

基于三轴重型全驱电动汽车路面附着系数估计

路永婕^{1,2}, 韩寅锋², 王翠艳², 张俊宁², 马智喆²

(1. 石家庄铁道大学 省部共建交通工程结构力学行为与系统安全国家重点实验室, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:提高重型车辆主动安全技术可以减少重型车辆交通事故,而车辆主动安全技术需要准确的路面附着系数作为数据输入来实现精确的控制,故对路面附着系数估计的研究具有重要意义。为实现三轴重型全驱电动汽车对路面附着系数的准确估计,搭建了9自由度车辆模型,选用Dugoff轮胎模型,并通过Matlab/Simulink建立了仿真模型。采用无迹卡尔曼滤波算法(unscented Kalman filter, UKF)分别对6个轮胎与路面间的路面附着系数进行估计,最终通过Simulink仿真,实现了高附、低附路面下的匀速直行和角阶跃工况以及对开路面的直行工况等多种工况下的路面附着系数估计,估计结果与实际路面附着系数基本一致,验证了算法的可行性。

关键词:路面附着系数估计;三轴电动汽车;无迹卡尔曼滤波;Simulink

中图分类号:U461.6 **文献标志码:**A **文章编号:**2095-0373(2021)04-0040-06

路面附着系数估计是实现车辆主动安全技术的关键因素之一,目前国内外对汽车路面附着系数估计的研究已有很多。熊璐等^[1]分别构建了纵向力观测器和侧向力观测器对纵侧2方向的路面附着系数进行估计,又根据模糊逻辑设计了融合估计算法,实现了对复杂路况下的路面附着系数估计;王震坡等^[2]将无迹卡尔曼滤波与模糊理论相结合,提高了算法的鲁棒性和自适应性;林葵等^[3]将神经网络应用到参数估计中,以相关动力学参数作为输入,通过学习、训练,实现估计效果的提升;赵立军等^[4]推导了利用附着系数和峰值附着系数之间的递推公式,利用递推最小二乘法估计峰值附着系数;王博等^[5]提出了7种典型路面的特征因子阈值及其区间进行路面识别;Ma et al^[6]针对汽车转向工况,通过提出基于单轮前轴调心扭矩来估计路面附着系数;Sun et al^[7]提出一种基于遗忘因子的卡尔曼滤波的改进算法,通过估计 $u-s$ 曲线的斜率得到路面附着系数估计值。

由上述可知,路面附着系数估计的研究多针对于四轮汽车的研究,对于重型三轴电动汽车研究较少。重型三轴汽车多用于长距离运输货物,且操作难度比常规四轮汽车大,更容易发生重大交通事故;其在结构、运动特性以及动力特性方面都要比四轮汽车更加复杂^[8],特别是重型三轴电动汽车前轴与中后轴距离较远,前后车体所处路面可能会有较大差别,故重型三轴电动汽车在路面附着系数估计方面存在着与四轮汽车不同的特性和问题。综上,针对重型三轴电动汽车建立9自由度整车模型,包括纵向、横向、横摆车轮转动;采用UKF滤波算法对6个车轮的路面附着系数分别进行估计,并通过Matlab/Simulink进行仿真分析,取得准确的估计结果,为之后重型三轴电动汽车的状态估计奠定了基础。

1 建立9自由度整车动力学模型

1.1 整车3自由度模型

收稿日期:2021-08-07 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.20210171

基金项目:石家庄铁道大学研究生创新资助项目(YC2021040);河北省自然科学基金面上项目(A2020210039);国家自然科学基金面上项目(12072204);河北省教育厅科学技术青年基金资助项目(QN2018237)

作者简介:路永婕(1981—),教授,博导,研究方向为车辆动力学与控制。E-mail:lu-yongjie@163.com

路永婕,韩寅锋,王翠艳,等.基于三轴重型全驱电动汽车路面附着系数估计[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,34(4):40-45.

如图 1 所示,以东风某三轴重型汽车为参照,建立 3 自由度六轮整车模型,包括:纵向、横向、横摆 3 个方向的运动。对所有影响因素进行分析,做出如下假设:固定在汽车上的坐标系原点与三轴重型汽车的质心重合;忽略汽车悬架的作用和垂直方向的运动;该车无绕 Y 轴的俯仰运动和绕 X 轴的侧倾运动;汽车各轮胎的机械特性相同;为简化问题,线性化方向盘转角和前轮转角关系。

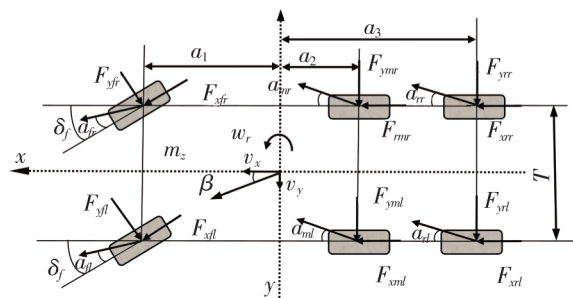


图 1 整车 3 自由度模型

动力学方程^[9]

$$ma_y = F_{xfr} \sin \delta_{fr} + F_{yfr} \cos \delta_{fr} + F_{xfl} \sin \delta_{fl} + F_{yfl} \cos \delta_{fl} + F_{ymr} + F_{ymr} + F_{yrr} + F_{yrl} \quad (1)$$

$$ma_x = F_{xfr} \cos \delta_{fr} + F_{yfr} \sin \delta_{fr} + F_{xfl} \cos \delta_{fl} + F_{yfl} \sin \delta_{fl} + F_{xmr} + F_{xmr} + F_{xrr} + F_{xrl} \quad (2)$$

$$I\dot{r} = (F_{xfr} \cos \delta_{fr} + F_{yfr} \sin \delta_{fr}) \frac{T}{2} + (F_{yfl} \cos \delta_{fr} + F_{xfr} \sin \delta_{fr}) a_1 - (F_{xfl} \cos \delta_{fl} - F_{yfl} \sin \delta_{fl}) \frac{T}{2} + (F_{xfl} \sin \delta_{fl} + F_{yfl} \cos \delta_{fl}) a_1 + F_{xmr} \frac{T}{2} - a_2 F_{ymr} + F_{xrr} \frac{T}{2} - a_3 F_{yrr} - (F_{ymr} a_2 + F_{xmr} \frac{T}{2} + F_{yrl} a_3 + F_{xrl} \frac{T}{2}) \quad (3)$$

考虑纵向和侧向加速度的影响,各轮胎的垂直载荷可表示为

$$\begin{cases} F_{zfl} = m_w g + \frac{a_3}{2L} m_b g - \frac{m_b a_x \times h_g}{2L} - \frac{a_3 h_g}{LB} m_b a_y, & F_{zfr} = m_w g + \frac{a_3}{2L} m_b g - \frac{m_b a_x \times h_g}{2L} - \frac{a_3 h_g}{LB} m_b a_y \\ F_{zml} = m_w g + \frac{a_1}{4L} m_b g + \frac{m_b a_x \times h_g}{4L} - \frac{a_1 h_g}{2LB} m_b a_y, & F_{zmr} = m_w g + \frac{a_1}{4L} m_b g + \frac{m_b a_x \times h_g}{4L} + \frac{a_1 h_g}{2LB} m_b a_y \\ F_{zrl} = m_w g + \frac{a_1}{4L} m_b g + \frac{m_b a_x \times h_g}{4L} - \frac{a_1 h_g}{2LB} m_b a_y, & F_{zrr} = m_w g + \frac{a_1}{4L} m_b g + \frac{m_b a_x \times h_g}{4L} + \frac{a_1 h_g}{2LB} m_b a_y \end{cases} \quad (4)$$

式中的参数如表 1 所示。

表 1 车辆参数表

参数名称	车辆质心到前轴的距离	车辆质心到中轴的距离	车辆质心到后轴的距离	整车质量	车身质量	轮胎质量	绕 Z 轴的转动惯量	路面附着系数	归一化轮胎力
	a_1/mm	a_2/mm	a_3/mm	m/kg	m_b/kg	m_w/kg	$I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	u_{ij}	F_{xij}^0, F_{yij}^0
参数大小	3 640	2 060	3 360	25 350	24 900	75	910 000	—	—

1.2 Dugoff 轮胎模型

Dugoff 轮胎模型^[10]

$$\begin{cases} F_x = \mu F_z C_x \frac{\lambda}{1-\lambda} f(L) \\ F_y = \mu F_z C_y \frac{\tan(\alpha)}{1-\lambda} f(L) \\ F(L) = \begin{cases} L(2-L), & L < 1 \\ 1, & L \geq 1 \end{cases} \\ L = \frac{1}{2 \sqrt{C_x^2 \lambda^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha}} (1-\lambda) (1-\epsilon v_x \sqrt{C_x^2 \lambda^2 + C_y^2 \tan^2 \alpha}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, μ 为轮胎与路面的附着系数; C_x 、 C_y 分别为轮胎纵滑及侧偏刚度; ϵ 为速度影响因子。为方便估计路面附着系数,将 Dugoff 轮胎模型简化为下述归一化模型,即可写为

$$\begin{cases} F_x = \mu F_x^0 = \mu F_z C_x \frac{\lambda}{1-\lambda} F(L) \\ F_y = \mu F_y^0 = \mu F_z C_y \frac{\tan \alpha}{1-\lambda} F(L) \end{cases} \quad (6)$$

式中, F_x^0 、 F_y^0 分别为纵向、侧向归一化力,与路面附着系数无关。

1.3 9 自由度整车仿真模型

根据上述模型,基于 Matlab/SimulinkR2018b 软件来实现整车模型的搭建和仿真。考虑到对路面附

着系数估计所需的车辆动力学响应,建立了纵、侧、横摆以及六轮转动 9 自由度非线性车辆模型^[11-15],其原理如图 2 所示。

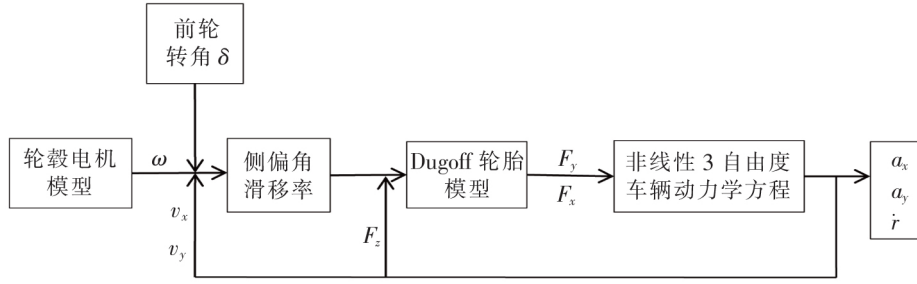


图 2 非线性车辆模型原理图

2 UKF 估计算法

无迹卡尔曼滤波算法^[16-17]的整个过程为:①通过比例无迹变换得到采样点;②一步预测;③量测更新;④迭代运算。

UKF 过程中的初值,测量噪声协方差 $R=0.05I_{3 \times 3}$,过程噪声协方差 $P=0.019I_{6 \times 6}$,初始误差协方差 $P_0=0.01I_{6 \times 6}$ 。

根据式(1)~式(3),分别建立状态方程(7)和量测方程(8)。

$$\begin{bmatrix} u_{fl}(n+1) \\ u_{fr}(n+1) \\ u_{ml}(n+1) \\ u_{mr}(n+1) \\ u_{rl}(n+1) \\ u_{rr}(n+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{fl}(n) \\ u_{fr}(n) \\ u_{ml}(n) \\ u_{mr}(n) \\ u_{rl}(n) \\ u_{rr}(n) \end{bmatrix} + w(t) \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ \dot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{F_{xfl}^0 \cos \delta_{fl} - F_{yfl}^0 \sin \delta_{fl}}{m} & \frac{F_{xfr}^0 \cos \delta_{fr} - F_{yfr}^0 \sin \delta_{fr}}{m} & \frac{F_{xml}^0}{m} & \frac{F_{xmr}^0}{m} & \frac{F_{xrl}^0}{m} & \frac{F_{xrr}^0}{m} \\ \frac{F_{yfl}^0 \cos \delta_{fl} - F_{xfl}^0 \sin \delta_{fl}}{m} & \frac{F_{yfr}^0 \cos \delta_{fr} - F_{xfr}^0 \sin \delta_{fr}}{m} & \frac{F_{yml}^0}{m} & \frac{F_{ymr}^0}{m} & \frac{F_{yrl}^0}{m} & \frac{F_{yrr}^0}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{fl} \\ u_{fr} \\ u_{ml} \\ u_{mr} \\ u_{rl} \\ u_{rr} \end{bmatrix} + v(t) \quad (8)$$

$H(3,1) \quad H(3,2) \quad H(3,3) \quad H(3,4) \quad H(3,5) \quad H(3,6)$

式中,随机变量 $w(t)$ 和 $v(t)$ 分别为过程噪声和测量噪声。

$$\begin{cases} H(3,1) = \frac{[(F_{xfl}^0 \sin \delta_{fl} + F_{yfl}^0 \cos \delta_{fl})a_1 - \frac{T}{2}(F_{xfl}^0 \cos \delta_{fl} - F_{yfl}^0 \sin \delta_{fl})]}{I_z} \\ H(3,2) = \frac{(F_{xfr}^0 \cos \delta_{fr} - F_{yfr}^0 \sin \delta_{fr})\frac{T}{2} + a_1(F_{yfr}^0 \cos \delta_{fr} - F_{xfr}^0 \sin \delta_{fr})}{I_z} \\ H(3,3) = \frac{-(F_{yml}^0 a_2 + F_{xml}^0 \frac{T}{2})}{I_z} & H(3,4) = \frac{F_{xmr}^0 \frac{T}{2} - a_2 F_{ymr}^0}{I_z} \\ H(3,5) = \frac{-(F_{yrl}^0 a_3 + \frac{T}{2} F_{xrl}^0)}{I_z} & H(3,6) = \frac{F_{xrr}^0 \frac{T}{2} - a_3 F_{yrr}^0}{I_z} \end{cases} \quad (9)$$

3 路面附着系数估计结果分析

3.1 匀速直行工况

分别设置路面附着系数为 0.8、0.3、对开路面(左侧路面 0.8,右侧路面 0.3),分别进行 60 km/h 的匀速直线行驶,以左侧车轮为例(对开路面为全部车轮),路面附着系数估计结果如图 3 所示。

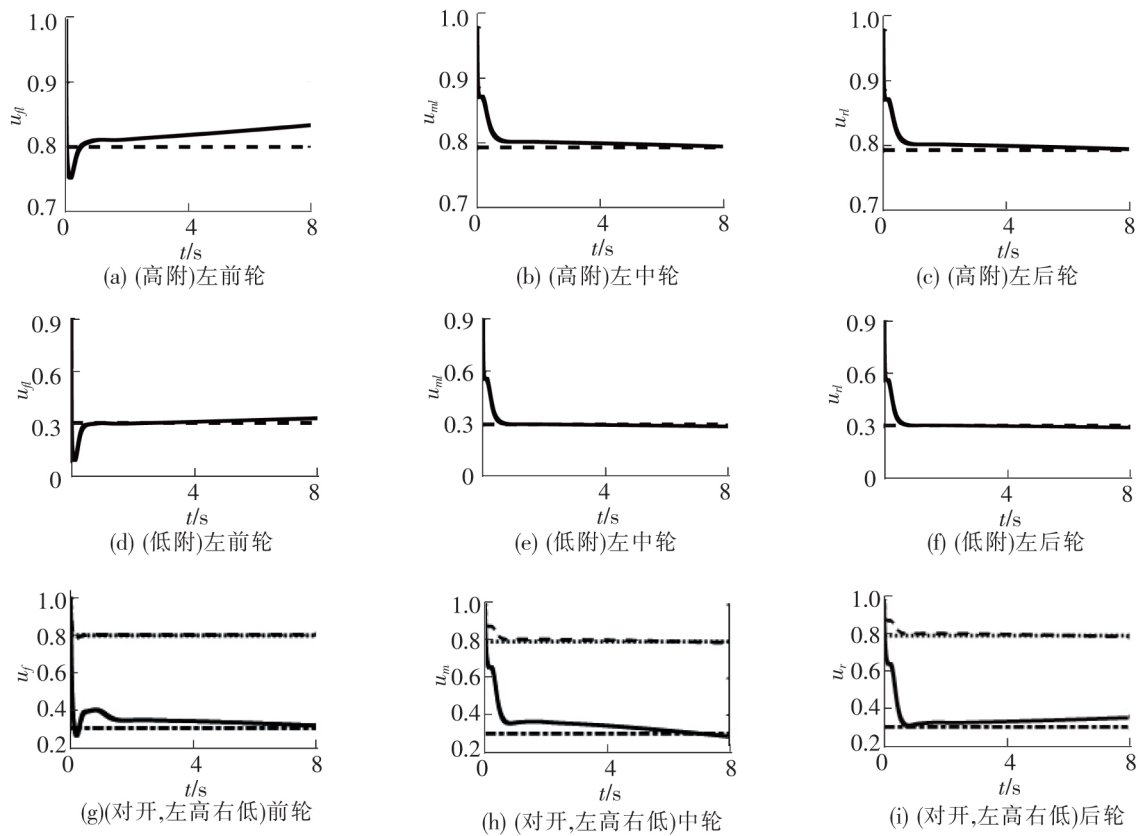


图 3 匀速直行工况下路面附着系数估计结果

从图 3(a)~图 3(c)可以看出,车轮与路面之间的附着系数估计值均在 0.9 s 之前收敛到 0.8,高附路面下左前轮算法收敛值偏移最大为 0.04,这是估计过程中不可避免的波动,估计结果仍然在 $[0, 0.05]$ 误差范围内收敛,其中图 3(b)、图 3(c)收敛效果较好,波动最大在 0.02。与高附路面相比,低附路面下算法收敛更快且误差更小。从图 3(g)~图 3(i)可以看出,对开路面下,车辆 6 个车轮与路面之间的附着系数估计值均在 0.8 s 前收敛到实际值附近,其中,在高附路面,算法收敛更快且误差更小,相比之下,算法在低附路面估计效果波动较大且最大误差值为 0.052。

3.2 角阶跃工况

给定行驶工况为 80° 的方向盘阶跃输入,如图 4(a)所示。设置路面附着系数实际值为 0.8,进行 60 km/h 下的角阶跃工况,以左轮为例,结果如图 4(b)~图 4(d)所示。

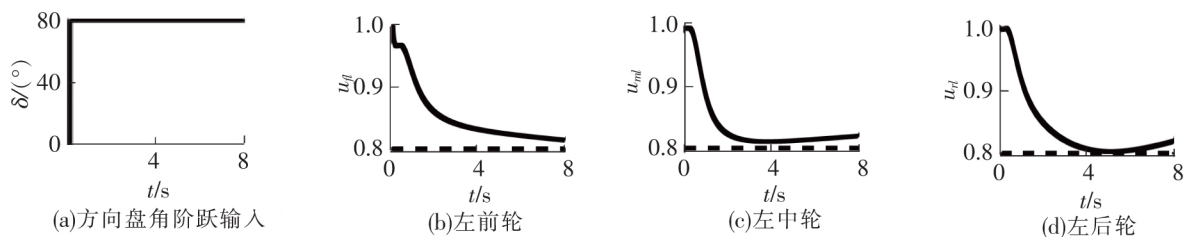


图 4 角阶跃工况下的路面附着系数估计结果

由图 4 得,在角阶跃极限工况,车辆力学响应剧烈,重载车辆惯性较大,车辆稳定性变差,这导致算法收敛速度变慢。前轮和后轮在 2.1 s 收敛至 $u=0.85$ 处,中轮在 1.4 s 收敛至 $u=0.85$ 处。中轮的估计值在 2.3 s 完全收敛至 0.8,且浮动较小;后轮在 4.3 s 时收敛至 0.8,伴有波动趋势;前轮随时间不断趋近 0.8。

3.3 误差分析

根据式(10)对上述匀速直行工况和角阶跃工况下的路面附着系数估计进行误差分析,结果如图 5 所示。

$$\text{error} = |\hat{\mu} - \mu| \quad (10)$$

式中, error 为路面附着系数估计误差; $\hat{\mu}$ 为路面附着系数估计值; μ 为路面附着系数实际值。

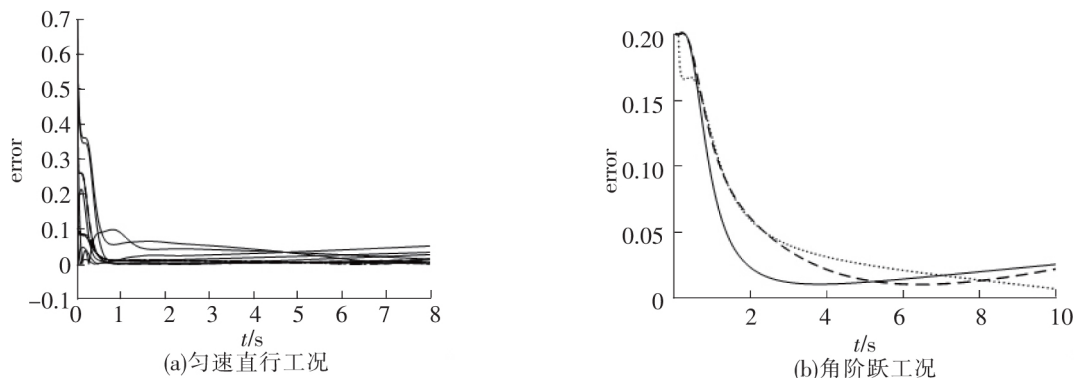


图 5 误差分析

从图 5 可得,匀速直行工况下 3 种路面,12 个估计结果,0.8 s 之前均已收敛到误差范围 $[0, 0.06]$ 内,对开路面右前轮估计结果在收敛后出现大幅波动,但在 1 s 内恢复;角阶跃极限工况下,尽管重载车辆惯性大,极限工况下车辆力学响应剧烈,仍然在 2.3 s 之内将路面附着系数估计误差收敛在 $[0, 0.05]$ 内。

4 结论

(1) 在估计精度方面,通过匀速直行工况下的高附、低附、对开路面以及角阶跃工况下的高附、低附路面的仿真实验,结果表明搭载无迹卡尔曼滤波算法的重型三轴电动汽车可以实现对其 6 个轮胎路面附着系数的分别估计,且估计误差在可接受范围内。

(2) 在时效性方面,设计的路面附着系数估计算法在匀速直行工况下响应快,估计效果好;但在角阶跃极限工况下收敛速度慢。提高转向工况下路面附着系数估计的收敛速度将成为下一阶段的研究工作。

(3) 单轮路面附着系数估计的实现意味着可以通过不同位置轮胎的路面附着系数估计情况实现对开路面、对接路面的识别,也可以对侧翻、制动失效等极端工况下的主动安全控制提供信号参考。

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]王震坡,薛雪,王亚超. 基于自适应无迹卡尔曼滤波的分布式驱动电动汽车车辆状态参数估计[J]. 北京理工大学学报, 2018,38(7):698-702.
- [3]林荣,王少博,赵又群,等. 基于改进 Keras 模型的路面附着系数估计[J]. 机械工程学报,2021,57(12):74-86.
- [4]赵立军,邓宁宁,葛柱洪,等. 四轮驱动车辆路面附着系数实时估计[J]. 哈尔滨工业大学学报,2014,46(11):42-46.
- [5]王博,孙仁云. 基于状态特征因子的路面识别方法研究[J]. 汽车工程,2012,34(6):506-510,522.
- [6]Ma Biao, Lv Chen, Liu Yahui, et al. Estimation of road adhesion coefficient based on tire aligning torque distribution[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2018,140(5):25-35.
- [7]Sun Yanan, Xiong Lu, Yu Zhuoping, et al. Road adhesion coefficient estimation[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011,1229:52-54.

- [8]田端洋. 多轴轮毂电机驱动汽车转向行驶转矩优化控制[D]. 长春:吉林大学,2019.
- [9]张俊宁. 基于改进动态轮胎模型的重型汽车转向/制动控制研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2017.
- [10]Anon. An analysis of tire traction properties and their influence on vehicle dynamic performance[J]. SAE Transactions, 1970,79:1219-1243.
- [11]时艳茹. 基于 UKF 滤波的汽车纵向和侧向速度估计算法研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [12]李绪龙. 基于路面附着系数的汽车防碰撞控制算法研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2018.
- [13]武钟财. 基于扩展卡尔曼滤波的路面附着系数估计算法研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
- [14]汪杰. 四轮轮毂电机驱动车辆转向稳定性控制[D]. 北京:北京理工大学,2015.
- [15]郑智勇. 基于 UKF 的半挂车列车状态及路面附着系数估计[D]. 沈阳:东北大学,2015.
- [16]王可东. Kalman 滤波基础及 Matlab 仿真[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2019.
- [17]黄小平,王岩. 卡尔曼滤波原理及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2015.

Estimation of Road Surface Adhesion Coefficient Based on Three-Axle Heavy-Duty All-Drive Electric Vehicle

Lu Yongjie^{1,2}, Han Yinfeng², Wang Cuiyan², Zhang Junning², Ma Zhizhe²

- (1. State Key Laboratory of Mechanical Behavior and System Safety of Traffic Engineering Structures, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Improving the active safety technology of heavy vehicles can reduce traffic accidents of heavy vehicles, and the vehicle active safety technology needs accurate road adhesion coefficient as data input to achieve accurate control, so the research on the estimation of road adhesion coefficient is of great significance. In order to realize the accurate estimation of road adhesion coefficient of three-axle heavy-duty all-drive electric vehicle, a 9-degree-of-freedom vehicle model was built, the Dugoff tire model was selected, and a simulation model was established by Matlab/Simulink. The unscented Kalman filter algorithm (UKF) was used to estimate the road adhesion coefficients between six tires and the road respectively. Finally, through Simulink simulation, the estimation of road adhesion coefficients under various conditions, such as the straight and angular step conditions of high and low attachment pavement, and the straight running conditions of off-road, was realized. The estimated results are basically consistent with the actual road adhesion coefficient, which verifies the feasibility of the algorithm.

Key words: three-axle electric vehicle; unscented Kalman filter; road adhesion coefficient estimation; Simulink