

# 智能轮胎

## ——轮胎智能制造的机遇与挑战

张向文<sup>1</sup>, 王飞跃<sup>2</sup>

1. 桂林电子科技大学电子工程与自动化学院, 桂林 541004

2. 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** 智能轮胎是信息技术和轮胎技术深度融合的产物, 为轮胎智能制造的信息化、智能化和网络化创造了极好的发展机遇。智能轮胎的状态监测方法为轮胎生产、仓储、运输、销售和维修服务全生命周期的信息化管理提供了便利; 其建模与控制技术方便了轮胎数字化设计与虚拟仿真的实现, 为轮胎制造过程的智能化提供了便利; 轮胎状态自动调节系统收集轮胎在不同路面状况、不同轮胎压力和不同速度下的信息, 方便进行轮胎性能的分析, 为轮胎制造过程的网络化提供了便利。但智能轮胎相关的轮胎材料和制造技术、传感器和芯片技术、实验测试技术以及智能化应用方面还存在一定的局限性, 对智能轮胎技术在轮胎智能制造过程的实施提出了挑战。

**关键词** 智能轮胎; 智能制造; 轮胎制造; 轮胎技术

智能制造是《中国制造 2025》的主攻方向之一<sup>[1]</sup>。轮胎工业作为汽车工业发展的基础, 在国民经济发展中起到非常重要的作用, 其整个设计、制造、仓储、运输、销售和售后跟踪服务周期很长, 需要花费大量的人力、物力和财力, 进行轮胎工业的改造意义重大。利用智能制造的数字化、信息化、网络化和智能化技术可以有效提高轮胎的质量<sup>[2]</sup>, 降低轮胎的制造成本, 增加轮胎设计、生产、销售和服务的效率, 因此, 智能制造技术在轮胎工业大有可为。

智能轮胎是一种在轮胎内嵌入传感器和芯片的智能化轮胎, 这种轮胎可以记录轮胎制造、仓储、运输、销售和使用过程的信息, 为实现轮胎全生命周期的质量跟踪服务提供保障, 为智能制造技术在轮胎工业的实施提供技术基础, 为轮胎智能制造创造发展的机遇。但是, 智能轮胎技术的发展比较缓慢, 涉及到轮胎材料、结构和制造工艺、高精度传感器、微处理器、数字信

号处理、人工智能、能量管理、天线和无线通信等技术, 实现的难度较大, 成为轮胎智能制造实施过程的挑战。

### 1 轮胎与轮胎工业

轮胎是汽车与路面接触的唯一部件。轮胎通过与路面的接触, 支撑整车和载荷的重量, 缓和不平路面的冲击, 传递汽车的驱动力、制动力和转向力, 实现汽车的驱动、制动和转向操作。因此, 轮胎的性能直接影响汽车的安全性、经济性、舒适性和排放性。

多年来, 汽车和轮胎技术人员一直致力于进行轮胎结构、材料与功能的改进, 采用不同的轮胎结构和橡胶配方, 降低轮胎的滚动阻力, 提高轮胎的耐磨性、舒适性和安全性, 延长轮胎的使用寿命。随着计算机和信息技术的发展, 轮胎技术人员利用计算机建立轮胎的模型, 通过对轮胎性能影响因素的分析, 进行轮胎结

收稿日期: 2018-05-24; 修回日期: 2018-10-29

作者简介: 张向文, 研究员, 研究方向为智能轮胎、汽车电子控制, 电子信箱: zxw@guet.edu.cn; 王飞跃, 研究员, 研究方向为平行智能、智能控制、社会计算、平行管理, 电子信箱: feiyue.wang@ia.ac.cn

引用格式: 张向文, 王飞跃. 智能轮胎——轮胎智能制造的机遇与挑战[J]. 科技导报, 2018, 36(21): 38-47; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.21.004

构的计算机辅助优化设计,开发了全天候轮胎、全地面轮胎、绿色轮胎、仿生轮胎、安全轮胎和智能轮胎,提高轮胎的舒适性、安全性、高速性和经济性<sup>[3-4]</sup>。

轮胎是汽车重要的配件,随着汽车工业的发展,轮胎工业也得到了快速的发展。在轮胎工业发展过程中,随着中国经济的快速崛起,中国的轮胎工业发展也走到了世界前列,但是中国轮胎企业与普利司通、米其林、固特异等国际轮胎巨头相比,在产品质量、技术水平、市场和服务方面都存在一定的差距。中国轮胎工业总体上大而不强,缺乏高端品牌产品,特别是随着原材料价格的上涨和劳动力成本的增加,以及美国等对中国实施的反倾销和反补贴等贸易壁垒的影响,中国轮胎产品的市场竞争力不断下降<sup>[5]</sup>。为提高竞争力,智能制造国家战略为轮胎工业的发展指明了方向。

## 2 智能轮胎

智能轮胎是一种智能化的轮胎,它能够自动获取与传输有关自身及所处环境的信息,并能够对这些信息做出正确判断和决策,然后根据决策结果执行相应的操作,从而提高汽车的安全性、经济性、舒适性和排放性。轮胎自身信息包括轮胎压力、温度、摩擦、振动、磨损和老化等状态信息和自身的身份信息,轮胎所处环境信息包括路面状况和车速等。目前的智能轮胎研究主要包括轮胎压力监测<sup>[6-12]</sup>、轮胎温度监测<sup>[6-7]</sup>、轮胎摩擦监测<sup>[13-18]</sup>、轮胎爆胎预警与控制<sup>[19-27]</sup>、轮胎状态自动调节<sup>[28-33]</sup>、轮胎历程可追溯性记录<sup>[34-37]</sup>等。

轮胎压力监测是智能轮胎最基本的功能,也是目前使用较多的TPMS(tire pressure monitoring system)的功能。轮胎温度监测一般和轮胎压力监测功能共同实现,通过安装在轮胎内部的压力和温度传感器同时进行轮胎压力和温度的监测。轮胎摩擦监测一般通过安装在轮胎内的加速度传感器或测量胎面形变的传感器进行轮胎形变的测量,从而估算轮胎的摩擦特性。轮胎爆胎预警与控制是智能轮胎基本功能的扩展,可以根据智能轮胎监测的轮胎压力变化,进行爆胎的预警,并且在爆胎发生后,自动进行制动和转向操作,提高汽车爆胎时的行驶安全性和稳定性。轮胎状态自动调节是根据智能轮胎监测的轮胎压力、温度和摩擦状态变化,自动进行轮胎压力和车速的调节,提高汽车的舒适性和安全性。

历程可追溯性记录是通过轮胎生产过程嵌入在轮胎胎面内的RFID(radio frequency identification)卡实现的。RFID卡是一种可以实现信息收集、处理和发送功能的微型芯片,它可以记录轮胎在制造、出厂、使用和报废全过程中每一个阶段的所有资料,包括轮胎的身份(轮胎品牌、生产序列号、DOT代码、生产厂厂址和生产日期)、轮胎的户籍(汽车主轴号码和轮辋号码)、轮胎的使用资料(历次出车时轮胎的温度、充气压力、速度、受力、变形等数据以及历次翻新、修补情况)、轮胎报废资料(报废原因和报废日期)等。通过RFID阅读器可以随时查询RFID卡内的记录资料,另外,通过电子注册和电子数据库管理,可以建立基于轮胎历程可追溯性记录的网络管理系统。基于这种轮胎信息网络管理系统,轮胎厂和汽车厂可以跟踪轮胎的使用情况,当轮胎出现问题时可以很快确定问题轮胎的位置,及时召回有问题的轮胎;交通管理部门可以利用RFID阅读器读取轮胎信息记录,实现汽车交通信息管理<sup>[35]</sup>;停车场管理部门可以利用RFID阅读器读取轮胎信息记录,获取汽车的身份信息,实现基于汽车身份信息的停车收费管理<sup>[36]</sup>。

虽然智能轮胎的功能很多,但是,大部分功能还处于研究阶段,目前成熟的智能轮胎功能主要是轮胎压力和温度等状态的监测功能,实现轮胎状态监测功能的智能轮胎基本结构如图1<sup>[38]</sup>所示。



图1 智能轮胎结构

Fig. 1 Structure of intelligent tire

智能轮胎主要由轮胎模块与车内中央模块组成,轮胎模块由安装在轮胎内的传感器、处理器和无线发射器组成,车内中央模块由车内的无线接收器、处理器与显示装置组成。轮胎模块的传感器测量轮胎的压力和温度等状态信息,测量信息经过处理器简单的处理之后,通过无线发射器发射出来。车内的中央模块的无线接收器接收4个轮胎模块发送的信息,处理器对获

得的信息进行判断处理之后,通过显示装置显示必要的信息,在轮胎状态异常时发出报警信号,提醒驾驶人注意,及时进行处理。

### 3 智能轮胎发展

目前成熟的智能轮胎技术主要集中在轮胎压力、温度和摩擦状态监测与历程可追溯性记录方面,在爆胎预警与控制及轮胎状态自动调节方面,大部分为理论和实验的研究。

#### 3.1 轮胎状态监测与历程可追溯性记录

在轮胎状态监测方面,TPMS技术得到广泛的研究,国内外都有比较成熟的产品<sup>[8-12]</sup>,另外,针对轮胎摩擦和历程可追溯性记录,德国大陆公司、美国固特异公司、法国米其林公司、日本普利司通公司和德国西门子公司取得了一些具有代表性的成果。

德国大陆公司通过在轮胎胎侧不同位置的橡胶中掺入强磁性橡胶胶料开发了有磁力的轮胎,如图2所示。这种轮胎,在胎侧外产生外界磁场,当轮胎旋转时胎侧的胶料被磁化形成正负交替变化的胎内磁场,轮胎的变形或摩擦力变化会引起胎内磁场的变化,通过胎侧外的磁场传感器测量磁场的变化,可以获得轮胎的变形和摩擦力变化。这种轮胎可以实现轮胎压力和摩擦力的测量,抗电磁干扰能力比较强,但是需要进行轮胎结构的专门设计和生产工艺流程的改造,安装和校准过程比较麻烦<sup>[34]</sup>。



图2 磁化轮胎传感器结构

Fig. 2 Structure of magnetized tire

(图片来源:Thomas Becherer(大陆公司))

美国固特异轮胎橡胶公司开发了一种会说话的轮胎,通过在轮胎成型时埋入并在轮胎硫化后被固封在轮胎胎体内的单片集成传感器和发射器,实现轮胎压

力和温度的监测与报警。当轮胎压力超过或低于设定值,轮胎温度超过设定值或有人偷拆轮胎时,这种会说话的轮胎会自动发出报警信号,提醒车主注意。这种会说话的轮胎,能够使驾驶人随时了解轮胎状况,及时做好维护保养,从而延长轮胎使用寿命。此外其反窃功能可以让驾驶人夜晚高枕无忧,所以深受长年累月跑长途运输的大型货车驾驶人的欢迎<sup>[34]</sup>。

法国米其林轮胎公司开发了嵌入RFID卡的轮胎,可以实现轮胎的历程可追溯性记录功能。RFID卡在轮胎生产过程中安装在胎侧,并经过加热硫化固定封装在胎侧。嵌入轮胎内的RFID卡,首先在轮胎生产厂内被“写入”轮胎序号、生产日期、生产厂代号等信息,然后在汽车制造厂“写入”汽车标识号码,将轮胎身份信息与汽车标识号码捆绑在一起,赋予数据的唯一性,通过电子注册系统实现轮胎的网络化信息管理。另外,法国米其林公司与生产TPMS的TRW公司和Wabco公司合作,生产能够进行轮胎压力和温度监测的智能轮胎,随后米其林公司实现了智能轮胎在欧洲和北美多家汽车车型的原装配置<sup>[34]</sup>。

日本普利司通公司开发了在轮胎内部嵌入芯片的智能工程机械轮胎,利用嵌入的芯片可以实现轮胎压力和温度的测量,自动记录轮胎的压力、温度和包括轮胎编号、商标、速度、轮位、车种、车型以及安装数据在内的信息,这些记录的信息通过天线发射到车内接收装置,车内接收装置对接收的数据进行记录和分析,因此,这种智能工程机械轮胎实现了轮胎压力和温度状态的监测和轮胎历程可追溯性记录功能。同时,接收装置分析和记录的信息还可以提供给维修人员,方便维修人员发现一些潜在的问题,例如制动器擦伤、轴承损坏和超载的轮位等<sup>[34]</sup>。另外,普利司通公司与东京大学合作,通过在5个轮辐上安装的应力传感器测量轮胎运动过程的变形,估算轮胎在路面的摩擦力情况,对轮胎摩擦状况监测进行了研究<sup>[16]</sup>。

德国西门子公司、奥地利维也纳工业大学、德国达姆施塔特工业大学及相关厂家共同开发了在轮胎表面嵌入声表面波传感器的智能轮胎。通过轮胎内的声表面波传感器进行轮胎压力、温度和摩擦的测量,然后将测量数据无线传输到汽车驾驶室内的控制装置上,随时提醒驾驶人注意,预防事故发生。这种智能轮胎除了可以提高驾驶安全性以外,还有助于降低油耗、延长轮胎寿命,从而对环境也起到保护作用<sup>[13-14]</sup>。

在轮胎状态监测方面,传感器的安装是一个重要的问题,TPMS在气门嘴位置和轮辋位置安装传感器,但是这些安装方式都比较麻烦,且监测的信息和实际轮胎胎面状态信息之间存在一定的差异,特别是无法测量轮胎的摩擦信息。而通过在胎面嵌入传感器的方式,传感器可以直接与轮胎橡胶接触,测量轮胎胎面的变形,获取轮胎的摩擦状态信息。Zhang等<sup>[39]</sup>设计了一种嵌入胎面的传感器安装方式,如图3所示,传感器通过粘贴的方式安装在轮胎内,可以直接测量轮胎接地区的多维变形。

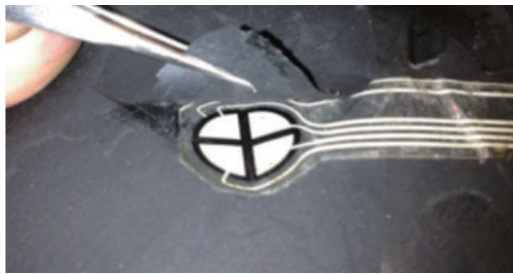


图3 传感器嵌入安装在胎面内进行轮胎变形的测量

Fig. 3 Sensors embedded in tire tread to measure the tire deformation

由于胎面嵌入安装的粘贴不牢固,一种固定传感器的安装架结构被研发出来,如图4<sup>[40]</sup>所示,这种安装架在轮胎硫化过程中直接制造出来,传感器通过嵌入固定在安装架内部,可以进行轮胎内压力、温度、摩擦和振动等状态的测量,安装和固定过程都比较方便。

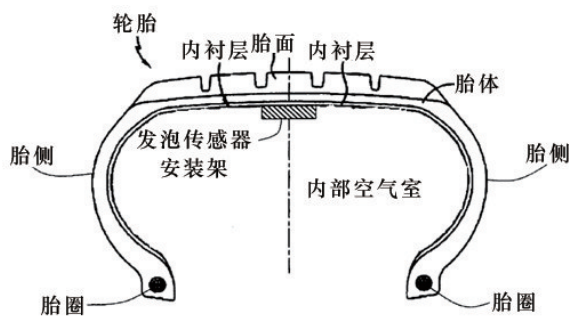


图4 传感器嵌入安装在胎内安装架进行轮胎状态的测量

Fig. 4 Sensors embedded within the tire mounting rack to measure the state of the tire

### 3.2 爆胎预警与控制

爆胎预警与控制研究,主要集中在实验测试和理论仿真分析两个方面。实验测试主要分为室内轮胎实验台的实验测试和室外的实车测试;仿真分析主要是基于实验测试的结果建立爆胎模型,设计爆胎控制算

法,基于仿真软件进行控制算法功能验证的研究。另外,为了避免爆胎,非充气轮胎和防爆轮胎也得到了广泛研究。

实验测试方面,加州大学伯克利分校利用具有放气控制阀的轮辋,进行了汽车直线行驶过程的前轮爆胎实验和后轮爆胎实验,发现爆胎后汽车向爆胎侧发生偏移。根据实验测试结果,设计了爆胎预警与控制系统,根据轮胎压力变化进行爆胎的预警,在爆胎后,通过降低发动机输出功率和调整转向盘转向角减小爆胎后的侧向偏移,并经过实验测试验证了控制系统的有效性<sup>[19-20]</sup>。桂林安金汽车安全测控技术有限公司利用配备ABS的帕萨特轿车和无ABS的桑塔纳轿车,进行电雷管爆胎实验,实验车速范围99~167.1 km/h,以验证开发的爆胎制动减速系统的有效性。测试结果显示,爆胎后,自动制动系统可以在48~180 ms内响应,汽车制动过程没有发生明显的偏航,因此,通过爆胎后的制动可以有效化解爆胎后的偏航危险<sup>[21]</sup>。吉林大学利用室内的轮胎实验台,通过零胎压模拟爆胎后的轮胎,分别在标准胎压、低胎压和零胎压工况进行轮胎纵滑、侧偏和侧倾力学特性测试,并测试轮胎在3种不同胎压下的滚动阻力和径向刚度。测试结果显示,爆胎后的轮胎纵滑刚度、侧偏刚度、侧倾刚度、滚动阻力系数以及径向刚度都发生了明显的变化,实验结果可以用于建立爆胎轮胎模型,进行汽车爆胎过程的动力学仿真研究<sup>[22]</sup>。

在理论仿真分析方面,主要是基于实验测试结果建立的爆胎模型,利用汽车动力学仿真软件,进行汽车不同轮胎爆胎后的动力学特性仿真研究。吉林大学分别研究了汽车直行过程和转向过程不同轮胎爆胎后汽车的动力学特性变化,发现前轮爆胎比后轮爆胎对汽车的影响更大<sup>[22-23]</sup>。另外,根据汽车爆胎动力学仿真分析的结果,研究了差动制动稳定性控制<sup>[22-23]</sup>、轨迹控制<sup>[24-25]</sup>、鲁棒控制<sup>[26]</sup>和协调运动控制算法<sup>[27]</sup>等,对各种控制算法都进行了仿真验证。

非充气轮胎是没有内胎和不需要充气的轮胎,例如米其林的TWEEL<sup>[41]</sup>、普利司通的AirFree<sup>[42]</sup>和韩泰的iFLEX<sup>[43]</sup>。在2005年,米其林推出了名为TWEEL的全球首款非充气轮胎,如图5<sup>[41]</sup>所示。Tweel轮胎采用轮胎和轮毂一体式设计,以橡胶制造的胎面和轮毂用柔软易变形的聚氨酯轮辐连接,轮辋和轮胎不能分开,形成一个整体,其安装和拆卸极其简单。其胎面经过纹理



图5 米其林的TWEEL结构及其在汽车上的使用

Fig. 5 Michelin TWEEL structure and its application in the car

化处理,可以和常规橡胶轮胎一样产生足够的抓地力,不会出现胎面被刺穿而导致爆胎的情况,柔软的轮辐虽然会变形,但通过与容易复原的轮辋结合,轮胎在吸收冲击后可以马上复原,其内部的支撑结构在越障时会发生弹性形变,从而吸收冲击力,减少减振器和悬架的负载。

非充气轮胎利用轮胎侧面辐射开来的网状结构为整条轮胎提供刚性和弹性,米其林的TWEEL采用类似于马车车轮的辐条式,普利司通的AirFree采用相互交错的辐射式,如图6<sup>[42]</sup>所示,韩泰的iFLEX采用独特的网状结构,如图7<sup>[43]</sup>所示。非充气轮胎虽然可以彻底解决爆胎问题,但是由于技术的原因,目前的应用还不多。另外,由于非充气轮胎的支撑结构裸露在外,在泥泞路



图6 普利司通的AirFree结构

Fig. 6 Bridgestone AirFree structure



图7 韩泰的iFLEX结构

Fig. 7 Hankook iFLEX structure

段或积雪路段行驶时,带有附着效应的泥土或积雪会堆积在支撑结构内,影响轮胎的弹性变形。当支撑结构内部进入异物时,也会导致支撑结构受损。特别是这种内部支撑结构难以使轮胎承受较重的负载及较高的速度,因此,目前这种轮胎只能运用在一些低速车辆上,比如割草机和超轻型车。

防爆轮胎不是能够防止爆胎的轮胎,而是一种能够在汽车发生爆胎后仍能以一定的车速继续行驶一段距离的轮胎。防爆轮胎又称为安全轮胎或泄气保用轮胎(runflat stability control,简称RSC),可以分为自密封式、自体支承式和辅助支承式3类。

自密封式防爆轮胎是在常规轮胎的带束层部位加入一层柔韧性和伸展性良好的密封层,如图8<sup>[44]</sup>所示,密封层采用的材料具有一定的粘性,呈准固态,当轮胎胎面被刺穿时,密封层即刻对刺孔进行永久性封堵,保证轮胎不再漏气。目前,德国大陆轮胎公司、法国米其林轮胎公司、美国固特异轮胎橡胶公司、意大利倍耐力轮胎公司、韩国韩泰轮胎公司和韩国锦湖轮胎公司等轮胎厂商已经向汽车制造商提供了配套自密封式防爆轮胎。

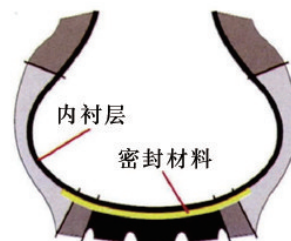


图8 自密封式防爆轮胎断面结构示意图

Fig. 8 Cross-section structure diagram of runflat tire with automatic sealing way

自体支承式防爆轮胎是一种特殊结构的轮胎,这种轮胎采用非常有韧性且加厚的轮胎侧壁,这种加厚的侧壁在轮胎爆胎或突然泄气的情况下,胎体仍然成型,保持与轮毂的良好结合,能够为汽车提供一定的支撑,保证汽车能够继续行驶,而传统轮胎在爆胎时,胎体会瞬间变形塌陷,无法支撑汽车继续行驶<sup>[45-46]</sup>。虽然这种轮胎可以降低爆胎引起的危险,免去车主对爆胎的后顾之忧,但是,这种轮胎成本很高,轮胎硬度和重量较大,驾驶舒适性不好,拆卸更换非常麻烦。自体支承式防爆轮胎如图9<sup>[46]</sup>所示。

辅助支承式防爆轮胎通过在轮辋和轮胎组成的胎

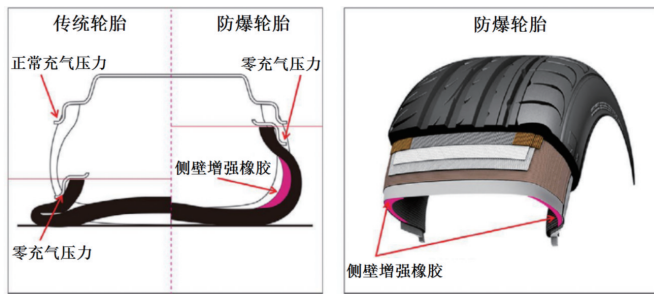


图9 自体支承式防爆轮胎的结构及泄气保用原理  
Fig. 9 Structure of runflat tire with self supporting way and principle of runflat

腔内安装支撑物,与轮辋和轮胎共同组成一个系统,在正常充气压力下,支撑物不参与工作,不影响轮胎基本性能,当轮胎漏气或爆胎时,轮胎胎压在极短时间内降低到零,在轮胎接地处,胎冠与轮胎内的支撑物接触,支撑物将支撑车体重量,轮胎紧箍于轮辋上,不会脱离轮辋,保证操纵稳定性,避免危险事故发生的同时可以保证汽车能够在一定速度范围内进行较长距离的安全行驶。法国米其林公司的PAX系统、德国大陆公司的CWS系统和意大利倍耐力公司的EMI,这3种轮胎都属于辅助支承式防爆轮胎,其中法国米其林公司的PAX系统具有一定的代表性<sup>[47-48]</sup>。米其林的PAX系统如图10<sup>[47]</sup>所示,包括特殊设计的轮毂、配合轮毂设计的轮胎、套在轮毂中心的支撑环和安装胎压监测器的气门嘴。当轮胎漏气时,以合成橡胶制造的支撑环支撑轮胎继续滚动。虽然PAX可以显著改善轮胎性能,提高驾驶的安全性、舒适性、经济性和操纵性,但是,PAX系统需要特殊设计的支撑环、轮毂和轮胎,设计和制造成本都比较高,重量比普通轮胎重,另外,PAX系统的拆卸和安装需要专用设备,过程比较麻烦。



图10 米其林PAX系统的基本结构  
Fig. 10 The basic structure of PAX system from Michelin company

### 3.3 轮胎状态自动调节

轮胎状态自动调节主要是对轮胎压力的调节,最初的轮胎状态调节技术应用于轮胎中央充放气系统CTIDS(central tire inflation deflation system)中,这种系统可以根据路面状况进行轮胎压力的自动调节,满足汽车在不同路面行驶的需要。智能轮胎出现后,根据智能轮胎获取的轮胎压力和温度状态,结合CTIDS的压力调节功能,可以实现轮胎状态的自动调节,提高汽车行驶的安全性、舒适性和通过性。

最早的CTIDS是美国通用汽车公司开发的,用于提高其开发的水陆两用载货车在松软的泥泞路面和水陆交界的松软沙滩上的通过能力,但是该系统采用外挂式管路,可靠性不高,并没有得到推广应用<sup>[28]</sup>。随后,苏联改进了该技术,采用内置式管道传输压缩气体,在各种型号的越野车上得到推广应用,美国在苏联技术的基础上,增加了自动控制系统,实现轮胎压力的自动调节。德国奔驰公司和法国拉比纳尔公司也开发了CTIDS,目前,CTIDS已经成为美国、德国、俄罗斯和法国军用越野车的标准配置<sup>[29-30]</sup>,并且在民用载货汽车<sup>[31]</sup>和农用车辆<sup>[32]</sup>上得到应用。天津军事交通学院开发了国内的CTIDS,如图11<sup>[30]</sup>所示,这种CTIDS在密封圈材料和轮胎压力控制阀方面进行了改进,简化了充放气的控制过程,提高了密封效果<sup>[30]</sup>。CTIDS虽然可以提高汽车在不同路面行驶的动力性和通过性,但是这种系统的结构比较复杂,需要设计专门的旋转密封装置、管道和充放气阀门,需要根据不同的汽车轮胎特点进行设计,难度较大。

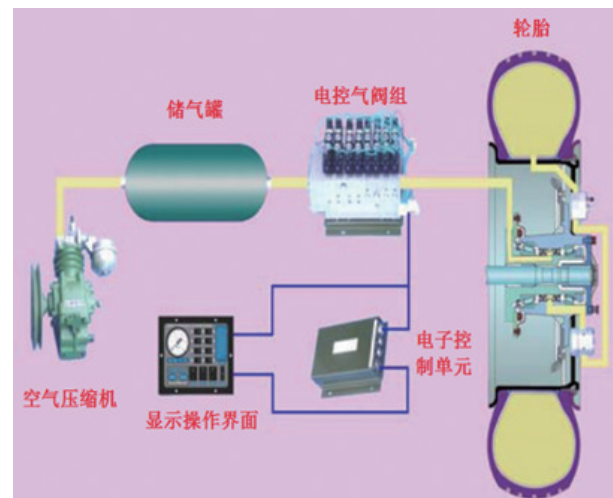


图11 CTIDS结构  
Fig. 11 Structure of CTIDS

## 4 轮胎智能制造的机遇

智能轮胎是利用信息技术对传统轮胎制造技术进行改造的产物,它可以促进轮胎智能制造过程信息技术和制造技术的深度融合,为轮胎智能制造创造快速发展的机遇。

1) 智能轮胎状态监测方法为轮胎生产、仓储、运输、销售和维修服务提供了便利,实现了轮胎产品全生命周期的数据管理。智能轮胎可以在轮胎生产过程中嵌入传感器芯片,该传感器芯片可以记录轮胎产品的身份信息和使用信息,在轮胎生产、仓储、运输和维修服务过程中,都可以根据传感器芯片的信息对产品进行跟踪和网络化信息管理。在轮胎使用过程中,轮胎内的传感器芯片进行轮胎状态信息的监测和收集,根据收集的轮胎状态信息可以进行轮胎的故障诊断,为客户提供维修提醒等增值服务,增加轮胎产品的价值,另外,收集的轮胎状态信息也可以为轮胎性能改进提供参考依据,从而促进轮胎设计过程的不断优化。

2) 智能轮胎爆胎预警与控制方面的建模和仿真研究,可以为轮胎设计过程提供更多的参考,加快轮胎新产品的数字化设计和虚拟仿真过程,优化轮胎产品的性能,减少实验测试的次数,降低设计的成本。非充气轮胎和防爆轮胎为轮胎新产品的结构设计提供了创新的思路,可以根据汽车类型和客户个性化需求,设计不同类型的轮胎结构,进行轮胎生产制造过程的流程改造,提高产品的技术含量,增强企业的品牌价值,实现轮胎产品的多样化和多功能化。

3) 智能轮胎状态自动调节系统的研究,可以实现轮胎在不同路面状况、不同轮胎压力和不同速度下的状态信息收集,分析轮胎在不同状态下的性能变化,统计汽车驾驶人的驾驶习惯,从而建立轮胎产品服务的数据库和轮胎性能变化的数据库,为轮胎性能优化设计和测试奠定基础。另外,基于收集的数据设计虚拟化的仿真系统,可以为客户提供多样化的服务,展示轮胎产品在不同路况和行驶状况下的性能变化,扩展轮胎产品的服务价值,满足客户个性化的需求。

## 5 轮胎智能制造的挑战

虽然智能轮胎技术为轮胎智能制造提供了极好的发展机遇,但是,智能轮胎还处于发展初期,功能还比

较简单,应用还不广泛,在轮胎材料和制造技术、传感器和芯片技术、实验测试技术以及智能化应用方面都存在一定的挑战。

1) 智能轮胎的传感器和芯片嵌入安装在轮胎内,对轮胎的材料和制造工艺提出了很高的要求。轮胎制造过程的高温高压环境极易造成传感器和芯片性能的下降和损坏,因此,需要进行轮胎制造工艺和流程的改进,以适应传感器和芯片的安装要求,减小对传感器和芯片的影响,延长传感器和芯片的使用寿命。另外,传感器和芯片的安装对轮胎整体刚度和弹性会产生一定的影响,需要进行轮胎新材料和结构的研究,降低传感器和芯片安装对轮胎性能的影响。

2) 智能轮胎的传感器和芯片通过无线方式进行信号的传输,轮胎内高温和潮湿的环境以及轮胎的旋转与振动对传感器的性能要求很高,无线传输过程对传感器的抗干扰性能要求也很高,因此,需要不断提高传感器和芯片的技术水平。另外,传感器和芯片要长时间工作,需要采用电池供电,电池的寿命限制了传感器的使用寿命,并且电池的体积和重量比较大,增加了轮胎旋转的动态负载,成为汽车高速行驶的安全隐患,废弃的电池还会造成环境的污染,因此,无源轮胎传感器是发展的必然方向。但是,目前的无源传感器技术还不成熟,传感器体积比较大,测量精度不高,抗干扰能力不强,安装不方便,因此,需要进行传感器设计、制造和封装技术的研究,减小传感器的体积,提高传感器的测量精度和抗干扰能力,从而为无源传感器和芯片在轮胎制造过程的胎面嵌入安装奠定基础。

3) 轮胎的性能一般通过室内实验台测试获得,但是在轮胎的实际运动过程中,路面状况、载荷、纵滑、侧偏、侧倾等特性都在变化,室内实验台的测试结果与实际情况总会存在一些差异,另外,对于爆胎过程的测试,出于安全性和测试成本考虑,很难在真实环境下进行重复性的爆胎实验,因此,目前的轮胎测试技术还不完善,随着智能轮胎技术的发展,需要不断增加新的测试手段,研究新颖的测试技术,获取更多的轮胎实际运行状态数据,进行轮胎性能的分析和新产品的改进。

4) 轮胎的智能化水平依赖于轮胎的状态信息和相关的智能诊断与控制算法,目前的智能轮胎获取的轮胎状态信息有限,基于轮胎状态信息的诊断过程简单,很少采用智能化的控制算法,因此,智能化水平不高。为了提高轮胎的智能化水平,需要结合汽车辅助驾驶

及无人驾驶系统、汽车物联网和其他汽车主动控制系统,收集更多的汽车和轮胎状态信息,综合利用收集的信息建立轮胎智能分析大数据分析平台,为轮胎智能制造过程的轮胎性能分析、故障维护和其他个性化服务提供数据支持。

## 6 结论

为适应工业 4.0 和《中国制造 2025》,中国轮胎工业必将进入智能制造时代,实现轮胎制造过程的自动化、信息化、网络化和智能化,提高轮胎的智能化水平,而智能轮胎作为一种先进的轮胎技术,符合智能化和信息化的发展趋势,因此,智能轮胎技术为轮胎制造过程的智能化提供了极好的发展机遇。基于智能轮胎的信息可以为轮胎优化设计、制造工艺和流程改造、运输和维护服务的网络化和个性化奠定基础,但是智能轮胎技术发展还处于初级阶段,轮胎材料和制造技术、传感器和芯片技术、实验测试技术以及智能化应用方面还存在一定的局限性,随着信息技术、智能技术和网络技术的发展,智能轮胎必将成为推动中国轮胎工业转型升级进入智能制造时代的重要力量。

### 参考文献(References)

- [1] 周济. 智能制造——“中国制造 2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.  
Zhou Ji. Intelligent manufacturing: Main direction of "made in China 2025"[J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273-2284.
- [2] 熊有伦. 智能制造[J]. 科技导报, 2013, 31(10): 1.  
Xiong Youlun. Intelligent manufacturing[J]. Science & Technology Review, 2013, 31(10): 1.
- [3] 庄继德. 汽车轮胎学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2001.  
Zhuang Jide. Automotive tire science[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2001.
- [4] 于清溪. 轮胎的绿色特性与发展[J]. 橡塑技术与装备, 2013, 39(1): 21-32.  
Yu Qingxi. Green characteristics and development of tires[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2013, 39(1): 21-32.
- [5] 于清溪. 轮胎工业生产现状与未来发展[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42(1): 7-15.  
Yu Qingxi. Present situation and development of tire industrial production[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2016, 42(1): 7-15.
- [6] 张向文. 应用于智能轮胎的无源无线声表面波压力和温度传感器研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.  
Zhang Xiangwen. Research on wireless passive pressure and temperature sensors based on surface acoustic wave for intelligent tires[D]. Beijing: Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, 2005.
- [7] Zhang X W, Wang Z X, Gai L F, et al. Design considerations on intelligent tires utilizing wireless passive surface acoustic wave sensors[C]// Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2004: 3696-3700.
- [8] TPMS, tire pressure monitoring system[EB/OL]. (2016-08-25) [2018-05-20]. <http://www.e-lead.com/eltmps/index9ed2.html>.
- [9] 张守燕. 奥迪轮胎压力监测系统剖析[J]. 汽车维修技师, 2009, (9): 21-23.  
Zhang Shouyan. Analysis of Audi tire pressure monitoring system[J]. Automotive Maintenance Technician, 2009, (9): 21-23.
- [10] NIRA 为沃尔沃汽车提供胎压监测系统[J]. 汽车零部件, 2014, (9): 11.  
NIRA supplying Volvo cars with TPI system[J]. Automobile Parts, 2014, (9): 11.
- [11] 大陆集团. 直接式胎压监测系统使驾乘更安全更环保[J]. 汽车工艺师, 2016, (5): 78-79.  
Continental Group. Direct tire pressure monitoring system makes driving safer and more environmentally friendly[J]. Automobile Technologist, 2016, (5): 78-79.
- [12] Kanwar B S, Vishwas B, Saied T, et al. Piezoelectric vibration energy harvesting system with an adaptive frequency tuning mechanism for intelligent tires[J]. Mechatronics, 2012, (22): 970-988.
- [13] Alfred P, Leonhard R. Measurement of physical parameters of car tires using passive SAW sensors[C]// The 2nd Conference on Advanced Microsystems for Automotive Applications, 1998: 249-262.
- [14] Alfred P, Reinhard S, Leonhard R. The "intelligent tire" utilizing passive SAW sensors—measurement of tire friction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48(6): 1041-1046.
- [15] Li L, Wang F Y, Shan G L, et al. Design of tire fault observer based on estimation of tire/road friction conditions[J]. Automatica Sinica, 2003, 28(5): 689-694.
- [16] Masanori O, Tatsuya I, Takafumi F, et al. Fundamental study of smart tire system[C]// Proceedings of 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference, Toronto, Canada, 2006: 1519-1524.
- [17] Li L, Wang F Y, Zhou Q Z. Integrated longitudinal and lateral tire/road friction modeling and monitoring for vehicle motion control[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transporta-

- tion Systems, 2006, 7(1): 1-19.
- [18] Mustafa A A, Kanwar B S, Saied T. An intelligent tyre based adaptive vehicle stability controller[J]. International Journal of Vehicle Design, 2014, 65(2/3): 118-143.
- [19] Patwardhan S, Tomizuka M, Zhang W, et al. Theory and experiments of tire blow-out effects and hazard reduction control for automated vehicle lateral control system[C]// Proceedings of the American Control Conference, 1994: 1207-1209.
- [20] Patwardhan S, Tan H S, Tomizuka M. Experimental results of a tire-burst controller for AHS[J]. Control Engineer Practice, 1997, 5(11): 1615-1622.
- [21] 傅建中, 石勇. 轮胎气压监测与爆胎自动减速系统[J]. 汽车工程, 2006, 28(2): 199-202, 171.  
Fu Jianzhong, Shi Yong. The tire pressure monitoring and vehicle deceleration system for tire blow-out[J]. Automotive Engineering, 2006, 28(2): 199-202, 171.
- [22] 王英麟. 基于 CarSim 与 UniTire 的爆胎汽车动力学响应研究[D]. 长春: 吉林大学, 2007.  
Wang Yinglin. Study on vehicle dynamic response to tire blow-out based on CarSim and UniTire[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [23] 郭孔辉, 黄江, 宋晓琳. 爆胎汽车整车运动分析及控制[J]. 汽车工程, 2007, 29(12): 1041-1045, 1109.  
Guo Konghui, Huang Jiang, Song Xiaolin. Analysis and control of vehicle movement with blow-out tire[J]. Automotive Engineering, 2007, 29(12): 1041-1045, 1109.
- [24] 于树友, 刘洋, 王菲, 等. 爆胎车辆轨迹控制的仿真[J]. 北京工业大学学报, 2016, 42(8): 1225-1232.  
Yu Shuyou, Liu Yang, Wang Fei, et al. Simulation of trajectory control of vehicles during a tire blowout[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(8): 1225-1232.
- [25] 王菲, 刘柏楠, 郭洪艳, 等. 爆胎汽车的轨迹跟踪与稳定性控制[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(11): 97-104.  
Wang Fei, Liu Bainan, Guo Hongyan, et al. Trajectory tracking and stability control for vehicle after tire blow-out[J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(11): 97-104.
- [26] Wang F, Chen H, Guo H Y, et al. Constrained  $H_{\infty}$  control for road vehicles after a tire blow-out[J]. Mechatronics, 2015, 30: 371-382.
- [27] Wang F, Chen H, Cao D P. Nonlinear coordinated motion control of road vehicles after a tire blowout[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2016, 24(3): 956-970.
- [28] 徐友春, 赵玉凡, 彭永胜. 汽车轮胎中央充放气系统在我国的发展和应[J]. 汽车技术, 1998 (1): 41-42.  
Xu Youchun, Zhao Yufan, Peng Yongsheng. Development and application of vehicle central tire inflation and deflation system in China[J]. Automobile Technology, 1998(1): 41-42.
- [29] 彭永胜, 赵玉凡, 刘洪泉, 等. 轮胎中央充放气系统的现状与发展趋势[C]// 2009 中国汽车工程学会年会论文集, 2009: 532-535.  
Peng Yongsheng, Zhao Yufan, Liu Hongquan, et al. Present state and trends in development of central tire inflation system [C]// Proceedings of Society of Automotive Engineering of China Congress, 2009: 532-535.
- [30] 赵玉凡, 袁一, 刘洪泉, 等. 轮胎中央充放气系统及其对提高汽车越野性能的作用[C]. 中国农业机械学会成立 40 周年庆典暨 2003 年学术年会, 2003: 1039-1041.  
Zhao Yufan, Yuan Yi, Liu Hongquan, et al. Central tire inflation/deflation system(CTI/DS) and its function to the performance of the cross-country vehicle[C]// Proceedings of Chinese Society for Agricultural Machinery 40th Anniversary Celebration and 2003 Congress, 2003: 1039-1041.
- [31] Alan F. Application of the eaton tire pressure control system to the commercial truck[J]. SAE transactions, 1994, (103): 390-395.
- [32] Adams B T, Reid J F, Hummel J W, et al. Effects of central tire inflation systems on ride quality of agricultural vehicles [J]. Journal of Terramechanics, 2004, 41(4): 199-207.
- [33] Zhang X W, Wang Z X, Li W, et al. A fuzzy logic controller for a intelligent tires system[C]// 2005 IEEE Intelligent Vehicle Symposium Proceedings, 2005: 875-881.
- [34] 邓海燕. 世界智能轮胎技术与产品[J]. 橡塑技术与装备, 2004, 30(3): 12-16.  
Deng Haiyan. World intelligent tire technology and product [J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2004, 30(3): 12-16.
- [35] Milos K, Nemanja S, Rolf K, et al. Applying tire pressure monitoring devices for traffic management purposes[C]// 2012 International Symposium on Signals, Systems, and Electronics (ISSSE), 2012: 1-6.
- [36] 刘川来, 董兰飞, 滕学志. 智能轮胎在车队信息化管理中的应用[J]. 中国橡胶, 2013, (23): 22-25.  
Liu Chuanlai, Dong Lanfei, Teng Xuezh. Application of intelligent tire in information management of fleet[J]. China Rubber, 2013, (23): 22-25.
- [37] 胡圣波, 司兵, 舒恒. 轮胎嵌入式超高频无源 RFID 系统的功率传递特性[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 150-158.  
Hu Shengbo, Si Bing, Shu Heng. Power transmission performance for ultra high frequency embedded RFID system in tire [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(21): 150-158.
- [38] Intelligent tire system[EB/OL]. (2007-10-05) [2010-05-20]. <http://www.vdo.com/press/pictures/chassis-carbody/sv-pp-iaa-2007-intelligent-tire-system.html>.
- [39] Zhang Y Z, Yi J G, Liu T. Embedded flexible force sensor for in-situ tire-road interaction measurements[J]. IEEE Sensors

- Journal, 2013,13(5): 1756-1765.
- [40] 固特异轮胎和橡胶公司. 带有整体式传感器安装架的轮胎: 中国, 200810190995.7[P]. 2009-07-22.  
Goodyear tire & rubber corporation, LTD. Tire with integral sensor mounting rack: China, 200810190995.7[P]. 2009-07-22.
- [41] 不会爆的轮胎: 米其林 Tweel[EB/OL]. (2009-07-09) [2018-05-20]. <http://www.ixiqi.com/archives/12373>  
Non-flat tire: Michelin Tweel[EB/OL]. (2009-07-09) [2018-05-20]. <http://www.ixiqi.com/archives/12373>.
- [42] 爆胎终结者,解密非充气轮胎[EB/OL]. (2014-12-05) [2018-05-20]. <http://auto.163.com/14/1205/06/ACMB59T4000853V5.html>.  
Flat tire terminator, decoding non-pneumatic tires[EB/OL]. (2014-12-05) [2018-05-20]. <http://auto.163.com/14/1205/06/ACMB59T4000853V5.html>.
- [43] 韩泰 iFlex 免充气轮胎成功完成实车测试[EB/OL]. (2015-07-15) [2018-05-20]. [http://info.xcar.com.cn/201507/news\\_1831704\\_1.html](http://info.xcar.com.cn/201507/news_1831704_1.html).  
Hankook iFlex has completed the real car test successfully [EB/OL]. (2015-07-15) [2018-05-20]. [http://info.xcar.com.cn/201507/news\\_1831704\\_1.html](http://info.xcar.com.cn/201507/news_1831704_1.html).
- [44] 徐立, 熊伟. 国外安全轮胎发展现状调研[C]//“赛轮金宇杯”第19届中国轮胎技术研讨会, 2016: 15-21.  
Xu Li, Xiong Wei. Research on the development status of safety tires abroad[C]// The 19th China Tire Technology Symposium of "Sailun Jinyu Cup", 2016: 15-21.
- [45] Cho J R, Lee J H, Jeong K M, et al. Optimum design of run-flat tire insert rubber by genetic algorithm[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2012, 52: 60-70.
- [46] Park N, Seo J, Kim K, et al. Sidewall-insert compound based on ZnO-treated aramid pulp fibers for run-flat tires[J]. Composite Interfaces, 2016, 23(8): 781-796.
- [47] 赵海蓉. 低胎压内支撑式安全轮胎系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.  
Zhao Hairong. Research on inner support run-flat tire system in low pressure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012.
- [48] 农德珠, 李汉堂. 安全轮胎的发展及其发展前景[J]. 现代橡胶技术, 2016, 42(4): 1-11.  
Nong Dezhu, Li Hantang. Development and prospect of safety tires[J]. Advanced Rubber Technology, 2016, 42(4): 1-11.

## Opportunities and challenges for tires intelligent manufacturing from intelligent tires

ZHANG Xiangwen<sup>1</sup>, WANG Fei-Yue<sup>2</sup>

1. School of Electronic Engineering and Automation, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China
2. State Key Laboratory of Management and Control for Complex Systems, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** The development of intelligent tire is in line with the automatic, informational, intelligent and networked trend of the tire manufacturing process, and it is the fusion result of information technology and tire technology, so the intelligent tire creates excellent opportunities for the informational, intelligent and networked development of tire intelligent manufacturing. The condition monitoring method of intelligent tires provides convenience for the information management of the whole life cycle of tire production, warehousing, transportation, sales and maintenance services. The modeling and control technology of intelligent tires facilitates the realization of digital design and virtual simulation of tires and provides convenience for the intellectualization of tire manufacturing process. Tire condition automatic regulating system can collect tire information under different road conditions and different tire pressure and different vehicle speed, so it provides networked convenience for the tire manufacturing process. However, there are some limitations on the tire materials and manufacturing technology, sensors and chip technology, test technology and intelligent application related with intelligent tires, so the intelligent tire technology also provides some challenges for the implementation of tire intelligent manufacturing.

**Keywords** intelligent tires; intelligent manufacturing; tire manufacturing; tire technology ●



(责任编辑 祝叶华)