DOI: 10.3901/JME.2020.12.174

磨损对轮胎侧偏刚度和回正刚度影响的研究*

卢荡¹ 卢磊¹ 吴海东¹ 李论² 王伟² 吕满意²

(1. 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室 长春 130000;

2. 中国第一汽车集团有限公司研发总院底盘开发所 长春 130000)

摘要: 基于轮胎六分力测试结果, 研究不同磨损状态下轮胎的侧偏力学特性, 得出轮胎侧偏特征参数随着轮胎磨损量的变化规律。通过建立胎面磨损模型阐明轮胎磨损特性变化的机理, 得到胎面刚度与磨损量的表达式, 之后根据该表达式和考虑轮胎磨损状态的轮胎刷子模型, 建立考虑胎面磨损的轮胎复杂刷子模型。通过模型推导得到磨损量与轮胎侧偏刚度、回正刚度的关系, 以该关系为 UniTire 轮胎模型的建模基础表达式, 建立考虑磨损的 UniTire 侧偏模型。为验证模型的正确性, 采用3种磨损状态的侧偏数据进行参数拟合, 得到考虑磨损的 UniTire 侧偏模型, 并预测其他2种磨损状态下的轮胎侧偏特性。预测模型的仿真结果与试验结果之间的误差较小, 有效证明了考虑磨损的 UniTire 侧偏模型的预测能力。本研究有助于完善 UniTire 轮胎模型, 为 UniTire 模型室内外扩展应用提供理论和技术支持。

关键词: 轮胎; 磨损; 侧偏刚度; 回正刚度; 刷子模型; UniTire 轮胎模型

中图分类号: TG156

Study on Influence of Wear on Tire Cornering Stiffness and Aligning Stiffness

LU Dang¹ LU Lei¹ WU Haidong¹ LI Lun² WANG Wei² LÜ Manyi²

(1. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130000;

2. General R&D Institute of China Department Experiment Unit,
China FAW Group Co., Ltd., Changchun 130000)

Abstract: Based on the results of tire handling test of tires, the cornering properties of the tire under different wear conditions are studied, and the variation law of the tire lateral deflection characteristic parameters with the tire wear amount is obtained. By establishing a tread wear model to clarify the mechanism of tire wear characteristics change, the expression of tread stiffness, aligning stiffness and wear amount is obtained. Then, based on the expression and the tire brush model considering the tire wear state, a complex brush model of the tire considering the tread wear is established. The relationship between the wear amount and the tire cornering stiffness is obtained by the model derivation. The relationship is used as the basic expression formula of UniTire modeling to establish the UniTire cornering model considering the tread wear. In order to verify the correctness of the model, three kinds of wear state cornering slip data are used to fit, and the UniTire cornering model considering wear is obtained, the tire cornering properties in the other two wear states is predicted. The error between the simulation results of the prediction model and the experimental results is small, which effectively proves the predictive ability of the UniTire cornering model considering wear. The UniTire tire model helps provide theoretical and technical support for the UniTire model indoor and outdoor expansion applications.

Key words: tire; wear; cornering stiffness; aligning stiffness; bush tire model; UniTire tire model

0 前言

随着汽车工业的发展, 车辆在人们日常生活中

的作用越来越大, 良好操控稳定性的车辆对乘客的安全有着非常重要的作用, 车辆动力学也一直是人们重点研究对象。轮胎是车辆唯一与路面接触的部件, 研究轮胎的力学特性是车辆动力学的基础, 是设计出良好操控稳定性车辆的关键^[1]。

车辆在日常行驶过程中常处于转弯制动等工况, 随着轮胎行驶里程的增加, 轮胎磨损日趋严重,

* 国家自然科学基金资助项目(51775224)。20190730 收到初稿, 20191202 收到修改稿

轮胎是一个全生命周期的部件, 起始状态到报废状态时轮胎的磨损量大约为 6 mm(达到磨损标志), 而轮胎不同磨损状态下其侧偏力学性有着非常大的差别, 严重影响了车辆的操控稳定性^[2]。车辆正向开发过程中, 进行整车测试时, 一次完整的测试周期后轮胎磨损也是非常严重的。所以研究磨损与轮胎稳态侧偏特性之间的关系非常重要。

2003 年彭旭东等^[3]系统地总结了轮胎的磨损类型, 研究了炭黑增强对轮胎用橡胶化合物磨损特性的影响规律。

2003 年, MICKY^[4]研究了轮胎胎肩磨损对车辆侧向稳定性的研究, 指出斜交胎中轮胎胎肩磨损量的增大对应车辆最大侧向加速减小的规律并不适用于子午线轮胎, 胎肩磨损对装有子午线轮胎车辆的最大侧向加速度没有明显的影响。

2010 年, LI 等^[5]建立了基于轮胎胎面横向振动的轮胎多边形磨损动力学模型, 通过数值模拟分析了系统的动力学特性, 指出胎压对轮胎多边形磨损的影响规律; 在 2014 年, 考虑轮胎接地摩擦的非线性特性建立了基于轮胎胎面横向振动的动态 LuGre 摩擦模型的轮胎多边形磨损动力学模型, 分析了系统的稳定性, 证明轮胎的振动是系统 Hopf 分岔引起的一种稳定的周期振动^[6-7]。

2010 年, METZ^[8]研究了低高宽比轮胎在非对称磨损状态下的力学特性。对装有不同磨损状态轮胎的车辆进行整车测试。结果表明, 由于侧倾导致的轮胎偏磨在一定程度上可以提高车辆的操稳性能。

2015 年, SINGH 等^[9]研究了花纹沟深度对车辆的影响, 通过建立考虑了花纹沟深度的自适应轮胎模型, 应用于车辆控制系统策略上, 并与传统的控制系统进行对比, 发现带有自适应轮胎模型的整车控制策略具有更大的优势^[9]。

2016 年, 陆清^[10]计算了轮胎与路面之间的摩擦功, 通过 Isight 优化, 得到悬架的前束角与外倾角对轮胎磨损的最优匹配关系。

2017 年, CHEN 等^[11]建立了三自由度非线性多轴转向动力学模型以评估轮胎侧向磨损量, 指出轮胎定位参数中前束角对轮胎磨损具有显著的影响。

NGUYEN 等^[12]建立了考虑轮胎磨损方向性和磨损历程的轮胎理论模型, 并通过有限元模型对该理论模型进行了验证。

综上所述, 目前对轮胎磨损的研究一致认为磨损是轮胎外部输入导致的轮胎花纹表面状态的改变, 研究重点集中在不同的轮胎载荷、侧偏角、侧倾角等外部输入对轮胎的磨损形式有什么样的影响, 轮胎的磨损量是如何随着上述变量而发生变化

的。而对于轮胎磨损之后, 其力学特性是如何改变的尚少见相关研究, 因此基于不同磨损状态下的轮胎侧偏力学特性试验, 进行轮胎力学特性的变化规律的研究, 并建立考虑磨损的轮胎动力学模型(UniTire 轮胎模型), 是一项提高轮胎动力学仿真及车辆动力学仿真精度的关键性技术研究工作。

1 轮胎磨损试验

轮胎磨损发生在轮胎与路面存在相对运动状态下, 常规的轮胎测试也常常伴随着轮胎磨损现象, 如何降低轮胎在试验过程中的磨损量是保证精确测量的关键, 本次磨损研究相关试验是基于 MTS CT III 轮胎六分力试验台进行, 如图 1 所示。MTS CT III 轮胎六分力试验台是用于轮胎六分力测试的设备, 具有高效, 高精度等测试特点。试验包括两部分: 磨耗试验、磨损特性试验。其中磨耗试验将轮胎胎面快速磨损到指定厚度; 磨损特性试验测得特定磨损状态下的侧偏力学特性。

图 1 MTS CT III 型轮胎六分力试验台

1.1 试验工况设定

试验轮胎为花纹沟初始深度为 8 mm, 共进行了五次磨耗试验, 每次磨耗试验完成之后通过分别测量固定位置的 A、B、C、D 四个花纹沟的深度, 具体如图 2 所示, 之后求得平均值作为测量结果, 如表 1 所示。在每个磨损状态下, 进行磨损特性试验, 磨损特性试验工况设定如表 2 所示。

图 2 磨损量为 1.34 mm 时花纹状态

表1 轮胎磨损试验工况设定

试验次数	第1次	第2次	第3次	第4次	第5次
花纹深度/mm	6.66	5.69	4.67	3.63	2.59
磨损量/mm	1.34	2.31	3.33	4.37	5.41

表2 磨损特性试验工况设定

轮胎型号	充气压力/kPa	路面速度/(km/h)	侧偏角加载方式	侧偏角范围/(°)	垂直载荷/kN
Atlas	250	5	定点测量	-1、-0.5、0、0.5、1	2、4

1.2 试验结果

轮胎花纹磨损量为1.34 mm时的轮胎花纹状态如图2所示。

不同载荷、不同磨损程度下,轮胎力学特性对比曲线如图3、4所示。

图3 载荷为2 kN时,侧向力与回正力矩对比曲线

从以上的试验结果可以看出,不同的磨损程度,轮胎所对应的侧向力和回正力矩有着比较大的差别,其中对应的关键轮胎特性为轮胎侧偏刚度和回正刚度^[13]。

轮胎侧偏刚度是指侧向力在侧偏角为零时的斜率,从上图可以看出不同磨损状态下的轮胎侧偏刚度不同,具体的轮胎侧偏刚度随磨损量的变化曲线如图5所示。

轮胎回正刚度指的是轮胎回正力矩在侧偏角为零时所对应的斜率,回正刚度随着磨损量的变化曲线如图6所示。

从侧偏刚度和回正刚度随着磨损量的变化曲线来看,小载荷下最大磨损量的轮胎侧偏刚度相比与

未磨损的轮胎侧偏刚度变化为64.95%,回正刚度变化为96.71%,大载荷时侧偏刚度变化为27.39%,回正刚度变化为97.90%。

图4 载荷为4 kN时,侧向力与回正力矩对比曲线

图5 不同载荷轮胎侧偏刚度随磨损量变化曲线

图6 不同载荷轮胎侧偏刚度随磨损量变化曲线

2 磨损对轮胎力学特性影响机理

从以上的试验结果可以看出, 磨损对轮胎侧偏特性影响显著, 轮胎的磨损发生在胎面上, 可以将轮胎的胎面进行单独建模, 研究磨损量对轮胎花纹块分布刚度的影响规律。

根据文献[14]中所提及的轮胎有限元建模方法可以将轮胎花纹简化为沿轮胎周向排布的花纹条。在小侧偏角状态下, 接地印迹内的花纹可以简化为下端(与路面接触端)固定的橡胶块, 简化模型如图 7 所示。

图 7 花纹块简化模型示意图

花纹块长度为 $2a$, 长度方向为轮胎运动方向; 花纹块高度为 h , 高度方向为垂直路面方向; 花纹块宽度为 l , 宽度方向为轮胎轴线方向。

简化模型的边界条件为花纹块与路面的接触面固定, 给花纹块上表面施加合力为 F_y 的均布载荷, 方向为 $+y$, 求解花纹块沿宽度方向的变形, 同时求解花纹块沿宽度方向的刚度。

$$\text{花纹块均布切应力 } \tau = \frac{F_y}{2a \cdot l}。$$

由剪切胡克定律 $\tau = G \cdot \gamma$ 可得, 该花纹块在合力为 F_y 的均布载荷作用下的应变为

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{F_y}{2a \cdot l \cdot G} \quad (1)$$

式中, G 为橡胶材料的切变模量; γ 为花纹块纵向线变形后的倾角。

根据弧长公式可求得接触面的侧向变形近似为

$$l_y \approx h \cdot \gamma = h \cdot \frac{F_y}{2a \cdot l \cdot G} \quad (2)$$

所以花纹块侧向刚度

$$K_{\text{trendy}} = \frac{F_y}{l_y} = \frac{2a \cdot l \cdot G}{h} \quad (3)$$

花纹块的侧向均布刚度

$$k_{y0} = \frac{K_{\text{trendy}}}{2a} = \frac{l}{h} \cdot G \quad (4)$$

从以上的刚度公式可以看出, 花纹块刚度与花

纹高度为反比例关系, 随着花纹高度的增加, 花纹块宽度方向刚度逐渐减小。

3 考虑轮胎磨损的刷子模型建模

从轮胎结构来看, 轮胎主要有胎面、胎体和胎侧等部分组成, 而轮胎磨损全部发生在胎面部分, 对胎体没有任何影响, 反映到刷子模型上是对应的胎面刷毛的分布刚度的变化。

刷子模型是一种简化的轮胎物理模型^[15], 能够反映轮胎的基本力学特性, 它将轮胎的胎面弹性和胎体弹性都简化为弹性刷毛。此模型对于轮胎磨损分析来说并不适用。故此时需要建立将胎体与胎面分开的刷子模型, 即“考虑胎体弹性的刷子模型^[16]”, 其中刷毛下端点变形和胎体变形参考图 8。式(5)为刷毛下端点侧向变形。

图 8 考虑胎体弹性小侧偏角时刷子模型侧向变形

$$\begin{cases} \Delta y(x) = y_t(x) - y_c(x) \\ y_t(x) = y_{c0} + a \cdot \theta - (a-x) \cdot \tan \alpha \\ y_c(x) = y_{c0} + y_b(x) + y_{cb}(x) \end{cases} \quad (5)$$

$$\Delta y(x) = (a-x) \cdot \left(\frac{M_z}{N_\theta} - \tan \alpha \right) - \frac{F_y}{K_{cb}} \cdot \xi \left(\frac{x}{a} \right) \quad (6)$$

式中, ξ 为胎体一般弯曲变形函数; N_θ 为胎体的扭转刚度。

所以侧向力和回正力矩

$$\begin{cases} F_y = \int_{-a}^a k_{ty} \Delta y(x) \cdot dx \\ M_z = \int_{-a}^a k_{ty} \Delta y(x) \cdot dx \cdot x \end{cases} \quad (7)$$

定义

$$\begin{cases} \varepsilon_0 = K_{ty} / K_{c0} = 2ak_{ty} / K_{c0} \\ \varepsilon_b = K_{ty} / K_{cb} = 2ak_{ty} / K_{cb} \\ \varepsilon_\theta = N_{t\alpha} / N_\theta = \frac{2}{3} a^3 k_{ty} / N_\theta \end{cases} \quad (8)$$

式中, K_{ty} 为轮胎接地印迹内胎面的侧向刚度; K_{c0} 为接地印迹内胎体侧向平移刚度; K_{cb} 为接地印迹

内胎体侧向弯曲刚度; N_θ 为接地印迹内胎体的扭转刚度。

计算得到

$$\begin{cases} F_y = -2a^2k_{ty} \frac{1}{(1+\varepsilon_b)(1+\varepsilon_\theta) + \frac{3}{2}D_1(-1)\varepsilon_b\varepsilon_\theta} \tan \alpha \\ M_z = \frac{2}{3}a^3k_{ty} \frac{1 + \left[1 + \frac{3}{2}D_1(-1)\right]\varepsilon_b}{(1+\varepsilon_b)(1+\varepsilon_\theta) + \frac{3}{2}D_1(-1)\varepsilon_b\varepsilon_\theta} \tan \alpha \end{cases} \quad (9)$$

式中, $D_1(-1)$ 为胎体弯曲变形在刷毛下端点的一阶矩。

计算得到考虑胎体弹性时轮胎侧偏刚度、回正刚度表达式为

$$K_y = -2a^2k_{ty} \frac{1}{(1+\varepsilon_b)(1+\varepsilon_\theta) + \frac{3}{2}D_1(-1)\varepsilon_b\varepsilon_\theta} \quad (10)$$

$$C_{Mz} = \frac{2}{3}a^3k_{ty} \frac{1 + \left(1 + \frac{3}{2}D_1(-1)\right)\varepsilon_b}{(1+\varepsilon_b)(1+\varepsilon_\theta) + \frac{3}{2}D_1(-1)\varepsilon_b\varepsilon_\theta} \quad (11)$$

考虑式(4), 可求得胎面的分布刚度

$$k_{ty} = C \cdot k_{y0} \quad (12)$$

式中, C 为单个花纹块刚度转换为胎面刚度的等效系数。

根据式(4)、式(8)~(11)可得

$$\begin{cases} K_y = -\frac{A_0 \cdot h}{h^2 + B_0 \cdot h + C_0} \\ C_{Mz} = \frac{m_1 \cdot h + m_2}{m_3 \cdot h^2 + m_4 \cdot h + m_5} \\ D_x = -\frac{a}{3} \cdot \left(1 + \frac{8 \cdot a \cdot C \cdot l \cdot G}{K_{cb}} \cdot \frac{1}{h}\right) \end{cases} \quad (13)$$

定义

$$\begin{cases} A_0 = 2Ca^2 \cdot l \cdot G \\ B_0 = \frac{6N_\theta a + 2a^2 K_{cb}}{3N_\theta \cdot K_{cb}} \cdot l \cdot G \cdot C \\ C_0 = \frac{4a^3 + 6a^2 D(-1)}{3N_\theta \cdot K_{cb}} \cdot l^2 \cdot G^2 \cdot C^2 \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} m_1 = 6 \cdot a^3 \cdot C \cdot G \cdot l \cdot N_\theta \cdot K_{cb} \\ m_2 = 16 \cdot a^6 \cdot C^2 \cdot G^2 \cdot l^2 \cdot K_{cb} \\ m_3 = 9 \cdot N_\theta \cdot K_{cb} \\ m_4 = 6 \cdot C \cdot G \cdot l \cdot (a \cdot N_\theta + a^3 \cdot K_{cb}) \\ m_5 = 48 \cdot a^4 \cdot (C \cdot G \cdot l)^2 \end{cases} \quad (15)$$

从式(13)可以看出, 由于轮胎花纹深度一般比较小, 故式(13)可简化为

$$\begin{cases} K_y = -\frac{A_0 \cdot h}{B_0 \cdot h + C_0} \\ D_x = b_1 + \frac{b_2}{h} \end{cases} \quad (16)$$

根据上述公式, 应用考虑胎面磨损及胎体刚度的刷子模型进行小侧偏角下轮胎侧偏工况仿真得到不同磨损量、不同载荷下的轮胎侧向力和回正力矩随侧偏角变化曲线。

不同的花纹沟深度备注如表 3 所示, 刷子模型的相关参数如表 4 所示, 刷子模型仿真结果如图 9~12 所示。

表 3 花纹沟深度表

mm

标注	h_1	h_2	h_3	h_4
花纹沟高度	8	6	4	2

表 4 刷子模型参数表

参数	$2a/m$	K_{ty}	K_{c0}	K_{cb}	N_θ
参数值	0.2	200 000	210 000	222 155	2 546 565

图 9 $F_z=2\ 000\text{ N}$ 刷子模型不同磨损程度侧向力和回正力矩随侧偏角变化曲线

图 10 $F_z=4\ 000\ \text{N}$ 刷子模型不同磨损程度侧向力和回正力矩随侧偏角变化曲线

图 11 $F_z=6\ 000\ \text{N}$ 刷子模型不同磨损程度侧向力和回正力矩随侧偏角变化曲线

之后仿真出各个载荷下, 轮胎侧偏刚度和回正刚度随着磨损量的变化曲线, 如图 12 所示。

从以上的仿真结果可以看出, 考虑胎面磨损的刷子模型得到的轮胎侧偏刚度和回正刚度随着磨损量的增加所体现的规律与试验得到的规律近似相同, 但这种的规律具体变化形式与试验所展示的有一定的差别。

图 12 不同载荷下刷子模型侧偏刚度和回正刚度随磨损量的变化曲线

4 考虑胎面磨损的 UniTire 模型

UniTire 模型是用于车辆动力学仿真和控制的非线性非稳态轮胎模型, 能够准确描述轮胎在复杂工况下的力学特性, 具有良好的外延和预测能力, 能对不同路面不同胎压不同速度的轮胎特性进行准确表达^[17-19]。但目前该模型并没有考虑磨损对力学特性的影响。

4.1 考虑磨损的 UniTire 轮胎模型建模

轮胎的侧偏力学特性中侧偏刚度和回正刚度都会随着磨损量的改变而改变, 但是对于经验建模从式(17)可以看出回正力矩的改变是由于侧向力和拖距的改变而改变的, 所以本研究重点主要集中在磨损对轮胎侧偏特性中侧偏刚度、回正刚度和拖距的影响上, 根据考虑磨损的 UniTire 模型中侧向力及回正力矩的表达式为^[17]

$$\begin{cases} F_y = \mu F_z \left\{ 1 - \exp \left[-\phi - E \cdot \phi^2 - \left(E^2 + \frac{1}{12} \phi^3 \right) \right] \right\} \\ M_z = F_y \cdot D_x \\ D_x = (D_{x0} - D_e) \exp(-D_1 \phi - D_2 \phi^2) + D_e \end{cases} \quad (17)$$

式中, $\phi = \frac{K_y \cdot S_y}{\mu_y \cdot F_z}$; K_y 为轮胎的侧偏刚度。

根据考虑磨损的刷子模型推导式(15)可知, 花纹沟深度与轮胎侧偏刚度的关系为反比例函数关系, 而花纹沟深度和磨损量为线性关系, 故在经验建模过程中将磨损量 l 和侧偏刚度为反比例函数关系设定为建模的基础。UniTire 模型中的侧偏刚度 K_y 表达式如式(17)所示, 在该表达式基础上乘以 K_{y_wear} , K_{y_wear} 的表达式如式(18)所示, 最终得到考虑磨损的 UniTire 模型侧偏刚度表达式(20)。

拖距与和花纹块高度的表达关系亦为反比例关系, 而花纹沟深度与磨损量为线性关系, 所以在经验建模过程中以磨损量和拖距为反比例函数关系为

基础构建相关经验模型。UniTire 经验模型中拖距表达式如式(21)所示, 在该公式基础上乘以 D_{x_wear} , D_{x_wear} 的表达式如式(22)所示, 得到考虑磨损的 UniTire 模型拖距表达式(23)。

$$K_y = s_{11} \cdot F_z \cdot \text{sech}(s_{12} \cdot F_{zn}^2 + s_{13} \cdot F_{zn}) \cdot (1 - s_{14} \cdot \sin^2 \gamma) \quad (18)$$

$$K_{y_wear} = \frac{A_0 \cdot h}{B_0 \cdot h + C_0} \quad (19)$$

$$K_y = s_{11} \cdot F_z \cdot \text{sech}(s_{12} \cdot F_{zn}^2 + s_{13} \cdot F_{zn}) \cdot (1 - s_{14} \cdot \sin^2 \gamma) \cdot K_{y_wear} \quad (20)$$

$$D_x = (D_{x0} - D_e) \exp(-D_1 \phi - D_2 \phi^2) + D_e \quad (21)$$

$$D_{x_wear} = b_1 + \frac{b_2}{h} \quad (22)$$

$$D_x = ((D_{x0} - D_e) \exp(-D_1 \phi - D_2 \phi^2) + D_e) \cdot D_{x_wear} \quad (23)$$

式中, l 为磨损量, 花纹高度与磨损量的关系为 $h = h_0 - l$ 。

之后采用考虑磨损的 UniTire 对不同磨损程度的试验数据进行数据辨识, 得到 A_0 、 B_0 、 C_0 、 b_1 和 b_2 参数值, 不同磨损程度下 UniTire 轮胎模型整体辨识精度均在 93% 以上, 辨识结果如图 13~16 所示。

图 13 载荷为 2 kN, 不同磨损状态侧向力辨识结果与试验结果对比曲线

图 14 载荷为 2 kN, 不同磨损状态回正力矩辨识与试验结果对比曲线

从以上的辨识结果可以看出, 考虑磨损的 UniTire 模型能够对不同磨损程度的轮胎侧偏力学特性进行精确的表达。

图 15 载荷为 4 kN, 不同磨损状态侧向力辨识与试验结果

图 16 载荷为 4 kN, 不同磨损状态回正力矩辨识与试验结果

4.2 不同磨损量的 UniTire 模型侧偏特性预测

考虑磨损的 UniTire 轮胎模型是基于磨损量为 1.34 mm、2.31 mm 和 3.33 mm 的试验数据而获得的, 为验证磨损模型的准确性, 本文对磨损量为 4.37 mm 和 5.41 mm 时的轮胎侧向力和回正力矩进行预测, 侧向力预测结果如图 17、18 所示, 回正力矩预测结果如图 19、20 所示。

从 UniTire 模型的预测结果来看, 考虑磨损特性的 UniTire 侧向力模型在大载荷和小载荷的预测精度都比较高。UniTire 回正力矩模型的精度并不是

特别高, 但是也基本表达了磨损对回正力矩特性的影响。

图 17 载荷为 2 kN, UniTire 侧向力模型磨损预测结果与试验结果对比曲线

图 18 载荷为 4 kN, UniTire 侧向力模型磨损预测结果与试验结果对比曲线

图19 载荷为2 kN, UniTire回正力矩模型磨损预测结果与试验结果对比曲线

图20 载荷为4 kN, UniTire回正力矩模型磨损预测结果与试验结果对比曲线

5 结论

(1) 从试验结果可以看出, 轮胎在不同的磨损状态下力学特性具有较大的差异, 轮胎侧偏刚度随着胎面磨损量的增加逐渐增大; 轮胎回正刚度随着胎面磨损量的增加逐渐增大; 侧偏刚度和回正刚度与胎面磨损的关系近似为线性关系。

(2) 基于考虑胎体弹性的刷子模型理论建立了考虑胎面磨损的轮胎刷子模型, 仿真结果证明轮胎侧偏刚度和回正刚度随着磨损量的增大而逐渐增大, 得到侧偏刚度和磨损量之间的关系表达式, 为经验模型建模提供建模基础。

(3) UniTire模型通过考虑磨损的影响之后, 辨识精度和预测精度都是比较高的, 这对于完善UniTire模型、精确表达不同磨损状态下的轮胎侧偏刚度特性具有重要意义。

(4) 通过试验和仿真研究, 建立了轮胎侧偏刚度与轮胎磨损量之间的关系, 提供了一种根据轮胎侧偏刚度估计轮胎磨损的方法, 具有一定的实际应用价值。

参考文献

- [1] 郭孔辉, 卢荡, 吴海东. 轮胎动力学协同发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2018, 20(1): 91-96.
GUO Konghui, LU Dang, WU Haidong. Tire dynamics collaborative development strategy[J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(1): 91-96.
- [2] DONALD F T, COLEMAN C, et al. Technical analysis of severe cornering induced tire wear on vehicle limit handling through repeatable on-track vehicle testing[J]. SAE, 2018-01-0558, 2018.
- [3] 彭旭东, 郭孔辉, 丁玉华, 等. 轮胎磨损机理及炭黑对磨损的影响[J]. 合成橡胶工业, 2003, 26(3): 136-140.
PENG Xudong, GUO Konghui, DING Yuhua, et al. Tire wear mechanisms and effect of carbon black on treadwear[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2003, 26(3): 136-140.
- [4] MICKY G G. Effects of tire shoulder wear on vehicle rollover limit testing[R]. SAE, 2003-01-2865, 2003.
- [5] LI Y, ZUO S G, LEI L, et al. Analysis of influence of tire pressure on polygonal wear of tire[C]// 2010 WASE International Conference on Information Engineering, Beidaihe, Hebei, 2010: 88-91.
- [6] ZUO S G, NI T X, WU X D, et al. Prediction procedure for wear distribution of transient rolling tire[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(3): 505-515.
- [7] LI Y, ZUO S, LEI L, et al. Analysis on polygonal wear of automotive tire based on lateral vibration of tire tread[J]. Journal of Tongji University, 2011, 21(1): 19-25.
- [8] METZ L D. Force and moment characteristics of a low aspect ratio asymmetrically worn passenger car tire[R]. SAE, 2010-01-0766, 2010.
- [9] SINGH K B, SIVARAMAKRISHNAN S. An adaptive tire model for enhanced vehicle control systems[R]. SAE, 2015-01-1521, 2015.
- [10] 陆清. 基于轮胎磨损的电动汽车扭力梁悬架性能分析和优化[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016.
LU Qing. Analysis and optimization of electric vehicle torsion beam suspension based on tire wear[D]. Hefei: Heifei University of Technology, 2016.

- [11] CHEN X, XU N, GUO K. Tire wear estimation based on nonlinear lateral dynamic of multi-axle steering vehicle[J]. International Journal of Automotive Technology, 2018, 19(1): 63-75.
- [12] NGUYEN V H, ZHENG D, SCHMERWITZ F, et al. An advanced abrasion model for tire wear[J]. Wear, 2018(396): 75-85.
- [13] 景立新, 吴利广, 李广, 等. 轮胎侧偏刚度对整车操稳性能的影响[J]. 汽车实用技术, 2018, 276(21): 90-93. JING Lixin, WU Liguang, LI Guang, et al. Influence of tire cornering stiffness on vehicle stability performance[J]. Automobile Applied Technology, 2018, 276(21): 90-93.
- [14] 卢磊. 轮胎花纹对轮胎噪声影响的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017. LU Lei. Study on the influence of tire tread on tire vibration noise[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [15] 刘青, 郭孔辉, 陈秉聪. 轮胎刷子模型分析 I. 稳态侧偏刷子模型[J]. 农业机械学报, 2000, 31(1): 19-22. LIU Qing, GUO Konghui, CHEN Bingcong. Review of tire brush models I. Steady state cornering brush models[J]. Transaction of Chinese Society for Agricultural Machinery. 2000, 31(1): 19-22.
- [16] 许男. 复合工况下轮胎稳态模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012. XU Nan. Study on the steady state tire model under combined conditions[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [17] 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.
- [18] 郭孔辉, 袁忠诚, 卢荡, 等. UniTire 轮胎稳态模型的速度预测能力[J]. 吉林大学学报, 2005, 35(5): 457-461. GUO Konghui, YUAN Zhongcheng, LU Dang, et al. Speed prediction ability of UniTire steady-state model[J]. Journal of Jilin University, 2005, 35(5): 457-461.
- [19] 卢荡, 郭孔辉. 轮胎侧偏力学特性的胎压影响分析及预测[J]. 吉林大学学报, 2011, 41(4): 915-920. LU Dang, GUO Konghui. Analysis and prediction of tire cornering property for different inflation pressure[J]. Journal of Jilin University, 2011, 41(4): 915-920.

作者简介: 卢荡, 男, 1972 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为轮胎动力学。

E-mail: ludang@jlu.edu.cn

卢磊, 男, 1989 年出生, 博士研究生。主要研究方向为轮胎动力学。

E-mail: lulei17@mails.jlu.edu.cn

吴海东(通信作者), 男, 1978 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为轮胎动力学。

E-mail: wuhd@jlu.edu.cn