

架空输电线路设计输电线路舞动分析

张琪

国网河南省电力公司许昌供电公司 河南 许昌 461000

摘要: 架空输电线路舞动是电力传输中的严重问题,由覆冰导线在风激励下产生低频大振幅振动。其成因包括覆冰不均匀、风激励及线路参数等。防治对策包括采用舞动试验技术、安装防舞装置、加强气象监测并优化线路设计。这些措施旨在降低舞动故障,确保电力系统的安全稳定运行。通过技术创新和科学管理,可有效应对舞动挑战,保障电力供应的可靠性和稳定性。

关键词: 架空输电线路; 舞动成因; 舞动机理; 防治对策

引言

随着国家经济的快速发展,对电力的需求和质量不断提高,架空输电线路作为电能传输的基础设施,其安全稳定运行对社会的持续发展具有重要意义。然而,架空输电线路长期暴露在自然环境中,极易受到风、冰、雷等环境因素的影响,从而引发各类故障,其中输电线路舞动便是一种严重且复杂的灾害现象。本文将从架空输电线路舞动的原因、机理、影响因素及防治对策等方面进行详细分析。

1 输电线路舞动概述

输电线路舞动,作为一种复杂的自然现象,其本质在于偏心覆冰的导线在特定风环境条件下的剧烈振动。这种振动具有显著的低频特征,振动频率通常介于0.1至3赫兹之间,而其振幅之大,可惊人地达到导线直径的5至300倍。当环境条件满足一即气温徘徊在0至-10摄氏度或更低,风速在2至25米/秒或更高,且风向与输电线路的走向形成45°至90°的夹角时,导线上的不均匀覆冰便成为了舞动的催化剂。

舞动现象一旦发生,其后果不容小觑。它不仅可能导致输电线路的瞬时跳闸,影响电力的连续供应,还可能对铁塔结构造成破坏,如横担部分螺栓的松动甚至脱落。此外,舞动还会对跳线、绝缘子、金具等关键部件产生巨大的冲击力,加速其磨损与老化,进而危及整个电网的安全稳定运行。因此,对于输电线路舞动的防范与治理,已成为电力行业不可忽视的重要课题。

2 舞动成因分析

2.1 覆冰因素

导线覆冰作为舞动现象的关键诱因,其复杂性和多样性不容忽视。首先,覆冰的形成过程受多种环境因素共同作用,包括但不限于温度、湿度、风速以及风向等。具体而言,雨淞因其高附着力和高密度,在低温高

湿环境下迅速积累于导线表面,形成不均匀且厚重的冰层,这种非对称的覆冰状态极大地改变了导线的气动特性,成为舞动的主要驱动力。相比之下,雾凇虽也常见于低温环境,但其轻盈且附着力弱,对导线的影响相对有限。

此外,覆冰的速度和厚度不仅受气象条件控制,还与导线的材质、直径、表面粗糙度等因素相关。例如,光滑表面的导线相较于粗糙表面更难形成稳定的冰层,而特定材质的导线则可能对特定类型的冰有更好的抵抗性。同时,风向的变化也会影响覆冰的分布,侧风或斜风更容易导致导线非均匀覆冰,从而加剧舞动的风险。

2.2 风激励因素

风激励作为导线舞动的直接驱动力,其复杂性体现在风速、风向、风攻角以及风场特性等多个方面。当风向与导线轴线垂直时,风对导线的升力作用达到最大,这是导致导线产生大幅度振动的关键因素。然而,在实际环境中,风向往往不断变化,风攻角也会随之调整,这使得舞动的动态特性更加复杂多变。不同风速下,风对导线的作用机制也有所不同。低风速时,风主要引起导线的微小振动;而随着风速的增加,风对导线的升力和阻力均显著增大,当风速达到某一临界值时,导线将发生共振现象,即大幅度、高频次的舞动。此外,地形地貌、周围建筑物等因素也会影响风场的分布和特性,进而对导线的舞动产生影响。

2.3 线路参数

线路参数作为舞动发生的内在条件,其影响机制同样值得深入探讨。大截面、多分裂导线由于自身结构复杂、扭转刚度大,在覆冰条件下更容易形成偏心覆冰,这种非对称的覆冰状态会显著改变导线的气动特性,使其更容易发生舞动。此外,导线运行张力和档距大小也是影响舞动的重要因素。张力越大,导线对风的抵抗能

力越强；而档距越大，则导线在风中的自由度越大，更容易发生大幅度振动^[1]。分裂导线由于其独特的结构特点，在舞动问题上尤为突出。分裂导线中的各子导线之间存在复杂的相互作用力，这种相互作用力在覆冰和风激励下会进一步放大，导致整个导线系统更容易发生舞动。因此，在设计和运行分裂导线时，需要特别关注其舞动稳定性问题。

3 舞动机理分析

3.1 偏心惯性耦合失稳机理

偏心惯性耦合失稳机理是解释输电线路，尤其是覆冰条件下导线舞动现象的重要理论之一。当导线表面覆盖冰层后，由于冰的不均匀分布或导线自身结构缺陷，导线的重心会发生偏移，不再位于其扭转中心的垂直上方。这种偏心状态在风荷载的作用下被放大，导致导线产生向上的微小位移。随着风速的波动，导线所受的向下惯性力（即重力与风阻力的合力）会周期性地变化，并对扭转中心产生一个非对称的扭转力矩。这一力矩的累积效应将逐渐激发导线的扭转振动，进而转化为横向的舞动。该机理的关键在于偏心与惯性力的相互作用，以及它们如何通过耦合作用导致系统失稳。尽管该理论在解释特定条件下的舞动现象上表现出色，如覆冰导线在风激励下的舞动，但其适用性和精确性仍需通过更多的实验观测和数值模拟来验证和完善。特别是针对不同环境条件、导线类型及覆冰形态下的具体表现，需要开展更加细致的研究。

3.2 稳定性舞动机理

稳定性舞动机理则侧重于从系统稳定性的角度来解释输电线路的舞动现象。它认为，大振幅的舞动是由于系统在某些参数下变得不稳定所导致的。这些参数可能包括导线的扭转刚度、阻尼特性、风荷载的频谱特性等。为了提升系统的稳定性，防止舞动的发生，可以采取多种措施，如增强导线的扭转刚度以减少其对风荷载的敏感度，或者通过安装阻尼装置来吸收振动能量，从而降低振幅。在实际应用中，稳定性舞动机理为防舞动技术的开发提供了重要的理论依据。例如，通过优化导线结构设计，采用新型高强度、高扭转刚度的材料，可以显著提高输电线路的抗舞动能力。同时，结合智能监测技术，实时监测导线的振动状态和环境参数，可以及时发现并预警潜在的舞动风险，为采取应急措施争取时间。

4 防治对策

4.1 采用舞动试验技术

在防治输电线路舞动问题的征程中，舞动试验技术扮演着至关重要的角色。该技术不仅依赖于先进的高精

度模拟软件，还结合了精细的物理模型，能够全方位、多维度地模拟现实世界中复杂多变的自然环境，如强风、多变风向、极端温度以及复杂地形等条件下的输电线路舞动场景。这种高度还原的试验环境，使得研究人员能够更加贴近实际地观察和分析输电线路在不同条件下的舞动特性，为制定精准有效的防治策略奠定坚实基础。

舞动试验不仅局限于测量舞动的基本参数如幅度和频率，更着重于揭示导线与塔架间复杂而微妙的动态交互作用机制。这些交互作用不仅关乎到舞动行为的直接诱因，更深刻影响着输电系统的整体稳定性和安全性^[2]。通过深入分析这些交互力，科研人员能够更准确地把握舞动对输电系统各组成部分的潜在威胁，进而提出针对性的改进措施。

此外，舞动试验技术还具备强大的数据积累与分析能力。通过持续、系统的试验，可以积累大量宝贵的试验数据，这些数据不仅为当前输电线路的舞动问题提供了解决方案，更为未来输电系统的设计与优化提供了宝贵的参考。基于这些数据分析，科研人员能够精确计算出各种抗舞设计所需的关键技术参数，如最优导线张力设置、阻尼器配置方案以及塔架结构优化等，从而为构建更加安全、可靠、高效的输电系统提供强有力的技术支持和科学依据。

4.2 安装防舞装置

在防舞装置的安装策略中，精准匹配不同区域的线路特性与潜在的舞动类型显得尤为关键。例如，在风灾频发且风速变化大的地区，应选择适应性更强、能耗散效率更高的双摆防舞装置，其双摆结构设计的灵活性能够有效应对复杂多变的舞动模式，显著降低舞动带来的损害。而对于舞动幅度相对较小但持续发生的区域，间隔条的应用则能显著增强导线间的稳定性，通过物理约束减少导线间的相对运动，进而抑制舞动的发生。此外，新型粘性阻尼装置的创新引入，不仅丰富了防舞手段，还以其独特的粘滞特性为导线提供了动态的阻力反馈。这种装置能够在导线开始舞动时即时响应，通过连续施加的阻力来消耗舞动能量，从而达到减缓乃至阻止舞动的效果。其材料科学的应用与优化，确保了长期使用的稳定性和可靠性，降低了维护成本。随着信息技术的飞速发展，智能化防舞装置已成为行业发展的新趋势。这些装置集成了物联网、大数据、人工智能等先进技术，能够实时监测线路的风速、风向、温度等环境参数，以及导线的振动频率、振幅等关键数据。基于这些数据，智能防舞系统能够自动分析舞动风险，动态调整防舞策略，实现预防、预警与应急响应的一体化管理。

这种高度自动化的防舞机制，不仅提高了舞动控制的效率和精度，还为电力系统的安全稳定运行提供了强有力的技术支撑。

4.3 加强气象监测

在防治输电线路舞动故障的对策中，加强气象监测是一项至关重要的举措。由于舞动现象往往与极端或特定气象条件紧密相关，构建一个高效、全面的气象监测与预警系统对于预防和控制舞动故障具有不可估量的价值。首先，这一系统需要实现广泛的地理覆盖，特别是针对输电线路沿线区域，确保不留监测死角。通过密集布设的地面气象站、高精度雷达、遥感卫星以及无人机等多元化监测手段，实现对风速、风向、温度、湿度、气压、降水量等关键气象要素的实时、高精度监测。这种多维度的数据收集，为后续的数据分析和预测提供了坚实的基础。在数据分析方面，利用大数据处理技术和先进的气象学算法，构建精准的气象预测模型。这些模型不仅能够分析当前的气象状况，还能基于历史数据、气候变化趋势以及地形地貌等因素，提前预测可能引发舞动的极端气象条件。例如，通过模拟不同风速、风向组合下导线的受力情况，可以评估舞动发生的可能性，并据此设定预警阈值。当预测到可能引发舞动的极端气象条件时，系统应立即向运维人员发出预警信息。这些信息不仅包括气象条件的详细信息，还应包含可能受影响的线路段、建议的应对措施以及紧急联系方式等。通过短信、邮件、APP推送等多种渠道，确保预警信息能够迅速、准确地传达给相关人员。此外，加强气象监测还需要与在线监测系统紧密结合。在线监测系统能够实时监控输电线路的状态，包括导线的振动频率、振幅、温度、张力等关键参数。当监测到异常情况，如导线振动异常、温度骤变等，系统应立即与气象监测数据进行比对分析，判断是否为舞动故障的前兆。一旦确认，立即启动应急预案，包括调整电网运行方式、加强巡视检查、采取临时加固措施等，以最大限度地减少舞动故障对电网安全的影响。

4.4 优化线路设计

在输电线路的防治对策中，优化线路设计扮演着至关重要的角色，它是从源头上提升线路抗舞动能力、保障电网稳定运行的关键环节。这一过程不仅需要深厚的专业知识，还需综合考虑多种因素，以确保设计的合理

性和科学性。首先，设计阶段需全面调研并深入分析地形、地貌、气象条件等自然因素。这些因素对输电线路的稳定运行具有直接且深远的影响。例如，山区、河谷等地形复杂区域，风场特性多变，易引发导线舞动^[1]。因此，在设计时需充分考虑这些区域的特殊性，通过模拟计算、风洞试验等手段，准确评估风荷载对线路的影响，并据此调整导线截面、张力等参数，以增强线路的抗风能力和稳定性。同时，气象条件的复杂性也不容忽视。特别是极端天气事件，如强风、冰雪、雷电等，都可能成为导线舞动的诱因。因此，设计时应结合历史气象数据和未来气候预测，合理确定线路的抗风、抗冰、防雷等级，确保线路在恶劣天气下仍能稳定运行。此外，线路运行要求和经济性也是设计时需要重点考虑的因素。在满足安全稳定运行的前提下，应尽可能降低线路成本，提高经济效益。这要求设计人员在导线选型、塔架结构设计等方面做出科学合理的决策，平衡好安全、经济和技术的关系。在细节设计上，同样需要精益求精。导线悬挂方式、间隔棒布置等看似微小的环节，实则对线路的抗舞动能力有着重要影响。例如，合理的导线悬挂方式能够减少风荷载对导线的直接作用，降低舞动发生的概率；而间隔棒的布置则能有效抑制导线间的相对运动，减少舞动幅度。

结束语

架空输电线路舞动是一种复杂的流固耦合振动现象，其成因复杂、影响严重。为了保障电力系统的安全稳定运行，必须加强对输电线路舞动的研究和防治工作。通过采用舞动试验技术、安装防舞装置、加强气象监测以及优化线路设计等措施，可以有效降低舞动故障的发生概率，确保电力系统的安全稳定运行。同时，还需要不断加强技术研发和人才培养，推动防舞技术的不断进步和创新发展。

参考文献

- [1]陈奕亮.架空输电线路的舞动现象与对策分析[J].集成电路应用,2020,37(03):60-61.
- [2]李健.架空输电线路舞动原理及防治方法分析[J].数字通信世界,2018,(09):237.
- [3]饶祖松.架空输电线路导线舞动的研究及防舞动设计[J].通讯世界,2018,(06):123-124.