

计及胎面花纹的子午线轮胎接地性能有限元分析

赵 鹏,丁玉梅,阎 惠,杨卫民*

(北京化工大学 轮胎设计与制造工艺国家工程实验室,北京 100029)

摘要:采用 Abaqus 软件建立带有部分胎面花纹的三维轮胎有限元模型,模拟研究不同工况下子午线轮胎的接地性能。研究表明:轮胎在静负荷和自由滚动工况下应力分布相似,沿轮胎中分面基本对称,最大应力在胎肩部位;在驱动工况下,高应力区向轮胎前进的反方向扩展,制动工况与此相反;在斜坡路面的应力分布与自由滚动时相似,但最大应力有所提高;侧偏滚动工况下的应力主要分布在轮胎的中分面及与侧偏方向相同的一侧,应力值明显提高。

关键词:子午线轮胎;花纹;自由滚动;接地性能;有限元分析

中图分类号:U463.341⁺.6;O241.82 **文献标志码:**B **文章编号:**1006-8171(2013)12-0712-06

轮胎是汽车的重要部件之一,它直接与路面接触,起支撑作用,保证车轮与路面有良好的附着性,提高汽车的牵引性、制动性和通过性。对轮胎接地问题进行准确的有限元分析可以进一步确定轮胎和车辆的使用性能,对优化轮胎结构、提高使用寿命和操纵安全性有重要意义^[1]。由于橡胶轮胎复杂的材料非线性、结构非线性和接触非线性,大大增加了有限元分析的难度,因此传统轮胎有限元分析往往忽略胎面花纹或只考虑周向花纹沟槽^[2-5]。然而,轮胎花纹直接与地面接触,地面与轮胎的相互作用通过花纹传递到胎体,可见花纹是影响轮胎接地性能的关键因素,忽略胎面花纹的分析结果与实际情况会有很大差别,并且花纹的相关性能得不到体现。本研究基于 Abaqus 有限元分析软件,对带有复杂胎面花纹的子午线轮胎在不同工况下的接地性能进行分析,为胎面花纹优化和轮胎性能评价提供依据。

1 模型建立

1.1 橡胶材料和帘线模型

橡胶是一种不可压缩或近似不可压缩的超弹性材料,其应力-应变关系表现出明显的非线性,使描述橡胶力学行为的本构模型十分复杂。工程

上常用的本构模型主要是 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型^[6]。

考虑轮胎的大变形以及 Yeoh 模型对较复杂变形状态具有良好的预报能力,本研究确定采用 Yeoh 模型,其应变能密度函数(W)为

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 + C_{30}(I_1 - 3)^3$$

式中, $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$,为主伸长比的第一不变量, $\lambda_i (i=1,2,3)$ 为 3 个主伸长比, C_{10} , C_{20} 和 C_{30} 为单轴拉伸或压缩、平面拉伸和等轴拉伸等简单实验所测数据拟合的材料常数。

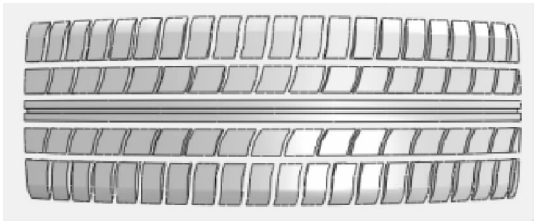
相对于轮胎中的橡胶材料,各种帘线所占的体积比很小,却分担了轮胎的大部分负荷,橡胶-帘线复合材料是各向异性材料,直接采用 Rebar 单元进行模拟是一种很有效的方法^[7]。Rebar 单元具有单向刚度,是处理带有加强筋的复合材料的一种理想单元。采用 Rebar 单元可以直接定义帘线的间距、横截面积、角度和模量等参数,在同一实体单元内还可以根据实际情况定义多个 Rebar 加强层。

1.2 胎面花纹部分建模

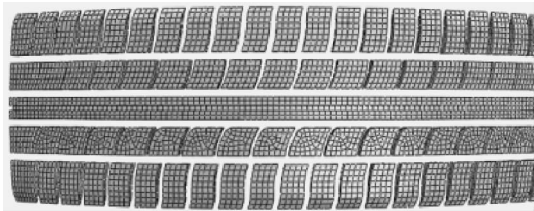
胎面花纹部分通过三维绘图软件 Pro/E 进行建模。考虑到本研究主要是对轮胎的接地性能进行分析,为了减小计算量,提高计算效率,只建立与地面接触的部分胎面花纹模型,并忽略花纹块上的刀槽,如图 1(a)所示。然后将胎面花纹导入到 Abaqus 软件中,进行网格划分和材料属性定义,如图 1(b)所示。

作者简介:赵鹏(1987—),男,山东淄博人,现在北京市中科科仪股份有限公司工作,硕士,主要研究方向为轮胎力学与噪声分析。

* 通信联系人



(a) 初始模型



(b) 网格模型

图 1 部分胎面花纹的初始与网格模型

1.3 轮胎有限元模型

根据 195/65R15 轮胎的实际结构,考虑胎面胶、胎侧胶、三角胶等材料,对帘线、胎体和钢丝圈采用 Rebar 单元,通过 Embed 功能嵌入到胎体中。在 Abaqus 软件中生成轴对称断面模型,利用 Symmetric Model Generation 功能,对接地部分进行网格细分,生成轮胎三维空间模型。将花纹与胎体使用绑定约束组合在一起,形成带有胎面花纹的轮胎有限元模型。为了简化计算,将轮辋和路面视为刚体,如图 2 所示。



图 2 轮胎三维有限元模型

1.4 边界条件定义

轮胎的接触主要包括轮胎与路面和轮胎与轮辋的接触。早期为了减小计算收敛的难度,通常将轮胎与轮辋的接触简化为固定边界条件。本研究采用接触边界条件对轮胎进行从装配到滚动工况的计算,接触摩擦因数设为 0.8。轮胎与地面的摩擦因数受诸多因素的影响,为了简化计算,本研究轮胎与地面的接触摩擦因数设为 0.8。

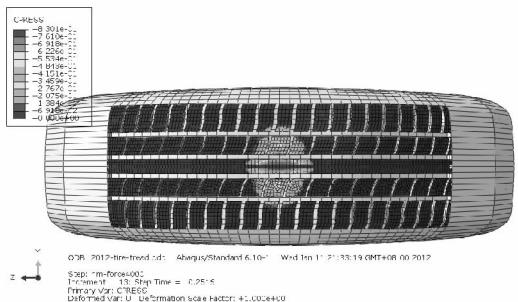
1.5 载荷工况

- 充气工况:施加在轮胎内表面,并且轮胎变形过程中该压力始终垂直作用于内表面;
- 静负荷工况:通过给轮辋施加一定位移或一定的作用力实现;
- 稳态滚动:通过轮胎的转速控制;
- 自由滚动:通过轮胎的扭矩控制;
- 侧偏状态:通过对自由滚动的轮胎施加侧向力实现。

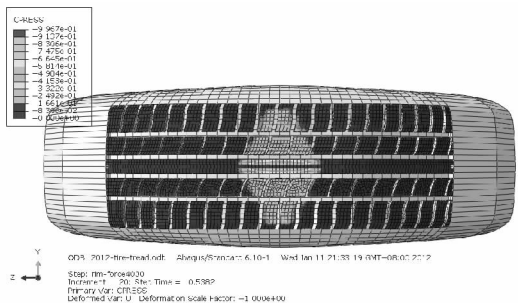
2 计算结果与讨论

2.1 静负荷工况下接地分析

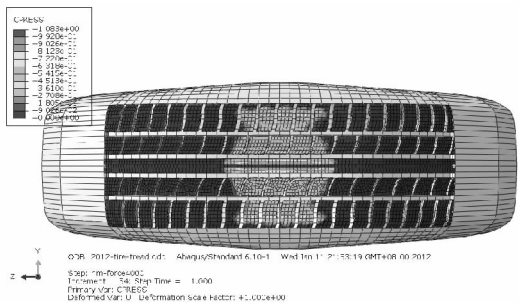
不同负荷下轮胎接地应力分布如图 3 所示。



(a) 1.060 kN



(b) 2.512 kN



(c) 3.982 kN

图 3 不同负荷下轮胎接地应力分布

静负荷工况下,轮胎与路面接触区域的法向应力分布极不均匀,胎肩部位和胎冠中部的应力较大。轮胎接触地面时,胎冠中部的接触应力最大,随着负荷增大,接触区域的高应力区由胎冠中部逐渐向胎肩部位扩展,最后在胎肩部位达到最大值。

轮胎接地时高应变能区位于胎肩处,如图4所示。

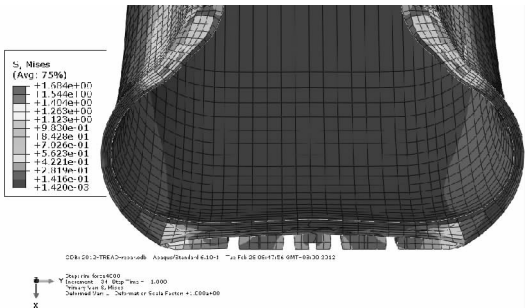


图4 静负荷工况下轮胎接地等效应力分布

从图4可以看出,轮胎滚动过程中的周期性变形使胎肩处由于滞后损失产生的热量较多,而胎肩较厚,橡胶又是热的不良导体,因此该部位散热较慢,致使该部位容易出现脱层和开裂等。

2.2 滚动工况下接地分析

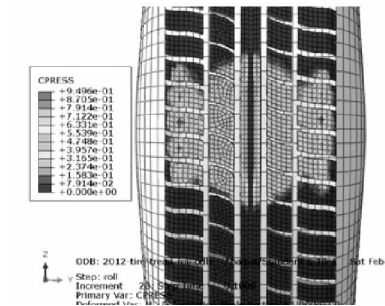
2.2.1 平直路面上轮胎滚动分析

行驶速度为 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,几种工况下轮胎接地应力分布如图5所示,轮胎接地法向应力沿圆周方向的分布曲线如图6所示。

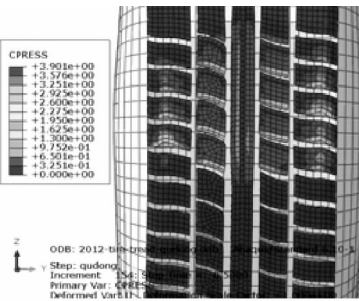
轮胎在自由滚动时,其接触应力的分布与静负荷工况下相似,高应力区分布在胎肩部位和胎冠中部,应力相对于胎冠中线基本呈对称分布并有向前扩展的趋势,但由于轮胎滚动时受惯性力的影响,相对于静负荷工况最大应力有所减小。在驱动和制动阶段,轮胎与地面的接触应力急剧增大,分布更不均匀。驱动时,高应力区向轮胎前进的反方向扩展,在接地区后部达到最大值;与此相反,制动时高应力区向前进方向扩展,在接地区前部达到最大值。

在驱动和制动阶段,胎面花纹发生严重变形并产生高度应力集中现象,如图7所示,这与接地处网格花纹疏密有关。由于轮胎整体模型计算的复杂性,未对该部位进行网格细分,因此分析结果可能与实际情况有一定差距,但其应力分布可反

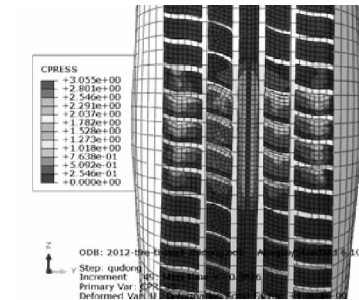
映出驱动和制动工况下轮胎的磨损最大,频繁启动、制动会缩短轮胎的使用寿命。



(a)自由滚动



(b)驱动



(c)制动

图5 几种工况下轮胎接地应力分布(轮胎滚动方向↑)

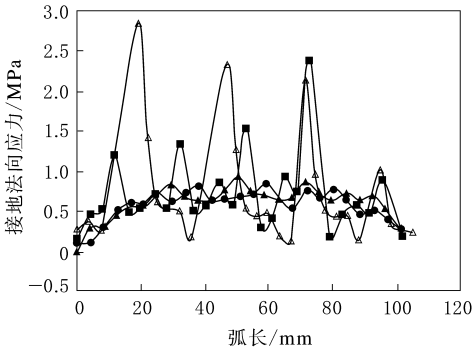
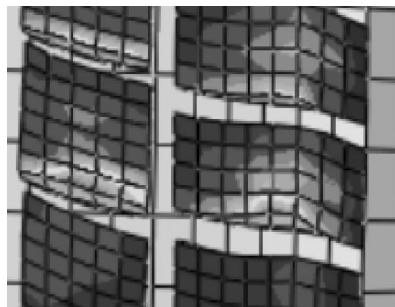
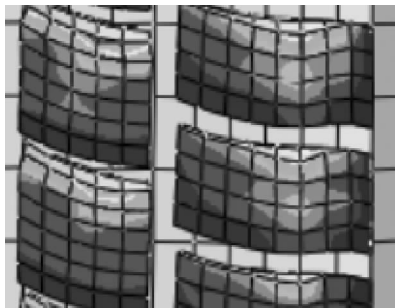


图6 轮胎接地法向应力沿周向的分布



(a)驱动



(b)制动

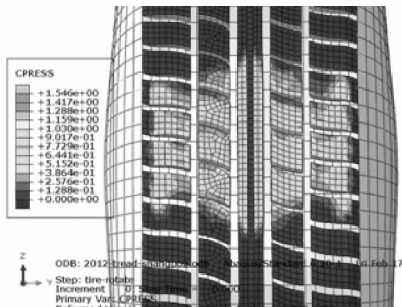
图 7 胎面花纹块变形及局部应力分布

2.2.2 倾斜路面上轮胎滚动分析

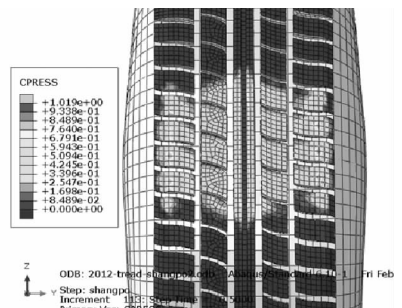
轮胎在斜度为 15° 路面上以 $20\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的速度滚动,其各种工况下的接地应力分布如图 8 所示。倾斜路面上轮胎在静负荷工况下的接地应力分布与平直路面基本相同,高应力区分布在胎肩和胎冠中部,但因有沿路面使轮胎下滑的分力,所以接地区最大应力值增大。上坡和下坡工况下,最大应力扩展到胎肩部位,最大应力高于平直路面。因此,相对平直路面上的滚动,轮胎在上、下坡阶段磨损更严重。值得注意的是,轮胎以相同的速度上、下坡时,下坡阶段的最高应力比上坡阶段大,其磨损也更严重。

2.2.3 轮胎侧偏滚动分析

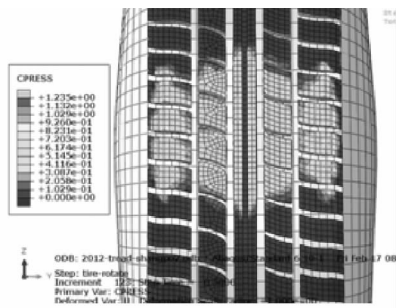
轮胎的侧偏状态对磨损有很大的影响,在侧向力为 2.5 kN 、行驶速度为 $20\text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,轮胎的侧偏变形和侧偏位移如图 9 和 10 所示。在侧偏力作用下,轮胎在侧向会偏离原断面中线一定距离,使轮胎的接地印痕长轴与胎冠中心线不重合,致使轮胎的行驶方向与滚动方向不一致。轮胎的侧向位移随侧向负荷增大而增大,在一定侧向负荷范围内两者呈线性关系。随着负荷继续增大,侧向位移变化加快,甚至出现侧向滑移。



(a)斜坡静负荷



(b)上坡



(c)下坡

图 8 倾斜路面各种工况下轮胎的接地压力分布

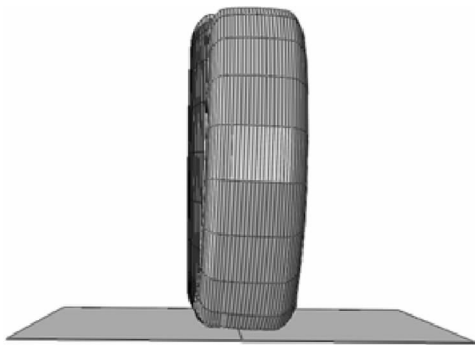


图 9 轮胎侧偏变形(侧向力方向→)

轮胎在侧向力作用下,接地应力分布与自由滚动时有很大差异,如图 11 所示,应力主要分布在与轮胎侧向偏移同方向的一侧,接触区域呈侧

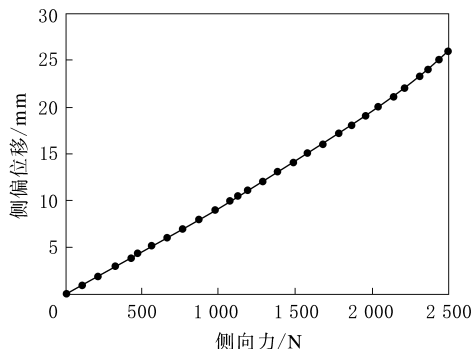
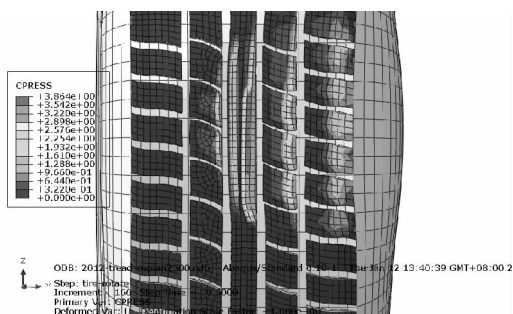
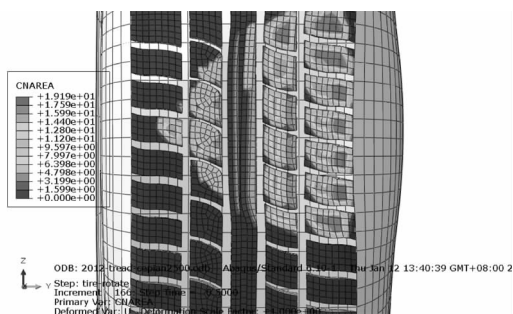


图10 轮胎侧偏位移曲线



(a) 应力分布



(b) 接触面积

图11 轮胎侧偏滚动的接触情况

(滚动方向↑, 侧向力方向→)

三角形形状,最大应力在中心沟槽的侧边上,且接触应力远大于轮胎自由滚动工况。因此,侧偏滚动对轮胎的单边磨损有严重影响,在侧偏状态下,给轮胎一个合适的侧倾角,有利于均衡接触应力分布,减轻磨损。

3 结语

本研究以 Abaqus 软件为平台,分析了带有部分复杂胎面花纹的子午线轮胎在各种工况下的接地情况,总结归纳了轮胎接地状态的法向应力分布规律。轮胎在静负荷和自由滚动工况下应力分布相似,沿轮胎中分面基本对称,最大应力在胎肩部位;在驱动工况下,高应力区向轮胎前进的反方向扩展,接触应力相对于自由滚动明显提高,制动工况与此相反;在斜坡路面上滚动时,其应力分布与自由滚动时相似,但最大应力有所提高;轮胎侧偏滚动工况下的应力分布与自由滚动时有明显差异,主要分布在轮胎中分面及与侧偏方向相同的一侧,应力值明显提高,容易造成轮胎的单边磨损。同时,轮胎花纹中的周向沟槽对轮胎的侧偏性能有很大影响。

本研究结果有利于对轮胎滚动过程中动态性能的深入了解,为胎面花纹结构优化和轮胎性能评价提供依据。

参考文献:

- [1] 辛振祥,邓涛,王伟. 现代轮胎结构设计[M]. 北京:化学工业出版社,2011:9.
- [2] Mir Hamid Reza Ghoreishy. Finite Element Analysis of the Steel Belted Radial Tire with Tread Pattern under Contact Load[J]. Iranian Polymer Journal,2006,15(8):667-674.
- [3] 尹伟奇,姚振汉,薛小香,等. 子午线轮胎稳态滚动有限元分析[J]. 橡胶工业,2005,52(7):389-395.
- [4] 束永平,陈秋红,郑建荣. 载重子午线轮胎稳态滚动有限元分析[J]. 华东理工大学学报,2008,34(6):902-907.
- [5] 葛金虎,王国林,应世洲,等. 载重子午线轮胎接地性能有限元分析[J]. 橡胶工业,2008,55(5):309-313.
- [6] 黄建龙,解广娟,刘正伟. 基于 Mooney-Rivlin 模型和 Yeoh 模型的超弹性橡胶材料有限元分析[J]. 橡胶工业,2008,55(8):467-472.
- [7] 李兵. 计及复杂胎面花纹的子午线轮胎结构有限元分析[D]. 合肥:中国科技大学,2008.

收稿日期:2013-06-16

Finite Element Analysis on Contact Performance of Radial Tire with Tread Pattern

ZHAO Peng, DING Yu-mei, YAN Hui, YANG Wei-min

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: A three dimensional tire finite element model with tread patterns was established by

using Abaqus software, and the contact performance of tire under different conditions were studied. The results showed that, the stress distribution of tire under static loading and free rolling conditions were similar, which was symmetric along the central line of the tire tread, and the maximum stress located in the shoulder of tire. On the driving condition, the high stress area extended towards the opposite direction of movement, while it extended towards the same direction of movement under the braking condition. The stress distribution of tire on a slope was similar with free rolling; however the maximum stress was higher. Under lateral rolling, the stress was mainly located in the central part of the tire tread and the side along the lateral direction, and the stress level increased significantly.

Key words: radial tire; tread pattern; free rolling; contact performance; finite element analysis

软控北美研发中心落户阿克隆

中图分类号: F27 文献标志码: D

2013 年 11 月 1 日, 软控股份有限公司(以下简称软控)北美研发中心在美国俄亥俄州阿克隆市举行成立仪式, 这是软控继 2009 年成立欧洲研发中心之后的第 2 个海外研发中心, 标志着软控全球研发体系更加完善。

软控北美研发中心将聚焦新产品、新技术的研发和创新, 结合行业技术发展趋势和市场需求进行产品规划和新产品的研发; 着力建设行业先进的实验室进行前沿技术研究, 使其成为新技术、新产品的开发基地; 积极吸纳行业人才; 关注行业动态, 更好地满足本地客户的需求, 实现与本地中高端客户的深入合作; 逐步发展成为行业领先的技术交流平台, 不断提升软控研究院的行业影响力。

北美研发中心的成立将有助于软控技术研发能力和创新水平的提升; 软控也将以此为平台为全球用户提供更加专业的技术和服 务, 匹配全球不同客户的需求, 继而为世界橡胶工业的升级发展贡献力量。

(软控股份有限公司 李令新)

一种具有胎圈结构改进的轮胎及其制造方法

中图分类号: TQ336.1 文献标志码: D

由广州市华南橡胶轮胎有限公司和广州丰力橡胶轮胎有限公司申请的专利(公开号 CN 103317973A, 公开日期 2013-09-25)“一种具有胎圈结构改进的轮胎及其制造方法”, 涉及的具有胎圈结构改进轮胎的制造方法为: ①在成型机上

制作圆筒形组合件; ②在圆筒形组合件上依次贴合加强层 a、加强层 b 和胎体帘布层, 或加强层 b、加强层 a 和胎体帘布层, 或加强层 b、胎体帘布层和加强层 a; ③将由支撑胶和钢丝圈组成的胎圈芯扣在胎体帘布层; ④在胎体帘布层上贴合胎肩垫胶; ⑤将在成型机带束鼓上贴好的冠部组件套在胎体帘布层正中央; ⑥充气、定型、反包、压合并制成胎坯; ⑦硫化。该制造方法可以显著提高轮胎的承载性能、抗疲劳性能和使用寿命, 从而保障行车安全。

(本刊编辑部 马 晓)

多功能多工位节能环保型轮胎试验机

中图分类号: TQ330.4⁺92 文献标志码: D

由北京化工大学申请的专利(公开号 CN 103323268A, 公开日期 2013-09-25)“多功能多工位节能环保型轮胎试验机”, 涉及的多功能多工位节能环保型轮胎试验机主要包括转鼓动力系统、加载测试系统、液压系统和控制系统。转鼓动力系统包括转鼓、转鼓支架、转鼓主轴、转鼓电动机和减速器。加载测试系统包括导轨电动机、螺杆、导轨、加载支架、滑杆、液压缸、轮胎座、爆胎失压保护装置、发电机滑块和轮胎发电机。该多功能多工位节能环保型轮胎试验机可实现 6 个工位相互独立的轮胎试验, 以高速耐久试验为主。轮胎带动轮胎发电机转动, 轮胎发电机发电, 产生的电量经过调整后输送回电网, 供转鼓电动机使用, 形成一个能量循环系统, 实现了节能环保。转鼓模块化结构设计可以模拟不同形式的路面, 并可实现不同路面形式的快速组合与更换。

(本刊编辑部 马 晓)