

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415614

穿戴式车载温度振动一体测试系统设计

叶 墘 贾云飞 王美君

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘要: 为了简化车辆测试人员在车辆测试过程中设备安装流程,提高车辆测试效率,设计了一种可长时间工作的穿戴式车载温振一体测试系统。测试节点设备以 STM32 单片机为主控,采用磁吸式安装,借助于开发的多功能适配器各测试节点可进行同步设置,实现同一时间基准下工作,并以 U 盘的形式与上位机连接,方便测试数据读取;多功能适配器还可对各测试模块进行充电、参数设置、数据读取和收纳提高了整套设备的勤务性。通过多项实验室功能测试和实车测试表明,本装置的安装方式方便可靠大大缩短了测试装备布置时间;测试系统振动采集精度相对误差 1% 以内,温度采集误差 ± 0.1 ℃;多设备采集同步时差在 μ s 级别。能够对车辆的温度和振动数据进行有效采集并存储,满足车辆运行状态参数采集的需要。

关键词: 穿戴式; 车载测试; 同步设置; U 盘储存

中图分类号: TH825; TH811; TN06 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.8040

Design of wearable In-Vehicle temperature and vibration integrated testing system

Ye Lei Jia Yunfei Wang Meijun

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A wearable, integrated vehicular temperature and vibration testing system has been devised to streamline equipment setup processes during vehicle testing, thereby bolstering testing efficiency. The system's testing nodes, governed primarily by STM32 microcontrollers, are affixed using magnetic suction mechanisms. Leveraging a multifunctional adapter developed for the purpose, synchronization and concurrent configuration of diverse testing nodes are achievable, ensuring operation within a unified temporal framework. Data interchange with the host computer is facilitated through USB flash drive connectivity, facilitating seamless retrieval of test data. Furthermore, the multifunctional adapter offers ancillary functionalities such as charging, parameter configuration, data retrieval, and storage, augmenting the overall efficacy of the equipment. Extensive experimentation encompassing laboratory validation and real-world vehicular trials attests to the system's convenient and dependable installation modality, markedly curtailing equipment setup durations. The testing system exhibits vibration acquisition accuracy within a relative error margin of 1%, while temperature acquisition errors are confined within ± 0.1 ℃. Synchronization time discrepancies among multiple devices are constrained to the microsecond level. This system adeptly captures and archives temperature and vibration data pertinent to vehicular operations, effectively catering to the exigencies of operational state parameter acquisition for vehicles.

Keywords: wearable; vehicular testing; synchronous configuration; USB storage

0 引言

目前对于运行车辆状态监测多基于伪损伤方法,即通过振动值和温度值等非直接参数来推测当前车辆的状态。而目前车载测试中,测量振动和温度等参数的测试方法主要有有线测试、无线测试和储存测试。在有线测试方面,杨

书仪等^[1]设计了一种惯性权值协同学习因子非线性动态调整的粒子群(particle swarm optimization-inertial weights co-learning factor, PSO-IWLF)优化算法于一体的履带车辆振动测试系统,该系统采用 MATLAB 软件和 LabVIEW 软件混合编程方式,利用丹麦 B&K 公司生产的 4514 压电式加速度传感器和美国 NI 公司生产的 USB6366 型数据采集

卡等硬件搭建而成；魏领军等^[2]采用多个应变计组成惠斯通电桥组成传感器前端，调理系统和显示系统组成测试系统二次仪表，通过有线测试的方式对装甲车辆传动轴转矩进行了测量，并对测量数据进行了处理分析，给装甲车辆载荷谱编制提供了高可信度数据；在无线测试方面，刘慧丰等^[3]提出了一种基于无线拓扑网络(WIFI-Mesh)的车辆参数分布式测试方法，该方法采用 Esp32 模块进行组网，通过无线传感时间同步学习(timing-sync protocol for sensor network, TPSN)算法进行时钟同步设计，完成了测试节点间的组网、通讯数据格式和自修复功能的设计；在储存方式测试方面，李磊^[4]通过存储测试装置对装甲车辆进行动态参数测试，主要为振动参数测试，通过加速度传感器采集了坐垫，车体后端侧面，车体后端底部的振动数据，并对采集数据与车辆实际运动状态进行了对比分析。

总体来说传统的车载测试大多采用有线的形式进行，在布线的过程中操作极其繁琐，对测试人员的技术水平要求较高。每一次测试开始前的准备工作占据了

整个测试过程的很大一部分时间，效率低下；在采用无线测试的测试系统中，由于引入无线传输模块，前期设备网络准备工作同样需要很长的时间，同时由于引入无线传输模块，设备续航大打折扣。针对此问题，本文基于 STM32 单片机和 LabVIEW 图形化编程软件，设计了一种穿戴式超长续航的车载温度振动一体测试系统，并设计了相关实验对测试系统的相关性能进行了考核，通过实验室实验及实车实验证明其具备采集精度高、安装方便、开机即用、对测试人员要求不高等优点，解决了传统车载测试测试前准备工作时间过长的问题，极大提高了测试效率。

1 测试系统总体构成

测试系统主要由数据采集模块、多功能适配器和系统上位机组成。其中数据采集设备可以通过同步箱和上位机进行数据交换，也可以直接和上位机进行数据交换。测试系统组成框图如图 1 所示。

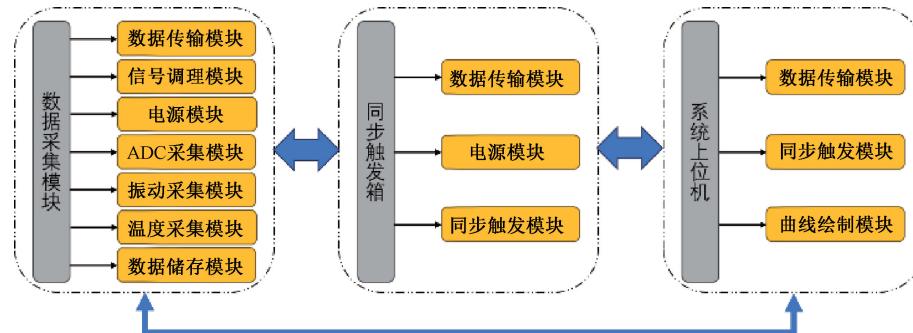


图 1 系统总体组成

其中，数据采集模块主要由微控制单元(microcontroller unit, MCU)、储存芯片^[5]、温度传感器、电池、振动传感器、模数转换(analog to digital converter, ADC)采集模块、发光二极管(light emitting diode, LED)指示模块及其他外围电子元器件。固件设计主要采用分层设计的方法，硬件驱动和用户操作层解耦合。硬件驱动层主要功能为驱动 MCU 的 ADC 外设，驱动储存芯片，实现数据传输，外部触发中断实现，以及驱动板上其他使用到的外设如定时器等。用户层主要是采集数据的滤波算法，通用 Fat 文件系统^[6](fat filesystem, FatFs)的操作函数封装，数据传输缓冲算法^[7]实现等。采集设备实物如图 2 所示。该数据采集设备尺寸 68 mm×44 mm×28 mm，重量仅 180 g。

多功能适配器主要由 MCU、充电管理模块^[8]、LED 指示模块和通用串行总线集线器(universal serial bus hub, USBHub)模块组成，多功能适配器负责作为中间设备和数据采集设备及上位机进行数据和命令的交换，同时对数据采集设备进行充电管理。多功能适配器实物图如图 3 所示。

同步系统上位机采用 LabVIEW^[9]图形化界面编程开发，主包含同步触发、数据读取、曲线图绘制。



图 2 数据采集设备实物图



图 3 多功能适配器实物图

2 系统设计需求分析

2.1 系统设计需求

车辆行驶在道路上会经过各种复杂的地形,经查阅文献[10-13]车辆行驶过程中道路激振频率在0.5~16 Hz范围,振动加速度值在±15 g范围;车身零部件自身运行振动频率在100 Hz以内,振动值在±8 g范围。根据奈奎斯特采样定理,设计的车载测试设备的采样率应大于原信号频率的10倍,本次设计针对100 Hz的分析频率将的采样率设计为1 kHz,振动量程设计为±18 g。车辆工作时环境温度基本在-40 °C~+60 °C,本设备温度测量量程设计为-40 °C~+65 °C。

传统车载测试布线及其繁琐,如图4所示,接线多且杂乱。为了简化车辆测试人员在车辆测试过程中设备安装流程,提高车辆测试效率,需要设计一种方便快捷的安装方式。本设备采用磁吸式安装方式,因此需要验证其可靠性。



图4 车载有线测试

2.2 磁吸可靠性实验室验证

磁吸式安装方式的核心为强磁铁,为了验证磁吸方式可靠性,采用振动台实验方式进行。

实验步骤设计如下:

- 1) 将数据采集设备磁吸到振动台;
- 2) 开启振动实验台,设定初始振动值;
- 3) 逐渐增大振动台振动值,直到18 g;
- 4) 逐渐增大振动频率直到100 Hz,保持振动10 s;
- 5) 重复试验5次。

试验环境如图5所示,振动台参数设置如图6所示。信号发生器经功率放大器放给振动台提供输入信号,使得振动台发生幅值为18 g的正弦振动。数据采集模块在100 Hz振动频率的振动下10 s仍未掉落,未移动,说明磁吸式安装方式可靠。

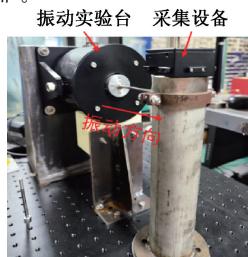


图5 磁吸实验

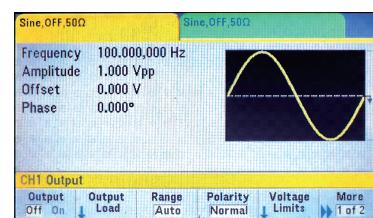


图6 振动台参数设置

3 系统功能验证

3.1 同步时差验证

在数据采集模块的下位机中采用外部中断触发的方式开启ADC工作。MCU不断检查触发管脚状态,一旦接收到下降沿就进入硬件中断,在硬件中断中经过消抖后触发ADC开始工作,进行加速度和温度数据采集。

测试系统中设计有用于数据采集模块同步的同步适配箱,该适配箱可以同时连接整个测试系统中的9个数据采集模块,可以同步触发采集工作,并且可以给各个模块充电。数据采集设备和同步适配箱连接时,两者触发管脚相连,且地线相连,此时两者的逻辑电平就完全一致。同步适配箱在接收到系统上位机传来的同步触发命令后将触发管脚电平拉低,此时所有连接的数据采集设备便被触发开始采集工作。

多设备同步触发时间差可以通过多通道数据采集仪评估,测试环境和测试结果分别如图7和8所示,由图8可以看出此方式同步触发时间差在μs级别,在车载测试中完全可以忽略不计。

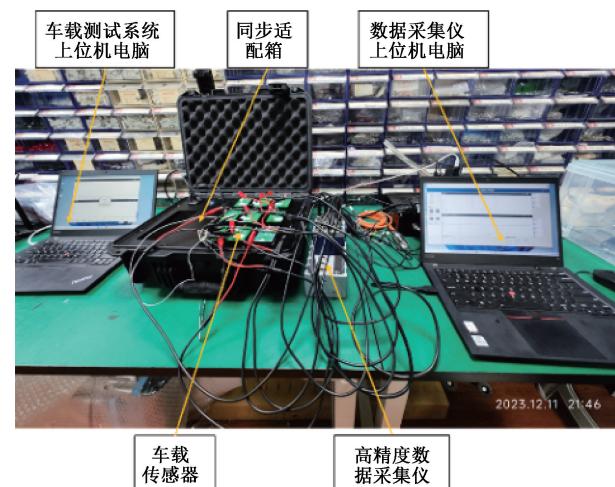


图7 同步测试环境

3.2 采样率与振动频率响应验证

利用信号发生器生成频率为100 Hz,幅值为1 V,偏移1 V的标准正弦波波形,数据采集模块通过采集信号发生器的标准信号,通过AD值电压换算,将采集的波形绘制如图9所示的波形图,由图可知,数据采集设备能够真实准确的表达出信号发生器产生的信号。

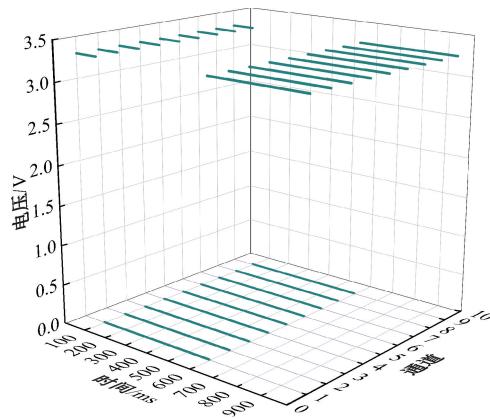


图 8 多设备同步时差评估

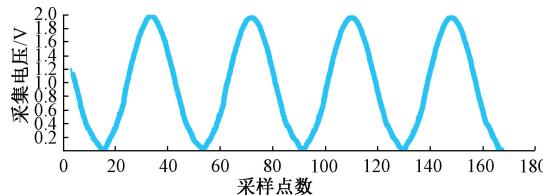


图 9 采集信号发生器 100 Hz 正弦波波形图

振动频率响应采用标准振动台进行实验,利用标准振动台输出频率为 100 Hz,幅值为 4 g 的标准正弦振动激励。经采集设备采集后,将采集数据导出到上位机中,绘制数据波形如图 10 所示,由图可知,数据采集设备采集的数据对振动台产生的振动激励反应准确真实,满足设计需求。

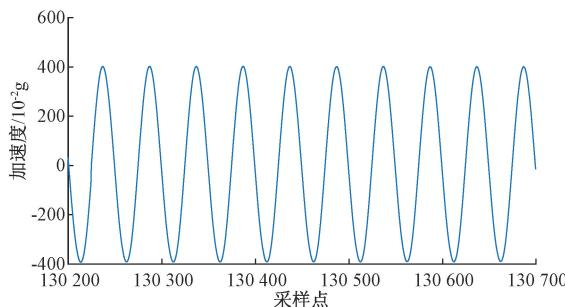


图 10 采集设备 100 Hz 下振动频率响应

3.3 采集精度验证

模块通过选用高精度的元器件,加入软、硬件滤波^[14],对测试设备整体进行标定等手段尽可能提高数据采集精度。

设备温度采集精度在江苏省计量科学研究院进行考核校准,通过高精度的恒温箱进行测试,将恒温箱分别设置 -40°C 、 -20°C 、 10°C 、 30°C 、 65°C ,每个温度保温十分钟。温度考核校准环境如图 11 所示,最终恒温箱示值和设备实际采集值如表 1 所示。由表 1 可知该设备温度采集精度高,误差仅为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 。

设备振动采集精度通过高精度标准振动实验台进行测试,设置振动台的振动值分别为 1 g、4 g、6 g、8 g、10 g、



图 11 温度考核校准环境

表 1 设备温度采集精度测试

温箱显示温度/°C	设备采集温度/°C	测量误差/°C	扩展不确定度 U(k=2)
-40	-39.9	+0.1	0.1
-20	-19.9	+0.1	0.1
10	9.9	-0.1	0.1
30	29.9	-0.1	0.1
65	64.9	-0.1	0.1

16 g、18 g,振动台在每个振动值下工作 10 s,全部测试完成后读出设备采集的数据。振动考核校准环境如图 12 所示采集值和设置的标准振动值对照表如表 2 所示。由表 2 可知该设备振动采集精度高,误差 1% 以内。

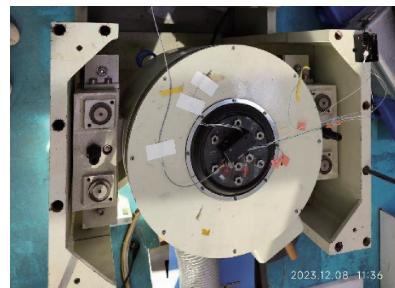


图 12 振动考核校准环境

表 2 设备振动采集精度测试

振动台标准值/g	设备示值/g	相对误差/%	拓展不确定度 (k=2)/%
1	0.99	-1.0	1.5
4	3.97	-0.7	1.5
6	5.95	-0.8	1.5
8	7.94	-0.7	1.5
10	9.91	-0.9	1.5
16	15.95	-0.3	1.5
18	17.96	-0.2	1.5

3.4 U 盘功能验证

数据读取采用将设备模拟成 U 盘^[15]的方法,通过单片机自带的通用串行总线(universal serial bus, USB)全速接口将数据从板上存储芯片读取到上位机电脑中。

模拟 U 盘的功能通过调用意法半导体(STMicroelectronics, ST)公司针对该型号单片机提供的 USB 驱动固件包,再自行实现 USB 状态函数、USB 读取函数、USB 写入函数等几个关键函数,最终设备可通过单片机自带的 USB 全速接口,将存储在存储芯片中的采集数据读取到上位机中。USB 实现获取状态和读写函数的函数调用逻辑如图 13 所示,其中安全数字卡(secure digital card, SD Card)驱动采用串行外围接口(serial peripheral interface, SPI)总线方式。最终模拟 U 盘如图 14 所示,该系统所有的设备均被成功模拟成 U 盘显示在上位机电脑的文件管理界面中,编号从 CZ001 到 CZ009,共计 9 个。U 盘存储测试如图 15 所示,峰值速率 710 KB/s,拷贝 100 MB 文件共计用时 151 s 平均速度 678 KB/s,综上,模拟 U 盘功能成功实现。

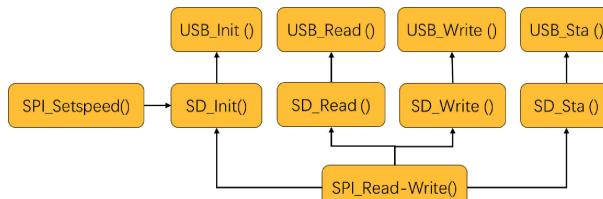


图 13 USB 用户函数调用逻辑



图 14 模拟 U 盘

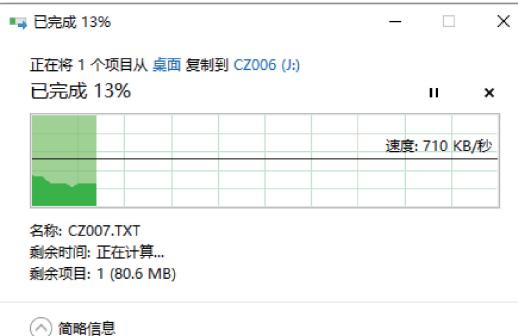


图 15 U 盘读写测试

4 实验测试

4.1 穿戴式方法可靠性测试

为了验证穿戴式安装方式的可靠性,将采集设备磁吸到家用运动型多用途汽车(sport utility vehicle, SUV)汽车上,分别安装到汽车的引擎盖上方、左前轮上方钣金、车身侧面钣金和车尾部后备箱钣金,具体如图 16 所示,经过连续三天的上下班通勤测试,期间通过减速带,下水道井盖

等容易产生巨大振动的地方。测试结果显示,设备未掉落,且在车身位置未发生改变。

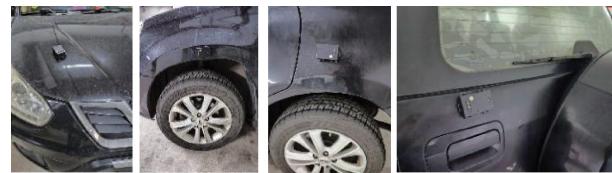


图 16 穿戴式安装方式可靠性实车测试

4.2 测试系统实车试验

将车载测试设备吸附在车辆前轮上方钣金(编号为 1),和车身中部侧面钣金(编号为 2)上,发动车辆以 40 km/h 的速度行驶,期间通过减速带和下水道井盖,路面从泊油路到水泥路反复切换。其中 1 号点位振动数据如图 17 所示,经过减速带或经过井盖振动值激增,符合行驶路面的起伏情况,经过减速带振动情况放大图如图 18 所示。2 号点位的实车试验数据分别如图 19、20 所示。两点位的温度测量

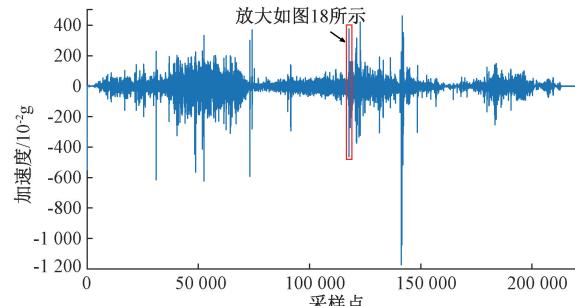


图 17 1 号点位实车试验振动数据

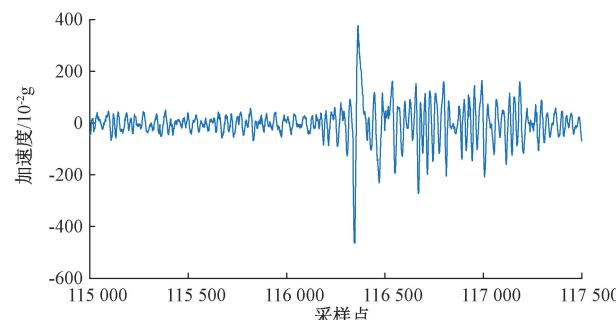


图 18 1 号点位经过减速带振动数据

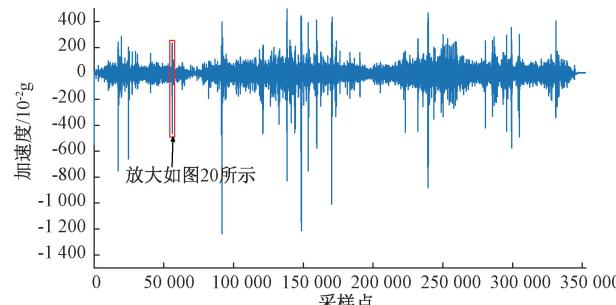


图 19 2 号点位实车试验振动数据

数据分别如图 21、22 所示,采集温度值和当天室外温度相当。

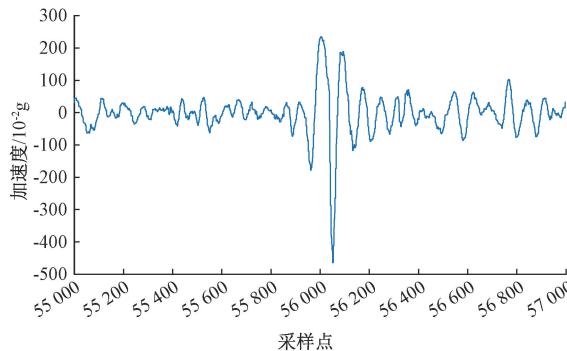


图 20 2 号点位经过减速带振动数据

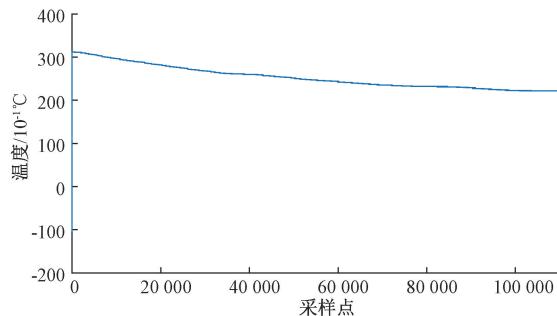


图 21 1 号点位温度数据

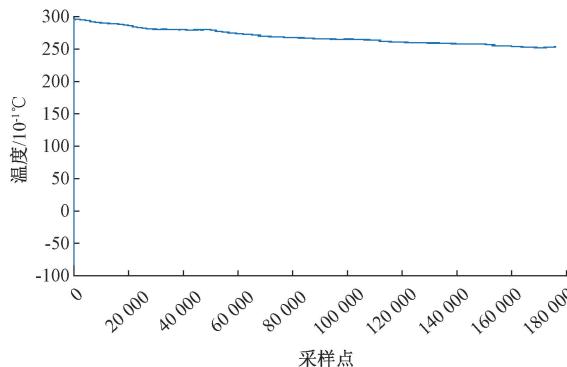


图 22 2 号点位温度数据

5 结 论

针对车辆的测试需求,开发设计了穿戴式温度振动一体测试系统,经过实验室测试以及实车试验测试得出以下结论。

穿戴式温度振动一体测试系统以 STM32 单片机为主控制器,开发了包含数据采集模块,多功能适配器;采用 LabVIEW 图形化软件开发了系统上位机。经过试验测试,该系统工作稳定高效,符合设计预期。

经过权威计量部门采用高精度标准恒温箱和高精度标准振动试验台的精度考核测试,并取得相应的考核校准证书,表明该系统具备高采集精度,温度采集误差 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,振动采集误差 $\pm 0.15 \text{ g}$,满足车辆相关参数测量要求。

穿戴式安装方式,安装快速可靠,极大节约了测试准备时间,降低了对测试人员技能的要求。U 盘方式读取数据方便快捷,进一步压缩了整个测试流程的时间。为后续其他的车载测试系统设计提供参考,具备工程应用价值。

参考文献

- [1] 杨书仪,廖力力,覃凌云,等.基于传感布置优化的履带车辆振动测试系统[J].兵工学报,2022,43(12):2989-2999.
- [2] 魏领军,刘海鸥,陈慧岩,等.某履带装甲车辆传动轴动态转矩数据采集及分析[J].汽车工程学报,2021,11(2):86-92.
- [3] 刘慧丰,李东昌,吕佳莹,等.基于 WiFi-Mesh 的车辆参数分布式测试技术研究[J].测试技术学报,2023,37(6):521-527.
- [4] 李磊.基于 RT-Thread 的车载振动存储采集系统设计[D].太原:中北大学,2023.
- [5] 孙悟雨,刘杰,徐园,等.国产大容量 eMMC 芯片的数据记录系统设计[J].单片机与嵌入式系统应用,2022,22(2):60-63.
- [6] 王喜亮,岳伟,熊一鹏.一种基于 FatFs 的监控数据管理方法[J].单片机与嵌入式系统应用,2022,22(2):68-71.
- [7] 毕荣,崔建峰,李磊,等.基于 eMMC 的车载振动测试嵌入式循环存储技术[J].国外电子测量技术,2023,42(10):113-119.
- [8] 王颖,杨志家,谢闯,等.基于惯性传感器的 HAR 数据采集系统设计[J].电子测量技术,2023,46(23):146-152.
- [9] 刘金,丁舒涛,何海.基于 LabVIEW 的自动驾驶汽车在线振动监测与诊断系统[J].上海汽车,2024,(2):22-26,38.
- [10] 谢浩,谢军,汤旭,等.基于路面不平整度的车辆动荷载影响分析[J].交通科学与工程,2023,39(3):26-37.
- [11] 毛明,李振平,邓高寿,等.坦克装甲车辆对试验测试技术的需求[J].计算机测量与控制,2016,24(3):8-10.
- [12] 李辉,孙国华,李斌,等.履带车辆振动噪声特性及其控制技术研究现状[J].机电产品开发与创新,2017,30(3):16-19,5.
- [13] 喻肇斌.汽车座椅振动噪声信号检测系统的研究与实现[D].秦皇岛:燕山大学,2015.
- [14] 郑华林,冯一夫,潘盛湖.基于 STM32 的金属管道弱磁信号采集系统设计[J].工程设计学报,2021,28(5):646-653.
- [15] 蒲泽坤,沈勇,陈旅超.USB 接口的 CDCMSC 复合设备设计与应用[J].单片机与嵌入式系统应用,2023,23(7):53-56,61.

作者简介

贾云飞(通信作者),博士,副研究员,主要研究方向为基于嵌入式系统的飞行器控制系统研究、基于嵌入式系统的弹载存储测试系统研究。

E-mail:yunfei_jia@163.com

叶壘,硕士研究生,主要研究方向为武器装备测试及其测试仪器。

E-mail:coconut_nut@foxmail.com