

平行轮胎的基本架构与关键技术

张向文^{1,2}, 王飞跃³

(1. 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 广西 桂林 541004;

2. 广西自动检测技术与仪器重点实验室, 广西 桂林 541004;

3. 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, 北京 100190)

摘要: 随着智能汽车和网联汽车的发展, 需要智能轮胎提供更多的轮胎状态信息。为了综合利用轮胎的状态信息, 基于平行系统理论建立一种平行轮胎架构, 用于轮胎状态的智能控制和管理, 从而提高轮胎的安全性、经济性和舒适性。针对建立的平行轮胎架构, 阐述了人工轮胎建模、人工轮胎的计算实验、人工轮胎和实际轮胎的平行执行关键技术的实现过程, 展望了平行轮胎的应用前景, 探讨了轮胎技术知识自动化的发展方向。

关键词: 智能轮胎; 人工轮胎; 计算实验; 平行执行; 平行控制和管理

中图分类号: TP13, U463

文献标志码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.202242

Basic framework and key technologies of parallel tires

ZHANG Xiangwen^{1,2}, WANG Fei-Yue³

1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China

2. Guangxi Key Laboratory of Automatic Detection Technology and Instruments, Guilin 541004, China

3. The State Key Laboratory for Management and Control of Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

Abstract: With the development of intelligent vehicles and connected vehicles, intelligent tires are required to provide more tire state information. In order to make comprehensive use of the state information of the tires, a framework of parallel tires was established based on the theory of parallel systems to control and manage the tired state intelligently, which improved the safety, economy, and comfort of the tires correspondingly. In view of the established framework of parallel tires, the realization process of the key technologies was described in detail, including artificial tire modeling, artificial tires computational experiments, and parallel execution between artificial tires and real tires. In addition, the application fields of parallel tires prospected, and the knowledge automation development direction of tire technology was discussed accordingly.

Key words: intelligent tire, artificial tire, computational experiment, parallel execution, parallel control and management

0 引言

随着智能汽车和网联汽车的发展, 人们需要的轮胎状态信息越来越多, 通过智能轮胎技术可以获取轮胎的压力、温度、摩擦、磨损和承受的作用力等信息。获取更多的轮胎状态信息, 优化控制和管理轮胎的状态变化, 完善和扩展智能轮胎的功能,

是支撑智能汽车和网联汽车技术发展的关键。

在轮胎智能化的发展过程中, 为了获取尽可能多的轮胎状态信息, 需要在轮胎内安装传感器; 为了提高轮胎的安全性、经济性和舒适性, 需要进行轮胎材料和结构的优化设计, 控制和管理轮胎的状态变化; 为了缩短汽车设计周期, 需要建立更准确的轮胎模型, 加快轮胎实验测试技术的发展。目前,

收稿日期: 2022-08-03; 修回日期: 2022-08-29

通信作者: 张向文, zwx@guet.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51465100)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China(No.51465100)

通过在胎内安装压力、温度和加速度传感器,可以获取智能轮胎的压力、温度、载重、磨损和摩擦力的变化,判断轮胎的安全状态,但是,传感器的安装比较麻烦,并且需要电池供电,电池的体积和重量比较大,容易影响轮胎旋转的动态平衡。另外,轮胎的磨损和摩擦力的变化难以用传感器直接测量,一般通过估计获取,但估计精度不高,并且容易受到多种干扰因素的影响^[1]。在轮胎材料和结构方面,纳米氧化锌、石墨烯、碳纳米管和白炭黑等材料被添加在橡胶中,以提高轮胎的耐磨性能,降低轮胎的滚动阻力。另外,还可以通过改变胎面花纹设计,提高胎面的抗湿滑能力,增加轮胎在不同路面的抓地力^[1]。但是,在智能轮胎设计中,为了减小传感器和芯片安装对轮胎整体刚度和弹性的影响,延长传感器和芯片的使用寿命,需要进行轮胎材料和结构的优化设计。在轮胎状态控制和管理方面,通过轮胎压力监测和爆胎控制,可以提高轮胎的安全性,但是,目前实车实验测试数据较少,可靠性不高^[1]。在轮胎模型方面,目前使用较多的魔术公式模型和 UniTire 模型可以描述轮胎在纵滑、侧偏和侧倾等运动工况(以下简称工况)下的力学特性变化,但是模型参数与轮胎类型、轮胎材料以及结构之间的关系复杂,模型参数适用范围有限。另外,目前的轮胎模型一般根据轮胎台架测试数据获得,与实车工况之间存在一定的差距,特别是难以对所有复杂的工况进行测试,因此,目前的轮胎模型在精度和适用性方面都存在一定的局限性。在轮胎实验测试技术方面,目前的转鼓式、平板式和平带式实验台可以模拟轮胎的速度、载荷和气压的变化,但是,对于轮胎慢速漏气、快速漏气、异常磨损或爆胎过程,目前还没有很好的测试手段^[1]。为了验证智能轮胎的功能,测试智能轮胎在各种复杂工况下的性能变化,需要根据智能轮胎的具体工况,不断研究新的测试技术和验证方法,完善实验和验证的手段。

通过上述分析可以看出,在智能轮胎的状态信息获取、材料和结构优化设计、状态控制和管理、准确模型建立和复杂工况实验测试技术方面,还存在不少问题。为了加快智能轮胎技术的发展,需要结合智能汽车和网联汽车技术,获取更多的轮胎和汽车状态信息,建立更准确的轮胎模型,基于建立的轮胎模型进行轮胎安全性、经济性和舒适性判断,根据判断的结果,对轮胎状态进行智能化的控

制和管理,从而提高轮胎的智能化水平。但是,在轮胎的实际运动过程中,由于轮胎的类型和老化程度、路面状况、交通状况、驾驶人的驾驶习惯不同,汽车的运动状态复杂多变,难以建立有效的轮胎模型进行轮胎智能化的研究。

平行系统理论是解决复杂系统不确定问题的有效途径,通过人工系统、计算实验和平行执行,建立复杂系统的人工模型,挖掘复杂系统的变化规律,实现对复杂系统不确定过程的管理和控制^[2]。本文基于平行系统理论,建立平行轮胎的系统架构,解决智能轮胎在复杂工况下的建模、测试和状态控制和管理难题。首先对平行系统理论进行介绍。然后基于平行系统理论,构建平行轮胎的基本架构,分析平行轮胎解决智能轮胎建模、测试、状态控制和管理难题的关键技术。最后,对平行轮胎的应用前景和研究方向进行探讨和展望。

1 平行系统理论

平行系统理论是中国科学院自动化研究所王飞跃教授在 2004 年提出的一种创新性的理论体系,通过人工系统(artificial system, A)、计算实验(computational experiment, C)和平行执行(parallel execution, P)的方法(ACP 方法),解决复杂系统不可分 and 不可知的问题,实现复杂系统的建模、实验和控制^[2-3]。平行系统的基本框架如图 1 所示,它包括实际系统和人工系统两部分,人工系统是对实际系统的软件化定义。一方面,实际系统与人工系统相互链接,通过信息交互和平行执行,实时分析对比二者的行为变化,使人工系统趋近实际系统,提高人工系统的准确性。另一方面,人工系统以虚实互动的方式对系统未来的变化状况进行预测和判断,人工系统引导实际系统,使实际系统趋近人工系统,借助人工系统实现对实际复杂系统的有效管理与控制^[3]。

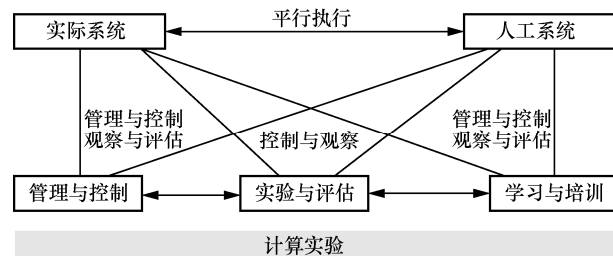


图1 平行系统的基本框架^[3]

在平行系统理论中,王飞跃教授建立了一套研究复杂系统的 ACP 方法^[3]。人工系统模型是传统的

数学或解析模型的扩展,是广义的知识模型,可以通过计算机的游戏技术进行建模,也可以在传统的解析方法、有限元方法、多体动力学等建模方法的基础上扩展。建立的模型是动态自适应变化的模型,可以随着接收的数据信息、专家输入的知识和经验等不断完善。计算实验是仿真模拟的升华,考虑人的心理因素和社会因素,基于人工系统模型,设定加速、失效、突变、极限等不同状况下的输入信息,进行精确可控的计算实验,分析计算实验结果,量化评估不同控制决策产生的效果,为指导实际系统积累知识和经验。另外,人工系统利用实际系统的输入进行同步的仿真计算和模拟,通过比较人工系统和实际系统的输出结果,分析导致人工系统出现误差的原因,不断修正人工系统,获得更准确的人工系统模型。平行执行是自适应控制和许多管理思想与方法的进一步推广,基于计算实验的结果,设定控制和管理策略,人工系统和实际系统通过虚实互动的方式同步或异步执行控制和管理策略。人工系统的执行结果可以指导实际系统运行,实际系统的执行结果也可以对人工系统进行修正,由此构成一种新型的虚实互动闭环反馈控制机制,使实际系统按照人工系统设定的控制目标运行,从而实现在各种复杂情况下对实际系统的有效管理和控制。

在计算实验部分,ACP方法给出了3种实现方式,包括实验与评估、学习与培训、管理与控制。在实验与评估中,针对由成本、安全、技术、道德等导致无法开展的重要破坏性实验和创新性实验,通过人工系统对不同的解决方案和管理策略进行计算实验,在短时间内进行大量重复的加速实验、压力实验、极限实验以及各种可能场景的试错实验,了解和统计分析复杂系统在不同情景和状况下的行为和反应,挖掘其中的变化规律,按照一定的指标体系评估不同控制方案和管理策略的效果,为优化控制方案和管理策略提供依据。在学习与培训方面,针对持续时间长、发生概率小的复杂系统行为,通过人工系统的计算实验,为控制和管理实际复杂系统的有关人员提供学习和培训的场景,使其快速了解复杂系统的各种状况以及不同控制方案和管理策略的效果,降低学习与培训的成本。在管理与控制方面,将实验与评估中获得的优化控制方案和管理策略同时作用于人工系统和实际系统,观察人工系统和实际系统的输出状态差异,根据产生

的误差反馈信号,对人工系统的模型结构或参数进行修正,以减少误差;通过虚实互动的循环交互过程,人工系统更加真实地模拟实际系统,同时实际系统中的新问题、新需求和新趋势可以实时导入人工系统,通过在人工系统中的多次计算实验和评估,不断优化控制方案和管理策略,引导实际系统趋近人工系统,实现对实际系统的有效管理和控制。

总之,利用平行系统理论的ACP方法,可以建立与实际系统接近的人工系统,利用人工系统描述实际系统,对人工系统进行实验与评估、学习与培训、管理与控制的计算实验,仿真和模拟实际系统的不同变化过程,预测实际系统未来可能出现的状态,通过人工系统和实际系统的平行执行,引导实际系统达到期望的未来状态。通过这种方式,人工系统从被动转换为主动,从静态转换到动态,从离线转换到在线,由从属地位提高到相等地位,形成虚实双反馈和虚实大闭环的平行控制和并行管理系统,进而使人工系统在实际复杂系统的管理与控制中充分发挥作用,将不定(uncertainty)、多样(diversity)、复杂(complexity)的“UDC”复杂系统转换为敏捷(agile)、聚焦(focus)、收敛(convergence)的“AFC”平行系统^[4]。

平行系统理论被提出之后,得到了众多领域学者的高度认可与支持,同时引发并引导了众多的前沿性研究与应用。在交通领域,构建了城市公路交通^[5-6]、城市轨道交通^[7]、高速铁路^[8]以及客运交通枢纽^[9]等平行系统,提升了交通管理与控制的效率。在汽车领域,构建了平行车联网^[10]和平行驾驶系统^[11],对无人车在复杂交通场景的理解和行驶决策能力进行测试和验证^[12],推动了无人驾驶技术的发展。在农业领域,通过建立植物生长的人工模型,构造了平行农业系统^[13]进行受控环境下的农业数字化生产,推动了农业的智慧化发展。在能源领域,构建了平行电网^[14]和平行电池^[15],推动了智能电网和生态化电池技术与服务的发展。在医学领域,构建了平行医院^[16]和平行医学^[17],实现了痛风^[18]、胃肠疾病^[19]和皮肤病^[20]的平行诊疗,推动了医疗诊断的数字化和智能化发展。在经济领域,利用平行系统进行电子商务的复杂性研究^[21],构建了平行区块链^[22]。在应急管理领域,针对突发事件的不确定性,建立了基于平行系统的非常规突发事件计算实验平台^[23],设计了平行应急疏散系统^[24],通过应急方案的实验和评估,推动了应急管理与控制技术的发展。在矿

山领域,建立了平行无人矿山系统^[25],实现了矿山管理的智能化^[26]。

2 平行轮胎基本架构

平行系统理论是解决复杂系统管理和控制问题的有效方法,下面基于平行系统理论建立平行轮胎的基本架构,如图2所示,为解决智能轮胎建模、测试、状态控制和管理难题提供一种可行的研究方案。平行轮胎通过多个软件定义的人工轮胎与实际轮胎之间的信息交互,在相同的工况下平行运行,根据实际轮胎的状态变化不断修正人工轮胎的模型,使人工轮胎模型趋近实际轮胎,然后利用人工轮胎进行计算实验,模拟和评估各种复杂工况下的轮胎状态变化,指导实际轮胎状态控制和管理策略的制订,解决实际轮胎在建模、测试、状态控制和管理等方面的技术难题,实现轮胎全生命周期的状态监测、智能控制和管理,提高轮胎的安全性、经济性和舒适性。

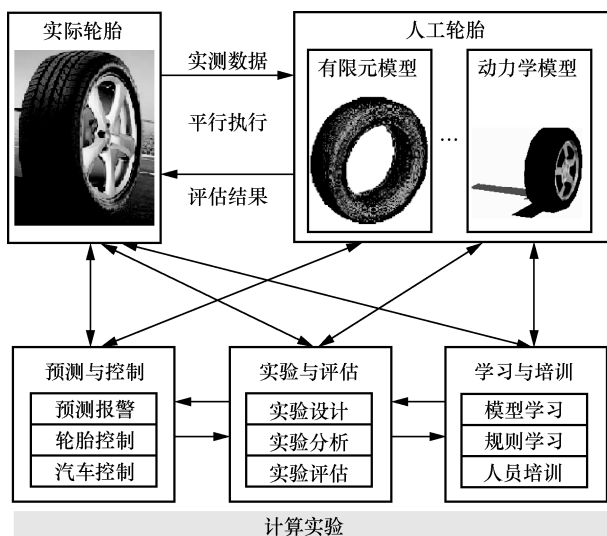


图2 平行轮胎的基本架构

由图2可以看出,平行轮胎由实际轮胎、人工轮胎、学习与培训、实验与评估、预测与控制5个部分组成。实际轮胎将实测数据传输给人工轮胎,人工轮胎进行轮胎安全状态评估,并将评估结果传输给实际轮胎,控制和管理实际轮胎的状态变化,通过实际轮胎和人工轮胎控制和管理过程的平行执行,人工轮胎模型不断趋近实际轮胎,实际轮胎状态变化不断趋近人工轮胎结果。利用建立的人工轮胎模型,可以进行学习与培训、实验与评估、预测与控制过程的计算实验,深入了解轮胎在各种复

杂工况下的状态变化过程,挖掘轮胎状态的变化规律,评估轮胎在不同控制和管理策略下的性能。学习与培训、实验与评估、预测与控制过程同时在实际轮胎和人工轮胎进行被称为平行执行,通过平行执行可以进一步完善人工轮胎模型,指导实际轮胎的预测与控制过程。下面对各部分进行具体阐述。

实际轮胎是汽车真实运动过程中的轮胎,其状态变化通过轮胎内安装的传感器和汽车上安装的其他传感器测量和估计获得。最基本的状态信息包括轮胎的压力、温度、转速、振动、轮胎/路面摩擦等。另外,随着汽车和轮胎安装的传感器数量的增加,状态信息还可以包括轮胎的滑移率、侧偏角、接地长度、纵向力、侧向力、法向力、侧倾力、磨损和老化等。实际轮胎的状态信息传输给人工轮胎,人工轮胎利用获取的轮胎状态信息进行轮胎安全状态评估;人工轮胎评估的结果传输给实际轮胎,指导实际轮胎的状态预测与控制,提高实际轮胎运行的安全性、经济性和舒适性。

人工轮胎是通过不同方式建立的多种轮胎模型,以模拟轮胎在不同工况下的状态变化。常用的模型包括有限元模型^[27]、经验模型^[28]、半经验模型^[29]和动力学解析模型^[28]。有限元模型可以模拟不同材料和结构的轮胎的压力、温度、胎体变形等状态变化;经验和半经验模型可以模拟轮胎/路面摩擦力的变化、轮胎磨损和老化状况等;动力学解析模型可以模拟轮胎的振动和各种力学特性的变化。另外,轮胎的状态变化与路面状况、汽车运动状态和驾驶人的驾驶习惯等紧密相关,因此,人工轮胎还包括路面模型、汽车模型和驾驶人模型,用于描述不同类型的汽车轮胎在不同路面状况和不同驾驶人操纵下的状态变化。根据计算实验和平行执行的需要,人工轮胎可以有多个,分别存储于驾驶人的手机、车主的家用电脑和办公室电脑、轮胎厂家的服务器、汽车厂商或维修厂商的服务器、研究人员的电脑。人工轮胎通过接收实际轮胎的状态数据,利用不同的计算实验方式,不断趋近实际轮胎,满足不同用户的需要。

学习与培训模块具有人工轮胎模型的学习功能和驾驶人的培训功能。在学习方面,人工轮胎接收实际轮胎的实测数据进行模型的学习和训练,不断提高人工轮胎模型的精度,扩大模型的适用范围,完善与轮胎模型相关的路面模型、汽车模型和驾驶人模型,为基于人工轮胎的实验与评估的实现

奠定基础。同时，实验与评估的结果可以进一步指导和改进学习规则，通过不断的循环提高人工轮胎模型的可靠性。在培训方面，不同汽车类型在不同路面状况下的轮胎状态变化的展示、驾驶人的不同操纵方式对轮胎状态的影响、轮胎在不同控制方案和管理策略下的效果对比等，都可以通过人工轮胎模型进行模拟演示，从而降低对驾驶人培训的难度，减少培训的成本。

实验与评估模块可以对设计的轮胎特定工况下的状态变化过程和轮胎控制策略进行计算实验，并评估实验结果。利用实际轮胎的结构和参数，设计轮胎爆胎、快速漏气、慢速漏气、异常磨损、老化等难以直接测试的轮胎实验。考虑路况、速度和轮胎载荷等的变化，通过人工轮胎进行大量重复性的计算实验，获取真实环境难以获得的实验数据，将实验数据传输给学习与培训模块，为人工轮胎模型的学习提供丰富的轮胎实验数据。另外，根据预测与控制模块的需求，利用实际轮胎的结构和参数，在不同的工况下，通过人工轮胎模型进行不同控制和管理策略的计算实验，分析实验结果的变化，评估不同控制和管理策略的性能，为预测与控制模块提供优化的控制和管理策略。

预测与控制模块可以通过人工轮胎模型预测轮胎在不同工况下的安全性、经济性、舒适性以及使用寿命等，还可以预测轮胎在不同控制和管理策略下的状态变化。根据预测的结果，同时在实际轮胎和人工轮胎中执行轮胎制动力分配与控制、轮胎压力调节、汽车速度控制、汽车方向控制以及汽车悬架调节等策略，即平行执行。在平行执行过程中，通过人工轮胎和实际轮胎之间的信息交互，确定人工轮胎和实际轮胎状态之间的差异，分析引起差异的原因，进行人工轮胎模型的修正，同时将控制和管理策略发送给实验与评估模块进行控制和管理策略的评估，确定优化的控制和管理策略。预测与控制模块利用优化的控制和管理策略进行实际轮胎和人工轮胎的控制，根据人工轮胎和实际轮胎的状态变化，不断循环执行实验与评估以及预测与控制过程，指导实际轮胎的状态变化，使其趋近人工轮胎，从而保证轮胎状态变化的安全性、经济性和舒适性。

3 平行轮胎实现的关键技术

在图2中进行人工轮胎建模、开展人工轮胎的

计算实验、实施人工轮胎和实际轮胎的平行执行，是实现平行轮胎的关键，也是解决轮胎准确建模、测试、状态控制和管理技术难题的关键，下面进行具体说明。

3.1 人工轮胎建模

人工轮胎是利用实际轮胎的参数、结构和状态数据，借助机理描述、知识表示和机器学习等手段，针对实际轮胎的不同结构和状态变化，构建的可计算、可重构、可编程的软件定义的对象和关系，将这些对象和关系组合成软件定义的轮胎模型、路面模型、汽车模型和驾驶人模型，实现对人工轮胎的建模。在人工轮胎建模初期，对模型准确性要求不高，只需要在功能和行为上“等价”，建模难度不大，可以在后期通过计算实验和平行执行不断提高模型准确性。利用建立的人工轮胎模型，通过改变软件定义对象的参数和关系的权重，可以描述无限可能的轮胎运动工况数据，满足实际数据驱动训练的数据多样性和大规模的要求。利用建立的人工轮胎模型，通过自底向上的多智能体方法对轮胎状态变化进行描述、建模和评估，建立轮胎情报系统与轮胎评估库，构建可以与实际轮胎平行执行的虚拟的人工轮胎。

综合考虑轮胎的功能和影响轮胎状态变化的不同对象之间的关系，可以建立如图3所示的人工轮胎模型结构，包括驾驶人模型、轮胎参数模块、轮胎快变化状态模块、轮胎慢变化状态模块和轮胎情报系统与轮胎评估库。

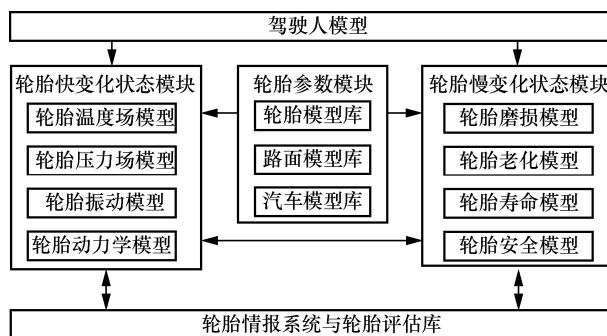


图3 人工轮胎模型结构

驾驶人模型描述驾驶人的驾驶操纵指令、汽车控制器的控制策略以及驾驶人的驾驶习惯，包括汽车加速、减速、定速、怠速、制动、转向以及制动力分配等，通过驾驶人实际操纵过程的功能描述和控制策略的知识表示进行建模。驾驶人的驾驶习惯通过调节驾驶人操纵指令的执行速度进行描述，具体可以根据实际采集的驾驶人操纵指令数据分析

获得。驾驶人模型是人工轮胎的主动控制模块,是进行轮胎状态控制和管理的关键。驾驶人操纵指令、控制策略以及驾驶人驾驶习惯不同,轮胎状态的变化也不同,因此,驾驶人模型直接与轮胎快变化状态模块和轮胎慢变化状态模块相连,为轮胎的状态变化提供调控信息。

轮胎参数模块为轮胎快变化状态模块和轮胎慢变化状态模块提供与轮胎相关的参数和数据,主要包括轮胎模型库、路面模型库和汽车模型库。轮胎模型库提供不同类型轮胎的材料和结构设计参数,路面模型库提供不同类型路面的附着系数参数和路面坡度参数,汽车模型库提供不同类型汽车的结构和性能设计参数。轮胎参数模块可以参考轮胎设计与测试数据、汽车设计与测试数据、道路规划与测试数据,结合轮胎、汽车和道路的相关标准,建立知识表示的方式,并在使用过程中不断完善。

轮胎快变化状态模块接收驾驶人模型的输入和轮胎参数模块的相关参数,描述轮胎在给定驾驶人操纵指令和控制策略作用情况下,在给定路面行驶过程中快变化状态的变化过程,包括轮胎温度场模型、轮胎压力场模型、轮胎振动模型和轮胎动力学模型,各模型之间存在相互联系。轮胎温度变化影响轮胎的压力,轮胎压力变化影响轮胎的振动,轮胎振动影响轮胎的纵滑、侧偏、侧倾等动力学特性,因此,在建立轮胎模型的过程中,需要综合考虑不同轮胎模型之间的相互影响,提高模型的精度,扩大模型的适用范围。轮胎压力场和温度场模型都可以采用有限元模型建立,也可以采用简化的解析模型建立。轮胎振动模型可以采用模态分析的方式建立。在轮胎动力学模型方面,可以采用解析方式建立理论模型,也可以根据测试数据建立经验模型或半经验模型。在模型建立之后,可以通过计算实验不断丰富模型信息。利用轮胎参数模块提供的轮胎、路面和汽车参数数据、驾驶人模型提供的驾驶人操纵指令和控制策略,基于建立的轮胎快变化状态模块的不同模型,可以模拟不同驾驶人操纵指令和控制策略下的轮胎快速状态变化过程,评估不同驾驶人操纵指令和控制策略对轮胎性能的影响。将评估结果存入轮胎评估库,同时将对应的轮胎模型信息存入轮胎情报系统,为平行轮胎的预测与控制功能提供必要的信息。另外,轮胎快变化状态模块和轮胎慢变化状态模块之间可以相互传递信息,轮胎快变化状态模块的轮胎模型可以利用轮胎慢变化状

态模块提供的轮胎状态信息进行参数修正,从而提高轮胎快变化状态模块轮胎模型的准确性。

轮胎慢变化状态模块接收驾驶人模型提供的驾驶人操纵指令和控制策略、轮胎参数模块提供的轮胎参数数据以及轮胎快变化状态模块提供的轮胎压力、温度、振动和动力学特性变化,描述轮胎在长期运动过程中慢变化状态的变化过程,主要包括轮胎的磨损模型、老化模型、寿命模型和安全模型。轮胎的磨损可以利用轮胎胎面厚度和形状的变化,利用测试数据建立经验模型。轮胎的老化可以根据胎面材料弹性和刚度的变化,利用测试数据建立经验模型。轮胎的寿命可以根据轮胎的磨损和老化程度,利用测试数据建立经验模型。可以随着测试数据的增加,不断修正这些经验模型,提高模型的准确性。在模型建立之后,可以利用轮胎参数模块提供的参数信息和驾驶人模型提供的驾驶人操纵指令和控制策略,基于建立的轮胎慢变化状态模块的不同模型,模拟不同驾驶人操纵指令和控制策略下的轮胎磨损和老化的变化过程,预测轮胎的寿命,估计轮胎安全性,评估不同驾驶人操纵指令和控制策略对轮胎慢变化状态的影响,将评估结果存入轮胎评估库。同时,将对应的轮胎磨损、老化、寿命和安全状态信息存入轮胎情报系统,作为轮胎全生命周期状态信息的记录,为平行轮胎的预测与控制功能实现提供必要的信息。

轮胎情报系统与轮胎评估库是人工轮胎信息记录的数据库,记录轮胎全生命周期的状态变化、不同控制策略下轮胎模型描述的快变化状态和慢变化状态的变化,分析轮胎模型误差和控制策略的适用范围,确定轮胎模型校正的方法,同时将校正方法传输到轮胎快变化状态模块和轮胎慢变化状态模块,用于轮胎模型的校正,提高轮胎模型的精度,扩大模型的适用范围。另外,轮胎评估库记录不同驾驶人操纵指令和控制策略与对应的轮胎状态变化的历史数据,为人工轮胎进行计算实验提供测试数据,计算实验直接调用轮胎评估库的数据进行测试,通过分析比较测试结果和轮胎评估库的历史数据,进一步验证控制策略的控制效果。

建立人工轮胎模型之后,需要利用实际轮胎测试的真实数据进行模型可信度的验证。利用相同的驾驶人操纵指令、控制策略和轮胎参数,测量轮胎的压力、温度、振动和动力学特性等快变化状态,测量和估计轮胎的磨损、老化、寿命和安全性等慢变化状态,利用人工轮胎模型计算对应的状态变化,通过比较模型

输出和真实测试结果,进行模型的修正和优化,不断降低模型误差。当人工轮胎和实际轮胎结果一致时,通过可信度验证,建立的人工轮胎模型就可以用于后面的计算实验和平行执行过程了。

3.2 人工轮胎的计算实验

建立人工轮胎之后,可以将驾驶人模型、轮胎模型、路面模型和汽车模型等设计成不同的智能体,通过智能体的组合和交互规则,产生复杂的轮胎应用场景,利用人工轮胎的计算实验,进行计算机的仿真、模拟和计算,获得不同轮胎应用场景的计算实验测试结果,借助机器学习、动态规划、数据挖掘等手段,对获得的数据进行训练和学习,对计算结果进行评估,分析可能的后果,获得不同应用场景下优化的轮胎状态控制和管理策略。计算实验通过计算机仿真和模拟实现,过程可以多次重复,并且输入和参数可控,因此,实验成本很低,效率很高,是解决目前轮胎测试技术难题的有效方法。

通过计算实验,可以完成实际轮胎难以完成的各种各样的加速、压力、极限、失效或突变等实验,可以进行控制策略的可行性分析和控制参数的优化设计。实际轮胎在快速漏气、慢速漏气、磨损、老化、爆胎等实验测试方面存在困难,但可以通过人工轮胎的计算实验实现。在快速漏气和慢速漏气方面,实际轮胎实验成本较高,过程难以控制,通过计算实验,可以方便调节漏气参数,观察轮胎状态参数变化,确定最优的漏气报警阈值,提高报警的准确性。在磨损和老化方面,实际轮胎的磨损和老化过程非常漫长,计算实验可以缩短实验进程,并且可以分析磨损和老化对轮胎其他性能的影响,

确定优化的轮胎状态控制和管理策略,延缓轮胎的磨损和老化进程。在爆胎实验方面,实际爆胎过程非常危险,成本很高,并且难以控制,计算实验可以进行不同场景下的爆胎实验,分析比较不同爆胎控制算法的效果,确定优化的控制策略和控制参数。

针对轮胎在快速漏气、慢速漏气、磨损、老化、爆胎等方面计算实验的需求,设计了如图4所示的人工轮胎计算实验方案基本流程,具体如下。

① 确定实验条件,包括实验开始的时间、步长、持续时间、初始条件和结束条件,轮胎漏气气孔的大小和位置等。如果进行慢速漏气实验,漏气气孔可以小一点;如果进行快速漏气实验,漏气气孔可以大一点;如果进行爆胎实验,要求漏气速率更快,漏气时间更短,因此漏气气孔可以更大一些,轮胎初始压力可以高一些。在进行磨损、老化、寿命预测和安全性实验时,步长可以长一些,从而加快实验的进程。

② 设置驾驶人指令和控制策略,驾驶人指令包括加速、减速、恒速、怠速和转向等,这些指令直接影响轮胎运动的速度、转向角、驱动力和制动力;控制策略是在驾驶人指令的基础上进行的转向角、驱动力、制动力和悬架高度的调节以及轮胎压力的调节等。对于快速漏气或慢速漏气实验测试,可以设置压力报警阈值、报警时间和漏气过程的速度调节策略等;对于爆胎实验测试,可以设置爆胎过程的制动力控制策略、转向角控制策略、悬架高度调节策略等;对于设置的控制策略和参数,可以通过计算实验测试,不断进行优化和调整。

③ 计算实验测试。将确定的实验条件、设置

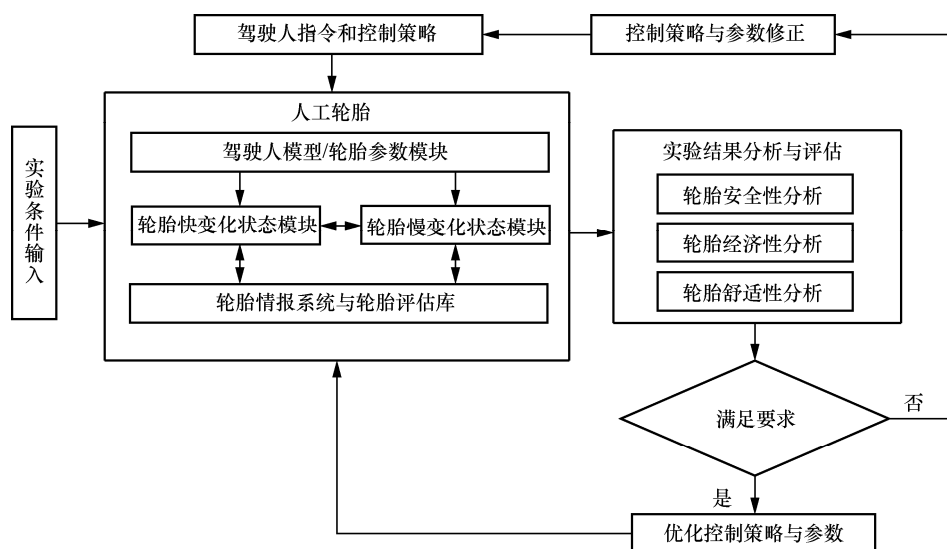


图4 人工轮胎计算实验方案基本流程

的驾驶人指令和控制策略输入人工轮胎模型, 人工轮胎模型执行计算实验过程, 记录实验过程的轮胎模型参数、轮胎快变化状态和轮胎慢变化状态的变化过程的实验结果, 分析评价驾驶人指令和控制策略的实际效果, 将计算实验结果存入轮胎情报系统, 将分析评价结果存入轮胎评估库。

④ 实验结果分析与评估。计算实验结束后, 人工轮胎模型将结果传输给实验结果分析与评估模块, 对轮胎的安全性、经济性和舒适性进行分析评估。在安全性方面, 可以考虑轮胎的压力、温度、磨损和老化等状态变化。在经济性方面, 可以考虑轮胎的磨损、寿命和滚动阻力等状态变化。在舒适性方面, 可以考虑轮胎的压力和振动等状态变化。在评估方法方面, 可以考虑专家经验评估方法、定性评估方法、模糊评估方法、定性加定量评估方法。如果评估结果满足轮胎设计要求, 可以将实验过程的控制策略和参数作为优化结果, 存入人工轮胎的轮胎评估库。如果评估结果不满足轮胎设计要求, 可以进行控制策略与参数的修正, 然后进入新一轮的计算实验过程, 通过多次循环实验, 得到优化的控制策略和参数。

3.3 人工轮胎和实际轮胎的平行执行

当建立的人工轮胎模型趋近实际轮胎的状态变化时, 可以利用计算实验获得优化的控制策略和驾驶人操纵方式, 将获得的控制策略和驾驶人操纵方式同时输入人工轮胎和实际轮胎, 通过平行执行方式, 将实际轮胎和人工轮胎组合起来, 形成平行轮胎。在平行执行时, 人工轮胎进行计算实验, 比较计算实验结果和实际轮胎结果, 将比较结果反馈给实际轮胎, 进行控制策略和参数的调整, 使实际轮胎结果趋近人工轮胎。通过人工轮胎和实际轮胎之间的虚实交互与闭环反馈, 实现控制策略的逐步优化, 形成实时自适应调节和优化控制的平行轮

胎, 解决目前轮胎状态控制与管理方面的技术难题。在平行轮胎中, 通过长期在线的模型训练和评估, 实现对实际轮胎不同工况的有效控制和管理。

人工轮胎和实际轮胎的平行执行主要包括人工轮胎模型的培育和实际轮胎实时控制策略的优化。在人工轮胎模型的培育方面, 通过多个人工轮胎和实际轮胎的平行执行, 获得多个人工轮胎的计算实验结果, 考虑计算实验结果之间的相互影响, 根据不同的人工轮胎计算实验结果和实际轮胎的结果, 不断修正人工轮胎模型, 使人工轮胎模型趋近实际轮胎, 具体过程如图5所示。

首先, 将驾驶人指令和轮胎初始状态参数数据同时输入实际轮胎和多个人工轮胎, 人工轮胎进行计算实验, 实验步长与实际轮胎相同, 获得不同人工轮胎的状态数据, 同时采集实际轮胎的状态数据, 将采集的数据和不同人工轮胎计算实验获得的状态数据进行比较, 得到不同人工轮胎的状态误差。然后, 将得到的状态误差反馈给对应的人工轮胎, 进行人工轮胎模型结构和参数的修正, 修正后的人工轮胎继续运行, 形成闭环反馈, 使人工轮胎计算实验结果不断趋近实际轮胎结果。人工轮胎模型的培育过程可以持续实际轮胎的整个生命周期, 在长期的平行执行过程中, 驾驶人的各种操纵指令、控制策略和路面类型会不断地重复出现, 实际轮胎的各种状态数据也会不断出现, 通过反馈误差模型修正, 人工轮胎模型的精度会不断提高, 逐步趋近实际轮胎, 从而完成人工轮胎模型的培育。

利用培育好的人工轮胎模型, 通过人工轮胎和实际轮胎的平行执行过程, 参照平行控制的思想^[30], 利用人工轮胎计算实验获得的优化控制策略控制实际轮胎, 使实际轮胎状态逐渐趋近人工轮胎, 实现实际轮胎实时控制策略的优化, 基本过程如图6所示。

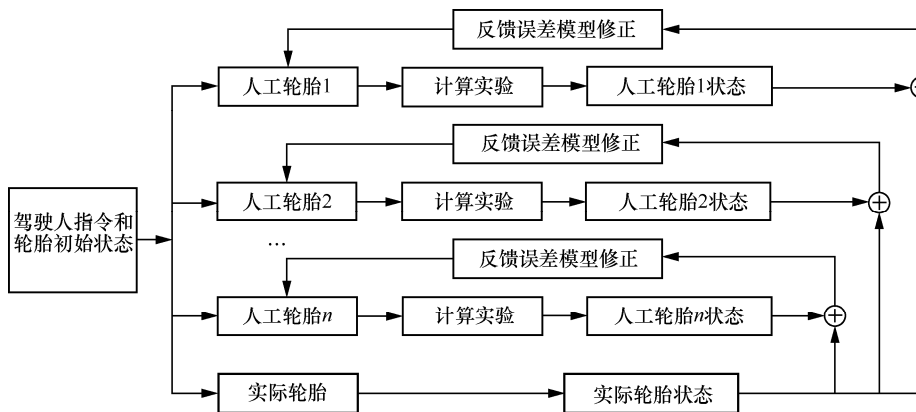


图5 人工轮胎和实际轮胎的平行执行实现人工轮胎模型的培育过程

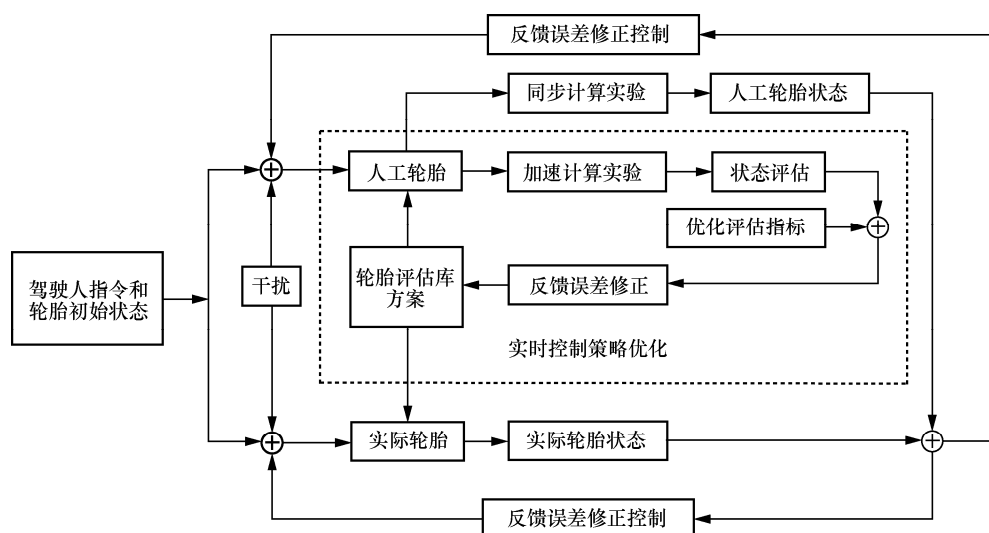


图6 人工轮胎和实际轮胎的平行执行进行控制策略优化和实现平行控制的基本过程

首先将实际轮胎的驾驶人指令和轮胎初始状态数据输入人工轮胎,利用人工轮胎计算速度快的特点,选择轮胎评估库的控制策略进行加速计算实验,对计算实验结果进行评估,比较评估结果和优化评估指标,根据比较结果,通过反馈误差修正轮胎控制策略,进行下一轮加速计算实验和评估过程,通过多次加速计算实验评估,获得优化的控制策略。然后,将优化的控制策略同时作用于人工轮胎和实际轮胎,进行平行控制,人工轮胎按照实际轮胎的状态数据采样率进行同步计算实验,获得人工轮胎状态数据,比较实际轮胎状态数据和人工轮胎计算实验结果,通过虚实互动方式反馈误差,不断修正控制策略,结合原来的优化控制策略和干扰信息,获得更优化的控制策略,通过平行控制多次反馈修正,实际轮胎的控制策略趋近人工轮胎优化控制策略,实际轮胎的状态趋近人工轮胎状态,从而实现实际轮胎的优化控制和管理,提高实际轮胎的安全性、经济性和舒适性。

4 平行轮胎应用展望

通过人工轮胎建模、计算实验测试和平行执行构建的平行轮胎是一种新型的轮胎架构,可以实现对轮胎复杂运动工况的建模、危险极限工况的计算实验测试和实际全生命周期运行过程的平行控制和管理,大大提高了轮胎的安全性、经济性和舒适性。下面对平行轮胎推动轮胎技术发展的可能应用前景进行分析和展望。

(1) 轮胎结构的平行设计

轮胎的性能与轮胎的结构直接相关,通过优化

轮胎的结构,可以不断提高轮胎的性能,因此,轮胎结构设计一直是轮胎技术研究的重点。利用平行轮胎的人工轮胎模型和计算实验方法,可以进行轮胎结构的平行设计。设计一种轮胎结构之后,利用人工轮胎模型进行不同温度、压力、磨损、老化、振动和路面状况下的计算实验。通过计算实验,对轮胎在不同工况下的特性进行测试和评估。根据评估结果,分析结构参数对轮胎性能的影响,进行轮胎结构的优化设计,然后进行新一轮的计算实验测试和评估,通过设计和测试评估过程的多次循环,可以设计出优化的轮胎结构,满足特定工况的轮胎性能需求。

(2) 轮胎模型的数字孪生

数字孪生是建立人工系统的一种有效方式,多胞胎的数字孪生模型可以从不同侧面反映实际系统的状态变化,建立与实际系统功能完全对应的数字孪生虚拟系统,并通过虚实互动不断提高数字孪生模型的精度^[31]。轮胎的数字孪生模型是功能上与实际轮胎接近的轮胎模型,可以是解析模型、经验模型、有限元模型或数据驱动模型,模型的精度不需要太高,模型的数量可以很多,每一个模型可以反映轮胎某一方面的状态变化,这样多胞胎的数字孪生模型就可以比较全面地反映实际轮胎的状态变化,形成与实际轮胎对应的人工轮胎模型。通过平行轮胎中的人工轮胎模型,可以进行不同工况下的计算实验测试,利用记录的测试结果可以进一步修正轮胎的数字孪生模型,不断提高模型的精度,扩大模型的适用范围。

(3) 轮胎性能的平行测试

平行测试是解决复杂极限工况的测试问题的

一种有效途径,基于建立的人工系统模型,通过计算实验可以获取实际系统难以测量的状态变化,通过平行执行过程,验证计算实验测试结果的合理性和有效性,通过误差反馈校正人工系统模型和计算实验过程,使实际系统结果趋近人工系统^[32]。针对目前轮胎测试技术的限制,对于特殊路面和极限状况下的实验测试,利用人工轮胎进行计算实验,根据计算实验结果分析轮胎性能的变化规律,设计简单的测试验证平台,通过在人工轮胎和实际轮胎上平行执行特定的驾驶人操纵指令,进行轮胎性能的平行测试。在平行测试过程中,人工轮胎和实际轮胎同步运行,通过分析比较测试结果,进行人工轮胎模型的修正和测试方案的优化,然后继续进行人工轮胎的计算实验测试,通过不断地循环测试和反馈校正,实际轮胎的状态变化和测试结果不断趋近人工轮胎计算实验结果,从而可以利用人工轮胎计算实验的方法获取实际轮胎难以测量的状态变化。

(4) 汽车轮胎功能匹配设计

目前轮胎厂商提供给汽车设计人员的轮胎测试数据一般是基于室内实验测试的结果,由于室内测试条件与实际汽车运动状况之间总会存在一定的差异,设计汽车的轮胎性能和实际测试结果之间也会存在一定的差异,因此,需要在设计完成之后,通过实车测试进行校正。人工轮胎模型可以比较准确地反映轮胎在不同运动状况、不同驾驶人操纵指令和不同路面状况下的状态变化,可以为汽车设计人员提供更详细的轮胎性能数据。因此,基于人工轮胎模型进行汽车轮胎功能匹配设计,可以提高汽车和轮胎之间的匹配程度。另外,汽车初步设计完成后,可以将人工轮胎模型整合到人工汽车模型中进行计算实验测试研究,分析汽车设计和轮胎匹配方面的问题,优化设计过程,不断提高设计汽车的性能。

(5) 轮胎状态智能控制和管理

为了充分发挥轮胎在不同工况下的性能,提高轮胎的安全性、经济性和舒适性,进行轮胎状态的智能控制和管理非常重要。利用培育好的人工轮胎模型,在不同的驾驶人操纵指令下,设置不同的轮胎运动状况和路面状况,进行各种轮胎智能控制和管理策略的计算实验测试。通过评估测试结果,分析不同智能控制和管理策略的效果,进行控制和管理策略的不断改进和优化。另外,对于测试过的智能控制和管理策略,可以在人工轮胎模型和实际轮胎上进行平行执行,进一步验证设计的智能控制和

管理策略的有效性和可靠性。

(6) 智能网联汽车技术融合

随着人工智能、网络技术、计算机视觉、物联网、大数据、云计算等新兴技术的发展,智能网联汽车成为汽车技术发展的必然趋势。在智能网联汽车中,不同汽车和不同轮胎之间需要进行信息交互,人工轮胎和实际轮胎平行执行,共同为智能网联汽车提供轮胎的状态和安全信息。另外,智能网联汽车将获得的路况信息、汽车状态信息、交通信息等传输给人工轮胎,人工轮胎利用获得的多源信息,优化人工轮胎的模型参数和结构,进行人工轮胎的计算实验测试,实现人工轮胎和实际轮胎的平行执行,不断提高人工轮胎模型的精度和计算实验的可靠性,为智能网联汽车提供更准确更全面的轮胎状态信息,不断优化轮胎状态智能控制和管理策略,提高智能网联汽车轮胎的安全性、经济性和舒适性。

(7) 驾驶人驾驶习惯分析

不同驾驶人的驾驶习惯不同,不同的驾驶习惯对汽车和轮胎的性能影响很大,通过平行轮胎的平行执行过程,可以进行驾驶人驾驶习惯的统计分析,研究驾驶人的驾驶习惯、体重和情绪等因素对轮胎控制策略的影响和轮胎性能的影响。在研究的基础上,可以将驾驶人的驾驶习惯添加到人工轮胎的驾驶人模型中,进行基于特定驾驶人驾驶习惯的人工轮胎计算实验测试,优化轮胎控制和管理策略,将优化的控制和管理策略用于实际轮胎,提高实际轮胎运行的安全性、经济性和舒适性。

(8) 驾驶安全性实时评估

汽车驾驶安全性与轮胎的状态和性能密切相关,通过安装传感器的智能轮胎可以获取轮胎的部分状态信息,但是获取的状态信息有限,并且实时性不强。在汽车行驶过程中,汽车状态、路面类型和驾驶人操纵指令都会影响轮胎状态,难以进行轮胎实时安全性的准确评估。利用培育好的人工轮胎模型,可以比较全面地反映轮胎的状态变化,通过平行轮胎的计算实验和平行执行,可以比较准确地获取轮胎的状态变化,实现轮胎安全性的实时评估,评估的结果可以用于优化实际轮胎的控制和管理,从而提高轮胎的安全性和汽车驾驶的安全性。

5 轮胎技术知识自动化

随着物联网、大数据和云计算等智能技术的发展,平行轮胎系统可以获取的数据和信息越来越

多, 依靠传统的自动化和信息技术难以实现有效的控制和管理, 知识自动化为实现平行轮胎的有效控制和管理决策提供了一种可行的方法。知识自动化是知识型工作的自动化, 利用人工智能、机器学习、大数据、云计算等技术, 通过计算机和网络完成那些需要专门知识、复杂分析、细致判断和创造性解决问题技巧才能完成的任务^[33]。在平行轮胎系统中, 可以在以下方面展开对轮胎技术知识自动化的研究。

(1) 人工轮胎建模自动化

可以利用轮胎状态变化的机理、驾驶人和行业专家的经验以及实验测试数据进行人工轮胎建模, 获取轮胎状态变化的机理知识、经验知识和数据知识。轮胎状态变化的机理知识通过数学描述的方法表示, 可以直接进行人工轮胎建模。驾驶人的经验知识可以通过大数据收集驾驶人的驾驶习惯获得, 行业专家的经验知识可以通过专业途径获得, 然后通过知识表示的方式, 进行人工轮胎的建模。轮胎状态变化的数据知识可以在平行轮胎运行过程中利用软件自动收集, 通过数据挖掘、聚类和分析等方法, 发现测试数据隐含的内在规律, 进行人工轮胎的建模。在初步建立人工轮胎模型之后, 在平行轮胎的运行过程中, 根据计算实验和平行执行的结果, 不断进行轮胎模型参数和表示方式的更新, 实现人工轮胎建模过程的自动化。

(2) 人工轮胎的计算实验自动化

利用建立的人工轮胎模型, 可以描述轮胎状态变化的不同知识表示形式, 通过对这些知识进行关联、融合和推理, 利用计算实验方法可以测试不同的轮胎工况, 获得大量的轮胎状态信息, 发现不同知识之间的联系。在计算实验测试时, 可以采用循环测试方式, 依次改变驾驶人指令、路面状况、轮胎初始状态等参数, 根据驾驶人指令、路面状况和轮胎状态之间的关联程度, 利用人工轮胎模型进行自动化的实验测试, 按照设定的评估标准对不同的实验测试结果进行评估, 当达到评估标准时, 停止实验测试, 记录和存储实验测试的结果, 获得优化的驾驶人指令、轮胎状态控制和管理策略。计算实验测试过程可以通过软件人机交互界面进行, 设置好测试任务后, 软件自动制订测试流程、执行测试过程、评估测试结果、记录和存储优化控制和管理策略, 实现人工轮胎计算实验过程的自动化。

(3) 人工轮胎和实际轮胎的平行执行自动化

利用计算实验测试获取的轮胎状态优化控制

和管理策略, 可以通过人工轮胎和实际轮胎的平行执行, 预测实际轮胎的状态变化, 引导实际轮胎状态趋近人工轮胎状态变化。在平行执行过程中, 系统根据驾驶人指令输入, 自动进行控制和管理策略选择, 人工轮胎自动进行加速计算实验测试和结果评估, 根据评估结果反馈自动校正控制和管理策略。同时, 实际轮胎自动执行校正过的控制和管理策略, 根据实际轮胎的执行结果和人工轮胎的计算实验结果, 继续进行控制和管理策略参数校正。通过虚实互动闭环反馈的方式, 引导实际轮胎的状态变化趋近人工轮胎的状态变化。在轮胎的全生命周期中, 当驾驶人指令、汽车类型、路况或轮胎状态变化时, 可以利用经验建立的模糊逻辑规则或强化学习方法, 自动进行控制和管理策略的选择, 执行人工轮胎和实际轮胎的平行控制, 实现平行执行过程的自动化。

6 结束语

平行系统理论是解决复杂系统不可知和不可分问题的有效方法, 本文基于平行系统理论, 建立了平行轮胎的基本架构, 利用人工轮胎建模、人工轮胎的计算实验、人工轮胎和实际轮胎的平行执行3种关键技术解决轮胎在复杂工况下的建模、测试、状态控制和管理难题。在人工轮胎建模方面, 考虑轮胎与驾驶人、汽车、路面等的关系, 建立了包括驾驶人模型、轮胎参数模块、轮胎快变化状态模块、轮胎慢变化状态模块、轮胎情报系统与轮胎评估库的人工轮胎模型, 反映了轮胎在各种复杂工况下的状态变化。在人工轮胎的计算实验方面, 基于人工轮胎模型, 建立了包括学习与培训、实验与评估、预测与控制模块的计算实验过程, 可以进行各种复杂工况下的计算实验测试, 评估不同轮胎控制和管理策略的性能, 预测轮胎状态的变化趋势。在人工轮胎和实际轮胎的平行执行方面, 基于建立的人工轮胎模型和计算实验获得的优化控制和管理策略, 建立了人工轮胎和实际轮胎同步或异步执行相同控制和管理策略的平行轮胎系统, 进行人工轮胎模型的培育和实际轮胎实时控制和管理策略的优化。另外, 基于建立的平行轮胎架构, 展望了平行轮胎技术在轮胎结构的平行设计、轮胎模型的数字孪生、轮胎性能的平行测试、汽车轮胎功能匹配设计、轮胎状态智能控制和管理、智能网联汽车技术融合、驾驶人驾驶习

惯分析和驾驶安全性实时评估方面的应用前景,探讨了轮胎技术在人工轮胎建模、计算实验和平行执行方面的知识自动化发展方向。

参考文献:

- [1] 张向文,王飞跃. 智能轮胎[M]. 北京:机械工业出版社, 2019: 577-579.
ZHANG X W, WANG F Y. Intelligent tires[M]. Beijing: China Machine Press, 2019: 577-579.
- [2] 王飞跃. 平行系统方法与复杂系统的管理和控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 485-489, 514.
WANG F Y. Parallel system methods for management and control of complex systems[J]. Control and Decision, 2004, 19(5): 485-489, 514.
- [3] 王飞跃. 人工社会、计算实验、平行系统: 关于复杂社会经济系统计算研究的讨论[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2004, 1(4): 25-35.
WANG F Y. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2004, 1(4): 25-35.
- [4] 王飞跃. 平行哲学与智能技术: 平行产业与智慧社会的对偶方程与测试基础[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(3): 245-255.
WANG F Y. Parallel philosophy and intelligent technology: dual equations and testing systems for parallel industries and smart societies[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(3): 245-255.
- [5] WANG F Y. Parallel control and management for intelligent transportation systems: concepts, architectures, and applications[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2010, 11(3): 630-638.
- [6] 吕宜生,陈圆圆,金峻臣,等. 平行交通: 虚实互动的智能交通管理与控制[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 21-33.
LYU Y S, CHEN Y Y, JIN J C, et al. Parallel transportation: virtual-real interaction for intelligent traffic management and control[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 21-33.
- [7] 宁滨,王飞跃,董海荣,等. 基于 ACP 方法的城市轨道交通平行系统体系研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2010, 10(6): 22-28.
NING B, WANG F Y, DONG H R, et al. Parallel systems for urban rail transportation based on ACP approach[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2010, 10(6): 22-28.
- [8] 宁滨,王飞跃,董海荣,等. 高速铁路平行控制与管理研究框架[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(4): 11-21.
NING B, WANG F Y, DONG H R, et al. Framework of parallel control and management for high-speed railway systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2010, 7(4): 11-21.
- [9] 刘小明,李正熙. 城市客运交通枢纽平行系统体系研究[J]. 自动化学报, 2014, 40(12): 2756-2765.
LIU X M, LI Z X. Parallel systems for urban passenger transport hub[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(12): 2756-2765.
- [10] 王晓,要婷婷,韩双双,等. 平行车联网: 基于 ACP 的智能车辆网联管理与控制[J]. 自动化学报, 2018, 44(8): 1391-1404.
WANG X, YAO T T, HAN S S, et al. Parallel Internet of vehicles: the ACP-based networked management and control for intelligent vehicles[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(8): 1391-1404.
- [11] 刘腾,王晓,邢阳,等. 基于数字四胞胎的平行驾驶系统及应用[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(1): 40-51.
LIU T, WANG X, XING Y, et al. Research on digital quadruplets in cyber-physical-social space-based parallel driving[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(1): 40-51.
- [12] LI L, WANG X, WANG K F, et al. Parallel testing of vehicle intelligence via virtual-real interaction[J]. Science Robotics, 2019, 4(28): eaaw4106.
- [13] 康孟珍,王秀娟,华净,等. 平行农业: 迈向智慧农业的智能技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(2): 107-117.
KANG M Z, WANG X J, HUA J, et al. Parallel agriculture: intelligent technology toward smart agriculture[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(2): 107-117.
- [14] 李小双,王晓,杨林瑶,等. 元电网 MetaGrid: 基于平行电网的新一代智能电网的体系与架构[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(4): 387-398.
LI X S, WANG X, YANG L Y, et al. MetaGrid: a parallel grids based approach for next generation smart power systems[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(4): 387-398.
- [15] 王飞跃,蒋怀光. 平行电池: 智能生态化电池技术与服务体系框架和流程[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(4): 521-531.
WANG F Y, JIANG H G. Parallel battery: the framework and process for an intelligent and ecological battery system and related services[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(4): 521-531.
- [16] 王拥军,王飞跃,王戈,等. 平行医院: 从医院信息管理系统到智慧医院操作系统[J]. 自动化学报, 2021, 47(11): 2585-2599.
WANG Y J, WANG F Y, WANG G, et al. Parallel hospitals: from hospital information system (HIS) to hospital smart operating system (HSOS)[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(11): 2585-2599.
- [17] 王飞跃. 平行医学: 从医学的温度到智慧的医学[J]. 智能科学与技术学报, 2021, 3(1): 1-9.
WANG F Y. Parallel medicine: from warmth of medicare to medicine of smartness[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2021, 3(1): 1-9.
- [18] 王飞跃,李长贵,国元元,等. 平行高特: 基于 ACP 的平行痛风诊疗系统框架[J]. 模式识别与人工智能, 2017, 30(12): 1057-1068.
WANG F Y, LI C G, GUO Y Y, et al. Parallel gout: an ACP-based system framework for gout diagnosis and treatment[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2017, 30(12): 1057-1068.
- [19] 张梅,陈鸢,王飞跃,等. 平行胃肠: 基于 ACP 的智能胃肠疾病诊疗[J]. 模式识别与人工智能, 2019, 32(12): 1061-1071.
ZHANG M, CHEN L, WANG F Y, et al. Parallel gastrointestinal: an ACP-based approach for intelligent operations[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 32(12): 1061-1071.
- [20] 王飞跃,苟超,王建功,等. 平行皮肤: 基于视觉的皮肤病分析框架[J]. 模式识别与人工智能, 2019, 32(7): 577-588.
WANG F Y, GOU C, WANG J G, et al. Parallel skin: a vision-based dermatological analysis framework[J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2019, 32(7): 577-588.
- [21] 王飞跃,曾大军,袁勇. 基于 ACP 方法的电子商务系统复杂性研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2008, 5(3): 1-8.
WANG F Y, ZENG D J, YUAN Y. An ACP-based approach for complexity analysis of E-commerce system[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2008, 5(3): 1-8.

- [22] 袁勇, 王飞跃. 平行区块链: 概念、方法与内涵解析[J]. 自动化学报, 2017, 43(10): 1703-1712.
YUAN Y, WANG F Y. Parallel blockchain: concept, methods and issues[J]. Acta Automatica Sinica, 2017, 43(10): 1703-1712.
- [23] 王飞跃, 邱晓刚, 曾大军, 等. 基于平行系统的非常规突发事件计算实验平台研究[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2010, 7(4): 1-10.
WANG F Y, QIU X G, ZENG D J, et al. A computational experimental platform for emergency response based on parallel systems[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2010, 7(4): 1-10.
- [24] 周敏, 董海荣, 徐惠春, 等. 平行应急疏散系统: 基本概念、体系框架及其应用[J]. 自动化学报, 2019, 45(6): 1074-1086.
ZHOU M, DONG H R, XU H C, et al. Parallel emergency evacuation systems: basic concept, framework and applications[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(6): 1074-1086.
- [25] 杨超, 高玉, 艾云峰, 等. 端对端平行无人矿山系统及其关键技术[J]. 智能科学与技术学报, 2019, 1(3): 228-240.
YANG C, GAO Y, AI Y F, et al. End-to-end parallel autonomous mining systems and key technologies[J]. Chinese Journal of Intelligent Science and Technology, 2019, 1(3): 228-240.
- [26] 陈龙, 王晓, 杨健健, 等. 平行矿山: 从数字孪生到矿山智能[J]. 自动化学报, 2021, 47(7): 1633-1645.
CHEN L, WANG X, YANG J J, et al. Parallel mining operating systems: from digital twins to mining intelligence[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(7): 1633-1645.
- [27] 邱恩超, 郭孔辉. 基于环模型的轮胎有限元建模与仿真研究[J]. 汽车技术, 2009(7): 4-9.
QIU E C, GUO K H. Tire FE modeling based on circle model and simulation study[J]. Automobile Technology, 2009(7): 4-9.
- [28] 张向文, 王飞跃, 高彦臣. 轮胎稳态模型的分析综述[J]. 汽车技术, 2012(2): 1-7.
ZHANG X W, WANG F Y, GAO Y C. Analysis of the tire steady-state models[J]. Automobile Technology, 2012(2): 1-7.
- [29] 郭孔辉. UniTire 统一轮胎模型[J]. 机械工程学报, 2016, 52(12): 90-99.
GUO K H. UniTire: unified tire model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(12): 90-99.
- [30] 王飞跃. 平行控制: 数据驱动的计算控制方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(4): 293-302.
WANG F Y. Parallel control: a method for data-driven and computational control[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(4): 293-302.
- [31] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与平行系统: 发展现状、对比及展望[J]. 自动化学报, 2019, 45(11): 2001-2031.
YANG L Y, CHEN S Y, WANG X, et al. Digital twins and parallel systems: state of the art, comparisons and prospect[J]. Acta Automatica Sinica, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [32] 尹培丽, 王建华, 陈阳泉, 等. 平行测量: 复杂测量系统的一个新型理论框架及案例研究[J]. 自动化学报, 2018, 44(3): 425-433.
YIN P L, WANG J H, CHEN Y Q, et al. Parallel measurements: a new theory and framework for complex measurement system and a case study[J]. Acta Automatica Sinica, 2018, 44(3): 425-433.
- [33] 王飞跃. 软件定义的系统与知识自动化: 从牛顿到默顿的平行升华[J]. 自动化学报, 2015, 41(1): 1-8.
WANG F Y. Software-defined systems and knowledge automation: a parallel paradigm shift from Newton to Merton[J]. Acta Automatica Sinica, 2015, 41(1): 1-8.

[作者简介]



张向文(1976—), 男, 博士, 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院研究员, 主要研究方向为智能轮胎电动汽车能量管理、动力电池管理系统、电动汽车再生制动控制。



王飞跃(1961—), 男, 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研究员, 国防科技大学军事计算实验与平行系统技术研究中心教授, 中国科学院大学中国经济与社会安全研究中心主任, 主要研究方向为智能系统和复杂系统建模、分析与控制。

Chinese Journal of Intelligent Science and Technology

Vol.4 No.3 September 2022

Contents

Review Intelligence

- Parallel Yuan-Ming Yuan Imperial Garden: from digital twin garden to metaverse smart heritage park.....
.....KANG Mengzhen, QIU Wenzhong, CHEN Zifu, WANG Meng, XU Shasha, WANG Xiujuan,
NI Aidong, JIANG Yujie, CHEN Shichao, DE REFFYE Philippe, WANG Fei-Yue(301)

Surveys and Prospectives

- A review of continual learning for robotics ZHAO Chao, XU Jie, CHEN Xingyu, MEI Kuizhi, LAN Xuguang(308)
Artificial intelligence technologies and applications in the metaverse WU Qiang, JI Xueting, LYU Linyuan(324)
Overview of metro train driving technology development: from manual driving to intelligent unmanned driving.....
..... LAI Wenzhu, CHEN Dewang, HE Zhenfeng, DENG Xinguo, GIUSEPPE CARLO Marano(335)

Papers and Reports

- Architecture and key techniques of parallel creation through the fusion of human-cyber-physical intelligence in CPSS.....
.....GUO Chao, LU Yue, WANG Xiao, YI Da, WANG Xiao, WANG Fei-Yue(344)
Knowledge-driven order allocation method for raw material supply chain in metallurgical enterprises.....
.....LIU Yishun, YANG Chunhua, HUANG Keke(355)
A constructive approach to ultrastable systems based on the self-awareness and self-expression architecture.....
.....WEN Junyi, YU Xiang, MAO Bifei, LI Jinghui, YAO Xin(371)
Short-term traffic state reasoning and precise prediction in urban networks.....
.....QIN Yuanqi, JI Qingyuan, GE Jun, DAI Xingyuan, CHEN Yuanyuan, WANG Xiao(380)
A metaverse-oriented digital citizen authentication scheme.....
.....LYU Qiuyun, CHENG Shaopeng, YANG Manzhi, CHEN Xiaoguang, WANG Zhen(396)
Dynamic configuration of distribution network based on improved hierarchical clustering and GL-APSO algorithm.....
.....WANG Yun, WANG Meiyun, ZHOU Jian, ZOU Yuanyuan, LI Shaoyuan(410)
A path planning method for complex naval battle field based on an improved DQN algorithm.....
.....YU Zhou, BI Jing, YUAN Haitao(418)
HVAC model-free optimal control method based on double-pools DQN.....
.....MA Shuai, FU Qiming, CHEN Jianping, FENG Fan, LU You, LI Zhengwei, QIU Shunian(426)
Basic framework and key technologies of parallel tires..... ZHANG Xiangwen, WANG Fei-Yue(445)

收录声明

本刊对发表的文章, 拥有出版电子版、网络版版权, 并拥有和其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬中已经包含上述费用。

Chinese Journal of Intelligent Science and Technology has the copyright to publish electronic edition, online edition of the published articles, and has the right to exchange information with other sites. The expenses have been included in the fee paid by editorial department.

道德声明

本刊发表的论文是作者独立取得的原创性研究成果, 无一稿多投; 论文内容不涉及国家机密; 未曾以任何形式用任何文种在国内外公开发表过; 论文内容不侵犯他人著作权和其他权利。若发生一稿多投、侵权、泄密等问题, 论文作者将承担全部责任。

The authors of *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology* guarantee that their submitted articles are original and contain nothing confidential. The said article is only submitted to *Chinese Journal of Intelligent Science and Technology*. The said article has not been published before and has not been submitted elsewhere for print or electronic publication consideration. The said article is no way whatever a violation or an infringement of any existing copyright or license from the third party. Otherwise, the authors of the said article shall take the blame for the violation or infringement of the related copyright and the leakage of secrets.

智能科学与技术学报

CHINESE JOURNAL OF INTELLIGENT SCIENCE AND TECHNOLOGY



2022年9月15日出版 定价：60.00元

ISSN 2096-6652



9 772096 665227

09>