

文章编号: 1000-1301(2000)01-0094-06

压电材料智能摩擦阻尼器对高耸钢塔 结构风振反应的半主动控制

瞿伟廉¹, 陈朝晖¹, 徐幼麟²

(1. 武汉工业大学土木工程与建筑学院, 武汉 430070; 2. 香港理工大学土木与结构工程系, 香港)

摘要: 压电材料是一种新型智能材料。本文将压电材料和被动摩擦阻尼器相结合设计出一种新型智能摩擦阻尼器, 并采用基于经典最优控制理论的半主动控制策略对高耸钢塔结构风振反应的控制进行了研究, 对国内即将兴建的第一高钢电视塔——合肥翡翠电视塔进行了算例分析。为满足摩擦阻尼器对高耸钢塔结构风振控制的特殊需要, 文中还建立了高耸钢塔结构的有限元模型和串联多自由度体系模型, 并在形成广义控制力作用位置矩阵和计算摩擦阻尼器两端的相对位移的过程中综合地运用了这两种力学模型。本文研究表明, 压电材料智能摩擦阻尼器可以有效地抑制高耸钢塔结构的风振反应。

关键词: 压电材料; 智能摩擦阻尼器; 高耸钢塔结构; 半主动控制; 风振反应

中图分类号: TU352.2 **文献标识码:** A

Wind-induced vibration control of high-rise steel-truss tower using piezoelectric smart friction dampers

QU Wei-lian¹, CHEN Zhao-hui¹, XU You-lin²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Department of Civil and Structural Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong)

Abstract: Piezoelectric material is a kind of new-type smart material. In the study of this paper, an innovative smart friction damper is designed to incorporate the piezoelectric material with passive friction damper. Based on the classical LQR theory, this paper puts forward a quasi-optimal control strategy for wind-induced vibration control of high-rise steel-truss tower using semi-active friction dampers. Hefei TV tower, the highest steel tower planned to be erected in China, is used as an analytical case to examine the control method. To meet the needs of dynamical analysis of friction-damper-equipped high-rise steel-truss tower, this paper constructs two mechanic models, which are spacial truss finite element model and series-connected multi-freedom model for high-rise tower's vibration control study. The two mechanic models are comprehensively used in establishing the broad-sensed control force location matrix and computing the relative displacement of the two ends of an arbitrarily located friction damper. The studies of this paper confirm the feasibility of this innovative method in the dynamical response analysis for friction-damper-equipped high-rise steel-truss tower, as well as the

收稿日期: 2000-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (59678046)

作者简介: 瞿伟廉, 男, 54岁, 教授, 副院长, 武汉工业大学土木工程与建筑学院。

effectiveness of piezoelectric smart friction dampers in abating the wind-induced vibration responses.

Key words: piezoelectric material; smart friction damper; high-rise steel-truss tower; semiactive control

1 引言

高耸钢塔一般采用塔架结构。这种结构以杆系钢结构为主,刚度与阻尼比较小,需考虑多个振型反应,因而结构风振反应大,舒适度往往不能满足设计要求。为保证这类结构的风振反应满足设计要求,除了采用增加结构刚度的方法外,还可以采用振动控制的方法来抑制结构的风振反应。目前常用的动力减振器(如 TMD、悬吊质量等)虽然能在一定程度上减小结构的风振反应,但它们的最大弱点是需要一个或多个很大的质量块,无论从结构实现上还是从使用上都多有不便。而且它一般只能控制一个或少数几个振型的风振反应,减振效果有限。

为了克服上述缺点,可采用摩擦阻尼器来实现高耸塔架结构的风振控制。这种阻尼器有两个突出的优点:其一,可以将它制作为摩擦杆件,代替普通杆件直接安装在塔架结构上,因而控制装置十分简洁,不占用结构使用空间,不影响结构造型;其二,摩擦阻尼器是一种耗能装置,可以控制所有振型的风振反应,这对于需考虑多个振型影响的高耸塔架结构是十分重要的。但是这类被动的摩擦阻尼器也有它自身的弱点,研究表明摩擦阻尼器的风振控制效果对摩擦单元滑动摩擦力的大小是十分敏感的,滑动摩擦力的选择不当常常限制了阻尼器的风振控制效果。另外,由于高耸塔架结构是空间结构,而脉动风荷载的方向是任意的,因此处于结构中相同标高的各摩擦阻尼器的滑动摩擦力只能设计为相同大小。这样,在相同标高的摩擦阻尼器中只有少数几个能起到摩擦耗能的作用。为此,若将各阻尼器设计为半主动的,那就会取得更好的风振控制效果。

半主动摩擦阻尼器的研究始于 90 年代。Akabay, Aktan(1990, 1991) 和 Kannan(1995) 设计了一种可变摩擦的装置,该装置包含一个刚性联结于结构支撑上的摩擦杆,通过调整接触压力控制摩擦力的大小。在他们的研究中,半主动摩擦阻尼器的控制策略为开关控制和最优控制。Hayen 和 Iwan(1994) 采用主动摩擦阻尼的方法对结构系统进行了振动控制的研究。Inaudi(1997) 提出了一种新的控制策略,取阻尼器滑动面之间的接触压力正比于该阻尼器前一个绝对位移反应峰值。

在上述研究工作中,他们都是依据比较简单的串联多自由度模型进行研究。尚未见到基于复杂空间有限元模型的研究成果。本文在此以高耸塔架结构作为研究对象,将智能材料与被动摩擦阻尼器相结合,设计出了应用于杆系结构的压电材料智能可调参数摩擦阻尼器。在建立了它对高耸塔架结构风振反应半主动控制的计算方法的基础上,文中将其应用于合肥翡翠电视塔的工程实际。模拟计算结果表明,压电材料智能摩擦阻尼器对高耸塔架结构风振反应的控制是十分有效的。

2 理论与公式

2.1 智能摩擦阻尼器对高耸塔架结构风振控制的基本方程

2.1.1 压电材料可调参数摩擦杆件的组成和作用原理

压电材料具有正压电效应和逆压电效应。当在压电元件的表面施加电压,通过电场的作用,会使压电材料内部正负电荷中心产生相对位移,并导致压电材料伸长,这种现象称为逆压电效应。这样,当压电元件两端被约束并施加电压时,就会在压电元件两端产生压力。利用此特性可将压电材料制成驱动元件。当电场作用方向和压电材料变形方向一致时,它们满足方程:

$$\varepsilon = d_{33} \frac{V}{t} - \frac{F}{A_p E_p} \quad (1)$$

式中： d_{33} 为压电常数； t 为电极之间的距离(即压电材料厚度)； V 为所加电压； A_p 为受力面积； E_p 为压电材料弹性模量； F 为约束所引起的力； ε 为非刚性约束下压电材料的应变。

根据压电材料的上述特性，我们将它与普通摩擦阻尼器复合制作成压电材料驱动的可调参数摩擦阻尼器，其原理图和与结构构件并联后的力学模型分别如图 1a 和图 1b 所示。由图中可见，当压电材料在电场驱动下伸缩变形

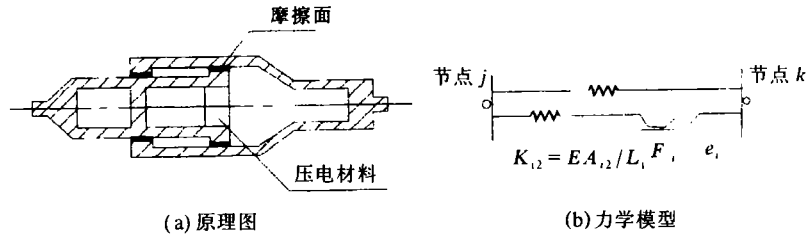


图 1 压电材料智能摩擦阻尼器

时，由于变形被约束，因此在摩擦面上产生正压力，当电场改变时，就可调整摩擦面上的正压力，从而改变摩擦力。如果摩擦阻尼器的设计可保证对压电材料的刚性约束，那么摩擦力 $F(t)$ 与摩擦阻尼器两端的相对变形速度 $v(t)$ 的关系就为

$$F(t) = \mu d_{33} A_p E_p \frac{V}{t} \text{Sgn}[v(t)] \tag{2}$$

式中 μ 为摩擦层的滑动摩擦系数。

值得指出的是，应用于高耸塔架结构的压电材料可调参数摩擦杆件实际上是由结构弹性单元 K_{11} 和滑动摩擦单元 $[E, A_{12}, L_1, F_1, e_1]$ 并联而成的。其中，弹性单元的存在保证了结构不会因联系的丧失而变为机构。滑动摩擦单元即智能摩擦阻尼器。其中 F_1 为按照半主动最优控制策略调整的摩擦单元的滑动摩擦力， e_1 为摩擦单元的滑移量。显然，在初始状态下 $e_1=0$ 。在这两种单元中，弹性单元对结构的贡献是将其本身的单元刚度矩阵叠加到结构的整体刚度矩阵中，而摩擦滑动单元对结构的贡献则是以可调的滑动摩擦力对结构的作用来体现的。

2.1.2 控制原始方程

高耸塔架结构风振控制的运动方程可表示为：

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{p(t)\} - [H]\{U(t)\} \tag{3}$$

式中：

$[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 分别为结构的节点层质量、阻尼和侧移刚度矩阵，其中 $[K]$ 中已包括智能摩擦杆件中弹性单元的贡献；

$\{x\}$ 、 $\{\dot{x}\}$ 、 $\{\ddot{x}\}$ 分别为结构的节点层位移、层速度和层加速度向量；

$\{p(t)\}$ 为作用在结构节点层上的脉动风荷载向量；

$\{U(t)\}$ 为作用在结构上的 $m \times 1$ 阶控制力向量，即智能摩擦杆件中可调摩擦阻尼器的轴力或滑动摩擦力，其中 m 为控制力数，即智能摩擦杆件的个数；

$[H]$ 为 $n \times m$ 阶广义控制力作用位置矩阵。

需要指出的是，方程 (3) 是基于竖向串联多自由度体系结构模型的结构运动方程。如果完全采用空间桁架模型进行动力时程分析，必然会带来两个难以处理的问题：其一，由于时程分析要进行上千次的逐步积分，庞大的自由度必然使计算工作量过大；其二，对于空间桁架结构模型进行动力分析，必须有相应的对应于每一个空间节点的风荷载样本，而这种三维空间相关的风荷载样本又是难以得到的。为此，本文对通过空间有限元法得到的三维结构整体刚度矩阵进行了缩聚，建立了竖向串联多自由度体系结构模型。

通常我们是采用现有大型通用有限元程序来建立高耸塔架结构的杆系有限元结构模型，并以此模型来求得结构的竖向串联多自由度体系结构模型。这种方法对于 TMD、TLD 等控制力作用于质点(结点层)的控制装置是可行的，但它无法描述作为空间桁架单元的摩擦阻尼器对结构动力反应的影响。这一方面是因为摩擦阻尼器不一定安置在结构节点层处，另一方面是因为摩擦阻尼杆件对结构提供的控制力并不线性正比于摩擦阻尼杆件两端的相对位移或相对速度，而是一种非线性

的库仑阻尼力。为此, 本文另行建立了高耸塔架结构的有限元结构模型, 并编制了高耸塔架结构的有限元分析程序。

2.1.3 广义控制力作用位置矩阵 $[H]$ 的建立

从式(3)可以看出, 控制力向量 $\{U(t)\}$ 是指每一个摩擦阻尼器的轴力或滑动摩擦力。显然, 它对应于结构的有限元结构模型。而式(3)的方程又为串联多自由度体系的运动方程。因此, 控制力作用位置矩阵 $[H]$ 实际上是建立了两种力学模型之间的联系。也就是说, $[H]\{U(t)\}$ 把摩擦阻尼器的实际控制力转换成了作用在结构每一质点(节点层)上的水平控制力。在这里, $[H]$ 已不是一般意义上的控制力作用位置矩阵, 而应理解为空间杆系有限元结构模型中摩擦阻尼器的控制力与串联多自由度体系结构模型中各质点(节点层)上的等价水平控制力之间的转换矩阵。由于它保留了一般控制力作用位置矩阵的形式, 故称之为广义的控制力作用位置矩阵。

现设第 j 个摩擦阻尼器对结构作用一个单位控制力 $u_j=1$ 。由于它并不一定作用在节点层处, 因此它对节点层水平振动反应的影响可看成是: 在节点层水平振动方向设置刚性连杆约束后, 它所引起的连杆内的约束反力对原结构反向作用的结果。据此可知, $u_j=1$ 引起的各节点层处的约束反力 $r_{ij}(i=1, \dots, n)$, 就组成了 $[H]$ 矩阵中的第 j 列元素。对于每一个摩擦阻尼器作此计算就可得到广义控制力作用位置矩阵 $[H]$ 。

2.2 智能摩擦杆件对高耸塔架结构风振反应的半主动控制策略

2.2.1 基本思路

为动态地调整摩擦阻尼器对结构的控制力, 先假设各摩擦阻尼器为主动控制单元, 按照最优控制理论求得最优主动控制力向量 $\{u(t)\}$ 。而半主动控制的目的是通过调整摩擦阻尼器的参数(滑动摩擦力)使摩擦阻尼器的控制力向量 $\{U(t)\}$ 尽可能地逼近最优主动控制力向量 $\{u(t)\}$ 。显然, 当摩擦阻尼器的半主动摩擦力 U_i 与最优控制力 u_i 反号以及 U_i 与 u_i 虽同号但 $|u_i| > |U_i|_{\max}$ 时, U_i 不可能达到 u_i 值。而在其余的情况下, 我们可以通过调整摩擦阻尼器的侧向正压力使 $U_i=u_i$ 。

2.2.2 最优主动控制力的计算

若将式(3)中摩擦阻尼器的控制力向量 $\{U(t)\}$ 以最优主动控制力向量 $\{u(t)\}$ 来代替, 并将该方程变换为状态方程:

$$\{\dot{d}\} = [A]\{d\} + [B]\{u(t)\} + [D]\{p(t)\} \quad (4)$$

式中:

$\{d\}^T = [\{\ddot{x}\}^T \{\dot{x}\}^T]$ 为状态向量;

$$[A] = \begin{bmatrix} [0] & [I] \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix}, \text{ 其中 } [I] \text{ 为 } n \times n \text{ 阶单位矩阵;}$$

$$[B] = \begin{bmatrix} [0] \\ -[M]^{-1}[H] \end{bmatrix}; \quad [D] = \begin{bmatrix} [0] \\ -[M]^{-1} \end{bmatrix}$$

那么, 根据线性二次型最优控制的评价函数:

$$J = \int_0^{t_f} \frac{1}{2} [\{d\}^T [Q] \{d\} + \{u\}^T [R] \{u\}] dt \quad (5)$$

式中:

t_f 为脉动风力的持续时间;

$[Q]$ 和 $[R]$ 分别为结构状态向量和控制力向量的加权矩阵。

应用最优控制理论, 可得到对结构风振反应的最优主动控制力为:

$$\{u(t)\} = -[R]^{-1}[B]^T[P]\{d\} \quad (6)$$

其中 $[P]$ 为下列 Riccati 矩阵代数方程的解:

$$[P][A] + [A]^T[P] - [P][B][R]^{-1}[B]^T[P] + [Q] = [0] \quad (7)$$

2.2.3 智能摩擦杆件半主动控制力的实现

在求得最优主动控制力向量 $\{u(t)\}$ 的基础上, 我们可以通过调整施加于压电材料上的电压 V 来控制智能摩擦杆件滑动摩擦力 $F(t)$ 的大小, 从而使摩擦阻尼器的控制力向量 $\{U(t)\}$ 尽可能地逼近最优主动控制力向量 $\{u(t)\}$ 。对于每一根智能摩擦杆件, 其半主动控制力 U_i 的实现方法为:

- (1) 当 U_i 与 u_i 同号且 $|U_i|_{\max} > |u_i|$ 时, $U_i = u_i$;
- (2) 当 U_i 与 u_i 同号且 $|U_i|_{\max} < |u_i|$ 时 $U_i = |U_i|_{\max} \cdot \text{Sgn}(u_i)$;
- (3) 当 U_i 与 u_i 反号时, $U_i = 0$ 。

2.2.4 半主动控制模拟计算的程序框图

本文根据上述理论和公式, 编制了高耸塔架结构风振反应智能磨擦半主动控制的分析程序, 该程序粗框图如图 2 所示。

3 工程应用

3.1 工程概况

合肥翡翠电视塔高 339m, 是即将动工兴建的国内第一高钢结构电视塔, 具有广播电视发射与传输、微波通讯和旅游观光等综合功能。该塔结构在标高 255m 以下为正六边形空间桁架体系, 底部外接圆直径为 88m, 在标高 255m 以上为正四边形天线桅杆。其中在标高 65m 和 218.2m 处设球形塔楼(分别称为下塔楼和上塔楼)。塔中央有电梯井道直通塔楼。电梯井道标高 28m 以下为 250mm 厚钢筋混凝土井筒, 标高 28m 至 243m 由四道竖向钢桁架体系组成, 分别在标高 92m、132.25m、162.5m、189.75m 和 218.2m 处与外部桁架相连。该塔架除标高 28m 以下的井筒为钢筋混凝土外其余均为全钢结构。显然, 它是属于高柔结构。当采用串联多自由度结构模型时, 我们从标高 65m 至 339m 共取了 18 个质点(节点层)。根据《建筑结构荷载规范》(GBJ10-89)可知, 合肥电视塔所在地区的基本风压值 W_0 为 0.30kN/m^2 , 属于 C 类地貌 ($a=0.20$, $H_T=400\text{m}$)。根据以上参数, 本文在产生了时间间隔为 0.02s、持续时间为 100s 的 18 维模拟脉动风样本的基础上对合肥电视塔进行了压电材料智能摩擦阻尼器风振半主动控制的设计计算。

3.2 智能摩擦阻尼器设置位置的确定

摩擦阻尼器提供给结构的控制力与摩擦阻尼器两端的相对位移和相对位移增量有关, 因此, 也与串联多自由度结构体系各质点(节点层)之间的相对位移有关。因此, 将摩擦阻尼器设置于层间变形比较大的质点(节点层)之间将会有较好的减振效果。通过分析合肥电视塔的结构振型曲线可以

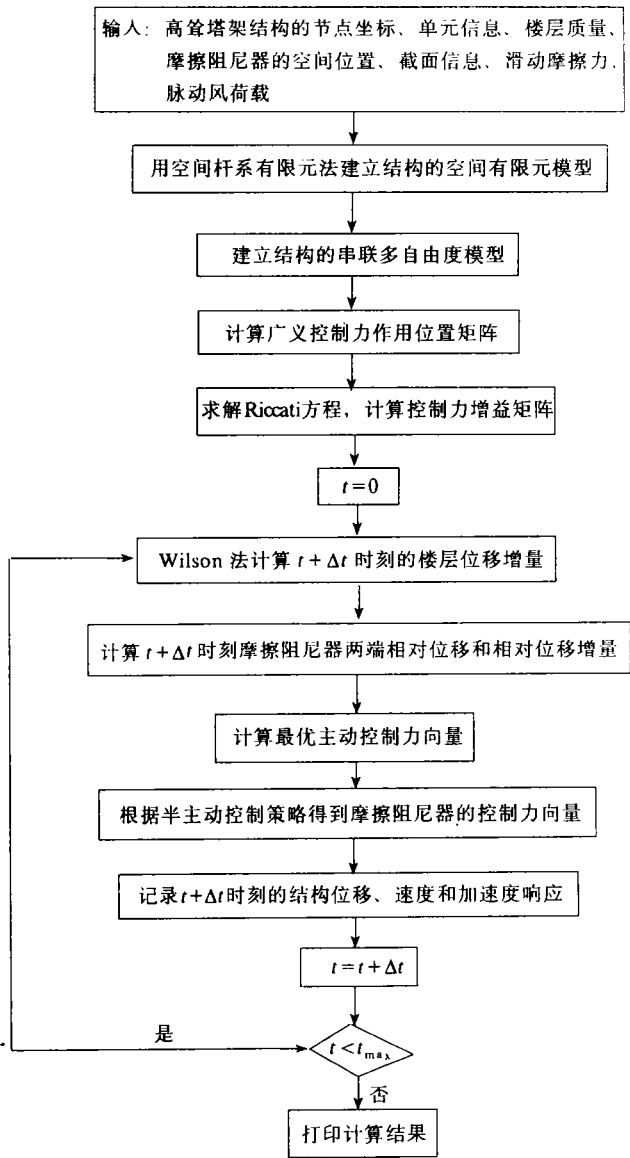


图 2 计算机模拟计算程序框图

发现，下塔楼的上部和上塔楼的上下部位是结构振型曲线变化比较显著的部位，这是因为在这些部位结构的刚度和质量变化比较大。为此，本文将合肥电视塔原结构标高 69.5m 与 92m 之间的 24 根斜杆和标高 189.75m 与 202.4m 之间的 24 根斜杆共 48 根杆件换为压电材料智能摩擦阻尼构件，并对该结构进行了未控结构、被动摩擦阻尼器控制和半主动摩擦阻尼器控制结构的风振响应的对比分析研究。其中，各摩擦阻尼构件的弹性单元轴向刚度 K_{i1} 和滑动摩擦单元刚度 K_{i2} 之和等于原结构相应杆件刚度，它们之比取为 $K_{i1}/K_{i2}=1/4$ 。

3.3 控制效果分析与比较

为了进行受控结构和未控结构风振响应的对比分析研究，定义减振率为：

$$VAR = \frac{Z_{nc} - Z_{co}}{Z_{nc}} \tag{8}$$

式中 Z_{nc} 为原结构的风振响应, Z_{co} 为将部分杆件换为摩擦阻尼杆件后的结构风振响应。

图 3 给出了被动摩擦阻尼杆件和半主动摩擦阻尼杆件对上塔楼的风振位移响应控制的时程曲线。其中，被动摩擦阻尼器风减振控制的减振率为 7.26%，而半主动摩擦阻尼器风振控制的减振率为 43.67%。图 4 给出未控结构、被动摩擦阻尼器控制结构和半主动摩擦阻尼器控制结构的楼层位移峰值包络曲线。从图中可以看出，半主动摩擦阻尼器的减振效果明显优于被动摩擦阻尼器。

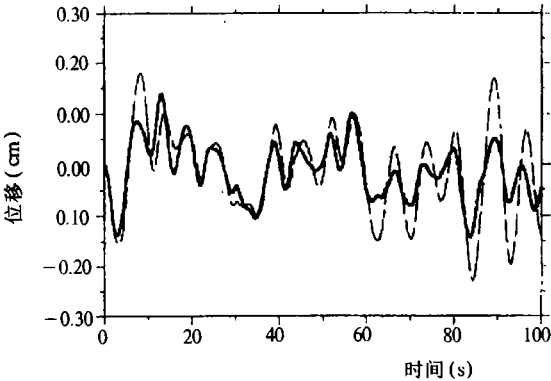


图 3 上塔楼受控风振位移时程曲线

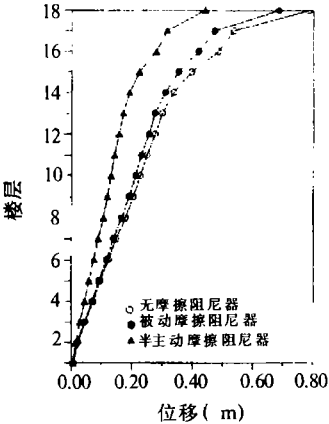


图 4 结构最大楼层位移

4 结论

通过上述研究，可以得到如下结论：

(1)对于具有数千个杆件的合肥电视塔，仅将其中 48 根杆件改为压电材料智能摩擦阻尼杆件，即取得了非常明显的减振效果。这说明半主动摩擦阻尼杆件的减振效果明显优于被动摩擦阻尼杆件。考虑到这种智能摩擦阻尼杆件具有构造简单和不占用结构空间的优点，且压电材料驱动元件仅用于改变摩擦阻尼器的参数，能耗较小，因此可以认为这是一种对于高耸钢塔结构具有广泛应用前景的耗能减振装置。

(2)本文对高耸钢塔结构采用两种力学模型，并从此得到的广义控制力作用位置矩阵的分析方法是可行的。

(3)本文建立的风振控制分析方法不但适用于智能摩擦阻尼器，而且可以引伸到其他智能减振装置，如 ER 和 MR 阻尼器对高耸钢塔结构的风振控制的研究中。

参考文献：

[1] 李爱群，蔡丹锋，张志强等，合肥电视塔风振控制研究[R]，东南大学，1999。
[2] 瞿伟廉等，高层建筑和高耸结构的风振控制设计[M]，武汉测绘科技大学出版社，1991。
[3] D.J. Dowdell and S. Cherry, Structural control using semi-active friction dampers[C], Proc. First World Conf. on Struct. Control, FA1, 1994.
[4] Z. Akbay and H.M. Aktan, Intelligent energy dissipation devices[C], Proc. 4th U. S. Nat. Conf. On earthquake Engrg, Vol.3, No.4, 427-435, 1990.