

文章编号: 1000_0887(2005) 07_0785_09

地基_结构相互作用系统的时域参数识别^{*}

黄 义, 刘增荣

(西安建筑科技大学 土木工程学院, 西安 710055)

(我刊原编委黄义来稿)

摘要: 提出地基_结构相互作用系统的时域参数识别方法。在建立地基_结构相互作用的计算模式和运动方程的基础上, 运用扩展的卡尔曼滤波技术, 将相互作用系统中的参数作为增加的状态变量, 建立了该系统的时域参数识别方法。并依据大型振动台条件下的层状地基_贮仓结构相互作用系统的模型试验数据, 实施了地基_结构相互作用系统时域参数识别的全过程。计算结果表明, 该方法产生良好的参数估计。

关键词: 地基_结构; 相互作用系统; 时域参数识别

中图分类号: TU470 **文献标识码:** A

引 言

在地基_结构的动力相互作用分析中, 计算模型中计算参数的确定是个关键性环节。

本文尝试采取参数识别的方法对地基_结构相互作用系统中的参数矩阵进行确定。在建立地基_结构相互作用的计算模式和运动方程的基础上, 运用扩展的卡尔曼滤波技术, 将相互作用系统中的参数作为增加的状态变量, 建立了该系统的时域参数识别方法。并依据大型振动台条件下的层状地基_贮仓结构相互作用系统的模型试验数据, 实施了地基_结构相互作用系统时域参数识别的全过程。

所进行的这种地基_结构相互作用系统的时域参数识别研究, 在目前国内外土木界土_结构动力相互作用研究领域和参数识别领域中, 尚属首次; 本文所建立的时域参数识别方法, 可为地基_结构相互作用分析提供一种新的参数确定方法, 同时可提高预测地震荷载作用下地基_结构相互作用效应的精度。因而, 所进行的研究, 具有重要的理论和实践意义。

1 计算模式和运动方程

假设

1) 将地表以下至基岩范围内的土层视为水平分层土层, 每层均匀地扩展在一个宽阔的平面上, 各水平土层的质量集中在一垂向单位土柱的相应层位上。

* 收稿日期: 2003_05_23; 修订日期: 2004_04_12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59978038)

作者简介: 黄义(1936—), 男, 陕西汉中人, 教授, 博士生导师;

刘增荣(1954—), 男, 陕西韩城人, 教授, 博士, 博士生导师(联系人: Tel: + 86_29_88491632;

E_mail: liuzengrong1954@yahoo.com.cn)。

2) 基岩与其上土层的结合面为水平面,且基岩只作水平运动,则水平土层只产生水平的剪切运动,并且只与竖向坐标有关而与水平坐标无关^[1]。

3) 结构的基础是刚性的,其平面形状为圆形或矩形,基础设置在地基表面上,基础与地基表面之间没有滑移和分离^[2,3]。

4) 将结构简化为具有多个集中质量的多质点体系,每个集中质量点上具有相对水平位移 ξ_{ci} 和相对转角 θ_{ci} 。

5) 地震荷载传至结构基底的作用仅考虑水平作用。

根据上述假设,可构成地基_结构相互作用系统的计算模型(图1)。

由图1所示地基_结构相互作用系统,可导出该系统的运动方程为:

$$M_c \ddot{V}_c + C_c \dot{V}_c + K_c V_c = -M_b \ddot{V}_b - C_b \dot{V}_b - K_b V_b, \quad (1)$$

其中, M_c 、 C_c 、 K_c 为地基参数矩阵, V_c 是地基土层自由场运动, V_b 是基岩的输入运动, M_b 、 C_b 、 K_b 表示地基参数矩阵中与基岩运动 \dot{V}_b 、 \dot{V}_c 、 V_c 相对应的项。

当结构附加于地基上时,即使由基岩运动引起的有效荷载保持不变,但由于地基与结构相互作用的缘故,地基_结构相互作用系统的运动方程可表示为:

$$[M_c + M_c] \left\{ \ddot{V}_c + \ddot{V}_c^t \right\} + [C_c + C_c] \left\{ \dot{V}_c + \dot{V}_c^t \right\} + [K_c + K_c] \left\{ V_c + V_c^t \right\} = -M_b \ddot{V}_b - C_b \dot{V}_b - K_b V_b, \quad (2)$$

其中, M_c 、 C_c 、 K_c 是上部结构的参数矩阵, V_c^t 是由于结构置于该地基土层上所引起的附加反应。

考虑到上式右端项的有效力输入是以基岩运动形式表示的,而这种形式的反应方程是不常用的,故而由(1)式中左端项表示(2)式中右端的基岩输入力,则得

$$[M_c + M_c] \left\{ \ddot{V}_c + \ddot{V}_c^t \right\} + [C_c + C_c] \left\{ \dot{V}_c + \dot{V}_c^t \right\} + [K_c + K_c] \left\{ V_c + V_c^t \right\} = M_c \ddot{V}_c + C_c \dot{V}_c + K_c V_c, \quad (3)$$

将(3)式进一步变换可得:

$$[M_c + M_c] \ddot{V}_c + [C_c + C_c] \dot{V}_c + [K_c + K_c] V_c = -M_c \ddot{V}_c - C_c \dot{V}_c - K_c V_c. \quad (4)$$

此方程给出地基_结构相互作用系统的附加运动。这种附加运动是由上部结构在地基土层的自由场运动影响下引起的有效力而产生的。

为了简化(4)中的有效力的表达式,将附加位移向量 V_c^t 和自由场位移向量 V_c 进行分块:

$$V_c^t = [V^t \quad V_g^t \quad V_a^t]^T, \quad V_c = [0 \quad V_g \quad V_a]^T, \quad (5)$$

式中: V^t 为上部结构的附加位移; V_g^t 为上部结构与地基土层共同部分的附加位移; V_a^t 地基土层的附加位移; V_g 为上部结构与地基土层共同部分的自由场位移; V_a 地基土层的自由场位移。

与此位移分块矩阵相对应,对所有的物理矩阵进行分块:

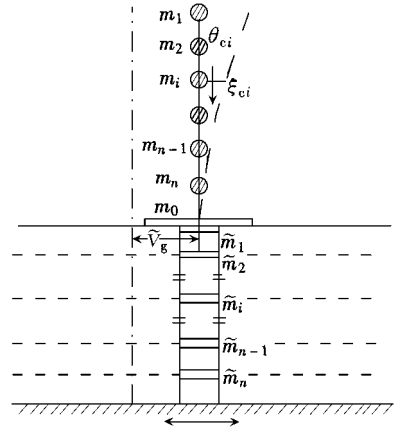


图1 地基_结构相互作用系统
参数识别的计算模式

$$\left\{ \begin{array}{l} M_c = \begin{bmatrix} M^t & M_g & \mathbf{0} \\ M_g^T & M_{gg} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, M_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & M_{gg} & M_{ga} \\ \mathbf{0} & M_{ag} & M_{aa} \end{bmatrix}, \\ C_c = \begin{bmatrix} C^t & C_g & \mathbf{0} \\ C_g^T & C_{gg} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, C_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & C_{gg} & C_{ga} \\ \mathbf{0} & C_{ag} & C_{aa} \end{bmatrix}, \\ K_c = \begin{bmatrix} K^t & K_g & \mathbf{0} \\ K_g^T & K_{gg} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, K_c = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & K_{gg} & K_{ga} \\ \mathbf{0} & K_{ag} & K_{aa} \end{bmatrix}, \end{array} \right. \quad (6)$$

基于这种分块, (4) 式中右端的有效力可由结构的分块物理矩阵的中间一列给出。因而(4)式可简化为:

$$\begin{aligned} & [M_c + M_c] \ddot{V}_c + [C_c + C_c] \dot{V}_c + [K_c + K_c] V_c = \\ & - \begin{bmatrix} M_g \\ M_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \ddot{V}_g - \begin{bmatrix} C_g \\ C_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \dot{V}_g - \begin{bmatrix} K_g \\ K_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} V_g, \end{aligned} \quad (7)$$

将附加位移向量 V_c^s 可表示成动力分量 V_c 与拟静力分量 V_c^s 之和, 即

$$V_c^s = V_c + V_c^s = V_c + r_c V_g, \quad (8)$$

其中 r_c 为影响系数矩阵, 它表示接触自由度产生单位静力自由场位移引起的拟静力位移, 其值可通过静力分析原理的方法导出。亦可从(7)式将动力项去掉的静力方程中导出, 即由(7)式将动力项去掉的静力方程为

$$[K_c + K_c] V_c^s = - [K_g \quad K_{gg} \quad \mathbf{0}]^T V_g$$

解之, 得拟静力位移为

$$V_c^s = - [K_c + K_c]^{-1} [K_g \quad K_{gg} \quad \mathbf{0}]^T V_g = r_c V_g$$

其中

$$r_c = - [K_c + K_c]^{-1} [K_g \quad K_{gg} \quad \mathbf{0}]^T.$$

将(8)式代入(7)式, 有

$$\begin{aligned} & [M_c + M_c] \left\{ \ddot{V}_c + r_c \ddot{V}_g \right\} + [C_c + C_c] \left\{ \dot{V}_c + r_c \dot{V}_g \right\} + [K_c + K_c] \left\{ V_c + r_c V_g \right\} = \\ & - \begin{bmatrix} M_g \\ M_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \ddot{V}_g - \begin{bmatrix} C_g \\ C_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \dot{V}_g - \begin{bmatrix} K_g \\ K_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} V_g, \end{aligned}$$

将拟静力项移至方程右边, 得

$$\begin{aligned} & [M_c + M_c] \ddot{V}_c + [C_c + C_c] \dot{V}_c + [K_c + K_c] V_c = \\ & - \left([M_c + M_c] r_c + \begin{bmatrix} M_g \\ M_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) \ddot{V}_g - \left([C_c + C_c] r_c + \begin{bmatrix} C_g \\ C_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) \dot{V}_g - \\ & \left([K_c + K_c] r_c + \begin{bmatrix} K_g \\ K_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right) V_g, \end{aligned}$$

将

$$r_c = - [K_c + K_c]^{-1} [K_g \quad K_{gg} \quad \mathbf{0}]^T$$

代入上式中后两项,并假定阻尼矩阵与刚度矩阵成反比例,有

$$[K_c + K_c]r_c + [K_g \quad K_{gg} \quad \mathbf{0}]^T = \mathbf{0}, [C_c + C_c]r_c + [C_g \quad C_{gg} \quad \mathbf{0}]^T = \mathbf{0},$$

从而,式(7)可简化为

$$\begin{aligned} & [M_c + M_c] \ddot{V}_c + [C_c + C_c] \dot{V}_c + [K_c + K_c] V_c = \\ & - \left[\begin{array}{c} [M_c + M_c]r_c + \begin{bmatrix} M_g \\ M_{gg} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \\ \vdots \\ V_g \end{array} \right] \end{aligned} \quad (9)$$

此方程即为最终的地基_结构相互作用系统的运动方程

2 地基_结构相互作用系统的参数识别方法

2.1 自由度凝聚

$$\text{令 } [M_c + M_c] = M; [C_c + C_c] = C; [K_c + K_c] = K,$$

则(9)式可表达为:

$$M \ddot{V}_c + C \dot{V}_c + K V_c = - (M r_c + [M_g \quad M_{gg} \quad \mathbf{0}]^T) \ddot{V}_g \quad (10)$$

因为假定阻尼矩阵与刚度矩阵成比例,并且质量矩阵可通过几何测量和材料的抽样试验而获得,故而地基_结构系统参数识别的主要任务为识别系统的刚度矩阵

考虑下面无阻尼系统的参数识别:

$$M \ddot{V}_c + K V_c = - (M r_c + [M_g \quad M_{gg} \quad \mathbf{0}]^T) \ddot{V}_g \quad (11)$$

在地基_结构系统中,系统的附加位移向量 $V_c = \begin{bmatrix} \xi_c \\ \theta_c \end{bmatrix}$. 在该系统的参数识别过程中,为了节省计算量,可用凝聚技术来减少自由度数目. 在凝聚过程中,一般转角自由度 θ_c 很少作为主自由度出现^[4]. 凝聚后,(11)式可表达为仅含水平附加位移向量 ξ_c 的方程,即

$$M_r \ddot{\xi}_c + K_r \xi_c = - (M_r r_c + [M_{gr} \quad M_{ggr} \quad \mathbf{0}]^T) \ddot{V}_g \quad (12)$$

其中 M_r 为在所保留的主自由度 ξ_c 上集结的集中质量矩阵;

$$K_r = K_{\xi_c \xi_c} - K_{\xi_c \theta_c} K_{\theta_c \theta_c}^{-1} K_{\theta_c \xi_c},$$

式中 $K_{\xi_c \xi_c}$ 、 $K_{\xi_c \theta_c}$ 、 $K_{\theta_c \xi_c}$ 、 $K_{\theta_c \theta_c}$ 为 K 中分别对应水平位移 ξ_c 和转角 θ_c 的分块矩阵;

$[M_{gr} \quad M_{ggr} \quad \mathbf{0}]^T$ 为 $M_r = [M_{cr} + M_{cr}]$ 中 M_{cr} 之与接触位移 V_g 相对应的一系列元素

2.2 参数识别方法

在(12)式两边同乘 M_r^{-1} ,则有

$$\ddot{\xi}_c + D \xi_c = - J \ddot{V}_g, \quad (13)$$

式中

$$D = M_r^{-1} K_r, \quad J = r_c + M_r^{-1} [M_{gr} \quad M_{ggr} \quad \mathbf{0}]^T.$$

在有效输入力 $-J \ddot{V}_g$ 的作用下,假定地基_结构相互作用系统中各质点的响 $\xi_c(t)$ 应受到观测噪声 $\eta(t)$ 的影响,从而有:

$$Y(t_k) = \xi_c(t_k) + \eta(t_k), \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (N \text{ 是取样点的数目}), \quad (14)$$

式中 $Y(t_k)$ 为在 $t_k = k \Delta t$ 时刻的观测列向量; $\xi_c(t_k)$ 为在 t_k 时刻的响应列向量; $\eta(t_k)$ 为在 t_k

时刻的观测噪声列向量。假定其为具有零均值和有限协方差矩阵的高斯白噪声,并且独立于 $V_g(t_k), \xi_c(t_k), \xi_c(t_k)$ 。至此,基于给定的时间序列 $Y(t_k) = [Y(t_1) \ Y(t_2) \ \dots \ Y(t_N)]$ 和 $V_g(t_k) = [V_g(t_1) \ V_g(t_2) \ \dots \ V_g(t_N)]$,由估计地基-结构相互作用系统的未知参数矩阵 D 和有效力偶合项 J 可构成系统的参数识别问题。

将未知参数矩阵 D 和有效力偶合项 J 视为状态变量,则可定义状态矢量为

$$X^T = [\xi_c^T \ \xi_c^T \ D_1^T \ D_2^T \ \dots \ D_N^T \ J_1 \ J_2 \ \dots \ J_N], \quad (15)$$

式中 D_l 为 D 为矩阵中的列, J_l 为 J 列向量中的元素。

式(13)和式(14)可表示为下面的非线性状态方程:

$$\dot{X} = f(X, V_g, t), \quad (16)$$

$$Y(t_k) = CX(t_k) + \eta(t_k), \quad (17)$$

其中 f 为 $(3n + n^2)$ 维矢量(当 $i > 2n + 1, f_i = 0, n$ 为自由度个数)。并且

$$C = I\Phi, \quad (18)$$

其中 Φ 表示 $n(2n + n^2)$ 维零矩阵,而 $I = n \times n$ 维单位阵。

对于方程(16)和(17),运用扩展的卡尔曼滤波技术(EKF),能由观测到的数据 $Y(t_k)$ 和 $V_g(t_k)$ 可估计出状态变量 $X(t)$,从而能够估计出未知参数矩阵 D 和有效力偶合项 J 值。扩展的卡尔曼滤波(EKF)计算过程如下^[5-7]:

1) 存储滤波状态:

$$(X(t_k | t_k), P(t_k | t_k)) \quad (19)$$

2) 计算预测状态:

$$X(t_{k+1} | t_k) = X(t_k | t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} f(t | t_k, t) dt \quad (20)$$

3) 计算预测误差协方差矩阵

$$P(t_{k+1} | t_k) = \Phi(t_{k+1}, t_k; X(t_k | t_k)) P(t_k | t_k) \Phi^T(t_{k+1}, t_k, X(t_k | t_k)) \quad (21)$$

4) 计算滤波增益矩阵:

$$K(t_{k+1}; X(t_{k+1} | t_k)) = P(t_{k+1} | t_k) C^T (CP(t_{k+1} | t_k) C^T + \eta)^{-1} \quad (22)$$

5) 处理观测数据:

$$X(t_{k+1} | t_{k+1}) = X(t_{k+1} | t_k) + K(t_{k+1}; X(t_{k+1} | t_k)) (Y(t_{k+1}) - CX(t_{k+1} | t_k)) \quad (23)$$

6) 计算新的误差协方差矩阵:

$$P(t_{k+1} | t_{k+1}) = (I - K(t_{k+1}; X(t_{k+1} | t_k)) C) P(t_{k+1} | t_k) (I - K(t_{k+1}; X(t_{k+1} | t_k)) C)^T + K(t_{k+1}; X(t_{k+1} | t_k)) \eta K^T(t_{k+1}; X(t_{k+1} | t_k)) \quad (24)$$

(7) 令 $t_k = t_{k+1}$, 并且返回步骤 1)。

从以上步骤可看出,如果初始状态 $X(t_0 | t_0), P(t_0 | t_0)$ 给出,对于所有 t_k 的可计算出估计状态 $X(t_k | t_k)$ 。然而,在本文地基-结构相互作用系统的参数识别研究中, $X(t_0 | t_0), P(t_0 | t_0)$ 是未知的,其原因在于状态矢量 X 将未知参数作为它的元素(参见式(15))。因而,须用下述总体迭代方法对所求问题进行求解。即:首先以初始的猜测值和利用 EKF 技术求 $X(t_N | t_N)$ (其中 N 为取样点数),然后将前轮计算所得结果作为后一轮计算的初始值,再次应用

EKF 技术以获得更好的估计。不断重复以上过程,直到所求状态变量收敛到所需精度为止。

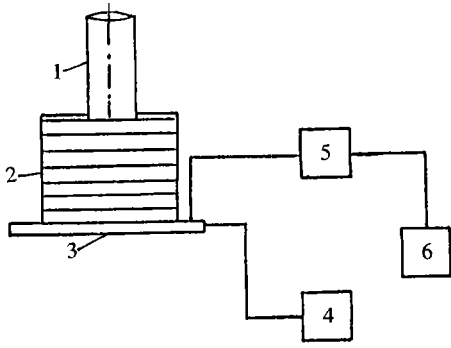


图2 地基_贮仓结构相互作用系统模型
试验系统示意图

- (1. 贮仓结构模型, 2. 层状地基模型, 3. 美国 UD 公司 2XSA60_T1000_32WL 型电磁振动台,
- 4. VIW_n 数字振动控制系统,
- 5. CVA_8 型电荷放大器, 6. SI1202 结构分析仪)

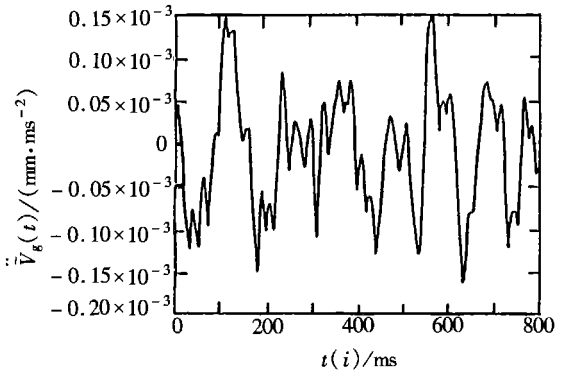


图3 试验所测 $\ddot{V}_g(t)$ 曲线

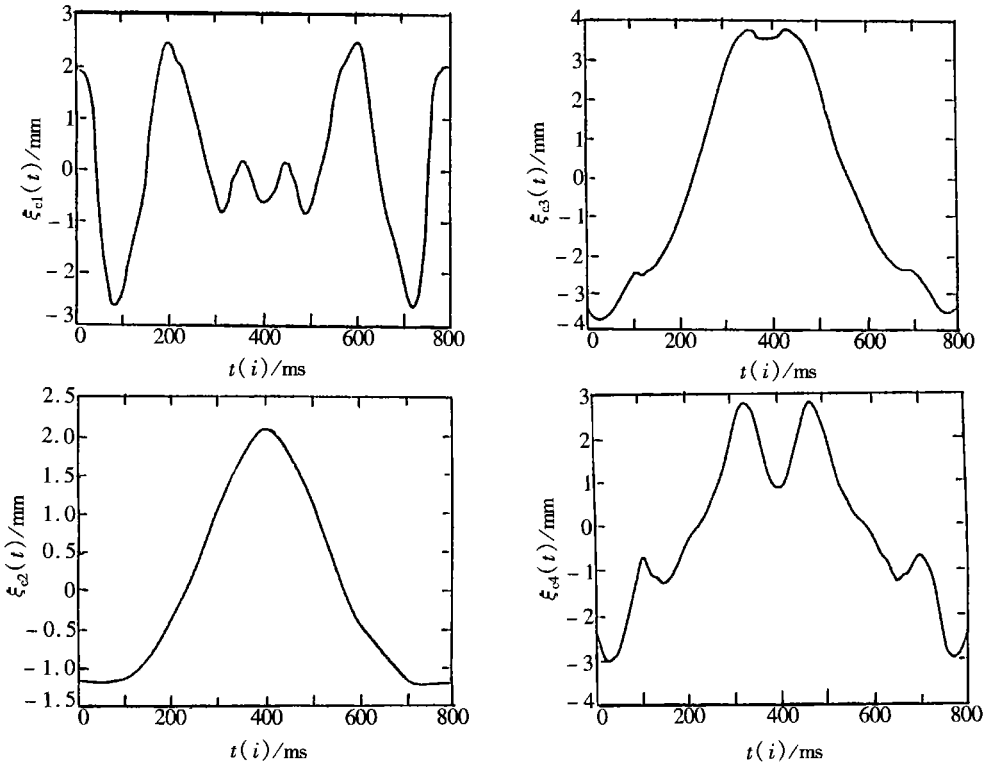


图4 试验所测 $\xi_c(t)$ 曲线

2.3 地基_结构相互作用系统时域参数识别的实施

为了验证所建立的地基_结构相互作用系统的参数识别方法,我们课题组进行了层状地基_贮仓结构相互作用系统的模型振动台试验。试验在电子部二十所“环境模拟与可靠性试验中

心”进行^[8~10]。试验系统示意图见图2。依据试验所测 V_g , ξ_c 值(图3和图4), 对未知参数矩阵 D 进行了识别。

根据图1所示计算模型, 取 $i = 4$, 系统的非线性状态方程可写为:

$$\begin{aligned} \dot{X}^T = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{28}] = [& \xi_{c1} \quad \xi_{c2} \quad \xi_{c3} \quad \xi_{c4} \quad \xi_{s1} \quad \xi_{s2} \quad \xi_{s3} \quad \xi_{s4} \quad D_{11} \quad D_{21} \\ & D_{31} \quad D_{41} \quad D_{12} \quad D_{22} \quad D_{32} \quad D_{42} \quad D_{13} \quad D_{23} \quad D_{33} \\ & D_{43} \quad D_{14} \quad D_{24} \quad D_{34} \quad D_{44} \quad J_1 \quad J_2 \quad J_3 \quad J_4], \end{aligned} \quad (25)$$

$$\dot{X} = f(X, V_g, t), \quad Y(t_k) = CX(t_k) + \eta(t_k), \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (26)$$

其中 f 的元素如下:

$$\begin{cases} f_1 = \dot{x}_5, f_2 = \dot{x}_6, f_3 = \dot{x}_7, f_4 = \dot{x}_8, \\ \dots \\ f_5 = - (x_9x_1 + x_{13}x_2 + x_{17}x_3 + x_{21}x_4) - x_{25}V_g, \\ \dots \\ f_6 = - (x_{10}x_1 + x_{14}x_2 + x_{18}x_3 + x_{22}x_4) - x_{26}V_g, \\ \dots \\ f_7 = - (x_{11}x_1 + x_{15}x_2 + x_{19}x_3 + x_{23}x_4) - x_{27}V_g, \\ \dots \\ f_8 = - (x_{12}x_1 + x_{16}x_2 + x_{20}x_3 + x_{24}x_4) - x_{28}V_g, \\ f_i = 0, \text{ 当 } 9 \leq i \leq 28. \end{cases} \quad (27)$$

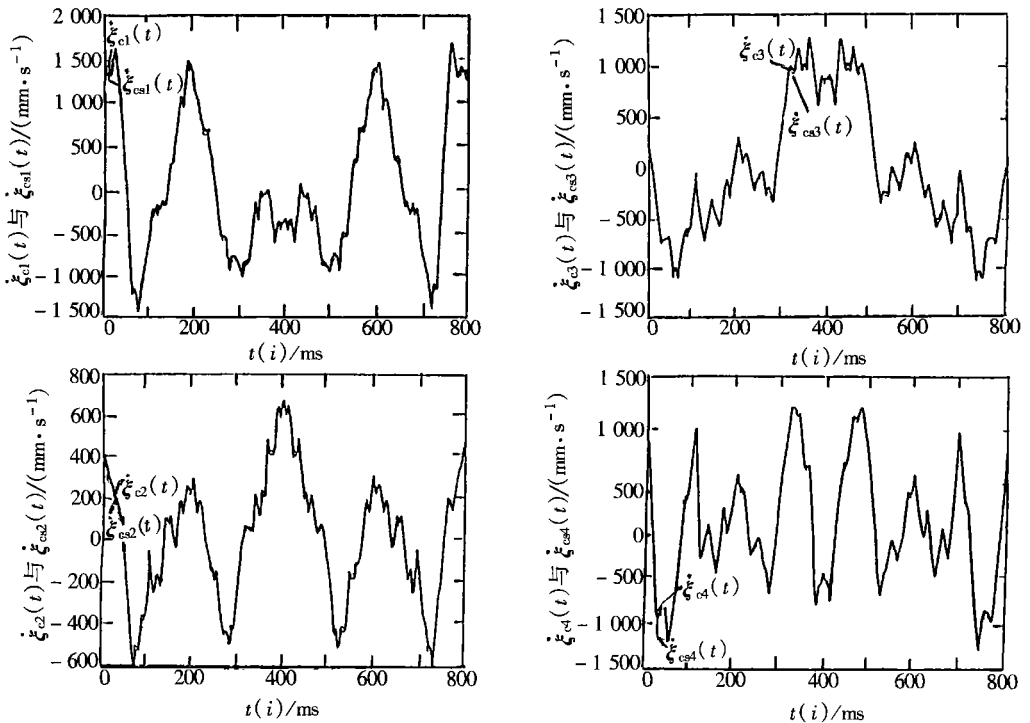


图5 识别出的速度值 $\xi_{c_i}(t)$ 与测量得到的速度值 $\xi_{cs_i}(t)$ 的比较

通过对观测响应数据 $\xi_c(t_k)$ 添加噪声 $\eta(t_k)$ ($\eta(t_k)$ 的强度假定为响应值 $\xi_c(t_k)$ 的均方根值的5%) 构成 $Y(t_k)$; 数据分析的时间长度 $t = 800$ ms, 取样点数 $N = 1024$, 时间间隔 $\Delta t = 0.782$ ms。图5示出了估计的速度值与观测的速度值的比较; 图6示出了与识别出的未知参数矩阵 D 中对角线元素相对应的估计误差均方根值; 表1示出了未知参数矩阵 D 值的识别结果。由图5可看出估计的速度值与观测的速度值基本一致; 由图6可看出, 随着迭代次数的

增加, 识别值与观测值之间的误差标准差趋于零。由此可见, 所建立的地基_结构相互作用系统的时域参数识别方法, 可产生良好的参数估计。

表 1 识别出的参数矩阵 D

元素	初始值	识别值	元素	初始值	识别值
D_{11}	1.000 0	0.052 6	D_{31}	1.000 0	0.199 9
D_{12}	1.000 0	- 0.085 8	D_{32}	1.000 0	- 0.414 1
D_{13}	1.000 0	0.382 1	D_{33}	1.000 0	2.087 3
D_{14}	1.000 0	0.132 0	D_{34}	1.000 0	0.111 7
D_{21}	1.000 0	- 0.023 3	D_{41}	1.000 0	0.375 4
D_{22}	1.000 0	2.366 5	D_{42}	1.000 0	0.249 5
D_{23}	1.000 0	- 0.119 9	D_{43}	1.000 0	1.267 3
D_{24}	1.000 0	0.165 2	D_{44}	1.000 0	1.913 0

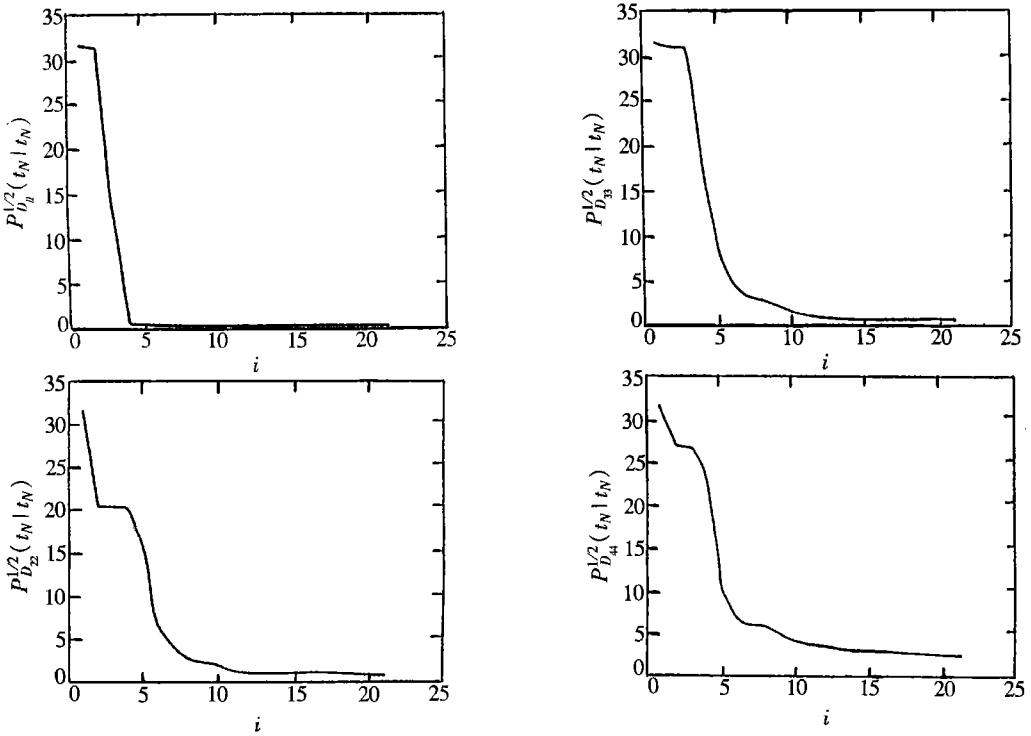


图 6 与 D 阵中对角线元素相对应的估计误差无方根值

$P_{D_{ii}}^{1/2}(t_N | t_N)$ 随迭代次数 i 的变化

3 结 论

本文对地基_结构相互作用系统的参数识别问题进行了系统的研究, 建立了该系统的时域参数识别方法; 并依据层状地基_贮仓结构相互作用系统模型试验所得数据, 实施了该系统的时域参数识别过程。计算结果表明, 所建立的时域参数识别方法, 可对地基_结构相互作用系统产生良好的参数估计, 首次解决了地基_结构这类复合系统的时域参数识别问题。

[参 考 文 献]

- [1] 张克绪, 谢君斐. 土动力学[M]. 北京: 地震出版社, 1989, 15—65.
- [2] Parmelee R A. Building foundation interaction effects[J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1967, **93**(EM2): 131—152.
- [3] Tajimi H. Discussion on building foundation interaction effects[J]. Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE, 1967, **93**(EM6): 294—298.
- [4] R D 库克. 有限元分析的概念和应用[M]. 程耿东 译. 北京: 科学出版社, 1989, 79—155.
- [5] YUN Chung_bang, Masanobu Shinozuka. Identification of nonlinear structural dynamic systems[J]. Journal Structural Mechanics, 1980, **8**(2): 187—203.
- [6] Andrew H Jazwinski. Stochastic Processes and Filtering Theory [M]. New York and London: Academic Press, 1970, 162—193; 266—329.
- [7] Erdal Safak. Identification of linear structures using discrete_time filters[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, **117**(10): 3064—3085.
- [8] 刘增荣. 层状动力地基、贮仓结构、层状地基—贮仓结构相互作用系统的参数识别[D]. 博士论文, 西安: 西安建筑科技大学, 1999, 87—100.
- [9] 刘增荣, 黄义. 基岩输入运动未知条件下的地基参数识别[J]. 岩土工程学报, 2000, **22**(6): 723—726.
- [10] 刘增荣, 黄义, 邵江. 贮仓结构参数的频域识别[J]. 振动与冲击, 2001, **20**(1): 79—81.

Time Domain Parameters Identification of Foundation_Structure Interaction System

HUANG Yi, LIU Zeng_rong

(Xi'an Architecture Science and Technology University,

Xi'an 710055, P. R. China)

Abstract: The time domain parameter identification method of the foundation_structure interaction system is presented. On the basis of building the computation mode and the motion equation of the foundation_structure interaction system, the system parameter identification method was established by using the Extended Kalman Filter technique and taking the unknown parameters in the system as the augment state variables. And the time parameter identification process of the foundation_structure interaction system was implemented by using the data of the layer foundation_storehouse interaction system model test on the large vibration platform. The computation result shows that the established parameter identification method can induce good parameter estimation.

Key words: foundation_structure; interaction system; time domain parameter identification