

轮胎非线性纵滑力学特性的分段仿射辨识建模方法

孙晓强^{1,2,3}, 胡伟伟¹, 吴鹏程¹, PAK Kin Wong³, 陈龙¹

(1. 江苏大学汽车工程研究院, 212013, 江苏镇江; 2. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 100084, 北京; 3. 澳门大学机电工程系, 999078, 澳门)

摘要: 针对传统轮胎力学模型因形式复杂、参数拟合困难等而不便于进行车辆系统动力学控制设计的问题, 提出一种基于数据驱动的轮胎纵滑力学特性分段仿射辨识建模方法。基于平板式轮胎动态特性试验台, 准确获取了反映轮胎在3 124、6 530、8 036、9 468、11 760 N等5个垂向载荷, 胎压880 kPa, 纵向滑移率变化范围为 $-1 \sim 0.5$, 以及峰值附着系数分别为0.34和0.77的两种路面条件下的非线性纵滑力学特性试验数据。在此基础上, 对试验结果进行了分析, 确定了轮胎纵向力与其主要影响因素间的一般映射关系, 进而引入分段仿射辨识理论完成轮胎纵滑力学特性的有效辨识。辨识主要由试验数据聚类、仿射子模型参数估计以及分解面系数矩阵求解等3个环节组成, 分别采用改进的K-means、最小二乘以及模糊加权近似支持向量机等算法进行实现, 最终针对低附路面和高附路面分别获取了10个仿射子模型用于拟合轮胎非线性纵滑力学特性试验数据。为验证辨识轮胎模型的精度, 将模型仿真结果与试验数据进行对比。结果表明, 所辨识的轮胎模型能够准确描述轮胎非线性纵滑力学特性, 模型整体拟合精度高于95%。

关键词: 车辆; 轮胎; 纵滑力学特性; 非线性建模; 分段仿射辨识

中图分类号: U463.3 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202107006 **文章编号:** 0253-987X(2021)07-0052-09



OSID 码

Modeling of Tire Longitudinal-Slip Mechanical Characteristics Based on Piecewise Affine Identification Method

SUN Xiaoqiang^{1,2,3}, HU Weiwei¹, WU Pengcheng¹, PAK Kin Wong³, CHEN Long¹

(1. Automotive Engineering Research Institute, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Electromechanical Engineering, University of Macau, Macau 999078, China)

Abstract: Due to complex form and difficult parameters fitting of the traditional tire mechanics model, it is not convenient for users to design vehicle dynamic control system. In this work, a data-driven modelling method for the tire longitudinal-slip mechanical characteristics is proposed based on piecewise affine identification approach. Firstly, the experimental data, which can accurately reflect the tire nonlinear longitudinal-slip mechanical characteristics under the conditions, where the tire vertical loads are respectively 3 124, 6 530, 8 036, 9 468 and 11 760 N, the tire pressure is 880 kPa, the variation range of tire longitudinal slip ratio is $-1 \sim 0.5$, and the road peak adhesion coefficients are 0.34 and 0.77, are obtained through a flat-plate test

收稿日期: 2020-11-10。 作者简介: 孙晓强(1989—),男,副教授。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52072161); 汽车安全与节能国家重点实验室开放基金资助项目(KF2016); 汽车测控与安全四川省重点实验室开放课题资助项目(QCCK2019-002)。

网络出版时间: 2021-03-09

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20210309.1109.006.html>

bench. On this basis, by analyzing the experimental data, the general mapping relationship between the tire longitudinal force and its main influencing factors is determined; and then effective identification of the tire longitudinal-slip mechanical characteristics can be conducted by adopting the piecewise affine identification theory. The aforementioned identification procedure mainly consists of experimental data clustering, parameters estimation of affine submodels, and computation of the hyperplane coefficient matrices, which are accomplished by using the algorithms such as modified K-means, least square, and fuzzy weighted proximal support vector machines, respectively. Finally, 10 affine submodels are obtained for low adhesion road and high adhesion road, respectively, to fit the experimental data of the tire nonlinear longitudinal-slip mechanical characteristics. To verify the accuracy of the identified tire model, the model simulation data are compared with the experimental data. The comparison results show that the overall fitting accuracy of the model is more than 95%, thus the identified model can approximate the tire nonlinear longitudinal-slip mechanical characteristics with high accuracy.

Keywords: vehicle; tire; longitudinal-slip mechanical characteristics; nonlinear modeling; piecewise affine identification

随着人们对车辆动态性能要求的逐渐提高,许多先进动力学控制系统得到了广泛应用^[1]。包括ABS、TCS以及ACC等在内的车辆纵向动力学控制系统由于对整车行驶安全具有重要影响,近年来已成为相关领域的研究热点^[2-4]。轮胎纵滑力学特性主要用于反映轮胎纵向力与轮胎相关工作状态间的复杂映射关系,在车辆大范围行驶工况下呈现出明显的非线性动态特征^[5],因此构建准确的轮胎纵滑力学特性模型对于整车纵向动力学控制设计十分关键。传统车辆纵向动力学控制研究由于缺乏对轮胎非线性纵滑力学特性的足够关注,因而在一定程度上导致了系统控制性能提升受限。

构建准确的轮胎力学模型一直是车辆系统动力学领域的关注焦点之一^[6-7]。现有轮胎力学模型按构建方式主要可分为经验模型和物理模型两大类,诸如弦模型、刷子模型、UniTire模型、“魔术公式”模型以及HSRI模型等轮胎力学模型均属于上述范畴^[8-11]。这些轮胎力学模型在精度和复杂程度等方面表现各异,但是对于推动轮胎力学模型的发展都起到了十分关键的作用。然而,从动力学控制的角度出发,由于在设计过程中需要反复调用轮胎模型,因此希望能够兼顾模型精度和计算效率,但是总体上看,现有轮胎模型大多形式复杂、参数拟合困难,因而给后续在此基础上进行系统动力学控制设计造成了不便。如何突破新型轮胎力学模型构建方式,有效协调轮胎模型精度要求与便于系统动力学控制设计二者间的相互矛盾,具有重要研究意义。

一般而言,建立系统数学模型主要有机理建模和辨识建模两种途径^[12]。鉴于轮胎与路面接触的复杂作用关系,通过机理建模的方式往往难以准确描述轮胎的复杂力学特性。另一方面,即使建立了复杂的机理模型,但对于后续系统控制设计可能会造成不便。随着计算技术的快速发展以及试验条件的不断完善,从系统输入输出数据出发,借助于数据挖掘、模型辨识等技术手段,有望解决上述问题。分段仿射辨识理论旨在根据系统输入输出数据,通过辨识手段获取系统数学模型的分段仿射形式^[13]。根据实际经验,绝大多数非线性系统都能通过分段仿射模型进行有效逼近。此外,值得指出的是,随着分段仿射系统理论的快速发展,相应的优化控制理论体系逐步建立^[14-15],因此基于系统分段仿射模型的动力学控制设计问题也已得到有效解决。

据此,本文考虑在准确获取反映轮胎非线性纵滑力学特性的试验数据基础上,采用基于数据驱动的分段仿射辨识方法进行轮胎纵滑力学特性的辨识建模,通过将系统非线性行为在各局部工作点处进行离散分解,而后运用线性仿射方法描述系统各个局部特征,从而实现轮胎完整纵滑力学特性的有效逼近。在辨识过程中,分别采用K-means、最小二乘以及模糊加权近似支持向量机等算法完成试验数据聚类、仿射子模型参数估计以及分解面系数矩阵求解等任务,最终获取轮胎纵滑力学特性模型的分段仿射形式,并对模型精度进行验证。

1 轮胎纵滑力学特性试验

1.1 轮胎力学特性试验台

为准确获取反映轮胎非线性纵滑力学特性的试验数据,基于平板式轮胎动态特性试验台(如图 1 所示)进行轮胎纵滑力学特性试验。该试验台具有轮胎力学特性测试精度高、工况全、效率高等优点。根据相关研究,轮胎纵滑特性主要受轮胎垂向载荷、纵向滑移率以及路面附着系数等 3 个因素的影响。因此,本文在考虑这 3 个因素的基础上,设计了轮胎纵滑力学特性试验工况,相关参数设定见表 1。



图 1 轮胎纵滑力学特性试验台

Fig. 1 Test bench of the tire longitudinal-slip characteristics

表 1 轮胎纵滑力学特性试验工况设定

Table 1 Setting of test conditions for tire longitudinal-slip mechanical characteristics

参数	数值
充气压力/kPa	880
垂向载荷/N	3 124,6 530,8 036,9 468,11 760
轮胎侧偏角/rad	0
纵向滑移率	-1~0.5
路面峰值附着系数	0.34(低附路面),0.77(高附路面)

由表 1 可以看出,在轮胎纵滑力学特性试验过程中,假定轮胎不存在侧偏现象,即轮胎侧偏角为零。同时,由于车辆在正常行驶过程中胎压变化幅度较小,因此假定轮胎充气压力保持不变。为有效反映轮胎在大范围行驶工况下纵滑力学特性,设定了 5 种不同的垂向载荷,同时将轮胎纵向滑移率变化范围设定为-1~0.5。当滑移率为负时,表示车辆制动,此时轮胎纵滑力学特性模型适用于所有制动轮,而当滑移率为正时,表示车辆驱动,此时轮胎纵滑力学特性模型仅适用于驱动轮。此外,考虑到不同附着系数路面对轮胎纵滑力学特性也有显著影响,在试验过程中通过变换滑台的方式,分别模拟了

两种具有不同峰值附着系数的路面,具体峰值附着系数分别测算为 0.34 和 0.77。

在试验过程中,首先对轮胎施加一垂向载荷,将轮胎充至目标气压,而后对轮胎施加不同的驱动力矩或制动力矩,启动滑台带动轮胎匀速运动,最后记录各滑移率所对应的轮胎纵向力数值,即可获取反映轮胎纵滑力学特性的试验数据。

1.2 试验结果分析

图 2 和图 3 所示分别为两种不同峰值附着系数路面下的轮胎纵滑力学特性试验结果。从图中可以看出,轮胎纵向力与轮胎垂向载荷和轮胎纵向滑移率之间呈现出明显的非线性关系。基于分段仿射辨识理论进行轮胎纵滑力学特性辨识的主要思想就是通过将图中所示的不规则曲面分解为若干个平面进行拟合,而每个平面正好对应一个仿射子模型,在此基础上,进一步结合仿射子模型切换策略,确定每个仿射子模型的工作区域,从而最终形成系统非线性模型的分段仿射形式。

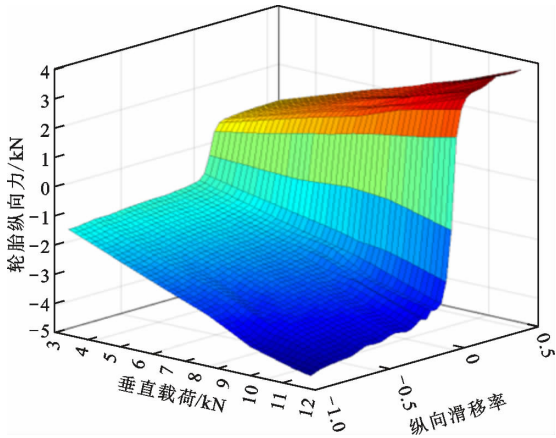


图 2 低附路面的轮胎纵滑力学特性试验结果

Fig. 2 Test results of tire longitudinal-slip mechanical characteristics on low adhesion road

根据上述试验结果,通过对比不同路面附着系数下同一工作区域(垂向载荷-纵向滑移率)内的轮胎纵向力数据可以发现,轮胎纵向力的比值与路面附着系数的比值基本相同。这一现象说明路面附着系数主要影响轮胎纵向力的幅值,而对于轮胎纵向力随垂向载荷和纵向滑移率的演化趋势影响程度较小。该发现可以为本文在轮胎纵滑力学特性辨识过程中只针对特定路面附着系数进行辨识提供依据,从而显著降低了系统分段仿射辨识问题的求解难度。与此同时,已有大量研究工作涉及路面附着系数的有效辨识^[16-17],因此路面附着系数可视为模拟轮胎纵滑力学特性的已知条件。

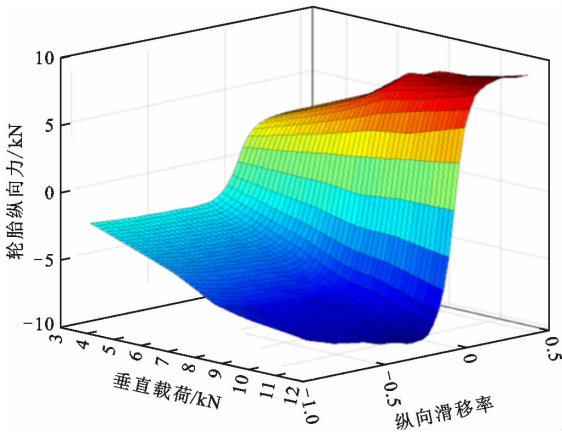


图3 高附路面的轮胎纵滑力学特性试验结果

Fig. 3 Test results of tire longitudinal-slip mechanical characteristics on high adhesion road

综合上述分析,本文所需完成的轮胎纵滑力学特性分段仿射辨识工作,最终被确定为辨识特定路面附着系数下轮胎纵向力与垂向载荷及纵向滑移率之间的三维非线性关系。在此基础上,其他路面附着系数下的轮胎纵滑力学特性可按比例确定。

2 系统分段仿射辨识

对非线性系统进行分段仿射辨识就是首先将系统工作区域划分为若干个不重叠的区域,而后获取反映每个工作区域内系统输入输出间关系的仿射子模型。从理论上讲,只要仿射子模型的数目足够多,同时子模型的切换控制策略有效,那么任意的非线性系统均可通过分段仿射模型进行良好逼近。因此,本文在准确获取反映轮胎非线性纵滑力学特性试验数据的基础上,采用分段仿射辨识方法进行轮胎纵滑力学特性建模。辨识工作主要是由试验数据聚类、仿射子模型参数估计以及分解面系数矩阵求解等3个环节所组成。

2.1 分段仿射辨识问题概述

分段仿射系统的一般表达式如下^[18]

$$y(t) = \begin{cases} \phi_1^T \begin{bmatrix} \zeta(t) \\ 1 \end{bmatrix}, & \text{if } \zeta(t) \in \chi_1 \\ \vdots \\ \phi_s^T \begin{bmatrix} \zeta(t) \\ 1 \end{bmatrix}, & \text{if } \zeta(t) \in \chi_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 为分段仿射系统的输出; $\phi_i (i=1, \dots, s)$ 为每个仿射子模型的参数, s 为仿射子模型的个数; $\zeta(t)$ 为系统回归向量,一般是由系统的输入输出向量所组成,其一般表达形式为

$$\zeta(t) =$$

$$[y(t-1), \dots, y(t-n_y), u(t-1), \dots, u(t-n_u)]^T \quad (2)$$

其中 n_y 和 n_u 为分段仿射模型的阶数, u 为系统输入; $\chi_i (i=1, \dots, s)$ 表示系统整体工作区域,且每个子区域 χ_i 相互不重叠,具体表达式为

$$\chi_i = \{F_i \zeta(t) + g_i \leq 0\} \quad (3)$$

其中 F_i 和 g_i 为分解面系数矩阵。

通过式(1)~(3)实现了分段仿射系统的定义,后续在系统输入输出数据的基础上,通过辨识手段获取系统模型的分段仿射形式。

2.2 分段仿射辨识的具体流程

2.2.1 试验数据聚类 鉴于传统数据聚类算法可能会因异常值的存在或初始化不佳而陷入局部极小,因此本文选用改进的K-means算法进行轮胎纵滑力学特性试验数据的聚类^[19],具体步骤如下。

(1)基于原始数据集 $\Theta = \{(x(j), y(j)), j=1, \dots, N\}$ 建立 N 个局部数据集 C_j 。每个局部数据集内是由每个数据点 $(x(j), y(j)), j=1, \dots, N$ 和与它相邻的 $c-1$ 个点所组成,并满足以下条件

$$\|x(j) - \hat{x}\|^2 \leq \|x(j) - \hat{x}\|^2, \quad \forall (\hat{x}, \hat{y}) \in \Theta \setminus C_j \quad (4)$$

(2)针对每个数据集,辨识其特征向量如下

$$\xi_j = [(\theta_j^{LS})^T, m_j^T]^T \quad \forall j=1, \dots, N \quad (5)$$

式中 θ_j^{LS} 为基于各局部数据集 C_j 内的数据点计算出来的参数向量,具体计算公式为

$$\theta_j^T = (\Psi_j^T \Psi_j)^{-1} \Psi_j^T y_{C_j} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Psi_j = \begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 & \dots & \phi_N \\ 1 & 1 & \dots & 1 \end{bmatrix} \end{array} \right\} \quad (6)$$

其中 $\phi_i (i=1, \dots, N)$ 表示各局部数据集 C_j 的回归向量, y_{C_j} 为数据集 C_j 内的输出向量。 m_j 为反映数据集 C_j 内数据稀疏性的散度向量,其表达式为

$$m_j = \frac{1}{c} \sum_{(x,y) \in C_j} x, \quad j=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

(3)针对数据集特征向量进行聚类划分。该步骤主要是将式(5)定义的各数据集特征向量划分为 s 个互不相交的子集 D_i ,为实现该目标,此处引入如下聚类目标函数

$$J(\{D_i\}_{i=1}^s, \{\mu_i\}_{i=1}^s) = \sum_{i=1}^s \sum_{\xi_j \in D_i} \|\xi_j - \mu_i\|_{R_j^{-1}}^2 \quad (8)$$

式中: μ_i 表示各子集 D_i 的中心; R_j 为反映各局部数据集参数向量 θ_j 置信度的方差矩阵,表达式为

$$R_j = \begin{bmatrix} V_j & 0 \\ 0 & Q_j \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中 V_j 为协方差矩阵, Q_j 为反映数据集 C_j 内数据稀疏性的散度矩阵, 二者的具体数学表达式为

$$\left. \begin{aligned} V_j &= \frac{y_{C_j}^T (I - \Psi_j (\Psi_j^T \Psi_j)^{-1} \Psi_j^T) y_{C_j} (\Psi_j^T \Psi_j)^{-1}}{c - (n+1)} \\ Q_j &= \sum_{(x,y) \in C_j} (x - m_j)(x - m_j)^T \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$n = n_y + pn_n$, p 为系统输入向量的维数。在上述定义的基础上, 通过寻找使得目标函数式(8)最小的子集 D_i 和中心 μ_i , 即可实现数据集特征向量的聚类划分。由于每个仿射子模型都应收集具有相似特征向量的所有数据点, 因此通过进一步进行特征向量的聚类, 即可实现仿射子模型数据集 Γ_i 的划分。具体划分规则如下

$$\xi_j \in D_i \Leftrightarrow (x(j), y(j)) \in \Gamma_i \quad (11)$$

2.2.2 仿射子模型参数估计 当完成仿射子模型数据聚类后, 即可根据数据集内的数据点对仿射子模型进行参数估计。针对传统最小二乘法因分类错误而产生的对异常值较为敏感的问题, 本文进一步引入了反映特征向量分配合理性的置信水平因子, 在此基础上采用加权最小二乘法完成仿射子模型参数估计, 具体就是计算出最合适的子模型参数向量 $\phi_i (i=1, \dots, s)$, 从而使得下列目标函数值最小^[20]

$$J_\xi = \sum_{(x(j), y(j)) \in \Gamma_i} w_j \| y(j) - \phi_i^T [x^T(j) \quad 1]^T \|^2 \quad (12)$$

2.2.3 分解面系数求解 在完成前述工作的基础上, 最后通过求解分解面系数矩阵即可实现轮胎纵滑力学特性的分段仿射辨识。值得指出的是, 一旦原始数据点被划分为 s 个数据集, 则可通过计算分解面系数矩阵的方式完成数据集重构。根据线性分类原理, 分解面系数矩阵的求解实则是完成 $s(s-1)/2$ 个模式识别问题, 而解决该问题的一个重要手段就是支持向量机。鉴于本文所涉及的数据点较多, 为保证识别性能和计算效率, 这里选用模糊加权近似支持向量机算法进行分解面系数求解^[21-23]。相较于传统支持向量机, 该算法利用模糊隶属度函数对每个样本的训练误差进行加权, 因此具有更强的抗噪声能力, 从而可以减少大量训练样本带来的不利影响。基于模糊加权近似支持向量机, 实现轮胎纵滑力学特性分段仿射辨识分解面系数求解的具体步骤如下。

(1) 寻找两个相邻的子集 D_i 和 D_j , 寻找过程所依据的数学公式如下

$$\{D_i, D_j\} = \min_{2 \leq i, j \leq s_{\max}, i \neq j} \{ \|\mu_i - \mu_j\|^2 \} \quad (13)$$

(2) 建立下述分解面系数矩阵求解问题

$$\begin{aligned} \min & \frac{1}{2} (\|F_i\|^2 + g_i^2) + \frac{E_i}{2} \sum_{i=1}^l t_i \xi_i^2, \\ \text{s. t.} & \begin{cases} y_i [F_i^T x_i + g_i] + \xi_i = 1 & i = 1, \dots, l \\ \frac{E_i}{2} \sum_l t_i \xi_i^2 = \frac{E_i^+}{2} \sum_{\{i|y_i=+1\}} t_i \xi_i^2 + \frac{E_i^-}{2} \sum_{\{i|y_i=-1\}} t_i \xi_i^2 \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: ξ_i 是用于防止样本数据在相邻子集中无法分割的松弛变量; l 是相邻子集中数据点数; E_i 是为实现算法复杂程度和错误分类样本量之间平衡的样本平衡因子, 对于正样本和负样本, E_i 可以进一步划分为 E_i^+ 和 E_i^- ; t_i 是用于表示样本点 i 对分解面的贡献率, t_i 越小, 说明样本点对分解面系数求解的影响程度越小。通过求解上式, 获取分段仿射模型分解面系数矩阵。主要计算过程包括样本平衡因子与样本点 i 对分解面贡献率的求解, 求解公式如下

$$d^+ = \frac{1}{k^+} \sum_{i=1}^{k^+} x_i^+; \quad d^- = \frac{1}{k^-} \sum_{i=1}^{k^-} x_i^- \quad (15a)$$

$$E^+ = E \frac{p^-}{k^+}; \quad E^- = E \frac{p^+}{k^-} \quad (15b)$$

$$e^+ = \sum_{i=1}^{k^+} \|x_i^+ - d^+\|; \quad e^- = \sum_{i=1}^{k^-} \|x_i^- - d^-\| \quad (15c)$$

$$r^+ = \max \|x_i^+ - d^+\|; \quad r^- = \max \|x_i^- - d^-\| \quad (15d)$$

$$\left. \begin{aligned} p^+ &= \frac{e^+}{k^+} = \frac{\sum_{i=1}^{k^+} \|x_i^+ - d^+\|}{k^+} \\ p^- &= \frac{e^-}{k^-} = \frac{\sum_{i=1}^{k^-} \|x_i^- - d^-\|}{k^-} \end{aligned} \right\} \quad (15e)$$

$$t_i^+ = 1 - \frac{\|x_i^+ - d^+\|}{r^+ + \lambda}; \quad t_i^- = 1 - \frac{\|x_i^- - d^-\|}{r^- + \lambda} \quad (15f)$$

式中: d^+ 和 d^- 是样本的中心; x_i^+ 和 x_i^- 分别代表正负样本; k^+ 和 k^- 分别表示正负样本的数量。基于式(15a)实现样本中心点的计算。在上述定义的基础上, 进一步计算所有样本到其中心的总欧式距离 e^+ 和 e^- , 如式(15c), 而后计算正负样本的平均密度 p^+ 和 p^- , 如式(15e)。鉴于传统支持向量机在确定分解面过程中可能会偏向样本量较少且分布稀疏的数据类别, 因此本文进一步为正负样本的平衡因子定义了如下比例关系

$$\frac{E^+}{E^-} \propto \frac{k^+}{k^-}; \frac{E^+}{E^-} \propto \frac{p^+}{p^-} \tag{16}$$

综合考虑样本的数量和分布情况,样本平衡因子可最终确定,如式(15b)。随后,确定样本点*i*对分解面的贡献率*t_i*,在这个过程中本文引入了模糊隶属度函数。首先,定义正负样本的半径,如式(15d),而后基于模糊隶属度函数确定*t_i*^[24],具体计算公式如式(15f),式中λ是为防止*t_i*为0而引入的任意小的正数。

3 辨识模型精度验证

通过对轮胎非线性纵滑力学特性试验数据进行上述辨识流程,最终可获取轮胎纵滑力学特性分段仿射模型。辨识过程中每个局部数据集内数据个数以及仿射子模型个数分别设定为1 050和10。为验证辨识模型精度,进一步将模型仿真结果与试验数据进行对比。图4和图5所示分别为两种路面附着

系数下的轮胎纵滑力学特性辨识模型仿真结果。

从图中可以看出,辨识模型的仿真结果呈现形式与原始试验数据非常相似,说明辨识出的若干个仿射子模型能够很好地近似轮胎纵向力与轮胎垂向载荷及胎纵向滑移率之间的非线性关系。与此同时,仿射子模型工作区域划分也在图4和图5中的二维平面内通过不同颜色标注出来了。

此外,在辨识过程中,还能获取每个仿射子模型的具体参数,如表2所示。从表中可以看出,在辨识过程中,总计辨识出10个仿射子模型。

表 2 辨识得到的仿射子模型参数

Table 2 Parameters of the affine submodels

路面类型	ϕ_{i-1}	ϕ_{i-2}	ϕ_{i-3}
高附路面	0.492	31 539	−1 859
	−0.326	−2 107	−5 786
	0.939	4 342	−1 472
	−0.396	35 807	1 903
	1.000	−730	−501
	0.340	−759	5 034
	−0.813	7 004	1 368
	0.070	83 698	−36
	−0.810	−2 512	−1 931
	−0.828	−1 074	−686
低附路面	−0.326	1 124	419.67
	0.284	9 715	−722.90
	0.370	588	−655.00
	0.005	66 450	257.46
	−0.336	690	84.38
	−0.353	805	549.74
	−0.286	5 779	725.50
	−0.355	486	451.10
	0.324	545	−242.60
	−0.350	344	93.97

为进一步验证辨识模型的精度与有效性,文中还给出了模型拟合误差,即轮胎纵向力仿真输出数据与试验数据之间的差值。图6和图7所示分别为两种路面附着系数下的轮胎纵滑力学特性辨识模型拟合误差。从图中可以看出,拟合误差的幅值主要集中在0附近,且相较于试验数据的幅值极小,说明所辨识的轮胎分段仿射模型具有较好的精度。

此外,为使得拟合误差更清晰,在图6和图7所呈现的结果基础上,图8和图9进一步展示了两种路面附着系数下PWA模型与试验数据之间的轮胎

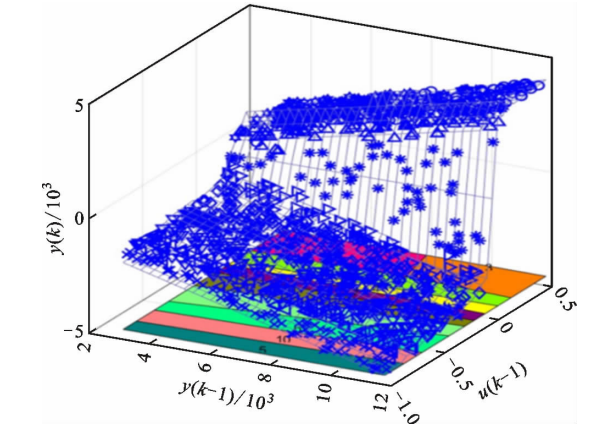


图 4 低路面附着系数下的辨识模型仿真结果
Fig. 4 Simulation results of identified tire model at low road adhesion coefficient

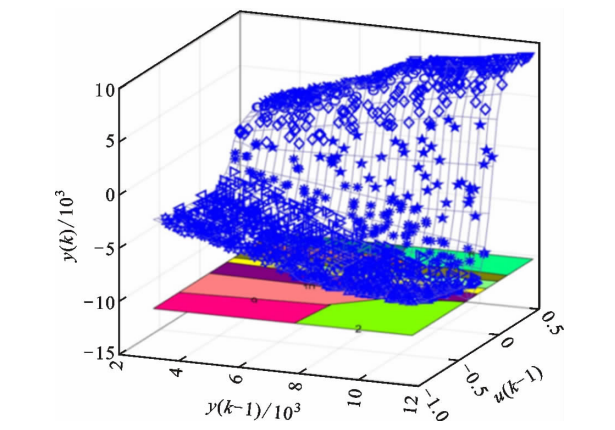


图 5 高路面附着系数下的辨识模型仿真结果
Fig. 5 Simulation results of identified tire model at high road adhesion coefficient

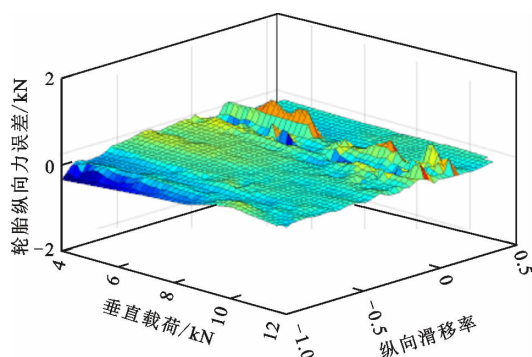


图6 低附着路面下的辨识模型拟合误差

Fig. 6 Fitting error of identified tire model at low road adhesion coefficient

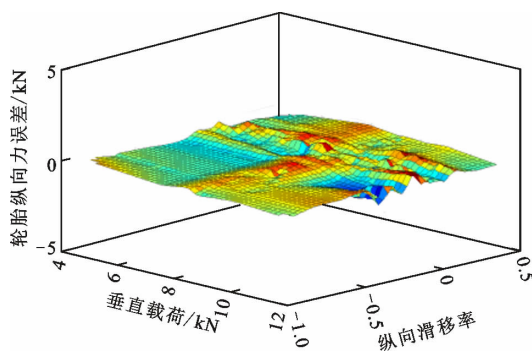


图7 高附着路面下的辨识模型拟合误差

Fig. 7 Fitting error of identified tire model at high road adhesion coefficient

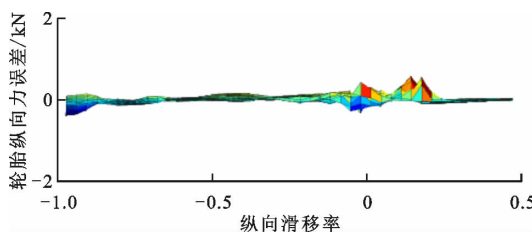


图8 低附着路面轮胎纵向力误差二维图

Fig. 8 Two-dimensional diagram of the tire longitudinal force error at low adhesion coefficient

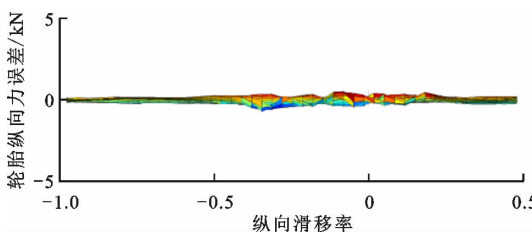


图9 高附着路面轮胎纵向力误差二维图

Fig. 9 Two-dimensional diagram of the tire longitudinal force error at high adhesion coefficient

纵向力拟合误差的二维图。由这两张图可以得出相同的结论,即与实际轮胎纵向力相比,拟合误差的幅度相对较小,这进一步表明了所得轮胎 PWA 模型的准确性和有效性。

鉴于轮胎纵滑力学特性往往是针对特定轮胎垂直向载荷而给出,因此文中进一步给出了特定轮胎垂直向载荷下的轮胎纵向力辨识模型仿真输出数据与试验数据之间的对比结果。图 10 和图 11 所示分别为低附路面下轮胎垂直向载荷为 9 468 N 时辨识模型与试验数据的轮胎纵向力对比结果以及高附路面下轮胎垂直向载荷为 11 760 N 时辨识模型与试验数据的轮胎纵向力对比结果。

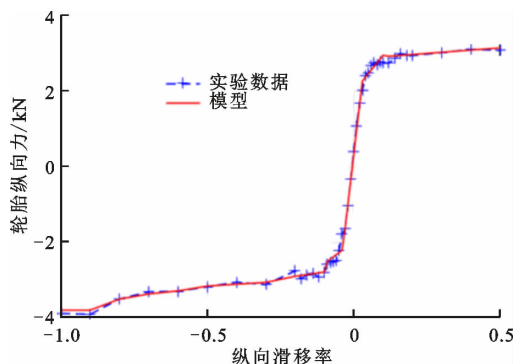


图10 低附路面下的轮胎纵向力对比结果(9 468 N)

Fig. 10 Comparison of tire longitudinal forces on low adhesion road (9 468 N)

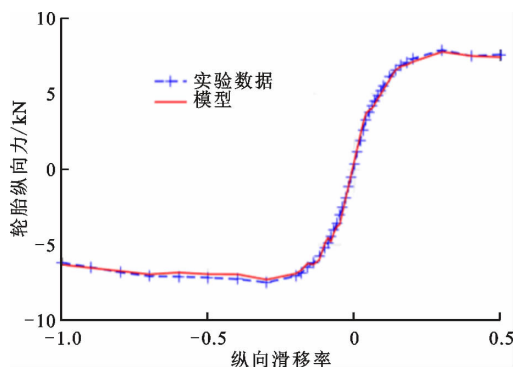


图11 高附路面下的轮胎纵向力对比结果(11 760 N)

Fig. 11 Comparison of tire longitudinal forces on high adhesion road (11 760 N)

从图中可以看出,两种路面附着系数下由辨识模型计算出轮胎纵向力演化趋势与试验数据吻合度较高,且轮胎纵向力拟合误差几乎可以忽略不计。综合上述对比结果表明,本文所辨识的轮胎分段仿射模型能够准确描述大范围行驶工况下的轮胎非线性纵滑力学特性,具有很好的拟合精度。

值得指出的是,数据量对于保证分段仿射辨识

模型的精度十分关键。本文在试验过程中总计采集了100 348个数据。根据辨识模型精度可以看出,在此数据量基础上辨识得到的模型精度达到了预期要求。获取理想辨识效果所需的数据量与被辨识对象的非线性特性往往直接相关,总体上,为保证辨识精度,应提供尽量多的数据。

4 结 论

本文在获取轮胎试验数据的基础上,通过进行试验数据聚类、仿射子模型参数估计以及分解面系数矩阵求解等工作,实现了轮胎非线性纵滑力学特性的分段仿射辨识建模,得出以下结论。

(1)路面附着系数主要影响轮胎纵向力的幅值,而对于轮胎纵向力随垂向载荷和纵向滑移率的演化趋势影响程度较小,轮胎纵向力主要与轮胎垂向载荷与纵向滑移率相关。

(2)通过将改进的K-means、最小二乘以及模糊加权近似支持向量机等算法进行相结合,能够实现轮胎非线性纵滑力学特性的有效辨识。

(3)模型仿真结果与试验数据对比表明,本文辨识得到的轮胎分段仿射模型的轮胎纵向力拟合误差相对于轮胎纵向力幅值几乎可以忽略不计,说明针对低附路面和高附路面,辨识得到的10个仿射子模型可以有效地拟合轮胎非线性纵滑力学特性试验数据。基于分段仿射辨识方法获取的轮胎辨识模型,能够实现大范围行驶工况下轮胎非线性纵滑力学特性的准确描述。

参考文献:

- [1] 严战友,赵晓林,陈恩利,等.基于车路耦合振动状态沥青路面力学响应[J].江苏大学学报(自然科学版),2020,41(5):601-608.
YAN Zhanyou, ZHAO Xiaolin, CHEN Enli, et al. Mechanical response of asphalt pavement based on vehicle-road coupling vibration [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2020, 41(5): 601-608.
- [2] BORRELLI F, BEMPORAD A, FODOR M, et al. An MPC/hybrid system approach to traction control [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 14(3): 541-552.
- [3] DEY K, YAN L, WANG Y. A review of communication, driver characteristics, and controls aspects of cooperative adaptive cruise control (CACC) [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation System, 2016, 17(2): 491-509.
- [4] 冯冲,丁能根,何勇灵.汽车ABS与AFS集成控制算法[J].江苏大学学报(自然科学版),2013,34(2): 138-143.
FENG Chong, DING Nenggen, HE Yongling. Integrated control algorithm of ABS and AFS for automobile [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2013, 34(2): 138-143.
- [5] 郭孔辉,孙胜利,卢荡.时变垂直载荷及时变滑移下轮胎的纵滑特性[J].吉林大学学报(工学版),2007,37(2): 249-252.
GUO Konghui, SUN Shengli, LU Dang. Tire longitudinal-slip characteristics considering transient vertical load and transient slip ratio [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2007, 37(2): 249-252.
- [6] VELENIS E, TSOTRAS P, CANUDAS C, et al. Dynamic tyre friction models for combined longitudinal and lateral vehicle motion [J]. Vehicle System Dynamics, 2015, 43(1): 3-29.
- [7] 张孝良,何海,聂佳梅,等.天棚惯性控制半主动悬架的性能分析[J].江苏大学学报(自然科学版),2018,39(5): 497-502.
ZHANG Xiaoliang, HE Hai, NIE Jiamei, et al. Performance analysis of semi-active suspension with skyhook-intertance control [J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 3-29.
- [8] PACEJKA H. Tire and vehicle dynamics [M]. London, UK: Butterworth, 2002: 329-335.
- [9] 郭孔辉. UniTire 统一轮胎模型 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 90-99.
GUO Konghui. UniTire: unified tire model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 90-99.
- [10] 尚强,王国权.基于PAC2002魔术公式的轮胎动力学特性分析[J].北京信息科技大学学报,2019,6(14): 76-81.
SHANG Qiang, WANG Guoquan. Tire dynamics analysis based on PAC2002 magic-formula [J]. Journal of Beijing Information Science & Technology University, 2019, 6(14): 76-81.
- [11] 罗文发,吴光强,郑松林.基于HSRI模型的参数自适应质心侧偏角观测器的设计[J].汽车工程,2013,35(3): 249-255.
LUO Wenfa, WU Guangqiang, ZHENG Songlin. Design of vehicle sideslip angle observer with parameter adaptation based on HSRI tire model [J]. Automobile Engineering, 2013, 35(3): 249-255.
- [12] 萧德云.系统辨识理论及应用[M].北京:清华大学

- 出版社, 2014.
- [13] ANDRIKOPOULOS G, NIKOLAKOPOULOS G, ARVANITAKIS I, et al. Piecewise affine modeling and constrained optimal control for a pneumatic artificial muscle [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(2): 904-916.
- [14] GROOT N, SCHUTTER B, HELLENDORRN H. Integrated model predictive traffic and emission control using a piecewise-affine approach [J]. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2013, 14(2): 587-598.
- [15] HEEMELS W, SCHUTTER B, BEMPORAD A. Equivalence of hybrid dynamical models [J]. *Automatica*, 2010, 37(7): 1085-1091.
- [16] 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.
YU Zhuoping, ZENG Dequan, XIONG Lu, et al. Road adhesion coefficient estimation for unmanned vehicle based on lidar [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2019, 47(7): 124-127.
- [17] XU Xing, CHEN Biyun, CHEN Chi. Estimation of road friction coefficient and vehicle states by 3-DOF dynamic model and HSRI model based on Information fusion [J]. *Asian Journal of Control*, 2017, 19(4): 1-10.
- [18] BEMPORAD A, GARULLI A, PAOLETTI S, et al. A bounded-error approach to piecewise affine system identification [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2005, 50(10): 1567-1580.
- [19] 刘哲, 黄文准, 王利平. 基于改进 K-means 聚类算法的大田麦穗自动计数 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(3): 174-181.
LIU Zhe, HUANG Wenzhun, WANG Liping. Field wheat ear counting automatically based on improved K-means clustering algorithm [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(3): 174-181.
- [20] CHEN Mengting, DING Feng, LIN Rongming, et al. Maximum likelihood least squares based iterative methods for output error bilinear parameter models with colored noises [J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2020, 30(15): 6262-6280.
- [21] 汤越, 肖妹, 汤玲迪. 泵性能测试曲线分段最小二乘多项式拟合算法 [J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(9): 744-748.
TANG Yue, XIAO Mei, TANG Lingdi. Piecewise least squares polynomial curve fitting algorithm for tested pump performance data [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 35(9): 744-748.
- [22] 左言言, 宋文兵, 陆怡, 等. 基于 LSSVM 样本熵的车内噪声声品质预测 [J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2020, 41(1): 1-7.
ZUO Yanyan, SONG Wenbing, LU Yi, et al. Interior noise sound quality prediction based on least square support vector machine-sample entropy [J]. *Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)*, 2020, 41(1): 1-7.
- [23] OWUSU E, ZHAN Y, MAO Qirong. An SVM-AdaBoost facial expression recognition system [J]. *Applied Intelligence*, 2014, 40(3): 536-545.
- [24] 王友芝, 郭萍, 郭珊珊, 等. 基于模糊定权的模糊可信性约束二次规划模型 [J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 36(9): 869-873.
WANG Youzhi, GUO Ping, GUO Shanshan, et al. Fuzzy credibility quadratic programming model based on fuzzy weighted weights [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 36(9): 869-873.

(编辑 荆树蓉)