

文章编号: 1000-5013(2010)01-0083-05

AVS 结构控制体系的振动全过程分析

黄庆丰

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 在主动变刚度(AVS)控制器开启和闭合瞬时,通过分析其体系的能量分布或动量分布变化,探讨在 AVS 结构控制体系变结构瞬时,体系运动状态迁移的条件及运动方程,以实现体系振动的全过程分析. 分析体系运动的稳定性及体系的减振机理,探讨在 AVS 控制器开启导致的体系内激励同 AVS 控制器开启和闭合策略之间的共同作用,以避免 AVS 控制器开启后体系短时间内陷于状态切换面作延伸运动,提高体系运动的鲁棒性和 AVS 控制子系统的减振效率.

关键词: 主动变刚度; 振动控制; 全过程分析; 运动状态; 迁移; 减振效率

中图分类号: TU 311.3

文献标识码: A

主动变刚度(AVS)结构控制体系是一种变结构振动控制体系,最早由 Kobori 提出. 它是在受控结构上设置一种由计算机控制的附加刚度锁定装置(AVS 控制器),按一定控制策略在结构振动过程中不断变化动力系统的刚度(闭合或开启 AVS 控制器),以达到减少结构振动幅值的目的. 它具有消耗能量少、控制简便有效的优点,因此在国内外受到了广泛关注^[1-3]. 本文给出一种主动变刚度结构控制体系振动的全过程分析方法.

1 AVS 结构控制体系运动的稳定性

AVS 结构控制体系可分解为结构子系统(原结构)和控制子系统,如图 1 所示. 从图 1 可知,AVS 控制器关闭,控制子系统起附加刚度作用;若 AVS 控制器开启,控制子系统不起附加刚度作用. 因为 AVS 结构控制体系运动具有一定的鲁棒性^[4],等效力法将 AVS 结构控制体系的运动方程表示为^[5]

$$M_s \ddot{Y} + C_s \dot{Y} + K_s Y + U_{k,c} = -M_s I_g \ddot{u}_g, \quad (1)$$

式(1)中: M_s , C_s , K_s 分别为结构子系统的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵. $U_{k,c}$ 为控制子系统的控制力向量, Y 为结构子系统的位移向量, I_g 为地面加速度影响向量, \ddot{u}_g 为地面加速度时间系列.

$$U_{k,c} = \begin{bmatrix} f_1(t) k_{1,c} y_{1,c}(t) \\ \vdots \\ f_n(t) k_{n,c} y_{n,c}(t) \end{bmatrix}, \quad I_g = \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix},$$

式中: $f_i(t) = 0$, $f_i(t) = 1$ 分别为控制器的开、关状态; $k_{i,c}$ 为结构各层所设置的 AVS 控制器的附加刚度; $y_{i,c}$ 为 AVS 控制器与结构子系统的协同运动位移. 式(1)可化为状态方程形式^[6],即

$$\dot{X} = f(X, t). \quad (2)$$

如果系统满足以下两个条件: (1) $f(X, t)$ 的各分量 $f_i(X, t)$ 在其定义域上连续; (2) $f(X, t)$ 的各分量 $f_i(X, t)$ 在其定义域上满足李普希兹条件,即在其定义域上存在常数 L_i ,使得

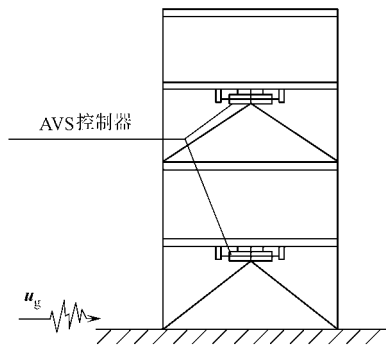


图 1 AVS 结构控制体系示意图
Fig. 1 AVS structural control system

收稿日期: 2009-03-15

通信作者: 黄庆丰(1966-),男,副教授,主要从事结构抗震的研究. E-mail: hqingfeng@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10872072); 华侨大学高层次人才科研启动项目(05BS305)

$$\|f_i(X, t) - f_i(Y, t)\| \leq L_i \sum_{j=1}^n \|x_j - y_j\|, \quad (3)$$

则式(1)的解存在且唯一. 对于 AVS 结构控制体系, 式(2)右边在体系结构形式切换位置不连续, 即式(2)在此位置无定义. 体系运动有两种可能: (1) 体系运动穿越状态切换面实现状态迁移; (2) 体系位于状态切换面作延伸运动.

为了分析 AVS 结构控制体系在结构型式切换位置的运动, 考察其在 AVS 控制器闭合或开启瞬时前后的体系振动能量分布变化. 若 AVS 控制器处于闭合状态, 体系振动能量分布包括结构子系统积蓄的能量分布 A 及 AVS 控制器积蓄的能量分布 A_c , 体系总的振动能量分布为 $A + A_c$; AVS 控制器开启后, 体系由结构子系统抵抗外激励, 但作为结构子系统的附件, AVS 控制器因之前处于闭合状态所积蓄有的能量 A_c 而相对于结构子系统振动, 对结构子系统的既有运动形成干扰. 若 AVS 控制器开启后, 其相对结构子系统振动能量 A_c 足够快地耗尽, 体系振动能量分布由变结构前的 $A + A_c$ 足够快地过度到变结构后的 A , 则体系运动将穿越状态切换面实现状态迁移而保持稳定性.

一般情况下, AVS 控制器的质量远小于结构子系统的质量, 而 AVS 控制器的刚度相对其质量很大. AVS 控制器开启后, 其相对于结构子系统振动的频率远大于结构子系统的固有频率, 而相对振动对结构子系统的能量输入将很小. 此外, AVS 控制器的阻尼比 ($= c/2m_c$) 较结构子系统的阻尼比大很多, 而其相对于结构子系统的振动能量 A_c 是有限的相对小量, 将很快被耗尽. 由系统稳定性的李雅普诺夫判别法可知, AVS 控制子系统开启后, 体系运动具有渐进稳定性.

但有一种情况是, AVS 控制子系统闭合时, 可能残留着之前相对于结构子系统振动的能量分布, 这可能会对 AVS 结构控制体系的运动形成干扰. 同时, 由于 AVS 控制器本身具有质量, 体系变结构会导致体系质量分布的微小变化而形成干扰. 然而, 干扰一般很小, 随时间推移, 这些干扰能量也将很快在体系运动中被耗尽. 同理, 此时体系运动也具有渐进稳定性.

总之, 若不出现 AVS 控制器开启产生的体系内激励同 AVS 控制器的开启和闭合策略共同作用, 导致 AVS 控制器短时间内反复开启和闭合. AVS 控制器具有质量较小而刚度相对质量很大的性质, 决定了 AVS 结构控制体系振动总具有渐进稳定性, 即具有一定的鲁棒性. 体系运动渐进稳定性属于体系运动鲁棒性的一类.

2 AVS 结构控制体系运动状态迁移时的加速度变化

AVS 结构控制体系运动具有一定的鲁棒性, 除体系变结构瞬时, 可认为式(1)在 AVS 控制子系统处于开启状态和闭合状态时均成立. 等效力法将式(1)中 AVS 控制子系统的控制力 $U_{k,c}$ 移项作为荷载处理, 避开了式(1)在体系变结构瞬时无定义的问题.

不计 AVS 控制器质量, 即不计 AVS 控制子系统闭合瞬时的扰动影响, 并近似认为 AVS 控制子系统的协同位移等于体系的层间位移, 则式(1)的增量形式可表达为

$$M_s \ddot{Y} + C_s \dot{Y} + (K_s + K_c A) Y = -M_s I_s \ddot{u}_g, \quad (4)$$

$$K_c = \begin{bmatrix} f_1(t) k_{1,c} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & f_n(t) k_{n,c} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式(4)中: $f_i(t) = 0, f_i(t) = 1$ 分别为 AVS 控制器开、关状态; A 为结构控制系统的层间位移与位移的转换矩阵, 即有

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & 1 & & 0 \\ \dots & & \dots & \dots \\ 0 & \dots & -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad Y_c = AY. \quad (6)$$

式(4)不存在 AVS 控制器的控制力计算滞后, 但 AVS 控制子系统开启瞬时体系的运动仍没有表达. 为解决这一问题, 考察 AVS 控制器开启瞬时体系能量分布变化, 以探讨体系运动状态的变化. 若不计 AVS 控制器开启后体系振动能量的输入和消耗, 结构子系统与 AVS 控制子系统振动能量的总和,

在 AVS 控制器开启的前、后瞬时应当相等,即

$$\frac{1}{2} \dot{Y}^T M_s \dot{Y} + \frac{1}{2} Y^T K_s Y + \frac{1}{2} Y_c^T K_c Y_c = \frac{1}{2} \dot{Y}_+^T M_s \dot{Y}_+ + \frac{1}{2} Y_+^T K_s Y_+ + E_c. \quad (7)$$

式(7)中: Y_- , Y_+ 分别表示 AVS 控制子系统开启前、后瞬时的体系位移矩阵, Y_c 为 AVS 控制子系统开启前瞬时的协同位移矩阵; E_c 为 AVS 控制子系统开启后瞬时的变形能。

由于 AVS 结构控制体系在变结构瞬时的运动具有一定的鲁棒性,式(7)右边第 3 项 E_c (即 AVS 控制器开启后相对于结构子系统振动的能量),对 AVS 控制器开启后的体系运动影响很小且很快被耗尽,对体系而言 $dE_c/dt=0$. 式(7)两边同时对时间求导,有

$$\dot{Y}^T M_s \ddot{Y} + \dot{Y}^T K_s \dot{Y} + \dot{Y}_c^T K_c \dot{Y}_c = \dot{Y}_+^T M_s \ddot{Y}_+ + \dot{Y}_+^T K_s \dot{Y}_+. \quad (8)$$

AVS 控制器在开启瞬时,各种体系内外部干扰和激励均为有限量,不可能导致体系运动的位移和速度突变,故

$$\dot{Y} = \dot{Y}_+ = \dot{Y}_c, \quad Y_- = Y_+ = Y, \quad (9)$$

AVS 控制器处于闭合状态时与结构子系统协同运动. 式(6)两边对时间求导,有

$$\dot{Y}_c = A \dot{Y}_c^T. \quad (10)$$

将式(6), (9), (10)代入式(8)并化简,有

$$\ddot{Y}_+ - \ddot{Y} = M_s^{-1} (A^T K_c A) Y. \quad (11)$$

式(11)即为 AVS 控制器开启瞬时,体系穿越状态切换面运动的补充方程,它与式(1), (4)共同描述了 AVS 结构控制体系振动的全过程。

式(11)表明: AVS 控制器开启瞬时后, AVS 控制子系统对外输出能量,体系内部因此产生一个加速度增量激励,从而穿越状态切换面实现运动状态迁移. 这一性质类似于电子绕原子核运动时的轨道迁移运动。

3 AVS 结构控制体系减振的影响因素

AVS 结构控制体系振动时, AVS 控制子系统的附加刚度有利于体系抵抗变形的能力,但不是体系位移幅值减小的主要因素. AVS 控制子系统按一定控制规则闭合和开启,形成不断从体系吸取振动能量并对外释放,从而通过有规则地减少体系振动能量来降低体系振动幅值. AVS 控制器的合理设计、AVS 控制器的开启和闭合控制策略设置,以及控制传感器响应滞后于体系响应等因素都会影响体系的减振效率。

假定 AVS 控制器的开关控制规则设置: AVS 控制器所在层的位移与速度乘积小于零,则开启 AVS 控制器;反之,则闭合 AVS 控制器. 按此控制规则,在 AVS 控制器开启瞬时,体系中该 AVS 控制器安装位置的速度与位移方向相反且数值将很小;而由式(11)可知, AVS 控制器开启瞬时,体系获得的加速度增量与体系位移同方向. 在这一加速度增量激励下,体系中 AVS 控制器安装位置的速度方向,短时间内可能由原来的与位移反向改变为与位移同向,位移与速度乘积由原来的小于零改变为大于零,按 AVS 控制器的开启和闭合规则, AVS 控制器在开启后又迅即闭合。

因此, AVS 控制器开启瞬时,体系获得的加速度增量激励与 AVS 控制器的开启和闭合控制规则间的相互作用,可能导致 AVS 控制器短时间内反复迅速地闭合和开启,体系运动在两种结构型式间不断切换. 即陷于状态切换面作延伸运动. 直到 AVS 控制器在与结构子系统协同运动中积蓄的能量已较小, AVS 控制器开启产生的加速度增量激励不再改变体系速度方向,体系运动最终摆脱状态切换面而实现状态迁移。

实际工程中, AVS 控制器开启后,体系短时间内陷于状态切换面作延伸运动,将影响体系运动的鲁棒性和 AVS 控制子系统的控制效率. 根据式(11)进一步建立逻辑判断条件,对原控制策略提出限制,从而避免不合理的 AVS 控制器开启后又迅即闭合动作,以提高 AVS 控制子系统的减振效率. 普遍认为,这一现象是由控制传感器响应滞后或结构子系统高阶频率响应影响较大所导致的,对 AVS 控制器开启后系统的加速度增量激励与控制器控制策略相互作用的影响则较少讨论. 这些作用因素之间有一定的关联性,后续这方面的研究应当有较好的意义。

此外,根据对 AVS 结构控制体系减振机理的讨论,控制子系统依赖于 AVS 控制器与结构子系统协调工作产生的变形来吸收和释放系统振动能量,且 AVS 控制器对外释放能量有一个过程,对控制高频振动分量的适用性较差,对低频振动分量的控制效果则相对较好.

4 算例及分析

将 AVS 控制器的开关控制规则,设置为 AVS 控制器所在层的位移与速度乘积小于零则开启,反之则闭合,并排除式(11)加速度增量对控制策略影响.其时程分析采用 Wilson² 法,输入最大加速度幅值为 $2.94\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的 EL-Centro 波.

算例 1 单质点 AVS 结构控制系统,原结构层质量 $m=90\text{ kg}$,层刚度 $k=5.6\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,阻尼 $c=120\text{ N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$,AVS 控制器的附加刚度 $k=0.2k$. 计算位移(y)响应曲线,如图 2 所示.图 2 中: $t=0.002$ (下同,略).

算例 2 3 层的 AVS 结构控制体系,原结构层质量 $m_1=61.7\text{ kg},m_2=m_3=29.9\text{ kg}$,层刚度分别为 $k_1=13.924\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1},k_2=k_3=20.092\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$,阻尼比 $\gamma_1=\gamma_2=\gamma_3=0.02$,仅底层安装 AVS 控制器,AVS 控制器附加刚度 $k_1=0.3k_1$. 计算位移响应曲线,如图 3、4 所示.

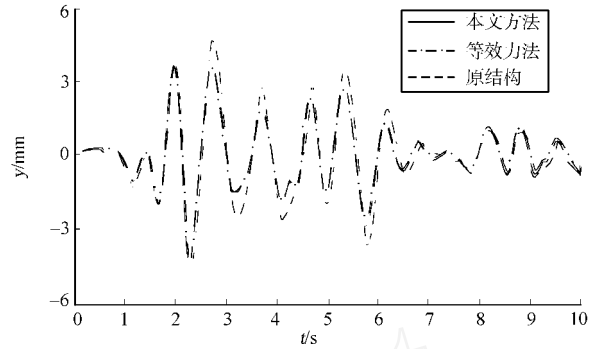


图 2 单自由度结构位移计算结果
Fig. 2 The displacement of structure of single degree of freedom

由图 2~4 可知,按所设定 AVS 控制器开关规则,单自由度和多自由度的 AVS 结构控制体系都达

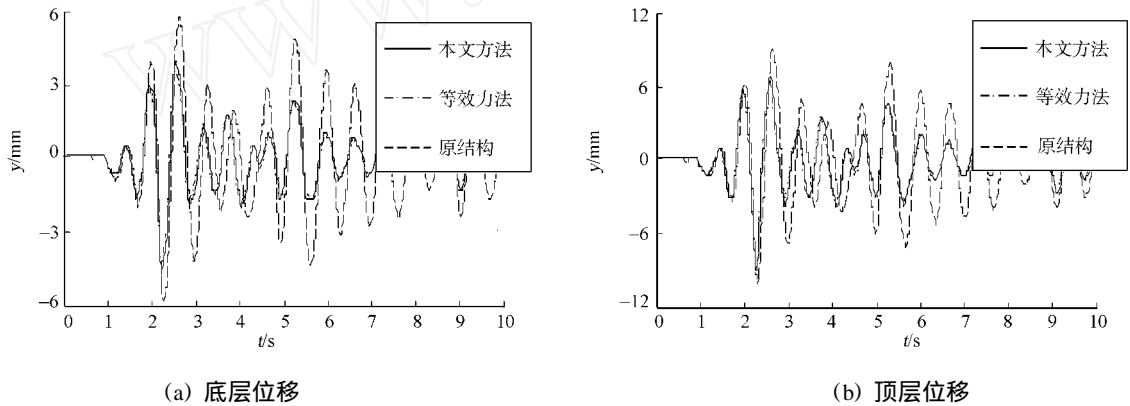


图 3 自由度结构位移计算结果

Fig. 3 The first floor displacement of structure of multiple degrees of freedom

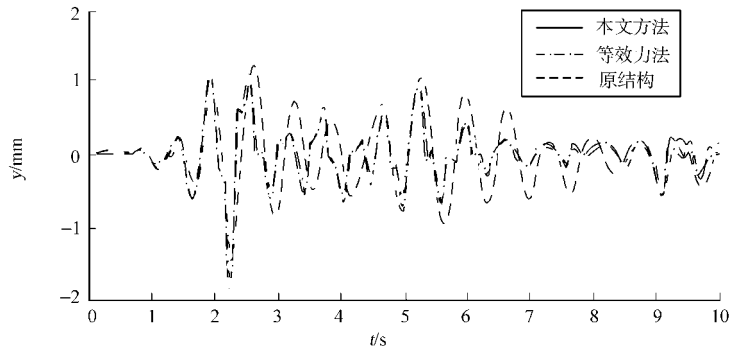


图 4 多自由度结构顶层层间位移计算结果

Fig. 4 The top floor relative displacement of structure of multiple degrees of freedom

到了明显的减振效果.从图 4 可知,底层设置的 AVS 控制器对顶层的层间位移有影响,但不一定能减

小顶层层间位移. 通过对图 3(a), (b) 及图 4 的比较可知, 顶层位移幅值的减少主要是由于底层位移幅值的减少所致.

5 结束语

根据 AVS 结构控制体系在变结构瞬时的能量分布变化与状态迁移运动的关系, 较直观地说明了控制体系振动具有的渐进稳定性及控制体系的减振机理. 所导出体系穿越状态切换面的状态迁移运动方程, 实现了 AVS 结构控制体系运动的全过程描述. 体系运动状态迁移的加速度增量与位移同向, 与体系振动控制规则共同作用下, 可能造成体系在 AVS 控制器开启后的短时间内陷于状态切换面作延伸运动, 影响体系运动的鲁棒性和降低减振效率. 导出的体系状态迁移运动方程, 可应用于改进 AVS 控制子系统的控制规则, 以提高体系的减振效率. 方法的计算过程的物理意义清楚, 可直接用于 AVS 结构控制体系的工程设计及其振动全过程分析.

参考文献:

- [1] KOBORI T, TAKAHASHI M, NASU T, et al. Dynamic loading test of real scale steel frame with active variable stiffness device[J]. Journal of Structural Engineering, 1991, 37B:317-328
- [2] HOUSER G W, BERGMAN L A, CAUGHEY T K, et al. Structural control: Past present and future[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(9):897-971
- [3] 白荣林, 杨润林, 杜建霞, 等. 结构变刚度/变阻尼控制若干问题的研究[J]. 建筑科学, 2009, 25(7):46-51.
- [4] 阎维明, 谭平. 多自由度主动变刚度控制体系的振型控制[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(1):120-126.
- [5] 李静斌, 赵林, 张猛. 主动变刚度阻尼多阵型半主动控制研究[J]. 世界地震工程, 2006, 22(3):105-110.
- [6] 何玉敖, 冯德平. 主动变刚度结构体系(AVS)多模态优化控制研究[J]. 建筑结构学报, 2000, 21(3):53-59.

Analysis of The Whole Vibration Process for AVS Structural Control System

HUANG Qing-feng

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: By analyzing the change of energy distribution or momentum distribution in the moment of closing or opening the active variable stiffness (AVS) controller, the transferring conditions of movement state and the motion equations of structural control system is studied, so as to achieve the analysis of the whole vibration process of the system, to discuss the stability of the movement and the mechanism of vibration reduction of the system. The interaction between the inner excitation due to the opening of AVS controller and the rule of opening-closing of AVS controller is investigated, which can avoid the stretching movement in switching surface of the system in the short time after the opening of AVS controller, to enhance robustness of the structural control system, and to increase the efficiency of vibration reduction of AVS control subsystem.

Keywords: active variable stiffness; vibration control; complete history analysis; movement state; transport; vibration reduction efficiency

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)