

汽车轮胎模型的研究现状与发展趋势

杜慧林,高志彬,刘志红

(青岛理工大学 汽车与交通学院,山东 青岛 266520)

摘要:通过对轮胎的理论模型、经验模型、半经验模型、自适应模型以及计算机模型发展现状与适用范围的综合分析,总结出现阶段轮胎稳态研究已基本趋于成熟,并指出汽车轮胎的研究方向不仅应加强其在非稳态和非线性方面的研究,还应在着重发展先进自适应模型和计算机模型的基础上,结合智能化与数字化开发技术,研究轮胎的动力学特性乃至整车的操作稳定性、舒适性与安全性。

关键词:轮胎模型;动力学研究;研究现状;非线性研究;智能化

中图分类号: TQ336.1⁺1

文章编号: 1006-8171(2019)04-0195-04

文献标志码: A

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2019.04.0195

在汽车行驶过程中,除了空气阻力和自身的重力之外,几乎所有的力和力矩都是通过车轮与地面的相互作用产生的,轮胎是连接汽车与地面的唯一部件,因此轮胎的动力学特性是影响汽车操纵稳定性和行驶平顺性及制动安全性的重要因素,对汽车的安全行驶具有重要的研究意义。根据实际运动情况进行合理简化并建立精确的轮胎动力学模型对研究车辆的动态特性等是必然要求。描述轮胎运动状态的轮胎模型是轮胎和汽车技术研究的关键问题,但由于轮胎的非线性特性及复杂结构使轮胎模型的建立成为一个难点。

1 轮胎模型的研究现状与分类

20世纪30年代初,汽车轮胎的动力学研究开始萌芽,至今已有80多年的历史。在最初的20年里主要是研究轮胎的稳态特性,直至60~70年代,轮胎模型在动态特性和非线性特性方面才开始发展起来。迄今为止,轮胎的动力学研究已经涉及多个层次,无论是稳态还是动态、线性还是非线性分析,都已经具备了相当丰富的轮胎模型。随着社会的进步以及科学和计算机技术的发展,轮胎自适应模型和计算机模型逐渐成为研究轮胎力学

特性模型发展的主流方向。轮胎模型可以大致分为理论模型、经验模型、半经验模型、自适应模型和计算机模型。

1.1 理论模型

轮胎理论模型也称为物理模型,是在对轮胎物理结构以及运动变形原理研究基础上建立的,用于描述轮胎在行驶过程中承受的力与力矩之间的数学关系。

1931年,J. Bradley等^[1]首先对轮胎的动态特性展开了研究。1941年,H. K. Fromm^[2]提出了一种胎体梁模型,轮胎与地面的接触区由附着区和滑移区两部分组成,至今在轮胎研究中依然采用此处理方法。E. Fiala^[3]最先对轮胎的侧偏特性展开研究,1954年,他在试验基础上以轮胎侧向位移只出现在轮胎与地面的接触区域为假设,利用轮胎梁模型分析研究了侧向力、侧偏角和回正力矩之间的关系,但是与试验值相比还存在着较大的偏差,他后来在此基础上进行了改进,提高了模型精度。1961年,W. Bergman^[4]研究了轮胎制动时的力学性能,分析了制动力对侧向力的影响,提出了“相互作用弹簧”的概念,但这种研究只适用于小滑移范围。1965年,F. Frank^[5]通过对胎体受力变形的分析,将胎体简化为具有弹性支承的梁,但模型太复杂,不利于分析研究。1966年,H. B. Pacejka^[6]在对轮胎的动力学研究中将轮胎简化为一种受拉伸的弦。同年,F. Boehm^[7]则建

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61401245);山东省重点研发项目(2016GNC112013)

作者简介:杜慧林(1992—),女,山东菏泽人,青岛理工大学在读硕士研究生,主要从事轮胎振动与噪声的研究。

E-mail: marydu7@126.com

立了圆环模型。1970年, H. Dugoff^[8]在研究中将轮胎胎面滑移速度为零时的摩擦参数与摩擦降低因素的函数定义为轮胎与路面的摩擦因数。1975年, P. K. Nguyen^[9]通过对现有轮胎摩擦模型比较, 证实了摩擦椭圆概念存在的必要性。1979年, H. B. Pacejka^[10]对轮胎稳态侧偏特性的数学模型和可有效表达联合工况条件下轮胎侧偏作用的概念展开了研究。1981年, H. Sakai^[11]以Fiala模型为理论基础并结合试验数据建立了轮胎发生纯纵滑和纵滑与侧偏情况下的理论模型。在国内, 1990年, 郭孔辉^[12]在对轮胎侧偏特性的研究中通过将轮胎在运行过程中承受的压力分布和变形情况简化为一般形式, 建立了一般理论模型, 提高了模型的通用性, 另外, 还考虑了轮胎侧向变形的影响, 此理论模型的可靠性促进了此后半经验模型的建立。1990年和1993年G. Gim^[13-14]分别在Bergman相互作用弹簧概念的基础上建立了纯滑移和联合滑移条件下的轮胎模型。在模型中轮胎由多个三维微元组成, 只需要轮胎的几何位置和参数就能定向描述轮胎的力与力矩。郭孔辉等^[15]在1995年根据轮胎的载荷分布情况建立了侧向力模型, 并结合试验研究了轮胎载荷分布与侧向力模型的相互关系。

发展至今, 在轮胎研究领域, Fiala模型、Gim模型和Pacejka弦模型是比较有影响力的3种理论模型。理论模型使用起来比较方便, 可有效地分析轮胎的力学现象和结构参数对力学特性的影响。但由于轮胎结构的复杂性和路面的不确定性, 在行驶过程中轮胎受力与变形难以确定, 又因理论模型通常要对轮胎进行合理简化, 很难精确分析轮胎的动态特性, 再加上模型比较复杂, 大大降低了模型精度和求解效率, 因此以上模型在轮胎动力学研究中存在较大的局限性。

1.2 经验与半经验模型

轮胎经验模型是在对大量的试验数据进行分析总结的基础上结合实际经验建立的轮胎模型。与纯理论模型相比, 显然经验模型具有更好的精确性。目前应用最广的经验模型是1991年由H. B. Pacejka等^[16]在大量试验基础上提出的Magic Formula模型, 又被称为魔术公式。它是一个通过拟合试验数据而得到的三角函数, 用一套模型便

能够表达不同驱动情况时的轮胎特性。至今为止, 在对轮胎进行动力学仿真研究时大多需要一定条件下的试验值与仿真结果作比较, 以验证求解结果的正确性, 但是由于试验条件的限制和多变的地面接触情况, 用有限的试验数据与仿真结果一一匹配是不现实的, 致使经验模型的预测能力受限。

与经验模型不同, 半经验模型需要通过试验数据拟合满足一定的边界条件, 使模型更简洁且精度更高。在进行轮胎模拟仿真时, 如果采用理论模型, 合理简化则将不可避免, 使轮胎模型的精确度大大降低, 但是半经验模型可利用与试验数据的拟合降低这种简化偏差, 因此高精度的半经验模型在汽车动力学仿真中得到广泛应用。1986年, 郭孔辉等^[17]以Fiala的理论模型为基础, 以试验数据为指导, 建立了轮胎纯工况与联合工况下的力学特性半经验公式即幂指数公式, 提出了统一轮胎模型(UniTire); 2006年通过试验数据, 利用多种辨识方法证明了此模型具有很高的预测能力^[18]; 2009年将UniTire模型与通用的动力学仿真软件相结合, 进一步证明了其实用性^[19]; 2016年又进一步用试验验证了模型在稳态和非稳态条件下的表达与预测能力^[20]。近几年来, UniTire幂指数统一半经验轮胎模型逐渐发展成熟, 其在汽车动力学仿真中的实际应用大大提高了模型的仿真精度和求解速度。

1.3 自适应模型

现阶段在自适应轮胎模型中人工神经网络模型应用最为广泛。1993年, L. Palkovics等^[21]以理论和试验数据为基础建立了神经网络轮胎模型, 它是一种通过模拟人体神经网络工作机制建立的能根据外界影响因素变化自动调整的智能自适应轮胎模型。1998年, 赵和平等^[22]证实了此模型的可靠性。2000年, 崔胜民等^[23]则利用多层前馈神经网络系统成功建立了轮胎侧偏特性模型。2001年, 徐立友等^[24]利用改进的BP算法提高了人工神经网络模型的训练速度和精度。另外, 2004年, J. A. Cabrea等^[25]采用遗传算法对Magic Formula模型进行了改进优化, 提高了轮胎模型的计算效率。2005年, 徐立友等^[26]建立了轮胎在联合工况下的神经网络模型, 通过模型与实测值对

比,进一步证明了BP神经网络可有效应用于轮胎特性的研究。2013年,王树威等^[27]建立了一种基于模块化神经网络的轮胎接触面压力模型,通过实践证明,此模型不仅在精度上优于经验模型,环境适应性也有一定程度提高。

自适应模型通过模拟人脑的独特思维,训练后可以较准确地模拟轮胎任何非线性受力工况,与传统模型相比,不仅建模效率高,计算求解速度快,且具有较高的精度和预测能力。

1.4 计算机模型

计算机模型是在试验和理论上利用计算机仿真软件且可根据需要输入参数求解得出轮胎受力或变形结果的轮胎模型。与传统的物理模型相比,计算机模型使用方便,可塑性高,但仿真精度有待提高。

现在基于计算机的有限元模型逐渐成为轮胎动态特性研究的热点并被广泛应用于汽车动力学仿真中。国外有限元方法的研究最早可以追溯到20世纪70年代,其得到广泛认识和发展则在90年代以后。如今常用的有限元分析软件有Ansys, Abaqus和Hypermesh等。2001年,白秀荣等^[28]采用试验模态分析方法验证了轮胎有限元模型的精确性,并研究了模型产生偏差的原因。闫相桥^[29]通过考虑轮胎非线性因素建立了稳态滚动轮胎的有限元分析模型,结果表明,该模型是较为合理的。2005年,谷叶水等^[30]利用Ansys仿真软件对子午线轮胎有限元模型进行振动模态分析,但忽略了轮胎对模型的影响。2012年,M. Behrooz等^[31]利用有限元技术根据轮胎结构的复杂性以及组成材料和接触方式的多样性建立了三维非线性有限元模型,并分析了模型网格尺寸对Von Mises的影响。2013年,冯希金等^[32]将有限元建模与试验相结合对模型进行模态分析,求解结果与试验数据吻合,但并未考虑负载工况。2015年,哈斯巴根等^[33]通过对轮胎有限元模型仿真结果与试验结果进行比较分析,探讨了模型优化问题,适当调整材料属性和轮胎接触属性可以提高模型精度。文献[34]则具体介绍了有限元方法在汽车轮胎设计中的应用。到目前为止,有限元模型已经应用到轮胎乃至整车的多个层面,包括NVH性能分析^[35]及载荷和接地性能分析^[36]等,且在热力学^[37]研究领域也

发挥着重大的作用。

2 轮胎模型的发展趋势

随着计算机和控制理论的发展,结合对目前轮胎模型研究现状的分析,得出轮胎模型在动态和非线性工况下的研究分析应大大增强,而且应考虑大力发展轮胎的自适应模型和计算机有限元模型^[38]。此外,汽车智能化和数字化已成为研究热点,随着对车辆安全性要求的提高,对整车在不同工况条件下仿真模型的需求量也越来越大,而在车辆数字化技术的开发过程中,可靠的轮胎模型尤为重要。轮胎模型除了要满足汽车舒适性、稳定性研究和力特性分析之外,还应着重应用于先进技术的开发以及温度场和空气动力学等复杂环境中。传统的轮胎模型应更加注重于与智能化技术相结合,在提高整车安全性的同时满足节能环保的需求。另外,应利用轮胎模型与地面接触的耦合分析,为汽车噪声控制研究提供更有利的数据库。最后,轮胎模型研究要以实际试验为基础,以确保精确的预测结果,因此轮胎试验及其方法研究对轮胎模型的发展 also 具有重要的意义。

3 结论

轮胎模型是车辆动力学研究的关键。轮胎模型实用性的关键是要具有相当的精度以及能够满足求解需求的力学描述和计算速度。综上分析,各种轮胎模型都具有自身的特点。

(1)理论模型中Gim模型具有较高的精度和适应性以及计算求解速度,且公式简洁,在建模过程中不需要与相关试验数据拟合,因此一般在轮胎碰撞事故领域对轮胎进行理论分析和基本预测中采用。

(2)Magic Formula模型表达式单一,使用方便,且与试验值拟合精度高,但由于其求解计算量较大,因此更适用于汽车控制系统设计和试验研究等要求精确描述轮胎力学特性的领域。

(3)UniTire半经验轮胎模型采用无量纲的形式,统一性强,拟合精度高,且计算量小,在轮胎设计和汽车试验模拟方面都有较好的应用前景。

(4)基于神经网络的自适应轮胎模型使用便捷,计算量小,并行性和预测能力强,一般用于轮

胎动力学建模和仿真分析。

(5) 计算机模型利用有限元软件,建模方便,可以较精确地预测轮胎在非线性条件下的受力和变形情况,而且随着计算机技术的发展,模型精度也将提升,同时也会大大提高模型的仿真精度,对轮胎动力学的虚拟研究将产生深远的影响。

现阶段,轮胎稳态研究已基本能够满足分析要求,相比之下,在动态方面的研究则大多局限于小幅度的运动。由于轮胎的自身结构复杂、材料各向异性、非线性特性和轮胎与地面接触形式的多样性,给可靠轮胎模型的建立带来了很大困难,例如轮胎的材料、尺寸和花纹等都会影响模型的建立,再加上实验设备精度有限,使轮胎在高频和大幅度运动的力学研究不能得到大力发展。

参考文献:

- [1] Bradley J, Allen R F. Factors Affecting Behavior of Rubber Tired Wheels on Road Surfaces[J]. Automotive Engineer, 1931, 21 (2777): 73-78.
- [2] Fromm H K. Berichte über die Geschichteder, Theories des Tadflatters[J]. Ber. Lilienthal ges, 1941: 28-33.
- [3] Fiala E. Seitenkräfte am Rollenden Luftreifen[J]. Z-VDI, 1954 (29): 27-59.
- [4] Bergman W. Theoretical Prediction of the Effect of Traction on Cornering Force[J]. SAE, 1961, 69 (9): 614-640.
- [5] Frank F. Grundlagen zur Berechnung der Seitenführung Skennlinien von Reifen[J]. Kautschukunt Gummi. Kunststoffe, 1965, 72 (5): 9-13.
- [6] Pacejka H B. The Wheel Shimmy Phenomenon[M]. Diss., America: T H Delft, 1966: 12-17.
- [7] Boehm F. Zurmechanik des Luftreifens Habilitationsschrift[M]. Diss., America: T H Stuttgart, 1966: 51-55.
- [8] Dugoff H. An Analysis of Tire Traction Properties and Their Influence on Vehicle Dynamic Performance[Z]. SAE Paper 700377, 1978: 64-66.
- [9] Nguyen P K. Tire Friction Models and Their Effect on Simulated Vehicle Dynamics[J]. Proceedings of a Symposium on Commercial Vehicle Braking and Handling, 1975 (5): 5-7.
- [10] Pacejka H B. Tyre Factors and Vehicle Handling[J]. Inter. J. of Vehicle Design, 1979, 1 (1): 19-22.
- [11] Sakai H. Theoretical and Experimental Studies on Dynamic Properties of tires[J]. Inter. J. of Vehicle Design, 1981, 2 (1): 1-3.
- [12] 郭孔辉. 轮胎侧偏特性的一般理论模型[J]. 汽车工程, 1990 (3): 1-12.
- [13] Gim G. An Analytical Model of Pneumatic Tires for Vehicle Dynamic Simulation[J]. Inter. J. of Vehicle Design, 1990, 11 (6): 1-4.
- [14] Gim G. A Three Dimensional Tire for Steady-state Simulations of Vehicle[Z]. SAE Paper 931913, 1993: 1-6.
- [15] 郭孔辉, 隋军. 轮胎垂直载荷分布与侧向力模型及纵向力之间的关系[J]. 汽车研究与开发, 1995 (1): 22-25.
- [16] Pacejka H B, Sharp R S. Shear Force Development by Pneumatic Tyres in Steady State Conditions: A Review of Modelling Aspects[J]. Vehicle System Dynamics, 1991, 20 (3/4): 121-176.
- [17] 郭孔辉, 王裕民, 刘蕴博, 等. 轮胎侧偏特性的半经验模型[J]. 汽车工程, 1986 (2): 44-54.
- [18] 郭孔辉, 袁忠诚, 卢荡. UniTire轮胎稳态模型的联合工况预测能力研究[J]. 汽车工程, 2006 (6): 565-568.
- [19] 郭孔辉, 金凌鸽, 卢荡. 统一轮胎模型在车辆动力学仿真中的应用[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39 (S2): 241-245.
- [20] 郭孔辉. UniTire统一轮胎模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52 (12): 90-99.
- [21] Palkovics L, Gindy E I M. Neural Network Representation of Tire Characteristics. the Neuro-Tire[J]. Int. J. of Vehicle Design, 1993, 14 (5): 563-591.
- [22] 赵和平, 周志立, 周学建. 轮胎侧向力神经网络模型[J]. 洛阳理工学院学报, 1998 (3): 85-90.
- [23] 崔胜民, 王斐. 基于人工神经网络的轮胎侧偏特性模型[J]. 轮胎工业, 2000, 20 (1): 11-14.
- [24] 徐立友, 周志立, 周学建, 等. 改进BP算法的轮胎侧向力神经网络模型[J]. 拖拉机与农用运输车, 2001 (2): 24-27.
- [25] Cabrea J A, Ortiz A, Carabias E, et al. An Alternative Method to Determine Themagic Tyre Model Parameters Using Genetic Algorithms[J]. Vehicle System Dynamics, 2004, 41 (2): 109-127.
- [26] 徐立友, 周志立, 李金辉, 等. 轮胎在侧向力、纵向力联合工况下的神经网络模型[J]. 机床与液压, 2005 (4): 128-130.
- [27] 王树威, 陈艳艳, 薄迎春. 基于模块化神经网络的汽车轮胎接触面压力模型[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39 (2): 245-250.
- [28] 白秀荣, 王卫防, 葛剑敏. 利用有限元进行轮胎模态分析的新方法[J]. 轮胎工业, 2001, 21 (7): 401-404.
- [29] 闫相桥. 稳态滚动轮胎的有限元分析模型[J]. 复合材料学报, 2001 (4): 108-114.
- [30] 谷叶水, 石琴. 子午线轮胎模态分析的有限元方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005 (3): 249-252.
- [31] Behrooz M, Olatunbosun O A, Ding W. Finite Element Analysis of Aircraft Tyre—Effect of Model Complexity on Tyre Performance Characteristics[J]. Materials & Design, 2012, 62 (35): 810-819.
- [32] 冯希金, 郑小刚, 危银涛, 等. 轮胎振动特性的有限元分析及关键影响因素研究[J]. 轮胎工业, 2013, 33 (1): 12-20.
- [33] 哈斯巴根, 朱凌, 石琴, 等. 轮胎有限元建模过程优化及刚度特性仿真研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38 (7): 944-948.
- [34] 颜卫卫, 马铁军. 有限元法在汽车轮胎设计中的应用[J]. 橡胶工业, 2014, 61 (1): 52-56.
- [35] 冯希金, 危银涛, 朱作勇, 等. 载重子午线轮胎滚动振动噪声仿真技术研究[J]. 轮胎工业, 2017, 37 (3): 131-138.
- [36] 王国林, 付晶, 梁晨. 子午线轮胎静态及滚动状态下接地特性试验研究[J]. 橡胶工业, 2016, 63 (7): 425-428.
- [37] 熊春明, 臧孟炎, 晏宁. 全钢子午线轮胎温度场仿真研究[J]. 机械设计与制造工程, 2017, 46 (2): 35-39.
- [38] 危银涛, 冯希金, 冯启章, 等. 轮胎动态模型研究的进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2014, 5 (4): 311-323.

收稿日期: 2018-11-26