智能轮胎下沉量实时监测系统设计

赵强,付宏勋,库来运,乔欢波,王岩

(山东理工大学交通与车辆工程学院,山东,淄博 255049)

摘 要:从利用轮胎下沉量表征轮胎承载状态的角度出发,设计了一款智能轮胎下沉量实时监测系统,利用单片机处理 模块实现对气压、温度、激光测距传感器的集成控制,并采用无线传输的方式将各传感器采集获取的数据传送至上位机 显示。经测试,系统工作稳定,满足基本使用要求。

关键词:承载状态;智能轮胎;下沉量;硬件设计;软件设计

中图分类号: U463.34 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.2095-1469.2022.05.08

Design of Intelligent Real-Time System for Monitoring Tire Deflection

ZHAO Qiang, FU Hongxun, KU Laiyun, QIAO Huanbo, WANG Yan

(School of Traffic and Vehicle Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, Shandong, China)

Abstract: An intelligent real-time system was designed for monitoring tire deflection which represents the tire loading status. A single-chip microcomputer module was used to achieve the integrated control of air pressure, temperature and laser ranging sensors. The data collected by each sensor was wirelessly transmitted to the upper computer for display. The test results showed the system worked stably and met the basic use requirements.

Keywords: bearing state; intelligent tire; sinking; hardware design; software design

车辆安全问题一直是人们关注的焦点。轮胎作 为汽车与路面接触的唯一部件,其稳定性的好坏对 于车辆行驶过程中的安全性、操纵稳定性等起着至 关重要的作用^[1-2]。随着智能汽车技术的发展,人 们对于车辆的主动安全性能越来越重视,催生了智 能轮胎系统这一概念^[3]。智能轮胎系统是根据需要 将不同类型的传感器嵌入到轮胎内部,获取不同的 轮胎特征,实现对轮胎状态、轮胎动力学特性以及 道路信息的判断,如胎压、轮胎力、路面附着情况等^[46]。

利用智能轮胎系统实现对轮胎承载状态的实时 监测一直以来都是研究的重点方向^[7-9],微机电系统(Micro Electro Mechanical System, MEMS)加速度传感器也凭借其体积小,成本低,可靠性高的优势得到广泛应用^[10-11]。黄小靖等^[12-13]利用三轴加速度传感器,搭建嵌入式无线智能轮胎系统,以

参考文献引用格式:

赵强,付宏勋,库来运,等.智能轮胎下沉量实时监测系统设计[J].汽车工程学报,2022,12(5):633-639. ZHAO Qiang, FU Hongxun, KU Laiyun, et al. Design of Intelligent Real-Time System for Monitoring Tire Deflection[J]. Chinese

Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(5):633–639. (in Chinese)



收稿日期:2021-09-14 改稿日期:2021-10-09 基金项目:国家自然科学基金(52002231)

径向加速度信号为特征,辨识轮胎接地印迹长度, 并建立垂向载荷与接地印迹长度的关系,实现对轮 胎垂向载荷的测量。赵健等^[14]利用三轴加速度信 号的典型特征,通过 BP 神经网络算法对轮胎力进 行了估算。XU Nan 等^[15]基于 RPROP(Resilient Backpropagation)算法,使用加速度传感器采集的 数据和实测的轮胎力训练神经网络,实现了在不同 驱动条件下轮胎力的预测。虽然加速度原理已经得 到广泛应用,但加速度传感器对路面噪声较为敏 感,会加大提取有效数据特征的难度,因此,后续 研究工作中还需针对智能轮胎系统的工作原理作进 一步的探究。

为此,本文设计了一款智能轮胎下沉量实时监测系统,通过轮胎内部温度、气压及测距传感器, 实现对不同工况下轮胎下沉量的实时测量,并通过 无线传输的方式将测量结果传至上位机实时显示, 以此判断轮胎在不同工况下的承载状态。

1 系统设计基础

轮胎下沉量的大小可直接反映轮胎的承载情况,轮胎等效下沉量计算公式为:

$$d = \frac{F}{K_z} \, \circ \tag{1}$$

式中: *d*为下沉量, mm; *F*为径向载荷, N; *K*_z为 径向刚度, N/mm。相关研究表明,轮胎的径向刚 度与轮胎充气压力具有直接联系^[16],当轮胎的充 气压力一定、施加载荷较小时,轮胎径向下沉量与 载荷呈非线性增长趋势;当载荷增加至一定数值, 且该值小于普通乘用车整备质量作用下单条轮胎所 承受的载荷时,轮胎径向下沉量与载荷就会呈近似 线性的增长趋势,即*K*_z基本保持恒定。因此,当 *K*₂处于基本恒定状态时,利用传感器技术实现对轮 胎充气压力和下沉量的测量,通过式(1)即可实 现对轮胎承载情况的实时监测,保证车辆行驶的安 全性。

从目前智能轮胎系统开发中使用不同类型传感 器测量轮胎特定部位变形中得到的启发,提出设计 一款智能轮胎下沉量实时监测系统,利用安装在轮 胎内部的测距、气压和温度传感器实时获取的轮胎 下沉量、充气压力及温度,实现对轮胎承载状态的 判断。轮胎下沉量测量原理如图1所示。



图1 轮胎下沉量测量原理图

由图1可知,测距传感器固定安装在轮辋表 面,当轮胎未充气且未加载时,测距传感器测得的 数据为d₀。将轮胎充气并安装在汽车上后,轮胎受 胎压和垂直载荷的影响发生变形。在轮胎滚动过程 中,当测距传感器测量点滚动至轮胎接地区域中心 位置时,传感器测得的数据为d₁。此时对比前后测 得的数据即可计算得到轮胎产生的下沉量为d:

d =

$$d_0 - d_{1\circ} \tag{2}$$

2 系统硬件设计

智能轮胎下沉量实时监测系统硬件结构主要包括:电源模块、测距模块、胎压测量模块、温度测 量模块、无线通信模块以及上位机组成。系统结构 如图 2 所示。



2.1 单片机处理模块

单片机处理模块选用STM32F103最小系统板,

搭载 STM32F103ZET6芯片, 主要用来实现对其他 各个传感器的集成控制, 接收处理传感器采集的数 据。本设计所应用到的硬件资源有模拟数字转换器 (Analog to Digital Converter, ADC)、集成电路总 线(Inter-Integrated Circuit, IIC)、串口、USB 转 串口接口、5 V、3.3 V 电源输入输出接口、通用 IO口。

2.2 测距模块

本设计选用的测距模块为VL53L0X激光测距 传感器,主要实现对轮胎下沉量的实时测量。该传 感器是基于飞行时间(Time of Flight, TOF)原理 的激光测距传感器,并且采用了第2代Flight Sense 技术,通过测量光子从发射到被障碍物反射飞回的 飞行时间,根据光速计算获取距离,从而实现直接 测距的功能。同样,根据不同的测量需求,传感器 具有默认、高精度、长距离、高速4种测量模式, 最高精度为±1 mm,且体积小,质量轻,整体满足 使用要求。此外,激光测距传感器模块自带 2.8 V 超低压差稳压芯片,可选用 3.3 V/5 V 电源为 VL53L0X芯片供电,其工作原理如图3所示。



图 3 激光测距传感器模块原理图

2.3 胎压测量模块

胎压测量模块主要用来实现对轮胎内部充气压 力的测量,选用了型号为RSCM17100KP501的气 压传感器。该传感器的气压量程为0~500kPa,能 够充分满足使用要求,其内部包含了温度补偿、自 动校准和差分放大等电路,可以直接输出1个0.5~ 4.5 V的模拟电压信号,该信号和气压测量值呈线 性的对应关系,单片机处理模块的ADC口读取该 电压后便可计算获取相应的压力值。

2.4 温度测量模块

温度测量模块主要用来监测轮胎内部温度。轮 胎在正常运行过程中,最高温度可以达到110℃, 所以系统中的温度传感器须具有足够大的量程,同 时体积也要足够小。DS18B20是美信公司出品的一 款温度传感器,量程为-55~125℃,体积小质量 轻,可以满足设计要求,采用单总线方式输出数字 信号,与单片机通信简单且抗干扰性高。

2.5 无线通讯模块

对于该系统而言,无线通讯模块必须具有体积 小、能耗低、传输速率满足需求的特点,蓝牙传输 正好满足这一要求。本设计中采用基于蓝牙4.2协 议标准的JDY-16 蓝牙模块进行无线数据传输,该 模块可以将单片机处理后的数据按照蓝牙4.2的 BLE协议打包成数据帧,通过天线进行数据发送, 实现与手机等上位机的无线通信。

2.6 电源模块

电源模块选用12V锂电池为整个系统供电。

3 系统软件设计

本设计采用的单片机处理模块为STM32,其开 发软件为Keil MDK5,编写程序使用的语言为C语 言。轮胎滚动过程中,整个系统需要激光测距传感 器进行连续数据测量并输出数据,以保证准确地获 取表征轮胎下沉量的有效数据。相比之下,轮胎内 部的充气压力和温度的变化过程相对缓慢,无需进 行连续测量和输出。因此,整个系统以激光测距传 感器的数据采集输出次数为基准循环工作,以提升 系统工作效率。

智能轮胎下沉量实时监测系统工作流程如图4所 示。系统开始工作后,首先定义表征输出测距数据 次数的变量*t*,单片机初始化后,激光传感器进行初 始化并配置测量模式,开始进行第1次测量并输出测 量数据。当输出的测量数据次数小于100次时,系统 会继续进行测距循环,直至输出100次测距数据后, 系统开始执行1次温度和气压测量并输出相关数据, 然后*t*将被置0,整个系统进入下一个工作循环。



汽车工程学报



3.1 激光测距传感器程序设计

对VL53L0X激光测距传感器进行的编程,主要实现了通过IIC通讯获取测量数据。

3.2 A/D转换程序设计

气压传感器主要使用 STM32 的 ADC 功能进行 数据的采集。本设计中使用具有 AD 转换功能的 PA1 引脚作为电压信号的输入引脚,进行单次转换 的配置。软件编程的详细步骤为:

(1) PA1对应的 ADC 为 ADC1、2、3,可以选择其中任意一个进行 AD 转换。本设计中开启 ADC1,使能 ADC1 的通道时钟。

(2)设置分频因子为6分频。设置PA1为模拟 通道输出引脚,复位ADC1。

(3)初始化结构体。选择 ADC 工作模式,设 置为单通道模式单次转换。选择 AD转换的触发信 (4) 开启 ADC1, 然后复位校准寄存器。等待 复位完成后开启 AD 校准,等待校准完成。

(5) 读取 ADC 值。在上面的校准完成之后, ADC 初始化完成。然后配置 ADC 通道转换顺序和 时间,设置采样周期为55.5。设置为转换结束后开 启中断,在中断中读取数据。开启中断后通过中断 函数返回数据,然后清除中断标志。AD转换流程 如图5所示。



通过以上几个步骤的设置,可以使用 STM32 的 ADC1 的 1 通道,将 PA1 引脚输入的模拟电压信 号 AD转换为 12 位数字信号。测得电压 V 与数字信 号 V_{AD}的关系为:

$$V = \frac{V_{\rm AD}}{4\,096} \times 3.3_{\,\circ} \tag{3}$$

式中:4096为2的12次方,由数字信号的位数决定;3.3为单片机的工作电压。测得电压值之后,可计算得到气压,kPa。

P = (V - 0.553) × 125 + 101。
式中: 0.553 为传感器的基础电压,每个传感器略
有不同,需要单独测量校准; 125 为转换系数,是

固定值; 101为标准大气压值。

3.3 温度传感器程序设计

DS18B20数字化温度传感器测量数据直接以 "一线总线"的数字方式传输,可以使用STM32单 片机直接读出被测温度,并且可根据实际要求通过 简单的编程实现9~12位的数字值读取。使用 DS18B20时,需要单片机与其通讯时遵循非常严格 的信号时序,以保证数据完整性,并且可以提高抗 干扰的能力。温度读取过程如图6所示。



图6 温度读取流程

4 系统功能测试

根据上述对系统硬件软件的设计,搭建系统硬件系统,测试系统功能的稳定性。硬件系统实物连接图及上位机数据显示界面如图7-8所示。

整个系统所用到的引脚及其对应功能, 见表1。



图7 硬件系统实物连接图

接收数据 实时显示 ()保存至文件		
接收:9203 Byte 实时速度:0 B/s	HEX	
接	度收通知数据 💿	
0=147 d=148 d=148 t=25.5 p=100 d=147 d=146		
关闭	清空	

图 8 上位机数据显示

目前,整个系统尚未完成集成化设计,系统模 块线束较多,不便于安装固定到轮胎内部轮辋表 面,且系统的综合性测试需要在多工况下进行,试 验过程复杂。为了能够快速验证系统功能的稳定 性,为下一步的集成化设计提供参考,在目前实验 室条件下,以间接测量的方式,首先对轮胎下沉量 进行测量验证。

表1 引脚连接关系及功能

引脚编号	GPIO	连接关系及功能
35	PA1	与气压传感器 Vout 引脚连接,是 ADC 输入引脚,接收输入的模拟电压信号
36	PA2	与激光测距传感器的SDA引脚连接,串口2TX脚,单片机串口2的时钟信号发送
37	PA3	与激光测距传感器的SCL引脚连接,串口2RX脚,单片机串口2的数据接收
41	PA5	与激光测距传感器的XSHUT引脚连接,输出片选信号
101	PA9	串口1TX脚,用于连接CH340的RX
102	PA10	串口1RX脚,用于连接CH340的TX
103	PA11	与温度传感器的DQ引脚连接,与温度传感器进行通信
69	PB10	与蓝牙模块的RXD引脚连接,串口3TX脚
70	PB11	与蓝牙模块的TXD引脚连接,串口3RX脚

将轮胎固定到静态加载试验机上。为了获得相同的试验效果,将1块长方形塑料板粘在轮辋上, 安装时下表面与地面平行,当轮胎发生径向变形时,塑料板到地面的距离会发生变化,变化量与轮 胎下沉量相等。同时,将激光测距传感器通过环氧 树脂AB胶粘贴固定在塑料板底部,保证测距传感 器的安装位置、测量点以及轮胎中心在同一纵轴线 上。具体安装位置如图9所示。

在 250 kPa标准充气压力作用下,通过控制加 载试验机径向电机,直接给予轮胎不同的径向位移 量,即准确的轮胎下沉量,使轮胎发生径向变形, 同时读取保存传感器采集的数据。由于测距传感器 采集的频率为 50 Hz,且采集的数据具有一定的波 动性,因此,以 30 个数据为一个数据组,对传感 器采集到的数据作均值处理以获取一个具体的下沉 量,并与实际的下沉量进行对比分析,验证传感器 测量精度。对比分析结果见表2。



图9 轮胎下沉量测量示意图

参考文献 (References)■

[1] 董红磊,王琰,肖凌云,等.产品安全认知视域下的自动
 驾驶车辆安全探讨 [J]. 汽车工程学报,2021,11(3):
 164-170.

DONG Honglei, WANG Yan, XIAO Lingyun, et al. Exploring the Safety of Self-Driving Vehicles in the Context of Product Safety Perception [J].Chinese Journal of Automotive Engineering, 2021, 11 (3) : 164–170. (in Chinese)

[2] 李小雨,许男,仇韬,等.各向异性刚度对轮胎力学特性及车辆操纵性的影响[J].吉林大学学报(工学版), 2020,50(2):389-398.

LI Xiaoyu, XU Nan, QIU Tao, et al. Effect of Anisotropic

表2 轮胎下沉量测量结果验证分析

实际下沉量/mm	传感器测得下沉量/mm	误差/%
5	4.78	4.40
10	10.92	9.20
15	13.85	7.67
20	18.92	5.40
25	24.04	3.80
30	29.59	1.30

由表2可知,由传感器测得的下沉量与实测下 沉量之间的误差均保持在10%以内,表明该系统能 够满足测距要求。

5 结论

本文设计了一款智能轮胎下沉量实时监测系统,旨在实现对不同工况下轮胎下沉量的实时测量,以进一步实现对轮胎承载情况的实时监测,保证车辆行驶安全性,主要结论如下:

(1)基于测距原理,以直接测距的方式利用激 光测距传感器实时监测轮胎下沉量的变化,数据采 集频率快,且满足高精度的需求。

(2)利用单片机模块实现了对各个传感器的集 成控制,系统硬件设计结构简单,工作原理复杂程 度较低。

(3)系统各传感器能够稳定有序采集所需数据,且各数据能够有效地通过无线传输的方式传至上位机显示,效率及可视化程度较高。

Stiffness on Tire Mechanical Properties and Vehicle Handling [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2020, 50 (2): 389–398.(in Chinese)

- [3] 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.
 ZHANG Xiangwen, WANG Feiyue. Smart Tires—Opportunities and Challenges of Tire Intelligent Manufacturing[J].
 Science and Technology Herald, 2018, 36(21): 38-47. (in Chinese)
- [4] 王国林,丁俊杰,周海超,等.智能轮胎力的敏感响应区域及变量[J].吉林大学学报(工学版),2020,50(6): 1983-1990.

WANG Guolin, DING Junjie, ZHOU Haichao, et al. Sensitive Response Regions and Variables of Intelligent Tire Force [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2020, 50 (6): 1983–1990. (in Chinese)

[5] 王岩,梁冠群,危银涛.基于支持向量机的智能轮胎路 面辨识算法 [J].汽车工程,2020,42(12):1671-1678, 1717.

WANG Yan, LIANG Guanqun, WEI Yintao. Intelligent Tire Pavement Identification Algorithm Based on Support Vector Machine [J]. Automotive Engineering, 2020, 42 (12):1671-1678, 1717.(in Chinese)

- [6] GARCIA-POZUELO D, OLATUNBOSUN O, YUNTA J, et al. A Novel Strain-Based Method to Estimate Tire Conditions Using Fuzzy Logic for Intelligent Tires [J]. Sensors, 2017, 17(2): 350.
- [7] LEE H, TAHERI S. Intelligent Tires—A Review of Tire Characterization literature [J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2017,9(2):114–135.
- [8] ROVERI N, PEPE G, MEZZANI F, et al. OPTYRE— Real Time Estimation of Rolling Resistance for Intelligent Tyres [J]. Sensors, 2019, 19(23):5119.
- [9] ZHU Bing, HAN Jiayi, ZHAO Jian. Tire-Pressure Identification Using Intelligent Tire with Three-Axis Accelerometer [J]. Sensors, 2019, 19(11): 2560.
- [10] ZOU Zhenyu, ZHANG Xudong, ZOU Yuan, et al. Tire-Road Friction Coefficient Estimation Method Design for Intelligent Tires Equipped with Three-Aaxis Accelerometer
 [J]. SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH, 2021, 5(3):249–258.
- [11] NISKANEN A, TUONONEN A J. Three Three-Axis IEPE Accelerometers on the Inner Liner of a Tire for Finding the Tire-Road Friction Potential Indicators [J]. Sensors,

作者简介

赵强(1996-),男,山东临沂人,硕士, 主要研究方向为智能轮胎技术。 Tel: 19811735639 E-mail: zhaoqiang7375@163.com 2015, 15(8): 19251-19263.

- [12] 黄小靖,张峰,张士文,等.智能轮胎的垂向载荷测量
 [J].汽车工程,2020,42(9):1270-1276,1283.
 HUANG Xiaojing, ZHANG Feng, ZHANG Shiwen, et al. Vertical Load Measurement of Intelligent Tire [J]. Automotive Engineering, 2020,42 (9): 1270-1276, 1283.(in Chinese)
- [13] 黄小靖,张峰,张士文.嵌入式无线智能轮胎系统设计
 [J].实验室研究与探索, 2020, 39(7):84-87.
 HUANG Xiaojing, ZHANG Feng, ZHANG Shiwen.
 Design of Embedded Wireless Intelligent Tire System
 [J]. Laboratory Research and Exploration, 2020, 39 (7):
 84-87.(in Chinese)
- [14] 赵健,路妍晖,朱冰,等.内嵌加速度计的智能轮胎纵/垂向力估计算法[J].汽车工程,2018,40(2):137-142,183.
 ZHAO Jian, LU Yanhui, ZHU Bing, et al. Longitudinal/ Vertical Force Estimation Algorithm of Intelligent Tire with Embedded Accelerometer[J].Automotive Engineering, 2018, 40(2):137-142,183.
- [15] XU Nan, ASKARI H, HUANG Yanjun, et al. Tire Force Estimation in Intelligent Tires Using Machine Learning
 [J].IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 23(4): 3565–3574.
- [16] 李利,刘潇冬,肖培光,等.基于ABAQUS建模的轮胎 接地特性及静态刚度的分析研究[J].特种橡胶制品, 2016,37(4):38-43.

LI Li, LIU Xiaodong, XIAO Peiguang, et al. Analysis and Research on Tire Grounding Characteristics and Static Stiffness Based on ABAQUS Modeling[J].Special Rubber Products, 2016, 37(4):38-43.(in Chinese)

通信作者



付宏勋 (1987-), 男, 山东淄博人, 博 士, 讲师, 主要研究方向为汽车系统动力 学、轮胎安全技术。 Tel: 18253376929 E-mail: fuhongxun615@163.com