

doi: 10.7690/bgzd.2026.01.018

基于扩展卡尔曼滤波器的路面附着系数辨识算法

张宏超^{1,2}, 许峻铭², 李淑慧¹, 宋 宝², 孙云龙¹, 梁晓明¹, 陈晓乐¹, 江 达¹, 杜 玲¹

(1. 中国北方车辆研究所轮式系统技术部, 北京 100072; 2. 华中科技大学机械科学与工程学院, 武汉 430074)

摘要: 为有效解决现有的路面峰值附着系数估计方法在非结构性路面估计精度较差的难题, 提出一种在非结构性路面下基于扩展卡尔曼滤波器的路面峰值附着系数估计方法。通过常用的车载传感器采集车辆位姿和车轮转角等车辆运动响应信号, 在传统车辆模型中引入等效悬架模型计算车轮垂向载荷等运动参数; 并将参数作为输入, 通过Dugoff轮胎模型计算扩展卡尔曼滤波器的系数矩阵; 引入等效悬架模型优化车轮垂向载荷的计算以及结合车辆位姿数据对车辆加速度进行修正, 提高对非结构路面下的路面附着系数辨识精度。通过在Carsim配置直线制动场景进行多工况仿真的结果表明: 附着系数的估计精度提高6.6%以上, 证明路面附着系数估计方法的有效性和准确性。

关键词: 非结构性路面; 状态估计; 扩展卡尔曼滤波器; 等效悬架模型; 路面附着系数

中图分类号: TP301.6; U461.6 **文献标志码:** A

Identification Algorithm of Road Adhesion Coefficient Based on Extended Kalman Filter

Zhang Hongchao^{1,2}, Xu Junming², Li Shuhui¹, Song Bao², Sun Yunlong¹,Liang Xiaoming¹, Chen Xiaole¹, Jiang Da¹, Du Ling¹

(1. Department of Wheel Systems Technology, North China Vehicle Research Institute, Beijing 100072, China;

2. School of Medical Science & Engineering, Huazhong University, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to effectively solve the problem of poor estimation accuracy of the existing road peak adhesion coefficient estimation method on the non-structural road surface, a road peak adhesion coefficient estimation method based on the extended Kalman filter under the non-structural road surface is proposed. Acquiring vehicle motion response signals such as a vehicle pose, a wheel rotation angle and the like through a common vehicle-mounted sensor, introducing an equivalent suspension model into a traditional vehicle model to calculate motion parameters such as a wheel vertical load and the like, taking the parameters as input, and calculating a coefficient matrix of an extended Kalman filter through a Dugoff tire model; An equivalent suspension model is introduced to optimize the calculation of the vertical load of the wheel, and the acceleration of the vehicle is corrected by combining the position and posture data of the vehicle, so that the identification accuracy of the road adhesion coefficient under the unstructured road surface is improved. The simulation results of multiple driving conditions in Carsim with straight line braking show that the estimation accuracy of adhesion coefficient is improved by more than 6.6%, which proves the effectiveness and accuracy of the road adhesion coefficient estimation method.

Keywords: unstructured pavement; state estimation; extended Kalman filter; equivalent suspension model; pavement adhesion coefficient

0 引言

在智能汽车领域, 非结构性路面具有复杂性和随机性的特点, 更容易引发安全问题, 并对车辆的安全控制提出更高的要求。车辆的主动安全控制常常需要调节轮胎和路面之间的作用力, 而路面能提供的最大作用力受路面峰值附着系数的制约^[1]; 因此, 轮胎路面峰值附着系数是实现车辆运动精确控制的关键参数, 也是智能车辆决策规划的重要输入。准确估计非结构性路面的峰值附着系数对车辆的安全行驶具有重要意义。

目前, 路面峰值附着系数的估计主要分为基于效果的方法 (Effect-based) 和基于原因方法 (Cause-based) 2类。基于原因的方法需要利用专用的测量设备 (光学传感器或超声波传感器等设配) 检测路面状况以估算路面峰值附着系数^[2-4]。例如, 文献[5]为了提高道路估计算法的收敛速度, 设计了一种基于车载摄像头的轮胎路面峰值附着系数估计方法。文献[6]提出采用声波发射装置以特定的声波和发射角度向路面连续发射声波, 分析接收到的声波频谱, 估算出路面的粗糙度, 从而识别路面。文献[7]

收稿日期: 2024-11-08; 修回日期: 2024-12-18

第一作者: 张宏超 (1978—), 男, 河南人, 硕士。

通信作者: 李淑慧 (1991—), 女, 河南人, 博士。

设计了一种基于车载摄像头的轮胎路面峰值附着系数估计方法,用于提高道路估计算法的收敛速度,但是易受光照的影响。总之,基于原因方法估计精确度高,但添加的专用测量设备价格昂贵,且受大雾、冰雪等天气影响较大。

基于效果的方法通过测量分析路面引起的车辆响应估计路面附着系数的大小^[2]。例如,通过附着系数-滑移率曲线的估计方法^[8-9]和利用回正力矩与轮胎侧偏角的关系的估计方法^[10-11]。这些方法仅需要常用的车载传感器,如轮速传感器、位姿传感器等,但使用工况有限,不能实现纵向力和侧向力耦合工况的路面峰值附着系数估计。为此,文献[12]构建了一种依靠结构化道路激光雷达反射强度特征与路面峰值附着系数映射关系的估计方法;然而,此类基于轮胎响应识别的方法会由于轮胎噪声产生机理复杂而受到许多外界不确定性因素的影响,有时难以准确估计路面峰值附着系数。文献[13]提出了一种利用决策树估计附着系数的方法,但是需要事先采集大量的数据,不适合在线估计。此外,学者们提出了基于车辆动力学模型和滤波器(如卡尔曼滤波器^[14]、扩展卡尔曼滤波器^[15]、无迹卡尔曼滤波器^[16-17]、容积卡尔曼滤波^[18],自适应均方容积卡尔曼滤波^[19]等)的路面峰值附着系数估计方法。例如文献[18]建立了含 Dugoff 轮胎模型的非线性三自由度模型。基于三阶容积卡尔曼滤波原理,设计了车辆行驶状态估计器、道路附着系数估计器和车辆参数估计器。文献[19]设计了一种基于自适应平方根卡尔曼滤波(ASRCKF)和分区相似性原理(SP)的纵向-横向协同估计算法,对四轮独立驱动电动汽车的车辆状态和轮胎-路面峰值附着系数进行了顺序估计。总之,该类算法大多建立七自由度车辆动力学模型和基于 Carsim 仿真软件自带的模型, Carsim 自带的车辆模型复杂度和自由度比目前常用的七自由度高很多,并且对于一些难以用模型去拟合的参数应该是直接用真实数据去替代的,更接近于实际车辆模型。此外,在这 2 类模型的基础上,采用滤波算法用于解决纵向力和侧向力耦合工况下路面附着系数的准确估计,具有求解过程简单,收敛速度快的优点,但该类方法并未充分考虑非结构路面的路面不平度和大坡度特征,仍面临一些挑战:1) 现有算法将车身和车轮视为刚性连接,导致计算的轮胎垂向载荷在路面不平条件下误差很大,使估计结果不准确;2) 现有算法往往忽略重力对车身加速度的影

响,直接将车身加速度作为观测量输入观测器中,使得算法无法在具有一定坡度的路面下准确估计。

针对上述问题,笔者在基于车辆动力学响应设计路面附着系数估计方法的基础上,考虑车辆垂向静、动载荷对车身加速度的影响,使用扩展卡尔曼滤波的方法,实现对非结构性路面附着系数参数的辨识。

1 基于等效悬架模型的车辆垂向载荷模型

在实现路面附着系数参数辨识中,需要获取车辆轮胎侧偏角、滑移率和垂向载荷,在非结构性路面下,垂向载荷会受到车辆垂向加速度的影响;因此,需要搭建精度更高的轮胎垂向载荷估计模型。笔者建立了基于等效悬架模型的车辆垂向载荷模型。

通过安装在车辆上的传感器获取车速信号、前轮转角信号以及横摆角速度信号,计算各轮侧偏角 α_{ij} 。

$$\alpha_{fl} = -\left(\delta - \arctan \frac{v_y + L_f \omega_z}{v_x - B_f \omega_z / 2} \right); \quad (1)$$

$$\alpha_{fr} = -\left(\delta - \arctan \frac{v_y + L_f \omega_z}{v_x + B_f \omega_z / 2} \right); \quad (2)$$

$$\alpha_{rl} = \arctan \frac{v_y - L_r \omega_z}{v_x - B_r \omega_z / 2}; \quad (3)$$

$$\alpha_{rr} = \arctan \frac{v_y - L_r \omega_z}{v_x + B_r \omega_z / 2}。 \quad (4)$$

式中: v_x 和 v_y 分别为车辆纵向和横向速度; ω_z 为车辆横摆角速度; δ 为前轮转角; B_f 和 B_r 为车辆前轮轮距和后轮轮距; L_f 和 L_r 为质心到前后车轴的距离。车轮系下轮心纵轴方向的速度 $v_{wx,ij}$:

$$v_{wx,fl} = (v_x - B_f \omega_z / 2) \cos \delta + (v_y + L_f \omega_z) \sin \delta; \quad (5)$$

$$v_{wx,fr} = (v_x + B_f \omega_z / 2) \cos \delta + (v_y + L_f \omega_z) \sin \delta; \quad (6)$$

$$v_{wx,rl} = v_x - B_r \omega_z / 2; \quad (7)$$

$$v_{wx,rr} = v_x + B_r \omega_z / 2。 \quad (8)$$

通过轮速传感器获取各轮轮速,各轮滑移率 λ_{ij} :

$$\lambda_{ij} = \frac{\omega_{w,ij} R_W - v_{wx,ij}}{\max(\omega_{w,ij} R_W, v_{wx,ij})}。 \quad (9)$$

式中: $\omega_{w,ij}$ 为各轮转速; R_W 为车轮半径; $ij \in \{fl, fr, rl, rr\}$ 。

通过自车参数计算车轮垂向静载荷 $F_{w_{ij}}$:

$$F_{w_{fl}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_b g L_r}{L_f + L_r} + m_w g; \quad (10)$$

$$F_{w_fr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_b g L_r}{L_f + L_r} + m_w g; \quad (11)$$

$$F_{w_rl} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_b g L_f}{L_f + L_r} + m_w g; \quad (12)$$

$$F_{w_rr} = \frac{1}{2} \cdot \frac{m_b g L_f}{L_f + L_r} + m_w g。 \quad (13)$$

式中： m_b 为车辆簧上质量； m_w 为车轮质量； g 为重力加速度。

基于车辆侧倾和俯仰运动模型，悬架位移和速度分析如图 1 所示。

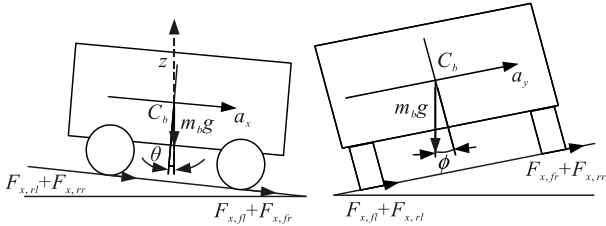


图 1 车辆侧倾和俯仰运动模型

通过车身侧倾和俯仰角以及质心位移计算各轮悬架位移：

$$z_{s_fl} = z_b + \frac{B_f}{2} \sin \phi - L_f \sin \theta; \quad (14)$$

$$z_{s_fr} = z_b - \frac{B_f}{2} \sin \phi - L_f \sin \theta; \quad (15)$$

$$z_{s_rl} = z_b + \frac{B_r}{2} \sin \phi + L_r \sin \theta; \quad (16)$$

$$z_{s_rr} = z_b - \frac{B_r}{2} \sin \phi + L_r \sin \theta。 \quad (17)$$

式中： z_b 为车辆质心垂向位移； ϕ 为车身侧倾角； θ 为车身俯仰角度。对悬架位移进行微分得悬架速度：

$$\dot{z}_{s_fl} = \dot{z}_b + \frac{B_f}{2} \cos \phi \cdot \dot{\phi} - L_f \cos \theta \cdot \dot{\theta}; \quad (18)$$

$$\dot{z}_{s_fr} = \dot{z}_b - \frac{B_f}{2} \cos \phi \cdot \dot{\phi} - L_f \cos \theta \cdot \dot{\theta}; \quad (19)$$

$$\dot{z}_{s_rl} = \dot{z}_b + \frac{B_r}{2} \cos \phi \cdot \dot{\phi} + L_r \cos \theta \cdot \dot{\theta}; \quad (20)$$

$$\dot{z}_{s_rr} = \dot{z}_b - \frac{B_r}{2} \cos \phi \cdot \dot{\phi} + L_r \cos \theta \cdot \dot{\theta}。 \quad (21)$$

通过加速度计和角度传感器获取车轮垂向加速度和垂向位移信号，并处理得到垂向速度信号。动态悬架力计算如下：

$$F_{ds_fl} = k_f(z_{w_fl} - z_{s_fl}) + c_f(\dot{z}_{w_fl} - \dot{z}_{s_fl}); \quad (22)$$

$$F_{dzs_fr} = k_f(z_{w_fr} - z_{s_fr}) + c_f(\dot{z}_{w_fr} - \dot{z}_{s_fr}); \quad (23)$$

$$F_{dzs_rl} = k_r(z_{w_rl} - z_{s_rl}) + c_r(\dot{z}_{w_rl} - \dot{z}_{s_rl}); \quad (24)$$

$$F_{dzs_rr} = k_r(z_{w_rr} - z_{s_rr}) + c_r(\dot{z}_{w_rr} - \dot{z}_{s_rr})。 \quad (25)$$

式中： z_{w_ij} 为各轮垂向位移； k_f 和 k_r 分别为悬架等效刚度系数； c_f 和 c_r 分别为悬架等效阻尼系数。车轮受力分析如图 2 所示。

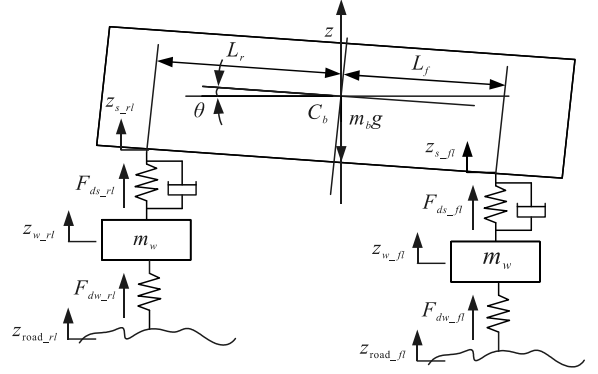


图 2 车轮受力分析

由动态悬架力和车轮加速度即可计算出动态轮胎垂向载荷：

$$F_{dw_fl} = m_w \ddot{z}_{w_fl} - F_{ds_fl}; \quad (26)$$

$$F_{dw_fr} = m_w \ddot{z}_{w_fr} - F_{ds_fr}; \quad (27)$$

$$F_{dw_rl} = m_w \ddot{z}_{w_rl} - F_{ds_rl}; \quad (28)$$

$$F_{dw_rr} = m_w \ddot{z}_{w_rr} - F_{ds_rr}。 \quad (29)$$

将计算得到的车轮垂向静载荷和动载荷相加得到车轮当前的垂向载荷。通过车轮侧偏角、滑移率和垂向载荷 Dugoff 归一化力的计算如下^[20-21]：

$$\left. \begin{aligned} F_x^0 &= F_z \cdot C_x \frac{\lambda}{1-\lambda} \cdot f(L) \\ F_y^0 &= F_z \cdot C_y \frac{\tan \alpha}{1-\lambda} \cdot f(L) \end{aligned} \right\}。 \quad (30)$$

式中： C_x 和 C_y 分别为轮胎纵向刚度和侧向刚度； λ 为滑移率； α 为轮胎侧偏角； L 为用以表达轮胎滑移的非线性特征参数，受行驶速度的影响，表达式：

$$f(L) = \begin{cases} L(2-L), & L < 1 \\ 1, & L \geq 1 \end{cases}; \quad (31)$$

$$L = \frac{1-\lambda}{\sqrt{C_x^2 \lambda^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha}} \cdot \left(1 - \varepsilon v_x \sqrt{C_x^2 \lambda^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha} \right)。 \quad (32)$$

式中 ε 为速度影响因子，用来描述滑移速度对轮胎力的影响。结合车身姿态和纵向加速度计算由轮胎力引起的加速度分量。

$$\left. \begin{aligned} a_{Fx} &= a_x - \sin \theta \\ a_{Fy} &= a_y - \sin \phi \end{aligned} \right\}。 \quad (33)$$

式中： a_{Fx} 为轮胎力引起的纵向加速度分量； a_{Fy}

为由轮胎力引起的横向加速度分量。

将计算得到的归一化力、处理后的加速度信号以及采集到的车轮转角输入扩展卡尔曼滤波模块中估计路面峰值附着系数。

2 基于路面附着系数的扩展卡尔曼滤波器

基于路面附着系数的扩展卡尔曼滤波所需的态方程为^[22]:

$$\begin{aligned} x(t) = f(x(t), u(t), w(t)) = \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{fl} \\ \mu_{fr} \\ \mu_{rl} \\ \mu_{rr} \end{bmatrix} + w(t). \end{aligned} \quad (34)$$

式中: $w(t)$ 为过程噪声; Q 为均方差; μ_{ij} 分别为四轮路面附着系数。

将车辆动力学的 3 个动力学方程中实际的轮胎力以归一化力形式表达, 即可得到量测方程, 再将非线性方程进行线性化处理。量测方程:

$$\begin{aligned} y(t) = h(x(t), v(t)) = \\ \begin{bmatrix} h(1,1) & h(1,2) & \frac{F_{xrl}^0}{m} & \frac{F_{xrr}^0}{m} \\ h(2,1) & h(2,2) & \frac{F_{yrl}^0}{m} & \frac{F_{yrr}^0}{m} \\ h(3,1) & h(3,2) & h(3,3) & h(3,4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_{fl} \\ \mu_{fr} \\ \mu_{rl} \\ \mu_{rr} \end{bmatrix} + v(t). \end{aligned} \quad (35)$$

式中: $v(t)$ 为过程噪声; R 为均方差; F_{xij}^0 和 F_{yij}^0 分别为轮胎的纵向归一化力和侧向归一化力; δ_l 和 δ_r 分别为左前轮转角和右前轮转角; $h(1,1) = (F_{xfl}^0 \cdot \cos \delta_l - F_{yfl}^0 \cdot \sin \delta_l) / m$; $h(1,2) = (F_{xfr}^0 \cdot \cos \delta_r - F_{yfr}^0 \cdot \sin \delta_r) / m$; $h(2,1) = (F_{xfl}^0 \cdot \sin \delta_l + F_{yfl}^0 \cdot \cos \delta_l) / m$; $h(2,2) = (F_{xfr}^0 \cdot \sin \delta_r + F_{yfr}^0 \cdot \cos \delta_r) / m$; $h(3,1) = (l_a (F_{xfl}^0 \cdot \sin \delta_l + F_{yfl}^0 \cdot \cos \delta_l) + \frac{T_f}{2} (F_{xfl}^0 \times \cos \delta_l - F_{yfl}^0 \cdot \sin \delta_l)) / I_z$; $h(3,2) = (l_a (F_{xfr}^0 \cdot \sin \delta_r + F_{yfr}^0 \cdot \cos \delta_r) + \frac{T_f}{2} (F_{xfr}^0 \times \cos \delta_r - F_{yfr}^0 \cdot \sin \delta_r)) / I_z$; $h(3,3) = (-\frac{T_r}{2} \cdot F_{xrl}^0 - l_b \cdot F_{yrl}^0) / I_z$, $h(3,4) = (\frac{T_r}{2} \cdot F_{xrr}^0 - l_b \cdot F_{yrr}^0) / I_z$ 。

只提供一个附着系数的辨识值, 所以为提高计算速度, 将以上状态方程和量测方程修改为:

$$x(t) = f(x(t), u(t), w(t)) = 1 \cdot \mu + w(t). \quad (36)$$

$$\begin{aligned} y(t) = h(x(t), v(t)) = \\ \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h(3,1) + h(3,2) + h(3,3) + h(3,4) \end{bmatrix} \mu + v(t); \end{aligned} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} h_1 = \frac{F_{xfl}^0 \cdot \cos \delta_l - F_{yfl}^0 \cdot \sin \delta_l}{m} + \\ \frac{F_{xfr}^0 \cdot \cos \delta_r - F_{yfr}^0 \cdot \sin \delta_r}{m} + \frac{F_{xrl}^0}{m} + \frac{F_{xrr}^0}{m}; \end{aligned} \quad (38)$$

$$\begin{aligned} h_2 = \frac{F_{xfl}^0 \cdot \sin \delta_l + F_{yfl}^0 \cdot \cos \delta_l}{m} + \\ \frac{F_{xfr}^0 \cdot \sin \delta_r + F_{yfr}^0 \cdot \cos \delta_r}{m} + \frac{F_{yrl}^0}{m} + \frac{F_{yrr}^0}{m}. \end{aligned} \quad (39)$$

式中 μ 为路面附着系数。扩展卡尔曼算法流程如图 3 所示。

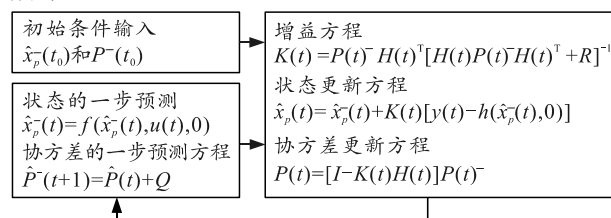


图 3 扩展卡尔曼滤波器算法流程

主要包含更新和预测模块。滤波器对所接收到的传感器信号进行整合, 先完成时间更新得到先验状态估计值, 再根据测量值完成测量更新得到后验估计值, 通过更新方程进行校正, 从而完成一次迭代。随着时间不断迭代, 对其参数进行不断修正, 完成对路面附着系数的准确估计。

3 实验

为对路面附着系数辨识算法进行验证, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建相应的模型, 利用 Carsim 设置车辆运动参数, 模拟实际车辆行驶情景, 利用扩展卡尔曼算法辨识所需参数。具体路面附着系数辨识实验流程如图 4 所示。

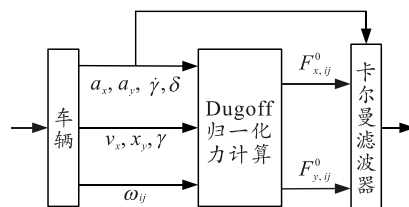


图 4 路面附着系数辨识实验流程

针对多种工况, 利用 Carsim 设置不同的附着系数, 选用相同的车辆模型进行仿真, 并输出相应的车辆响应信号。在 Matlab/Simulink 环境搭建算法模型, 用于接收车辆响应, 进行路面附着系数的辨识

并与设置的值进行对比。设计以下 3 组仿真实验，分别测试高、中、低 3 种路面下附着系数的辨识结果。将初始车速设置为 100 km/h，用于满足车辆高速行驶需求，并且设置路面具有一定不平度(见图 5)和坡度，以模拟非结构性路面的特征，具体参数如表 1 所示。

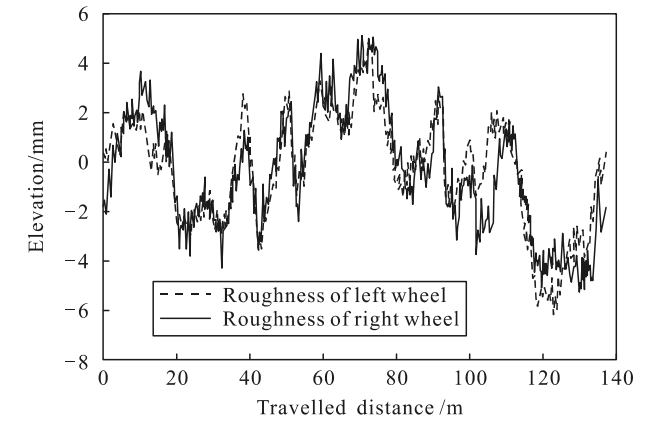


图 5 路面不平度

表 1 实验参数设置

目标速度/ (km/h)	制动控制/ MPa	开环操纵 量/(°)	路面附着 系数 μ	坡度
100	10	0	0.85	0.1
100	10	0	0.50	0.1
100	10	0	0.30	0.1

当高路面附着系数为 0.85 时，本项目进行了仿真及路面附着系数估计，将基于等效悬架模型的路面附着系数估计结果和常规的基于七自由度车辆动力学模型的路面附着系数估计结果进行对比，实验曲线如图 6 所示。

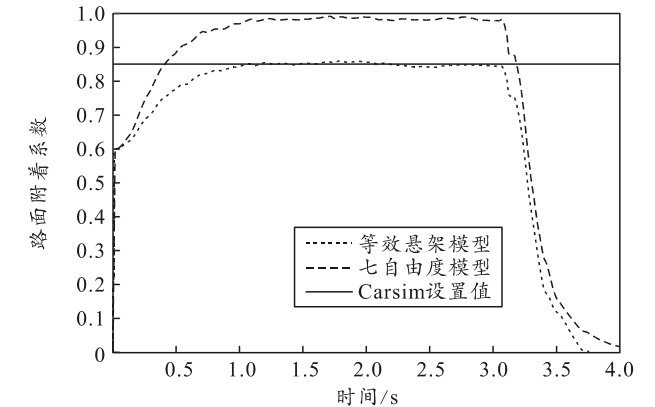


图 6 路面附着系数 0.85 估计结果

由图 6 的实验曲线可以看出：基于等效悬架的估计结果曲线在 1 s 时已收敛至 0.85 左右，并且随后保持较小波动，直到 3 s 后车辆制动完成。基于七自由度车辆模型估计结果曲线收敛速度较慢，并且最终稳定在 1 左右，存在较大偏差。

设置路面附着系数为 0.5，估计结果曲线如图 7

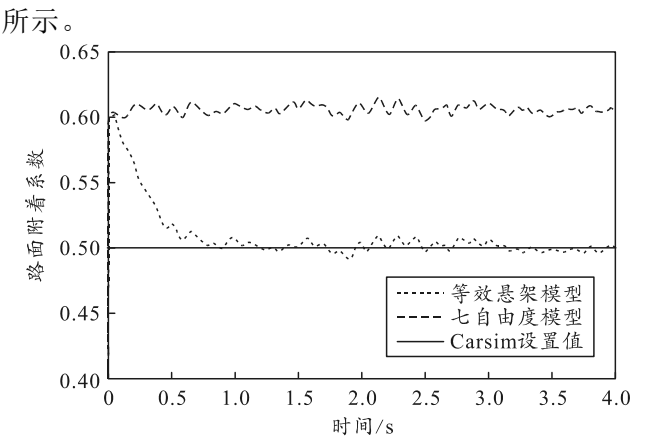


图 7 路面附着系数 0.5 估计结果

由图 7 的实验曲线可以看出：在坡度路面下，基于传统七自由度车辆动力学模型的路面参数附着系数估计方法在 0.6 左右波动，无法收敛至 0.5。基于等效悬架的路面附着系数估计方法在 1 s 内收敛至 0.5 左右，并且随后波动较小。

设置路面附着系数为 0.3，估计结果曲线如图 8 所示。

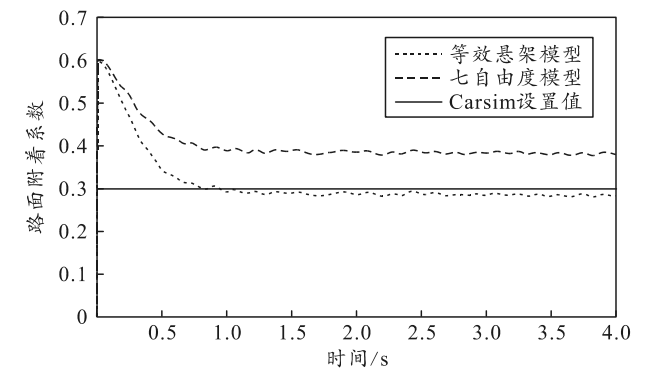


图 8 路面附着系数 0.3 估计结果

由图 8 的实验曲线可以看出：基于等效悬架的估计结果曲线 0~1 s 时快速收敛，此后在 0.29 左右保持稳定。基于七自由度车辆模型估计结果曲线在 0.39 左右保持稳定。

对比 3 组实验，基于等效悬架的估计结果与 Carsim 设置的路面附着系数虽然都有一定的误差，但误差较小，并且相较于基于七自由度车辆模型的估计结果精度更高。2 种方法的估计结果的均方根误差如表 2 所示。

表 2 实验估计结果均方根误差

路面附着系数 μ	等效悬架模型 RMSE	七自由度模型 RMSE
0.85	0.098 883 12	0.140 373 73
0.50	0.033 300 70	0.108 383 93
0.30	0.058 394 54	0.106 029 60

观察估计结果的均方根误差，基于等效悬架模型的估计方法在多种路面附着系数下具有更小的误

差,估计精度,至少提高了 6.6%相较于基于七自由度车辆动力学模型的估计方法,在具有坡度和路面不平特征的非结构性路面上,估计精度更高。

4 结束语

通过设计的直线制动工况仿真实验,验证了笔者提出的结构性路面下路面峰值附着系数估计方法的有效性,证明该方法提高了非结构路面下车辆动力学模型的精度,解决了现有算法在路面不平和大坡度条件下估计效果差的问题。

参考文献:

- [1] 熊璐,金达,冷搏,等.考虑复杂激励条件的分布式驱动电动汽车路面附着系数自适应估计方法[J].机械工程学报,2020,56(18):123-133.
- [2] 袁朝春,张龙飞,陈龙.路面附着系数识别方法发展现状综述及展望[J].机械制造与自动化,2018(2):1-4,7.
- [3] SATO Y, KOBAYASHI D, WATANABE K, et al. Study on recognition method for road friction condition[J]. Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan, 2007, 38(2): 51-56.
- [4] WANG Q M, XU J M, SUN T, et al. Research on Road Adhesion Condition Identification Based on an Improved ALexNet Model[J]. Advanced transportation, 2021(6): 1-14.
- [5] BO L, JIN D, XIONG L, et al. Estimation of tire-road peak adhesion coefficient for intelligent electric vehicles based on camera and tire dynamics information fusion[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 150(6): 107275.
- [6] SWART P L, LACQUET B M. An acoustic sensor system for determination of macroscopic surface roughness[J]. Instrumentation & Measurement, 1996, 45(5): 879-884.
- [7] LENG B, JIN D, XIONG L, et al. Estimation of tire-road peak adhesion coefficient for intelligent electric vehicles based on camera and tire dynamics information fusion[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2021, 150: 1-15.
- [8] 蒋春文.基于路面附着系数的 AEB 控制系统研究[D].吉林:吉林大学,2020.
- [9] CHEN G, WANG X L, SU L L, et al. Safety distance model for longitudinal collision avoidance of logistics vehicles considering slope and road adhesion coefficient[J]. Automobile Engineering, 2021, 235(2-3): 498-512.
- [10] 范思远.汽车横摆状态估计和稳定性控制的研究[D].黑龙江:东北林业大学,2021.
- [11] MA B, LYU C, LIU Y, et al. Estimation of Road Adhesion Coefficient Based on Tire Aligning Torque Distribution[J]. Dynamic Systems Measurement and Control, 2018, 140(5): 051010.
- [12] 侯欣辰,冷搏,曾德全,等.基于激光反射强度特征的智能汽车路面估计方法[J].同济大学学报(自然科学版),2021,49(z1):141-147.
- [13] FNYES D, NMETH B, GSPR P. Design of LPV control for autonomous vehicles using the contributions of big data analysis[J]. International Control, 2021: 1-23.
- [14] VILLAGRA J, D'ANDREA-NOVEL B, FLIESS M, et al. A diagnosis-based approach for tire-road forces and maximum friction estimation[J]. Control Engineering Practice, 2011, 19(2): 174-184.
- [15] 李韶华,王桂洋,杨泽坤,等.基于DRBF-EKF算法的车辆质心侧偏角与路面附着系数动态联合估计[J].力学学报,2022,54(7):1853-1865.
- [16] CHEN X, ZHOU B, WU X. Autonomous vehicle path tracking control considering the stability under lane change[J]. Systems and Control Engineering, 2021, 235(8): 1388-1402.
- [17] ZHANG Z, LIU C G, MA X J, et al. Driving force coordinated control of an 8×8 in-wheel motor drive vehicle with tire-road friction coefficient identification[J]. Defence Technology, 2022, 18(1): 119-132.
- [18] LI G, FAN D S, WANG Y, et al. Study on vehicle driving state and parameters estimation based on triple cubature Kalman filter[J]. International Heavy Vehicle Systems, 2020, 27(1/2): 126.
- [19] CHEN X, LI S, LI L, et al. Longitudinal lateral cooperative estimation algorithm for vehicle dynamics states based on adaptive-square-root-cubature-Kalman-filter and similarity-principle[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2022(176): 176-197.
- [20] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2009.
- [21] GUNTUR R, SANKAR S. A friction circle concept for dugoff's tyre friction model[J]. International Vehicle Design, 1980, 1(4): 373-377.
- [22] ADIKKAPPAN M, SATHIYAMOORTHY N. A real time state of charge estimation using Harris Hawks optimization based filtering approach for electric vehicle power batteries[J]. International energy research, 2022(7): 46.