

架空输电线路防舞动分析研究

陈志凌

昱安电力设计有限公司 湖南 长沙 410000

摘要：本文深入分析架空输电线路舞动现象。阐述舞动产生机制，包括导线不均匀覆冰与风激励等；探讨舞动类型与特征。分析气象、线路自身及地理环境等影响舞动因素。介绍理论分析、数值模拟、监测与数据分析等舞动分析方法。提出线路设计优化、防舞动装置应用及运行维护管理等防舞动措施，为保障架空输电线路安全稳定运行提供参考。

关键词：架空输电线路；舞动原理；影响因素；分析方法；防舞动措施

引言：架空输电线路作为电力传输的关键设施，其安全稳定运行至关重要。然而，在实际运行中，线路舞动问题时有发生，给电力系统带来严重威胁。舞动不仅会导致导线断股、金具损坏，还可能引发线路跳闸等故障。深入研究架空输电线路防舞动，了解舞动产生原理、影响因素，掌握有效的分析方法和防舞动措施，对于提高线路运行可靠性、保障电力供应稳定具有重要意义。

1 架空输电线路舞动原理

1.1 舞动产生机制

架空输电线路舞动的产生与导线不均匀覆冰、风激励等因素密切相关。在寒冷天气条件下，当空气中的过冷却水滴遇到温度低于冰点的导线时，会在导线上冻结形成覆冰。由于风向、风速的变化以及导线周围气流的影响，导线表面的覆冰往往是不均匀的，会形成特定的形状，如新月形、D形等。这种不均匀覆冰改变了导线的截面形状，使其在风中的空气动力学特性发生变化。当风以一定的速度和角度吹向覆冰导线时，会在导线的上下表面产生交替变化的空气动力，这种空气动力会激发导线的振动。当风的激励频率与导线的固有频率接近时，就会发生共振，导致导线产生较大幅度的舞动。线路的档距、高度、导线的张力等结构参数也会影响舞动的发生和发展。较大的档距和较高的线路架设高度会使导线的固有频率降低，更容易与风的激励频率产生共振，从而增加舞动的可能性。

1.2 舞动类型与特征

架空输电线路常见的舞动类型包括横向舞动、纵向舞动和扭转舞动。横向舞动是指导线在垂直于线路方向的平面内发生的舞动，这是最常见的舞动类型。其特征是舞动频率较低，一般在0.1-3Hz之间，振幅较大，可达数米甚至数十米，对线路的危害也最大。横向舞动通常发生在导线覆冰不均匀且风速适中的情况下，风向与线

路的夹角一般在45°-90°之间。纵向舞动是指导线在线路方向上发生的舞动，其频率相对较高，振幅较小，发生条件与线路的张力变化、风速的脉动等因素有关^[1]。扭转舞动则是导线绕自身轴线发生的扭转振动，这种舞动类型相对较少见，往往与导线的截面形状、覆冰的不对称性等因素密切相关。了解不同舞动类型的特征和发生条件，对于制定有效的防舞动措施具有重要意义。

2 影响架空输电线路舞动的因素

2.1 气象因素

2.1.1 覆冰条件

覆冰是引发架空输电线路舞动的重要因素之一。不同的覆冰类型对舞动的影响存在差异。雨凇覆冰质地坚硬，会在导线上形成较为坚固的冰层，这种覆冰类型更容易使导线的截面形状发生明显改变，增加导线在风中的空气动力学不稳定性，从而提高舞动的可能性。雾凇覆冰结构较为疏松，但累积到一定厚度也会对导线的重量和空气动力特性产生影响。覆冰厚度对舞动的影响更为显著。较薄的覆冰可能只是轻微改变导线的截面形状，而随着覆冰厚度的增加，导线的重量明显增加，覆冰形成的不对称形状更加突出，使得风作用在导线上的空气动力大幅增加，当达到一定程度时，就容易引发导线的舞动。

2.1.2 风力与风向

风力大小对舞动的发生起着关键作用。一般来说，当风速达到一定阈值后，才有可能引发导线舞动。在适中的风速范围内，随着风速的增加，作用在覆冰导线上的空气动力也随之增大，当风力的激励频率与导线的固有频率接近时，就容易发生共振，导致舞动的发生和发展。风向与线路的夹角也会对舞动产生重要影响。当风向与线路的夹角在45°-90°之间时，风对覆冰导线的横向作用力较大，最容易引发横向舞动，这是舞动中危害较

大的类型。而当风向与线路夹角较小时，产生的横向力较小，舞动发生的可能性也相应降低。

2.1.3 温度与湿度

温度和湿度的变化与舞动的发生存在密切关联。温度的变化会影响覆冰的形成和融化过程。在温度接近冰点时，空气中的过冷却水滴更容易在导线上冻结形成覆冰，为舞动的发生创造条件。当温度发生剧烈变化时，覆冰可能会出现不均匀的融化或脱落，这会改变导线的重量分布和空气动力特性，进而可能引发导线的舞动。湿度条件也会影响覆冰的形成。较高的湿度意味着空气中含有的水汽，在低温环境下更容易形成覆冰，增加舞动发生的概率。

2.2 线路自身因素

2.2.1 导线参数

导线材质、直径、张力等参数对舞动有显著影响。不同材质的导线具有不同的物理特性，如弹性模量、密度等，这些特性会影响导线的固有频率。当导线的固有频率与风的激励频率接近时，就容易发生舞动。导线直径的大小会影响导线的截面形状和空气动力特性。较大直径的导线在覆冰后，其截面形状的改变更为明显，受到的空气动力也更大，更容易引发舞动。导线张力的大小会影响导线的固有频率和振动特性。张力较低的导线固有频率较低，更容易与风的激励频率产生共振，从而增加舞动的可能性。

2.2.2 线路走向与档距

线路走向与风向的关系会影响舞动的发生。当线路走向与盛行风向的夹角较大时，如接近垂直，风对导线的横向作用力较大，舞动发生的可能性较高。档距大小对舞动的影响也很重要。较大的档距会使导线的固有频率降低，因为档距越大，导线的跨度越大，其振动特性发生变化，更容易与风的激励频率相匹配，从而增加舞动的概率。而较小的档距则会使导线的固有频率相对较高，减少与风激励频率共振的机会。

2.2.3 杆塔结构与高度

杆塔结构会影响线路的整体刚度和振动特性。不同的杆塔结构对导线的支撑方式和约束条件不同，从而影响导线的固有频率和舞动特性。例如，刚度较大的杆塔结构可能会使导线的固有频率提高，降低舞动的可能性^[2]。杆塔高度的增加会使导线距离地面更远，地面障碍物对风的影响相对减小，风速可能会相对较大，较高的杆塔也会使导线的固有频率降低，这两个因素都可能增加舞动发生的可能性。

2.3 地理环境因素

2.3.1 地形地貌

不同的地形地貌对舞动的影响不同。在山区，地形复杂，风速和风向会受到山体、山谷等地形的影响而发生剧烈变化，容易形成复杂的风场。这种复杂的风场可能会产生不稳定的气流，对覆冰导线产生不规则的激励，增加舞动发生的概率。山区的气候条件也较为复杂，更容易出现覆冰现象，进一步促进舞动的发生。在平原地区，地形相对平坦，风场较为稳定，但在特定的气象条件下，如遇到强风或覆冰，也可能发生舞动。

2.3.2 周边障碍物

周边建筑物、树木等障碍物会对风场产生影响，进而影响舞动的发生。建筑物和树木等障碍物会改变风的流动方向和速度，在障碍物附近形成复杂的气流。当风经过障碍物时，可能会产生涡流、湍流等不稳定气流，这些气流作用在覆冰导线上，可能会引发导线的不规则振动，增加舞动的可能性。障碍物的分布和高度也会影响风场的变化程度，进而影响舞动的发生概率和舞动特性。

3 架空输电线路舞动分析方法

3.1 理论分析方法

理论分析是研究舞动机理的基础方法，主要包括数学模型的建立与动力学分析。数学模型用于描述导线在风荷载和覆冰等外界因素作用下的运动行为。模型通常以偏微分方程或常微分方程的形式表达，考虑导线质量、张力、边界条件以及外部激励等因素。通过简化假设和合理建模，能够揭示舞动的基本特征及其变化规律。动力学分析则基于力学原理，从能量传递、振动频率和稳定性等方面探讨导线的响应特性。该方法可帮助理解舞动的发生条件及发展过程，特别是在不同风速与覆冰状态下，导线可能出现的不稳定运动形式。通过对系统进行模态分析和稳定性判别，可以预测舞动是否可能发生，并为后续治理提供理论依据。

3.2 数值模拟方法

随着计算机技术的发展，数值模拟已成为研究舞动的重要工具。常用的模拟软件包括有限元分析软件和流体动力学仿真平台。这些软件能够构建高精度的导线模型，模拟不同环境条件下的受力状态和动态响应^[3]。在模拟过程中，需要合理设置边界条件、材料属性、初始激励等参数。例如，导线的弹性模量、单位长度质量、初始张力等物理参数应根据实际工程数据设定。风场分布和覆冰形态也需作为外部激励输入模型，以反映真实环境对导线的影响。模拟过程一般包括前处理建模、求解计算和后处理结果分析三个阶段。通过模拟可以直观展示导线在不同工况下的位移、应力和振动情况，有助

于识别舞动风险区域，评估防舞措施的有效性，并优化装置布置方案。相比传统实验方法，数值模拟具有成本低、周期短、适应性强等优势。

3.3 监测与数据分析方法

现场监测是获取舞动实际发生情况的关键途径。随着传感技术和通信手段的进步，越来越多的在线监测设备被应用于输电线路的状态感知。常见的监测手段包括加速度传感器、倾角传感器、视频监控以及无人机巡检等。这些技术可以实时采集导线的振动幅度、频率、方向等信息，记录舞动发生时的动态特征。数据分析方法则用于处理和解读监测所得的大量数据。常用的技术包括时频分析、统计特征提取、模式识别等。通过对历史数据的整理和对比，可以发现舞动发生的规律性，如季节性、地域性和气象相关性。结合人工智能算法，还能实现对舞动趋势的预测，辅助运维人员提前采取应对措施。监测与数据分析的结合不仅提高了对舞动现象的认知水平，也为防舞设计提供了有力支撑。通过不断积累和优化数据模型，可以逐步提升对舞动风险的判断能力，推动防舞技术向智能化、精准化方向发展。

4 架空输电线路防舞动措施

4.1 线路设计优化措施

在线路设计阶段，合理的导线选型与布置对提升抗舞动能力具有重要作用。应根据线路所处区域的气象条件及历史舞动记录，选择抗风性能较好的导线类型。例如，采用分裂导线结构可在一定程度上破坏气流对称性，降低舞动发生概率。优化导线排列方式，如采用倒三角或紧凑型布置，有助于改善空气动力学特性，提高整体稳定性。杆塔结构的设计同样影响线路的抗舞能力。通过增强杆塔的整体刚度与连接强度，可提高其对导线舞动引发的动态冲击的承受能力。在关键部位加强基础固定和构件连接，有助于减少因振动引起的结构松动或疲劳损坏。线路路径规划是防舞设计的重要环节。在选线过程中，应尽量避开易形成强风区或覆冰严重的地形区域，如开阔山谷、山口地带。通过科学规划路径走向，可有效降低舞动风险，提高线路运行的安全性和可靠性。

4.2 防舞动装置应用

在线路投入运行后，安装防舞动装置是一种直接有效的控制手段。相间间隔棒是常用的防舞装置之一，通过限制相邻导线之间的相对运动，减小舞动幅度，从而抑制共振的发生。该装置适用于分裂导线系统，在多风

或多冰地区效果尤为明显^[4]。防舞器种类较多，包括扭转式防舞器、偏心重锤式防舞器等。这些装置通过改变导线系统的质量分布或增加阻尼来削弱舞动能量。不同类型防舞器适用于不同舞动模式，需结合实际线路参数和舞动特征进行合理选用。除主要防舞装置外，一些辅助装置也发挥着积极作用。例如，阻尼线通过吸收振动能量来减弱舞动强度；防振锤则可增强导线局部阻尼，防止微风振动累积引发舞动。这些装置配合使用，能进一步提升线路的抗舞性能。

4.3 运行维护管理措施

除了设计和装置配置，运行阶段的管理同样不可忽视。建立完善的舞动监测与预警系统是及时掌握线路状态的关键。通过部署传感器、视频监控和远程数据传输设备，可实现对导线振动状态的实时感知，并结合数据分析预测潜在风险，为运维决策提供支持。定期巡检和维护工作是保障线路长期稳定运行的基础。运维人员应按照计划对导线、金具、防舞装置进行全面检查，确保各部件处于良好状态。特别是防舞装置的紧固件和连接部位，容易因长期振动出现松动，应及时修复，防止功能失效。针对可能出现的严重舞动情况，还需制定相应的应急预案并开展演练。预案内容应涵盖故障识别、应急处置流程、抢修资源配置等方面。通过模拟突发状况下的响应过程，提高运维队伍的快速反应能力和协同配合水平，最大限度减少舞动造成的损失。

结束语

架空输电线路舞动问题复杂多样，受多种因素影响。通过对其舞动原理、影响因素、分析方法的深入研究，以及采取线路设计优化、防舞动装置应用和运行维护管理等综合措施，可有效降低舞动发生的概率和危害程度。未来，随着技术的不断进步，应进一步探索更先进的防舞动技术和方法，不断提高架空输电线路的抗舞动能力，为电力系统的安全稳定运行提供更有力的保障。

参考文献

- [1] 冯柏辰,吴柏辰.架空输电线路风振特性分析与控制研究[J].电网技术,2023,47(12):118-125.
- [2] 陈思远,周志强.导线防舞动装置结构优化与性能评估[J].高电压技术,2024,50(3):102-108.
- [3] 赵志强,吴建国.输电线路张力调节系统对抗舞动性能影响分析[J].电力系统保护与控制,2024,52(7):65-72.
- [4] 杨继超,张慧,齐奇,等.高压架空输电线路导线防舞动装置安装技术研究[J].电力设备管理,2024(21):276-278.