

子午线轮胎稳态滚动的有限元分析

蒋丰璘

(双钱集团股份有限公司 轮胎研究所, 上海 200245)

摘要:以子午线轮胎 11.00R20 为例,考虑轮胎变形的几何非线性以及轮胎与地面、轮胎与轮辋的大变形非线性接触等,建立子午线轮胎稳态滚动的有限元分析模型。对轮胎进行了静负荷工况和稳态滚动工况下的受力和接地压力分析,并提取轮胎的滚动半径。结果表明:在相同角速度下,纵向摩擦力的值随着摩擦因数的增大而增大;随着角速度的增大,轮胎侧向摩擦力先增大后减小;制动和牵引状态下,地面对轮胎的摩擦应力分布很不均匀,制动状态时,高摩擦应力区向与运动方向相反的方向扩展,牵引状态时,高摩擦应力区向运动方向扩展。

关键词:子午线轮胎;稳态滚动;有限元分析

中图分类号:TQ336.1;U463.341⁺.6;O241.82 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-8171(2015)10-0586-06

轮胎是汽车的主要配件,其作用主要是支撑车辆的负荷,向地面传递驱动力、制动力和转向力,承担车辆缓冲减震等功能,同时对汽车的乘坐舒适性、操纵性、安全性和经济性等方面都产生重要影响^[1]。轮胎力学特性研究是汽车轮胎学的核心内容,可以指导轮胎设计人员更好地改进结构、优化设计和提高性能。

本工作基于 Abaqus 有限元分析软件,以子午线轮胎 11.00R20 为例,考虑轮胎变形的几何非线性以及轮胎与地面、轮胎与轮辋的大变形非线性接触等,建立子午线轮胎稳态滚动的有限元分析模型。对轮胎进行了静负荷工况以及稳态滚动工况下的受力和接地特性分析等,并提取了轮胎的滚动半径。

1 模型建立

1.1 材料模型

轮胎是由多种材料组成的复合体,包括橡胶、钢丝以及帘线-橡胶复合材料。轮胎中的胎体帘布和带束层均为帘线-橡胶复合材料,采用目前运用广泛的 Rebar 模型来模拟。Rebar 模型可以将多个帘布层表示在同一个单元内,且不会增加自由度,同时参数的测定简便可靠。橡胶材料没有

采用超弹性材料模型,而是采用泊松比较大的弹性材料进行计算。

1.2 边界条件

传统计算中通常忽略轮辋,在胎圈处施加相应的边界条件,这样减小了计算收敛的难度,但是难以准确描述胎圈部位的应力分布。本工作使用接触边界条件对轮胎进行从装配到滚动工况的一系列计算。将轮辋和路面简化为解析刚体,轮胎与轮辋、轮胎与地面之间的接触采用有限滑移法^[2]描述。轮胎与轮辋和轮胎与地面之间的摩擦因数分别为 0.3 和 0.7。

1.3 负荷工况

(1)充气工况。用均布负荷的方式施加,作用在轮胎内表面上,充气压力为 930 kPa。

(2)静负荷工况。通过路面相对于轮胎轴心的作用力来实现,即给路面施加一个集中力 35 500 N。

(3)稳态滚动工况。通过控制轮胎的转速(角速度)来实现。

(4)自由滚动工况。通过控制轮胎的转矩来实现。

2 结果与讨论

2.1 轮胎滚动半径的确定

自由半径为轮胎空载时的半径;静力半径为轮胎在径向负荷作用下,轮胎中心与道路接触面

之间的距离;滚动半径为轮胎行驶时的半径。滚动半径可采用实际测试方法得到,即利用车轮转动圈数与实际车轮滚动距离之间的关系来换算:

$$r = \frac{S}{2\pi n}$$

式中, r 为滚动半径, n 为车轮转动圈数, S 为转动 n 圈时车轮滚动的距离。

此外,也可以通过有限元模拟的方法得到轮胎的滚动半径。假设轮胎以 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 的速度在平坦的硬质路面上直线行驶,已知轮胎自由半径为 542 mm ,静负荷工况下的轮胎静力半径为 511.8 mm 。而轮胎的滚动半径在轮胎自由半径与静力半径之间,因此,可以估计轮胎自由滚动发生在角速度为 $30.75\sim 32.56\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间的时候。因此选择角速度为 $30\sim 33\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 的区间范围,从而确保在角速度为 $30\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,轮胎处于完全制动状态;而在角速度为 $33\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,轮胎处于完全牵引状态。因而在完全制动与完全牵引之间获得一系列的稳态解。以轮胎转矩为零来模拟轮胎的自由滚动过程。不同角速度时,轮胎中心轴的转矩如图 1 所示。

在此基础上进一步进行精确搜索,得到不同角速度时轮胎中心轴的转矩值,如图 2 所示。由图 2 可知,轮胎自由滚动时的角速度为 $31.309\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$,从而得到轮胎的滚动半径为 532.33 mm 。

2.2 上、下断面骨架材料轴力分布

静负荷工况与稳态滚动工况下轮胎上、下断面(接地断面)的骨架材料轴力分布曲线如图 3 和 4 所示。由图 3 和 4 可以看出,轮胎在静负荷工况和稳态滚动工况下,其骨架材料受力趋势一致,大小相差不大。因此,在进行骨架材料受力分析时,只需模拟其静负荷工况即可,以提高计算效率。

2.3 接地分析

2.3.1 纵向摩擦力与转动角速度的关系

不同摩擦因数下纵向摩擦力与角速度的关系如图 5 所示。由图 5 可见,在相同角速度下,纵向摩擦力的值随着摩擦因数的增大而增大。

2.3.2 侧向摩擦力与转动角速度的关系

不同摩擦因数下侧向摩擦力与角速度的关系如图 6 所示。从图 6 可以看出:随着角速度的增

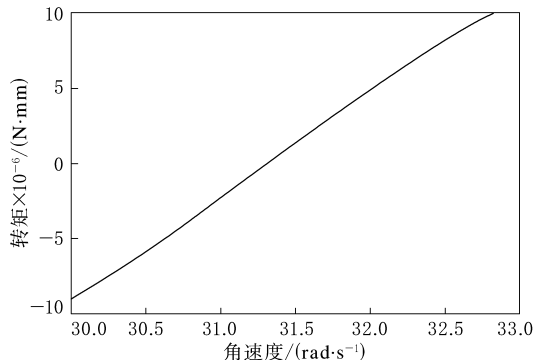


图 1 不同角速度下的转矩

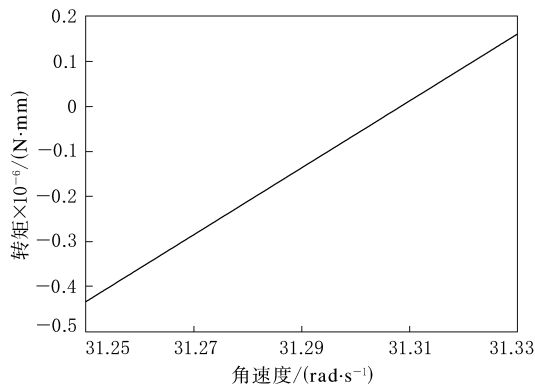


图 2 不同角速度下的转矩(精确搜索)

大,轮胎侧向摩擦力经历了先增大后减小的过程;侧向摩擦力最大值发生在驱动工况下,且随着摩擦因数的增大而增大。

2.3.3 纵向摩擦应力分布

轮胎在 $60\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 行驶速度下,制动和牵引时轮胎接地面的纵向摩擦应力分布如图 7 所示。从图 7 可以看出:完全制动状态时,地面对轮胎的摩擦应力分布很不均匀,高摩擦应力区向与运动方向相反的方向扩展;完全牵引状态时,地面对轮胎的摩擦应力分布也很不均匀,高摩擦应力区向运动方向扩展。

2.3.4 法向接地应力分布

轮胎在各种状态下的法向接地应力分布如图 8 所示。由图 8 可见:在制动状态下,高应力区向与运动方向相反的方向扩展;在自由滚动状态下,高应力区向运动方向扩展,当下沉量增大时,这种现象将更加明显;在牵引状态下,接地压力分布与自由滚动状态相比,高应力区向运动方向移动更明显,这是由于在驱动状态下,滚动阻力更大。

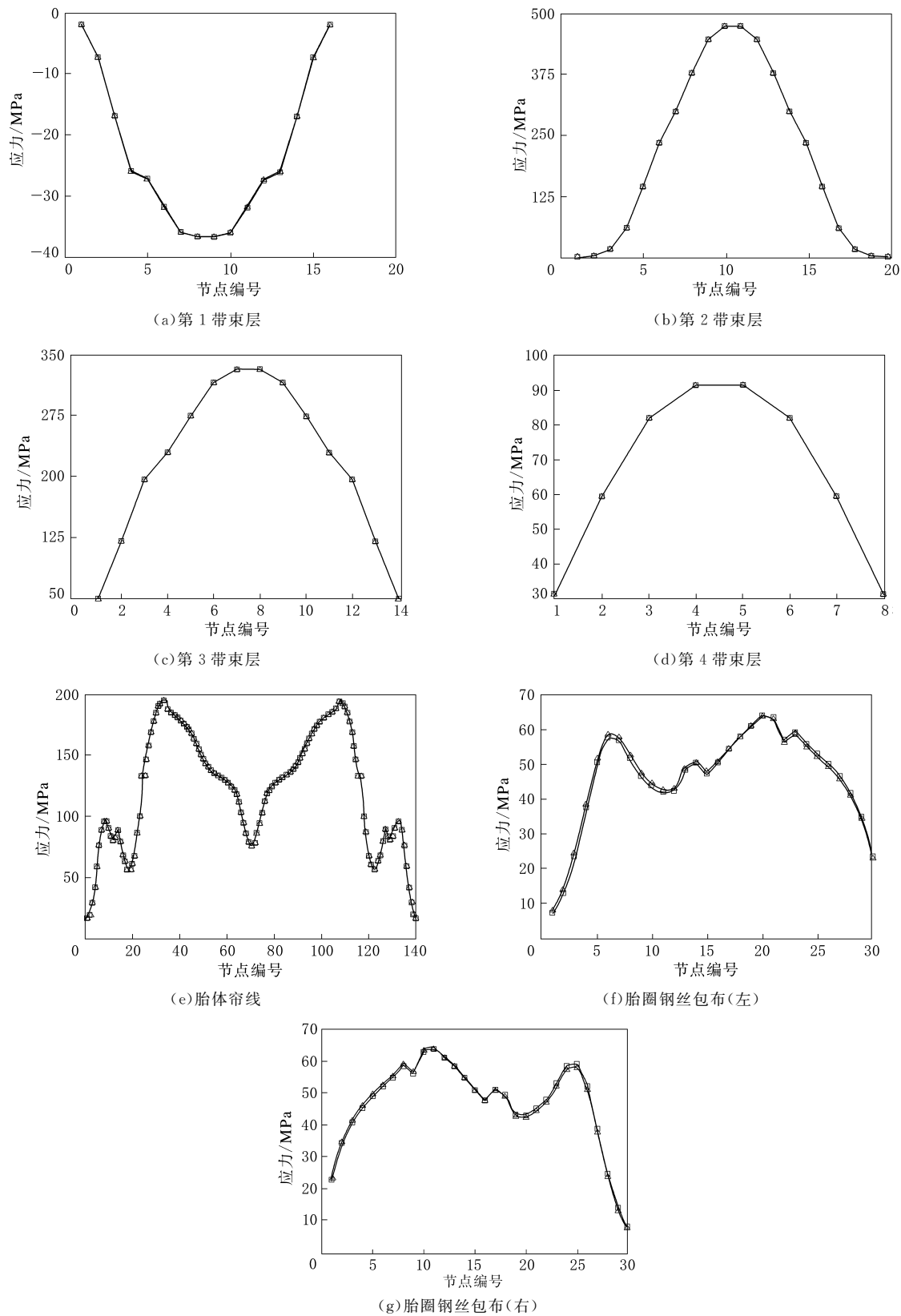
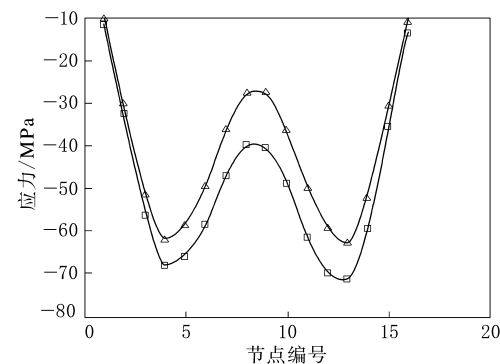
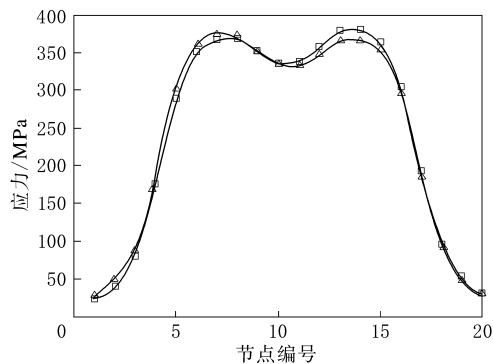


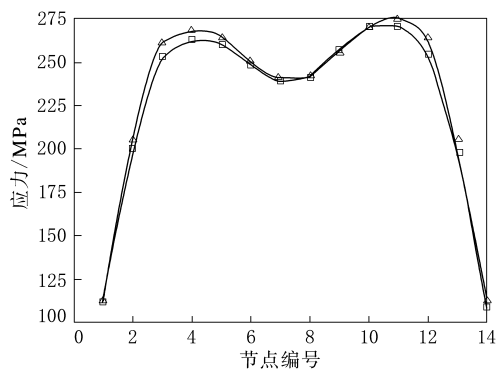
图 3 上断面骨架材料轴力分布曲线



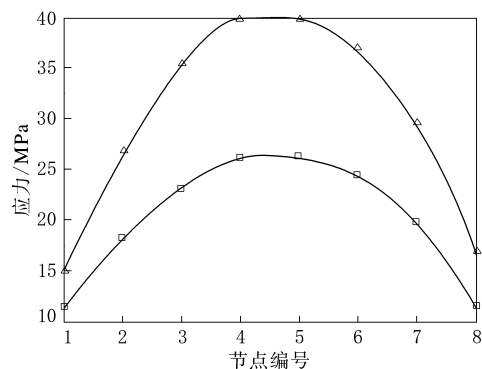
(a) 第 1 带束层



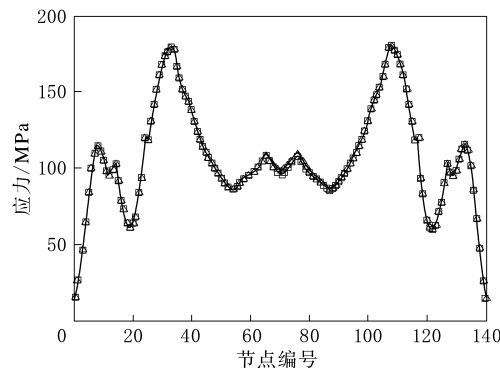
(b) 第 2 带束层



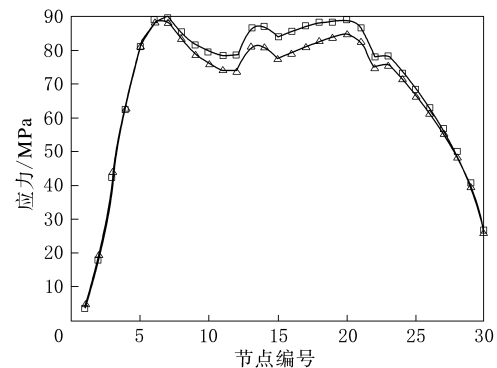
(c) 第 3 带束层



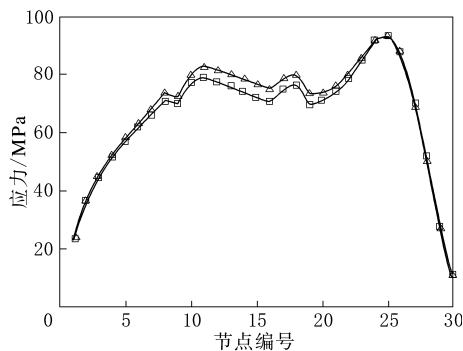
(d) 第 4 带束层



(e) 胎体帘线



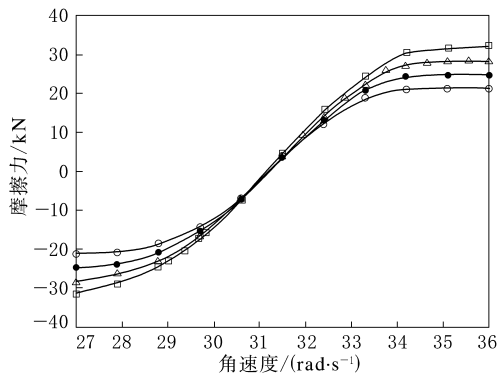
(f) 胎圈钢丝包布(左)



(g) 胎圈钢丝包布(右)

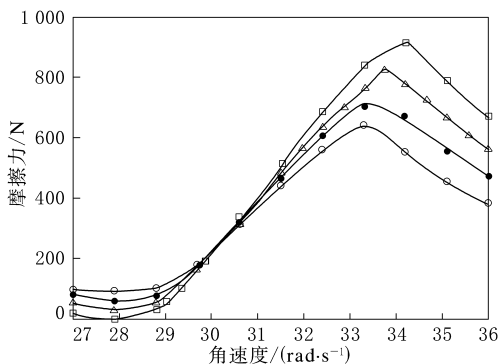
注同图 3。

图 4 下断面(接地断面)骨架材料轴力分布曲线



摩擦因数: ○—0.6; ●—0.7; △—0.8; □—0.9。

图5 不同摩擦因数下纵向摩擦力与转动角速度的关系



注同图5。

图6 不同摩擦因数下侧向摩擦力与转动角速度的关系

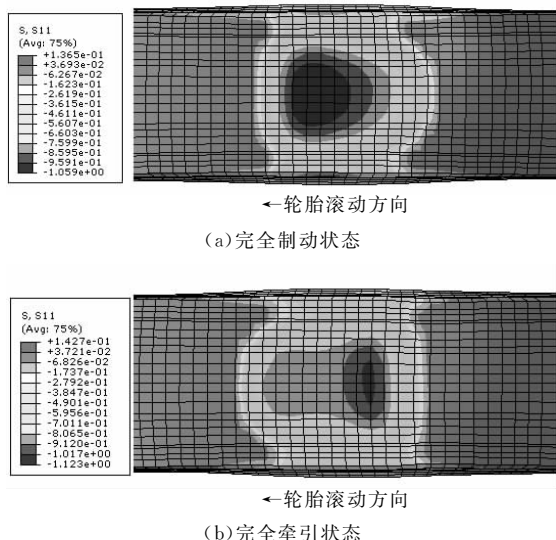


图7 轮胎接地面的纵向摩擦应力分布云图

3 结语

利用 Abaqus 软件建立轮胎稳态滚动的有限元模型。在模型计算中,考虑了轮辋的装配、轮胎

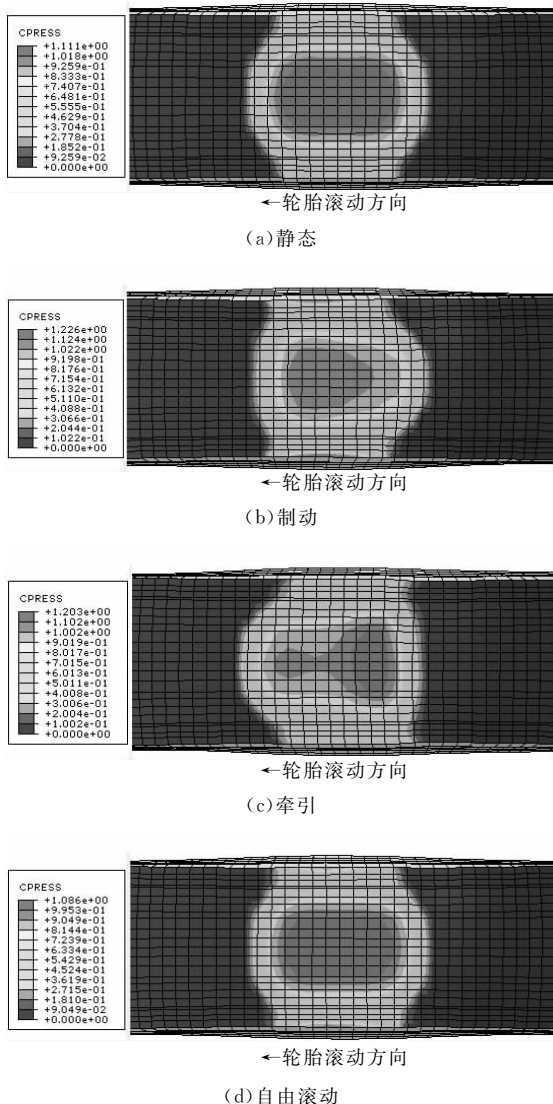


图8 轮胎法向接地应力分布云图

的静态负荷施加、自由滚动、完全制动和牵引过程,通过模拟得出如下结论。

(1)在相同角速度下,纵向摩擦力的值随着摩擦因数的增大而增大。

(2)随着角速度的增大,轮胎侧向摩擦力先增大后减小;侧向摩擦力最大值发生在驱动工况下,且随着摩擦因数的增大而增大。

(3)制动状态时,地面对轮胎的摩擦应力分布很不均匀,高摩擦应力区向与运动方向相反的方向扩展;牵引状态时,地面对轮胎的摩擦应力分布很不均匀,高摩擦应力区向运动方向扩展;自由滚动状态下,高应力区向运动方向扩展。

研究结果有利于了解轮胎的力学特性,以便

进一步优化轮胎结构,提高轮胎性能。

参考文献:

[1] 庄继德. 现代汽车轮胎技术[M]. 北京:北京理工大学出版

社,2001.

[2] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006:137-138.

收稿日期:2015-04-13

Finite Element Analysis of Steady-state Rolling of Radial Tire

JIANG Feng-lin

(The Tyre Research Institute of Double Coin Holdings Ltd,Shanghai 200245,China)

Abstract: Using 11.00R20 radial tire as an example,a finite element model of steady-state rolling radial tire was established,considering the geometric nonlinear deformation of the tire and the large deformation in nonlinear contact between the tire and ground,as well as the tire and rim. The axial force distribution,contact pressure distribution and friction stress distribution were studied for the tire with standard pressure and load in the case of static loading and steady state rolling,and the rolling radius was obtained. The results showed that,at the same angular velocity,the absolute value of longitudinal friction force increased as the friction coefficient increased. As the angular velocity increased,the side friction force increased at first and then decreased. Under braking and traction state,the ground tire friction stress distribution was quite non-uniform,the high friction stress area was extended to the opposite direction of the movement direction under the braking condition,and the high friction stress area was extended to the movement direction under the traction condition.

Key words: radial tire;steady-state rolling;finite element analysis

Carlstar 集团推出 Carlisle Trail Pro 轮胎

中图分类号:TQ336.1;U463.341 文献标志码:D

美国《现代轮胎经销商》(www.moderntire-dealer.com)2015 年 8 月 13 日报道:

Carlstar 集团有限责任公司推出用于全地形车辆、运输车和农夫车的 Carlisle Trail Pro 轮胎(见图 1)。

公司称,Trail Pro 轮胎即使在混合地形下仍然能够提供平坦流畅的驾驶体验。无向自洁式的 Trail Pro 轮胎胎面花纹兼顾了前方及侧面良好的牵引性能与最适宜的制动性能,并提供了优异的胎面磨损性能和抗切割性能。有圆齿的胎肩还提供了抗刺扎保护并有助于排泥。

“实验室及实地测试表明,Trail Pro 轮胎像岩石一样坚固,在崎岖路面行驶时也能提供出众的驾驶品质。”动力户外产品市场拓展经理 Jennifer Weber 称。



图 1 Carlisle Trail Pro 轮胎

Trail Pro 轮胎的通用规格有:25×10-12 NHS,25×8-12 NHS,26×9-12 NHS,26×11-12 NHS,27×9-14 NHS,27×11-14 NHS。12 英寸轮胎具有 4 层级坚固的胎体以提高耐久性能。结实的 14 英寸轮胎具有 6 层级结构以提高抗刺扎性能。

(马 晓摘译 许炳才校)