

汽车轮胎六分力特性预测研究进展

卢 荡, 夏丹华*

(吉林大学 汽车工程学院, 吉林 长春 130025)

摘要:回顾汽车轮胎六分力测试技术和汽车轮胎模型及预测研究的发展, 介绍和评述了轮胎六分力的建模方法和预测机理, 总结了轮胎六分力特性预测的核心问题和发展方向。不同负荷条件下的轮胎纯侧偏或纯纵滑六分力特性预测, 以及基于纯工况试验数据预测复合滑移特性已经取得一些研究成果, 但模型预测范围和精度均有待提升; 具有预测能力的轮胎模型可减少试验量, 在产品开发效率和成本控制上均具有应用前景; 高精度、高计算效率和低成本、短周期, 以及可反映设计参数变化的轮胎模型研究是模型发展的重要方向。

关键词:汽车轮胎; 六分力; 测试技术; 模型; 预测

中图分类号: TQ336.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-8171(2021)03-0185-05

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2021.03.0185

1888年, 邓禄普发明了充气轮胎。之后, 汽车的发明使充气轮胎得到广泛的应用与发展。当汽车成为轮胎的目标市场后, 从起初的安全性到轮胎力对于汽车操纵稳定性及平顺性的重要性, 汽车轮胎的相关研究逐渐受到重视^[1-6]。美国Smithers公司Potting教授明确提出: “轮胎六分力^[7]测试是打开通往车辆动力学研究大门的钥匙”。

2012年前后, 中国自主品牌汽车及轮胎行业意识到正向开发过程中轮胎力学特性的重要性, 中策橡胶集团有限公司和安徽佳通轮胎有限公司率先引进了美国MTS Flat-trac CT型六分力测试设备, 之后中国汽车技术研究中心、中国第一汽车集团有限公司等又陆续引进了10余台。据调研,

国内部分轮胎企业甚至购置了两台六分力试验机。这说明轮胎六分力对于汽车及轮胎开发具有重要的意义, 但同时说明了轮胎模型过于依赖大量的六分力试验数据。现阶段, 轮胎六分力测试及建模主要存在如下问题。

(1) 经验或半经验轮胎模型对试验数据需求量大, 试验开发任务量大, 试验周期长、成本高。

(2) 大规格、大负荷轮胎的六分力测试受设备量程的限制难以进行, 尤其是驱、制动试验。

(3) 高质量的六分力测试数据对试验操作人员素质要求高。

鉴于上述轮胎建模及车辆动力学仿真中的不利因素, 有必要研究轮胎六分力特性预测技术, 以减小轮胎六分力试验量, 缩短测试周期、降低成本。

基金项目: 中央军委基础加强计划重点基础研究项目(2020G024J*****)



作者简介: 卢荡(1972—), 男, 黑龙江大庆人, 吉林大学教授、博士生导师, 轮胎动力学协同创新联盟秘书长、专家委员会常务副主任, 吉林大学汽车仿真与控制国家重点实验室智能网联车辆动力学创新团队责任教授。从事非充气轮胎结构设计理论、车辆动态仿真理论、超高安全性汽车底盘集成控制、汽车智能化技术、航空轮胎动力学、智能轮胎算法等研究和开发工作, 主持建成轮胎动力学研究基地, 获国家科技进步二等奖2项, 吉林省科技进步一等奖、中国汽车工业科技进步特等奖、中国汽车工业技术发明二等奖、教育部技术发明二等奖及吉林省专利金奖。

*通信联系人(xiadh18@mails.jlu.edu.cn)

1 轮胎六分力测试技术发展回顾

轮胎六分力测试始于20世纪30年代, 最早是美国固特异公司的R. D. Evans和U. S. Rubber公司的A. W. Bull分别在光滑钢制转鼓、平坦及弯曲表面进行了六分力测试研究, 当时已经注意到测试表面的摩擦性能。20世纪60年代, 独立悬架的出现极大地促进了车辆操纵和转向性能的研究。1973年, 美国General Dynamics公司首次在TIRF转鼓试验机上成功改造了六分力试验机, 由此诞生

了世界上第1台高速平带式轮胎六分力试验机。20世纪80年代,荷兰代尔夫特理工大学发明了平板式轮胎试验台。1980年,美国MTS公司发明了第1台Flat-trac平带式轮胎六分力试验机。1984年,我国吉林大学郭孔辉院士团队成功开发了国内第1台平板式轮胎六分力试验机。伴随着轮胎六分力测试技术的兴起,车辆动力学在20世纪80年代后得到快速发展。目前,汽车和轮胎行业内使用率最高的六分力试验机来自美国MTS公司制造的Flat-trac设备,全球销售约75台,中国约13台,占17%。

目前汽车和轮胎行业内流行的魔术公式模型^[8]是一个经验模型,依赖于大量的六分力试验数据。虽然MTS Flat-trac是一种高效的轮胎台架式六分力试验机,但经验轮胎模型的全工况建模试验周期长和费用高的问题仍有待解决,大规格、大负荷轮胎的测试难题也亟需解决。因此,探索轮胎六分力特性预测方法,对降低试验成本和缩短汽车开发周期具有重要的意义。

2 轮胎六分力模型发展及预测研究进展

1941年,德国空军举办了车轮摆振问题会议,会上提出最原始的轮胎六分力数学模型。第二次世界大战末期,航空稳定性相关理论技术被引入汽车操纵稳定性研究中。美国Cornell大学学者Milliken和Segel在通用汽车公司资助下率先开展了这项研究,由此拉开了轮胎六分力建模研究的序幕。

轮胎六分力建模研究大致可分为3个阶段,即简单物理模型研究、经验或半经验模型研究以及结构化模型研究阶段。早期的轮胎六分力建模以简单物理模型为主,主要集中在20世纪50—90年代,如刷子理论模型、Fiala轮胎模型、梁模型和弦模型等。20世纪90年代末,经验或半经验轮胎模型得到快速发展,如荷兰学者H. B. Pacejka发明了魔术公式轮胎模型,我国郭孔辉院士发明了UniTire统一轮胎模型^[9]等。后来,结构化轮胎模型受到高度重视和发展,出现了FTire轮胎模型、RMOD-K轮胎模型和CDTire轮胎模型等。

随着计算机技术的发展,有限元轮胎模型得到快速发展。一方面,轮胎六分力试验成本昂贵,

试验周期较长,使得运用轮胎建模方法对轮胎六分力特性进行描述和分析成为较好的选择;另一方面,由于经验或半经验轮胎模型依赖大量的轮胎六分力试验数据,国内外学者在研究高精度轮胎建模的同时也在不断进行模型预测研究与探索,以尽可能减小六分力试验量。

1958年,H.B.Pacejka在Fiala模型的归一化理论基础上提出了Similarity模型^[10],后来又被H.S.Radt和H.B.Pacejka论证。1983年,H.S.Radt和Milliken通过试验再次证明了纯滑移条件下轮胎力学特性存在相似性。Similarity模型具有两个方面的预测能力:第一,纯侧偏或纯纵滑工况不同负荷条件下的侧向力和纵向力预测;第二,基于纯侧偏及纯纵滑特性预测复合滑移特性。Similarity模型预测原理是利用纯滑移特性的相似性,在纯滑移工况条件下通过垂向和水平方向的平移以及零点附近斜率的缩放实现不同负荷条件的侧向力或纵向力预测;复合滑移工况下轮胎力学特性预测是基于刷子理论模型定义的侧向及纵向滑移率,并假设纵滑刚度与侧偏刚度相同、纵向摩擦系数与侧向摩擦系数相同以及接地印痕总切力方向与滑移速度方向相同,然后利用纯纵滑纵向力和纯侧偏侧向力公式近似计算总切力幅值。该方法计算效率高,能够很好地表示纯工况滑移特性,包括外倾角的影响。但是,Similarity模型中假设轮胎侧偏刚度与纵滑刚度相同、纵向摩擦系数与侧向摩擦系数相同,会给模型预测带来误差,尤其是当侧向和纵向复合滑移水平较高时,Similarity模型预测结果可能会出现较大偏差。

1972年美国学者V. T. Nicolas和T. R. Comstock提出了Nicolas-Comstock模型^[11],可利用防抱死制动系统预测拖拉机半拖车在各方向上的力。但是,该模型关于侧向力及纵向力对于侧偏角、滑移率在全量程范围内的建模不够准确。

1993年,美国Smithers公司的D. J. Schuring和M. G. Pottinger以及阿克伦大学的W. Pelz提出了BNPS (Bakker-Nyborg-Pacejka Equations)模型^[12]。该模型基于初期的魔术公式轮胎模型,在分别拟合轮胎力和力矩基础上将其整合表达为侧偏角、负荷及侧倾角的函数(由原来的6个魔术公式参数变量

缩减为3个BNPS系数),因此,可快速实现纯工况下侧偏角、负荷及侧倾角之间任何组合条件下的侧向力和回正力矩预测,因此,在车辆动力学上的响应更快,精度更高。

1993年,H. S. Radt和D. A. Glemming提出了一种基于半经验、半理论的轮胎六分力归一化方法^[13]。该方法基于对试验数据的观察(相同速度、不同负荷条件下的六分力试验数据可经归一化处理后近似叠加在一条曲线上,因此侧向力、回正力矩和倾翻力矩可表达为关于侧偏角、侧倾角和滑移率的函数),通过将轮胎六分力数据归一化处理成关于负荷、侧偏角、侧倾角及滑移率的函数,可获得不同侧偏角、侧倾角、滑移率及负荷组合条件下的轮胎复合滑移力学特性,以减少试验轮胎磨损并有效降低试验费用。归一化方法受轮胎胎压影响较小,适用于干燥和湿滑路面。

1996年,美国学者D. J. Schuring, M. G. Pottinger和W. Pelz又提出了Combinator轮胎模型(又称Slip Circle Model)^[14]。该模型可利用摩擦椭圆以及轮胎纯工况试验数据来预测复合工况滑移特性。该模型假设轮胎与路面的总滑移率可用向量表示,且轮胎与路面接地印痕的总切力方向与总滑移率方向一致。因此,总切力幅值是关于总滑移率和总滑移率方向角的函数。该模型采用余弦函数表达轮胎总切力的量值,通过假设总切力方向与轮胎滑移速度方向一致,可以获得轮胎的侧向力和纵向力。该模型具有预测能力且不需要复合工况的试验数据,缺点在于无法表达各向异性刚度下轮胎的力学特性,在小滑移率下会出现较大的误差。

由于小滑移工况下的轮胎纵滑刚度通常大于侧偏刚度,因此在小滑移率下会出现较大的误差。1998年,M. G. Pottinger等^[15]在载重轮胎和赛车轮胎上对Combinator轮胎模型预测能力进行了试验及仿真验证。试验结果表明:Combinator模型在载重轮胎和赛车轮胎上能较好地预测复合工况的滑移特性,可缩短试验周期、降低试验成本,并指出纯侧偏和纯纵滑试验数据质量是影响轮胎模型预测的关键因素;同时,路面摩擦系数会影响试验但不属于模型预测考核范畴,提出了利用控制轮胎监测路面摩擦系数变化的理念;最后,M. G. Pottinger建议开发更加高效的侧向力及纵向

力的试验获取方法,更好地应用Combinator模型,以实现最佳的试验经济性。

2000年,美国Exponent Corporation公司和圣母大学的两名学者在现有的Nicolas-Comstock模型基础上进行了修正,提出一种MNC (Modified Nicolas-Comstock) 模型^[16],可以预测轮胎与路面间复合滑移条件下侧向力及纵向力。该模型只需获取纯侧偏工况下的侧向力及纯纵滑条件下的纵向力,通过限制摩擦系数即可得到侧向力与纵向力合力的预测结果。该模型可用于车辆动力学仿真,也可用于事故再现。

2004年,J. Svendenius和M. Gafvert提出了LUND模型^[17-18]预测方法,可通过纯工况(纯侧偏和纯纵滑)试验数据预测复合工况下的轮胎六分力特性。其原理是分别根据纯侧偏和纯纵滑模型计算附着力和滑移力,然后通过乘以比例系数的方式计算复合工况下的侧向力及纵向力,并建立与滑移速度的关系,以往的其他轮胎模型都不具备这一点。J. Svendenius和M. Gafvert对LUND模型和Combinator模型进行了对比研究,结果表明LUND模型效果优于Combinator模型,原因在于LUND模型考虑了总切力方向的变化,具有表达各向异性的能力。但是LUND模型是以刷子模型为基础,采用简单的抛物线压力分布形式,模型具有较多的简化,导致其精度和应用范围受到限制,而且采用分离计算附着力和滑移力的方法,导致工况繁多,公式极其复杂,不便于应用。

郭孔辉于1986年提出了UniTire轮胎模型和无量纲统一建模思想。2006年,吉林大学袁忠诚^[19]提出了利用纯侧偏和纯纵滑的试验数据,或加上部分复合工况试验数据来辨识UniTire模型参数,将复合滑移特性的模型参数设为经验值,以实现轮胎复合滑移特性的预测,并将UniTire, Similarity, Combinator和LUND模型预测精度进行了对比。结果表明:UniTire轮胎模型在预测复合工况下轮胎六分力特性方面具有很高的预测精度。同时,也提出了UniTire轮胎稳态模型从低速试验数据预测高速轮胎力学特性的能力时,经验值的选择至关重要,局限于当时测试资源,还需进行大量的理论和试验研究,以及轮胎复合滑移力学特性需进一步研究。

2010年,荷兰埃因霍温工业大学的I. J. M. Besselink、荷兰赫尔蒙德汽车公司的A. J. C. Schmeitz以及荷兰代尔夫特理工大学的H. B. Pacejka在魔术公式轮胎模型基础上,提出了一种考虑轮胎胎压变化的六分力建模方法^[20]。利用该方法,只需进行3组不同胎压下的六分力试验,即可预测其他胎压下的六分力特性,对魔术公式轮胎模型进行了很好的扩展。试验结果表明,该模型表达精度很高。

2012年,吉林大学吕波提出了一种改进的滑移圆模型^[21],实现由纯工况试验数据预测复合滑移工况轮胎力学特性,可减少试验工作量,且模型有较高的预测精度。该模型在小侧偏角下采用纯滑移特性和部分复合滑移特性,修正了复合工况下轮胎模型在小侧偏角下的表达精度,预测精度优于Combinator模型。

2012年,吉林大学许男在UniTire轮胎模型的理论基础上引入了综合滑移率圆的概念^[22],对同一综合滑移率下的轮胎力学特性进行了分析,并在此基础上,结合各向异性刚度下复合工况总切向力方向的变化机理,提出了基于状态刚度法预测侧偏、纵滑复合工况下的轮胎力学特性,能够很好地解决各向异性刚度条件下复合工况的预测难题。同时进一步考虑侧倾的影响,建立了侧偏、侧倾以及纵滑全复合工况下的预测模型。该预测模型具有广泛的适用性,且不再需要任何复合工况数据,试验结果显示模型具有较高的预测精度。

2015年,弗吉尼亚理工大学的S. Taheri和普利司通美国公司的T. Wei^[23]提出在汽车转向及驱、制动复合工况中,轮胎六分力建模对预测汽车性能至关重要。他们提出了一种基于平带式试验数据建立半经验轮胎模型来预测轮胎复合滑移特性的方法,可用于轮胎虚拟设计优化。利用回归方法将实测的六分力数据转化为由加权函数修正的纯滑移多维插值函数。通过用经验确定的形状函数修正纯滑移条件下的六分力数据,可以建立精确的复合滑移六分力预测方法,使用标准松弛长度方程再现瞬态效应。该模型计算接触面中心的六分力,模型表达精度较高,通过与魔术公式轮胎模型进行对比,在参数化和六分力预测方面具有更好的性能。

2018年,吉林大学徐婷基于考虑胎压和负荷的接地印痕模型和胎体负荷变形模型,建立了一种半物理轮胎模型^[24],可以预测不同胎压和负荷下轮胎稳态力学特性。该模型预测精度较魔术公式轮胎模型高,但是建模较为复杂,需要先建立胎体复杂轮胎模型、胎面模型及接地印痕模型,以循环迭代方式计算每步长的轮胎力,因此模型计算效率较低。

2020年,吉林大学的卢荡、夏丹华以及中策橡胶集团有限公司的杨通^[25]提出了基于UniTire轮胎模型由纯侧偏和纯纵滑试验数据预测复合工况轮胎力学特性的方法,通过引用参考轮胎的复合滑移特性参数,且严格筛选参考轮胎,并合理设置参数边界,模型的预测精度能够得到有效保证。经试验及仿真验证,在未考虑外倾角影响的情况下,UniTire模型的预测精度比Similarity模型和Combinator模型更高。

3 结语

(1)国内外学者针对不同负荷条件下的纯侧偏或纯纵滑六分力特性预测,以及基于纯工况预测复合工况做了较多研究,并取得了一些研究成果,但模型预测范围和精度均有待提升,尤其是由纯侧偏特性预测纯纵滑特性,目前仍是空白。

(2)经验或半经验轮胎模型依赖大量的试验数据,试验周期长,试验成本高,尤其是对大规格和大负荷轮胎试验能力不足。具有预测能力的轮胎模型可减少试验量,在产品开发效率和成本控制上均具有应用前景。

(3)高精度、高计算效率和低成本、短周期以及可反映设计参数变化的模型研究是轮胎模型发展的重要方向。基于简化物理模型的具有预测功能的实用模型和高精度有限元轮胎模型以及具有强实时计算功能的轮胎模型,是今后轮胎模型的重要发展趋势。

参考文献:

- [1] 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理[M]. 南京:江苏科学技术出版社, 2011.
- [2] 米奇克·M. 汽车动力学(C卷)[M]. 北京:人民交通出版社, 1997.
- [3] 措莫托. 汽车行驶性能[M]. 北京:科学普及出版社, 1992.
- [4] 宗长富, 郭孔辉. 汽车操纵稳定性的研究与评价[J]. 汽车技术,

- 2000(6):6-11.
- [5] 韦勇, 韦宝倡, 赵亮, 等. 轮胎力学特性对汽车操纵稳定性的影响分析[J]. 轮胎工业, 2020, 40(3):131-138.
- [6] 崔志博, 柴德龙, 吕佳峰, 等. 高速滚动子午线轮胎变形和印痕预测方法[J]. 橡胶工业, 2020, 67(5):346-355.
- [7] Gent A N, Walter J D. The Pneumatic Tire[M]. Akron: NHTSA, 2005.
- [8] Pacejka H B. Tire and Vehicle Dynamics (Third Edition) [M]. Great Britain: Elsevier Ltd, 2012.
- [9] 郭孔辉. 汽车轮胎动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 11.
- [10] Pacejka H B. Study of the Lateral Behaviour of an Automobile Moving upon a Flat Level Road[R]. United States: Cornell Aeronautical Laboratory, 1958.
- [11] Nicolas V T, Comstock T R. Predicting Directional Behavior of Tractor Semitrailers when Wheel Anti-skid Brake Systems are Used[C]. United States: ASME Paper, 1972.
- [12] Schuring D J, Pelz W, Pottinger M G. The BNPS Model—An Automated Implementation of the “Magic Formula” Concept[C]. Phoenix: SAE International, 1993.
- [13] Radt H S, Glemming D A. Normalization of Tire Force and Moment Data[J]. Tire Science and Technology, 1993, 21(2):91-119.
- [14] Schuring D J, Pelz W, Pottinger M G. A Model for Combined Tire Cornering and Braking Forces[C]. Detroit: SAE International, 1996.
- [15] Pottinger M G, Pelz W, Falcicola G. Effectiveness of the Slip Circle, “Combinator”, Model for Combined Tire Cornering and Braking Forces when Applied to a Range of Tires[R]. Indianapolis: SAE International, 1998.
- [16] Brach R M. Modeling Combined Braking and Steering Tire Forces[R]. Detroit: SAE International, 2000.
- [17] Svendenius J, Gafvert M. A Brush-Model Based Semi-empirical Tire Model for Combined Slips[R]. Detroit: SAE International, 2004.
- [18] Svendenius J, Gafvert M. A Semi-empirical Dynamic Tire Model for Combined-Slip Forces[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44(2):189-208.
- [19] 袁忠诚. 轮胎稳态模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [20] Besselink I J M, Schmeitz A J C, Pacejka H B. An Improved Magic Formula/Swift Tyre Model that can Handle Inflation Pressure Changes[J]. Vehicle System Dynamics, 2010, 48:337-352.
- [21] 吕波. 轮胎侧偏纵滑特性分析及预测[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [22] 许男. 复合工况下轮胎稳态模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
- [23] Taheri S, Wei T. A New Semi-empirical Method for Estimating Tire Combined Slip Forces and Moments during Handling Maneuvers[J]. Journal of the American Society of Nephrology Jasn, 2015, 8(2):2896.
- [24] 徐婷. 考虑接地印迹特性的半物理轮胎模型研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- [25] Xia D, Lu D, Yang T. A Prediction Method of Tire Combined Slip Characteristics from Pure Slip Test Data[R]. Detroit: SAE International, 2020.

收稿日期: 2020-11-27

Research Progress on Prediction of Force and Moment Characteristics of Automobile Tire

LU Dang, XIA Danhua

(Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract: The development of automobile tire force and moment test technology, tire model and force prediction research were reviewed, the modeling method and prediction mechanism of tire force and moment were introduced, and the core problems and development direction of tire force and moment characteristic prediction were summarized. Some research results were achieved on the prediction of pure side slip or pure longitudinal slip force and moment characteristics under different load conditions, and on the prediction of combined slip characteristics based on the test datas under pure slip condition, but the prediction range and accuracy of the model needed to be improved. The tire models with prediction ability could reduce the amount of test, and had application prospects in improving the product development efficiency and cost control. Research on tire models that had high-precision, high calculation efficiency, low cost, short development cycle, and could reflect changes in design parameters was an important direction of model development.

Key words: automobile tire; force and moment; test technology; model; prediction