

带复杂花纹的轮胎六分力计算方法

付新华, 李 宁, 侯京斌, 胡永康

(三角轮胎股份有限公司, 山东 威海 264200)

摘要:以205/55R16 TH201轮胎为例介绍了一种带复杂花纹的轮胎六分力的计算方法, 包括侧偏工况、纵滑工况及联合工况等, 并对计算结果精度进行了验证。研究表明, 该方法计算得到的六分力数据可以直接用于拟合轮胎的动力学模型并用于整车分析。

关键词:轮胎; 动力学模型; 花纹; 有限元分析; 六分力; 侧向力; 纵向力; 回正力矩

中图分类号: TQ336.1⁺1; O241.82

文献标志码: A

文章编号: 1006-8171(2020)04-0201-08

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2020.04.0201



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

轮胎是车辆与路面接触的唯一部件, 车辆在行驶过程中一系列力的传递都是通过轮胎实现的, 因此轮胎是研究车辆动力性的基础^[1]。车辆动力学主要研究车辆在加速、转弯、制动等不同使用状态下的动态力学特性及其对车辆使用性能的影响。其中操纵稳定性和行驶平顺性是评价车辆使用性能的两个非常重要的指标。

目前各主机厂在新车型开发过程中也越来越关注操纵稳定性及行驶平顺性, 要求也越来越高, 但需要有了轮胎模型后才能进行后续的整车性能仿真。目前获取轮胎动力学模型最直接有效的方法是进行样胎测试, 这就需要生产样胎, 同时不同的设备均有其局限性, 并且完成一条样胎的建模需要耗费大量时间。如果样胎与悬架不匹配, 还需要进行新一轮的试制和测试, 会影响整车开发的周期。

如果在轮胎设计阶段就可以对轮胎六分力进行预判, 并根据主机厂的要求调整轮胎设计以满足轮胎与悬架的匹配, 可以大幅缩短产品开发周期, 进而提高配套的成功率。这就需要通过仿真计算的途径来实现。而目前基于Abaqus/Standard的稳态计算方式不能用于带花纹轮胎的计算, 因此开发了基于Abaqus/Explicit的带复杂花纹的轮

胎六分力计算方法。

1 轮胎动力学模型

为更好地理解轮胎动力学, 学界引入了六分力来定义路面对轮胎的作用, 将路面对轮胎的作用分解成SAE坐标系下的3个力(F_x, F_y, F_z)和3个力矩(M_x, M_y, M_z), 如图1所示, 其中 v, ω 和 α 分别为速度、角速度和侧偏角。通过六分力来解释轮胎在不同充气压力、负荷、速度、侧偏、纵滑等工况下的运动学响应。

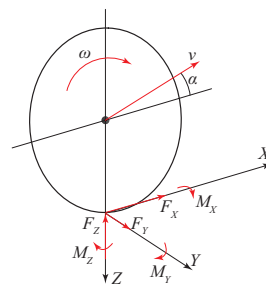


图1 SAE坐标系

由于轮胎结构复杂、材料种类较多且高度非线性, 因此轮胎模型相对复杂^[2]。在整车分析时一般将轮胎单独模型化, 即用相应的数学模型来表征其动力学性能。根据整车动力学仿真的需求, 轮胎动力学模型可以分为适用于操纵稳定性仿真的模型和适用于平顺性和耐久性的轮胎模型。前者要求能准确描述轮胎在车辆转弯、制动等工况下的稳态六分力, 代表模型包括MF-Tyre/PAC02和UniTire等; 后者要求轮胎模型能够满足一定的

作者简介:付新华(1985—), 男, 山东莘县人, 三角轮胎股份有限公司工程师, 硕士, 主要从事轮胎性能仿真及材料性能测试研究工作。

E-mail: fuxinhua@triangle.com.cn

频域范围,还要能识别路面模型并计算出精确的轮胎动态负荷等,代表模型包括SWIFT和FTire模型等。

获取轮胎的动力学模型就是得到各工况下的六分力数据,最直接有效的方法是进行六分力测试,主要测试设备包括MTS平板试验机、转鼓试验机(一般进行轿车及轻型载重轮胎的测试)以及低速平板测试台(可以进行相对大规格、高负荷轮胎的测试)。另外,还可以进行室外测试。但是测试的前提是要有样胎,并且不论是室内测试还是室外测试都对轮胎的规格、负荷和速度等有一定的局限。

2 轮胎六分力仿真计算模型建立

将设计阶段的轮胎建立有限元模型,考虑轮胎实际花纹,然后应用Abaqus软件提供的隐式、显式求解器分别计算轮胎在不同负荷、速度、充气压力下不同侧偏角、侧倾角的六分力数据,然后直接由仿真数据拟合出动力学模型,用于整车分析,仿真分析需要有足够的计算精度^[3-4]。

2.1 仿真模型

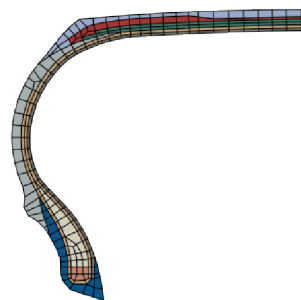
对于光面和只带纵沟轮胎的模型,一般选择Abaqus/Standard软件进行稳态求解计算。稳态计算基于拉格朗日/欧拉混合描述,使用拉格朗日描述单元的变形,而刚性转动部分用欧拉描述。光面和带纵沟的轮胎模型可以认为是轴对称的,所以选择稳态计算。但是考虑轮胎花纹后,花纹网格在空间上是不连续的,因此选择显式计算相对更合适。本研究基于Abaqus中Connector单元进行带花纹轮胎六分力的计算。

2.1.1 Hinge单元

Abaqus中有一类Connector单元,用来模拟模型中两个点之间的运动学和力学关系。Hinge连接属性是一种组合连接属性,仅有一个相对运动分量可用,即只能沿着轴发生相对旋转。因此可以将Hinge单元的旋转轴设置成轮胎的旋转轴,并通过对Hinge参考点施加旋转来表征轮胎的侧倾和侧偏,对Hinge连接单元施加转矩来表征制动和驱动,通过计算输出相对应的力和力矩的结果。经验证这种方式可以准确地描述轮胎在侧偏、侧倾和制动等各种工况下的运动模式。

2.1.2 轮胎有限元分析模型

以205/55R16 TH201轮胎为例,对轮胎及花纹分别进行网格划分,选择Abaqus/Explicit适合的缩减积分单元,橡胶材料超弹性选用Yeoh本构模型,粘弹性由时域7阶Prony级数表征。轮胎有限元模型如图2所示。



(a) 二维



(b) 三维

图2 轮胎有限元模型

2.2 模型精度验证

首先应用Abaqus隐式算法将建好的轮胎有限元模型在标准充气压力(240 kPa)下进行静负荷刚度计算,结果如图3所示,轮胎最大负荷为670 kg(6 566 N)。

与实测结果的对比证明了该轮胎有限元模型的可靠性。

2.3 六分力仿真计算及精度验证

轮胎与轮辋接触摩擦因数为0.2,胎面花纹与地面接触用指数摩擦模型定义。首先在Abaqus/Standard下完成二维充气和三维充气分析,然后在Abaqus/Explicit下进行加载、侧偏及制动计算,部分印痕计算结果如图4所示。

力和力矩显式动态计算会有数值振荡,侧偏角越大,数值振荡越明显,但结果尚可接受。对计

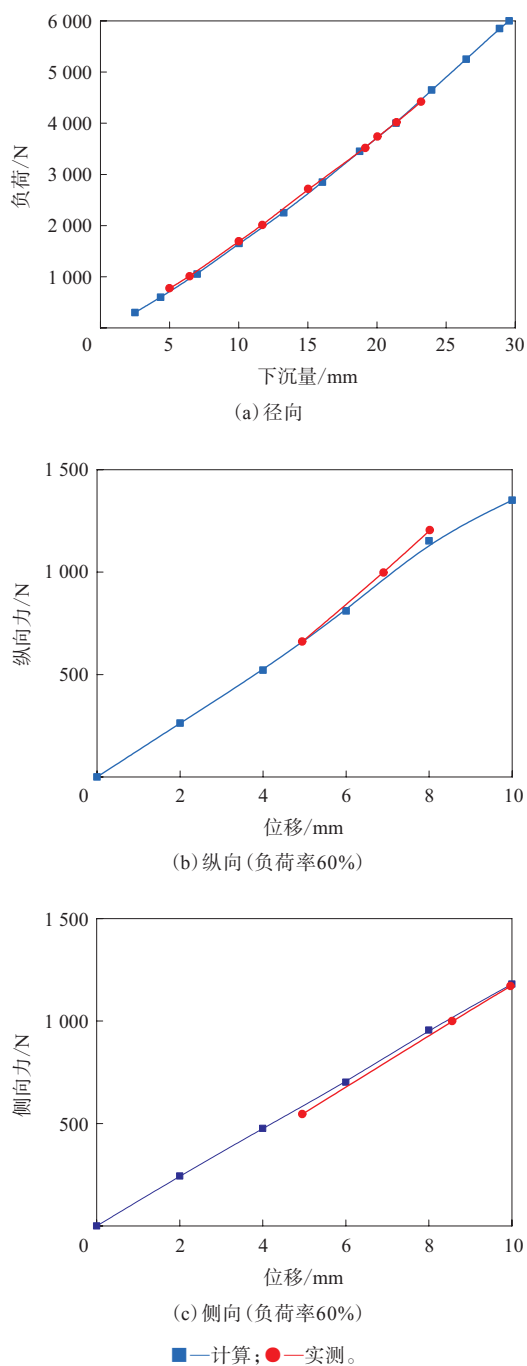


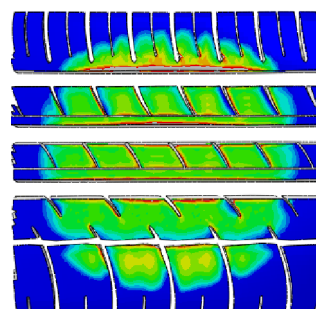
图3 轮胎静负荷刚度计算与实测结果对比

算结果进行滤波处理,得到力和力矩随侧偏角和滑移率的变化曲线。

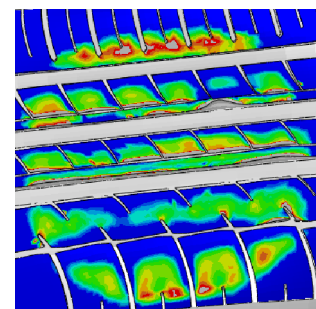
将仿真结果与在MTS试验台相同工况下的测试结果进行对比,结果如图5所示。

从图5可以看出,与实测结果对比,该方法计算得到的六分力结果精度满足要求。

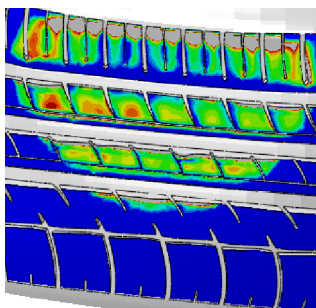
需要特别注意的是轮胎六分力仿真计算结果



(a) 自由滚动



(b) 侧偏角+4°



(c) 侧偏角-6°

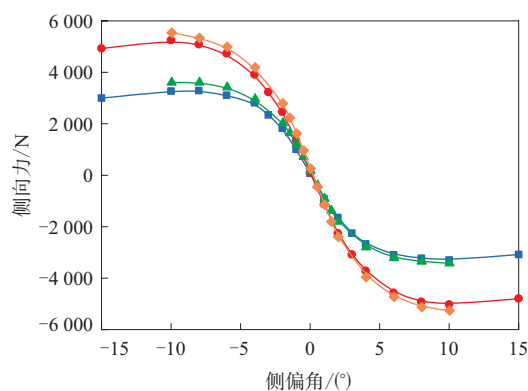
图4 部分轮胎印痕计算结果

与胎面胶的摩擦因数密切相关,而胎面胶的摩擦与温度、滑移速度、接触压力、路面粗糙度及材质均相关,因此应用合适的摩擦模型表征路面与胎面之间的摩擦特性是影响六分力仿真结果精度的关键因素之一。

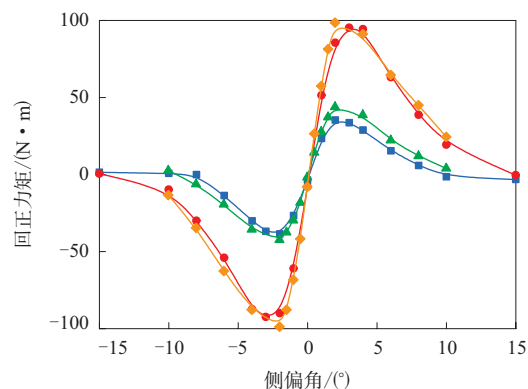
3 轮胎六分力仿真计算实例

应用上述方法拟合适用于整车操纵稳定性仿真的PAC02模型,包括静负荷刚度、纯侧偏、纯纵滑、联合制动和有效滚动半径计算等。

首先对负荷率分别为40%,80%和120%下的纵向刚度和侧向刚度进行计算,然后对侧偏、纵滑和联合工况进行模拟计算。下面分别就纯侧偏、



(a) 侧向力



(b) 回正力矩

■—负荷率60%计算值; ●—负荷率80%计算值; ▲—负荷率60%实测值; ◆—负荷率80%实测值。

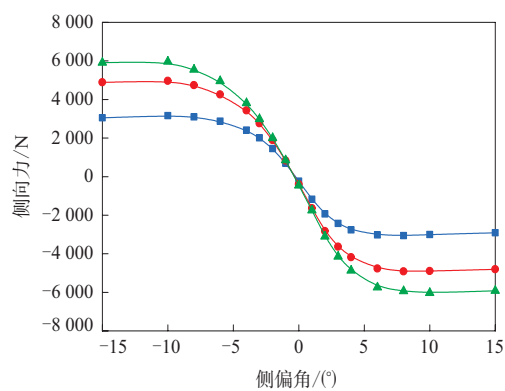
图5 轮胎力和力矩计算与实测结果对比
纯纵滑和联合工况计算进行介绍^[5], 轮胎标准负荷为530 kg (5 194 N), 速度为60 km · h⁻¹。

3.1 纯侧偏工况

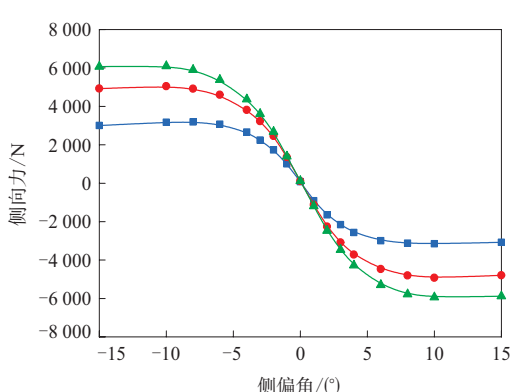
侧偏工况下主要关注侧向力和回正力矩, 在3种恒定侧倾角下侧向力和回正力矩随侧偏角的变化曲线分别如图6和7所示。

试验表明, 正侧偏角产生负侧向力, 正侧倾角产生正侧向力, 当侧倾角与侧偏角异号时, 侧向力峰值比仅有侧偏角作用时会高一些; 反之, 当侧倾角与侧偏角同号时, 侧向力峰值比仅有侧偏角作用时小。但是相对侧偏角来说, 由侧倾角引起的侧向力相对较小, 并且随侧倾角增大对侧向力的影响逐渐减小。因此, 在图6中±5°侧倾角与0°侧倾角结果相差不明显。

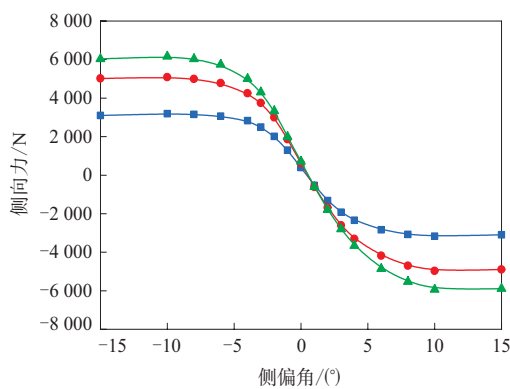
从图7可以看出, 正侧偏角引起正回正力矩, 正侧倾角也引起正回正力矩, 因此当侧倾角与侧偏角同号时, 回正力矩峰值比仅有侧偏角时增



(a) 侧倾角-5°



(b) 侧倾角0°



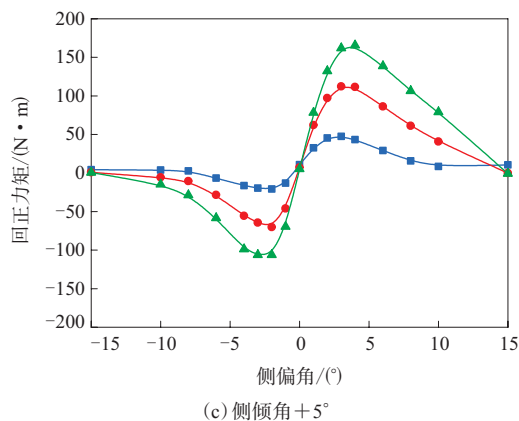
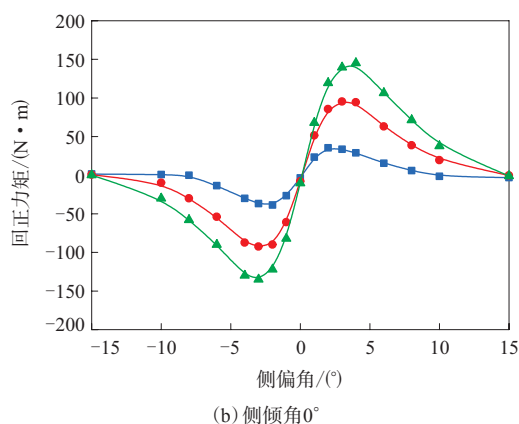
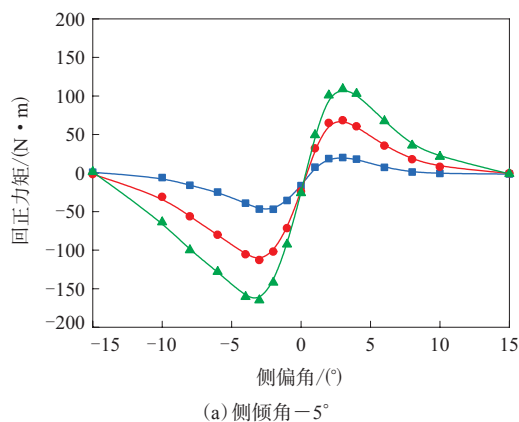
(c) 侧倾角+5°

负荷率/%: ■—40; ●—80; ▲—120。

图6 在3种恒定侧倾角下侧向力随侧偏角的变化曲线
大; 侧倾角与侧偏角异号时峰值比仅有侧偏角时有所下降。

3.2 纯纵滑工况

纵滑工况下主要关注纵滑刚度、纵向力峰值以及滑移纵向力(滑移率为100%时的纵向力)。在3种恒定侧倾角下纵向力随滑移率的变化曲线如



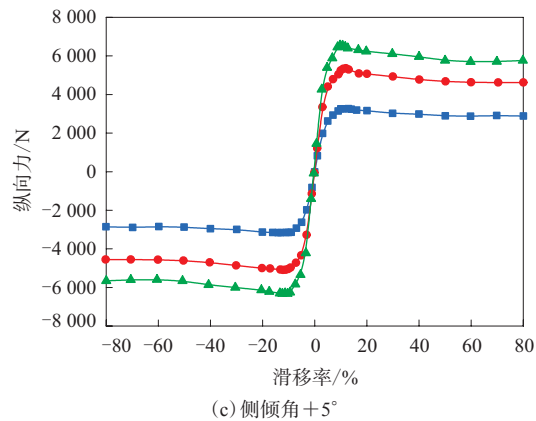
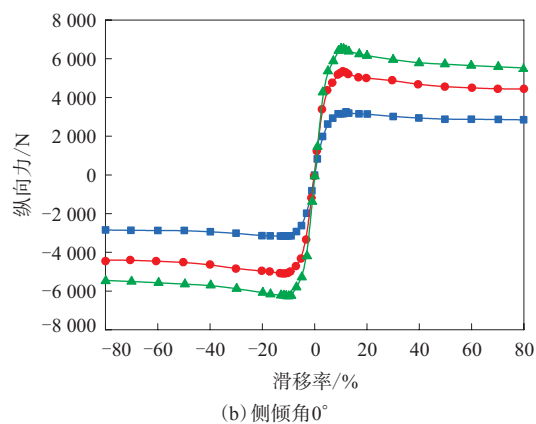
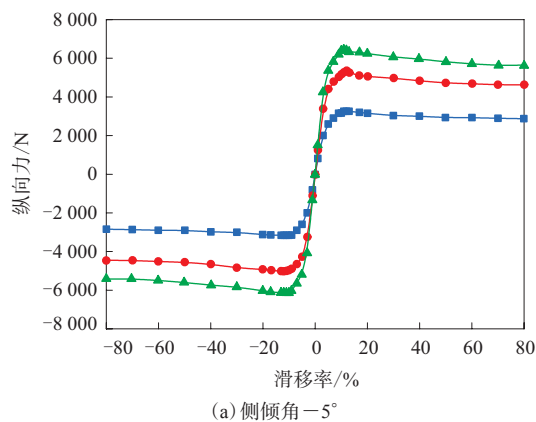
注同图6。

图7 在3种恒定侧倾角下回正力矩随侧偏角的变化曲线
图8所示。曲线的形状和峰值出现的位置与轮胎规格、结构设计和胎面胶配方等有关。

3.3 联合工况

部分联合工况下侧向力、纵向力和回正力矩随滑移率的变化曲线如图9—11所示。

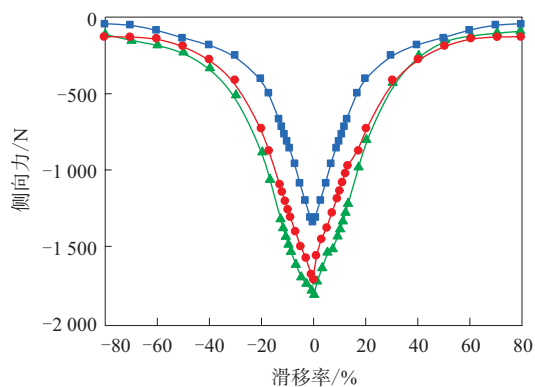
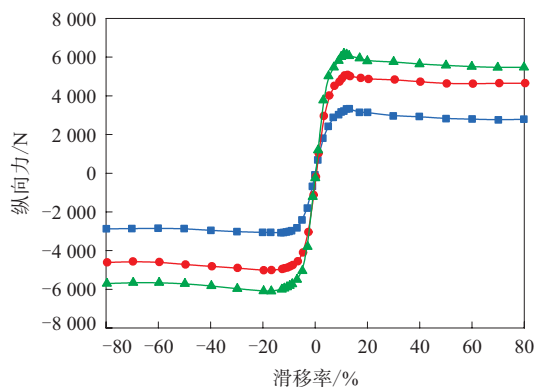
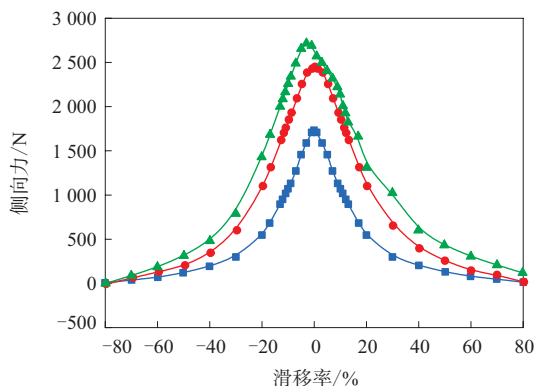
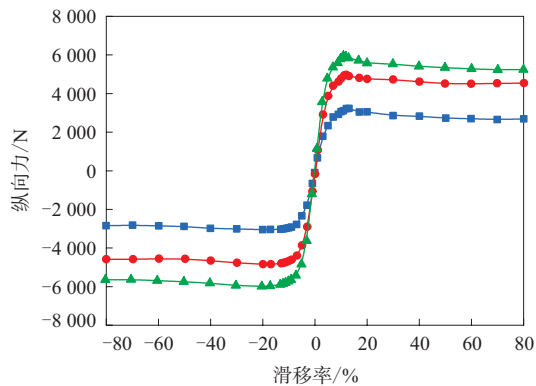
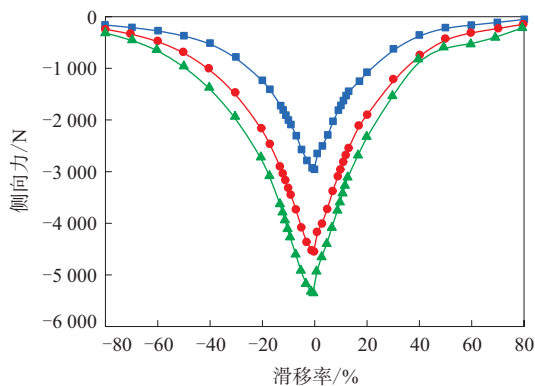
从图9可以看出,侧向力是侧偏角的函数,在



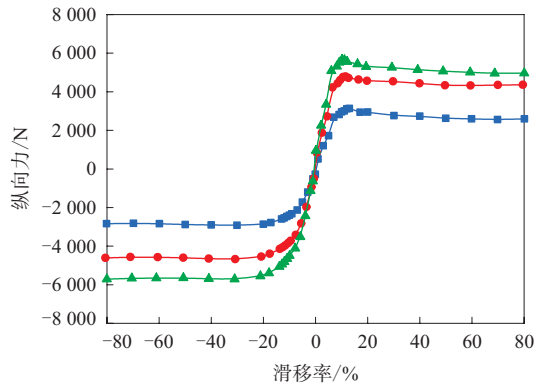
注同图6。

图8 在3种恒定侧倾角下纵向力随滑移率的变化曲线
联合工况下不同侧偏角时侧向力峰值不同,在相同侧偏角下,制动与驱动工况有明显区别。

从图10可以看出,侧偏角对纵向力曲线的形状、纵向力峰值及其出现的位置略有影响,相同侧偏角下制动与驱动工况的峰值及其出现的位置略有差别。

(a) 侧倾角 -5° 和侧偏角 $+2^{\circ}$ (a) 侧倾角 -5° 和侧偏角 $+2^{\circ}$ (b) 侧倾角 0° 和侧偏角 -2° (b) 侧倾角 0° 和侧偏角 -2° (c) 侧倾角 $+5^{\circ}$ 和侧偏角 $+5^{\circ}$

注同图6。

(c) 侧倾角 $+5^{\circ}$ 和侧偏角 $+5^{\circ}$

注同图6。

图9 联合工况下侧向力随滑移率的变化曲线

从图11可以看出,驱动时回正力矩曲线与制动时区别更明显,不同侧偏角下差异较大。

3.4 负荷及滚动半径

在滑移率和侧倾角均为 0° 的条件下,负荷半径随侧偏角的变化曲线如图12所示。

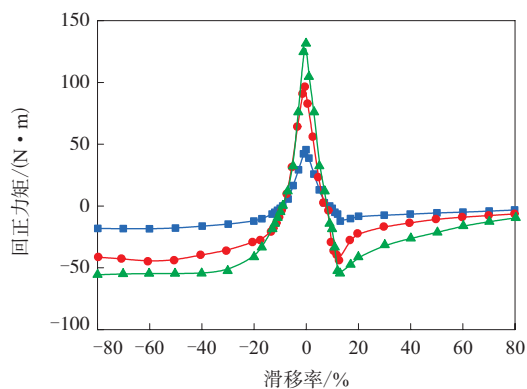
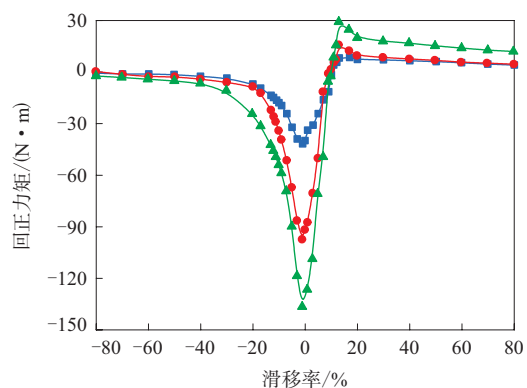
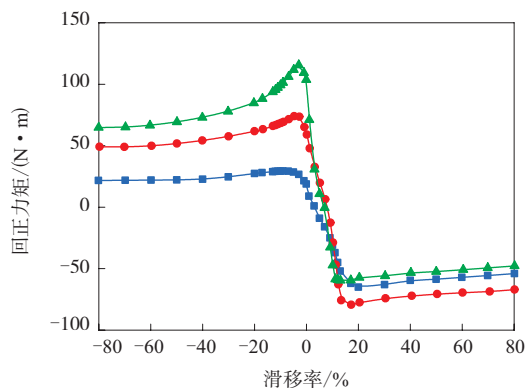
从图12可以看出,随侧偏角增大,轮胎径向刚

图10 联合工况下纵向力随滑移率的变化曲线

度下降,负荷半径减小。

根据 0° 侧偏角时的负荷半径及角速度计算得到不同负荷下的有效滚动半径,结果如图13所示。

将上述计算结果通过ADAMS/Car模块中自带的或其他拟合工具辨识得到PAC02动力学模型

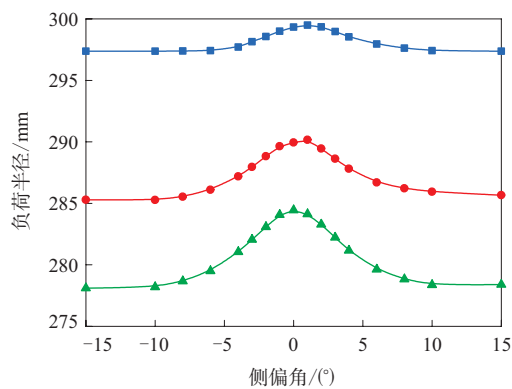
(a) 侧倾角 -5° 和侧偏角 $+2^\circ$ (b) 侧倾角 0° 和侧偏角 -2° (c) 侧倾角 $+5^\circ$ 和侧偏角 $+5^\circ$

注同图6。

图11 联合工况下回正力矩随滑移率的变化曲线
TIR文件,进而用于整车操纵稳定性分析。

4 结语

根据MTS试验台稳态六分力测试开发了基于Abaqus/Explicit带复杂花纹轮胎的侧偏、纵滑及联合工况的计算方法。通过验证,该方法仿真精度



注同图6。

图12 轮胎负荷半径随侧偏角的变化曲线

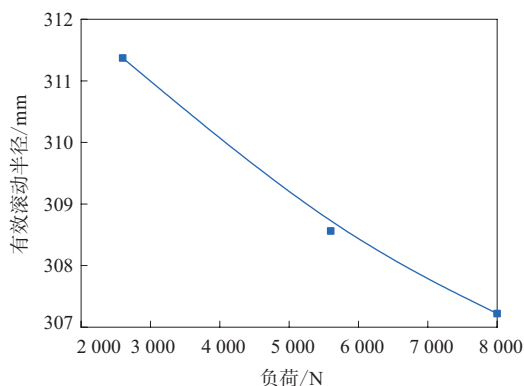


图13 轮胎有效滚动半径随负荷的变化曲线

满足要求,可以在整车性能仿真中直接用于拟合轮胎动力学模型,并通过实例介绍了该方法进行轮胎动力学仿真计算的具体应用。

通过该方法可以分析调整结构或配方后轮胎六分力性能能否满足整车性能的要求,但需要注意通过调整轮胎结构或者配方等提升六分力性能时要兼顾耐久性能和滚动阻力等其他性能。

参考文献:

- [1] 张天华,许喆,王伟. 交错结构免充气安全轮胎的静态接地性能和疲劳寿命的有限元分析与预测[J]. 橡胶工业,2018,65(12):1383-1386.
- [2] Gent A N, Walter J D. The Pneumatic Tire[M]. Washington, USA: NHTSA,2005:409-419.
- [3] 庄茁,由小川,廖剑晖,等. 基于Abaqus的有限元分析和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2009:189-209.
- [4] 石亦平,周玉荣. Abaqus有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006:226-238.
- [5] Masato Abe. 车辆操纵动力学理论与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2016:4-70.

收稿日期:2019-11-26

Calculation Method of Six Component Forces of Tire with Complex Tread Pattern

FU Xinhua, LI Ning, HOU Jingbin, HU Yongkang

(Triangle Tire Co., Ltd, Weihai 264200, China)

Abstract: Taking 205/55R16 TH201 tire as an example, a calculation method of six component forces of tire with complex tread patterns was introduced, including side slip condition, longitudinal slip condition and complex condition, and the accuracy of the calculation results was verified. The results showed that the six component forces data calculated by this method could be directly used to fit the tire dynamic model, and used for vehicle analysis.

Key words: tire; dynamic model; pattern; finite element analysis; six component force; lateral force; longitudinal force; aligning torque

玲珑轮胎欲融资20亿元 做大做强荆门基地

2020年2月17日,山东玲珑轮胎股份有限公司(以下简称玲珑轮胎)发布公告称,拟公开增发股份总数不超过1亿股,发行价格不低于公告招股意向书前20个交易日公司股票均价或前1个交易日公司股票均价,募集资金总额不超过20亿元。其中,14亿元用于湖北荆门年产800万套半钢和120万套全钢高性能轮胎生产项目,6亿元用于补充流动资金。

玲珑轮胎表示,近3年公司轮胎产能利用率一直维持在较高水平,产能不足问题日益显现。本次公开增发股份有利于公司突破产能瓶颈,开拓国内配套市场,进一步提升公司的市场占有率;加快“5+3”战略的落地,即在国内建设5个生产基地,在海外建设3个生产基地,进一步拓展国内生产和销售业务,增强公司消化订单的灵活性和机动性,优化制造产地分布,落实公司发展战略。

通过此次股份增发,玲珑轮胎以智能化标准建设一处生产基地,有利于公司顺应轮胎行业“智能化、自动化、信息化”的变革趋势,抓住制造业转型升级的战略机遇期,提高自身的核心竞争力。

此外,轮胎行业是重资产行业,前期投资和后期经营所需资金量大,随着玲珑轮胎业务规模的不断扩大,资金需求越来越明显。本次发行募集资金到位后将其中一部分用于补充流动资金,有

利于优化公司资本结构,降低财务费用,提升公司盈利能力和抗风险能力。

(摘自《中国化工报》,2020-02-21)

炭黑弱势行情难改

2020年春节期间,国内炭黑市场成交偏淡,由于节前贸易商及下游终端企业备货完毕,陆续离市,市场多以节前订单出货为主,交投基本停滞,炭黑市场弱势维稳。后市来看,随着下游开工推迟,需求难以回暖,预计炭黑市场难改低价行情。

供应方面,进入2020年2月,炭黑企业生产基本维持春节期间水平,开工率在五成左右,且由于物流受限,企业出货只能以周边为主,厂家库存增加明显。受此影响,部分炭黑厂家后期有减产或停产意向。贸易商方面,因下游多未归市,现阶段贸易商消化前期库存为主,对市场维持观望。

需求方面,因假期延长及物流受限,轮胎及橡胶制品企业放假时间长于往年,下游对炭黑的需求放缓。

综合来看,由于物流受限,炭黑库存增加明显;原料煤焦油市场受物流影响有涨库存的风险,市场有下滑可能;下游开工时间待定,短期内下游需求量不大。在多种利空因素影响下,不排除炭黑市场价格有下滑可能。

(摘自《中国化工报》,2020-02-05)