

# 基于智能手机的结构振动测试及舒适度改进 评价方法

王来顺, 何浩祥, 李少松

(北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京 100124)

**摘要:** 由于传统的振动测试仪器在便携性和实时性方面存在不足, 基于智能手机研发实时监测模块并实现对结构加速度的精准采集及舒适度分析。通过振动台动力试验和楼板振动试验验证智能手机测试振动信号的精度和性能。针对传统舒适度评价方法在适用范围和评价参数类型方面的不足, 提出采用位移和速度的四次方振动剂量值作为舒适度评价指标的思路, 并给出适用于桥梁和建筑结构的舒适度综合限值要求。采用智能手机对某人行天桥和建筑结构楼板的竖向振动进行测试, 并通过多个指标及其限值对舒适度进行了评价。结果表明: 对于长柔结构的舒适度评价, 宜将位移和速度的四次方振动剂量值作为补充评价指标, 并需对多个时段数据进行全面分析。

**关键词:** 人致振动; 振动测试; 舒适度评价; 智能手机; 四次方振动剂量值;

**中图分类号:** TU311.3; TU375.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-4523(2023)06-1613-10

**DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.2023.06.016

## 引言

随着城市化进程推进和经济发展, 城市交通和人口分布日益密集化, 工程结构的高度或跨度不断攀升, 部分结构在环境激励和人致荷载下的振动强度和幅值较大, 人体舒适度和感官体验较差。随着人们对结构适用性的需求不断提高, 结构舒适度的监测与控制逐渐受到了广泛关注与研究<sup>[1-2]</sup>。目前结构舒适度监测和评价主要存在如下问题: 舒适度监测通常需要采用专业设备, 其成本高、携带和使用不便且需专业人员操作等, 不易普及和推广; 监测数据往往需要线下处理, 实时性和共享性差, 难以适应物联网和大数据发展的需求。目前基于智能手机的监测、分析和共享技术迅猛发展<sup>[3]</sup>, 具有精度良好、普及率高、无线传输及成本低廉等优势, 可以克服专业传感器和监测仪器的部分局限, 相关技术具有重要的应用和推广价值。

在基于智能手机的场地振动测试方面, Shiferaw<sup>[4]</sup>研究了交通诱发地面振动下智能手机的数据采集能力, 确认部分智能手机可以用于专业振动测量, 并对传感器的测量范围、分辨率及抗干扰能力进行了评估。Chen 等<sup>[5]</sup>对智能手机加速度传感器的振动测试频率范围做了研究, 证明了手机内置的惯性加速度传感器能够基本满足 4~8 Hz 及更高频率振

动测试的要求。韩瑞聪<sup>[6-7]</sup>将智能手机应用于建筑结构监测, 利用自主开发的程序采集数据并上传至云端, 结果证明手机采集的数据与传感器数据较吻合, 验证了其在振动测试领域应用的可行性。在基于智能手机的桥梁性能评估方面, 也有相关研究<sup>[8]</sup>, 赵雪峰等<sup>[9]</sup>开发了智能手机振动监测软件, 并应用于桥梁索力监测。Castellanos-Toro 等<sup>[10]</sup>研究利用智能手机测量桥梁自振频率, 结果表明采用智能手机识别柔性结构的模态是可行的。张丹丹等<sup>[11]</sup>基于安卓系统智能手机中的百度地图 API 建立了桥梁振动信息显示系统, 实现了监测智能化。Feldbusch 等<sup>[12]</sup>开发了 iDynamics 软件, 通过智能移动设备进行结构振动测量、分析及评估。Ozer<sup>[13]</sup>研究了基于智能手机的多传感器结构监测, 并提供了云端共享解决方案。也有研究学者开展了基于智能手机的舒适度评估研究。潘子叶等<sup>[14]</sup>研究了智能手机测试人行荷载的实施技术和测试精度。曹雷等<sup>[15]</sup>将智能手机应用到环境舒适度分析中, 利用有效数据研究了受测者身高、年龄及体重等个体特征和发生场所以及振动方向等环境因素对振动感受的影响。郭丽娜等<sup>[16]</sup>通过自主研发的手机客户端对结构振动信号进行了测试。然而, 以上研究所采用的智能手机的加速度测试精度偏低, 不能充分实现全频段范围内的舒适度评估, 其评估方法也不全面。

综上, 国内外研究者已经通过测试和工程应用

验证了智能手机在结构振动监测领域应用的可行性。然而,大部分研究并未深入探讨智能手机在微振动监测和结构振动舒适度精细化评测方面的精度,尤其是在基于安卓系统的智能手机对舒适度的监测及相关软件研发方面尚需加强。随着用手机进行加速度测试的精度不断提高,利用目前先进的智能手机进行舒适度评估的研究需要深入而全面的探索。

在确保智能手机能够采集精准的振动数据后,尚需对结构舒适度进行准确而全面的评价。在结构舒适度新型评价方法研究方面,何强等<sup>[17]</sup>总结了振动舒适度评价指标和标准,指出需要综合运用多种方法对舒适度进行评价。宋志刚等<sup>[18]</sup>提出了基于烦恼率的结构振动舒适度设计模型,并给出了不同振动场景下的烦恼率曲线。冯鹏等<sup>[19]</sup>研究了行人舒适性与天桥振动特性的相关性,提出了以峰值加速度为依据的行人舒适度系数及基于性能的天桥设计方法。值得注意的是,上述评价方法仅以振动加速度作为物理参数,且对不同结构形式及振动场景的需求缺乏细致考虑。目前中国及国际的舒适度评价标准均给出了满足不同场景和需求的舒适度振动限值,控制指标通常为加速度或计权加速度幅值,但并没有充分考虑关于速度和位移的参数限值。只有加拿大舒适度评价标准<sup>[20]</sup>给出了简单规定:对于基频在 8 Hz 以下的楼板结构,以峰值加速度作为评价指标;否则以峰值速度作为评价指标。该标准虽然给出了以楼板频率划分的评价指标,但未列出具体评价限值。实际上,速度和位移的振动特性、频谱分布及幅值具有自身的特点,在某些情况下能够反映加速度参数无法表征的振动特征,宜在舒适度评价方法中予以考虑。此外,国内外关于桥梁和建筑结构的舒适度评价标准并不完全一致,建筑结构的舒适度评价一般将加速度四次方振动剂量值作为必要指标,但在桥梁中并未予以充分考虑。将各种结构的评价方法和标准进行整合并给出统一的物理参数类型及阈值设置方式具有重要的应用意义。

有鉴于此,本文首先研发了基于安卓系统的智能手机数据采集和分析技术,并基于振动台测试试验验证了以安卓系统智能手机进行振动测试的精度和可行性。在此基础上,通过模拟和实测数据证明了基于速度和位移对舒适度进行评价的必要性。最后,提出了相关的舒适度评价方法和振动剂量值阈值。研究了柔度较大结构的实测振动舒适度并针对模拟加速度信号进行了舒适度评价,结果表明仅通过加速度限值来评价长柔结构舒适度并不全面,宜考虑关于速度和位移的影响。

## 1 基于振动台试验的智能手机测试精度验证

人体对竖向振动的反应远大于对水平振动的反应,人类活动中直接接触的结构构件是楼板,其主要传递竖向振动,因此结构振动下的人体舒适度研究主要考虑竖向振动即 Z 轴加速度幅值和特性的影响。刘延柱等<sup>[21]</sup>介绍了智能手机内置的微型陀螺仪及其力学性能。智能手机对振动信号的采集主要依靠其中配备的微型加速度传感器或微陀螺仪,它是基于微机电系统技术研发的产品,具有体积小、性价比高、无线传输及数据共享等优点,当有振动产生时传感器可以记录三个轴上的加速度值以及绕三轴转动的角加速度。智能手机中所配置的加速度传感器的精度是测试精度主要的影响因素。理论及已有实测结果表明,较大振幅下利用智能手机可以得到更精确的结果,而不同性能的手机测试微小振幅的精度则有所区别。因此,需要开展微振幅动力试验验证智能手机传感器的精度。本研究中的智能手机为国产高性能安卓系统手机,其配备的陀螺仪型号为 MPU6050,加速度传感器的型号为 LSM6DS3,采用的芯片是麒麟 980,最高采样频率为 100 Hz。

智能手机振动数据采集过程由其所配置的加速度传感器完成。智能手机对于本身内置加速度传感器的调用可以分为命令模块和采集模块两部分。在数值分析软件 MATLAB 中申请并获得智能手机应用授权之后,利用该软件获取智能手机内存信息并实现振动数据的采集、存储及上传。此外,命令模块又将采集过程分为启动采集和终止采集两部分来完成,能够更好地控制所需时间范围内的振动数据以及实现硬件识别并确定采集流程。输入存储命令后振动数据可被保存并上传至指定云端数据库,从而为数据处理和分析提供便利条件。智能手机的数据采集基本流程如图 1 所示。智能手机精度是本文整体研究的技术基础,下文将对智能手机传感器精度进行充分验证。

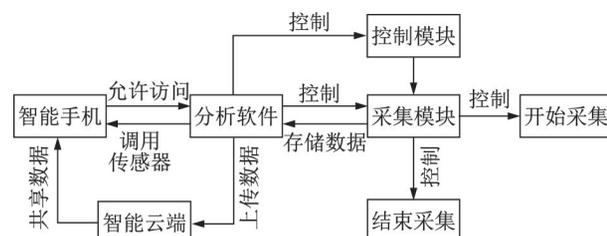


图 1 智能手机数据采集流程图

Fig. 1 Smartphone data acquisition flowchart

为了验证智能手机的振动测试精度,采用对智能手机与专业传感器进行性能对比的方法开展振动台测试试验。选择振动台进行测试的原因主要为:(1)其产生的加速度激励范围较大,便于对不同振幅范围的传感器加速度信号进行采集和验证;(2)振动台的激励荷载可控,既可以施加相对规整的简谐波激励,也可以产生白噪声及随机波,因而加速度信号波形可校核并可准确判断智能手机采集数据的精度;(3)振动台试验的测试环境良好,不受其他振动荷载和噪声的影响。试验所用振动台采用电动混合试验系统,其主要性能参数如表 1 所示。输入的振动信号频率为 1000 Hz。

表 1 振动台基本参数

Tab. 1 Basic parameters of the shaking table

性能类别	参数	性能类别	参数
额定载荷/kg	40	最大速度/(m·s <sup>-1</sup> )	1
台面尺寸/mm <sup>2</sup>	500×500	最大加速度/g	1
			(40 kg 载荷下)
最大位移/mm	±100	频率范围/Hz	0.05~100

选用的专业加速度传感器为 941B 伺服式传感器和压电传感器。941B 传感器采用了无源闭环伺服技术,具有良好的超低频特性。压电传感器是一种基于压电效应和机电转换式的传感器,具有灵敏度高、结构简单、重量轻及性能可靠等优点。以上两种传感器的采样频率均为 1000 Hz。将智能手机的采样频率设为 100 Hz。振动台的输出激励包括简谐波、地震波和白噪声激励三种情况。依据人体舒适度的工程测试需求及手机测试精度需求确定振动台激励幅值范围。将智能手机与两种专业传感器均固定于振动台上相邻位置。对振动台施加激励,三个传感设备同时采集加速度数据。试验结构布置如图 2 所示,两种专业传感器及智能手机如图 3(a),(b)所示。

对相同激励下三种传感器采集的数据进行对比分析,2 Hz 和 15 Hz 简谐波激励、El Centro 地震波及幅值 50 和 100 mm 白噪声下的加速度时程曲线对比分别如图 4(a),(b),(c),(e)和(f)所示。地震激励

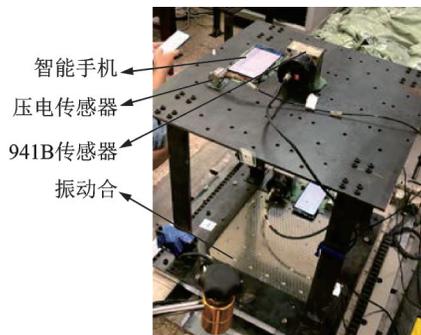


图 2 振动台试验布置图

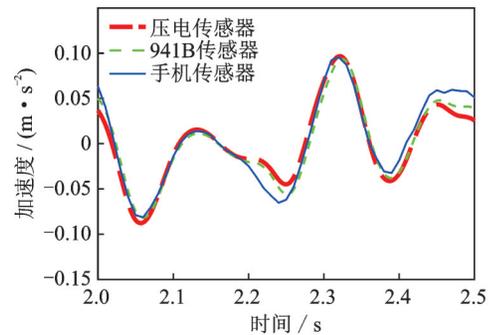
Fig. 2 Test layout of shaking table



图 3 传感器及智能手机

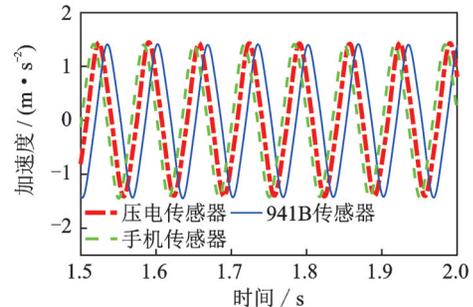
Fig. 3 Sensors and smartphone

下信号的频谱曲线如图 4(d)所示。结果表明:与专业传感器相比,智能手机测得的波形和峰值吻合度均非常高,在理想振动条件下,其满足工程舒适度测试需求。当加速度幅值在 0.05 m/s<sup>2</sup>左右时,智能手机测得的数据仍然可以与专业传感器数据基本保持一致,性能良好。



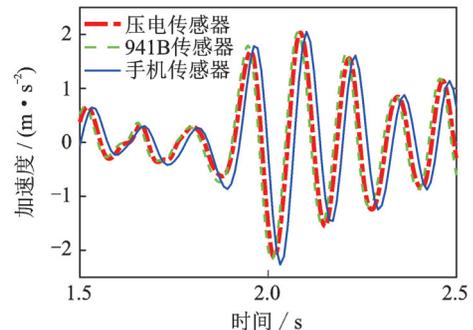
(a) 2 Hz 简谐波下时程曲线

(a) Time-history curve under 2 Hz simple harmonic wave



(b) 15 Hz 简谐波下时程曲线

(b) Time-history curve under 15 Hz simple harmonic wave



(c) El Centro 地震波激励下的时程曲线

(c) Time-history curve under El Centro seismic wave

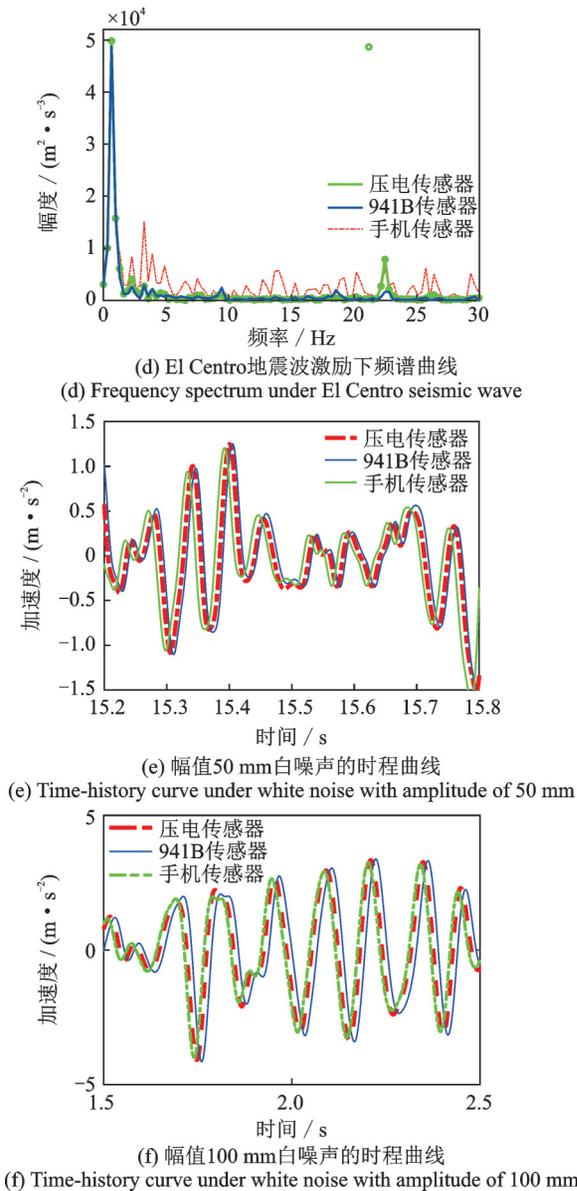


图4 振动台试验各工况下的曲线

Fig. 4 Shaking table test results under various conditions

为了深入地对智能手机的精确性和稳定性进行定量分析,可计算并比较三种传感器数据的均方根误差(RMSE)值,其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [X_o(i) - X_m(i)]^2}{n}} \quad (1)$$

式中  $X_o(i)$  表示真值,这里可取精确传感器测试值;  $X_m(i)$  表示其他传感器测试值;  $n$  为测试数据的数量,  $i$  为数据序号。一般认为 941B 传感器具有最高的精度,因此将其测试数据作为真值和基准,分别计算智能手机信号或压电传感器信号的 RMSE 值。相关工况的结果如表 2 所示。

由表 2 结果可知,智能手机与 941B 的精度偏差较小,可以接受,其性能与压电传感器类似,表明智能手机的精度接近于专业传感器。

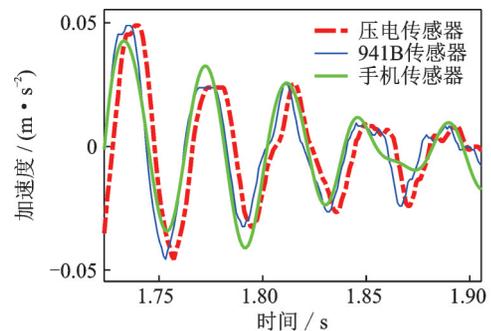
表 2 传感器信号均方根误差评估

Tab. 2 Evaluation of RMSE of various sensor signals

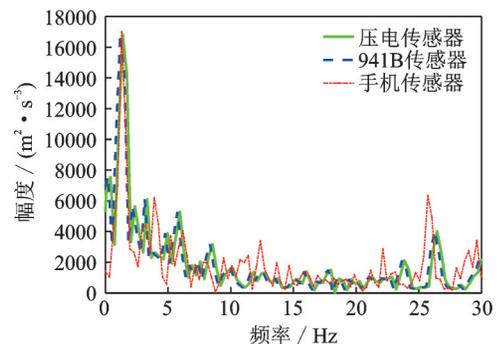
工况	RMSE	
	手机	压电传感器
2 Hz 简谐波激励	0.06	0.01
15 Hz 简谐波激励	0.19	0.15
振幅为 50 mm 地震激励	0.18	0.17
振幅为 50 mm 白噪声激励	0.05	0.04
楼板人行荷载激励	0.04	0.02

在舒适度评价标准中,一般规定住宅结构楼板竖向振动加速度限值为  $0.05 \text{ m/s}^2$ ,而振动台激励幅值偏大不能完全满足要求。为进一步检验小幅值时以及实际环境下智能手机的测试精度,本文在某平面尺寸为  $4.3 \text{ m} \times 6.1 \text{ m}$  的房间内完成了楼板振动试验。将智能手机、941B 传感器和压电传感器布置在楼板的中心位置,各传感器采样率与振动台试验设置相同。通过无规律的人体跳动给楼板施加竖向激励,采集竖向加速度数据,对手机传感器的精度再次进行了检验,采集的加速度数据时程曲线如图 5 所示。

结果表明智能手机传感器精度与压电传感器、941B 传感器的非常接近。在加速度幅值低至  $0.05 \text{ m/s}^2$  左右情况下,智能手机测得的数据精度依然可以接受。综上,可以认为该智能手机中传感器的精度可以满足舒适度评估的要求。



(a) Time-history curve of acceleration of the floor slab



(b) Spectral of acceleration of floor slab

图 5 结构楼板振动时程曲线及频谱曲线

Fig. 5 Vibration time-history curve and frequency spectrum curve of structural floor

## 2 舒适度评价方法对比及改进

通过智能手机等设备采集结构振动信号之后,尚需要进行数据分析并对舒适度进行评价。考虑到人体对不同频率振动信号的振动敏感性不同,需要对不同频率成分的振动信号进行频率计权<sup>[21]</sup>。国际及众多国家的舒适度评价标准均对楼板或桥面板的舒适度计算方法进行了规定,对振动频率及加速度振幅进行了限制,但具体公式和阈值要求有所区别。国际标准 ISO 2631-1—1997<sup>[22]</sup>通过一般性的方法实现各种情况下人体振动舒适度评价,其中认为不同情况下需采用不同的指标评价舒适度。当波峰因素小于等于9时,采用计权均方根加速度( $a_w$ )进行评价,其计算式如下:

$$a_w = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中  $a_w(t)$  为瞬时计权加速度,对于水平向移动单位为  $m/s^2$ ,对于转动单位为  $rad/s^2$ ;  $T$  为振动测量的持续时间,单位为  $s$ 。

若计权加速度不便于计算,对于频域信号而言,计权均方根加速度值可以通过对整个频域范围内的功率谱积分再开方得到,相关计算公式为:

$$a_w = \left[ \int_{0.5}^{80} w^2(f) S_a(f) df \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

式中  $S_a(f)$  为对  $a(t)$  频谱变换得到的功率谱密度函数, $w(f)$  为频率计权函数。

当波峰因素大于9或者当采用计权均方根加速度评价可能低估了振动的影响时,采用振动剂量值(Vibration Dose Value,简称VDV)进行评价,加速度四次方振动剂量值的计算式为:

$$VDV_a = \left[ \int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

在中国标准《城市区域环境振动标准》<sup>[23]</sup>中,以Z振级作为评价指标,其由加速度转化而来,适用于振动频率范围为1~80 Hz的振动评估。《建筑工程容许振动标准》<sup>[24]</sup>里以四次方振动剂量限值对舒适度进行评价,具体限值如表3所示。

在德国标准 DIN 4150-2—1999<sup>[25]</sup>中用KB值来衡量舒适度,KB值越大代表人的感受越不舒服。

表3 加速度四次方振动剂量限值(单位: $m \cdot s^{-1.75}$ )

Tab. 3 Acceleration quadre vibration dose value limit (Unit:  $m \cdot s^{-1.75}$ )

建筑物类别	时间	容许值
住宅	白天	0.2
	黑夜	0.1
办公建筑	白天	0.4

在英国标准 BS 6841:1987<sup>[26]</sup>中,根据不同的振动情况采用不同的指标评价舒适度:当振动强度恒定或者波峰因素小于6时,采用加权加速度均方根(root mean square, r.m.s)进行评价;当波峰因素大于6或者振动形式为冲击或者间断时,采用竖向四次方振动剂量值进行评价。加拿大标准协会给出规定,对于基频在8 Hz以下的楼板结构,以峰值加速度作为评价指标;当楼板结构的基频超过8 Hz时,以峰值速度作为评价指标<sup>[20]</sup>。

以上几个典型舒适度评价标准均采用加速度或者加速度转换公式对舒适度进行评价,只有加拿大的舒适度标准提出了考虑速度影响,但未给出具体限值。考虑到一些柔度较大的结构造成人体舒适度较差的原因是振动幅度(位移)较大,而此时仅通过加速度评价可能无法全面反映真实情况,对舒适度不能精准评价。Griffin<sup>[27]</sup>也曾认为仅依据加速度峰值或均值不能充分反映振动时程的全部特征,速度和位移也是量化振动特征的良好指标,但并没有给出明确的量化计算方法。鉴于现代工程结构形式日益丰富,当结构振动导致的人体不舒适特征在加速度层面表现不明显时,在速度和位移层面可能有所体现,本文建议引入速度和位移参数或限值对结构进行舒适度评价。下文首先通过模拟信号探讨发生上述情况的可能性,之后进一步通过实测信号进行分析和验证,进而给出指标阈值。

考虑到结构振动信号具有短时随机性和长时趋势性特征,本文采用正弦信号和随机信号相叠加的方式模拟结构竖向加速度信号,相应的MATLAB程序函数具体表达式为: $a=10\sin(40.2t+3.2\text{randn}(1,\text{length}(t)))$ 。其中, $a$ 为加速度信号, $\sin$ 为正弦函数, $t$ 为时间, $\text{randn}$ 为产生标准正态分布数组的随机函数, $\text{length}(t)$ 为时间数据点数。按该函数随机生成两组加速度数据,时程曲线对比图如图6(a)所示。

利用严密的频域积分法将上述两组加速度数据转换为速度和位移,相关时程曲线分别如图6(b),(c)所示。图6结果表明尽管两组加速度的波形和峰值接近,但由于随机性和低频特征不同,两组信号对应的速度和位移的数据相差较大。这表明在某些情况下当结构振动加速度信号满足阈值要求时,速度和位移却可能超过限值,仅依靠加速度来评价人体舒适度是不全面的。有鉴于此,在传统的基于加速度的VDV<sub>a</sub>计算式基础上,本文提出速度和位移的四次方振动剂量值指标,其计算式分别为:

$$VDV_v = \left[ \int_0^T v_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

$$VDV_a = \left[ \int_0^T d_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

式中  $v_w(t)$  为瞬時計权速度;  $d_w(t)$  为瞬時計权位移。权重计算方式与瞬時計权加速度形式相同。

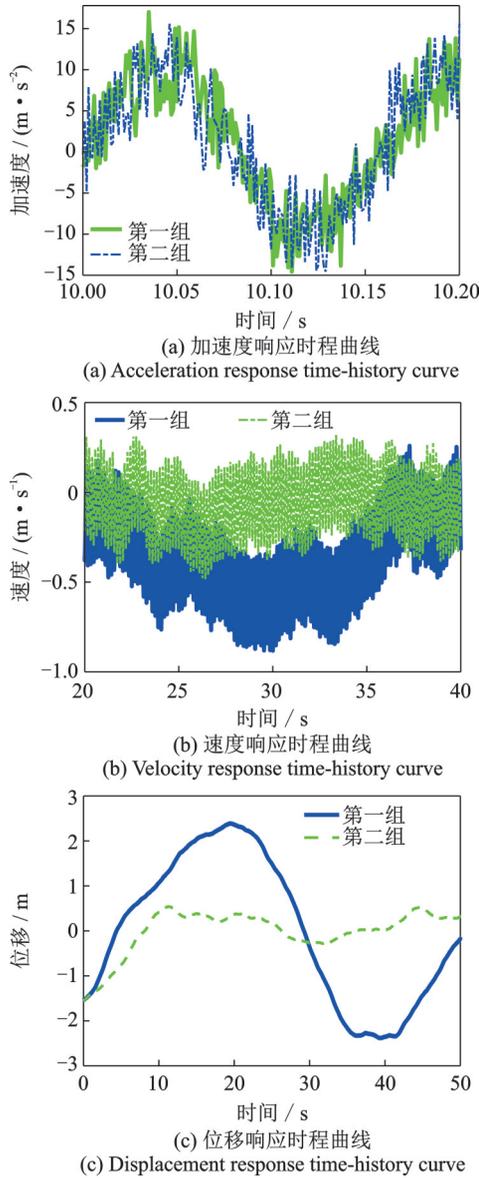


图 6 无规律跳动激励楼板振动时程曲线

Fig. 6 Irregular beating excitation floor vibration time-history curve

对于实际振动情况比较复杂的结构, 本文建议在采用  $VDV_a$  进行舒适度评价的同时, 宜考虑利用速度和位移的四次方振动剂量值  $VDV_v$  和  $VDV_d$  指标进行评价, 但其必要性和相关阈值尚需结合实际工程确定。本文对 14 座人行天桥及 22 幢建筑结构典型楼板的竖向振动进行了长期监测和测试, 加速度信号累计时长达到 78.3 h。完成加速度数据采集后, 采用频域积分法获取了相应的速度和位移数据, 进而完成了频谱、幅值和振动剂量值分析。利用专业传感器采集的振动加速度与舒适度加速度限值的

平均占比计算出速度和位移数据的限值。最终, 结合计算结果及人工经验, 综合评估给出了适用于人行天桥桥面和建筑结构楼板的位移、速度和加速度的峰值限值及四次方振动剂量值限值, 分别如表 4 和表 5 所示。在相关结构的竖向振动舒适度评价中可以以表 4 或表 5 的限值作为评价依据。

表 4 人行天桥竖向振动响应限值

Tab. 4 Vertical vibration response limit of pedestrian bridge

类别	加速度	速度	位移
VDV	1.150 m/s <sup>1.75</sup>	0.0620 m/s <sup>0.75</sup>	0.0940 m·s <sup>0.25</sup>
振动峰值	0.430 m/s <sup>2</sup>	0.0171 m/s	0.0364 m

表 5 建筑结构竖向振动响应限值

Tab. 5 Vertical vibration response limit of building structures

类别	加速度	速度	位移
VDV	0.4000 m/s <sup>1.75</sup>	0.0247 m/s <sup>0.75</sup>	0.0463 m·s <sup>0.25</sup>
振动峰值	0.050 m/s <sup>2</sup>	0.0080 m/s	0.0150 m

### 3 实际舒适度评价案例分析

为了验证本文提出的基于智能手机的结构舒适度测试技术及改进评价方法, 选择一个刚度较小的人行天桥和一个空间较大的建筑结构房间进行实际测试和分析。选择测试的桥梁为北京市某人行三跨连续梁天桥, 该天桥主梁主要采用钢结构, 桥面上铺塑胶面层。主要设计参数为: 跨度为 30.5 m, 桥面宽 2.2 m, 高度为 4.5 m, 设计使用年限为 50 年, 桥面铺装使用年限为 10 年, 抗震设防烈度为 8 度。对该天桥上的行人进行舒适感调查, 结果显示: 感觉不舒服的人数占被调查总人数的 81.06%, 不在意的人数占 8.59%, 认为没影响的人数占 10.35%。以上数据表明该天桥的振动对行人的感受造成了较明显的影响, 因此选择该天桥作为振动测试试验对象。将上述试验中的三种传感器布置在天桥主梁的跨中并进行测试, 如图 7 所示。在有关人行天桥舒适度



图 7 人行天桥振动采集传感器布置图

Fig. 7 Layout of sensors for pedestrian overpass vibration

评价标准中,其竖向振动加速度上限值一般为  $0.43 \text{ m/s}^2$ ,但对速度和位移的峰值以及响应的振动剂量值均无明确规定。在不同时间段利用智能手机等传感器对振动信号进行连续采集,得到桥面加速度响应数据。

典型的两组加速度时程曲线如图 8(a)所示,利用频域积分法将其转换为速度和位移,相关时程曲线分别如图 8(b)和(c)所示。由图 8(a)可知两组加速度数据的峰值和波形比较接近,峰值绝对值均在  $0.43 \text{ m/s}^2$  以下,满足峰值限值的要求。然而,图 8(b)和(c)对应的速度和位移峰值分别为  $0.02291 \text{ m/s}$  和  $0.03983 \text{ m}$ ,均超过了表 4 中的限值。在此基础上计算每组实测数据的加速度、速度和位移的四次方振动剂量值,如表 6 所示。两组加速度的  $VDV$  均未超过规定限值,满足舒适度要求。然而,速度和位移的  $VDV$  却都超过了规定的限值,故

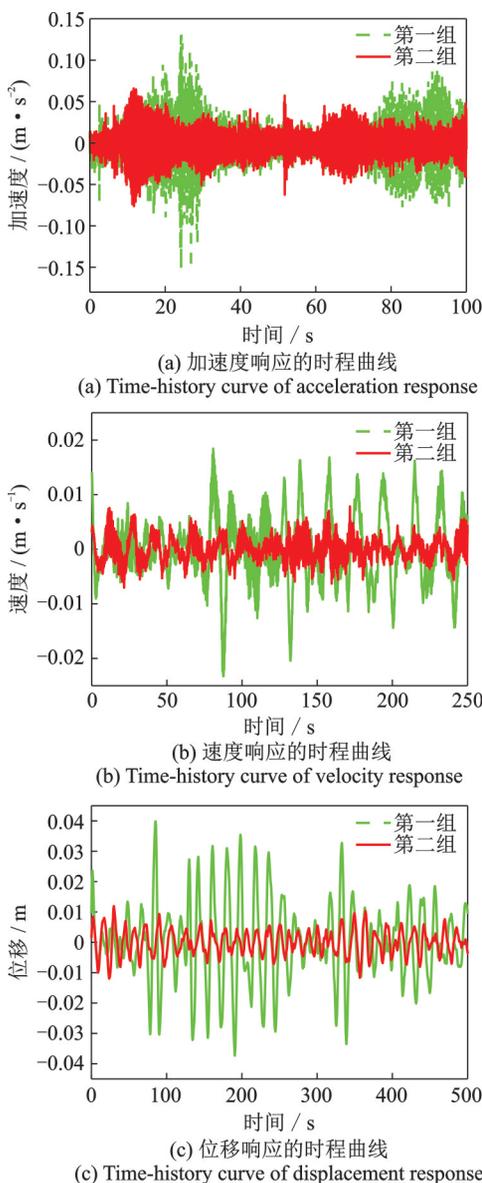


图 8 人行天桥振动时程曲线

Fig. 8 Vibration time-history curve of pedestrian bridge

表 6 人行天桥人致振动的  $VDV$  值

Tab. 6  $VDV$  of human induced vibration of the pedestrian bridge

组别	加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1.75})$	速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-0.75})$	位移/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{0.25})$
第一组	0.7483	0.0701	0.1010
第二组	0.6422	0.0655	0.0988

可认为该情况下振动不满足速度和位移舒适度的要求。综上,该情况下人行天桥的舒适度实际是不完全满足要求的,该结论与实际调查结果相吻合。

为深入探究上述现象产生的原因,现将信号均分为五段,计算出各段剂量值及其变异系数,结果如表 7 所示。可以发现各段信号的  $VDV$  变异系数均较小,而速度和位移的剂量值变异系数很高。这表明竖向刚度偏小的桥梁或结构受人致荷载的影响显著,竖向变形较大,尽管竖向速度和位移变化较缓慢,但相关信号在低频区域的能量分布较明显,人体舒适度特征不完全体现在以高频能量为主的加速度信号方面,需要基于结构位移和速度信号进行更深入的舒适度评价。此外,对于对振动比较敏感的柔性结构,宜全面考虑响应峰值和振动剂量值的特征。

表 7 天桥振动数据分段后的  $VDV$  值及变异系数

Tab. 7  $VDV$  value and variation coefficient after segmentation of pedestrian bridge vibration data

类别	加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1.75})$		速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-0.75})$		位移/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{0.25})$	
	第一组	第二组	第一组	第二组	第一组	第二组
$VDV$	0.1437	0.1402	0.0117	0.0058	0.0409	0.0272
	0.1407	0.1423	0.0158	0.0135	0.0217	0.0206
	0.1399	0.1373	0.0073	0.0104	0.0172	0.0255
	0.1432	0.1414	0.0113	0.0049	0.0252	0.0062
	0.1440	0.1398	0.0060	0.0058	0.0064	0.0117
变异系数	1.31%	1.35%	37.6%	45.84%	56.48%	74.61%

为了探究刚度较大的工程结构舒适度评价中是否需要考虑位移特征的影响,以及表 5 中限值的合理性。本文对北京市某图书馆中一间跨度较大的房间进行了竖向振动监测,其平面尺寸为  $20 \text{ m}\times 45 \text{ m}$ ,楼板厚度为  $150 \text{ mm}$ 。激励荷载为室内正常人行荷载,智能手机布置在室内中心位置,对该点进行多次振动采集,每次时间为  $20 \text{ min}$ 。典型的加速度响应时程如图 9(a)所示,相应的速度和位移响应时程分别如图 9(b)和(c)所示。可以看出:两组加速度信号的波形和峰值非常吻合,加速度值均未超过  $0.05 \text{ m/s}^2$ ;速度和位移的峰值和走势非常吻合,并且速度和位移幅值也远远小于舒适度规定的限值。

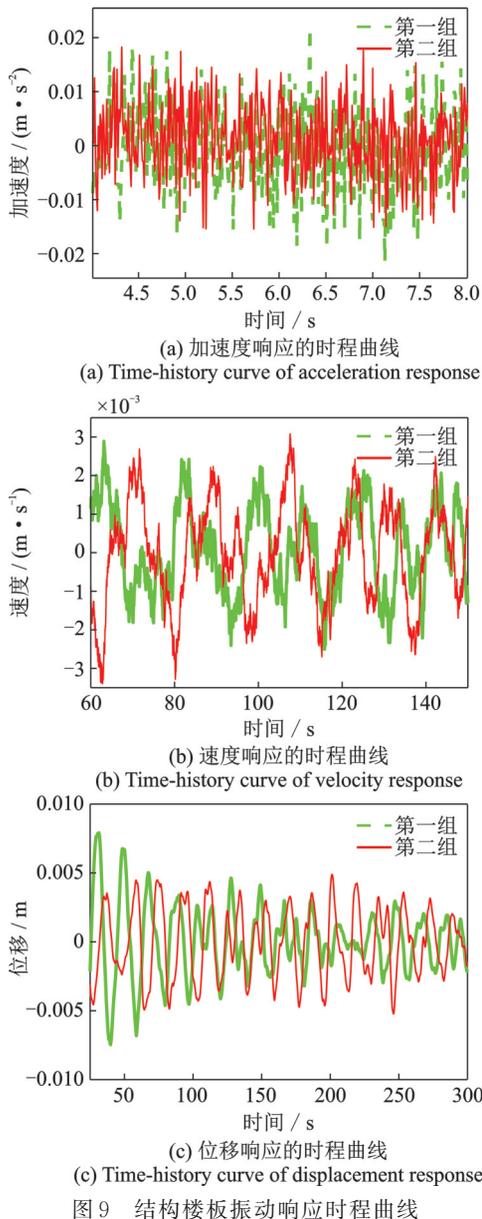


Fig.9 Vibration response time-history curve of structural floor

结合表5的限值,从振动响应的峰值角度进行舒适度评价。可认为加速度、速度和位移均满足要求。同时对以上数据进行了振动剂量值的计算,具体数值如表8所示。可见各种响应的振动剂量值均在规定的限值范围内,故该振动数据满足舒适度指标的要求。此外,为了验证数据的稳定性,将每组数据均分为五段并计算变异系数,结果如表9所示。结果显示,加速度剂量值的变异系数极小,而速度和位移剂量值的变异系数也始终保持在0.2以下,表明振动较稳定,随机性弱。总之,该结构的竖向振动同时满足结构振动舒适度峰值限值及四次方振动剂量限值的要求。

综上,对于楼板刚度较大的普通结构,在评价舒适度时可不考虑关于速度和位移的参数限值;对于

柔度较大的结构,在评价舒适度时应在考虑加速度限值的基础上考虑速度和位移的限值,以确保舒适性在可接受范围内。

表8 图书馆振动响应的VDV值

Tab.8 VDV value of library vibration response

类别	加速度/( $m \cdot s^{-1.75}$ )	速度/( $m \cdot s^{-0.75}$ )	位移/( $m \cdot s^{0.25}$ )
VDV	0.2103	0.01855	0.03957
	0.1398	0.01423	0.03523

表9 图书馆振动响应分段后VDV值及变异系数

Tab.9 VDV value and variation coefficient after the library vibration response segmentation

类别	加速度/( $m \cdot s^{-1.75}$ )		速度/( $m \cdot s^{-0.75}$ )		位移/( $m \cdot s^{0.25}$ )	
	第一组	第二组	第一组	第二组	第一组	第二组
VDV	0.2103	0.1501	0.0216	0.0142	0.0261	0.0378
	0.2059	0.1477	0.0223	0.0126	0.0180	0.0255
	0.2064	0.1493	0.0179	0.0130	0.0225	0.0237
	0.2107	0.1521	0.0208	0.0135	0.0145	0.0309
	0.2113	0.1510	0.0195	0.0149	0.0203	0.0237
变异系数	1.23%	1.11%	8.67%	6.95%	19.77%	18.58%

## 4 结论

智能手机内部的陀螺仪可以对振动信号进行实时测试,且具有携带和使用便捷、便于分析及共享等优势,可以弥补传统振动测试仪器的不足。本文研发了基于安卓系统的智能手机实时监测模块,将其应用到人行天桥和建筑结构的舒适度评价中。针对传统舒适度评价方法的不足,提出考虑位移和速度的四次方振动剂量限值的建议,并给出了具体要求。通过相关舒适度实测分析,验证了基于智能手机的振动测试模块及综合舒适度评价方法具有良好的精度和实用性。主要结论如下:

(1) 振动台试验和楼板振动试验的结果均表明高性能的安卓系统智能手机在加速度幅值大于等于 $0.05 m/s^2$ 时能够准确采集到振动数据,可基本满足实际振动监测精度的需求。

(2) 对于长柔结构,响应的加速度信号并不能完全体现结构的振动特性和舒适度特征,有必要采用速度和位移信号进行更详细的分析,尤其需要重视速度和位移四次方振动剂量值及其限值要求。

(3) 针对现有人行天桥的舒适度评价方法并不考虑四次方振动剂量值的不足,本文提供了面向人行天桥和建筑结构的多种舒适度评价参数及限值,对传统舒适度评价方法和标准进行了有益的补充。

## 参考文献:

- [1] 申选召,滕军.基于随机步行荷载和烦恼率的楼板振动舒适度评价方法研究[J].振动与冲击,2012,31(22):71-75.  
SHEN Xuanzhao, TENG Jun. Study on evaluation method of floor vibration comfort based on random walking load and annoyance rate[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(22): 71-75.
- [2] 丁洁民,尹志刚.地铁引起建筑物振动舒适度分析[J].振动与冲击,2008,27(9):96-99.  
DING Jiemin, YIN Zhigang. Analysis of building vibration comfort caused by subway[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(9): 96-99.
- [3] Vega Francisco, Yu Wen. Smartphone based structural health monitoring using deep neural networks[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 346: 113820.
- [4] Shiferaw H M. Measuring traffic induced ground vibration using smartphone sensors for a first hand structural health monitoring[J]. Scientific African, 2021, 11: e703.
- [5] Chen J, Tan H, Pan Z. Experimental validation of smartphones for measuring human-induced loads[J]. Smart Structures and Systems, 2016, 18(3): 625-642.
- [6] 韩瑞聪.基于智能移动终端的土木结构集群云监测探索研究[D].大连:大连理工大学,2014.  
HAN Ruicong. Research on cloud monitoring of civil structure cluster based on intelligent mobile terminal [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [7] 韩瑞聪.基于智能手机的多参数监测技术及地震应急响应研究[D].大连:大连理工大学,2018.  
HAN Ruicong. Research on multi parameter monitoring technology and earthquake emergency response based on smart phone[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [8] Thomas M, Mohammad V, Shamim P, et al. Smartphone data streams for bridge health monitoring[J]. Procedia Engineering, 2017, 199: 966-971.
- [9] 赵雪峰,喻言,李明楚.智能手机结构健康云监测技术[J].物联网技术,2015,5(8):8-11.  
ZHAO Xuefeng, YU Yan, LI Mingchu. Smartphone structure health cloud monitoring technology[J]. Internet of Things Technology, 2015, 5(8): 8-11.
- [10] Castellanos-Toro S, Marmolejo M, Marulanda J, et al. frequencies and damping ratios of bridges through operational modal analysis using smartphones[J]. Construction and Building Materials, 2018, 188: 490-504.
- [11] 张丹丹,赵宏伟,宋云峰.基于Android的桥梁挠度监测及预测系统[J].计算机系统应用,2019,28(1):87-93.  
ZHANG Dandan, ZHAO Hongwei, SONG Yunfeng. Bridge deflection monitoring and prediction system based on Android [J]. Computer System & Application, 2019, 28(1): 87-93.
- [12] Feldbusch A, Sadegh-Azar H, Agne P. Vibration analysis using mobile devices (smartphones or tablets)[J]. Procedia Engineering, 2017, 199: 2790-2795.
- [13] Ozer E. Multisensory smartphone applications in vibration-based structural health monitoring[D]. New York: Columbia University, 2016.
- [14] 潘子叶,陈隽,谭寰.基于智能手机的行人荷载测试研究[J].振动与冲击,2018,37(14):22-29.  
PAN Ziye, CHEN Jun, TAN Huan. Research on pedestrian load test based on smart phone[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(14): 22-29.
- [15] 曹雷,陈隽.振动舒适度的智能手机大数据研究[J].振动工程学报,2020,33(5):961-970.  
CAO Lei, CHEN Jun. Research on smart phone big data of vibration comfort [J]. Journal of Vibration Engineering, 2020, 33(5): 961-970.
- [16] 郭丽娜,马翰章,贾献卓,等.基于智能手机的结构振动测试与舒适度评估方法[C]//第十九届全国现代结构工程学术研讨会论文集.2019:488-492.  
GUO Lina, MA Hanzhang, JIA Xianzhuo, et al. Structural vibration testings and comfort evaluation method based on smart phone [C]// Proceedings of The 19th National Symposium on Modern Structural Engineering. 2019: 488-492.
- [17] 何强,李斌,葛勇.环境振动舒适度评价指标及方法研究进展[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2012,29(6):71-78.  
HE Qiang, LI Bin, GE Yong. Research progress on evaluation indexes and methods of environmental vibration comfort[J]. Journal of Chongqing Industrial and Commercial University (Natural Science Edition), 2012, 29(6): 71-78.
- [18] 宋志刚,金伟良.行走作用下梁板结构振动舒适度的烦恼率分析[J].振动工程学报,2005,18(3):288-292.  
SONG Zhigang, JIN Weiliang. Trouble rate analysis of vibration comfort of beam slab structure under walking [J]. Journal of Vibration Engineering, 2005, 18(3): 288-292.
- [19] 冯鹏,金飞飞,叶列平,等.人行天桥结构振动舒适度量化与振动特性实测研究[J].振动工程学报,2013,26(4):545-553.  
FENG Peng, JIN Feifei, YE Lieping, et al. Quantification of vibration comfort and measurement of vibration characteristics of pedestrian overpass structure[J]. Journal of Vibration Engineering, 2013, 26(4): 545-553.
- [20] Applied Technology Council. ACT Design Guide 1:

- minimizing floor vibration[S]. ACT, 1999.
- [21] 刘延柱, 杨晓东. 藏在手机里的微型陀螺仪[J]. 力学与实践, 2017, 39(5): 506-508.  
LIU Yanzhu, YANG Xiaodong. Micro gyroscope hidden in mobile phone[J]. Mechanics in Engineering, 2017, 39(5): 506-508.
- [22] Mechanical vibration and shock-evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part 1: general requirements; ISO 2631-1—1997 [S]. Switzerland: International Organization for Standardization, 1997.
- [23] 国家环境保护局. 城市区域环境振动标准: GB 10070—88[S]. 北京: 中国标准出版社, 1989.  
State Environmental Protection Administration of PRC. Standard for environmental vibration in urban area: GB 10070—88[S]. Beijing: Standards Press of China, 1989.
- [24] 中国机械工业联合会. 建筑工程容许振动标准: GB 50868—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.  
China Machinery Industry Federation. Standard for allowable vibration of building engineering: GB 50868—2013[S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [25] Vibrations in building-Part 2: effects on persons in buildings: DIN 4150-2—1999 [S]. Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1999.
- [26] Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock: BS 6841: 1987[S]. British Standard Institute, 1987.
- [27] GRIFFIN M J. Handbook of Human Vibration [M]. Academic Press, 1990.

## Structural vibration test and improved comfort evaluation method based on smart phone

WANG Lai-shun, HE Hao-xiang, LI Shao-song

(Beijing Key Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** In view of the shortcomings of traditional vibration testing instruments in portability and real-time performance, a real-time monitoring module is developed based on smart phones, and the accurate acquisition of structural vibration signals and comfort analysis are realized. The accuracy and performance of the testing vibration signal from smart phones are verified by structural shaking table test and floor vibration test. In order to overcome the shortcomings of the traditional comfort evaluation methods in the scope of application and the types of evaluation parameters, the idea of using the fourth power vibration dose value of displacement and speed as the comfort evaluation index is proposed, and the comprehensive comfort limit requirements for bridges and structures are given. Smart phones are used to test the vertical vibration of one footbridge and one building floor, and the comfort is systematically and deeply evaluated through multiple indexes and the limitations. The results show that for the comfort evaluation of long flexible structure, the fourth power vibration dose value of displacement and velocity should be taken as the supplementary evaluation index, and the multi segment data should be comprehensively analyzed.

**Key words:** human induced vibration; vibration test; comfort evaluation; smartphone; quartic vibration dose value

**作者简介:** 王来顺(1997—),男,硕士研究生。E-mail: 1375132919@qq.com。

**通讯作者:** 何浩祥(1978—),男,博士,教授。E-mail: hhx7856@163.com。