

斜拉桥拉索振动及减振技术研究进展

彭 辉

[上海城建市政工程(集团)有限公司,上海市 200333]

摘要: 斜拉索作为斜拉桥的核心受力构件,其振动问题直接影响桥梁服役安全。梳理了斜拉索主要振动类型的激发机理、动力特性及潜在危害,综述了传统被动减振技术及拉索减振新技术的研究进展与工程应用,分析了各类技术的优势与现存不足。研究表明,传统被动技术存在减振效能瓶颈,主动控制工程适用性差,半主动/智能控制与新型被动技术实现了性能突破,复合减振通过多手段协同是解决斜拉索多模态振动的重要方向。未来研究方向包括复杂工况下的减振理论、新型阻尼器研发、多模态参数优化及工程化验证等方面,为超大跨斜拉桥拉索减振设计提供参考。

关键词: 桥梁;斜拉桥;拉索;振动;减振技术

中图分类号: U448.41; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)05-0182-06

Research on Cable Vibration and Vibration Reduction Technology of Cable-stayed Bridge

PENG Hui

[Shanghai Urban Construction Municipal Engineering (Group) Co., Ltd., Shanghai 200333, China]

Abstract: As the core load-bearing component of cable-stayed bridges, the vibration behavior of cables directly impacts the bridge safety during service. The excitation mechanisms, dynamic characteristics and potential hazards of major cable vibration modes are sorted out. The research progress and engineering applications of traditional passive vibration reduction technologies and new cable vibration reduction techniques are summarized. The advantages and limitations of each technology are analyzed. The research results show that the traditional passive technologies face the bottlenecks of vibration reduction efficiency and the poor applicability of active control engineering. The semi-active/intelligent control and the new passive technologies have achieved the performance breakthroughs. The composite vibration reduction through multi-means collaboration is an important direction to solve the multi-modal vibrations of the cables. The future research directions include the vibration reduction theories under complex operating conditions, the development of new dampers, and the optimization and engineering validation of multi-modal parameters, which provides a references for vibration reduction design of the cables of ultra-long-span cable-stayed bridges.

Keywords: bridge; cable-stayed bridge; stayed cable; vibration; vibration reduction technology

0 引言

斜拉索作为斜拉桥的核心承重构件,因质量轻、柔度大、阻尼低,极易在风、风-雨等外界环境激励下发生多种有害振动^[1]。持续、大幅度的振动不仅会引发拉索及连接件的疲劳损伤,还会破坏拉索的锚固器及防腐系统、造成在役阻尼器失效,进而缩短斜拉索使用寿命并增加桥梁结构的整体维护成本,同时对桥上行车安全构成严重威胁。因此,有必要发展有效的减振技术来控制拉索振动,以保证桥梁的

正常安全运营。

目前,应用最广的被动黏滞阻尼器(VD, viscous damper)仅能实现对斜拉索单阶模态的最优控制,减振效果受限于安装位置与斜拉索长度的比值^[2]。随索长不断增加,VD已难以满足大柔度超长斜拉索多阶模态的减振需求,亟须发展振动控制新技术以提升减振效果。

现有拉索减振技术综述多侧重于传统技术或单一新技术。本文梳理了新型被动减振技术的共性力学机理与工程适配特性;对主动、半主动、新型被动及复合减振技术的技术体系进行了整合,对比分析其原理、优势与应用短板,形成完整的拉索减振技术框架;最后结合千米级超大跨斜拉桥的工程需求,针

收稿日期: 2026-02-05

作者简介: 彭辉(1981—),男,本科,高级工程师,从事道路桥梁工程施工工作。

对现有技术短板提出未来研究切入点和技术重难点,为超大跨斜拉桥拉索减振设计提供参考。

1 斜拉桥拉索振动类型

斜拉索常见的振动类型主要包括风致振动和非风致振动。风致振动由风或风-雨耦合激励引起,主要表现为风雨激振、涡激共振、尾流驰振和抖振等形式。非风致振动由斜拉索与桥面板或桥塔之间的相互作用产生,包括参数振动和线性内部共振等。各类振动的激发机理、特点、危害性及典型实桥案例汇总如表 1 所示。

表 1 斜拉索主要振动类型			
振动类型	机理概述	特点及危害性	实桥案例
风雨激振 ^[3]	雨水形成水线改变拉索气动外形,与来流风耦合产生负阻尼自激振动	低频大振幅,持续剧烈,加速拉索疲劳,破坏锚固端及支座	日本 Meiko Nishi 大桥、中国汕头海湾大桥、杨浦大桥
涡激共振 ^[4]	气流绕索产生周期性漩涡脱落,频率接近拉索固有频率诱发横向振动	频率锁定,振幅中等,单模态为主,连接件易磨损开裂	丹麦大贝尔特桥、法国诺曼底大桥、中国南京长江三桥、虎门大桥
尾流驰振 ^[5]	上游拉索尾流中的紊流与漩涡作用于下游相邻拉索,改变气动升力引发自激振动	低风速密索易发生,多模态耦合,索间易碰撞	英国塞文桥、美国金门大桥、中国苏通大桥
抖振 ^[6]	紊流场中随机强迫振动,成因包括自然风脉动、拉索自身尾流及周边结构干扰	宽频带,覆盖多阶模态;长期累积疲劳降低结构寿命	日本明石海峡大桥、英国亨伯桥、中国港珠澳大桥
参数振动 ^[7]	桥塔与桥面振动带动索端双向激励,轴向激励频率接近拉索固有频率 2 倍时引发大幅振动	振动频率为拉索固有频率的倍数或分频,易与其他振动耦合	挪威斯堪桑德桥、中国虎门大桥
线性内部共振 ^[7]	外部激励频率接近拉索某阶固有频率,诱发多模态耦合共振	高阶模态振幅被显著放大,振动形式复杂,易引发索体局部破坏	韩国仁川大桥、中国昂船洲大桥

由表 1 可知,斜拉索振动类型多样、成因复杂,均会导致拉索疲劳、结构稳定性下降,直接威胁桥梁安全。因此,深入研究各类振动的抑制机理,发展针对性的减振技术具有重要工程意义。

2 传统被动拉索减振技术

传统被动控制方法无需外部供能,具有造价低廉、便于安装与维护等优势,在工程实践中应用最为广泛,主要分为空气动力学减振措施、增设辅助索和机械阻尼措施 3 大类。

2.1 空气动力学减振措施

空气动力学措施通过改变拉索外形或增加表面粗糙度抑制水线形成,降低风雨振发生的可能性^[3]。常用方式包括缠绕螺旋线、设置纵肋^[3]或凹槽、吹吸气套环^[8]及采用波浪外形^[1]等。该类措施造价低廉、维护简便,在国内外斜拉桥工程中应用广泛:如日本 Higashi-Kobe 桥采用了表面带有纵向凸起的 PE 套管斜拉索;我国苏通大桥和南京长江二桥分别通过表面印花、缠绕螺旋线实现减振。但该类措施缺乏统一设计理论,且实桥应用效果并非完全可靠,常需与其他措施配合使用。

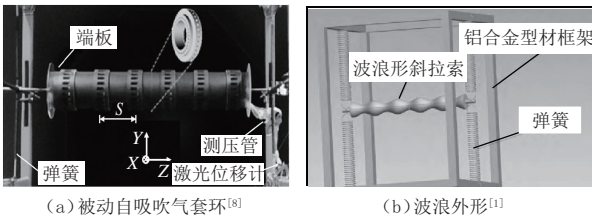


图 1 空气动力学减振措施

2.2 辅助索措施

辅助索通过连接多根拉索形成索网体系,缩短拉索有效自由长度,提高自振频率及面内刚度以抑制振动^[6]。

日本 Meikoh West 桥、丹麦 Faro 桥等均采用了辅助索减振方案。但辅助索连接节点处容易产生疲劳损伤,需不定期更换;同时附加的索网结构会对斜拉桥的整体景观协调性造成一定影响,因此该方法在实际工程中尚未得到大规模推广应用,通常需要与其他机械减振措施配合使用。

2.3 机械阻尼措施

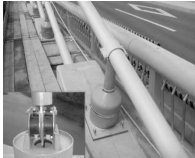
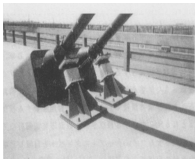
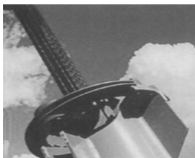
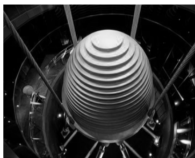
机械阻尼措施通过在拉索锚固端安装阻尼器来提高附加阻尼比,因安装便捷、维护方便,成为应用最广泛的减振手段。常见阻尼器类型、减振机理及其工程应用如表 2 所示。

调谐质量阻尼器(TMD, tuned mass damper)在超高层建筑减振中应用广泛,但因频率调谐精度要求高、对多模态振动控制效果有限等,在拉索减振中常以 TMD-辅助索等复合形式出现^[6]。尽管上述各类机械阻尼器已在工程中得到一定应用,但面对超长拉索,其局限性日显,附加阻尼有限、安装维修难度大、部分存在阻尼液泄露等问题^[11-12],已难以满足超大跨斜拉桥减振需求。

3 拉索减振新技术

千米级斜拉桥超长索的复杂动力学特性对减振

表2 斜拉索被动阻尼器类型^[6,10]

阻尼器类型	减振机理	实物图	优缺点	实际工程应用
高阻尼橡胶阻尼器 HDR	利用高阻尼器橡胶材料的剪切变形耗散振动能量		构造简单,成本低,安装便捷;阻尼力较小,易受温度影响,耐久性一般	日本 Tatara 大桥、上海南浦大桥、杨浦大桥
油阻尼器 OFD	活塞与油缸相对运动形成压力差,驱动高黏滞液体流过阻尼孔,产生轴向阻尼力		理论成熟,减振效果好;结构复杂、精度校准难、维护成本高	法国 Brotonne 桥、美国 Sunshine Skyway 桥、南京长江二桥
黏滞剪切型阻尼器 VSD	利用黏性材料的高黏度黏滞力耗散能量		减振效果较好,易于安装;对环境与频率要求高,维护成本较高	日本幸魂大桥、杭州湾跨海大桥、武汉长江二桥
摩擦阻尼器 FD	利用接触面间的相对滑动摩擦耗散拉索振动能量		耗能强,适配低频大位移振,构造简单;阻尼力受磨损、温度影响	香港汲水门大桥、瑞典乌德瓦拉大桥
调谐质量阻尼器 TMD	通过调谐质量块与主结构共振耗散能量		对特定频率振动控制效果显著,构造简单;频带较窄,对多模态控制有限	常与辅助索构成复合减振系统,或作为新型减振装置的设计原型

效率提出了更高要求。为突破传统被动技术的性能瓶颈,满足多模态、全工况减振需求,主动控制、半主动及智能控制、新型被动及复合减振等新技术应运而生。

3.1 主动控制减振技术

主动控制通过外部供能与控制算法,由压电作动器、超磁致伸缩作动器(GMA, giant magnetostrictive actuator)等施加实时主动控制力^[13-14],主要包括采用主动阻尼装置和主动控制拉索端部轴向运动两种形式^[13]。理论减振效果最优,但因能耗高、极端工况可靠性差,难以实现工程推广。

3.2 基于半主动阻尼器的半主动及智能控制减振技术

半主动及智能控制兼具被动稳定可靠与主动控制可调的优势,可实现拉索多模态复合减振,仅需少量外部能量即可实现实时优化控制,常用装置包括磁流变阻尼器(MR, magnetorheological damper)(见图2(a))、形状记忆合金阻尼器(SMA, shape memory alloys)(见图2(b))等。

Li 等^[15]首次提出 SMA 阻尼器减振方案并经数值与试验验证,拉索多模态振动幅值降低 30% 以上,附

加阻尼比高达 2.2%。Liu M 等^[16]通过建立拉索-SMA 阻尼器系统模型、开展试验进一步优化其效能。MR 阻尼器响应迅速且阻尼力连续可调,已应用于洞庭湖大桥、滨州黄河大桥等工程,多项研究^[17-19]均证实 MR 阻尼器在抑制风雨振及多模态振动方面优于传统 VD,其核心优势是特定算法下的“负刚度”特性,可放大拉索位移,提升系统耗能能力。

常规 MR 阻尼器半主动控制依赖外部电源、传感器及复杂控制器,工程应用受限。为此,研究转向无外部供能的新型 MR 阻尼器及负刚度纯被动阻尼器。刘鹏飞等^[20]研发的新型永磁式 MR 阻尼器、汪志昊等^[21]提出的新型自供电 MR 阻尼器,经试验验证均以被动控制手段实现了接近甚至优于半主动控制的效果,为拉索减振提供了高效可靠的解决方案。其中自供电 MR 阻尼器在 MR 阻尼器与能量回收电机分置拉索不同端的最优匹配工况下,对拉索前两阶模态的附加阻尼比分别提升至 1.19%、1.26%,整体阻尼比达 1.35%~1.41%。

该类技术虽减振性能优异,但仍存在短板:(1)控制算法未充分考虑超长索垂度、多模态耦合等复杂工况;(2)SMA 阻尼器耐久性差,新型 MR 阻尼器

缺乏全尺寸验证与长期服役监测;(3)智能算法集成度低,全工况自主优化尚处起步阶段。

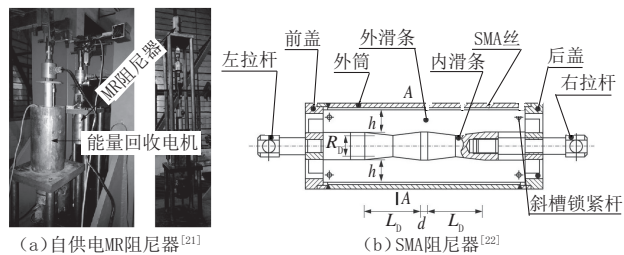


图2 半主动阻尼器

3.3 新型被动减振技术

3.3.1 负刚度型拉索减振技术

受磁流变阻尼器伪负刚度特性的启发,研究人员借助负刚度的耗能增效机制,研发出预压弹簧式(NSD, preload spring damper)及磁致式(MNSD, magnetorheological preload spring damper)等负刚度阻尼器(见图3(a)和(b))。NSD通过预压弹簧与VD组合实现负刚度,减振效果优于传统VD^[23]。MNSD利用永磁体间的斥力或吸力产生负刚度,调节更灵活,可解决安装位置过低引发的嵌固效应^[23]。在此基础上,尹光照等^[25]研发出磁致负刚度电涡流阻尼器(MNS-ECD, Magnetostrictive negative stiffness eddy current damper),以“准恒定”负刚度系数改善了传统NSD的非线性设计精度问题。

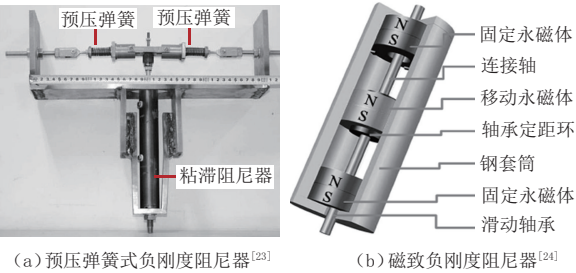


图3 负刚度阻尼器

研究表明,被动负刚度阻尼器的减振效果可接近半主动控制水平,但仍存在黏滞阻尼单元耐久性不足、负刚度偏大易引发系统稳定性风险等问题。

3.3.2 惯性质量型拉索减振技术

惯性质量型减振技术借助频率相关型负刚度效应实现耗能增效。常用滚珠丝杠式惯质阻尼器,可突破传统阻尼器尺寸与安装受限的性能瓶颈^[27]。理论研究表明,惯性质量黏滞阻尼器(VIMD, viscous inertial mass damper)(见图4(a))可提供远超传统VD的附加模态阻尼比^[28],通过优化惯质与阻尼系数,单阶模态阻尼比最大值可接近VD的9倍,且惯质的引入可有效减轻拉索垂度带来的不利影响。

为进一步提升性能,研究人员发展了串联式

(SVMD, series viscous mass damper)^[29]以及耦合弹簧单元的调谐式惯容阻尼器(TVMD, tuned inerter mass damper)等多种构型^[30-31],并开展多模态振动控制参数优化研究。汪志昊等^[32]通过惯性质量电磁阻尼器(EIMD, Electromagnetic inertial mass damper)(见图4(b))试验发现不同阶模态的最优惯性质量存在差异,且无量纲负刚度系数接近-1时,拉索前两阶模态附加阻尼比可达传统VD的2.02倍、4.46倍,减振效果得到极大提升。

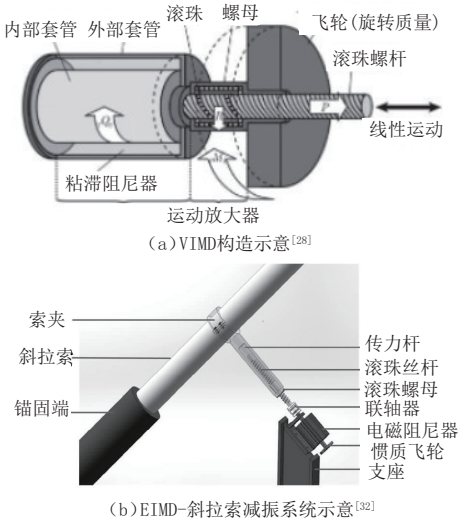


图4 惯质阻尼器

综上,基于惯性质量放大效应的阻尼器,凭借频率相关型负刚度特性,既解决了传统阻尼器的尺寸限制,又能提供数倍于传统阻尼器的模态阻尼比,是被动控制领域提升超长拉索减振性能的重要方向。

3.3.3 杠杆放大型拉索减振技术

为解决传统阻尼器在超长拉索应用中的安装高度与景观限制问题,汪正兴等^[33]首次提出杠杆质量阻尼器(LMD, lever mass damper),通过杠杆放大效应实现低安装高度下的高效减振,效果优于传统阻尼器^[33]。在此基础上,刘德清等^[34]为石首长江公路大桥设计双杆倒Y形LMD,实测拉索对数衰减率超过3%。衍生的电涡流杠杆质量阻尼器(ELMD, eddy current lever mass damper)和摆式杠杆质量阻尼器(PLMD, pendulum lever mass damper)等^[35-36],可满足高寒环境下超长拉索的减振需求。

LMD可解决传统减振器尺寸限制问题,安装维护简便且景观影响小,已应用于湖北荆岳长江大桥、武汉天兴洲长江大桥等,其衍生形式ELMD也实现了工程应用^[1]。

3.4 复合减振技术

拉索长度增加使多模态振动问题凸显,传统单

点阻尼器存在高阶模态减振盲区,同时辅助索网系统阻尼不足,导致单一措施难以满足超长拉索的减振需求。因此,阻尼器-辅助索混合系统、多点分布式阻尼系统,成为复合减振技术的主要发展方向^[37]。

3.4.1 混合减振系统

辅助索可通过索网体系提升系统刚度与自振频率,但其自身阻尼较低^[38]。混合减振系统结合辅助索和各类阻尼器,弥补了索网系统阻尼不足的缺陷^[39-40],已应用于诺曼底大桥、苏通大桥等工程^[16]。其中苏通大桥最长拉索达577 m,采用“辅助索+VD+黏弹性阻尼器(VED)”混合方案,按拉索长度匹配阻尼器类型,安装于距下锚固端2.21%~2.60%索长处。实测各阶模态阻尼比提升至0.36%~1.565%,1.4~3.0 Hz风雨振频段减振效能最优,振动幅值降低80%以上^[12]。

3.4.2 多点分布式阻尼器

分布式阻尼系统通过在拉索不同位置安装多个阻尼器,直接解决单点阻尼器减振盲区问题^[41],主要有索两端或同侧安装两种形式。Wang等^[42]通过试验表明,同侧布置时拉索前两阶模态阻尼比最高达1.92%,较单点阻尼器提升1.7倍;异侧布置时阻尼比可达4.62%,接近两单点阻尼器效果之和。针对同侧多阻尼器布置方案,孙利民等^[43]通过实桥试验,验证了黏弹性与HDR阻尼器组合使拉索10~12 Hz频段高阶模态阻尼比提升至0.176%~0.198%,成功抑制了仅单阻尼器时出现的明显涡振。

复合减振技术突破了单一技术局限,但仍存在短板:混合系统参数匹配与协同优化理论不完善;分布式系统多阻尼器耦合机理不明;全尺寸验证与长期监测不足。

4 未来研究展望

本文梳理了斜拉索振动类型与减振技术现状,明确了各类振动机理与危害,对比了各类减振技术的适用性。研究表明,传统机械阻尼与主动控制存在明显局限,半主动/智能控制、新型被动及复合减振技术已成为超长拉索多模态减振主流方向。各类技术虽通过了工程实践验证,但仍存在理论简化、工况适配不足、工程验证缺失等问题,需进一步完善。未来拉索减振技术研究可聚焦以下方向:

(1)复杂工况减振理论:针对超长索垂度效应、多模态耦合及极端环境等问题,建立风-雨-索耦合

精细化模型,深化复杂工况减振机理,重点解决多场耦合控制算法鲁棒性设计与实桥模型匹配验证难点。

(2)新型高性能阻尼器:聚焦阻尼器耐久性差、全尺寸验证缺失问题,研发高阻尼、低能耗的抗极端环境小型化阻尼器,突破负刚度单元耐久与自供电MR能量收集效率的瓶颈。

(3)多模态参数优化设计:针对混合/分布式系统参数匹配与耦合机理不明问题,建立索-网-阻尼器强非线性模型,优化随机激励下的参数与安装位置协同策略,解决多目标优化收敛性与多阻尼器协同机理分析问题。

(4)工程化验证与长期监测:针对新型减振技术全尺寸验证与长期监测缺失问题,开展千米级超长索全尺寸减振试验,搭建实桥长期监测体系,攻克试验方案设计、耐久性评价标准制定等难点。

本研究为综述性论文,重在梳理评述现有拉索减振技术,分析基于既往数据,存在一定时效性局限,相关结论仍需结合实桥工程实践进一步验证。

参考文献:

- [1] 李龙安,苗润池,屈爱平.超长斜拉索风致振动控制研究[J].地震工程与工程振动,2014,34(3):206-211.
- [2] 汪峰,彭章,刘章军.设置黏滞阻尼器的斜拉索参数振动模型及控制分析[J].振动工程学报,2019,32(6):977-985.
- [3] 乔浩明.抑制斜拉索风雨激振的纵向肋条措施的减振机理研究[D].天津:天津大学,2019.
- [4] Zhao L, Cui W, Shen X, et al. A fast on-site measure-analyze-suppress response to control vortex-induced-vibration of a long-span bridge[J]. Structures, 2022, 35, 192-201.
- [5] 傅享仁,王灵芝,晏致涛,等.错列布置下游圆柱尾流驰振特性的数值模拟与荷载分析[J].重庆大学学报,2022,45(9):73-82.
- [6] 高无迪.基于调谐质量阻尼器-辅助索的斜拉索振动控制研究[D].郑州:郑州大学,2022.
- [7] 杜军平.超长斜拉索参数振动的主动和半主动控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [8] 陈文礼,陈冠斌,黄业伟,等.斜拉索涡激振动的被动自吸吹气流动控制[J].中国公路学报,2019,32(10):222-229.
- [9] Wang X J, Zhu Y, Yan H B, et al. The vortex-induced vibration of a circular cylinder with helical grooves[J]. Engineering Structures, 2025, 327: 119669.
- [10] 汪正兴,王波,柴小鹏.大跨度斜拉桥斜拉索阻尼减振技术研究进展[J].桥梁建设,2015,45(3):13-19.
- [11] 周亚刚,孙利民.斜拉索-三单元Maxwell阻尼器系统的复模态分析[J].同济大学学报(自然科学版),2006(1):7-12.
- [12] Chen L, Sun L, Xu Y, et al. A comparative study of multi-mode cable vibration control using viscous and viscoelastic dampers through field tests on the Sutong Bridge[J]. Engineering Structures, 2020, 224: 111226.
- [13] Huang P, Wang X, Wen Q, et al. Active control of stay cable vibration

- using a giant magnetostrictive actuator[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2018, 31(5): 04018074.
- [14] Gatulli V, Alaggio R, Potenza F. Analytical prediction and experimental validation for longitudinal control of cable oscillations[J]. Int. J. Non Linear Mech., 2008, 43(1): 36–52.
- [15] Li H, Liu M, Ou J P. Vibration mitigation of a stay cable with one shape memory alloy damper[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2004(11): 21–36.
- [16] LIU M, LI H, SONG GB, et al. Investigation of Vibration Mitigation of Stay Cables Incorporated with Superelastic Shape Memory Alloy Dampers[J]. Smart Materials & Structures, 2007, 16(6): 2202–2213.
- [17] Xiongjun Y, Ying L, Hongping Z, Wenai S. In-situ detection of cable MR damper failures using cable substructure vibration displacements under unknown wind loads[J]. Engineering Structures, 2024, 318: 118743.
- [18] Huang H W, Sun L M. Control performance assessment of cable-MR damper system based on pole assignment theory[J]. Structures, 2022, 44: 785–795.
- [19] 徐彦青, 郭彤. 半主动控制下超长斜拉索的面外风振响应[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 146–151.
- [20] 刘鹏飞, 马伦权, 王波, 等. 新型斜拉索永磁式磁流变阻尼器及其参数优化研究[J]. 桥梁建设, 2018, 48(4): 51–55.
- [21] 汪志昊, 寇琛, 许艳伟, 等. 自供电 MR 阻尼器复合减振系统对斜拉索振动控制试验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10): 6–10; 19.
- [22] 左晓宝, 李爱群, 孙杏花. SMA 阻尼器-斜拉索系统减振控制试验[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2008, 32(6): 666–671.
- [23] Zhou P, Li H. Modeling and control performance of a negative stiffness damper for suppressing stay cable vibrations[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(4): 764–782.
- [24] Shi X, Zhu S Y, Spencer B F. Experimental study on passive negative stiffness damper for cable vibration mitigation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2017, 143(9): 04017070.
- [25] 尹光照, 汪志昊, 程志鹏, 等. 磁致负刚度电涡流惯质阻尼器力学性能试验与仿真[J]. 振动与冲击, 2022, 41(10): 309–316.
- [26] Wang Z H, Cheng Z P, Yin G Z, et al. A magnetic negative stiffness eddy-current inertial mass damper for cable vibration mitigation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023, 188: 110013.
- [27] 贺杜鹏. 基于磁粉离合的变惯质阻尼器力学性能及对斜拉索减振研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2025.
- [28] Shi X, Zhu S Y. Dynamic characteristics of stay cables with inerter dampers[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 42(3): 287–305.
- [29] Huang Z W, Hua X G, Chen Z Q, et al. Performance evaluation of inerter-based damper devices for structural vibration control of stay cables[J]. Smart Structures and Systems, 2019, 23(6): 615–626.
- [30] 邵辉, 汪志昊. 调谐惯容阻尼器对斜拉索振动控制的研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(1): 70–75.
- [31] Ikago K, Saito K, Inoue N. Seismic control of single-degree-of-freedom structure using tuned viscous mass damper[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(3): 453–474.
- [32] 汪志昊, 邵辉, 许艳伟, 等. 惯性质量对斜拉索阻尼器减振增效作用试验研究[J]. 振动工程学报, 2019, 32(3): 376–385.
- [33] 汪正兴, 任文敏, 陈开利. 斜拉索杠杆质量减振器的减振分析[J]. 工程力学, 2007, 24(11): 153–157.
- [34] 刘德清, 赵海威, 汪正兴, 等. 石首长江公路大桥斜拉索杠杆质量阻尼器应用研究[J]. 世界桥梁, 2021, 49(2): 71–77.
- [35] 王波, 汪正兴, 柴小鹏, 等. 斜拉桥斜拉索永磁电涡流杠杆质量阻尼减振技术[J]. 桥梁建设, 2015, 45(4): 13–18.
- [36] 王智宇. 斜拉桥斜拉索摆式杠杆质量阻尼器 PLMD 减振技术研究[J]. 北方交通, 2015(10): 55–59.
- [37] 狄方殷. 斜拉索分布式减振体系理论分析与试验研究[D]. 上海: 同济大学, 2024.
- [38] 李鑫. 惯容阻尼器与辅助索对斜拉索参数振动复合减振研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- [39] 刘洋. 超长斜拉索多模态复合减振方法研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023.
- [40] 高云峰, 张年红, 叶元芬, 等. 辅助索和阻尼器协同作用的振动控制效果数值模拟研究[J]. 公路, 2019, 64(5): 170–174.
- [41] 陈林, 杨岱鑫, 沈孔健, 等. 斜拉索多点减振系统面内振动通用分析模型与多阶阻尼效果[J/OL]. 振动工程学报, 2025: 1–12 (2025–06–24) [2026–01–20]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=7DtDJWciuTL4xSic3HLDexlue4Ij9wehO90j8oK_7XVmBX-Qod63Btx2qnjk7owLSFLcvOEMqx-LXgBP-ZhLi7KtOuFCn3FK1b8P6RttANlpCWY0xZvFWM4AmyyYvYbC-x5XwyXFTTKteu611Np9HkH8CKPZsRWW_1KAiXibj9dqU3sNSAt1EQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [42] Wang Z H, Cheng Z P, Wang H, et al. Damping of a stay cable with two eddy-current inertial mass dampers: theoretical analysis, experimental study, and parameter optimization[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2022, 29(11): e3085.
- [43] 孙利民, 狄方殷, 陈林, 等. 斜拉索-双阻尼器系统多模态减振理论与试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 975–985.