

DOI: 10.7672/sgjs2025240057

# 斜拉桥拉索减振效果提升方法研究进展\*

马骏骥<sup>1</sup>, 运志付<sup>1</sup>, 蔺伟楠<sup>2</sup>, 许艳伟<sup>3</sup>

(1. 中铁三局集团有限公司, 山西 太原 030024; 2. 山西交控公路材料新技术有限公司, 山西 太原 030031; 3. 华北水利水电大学土木与交通学院, 河南 郑州 450045)

**[摘要]** 斜拉桥作为一种现代桥梁结构,在大跨度、结构美观、施工便利等方面具有明显优势,因此越来越受到工程师和设计者的青睐,并成为城市建设和交通基础设施的重要组成部分。但斜拉索振动对桥梁结构的安全运营和维护成本构成了严重威胁。因此,发展有效的斜拉索振动控制技术成为当务之急。综述了近年来关于斜拉索减振技术的研究进展,包括斜拉索振动主要类型、振动控制方法及斜拉索减振效果提升方法与技术 3 个方面,总结了各种方法与技术对斜拉索减振方面的优势。最后,阐述了一些施工期间斜拉索的减振措施。

**[关键词]** 桥梁;斜拉桥;拉索;减振;振动类型

**[中图分类号]** U448.27

**[文献标识码]** A

**[文章编号]** 2097-0897(2025)24-0057-07

## Progress Method of Vibration Control Effect on Stay Cables of Cable-stayed Bridge

MA Qinji<sup>1</sup>, YUN Zhifu<sup>1</sup>, LIN Weinan<sup>2</sup>, XU Yanwei<sup>3</sup>

(1. China Railway No. 3 Engineering Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030024, China;

2. Shanxi Transportation Holding Highway Materials New Technology Co., Ltd.,

Taiyuan, Shanxi 030031, China; 3. School of Civil Engineering and Transportation, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou, Henan 450045, China)

**Abstract:** As a modern bridge structure, cable-stayed bridges have obvious advantages in terms of large spans, structural aesthetics, and ease of construction, so they are increasingly favoured by engineers and designers, and have become an important part of urban construction and transportation infrastructure. However, the vibration problem of stay cables poses a serious threat to the safe operation and maintenance cost of bridge structures. Therefore, the development of effective vibration control technology for stay cables has become an urgent task. This paper reviews the research progress on the vibration control technology of stay cables in recent years, including the main types of vibration of stay cables, vibration control methods, and new methods and technologies to enhance the vibration control effect of stay cables, and this paper also summarizes the advantages of various methods and technologies in vibration control of stay cables. Finally, some measures for vibration control of the stay cables during construction are described.

**Keywords:** bridges; cable stayed bridges; cables; vibration control; vibration type

### 0 引言

斜拉桥作为一种索承式桥型<sup>[1]</sup>,自 20 世纪中叶以来发展迅速,展现出卓越的跨越能力、经济性和

美学特征。我国在斜拉桥建设领域取得了显著成就,其斜拉桥数量居世界之首,并且拥有多座主跨长度位居全球前列的斜拉桥。目前,全世界主跨长度排名前 10 位的斜拉桥中,我国占了 8 座,其中主跨度超千米级已建成的 4 座斜拉桥中我国就有 3 座,目前在建主跨度超千米级的斜拉桥共 3 座。随着斜拉桥主跨长度的增大,斜拉索的风振问题成为一个日益突出的挑战,特别是对超长斜拉索的振动

\* 河南省高等学校重点科研项目(24B560012);河南省科技攻关项目(242102320046)

**[作者简介]** 马骏骥,工程师,E-mail: 2631375730@qq.com

**[通信作者]** 许艳伟,讲师,E-mail: xuyanwei\_v587@163.com

**[收稿日期]** 2024-09-28

控制提出了更高要求。

斜拉索风振问题成为制约其发展的关键因素之一,其中涡振、风雨振和驰振等形式的振动对斜拉索造成严重危害。当前常用的被动黏滞阻尼器<sup>[2-3]</sup>虽是斜拉索振动控制的有效手段,但其在超长斜拉索上的应用受到一定限制,特别是在满足多模态减振需求方面存在难题。我国在斜拉桥建设领域取得了显著成就,但也面临着斜拉索振动控制方面的挑战。为了进一步提升斜拉桥的安全性和可持续性发展,需加强对斜拉索振动控制技术的研究与应用,以满足日益增长的大跨度桥梁工程需求。

1 斜拉索振动主要类型

斜拉索常见的振动类型主要包括风致振动和参数振动<sup>[4-5]</sup>,其中风致振动又分为涡激振动、风雨激振和驰振等类型,如图 1 所示。

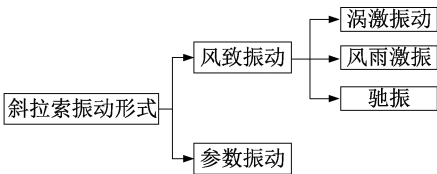


图 1 斜拉索振动形式  
Fig. 1 Vibration forms of stay cable

1.1 风致振动

1.1.1 涡激振动

涡激振动是指在无降雨、较低风速下,斜拉索出现的一种高频、小幅度振动现象,如图 2 所示,具有频率锁定现象,较易发生于拉索的高阶模态<sup>[6]</sup>。其产生与拉索自身的空气动力不稳定有关。当拉索的涡振频率与其固有频率接近时,会导致拉索产生剧烈的横向振动。



图 2 涡激振动  
Fig. 2 Vortex-induced vibration

在国内外多座斜拉桥均发现拉索的高阶涡振现象,并且此现象早已在多个工程中得到证实。

1.1.2 风雨激振

风雨激振是指在一定风速、风向和降雨等因素作用下,斜拉索发生的低频大幅度振动现象,对斜拉索的危害尤为严重<sup>[7]</sup>。如图 3 所示,当拉索发生风雨激振时,其表面会出现 2 条有规律的水线,并随着拉索振动沿拉索表面周向振荡。这种振荡的水流导致截面的风阻系数周期性变化,从而加剧这种流固耦合效应。到目前为止,国内外多座斜拉桥的

拉索都出现过这种振动现象。

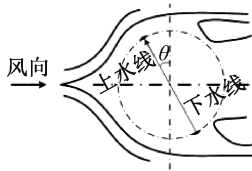


图 3 风雨激振原理  
Fig. 3 Principle of rain-wind induced vibration

1.1.3 驰振

驰振是一种自激振动,具有一定的发散性,其包括尾流驰振<sup>[8]</sup>和干索驰振,对拉索的影响也非常显著。近年来,随着对斜拉桥的风致振动问题进行深入研究,尾流驰振和干索驰振已成为研究的重点之一。如图 4 所示,在风作用下,斜拉索的上风向尾流引起斜拉索下风向产生更大振动的现象叫做尾流驰振,这种现象主要受拉索间距、风攻角和风偏角等因素影响;拉索在风荷载作用下而产生的大幅度、不稳定振动现象叫做干索驰振,它的出现与拉索表面的粗糙程度有很大关系。

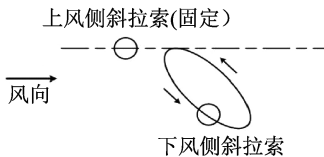


图 4 尾流驰振原理  
Fig. 4 Principle of wake galloping

尾流驰振和干索驰振在斜拉桥的风致振动方面具有重要影响。通过风洞试验研究,研究人员深入探讨了尾流驰振和干索驰振的产生机理及影响因素,为斜拉桥的设计和施工提供了重要的理论支持与技术指导。

1.2 参数振动

随着斜拉桥跨度和索长的增加,斜拉索与主塔、主梁接近的固有振动频率也变得更加丰富,参数振动问题也日益突出。斜拉索参数振动的产生机理复杂,受多种因素影响,包括风、车辆或其他荷载作用等。此类振动问题在设计阶段便需充分考虑,并采取相应控制措施,以保证斜拉桥安全运营和使用寿命。位于我国江苏南通的主跨长度 1 088m 的苏通长江公路大桥和主跨长度 1 092m 的沪苏通长江公铁大桥在设计阶段均考虑了斜拉索参数振动问题。

针对不同类型的振动问题,需制订特定的振动控制方案,并在斜拉桥设计和施工阶段便充分考虑振动控制的相关因素。

2 斜拉索振动控制方法

斜拉索的振动控制一直是结构工程领域的重要课题,对大跨度斜拉桥等柔性结构的振动抑制具有重要意义。斜拉索的减振措施主要有空气动力学减振措施、辅助索减振措施和横向阻尼器减振措施。其中,空气动力学减振措施是指通过调整拉索的表面形状对表面进行加工处理的方式来达到降低斜拉索风振的目的,辅助索减振措施是指通过连接主索和辅助索提高拉索固有频率来抑制拉索振动,横向阻尼器减振措施则是指通过布设横向抑振装置的方式达到拉索减振效果。

2.1 空气动力学减振措施

斜拉索由于独特的结构并暴露于大自然中,对风的响应尤为敏感,因此空气动力学减振措施在斜拉索振动控制中扮演着重要角色,一般可通过改变斜拉索的涂层与外形或安装螺旋丝、导流片等装置来减少拉索由于风引起的振动。图 5 列举了 3 种拉索表面处理方式,通过这些空气动力学减振措施,斜拉索可更有效地抵抗自然环境的风压力,确保斜拉桥长期稳定性和安全性。

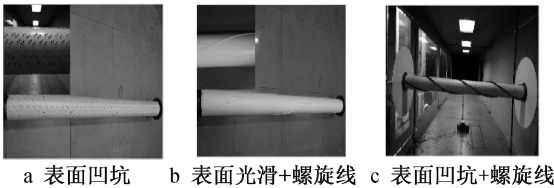


图 5 斜拉索气动措施

Fig. 5 Aerodynamic measures for stay cables

目前,空气动力学减振措施在斜拉桥应用中依然面临诸多挑战,尤其在处理多种风致振动类型时。在实际工程中,由于每座桥梁的设计、位置和环境不同,拉索振动的频率、幅值和类型等也有所不同,这就导致空气动力学减振措施的振动控制效果有限,因此需联合其他措施共同发挥作用。

2.2 辅助索减振措施

辅助索减振措施将主索和辅助索相连,以增加斜拉索各阶模态的固有频率,从而达到对拉索振动的控制效果。

斜拉索-辅助索系统的研究源远流长<sup>[9-10]</sup>,在控制桥梁索网体系的振动中扮演着关键角色,它们通过调整体系的刚度、频率和阻尼特性帮助减少拉索振动和提高整体稳定性。然而,辅助索的使用也伴随着一些技术和实际情况的挑战,这些不足之处包括疲劳问题、美观性问题、安装与维护复杂性问题等。

2.3 横向阻尼器减振措施

横向阻尼器减振措施是控制斜拉索振动中公认的有效手段之一<sup>[11]</sup>,尤其是在减少因风、交通等引起的拉索振动方面表现出色。这种措施的主要优点是直接性和高效性,在不改变桥梁结构美观和不增加过多结构负担的情况下,通过合理的设计和配置,在斜拉索与桥面或桥塔间布设横向抑振装置,利用机械阻尼来吸收和消散由拉索振动引起的能量,从而有效降低拉索在各种振动形式激励下的动力响应。

斜拉桥采用的阻尼器通常分为内置阻尼器和外置阻尼器,这两种类型各有其独特的安装方式和作用机制,针对不同的工程需求和环境条件提供有效的振动控制解决方案。内置阻尼器最常见的是高阻尼橡胶(HDR)阻尼器,外置阻尼器常见类型包括黏滞阻尼器(VD)、杠杆质量阻尼器(LMD)和磁流变阻尼器(MRD)<sup>[12]</sup>等。

Pacheco 等<sup>[13]</sup>引入了估算斜拉索模态阻尼的通用曲线,该曲线综合考虑了阻尼比、模态数、阻尼器尺寸、拉索长度及基本频率等参数。该曲线可应用于张紧拉索,通常情况下,阻尼器至锚固端的距离一般为拉索长度的 1/10 以内。通过对阻尼器安装位置进行优化,附加阻尼比可达到 0.5 倍的相对安装位置( $0.5x_d/l$ )。

3 斜拉索减振效果提升方法与技术

随着斜拉桥进入千米级时代,超长斜拉索带来的挑战也越来越明显。这些超长索的动力学特性复杂,尤其是高阶和多模态振动问题给桥梁设计、施工及维护带来新的难题,迫切需发展提高拉索减振效率的方法与技术。图 6 列举了 4 种斜拉索减振效果提升技术。

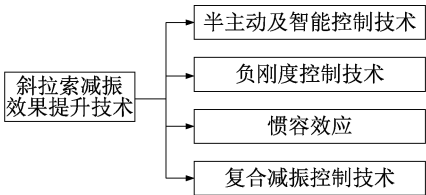


图 6 斜拉索减振效果提升技术

Fig. 6 Vibration control effect improvement technology of stay cables

3.1 基于斜拉索半主动及智能控制的斜拉索减振效果提升

MRD 作为一种非常有效的半主动控制技术,特别适用于斜拉桥等大型结构的振动控制。MRD 通过改变它们的磁场来调整阻尼特性,从而提供智能



化的振动控制<sup>[14-15]</sup>。何旭辉等<sup>[16]</sup>和 Li 等<sup>[17]</sup>分别在洞庭湖大桥和滨州黄河大桥上安装 MRD 以抑制拉索振动。现场试验和实际应用的结果表明,相比于传统被动阻尼器,MRD 在控制斜拉索振动方面具有显著优势。此外,针对斜拉索振动控制面临的新挑战,汪志昊等<sup>[14]</sup>提出了一种新型自供电 MRD 复合减振系统,该系统不仅利用了 MRD 的高效减振特性,还增加了自供电功能,大大提高了系统的应用便利性和能效,如图 7a 所示。许艳伟<sup>[15]</sup>提出了一种新型基于磁流变伪负刚度(MR-PNS)的拉索振动控制新方法,该方法通过独特的伪负刚度机制增强了 MRD 的效能,目的是提高斜拉索的减振效果,如图 7b 所示。

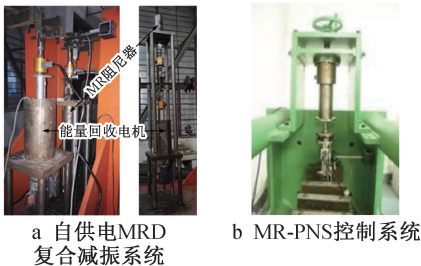


图 7 磁流变阻尼器

Fig. 7 Magnetorheological dampers

由于其出色的智能控制能力,基于半主动和智能控制技术的 MRD 正逐渐成为增强斜拉索减振效果的一种关键方法。新型永磁式 MRD 和自供电 MRD 的研发也为解决斜拉索振动控制中的问题提供了新思路 and 可能性。这些成果对解决大跨度超长斜拉索工程中的振动问题具有重要的理论和实践意义。

### 3.2 基于负刚度控制的斜拉索减振效果提升

被动负刚度阻尼器基于负刚度控制原理设计,目的是提高桥梁结构在自然环境影响下的稳定性和安全性。Chen 等<sup>[18]</sup>通过在黏滞阻尼器的运动方向上布置预压弹簧来实现负刚度特性,开发了预压弹簧型负刚度阻尼器(NSD),如图 8a 所示,这种装置利用预压弹簧产生的力来抵消部分由黏滞阻尼器产生的正向刚度,从而整体上实现负刚度效应;Shi 等<sup>[19]</sup>研发了磁致负刚度阻尼器(NSD),如图 8b 所示,这种阻尼器利用磁力来实现负刚度特性,从而增强阻尼效果。在他们的理论与试验研究中,磁致 NSD 通过在阻尼器安装位置处放大拉索位移,有效实现了振动控制的增效,且相对于 VD,磁致 NSD 能有效解决由于安装位置过低而产生的嵌固效应问题,同时又能为斜拉索提供更大附加模态阻尼

比;尹光照等<sup>[20]</sup>研发的磁致负刚度电涡流阻尼器(MNSED)是一种融合了磁致负刚度元件和电涡流阻尼元件的振动控制设备,如图 8c 所示,不仅在理论上展示了优越的性能,也通过力学性能试验得到了实际验证;Wang 等<sup>[21]</sup>进行了 MNSED 样机对模型拉索振动控制的试验研究,为其在工程实践中应用提供了参考,该试验不仅证实了 MNSED 在减少斜拉索振动方面的有效性,还引入了一种针对斜拉索多模态振动控制的参数优化方法,进一步增强了这一技术的应用潜力;程志鹏等<sup>[22]</sup>提出了将被动负刚度控制技术和非线性黏滞阻尼特性融合在一起的思路,开展了负刚度非线性黏滞阻尼器(NSNVD)对斜拉索减振增效的研究,这种独特的组合不仅优化了单模态减振效果,还增强了对多模态振动的控制能力,同时相比于非线性黏滞阻尼器(NVD)、负刚度线性黏滞阻尼器(NSLVD),NSNVD 对斜拉索减振方面的优势更明显。

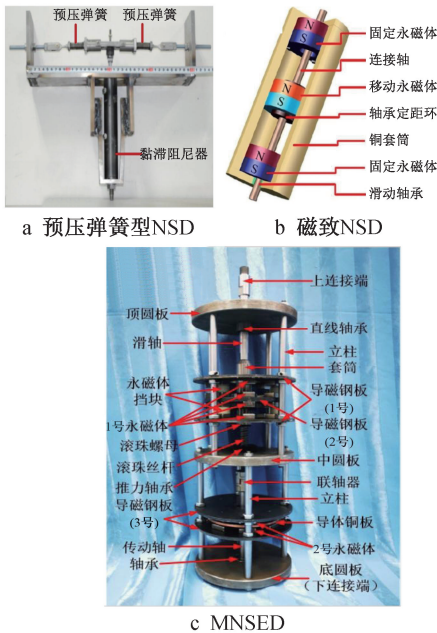


图 8 负刚度阻尼器

Fig. 8 Negative stiffness dampers

预压弹簧与黏滞阻尼器结合研发的预压弹簧型 NSD 及磁致 NSD 的研究成果表明,这些负刚度阻尼器在提高拉索减振性能方面有明显优势,且可灵活调节负刚度,达到减振增效的目的。基于负刚度控制的斜拉索减振效果提升技术在斜拉索振动控制领域取得了重要进展,为解决斜拉索振动问题提供了新的思路和可能性。这些成果对斜拉桥工程设计和施工具有重要的理论与实际意义。

### 3.3 基于惯容效应的斜拉索减振效果提升

基于惯容效应的斜拉索减振效果提升是当前

工程结构研究的热点。在斜拉索减振系统中,惯容机构的主要作用是存储和释放能量,从而抵抗振动。Lu 等<sup>[23]</sup>开展了惯性质量黏滞阻尼器(VIMD)实际案例研究,包括阻尼器参数设置、模态阻尼增强和风荷载下的减振效果,结果表明,VIMD 是一种很有前途的被动阻尼器,与传统的 VD 相比,具有更大耗能能力;Wang 等<sup>[24]</sup>结合了惯性质量和电磁阻尼两种技术,研发了惯性质量电磁阻尼器(REIMD),并开展了拉索减振试验研究,结果表明,REIMD 提供的第一、二阶附加模态阻尼比最大值分别对应 VD 理论值的 2.02 倍和 4.46 倍;如图 9 所示,汪志昊等<sup>[25]</sup>结合电涡流阻尼和惯性质量两种技术,研制了一种新型电涡流惯质阻尼器(ECIMD),并对其进行了模型拉索减振试验,结果表明,相较于传统的 VD,ECIMD 在控制斜拉索的单模态和多模态振动方面表现出更优异的性能;此外,汪正兴等<sup>[26]</sup>利用杠杆原理提出了一种 LMD,并研究分析了这种阻尼器的减振机理,且通过参数调整验证了 LMD 在提升斜拉索减振效果方面的最佳性。

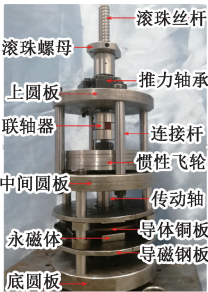


图 9 电涡流惯质阻尼器

Fig. 9 Eddy-current inertial mass damper

惯容机构和阻尼元件的结合使用是一个研究热点,这种组合被称为“惯容-阻尼”减振系统(PVMD)。阻尼元件并联惯容元件的技术可使阻尼元件自身位移进行放大,进而达到阻尼器位移响应放大与耗能增效的目的<sup>[27-28]</sup>。

此外,基于惯容效应的减振技术在工程结构领域一直以来具有重要的应用前景和研究价值。这些技术的引入和发展为斜拉索的振动控制和结构稳定性提供了新的途径和手段,对工程结构的安全性和可靠性有着积极的促进作用。

3.4 基于复合减振的斜拉索减振效果提升

复合减振技术在超长斜拉索的减振中得到了发展<sup>[29]</sup>。Cu 等<sup>[30]</sup>提出了一种创新的减振策略,即在单一斜拉索上同时安装传统的 VD 和调谐质量阻尼器(TMD)。这种复合减振措施的研究结果表明,它不仅能弥补单一阻尼系统的局限性,还能显著提

高斜拉索减振系统的整体稳定性和鲁棒性,结合了 VD 耗能和 TMD 质量调谐的优点,实现了更全面的振动控制效果;Wang 等<sup>[31]</sup>开展了双惯性质量阻尼器(IMDs)理论研究,结果表明,安装在斜拉索两侧的 IMD 单模态振动减缓方面的效果近似等于 2 个单独 IMD 减振效果的总和;另外,程志鹏<sup>[32]</sup>进一步进行了单索同侧 IMDs 的拉索多模态振动控制研究,结果表明,当 IMD 匹配合适参数配置,并安装在斜拉索的同一侧时,它们不仅可提供超过在拉索远端仅安装单个 IMD 的单模态和多模态减振效果,而且在降低斜拉索的高阶模态振动方面具有显著优势,从而可极大地增强斜拉索的整体稳定性和耐久性;如图 10 所示,岳方方<sup>[33]</sup>进一步探索了 ECIMD 在斜拉索减振中的应用,尤其是关于双 ECIMD 在单索的两侧和同侧布置,通过精确的理论模型和实际的试验设计,对这项设计进行了详细测试和验证,研究结果表明,当具有合理参数配置的双 ECIMD 安装在斜拉索的同一侧时,其减振效果不仅优于单一远端的 ECIMD,还超过了 2 个 ECIMD 各自减振效果之和,这表明同侧配置的 ECIMD 能更有效地协同工作,通过增强的相互作用和协调来达到更高的减振效果。

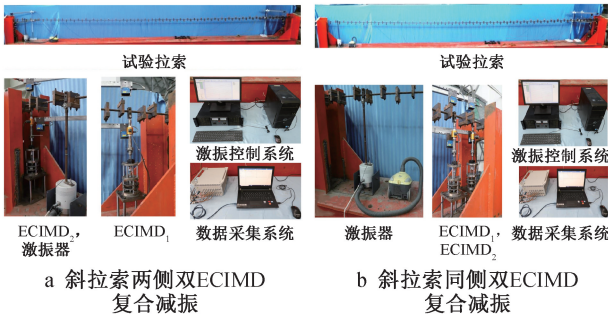


图 10 斜拉索-双电涡流惯质阻尼器复合减振试验

Fig. 10 Composite vibration control test of stay cable-ECIMD

复合减振技术在解决超长斜拉索的减振问题上具有重要意义。同时,复合减振技术通过多种阻尼器的组合提高了斜拉索的振动控制效果。

4 施工期间斜拉索减振措施

斜拉索不仅要在设计阶段考虑其风致振动问题,同时应对施工期间出现的拉索风致振动影响也尤为重要,因为这不仅影响施工期间桥梁的结构安全,而且影响施工进度及施工人员舒适性等。

李东超等<sup>[34]</sup>针对大跨度斜拉桥施工过程中斜拉索的减振需求,研发一种由钢丝绳与剪切型高阻尼橡胶阻尼装置串联组成的斜拉索临时阻尼器,结果表明,该方法具有显著的减振效果,并具备较高

的应用推广价值;李亮<sup>[35]</sup>提出在索端安装临时减振辅助索和减振木塞的方法,并应用于实际工程,结果表明,两种方法相结合可对斜拉索减振起到一定作用;此外,谭星旭等<sup>[36]</sup>总结了在施工期间斜拉索的多种减振措施,包含利用永久减振措施作为施工过程中的减振措施,也介绍了一些简单的临时减振措施,可应对不同施工情况下的减振要求。

## 5 结语

本文综述了近年来关于斜拉索减振技术的研究进展,讨论了斜拉桥等大跨度土木工程结构的振动控制问题,总结了斜拉索减振效果提升新方法与技术,阐述了施工期间一些斜拉索减振措施。这些设计和施工阶段的斜拉索减振技术与措施,对解决大跨度超长斜拉索工程中的振动问题均有着重要的理论和实践意义,为斜拉索振动控制技术的进一步发展和工程应用提供了参考。

## 参考文献:

- [1] 甘国荣,李居泽,赖道辉,等.大跨度斜拉桥拉索安装扭转控制技术[J].施工技术(中英文),2024,53(4):98-102.  
GAN G R,LI J Z,LAI D H,et al.Torsion control technology of stay cable installation of long-span cable-stayed bridge[J].Construction technology,2024,53(4):98-102.
- [2] 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):46-51,59.  
DUAN Y F,LI P,ZHOU X T,et al.Practical design method for external viscous damper of stay cable[J].China journal of highway and transport,2015,28(11):46-51,59.
- [3] KRENK S,HØGSBERG J R. Damping of cables by a transverse force[J]. Journal of engineering mechanics,2005,131(4):340-348.
- [4] 王修勇,蒋乾超,孙洪鑫,等.斜拉桥拉索风雨激振参数联合概率分布模型[J].土木工程学报,2017,50(10):69-74.  
WANG X Y,JIANG Q C,SUN H X,et al.Joint probability distribution model of wind-rain-induced vibration parameters of stay cables on cable-stayed bridges[J].China civil engineering journal,2017,50(10):69-74.
- [5] WANG H,TAO T Y,GAO Y Q,et al.Measurement of wind effects on a kilometer-level cable-stayed bridge during typhoon Haikui [J]. Journal of structural engineering, 2018, 144(9):04018142.
- [6] 祝志文,陈魏,李健朋,等.多塔斜拉桥加劲索涡激振动实测与时域解析模态分解[J].中国公路学报,2019,32(10):247-256.  
ZHU Z W,CHEN W,LI J P,et al.Field observation of vortex-induced vibration of stiffening cables in a multi-tower cable-stayed bridge with application of analytical mode decomposition [J]. China journal of highway and transport,2019,32(10):247-256.
- [7] HIKAMI Y,SHIRAIISHI N. Rain vibrations of cables in cable-stayed bridge [J]. Journal of wind engineering and industrial

aerodynamics,1992,43(3):2011-2022.

- [8] LI Y L,WU M X,CHEN X Z,et al.Wind-tunnel study of wake galloping of parallel cables on cable-stayed bridges and its suppression[J]. Wind and structures an international journal,2013,16(3):249-261.
- [9] EHSAN F,SCANLAN R H. Damping stay cables with ties [C]//Proceedings of 5th US-Japan Workshop on Aerodynamics,1990.
- [10] YAMAGUCHI H,JAYAWARDENA L. Analytical estimation of structural damping in cable structures [J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics,1992,43(1/2/3):1961-1972.
- [11] WANG Z H,GAO H,XU Y W,et al. Impact of cable sag on the efficiency of an inertial mass damper in controlling stay cable vibrations [J]. Smart structures and systems,2019,24(1):83-94.
- [12] XU Y W,XU Z D,GUO Y Q,et al. Single input magnetorheological pseudo negative stiffness control for bridge stay cables [J]. Smart materials and structures,2021,30(1):015032.
- [13] 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):1961-1979.
- [14] 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):1-5,14.  
WANG Z H,KOU C,XU Y W,et al.Experimental study on the cable vibration control using a self-powered MR damper hybrid system[J]. Journal of vibration and shock,2019,38(10):1-5,14.
- [15] 许艳伟.斜拉索磁流变智能减振系统理论与试验研究[D].南京:东南大学,2021.  
XU Y W. Theoretical and experimental research on magnetorheological intelligent vibration control system for stay cables[D]. Nanjing:Southeast University,2021.
- [16] 何旭辉,陈政清,黄方林,等.洞庭湖大桥斜拉索减振试验研究[J].振动工程学报,2002,15(4):447-450.  
HE X H,CHEN Z Q,HUANG F L,et al. Test of vibration mitigation of a stay cable on the Dongting Lake Bridge [J]. Journal of vibration engineering,2002,15(4):447-450.
- [17] LI H,LIU M,LI J H,et al. Vibration control of stay cables of the Shandong Binzhou Yellow River Highway Bridge using magnetorheological fluid dampers [J]. Journal of bridge engineering,2007,12(4):401-409.
- [18] CHEN L,SUN L M,NAGARAJIAH S. Cable with discrete negative stiffness device and viscous damper: passive realization and general characteristics [J]. Smart structures and systems,2015,15(3):627-643.
- [19] SHI X,ZHU S Y,LI J Y,et al. Dynamic behavior of stay cables with passive negative stiffness dampers [J]. Smart materials and structures,2016,25(7):075044.
- [20] 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.

YIN G Z, WANG Z H, CHENG Z P, et al. Numerical simulation and experimental study on mechanical properties of a magnetic negative stiffness eddy-current inertia damper [ J ]. Journal of vibration and shock, 2022, 41 ( 10 ) : 309-316.

[ 21 ] 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.

[ 22 ] 程志鹏, 汪志昊, 郜辉, 等. 负刚度非线性黏滞阻尼器对斜拉索振动控制研究 [ J ]. 振动工程学报, 2022, 35 ( 3 ) : 652-662.

CHENG Z P, WANG Z H, GAO H, et al. Nonlinear viscous dampers paralleled with negative stiffness for cable vibration control [ J ]. Journal of vibration engineering, 2022, 35 ( 3 ) : 652-662.

[ 23 ] LU L, DUAN Y F, SPENCER B F J, et al. Inertial mass damper for mitigating cable vibration [ J ]. Structural control and health monitoring, 2017, 24 ( 10 ) : e1986.

[ 24 ] WANG Z H, XU Y W, GAO H, et al. Vibration control of a stay cable with a rotary electromagnetic inertial mass damper [ J ]. Smart structures and systems, 2019, 23 ( 6 ) : 627-639.

[ 25 ] 汪志昊, 程志鹏, 王浩, 等. 电涡流惯质阻尼器对斜拉索振动控制研究 [ J ]. 土木工程学报, 2021, 54 ( 12 ) : 53-63, 115.

WANG Z H, CHENG Z P, WANG H, et al. Eddy-current inertial mass damper for cable vibration control [ J ]. China civil engineering journal, 2021, 54 ( 12 ) : 53-63, 115.

[ 26 ] 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.

WANG Z X, REN W M, CHEN K L. Analysis on inclined cable vibration suppression using lever mass damper [ J ]. Engineering mechanics, 2007, 24 ( 11 ) : 153-157.

[ 27 ] 汪志昊, 郜辉, 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 ) : 377-385.

WANG Z H, GAO H, XU Y W, et al. Experimental study on the improving effect of inertial mass on vibration control of stay cables with dampers [ J ]. Journal of vibration engineering, 2019, 32 ( 3 ) : 377-385.

[ 28 ] 郜辉, 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.

GAO H, WANG Z H. Study on the vibration control of stayed cable with tuned inertial damper [ J ]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power ( natural science edition ), 2020, 41 ( 1 ) : 70-75.

[ 29 ] 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.

LIU Y. Research on the multi-mode composite vibration control method of super-long stay cables [ D ]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023.

[ 30 ] CU V H, HAN B. A stay cable with viscous damper and tuned mass damper [ J ]. Australian journal of structural engineering, 2015, 16 ( 4 ) : 316-323.

[ 31 ] WANG Z H, YUE F F, GAO H. Free vibration of a taut cable with two discrete inertial mass dampers [ J ]. Applied sciences, 2019, 9 ( 18 ) : 3919.

[ 32 ] 程志鹏. 斜拉索多模态振动控制效果提升方法研究 [ D ]. 郑州: 华北水利水电大学, 2021.

CHENG Z P. Research on the methods of improving multi-mode vibration control effect of stay cables [ D ]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2021.

[ 33 ] 岳方方. 基于电涡流惯质阻尼器的斜拉索减振研究 [ D ]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.

YUE F F. Vibration control of stay cables using the eddy-current inertial mass damper [ D ]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020.

[ 34 ] 李东超, 赵海威, 杨林. 大跨度斜拉桥施工期斜拉索减振技术研究及应用 [ J ]. 世界桥梁, 2021, 49 ( 3 ) : 91-96.

LI D C, ZHAO H W, YANG L. Research and application of vibration suppression techniques for stay cables of long-span cable-stayed bridge in construction stage [ J ]. World bridges, 2021, 49 ( 3 ) : 91-96.

[ 35 ] 李亮. 施工期间斜拉索临时减振措施效果测试 [ J ]. 工程与建设, 2011, 25 ( 4 ) : 495-497.

LI L. Effect test of temporary vibration reduction measures for stay cables during construction [ J ]. Engineering and construction, 2011, 25 ( 4 ) : 495-497.

[ 36 ] 谭星旭, 刘华平, 陈定平. 斜拉桥拉索施工过程中的减振措施 [ J ]. 湖南交通科技, 2004, 30 ( 2 ) : 74-75.

TAN X X, LIU H P, CHEN D P. Vibration reduction measures during cable construction of cable-stayed bridge [ J ]. Hunan communication science and technology, 2004, 30 ( 2 ) : 74-75.