

结构模态参数测试的传感器优化布置研究*

王山山 任青文

(河海大学土木工程学院, 南京 210098)

摘要 结构模态参数的测试是进一步进行结构动力响应计算、结构损伤检测等的重要基础。在线结构的模态参数的测试通常采用环境激励来进行。在采用环境激励的结构动力特性测试中,传感器的布置直接影响测试的结果。采用有限带宽白噪声激励模拟环境激励研究传感器的布置对结构模态参数测试的影响。实验结果表明传感器的不同布置影响结构动力参数的测试结果,优化布置传感器可以提高结构模态参数的测试精度。

关键词 结构,模态参数,传感器,环境激励,白噪声

前言

基于振动理论的结构无损检测是通过利用所测的振动信号经过一定处理而实现的。振动信号的拾取需要传感器的布点来实现。因此传感器布置在什么部位、传感器使用数量的多少是一个关键的工作。为提高测试精度,对传感器的使用数量和优化布置得到越来越多的重视^[1-3]。特别是对在线结构的检测,因受测试条件及现场条件的限制,测试不象室内实验容易重复进行,这时传感器的布置就显得特别重要。对结构损伤的检测,大多都是基于结构动力特性而进行的。提高测试结构动力特性的精度,就可有效地提高结构损伤检测的精度。现代结构向着大型化和复杂化的方向发展,对于实际足尺度结构的动力特性测试,激振需要出力非常大的激振器,这在实际测试上存在一定的困难,在很多时候无法实现。对足尺度结构的测试,目前广泛采用环境激励的方法而进行,即通过脉动试验的方法而进行^[4-6]。利用高灵敏度的传感器、放大记录设备,借助于随机数据处理技术,利用环境激励量测结构的响应,分析确定结构的动力特性是一种有效而简便的方法,它可以在不用任何激振设备,对结构不产生损害,也不影响结构正常工作的情况下进行,即在自然环境条件下量测结构的振动响应,经过数据分析就可确定其动力特性。本文研究在环境激励条件下传感器的布置对结构模态参数测试精度的影响。

1 理论依据

在采用环境激励进行动力特性测试时,可作如下的假设^[7]:环境激励是一个各态历经的平稳随机过程;对多自由度体系,在共振频率附近所测得的物理坐标的位移幅值,可以近似地认为就是纯模态的振型幅值;激振源的频谱是较平坦的,可以把它近似为有限带宽白噪声,也即激振源的傅立叶谱或者功率谱是一个常数。

对于一个 n 个自由度系统,设在 k 个自由度上施加激励,在 p 个自由度测试响应,根据文献^[7]可知频响函数为

$$H_{pk}(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{\phi_{pi}\phi_{ki}}{(K_i - \omega^2 M_i) + j\omega c_i} \quad (1)$$

对于一个有阻尼的多自由度系统,运动微分方程可表示为^[7]

$$\begin{aligned} [M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + \\ [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

在线性不变系统的前提下,如果有 n 个自由度系统的脉冲响应函数矩阵 $[h(t)]$ 已知,在 m 个自由度上作用平稳随机激励设为

$$\{f(t)\} = \{f_1(t), f_2(t), \dots, f_m(t)\}^T \quad (3)$$

在此激励下产生的随机响应 $\{x(t)\}$ 由下式给出

$$\begin{aligned} E\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{+\infty} [h(t-\tau)]E\{\{f(t)\}\}d\tau = \\ \int_{-\infty}^{+\infty} [h(t)]E\{\{f(t-\tau)\}\}d\tau \end{aligned} \quad (4)$$

2004-08-13 收到第1稿,2004-12-30 收到修改稿。

* 水利部科技创新基金资助项目(SCX2000-56)和河海大学科技创新基金重点资助项目(2002404543)

将上式写成响应的自相关函数矩阵的形式

$$\begin{aligned} [R_{xx}(t_1 - t_2)] &= E[\{x(t_1)\}\{x(t_2)\}^T] = \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [h(t_1 - \tau_1)\{f(t_2 - \\ & \tau_2)\}^T][h(\tau_2)]^T d\tau_1 d\tau_2 = \\ & \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [h(\tau_1)][R_{FF}(t_1 - t_2 - \\ & \tau_1 - \tau_2)][h(\tau_2)]^T d\tau_1 d\tau_2 \quad (5) \end{aligned}$$

由于功率谱密度函数与自相关函数之间及脉冲响应函数之间有对应的关系,则可得激励和响应随机过程的功率谱密度的矩阵关系如下

$$[S_{xx}(\omega)] = [H(\omega)][S_{FF}(\omega)][H^*(\omega)]^T \quad (6)$$

矩阵 $[S_{xx}(\omega)]$ 在第 p 行和第 k 列上的元素 $S_{xxpk}(\omega)$ 就是系统的第 p 个自由度和第 k 个自由度的响应之间的互谱密度函数,它的计算公式为

$$S_{xxpk}(\omega) = \sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m H_{pq}(\omega) S_{FFqr}(\omega) H_{rk}^*(\omega) \quad (7)$$

当 $p = k$ 时,就得到系统在第 p 个自由度上响应的自功率谱密度函数,也就是矩阵 $[S_{xx}(\omega)]$ 中的对角元素.它的计算公式为

$$S_{xxpp}(\omega) = \sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m H_{pq}(\omega) S_{FFqr}(\omega) H_{rp}^*(\omega) \quad (8)$$

当 $\omega \approx \omega_i \pm \frac{1}{2} \Delta\omega_i = K_i/M_i \pm \frac{1}{2} \Delta\omega_i$ 时,由式(1)可得

$$H_{pk}(\omega_i) \approx \frac{\phi_{pi}\phi_{ki}}{j\omega c_i} = -\frac{\phi_{pi}\phi_{ki}}{\omega c_i} \quad (9)$$

$$H_{pk}^*(\omega_i) \approx \frac{\phi_{pi}\phi_{ki}}{j\omega c_i} = \frac{\phi_{pi}\phi_{ki}}{\omega c_i} \quad (10)$$

利用方程(7),(8),(9)和(10)有

$$\begin{aligned} \frac{S_{xxpk}(\omega)}{S_{xxpp}(\omega)} &= \frac{\sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{pi}\phi_{ki}}{\omega_i c_i} S_{FFqr}(\omega_i) \frac{\phi_{ri}\phi_{ki}}{\omega_i c_i}}{\sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{pi}\phi_{qi}}{\omega_i c_i} S_{FFqr}(\omega_i) \frac{\phi_{ri}\phi_{ri}}{\omega_i c_i}} = \\ & \frac{\phi_{ki}\phi_{pi} \sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{qi}}{\omega_i c_i} S_{FFqr}(\omega_i) \frac{\phi_{ri}}{\omega_i c_i}}{\phi_{pi}\phi_{pi} \sum_{q=1}^m \sum_{r=1}^m \frac{\phi_{qi}}{\omega_i c_i} S_{FFqr}(\omega_i) \frac{\phi_{ri}}{\omega_i c_i}} = \frac{\phi_{ki}}{\phi_{pi}} \quad (11) \end{aligned}$$

由上式可见,若响应信号可近似地为单一模态的响应,响应信号的互谱与自谱之比即近似为振型之比.

由于已假设前提条件激振源的傅立叶谱或者功率谱是一个常数,输入谱在 $\omega \approx \omega_i \pm \frac{1}{2} \Delta\omega_i$ 处于 $\Delta\omega_i$ 这较窄的频段中,结构响应的频谱就是结构的动力特性.由此不仅可以确定固有频率,还可以在结构脉动信号 $x(t)$ 的傅立叶谱 $X(\omega)$ 或功率谱 $G(\omega)$ 上,利用半功率点确定阻尼比.

2 实验研究

实验模型采用钢质悬臂梁,梁长为 450 mm,截面宽和高均为 12 mm.悬臂梁的示意图见图 1.为测试方便,在悬臂梁上设 10 个节点,节点之间的间距为 5 mm.其中 1 号节点为悬臂梁的固定端.在其余各节点处设置测试响应的测点.测点号为 C2 ~ C10,共 9 个测点.

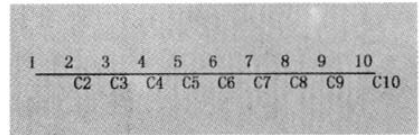


图 1 悬臂梁的示意图

Fig. 1 The model of cantilever

实验由 DY-300-2-60 电动振动系统产生有限带宽白噪声来模拟环境激励,功率谱密度的大小为 $0.1(\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$,激振频率带宽为 30 Hz ~ 346 Hz.每个测点处布置 CA-YD-103 型压电晶体加速度传感器,传感器的灵敏度见表 1.

实验现场悬臂梁结构模型及传感器布置照片见图 2.

数据采集由 DH3857 型多通道并行数据采集与分析系统完成,数据采集时间均为 10 min.用脉动法确定结构动力特性时,需用参考点的响应来代替激振力,因此参考点的位置对测试精度至关重要.在实际测试时,参考点的位置变化是通过传感器的不同布置来实现的.本文重点研究当参考点发生变化,即传感器的不同布置时对结构模态参数测试精度的影响.

测试的典型测点时程曲线图见图 3.

表 1 传感器的灵敏度

Table 1 Sensitivity of sensor

Number of sensor	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Sensitivity/(pc/ms ²)	2.15	1.96	2.07	1.91	2.13	1.94	1.90	2.08	1.90

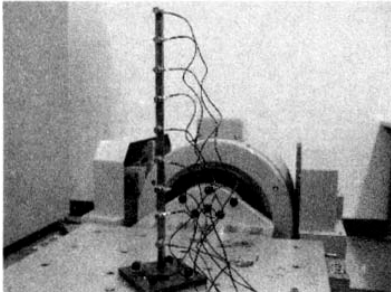


图 2 实验现场悬臂梁结构模型及传感器布置照片
Fig.2 Photo of testing system

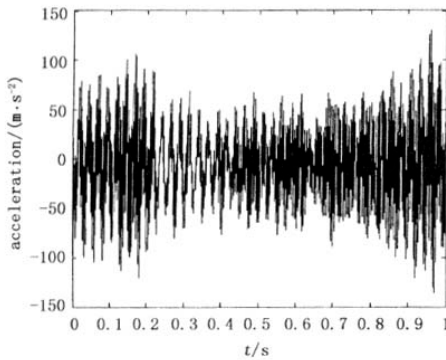
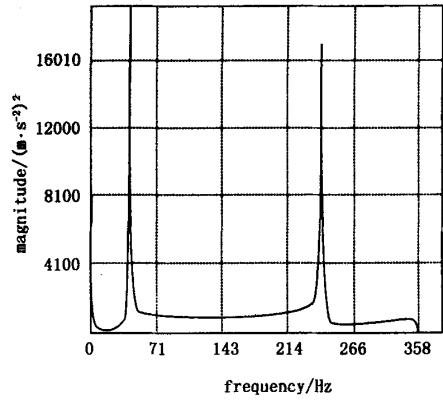


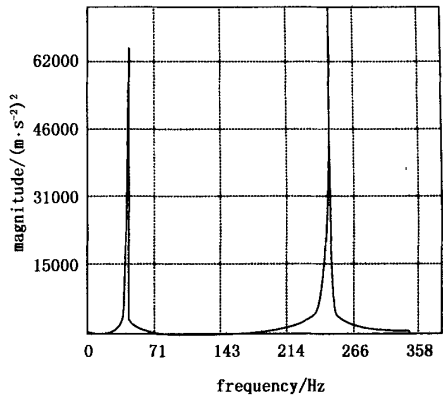
图 3 典型测点时程曲线图
Fig.3 Time trace curve for classic testing

图 4 为对应的傅立叶变换图.其中(a)为 C2 号测点傅立叶变换图,(b)为 C7 号测点傅立叶变换图,(c)为 C8 号测点傅立叶变换图.从图中可知,C2 测点的幅值比 C7 与 C8 测点小,除在结构前两阶自振频率处出现峰值外,在整个测试频带上都存在较大的幅值.由此可见,此处弹性位移较小,刚性位移的影响较大.C8 测点的幅值较大,但第一阶自振频率处的幅值明显大于第二阶自振频率处的幅值,说明此处结构在前两阶自振频率处的弹性位移有较大差别,进一步分析可知,此测点位于结构第二阶振型的节点处.

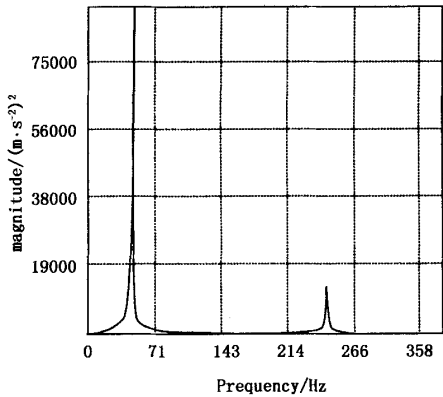
由于结构第一阶自振频率与激振系统地基的自振频率接近,系统噪声对测试信号的影响较大,以下主要以结构第二阶模态的测试进行分析.表 2 为采用不同参考点得出的结构第二节自振频率值和相应的阻尼比.由表中可见,参考点的位置不同对自振频率没有影响,但阻尼比有相应的变化,在 C2 测点处,阻尼比变大,在 C8 测点处,阻尼比变小.



(a)



(b)



(c)

图 4 典型测点傅立叶变换图

Fig.4 Fourier transform of classic testing

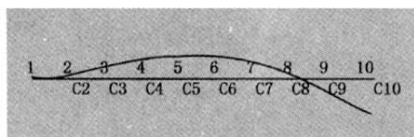
图 5 为对应的结构第二节振型图.其中(a)是取 C2 号测点为参考点的结构第二节振型图,(b)是取 C7 号测点为参考点的结构第二节振型图,(c)是取 C8 号测点为参考点的结构第二节振型图.从

图中可知,参考点的位置变化没有引起结构第二节 振型的明显变化.

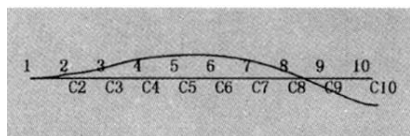
表2 第二节自振频率和阻尼比

Table 2 The second order natural frequency and damping ratio

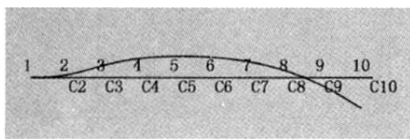
Place of basic point	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
Frequency/Hz	255.86	255.86	255.86	255.86	255.86	255.86	255.86	255.86	255.86
Damping ratio/%	0.50	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.47	0.48	0.48



(a)



(b)



(c)

图5 结构第二节振型图

Fig. 5 The second order modal shapes of structure

3 结论

从以上实验结果可见,在使用环境激励法进行结构的模态实验时,传感器的不同布置决定了参考点的位置,参考点的位置对实验结果有一定的影响.对于实验中所研究的悬臂梁结构,参考点位置的变化对结构自振频率和振型的影响小,而阻尼比对传感器位置的布置较敏感.这样可通过传感器的优化布置提高测试结构动力特性测试的精度.参考

点应避免刚体位移相对较大的位置,还应避开处在要研究的阶次振型的节点处.

参 考 文 献

- 1 Richard G Cobb, Brad S Liebst. Sensor placement and structural damage identification from minimal sensor information. *AIAA Journal*, 1997,35(2):369~374
- 2 Li YY, Yam LH. Sensitivity analyses of sensor locations for vibration control and damage detection of thin-plate system. *Journal of Sound and Vibration*, 2001,240(4):623~636
- 3 Worden K, Burrows AP. Optimal sensor placement for fault detection. *Engineering Structure*, 2001, 23: 885~901
- 4 Harik TE, Allen DL. Free and ambient vibration of Brent-Spence bridge. *Journal of Structural Engineering*, 1997, 123(9):1262~1268
- 5 Quek Ser Tong, Wang Wenping, Chan Ghee Koh. System identification of linear MDOF structures under ambient excitation. *Earthquake Engng Struct Dye*, 1999, 28:61~77
- 6 Lambros S Katafygiotis, Yuen Kaveng, Chen Jaychung. Bayesian modal updating by use of ambient data. *AIAA Journal*, 2001, 39(2):271~278
- 7 徐建. 建筑振动工程手册.北京:中国建筑工业出版社, 2002. 699~709(Xu Jian. Engineering Manual of Building Vibration. Beijing: China Building Industry Press, 2002. 699~709(in Chinese))

A STUDY ON OPTIMAL SENSOR PLACEMENT FOR STRUCTURAL MODAL PARAMETERS TESTING*

Wang Shanshan Ren Qingwen

(College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract The testing of structural modal parameters is an important basis of dynamic response analysis and structural damage detection. Modal parameters of real structure are usually tested by ambient excitation. The sensor placement affects testing accuracy during this detection. The affection of sensor placement on structural parameters testing are studied by finite bandwidth white noise vibration experiment. The experimental result shows that optimal sensor placement can improve testing accuracy of structural modal parameters.

Key words structure, modal parameters, sensor, ambient excitation, white noise

简讯

《动力学与控制学报》即将进入国家中文核心期刊

《动力学与控制学报》从2003年底创刊以来,经过全国动力学与控制科学工作者、期刊编委和编辑部成员的不懈努力,将于2005年进入国家中文核心期刊的行列。

《动力学与控制学报》编辑部

Received 13 August 2004, revised 30 December 2004.

* The project supported by Science and Technology Foundation of Ministry of Water Resources of China(SCX2000-56) and Science and Technology Foundation of Hohai University(2002404543)