

架空输电线路设计输电线路舞动分析研究

王 庆

桐庐电力开发有限公司 浙江 杭州 311500

摘 要：本文围绕架空输电线路舞动展开分析研究，首先阐述输电线路舞动的定义、表现形式、物理机制及典型发生场景，明确舞动对线路安全的威胁；接着从气象、线路自身参数、结构设计、地形地貌维度剖析关键影响因素；随后介绍理论分析、数值模拟、试验分析及预测模型四类舞动分析方法；最后提出导线选型、线路参数调整、防舞装置集成、路径规划优化策略，为提升架空输电线路抗舞动能力、保障线路稳定运行提供技术参考。

关键词：架空输电线路；输电线路舞动；舞动影响因素；舞动分析方法；抗舞设计策略

引言：架空输电线路是电力系统重要组成部分，其安全运行直接关系电力供应稳定性。输电线路舞动作为低频大振幅振动现象，易引发线路跳闸、杆塔损坏等问题，严重威胁电网安全。当前，舞动在特定气候与地形条件下频发，传统设计难以有效防控。开展舞动分析研究，探索科学的抗舞设计策略，对提升线路抗舞能力、减少故障损失、保障电力系统可靠运行具有重要现实意义。

1 输电线路舞动的基础认知

1.1 输电线路舞动的定义与表现形式

输电线路舞动是指导线在特定外界条件作用下，发生的低频、大振幅周期性振动现象，振动频率通常在0.1-3Hz之间，振幅可达到导线直径的数十倍甚至上百倍，对线路结构稳定性构成显著威胁。垂直舞动是常见表现形式之一，其特征为导线沿垂直于线路走向的竖直方向做上下周期性运动，振动过程中导线张力随位移变化，易导致杆塔受力不均，长期作用可能引发杆塔倾斜或导线疲劳损伤^[1]。扭转舞动则表现为导线围绕自身轴线的周期性旋转振动，振动时导线各截面扭转角度存在差异，可能造成导线间相互摩擦、磨损绝缘层，同时扭转与垂直运动常伴随发生，形成更为复杂的复合振动形态，进一步加剧线路损坏风险。

1.2 舞动发生的基本物理机制

舞动的发生本质是气流激励、线路共振与能量传递共同作用的结果。气流激励是舞动的初始动力来源，当气流流经导线表面时，若导线表面存在覆冰等非对称形态，会导致气流在导线两侧形成压力差，产生周期性的气动升力与扭矩，推动导线产生振动。线路共振为舞动的持续提供条件，当气流激励频率与导线自身的固有振动频率接近或一致时，线路进入共振状态，振动幅值急剧放大，形成明显舞动现象。能量传递过程则维持舞动的持续性，气流持续提供的气动能量不断补充导线振

动过程中消耗的能量，包括导线自身阻尼消耗、杆塔支撑处摩擦消耗等，使振动能够在较长时间内保持稳定振幅，直至外界激励条件发生改变。

1.3 舞动的典型发生场景与环境关联

舞动的发生与特定地形、气候条件存在紧密关联。从地形角度来看，平原开阔区域、河谷地带及湖泊周边是舞动高发场景，这些区域气流流动顺畅，易形成稳定且持续的气流场，为导线提供持续激励；峡谷地形因气流受地形约束产生加速效应，可能增强气流对导线的激励作用，同样易诱发舞动。从气候条件来看，覆冰天气是舞动发生的关键诱因，导线表面形成的非对称覆冰改变导线气动外形，显著提升气流激励效果；特定风速范围（通常为2-20m/s）为舞动提供适宜动力条件，风速过低难以产生足够气动力量，风速过高则易破坏稳定振动形态；温度处于0℃左右时，既易形成覆冰，又能保证导线材料具备一定弹性，为振动提供良好力学基础，这些气候因素共同作用，使舞动在特定季节与区域频繁发生。

2 输电线路舞动的关键影响因素分析

2.1 气象因素

风速是舞动发生的基础动力条件，过低风速难以产生足够气动力量推动导线振动，过高风速则易打破稳定振动形态，只有处于特定区间的风速才能为舞动提供持续且适宜的激励。风向决定气流与导线的作用角度，当风向与线路走向呈一定夹角时，气流更易在导线表面形成非对称压力分布，增强气动激励效果。覆冰类型与厚度直接改变导线气动外形，非对称覆冰（如新月形、扇形覆冰）会显著加剧气流在导线两侧的压力差，提升气动升力与扭矩，覆冰厚度增加则会进一步放大这种非对称效应，同时改变导线质量与刚度，间接影响其振动特性，为舞动发生创造更有利条件。

2.2 线路自身参数

导线型号决定导线的材料特性与力学性能,不同材质的导线在弹性模量、密度等方面存在差异,这些差异会影响导线的固有振动频率,进而决定其是否易与气流激励频率形成共振。截面尺寸影响导线与气流的作用面积,较大截面尺寸的导线能承接更多气流能量,更易产生明显振动;截面形状的对称性则与覆冰后的非对称效应直接相关,非圆形截面导线覆冰后更易出现不规则形态,加剧舞动风险。分裂数通过改变导线整体气动特性影响舞动,多分裂导线的子导线间会产生气流干扰,可能增强或削弱气动激励效果;导线张力则影响其刚度与固有频率,张力过大或过小都会改变导线的振动响应,适宜张力下导线更易进入共振状态,诱发舞动。

2.3 结构设计因素

杆塔间距决定导线的悬挂跨度,较大间距会使导线在气流作用下产生更大振幅,同时增加导线振动时的张力变化幅度,加剧舞动对线路结构的影响;较小间距虽能限制振幅,但可能因杆塔数量增加提升整体工程复杂度。绝缘子类型影响导线与杆塔间的连接刚度,不同绝缘子的弹性系数存在差异,刚度较低的绝缘子对导线振动的约束作用较弱,可能使舞动振幅进一步放大;刚度较高的绝缘子虽能限制振动,但可能将振动能量传递至杆塔,增加杆塔受力负担。线路档距直接关系导线的振动形态,档距过大时导线中间部位易出现大幅垂向振动,档距过小则可能使导线振动频率偏离气流激励频率,降低舞动发生概率。

2.4 地形地貌因素

平原地区地形开阔,气流流动顺畅且稳定,能为导线提供持续均匀的气动激励。这类区域无复杂地形遮挡,气流在传播过程中不易受到阻碍或分流,难以形成紊乱流场,更易维持稳定的气流状态,进而为导线舞动创造持续且规律的激励条件^[2]。山区地形起伏较大,气流经过山坡、山谷时会发生绕流与加速,形成不规则气流场,可能使导线受到间歇性或不均匀的气动激励,导致舞动形态更复杂。峡谷地形因两侧山体约束,气流会产生明显加速效应,流速提升增强气动激励强度,同时峡谷内气流方向相对固定,易与线路形成稳定作用角度,进一步提升舞动发生概率,且峡谷内的狭管效应可能使舞动持续时间更长、影响更显著。

3 输电线路舞动的分析方法与模型构建

3.1 理论分析方法

理论分析方法以流体力学与结构动力学为核心基础,推导舞动发生与发展的内在机理。从流体力学角度,通过建立气流绕流导线的流场方程,分析不同覆冰

形态下导线表面的压力分布规律,计算气流作用于导线的气动升力、阻力与扭矩,明确气动激励的产生机制与大小。从结构动力学角度,构建导线的振动动力学模型,考虑导线的质量、刚度、张力等参数,推导导线的固有振动频率与振型,分析气动激励与导线固有特性的耦合关系,判断共振发生条件。通过将流体力学计算的气动载荷代入结构动力学模型,形成完整的舞动机理推导体系,为后续分析提供理论支撑,明确各影响因素对舞动的作用规律。

3.2 数值模拟方法

有限元模型在舞动分析中用于构建导线与杆塔的结构模型,将导线离散为多个单元,赋予各单元材料属性、几何参数与边界条件,模拟导线在气动载荷作用下的振动响应,计算不同工况下导线的振幅、应力分布与振动频率,分析线路结构对舞动的承受能力。计算流体力学模型则聚焦气流与导线的相互作用,通过划分流场网格,模拟不同风速、风向及覆冰形态下的流场特性,精确计算导线表面的气动载荷分布,捕捉气流绕流过程中的涡旋脱落、压力变化等细节,为有限元模型提供精准的载荷输入。两种模型协同应用,可完整还原舞动过程中气流激励与结构振动的耦合效应,弥补理论分析难以处理复杂工况的不足。

3.3 试验分析方法

风洞试验通过搭建缩尺导线模型,在风洞中模拟不同风速、风向的气流环境,同时模拟导线覆冰形态,通过传感器采集模型在气流作用下的振动数据,包括振幅、频率、气动载荷等,直观观察舞动现象的产生与发展过程,验证理论分析与数值模拟结果的准确性。覆冰模拟试验则在人工气候室中,通过控制温度、湿度、风速等参数,在导线模型表面形成与实际工况一致的覆冰形态,再结合风洞试验或振动台试验,分析覆冰对导线气动特性与振动响应的影响,获取不同覆冰类型与厚度下的舞动数据,为舞动分析提供真实工况下的试验支撑,确保分析结果更贴合实际工程场景。

3.4 舞动预测模型

舞动预测模型围绕多因素耦合逻辑,实现对舞动发生概率与强度的预测。模型首先整合气象、线路参数、地形等多维度影响因素,建立各因素与舞动发生、舞动强度的关联数据库。通过统计分析历史舞动案例,确定各因素的权重系数,明确关键影响因素的阈值范围。在此基础上,构建预测算法,输入实时或预测的气象数据、线路自身参数与地形条件,计算舞动发生的概率;同时结合数值模拟与试验数据,建立舞动强度与各影响

因素的量化关系,预测舞动发生时的强度等级。该模型可提前判断线路面临的舞动风险,为线路设计与运维提供决策依据,助力提前采取防控措施。

4 基于舞动分析的架空输电线路优化设计策略

4.1 导线选型优化

导线选型优化以适配抗舞动需求为核心,重点关注导线结构对气动特性与振动响应的影响。异形导线通过改变传统圆形截面形态,采用非对称或特殊轮廓设计,减少覆冰时的非对称效应,降低气流作用下的气动升力与扭矩,从源头削弱舞动激励^[3]。防舞导线则通过在导线内部或表面增加特殊结构,如内置阻尼元件、表面设置扰流凸点,增强导线自身阻尼特性,消耗振动能量,抑制振幅放大。设计过程中需结合线路途经区域的气象条件与舞动风险等级,选择适宜的导线结构类型,确保导线在具备足够机械强度与导电性能的同时,拥有良好的抗舞动能力,减少舞动发生概率与振动强度。

4.2 线路参数设计调整

线路参数设计调整聚焦档距、张力、杆塔布置的抗舞动优化,通过改变线路结构参数改变振动特性。档距设计需结合舞动分析结果,避免过大档距导致导线振幅过大,同时兼顾经济性与安全性,在高舞动风险区域适当缩小档距,增强导线振动约束;在低风险区域可合理放大档距,平衡工程成本与抗舞动需求。导线张力调整需通过计算确定最优值,过大张力可能增加导线疲劳损伤风险,过小张力则易使导线固有频率接近气流激励频率,引发共振;需根据导线型号与舞动特性,设定既能避开共振区间,又能保证线路安全运行的张力范围。杆塔布置优化需考虑杆塔间距与排列方式,通过合理布局减少气流在杆塔间的紊乱效应,避免相邻导线振动相互干扰,同时增强杆塔对导线振动的支撑约束,提升线路整体抗舞动性能。

4.3 防舞装置集成设计

防舞装置集成设计需根据线路舞动特性与工况条件,选择适配的相间间隔棒、防舞鞭、失谐摆等装置并优化布置方案。相间间隔棒用于连接多分裂导线,限制子导线间的相对运动,减少气流干扰引发的复杂振动,布置时需根据分裂数与档距长度确定安装间距,确保对

各子导线形成有效约束。防舞鞭通过自身摆动消耗导线振动能量,安装位置需选在导线振动振幅较大区域,如档距中部,根据导线直径与振动频率确定防舞鞭的长度与质量,保证能量消耗效果。失谐摆利用摆体与导线振动的频率差异产生反相位运动,抵消部分振动能量,设计时需精确计算摆长与摆重,使其固有频率远离导线舞动频率,避免共振放大,同时考虑装置对导线张力与风荷载的影响,确保线路安全运行。

4.4 线路路径规划优化

线路路径规划优化以舞动风险评估为基础,结合气象数据、地形地貌条件选择低风险路径。设计前期需开展详细的舞动风险调研,收集线路途经区域的历史舞动案例、风速风向统计数据、覆冰情况与地形特征,建立风险评估模型,划分高、中、低风险区域。路径选择时优先避开高风险区域,如平原开阔地带、峡谷风口、湖泊周边等易形成稳定气流与覆冰的区域;若无法完全避开,需选择风险相对较低的路线,如沿山体背风侧、地形起伏较小区域敷设。同时需考虑路径与气象灾害高发区的距离,避免线路同时面临舞动与其他灾害的叠加风险,通过科学的路径规划从源头降低舞动对线路的威胁,为后续抗舞动设计奠定基础。

结束语

通过对架空输电线路舞动的深入分析,明确了舞动定义、机制、影响因素及分析方法,并提出了针对性的优化设计策略。这些策略从导线选型、参数调整、防舞装置集成到路径规划,全方位提升了线路抗舞动能力。未来,需持续研究新技术、新材料,完善舞动预测与防控体系,以更好地应对复杂环境挑战,保障电力系统安全稳定运行,为社会经济发展提供坚实支撑。

参考文献

- [1]何勇军,孙国磊,张斌,等.架空输电线路舞动风险定量评价方法研究[J].山东电力技术,2025,52(7):97-104.
- [2]赵珊鹏,马爱彪,张友鹏,等.微地形风场下架空输电导线风致振动特性分析[J].中南大学学报(自然科学版),2024,55(4):1567-1580.
- [3]杨洋,万源浩,李孟,等.架空线路舞动特性与监测预警技术研究[J].科技创新与应用,2025,15(26):24-30,35.