

胎面花纹对轮胎滑移刚度影响分析与补偿

卢 荡, 杨文豪, 袁 浩, 吴海东

(吉林大学 汽车底盘集成与仿生全国重点实验室, 长春 130022)

摘要: 考虑到花纹有限元模型建模复杂以及计算成本较高, 本文探究了胎面花纹对轮胎滑移刚度的影响规律与补偿方法。首先建立轮胎和橡胶试样有限元模型, 通过理论分析和仿真验证确定粘弹性材料参数, 并根据试验获取超弹性材料参数, 完成轮胎有限元仿真与试验的验证; 其次, 进行光面胎和花纹胎有限元模型仿真, 探索花纹对滑移刚度的影响; 然后, 建立不同规格的轮胎有限元模型与对应尺寸的花纹, 分析花纹对不同规格轮胎滑移刚度的影响, 并研究花纹在不同材料属性和胎压下对滑移刚度的影响; 最后, 根据以上研究建立光面胎的轮胎滑移刚度补偿方法。结果表明: 花纹使轮胎滑移刚度出现下降, 且对纵滑刚度和侧偏刚度的影响不同。在相同载荷下花纹对不同规格轮胎、材料属性和胎压下的滑移刚度具有近乎相同的影响。建立的胎面花纹滑移刚度补偿方法具有较好的精度, 侧偏刚度和纵滑刚度精度分别为 96.6% 和 97.6%。该研究节省了胎面花纹有限元模型的建模时间与成本, 也为轮胎设计与性能优化提供一定的参考。

关键词: 轮胎动力学; 胎面花纹; 有限元模型; 滑移刚度; 补偿方法

中图分类号: U461.341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2026)05-1185-12

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20241085

Analysis and compensation of influence of tread pattern on tire slip stiffness

LU Dang, YANG Wen-hao, YUAN Hao, WU Hai-dong

(National Key Laboratory of Automotive Chassis Integration and Bionics, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Considering the complexity of the finite element model for tread patterns and the high computational cost, this paper explores the influence of tread patterns on tire slip stiffness and proposes a compensation method. First, finite element models of the tire and rubber sample were developed. Viscoelastic material parameters were determined through theoretical analysis and simulation validation, while hyperelastic material parameters were obtained from testing to complete the tire finite element simulation and validation. Next, simulations of smooth and patterned tires were conducted to examine the effect of tread patterns on slip stiffness. Subsequently, finite element models of tires with varying specifications and corresponding tread patterns were created to analyze the impact of patterns on slip stiffness for different tire specifications. The effects of material properties and tire pressure on slip stiffness were also explored. Finally, based on the findings, a compensation method for tire slip

收稿日期: 2024-11-02.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52172366, 51775224).

作者简介: 卢荡(1972-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 轮胎动力学. E-mail: ludang@jlu.edu.cn

通信作者: 吴海东(1978-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 轮胎动力学. E-mail: wuhd@jlu.edu.cn

stiffness in smooth tires was established. The results indicate that tread patterns reduce tire slip stiffness and have differing impacts on longitudinal and lateral stiffness. Under the same load, the effect of tread patterns on slip stiffness is nearly identical across various tire specifications, material properties, and tire pressures. The developed compensation method for tread pattern slip stiffness demonstrates high accuracy, with 96.6% for longitudinal stiffness and 97.6% for lateral stiffness. This study can significantly reduce the time and cost required to model tread pattern finite element models, offering valuable insights for tire design and performance optimization.

Key words: tire dynamics; tread pattern; finite element model; tire stiffness; compensation method

0 引言

轮胎作为车辆与路面接触的唯一部件,影响着整车的动力学性能,受到广大学者的研究与关注^[1-4]。轮胎的力学特性获取往往通过试验测试和有限元仿真的方法进行^[5-8],其中试验测试存在开发周期长和测试成本高的问题,且无法将轮胎的性能开发提前到设计阶段,因此使得有限元仿真的技术方法备受关注^[9-11]。但是,轮胎有限元模型中胎面花纹的建模较为复杂且计算时间较长,因此通过分析胎面花纹对轮胎滑移刚度的影响规律,并建立一种通过光面胎获取花纹胎的滑移刚度补偿方法,能够减少建模的时间和成本,提高轮胎性能开发效率。

很多学者对花纹胎的性能进行了研究^[12-14]。Pinay等^[15]为了更好地测试轮胎胎面沟槽对噪声的影响,通过吸音泡沫材料将胎面的沟槽进行填充,结果表明沟槽对轮胎的噪声具有较大的影响。曹金凤等^[16]选取了分别具有横沟、纵沟和光面的轮胎进行了噪声试验,探究轮胎接地印迹前后端噪声的差异,发现三款轮胎噪声指向性由强到弱为光面胎、纵沟胎和横沟胎,且横沟和纵沟是造成接地后端噪声较大的主要原因。梅焯等^[17]根据猫抓运动时表现出的良好静音和强抓地性,进行了轮胎花纹结构的仿生设计,并通过仿真得到设计后的轮胎噪声和抓地性能均有优化。Chiu等^[18]研究了不同花纹对湿滑路面的抓地性能,结果表明横纵沟槽均可以提高轮胎的抓地能力,不够深的沟槽可能导致排水的延迟。Zhou等^[19]通过仿真对胎面花纹进行了优化,提高了轮胎的排水能力。由上述研究可知,目前对胎面花纹的研究主要集中于轮胎的降噪和排水能力,而对胎面花纹的转向和驱动制动性能研究相对较少。

有限元模型作为重要的技术手段,许多学者对其进行了研究^[20-23]。刘从臻等^[24]建立了轮胎侧

偏纵滑水有限元仿真模型,对湿滑路面上的轮胎力学特性进行了预测,并通过试验数据进行了验证。Fakhr等^[25]首先建立了带钉轮胎有限元仿真模型,并充分考虑了轮胎和路面之间的相互作用,仿真结果表明有钉轮胎可以有效提高轮胎的牵引力。贾雪峰等^[26]考虑到通过试验的方式获取轮胎爆裂过程中的力学特性较为危险和困难,因此建立一种可模拟爆胎的有限元仿真模型,模拟泄气导致的轮胎的径向刚度迅速降低和滚动半径减小等情况。Xu等^[27]建立了轮胎有限元模型,并通过振动模态试验验证了模型的有效性,分析了不同充气压力、载荷、工况和帘线角度对轮胎振动特性的影响。Park等^[28]根据获取的帘线应力应变与温度的数据建立有限元子程序,仿真分析了轮胎的温度分布情况和滚动阻力系数,并通过试验数据对有限元仿真结果进行了验证。综上所述,轮胎有限元仿真的主要内容分为以下部分:通过调整设计参数对轮胎结构设计进行指导,从而降低生产成本和开发周期;部分学者根据有限元模型,设置相应的仿真工况,观察仿真结果;还有一些研究考虑到试验的复杂性以及困难性,通过有限元模型可以较为方便地获取轮胎力学特性。但是,目前关于花纹对轮胎滑移刚度影响的研究相对较少,且由于胎面花纹模型较为复杂,会大幅增加有限元建模与仿真时长,因此通过简单光面胎性能预测复杂花纹胎性能,能够缩短开发周期和减少开发成本。

本文研究了胎面花纹对轮胎滑移刚度的影响与补偿方法,通过建立考虑花纹的轮胎有限元模型,分析相同胎面花纹对不同规格、材料属性以及充气压力下的滑移刚度影响,建立基于光面胎的滑移刚度补偿方法,节省花纹建模时间与提高仿真效率。首先,建立轮胎和橡胶试样有限元模型,通过理论分析和仿真验证确定粘弹性材料参数,并根据循环往复拉伸试验获取超弹性材料参数,

完成轮胎有限元仿真与试验的验证;其次,进行光面胎和花纹胎有限元模型仿真,探索花纹对滑移刚度的影响;然后,建立不同规格的轮胎有限元模型与对应尺寸的花纹,分析花纹对不同规格轮胎滑移刚度的影响,并研究花纹在不同材料属性和胎压下对滑移刚度的影响;最后,根据以上研究建立光面胎的轮胎滑移刚度补偿方法。通过光面胎滑移刚度预测复杂花纹胎滑移刚度,缩短轮胎开发周期和减少开发成本。

1 轮胎有限元模型建立

1.1 花纹轮胎有限元模型建模

选取某品牌 215/55R18 型号轮胎为研究对象,建立考虑花纹的轮胎有限元模型。轮胎的橡胶结构主要由胎面、胎侧、胎体和三角胶等组成,帘线结构主要为两层带束帘线、冠带帘线和胎体帘线等。依据轮胎材料设计分布图和轮辋结构图,进行橡胶、帘线和轮辋有限元模型的建立,通过对称旋转命令生成轮胎三维主体有限元模型。根据单节距的花纹沿周向旋转生成完整胎面花纹有限元模型,将轮胎主体部分与完整胎面花纹模型组合为整体模型。具有花纹的轮胎有限元模型结构较为复杂且单元较多,因此在隐式求解中收敛性较差,需要采用显式求解方法进行稳态仿真。根据以往的研究^[13]发现,结构简化模型和摩擦简化模型对有限元模型仿真精度影响较小,但是可以很大程度提高计算效率和减少不收敛问题,因此对模型进行一定程度的简化,简化后该模型共包含 150 085 个单元和 223 580 个节点。花纹轮胎有限元模型建模过程如图 1 所示。

1.2 材料参数确定

由于轮胎橡胶材料中具有粘弹性特性,因此

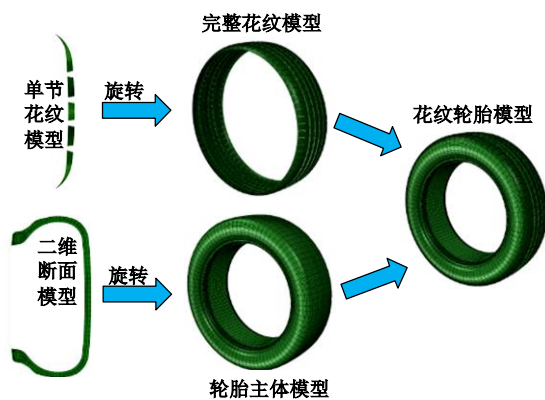


图 1 花纹轮胎有限元模型建模过程

Fig. 1 Pattern tire finite element model modeling process

在有限元建模仿真过程中,需要考虑粘弹性材料参数,通过粘弹性模型进行理论分析和有限元仿真结果验证,确定粘弹性参数的设置。

粘弹性本构模型为广义 Maxwell 标准模型,用 Prony 级数来表达橡胶材料对时间的依赖性,剪切松弛模量的表达式为:

$$G(i) = G_0 \left(1 - \sum_{i=1}^n g_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \right) \quad (1)$$

式中: $G(i)$ 为剪切松弛模量的瞬时值; G_0 为剪切松弛模量初始值; g_i 为无量纲化材料常数; τ_i 为每个 Prony 级数项的松弛时间。

将剪切松弛模量的瞬时值除以初始值,得到无量纲的剪切松弛模量:

$$g_i = \frac{G(i)}{G_0} \quad (2)$$

有限元建模过程中将材料参数或分析步设置为 Moduli=INSTANTANEOUS(瞬时模量),此时表示为试验测量所得的材料参数未发生松弛,如下式所示:

$$G_0 = G_\infty + G_1 \quad (3)$$

式中: G_∞ 为线弹性; G_1 为粘弹性。

模型材料参数或分析步设置为 Moduli=LONG TERM(长期模量),此时表示为试验测量所得的材料参数为完全松弛的结果,如下式所示:

$$G_0 = G_\infty \quad (4)$$

根据 Abaqus 使用帮助文档的说明可知, Moduli=INSTANTANEOUS 为试验所测得的材料参数未发生松弛,此时输入的弹性模量为:弹性+粘弹性。而 Moduli=LONG TERM 为试验测量所得的材料参数为完全松弛后的结果,此时输入的弹性模量为弹性。因此,通过设定材料 Moduli 可以计算出对应模型中弹簧的弹性模量值,从而计算得到对应的 G_0 和 G_∞ 。材料为 INSTANTANEOUS 时,此时输入的弹性模量为(线弹性+粘弹性),结合公式(2)和公式(3),可求得线弹性和粘弹性。材料为 LONG TERM 时,此时输入的弹性模量仅为线弹性,结合公式(2)和公式(3),可求得该材料参数下的线弹性和粘弹性。理论模型材料参数如下:弹性模量为 100,剪切松弛模量为 0.3。

表 1 为上述理论分析结果,材料参数设置和分析步参数设置为瞬时模量 INSTANTANEOUS 时,材料属性表征为存在粘弹性时,全部松弛后的结果;材料参数设置为 INSTANTA-

NEOUS,分析步参数设置为LONGTERM,在实验中无对应现象;材料参数设置为LONG-TERM,分析步设置为INSTANTANEOUS,材料属性表征为存在粘弹性时,未发生松弛的较短时间测量的弹性模量;材料参数设置为LONG-TERM,分析步参数设置为LONGTERM,材料属性表征为不存在粘弹性,仅有弹性模量。

表 1 理论计算结果

Table 1 Theoretical calculation result

分析步	材料	
	INSTANTANEOUS	LONGTERM
INSTANTANEOUS	100	142.86
LONGTERM	70	100

为验证理论计算结果,将表 1 中的材料参数输入到试样有限元仿真模型中以及在分析步和材料中相应设置 INSTANTANEOUS 和 LONG-TERM 模型,进行橡胶单轴拉伸试验仿真,并对比了图 3 仿真结果和表 1 理论结果。按照标准哑铃状 II 型试样,进行有限元模型建模,如图 2 所示。其中,12.5 mm 为内侧过渡边半径,8 mm 为外侧过渡边半径。

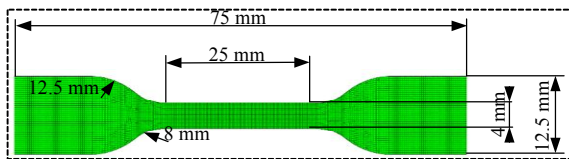


图 2 II 型哑铃状试样有限元模型

Fig. 2 Finite element model of type II dumbbell specimen

图 3 为有限元单轴拉伸应力应变结果。如图 3 所示,有限元仿真结果和表 1 中的理论分析具有较好的一致性,当材料和分析步参数设置不同时,得到的弹性模量出现偏小、正常和偏大。因此,根据以上结果合理地设置有限元仿真中材料和分析步的 INSTANTANEOUS 和 LONG TERM 模型。表 2 为材料和分析步参数设置。

1.3 材料模型的确定与参数获取

橡胶材料测试方法及本构模型的选择,对轮

表 2 材料和分析步参数设置

Table 2 Material and analysis step parameter settings

类型	材料	分析步
系列 1	LONGTERM	LONGTERM
系列 2	INSTANTANEOUS	INSTANTANEOUS
系列 3	LONGTERM	INSTANTANEOUS
系列 4	INSTANTANEOUS	LONGTERM

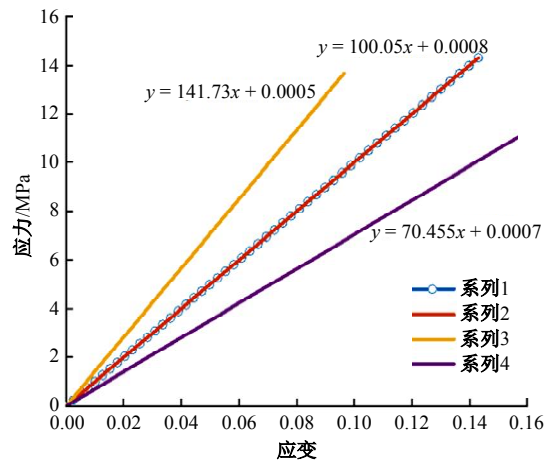


图 3 有限元模型单轴拉伸应力应变结果

Fig. 3 Finite element model uniaxial tensile stress-strain results

胎有限元仿真精度有至关重要的作用。为了消除橡胶前期变形中动力学响应影响因素,得到更加真实的力学特性,采用单轴循环拉伸试验方法对橡胶试样进行三组相同试验测试,根据最后一段数据拟合橡胶本构模型,然而由于橡胶的特性使卸载后应变没有恢复到初始的状态,因此需要通过下式对最后一段应变数据处理:

$$\epsilon_{\text{new}} = \frac{1 + \epsilon}{1 + \epsilon_{\text{set}}} - 1 \quad (5)$$

式中: ϵ_{new} 为归零后应变数据; ϵ 为原始应变数据; ϵ_{set} 为原始的初始应变数据。

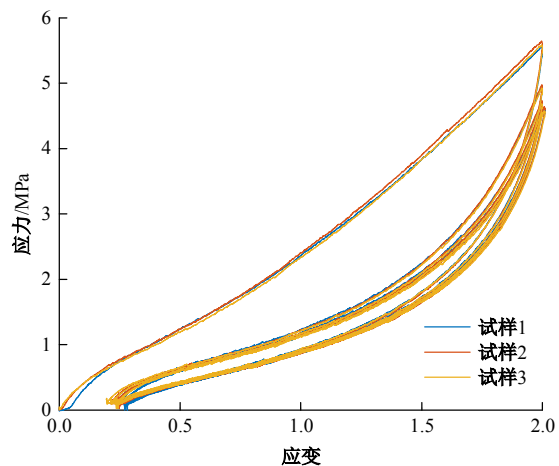


图 4 橡胶单轴循环拉伸应力应变结果

Fig. 4 Rubber uniaxial cyclic tensile stress-strain results

图 4 为橡胶循环拉伸应力应变结果。根据橡胶应力应变测试结果进行本构模型的拟合,对比 Mooney-Rivlin、Ogden 和 Yeoh 本构模型拟合结果。图 5 为不同橡胶本构模型拟合结果。表 3 为橡胶材料 Yeoh 本构模型参数。由图 5 可知, Og-

den 本构模型整体拟合精度较好,但 Ogden 模型在进行仿真时,通常需要更多的试验数据,本文仅使用单轴拉伸试验,因此不考虑 Ogden 模型。根据本文测试拟合效果,橡胶 Yeoh 本构模型整体拟合精度要优于 Mooney-Rivlin,且 Yeoh 本构模型参数少于 Ogden 本构模型,因此选取 Yeoh 模型参数作为研究所用的本构模型。

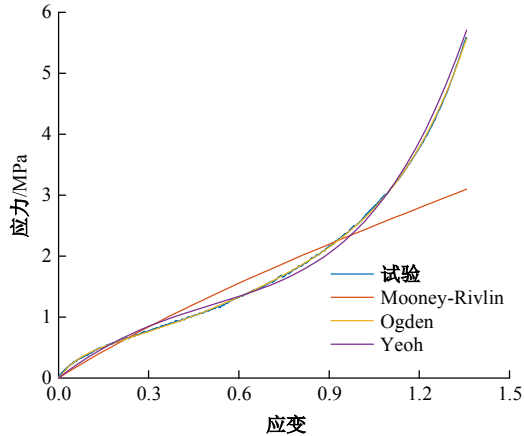


图 5 不同橡胶本构模型拟合结果

Fig. 5 Fitting results of different rubber constitutive models

表 3 橡胶材料 Yeoh 本构模型参数

Table 3 Parameters of rubber material Yeoh constitutive model

胶料	C10	C20	C30
内衬胶	0.223 128	-0.02	0.007 52
胎面胶	0.636 056	-0.097 3	0.038 5
胎侧胶	0.248 007	-0.014 2	0.003 26
冠带胶	0.528 143	-0.053 5	0.010 8
带束胶	0.593 508	-0.079 365 8	0.020 133 6
胎面底胶	0.355 179	-0.011 4	0.004 01
胎圈护胶	0.485 371	-0.048 2	0.015 2
胎体	0.409 243	-0.046 2	0.009 2

轮胎骨架材料使用“*REBAR LAYER”命令定义,表达其在橡胶材料中的嵌入关系。骨架材料定义需要设置角度、杨氏模量、截面积、泊松比、间距等参数,如表 4 所示。

表 4 帘线材料参数

Table 4 Cord material parameters

参数	冠带层	带束层	胎体层	钢丝圈
角度/(°)	0	65	90	0
杨氏模量/MPa	5 098.8	202 211	4 956	151 098
截面积/mm ²	0.220 6	0.141 368	0.454	1.317 1
泊松比	0.3	0.3	0.3	0.3
间距/mm	0.746	1.111	1	1.052

2 轮胎试验测试与有限元模型验证

2.1 轮胎试验测试

轮胎静态和稳态力学特性试验测试,分别根据耦合刚度试验台架和 MTS 轮胎六分力试验台进行。耦合刚度试验台径向力、纵向力为伺服电机拖动丝杠加载;试验台回转为伺服电机拖动回动转矩记载。通过 2 套位移传感器,测控轮胎的径向位移变化和纵向位移变化;试验台安装 2 套旋转编码器,测控加载轮胎的侧倾角度和回转角度,并附带六分力传感器。

通过耦合刚度试验台对轮胎施加一定载荷,得到轮胎径向刚度,然后分别施加侧向和纵向位移以及扭转角,得到轮胎的侧向刚度、纵向刚度和扭转刚度。根据 MTS 轮胎六分力试验台架对纵滑工况和侧偏工况进行台架试验测试,稳态纵滑工况是对轮胎施加载荷后,保持路面线速度持续恒定移动,控制轮胎角速度变化,实现稳态纵滑工况的扫频测试;稳态侧偏工况对轮胎施加一定载荷后,路面以恒定的线速度带动轮胎转动,并持续对轮胎施加不同的侧偏角,完成稳态侧偏工况的扫频测试。图 6 和图 7 分别为轮胎耦合刚度试验台和 MTS 轮胎六分力试验台。表 5 为轮胎静态刚度试验工况。表 6 为轮胎稳态工况试验工况。



图 6 轮胎耦合刚度试验台

Fig. 6 Tire coupling stiffness test bench



图 7 MTS 轮胎六分力试验台

Fig. 7 MTS tire six-component force test bench

2.2 轮胎静态刚度仿真与验证

根据建立的轮胎有限元模型,进行轮胎静态工况有限元仿真。轮胎有限元仿真条件设置与试验一致,充气压力为 250 kPa,对路面施加 10 100 N

表 6 静态刚度试验工况

Table 6 Static stiffness test conditions

轮胎规格	刚度	充气压力/kPa	载荷/N
215/55R18	垂向	250	\
	侧向	250	2 705/5 410/8 115
	纵向	250	2 705/5 410/8 115
	扭转	250	2 705/5 410/8 115

表 6 稳态试验工况

Table 6 Steady-state test conditions

工况	路面速度/(km·h ⁻¹)	充气压力/kPa	载荷/N
侧偏	60	250	2 705/5 410/8 115
纵滑	60	250	2 705/5 410/6 762

载荷,进行径向刚度仿真。对路面分别施加 2 705 N、5 410 N 和 8 115 N 载荷,进行侧向刚度、纵向刚度和扭转刚度仿真,并将试验数据与有限元仿真

结果进行对比,验证轮胎有限元模型在静态工况的有效性。

图 8 为轮胎静态工况力学特性测试与仿真结果对比。表 7 为轮胎静态工况仿真精度汇总由图 8 和表 7 可知,垂向刚度随着轮胎垂向位移的增大,仿真结果误差增大,且试验测试结果大于仿真结果。纵向刚度和侧向刚度的试验与仿真结果在小位移下一致性较高,误差随位移增大而增大。扭转刚度仿真在小扭转角下一致性较好,误差随着扭转角增大而增大。各向刚度的仿真结果与试验数据相差较小,其中径向刚度、侧向刚度、纵向刚度和扭转刚度平均精度分别为 95.6%、96.8%、97.4% 和 95.3%,验证了花纹轮胎有限元模型的有效性。

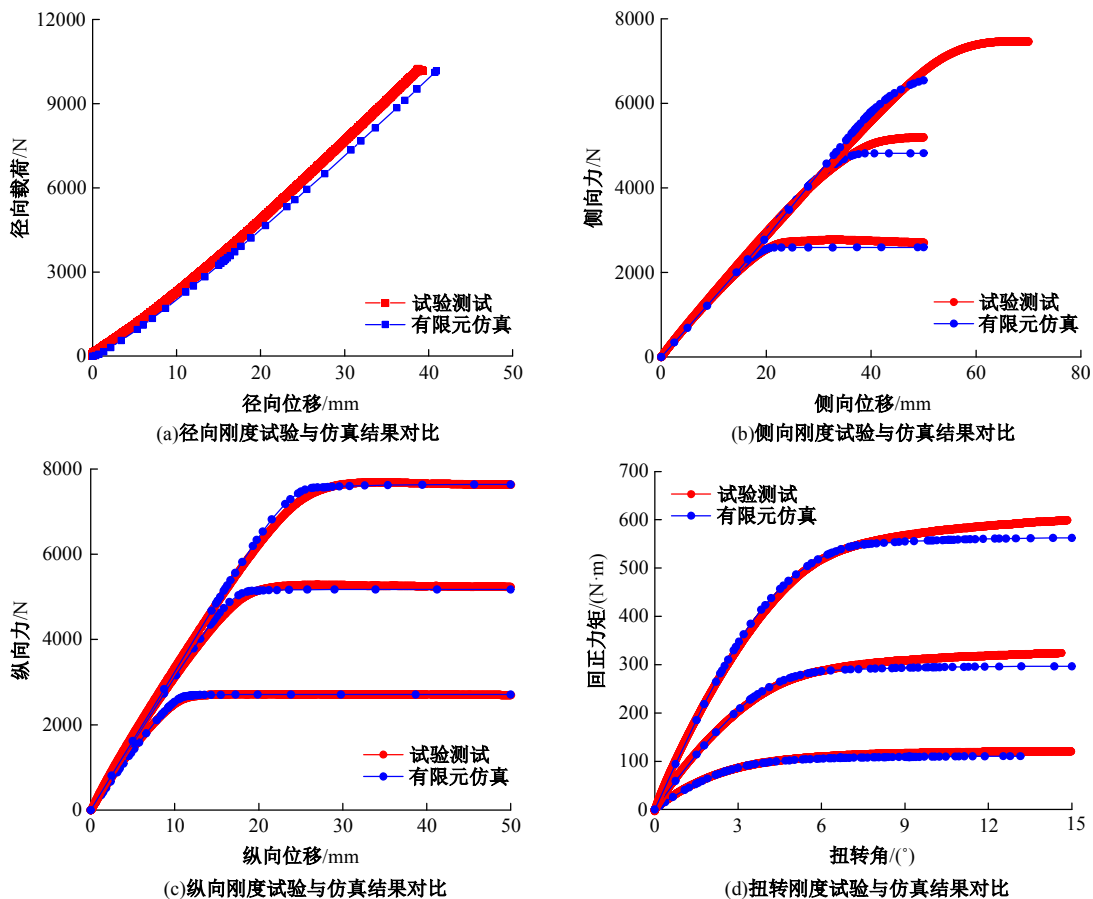


图 8 轮胎静态工况力学特性测试与仿真结果对比

Fig. 8 Comparison of test and simulation results of tire mechanical characteristics under static conditions

2.3 轮胎稳态滑移刚度仿真与验证

根据建立的轮胎有限元模型,进行稳态工况有限元仿真。有限元仿真条件设置与试验保持一致,路面移动速度为 60 km/h,轮胎的充气压力为 250 kPa,载荷分别为 2 705 N、5 410 N 和 8 115 N,

通过路面带动轮胎进行滚动,并对轮胎施加±1°侧偏角和±1%的滑移率,进行侧偏刚度和纵滑刚度有限元仿真,由于进行轮胎滑移刚度的仿真,因此将仿真的摩擦条件设置为库伦摩擦。将试验数据与得到的有限元仿真结果进行对比,验证轮

表 7 轮胎静态工况仿真精度汇总
Table 7 Summary of tire static condition simulation accuracy %

载荷/N	径向刚度	侧向刚度	纵向刚度	扭转刚度
2 705	96.5	98.1	99.5	94.7
5 410	96.2	98.0	96.4	94.5
8 115	94.2	94.3	96.2	96.7

胎有限元模型在稳态工况的有效性。

由不同载荷下侧偏刚度和纵滑刚度的仿真结果与试验数据可知,有限元仿真结果与试验数据的一致性较高。其中由于试验台架量程所限,不能进行 8 115 N 载荷纵滑试验,因此纵滑试验的最大测试载荷要小,不同载荷下侧偏刚度和纵滑刚度的平均精度分别为 94.9% 和 90.8%。

图 9 为轮胎稳态工况力学特性测试与仿真结果对比。表 8 为轮胎稳态工况仿真精度汇总。

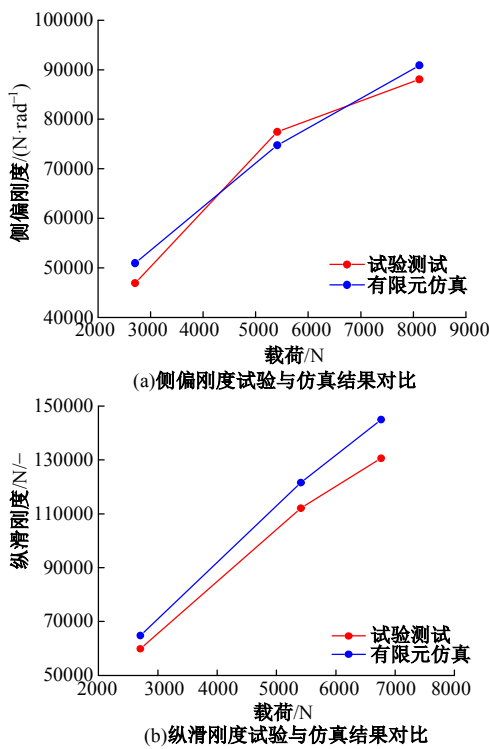


图 9 轮胎稳态工况力学特性测试与仿真结果对比

Fig. 9 Comparison of test and simulation results of tire mechanical characteristics under steady state conditions

表 8 轮胎稳态工况仿真精度汇总

Table 8 Summary of tire steady-state simulation accuracy %

载荷/N	侧偏刚度	纵滑刚度
2 705	91.4	91.8
5 410	94.6	91.5
8 115	96.8	—

3 花纹对滑移刚度的影响与补偿

3.1 相同花纹的不同规格轮胎有限元模型建立

为了考察相同类型花纹对不同规格轮胎的滑移刚度影响,需要建立不同规格的轮胎有限元模型和相对应尺寸的花纹。由于缺少该相同类型花纹的轮胎设计图,因此通过已有的设计图进行分析,对不同规格轮胎花纹尺寸进行建模。图 10 为不同规格轮胎及对应尺寸的花纹(彩图参见电子版,下同),对 3 款不同规格轮胎模型进行对比,其中,AB 为轮胎第一道沟槽的宽度,AC 为轮胎第二道沟槽的宽度,AD 为轮胎胎面宽度。由表 9 和表 10 可知,以 TireA 为基准计算两款轮胎的断面宽比例,对胎面花纹的尺寸进行缩放,得到的计算尺寸和设计尺寸可以很好地对应,因此可通过该方法对本文轮胎有限元模型进行不同规格和尺寸的花纹建模。表 9 为不同规格轮胎胎面设计尺寸。表 10 为轮胎胎面计算尺寸。

根据上述胎面花纹尺寸建模方法,对不同胎宽的轮胎主体模型和花纹模型进行建模,并分别命名为 Tire1、Tire2、Tire3 和 Tire4。轮胎主体模型和花纹模型在材料属性及沟槽深度和宽度上尺寸一致,主要的区别为轮胎胎宽和花纹的尺寸,模型中的白色单元为轮胎和趾口接触简化部分。为了分析胎面花纹对滑移刚度的影响,相应地建立了光面胎有限元模型。图 11 为不同规格花纹轮胎有限元模型建模。表 11 为轮胎胎面花纹尺寸。

3.2 花纹对不同规格轮胎滑移刚度的影响

根据建立的花纹胎和光面胎有限元模型,进行侧偏刚度和纵滑刚度有限元仿真与分析,仿真的充气压力为 250 kPa,速度为 60 km/h,载荷分别为 4 000 N、6 000 N 和 8 000 N,轮胎与路面间的摩擦均设置为库伦摩擦,且摩擦因数统一设置为 1.0。表 12 为花纹胎和光面胎滑移刚度仿真结果。图 12 为不同规格下花纹胎和光面胎的滑移刚度比值。由表 12 和图 12 可知,当胎面花纹类型相同时,不同规格的花纹胎和光面胎关于滑移刚度比值在相同载荷条件下具有近似成比例的关系,四款轮胎中侧偏刚度和纵滑刚度的比值偏差最大不超过 4.4%,平均偏差为 2.1%。因此,相同类型花纹的不同规格轮胎和光面胎关于滑移刚度成比例具有一定的合理性。胎面花纹会使轮胎

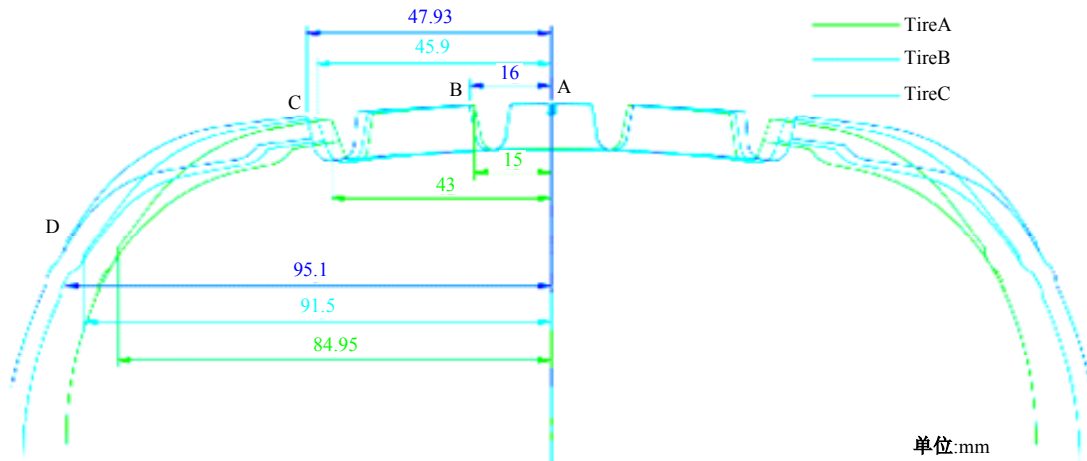


图 10 不同规格轮胎及对应尺寸的花纹

Fig. 10 Different specifications of tires and corresponding size patterns

表 9 不同规格轮胎胎面设计尺寸

Table 9 Tread design dimensions of tires with different specifications

类型	断面宽/mm	AB/mm	AC/mm	AD/mm
TireA	190	15	43	85
TireB	207	16	45.9	91.5
TireC	211.5	16	47.9	95.1

表 10 轮胎胎面计算尺寸

Table 10 Calculated tread dimensions

类型	断面宽/mm	AB/mm	AC/mm	AD/mm
TireB	207	16.3	46.8	92.6
TireC	211.5	16.7	47.8	94.6

表 11 轮胎胎面花纹尺寸

Table 11 Tread pattern dimensions

类型	断面宽/mm	AB/mm	AC/mm	AD/mm
Tire1	226	20.5	55.0	104.3
Tire2	216	19.6	52.6	99.7
Tire3	236	21.4	57.4	108.9
Tire4	241	21.9	58.7	111.2

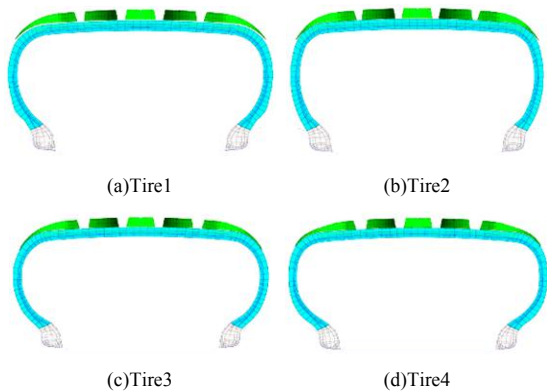


图 11 不同规格花纹轮胎有限元模型建模

Fig. 11 Finite element modeling of tires with different specifications

的侧偏刚度和纵滑刚度出现下降,且下降的程度不同。

3.3 不同材料和胎压下花纹对轮胎滑移刚度的影响

轮胎与整车的性能匹配过程中,胶料属性和

胎压也是重要的调校内容。因此,本文对不同材料和胎压的花纹胎和光面胎进行仿真,分析胶料和胎压不同时胎面花纹对轮胎滑移刚度的影响,并验证在不同材料属性和胎压下,相同类型的花纹轮胎滑移刚度近似成比例关系的合理性。考虑到胎面胶对轮胎力学特性具有重要影响,因此选取胎面胶作为研究对象,对胎面胶的不同应变范围进行本构模型拟合,选取 100% 和 50% 的应变范围,另外分别探究 210 kPa 和 290 kPa 胎压下花纹对轮胎滑移刚度的影响,路面移动速度仍为 60 km/h。表 13 为胎面胶本构模型参数拟合的范围。

图 13 为不同材料属性和胎压下花纹胎和光面胎滑移刚度比值。由图 13 可知,不同材料属性和胎压下,均能较好地反映出花纹类型相同时关于花纹胎和光面胎滑移刚度之间的比值在相同载荷条件下具有近似成比例的关系,轮胎滑移刚度的比值偏差最大不超过 5.4%,平均偏差为 2.4%。因此,在不同材料和胎压下,花纹胎和光面胎滑移刚度成比例具有一定的合理性。

3.4 考虑胎面花纹的轮胎滑移刚度补偿

考虑到轮胎胎面花纹的更新迭代周期长,且通常使用市场认可度较高和性能较好的胎面花纹

表 12 花纹胎和光面胎滑移刚度仿真结果

Table 12 Simulation results of tire slip stiffness of patterned and smooth tires

轮胎类型	花纹类型	侧偏刚度(N/rad)			纵滑刚度(N/—)		
		$F_z=4\ 000\text{ N}$	$F_z=6\ 000\text{ N}$	$F_z=8\ 000\text{ N}$	$F_z=4\ 000\text{ N}$	$F_z=6\ 000\text{ N}$	$F_z=8\ 000\text{ N}$
Tire1	花纹胎	66 065.5	82 518.5	90 529.3	98 522	131 870	163 450
	光面胎	74 298.3	97 014.5	108 369.5	106 910	144 960	180 150
Tire2	花纹胎	71 884.3	90 078.1	101 410.7	107 580	144 980	180 250
	光面胎	83 078.9	101 410.7	112 950.0	119 440	154 910	194 270
Tire3	花纹胎	62 850.7	79 022.3	88 825.7	91 497	121 300	151 570
	光面胎	72 273.8	94 761.5	106 661.8	101 350	135 890	167 110
Tire4	花纹胎	59 072.0	76 363.8	86 915.9	85 724	121 300	145 040
	光面胎	68 634.6	89 656.4	102 666.9	96 256	135 890	158 000

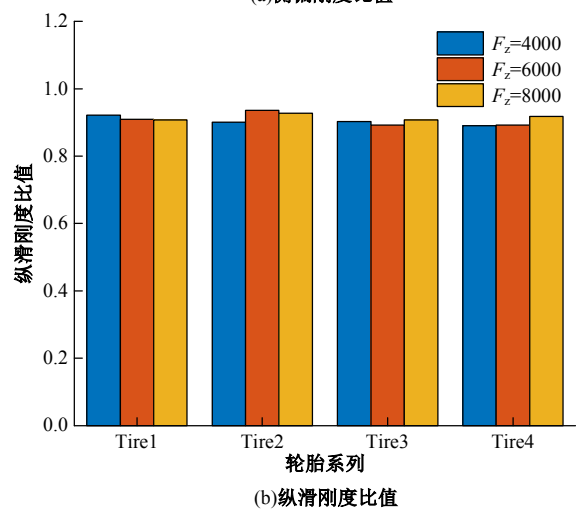
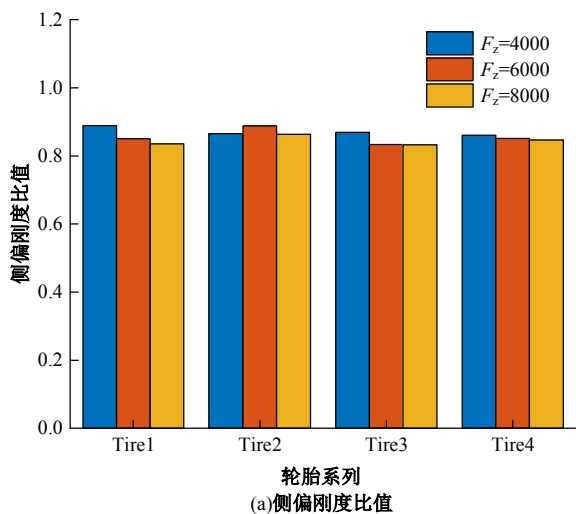


图 12 不同规格下花纹胎和光面胎的滑移刚度比值

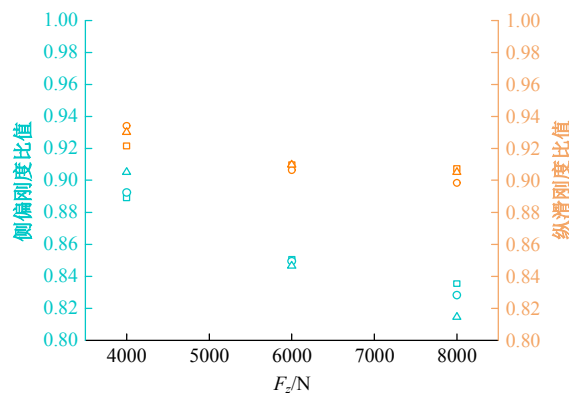
Fig. 12 Slip stiffness ratio of treaded and smooth tires under different specifications

对新开发的轮胎进行适配,因此,可以根据相同类型花纹轮胎和光面胎关于滑移刚度近似成比例关系,对轮胎的滑移刚度进行补偿。由图 12 和表 11 可知,Tire1 和 Tire2 轮胎的滑移刚度比例误差较

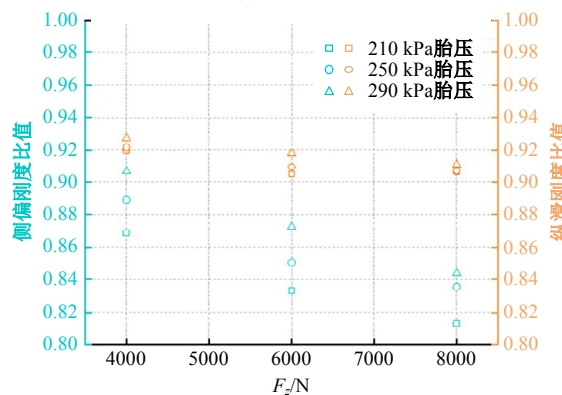
表 13 胎面胶本构模型参数拟合范围

Table 13 Fitting range of tread rubber constitutive model parameters

应变范围/%	C10	C20	C30
135	0.636 06	-0.097 31	0.038 45
100	0.667 89	-0.168 75	0.067 81
50	0.795 11	-0.795 89	0.705 99



(a)不同胶料



(b)不同胎压

图 13 花纹胎和光面胎的滑移刚度比值

Fig. 13 Slip stiffness ratio of treaded and smooth tires

大,因此选取 Tire2 规格轮胎进行补偿,根据下式得到 Tire2 轮胎的侧偏刚度和纵滑刚度:

$$\begin{cases} K_{x\text{pre-pattern}} = \frac{K_{x\text{pattern}}}{K_{x\text{smooth}}} \cdot K_{x\text{pre-smooth}} \\ K_{y\text{pre-pattern}} = \frac{K_{y\text{pattern}}}{K_{y\text{smooth}}} \cdot K_{y\text{pre-smooth}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $K_{x\text{pre-pattern}}$ 和 $K_{y\text{pre-pattern}}$ 分别为需要补偿的花纹胎纵滑刚度和侧偏刚度; $K_{x\text{pre-smooth}}$ 和 $K_{y\text{pre-smooth}}$ 分别为光面胎纵滑刚度和侧偏刚度; $K_{x\text{pattern}}$ 和 $K_{y\text{pattern}}$ 分别为经验的花纹胎纵滑刚度和侧偏刚度, $K_{x\text{smooth}}$ 和 $K_{y\text{smooth}}$ 分别为经验的光面胎纵滑刚度和侧偏刚度。

根据 Tire1 花纹胎和光面胎滑移刚度比例关系,并结合 Tire2 的光面胎滑移刚度结果,进而补偿得到 Tire2 的花纹胎侧偏刚度和纵滑刚度。图 14 为轮胎稳态滑移刚度补偿结果。由图 14 可知,通过补偿得到的花纹胎侧偏刚度和纵滑刚度与试验数据对比具有较好精度,平均精度分别为 96.6% 和 97.6%。

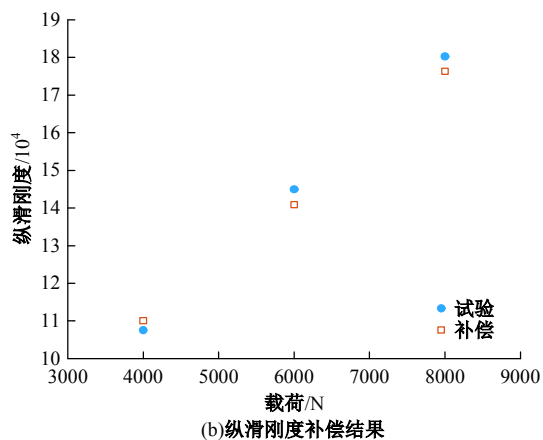
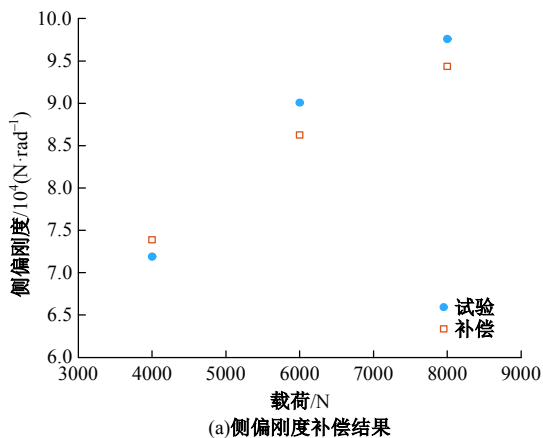


图 14 轮胎稳态滑移刚度补偿结果

Fig. 14 Compensation results of steady-state tire slip stiffness

4 结 论

(1)通过理论分析与仿真对比,确定了橡胶材料的正确参数,并根据循环往复拉伸方法进行橡胶材料测试,选取最后一段数据拟合 Yeoh 本构模型,完成详细有限元模型的建模和验证。

(2)花纹胎相比光面胎具有较低的纵滑刚度和侧偏刚度,且影响的程度不同。花纹类型相同同时不同规格花纹胎与光面胎的滑移刚度比值呈近似成比例关系,最大偏差不超过 4.4%,平均偏差为 2.1%。

(3)在不同材料属性和胎压条件下,花纹胎与光面胎的滑移刚度比值依然呈近似成比例关系,偏差最大不超过 5.4%,平均偏差为 2.4%,进一步验证了相同类型花纹的滑移刚度具有近似成比例的关系。

(4)根基于滑移刚度比值的近似成比例关系,对 Tire2 光面胎进行滑移刚度补偿,结果表明该补偿方法能有效提高花纹胎侧偏刚度和纵滑刚度的精度,平均精度分别为 96.6% 和 97.6%,验证了该补偿方法的有效性。

参考文献:

[1] 郭孔辉. UniTire 统一轮胎模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 90-99.
Guo Kong-hui. UniTire: Unified tire model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 90-99.

[2] Bari Pritam, Husain Kanchwala. An analytical tire model using thin shell theory[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2023, 248: 108227.

[3] 郭孔辉, 黄世庆, 吴海东. 适用于高频激励的面内轮胎动态模型[J]. 吉林大学学报:工学版, 2020, 50(1): 19-28.
Guo Kong-hui, Huang Shi-qing, Wu Hai-dong. In-plane dynamic tire model for high-frequency excitation [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2020, 50(1): 19-28.

[4] Beregi, Sandor. Nonlinear analysis of the delayed tyre model with control-based continuation [J]. Nonlinear Dynamics, 2022, 110(4): 3151-3165.

[5] Toyoshima T, Matsuzawa T. Study of physical characteristic tire model about cornering stiffness (Proposal of new tire model suitable for specification consideration)[J]. Transactions of the JSME, 2019, 85(880): 19-00284.

[6] Sarkisov P, Prokop G, Kubenz J, et al. Physical un-

- derstanding of transient generation of tire lateral force and aligning torque[J]. *Tire Science and Technology*, 2019, 47(4): 308-333.
- [7] Xu N, Guo K, Zhang X, et al. An analytical tire model with flexible carcass for combined slips[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014: 397538.
- [8] 卢荡, 卢磊, 吴海东, 等. 磨损对轮胎侧偏刚度和回正刚度影响的研究[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(12): 174-183.
- Lu Dang, Lu Lei, Wu Hai-dong, et al. Study on influence of wear on tire cornering stiffness and aligning stiffness[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(12): 174-183.
- [9] 余旭东, 赵剑, 郭烈, 等. 考虑接地效应的轮胎柔性圆环建模及其径向振动特性研究[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(23): 152-163.
- Yu Xu-dong, Zhao Jian, Guo Lie, et al. Investigation of tire radial vibration property using an improved tire flexible ring model with contact effects[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(23): 152-163.
- [10] Bürger Lukas, Frank Naets. High fidelity nonlinear finite element tire modeling for dynamic analysis: Total Lagrangian formulation in rolling contact[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2024, 571: 118098.
- [11] Wang Yin-long, Zhao Li, Li Zi-ran, et al. Finite element simulation of radial tire building and shaping processes using an elasto-viscoplastic model[J]. *CMES-Computer Modeling in Engineering & Sciences*, 2023, 135(2): 1187-1208.
- [12] 王国林, 梅焯, 周海超, 等. 家猫爪垫减振机理及其在轮胎花纹中的仿生应用研究[J]. *振动与冲击*, 2022, 41(1): 128-136.
- Wang Guo-lin, Mei Ye, Zhou Hai-chao, et al. Vibration reduction mechanism of cat claw pad and its bionic application in tire pattern[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(1): 128-136.
- [13] Yang Wen-hao, Lu Dang. Research on fast and efficient virtual sample delivery method of tire mechanical characteristics[J]. *Tire Science and Technology*, 2025.
- [14] Zhang Yuan-chao, Gao Jing-wei, Qiao Li. Experimental study on friction coefficients between tire tread rubber and ice[J]. *AIP Advances*, 2018, 8(7): 075005.
- [15] Pinay Julien, Yoshinori Saito, Christian Mignot, et al. Understanding the contribution of groove resonance to tire-road noise on different surfaces under various operating conditions[J]. *Acta Acustica*, 2020, 4(6): 6.
- [16] 曹金凤, 黄伟, 张春生, 等. 花纹结构对载重轮胎噪声辐射的影响规律研究[J]. *汽车工程*, 2020, 42(7): 956-964.
- Cao Jin-feng, Huang Wei, Zhang Chun-sheng, et al. Study on the influence of tread pattern on noise radiation of truck tire[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(7): 956-964.
- [17] 梅焯, 周海超, 王国林, 等. 基于猫爪生物功能实现机理的轮胎花纹结构耦合仿生设计[J]. *机械工程学报*, 2024, 60(24): 274-281.
- Mei Ye, Zhou Hai-chao, Wang Guo-lin, et al. Study on tire pattern structure bionic design based on the realization mechanism of Cat's paw pads biological function[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2024, 60(24): 274-281.
- [18] Chiu Jin-Tong, Shui Chau-Rung. Analysis of the wet grip characteristics of tire tread patterns[J]. *Tire Science and Technology*, 2018, 46(1): 2-15.
- [19] Zhou Hai-chao, Jiang Z, Jiang Bai-yu, et al. Optimization of tire tread pattern based on flow characteristics to improve hydroplaning resistance[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2020, 234(13): 2961-2974.
- [20] Lu Dang, Yang Wen-hao, Wu Hai-dong, et al. Research on simplified tire finite element modeling and simulation method[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2023, 239(2/3): 447-463.
- [21] 黄晓明, 曹青青, 刘修宇, 等. 基于路表分形摩擦理论的整车雨天制动性能模拟[J]. *吉林大学学报: 工学版*, 2019, 49(3): 757-765.
- Huang Xiao-ming, Cao Qing-qing, Liu Xiu-yu, et al. Simulation of vehicle braking performance on rainy days based on pavement surface fractal friction theory[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2019, 49(3): 757-765.
- [22] 卢荡, 杨文豪, 吴海东, 等. 轮胎力学特性仿真高精度有限元建模方法研究[J]. *汽车工程*, 2022, 44(10): 1556-1562, 1590.
- Lu Dang, Yang Wen-hao, Wu Hai-dong, et al. Research on high-accuracy finite element modeling method for Tire mechanics characteristics simulation[J]. *Automotive Engineering*, 2022, 44(10): 1556-1562, 1590.
- [23] Sun Li-hong, Lu Dang. Study on the mechanism of belt cord angle contribution to tire cornering power [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engi-*

- neers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2024.
- [24] 刘从臻, 陈高, 刘洪柱, 等. 湿滑路面轮胎接地力学特性模型[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2024, 54(6): 1501-1511.
- Liu Cong-zhen, Chen Gao, Liu Hong-zhu, et al. Tire grounding mechanical model on wet roads[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2024, 54(6): 1501-1511.
- [25] Fakhr E, Spitas C. Finite element analysis of studded tyre performance on snow: a study of traction[J]. Vehicle System Dynamics, 2023: 1-21.
- [26] 贾雪峰, 冯启章, 刘献栋, 等. 爆裂轮胎精确建模及其动态特性仿真方法研究[J]. 汽车工程, 2023, 45(5): 854-864, 872.
- Jia Xue-feng, Feng Qi-zhang, Liu Xian-dong, et al. Research on accurate modeling and simulation method of dynamic characteristics for automotive tire blow-out process[J]. Automotive Engineering, 2023, 45(5): 854-864, 872.
- [27] Xu M D, Ge Y, Du X, et al. Analysis of vibration characteristics and influencing factors of complex tread pattern tires based on finite element method[J]. Machines, 2024, 12(6): 386.
- [28] Park Jong-Won, Jeong Hyun-Yong. Finite element modeling for the cap ply and rolling resistance of tires [J]. International Journal of Automotive Technology, 2022, 23(5): 1427-1436.