

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201702055



坐姿状态下人-结构相互作用体系 水平振动特性

王丰磊, 叶茂, 付明科

(广州大学 淡江大学工程结构灾害与控制联合研究中心, 广东 广州 510006)

摘要: 针对人-结构系统水平振动问题, 建立质量轻基频低的试验平台, 研究人端坐于试验平台时该人-结构相互作用体系的水平振动特性. 试验结果表明: 自然端坐状态下, 人体的不同朝向对结构的动力特性的影响不同. 当人朝 x 向端坐时, 结构多出一个振型频率, 而基频恰好分布于两振型中间; 而当人朝 y 向端坐时, 结构仅有共振频率高于原结构基频. 在研究中, 人通常比较成质量块放在结构装置上, 而事实上质量块对结构的振型阻尼比影响很小, 人体能显著增大结构振型阻尼比. 因此, 不能将水平向自然端坐的人仅仅看作质量块, 而应当成质量-弹簧-阻尼完整的体系.

关键词: 人-结构系统; 质量-平台系统; 水平振动; 振型频率; 动力特性; 坐姿

中图分类号: TU 317.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0020-04

Horizontal Vibration Characteristics of Human-Structure Interaction System in Sitting Posture

WANG Fenglei, YE Mao, FU Mingke

(Tamkang University Joint Research Center for Engineering Structure Disaster Prevention and Control,
Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the system level of vibration structure, a low frequency light mass test platform was established to study the horizontal vibration of human-structure interaction system in sitting posture. The experimental results show that under the natural sitting state, the influence of different human orientations on the dynamic characteristics is different, when human orientation is x direction, the structure has one more vibration frequency, and fundamental frequency locates just between two modes; when human orientation is y direction, only the structure resonance frequency is higher than the fundamental frequency of original structure. The human usually is simulated into a mass on structure, the influence of the mass on the modal damping ratio is slight, but human can significantly increase the structural modal damping ratio, therefore the human under the natural sitting state cannot be regarded simply as a mass, but should be combined into the whole system of mass-spring-damping.

Keywords: human-structure system; mass-platform system; horizontal vibration; mode frequency; dynamic characteristics; sitting posture

随着对土木工程领域的深入研究, 建筑结构逐渐向大空间、大跨度方向发展. 这些建筑的材料具有高强度、轻质量、耐久性好等优点, 但是这些结构因本身自振频率较低、阻尼小、柔度大, 在人群密集处会产生较大人群荷载, 使得结构振动过大. 如人在钢架的人行天桥、演唱会的临时看台等建筑上震感强烈,

收稿日期: 2016-02-23

通信作者: 叶茂(1987-), 男, 副研究员, 博士, 主要从事结构振动的研究. E-mail: 123698111@qq.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51178126, 51208125); 广东省科技计划项目(2016B050501004); 广东省广州市科技计划项目(2013J2200074)

不仅影响舒适性,还可能引起建筑物坍塌^[1-2]. Sachse^[3]在前人研究人-结构的基础上,通过实验提出人体竖向动力模型. Ibrahim^[4]通过对前人研究进行改进,在坐姿与站姿等不同姿势上引进多元化模型参数. Littler 等^[5-6]对矩形看台结构在有无人群两种情况下的两个方向结构的原始频率的测试分析得出竖向与水平向外侧在一定程度被削减,而水平向内侧频率变大. Zhou^[7]和王海等^[8]研究分析了人-结构系统耦合作用,建立了人-平台结构竖向研究理论基础,并对分布有限人数的结构体系竖向振动模态特性理论进行分析. 何卫等^[9]研究人板质量比、频率比等参数对人-板系统竖向振动和阻尼人群-薄板系统振动特性的影响. 李红利等^[10]研究人-桥竖向动力相互作用效应理论与相应的理论表达式. 综上所述,国内外对人-结构系统的研究大多是关于人-结构竖向系统,而基本未对水平系统做出实质性的研究. 为了研究人在自然端坐下前后左右 4 个方向的水平振动特性,本文在水平振动试验平台上,分别对结构系统、质量块-结构系统,以及人-结构系统进行水平振动研究,并对其振动特性进行分析.

1 人-结构系统振动试验概况

图 1 为试验装置,其材质采用 Q345 钢. 图 1 中:1 号构件尺寸为 $3.60\text{ m} \times 0.20\text{ m} \times 0.01\text{ m}$;2 号构件(承重板)下部设加劲肋,其尺寸为 $0.700\text{ m} \times 0.700\text{ m} \times 0.006\text{ m}$;在 1 号与 3 号构件上铺设卡槽,并用膨胀螺栓固定在装置上. 另外,1 号构件通过螺栓与承重板连接来传递振动. 为便于叙述,将分别将构件厚度、长边及竖直等 3 个方向为 x, y, z 向;以承重板的远端为刻度原点,在 y 向(长边方向)作刻度线. 为了保证数据的精确性,数据收集采用 B&K Pulse TM 3560D 数据采集器;水平 x 向(厚度方向)振动是通过 3 个 4381-v 型加速度传感器进行测试.

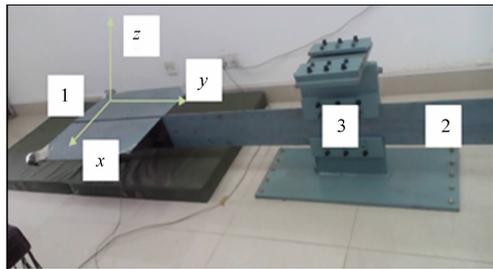


图 1 试验装置
Fig. 1 Test setup

2 原结构与质量块-结构动力特性分析

试验过程中,将 1 号构件移动至 3 号构件中的卡槽左端,其读数为 235 cm(即从卡槽左端到承重板左端距离). 给出空载状态下原结构水平 x 向加速度(a)的时程曲线和对应的自功率频率谱,分别如图 2,3 所示. 由图 2,3 测试结果可知:结构基频为 2.335 Hz,振型阻尼比为 0.131 5%.

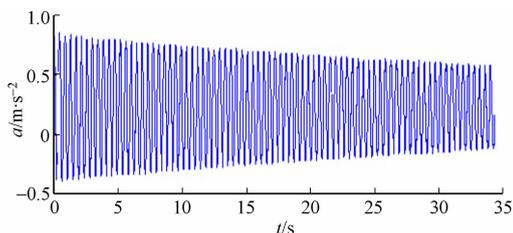


图 2 加速度 x 方向时程曲线

Fig. 2 Time history curve of x direction acceleration

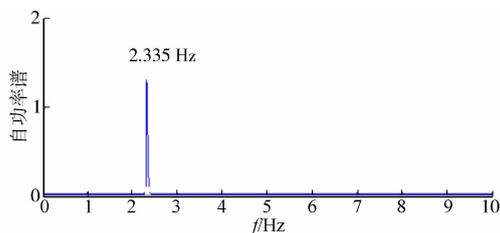


图 3 自功率频率谱

Fig. 3 Self power frequency spectrum

在承重板上加不同重量质量块,测试质量块-结构系统的动力特性,对比分析人-结构系统,如图 4 所示. 图 4 中:质量块为 60.1 kg.

结构上加载质量块(钢制圆盘),进行 5 次加载,加载质量 $M_1 \sim M_5$ 分别为 12.2, 24.1, 36.1, 48.2, 60.1 kg,不同质量块-平台系统模态变化,如表 1 所示. 表 1 中: f 为频率.

由表 1 可知:随着质量块质量的增加,系统的基频随之降低,但振型阻尼比在纯质量块的作用下影响微乎其微. 因此,质量块对一阶阻尼比的影响可忽略,但对结构的基频有显著影响.

单人-结构系统试验模型,如图 5 所示. 由图 5 可知:当端坐人产生很大的阻尼,说明人-结构系统已迅速静止. 当人朝 x 向端坐时,单人-结构系统水平 x 向时程图与自功率谱,如图 6 所示. 由图 6 可知:空载状态下原结构在 $0 \sim 10\text{ Hz}$ 的频率范围只出现一个共振频率点;而当人朝 x 向端坐时,出现了两个共



图 4 质量块-平台系统示意图
Fig. 4 Mass-platform system

表1 不同质量块-平台系统模态变化

Tab.1 Modal changes of different mass-structure system

| 工况 | 平台结构系统 | 平台系统(M1) | 平台系统(M2) | 平台系统(M3) | 平台系统(M4) | 平台系统(M5) |
|-------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|
| m (附加)/kg | 0 | 12.2 | 24.1 | 36.1 | 48.2 | 60.2 |
| J /Hz | 2.336 | 1.993 | 1.769 | 1.616 | 1.482 | 1.389 |
| 阻尼比/% | 0.132 5 | 0.096 6 | 0.122 3 | 0.142 4 | 0.123 6 | 0.173 7 |

振频率点,空结构基频大于其中一个共振频率,另一个恰恰相反。

人朝 y 向端坐时,单人-结构系统水平 x 向时程图与自功率谱,如图7所示。由图7可知:端坐人提供很大的阻尼,人朝 y 向端坐与 x 向区别很大, y 向只有一个高于空载状态下原结构基频的共振频率。

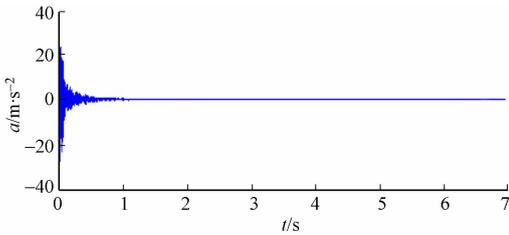
单人静态自然端坐人-结构系统测试结果(18个人),如图8所示。由图8可知:人朝 x 向端坐时,结构有两个振型频率分布在空载状态下原结构基频的两边(比空荷载结构多出一个频率),共



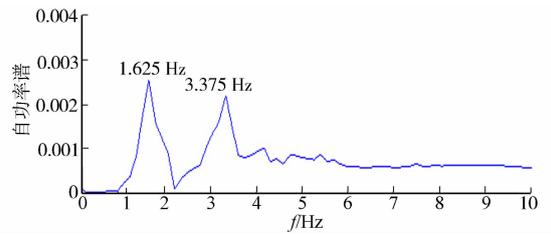
(a) x 向端坐图 (b) y 向端坐图

图5 单人-结构系统试验模型

Fig.5 Human-structure test model



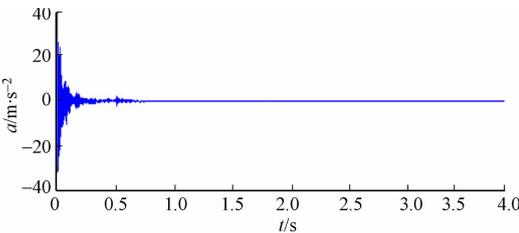
(a) 加速度 x 方向时程图曲线



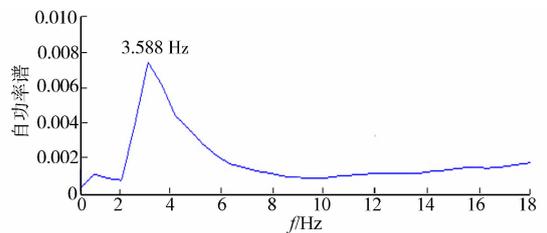
(b) 自功率频率谱曲线

图6 x 向端坐单人-结构系统水平

Fig.6 x direction one people-structure system



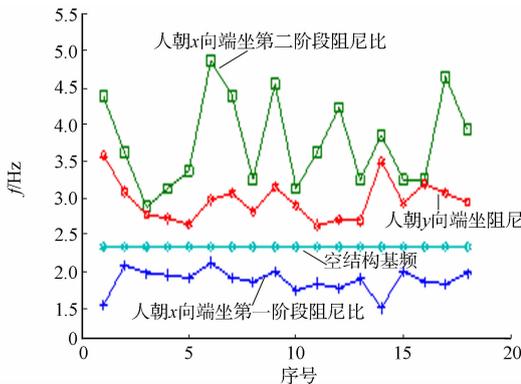
(a) 加速度 y 方向时程图曲线



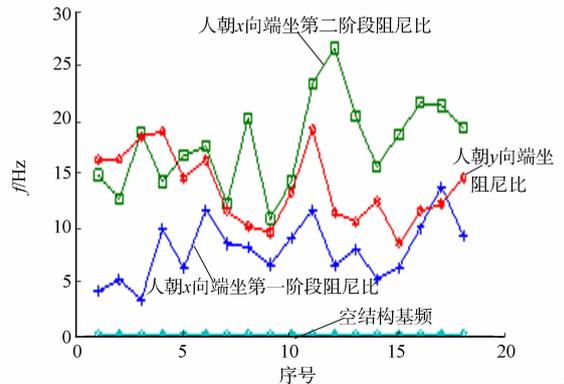
(b) 自功率频率谱曲线

图7 y 向端坐单人-结构系统水平

Fig.7 y direction one people-structure system



(a) 人-结构系统与空平台结构基频



(b) 人-结构系统与空平台结构阻尼比

图8 单人静态自然端坐人-结构系统测试结果

Fig.8 Test result of one people-structure system

振频率的平均值分别为 1.881, 3.755 Hz; 然而, 对于人朝 y 向端坐时, 结构只存在一个共振频率, 其平均值为 2.965 Hz, 低于共振频率; 此外, 人端坐状态将会使整个系统的阻尼大很多, 人朝 x 向端坐时, 系统第一阶与第二阶振型阻尼比分别为原结构的 60.3, 133.3 倍(其中第一阶与第二阶振型阻尼比平均值分别是 8.014%, 17.735%); 而人端坐朝向为 y 向端坐时, 系统阻尼比为原结构的 107.1 倍(阻尼比平均值是 14.243%)。

3 试验结果与分析

人体在水平向可以看成质量-弹簧-阻尼系统, 因为人朝 x 向端坐时, 结构有两个振型频率分布在空载状态下原结构基频的两侧(比空荷载结构多出一个频率); 人朝 y 向端坐时, 结构只存在一个共振频率, 且此空载状态下原结构基频低于共振频率。上述现象表明端坐的前后向人体与左右向人体的动力特性有很大的区别; 端坐人-结构系统阻尼效果显著导致在水平向自然端坐的人不能当成质量块。

4 结论

通过整个试验过程数据采集与分析, 可获取如下 4 个结论。

- 1) 通过人-结构系统和质量-平台系统比较, 两者在动力特性方面差异明显, 其中, 人-结构水平动力特性是不可以把人看成质量块附加在结构上。
- 2) 自然端坐的人在前后左右 4 个方向上, 人体对结构的动力特性产生的影响有以下区别, 即当人朝 x 向端坐时, 结构多出了一个振型频率, 而基频恰好分布于两振型中间; 而当人朝 y 向端坐时, 结构仅有共振频率高于原结构基频。
- 3) 结构振型阻尼比受人的端坐状态的影响很大, 而质量块对结构的振型阻尼比影响可忽略。
- 4) 为了研究人-结构体系在水平向的振动特性可将端坐人体看作质量-弹簧-阻尼系统。

参考文献:

- [1] 苏冠兴, 张志强, 李爱群. 人行天桥的 MTMD 减振控制研究[J]. 特种结构, 2010(1): 71-75.
- [2] DALLARD P, FITZPATRICK T, FLINT A, *et al.* The Millennium Bridge, London: Problems and solutions[J]. Structural Engineer, 2001, 79(8): 15-17.
- [3] SACHSE R. The influence of human occupants on the dynamic properties of slender structures[D]. Sheffield: University of Sheffield, 2002.
- [4] IBRAHIM Z. The Effects of crowds on dynamic characteristics of stadia structures[D]. Sheffield: University of Sheffield, 2006.
- [5] LITTLER J D. Full-scale testing of large cantilever grandstands to determine their dynamic response[J]. Structures and Buildings, 1998, 15(2): 123-134.
- [6] LITTLER J D. Retractable grandstands: Dynamic response[M]. Garston: RC Press, 2000.
- [7] ZHOU Ding. Free vibration of rectangular plates with attached discrete sprung masses[J]. Shock and Vibration, 2012, 19(1): 101-112. DOI: 10.1155/2012/983576.
- [8] 王海, 周叮, 王曙光. 人-梁相互作用动力学模型研究[J]. 工程力学, 2010, 27(5): 14-20.
- [9] 何卫, 谢伟平, 刘隆. 人-板耦合系统动力特性研究[J]. 工程力学, 2013, 30(1): 58-67. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2012.02.0084.
- [10] 李红利, 陈政清. 人-桥竖向动力相互作用效应理论与试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(6): 78-87. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2014.06.004.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 方德平)