

随机输入下附属结构的位置优化

国巍, 李宏男

(大连理工大学 海洋和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 首先推导了随机输入下单个附属结构和多个附属结构的动力响应表达式, 以此进一步分析了影响附属结构最优位置的各个因素, 并提出了利用遗传算法进行附属结构位置优化的方法。最后用一个 10 层剪切结构作为算例, 利用遗传算法并采用权重系数变换法进行了多个附属结构的多目标位置优化。

关键词: 附属结构; 最优位置; 遗传算法; 多目标优化

中图分类号: P315 **文献标识码:** A

工程中所研究的二次结构系统是由主体结构 and 附属结构两部分所组成的。一般将仪器设备、管线管道以及填充墙和天花板等称作附属结构, 而把直接与地面相连的建筑结构称作主体结构。近年来随着基于结构性能的抗震设计理论的研究与发展, 附属结构的抗震设计已经引起人们越来越多的关注^[1]。国内外对附属结构的抗震分析主要有几种方法: 楼层反应谱法^[2-3], 复合体系的动力分析方法^[4-5]和基于摄动理论的近似方法^[6]等。楼层反应谱法借鉴于反应谱理论, 是地面反应谱方法的扩展; 复合体系的动力分析有时程分析和基于随机振动理论的分析方法, 可以看作是精确的动力分析方法; 摄动法利用矩阵摄动理论, 多用于对主体结构影响较小的小质量附属结构的情况, 是有一定应用范围的近似方法。

地震动是十分复杂的现象, 具有很强的随机性, 即使同一地点, 遭受相同震级且震源也相同的两次地震, 结果也不会一样, 具有非重复性。上世纪 60 年代起, 随机振动理论逐渐发展起来, 它引进了概率统计的思想, 能够反映地震动的复杂性、随机性和非重复性等特征, 更加符合地震动的实际情况。随机地震动作用下附属结构的优化类似于调谐质量阻尼器 (TMD) 的参数优化, 二者的区别在于它们的优化目标不同。附属结构关注的是非结构构件的动力响应, 而调谐质量阻尼器 (TMD) 作为被动减震设施, 关注的是主体建筑结构的动力响应。在调谐质量阻尼器 (TMD) 参数优化方面, 国内外学者做了大量的研究^[7-10]。

本文借鉴调谐质量阻尼器的优化推导出了附属结构的随机响应表达式, 分析了影响最优位置的几个因素, 并利用遗传算法 (GA) 进行了多个附属结构的位置优化。

1 随机输入下附属结构的响应

设地面加速度为 \ddot{x}_g , 主体结构的质量、阻尼和刚度矩阵分别为 M 、 C 和 K , 主体结构相对于地面位移向量为 X , E 为单位列向量。

二次结构系统模型如图 1 所示。

1.1 单个附属结构的响应

设附属结构的质量为 m_s , 刚度为 k_s , 阻尼为 c_s , 阻尼比为 ξ_s , 自振频率为 ω_s 。附属结构相对于所在楼层的位移为 x_s , E_s 为附属结构的位置向量。

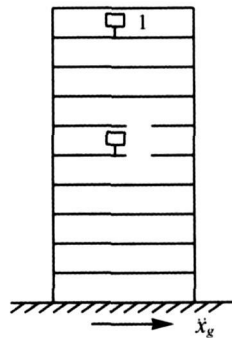


图 1 二次结构系统模型

二次结构体系的运动方程为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -ME\ddot{x}_g + E_s F_e \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s + c_s \dot{x}_s + k_s x_s = -m_s (\ddot{x}_g + \ddot{X}_s) \quad (2)$$

式中 F_e 为主附结构之间的相互作用力, $F_e = c_s \dot{x}_s + k_s x_s = 2m_s \xi_s \omega_s \dot{x}_s + m_s \xi_s \omega_s^2 x_s$, \ddot{X}_s 为二次结构所在楼层相对地面的加速度。

主体结构位移可以表示 $X = \Phi \{q\}$, 其中 Φ 为主体结构的模态矩阵, $\{q\}$ 为主体结构的广义坐标矩阵。设 $\{\phi_r\}$ 为主体结构第 r 阶模态向量, 则 (1) 式利用模态解耦可得:

$$\ddot{q}_r(\dot{t}) + 2\xi_r \omega_r \dot{q}_r(\dot{t}) + \omega_r^2 q_r(\dot{t}) = -\{\phi_r\}^T M E \ddot{x}_g(\dot{t}) + \{\phi_r\}^T E_s F_e(\dot{t}) \quad (3)$$

对上式进行傅立叶变换, 可得:

$$q_r(\omega) (-\omega^2) + 2\xi_r \omega_r (\dot{\omega}) q_r(\omega) + \omega_r^2 q_r(\omega) = -\{\phi_r\}^T M E \ddot{x}_g(\omega) + \{\phi_r\}^T E_s F_e(\omega) \quad (4)$$

令 $m_r = \{\phi_r\}^T M E \dot{h}_r(\omega) = 1/(\omega_r^2 - \omega^2 + 2\xi_r \omega_r \omega)$, $L_r = 2m_s \xi_s \omega_s (\dot{\omega}) + m_s \omega_s^2$, $\phi_r^a = \{\phi_r\}^T E_s$, 从而 (4) 式可以写成如下形式:

$$X_j(\omega) = \sum_{r=1}^n \phi_r^j h_r(\omega) \{-m_r \ddot{x}_g(\omega) + \phi_r^a L_r x_s(\omega)\},$$

基金项目: 教育部创新团队资助计划 (编号: IRTO518)

收稿日期: 2007-04-09 修改稿收到日期: 2007-05-28

第一作者 国巍男, 博士生, 1982年生

通讯作者 李宏男男, 教授, 博导, 1957年生

$$j=1, \dots, n \quad (5)$$

同理,对附属结构的运动方程进行傅立叶变换可得:

$$\ddot{x}_s(\omega) = h[-\ddot{x}_g(\omega) - \ddot{X}_s(\omega)] = h[-\ddot{x}_g(\omega) + \omega^2 X_s(\omega)] \quad (6)$$

式中: $h(\omega) = 1/(\omega_c^2 - \omega^2 + 2\xi_c\omega\omega_c)$.

综合考虑主附结构频域表达式(5)和(6),整理可得传递函数的表达式为:

$$H_s(\omega) = \frac{\ddot{x}_s(\omega)}{\ddot{X}_s(\omega)} = \frac{h[-1 - \omega^2 e_a]}{1 - h\omega^2 I_e e_{aa}} = \frac{h[-e_a\omega^2 + 1]}{h_e I_e e_{aa}\omega^2 - 1} \quad (7)$$

式中: $e_{aa} = \sum_{r=1}^n \phi_r^a h_r(\omega) \phi_r^a$, $e_a = \sum_{r=1}^n \phi_r^a h_r(\omega) m_c$

地震动的能量谱密度函数为 S_{x_g} , 则附属结构相对位移 x_s 的方差为

$$E(x_s^2) = \int |H_s(\omega)|^2 S_{x_g} d\omega$$

1.2 多个附属结构的响应

本文以两个附属结构为例来推导多个附属结构的随机响应公式。

附属结构的质量、刚度、阻尼矩阵分别为

$$m_c = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}, \quad c_c = \begin{bmatrix} c_1 + c_3 & -c_3 \\ -c_3 & c_2 + c_3 \end{bmatrix},$$

$$k_c = \begin{bmatrix} k_1 + k_3 & -k_3 \\ -k_3 & k_2 + k_3 \end{bmatrix}, \text{ 相对于所在楼层的位移为}$$

$$x_c = \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix}, E_s \text{ 为附属结构的位置向量。}$$

二次结构体系的运动方程为:

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = -ME\ddot{x}_g + E_s F_c \quad (8)$$

$$m_c \ddot{x}_c + c_c \dot{x}_c + k_c x_c = -m_c \ddot{X}_p \quad (9)$$

$$\text{式中: } \ddot{X}_p = \begin{Bmatrix} \ddot{x}_g + \ddot{X}_1 \\ \ddot{x}_g + \ddot{X}_2 \end{Bmatrix}, F_c = \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} c_1 \dot{x}_1 + k_1 x_1 \\ c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 \end{Bmatrix}.$$

对方程(8)、(9)进行频域变换,推导过程类似于单个附属结构的情况,得到两个附属结构传递函数和

随机响应的表达式:

$$H_s(\omega) = [H_1(\omega) \quad H_2(\omega)] \quad (10)$$

$$H_1(\omega) = (a_1 b_1 - a_2 b_2) / (a_1 a_4 - a_2 a_3) \quad (11)$$

$$H_2(\omega) = (a_1 b_2 - a_2 b_1) / (a_1 a_4 - a_2 a_3) \quad (12)$$

$$E(x_1^2) = \int |H_1(\omega)|^2 S_{x_g(\gamma)}(\omega) d\omega \quad (13)$$

$$E(x_2^2) = \int |H_2(\omega)|^2 S_{x_g(\gamma)}(\omega) d\omega \quad (14)$$

式中, $a_1 = h_1(\omega)\omega^2 I_{e1} e_{aa} - 1$, $a_2 = h_1(\omega)\omega^2 I_{e2} e_{ab}$, $a_3 = h_2(\omega)\omega^2 I_{e1} e_{ba}$, $a_4 = h_2(\omega)\omega^2 I_{e2} e_{bb} - 1$, $b_1 = h_1(\omega) \cdot$

$[\omega^2 e_{ar} + 1]$, $b_2 = h_2(\omega) [\omega^2 e_{br} + 1]$, $e_{aa} = \sum_{r=1}^n \phi_r^a h_r(\omega) \cdot$

ϕ_r^a , $e_{ab} = e_{ba} = \sum_{r=1}^n \phi_r^a h_r(\omega) \phi_r^b$, $e_{bb} = \sum_{r=1}^n \phi_r^b h_r(\omega) \phi_r^b$, $e_{ar} = \sum_{r=1}^n$

$\phi_r^a h_r(\omega) m_r$, $e_{br} = \sum_{r=1}^n \phi_r^b h_r(\omega) m_r$.

2 附属结构最优位置的影响因素

从附属结构的传递函数表达式(7)、(11)和(12)可以看出,影响附属结构动力响应的几个因素:附属结构的质量 m_c 、刚度 k_c 、阻尼 ξ_c 以及所在楼层位置 a 。

m_c 、 k_c 、 ξ_c 的变化对附属结构动力响应的影响是显而易见的:质量增大相对位移增大,刚度、阻尼增大则相对位移减小。附属结构所在楼层位置对动力响应的影响比较复杂,不同位置动力响应不同。与调谐质量阻尼器(TMD)的位置优化不同^[8],附属结构所在楼层位置优化关注的不是主体结构的动力响应,而是附属结构相对于所在楼层的位移。

2.1 单个附属结构

设主体结构 1~10 层质量均为 1 000 kg 刚度为 2×10^6 N/m 阻尼比为 0.05 附属结构阻尼比为 0.02 地震动取白噪声输入 $S_{x_g} = S_0 = 1$ 。

本文通过反复迭代计算出了附属结构最优楼层位置随着附属结构质量、刚度改变而变化的情况。图 2~5 分别给出了当质量 $m_c = 100$ kg、 $m_c = 500$ kg、 $m_c = 1 000$ kg、 $m_c = 2 000$ kg 时最优楼层位置随频率(刚度)变化的规律。从图中可以看出,随着质量、频率的变化附属结构的最优楼层位置也相应改变。

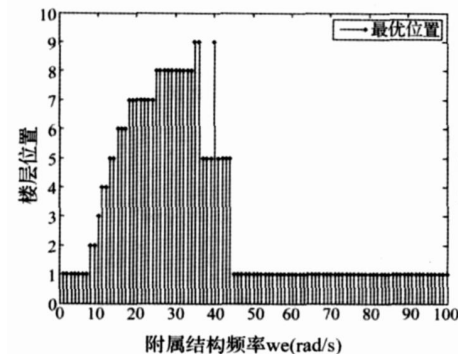


图 2 $m_c = 100$ kg

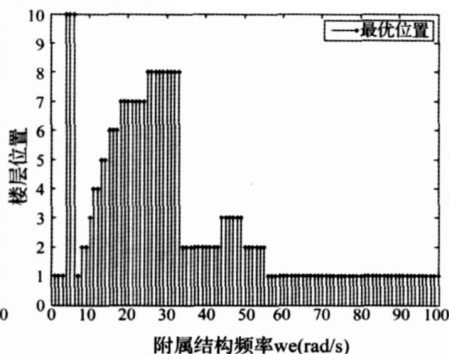


图 3 $m_c = 500$ kg

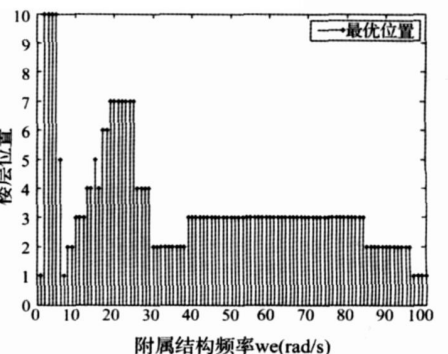


图 4 $m_c = 1 000$ kg

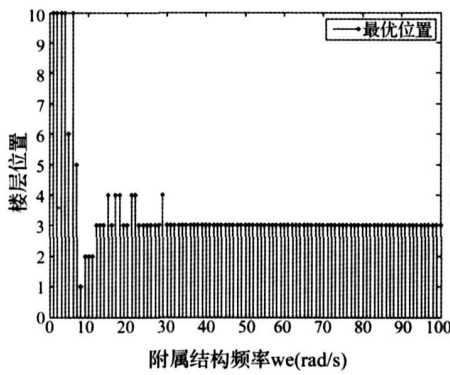


图 5 $m_e=2\ 000\ \text{kg}$

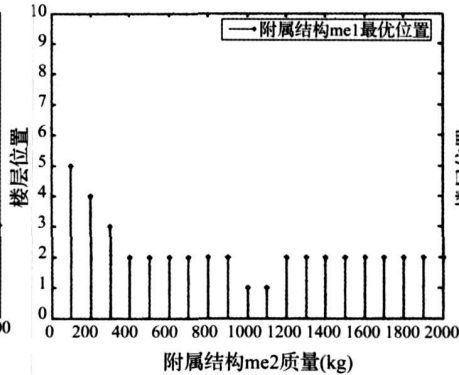


图 6 m_2 质量对 m_1 最优位置的影响

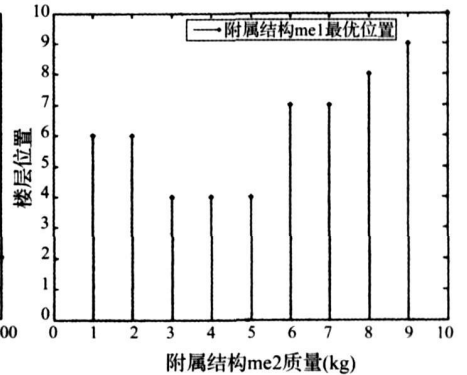


图 7 m_2 位置对 m_1 最优位置的影响

如图 2 图 3 所示, 当质量较小时, 在主体结构前几阶主要自振频率范围外的低频段和高频段附属结构的最优位置为第 1 层, 中间频率段附属结构最优位置位于主体结构的中间层, 并随频率的变化而改变。这主要是由于附属结构与主体结构前几阶自振频率调谐共振所引起的。主附结构频率调谐时调谐频率所对应的主体结构振型对附属结构动力响应的影响明显。如果不考虑其他振型的影响, 当附属结构质量较小时最优位置则位于该调谐振型的振幅最小层。在附属结构质量较大时, 随着质量的增加附属结构对主体结构的反作用也逐渐增大, 主附结构要作为一个复合体系进行动力分析。低频段和高频率段最优位置不再位于底层。

如图 4 图 5 所示, 在本文算例中低频段最优位置位于顶层, 高频段最优位置更多位于中间层。可以说, 当质量大于主体结构的 $1/10$ 时, 附属结构与主体结构相互作用明显, 最优位置随着频率改变而呈现一个复杂的变化, 应该综合考虑整个复合体系的动力特性来分析最优位置。

2.2 多个附属结构

多个附属结构的最优位置同样随着质量、频率的变化而改变, 但与单个附属结构不同的是, 多个附属结构中每个附属结构的最优位置不仅受到自身动力参数的影响, 也受到其他附属结构参数的影响。

本文以双附属结构为例来说明一个附属结构质量、位置的改变对另外一个附属结构最优位置的影响。

令 $m_1=1\ 000\ \text{kg}$ $k_1=3\times 10^5\ \text{N/m}$ $\xi_1=0.02$ m_2 位于主体结构第 5 层。图 6 给出了 m_1 最优楼层位置受 m_2 质量变化的影响规律。从图中可以看出 m_2 质量较小时对 m_1 最优位置的影响不大, 随着 m_2 质量的增大 m_1 的最优位置逐渐改变, 由第 5 层变为第 2 层。当 m_2 质量较大到一定程度时 m_1 的最优位置趋于稳定, 不再发生改变。

令 $m_1=m_2=1\ 000\ \text{kg}$ $k_1=k_2=3\times 10^5\ \text{N/m}$ $\xi_1=$
 $\xi_2=0.02$ 图 7 给出了 m_1 最优楼层位置受 m_2 位置的

影响规律。从图中可以看出, 随着 m_2 位置的变化时 m_1 最优楼层位置也相应发生改变, 这体现了两个附属结构之间的相互作用。对于多个附属结构的最优位置布置, 也应该综合考虑整个复合体系的动力特性来进行分析。

3 基于遗传算法的位置优化

遗传算法 (Genetic Algorithm 简称 GA)^[11] 起源于对生物系统所进行的计算机模拟研究, 是一种广为应用、高效率的随机搜索与优化算法。它以适应度函数 (或目标函数) 为依据, 通过对群体、个体施加遗传操作实现群体内个体结构重组, 群体、个体一代一代得以优化并逐渐逼近最优解。遗传算法鲁棒性强, 在全局范围内搜索最优解或次优解, 并且搜索不依赖于梯度信息, 适用于复杂而庞大的搜索空间。本文以双附属结构的位置优化为例, 说明了利用遗传算法 (GA) 对多附属结构位置优化的方法。

多个附属结构的位置优化问题属于多目标优化问题。在实际应用中, 工程优化问题大多数是多目标优化问题, 有时需要使多个目标在给定区域上都可能达到最优。多目标优化问题一般的数学模型可描述为:

$$\begin{cases} V-\min f(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T \\ s.t. x \in X, X \subset R^n \end{cases} \quad (15)$$

式中, $V-\min$ 表示向量极小化, 即向量目标函数 $f(x)=[f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T$ 中的各个子目标函数都尽可能地达到极小化, X 为问题的解空间。

对于求解多目标优化问题的 Pareto 最优解 (Pareto Optimal Solution)^[11], 目前已经有多种基于遗传算法的求解方法。本文采用权重系数变换法。它通过给每个子目标函数赋予权重并进行线性加权组合得到了多目标问题的评价函数, 从而多目标优化问题就可以转换为单目标优化问题, 即可以利用单目标优化的遗传算法求解多目标优化问题。评价函数表达如下:

$$u = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot f_i(x)$$

式中, U 为评价函数; ω_i 为相应的 $f(x_i)$ 在多目标优化问题中的重要程度。

本文主体结构模型如图 1 所示, 主体结构参数如前所述。地震动采用白噪声模型: $S_{x_g} = S_0 = 1$ 并设 $m_1 = 500 \text{ kg}$ $m_2 = 1000 \text{ kg}$ $k_1 = k_2 = 3 \times 10^7 \text{ N/m}$ $\xi_1 = \xi_2 = 0.02$ 。

多目标优化的权重 ω_i 采用固定权重, 可以得到固定方向 Pareto 最优解。根据不同的需求和每个子目标函数值的重要性确定各个权重的相对大小。本文取 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$, 则双附属结构位置优化的评价函数可以表示为 $U = 0.5 \times \left(\sqrt{E(x_1)} + \sqrt{E(x_2)} \right)$ 。

利用 MATLAB 里 GADS 工具箱 [12], 设定每一代群体中个体的数量为 20 迭代步数为 50 步, 交叉概率为 0.8 变异函数为 0.01 适应度函数为评价函数 U 利用遗传算法对两个附属结构的位置进行优化, 发现当迭代进行到第 30 步时最优解已经与平均解相等, 停止迭代, 可以得到问题的一个 Pareto 最优解。图 8 给出了整个迭代过程中评价函数值的收敛曲线和最佳个体的直方图, 可以看到两个附属结构的评价函数最小值为 $U_{min} = 0.023093$ 附属结构 1 和 2 的最优位置分别是第 5 层和第 4 层。

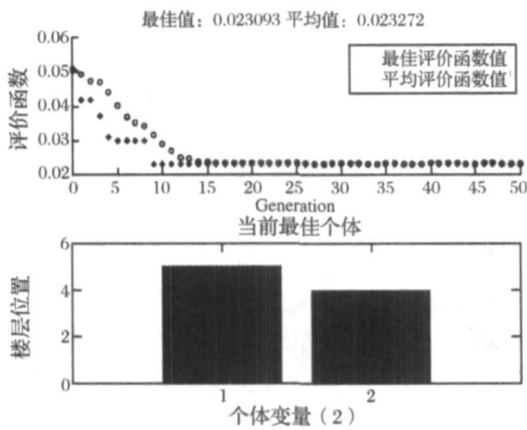


图 8 楼层位置优化

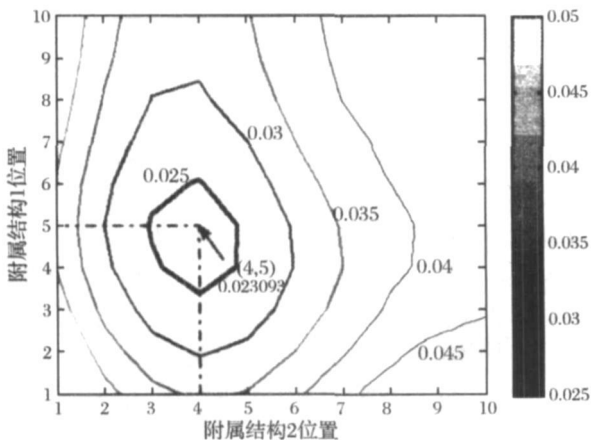


图 9 附属结构 1 和 2 位置组合的等值线图

通过穷举法可以计算得到附属结构 1 和 2 在各种位置组合下评价函数 U 的等值线图, 如图 9 所示。从图 9 中可以看到, 附属结构 1 和 2 的最优位置分别为第 5 层和第 4 层, 这与遗传算法位置优化的结果相符。

本文仅以两个附属结构的简单情况为例说明遗传算法在附属结构位置优化中的应用, 而在实际工程中往往存在大量附属结构, 比如计算机。对于此类大量附属结构的位置优化问题, 实际问题所对应的搜索空间往往都很大, 穷举法效率太低而且鲁棒性不强, 此时遗传算法通过有向的随机搜索可以迅速缩小搜索空间并逐渐逼近最优解。

4 结 论

本文对随机输入下附属结构的响应进行了公式推导, 并分析了影响附属结构最优位置的几个重要因素, 最后利用遗传算法对多个附属结构的最优位置进行了计算。通过本文的研究, 我们可以得到以下结论:

1) 附属结构在主体结构上的不同位置具有不同的动力响应, 并存在一个最优位置使它的响应最小。附属结构的动力参数对最优位置有显著影响, 如附属结构质量、刚度等。

2) 多个附属结构的位置优化不仅要考虑各自的动力参数, 还要考虑它们之间的相互影响。从本文的研究可以看出一个附属结构的质量、位置等的变化均会导致其他附属结构最优位置的改变。因此分析多个附属结构的最优位置要综合考虑多个附属结构与主体结构构成的复合体系的动力特性。

3) 多个附属结构的位置优化问题属于多目标优化问题, 本文采用权重系数变换法将多目标优化问题转换为单目标优化, 并利用遗传算法进行迭代运算得到了两个附属结构的最优位置。遗传算法鲁棒性强, 适用于复杂而庞大的搜索空间, 可以用来解决大量附属结构在高层结构的位置优化问题。

参 考 文 献

[1] 李宏男, 国 巍. 楼板谱研究述评 [J]. 世界地震工程, 2006 22(2): 7—13

[2] Taken Igusa A, men Der Kiureghian. Generation of floor response spectra including oscillator structure interaction [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 1985 13 (5): 661—676

[3] 秦 权, 聂 宇. 非结构构件和设备的抗震设计和简化计算方法 [J]. 建筑结构学报, 2001 22(3): 15—20

[4] A method for the transfer function matrix of combined primary-secondary systems using classical modal decomposition [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2006 35 (5): 251—266

[5] 张向东. 选煤场结构—设备复合体系抗震研究 [D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2004 6

(下转第 48 页)

2.4 转子偏心量对系统运动的影响

转子—轴承系统中不平衡力是引起系统故障的主要原因, 偏心大小决定着转子工作过程中的不平衡力。本文在碰摩刚度 $k=2.5 \times 10^7 \text{ N/m}$ 转静间隙 $\delta=0.01 \text{ mm}$ 及滚动轴承间隙 $c=0.04 \text{ mm}$ 下仿真计算了不同偏心量下系统的响应, 图 22(a)~(d)分别为不同偏心量(0.02 mm, 0.03 mm, 0.04 mm和 0.05 mm)下转子系统的响应随激励频率变化的分叉图。对比图 16(偏心量为 0.01 mm), 可以得出以下结论: 随着偏心量的增加, 转子不平衡力逐渐起主导作用, 滚动轴承的间隙非线性作用相对减弱, 系统的稳定性得到进一步改善, 系统的混沌区间减小。

3 结论

1) 建立了转子—滚动轴承系统的不平衡—碰摩耦合故障动力学模型, 在滚动轴承建模中, 综合考虑了轴承间隙、非线性接触力及由总体刚度周期变化产生的 VC 振动。在转子模型中考虑了随转速动态变化的转子不平衡力和转静碰摩力对滚动轴承的影响;

2) 用变步长龙格库塔方法, 仿真计算了系统的响应, 分析了转速对转子—轴承系统的 VC 振动和旋转频率振动的影响, 计算结果与现有研究结果取得了较好的一致性;

3) 研究了碰摩刚度对系统响应的影响, 当碰摩刚度增大时, 碰摩力逐渐在运动中成为主导因素, 使系统由混沌运动逐渐向周期运动演变, 能够有效地改善系统运动稳定性。

4) 研究了轴承间隙对系统运动的影响, 发现了轴承—转子系统通往混沌的倍周期分叉及阵发性分叉途径。通过对不同轴承间隙下的运动分叉图比较, 发现轴承间隙是影响系统运动稳定性的重要因素, 过大的间隙将导致系统混沌运动的持续时间很长, 严重影响系统的运动稳定性。因此在设计和使用过程中需要对滚动轴承间隙进行有效控制。

5) 研究了转子偏心量对系统运动的影响, 发现随着偏心量的增加, 转子不平衡力逐渐起主导作用, 滚动轴承间隙引起的强非线性轴承力的作用相对减弱, 从而导致系统稳定性得到逐渐改善。

参考文献

- [1] 闻邦椿, 武新华, 丁千, 韩清凯. 故障旋转机械非线性动力学的理论与试验[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 103—112.
- [2] 刘献栋, 何田, 李其汉. 支承松动的转子系统动力学模型[J]. 航空动力学报, 20(1): 54—59.
- [3] 何田, 刘献栋, 陈恩利. 具有滚动轴承松动故障转子系统的分叉和混沌[J]. 石家庄铁道学院学报, 2003, 16(3): 75—78.
- [4] 陈恩利, 何田, 郑猛, 刘献栋. 滚动轴承—转子系统支承松动时的复杂运动研究[J]. 动力学与控制学报, 2(4): 49—55.
- [5] 袁茹, 赵凌燕, 王三民. 滚动轴承—转子系统的非线性动力学特性分析[J]. 机械科学与技术, 2004, 23(10): 1175—1177.
- [6] 袁惠群, 闻邦椿, 王德友, 刘叔伦. 滚动轴承—转子—定子系统的碰摩故障分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 244—247.
- [7] Fukata S, Gad E H, Kondou T et al. On the radial vibration of ball bearings (computer simulation), Bulletin of the JSME 28, 1985, 899—904.
- [8] Mevel B, Guyader J L. Routes to chaos in ball bearings[J]. Journal of Sound and Vibration, 1993, 162(3): 471—487.
- [9] Kim Y B, Noah S T. Bifurcation analysis for a modified Jeffcott rotor with bearing clearance[J]. Nonlinear Dynamics, 1990, (1): 221—241.
- [10] Kim Y B, Noah S T. Quasi-periodic response and stability analysis for a nonlinear Jeffcott rotor[J]. Journal of Sound and Vibration, 1996, 190(2): 239—253.
- [11] Tiwari M, Gupta K. Dynamic response of an unbalanced rotor supported on ball bearings[J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 238(5): 757—779.
- [12] 姜健飞, 胡良剑, 唐俭. 数值分析及其 MATLAB 实验[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 149—151.

(上接第 26 页)

参考文献

- [6] Suarez L E, Singh M P. Eigenproperties of non-classically damped primary structure and equipment systems by a perturbation approach[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1987, 15(5): 565—583.
- [7] 王爱文, 史扬, 缪升. 基于遗传算法的 TMD 系统参数优化和设计[J]. 昆明理工大学学报, 2002, 27(1): 69—72.
- [8] 滕军, 高峰, 刘红军, 等. 脉动风作用下电视塔结构 TMD 控制的惯性质量与位置优化[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(1): 35—40.
- [9] 李创第, 黄天立, 李墩, 等. 带 TMD 结构随机地震响应分析的复模态法[J]. 振动与冲击, 2003, 22(1): 36—39.
- [10] Yozo Fujino, Masao Aki. Design formulas for tuned mass dampers based on a perturbation technique[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1993, 22(10): 833—854.
- [11] 玄光男, 程润伟. 遗传算法与工程优化(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [12] 雷英杰, 张善文, 李续武. 遗传算法工具箱及应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.

Key words: reverberation matrix method, MTMD, transient response, structural vibration reduction, planar framed structures (PP: 14—18)

REAL-TIME ROAD SURFACE IDENTIFICATION BASED ON WHEEL VIBRATION

LIU Jun-hui² WU Shi-jing

(1. Physics and Information Engineering Institute, Jianghan University, Wuhan 430056, China)

(2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A road surface identification method is presented based on wheel vibration due to road surface roughness. Firstly, a wheel vibration model is analyzed, the wheel vibration can reflect the road surface roughness, i.e. the type of road. Then, using wavelet and FFT analysis of the high frequency wheel vibration of all kinds of road is performed and the frequency spectrum characteristics are gained. Thus, according to the frequency spectrum characteristics, a road fuzzy classifier is built to identify road. In numerical simulations for blacktop and matted road surfaces, the road identification accuracy reaches 95%.

Key words: road surface identification, road roughness, wheel vibration, wavelet, fuzzy classifier (PP: 19—22)

POSITION OPTIMIZATION OF A SECONDARY STRUCTURE WITH RANDOM INPUT

GUO Wei LI Hong-nan

((State Key Lab of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China))

Abstract: The seismic response expressions of a single secondary system and a multi secondary system with random input are derived. Based on these expressions, the optimal position of secondary systems gained using genetic algorithm is discussed. A 10-storey shear structure is selected as an example. Multi-objective optimization of a multi secondary system is carried out with the genetic algorithm and the weighted coefficient method.

Key words: secondary structures, optimal position, genetic algorithm, multi-objective optimization (PP: 23—26, 48)

APPLICATIONS OF DYNAMIC SUBSTRUCTURE METHOD ON STRUCTURAL DYNAMIC REANALYSIS

ZHANG Mei-yan, RAY P. S. HAN, TANG Guo-an

(Department of Mechanics & Engineering Science, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: Structural dynamic reanalysis plays an important part in structure vibration control, dynamic characteristic design and optimization. A new method of structure dynamic reanalysis using substructure sensitivity synthesis is presented. By utilizing the technology of fixed interface substructure mode synthesis, both number of DOF and cost of computation are significantly reduced. The generalized expressions of the n^{th} order eigen-derivative with substructure sensitivity synthesis are also proposed. The structure dynamic reanalysis method proposed is simple in operation, easy in implement and can be applied to large complex structures.

Key words: fixed interface mode synthesis, substructure sensitivity synthesis, structural dynamic reanalysis, Ritz basis, Rayleigh quotient (PP: 27—29, 42)

BIFURCATION AND CHAOS OF A SIMPLY SUPPORTED THIN CIRCULAR PLATE UNDER COUPLING ACTION OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD AND A MECHANICAL FIELD

YANG Yang, ZHU Wei-guo, BAI Xiang-zhong

(Department of Civil Engineering and Mechanics, Yan Shan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The problem of bifurcation and chaos of a simply supported thin circular plate under coupling action of a