

Study on the Vibration Comfort of the Pedestrian Bridge in Tongji University Library Central Hall

Jun Ding

Department of Structural Engineering, Tongji University, Shanghai
Email: hitdaydream@126.com

Received: Feb. 13th, 2017; accepted: Mar. 4th, 2017; published: Mar. 7th, 2017

Abstract

The study conducted an experiment to obtain the vibration response of the bridge structure in two directions of vertical and lateral directions with the SVSA vibration signal acquisition and analysis system according to the principle of pulsating method, and obtained the first and the second order natural frequencies and damping ration in two directions. Evaluating the structure's vibration comfort with the frequency control method and the restricted dynamic response method, all the experimental results meet the requirement of relevant specification. However, since the natural frequencies are close to the limitation of specification, pedestrian load still may cause structural resonance; meanwhile, there is a certain difference between the experiment and the specification because the pedestrian bridge is in a quiet environment during the experiment. Therefore, it is necessary to improve the vibration control standard.

Keywords

Pedestrian Bridge, Pulsating Method, Natural Frequency, Damping Ration, Vibration Comfort

同济大学图书馆中央大厅天桥振动舒适度研究

丁俊

同济大学建筑工程系, 上海
Email: hitdaydream@126.com

收稿日期: 2017年2月13日; 录用日期: 2017年3月4日; 发布日期: 2017年3月7日

摘要

根据脉动法原理, 通过实验利用SVSA振动信号采集分析系统获得了天桥结构竖向与侧向两个方向的振动

响应,并对数据整理分析,得到了结构上两个方向的第一、二阶自振频率与阻尼比。分别利用频率控制法和限制动力响应法对结构的振动舒适度进行评价,实验结果均满足规范要求。但由于自振频率接近规范限值,人行荷载仍有可能引发结构共振;同时室内天桥处于安静环境,与规范适用情况有一定差别。因此此类结构物仍需提高振动控制标准。

关键词

人行天桥,脉动法,自振频率,阻尼比,振动舒适度

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

人行天桥是改善城市交通条件的一种建筑形式,一般在交通繁忙的户外空间中使用。随着钢材等高强度建筑材料的广泛使用,人行天桥结构向轻盈、柔细的趋势发展,使得人行天桥的振动问题不容忽视。国内对人行天桥的设计,基本上是借用铁路桥或公路桥规范中动力冲击系数的概念,将人群荷载等效为静力荷载考虑[1]。虽然承载力、变形等可以满足结构安全性要求,但如果其模态频率较低,一旦与人群激励频率重合,可能导致共振现象而造成结构振动过大。这种振动虽然不足以导致结构发生安全问题,但会让桥上行人有不适感,在不明振动原因情况下会出现紧张甚至恐慌的心理,严重影响其使用性能。如2000年伦敦千禧桥事件,由于开通当日同行人数多达10万,发生过度横向振动事件[2]。近年来,我国关于一些人行桥振动导致行人不适的问题也时有发生,如杭州市延安路上的一座大跨工字型钢箱梁结构的人行桥,在使用过程中行人普遍反映行走时有很明显的振感,使其安全性受到怀疑,后经检测是由于结构固有频率过低[3]。因此,掌握结构的动力特性对人行桥的设计非常重要。

近年来,公共建筑结构的振动舒适度问题在我国受到关注,有关规范对公共建筑结构的舒适度提出了要求,如《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69-2016)[4]中建议结构一阶固有频率大于3 Hz,以及《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99-98)[5]对压型钢板组合楼盖的要求是大于15 Hz。但仅依靠自振频率单个指标无法全面衡量楼板的动力特性,一些轻型楼盖虽然自振频率较高,但是质量小,激振容易,同样可能存在舒适度问题[6];另外忽略了阻尼的影响也不尽合理。同时,由于人行天桥在大空间室内结构中得到运用,采用户外天桥的评价标准已不能很好地满足实际要求。

本文利用脉动法对同济大学图书馆中央大厅天桥进行了测试,得到其自振频率和阻尼比,并结合规范对其舒适度进行了评价分析。

2. 实验原理和设备

2.1. 实验原理

脉动法是利用环境的微小振动作为输入,通过被测试结构的输出数据识别结构动力特性和模态参数。利用该法进行测试时,一般有如下三个假定[7]:

- (1) 系统的输入和响应为平稳的各态历经的随机过程;
- (2) 脉动激励信号为白噪声信号;
- (3) 结构的阻尼比足够小,且各阶自振频率相隔较远,模态之间耦合很小。

在上述假定下，可利用响应谱峰值确定自振频率，并利用半功率点法进行阻尼识别，其精度能满足工程要求。

2.2. 实验设备

本实验采用同济大学土木工程学院结构工程与防灾研究所自主研发的 SVSA 振动信号采集分析系统 [8]，由高灵敏度压电式传感器，多通道数据采集仪和基于 VB.net 开发平台的采集分析软件构成见图 1，设备参数见表 1。

3. 实验方案

3.1. 测试结构简介

同济大学四平路校区图书馆中央大厅天桥为改造后结构，承重体系为钢结构，楼面铺设瓷砖，两端与同层楼板整体相连，跨中和两端共有 6 根钢柱支撑。天桥贯穿中央大厅，将图书馆前后两部分衔接起来，见图 2。平时人流量较小，但行走时振动感明显。本次实验对天桥结构水平横向和竖向两个方向进行测试，获取结构的前两阶自振频率和阻尼比。

3.2. 实验步骤

(1) 实验准备

将信号线一端与传感器连接，另一端分别和数据采集仪上 0 通道和 1 通道连接。用 USB 连接线将数

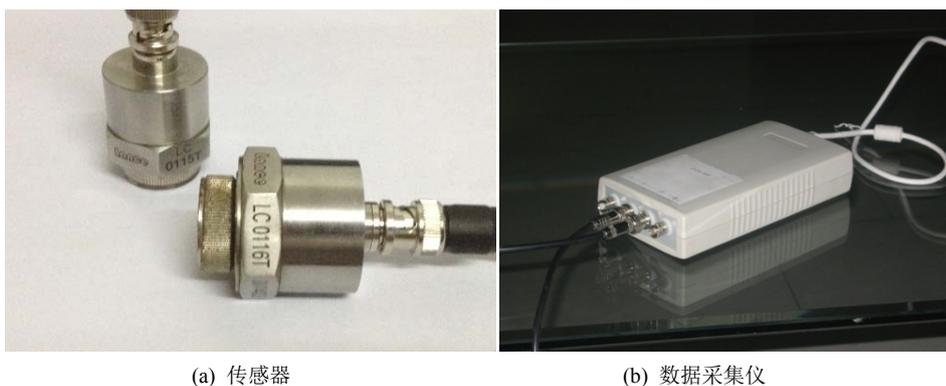


Figure 1. Main experimental equipment

图 1. 主要实验设备



Figure 2. Pedestrian bridge

图 2. 人行天桥

据采集仪和便携式电脑连接。打开 SVSA 软件，未出现连接错误的提示，证明数据采集系统已连接完毕。在传感器连接后，对数据进行预采集测试，若发现数据偏离中心轴线较多，离散性大，则说明传感器尚处于充放电过程，待传感器稳定后正式采集记录实验数据。

(2) 采样参数设置

起始通道定为 0，采用两个传感器量测，通道总数为 2；采样频率设为 100 Hz。传感器灵敏度分别为 $1\text{ V} = 59.3\text{ cm/s}^2$ 和 $1\text{ V} = 60.4\text{ cm/s}^2$ ，统一取 $1\text{ V} = 60,000\text{ }\mu\text{g}$ 。

(3) 测点布置

本次实验采用连续采集，在天桥地面均匀布置 6 个测点，其中 4 个测点数据有效。测试时间为 3~5 分钟，选择人流稀少的时候进行测试，以避免人行荷载造成较大干扰。

4. 实验结果

自振频率与阻尼比

将测得数据采用以下方法进行预处理：去初始项，以消除“零漂”干扰；去直流项，消除工频信号干扰；去趋势项，消除电信号干扰，其中三点拟合法更符合实际情况的处理。将所测的竖向、横向数据利用 SVSA 软件分别得到其幅值谱和阻尼比，图 3~图 8 依次为测点 1 所得到的竖向与侧向加速度幅值、地面脉动及功率谱幅值。

将自振频率和阻尼比测试结果统计于表 2，可以看出：

(1) 4 组实验结果相差不大，其中自振频率一致程度非常高，显示出实验仪器设备的精度较高，测试

Table 1. Experiment instrument parameters

表 1. 实验仪器参数

名称	编号	规格	数量	备注
信号线	-	6 m	2	-
USB 连接线	-	-	1	-
SVSA 采集仪	-	4 通道	1	-
加速度传感器	1113	KD12000L	1	$1\text{ V}=59.3\text{ cm/s}^2$
加速度传感器	1117	KD12000L	1	$1\text{ V}=60.4\text{ cm/s}^2$

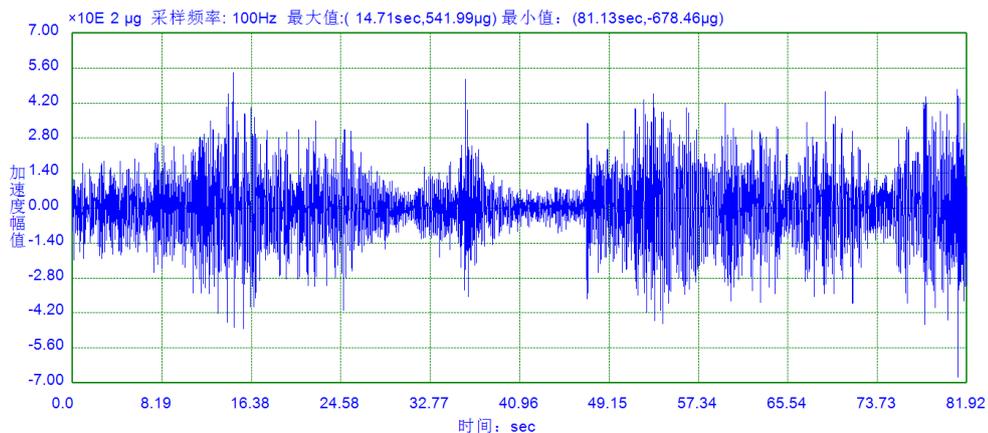


Figure 3. Vertical acceleration amplitude

图 3. 竖向加速度幅值

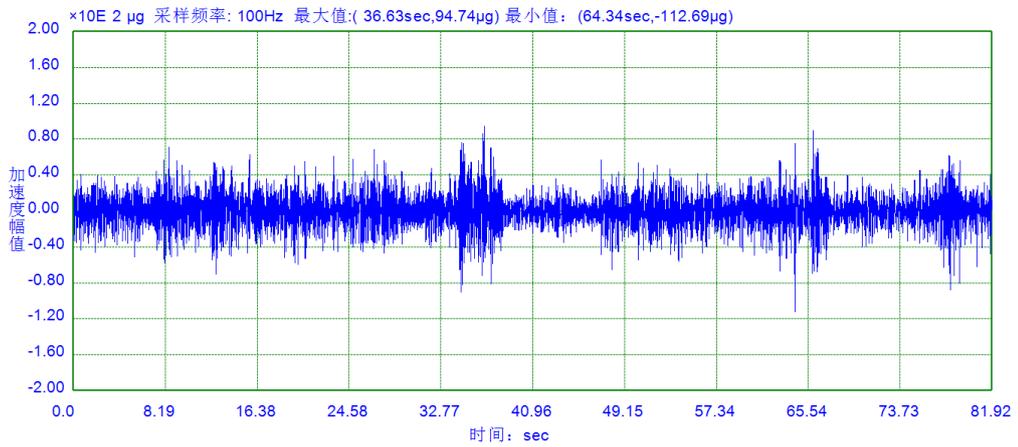


Figure 4. Lateral acceleration amplitude
图 4. 侧向加速度幅值

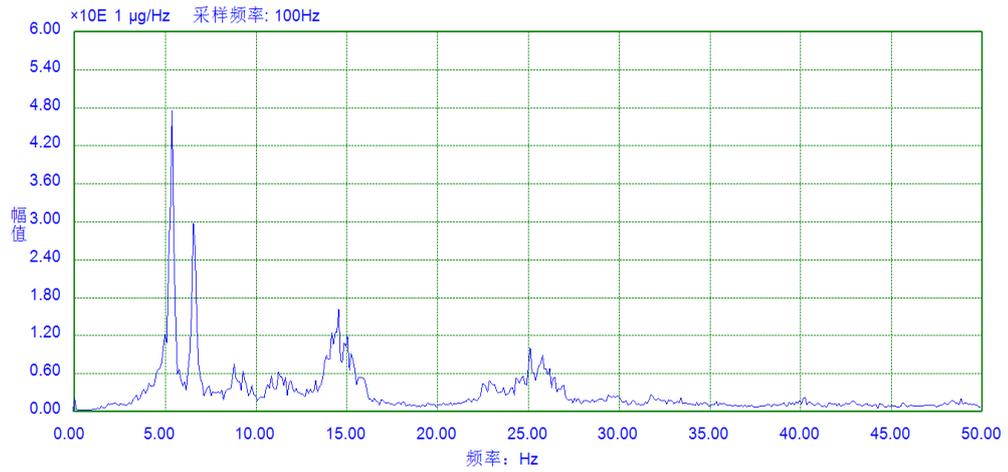


Figure 5. Vertical ground pulse amplitude
图 5. 竖向地面脉动幅值

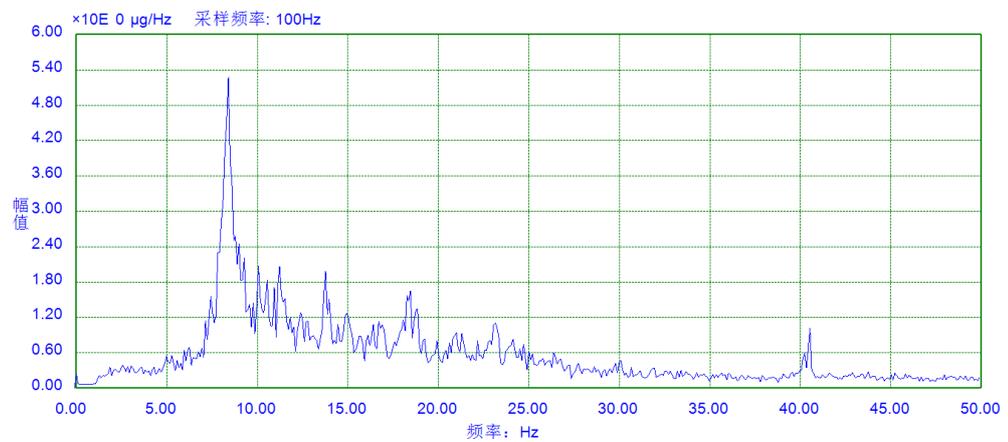


Figure 6. Lateral ground pulse amplitude
图 6. 侧向地面脉动幅值

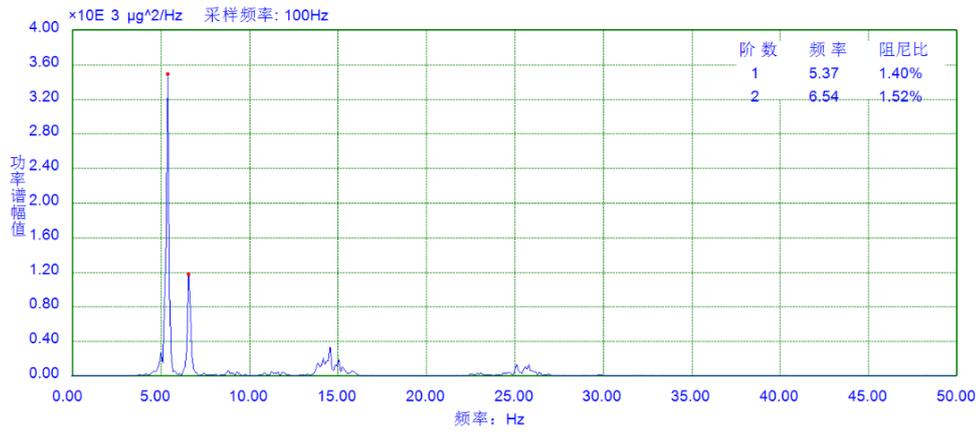


Figure 7. Vertical power spectrum amplitude
图 7. 竖向功率谱幅值

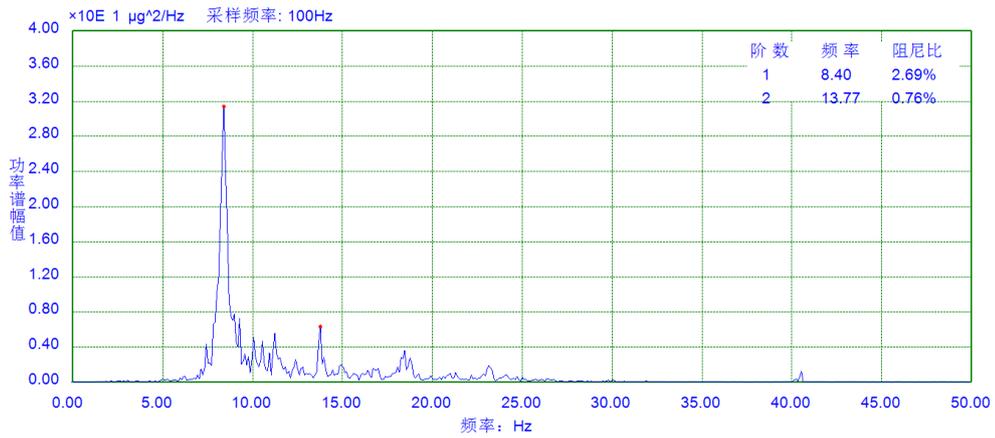


Figure 8. Lateral power spectrum amplitude
图 8. 侧向功率谱幅值

Table 2. Experiment results
表 2. 测试结果

测点	方向	阶数	自振频率(Hz)	阻尼比(%)
1	竖向	1	5.37	1.40
		2	6.54	1.52
	侧向	1	8.40	2.69
		2	13.77	0.76
2	竖向	1	5.37	1.28
		2	6.54	1.66
	侧向	1	8.40	2.73
		2	11.13	2.57
3	竖向	1	5.37	3.31
		2	6.54	1.01
	侧向	1	8.40	2.02
		2	-	-
4	竖向	1	5.37	2.20
		2	6.54	0.95
	侧向	1	8.40	1.61
		2	-	-

结果可靠性较好。用平均值计算,结构竖向第一、二阶自振频率和阻尼比分别为 5.37 Hz、6.54 Hz 和 2.05%、1.29%; 结构侧向第一、二阶自振频率和阻尼比分别为 8.40 Hz、12.45 Hz 和 2.26%、1.67%。

(2) 随阶数增加,结构的自振频率增大,阻尼比减小,与振动理论相符。

(3) 本次实验中,结构前两阶侧向频率要高于同阶竖向频率,阻尼比也高于同阶竖向频率,这是因为侧向刚度较竖向大。而竖向刚度为桥面平面外刚度,比平面内刚度更柔,这也符合一般认识。

(4) 本实验所测阻尼比数据离散性相对较大,这是因为结构的阻尼比并不是结构固定不变的常数,结构的阻尼比依赖于振动的振幅,也即结构的阻尼比随着结构的振幅变化而变化[9]。在《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3-2010) [10]中指出,结构阻尼比与外力作用下结构振动的塑性变形有关,塑性变形越小,阻尼比越小。多遇地震作用下阻尼比为 0.04,风荷载作用下为 0.02~0.04,而实验采用输入为地脉动的微小振动,因此实验结果略小于上述值。

5. 结构振动舒适度分析

5.1. 控制频率法分析结构振动舒适度

控制频率法,或称避开敏感频率法,是基于避免共振的思路,即控制楼板的主要振型的自振频率不落入人行荷载激励频率覆盖范围内。人正常行走的步频范围是 1.6~2.4 Hz,当楼板自振频率不在这个范围内,则不会引起不适感。因为这种评价指标简便易行,得到各国规范的广泛使用,表 3 列出几种不同规范的限值。

根据实验测得结果,一阶频率为 5.27 Hz,按照表中三种国外规范以及《城市人行天桥与人行地道技术规范》(CJJ69-95)均满足要求,但不满足《高层民用建筑钢结构技术规程》(JGJ99-2015)的限值要求。生理学上,人对环境振动的反应频率范围在 100 Hz 以下。对于坐着的人来说,第一共振频率发生在 4~6 Hz;对于站立的人来说,第一共振频率发生在 5~12 Hz [6]。根据这个事实,虽然此次实验结果满足大部分规范要求,但仍然会引起行人的不适感,尤其是在天桥上站立的行人。近年来,国际上很多规范都不再采用纯粹的控制频率法,而是一般要求通过计算楼板的响应来获得舒适度评价参数。

5.2. 限制动力响应法分析结构振动舒适度

限制动力响应法基于共振理论得出桥梁结构上最大响应来评估其振动舒适性,确保桥梁振动响应不超过舒适度界限值。表 4 列出了两种以峰值加速度为指标的规范限值。

在对天桥进行测试期间,虽然选择时间段较为安静,但并未限值行人通过。测试过程中偶尔有一两个行人路过,因此实测数据中含有单个行人荷载激励下的响应,如表 5。由测得数据看出,竖向加速度幅值最大为 0.0801 m/s²,并未超过两种规范限值;而侧向加速度幅值最大为 0.0062 m/s²,也未超出规范的限值。

Table 3. Limit values of different codes for natural frequencies

表 3. 不同规范对自振频率的限值

规范名称	频率限值	适用范围
National Building Code of Canada [13]	≥ 5 Hz	住宅、学校、会堂等
BS5400-2 [11]	≥ 5 Hz	人行桥
EN093 [12]	<1.2 Hz, >2.6 Hz	人行桥
JGJ99-2015《高层民用建筑钢结构技术规程》[5]	≥ 15 Hz	压型钢板组合楼盖
CJJ69-95《城市人行天桥与人行地道技术规范》[4]	≥ 3 Hz	室外人行天桥

Table 4. Limit values of different codes for peak acceleration
表 4. 峰值加速度规范限值

规范类型	竖向加速度	水平加速度
英国规范 BSI 5400 [11]	$a_{\max} \leq 0.5\sqrt{f}$ m/s ²	-
欧盟规范 Euro Code [12]	$a_{\max} \leq 0.7$ m/s ²	$a_{\max} \leq 0.2$ m/s ²

Table 5. Response of individual pedestrian loads
表 5. 单个行人荷载激励下的响应

加速度方向	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
竖向	0.0068 m/s ²	0.0387 m/s ²	0.0266 m/s ²	0.0801 m/s ²
侧向	0.0011 m/s ²	0.0062 m/s ²	0.0048 m/s ²	0.0038 m/s ²

6. 结论

本文对同济大学图书馆中央大厅天桥做了脉动测试研究，得出以下结论：

(1) 采用 SVSA 振动信号采集分析系统获得了结构竖向与侧向一、二阶自振频率和阻尼比，实验结果可靠性较高。

(2) 针对实验结果，分别利用控制频率法和限制动力响应法评价了结构的振动舒适性。评价结果显示，结构的自振频率与振动加速度幅值均满足规范要求。

(3) 对于行人反应的天桥振动问题，可能有两种原因：一是虽然自振频率满足规范要求，但接近限值，即行人步行荷载频率仍有可能引发结构共振，导致振动较大；二是评价舒适度所参照的规范适用于一般户外天桥，对于室内天桥目前没有规范明确做出规定，而作为安静环境下的行人，对于结构物振动的敏感程度高于户外嘈杂环境。因此此类结构物，仍需提高振动控制标准。

参考文献 (References)

- [1] 肖学双. 钢结构人行桥人致振动舒适度及其控制研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙市: 长沙理工大学, 2009.
- [2] 郑凯锋. 独特的伦敦千年桥及其加固方案和全桥结构仿真分析研究[J]. 世界桥梁, 2001(1): 1-5.
- [3] 陈阶亮. 行人激励下人行天桥的振动舒适性研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州市: 浙江大学, 2007.
- [4] 北京市市政工程设计研究院. CJJ69-95, 城市人行天桥与人行地道技术规范[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ99-2015, 高层民用建筑钢结构技术规程[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [6] 潘宁. 人行荷载下楼板振动响应舒适度研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2012.
- [7] 施卫星, 马秋玲. 结构振型脉动测试方法的应用[C]//中国振动工程学会. 2006 年全国振动工程及应用学术会议论文集. 上海市: 中国声学学会, 2006.
- [8] 王勇. 结构振动信号的采集与处理方法研究[D]: [博士学位论文]. 上海: 同济大学, 2006.
- [9] 王方博, 施卫星, 刘继壮, 等. 上海国际设计中心脉动测试研究[J]. 结构工程师, 2013, 29(3): 127-132.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ3-2010, 高层建筑混凝土结构技术规程[M]. 北京: 北京中国建筑工业出版社, 2011.
- [11] British Standard Institution (2000) Steel, Concrete and Composite Bridges. Code of Practice for Design of Steel Bridges. BSI, London.
- [12] European Committee for Standardization (1994) EUROCODE 4 Design of Composite Steel and Concrete Structures. CEN, Brussels.
- [13] National Research Council of Canada (2011) National Building Code of Canada 2010. NRCC, Ottawa.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org