

MBC 策略供需函数模型研究

李宏男^{*1,2}, 李 瀛^{1,2}

(1. 大连理工大学 海岸与近海工程国家重点实验室, 大连 116024;
2. 中国联合工程公司 能源与环境工程公司, 杭州 310022)

摘要:总结并改进了基于市场机制的控制 MBC(Market-Based Control)策略应用于建筑结构控制时所采用的供需 S-D(Supply-Demand)函数模型;基于 Lyapunov 第二法确立了保证受控结构系统稳定的方法,提出了确定改进 S-D 函数模型中各参数值的“归一化”方法并给出了相应流程;结合安装有控制装置的建筑结构的仿真计算,分析了改进模型中参数的取值对系统控制效果的影响,同时验证了采用改进供需函数模型 MBC 策略的合理性及有效性。

关键词:地震作用;结构控制;MBC 策略;供需函数模型
中图分类号:O328 **文献标识码:**A

1 引言

结构振动控制技术可以减小结构由于风或地震作用引起的振动反应,有效地提高结构抗风、抗震性能^[1,2],为工程设计和建设开辟了一条新途径。

振动控制领域应用的主动、半主动控制方法需按照一定的算法对输入的测量信号进行计算分析,确定相应的控制信号并向控制装置发出动作指令,实现对原系统的控制。系统可取得的控制效果往往依赖于控制算法,离开了控制算法控制系统就难以发挥作用。基于市场机制的控制 MBC(Market-Based Control)策略应用自由经济中的市场竞争机制模拟复杂的控制系统(包含两部分:能量源系统和受控系统),充分利用市场的价格机制来分配控制系统中有限的控制能量,可以看成是一种在虚拟的市场环境中完成控制能量最优分配的策略^[3,4],与之相应的算法即为 MBC 算法。

将 MBC 算法应用到土木结构控制系统设计时,一个关键的问题在于建立能合理反映系统控制能量分配规律的供需 S-D(Supply-Demand)函数

模型,因为在不同的模型下控制系统表现出的效果往往会不一样。控制系统的稳定性也是衡量控制算法的一个重要标志,由控制算法导致的控制装置出力异常,将严重影响控制系统的正常工作甚至可能带来灾难性的后果。本文在已有工作基础上对 S-D 函数模型进行了分析并加以改进,并基于 Lyapunov 稳定理论讨论了应用改进供需模型 MBC 策略的控制系统稳定性,同时也给出了模型中参数的确定方法,为实际工程应用提供了依据。

2 MBC 策略下结构控制模型

2.1 受控结构运动方程

设置 m 个控制装置的 n 自由度结构,在外界干扰和控制力作用下的运动方程表示为

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = D_s F(t) + B_s U(t) \quad (1)$$

式中 M, C 和 K 分别为 $n \times n$ 维的结构质量,阻尼和刚度矩阵; x, \dot{x} 和 \ddot{x} 分别为 n 维的位移,速度及加速度向量, $F(t)$ 为外界干扰作用, D_s 为外界干扰位置矩阵, $U(t)$ 为控制力向量, B_s 为相应的位置矩阵。令 $Z(t) = \{x(t)^T \quad \dot{x}(t)^T\}^T$,将运动方程(1)转化为状态方程形式为

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + BU(t) + DF(t) \quad (2)$$

式中 $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$

收稿日期:2007-12-06;修改稿收到日期:2008-10-20.

基金项目:国家自然科学基金(50678029,50808036);教育部创新团队(IRT0518);高等学校学科创新引智计划(B08014)资助项目.

作者简介:李宏男*(1957-),男,博士,教授,博士生导师
(E-mail:hnli@dlut.edu.cn).

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}B_s \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}D_s \end{bmatrix}$$

2.2 基于市场机制的控制(MBC)策略

经济学(Economics)研究的是在资源稀缺的给定条件下,消费者、生产厂家和政府部门为实现各自目标而进行的选择^[5]。在不需政府干预的自由市场经济中,作为市场主体的销售商(Seller,卖方)和消费者(Consumer,买方)在价格准则作用下分配稀缺资源来实现各自利益的最大化。

结构控制系统与自由市场经济体系之间具有一定的相似性,两者都要实现稀缺资源的合理有效分配。在自由市场经济中,销售商拥有的商品是待分配的稀缺资源,而在结构控制系统中,受控结构所需的控制能量(促成控制装置出力)是待分配的稀缺资源。在 MBC 结构系统中,能量源系统相当于自由市场中的销售者,而结构-控制装置系统相当于消费者,控制器可看成一个虚拟的市场。能量源系统供给的能量和被控结构需求的能量都是与虚拟市场中控制能量价格相关的。通过此价格被控结构可以获得相应的控制能量,同时控制器将它们转换为控制信号传输给控制装置进行控制力输出,如图 1 所示。

Lynch 等^[3]将 MBC 策略应用到结构振动控制领域,其研究表明采用 MBC 算法对结构进行振动控制可以获得与基于 LQR 算法相当的控制效果。霍林生等^[6]应用 MBC 算法对半主动的 TLCD 进行控制也表明采用此方法减振效果好且节约能量。MBC 算法在工程控制领域中应用的一个关键在于确定受控结构系统即消费者对控制装置能量的需求方程,如何合理地选取需求方程对控制系统的品质具有较大的影响。

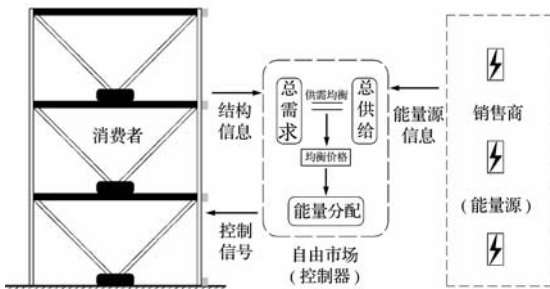


图 1 结构 MBC 策略模型

Fig. 1 Model of structure using MBC strategy

3 供给函数与需求函数模型

3.1 现有 S-D 函数模型

用市场机制来模拟结构控制系统时,虚拟市场的供需函数并没有严格的形式。在选取供给函数时,主要考虑的是市场价格,价格越高,供应量越大。而在选取需求函数时,主要考虑的是结构的反应和控制能量的价格,即:价格上涨,结构趋向于购买较少的能量;结构反应越大,为减小结构振动所需购买的能量越大。为提高计算效率,在 MBC 策略中,供给函数一般取为线性函数模型而需求函数模型可取不同的形式。如采用 MBC 策略的结构振动控制已有下列两种供需函数组合模型:

(1) 线性供给-线性需求模型 LLM(Linear Supply-Linear Demand Model)

Lynch 等^[5]选用了线性函数模型来描述虚拟市场中的供给与需求函数。对单自由度受控结构系统供给与需求函数为

$$Q_s = p/\beta \tag{3}$$

$$Q_D = -|f(x, \dot{x})| \cdot p + |g(x, \dot{x})| \tag{4}$$

式中 β 是反映能量源供给的常数, $f(x, \dot{x})$ 和 $g(x, \dot{x})$ 为结构位移 x_i 与速度 \dot{x}_i 的函数,反映控制能量需求。

而对多自由度受控结构系统,供给函数仍用式(3),但引入虚拟财富的概念加到需求函数中,体现购买力的强弱,即单一买方的需求函数为

$$Q_{D,i} = W_i(-|f(x_i, \dot{x}_i)| \cdot p + |g(x_i, \dot{x}_i)|) \tag{5}$$

式中 W_i 表示各买方的虚拟财富值。当供需相等时,市场达到均衡,可得均衡价格 p 。将此价格代入需求函数方程可求得需求能量,进而得到与之成正比的控制力。

(2) 线性供给-幂需求模型 LPM(Linear supply-Power demand Model)

文献[7]从销售商的利润函数与消费者的效用函数出发,得到了供需函数的另一种模型,即线性供给与一次幂需求函数模型,此模型可改写为如下形式:

$$Q_s = p/\eta \tag{6}$$

$$Q_{D,i} = \frac{W_i(\alpha |x_i| + \beta |\dot{x}_i|)}{p} \tag{7}$$

式中 η 为反映能量源供给的常数, α, β 为结构位移 x_i 与速度 \dot{x}_i 的加权系数。

3.2 改进 S-D 函数模型

结构在地震等外界随机荷载作用下的运动往往表现为层间的相对运动,如果此相对运动超过了某个限值,结构将趋向于不安全。当采用控制装置对结构进行振动控制时,所要达到的目标就是要保证结构的层间运动在一个合适的范围内。应用 MBC 策略进行结构控制时,提出采用表征结构层间运动的层间相对位移与层间相对速度的加权求和来反映受控结构对控制装置的出力要求。

同时如果引入财富的概念来表示单个买方的购买能力时,须确定虚拟市场中的财富在每个控制时间段内迁移与重组的方式。目前已有两种方式:均分方式^[3]和定值方式^[8]。在第一种方式中在每个单步计算时间内需要进行财富的再分配,选用该方式时需要更多的在线计算时间,不利于控制品质的提高;而在后一种方式中,财富在各控制时段视为定值,不会发生迁移及重组,即不考虑财富的影响,本文在研究选用该种方式。

(1) 改进线性供给 - 幂需求模型 ALPM (Advanced Linear supply-Power demand Model)

在原模型中,考虑的是位移与速度的绝对值加权求和,而且其方向没有很好的反映出来。将此模型改进为如下形式:

$$Q_{S,j} = \eta_j \cdot p \quad (8)$$

$$Q_{D,i} = \frac{|\alpha_i x_{d,i} + \beta_i \dot{x}_{d,i}|}{p} \quad (9)$$

式中 η_j 为反映能量源供给的常数, $x_{d,i}$ 和 $\dot{x}_{d,i}$ 分别表示单个买方代表的结构的层间相对位移和层间相对速度, $\alpha_i \geq 0, \beta_i > 0$ 为相应的权系数。

市场均衡时:

$$\sum_j Q_{S,j} = \sum_i Q_{D,i} \quad (10)$$

可求得平衡价格 p ,进而可得到正比于需求能量的控制力(考虑了方向):

$$U_i = -K \cdot \frac{(\alpha_i x_{d,i} + \beta_i \dot{x}_{d,i})}{p} \quad (11)$$

式中 $K > 0$ 为控制力增益系数,可按所要达到的控制效果进行选取。

(2) 线性供给 - 指数需求模型 LEM (Linear supply-Exponential demand Model)

随机荷载作用下的建筑结构,在荷载作用时刻需要的控制力大小在一定范围内,过大的控制力将导致系统的不安全。应用 MBC 策略,可认为市场中

能量价格为零时,结构系统只能得到有限的能量,此即为可能获得的最大能量。据此,提出供给函数采用线性函数形式而需求函数采用指数函数形式的模型:

$$Q_{S,j} = \eta_j \cdot p \quad (12)$$

$$Q_{D,i} = |\alpha_i x_{d,i} + \beta_i \dot{x}_{d,i}| \cdot e^{-cp} \quad (13)$$

式中 c 为需求调节系数,一般可取为 1。同样,通过平衡价格 p 可求得正比与需求能量的控制力:

$$U_i = -K \cdot (\alpha_i x_{d,i} + \beta_i \dot{x}_{d,i}) \cdot e^{-cp} \quad (14)$$

4 MBC 算法稳定性讨论及参数确定方法

4.1 稳定性讨论

控制系统的稳定性是指控制系统在平衡状态下受外部扰动后恢复到平衡状态的趋势或能力^[9]。在控制理论中系统的稳定性可以借助系统极点在复平面上的位置来定性判定,如果一个极点出现在复平面虚轴的右侧,系统则是不稳定的;只有所有的极点位于复平面的左半部分,系统才是稳定的。采用 MBC 策略的结构振动控制,已有的研究还没有给出理论上的稳定性准则。文献[3,6]只是从结构控制系统极点位置来定性判断单自由度结构系统的稳定性。对采用半主动控制装置的多自由度结构系统,文献[3]指出由于半主动装置的有界输入与输出性(Bounded-Input Bounded-Output),保证了 MBC 策略下的半主动控制系统的稳定性。然而,对 MBC 策略应用于主动控制的系统稳定性尚未研究。

在受控结构的状态方程(2)中,不考虑外界干扰下时为

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + BU(t) \quad (15)$$

式中 $U(t) = [U_1(t), U_2(t), \dots, U_m(t)]^T$ 。对于采用改进模型(如:LEM模型)的 MBC 策略下结构控制系统,控制力为式(14)形式,则 $U(t)$ 可写为

$$U(t) = \begin{Bmatrix} -K \cdot (\alpha_1 x_{d,1}(t) + \beta_1 \dot{x}_{d,1}(t)) \cdot e^{-cp} \\ -K \cdot (\alpha_2 x_{d,2}(t) + \beta_2 \dot{x}_{d,2}(t)) \cdot e^{-cp} \\ \dots \\ -K \cdot (\alpha_m x_{d,m}(t) + \beta_m \dot{x}_{d,m}(t)) \cdot e^{-cp} \\ -K \cdot e^{-cp} \cdot [\alpha, \beta] \cdot \begin{Bmatrix} x_d(t) \\ \dot{x}_d(t) \end{Bmatrix} \\ -\lambda \cdot [\alpha, \beta] \cdot \begin{bmatrix} B_s^T \\ B_s^T \end{bmatrix} \cdot Z(t) \end{Bmatrix} = \quad (16)$$

式中 $\lambda = K \cdot e^{-cp} > 0$ (ALPM 模型有 $\lambda = \frac{K}{p} > 0$),

$\alpha = \text{diag}([\alpha_1, \alpha_2 \cdots, \alpha_m]), \beta = \text{diag}([\beta_1, \beta_2 \cdots, \beta_m]),$

$x_d(t) = [x_{d,1}(t), x_{d,2}(t), \cdots, x_{d,m}(t)]^T$

$\dot{x}_d(t) = [\dot{x}_{d,1}(t), \dot{x}_{d,2}(t), \cdots, \dot{x}_{d,m}(t)]^T$

假定:

$$\frac{\alpha_1}{\beta_1} = \frac{\alpha_2}{\beta_2} = \cdots = \frac{\alpha_m}{\beta_m} = \gamma \geq 0 \quad (17)$$

式中 γ 值反映了在改进 MBC 算法中层间位移与层间速度的相对重要性程度,则式(16)可变换为

$$\begin{aligned} U(t) &= -\lambda \cdot \beta \cdot [\gamma I, I] \cdot \begin{bmatrix} B_s^T \\ B_s^T \end{bmatrix} \cdot Z(t) = \\ &= -\lambda \cdot \beta \cdot B^T \cdot \begin{bmatrix} K & \gamma M \\ \gamma M & M \end{bmatrix} \cdot Z(t) = \\ &= -\lambda \cdot \beta \cdot B^T \cdot Q \cdot Z(t) \end{aligned} \quad (18)$$

式中 $Q = Q^T = \begin{bmatrix} K & \gamma M \\ \gamma M & M \end{bmatrix} > 0$

将式(18)代入式(15)有

$$\begin{aligned} \dot{Z}(t) &= AZ(t) + B(-\lambda \cdot \beta \cdot B^T \cdot Q \cdot Z(t)) = \\ &= (A - B \cdot \lambda \beta \cdot B^T \cdot Q) \cdot Z(t) \end{aligned} \quad (19)$$

取下式作为 Lyapunov 函数:

$$v(Z) = Z^T Q Z \geq 0 \quad (20)$$

根据 Lyapunov 第二法,控制系统要保持稳定,

则 Q 的选择应该满足: $\frac{dv(Z)}{dZ} \leq 0$ (21)

上式可化为

$$\begin{aligned} \frac{dv(Z)}{dZ} &= \dot{Z}^T Q Z + Z^T Q \dot{Z} = \\ &= Z^T \cdot (A^T Q + Q A - 2Q B \cdot \lambda \beta \cdot B^T Q) \cdot Z = \\ &= Z^T \cdot (A^T Q + Q A) \cdot Z - \\ &= Z^T \cdot (2Q B \cdot \lambda \beta \cdot B^T Q) \cdot Z \end{aligned} \quad (22)$$

对于式(22),右边第二项 $-Z^T \cdot (2Q B \cdot \lambda \beta \cdot B^T Q) \cdot Z \leq 0$ 是恒成立的。欲使式(21)恒成立,则必须有

$$Z^T \cdot (A^T Q + Q A) \cdot Z \leq 0 \quad (23)$$

恒成立,矩阵 $(A^T Q + Q A)$ 应为半负定矩阵,即其特征根应在复平面虚轴左侧, $\text{Re}(\lambda(A^T Q + Q A)) \leq 0$ 。

$$\begin{aligned} A^T Q + Q A &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} K & \gamma M \\ \gamma M & M \end{bmatrix} + \\ &= \begin{bmatrix} K & \gamma M \\ \gamma M & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} -2\gamma K & -\gamma C \\ -\gamma C & 2\gamma M - 2C \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (24)$$

当 $\gamma = 0$ 时,可知 $(A^T Q + Q A)$ 恒为半负定矩

阵,控制系统恒稳定。也就是说当在改进 MBC 策略下,采用层间速度反映控制能量需求时,系统总是稳定的。当 $\gamma > 0$ 时,可取得一个 γ 值使得 $\text{Re}(\lambda(A^T Q + Q A)) \leq 0$,此时控制系统也是稳定的。

4.2 改进 S-D 函数模型参数确定方法

在结构控制系统中应用 MBC 策略时,选择合适的供需函数模型后,模型参数的确定也是一个关键。Lynch 等^[3] 及霍林生等^[6] 把无控结构的位移和速度的均方反应调到 1 所需的比例因子作为 LLM 模型的权值系数;李学涛^[8] 应用遗传算法优化出各类场地上的 LPM 模型的参数,但给出的参数具有结构局限性,不适用于不同形式的受控结构,而且参数优化过程复杂,不同地震动下优化出的参数往往不一样。

为方便实际应用,针对改进 S-D 模型的 MBC 策略,提出“归一化”思想来确定 ALPM 及 LEM 的权系数。针对各 S-D 模型,设定某价格下的各买方需求量为单位值(在受控结构中则代表结构在全过程运动中反应最大时的控制能量需求量为单位值),而卖方供给量与价格成一次正比例的关系。该方法具体步骤如下:

(1) 选取多条与场地土匹配的地震波,按设防要求对结构进行无控工况下的分析,得到多条地震动作用下无控结构相应层层间位移与层间速度的峰值平均值,记为 $\bar{x}_{dmax,i}$ 和 $\bar{\dot{x}}_{dmax,i}$ 。

(2) 选择 γ 值,保证矩阵 $(A^T Q + Q A)$ 的特征值的实部均不大于 0。

(3) 针对各层最大层间反应下的供需进行“归一化”处理

ALPM 模型,如图 2 所示。

供给: $\eta_j = 1$ (25)

需求: $Q_{D,i} = \frac{|\alpha_i \bar{x}_{dmax,i} + \beta_i \bar{\dot{x}}_{dmax,i}|}{p_0} = 1$

其中由 $p_0 = 1$,则可得

$$\alpha_i \bar{x}_{dmax,i} + \beta_i \bar{\dot{x}}_{dmax,i} = 1 \quad (26)$$

LEM 模型,如图 2 所示。

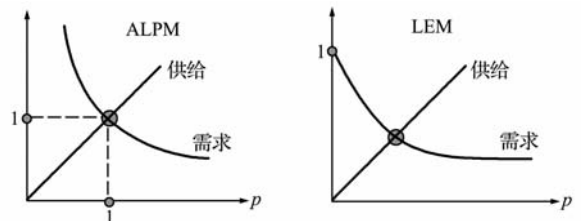


图 2 ALPM 及 LEM 模型“归一化”示意图

Fig. 2 Normalization of ALPM and LEM

$$\text{供给: } \eta_i = 1 \quad (27)$$

需求: $Q_{D,i} = |\alpha_i \bar{x}_{dmax,i} + \beta_i \dot{\bar{x}}_{dmax,i}| e^{-p_0} = 1$, 其中由 $p_0 = 0$, 同理有:

$$\alpha_i \bar{x}_{dmax,i} + \beta_i \dot{\bar{x}}_{dmax,i} = 1 \quad (28)$$

(4) 根据第(2)步所得的 γ 值及式(17), 结合式(26)或式(28)即可确定加权系数 α_i 与 β_i 。

(5) 最后根据控制器的出力范围及特性来选择控制力增益系数 K , 以达到期望的减振效果。

5 数值算例验证与分析

选取一 20 层剪切型结构^[10]为研究对象, 采用改进 MBC 策略设计控制器, 并分析结构振动控制系统的反应。主动控制装置设置在结构的第 1~5、8~12 及 15~19 层。外部地震激励选用 Benchmark 结构分析时所采用的四条地震记录^[2]: El Centro, Kobe, Northridge 及 Hachinohe, 峰值加速度统一调整为 400gal。结合 4.2 节给出的方法, 可确定两种改进模型中的参数为

$$\alpha = \text{diag}([0.624, 0.644, 0.709, 0.764, 0.758, 0, 0, 0.790, 0.790, 0.772, 0.746, 0.722, 0, 0, 0.649, 0.620, 0.545, 0.473, 0.556, 0])$$

$$\beta = \alpha/\gamma, \gamma = 0.1.$$

研究控制力与增益系数 K 之间的关系, 选用这四条地震记录作为外部干扰, 峰值仍为 400gal,

K 取不同值。限于篇幅, 此处仅给出 El Centro 激励下的结果。图 3(a~f) 给出了采用 ALPM 模型与 LEM 模型时, 受控结构各层层间位移、绝对加速度及控制力在不同 K 值下的峰值反应图。可知随着 K 取值的增大, 所需要的控制力增大, 结构反应减小; 当 K 达到一定值以后, 继续增大 K 值, 结构绝对加速度将趋于稳定。结构在两种改进 S-D 模型的 MBC 策略控制下反应相当且控制效果好, 表明了改进模型合理有效。

从仿真计算过程中看, ALPM 模型在地震动前期, 由于加速度较小使得结构反应较小时, 得到的均衡价格 p 会过小, 又因此模型相当于倒数模型, 可能导致求得的控制能量相对实际需要偏大。为避免这种情况可以设定一个最低价格, 即“买卖”活动只能在不低于此价格情况下进行。而对于 LEM 模型来说, 由于其为指数模型, 供需平衡时均衡价格需要用如牛顿迭代法等数值求解方法获得, 但本文利用了“归一化”思想, 求解速度快精度高, 可以很好地避免因计算产生的时滞现象。

按设防目标设计好的结构控制系统, 控制器参数的是固定的。然而地震动强度具有随机性, 每次发生的强度大小不尽相同。采用参数固定的控制器能否抑制在随机的地震动下的结构反应, 是一个值得需要考虑的问题。

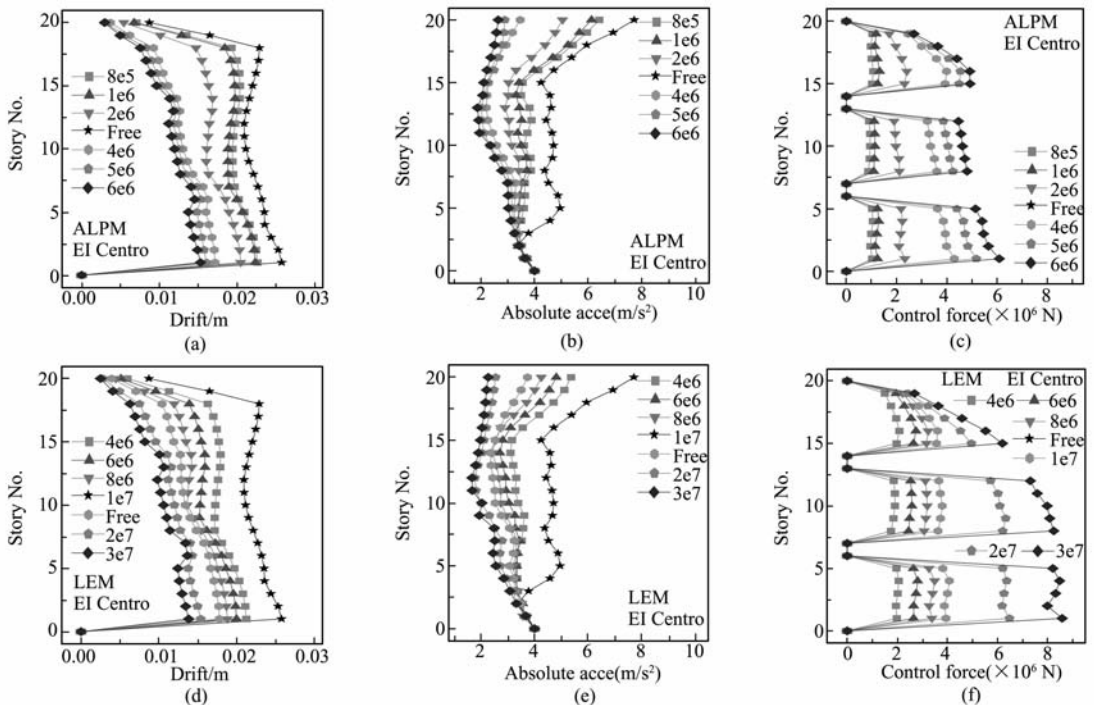


图 3 ALPM 与 LEM 下随 K 值变化受控结构的反应

Fig. 3 Response of the controlled structure under ALPM and LEM with different K values

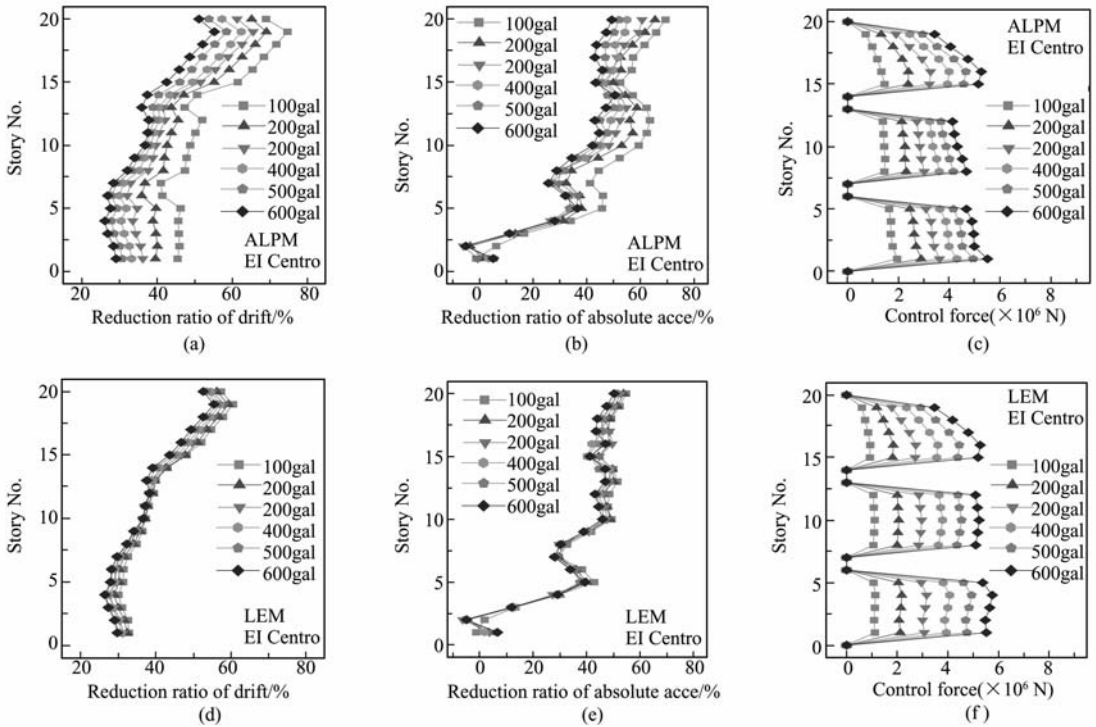


图 4 固定参数 MBC 结构在不同地震动强度输入下的反应

Fig. 4 Response of the MBC structure with fixed-parameters subjected to different-intensity quakes

针对采用两种改进 S-D 模型的 MBC 策略的受控结构,研究其在控制器参数固定下,输入地震动强度不同时的反应。选用前述结构,取 ALPM 模型增益系数 $K = 4e6$ 而 LEM 模型 $K = 1e7$,其余参数不变。仍用 Benchmark 四条地震记录作为外部干扰输入,峰值分别调整为 100gal,200gal,300gal,400gal,500gal 及 600gal。为比较控制效果,定义结构反应的减震率为

$$\rho = \frac{x_0 - x}{x} \times 100\% \quad (29)$$

式中 x_0 表示无控时结构的反应(如层间相对位移与绝对加速等), x 为受控制时结构相应的反应。这里仅列出 El Centro 激励下的结果。

图 4(a~f) 为不同强度的 El Centro 地震动输入时,参数固定的 ALPM 及 LEM 模型 MBC 策略下结构各层层间相对位移反应减震率、绝对加速度反应减震率及控制力峰值图。分析可知随着地震动强度的增大,有效地抑制结构反应控制装置出力峰值也将增大。

同时从图中结果也可知结构采用参数固定的 ALPM 与 LEM 模型 MBC 策略,在不同强度地震激励时所表现出的控制效果不尽相同。采用 ALPM 模型时,结构各层层间相对位移及绝对加速度的减震率随地震强度的增大而减小,减震率变化幅度较宽;而在 LEM 模型下,各层层间相对位移及绝对加

速度的减震率随地震强度的增大而略有减小,但减震率变化幅度不大,这表明该模型适用性较强,能较好地实现控制力调整保证控制效果在预定范围内。

6 结 语

MBC 策略是一种能实现对受控系统有效控制的策略。本文提出了改进的 MBC 策略 S-D 模型,并基于 Lyapunov 稳定理论,对受控结构采用改进供需函数模型的 MBC 策略时的稳定性进行研究,丰富了 MBC 理论。给出了改进 S-D 模型中各参数的确定方法,方便实际应用。结合实例研究了 S-D 模型参数取值不同时受控结构的反应,分析了 S-D 模型参数固定时,不同强度地震动输入下受控结构的反应,表明了控制系统的有效性及 MBC 算法具有较强的自适应性。

然而本文的研究只考虑了结构是线性的情况,对改进供需函数模型的 MBC 策略是否适用于强震作用下非线性结构控制系统,需要作进一步的深入研究。

参考文献 (References):

[1] 李宏男,李忠献,等. 结构振动与控制[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005. (LI Hong-nan, LI Zhong-xian, et al. *Structure Vibration and Control* [M].

- Beijing; China Architecture & Building Press, 2005. (in Chinese))
- [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 Jin-ping. *Vibration Control of Structures——Active, Semiactive and Intelligent Control* [M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [3] LYNCH J P, LAW K H. Market-based control of linear structural systems[J]. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2002, **31**(10):1855-1877.
- [4] 李宏男, 李学涛, 霍林生. 基于市场机制结构控制策略的研究和应用进展[J]. 世界地震工程, 2005, **21**(4): 1-9. (LI Hong-nan, LI Xue-tao, HUO Lin-sheng. State-of-art of structural control research of market-based control [J]. *World Earthquake Engineering*, 2005, **21**(4):1-9. (in Chinese))
- [5] 张 军, 等译. 经济学(微观)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007. (ZHANG Jun, et al, transtlat. *Micro-economics*[M]. Beijing; China Machine Press, 2007. (in Chinese))
- [6] 霍林生, 李宏男. 基于市场机制的 TLCD 半主动控制方案[J]. 应用力学学报, 2005, **22**(1):71-75. (HUO Lin-sheng, LI Hong-nan. Control law for market-based semi-active tuned liquid column dampers[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2005, **22**(1): 71-75. (in Chinese))
- [7] LYNCH J P, LAW K H. A market-based control solution for semi-active structural control[C]. Computing in Civil and Building Engineering, Proceedings of the Eight International Conference, Stanford, CA, USA, Aug 14-16, 2000.
- [8] 李学涛. 基于市场机制的结构振动控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2006. (LI Xue-tao. Market-based control algorithm applied in structure control [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese))
- [9] 胡寿松. 自动控制原理(第四版)[M]. 北京: 科学出版社, 2002. (HU Shou-song. *Automatic Control (Fourth Edition)* [M]. Beijing; Science Press, 2002. (in Chinese))
- [10] KURINO H, TAGAMI J, et al. Switching oil damper with built-in controller for structural control[J]. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 2003, **129**(7):895-904.

Study on supply-demand function models of MBC strategy

LI Hong-nan^{*1}, LI Ying^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Energy & Environmental Engineering Company, China United Engineering Corporation, Hangzhou 310022, China)

Abstract: MBC strategy is an effect control approach that uses the liberal economy market to simulate a complex control system where the energy system and the controlled system are replaced by a seller and a consumer, and the merchandise's supply-demand (S-D) law is applied to distributing the control energy. When applying MBC strategy to civil structure control, the responses of a structure are often different from each other under different S-D function models. So how to build an appropriate S-D function representing the distribution rule of structure control energy is especially important and it becomes the key of MBC strategy applied to structure control. Here, some S-D function models are presented, analyzed and improved. The stability of the controlled system is also discussed and the method to select the coefficients in these models is given for the convenience of actual engineering application.

Key words: seismic action; structural control; MBC strategy; S-D function model