

文章编号:1671-4229(2023)02-0035-08

# 基于车载智能手机的桥梁频率识别研究

周祖年, 罗显智, 余文业, 钟幸峰, 罗旭飞, 周军勇\*

(广州大学 土木工程学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 为发展高效的路网级桥梁结构状态检测技术,探索采用智能手机作为车载传感器进行桥梁频率间接识别的可能性。文章进行了以下试验:①通过市场调研确定了12款具有加速度采集功能的智能手机APP,分别从技术参数和试验可行性角度筛选了4款用于结构振动测试;②将智能手机和精密传感器安装于试验桥上测试结构振动,对比二者采集效果以验证智能手机用于桥梁振动测试的可行性;③将二者安装于试验车上,研究车辆静置于桥梁上和车辆移动过桥两种工况下采集结果的差异。试验表明,直接安装于桥梁上,二者时频图完全一致。安装于车辆上,静置工况下,二者时频信号有较好一致性;移动工况下,二者频域信号基本相同,时域信号变化规律相似。试验证明智能手机可以在一定程度上替代精密传感器用于车载传感器移动监测桥梁健康状态。

**关键词:** 桥梁工程; 结构健康监测; 间接测量; 智能手机; 频率识别

**中图分类号:** U 441.2 **文献标志码:** A

## Study on the identification of bridge frequencies using vehicle-mounted smartphones

ZHOU Zu-nian, LUO Xian-zhi, YU Wen-ye, ZHONG Xing-feng, LUO Xu-fei, ZHOU Jun-yong\*

(School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** To develop an efficient inspection technology on the structural condition of network-level bridges, this study explores the feasibility of indirect identification of bridge frequencies using smartphones as vehicle-mounted sensors. First, twelve smartphone apps with acceleration acquisition functions were determined through market research, and four apps were selected for structural vibration testing based on their technical parameters and experimental feasibilities. Then, the smartphone and commercial sensors were directly installed on the test bridge to measure the bridge vibrations, and the acquired time domain and frequency domain diagrams of the signals collected by the two sensors were compared and analyzed to validate the feasibility of using smartphones in bridge vibration tests. Finally, the smartphone and commercial sensors were installed on the test vehicle to analyze the differences in the time domain and frequency domain diagrams collected by the two sensors when the test vehicle was statically placed on the bridge and moving across the bridge. The experimental results showed that the time domain and frequency domain diagrams of vibration signals collected by the two sensors were the same when installed on the bridge. In the case of sensors installed on the test vehicle, the time-

收稿日期: 2022-12-30; 修回日期: 2023-03-08

基金项目: 广州市基础研究计划市校(院)联合资助项目(SL2023A03J00897); 广州大学大学生创新创业训练计划资助项目(S202111078093, S202211078162)

作者简介: 周祖年(1995—),男,硕士研究生. E-mail:18856309513@163.com

\*通信作者. E-mail:jyzhou@gzhu.edu.cn

引文格式: 周祖年, 罗显智, 余文业, 等. 基于车载智能手机的桥梁频率识别研究[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2023, 22(2): 35-42.

frequency signals collected by the two sensors had good consistency when the vehicle was statically placed on the bridge. However, when the vehicle moved across the bridge, the frequency diagrams of the signals collected by the two sensors were generally the same, and the time-history diagrams were similar. This study proves that smartphones can serve as alternatives to commercial sensors as monitoring equipment mounted on vehicles to inspect the health condition of bridge structures.

**Key words:** bridge engineering; structural health monitoring; indirect measurement; smartphone; frequency identification

桥梁是道路交通运输网络中的生命线枢纽工程,对于打破通行瓶颈、促进资源流动、加强社会沟通具有非常重要的意义。据统计<sup>[1]</sup>,截至 2016 年底,我国公路桥梁中处于 IV 类(有安全隐患)和 V 类(危险状态)的桥梁接近 4 万座,占比达 3.8%,按照当前桥梁管养水平预计,30 年后这一比例将接近 17.0%,这将成为道路运输网络中的致命缺陷。掌握既有桥梁的健康状态,是进行桥梁养护及维修加固的基础,对于优化路桥管理养护资源具有重要意义<sup>[2]</sup>。目前,主要有常规检测和健康监测两种手段对既有桥梁健康状态进行识别分析。常规检测主要通过人工巡检、无损探测和荷载试验等途径实施,但是存在人力资源要求高、检测效率低和干扰交通通行等缺陷<sup>[3]</sup>。健康监测通过在桥梁上布设传感器及采集系统,实时获取桥梁的荷载与结构响应信息,并对结构状态及安全进行动态评估<sup>[4-6]</sup>;然而,健康监测通常要求传感器的采集精度高、使用寿命长、数据传输快,由此造成了传感器的成本高昂;另一方面,需要在桥梁上布置相当数量的传感器才能掌握结构状态,否则难以覆盖数量庞大的路网桥梁。因此,探索低成本且满足高精度要求的新型桥梁健康监测技术,具有迫切的现实意义。

基于车载传感器的间接量测技术独辟蹊径地将传感器布设在通行桥梁的车辆上,在车辆过桥激励下,产生车桥耦合振动,采集的车辆振动信号里涵盖了桥梁的动力特性,应用信号处理方法可以识别出桥梁结构参数(如频率、模态及阻尼等),进而达到监测桥梁健康状态的目的。该创新思想由 Yang 等<sup>[7]</sup>和 Lin 等<sup>[8]</sup>提出,受到了国内外学者的广泛关注<sup>[9-12]</sup>。大量研究证实<sup>[7-12]</sup>,基于车载传感器采集的振动信号不仅能够反映桥梁振动频率、结构阻尼、模态振型等动力参数,还能识别局部刚度退化、裂缝、预应力损失及桥墩冲刷等损伤特性。近年来,有学者提出采用智能手机替代精

密传感器进行桥梁健康状态移动监测<sup>[13-16]</sup>,充分利用了智能手机便携性强、容易获得和使用广泛等特点。Mcgetrick 等<sup>[13]</sup>率先采用车载智能手机和全球卫星导航系统建立了城市基础设施移动监测系统,实际应用证明了该监测系统的有效性,并指出该系统是专业传感器经济成本的 1%。Matarazzo 等<sup>[14]</sup>基于车载智能手机成功识别了哈佛大桥的前三阶固有频率,且采用多个智能手机进行重复试验,显著提高了识别精度;Mei 等<sup>[15]</sup>利用智能手机的陀螺仪和加速度采集仪进行桥梁和道路的健康状况感知,并通过模型试验验证其效果。Sitton 等<sup>[16]</sup>在没有桥梁振动参数的先验信息情况下,采用智能手机成功识别桥梁的基础频率,识别误差仅为 4%。近年来,基于车载智能手机的桥梁健康监测在国内也开始受到关注并进行了初步探索,刘志平等<sup>[17]</sup>利用谷歌 NX5 和小米 MI3 两个品牌的手机和 SPAN-IGM-A1 惯性组合导航系统对徐州汉桥进行加速度信号采集和振动检测的对比试验,有效验证了便携式、低成本 Android 智能手机进行桥梁振动检测的可行性。从建力等<sup>[18]</sup>通过滤波技术剔除手机传感器因系统稳定及测试环境引起的随机误差,提高了智能手机测试车体振动加速度的质量,用于评价轨道平顺状态和车辆振动的舒适性。这些研究表明,利用智能手机作为传感器感知车辆过桥的振动信号,能够用于桥梁健康状况的评估。

本研究拟系统建立基于车载智能手机识别桥梁频率的方法:①梳理目前能够用于加速度信号采集的智能手机 APP,比较它们的操作特点和技术指标,从而筛选出能够用于结构振动监测的类型;②通过模型试验对比采用智能手机和精密传感器进行桥梁振动监测的效果,进一步测试所筛选 APP 监测结构振动的精度;③基于模型试验,研究车载智能手机进行桥梁频率识别的方法和效果,推动车载智能手机进行路网桥梁移动监测的

工程应用。

## 1 智能手机的加速度采集系统

目前商用智能手机的操作系统主要以 Android 和 iOS 为主,通过调研汇总了具有加速度采集功能的 APP,如表 1 所示。对这些 APP 的语言环境、数据导出格式、采集精度、采集频率和采集时长等进行了对比。表中的 APP 是笔者尽可能收集到的资源汇总,其语言环境以中文和英文为主,部分是日文。所有 APP 都能够以数据文本的方式导出,这为基于手机采集振动加速度数据的再处

理提供了较大的支持。但是部分 APP 的数据保存和共享存在一定的缺陷,例如 Accelerometer 只能通过短信分享存储数据, Sensor Sense 保存数据偶尔存在闪退问题,等等。大部分 APP 数据采集精度可以保证  $1 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-2}$ ,这基本能够涵盖土木工程结构的振动影响特性,少量程序申明数据采集精度达到  $1 \mu\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。采集频率方面,实际桥梁结构的基础振动频率通常在  $0 \sim 10 \text{ Hz}$  以内,前三阶基本在  $25 \text{ Hz}$  以内,为了满足采样不失真的目标,要求采集系统的频率不低于  $50 \text{ Hz}$ 。此外,大部分 APP 支持无限时长 ( $\geq 10 \text{ min}$ ) 的数据采集,仅有少量 APP 数据采集需要付费。

表 1 面向振动加速度采集的智能手机 APP 及其技术参数

Table 1 Smartphone APPs and their technical parameters for measuring vibration accelerations

APP 名称	操作系统	语言环境	数据导出格式	采集精度 $/(m \cdot s^{-2})$	采集频率 $/\text{Hz}$	采集时长	备注
Acceleration	iOS	中文	CSV	$10^{-6}$	$3 \sim 100$	$\geq 10 \text{ min}$	能够测试转动加速度
Phyphox	iOS	中文	EXCEL CSV	0.01	100	$\geq 10 \text{ min}$	其 Android 版本就是物理工坊
Sensor Logger	iOS	英文	CSV	0.001	$0 \sim 60$	$\geq 10 \text{ min}$	保存数据时间值误差在 $\pm 0.000 1 \text{ s}$
Acceleration Logger	iOS	日文	CSV	$10^{-6}$	$10; 10; 100$	$\geq 10 \text{ min}$	数据保存时可能闪退
Accelerometer	iOS	英文	CSV/XML/JSON	0.001	$1 \sim 30$	$\geq 10 \text{ min}$	数据只能通过短信分享
Physics Toolbox Suite	iOS	英文	CSV	0.001	100	$\geq 10 \text{ min}$	保存数据的时间值存在 $\pm 0.01 \text{ s}$ 的随机偏移,数据存储偶尔卡顿
G-Sensor logger	Android	中文	CSV	0.01	50	10 000 点/次(免费版); 不限(收费版)	保存数据的时间值存在 $\pm 0.01 \text{ s}$ 的随机偏移
物理工坊	Android	中文	EXCEL CSV	0.01	100	$\geq 10 \text{ min}$	保存数据时间值误差在 $\pm 0.000 1 \text{ s}$
Sensor Sense	Android	中文	CSV	0.01	5	$\geq 10 \text{ min}$	保存数据可能存在闪退现象
Physics Toolbox Accelerometer	Android	中文	CSV	0.001	$\{100, 500\}$	$\geq 10 \text{ min}$	保存数据的时间值存在 $\pm 0.01 \text{ s}$ 的随机偏移
Sensor Kinetics	Android	中文	CSV	0.01	$\{5, 15, 50, 500\}$	$\geq 10 \text{ min}$	仅收费版支持数据保存
加速度センサーロガー	iOS	日文	CSV	0.001	$1 \sim 10$	$\geq 10 \text{ min}$	语言问题数据分享困难

为了满足车载传感器的数据采集与桥梁健康识别,要求手机加速度传感器采集系统具有如下功能特性:①能够很好地进行数据存储和共享,方便车载加速度数据的处理分析;②具有不低于  $50 \text{ Hz}$  的数据采集频率,可敏感地感知振动响应;③数据采集具有较准确的精度(包括时间、定位精

度),数据稳定性较好。基于上述功能特性要求,通过对表中所有加速度采集 APP 的体验及参数对比分析,最终选择 Acceleration、Phyphox、Sensor Logger 和物理工坊 4 款 APP 作为车载传感器振动采集程序。

## 2 智能手机振动测试效果的对比评估

基于所选择的手机加速度采集程序,通过与精密加速度传感器一起安装在模型桥梁上,以激振器固定频率激励以及初始位移自由振动的方式,通过手机传感器和精密传感器分别测试桥梁振动响应时程,从信号的时域和频域角度对比评估手机加速度采集程序与精密传感器的采集效果。智能手机用双面胶牢固地固定在被测物体表面,在实际应用中有必要研发智能手机固定装置,可以快速固定在被测物体上,测量其振动,又便于拆卸。

### 2.1 试验模型与测试工况

试验模型为 3 m 等截面简支钢梁,采用 550 mm × 60 mm × 10 mm 的工字形横断面,模型梁设

计图与实景照片如图 1 所示。为了精确对比各款 APP 加速度采集效果与精密传感器,分别选择一个精密传感器和一个智能手机 APP,同时采集振动数据。传感器布置在模型桥跨中位置,其中智能手机采用双面胶粘贴在测试钢梁上,精密传感器采用磁力座固定,采用压电式加速度传感器、内置 IEPE 放大器、测量范围 10 g、频率响应 0.2 ~ 2 500 Hz。采用两种测试模式进行对比:①激振器固定 8.00 Hz 的频率竖向激励,布置在靠近跨中 30 cm 位置,桥梁一阶竖弯频率为 7.80 Hz;②人为在跨中施加初始竖向位移,使模型桥自由振动。为了准确对比智能手机与精密传感器对振动响应时程采集信号的匹配情况,选择这些 APP 的最大采集频率进行试验,即 Sensor Logger 为 50 Hz,而其他为 100 Hz,精密传感器选择与对应 APP 相同采集频率进行试验对比。

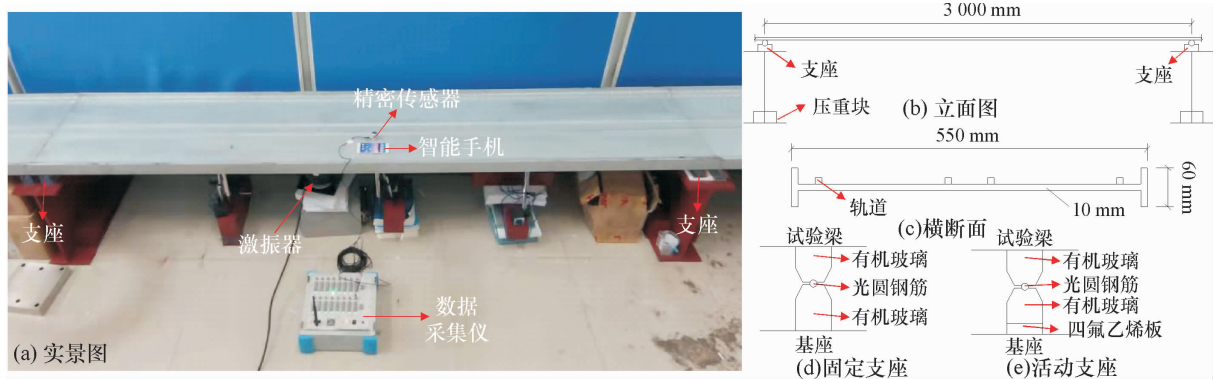


图 1 车桥试验模型的实景图与设计构造图

Fig. 1 Photos and design drawings of the scaled vehicle-bridge test model

### 2.2 测试效果的对比评估

对比强迫振动和自由振动情况下智能手机与精密传感器对加速度时程和加速度频谱的采集和分析结果,如图 2 和表 2 所示。限于论文篇幅,图 2 只给出了物理工坊 APP 与精密加速度传感器采集信号的时域和频域结果对比,表 2 则给出了 4 款 APP 与精密传感器所识别频率与阻尼比的对比。激振器强迫振动的时程加速度信号采用快速傅里叶变换获得频谱图,初始位移下的自由振动则截取自由衰减振动段的数据信号进行快速傅里叶变换获得其频谱。通过频谱分析:激振器受迫振动的信号的主要频率应该与激振器频率相同,即 8 Hz;自由衰减振动中获得的主要频率应该为模型桥一阶固有频率,即 7.80 Hz。

测试结果显示,这 4 款 APP 总体对时程加速

度的采集与精密传感器具有很好的一致性,物理工坊和 Phyphox 能完全重合精密传感器的采集时程曲线,Acceleration 和 Sensor Logger 对于规律受迫振动的时程曲线能够达到高度一致,但是对于不规则振动的时程曲线在局部存在一定差异。从采集加速度频谱图的对比来看,手机传感器对振动信号的频谱分析与精密传感器具有较高的一致性,两者识别的一阶频率完全一致,相对而言,手机传感器存在更多的杂波信号,使得其频谱图有更多频率信号的分布,这在一定程度上反映了智能手机相对于精密传感器会在数据采集过程中引入未知的振动信号。

由表 2 可知,无论是受迫振动还是自由振动,智能手机识别的振动频率与精密传感器完全一致。受迫振动下,4 款手机 APP 识别的振动频率

均为激励频率,自由振动下物理工坊和 Phyphox 能够精确地识别到桥梁的固有频率,而 Acceleration 和 Sensor Logger 识别的桥梁频率分别为 7.83 Hz 和 7.84 Hz,与真实的桥梁频率误差在 1% 以内。此外,根据自由振动衰减曲线计算桥梁的阻尼比

系数,对比可以看出,智能手机与精密传感器测试得到的桥梁阻尼比均在 0.011 左右,测试偏差在  $\pm 0.001$  以内,整体效果较好,且 4 款智能手机的测试结果非常接近。这些结果充分表明智能手机具有替代精密加速度传感器用于结构振动测试的潜力。

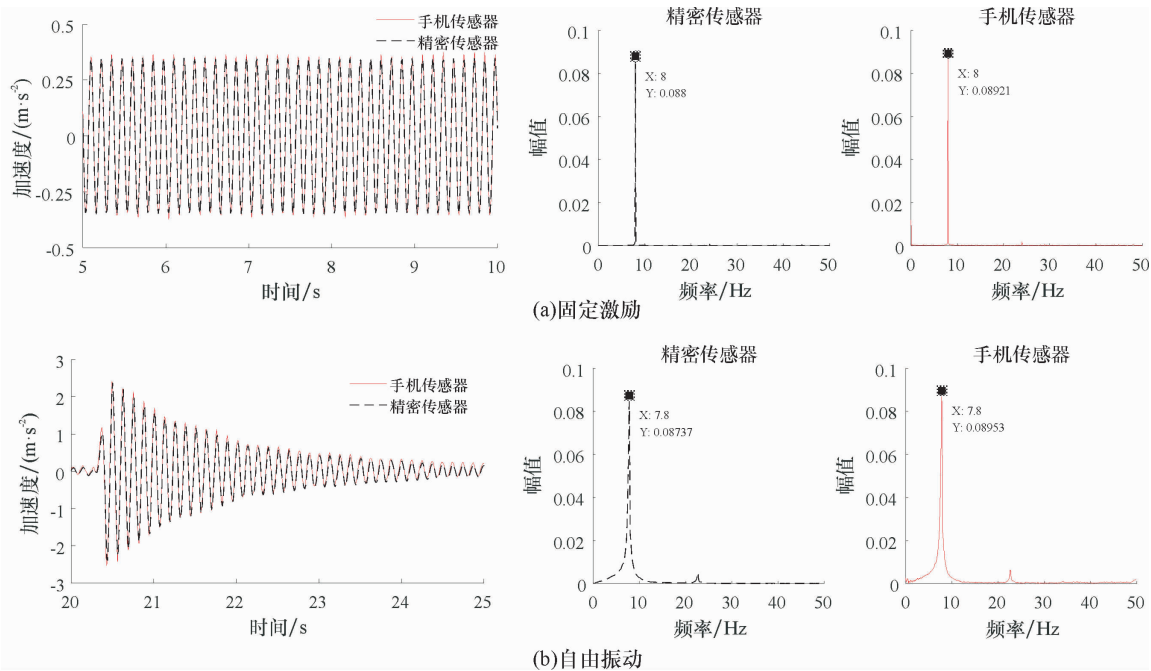


图 2 物理工坊与精密传感器安装于桥梁上的测试加速度结果对比

Fig. 2 Comparison of acceleration measurements between the “物理工坊” app and commercial sensors installed on the bridge

表 2 智能手机与精密传感器对试验梁动力参数识别结果的对比分析

Table 2 Comparative analysis of dynamic parameters identification of the test beam by the smartphone and commercial sensors

APP 类型	频率(固定激励)/Hz		频率(自由振动)/Hz		阻尼比(自由振动)	
	智能手机	精密传感器	智能手机	精密传感器	智能手机	精密传感器
物理工坊	8.00	8.00	7.80	7.80	0.011 9	0.011 5
Acceleration	8.00	8.00	7.83	7.83	0.010 2	0.010 5
Sensor Logger	8.00	8.00	7.84	7.84	0.010 4	0.010 5
Phyphox	8.00	8.00	7.80	7.80	0.011 5	0.010 7

### 3 基于车载智能手机的桥梁频率识别

前述试验将智能手机直接安装在桥梁上测试结构振动响应,这里将智能手机和精密传感器安装在移动车辆上,通过间接手段测试桥梁动力参数。其过程(图 3)包括:①将试验车静置于桥梁上,通过对桥梁施加初始位移使得桥梁自由衰减振动,对比精密传感器和智能手机采集信号对桥梁动力参数的识别结果;②通过人工拖拉方式以随机速度将试验车拉动过桥,获得过桥车辆的振

动信号。试验中试验车质量为 15.82 kg,弹簧刚度为  $266.7 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

#### 3.1 基于静置车辆振动信号的桥梁参数识别

图 4 给出了智能手机与精密传感器在静置车辆上测试信号的时程结果对比。由图 4 可见,安装于静置车辆上相对于安装于桥梁上,两种传感器之间的测试信号呈现较大的差异,这种差异主要体现在对加速度峰值采样结果的不同,但是信号的振动规律是完全一致的。需要特别注意的是物理工坊和 Phyphox 采集效果要更好些,而 Acceleration 和 Sensor Logger 则在某些局部采集信号与

精密传感器方面存在较大差异。将时程信号进行 FFT 变化获得振动频率,显然由于车辆是静置的,测试的振动频率应该主要包含车体频率和桥梁频

率,而 FFT 分析结果表明车体振动信号较为微弱、在频谱图中不明显。

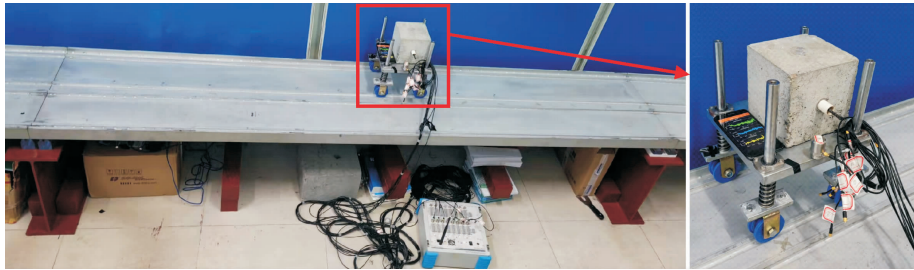


图 3 基于车载传感器的桥梁监测试验图

Fig. 3 Experimental photo of bridge monitoring using drive-by sensors

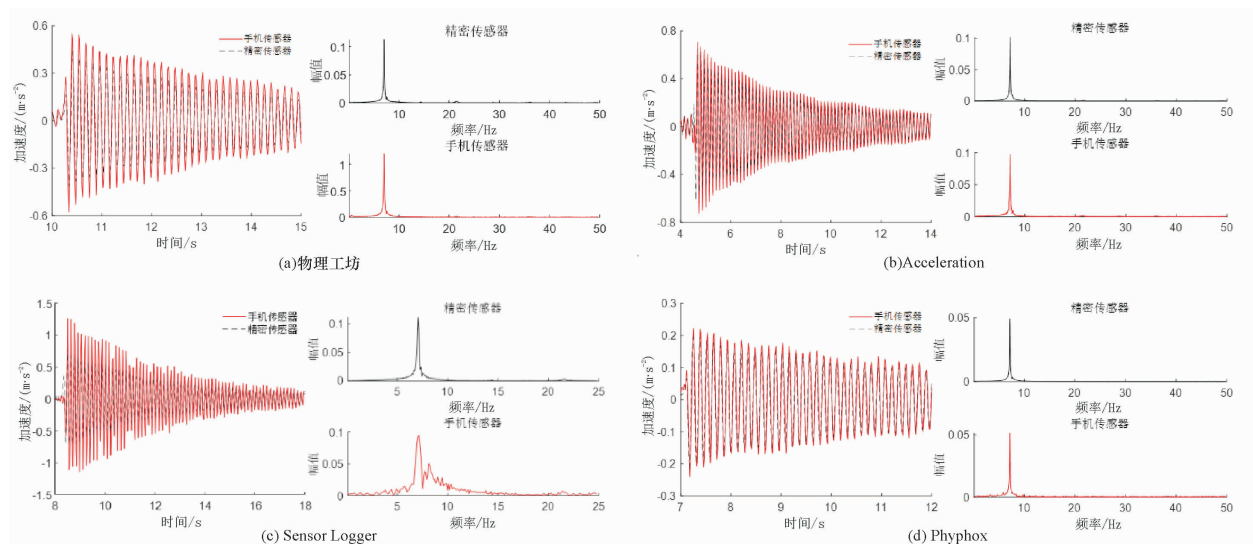


图 4 智能手机与精密传感器对静置车辆振动信号的测试结果对比

Fig. 4 Comparison of measurements between the smartphone and commercial sensors installed on the static vehicle

由图 4 可知,物理工坊与精密传感器测试频率分别为 7.067 8 Hz 和 7.067 8 Hz, Acceleration 和精密传感器测试频率分别为 7.107 3 Hz 和 7.107 3 Hz, Sensor Logger 和精密传感器测试频率分别为 7.083 5 Hz 和 7.083 5 Hz, Phyphox 和精密传感器测试频率分别为 7.157 1 Hz 和 7.157 1 Hz, 上述结果表明智能手机虽然时程测试结果与精密传感器在峰值捕捉上存在一定差异,但是对振动信号的频率采集结果高度一致,说明在车辆静置条件下,完全可以采用智能手机替代精密传感器测试桥梁结构的动力特性参数。需要注意的是,4 款手机 APP 采集结果存在一定差异,但是误差在 1.5% 以内,且本工况下的测试频率要低于桥梁频率 7.80 Hz,主要是试验车增加了结构质量从而降低了固有频率。

### 3.2 基于移动车辆振动信号的桥梁参数识别

初步试验发现仅通过人工拖拉试验车过桥的方式,测量的车辆振动信号可以识别桥梁频率,但是该频率成分不明显,且受到其他振动信号的影响,这可能是因为试验车本身振动信号较强掩盖了桥梁频率,通过改进试验车弹簧刚度和车体质量等方式可以进一步增强识别效果。在试验车过桥之前,给桥梁简单触碰激励使得桥梁具有初始振动,然后人工拖拉试验车过桥获得车体振动加速度,通过 FFT 变换得到车体加速度响应的频谱图。

图 5 给出了移动车辆上智能手机与精密传感器的测试信号,分别从时程响应和频谱图方面进行了对比。从时程响应来看,手机传感器时程信号的变化规律与精密传感器的基本相似,但是在峰值响应上,手机传感器测试数值整体偏高,这个

测试偏差相对于静置车辆上的测试信号之间的偏差更加显著,主要是受到移动车辆本身的振动影响。从频谱图来看,两种传感器测试获得的主频都是桥梁频率,识别结果完全相同,不同 APP 之间识别的桥梁频率误差在 3% 以内,说明采用智能手机用于车载传感器移动测试桥梁动力参数的可行

性。需要注意的是,手机传感器的频谱相对于精密传感器杂波信号更少、频谱更加纯净、基频峰值更大,这主要是因为精密传感器是有线的,移动过程中采集线的运动一定程度会影响信号的纯正性,这说明了智能手机作为无线传感器在车载移动监测技术应用中的优势。

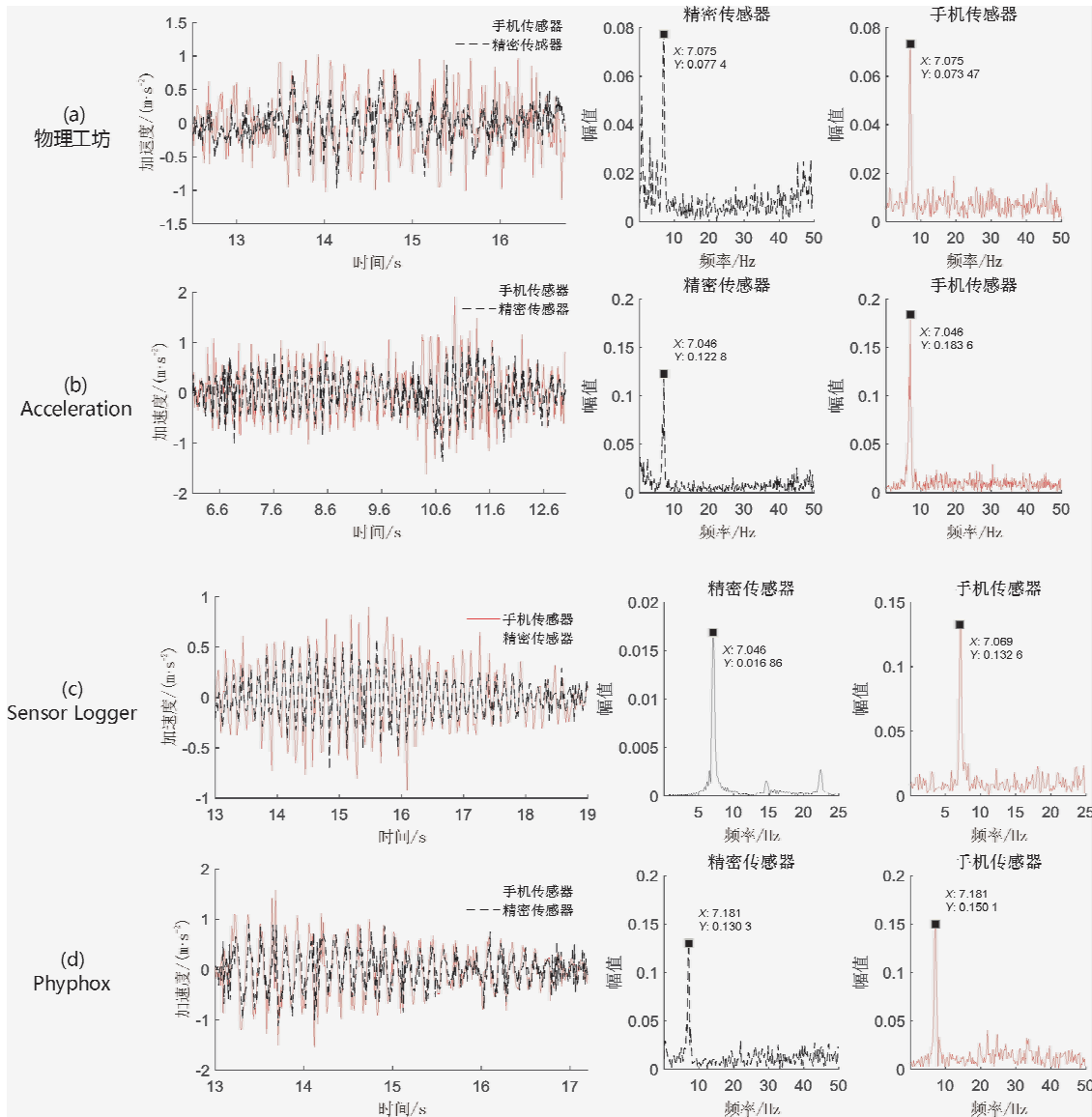


图 5 智能手机与精密传感器对移动车辆振动信号的测试结果对比

Fig. 5 Comparison of measurements between the smartphone and commercial sensors installed on the moving vehicle

#### 4 结论与展望

本文探索了智能手机作为车载传感器间接测量桥梁频率的试验效果,筛选了市面上可用于加速度信号采集的智能手机 APP,通过智能手机与

精密传感器采集振动信号的对比,分别直接安装于桥梁上测试桥梁振动、安装于车辆上测试桥上静置车辆振动和安装于车辆上测试桥上移动车辆振动,说明了智能手机用于桥梁频率测试的效果,主要结论如下:

- (1) 通过对目前市面上 Android 和 iOS 系统的

12 款加速度采集 APP 的技术对比和试验分析,筛选了 Acceleration、Phyphox、Sensor Logger 和物理工坊这 4 款 APP 可用于结构振动测试;

(2) 直接将传感器安装于桥梁上,在固定激励或自由振动条件下,智能手机对信号的时程采集结果及信号的频域分析结果都高度等同于精密加速度传感器;

(3) 将传感器安装于静置于桥梁的车辆上,在自由振动条件下,智能手机对信号的时程采集结果基本等同于精密传感器,信号的频域分析结果则完全相同;

(4) 将传感器安装于桥梁的机动车辆上,智能手机与精密传感器采集信号规律相同,但是幅值具有明显差异,然而两者均能准确识别桥梁频率,且智能手机因为是无线传感器设备,频谱分析结果优于有线精密传感器。

本研究充分证明了智能手机可以在一定程度上替代精密传感器用于结构振动测试,可以作为车载传感器移动监测桥梁结构状态。后续可以进一步开展基于智能手机移动监测识别桥梁模态振型、阻尼比以及结构损伤的可能性等研究。

### 参考文献:

- [1] 周建庭, 郑丹. 保障我国桥梁安全的战略思考[J]. 中国工程科学, 2017, 19(6): 27-37.
- [2] 张喜刚, 刘高, 马军海, 等. 中国桥梁技术的现状与展望[J]. 科学通报, 2016, 61: 415-425.
- [3] Dorafshan S, Maguire M. Bridge inspection: Human performance, unmanned aerial systems and automation [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, 8(3): 443-476.
- [4] Li H, Ou J P, Zhang X G, et al. Research and practice of health monitoring for long-span bridges in the mainland of China [J]. Smart Structures & Systems, 2015, 15(3): 555-576.
- [5] Bao Y Q, Chen Z C, Wei S Y, et al. The state of the art of data science and engineering in structural health monitoring [J]. Engineering, 2019, 5(2): 234-242.
- [6] Sun L M, Shang Z Q, Xia Y, et al. Review of bridge structural health monitoring aided by big data and artificial intelligence: From condition assessment to damage detection [J]. Journal of Structural Engineering, 2020, 146(5): 04020073.
- [7] Yang Y B, Lin C W, Yau J D. Extracting bridge frequencies from the dynamic response of a passing vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2004, 272(3/5): 471-493.
- [8] Lin C W, Yang Y B. Use of a passing vehicle to scan the fundamental bridge frequencies: An experimental verification [J]. Engineering Structures, 2005, 27(13): 1865-1878.
- [9] Gonzalez A, O'Brien E J, Mcgetrick P J. Identification of damping in a bridge using a moving instrumented vehicle [J]. Journal of Sound and Vibration, 2012, 331(18): 4115-4131.
- [10] Kong X, Cai C S, Deng L, et al. Using dynamic responses of moving vehicles to extract bridge modal properties of a field bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2017, 22(6): 04017018.
- [11] Yang Y B, Yang J P. State-of-the-art review on modal identification and damage detection of bridges by moving test vehicle [J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2018, 18(2): 1850025.
- [12] 阳洋, 项超, 蒋明真, 等. 考虑粗糙度影响的桥梁损伤识别间接测量方法[J]. 中国公路学报, 2019, 32(1): 103-110, 130.
- [13] Mcgetrick P J, Hester D, Taylor S E. Implementation of a drive-by monitoring system for transport infrastructure utilising smartphone technology and GNSS [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2017, 7(2): 175-189.
- [14] Matarazzo T J, Santi P, Pakzad S N, et al. Crowdsensing framework for monitoring bridge vibrations using moving smartphones [J]. Proceedings of the IEEE, 2018, 106(4): 577-593.
- [15] Mei Q, Gul M, Shirzad-Ghaleroudkhani N. Towards smart cities: Crowdsensing-based monitoring of transportation infrastructure using in-traffic vehicles [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2020, 10: 653-665.
- [16] Sitton J D, Rajan D, Story B A. Bridge frequency estimation strategies using smartphones [J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2020, 10(3): 513-526.
- [17] 刘志平, 朱丹彤, 杨磊, 等. Android 手机传感器的桥梁振动检测试验[J]. 科技导报, 2017, 35(10): 80-86.
- [18] 从建力, 王源, 杨翠平, 等. 智能手机检测车辆振动加速度数据预处理方法[J]. 数据采集与处理, 2019, 34(2): 349-357.