

文章编号:1673-2049(2007)02-0006-07

结构主动变刚度·阻尼控制系统及其优化设计

谭平,周福霖

(广东省地震工程与应用技术重点实验室,广东 广州 510405)

摘要:介绍了一种新型开关控制型的半主动控制系统——主动变刚度·阻尼(AVS·D)系统的装置组成及其减振控制机理,阐述了该系统所特有的反应放大原理,建立了该控制系统的运动方程。基于瞬时最优控制的思想推导了该控制系统的开关控制律。为了充分发挥该控制装置的作用,优化了主动变刚度·阻尼装置的参数设计,并基于遗传算法研究了主动变刚度·阻尼装置在结构中的空间位置优化方法。计算机仿真分析结果显示,主动变刚度·阻尼系统是一种性能非常优越的半主动控制系统,所推导的瞬时最优半主动开关控制律是很有效的。对不同数目的主动变刚度·阻尼装置进行位置优化,结果表明,所提出的位置优化方法对于优化多个主动变刚度·阻尼装置的位置是相当高效的,可以最大限度地发挥该控制系统的性能。

关键词:半主动控制;主动变刚度·阻尼控制;优化设计;控制算法;遗传算法

中图分类号:TU318

文献标志码:A

Structural Active Variable Stiffness · Damping Control System and Its Optimal Design

TAN Ping, ZHOU Fu-lin

(Key Laboratory of Earthquake Engineering and Applied Technique of Guangdong Province,
Guangzhou 510405, Guangdong, China)

Abstract: Authors introduced a new semiactive control system, active variable stiffness · damping (AVS · D) system, whose composition and work principle were described. The AVS · D system was capable of amplifying the interstory drift and velocity and made dampers dissipate more energy. In this study, the control law of the AVS · D system was derived based on an instantaneous performing index. To optimally utilize the AVS · D control devices and economically improve the control performance, genetic algorithm(GA) was used to design the multiple device location. Numerical simulation indicates that the AVS · D system is a new semiactive control system with high performance and the proposed instantaneous control law of the AVS · D system is quite effective. The proposed procedure of optimizing the placement of AVS · D devices is high efficient, which can make the most advantage of AVS · D system.

Key words: semiactive control; active variable stiffness · damping control; optimal design; control algorithm; genetic algorithm

0 引言

结构振动控制理论与技术是近几十年发展起来

的土木工程结构抵抗地震或强风等环境荷载的新对策。目前各国学者已经提出了各种被动、主动、半主动和混合的控制策略,并进行了大量的理论和试验

收稿日期:2007-04-21

基金项目:国家科技部重大基础研究前期研究专项项目(2004CCA03300);广州市科技攻关计划项目(2004Z1-E0051)

作者简介:谭平(1973-),男,湖南常德人,研究员,工学博士,博士后,E-mail:ptan@gzhu.edu.cn。

研究,部分研究较成功的结构控制技术已应用到实际工程中,并在多个国家制定了相应的应用规范与规程。半主动控制因综合了主动控制与被动控制的优点,既具有主动控制效果好、适用范围广的特点,又具有被动控制成本低、可靠性高的优点而受到广泛关注^[1-2]。笔者提出了一种新型开关控制型的半主动控制系统——主动变刚度·阻尼控制系统^[3],该系统充分地利用了变频与阻尼2种减振机制,将主动变刚度控制(AVS)与主动变阻尼控制(AVD)有机地结合起来,它既具有主动变刚度控制使受控结构能主动地避开外激励卓越频率的优点,又具有主动变阻尼控制削减受控结构动力反应峰值及对较宽频带内的外界激励具有非频变减振性能的优点。该控制系统所需外部电源极少,可电池化,因此具有较好的工程应用前景。为了能充分发挥主动变刚度·阻尼控制系统的减振控制效果,对该控制系统进行进一步的优化设计是非常必要的。

一般而言,一个控制系统的减振控制效果取决于3个方面:①所采用的控制律;②控制装置的参数设计;③控制装置的位置与数量。本文中笔者介绍了主动变刚度·阻尼控制装置的构成,研究了该控制系统的减振控制机理及其特有的反应放大功能,建立了该控制系统的运动方程。为优化主动变刚度·阻尼控制系统的控制效果,笔者从具有时间步进特性的主动瞬时最优控制算法出发推导了控制系统中各主动变刚度·阻尼装置的开关控制律,并深入研究主动变刚度·阻尼装置中各参数之间的相互关系及优化设计主动变刚度·阻尼装置的参数;基于遗传算法(GA)提出了对不同数目的主动变刚度·阻尼装置进行空间位置优化的方法。为了验证主动变刚度·阻尼优化设计的结果,本文中以某12层建筑结构为例,对主动变刚度·阻尼系统的减振控制效果及位置优化进行了计算机仿真分析。

1 工作原理

1.1 减振控制机理

图1为主动变刚度·阻尼装置安装于结构上的示意图。主动变刚度·阻尼装置由水平抗侧力构件(图1中支撑)、阻尼器、双液缸-活塞系统、导杆与阀门等组成。整个主动变刚度·阻尼控制系统还包括测量采集系统、控制计算机和外加能源。

主动变刚度·阻尼装置通过双液缸之间阀门的切换可实现2种工作状态:当阀门关闭时,油路堵塞,由于液缸内的黏滞性液体几乎不能被压缩,此时

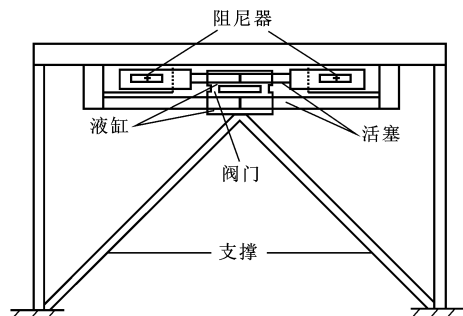


图1 主动变刚度·阻尼控制装置

Fig.1 AVS·D Control Device

阻尼器因其两端没有相对运动而不起作用,主动变刚度·阻尼装置通过其水平抗侧力构件向受控结构提供附加刚度,这与Kobri提出的主动变刚度(AVS)装置的作用相似^[4],主要通过改变受控结构刚度的变频机制减振,即变刚度状态;当阀门开启时,油路畅通,液缸与结构之间产生相对运动,从而使阻尼器工作,此时阻尼器向受控结构提供附加阻尼,这又有主动变阻尼控制的特点,且主动变刚度·阻尼装置主要通过阻尼机制减振,即变阻尼状态。作为开关控制型半主动控制装置,主动变刚度·阻尼装置可通过阀门的开关动作来控制油路,实现不同的控制方式。当阀门始终闭合时,主动变刚度·阻尼装置仅向受控结构提供附加的抗侧刚度,即Passive-off控制。当阀门开启时,油路始终畅通,即Passive-on控制。根据既定的开关控制律主动地控制阀门的动作时,系统实现半主动控制,即主动变刚度·阻尼控制。单个主动变刚度·阻尼装置半主动控制是通过主动地控制阀门的切换,从2种工作状态中选择一种较优的工作状态,向受控结构提供附加刚度或阻尼,从而使受控结构的动力反应尽可能小,以达到减振的目的。

1.2 反应放大原理

当阀门开启时,主动变刚度·阻尼装置具有阻尼器的反应放大功能,如图2(a)所示。设结构位移为 y ,液缸的支撑位移为 y_t ,下部活塞相对于液缸的位移为 $\Delta_1 = y - y_t$ 。当上、下2个活塞的面积比为 β 时,若忽略液缸内液体的可压缩性,可得到上部活塞相对于液缸的位移 $\Delta_2 = \beta\Delta_1$,主动变刚度·阻尼装置中阻尼器两端的相对位移为 $y_e = (1 + \beta)y_t$ 。与图2(b)所示普通耗能阻尼器相比,主动变刚度·阻尼装置中阻尼器两端的相对位移放大了 $1 + \beta$ 倍,且上、下2个活塞面积比 β 越大,相对位移放大得就越多。

值得注意的是,主动变刚度·阻尼的双液缸装置不仅可以放大位移,同时还可以放大速度反应,因此

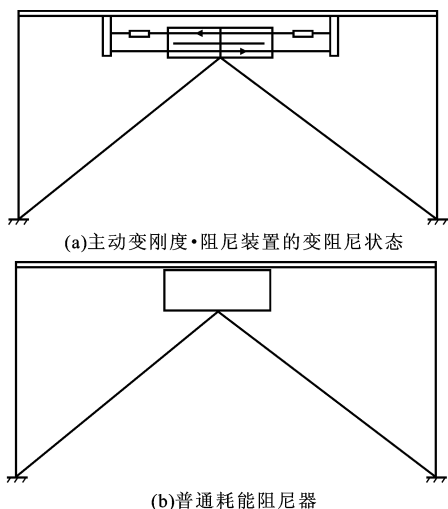


图2 主动变刚度·阻尼装置的反应放大原理

Fig. 2 Response Amplification Principle of AVS-D Device

主动变刚度·阻尼系统中的阻尼器可以是黏滞阻尼器、滞回阻尼器或黏弹性阻尼器等。通过调整上、下2个活塞的面积比,将结构与液缸的运动差异放大,可以在很大程度上解除传统耗能减振控制装置中阻尼器对结构层间位移与层间速度反应的依赖性,使该系统在小震或常遇风荷载作用下就开始发挥作用,极大地增强了阻尼器的耗能减振效果。

2 参数优化

由于阀门开启时主动变刚度·阻尼装置具有阻尼器两端的反应放大功能,因此实际工程应用中应合理设计控制装置的参数,使阻尼器两端的反应最大。笔者以常见的金属滞回阻尼器为例,阐述主动变刚度·阻尼装置的参数优化过程。

设阻尼器对结构的作用力为 F_1 , 根据双液缸中压强相等原理, 下部活塞杆对结构的作用力为 $F_2 = \beta F_1$, 因此主动变刚度·阻尼装置对结构提供的控制力合力为 $F = F_1 + F_2 = (1 + \beta) F_1 (y_e, \dot{y}_e) = (1 + \beta)^2 F_1 (y_1, \dot{y}_1)$, 即主动变刚度·阻尼装置具有独特的双液缸设计, 相当于 $(1 + \beta)^2$ 个如图 2(b) 所示的普通耗能阻尼器的阻尼器并联后与支撑串联。

假设图 2(a) 中地面输入的加速度较小而主动变刚度·阻尼装置中阻尼器尚未屈服, 且阻尼器的弹性刚度为 k_1 , 则阻尼器对结构的作用力为

$$F_1 = k_1 y_e = (1 + \beta) k_1 (y - y_t) \quad (1)$$

根据双液缸中压强相等的原理可知, 下部活塞杆对结构的作用力为 $F_2 = \beta F_1$, 因此主动变刚度·阻尼装置对结构提供的控制力合力为

$$F = F_1 + F_2 = (1 + \beta) F_1 = (1 + \beta)^2 k_1 (y - y_t) \quad (2)$$

即主动变刚度·阻尼装置具有独特的双液缸的设计, 相当于 $(1 + \beta)^2$ 个如图 2(b) 所示的普通耗能阻尼器的阻尼器并联后与支撑串联。

主动变刚度·阻尼装置对受控结构的作用力又可以通过支撑力表示为

$$F = k_t y_t \quad (3)$$

式中: k_t 为支撑刚度。

将式(2)、(3)联立, 得到支撑位移 y_t 与结构位移 y 的关系为

$$y_t = \frac{(1 + \beta)^2 k_1}{k_t + (1 + \beta)^2 k_1} y \quad (4)$$

因此阻尼器两端的相对位移 y_e 可表示为

$$y_e = \frac{k_t (1 + \beta)}{k_t + (1 + \beta)^2 k_1} y \quad (5)$$

令 $g = \frac{y_e}{y}$, $x = 1 + \beta$, $b = \frac{k_1}{k_t}$, 式(5)可表示为

$$g = \frac{x}{1 + bx^2} \quad (6)$$

为了使装置放大作用最为明显, 需要通过数学优化使式(6)中的 g 最大来实现。经过优化可知, 当 $x = \sqrt{1/b}$ 时, 装置的放大系数 β 、支撑刚度 k_t 与阻尼器的弹性刚度 k_1 应满足

$$k_t = (1 + \beta)^2 k_1 \quad (7)$$

阻尼器两端的变形最大时, 装置放大作用最为明显, 此时 $g = (1 + \beta)/2$ 取得最大值。在实际工程应用中可以按式(7)来确定主动变刚度·阻尼装置的参数。

3 瞬时最优控制算法

考虑地震作用下在一个 n 自由度结构上设置 m 个主动变刚度·阻尼控制装置, 系统的质量、刚度和阻尼由切换方程确定, $\mathbf{I}(t)$ 为全部主动变刚度·阻尼控制装置的切换状态。对于装有主动变刚度·阻尼装置的结构, 当阀门开启和闭合时, 即在 2 种被动控制工况 Passive-on 与 Passive-off 下的变形如图 3 所示。根据 Hamilton 原理推导的主动变刚度·阻尼控制体系运动方程为

$$\mathbf{M}_1 \ddot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{C}_1 \dot{\mathbf{Y}}(t) + \mathbf{K}_1 \mathbf{Y}(t) = \boldsymbol{\eta}_1 \ddot{\mathbf{u}}_g(t) + \mathbf{R}_1(t_0) \quad (8)$$

式中

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s + \bar{\mathbf{E}}^T \mathbf{M}_t \bar{\mathbf{E}} + \mathbf{I}_2^T \bar{\mathbf{E}}^T \tilde{\mathbf{M}}_t \bar{\mathbf{E}} \mathbf{I}_2 & \mathbf{I}_2^T \bar{\mathbf{E}}^T \tilde{\mathbf{M}}_t \\ \tilde{\mathbf{M}}_t \bar{\mathbf{E}} \mathbf{I}_2 & \tilde{\mathbf{M}}_t \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\eta}_1 = - \begin{bmatrix} \mathbf{M}_s \mathbf{I}_1 + \bar{\mathbf{E}}^T \mathbf{M}_t \hat{\mathbf{I}}_1 + \mathbf{I}_2^T \bar{\mathbf{E}}^T \tilde{\mathbf{M}}_t \hat{\mathbf{I}}_1 \\ \tilde{\mathbf{M}}_t \hat{\mathbf{I}}_1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_s + \mathbf{I}_h^T \bar{\mathbf{E}}^T \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \tilde{\mathbf{C}}_e \tilde{\boldsymbol{\beta}} \mathbf{E} \mathbf{I}_h - \mathbf{I}_h^T \bar{\mathbf{E}}^T \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \tilde{\mathbf{C}}_e \tilde{\boldsymbol{\beta}} \\ -\tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \tilde{\mathbf{C}}_e \tilde{\boldsymbol{\beta}} \mathbf{E} \mathbf{I}_h & \tilde{\boldsymbol{\beta}}^T \tilde{\mathbf{C}}_e \tilde{\boldsymbol{\beta}} \end{bmatrix};$$

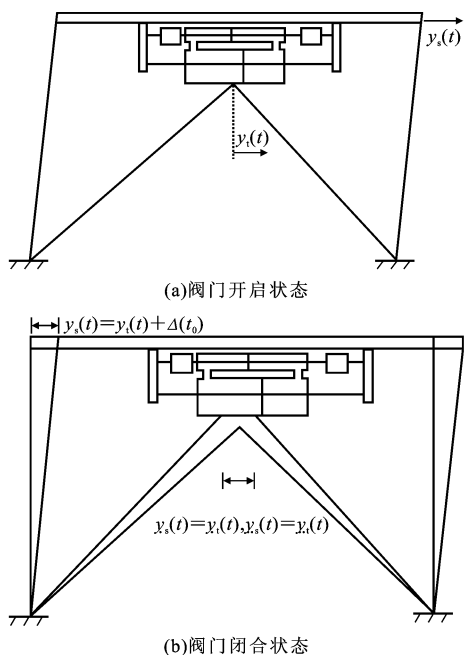


图3 装有主动变刚度·阻尼装置的结构变形

Fig. 3 Deformation of Structure with AVS·D Device

$$\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s + \mathbf{I}_h^T \bar{\mathbf{E}}^T \mathbf{K}_t \bar{\mathbf{E}} \mathbf{I}_h & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{K}}_t \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}(t_0) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_h^T \bar{\mathbf{E}}^T \mathbf{K}_t \Delta(t_0) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}; \mathbf{I}_2 = \begin{bmatrix} 0 & & & \\ 1 & 0 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{I}_h = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ -1 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \\ & & -1 & 1 \end{bmatrix}。$$

式中: $\mathbf{Y}(t)$ 为系统的位移向量, 包括受控结构与控制装置的位移列向量, 对应于不同工况, 其维数是变化的, $\mathbf{Y}(t) = [\mathbf{Y}_s(t) \ \mathbf{Y}_t(t)]^T$; \mathbf{M}_s 、 \mathbf{K}_s 、 \mathbf{C}_s 分别为原受控结构的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; \mathbf{M}_t 、 \mathbf{K}_t 、 \mathbf{C}_t 分别为控制装置的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; $\tilde{\mathbf{M}}_t$ 、 $\tilde{\mathbf{K}}_t$ 、 $\tilde{\mathbf{C}}_t$ 分别为阀门打开时的主动变刚度·阻尼装置的质量矩阵、刚度矩阵和阻尼矩阵; $\hat{\mathbf{I}}_1$ 为单位向量; $\boldsymbol{\beta} = \mathbf{I} + \vec{\boldsymbol{\beta}}$, $\vec{\boldsymbol{\beta}}$ 由各控制装置的放大系数组成, 根据两液缸的面积比确定; $\tilde{\mathbf{E}}$ 、 $\bar{\mathbf{E}}$ 分别为对应于阀门闭合与开启时控制装置的位置矩阵; $\mathbf{R}_1(t_0)$ 为阀门上次闭合时控制装置所在楼层的层间位移与缸体位移之差。式(8)中, 对应于不同的开关函数 $\mathbf{I}(t)$, 各系数是不同的。

在状态空间中, 式(8)可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{X}}(t) &= \mathbf{A}_1(t) \mathbf{X}(t) + \mathbf{W}_1 \ddot{\mathbf{u}}_g(t) + \mathbf{L}_1 \mathbf{R}_1(t_0) \\ \mathbf{X}(t) &= \begin{bmatrix} \mathbf{Y}(t) \\ \dot{\mathbf{Y}}(t) \end{bmatrix} \\ \mathbf{A}_1(t) &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E} \\ -\mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{K}_1 & -\mathbf{M}_1^{-1} \mathbf{C}_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{W}_1 &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_1^{-1} \boldsymbol{\eta}_1 \end{bmatrix} \\ \mathbf{L}_1 &= \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_1^{-1} \end{bmatrix} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: \mathbf{E} 为元素均为 1 的矩阵。

由于半主动控制系统无需外部能源向受控结构施加主动控制力, 因此半主动控制系统是稳定的, 较主动控制具有更大的自由度。当一个结构上设置多个主动变刚度·阻尼装置时, 控制系统可以在任一控制间隔内改变系统中每个控制装置的开关状态。笔者在选择主动变刚度·阻尼系统控制算法时, 对于单个主动变刚度·阻尼装置的开关控制是独立的, 但采用一种集中的控制策略, 即主动变刚度·阻尼装置的开关状态不是仅依赖于其所在位置处结构的局部动力反应, 而是从减小结构的整体动力反应出发确定主动变刚度·阻尼系统中各控制装置的开关状态。

本文中基于一种瞬时最优控制的思想推导了主动变刚度·阻尼系统半主动控制算法, 该控制策略是在每一控制时刻选择一组开关切换状态 $\mathbf{I}(t)$, 使受控结构的整体动力响应瞬时最小。主动变刚度·阻尼控制系统的数学模型为: 求解 $\mathbf{I}(t)$ 使得 $J[\mathbf{I}(t)] = \min\{\mathbf{Y}_z[\mathbf{I}(t)]^T \mathbf{Q} \mathbf{Y}_z[\mathbf{I}(t)]\}$, 其中 \mathbf{Y}_z 为需要控制的结构动力反应; \mathbf{Q} 为一个对称和半正定的权矩阵。该模型满足式(9), 即约束条件为各种工况下系统的运动方程。

设 $\boldsymbol{\Phi}$ 、 $\boldsymbol{\theta}$ 分别为系统矩阵 $\mathbf{A}_1(t)$ 的特征向量矩阵和特征值矩阵; 设 $\mathbf{X}(t) = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{Z}(t)$, $\mathbf{Z}(t)$ 为广义坐标向量。将 $\boldsymbol{\Phi}^{-1} \mathbf{A} \boldsymbol{\Phi} = \boldsymbol{\theta}$ 代入式(9), 可得

$$\dot{\mathbf{Z}}(t) = \boldsymbol{\theta} \mathbf{Z}(t) + \boldsymbol{\Phi}^{-1} [\mathbf{W}_1 \ddot{\mathbf{u}}_g(t) + \mathbf{L} \mathbf{R}(t_0)] \quad (10)$$

式(10)的解为

$$\mathbf{Z}(t) = \exp(\boldsymbol{\theta} \Delta t) \mathbf{z}(t - \Delta t) + \int_{-\Delta t}^t \exp[\boldsymbol{\theta}(t - \tau)] \cdot \boldsymbol{\Phi}^{-1} [\mathbf{W}_1 \ddot{\mathbf{u}}_g(t) + \mathbf{L} \mathbf{R}(t_0)] d\tau \quad (11)$$

式中: Δt 为采样周期。

假定地震动在采样周期内呈线性变化, 同时由于 \mathbf{R}_1 在时段 $[t_0, t]$ 为常量 ($t_0 \leq t - \Delta t < t$), 由此可得 $\mathbf{R}(t_0) = \mathbf{R}(t - \Delta t)$ 。在上述条件下, 式(11)可写为

$$\mathbf{Z}(t) = \exp(\boldsymbol{\theta} \Delta t) \mathbf{z}(t - \Delta t) + \mathbf{F}' \mathbf{W}_1 \ddot{\mathbf{u}}_g(t - \Delta t) + \mathbf{G}' \mathbf{W}_1 \ddot{\mathbf{u}}_g(t) + \mathbf{N}' \mathbf{L} \mathbf{R}(t - \Delta t) \quad (12)$$

式中

$$\mathbf{F}' = \boldsymbol{\theta}^{-1} \exp(\boldsymbol{\theta} \Delta t) \boldsymbol{\Phi}^{-1} - \frac{1}{\Delta t} \boldsymbol{\theta}^{-2} \exp(\boldsymbol{\theta} \Delta t) \boldsymbol{\Phi}^{-1} +$$

$$\frac{1}{\Delta t} \boldsymbol{\theta}^{-2} \boldsymbol{\Phi}^{-1};$$

$$\mathbf{G}' = -\boldsymbol{\theta}^{-1} \boldsymbol{\Phi}^{-1} + \frac{1}{\Delta t} \boldsymbol{\theta}^{-2} \exp(\boldsymbol{\theta} \Delta t) \boldsymbol{\Phi}^{-1} - \frac{1}{\Delta t} \boldsymbol{\theta}^{-2} \boldsymbol{\Phi}^{-1};$$

$$\mathbf{N}' = \boldsymbol{\theta}^{-1} \exp(\boldsymbol{\theta} \Delta t) \boldsymbol{\Phi}^{-1} - \boldsymbol{\theta}^{-1} \boldsymbol{\Phi}^{-1}.$$

由此,状态反应向量的解可以表示为

$$\mathbf{X}(t) = \exp(\mathbf{A} \Delta t) \mathbf{X}(t - \Delta t) + \mathbf{B} \ddot{\mathbf{u}}_g(t - \Delta t) + \mathbf{C} \ddot{\mathbf{u}}_g(t) + \mathbf{H} \mathbf{R}(t - \Delta t) \quad (13)$$

式中: $\mathbf{B} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{F}' \mathbf{W}$; $\mathbf{C} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{G}' \mathbf{W}$; $\mathbf{H} = \boldsymbol{\Phi} \mathbf{N}' \mathbf{L}$ 。

对于主动变刚度·阻尼控制系统,当结构上设置 m 个主动变刚度·阻尼装置时,在每一个采样周期内控制系统有 2^m 种开关切换工况。通过与计算系统的性能指标 $J[\mathbf{I}(t)]$ 进行比较,可得到半主动控制系统的开关控制律,即

$$J_{\min} = \min J[\mathbf{I}(t)] = \min(\mathbf{Y}_{e,1}^T \mathbf{Q}_y \mathbf{Y}_{e,1}) \quad (14)$$

$$\mathbf{I}(t) = \mathbf{I}(J_{\min}) \quad (15)$$

这样,在每一个采样周期内主动变刚度·阻尼控制系统从 2^m 种工况中选择一种最佳的工作状态,并通过对各装置阀门的开关控制实现,使整体结构的动力反应在每一控制时刻都达到最小。

4 位置优化

结构控制系统的性能一方面取决于控制装置的物理参数与选用的控制律,另一方面取决于控制装置的设置位置。为了充分地发挥主动变刚度·阻尼控制系统的减振性能,笔者基于遗传算法^[5]提出了一种主动变刚度·阻尼装置在房屋结构中的位置优化方法。为了简化问题,假定各控制装置具有相同的物理参数,而且在寻找最优控制装置位置的过程中,所有主动变刚度·阻尼装置都处于阀门打开状态,即 Passive-on 状态。

图 4 为主动变刚度·阻尼装置位置优化方法的流程。这一优化过程是一个反复迭代的过程。在开始搜寻前,随机产生初始群体,用遗传算法的术语来表示,群体中的每一个体,即每一条染色体代表所有主动变刚度·阻尼装置的一种可能的位置组合,染色体上的一个基因型对应于结构某一特定楼层是否设置控制装置。父群经交叉、变异操作,产生新的子群。对于子群中每一个体均要进行适应度评估,从中选择适应度较高的最优个体取代原群体中适应度较

低的个体而形成新一代的父群。上述过程被不断地重复直到超过指定的最大进化代数 i 为止。

本文中所提出的主动变刚度·阻尼控制装置位置优化方法,考虑了房屋所在场地的地震动特性。笔者基于随机振动理论推导了结构在随机地震激励下结构相应的方差。该方法的优点在于可以根据控制目标定义任意形式的性能目标函数来优化主动变刚度·阻尼装置的位置,而无要求该目标函数在整个优化区域内连续可导,因此主动变刚度·阻尼系统的控制目标是改善结构的安全性,即从减小结构的最大层间位移出发选择如下的目标函数

$$F = \frac{\max \sigma_{d_i}}{\max \sigma_{d_{ui}}} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

式中: σ_{d_i} 为受控结构第 i 层层间位移的均方根值; $\sigma_{d_{ui}}$ 为对应无控结构第 i 层层间位移的均方根值。

在计算式(16)时,结构的均方根响应是根据 Lyapunov 方程来确定的^[6]。笔者基于 Matlab 的遗传算法工具箱编写了主动变刚度·阻尼装置位置优化的计算程序^[7]。显然,上述主动变刚度·阻尼装置的位置优化方法可推广应用于其他主动控制或被动控制装置的位置优化。

5 仿真分析

为了检验主动变刚度·阻尼系统的控制效果及本文中提出的主动变刚度·阻尼系统瞬时最优控制算法及位置优化方法的有效性,笔者对某 12 层线性剪切型结构进行了计算机仿真分析。该结构的质量与刚度值见表 1,假定结构各阶振型阻尼比均为 3%。地面运动加速度采用 Kanai-Tajimi 地震动随机模型,谱参数分别为:卓越频率 $\omega_g = 15 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, 阻尼比 $\xi_g = 0.7$,白谱强度因子 $S_0 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot \text{rad}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$ 。主动变刚度·阻尼装置的参数分别为: $m_t = 105.56 \text{ kg}$, $k_t = 15\,000 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$, $C_c = 15 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,各主动变刚度·阻尼装置的放大系数为 $\beta = 3$ 。

表 2 为本文中所提出的位置优化方法得到的不

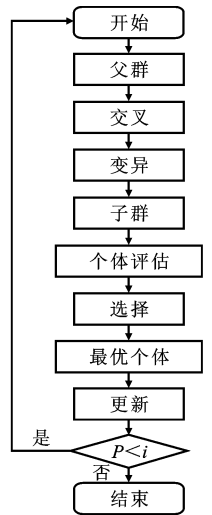


图 4 控制装置位置优化设计流程
Fig. 4 Design Procedure of Location Optimization of Control Device

表 1 某 12 层结构的结构参数

Tab. 1 Structural Parameters of Some 12-story Structure		
楼层	质量/kg	刚度/(kN·m ⁻¹)
1,2	5 278	22 500
3,4,5	5 278	20 880
6,7,8	5 278	17 680
9,10	5 278	15 060
11,12	5 278	10 880

表 2 控制装置的最优位置方案与性能

Tab. 2 Optimal Location Project and Corresponding Performance of Control Devices		
装置个数	装置的最优位置	目标函数值/10 ⁻²
2	1,3	84.17
4	1,3,3,6	73.88
6	1,1,2,3,3,6	67.23
8	1,1,2,2,3,3,4,6	62.36
10	1,1,1,2,3,3,3,4,6,6	58.04

注:装置的最优位置项中的数字表示楼层。

同数目的主动变刚度·阻尼控制装置的最优位置设置方案的结果。当控制装置的数目增加时,目标函数值递减,结构的最大层间位移明显减小,这表明受控结构的安全性得到了较大改善。从表 2 可以看出,几乎所有最优的主动变刚度·阻尼装置的位置均在受控结构的下半楼层,且出现了在结构同一楼层上布置多个装置的情形。这是由于剪切型结构较低层的层间位移远大于较高层的层间位移,因此为了减小结构的最大层间位移,控制装置必须尽量设置在下部楼层;而下部楼层所需控制力大于单个主动变刚度·阻尼装置的工作能力,所以需要将多个主动变刚度·阻尼装置设置在同一楼层来提供所需的控制力。

图 5 为结构中设置 10 个主动变刚度·阻尼控制装置时,历代最优个体目标函数值的进化曲线。仿真分析时一共考虑了 100 代,每代的群体中包含 15 个个体。很明显,每一代最优个体的目标函数值随着进化代数的增加呈单调递减,在进化 70 代(产生 1 050 个个体)后得到最优装置,与穷举法检验每一种可能的位置组合相比(共有 C_{12}^{10} 种可能),其计算量是微不足道的。显然,主动变刚度·阻尼装置的数量越多,该方法的优越性就越明显,因此,本文中提出的主动变刚度·阻尼装置的位置优化方法的计算效率是很高的。

图 6 为主动变刚度·阻尼系统放大系数对控制效果的影响规律。图 6 中当主动变刚度·阻尼装置的放大系数 $\beta=0$ 时,曲线在理论上对应于在结构上

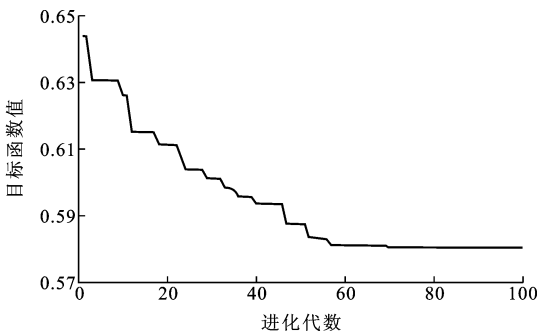


图 5 历代最优个体的判别函数值

Fig. 5 Criterion Function Value of Optimal String in Each Generation

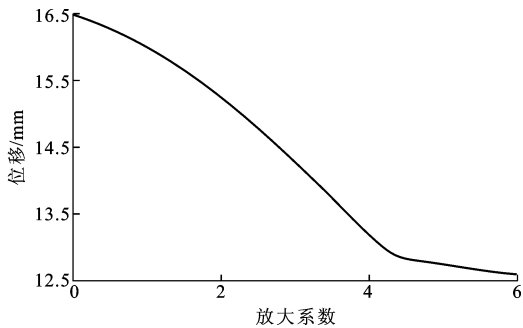


图 6 最大层间位移与放大系数的关系

Fig. 6 Relation of Peak Interlayer Displacement and Amplification Coefficient

安装传统耗能阻尼器时的层间位移均方差。随着放大系数 β 的增加,结构的最大层间位移均方差线性递减;当放大系数 $\beta>4.5$ 时,其递减趋势趋于平缓。主动变刚度·阻尼系统的反应放大功能可以通过合理设计装置的放大系数使阻尼器更加高效地工作,从而耗散更多的振动能量,大大提高所控结构的安全性。

为了检验主动变刚度·阻尼系统不同控制方式的控制效果,对该结构输入 1940 年 El Centro 地震波的南北分量进行计算机仿真分析。假定结构仅设置 2 个主动变刚度·阻尼装置,从表 2 中可知,其最优的位置分别在结构的第 1 层和第 3 层。图 7 与图 8 比较了不同控制工况时受控结构的反应。图 7 中相比于无控制时的情形,半主动控制时结构底层的峰值位移响应减少了 68.9%, Passive-on 状态时减少了 50.61%,而 Passive-off 状态时减少了 14.02%。由此可知,主动变刚度·阻尼系统及所采用的控制律是非常有效的。图 8 为结构各楼层的最大位移包络图。结果表明,当对结构进行控制时,结构各楼层的位移均减小了。在所有的控制工况中,半主动控制能取得最优的控制效果,而半主动控制和 Passive-

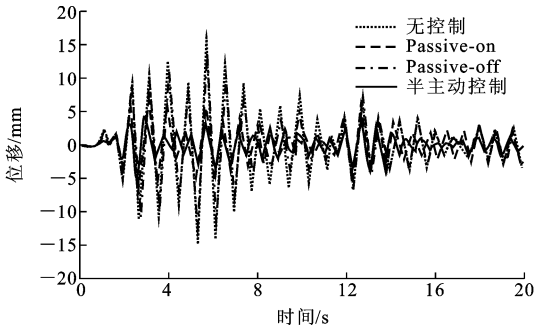


图7 底层楼面位移响应时程

Fig. 7 Time-history of First Floor Displacement Response

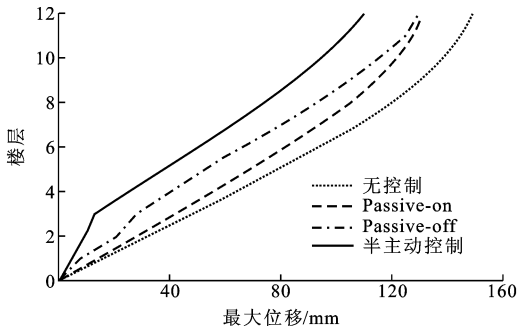


图8 结构最大位移响应

Fig. 8 Maximum Displacement Response of Structure

on 状态均优于 Passive-off 状态,原因是前 2 种控制时主动变刚度·阻尼都具有反应放大功能。

图 9 为仿真分析所得到的主动变刚度·阻尼控制系统半主动控制时 2 个主动变刚度·阻尼装置的开关切换时程曲线(开关状态的 0 表示关状态,1 表示开状态)。图 9 中 2 个控制装置在大多数时段内阀门是开启的,这表明具有反应放大功能的变阻尼的工作状态优于变刚度的工作状态。

6 结 语

(1)基于受控结构性能瞬时最优控制策略推导的主动变刚度·阻尼系统开关控制律是十分有效的,半主动控制取得了比 2 种对应的被动控制更好的控制效果,可有效地增强受控结构体系在地震作用下的安全性。

(2)主动变刚度·阻尼装置的反应放大原理是非常明显的,半主动控制和 Passive-on 控制时均可取得优于 Passive-off 控制的效果。

(3)本文中所提出的基于遗传算法的主动变刚度·阻尼装置位置优化方法可以根据控制目标自由定义目标函数,计算效率非常高,可推广应用于其他控制装置的位置优化。

(4)主动变刚度·阻尼系统是一种非常有效的半

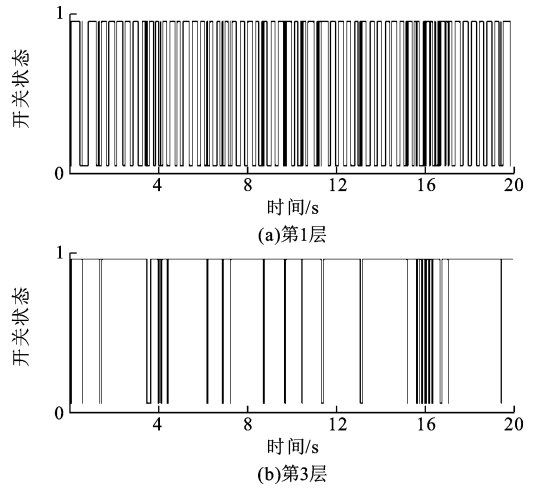


图9 阀门开关切换时程

Fig. 9 Switching Time-histories of Valve

主动控制装置,通过对该系统进行优化设计,可使之较其他纯主动控制装置和纯被动控制装置更具有性能、技术和价格上的综合竞争能力,因此具有更好的工程应用前景。

参考文献:

References:

- [1] 周福霖. 工程结构减振控制[M]. 北京:地震出版社, 1997.
ZHOU Fu-lin. Seismic Reduction Control of Engineering Structures[M]. Beijing: Seismological Press, 1997.
- [2] SPENCER B F J, NAGARAJIAH S. State of the Art of Structural Control[J]. J of Struc Engrn, 2003, 129 (7): 845-856.
- [3] 谭 平. 结构主动变刚度阻尼控制的理论与试验研究[D]. 长沙:湖南大学, 2000.
TAN Ping. Experimental and Theoretical Study on Structural Active Variable Stiffness and Damping Control System[D]. Changsha: Hunan University, 2000.
- [4] NASU T, KOBORI T, TAKAHASHI M, et al. Active Variable Stiffness System with Non-resonant Control [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 2001, 30(11): 1 597-1 614.
- [5] GOLDBERG D E. Genetic Algorithm in Search, Optimization and Machine Learning[M]. Reading: Addison Wesley, 1999.
- [6] SOONG T T, GRIGORIU M. Random Vibration of Mechanical and Structural Systems[M]. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- [7] POHLHEIM H. Evolutionary Algorithms: Overview, Methods and Operators[M]. Berlin: Springer, 1999.