

# The Experimental Modal Analysis of Five-Storey Building Scale Model

Haidong Qin

Tongji University, Shanghai  
Email: 1509164988@qq.com

Received: May 5<sup>th</sup>, 2017; accepted: May 22<sup>nd</sup>, 2017; published: May 26<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

The experimental modal analysis of a five-storey building scale model is performed with the use of hammer test in this paper. After obtaining vibration signal data and processing them by means of mathematical software MATLAB, the FRF (Frequency Response Function) of the model is achieved. Then, the FRF is studied further to obtain the model's horizontal modal parameters such as modal frequency and modal shape, using relevant modal parameter estimation methods in frequency domain. Furthermore, the results' validity is examined and testified by means of the comparison between test's results and that of ANSYS.

## Keywords

Scale Model, Experimental Modal Analysis, Frequency Response Function, Model Parameter

---

# 五层房屋缩尺模型实验模态分析

覃海懂

同济大学, 上海  
Email: 1509164988@qq.com

收稿日期: 2017年5月5日; 录用日期: 2017年5月22日; 发布日期: 2017年5月26日

---

## 摘要

通过锤击实验, 对五层房屋缩尺模型进行了实验模态分析, 利用数学软件MATLAB对所得数据进行相关处理得到结构模型的频响函数, 运用模态参数识别频域法的相关原理对得到的频响函数进行相关模态参数的识别, 获得了结构模型弱轴水平方向的固有频率和模态振型, 并将所得结果与ANSYS有限元分析结果进行比较, 检验了实验结果的准确性和有效性。

## 关键词

缩尺模型, 实验模态分析, 频响函数, 模态参数

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. 前言

模态分析, 其经典定义[1]是: 将线性定常系统振动微分方程组中的物理坐标变换为模态坐标, 使耦合方程组解耦成为一组以模态坐标及模态参数描述的独立方程, 以便求出系统的模态参数。模态分析所用的坐标变换矩阵为模态矩阵, 其每列为模态振型。模态, 是指结构本身固有的振动特性, 包括固有频率、阻尼比和模态振型。利用这些参数, 我们就能预测结构在各种实际激励作用下的响应, 因而模态分析是结构设计以及损伤识别的重要方法。

实验模态分析是指利用实验手段对研究系统进行模态分析, 是一个完整而系统的分析过程, 它要综合应用线性振动理论、动态实验测试技术、数字信号处理和系统参数识别等手段进行系统识别[2] [3]。它的主要内容和步骤有: (1)动态数据的采集及频响函数或脉冲响应函数分析。具体又包括: ①激励方法[4]。实验模态分析是人为地对结构物施加一定动态激励, 采集各点的振动响应信号及激励信号, 根据激励信号及响应信号, 用各种参数识别方法获取模态参数。激励方法不同, 相应识别方法也不同。目前主要由单输入单输出(SISO)、单输入多输出(SIMO)、多输入多输出(MIMO)三种方法。以激励的信号特征还可分为正弦慢扫描、正弦快扫描、稳态随机(包括白噪声、宽带噪声或伪随机)、瞬态激励(包括随机脉冲激励)等。②数据采集。SISO 方法要求同时高速采集输入与输出两个点的信号, 用不断移动激励点位置或响应点位置的办法取得振型数据。SIMO 及 MIMO 的方法则要求大量通道数据的高速并行采集, 因此要求大量的振动测量传感器或激振器, 实验成本较高。③时域或频域信号处理。例如谱分析、传递函数估计、脉冲响应测量以及滤波、相关分析等。(2)建立结构数学模型。根据已知条件, 建立一种描述结构状态及特性的模型, 作为计算及识别参数依据。目前一般假定系统为线性的。由于采用的识别方法不同, 也分为频域建模和时域建模。根据阻尼特性及频率耦合程度分为实模态或复模态模型等。(3)参数识别。按识别域的不同可分为频域法、时域法和混合域法, 激励方式不同(SISO、SIMO、MIMO), 相应的参数识别方法也不尽相同。并非越复杂的方法识别的结果越可靠。对于目前能够进行的大多数不是十分复杂的结构, 只要取得了可靠的频响数据, 即使用较简单的识别方法也可能获得良好的模态参数; 反之, 即使用最复杂的数学模型、最高级的拟合方法, 如果频响测量数据不可靠, 则识别的结果一定不会理想。(4)振型动画等结果的显示。参数识别的结果得到了结构的模态参数模型, 即一组固有频率、模态阻尼以及相应各阶模态的振型。由于结构复杂, 由许多自由度组成的振型也相当复杂, 必须采用动画的方法, 将放大的振型叠加到原始的几何形状上。以上四个步骤是模态实验及分析的主要过程。而支持这个过程的除了激振拾振装置、双通道 FFT 分析仪、台式或便携式计算机等硬件外, 还要有一个完善的模态分析软件包。通用的模态分析软件包必须适合各种结构物的几何物征, 设置多种坐标系, 划分多个子结构, 具有多种拟合方法, 并能将结构的模态振动在屏幕上三维实时动画显示。随着实验技术和计算机技术的发展, 实验模态分析更加广泛地应用于航空航天、汽车、船舶、高层超高层等特种建筑、机械、交通运输、军工这些领域, 它已经成为一门非常重要的工程技术。

本文对一五层房屋的缩尺模型进行实验模态分析,采用单输入多输出(SIMO)激振拾振模式,使用力锤作为激励源,采集力锤的激励力信号和房屋模型的振动响应加速度信号,编写 MATLAB 程序对信号进行处理求解其频率响应函数,运用频域识别方法获取了房屋模型的固有频率和振型等模态参数,再利用 ANSYS 建模计算该模型的模态参数,对比分析实验结果和数值结果。

## 2. 实验方法

五层房屋缩尺模型材料为普通 Q235 钢材,楼板尺寸  $40\text{ cm} \times 25\text{ cm} \times 0.3\text{ cm}$ ,柱截面  $1.5\text{ cm} \times 0.4\text{ cm}$ ,第一层板与地面净间距为  $23\text{ cm}$ ,各楼板净间距为  $15\text{ cm}$ ,各柱对称布置于楼板四周,柱子与板的两边净间距分别为  $4.6\text{ cm}$  和  $0\text{ cm}$ ,板柱间连接采用焊接形式,柱底端与地面固接,见图 1。

实验采用的激励源为力锤,锤头安装有力传感器,用以测量激励信号。测量响应信号的传感器为压电式加速度传感器[5],一共 5 个,分别布置于各层楼板的中间位置,沿结构弱轴方向布置,各层楼板从下往上按 1 到 5 依次对各测点进行编号,用以测量弱轴水平向的振动加速度响应信号,将激励信号和响应信号总共 6 路信号先接入 KD5008C 电荷放大器进行信号放大,通道 1 接入激励力信号,通道 2~6 分别接入测点 1~5 的加速度响应信号,再利用 INV306U 智能信号采集处理分析仪和计算机 DASP 软件进行信号采集及数据的保存和输出。

实验时,首先按照测量要求连接好线路,见图 2。

根据传感器的标定值设置电荷放大器的有关参数和对各个信号通道进行标定,设置好工程单位和标定值,设定采样频率  $f_s$  和采样时长。由于事先不知道结构模型的最高固有频率,可以先将采样频率设置得大一些,利用计算机中 DASP 软件自带的频谱分析功能,算出各路信号的频谱,从而确定模型的最高固有频率  $f_{0\max}$  的近似值,然后,根据采样定理:  $f_s \geq 2f_{0\max}$ ,重新设置采样频率。大量实验结果表明,一般而言,取  $f_s$  为  $f_{0\max}$  的 3 到 4 倍即可确保实测信号中高频成分的完整性和有效性。采用力锤激励时,结构模型是自由衰减响应,振动衰减的时间历程不是很长,因此,为了保证能够采集到整个过程的衰减信号,采样时间可以设置得比衰减时间稍长即可。虽然理论上已经证明,仅需频响函数的一行或一列,就可以识别出系统的所有模态参数,但为了分析结果的科学性和有效性,可以测出整个频响函数矩阵。本实验对象为五层房屋缩尺模型,而且仅仅进行弱轴水平方向的模态分析,故理论上结构的自由度数为 5。实验时,单点激励,多点拾振,即每次用力锤沿着弱轴水平地敲击一层板,同时测量输入输出信号,这样即可得到频响函数矩阵的一列,依次水平敲击各层板,便可得到整个频响函数矩阵。

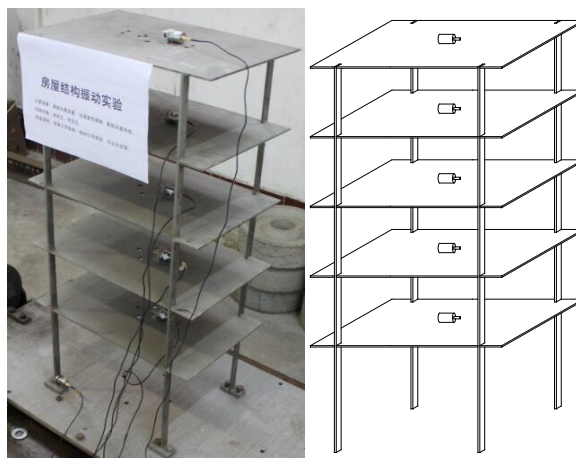


Figure 1. Building scale model  
图 1. 房屋缩尺模型

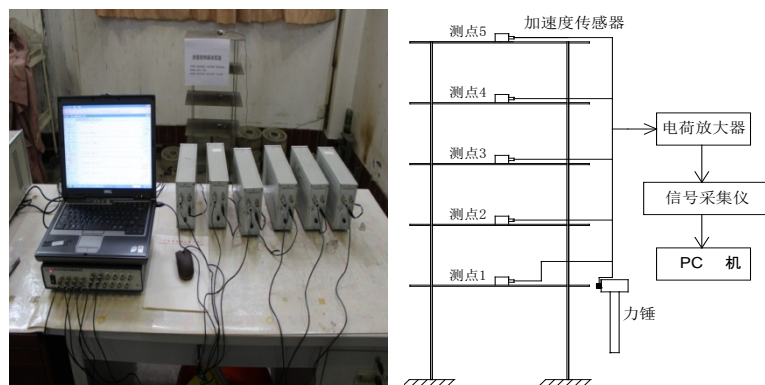


Figure 2. Experimental wiring diagram  
图 2. 实验装置接线

每次实验后, 输出所测得的激励力和加速度响应的时程信号数据, 为后续的数据处理分析做好准备。

### 3. 结果与讨论

一般而言, 对于实验测得的原始信号数据是不能直接用来进行数据分析的, 由于各种噪声干扰的存在, 或实验仪器设备温度的变化引起的零漂, 都会使数据偏离真实值, 因而都要对原始数据进行预处理, 或消除信号中的零漂和趋势项, 或进行滤波以消除高频噪音信号, 或剔除坏点与毛刺, 光滑数据, 总而言之, 只有经过一定的预处理, 才能得到最接近于真实信号的数据。

经过预处理的原始信号数据, 就可以用于时域或频域的相关处理与分析。时域处理与分析一般包括振动过程的重现, 绘制相关的波形图, 根据我们的需要, 或由实测加速度信号经过积分得到速度信号或位移信号, 或由实测位移信号经过微分求出速度信号或加速度信号。频域处理与分析则包括信号的频谱分析(自谱分析或互谱分析), 求取频响函数和相干函数。相干函数是反映响应信号与激励信号之间相关程度的重要参数, 其值越大, 说明响应信号与激励信号之间的相关关系越好, 实测频响函数的估计精度也越高。时域和频域处理分析从两个不同角度来研究信号, 时域分析以时间轴为坐标表示各物理量的信号波形随时间的变化关系, 形象而直观, 频域分析则以频率轴为坐标表示各物理量与频率的关系, 这更为简练, 剖析问题更加深刻和方便。

实验时用力锤水平敲击第一层板, 可得激励力和各层楼板测点的振动响应加速度时程曲线及其频谱曲线见图 3。

从激励力频谱曲线看出, 激励力的频率范围较宽, 曲线比较光滑平顺, 因此激励力具有较高的有效性, 满足模态实验对于激振力的要求; 从各个测点的加速度频谱图可以看出, 各测点做自由衰减振动时, 它们都有 5 个主要的频率分量, 与结构自由度数吻合, 而理论分析告诉我们, 线性多自由度系统的自由衰减振动是各个主振动的线性叠加, 主振动个数与结构自由度数相同。

用 MATLAB 软件[6]编写相关程序, 对上述得到的频谱信号进行进一步相关处理和分析, 求出频响函数。以测点 1 为例, 其频响函数曲线见图 4。

由相干函数曲线可知, 相干值大部分等于 1, 说明响应信号与激励信号之间的相干关系很好, 相干程度较大, 信号的信噪比较高, 实验数据可靠。虚频曲线各峰值对应的频率为 7.8 Hz, 26.0 Hz, 48.5 Hz, 73.8 Hz, 97.3 Hz, 此即结构的各阶固有频率值。同样地, 可以求出 2、3、4、5 测点的频响函数。根据 5 个测点的频响函数的虚频曲线, 各阶固有频率对应的峰值的比值就是该阶固有频率对应的振型[7]。

敲击第一层楼板得到的固有频率和振型见下表 1。

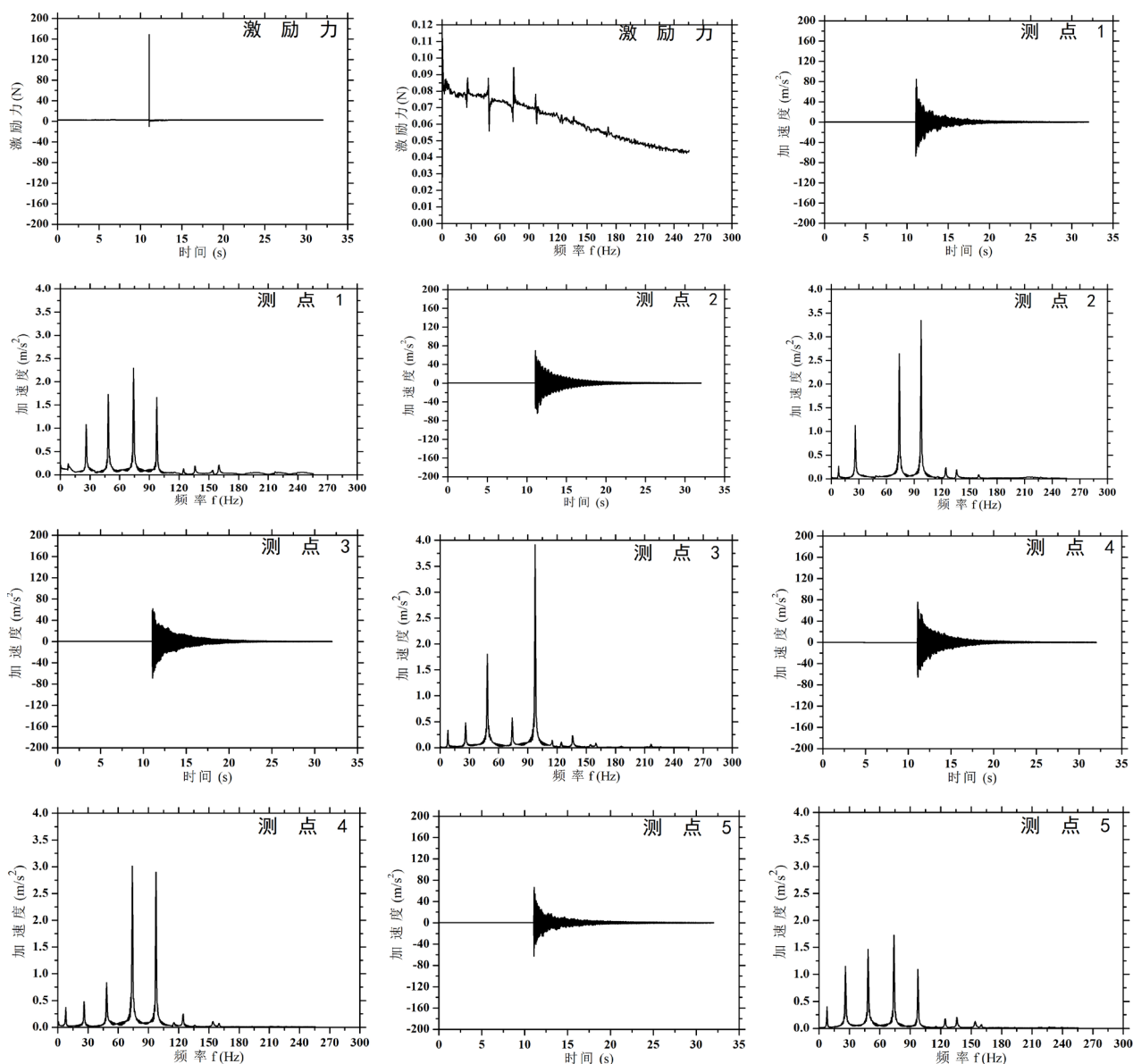


Figure 3. Time history curve and frequency spectrum of excitation signal and response signal

图 3. 激励信号和响应信号时程曲线及频谱曲线

Table 1. Natural frequency and mode

表 1. 固有频率及振型

模态阶数	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
频率 f/Hz	7.8	26.0	48.5	73.8	97.3
测点 1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
测点 2	1.486	1.079	0.035	-1.138	-2.018
测点 3	2.038	0.464	-1.046	-0.247	2.390
测点 4	2.230	-0.406	-0.440	1.271	-1.722
测点 5	2.374	-1.035	0.792	-0.719	0.648

理论上, 频响函数矩阵是对称的, 因此只需要求出频响函数矩阵的一行或者一列即可得到固有频率和振型。即只需要敲击任一层楼板, 测出对应的激励信号和响应信号, 均可以识别出结构的固有频率和振型。为了使最终得到的模态参数更加精确, 再依次用力锤敲击 2、3、4、5 层楼板, 并测量相应的激励信号和响应信号, 分别计算频响函数, 获得固有频率和振型, 再取平均值为作为最终的模态参数, 结果见表 2。

用 ANSYS 建模计算固有频率和振型, 结果见表 3。

实验结果与 ANSYS 数值结果对比见表 4 和图 5。

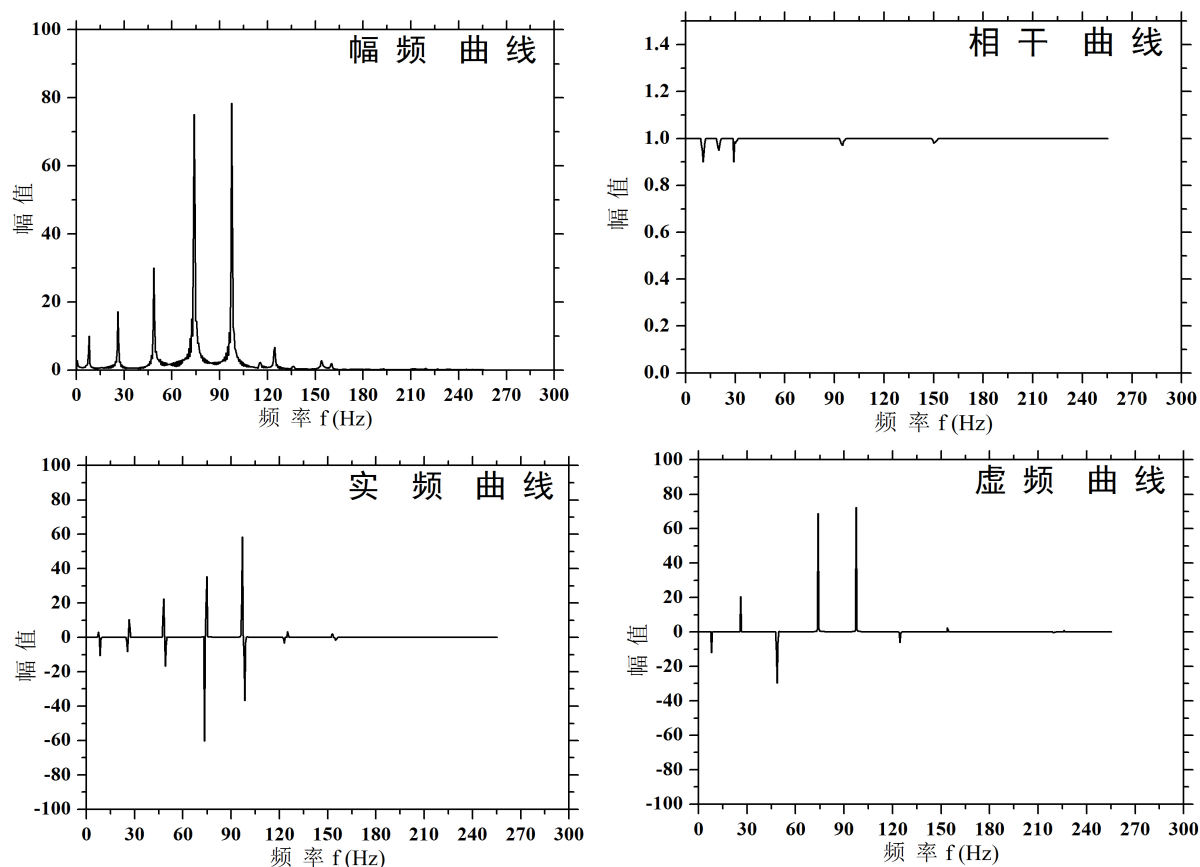


Figure 4. Frequency response function of testing point 1

图 4. 测点 1 频响函数

Table 2. Averaged natural frequency and mode

表 2. 平均后固有频率及振型

模态阶数	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
频率 f/Hz	7.8	26.0	48.5	73.8	97.3
测点 1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
测点 2	1.486	1.079	0.035	-1.138	-2.018
测点 3	2.038	0.464	-1.046	-0.247	2.390
测点 4	2.230	-0.406	-0.440	1.271	-1.722
测点 5	2.374	-1.035	0.792	-0.719	0.648

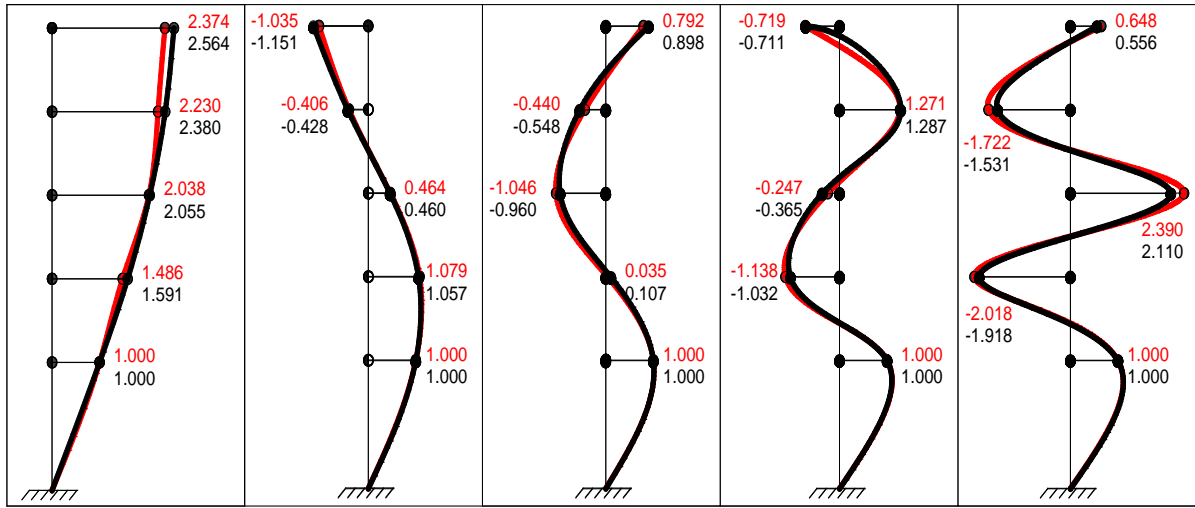


Figure 5. Comparison of mode (red: experiment black: ANSYS)

图 5. 振型对比(红色：实验 黑色：ANSYS)

Table 3. Natural frequency and mode of ANSYS

表 3. ANSYS 固有频率及振型

模态阶数	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
频率 f/Hz	7.1	23.4	49.7	69.3	96.4
测点 1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
测点 2	1.591	1.057	0.107	-1.032	-1.918
测点 3	2.055	0.460	-0.960	-0.365	2.110
测点 4	2.380	-0.428	-0.548	1.287	-1.531
测点 5	2.564	-1.151	0.898	-0.711	0.556

Table 4. Comparison of natural frequency

表 4. 固有频率对比(单位：Hz)

模态阶数	第一阶	第二阶	第三阶	第四阶	第五阶
Ansys 值	7.1	23.4	49.7	69.3	96.4
实验值	7.8	26.0	48.5	73.8	97.3
相对误差	8.9%	10%	2.4%	6.1%	1%

对比实验和数值结果可以知道，二者有一定误差。实验只进行了结构弱轴方向的模态测量与分析，未考虑强轴方向和结构空间性能的影响，因此与 ANSYS 结果有一定的误差，但是误差较小，实验结果良好。

#### 4. 结论

通过实验模态分析可以有效获取所研究的五层房屋缩尺模型的固有频率和模态振型等模态参数，实验结果与 ANSYS 数值计算结果对比表明实验结果比较精确。

#### 参考文献 (References)

[1] 傅志方, 华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000.

- 
- [2] 李德葆, 陆秋海. 工程振动实验分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
  - [3] 李德葆, 陆秋海. 实验模态分析及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
  - [4] Hutin, C. (2000) Modal Analysis Using Appropriate Excitation Techniques. *Sound and Vibration*, 1-8.
  - [5] 杨学山. 工程振动测量仪器和测试技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2001.
  - [6] 王济, 胡晓. MATLAB 在振动信号处理中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
  - [7] Avitabile, P. (2001) Experimental Modal Analysis: A Simple Non-Mathematical Presentation. *Sound and Vibration*, 20-31.

**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](mailto:hjce@hanspub.org)