

文章编号:1673-2049(2005)04-0005-06

斜拉索风雨振现场观测与振动控制

陈 政 清

(湖南大学 风工程试验研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘 要:介绍了斜拉索风雨振现场观测与振动控制研究的情况。在湖南岳阳洞庭湖大桥上建立了风雨振观测系统,并连续 4 年进行了长时间现场观测,在风速、风向、雨量等参数对风雨振的影响规律与拉索风雨振振动形态方面有了新的发现。提出了一种多模态振动控制的参数优化方法。进行了拉索—磁流变阻尼器系统的减振性能仿真研究与现场试验研究,全面评估了磁流变阻尼器的实际减振性能。开发了一套磁流变式拉索减振系统,并于 2002 年在该大桥全桥实施,3 年来显示了良好的减振效果。同时针对城市桥梁磁流变减振系统的低压供电线路最易受到人为破坏的问题,设计开发了一种永磁可调式磁流变阻尼器(PMAA-MR),并将其成功应用于湖南长沙洪山庙大桥的拉索减振。

关键词:斜拉索;风雨振;现场观测;磁流变阻尼器;振动控制

中图分类号:U441.3 **文献标志码:**A

On-site observation of wind-rain induced vibration of stay cables and its control

CHEN Zheng-qing

(Wind Engineering Experiment Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: On-site observation of wind-rain induced vibration of stay cables and its control were studied. A monitoring system for wind-rain induced vibration was built on the Dongting Lake Bridge and has worked for four years. Some new discoveries were obtained in the influence of wind speed, wind direction and rainfall on wind-rain induced vibration and in the vibration shape of stay cables. A method for parameter optimization based on multimode vibration control was presented. To investigate the performance of MR dampers on mitigating cables vibration, both of numerical simulations and field tests were conducted. A new technique of mitigating cables vibration using MR dampers was exploited and applied on the Dongting Lake Bridge in 2002. The observations of the past three years show that the effectiveness of the mitigating vibration is quite well. To avoid the destruction on purpose of the power supply system to MR dampers, a PMAA-MR damper was developed and successfully fitted on the Hongshanmiao Bridge in Changsha.

Key words: stay cable; wind-rain induced vibration; on-site observation; MR damper; vibration control

收稿日期:2005-09-20

基金项目:国家自然科学基金项目(50178013)

作者简介:陈政清(1947-),男,湖南湘潭人,湖南大学教授,博士生导师,工学博士. E-mail:zqchen@hnu.cn

0 引言

随着大跨度斜拉桥的兴建,拉索的大幅振动及其振动控制已成为亟待解决的关键问题。特别是斜拉索在风雨共现气候条件下发生的所谓风雨振现象,常常引发拉索的大幅振动,有时还会激起桥面的振动,对桥梁安全构成严重威胁^[1~3]。自 1984 年日本学者 HIKAMI 首先观察到拉索的风雨振现象并提出风雨振概念以来,拉索风雨振机理及其振动控制引起了各国学者越来越多的关注。

关于拉索风雨振发生的条件及机理,各国学者已做了大量的风洞试验^[4],同时还进行了为数不多的现场观测,目前已基本弄清了风雨振发生的条件。对于风雨振机理的研究,由于风雨振现象涉及因素多,情况异常复杂,虽然目前已取得了一定进展,但还远没有达到完善的程度。通过对实际斜拉桥进行风雨振观测,可以积累丰富的实测数据,有利于拉索风雨振机理的研究。

安装阻尼器是抑制拉索振动的一种有效方法^[5]。磁流变阻尼器(MR Damper)是一种新型的智能阻尼器,具有良好的减振效果^[6~8]。应用磁流变阻尼器进行斜拉索振动控制,能克服被动阻尼器的缺点,并且可以通过调节输入电压来调整每根拉索的阻尼力以使其达到最佳状态,从而取得更好的控制效果。

为此,笔者开展了连续 4 年的拉索风雨振现场观测与磁流变阻尼器拉索减振技术研究,并且获得了一些重要成果。本文是对这些研究成果的一个全面总结。

1 拉索风雨振现场观测

岳阳洞庭湖大桥是一座预应力混凝土 3 塔斜拉桥,由于地处洞庭湖口,建成后发生了多次拉索风雨振现象。为了发现和揭示拉索风雨振的规律、机理,笔者在该桥上建立了拉索风雨振现场观测系统。该系统包括安装在桥塔顶部及桥面的 3 向超声风速仪、雨量计,在拉索和桥塔布置的加速度传感器等。从 2000 年 1 月至 2004 年 4 月,每年笔者都进行了长期连续的现场观测,获得了重要的现场实测资料,在拉索风雨振形成条件、振动形态方面有了一系列新的发现^[9~20]。

1.1 拉索振动形态

图 1~3 分别给出了洞庭湖大桥某根拉索的第一~第三阶模态振动时的加速度及位移运动轨迹。

从图 1~3 中可以看出:在拉索中部一个相当大的范围内每个拉索截面都有几乎相等的振幅,证明了拉索风雨振振动形态的驰振特征;拉索稳定的大幅振动总是由某一阶模态控制,其振动频率在 3 Hz 以下,分析表明在拉索的起振阶段和振动停息阶段,常伴有主模态转移现象;拉索振动时,面内、外振动同时发生,但面内振动总是大于面外振动,因此在与拉索垂直的平面上,拉索的振动轨迹像一个斜置的椭圆,最大振幅可大于拉索直径的 3 倍。

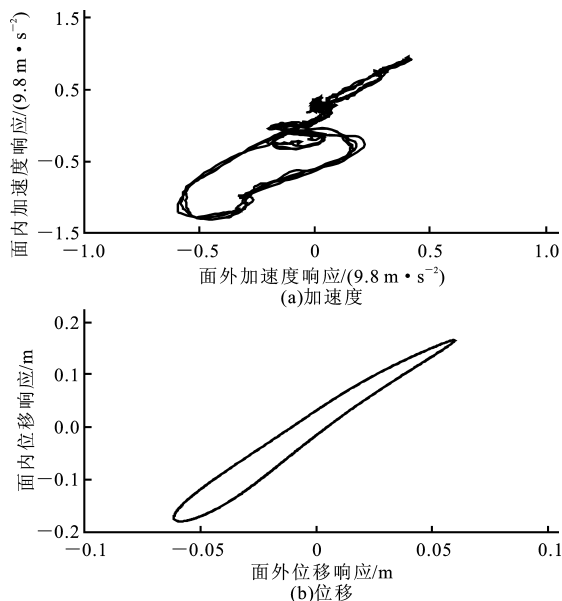


图 1 拉索一阶模态振动时加速度及位移运动轨迹

Fig. 1 Vibration track of acceleration and displacement of the first mode shape of cables

1.2 风雨振与气候参数的关系

图 4 给出了该桥拉索振动与气候参数的关系,从图 4 中可以看出:降雨是拉索发生大幅度风雨激振的必要条件,但是风雨振与降雨强度却无明显的相关性,小到中雨都可能发生风雨振,降雨在拉索上形成的上水线是风雨振的必要条件;风雨振发生的风速为 6~20 m/s,当风速超过 14 m/s 时,就有较强烈的风雨振现象,在 14~20 m/s 范围内,振幅随风速增大而增加;风雨振时风与斜拉索的相对偏航角为 10°~50°,说明迎风的拉索不易发生风雨振;该桥址区地形开阔,现场实测的风场紊流度明显低于规范的最小值(表 1),说明了桥址处风场低紊流度特征,这也是拉索容易发生风雨振的原因。

1.3 风雨振与拉索本身参数的关系

以前有文献报道认为拉索与水平面的倾角大于 60°以后,拉索不易发生风雨振,但洞庭湖大桥的观测结果表明:即使是非常靠近桥塔的拉索,其倾角已

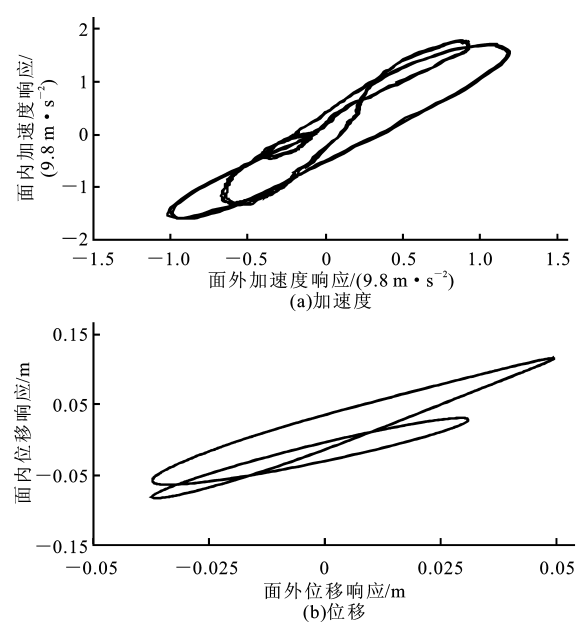


图 2 拉索二阶模态振动时加速度及位移运动轨迹
Fig. 2 Vibration track of acceleration and displacement of the second mode shape of cables

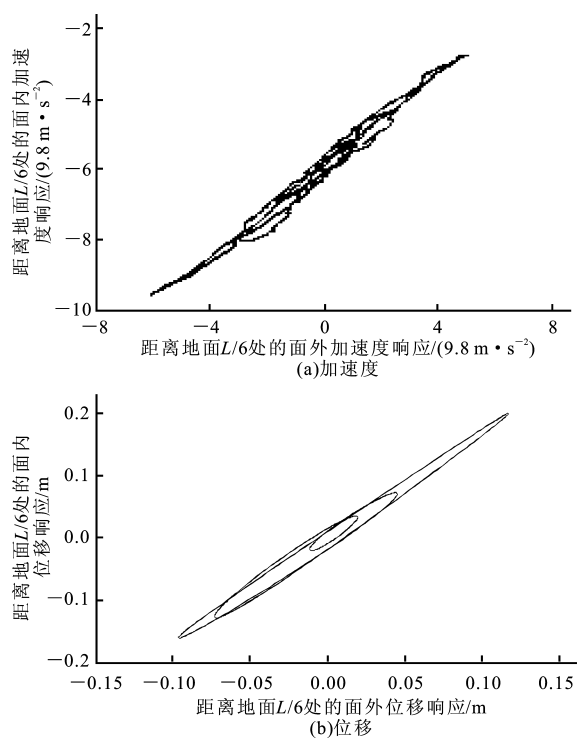


图 3 拉索三阶模态振动时加速度及位移运动轨迹
Fig. 3 Vibration track of acceleration and displacement of the third mode shape of cables

达 70°,也会发生明显的风雨振。
1.4 空气动力负阻尼比

拉索的风雨振是拉索在风雨作用下产生的空气动力负阻尼比引起的,空气动力负阻尼比的大小对认识风雨振机理和研究减振措施是非常重要的。拉

索振动的净负模态阻尼比可表示为
$$\xi_{\text{net}} = \xi_{\text{mech}} + \xi_{\text{aero}} \quad (1)$$

式中: ξ_{mech} 、 ξ_{aero} 分别为拉索的固有结构阻尼比和空气动力阻尼比。在特别的风雨作用下, ξ_{aero} 可能变为负阻尼比,当负阻尼比超过结构阻尼比时,拉索的振动将越来越大而形成风雨振现象。根据测得的该桥拉索风雨振信号,采用非线性拟合方法,可以求得该

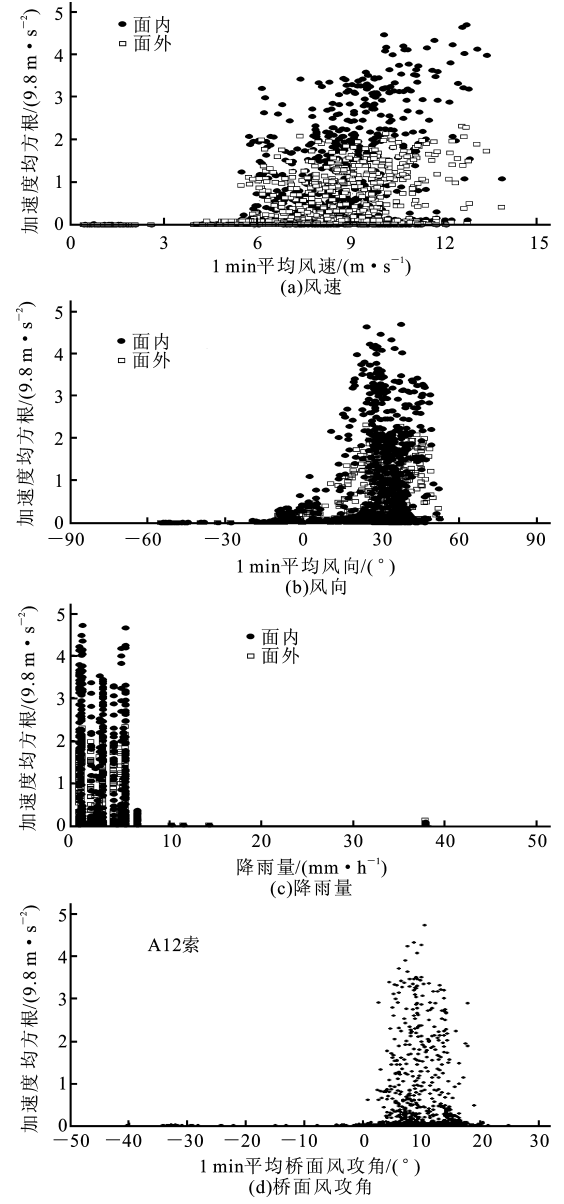


图 4 拉索振动与气候参数的关系
Fig. 4 Relation of climate parameters and vibration of cables
时段内的平均等效模态阻尼比。拟合得到其第一~第三阶平均净负模态阻尼比分别为 0.054 8%、0.016%、0.069 1%。

1.5 主振模态及模态参与特性
拉索风雨振时,对于特定拉索并非是以固定的某阶模态频率振动。随外界条件的变化,拉索的振动频

率也会转移及变化。为了研究主要振动频率的分布特性,并以位移分量最大的模态为主振模态,笔者将测量得到的某一根拉索风雨振数据进行了统计分析,

表 1 洞庭湖大桥拉索风雨振风场紊流强度

Tab. 1 Turbulence intensity of wind-rain induced vibration of cables on Dongting Lake Bridge

时 间		位 置/m	紊流强度实测值			紊流强度标准值(Ⅰ类场地)		
			I_u	I_v	I_w	I_u	I_v	I_w
2003 年 4 月 1~2 日	16:51~21:36	桥面 ($20\leq z\leq 30$)	0.091 6	0.085 5	0.077 8	0.13	0.11	0.07
	22:10~02:48	桥塔 ($100\leq z\leq 150$)	0.065 5	0.052 8	0.074 7	0.10	0.09	0.05
	16:51~21:36	桥面 ($20\leq z\leq 30$)	0.093 8	0.098 8	0.082 4	0.13	0.11	0.07
	22:10~02:48	桥塔 ($100\leq z\leq 150$)	0.074 4	0.076 7	0.079 2	0.10	0.09	0.05
2003 年 4 月 28~29 日	21:32~03:22	桥面 ($20\leq z\leq 30$)	0.111 9	0.090 9	0.056 1	0.13	0.11	0.07

为了评估风雨振时单个模态的参与程度,定义模态参与指数(Modal Contribution Index)为

$$I_{MC} = \frac{A_n}{\sqrt{\sum_i A_i^2}} \tag{2}$$

式中: I_{MC} 为模态参与指数; A_n 为第 n 阶主振模态的位移幅值; A_i 为第 i 个参与模态的幅值。

图 6 为拉索风雨振时 I_{MC} 的直方图,从图 6 中可知:少部分响应表现为单模态振动,而大部分响应则表现为多模态参与的振动。

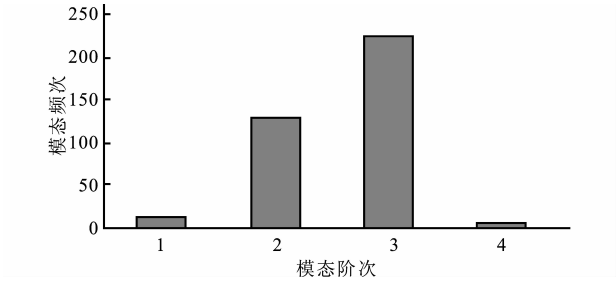


图 5 主振型模态分布

Fig. 5 Distribution of main mode shape

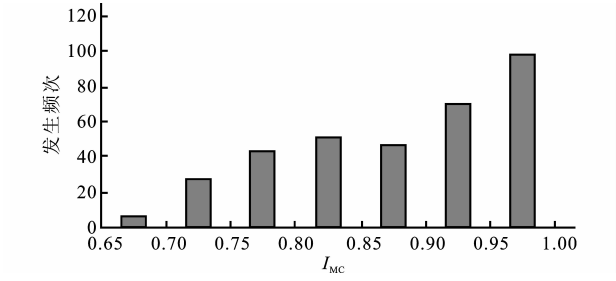


图 6 I_{MC} 分布

Fig. 6 Distribution of I_{MC}

2 磁流变阻尼器拉索振动控制^[9~20]

2.1 力学模型

通过试验,研究了磁流变阻尼器阻尼力与振幅、频率、输入电压等参数的关系,建立了反映磁流变阻

尼器强非线性 的双线性力学模型;改进了 BOUC-WEN 磁流变阻尼器非线性模型,并对多种参数模型进行了程序设计。图 7 为磁流变阻尼器力学模型试验。

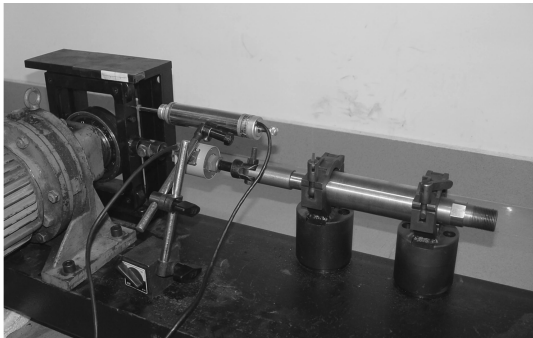


图 7 磁流变阻尼器力学模型试验

Fig. 7 Test of mechanical model of MR dampers

2.2 被动控制理论

通过仿真研究,得到了磁流变阻尼器电压、拉索振幅、振动频率、安装高度等参数与拉索模态阻尼比的关系,提出了应用磁流变阻尼器进行拉索振动控制时优化电压的数学模型。采用磁流变阻尼器非线性双粘性模型,推导了磁流变阻尼器等效粘性阻尼系数的计算公式,提出了磁流变阻尼器拉索减振设计的工程实用方法。并且基于最优控制理论,提出了多模态控制的拉索减振设计方法。

2.3 被动控制试验

采用自行研制的拉索激振设备,针对洞庭湖大桥多根拉索,采用不同安装高度、不同设计形式的磁流变式减振系统进行了多次试验,评估了各种参数条件下磁流变阻尼器的减振效果。图 8 为磁流变阻尼器拉索减振现场。图 9 为拉索模态阻尼比与磁流变阻尼器输入电压的关系。图 10 为拉索风雨振时有阻尼器与无阻尼器拉索的振动对比。试验研究结果表明:安装磁流变阻尼器后拉索模态阻尼比提高

了 3~6 倍,风雨振发生时的测试结果证明了磁流变阻尼器具有良好的减振效果。

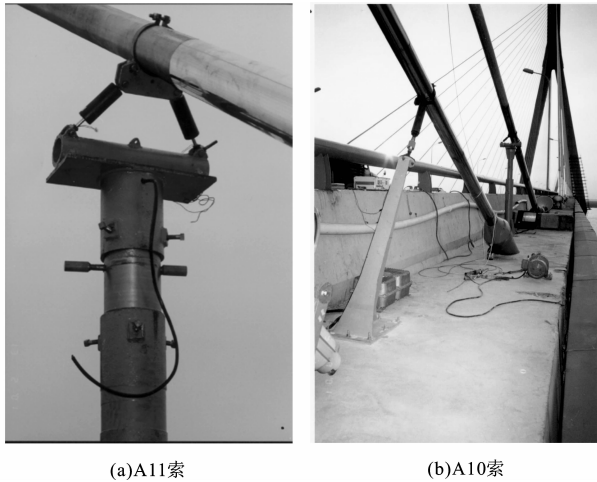


图 8 磁流变阻尼器拉索减振现场试验
Fig. 8 On-site test of mitigating vibration of cables using MR dampers

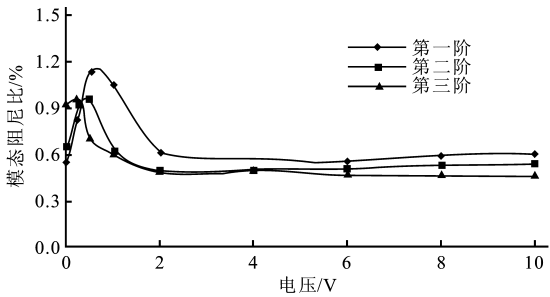


图 9 拉索模态阻尼比与磁流变阻尼器输入电压的关系
Fig. 9 Relation of damper ratio of mode shape of cables and input voltage of MR dampers

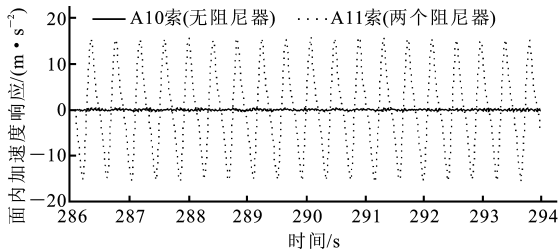


图 10 拉索风雨振时的振动对比
Fig. 10 Vibration comparison of wind-rain induced vibration of stay cables

2.4 半主动控制

针对拉索—磁流变阻尼器系统,提出了基于结构加速度响应识别的拉索—磁流变阻尼器系统模型、进行闭环控制的神经网络算法以及状态微分反馈算法,并应用实时控制系统进行了系列现场试验。

2.5 磁流变式拉索减振系统

在对拉索—磁流变阻尼器系统进行大量研究的基础上,开发了磁流变式拉索减振系统,如图 11 所示,并对该减振系统各部件进行了精心设计,保证了系统的有效性和耐久性。



图 11 洞庭湖大桥拉索减振系统
Fig. 11 System of mitigating vibration of cables on Dongting Lake Bridge

2.6 永磁可调式磁流变阻尼器

针对该桥拉索减振的实际工程情况,自主研制了永磁可调式磁流变阻尼器,该阻尼器能调节阻尼力大小,不需电源,进一步提高了磁流变式拉索减振系统的可靠性和工程适用性。研究成果已向国家申请了发明专利和实用新型专利,并应用于长沙洪山庙大桥、浏阳河大桥,图 12 为洪山庙大桥。



图 12 洪山庙大桥拉索减振系统
Fig. 12 System of mitigating vibration of cables on Hongshanmiao Bridge

3 结 语

在湖南岳阳洞庭湖大桥上建立了风雨振观测系统,并进行了连续、长期的现场观测,获得了风速、风向、雨量等参数对风雨振的影响规律,在拉索风雨振动特征和机理研究方面取得了一些重要成果。

(1)对磁流变阻尼器拉索减振效果进行了深入、

系统的研究,提出了磁流变式拉索减振系统的实用工程设计方法。

(2)开发的磁流变式拉索减振系统成功应用于岳阳洞庭湖大桥,解决了该桥严重的拉索风雨振问题。2003 年 1 月该系统被 Civil Engineering Magazine 评价为世界上第一套将磁流变阻尼器应用于桥梁结构的智能控制系统;2005 年 4 月 20 日中国中央电视台十套《科技之光》(前沿版)栏目对岳阳洞庭湖大桥磁流变式拉索减振系统作了专题报道。

(3)发明的永磁可调式磁流变阻尼器,已分别应用于长沙洪山庙大桥、浏阳河大桥的拉索减振,取得了很好的效果。

参考文献:

- [1] HIKAMI Y, SHIRAIISHI N. Rain-wind induced vibrations of cables in cable-stayed bridges[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1992, 43(3): 2 011—2 022.
- [2] SWAN R. Vibrations damped[J]. Bridge Design and Engineering, 1997, 41(9): 44—45.
- [3] TAKENA K, MIKI C, SHIMOKAWA H. Fatigue resistance of large-diameter cable for cable-stayed bridges[J]. Journal of Structural Engineering, 1992, 118(3): 701—715.
- [4] VERWIEBE C. Exciting mechanisms of rain-wind-induced vibration[J]. Structural Engineering International, 1998, 53(8): 129—135.
- [5] PACHECO B M, FUJINO Y, SULEKH A. Estimation curve for modal damping in stay cables with viscous damper[J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(6): 1 961—1 979.
- [6] DYKE S J, SPENCER J B F, SAIN M K, CARLSON J D. On the efficacy of magnetorheological damper for seismic response reduction[A]. 1997 ASME Design Engineering Technical Conference [C]. California: Sacramento, 1997. 14—17.
- [7] SAITO T, MATSUMOTO M, KITAZAWA M. Rain-wind excitation of cables on cable-stayed Higashi-Kobe bridge and cable vibration control[A]. Proceedings of Conference on Cable-stayed and Suspension Bridges[C]. Deauville: Springer Verlag, 1994. 507—514.
- [8] SPENCER J B F, DYKE S J, SAIN M K, CARLSON J D. Phenomenological model for magnetorheological dampers[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(3): 230—238.
- [9] CHEN Z Q, WANG X Y, KO J M, NI Y Q. MR damping system for mitigating wind-rain induced vibration on Dongting Lake cable-stayed bridge[J]. Wind and Structures, 2004, 7(5): 293—304.
- [10] CHEN Z Q, WANG X Y, NI Y Q, KO J M. Field measurements on wind-rain-induced vibration of bridge cables with and without MR damper[A]. Proceedings of the Third World Conference on Structural Control[C]. Como: F Casciati, 2002. 393—402.
- [11] CHEN Z Q, WANG X Y, KO J M, NI Y Q, SPENCER B F, JR, YANG G. MR damping system on Dongting Lake cable-stayed bridge[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5057: 229—235.
- [12] WANG X Y, NI Y Q, KO J M, CHEN Z Q. Optimal design of viscous dampers for multi-mode vibration control of bridge cables[J]. Engineering Structures, 2005, 27(5): 792—800.
- [13] 王修勇, 陈政清, 倪一清. 斜拉桥拉索风雨振观测及其控制[J]. 土木工程学报, 2003, 36(6): 53—59.
- [14] 王修勇, 陈政清, 倪一清, 高赞明. 斜拉桥拉索磁流变阻尼器减振技术研究[J]. 中国公路学报, 2003, 16(2): 52—56.
- [15] 王修勇, 陈政清, 高赞明, 倪一清. 磁流变阻尼器对斜拉索振动控制研究[J]. 工程力学, 2002, 19(6): 22—28.
- [16] 王修勇, 陈政清, 何旭辉, 等. 洞庭湖大桥风雨振减振试验研究[J]. 桥梁建设, 2002, 32(2): 11—14.
- [17] 王修勇, 陈政清, 何旭辉, 倪一清. 斜拉桥拉索风雨振控制的智能阻尼技术[J]. 振动与冲击, 2002, 21(3): 26—30.
- [18] 王修勇, 陈政清, 倪一清. 斜拉索—磁流变阻尼器系统半主动控制的神经网络法[J]. 振动与冲击, 2003, 22(4): 49—53.
- [19] 王修勇, 戚跃然, 陈政清, 倪一清. 磁流变阻尼器控制拉索振动的优化参数研究[J]. 湘潭矿业学院学报, 2003, 18(1): 31—35.
- [20] 王修勇, 陈政清. 确定斜拉索减振阻尼器优化参数的一种方法[J]. 振动与冲击, 2002, 21(1): 89—91.