

文章编号: 1000-4750(2010)01-0160-05

# 基于滚球隔震和换能控制的智能控制系统

\*孙作玉, 王 晖, 赵桂峰

(广州大学土木工程学院, 广东, 广州 510006)

**摘 要:** 提出了基于滚球隔震和换能控制的智能控制系统, 在结构物的底层采用滚球隔震并实施换能控制, 利用滚球隔震有效地降低了地震激励对上部结构的影响, 同时发挥出换能控制的特点, 限制隔震层的相对位移并改善控制效果。建立了该控制系统的数学模型, 对换能控制装置进行了改进, 实现了多级荷载的换能控制, 采用遗传算法实施智能控制。通过仿真分析研究了该系统的特点和算法的有效性。

**关键词:** 智能控制; 滚球隔震; 换能控制; 遗传算法; 仿真分析

**中图分类号:** TU352.1 **文献标识码:** A

## INTELLIGENT STRUCTURAL CONTROL SYSTEM BY EMPLOYING BALL ISOLATION AND CONTROL WITH ENERGY TRANSFORM

\*SUN Zuo-yu, WANG Hui, ZHAO Gui-feng

(College of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou, Guangdong 510006, China)

**Abstract:** An intelligent structural control system is proposed by employing ball isolation and by controlling with energy transform. Responses of a super structure is controlled effectively by ball isolation, while the relative drift of the isolation layer is alleviated and the control performances are improved depending on the merits of the control device with an energy transducer. A numerical model of the control system is established. An multi-stage force control is conducted by employing the modified control device. Intelligent control is implemented using genetic algorithm. The effectiveness of the control strategy and control system characters is investigated through a sample building simulation.

**Key words:** intelligent structural control; ball isolation; control device with energy transducer; genetic algorithm; simulation

建筑结构振动控制是减轻结构物在地震、强风或海浪等随机荷载激励下结构响应的有效措施<sup>[1]</sup>, 近 40 年来, 人们探索和研究了多种结构振动控制形式<sup>[2]</sup>, 理论研究和实际工程应用都取得了显著的进展。结果表明主动控制的控制效果最好, 但其技术较复杂, 并需要持续稳定的外界能源, 因此具有成本高, 可靠性较难保障的不足; 对比而言, 被动控制仅需要简单的耗能元件, 成本较低, 易于加工制作, 因此在工程实践中得到了广泛应用<sup>[3]</sup>, 但其

明显的不足是控制效果不具有荷载适应性, 当外激励荷载与设计荷载有较大差别时, 控制效果明显变差。为了克服主动控制和被动控制各自的不足并发挥两者的优点, 半主动控制得到了越来越多的重视, 通过应用很小的能量主动调节控制系统的参数, 采用主动控制的方式, 取得了优于被动控制、接近主动控制的效果, 目前已经成为结构振动控制研究的热点。但由于没有类似于主动控制的能源保障, 其控制力的实现依然受限于作动器相对运动的

收稿日期: 2008-08-23; 修改日期: 2009-06-11

项目基金: 国家自然科学基金项目(50678039)

作者简介: \*孙作玉(1963—), 男, 山东人, 教授, 博士, 从事结构振动控制研究(E-mail: sunzuoyu@163.com);

王 晖(1963—), 女, 山东人, 副教授, 学士, 从事结构工程研究(E-mail: wanghui\_sunyu@163.com);

赵桂峰(1972—), 男, 黑龙江人, 高工, 博士, 从事结构振动控制研究(E-mail: zgf\_220@yahoo.com.cn).

方向。建筑结构换能控制是解决这类问题的有益探索<sup>[4-8]</sup>，其核心思想是利用“隔震换能控制装置”将地震激励引起的结构振动的一部分动能转换为液压能贮存起来，并作为对结构实施主动控制的能源，克服了传统主动控制对能源依赖所带来的成本高、可靠性难以保障的不足。理论分析和实验研究证明了这种控制方案的可行性和有效性。

建筑结构隔震换能系统的换能效率与隔震层的相对位移及层间恢复力直接相关，为了进一步发挥隔震换能装置的性能并改善隔震效果，本文提出了基于滚球隔震和换能控制的智能控制系统，即在结构物的底层采用滚球隔震并实施换能控制，利用滚球隔震进一步降低地震激励对上部结构的影响，并提高隔震换能系统的换能效率。建筑结构隔震换能系统的控制效果与蓄能器的气体压力有关，通过改进隔震换能装置，实现了多级荷载换能控制，相比原设计方案，有利于提高振动控制效果。针对所提出的滚球隔震换能控制系统，基于滚球隔震的特点建立了动力学方程，结合多级荷载换能控制，应用遗传算法实现了该系统的智能控制。

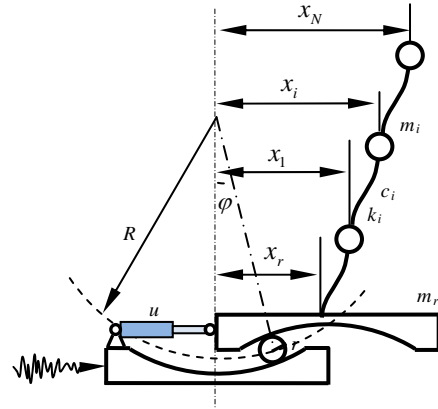
### 1 滚球隔震换能控制的动力学方程

滚球隔震是一种十分有效的建筑结构振动控制措施<sup>[9]</sup>，其原理是在隔震层处利用钢球的滚动隔离基础的运动对上部结构的影响。由于钢球的滚动摩擦很小，因此上部结构的运动主要受球槽形状的影响，它提供影响上部结构运动的作用力，因此要进行合理的设计，以保证隔震层不至产生过大的相对位移。显然如果球槽半径较小，隔震层的相对位移也较小，但是隔震效果也会受到影响。本文设计的滚球隔震换能控制系统则是在隔震层处同时安装有换能控制装置，发挥其换能和控制的作用，并改善振动控制效果。

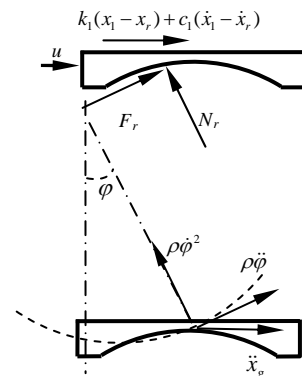
基于滚球隔震结构的特点，其上部结构可以简化成层剪切模型<sup>[9]</sup>，考虑换能控制装置的作用，该系统的力学模型如图 1 所示。

图 1 中  $R$  为球槽的半径； $r$  为钢球的半径；设  $\rho$  为底板质心运动轨迹的曲率半径；用  $f_r$  代表滚球的滚动摩擦系数，则系统的动力学方程为：

$$m_r(\rho\ddot{\phi}\cos\phi - \rho\dot{\phi}^2\sin\phi + \ddot{x}_g) - F_r\cos\phi + N_r\sin\phi - k_1(x_1 - x_r) - c_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_r) - u = 0 \quad (1)$$



(a) 滚球隔震换能控制计算模型



(b) 隔震底板计算模型

图 1 计算模型

Fig.1 Computational model

$$m_i(\ddot{x}_i + \ddot{x}_g) - k_{i+1}(x_{i+1} - x_i) - c_{i+1}(\dot{x}_{i+1} - \dot{x}_i) + k_i(x_i - x_{i-1}) + c_i(\dot{x}_i - \dot{x}_{i-1}) = 0 \quad (2)$$

$$m_N(\ddot{x}_N + \ddot{x}_g) + k_N(x_N - x_{N-1}) + c_N(\dot{x}_N - \dot{x}_{N-1}) = 0 \quad (3)$$

$$\left(m_r + \sum_{i=1}^N m_i\right)(\rho\ddot{\phi}\sin\phi + \rho\dot{\phi}^2\cos\phi) - F_r\sin\phi - N_r\cos\phi + g\left(m_r + \sum_{i=1}^N m_i\right) = 0 \quad (4)$$

$$F_r = -N_r f_r \operatorname{sgn}(\dot{\phi}) \quad (5)$$

$$x_r = \rho\sin\phi, \quad \dot{x}_r = \rho\dot{\phi}\cos\phi \quad (6)$$

$$\rho = 2(R - r) \quad (7)$$

由式(4)和式(5)可得：

$$N_r = \frac{\left(m_r + \sum_{i=1}^N m_i\right)(\rho\dot{\phi}\sin\phi + \rho\dot{\phi}^2\cos\phi + g)}{\cos\phi - \operatorname{sgn}(\dot{\phi})f_r\sin\phi} \quad (8)$$

将式(5)－式(8)代入式(1)有：

$$\ddot{\phi} = [k_1(x_1 - \rho\sin\phi) + c_1(\dot{x}_1 - \rho\dot{\phi}\cos\phi) + m_r\rho\dot{\phi}^2\sin\phi -$$

$$m_f(g + \rho\dot{\varphi}^2 \cos\varphi) - m_r\ddot{x}_g + u / [\rho(m_r \cos\varphi + m_f \sin\varphi)] \quad (9)$$

$$m_f = M \left( \frac{\sin\varphi + \operatorname{sgn}(\dot{\varphi})f_r \cos\varphi}{\cos\varphi - \operatorname{sgn}(\dot{\varphi})f_r \sin\varphi} \right) \quad (10)$$

$$M = \left( m_r + \sum_{i=1}^N m_i \right) \quad (11)$$

式中  $\operatorname{sgn}(\dots)$  是符号函数。

为便于仿真分析, 引入状态向量  $\mathbf{y}$ :

$$\begin{cases} y_1 = \varphi, & y_2 = x_1, & \dots, \\ y_{i+1} = x_i, & \dots, & y_{N+1} = x_N, \\ y_{N+2} = \dot{\varphi}, & y_{N+3} = \dot{x}_1 & \dots, \\ y_{i+N+2} = \dot{x}_i, & \dots, & y_{2N+2} = \dot{x}_N \end{cases} \quad (12)$$

则运动方程的状态空间描述为:

$$\dot{y}_i = y_{i+N+1}, \quad i = 1, 2, \dots, N+1 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \dot{y}_{N+2} = & [k_1(y_2 - \rho \sin(y_1)) + c_1(\dot{x}_1 - \rho y_{N+2} \cos(y_1)) + \\ & m_r \rho y_{N+2}^2 \sin(y_1) - m_f(g + \rho y_{N+2}^2 \cos(y_1)) - \\ & m_r \ddot{x}_g + u] / [\rho(m_r \cos(y_1) + m_f \sin(y_1))] \quad (14) \end{aligned}$$

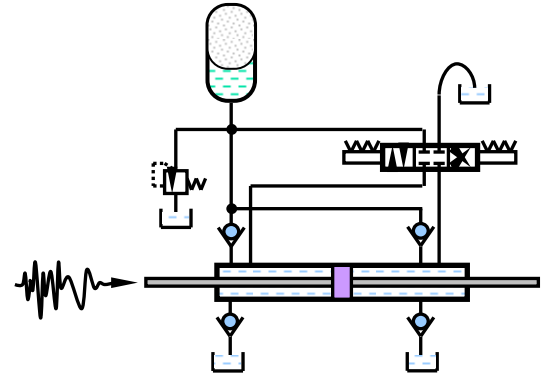
$$\begin{aligned} \dot{y}_{i+N+2} = & \frac{1}{m_i} (k_{i+1}(y_{i+2} - y_{i+1}) + c_{i+1}(y_{i+N+3} - y_{i+N+2}) - \\ & k_i(y_{i+1} - y_i) - c_i(y_{i+N+2} - y_{i+N+1})), \\ & i = 1, 2, \dots, N-1 \quad (15) \end{aligned}$$

$$\dot{y}_{2N+2} = \frac{-1}{m_N} (k_N(y_{N+1} - y_N) + c_N(y_{2N+2} - y_{2N+1})) \quad (16)$$

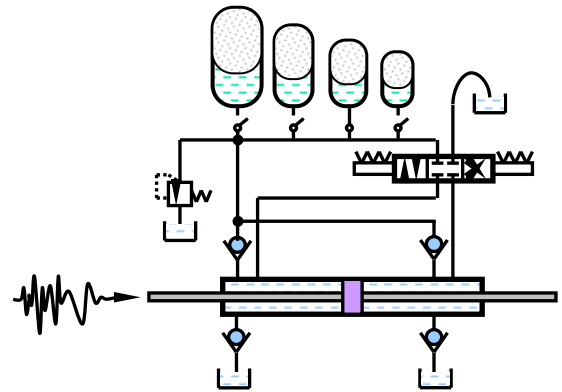
$$m_f = M \left( \frac{\sin(y_1) + \operatorname{sgn}(y_{N+2})f_r \cos(y_1)}{\cos(y_1) - \operatorname{sgn}(y_{N+2})f_r \sin(y_1)} \right) \quad (17)$$

## 2 隔震换能控制装置的改进

试验研究表明隔震换能控制装置的控制性能与蓄能器中的压力直接相关<sup>[6-9]</sup>, 当蓄能器容积相对较大时, 工作过程中蓄能器压力的波动变化并不大, 此时该装置的控制效果相当于bang-bang控制, 其原理如图 2(a)所示。为了进一步改善该装置的控制性能, 在原装置的基础上增加几个不同压力的蓄能器, 这几个蓄能器容积由大到小, 初始压力由低到高, 每个蓄能器下面连接一个电磁开关阀, 控制油路的通闭。例如当需要的油压为  $p=p_i$  时, 则通过电信号控制, 打开该第  $i$  个油压蓄能器下的电磁开关阀, 同时关闭其它油压蓄能器下的电磁开关阀, 这样就实现了多级荷载的隔震换能控制, 其原理见图 2(b)。



(a) 原隔震换能控制装置原理图



(b) 新隔震换能控制装置原理图

图 2 隔震换能控制装置原理图

Fig.2 Principal scheme of control device with energy transducer

相对于原控制装置而言, 改进的控制装置增加了几个蓄能器和电磁开关阀, 成本有所增加, 控制方式也变复杂了一些, 但是实际应用时, 所需控制器将不只一个, 此时这些蓄能器可以共用。因此新的设计将发挥其长处, 而带来的不利影响并不大。

## 3 智能控制算法

由前述的动力学方程可知, 该系统是一个非线性系统, 再考虑到换能控制装置所能提供的控制力并不是连续性变化的, 因此传统的控制算法和理论在这里并不适用。针对这类问题, 采用智能控制是一种合适的方案, 目前常用的智能控制方法有模糊控制、神经网络控制和遗传算法控制<sup>[2]</sup>等。对于本文的问题, 由于多级荷载控制实施时所涉及的情况并不复杂, 采用遗传算法不但能够达到较理想的控制效果, 而且算法实现相对容易处理, 因此这里采用遗传算法进行智能控制。

应用遗传算法进行最优控制<sup>[10]</sup>, 主要包括最优控制力时程“初始种群”的设计, 然后通过“交叉”、“变异”和“遗传”等运算, 生成新的优化控制力时程, 过程中依据性能指标函数作为判断优劣的依

据, 并选择性能指标较小的部分种群按照设定的比率进行遗传优化, 其最大的优点是算法适应性强, 不但可以应用于线性系统, 而且也适用于强非线性系统, 它的另一个优点是, 能够进行全局寻优。考虑多级荷载控制的特点, 提出了适合于本文装置控制的遗传算法。

设已知系统前 $t_k=k \cdot dt(k=1, 2, \dots, m)$ 时刻的状态响应, 现在欲求其后 $m+s$ 时刻的控制力, 即 $u_{m+s}$ ,  $s=1, 2, \dots, j, \dots, n$ 。若 $m+s$ 时刻的系统地状态向量为 $Y_{m+s}$ , 则遗传算法最优控制力计算的问题可定义为:

$$\begin{cases} \text{求} & u_i (i = m+1, m+2, \dots, m+s) \\ \text{最小化} & J = \sum_{i=m+1}^{m+s} (Y_i^T Q_1 Y_i + \dot{Y}_i^T Q_2 \dot{Y}_i) \\ \text{受约束} & g(Y_i, \dot{Y}_i, u_i) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $g(Y_i, \dot{Y}_i, u_i) = 0$  是前述系统动力学式(13)一式(17)对应的离散系统状态方程;  $Q_1$ 、 $Q_2$  则分别是性能指标函数  $J = \sum_{i=m+1}^{m+s} (Y_i^T Q_1 Y_i + \dot{Y}_i^T Q_2 \dot{Y}_i)$  中与状态向量及其导数对应的权系数矩阵。

将控制力时程 $u_i (i = m+1, m+2, \dots, m+s)$ 用控制力时程矢量 $U_j$ 表示, 则初始控制力种群 $U_j (j=1, 2, \dots, k)$ 的生成可以按照下述步骤进行:

$$U_j = [u_{m+1}^j \quad u_{m+2}^j \quad \dots \quad u_{m+s}^j]$$

其中的 $u_{m+k}^j$ 表示 $U_j$ 在 $m+k$ 时刻的值, 则:

$$u_{m+k}^j = \text{RandF}(-1, 0, 1) \cdot \text{RandF}(P_1, P_2, \dots, P_L) \cdot A$$

式中:  $\text{RandF}(v_1, v_2, \dots, v_N)$ 表示随机生成函数, 其取值为按照均匀分布随机选取输入参数中的一个数值作为函数值;  $P_k$ 表示第 $k$ 个蓄能器的压力;  $A$ 为换能控制器中活塞的油压面积。如此可以生成 $U_j$ 中的诸元素, 形成 $U_j$ , 同理生成初始控制力种群 $U_j (j=1, 2, \dots, k)$ 。

在此基础上, 以式(18)为性能指标函数, 即可应用遗传算法进行最优控制力计算<sup>[10]</sup>, 并实施智能控制。

#### 4 数值算例

以一个三层砌体房屋结构为例, 应用前述智能控制算法, 分析所提智能控制系统的性能及其参数的影响, 并与传统滚球隔震系统进行对比。房屋结构的有关参数为: 隔震底板及各层的质量均为 345.6t, 结构各层的阻尼和刚度分别为  $2.937 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{s/m}$  和  $3.404 \times 10^8 \text{ N/m}$ 。采用 El Centro (N-S)波作为地面加速度激励, 输入加速度峰值调整为 0.3g。采用前述的智能算法实施控制, 多级控制力的 4 个级别为

0MN、0.5MN、2MN、5MN, 相应的蓄能器压力分别为 0.1MPa、3.5MPa、14MPa、35MPa, 仿真分析时间步长为 0.01s, 为兼顾计算效率和控制效果, 每次计算下两个时刻的最优控制力, 并实施控制, 仿真结果见图 3—图 6。

图 3 所示为  $R=1.0\text{m}$  时, 滚球隔震与智能控制位移响应对比。由图 3 可见, 采用智能控制不但降低了结构的位移响应, 同时也使得隔振层的位移显著降低。

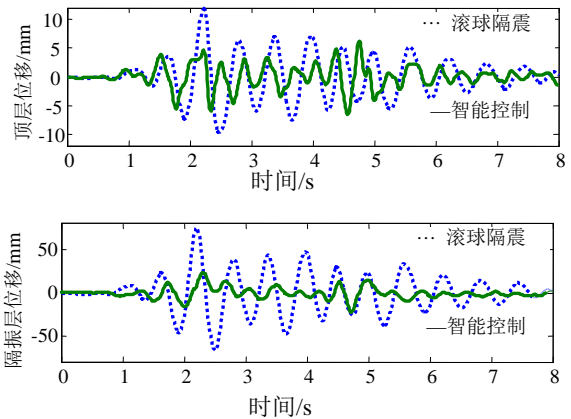


图 3  $R=1.0\text{m}$ , 滚球隔震与智能控制位移响应对比  
Fig.3 Comparison between the responses of the building under ball isolation and intelligent control ( $R=1.0\text{m}$ )

图 4 所示为  $R=2.0\text{m}$  时, 滚球隔震与智能控制位移响应对比。对比图 3 与图 4 可见, 滚球隔震效果与半径直接关系, 而智能控制受此影响较小。这一特点可方便智能控制系统隔震球槽的加工制作并改善振动控制效果。

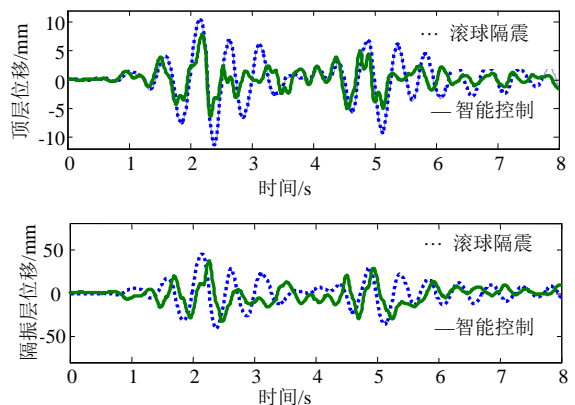


图 4  $R=2.0\text{m}$ , 滚球隔震与智能控制位移响应对比  
Fig.4 Comparison between the responses of the building under ball isolation and intelligent control ( $R=2.0\text{m}$ )

图 5 所示为  $R=1.0\text{m}$  时, 两级荷载控制与多级荷载控制时结构响应对比。由图 5 可见, 采用多级荷载控制可以明显改善控制效果, 特别是隔振层的位移有明显的降低。

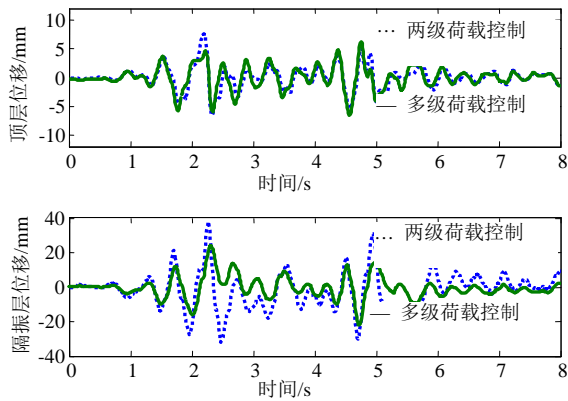


图5  $R=1.0m$ , 两级荷载控制与多级荷载控制响应对比  
Fig.5 Comparison between the responses of the building under two stages force control and multistage force control ( $R=1.0m$ )

图6(a)所示两级荷载控制时的控制力时程, 图6(b)为多级荷载控制时的控制力时程。

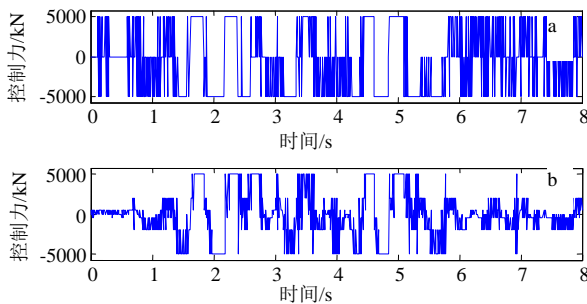


图6  $R=1.0m$  时, 两级荷载控制与多级荷载控制力时程  
Fig.6 Control force time histories under two stages force control and multistage force control ( $R=1.0m$ )

## 5 结论

(1) 提出了滚球隔震换能控制系统, 利用滚球隔震, 可以有效提高隔震效果, 同时充分发挥隔震换能装置的主动控制性能。

(2) 通过改进隔震换能装置的设计, 实现了多级荷载换能控制, 改善了隔震换能装置的控制性能。

(3) 滚球隔震换能控制系统是典型的非线性控制系统, 采用遗传算法可以实现该系统的最优控制。

(4) 仿真分析表明, 球槽半径对传统的滚球隔震的性能影响较大, 而滚球隔震换能控制系统受此影响较小, 因此有利于智能控制系统隔震球槽的加工制作并使系统保持较好的振动控制效果。

## 参考文献:

- [1] Song T T. Active structural control: Theory and practice [M]. New York: Longman Scientific & Technical, 1990.
- [2] 欧进萍. 结构振动控制-主动、半主动和智能控制[M]. 北京: 科学出版社, 2003.  
Ou Jinping. Structural vibration control-active, semi-active and intelligent control [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese)
- [3] 周福霖. 工程结构减震控制[M]. 北京: 地震出版社, 1997.  
Zhou Fulin. Vibration alleviation control for engineering structure [M]. Beijing: Seismology Press, 1997. (in Chinese)
- [4] 孙作玉, 王晖. 地震激励下非线性结构的隔震换能控制[J]. 土木工程学报, 2005, 38(7): 6-10.  
Sun Zuoyu, Wang Hui. Isolation transducer control of nonlinear structure under seismic excitation [J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(7): 6-10. (in Chinese)
- [5] 孙作玉, 程树良, 王焕定. 隔震换能系统的换能效率及振动控制效果的研究[J]. 工程力学, 2005, 22(2): 132-136.  
Sun Zuoyu, Cheng Shuliang, Wang Huanding. On energy transition efficiency and control effect of base-isolated structure with transducer [J]. Engineering Mechanics, 2005, 22(2): 132-136. (in Chinese)
- [6] 程树良, 孙作玉, 王焕定. 隔震换能控制装置力学性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(8): 1058-1062.  
Cheng Shuliang, Sun Zuoyu, Wang Huanding. Experimental study on the performance of control device for isolation and energy transform [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(8): 1058-1062. (in Chinese)
- [7] 孙作玉, 程树良, 王焕定. 隔震换能系统的性能及其参数影响分析[J]. 世界地震工程, 2006, 22(1): 104-108.  
Sun Zuoyu, Cheng Shuliang, Wang Huanding. Performance and parameter analysis of base-isolated structure with transducer [J]. World Earthquake Engineering, 2006, 22(1): 104-108. (in Chinese)
- [8] 程树良, 王焕定, 孙作玉. 隔震换能系统换能效果实验研究[J]. 工程力学, 2006, 23(11): 38-44.  
Cheng Shuliang, Wang Huanding, Sun Zuoyu. Experimental study on effect of energy transition of base-isolated structure with energy transducer system [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(11): 38-44. (in Chinese)
- [9] Zhou Qiang, Lu Xilin, Wang Qingmin. Dynamic analysis on structures base-isolated by a ball system with restoring property [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1998, 27: 773-791.
- [10] 孙作玉, 张薇敬. 基于RDRNN的变阻尼半主动结构控制遗传算法[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2000, 33(2): 8-12.  
Sun Zuoyu, Zhang Weijing. Semi-active structural control GA by variable dampers based on RDRNN [J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2000, 33(2): 8-12. (in Chinese)