

智能轮胎的研究及其相关核心技术

王飞跃^{1,3}, 单国玲², 李力³, 王知学¹, 王传铸², 冯希金²

(1. 中科院自动化研究所 智能控制和系统工程中心, 北京 100080; 2. 三角轮胎股份有限公司, 山东 威海 264200; 3. 美国亚利桑那大学 PARCS 研究中心, 图森, 亚利桑那)

摘要: 简述了三角智能轮胎试验平台系统和相关的智能轮胎核心技术的部分基本成果。针对当前国际智能轮胎的发展趋势, 重点讨论了基于被动辐射表面波技术的物理传感器、基于信号处理的虚拟传感器和基于 GPS/INS 信号的监测系统的设计与实现。

关键词: 智能轮胎; 故障监测; 传感器; 信号处理; 实时通讯; 安全报警系统

中图分类号: TQ336.1⁺1; TQ330.4⁺92 **文献标识码:** B **文章编号:** 1006-8171(2002)12-0713-07

智能轮胎的研究与开发是目前汽车技术的最新发展方向之一。这一概念的出现是近年来电子计算机和信息技术在汽车产品上广泛深入应用的直接结果。智能轮胎的研究涉及材料、结构、传感、信号处理、无线通讯和实时内嵌计算等多项先进技术, 是实现安全驾驶、经济行车和减少汽车使用对环境冲击的关键技术, 也是发展未来汽车电子的基础性工作。

轮胎问题是造成和诱发交通事故的主要原因, 特别是当汽车在高速公路上行驶时更是如此。同时轮胎充气压力不当也会引起大量的燃料浪费和环境污染。例如, 最近美国发生的费尔斯特通轮胎大规模召回事件, 据称主要是因为轮胎气压不足, 产生热量过多, 从而破坏其内部结构, 造成爆胎, 引发车祸, 已经导致 150 多人死亡, 损失惨重。类似的事件在其它轮胎公司和国家也时有发生。智能轮胎的应用可以有效地解决这类问题。因为使用智能轮胎, 驾驶员可以持续准确地了解轮胎状态并得到及时的提示。

然而, 尽管轮胎压力监测器等早已存在几十年了, 但真正方便、实用、有效、可靠并具有智能的轮胎技术至今还没有出现。随着上世纪末电子、计算机、传感器和通讯技术的不断发展, 特别是智

能汽车概念出现之后, 世界上许多汽车生产国家, 特别是美国、德国和日本, 纷纷加快进度, 投入了大量人力和物力从事智能轮胎的研发, 并在各类 SAW(被动辐射表面波) 传感器的研制等方面取得了重大进展, 获得许多相关专利^[1]。

同时, 国际上许多汽车公司也积极参与开发新型和智能型轮胎, 试图在实现轮胎压力监测的同时, 完成诸如轮胎道路摩擦、动态平衡和轮胎温度监控等功能, 并将其与智能驾驶、导航和电子安全系统等其它汽车控制预警结合起来, 共同组成一个完整的智能汽车电子监控系统。

我国是轮胎消费大国, 每年各种车辆消耗的轮胎约有几千万条, 轮胎市场容量巨大。但是由于我国轮胎工业起步较晚, 投入不足, 轮胎的子午化率仅为 30% 左右。目前已经拥有的子午线轮胎产品也大多是中低档产品, 与国外品牌产品相比处于竞争劣势。要缩短与国外大轮胎公司的差距, 必须采取异军突起的手段, 抓住当前国际轮胎发展的新动向, 加大投入进行研究, 力争在新的起点上与国际水平保持一致。为此, 三角轮胎股份有限公司、中科院自动化研究所和美国亚利桑那大学成立了智能轮胎联合研发中心, 致力发展具有自主知识产权的智能轮胎核心技术和相关产品。本文就联合研发中心的主要工作进行简述, 重点讨论基于 SAW 技术的各种物理传感器、基于信号处理的虚拟传感器和基于 GPS/INS(全球定位系统/惯性导航系统) 信号的各种监测

作者简介: 王飞跃(1961-), 男, 山东青岛人, 中科院自动化研究所研究员、美国亚利桑那大学终身教授, 博士, 主要从事的研究领域为实时内嵌系统、智能控制系统、复杂系统理论, 特别是智能系统在智能汽车和智能交通中的应用等。

系统的设计与实现。

1 三角智能轮胎试验平台

为实现所要求的功能,智能轮胎的研究范围必须包括汽车状态、道路条件和轮胎本身的实时情况及其相互影响,而支撑智能轮胎系统的核心技术是材料和结构、传感和信号处理、实时通讯和智能数据融合算法以及相关的预警系统和各种汽车安全与控制系统。图1示出了智能轮胎研究的这些基本特性。与之对应,三角智能轮胎试验平台系统由材料和结构的智能设计、智能传感和信号处理、数据传输和网络通讯、数据综合和智能算法以及智能预警、安全和控制系统5个模块组成,如图2所示。各模块的基本功能简述如下。

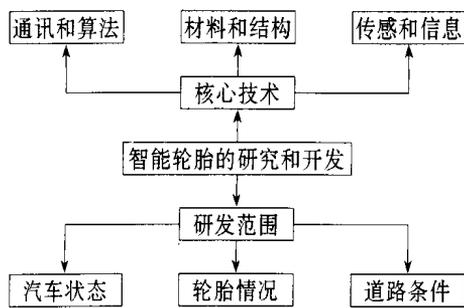


图1 智能轮胎研究的特性

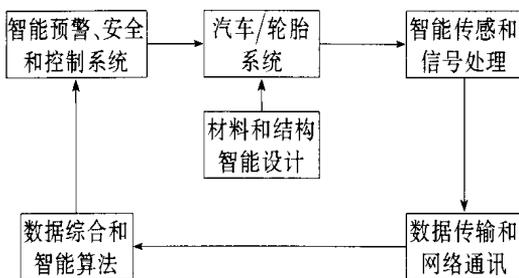


图2 三角智能轮胎试验平台的基本结构

(1) 材料和结构智能设计模块

长期以来,材料调配和结构设计是轮胎研究的全部内容。随着计算机辅助设计的广泛使用,这部分内容也逐渐归入智能轮胎的研究范畴。纳米技术的应用和绿色轮胎的概念一直是这方面研究的重点。材料和结构智能设计模块的功能就是评价已有技术的功能和性能。这一模块的核心是基于COCS的计算机优化元件结构系统,它提供包括轮胎的结构、外形、材料和胎面等智能优化设计。目前工作的重点是纳米技术的应用和基于压

电体的智能材料的应用。

(2) 智能传感和信号处理模块

智能传感和信号处理模块主要用来评估和检测各种轮胎压力、温度、摩擦因数和其它传感器信息。该模块是整个系统的基础。

(3) 数据传输和网络通讯模块

数据传输和网络通讯模块主要解决如何将传感器采集到的数据传到车内现场总线,然后再送到相应的车辆内嵌计算系统进行处理。其中包括传感信息的有线和无线获取、现场总线设计和实现及通讯协议的制定等内容。该模块是其它系统模块之间的联系纽带和整个系统集成的基础。

(4) 数据融合和智能算法模块

数据融合和智能算法模块主要实现智能轮胎传感器数据的融合和处理,从而达到识别和预测轮胎状态以及进一步检测轮胎故障和容错控制的目的。由于轮胎表面张力受路面状况和轮胎温度、压力、动平衡状态等诸多因素影响,必须建立相当复杂的模型进行分析。因此本模块综合应用了模糊辨识、小波分析和神经网络等多种技术,是整个系统智能化的集中体现。

(5) 智能预警、安全和控制系统模块

由于计算能力的限制,目前研制的多数轮胎传感系统都只能进行单一状态的检测。随着汽车电子程度的不断提高,将出现车载计算机,因此计算资源不再是主要问题。智能预警、安全和控制系统模块是以一个车辆内嵌计算系统为基础,研究如何将来自轮胎、道路和车辆的各种不同、多重和赘余的信号结合起来,利用计算智能理论中的各种方法,例如模糊逻辑、神经网络和遗传算法,为汽车预警、安全和控制系统提供可靠和准确的信息。目前考虑的车内系统包括反锁系统ABS、反旋系统ASS、稳定性控制系统SCS、自适应巡航控制系统ACC和自适应悬挂控制系统ASC。这一模块将是从目前智能轮胎的研究转向后期汽车电子系统研发的关键。

由上述模块组成的三角智能轮胎试验平台系统分两种,即用于室内轮胎试验的固定平台系统和用于现场轮胎的车载平台系统。其中车载智能轮胎平台系统将列入国家“863”高科技攻关项目“试车专用机器人和自动试车场设计”中,成为其

中的一个组成部分。

联合研究中心目前工作的重点是：基于 SAW 技术的各种物理传感器的设计与实现；基于信号处理的各种虚拟传感器的设计与实现；基于 GPS/INS 信号的监测系统的设计与实现。下面比较详细地讨论了这些研究的难点和相应的解决方案。

2 基于 SAW 技术的各种传感器

用于轮胎状态检测的传感器有很多种,基本上都需要锂电池支持才能工作。目前最常用的是应变型压力传感器和 Hall 型摩擦因数传感器。此外还有红外线温度传感器等。此类传感器的主要缺点是：由于锂电池的限制,使用寿命较短,使用不便；传感器系统的质量大都在 20 g 左右,从而引起较大的动态负载,特别是在最关键的高速区段。

基于 SAW 技术的轮胎传感器是近年来新开发的^[1],且仍处于试验阶段。其主要优点是胎内传感器部分不需电池支持,而且质量较小。目前已经开发出的试验传感器只有 5 g 左右,同时可以在高温等恶劣环境下工作,因此,与其它类型传感器相比,具有明显的优势。其实,基于 SAW 的传感技术在许多领域都早已得到广泛应用,特别是在手机等通讯工具上更是不可缺少的部分^[2]。SAW 型传感器基本工作原理并不很复杂,主要是在轮胎的表面嵌入薄石英片,通过石英压电晶体将压力信号转化为相应的响应频率信号,并在询问频率的诱发下,返回响应频率,从而测量行驶中汽车轮胎的压力和温度等。

联合中心开发的无线型 SAW 传感器主要由三部分组成,即无线轮询单元、无线单元和 SAW 传感器装置。在其运行过程中,首先是车载轮询单元发出 RF 脉冲,它既作为询问信号同时也是激励能源的载体;RF 脉冲由天线接收后,存入表面辐射波,表面辐射波通过传感效应而改变,最后传播回到轮询单元,成为获取压力、位移、温度和湿度等信息的基本数据。图 3 示出无线 SAW 传感器的基本组成。图 4 示出车载轮询单元的一个设计初型。

无线型 SAW 传感器设计的主要技术难点包括：EMI/EMC 效应的分析和实验；材料选择和内部结构的设计；获取多种信息的综合 SAW 传感器的设计和信号的处理算法。这 3 个问题是相互联系和影响的,对应的解决方案也应是综合性的。

首先由于轮询单元和轮胎的距离相对较短,为了减小 EMI/EMC 效应,采用了时间采样方式进行轮询。此时接收器必须采用宽频采样,同时由于 SAW 传感器信号只有几个微秒的延时,因此轮询频率比较高,可达每秒 10 次。试验证明,在不加平均算法或脉冲压缩的情况下,轮询距离可达 0.5 m 左右,加上以后可提高到几米的范围(距离随轮询频率而变化),因此对于轮胎应用是足够的。

目前用于 SAW 传感器的典型基材有石英、锂钽氧化物 (LiTaO_3) 和锂铌氧化物 (LiNbO_3)。试验证明,基材的选择应与所需要的传感信号相关,而且基材和 IDT (Interdigital Transducer) 的结构尺寸决定了传感器所能包含的频率范围(一般

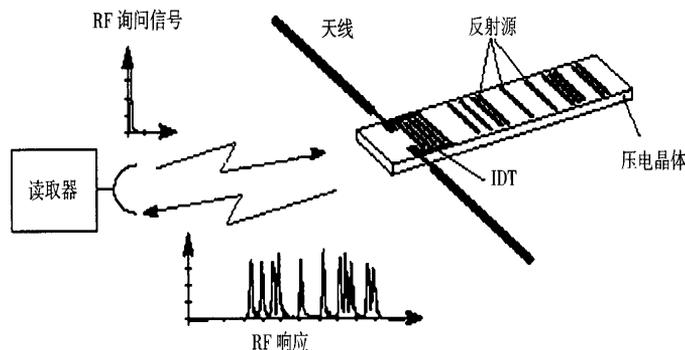


图 3 无线 SAW 传感器的基本组成

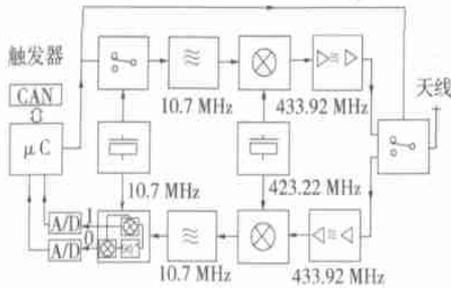
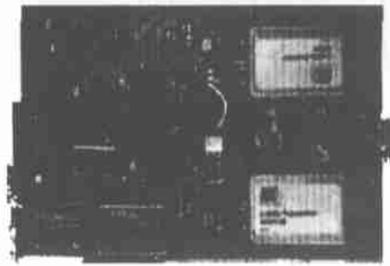


图4 车载轮询单元设计初型



可达 0.02 ~ 3 GHz)。多数文献中报道的 SAW 传感器都采用均匀 IDT 设计和均匀的开放式反射器。虽然这种设计十分简单,但试验表明它们能引起高辐射式反射,从而减小信噪比,同时不可避免的非均匀性也会引起其它许多问题。因此,采用单相单向 IDT 结构和 Chevron 型反射器。

为了设计综合型 SAW 传感器,必须对 SAW 装置及其结构进行量化分析,涉及信号处理(脉冲效应函数及其付氏变换)、网络理论(主要是 P 矩阵模型)和场论(包括波分析、周期格林函数以及有限元和边界元方法)。其中信号处理方法可作为一阶近似,为场论的二阶效应结构分析提供初始解。在综合 SAW 信号的分析中,必须考虑电极反应、体辐射效应、模态转换、散射和 IDT 之间的电磁场感应等二阶影响。由于目前还难以通过一个 SAW 传感装置同时获取多种信息,因此研究的重点是单一 SAW 传感器的优化设计和多个单一 SAW 传感器的布局设计。初型 SAW 传感器包括压力传感器、温度传感器、摩擦因数传感器和力矩传感器,其中力矩传感器是由 2 个压力传感器组合而成。图 5 示出 SAW 传感器测量轮胎压力的试验曲线(实际压力在 10.25 时刻由 0.19 MPa 跳变为 0.15 MPa)。

3 基于信号处理的各种虚拟传感器

所谓虚拟传感器是指利用现有的信号间接获取那些不能直接测量或直接测量成本非常高的信息的过程。虚拟传感器可用于估测路面与轮胎间的摩擦、路面条件、轮胎膨胀压力和轮胎转动平衡状态等。虚拟传感器的最大优点是以算法为主,成本相对较低,但对计算能力、信号的实时性以及多信号的协调等要求较高。

虚拟传感器的设计涉及系统建模、信号处理、

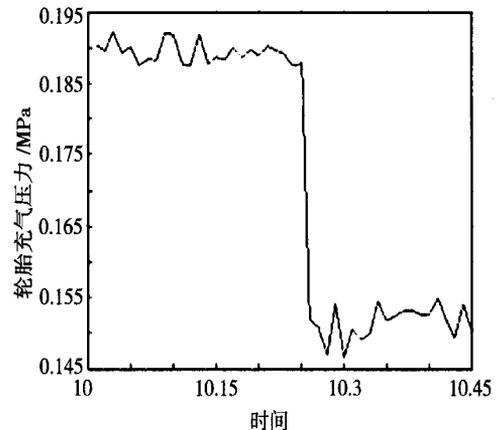


图5 轮胎压力 SAW 传感器的试验曲线

数据融合、信息标定和自适应自学习等方面。我们采用的主要方法是 Kalman 滤波、小波分析、时序分析和计算智能中模糊逻辑、神经网络以及遗传算法。目前的算法实现都是基于普通 PC,因为现在还无法确定车载内嵌计算机的资源条件。

联合中心最早完成的虚拟传感器是轮胎与路面摩擦因数的观测器。其设计原理是基于试验总结出的轮胎摩擦因数和车辆滑动之间的关系模型(如常用的 LuGre 模型^[31]),根据测出的车辆滑动情况,估计轮胎的摩擦情况。文献[4]讨论了一种根据 LuGre 模型设计的轮胎摩擦异常报警观测器。该模型仅需要轮胎转动角速度的观测数据来驱动整个估计模型。在发生故障时,轮胎转动角速度的观测值与模型估计值会产生超过阈值的误差,从而触发报警,如图 6 所示。图 7 示出引入的某摩擦描述变量的估计值迅速从故障前的真实值收敛到故障后的真实值的过程。

轮胎压力指标显示虚拟传感器是国际上研究的另一个热点,目前已有大约 40 多个专利。这些技术多是通过车速进行振动分析或是对车轮半径估算而设计的。振动分析采用快速付氏变换

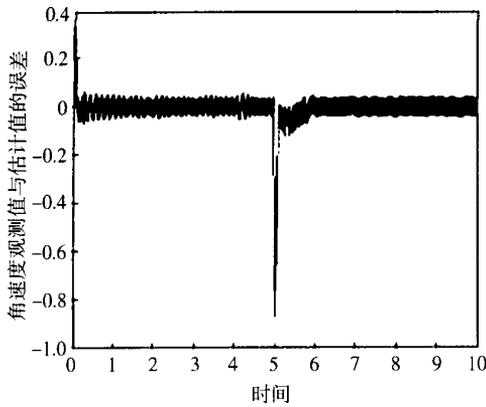


图 6 轮胎转动角速度观测值和模型估计值误差的变化过程

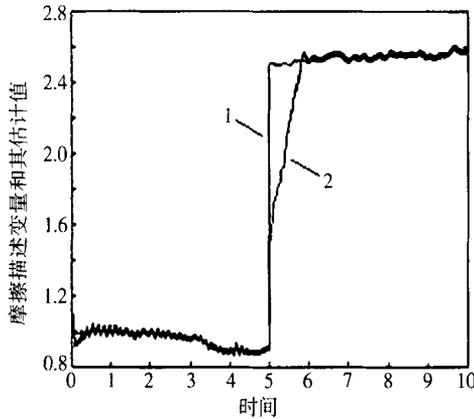


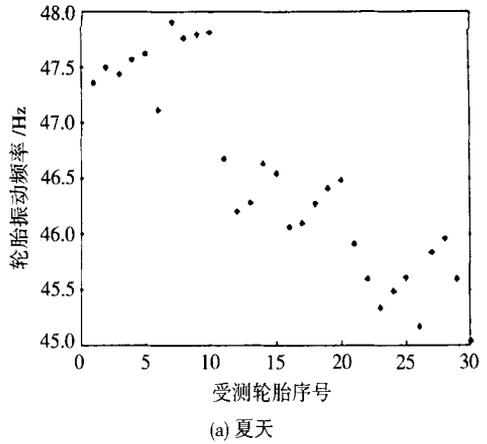
图 7 摩擦描述变量和其估计值的变化过程
1—摩擦描述变量 ;2—摩擦描述变量估计值 ^

FFT 或参数化模式,而轮径估算一般是采用非线性辨识函数的方法。这些虚拟传感器一般都不是直接估算胎压,而是估算胎压的各种间接指数。

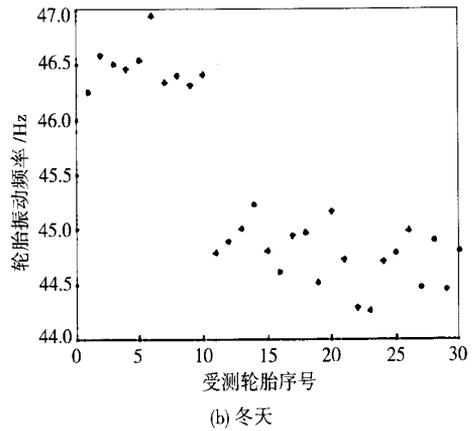
为了在自主知识产权和专利方面有所突破,利用现代振动分析和模式识别研究的新技术,联合中心设计了采用基于小波的振动分析虚拟传感器和基于模糊神经元的轮径虚拟传感器。

一般轮胎的振动频率为 40~50 Hz。基于小波的振动分析虚拟传感器可通过轮胎振动频率的变化估计不同天气条件下轮胎的漏气严重程度、轮胎的花纹间偏差以及车轮的动态不平衡程度等。采用这种方法的试验结果示于图 8 和 9。

基于轴向函数的模糊神经元方法的轮径估算主要用来检测轮胎的漏气程度,特别是所有轮胎同时缓慢漏气的情况,进而启动自动补偿充气设



(a) 夏天



(b) 冬天

图 8 在夏天和冬天不同漏气情况下 轮胎振动频率-故障聚类关系

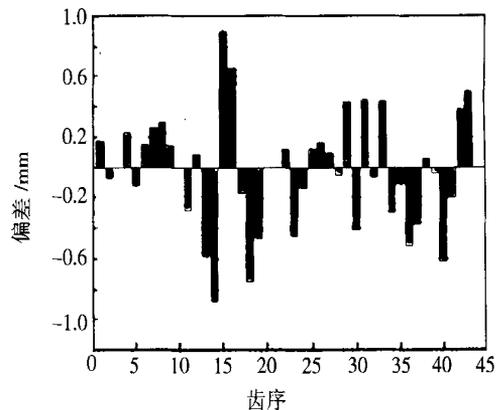


图 9 一个轮胎的花纹齿距偏差估计

备。目前这一方法需要非常精细的标定过程,我们尝试引入质量工程中的 SPC (Stochastic Process Control) 方法,对现有算法进行改进。

由于虚拟传感器仅需要模型和算法,一旦通讯和计算资源问题得以解决,各种不同特点的虚

拟传感器可以并存融合,同时虚实传感器可以相互结合,通过“投票”或其它算法获取有用的参数或信息,实现对轮胎、车辆和路面的状态进行准确可靠和容错的连续监控。在此基础上,可进一步开发各种事故诊断、预测防止和维护服务的算法体系。

4 基于 GPS/INS 信号的监测系统

目前欧美各国的高中档轿车大多都带有全球定位系统 GPS 以及相应的地理位置系统 GIS,但这些系统现在只能用来导航、防盗和救护等服务。利用 GPS 信号及惯性导航系统 INS 信号对车轮和路面摩擦状态进行估算是近年来新兴的研究课题^[5]。

基于 GPS/INS 信号的轮胎监测系统的特点是可提供车辆的绝对运动信息,这一信息同时包括纵向和横向运动。而前面讨论的方法只能测量和利用相对纵向运动信息,利用上节的虚拟传感方法往往涉及较为复杂的运动建模及相应的微分方程。同时,在许多关键情况下,如大滑动或高速时,测量噪声往往使二次虚拟估算无效。由于车辆纵向和横向运动轨迹都和轮胎与路面的摩擦有关,因此利用 GPS/INS 信号计算纵向或横向运动轨迹的变化,进而推算轮胎的摩擦因数和其参数都是可行的。一般来说,利用纵向运动信息比较简单,而横向则比较复杂。必须指出的是,利用 GPS 和 INS 信号还可以获取许多其它关于车辆状态和路面条件的信息。

一般 GPS 信号由于受大气条件、人工噪声以及其它随机干扰的影响,定位精度不是很高,但通过微分校正,精度可大大提高,即所谓的 DGPS 技术。不过,在不加微分校正的情况下, GPS 仍可提供很高精度的三维速度信息,包括转动、偏动和波动速率等。另一方面,由于一般 GPS 信号的更新频率不是很高(通常每秒一次),特别在高速行驶情况下需要连续补偿,这可以通过可提供连续信号的 INS 单元来实现。反过来,利用 GPS 信号可以对不具有长期稳定性的 INS 信号加以校正,提高共同精度。我们的 GPS/INS 试验模块采用

基于无线电台的 DGPS 系统和光纤陀螺仪。

由于轮胎情况和轮胎/道路条件可通过前述方法进行估算,这里研究的重点是如何利用 GPS/INS 信号估计车辆的整体状态,特别是车轮滑动、车体侧滑角度和轮胎侧滑角度的估算。这些是目前汽车电子稳定性控制所必需的信息,同时也很难直接测量,需要通过昂贵的专用相对地面速度传感器才能获得。

车轮滑动的确定比较简单,主要是通过 GPS 测出的纵向车速与重度刹车和加速时车轮速度传感器测出的车轮速度值之间的差别来计算。同时,在正常行驶时利用 GPS 信号不断校正车轮速度传感器,提高滑动估算精度。

车体侧滑角度是指车辆前进方向与车辆质心行驶方向之间的差别,其确定步骤相对复杂。车辆行驶方向首先由 GPS 速度测量来确定,而前进方向则通过进一步综合陀螺仪测出的偏转角速度来确定。但是如果车辆的波动较大,则必须在 GPS 测出的速度中减去由于波动而引起的速度分量。这一分量一般要通过波动轴向陀螺仪测出的波动速率来计算。

轮胎侧滑角度是指轮胎纵向轴与其行驶方向之间的差别。每条轮胎的行驶方向都可通过车辆的几何模型将 GPS 天线处的车辆速度转换至轮胎处的速度来确定,而轮胎的方向则通过已知的车辆前进方向和车轮相对于车辆的位置的测量来确定。

以上确定车辆状态的算法都是通过 Kalman 滤波方法来实现的。表面看来,这些状态的确定与智能轮胎的研究没有直接的关联,但本质上它们是密切相关的,因为只有轮胎情况、道路条件和车辆状态的整体组合才能提供行车安全的完整信息。因此 GPS/INS、轮胎传感器和虚拟传感器三位一体才能比较全面地确保车辆行驶的安全。同时,三类传感和估算方法的一体化组合也是下一步开展汽车电子系统研发的基础。图 10 示出利用多种传感器进行数据综合、支持各种汽车电子系统的综合策略。

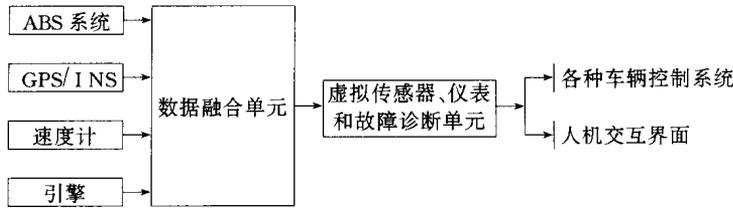


图 10 多种传感器的数据融合和各种汽车电子系统的综合集成

致谢:本项目部分由国家计委和中科院“海外杰出人才引进计划”和国家自然科学基金委“国家杰出青年研究基金”课题组以及三角集团资助完成,特致鸣谢。

参考文献:

[1] Pohl A. Monitoring the tire pressure at cars using passive SAW sensors[A]. Proc. IEEE Ultrasonics Symp. Toronto, Canada: 1997.

[2] Ruppel C W. SAW devices for consumer communication applica-

tions[J]. IEEE Tran. Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control. 1993, 40(5):12.

[3] Wit C C. A new model for control of system with friction[J]. IEEE Trans. Automatic Control. 1995, 40(3):48.

[4] Li L, Wang F Y. Observer design for virtual sensor of road/tire friction conditions[A]. Proc. of ICOSYS. Brasil:2002.

[5] Hahn J. GPS-based real-time identification of tire-road friction coefficient[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology. 2002, 40(3):51

第 12 届全国轮胎技术研讨会论文(二等奖)

山东泰山轮胎有限公司挂牌成立

中图分类号:F271 文献标识码:D

2002 年 9 月 19 日,山东泰山轮胎有限公司正式挂牌成立。肥城市委书记朱玉合,市委副书记、市长刘卫东为新公司揭牌。

泰山轮胎有限公司董事长、总经理翟远新在公司揭牌仪式上讲了话。他指出,根据市委、市政府要求,本着对职工、企业及国家负责的原则,广泛发动群众,统一认识,先后完成了人员摸底、资产评估和方案制定工作,并将方案印发给全体职工进行讨论修改,提交职代会通过,全体职工按个人入股申请足额缴纳出资,共募集股本 1 125 万元。新公司的筹备严谨有序,扎实稳妥,既维护了职工利益,又把市政府的要求落到了实处,实现了生产经营和职工思想的双稳定。

肥城市市长刘卫东在揭牌仪式上讲话时指出,作为原化工部专业轮胎定点企业,泰山轮胎厂走过了 30 多年的发展历程。特别是 1999 年划归地方以来,企业领导带领广大干部职工,认真实施“稳中求快,造大培强”的发展战略,使企业不仅成为肥城市工业经济的顶梁柱,而且跨入泰安市实施的“13511”工程行列。山东泰山轮胎有限公司的成立是泰山轮胎厂加快建立现代企业制度、加

速企业改革与发展迈出的关键一步,也是肥城市纵深推进改革改制、全力建设工业强市所取得的又一重大成果。他希望山东泰山轮胎有限公司按照“十五”期间的既定目标和思路,进一步抢抓机遇,乘势快上,切实以全新的机制和更加强劲的步伐跨跃前进;特别要建立健全规范的法人治理机构;搞好制度创新、技术创新和产品创新,增强企业综合竞争力,使企业发展再上新台阶。

(山东泰山轮胎有限公司 郭泗耀供稿)

河北轮胎有限责任公司大胎车间建成投产

中图分类号:F273 文献标识码:D

河北轮胎有限责任公司 2002 年的技改重点项目——新建大胎车间于 10 月 16 日竣工投产。新车间主要生产工程机械轮胎、大型农业轮胎等产品,设计年生产能力为 5 万套,新增产值 1 亿多元。此项工程在建设充分体现了快、好、省的原则,从设计到投产只用了 6 个月的时间。大胎车间的建成投产为该公司增添了一个新的经济增长点。

(河北轮胎有限责任公司 王向仁供稿)