

# 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。笔者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

**中图分类号:** U461.1 **文献标识码:** A

## Tire Dynamics Collaborative Development Strategy

Guo Konghui, Lu Dang, Wu Haidong

(State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Tire dynamics is an important bottleneck in the autonomous development of automobiles and aircraft. This study compares the development of tire dynamics both nationally and in other nations, and indicates a significant challenge in the development of tire dynamics in China in the face of an increasingly fierce international competition. The strategies and suggestions for the collaborative development of tire dynamics in China are proposed after analyzing the characteristics of the tire dynamics test, simulation, and application technology.

**Keywords:** tire dynamics; automobile; airplane; collaborative development; strategy

### 一、前言

轮胎是汽车、飞机甚至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, 胎面与路面始终处于

滚动变接触状态, 在接地印迹内基于胎面胎体的复杂变形传递来自路面的各种载荷, 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, 轮胎与路面间还有侧向力、纵向力、翻倾力矩、滚动阻力矩及回正

收稿日期: 2018-01-25; 修回日期: 2018-02-09

通讯作者: 卢荡, 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室, 教授, 主要研究方向为轮胎动力学; E-mail: ludang@jlu.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“轮胎动力学协同发展策略研究”(2016-XY-05)

本刊网址: www.engingsci.cn

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与轮胎动力学相关的特性数据、先进模型及具体应用。

## 二、国内外轮胎动力学的发展历程

### （一）国外轮胎动力学的发展历程

美国、德国、荷兰自 20 世纪 30 年代就开始进行轮胎动力学的研究，开发了 Fiala、UA 及 Magic Formula (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、纵滑等四维输入的复合工况。其中有代表性的是荷兰代尔夫特理工大学 (TU Delft) Pacejka 教授于 20 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]。

实际经验表明，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，美国美特斯 (MTS) 系统公司开发的 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泛应用。在航空轮胎动力学测试技术方面，20 世纪 20 年代末至 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，已建成美国空军起落架系统卓越中心 (LGSCE)，拥有许多世界上独一无二的测试设备：转鼓直径为 3.048 m (120 in) 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；鼓面直径为 4.267 2 m (168 in) 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，所以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) 兰利研究中心于 1956 年建立了 Aircraft Landing Dynamics Facility (ALDF)，其规模极其庞大，经不断升级，目前测试跑道长度已达 853 m (2 800 ft)，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。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来表达 [7]。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、民用航空、通用航空、美国联邦航空管理局 (FAA)、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 [8]。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 [9]。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 教授的指导下，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 [10]。

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）国内轮胎动力学的发展历程

我国轮胎动力学研究的直接起因是 20 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，解决了汽车开发中轮胎模型高精度应用的难题 [11~14]。

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，成为我国飞机研发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，在缺乏足够数据的情况下，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，有大批的在役、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在较大挑战。

## 三、我国轮胎动力学协同发展策略

轮胎动力学涵盖测试、仿真及应用三方面的理论与技术，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）我国的汽车轮胎动力学测试技术与航空轮胎动力学测试技术之间呈现出发展不均衡的态势，与汽车轮胎动力学的测试技术相比，我国航空轮胎动力学的测试技术基本处于空白状态，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，2014—2017 年，国内采购了 13 台 MTS Flat-Trac 试验台，但基本没有开展相关的试验规范及测试技术研究。

（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，需要在理论上清楚地认识轮胎动力学，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。与美国、欧洲比较完善的轮胎动力学测试标准体系相比，我国轮胎动力学标准制定工作才刚刚起步。

（7）掌握轮胎动力学测试技术的人才稀缺，一方面专业性培训少；另一方面是对人才的培养缺

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，但由于航空轮胎动力学测试设备技术含量更高、投入更大，需要国家投入资金来支持测试设备的建设。

(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的独特技术，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，比目前 MTS 的测试技术具有优越性。因此，我们既要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消除不了曲率的影响，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的动力学特性机理，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，既能满足航空轮胎测试需要，也可以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，我国所需的六分力传感器基本依赖国外进口，若采购大量程的六分力传感器就需要投入

巨额资金，而且也掌握不了相关技术，所以对于关键部件需要投入资源进行研发，这样才能保障轮胎动力学测试技术的持续发展。

(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，需要系统、深入的研究，如果掌握了测试技术，就容易制定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非常迫切，因此需要搭建一个交流平台，培养一批能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

在国外的轮胎动力学研究中，以荷兰 Pacejka 教授为代表，其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 MF 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，做好以下几个协同。

(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的发展方向。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用的工具软件。

(4) 做好理论研究 with 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以下问题。

(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够深入,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低。

(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,重点在于以下几个方面。

(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的基础上,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,建立一套多层次、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。因轮胎模型的复杂性,在应用中需要有很强的技术背景,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,突破国外的技术壁垒,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，也直接关系到飞机安全。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 20 世纪 50 年代的数据指导设计，然而现在的轮胎技术与 20 世纪 50 年代相比已经有了质的变化，飞机性能也有了质的飞跃，继续使用那时的数据是极不科学的，也会存在巨大危险，需要研制航空轮胎六分力专用测试装备。

#### 参考文献

- [1] Pacejka H B, Besselink I. Tire and vehicle dynamics (third edition) [M]. Netherlands: Elsevier Ltd., 2012.
- [2] Jiao Z X, Liu X C, Li F Y, et al. Aircraft antiskid braking control method based on tire-runway friction model [J]. Journal of Aircraft, 2016, 54(1): 75–84.
- [3] Howcroft C, Krauskopf B, Lowenberg M, et al. Influence of variable side-stay geometry on the shimmy dynamics of an aircraft dual-wheel main landing gear [J]. SIAM Journal on Applied Dynamical Systems, 2013, 12(3): 1181–1209.
- [4] Guo K H, Lu D. UniTire: Unified tire model for vehicle dynamic simulation [J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(sup 1): 79–99.
- [5] Carter J F, Nagy C J. The NASA landing gear test airplane [R]. USA: NASA Technical Memorandum, 1995.
- [6] McClain J G, Vogel M, Pryor D R, et al. The United States Air Force's Landing Gear Systems Center of excellence—A unique capability [R]. Florida: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2007.
- [7] Smiley R F, Horne W B. Mechanical properties of pneumatic tires with special reference to modern aircraft tires [R]. Virginia: NASA Technical Report, 1960.
- [8] Pritchard J I. An overview of landing gear dynamics [R]. Virginia: NASA Langley R.C., 1999.
- [9] Daugherty R H. A study of the mechanical properties of modern radial aircraft tires [R]. Virginia: Langley Research Center, NASA, Langley Field, 2003.
- [10] Besselink I J M. Shimmy of aircraft main landing gears (Doctoral dissertation) [D]. Delft: Delft University of Technology, 2000.
- [11] Guo K H, Lu D, Ren L. A unified non-steady non-linear tyre model under complex wheel motion inputs including extreme operating conditions [J]. JSAE Review, 2001, 22(4): 395–402.
- [12] Guo K H, Lu D, Chen S K, et al. The UniTire model: A nonlinear and non-steady-state tyre model for vehicle dynamic simulation [J]. Vehicle System Dynamics, 2005, 43(sup1): 341–358.
- [13] Lu D, Guo K H, Moshchuk N, et al. Modelling of tire overturning moment and loaded radius [J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(sup1): 104–114.
- [14] Lu X P, Guo K H, Lu D, et al. Effect of tire camber on vehicle dynamic simulation for extreme cornering [J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(sup1): 39–49.