

智能轮胎的垂向力预测应用研究

王 岩¹, 林炳钦^{1,2}, 梁冠群¹, 危银涛^{1*}

(1. 清华大学 汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084; 2. 青岛理工大学 机械与汽车工程学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 选用MEMS加速度传感器搭建智能轮胎的硬件测试系统, 并利用该系统实现对轮胎垂向力的预测。为了获取各种工况下的智能轮胎传感器数据, 同时对预测算法进行验证, 分别进行了转鼓台架试验和实车试验。结果表明, 基于智能轮胎的垂向力预测算法具有较高的精度, 可以满足工程应用要求。

关键词: 智能轮胎; 垂向力; 多传感器融合; 预测算法

中图分类号: TQ336.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-8171(2019)02-0117-05

DOI: 10.12135/j.issn.1006-8171.2019.02.0117

车辆安全问题一直是汽车行业的焦点问题, 特别是在智能汽车时代, 如何实现实时监控车辆运行与道路状况至关重要。轮胎是汽车与道路接触的唯一部件, 传递着车辆运动所需的力和力矩, 轮胎对于车辆的动力性、舒适性、安全性和经济性等多方面都有着重要的影响, 因而实现对轮胎力的监测或估算非常重要^[1-3]。然而受限于技术手段与成本因素, 对于普通的商用车与乘用车, 直接测量轴头的力或轮胎与路面接触的力并不现实。目前车辆底盘控制系统均是通过车辆动力学模型推导, 采集车辆的特性参数(质量和质心位置等)和车辆运动状态参数(车身的三向加速度)等信息实现对轮胎力的估算, 这种非直接估算方式存在一定的误差。随着传感器和电子技术的发展, 通过在轮胎内部埋入传感器监测轮胎运行的动态信息, 实现对轮胎状态参数的获取, 从而提供了直接测量轮胎力的方式。

尽管经过数十年的发展, 轮胎本质上仍然是一个“被动”的部件, 即轮胎运行过程中所受到的轮胎力和力矩、轮胎与路面的接触状况均是未知且无法直接获取的。智能轮胎, 即是将微型传感器埋入轮胎内部, 直接监测轮胎的各项参数(轮胎胎压、胎温、六分力、轮胎-路面附着系数)等信息, 并提供给车辆的动力控制系统, 额外的信息将极

大地提高底盘控制系统的性能^[4-5]。近年来, 智能轮胎技术逐渐受到关注, 除了现有的胎压监测系统以外, 各国学者纷纷投入到智能轮胎系统的开发与应用中, 他们尝试采用不同种类的传感器, 包括光学传感器^[6]、霍尔传感器^[7]、压电型传感器^[8]、表面声波传感器^[9]和加速度传感器^[10]等, 也取得了一定的研究成果。智能轮胎技术的核心在于如何将传感器测量得到的量转换为车辆底盘控制系统真正需要的轮胎动力学信息及轮胎-路面接触信息^[11-15]。

通过对比不同类型的传感器优缺点, 由于加速度是与轮胎力直接相关的运动学参数, 且MEMS加速度传感器尺寸小, 成本较低, 可靠性较高, 因此本工作选用MEMS加速度传感器搭建智能轮胎的硬件测试系统, 并利用该系统实现对轮胎垂向力的预测。轮胎垂向力是轮胎模型和车辆底盘控制系统中的重要输入参数之一, 垂向力的变化将极大地影响轮胎的纵向力与侧向力, 进而影响整车的运动。同时由于车辆超载带来的交通安全事故也迫切需要车辆的载荷监测预警系统。因此, 实现轮胎的垂向力预测具有重要的学术研究与工程应用意义。

本文首先介绍智能轮胎的硬件系统构架, 随后进行了转鼓台架试验和实车试验, 台架试验用来采集不同工况下的传感器信号, 以用于对标算法, 实车试验则用来验证算法的准确性。基于轮胎滚动的变形过程, 构建了智能轮胎垂向力预测算法框架, 由加速度信号反推轮胎垂向力。

作者简介: 王岩(1992—), 男, 江苏南通人, 清华大学在读博士研究生, 主要从事智能轮胎的理论与应用研究。

*通信联系人(weiyt@tsinghua.edu.cn)

1 智能轮胎硬件系统

将MEMS加速度传感器粘贴在轮胎内衬层中央部位,粘贴位置如图1和2所示,以监测轮胎该点处的三向加速度信号。

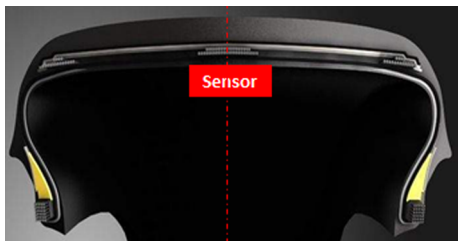


图1 传感器安装位置(红色位置)

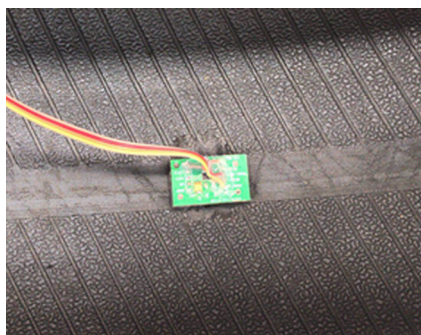


图2 MEMS加速度传感器

在车辆行驶过程中,粘贴位置点不断地接地离地造成加速度信号的不断变化。当施加的轮胎垂向力变化时,加速度信号会呈现不同的变化规律,从而借助加速度信号实现轮胎垂向力的预测估算。由于MEMS传感器尺寸小、质量小、可靠性高,使用特制胶水将其粘接在轮胎内壁,不会影响轮胎动态均衡性,也不会改变轮胎原有的特性。MEMS加速度传感器的技术指标如下:量程 $\pm 200\text{ g}$,采样频率 $200\sim 3\,200\text{ Hz}$,分辨率 $100\text{ mg}\cdot\text{LSB}^{-1}$,尺寸 $3\text{ mm}\times 3.25\text{ mm}\times 1.06\text{ mm}$,质量 0.3 g ,其量程和频率均满足目前试验的使用要求。

由于轮胎内部的严苛使用环境要求以及产品化使用需求,本智能轮胎系统采用无线数据传输技术,实时存入电脑以方便后续进一步处理,从而减小了不必要的线束,保证了系统的可靠性。目前采用可无线充电的锂电池进行电量供给,未来将采用无源技术以扣除额外的电源,使系统更加简单便捷。

智能轮胎硬件系统构架如图3所示。

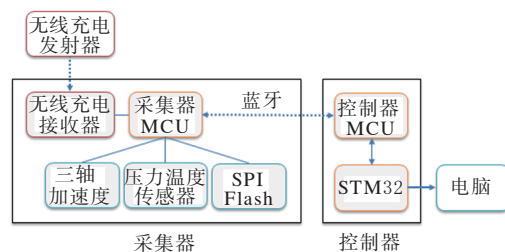


图3 智能轮胎硬件系统构架

2 智能轮胎试验方案

选用固特异的一款205/55R16轿车轮胎,将传感器系统置入轮胎内部,从而开发了后续试验所需的智能轮胎系统。

为了进行轮胎垂向力预测算法的开发,需要进行试验以获取各种工况下的智能轮胎传感器数据,同时需要对预测算法进行验证,因而分别进行了转鼓台架试验和实车试验。

2.1 转鼓台架试验

转鼓台架试验采用天津久荣工业技术有限公司的耐久性试验机进行,耐久性试验机方便改变轮胎的负荷和滚动速度,使轮胎在不同工况(充气压力、滚动速度和负荷)下匀速稳定滚动,如图4所示。



图4 智能轮胎转鼓台架试验

2.2 实车试验

将本智能轮胎系统安装在某款轿车上进行测试;同时为了实时获取车辆行驶过程中轮胎的垂向力变化情况,采用KISTLER随车六分力测试系统,以测量轮胎的三向力,如图5所示。

为了预测垂向力,进行了直线行驶工况试验,选取平直沥青路面,不断地改变轮胎的充气压力和车辆的行驶速度,以校核不同工况下预测算法的普适性,如图6所示。



图5 KISTLER六分力传感器



图6 智能轮胎实车试验

3 智能轮胎垂向力预测算法

3.1 垂向力测量原理

根据SWIFT TIRE轮胎模型,垂向力和胎压的变化将改变接地印痕的长度和宽度,它们存在如下函数关系。

$$a = R_0 [a_1 (\frac{F_z}{C_z R_0})^m + b_1 (\frac{F_z}{C_z R_0})^n] \quad (1)$$

式中, a 为接地印痕半长, R_0 为轮胎自由滚动半径, F_z 为垂向力, C_z 为垂向刚度, a_1 和 b_1 为待拟合的系数, m 和 n 为待拟合的次数。

由式(1)可以得到,轮胎与地面接触时接地印痕长度与轮胎的垂向力和垂向刚度有关,轮胎接地印痕长度随垂向力的增大而增大,随垂向刚度的增大而减小。而垂向刚度随胎压的增大而增大,则接地印痕长度随胎压的增大而减小。子午线轮胎的接地印痕宽度随垂向力和垂向刚度的变化改变较小。而垂向刚度与胎压有关,轮胎的滚动速度也会影响自由滚动半径。试验结果表明,轮胎滚动的接地印痕也会随着轮胎的滚动速度而发生变化^[16],如图7所示。

如果能通过传感器获得轮胎的胎压、滚动速度和接地印痕长度,便可反推计算轮胎的垂向



图7 垂向载荷与胎压、接地印痕和滚动速度的关系

力。因此,垂向力预测的核心在于推导其关于胎压、滚动速度和接地印痕的物理关系,即:

$$F_z = f(P, v, a) \quad (2)$$

式中, P 为胎压, v 为滚动速度。

3.2 轮胎接地印痕长度的加速度表征

图8所示为实测采样得到的径向加速度信号。从图8可以看出,径向加速度信号呈现周期性,其周期对应了轮胎滚动一周。

图9所示为三向加速度信号随着轮胎滚动的变化情况。紫色曲线为径向加速度信号,绿色曲线为纵向加速度信号,褐色曲线为侧向加速度信号。

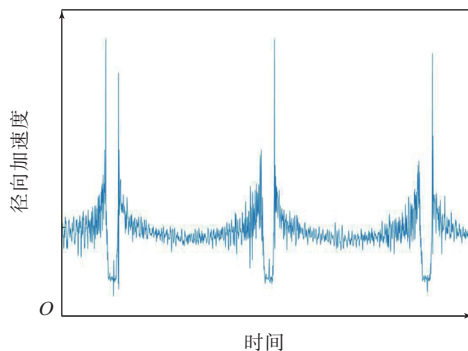


图8 实测径向加速度

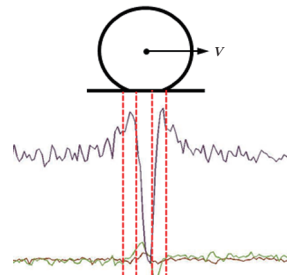


图9 加速度印痕与轮胎接地印痕长度的关系

从图9可以看出,在轮胎滚动过程中传感器测量的侧向加速度信号变化不大,而纵向加速度和径向加速度变化较大,这与轮胎滚动时与路面接触发生的弹性变形有关。

对于纵向加速度,当传感器粘接位置处于非接地区域时,保持在零附近;而当接地时轮胎表面橡胶发生瞬时压缩,而离地时瞬时拉伸,从而造成加速度瞬时增大,且接地离地加速度方向相反。

对于径向加速度,跟踪加速度计粘贴位置点 P ,当该点跟随轮胎旋转时开始进入接地区域,由于完整的圆周运动受到地面阻碍,轮胎产生变形,在向心加速度上还要附加由于形变产生的加速度,形变逐渐加速累积,加速度增大。当点 P 所在位置的轮胎外沿与地面完全接触时,轮胎局部与地面保持平行,此时直线运动无向心加速度,没有变形也不存在加速度,整体加速度在出现峰值后会突然下降,然后保持较平的谷底,之后离开接地区域的过程与此相反,出现另一个对称的峰值,之后逐渐下降保持在一个常值附近。

纵向与径向加速度的变化对应着轮胎滚动时的接地范围。由于纵向加速度变化程度较小且容易受到噪声的影响,在低速时纵向加速度变化会被噪声淹没。最终选用径向加速度以计算轮胎滚动时的接地印痕长度;向心加速度可以计算轮胎的滚动速度,峰值波动区域用来计算接地印痕长度,加之胎压传感器监测的胎压,结合上述的物理表征模型,便可实现利用智能轮胎传感器测量的数据预测轮胎滚动时所受垂向力的目标。

3.3 垂向力预测结果

基于上述的硬件测试系统与智能轮胎垂向力预测算法,对实车测试得到的数据进行分析计算,从而预测出车辆行驶过程中的轮胎垂向力。

图10所示为某一行驶工况,蓝色曲线为随车六分力传感器在轴头处采集得到的垂向力信号,红色曲线为利用智能轮胎预测的轮胎垂向力。结果表明,智能轮胎在能够准确地预测垂向力的同时,还能反映垂向力的变化情况。对实车测试进行的12组不同行驶速度与胎压情况下的预测结果进行分析,分别计算一段时间内智能轮胎垂向力的预测均值与实测均值,结果如表1所示。

从表1可以看出,预测值与实测值的相对误差

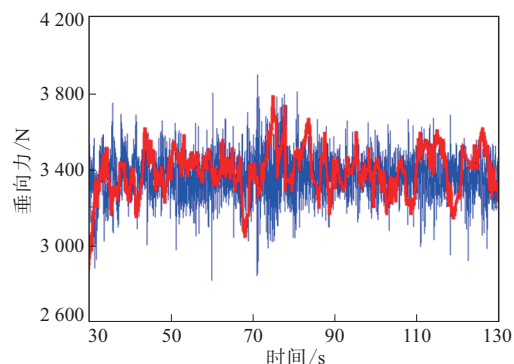


图10 智能轮胎垂向力预测结果

表1 智能轮胎垂向力预测精度

工况	预测均值/N	实测均值/N	相对误差/%
1	3 287.0	3 316.6	0.89
2	3 443.1	3 313.7	3.91
3	3 316.5	3 288.9	0.84
4	3 301.8	3 340.9	1.17
5	3 405.3	3 324.9	2.42
6	3 291.0	3 319.4	0.86
7	3 300.2	3 358.0	1.72
8	3 405.7	3 354.2	1.54
9	3 387.8	3 375.0	0.38
10	3 441.8	3 366.1	2.25
11	3 334.1	3 365.8	0.94
12	3 249.1	3 362.0	3.36

均在4%以下,这说明基于智能轮胎加速度信号预测轮胎垂向力的方法具有较高的精度与可靠性。

4 结论

本工作搭建了基于多传感器的智能轮胎硬件系统,其核心器件为MEMS加速度传感器,安装在轮胎内衬层中央位置;提出了智能轮胎垂向力预测算法,将传感器测量得到的加速度(运动学)信息转化为车辆控制系统的轮胎受力(动力学)信息;进行了转鼓台架试验,采集不同工况下的轮胎运动学信息,并将智能轮胎装车进行实车试验,以验证算法。基于智能轮胎的轮胎垂向力算法可以实现对轮胎力的准确预测,具有较高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] Pacejka H. Tire and Vehicle Dynamics (Third edition) [M]. Elsevier's Science and Technology Rights Department in Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2012.
- [2] 许志超,周福强,危银涛,等. 商用车轮胎通过噪声与温度、速度和

- 花纹关系的实验研究[J]. 橡胶工业, 2017, 64(11): 655-659.
- [3] 崔志博, 王友善, 吴健, 等. 接地特性对轮胎纯侧偏六分力影响的数值研究[J]. 橡胶工业, 2017, 64(11): 678-682.
- [4] Lee H, Taheri S. Intelligent Tires—A Review of Tire Characterization Literature[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017, 9(2): 114-130.
- [5] Matsuzaki R, Todoroki A. Wireless Monitoring of Automobile Tires for Intelligent Tires[J]. Sensors, 2008, 8(12): 8123.
- [6] Tuononen A J, Matilainen M J. Real-time Estimation of Aquaplaning with an Optical Tyre Sensor. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D[J]. Journal of Automobile Engineering, 2009, 223(10): 1263-1272.
- [7] Yilmazoglu O, Brandt M, Sigmund J, et al. Integrated InAs/GaSb 3D Magnetic Field Sensors for “The Intelligent Tire” [J]. Sensors & Actuators A: Physical, 2001, 94(1-2): 59-63.
- [8] Ryosuke Matsuzaki, Akira Todoroki, Hideo Kobayashi, et al. Passive Wireless Strain Monitoring of a Tire Using Capacitance and Electromagnetic Induction Change[J]. Advanced Composite Materials, 2003, 14(2): 147-164.
- [9] Pohl A, Steindl R, Reindl L. The “Intelligent Tire” Utilizing Passive SAW Sensors Measurement of Tire Friction[J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 1999, 48(6): 1041-1046.
- [10] Federico Cheli, Edoardo Sabbioni, Pesce M, et al. A methodology for Vehicle Sideslip Angle Identification: Comparison with Experimental Data[J]. Vehicle System Dynamics, 2007, 45(6): 549-563.
- [11] Braghin F, Brusarosco M, Cheli F, et al. Measurement of Contact Forces and Patch Features by Means of Accelerometers Fixed Inside the Tire to Improve Future Car Active Control[J]. Vehicle System Dynamics, 2006, 44: 3-13.
- [12] Savaresi S M, Tanelli M, Langthaler P, et al. New Regressors for the Direct Identification of Tire Deformation in Road Vehicles Via “In-Tire” Accelerometers[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(4): 769-780.
- [13] Sakaguchi K, Suzuki M, Matsubara T, et al. Optimal Tire Force Allocation by Means of Smart Tire Technology[J]. SAE International Journal of Passenger Cars—Mechanical Systems, 2013, 61(1): 163-176.
- [14] Christian Oertel, Wei Y T. Tyre Rolling Kinematics and Prediction of Tyre Forces and Moments: Part I: A Theory and Method[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(11): 1673-1687.
- [15] Wei Y T, Christian Oertel, Shen X L. Tyre Rolling Kinematics and Prediction of Tyre Forces and Moments: Part II: A Simulation and Experiment[J]. Vehicle System Dynamics, 2012, 50(11): 1689-1706.
- [16] Hong H N, Cesbron J, Anfosso Ledee F, et al. Dependence of the Contact Area on the Velocity of a Rolling Tire[J]. Journal of the Acoustical Society of America, 2009, 123(5): 3868.

收稿日期: 2018-10-11

Tire Vertical Force Estimation based on Smart Tire System

WANG Yan¹, LIN Bingqin^{1,2}, LIANG Guanqun¹, WEI Yintao¹

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, China)

Abstract: The hardware test system of smart tire was built by using the MEMS accelerometer, and the tire vertical force was predicted by the system. In order to obtain the data of smart tire sensor under various working conditions, and verify the prediction algorithm, the drum bench test and vehicle experiment were carried out respectively. The results showed that, the vertical force prediction algorithm based on smart tire had high accuracy, and could meet the requirements of engineering applications.

Key words: smart tire; vertical force; multi-sensor fusion; prediction algorithm

一种轮胎外观检测方法

由苏州光图智能科技有限公司申请的专利(公开号 CN 108982545A, 公开日期 2018-12-11)“一种轮胎外观检测方法”, 涉及的轮胎外观检测方法包括以下步骤: (1) 对待测轮胎进行拾取和固定; (2) 通过照相机对旋转的待测轮胎进行拍摄以获得花纹面图案或侧面图案; (3) 获取

照相机所拍摄到的花纹面图案和侧面图案, 并将其与预设的轮胎比对数据进行对比分析, 判断待检测轮胎是否存在缺陷。通过该方法可以实现对轮胎的自动化检测, 提高检测效率和检测准确性, 克服现有轮胎检测技术中重复操作、界定问题难度大, 速度慢, 效率低的缺陷。

(本刊编辑部 马 晓)