第 34 卷　第 1 期　　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　　Vol. 34　No. 1
2021 年 3 月　Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Mar. 2021

制动工况下未知路面附着特性识别方法

霍肖楠[1]，　冯国胜[2]，　应　铭[2]，　贾素梅[2]

(1. 石家庄铁道大学 电气与电子工程学院，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：路面附着特性是影响车辆制动性能的重要因素之一，而实际中车辆行驶的路面往往是未知的或非典型的。为了改善车辆在未知路面行驶时的防抱死制动控制性能，提出了一种瞬时车况路面附着特性识别方法。基于行车瞬时采样数据，结合典型路面的附着特性曲线，对未知路面附着特性的几个数据节点进行了估算。最终利用 4 组附着特性数据节点对未知路面附着特性曲线进行拟合，得到当前未知路面上车轮滑移率与附着系数关系曲线。将识别结果与典型路面 Burckhardt 轮胎路面模型进行对比，结果表明，该识别算法可利用单个滑移率-附着系数关系对未知路面附着特性曲线进行有效识别。

关键词：制动；路面附着特性；识别方法；Burckhardt

中图分类号：U461.3　　文献标志码：A　　文章编号：2095－0373(2021)01－0037－06

近年来国内汽车数量呈爆发式增长。为了提高道路交通的安全性，汽车制动的相关技术研究已经成为关键问题[1]。

在汽车防抱死制动过程中，车轮角速度变化量由地面制动力、车轮制动力矩、车轮滚动半径等共同决定，而路面附着系数与整车质量决定了地面制动力的大小，因此路面附着系数是制动控制系统中的一项重要参数。在汽车防抱死制动控制系统的建模中，往往将一条已知的典型路面附着系数特性曲线建立在模型中，根据线性查表或现有的轮胎-路面模型得到车轮滑移率与附着系数的对应关系，将目标滑移率控制在 15%～20% [2-4]，在研究中默认车辆行驶过程中所行驶路面的附着特性关系均是已知的。实际车辆行驶的路面环境会由于温湿度、粗糙度及材料等因素的变化使附着特性发生改变，改变后的路面附着特性往往是未知的或非典型的，典型已知路面的附着特性关系在未知路面中的制动控制模型中将不再适用。及时对未知路面附着特性进行有效识别可根据当前路面进一步锁定最佳滑移率，同时对制动器制动力进行调整，取得更好的制动效果[5-6]。

目前针对路面附着特性识别方法的研究大致分为 2 类[7]：基于原因和基于效应。文献[8]采用基于轮缸压力的附着系数估算方法；文献[9]采用基于激光雷达的路面附着系数估计方法；文献[10]通过模型峰值确定滑移率与峰值附着系数；文献[11]采用典型路面附着系数平均法对未知路面峰值附着系数进行估算。本文的识别算法属于基于效应，利用常用的轮速传感器、车速传感器等设备，根据不同瞬时车况下的滑移率与附着系数信息，选取适宜的单边或双边典型参考路面，分别结合线性类比以及权重分配思想，对未知路面峰值附着系数与抱死附着系数进行估算，进而根据路面通用附着特性对当前路面整体附着特性曲线进行识别。

1　典型路面轮胎-地面模型

对于路面附着特性目前大多采用双线性模型、Burckhardt 模型以及“魔术公式”模型来描述滑移率与附着系数的关系。选用拟合精度较高、参数较少的 Burckhardt 模型为基本参考数据，对轮胎地面附着特

收稿日期：2019－12－30　　责任编辑：车轩玉　　DOI：10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20190223

基金项目：河北省重大科技成果转化专项(18042211Z)

作者简介：霍肖楠(1994—)，男，硕士研究生，研究方向为电气自动化设备的研发制造。E-mail：353160752@qq.com

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

霍肖楠，冯国胜，应铭，等. 制动工况下未知路面附着特性识别方法[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版)，2021，34(1)：37-42.

性进行研究[12]。Burckhardt 模型公式为

$$\varphi(s)=c_1(1-e^{c_2 s})-c_3 s \tag{1}$$

Burckhardt 模型归纳出了 7 种典型路面的曲线模型系数,7 种典型路面的 Burckhardt 模型参数见表 1。

表 1 7 种典型路面的 Burckhardt 模型参数

路面	c_1	c_2	c_3
干沥青	1.280 1	23.99	0.52
湿沥青	0.857	33.822	0.347
干水泥	1.197 3	25.168	0.537 3
干鹅卵石	1.371 3	6.4565	0.669 1
湿鹅卵石	0.400 4	33.708 0	0.120 4
雪	0.194 6	94.129	0.064 6
冰	0.05	306.39	0

在 Burckhardt 模型中,仅需要获知 3 个参数就可对任意路面进行滑移率与附着系数关系的描述,Burckhardt 模型下的典型路面附着特性曲线如图 1 所示。

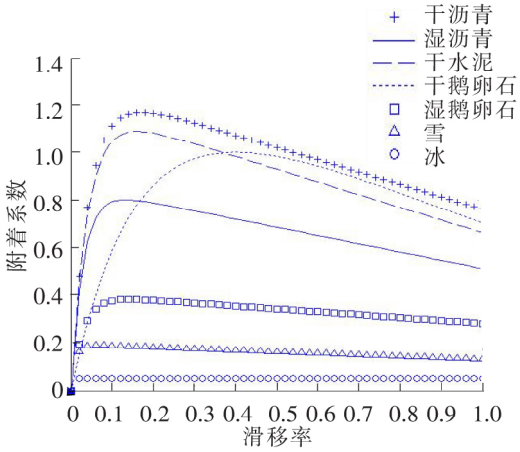


图 1 Burckhardt 模型下的典型路面附着特性曲线

由图 1 可知,各种不同类型路面的滑移率与附着系数关系呈现出相似的变化趋势:路面附着系数首先随着滑移率的增大而增大,达到路面峰值附着系数,此时的滑移率为最佳滑移率,随后路面附着系数又随着滑移率的增大而减小,直到滑移率为 100%时达到抱死附着系数。然而不同的路面在相同滑移率下的附着系数各不相同。其中,干鹅卵石路面的附着特性与其他路面差异较大,不满足大多数路面的类比统一规律,因此,干鹅卵石路面不作为路面识别的典型参考路面。7 种典型路面附着特性参数见表 2。

表 2 7 种典型路面附着特性参数

路面	最佳滑移率	峰值附着系数	抱死附着系数
干沥青	0.17	1.170 0	0.760 0
湿沥青	0.13	0.801 3	0.510 0
干水泥	0.16	1.090 0	0.660 0
干鹅卵石	0.40	1.000 0	0.700 0
湿鹅卵石	0.14	0.380 0	0.280 0
雪	0.06	0.190 0	0.130 0
冰	0.024	0.050 0	0.050 0

由表 2 可知,在不同路面附着特性导致了最佳滑移率不同。车辆制动控制系统需实时对当前路面附着特性进行识别,根据路面特性状况确定车轮的最佳滑移率,然后通过调节车轮制动压力,使实际车轮滑移率保持在最佳值附近[13]。

2 路面附着特性参数采集与估算

2.1 瞬时车况下路面附着数据采集

汽车的制动控制要求具有很好的实时性,路面附着特性的识别是制动控制的前提,路面附着特性的识别方法应该满足快速、准确以及高效。在瞬时状态下,单个车轮的滑移率与路面附着系数的值是唯一的。根据传感器实时获取到的轮速与车速信息,可计算得到瞬时状态下的滑移率

$$s=\frac{v-\omega r}{v} \tag{2}$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中,v 为车速;ω 为车轮角速度;r 为车轮滚动半径。

路面附着系数被定义为地面纵向力与垂直载荷的比值。地面纵向力可由车辆所受加速度的大小计算得到。为了减少数据运算与处理的时间,采用基于地面制动减速度的路面附着系数计算方法来获取瞬时状态下路面的单一附着系数[14]。

$$\varphi=\frac{F_{xb}}{F_Z}=\frac{1}{g}\frac{\Delta v}{\Delta t} \tag{3}$$

式中,F_{xb} 为地面制动力;F_Z 为车轮垂直载荷;g 为重力加速度;Δv 为相邻 2 次采样车速差;Δt 为车速采样周期。

由此,车辆电控单元可通过车载传感器装置获取自车车速、轮速信息,经过计算得到瞬时状态下路面附着系数与滑移率对应关系的一组真实数据点。

2.2　未知路面的附着系数估算方法

由于各路面的附着系数特性曲线具有相似的变化趋势,因此,可利用与未知路面附着特性相近的已知典型路面附着特性曲线,对未知路面的抱死附着系数、峰值附着系数以及最佳滑移率等数据点进行估算。

某一时刻下车辆获得未知路面的瞬时附着特性参数(s_e,φ_e),将滑移率为 s_e 时其他典型路面的附着系数与 φ_e 进行对比,选出 1 条或 2 条与未知路面附着特性曲线最相近的典型路面作为参考路面,参考路面选取示意图如图 2 所示。当未知路面附着特性曲线高于或低于所有典型路面时,仅选取 1 条最近典型路面作为单边参考路面即可,如图 2(a)所示;当位置路面附着特性介于 2 条典型路面之间时,选取其上下 2 条最近的典型路面作为双边参考路面,如图 2(b)所示。

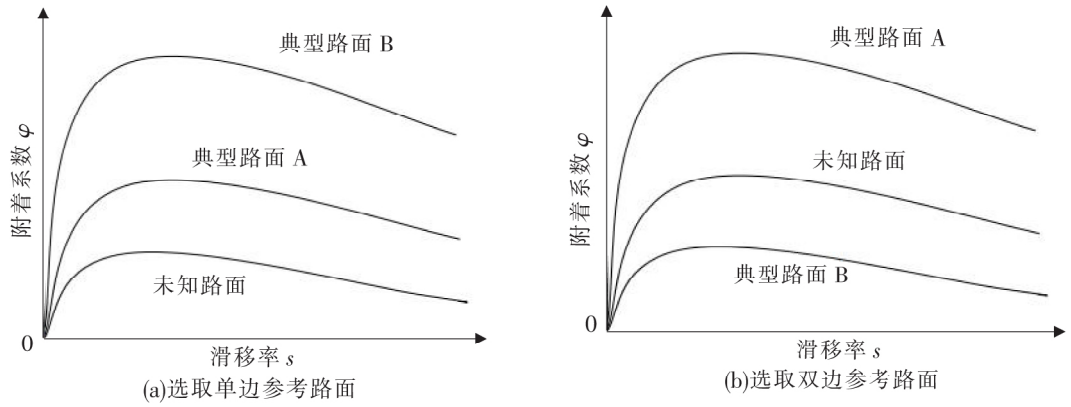


图 2　参考路面选取示意图

假如通过相同滑移率下的附着系数大小比较获知:相同滑移率下,未知路面附着系数最小,且与典型路面 A 的附着系数最为相近,应选取单边参考路面。基于线性类比的思想,利用典型路面 A 的曲线数据对未知路面的峰值附着系数和以及抱死附着系数进行估算,认为未知路面附着特性与典型路面 A 具有以下线性关系

$$\frac{\varphi_{Ap}}{\varphi_{ep}}=\frac{\varphi_{Al}}{\varphi_{el}}=\frac{\varphi_{Ae}}{\varphi_e} \tag{4}$$

式中,φ_{Ap} 为典型路面 A 的峰值附着系数;φ_{ep} 为未知路面的峰值附着系数;φ_{Al} 为典型路面 A 的抱死附着系数;φ_{el} 为未知路面的抱死附着系数;φ_{Ae} 为滑移率为 s_e 时典型路面 A 的附着系数。

同理,未知路面的最佳滑移率也可根据典型路面 A 的最佳滑移率进行线性估算

$$\frac{s_{Ar}}{s_{er}}=\frac{\varphi_{Ae}}{\varphi_e} \tag{5}$$

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中,s_{Ar} 为典型路面 A 的最佳滑移率;s_{er} 为未知路面的最佳滑移率。

假如通过相同滑移率下的附着系数大小比较获知:未知路面附着系数介于典型路面 A 与典型路面 B 两者之间,其中典型路面 A 的附着系数较高,典型路面 B 的附着系数最低,选取双边参考路面,基于权重分配的类比思想,利用典型路面 A 与典型路面 B 的曲线数据对未知路面的峰值附着系数和抱死附着系数进行估算

$$\varphi_{ep}=\frac{\varphi_e-\varphi_{Be}}{\varphi_{Ae}-\varphi_{Be}}\frac{\varphi_e}{\varphi_{Ae}}\varphi_{Ap}+\frac{\varphi_{Ae}-\varphi_e}{\varphi_{Ae}-\varphi_{Be}}\frac{\varphi_e}{\varphi_{Be}}\varphi_{Bp} \tag{6}$$

$$\varphi_{el}=\frac{\varphi_e-\varphi_{Be}}{\varphi_{Ae}-\varphi_{Be}}\frac{\varphi_e}{\varphi_{Ae}}\varphi_{Al}+\frac{\varphi_{Ae}-\varphi_e}{\varphi_{Ae}-\varphi_{Be}}\frac{\varphi_e}{\varphi_{Be}}\varphi_{Bl} \tag{7}$$

式中,φ_{Be} 为滑移率为 s_e 时典型路面 B 的附着系数;φ_{Bp} 为典型路面 B 的峰值附着系数;φ_{Bl} 为典型路面 B 的抱死附着系数。

同理,未知路面的最佳滑移率可在双边参考路面下根据路面 A 与路面 B 的最佳滑移率进行估算

$$s_{er}=\frac{\varphi_e-\varphi_{Be}}{\varphi_{Ae}-\varphi_{Be}}s_{Ar}+\frac{\varphi_{Ae}-\varphi_e}{\varphi_{Ae}-\varphi_{Be}}s_{Br} \tag{8}$$

式中,s_{Br} 为典型路面 B 的最佳滑移率。

对于可以选择双边参考路面计算的未知路面,也可使用单边参考路面进行计算,但经过对比发现,选用单边参考路面预测出的数值结果误差比采用双边大。

2.3 附着系数估算结果误差分析

附着系数特性曲线识别的关键问题首先在于峰值附着系数与抱死附着系数估算的准确性,其次是利用数据组对曲线拟合的拟合算法。由上文可知,汽车在同一路面行驶中,滑移率与附着系数的采样数据不同,其估算结果也会有所差异。

使用一条已知的典型湿沥青路面作为未知路面,使用该路面附着特性曲线的所有数据点对该路面附着特性曲线的峰值附着系数与抱死附着系数进行估算,将估算结果与 Burckhardt 模型下的该路面峰值附着系数与抱死附着系数进行对比,根据误差分析结果验证算法的可靠性。

由图 1 中各路面附着关系可知,干水泥路面附着特性介于干沥青与湿沥青之间,故选用双边参考路面算法对湿沥青路面峰值附着系数与抱死附着系数进行估算,估算结果如图 3 所示。

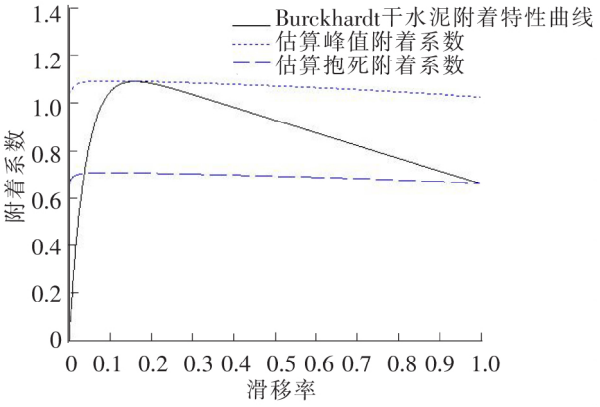


图 3 干水泥路面峰值、抱死附着系数估算结果

由图 3 可知,干水泥路面估算峰值附着系数的最大值为 1.092 7,最小值为 1.024 3,估算抱死附着系数的最大值为 0.707 0,最小值为 0.659 9。表 2 中干水泥路面的峰值附着系数为 1.090 0,抱死附着系数为 0.660 0。结果表明,干水泥峰值附着系数的估算最大误差约为 6%,抱死附着系数的估算最大误差约为 7.1%。

3 未知路面附着特性曲线拟合与验证

使用已知典型路面作为未知路面,将识别结果与 Burckhardt 模型下的该路面附着特性曲线进行对比,根据误差分析结果验证识别算法的可靠性。

假设车辆瞬时状态下获取干沥青路面、湿沥青路面、干水泥路面、干鹅卵石路面、湿鹅卵石路面、雪路面以及冰路面的滑移率-附着系数分别为(0.6,0.968 1)、(0.6,0.648 8)、(0.6,0.874 9)、(0.6,0.941 3)、(0.6,0.328 2)、(0.6,0.155 8)、(0.6,0.05),分别根据其适宜的参考路面进行相关附着特性参数的估算。其中,干沥青与冰路面选用单边参考路面,其余路面选用双边参考路面。根据上述瞬时数据,对 7 种典型路面附着特性参数进行估算,估算结果如表 3 所示。

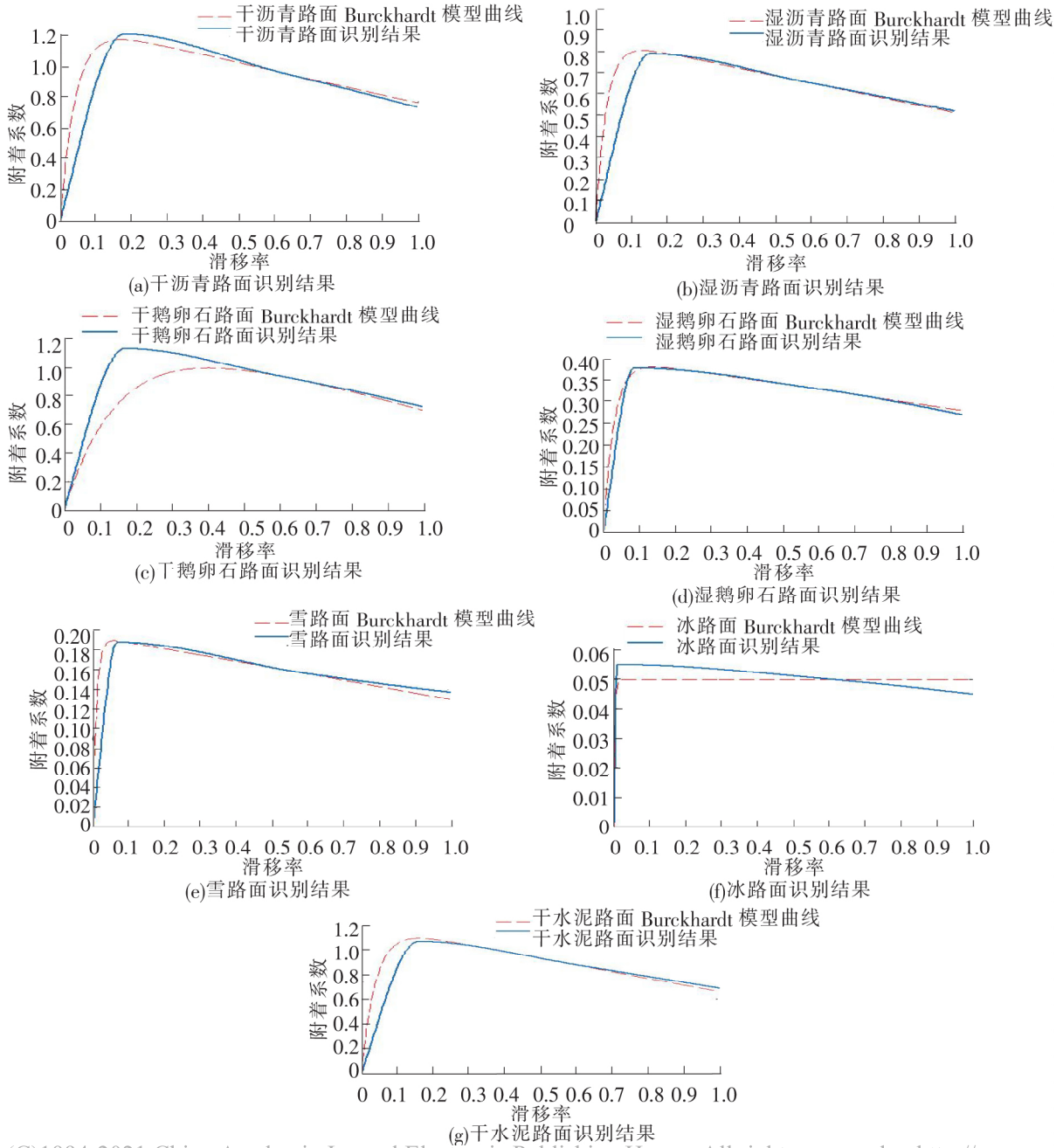
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图 1 路面附着特性曲线可知,各路面的附着特性曲线恒过(0,0)点,因此可获得未知路面附着特性曲线中的 4 组数据点(0,0),(s_{er},φ_{ep}),(s_e,φ_c),(1,φ_d)。

根据曲线坐标可知,所得 4 组数据点处于附着特性曲线的关键节点处,对附着曲线具有较好的拟合性。为了得到完整的路面附着系数特性曲线,在 Matlab 中分别对识别路面附着特性曲线进行非线性拟合,7 种典型路面识别结果如图 4 所示。

表 3　7 种典型路面附着特性参数估算结果

路面	估算最佳滑移率	估算峰值附着系数	估算抱死附着系数
干沥青	0.177	1.206 0	0.730 0
湿沥青	0.140	0.784 7	0.515 9
干水泥	0.158	1.064 0	0.687 0
干鹅卵石	0.167	1.136 0	0.723 0
湿鹅卵石	0.110	0.377 3	0.270 0
雪	0.068	0.188 2	0.147 1
冰	0.020	0.060 0	0.045 0



(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

图 4　7 种典型路面附着特性曲线识别结果

由图4可以看出,干鹅卵石路面与其他典型路面特性的差异性较大,在识别结果中存在较大误差。其余6种典型附着特性曲线的识别结果与Burckhardt模型中的相似,具有相同的滑移率与附着系数关系,得到了较好的拟合结果。

4 结论

为了加强未知路面识别的实时性与可靠性,提出了使用瞬时车况数据对路面附着特性的识别算法,实现了车辆对当下路面附着特性进行快速识别。首先,利用单个实际路面附着特性数据,对该路面的峰值附着系数与抱死附着系数进行估算,经过对比,峰值附着系数估算结果的最大误差约为6%,抱死附着系数误差最大约7%;随后,结合路面附着特性的特点,利用4组数据对路面附着特性进行拟合,经过与Burckhardt模型进行比较,验证了该方法在多数路面附着特性识别中具有较好的可靠性。

参 考 文 献

[1]蒋鸣雷. 新能源汽车制动系统的发展趋势[J]. 汽车实用技术,2019(19):16-17,42.
[2]蒙柳. 基于Matlab/Simulink的汽车制动防抱死研究[J]. 北京汽车,2018(1):43-46.
[3]赵帅. 轿车副车架隔振性能的动态建模研究[D]. 长春:吉林大学,2014.
[4]袁善坤,储江伟,李洪亮,等. 基于Simulink的ABS作用下的电机制动仿真[J]. 森林工程,2018,34(6):38-42.
[5]Wang Feng, Fan Xiaobin, Zhang Yeming. Fuzzy identification based on tire/road adhesion feature[J]. CADDM, 2015, 25(1):62-67.
[6]Sun R Y, Shan Y M, Wang B. Study of pavement identification approach based on wavelet analysis[J]. Applied Mechanics and Materials, 2010, 44/45/46/47:3632-3639.
[7]余卓平,左建令,张立军. 路面附着系数估算技术发展现状综述[J]. 汽车工程,2006(6):546-549.
[8]马镯. 车辆液压制动系统建模及路面参数估计方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
[9]余卓平,曾德全,熊璐,等. 基于激光雷达的无人车路面附着系数估计[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2019,47(7):124-127.
[10]桂临秋. 基于轮毂电机的四轮驱动电动汽车驱动防滑系统的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2017.
[11]袁朝春,张龙飞,陈龙,等. 路面峰值附着系数辨识算法研究[J]. 汽车工程,2017,39(11):1268-1273.
[12]张向文,王飞跃,高彦臣. 轮胎稳态模型的分析综述[J]. 汽车技术,2012(4):1-6.
[13]彭晓燕,章兢,陈昌荣. 基于RBF神经网络的最佳滑移率在线计算方法[J]. 机械工程学报,2011,47(14):108-113.
[14]余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2009.

Identification Method of Unknown Road Adhesion Characteristics Under Braking Condition

Huo Xiaonan[1], **Feng Guosheng**[2], **Ying Ming**[2], **Jia Sumei**[2]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;
2. School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The road adhesion characteristics is one of the most important factors that affect the braking performance of vehicle. However, the road surface of vehicle is often unknown or atypical in practice. In order to improve the anti-lock braking control performance of vehicle driving on unknown road surface, a method of identifying the road adhesion characteristics under instantaneous vehicle condition was proposed. Based on the instantaneous traffic sampling data, combined with the adhesion characteristic curve of typical pavement, several data nodes of unknown pavement adhesion characteristic were estimated. Finally, four groups of adhesion characteristic data nodes were used to fit the unknown pavement adhesion characteristic curve, and the relationship curve between the wheel slip ratio and adhesion coefficient was obtained on the unknown pavement.

Key words: braking; pavement adhesion characteristics; recognition method; Burckhardt

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net