



汽车轮胎动力学

郭孔辉 著



科学出版社

非外借

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

汽车轮胎动力学

郭孔辉 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是国内第一部全面阐述汽车轮胎动力学的专著,是作者近 40 年研究成果的总结。书中首先从恒定摩擦系数轮胎简化理论模型入手,讨论了动摩擦系数对轮胎力学特性的影响,引出全工况高精度 UniTire 轮胎模型,并介绍了其拓展应用及预测能力;在稳态建模基础上,阐述了侧偏、纵滑、侧倾及动载下的轮胎非稳态特性,开展了不平路面中高频动态特性的研究;最后介绍了轮胎动力学试验及应用方面的研究内容。

本书在结构体系安排上以循序渐进为原则,逐步引导读者掌握最新的研究成果,适合车辆工程专业的硕士、博士研究生阅读,对从事汽车底盘开发及轮胎动力学理论、试验及应用研究的相关工程技术人员也有所帮助。

图书在版编目(CIP)数据

汽车轮胎动力学 / 郭孔辉著. —北京: 科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-059128-9

I. ①汽… II. ①郭… III. ①汽车轮胎-动力学 IV. ①U463.341.01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 238823 号

责任编辑: 裴 育 纪四稳 / 责任校对: 王萌萌

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

河北鹏润印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018 年 11 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018 年 11 月第一次印刷 印张: 22

字数: 432 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

轮胎动力学是车辆动力学的基础，国外自 20 世纪 30 年代就开始了轮胎动力学的研究，持续开发了系列轮胎模型。我国轮胎动力学研究起步较晚，直到 1984 年长春汽车研究所成功开发了 QY7329 轮胎试验台，相关研究才得以快速推进。与国外完备试验条件支撑的经验建模思路不同的是，我国轮胎动力学研究在理论方面进行了深入细致的探索，提出了全工况统一建模理论，将轮胎力学特性分解成由轮胎结构决定的自身力学特性和由轮胎与路面间的接触决定的动摩擦特性，奠定了实用高精度轮胎模型建立及测试设备开发的理论基础，进而建成了比较完整的全工况高精度轮胎动力学技术体系。

本书共 10 章，第 1 章介绍轮胎动力学研究的主要特点；第 2 章阐述轮胎动力学统一建模理论；第 3 章介绍轮胎-路面动摩擦特性并分析其对轮胎力学特性的影响；第 4 章为实用高精度 UniTire 轮胎模型与 Magic Formula 等轮胎模型的对比研究；第 5 章进行 UniTire 轮胎模型预测能力的拓展应用研究；第 6 章介绍轮胎非稳态特性理论及半经验模型；第 7 章为轮胎动态载荷下力学特性研究；第 8 章进行轮胎中高频动态特性的研究；第 9 章介绍轮胎力学特性试验技术；第 10 章介绍 UniTire 轮胎模型相关应用技术。

本书是在总结作者科研团队的卢荡、隋军、刘青、侯永平、任雷、庄晔、袁忠诚、吴海东、金陵鸽、许男、路兵兵等研究成果的基础上完成的。在书稿整理过程中，卢荡、路兵兵、卢磊对稿件中公式、文字、图片的校对工作提供了大量的帮助，在此衷心感谢团队成员辛勤的付出。

轮胎动力学是一门交叉综合的基础学科，虽然已有不少研究，但随着仿真技术发展，理论与技术方面依然面临着诸多挑战，受作者工作和认知的局限，书中难免存在不妥之处，希望读者批评指正。

郭孔辉

2018 年 6 月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 研究概述	1
1.2 主要研究特色	2
1.2.1 基本思路	2
1.2.2 主要特点	2
参考文献	8
第 2 章 统一半物理稳态模型	9
2.1 轮胎印迹更新坐标系及统一滑移率定义	9
2.2 轮胎接地印迹内压力分布统一表达	11
2.3 轮胎简化理论模型	13
2.4 轮胎接地印迹垂直压力分布的影响及边界条件的研究	17
2.5 UniTire 轮胎模型的基本公式	20
2.6 总切力方向修正	21
2.7 稳态纵滑侧偏半经验模型的结构参数	22
2.8 考虑侧倾影响的稳态统一半经验模型	27
参考文献	30
第 3 章 轮胎-路面动摩擦特性	31
3.1 考虑简单动摩擦特性的统一轮胎刷子模型	31
3.2 考虑橡胶动摩擦特性的轮胎一般理论模型	39
参考文献	52
第 4 章 全工况高精度实用模型	53
4.1 UniTire 与 MF 轮胎稳态模型的对比研究	53
4.2 UniTire 轮胎稳态模型的复合工况预测能力	65
4.3 UniTire 轮胎稳态模型的速度预测能力	83
4.4 UniTire 轮胎稳态模型公式	95
参考文献	100
第 5 章 UniTire 轮胎模型的拓展应用与工况预测	101
5.1 状态刚度法预测复合工况力学特性	101

5.1.1	“综合滑移率圆”概念	101
5.1.2	“综合滑移率圆”下轮胎力学特性	102
5.1.3	状态刚度法预测侧偏纵滑复合工况力学特性	105
5.1.4	含有侧倾角时复合工况力学特性的预测	117
5.2	复合工况回正力矩特性的预测	121
5.3	UniTire 复合工况预测模型特点	123
5.3.1	预测模型所需试验工作量	123
5.3.2	预测模型精度	124
5.4	UniTire 大载荷预测模型	127
5.4.1	侧偏刚度的理论分析和预测	128
5.4.2	侧偏回正刚度的分析和预测	131
5.4.3	动摩擦系数随载荷的变化	133
5.4.4	工程轮胎大载荷下侧向力和回正力矩的预测	135
	参考文献	139
第 6 章	高精度侧偏纵滑侧倾非稳态特性	141
6.1	轮胎非稳态侧偏特性理论模型	141
6.2	轮胎非稳态侧偏特性半经验模型	148
6.3	复杂工况下的轮胎非稳态力学特性模型	169
	参考文献	184
第 7 章	轮胎动载侧偏非稳态特性	185
7.1	动载下轮胎侧偏特性的基本理论	185
7.1.1	轮胎接地印迹长度与载荷的关系	186
7.1.2	动载下轮胎接地印迹上各点的接触历程	189
7.1.3	胎体侧向刚性时动载下轮胎的侧向力及回正力矩	194
7.1.4	胎体侧向弹性时动载下轮胎的侧向力及回正力矩	199
7.1.5	其他典型动载下轮胎的侧向力及回正力矩	205
7.2	轮胎动载侧偏特性离散仿真模型	215
7.2.1	轮胎离散刷子模型	215
7.2.2	胎体弹性的影响	218
7.2.3	轮胎离散仿真模型的验证	220
7.2.4	轮胎动载侧偏特性仿真结果	223
7.3	轮胎动载侧偏特性半经验模型	228
7.3.1	轮胎动载侧偏特性侧向力半经验模型	228

7.3.2	轮胎侧偏非稳态特性半经验模型	230
7.3.3	轮胎动载侧偏非稳态特性半经验模型	231
7.3.4	半经验模型与试验数据对比	234
	参考文献	237
第 8 章	轮胎中高频动态特性	239
8.1	轮胎在不平路面上的等效激励	239
8.2	垂直方向简单动态模型	254
8.3	轮胎平面内动态模型	266
	参考文献	291
第 9 章	轮胎力学特性试验研究	292
9.1	平板式轮胎动特性试验台开发	292
9.1.1	复合四连杆运动解耦机构	292
9.1.2	全工况轮胎测试	293
9.1.3	印迹中心轮胎六分力解算	295
9.1.4	轮胎动力学特性试验方法	301
9.2	全天候全路况胎面摩擦瞬态测试技术	309
9.2.1	轮胎橡胶摩擦特性试验台	309
9.2.2	轮胎橡胶-路面摩擦试验方法	311
9.2.3	轮胎橡胶-冰面摩擦试验结果及处理	313
	参考文献	317
第 10 章	UniTire 轮胎模型应用技术	318
10.1	UniTire Tool 软件开发及 UniTire 轮胎模型数据库建立	318
10.1.1	UniTire Tool 软件开发	318
10.1.2	UniTire 轮胎模型数据库建立	321
10.2	UniTire 轮胎模型应用模块的开发	321
10.2.1	版本的特色	321
10.2.2	UniTire 在汽车动力学分析中的应用	322
10.3	UniTire 与 ADAMS 连接	323
10.3.1	在 ADAMS/Car 下应用 UniTire 轮胎模型	323
10.3.2	在 ADAMS/Solver 下应用 UniTire 轮胎模型	324
10.3.3	ADAMS 对 UniTire 的调用过程	325
10.3.4	UniTire 在 TMPT 中的测试结果	326
10.3.5	UniTire 在 ADAMS/Car 中的仿真结果	331

10.4 UniTire 与 CarSim 连接.....	336
10.4.1 连接基本流程.....	336
10.4.2 UniTire 在 CarSim 中的仿真验证.....	337
参考文献.....	342
索引.....	343

第1章 绪 论

1.1 研究概述

轮胎是汽车与路面接触的唯一部件,轮胎动力学是高性能汽车开发的基础理论及关键技术,一直为国际汽车工程界的关注焦点和研究热点^[1,2]。

美国、德国、荷兰自20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、纵滑等四维输入的复合工况^[2-6]。我国开展轮胎动力学研究的直接原因是20世纪60年代红旗轿车出现高速稳定性问题,但因当时缺乏试验支持,初期进展缓慢。1984年,长春汽车研究所成功开发了QY7329轮胎试验台,使我国无法进行轮胎动力学测试的状况被彻底改变,我国轮胎动力学的研究得以快速推进。

四十多年来,瞄准轮胎动力学研究的理论与技术难点,并结合我国汽车开发的实际需求,作者科研团队完成了轮胎动力学理论、方法、装备及应用技术的系列创新,建立了比较完整的全工况高精度轮胎动力学技术体系:

(1) 提出了轮胎动力学统一建模理论以及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,建立了多变量无量纲组合的统一模型,以解决全工况高精度理论建模问题。

(2) 创立了轮胎-路面动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,建立了半物理UniTire轮胎模型,实现了实用的全工况轮胎模型的高精度表达。

(3) 开发了复合四连杆运动解耦轮胎试验台以及微环境箱全天候全路况模拟胎面摩擦特性试验台,解决了轮胎动力学特性全工况高精度测试难题。

(4) 提出了UniTire轮胎模型参数分类分步高精度辨识方法,开发了针对汽车不同设计阶段需求的UniTire轮胎模型应用软件及参数辨识工具软件,以解决汽车开发中轮胎模型高精度应用的难题。

研究成果在汽车行业获得广泛的应用,对提升我国汽车的自主开发和科技创新能力、促进汽车工业技术进步发挥了重要作用。

1.2 主要研究特色

1.2.1 基本思路

轮胎为多层异性结构,常处于滚动变接触大变形工作状态,其动力学研究一直是国际性难题。全工况高精度轮胎动力学体系包含两方面主要技术:一是全工况高精度轮胎特性测试技术;二是实用轮胎模型全工况特性的高精度建模技术。针对这两方面内容,对比国外的研究,本书研究采用了全新的技术思路。

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,试验研究与建模研究各自平行发展,关联不多。纯经验方法是轮胎模型建立的主流方法,即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,最具代表性的就是 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。轮胎试验技术开发以商业公司为主,如美国 MTS 公司,但因对轮胎动力学理论及建模要求不能完全深入掌握,开发的设备常偏离建模需求,甚至出现因设计方案瑕疵降低测试精度的问题。

在国内,长期以来,作者科研团队是唯一系统开展轮胎动力学研究的团队,技术思路以“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 轮胎模型;同时,在理论指导下,明确了轮胎试验设备的开发目标,建立了轮胎自身特性测试设备与轮胎-路面摩擦特性测试设备相结合的全工况高精度测试技术。实践表明,基于共同“理论”核心,轮胎动力学试验技术与建模技术的融合发展,更利于正确建立满足汽车开发实际需求的全工况高精度轮胎动力学技术体系。

1.2.2 主要特点

第一,建立轮胎动力学全工况高精度统一建模理论:针对多维输入,提出基于复杂胎体变形耦联传递矩阵的非稳态建模新方法,运用“变形积累函数”的 Pade 展开获得精确的多维有效输入,采用统一滑移率定义及滑移率无量纲变换,实现轮胎多维有效输入的归一化处理,在轮胎接地印迹任意压力分布情况下,建立轮胎无量纲总切力与无量纲滑移率的统一理论模型,精确计算轮胎复杂复合工况下的动力学特性,实现了轮胎动力学特性的全工况高精度理论建模。

轮胎动力学理论建模的难点是：针对轮胎多维输入复合工况，给出确保理论精度的解析模型。因为解析模型可给出更多轮胎动力学本质的分析，所以全工况高精度解析模型成为首要的研究目标。

但是，看似简单圆环体的轮胎却是一个极其复杂的非线性系统，国外建立全工况高精度解析模型的努力收效受限，其理论模型研究走入了两个极端：一是模型过于简单，采用很多特定性假设，虽得到简单的解析公式，如 Fiala、UA 轮胎模型等，但因模型结果不具普适性，这类模型只能应用于特定工况，且建模中采用简化假设，模型精度不高；二是模型过于复杂，如基于轮胎材料的本构关系及几何信息建立的有限元模型，该类模型只能给出数值解，无法得到具有指导意义的解析关系，且因极低的计算效率还很难应用于汽车的开发中。也正因在全工况高精度理论模型研究方面鲜有突破，国外学者更加相信“经验建模”是实用轮胎动力学模型的唯一出路。

作者科研团队取得的突破主要采用了以下三方面的技术：

(1) 有效输入的精确获得。决定轮胎动力学特性的是经过弹性轮胎松弛的有效输入，建立复杂胎体变形下耦联传递矩阵，运用“变形积累函数” $E(s)$ 及 $\Delta E_t(s)$ 的 Pade 展开获得精确的轮胎有效输入。

$$\begin{cases} G_{f\psi}(s) = \frac{F_y(s)}{\psi(s)} = C_{i\alpha} (1 - E(s)) \frac{1 - \varepsilon_w \varepsilon_\theta E(s)}{B(s) + \varepsilon_\theta N(s)} \\ G_{fy}(s) = \frac{F_y(s)}{Y(s)} = -C_{i\alpha} \frac{(1 + \varepsilon_\theta) E(s) - \varepsilon_\theta \Delta E_t(s)}{a(B(s) + \varepsilon_\theta N(s))} \\ G_{m\psi}(s) = \frac{M_z(s)}{\psi(s)} = -N_{i\alpha} \left(N(s) \frac{1 - \varepsilon_w \varepsilon_\theta E(s)}{B(s) + \varepsilon_\theta N(s)} + \varepsilon_w E(s) \right) \\ G_{my}(s) = \frac{M_z(s)}{Y(s)} = N_{i\alpha} \frac{(1 + \varepsilon_b) \Delta E_t(s)}{a(B(s) + \varepsilon_\theta N(s))} \end{cases}$$

(2) 轮胎多维输入的归一化处理。定义统一滑移率，实现轮胎侧偏、侧倾、转偏、驱动、制动多维运动输入的归一化，进一步采用无量纲滑移率变换，实现不同路面、速度、胎压输入的全部多维输入的归一化。

(3) 轮胎特性统一理论模型。针对轮胎接地印迹内垂直压力分布的复杂性，接地压力不宜用某种特定分布函数表示，故采用任意压力分布函数，推导得到以无量纲滑移率为输入的轮胎动力学特性统一理论模型，因该统一理论模型适用于所有印迹压力分布情况，理论模型精度获得保障。

采用以上技术，全工况高精度轮胎动力学理论建模方法如图 1.1 所示。

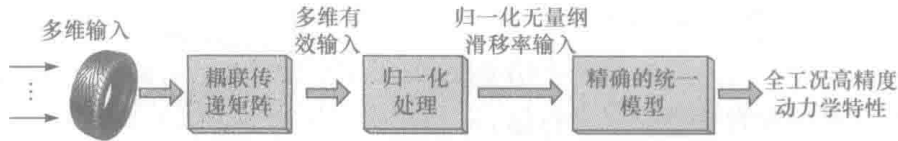


图 1.1 全工况高精度轮胎动力学理论建模方法

表 1.1 给出了本书所建立的理论模型与 Fiala、UA 轮胎模型的对比。

表 1.1 轮胎动力学理论模型对比

对比项	本书所建理论模型	Fiala、UA 轮胎模型
建模坐标系	特殊的印迹更新坐标系	ISO 或 SAE 坐标系
滑移率定义	统一滑移率定义，实现多维输入的归一化	制动、驱动、侧偏分别定义
接地印迹压力分布形式	任意压力分布	特定压力分布
模型公式形式	使用一组参数的一套模型公式	针对制动、驱动、侧偏工况分别建模，多套模型公式
模型参数	参数少	参数多
轮胎动力学内在联系	可分析动力学特性的内在联系	不能分析动力学特性的内在联系
全工况表达能力	全工况模型，适用工况扩展至八维	非全工况模型：Fiala 轮胎模型最多适用二维输入，UA 轮胎模型适用三维输入
模型精度	针对一般情况的建模，精度高	采用特定简化假设，精度低

第二，创立轮胎-路面动摩擦系数函数分离与插入方法，消除仿真时因与试验的路面、速度、胎压参数不同而导致的轮胎-路面摩擦特性误差，提高轮胎模型仿真应用精度；满足统一理论模型极大滑移与极小滑移时各阶边界条件，构建无量纲总切力与无量纲滑移率的 e 指数函数关系，用经验建模方法表达理论模型中的局部复杂解析关系，集成理论模型的全工况和边界高精度、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。

实用轮胎模型需要解决的关键问题是复杂复合工况下模型对动力学特性的高精度表达。汽车动力学仿真需要轮胎模型具有“高精度”，而轮胎实际经历的多维输入复杂工况，又使“全工况”成为实用轮胎模型的基本要求。

因轮胎的耦合非线性，基于“经验”的建模方法无法解决“全工况”与“高精度”间的看似矛盾的关系。对经验模型而言，增加模型的一维输入，模型的整体形式需改变并增加大量参数，且超过某一临界维数，经验模型根本无法建立，

因此经验建模方法难以达到“全工况高精度”要求,如国际著名的 MF 轮胎模型在保证一定精度条件下,目前也只能做到对侧偏、侧倾、纵滑及垂直载荷的四维输入整体建模。

作者科研团队建立的全工况高精度 UniTire 轮胎模型采用了以下关键技术:

(1) 轮胎-路面动摩擦系数函数分离及插入。依据统一理论模型,轮胎动力学特性是轮胎自身特性与轮胎-路面摩擦特性的非线性合成,根据轮胎试验数据,采用参数辨识技术,可以分离出轮胎自身特性及轮胎-路面摩擦特性。考虑到轮胎试验与整车仿真时路面状况、滚动速度、胎压参数不会完全一致,因此可用变化的仿真条件下轮胎-路面摩擦特性与不变的轮胎自身特性重新合成出精确的轮胎动力学特性,通过“插入”轮胎-路面摩擦系数保证仿真时轮胎模型精度。

(2) 理论模型的全工况及边界高精度优点与经验建模局部高精度优点相结合的半物理建模技术。从轮胎特性统一理论模型可知,无量纲总切力与无量纲滑移率的统一表达,是确保实用模型全工况高精度的关键,因此在 UniTire 建模中重点构建无量纲总切力与无量纲滑移率的关系,并用 e 指数函数使 UniTire 轮胎模型极大滑移与极小滑移时各阶边界条件与理论模型一致,保证 UniTire 轮胎模型的全工况及边界的高精度,同时将理论模型中局部复杂解析关系用经验模型表达,实现局部建模的高精度,建立了全工况高精度 UniTire 半物理模型:

$$\bar{F} = 1 - \exp\left(-\phi - E\phi^2 - \left(E^2 + \frac{1}{12}\right)\phi^3\right), \quad D_x = (D_{x0} + D_e)\exp(-D_1\phi - D_2\phi^2) - D_e$$

图 1.2 为美国通用汽车公司提供的试验数据及 MF 轮胎模型结果,与 UniTire 轮胎模型在模型精度、预测能力及建模所需试验量方面的对比:UniTire 轮胎模型在全部对比工况都比 MF 轮胎模型精度高,UniTire 轮胎模型具有预测能力,比 MF 轮胎模型节省 46%建模数据。

第三,开发出低速平板复合四连杆运动解耦轮胎试验台,解决轮胎磨损、稳态测试及侧倾侧偏高精度测试的难题,研制了微环境箱全天候(雨、雾、温度、湿度)全路况模拟胎面高速摩擦特性试验台,解决了轮胎-路面高速动摩擦特性测试难题,两套设备的结合实现了轮胎动力学特性全工况高精度测试。

高精度是试验测试的共同要求,因轮胎多维输入多维输出的耦合特性,全工况高精度成为轮胎动力学特性测试的难点。

国外轮胎试验设备开发以商业公司为主,如美国 MTS 公司开发的 Flat-Trac 系列平带式高速轮胎试验台,虽然在实验室内实现了轮胎高速滚动,但该设备更适合轮胎改进设计前后的动力学特性对比检测,而不完全满足轮胎建模的全

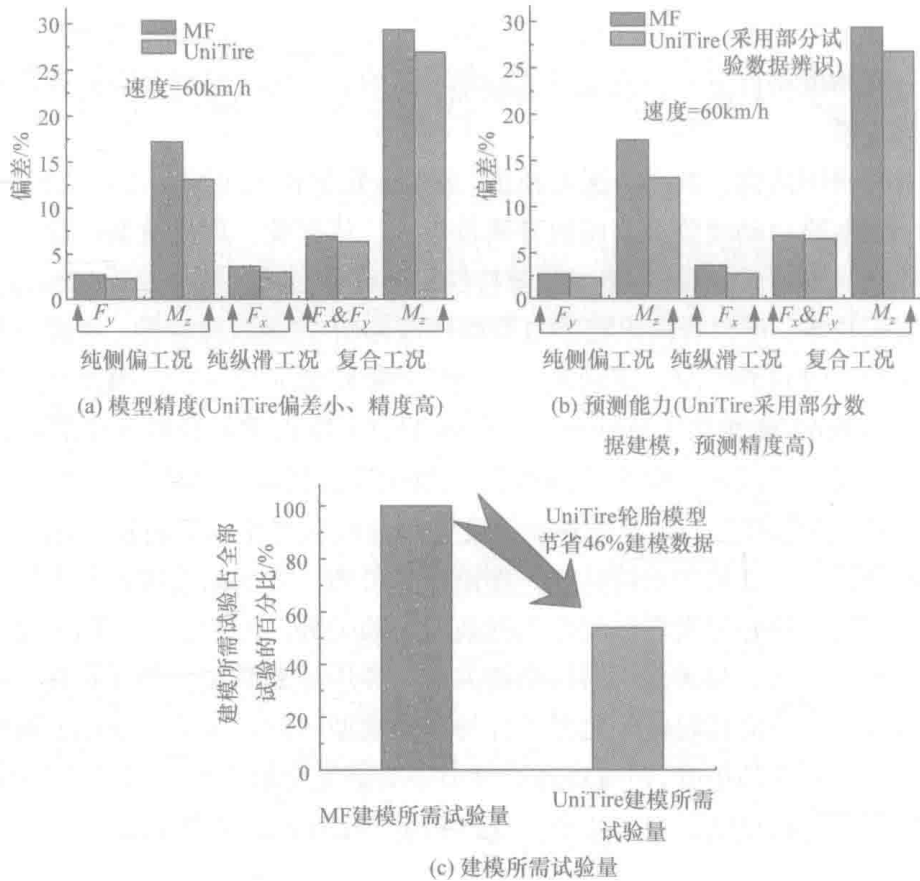


图 1.2 UniTire 与 MF 轮胎模型对比

工况高精度测试要求。Flat-Trac 试验台有如下两方面问题：一是为避免测试中轮胎过度磨损影响测试精度，需采用快速的轮胎相对路面的转向运动实现轮胎的侧偏角输入，此时轮胎处于准稳态工况，得到的试验结果不满足轮胎模型对稳态试验数据的需求，此外，还会产生附加的轮胎转偏运动输入，影响测试结果；二是重要的侧倾侧偏复合工况测试时，轮胎接地印迹中心动态移动，不仅为轮胎六分力的解算带来了困难，同时因印迹中心移动导致附加的侧偏及转偏输入，降低测试精度。

作者科研团队在轮胎动力学统一建模理论指导下，自主开发了测试轮胎自身特性及轮胎-路面摩擦特性的试验设备，建立了全工况高精度轮胎动力学试验装备体系。

低速平板复合四连杆运动解耦轮胎试验台(图 1.3)用于轮胎自身特性测试，低速滚动保证测试轮胎的低磨损无损伤，并得到精确的稳态特性数据，同时因采用创新的复合四连杆运动解耦机构，保证了轮胎侧倾侧偏瞬态特性测试时试验台侧倾轴线与侧偏轴线交点始终与轮胎接地印迹中心重合，消除不必要的侧偏

及转偏运动,在测试原理上保证测试的高精度。全天候全路况胎面高速摩擦特性试验台(图 1.4)采用“瞬态测定法”消除磨损与温升的障碍,轮胎高速滚动时的轮胎-路面摩擦特性可精确测得。

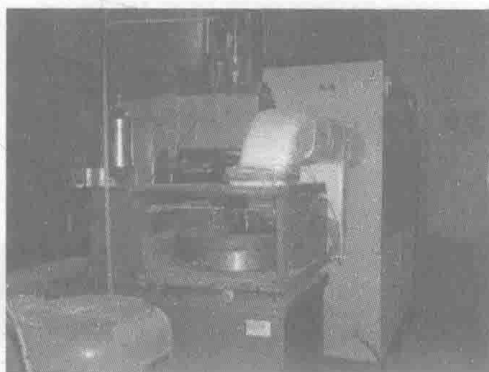


图 1.3 复合四连杆运动解耦轮胎试验台 图 1.4 全天候全路况胎面高速摩擦特性试验台

第四,提出 UniTire 轮胎模型参数分类分步高精度辨识方法,开发了针对汽车不同设计阶段需求的 UniTire 轮胎模型应用软件及参数辨识工具软件,实现了汽车开发中轮胎模型的高精度应用。

轮胎动力学应用的关键技术难点是:轮胎模型参数高精度辨识以及如何建立便于工程师在汽车动力学分析中应用的轮胎模型。

UniTire 轮胎模型参数辨识采用参数分类分步辨识的方法(图 1.5),即先辨识对试验数据敏感且重要的轮胎特性线性区刚度参数,再辨识纯工况非线性区参数,最后辨识复合特性的修正参数,确保模型参数的高精度,开发了相应辨识软件 UniTire Tool,方便工程师使用。

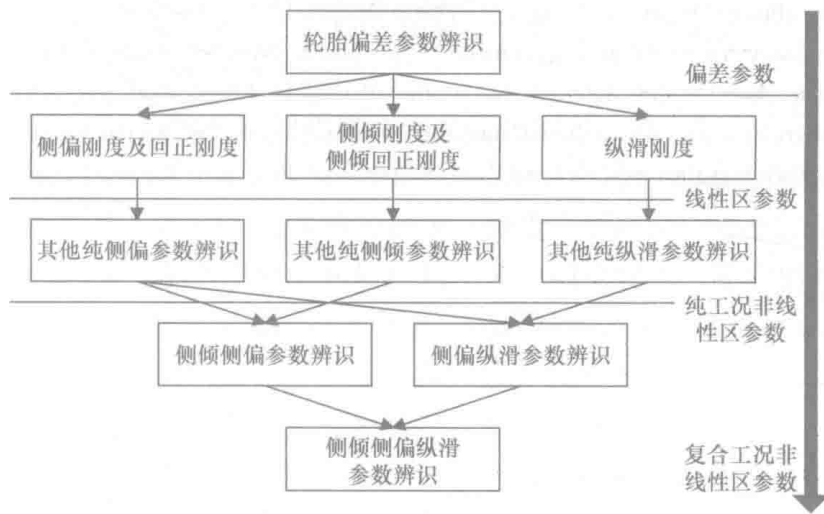


图 1.5 UniTire 轮胎模型参数高精度辨识方法

根据汽车正向开发设计不同阶段对轮胎模型需求的不同,开发了 UniTire/Easy、UniTire/Standard 及 UniTire/Extreme 等版本的模型应用软件,各版本模型的参数数量及所需试验数据都有明显差异,更便于工程师根据开发需要选择应用。同时,定义了基于印迹更新坐标系的 UniTire 轮胎接口,实现与主要动力学分析软件 ADAMS、CarSim 等的精确连接(图 1.6)。

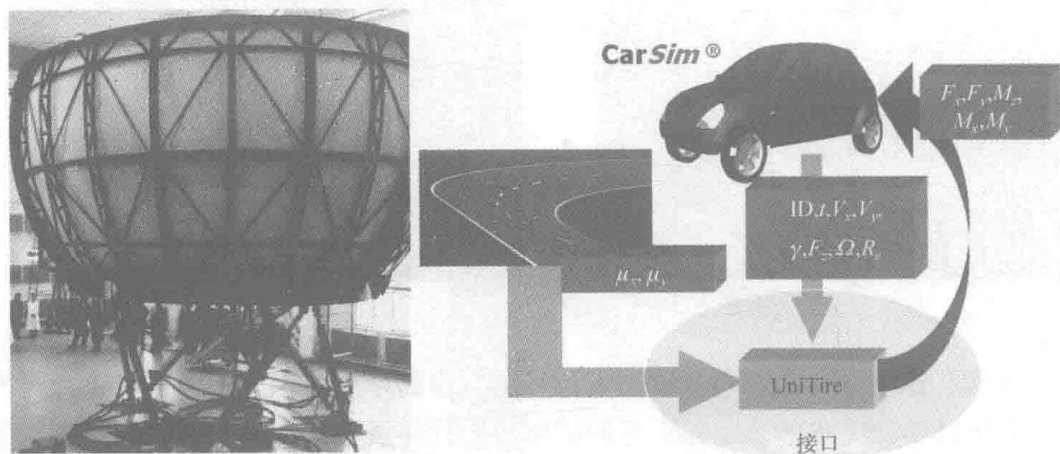


图 1.6 UniTire 在驾驶模拟器及 CarSim 软件中的应用

参考文献

- [1] 郭孔辉. 汽车操纵动力学原理. 南京: 江苏科学技术出版社, 2011.
- [2] Pacejka H B, Besselink I. Tire and Vehicle Dynamics. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 2012.
- [3] Fiala E. Seitenkräfte am rollenden luftreifen. Zeitschrift der VDI, 1954, 96(29): 973-979.
- [4] Gim G, Nikravesh P E. An analytical model of pneumatic tyres for vehicle dynamic simulations Part 1: Pure slips. International Journal of Vehicle Design, 1990, 11(6): 589-618.
- [5] Gim G, Nikravesh P E. An analytical model of pneumatic tyres for vehicle dynamic simulations Part 2: Comprehensive slips. International Journal of Vehicle Design, 1991, 12(1): 19-39.
- [6] Gim G, Nikravesh P E. An analytical model of pneumatic tyres for vehicle dynamic simulations Part 3: Validation against experimental data. International Journal of Vehicle Design, 1991, 12(2): 217-228.

第 2 章 统一半物理稳态模型

轮胎动力学研究中, 复杂理论模型因其计算效率低还没有成功应用的先例, 简单理论模型, 如刷子模型, 又因其采用过多假设导致表达精度低, 无法满足整车高精度仿真的需要。如何平衡理论模型复杂程度及其指导实用轮胎模型建模的作用一直是轮胎动力学研究者考虑的重要问题。

本章通过采用全新的轮胎建模坐标系, 考虑接地印迹内任意压力分布形式, 推导轮胎侧偏纵滑特性的统一理论模型, 并进行理论模型边界条件的研究, 给出实用的 UniTire 轮胎模型基本公式。

2.1 轮胎印迹更新坐标系及统一滑移率定义

轮胎与路面的接触区域称为轮胎的接地印迹(简称接地印迹), 正是在这个区域内, 轮胎与路面相互作用, 产生使汽车实现各种运动(如转向、驱动、制动)的力和力矩。轮胎建模中, 通常将接地印迹内的分布力向接地印迹中心进行简化, 形成一个空间力系, 称为“轮胎六分力”。不同于国际轮胎建模中常采用的 SAE 坐标系或 ISO 坐标系, UniTire 轮胎模型采用印迹更新坐标系(contact patch updated coordinate system, 简称 CPU 坐标系)。采用印迹更新坐标系便于在汽车任意运动状态下确定轮胎六分力的正确方向^[1]。

图 2.1 给出了 UniTire 轮胎模型印迹更新坐标系。轮胎接地印迹中心 O_t 是轮胎坐标系的原点; X_t 轴为车轮平面与地平面的交线; Y_t 轴为车轮旋转轴线在地平面上的投影; Z_t 轴通过接地印迹中心并垂直于路面, 向上为正, 坐标系符合右手定则。由于不断更新的轮胎接地印迹前 endpoint 取决于轮胎的旋转方向, 所以 X_t 轴的正方向为印迹更新速度方向, 这样规定方向可以统一滑移率的定义, 也使得纵向力、侧向力、总切力及力矩具有简化而统一的表达式。轮胎接地印迹中心的速度用 V 表示, 其方向决定了侧偏角 α 的大小。图 2.1 中给出了正的侧偏角 α 、侧倾角 γ 、轮胎滚动角速度 Ω 、纵向力 F_x 、侧向力 F_y 、垂直力 F_z 、翻倾力矩 M_x 、滚动阻力矩 M_y 及回正力矩 M_z 。