

文章编号: 1000-4750(2007)02-0009-06

考虑作动器时滞及其补偿的实时子结构 实验稳定性分析

王倩颖, *吴 斌, 欧进萍

(哈尔滨工业大学, 土木工程学院, 哈尔滨, 150090)

摘 要: 实时子结构实验中, 使用液压伺服作动器作为加载设备时会出现作动器响应的时滞问题。根据作动器的动力特性, 提出液压伺服作动器阶跃响应的双线性简化模型。基于该模型, 以 OS 法(Operator-Splitting method)和中心差分法为例, 利用谱半径方法分析了作动器时滞及其补偿对实验稳定性的影响。分析结果表明, 作动器时滞使实验的稳定性降低, 三阶外插补偿可以提高实验的稳定性。此外, 分析结果也表明 OS 法的稳定性好于中心差分法。

关键词: 结构实验技术; 实时子结构实验; 时滞; 补偿; OS 法; 中心差分法

中图分类号: TU317 **文献标识码:** A

STABILITY ANALYSIS OF REAL-TIME SUBSTRUCTURE TESTING CONSIDERING ACTUATOR DELAY AND COMPENSATION

WANG Qian-ying, *WU Bin, OU Jin-ping

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: In real-time substructure testing (RST) with a hydraulic actuator as the loading devices, there is an inevitable time delay of actuator response. This paper introduces a bilinear step response model based on the basic dynamics of an actuator. With this model, the effects of time delay and compensation of integration methods in RST are analyzed using spectrum radius method. The specific time stepping methods under investigation are the operator-splitting method and the central difference integration method. The analysis results show that the time delay will reduce the stability of RST response, while the 3rd-order polynomial compensation can improve the stability effectively. The results also show that the stability of the operating-splitter method is better than that of the central difference method.

Key words: seismic testing; real-time substructure testing; delay; compensation; operator-splitting method; central difference method

收稿日期: 2005-06-27; 修改日期: 2005-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(50338020); 国家高科技发展计划(863 计划子课题)(2003AA602150)

作者简介: 王倩颖(1978), 女, 哈尔滨人, 博士, 从事防灾减灾研究;

*吴 斌(1970), 男, 武汉市人, 教授, 博士, 从事结构工程及防灾减灾研究(E-mail: bin.wu@hit.edu.cn);

欧进萍(1959), 男, 湖南宁远人, 教授, 博士, 院士, 副校长, 从事防灾减灾及工程力学研究。

1 引言

传统的结构抗震实验可以分为静力往复循环实验、伪动力实验^[1-3]和振动台实验^[4-8],实时子结构实验是由伪动力实验发展而来的一种新的实验技术。这种实验技术把结构中非线性的部分作为实验子结构进行实时实验,而结构的其余部分作为数值子结构利用计算机模拟。随着速度相关型阻尼器日益广泛地应用于工程实践^[9],实时子结构实验吸引了越来越多学者的关注^[10-15]。

在实时子结构实验中,通常采用液压伺服作动器作为实验子结构的驱动装置,这就不可避免地需要面对液压伺服作动器的时滞问题,即发送给液压伺服作动器信号和作动器到达指定位移之间的时间滞后问题。Horiuchi 等^[11]的研究发现,在线性系统中,时滞相当于给结构附加了一个负阻尼,其大小与结构的刚度成正比,当这个负阻尼大于结构本身的阻尼时,实验将失去稳定性。这样使得实时子结构实验只能在小刚度或大阻尼的结构上进行,限制了实时子结构实验的应用。Horiuchi 等尝试通过外插命令信号,即提前发送一步或几步的命令信号来进行时滞补偿,通过研究发现利用三阶外插补偿能够很好地满足精度与稳定性的要求。文献[11]中关于时滞问题的稳定性研究是基于结构做连续的正弦运动和连续 Laplace 变换的,并且脱离了具体的数值积分方法。由于实时子结构实验的离散特性,离散的方法比连续的方法更适合于研究实时子结构实验的时滞补偿问题。因此,将时滞补偿问题与实验中所使用的数值积分方法结合起来研究其稳定性是不可避免的。本文提出一种简化的作动器阶跃响应模型,在此模型的基础上采用 OS 算法^[13]和中心差分法^[12]作为实时子结构实验数值积分方法,分析了时滞对实验稳定性的影响和采用三阶外插补偿作为时滞补偿方法时实验的稳定性。

2.1 作动器动力特性的简化模型

哈尔滨工业大学力学与结构实验中心的 63 吨 Schenck 作动器的阶跃响应如图 1 所示。由图 1 可见,位移的阶跃响应是曲线形式的。为了便于分析,把阶跃响应简化为图 1 中粗点线所示的双线性形式,认为达到目标位移的 95%即为达到目标位移。图 1 所示的情况是单步响应的幅值为 2 (-1~1),阶跃指令信号发生于 2.78 秒,2.88 秒的的位移达到 0.9(响应达到 1.9),即可

以认为响应达到目标位移。则 $t_d = 0.1s$, $t_d = 0.1s$, $t_d = t_d$ 为作动器阶跃响应时滞。

在实时子结构实验中, t_{i+1} 时刻的作动器响应可以认为是 t_{i+1} 时刻和前面各时刻位移命令的总效应。假定作动器和试件是线性体系,则作动器第 $i+1$ 步的总响应 d'_{i+1} 可以由前面各步位移增量命令 Δd_j 的响应叠加得到,这里 $\Delta d_j = d_j - d_{j-1}$ ($j = 1, 2, \dots, i+1$),其中 d_j 是位移命令。因此 d'_{i+1} 可按下式计算

$$d'_{i+1} = \sum_{j=1}^{i+1} R[\text{STEP}(\Delta d_j, t - t_{j-1})] \quad (1)$$

式中 $\text{STEP}(\Delta d_j, t - t_{j-1})$ 表示幅值为 Δd_j , 起始时刻为 t_{j-1} 的阶跃函数。 $R(\cdot)$ 表示图 1 中的双线性阶跃响应。作动器响应的叠加效果见图 2。

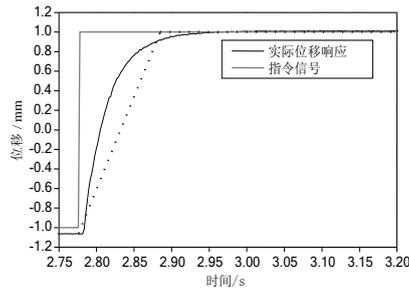


图 1 63 吨 Schenck 作动器的阶跃响应

Fig.1 Step response of 630kN Schenck actuator

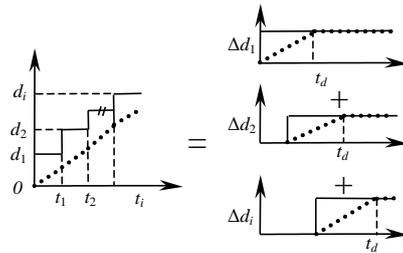


图 2 作动器响应计算简图

Fig.2 Computation scheme of actuator response

为简单起见,设 $t_d = n\Delta t$, $t_d = n\Delta t$, $t_d = n\Delta t$ 为计算时间间隔。考虑图 1 所示的双线性作动器响应假设和式(1)表示的叠加原理,第 $i+1$ 步的作动器实际位移 d'_{i+1} 和速度 v'_{i+1} 可以表示为

$$d'_{i+1} = \begin{cases} \sum_{j=1}^{i+1} \frac{\Delta d_j}{t_d} (i+2-j)\Delta t, & (i < n-1) \\ d_{i-n+1} + \sum_{j=i-n+2}^{i+1} \frac{\Delta d_j}{t_d} (i+2-j)\Delta t = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} d_{i+1-j}, & (i \geq n-1) \end{cases} \quad (2)$$

$$v'_{i+1} = \begin{cases} \frac{d_1-d_0}{t_d} + \frac{d_2-d_1}{t_d} + \dots + \frac{d_{i+1}-d_i}{t_d} = \frac{d_{i+1}-d_0}{t_d}, & (i < n-1) \\ \frac{d_{i+1}-d_i}{t_d} + \frac{d_i-d_{i-1}}{t_d} + \dots + \frac{d_{i-n+2}-d_{i-n+1}}{t_d} = \frac{d_{i+1}-d_{i-n+1}}{t_d}, & (i \geq n-1) \end{cases} \quad (3)$$

2 考虑作动器时滞的 OS 法稳定性分析

对于实时子结构实验，假定数值子结构的阻尼力是线性的而恢复力与位移有关，结构的运动方程可以表示为如下形式

$$M\ddot{a} + C_N \dot{v} + R_N(d) + R_E(d, v) = F \quad (4)$$

式中的下标 **N** 和 **E** 分别代表数值子结构和实验子结构。 M 为总质量矩阵 ($M = M_N + M_E$), M_E 为试件质量可忽略, 则 $M = M_N$, C_N 为数值子结构阻尼矩阵, R_N 为数值子结构的恢复力向量, R_E 为实验子结构的反力向量。 d, v, a 分别为结构节点的位移、速度和加速度, F 为外荷载向量。试件的质量可忽略不计, 则试件的特性与加速度无关, 实验子结构的恢复力可表示为 $R_E(d, v)$ 。OS 法假定第 $i+1$ 步的位移 d_{i+1} 和速度 v_{i+1} 为^[13]

$$-\tilde{d}'_{i+1} = d_i + \Delta t v_i + \frac{\Delta t^2}{4} a_i \quad (5)$$

$$-d'_{i+1} = \tilde{d}'_{i+1} + \frac{\Delta t^2}{4} a_{i+1} \quad (6)$$

$$\tilde{v}'_{i+1} = \frac{\tilde{d}'_{i+1} - \tilde{d}'_i}{\Delta t} = v_i + \frac{a_i}{2} \Delta t \quad (7)$$

$$v'_{i+1} = v_i + \frac{\Delta t}{2} (a_i + a_{i+1}) \quad (8)$$

其中: \tilde{d} 和 d 分别代表预测位移向量和实际位移向量, Δt 表示积分时间间隔。实验中将预测位移作为目标位移指令发送给作动器, 测量预测位移对应的

实验子结构反力并对此反力进行修正, 根据修正后的实验子结构反力可以由式(4)计算第 $i+1$ 步加速度 a_{i+1} , 然后利用式(6)、式(8)对预测位移和速度修正得到实际位移 d_{i+1} 和速度 v_{i+1} 。第 $i+1$ 步的反力经修正后为^[13]

$$R_N(d_{i+1}) = K_{NL}(d_{i+1} - \tilde{d}'_{i+1}) + R_N(\tilde{d}'_{i+1}) \quad (9)$$

$$R_E(d_{i+1}, v_{i+1}) = K_{EL}(d_{i+1} - \tilde{d}'_{i+1}) + C_{EL}(v_{i+1} - \tilde{v}'_{i+1}) + R_E(\tilde{d}'_{i+1}, \tilde{v}'_{i+1}) \quad (10)$$

这里: K_{NL} 和 K_{EL} 分别代表数值子结构和实验子结构的线性刚度矩阵, 这两个线性刚度矩阵要首先确定, 理论上可以取不小于初始刚度的任意值, 通常都取为结构起始的切线刚度。 C_{EL} 是实验子结构的线性阻尼矩阵。将式(9)、式(10)代入式(4), 可以得到第 $i+1$ 步的运动平衡方程为

$$M a_{i+1} + C_N v_{i+1} + K_{NL}(d_{i+1} - \tilde{d}'_{i+1}) + R_N(\tilde{d}'_{i+1}) + K_{EL}(d_{i+1} - \tilde{d}'_{i+1}) + C_{EL}(v_{i+1} - \tilde{v}'_{i+1}) + R_E(\tilde{d}'_{i+1}, \tilde{v}'_{i+1}) = F_{i+1} \quad (11)$$

考虑单自由度体系, 计算简图见图 3, 认为数值子结构阻尼力和恢复力均为线性, 实验子结构的阻尼力和恢复力为非线性, 则有 $K_{NL} = K_N$, $K_{EL} = \alpha K_E$, $C_{EL} = \beta C_E$, 其中 α 和 β 分别是线性刚度和线性阻尼与实际刚度和实际阻尼的比值。可以得到平衡方程

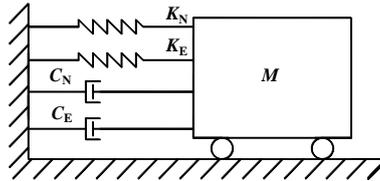


图 3 单自由度体系实时子结构实验计算简图

Fig.3 Computation scheme of a linear SDOF system in RST

$$M a_{i+1} + C_N v_{i+1} + K_N d_{i+1} + \alpha K_E (d_{i+1} - \tilde{d}'_{i+1}) + \beta C_E (v_{i+1} - \tilde{v}'_{i+1}) + R_E(\tilde{d}'_{i+1}, \tilde{v}'_{i+1}) = f_{i+1} \quad (12)$$

考虑时滞 $t_d = n\Delta t$, 平衡方程(12)中实验子结构的反力 $R_E(\tilde{d}'_{i+1}, \tilde{v}'_{i+1})$ 应为 $R_E(\tilde{d}'_{i+1}, \tilde{v}'_{i+1})$ 。

$$R_E(\tilde{d}'_{i+1}, \tilde{v}'_{i+1}) = C_E \tilde{v}'_{i+1} + K_E \tilde{d}'_{i+1} \quad (13)$$

其中 \tilde{d}'_{i+1} 和 \tilde{v}'_{i+1} 分别表示考虑时滞影响的作动器位移和速度响应, 考虑式(2)、式(3)中 $(i \geq n-1)$ 的情况, 得到

$$\tilde{d}'_{i+1} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \tilde{d}_{i+1-j} \quad (14)$$

$$\tilde{v}'_{i+1} = \frac{\tilde{d}_{i+1} - \tilde{d}_{i-n+1}}{t_d} \quad (15)$$

将式(13)代入式(12), 并考虑式(5)~式(8), 对于自由振动有

$$\left\{ 1 + (\xi_N + \beta\xi_E)\Omega + \frac{(\alpha-1)\Omega_E^2 + \Omega^2}{4} \right\} a_{i+1} + 2\omega\xi_N\tilde{v}_{i+1} + \omega_N^2\tilde{d}_{i+1} + 2\omega\xi_E\tilde{v}'_{i+1} + \omega_E^2\tilde{d}'_{i+1} = 0 \quad (16)$$

其中: $\omega_E = \sqrt{\frac{K_E}{M}}$, $\omega_N = \sqrt{\frac{K_N}{M}}$, $\Omega = \omega\Delta t =$

$$\sqrt{\frac{K_N + K_E}{M}}\Delta t, \quad \Omega_E = \omega_E\Delta t = \sqrt{\frac{K_E}{M}}\Delta t, \quad \xi_E = \frac{C_E}{2M\omega},$$

$$\xi_N = \frac{C_N}{2M\omega}.$$

式(16)写为状态方程的形式为

$$\mathbf{Y}_{i+1} = \mathbf{A}'\mathbf{Y}_i \quad (17)$$

其中

$$\mathbf{Y}_i = [\tilde{d}_i, \dots, \tilde{d}_{i-n+1}, \tilde{v}_i\Delta t, a_i\Delta t^2]^T \quad (18)$$

\mathbf{A}' 具体形式可以参考文献[14]。数值积分的稳定性条件为^[12]

$$\rho(\mathbf{A}') \leq 1 \quad (19)$$

式中 $\rho(\mathbf{A}')$ 是放大矩阵 \mathbf{A}' 的谱半径, $\rho(\mathbf{A}') = \max|\lambda_i|$, λ_i 是放大矩阵 \mathbf{A}' 的特征值。

3 三阶补偿的 OS 法稳定性分析

三阶外插补偿方法即通过三阶拉格朗日插值方法^[16]预测 t_{i+1} 时刻之后某时刻的位移指令, 并作为指令信号发送给作动器执行以减小作动器时滞带给实验影响。

考虑三阶外插补偿, 在 t_i 时刻通过三阶外插的方法预测 $(t_{i+1} + \mu\Delta t)$ 时刻的位移并作为第 $i+1$ 步的位移指令发送给作动器, μ 是 0 到 1 之间的一个常数。插值预测位移按下式计算

$$\tilde{d}_{i+1}^p = \sum_{j=0}^3 a_j \cdot \tilde{d}_{i+1-jm} \quad (20)$$

式中 \tilde{d}_{i+1}^p 为利用外插法预测得到的第 $i+1$ 步的位移指令, m 为插值计算的取值间隔, 等于函数拟合取值时间间隔与 Δt 的比值。

由于采用外插预测位移作为作动器的目标位移指令, 且作动器存在时滞, 运动平衡方程式(12)中 $R_E(\tilde{d}_{i+1}, \tilde{v}_{i+1})$ 应为 $R_E(\tilde{d}_{i+1}^p, \tilde{v}_{i+1}^p)$ 。这里 \tilde{d}_{i+1}^p 和 \tilde{v}_{i+1}^p 分别表示将 \tilde{d}_{i+1}^p 和 \tilde{v}_{i+1}^p 作为作动器指令, 并考虑作动器

时滞的实际位移和速度响应, 可以表示为

$$\tilde{d}_{i+1}^{p'} = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \tilde{d}_{i+1-j}^p \quad (21)$$

$$\tilde{v}_{i+1}^{p'} = \frac{\tilde{d}_{i+1}^p - \tilde{d}_{i+1-n}^p}{t_d} \quad (22)$$

考虑式(20), 得到

$$\tilde{d}_{i+1}^{p'} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^3 \sum_{j=0}^{n-1} a_k \cdot \tilde{d}_{i+1-j-km} \quad (23)$$

$$\tilde{v}_{i+1}^{p'} = \frac{1}{t_d} \sum_{k=0}^3 a_k (\tilde{d}_{i+1-km} - \tilde{d}_{i+1-n-km}) \quad (24)$$

与没有加入补偿的稳定性分析相同, 可以得到相邻两步的状态方程为

$$\mathbf{Y}_{i+1}^c = \mathbf{A}''\mathbf{Y}_i^c \quad (25)$$

其中

$$\mathbf{Y}_i^c = [\tilde{d}_i, \dots, \tilde{d}_{i+1-n-3m}, \tilde{v}_i\Delta t, a_i\Delta t^2]^T \quad (26)$$

图 4 为 $a=1$ 、 $\beta=1$, $\xi_N=0$, $K_E=0$, ξ_E 取不同值时 $t_d=3\Delta t$ 的 OS 法放大矩阵 \mathbf{A}' 谱半径。图 5 为加入三阶外插补偿的放大矩阵 \mathbf{A}'' 的谱半径, 计算参数与图 4 参数相同, 三阶补偿参数取 $m=1$ 、 $\mu=0.4$, 得到 $a_0=1.9040$; $a_1=-1.6320$; $a_2=0.9520$; $a_3=-0.2240$, 其意义是利用 \tilde{d}_{i+1} 、 \tilde{d}_i 、 \tilde{d}_{i-1} 拟合三次函数, 外插得到预测位移 \tilde{d}_{i+1}^p , 数值上等于 $(t_{i+1}+0.4\Delta t)$ 时刻的位移指令。定义稳定界限 $[\Omega]$ 为在 $(0, \Omega]$ 上保证 $\rho(\mathbf{A}', \Omega) \leq 1$ 的最大 Ω , $[\Omega]$ 是衡量积分算法是否稳定的标准, 当 $\Omega \leq [\Omega]$ 时, 积分算法稳定, 反之则失稳。在作动器没有时滞的情况下, 实时子结构 OS 算法是无条件稳定的^[13], 即稳定界限 $[\Omega]$ 为无穷大。由图 4 可见, 当作动器的时滞 $t_d=3\Delta t$, ξ_E 取值为 0.1~0.6 时, $[\Omega]$ 降低到 1.13~1.03。从图 5 中可见, ξ_E 取值为 0.1~0.6 时 $[\Omega]$ 为 2.37~2.87。与图 4 相比, OS 算法的稳定性有很大提高。

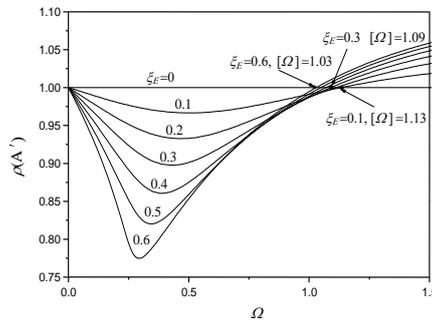


图 4 考虑时滞的 OS 法放大矩阵 \mathbf{A}' 谱半径

Fig.4 Spectrum radii with delay (OS method)

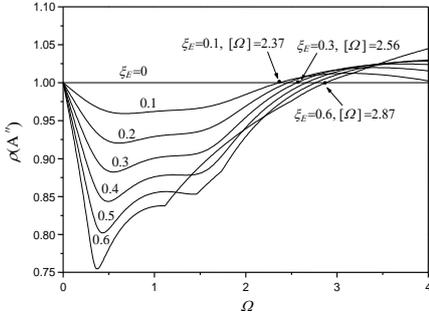


图5 加入三阶外插补偿的 OS 法放大矩阵 A'' 谱半径

Fig.5 Spectrum radii with 3rd-order compensation (OS method)

本文中所讨论的算例均为实验子结构 $K_E = 0$ ，即实验子结构阻为尼元件的情况。考虑实验子结构刚度影响的算例可以参考文献[14]。

4 考虑作动器时滞和三阶补偿的中心差分法稳定性分析

标准中心差分法中第 i 步的速度和加速度假定如下

$$v_i = \frac{d_{i+1} - d_{i-1}}{2\Delta t} \quad (27)$$

$$a_i = \frac{d_{i+1} - 2d_i + d_{i-1}}{\Delta t^2} \quad (28)$$

假设数值子结构的阻尼力是线性而恢复力与位移有关，将式(27)和式(28)带入式(4)得到

$$d_{i+1} = \left(\frac{M}{\Delta t^2} + \frac{C_N}{2\Delta t} \right)^{-1} \left[F_i - R_N(d_i) + \frac{2M}{\Delta t^2} d_i - \left(\frac{M}{\Delta t^2} - \frac{C_N}{2\Delta t} \right) d_{i-1} - R_E(d_i, v_i) \right] \quad (29)$$

考虑单自由度体系，计算简图见图 3，认为数值子结构恢复力为线性，实验子结构的阻尼力和恢复力均为非线性，则有下式成立

$$R_N(d) = K_N d \quad (30)$$

$$R_E(d, v) = K_E d + C_E v \quad (31)$$

考虑自由振动的情况，可以得到平衡方程

$$d_{i+1} = \left(\frac{M_N}{\Delta t^2} + \frac{C_N}{2\Delta t} \right)^{-1} \left[\left(-K_N + \frac{2M_N}{\Delta t^2} \right) d_i - \left(\frac{M_N}{\Delta t^2} - \frac{C_N}{2\Delta t} \right) d_{i-1} - R_E(d_i, v_i) \right] \quad (32)$$

与 OS 法稳定性分析方法相同，考虑时滞 $t_d = n\Delta t$ ，平衡方程(32)中实验子结构的反力 $R_E(d_i, v_i)$ 应为 $R_E(d_i', v_i')$ ，加入三阶补偿后式(32)中的 $R_E(d_i, v_i)$ 应为 $R_E(d_i'', v_i'')$ ，可以得到考虑时滞的放大矩阵 A' 和加入三阶补偿的放大矩阵 A'' 。

图 6 为 $\xi_N = 0$ ， $K_E = 0$ ， ξ_E 取不同值时 $t_d = 3\Delta t$ 的中心差分法的放大矩阵谱半径。图 7 为加入三阶外插补偿的中心差分法放大矩阵谱半径，三次外插补偿参数与图 5 相同，其他参数与图 6 相同。标准中心差分法稳定界限是 2，在作动器没有时滞的情况下， ξ_E 取值为 0.1~0.6 时，实时子结构中心差分

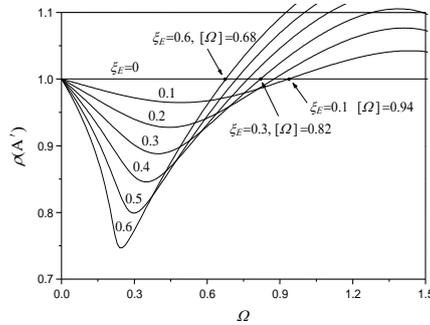


图6 考虑时滞的中心差分法放大矩阵 A' 谱半径

Fig.6 Spectrum radii with delay (central difference method) 法的稳定界限为 $1.81 \sim 1.13$ ^[12]。由图 6、图 7 可见， ξ_E 取值为 0.1~0.6 时， $[\Omega]$ 降低到 0.94~0.68。加入补偿后 $[\Omega]$ 为 1.43~0.87。与图 4、图 5 相比，考虑作动器时滞与补偿的情况下 OS 算法的稳定性均优于中心差分法。

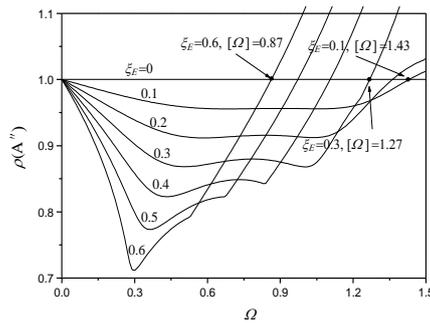


图7 加入三阶外插补偿的中心差分法放大矩阵 A'' 谱半径

Fig.7 Spectrum radii with 3rd-order compensation (central difference method)

5 算例

考虑单自由度结构体系, 计算简图见图 3。初始条件为 $d_0 = 1\text{cm}$, $v_0 = 0$, 自振周期 $T = 1\text{s}$, 数值子结构阻尼比 $\xi_N = 0$, 实验子结构刚度 $K_E = 0$, 实验子结构的阻尼比 $\xi_E = 0.3$, 作动器阶跃响应时滞 $t_d = 3\Delta t$ 。

图 8 为考虑作动器时滞的 OS 法数值计算位移时程。图 9 为加入三阶外插补偿并考虑时滞的 OS 法数值计算位移时程, 三阶补偿参数与图 5 相同。图 8、图 9 计算时均取 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 1$ 。由图 4、图 5 可知, $\xi_E = 0.3$ 无补偿时稳定界限 $[\Omega] = 1.09$, 加入三阶外插补偿后 $[\Omega] = 2.56$ 。从图 8、图 9 可见, 没有加入补偿的位移在 $\Omega = 1.08$ 时收敛, 在 $\Omega = 1.10$ 时发散, 加入补偿后在 $\Omega = 2.55$ 时收敛, 在 $\Omega = 2.57$ 时发散。

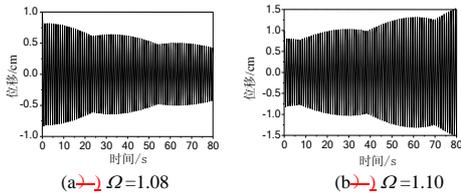


图 8 考虑作动器时滞的 OS 法自由振动位移时程
Fig.8 Displacement history of free vibration with delay (OS method)

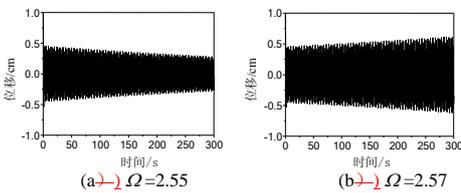


图 9 加入三阶外插补偿且考虑作动器时滞的 OS 法自由振动位移时程

Fig.9 Displacement history of free vibration with 3rd-order compensation (OS method)

图 10 为考虑作动器时滞的中心差分法数值计算位移时程。图 11 为加入三阶外插补偿并考虑时滞的中心差分法数值计算位移时程, 三阶补偿参数与图 7 相同。由图 6、图 7 可知, $\xi_E = 0.3$ 无补偿时稳定界限 $[\Omega] = 0.82$, 加入三阶外插补偿后 $[\Omega] = 1.27$ 。从图 10、图 11 可见, 没有加入补偿的位移在 $\Omega = 0.81$ 时收敛, 在 $\Omega = 0.83$ 时发散, 加入补偿后在 $\Omega = 1.26$ 时收敛, 在 $\Omega = 1.28$ 时发散。

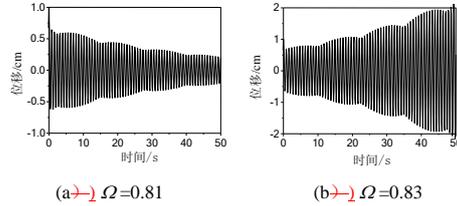


图 10 考虑作动器时滞的中心差分法自由振动位移时程
Fig.10 Displacement history of free vibration with delay (central difference method)

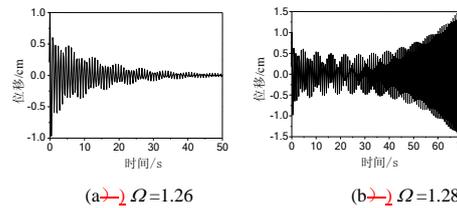


图 11 加入三阶外插补偿且考虑作动器时滞的中心差分法自由振动位移时程

Fig.11 Displacement history of free vibration with 3rd-order compensation (central difference method)

单自由度位移时程的数值计算结果表明, 考虑作动器时滞及补偿的情况下, OS 算法的实验稳定性均好于中心差分法。

6 结论

本文提出了一种双线性的作动器阶跃响应简化模型, 基于这种简化模型分析了 OS 算法和中心差分法作为逐步积分算法时实验的稳定性, 并探讨了采用三阶外插补偿方法时实验稳定性的变化。由数值分析的结果可以看出时滞使实验的稳定性下降, 三阶外插补偿可以提高实验的稳定性, OS 算法的稳定性好于中心差分法。

参考文献:

- [1] 邱法维. 结构抗震实验方法进展[J]. 土木工程学报, 2004, 137(110): 19-27.
Qiu Fawei. Developments of seismic testing methods of structures [J]. China Civil Engineering Journal, 2004, 137(110): 19-27. (in Chinese)
- [2] 邱法维, 钱稼茹, 陈志鹏. 结构抗震实验方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
Qiu Fawei, Qian Jiuru, Chen Zhipeng. Seismic testing methods for structures [M]. Beijing: Science Press, 2000. (in Chinese)
- [3] 田石柱, 赵桐. 抗震拟动力实验技术研究[J]. 世界地震工程, 2001, 17(4): 60-66.

- Tian Shizhu, Zhao Tong. Research on seismic pseudodynamic test [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001, 17(4): 60~66. (in Chinese)
- [4] 吕西林, 朱玉华, 施卫星. 组合基础隔震房屋模型振动台试验研究[J]. 土木工程学报, 2001, 34(2): 43~49.
- Lu Xilin, Zhu Yuhua, Shi Weixing. Shaking table test on building models with combined isolation system [J]. China Civil Engineering, 2001, 34(2): 43~49. (in Chinese)
- [5] 武敏刚, 吕西林. 混合结构振动台模拟试验研究与计算分析[J]. 地震工程与工程振动, 2004, 24(6): 103~108.
- Wu Mingang, Lu Xilin. Shaking table model test and theoretical analysis for seismic resistance of hybrid structures [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(6): 103~108. (in Chinese)
- [6] 方重. 大型模拟地震振动台主要参数的确定及技术经济分析[J]. 世界地震工程, 2001, 17(4): 135~138.
- Fang Zhong. Determination of main parameters and technico-economic analysis for large scale earthquake simulator [J]. World Information on Earthquake Engineering, 2001, 17(4): 135~138. (in Chinese)
- [7] 韩俊伟, 李玉亭, 胡宝生. 大型三向六自由度地震模拟振动台[J]. 地震学报, 1998, 20(3): 327~331.
- Han Junwei, Li Yuting, Hu Baosheng. Large scale six degree of freedom shaking table [J]. Acta Seismological Sinica, 1998, 20(3): 327~331. (in Chinese)

[[6](参考文献[8]~[16]转第 8 页)•

带格式的: 项目符号和编号