

文章编号:1673-2049(2006)01-0010-07

# MR 阻尼器对高耸结构风振反应的智能控制

瞿伟廉

(武汉理工大学 道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室,湖北 武汉 430070)

**摘要:**介绍了 MR 阻尼器对高耸结构风振控制的理论与技术。在详细地说明了 MR 阻尼器的智能特性和力学模型的基础上,提出了 MR 阻尼器对高耸结构风振半主动控制的基本理论,建立了 MR 阻尼器对电视塔、输电线塔和桅杆等高耸结构风振半主动控制的设计方法。工程实例的设计和仿真分析表明:MR 阻尼器对高耸结构风振反应的智能控制技术具有较好的减振效果,是一种具有广泛应用和推广价值的高耸结构的抗风技术。

**关键词:**高耸结构;MR 阻尼器;风振半主动控制;模糊控制

**中图分类号:**TU973.32

**文献标志码:**A

## MR Damper Intelligent Control on High Construction Wind-Induced Vibration Response

QU Wei-lian

(Key Laboratory of Road, Bridge and Construction Engineering of Hubei Province, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China)

**Abstract:** The theory and technology of MR damper were introduced and based on elaborating the intelligent characteristic and mechanics model of MR damper, semiactive control theory of MR intelligent damper on high construction wind-induced vibration was proposed and design method of semiactive control of MR damper on television tower, transmit electricity tower and mast construction wind-induced vibration was built. Engineering example design and simulation analysis show that the technology of MR damper intelligent control on high construction wind-induced vibration response has a good effect and it is worth applying in reality.

**Key words:** high construction; MR damper; wind-induced vibration semiactive control; fuzzy control

## 0 引言

高耸结构(电视塔、输电线塔和桅杆结构)是一种应用广泛的工程结构。由于这种结构具有高、柔和阻尼小的特点,因此它的风振响应较大,如在风力作用下,电视塔结构的舒适度要求有时不易满足,以致影响电视塔结构的正常使用;输电线塔和桅杆结构的强度要求有时也不易满足,以致出现严重的倒塌事故<sup>[1-5]</sup>。为此,深入研究高耸结构的风致破坏机

理,寻找高耸结构新的抗风途径是十分必要的。

结构风振控制技术是高耸结构抗风的新途径,但是由于高耸结构常规的振动控制技术(TMD 动力减振器、粘弹性阻尼器和油阻尼器等)都存在一些无法克服的缺点,因此影响了它们在高耸结构抗风设计中的推广和应用。MR 阻尼器是近年发展起来的一种优秀的半主动控制装置<sup>[6-10]</sup>。由于它具有结构简单、出力大、调节容易和控制效果好的特点,因此它为高耸结构的风振控制展现了美好的前景。

收稿日期:2006-01-18

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50038010)

作者简介:瞿伟廉(1946-),男,上海市人,教授,博士生导师,E-mail:qwlian@sina.com。

笔者主要介绍 MR 阻尼器对高耸结构风振控制的理论与技术。在详细地说明了 MR 阻尼器的智能特性和力学模型的基础上,提出了 MR 阻尼器对高耸结构风振半主动控制的基本理论,建立了 MR 阻尼器对电视塔、输电线塔和桅杆结构风振半主动控制的设计方法。工程实例的设计和仿真分析表明:MR 阻尼器对高耸结构风振反应的智能控制技术具有较好的减振效果,是一种具有广泛应用和推广价值的高耸结构的抗风技术<sup>[11-17]</sup>。

## 1 MR 阻尼器的智能特性和力学模型

### 1.1 磁流变液的智能特性

磁流变液是一种两相悬浮的智能材料,它在磁场的作用下能在  $10^{-2}$  s 的瞬间由牛顿流体变成粘塑性体或反之。随着磁场强度的变化,此粘塑性体会具有不同的屈服剪切应力,如图 1 所示。由于磁流变液是通过电流的改变来调节磁场强度的大小的,因此它既具有调节容易,又具有改变迅速和性能稳定的特点,是一种良好的智能驱动材料。

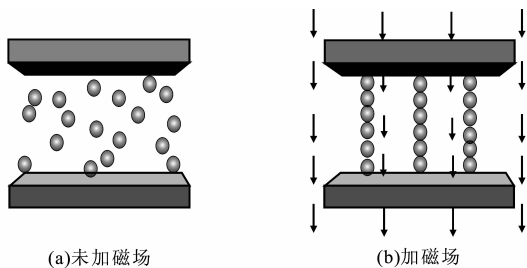


图 1 磁流变液工作原理

Fig. 1 Work Principle of Magnetorheological Fluid

### 1.2 MR 阻尼器的智能特性

依据磁流变液的上述智能特性,若把它做成流体阻尼器的控制阀,那么它就成为了阻尼器参数可调的智能阻尼器。图 2、3 分别为 MR 阻尼器工作原理和基本构造。由图 2、3 中可知:当 MR 流体阻尼器的活塞运动时,将挤压缸体中一端的磁流变液通过活塞与缸体之间的缝隙流向另一端,使 MR 阻尼器产生阻尼力;当在活塞与缸体之间的缝隙上加磁场,并改变磁场强度时,就会使缝隙中的磁流变液成为具有不同屈服剪切应力的粘塑性体。这样,当活塞再次运动挤压阻尼器一端的磁流变液时,必须克服缝隙中粘塑性体的屈服剪切应力才能运动,从而使其在不同磁场强度下具有不同的阻尼力。

由上可知,MR 阻尼器具有如下智能特性:

(1) 只需调节电流(达到调节磁场强度的目的)就可实现阻尼力的可调;

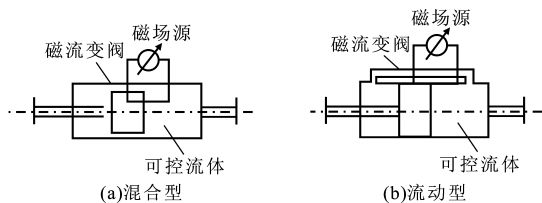


图 2 MR 阻尼器工作原理

Fig. 2 Work Principle of MR Damper

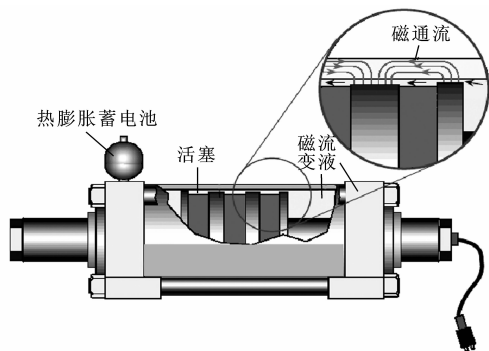


图 3 MR 阻尼器基本构造

Fig. 3 Basic Construction of MR Damper

(2) 调节简单方便,易于操作;

(3) 所需外加能源很小,最大阻尼力为 300 kN 的 MR 阻尼器所需外加能源(直流电源)的功率仅为 20~50 W。

### 1.3 MR 阻尼器的力学模型

根据已有的报道可知,各国已建立了 MR 阻尼器的许多力学模型,但与真实 MR 阻尼器的试验结果较为吻合的为笔者提出的修正的 Bingham 模型,如图 4 所示。依据此模型,MR 阻尼器输出的阻尼力可表示为

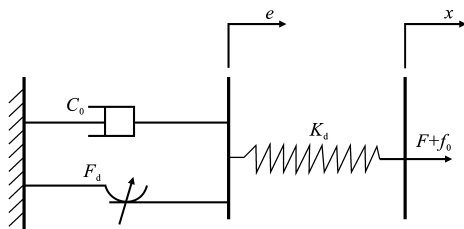


图 4 修正的 Bingham 模型

Fig. 4 Modified Bingham Model

$$F(t) = C_d \dot{e} + F_d(E) \operatorname{sgn}(\dot{e}) - f_0 = K_d(x - e) - f_0 \quad (1)$$

式中:  $C_d$  为粘滞阻尼系数;  $F_d(E)$  为可控库仑阻尼力;  $K_d$  为 MR 阻尼器等效轴向刚度;  $x$  为 MR 阻尼器总位移;  $e$  为 Bingham 滑动位移。由于  $C_d$ 、 $F_d$ 、 $K_d$  都与控制电流(磁场强度)有关,因此它们分别为

$$\left. \begin{aligned} C_d &= C_{ds} + C_{dd} u \\ F_d &= F_{ds} + F_{dd} u \\ K_d &= K_{ds} + K_{dd} u \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\dot{u} = -\eta(u - I) \quad (3)$$

式中:  $\eta$  为反映 MR 阻尼器磁滞响应时间;  $u$  为内变量, 反映模型参数与电流之间的关系;  $I$  为电流。根据足尺 MR 阻尼器的试验结果, 采用参数识别方法识别式(2)、(3)中所有参数, 可建立它的力学模型。

## 2 MR 阻尼器的控制策略

### 2.1 基本方程

对于安装有 MR 阻尼器的高耸结构, 其风振控制的方程为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{P}(t) - \mathbf{H}\mathbf{U}(t) \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{M}$ 、 $\mathbf{C}$ 、 $\mathbf{K}$  分别为高耸结构的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵;  $\ddot{\mathbf{x}}$ 、 $\dot{\mathbf{x}}$ 、 $\mathbf{x}$  分别为高耸结构的加速度向量、速度向量和位移向量;  $\mathbf{P}(t)$  为脉动风力向量;  $\mathbf{H}$  为控制力作用位置矩阵;  $\mathbf{U}(t)$  为 MR 阻尼器的控制力向量。

MR 阻尼器的最大优点是参数可调, 改变了常规阻尼器参数不变的缺点; 最大缺点是具有磁滞效应, 即在用改变电流(磁场强度)调节其输出力时, 有一个时间滞后的效应。这就存在了一个问题: 应该按什么样的控制策略来调节 MR 阻尼器的参数和进行磁滞效应的调整, 以使它的控制效果最好。

### 2.2 控制策略

控制策略的总体思想是: 首先, 按照控制论的原理, 寻找一种保证控制效果最好或较好的主动控制力的调整算法; 然后, 建立通过调整 MR 阻尼器的参数, 使 MR 阻尼器实现的控制力与上述主动控制力最接近。

#### 2.2.1 基于 MR 阻尼器最优主动控制位移的半主动控制策略

若令状态向量

$$\mathbf{Z} = [\mathbf{x} \quad \dot{\mathbf{x}}]^T \quad (5)$$

则式(1)、(4)可合并为

$$\dot{\mathbf{Z}} = \mathbf{A}\mathbf{Z} + \mathbf{B}\mathbf{e} + \mathbf{D}\mathbf{P}(t) \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{e}$  为 MR 阻尼器的滑动位移。

考虑到设置 MR 阻尼器的目标是在减小每个瞬时高耸结构风振响应的同时, 使每个瞬时 MR 阻尼器实现的控制力不会过大, 而瞬时控制力又直接与 MR 阻尼器的瞬时滑动位移  $\mathbf{e}$  有关, 因此瞬时控制目标的评价函数可取为

$$J = \mathbf{Z}^T \mathbf{S} \mathbf{Z} + \mathbf{e}^T \mathbf{R} \mathbf{e} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{S}$ 、 $\mathbf{R}$  分别为状态向量  $\mathbf{Z}$  和 MR 阻尼器的滑动位移  $\mathbf{e}$  的加权矩阵。显然, MR 阻尼器控制的最终目标就是要使  $J$  趋于最小。

根据瞬时最优控制理论, 可以得到使瞬时目标函数  $J$  趋于最小的 MR 阻尼器的最优滑动位移  $\mathbf{e}_{\text{opt}}$  为

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{e}_{\text{opt}} &= -\mathbf{F}^* \mathbf{Z} \\ \mathbf{F}^* &= \frac{\Delta t}{2} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{S} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

若 MR 阻尼器的滑动位移  $\mathbf{e}$  能按  $\mathbf{e}_{\text{opt}}$  主动进行, 则可使控制的目标函数  $J$  趋于最小。由于要使 MR 阻尼器的滑动位移  $\mathbf{e}$  来主动调节是十分困难的, 因此只能通过调节 MR 阻尼器的参数  $F_d(E)$  来使它的滑动位移  $\mathbf{e}$  尽量地靠近  $\mathbf{e}_{\text{opt}}$ , 从而使目标  $J$  尽量趋于最小。那么采用什么样的控制策略来调节 MR 阻尼器的  $F_d(E)$  而使  $\mathbf{e}$  趋近于  $\mathbf{e}_{\text{opt}}$  呢? 本文中采用易于实现的“开关”半主动控制策略。它可表示为

$$F_{dj} = \begin{cases} F_{\min} & \dot{\mathbf{e}}_j(\mathbf{e}_{\text{opt}j} - \mathbf{e}_j) > 0 \\ F_{\max} & \dot{\mathbf{e}}_j(\mathbf{e}_{\text{opt}j} - \mathbf{e}_j) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $j = 1, 2, \dots, l$ 。

#### 2.2.2 基于 MR 阻尼器模糊主动控制力的半主动控制策略

考虑到土木工程结构的特点是参数和力学模型不精确, 因此寻找不依赖于参数和结构模型的半主动控制策略是十分有意义的。模糊主动控制算法的基本思想是把专家的思想写成控制规则, 通过模糊推理得到控制作用集, 并用于被控对象或过程。本文中笔者利用模糊控制的原理, 将高耸结构风振控制各时刻结构节点层的位移响应  $x$  和加速度响应  $\ddot{x}$  作为输入量, 此时刻的主动控制力  $f_{oi}$  作为模糊控制器的输出量。采用 IF...THEN 语句描述结构的模糊控制规则。定义它们各自的模糊集为

$$\mathbf{x} = \dot{\mathbf{x}} = f_{oi} = \{S_{NB}, S_{NM}, S_{NS}, S_{ZE}, S_{PS}, S_{PM}, S_{PB}\} \quad (10)$$

式中:  $S_{PB}$  为正大;  $S_{PM}$  为正中;  $S_{PS}$  为正小;  $S_{ZE}$  为零;  $S_{NS}$  为负小;  $S_{NM}$  为负中;  $S_{NB}$  为负大。它们的隶属函数采用最简单的三角形隶属度函数, 隶属度函数曲线如图 5 所示。

将每一条模糊规则集合起来就形成了模糊控制规则, 如表 1 所示, 它的特点是不依赖于结构本身的参数。根据模糊控制规则表可得到模糊输出量, 再采用重心法对其进行解模糊处理, 就可得到 MR 阻尼器作用于高耸结构上的主动控制力, 因此若采用开关半主动控制策略来调节 MR 阻尼器的  $F_d(E)$ , 就可使 MR 阻尼器实现的控制力尽量地靠近模糊主动控制力。

#### 2.2.3 基于响应预测的磁滞调整

由于 MR 阻尼器的磁滞效应是: 当需要调节

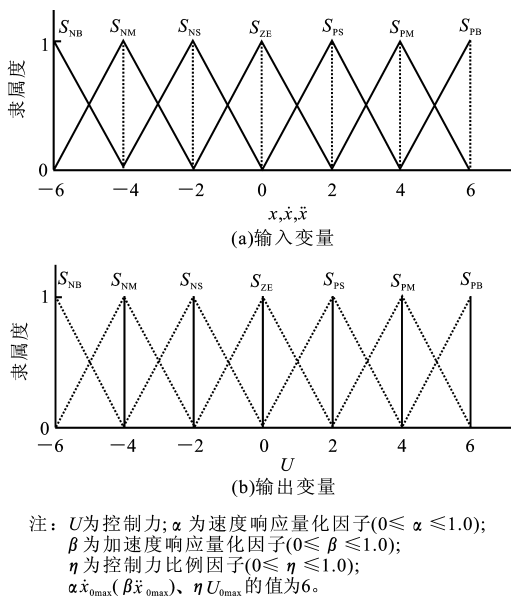


图 5 隶属度函数

Fig. 5 Subordinate Function

MR 阻尼器的控制力时,其控制力调节要滞后于磁场的调节,因此 MR 阻尼器就不能完全按半主动控制策略来进行调节。对此,应采用响应预测的方法来解决,即先预测磁滞末时刻结构的响应,并据此来预测磁滞末时刻的主动控制力;然后再以开关半主动控制策略来调整 MR 阻尼器上的磁场,从而使磁滞末时刻 MR 阻尼器的参数刚好达到开关半主动控制策略的要求。

表 1 模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy Control Law

输入变量 $\ddot{x}$		$S_{NB}$	$S_{NM}$	$S_{NS}$	$S_{ZE}$	$S_{PS}$	$S_{PM}$	$S_{PB}$
输入变量 $x$	$S_{NB}$	$S_{PB}$	$S_{PB}$	$S_{PB}$	$S_{PM}$	$S_{PS}$	$S_{PS}$	$S_{ZE}$
	$S_{NM}$	$S_{PB}$	$S_{PB}$	$S_{PM}$	$S_{PS}$	$S_{ZE}$	$S_{ZE}$	$S_{NS}$
	$S_{NS}$	$S_{PB}$	$S_{PM}$	$S_{PS}$	$S_{PS}$	$S_{ZE}$	$S_{NS}$	$S_{NM}$
	$S_{ZE}$	$S_{PM}$	$S_{PS}$	$S_{PS}$	$S_{ZE}$	$S_{NS}$	$S_{NM}$	$S_{NB}$
	$S_{PS}$	$S_{PS}$	$S_{ZE}$	$S_{ZE}$	$S_{NS}$	$S_{NS}$	$S_{NM}$	$S_{NB}$
	$S_{PM}$	$S_{PS}$	$S_{ZE}$	$S_{NS}$	$S_{NS}$	$S_{NM}$	$S_{NB}$	$S_{NB}$
	$S_{PB}$	$S_{ZE}$	$S_{NS}$	$S_{NM}$	$S_{NM}$	$S_{NB}$	$S_{NB}$	$S_{NB}$

### 3 MR 阻尼器对电视塔结构风振反应的半主动控制

#### 3.1 工程概况

合肥翡翠电视塔塔高 339 m,是具有复杂结构形式的塔架结构,如图 6 所示。该塔标高 255 m 以下是结构横截面为正六边形的空间桁架体系,标高 255 m 以上是结构横截面为正四边形的天线桅杆。其中,标高 65、218.2 m 处设有球形塔楼,分别称为下塔楼和上塔楼。该塔架除了 28 m 下有钢筋混凝

土井筒以外,其余均为钢杆系结构,并且其质量和刚度沿高度分布极不均匀,结构的绝大部分质量都集中在上下塔楼处,而上塔楼上部高达 84 m 的天线桅杆的刚度又远远小于下部塔架结构的刚度。这种刚度的不均匀和巨大反差会显著增加结构的风振反应。通过对该电视塔结构风振响应的仿真分

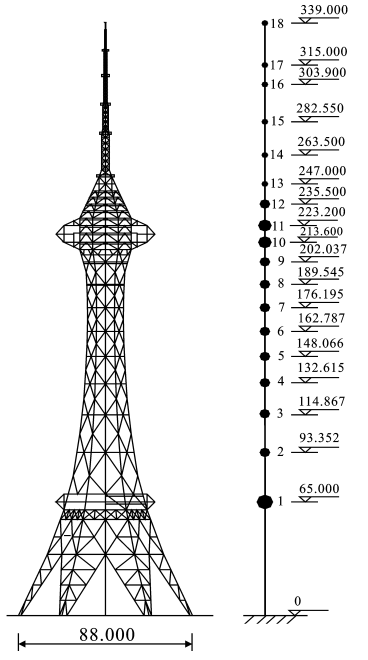


图 6 合肥电视塔结构模型(单位:m)

Fig. 6 Construction Model of Hefei Television Tower (Unit:m)

析可知,其风振响应不能满足结构的抗风设计要求。为此,考虑采用 MR 阻尼器进行结构的风振控制。

#### 3.2 MR 阻尼器的设置方案

考虑到 MR 阻尼器对结构所能提供的控制力与 MR 阻尼器两端的相对位移有关,因此它也与串联多自由度结构体系节点层之间的相对位移有关。据此,将 MR 阻尼器设置于层间变形比较大的节点层之间将会有较好的减振效果。根据合肥电视塔结构的振型曲线可以发现,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,笔者在该塔结构标高 69.50~92.00 m 和 189.75~202.40 m 分别设置了 24 个 MR 阻尼器,并将 MR 阻尼器与所在位置的原结构杆件合并制成阻尼杆件,代替普通杆件直接安装在结构上实现对高耸电视塔塔架结构风振反应控制。为简化设计,所设置的 48 个 MR 阻尼器的规格一致,阻尼器的基本参数如表 2 所示。

表 2 MR 阻尼器的基本参数

Tab. 2 Basic Parameters of MR Damper

$K_d/$ ( $10^8 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ )	$\eta_0/$ ( $\text{kPa} \cdot \text{s}$ )	$P_y/$ kN	$b/$ m	$A_p/$ m	$L/$ m	$T/$ m	$\tau_{ymin}/$ kPa	$\tau_{ymax}/$ kPa
0.7	0.002 4	0.05	0.314	0.007	0.5	0.001	0.1	60

#### 3.3 结构风振控制的效果

笔者在合肥电视塔塔顶及上塔楼各建立了一组 MR 阻尼器参数调整的模糊控制器,它将塔顶

及上塔楼的风振位移和加速度作为输入量,塔顶及上塔楼各 MR 阻尼器的控制力作为输出量。应用模糊半主动控制策略,经对电视塔风振控制的仿真分析可以得到其节点层位移、速度和加速度峰值反应包络曲线,如图 7 所示。由图 7 中可知:MR 阻尼器使该塔各部位的反应都得到了很好的控制。其中,塔顶的位移响应最大值由无控制时的 151.6 mm 减小为 66.5 mm,减振率达到了 56.1%;上塔楼的加速度响应由无控制时的  $0.28\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  减小为  $0.17\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$ ,减振率达 39.6%,满足了结构的舒适性要求。以上分析表明:在该塔上设置的 48 个 MR 阻尼器对结构风振反应的减振效果是令人满意的。

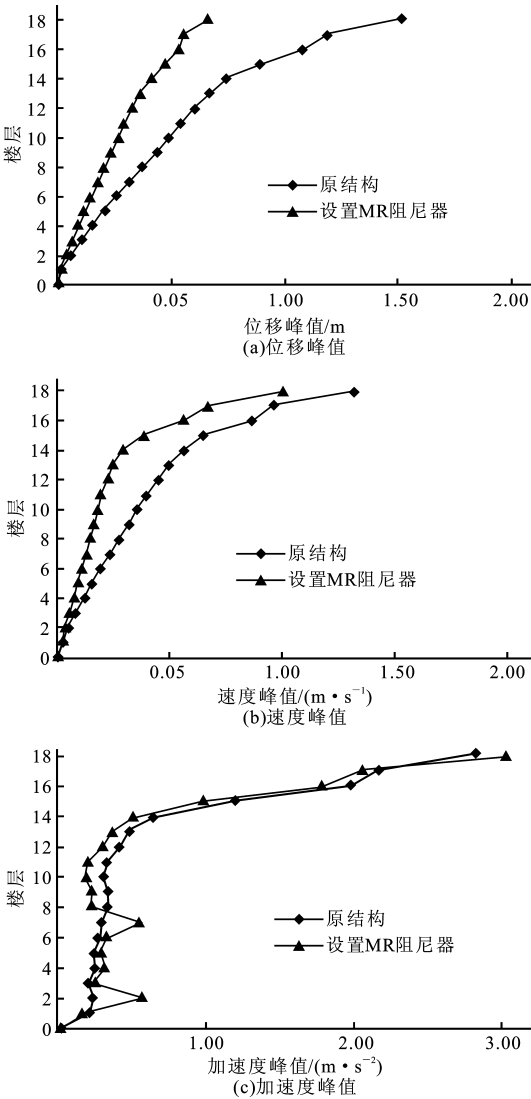


图 7 合肥电视塔设置 MR 阻尼器的  
楼层风振反应峰值曲线

Fig. 7 Wind-Induced Vibration Response Peak Value  
Curves After Setting MR Damper on Hefei Television Tower

## 4 MR 阻尼器对输电线塔结构风振反应的半主动控制

### 4.1 工程概况

长沙-岗市湘江大跨越输电线塔塔高 108 m,导线跨距 832 m,整个输电线路横跨湘江,如图 8 所示。该塔为钢桁架结构,在强风作用下塔线耦联体系的风振动力反应较为显著;另外,作用于该塔上的脉动风荷载沿高度分布不均匀,导线横担处风荷载较大,而该处又是塔架与导线相互连接的部位,这种荷载的差异以及塔线耦联振动的影响无疑会大大增加结构的风振反应。为此,笔者采用 MR 阻尼器对该塔的风振反应进行了控制。

### 4.2 MR 阻尼器的设置方案

MR 阻尼器设置在具有较大相对变形的节点层之间会取得较好的减振效果。对于湘江输电线塔结构而言,一方面,塔身节点的相对变形要大于上部塔头节点的相对变形;另一方面,输电线塔上部结构复杂、杆件众多,难以设置 MR 阻尼器,因此笔者沿该塔身各节点层在平面和出平面方向从下到上各设置 10 根 MR 阻尼器杆件。为了使在平面和出平面方向的 MR 阻尼器安装方便,可将各方向 MR 阻尼器沿塔身周边设置。这样既可以保证 MR 阻尼器的安装方便,同时可以使 MR 阻尼器产生的控制力能均匀地作用于整个塔身。为设计方便,湘江输电线塔所采用完全相同的 10 根 MR 阻尼器杆件,其基本参数见表 3。

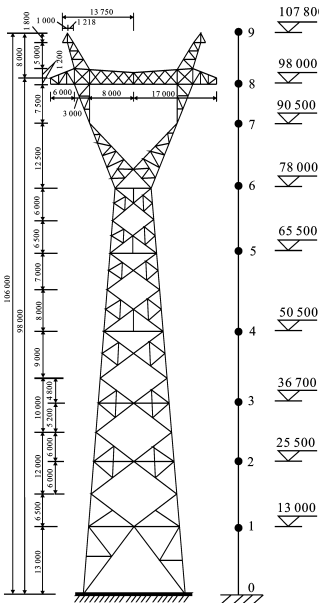


图 8 长沙-岗市湘江大跨  
越输电线塔 (单位:mm)

Fig. 8 Elevation of Transmit  
Electricity Tower from  
Changsha to Gangshi over  
Xiangjiang (Unit:mm)

### 4.3 结构风振控制的效果

为了比较设置 MR 阻尼器的湘江输电线塔在不同控制策略下的减振效果,笔者仿真分析了被动-关、被动-开、固定增量半主动控制策略和模糊半主

动控制策略下的风振控制效果,其结果如图 9、10 所示。由图 9、10 可知:4 种控制策略都有一定的减振效果,但半主动控制的减振效果较为均匀,在保证对位移反应优良减振效果的前提下,可有效地提高对速度反应和加速度反应的减振效果。

表 3 MR 阻尼器杆件的基本参数

Tab. 3 Basic Parameters of MR Damper						
$D/m$	$d/m$	$L/m$	$t/m$	$\eta_0/(Pa \cdot s)$	$\tau_{ymin}/kPa$	$\tau_{ymax}/kPa$
0.09	0.025	0.3	0.001	0.001	0.2	60~80

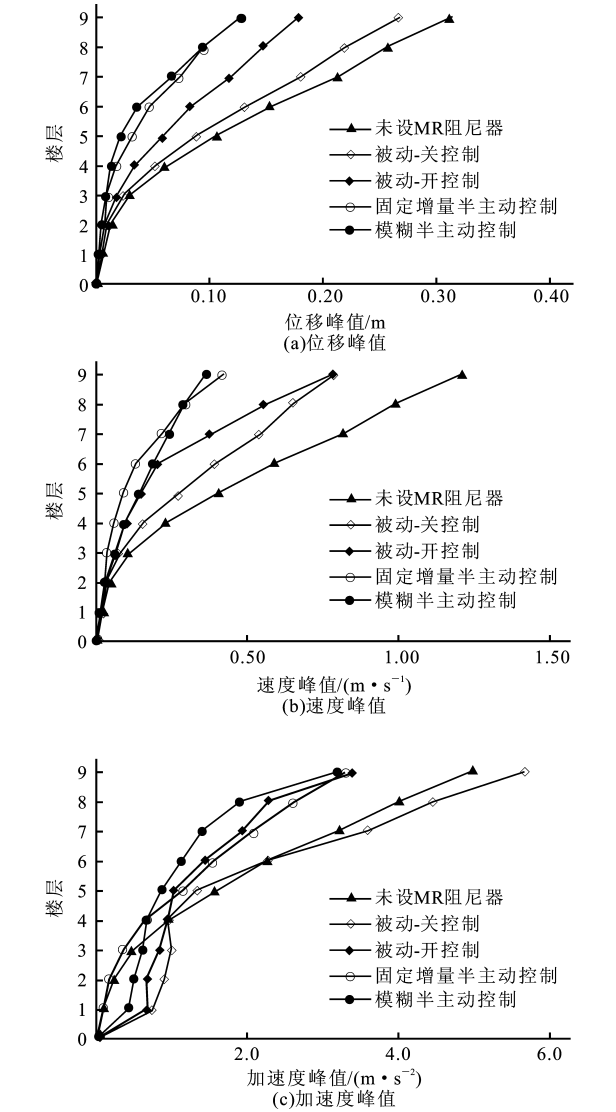


图 9 不同控制下湘江输电线塔出平面风振反应峰值曲线  
Fig. 9 Outer Plane Wind-Induced Vibration Response Peak Value Curves on Xiangjiang Transmit Electricity Tower Under Different Control

## 5 结 语

(1)磁流变液是功能优异的智能材料,用它制作的 MR 阻尼器具有构造简单,调节容易,响应迅速,

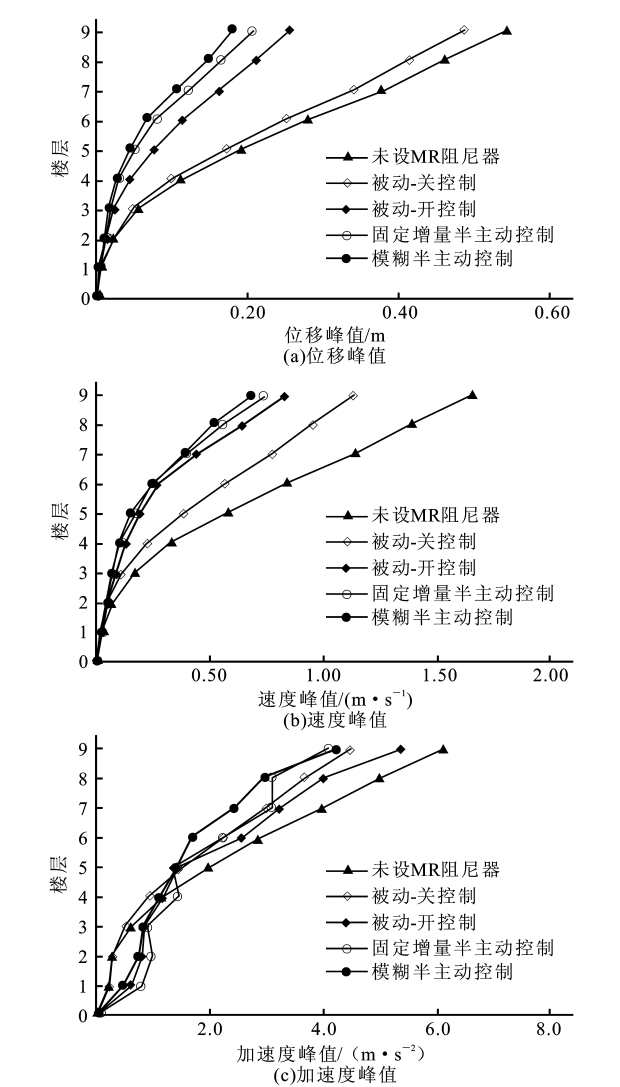


图 10 不同控制下湘江输电线塔平面风振反应峰值曲线  
Fig. 10 Plane Wind-Induced Vibration Response Peak Value Curves on Xiangjiang Transmit Electricity Tower Under Different Control

能耗极小和价格便宜的优点。

(2)MR 阻尼器可有效地实现高耸结构风振反应的半主动控制,并能解决高耸结构抗风设计中的疑难问题。

(3)合理设置 MR 阻尼器和选择合理的半主动控制策略是 MR 阻尼器对高耸结构风振控制能否成功的关键。

## 参考文献:

### References:

[ 1 ] QU W L, CHEN Z H, XU Y L. Dynamic Analysis of Wind-Excited Truss Tower with Friction Dampers [J]. Comput Struct, 2001, 79(32): 2 817-2 831.  
[ 2 ] QU W L, XU Y L. Semi-active Control of Seismic Response of Tall Buildings with Podium Structure Using

- ER/MR Dampers[J]. Struct Res Tall Building, 2001, 10(3): 179-192.
- [3] XU Y L, QU W L, CHEN Z H. Control of Wind-Excited Truss Tower Using Semiactive Friction Damper[J]. J Struct Eng-ASCE, 2001, 127(8): 861-868.
- [4] QU W L, CHEN B. Wind-Induced Response Semi-active Control of Large Span Transmission Tower Using MR Dampers[C]//Wind Structure Committee, Third China-Japan-US Symposium on Structural Health Monitoring and Control and Fourth Chinese National Conference on Structural Control. Shanghai: Science and Technology Press, 2004: 201-211.
- [5] LIANG Shu-guo, MA Zhen-xin. An Analysis of Wind Induced Responses for Dashengguan Electrical Transmission Tower-Line System Across the Yangtze River [C]//Wind Engineering Edition Team. Proceedings of the 10th International Conference on Wind Engineering. Wuhan: Wuhan University Press, 1999: 565-570.
- [6] 周 强, 瞿伟廉. 磁流变阻尼器的两种力学模型和实验验证[J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22(4): 144-150.
- ZHOU Qiang, QU Wei-lian. Two Mechanic Models for Magnetorheological Damper and Corresponding Test Verification[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2002, 22(4): 144-150.
- [7] 瞿伟廉, 李 波. MR 智能阻尼器对桅杆结构风振响应的智能半主动控制[J]. 地震工程与工程振动, 2003, 23(3): 1-7.
- QU Wei-lian, LI Bo. Semi-active Control for Response of Guyed Mast by MR Dampers Subjected to Wind Loading[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2003, 23(3): 1-7.
- [8] 李宏男, 王前信. 大跨越输电塔体系的动力特性[J]. 土木工程学报, 1997, 30(5): 28-36.
- LI Hong-nan, WANG Qian-xin. Dynamic Characteristics of Long-Span Transmission Lines and Their Supporting Towers[J]. China Civil Engineering Journal, 1997, 30(5): 28-36.
- [9] 武 岳, 陈 波, 沈世钊. 大跨度屋盖结构等效静风荷载研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 27-31.
- WU Yue, CHEN Bo, SHEN Shi-zhao. Research on Equivalent Static Wind Loadings of Large-Span Roof Structures[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 27-31.
- [10] 贺拥军, 周绪红, 刘永健, 等. 超大跨度巨型网格结构[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(3): 25-29.
- HE Yong-jun, ZHOU Xu-hong, LIU Yong-jian, et al. Super-Span Reticulated Mega-structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(3): 25-29.
- [11] 王肇民. 桅杆结构[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- WANG Zhao-min. Mast Structure[M]. Beijing: Science Press, 2000.
- [12] 瞿伟廉. 高层建筑和高耸结构的风振控制设计[M]. 武汉: 武汉测绘科技大学出版社, 1991.
- QU Wei-lian. Wind Vibration Control Design of High Building and High Construction[M]. Wuhan: Wuhan University of Mapping Science and Technology Press, 1991.
- [13] 黄 文, 李明瑞, 黄文彬. 杆系结构的几何非线性分析[J]. 计算结构力学及其应用, 1995, 12(1): 7-15.
- HUANG Wen, LI Ming-rui, HUANG Wen-bin. Geometry Non-linear Analysis of Bar Structure[J]. Journal of Computational Structure Mechanics and Application, 1995, 12(1): 7-15.
- [14] 马 星, 李 泽, 蒋 涛, 等. 考虑纤绳振动桅杆结构的随机风振分析[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 1998, 26(6): 631-635.
- MA Xing, LI Ze, JIANG Tao, et al. Analysis of Guyed Mast Under Stochastic Wind Load when Oscillation of Cables Is Considered[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 1998, 26(6): 631-635.
- [15] 陈政清. 斜拉索风雨振现场观测与振动控制[J]. 建筑科学与工程学报, 2005, 22(4): 5-10.
- CHEN Zheng-qing. On-Site Observation of Wind-Rain Induced Vibration of Stay Cables and Its Control[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(4): 5-10.
- [16] 邓洪洲, 史国富, 马 星. 中、英两国规范对桅杆风振设计规定的比较[J]. 特种结构, 2001, 18(2): 69-72.
- DENG Hong-zhou, SHI Guo-fu, MA Xing. Comparison of Chinese and English Criterion on Mast Wind Vibration Design[J]. Special Structures, 2001, 18(2): 69-72.
- [17] 李 惠, 刘 敏, 欧进萍, 等. 斜拉索磁流智能阻尼控制关系分析与设计[J]. 中国公路学报, 2005, 18(4): 37-42.
- LI Hui, LIU Min, OU Jin-ping, et al. Design and Analysis of Magnetorheological Dampers with Intelligent Control Systems for Stay Cables[J]. China Journal of Highway and Transport, 2005, 18(4): 37-42.