪目标滑移率,所以选择实际滑移率 λ 为状态变量,最佳滑移率为控制目标,设计控制器的跟踪误差为

$$e = \lambda - \lambda_{ref} \quad (23)$$

切换函数 s 设计为

$$s = e + b_1 \int e dt. \quad (24)$$

式中: b_1 为大于零的常数。

对式(15)求导得

$$\dot{\lambda} = \frac{(1 - \lambda)\dot{v} - \dot{\omega}_{wi}R_w}{v} \quad (25)$$

对切换函数求导得

$$\dot{s} = \dot{\lambda} + b_1 e_0 \quad (26)$$

将式(25)以及式(1)代入式(26)得

$$\dot{s} = \frac{J_w(1 - \lambda)\dot{v} + (T_{bi} - F_{xi}R_w + F_{zi}R_w f)R_w}{J_w v} + b_1 e_0 \quad (27)$$

为了减小系统的抖振,采用一种改进的指数趋近率:

$$\begin{cases} \dot{s} = -e^2 \varepsilon \cdot \text{sat}(s) - ks; \\ \text{sat}(s) = \frac{s^2}{|s| + d} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\varepsilon > 0$; $k > 0$; d 为大于零的极小量。

所以可以得到单轮总制动力矩:

$$T_{bi} = -\frac{J_w}{R_w}(v(e^2 \varepsilon \cdot \text{sat}(s) + ks + b_1 e) + (1 - \lambda)\dot{v}) + F_{xi}R_w - F_{zi}R_w f_0 \quad (29)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2}s^2 \quad (30)$$

对式(30)求导得

$$\dot{V} = s \cdot \dot{s} = -e^2 \varepsilon \cdot \frac{s^2}{|s| + d} - ks^2 \leq 0 \quad (31)$$

所以定义的 Lyapunov 函数满足 Lyapunov 稳定性判据,该积分滑模控制器是渐近稳定的。

4 仿真结果分析

4.1 单一路面仿真分析

以 0.6 附着路面对控制策略进行验证,初始车速为 60 km/h,对应的前后轮最佳滑移率分别为 0.086,0.096,仿真结果如图 5 所示。从图 5(a)和图 5(b)可以看出,积分滑模控制方法在 ABS 工作时间内可以使前后轮的滑移率快速且准确地跟踪估计的最佳滑移率,且估计出的最佳滑移率在稳态时

与实际的最佳滑移率的最大误差不超过 3%。而在制动后期,由于此时车速 $v \leq 3$ m/s,EMB 输出的制动力矩设置为 10 MPa,轮速快速降低,实际滑移率快速增大到 1.0,而估计的最佳滑移率会在几种典型路面的最佳滑移率区间内,前后轮最佳滑移率的估计值不会大于干沥青路面的最佳滑移率。图 5(c)为车速和轮速图,结果表明,在车速为 3 m/s 之前车轮未发生抱死,前后轮轮速在 0.5 s 前发生轻微波动,之后维持线性变化的趋势。图 5(d)为本文控制策略与 CarSim 内部策略控制的对比图,且 CarSim 中开启了 ABS 功能。可以看出,CarSim 控制策略的制动总时间为 3.536 s,制动总距离为 32.515 m;而本文控制策略的制动总时间为 3.154 s,制动总距离为 27.380 m,制动总时间缩短了 10.8%,制动总距离减少了 15.8%,说明本文的控制策略有着更好的制动性能,能够提高车辆的制动安全性。

4.2 对接路面仿真分析

设置对接路面仿真工况,初始车速为 100 km/h 并进行紧急制动,对接路面前 50 m 的路面利用附着系数为 0.801 3,之后驶入附着系数 0.380 0 的路面,直到车速为 0。对应的前 50 m 的前后轮最佳滑移率分别为 0.114 0,0.128 4;后面路程的前后轮最佳滑移率分别为 0.054 0,0.055 0。仿真结果如图 6 所示。

从图 6(a)和图 6(b)可以看出,在前 50 m 处,前后轮滑移率在 1 s 左右到达最佳滑移率并很好地跟踪估计的最佳滑移率,在路面发生变化后,前后轮滑移率经过一定时间的波动后依然能很好地跟踪最佳滑移率,证明估计算法有较高的准确度。图 6(c)为车速和轮速图,结果表明,前后轮轮速在对接处会有着一定量的波动,但之后依然维持线性变化的趋势。图 6(d)为本文控制策略与 CarSim 内部策略控制在对接路面的制动距离的对比图,CarSim 中同样开启了 ABS 功能。其中 CarSim 控制策略的制动总时间为 6.865 s,制动总距离为 86.660 m;而本文控制策略的制动总时间为 5.632 s,制动总距离为

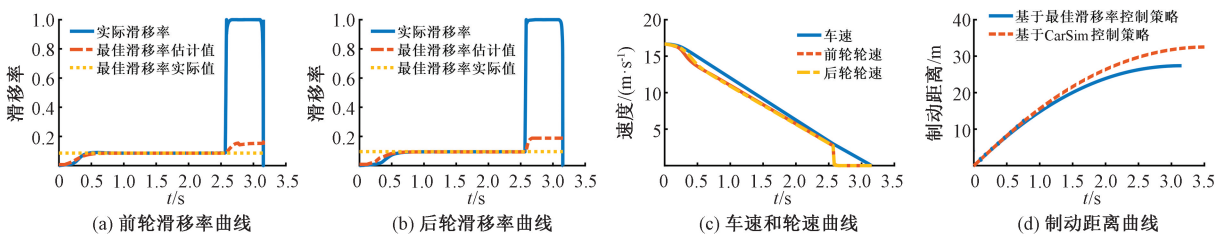


图 5 单一路面仿真结果

Figure 5 Single pavement simulation results

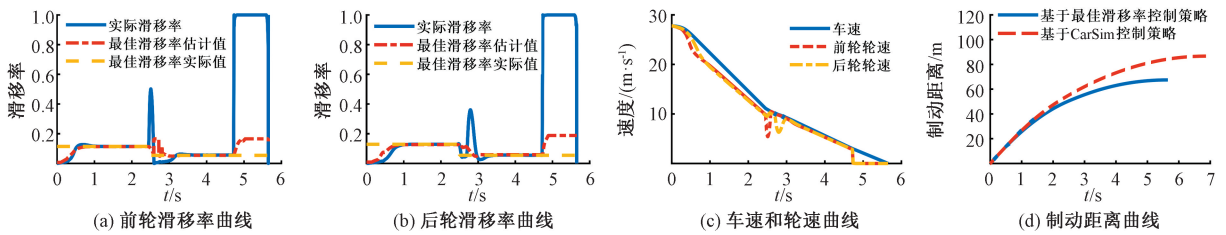


图6 对接路面仿真结果

Figure 6 Docking pavement simulation result

76.460 m,制动总时间缩短了18.0%,制动总距离减少了22.2%。说明本文的控制策略在对接路面条件下依然保持了出色的制动性能与制动稳定性。

5 结论

本文在使用 EMB 系统的基础上,设计了基于最佳滑移率估计的 ABS 积分滑模控制算法。其中,在最佳滑移率估计部分,同时考虑了典型路面的峰值路面利用附着系数和最佳滑移率间的差异,且为了减少估计过程中的计算量,对估计过程进行了预先处理,平衡了估计算法实时计算量小与估计准确度高要求。基于 CarSim 和 Simulink 的联合仿真模型验证了估计算法在典型路面间的单一路面和对接路面都有良好的准确度,并证明了 ABS 积分滑模控制器具有良好的控制效果,能够显著降低车辆的制动距离和制动时间,提高车辆的安全性。相比于 CarSim 内部基于逻辑门限值的 ABS 算法,本文基于最佳滑移率估计的 ABS 控制策略在提高汽车制动性能方面具有显著优势。

参考文献:

[1] 陈焯强. 浅谈 EMB 线控制动系统控制策略研究[J]. 内燃机与配件, 2023(17): 76-78.
CHEN Y Q. Research on control strategy of EMB line control system[J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2023(17): 76-78.

[2] 黄会茹. 浅谈 ABS 汽车防抱死制动系统[C]//第十三届河南省汽车工程科技学术研讨会. 信阳: 河南省汽车工程学会, 2016: 113-114.
HUANG H R. A brief discussion on ABS automotive anti lock braking system[C]// The 13th Henan Province Automotive Engineering Technology Academic Symposium. Xinyang: Society of Automotive Engineers of Henan, 2016: 113-114.

[3] 孙鹏鹏. 紧急制动工况下四轮轮毂电动汽车的滑移率控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022:24-33.
SUN P P. Research on slip rate control strategy of four in-wheel motors electric vehicle under emergency braking

condition[D]. Changchun: Jilin University, 2022:24-33.

- [4] KIM C S, HAHN J O, HONG K S, et al. Estimation of tire-road friction based on onboard 6-DoF acceleration measurement[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2015, 64(8): 3368-3377.
- [5] DEVADIGA S S, GAURKAR P V, VIVEKANANDAN G, et al. A computationally and data-efficient reference slip estimation algorithm for antilock brake system[C]//2023 9th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). Piscataway: IEEE, 2023: 471-476.
- [6] DINÇMEN E. Adaptive extremum seeking scheme for ABS control[C]//2014 13th International Workshop on Variable Structure Systems (VSS). Piscataway: IEEE, 2014: 1-6.
- [7] KIM M H, PARK J, CHOI S. Road type identification ahead of the tire using D-CNN and reflected ultrasonic signals[J]. International Journal of Automotive Technology, 2021, 22(1): 47-54.
- [8] WANG H L, WANG J N, PI D W, et al. Optimization of commercial vehicle mechatronics composite ABS braking control considering braking efficiency and energy regeneration[J]. IEEE transactions on transportation electrification, 2024: 3421303.
- [9] 尹安东, 李聪聪. 电动汽车 ABS 最优滑移率滑模控制研究[J]. 汽车科技, 2018(2): 8-14.
YIN A D, LI C C. Research on optimal slip control for ABS of electric vehicle based on sliding mode control[J]. Auto Sci-Tech, 2018(2): 8-14.
- [10] 朱振华. 独立驱动/制动电动汽车制动能量回收优化控制策略研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
ZHU Z H. Research on braking energy recovery optimal control strategy of independent drive/brake electric vehicle[D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [11] 潘公宇, 徐申. 考虑道路识别的四驱电动汽车再生制动策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2024, 45(1): 1-7.
PAN G Y, XU S. Regenerative braking control strategy of four-wheel drive electric vehicle considering road identification[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science

- Edition), 2024, 45(1): 1-7.
- [12] WANG J C, HE R. Varying charge voltage in the steps control method of ABS for in-wheel motors driven electric vehicles based on an improved LQG scheme[J]. IEEE Access, 2018, 6: 15039-15050.
- [13] 夏利红. 基于 EMB 的分布式复合制动系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- XIA L H. The study on distributed hybrid braking system based on EMB[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [14] 潘公宇, 徐豪晖, 刘志强, 等. 汽车电子机械制动系统的 ABS 自抗扰控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(6): 55-62.
- PAN G Y, XU H H, LIU Z Q, et al. ABS automatic disturbance rejection control of automotive electronic mechanical braking system[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(6): 55-62.
- [15] 刘志强, 陈玉锦, 陈林. 电子机械制动器的间隙调控方法[J]. 兵工学报, 2022, 43(7): 1478-1487.
- LIU Z Q, CHEN Y J, CHEN L. A gap control method for electromechanical brakes[J]. Acta Armamentarii, 2022, 43(7): 1478-1487.
- [16] 余志生. 汽车理论[M]. 6 版. 北京: 机械工业出版社, 2019: 115-117.
- YU Z S. Automobile theory[M]. 6th ed. Beijing: China Machine Press, 2019: 115-117.
- [17] ZHANG J H, SUN W C, JING H H. Nonlinear robust control of antilock braking systems assisted by active suspensions for automobile[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27(3): 1352-1359.
- [18] 申超. 基于路面识别的四轮轮毂电机电动汽车驱动防滑控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016: 33-36.
- SHEN C. Study on acceleration slip regulation control strategy of four-wheel independent drive electric vehicle based on road identification[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016: 33-36.
- [19] 何仁, 冯海鹏. 基于峰值附着系数曲面的路面辨识算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(4): 1245-1256.
- HE R, FENG H P. Road surface identification algorithm based on peak adhesion coefficient surface[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(4): 1245-1256.
- [20] 何仁, 李梦琪. 基于路面识别的复合制动与 ABS 集成控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 20-26.
- HE R, LI M Q. Integrated control strategy of combined braking system and ABS based on road identification[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 20-26.

Automotive EMB Anti-lock Control Based on Optimal Slip Rate Estimation

PAN Gongyu, XIONG Haodong

(School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The traditional logic threshold-based ABS control method failed to fully utilize the road adhesion coefficient and caused significant slip rate fluctuations during operation. To address this issue, an automotive EMB anti-lock control strategy based on optimal slip rate estimation was proposed. The proposed strategy initially established a nonlinear model between tire slip rate and road utilization adhesion coefficient, and then employed a segmented estimation algorithm to rapidly and accurately track the optimal slip rate. Subsequently, based on the estimated optimal slip rate, an integral sliding mode controller was designed. By precisely adjusting the EMB braking torque and electric braking torque, the slip rates of the front and rear wheels were maintained at their respective optimal slip rates, ensuring optimal braking distances for automobiles under various road conditions. Simulation results indicated that the employed estimation algorithm was capable of identifying the optimal slip rate of the current road surface rapidly and accurately, with the maximum error between the estimated optimal slip rate and the actual optimal slip rate at steady state not exceeding 3%. Furthermore, the integral sliding mode controller could precisely control the slip rate to remain near the optimal slip rate. Compared to the ABS control strategy built into CarSim, the total braking time in a single road condition scenario was shortened by 10.8%, and the total braking distance was reduced by 15.8%. For docking pavement conditions, the total braking time was shortened by 18.0%, and the total braking distance was reduced by 22.2%.

Keywords: optimal slip rate; electro-mechanical braking; ABS; estimation algorithm; integral sliding mode control