DOI: 10.3901/JME.2019.24.105

一种非充气机械弹性安全车轮的研究进展*

赵又群

(南京航空航天大学能源与动力学院 南京 210016)

摘要: 轮胎是汽车与路面之间接触并产生相互作用的唯一媒介,直接影响着汽车的操纵稳定性、行驶安全性及乘坐舒适性等。然而,传统充气轮胎往往存在爆鼓、爆胎、泄气以及胎压不稳等安全隐患,严重影响汽车行驶的安全性。为此,提出安全车轮基本概念,概述安全车轮的发展现状,阐述机械弹性安全车轮的结构和原理;介绍机械弹性安全车轮的数值计算模型、简化解析模型,以及相应的机械弹性安全车轮的垂向力、纵向力、侧向力、侧偏特性、侧倾特性、动态特性、响应特性、牵引特性、包容特性等的计算,和台架或者装车试验验证;研究结果揭示了机械弹性安全车轮的基本特性,为机械弹性安全车轮的研发与推广应用奠定一定的理论基础,期望促进非充气安全车轮的发展。

关键词: 主动安全; 安全车轮; 轮胎力学; 机械弹性安全车轮; 研究进展

中图分类号: U463; U461

Research Progress on Kind of Non-pneumatic Mechanical Elastic Safety Wheel

ZHAO Youqun

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: Tire is the only medium of contact and interaction between vehicle system and road surface, which directly affects the handling stability, driving safety and ride comfort of vehicle system. However, traditional pneumatic tires often have some hidden dangers, such as drum burst, tire burst, exhaust and unstable tire pressure, which seriously affect the safety of vehicle operation. The basic concept of run-flat tire (RFT) is defined, and the present research status of RFT and the practical significance of developing RFT are summarized. The structure and principle of the non-pneumatic mechanical elastic safety wheel (MES-wheel) are expounded, respectively. These models, including numerical calculation models and simplified analytical models, are introduced. Moreover, the various characteristics of MES-wheel, including the vertical force, longitudinal force, lateral force, cornering properties, camber performance, dynamic performance, response characteristic, tractive characteristic and enveloping properties were presented; the bench test and vehicle test are carried out to validate the results of the simulating calculation. The research results revealed the basic characteristics of MES-wheel. The MES-wheel is put forward, which established the basic theory to study and promote the idea of RFT developing during automotive field. Hopefully, it can boost the development of non-pneumatic safety wheel in the future.

Key words: active safety; RFT; tire mechanics; mechanical elastic safety wheel; present state and perspective

0 前言

轮胎是车辆行驶系统的一个关键部件^[1],同时也是车辆与路面产生相互作用的唯一部件,其基本功用是承载、产生地面作用力、缓冲地面激励等,同时影响车辆操纵稳定性、行驶平顺性、乘坐舒适性等方面性能^[2-4]。

为了提高轮式车辆在越野路面的通过性,科研与工程技术人员针对不同的越野路面设计出了多种越野轮胎,如椭圆形轮胎、拱形轮胎、沙地轮胎、冰雪路面轮胎、高越野专用轮胎、沙漠仿生轮胎等。通过分析上述轮胎的结构特征,可知它们都是通过增加轮胎断面宽度、减小高宽比、降低充气压力 and 设计特殊胎面花纹等方法提高轮胎接地面积,减小轮胎接地压强,从而保证轮式车辆具有较好的通过性。但是,对所有结构类型的越野轮胎而言,它们都存在一个共性的缺点,即易被尖锐物体刺穿导致泄气或爆裂,从而使车辆丧失机动性能。因此,研

* 总装备部探索研究重大(NHA13002)、国家自然科学基金(11672127)和中央高校基本科研业务费专项资金(NP2018403)资助项目。20180627 收到初稿,20190221 收到修改稿

究防爆防扎轮胎暨安全车轮技术具有重要的工程实用价值。

安全车轮技术是各种能确保车轮功能作用,改善和消除因车轮故障和失效而导致车辆失能安全隐患的车轮开发综合技术,安全车轮技术的概念是伴随着充气轮胎发展而形成的。安全车轮技术研究正在沿着充气型轮胎安全性能改善和采用非充气车轮结构来根本消除爆胎隐患两条技术路线发展。

1 安全车轮的发展

1.1 充气型轮胎安全车轮

采用充气轮胎的车辆在高速行驶时存在爆胎隐患,越野路面行驶存在刺破危险,严重影响车辆的行驶安全性和机动性。据统计,高速公路 46% 的交通事故是由轮胎发生故障引起的,仅爆胎一项就占轮胎事故总量的 70%,车辆时速在 160 km 以上发生爆胎造成的死亡率接近 100%^[5]。

为提高充气轮胎的各项性能,现已研发多种基于充气轮胎结构的安全轮胎,也称之为零压续跑轮胎^[6]。充气型轮胎安全车轮是在原有充气轮胎上的结构改进,主要分为自体支撑型、辅助支撑型、双重内腔型轮胎和自密封型轮胎四种类型^[7]。自体支撑型安全轮胎是通过加厚胎侧实现自体支撑,辅助支撑型安全车轮在原充气轮胎的内部附加支撑体,在充气轮胎泄气后由支撑体支撑车辆重量,实现泄气后的续驶功能。但是,自体支撑型安全轮胎胎侧变厚,轮胎刚度变大,车辆平顺性变差,另外还存在加工工艺复杂,散热难等关键问题。辅助支撑型安全车轮采用在轮胎内部安装支撑体的结构。在正常行驶状态下,内支撑体不参与车轮的受力,轮胎特性和传统充气轮胎一样;当轮胎被刺破泄气时,轮胎靠内部支撑体来实现车轮的支撑功能,保证车辆能正常行驶。但是,对该结构的车轮来说,当泄气行驶时,支撑体和橡胶轮胎之间的摩擦生热问题十分严重,因此不适合大负荷、长距离的行驶。双腔型安全轮胎通过在原有胎腔内部设置隔膜的方法,使原有单个腔体变为双腔或多腔式设计结构。双腔型安全轮胎的不足之处在于结构复杂、制造难度大、成本高,且并列的腔体都被刺破时,轮胎将无法继续使用。自密封型安全轮胎采用在橡胶层胎体内部增加一层充满密封剂的密封层,当轮胎被刺穿时,密封层中的密封剂可以迅速流到穿孔周围,密封住破损口。自密封型安全轮胎只能适用低于一定尺寸范围内(5~6 mm)的刺扎破坏,

且温度适应性能较差,破坏轮胎的平衡性、影响车辆正常行驶。除此之外,由于传统充气轮胎在胎压维护、加工工序复杂等方面存在不足,这些都给改善传统充气轮胎安全性能,提高车辆安全性和通过性带来较大困难。

1.2 非充气型轮胎安全车轮

由于充气安全轮胎泄气后不能长时间远距离行驶,只能作为一种应急安全措施。因此,研究非充气型轮胎安全车轮成为一种必然的发展趋势。

目前国内外已开发出多种非充气型轮胎安全车轮。新中国成立后的一段时期内我国曾使用“海绵轮胎”用作防弹车轮,在轮胎的内腔中以弹性较好的海绵体来代替传统充气轮胎的压缩空气^[8]。这种轮胎主要应用于牵引火炮以及部分工程用车等,具有不怕刺扎、防弹等优点,但是其缺点为行驶速度较慢,因此随着自行火炮的出现以及工程用车车速的提升海绵轮胎逐渐被淘汰。1993 年马来西亚(Asiatic Airboss)公司研制出一种非充气活节轮胎,并有特制轮辋匹配^[9],适用于低速特种车辆,如装载机和挖掘机。2005 年,法国米其林公司研发出整体式无气车轮 TWEEL^[10-11],同时米其林公司还对这种特殊的 TWEEL 车轮进行了优化设计^[12],并已将其装配在汽车及工程车辆上进行了试验,但由于该轮胎还处于概念研发阶段,广泛推广应用还需要一段时间。2008 年,美国威斯康辛州麦迪逊聚合物研究中心研制出了一种非充气的蜂窝结构的轮胎^[13],由于不是充气轮胎结构,可以避免轮胎爆胎,在噪声抑制和轮胎摩擦发热上也比普通轮胎更优越,还能够抵御一定程度的爆炸攻击。2009 年,固特异轮胎公司开发出一款非充气的弹簧轮胎装配在月球车上^[14],弹簧轮胎应用于机动车辆存在两大问题,即侧向稳定性较差及包络特性较差,因此,其推广应用具有很大的障碍。2013 年,普利司通集团发布了 Air Free Concept 第二代非充气轮胎^[15],它的亮点在于具有可再生、低滚阻、安全和环保的优良性能。但是,无论其高机动性还是其承载能力均略显不足,目前仅面向特殊车型,如在高尔夫球车这类车型进行小批量匹配试装。2014 年,米其林公司发布了具有可自修复能力轮胎,称之为“Selfseal”,它的自修复能力来自于其轮胎内层涂有的特殊密封剂材料,行驶中的轮胎被异物刺穿时,穿孔会被内部的特殊密封剂瞬间堵住^[16]。这种可以涂抹在普通轮胎的内部特殊材料非常有利于安全轮胎的推广,但是这类轮胎只能防扎、防刺破并不能防爆。2014 年北汽集团与美国 MKP 公司合作生

产了采用负泊松比结构的轮胎，这款轮胎采用了双层设计，即使第一层发生破裂，更加坚固的内层依旧可以支撑车体保证车辆行驶，并已装备在 BJ100 车上进行了相关的试验研究。2015 年，韩国韩泰公司研制了名为 iFlex 的非充气轮胎^[17]，它是由聚氨酯合成材料制成，这种新型材料在保持柔软坚韧形态的同时也兼顾了性能，可最大限度地发掘轮胎的环保潜能，不仅使得回收更加便捷、提高了再生产时的循环利用率，还能降低滚动阻力，为车辆带来更佳的油耗表现。2016 年，万力轮胎公司研发出了一种新型非充气轮胎，称之为“Alpha-T”轮胎，并且其胎面和轮毂为一体式设计，它的结构非常简单，其中的每个零部件均采用了无气孔技术硫化，这种设计无论是在使用还是更换过程中都极为便利。此外，还可以利用智能化控制技术来实时检测路况，自动变化其胎面的花纹孔径的大小来实时提供最佳的抓地力。2017 年，日本东洋橡胶工业公司推出一款名为“noair”的非充气轮胎，它的内部有一百个由高性能树脂材料所制成的呈辐射状轮辐，使得车轮在行驶过程中能较好地分散胎面与地面的接触力，但是它的缓冲性能略显不足，因此在车内噪音、乘坐舒适感等方面仍有改进余地。

南京航空航天大学赵又群教授科研团队在国内较早地开展了非充气型机械弹性安全车轮的研究工作^[18-21]，并提出了一种非充气结构的机械弹性安全车轮设计方案。该结构突破了传统车轮和轮胎的分体式设计，采用铰链组连接弹性车轮外圈和轮毂的非充气结构，利用机械结构弹性替代传统充气轮胎的橡胶充气弹性，在满足充气轮胎必备功能的基础上，还具有抗刺扎、防破损、承载能力强等特点。随着研究的深入，课题组还研制了一系列新型结构的弹性车轮，如液压式复合车轮，防侧翻弹性车轮和分段式弹性车轮^[22-24]等。

对比国外关于安全轮胎技术的发展，虽然我国对于充气型安全轮胎技术的研发起步较早，并且也取得了一系列显著成就，国内多个大型专业轮胎生产厂商也已基本具备并实现了安全轮胎的批量化、规模化生产，取得了良好的经济、社会和国防效益。但是，在新型非充气型安全轮胎技术方面与国外先进水平相比仍存在一定差距。

2 机械弹性安全车轮的结构和原理

2.1 机械弹性安全车轮的结构

机械弹性安全车轮属于非充气型安全车轮，

其结构形式与普通充气轮胎存在本质区别，其中最主要的区别在于机械弹性安全车轮采用一种新型的机械弹性式的非充气结构，代替了普通轮胎的压缩空气弹性^[25]。机械弹性安全车轮的基本结构(图 1)，它主要由三大部分构成，分别是轆轮、铰链组和悬毂。

图 1 机械弹性安全车轮的基本结构

轆轮是由橡胶层及其包裹在内部的弹性环组构成。弹性环组是由周向等角度分布的卡环和横向均匀排列的弹性环组合而成。轆轮与路面直接接触，其主要作用是传递车辆牵引力、制动力、侧向力，缓冲车轮滚动过程中来自路面的冲击，因此要求其具有良好的耐磨性、弹性和抓地性等。

铰链组一般由两节或三节铰链连接而成，其最大长度略大于轆轮与悬毂之间的安装间隙。铰链组与弹性环组共同构成了机械弹性式非充气结构，从而摆脱了普通轮胎的充气结构。铰链组的主要作用是传递牵引力、制动力、侧向力和各种力矩，以及配合轆轮以实现缓冲来自路面的冲击等。

悬毂置于车轮中间位置，通过铰链组悬挂在轆轮上。机械弹性安全车轮的悬毂有别于普通充气轮胎配套的轮毂，它是一种特制轮毂，一般由前盘和后盘两部分组成。悬毂除了具有与车辆半轴匹配的安裝孔以外，还具有铰链组及其他关键部件的安裝孔。

通过上述分析可知，机械弹性安全车轮采用了一种“弹性环组-铰链组式”的非充气结构形式，消除了普通充气轮胎可能存在的胎压不稳、刺破泄气或爆胎等安全问题，从而大幅提升了自身的安全性能。

2.2 机械弹性安全车轮的原理

下面以机械弹性安全车轮的驱动工况为例，说明其基本工作原理。图 2 是其驱动工况示意图。

垂直载荷和转矩经车轴传递到悬毂，从而使得铰链组的状态发生改变，由微弯曲变成张紧，进而使铰链组对轆轮形成拉力，该力沿轆轮切向方向的分力克服机械弹性安全车轮与路面之间的静摩擦力，使车轮由静止状态开始滚动。

图 2 机械弹性安全车轮驱动工况示意图

在垂直载荷的作用下，弹性轮圈发生弹性变形，弹性轮圈上部因受到来自于毂的向下拉力，使其有设定范畴内的适度的类椭圆的弹性变形；接地区域的弹性轮圈由弧线变为直线段；其他区域自由过渡。毂在铰链组拉力的作用下，悬挂于弹性轮圈的中间位置。弹性轮圈向下移动一段距离，位于弹性轮圈下方的铰链组则不受力且呈弯曲状。

车轮滚动时，各铰链组形成“张紧-微曲-张紧”的状态变化，并以此方式循环。另外，来自路面不平度的激励将由弹性轮圈的弹性变形以及铰链组的弯曲所缓解，故机械弹性安全车轮具有良好的缓冲减振性能。

3 机械弹性安全车轮的建模

3.1 数值计算模型

开发了多种机械弹性车轮的数值计算模型，包括有限元模型、多体动力学模型、热机耦合模型等。

岳红旭等^[18]建立了新型机械弹性安全车轮的几何模型，说明了车轮构成及基本原理。基于车轮的几何非线性、材料非线性及车轮与地面接触的非线性，建立了车轮的三维几何模型，并且用 ANSYS 软件的非线性分析技术对车轮进行了非线性有限元分析。

姜成等^[26]在保证结构与实际车轮模型结构相同的条件下，建立机械弹性车轮的三维几何模型，实现了车轮受力时的结构协调性和弹簧的回位功能，并且利用 ANSYS 软件对车轮进行了有限元仿真分析，计算了车轮的径向刚度。

张彬彬等^[27]基于车轮的多体结构及弹性轮圈分层结构，建立了机械弹性车轮三维几何模型；分析了弹性轮圈厚度和弹性环截面边长等结构参数对机械弹性车轮承载特性的影响。闫乐乐等^[28]基于参数化设计和 Pro/E 二次开发的理论，开发了机械弹性车轮的结构参数化设计平台，该平台以交互的方

式实现机械弹性车轮强度和尺寸校核、三维零件模型和工程图的自动生成、虚拟装配等，避免了在传统设计过程中通过查阅国家标准、工程手册来确定设计参数等繁琐工作。臧利国等^[29]根据车轮工作原理和结构特征，建立了机械弹性车轮三维几何模型，利用模态分析的有限元方法计算了无损伤车轮的固有频率和振型；结合车轮力学特性和充气轮胎的常见失效形式，对车轮的失效形式和危险区域进行了分析；将 B 级随机路面不平度作为动态激励输入，研究了局部损伤车轮的动态响应规律。王强等^[30]建立基于弹性滚子接触模型的机械弹性车轮三维几何模型，通过有限元分析对车轮的包容特性及影响因素进行了研究，并得出车轮垂向动态力学响应随负荷和径向刚度变化的规律。张明杰等^[31]结合机械弹性车轮的结构及承载方式，建立了机械弹性车轮三维几何模型与疲劳试验有限元模型，并基于 Miner 线性疲劳累积损伤理论对其进行疲劳寿命预测。

XIAO 等^[32]提出了一种基于有限元分析建立虚拟试验场新模型的新方法，并结合随机振动损伤分析，精确预测了机械弹性车轮的寿命。从恒定寿命设计的角度研究了车轮的薄弱部件和无限寿命部件，并开发了适用于机械弹性车轮的近似响应面模型。以此来计算机弹性车轮的模态、质量和寿命。

ZHU 等^[33]建立了一种关于机械弹性车轮的热机耦合有限元模型，来研究车轮的侧偏特性。该模型将热传递与摩擦模型结合到机械弹性车轮的三维有限元模型中，通过将模拟结果与轮胎动力学测试数据进行比较，发现该热机耦合模型具有高可靠性和准确性。

3.2 简化解析模型

开发了多种机械弹性车轮解析模型，包括滚动阻力模型、刷子模型、弹性绳索简化模型、曲梁模型、温升预测模型等。

李波等^[34]在分析轮胎滚动阻力产生的机理以及考虑材料的弹性迟滞特点后，提出机械弹性安全车轮滚动阻力解析模型。该文基于非线性弹性力和非线性阻尼力构建了轮胎垂向复合回复力公式，搭建了特定试验进行了模型参数辨识，并且验证了模型的有效性。

李波等^[35]根据刷子模型，将弹性车轮的弹性梁看作连接在刚性轮毂上的一系列可以产生伸缩变形的弹性刷毛组成，在刚性路面建立垂向和纵向力分布函数，并研究了弹性车轮弹性梁厚度与纵向合力的关系及弹性梁滑移率与纵向合力的关系。针对现有轮胎模型不再适用于机械弹性车轮的振动分析的

问题, 依据其结构特点和铰链组单向传力特性, 赵又群等^[36]提出弹性绳索简化模型, 推导弹性绳索刚度表达式、总等效刚度表达式以及系统频响函数, 建立了振动分析模型, 并且进行了 C 级随机不平路面输入激励下的随机振动分析。在研究如何提高轮胎接地性能方面, 臧利国等^[37]根据 Timoshenko 曲梁车轮模型, 通过对机械弹性车轮的悬架式承载和刚度特性进行分析, 揭示了车轮径向刚度主要取决于轱辘和铰链组的结构和力学特性, 并且对车轮径向刚度做了一系列参数化分析。

王强等^[38]利用曲梁理论建立了弹性基础封闭圆环曲梁模型, 确定了车轮刚度与车轮变形量、变形速率及激振频率之间的解析关系, 并且建立了车轮刚度和阻尼的非线性解析模型, 该模型反映了车轮变形量和激振频率对车轮刚度的影响, 以及车轮变形速率和激振频率对车轮阻尼的影响。

陈月乔等^[39]建立了机械弹性车轮热平衡状态简化传热数学模型, 分析了车速、橡胶材料损耗因子、热导率和车轮断面宽度对最高温度的影响, 并且应用多元回归技术建立了滚动状态下最高温度与多因素变化回归方程, 进行了 F 分布检验和预测案例的分析。

ZHU 等^[40]推导了在不同驾驶条件下机械弹性车轮的表面温升预测理论模型。结合机械弹性车轮的特殊结构讨论其发热和散热机制, 然后建立车轮的机械模型以获得单位时间的发热量, 同时利用热力学理论分析散热量, 并通过试验测量验证了所提理论模型的有效性。

ZHU 等^[41]建立了包含温升模型、材料特性模型、滑移速度与温升效应影响的摩擦模型、力学特性模型四种模型耦合影响的车轮热机耦合力学特性理论模型; 对车轮在纵滑、侧偏及其复合工况下的热机耦合力学特性进行仿真计算与分析, 证明了该模型能更加准确地预测复合工况下车轮的力学特性及其温升特性。

4 机械弹性安全车轮的基本力学特性

4.1 机械弹性安全车轮的载荷特性(垂向力)

付宏勋等^[42]研究了胎圈结构参数对机械弹性车轮接地压力分布的影响, 利用有限元分析了胎圈断面高宽比、弹性环断面高宽比或弹性环分布系数对车轮接地长度和接地面积的影响。臧利国等^[43]建立了机械弹性车轮非线性有限元模型, 对机械弹性车轮径向刚度特性及影响因素进行研究, 分析了使用条件和车轮结构等因素对机械弹性车轮径向刚度

的影响, 揭示了地面约束、材料、垂直载荷及力矩对车轮固有频率和振型的影响规律。

臧利国等^[44]采用压敏膜法对机械弹性车轮的静态接地特性进行试验研究, 研究了充气安全轮胎、轱辘和机械弹性车轮在不同载荷下的接地压力分布规律, 对比分析了充气安全轮胎和机械弹性车轮的接地特性。

ZHAO 等^[45]在分析机械弹性车轮承载特性的基础上设计了四种不同铰链结构和分布的车轮, 使用低速平板试验台进行这四种机械弹性车轮和一个充气轮胎的刚度特性试验, 包括垂直、纵向、横向和扭转刚度, 对试验数据和模拟数据进行了充分的比较和分析, 研究结果为 ME 轮的性能和结构优化提供了理论和技术验证。

ZHAO 等^[46]考虑到加工和安装误差对机械弹性车轮的径向刚度的影响, 基于区间数学分析, 在一定的误差范围内预测了机械弹性车轮的径向刚度, 并研究了机械弹性车轮上误差与载荷之间径向刚度的规律性。

4.2 机械弹性安全车轮的纵向力

赵又群等^[47]在轮胎结构简化的基础上, 建立了修正的轮胎刷子模型, 并推导了机械弹性车轮纵向力的表达式, 分析了车轮与地面之间的接触情况, 分别求解附着区纵向力和滑移区纵向力, 并对两者的关系进行分析。

李波等^[35]研究了弹性车轮结构特点与驱动性能的关系, 根据刷子模型将弹性车轮的弹性梁简化成可以产生伸缩变形的弹性刷毛组成, 建立了垂向和纵向力分布函数, 根据地面接触情况积分求解纵向合力, 并研究了弹性车轮弹性梁厚度与纵向合力的关系及弹性梁滑移率与纵向合力的关系。

LI 等^[48]又提出了机械弹性安全车轮驱动力模型, 介绍了机械弹性安全车轮的刷子模型, 同时弹性支撑和胎面的变形也考虑在内, 由仿真软件 CarSim 验证了模型的有效性。

4.3 机械弹性安全车轮的侧向力、侧偏特性与侧倾特性

李波等^[49]为了精确地估计轮胎抓地状态, 采用轮胎刷子模型, 同时考虑纵向滑移和侧向滑移情况, 提出了改进的复合滑移轮胎刷子模型对影响汽车行驶稳定性和安全性的轮胎和地面之间的相互作用模型进行了深入研究。

为分析轮胎侧向力对汽车转向稳定性的影响, 沈法鹏等^[50]建立了非线性轮胎侧向力模型并通过四自由度整车动力学模型计算了不同车速下汽车质心侧偏角、车身侧倾角和前轮转角响应。虚拟试验

和实车试验的结果表明,汽车高速转向行驶时,非线性轮胎侧向力模型能更准确地反映出汽车运动状态的响应,各状态响应的平均绝对误差能控制在相应状态幅值的 10% 以内。研究结果对汽车稳定性控制系统的设计具有理论指导意义。

为了探究机械弹性车轮与地面接触时的力学性能,DU 等^[51]利用有限元法,建立了车轮-土壤接触交互的非线性三维有限元模型,进行了不同转速下车轮越障的模拟计算及分析,得到了不同工况下车轮与土壤的应力分布与相对位移。详细介绍和讨论了不同的车轮转速对于轮毂中心位移、速度以及加速度的影响。

DU 等^[52]通过数值模拟和试验方法研究了机械弹性安全车轮的外倾特性,建立了一个包括材料非线性、大变形的各向异性橡胶复合材料的非线性三维机械弹性车轮有限元模型,研究了不同的外倾角度对径向刚度、车轮变形、接触压力分布以及接触面轮胎力的影响。

付宏勋等^[53]对车轮稳态侧偏工况下的力学特性进行了理论和试验研究,基于机械弹性车轮结构特点以及刷子建模理论,建立不同侧偏角下车轮稳态侧偏理论模型,利用轮胎动态力学特性试验台架,对车轮样机进行稳态侧偏特性试验分析,得到了车轮侧向力、回正力矩与侧偏角的关系曲线。

为深入研究机械弹性车轮侧向力学特性,付宏勋等^[54]基于理论及数值仿真的方法对车轮侧向刚度影响因素进行了分析。基于能量法建立了髋轮单元侧向刚度理论模型,并得到影响车轮侧向刚度的主要因素。利用有限元分析软件 ABAQUS 对机械弹性车轮进行了侧向刚度特性的数值仿真计算,并利用机械弹性车轮样机的试验数据验证了车轮有限元模型的有效性。计算结果表明,随着垂向载荷、橡胶层切度模量的增大,机械弹性车轮的侧向刚度均增大;随着髋轮断面高宽比的增大,车轮侧向刚度呈减小趋势。通过对机械弹性车轮侧向刚度特性影响因素的理论及数值分析,可为优化车轮刚度特性及改进车轮结构等方面的研究提供参考。

5 机械弹性安全车轮的装车特性

5.1 机械弹性安全车轮的动态特性

ZHAO 等^[55]建立了机械弹性车轮非线性有限元模型,揭示了地面约束、材料、垂直载荷及力矩对车轮固有频率和振型的影响规律。李波^[56]利用车轮自由模态试验获得模态参数,建立接地印迹模型,

通过台架试验进行了验证。李小龙^[57]通过简化的机械弹性车轮有限元模型,进行了其工作模态特性仿真,得到了机械弹性车轮工作模态前 20 阶振型及对应的固有频率,得到了机械弹性车轮工作状况下固有动态特性的特点及规律。

为了研究机械弹性车轮的振动特性及其主要影响因素,WANG 等^[58]利用弹性环作为基础,考虑其径向与切向弹性环刚度建立了机械弹性车轮模型。通过模态扩展技术与 Arnoldi 求解得到无拉伸振动的受迫振动的通解,并利用有限元仿真和模态试验验证了其结果的准确性。研究得到了自由状态不同载荷状态下机械弹性车轮的固有频率与振型,而且进一步研究了不同旋转速度、载荷以及铰链组数对于车轮固有频率的影响。结果反映了机械弹性车轮振型的规律性,并为车轮的结构优化以及整车的振动特性分析提供了一定的参考。

为了研究新型机械弹性车轮的双重缓冲减振性能,通过对路径转移率和插入损耗进行评估的方法研究了机械弹性车轮振动的传输路径。根据车轮传输路径的激振力,建立了车轮振动传输路径系统模型。结合模态试验的分析结果,对振动传递路径系统的反应逐一进行定量分析。分析结果反映了机械弹性车轮实际振动传输特性的规律,为机械弹性车轮结构优化提供了一定的参考^[59]。

王强等^[60]采用有限元计算与试验测试相结合的分析方法对机械弹性车轮振动特性进行了研究。通过有限元分析得到车轮结构的振动模态频率及相应的振型,结合参数灵敏度分析和试验模态对其有限元模型进行了修正。

ZHAO 等^[61]采用有限元法和试验模态分析的组合来表征在特定热环境下的机械弹性轮结构的动态响应。研究了高热条件对机械弹性车轮结构动力响应的影响。得到的结果表明,试验模态分析结果与使用所提出的有限元模型获得的结果一致,表明该有限元模型在分析在实际热环境下工作的机械弹性车轮模态时的高可靠性。通过所提出的分析方法,可以预测和评估机械弹性车轮在特定热条件下运行的结构动力响应,有利于车轮结构的动态优化设计,避免轮胎温度相关的振动故障,提高安全性。

DENG 等^[62]基于三维非线性有限元模型对机械弹性车轮在稳态滚动条件下的动态特性进行了分析,具体分析了机械弹性车轮的接触压力和摩擦应力分布,此外,还基于模拟结果分析了 MEW 的关键部件的应力状态,例如弹性环和铰链组。

5.2 机械弹性安全车轮的响应特性

汪伟等^[20]在 ADAMS 中建立了包括新型机械弹

性车轮在内的整车模型,经随机路面输入仿真分析得出匹配机械弹性车轮的整车符合平顺性要求,且满足普通轮胎的平顺性规律。

WANG 等^[63]基于曲梁理论建立了机械弹性车轮的弹性闭环曲梁模型,研究了机械弹性车轮的刚度特性,分析了机械弹性车轮径向变形,抗弯刚度;利用有限元法对曲梁模型的正确性进行了验证。结果表明,机械弹性车轮的等效刚度与动态响应会随着弹性钢丝环的增加呈非线性增长,同时,它们也会随着变形量呈非线性增长,而动态响应随激励频率的增加而明显减小。

DU 等^[64]研究了机械弹性车轮在外倾角滚动条件下的接地特性。结合有限元分析与试验验证,为了突出 ME 轮的优点,选择充气轮胎作为参考轮胎,并且在自由滚动、制动条件下比较和分析具有不同外倾角的这两个轮胎的接地特性。在驱动条件下应用机械弹性车轮和充气轮胎的不同滑移率值来分析滑移率对接地特性的影响。得到的结果表明,随着外倾角的增加,机械弹性车轮和充气轮胎将逐渐遭受胎面表面的部分磨损,但充气轮胎的压力集中更严重。

李海青等^[65]为深入研究匹配机械弹性车轮的某越野车的横摆与侧翻稳定性,以横摆角速度和预测载荷转移率分别作为横摆稳定性和侧翻稳定性的评价指标,并建立匹配机械弹性车轮的整车非线性 Carsim 仿真模型。基于相平面分析方法研究机械弹性车轮侧偏力学特性对汽车横摆与侧翻稳定性的具体影响规律。结果表明,机械弹性车轮与子午线充气轮胎侧偏特性曲线的变化趋势基本一致,侧向力峰值基本相同,但机械弹性车轮的侧偏刚度较大,匹配机械弹性车轮的整车侧翻稳定性较好,横摆稳定性较差;增大机械弹性车轮的侧向力峰值的同时适当减小侧偏刚度值,可以提高匹配机械弹性车轮汽车的横摆与侧翻稳定性,为车轮侧偏性能的改进及车轮结构优化提供相应的理论依据。

5.3 机械弹性安全车轮的牵引特性

汪伟等^[66]利用机械弹性车轮有限元模型计算出车轮的滚动半径,进行了通过性分析,详细阐述了挂钩牵引力各个分力的影响因素,为车轮的设计改进提供了理论支持。

臧利国等^[67]根据建立的非线性有限元模型对机械弹性车轮和子午线充气轮胎的接地特性进行了对比研究,结果表明,机械弹性车轮有效地降低了接地压力偏度值,改善了轮胎接地的均匀性,提高了车轮耐磨损性能和抓地性能。通过对机械弹性车轮特殊承载方式进行分析,建立了考虑车

轮滑转和地面切应力的驱动轮牵引性能预测模型,推导了车轮沉陷、土壤推力、挂钩牵引力等计算公式,对机械弹性车轮和普通充气轮胎的牵引性能进行了对比^[68]。

赵又群等^[69]根据机械弹性车轮结构特点,同时考虑弹性支撑和胎面的受力变形,并利用简单的物理假设,建立了刷子模型;通过车轮地面受力、摩擦因数和摩擦圆理论确定了抓地余量;建立了一个关于抓地余量的一元三次方程,讨论了模型参数对抓地性能的影响。

5.4 机械弹性安全车轮的包容特性

王强等^[70]利用有限元分析和试验测试方法对机械弹性车轮的包容特性进行了力学研究。通过平面及障碍物作用下车轮垂向力学特性的分析,揭示了障碍物截面形状对车轮垂向力学响应的影响规律,并验证了所建模型的可靠性。基于车轮非线性有限元模型和台架试验,分析了车轮在三种不同截面障碍物作用下的低速稳态包容特性,并研究了车轮通过障碍物后的垂向和纵向动态力学响应的变化规律,及负荷和障碍物截面形状对包容特性的影响。结果表明,车轮垂向力响应随负荷的增加由抛物线形过渡到马鞍形,车轮纵向力响应随负荷的增加而增大,其变化曲线类似为正弦形状;且车轮垂向力和纵向力响应随障碍物高度的增加而增大;其响应峰值相对较低、变化较平缓,在一定载荷条件下,车轮表现出典型的包容特性。

6 结论

非充气机械弹性安全车轮利用弹性结构代替普通轮胎的充气弹性,在满足普通充气轮胎各项基本性能的基础上,使车轮不存在扎破、爆胎等安全隐患。非充气技术属于轮胎革新的范畴,摆脱了传统轮胎的充气结构形式,使车轮的安全性能显著提升。本文对一种新型的具有非充气结构的机械弹性安全车轮的研究进展进行了较为详实的介绍,主要包括机械弹性车轮的结构及工作原理、建模问题、基本力学特性以及装车特性等。

非充气安全车轮技术是安全车轮研发中一个非常重要的研究领域,本课题组就一种非充气式机械弹性安全车轮做了大量基础性、探索性和创新性的研究工作,并取得了一系列研究成果,然而还有很多方面有待继续深入的探究,未来机械弹性车轮研究的核心与重点包括以下方面。

(1) 车轮预测模型的修正。在原有各类几何模型、解析模型的基础上,可以考虑复杂工况下轮胎

各项性能的预测模型的建立,以及模型参数的调试与修正,以增强机械弹性车轮力学特性预测模型的准确性和适应性,为机械弹性车轮与整车的匹配奠定基础。

(2) 车轮轻量化。在原有车轮的结构与加工制造的基础上,考虑车轮不同关键零部件材料的选型与加工工艺的完善;针对弹性环、卡环和铰链等关键零部件,在保证车轮具有良好的承载性能与安全性能的基础上,可以从新材料的采用、车轮结构的优化以及制造工艺的完善等方面综合考虑,达到车轮及整车轻量化的目的。

(3) 车轮耐久性。通过研究机械弹性安全车轮零部件的关重性,挖掘其耐久性与可靠性增长的有效因素,重点研究关重件结构的强度优化和易磨易损零部件的寿命预测,并精确估计车轮的检修周期,从而提高车轮的设计和使用寿命。

(4) 车轮振动噪声辐射特性。通过对机械弹性安全车轮的研究发现,由于车轮机构的特殊性,其机械零部件在行驶过程中不可避免地会出现机械磨损及振动现象,致使在行驶过程中车轮产生振动与噪声,影响整车的动力性、平顺性、舒适性等。因此,需要对车轮振动噪声的预测与控制方法展开深入研究。

(5) 车轮与整车的匹配。对于机械弹性安全车轮性能的研究不能只停留在对其基本性能的分析与评价上,而应侧重对匹配机械弹性安全车轮的汽车各项行驶性能的优化上,例如与同为行驶系的悬架的协同优化设计。

(6) 机械弹性安全车轮性能指标体系的构建。对机械弹性车轮的结构拓扑以及各项力学性能做进一步优化设计,研究不同结构拓扑下机械弹性车轮的机动性能、安全性能、生存性能、可靠性能以及适应性,构建机械弹性安全车轮性能指标的评价体系,为机械弹性安全车轮与普通充气轮胎车轮的互换性研究和推广应用提供指导。

非充气机械弹性安全车轮的研究,在完成车轮基本力学性能的基础理论和结构设计的同时,保证其具有更加良好的机动性能、安全性能、生存性能、可靠性能以及适应性,为非充气型安全车轮的研究提供一定的理论基础及技术支撑,期望为带动非充气安全车轮的发展起到一定的积极作用。

参 考 文 献

- [1] 陈家瑞. 汽车构造[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
CHEN Jiarui. Automobile structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2006.
- [2] 庄继德. 车辆地面力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
ZHUANG Jide. Vehicle-terramechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [3] 郭孔辉. 汽车操纵动力学[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 1991.
GUO Konghui. Vehicle handling dynamics[M]. Changchun: Jilin Science and Technology Press, 1991.
- [4] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
YU Zhisheng. Vehicle theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [5] JANG I G, SUNG Y H, YOO E J, et al. Pattern design of a non-pneumatic tyre for stiffness using topology optimization [J]. Engineering Optimization, 2011, 42(2): 119-131.
- [6] 佟金, 杨欣, 张伏, 等. 零压续跑轮胎技术现状与发[J]. 农业机械学报, 2007, 38(3): 182-187.
TONG Jin, YANG Xin, ZHANG Fu, et al. Development of run flat tire technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(3): 182-187.
- [7] CHO J R, LEE J H, JEONG K M, et al. Optimum design of run-flat tire insert rubber by genetic algorithm[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2012, 52: 60-70.
- [8] 涂学忠, 摘译. 充聚氨酯海绵实心轮胎[J]. 轮胎工业, 2005, 25(9): 546.
TU Xuezhong(abridged translation). Solid tire filled with polyurethane sponge[J]. Tire Industry, 2005, 25(9): 546.
- [9] 邓海燕, 关泰. 安全轮胎的发展历史和未来前景[J]. 化工科技市场, 2005, 28(3): 9-14.
DENG Haiyan, GUAN Tai. Developing history and fore-ground of run-flat tires[J]. Chemical Technology Market, 2005, 28(3): 9-14.
- [10] RHYNE T B, CRON S M. Development of a non-pneumatic wheel[J]. Tire Science and Technology, 2006, 34(3): 150-169.
- [11] MA Jianfeng, KOLLAA, SUMMERS J D, et al. Numerical simulation of new generation non-pneumatic tire (TWEEL) and sand[C]// Proceedings of the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference, California: American Society of Mechanical Engineers, 2009: 123-130.
- [12] 薛梓晨, 贺建芸, 丁玉梅, 等. 非充气安全轮胎的研究现状[J]. 橡胶工业, 2014, 61(10): 632-635.
XUE Zichen, HE Jianyun, DING Yumei, et al. Research status of non-pneumatic safety tyres[J]. China Rubber Industry, 2014, 61(10): 632-635.
- [13] JU J, ANANTHASAYANAM B, SUMMERS J D, et al.

- Design of cellular shear bands of a non-pneumatic tire investigation of contact pressure[R]. SAE, 2010-01-0768, 2010.
- [14] ASNANI V, DELAP D, CREAGER C. The development of wheels for the lunar roving vehicle[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(3): 89-103.
- [15] Bridgestone Corporation Reveals Second Generation “Air Free Concept (Non-pneumatic) Tire”. Targeting Future Practical Viability by Bolstering Functionality [EB/OL]. [2013-11-21].<https://www.bridgestone.com/corporate/news/2013112101.html>
- [16] MCNULTY M. Goodyear targets waste with a self-sealing tire[J]. Waste News, 2005(2): 5-6.
- [17] 赵敏, 吴秀兰. 韩泰 iFlex 轮胎性能与传统轮胎相似[J]. 橡胶工业, 2015, 62(9): 575-575.
- ZHAO Min, WU Xiulan. The performance of Hantai iFlex tyre is similar to that of traditional tyre[J]. China Rubber Industry, 2015, 62(9): 575-575.
- [18] 岳红旭, 赵又群. 一种新型安全车轮的非线性有限元分析[J]. 中国机械工程, 2012, 23(11): 1380-1385.
- YUE Hongxu, ZHAO Youqun. Nonlinear finite element analysis of a new safety wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(11): 1380-1385.
- [19] WANG Wei, ZHAO Youqun, WANG Jian, et al. Structure analysis and ride comfort of vehicle on new mechanical elastic tire[C]// Proceeding of FISITA 2012 World Automotive Congress, Beijing, China, November 27-30, 2012: 199-209.
- [20] 汪伟, 赵又群, 姜成, 等. 基于新型机械弹性车轮的整车平顺性分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(22): 3114-3117.
- WANG Wei, ZHAO Youqun, JIANG Cheng, et al. Ride comfort of vehicle on new mechanical elastic wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(22): 3114-3117.
- [21] 汪伟, 赵又群, 姜成, 等. 新型机械弹性车轮的力学传递特性分析[J]. 江苏大学学报, 2013, 34(3): 261-266.
- WANG Wei, ZHAO Youqun, JIANG Cheng, et al. Characteristic analysis of mechanical transmission for a new mechanical elastic wheel[J]. Journal of Jiangsu University, 2013, 34(3): 261-266.
- [22] 李小龙, 赵又群, 刘英杰. 液压式复合车轮: 中国: ZL201310236856.4 [P]. 2013-09-11.
- LI Xiaolong, ZHAO Youqun, LIU Yingjie. Hydraulic compound wheel: China: ZL201310236856.4[P]. 2013-09-11.
- [23] 李小龙, 赵又群, 臧利国, 等. 防侧翻弹性车轮: 中国: ZL201310236876.1[P]. 2013-09-11.
- LI Xiaolong, ZHAO Youqun, ZANG Ligu, et al. Anti-rollover elastic wheels: China: ZL201310236876.1 [P]. 2013-09-11.
- [24] 赵又群, 李小龙, 李波, 等. 分段式弹性车轮: 中国: ZL201310431410.7[P]. 2014-01-01.
- ZHAO Youqun, LI Xiaolong, LI Bo, et al. Segmented elastic wheel: China: ZL201310431410.7[P]. 2014-01-01.
- [25] LI Bo, ZHAO Youqun, ZANG Ligu. Closed-form solution of curved beam model of elastic mechanical wheel[J]. Journal of vibroengineering, 2014, 16(8): 3951-3962.
- [26] 姜成, 赵又群, 阮米庆, 等. 基于序列二次规划算法的机械弹性车轮的结构优化[J]. 机械科学与技术, 2014, 33(3): 423-427.
- JIANG Cheng, ZHAO Youqun, RUAN Miqing, et al. Structure optimization of the mechanical elastic wheel based on the sequential quadratic programming algorithm[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2014, 33(3): 423-427.
- [27] 张彬彬, 赵又群, 王强. 机械弹性车轮结构参数对承载特性的影响[J]. 重庆理工大学学报, 2016, 30(4): 21-26.
- ZHANG Binbin, ZHAO Youqun, WANG Qiang. Influence of mechanical elastic wheel configuration on load carrying characteristic[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2016(4): 21-26.
- [28] 闫乐乐, 赵又群, 付宏勋, 等. 机械弹性车轮的结构参数化设计[J]. 中国机械工程, 2016, 27(9): 1251-1256.
- YAN Lele, ZHAO Youqun, FU Hongxun, et al. Structure parameterized design for a new mechanical elastic wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(9): 1251-1256.
- [29] 臧利国, 赵又群, 李波, 等. 局部损伤的机械弹性车轮的静动态特性[J]. 振动、测试与诊断, 2016, 36(3): 478-483.
- ZANG Ligu, ZHAO Youqun, LI Bo, et al. Static and dynamic state characteristics of local damage mechanical elastic wheel[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2016, 36(3): 478-483.
- [30] 王强, 赵又群, 付宏勋, 等. 载荷与径向刚度对机械弹性车轮包容特性的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(13): 36-42.
- WANG Qiang, ZHAO Youqun, FU Hongxun, et al. Effect of load and radial stiffness on containment characteristics of mechanical elastic wheel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(13): 36-42.
- [31] 张明杰, 赵又群, 杜现斌, 等. 机械弹性车轮疲劳寿命及其影响因素研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2016, 37(11): 1560-1564.
- ZHANG Mingjie, ZHAO Youqun, DU Xianbin, et al. Fatigue life and influencing factors of a mechanical elastic

- wheel[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2016, 37(11): 1560-1564.
- [32] XIAO Zhen, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. The multi-objective optimization of a non-pneumatic wheel based on its life prediction[J]. Engineering Computations, 2019, 36(3): 997-1020.
- [33] ZHU Mingmin, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Thermo-mechanical coupled modeling for numerical analyzing the influence of thermal and frictional factors on the cornering behaviors of non-pneumatic mechanical elastic wheel[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2019, 91: 13-27.
- [34] 李波, 赵又群, 臧利国, 等. 基于弹性迟滞理论的轮胎滚动阻力解析模型构建[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 56-62.
- LI Bo, ZHAO Youqun, ZANG Ligu, et al. Analytical model of tire rolling resistance based on elastic hysteresis theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(17): 56-62.
- [35] 李波, 赵又群, 陈月乔, 等. 弹性车轮纵向力刷子模型分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(5): 662-665.
- LI Bo, ZHAO Youqun, CHEN Yueqiao, et al. Longitudinal force analysis for an elastic wheel based on the brush model[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(5): 662-665.
- [36] 赵又群, 李小龙, 张明杰, 等. 机械弹性车轮随机振动理论与数值分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(7): 47-51.
- ZHAO Youqun, LI Xiaolong, ZHANG Mingjie, et al. Theoretical and numerical analysis on the random vibration of mechanical elastic wheel[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(7): 47-51.
- [37] 臧利国, 赵又群, 李波, 等. 非充气机械弹性车轮静态径向刚度特性研究[J]. 兵工学报, 2015, 36(2): 355-362.
- ZANG Ligu, ZHAO Youqun, LI Bo, et al. Static radial stiffness characteristics of non-pneumatic mechanical elastic wheel[J]. Acta Armamentarii, 2015, 36(2): 355-362.
- [38] 王强, 赵又群, 杜现斌, 等. 机械弹性车轮径向刚度和阻尼模型的分析[J]. 中国机械工程, 2016, 27(10): 1408-1413.
- WANG Qiang, ZHAO Youqun, DU Xianbin, et al. Analyses of radial stiffness and damping model for mechanical elastic wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(10): 1408-1413.
- [39] 陈月乔, 赵又群, 阮米庆, 等. 机械弹性车轮滚动状态稳态温度场有限元分析[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(3): 364-369.
- CHEN Yueqiao, ZHAO Youqun, RUAN Miqing, et al. Finite element analysis on steady-state temperature field of a rolling mechanical elastic wheel[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2016, 35(3): 364-369.
- [40] ZHU Mingmin, ZHAO Youqun, XIAO Zhen, et al. Surface temperature prediction of novel non-pneumatic mechanical elastic wheel based on theory analysis and experimental verification[J]. Numerical Heat Transfer Part B Fundamentals, 2018, 73(6): 399-414.
- [41] ZHU Mingmin, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Thermodynamics modeling of a novel nonpneumatic mechanical elastic wheel for predicting its mechanical-thermal behavior[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2019, 75(7): 435-455.
- [42] 付宏勋, 赵又群, 林菜, 等. 胎圈结构参数对机械弹性车轮接地压力分布的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(17): 57-64.
- FU Hongxun, ZHAO Youqun, LIN Fen. Influences of bead structure parameters on contact pressure distribution of mechanical elastic wheel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(17): 57-64.
- [43] 臧利国, 赵又群, 姜成, 等. 机械弹性安全车轮径向刚度特性及影响因素研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(8): 181-186.
- ZANG Ligu, ZHAO Youqun, JIANG Cheng, et al. Mechanical elastic wheel's radial stiffness characteristics and their influencing factors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(8): 181-186.
- [44] 臧利国, 赵又群, 李波, 等. 非充气机械弹性车轮接地特性试验研究[J]. 汽车工程, 2016, 38(3): 350-355.
- ZANG Ligu, ZHAO Youqun, LI Bo, et al. An experimental study on the ground contact characteristics of non-pneumatic mechanical elastic wheel[J]. Automotive engineering, 2016, 38(3): 350-355.
- [45] ZHAO Youqun, DU Xianbin, LIN Fen, et al. Static stiffness characteristics of a new non-pneumatic tire with different hinge structure and distribution[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2018, 32(7): 3057-3064.
- [46] ZHAO Youqun, XIAO Zhen, LIN Fen, et al. Influence analysis of machining and installation errors on the radial stiffness of a non-pneumatic mechanical elastic wheel[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2018, 31(1): 68.
- [47] 赵又群, 李波, 臧利国, 等. 基于修正的轮胎刷子模型纵向力分析[J]. 华南理工大学学报, 2014, 42(11): 50-54.
- ZHAO Youqun, LI Bo, ZANG Ligu, et al. Analysis of

- longitudinal force based on modified tyre brush model[J]. Journal of South China University of Technology, 2014, 42(11): 50-54.
- [48] LI Bo, ZHAO Youqun, ZANG Ligu, et al. Driving force model of non-pneumatic elastic wheel[J]. Transaction of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 33(2): 231-236.
- [49] 李波, 赵又群, 臧利国, 等. 基于复合滑移理论的轮胎抓地状态建模与验证[J]. 农业工程学报, 2014, 30(16): 68-74.
- LI Bo, ZHAO Youqun, ZANG Ligu, et al. Construction and verification of tire grip state based on combined-slip theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(16): 68-74.
- [50] 沈法鹏, 赵又群, 赵洪光, 等. 非线性轮胎侧向力对汽车转向稳定性的影响[J]. 中国机械工程, 2015, 26(1): 135-139.
- SHEN Fapeng, ZHAO Youqun, ZHAO Hongguang, et al. Effects of nonlinear tire lateral force on vehicle steering stability[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(1): 135-139.
- [51] DU Xianbin, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Numerical analysis of dynamic interaction between a non-pneumatic mechanical elastic wheel and soil with an obstacle[J]. Part D: Journal of Automobile Engineering, 2017, 231(6): 731-742.
- [52] DU Xianbin, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Numerical and experimental investigation on the camber performance of a non-pneumatic mechanical elastic wheel[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39(9): 3315-3327.
- [53] 付宏勋, 赵又群, 林棻, 等. 机械弹性车轮稳态侧偏特性的理论与试验分析[J]. 浙江大学学报, 2017, 51(2): 344-349.
- FU Hongxun, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Theoretical and experimental analysis on steady-state cornering properties of mechanical elastic wheel[J]. Journal of Zhejiang University, 2017, 51(2): 344-349.
- [54] 付宏勋, 赵又群, 林棻, 等. 机械弹性车轮侧向刚度特性的影响因素研究[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(7): 863-869.
- FU Hongxun, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Analysis on influencing factors of lateral stiffness of mechanical elastic wheel[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(7): 863-869.
- [55] ZHAO Youqun, ZANG Ligu, CHEN Yueqiao, et al. Non-pneumatic mechanical elastic wheel natural dynamic characteristics and influencing factors[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(5): 1707-1715.
- [56] 李波. 机械弹性安全车轮纵向力学性能若干关键问题研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- LI Bo. Research on some key problems for mechanical elastic safety wheel longitudinal mechanics performance[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [57] 李小龙. 机械弹性车轮的动态特性及其影响因素的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- LI Xiaolong. Research on dynamic characteristics and influencing factors of mechanical elastic wheel[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [58] WANG Qiang, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Research on vibration characteristics and its key influencing factors of new mechanical elastic wheel[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(8): 5337-5352.
- [59] WANG Qiang, ZHAO Youqun, LIN Fen. Research on the structural transfer path of new mechanical elastic wheel Vibration[C]// International Conference on Mechanics Design, Manufacturing and Automation (MDM2016), Suzhou, China, MAY 14-15, 2016: 743-753.
- [60] 王强, 赵又群, 林棻, 等. 机械弹性车轮有限元计算与试验模态的相关性分析[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(1): 86-93.
- WANG Qiang, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Correlation between the finite element calculation and experimental mode of a mechanical elastic wheel[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(1): 86-93.
- [61] ZHAO Youqun, ZHU Mingmin, LIN Fen, et al. Thermal modal analysis of novel non-pneumatic mechanical elastic wheel based on FEM and EMA[J]. AIP Advances, 2018, 8(1): 015229.
- [62] DENG Yaoji, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Simulation of steady-state rolling non-pneumatic mechanical elastic wheel using finite element method[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2018, 85: 60-79.
- [63] WANG Qiang, ZHAO Youqun, DU Xianbin, et al. Equivalent stiffness and dynamic response of new mechanical elastic wheel[J]. Journal of Vibroengineering, 2016, 18(1): 431-445.
- [64] DU Xianbin, ZHAO Youqun, WANG Qiang, et al. Grounding characteristics of a non-pneumatic mechanical elastic tire in a rolling state with a camber angle[J]. Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 2019, 65(5): 287-296.
- [65] 李海青, 赵又群. 匹配机械弹性车轮的汽车稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(1): 77-85.
- LI Haiqing, ZHAO Youqun. Stability of vehicles with mechanical elastic wheel[J]. Journal of Harbin Institute of

Technology, 2019, 51(1): 77-85.

- [66] 汪伟, 赵又群, 黄超, 等. 新型机械弹性车轮的建模与通过性研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(6): 724-729.
WANG Wei, ZHAO Youqun, HUANG Chao, et al. Modeling and trafficability analysis of new mechanical elastic wheel[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(6): 724-729.
- [67] 臧利国, 赵又群, 李波, 等. 机械弹性车轮提高轮胎耐磨性和抓地性分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(12): 56-63.
ZANG Ligu, ZHAO Youqun, LI Bo, et al. Mechanical elastic wheel improving road holding and wear resistance of tire[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(12): 56-63.
- [68] 臧利国, 赵又群, 李波, 等. 机械弹性车轮结构参数对牵引性能的影响[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2014, 35(11): 1415-1421.
ZANG Ligu, ZHAO Youqun, LI Bo, et al. Influence of mechanical elastic wheel configuration on traction

performance[J]. Journal of Harbin engineering university, 2014, 35(11): 1415-1421.

- [69] 赵又群, 李波, 陈月乔, 等. 基于刷子模型的非充气弹性车轮抓地余量分析[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(2): 380-388.
ZHAO Youqun, LI Bo, CHEN Yueqiao, et al. Analysis of non-pneumatic elastic wheel grab margin based on brush model [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2015, 23(2): 380-388.
- [70] 王强, 赵又群, 林棻, 等. 新型机械弹性车轮包容特性的力学研究[J]. 振动、测试与诊断, 37(2): 266-272.
WANG Qiang, ZHAO Youqun, LIN Fen, et al. Mechanical study on enveloping characteristics for new mechanical elastic wheel[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2017, 37(2): 266-272.

作者简介: 赵又群(通信作者), 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车动态仿真与控制、汽车主动安全与控制、汽车结构力学与 NVH、新型动力与电动汽车、智能车辆人机共驾理论与方法、人-车-路协同与安全控制、安全车轮设计理论与方法、全线控安全电动轮驱动车辆理论与方法、无悬架(履带/装甲)车辆行走(驶)系统。
E-mail: yqzhao@nuaa.edu.cn

(上接第 104 页)

- [56] YOKOSHIMAV T, MUKOYAMA D, MAEDA F, et al. Direct observation of internal state of thermal runaway in lithium ion battery during nail-penetration test[J]. Journal of Power Sources, 2018, 393: 67-74.
- [57] ZHU J, LUO H, LI W, et al. Mechanism of strengthening of battery resistance under dynamic loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2019, DOI: 131. 10.1016/j.ijimpeng. 2019. 05.003.
- [58] JIA Y, YIN S, LIU B, et al. Unlocking the coupling mechanical-electrochemical behavior of lithium-ion battery upon dynamic mechanical loading[J]. Energy, 2019, 166: 951-960.

- [59] CHEN Y, SANTHANAGOPALAN S, BABU V, et al. Dynamic mechanical behavior of lithium-ion pouch cells subjected to high-velocity impact[J]. Composite Structures, 2019, 218: 50-59.

作者简介: 陈泽宇, 男, 1982 年出生, 副教授。主要研究方向为动力电池故障诊断及安全管理。
E-mail: chenzy@mail.neu.edu.cn

熊瑞(通信作者), 男, 1985 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为电动汽车动力电池系统管理与综合控制。
E-mail: rxiong@bit.edu.cn

孙逢春, 男, 1958 年出生, 教授, 博士研究生导师, 中国工程院院士。主要研究方向为车辆电传动, 车辆动力学。
E-mail: sunfch@bit.edu.cn