

395/85R20 TRY66 轮胎纯侧偏特性 仿真与试验对比研究

高 明,于海涛,周鹏程,吴春婧,于 飞,谭明明
(三角轮胎股份有限公司,山东 威海 264200)

摘要:采用 Abaqus 有限元分析软件对 395/85R20 TRY66 轮胎进行静态加载及纯侧偏条件下的仿真模拟,结合试验数据,对充气压力和负荷下轮胎的侧偏角与侧向力、回正力矩之间的关系进行讨论,同时探讨了轮胎带束层残余回正力矩和残余侧向力对车辆操控稳定性和安全性的影响。结果显示,在轮胎产品设计的初始阶段,仿真技术可以发挥重要作用。

关键词:子午线轮胎;侧向力;侧偏角;回正力矩;摩擦圆;有限元分析
中图分类号:TQ336.1+1;O241.82 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2013)11-0655-07

轮胎的侧偏力学特性是汽车操纵动力学研究的重要内容之一^[1],对汽车的转向运动、车轮定位参数的合理选择有重要的影响。轮胎作为车辆唯一与地面接触的部件,除了为车辆提供负荷支撑,还起着为车辆传递力和力矩的重要作用。因此在进行轮胎产品设计时,为了保证车辆与轮胎之间的匹配特性,产品设计人员除了关注轮胎的高速、耐久等基本性能外,还需对轮胎的侧偏特性进行设计。轮胎的侧偏力学特性对车辆的操控稳定性、舒适性和干湿路面抓着性及安全性等具有重要的影响。

随着生活水平的提高,人们对车辆提出了更高的要求,目前大部分轿车轮胎及部分载重轮胎配套客户向我公司提出了侧偏方面的设计要求。当前主机厂提出的都是一些基本的参数要求,主要涉及轮胎侧向力、回正力矩、侧偏角及侧偏刚度等。随着我国车辆设计水平的提高以及与国际客户交流的日益频繁,主机厂必将提出更高的要求。我公司新设计开发的 395/85R20 轮胎主要定向配套我国某型军用装甲车和某款高性能军用越野车,因此对轮胎的操控性能、越野性能及安全性等提出了更高的要求,应客户的要求在吉林大学进行了该规格轮胎侧偏力学特性的测试工作。

随着计算机技术和力学仿真软件技术的发展,研究人员可以方便地借助高性能计算机对轮胎产品进行模拟仿真,从而预测轮胎的充气、加载、制动、驱动、侧偏、侧倾以及各复杂工况等^[2-3]。目前汽车企业或研究机构在进行车辆的动力学仿真研究时,往往将轮胎的侧向力、回正力矩、侧偏角及侧偏刚度等数据作为输入,并没有对影响该数据的轮胎结构参数及工况条件等进行细致的研究工作。本工作借助 Abaqus 软件平台建立了新开发的 395/85R20 TRY66 全钢子午线轮胎的有限元分析模型,对轮胎的静态加载数据及部分侧向力、回正力矩等参数的仿真与试验数据进行对比研究,并试图以此项工作为基础,逐步调试和完善模型,为后续更好地开展复合工况分析打下基础。

1 试验设备及条件

本研究涉及的静态加载数据包括静负荷半径、下沉量、断面宽等,在我公司的刚度试验机上测试得到;侧偏数据主要包括侧向力、回正力矩、侧偏角等,均为吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室测试。

1.1 试验设备

吉林大学汽车动态模拟国家重点实验室研制开发的具有国际水平的低速平板式轮胎动态特性

作者简介:高明(1979—),男,山东费县人,三角轮胎股份有限公司工程师,学士,主要从事轮胎力学研究及管理工作。

试验台(见图1)主要由4个系统构成,即计算机主控制系统、液压伺服系统、机械运动系统和信号采集系统,可以完成下述系列试验:轮胎的垂直刚度特性、纯侧偏稳态特性、纯侧倾稳态特性、纯纵滑稳态特性、滚动阻力特性、侧偏纵滑联合工况下的稳态特性及侧偏侧倾联合工况下的稳态特性等试验。



图1 低速平板式轮胎动态特性试验台

轮胎动态特性试验台的主要技术指标如下:轮胎半径 200~400 mm;轮胎垂直负荷 0~20 kN;轮胎侧偏角 $-25^{\circ} \sim +25^{\circ}$;轮胎外倾角 $-15^{\circ} \sim +15^{\circ}$;滑台载入力 10 kN;滑台最大行程 5 m。

1.2 试验条件

本研究涉及的所有侧偏及侧倾力学特性试验数据均采用上述试验平台进行测试,测试条件如下:轮胎规格 395/85R20 TRY66;轮胎充气压力 530,310 kPa;轮胎垂直负荷 5,10,15,20 kN;轮胎侧偏角 $0^{\circ}, \pm 0.5^{\circ}, \pm 1^{\circ}, \pm 2^{\circ}, \pm 4^{\circ}, \pm 6^{\circ}, \pm 8^{\circ}, \pm 10^{\circ}, \pm 12^{\circ}$ 。

轮胎侧偏工况试验及混凝土试验路面如图2和3所示。

2 有限元模型建立

为便于数据分析和对比及后续模型的调试和改进,本工作共建立2个有限元模型:光面轮胎模型(约定为FEA1)和带花纹轮胎模型(约定为FEA2),将两个模型得到的部分数据与试验测试数据(约定为E)进行对比研究。

带花纹轮胎的有限元模型的建模过程如图4所示。为了提高模型的收敛性,将轮胎花纹块划分为六面体网格,花纹与轮胎主体之间采用 tie



图2 轮胎侧偏工况试验示意



图3 轮胎混凝土试验路面

约束。为了方便起见,图4中FEA1模型的生成过程只起图示的作用,实际使用时FEA1模型应该由完整的轮胎二维模型旋转得到。橡胶结构离散为8节点的完全积分常压力杂交六面体单元(C3D8H),内部骨架材料使用4节点的减缩积分四边形面单元(SFM3D4R)。

本研究的轮胎坐标约定如下:轮胎接地中心为坐标原点, x 轴为车轮平面与路面的交线且前进方向为正方向; y 轴通过原点垂直于 x 轴,车轮前进方向右方为正; z 轴通过原点与路面垂直,向下为正。 F_x, F_y 和 F_z 分别为切向力、侧向力和径向力, M_x, M_y 和 M_z 分别为翻转力矩、滚动阻力矩和回正力矩, α 为侧偏角^[1]。

3 计算结果与试验对比分析

3.1 径向刚度

不同充气压力下轮胎的负荷半径与径向负荷的关系曲线如图5所示。从图5可以看出,轮胎的负荷半径随着负荷的增大而减小,基本呈线性关系。试验与仿真结果的变化趋势一致,但是光面轮胎的径向刚度较试验结果偏大,带花纹轮胎

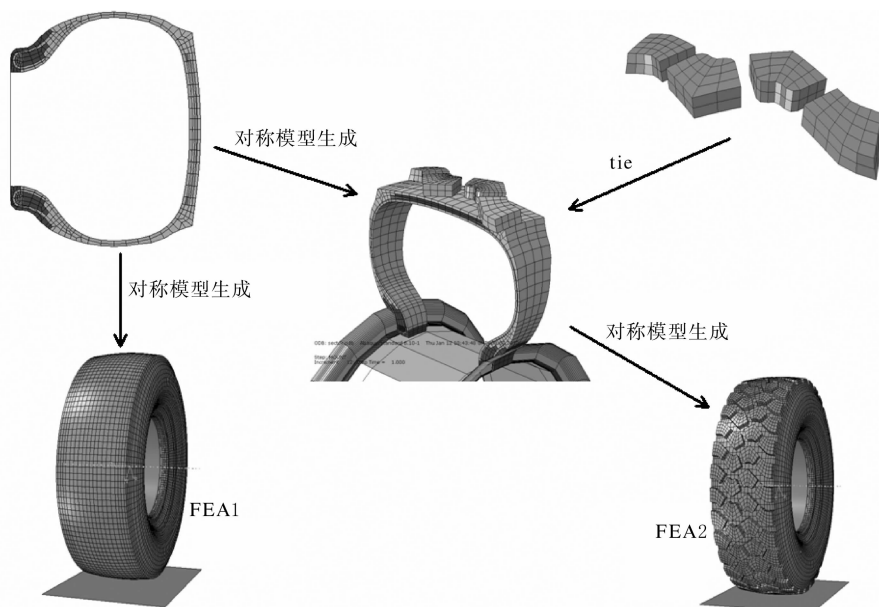
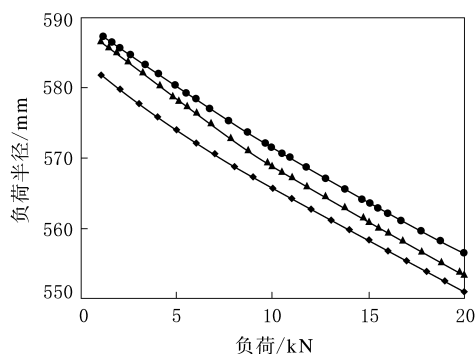
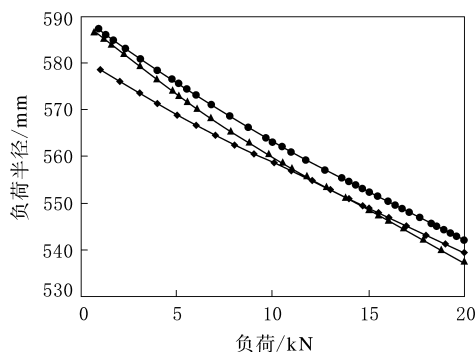


图 4 带花纹轮胎建模过程示意



(a) 充气压力 530 kPa



(b) 充气压力 310 kPa

◆—E; ●—FEA1; ▲—FEA2。

图 5 负荷半径与径向负荷的关系曲线

与试验结果更为接近,但是当轮胎充气压力为 310 kPa 时,试验数据与 FEA2 模型的仿真数据出现交叉现象,这是由于轮胎在充气压力较低且

负荷较大时由于轮胎内腔体积骤降,充气压力对轮胎整体刚性的贡献值占主体,导致轮胎刚度增量相对增大,从而出现随着负荷增大负荷半径减小趋缓的现象。

3.2 侧偏特性

侧偏特性测试轮胎充气压力为 530 kPa,平台的移动速度为 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,分别施加负荷 5, 10 和 15 kN,得到的轮胎侧向力与侧偏角的关系曲线如图 6 所示。从图 6 可以看出,当轮胎侧偏角较小时,侧向力与侧偏角基本呈线性关系,侧向力随着侧偏角的增大而增大,之后增幅变缓,侧偏角增大到一定值(本例约为 4°),侧向力开始基本保持不变。在进行轮胎侧偏特性研究时,一般将侧向力与侧偏角关系曲线线性段部分的斜率称为轮胎的侧偏刚度。国际上有时取 $F_y=0$ 与 $F_y=1/3F_{y\max}$ 之间的割线的斜率,这样适应的有效区间较大^[4]。由于在侧偏角为 1° 时的侧向力一般处在线性段范围,有时工程上为了方便而近似地将 1° 侧偏角对应的侧向力作为侧偏刚度。侧偏刚度是用来评估车辆及轮胎侧偏特性的重要参数。

3.2.1 负荷的影响

为了方便起见,本研究轮胎的侧偏刚度均取侧偏角为 1° 时侧向力的值,同时将侧偏刚度与对应的负荷的比值称为侧偏刚度系数(以下简称侧偏系数)。由于设备最大负荷范围的局限,本分析

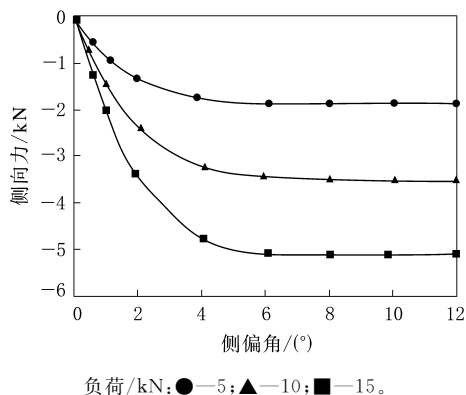


图6 轮胎侧向力与侧偏角的关系曲线

最大加载负荷为 25 kN。在充气压力为 530 kPa、速度为 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件下,试验及仿真得到的负荷对轮胎侧偏刚度及侧偏系数的影响如图 7 所示。从图 7 可以看出:轮胎的侧偏刚度随着负荷的增大基本呈线性增大,但是数值仿真结果显示当侧偏刚度增大到一定极限后开始减小;侧偏系数随着负荷的增大而减小。从图 7 还可以看出试验数据与仿真数据之间存在一定差距,带花纹轮胎模型的分析结果较光面轮胎模型稍好。

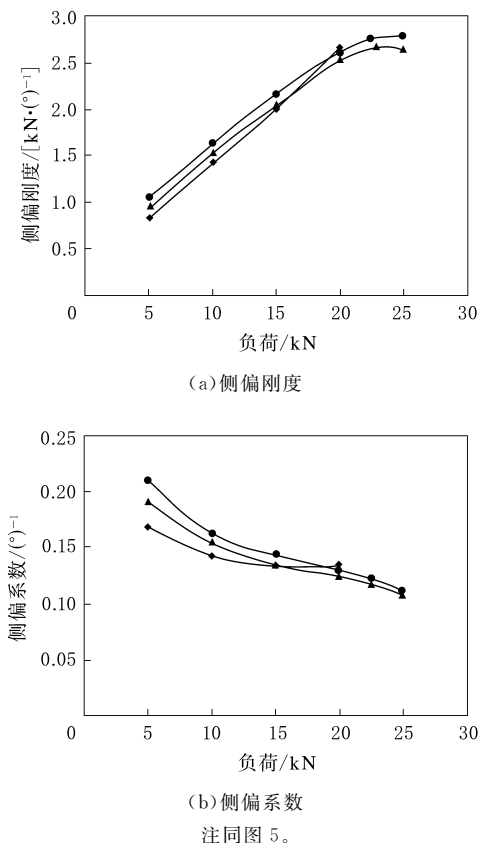


图7 负荷对轮胎侧偏刚度和侧偏系数的影响

3.2.2 充气压力的影响

在负荷为 5 kN、速度为 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件下,试验得到的轮胎侧向力与充气压力的关系曲线如图 8 所示。一般认为增大轮胎的充气压力,侧向力随之增大,但是从图 8 可以看出,在充气压力从 300 kPa 增大到 800 kPa 的过程中,轮胎的侧向力缓慢减小。

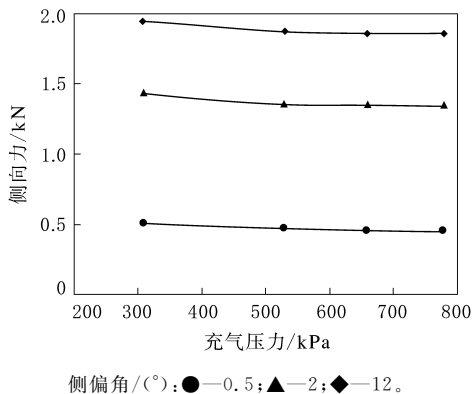


图8 充气压力对轮胎侧向力的影响

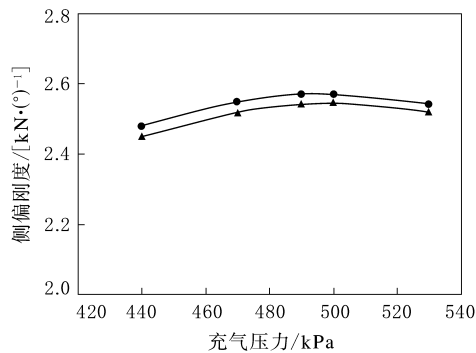
在负荷为 20 kN、速度为 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的条件下,仿真计算得到的不同充气压力下轮胎的侧偏刚度及侧偏系数如图 9 所示。从图 9 可以看出,当轮胎负荷为 20 kN 时,随着充气压力的增大,轮胎的侧偏刚度缓慢增大,但是增幅较小。分析认为,随着轮胎充气压力的增大,轮胎的整体刚性增大,这在一定程度上增大了轮胎的侧偏刚度,但是在轮胎充气压力增大的同时,轮胎的接地印痕面积及长度减小,又造成侧偏刚度减小,因此在考虑轮胎充气压力对侧偏刚度的影响时应该综合考虑轮胎负荷、充气压力及印痕变化的贡献度。一般当轮胎负荷较大时,充气压力对轮胎整体刚性的影响相对印痕变化大得多,充气压力增大时,轮胎的侧偏刚度有一定程度的增大;当轮胎负荷相对较小时,轮胎印痕对刚度的影响为主要因素,充气压力增大时,由于印痕的减小导致轮胎侧偏刚度随之减小。

3.2.3 摩擦圆

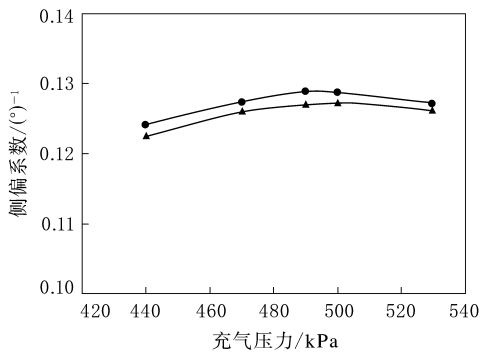
一般认为如果车轮没有滑动,处于纯滚动状态,车轮同时受水平面内切向力 F_x 和侧向力 F_y 作用时,应该满足如下公式:

$$\sqrt{F_x^2 + F_y^2} \leq \mu F_z$$

式中, μ 为轮胎与路面之间的附着系数。该公式



(a)侧偏刚度



(b)侧偏系数

●—FEA1; ▲—FEA2。

图 9 充气压力对轮胎侧偏刚度和侧偏系数的影响

可以用一个圆来描述,称为卡姆圆(摩擦圆),如图 10 所示。卡姆圆是车轮的滚动极限,如果 F_x 和 F_y 的几何和大于卡姆圆半径,车轮处于滑移状态;如果小于卡姆圆半径,则车轮处于滚滑状态。

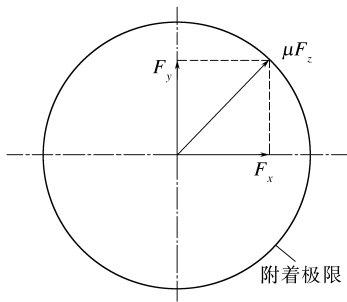


图 10 卡姆圆

轮胎的切向力主要表现为驱动力和制动力,将轮胎的侧向力-侧偏角关系曲线及侧向力-切向力关系曲线联系起来,如图 11 所示。图 11 中实线为不存在切向力,即 $F_x=0$ 时的曲线,虚线为存在某一切向力 F_{x1} 时的关系曲线。从图 11 可以看出,如果在给定的侧向力 F_y 基础上给车轮

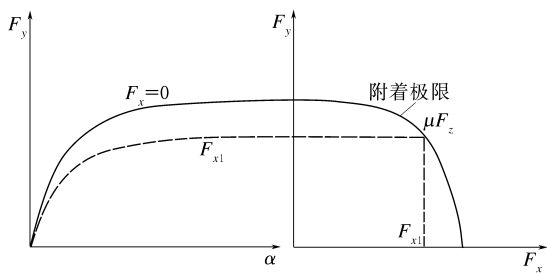


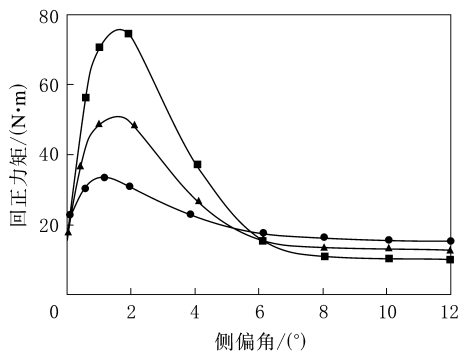
图 11 轮胎的切向力与侧向力和侧偏角的关系

施加一个切向力 F_x ,为了保证车辆的操控稳定性,相应的轮胎侧偏角就需要增大。

3.3 回正力矩

由于轮胎接地侧向压力在接地面内分布不均匀,如果假定车辆行驶方向为前方,则轮胎接地面前端接地侧向压力较小,而在后端较大,从而造成轮胎侧向反作用合力的作用中心处于印痕几何中心的后方,偏离距离称为轮胎的拖距。拖距的存在使侧向力与侧向反力的合力形成一个绕 z 轴的力矩,使轮胎回复原来的位置,保证车轮稳定地直线行驶,称为回正力矩。回正力矩是用来评估车辆行驶稳定性的重要参数。

轮胎充气压力为 530 kPa,平台的移动速度为 $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,分别施加负荷 5,10,15 kN,测试得到的轮胎回正力矩与侧偏角的关系曲线如图 12 所示。



注同图 6。

图 12 轮胎回正力矩与侧偏角的关系曲线

从图 12 可以看出,当侧偏角为零时回正力矩并不为零,随着侧偏角的增大回正力矩增大,当侧偏角增大到达一定值时,回正力矩达到峰值,然后开始减小。负荷对轮胎回正力矩的影响较为明显,随着负荷的增大,回正力矩的峰值增大,同时与回正力矩峰值对应的侧偏角也增大。

3.4 残余回正力矩

轮胎的带束层残余回正力矩(PRAT)是评价车辆行驶稳定性、安全性及舒适性的重要指标, PRAT 与轮胎轮廓、花纹设计及带束层结构设计参数密切相关。由于子午线轮胎有多层带束层,各带束层之间角度不同且相交成不对称的带束层组件,当其承受简单的拉伸负荷时,带束层组件之间产生剪切、弯曲及扭转等复杂的力学特性。当轮胎承受负荷及自由滚动时,由于轮胎形状在接地区域由环面逐渐变平导致轮胎承受侧向及周向的剪切应力,同时由于带束层的张力产生额外的平面剪切。上述的剪切应力作用到花纹块后使花纹块产生耦合反作用力。因此,即使轮胎直线匀速行驶时同样会有侧向力及回正力矩的存在,带束层角度效应是子午线轮胎的固有特性,导致轮胎在侧偏角为零时的侧向力和回正力矩不为零。

车辆企业一般根据汽车的适配市场设计某款车辆的残余回正力矩(VRAT),该力矩确定后轮胎生产企业需要根据该 VRAT 设计轮胎的 PRAT,并使轮胎的 PRAT 值与 VRAT 值很好地匹配。在充气压力为 530 kPa、速度为 20 km·h⁻¹的条件下,利用 FEA2 模型得到的轮胎侧向力及回正力矩与侧偏角的关系曲线如图 13 所示。

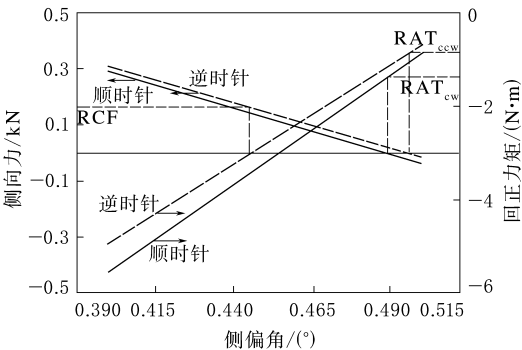


图 13 轮胎残余回正力矩计算示意

由于 PRAT 与带束层的角度有很大关系,因此分别计算了轮胎顺时针和逆时针旋转状态的数据,图 13 中 RAT_{cw} 和 RAT_{ccw} 分别为轮胎顺时针和逆时针旋转时当侧向力为零时的回正力矩,称为残余回正力矩;RCF 为轮胎的残余侧向力(回正力矩为零时的侧向力),轮胎的 PRAT 为

RAT_{cw} 与 RAT_{ccw} 二者之和的一半,锥度效应残余回正力矩(CRAT)为这二者之差的一半。

采用 FEA1 和 FEA2 两个有限元模型计算得到的 PRAT 和 CRAT 值如表 1 所示。从表 1 可以看出,轮胎的 PRAT 值差距较大,而 CRAT 值很接近。分析认为,CRAT 主要由轮胎生产制造过程中的系统误差引起,如果不考虑两个模型中花纹的差异,其结果应该近似一致,而 PRAT 主要与轮胎的设计参数有关,也就是说取决于轮胎结构、花纹等设计参数,因此两个模型的计算结果差异较大。

表 1 轮胎带束层残余回正力矩 N·mm

项 目	FEA1	FEA2
PRAT	729.256 0	1 140.181 9
CRAT	269.191 2	268.597 3

4 结语

对 395/85R20 TRY66 轮胎纯侧偏试验及仿真结果进行了对比研究。随着公司设备的逐步完善,后续将开展轮胎的侧倾及侧偏侧倾复合工况的试验及仿真技术的研究工作。从本研究的讨论看,仿真手段在轮胎设计中起着重要的作用,特别是在轮胎量产之前参与车辆研发的初级阶段,仿真方法可作为有力的切入手段。为了更好地改善车辆的驾驶性能,轮胎和汽车企业应该在产品设计阶段展开密切合作,开展底盘性能及车辆与轮胎匹配的研究,设计出更有针对性的产品。轮胎企业也要适时开展车辆与轮胎匹配性能的研究工作,特别是在轮胎侧偏特性试验方法及仿真手段方面进行开创性研究。

参考文献:

[1] 高明,张则高. 215/45R17 轿车子午线轮胎侧偏特性仿真分析[M]. 轮胎工业,2011,31(4):208-209.
[2] Herron Q J, Sansalone J R, Mars K H, et al. Validation of a Steady-state Transport Analysis for Rolling Treaded Tires [J]. Tire Science and Technology, 2007, 35(3): 183-208.
[3] Lazeration J J. An Investigation of the Slip of a Tire Tread [J]. Tire Science and Technology, 1997, 25(1): 78-95.
[4] Manfred Mitschke, Henning Wallentowitz. 汽车轮胎动力学 [M]. 陈荫三,余强,译. 北京:清华大学出版社,2009:30-35.

Simulation and Experimental Study of Pure Cornering Based on 395/85R20 TRY66 Tire

GAO Ming, YU Hai-tao, ZHOU Peng-cheng, WU Chun-jing, YU Fei, TAN Ming-ming

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

Abstract: The steady loading and pure cornering performance of 395/85R20 TRY66 tires were simulated by using Abaqus finite element analysis software. Based on the simulation and experimental results, the relationship between the slip angle and cornering force, aligning torque of tire under inflation and loading conditions, and the influence of residual aligning torque in belt ply and residual cornering force on the vehicle handling stability and safety were discussed. The simulation technology was very useful in the initial stage of tire product design.

Key words: radial tire; cornering force; slip angle; aligning torque; friction circle; finite element analysis

飞劲轮胎参与道路旅行

中图分类号: TQ336.1; F27 文献标志码: D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com) 2013 年 8 月 19 日报道:

飞劲轮胎公司正在参与社交媒体发起的道路旅行活动,以展示其 ZIEX ZE-914 Ecorun 系列轮胎(见图 1)的燃油效率。此次道路旅行始于 2013 年 8 月 19 日,目的地由飞劲轮胎的 Facebook 粉丝选定。



图 1 ZIEX ZE-914 Ecorun 系列轮胎

飞劲公司声称,此次道路旅行也有助于人们将飞劲品牌作为日常高性能轮胎的选择。

美国汽车改装杂志《Import Tuner》的编辑也参与了此次旅行,驾驶安装了飞劲轮胎的 1993 年产本田 Civic VX(VTEC-E)车。

飞劲公司表示,这辆车有 20 年历史的车经过改装,包括发动机、悬架、动力和调谐系统,并减小质量,从而使阻力系数减小,同时安装了低滚动阻力轮胎,以期使单位燃油行驶里程显著提高,燃料效率增幅超过 20%。

飞劲主管市场的副总裁 Andrew Hoit 表示,这次旅行将社交媒体的力量和 ZIEX ZE-914 系列轮胎整合,既是一个有趣的事,也是针对燃油效率的一项重大研究。公司期望通过 Facebook, Twitter 和 Instagram 的粉丝引导南部和西南部市民使用飞劲轮胎;同时希望 ZE-914 Ecorun 系列轮胎能赢得相当数量的关注。

飞劲公司声称, ZIEX ZE914 ECORUN 系列轮胎属于交叉车型轮胎,设计时采用了低滚动阻力胶料,可以降低燃油消耗。 ZIEX ZE914 ECORUN 系列轮胎的特点是采用不对称胎面花纹,有 4 条直而宽的周向花纹沟槽以及 2 条高刚性的条形花纹提供抗水滑能力,具有良好的干湿路面制动稳定性。轮胎布满花纹沟和刀槽花纹,使胎面磨耗均匀性和驾驶舒适性最佳,同时提供更大的牵引性能。 ZIEX ZE914 ECORUN 系列轮胎目前上市规格为 15~18 英寸,速度级别包括 H, V 和 W。

(赵 敏摘译 吴秀兰校)