

结构—设备体系空间动力学 模型建模*

赵 晓 李 杰

(郑州工学院)

摘 要: 工业结构和工业系统的抗震性能分析是近年来地震工程研究中的一个新方向, 针对结构—设备体系动力相互作用中存在的问题, 本文重点研究了空间结构—设备体系的动力学模型。文中, 以考虑有势力的拉格朗日方程为工具, 具体给出了层间剪切型体系的动力方程矩阵表达式, 并将模型计算结果与实验结果进行了分析对比。

关键词: 结构—设备体系, 动力相互作用, 地震反应

中图分类号: TU311.3

随着工业化程度的提高, 人们对于系统抗御灾害的能力的关注越来越强烈。在工业系统抗震性能分析研究中, 不可避免地要涉及结构—设备综合体系的抗震性能分析问题。从系统分析的观点来看, 结构—设备体系可以视为工业系统抗震可靠性分析中的动力耦联单元, 深入研究这种基本单元的地震反应机理, 对于分析工业系统的抗震薄弱环节具有基础性的意义。

长期以来, 从事建筑结构设计与从事设备设计的工作者之间的联系仅限于工艺上的协调, 而很少共同关心综合体系的抗震能力问题。但在实际上, 结构与设备在地震时是共同工作的, 不考虑其间的动力相互作用, 在某些情况下, 设计参数偏于不安全。因此, 结构—设备体系地震反应分析模型的研究也是进行这类协同体系抗震设计的基础。

将结构—设备体系作为二阶系统进行分析研究, 在国际上七十年代就开始了, 然而, 迄今为止的绝大部分研究工作, 都局限于平面结构体系, 而对于空间结构—设备体系的协同分析研究, 则进行得极少, 对于偏心空间结构体系, 由于其平移—扭转耦联造成频谱密集等问题, 势必影响结构—设备动力相互作用的结果, 而对此问题的研究, 至今较少。

本文以考虑有势力的拉格朗日方程为工具, 建立了结构—设备相互作用动力分析的空间平扭耦联模型。将每层质心在 x , y 方向的位移 u , v 和每层绕 Z 轴的转动角 θ 取为

* 收稿日期: 1995-03-03

结构运动的基本变量, 并将各层设备简化为串联多自由度系统, 每个质点有 u_c 、 v_c 两个基本变量, 设备偏心联接在主结构上。以此为基础, 建立了具体的分析表达式, 编制了相应的计算机分析程序, 与振动台试验结果的对比分析表明, 本文所提分析方法是合理而实用的。

1 分析模型的建立

推导结构动力方程的方法有多种, 如动平衡法, 哈密尔顿原理, 拉格朗日方程等, 本文采用有势力的拉格朗日方程为工具, 其一般表达式为:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial V}{\partial q_j} = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中, T 为体系的动能; V 为体系的势能; q_j 为广义位移。

工业设备与结构物之间的关系可以分为搁置、悬吊、并联等基本类型, 其中搁置类型最为常见, 采用集中质量的方法, 可以将空间结构—设备体系转化为图 1 所示的空间力学模型。

与模型及坐标系有关的变量说明如下:

u_i : 主结构第 i 层质心在 x 方向相对地面的位移;

v_i : 主结构第 i 层质心在 y 方向相对地面的位移;

θ_i : 主结构第 i 层绕 Z 轴相对于地面的转动位移;

u_{ij} : 第 i 层上子结构第 j 个集中质量在 x 方向相对地面的位移;

v_{ij} : 第 i 层上子结构第 j 个集中质量在 Y 方向相对地面的位移;

m_i : 第 i 层主结构集中质量;

J_i : 第 i 层主结构关于质心的转动惯量;

m_{ij} : 第 i 层上子结构第 j 个集中质量;

N : 主结构层数;

N_i : 第 i 层上子结构集中质量数;

N_{Li} : 主结构第 i 层上柱子数;

(X_{si}, Y_{si}) : 第 i 层子结构关于主结构的水平位置坐标。

限于篇幅, 本文只讨论主、子结构均为层间剪节体系的情况, 并假定各楼层质心位于一条直线上, 对于一般情形的推广, 并无原则困难, 见文献[2]。

对于图 1 所示的主—子结构耦合系统, 系统的总动能和总势能分别表达为:

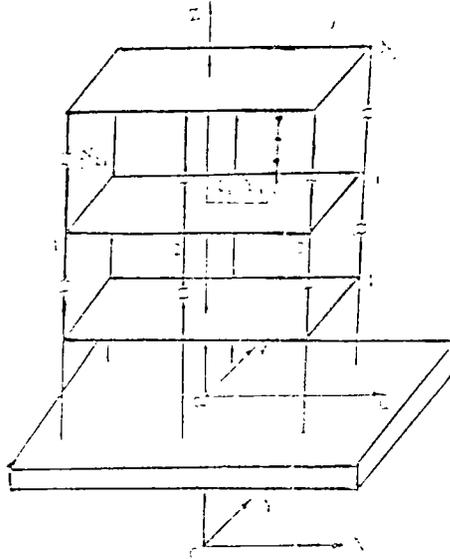


图 1

$$T = \sum_{i=1}^n T_{pi} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} T_{sij} \quad (2)$$

$$V = \sum_{i=1}^n V_{pi} + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{N_i} V_{sij} \quad (3)$$

式中, T_{pi} 、 V_{pi} 分别表示第 i 层主结构系统的动能、势能, 其中, T_{pi} 由板的平动动能, 平面内转动动能等组成, V_{pi} 由柱子的弹性变形能等组成, T_{sij} 、 V_{sij} 分别表示第 i 层结构上的设备系统第 j 个集中质量的平动动能和弹性变形势能, 将 (2) (3) 式代入有势力的拉格朗日方程中:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}_i} \right) + \frac{\partial V}{\partial u_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4a)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{v}_i} \right) + \frac{\partial V}{\partial v_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4b)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}_i} \right) + \frac{\partial V}{\partial \theta_i} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4c)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}_{ij}} \right) + \frac{\partial V}{\partial u_{ij}} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, N_i \quad (4d)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{v}_{ij}} \right) + \frac{\partial V}{\partial v_{ij}} = 0 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad j = 1, 2, \dots, N_i \quad (4e)$$

注意到边界条件:

$$u_o = 0 \quad v_o = 0 \quad \theta_o = 0 \quad (5)$$

即可给出不考虑阻尼力的动力方程:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{u}_g\} \quad (6)$$

式中:

$$\{u\} = \{u_1, \dots, u_N; v_1, \dots, v_N; \theta_1, \dots, \theta_N; u_{11}, \dots, u_{1N_1}; \dots; u_{i1}, \dots, u_{iN_i}; \dots; u_{N1}, \dots, u_{NN_N}; v_{11}, \dots, v_{1N_1}; \dots; v_{i1}, \dots, v_{iN_i}; \dots; v_{N1}, \dots, v_{NN_N}; \dots; C_{NN_N}\}^T \quad (7)$$

$$\{u_g\} = \left[\underbrace{x_g, \dots, x_g}_{N \uparrow}; \underbrace{Y_g, \dots, Y_g}_{N \uparrow}; \underbrace{\theta, \dots, \theta}_{N \uparrow}; \right. \\ \left. x_g, \dots, x_g; Y_g, \dots, Y_g \right]^T \\ \sum_{i=1}^n N_i \uparrow \quad \sum_{i=1}^n N_i \uparrow \quad (8)$$

$$[M] = \text{diag}(m_1, \dots, m_N; m_1, \dots, m_N, J_1^*, \dots, J_N^*; \\ m_{11}, \dots, m_{1N_1}; \dots; m_{N1}, \dots, m_{NN_N}; \\ m_{11}, \dots, m_{1N_1}; \dots; m_{N1}, \dots, m_{NN_N}) \quad (9)$$

其中: $J_i^* = J_i + \sum_{j=1}^{N_i} m_{ij}(x_{si}^2 + y_{si}^2)$ (10)

$$[K] = \begin{bmatrix} [K_{xx}] & [0] & [K_{x\theta}] & [K_{pax}] & [0] \\ [0] & [K_{yy}] & [K_{y\theta}] & [0] & [K_{psy}] \\ [K_{\theta x}] & [K_{\theta y}] & [K_{\theta\theta}] & [K_{p\theta x}] & [K_{p\theta y}] \\ [K_{spx}] & [0] & [K_{sx\theta}] & [K_{sx}] & [0] \\ [0] & [K_{spx}] & [K_{sy\theta}] & [0] & [K_{sy}] \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中, 部分子矩阵的具体表达式如下:

$$[K_{xx}] = \begin{bmatrix} k_{x1} + k_{x2} + k_{x11} & & -k_{x2} & & \\ & -k_{x2} & k_{x2} + k_{x3} + k_{x21} & & -k_{x3} \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & -k_{xi} & k_{xi} + k_{x(i+1)} + k_{xi1} & -k_{x(i+1)} \\ & & & \dots & \dots \\ & & & -k_{xN} & k_{xN} + k_{xN1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$[K_{x\theta}] = \begin{bmatrix} K_{x\theta1} + K_{x\theta2} + k_{x11} Y_{s1} & & -K_{x\theta2} & & \\ & -k_{x\theta2} & k_{x\theta2} + k_{x\theta3} + k_{x21} Y_{s2} & & -k_{x\theta3} \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & -k_{x\theta i} & k_{x\theta i} + k_{x\theta(i+1)} + k_{xi1} Y_{si} & -k_{x\theta(i+1)} \\ & & & \dots & \dots \\ & & & -k_{x\theta N} & k_{x\theta N} + k_{xN1} Y_{sN} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$[K_{\theta\theta}] = \begin{bmatrix} k_{\theta\theta1} + k_{\theta\theta2} + k_1 & & -k_{\theta\theta2} & & \\ & -k_{\theta\theta2} & k_{\theta\theta2} + k_{\theta\theta3} + k_2 & & -k_{\theta\theta3} \\ & & \dots & \dots & \dots \\ & & -k_{\theta\theta i} & k_{\theta\theta i} + k_{\theta\theta(i+1)} + k_i & -k_{\theta\theta(i+1)} \\ & & & \dots & \dots \\ & & & -k_{\theta\theta N} & k_{\theta\theta N} + k_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

其中

$$k_1 = k_{x11}y_{s1}^2 + k_{y11}x_{s1}^2 \quad (15a)$$

$$k_2 = k_{x21}y_{s2}^2 + k_{y21}x_{s2}^2 \quad (15b)$$

$$k_i = k_{xi1}y_{si}^2 + k_{yi1}x_{si}^2 \quad (15c)$$

$$k_n = k_{xN1}y_{sN}^2 + k_{yN1}x_{sN}^2 \quad (15d)$$

$$[K_{psx}] = \begin{bmatrix} [K_{psx1}] & & & \\ & [K_{psx2}] & & \\ & \dots & \dots & \\ & & & [K_{psxN}] \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中 $[K_{psx}] = [-k_{x11}, 0, 0, \dots, 0]_{1 \times Ni}$ (17)

$$[K_{p\theta x}] = \begin{bmatrix} [K_{p\theta x1}] & & & \\ & [K_{p\theta x2}] & & \\ & \dots & \dots & \\ & & & [K_{p\theta xN}] \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中 $[K_{p\theta xi}] = [k_{xi1}y_{si}, 0, 0, \dots, 0]_{1 \times Ni}$ (19)

$$[K_{spx}] = \begin{bmatrix} [K_{spx1}] & & & \\ & [K_{spx2}] & & \\ & \dots & \dots & \\ & & & [K_{spxN}] \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中 $[K_{psxi}] = [-k_{xi1}, 0, 0, \dots, 0]_{Ni \times 1}^T$ (21)

$$[K_{s\theta}] = \begin{bmatrix} [K_{sx\theta 1}] & & & \\ & [K_{sx\theta 2}] & & \\ & \dots & \dots & \\ & & & [K_{sx\theta N}] \end{bmatrix} \quad (22)$$

其中 $[K_{px\theta i}] = [k_{xi1}y_{si}, 0, 0, \dots, 0]_{Ni \times 1}^T$ (23)

$$[K_{sx}] = \begin{bmatrix} [K_{sx1}] & & & \\ & [K_{sx2}] & & \\ & \dots & \dots & \\ & & & [K_{sxN}] \end{bmatrix} \quad (24)$$

其中

$$[K_{xij}] = \begin{bmatrix} k_{xi1} + k_{xi2} & -k_{xi2} & & & \\ -k_{xi2} & k_{xi2} + k_{xi3} & -k_{xi3} & & \\ & \dots & \dots & \dots & \\ & -k_{xij} & k_{xij} + k_{xi(j+1)} & -k_{xi(j+1)} & \\ & & -k_{xiNi} & k_{xiNi} & \end{bmatrix} \quad (25)$$

(12)~(25)式中 K 表示主结构刚度, k 表示子结构刚度。

2 阻尼模型选取

在前面推导中, 没有考虑阻尼力的影响, 正如本文所强调的, 我们仅限于有势力的拉格朗日方程建模, 这样做的原因主要是为了建模的方便。

阻尼产生的机理是相当复杂的, 一般说来, 它既含有结构自身材料特征的影响, 又包括了结构周围介质与结构相互影响。因此, 要完全反映结构的阻尼机理, 在目前尚存有较大困难, 本文采用瑞利阻尼假定构造结构—设备体系的阻尼矩阵, 在此前提下, 进一步考虑结构—设备体系各部分阻尼存在差异的基本事实, 本文建议采用下式来构造阻尼矩阵:

$$[C] = \begin{bmatrix} [C]_p \\ [C]_s \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$\text{式中, } [C]_p = a_p [M]_p + b_p [K]_p \quad (27a)$$

$$[C]_s = a_s [M]_s + b_s [K]_s \quad (27b)$$

上述阻尼矩阵对于结构、设备分别采用不同的线性组合系数(a_p , b_p)和(a_s , b_s), 这些系数分别由结构、设备的给定阻尼比来反映, 可以统一表达为:

$$a = 2\left(\frac{\xi_i}{\omega_i} - \frac{\xi_j}{\omega_j}\right) / \left(\frac{1}{\omega_i^2} - \frac{1}{\omega_j^2}\right) \quad (28a)$$

$$b = 2(\xi_i \omega_i - \xi_j \omega_j) / (\omega_i^2 - \omega_j^2) \quad (28b)$$

式中, ξ_i 为第 i 振型的阻尼比, ω_i 为第 i 振型的圆频率。

加入阻尼矩阵以后的结构—设备体系的动力方程可以表达为:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{\ddot{r}_g\} \quad (29)$$

3 数值分析

为了验证本文所提出模型的适用性, 用本文所提出的模型计算结果和结构—设备体系的振动台实验结果进行了对比分析, 该实验采用对称和偏心两种模型^[3], 台面输入为双向水平 pasadena 地震波, 计算所采用的结构—设备体系简图见图 2、图 3。

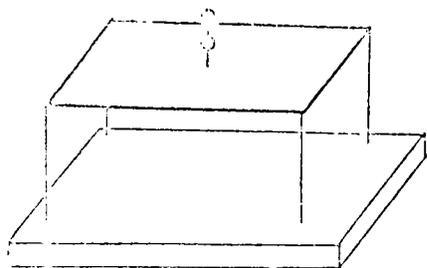


图 2

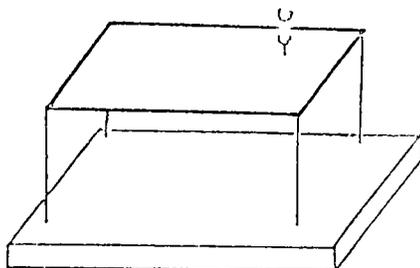


图 3

利用本文所提出模型，编制了计算机程序，采用逐步积分法计算结构的时程响应，图 4 表示对称体系顶层集中质量部分 Y 方向的计算结果与实验结果的加速度时程比较，图 5 表示偏心体系顶层集中质量部分 X 方向的计算结果与实验结果的加速度时程反应比较，图中实线表示实验结果，虚线表示计算结果。

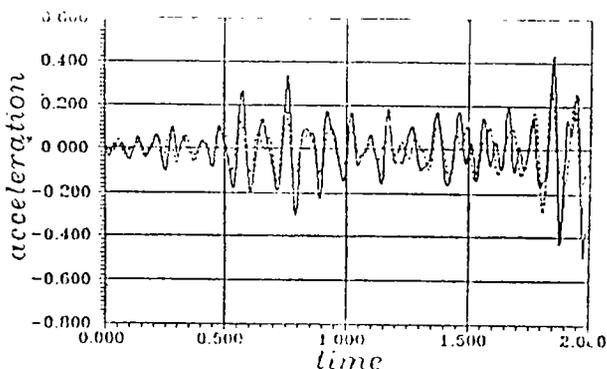


图 4

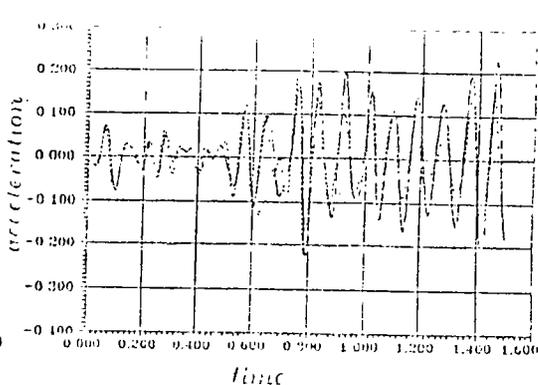


图 5

从图 4、图 5 可以看出，计算结果与模型实验结果良好吻合，这说明本文所提方法的适用性。

4 结语

4.1 本文应用有势力的拉格朗日方程建立了结构—设备体系的动力方程，并具体给出了剪切体系等的动力方程矩阵表达式，本文模型可以考虑结构的空扭耦合效应，经过数值算例和实验记录比较，在弹性阶段计算结果和实验记录良好吻合，说明本文所提方法正确，计算可靠，该模型可以用来研究结构—设备动力相互作用，这对于深化结构—设备动力相互作用理论的研究具有积极的意义。

4.2 本文所提出的模型并未限制设备的质量较小，比较符合工业结构设备的现状，并重点考虑了设备非对称布置这一情况，具有一定实用价值。

4.3 从系统分析的观点看, 结构—设备体系可以视为工业系统抗震可靠性分析的动力耦联单元, 深入研究这种基本单元的地震反应机理, 对于分析工业系统的抗震薄弱环节具有基础性的意义。

参 考 文 献

- 1 李杰, 陈淮, 赵晓. 结构—设备动力相互作用研究综述. 世界地震工程. 1994年第2期.
- 2 赵晓. 结构—设备体系地震反应分析模型研究与程序实现. 郑州工学院硕士学位论文. 1993年4月.
- 3 李杰. 多维地震波输入的结构—设备模型振动台试验研究. 土木工程防灾国家重点试验室基金项目研究报告. 1992年
- 4 李杰, 李国强. 地震工程学导论. 地震出版社. 1992年

Modeling of the space structure—equipment dynamic system

Zhao Xiao Li Jie
(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: In recent years, the aseismic performance analysis of the industrial structure and the industrial system is a new research direction in the earthquake engineering. To the problems existing in the dynamic analysis of the combined structure—equipment system, this paper centers on the establishment of the space structure—equipment system dynamic model. By using of the potential legrange equation, the detailed dynamic matrix expressions are derived for the storey shear system, on the base, we make a comparison analysis of the results of test and that of computing analysis.

Keywords: structure—equipment, dynamics interaction, earthquake rection