

结构试验模态的计算机仿真分析

徐礼华¹ 黄君宁¹

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:根据土木工程结构的特点,采用 Visual Basic 语言编写结构模态识别程序,使用频域单模态法识别结构模态参数,并采用计算机仿真分析技术讨论了在不同条件下的识别精度.分析结果表明,采用该程序识别结构的模态参数是可行的.

关键词:模态识别; 频域法; 随机激励

中图分类号:TU317:P315.96 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7037(2005)03-0005-05

在实际工程中,求结构模态参数的方法有计算模态分析法和试验模态分析法,前者根据已知的结构质量矩阵和刚度矩阵,用求特征值和特征向量的方法求解结构的模态参数.而许多已建结构的质量和刚度是未知的,或者由于结构的损伤破坏使刚度发生了变化,试验模态分析技术是在结构质量和刚度未知的情况下,依据试验和数据来处理来识别结构的模态参数.作者采用可视化开发工具 Visual Basic 语言编写了结构振动模态识别程序,使用频域法识别结构的模态参数.试验模态分析在实际应用中不可避免地会受到环境和仪器设备等因素的影响,而使信号中混入了噪声.采用有限元软件 ANSYS 模拟结构在一定激励下的振动过程,并在信号中加入一定的随机噪声信号来模拟实际信号.运用通用有限元软件 ANSYS 求解结构模态参数,以检测作者编写的模态分析程序的可靠性.结果表明,该程序是可靠的.

1 结构模态参数识别的理论分析

具有阻尼的多自由度体系的振动微分方程

$$[M]\{\ddot{y}\} + [C]\{\dot{y}\} + [K]\{y\} = \{f(t)\}, \quad (1)$$

式中, $[M]$ 为结构的总质量矩阵; $[C]$ 为结构的阻尼矩阵; $[K]$ 为结构的总刚度矩阵; $\{f(t)\}$ 为激励力向量; $\{y\}$, $\{\dot{y}\}$ 和 $\{\ddot{y}\}$ 分别为节点的位移、速度和加速度向量.对(1)式两边进行拉氏变换得

$$([M]s^2 + [C]s + [K])\{Y(s)\} = \{F(s)\}, \quad (2)$$

式中, $\{Y(s)\}$ 和 $\{F(s)\}$ 分别为 $\{y(t)\}$ 和 $\{f(t)\}$ 的

拉氏变换.由式(2)得

$$\{Y(s)\} = [H_d(s)]\{F(s)\}, \quad (3)$$

式中, $[H_d(s)]$ 为结构的位移传递函数矩阵,且

$$[H_d(s)] = ([M]s^2 + [C]s + [K])^{-1}. \quad (4)$$

对上式进行适当的变换,并令 $s = j\omega$,可得结构的加速度传递函数矩阵

$$[H_a(\omega)] = \sum_{i=1}^N \frac{-\omega^2 \{f_i\} \{f_i\}^T}{M_i(\omega^2 - \omega_{ni}^2 + 2j\omega\zeta_{ni})}, \quad (5)$$

式中, M_i 为结构的 i 阶模态质量; ω_{ni} 为结构的 i 阶模态圆频率; ζ_{ni} 为 i 阶模态阻尼比.

传递函数矩阵中的任一元素 $H_a^{rp}(\omega)$ 表示 p 点激励, r 点拾振的传递函数

$$H_a^{rp}(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{-\omega^2 \eta_{ri} \phi_{pi}}{M_i(\omega^2 - \omega_{ni}^2 + 2j\omega\zeta_{ni})}, \quad (6)$$

式中, η_{ri} 和 ϕ_{pi} 表示结构 i 阶振型在位置 r 和 p 点的坐标.由此可见,结构的传递函数是一个只与结构的模态参数, η_{ri} 和 ϕ_{pi} 有关的函数,通过测量结构各点的传力函数就可求出结构的模态参数.

2 结构模态识别

2.1 数字信号处理

在本文程序中,通过一定的采样频率,对结构的输入和输出信号采样得到时域上的离散点,然后采用快速傅立叶变换(FFT)技术将信号由时域变为频域.傅立叶变换是在无限时间上进行的,而实际记录的信号在时间上总是有限的,记为 $x_T(t)$,可认为 $x_T(t)$ 是对真实信号 $x(t)$ 进行时间长

度为 T 的截断,即相当于在原信号上加了一个高度为 1、时间长度为 T 的矩形时域窗函数,使窗外数据全部丢失,并导致频域内会附加一些频率成分,即泄漏.这将使频谱计算值与真实值之间产生较大的差异.减小频谱泄漏的方法有两种^[1]:加长信号的记录时间 T ;对窗函数进行改进,如采用 Hanning 窗、Hamming 窗、三角窗、余弦坡度窗、Blackman 窗和平顶窗等^[1,2].在本文程序中,采用对时域信号加 Hanning 窗的办法来减少泄漏.

2.2 结构频率的识别

频域的模态参数识别方法包括单模态识别法和多模态识别法,单模态识别法计算速度快且易于编程.当结构的阻尼比较小,各阶模态频率相间较为稀疏的时候,多自由度结构相邻模态之间将不严重耦合^[3],此时,可采用单模态识别法进行识别.土木工程结构基本满足以上条件,所以在本文程序中采用单模态法,即求某一阶模态参数时不考虑其它阶模态的影响,根据结构加速度传递函数的幅值谱来识别结构的模态频率.采用五点重复错开法确定传递函数幅值的峰值和模态自由度^[4],峰值点所对应的频率就是结构的模态频率.

2.3 结构阻尼比的识别

由于影响结构阻尼比识别精度的因素很多,如环境振动的不稳定性、结构固有频率之间频率间隔的大小、功率谱幅值的精度及频率分辨率等,所以结构阻尼比往往很难被精确地识别^[5].对于每个被识别出的固有模态,采用模态频率点附近几个点的数据求结构的阻尼比,计算公式如下

$$= \frac{2}{r} \cdot \frac{1}{\tan(\omega_1/2) + \tan(\omega_2/2)}, \quad (7)$$

式中, r 为结构的第 r 阶模态频率; ω_1 和 ω_2 分别是 r 两侧的点; ω_1 和 ω_2 分别为频率点 ω_1 和 ω_2 的导纳圆半径与 r 的半径之间的夹角(图 1).

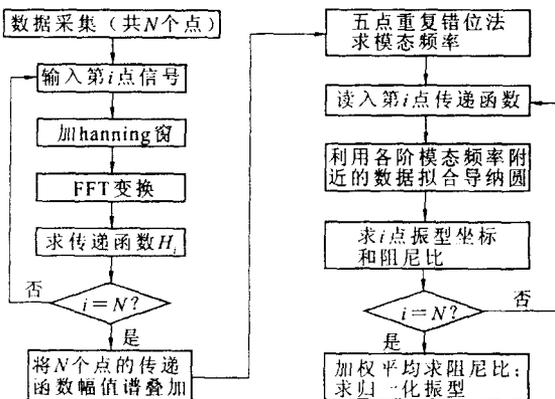


图 1 模态识别流程

2.4 结构振型的识别

由式(6)可知,多自由度结构频响函数幅频曲

线的峰值在结构各阶模态频率附近,即

$$|H_a^p(\omega)|_{\text{峰}} = |H_a^p(\omega_i)| = \frac{r_i}{2M_i \zeta_i}$$

由上式可以看出,各测点传递函数在某阶模态频率处的幅值之比等于该阶模态振型在各测点处的坐标之比.考虑到各点识别的同一阶模态频率可能不在同一个点上,为了减小误差,采用频率点附近的几个点的数据拟合导纳圆,用导纳圆直径之比作为振型坐标之比.

3 结构模态仿真算例与分析

为了减小计算工作量,同时又能说明问题,选择了一个简单的一榀两跨的五层钢筋混凝土框架结构(图 2).用有限元软件 ANSYS 建立该结构的有限元模型,首先采用子空间迭代法求结构的模态参数,以此结果作为结构模态参数的理论值.

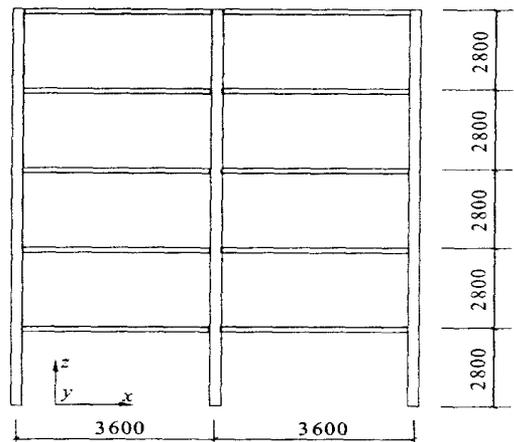


图 2 框架立面示意/mm

3.1 采用冲击激励识别模态

在结构的顶层,沿 Y 方向施加一个冲击力,识别结构在 Y 方向上的模态参数.该冲击力的时间长度为 8s,共 1024 个数据点.采用逐步积分法求解结构的响应.在结构每层选取一个点的加速度响应数据,利用所编软件进行模态识别.每组数据共 1024 个点,采样频率为 128Hz.首先对数据进行加窗处理和傅立叶变换,求出结构各层的加速度传递函数.为了探讨噪声对识别结果的影响,在结构的加速度响应信号中分别加入峰值为加速度峰值 10% 和 20% 的随机噪声信号(表 1,2).

由以上识别结果可知,采用该软件能较准确地识别出结构的模态参数,其中模态频率的识别结果最为准确.结构的基频识别结果与理论值仅相差 0.061Hz,传递函数的频率分辨率为 0.125Hz,可见此识别结果已很精确.采用不同的噪声强度时,

表 1 模态频率及阻尼比识别结果

激励方式	噪声大小	第一阶		第二阶		第三阶		第四阶	
		频率	阻尼比	频率	阻尼比	频率	阻尼比	频率	阻尼比
理论值	无	2.689	0	8.636	0	16.342	0	21.114	0
	无	2.750	0.0678	8.625	0.0297	15.625	0.0351	22.375	0.0052
冲击力	10 %	2.750	0.0777	8.625	0.0288	15.625	0.0362	22.375	0.0054
	20 %	2.750	0.0895	8.625	0.0286	15.625	0.0355	22.375	0.0055
随机激励	无	2.750	0.1386	8.625	0.0129	15.625	0.0324	22.375	0.0058
	10 %	2.750	0.1356	8.625	0.0135	15.625	0.0322	22.375	0.0044
	20 %	2.750	0.1447	8.625	0.0155	15.625	0.0317	22.375	0.0051

表 2 采用冲击力识别的结构振型

位置	第一阶		第二阶		第三阶	
	理论值	无噪声	理论值	无噪声	理论值	无噪声
5 层	1	1	0.9901	0.9585	0.9329	0.9331
4 层	0.8691	0.8517	0.1907	0.1874	- 0.6800	- 0.6879
3 层	0.6716	0.6891	- 0.6774	- 0.7198	- 0.8658	- 0.8651
2 层	0.4244	0.4887	- 1	- 1	0.6194	0.6214
1 层	0.1653	0.1793	- 0.5705	- 0.5569	1	1

位置	第一阶		第二阶		第三阶	
	10 % 噪声	20 % 噪声	10 % 噪声	20 % 噪声	10 % 噪声	20 % 噪声
5 层	1	1	0.9689	0.9738	0.9337	0.9336
4 层	0.8079	0.7727	0.1623	0.1744	- 0.6939	- 0.6995
3 层	0.8180	0.9034	- 0.6657	- 0.6212	- 0.8698	- 0.8733
2 层	0.4283	0.3821	- 1	- 1	0.6389	0.6619
1 层	0.2017	0.2256	- 0.6575	- 0.7768	1	1

模态频率的识别结果比较稳定,低阶频率基本没有变化,高阶频率的变化也不大。

由于原结构是无阻尼的,从理论上讲,识别出的阻尼比也应等于零。但因在信号采集和傅立叶变换过程中,信号有泄漏,使得识别出的阻尼比不为零。同时,阻尼比的识别结果不稳定,随着噪声的不断增大,各阶阻尼比无明显变化。

从表 2 可见,当信号无噪声时,结构的前三阶振型与理论值相差不大。随着噪声的不断增大,振型的误差也逐渐增大,低阶振型的形状发生变化。结构的高阶振型即使在无噪声的情况下误差也较大,某些点的振型坐标符号与理论值相反,振型的形状与理论值相差很大。这表明,结构低阶振型的识别结果比较准确,而高阶振型的识别结果有误差。

3.2 采用随机激励识别模态

在实际结构的模态试验中,由于结构物的体量庞大,一方面很难对其施加足够大的可控力或激励作为输入;另一方面,地脉动力和风脉动往往同时作为输入激励,且地面不同点的地脉动及不同高度处的风脉动不一定完全一致,因此很难说清以哪点测得的信号作为工程结构的输入信号^[3]。所以,在工程结构动力检测中,采用随机地脉动作为结构的激励,只利用输出的响应信号来识别结构的模态参数,称为环境随机激励法。

采用随机函数生成一组随机数作为地脉动的

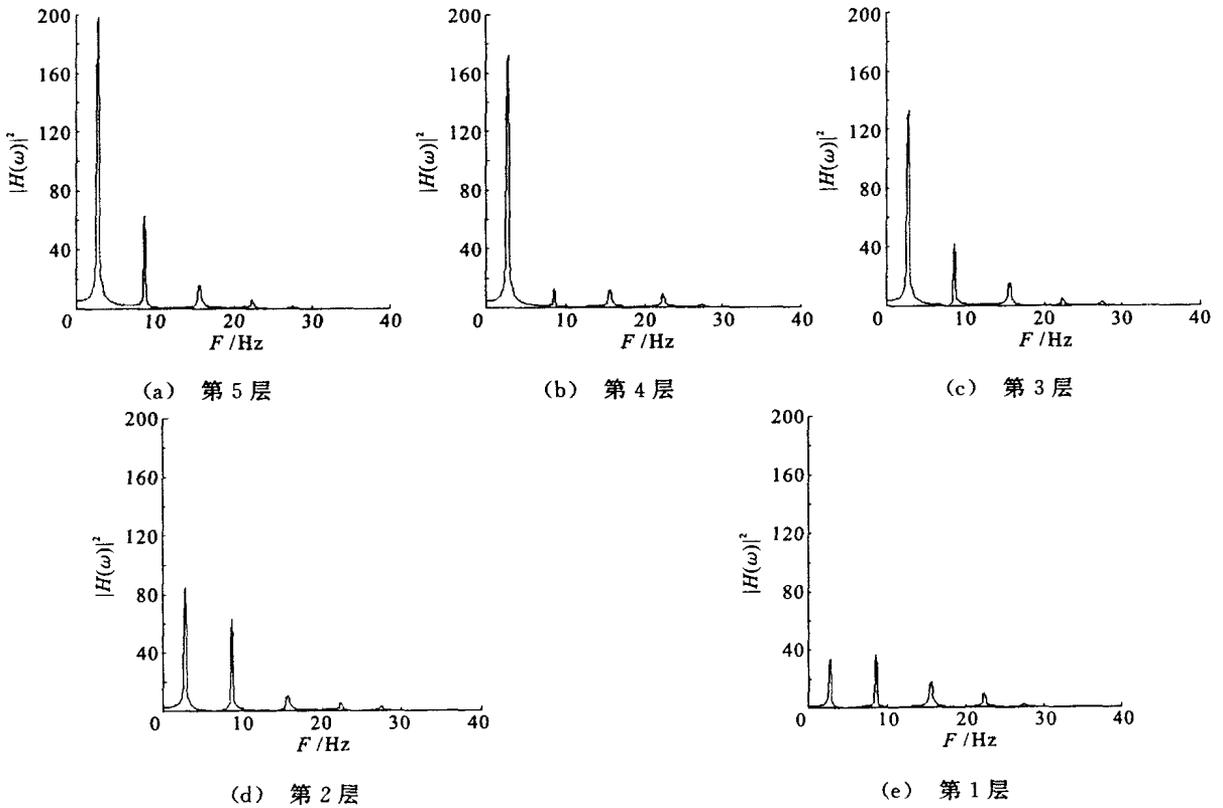
加速度值,用时程分析法求结构在此地震加速度作用下各点的响应。同样,在结构加速度响应信号中分别加入峰值为加速度峰值 10 % 和 20 % 的随机噪声信号。对于各个模态频率比较分开、阻尼比较小的多自由度结构,在随机激励下响应信号的互谱与自谱的峰值之比可近似为振型之比^[3],现在一般都采用此方法来识别随机激励下的振型。本文采用各点响应加速度的自谱来识别模态参数。由图 3 中绘出的无噪声时各点加速度响应的幅值谱曲线可见,在各阶频率点处幅值谱的峰值之比近似等于各点的振型之比。为了减小误差,在程序中用各阶频率点附近的自谱数据拟合导纳圆,用导纳圆直径之比求振型。

采用随机激励法进行识别时,结构模态频率的识别结果比较准确,与采用冲击力识别的结果基本相同。但是当响应信号中的噪声太大时,响应信号的自功率谱中非模态频率处会出现一些小的峰值点。当直接采用五点重复错位法识别时,容易把它们也作为频率点,此时应根据各点的自谱峰值是否在同一位置、频率点处的相干函数大小和相位关系是否相同等因素将这些点去除掉^[3]。采用随机激励识别出的阻尼比也不稳定,只有个别与冲击力法识别的结果接近。在无噪声时,结构低阶振型的识别结果较准确,但噪声对振型的影响较大;有噪声时,振型形状与理论值相差较大(表 3)。

表3 采用随机激励识别的结构振型

位置	第一阶		第二阶		第三阶	
	理论值	无噪声	理论值	无噪声	理论值	无噪声
5层	1	1	0.990 1	0.993 5	0.932 9	0.933 5
4层	0.869 1	0.868 9	0.190 7	0.192 3	- 0.680 0	- 0.681 1
3层	0.671 6	0.671 8	- 0.677 4	- 0.677 3	- 0.865 8	- 0.866 8
2层	0.424 4	0.425 9	- 1	- 1	0.619 4	0.619 1
1层	0.165 3	0.167 4	- 0.570 5	- 0.570 4	1	1

位置	第一阶		第二阶		第三阶	
	10%噪声	20%噪声	10%噪声	20%噪声	10%噪声	20%噪声
5层	1	1	0.957 1	0.923 3	0.938 6	0.933 8
4层	0.917 4	0.901 4	0.199 5	- 0.267 2	- 0.697 3	- 0.714 7
3层	0.444 5	0.340 9	- 0.673 9	- 0.667 1	- 0.885 3	- 0.906 1
2层	0.628 8	0.857 4	- 1	- 1	0.624 0	0.633 7
1层	0.084 8	0.021 2	- 0.533 2	- 0.503 9	1	1



4 结构试验模态分析

为了进一步说明本程序在实际模态试验中的可靠性,采用一有机玻璃模型进行试验模态分析.图4模型为一19层的框-筒结构,1~6层的层高为90 mm,7~19层的层高为64 mm;各层平面均为八边形,其最大边长为640 mm;由布置在中间部分的电梯井、加工间等构成内筒,其横截面为正方形,尺寸为260 mm x 260 mm;周边框架由12根正

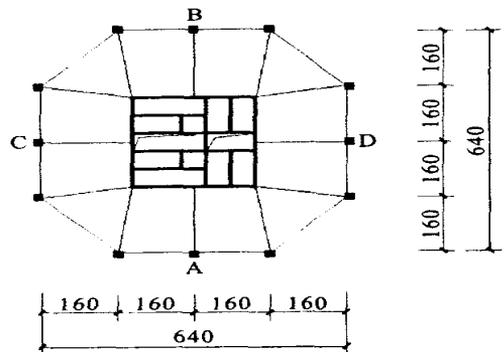


图4 模型平面示意/mm

方形截面柱(1~6层的边长为24 mm ×24 mm, 7~19层的边长为16 mm ×16 mm)及连梁组合而成,边柱与内筒之间由楼板及连梁连成整体。

先采用 ANSYS 建立结构的有限元模型,用子空间迭代法求出结构的模态参数。然后,采用试验模态分析方法对模型进行模态试验。用多点输入单点输出的试验方法,即固定响应点的瞬态激励法,用力锤敲击各点,对模型施加一瞬态激励力,采用压电式加速度计采集结构顶层 A 点处加速度响应信号。各数据样本长度相同,均为1 024,每个测试点敲击2次,在频域内平均两次,采样频率为1 000 Hz。用本文程序对采集到的信号分析处理,识别结构的模态参数结果如表4。

表4 模型的频率和阻尼比识别结果

方式	第一阶		第二阶		第三阶	
	频率	阻尼比	频率	阻尼比	频率	阻尼比
ANSYS	21.284	0	82.417	0	107.580	0
实测	18.554	0.138 6	84.961	0.068 7	110.352	0.038 0

通过以上数据可知,该程序用于试验模态分析是可行的,能较准确识别出结构的模态参数,但与采用数值模拟的方式相比还存在一定的误差。这主要是由于有限元模型与实际结构之间存在差异,在有限元模型中结构的底部是完全约束的,而实际的结构底部不能做到完全约束。另外,试验数据不可避免地会受到环境和仪器设备等因素的影响而使信号中混入了噪声,影响识别的精度。

5 结 论

a. 频率的识别结果比较精确,不同激励方式对频率的影响不大;噪声信号的干扰对模态频率的影响也不大,但噪声的影响可能会识别出一些多余的频率点,此时应根据各点峰值位置、相干函数和相位关系等将这些点除掉。

b. 阻尼比的识别结果不够稳定,随着激励方式和噪声的不同,识别结果也不同,且无明显规律。

c. 在低噪声的情况下,结构前几阶振型的识别结果比较准确,但很难识别出高阶振型;噪声对振型的影响比较大。

d. 在采用环境随机激励时,由于无法测量输入信号,采用结构加速度响应信号的自谱来识别结构的模态参数,能较准确地识别出结构的频率和低阶振型。

参 考 文 献

- [1] 周传荣,赵淳生.机械振动参数识别及其应用[M].北京:科学出版社,1989.
- [2] 张令弥.振动测试与动态分析[M].北京:航空工业出版社,1992.
- [3] 李国强,李杰.工程结构动力检测理论与应用[M].北京:科学出版社,2002.
- [4] 中国电子仪器仪表学会信号处理学会《振动数学信号处理程序库》编委会.振动数字信号处理程序库[M].北京:科学出版社,1988.
- [5] 朱乐东.桥梁固有模态的识别.同济大学学报[J].1999,(27)2:179-183.

Computer Simulation of Structure Experimental Mode

XU Li-hua¹ HUANG Jun-ning¹

(1. School of Civil Eng., Wuhan Univ., Wuhan 430072, China)

Abstract: According to the characteristics of the civil engineering structure, the procedure of mode identification is programmed with the Visual Basic language, which uses the frequency-domain single modal method to identify modal parameter. Precision of identification under different conditions is analyzed through the computer simulation technology. The results show that the procedure is fit to identify the modal parameter.

Key words: modal identification; frequency-domain method; random disturbance