

引用格式: Wang Lixian, Di Shengkui. Modal Parameter Identification Based on Impact Excitation Stochastic Subspace Method[J]. Journal of Gansu Sciences, 2015, 27(1): 140-143. [王立宪, 狄生奎. 基于锤击激励的随机子空间法模态参数识别[J]. 甘肃科学学报, 2015, 27(1): 140-143.]  
doi: 10.16468/j.cnki.issn/1004-0366.2015.01.030.

# 基于锤击激励的随机子空间法模态参数识别

王立宪, 狄生奎

(兰州理工大学 甘肃省土木工程防灾减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘要** 结构模态参数识别是结构健康监测领域研究中的重点, 检测得到的模态参数是判定结构健康状况的重要依据, 以钢筋混凝土简支梁模型为研究对象, 采用 Midas /Civil 有限元软件进行模态参数分析, 并以有限元计算结果为参考, 采用锤击激励法进行简支梁的模态实验, 并分别用随机子空间法和特征系统实现算法识别了整体结构的模态参数, 两者误差最大不超过 6%, 说明锤击法的模态试验是成功的, 试验结果可以为同类结构的模态试验分析提供参考。

**关键词** 参数识别; 模态分析; 锤击激励; 随机子空间法

**中图分类号:** U441      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1004-0366(2015)01-140-04

结构参数识别是结构健康监测领域研究的重点<sup>[1,2]</sup>。目前结构健康监测中, 结构动力参数识别是基于结构动态测试的模态分析方法, 应用比较广泛。结构试验模态参数识别一般分为时域模态参数识别法和频域模态参数识别法。在频域法中, 根据不同激励方式, 又分为环境激励法<sup>[3]</sup>、力锤法<sup>[4]</sup>、火箭激励法和爆炸法等。结构的动力特性, 一般可以通过有限元计算和试验模态分析两种方法获得, 对于重要结构通常要经过试验对理论分析进行验证。通过试验模态参数修正有限元计算模型或进行结构的动力修改是目前研究的热点问题之一<sup>[5-8]</sup>。

混凝土简支桥梁在公路桥梁中占有较大比重, 因此研究如何用便捷的方法检测其损伤是否发生、损伤发生的位置与损伤程度是一项非常有意义的工作。结合室内钢筋混凝土简支梁的动力试验, 针对锤击法模态试验技术在土木结构中的应用特点, 利用随机子空间法和特征实现算法对钢筋混凝土简支梁进行模态测试分析, 并将模态试验分析值与理论结果进行对比分析, 得到了一些有价值的结论。

## 1 锤击激励试验原理

锤击法激励方式就是采用装有力传感器的敲击

锤对试验件进行冲击激励, 其传递函数的表达式为<sup>[9]</sup>

$$H_{ij}(j\omega) = \sum_{k=1}^N \left[ \frac{r_{ijk}}{j\omega - \lambda_k} + \frac{r_{ijk}^*}{j\omega - \lambda_k^*} \right], \quad (1)$$

其中:  $H_{ij}(j\omega)$  为响应自由度  $i$  和参考自由度  $j$  之间的传递函数;  $N$  为在考虑的频率范围内提供给结构的动态响应的振动模态数;  $r_{ijk}$  为模态  $k$  的留数值;  $\lambda_k$  为模态  $k$  的极点值; \* 表示复共轭。

极点值为

$$\lambda_k = \delta_k + j\omega_{dk} \text{ 或 } \lambda_k = -\zeta_k\omega_{nk} + j\omega_{nk}\sqrt{1-\zeta_k^2}, \quad (2)$$

其中:  $\omega_{dk}$  为模态  $k$  的有阻尼固有频率;  $\delta_k$  为模态  $k$  的阻尼因子;  $\omega_{nk}$  为模态  $k$  的无阻尼固有频率;  $\zeta_k$  为模态的阻尼比。

极点、固有频率(有阻尼的和无阻尼的)、阻尼因子或阻尼比、模态振型以及留数通常被称为模态参数。模态参数一旦估计出来, 可以通过软件的动画显示功能形象的显示模态振型, 以此来描述结构的振动特性。

## 2 有限元模拟与模态试验分析

### 2.1 有限元分析

试验采用模型为一钢筋混凝土简支梁, 简支梁长度为 1.3 m, 梁高 200 mm, 梁宽 140 mm, 混凝土强度值为 C30, 泊松比为 0.2。运用 Midas/Civil 有限元软

收稿日期: 2014-02-19; 修回日期: 2014-03-21.

基金项目: 甘肃省科技支撑项目(0708GKCA002); 甘肃省自然科学基金暨中青年科技基金项目(3ZS062-B25-031).

作者简介: 王立宪(1977-), 男, 甘肃靖远人, 博士, 讲师, 研究方向为结构健康监测. E-mail: wanglxian@lut.cn.

件对钢筋混凝土简支梁模型进行模态分析,采用子空间迭代法和 Lanczos 法进行特征向量分析并进行对

比。有限元分析中将构件分成 13 个节点,12 个单元。图 1 为简支梁模型与有限元建立的模型。



图 1 简支梁模型与有限元模型

Fig. 1 Simply supported beam model and finite element model

### 2.2 测点布置及模态试验分析

将梁体单元简化为杆件,沿梁的长度方向划分出 13 个测点,采用锤击法来分析模型的动力模态参

数。试验模型示意图测点布置见图 2。图 2 中编号为锤击的测点号,选取响应点时要尽量避免在模态振型的节点上。试验加速度传感器设置在 8 号测点

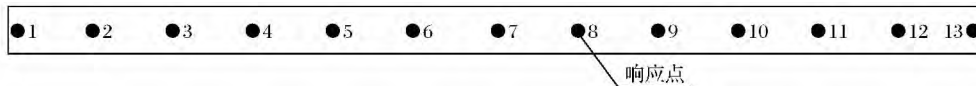


图 2 简支梁模型测点布置

Fig. 2 Layout of measuring points of the simply supported beam model

上,采用多点激励,单点响应的方法进行测试。

40 kHz,试验采样频率为 5 120 Hz。

动态测点布置应选择振型曲线峰值较大处,避免将测点布置在振型曲线上的“节点”处,试验前首先采用有限元方法进行结构动力特性分析获取节点位置,同时测点在平面上布置时,尽量设置在结构各段的刚度中心处。

试验结果采用两种识别结构模态参数的方法,一种是时域识别的随机子空间法,另一种是特征系统实现法。在进行模型的锤击测试各种工况中,通过力锤在各测点上轮流锤击的方式来采集、处理数字信号并分析模型模态参数。为保证力脉冲信号的足够脉宽,力锤锤头安装弹性冲击垫,并在试验中注意冲击垫座是否牢固,力锤在敲击时,执锤要稳,落点要准,勿使冲击垫在试件上滑移。图 3 为竖向测试时的加速度时程曲线。

试验中量测响应信号所选用的是压电加速度传感器,电荷灵敏度 4.9 PC/ms<sup>2</sup>,最大横向灵敏度为 0.3%,测量频率范围为 0.2~8 000 Hz。选用 LC-2 型力锤,锤重 0.3 kg,最大量程为 5 kN,固有频率

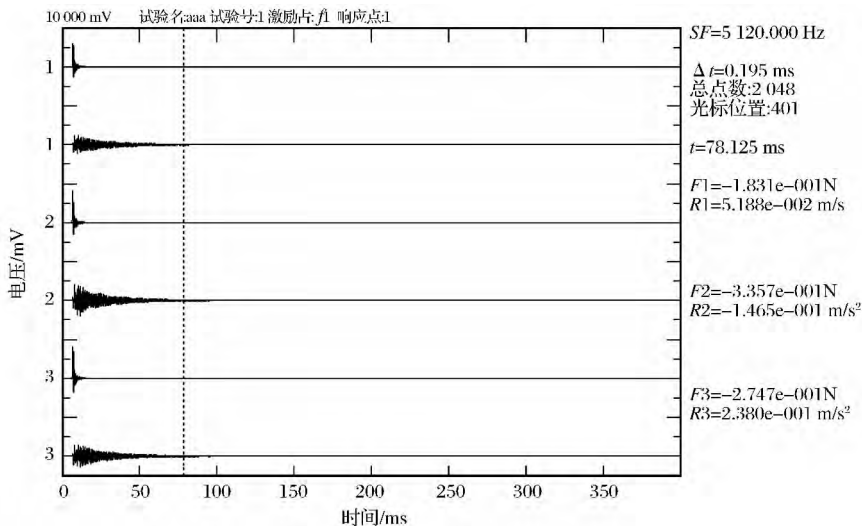


图 3 加速度时程曲线

Fig. 3 Acceleration time-histroy curve

振型相关矩阵校验主要用来校核各阶模态振型之间的正交性。图4为模态分析中获得的振型相关矩阵校验立体图,除主对角元素为1,其他元素的值都很小,可以看出模态分析结果较为可靠。图5为随机子空间法稳定图。图5显示在结构实际频率处,出现明显的稳定轴,说明检测结果可靠。

表1为有限元分析(FE)与ERA、SSI法的频率对比。由表1可知,检测过程中由于噪声的影响及实体模型与有限元模型边界条件的差异,有限元结果计算频率与实测频率有一定的误差,但前三阶模态频率的差值百分比均在6%以内,说明实测的模态结果与有限元模拟结果是吻合的。

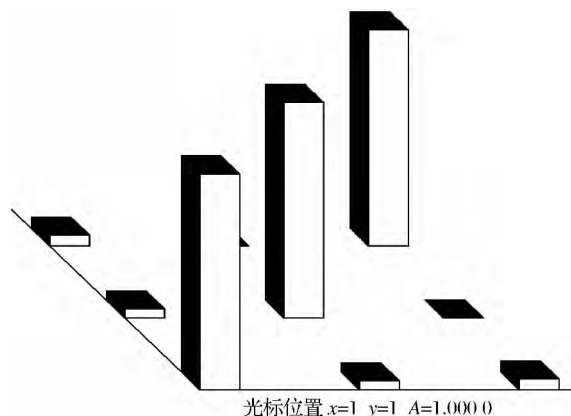


图4 振型相关矩阵校验立体图

Fig. 4 Modal correlation matrix check stereogram

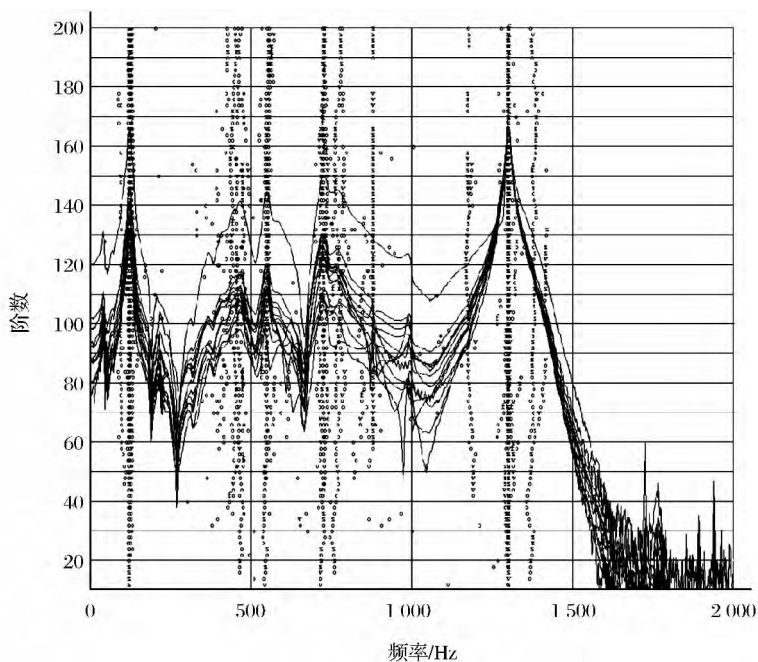


图5 随机子空间法稳定图

Fig. 5 Stabilization diagram of the stochastic subspace identification method

表1 有限元分析(FE)与ERA、SSI法的频率对比

Table 1 Comparison between frequencies of the finite element analysis, ERA and SSI

模态阶数	FE 计算频率/Hz	ERA 计算频率/Hz	SSI 计算频率/Hz	ERA 与 FE 差值/%	SSI 与 FE 差值/%
1	180.14	171.81	170.62	4.62	5.28
2	735.57	726.82	725.25	1.19	1.41
3	1266.28	1282.76	1284.37	1.31	1.43

### 3 结论

以钢筋混凝土筒支梁模型为研究对象,运用力锤作为冲击激励,测试获得结构的加速度响应信号,

并采用随机子空间法和特征系统实现法得到筒支梁的固有频率、阻尼比和振型等模态参数,通过与有限元模型计算结果进行对比分析,验证了识别结果的可靠性。结果表明,两种方法识别所得的模态频率

和振型基本吻合。通过有限元分析与实测低阶模态对比分析,实测低阶振型中并不因为阶次越低而精度确越高。要使锤击法所测的模态频率精度较高,需要尽量减少测试技术和模态识别算法等多方面的不利影响。

#### 参考文献:

- [1] 袁万城,崔飞,张启伟. 桥梁健康监测与状态评估的研究现状与发展[J]. 同济大学学报:自然科学版,1999,27(2):59-63.
- [2] 傅志方. 振动模态分析与参数识别[M]. 北京:机械工业出版社,1990.
- [3] 田仲初,陈常橙,郑万泔. 钢箱提蓝拱桥整桥模态试验研究[J]. 振动与冲击,2004,23(2):44-49.
- [4] 沈松,应怀樵,雷速华,等. 用锤击法和变时基技术进行黄河铁路桥的模态试验分析[J]. 振动工程学报,2000,13(3):172-175.
- [5] 刘文峰,宿健,何玉珊,等. 32 m 简支铁路桥横向振动的研究分析[J]. 振动、测试与诊断,2004,24(1):59-62,79.
- [6] 周勇军,赵小星,宋一凡,等. 连续梁桥模态分析与试验[J]. 长安大学学报:自然科学版,2007,27(3):57-60.
- [7] 周勇军,赵小星,贺拴海,等. 弯钢箱梁桥的动力分析及模态试验[J]. 郑州大学学报:工学版,2005,26(4):20-24.
- [8] 张宏斌,宋广君,张哲,等. 模态分离法在拱桥动载试验中的应用[J]. 公路交通科技,2005,22(1):66-68.
- [9] 刘兵. LMS 模态分析软件在齿轮组件模态试验中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究,2003,16(2):43-45.

## Modal Parameter Identification Based on Impact Excitation Stochastic Subspace Method

Wang Lixian, Di Shengkui

(Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Mitigation of Gansu, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract** Modal parameter identification is the focus of the research field of structural health monitoring and modal parameters obtained are an important basis for determining the degree of structural health. With the reinforced concrete simply supported beam model as the study object, the finite element software Midas/Civil was adopted for the analysis of modal parameters. Finite element calculated results were consulted and the impact excitation method was adopted to conduct modal experiments on simply supported beams, and the stochastic subspace identification method and the Eigen system realization algorithm were applied to identify the modal parameters of the overall structure. The maximum error was less than 6%, which showed that the modal test of the impact excitation method was successful and the test results provided a solid basis for the modal test of similar structures.

**Key words** Parameter identification; Modal analysis; Impact excitation; Stochastic subspace identification method