

考虑扭转耦联效应的附属结构最优位置分析

国巍*, 李宏男

(大连理工大学 海岸和近海工程国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 实际建筑物大多为偏心结构, 扭转耦联效应使同层楼板上不同位置处附属结构的动力响应也不相同, 通常存在一个平面最优位置。本文建立了主附结构体系的扭转耦联模型, 利用复模态理论和模式搜索方法研究了影响附属结构最优位置的几个重要因素, 包括地震输入方向、场地类别、主体结构偏心、附属结构质量、频率及阻尼比等, 通过数值分析得出了一些有益的结论。

关键词: 附属结构; 扭转耦联; 复模态; 模式搜索; 最优位置
中图分类号: TU318 **文献标识码:** A

1 引言

近年来, 主附结构体系的研究已经引起了人们越来越多的关注^[1]。在实际工程中, 附属结构的形式多种多样, 建筑物中的非承重构件、女儿墙、设备及管线等均可看作附属结构, 它们与主体结构一起构成了主附结构体系。由于主体结构与附属结构间的相互作用, 附属结构在地震作用下的动力响应需要综合考虑主附结构体系整体的动力特性。目前, 关于主附结构体系的研究多采用串联多自由度模型。该模型将建筑物简化为串联多自由度, 附属结构简化为单自由度或多自由度体系, 主体结构与附属结构均被考虑为剪切模型, 可以方便地引入模态坐标的概念。但该模型只考虑平移运动, 并没有考虑主体结构本身偏心或附属结构偏心布置所引起的扭转耦联效应, 与实际情况不符, 需要建立空间扭转耦联模型。20世纪90年代, 李杰等建立了空间扭转耦联模型, 并进行了实验和数值分析^[2]。Yang 和 Huang 建立了主体结构单方向偏心的主附结构体系动力相互作用模型^[3], 并进一步研究了基础隔震情况下附属结构的动力响应特性^[4]。同时, Agrawh 和 Datta 也对考虑扭转效应的附属结构动力特性进行了分析, 研究了单点和多点支撑附

属结构在扭转耦联效应下的动力响应^[5, 6]。

主附结构体系一个研究广泛的例子就是调谐质量阻尼器-结构体系。在参数优化方面, Ahlawat 和 Ramaswamy 利用遗传算法进行了考虑扭转效应的调谐质量阻尼器(TMD)多目标优化研究^[7]。本文所讨论的附属结构的参数优化类似 TMD 的优化, 不同的是优化目标函数选取不同, 调谐质量阻尼器优化目标是减小主结构的响应, 而附属结构的优化目标是减小附属结构的位移和加速度响应。

由于主附结构体系的非经典阻尼特性, 需要利用复模态对动力方程进行解耦。复模态理论在非经典阻尼体系中的应用已经有了许多研究成果^[8, 9], 对于结构体系往往只取第一振型进行近似分析。本文建立了主附结构体系的扭转耦联模型, 模型较简单, 可以利用 QR 分解精确求解复模态^[10, 11], 进而对附属结构进行频域分析, 并利用模式直接搜索法分析了附属结构最优位置的影响因素, 得出了一些有益的结论。

2 建立空间扭转耦联模型

建立主附结构体系的扭转耦联模型, 如图1所示。主体结构为单层偏心结构, 质心为 CM, 刚心为 CR, 以质心为坐标原点 O, 建立直角坐标系 XOY。假设主体结构的刚心坐标为 (e_x, e_y) , 质量为 m_p , 楼板刚度无限大, 柱子 X 与 Y 方向的抗侧移刚度相同, 四根柱子刚度分别为 k_{p1}, k_{p2}, k_{p3} 和 k_{p4} ,

收稿日期: 2007-12-06; 修改稿收到日期: 2008-10-12

基金项目: 教育部创新团队资助计划(IRT0518)

作者简介: 国巍*(1982-), 男, 博士

(E-mail: wei.guo.86@gmail.com);

李宏男(1957-), 男, 长江学者, 特聘教授。

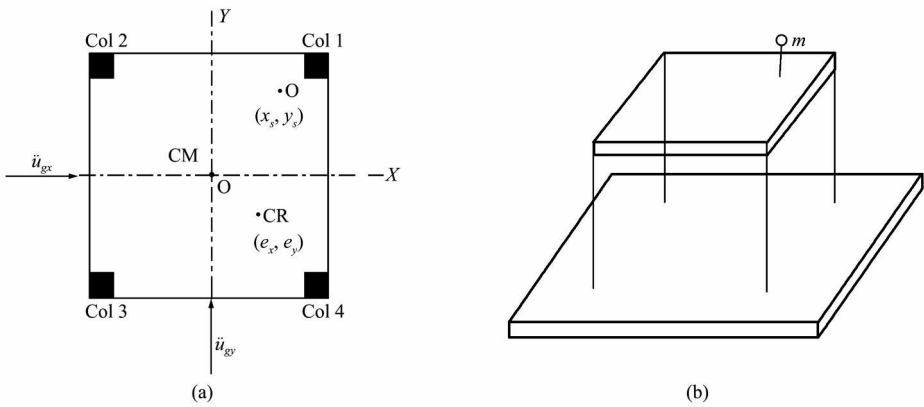


图 1 主附结构体系结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of primary-secondary systems

主体结构阻尼为经典阻尼, 阻尼比为 ξ_p 。附属结构质量为 m_s , 刚度为 k_s , 阻尼比为 ξ_s , 阻尼 $c_s = 2m_s\xi_s\omega_s$, 附属结构所在位置坐标为 (x_s, y_s) 。

由以上假定可知: $k_{px} = k_{py} = k_p = \sum_{i=1}^4 k_{pi}$, $k^0 = \sum_{i=1}^4 k_{pi}R_i^2$, $e_x = \sum_{i=1}^4 k_{pi}x_i / \sum_{i=1}^4 k_{pi}$, $e_y = \sum_{i=1}^4 k_{pi}y_i / \sum_{i=1}^4 k_{pi}$, 式中 R_i 为柱到质心的距离, x_i 和 y_i 分别为柱的位置坐标。主体结构的质量矩阵为 M_p , 刚度矩阵为 K_p , 阻尼矩阵为 C_p , 则 $M_p = \text{diag}(m_p, m_p, m_p r^2)$, $K_p = [k_{px}, 0, -k_{px}e_y; 0, k_{py}, -k_{py}e_x; -k_{px}e_y, k_{py}e_x, k^0]$ 。假设主体结构的阻尼为比例阻尼, 则 $C_p = a_0 M_p + a_1 K_p$, 由 $\xi_n = \frac{1}{2\omega_n} \sum_b a_b \omega_n^{2b} = \xi_p$ 构造的方程组可以得到 a_0 和 a_1 , 从而确定阻尼矩阵 C_p 。附属结构的质量矩阵为 M_s , 刚度矩阵为 K_s , 阻尼矩阵为 C_s , 则 $M_s = \text{diag}(m_s, m_s)$, $K_s = \text{diag}(k_s, k_s)$, $C_s = \text{diag}(c_s, c_s)$ 。

多维地震输入为 $\ddot{u}_g = [\ddot{u}_{gx}, \ddot{u}_{gy}, \ddot{u}_{g\theta}]^T$, 本文考虑单向地震输入的情况, 即 $\ddot{u}_{gy} = 0, \ddot{u}_{g\theta} = 0$ 。令 $U = [u_{px}, u_{py}, u_{p\theta}, u_{sx}, u_{sy}]^T$, 向量各元素为主体结构与附属结构相对地面的位移, 则主附结构体系的运动方程可以写成如下形式:

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = -ME\ddot{u}_{gx} \quad (1)$$

式中 $M = \text{diag}(m, m, m r^2, m_s, m_s)$;
 $C = [c^{11} + c_s, 0, c^{13} - c_s y_s, -c_s, 0; 0, c^{22} + c_s, c^{23} + c_s x_s, 0, -c_s; c^{31} - c_s y_s, c^{32} + c_s x_s, c^{33} + c_s x_s^2 + c_s y_s^2, c_s y_s, -c_s x_s; -c_s, 0, c_s y_s, c_s, 0; 0, -c_s, -c_s x_s, 0, c_s]$;
 $K = [k_{11} + k_s, 0, k_{13} - k_s y_s, -k_s, 0; 0, k_{22} + k_s, k_{23} + k_s k_s, 0, -k_s; k_{31} - k_s y_s, k_{32} + k_s x_s, k_{33} + k_s x_s^2 + k_s y_s^2, k_s y_s, -k_s x_s; -k_s, 0, k_s y_s, k_s, 0; 0,$

$$-k_s, -k_s x_s, 0, k_s];$$
$$E = [E_p, E_s]^T = [1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0]^T.$$

3 基于复模态方法的频域分析

对于非经典阻尼体系, 运动方程解耦需要求解复模态。本文的主体结构模型足够简单, 可以采用 QR 分解得到复模态的精确解, 而对于复杂多自由度主体结构可以采用摄动法^[12] 计算复模态, 也可以到达一定精度。

构造状态向量 $\bar{U} = [U, \dot{U}]^T$, 并令 $F = -ME\ddot{u}_{gx}$, 则主附结构体系的运动方程可以写成如下形式:

$$A\dot{\bar{U}} + B\bar{U} = [F^T, 0]^T \quad (2)$$

$$\text{式中 } A = \begin{bmatrix} C & M \\ M & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} K & 0 \\ 0 & -M \end{bmatrix}$$

自由振动的状态方程可以表达为

$$A\dot{\bar{U}} + B\bar{U} = \{0\} \quad (3)$$

设 $\bar{U} = \varphi e^{\lambda t}$, $\dot{\bar{U}} = \varphi \lambda e^{\lambda t}$, 代入方程(3) 可得 $(A\lambda + B)\varphi = 0$, 其中 $\varphi = [\varphi^T, \lambda\varphi^T]^T$, 则可表达为

$$(A\lambda + B) \begin{bmatrix} \varphi \\ \lambda\varphi \end{bmatrix} = 0 \quad (4)$$

式中 φ 为主附结构体系的复模态向量, λ 为复特征值。构造状态方程的模态矩阵:

$$\{\bar{\varphi}\} = [\varphi_1 \ \cdots \ \varphi_n \ \varphi_1^* \ \cdots \ \varphi_n^*]$$

星号表示取共轭复数。状态方程的特征值矩阵为

$$\begin{bmatrix} \Lambda & 0 \\ 0 & \Lambda^* \end{bmatrix} = \text{diag}(\lambda_1, \cdots, \lambda_n, \lambda_1^*, \cdots, \lambda_n^*)$$

复模态在 $2n$ 维复特征空间中正交, 即当 $r \neq s$ 时, $\varphi_r^T A \varphi_s = 0, \varphi_r^T B \varphi_s = 0$; 当 $r = s$ 时, $\varphi_r^T A \varphi_r = a_r,$

$\varphi_r^T \mathbf{B} \varphi_r = \mathbf{b}_r$. 状态向量可以表达为 $\bar{\mathbf{U}} = [\mathbf{U}, \dot{\mathbf{U}}]^T = \begin{Bmatrix} \varphi \\ \dot{\varphi} \end{Bmatrix} [\mathbf{Q}^T, \mathbf{Q}^*]^T$, 代入状态方程, 并在左边乘以 $\begin{Bmatrix} \varphi \\ \dot{\varphi} \end{Bmatrix}^T$, 利用正交性条件可得

$$\text{diag}(a_1 \cdots a_n, a_1^* \cdots a_n^*) \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \dot{\mathbf{Q}}^* \end{bmatrix} + \text{diag}(b_1 \cdots b_n, b_1^* \cdots b_n^*) \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \dot{\mathbf{Q}}^* \end{bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varphi \\ \dot{\varphi} \end{Bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由方程(5)可得到广义坐标的时域表达, 转换为物理坐标并进行傅氏变换, 得到主附结构系统的传递函数矩阵:

$$\mathbf{H}(\omega) = \sum_{i=1}^n \left[\frac{\phi_r \phi_r^T}{a_r(j\omega - \lambda_r)} + \frac{\phi_r^* \phi_r^{*T}}{a_r^*(j\omega - \lambda_r^*)} \right] \quad (6)$$

可以得到附属结构响应的功率谱矩阵, 表达式为 $\mathbf{S}_y(\omega) = \mathbf{H}^*(\omega)^T \mathbf{S}_x(\omega) \mathbf{H}(\omega)$, 激励与响应的互谱矩阵为 $\mathbf{S}_{xy}(\omega) = \mathbf{S}_x(\omega) \mathbf{H}(\omega)$, 其中 $\mathbf{S}_x(\omega)$ 为地震输入能量谱矩阵.

4 最优位置的影响参数分析

4.1 主附结构体系基本参数

不失一般性, 可令主体结构质量为 $m_p = 1 \times 10^5 \text{ kg}$, 刚度为 $k_{p1} = k_{p2} = k_{p3} = 2 \times 10^6 \text{ kN/m}$, $k_{p4} = 5 \times 10^6 \text{ kN/m}$, 楼板尺寸为 $x = 8 \text{ m}$, $y = 6 \text{ m}$, 回转半径为 $r = 2.5 \text{ m}$, 阻尼比为 $\xi_p = 0.05$; 附属结构质量为 $m_s = 1 \times 10^4 \text{ kg}$, 刚度为 $k_s = 1 \times 10^6 \text{ kN/m}$, 附属结构阻尼比为 $\xi_s = 0.02$, 所在位置为 $x_s = 3 \text{ m}$, $y_s = 2 \text{ m}$. 地震沿 X 向输入, 采用白噪声模型, 即 $\mathbf{S}_x = \mathbf{S}_0$.

附属结构的动力响应有两个重要的研究参数, 分别为附属结构相对于主体结构的位移与附属结构相对于地面的加速度, 本文取加速度作为附属结构动力响应的研究参数. 取附属结构在主体结构上加速度响应最小的位置为最优位置, 本文研究了最优位置的几个重要影响因素.

4.2 影响附属结构动力响应的因素

4.2.1 地震输入

地震输入是影响主附结构体系动力响应的关键性因素, 主要包括地震输入方向及地震输入类别(场地类别)等参数.

4.2.2 主体结构的动力特性

作为附属结构的支撑, 主体结构可以看作一个滤波器, 地震波经过主体结构滤波之后作用于附属

结构, 主体结构的动力特性与地震波共同决定了附属结构的动力输入. 主体结构的动力特性主要包括主体结构的质量、频率、阻尼以及偏心结构的偏心等.

4.2.3 附属结构的动力特性

在经过主体结构滤波之后的地震作用下, 附属结构的动力特性决定了它的动力响应. 附属结构的动力特性主要包括附属结构的质量、频率、阻尼以及在主体结构中的位置等.

4.3 影响附属结构最优位置的因素

附属结构最优位置的影响因素与影响附属结构动力响应的因素相同, 主要分为地震输入、主体结构和附属结构的动力特性三个方面的参数. 本文取附属结构 X 和 Y 方向的加速度方值之和为优化的目标函数, 即 $f = d_x^2 + d_y^2$, 其中 d_x 为 X 方向加速度均方根值, d_y 为 Y 方向加速度均方根值, 采用模式直接搜索方法计算空间扭转耦联模型中附属结构的最优位置. 尽管附属结构响应曲面较平坦, 局部最优解的个数也相应较少, 但本文为了避免模式搜索陷入局部最优, 采用改变搜索的初始位置来达到寻求全局最优的目的, 有代表性在主体结构上取四个初始位置点 $(4, 3)$, $(-4, 3)$, $(-4, -3)$ 和 $(4, -3)$.

4.3.1 地震输入方向

取地震输入方向的范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, 通过模式搜索得到在不同地震输入方向下附属结构最优位置变化的情况. 随着地震输入方向的改变, 附属结构最优位置会相应发生变化. 采用本文算例给出的结构参数, 随着地震输入方向的不同, 附属结构最优位置在主体结构上的四个区域上连续变化, 对应图 2(a ~ d) 段范围.

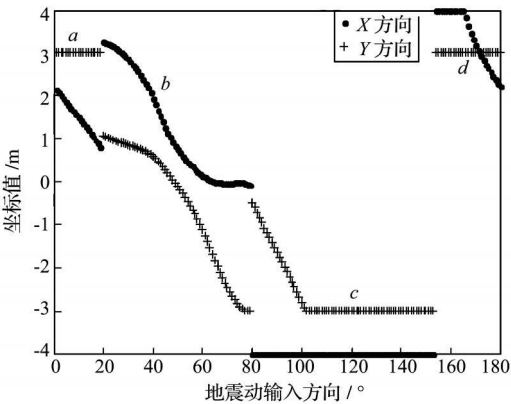


图 2 地震输入方向对附属结构最优位置的影响

Fig. 2 Effect of earthquake inputs's direction on the subsystem's optimal position

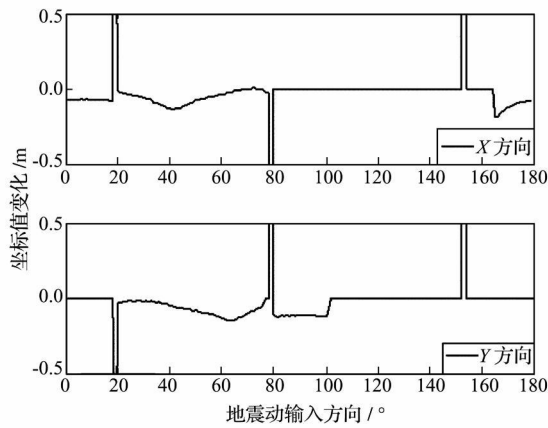


图 3 附属结构最优位置承受地震动输入方向的变化幅度
Fig. 3 Effect of earthquake inputs direction on the change range of subsystem's optimal position

从图 2 可以得知,在不同的地震输入条件下附属结构的最优位置并不是总在缓慢稳定的变化,而是存在几个稳定变化的区域;同时可以看出,在不考虑附属结构的反馈作用时,最小或最大加速度响应应该位于主体结构平面的各个角点,而实际上只有在 c 段的一部分范围附属结构的最优位置处于角点,大部分情况下最优位置位于主体结构内部或边界上,这主要是由于附属结构与主体结构之间相互作用所导致的。如果不考虑附属结构的反馈作用,所求得的最优位置会有较大的误差。

图 3 给出了附属结构最优位置随地震输入角度改变而变化的幅度。从图中可以看到除了在几个角度处附属的最优位置有突变,而在其他角度区域内最优位置缓慢微小变化或保持不变。

4.3.2 场地类别和地震分组

本文采用 Clough 和 Penzien 建议的修正滤波白噪声随机地震模型^[13]:

$$S(\omega) = \left(\frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2\omega_g^2\omega^2}{\omega_g^2 - \omega^2} \right)^2 + 4\zeta_g^2\omega_g^2\omega^2 \times \frac{\omega^4}{(\omega_f^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_f^2\omega_f^2\omega^2} S_0 \quad (7)$$

式中 S_0 为谱强度因子, ζ_g 和 ω_g 分别为地基土的阻尼比和卓越频率, ζ_f 和 ω_f 通常取 $\zeta_f = \zeta_g$ 和 $\omega_f = 0.1\omega_g \sim 0.2\omega_g$ 。

本文根据不同场地类别、设计地震分组建立了包括白噪声输入的 13 种随机地震输入模型,模型相对应的地震参数参考文献^[14]。如表 1 所示,对地震输入模型进行编号,其中白噪声输入序号为 1。采用模式搜索计算在不同场地条件和地震分组

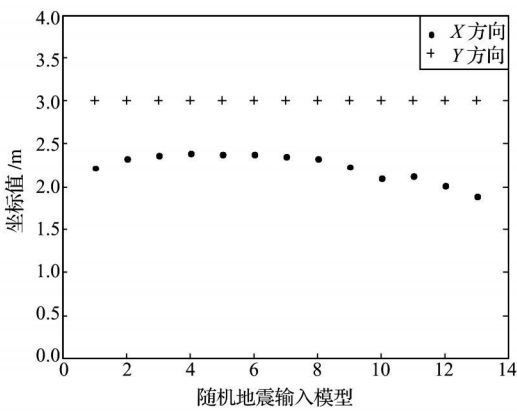


图 4 随机地震输入模型对附属结构最优位置的影响
Fig. 4 Effect of random earthquake input model on the subsystem's optimal position

下附属结构最优位置的分布,如图 4 所示。从图中可以看出,随着场地类别、设计地震分组的改变,附属结构的最优位置变化并不明显,最优位置在沿地震输入方向有微小平移,而在垂直地震输入方向则没有改变。

表 1 随机地震输入模型序号

Tab.1 Serial number of random earthquake input models

场地类别	I	II	III	IV
设计地震第一组	2	5	8	11
设计地震第二组	3	6	9	12
设计地震第三组	4	7	10	13

4.3.3 主体结构偏心

主体结构偏心位置改变,附属结构的最优位置也随之不同。改变 4 柱的刚度,主体结构的偏心位置随之发生改变。观察附属结构最优位置的变化,图 5 给出了当 4 柱的刚度在 $1 \times 10^5 \sim 1 \times 10^7$ kN/m

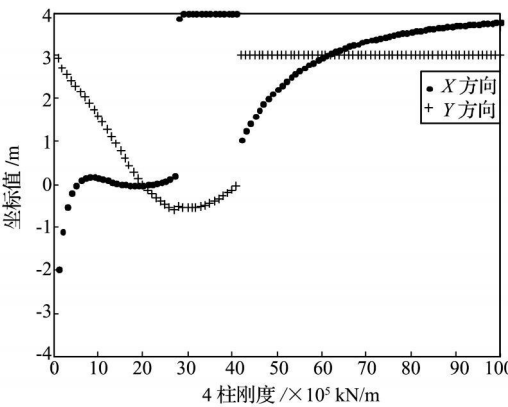


图 5 改变 4 柱刚度对附属结构最优位置的影响
Fig. 5 Effect of stiffness of column 4 on the subsystem's optimal position

表 2 主体结构偏心距对附属结构最优位置的影响

Tab.2 Effect of primary system's eccentricity on the subsystem's optimal position

X 向偏心距	- 4.0	- 3.2	- 2.4	- 1.6	- 0.8	0	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0
- 4.0	- 2.10/1.92	- 2.36/ 3	- 3.16/0.83	- 2.96/- 2.03	- 1.91/- 3	0/- 3	1.91/- 3	2.96/- 2.03	3.16/ 0.83	2.36/ 3	2.10/1.92
- 3.2	- 0.74/ 3	- 2.90/ 3	- 4/ 0.31	- 3.99/- 3	- 2.59/- 3	0/- 3	2.59/- 3	3.99/- 3	4/ 0.31	2.90/ 3	0.74/ 3
- 2.4	- 0.64/ 3	- 3.58/ 3	- 4/ 1.02	- 4/- 1.45	- 3.31/- 2.07	0/- 1.85	3.31/- 2.07	4/- 1.45	4/ 1.02	3.58/ 3	0.64/ 3
- 1.6	0.01/ 3	- 4/ 3	- 4/ 3	- 3.63/ 3	- 2/- 0.20	0/- 0.25	2/- 0.20	3.63/ 3	4/ 3	4/ 3	- 0.01/ 3
- 0.8	2.78/ 3	- 4/ 3	- 4/ 3	- 2.43/ 3	- 1.62/ 3	0/ 3	1.62/ 3	2.43/ 3	4/ 3	4/ 3	- 2.78/ 3
0	4/ 3	4/ 3	2.55/ 3	2.45/ 3	4/ 3	- 4/ 3	- 4/ 3	- 2.45/ 3	- 2.55/ 3	- 4/ 3	- 4/ 3
0.8	2.78/- 3	- 4/- 3	- 4/- 3	- 2.43/- 3	- 1.62/- 3	0/- 3	1.62/- 3	2.43/- 3	4/- 3	4/- 3	- 2.78/- 3
1.6	0.01/- 3	- 4/- 3	- 4/- 3	- 3.63/- 3	- 2/ 0.20	0/- 0.25	2/ 0.20	3.63/- 3	4/- 3	4/- 3	- 0.01/- 3
2.4	- 0.64/- 3	- 3.58/- 3	- 4/- 1.02	- 4/ 1.45	- 3.31/ 2.07	0/ 1.85	3.31/ 2.07	4/ 1.45	4/- 1.02	3.58/- 3	0.64/- 3
3.2	- 0.74/- 3	- 2.90/- 3	- 4/- 0.31	- 3.99/- 3	- 2.59/- 3	0/ 3	2.59/ 3	3.99/ 3	4/- 0.31	2.90/- 3	0.74/- 3
4.0	- 2.10/- 1.92	- 2.36/- 3	- 3.16/- 0.83	- 2.96/ 2.03	- 1.91/ 3	0/ 3	1.91/ 3	2.96/ 2.03	3.16/- 0.83	2.36/- 3	2.10/- 1.92

注:表格中数据表达形式为 X 坐标/Y 坐标,单位:m。

变化时,附属结构最优位置的变化。可以看出,随着偏心位置的改变附属结构的最优位置也相应发生变化。

主体结构总刚度保持不变,通过改变刚度分布来改变主体结构的偏心位置,观察此时附属结构最优位置的变化,见表 2。可以看出,当主体结构的偏心位置关于 X 轴对称时,附属结构的最优位置同样关于 X 轴对称,即最优位置的 X 坐标相同,Y 坐标符号相反;当主体结构的偏心位置关于 Y 轴对称时,附属结构的最优位置也关于 Y 轴对称,即最优位置的 Y 坐标相同,X 坐标符号相反。

4.3.4 附属结构的质量

图 6 为在附属结构频率不变的情况下质量改变对最优位置的影响。从图中可以得到,在附属结构频率保持不变的情况下,当附属结构质量较小时,最优位置在角点,即不考虑附属结构对主体结

构的影响时的响应最小点。随着质量比的增大,附属结构与主体结构之间的相互作用的影响变得明显,最优位置不再位于主体结构的角点,X 坐标开始向坐标原点靠近,而 Y 坐标保持不变,体现在平面上,为最优位置在主体结构上边界处向 X 负方向的移动。当质量比增大到一定程度时,从图中可以看出,大约在 0.8 左右,最优位置不再位于主体结构的上边界,最优位置位于主体结构平面的内部,附属结构对主体结构的动力响应有明显影响。

4.3.5 附属结构的阻尼比

图 7 给出了附属结构阻尼比的改变对最优位置的影响,可以看到在低阻尼区域,附属结构的最优位置随着阻尼的增大沿 X 轴方向向边界移动,在接近临界阻尼时,附属结构的最优位置随着阻尼的增大沿着 X 轴方向从边界向内部移动,其他情况下附属结构的最优位置保持不变。综合来说,在

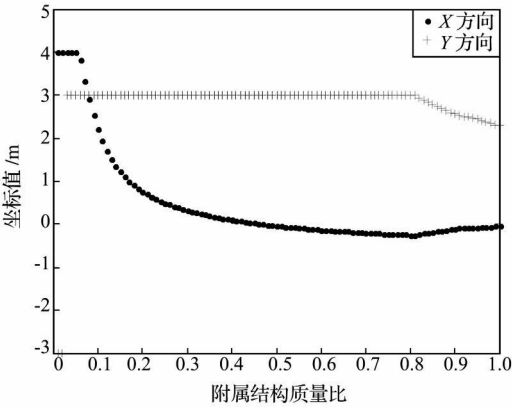


图 6 附属结构质量对比最优位置的影响
Fig. 6 Effect of subsystem's mass ratio on the subsystem's optimal position

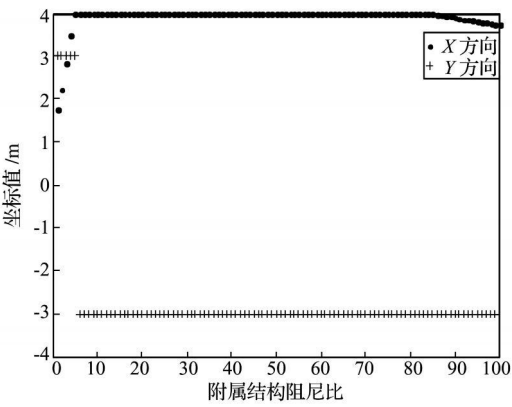


图 7 附属结构阻尼对比最优位置的影响
Fig. 7 Effect of subsystem's damping ratio on the subsystem's optimal position

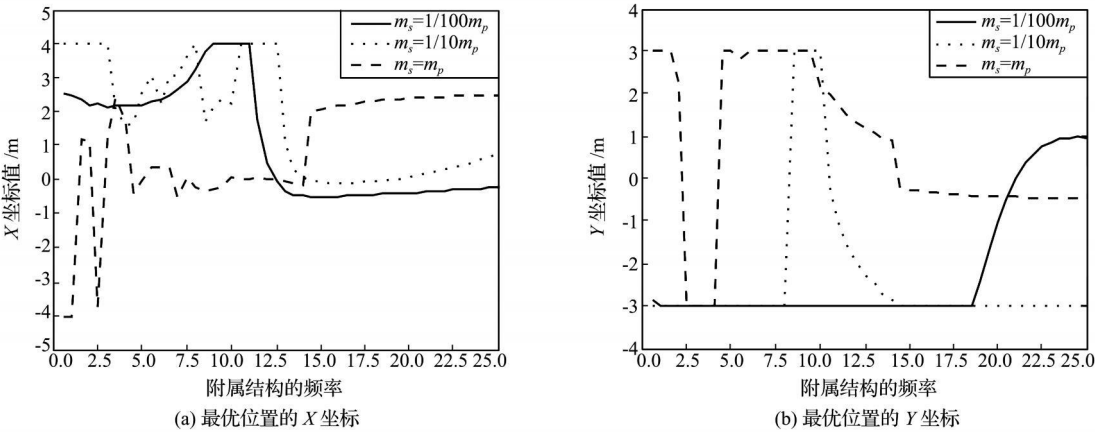


图 8 附属结构频率对最优位置的影响
Fig. 8 Effect of substructure frequency on the substructure's optimal position

X 向地震输入下附属结构阻尼比的改变对最优位置的影响不大, 只在低阻尼和高阻尼段在 X 方向有微小移动。

4.3.6 附属结构的频率

随着附属结构频率的改变, 附属结构的响应也将相应发生改变。本文取 $0.5 \sim 25 \text{ rad/s}$ 范围内一系列频率点, 分别计算了附属结构质量等于 $1/100m_p$, $1/10m_p$, m_p 的最优位置, 如图 8 所示。可以看到, 当附属结构质量较小, 体现在图中即 $m_s = 1/100m_p$ 时, 附属结构的最优位置在主体结构前两阶频率附近($\omega_1 = 9.97 \text{ rad/s}$, $\omega_2 = 10.49 \text{ rad/s}$)变化较明显, 而在其他频率范围内附属结构最优位置的改变较小; 随附属结构质量的增大, 如图中所示当 $m_s = 1/10m_p$ 时, 附属结构的最优位置在远离调谐的高频段变化仍然不明显, 而在接近主体结构基频的低频段最优位置也开始明显变化; 当附属结构等于主体结构质量时, 即当 $m_s = m_p$ 时, 低频段附属结构的最优位置变化很明显, 高频段仍然变化很小。

可以得到这样的结论, 当附属结构质量相对于主体结构较小时, 其对主体结构的影响较小, 附属结构的最优位置主要由主体结构的响应来决定, 频率的改变对最优位置影响不大; 特殊情况是当二者频率调谐时相互之间的作用明显, 附属结构的最优位置也相应发生明显变化。随着附属结构的质量的增大, 其对主体结构的相互作用也越来越明显, 主附结构系统的振动频率会发生明显偏移; 当附属结构频率较低时, 调谐频率向低频段偏移, 导致低频

段附属结构最优位置变化较大, 当附属结构频率较高时, 体系频率向高频段偏移, 体现在图中为最优位置变化明显的区段往高频扩展, 而在远离调谐频率的高频段附属结构的最优位置变化很小。

5 结 论

本文建立了考虑扭转耦联效应的主附结构体系模型, 并采用模式搜索研究了影响附属结构最优位置的几个因素, 得到了一些有益的结论:

- (1) 影响附属结构最优位置的因素主要有地震输入, 主体结构的动力特性, 附属结构的动力特性等因素。
- (2) 在不同地震输入方向下附属结构的最优位置也不相同, 并且分布在几个隔离的区域, 通常并不位于主体结构的角点上。
- (3) 通过对 13 种地震输入(包括白噪声)下附属结构最优位置变化的研究, 可以看出场地类别的改变对附属结构的最优位置的影响很小, 最优位置只在平行地震输入方向有微小移动, 而在垂直地震输入方向没有变化。
- (4) 主体结构偏心影响附属结构最优位置的分布。当主体结构的偏心位置关于 X 轴对称时, 附属结构的最优位置同样关于 X 轴对称; 当主体结构的偏心位置关于 Y 轴对称时, 附属结构的最优位置也将关于 Y 轴对称。
- (5) 附属结构的质量较小时最优位置位于主体结构

间相互作用明显,最优位置沿边界逐渐向主体结构内部靠拢。

(6) 附属结构阻尼比的变化对最优位置的影响很小。

(7) 当附属结构与主体结构频率调谐时,最优位置有明显变化。当附属结构质量较大时,与主体结构之间的相互影响,导致在主体结构基频的低频段最优位置也有明显变化,而在远离调谐频率的高频段附属结构的最优位置则仍然变化不大。

参考文献(References):

[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. (LI Hong-nan, GUO Wei. State-of-the-art review on development of floor response spectrum[J]. *World Earthquake Engineering*, 2006, 22(2): 7-13. (in Chinese))

[2] 赵晓, 李杰. 结构-设备体系空间动力学模型建模[J]. 郑州工学院学报, 1995, 16(4): 30-37. (ZHAO Xiao, LI Jie. Modeling of the space structure-equipment dynamic system[J]. *Journal of Zhengzhou institute of Technology*, 1995, 16(4): 30-37. (in Chinese))

[3] YANG Y B, HUANG W. Seismic response of light equipment in torsional buildings[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1993, 22(2).

[4] YANG Y B, HUANG W H. Equipment-structure interaction considering the effect of torsion and base isolation[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 1998, 27(1): 155-171.

[5] AGRAWH A K. Non-linear response of light equipment system in a torsional building to bi-directional ground excitation[J]. *Shock and Vibration*, 1999, 6: 223-235.

[6] AGRAWH A K, DATTA T K. Behavior of multiple supported secondary system mounted on a torsional coupled primary system[J]. *International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2001, 3(1): 13-22.

[7] AHLAWAT A S, RAMASWAMY A. Multiobjective optimal absorber system for torsional coupled

seismically excited structures[J]. *Engineering Structures*, 2003, 25: 941-950.

[8] 李创第, 李瞰, 黄天立, 等. 高层建筑TMD风振控制分析的复模态法[J]. 振动与冲击, 2003, 22(2): 1-4. (LI Chuang-di, LI Tun, HUANG Tian-li et al. Complex mode theory used for random wind-induced response[J]. *Journal Vibration and Shock*, 2003, 22(2): 1-4. (in Chinese))

[9] 李创第, 晓华, 陈俊忠, 等. 基础隔震结构基于Clough-Penzien谱随机地震响应分析的复模态法[J]. 振动与冲击, 2006, 25(5): 162-165. (LI Chuang-di, DING Xiao-hua, CHEN Jun-zhong et al. Complex model method for analysis of random earthquake response of structures with base isolation on the basis Clough-Penzien spectrum[J]. *Journal Vibration and Shock*, 2006, 25(5): 162-165. (in Chinese))

[10] 李忠献, 何玉教. 非经典阻尼结构动力分析模态综合法综述[J]. 工程力学, 1992, 9(1): 51-59. (LI Zhong-xian, HE Yu-ao. A summary of modal superposition methods of dynamic analysis for nonclassically damped structures [J]. *Engineering Mechanics*, 1992, 9(1): 51-59. (in Chinese))

[11] 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. (FU Zhi-fang, HUA Hong-xing. *Modal Analysis Theory and Application* [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2000. (in Chinese))

[12] 楼梦麟, 范么清. 求解非比例阻尼体系复模态的实模摄动法[J]. 力学学报, 2007, 39(1): 112-118. (LOU Meng-lin, FAN Yao-qing. Modal perturbation method for obtaining complex modal characteristics of non-proportional damping systems[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 39(1): 112-118. (in Chinese))

[13] CLOUGH R W, PENZIEN. *Dynamics of Structures* [M]. New York, McGraw-Hill, Inc, 1993.

[14] 曹资, 薛素铎. 空间结构抗震理论与设计[M]. 北京: 科学出版社, 2005. (CAO Zi, XUE Su-duo. *Spatial Structures Seismic Theory and Design* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese))

(下转第 810 页)

151-179.

[13] ROCHERY M, JERMYN I, ZERUBIA J. Higher order active contours[J] . *International Journal of Computer Vision*, 2006, 69(1): 27-42.

[14] WEIKERT J, ROMENY B M, VIERGEVER M. Efficient and reliable schemes for nonlinear diffusion filtering[J] . *IEEE Transaction on Image Processing*, 1998, 7(3): 398-410.

Topology optimization of distributed compliant mechanisms base on level set method

LUO Jun-zhao, WANG Shu-ting *, CHEN Li-ping
(National CAD Support Software Engineering Research Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: A new method for designing the distributed compliant mechanisms is presented based on level set method. The quadratic energy function used in image analysis is introduced into the level set model to control the minimal geometrical dimension of the compliant mechanisms optimized results and gain a strip-like even-distributed compliant mechanisms, which solves well the problems of one-node-connected hinges that exist in the conventional topology optimization of compliant mechanism. A semi-implicit additive operator splitting (AOS) scheme is adopted to solve the level set equation. In this method the time step decided by the CFL condition in the Up-wind scheme is clearly relaxed and it improves the efficiency of the optimization arithmetic. A typical two dimensional example is applied to demonstrate the validity of the presented method.

Key words: level set method; topology optimization; quadratic energy function; additive operator splitting (AOS) scheme; up-wind scheme

(上接第 803 页)

Secondary system’s optimal position analysis concerning the lateral-torsion coupling effect

GUO Wei *, LI Hong-nan
(State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A majority of actual structures are eccentric structures, so the lateral-torsional coupling of primary-secondary systems, which has significant influence on secondary system’s response under earthquake loading, is needed to be considered. Considering torsion movement, the secondary system’s responses on different positions of the same floor are also different, and an optimal position for minimal response exists. In this paper a model of primary-secondary systems concerning lateral-torsion coupling and interaction between primary and secondary systems is established and studied from the point of random vibration, by using complex mode theory and pattern research method for secondary system’s optimal position, furthermore, the influencing factors of optimal position are also analyzed, such as direction of earthquake input, site of different classification, eccentricity of primary system, the mass, frequency, and damping ratio of secondary system etc. At the end of this paper some useful conclusions were provided by numerical work, from which we can see lateral-torsional coupling due to the eccentricity of structures and the interaction between primary and secondary systems have important effect on the secondary system’s response, and due to the interaction optimal position is not only located at corner of the plane any more.

Key words: secondary system; lateral-torsional coupling; complex mode; pattern search; optimal position