

一种多功能单跨梁振动实验系统

李显昌¹, 朱海涛^{1,2}, 张梁¹

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;

2. 滨海土木工程结构与安全教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:为研究梁的振动问题,开发了一种多功能单跨梁振动实验系统。该振动实验系统主要由底座、支座、激振器、位移传感器、力传感器和数据采集处理系统6部分组成。通过更换支座可以实现简支梁、悬臂梁、一端固定一端铰支、两端固定梁等多种形式梁实验,并且可以通过更改激振器位置,实现不同位置加载。测得了几种典型正弦激励荷载作用下梁振动时程曲线和3根悬臂梁的固有频率,并与有限元数值模拟值进行比对。结果表明:梁的振幅和固有频率实验值与有限元数值模拟值吻合较好,具有较高的精度。该振动实验系统可用于土木工程中梁振动、模态分析等课程的实践教学,也可用于梁振动基础理论的研究。通过一定的设置,也可以实现随机振动实验。

关键词:振动台;梁;数值模拟;实验;教学

中图分类号: TU990.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2020)02-0130-07

0 引言

在土木学科课程和土木领域研究中,梁的振动问题以及梁振动固有频率的研究具有重要的理论和应用价值,但是由于梁振动问题过于复杂,实验难以操作,因而在梁振动实际教学和研究中很难将理论和实践结合起来^[1]。实际上,为了实现梁振动问题的实践教学与研究,部分高校和科研机构相继开发了一系列振动教学系统。张蔚波等^[2]基于市场上已有的振动教学系统研制了简支梁形式的振动教学平台;李建康等^[3]研制的三自由度弦振动的模态教学装置在各类振动实验教学平台中被广泛采用;李兆军等^[4]研制了能对离散质量、梁和轴振动的振动实验台;任张晨等^[5]采用传统锤击方法测得了四不等跨连续梁的固有频率,并将有限元软件分析计算结果与实验得到的结果进行分析比对,验证了实验的可靠性;刘爱民等^[6]用将悬臂梁固定在支架上剪断自由端悬挂重物的方式对悬臂梁结构进行了动力学分析;曹东兴^[7]通过搭建实验平台研究了简谐荷载作用下方形截面悬臂梁的非线性振动特性。上述几种梁振动教学平台和研究装置,或限于弦振动,将质量集中在几点与实际梁模型相差甚远;或形式较复杂,操作较为麻烦;或激励方法较为传统,实验数据不能保持较好的稳定性和连续性,因而不能很好地用于梁振动的教学和研究。为了更好地开展梁振动问题的教学与研究,开发了一种结构简单、布置灵活的多功能单跨梁振动实验系统,利用该振动实验系统开展了实验,并将实验结果与数值解进行比对,结果吻合较好。该振动实验系统具有较好的精度,可以用在土木学科梁振动教学实践和基础理论研究中,也可用于复杂的随机振动实验。

1 多功能单跨梁振动实验系统构建

1.1 多功能单跨梁振动实验系统

多功能单跨梁振动实验系统的设计要满足3个要求:①能实现多种形式梁振动实验;②能够实现不

收稿日期:2018-12-28 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxbzb.20180156

基金项目:国家自然科学基金(51478311);天津大学自主创新基金(2017XRX-0018)

作者简介:李显昌(1992—),男,硕士研究生,研究方向为结构随机振动与工程应用。E-mail:892210874@qq.com

李显昌,朱海涛,张梁.一种多功能单跨梁振动实验系统[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2020,33(2):130-136.

同激励荷载和激励点的施加以丰富实验内容；③能够通过数据直观地观察梁振动曲线，并应具有较高的精度。整个梁实验系统由底座、支座、激振器、位移传感器、力传感器和数据采集处理系统 6 部分组成。底座由板 1 和板 2 通过角焊缝连接，焊缝要通过计算校核保证不会出现破坏、局部失稳或整体失稳^[8]。板 1 尺寸为 800 mm×400 mm×10 mm，并且根据激励点加载位置不同在板面上预留相应螺栓孔用来固定激振器；板 2 尺寸为 800mm×800 mm×10 mm，根据梁支座位置预留相应螺栓孔以固定支座。底座拼接效果如图 1 所示。支座设计成 2 种形式，分别为简支端支座和固定端支座，为了减少约束对梁振动实验的影响，支座应具有较大的刚度，支座尺寸和三维图如图 2 所示。激振器使用强力电动式模态激振器，其可以为梁提供最大激振力为 100 N、最大振幅为 10 mm 的激励；力传感器采用动态力传感器，其一端通过顶针与激振器连接，另一端与试件梁连接，为保证梁仅在激振器激励作用下振动而不是与激振器协同振动，力传感器与试件梁之间不能采取固定约束，在实验时通过调节顶针使力传感器与试件梁轻微预压紧即可；位移传感器采用激光位移传感器，其测量范围在 ±60 mm，分辨率 8 μm，具有较高的精度。实验系统工作原理示意图如图 3 所示，实体图如图 4 所示。

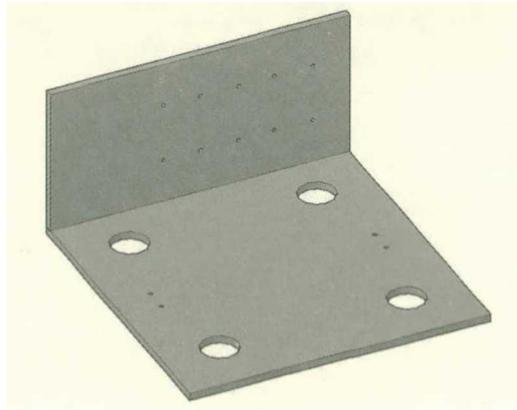


图 1 系统底座

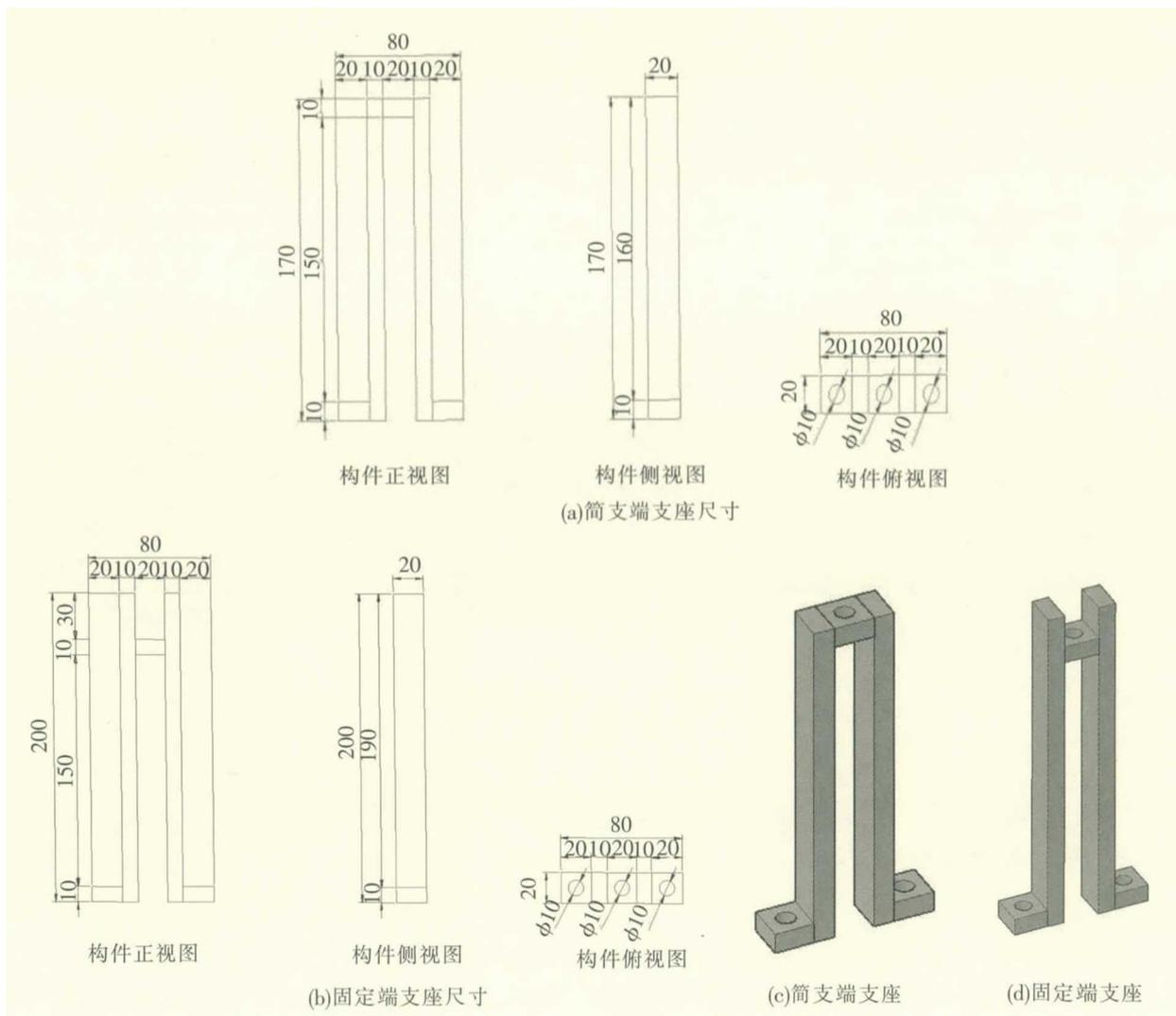


图 2 支座尺寸和三维实体图(单位:mm)

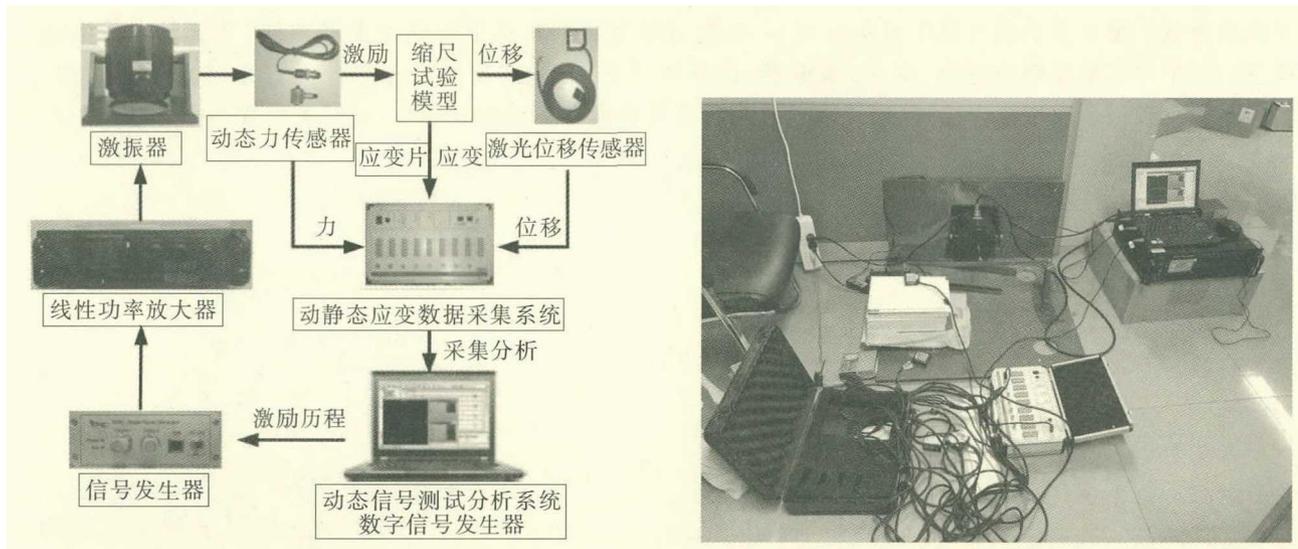


图 3 实验系统工作原理示意图

图 4 系统组装实体图

1.2 梁振动工况方案

为验证上述单跨梁振动实验系统的可靠性,制作了 3 根截面尺寸不同的钢梁进行实验,钢梁长度均为 620 mm,其截面尺寸如图 5 所示。根据底座上预留螺栓孔,可以将激振器固定在不同的位置,实现不同激励点加载,结合支座的固定形式,可以有以下振动工况组合方案,共计 36 种,其排列组合如表 1 所示。

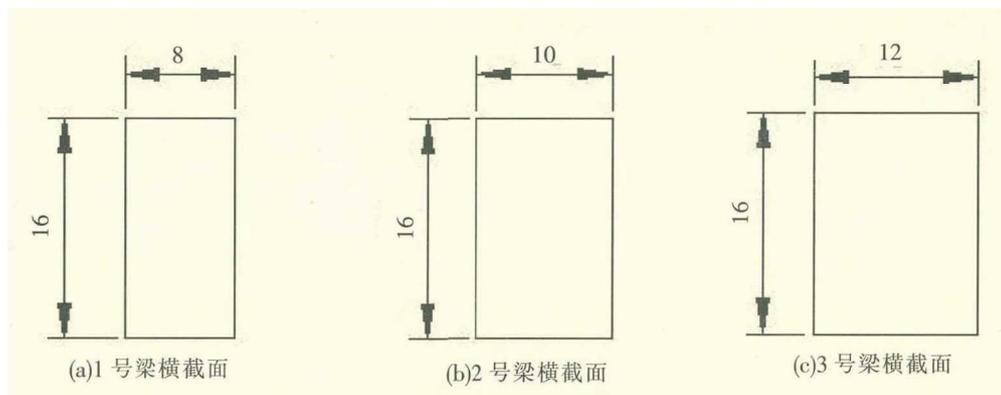


图 5 试件梁截面图(单位:mm)

表 1 振动工况组合方案值

激振点位置	两端简支	一端固定	一端固定一端简支	两端固定	方案数量
1/4	3	3	3	3	12
1/3	3	3	3	3	12
1/2	3	3	3	3	12

2 梁振动实验测试结果

2.1 强迫振动

使用上述研发的单跨梁振动实验系统,选取几种典型工况进行了振动实验。实验中选用正弦波作为激励荷载,为了能够较好地采集钢梁的振动数据,实验中调节信号源正弦波信号的频率为 10 Hz,振幅通过线性功率放大器的输出电压控制,分别为 0.6 V、1 V、1.4 V。实验工况如表 2 所示。

表 2 实验工况

工况	梁	约束形式	电压/V	位移采集位置	工况	梁	约束形式	电压/V	位移采集位置
1	1号梁	悬臂梁	0.6	自由端	7	3号梁	悬臂梁	0.6	自由端
2	1号梁	悬臂梁	1	自由端	8	3号梁	悬臂梁	1	自由端
3	1号梁	悬臂梁	1.4	自由端	9	3号梁	悬臂梁	1.4	自由端
4	2号梁	悬臂梁	0.6	自由端	10	1号梁	简支梁	1	跨中
5	2号梁	悬臂梁	1	自由端	11	1号梁	简支梁	1.4	跨中
6	2号梁	悬臂梁	1.4	自由端					

对于表 2 中所列出的工况进行振动实验,悬臂梁的加载点和振动位移监测点分别选取跨中 1/2 处和自由端点处,简支梁的加载点和振动位移监测点均选取跨中 1/2 处,部分工况的振动位移时程曲线和激振力时程曲线如图 6 和图 7 所示。

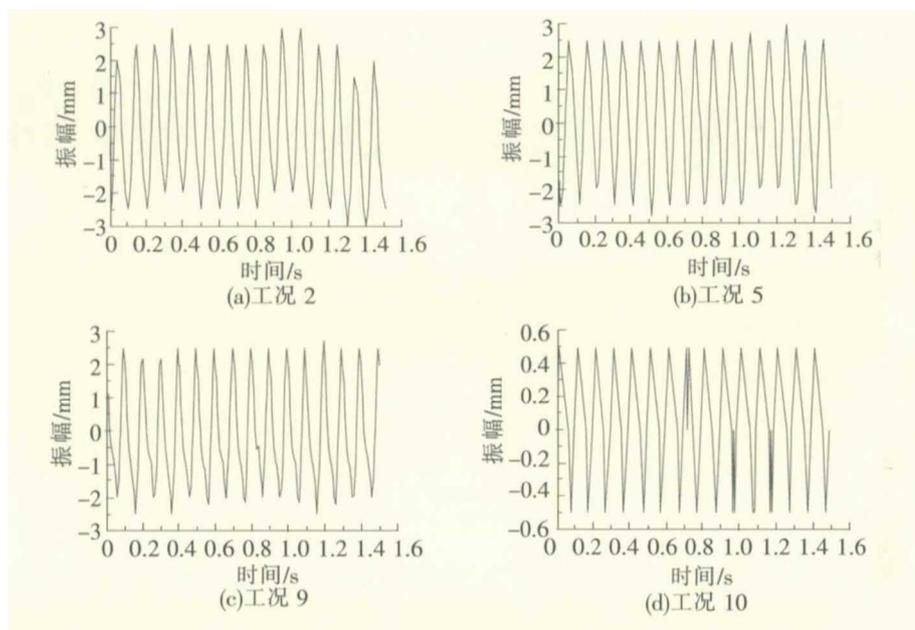


图 6 振动位移时程曲线

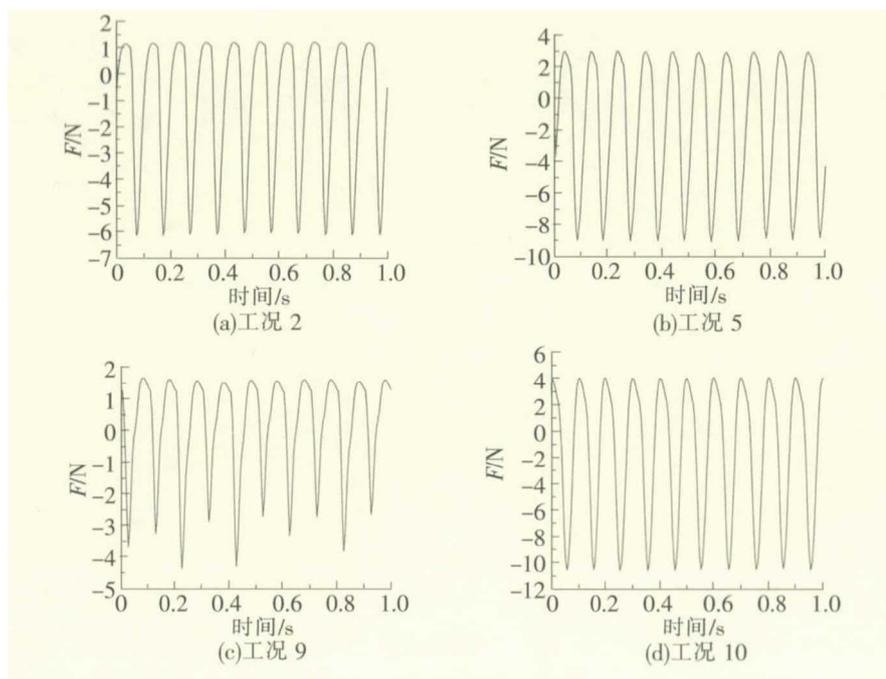


图 7 激振力时程曲线

2.2 模态分析

使用上述研发的单跨梁振动实验系统,分别对工况 1、工况 4、工况 7 钢梁试件进行扫频,扫频波形选用正弦波,扫频范围为 5~100 Hz,扫频时间选为 20 s,扫频时间不易过小同时也不易过大,如果时间过小则每个频率停留时间过于短暂,位移传感器不能够有效采集到相应位移;如果时间过大,则在每频上采集数据点过多,位移时程曲线失真,影响模态分析结果。在扫频过程中,梁的振动是一个非常复杂的随机振动过程,其振动频率在 0 到无穷大之间连续变更,可以用非周期性函数来描述这种振动的过程。非周期波形不能直接展开成为傅里叶函数,但在研究时可以将其看成一个周期无穷大的周期波,其频谱是连续频谱^[9]。模态分析主要考虑加载方向平面外振动,对 3 根钢梁扫频得到位移时程曲线经过快速傅里叶函数转化(FFT)便可得到相应的频谱,3 根钢梁在以上 3 种工况下的频谱如图 8 所示。

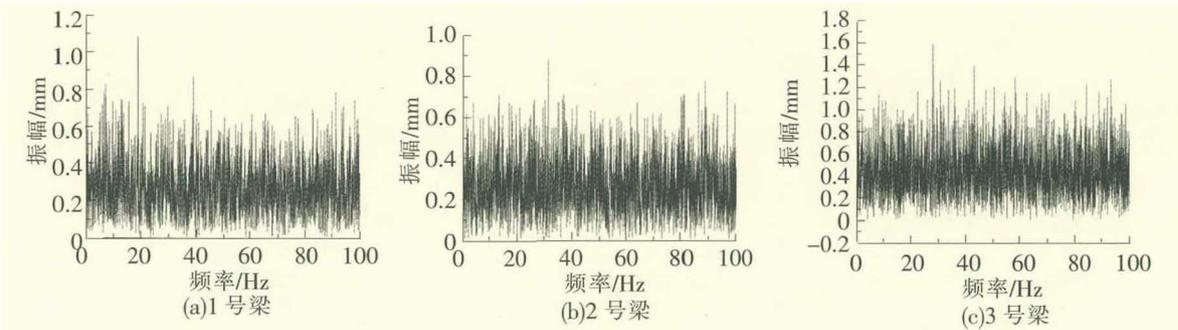


图 8 频谱分析图

3 数值模拟与结果对比

3.1 数值模拟

采用 ABAQUS 建立梁的三维实体单元模型,为了简化模型,模型中不对激振器加载顶针建模,而只是在顶针一端的受力点处定义一个参考点,然后在此点和梁表面之间建立分布耦合约束,从而模拟激振器顶针与梁的连接关系^[10]。梁材料为 Q235,密度为 7 850 kg/m³,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3。将实验中采集得到的激振力作为加载荷载幅值,得到数值位移时程曲线,如图 9 所示。

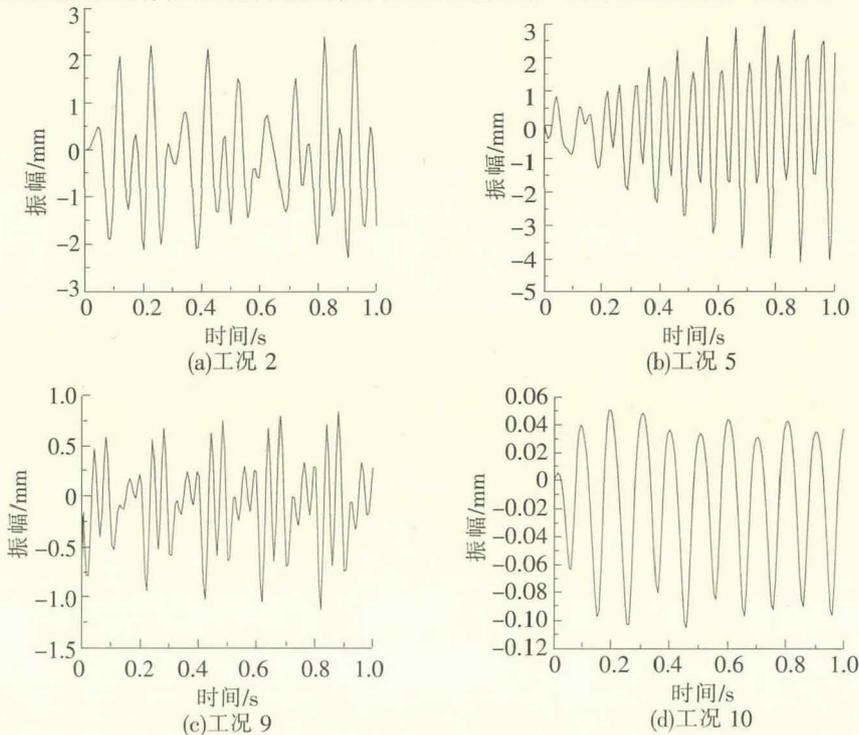


图 9 数值位移时程曲线

3.2 结果对比

将实验中采集到的位移时程曲线平均振幅与数值模拟位移时程曲线平均振幅进行比对,结果如表 3 所示;实验模态分析结果与数值模态分析结果比对如表 4 所示。

表 3 振幅结果对比

mm

工况	实验值	数值值	差值	工况	实验值	数值值	差值
工况 1	1.5	0.72	0.78	工况 7	1.2	0.4	0.8
工况 2	3.4	2.3	1.1	工况 8	2.2	0.98	1.22
工况 3	3.7	3.2	0.5	工况 9	2.5	1.96	0.54
工况 4	2.4	0.8	1.6	工况 10	0.5	0.1	0.4
工况 5	2.5	3.5	1	工况 11	0.7	0.12	0.58
工况 6	3	2.8	0.2				

表 4 模态分析结果对比

Hz

梁号	模态阶数	实验值	数值值	差值
1 号梁	1	19	16.8	2.2
1 号梁	2	38	34.5	3.5
2 号梁	1	29	33.8	4.8
3 号梁	1	28	25.3	2.7

3.3 误差分析

从实验结果和数值模拟结果对比来看,该振动实验系统具有较高的精度。振幅误差最低为 0.2 mm、最大为 1.6 mm,相对误差可达到 7%左右;模态分析误差最大为 4.8 Hz,最小为 2.2 Hz,相对误差可达到 10%左右。误差的主要原因有:①振动实验系统中采用的位移传感器和力传感器都为高精密度器件,在实验中,振动平台自身产生的微小振动会对实验结果造成很大的误差;②振动实验系统中梁支座刚度有限,而在数值建模中为了简化模型将支座刚度简化为无穷大,从而造成一定的误差;③振动过程中,激振器顶针与梁不能一直保持较好理想接触,部分时间存在脱离,在数值模拟中顶针与梁接触理想,致使实验结果与数值模拟结果存在误差;④实验中振动位移采集点与数值模拟中位移监控点不完全是同一点,造成实验结果与数值模拟结果误差。

4 结论

(1)开发了一种多功能单跨梁振动实验系统,该振动实验系统结构简单,操作方便,能实现多种形式梁振动实验,可用于梁振动、模态分析等课程的实践教学,丰富土木类本科生和研究生的教学实践,为进一步加强和提高学生在梁振动方面的实践和创新能力提供平台,也为梁振动基础理论研究和随机振动研究提供一种实验手段。

(2)设计了 3 根不同截面的梁,进行了 11 种不同工况的振动实验,并对 3 根悬臂梁进行模态分析。将实验结果与数值模拟结果进行比对,结果吻合较好,表明该单跨梁振动实验系统具有较高的精度。

(3)深层次分析了该单跨梁振动系统在实验中产生误差的原因,为今后利用该系统进行梁振动实践教学和基础理论研究进行误差分析提供参考。

参 考 文 献

[1]孙金坤,韩文坝,李奎,等.两种理论下梁振动固有频率试验研究[J].四川建筑科学研究,2018,44(1):33-36,42.

- [2]张蔚波,齐淑敏,王佩凤,等. 振动教学实验台系统研制[J]. 山东建筑大学学报,2009,24(3):276-278,281.
- [3]李建康,肖同亮,蔡东升,等. 多自由度系统模态振型创新型教学实验的设计与实现[J]. 实验技术与管理,2006(2):16-18.
- [4]李兆军,耿葵花,杨旭娟,等. 机械动力学综合振动实验台的研制[J]. 实验室研究与探索,2010,29(6):134-136.
- [5]任张晨,袁向荣,陈泽贤,等. 四不等跨连续梁振动试验分析及冲击系数探讨[J]. 实验室研究与探索,2017,36(8):29-33.
- [6]刘爱民,傅惠南,刘文振,等. 不同结构特征悬臂梁的振动实验研究[J]. 机械工程与自动化,2017(6):148-149,154.
- [7]曹东兴. 轴向激励悬臂梁非平面振动的实验研究[C]//第九届全国振动理论及应用学术会议论文集. 杭州:浙江大学出版社,2007.
- [8]陈绍蕃,郭成喜. 钢结构[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [9]贾旭鹏. 地铁运行振动的传播规律和对地面建筑的影响[D]. 上海:同济大学,2008.
- [10]石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

The Utility Model Relates to a Multifunctional Single Span Beam Vibration Experimental System

Li Xianchang¹, Zhu Haitao^{1,2}, Zhang Liang¹

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Key Laboratory of Coast Civil Structure Safety, Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to study the vibration of continuous beam, a vibration experimental teaching platform of multi-form single span beam was developed. The vibration experimental system was mainly composed of the base, pedestal, vibrator, displacement sensor, force sensor and data acquisition processing system of six parts. Multiple forms of beam experiments could be realized by changing the beam support such as simply supported beam, cantilever beam hinge, an end fixed beam and both ends fixed beam and different positions could be loaded by changing the position of the exciter. The time history curves of beam vibration and the natural frequencies of three cantilever beams under several typical sinusoidal excitation loads were measured and compared with the numerical simulation values of finite element method. The results show that the experimental values of beam amplitude and natural frequency are in good agreement with those of finite element numerical simulation and have high precision. The vibration table can be used for the practical teaching of beam vibration, modal analysis and other courses in civil engineering. Random vibration can be realized through certain settings.

Key words: vibration table; the continuous beam; numerical simulation; the experiment; teaching