轮胎动力学通讯

Tire Dynamics Newsletter 2018年 第1期

本期导读

政策战略	轮胎动力学协同发展策略研究
标准法规	协同努力 培育标准 促进轮胎和汽车的技术进步
技术动态	轮胎动力学国内外技术动态
企业风采	恭贺山东玲珑轮胎股份有限公司成为联盟副理事长单位

TDA 轮胎动力学协同创新联盟
Tire Dynamics Collaborative Innovation Alliance

目 录

政策战略	3
轮胎动力学协同发展策略研究 郭孔辉，卢荡，吴海东	3
标准法规	8
协同努力 培育标准 促进轮胎和汽车的技术进步 郭孔辉	8
轮胎动力学标准体系 卢荡，李论	10
轮胎动力学CSAE标准工作进展简讯	12
技术动态	
轮胎动力学参数对车辆侧向动力学响应特性的影响分析 程泽木，孔智，卢剑伟	13
基于霍恩海姆轮胎模型的行驶动力学及舒适性研究 刘前进（译）	18
企业风采	
恭贺山东玲珑轮胎股份有限公司成为联盟副理事长单位	25
轮胎动力学协同创新联盟副理事长单位名录	26

政策战略

轮胎动力学协同发展策略研究

郭孔辉，卢荡，吴海东
（吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室，长春 130025）

摘要：在汽车及飞机的自主发展中，轮胎动力学是个重要瓶颈。本文对比了国内外轮胎动力学的发展状况，指出面临当前愈加激烈的国际竞争，我国轮胎动力学的发展存在较大挑战。在分析了轮胎动力学测试、仿真及应用技术的特点后，提出了协同发展我国轮胎动力学的策略及建议。

关键词：轮胎动力学；汽车；飞机；协同发展；策略

Tire Dynamics Collaborative Development Strategy

Guo Konghui，Lu Dang，Wu Haidong
（State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control，Jilin University, Changchun 130025）

Abstract：Tire dynamics is an important bottleneck in the autonomous development of automobiles and aircraft. This paper compares the development of tire dynamics at home and abroad and points out that in the face of the increasingly fierce international competition, there is a big challenge to the development of tire dynamics in our country. After analyzing the characteristics of tire dynamics test, simulation and application technology, the strategies and suggestions for collaborative development of tire dynamics in China are put forward.

Keywords：Tire Dynamics；Automotive；Airplane；Collaborative Development；Strategy

一、前言

轮胎是汽车、飞机、甚至于航天器不可或缺的零件，是与地面接触的唯一部件， 承载了汽车或飞机的载荷和运动功能，轮胎动力学是飞机自主研发和汽车自主发展的一个重要瓶颈，是国际公认的难题[1-4]。

轮胎具有多层异性结构，处于滚动大变形变接触的工作状态，影响轮胎动力学特性的因素包括侧偏角、侧倾角、纵向滑移率，当轮胎在路面上运动轨迹的曲率较大时，还会有明显的转偏率输入，同时垂直载荷、滚动速度、胎压、路面摩擦系数、路面曲率、温度都对轮胎动力学特性有显著影响，除了垂直力，轮胎与路面间还作用有侧向力、纵向力、翻倾力矩、滚动阻力矩及回正力矩，且因轮胎的变形使得这些力之间相互耦合、互为影响，胎面单元与路面间的接触、附着、滑移、脱离，也使轮胎动力学特性具有很强的非线性，因此轮胎动力学特性描述的是耦合非线性系统多输入多输出间的复杂力学关系。掌握轮胎动力学的核心数据、核心技术、核心理论、核心理念就必须掌握轮胎动力学相关的特性数据、先进模型及具体应用。

二、国内外轮胎动力学发展的对比

（一）国外轮胎动力学发展现状

美国、德国、荷兰自上世纪30年代就开始了轮胎动力学的研究，开发了Fiala、UA及Magic Formula（简称MF）等轮胎模型，在模型精度提高的同时，适用范围也从单一工况扩展至侧偏、纵滑等4维输入的复合工况。其中代表性的是荷兰Delft大学Pacejka教授于上世纪80年代中期提出的MF轮胎模型，该模型通过参数辨识技术可以从轮胎特性测试数据中获得表达轮胎力学性能的模型参数，MF轮胎模型在汽车动力学研究中获得了很好的应用，也被应用于飞机的地面动力学研究。同时，非水平路面的轮胎动力学测试及建模技术也迅速发展，目前开发有FTire、SWIFT及CDTire等轮胎模型[1]。

经验表明，理论及应用技术发展的主要推动力是测试技术的进步。目前，美国MTS公司开发的Flat Trac系列轮胎六分力试验台已在汽车轮胎动力学测试领域获得广发应用。在航空轮胎动力学测试技术方面，上世纪20年代末30年代初，美国空军在俄亥俄州赖特-帕特森空军基地（WPAFB）开始

建设飞机性能测试实验室，已建成LGSCE起落架系统中心，拥有许多世界独一无二的测试设备：转鼓直径3.048米（120英寸）的航空轮胎六分力动力计，转鼓的速度、轮胎垂直载荷、侧偏角、侧倾角可动态控制，并精确测量轮胎复杂运动状态下的耦合非线性六分力特性；鼓面直径4.2672米（168英寸）的内转鼓航空轮胎六分力动力计，因采用内鼓面作为模拟路面，因此可通过粘贴不同的路面材料来模拟真实路面状态，除了转鼓的速度、轮胎垂直载荷、侧偏角、侧倾角可动态控制外，轮胎的制动力矩或制动滑移率同样可控，可精确测量轮胎复杂耦合状态下的六分力特性；平板式航空轮胎六分力动力计，可以完成全面的轮胎动态及静态力学性能测试。被测试轮胎安装在定位机架上，该机架可以设定轮胎的侧偏角、侧倾角，并实现垂直加载及制动，用于路面模拟的平板可以纵向移动，带动轮胎转动，平板表面可以安装不同的路面材料满足测试要求，因此，可以精确测量轮胎复杂运动状态下的耦合六分力特性，主要用于航空轮胎滚动松弛长度、侧偏刚度、胎体侧向刚度、回正刚度及胎体扭转刚度的测量[5-6]。美国国家航空航天局（NASA）兰利研究中心1956年建立Aircraft Landing Dynamics Facility(ALDF)，规模极其庞大，经不断升级，目前测试跑道长度已达853米（2800英尺），航空轮胎动力学问题一直是该中心研究的重点，利用该设备已在航空轮胎滑水现象、轮胎路面摩擦磨损问题等方面进行了大量研究[7-8]。1960 年，基于大量的测试研究，发布 NASA Technical Report R-64 (Mechanical Properties of Pneumatic Tires With Special Reference to Modern Aircraft Tires)报告，该报告主要目标是研究影响航空轮胎力学性能的主要参数，并将这些参数与轮胎力学性能通过定量的公式表达[9]。1998年1月，NASA兰利研究中心成立起落架工作室，人员构成来自起落架及轮胎制造商、民航、通用航空、美国联邦航空管理局（FAA）、赖特-帕特森空军基地（WPAFB），大家一致的共识是“只要有精确的轮胎力学特性作为模型的输入，通过仿真完全可以预测起落架摆振和刹车震动时的动力学行为”［10]。工作室要求更新NASA Technical Report R-64，使其涵盖子午线轮胎及高级斜交胎的动力学特性，并已在1999年夏天全面展开了实质性的轮胎特性测试工作,已发布部分成果[11]。在航空轮胎力学性能测试设备不断发展的同时，国外基于测试结果的仿真应用研究也得到深入的开展，2000年，在Pacejka教授指导下，Lgo Besselink在前人研究的基础上系统开展了飞机主起落架的摆振研究， 结果表明：飞机地面动力学的仿真研究能够做到在起落架设计的早期就定位摆振问题，得到更优的设计，现在的多体动力学仿真软件结合高精度的轮胎模型可以进行飞机摆振的精确分析[12]。

可以看到，国外无论在汽车轮胎动力学还是航空轮胎动力学的试验、仿真及应用技术方面都取得了系统发展，支撑了高性能汽车及飞机的研发。

（二）国内轮胎动力学发展现状

我国轮胎动力学研究的直接起因是上世纪60年代红旗轿车的高速稳定性问题，因缺乏试验支持，初期进展缓慢。1984年随着成功开发了QY7329轮胎试验台，我国无法进行轮胎动力学测试的状况被彻底改变，轮胎动力学的研究得以快速推进。多年来瞄准全工况高精度的技术难点并结合我国汽车开发的实际需求，完成了汽车轮胎动力学理论、方法、装备及应用技术的系列创新：① 创立轮胎动力学统一建模理论，提出耦联传递矩阵的非稳态建模新方法，采用轮胎多维输入的归一化变换，建立多变量无量纲组合的统一模型，解决全工况高精度理论建模难题；② 首创轮胎-路面动态摩擦系数分离与插入方法，集成理论模型的全工况和边界高精度与经验建模局部高精度的优势，建立半物理UniTire轮胎模型，解决实用全工况轮胎模型高精度表达的难题；③ 开发出复合四连杆运动解耦轮胎试验台及微环境箱全天候全路况模拟胎面摩擦特性试验台，解决轮胎动力学特性全工况高精度测试难题；④ 提出UniTire模型参数分类分步高精度辨识方法，开发了三个版本针对汽车不同设计阶段需求的UniTire模型应用软件及参数辨识工具软件，解决汽车开发中轮胎模型高精度应用的难题[13-16]。

但在航空轮胎动力学方面的研究滞后较多，1989年10月，成都飞机发展部编译了中文版《现代航空轮胎的力学特性》一书，成为我国飞机开发长期以来最重要的参阅资料之一。轮胎动力学特性测试数据的匮乏，严重阻碍了我国航空轮胎动力学的应用研究，有限的应用研究尝试都是采用静态测试的数据，利用国外文献的一些经验公式粗略估算航空轮胎力学特性，用于起落架设计阶段，后期再通过起落架系统试验进行验证，一旦因为轮胎动力学性能导致系统试验不能通过，由于缺乏足够的数据，处理起来非常困难。2011年，吉林大学与中国航空工业集团公司西安飞机设计研究所合作开展了“LMS高级轮胎模型库技术开发”，将自主技术的UniTire轮胎模型应用于飞机开发的仿真分析，已经体现出相对常用分析软件中的通用轮胎模型的显著优势，大大提升了仿真分析结果的准确度，其仿真计算结果与飞机地面转弯试验及前起落架摆振试验有很好的一致性，进一步深入应用的潜力巨大。

近几年是我国航空工业发展的黄金时期，有大批在役、在研项目，但由于缺乏航空轮胎六分力的实测数据，导致设计阶段的仿真分析和实际情况发生偏差，往往到了试验阶段才能发现起落架系统发生摆振等等系列问题，严重时还需设计更改，带来时间周期拖延、试验费用增加、设计质量无法有效保证等问题。未来汽车及飞机产业面临的国际竞争将愈加激烈，我国轮胎动力学发展仍存较大挑战。

三、我国轮胎动力学协同发展的策略

轮胎动力学涵盖测试、仿真及应用三方面理论与技术，既包括汽车轮胎动力学又包括航空轮胎动力学，相同的理论、技术及方法是汽车与航空轮胎动力学协同发展的重要基础。

（一）测试技术协同发展策略

我国轮胎动力学测试技术具有以下特点：

（1）汽车轮胎动力学测试技术与航空轮胎动力学测试技术发展的不均衡，相比汽车轮胎，航空轮胎动力学测试技术基本空白，急需发展。

（2）重载汽车轮胎动力学测试技术与乘用车轮胎动力学测试技术发展的不均衡，重载汽车轮胎动力学测试技术明显欠缺。

（3）乘用车轮胎动力学测试设备过度发展，从2014~2017年国内采购了13台MTS Flat Trac试验台，但相关的试验规范及测试技术研究基本没有开展。

（4）相对于快速发展的我国航空工业，航空轮胎动力学测试设备发展显著滞后，以致目前我国没有可用的航空轮胎动力学测试设备。

（5）轮胎动力学测试技术的理论及应用研究不够深入。测试设备是测试技术发展的硬件平台，但测试设备不代表测试技术，需要在理论上认识清楚轮胎动力学，之后才能有针对性地开展测试技术的研究。

（6）轮胎动力学测试技术的标准、规范空白。相比美国、欧洲比较完善的轮胎动力学测试标准体系，我国轮胎动力学标准制定工作刚刚起步。

（7）掌握轮胎动力学测试技术的人才稀缺，一方面是专业性培训少，另一方面人才的培养缺乏系统的规划。

上述特点体现出的最大问题就是发展的“不均衡”，为了解决这个问题，我国轮胎动力学测试技术需要协同发展：

（1）企业与国家对测试技术发展投入的协同。测试技术发展需要投入必要的资金用于测试设备的建设，根据目前我国测试设备的现状，企业已经在产量高的乘用车轮胎测试设备上有了很大的投入，但对于航空轮胎动力学测试设备由于技术含量更高、投入更大，需要国家投入资金支持测试设备建设。

（2）购买国外技术与发展自主技术的协同。客观上，我国轮胎动力学整体水平与国外存在差距，但在轮胎动力学测试技术上我们也有自己独特技术，比如轮胎印迹中心恒定不动的复合滑移测试原理就是我们自己提出的专利技术，相比于目前MTS的测试技术具有优越性。因此，既要消化吸收国外的先进技术，也要不放弃发展自己的测试技术，尤其对于航空轮胎动力学特性测试试验台的开发更应如此，这样才能尽快建立起支撑航空轮胎与飞机研发的基础技术体系。

（3）测试技术与仿真技术的协同。从一定意义而言，仿真技术是另一种测试技术，是对现有测试技术的有效延伸，测试与仿真技术的紧密结合才能建立更全面的轮胎动力学测试技术体系。比如，目前满足航空轮胎高速重载测试需要的模拟路面是转鼓路面，但转鼓的曲率对测试结果有着不可忽略的影响，大直径转鼓制造成本高且也消除不掉曲率的影响，但结合仿真技术就可实现用小直径转鼓测试航空轮胎动力学特性的目标，我们已有相关的专利技术。

（4）航空轮胎与汽车轮胎测试技术的协同。轮胎都是充气且在路面上滚动使用的部件，无论是航空轮胎还是汽车轮胎都具有相同动力学特性机理，区别仅仅在于使用的载荷、速度、路面等具体工况，因此，可以建设一套高水平测试设备既满足航空轮胎测试需要，也可弥补目前汽车轮胎动力学特性测试能力的不足。

（5）测试设备整机开发与关键部件开发的协同。轮胎动力学测试设备开发的难点常在于关键部件的开发，比如重载轮胎动力学特性测试需要的大量程六分力传感器，我国六分力传感器基本依赖进口，若采购大量程的六分力传感器就需要投入巨额资金，而且也掌握不到相关技术，因此对于关键部件也需投入资源进行研发，这样才能保障轮胎动力学测试技术持续的发展。

（6）测试设备开发与标准规范制定的协同。标准规范代表一个领域的技术水平，需要深入系统的研究，如果掌握了测试技术，就容易制订符合我国现阶段发展需要的标准规范，否则照搬国外的标准可能会制约我国轮胎动力学测试技术的发展。

（7）技术研究与人才培养的协同。轮胎动力学是车辆动力学的基础，无论是理论研究还是试验研究都具有很大的挑战性，因此国际上专注轮胎动力学研究的团队不多，每年培养的人才非常有限，而我国对于掌握轮胎动力学测试技术的专业人才需求又是非常迫切，因此需要搭建一个交流平台，培养一批满足我国轮胎动力学技术发展需要的技术人员。

（二）仿真技术协同发展策略

国外的轮胎动力学研究中，以荷兰Pacejka教授为代表，在理论研究上做过非常系统深入的工作，但在工程应用方面的思路仍以“经验”为主导，纯经验方法是轮胎模型建立的主流方法，既根据对大量轮胎试验数据的观察，寻找形式比较巧妙的数学公式，运用参数辨识技术，建立轮胎动力学特性输出与输入变量间的纯经验描述，最具代表的就是Pacejka教授提出的M F轮胎模型。理论模型多采用特定性假设，工况适用范围小，精度不高。

国内，以郭孔辉教授团队为代表，研究思路以“理论”为核心，通过全工况理论模型的建立，理清复杂轮胎动力学表象背后的内在联系，并基于理论模型指导，建立吸取经验建模优势的半物理UniTire模型。

因此，我国轮胎动力学仿真技术发展要充分利用已有的理论基础，以满足汽车、航空工业的快速发展为目标，做好以下的协同：

（1）汽车轮胎与航空轮胎动力学仿真技术发展的协同。无论是汽车轮胎还是航空轮胎都是与地面接触的唯一部件，因此其力学特性对于汽车或飞机的开发都是至关重要的，但由于各种原因，汽车轮胎与航空轮胎动力学仿真技术存在发展的不平衡，目前的情况是，汽车动力学仿真中非线性非稳态轮胎模型的使用已非常普遍，但在飞机地面动力学仿真中最新的轮胎模型技术还未得到广泛应用。

（2）仿真技术与测试技术的协同。仿真技术的运用可以显著缩短开发周期、降低开发成本，目前在汽车的开发中可以说离开仿真技术寸步难行，但仿真技术的发展离不开测试技术的支持，汽车轮胎动力学测试技术已基本健全，但我国航空轮胎动力学测试技术基本空白，急需发展。

（3）仿真技术与应用技术的协同。仿真的目的是应用，同时应用的需求将引导仿真技术发展方向。不同的应用问题对轮胎动力学模型的要求是不同的，要开发方便轮胎动力学模型应的工具软件。

（4）做好理论研究与经验建模方法的协同。轮胎结构复杂、使用工况多变，在考虑振动噪声特性时也要顾及与其配套的轮辋特性，其动力学特性的描述一直是车辆动力学研究领域的难点问题。已有的工作表明，纯理论或纯经验的轮胎动力学模型在应用上都存在问题，而半物理或半经验的模型才是轮胎动力学仿真技术发展的主流方向。

（三）应用技术协同发展策略

依托于商业化的软件平台，国外的轮胎动力学应用技术已经普及，而我国轮胎动力学应用技术发展中还存在一些问题：

（1）我国中高频轮胎模型应用并不广泛，国内只有部分单位在应用FTire、SWIFT等中高频模型，并且由于模型本身的复杂性及使用者自身能力的局限性，存在许多无法理解、无法验证的公式，影响FTire模型、SWIFT模型的深入应用。

（2）国外许多先进模型不仅在汽车轮胎行业取得了领先的地位，实现了与动力学软件对接嵌入，在航空轮胎方面也取得了很大的成功。我国航空轮胎动力学模型的应用还不深入，在解决实际问题时有些甚至采用简化的线性模型，导致的直接问题就是仿真可信度问题。

（3）虽然我国已经引进了PAC2002、FTire等模型，由于一些技术原因只能对民用汽车轮胎准确的建模，但由于民用轮胎与军用轮胎的不同，航空轮胎与汽车轮胎的不同，使得我国军用轮胎与航空轮胎力学的发展明显落后于民用汽车轮胎。在航空轮胎和军用轮胎的领域，需借鉴国外技术成果，并在其基础上推陈出新，以拓宽轮胎动力学应用领域。此外，基于轮胎动力学应用的轮胎设计方法研究也不足。

为了解决这些问题，需要协同发展我国轮胎动力学应用技术，重点在于：

（1）基础数据库与流程规范的协同发展。要加强仿真基础资源库建设，坚持“以我为主”，在历史仿真和试验数据积累基础上，综合运用虚实混合的方法构建一套工程可用的仿真基础资源库，并将成熟度管理方法引入到仿真模型管理方面，建立一套多层级、多精度、多尺度的仿真模型管理方法和行业建模规范，在此基础上建立面向汽车、飞机及轮胎设计的仿真可信度评估体系。

（2）面向不同设计阶段需求的轮胎模型接口技术的协同发展。在汽车或飞机开发的不同阶段，解决的应用问题是不同的，需要不同复杂程度的轮胎模型，因此基于动力学仿真平台的接口规范开发系列轮胎模型是满足应用需求的有效手段。

（3）自主模型应用技术与引进模型应用技术的协同发展。轮胎模型因其复杂性，在应用中需要很强的技术背景，为方便轮胎模型应用，需要开发不同模型的参数辨识、模型参数调整的工具软件，借助于工具软件可实现多种轮胎模型的正确的应用。

四、加快我国轮胎动力学协同发展的建议

（一）以航空轮胎动力学与汽车轮胎动力学协同发展为目标，实现优势互补，共同发展

汽车工业是我国国民经济的支柱产业，航空工业是高端制造业的“顶梁柱”，轮胎动力学既包括汽车轮胎动力学又包括航空轮胎动力学，相近的理论、技术及方法是汽车与航空轮胎动力学协同发展的重要基础，而且在目前条件下，只有协同发展才能充分利用已有技术、强强结合、优势互补，突破国外技术壁垒，共同支撑我国汽车工业及航空工业的快速发展。轮胎动力学测试技术是仿真技术的依托，而仿真技术又是应用技术的基础，应以系统开展轮胎动力学测试技术、仿真技术及应用技术为抓手，实现轮胎动力学的协同发展。

（二）以研制“航空轮胎耦合非线性六分力测试装备”为突破口，满足高性能飞机研发的需要

航空轮胎是飞机起落架系统的重要部件，其滚动力学性能——六分力特性，直接影响飞机起飞、着陆、制动、转弯和滑行阶段的运动特性，也直接关系飞机安全。六分力特性是飞机尤其是高性能飞机设计过程中非常重要的基础数据。我国目前还在使用50年代的数据指导设计，然而现在的轮胎技术与50年代相比已经有了质的变化，飞机性能也早就不可同日而语了，继续使用那时的数据是极不科学也是潜在巨大危险的，需要研制航空轮胎六分力专用测试装备。

参考文献

[1] Hans B. Pacejka, Igo Besselink: Tire and Vehicle Dynamics (Third Edition). Elsevier Ltd, ISBN: 978-0-08-097016-5, 2012

[2] Zongxia Jiao, Xiaochao Liu, Fengyu Li, and Yaoxing Shang: Aircraft Antiskid Braking Control Method Based on Tire–Runway Friction Model. Journal of Aircraft, Vol. 54, No. 1, pp. 75-84, 2017

[3] Howcroft C., Krauskopf B., Lowenberg MH. & Neild SA.: Influence of Variable Side-Stay Geometry on the Shimmy Dynamics of an Aircraft Dual-Wheel Main Landing Gear. SIAM Journal on Applied Dynamical Systems, vol 12., pp. 1181-1209, 2013

[4] Konghui Guo, Dang Lu: UniTire: unified tire model for vehicle dynamic simulation. Vehicle System Dynamics, Vol. 45, Supplement 1, 79-99, 2007

[5] John F. Carter, Christopher J. Nagy: The NASA Landing Gear Test Airplane. NASA Technical Memorandum 4703, 1995

[6] J. Greer Mc Clain, Martin Vogel and Dennis R. Pryor, Hugo E. Heyns: The United States Air Force's Landing Gear Systems Center of Excellence -A Unique Capability-. AIAA 2007-1638, 2007

[7] http://gftd.larc.nasa.gov/facilities/aldf.html

[8] http://www.nasa.gov/centers/langley/events/aldf_demonstration_prt.htm

[9] Robert F., Smiley and Walter B., Horne: Mechanical Properties of Pneumatic Tires with Special Reference to Modern Aircraft Tires. NASA Technical Report R-64, 1960

[10] J. Pritchard: An Overview of Landing Gear Dynamics, NASA Langley R.C., TM-1999-209143, ARL-TR-1976, May 1999

[11] Robert H. Daugherty: A study of the mechanical properties of modern radial aircraft tires[R]. NASA/TM-2003-212415, Virginia, USA: Langley Research Center, NASA, Langley Field, 2003

[12] I.J.M. Basselink. Shimmy of Aircraft Main Landing Gears. Doctoral Thesis, 2000

[13] Konghui Guo, Dang Lu and Ren Lei: A Unified non-steady non-linear tyre model under complex wheel motion inputs including extreme operating conditions. JSAE REVIEW, Vol22, Iss 4, 396-402, 2001

[14] Konghui Guo, Dang Lu et al.: The UniTire Model: a non-linear and non-steady-state tyre model for vehicle dynamic simulation. Vehicle System Dynamics, Vol. 43, Supplement 1, 341-358, 2005

[15] Dang Lu, Konghui Guo et al.: Modelling of tire overturning moment and loaded radius. Vehicle System Dynamics, Vol. 44, Supplement 1, 104 - 114, 2006

[16] Xiaopei Lu, Konghui Guo, Dang Lu and Yinglin Wang: Effect of tire camber on vehicle dynamic simulation for extreme cornering. Vehicle System Dynamics, Vol. 44, Supplement 1, 39 - 49, 2006

标准法规

协同努力 培育标准 促进轮胎和汽车的技术进步

郭孔辉
（中国工程院 院士，轮胎动力学协同创新联盟 理事长）
（2018年9月5日轮胎动力学标准及应用研讨会 重要讲话）

一、引言

大家都认为制定轮胎动力学的相关标准非常重要，要尽快抓紧制定。我们作为轮胎动力学协同创新联盟，对标准推动工作责无旁贷。让我起个头，先作个发言，起个抛砖引玉的作用。做轮胎动力学相关标准，我也缺乏经验，说的不对的地方，希望大家不受我的片面意见的影响，群策群力，共同做好轮胎动力学标准的起步工作。

最近我们大家通过电邮、微信有许多专家提出了不少很好的想法与意见，有一些还需要我们认真的思考讨论来汇集大家的智慧。

这次会议若果意见未能取得一致，也不要紧，也可以先讨论几条原则，例如：有利于及早推进轮胎动力学相关工作的发展，有利于各相关单位协同工作和标准的推行等。相信通过大家的协同努力，一定能高质量地完成这个重要的历史性任务。

二、轮胎标准的种类

一般说来，标准有国家标准、行业标准和国际标准之别；还有成熟的程度不同分为“法规性”和“推荐性”标准，成立之前标准需要经过国家标准法规机构的审批；国际标准则要经过ISO委员会的审定。各个企业根据自身生产经营活动的需要又可以有各自的企业标准。根据标准适用范围又可分为：产品标准，为相关应用提供依据；试验标准，实验条件、评价方法、数据表达等的统一，为产品特性的的比较提供依据；名词术语标准，为整个行业名词术语的统一，提供共同语言，方便沟通。

（1）产品标准

例如，GB/T 21910-2008轿车轮胎规格、尺寸、气压与负荷。

（2）试验标准

例如，GB/T 33829-2017轿车轮胎雪地抓着性能试验方法。

美国通用汽车公司曾对轮胎供应商提出《通用》对轮胎供应商的轮胎性能评价的评价准则（TPC），引起全球轮胎供应商的严重关注。

（3）名词术语标准

ISO的轮胎动力学标准基本涵盖了汽车动力学名词术语标准。

三、标准的产生与发展

标准因生产科技活动需要而产生，随着科技进步而发展。标准是生产和科技活动的结晶，适时修订通常是不可避免的。随着生产和科技活动的进步，有些落后了，就予以废除；有的由于在生产与科技发现新问题，出现新需求。

例如，轮胎的滚动阻力对汽车的耗能有重要影响；滚动阻力的要求和试验方法对提高轮胎的能耗的重要性（包括试验方法的统一等；起初用双小鼓，后改为统一尺寸的大鼓）。尚未得到我国有关企业的重视。

又例如，轮胎制造的均匀性（Uniformity）影响着轮胎的振动、噪声；因而要求制定控制均匀性的标准和试验方法标准。

再如，子午轮胎出现后出现“Ply steer”（“帘线層转向”）和“Conisity”（“帘线層锥度”）影响汽车的

四、操纵稳定性标准的经验

大跃进时期，到处开发新汽车，每一种新车几乎都存在操稳问题，例如“红旗”高速失控；“吉普”等多种汽车甩尾；“解放”、“东风”等车摆头；回正性很差等等。汽研所和清华相继开展汽车操稳性研究在汽研所（本人）的主持下制定了六项操稳性试验方法标准和评价方法。各企业积极贯彻试行，操稳性问题得到很大程度的扭转。

标准制定要有的放矢，尽量结合解决实际问题；标准制定要尽量基于对实际问题的了解和深入的研究。例如基于对“红旗”高速失控；“吉普”等多种汽车甩尾的深入研究。既要充分吸收国际的成果与经验，也要结合对实际问题的研究，对于一些国外比较成熟的标准我们可以借鉴、翻译采用；但不能只做国际标准的翻译。

五、标准随科技的发展而改变

最近我国开始重视轮胎的六分力特性，但对实验条件的控制、要求的规定（包括国外科技界）都不够明确。

六分力试验，速度条件的转换，如何节省成本，如何减少试验工作量都需要进一步明确；这里需要总结经验并开展相关的科研工作。轮胎在冰雪路面上的阻力与牵引性能的测试方法与指标，都是需要我们深入研究的问题。轮胎在极限工况下的性能更是存在非常复杂的问题

及早制定必要的标准，有利于轮胎和汽车的技术进步。标准的制定既要有合理性、先进性，也需要有广泛的可行性。意见不统一时，也可以“先宽后严”，循序渐进。根据技术发展的轻重缓急，做出规划积极推进。

六、建议首先推进的标准项目

建议根据轻重缓急安排计划，也可以同时分工负责，同时推进。建议抓紧推进的标准项目有：

（1）轮胎的滚动阻力；

（2）轮胎的耐磨性试验方法；

（3）轮胎的均匀性(uniformity)；

（4）轮胎的“帘线转向”（ply-steer）与“锥度”(conisity) 试验方法；

（5）轮胎力与力矩（F&M）试验方法；

（6）高速轮胎六分力试验方法，避免轮胎磨损，影响特性；

（7）轮胎复合六分力试验方法；

（8）轮胎六分力试验车速的标定与预测方法。

轮胎动力学标准体系

卢 荡[1]，李 论[2]
（1 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室，长春 130025）
（2 一汽集团研发总院底盘开发所，长春 130000）

轮胎作为汽车与路面接触的唯一部件，承载了汽车的载荷和运动功能。轮胎动力学涵盖测试、仿真及应用三方面理论与技术，是汽车技术自主发展的一个重要瓶颈，也是国际公认的技术难题。在当今汽车电动化、智能化发展潮流中，轮胎动力学正焕发出蓬勃的生机，新型汽车底盘匹配设计、高安全性电控系统开发及智能轮胎核心算法都依赖于对轮胎动力学的理解与掌握，填补我国轮胎动力学相关标准的空白是急需解决问题。

为理清轮胎动力学标准制定工作思路，应首先重点规划轮胎动力学标准体系，否则容易导致标准工作混乱、引起标准间的相互矛盾。轮胎动力学标准体系框架提出后，标准体系可随标准推进工作逐步完善。

首先应搭建基础性表准，之后基于此建立应用性标准。

一、基础性标准

基础性标准，即方法性标准。除轮胎动力学术语标准外，基础性标准可分为静态特性标准、稳态特性标准、瞬态特性标准以及动态特性标准（见图1）。

基础性标准适用于所有类型轮胎，**其重点在于描述清楚测试方法的具体实施过程，方便应用性标准对基础性标准进行不同程度的引用。**对试验轮胎、试验设备，以及具体试验条件如载荷、速度、侧偏角等的设定可以在应用性标准中明确。

（1）术语标准

轮胎动力学术语标准应包含轮胎动力学专业术语，规范和界定了行业交流最基本的内容，统一共同语言。

（2）静态特性标准

静态特性标准可分为：轮胎接地印迹形状测试方法、平路面侧/纵/垂向刚度测试方法、平路面原地转向特性测试方法、横/纵斜置Cleat侧向刚度测试方法、横/纵斜置Cleat纵向刚度测试方法等。描述轮胎静态特性试验方法。

（3）稳态特性标准

稳态特性标准可分为：稳态侧偏特性测试方法、稳态纵滑特性测试方法、稳态复合滑移特性测试方法、稳态转偏特性测试方法等。描述轮胎稳态特性试验方法，不体现具体设备、条件和参数等信息。

（4）瞬态特性标准

瞬态特性标准可分为：侧偏角/滑移率准稳态试验方法、侧偏角阶跃试验方法、转动角阶跃试验方法、纵向力瞬态特性试验方法、垂直动载荷侧偏特性试验方法等。描述轮胎瞬态特性试验方法，不体现具体设备、条件和参数等信息。

（5）动态特性标准

动态特性标准可分为：横置Cleat动态特性测试方法、斜置Cleat动态特性测试方法、高速均匀性/模态特性测试方法

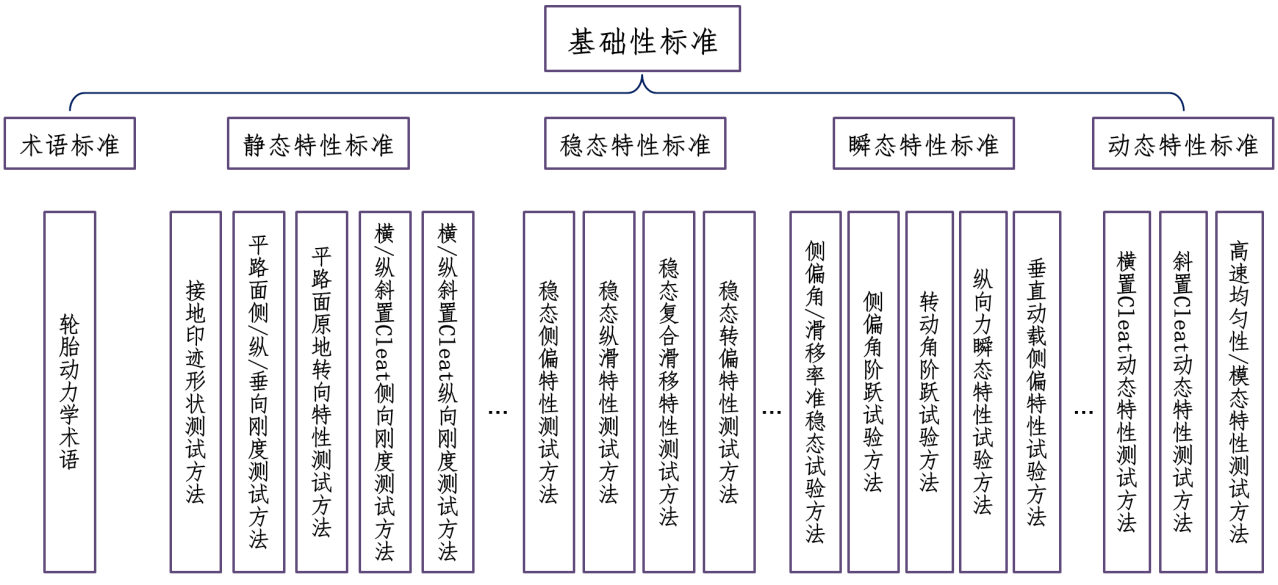


图1. 轮胎动力学基础性标准分类建议

二、应用性标准

应用性标准（见图2）可按乘用车轮胎、商用车轮胎等特定类型的轮胎进行分类。**重点在于针对具体应用目标描述清楚具体的试验条件**（如轮胎的准备、预跑、试验的载荷、速度等条件），测试方法则可直接引用基础性标准中对于方法的描述。

针对不同类型的轮胎，应用性标准又可分为：侧偏特性对标分析方法、纵滑特性对标分析方法、复合滑移特性对标分析方法、PAC模型建模测试方法、UniTire模型建模测试方法、FTire模型建模测试方法、CDTire模型建模测试方法等。

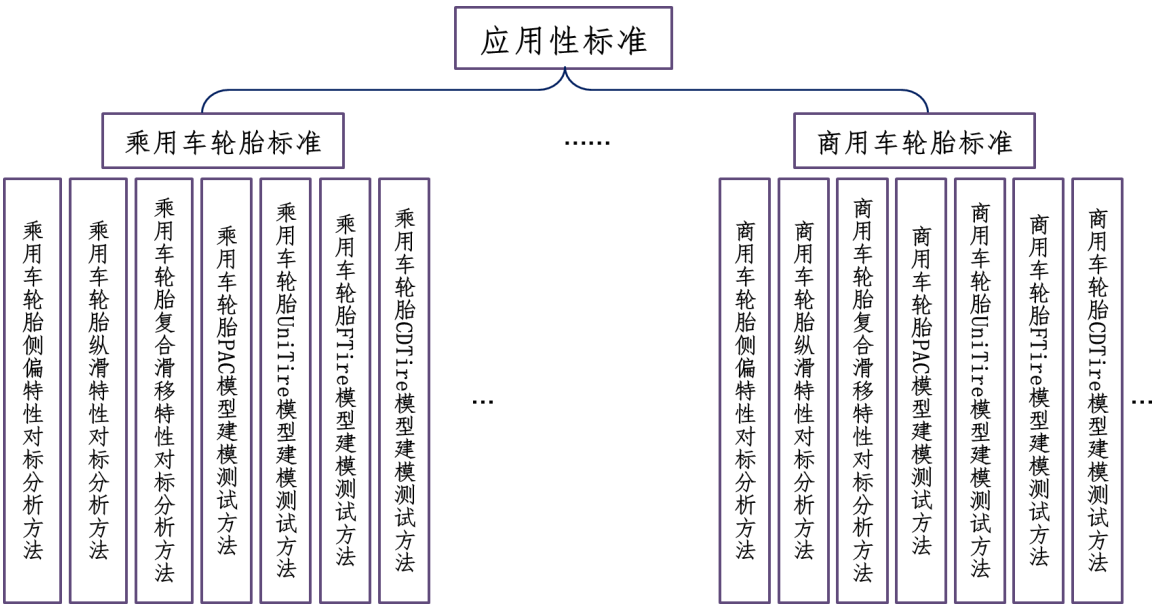


图2. 轮胎动力学应用性标准分类建议

轮胎动力学CSAE标准工作进展简讯

2018年9月5日~6日，“轮胎动力学标准及应用研讨会”在重庆召开，本次会议由轮胎动力学协同创新联盟主办，中国汽车工程研究院股份有限公司承办。

中国汽车工程研究院股份有限公司研发中心主任邓兆祥先生为会议开幕致辞。 联盟理事长郭孔辉院士发表了题为《协同努力，培育标准 促进轮胎和汽车的技术进步》重要讲话 重要讲话。来自轮胎企业、汽车主机厂、研究机构及高校的共计57位相关技术专家参会。

5日下午，中国汽车工程学会高级经理丁彦辞先生主持了“CSAE标准专家组成立大会暨立项审查会”，郭孔辉院士亲自为联盟CSAE标准专家组颁发聘书。

与会专家针对《轮胎稳态侧偏特性试验方法》、《轮胎稳态纵滑特性试验方法》与《轮胎稳态复合滑移特性试验方法》三项标准进行深入研讨。

轮胎动力学是我国轮胎行业实现转型升级的关键技术，轮胎动力学相关标准缺失是行业急需解决的问题。制定统一标准，才能促进汽车产业自主汽车发展，让轮胎、汽车企业不再闭门造车，共同进步，轮胎动力学协同创新联盟会更加积极努力推动和参与我国相关标准的制定。

9月17日中国汽车工程学会发布了《轮胎稳态侧偏特性试验方法》等3项轮胎动力学标准立项讯息，并公布了三项标准任务书号。（http://csae.sae-china.org/a2539.html）

《轮胎稳态侧偏特性试验方法》等3项轮胎动力学标准立项

发布时间：2018-09-17 来源：中国汽车工程学会

序号	任务书号	标准项目名称
1	2018-41	轮胎稳态侧偏特性试验方法
2	2018-42	轮胎稳态复合滑移特性试验方法
3	2018-43	轮胎稳态纵滑特性试验方法

项目提出单位：轮胎动力学协同创新联盟

项目牵头单位：吉林大学

项目进展情况咨询：技术标准部　010-50950080　dyc@sae-china.org

9月20日三项标准征求意见稿提交至中国汽车工程学会并开始公开征集意见。

（本刊讯）

技术动态

轮胎动力学参数对车辆侧向动力学响应特性的影响分析

程泽木[1]，孔智[2]，卢剑伟[2]
（1 安徽江淮汽车集团股份有限公司 合肥 230091）
（2 合肥工业大学汽车与交通工程学院 合肥 230009 ）

摘要：本文研究轮胎动力学参数对车辆侧向动力学响应的影响。以Adams/Car为软件平台建立了整车刚柔耦合动力学模型，并验证了所建立模型的准确性。基于该模型以定方向盘转角仿真工况为例，考察了轮胎垂向刚度、侧向刚度及外倾角等参数对横摆角速度、车身侧倾角等侧向动力学响应的影响，为轮胎动力学参数匹配提供一定的参考。

关键词：轮胎动力学参数；车辆侧向动力学响应；整车刚柔耦合动力学模型

Analysis of Influence of Tire Dynamic Parameters on Vehicle Lateral Dynamic Response Characteristics

Zemu Cheng[1], Zhi Kong[2], Jianwei Lu[2]
(1. Passenger Car of Research Center, Anhui Jianghuai Automobile Co., Ltd., Hefei 230601,China;)
(2. School of Automotive and Transportation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009,China)

Abstract：This article studies the influence of tire dynamics parameters on the lateral dynamic response of the vehicle. The rigid-flexible coupling dynamic model of the whole vehicle was established with Adams/Car as a software platform, and the accuracy of the established model was verified. Based on the model's simulation of the steering wheel rotation angle, the effects of the tire's vertical stiffness, lateral stiffness, and camber angle on lateral dynamic response, such as yaw rate and body roll angle, were investigated. Matching provides a certain reference.

Keywords：Tire dynamics parameters; Vehicle lateral dynamic response; Rigid-flexible coupling dynamic model of complete vehicle;

1. 引言

汽车操纵稳定性关系到驾驶员的驾驶感受和交通安全，是反映汽车设计和制造水平的重要指标。随着社会经济的发展，汽车保有量逐年增长，汽车已经成为人们必不可少的一种交通工具。人们对于汽车操纵性能也提出了更高的要求。轮胎作为车辆与路面间传递力和力矩的唯一部件，对汽车的操纵性能有着重要的影响。轮胎与车辆之间的合理匹配直接关系到车辆操纵稳定性的好坏。本文依托某SUV研究轮胎动力学参数匹配对车辆侧向动力学响应的影响。

2. 轮胎动力学模型参数简述

轮胎是车辆重要的组成部分，直接与地面接触。由于轮胎材料、结构及其与路面相互作用关系的复杂性，轮胎的动力学特性对车辆动力学有重要的影响。轮胎建模第一步要先确定输入输出，明确建模重点，如图1所示。

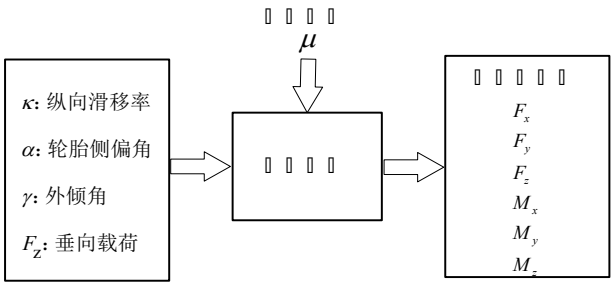


图1 基于魔术公式的轮胎模型的输入与输出

在汽车动力学应用中，魔术公式（Magic Formula）能很好地建立轮胎-地面交互作用。魔术公式是用三角函数的组合公式拟合轮胎试验数据，用一套形式相同的公式来完整地表达轮胎的纵向力、侧向力、回正力矩、翻转力矩、阻力矩，以及纵向力、侧向力的联合作用工况，魔术公式的一般表达式为

$$Y(x)=D\sin[C\arctan\{Bx-E(Bx-\arctan(Bx))\}] \quad (1)$$

其中，$Y(x)$是F_y或者F_x；D为峰值因子，表示曲线峰值特征；C为形状因子，影响曲线的形状；B为刚度因子，影响曲线的斜率；E为曲率因子，改变曲线峰值处的曲率特征，其曲线参数特征如图2所示。

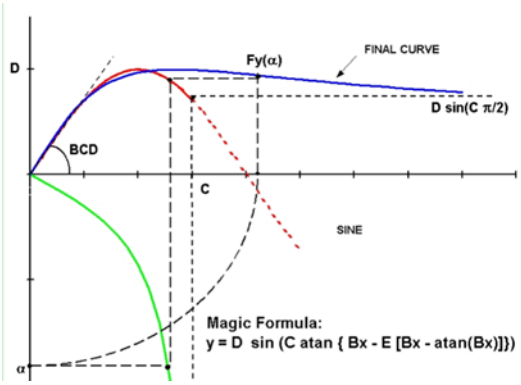


图2 魔术公式参数特征

3. 面向侧向动力学分析的整车多体动力学建模

为了考察轮胎动力学参数对车辆侧向动力学响应的影响，基于Adams/Car软件平台建立整车的多体动力学模型，对悬架、车身、转向、轮胎等子系统建模要点做如下说明。

（1）悬架：前悬架为麦弗逊结构，后悬架为多连杆结构，对后悬架拖曳臂以柔性体建模。悬架硬点坐标依据车型数据确定，部件之间根据其连接特征采用衬套和球铰等方式连接，相关弹簧、减震器、缓冲块、衬套的参数通过试验获得。

（2）车身：将车身定义为质量块，转动惯量SAE估值公式如下：

$$\begin{cases} I_{xx}=(RH+Hg)*TW*m/K_x \\ I_{yy}=(RH+Hg)*L*m/K_y \\ I_{zz}=TW*B*m/K_z \end{cases} \quad (2)$$

其中：***TW***=轮距，***B***=轴距，***m***=汽车质量，RH=车顶离地高度，***Hg***=汽车质心高度，***L***=汽车总长，上述单位为kg与m，K_x：轿车7.9846，K_y：轿车5.2901，K_z：轿车2.1942。

（3）转向：该车型转向系统采用齿轮齿条机构，关键点坐标由该车型总布置数据确定，传动比通过最大转向角与最大齿条位移确定。

（4）轮胎：根据样车轮胎六分力试验数据对轮胎力学模型参数进行辨识，对轮胎属性文件进行修改，建立轮胎子系统。

（5）其它零部件如前后横向稳定杆、动力总成等参数依据车型参数确定。各子系统之间用通讯器进行连接。

整车多体系统动力学模型的拓扑结构如图3所示，得到的整车刚柔耦合模型如图4所示。

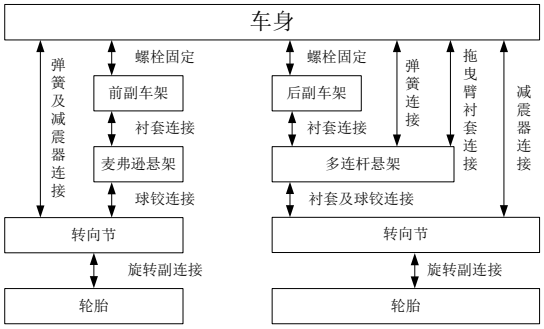


图3 整车拓扑结构

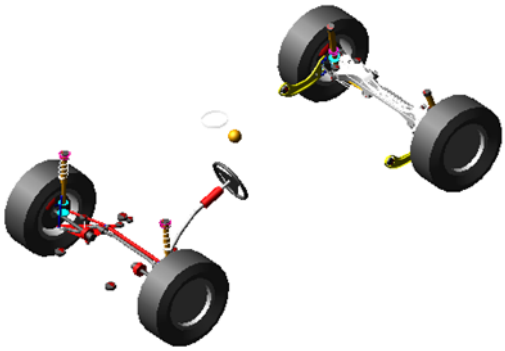


图4 整车刚柔耦合模型

在Adams/Car中进行同向轮跳仿真实验，并与实车试验进行对比，其中，将车身及方向盘锁止，并施加制动力矩使车轮不能绕自身旋转轴转动，左右车轮在垂直加载缸的作用下同向跳动，将得到的测试结果与实际测试结果对比，如图5所示。

从图中可以看出，同向轮跳时仿真试验结果与实车试验数据吻合较好，这也验证了所建立模型的准确性。其中曲线基准（即曲线最高最低点）的差异主要是因为试验车与仿真模型车身姿态不同，而曲线变化范围的不一致主要是模型与试验车悬架硬点实际坐标存在的差距造成，这种误差主要是试验样车的制造与装配误差造成。

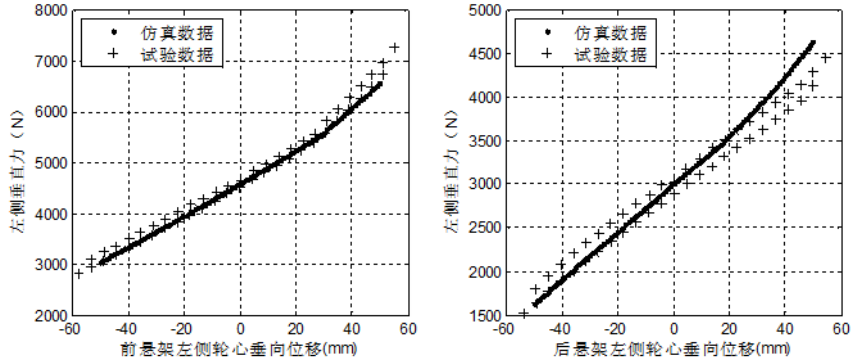
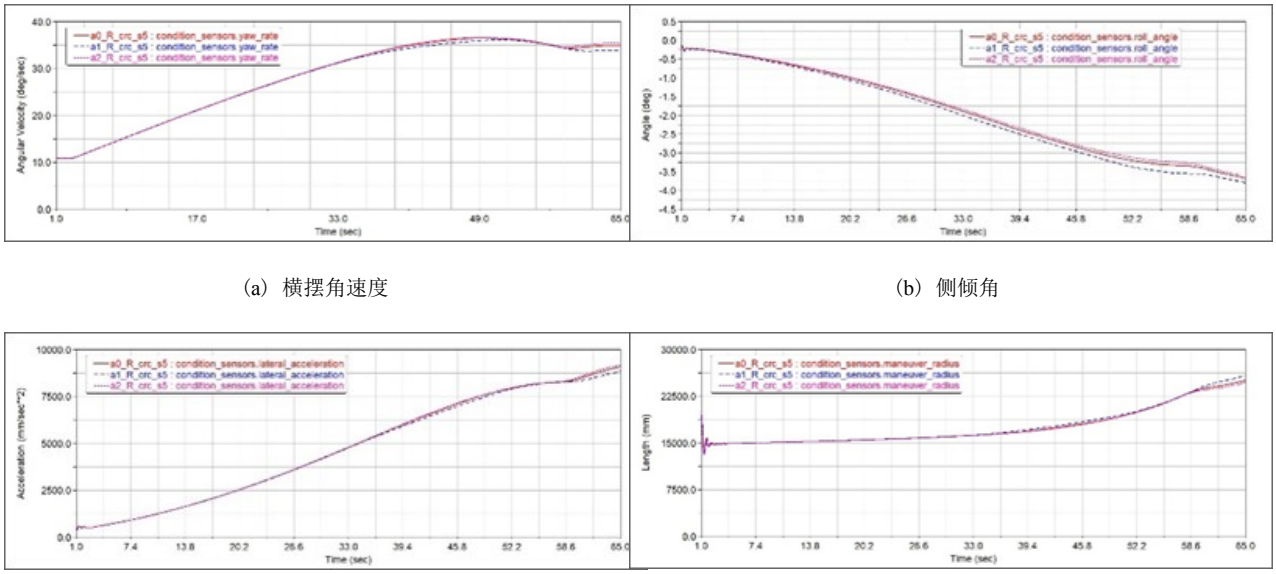


图5 轮心垂向位移与垂直力图

基于上述所建立的整车多体动力学模型，考察轮胎垂向刚度、侧向刚度、外倾角等轮胎参数对整车侧向动力学响应的影响。

4.1 垂向刚度

以整车仿真的定方向盘转角为仿真工况，考察垂向刚度分别为210000N/m，260000N/m，310000N/m时车辆动态响应的结果，如图6所示，其中蓝色，红色和粉红色曲线分别代表垂向刚度为210000N/m，260000N/m，310000N/m。



（a）横摆角速度 （b）侧倾角

（c）侧向加速度 （d）转向半径

图6 车辆动态响应（垂向刚度改变）

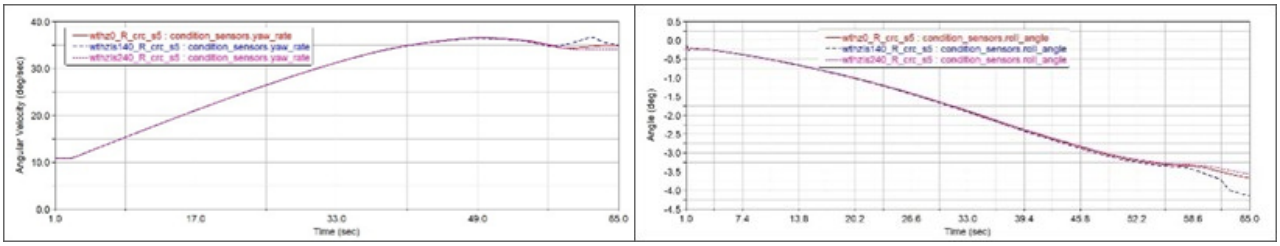
从图6（a）中可以看出垂向刚度较低时，横摆角速度的峰值也较低。从图（b）中可以发现车身侧倾角随着垂向刚度的减小而增大。图（c）和（d）表明垂向刚度对侧向加速度的影响较小，垂向刚度较小时，转向半径会略微增大。

4.2 侧向刚度

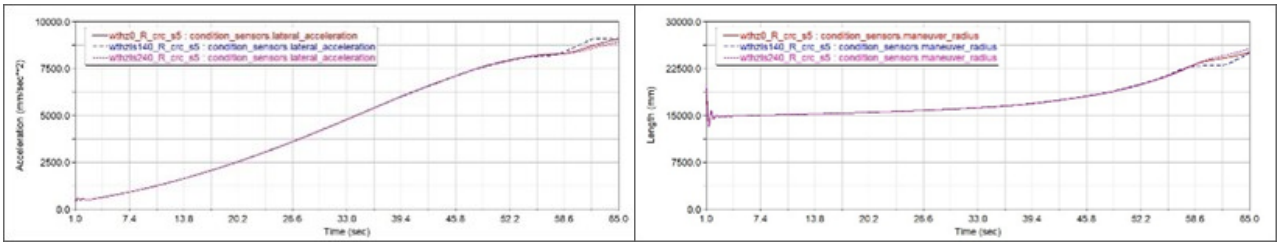
以整车仿真的定方向盘转角为仿真工况，考察侧向刚度分别为140000N/m，190000N/m，240000N/m时车辆动态响应的结果，如图7所示，其中蓝色，红色和粉红色曲线分别代表垂向刚度为140000N/m，190000N/m，240000N/m。

动态响应的结果，如图6所示，其中蓝色，红色和粉红色曲线分别代表垂向刚度为210000N/m，260000N/m，310000N/m。

从图7（a）中可以看出侧向刚度较低时，横摆角速度的峰值较高。从（b）中可以发现车身侧倾角随着垂向刚度的减小而增大。图（c）和（d）表明垂向刚度较小时，侧向加速度略微增加，转向半径略微减小。



(a) 横摆角速度　　(b) 侧倾角



(c) 侧向加速度　　(d) 转向半径

图7 车辆动态响应（侧向刚度改变）

4.3 外倾角

以整车仿真的定方向盘转角为仿真工况，考察外倾角分别为0.5°，-0.5°，-1.5°时车辆动态响应的结果，如图8所示，其中红色，蓝色和粉红色曲线分别代表垂向刚度为0.5°，-0.5°，-1.5°。

从图8（a）中可以看出外倾角为0.5°时，横摆角速度较低。从（b）中可以发现外倾角为-1.5°时，车身侧倾角有明显的增加。图（c）和（d）表明外倾角为0.5°时，侧向加速度减小，转向半径略微增加。

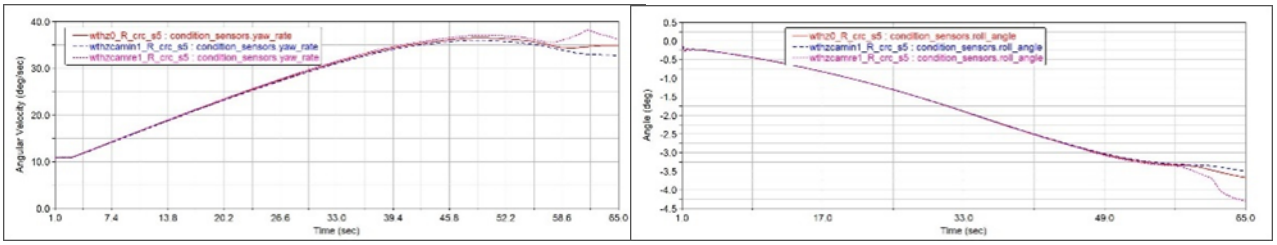
5. 结论

（1）车轮垂向刚度、侧向刚度及外倾角对车辆横摆角速度响应均有影响，其中外倾角对其影响较大，将外倾角设为正值获得更好的车身横摆响应。

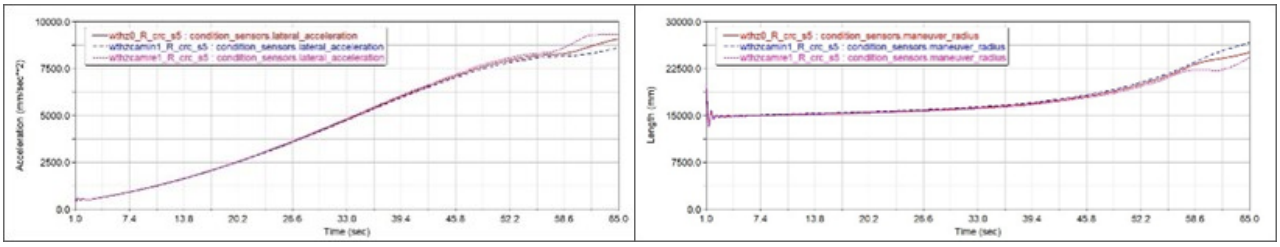
（2）车身侧倾角对轮胎参数设置较为敏感，垂向刚度和侧向刚度的减小都会引起侧倾角增大，外倾角为正值时，侧倾角减小。

（3）轮胎垂向刚度及侧向刚度对侧向加速度影响不明显，外倾角为正值时，侧向加速度有明显的降低。

（4）转向半径随着垂向刚度的减小而增大，随着侧向刚度的减小而减小，外倾角为正值时，转向半径明显增大。



(a) 横摆角速度　　(b) 侧倾角



(c) 侧向加速度　　(d) 转向半径

图8 车辆动态响应（外倾角改变）

参考文献

[1]胥永宫. 轿车轮胎操纵稳定性匹配研究[D]. 吉林大学，2011.

[2]喻凡，林逸. 汽车系统动力学[M]. 机械工业出版社，2005.

[3]陈军. MSC.ADAMS技术与工程分析实例[M]. 中国水利水电出版社，2008.

[4]姜俊昭. 计入运动副间隙的车辆制动摆振动力学分析及干预策略研究[D]. 合肥工业大学，2017.

基于霍恩海姆轮胎模型的行驶动力学及舒适性研究

刘前进　译

（吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室，长春 130025）

原文作者：

Alexander Bürger

研究助理

霍恩海姆大学农业工程研究所

Stefan Böttinger 教授

农业工程研究所所长

农业工程系系主任

霍恩海姆大学

摘要：为在开发阶段避免物理原型的使用并降低成本，需建立整车仿真模型。在整车仿真模型中，轮胎与路面的接触建模尤为重要。霍恩海姆大学农业工程研究所针对农用轮胎开发了专用轮胎模型，即霍恩海姆轮胎模型。该模型能够有效、快速、灵活地用于行驶动力学及行驶舒适性研究。

1. 引言

拖拉机在农业及建筑工程中被用作灵活移动机器和运输车辆，其在农业运输中的时间份额高达50%[1]，而这些任务大部分是在公共道路上进行的。由于法律规范对运输质量及车辆尺寸规格的限制，只能通过提高行驶车速来提高运输能力。行驶车速最高达到60km/h。这就导致对驾驶安全和舒适性的更高要求。

仿真模型能够在不需要物理样机的情况下评价开发阶段的行驶动力学及舒适性。而轮胎-路面相互作用的建模之所以极其重要是因为其是车辆稳定力的诱因。除此之外，轮胎，尤其对于农用车辆来说，提供了较多的悬挂和阻尼。霍恩海姆轮胎模型即是为大体积农机轮胎而开发。该模型的特点是完全基于物理方法，参数化简单，计算工作量小，应用灵活。例如，该模型被用于行驶动力学（双移线）和行驶舒适性（通过一段崎岖不平路段）研究，并通过不同的拖拉机进行道路试验，验证了仿真结果。

2 仿真模型及参数化

通过两种不同的整车模型（Fendt Favorit509C和Fendt 313 Vario）进行了行驶动力学和舒适性研究，除轮胎外，两种模型具有相同的结构。通过与制造商合作，在Simpack中建立了拖拉机的整车多体动力学模型。依据运动学作用和质量属性进行了车体的运动学建模。此外，利用MBS模块建立了橡胶衬套及油气前悬架等力单元模型。在Matlab Simulink里面建立了四轮模型。两种模型之间通过Simat界面以0.2ms的固定步长进行联合仿真。轮胎模型的输入（轮心纵向及侧向速度V_x、V_y，轮心与路面零面之间的垂向距离h，外倾角β，角速度ω_x和ω_y）和输出（轮胎六分力）在两种模型之间进行交互传输。

霍恩海姆轮胎模型完全基于物理方法，每个模型参数可以对应于表征农机轮胎特性的特定部位。该模型由在纵向平面内成角间距为2°~3°布置的轮辐组成，如图1所示。为了缩短计算时间，依据预期的路面激励，这些轮辐只分配到特殊的扇形区域。每个轮辐在径向、切向和侧向由弹簧-阻尼单元组成。此外，相邻轮辐之间通过径向间弹簧进行连接。轮胎-路面之间的相互作用通过粘滑法进行建模。所有轮辐通过轮辐连接器连接。在轮辐连接器与轮辋之间，在扭转方向（绕侧向轴线）及侧向轴线方向建立了另外设置了两个力单元，这些力单元显著地影响着轮胎力在纵向及侧向的瞬态响应[2]。

该轮胎模型的参数可以分为四类，如表1所示。根据力的传递原则，不同使用参数之间具有相互依赖性。这些参数可以由霍恩海姆大学农业工程研究所的两套测试设备加以确定。几何参数和径向及径向连接力单元参数有平带式试验台确定[3]，如图2所示。切向，侧向和扭转方向上的力单元由移动式单轮试验机确定[4]，如图2所示。同时，这些设备也用来验证单轮应用场合下该轮胎模型。

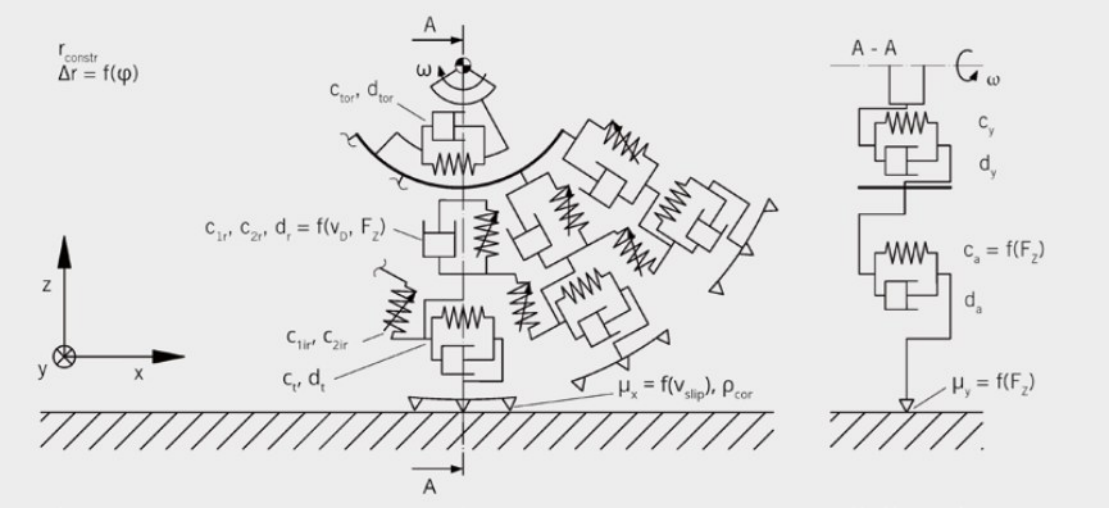


图1 霍恩海姆轮胎模型结构及参数，侧视图（左）和截面图（右）

表1 霍姆海恩轮胎模型参数及其附属性

类别	符号	单位	参数含义	依附参数
轮胎几何 (Tire geometry)	r_{constr}	m	轮胎结构半径	-
	Δγ	m	径向跳动量	转动角度φ
轮胎-路面接触属性 (Tire-surface interaction)	μ_x	-	纵向摩擦系数	滑移速度V_{side}
	μ_y	-	侧向摩擦系数	车轮载荷F_z
	ρ_{cor}	-	滚动阻力系数修正系数	-
力单元 （Force elements）	C_{1r}	N/m	径向刚度系数	驱动速度v_D,车轮载荷F_z
	C_{2r}	-	径向刚度系数	
	d_r	Ns/m	径向阻尼系数	
	C_{1ir}	N/m	径向连接刚度系数	-
	C_{2ir}	N/m^2	径向连接刚度系数	-
	C_t	N/m	切向刚度系数	-
	d_t	Ns/m	切向阻尼系数	-
	C_a	N/m	轴向刚度系数	车轮载荷F_z
	d_a	Ns/m	轴向阻尼系数	-
	C_{tor}	Nm/rad	扭转刚度系数	-
	d_{or}	Nms/rad	扭转阻尼系数	-
	C_y	N/m	侧向刚度系数	-
	d_y	Ns/m	侧向阻尼系数	-
路面 （Road surface）	h_{road}	m	路面轮廓高度	距离s

图2 用于垂向参数辨识的平带式轮胎试验台

图3 用于水平面内参数辨识的移动式单轮试验机

3. 试验拖拉机

农业研究所提供了两种用于道路测试的试验拖拉机。从2003年至2017年，一直使用型号为Fendt Favorit 509C的拖拉机，其额定功率为70kW，机械动力式变速器，底座为2.33m，如图4所示，该拖拉机配备有安装在悬架横向摇杆上的帘布式前轴和驾驶室悬置衬套。有关行驶动力学[5]和过离散障碍物[2]的很多研究成果业已见刊。自2017年起，额定功率为92kW，配备有液压机械动力分流变速器，底座为2.42m的Fendt 313 Vario型号的试验拖拉机服役，如图5所示。与Fendt Favorit 509C拖拉机相比，该拖拉机配备有安装在悬挂纵向摇杆上的帘布式前轴以及驾驶室机械式悬挂。两种拖拉机都配备了相同型号及尺寸的轮胎，前轴为固特异DT812，规格为480/70 R 24，后轴为520/70 R 38。

测试设置安装在两台试验拖拉机上，测量结构只有略微不同，因此以Fendt 313 Vario为例进行介绍，如图6所示。图中关键部件是位于两个后轮及一个右前轮的测试轮辋，被用来测量轮毂纵向、侧向和垂向的轮心力[6]。通过光学速度传感器、惯性测量单元（IMU）和转角传感器测量车辆的行驶工况，不同的角度及位移传感器用来测量前轴纵向摇杆和驾驶室的位置。为了评价车身的振动，在底盘、前轴、驾驶室地板和驾驶坐垫上布置有加速度传感器。通过这些测试装置，可以详细地进行整车仿真模型的验证。2016年夏季，利用Fendt Favorit 509C在机场跑道上进行了行驶动力学道路试验。2017年夏季，利用Fendt 313 Vario在崎岖不平路面上进行了行驶舒适性测试（ISO 5008平滑轨道[7]）。

图4 试验拖拉机Fendt Favorit 509C

图5 试验拖拉机Fendt 313 Vario

图6 装配在Fendt 313 Vario上的测试设备

4 结果和验证

行驶动力学（用Fendt Favorit 509C依据ISO 3888[8]进行的双移线）研究结果展示。在该项测试中，车辆以恒定速度驶入移线入口。而后，左转方向盘驶入原车道。整个过程在滑行模式下进行。该项测试属于闭环操作。入口和出口及规避车道都依据车辆宽度2.285m进行调整。试验过程中，轮胎胎压为1.2bar，初始速度为40km/h。最后，将测量得到的行驶速度、方向盘转角历程作为输入提供给多体动力学仿真模型（MBS）。与道路试验不同，仿真是开环输入。

首先，可以看到后轮胎在左转弯时载荷下降，如图7所示（左下）。同时，处于转弯外侧的两轮胎载荷增加，如图7所示（右）。类似地，这些现象可以在相反的右侧轮胎的右转弯中。如预期，侧向力表现为回正方向的特点。试验（黑色）与仿真（红色）的垂直力Fz（上，连续线）及侧向力Fy（下，虚线）的幅值和相位均具有较好的相关性。

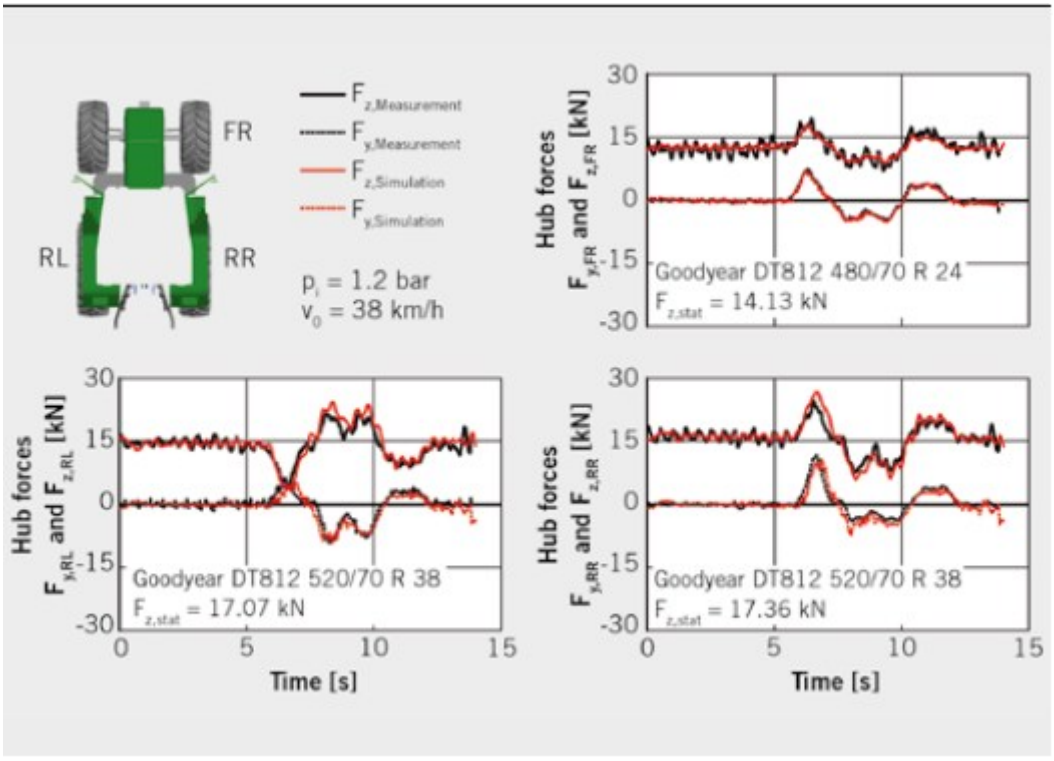


图7 Fendt Favorit 509C双移线时的轮胎力

双移线是在平坦路面上进行的。相对于农机轮胎花纹块对车身振动的激励，任何来自路面崎岖不平度的激励均可忽略。霍恩海姆轮胎模型同样适用于更加复杂道路上的行驶舒适性研究。在本文中，驾驶舒适性这一术语认为等同于驾驶员暴露于车身的振动。

以车辆通过崎岖不平路面（ISO 5008平滑轨道），胎压为1.2bar，行驶车速为12km/h，整车质量为9090kg（前后轴荷分配近似为60/40）为例。其中，平滑轨道由对齐的不同高度的木梁组成，左、又条带的表面轮廓不同，以便在100m的测试行程内能够激发不同的车辆运动（俯仰、侧倾）。而后，将测量得到的车速和转角作为输入提供给Fendt 313 Vario多体动力学模型。

由于车轮力激励车辆振动，装配有测试轮辋的三个车轮的力曲线也在这里检测，如图8所示。为明晰起见，这里仅展示出30s测试持续时间中的5s，并且只考虑车轮轮荷Fz（上侧，连续线）和纵向力Fx（下侧，虚线），因为车辆的侧向激励极小。对于车轮轮荷来说，试验（红色）与仿真（黑色）具有很好的相关性，而对于纵向力来说，相关性差一些。这是因为在道路测试和仿真中，纵向速度控制不同。

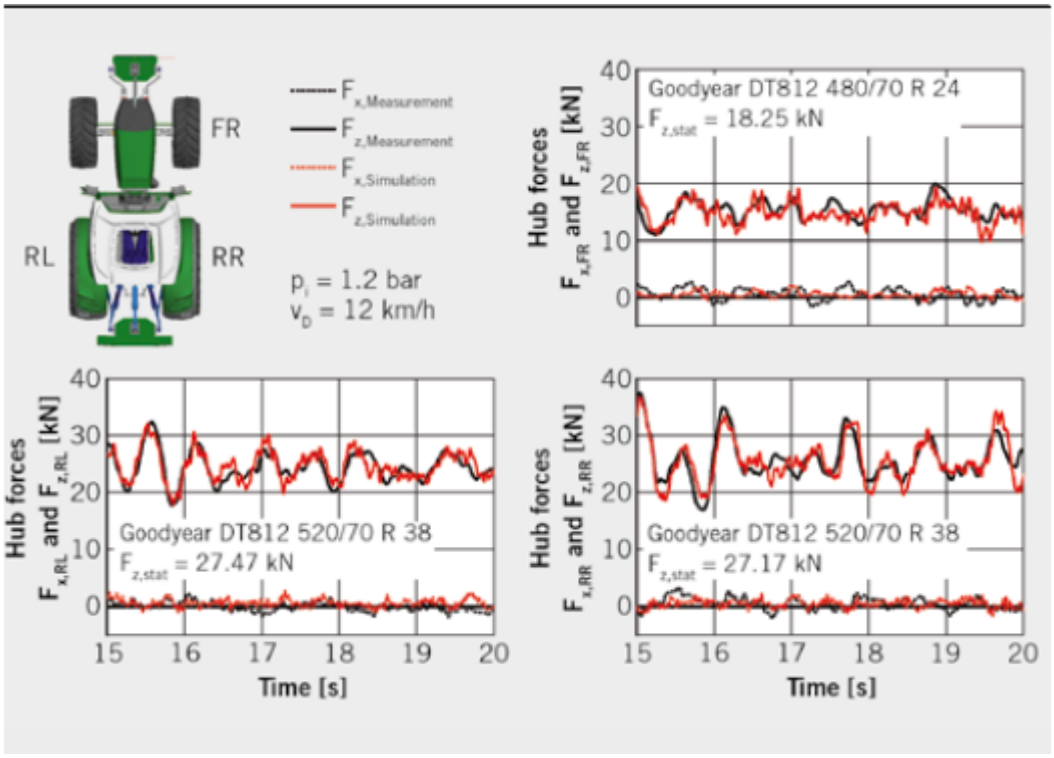


图8 Fendt 313 Vario过崎岖不平路面（ISO 5008平滑导轨）轮胎力时间响应

为了评价行驶舒适性，又在频域内进行了车轮轮荷的分析，如图9所示。可以看出，在低频段及载荷较大的情况下，试验与仿真具有较好的相关性。底盘、驾驶室及前轴不同的固有频率可以清楚地观察到。

利用提出的仿真模型，可以将驾驶座椅上的加速度历程再现到同一水平。依据ISO 2631-1[9]道路测试计算得到的振动值为1.48m/s2，仿真预测值为1.43m/s2，对应的误差约为3%。

5 总结与展望

结合整车多体动力学仿真模型，霍恩海姆轮胎模型可以用来进行农用拖拉机及其他农业设备的行驶动力学和舒适性研究。完全基于物理的建模方法减少了模型参数，利用测试设备可以方便地获得这些参数。根据应用条件，该轮胎模型可以进行不同的调整以减少计算工作量。以双移线和过崎岖不平路面为例，利用两种试验拖拉机对该模型进行了应用展示。使用配备有测试拖拉机的道路试验对仿真结果进行了验证。结果表明试验与仿真具有较好的相关性。在霍恩海姆大学农业工程研究所，未来的工作将是在不需要特殊测试设备的情况下实现有效及基于目标的参数化建模。

致谢

霍恩海姆大学农业工程研究所感谢德国研究基金会（Deutsche Forschungs-gemeinschaft, DFG）对 “霍恩海姆轮胎模型进一步的研究”课题的支持，Agco有限公司提供的测试拖拉机，DLG-Test Center Technology、Farm Inputs和Robert Bosch（罗伯特 博世）有限公司提供的测试路面。

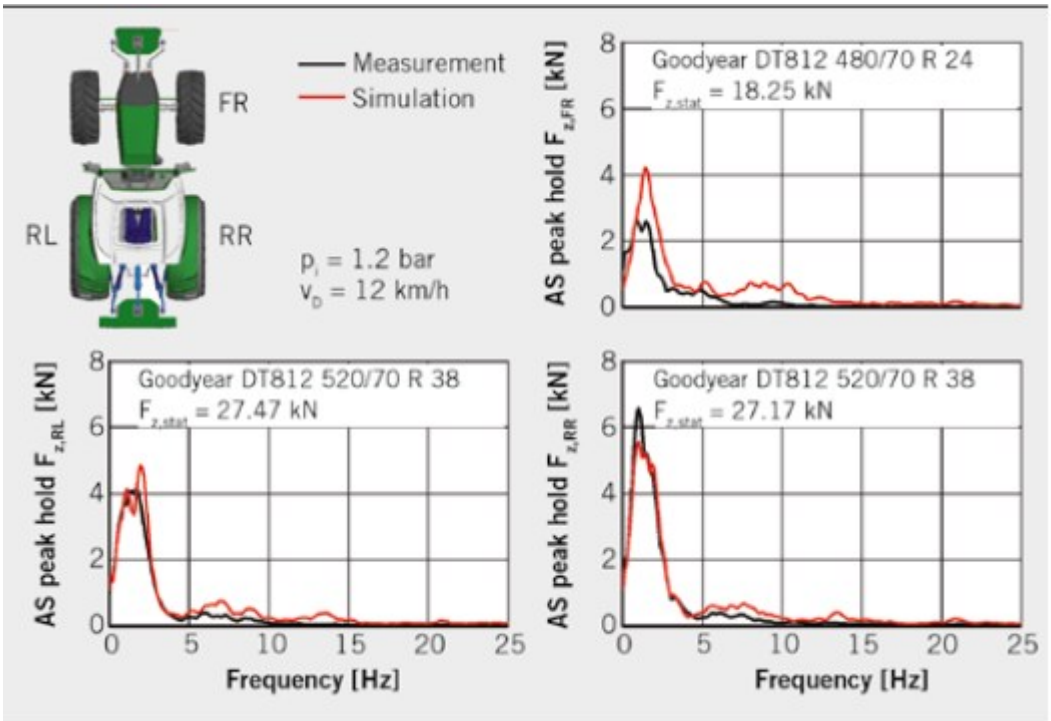


图9 Fendt 313 Vario过不平路面时轮胎垂直力的的振幅谱（峰值保持）

参考文献

[1] Fröba, N.: Traktoren bei landwirtschaftlichen Transport- und Umschlag -

arbeiten. In: Landtechnik 53 (1998), special issue, pp. 212–214

[2] Witzel, P.: Ein validiertes Reifenmodell zur Simulation des fahrdynamischen und fahrkomfortrelevanten Verhaltens von Ackerschleppern bei Hindernisüberfahrt. Stuttgart, Universität, dissertation, 2015

[3]Plesser, J.: Dynamisches Verhalten von Ackerschlepper-reifen in Vertikal- und Längsrichtung auf fester Fahrbahn. Stuttgart, Universität, dissertation, 2015

[4] Barrelmeyer, T.: Untersuchung der Kräfte an gelenkten und angetriebenen Ackerschlepperrädern bei Gelände- und Straßenfahrt. Stuttgart, Universität, dissertation, 2015

[5] Ferhadbegovic´ , B.: Entwicklung und Applikation eines instationären Reifenmodells zur Fahrdynamiksimulation von Ackerschleppern. Stuttgart, Universität, dissertation, 2015

[6] Späth, R.: Dynamische Kräfte an Standardtraktoren und ihre Wirkungen auf den Rumpf. München, Technische Universität, dissertation, 2004

[7] N. N.: Agricultural wheeled tractors and field machinery – Measurement of whole-body vibration of the operator. ISO 5008, 1979

[8] N. N.: Passenger cars – Test track for a severe lane-change manoeuvre – Part 2: Obstacle avoidance. ISO 3888-2, 2011

[9] Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements. ISO 2631/1, 1985

企业风采

恭贺山东玲珑轮胎股份有限公司成为联盟副理事长单位

2018年9月，山东玲珑轮胎股份有限公司（简称“玲珑轮胎”）正式成为轮胎动力学协同创新联盟副理事长单位。成为轮胎动力学协同创新联盟成立以来，增加的第18家副理事长单位。

玲珑轮胎成立于1975年，是一家专业化、规模化的轮胎生产企业，2016年7月6日在上交所主板上市，公司目前在全球拥有6个研发机构，5个生产基地，产品销往全球180多个国家和地区。广泛应用于商用车、乘用车、工程机械等，成功进入大众、通用、福特、印度塔塔、俄罗斯雷诺日产、菲亚特、巴西现代等全球知名汽车品牌的全球配套体系，并成为中国一汽、陕西重汽、东风汽车、北汽福田、重庆红岩、上汽通用五菱、吉利汽车、长安汽车、比亚迪、奇瑞汽车等国内外60多家汽车厂的主要供应商和优秀供应商。公司全球雇员总数超过12000人，是中国轮胎前5强，世界轮胎20强。

在联盟过去一年举办的活动中，玲珑轮胎积极参与，发挥了模范带头作用，对联盟工作给予极大的支持。

玲珑轮胎成为副理事长单位，必将更好的参与和主持联盟工作，体现了对联盟工作的高度认可，表达了协同合作、促进行业发展的决心。成为副理事长单位，不仅意味着在联盟今后的工作活动中能享受到更多权益，更意味着将肩负更多为行业进步贡献力量的责任。相信在玲珑轮胎的参与和主持下联盟工作定会取得长足进步，结出丰硕果实！为行业进步和发展谋得更多途径！

联盟的宗旨是：协同创新、集聚资源、战略合作、突破瓶颈、互赢共荣。经过一年的不断努力，联盟从刚刚起步到现在逐渐成熟，我们乐于看到联盟的工作被更多企业认可，我们衷心希望更多企业加入联盟，共同促进行业进步，实现联盟成员的共同发展。

（本刊讯）

轮胎动力学协同创新联盟副理事长单位名录

（按加入先后顺序）

中国第一汽车集团公司

东风汽车公司技术中心

广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院

重庆长安汽车股份有限公司

浙江吉利汽车研究院有限公司

上汽通用五菱汽车股份有限公司

安徽江淮汽车集团股份有限公司

中国汽车工程研究院股份有限公

中国汽车技术研究中心

安徽佳通乘用子午线轮胎有限公司

固特异轮胎橡胶公司

倍耐力轮胎有限公司

中策橡胶集团有限公司

三角轮胎股份有限公司

山东丰源轮胎制造股份有限公司

浦林成山（山东）轮胎有限公司

江苏通用科技股份有限公司

山东玲珑轮胎股份有限公司

联盟秘书处
Tel：+86 431-81807101
E-mail：tda@chinnov.cc
URL：www.tdachina.org.cn

协同创新　集聚资源

战略合作　突破瓶颈

互赢共荣

2018年9月30日发行