

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.003

基于加速度的汽车悬架位移实时测试方法试验研究^{*}

张小龙 潘登 姜山 陈彬 曹成茂

(安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

摘要: 采用虚拟实时控制器实现基于加速度信号的汽车悬架位移的实时测量。硬件测试系统采集器选用了工业级嵌入式系统 CompactRIO 及其 C 模块, 传感器选用了 ICP 加速度传感器、拉线位移传感器和 GPS 系统。基于 LabVIEW 完成了 FPGA 编程、控制器编程, 编程时采用了多线程和 FIFO 技术、采样数据打包时均包含了时间信息, 有效提高了数据传输的快速性和数据处理的准确性。在控制器中实现了基于 LabVIEW 的小波滤波和支持向量机 (SVM) 模型的悬架位移实时预测输出 (CAN, 100 Hz)。根据悬架下测点的加速度均方根值对 7 种典型路面等级进行了划分, 并将路面等级信息作为 SVM 模型的输入元素。对 7 种路面系统试验和数据分析表明: 选用的 ε -SVR 算法, 取 $\varepsilon = 0.01$ 时, 控制器小波滤波一个点和预测一次悬架位移耗时小于 1 ms, 满足实时性要求; 悬架位移模型预测曲线与实际测量曲线相关系数基本在 0.90 以上, 满足精度要求。

关键词: 汽车 悬架位移 加速度 实时测试 虚拟仪器 试验

中图分类号: U467.1; TP23 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)10-0015-08

Experiment on Real-time Test Method for Automotive Suspension Distance Based on Acceleration

Zhang Xiaolong Pan Deng Jiang Shan Chen Bin Cao Chengmao

(School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: Real-time measurement for automotive suspension distance based on acceleration was carried out by using virtual real-time controller. This paper set up a test system, in which the industrial embedded system CompactRIO and several C modules were employed as its hardware collector, besides typical ICP acceleration sensor, displacement sensor and GPS system were also employed. FPGA programming and controller programming using the multi-threading and FIFO method were completed in LabVIEW. The time information was contained in every sample data package, which effectively improved the speed of data transmission and the accuracy of data processing. Wavelet filter and support vector machine (SVM) model were built and embedded in CompactRIO to predict and output suspension distance (CAN, 100 Hz) in real time. The grade of seven kinds of typical roads was determined according to the RMS value of acceleration of suspension's lower measuring point, which was employed as input element of the SVM model. The road way tests and data analyses indicated that the controller consumes less than 1 ms when completing one point's wavelet filtering and predicting in which $\varepsilon = 0.01$ for ε -SVR algorithm. The relationship coefficient of the suspension displacement curves of predicted by SVR model and measured in road way tests were more than 0.90 primarily. So the system could meet the requirements of accuracy and real-time control.

Key words: Automotive Suspension displacement Acceleration Real-time measurement Virtual instrument Experiment

收稿日期: 2013-04-22 修回日期: 2013-04-26

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51105001)和安徽省高等学校省级自然科学研究重点资助项目(KJ2011A101)

作者简介: 张小龙, 副教授, 博士, 主要从事汽车轮胎力传感与动力学控制研究, E-mail: sunshine.lzh@gmail.com

通讯作者: 曹成茂, 教授, 博士, 主要从事智能检测与控制技术研究, E-mail: caochengmao@sina.com

引言

汽车悬架主要作用是传递轮胎(或车桥)对车身的作用力,但悬架的动力学特性影响汽车的操纵稳定性和平顺性。如车身侧倾和俯仰运动产生载荷转移直接改变轮胎和路面的附着状态;悬架的动扰度和对不同路面激励下的隔振特性影响乘坐舒适性。悬架系统电子控制目的是改善悬架的动力学特性和整车性能,其中悬架线位移是分析控制作用下悬架传递特性、位移特性等的重要参数^[1-3]。对悬架线位移的直接测量方法是基于线位移传感器,但车轮高频低振幅振动将导致测试精度降低且传感器容易损坏。一般期望采用加速度计的测量方法,传感器质量、体积小便于安装,且成本低,理论上通过对加速度的一次和二次积分可完成速度和位移的转换,在实际中得到广泛应用。另外,加速度信号可以直接应用于路谱分析和台架再现试验。

对加速度信号进行积分运算主要存在信号漂移、低频带宽限制、积分初始值难以确定等问题^[4-5],在时域内进行直接积分效果不好。徐庆华利用 FFT 的积分特性,基于加速度信号的 FFT 变换系数运算完成了时间域的积分运算,但没有对加速度传感器信号频谱进行处理,趋势项等仍然存在^[6]。进一步对 FFT 数值进行带通滤波,确定低频阈值,避开了加速度传感器低频信号传感精度差的影响,但能量泄漏不可避免。FFT-DDI 方法,将频域滤波和时域积分交替进行,特别是频域滤波时对 FFT 的前面的数值和最后一个数值直接赋值改变,从而有效提高了低频信号的积分效果^[7-8]。

以上方法适用于期望加速度测量方向与其敏感方向基本一致情况。汽车悬架位移,特别是现在普遍采用的独立悬架,在其悬架上支点和下摆臂处安装的加速度计初始安装方向在汽车运动过程中经常发生改变,基于以上方法产生的非原理性误差增大(可视测量噪声)。本文研究这一应用需求下的基于加速度信号的悬架位移实时测试方法。采用无相位延迟的小波滤波方法对加速度信号进行滤波,然后基于支持向量机建立悬架位移非线性测量离线模型,最后将模型参数应用于实时测量中。

1 基于 cRIO 的测试系统硬件结构

选用美国 NI 公司的嵌入式系统 CompactRIO (简称 cRIO)作为实际系统数据采集器,由 C 模块、可重新配置现场可编程门阵列(FPGA)机箱、嵌入式控制器组成。其优势是体积小、工业级设计、功能

可重新配置(LabVIEW 编程)、运行实时系统。

系统硬件框图如图 1 所示,主要包括 GPS 系统、传感器组和数据采集器等,采样数据存储在 U 盘中,数据处理可离线在 PC 机中完成,也可通过数据采集器主控制器完成实时悬架位移解算。系统主要传感器和设备性能参数及配置情况如表 1 所示。

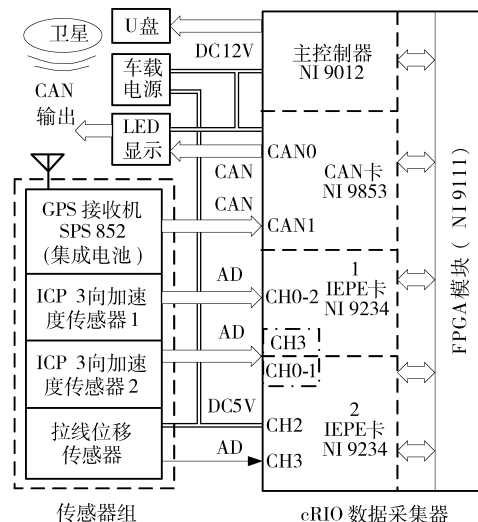


图 1 基于 cRIO 的测试系统结构框图

Fig. 1 Test system structure diagram based on cRIO

1.1 传感器组

GPS 系统采用了单点绝对定位方式,其定位精度不高,但其水平车速测量精度尚可,主要用于辅助提供车体行驶轨迹和车速信息。选用了美国 Trimble 公司的 SPS 852 GPS 接收机和 GA810 双频天线,开通了 L1、L2 双频载波信号接收功能和 CAN 数据输出功能。SPS 852 接收机 CAN 物理接口是 Lemo 口的 4 脚 (CANH) 和 5 脚 (CANL)^[9],传输波特率是 250 kb/s。在 CAN 通讯两端各并联了一个 120 Ω 的电阻以提高通讯可靠性。

对 GPS 接收机输出进行配置,选用标准 NMEA 格式输出,包括位置 (GPGGA)、速度和水平速度方向角 (GPVTG) 和定位精度 (GPGST) 等信息,通过 CAN 接口发送至数据采集器 CAN 模块,设置数据更新频率 5 Hz,实际最高可达 20 Hz。

系统选用了两个 3 向内置电荷-电压转换器的低阻抗压电式加速度传感器 ICP 356A16(美国 PCB 公司注册为 ICP,又称为 IEPE)。工作时由采集模块提供 2 mA 恒定电流,直流供电和信号输出使用同一根导线。ICP 加速度传感器具有质量小、安装可靠、抗干扰能力强可远距离测量的优势。传感器安装后,主要取其垂直地面方向的测量值,其他两个敏感方向(与汽车纵向和侧向一致)测量值仅用于过程分析。

选用拉线位移传感器用于测量悬架弹簧的压缩

拉伸变形位移,具体为美国 Firstmark Contorls 公司的型号为 161-1915 的传感器。其实质是一个可变电阻,对外输出阻值的变化与拉线长度呈正比,其灵敏度与测试系统供给的电压有关,量程为 606 mm,满量程输出为电源电压。考虑到供电电源的波动影响,系统设计时对供电电源也进行采样。

表 1 主要传感器与设备性能参数与设置
Tab.1 Performance parameters of sensors and equipments

传感器与设备		精度与性能	数据传输 物理接口	数据更新 速率	供电形式
GPS 车载接收机 和 GPS 天线	美国 Trimble SPS	RTK 定位精度 8 mm RMS;速度精度 0.1 km/h	CAN (250 kbps)	5 Hz (最高 20 Hz)	内置电池
	852 和 GA 810	RMS;可配置 NEMA 格式数据输出			
三向 ICP 加速度 传感器	美国 PCB 356A16	频率范围:0.5 Hz ~ 5 kHz;灵敏度(100 Hz 时):96.4 ~ 103.2 mV/g;量程:± 50 g,线性度:≤1%	模拟输出	—	采集模块 2 mA 恒流激励
拉线位移传感器	美国 Firstmark Contorls	型号 161-1915,量程 606 mm,阻抗 5 kΩ ± 20%,输出电压范围随供电电压	模拟输出	—	外部供电 DC 5 V
cRIO 主控制器及 机箱	美国 NI 9012, NI 9111	VxWorks 实时系统,主频 400 MHz,内存 64 MB,Flash 128 MB,USB 数据存储,FPGA 类型 Virtex-5 LX30	串口 ×1 网口 ×1 USB 口 ×1	—	外部供电 DC 12 V
IEPE 采集模块	美国 NI 9234	可对 IEPE 传感器信号和普通信号采样,单通道采样频率 51.2 kHz,分辨率 24 位,量程 ±5 V,同步采样	BNC 接头	每个通道数据读取频率 1 kHz	机箱供电
CAN 信号采集模 块	美国 NI 9853	兼容 CAN 2.0B 协议	CAN ×2	实时接收与发送	机箱和外部供电 DC 12 V
LED 显示器与系 统 CAN 输出	英国 Racelogic RLVBDSPO3	兼容 CAN 2.0B 协议	CAN ×1 串口 ×1	车速 5 Hz;悬架 位移 100 Hz	外部供电 DC 12 V

1.2 数据采集器与实时输出显示装置

数据采集装置主控制器是 NI 9012,采用 400 MHz Freescale MPC5200 实时处理器,运行 VxWorks 操作系统,内存 64 MB,Flash 128 MB。具有 1 个 RS 232 串口,1 个 100 M 以太网端口,还有 1 个全速 USB 主机端口,系统中利用其连接至 USB 闪存完成采样数据的存储^[10]。

对加速度传感器信号的采集选用了 NI 9234 模块,它可对 4 路 IEPE 加速度传感器信号同步采集,字长 24 位,输入信号量程为 ±5 V。也可对普通模拟输入信号进行采集,需要在 NI 9234 编程时选择确定^[11]。该模块单通道最大采样频率为 51.2 kHz。

系统选用了 NI 9853 模块实现 CAN 信号的采集以及输出信号到 LED 显示装置进行实时显示。NI 9853 模块有 2 路独立的高速 CAN 节点,支持 CAN 2.0B 协议^[12]。其中 CAN1 通道需要外部供电,用于接收 GPS 接收机传输过来的信号。CAN0 通道用于将提取的车辆运动速度等信息实时发送到 LED 显示装置,具体为英国 Racelogic 公司开发的 RLVBDSPO3,下文简称 MFD (Multifunction display)^[13]。MFD 挂接在 CAN 总线上,其左右两侧有两个直接相通的 CAN 接口,其中一侧的 CAN 接口用于与 NI 9853 CAN0 接口相连,另一侧用于整个

测试系统对外输出。MFD 出厂默认 CAN 通信波特率为 500 kb/s。

1.3 系统供电

整个测试系统有 5 处需要供电,其中 GPS 接收机其内置有锂电池,不需要现场外部供电。数据采集器主控制器供电范围为 DC 9 ~ 35 V,CAN 模块 CAN1 通道供电范围为 DC 8 ~ 25 V,均需外部供电。LED 显示装置供电也是宽电压范围 DC 5.3 ~ 30 V。拉线位移传感器需要外部供电,且系统对电压信号也要进行采集,选择的 NI 9234 模块通道输入量程为 ±5 V,所以实际供电电压最大只能选择 DC 5 V。最终系统选用了 一个两路电压可调输出移动电源斯丹德锂电池,型号 Mp-20000A,容量 23 000 mA·h,调整其输出分别为 DC 12V 和 DC 5 V。

2 基于 LabVIEW 的测试系统软件设计

2.1 cRIO 编程方法与应用程序生成

cRIO 数据采集器的控制器与 C 模块的通讯不能直接实现,需要进行 FPGA 模块编程。FPGA 模块编程可由用户自行完成,可实现复杂的高速数据交换,即常说的 FPGA 编程。也可采用 LabVIEW 中对 C 模块预编译的 FPGA 程序,即扫描方式。扫描模式实现简单,但通讯速率低,一般用于低频慢速信号

的采集。本文采用 FPGA 编程方法。

在上位机 LabVIEW 环境下利用程序向导生成 FPGA 工程,远程机为 cRIO。直接在 cRIO 下创建的 VI 在控制器实时系统 NI 9012 中运行,而在 cRIO→Chassis→FPGA Target 下创建的 VI 就是 FPGA 程序,编译后在 FPGA NI 9111 中运行。

程序调试完成后可通过 cRIO→Build Specifications 生成一个新的 Real-Time Application 程序并下载到 cRIO 中,重启 cRIO 后其可独立运行。在生成应用程序前需要确定系统启动运行的 VI。

2.2 FPGA 编程

FPGA 程序是控制器与 C 模块数据传输的桥梁。在系统中,FPGA 程序首先完成对 C 模块的设置,然后按照一定时序读取 8 个通道的 AD 采样值和 CAN1 通道的 GPS 数据,并上传到控制器,同时接收控制下传的数据通过 CAN0 通道发送出去。

对 C 模块的设置有两种方式,一种是在工程文件 cRIO→Chassis→FPGA Target 下鼠标右键点击相应模块属性进行设置,另一种是在程序中访问 FPGA I/O method 和 I/O Property 函数编程实现。本系统采用了第 1 种方法。2 个 NI 9234 模块共 8 个通道,其中 6 个通道对 2 个加速度传感器 6 路信号进行采集,通道设置为“IEPE AC Coupled”,激励恒电流 2 mA,剩下 2 个通道对拉线位移传感器普通模拟信号和电压信号进行采集,通道设置为“DC Coupled”。所有通道采样频率都设置为 51.2 kb/s。NI 9853 的 CAN1 通道波特率为 250 kb/s,CAN0 通道波特率为 500 kb/s。

FPGA 向控制器传递的数据量大,且包含不同模块的信息,程序设计时采用了 Target to Host-DMA 方式的 FIFO。而控制器向 FPGA 传递的数据量小,且有实时性要求,选用了读写控件方式。

FPGA 中的 FIFO 在数据填满后,会处于等待状态,直至超时或有新的空闲位置。所以考虑到模拟信号模数转换数据之间以及其与 CAN1 通道接收数据之间的同步,进行了如下处理:首先将 FIFO 数据类型设置为 U64;AD 转换数据和 CAN1 通道接收数据都写入统一的 FIFO 中;FIFO 中的元素都包含 32 位时钟信息。

图 2a 是 AD 模块的数据打包方法,图 2b 是根据图 2a 对模块 3(NI 9234)4 个通道同步采样数据进行打包和写入 FIFO 程序实现。AD 采样值是 24 位有符号定点数,其最高位 b23 是符号位,先将其转换成布尔数组,然后视其符号位为无符号位最高位再转变成无符号数进行打包。图 2c 是对模块 1(NI

9853)的 CAN1 通道帧数据打包成 U64 的方法,一帧 CAN 数据转换成 3 个 U64,其中第 2 个 U64 的程序实现如图 2d 所示。如果一帧 CAN 数据不足 8 个字节,则不足部分以 0 代替,对数据解析时以 CAN 报文中的“数据长度”参数为准。AD 采样与 CAN 数据接收在同一个 while 循环中实现,分时对 FIFO 写操作。while 循环周期是 1 ms,也就是 AD 所有通道数据读取周期均是 1ms,CAN1 接收查询周期是 1 ms,完全满足工程需要。

图 2e 是 FPGA 程序中采用读写控件方式实现数据由控制器到 CAN 模块的数据发送程序。也是采用 while 循环,循环周期是 0.5 ms。

FPGA 程序由图 2b 和图 2e 两个 while 循环组成,2 个线程独立运行。整个 FPGA 程序编译生成 lvbitx 网格文件,供控制器编程时通过 FPGA Open VI Reference 函数调用。

2.3 控制器编程

控制器程序的主要功能包括 FPGA_FIFO 数据读取、数据提取与文件保存、悬架位移预测与速度实时显示等,程序实现框图如图 3 所示。3 个功能分别在 3 个 while 循环中实现,相当于 3 个线程并行运行,之间通过在 RT 下建立的 2 个 FIFO 实现数据交换。这样安排有利于提高 FPGA 上传数据的可靠接收和实时处理。

两个 AD 模块 1 s 产生 8k 个 u64 数据,CAN 模块按 5 Hz 产生 GPGGA、GPVTG、GPGST 3 条语句共 165 帧数据,即 495 个 u64 数据。在读取 FPGA FIFO 时,按 100 行/10 ms 速率读取完全满足实时性和可靠性要求。具体程序如图 4a 所示,为便于读图,将程序中的 error 簇连线全部省略了(下同)。RT_FIFO_I 的元素是数组,在创建时要给其 element in array 输入端子赋值 100,其默认值是 1。调试时用显示控件实时显示每次读取 FPGA_FIFO 后剩余元素个数以确定元素是否实时读取。

图 4b 主要完成从 RT_FIFO_I 中读取数据、提取与保存成数据文件,同时将速度、加速度信息整理成 u64 类型写入到 RT_FIFO_II 中用于实时处理用。根据 u64 的 b60-b63 就可以分辨出是 AD 数据还是 CAN 数据,AD 数据一个 u64 就代表一个采样点,而 CAN 数据需要 3 个 u64 才能表示完整,在程序中通过 case 结构来判断并拼接。系统选用的 sps 852 接收机输出的 CAN 数据中,GPGGA、GPVTG、GPGST 语句的 ID 均是 0x18EBFFDA,它们之间通过 ID 是 0x18ECFFDA 的一条 CAN 帧进行分割。每条 GPS 语句的结尾都是换行回车符,程序中首先将 CAN 数据转成 ASCII 码格式首尾拼接,然后基于换行回车

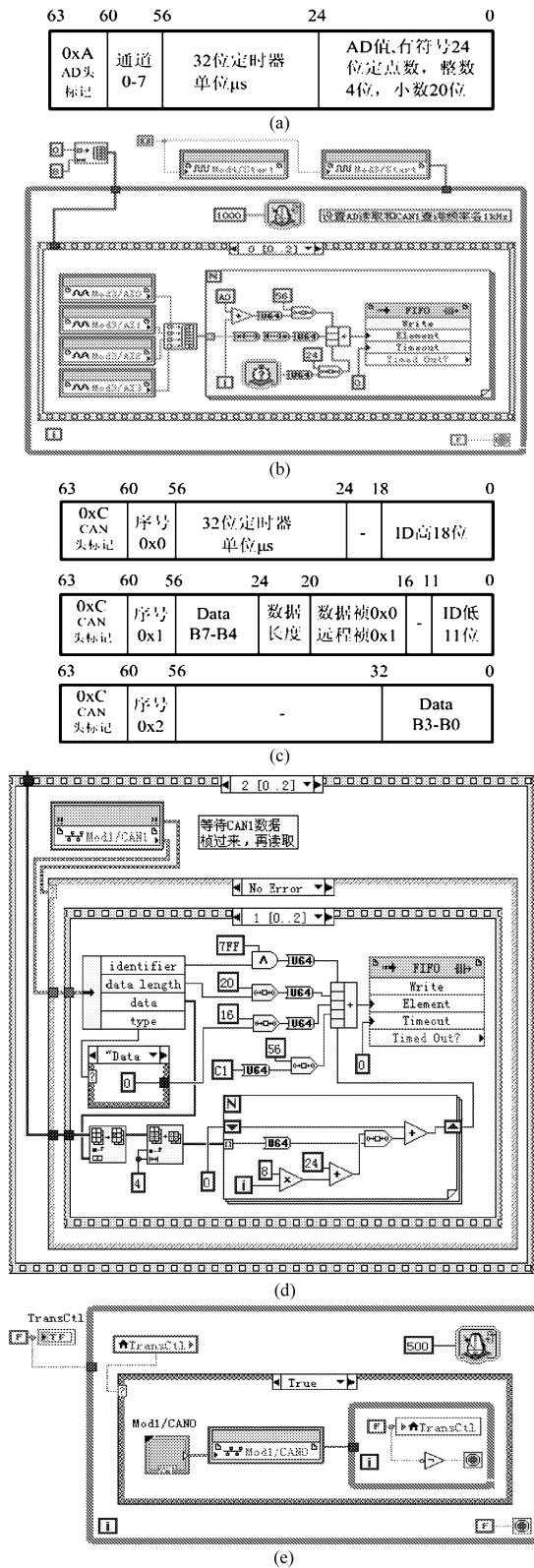


图 2 FPGA 程序

Fig.2 FPGA programming

- (a) AD 模块数据打包
- (b) AD 模块数据采集程序
- (c) CAN 模块数据打包
- (d) CAN 模块数据采集程序
- (e) CAN 数据发送程序

符进行识别和截取。

图 4c 是对测量数据实时处理和显示输出程序。RT_FIFO_II 中的数据单元仍采用带时间信息的 u64

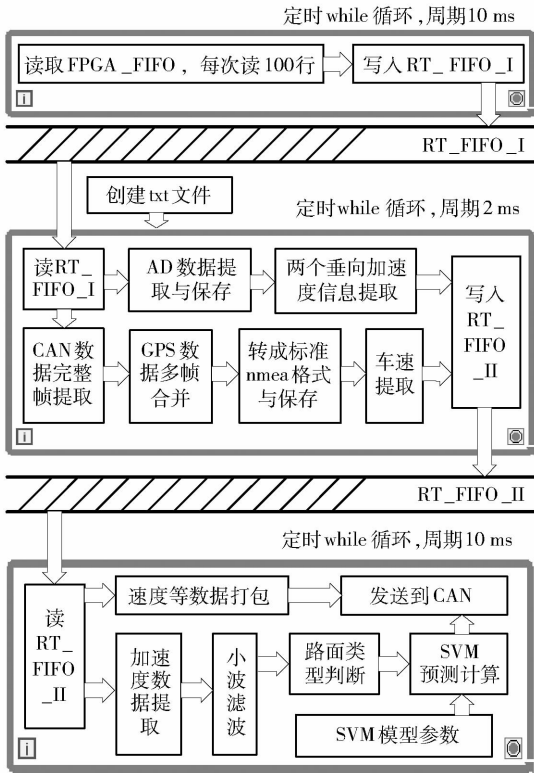


图 3 控制器编程框图

Fig.3 Controller programming diagram

类型,由 8 位标志符、32 位时间和 24 位定点数组成,其中标志符用于区别是速度、上下测点加速度信息。程序中处理加速度信息时,首先采用了小波滤波方法对加速度进行滤波,上下测点滤波时小波分解层数略有不同,然后进行路面识别,最后基于离线学习好的支持向量机模型参数对悬架位移进行预测。路面识别基于最近 100 组的采样数据的均值和方差进行判断。

实时通过 CAN 发送的数据包括速度和实时预测的悬架位移,并可通过 LED 显示器显示。其中速度更新频率是 5 Hz,悬架位移更新频率是 100 Hz。系统中选用的 LED 显示器默认的 0x302 的 ID 帧包含速度信息,需要按照其协议进行速度信息打包,同时将悬架位移信息也打包到 0x305 的 ID 语句中,发送时 0x301~0x306 共 6 条语句连续轮流发送,这样显示器才能正确显示^[13]。

3 试验与结果分析

基于某国产乘用车搭建了试验系统(图 1),部分实物如图 5 所示,试验在某试验场 7 种不同典型路面进行。加速度传感器安装在悬架弹簧与下摆臂和车身连接支座附近,拉线位移传感器的两个测点也是在加速度传感器附近。先基于保存的数据离线学习得到悬架位移预测模型,然后将该模型集成到采集系统中实现悬架位移实时预测输出。

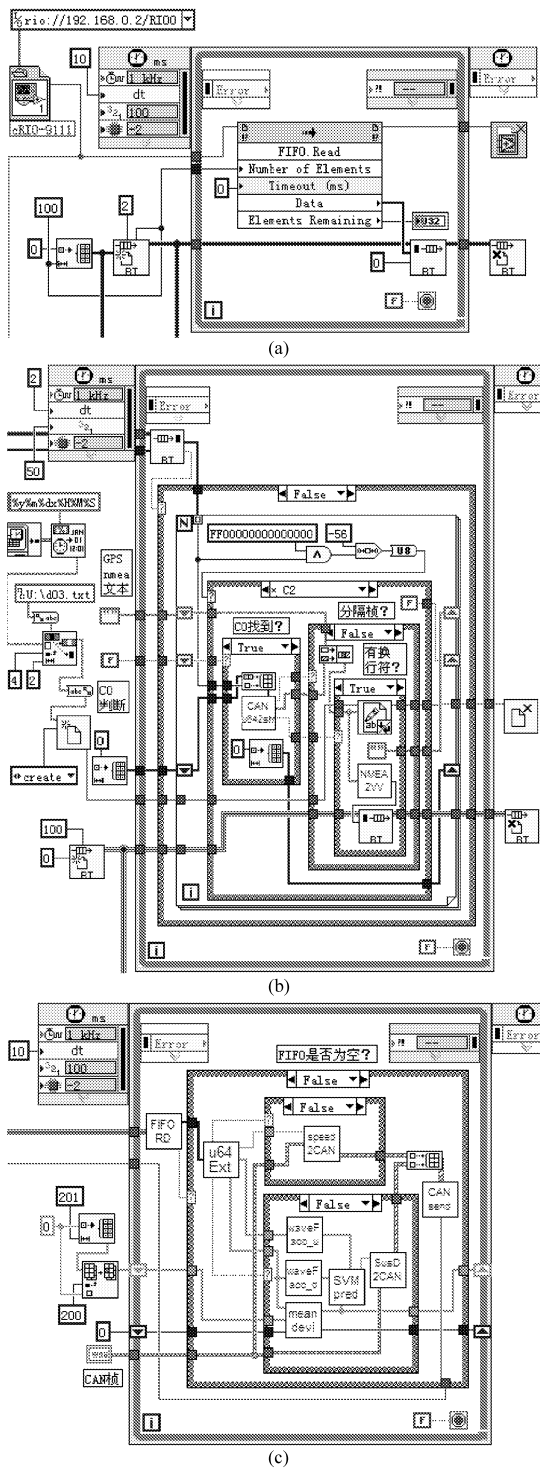


图4 控制器编程

Fig.4 Controller programming

(a) 读取 FPGA_FIFO 数据 (b) 采样数据提取与文件保存程序
(c) 悬架位移实时预测与显示程序

3.1 试验数据小波滤波预处理

悬架弹簧上下支点加速度传感器安装位置测取的垂向加速度信号含有不同程度的高频噪声,不利于后续模型的建立。采用小波滤波方法对加速度信号进行滤波处理,具有无相位延迟特点。首先对原始信号进行小波分解,然后对分解得到的高频信号小波系数采用阈值限定等方法进行抑制,最后利用

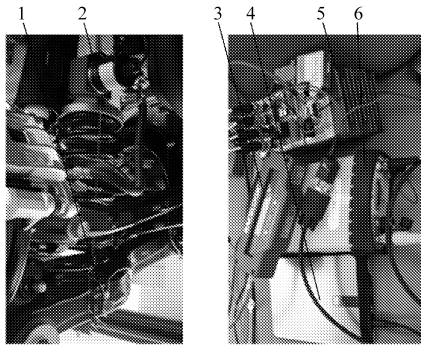


图5 传感器与测试仪器实物

Fig.5 Pictures of sensors and test instruments

1. 线位移传感器 2. 下测点加速度传感器整车 3. 显示器
4. 电源 5. cRIO 采集器 6. GPS 接收机

处理后的小波系数进行信号重构。在 Matlab 中对离线采集的数据进行调试,对下测点加速度信号采用小波函数 db5,进行 5 层分解,降噪阈值函数选为 heursure,阈值调整函数参数选为 mln,这样效果比较理想。滤波最终在采集系统中基于 LabView 的 Express VI 实现。图 6 为汽车在砂石路面上行驶时悬架测点加速度信号滤波处理结果。

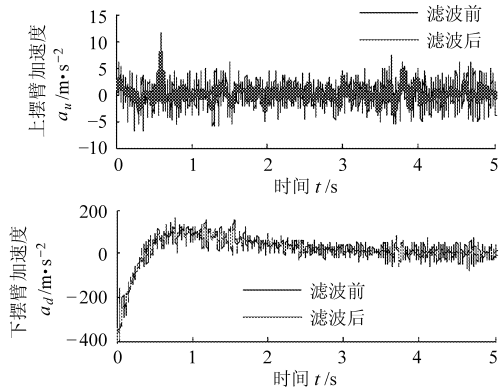


图6 砂石路面试验数据滤波结果曲线

Fig.6 Test data filtering result curves on gravel road

3.2 悬架位移支持向量回归模型建立

汽车悬架位移影响因素多,主要包括悬架两测点垂向加速度以及汽车纵向车速等。支持向量机(SVM)建模方法适合于此种非线性映射关系的建立,其主要难点是样本的获取、满足实时性和控制精度要求的模型学习算法^[14-15]。

试验在 7 种典型路面上进行,包括扭曲路、石块路、鹅卵石路、砂石路、搓板路、长波路和一般公路。不同路面对轮胎输入激励程度不同,为了进一步提高 SVM 建模准确性,根据悬架下测点加速度信号标准差值(S)对路面进行分级,并将路面等级也考虑到模型的输入向量中。根据标准差值的大小将路面分为 3 个等级,当 $S \leq 10 \text{ m/s}^2$,为Ⅰ级路面;当 $10 \text{ m/s}^2 < S \leq 100 \text{ m/s}^2$,为Ⅱ级路面;当 $S > 100 \text{ m/s}^2$,为Ⅲ级路面。

建立的 SVM 模型结构如图 7 所示。输入向量包括悬架两测点垂向加速度、车速、路面等级,输出为悬架位移。对速度信号进行插值得到与加速度信号相同的采样频率。对路面等级学习依据 1 s 内悬架下测点垂向加速度,具体实现参见图 4c。基于 Matlab 对模型离线学习。取 7 种路面数据文件的奇数行作为学习样本,取偶数行作为测试样本。此外对所有样本作归一化处理,以避免输入元素大小范围不同对输出贡献的影响,同时提高计算速度。

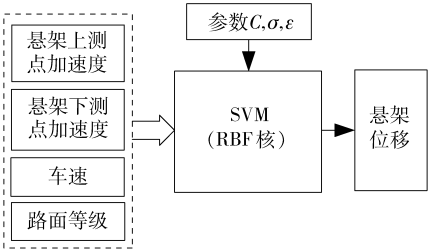


图 7 SVM 模型

Fig. 7 SVM model

本文选用 ε -support vector regression (ε -SVR) 回归算法,并基于 LibSVM (Matlab 版) 完成汽车悬架位移估计的支持向量机回归模型离线建模。运用 svmtrain 函数对学习样本进行学习得到悬架位移回归模型,运用 svmpredict 函数确定测试样本输入下的悬架位移估计值,并与测试样本输出值进行对比分析模型估计精度。 ε -SVR 的核函数选高斯径向基

(RBF) 核,即

$$K = \exp \left(- \frac{||X - X_c||^2}{2\sigma^2} \right)$$

其中, X 表示样本输入向量, X_c 表示核函数的中心向量。 σ 为核函数的宽度参数,控制了函数的径向作用范围,其值越大表示高斯滤波器的频带越宽。

ε -SVR 算法中 ε 反应了估计值与测量值间的偏差, ε 取值越大,需要的支持向量个数越少,从而模型预测实时性越高。另外,算法中的惩罚系数 C 和高斯径向基核函数参数 σ 对学习速度和估计精度也有很大影响。 ε 取值取决于实际应用需要,而 C 和 σ 的选取可通过网格搜寻、交叉验证方法得到。表 2 是优化后的 7 种路面分级与预测效果,图 8 为其中 2 种路面的测试与预测曲线。

表 2 路面分级及预测效果 ($\varepsilon = 0.01$)

Tab. 2 Road classification and prediction effect						
路面等级	标准差 $S/m \cdot s^{-2}$	不同路面	支持向量个数 nSV	均方误差 MSE	相关系数 R	最佳参数对 (C, σ)
I	0. 819	扭曲路	1 342	0. 001 6	0. 988 8	(16, 1 024)
	4. 553	一般公路	1 697	0. 001 3	0. 947 3	
	11. 281	长波路	1 681	0. 000 6	0. 991 8	
II	35. 826	鹅卵石路	1 924	0. 001 4	0. 947 8	(1, 512)
	51. 976	石块路	2 017	0. 002 1	0. 943 2	
	93. 771	搓板路	2 274	0. 003 6	0. 888 6	
III	143. 130	砂石路	1 809	0. 000 8	0. 985 0	(32, 1 024)

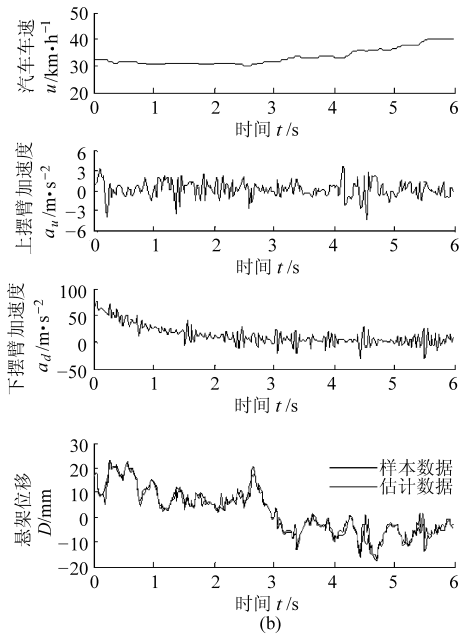
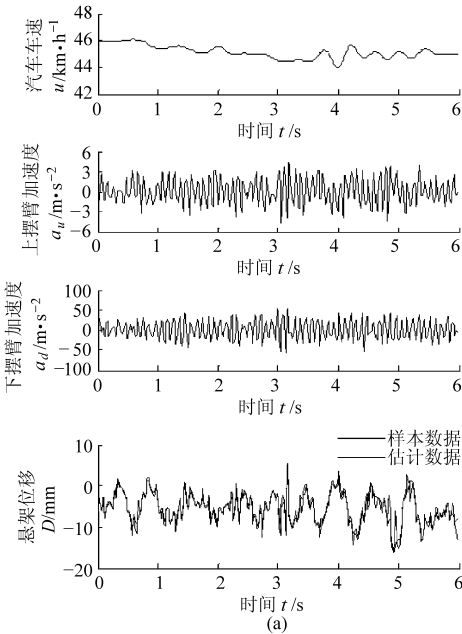


图 8 典型路面测试与悬架位移预测曲线

Fig. 8 Curves of test signals and estimated suspension displacement on typical roads

(a) 搓板路 (b) 砂石路

3.3 SVM 模型实时性测试

在 cRIO 测试系统中对小波滤波和 SVM 预测耗

时分别进行了测试。对 3 000 个加速度数据进行小波滤波总耗时 128 ms, 预测 3 000 次悬架位移总耗

时 2 760 ms,平均进行一个点滤波和预测耗时不足 1 ms。系统设计时悬架位移输出是 1 点/10 ms,所以实时性完全满足要求。

4 结 论

(1) 悬架位移实时可靠测量是汽车电控悬架研究以提高整车稳定性和平顺性的重要方面。采用虚

拟仪器完成了基于加速度信号的悬架位移实时测量,其实时性和精确性均满足要求。

(2) 构建的测试系统选用了工业级的虚拟仪器,通过编程实现数据的采集、实时处理与保存、实时滤波与预测输出,可靠性高,通过 CAN 接口可方便地与其他控制器集成使用。

参 考 文 献

1 van Zanten A T. Bosch ESP system; 5 years of experience[C]. SAE Paper 2000-01-1633, 2000.

2 Li Liang, Li Hongzhi, Zhang Xiaolong, et al. Real-time tire parameters observer for vehicle dynamics stability control[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 23(5):620~626.

3 陈无畏, 祝辉. 基于状态识别的整车操纵性和平顺性的协调控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6):121~129.
Chen Wuwei, Zhu Hui. Coordinated control of vehicle ride comfort and handling stability based on state identification[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6):121~129. (in Chinese)

4 容太平, 沈承虎, 袁中平, 等. 用加速度传感器测量位移的原理与误差分析[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(5):58~60.
Rong Taiping, Shen Chenghu, Yuan Zhongping, et al. The principle of measuring the displacement with accelerometer and the error analysis [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2000, 28(5):58~60. (in Chinese)

5 Han S. Retrieving the time history of displacement from measured acceleration signal[J]. KSME International Journal, 2003, 17(2):197~206.

6 徐庆华. 试采用 FFT 方法实现加速度、速度与位移的相互转换[J]. 振动、测试与诊断, 1997, 17(4):30~34.
Xu Qinghua. Conversion between vibrational acceleration, velocity and displacement using FFT [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 1997, 17(4):30~34. (in Chinese)

7 Ribeiro J G T, Castro J T P, Freire J L F. New improvements in the digital double iteration filtering method to measure displacements using accelerometers [C]//Proceedings of the 19th International Modal Analysis Conference (IMAC XIX), 2001:538~541.

8 李东文. 振动加速度信号直接数字积分的 DSP 实现[D]. 太原:太原理工大学, 2008
Li Dongwen. Relization of direct digital integration method for vibration acceleration signal based on DSP [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2008. (in Chinese)

9 Trimble Navigation Ltd. Getting started guide-Trimble SPS 852 modular GPS receiver[M]. Ver 4.41A Trimble Navigation Ltd. , 2011.

10 National Instruments Corporation. Operating instructions and specifications, compactRIO™ NI cRIO-9012/9014, intelligent real-time embedded controller for compactRIO [M]. National Instruments Corporation, 2010.

11 National Instruments Corporation. Operating instructions and specifcations, NI 9234 [M]. National Instruments Corporation, 2008.

12 National Instruments Corporation. Operating instructions, NI 9234, 2-port, high-speed CAN module[M]. National Instruments Corporation, 2011.

13 Racelogic Ltd. Multi function display RLVBDSPO3 instruction manual[M]. Racelogic Ltd. , 2011.

14 Hsu Chih-Wei, Chang Chih-Chung, Lin Chih-Jen. A practical guide to support vector classification [EB/OL]. [2012-12-08]. <http://www.csie.ntu.edu.tw/~cjlin>.

15 刘伟, 王建平, 刘长虹, 等. 基于粒子群寻优的支持向量机番茄红素含量预测[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4):143~147, 155.
Liu Wei, Wang Jianping, Liu Changhong, et al. Lycopene content prediction based on support vector machine with particle swarm optimization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4):143~147, 155. (in Chinese)