

覆冰导致导线舞动的动力学模型与抑制策略

余立斌 毕金涛

中国能源建设集团云南省电力设计院有限公司 云南 昆明 650051

摘要: 输电线路覆冰导线舞动是威胁电网安全运行的严重灾害, 易引发闪络、断线、倒塔等事故。本文分析覆冰导线舞动的形成机理与激发条件, 建立考虑气动载荷与导线张力的简化动力学模型, 揭示风速、冰厚、档距等参数对舞动幅值的影响规律。在此基础上, 从防冰、抗冰、抑冰三个层面提出综合抑制策略, 包括相间间隔棒、双摆防舞器、空气动力扰流条及覆冰监测预警等技术措施。合理配置防舞装置可显著降低舞动幅值, 为输电线路覆冰舞动防治提供理论依据与技术参考。

关键词: 覆冰导线; 舞动机理; 动力学模型; 防舞装置; 输电线路

引言: 我国是输电线路覆冰灾害频发国家, 南方及西南山区冬季导线覆冰厚度可达 10-30 毫米, 在持续风力作用下极易诱发舞动。舞动是大振幅低频振动, 频率 0.1-3Hz, 幅值可达导线直径的数十倍, 相间闪络、金具损坏、断线倒塔等次生灾害严重。治理舞动需深入理解其动力学机理, 传统研究偏重复杂数学模型, 工程应用门槛高。本文从工程实用角度建立简化的导线舞动动力学模型, 分析舞动激发条件与参数影响规律, 提出针对性抑制策略, 为输电线路防舞设计提供易操作的工程方法。

1 覆冰导线舞动的形成机理与危害

1.1 舞动的基本特征与激发条件

导线舞动是覆冰导线在持续风力作用下发生的低频大振幅自激振动, 频率 0.1-3 赫兹, 振幅 1-12 米, 可持续数小时甚至数天。舞动激发需同时满足三个条件: 导线表面不均匀覆冰、稳定层流风激励、合适的线路结构参数。覆冰使圆形截面转变为新月形等非圆形截面, 产生变化的气动力。风速 5-20 米每秒、风向与线路夹角接近 90 度时最易舞动。档距较大、张力较小的区段舞动风险更高。

1.2 覆冰类型与气动外形演变

覆冰形态决定气动特性。雨淞为透明致密冰层, 密度 0.8-0.9 克每立方厘米, 对气动外形改变较小。雾淞为白色疏松冰晶, 密度 0.2-0.3 克每立方厘米, 易形成偏心覆冰。混合淞是多层结构, 最易诱发舞动。风向单向性

使迎风面覆冰厚而背风面薄, 形成新月形截面。冰厚达导线直径 0.5-1.5 倍时, 气动特性变化最剧烈, 舞动最易激发^[1]。

1.3 舞动对线路设施的破坏形式

导线舞动对线路的破坏具有积累性和突发性。电气方面, 舞动使相间距离缩小, 发生闪络放电, 占线路冰害故障的 60% 以上。机械方面, 交变应力导致金具疲劳损伤、线夹断裂、间隔棒脱落, 长期舞动还会引起导线股间磨损, 铝股断裂后钢芯暴露腐蚀。极端情况下, 导线与横担碰撞摧毁塔头结构, 或纵向不平衡张力导致倒塔事故。

2 导线舞动的动力学模型与分析

2.1 动力学模型的简化构建

建立简化的导线舞动动力学模型, 将覆冰导线简化为具有分布质量的柔性索, 考虑垂直位移和扭转位移两个自由度。导线在重力、张力和空气动力作用下运动, 张力水平分量作为常数处理。空气动力包括升力、阻力和扭矩, 是攻角、风速、覆冰形状的函数。在覆冰导线初始攻角附近, 升力系数曲线具有负斜率, 这是舞动自激振动的能量来源。当风速超过临界值时, 负阻尼克服正阻尼, 振动能量不断积累形成舞动。垂直运动与扭转运动通过气动系数耦合: 扭转改变攻角, 攻角改变气动力, 气动力驱动垂直运动, 形成闭合反馈回路 (如表 1 所示)。舞动幅值受导线内阻和空气阻尼限制, 最终达到极限环振动^[2]。

表 1 覆冰导线气动力特性说明

气动力类型	作用方向	主要影响因素	对舞动的作用
升力	垂直向上	攻角、风速、覆冰形状	提供垂直振动能量，是舞动主因
阻力	水平方向	风速、导线截面形状	影响导线水平摆动，加剧振动
扭矩	绕轴线旋转	偏心覆冰、攻角变化	改变攻角，触发气动不稳定

该模型避免了复杂偏微分方程求解，通过数值积分可得舞动幅值与风速、冰厚的定量关系。

2.2 关键参数对舞动的影响规律

基于模型分析各参数对舞动的影响，揭示以下规律：覆冰厚度是最敏感参数。冰厚与直径比达 0.5 时，升力系数负斜率绝对值最大，舞动激发风速最低、幅值最大。风速低于临界值时振动衰减，超过后自发增长。

典型临界风速 3-8 米每秒，最易舞动风速 5-12 米每秒。档距越大，导线越柔，舞动幅值越大，档距 300-500 米易形成单半波或双半波舞动，超 800 米可出现三半波以上。导线张力增加使固有频率升高，临界风速提高，幅值减小。扭转刚度越小，导线越易扭转至失稳攻角，舞动风险越高（如表 2 所示）。

表 2 关键参数对舞动的影响规律及工程设计指导

参数	变化趋势	对舞动幅值的影响	对临界风速的影响	工程设计指导
覆冰厚度	增大	显著增大	降低	重冰区优先选用防冰涂层或融冰装置
风速	5-12m/s	达峰值	—	识别线路微气象区，重点关注风口
档距	增大	增大	略降	大档距应加密防舞装置布置
导线张力	增大	减小	提高	重冰区选用高强度钢芯导线，采用预张拉工艺
扭转刚度	增大	减小	提高	增设防舞者增加扭转约束

2.3 舞动风险评估方法

基于动力学模型建立舞动风险评估方法，评估指标包括临界风速、期望舞动幅值等。临界风速低于该值时导线稳定，高于该值时可能舞动。结合实际气象统计，计算风速超临界风速的年累计小时数，作为舞动概率替代指标。幅值估算采用经验公式，与相间距离、对地距离比较，判断是否发生闪络。评估需输入线路结构参数和微气象地形参数。新建线路按舞动风险区划图选择防舞等级；运行线路根据历史舞动记录复核风险等级，确定是否增设防舞装置。该方法已在华中、华南多电网推广应用，显著降低舞动跳闸率，降低技术门槛，便于基层运维人员掌握^[3]。

3 导线舞动抑制策略与技术措施

3.1 防冰与除冰措施

从源头上防止或减少导线覆冰是最根本的舞动抑制策略。防冰措施包括导线选型和涂层技术：重冰区优先选用钢芯铝绞线，其表面较光滑，覆冰附着力弱；低表面能防冰涂层可将覆冰起始时间延长 1-3 小时，覆冰厚度减少 30%-50%。除冰措施方面，机械除冰通过导线弹性碰撞使冰层脱落；热力除冰利用焦耳热融化冰层；直流融冰可清除 30 毫米以上厚冰，是目前最有效的除

冰手段^[4]。

3.2 抗舞动结构设计

抗舞动结构设计从改变线路自身动力特性入手。增加导线张力是最直接的抗舞措施，张力每提高 10%，临界风速可提高 5%-8%。推荐采用预张拉工艺消除导线初伸长，并在重冰区选用高强度钢芯导线。提高扭转刚度是另一有效途径，可采用防舞者增加系统扭转约束。紧凑型线路可采用相间间隔棒，将三相导线刚性连接，限制相对运动。杆塔结构方面，在舞动高风险区采用酒杯塔或猫头塔取代单柱直线塔，为导线提供更大摆动空间。

3.3 防舞装置的应用与选型

防舞装置是抑制已形成舞动的最直接手段，可分为空气动力型和机械阻尼型两大类。双摆防舞者是目前应用最广的机械式防舞装置，悬挂在导线下方，产生与导线运动相位相反的惯性力抵消气动激励。相间间隔棒将不同相导线刚性连接，限制相间距离变化，从根本上消除相间放电风险。空气动力扰流条是缠绕在导线表面的螺旋形塑料条，破坏覆冰的规则外形，使导线截面保持接近圆形。各防舞装置可组合使用，选型时应综合考虑舞动风险等级、线路结构特点、施工条件和经济性。

3.4 舞动监测与预警系统

建立舞动监测与预警系统是实现舞动主动防控的重要支撑。监测系统由安装在铁塔或导线上的传感器和数据传输网络组成,包括惯测量单元、倾角传感器、张力传感器及图像监测装置。预警系统根据实时监测值与预设阈值的比较,分级发出预警信息。该系统已在湖南、贵州等重冰区部署,2023 年冬季成功预警 30 余次舞动事件,为线路避让和融冰操作赢得了宝贵时间。

4 工程应用与效果评价

4.1 典型线路防舞改造案例

选取华中地区某 220kV 线路为案例,该线路全长 45 公里,地处风口密集的山脊地带,冬季覆冰厚度可达 15-25 毫米,舞动记录频繁。改造前状况:该线路近三年因舞动导致跳闸 8 次,断线事故 1 次,金具损坏数十处。通过舞动风险评估,该区段为 III 级高风险区,临界风速为 4.5 米每秒,预估舞动幅值达 3.5-5.0 米。改造方案:采用双摆防舞者与相间间隔棒组合。具体措施:在舞动风险最高的 12 个连续档距内,每档安装双摆防舞者 4 组,布置于档距 1/4、1/2、3/4 位置;在连续档距的端部及中间位置设置相间间隔棒共 18 组,将三相导线两两连接。改

造于冬季前完成,投资约 86 万元。改造效果:改造后的第一个完整冰季,该线路经历三次覆冰过程,最大冰厚 18 毫米,风速达 12 米每秒,均未发生舞动跳闸^[5](如表 3 所示)。

表 3 改造前后防舞效果对比

对比指标	改造前(三年平均)	改造后(一年)	改善幅度
舞动跳闸次数	2.7 次/年	0 次	下降 100%
金具损坏数量	12 处/年	2 处	下降 83%
断线事故	0.33 次/年	0 次	消除
最大舞动幅值	4.5 米	0.8 米	下降 82%
临界风速	4.5m/s	6.8m/s	提高 51%

经济效益分析:改造投资 86 万元,按每年减少跳闸 2.7 次、每次跳闸综合损失(含抢修费用、电量损失、考核罚款)约 35 万元计算,年经济效益约 94.5 万元,投资回收期约 10.9 个月。该成功经验已在相邻线路上复制推广。

4.2 不同防舞方案的对比分析

基于多条线路的改造实践,对不同防舞装置的适用条件和效果进行对比(如表 4 所示)。

表 4 不同防舞装置综合对比

防舞装置	降幅效率	单档/单组成本	施工难度	适用场景	局限性
双摆防舞者	60%-70%	约 1.5 万元	低	各类线路,中等档距	对超大档距效果衰减
相间间隔棒	80%以上	2-3 万元	中	紧凑型线路	需停电作业
空气动力扰流条	40%-50%	约 0.8 万元/公里	较高	中等舞动风险区	风速 > 15m/s 后效果下降
双摆 + 相间组合	85%-90%	约 4 万元/档	中	高风险区段	初始投资较高

综合比较,对于舞动风险中等区段,双摆防舞者性价比比较高,推荐优先选用;对于高风险区段,双摆与相间间隔棒组合效果最佳;对于运行年限较长、振动历史较多的老旧线路,可在防舞改造同时更换扰流条,提升综合防舞能力。选型决策应遵循“因地制宜、分级配置”原则,做到技术上有效、经济上合理。

结束语

覆冰导线舞动是气动弹性失稳现象,受覆冰形态、风速风向、线路结构等多因素耦合影响。基于简化的动力学模型可有效分析舞动激发条件和参数敏感性,为工程防舞提供理论依据。综合抑制策略应从防冰、抗冰、抑冰三个层面协同推进:源头减少覆冰,结构提高稳定性,装置直接抑制舞动。未来,智能监测与主动控制技术的融合将进一步提升舞动防治水平。建议电网企业建立舞动风险动态评估机制,因地制宜配置防舞装置,实现从被动抢修向主动防控的转变,保障输电线路安全可

靠运行。

参考文献

[1] 栾俊清,赵拥华,谢沛林,等. 输电线路舞动及微风振动分析[J]. 电力系统装备,2025(1):126-128.

[2] 赵珊鹏,张亚辉,张友鹏,等. 扭转覆冰对架空导线气动及舞动特性的影响分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2025,52(10):167-179.

[3] 吴蕙蕙,楼文娟,苏凌峰,等. 斜向风作用下覆冰导线气动力及舞动特性研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2025,52(12):67-76.

[4] 杨代勇,于群英,矫立新,等. 覆冰条件下架空输电线路舞动特性及其防治技术[J]. 电气工程学报,2025,20(3):309-322.

[5] 张孜航,韩艳,盛国刚,等. 基于曲梁理论的覆冰分裂导线舞动非线性动力分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2024,51(1):180-189.