

# 输电塔-线体系振动控制研究进展

张 鹏<sup>1,2</sup>, 李宏男<sup>2,3</sup>, 田 利<sup>4</sup>, 张卓群<sup>5</sup>, 范颖芳<sup>1</sup>

(1. 大连海事大学道路与桥梁研究所, 辽宁 大连 116026; 2. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024;  
3. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 4. 山东大学土建与水利学院, 山东 济南 250061;  
5. 国核电力规划设计研究院有限公司, 北京 100095)

**摘 要** 目的 综述振动控制技术在输电塔-线体系减振方面的研究进展, 并对未来研究方向提供建议. 方法 搜集整理了近来输电塔-线体系振动控制方面的研究成果, 按照被动控制、主动控制和半主动控制 3 个方面, 详细介绍了各类阻尼器的研究方法及其减振效果, 并针对现有研究的难点及不足提出了建议. 结果 被动、主动及半主动控制技术均可有效降低输电塔-线体系的动力响应, 目前研究主要采用数值分析的方法验证各类阻尼器的减振效果, 参数优化研究较少, 试验验证及工程应用较少. 结论 被动控制技术中的吸振和消能减振技术无需能量输入、安装维护方便, 更适用于输电塔-线体系.

**关键词** 输电塔-线体系; 动力分析模型; 振动控制; 阻尼器; 控制算法

中图分类号 TU279.7<sup>+</sup>44; TU352 文献标志码 A

## A Review of Vibration Control Techniques of the Transmission Tower-Line System

ZHANG Peng<sup>1,2</sup>, LI Hongnan<sup>2,3</sup>, TIAN Li<sup>4</sup>, ZHANG Zhuoqun<sup>5</sup>, FAN Yingfang<sup>1</sup>

(1. Institute of Road and Bridge Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026; 2. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, China, 116024; 3. School of Civil Engineering Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 4. School of Civil and Hydraulic Engineering, Shandong University, Ji'nan, China, 250061; 5. State Nuclear Electric Power Planning, Design & Research Instit Co., Ltd, Beijing, China, 100095)

**Abstract:** This paper aims to review literatures on the vibration control of transmission tower-line system and provide suggestions for future study. Recent studies within this field are collected and collated in this study. The vibration mitigation techniques are categorized as passive control, active control and semi-active control. The research methods, vibration control performance of each damper are discussed in detail and suggestions are provided for future study. Recent studies have proven that all these vibration control techniques are very effective in reducing the dynamic re-

收稿日期: 2017-08-24

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51578099, 51578325)

作者简介: 张鹏(1984—), 男, 博士, 主要从事输电塔结构振动控制方面研究.

sponse. However, most researches focus on verifying the effectiveness of each damper by numerical analysis. Parametric study, optimal study, experimental study and applications are hardly reported. The passive vibration control technique is more suitable for oscillation mitigation of the transmission tower-line system because it has no demand for energy input or maintenance.

**Key words:** transmission tower-line system; dynamic analysis model; vibration control; damper; vibration control algorithm

输电塔-线体系作为电力运输的实际载体,是一种重要的生命线工程.然而,由于其本身固有的高耸、大跨和低阻尼特性,输电塔-线体系在地震、风荷载等作用下会强烈振动,甚至出现倒塌.2008年汶川地震造成至少70余座电塔破坏,1 643条线路受损<sup>[1-2]</sup>;2010年青海玉树地震中35 kV输电线路受损28 km,10 kV输电线路受损65 km,400 V输电线路受损148 km<sup>[3]</sup>;2013年芦山地震受损线路39条<sup>[4]</sup>.相比地震,风灾造成的输电线路破坏更为频繁<sup>[5-7]</sup>.因此,有必要采取有效措施来降低塔-线的动力响应,确保其在各种外界荷载作用下安全稳定运行.

振动控制是现代控制理论中一个重要概念,在土木工程领域已经得到了大量应用.其中,国外对于输电振动控制研究较少,代表性成果主要包括:J. H. Park<sup>[7]</sup>提出的摩擦型构件,R. C. Battista<sup>[8]</sup>提出的非线性摆阻尼器.而我国学者近年来对此进行了大量研究,取得了一系列研究成果.笔者将按将按被动控制、主动控制和半主动控制3类,分别介绍振动控制技术在输电塔-线体系减振方面的研究进展,并对未来研究方向提供建议.

# 1 被动控制

被动控制是通过某种装置改变工程结构的动力特性,以达到隔震、吸振或耗能目的的控制技术<sup>[9]</sup>.它不需要外部能量,而且构造简单、施工方便、易于修复和更换,因此非常适用于输电塔的这种恶劣的野外施工环境.被动控制技术可分为隔震减振、吸能减振和耗能减振三类.

## 1.1 隔震减振技术

结构基础隔震技术通过在基础与上部结构之间设置隔震层,隔离地震能量向上传递以降低结构的地震反应<sup>[10]</sup>.该技术适用于自重较大、倾覆弯矩较小的短周期建筑结构.然而,输电塔结构高宽比大、自振周期长,而且由于导线的张拉使得塔腿处存在一定的上拔力和倾覆弯矩,因此传统的隔震垫并不适用于输电塔-线体系,需要设计新型隔震器以对抗上拔力和倾覆弯矩.蔡锦荣和刘树堂<sup>[11]</sup>提出设置环形上盖板来抵抗上拔力,并使用了形状记忆合金(SMA)弹簧替代普通弹簧,通过SMA的超弹性增加耗能能力.在强震下输电塔顶层相对加速度减小74.1%,轴力减小64.1%.刘树堂和康丽萍<sup>[12]</sup>提出一种新的基于弹簧-偏心轴承的滚动隔震支座.该装置利用弹簧可有效地限制滚动板的位移,保证滚动隔震支座的自动复位能力;嵌于滚动板之上的正交轴承系统很好地解决了滚球定位及同步运动问题. Simulink 仿真结果显示,该装置能将结构从“放大晃动型”变为“整体平动型”,在El Centro地震动和广州波激励下结构均有较好的减振效果.

## 1.2 吸能减振技术

吸振减振通过附加某种子结构,使主结构的振动转移到子结构上,从而减小主结构的振动<sup>[13]</sup>.通常子结构需要调谐到主结构的某一阶模态,仅能降低主结构的某一阶振动.动力分析和试验研究表明,输电塔-线体系在地震或风荷载激励作用下的振动以一阶振型为主<sup>[14-15]</sup>,适合采用吸振类阻尼器进行减振.20世纪90年代末至今,调谐质量阻尼器(TMD)在输电塔的抗震和抗风中得到了大

量理论研究和试验研究:黄斌和唐家祥<sup>[16]</sup>提出了环式 TMD 用于减小大跨越输电塔风致动力响应;邓洪洲等<sup>[17-18]</sup>提出在塔顶安装弹簧-质量滑块式 TMD,并配合黏弹性阻尼器进行减振;贺业飞等<sup>[19]</sup>通过风洞试验验证了悬挂质量摆对于输电塔风振响应的减振效果;侯洁等<sup>[20]</sup>分析了当悬挂质量摆出现大摆角时的减振效果;L. Tian 等<sup>[21-22]</sup>分析了 TMD 对于塔-线体系的减振效果;李黎等<sup>[23]</sup>提出了球面滑动式 TMD,用于降低输电塔的地震响应;张鹏等<sup>[24]</sup>给出了 TMD 和主结构进行一体化优化设计的方法。

目前设计吸振器和分析其减振效果时均假设地基为刚性,但已有研究表明:土-结构动力相互作用 (SSI) 会影响受控结构的频率<sup>[25]</sup>。在未来研究中,可以考虑 SSI 对阻尼器减振效果的影响,检验其振动控制的有效性和鲁棒性,提出考虑 SSI 效应的阻尼器参数优化方法。

TMD 和悬挂质量摆均为线性吸振器,抑振频带往往较窄<sup>[26]</sup>,当主结构振动减小后,动力吸振器的能量会传回主结构,从而降低减振效果。有学者发现,在吸振器中引入非线性弹簧或碰撞,会形成非线性能量阱 (NES)。NES 能单向的吸收主结构的振动能量而不传回<sup>[27-28]</sup>。此外还具有鲁棒性和抑振频带宽的特点<sup>[29-30]</sup>。因此可以尝试将非线性吸振器引入输电塔-线体系的振动控制。

### 1.3 耗能减振技术

耗能减振是通过在结构变形较大位置安装阻尼单元,耗散主结构的动能来减小其动力响应<sup>[31]</sup>。耗能阻尼器可以控制输电塔所有振型的反应。目前在输电塔-线体系中已经得到研究的有:黏弹性阻尼器、金属摩擦阻尼器、防屈曲支撑和橡胶铅芯阻尼器。

黏弹性阻尼器 (VED) 通过利用黏弹性材料的滞回耗能特性来增大主结构阻尼,减小其振动<sup>[32]</sup>。因其体积小、质量轻的特点,目前是输电塔-线振动控制中研究最多的耗能

阻尼器。江宜城、钟寅亥等<sup>[33-34]</sup>以王家滩直流大跨越输电铁塔为背景,通过仿真分析证明黏弹性阻尼器可以将输电塔的风振位移响应降低 26.3%,杆件轴力也有不同程度降低。曹枚根等<sup>[35]</sup>以跨越珠江铁桩水道的某 122 米输电塔为背景建立数值模型,输入 El Centro 地震时程,发现黏弹性阻尼器对位移和加速度的减振率均高达 60%。钟万里等<sup>[36]</sup>利用 ANSYS 建立广东某 220kV 输电塔模型,用 Combin14 单元模拟黏弹性阻尼器。仿真结果表明:采用黏弹性阻尼器能够有效地抑制输电线路风振,控制节点的位移显著下降。钟万里等<sup>[37]</sup>进一步在实际线路上布设了阻尼器,2012“启德”台风登陆期间,监测了输电塔的振动加速度。实测表明:台风登陆期间输电塔的振动加速度下降 60%~70%。为解决黏弹性阻尼器仿真的计算效率问题,甘凤林等<sup>[38]</sup>提出了一种基于“层概念”的附加等效阻尼比的计算方法,仿真结果表明该方法精度较高,在多种工况下误差不超过 5%。

摩擦阻尼器通过利用摩擦面的摩擦消耗结构动能,从而降低主结构的动力响应。陈波和郑瑾<sup>[39-40]</sup>针对输电塔-线体系的平面内振动和平面外振动分别建立了动力分析模型。仿真结果表明:摩擦阻尼器具有形式简单、耗能力强的特点,可以有效地减小高压输电塔的地震反应和风振反应,但在实际工程应用中需要根据动力荷载的强度对阻尼器的摩擦力大小进行优化设计。J. H. Park 等<sup>[7]</sup>提出了两种摩擦型构件。这两种构件体积较小,可以并联在角钢构件上,施工简便。J. H. Park 等按 1/2 比例建立了塔身的一部分,在模型顶部施加动荷载。试验结果表明:摩擦构件分担了主材的轴力,同时加大了滞回环的面积,提高了结构耗能能力。

防屈曲支撑主要由内层耗能构件和外层约束构件组成。在工作时,内层构件受压屈服产生滞回耗能,而外层构件主要起约束和支

撑作用<sup>[41]</sup>. 李黎等<sup>[42]</sup>提出一种新型双套管防屈曲耗能支撑,将其简化为双线性模型,在 ANSYS 中用 Combin40 单元模拟. 研究结果表明:该装置能有效控制塔头及塔身杆件的位移及内力,该减振器适宜安装在内力较大或相对位移较大部位.

橡胶铅芯阻尼器通过金属铅及橡胶的剪切变形消耗振动能量,通常与输电塔主材并联安装. 李黎等<sup>[43-44]</sup>利用 ANSYS 建立塔-线体系和橡胶铅芯阻尼器的模型,比较了在不同风向角的动风作用下阻尼器的控制效果,通过对钢管的轴向变形、纯刚度的影响、静风荷载的响应和输电塔可靠度的研究,验证了阻尼器的控制效果. 尹鹏等<sup>[45]</sup>发现采用橡胶铅芯阻尼器后风荷载调整系数得到有效减少且减少率沿塔高逐渐增大. 李黎等<sup>[46-47]</sup>在后续研究中考虑了导线舞动作用,研究表明输电塔受到风振激励或导线舞动影响时会产生较大的动力响应,而橡胶铅芯阻尼器可以有效抑制铁塔响应,提高其可靠度. 夏正春等<sup>[48]</sup>将该类阻尼推广到对于断线振动的控制,通过仿真分析证明了该阻尼器能减小断线时塔响应.

虽然已有研究已证明了消能类阻尼器的减振效果,但阻尼器的参数及优化布置方法仍有待于进一步研究. 在目前的研究中,学者大多根据工程背景提出几种布置方案,然后通过时程分析比较几种方案的优劣,涉及阻尼器优化布置的文献较少. 郭勇等<sup>[49]</sup>提出两种优化算法,一种以遗传算法为基础,选取输电塔的  $H_{\infty}$  范数和阻尼器的总量作为优化的目标函数,采用代间比较权重对适应度函数加权;另一种方法<sup>[50]</sup>将遗传算法和优劣出算法相结合,以  $H_{\infty}$  范数、阻尼器的总量和阻尼器平均耗能为目标函数. Miguel 等<sup>[51]</sup>提出了基于 backtracking search optimization algorithm (BSA) 算法的优化方法,可以同时摩擦阻尼器的位置和摩擦力大小进行优化.

## 2 主动控制

主动振动控制技术是通过实时观测主结构振动情况并针对性的施加减震控制力的减振技术<sup>[52]</sup>. 从减振机理上看,主动控制可以根据结构及激励特性实时调节出力状态,减振效果好于被动减振. 然而,主动控制需要安装大量传感器、作动器,因此成本远高于被动控制. 此外,主动控制需要实时计算以及大量的能源输入,这对于输电塔-线体系难以保证. 因此,目前主动控制在输电塔线体系减振中的研究较少,且主要停留于数值模拟阶段. 王杜良等<sup>[53]</sup>将 90 个 Giant Magnetostrictive Material (GMM) 主动杆件布置到角钢杆件上,通过遗传算法对杆件数目和位置进行了优化,用 LQR 控制算法作为主动控制算法. 数值模拟表明该方法能明显衰减输电塔模型的地震响应,减震效果比较理想. 苏桥磊和周畅<sup>[54]</sup>采用 MATLAB 软件中内置遗传算法工具箱研究了 GMM 作动器的优化布置,仿真分析表明优化结果比随机布置提高减振效果约 20%.

目前输电塔-线体系的主动控制处于研究还处于起步阶段,在今后的研究中还有两方面问题需要解决:一是控制装置的相关问题,如传感器和作动器的优化设计和优化布置、作动器的供电问题和时滞问题等;二是控制算法的相关问题. 解决这两方面问题时可充分参考建筑结构领域的主动控制技术.

## 3 半主动控制

结构半主动控制的原理与结构主动控制的基本相同,只是作动器需要利用结构的往复相对变形或相对速度实现控制力<sup>[55]</sup>. 相对于主动控制,半主动控制需要能量输入较小. 相对于被动控制,半主动控制可以根据外界激励和结构响应的大小而灵活地调节控制力,减振效果更好. 由于半主动控制较为复杂,学者对输电塔-线结构建模通常使用数

学软件(MATLAB)建立多质点模型.研究重点在于提出不同的半主动控制装置和控制算法.目前还没有文献涉及半主动控制的于试验验证和工程实现方法.

### 3.1 半主动控制装置

应用于输电塔-线体系的半主动控制的阻尼器有两种:磁流变(MR)阻尼器<sup>[55-56]</sup>和半主动摩擦阻尼器<sup>[57-59]</sup>.

磁流变阻尼器通过磁场变化调节阻尼器的屈服剪应力,进而调整活塞运动的阻尼力大小.陈波等<sup>[56]</sup>以湘江大跨越输电塔为背景,在平面方向和出平面方向各设置10个MR阻尼器,采用固定增量的半主动控制算法.研究表明:MR阻尼器对位移和速度反应的减振率均达50%以上.磁流变阻尼器有两个参数需要设计:轴向刚度和最大屈服剪应力.增大轴向刚度能提高减振率,但当轴向刚度超过某一值后减振率趋于稳定.提高最大屈服剪应力同样会提高减振率,但超过某一值后减振率也会趋于稳定.

半主动摩擦阻尼器在传统的摩擦阻尼器上添加了压电材料,通过压电材料驱动器调整摩擦面的压力,进而调整摩擦力大小.陈波等<sup>[57]</sup>在某输电塔上安装了20根半主动摩擦阻尼器,提出了两种控制算法.分析表明半主动控制的减振效果优于被动控制,且其减振效果对外荷载强度具有鲁棒性.樊禹江等<sup>[58-59]</sup>提出了一种新型压电摩擦阻尼器,以某110 kV杆塔为背景布设了100个阻尼器,并用遗传算法对阻尼器位置进行了优化.研究表明:半主动压电摩擦阻尼器构造简单可靠,能削弱“迟滞”现象,有效降低输电塔结构响应;经过遗传算法进行位置优化后的减振效果优于随机布置.展猛等<sup>[60]</sup>提出了一种具有复位功能的压电摩擦阻尼器及相应的模糊控制策略,模型试验表明该阻尼器质量轻,占用空间小,能较好地抑制结构的动力响应.

### 3.2 半主动控制算法

通常进行半主动控制时先根据结构响应确定主动控制力,然后使用Bang-Bang算法等半主动控制策略用阻尼力追踪主动控制力,以达到接近主动控制的减振效果<sup>[58-59]</sup>.确定主动控制力的具体方法有LQR法、LQG法、 $H_2$ 或 $H_\infty$ 法<sup>[61-62]</sup>等.然而,此类方法需要采集结构各个质点的位移和速度,观察向量庞大、在线计算量大、控制系统鲁棒性不佳.

此外,LQR法、LQG法、 $H_2$ 或 $H_\infty$ 法等主动和半主动振动控制算法需要监测结构整体振动情况,为达到减振效果需要布置大量传感器.为减小观测向量,陈波等<sup>[57]</sup>提出了基于局部反馈的固定增量半主动控制策略,该策略仅观测半主动摩擦阻尼器的滑动状态,根据滑动状态以固定增量加大或减小摩擦力,从而使其耗能达到最大.

## 4 未来研究方向展望

综上所述,输电塔-线体系是重要的生命线工程,但在风及地震等动力作用的激励下容易产生剧烈振动甚至出现破坏,因此应当采用各类技术手段减小其动力响应.目前,结构振动控制技术已经在输电塔-线减振中得到了大量研究,但还存在一些值得深入的地方,笔者建议关注如下几个方面.

数值仿真方面:目前分析各类阻尼器或控制算法的减振效果时仍以时程分析为主.为反映塔-线体系的耦联作用及几何非线性,进行数值仿真时需要不断计算刚度矩阵,因此计算效率较低.如何建立塔-线-阻尼器体系的简化模型,如何建立简化模型与精细有限元模型的关系,将成为近期研究的重点.

荷载、激励方面:目前进行输电塔减振研究时主要考虑地震及脉动风两类荷载.而输电塔-线实际承担的动力荷载有多种形式:如断线、脱冰、舞动、飊线风和下击暴流等.在未来研究中,可以将现有减振技术应用于应对更多类型的动力作用,并考虑在多种因素

激励下的减振设计方法。

减振效果评价方面:目前评价振动控制技术的减振效果时,大多以结构的相对位移响应为指标,而减振装置对结构反应模式、破坏方式及全寿命内承载力、可靠度的影响均未见提及。如何采用多指标评判减振装置的效果,如何根据多个指标进行减振装置设计,将是下一阶段研究的方向。

智能减振控制方面:智能控制具备自适应和自组织的功能,适用于输电塔-线体系这种非线性、强耦合、多变量的、不确定性强的复杂系统;将智能材料及智能算法引入该结构的振动控制将成为一种趋势。

## 参考文献

- [1] 张大长,赵文伯,刘明源. 5·12 汶川地震中电力设施震害情况及其成因分析[J]. 南京工业大学学报(自然科学版), 2009, 31(1): 44 - 48.  
(ZHANG Dachang, ZHAO Wenbo, LIU Mingyuan. Analysis on seismic disaster damage cases and their causes of electric power equipment in 5·12 Wenchuan earthquake[J]. Journal of Nanjing university of technology (natural science), 2009, 31(1): 44 - 48.)
- [2] 刘如山,张美晶,郭玉斌,等. 汶川地震四川电网震害及功能失效研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010(增刊1): 200 - 211.  
(LIU Rushan, ZHANG Meijing, WU Yubin, et al. Damage and failure study of Sichuan electric power grid in Wenchuan earthquake[J]. Journal of basic science and engineering, 2010(S1): 200 - 211.)
- [3] 刘爱文,李小军,郭恩栋,等. 玉树和宁洱等近城镇中强地震对中小城市影响的启示[J]. 应用基础与工程科学学报, 2010(增刊1): 152 - 161.  
(LIU Aiwen, LI Xiaojun, GUO Endong, et al. Effect of urban earthquake on the small and medium city in China through the damage analysis of Yushu earthquake and Ning'er earthquake[J]. Journal of basic science and engineering, 2010(S1): 152 - 161.)
- [4] 刘如山,刘金龙,颜冬启,等. 芦山 7.0 级地震电力设施震害调查分析[J]. 自然灾害学报, 2013, 22(5): 83 - 90.  
(LIU Rushan, LIU Jinlong, YAN Dongqi, et al. Seismic damage investigation and analysis of electric power system in Lushan M<sub>s</sub> 7.0 earthquake[J]. Journal of natural disasters, 2013, 22(5): 83 - 90.)
- [5] 谢强,张勇,李杰. 华东电网 500 kV 任上 5237 线飊线风致倒塌事故调查分析[J]. 电网技术, 2006(10): 59 - 63.  
(XIE Qiang, ZHANG Yong, LI Jie. Investigation on tower collapses of 500kV Renshang 5237 transmission line caused by downburst[J]. Power system technology, 2006(10): 59 - 63.)
- [6] 张锋,吴秋晗,李继红. 台风“云娜”对浙江电网造成的危害与防范措施[J]. 中国电力, 2005(5): 39 - 42.  
(ZHANG Feng, WU Qiuhan, LI Jihong. Harzards of typhoon Rananim to Zhejiang power grid and its preventive measures[J]. Electric power, 2005(5): 39 - 42.)
- [7] PARK J H, MOON B W, MIN K W, et al. Cyclic loading test of friction-type reinforcing members upgrading wind-resistant performance of transmission towers[J]. Engineering structures, 2007, 29(11): 3185 - 3196.
- [8] BATTISTA R C, RODRIGUES R S, PFEIL M S. Dynamic behavior and stability of transmission line towers under wind forces[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2003, 91(8): 1051 - 1067.
- [9] 李宏男,霍林生. 结构多维减振控制[M]. 北京: 科学出版社, 2008.  
(LI Hongnan, HUO Linsheng. Multi-dimensional vibration control of structures[M]. Beijing: Science Press, 2008.)
- [10] 魏陆顺,周福霖,刘文光. 组合基础隔震在建筑工程中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2007(2): 158 - 163.  
(WEI Lushun, ZHOU Fulin, LIU Wenguang. Application of combined base isolation to buildings[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2007(2): 158 - 163.)
- [11] 蔡锦荣,刘树堂. SMA 弹簧-轴承滚动隔震输电塔的地震反应分析[J]. 广东土木与建筑, 2009(5): 14 - 17.  
(CAI Jinrong, LIU Shutang. Seismic response analysis of transmission tower with SMA spring-bearing[J]. Guangdong architecture civil engineering, 2009(5): 14 - 17.)
- [12] 刘树堂,康丽萍. 基于 SIMULINK 的基础滚动隔震输电塔地震仿真分析[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增刊2): 266 - 271.  
(LIU Shutang, KANG Liping. Seismic response analysis on the rolling isolated transmission tower based on SIMULINK[J]. China civil engineering journal, 2013, 46(S2): 266 - 271.)
- [13] ALBERMANI F, MAHENDRAN M, KITIPORNCHAI S. Upgrading of transmission towers using a diaphragm bracing system[J]. Engineering structures, 2004, 26(6): 735 - 744.
- [14] 郭勇,孙炳楠,叶尹,等. 大跨越输电塔线体系气弹模型风洞试验[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(9): 1482 - 1486.

- (GUO Yong, SUN Bingnan, YE Yin, et al. Wind tunnel test on aeroelastic model of long span transmission line system [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2007, 41(9): 1482 - 1486. )
- [15] 白杰, 谢强, 薛松涛. 1000 kV 特高压同塔双回输电线路塔线耦联体系地震模拟振动台试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 116 - 123.
- (BAI Jie, XIE Qiang, XUE Songtao. Shaking table tests on 1000 kV UHV AC double circuit transmission tower-conductor coupling systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 116 - 123. )
- [16] 黄斌, 唐家祥. 大跨越输电塔结构风振控制[J]. 噪声与振动控制, 1997(5): 2 - 5.
- (HUANG Bin, TANG Jiaxiang. Vibration control of a long-span transmission tower subjected to wind [J]. Noise and vibration control, 1997(5): 2 - 5. )
- [17] 邓洪洲, 朱松晔, 苏速, 等. 大跨越输电塔线体系风振控制风洞试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003(9): 1009 - 1013.
- (DENG Hongzhou, ZHU Songye, SU Su, et al. Wind tunnel investigation on wind-induced vibration control of long span transmission line systems [J]. Journal of Tongji university, 2003(9): 1009 - 1013. )
- [18] 邓洪洲, 朱松晔, 陈亦, 等. 大跨越输电塔线体系风振控制研究[J]. 建筑结构学报, 2003(4): 60 - 64.
- (DENG Hongzhou, ZHU Songye, CHEN Yi, et al. Study on wind induced vibration control of long transmission tower line systems [J]. Journal of building structures, 2003(4): 60 - 64. )
- [19] 贺业飞, 楼文娟, 孙炳楠, 等. 悬挂质量摆对大跨越输电塔的风振控制[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005(12): 1891 - 1896.
- (HE Yefei, LOU Wenjuan, SUN Bingnan, et al. Wind-induced vibration control of long span transmission tower with suspended mass pendulums [J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2005(12): 1891 - 1896. )
- [20] 侯洁, 霍林生, 李宏男. 非线性悬吊质量摆对输电塔减振控制的研究[J]. 振动与冲击, 2014(3): 177 - 181.
- (HOU Jie, HUO Linsheng, LI Hongnan. Aseismic control of transmission towers with nonlinear suspended mass pendulums [J]. Journal of vibration and shock, 2014(3): 177 - 181. )
- [21] TIAN L, WANG Q, YU Q, et al. Wind-induced vibration optimal control for long span transmission tower-line system [J]. Open civil engineering journal, 2013, 7(1): 159 - 163.
- [22] TIAN L, ZENG Y. Parametric study of tuned mass dampers for long span transmission tower-line system under wind loads [J]. Shock and vibration, 2016(8): 1 - 11.
- [23] 李黎, 夏正春, 张行, 等. FPS 型 MTMD 在输电塔减震中的应用[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2007(3): 4 - 7.
- (LI Li, XIA Zhengchun, ZHANG Xing, et al. Seismic performance of FPS-MTMD for transmission tower-line systems [J]. Journal of Huazhong university of science and technology (urban science edition), 2007(3): 4 - 7. )
- [24] 张鹏, 李宏男, 宋钢兵, 等. 输电塔-调谐质量阻尼器减振系统的一体化设计[J]. 电力建设, 2015(5): 84 - 90.
- (ZHANG Peng, LI Hongnan, SONG Gangbing, et al. Integrated design of transmission tower-tmd damping system [J]. Electric power construction, 2015(5): 84 - 90. )
- [25] 徐静, 李宏男, 李钢, 等. 考虑桩-土-结构动力相互作用的输电塔地震反应分析[J]. 工程力学, 2009(9): 24 - 29.
- (XU Jing, LI Hongnan, LI Gang, et al. Seismic response analysis of transmission tower in consideration of the pile-soil dynamic interaction [J]. Engineering mechanics, 2009(9): 24 - 29. )
- [26] 刘耀宗, 郁殿龙, 赵宏刚, 等. 被动式动力吸振技术研究进展[J]. 机械工程学报, 2007(3): 14 - 21.
- (LIU Yaozong, YU Dianlong, ZHAO Honggang, et al. Review of passive dynamic vibration absorbers [J]. Chinese journal of mechanical engineering, 2007(3): 14 - 21. )
- [27] VAKAKIS A F. Inducing passive nonlinear energy sinks in vibrating systems [J]. Transactions-American society of mechanical engineer journal of vibration and acoustics, 2001, 123(3): 324 - 332.
- [28] JIANG X, MCFARLAND D M, BERGMAN L A, et al. Steady state passive nonlinear energy pumping in coupled oscillators: theoretical and experimental results [J]. Nonlinear dynamics, 2003, 33(1): 87 - 102.
- [29] GOURDON E, ALEXANDER N A, TATLOR C A, et al. Nonlinear energy pumping under transient forcing with strongly nonlinear coupling: theoretical and experimental results [J]. Journal of sound and vibration, 2007, 3(3): 522 - 551.
- [30] GOU W, LI H, LIU G, et al. A simplified optimization strategy for nonlinear tuned mass damper in structural vibration control [J]. Asian journal of control, 2012, 14(4): 1059 - 1069.
- [31] 周云, 徐彤. 耗能减震技术研究及应用的新进展[J]. 地震工程与工程振动, 1999, 19(2): 122 - 131.
- (ZHOU Yun, XU Tong. Recent advances in research, development and applications of seismic energy dissipation [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1999, 19

- (2):122-131.)
- [32] 周云,徐赵东,赵鸿铁.粘弹性阻尼结构的性能、分析方法及工程应用[J].地震工程与工程振动,1998(3):97-108.  
(ZHOU Yun,XU Zhaodong,ZHAO Hongtie. Study on behavior, analytical methods and application of viscoelastic structure[J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 1998(3):97-108.)
- [33] 江宜城,钟寅亥,樊剑,等.粘弹性阻尼器控制下大跨越输电塔风振响应分析[J].钢结构,2003(4):34-36.  
(JIANG Yicheng,ZHONG Yin Hai,FAN Jian, et al. Wind vibration responses analyses for electrical transmission tower with viscoelastic dampers under wind load[J]. Steel construction,2003(4):34-36.)
- [34] 钟寅亥,李黎,江宜城.粘弹性阻尼器在控制输电塔风振反应中的应用[J].华中科技大学学报(城市科学版),2003(2):69-71.  
(ZHONG Yin Hai,LI Li,JIANG Yicheng. Application of viscoelastic damper to control vibration response of transmission tower under wind[J]. Journal of Huazhong University, of Science and technology (urban science edition),2003(2):69-71.)
- [35] 曹枚根,周福霖,徐忠根,等.大跨越输电塔线体系减震控制分析研究[J].电网技术,2007(14):45-51.  
(CAO Meigen,ZHOU Fulin,XU Zhonggen, et al. Research on seismic control of large crossing transmission towers for transmission lines[J]. Power system technology, 2007(14):45-51.)
- [36] 钟万里,吴怡,王伟,等.基于粘弹性阻尼器输电线路的风振控制研究[J].中国电力,2012(10):63-67.  
(ZHONG Wanli,WU Yi,WANG Wei, et al. Wind-induced vibration control for high-voltage transmission system using viscoelastic-damper[J]. Electric power,2012(10):63-67.)
- [37] 钟万里,吴灌伦,王伟,等.基于阻尼耗能原理的高压输电塔风振抑制方法[J].中南大学学报(自然科学版),2013(1):397-402.  
(ZHONG Wanli,WU Guanlun,WANG Wei, et al. Wind-induced vibration reduction technology of high-voltage transmission tower based on polymer damper[J]. Journal of central south university (science and technology), 2013(1):397-402.)
- [38] 甘凤林,蒋海龙,曾聪,等.附加粘弹性阻尼器的输电塔线体系阻尼特性研究[J].工程抗震与加固改造,2015(1):58-63.  
(GAN Fenglin,JIANG Hailong,ZENG Cong, et al. Research on damping characteristic of electrical transmission tower-line system with viscoelastic dampers[J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2015(1):58-63.)
- [39] 陈波,郑瑾,王建平.高压输电塔的摩擦耗能减震控制[J].武汉理工大学学报,2009(1):78-82.  
(CHEN Bo,ZHENG Jin,WANG Jianping. Seismic mitigation of transmission tower by using passive friction dampers[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2009(1):78-82.)
- [40] 郑瑾,陈波.输电线路的风致振动被动耗能控制[J].武汉理工大学学报,2007(12):80-83.  
(ZHENG Jin,CHEN Bo. Wind-induced vibration control of transmission tower-line system by using passive devices[J]. Journal of Wuhan university of technology,2007(12):80-83.)
- [41] 郎海坡,戚承志,苗启松.防屈曲耗能支撑的发展状况[J].施工技术,2008(增刊2):478-482.  
(LANG Haipo,QI Chengzhi,MIAO Qisong. Review of development of buckling-restrained energy consumption brace[J]. Construction technology,2008(S2):478-482.)
- [42] 李黎,曹化锦,尹鹏,等.防屈曲耗能支撑对大跨越输电塔风振控制研究[J].水电能源科学,2010(6):121-124.  
(LI Li,CAO Huajin,YIN Peng, et al. Research on wind-induced vibration control for large-span transmission tower with buckling-restrained braces[J]. Water resources and power,2010(6):121-124)
- [43] 李黎,尹鹏.大跨越输电塔-线体系风振控制研究[J].工程力学,2008(增刊2):213-229.  
(LI Li,YIN Peng. The research on wind-induced vibration control for big-span electrical transmission tower-line system[J]. Engineering mechanics,2008(S2):213-229.)
- [44] 李黎,尹鹏,王开明,等.不同风向角动风下大跨越输电塔风振响应分析[J].武汉理工大学学报,2009(23):68-71.  
(LI Li,YIN Peng,WANG Kaiming, et al. Analysis of wind-induced vibration for big-span electrical transmission tower under different wind directions[J]. Journal of Wuhan university of technology,2009(23):68-71.)
- [45] 尹鹏,李黎,胡亮霞,等.橡胶铅芯阻尼器控制下输电塔风振系数研究[J].水电能源科学,2009(1):187-191.  
(YIN Peng,LI Li,HU Liangxia, et al. Research of wind-induced vibration coefficient for transmission towers using lead rubber dampers[J]. Water resource and power, 2009(1):187-191.)
- [46] 李黎,曹化锦,罗先国,等.输电塔-线体系的舞动及风振控制[J].高电压技术,2011(5):1253-1260.  
(LI Li,CAO Huajin,LUO Xianguo, et al. Galloping and wind-induced vibration control on

- transmission tower-line system[J]. High voltage engineering, 2011(5): 1253-1260.)
- [47] LI L, CAO H, YE K, et al. Simulation of galloping and wind-induced vibration control[J]. Noise and vibration worldwide, 2010, 41(10): 15-21.
- [48] 夏正春, 梁政平, 李黎, 等. 大跨越输电塔线的断线振动及控制[J]. 武汉理工大学学报, 2008(9): 84-88.  
(XIA Zhengchun, LIANG Zhengping, LI Li, et al. Wire-breaking induced vibration and control of long-span electric transmission tower-line system[J]. Journal of Wuhan university of technology, 2008(9): 84-88.)
- [49] 郭勇, 孙炳楠, 叶尹. 多目标优化方法在输电塔阻尼器布置中的应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006(10): 1755-1760.  
(GUO Yong, SUN Bingnan, YE Yin. Multi-objective optimization approach for damper distribution of transmission towers[J]. Journal of Zhejiang university (engineering science), 2006(10): 1755-1760.)
- [50] 郭勇. 大跨越输电塔线体系的风振响应及振动控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.  
(GUO Yong. Studies on wind-induced dynamic response and vibration control of long span transmission line system[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.)
- [51] MIGUEL L F F, MIHUEL L F F, LOPEZ R H. Simultaneous optimization of force and placement of friction dampers under seismic loading[J]. Engineering optimization, 2016, 48(4): 582-602.
- [52] SOONG T T, SPENCER J R. Active, semi-active and hybrid control of structures[J]. Bulletin of the New Zealand national society for earthquake engineering, 2000, 33(3): 387-402.
- [53] 王社良, 朱熹育, 朱军强等. 输电塔减震主动控制中 GMM 作动器的优化布置研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(19): 48-52.  
(WANG Sheliang, ZHU Xiyu, ZHU Junqiang, et al. Optimal placement of GMM actuators for active vibration control of a power transmission tower[J]. Journal of vibration and shock, 2012, 31(19): 48-52.)
- [54] 苏桥磊, 周旸. GMM 作动器在高压输电塔结构抗震控制中的优化布置研究[J]. 特种结构. 2015, 32(4): 117-120.  
(SU Qiaolei, ZHOU Yang. Optimal placement of GMM actuators for vibration control of a power transmission tower subjected to earthquake[J]. Special structures, 2015, 32(4): 117-120.)
- [55] CHEN B, ZHENG J, QU W. Control of wind-induced response of transmission tower-line system by using magnetorheological dampers[J]. International journal of structural stability & dynamics, 2009, 9(4): 661-685.
- [56] 陈波, 郑瑾, 瞿伟廉. 基于磁流变阻尼器的大跨越输电塔线体系风致振动控制[J]. 振动与冲击, 2008(3): 71-74.  
(CHEN Bo, ZHENG Jin, QU Weilian. Wind-induced response mitigation of transmission tower-line system by using magnetorheological dampers[J]. Journal of vibration and shock, 2008(3): 71-74.)
- [57] 陈波, 瞿伟廉, 郑瑾. 输电塔线体系风振反应的半主动摩擦阻尼控制[J]. 工程力学, 2009(1): 221-226.  
(CHEN Bo, QU Weilian, ZHENG Jin. Semi-active control for wind-induced responses of transmission tower-line system using friction dampers[J]. Engineering mechanics, 2009(1): 221-226.)
- [58] 樊禹江, 王社良, 苏乔磊, 等. 新型压电摩擦阻尼器在输电塔结构中的振动控制研究[J]. 空间结构, 2013(3): 79-84.  
(FAN Yujiang, WANG Duliang, SU Qiaolei, et al. Research of vibration control of high-voltage transmission tower with a new piezoelectric friction damper[J]. Spatial structures, 2013(3): 79-84.)
- [59] 樊禹江, 王社良. 基于新型压电摩擦阻尼器的高压输电塔半主动抗震控制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2013(4): 336-341.  
(FAN Yujiang, WANG Sheliang. Semi-active seismic control of high-voltage transmission tower based on a new type of piezoelectric friction damper[J]. Journal of Hohai university (natural sciences), 2013(4): 336-341.)
- [60] 展猛, 王社良, 朱军强, 等. 安装复位型压电摩擦阻尼器模型结构控振试验研究[J]. 振动与冲击, 2015(14): 45-50.  
(ZHAN Meng, WANG Sheliang, ZHU Junqiang, et al. Vibration control tests of a model structure installed with piezoelectric friction damper with reset function[J]. Journal of vibration and shock, 2015(14): 45-50.)
- [61] 马涌泉, 邱洪兴. 输电塔-线体系风致响应的鲁棒半主动控制[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016(2): 279-284.  
(MA Yongquan, QIU Hongxing. Wind-induced response suppression of transmission tower-line system using a robust and semi-active controller[J]. Journal of northeastern university (natural science), 2016(2): 279-284.)
- [62] 马涌泉, 邱洪兴. 大跨越输电塔线体系风振控制新策略[J]. 上海交通大学学报, 2014(12): 1751-1759.  
(MA Yongquan, QIU Hongxing. An novel strategy for controlling wind-induced vibration of large span transmission tower line system[J]. Journal of Shanghai jiaotong university, 2014(12): 1751-1759.)