

结构人致振动舒适度无线评估系统 实现与工程实践

朱前坤, 刘 艺, 崔德鹏, 杜永峰

(兰州理工大学防震减灾研究所, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 为了准确测量结构的振动加速度, 科学高效地判断振动是否引起使用者的不适和影响结构的正常使用, 利用 IEPE 压电式传感器和微型电脑树莓派(Raspberry Pi), 基于 Python 计算机编程语言设计一款智能惯性评估系统, 同时将国内外结构人致振动舒适度评估标准写入该系统, 使结构振动测量评估系统的成本和硬件尺寸最小化, 并实现无线传输、快速处理数据和判断评估振动舒适度的功能。基于上述功能目标, 以实验室人行桥为例与 DASP 工程版动态测试分析系统采集的加速度响应进行对比, 幅值谱主频相对误差在 0.02%~2.85% 之间, 验证了传感系统采集精度。以人行天桥、教学楼楼盖、住宅楼楼盖和宿舍楼楼盖为研究对象在人致激励作用下进行振动舒适度测试, 结果表明: 研制的智能惯性传感系统可高效、实时测量结构产生的加速度响应, 并且可以准确判断振动舒适度, 为研究人员提供可靠的振动舒适度评估结果。

关键词: 人致振动; 振动舒适度; 树莓派; 传感器; 加速度

中图分类号: TU311.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)04-1024-09

DOI: 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.04.016

引 言

随着中国社会经济的发展和人民生活水平的日益提高, 在考虑结构安全性问题的同时, 关于建筑物振动舒适度的问题也引起了人们的高度重视。轻质高强材料的广泛应用和建筑物独特的造型使结构的跨度增大, 阻尼变小, 自振频率降低, 在人致激励作用下容易引起结构的大幅度振动, 造成使用人员的心理恐慌以及影响结构的正常使用。因此对建筑物结构进行振动舒适度准确评估可以保证结构的可靠性, 使用户具有良好的使用感, 同时对优化结构、延长结构的安全寿命具有重大意义^[1-3]。

目前, 国内外学者在进行结构振动舒适度研究中多采用传统有线传感系统。汪志昊等^[4]在进行钢混叠合板组合楼盖振动舒适度研究时, 采用 CO-INV 型数据采集系统及 DH610V 型电磁式速度传感器。何余良等^[5]在进行人致激励下装配式楼板振动舒适度分析时, 采用东华加速度测试系统进行加速度响应采集。丁叶蔚等^[6]开展木楼盖振动测试与舒适度分析时, 采用了包含信号采集箱、调理箱及分析软件的 CRAS 信号采集分析系统。Setareh^[7]在对细长人行桥的振动舒适度问题的模态

测试中, 采用 16 通道的信号采集仪及加速度计进行试验, 使用 ME' scope VES 系统进行模态分析。Cao 等^[8]在用误差域模型证伪的方法评估人行桥的振动舒适度的现场试验中, 使用 PCB 393B12 传感器测量动态响应。传统的传感器采集系统虽具有完备的采集体系, 但其体积大, 连接设备多, 不方便携带, 布线繁杂, 同时采集系统只进行信号采集与模态等分析, 对于结构的振动舒适度无法进行快速准确的判断, 还需在数据分析结束后根据规范进一步评估。

还有部分学者为振动测量自行研发加速度传感器。金峤等^[9]结合等强度梁与 L 型转轴设计了一种可调节灵敏度及量程的用于测量楼盖振动的光纤加速度传感器, 光纤传感器易受温度影响, 且需要光纤解调仪辅助采集, 对测试环境有一定的要求。童一飞等^[10]设计了一款以 FPGA 为主控芯片的低功耗的传感器采集系统用于工程领域振动测试, 但 FPGA 只能依靠硬件来进行功能实现, 设计人员需要对硬件系统及内部资源较为熟悉才能保证各元器件的配合, 开发具有难度。王占友等^[11]基于恩智浦单片机和 IEPE 传感器提出了一种智能加速度传感方案, 单片机在开发难度上大大降低, 却不能运行分时操作系统, 需要编程后再上传至主板。

收稿日期: 2021-11-15; **修订日期:** 2022-03-07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52168041, 51868046); 研究生教育质量工程项目(56-256017)。

综上所述,针对结构振动舒适度问题和现有传感器的缺陷,本文研发了一款基于树莓派4B的振动舒适度无线智能评估系统,基于Python计算机编程语言进行编程实现了加速度响应的采集和数据快速傅里叶变换,并且将国内外振动舒适度评估标准写入系统,在采集测量结束后即可得到不同标准下的评价结果,通过现场试验对系统的准确性进行验证,并使用该系统对楼盖进行测试。试验表明该系统可实现对人致振动下结构动态响应的监测,与传统传感系统相比具有体积小,轻量级,成本低,易开发,易携带,可视化,可进行振动舒适度评估的优势。

1 人致振动舒适度评估标准

为满足大跨楼盖在人致激励作用下的振动舒适度要求,主要采用以下两种控制方法来保证达到结构的舒适度指标:一是频率调整法,该方法规定结构的基频必须大于设定的频率基准值;二是动力响应分析法,该方法规定结构的振动响应必须小于规定的响应限值,常选用振动加速度响应为动力响应。杜浩等^[12]研究胶合木-混凝土组合楼盖在人行荷载激励作用下的振动舒适度时,采用了基频和峰值加速度双重指标进行振动舒适度评估^[13-14]。在振动舒适度评估中,自振频率只能作为舒适度评估的初步条件,评估标准还应满足人行荷载下结构的动力响应的要求。故考虑到对加速度响应的限制及时间等因素,本系统采用的中国、美国、欧洲的评价标准分别为文献^[15-17]。

1.1 中国

文献^[13]中第4.2.1条规定:以行走激励为主的建筑楼盖,第一阶竖向自振频率不宜低于3 Hz,竖向振动峰值加速度不应大于表1中的限值。

表1 楼盖竖向振动峰值加速度

Tab. 1 Peak acceleration of vertical vibration of floor

楼盖使用类别	峰值加速度 限值/(m·s ⁻²)
手术室	0.025
住宅、医院病房、办公室	0.05
商场、餐厅、机场大厅	0.15

1.2 美国

文献^[14]中每个评估标准由两部分组成:加速度或速度方面的结构响应预测和容许限值。如果结

构响应没有超过容许限值,则预测楼板或其他评估元件仅允许由于人类活动引起的可接受的振动水平。该标准提出的楼板结构和人行天桥的峰值加速度限值如图1所示。

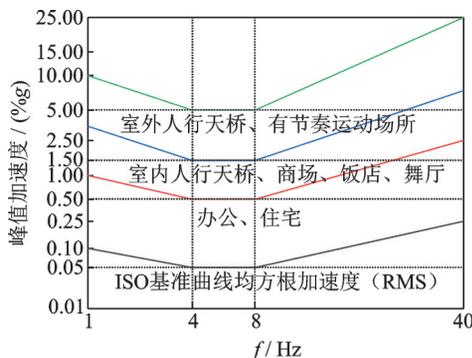


图1 楼板结构和人行天桥的峰值加速度限值

Fig. 1 Peak acceleration limits of floor structure and pedestrian bridge

1.3 英国

文献^[17]中第3.5条提出了考虑长期振动过程中可能存在的停歇期和幅值变化的振动剂量值(VDV)方法:

$$VDV = \left[\int_0^T a^4(t) dt \right]^{0.25} \quad (\text{m/s}^{1.75}) \quad (1)$$

式中 VDV 为振动剂量值; $a(t)$ 为频率加权加速度; T 为振动的总周期; $\text{m/s}^{1.75}$ 为单位。表2给出了不同情况下VDV的允许值。

表2 不同情况下VDV的允许值(单位: m/s^{1.75})

Tab. 2 Allowable value of VDV under different conditions (Unit: m/s^{1.75})

地点	不太可能引起负面情绪	可能引起负面情绪	很有可能引起负面情绪
白天住宅(16 h)	0.2~0.4	0.4~0.8	0.8~1.6
夜晚住宅(8 h)	0.13	0.26	0.51

2 人致振动舒适度评估系统

2.1 系统方案设计

本文设计的智能评估系统整体设计方案如图2所示。该方案主要分为加速度采集、振动舒适度判断以及数据输出三个模块。将CT1050LC型号的IEPE加速度传感器放置在结构上,启动评估系统客户端,MCC 172数据采集卡对加速度响应进行采集,将采集的数据传输至树莓派4B主板的判断系统,根据判断系统中的评估标准^[15-17]进行结构的舒适度判断,最后将结构舒适度评估结果输出至评估

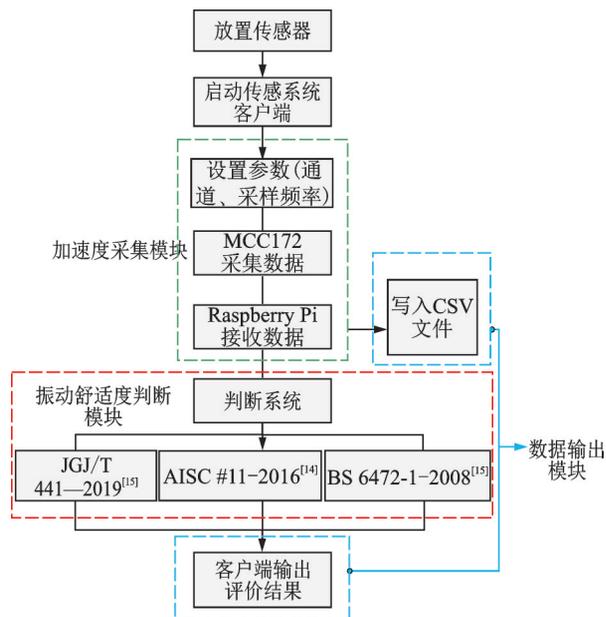


图2 系统整体设计方案

Fig. 2 Overall design scheme of the system

系统客户端供试验人员参考,测量过程中采集的加速度数据自动保存至CSV文件中便于察看和用于其他数据分析。

2.2 系统编程语言

本文设计的智能评估系统采用Python作为编程语言,Python语言具有简单、易学、易读、易维护的特点,功能强大且学习成本低,同时Python的可移植性较强,在Linux, Windows, FreeBSD, Macintosh, Solaris等操作平台均可开发,Python作为开放源代码软件之一以及其标准库的丰富性和多样性极大地为开发者提供了便利。

2.3 硬件组成

该系统硬件由树莓派4B主板, MCC 172数据采集卡, 锂电池, CT1050LC型IEPE传感器组成。传感器实物连接如图3所示。

智能评估系统采用树莓派4B作为主控核心(见图4), 树莓派(Raspberry Pi)4B是一款基于微处理器ARM而外观尺寸仅有信用卡大小的微型电脑主板,该主板以Micro SD卡作为内存硬盘,卡片主板周围具有4个USB接口和一个以太网接口,连接鼠标、键盘后可实现台式或便携式计算机的基本功能。

传感器为CT1050LC型IEPE传感器,尺寸为 $\Phi 25\text{ mm} \times 26\text{ mm}$,灵敏度为 500 mV/g ,量程为 10 g ,频率范围在 $0.2\sim 2500\text{ Hz}$,使用温度范围在 $-40\sim +150\text{ }^{\circ}\text{C}$,质量为 90 g ,仅仅是941B型拾振器质量的十分之一,内部含有压电材料使传感器不易受到外

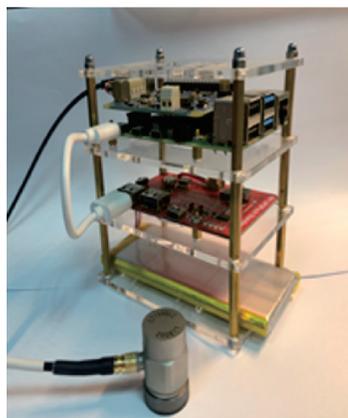


图3 传感器实物图

Fig. 3 Physical diagram of sensor



图4 树莓派4B主板

Fig. 4 Main board of Raspberry Pi 4B

部电磁环境的影响而导致采集结果不稳定,其供电和输出信号采用两线制方式,该传感器的优点是内置了电荷放大器,可与数据采集系统直接连接,不需要其他二次仪表,使输出结果更稳定,测量结果更可靠,适用于测量大多数振动。

数据采集卡采用的是基于树莓派的一款24位,应用于测量声音和振动中IEPE传感器信号的DAQ HAT-MCC 172,不需要多余的线路连接,可直接安装于树莓派40-pin通用输入输出(GPIO)连接器上。MCC 172数据采集卡尺寸为 $6.2\text{ cm} \times 5.6\text{ cm}$,供电电压为 5 V ,输入耦合为AC耦合。MCC 172配有2路同步24位差分模拟输入通道,采集速率高达每秒 51.2 k 数据点。每路通道配有专用A/D转换器。ADC共享时钟并同步转换,同

时采集数据。采集卡还可直接提供 IEPE 激励,无需额外添加信号调理设备,这使得系统的开发只需基于两块银行卡大小的主板,缩减设备数量及体积。并且 MCC 172 数据采集卡可通过 GPIO 引脚叠加共同工作,每块采集卡可连接两通道,最多可叠加 8 块采集卡在树莓派上,进行 16 通道同时采集的工作。

供电电源则由 UPS Pack V3 供电扩展板和 6500 mAh 锂电池组成,供电扩展版可以有效地保护树莓派主板,电池电量充满后续航时间可达 9 h,电量耗尽前 UPS 主板会提前通过 System halt signal 通知树莓派提前关机,然后自动进入休眠模式,防止树莓派由于非法关机而使系统文件被破坏。

2.4 GUI 图形用户界面设计与功能实现

为了便于用户观测数据变化趋势以及振动舒适度评价结果,本系统利用 Python Qt 5.12 下的 Qt Designer 编辑器对 GUI 界面进行设计,首先创建一个 QMainWindow 主窗口,使用 Push Button, Radio Button, Combo Box, Text Label 等组件先进行 GUI 界面采样频率和灵敏度设置,通道选取,采集的开始与停止以及评估条件选择等功能需求的布置,Label 和 Graphics View 控件用于显示加速度采集曲线以及 FFT 曲线。主界面的创建完成后保存文件生成后缀名为 ui 的文件,通过 Python Qt 5.12 中的 pyuic5 功能自动转化为 py 文件,用户通过运行 py 文件可进入到评估系统界面进行操作。

根据 Python Qt 界面与逻辑可分离的特点,基于 IDE(开发集成环境)PyCharm 对逻辑代码进行编辑,完成峰值加速度提取,数据写入 CSV 文件,导入汉宁窗函数来实现快速傅里叶变换,同时将中国、美国、欧洲振动舒适度评估标准转化为条件判断语句写入评估系统,分块定义实现与主窗口的功能连接。以上代码编写成功后,运行时 GUI 操作界面如图 5 所示。至此,本文所提出的系统方案通过这操作界面得到了可视化实现,左侧图框显示实时数据,右侧可控制采集和评估流程,采集结束后自动生成 CSV 文件保存在后台。

3 验证性试验

以实验室钢结构玻璃人行桥为例,对本文设计的树莓派传感器的可行性进行验证。钢结构玻璃人行桥共五跨,总跨度 $L=10.1\text{ m}$,宽度 $B=1.6\text{ m}$,基频为 4.0 Hz ,其余参数见文献[18],测点布置在跨中区域,如图 6 所示。试验中采用单个行人作为试验



图5 振动舒适度评估系统GUI图形用户界面

Fig. 5 GUI graphical user interface of vibration comfort evaluation system

过程中的振源,单个行人按照图示方向以 1.6 Hz , 2.0 Hz 以及随机步频行走 180 s ,产生的单人行走激励使钢结构玻璃人行桥起振。然后使用本文搭建的树莓派测量系统和 941B 型拾振器配套的 DASP 工程版动态测试分析系统以 200 Hz 的采样频率同时进行加速度响应的采集。

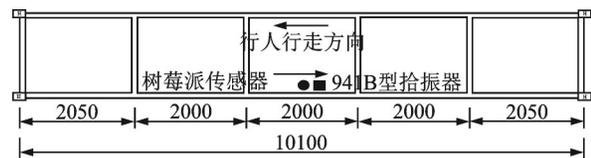


图6 传感器及振源布置图(单位:mm)

Fig. 6 Layout diagram of sensor and vibration source (Unit: mm)

图 7(a)~(d)对比了单个行人在 2.0 Hz 步频和随机步频激励下,搭建的树莓派传感器和 941B 型拾振器测得的加速度时程曲线和傅里叶频谱图。图 8 为实验室桥面试验现场图。试验结果表明,搭建的以树莓派为主控中心的传感器和 941B 型拾振器测得的加速度时程曲线基本吻合, 2.0 Hz 步频下幅值谱主频相对误差为 0.1% , 0.02% , 0.07% , 随机步频下幅值谱主频相对误差为 0.05% , 两种工况得到的傅里叶谱值图所示数据和钢结构玻璃人行桥已知的 4.0 Hz 基频对比, 2.0 Hz 步频的相对误差为 0.025% , 随机步频的相对误差为 2.85% , 故本文设计的树莓派传感器满足实际测量要求,具有可行性。

4 现场实际应用

4.1 实例 1: 人行天桥

该系统在验证了传感器的测量精度后进行现场实际应用,选取兰州市七里河区西津东路人行天桥作为 1 号试点,桥身主体为钢结构,人行桥长

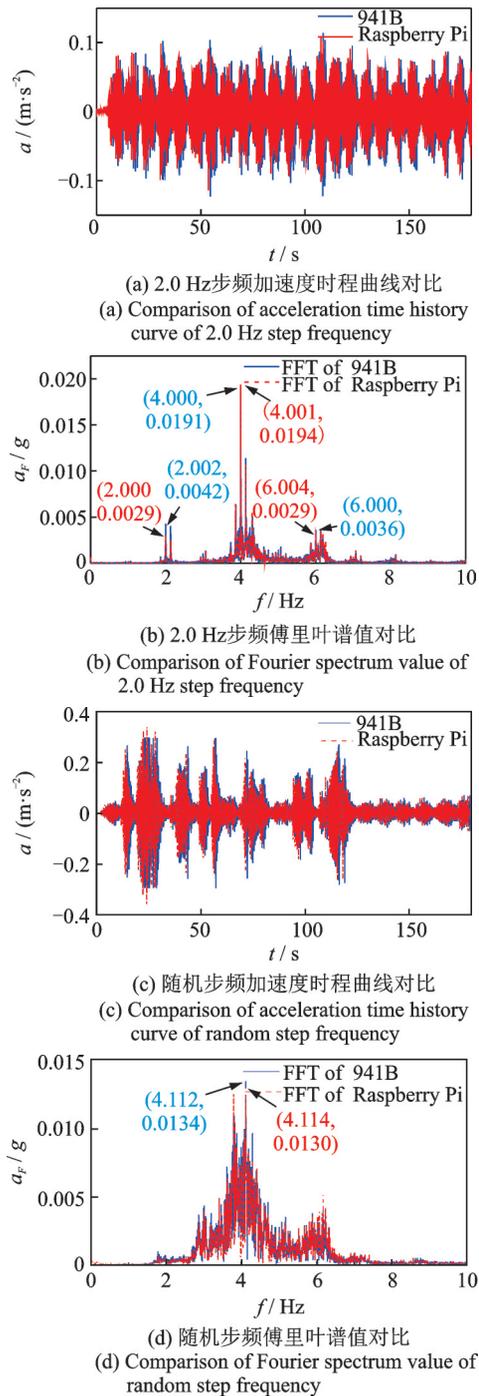


图7 2.0 Hz和随机步频测试精度对比

Fig. 7 Comparison of testing accuracy between 2.0 Hz and random step frequency

31.5 m, 宽 3.1 m, 两侧有 1.2 m 高的钢管扶手, 桥下为八车道的城区主干路, 将组装好的树莓派传感器使用磁座安装在人行天桥桥面跨中位置处, 图9为试验工况图, 试验时长为 240 s, 试验期间该人行桥大约通过 60 名行人, 包含学生、老年人、上班族等群体, 行人双向以快速、中速、慢速步频随机行走, 随机步频下测得的人行天桥峰值加速度为 0.0113 m/s^2 , 基频为 4.665 Hz, 传感系统采集的加速度时程曲线与局部傅里叶频谱图如图 10 所示。评估系统得到的振动舒适度评价结果如表 3 所示。



图8 实验室桥面试验现场图

Fig. 8 Test site diagram of laboratory bridge deck



图9 试验现场图

Fig. 9 Test site diagram

4.2 实例2: 教学楼楼盖

以1号教学楼楼盖作为2号试点, 该教学楼主体为钢筋混凝土结构, 共四层, 选取二层右侧边跨某教室进行振动舒适度评估, 楼盖长 11.4 m, 宽 9.8 m, 教室中放置课桌和椅子共 68 套, 树莓派传感器放置在楼盖跨中位置处, 共 11 名试验人员参与试验, 试验人员为在校大学生, 包括 5 名男生, 6 名女生, 分三种工况对教室的一般状态进行模拟, 试

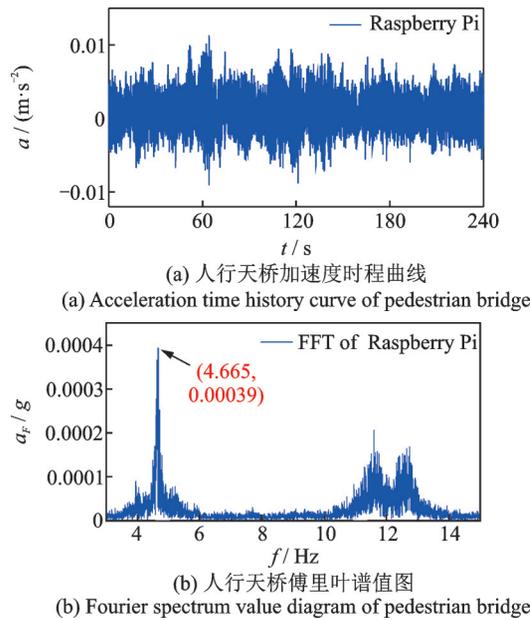


图 10 人行天桥试验结果图

Fig. 10 Test results diagram of pedestrian bridge

表 3 现场试验振动舒适度评价结果

Tab. 3 Evaluation results of vibration comfort in field test

工况	JGJ/T 441—2019 ^[13]	AISC #11—2016 ^[14]	BS 6472-1—2008 ^[15]
人行天桥	符合规范要求	符合规范要求	不太可能引起负面情绪
教学楼楼盖工况一	符合规范要求	符合规范要求	不太可能引起负面情绪
教学楼楼盖工况二	符合规范要求	符合规范要求	不太可能引起负面情绪
教学楼楼盖工况三	符合规范要求	符合规范要求	不太可能引起负面情绪
住宅楼楼盖	符合规范要求	符合规范要求	不太可能引起负面情绪
宿舍楼楼盖	符合规范要求	符合规范要求	不太可能引起负面情绪

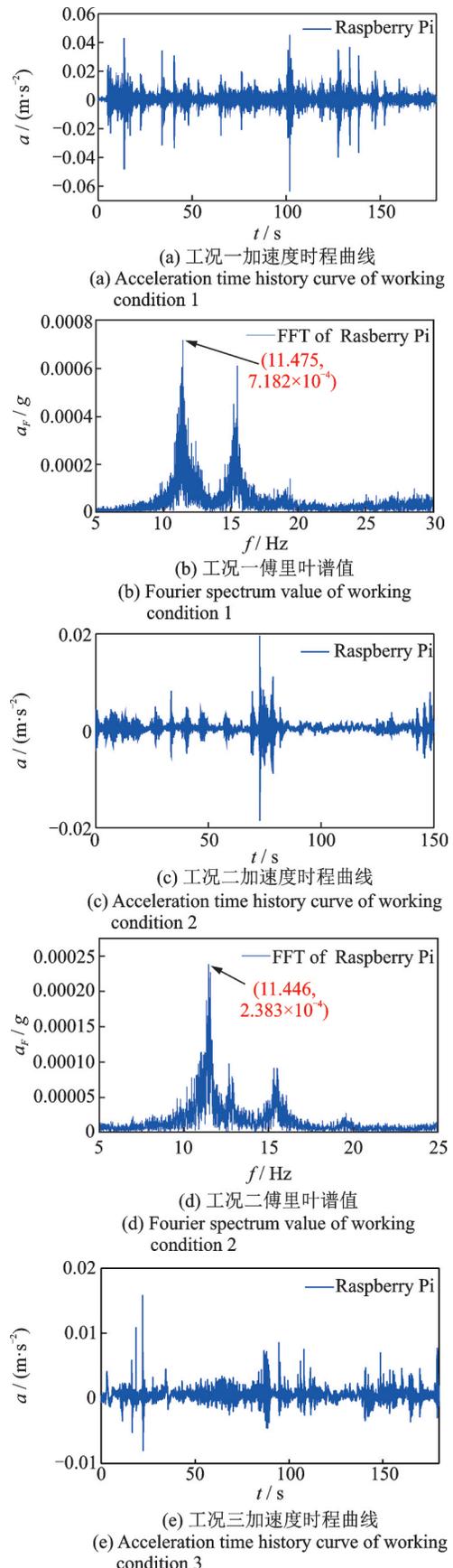
验现场图片如图 11 所示。工况一: 试验人员以随机步频在教室中行走, 对课间学生在教室中的出入及活动进行模拟; 工况二: 试验人员跟随口令进行起立、坐下等动作, 对上课时间段中的互动过程进行模拟; 工况三: 环境激励, 对教室在无人环境下的状态进行模拟。每次试验时长为 180 s, 现场测得



图 11 试验现场图

Fig. 11 Test site diagram

的教室楼盖峰值加速度分别为 0.0638 m/s², 0.0196 m/s², 0.0158 m/s², 基频分别为 11.475 Hz, 11.446 Hz, 11.647 Hz, 加速度时程曲线和局部傅里叶频谱图如图 12 所示, 工况三中的异常信号为校车经过减速带时引起的楼盖振动。评估系统得到



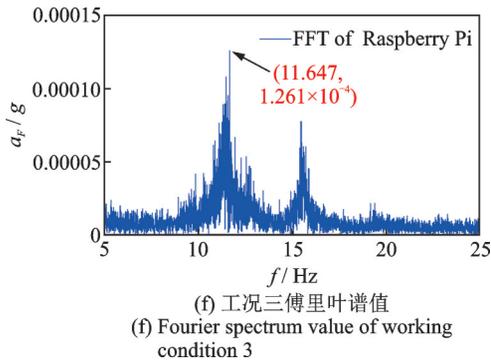


图12 三种工况试验结果图

Fig. 12 Test results diagram under three working conditions

的振动舒适度评价结果如表3所示。

4.3 实例3:住宅楼楼盖

以印刷厂住宅楼楼盖作为3号试点,该住宅楼主体为钢筋混凝土结构,共五层,选取三层某户进行振动舒适度评估,楼盖长10.4 m,宽4.3 m,树莓派传感器放置在楼盖跨中位置处,试验现场图片如图13所示。工况设置为环境激励,模拟房间内无住户活动的状态,其余未参与测试的楼盖均有住户进行日常活动,试验时长180 s,随机步频下测得的住宅楼楼盖峰值加速度为 0.01955 m/s^2 ,基频为24.916 Hz,传感系统采集的加速度时程曲线与局部傅里叶频谱图如图14所示。评估系统得到的振动舒适度评价结果如表3所示。

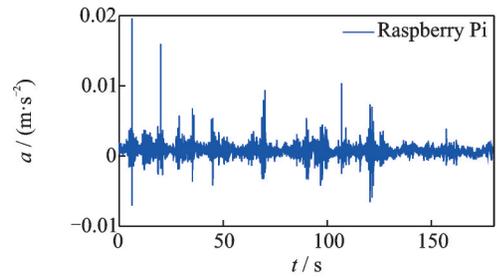


图13 试验现场图

Fig. 13 Test site diagram

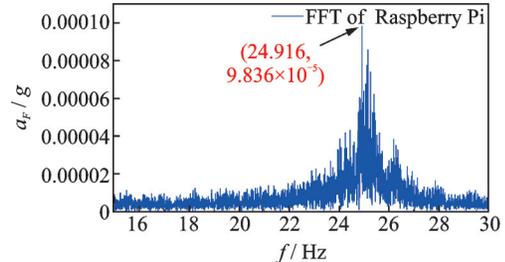
4.4 实例4:宿舍楼楼盖

以14号东宿舍楼楼盖作为4号试点,该宿舍楼主体为钢筋混凝土结构,共八层,每层34间宿舍,选取三层左侧边跨某宿舍进行振动舒适度评估,楼盖长6.4 m,宽3.5 m,宿舍内置有桌椅、铁架床等家具,树莓派传感器放置在楼盖跨中位置处,试验现场图片如图15所示。考虑到楼盖的使用功能以及文献[17]中白天与夜间不同的评估标准,本案例中工况设置为夜间10点状态下环境激励,试验时长180 s,随机步频下测得的住宅楼楼盖峰值加速度为 0.00966 m/s^2 ,基频为33.891 Hz,传感系统采集的加速度时程曲线与局部傅里叶频谱图如图16所示,加速度时程曲线中的异常信



(a) 住宅楼楼盖加速度时程曲线

(a) Acceleration time history curve of residential floor



(b) 住宅楼楼盖傅里叶谱值图

(b) Fourier spectrum value diagram of residential floor

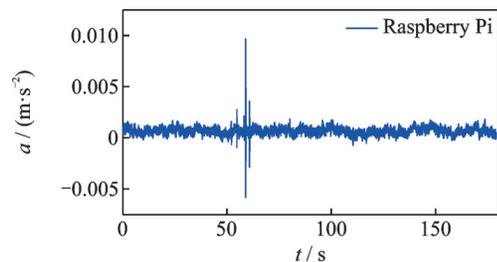
图14 住宅楼楼盖试验结果图

Fig. 14 Test results diagram of residential floor



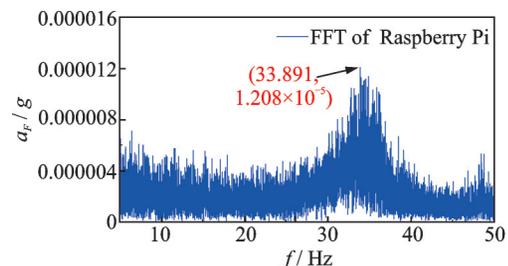
图15 试验现场图

Fig. 15 Test site diagram



(a) 宿舍楼楼盖加速度时程曲线

(a) Acceleration time history curve of dormitory floor



(b) 宿舍楼楼盖傅里叶谱值图

(b) Fourier spectrum value diagram of dormitory floor

图16 宿舍楼楼盖试验结果图

Fig. 16 Test results diagram of dormitory floor

号为宿舍门关闭撞击时引起的楼盖振动。评估系统得到的振动舒适度评价结果如表3所示。

5 结 论

本文设计基于IEPE压电式传感器和树莓派的结构人致振动评估系统,与传统加速度采集系统相较,具有以下优点:

(1)该系统采用Python计算机编程语言和树莓派、MCC 172数据采集卡相结合,降低了开发难度和成本,易于维护。其硬件结构简单,体积小,成本低,功耗低,携带方便,与PC端采用无线连接,配备了锂电池电源,使用更具有灵活性。

(2)采用Qt Designer编辑器创建GUI图形用户界面,简单便捷,用户可直观看见数据变化趋势。将中国、美国、欧洲等振动舒适度技术标准评估部分写入系统,可以在加速度采集结束后快速判断结构是否超过标准限值以及是否引起人的不适感。

通过实验室验证性试验,对比傅里叶频谱图可知,其幅值谱主频在2.0 Hz步频下相对误差在0.02%~0.1%,随机步频下相对误差为2.85%,试验以及现场实际应用表明,该系统满足加速度测量精度和采集要求,在振动舒适度的评估过程中拥有良好的应用前景,同时该系统也可应用于其他结构构件加速度响应的采集。

参考文献:

- [1] 王智丰,李贤军,易锦,等.大跨胶合木拱桥人致振动及其优化控制[J].土木工程学报,2021,54(4):79-94.
Wang Zhifeng, Li Xianjun, Yi Jin, et al. Human-induced vibration and optimal control of long-span glulam arch bridges[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(4): 79-94.
- [2] 庞瑞,王文康,张天鹏,等.踮脚和跳跃荷载下四边简支全装配式RC楼盖振动特性试验研究[J].建筑结构学报,2021,42(5):121-132.
Pang Rui, Wang Wenkang, Zhang Tianpeng, et al. Experimental study on vibration behavior of simple supported untopped precast RC floor under bounce and jumping loads[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(5): 121-132.
- [3] 官京城,谈丽华,陈鑫,等.考虑人-结构耦合作用的室内大跨钢连廊振动舒适度分析[J].建筑结构,2021,51(8):43-49.
Guan Jingcheng, Tan Lihua, Chen Xin, et al. Vibration comfort analysis of an indoor large-span steel corridor considering human-structure coupling[J]. Building Structure, 2021, 51(8): 43-49.
- [4] 汪志昊,王进沛,徐珂,等.某城楼大跨度钢-混凝土叠合板组楼盖振动舒适度研究[J].建筑结构,2021,51(2):92-96.
Wang Zhihao, Wang Jinpei, Xu Ke, et al. Study on vibration serviceability of a large-span steel-concrete composite floor in a city gate[J]. Building Structure, 2021, 51(2): 92-96.
- [5] 何余良,陈佳文,周仁甫,等.人行激励下预制装配式叠合楼板振动舒适度分析[J].建筑结构,2020,50(S2):433-439.
He Yuliang, Chen Jiawen, Zhou Renfu, et al. Comfortable analysis on prefabricated composite slabs under human-induced dynamic loads[J]. Building Structure, 2020, 50(S2): 433-439.
- [6] 丁叶蔚,付海燕,王正,等.木楼盖环境激励与冲击激励下振动测试与舒适度分析[J].建筑结构,2020,50(16):100-106.
Ding Yewei, Fu Haiyan, Wang Zheng, et al. Vibration test and comfort analysis of wooden building floor structure under environmental and impact excitations[J]. Building Structure, 2020, 50(16): 100-106.
- [7] Setareh Mehdi. Vibration serviceability issues of slender footbridges[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(11): 04016084.
- [8] Cao Wenjun, Koh C G, Smith I F C. Vibration serviceability assessment for pedestrian bridges based on model falsification[J]. Journal of Bridge Engineering, 2021, 26(3): 5020012.
- [9] 金峤,吴翔宇,王传克,等.一种用于人致楼盖振动测试的光纤加速度传感器[J].仪表技术与传感器,2020(7):11-16.
Jin Qiao, Wu Xiangyu, Wang Chuanke, et al. Fiber bragg grating acceleration sensor for detecting floor vibration caused by human walking[J]. Instrument Technique and Sensor, 2020(7): 11-16.
- [10] 童一飞,王红亮.低功耗IEPE传感器数据采集系统的设计与实现[J].电测与仪表,2019,56(5):101-104.
Tong Yifei, Wang Hongliang. Design and implementation of low-power IEPE sensor data acquisition system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 101-104.
- [11] 王占友,何琳.IEPE型智能加速度传感器的设计[J].舰船电子工程,2017,37(5):114-117.
Wang Zhanyou, He Lin. Design of IEPE intelligent acceleration sensor[J]. Ship Electronic Engineering, 2017, 37(5): 114-117.
- [12] 杜浩,胡夏闽,王汉成,等.胶合木-混凝土组合楼盖人行荷载激励下振动舒适度研究[J].建筑结构学报,2020,41(1):140-148.

- Du Hao, Hu Xiamin, Wang Hancheng, et al. Vibration serviceability of glulam-concrete composite floor under pedestrian excitation[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(1): 140-148.
- [13] 钢-混凝土组合楼盖结构设计施工规程: YB 9238—1992[S]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
Code for steel-concrete composite floor design and construction: YB 9238—1992 [S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992.
- [14] 组合结构设计规范: JGJ 138—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Code for design of composite structures: JGJ 138—2016 [S]. Beijing: China Architecture Building Press, 2016.
- [15] 娄宇, 吕佐超, 黄健, 等. 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准: JGJ/T 441—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
Lou Yu, Lü Zuochao, Huang Jian, et al. Technical code for human comfort of the floor vibration: JGJ/T 441—2019[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2019.
- [16] AISC/CISC. Steel design guide series No.11: floor vibrations due to human activity: AISC #11—2016 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, Inc., 2016.
- [17] Technical Committee GME/21/6. Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings: BS 6472-1—2008[S]. London: British Standards Institution, 2008.
- [18] 朱前坤, 马法荣, 张琼, 等. 行人-结构竖向动力耦合效应试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(11): 125-133.
Zhu Qiankun, Ma Farong, Zhang Qiong, et al. Experimental study on vertical dynamic coupling effect of pedestrian structure [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(11): 125-133.

Realization and engineering practice of wireless evaluation system for vibration comfort of structures

ZHU Qian-kun, LIU Yi, CUI De-peng, DU Yong-feng

(Institute of Earthquake Protection and Disaster Mitigation, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to accurately measure the vibration acceleration of the structure and provide a scientific and efficient judgment for whether the vibration causes discomfort to the user and affects the normal use of the structure, an intelligent inertia evaluation system is designed by using IEPE piezoelectric sensor and microcomputer Raspberry Pi based on Python. The evaluation standards of human-induced vibration comfort of structures in China, the United States and Europe are all written into the system, which can minimize the cost and size. This evaluation system can realize the functions of wireless transmission, data processing and vibration comfort evaluation rapidly. Based on the above functional objectives, taking the laboratory footbridge as a research object, compared with the acceleration response collected by the dynamic test and analysis system of DASP engineering version, the relative error of the main frequency of the amplitude spectrum is between 0.02% and 2.85%, which verifies the acquisition accuracy of the sensor system. Taking the pedestrian footbridge and the floor of the teaching building, residential building and dormitory as the research object to test the vibration comfort under human-induced excitation. The results show that the intelligent inertial sensing system can measure the acceleration response of the structure efficiently and in real time, and it can judge the vibration comfort accurately, which provides reliable evaluation results of vibration comfort for researchers.

Key words: human-induced vibration; vibration comfort; Raspberry Pi; sensor; acceleration

作者简介: 朱前坤(1981—),男,博士,教授。电话: 13679488676; E-mail: zhuqk@lut.cn。