

# 电网舞动灾害应对技术体系研究综述

赵彬, 刘彬, 朱宽军

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055)

**摘要:** 中国电网结构复杂, 线路分布广泛, 近年来受气候异常变化影响, 大范围、长时间舞动导致的机械、电气故障频发。尤其是2007年以来, 对线路运行影响较大的舞动灾害天气过程呈多发态势。统计数据显示, 覆冰舞动已经成为导致线路故障停运的首要原因。传统舞动防治技术手段大都以舞动诱发过程为主要防治对象, 基于“避、抗、防、测”基本原则, 构建了电网舞动灾害应对技术体系, 主要防治手段包括绘制舞动分布图, 制定防舞设计标准, 提出装置设计、检测、应用和评价方案等。经过多年的完善, 现有技术体系体现出了较好的防范和治理效果, 但在舞动发生期间却不具备任何实用性和可操作性。文中针对现有电网舞动灾害应对技术体系的优势、不足和针对性的完善措施, 以及近期非线性动力减振、舞动机理、人工智能等相关领域研究成果进行总结介绍和综述, 并指出今后可能实现更好舞动应对效果的技术领域和研究方向, 力图为电网防灾减灾和线路运维工作提供借鉴和参考。

**关键词:** 电网运维; 输电线路; 覆冰舞动; 防振金具设计; 防舞方案; 非线性动力减振

**中图分类号:** TM 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)06-0022-09

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20220604

## A Research Review on Technical Response System to Galloping of Power Grid

ZHAO Bin, LIU Bin, ZHU Kuanjun

(China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China)

**Abstract:** The structure of power grid in China is complex with the lines widely distributed, while the abnormal climate changes in recent years have also been causing extensive and long-running galloping, which leads to frequent mechanical and electrical faults. Especially since 2007, weather conditions and processes that may induce galloping and thus have a great impact on the operation of transmission lines have been occurring frequently, and the statistics show that the galloping of iced transmission lines has been the primary cause of line failure and outage. For most traditional anti-galloping techniques, the induction process of galloping is seen as the main target for prevention. So based on the basic principles of "galloping avoidance, galloping resistance, anti-galloping, and galloping measurement", the technical response system is constructed for galloping-induced failures in power grid, in which the prevention and control measures mainly includes the drawing of galloping distribution maps, the formulation of standards for anti-galloping design, and the proposal of various schemes for device design, detection, application and evaluation, etc. With years of improvement, the current technical system has demonstrated good prevention and management effects but lacks practicability and operability during galloping. It is an attempt to review and summarize the advantages, weakness and targeted improvement measures in the existing technical response system to power grid galloping, as well as the recent research results in various related fields, such as nonlinear dynamic oscillation mitigation, galloping mechanism, artificial intelligence. Furthermore, the technical areas and research directions are put forward where better effects of galloping response may be achieved in the future, aiming to provide references for the prevention and mitigation of power grid failures and the operation and maintenance of lines.

**Key words:** operation and maintenance of power grid; transmission line; galloping of iced transmission lines; design of anti-oscillation hardware fittings; anti-galloping scheme; nonlinear dynamic oscillation mitigation

## 0 引言

中国电网结构复杂,线路分布广泛,截至2020年,在运在建特高压线路已超过35 000 km,成为能源电力可持续发展的关键环节,在现代能源供应体系中发挥着重要的枢纽作用。

然而近年来受气候异常变化影响,大范围、长时间舞动导致的机械、电气故障频发。2007年冬季至今,国家电网有限公司500 kV及以上输电线路多次故障停运,其中舞动是诱发线路故障停运的首要原因。进一步对近年来雨雪冰冻灾害分析显示,对电网运行影响较大的雨雪冰冻灾害天气过程呈多发、频发态势,每年冬季都会遭遇1~2次,而且波及范围向非传统重覆冰和舞动易发区演进,其中典型案例是:2020年2月环渤海冰灾中,位于0级舞动区的天津某液体天然气供气电源线路发生舞动,造成长时间停电且无法恢复;同年11月吉林冰灾中,0级舞动区内某66 kV供水电源线发生舞动,造成供水泵站停电,由于供暖也需要水源,造成部分地区长时间无法供暖、供气。上述案例中,面对偶发性的长时间舞动,没有任何可采取的措施和方法来有效阻止舞动造成的长时间故障停运。

下面,首先详细介绍现阶段基于“避、抗、防、测”4个方面的舞动应对方法、技术特点、主要问题和完善措施,从舞动机理、设计方法、监测预警和防治技术领域成果进行总结,并引入非线性动力防舞、人工智能、智能监测等前沿技术的应用和探索,为全球气候变暖形势下电网防灾减灾工作提供借鉴和参考。

## 1 诱发机理研究

舞动诱发机理研究是目前应对技术体系内所有方法、装置和标准等元素的关键核心。目前解释覆冰舞动的机理多为激发、失稳机理,如Den Hartog机理、Nigol机理、惯性耦合机理、稳定性机理以及非线性内共振失稳机理等,可分别从不同角度来解释舞动发生、发展的影响机制。在这些机理基础上建立的舞动灾害应对技术体系,主要以“避、抗、防、测”为基本理念和指导原则。因此,在输电线路运行阶段发生的舞动,只能等线路停运后进行技改来提升

线路抵御舞动灾害的能力。

然而,从近年来的发展成果来看,舞动诱发机理研究已经从以往的线性本质向非线性本质转变。目前,针对覆冰多分裂导线-间隔棒-防舞器等耦合结构要素的关系,还仅限于连续分布质量、非线性刚度、线性模态、内共振、静态分岔和hopf分岔等基本非线性特征关系,对奇异性、多模态耦合、非线性模态以及非线性阻尼等特征的研究还较为匮乏。而且,最为关键的问题是,近年来实用性的装置更新迭代越来越慢。究其原因,是解析和数值等方法分析的结果对完善舞动应对技术体系的指导意义越来越小,而舞动风洞或真型线路现场模拟试验对气象条件、线路结构、特征测试技术以及结果分析的要求非常高,其经济成本也较高,导致理论和试验分析在一定程度上脱节,无法推动新装置的应用和推广。针对这一难题,在研发和推广小型化监测装置的基础上,有不少研究者提出较为恰当的舞动特征监测解决方案。

## 2 现有技术体系

### 2.1 避舞

“避”主要是在线路规划阶段合理规划线路走向和路径,在综合生态、环境条件、线路造价等分析的基础上,尽可能避开易舞区和微气象、微地形区。该领域主要的研究工作集中在如何找出舞动高风险区域,即绘制舞动风险分布图。传统舞动风险分布图绘制方法有频率法和舞动系数法。舞动系数法因实际操作困难,未得到推广应用。频率法体现的结果虽然能够在一定程度上反映舞动发生的地区分布,但“守株待兔”式方法难以准确预测无舞动历史区域内线路的舞动风险。

文献[1]在频率法、舞动系数法基础上,提出了基于气象地理法的输电线路舞动分布图绘制方法:在统计和分析该区域输电线路历年来发生导线覆冰舞动情况的基础上,通过总结气象、地形特征规律,建立覆冰舞动的气象模型和地理模型;结合运行经验提出舞动区域的分区、分级标准,建立舞动分布图绘制方法标准技术体系;以湖北省为例采用气象地理法绘制了舞动分布图,并检验其与实际舞动情况的吻合程度,验证了该方法的合理性和正确性。

避舞方法在过去几年中开展了大量的应用,部

分重要线路通过规避易舞区等方法,取得了一定的避舞效果。多年应用经验表明,该方法的有效性得到进一步提升的前提,是通过历史案例准确总结、归纳并掌握各区域舞动风险出现和演变的规律。然而,随着电网建设规模的扩大,全球气候的异常变化,0级、1级舞动区内出现的偶发性舞动越来越多见,防舞能力提升的基础和前提已经基本无法实现。除了缩短舞动分布图的修订周期(目前是2~3年),目前这一方向发展的前沿趋势,是参考覆冰、风区分布图,考虑30年、50年和100年重现期,进行架空线路路径调整和优化,从而进一步提升输电线路设计防舞能力,并为后续其他防舞设计提供更为精准和差异化的依据。

## 2.2 抗舞

覆冰导线舞动会使导线产生动态交变应力,降低导线的疲劳寿命,造成导线损伤甚至断线;同时,舞动会在绝缘子串、横担及输电铁塔上施加较大的动力荷载,造成绝缘子串摆动、横担扭曲变形、杆塔塔身摇晃甚至倒塌。“抗”就是在设计、运维、改造阶段,对经过易舞区的线路采取提高线路机械强度、电气安全裕度的方法,来提升导线、杆塔、金具、绝缘子等结构抵抗舞动破坏能量的能力。一般情况下,舞动的破坏首先是闪络跳闸,其次是低频、大幅值振动导致的结构强度不足或疲劳损坏。对于经过易舞区的线路,如果适当提高线路的机械强度或电气强度,使得即使发生中等强度的舞动,也不至于发生因线路电气强度不足而闪络跳闸,或发生因机械强度不足而损坏,避免对线路的运行造成严重影响。

抗舞的关键,在于充分认识杆塔-导线-绝缘子-金具耦连体系中一个或多个结构的舞动特征和失稳演变过程。对此,文献[1]采用梁单元对覆冰导线的舞动进行了非线性数值模拟,但导线的抗弯刚度小不适合采用梁单元进行模拟,且该文献没有考虑覆冰后由于偏心而产生的惯性作用。

除此之外,近年来的运行经验表明,舞动交变载荷是杆塔螺栓松脱的重要原因。文献[2]通过大量螺栓松动试验,开发了螺栓连接在受横向激励时的自松动现象完整模型,从静态和动态模型分析结果中发现螺栓自松动的主要原因是质量块和螺栓之间的相互影响,并预测了螺栓自松动过程。文献[3]通过试验和有限元模拟揭示了螺栓受横向循环载荷作用的自松动机理,认为螺栓连接的自松动过程分

别由材料循环塑性变形和螺母回旋导致,自松动现象的初始过程取决于材料的循环塑性变形。文献[4-5]结合导线舞动时输电铁塔横担损坏情况,分析了螺栓松脱、断裂后横担承载力的变化规律,提出了采用双帽螺栓等防松脱技术措施,经过多年的共同努力,螺栓防松脱已成为每年入冬前各地设备管理部分防冰抗舞工作的重点环节。

由于抗舞能力的提升意味着线路造价会成倍增加,同时受其他多种因素的制约,抗舞措施客观推广实施难度较大,且大都都需要依赖主观经验,工程中发挥的实际效果相对较差。因此,应重视螺栓防松对防舞能力的提升效果,尤其是利用双螺母来提升杆塔防松能力。特别是针对重点防护线路区段,应优先选用双螺母设计形式,从而提升低频载荷下的防松能力。在档距控制方面,张力和档距因素对舞动特性影响较大,缩小档距可起到一定的防舞效果。此外,还可利用真型塔试验校验杆塔抗舞能力。

## 2.3 防舞

“防”就是在线路设计或运行阶段对存在发生舞动可能性的线路区段加装防舞器,防患于未然。经过数十年的研究和探索,已有多种防舞技术应用与输电线路,中国在舞动治理和防舞技术方面也积累了丰富的经验,取得了良好的效果。相对于“避”和“抗”,“防”的造价是最低的,也容易实现。防舞技术可以在线路规划设计阶段实施,也可以在线路建成后运行阶段实施。后者一般都是在预判线路可能发生舞动,或在线路已发生舞动后开展的工作,是操作简单、效果良好的舞动防治技术。“防”舞技术主要是加装防舞装置。

目前,国内外常用的防舞装置有很多,按照其原理大都可以分为:以改变导线自身动力学特性为目的,如阻尼间隔棒、失谐摆防舞器、压重防舞器、线夹回转式间隔棒、终端阻尼器、整体式偏心重锤、双摆防舞器和拉线防舞器(或称相地间隔棒);以改变导线所受到的气动载荷为目的,包括空气动力阻尼器、扰流防舞器、气动阻尼片。

1)在改变导线自身动力学特性的装置方面,“线夹回转式间隔棒+双摆防舞器”组合方案是目前在中国应用最多、范围最广、电压覆盖最全的经典防舞方案。文献[6]对特高压等级线路的防舞机理进行了细致分析,提出了以稳定性机理为基本理论的特高压线路防舞设计理念;并在该机理基础上,设计



开发了两种新型防舞装置,包括可以提高该类型线路在受到冰风激励下稳定性的线夹回转式间隔棒双摆防舞器 RCSDPAD,以及具有改变覆冰截面形状、减轻激励力的作用线夹回转式间隔棒 RCS。2016年1月和2018年2月,湖北地区先后分别遭受了大范围雨雪冰冻灾害的影响,灾后统计数据(见图1)表明,135条110 kV及以上舞动线路中,安装双摆防舞器的线路仅有6条,且均未出现本体受损<sup>[7]</sup>。

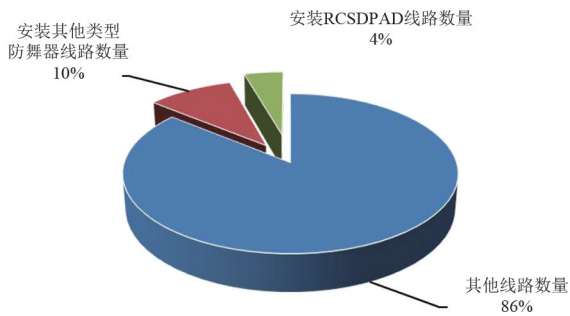


图1 按照防舞装置类型对湖北舞动线路统计(条数比例)

同时,相间间隔棒在中国线路中的应用也相对较多。相间间隔棒具有保持导线间距,防止相对运动的效果。根据德国、加拿大以及中国加装相间间隔棒的若干条输电线路运行状态来看,其在防止舞动引起的金具破坏,甚至断线倒塔等事故方面有着很好的效果<sup>[8]</sup>。加装于单相分裂导线上的间隔棒,也有明显的防舞减振效果。但是实际的运行经验表明,相间间隔棒也存在一定缺陷:首先,由于扭转与其他方向剧烈振动相耦合,产生的直接后果是要么导线被严重磨损,要么棒体因反复弯折被折断;其次,相间间隔棒会在两端导线同步舞动时失去防舞效果;最后,舞动期间覆冰棒体弯折对两相导线电气安全距离的影响机理尚不明确。

文献[9]在充分调研国内相关技术研究现状的基础上,通过开展拉线防舞装置限位调节范围研究、自动式限位式装置研制、半自动式和被动式限位装置研制、限位式防治技术总体设计方案等工作,得出了限位式防舞装置中调节装置的调节范围,研制出了自动式、半自动式、被动式等3种限位装置,提出了限位式防治技术总体设计方案。所研制的自动式、半自动式、被动式等3种限位装置及配套金具无论是机械强度还是电气性能指标均满足现行国家标准、行业标准及规范的要求,也满足输变电工程的使用要求,为工程设计和建设提供技术支撑。

动力减振器技术也获得了一定发展,文献[10]在针对覆冰四分裂导线舞动特征开展详细仿真基础上,提出一种基于线性共振原理的分裂导线防舞器,并给出其参数优化设计准则,该防舞器具有重量轻、制造简单、成本低、防风雪等优点。基于非线性能量槽(nonlinear energy sink, NES)和颗粒阻尼技术的零频防舞器设计理念也于近期被提出<sup>[11]</sup>,并开展了优化设计、试制加工和相关测试,试验室测试结果表明,零频防舞器在阻尼特性和共振频域宽度等方面,表现出了一定优越性。

此外,从 Den Hartog 和 Nigol 两种舞动机理来看,输电导线的阻尼特性是影响导线舞动的重要因素,也是对多种防舞装置进行设计和改进的重要参数。文献[12]通过对导线单自由度和多自由度耦合振动的分析研究后得出,导线的阻尼越大,导线起舞临界风速就越大,越有利于防舞。终端阻尼器的设计就是基于此原理。此外,带有阻尼特性的相间间隔棒<sup>[13-14]</sup>和线夹回转式间隔棒<sup>[15-16]</sup>,都是以增加线路阻尼特性进行的针对性改进产品。

2)在考虑空气动力学特性的防舞装置方面,扰流防舞器就是基于此原理进行设计的产品之一,通过将其缠绕于输电导线上使导线截面部分被改变,相邻导线截面的不同会造成其所受气动力相互干扰和抵消,从而达到抑制舞动的目的。该装置已在湖北地区部分线路上有所应用。

气动阻尼片是一种空气动力学稳定装置,目前该装置的实际防舞效果在低电压等级线路上得到了良好的体现,文献[17]用计算流体动力学方法评估了扰流防舞器等防舞装置对导线气动力系数的影响,通过数值仿真评估发现,该类型防舞器对防止导线舞动有明显效果。悬挂式阻尼片可以有效抑制导线的 Den Hartog 舞动,相比固定式其更为有效。

3)另外,当受客观因素限制,重要线路无法实现有效避舞、抗舞、防舞时,差异化设计方法就成为了目前最实用、有效的舞动应对方法,同时差异化设计技术也是目前防灾减灾领域较为热门的研究方向,属于传统避舞、抗舞、防舞技术的组合优化或提升应用,难度主要侧重于如何才能充分发挥二者的最大防舞效果。此外,针对防舞装置的粘滞阻尼元素开展研究,进一步促进导线舞动能量向内能形式转化,降低舞动诱发时的气动负阻尼,从而有效提升防舞效果。

## 2.4 测 舞

“测”主要分为舞动特征监测和风险预测。前者是对导线舞动时间、幅值、频率、模态等特征的记录;后者是基于历史案例、舞动机理和气象预报,对未来一段时间内线路舞动风险进行分析、评估和判断。二者虽时间属性不同,技术手段上也存在显著差异,但二者存在相辅相成关系,同样不可或缺。

### 2.4.1 舞动特征监测

目前,舞动特征监测主要有视频监拍技术和传感器技术。

1) 基于视频监拍技术研发的舞动监测装置,一般由视频监测单元、网络传输单元以及后台存储展示单元组成<sup>[18]</sup>。该技术的优势在于适用范围广,除了监测舞动还可对外力破坏、异物、鸟害和山火等灾害进行监测,适用性、经济性较好。所存在的弊端主要是对电池、网络传输要求高,采集信息量有限,容易受到积雪、冻雨、大雾等恶劣气候条件影响。为了克服这些不足,文献[19]基于 5G、自组网、人工智能以及边缘计算等前沿技术,将测试设备小型化并可靠封装,有效提升恶劣天气的适应能力;同时引入边缘计算技术,优化硬件逻辑构建、特征识别算法和数据传输结构,充分降低电源和通信网络要求。

2) 传感器技术可分为基于惯性加速度和空间定位两个技术方向。前者的研究中,文献[20]设计了利用加速度传感器测量输电导线摆动振幅和摆动角度的方法来监测输电导线单点舞动的方案,可实现在载体摆动位移超过警戒值时系统发出预警。文献[21]采用传感器与间隔棒一体化封装方法,但未考虑导线扭转情况以及安装位置对测量精度的影响。基于 MEMS 基础芯片以及边缘计算技术,文献[22]研发了低功耗、集成式舞动监测传感器,并在安徽、河南、湖北、内蒙古等导线易舞省份开展了大量应用,初步构建了国家电网有限公司重点线路舞动监测系统,是目前专业测量舞动振幅、频率等特征领域内较为主流的测试技术。文献[23]针对线路舞动模态构型,考虑实际传感器布置数量有限的特征,提出了一种基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法。

基于空间定位技术监测线路舞动技术研究和装置研发方面,是近年来的研究热点。文献[24-27]先后基于北斗地基增强系统、电力北斗精准服务网、

北斗差分技术进行输电线路舞动监测的装置,可实现舞动轨迹和频率的监测。包括 RFID 等技术<sup>[28-29]</sup>也被探索应用,但受体积、功耗、外观和电晕等客观因素限制,上述装置依然存在成本较高、多个监测单元同步采集与传输以及取能装置可靠性不足等问题。此外,文献[30-33]分别研究了光纤信号解调方法,并应用于导、地线和 OPGW 光缆舞动状态监测,但在现场应用上难度较大。

客观准确的舞动特征监测,不仅可以验证舞动评估手段是否合理,也可以验证防舞装置的实际效果如何。因此,有必要针对现有舞动监测装置的不足,结合当前智能芯片、边缘计算、自组网、宽带卫星等技术的发展,深入开展可靠的舞动智能监测技术和装置研发。

此外,目前国内外的现场舞动观测所存在的缺陷包括:只能在数公里范围的有限形式的线路档进行试验,无法对所有档距、电压等级、耐张段进行充分模拟;同时受到当地局部气候严格限制,无法对风速、风向等现场条件进行调整。但是安装了小型化舞动监测装置的线路段即可成为“试验线路”的一部分,安装越多,观测数据就越多,舞动特征分析和评估也就更全面,可规避舞动风洞和现场试验的缺陷和不足,降低试验成本,使实际运行的线路状态数据更具研究价值。

### 2.4.2 舞动特征预测

严格来说,舞动风险预测是从避舞技术中的舞动分布图绘制发展出的一个新方向。由于充分考虑了气象预测数据,时间尺度更灵活,参考案例更丰富,尤其适用于已建成的庞大、复杂输电网络。从舞动诱发所需的外在条件来说,风场环境和偏心覆冰预测是预测舞动风险的关键要素。前者包含风力、风向两个气象基本要素,可以从预报材料中直接得到;但后者的形成机理相对复杂,甚至舞动预测所关注的并非覆冰的重量(目前大多数覆冰监测、预测擅长的方向),而是更为复杂的气动外形(如新月型、D型和扇形等)。目前覆冰预测方法和技术的准确度还有待提升。所以,天气系统本身的混沌特征,再迭加覆冰导线舞动诱发过程本身具有强非线性特征,输电线路舞动风险预测的难度和挑战非常大。

按照预测精度和对象分类,目前常用的舞动预测方法主要分两种:

1)仅考虑气象地理条件,把具有大风和覆冰条件的区域筛选出来,先进行覆冰预测<sup>[34-39]</sup>(目前主要关注覆冰厚度特征预测,而非气动外形、偏心特征,然而后者才是诱发舞动的关键性条件);再按照以往舞动案例记录的条件数据交叉匹配,确定各地风险等级的大小<sup>[40]</sup>。

2)利用大数据、人工智能等技术,对以往舞动案例数据特征进行全面分析和学习,建立舞动风险预警模型<sup>[41-44]</sup>,将未来某线路所在地区天气预报参数输入该模型,就可以得出未来时间段该线路舞动风险大小。其中,文献[45]利用支持向量机方法建立了16类舞动影响因素变量与4类舞动特征(是否舞动、舞动时长、破坏程度、是否跳闸)的关联模型,给出了各特征变量与舞动的相关系数排序,提出了一种引入小样本分析的基于机器算法的舞动预测方法;提出了基于输电线路舞动的多分类器集成学习决策机制,针对舞动时长和舞动概率的连续值输出问题采用加权平均决策集成学习,针对破坏程度和是否跳闸的离散值输出问题采用加权投票决策方法集成学习。

由此可见,两种预测方法都离不开气象预报,但第一种预测精度无法具体到杆塔段,单独使用第二种方法则会出现“气象数据精度越高,计算量越大”的问题,无法做到实时快速研判。所以,目前主流方法是将二者结合使用,先确定风险区域,再从高风险区域集合中确定线路段风险等级。同时,得益于监测技术的发展和设备的推广,目前驰振案例数据越来越多,样本特征也越来越丰富,且表现出正反面数据量严重不均衡等特征。基于支持向量机、神经网络、随机梯度森林等人工智能方法预测和判断舞动风险的技术,表现出过拟合等缺陷,基于人工智能技术的舞动风险预测方法具有更深的研究潜力。

### 3 应急舞动抑制

由前述可知,目前电网舞动应对技术体系的短板在于,舞动发生期间可以采取哪些应急保护措施,哪些主动干预手段可以缩短舞动持续时间。现阶段“可供选择和参考的”主动抑舞方法包括采取拉线(可改变线路结构参数)和针对覆冰舞动导线开展融冰、除冰(可消除偏心覆冰、降低气动载荷波动)。

#### 3.1 融冰抑舞

现阶段的融除冰技术,按照原理可分为热融冰、化学融冰、机械除冰、激光除冰等<sup>[46-47]</sup>。目前适用于电网的机械除冰、激光除冰以及其他融除冰技术尚处于探索阶段,一般适用于重覆冰时的融除冰,无法对舞动中的覆冰导线开展作业。针对融冰抑舞,可供参考的是热融冰和化学融冰方法。

##### 3.1.1 热融冰方法

热熔冰方法包括过电流融冰法、交流短路融冰法和直流融冰法<sup>[48-50]</sup>。其中,过电流融冰法通过提升线路电流的方式,升高线路温度实现融冰。该方法可以在不影响线路正常运行的情况下使用,然而交流潮流难以控制导致该方案落地具有较大困难。交流短路融冰法需短接两相或三相导体,利用产生的短路电流产生热量来提高导线温度,融化线路覆冰。该方法在国内外均已得到普遍使用,然而无法用于多分裂导线场景的缺陷阻碍了其进一步推广。

直流融冰技术借助整流电路将交流电源转变为可控的直流电流,进而控制电流进行精准融冰<sup>[51-52]</sup>。该方法对于线路导体材质、覆冰尺寸等因素具有较高的适应性和可控性。而且研究表明:交流短路融冰法<sup>[50]</sup>在应用于500 kV及以上交直流输电线路覆冰的场景时面临一系列难以克服的困难;而直流融冰装置具有可变的电源容量,与交流短路融冰相比直流融冰更加具有优势。

多个省份针对长时间覆冰舞动的主动抑制问题,曾开展少量应急直流融冰作业的尝试和探索。但实践表明,由于舞动灾害与重覆冰灾害有着本质区别,利用热融冰技术来实施主动抑舞,其可行性、经济性和安全性均无法满足实际运维需求。主要原因在于其存在以下难以克服的难题。

1)可行性方面:由于覆冰舞动所需的覆冰量较小,短时间内即可满足失稳条件,并使舞动垂向和扭转达到较大幅值。但热融冰作业不仅需要提前在站内部署融冰装置或移动融冰车,同时也需要设备管理、调度等部门协同配合,技术难度较大,无法做到及时高效的主动抑舞。

2)经济性方面:导线电阻低,想要达到融冰温度,短路发热需消耗的电量非常大。由于覆冰舞动发生时正值冬季寒潮甚至雨雪冰冻灾害期间,电能供应较为紧张,线路自身消耗电能过多会导致电网



运行经济性降低。

3) 安全性方面: 传统的热融冰技术涉及电网设备多, 期间大电流对各个环节的影响不容忽视, 且舞动导线受热后融冰情况存在随机性。系统能量的平衡状态被破坏后发展、演变机理不明确, 容易对金具、绝缘子甚至横担造成较大冲击载荷, 存在隐性损伤风险, 影响后续电网安全运行。

### 3.1.2 化学融冰方法

化学融冰是一种借助化学融冰试剂, 降低冰融点的方法<sup>[53]</sup>。该方法目前一般用于道路融冰、场地融冰或大型建筑结构融冰, 具有简单实用、融冰比例可控性强等优点, 但目前在电网设备融冰中使用较少。主要原因是融冰试剂会对环境造成一定程度的污染, 甚至腐蚀导线、金具等结构。目前, 该技术在舞动抑制方面尚不具备可行性, 除非有新型可靠、快速的融冰方法研发并通过试验测试。

### 3.2 拉线抑舞

现阶段的拉线抑舞可参考“防”舞方法中的拉线防舞<sup>[54-56]</sup>, 通过在单相导线档内安装拉线, 并将另一端固定于地面连接装置, 可实现较好的防舞效果。然而在导线发生覆冰舞动后, 想要通过拉线防舞器实现主动抑舞, 则存在以下问题:

1) 拉线安装过程中, 对导线、绝缘子、杆塔的瞬态冲击影响过程尚不明确。防舞过程中, 导线一直被拉线固定, 自始至终没有出现大幅值的运动。但实施主动抑舞作业时, 安装拉线会导致舞动能量在短时间内传递到导线两端线夹、绝缘子和横担上, 形成较大冲击载荷, 给连接金具、绝缘子串连接部位等薄弱环节带来损伤风险。

2) 临时拉线布设不便。常规的标准地锚应需提前布设混凝土基础, 无法满足现阶段线路舞动的突发性和应急性需求。

## 4 讨论与展望

传统观点认为架空导线一旦发生舞动, 其较大的能量无法短时间内消除。这是目前现场无法采取任何技术手段抑制甚至消除舞动的根本原因。但是随着这一偶发性问题变得越来越频繁, 在新技术、新方法、新装备不断进步后, 这一观点被推翻已经变得越来越可能。依照目前科技发展趋势, 安全可靠、经

济实用且便捷有效的技术装备很有可能从以下两个方面取得突破:

1) 随着无人机、人工智能、无线传感、高能电池以及复合材料等技术的出现, 以新型拉线等为代表的新装置将变得越来越小型化, 便于现场快速施工, 从而在几小时内完成相关作业。

2) 结构阻尼是线路防振减振的关键, 以电磁阻尼、颗粒阻尼等粘滞阻尼为代表的阻尼技术将被重点关注, 从而有效降低风场和偏心覆冰带来的气动负阻尼, 破坏舞动能量平衡。

## 5 结论

上面总结介绍了现有电网舞动灾害应对技术体系的优势、不足以及近期非线性动力减振、舞动机理、人工智能等相关领域研究成果, 指出今后可能实现更好舞动应对效果的技术领域和研究方向, 力图为解决非舞动易发区内线路段偶发的长时间舞动问题提供解决思路和方法, 建立完备的“避、抗、防、测、抑”舞动灾害应对技术体系, 为后续防冰防舞工作提供先进技术支持, 为电网防灾减灾和线路运维工作提供借鉴和参考。

### 参考文献

- [1] 李军辉, 程永锋, 龚坚刚, 等. 气象地理法在舞动分布图绘制中的改进与应用[J]. 中国电力, 2015, 48(4): 121-126.
- [2] 王丽新, 杨文兵, 杨新华, 等. 输电线路舞动的有限元分析[J]. 华中科技大学学报(城市科学版), 2004(1): 76-80.
- [3] JIANG Yanyao, CHANG J J, LEE C-H, et al. An experimental study of the torque-tension relationship for bolted joints[J]. International Journal of Materials and Product Technology, 2001, 16(4/5): 417-426.
- [4] 杨风利, 党会学, 杨靖波, 等. 导线舞动时输电铁塔承载性能及破坏模式分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 135-141.
- [5] 杨风利, 党会学, 杨靖波, 等. 500 kV 输电线路塔线体系舞动响应分析[J]. 中国电力, 2015, 48(7): 139-145.
- [6] 任西春, 朱宽军, 刘超群. 特高压输电线路新型防舞器建模分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(6): 96-101.
- [7] 赵彬, 程永锋, 王景朝, 等. 2015年初湖北架空线路覆

- 冰舞动灾害原因的理论分析与应对措施[J].振动与冲击,2017,36(10):93-97.
- [8] 郭应龙,李国兴,尤传永.输电线路舞动[M].北京:中国电力出版社,2003.
- [9] 李新民,朱宽军,刘彬.典型覆冰导线空气动力学特性数值和试验模拟[J].高电压技术,2014,40(2):427-433.
- [10] 胡景.覆冰四分导线舞动与新型防舞器的数值模拟研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [11] 赵彬.特高压导线覆冰舞动机理与新型防舞器的应用基础研究[D].北京:中国电力科学研究院,2017.
- [12] 秦朝红.非线性动力学双参量奇异性方法及其工程应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [13] 严波,崔伟,何小宝,等.三相导线三角形排布线路相间间隔棒防舞研究[J].振动与冲击,2016,35(1):106-111.
- [14] 李新民,朱宽军,李军辉.输电线路舞动分析及防治方法研究进展[J].高电压技术,2011,37(2):484-490.
- [15] 刘连光,赵强,葛江锋,等.线夹回转式导线阻尼间隔棒防舞模型与评估方法[J].电力建设,2014,35(4):59-64.
- [16] 刘连光,赵强,刘自发,等.线夹回转式导线阻尼间隔棒防舞机理与模态分析[J].电力建设,2014,35(3):74-78.
- [17] 楼文娟,孙珍茂,吕翼.扰流防舞器与气动力阻尼片的防舞效果[J].电网技术,2010,34(2):200-204.
- [18] 赵建青,姚瑶,邱玩辉,等.基于输电线路在线巡视系统的智能预警系统研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(23):49-54.
- [19] 李孟轩,欧文浩,马潇,等.基于惯性传感单元的输电线路舞动监测系统设计[C]//2020年中国通信学会能源互联网学术报告会,成都:中国通信学会学术委员会,2020:6.
- [20] 张帆.基于加速度传感器定位的输电线路舞动监测装置研究[D].重庆:重庆大学,2009.
- [21] 耿亮,王峥,王海宝,等.基于加速度传感器的输电线路舞动监测系统研发及应用[J].电气时代,2018(4):80-84.
- [22] 张树华,全杰,张璠,等.面向能源互联网智能感知的边缘计算技术研究[J].电力信息与通信技术,2020,18(4):42-50.
- [23] 龚彧,赵峰,李冬华,等.基于压缩感知的架空线路舞动波形重构方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(9):97-104.
- [24] 袁敬中,潘国兵,谢景海,等.基于多模空间距离权重融合的高压架空输电线路舞动监测模块的设计[J].电力系统保护与控制,2020,48(24):173-179.
- [25] 张孜豪,稂龙亚,晏节晋,等.基于北斗地基增强系统的输电线路舞动监测系统[J].电力信息与通信技术,2020,18(10):42-47.
- [26] 李锦林,张丽萍,马胜,等.基于北斗系统的输电线路舞动监测系统[J].中国新通信,2021,23(1):164-166.
- [27] 彭槐振.基于北斗差分定位的导线舞动在线监测研究[D].合肥:合肥工业大学,2021.
- [28] 王泉智,何怡刚,邓芳明,等.基于RFID加速度传感器标签的导线舞动在线监测[J].传感器与微系统,2017,36(8):99-102.
- [29] 王泉智.基于RFID传感器标签的导线舞动在线监测技术研究[D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [30] 王晓楠.架空输电线路风舞监测信号分析与处理[D].成都:电子科技大学,2018.
- [31] 谢凯,张洪英,赵衍双,等.导线舞动条件下输电系统结构健康监测的光纤研究[J].激光与光电子学进展,2018,55(7):113-125.
- [32] 穆汝婷.光纤复合架空地线舞动信号识别方法研究[D].吉林:东北电力大学,2020.
- [33] 曾荣,马媛媛,张传虎.偏振编码BB84系统在OPGW光缆舞动情况下的稳定性[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(6):749-752.
- [34] 庄文兵,祁创,熊小伏,等.计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):6-13.
- [35] 陈勇,李鹏,张忠军,等.基于PCA-GA-LSSVM的输电线路覆冰负荷在线预测模型[J].电力系统保护与控制,2019,47(10):110-119.
- [36] 王燕,杜志叶,阮江军.高压架空输电线路覆冰情况下风险评估研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(10):84-90.
- [37] 朱斌,潘玲玲,邹扬,等.考虑融冰因素的输电线路覆冰故障概率计算[J].电力系统保护与控制,2015,43(10):79-84.
- [38] 黄宵宁,许瑞,许家浩.南方山区线路覆冰在线监测数据特征分析与预测模型研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(23):111-116.
- [39] 邸悦伦,蔡泽林,李丽,等.环渤海地区大范围输电线路舞动风场特征分析[J].电网与清洁能源,2021,37(7):121-129.
- [40] 廖峥.基于BP神经网络的输电线路舞动预测及电网风险预警方法[D].重庆:重庆大学,2017.
- [41] MOU Z, YAN B, LIN X, et al. Prediction method for galloping features of transmission lines based on FEM



- and machine learning [J]. Cold Regions Science and Technology, 2020, 173: 103031.
- [42] 褚双伟,熊小伏,刘善峰,等.计及输电线路舞动预测的电网短期风险评估[J].电力系统保护与控制, 2018,46(9):86-93.
- [43] 廖峥,熊小伏,李新,等.基于 BP 神经网络的输电线路舞动预警方法[J].电力系统保护与控制, 2017, 45(19):154-161.
- [44] 汉京善,吕海平,李丹煜,等.基于 GA-BP 神经网络算法的输电线路舞动预警方法[J].电网与清洁能源, 2021,37(4):1-7.
- [45] 蒋明,赵汉棣,马小强.高压输电线路覆冰及防冰、除冰技术综述[J].电力安全技术, 2020, 22(4):26-32.
- [46] 王勇,苗虹,莫思特,等.高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J].电力系统保护与控制, 2020,48(18):178-187.
- [47] 李刚,邵毅.电力系统较为常用的线路融冰方法[J].科技与企业, 2013(5):275.
- [48] 覃晖,邓帅,黄伟,等.南方电网输电线路融冰措施综述[J].电力系统保护与控制, 2010,38(24):231-235.
- [49] 陆佳政,张红先,方针,等.湖南电力系统冰灾监测结果及其分析[J].电力系统保护与控制, 2009,37(12):99-105.
- [50] 赵国帅,李兴源,傅闯,等.线路交直流融冰技术综述[J].电力系统保护与控制, 2011,39(14):148-154.
- [51] 钟科,罗桑.沥青路面融冰化雪技术研究综述[J].公路交通科技(应用技术版), 2013,9(5):268-270.
- [52] 江宇轩.输电线路车载直流融冰装置设计与控制研究[D].扬州:扬州大学, 2019.
- [53] 姚致清,刘涛,张爱玲,等.直流融冰技术的研究及应用[J].电力系统保护与控制, 2010, 38(21):57-62.
- [54] 肖良成,李新民,江俊,等.典型覆冰导线气动绕流计算及动态特性分析[J].中国科学:结构和系统动力学与控制专刊, 2013,43(4):500-510.
- [55] 李梦丽,米俊,张博,等.相间间隔棒对特高压八分裂导线的静态张力影响分析[J].河南科技, 2017(1):123-125.
- [56] 向玲,唐亮,卢明,等.三相特高压输电线路相间间隔棒防舞仿真分析[J].中国工程机械学报, 2017, 15(4):298-304.
- 作者简介:**  
赵彬(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;  
刘彬(1978),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电网防灾减灾;  
朱宽军(1969),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电网防灾减灾。(收稿日期:2022-07-20)
- \*\*\*\*\*
- (上接第 6 页)
- [12] 鲁元兵,楼文娟,李焕龙.输电导线不均匀脱冰的全过程模拟分析[J].振动与冲击, 2010,29(9):47-50.
- [13] 王黎明,曹露,高亚云,等.输电线路非均匀脱冰严重工况的规律[J].高电压技术, 2018, 44(8):2442-2449.
- [14] YAN Bo, CHEN Kequan, GUO Yueming, et al. Numerical simulation study on jump height of iced transmission lines after ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1):216-225.
- [15] 张殿生.电力工程高压送电线路设计手册[M].北京:中国电力出版社, 2003.
- [16] 杨风利,杨靖波,付东杰,等.塔线系统脱冰跳跃动力响应分析[J].振动工程学报, 2010, 23(1):86-93.
- [17] HUANG Guizao, YAN Bo, LIU Jiaqiong, et al. Experimental study on torsional behavior of twin bundle conductor lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3):1423-1431.
- [18] ROSHAN F M, MCCLURE G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electric transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46:1-11.
- [19] MORGAN V T, SWIFT D A. Jump height of overhead-line conductors after the sudden release of ice loads[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1964, 111(10):1736-1746.
- [20] KOLLAR L E, FARZANEH M. Modeling sudden ice shedding from conductor bundles[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2):604-611.
- 作者简介:**  
闫向龙(1996),男,硕士研究生,研究方向为输电线路脱冰跳跃动力特性;  
郭裕钧(1989),男,博士,副教授,研究方向为高电压与绝缘技术;  
黄桂灶(1993),男,博士,助理研究员,研究方向为输电线路脱冰、舞动动力学;  
张血琴(1979),女,博士,副教授,研究方向为高电压与绝缘技术;  
吴广宁(1969),男,博士,教授,研究方向为高电压与绝缘技术。(收稿日期:2022-08-29)