

# 全钢载重子午线轮胎侧偏特性有限元分析

钱瑞瑾, 程 昊

(双钱集团上海轮胎研究所有限公司, 上海 200245)

**摘要:**以275/70R22.5 RT606全钢载重子午线轮胎为研究对象,运用有限元分析软件TYABAS和Abaqus建立轮胎侧偏特性分析有限元模型,并研究不同负荷的稳态滚动条件下,侧向力和回正力矩随侧偏角的变化规律。结果表明:在单一垂直负荷下,随着侧偏角的增大,侧向力的绝对值逐渐增大,当侧偏角为 $-5^\circ$ 和 $5^\circ$ 时,回正力矩分别达到极小值和极大值;在同一侧偏角下,随着负荷的增大,侧向力的绝对值逐渐增大。侧偏刚度仿真结果与试验结果一致,验证了仿真分析方法的有效性。

**关键词:**全钢载重子午线轮胎;侧偏特性;侧向力;回正力矩;有限元分析;仿真分析

**中图分类号:**U463.341+.3/.6;O241.82

**文章编号:**1006-8171(2021)03-0143-05

**文献标志码:**A

**DOI:**10.12135/j.issn.1006-8171.2021.03.0143

汽车对地面的作用是通过轮胎实现的,轮胎的力学特性直接影响车辆的操纵性、平顺性和安全性等性能。汽车的操纵稳定性很大程度上取决于轮胎的侧偏特性,其已成为各汽车厂家和轮胎生产企业研究和分析的重点。

在汽车行驶过程中,由于路面的侧向倾斜、转弯时的离心力等因素,使车轮的运动方向偏离其中心,此时车轮的旋转平面与行驶方向的夹角称为侧偏角,如图1所示。

传统的试验方法是研究轮胎侧偏特性的重要手段,黄舸舸等<sup>[1]</sup>通过常规试验研究了带束层结构对轮胎侧偏特性的影响。近年来,随着计算机技术的飞速发展和有限元商用分析软件的不断完善,有限元仿真分析方法开始应用于轮胎侧偏特性的研究<sup>[2-10]</sup>。



**作者简介:**钱瑞瑾(1961—),男,浙江宁波人,双钱轮胎集团有限公司总工程师、双钱集团上海轮胎研究所有限公司所长,教授级高级工程师,硕士,主要从事轮胎结构分析与设计、轮胎制造工艺技术的研发。主持的全钢工程机械子午线轮胎项目获得上海市科技进步一等奖,多个项目获得上海市科技进步奖及优秀新产品奖;荣获中国橡胶工业科学技术进步有功专家称号;2002年获国家津贴证书;主持形成了绿色轮胎行业规范,主持起草了GB/T 22036—2008《轮胎惯性滑行通过噪声测试方法》。

**E-mail:**qianruijin@doublecoinholdings.com

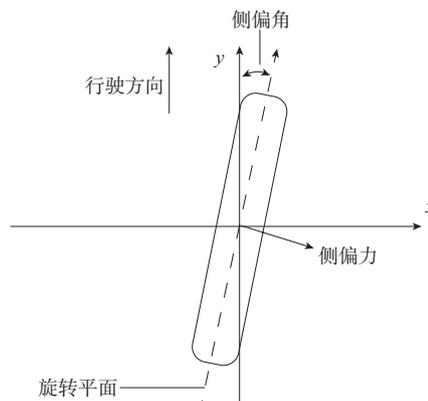


图1 车轮侧偏示意

本工作以275/70R22.5 RT606全钢载重子午线轮胎为研究对象,运用哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所开发的轮胎专用有限元分析软件TYABAS建立轮胎二维和三维有限元分析模型,在Abaqus软件中建立不同侧偏角的轮胎侧偏特性分析有限元模型,使用隐式分析方法进行仿真分析<sup>[11-18]</sup>,并对计算结果进行处理,得到轮胎的侧向力和回正力矩等数据。

## 1 轮胎三维建模

采用有限元分析软件TYABAS对275/70R22.5 RT606全钢载重子午线轮胎的结构设计图进行网格划分<sup>[19-23]</sup>,如图2所示。

橡胶材料的不可压缩性用Lagrange乘子法解

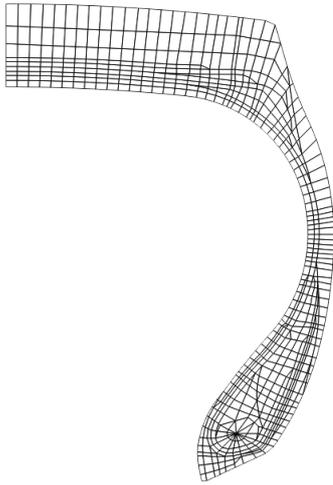


图2 轮胎二维网格划分

决,而以物理非线性Mooney-Rivlin模型来模拟应变能密度( $W$ )公式描述为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3)$$

式中, $I_1$ 和 $I_2$ 分别为第一和第二不变量; $C_{10}$ 、 $C_{01}$ 和 $C_{11}$ 为单轴拉伸或压缩、平面拉伸和等轴拉伸等试验测得的数据拟合而成的材料常数。

胎体帘布层和带束层均为正交各向异性材料,用rebar嵌入式单元处理,橡胶材料用各向同性不可压缩单元表示,钢丝圈用各向同性线弹性材料单元描述。

在二维模型的基础上,通过旋转生成三维轮胎模型,共有106个断面,接地区域附近断面密度大,然后逐渐增大划分区域,如图3所示。

轮胎三维模型中的橡胶材料采用各向同性的不可压缩C3D8H单元表示,选用超弹性模型

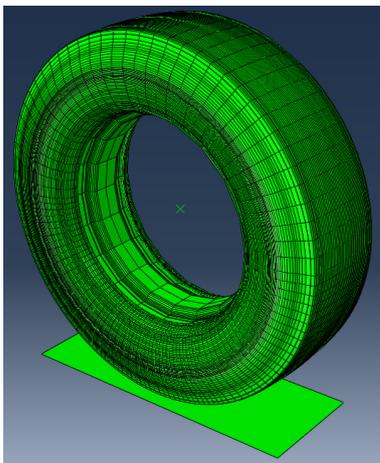


图3 轮胎三维模型

Mooney-Rivlin描述材料的应力-应变行为。275/70R22.5 RT606全钢载重子午线轮胎的充气压力为930 kPa,标准负荷为34 790 N,轮胎与轮辋之间的摩擦因数为0.5,滑移率为0.01。计算条件如下:轮胎需要在稳态滚动的条件下转弯,稳态滚动速度  $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ,转弯角度  $-10^\circ \sim 10^\circ$ 。

## 2 结果与讨论

以上述建立的轮胎模型为基础,分别研究标准负荷的33%、67%、100%、133%和167%五组负荷下轮胎的侧偏刚度。本研究中的侧偏刚度为稳态侧偏刚度。稳态是指轮胎在不受驱动力或制动力的情况下的状态,又称自由滚动状态。轮胎的侧偏刚度( $K$ )计算公式如下:

$$K = \frac{F}{\alpha}$$

式中, $F$ 为轮胎的侧向力, $\alpha$ 为侧偏角。

### 2.1 同一侧偏角下不同负荷的接地印痕变化

采用有限元分析软件Abaqus提取出侧偏角为 $-10^\circ$ 时不同负荷下的接地印痕,如图4—8所示。

从图4—8可以看出,轮胎接地印痕的基本形状为梯形,并且随着负荷的增大,接地压力的最大值由中心区域逐渐向轮胎边缘转移,这与试验情

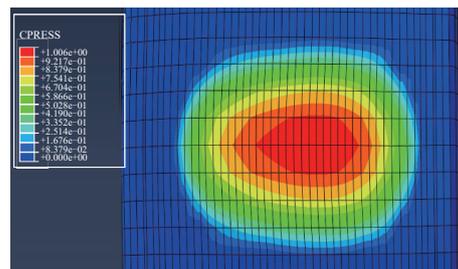


图4 33%标准负荷下的接地印痕

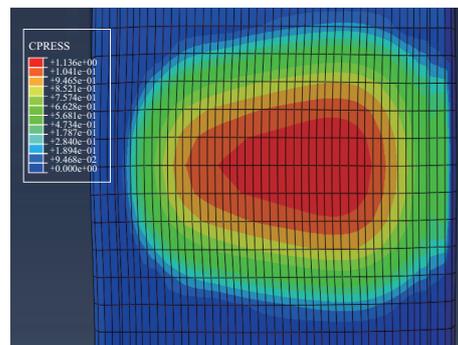


图5 67%标准负荷下的接地印痕

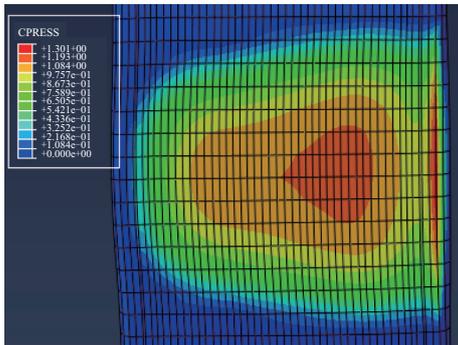


图6 100%标准负荷下的接地印痕

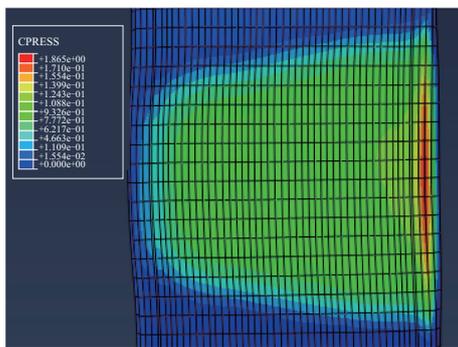


图7 133%标准负荷下的接地印痕

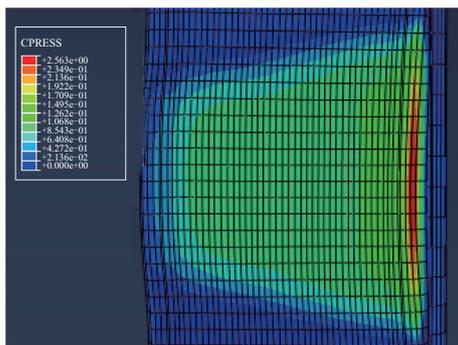


图8 167%标准负荷下的接地印痕

况基本相符。

### 2.2 单一垂直负荷对侧偏特性的影响

当充气压力为930 kPa、标准负荷为34 790 N时,单一垂直负荷下轮胎侧向力与侧偏角的关系曲线如图9所示。

从图9可以看出,在侧偏角为 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内,正的侧偏角产生负的侧向力,负的侧偏角产生正的侧向力,侧向力随侧偏角的变化呈现出一个负的斜率形式,但随着侧偏角的增大,侧向力的绝对值呈逐渐增大趋势。当侧偏角为 $0^{\circ}$ 时,侧向力并不为零,这主要是由于带束层的角度设计及侧偏侧倾的叠加影响等所致。

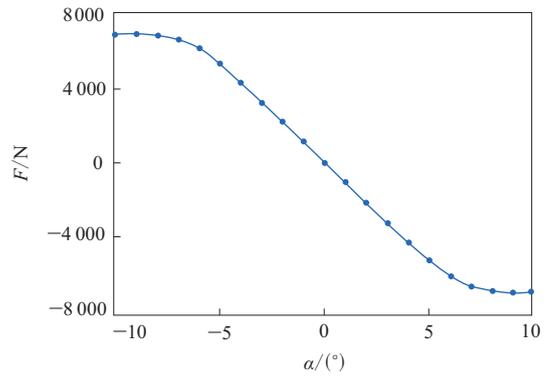


图9 单一垂直负荷下轮胎侧向力与侧偏角的关系曲线

回正力矩( $M_z$ )是轮胎发生侧偏时作用于轮胎绕Z轴的力矩,是使车轮恢复到直线行驶位置的主要力矩之一。回正力矩与侧偏角之间存在着复杂的非线性函数关系。在额定负荷下,回正力矩与侧偏角的关系曲线如图10所示。

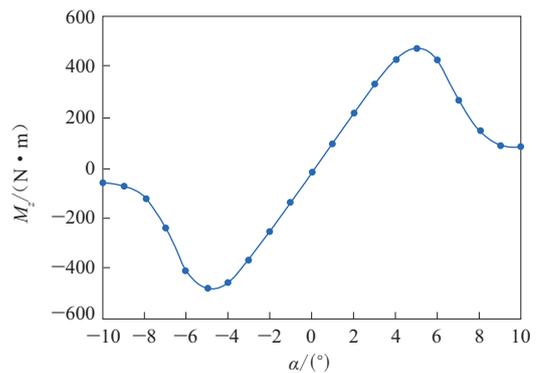


图10 单一垂直负荷下回正力矩与侧偏角的关系曲线

从图10可以看出:在侧偏角为 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内,回正力矩在形式上大致关于 $M_z=0$ 对称,并且在侧偏角从 $0^{\circ}$ 到 $-5^{\circ}$ 范围内变化时, $M_z$ 为负值并逐渐减小,当侧偏角为 $-5^{\circ}$ 时, $M_z$ 达到极小值,在侧偏角从 $-5^{\circ}$ 到 $-10^{\circ}$ 范围内变化时, $M_z$ 逐渐增大并趋于平缓;但侧偏角在 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内, $M_z$ 的变化情况刚好相反,侧偏角在 $0^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 范围内增大时 $M_z$ 逐渐增大,当侧偏角为 $5^{\circ}$ 时 $M_z$ 达到极大值,之后随侧偏角的增大, $M_z$ 逐渐减小并趋于平缓。

### 2.3 负荷对侧偏特性的影响

不同负荷下的轮胎稳态滚动半径变化如图11所示。

从图11可以看出,随着负荷率在33%~167%之间逐渐增大,轮胎稳态滚动半径逐渐减小。随着负荷的增大,轮胎的下沉量也随之增大,其稳态

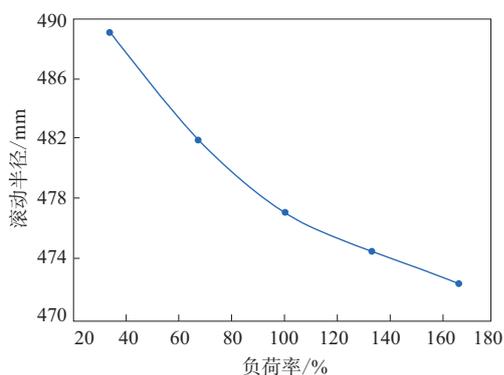
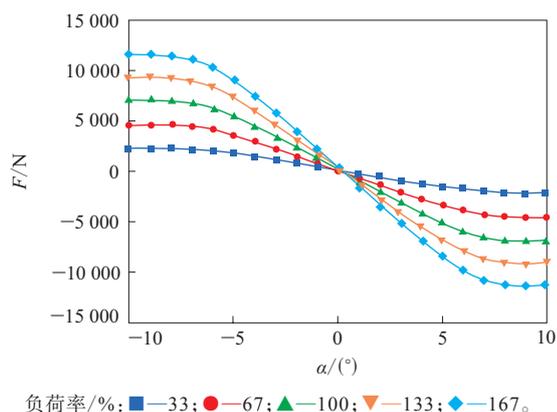


图11 不同负荷下的轮胎稳态滚动半径变化

滚动半径逐渐减小,与实际情况基本相符。

不同负荷下轮胎侧向力随侧偏角的变化如图12所示。



负荷率/%: ■—33; ●—67; ▲—100; ▼—133; ◆—167。

图12 不同负荷下轮胎侧向力与侧偏角的关系曲线

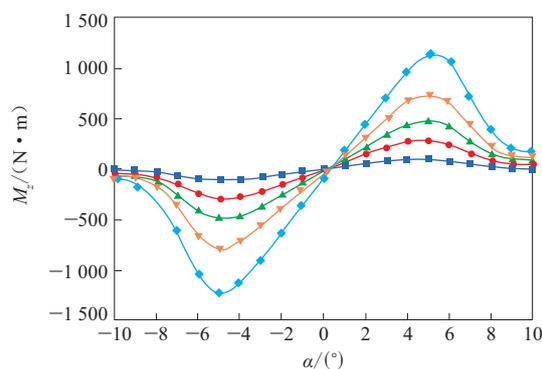
从图12可以看出,在同一侧偏角下,随着负荷的增大,侧向力的绝对值也逐渐增大,并且表现出一定的规律性,各曲线的变化趋势基本相同。

不同负荷下轮胎的回正力矩与侧偏角的关系曲线如图13所示。

从图13可以看出,回正力矩随侧偏角变化的曲线在负荷变化时会表现出几乎相同的形状特征。在侧偏角为 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内,当侧偏角为 $-5^{\circ}$ 和 $5^{\circ}$ 时,不同负荷下的轮胎回正力矩分别达到极小值和极大值。

## 2.4 仿真结果评价

为验证有限元仿真分析的有效性,我公司与试验平台合作选取1条275/70R22.5 RT606全钢载重子午线轮胎进行测试,在标准负荷、标准压力下验证侧偏角为 $-1^{\circ}$ 和 $1^{\circ}$ 对应的侧向力,并与仿真结果进行比较。



注同图12。

图13 不同负荷下轮胎的回正力矩与侧偏角的关系曲线

根据常规做法,通常在小侧偏角范围内,侧向力和侧偏角几乎呈线性关系,因此取侧偏角为 $-1^{\circ}$ 和 $1^{\circ}$ 时的侧向力的平均值作为近似的侧偏刚度。侧偏刚度的仿真结果和试验结果分别为 $1\ 092$ 和 $1\ 051\ \text{N}\cdot(^{\circ})^{-1}$ 。通过对比可以看出仿真结果与试验结果的误差为3.9%,在合理的误差范围内,说明了轮胎侧偏特性有限元仿真分析方法的有效性。

## 3 结论

本文以275/70R22.5 RT606全钢载重子午线轮胎为研究对象,运用有限元分析软件TYABAS和Abaqus建立了有限元分析模型,对轮胎稳态侧偏特性进行模拟仿真,研究其在不同负荷下的规律性。

(1)随着负荷的增大,接地压力的最大值由中心区域逐渐向轮胎边缘转移。

(2)在单一垂直负荷下,随着侧偏角的增大,侧向力绝对值逐渐增大;在侧偏角从 $0^{\circ}$ 到 $-5^{\circ}$ 范围内变化时,回正力矩为负值并逐渐减小,而在侧偏角从 $-5^{\circ}$ 到 $-10^{\circ}$ 范围内变化时逐渐增大;但在侧偏角为 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内,回正力矩的变化情况刚好相反;在侧偏角为 $-5^{\circ}$ 和 $5^{\circ}$ 时回正力矩分别达到极小值和极大值,随后逐渐趋于平缓。

(3)在不同负荷下,轮胎的稳态滚动半径随着负荷的增大而逐渐减小。侧向力随着负荷的变化表现出一定的规律性。在同一侧偏角下,随着负荷的增大,侧向力的绝对值逐渐增大。随着负荷逐渐增大,在侧偏角为 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内,回正力矩的曲线变化趋势几乎相同,在侧偏角为 $-5^{\circ}$ 和 $5^{\circ}$

时回正力矩分别达到极小值和极大值。

### 参考文献:

- [1] 黄炯炯,蒋中凯,危银涛,等. 带束层结构对载重子午线轮胎侧偏特性的影响[J]. 轮胎工业,2011,31(7):394-398.
- [2] 区志明,王友善,汪俊. 冠带层模量对轿车子午线轮胎接地性能和侧向刚度的影响[J]. 轮胎工业,2010,30(8):459-462.
- [3] Gent A N, Walter J D. 轮胎理论与技术[M]. 危银涛,李勇,冯希金,等,译. 北京:清华大学出版社,2013:208-210.
- [4] 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.
- [5] 刘青,郭孔辉. 轮胎刷子模型分析 II. 稳态纵滑与纵滑侧偏刷子模型[J]. 农业机械学报,2000,31(2):4-8.
- [6] 郭孔辉,刘青. 稳态条件下用于车辆动力学分析的轮胎模型[J]. 汽车工程,1998,20(3):129-134.
- [7] 郭孔辉,刘青. 考虑胎体复杂变形的轮胎稳态侧偏特性理论模型[J]. 机械工程学报,1999,35(2):15-18.
- [8] 刘昌波,曹飞,宋振勇,等. 基于有限元方法的轮胎振动模态影响因素分析[J]. 轮胎工业,2019,39(11):652-656.
- [9] 管迪华,李梅. 不同宽度轮辋对轮胎静刚度特性影响的试验分析[J]. 汽车技术,2007(1):31-44.
- [10] 李长宇,杜云峰,宁卫明,等. 新型安全轮胎的设计及其有限元仿真分析[J]. 橡胶工业,2019,66(7):529-533.
- [11] 贺海留. 影响轿车子午线轮胎静态纵向刚度的因素[J]. 橡胶工业,2003,50(10):612-616.
- [12] 石琴,陈无畏. 基于有限元理论的轮胎刚度特性的仿真研究[J]. 系统仿真学报,2006,18(6):1445-1449.
- [13] 王伟,胡小军,赵树高. 子午线轮胎接触摩擦问题有限元分析[J]. 弹性体,2008,18(1):13-17.
- [14] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
- [15] Kao B G, Warholc T. Tire Lateral Force Modeling and the Bushing Analogy Tire Model[J]. Tire Science and Technology, 2005, 33(1): 18-37.
- [16] Lu M. FEA Study of Belt Angle Effect to Cornering Stiffness and Ply Steer[C]. ASME 2009 International Design Engineering Conference. San Diego, USA: ASME, 2009: 703-705.
- [17] Matyja F E. Steering Pull and Aligning Torque[J]. Tire Science and Technology, TSTCA, 1987, 15(3): 207-240.
- [18] Li Z, Li Z R, Xia Y M. An Implicit to Explicit FEA Solving of Tire F&M with Detailed Tread Blocks[J]. Tire Science and Technology, TSTCA, 2012, 15(3): 83-107.
- [19] 李炜. 子午线轮胎结构有限元分析和设计原理的若干问题研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2008.
- [20] Simulia Software Corporation. Abaqus User Subroutines Reference Manual[M]. Providence: Simulia Software Corporation, 2010.
- [21] 王国林,乔磊,周海超,等. 基于有限元仿真的载重子午线轮胎降噪方法研究[J]. 橡胶工业,2019,66(4):243-248.
- [22] 葛超,李亚东,张晓鹏,等. 轮胎有限元仿真接地印痕边缘提取程序设计[J]. 轮胎工业,2019,39(2):73-76.
- [23] 黄兆阁,李伟,孟祥坤,等. 免充气轮胎优化设计有限元分析[J]. 橡胶工业,2020,67(6):449-454.

收稿日期:2020-12-21

## Finite Element Analysis on Cornering Characteristics of Truck and Bus Radial Tire

QIAN Ruijin, CHENG Hao

(Double Coin Group Shanghai Tyre Research Institute Co., Ltd, Shanghai 200245, China)

**Abstract:** Taking the 275/70R22.5 RT606 truck and bus radial tire as the research object, the finite element model of tire cornering characteristics was established by using the finite element analysis software TYABAS and Abaqus, and the effects of the side slip angle on the lateral force and aligning torque under the condition of steady rolling and different loads were studied. The results showed that, under a single vertical load, the absolute value of the lateral force increased with the increasing of the side slip angle. When the side slip angle was  $-5^\circ$  and  $5^\circ$ , the aligning torque reached the minimum and maximum values, respectively. Under the same side slip angle, the absolute value of the lateral force increased with the increasing of the load. The simulation results were consistent with the test results, which verified the effectiveness of the simulation analysis method.

**Key words:** truck and bus radial tire; cornering characteristics; lateral force; aligning torque; finite element analysis; simulation analysis