



汽车技术创新与研发
系列丛书

智能轮胎

张向文 王飞跃 ◎ 著

INTELLIGENT
TIRES

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



汽车技术创新与研发
系列丛书

智能轮胎

张向文 王飞跃◎著

INTELLIGENT
TIRES



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书的内容围绕智能轮胎研究的总体概况、物理基础、状态信息获取方法、功能实现方法以及问题分析与展望进行阐述。总体概况部分对智能轮胎的研究背景、定义、功能、结构和发展情况进行阐述；物理基础部分对轮胎的压力、温度、摩擦和振动特性进行了详细的分析和研究，为智能轮胎分析和设计提供物理基础；状态信息获取方法部分对智能轮胎常用的传感器的结构、原理、试验测试结果和优缺点进行了详细的分析和总结，对汽车动力学和常用的轮胎模型进行了详细的分析和阐述，为基于轮胎模型的轮胎状态参数估计提供理论基础，介绍了各种轮胎状态参数的估计方法；功能实现方法部分对 TPMS 实现的轮胎压力监测的功能、爆胎预警与控制功能、轮胎状态智能调节功能进行了介绍；问题分析与展望部分通过对智能轮胎研究问题的分析，介绍了设计的平行轮胎框架，预测了采用平行轮胎解决智能轮胎目前研究问题的可行性。附录部分给出了智能轮胎知识（情报）服务平台的介绍，方便同行研究人员基于网站平台进行交流。

本书适合智能车辆及智能轮胎研究人员阅读使用，也适合车辆工程专业师生及汽车技术人员阅读参考。

图书在版编目（CIP）数据

智能轮胎/张向文，王飞跃著. —北京：机械工业出版社，2018.9
（汽车技术创新与研发系列丛书）

ISBN 978-7-111-60663-5

I. ①智… II. ①张…②王… III. ①智能技术—应用—汽车轮胎
IV. ①U463.341—39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2018）第 183812 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：孙 鹏

责任编辑：孙 鹏

责任校对：郑 婕 张晓蓉 责任印制：张 博

北京铭成印刷有限公司印刷

2019 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·38.5 印张·3 插页·793 千字

0 001—2 500 册

标准书号：ISBN 978-7-111-60663-5

定价：199.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88361066

机工官网：www.cmpbook.com

读者购书热线：010-68326294

机工官博：weibo.com/cmp1952

金书网：www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

教育服务网：www.cmpedu.com

序

preface

本书的写作，从策划到完成，用了整整 20 年的时间。看着眼前六百余页的书稿，往事历历在目，科研的辛苦与结果的无常，令人感慨。藉成书之机，简要回顾，权为序。

20 世纪末，我的研究重点转向后来称为社会计算和平行系统的领域，但相当一部分精力仍花在智能交通方面，并在中国科学院自动化研究所建立智能交通实验室 (*Complex Adaptive Systems for Transportation, CAST*)。CAST 的任务有二：首先以智能交通为主，力争建成一套能用于当时还在期望中的北京奥运会的系统；再以智能汽车为辅，开展基础理论和原型系统研究。因为在完成 Caterpillar 的 *AutoDig* (自动挖掘) 和亚利桑那州的 *VISTA* (“远望”无人车，是 *Vehicles with Intelligent Systems for Transport Automation* 的英文缩写) 项目之后，感觉由于法规和人性习惯，无人的智能车在 50 年内都难以普及应用，但此项研究在年轻学子和社会上具有很大的吸引力，而且涉及计算机、人工智能、力学、控制、电子、机械、动力等多种学科，是培养和锻炼人才的“绝佳”课题。

基于这种考量，我们在 1999 年为 CAST 规划了五个智能车的研究方向：一是嵌入式系统和实时专用操作系统，二是传感与控制，三是动力学与机电一体化设计，四是虚拟测试与验证技术，五是智能轮胎和网络化运维。2001 年起，这也成了我的国家自然科学基金委员会杰出青年基金项目“智能车辆核心技术及其应用”的主要研究内容。

我将在国内招的第一个博士生王知学投入到第一方向，主攻实时任务的调度优化和汽车、道路、家庭，各类维护和服务中心之间的网络化操作系统。2004 年我们与中国汽车技术研究中心合作，获得了国家科技部 863 重点项目支持，进行“*vASOS* - 基于 *OSEK/VDX* 和 *OSGi* 的嵌入式汽车软件平台与关键技术”研发。当时中国汽车的电子部分占整车成本比例很低 (2006 年项目结题时，国内，普通汽车：约 5%；中高档汽车：15%~25%；高档汽车：无。国外，普通汽车：约 18%；中高档汽车：35%~45%；高档汽车：约 50%)，行业的有关单位都不愿参加此项目。后来山东省科学院很感兴趣，由其自动化研究所牵头，以我的名义在省里争取了一个 300 万的重点课题，后来又批数千万成立了“山东省汽车电子技术重点实验室”，主要由王知学负责，我做学术委员会主席。这个方向最近产业化的实践就是为二汽神龙完成的“标致 307”汽车的相关项目，规模达 80 万辆，当时最紧迫的任务是 *CAN* 与 *LIN* 总线技术的引入和集成。

第二个方向是我最不担心，可又难以展开的课题，因为当时难寻无人车的合作伙伴和试车场地，最后只好安排博士生李力利用 *VISTA* 项目的背景，于 2005 年完

成英文专著《*Advanced Motion Control and Sensing for Intelligent Vehicles*》。同年，利用自己在美国拉斯维加斯主持 *IEEE* 智能车会议（*2005 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*）的机会，劝说在会上做书展的施普林格出版社代表出版此书，理由是当时还没有这方面的研究专著。两年后，几番周折，施普林格出版社同意出版，可惜发行后销量甚少，直到 2015 年后情况才大为改善。十年后，在时任机械工业出版社副社长陈海娟女士的热情支持下，此书的中文版《智能汽车：先进传感与控制》得以发行。平心而论，此书的一些理念，就是人工智能长足进步后的今天，也不见得落后。

因为曾学习研究力学多年，我对动力学与机电一体化的第三个方向有些偏爱，明知这不是智能车研发重点，还是坚持设立了这一方向，希望为将来的机电一体化设计与控制建立基础，扩展自己过去在柔性机器人手臂优化设计方面的工作。在美教书期间，我曾安排雷神公司 *Raytheon KD* 项目（*Killer Vehicles*，星球大战计划的一部分）的三位在职研究生建立过一个 18 个自由度的车辆动力学模型，虽然无法实时应用，但可以为深度仿真提供途径。然而，一段时间内我无法找到有兴趣且有能力从事这一方向的人员。无奈，只好动员从清华刚毕业的硕士生周群植做这方面的工作。群植花了三年多的心血，埋头一人完成了大量的工作，但由于其他更好的机会，最终还是放弃了这个方向，转入文本分析，获得博士学位后，在硅谷 *Apple* 实验室工作。两年前，我们在旧金山机场会面，就着眼前湾区的无人车热谈起此事，还真有一种“先烈”的感觉。至今，我还保留当年群植未完成的书稿《汽车动力学与控制基础》，但已无完成的欲望和气力。

最初，我并没有把第四个方向作为研发工作，而是将其看作是工程项目。研发 *VISTA* 时，我曾与通用汽车在亚利桑那州的两个试车场联系过，认为无人车技术虽然难上路，但在试车场可以发扬光大：以 24/7 的方式在各种路况和气候条件下试车。当他们告诉我试车员的工资和保险成本，特别是相伴的各种职业病（主要是胃下垂等病状）后，我更是觉得无人车可用于试车场。后来，我通过通用汽车 *On-Star*（安吉星）公司的总裁 *David Acton* 先生向通用提交了一份无人车加数字化的试车场草案。之后听说通用将关闭其在亚利桑那的试车场，还以为会尝试自己的建议，但直到我把精力转到国内时还没有下文。

1999 年初秋，由中国科学院自动化研究所一位老先生安排，我第一次赴长春一汽去见负责生产的一位资深副厂长，希望能在智能车方面合作。副厂长表示有兴趣在海南新的试车场中试一下无人数字试车场的建议，但是担心技术支撑问题。第二年我又带着访问中国的 *Acton* 先生与这位副厂长率领的一汽团队在京会谈，最后还是无果而终。不久，德国的奔驰和宝马都开始了将无人车和仿真用于汽车测试（不是设计，这方面工作很早就有）的研究。

就在我准备放弃这方面的计划之时，在访问公安部车辆中心时，有人向我推荐了交通部公路科学研究所的王笑京总工，并在他的安排下参观了交通部在通州（现为通州）的国家 *ITS* 实验基地：三千余亩，一片绿林！让我十分震撼，并提出将其中用于测试高速公路 *ETC* 的三百亩扩成数字化的无人车测试基地，这就是后

来于 2003 年发表在《IEEE Intelligent Systems》杂志上的《Creating a Digital - Vehicle Proving Ground》一文的由来。虽然这一设想今天仍未实现，但数字化的虚实互补平行无人试车场的理念，目前已为许多专业人士接受，并在国家自然科学基金委员会组织的“中国智能车未来挑战赛”(Intelligent Vehicles Future Challenge, IVFC)和江苏常熟的“中国智能车测试基地”得到了应用。自 2009 年起，IVFC 的赛事和无人车的智能测试成为我和学生在无人车方面的主要工作，除了自己做了十多年的裁判长，博士生汤淑明和黄武陵也花了许多精力，特别是由此完成的无人车“平行测试”技术在西安交通大学郑南宁院士团队、清华大学李力团队、青岛智能产业技术研究院和慧拓智能机器有限公司等多家单位的共同努力之下，已引发业内广泛的兴趣，相关文章《Parallel Testing of Vehicle Intelligence via Virtual - Real Interaction》(汽车智能的虚实互动平行测试)最近被选为《Science Robotics》杂志的人工智能焦点文章。

当然，在我眼中，最为曲折的还是智能轮胎这第五个方向。除了必需，研究智能轮胎的个人因素有三：一是 20 世纪 80 年代 MIT 有人提出机器人的直接电机驱动技术，我开始不解，后来觉得可用于汽车的轮胎直接驱动，或许可以减去许多机械驱动装置，这是自己第一次关注轮胎；二是在南亚利桑那州的露天大矿 (Open Pits) 做项目时，被比人高许多的特种矿山卡车用的轮胎吸引，特别是当我听说每条轮胎价格高达 3 万多美元，操作需要很高的技巧，相关维护和消耗是一笔巨大的费用后，对轮胎就更加好奇了；三是 1997 年夏天在洲际高速 I - 10 的图森至凤凰城路段上，由于轮胎胎面突然在高速行驶中剥离，险些酿成致命事故，让自己切身感到对轮胎实时监测的重要性，否则行驶安全和节能等优化措施就是空谈。

然而，谁可以开始这方面的研究？刚刚入学的博士生张向文引起了我的注意。除了他的力学背景外，直觉告诉我少语的向文可以静下心来专注当时信息领域里最不起眼极少有人研究的轮胎。本书的成稿，证实了自己当时的判断，只是向文的付出如此之大，是我没有想到的。

智能车项目启动之初，国企之外，我曾试图与两家民企合作，一是与刚拿到造车许可的吉利集团，曾委托山东省科学院自动化研究所的负责人给李书福先生写信，希望利用吉利的车建一支用于演示的无人车队，在中国重演一次美国 1997 年在圣地亚哥举办的无人车“Big Demo”，为吉利做广告，以此改变消费者眼里的“摩托车汽车”甚至“农民车”的印象，可惜无回应。二是与三角轮胎公司联系，研发智能轮胎。恰好此时美国交通部出台法规要求，2003 年 11 月私家车的轮胎必须有气压监测系统 (TPMS)，这就是 2000 年爆发的著名的普利司通轮胎召回案和由此引发的 TREAD 国会法案的结果。在时任三角轮胎总工程师单国玲女士的大力支持下，中国科学院自动化研究所和美国亚利桑那大学与三角轮胎于 2002 年底合作成立三角智能轮胎研究中心。在此之前，我们已与三角轮胎合作完成了两篇智能轮胎论文，先后发表于《轮胎工业》杂志，这就是第 1 章参考文献部分的文 [1] 和文 [2]。根据当时的文献检索，这是国内最早的智能轮胎文章。

研究中心成立仪式上的一段经历，让我终生难忘。时任亚利桑那大学工学院负

责科研的院长，美国工程院院士 *J. Brent Hiskey* 教授专程由美赴威海参加成立仪式。会前检查文件时发现他的名字被拼成 *Whiskey*，一种烈性洋酒，改过后打印出来，一看还是 *Whiskey!* 最后发现竟然是刚安装使用不久的编辑系统自动修改所致，一时成为“智能”的笑话！成立仪式之后的晚宴上，开始就要求他与大家一起按当地风俗连干三杯，否则，就不是“诚心诚意”。但 *Hiskey* 是一名虔诚的教徒，不但滴酒不沾，其教规让他连茶都不能喝。无奈之下，我只好代他，三杯之后立即呕吐不止，无法继续下面的活动。此事让我从一开始就对这一项目就有了恐惧之情，加上后来合作方负责人员之一脱离企业自己成立了经营 *TPMS* 产品的公司，研究中心项目没有做多少就终止了。

但研究还要进行，可一开始难题就出现了。在建模方面，发现轮胎与路面的摩擦模型众多，有名带姓的就有 *Dugoff* 模型、*Burckhardt* 模型、*LuGre* 模型等多个，但都不理想，加上当时 *GPS* 技术还不成熟，手头又无合适的测量手段，一时成为“拦路虎”。在技术方向，首选的声表面波 (*Surface Acoustic Wave, SAW*) 技术虽然具有高精度、高灵敏、体积小、重量轻、功耗低、抗干扰能力强、结构工艺性好、便于大批量生产等许多优点，特别是可以无线无源化，对于轮胎极为理想，但当时无经费购置相应的设计测试环境和工具，加上大家对 *SAW* 封装工艺和温度对其测量精度的影响没有把握，最终只对 *SAW* 轮胎传感器的建模、仿真、设计、工艺、材料优化等问题做了一些力所能及的研究。这期间，我安排了李力和群植等协助向文完成了一部分工作。

不久，向文博士毕业，赴桂林电子科技大学任教。我曾想安排他在国外进修一段时间，但当时很少有人从事这方面的研究。离京前，我约向文深谈，希望他不要放弃刚开始的方向，我也将尽可能地支持他的研究。后来，为了让他更好地了解国际上智能轮胎的研究现状，加上此领域专家奇缺，我力主资历还浅的向文担任 *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 的编辑。让我没有想到的是，做事一贯认真的向文处理稿件极其认真，在审稿方面耗去了大量时间，最后不得不辞去这项工作。

独立工作后，向文一直与我保持联系，继续智能轮胎的研究，取得了许多进展，并得到国家自然科学基金委员会等机构的有力支持。2007年，我们完成了本书的英文初版 *《Intelligent Tires: Modeling, Sensing, and Analysis》*，由硅谷的 *Westing Publishing Co* 出版。这是一家由朋友在美创办的出版社，为了表示对其的支持，我们在第一方向的 *《嵌入式系统的组织与设计——基本方法与应用》*（作者：王飞跃，赖关丕，艾云峰，李乐飞，黄锋），还有一本 *《Recent Advance in ITS》*，共三本书都交其刊发，可惜公司不久就不再出版科技类著作。

后来，向文的研究一大部分转向电动汽车，并得到学校和地方的大力支持。2013年，武汉一家经营公交轮胎的企业对我关于采用平行技术实现轮胎网络化运营的设想感兴趣，商谈合作，我推荐了向文，希望他能借此进一步开展智能轮胎的研究。再后来，航天科技集团有关部门与深圳合作，计划在一个新区建立智能轮胎研究和运营中心，条件优厚，我动员向文参加，但因电动车的工作刚上台阶，他只能放弃。

无人车的世界热潮开始之后，我又一次与向文深谈，建议花时间完成《智能轮胎》中文版，因为我发现当时至少市面上还没有此类专著。更大原因是我认为应尽快启动智能轮胎研究，这对无人车的性能和安全至关重要。2016年的暑期，向文赴京，在我办公地点附近，集中精力专注本书的写作。基本框架商定之后，我安排相关学生和同事为其做些辅助工作，主要是建立了一个针对本书写作的智能轮胎知识（情报）服务平台系统。本书的附录里列出其初步的功能，希望有机会进一步完善，将来成为一个支撑大家从事智能轮胎研究和开发的开源平台。

初稿完成之后，已是2016年底。我花了三个多月的时间，才完成自己的修改意见，因为许多材料已超出当时我对智能轮胎的规划，有些内容自己读起来都感觉吃力了。一方面我为向文这么多年的坚持和认真所感动，一方面又为自己的一己执着而不安。如果当年向文没按我的指导而选择其他更加热门的课题，此般的辛苦，会有什么样的成就？当然，这是一个无法回答的问题。作为一名已有三十多年经历的研究生导师，印象里这是我第一次萌生这样的感想。

书稿修改完成后，没想到在阅读清样时我又有了新的想法，提出了许多新的修改意见。为此自己心里也有些不安，利用开会去桂林的机会，还与向文见了一面。没想到向文没有一句怨言，认认真真又花了数月的功夫，再次对书稿进行了全面的校订，也使本书的出版延迟了一年的时间。

我之所以坚持对轮胎的研究，是认为目前对轮胎的重视和研究远远不够，智能技术几乎还没有在轮胎上发挥作用。但轮胎对于车辆行驶的安全、对于环境保护的力度、对于行车效率及舒适水平的保障，至关重要，必须长期深入地研究。将来，我希望像本书最后一章所初步构想的一样，利用物联网、大数据、区块链和云计算等，使轮胎也成为虚实互动具有平行智能的智慧轮胎，成为确保各种车辆可以平安运行的“平行轮胎”。

为此，我必须感谢向文，他在智能轮胎方向已经是我的老师，感谢他在相当程度上完成了自己在轮胎方面的愿望，更希望本书能够帮助更多的学者和工程技术人员投身智能轮胎的研究。在此，还要感谢在我轮胎研发之初给予极大帮助的单国玲女士和高彦臣博士，他们是中国轮胎行业发展的一线开拓者和见证人，感谢他们百忙之中审阅本书初稿并提出宝贵意见。王晓博士，陆浩、孙星恺、吕宏强、任志远等同事和学生也对本书做了许多支撑工作，在此深表感谢！

最后，借此机会，我要感谢机械工业信息研究院副院长陈海娟女士，还有机械工业出版社汽车分社的策划编辑孙鹏。他们曾多次赴中国科学院自动化研究所商讨本书的出版，为此项目付出大量心血和时间。没有他们的热情支持，本书的出版难以如此顺利。

王飞跃

中国科学院自动化研究所
复杂系统管理与控制国家重点实验室
2019年3月16日于北京

前言

foreword

爆胎一直是高速公路交通事故的头号杀手，汽车在高速公路上行驶时，当车速超过 160km/h 时发生爆胎，驾驶人几乎没有生还的可能。为了解决爆胎问题，汽车和轮胎研究人员想尽办法，对轮胎材料和结构不断进行改进，设计漏气保用轮胎和无内胎轮胎，但是，这些轮胎结构复杂，体积和重量都比较大，成本较高，降低了轮胎的舒适性和经济性。随着信息技术的发展，智能技术的兴起和网络技术的普及，智能轮胎成为解决爆胎问题和提高轮胎性能的有效手段。

智能轮胎是一种新兴的智能化的轮胎，它能够通过胎内安装的传感器或汽车其他传感器获取轮胎的压力、温度、摩擦和振动等状态信息，根据获取的信息进行轮胎压力和安全等状态的智能判断，当轮胎状态异常时能够自动报警，提醒驾驶人及时处理，保证轮胎的压力经常处于标准压力附近，当轮胎出现快速漏气或爆胎等危险状态时能够自动代替或辅助驾驶人进行汽车的制动或转向操纵，从根本上解决轮胎漏气或爆胎引起的交通事故，从而显著提高汽车的安全性、环保性、经济性和舒适性。

作者最早接触智能轮胎研究是 2002 年 9 月，当时刚进入中国科学院自动化研究所攻读博士学位，导师王飞跃教授将自己发表的第一篇智能轮胎的论文“智能轮胎的研究及其相关核心技术”拿给我看，并且把相关的参考文献也一起打印给我，通过和导师的交流，对智能轮胎研究的前景充满了憧憬，确定了进行智能轮胎研究的目标和方案。当时的智能轮胎研究大部分都集中在有源传感器测量轮胎的压力和温度，通过无线发射方式进行信息的收集，博士课题需要一定的理论深度，因此，针对有源传感器的局限性，确定了“应用于智能轮胎的无源无线声表面波压力和温度传感器”的博士课题，随后的三年时间，在导师的指导下，通过与山东威海三角轮胎公司和美国亚利桑那大学合作，设计了一套应用于智能轮胎的无源无线声表面波压力和温度传感器，解决了传感器压电基片切割方向优化选择问题以及同时进行轮胎压力和温度测量的信号校正问题。

2005 年 7 月，博士毕业后，进入桂林电子科技大学工作，通过和导师王飞跃教授合作，继续从事智能轮胎相关问题的研究，随后，获得了中国科学院复杂系统与智能科学重点实验室（目前的复杂系统管理与控制国家重点实验室）开放课题“智能轮胎技术研究”的资助，针对智能轮胎中的 *TPMS* 进行了轮胎压力监测功能实现方面的研究，同时，进行基于轮胎电容阻抗的无源无线声表面波传感器研究，在导师的指

导下，完成了智能轮胎方面最早的专著《*Intelligent Tires: Modeling, Sensing, and Analysis*》的撰写，对轮胎的模型、轮胎传感器和轮胎压力、温度与摩擦特性进行了详细的阐述，该专著2007年由美国 Westing Publishing Co. 出版。

2008年，在完成开放课题“智能轮胎技术研究”之后，获得了国家自然科学基金青年基金项目“基于轮胎阻抗和 SAW 谐振器的无线无源轮胎压力传感器研究”资助，对轮胎阻抗与轮胎压力之间的关系进行了深入的研究，建立了轮胎电容阻抗变化与轮胎压力变化之间的线性关系，设计实现了基于轮胎阻抗和 SAW 谐振器的无线无源轮胎压力传感器测试系统。

随着 MEMS 技术的进步，轮胎传感器芯片集成了轮胎压力、温度、电池电压和加速度传感器、无线发射器和微控制器，集成度和信号采集精度都很高，进行智能轮胎的 TPMS 的开发难度逐渐降低，国内外涌现了大量的 TPMS 产品，而对于无源无线传感器的研究，由于设计、制造和安装等方面的问题，仍然没有实现市场化，在没有新的研究思路的情况下，作者转入热门的电动汽车研究，在2014年获得了国家自然科学基金项目“基于滑移率优化分配的电动汽车再生制动自适应动态协调控制算法研究”，该研究基于前期在智能轮胎状态信息获取方法方面的研究，进行电动汽车制动力分配与控制算法的研究，属于智能轮胎获取信息应用方面的一种拓展，因此，随后的研究大部分也围绕智能轮胎信息获取及应用方面。

2013年以来，导师王飞跃教授密切关注智能轮胎的研究动向，为作者在智能轮胎方面的研究指明了方向，鼓励作者在原来的著作《*Intelligent Tires: Modeling, Sensing, and Analysis*》的基础上，结合近年来国内外的研究成果，完成一本内容全面的智能轮胎著作，为更多的研究者提供参考。2013年3月开始，作者着手准备智能轮胎著作的撰写，对国内外在智能轮胎相关方面的研究内容进行了广泛的阅读，特别是轮胎状态参数估计方面的众多的内容。2016年11月，完成了初稿的撰写，导师王飞跃教授进行了认真的阅读，并给出了十分详细的意见，另外，安排陆浩、吕宏强、孙星恺、任志远和王晓等人构建了智能轮胎知识（情报）服务平台，完整地收集了国内外在智能轮胎方面的研究成果，为作者提供了非常丰富的国内外文献资料。在此基础上，作者进一步扩充了书稿的内容，终于在2017年7月完成了修改稿。

本书的内容围绕智能轮胎研究的总体概况、物理基础、状态信息获取方法、功能实现方法以及问题分析与展望进行阐述。总体概况部分为第1章智能轮胎概述，对智能轮胎的研究背景、定义、功能、结构和发展情况进行阐述。物理基础部分为第2章轮胎物理特性分析，对轮胎的温度、压力、摩擦和振动特性进行了详细的分析和研究，为智能轮胎分析和设计提供物理基础。状态信息获取方法部分分为6章，是本书的核心部分，对于智能轮胎的研究，信息的获取和处理是最根本的问

题，也是作者花费大量时间研究的问题。第3章轮胎状态测量与轮胎传感器设计部分对智能轮胎常用的传感器的结构、原理、实验测试结果和优缺点进行了详细的分析和总结。第4章汽车动力学与轮胎模型分析部分对汽车动力学和常用的轮胎模型进行详细的分析和阐述，为基于轮胎模型的轮胎状态参数估计提供理论基础。第5~8章介绍了各种轮胎状态参数的估计方法，第5章为轮胎压力与侧偏刚度估计，第6章为汽车速度估计，第7章为轮胎/路面摩擦估计，第8章为汽车侧偏角估计。功能实现方法部分通过第9~11章进行阐述，第9章对TPMS实现的轮胎压力监测的功能进行介绍，第10章对爆胎预警与控制功能进行介绍，第11章对轮胎状态智能调节功能进行介绍。问题分析与展望部分通过第12章平行轮胎进行阐述，通过对智能轮胎研究问题的分析，介绍了设计的平行轮胎框架，预测了平行轮胎解决智能轮胎目前研究问题的可行性。附录部分给出了智能轮胎知识（情报）服务平台的介绍，方便同行研究人员基于网站平台进行交流。

本书的内容主要来源于作者和作者导师王飞跃教授的研究成果，部分成果来源于同行的研究，其中参考同行的研究成果，在书中都进行了详细的标注，在此深表谢意。任何一个领域的发展都需要广大学者的共同研究，本书为从事智能轮胎及相关领域研究的同行提供了相对完善的参考资料，限于作者研究水平和眼界，难免会出现错误和疏漏之处，欢迎同行研究者提出批评指正。

借此机会，我要感谢我的博士生导师王飞跃教授，是他将我引入智能轮胎的研究领域，多年来不断地支持和鼓励我，引导我从事智能轮胎研究的正确方法和思路，是他对待智能轮胎的研究热情和献身科学研究的精神鼓舞了我，给予我长期坚持智能轮胎研究的信心和勇气。另外，也感谢为本书撰写建立智能轮胎知识（情报）服务平台系统的陆浩、吕宏强、孙星恺、任志远和王晓博士，感谢几位为本书完成提供了非常完善的文献资料。

张向文
桂林电子科技大学

目录

contents

序

前言

第 1 章 智能轮胎概述	1
1.1 引言	1
1.2 轮胎与轮胎技术	1
1.2.1 轮胎核心功能	1
1.2.2 轮胎基本结构	2
1.2.3 轮胎类型	2
1.2.4 轮胎技术及发展	4
1.3 智能轮胎技术	6
1.3.1 智能轮胎研究背景	6
1.3.2 智能轮胎定义与智能轮胎功能	7
1.3.3 智能轮胎结构	9
1.3.4 智能轮胎发展	9
1.4 智能轮胎与智能汽车的关系	13
1.5 全书的组织结构	14
1.6 参考文献	16
第 2 章 轮胎物理特性分析	20
2.1 引言	20
2.2 轮胎温度特性分析	20
2.2.1 轮胎温度变化对轮胎性能的影响	20
2.2.2 轮胎温度特性理论分析	22
2.2.3 轮胎温度特性实验研究	23
2.2.4 轮胎温度影响因素分析	26
2.3 轮胎压力特性分析	29
2.3.1 轮胎压力对汽车和轮胎性能的影响	30
2.3.2 轮胎压力实验研究	36
2.3.3 轮胎压力影响因素分析	38

2.3.4	合适轮胎压力的选择	41
2.4	轮胎摩擦特性分析	42
2.4.1	轮胎摩擦特性对汽车性能的影响	42
2.4.2	轮胎摩擦机理分析	43
2.4.3	轮胎摩擦分类	44
2.4.4	轮胎摩擦影响因素分析	46
2.5	轮胎振动特性分析	58
2.5.1	轮胎振动特性对汽车性能的影响	59
2.5.2	轮胎振动理论模型	60
2.5.3	轮胎振动模态分析	62
2.5.4	轮胎振动影响因素分析	64
2.6	轮胎物理特性分析研究方向	67
2.7	参考文献	68
第3章	轮胎状态测量与轮胎传感器设计	78
3.1	引言	78
3.2	轮胎状态测量方法	78
3.3	集成 MEMS 传感器	80
3.4	轮胎阻抗传感器	81
3.4.1	轮胎电容阻抗传感器	81
3.4.2	轮胎电容电阻阻抗传感器	87
3.4.3	橡胶基电容阻抗传感器	92
3.4.4	轮胎阻抗传感器优缺点分析	96
3.5	超声波传感器	97
3.5.1	轮胎垂直载荷测量原理及结果	97
3.5.2	轮胎压力测量原理及结果	99
3.5.3	轮胎温度测量原理	100
3.5.4	超声波传感器优缺点分析	100
3.6	光学传感器	101
3.6.1	激光传感器	101
3.6.2	光敏传感器	103
3.7	电磁传感器	105
3.7.1	霍尔磁场传感器	105
3.7.2	磁化轮胎传感器	108
3.8	声表面波传感器	109

3.8.1 声表面波延迟线型传感器	111
3.8.2 声表面波谐振器型传感器	123
3.8.3 声表面波谐振器与轮胎电容阻抗混合型传感器	128
3.8.4 声表面波传感器优缺点分析	140
3.9 智能轮胎传感器发展趋势	142
3.10 参考文献	143
第4章 汽车动力学与轮胎模型分析	147
4.1 引言	147
4.2 汽车动力学基础	147
4.2.1 汽车纵向动力学基础	147
4.2.2 汽车侧向动力学基础	148
4.3 轮胎运动过程描述	152
4.4 轮胎垂直载荷分布特性	153
4.5 轮胎稳态模型分析	157
4.5.1 轮胎稳态理论模型	157
4.5.2 轮胎经验模型	183
4.5.3 轮胎半经验模型	189
4.5.4 轮胎稳态模型比较	204
4.6 轮胎非稳态模型分析	209
4.6.1 轮胎纵向非稳态模型	210
4.6.2 轮胎侧向非稳态模型	213
4.7 轮胎模型研究方向	217
4.8 参考文献	220
第5章 轮胎压力与侧偏刚度估计	230
5.1 引言	230
5.2 轮胎压力估计	230
5.2.1 基于轮胎刚度的轮胎压力估计	230
5.2.2 基于轮胎半径变化的轮胎压力估计	232
5.2.3 基于轮胎振动分析的轮胎压力估计	233
5.3 轮胎侧偏刚度估计	236
5.3.1 轮胎侧偏刚度特性	236
5.3.2 轮胎侧偏刚度估计方法研究	237
5.3.3 轮胎侧偏刚度估计仿真研究	244
5.4 轮胎压力估计和轮胎侧偏刚度估计的研究方向	252

5.5 参考文献	252
第6章 汽车速度估计	255
6.1 引言	255
6.2 纵向速度估计	255
6.2.1 基于轮速与加速度线性叠加的估计方法	255
6.2.2 基于轮速与加速度的模糊估计方法	257
6.2.3 基于轮速和加速度的卡尔曼滤波器估计方法	258
6.2.4 基于轮速和加速度的模糊卡尔曼滤波器估计方法	259
6.2.5 基于轮速、加速度和转向角的模糊卡尔曼滤波器与加速度积分融合的 估计方法	261
6.2.6 基于轮速和加速度的滑模观测器估计方法	263
6.2.7 纵向速度估计方法分析	266
6.3 侧向速度估计	267
6.3.1 基于横摆角速度观测量的估计方法	268
6.3.2 基于横摆角速度观测量和侧向加速度输入量的估计方法	269
6.3.3 基于横摆角速度和侧向加速度观测量的估计方法	270
6.3.4 侧向速度估计方法分析	272
6.4 纵向和侧向速度共同估计	273
6.4.1 卡尔曼滤波器估计方法	273
6.4.2 观测器估计方法	293
6.4.3 纵向和侧向速度估计方法分析	305
6.5 汽车速度估计研究方向	307
6.6 参考文献	308
第7章 轮胎/路面摩擦估计	312
7.1 引言	312
7.2 摩擦系数估计	312
7.2.1 纵向摩擦系数估计	313
7.2.2 侧向摩擦系数估计	324
7.2.3 最大摩擦系数估计	325
7.2.4 摩擦系数估计分析	328
7.3 摩擦力估计	329
7.3.1 纵向力估计	329
7.3.2 侧向力估计	335
7.3.3 纵向力和侧向力同时估计	344

7.3.4 摩擦力估计分析	381
7.4 轮胎/路面摩擦估计研究方向	381
7.5 参考文献	383
第8章 汽车侧偏角估计	389
8.1 引言	389
8.2 基于汽车运动学模型的积分方法	389
8.3 基于汽车动力学模型的模型估计方法	391
8.3.1 基于轮胎线性模型的估计方法	391
8.3.2 基于轮胎随机游走模型的估计方法	396
8.3.3 基于轮胎松弛模型的估计方法	397
8.3.4 基于轮胎非线性模型的估计方法	404
8.3.5 基于轮胎线性自适应模型的估计方法	413
8.3.6 基于动力学模型的估计方法分析	424
8.4 基于汽车运动学模型和汽车动力学模型的混合估计方法	425
8.5 模型参数变化对估计结果的影响	430
8.6 汽车侧偏角估计的研究方向	432
8.7 参考文献	434
第9章 TPMS	440
9.1 引言	440
9.2 TPMS 研究的背景与意义	440
9.3 TPMS 的功能和标准	443
9.3.1 TPMS 的作用	443
9.3.2 TPMS 的功能	444
9.3.3 TPMS 标准	445
9.4 间接式 TPMS	447
9.4.1 间接式 TPMS 工作原理	447
9.4.2 间接式 TPMS 实现方法	448
9.4.3 间接式 TPMS 优缺点分析	456
9.5 直接式 TPMS	457
9.5.1 直接式 TPMS 的结构与原理	458
9.5.2 直接式 TPMS 实现方法	460
9.5.3 直接式 TPMS 优缺点分析	480
9.6 混合式 TPMS	482
9.7 无源 TPMS	483

9.7.1	能量收集器	483
9.7.2	电磁耦合方式	490
9.7.3	无源 TPMS 的优缺点分析	491
9.8	TPMS 技术发展方向	492
9.9	参考文献	494
第 10 章	爆胎预警与控制	504
10.1	引言	504
10.2	爆胎原因分析	504
10.3	爆胎理论和实验研究	506
10.3.1	爆胎过程的轮胎压力变化	507
10.3.2	爆胎过程的轮胎性能变化	508
10.3.3	爆胎模型	515
10.4	汽车爆胎过程的动力学分析	516
10.5	爆胎的预警与控制	519
10.5.1	非充气轮胎	520
10.5.2	防爆轮胎	521
10.5.3	爆胎预警与控制	525
10.6	爆胎预警与控制研究方向	549
10.7	参考文献	550
第 11 章	轮胎状态智能调节系统	554
11.1	引言	554
11.2	轮胎中央充放气系统	554
11.2.1	轮胎中央充放气系统的作用	555
11.2.2	轮胎中央充放气系统的结构	556
11.2.3	轮胎中央充放气系统的工作原理	561
11.2.4	轮胎中央充放气系统分析	565
11.3	轮胎压力和车速智能调节系统	566
11.3.1	轮胎压力和车速智能调节系统模糊逻辑控制器设计	566
11.3.2	轮胎压力与车速智能调节系统仿真研究	570
11.4	轮胎状态智能调节系统研究方向	573
11.5	参考文献	574
第 12 章	平行轮胎	577
12.1	引言	577
12.2	智能轮胎研究存在的问题分析	577