

基于电磁调控阻尼器的拉索减振方法研究

梁 栋¹, 卢建峰¹, 高启战², 闫 峰³, 闫 武²

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024;
3. 邢台学院科研处, 河北 邢台 054001)

摘要 目的 提出拉索多阶耦合振动问题的解决方法, 为解决该类工程问题提供参考。方法 设计电磁调控阻尼器, 并提出相应减振方法用于抑制拉索的多阶耦合振动; 为验证该电磁调控阻尼器的广谱减振性能, 针对模型索设计了包括单阶和耦合振动在内的多种试验, 并将试验结果与传统黏滞阻尼器的试验结果进行对比。结果 在单阶振动问题中, 该电磁调控阻尼器能够实现在更宽频率范围内对拉索振动进行减振; 在多阶耦合振动问题中, 该电磁调控阻尼器能够实现对主振动模态的目标识别与控制。结论 利用电磁调控装置驱动相应的阻尼元件介入振动系统, 实现对拉索主振动模态的实时控制, 是抑制拉索多阶耦合振动的有效途径。

关键词 广谱减振; 主动控制; 多阶耦合; 电磁调控阻尼器; 可变阻尼

中图分类号 TU997

文献标志码 A

引用格式: 梁栋, 卢建峰, 高启战, 等. 基于电磁调控阻尼器的拉索减振方法研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2024, 40(4): 617-626. (LIANG Dong, LU Jianfeng, GAO Qizhan, et al. Research on cable vibration reduction method based on electromagnetic control damper[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2024, 40(4): 617-626.)

Research on Cable Vibration Reduction Method Based on Electromagnetic Control Damper

LIANG Dong¹, LU Jianfeng¹, GAO Qizhan², YAN Feng³, YAN Wu²

(1. School of Civil and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin, China, 300401; 2. China First Highway Group Co. Ltd., Beijing, China, 100024; 3. Research Department, Xingtai University, Xingtai, China, 054001)

Abstract: A solution to the multi-order coupled vibration problem of tension cables is proposed to provide a reference for solving this type of engineering problems. In this paper, an electromagnetically regulated damper is designed and a corresponding damping method is proposed for suppressing the multi-order coupled vibration of a tension cable. In order to verify the broad-spectrum damping performance of this electromagnetic modulating damper, various tests including single-order and coupled vibrations were designed for the model cable, and the test results were

收稿日期: 2023-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51978236)

作者简介: 梁栋(1976—), 男, 教授, 博士, 主要从事桥梁结构智能检测等方面研究。

compared with those of the traditional viscous dampers. In single-order vibration problems, the electromagnetic modulation damper is able to realize the damping of cable vibration in a wider frequency range; in multi-order coupled vibration problems, the electromagnetic modulation damper is able to realize the target identification and control of the main vibration modes. The use of electromagnetic control devices to drive the corresponding damping elements to intervene in the vibration system, realizing the real-time control of the main vibration modes of the cable is an effective way to inhibit the multi-order coupled vibration of the cable.

Key words: broad spectrum vibration reduction; active control; multi-order coupled vibration; electromagnetic controlled damper; variable damping

斜拉索作为斜拉桥的主要受力构件,将主梁所受的大部分静、动荷载传递到桥塔^[1]。在风荷载、地震激励等作用下斜拉索会发生振动现象,主要包括涡振^[2]、驰振^[3]、抖振^[4]、风雨激振^[5]等振动形式,会对桥梁结构安全性、舒适性和使用寿命产生不利影响。为降低拉索振动影响,工程中已采取了多种应对措施:例如通过改变斜拉索的外观形态,来减少风致振动^[6];使用辅助索通过增加拉索的平面刚度,减小面内振动^[7];使用外置阻尼器提供额外阻尼。由于更改拉索气动形态的方法与设置辅助索方法对拉索在频率方面存在影响^[8],故外置阻尼器方法更加适用。段元锋^[9]在斜拉索-阻尼器系统模态阻尼比统一公式的基础上,通过公式变量分离、拉索参数统计等方法,得到了可近似独立衡量各参数影响的黏滞阻尼器实用设计方法。Y. L. Xu等^[10]通过倾斜垂索-油阻尼器缩尺模型试验,初次证明了垂度对阻尼比的影响。Y. Achkire等^[11]提出了变刚度主动控制策略,并通过缩尺模型证明了理论结果。A. Ruangrassamee等^[12]通过模拟方法,证明了非线性黏性阻尼力方案和两级摩擦阻尼力方案的有效性。

随着社会的发展,斜拉桥对大跨度有了更高的要求,索长随之增长,缆索基频也随索长变化而降低,对风雨诱导振动(RWIV)敏感的频率范围内的拉索振动阶次数量也会显著增加^[13],同时与涡流脱落引起的高模态电缆振动相对应的风速也会降低^[14],这使得拉索

耦合振动问题愈发凸显^[15-18]。L. M. Sun等^[19]改进了欧文参数,发现在垂度较低时,非线性阻尼器具有更高的模态阻尼。同时N. Hoang等^[20]和L. Chen等^[21]也分别通过能量等效法和多谐平衡法为该结论提供了理论基础,并且发现,与线性阻尼器相比,非线性阻尼器在为留置电缆的多种振动模式提供模态阻尼方面更具优势。H. Gao等^[22]基于输出反馈调节理论对黏性惯质阻尼器进行多模态设计优化;F. D. Di等^[23]基于遗传算法对多个典型阻尼器进行了多模态优化设计;R. Z. Zhu等^[24]提出了一种新型自定心流体黏性阻尼器,并进行了低循环反向加载试验;Y. K. Wen等^[25]通过优化主动调谐质量阻尼器(ATMD)和传感器的放置以及开发控制模型和方案来缓解斜拉桥的多模抖动;M. Zurawski等^[26]提出了一种新的自适应调谐粒子冲击阻尼器(ATPID)的模型与实时控制策略,缓解了稳态振动。

以油阻尼器作为外置减振设施在减振措施中已应用多年,油阻尼器在工程中普适性依旧较强^[27],但是油阻尼器面临在宽幅耦合振动时对部分频带减振效果不足的问题。为解决上述问题,笔者基于电磁控制的实时性,设计了两个黏滞阻尼器的电磁调控装置(电磁调控阻尼器),并进行模型索试验研究,以实现拉索多阶耦合振动的减振。研究表明,利用电磁调控装置驱动相应的阻尼元件介入振动系统,实现对拉索主振动模态的实时控制,是抑制拉索多阶耦合振动的有效途径。

1 电磁调控阻尼器的组成及其减振控制策略

1.1 调控装置组成

电磁调控阻尼器由振动测量装置、电磁控制系统和能耗装置三部分构成。其中振动测量装置主要是利用位移或速度传感器获取拉索振动频谱信号的装置;电磁控制系统主要包括信号输入设备、信号处理设备、信号输

出与执行器,其中信号处理设备处理输入信号,确定执行设备执行与否,执行器控制传动轴位置,达到选择阻尼元件的目的;能耗装置是指对拉索不同振动阶次进行控制的阻尼元件(见图 1(a))。通过调整阻尼油黏度,可以实现对拉索不同振动阶次的最优减振效果。相较于传统控制能耗装置(见图 1(b)),电磁调控可由电磁铁控制拨叉选择工作阻尼参数。

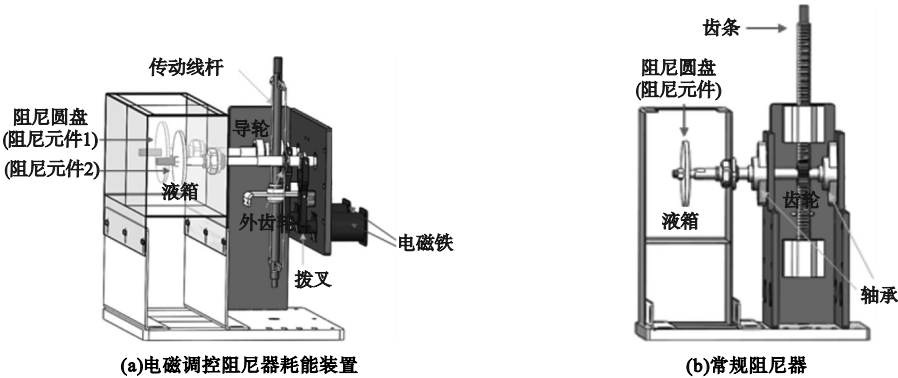


图 1 电磁调控与常规控制能耗装置
Fig. 1 Diagram of the damper model

1.2 减振控制策略

在利用电磁调控阻尼器进行拉索多阶耦合振动的减振时,首先采用位移计或速度计进行拉索振动频谱信号的不间断测量;再运用 MCU 进行信号处理,动态获取振动能量最大模态;其次应用电磁继电器完成电路高

压与低压的互相转化,通过 MCU 输出信号控制该继电器开关;最后通过交流接触器完成对适应振动能量最大模态的阻尼器的选择动作。主要控制流程如图 2 所示,各流程不间断工作。

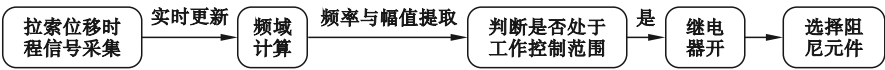


图 2 电磁调控阻尼器的主要控制流程
Fig. 2 The main control flow of electromagnetic control damper

笔者采用减振控制策略如下,可假设为阻尼更换系统模型,阻尼器出力公式为

$$F = \begin{cases} C_1 V(x_a, t), Z_i > Z_0 \cap (f_i > f_i \cup f_i > f_0); \\ C_2 V(x_a, t), Z_i > Z_0 \cap f_i \leq f_i \leq f_0. \end{cases} \quad (1)$$

式中: C_1 为低频大幅值对应阻尼; C_2 高频小幅值对应阻尼,其中 $C_1 > C_2$; \dot{V}_a 为阻尼器安装位置处运动速度; Z_i, f_i 分别为监测点处位移幅值与频率; Z_0, f_0, f_1 分别为阻尼器设定幅值与频率参数。

1.3 电磁调控架构

电磁调控系统通过信号采集、信号传输与处理、阻尼器控制三个层次实现,配合人机交互,完成阻尼器的电磁调控。该架构整体思路为将激光位移计电压信号作为输入,通过 BNC 接口与降压跟随电路传至 ADC 中,而后通过 SPI 协议进入 MCU 中,在其中进行数据的 FFT、频率提取、阻尼选择等数据分析,将决策信号通过电压放大方法控制电磁

铁电路开关,完成阻尼选择动作。

为采集拉索振动信号,笔者采用激光位移计测量位移时程,被采集数据的预处理流程如图3所示。电磁调控阻尼器中数据传输方式为有线传输。

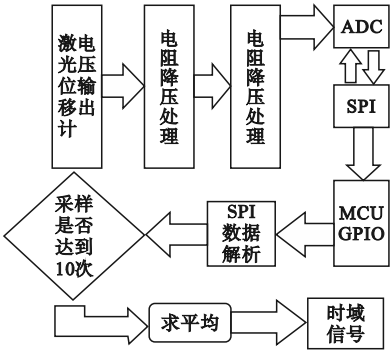


图3 信号预处理

Fig. 3 Signal pre-processing

为处理拉索振动信号,需对预处理后信号进行处理。将时域信号输入MCU进行数据的快速FFT变换、频率提取等数据分析,而后输出决策信号,具体流程如图4所示。

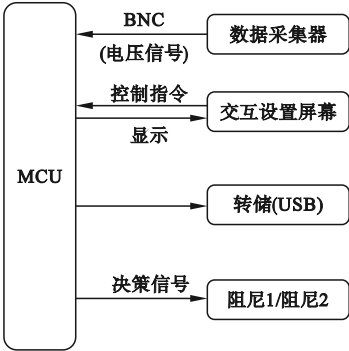


图4 信号处理分析

Fig. 4 Signal processing and analysis

为完成更宽频带范围内的减振目标,需对决策信号进行输出。在阻尼器工作时,需将运用决策信号控制动力系统,阻尼器才可以进行阻尼元件更换工作。电磁调控装置的各部分供电示意图如图5所示。

2 拉索-电磁调控阻尼器减振试验

2.1 模型索与试验设备

试验采用两个型号为DH1301、精度为

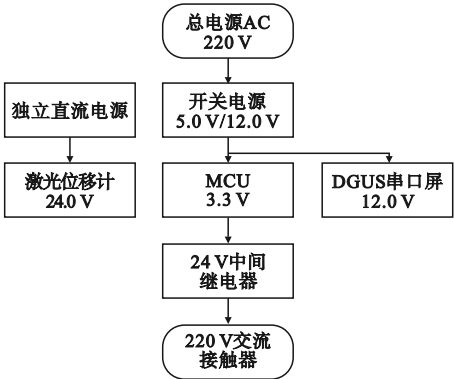


图5 阻尼器供电系统

Fig. 5 Damper power supply system

0.1 Hz 的信号发生器;两个型号为DH400050的激振器;两个型号为HL-G112-S-J、精度为0.01 mm的激光位移计;1个精度等级为0.05的力传感器;1个型号为DH5956的动态信号分析系统等设备。试验装置如图6所示。

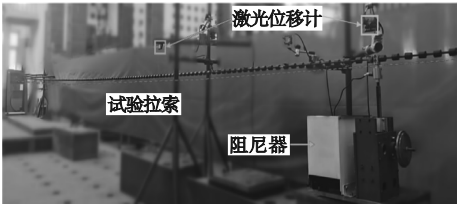


图6 常规阻尼器试验装置

Fig. 6 The installation diagram of the test device

试验中为降低拉索自振频率,采用增加拉索自重的方法,间距8 cm安装小质量块。安装了小质量块的模型索参数见表1。

表1 模型索参数

Table 1 The parameters of the model cable

拉索拉力/N	索长/m	每延米质量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	横断面积/ 10^{-5}m^2
13 000	14	2.402	5.02

2.2 试验工况设计

为测试电磁调控阻尼器的减振效果,试验工况设计见表2和表3。表中工况7~工况12用于验证电磁调控系统在模型索单阶振动条件下能否正确进行识别与执行工作;工况19~工况24用于验证电磁调控系统在拉索耦合振动工况下是否可以准确识别并执

行减振;工况1~工况6、工况13~工况18为相应常规黏滞阻尼器减振效果的对照组。耦合工况的激振方式为,同时用两个激振器分别激励前两阶振动,主控阶次停止激振后干扰阶次持续激振,以实现模型索的耦合振动,并展示各阶次抑振效果。

表2 拉索单阶振动衰减工况汇总

Table 2 Summary of single-order vibration attenuation conditions of cables

工况	控制方式	振动状态	$C_d/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
1	常规控制	1 st	0
2	常规控制	1 st	50
3	常规控制	1 st	100
4	常规控制	2 nd	0
5	常规控制	2 nd	50
6	常规控制	2 nd	100
7	电磁调控	1 st	0
8	电磁调控	1 st	50(100)
9	电磁调控	1 st	100(50)
10	电磁调控	2 nd	0
11	电磁调控	2 nd	50(100)
12	电磁调控	2 nd	100(50)

注:表中1st表示拉索1阶振动状态;2nd表示拉索2阶振动状态; C_d 为阻尼油黏度系数,括号中为次控阶次对应阻尼油黏度系数。

表3 拉索前两阶耦合振动衰减工况汇总

Table 3 Summary of the first two order coupling vibration attenuation conditions of cables

工况	控制方式	振动状态	$C_d/(\text{Pa}\cdot\text{s})$
13	常规控制	1 st _{co2}	0
14	常规控制	1 st _{co2}	50
15	常规控制	1 st _{co2}	100
16	常规控制	2 nd _{col}	0
17	常规控制	2 nd _{col}	50
18	常规控制	2 nd _{col}	100
19	电磁调控	1 st _{co2}	0
20	电磁调控	1 st _{co2}	50
21	电磁调控	1 st _{co2}	100
22	电磁调控	2 nd _{col}	0
23	电磁调控	2 nd _{col}	50
24	电磁调控	2 nd _{col}	100

注:表中1st_{co2}表示拉索1阶为主、2阶为辅的耦合振动状态;2nd_{col}表示2阶为主、1阶为辅的耦合振动状态。

2.3 拉索自由振动

相隔50个振动周期计算得到拉索模型面内一阶自由振动的试验阻尼比,平均值见表4。考虑拉索垂度的自振频率计算式为

$$f_i = \frac{i}{2L} \sqrt{\frac{T}{m} \left[1 + \frac{2\lambda^2}{i^4 \pi^4} (1 + (-1)^{i+1})^2 \right]}$$

(2)

式中:拉索垂度系数 $\lambda^2 = (mgL\cos\theta/T)^2 LEA/L_e T$, $L_e = L [1 + (mgL\cos\theta/T)^2/8]$, 计算得 $\lambda^2 = 0.149$ 。

拉索模型面内自振频率试验值与理论值比较结果见表4。从表中可以看出,面内自振频率试验值与理论值的误差较小,表明该模型与测量系统误差满足试验要求。

表4 拉索模型面内自由衰减

Table 4 The in-plane free attenuation of the cable

振动形态	试验频率/Hz	理论频率/Hz	误差	试验阻尼比
1 st	2.726 9	2.646 6	-0.036 4	0.000 34
2 nd	5.387 0	5.254 8	-0.025 2	0.001 01
1 st _{co2}	2.708 9	2.631 1	-0.029 6	0.000 51
2 nd _{col}	5.356 7	5.254 8	-0.019 4	0.000 92

2.4 单阶自由衰减下调控装置影响试验

为验证电磁调控装置在单阶条件下对阻尼性能的影响,开展电磁调控阻尼器-拉索系统模型单阶自由振动试验。图7所示为工况3、工况9下四分点处位移时程曲线。从图中可以看出,该曲线幅值在电磁控制传动杆撤回前指数衰减,这种趋势近似传统黏滞阻尼器参与工作。衰减至设置临界工作幅值(设置为2 mm)时,控制系统识别当前振动状态,电磁调控装置将阻尼元件更换为小阻尼元件且由连接杆带走系统部分动量,故阻尼力有所降低。其他电磁调控工况在L/4处面内一、二阶自由振动衰减曲线变化趋势与图7相似,故不在赘述。

不同阻尼工况的单阶激振条件下电磁调控阻尼器与传统黏滞阻尼器的试验结果见表5和表6。从表中可以看出,除了工况12,电磁

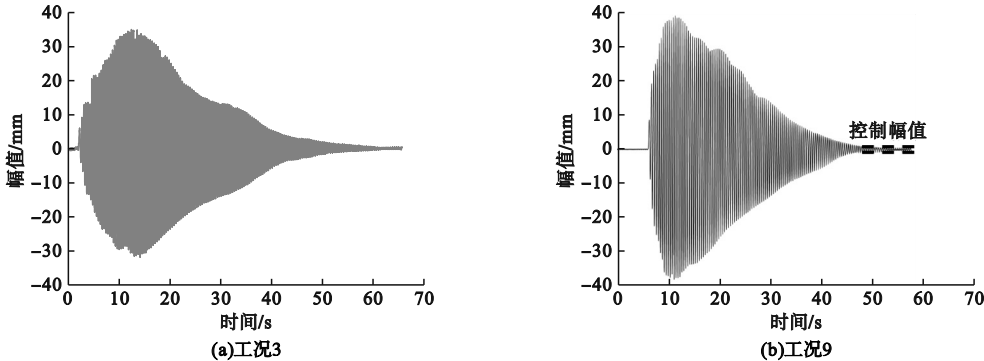


图7 $L/4$ 处面内 1^{st} 的振动状态

Fig. 7 The vibration state of working conditions 3 and 9 at $L/4$

调控阻尼器的模态频率普遍低于常规阻尼器,分析原因为较大的惯质参数导致拉索-阻尼器系统自振频率降低。但在工况 12 下,由于惯质与阻尼参数的共同影响,拉索振动状态复杂,阻尼器有一定锚固作用,所得频率近似于阻尼器较长侧拉索的自振频率。试验结果表明,在单阶自由衰减条件下,电磁调控阻尼器相对于传统黏滞阻尼器,其减振能力几乎没有区别,电磁调控装置能够顺利完成阻尼选择任务。

表5 1^{st} 各工况汇总

Table 5 The summary results of 1^{st}

1^{st} 工况	f_1/Hz	ξ_1
1	2.727	0.03
2	2.716	0.16
3	2.845	0.36
7	2.705	0.07
8	2.7	0.2
9	2.793	0.39

注: ξ_1 为 1 阶阻尼比。

表6 2^{nd} 各工况汇总

Table 6 The summary results of 2^{nd}

2^{nd} 工况	f_2/Hz	ξ_2
4	5.387	0.01
5	5.455	0.18
6	5.556	0.31
10	5.505	0.04
11	5.391	0.21
12	5.603	0.47

注: ξ_2 为 2 阶阻尼比。

2.5 拉索-阻尼器 1^{st}_{co2} 强迫耦合振动工况

为验证该电磁调控装置在拉索多阶耦合振动条件下模态识别性能与对阻尼性能发挥的影响,对拉索-阻尼器系统模型展开 1 阶为主 2 阶为辅的耦合振动减振试验。工况 21、工况 15 下, $L/4$ 处位移时程曲线如图 8 所示。

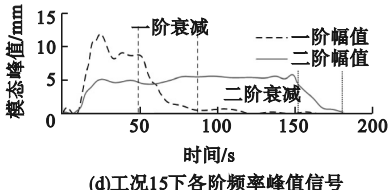
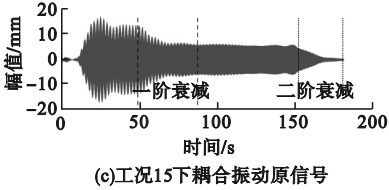
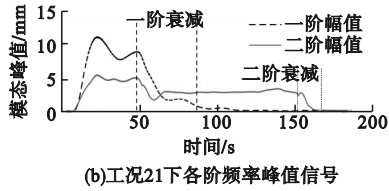
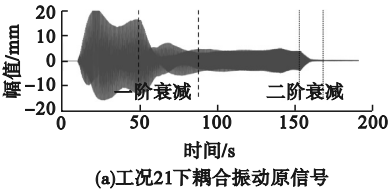


图8 $L/4$ 处面内 1^{st}_{co2} 下的振动状态

Fig. 8 The result of working condition 1^{st}_{co2} at $L/4$

从图 8(a)和图 8(b)可以看出,在50 s之前,拉索为1阶为主2阶为辅的耦合振动;50~90 s时,拉索1阶幅值逐渐衰减,2阶幅值小幅增长;90~150 s时,拉索为2阶振动;150~170 s时,2阶逐渐衰减至控制幅值以下。

相较于工况 15 中常规阻尼器下的位移时程曲线(见图 8(c)和图 8(d)),电磁调控阻尼器在 2 阶衰减时,由于阻尼参数的更换,展现出了更快的衰减速度,而在其他方面则并无明显区别。拉索在电磁控制传动杆作用后指数衰减,近似传统黏滞阻尼器参与工作。主控阶次衰减至设置临界工作幅值(设置为 2 mm)时,调控系统完成识别与更换阻尼工作,故主控阶次对数衰减率降低。在耦合状态中四分点幅值存在波动现象。在主控阶次衰减、次控阶次强迫振动时,主控、次控阶次幅值均呈波动减小,最终主控阶次幅值消失。这些耦合工况下趋势均与无阻尼耦合自由衰减相近。次控阶次衰减时与对应阶次自由衰减类似。为方便与工况 15 对比,将调控装置对二阶反应延后。其他电磁调控工况在 L/4 处面内多阶耦合强迫振动衰减曲线变化趋势与图 8 相似,故不在赘述。

不同阻尼一阶振动幅值为主工况下,电磁调控阻尼器与传统黏滞阻尼器的一阶、二阶频率和阻尼比见表 7。

表 7 1st_{co2}各工况汇总

Table 7 The summery results of 1 st _{co2}		
1 st _{co2} 工况	f_1 /Hz	ξ_{1co2}
13	2.71	0.052
14	2.733	0.21
15	2.842	0.36
19	2.738	0.049
20	2.717	0.23
21	2.759	0.41

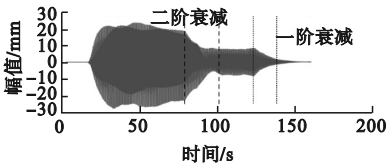
注: ξ_{1co2} 为 1st_{co2}下耦合衰减时的 1 阶阻尼比。

从表 7 中可以看出,在合理范围内随着阻尼越大,阻尼比越大;电磁调控较传统黏滞阻尼器在相同工况下阻尼比更大。试验结果表明,当以一阶振动为主导且存在小振幅耦

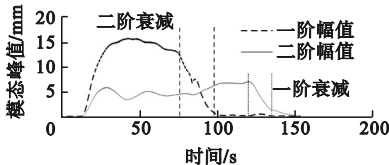
合的振动状态在衰减时,电磁调控装置能有效提升黏滞阻尼器的性能,为其提供更为丰富的阻尼参数选择,并拓展了可控振动频率的范围。

2.6 拉索-阻尼器 2nd_{col}强迫耦合振动工况

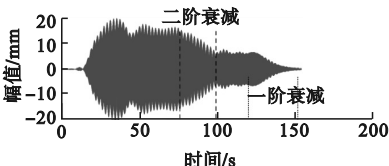
为验证该电磁调控阻尼器在拉索多阶耦合振动条件下的工作性能,对拉索-阻尼器系统模型展开了二阶为主控阶次的多阶耦合强迫振动试验。工况 23、工况 17 下,L/4 处位移时程曲线如图 9 所示。



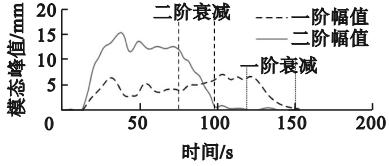
(a)工况23下耦合振动原信号



(b)工况23下各阶频率峰值信号



(c)工况17下耦合振动原信号



(d)工况17下各阶频率峰值信号

图 9 L/4 处面内 2nd_{col}处面内的振动状态

Fig. 9 The vibration state of working condition

23 at L/4

从图 9 中可以看出,其与一阶为主控阶次时整体趋势相同,但较一阶振动幅值为主工况波动幅值变小、波动次数变多。次控阶次衰减时与对应阶次自由衰减类似。为方便与工况 17 对比,将调控装置对一阶响应时间

延后。在 75 s 之前,拉索为 2 阶为主 1 阶为辅的耦合振动;75 ~ 100 s 时,拉索 2 阶幅值逐渐衰减,1 阶幅值小幅增长;100 ~ 120 s 时,拉索处于 1 阶稳态振动;120 ~ 140 s 时,1 阶逐渐衰减至控制幅值以下。相较于工况 17 的常规阻尼器,电磁调控阻尼器在 1 阶衰减时,展现出更快的衰减速度,而在其他方面并无明显区别。其他电磁调控工况在 $L/4$ 处面内 2nd_{col} 振动衰减曲线变化趋势与图 9 相似,故不在赘述。

不同阻尼工况下,电磁调控阻尼器与传统黏滞阻尼器的一阶、二阶频率与阻尼比见表 8。结果表明,安装电磁调控装置前后试验结果趋势相近,该电磁调控阻尼器可以完成增加可选阻尼参数的任务。

表 8 2nd_{col} 各工况汇总

Table 8 The summary results of 2 nd _{col}		
2 nd _{col} 工况	f_2/Hz	$\xi_{2\text{col}}$
16	5.356	0.093
17	5.413	0.17
18	5.592	0.43
22	5.417	0.09
23	5.357	0.16
24	5.355	0.49

注: $\xi_{2\text{col}}$ 为 2st_{col} 下耦合衰减时的 2 阶阻尼比。

2.7 电磁调控阻尼器对拉索耦合振动的自主减振

试验为采集理想耦合条件下的阻尼性能,设置了次控阶次反应延后时间。考虑实际情况,开展拉索-阻尼器系统耦合自由衰减工况。其中 2nd_{col} 电磁调控工况的四分点处衰减时位移结果如图 10(a)、图 10(b)所示,对应的常规控制工况结果如图 10(c)、图 10(d)所示。从图中可以看出,电磁控制时在 140 s 之前为二阶为主、一阶为辅的耦合振动,在 140 s 处开启电磁调控装置,开启模式识别、幅值对比工作,并在 142 s 处自动完成阻尼选择动作,之后二阶幅值迅速降低,一阶幅值缓慢减小;于 150 s 处二阶幅值小于—

阶幅值,并在 152 s 自动完成阻尼重选动作,使得二阶幅值迅速降低;至 156 s 时幅值降低至控制幅值以下,自动取消阻尼选择动作。相较于常规控制结果,电磁调控的次控阶次衰减更快,试验结果证明了该调控装置的实用性。自由衰减工况趋势与类似,故在此不再赘述。

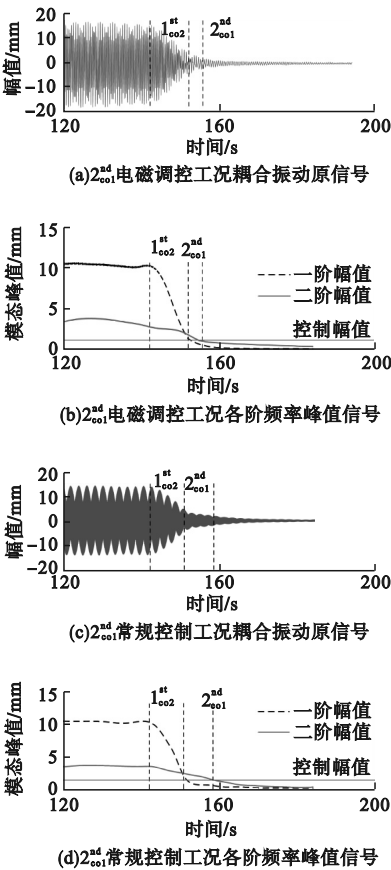


图 10 耦合自由衰减工况的振动状态

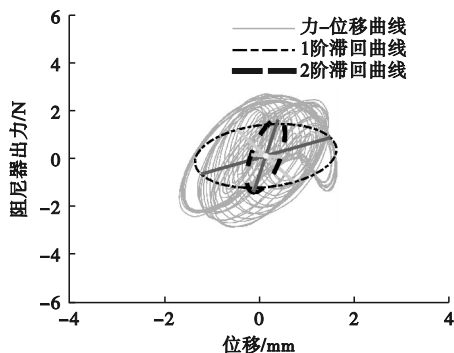
Fig. 10 The vibration state of coupled free attenuation with damper

2.8 多阶耦合振动下的减振效果分析

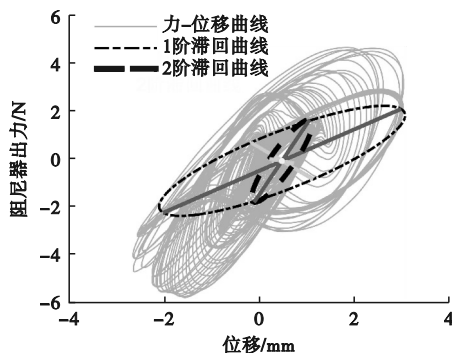
为验证耦合状况对阻尼器工作的影响,对电磁调控阻尼器-拉索系统模型多阶耦合试验结果与单阶自由振动结果对比。图 11 所示为工况 15、工况 21 的滤波后 1 阶衰减滞回曲线。从图中可以看出,在阻尼元件突然参与运动时滞回曲线循环方向存在突变,突变后与传统黏滞阻尼器相近;耦合工况下观察电磁调控阻尼器的滞回曲线可以发现,

能量耗散性能较相同幅值($L/4$ 处)的单阶振动时均有所提高,表现为在振幅近似的情况下滞回曲线面积增加,故阻尼比也随之提高;之后电磁调控单阶衰减中存在明显阻尼力突变现象,且由于调控装置的存在,使得滞回曲

线最终表现出负刚度特性;随着一阶衰减,振动频率2阶逐渐成为主导,故随滞回曲线主轴由一阶长轴方向愈发接近二阶长轴方向,同时在定幅激振下电磁调控的滞回曲线面积更大,故减振效果更好。



(a)传统黏滞阻尼器 1_{cos} 时1阶衰减



(b)电磁调控阻尼器 1_{cos} 时1阶衰减

图 11 $l_1/L=0.025$ 、 $C_d=100$ 时滞回曲线

Fig. 11 The hysteretic curves of working conditions 15 and 21

3 结 论

(1)笔者利用拉索的倍频特性和电磁控制系统的极快响应速度,通过电磁控制将两个黏滞阻尼器结合在一起,能够实现在更宽频率范围内对拉索多阶耦合振动进行减振。

(2)在进行振动信号时域检测时,可在电路中通过分段平均滤波的方式来规避测量噪声所带来的影响,避免阻尼器控制状态出现“跳变”问题。而在实际振动控制中,可通过设置振幅与阈值的对比条件,避免阻尼器频繁介入振动系统的问题。

(3)利用电磁调控装置驱动相应的阻尼元件介入振动系统,实现对拉索主振动模态的实时最优控制,是抑制拉索多阶耦合振动的有效途径。

参考文献

[1] 李永乐,孙超,向活跃,等. 三维随机激励作用下斜拉索参数振动的有限元分析[J]. 桥梁建设,2017,47(2):19-24.
(LI Yongle, SUN Chao, XIANG Huoyue, et al. Finite element analysis of parametric vibration of stayed cable under three-dimensional random excitation [J]. Bridge construction, 2017, 47(2):19-24.)

[2] 何旭辉,张兵,邹云峰,等. 芜湖长江公铁大桥主桥抗风性能试验研究[J]. 桥梁建设,2019,49(2):24-29.
(HE Xuhui, ZHANG Bing, ZOU Yunfeng, et al. Experimental research on wind-resistant performance of main bridge of Wuhu Changjiang river rail-cun-road bridge [J]. Bridge construction, 2019, 49(2):24-29.)

[3] DEMARTINO C, RICCIARDELLI F. Assessment of the structural damping required to prevent galloping of dry HDPE stay cables using the quasi-steady approach [J]. Journal of bridge engineering, 2018, 23(4):0001168.

[4] 胡旭辉,杨申云,李郁林,等. 组合梁斜拉桥施工最大单悬臂阶段抖振响应及减振研究[J]. 桥梁建设,2021,51(1):21-28.
(HU Xuhui, YANG Shenyun, LI Yulin, et al. Study of buffeting response and suppression measures for composite girder cable-stayed bridge in longest cantilever state during construction [J]. Bridge construction, 2021, 51(1):21-28.)

[5] 张为,刘庆宽,刘小兵. 长安街西延永定河大桥斜拉索风雨振及减振措施研究[J]. 世界桥梁,2020,48(3):48-52.
(ZHANG Wei, LIU Qingkuan, LIU Xiaobing. Study of rain-wind induced vibration on stay cables of Yongding river bridge on west expansion of Chang'an avenue and vibration suppression measures [J]. World bridges, 2020, 48(3):48-52.)

[6] MATSUMOTO M, SHIRAIISHI N, SHIRATO H. Rain-wind induced vibration of cables of cable-stayed bridges [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1992, 43(1):2011-22.

[7] CARACOGLIA L, JONES N P. In-plane dynamic

- behavior of cable networks. part 1: formulation and basic solutions [J]. Journal of sound and vibration, 2005, 279(3): 969 - 91.
- [8] CARACOGLIA L, JONES N P. In-plane dynamic behavior of cable networks. Part 2: prototype prediction and validation [J]. Journal of sound and vibration, 2005, 279(3): 993 - 1014.
- [9] 段元锋, 李频, 周仙通, 等. 斜拉索外置式黏滞阻尼器实用设计方法[J]. 中国公路学报, 2015, 28(11): 46 - 51.
(DUAN Yuanfeng, LI Pin, ZHOU Xiantong, et al. Practical design method for external viscous damper of stay cable [J]. China journal of highway and transport, 2015, 28(11): 46 - 51.)
- [10] XU Y L, ZHAN S, KO J M, et al. Experimental study of vibration mitigation of bridge stay cables [J]. Journal of structural engineering, 1999, 125(9): 977 - 986.
- [11] ACHKIRE Y, BOSSENS F, PREUMONT A. Active damping and flutter control of cable-stayed bridges [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 1998, 74/75/76: 913 - 921.
- [12] RUANGRASSAMEE A, KAWASHIMA K. Seismic response control of a cable-stayed bridge by variable dampers [J]. Journal of earthquake engineering, 2006, 10(1): 153 - 165.
- [13] 陈政清, 李寿英, 邓羊晨, 等. 桥梁长索结构风致振动研究新进展[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(5): 1 - 8.
(CHEN Zhengqing, LI Shouying, DENG Yangchen, et al. Recent challenges and advances on study of wind-induced vibrations of bridge cables [J]. Journal of Hu'nan university (natural sciences), 2022, 49(5): 1 - 8.)
- [14] 康厚军, 郭铁丁, 赵跃宇. 大跨度斜拉桥非线性振动模型与理论研究进展[J]. 力学学报, 2016, 48(3): 519 - 535.
(KANG Houjun, GUO Tieding, ZHAO Yueyu. Review on nonlinear vibration and modeling of large span cable-stayed bridge [J]. Chinese journal of theoretical and applied mechanics, 2016, 48(3): 519 - 535.)
- [15] GE C X, CHEN A R. Vibration characteristics identification of ultra-long cables of a cable-stayed bridge in normal operation based on half-year monitoring data [J]. Structure and infrastructure engineering, 2019, 15(12): 1567 - 1582.
- [16] 胡勇, 柴小鹏, 赵海威, 等. 沪苏通长江公铁大桥主航道桥斜拉索振动控制技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(4): 95 - 100.
(HU Yong, CHAI Xiaopeng, ZHAO Haiwei, et al. Vibration control techniques for stay cables of main navigational channel bridge of Shanghai-Suzhou-Nantong Changjiang river rail-cum-road bridge [J]. Bridge construction, 2020, 50(4): 95 - 100.)
- [17] 查道宏. 沪苏通长江公铁大桥斜拉索高阶振动控制研究[J]. 桥梁建设, 2022, 52(6): 1 - 7.
(ZHA Daohong. Study of higher-mode vibration control of stay cables of Shanghai Suzhou-Nantong Changjiang river rail-cum-road bridge [J]. Bridge construction, 2022, 52(6): 1 - 7.)
- [18] KIM S, KIM S, KIM H K. High-mode vortex-induced vibration of stay cables: monitoring, cause investigation, and mitigation [J]. Journal of sound and vibration, 2022, 524: 116758.
- [19] SUN L M, XU Y Y, CHEN L. Damping effects of nonlinear dampers on a shallow cable [J]. Engineering structures, 2019, 196: 109305.
- [20] HOANG N, FUJINO Y. Multi-mode control performance of nonlinear dampers in stay cable vibrations [J]. Structural control & health monitoring, 2009, 16(7/8): 860 - 868.
- [21] CHEN L, SUN L M. Steady-state analysis of cable with nonlinear damper via harmonic balance method for maximizing damping [J]. Journal of structural engineering, 2017, 143(2): 04016172.
- [22] GAO H, WANG H, LI J, et al. Optimum design of viscous inerter damper targeting multi-mode vibration mitigation of stay cables [J]. Engineering structures, 2021, 226: 111375.
- [23] DI F D, CHEN L, SUN L M. Optimal design of dampers for multi-mode cable vibration control based on genetic algorithm [J]. International journal of structural stability and dynamics, 2021, 21(4): 2150058.
- [24] ZHU R Z, GUO T, MWANGILWA F. Development and test of a self-centering fluidic viscous damper [J]. Advances in structural engineering, 2020, 23(13): 2835 - 2849.
- [25] WEN Y K, SUN L M. Distributed ATMD for buffeting control of cable-stayed bridges under construction [J]. International journal of structural stability and dynamics, 2015, 15(3): 1450054.
- [26] ZURAWSKI M, GRACZYKOWSKI C, ZALEWSKI R. The prototype, mathematical model, sensitivity analysis and preliminary control strategy for adaptive tuned particle impact damper [J]. Journal of sound and vibration, 2023, 564: 117799.
- [27] 陈永祁, 马良喆. 液体粘滞阻尼器应用现状及改进其适用性耐久性的措施方法[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(3): 97 - 106.
(CHEN Yongqi, MA Liangzhe. Application status of liquid viscous dampers and measures to improve their applicability durability [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2022, 44(3): 97 - 106.)

(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)