

无人机除雪凇棒撞击覆雪凇导线参数优化研究

吴晨磊¹, 杨昊¹, 吴芊姘¹, 司渭滨², 张璐², 朱明曦²

(1. 西安工程大学 电子信息学院, 西安 710600;

2. 国网陕西省电力有限公司电力科学研究院, 西安 710100)

摘要: 针对现有无人机搭载除雪凇棒撞击导线除雪凇时操作参数选取缺乏依据且效率低的问题, 文中通过仿真计算研究无人机搭载除雪凇棒撞击覆雪凇导线的关键参数。基于有限元软件构建了无人机-除雪凇棒撞击覆雪凇导线力学模型, 采用 Drucker-Prager 本构模型与剪切损伤演化机制模拟了覆雪凇的动态剥离过程, 系统研究了除雪凇棒撞击参数和覆雪凇特性对除雪凇效果的影响规律。结果表明: 撞击速度是决定除雪凇效率的主导因素, 而质量参数的影响相对较弱; 覆雪凇内聚力与厚度的增加会提高导线的初始预紧拉应力与弧垂值, 但由此产生的弹性势能积累使得覆雪凇在低速撞击时更易发生整体脱落, 最终提出了无人机除雪凇作业中除雪凇棒撞击参数的优化配置方案, 对于 20 mm 厚度及以下的覆雪凇导线, 建议除雪凇棒重量采用 2 kg ~ 6 kg, 撞击速度控制在 2 m/s ~ 8 m/s; 对于 20 mm 厚度以上的覆雪凇导线, 推荐使用 1 kg ~ 2 kg 的除雪凇棒配合 1 m/s ~ 2 m/s 的撞击速度, 该方案为优化输电线路除雪凇作业提供了理论指导和技术支撑。

关键词: 覆雪凇导线; 无人机-除雪凇棒; 有限元仿真; 动态剥离过程; 撞击参数优化

DOI: 10.19753/j.issn1001-1390.2026.07.003

中图分类号: TM75

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2026)07-0028-09

Optimization study of parameters of UAV snow removal freezing rod impacting on snow-covered freezing conductor

WU Chenlei¹, YANG Hao¹, WU Qianhua¹, SI Weibin², ZHANG Lu², ZHU Mingxi²

(1. School of Electronic and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710600, China.

2. Electric Power Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd., Xi'an 710100, China)

Abstract: Aiming at the problem of lack of basis and low efficiency in the selection of operating parameters when the existing unmanned aerial vehicle (UAV) carrying a rod impacting the conductor to remove the freezing snow, this paper investigates the key parameters of the UAV carrying a rod impacting the snow-covered freezing snow conductor through simulation and calculation. A UAV-snow freezing rod impact on the snow-covered freezing conductor mechanics model is built based on the finite element software, the dynamic stripping process of the snow-covered freezing is simulated using the Drucker-Prager constitutive model and shear damage evolution mechanism, and the influence law of the impact parameters of the snow freezing rod and the snow-covered freezing characteristics on snow freezing is systematically studied. The results show that the impact speed is the dominant factor in determining the efficiency of freezing snow removal, and the influence of quality parameters is relatively weak; the increase of cohesion and thickness of snow-covered freezing will increase the initial pre-tensioned tensile stress and arc droop value of the conductor, while the resulting accumulation of elastic potential energy makes the snow-covered freezing more prone to fall off as a whole when it is impacted at low speeds, and ultimately puts forward the optimized configuration of the impact parameter of the rod of snow-covered freezing in the freezing operation of the UAV. For the 20 mm thickness and the following snow-covered freezing conductor, it is recommended that the weight of the snow-removing freezing rod is 2 kg ~ 6 kg, and the impact speed is controlled at 2 m/s ~ 8 m/s. For the snow-covered freezing conductor above 20 mm thickness, it is recommended that the 1 kg ~ 2 kg snow-removing freezing rod be

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52007138)

used with the impact speed of 1 m/s ~ 2 m/s. This program provides theoretical guidance and technical support for optimizing the transmission line snow-removing freezing operation.

Keywords: snow-covered freezing conductor, drones-freezing snow removal, finite element simulation, dynamic peeling process, optimization of impact parameters

0 引言

特殊地形与气候条件导致输电线路覆冰问题频发,其中山区复杂地貌区域的冰雪灾害对输电安全构成严重威胁^[1-4]。目前输电线路除冰技术主要分为机械除冰、热力除冰及化学防冰三类^[5-6]。机械除冰(如人工敲击、机器人刮削)虽操作直观,但存在效率低、不可连续跨杆作业、安全风险高及地形适应性差等缺陷^[7];热力除冰(如短路电流融冰、电加热)需中断供电且能耗成本显著,经济性受限^[8-9];化学防冰(如疏水涂层、化学试剂)则面临时效性短和环境污染等问题。以上输电线路除冰技术虽已较为成熟,但在除低密度雪凇时存在资源浪费问题,且停电作业的经济效益较低,因此,亟需寻求一种无需停电且经济高效的输电线路除雪凇技术。

近年来,无人机搭载除雪凇棒撞击导线技术因其具有可不停电工作、受地形限制小、安全系数高、经济高效等优点逐渐被电网工作人员实际运用^[10-11],且在除雪凇工作中表现出了不错的除雪凇效果^[12]。

其工作原理为首先通过防潮绝缘绳将无人机与除雪凇棒连接,随后操控无人机将除雪凇棒的中下部对准导线覆雪凇区域;接着无人机水平后退并悬停完成撞击准备,继而水平加速飞行;当除雪凇棒接近导线时实施紧急制动,利用惯性作用使除雪凇棒甩动撞击导线,通过导线振动实现覆雪凇剥离。然而现有技术仍存在理论指导不足、操作规范缺失等问题,导致除雪凇效率低下且存在操作盲目性。因此,亟需系统研究无人机搭载除雪凇棒撞击除雪凇系统中关键参数的变化规律及其对除雪凇效果的影响机制。

关于机械除冰技术的研究较多,文献[13]提出了一种高频振动除冰技术,利用仿真模型模拟了 500 kV 地线 15 mm 覆冰除冰过程,分析了不同炸药量对除冰效果的影响。文献[14]设计了一款轻量化、智能化的主动除冰机器人,采用铝合金材料对机器人主体结构进行了厚度灵敏度优化,除冰冲击机构利用了撞击块和除冰刀实现了高效率除冰。文献[15]提出了一种基于冲击载荷的机械除冰方法,利用非线性有限元模型模拟了 25 种典型场景

下的除冰过程,涵盖冲击参数、覆冰特征及线路结构的影响。文献[16]利用 Ansys 软件构建了接触网覆冰的精细模型,并从承力索下垂度、振动频率及网格收敛性三个方面验证了模型的可靠性,通过模拟人工敲击的冲击载荷,分析了不同施力位置、载荷强度及覆冰厚度对除冰效果的影响。而国内外关于无人机搭载除雪凇棒撞击导线除雪凇技术的研究较少,文献[17]提到了无人机搭载激光设备和喷火装备除冰技术,介绍了利用红外激光的热效应和喷火的热能融化覆冰的方法。文献[18]提出了风电机组叶片的无人机除冰喷射控制系统,基于 PWM 驱动控制部分的优化以及离散式 PID 算法的控制提高了喷射系统的流量精度和除冰效率。总之,当前针对无人机搭载除雪凇棒撞击导线除雪凇技术的研究多集中于理论层面,尚未对其除雪凇效率的关键参数展开深入研究,且存在两方面显著不足:缺乏系统性试验方法及量化结论。

通过数值模拟方法进行了无人机搭载除雪凇棒撞击导线振动除雪凇计算。基于建立的无人机-除雪凇棒撞击覆雪凇导线力学模型,明确了除雪凇棒质量、撞击速度以及覆雪凇类型、厚度等关键参数对导线除雪凇效果的影响规律,该研究成果对提升输电线路除雪凇效率、保障电力设施安全运行具有重要实践价值。

1 模型建立

1.1 覆雪凇导线模型

钢芯铝绞线结构的导线建模复杂性较高,主要源自多股线材的接触作用。建模过程中需重点考虑关键影响因素,简化次要参数,并协调理论精度与实际可行性。以 110 kV 电压等级常用导线 LGJ-300/40 为研究对象,在大跨度建模时采用整体等效方法,忽略内部结构细节。其材料力学参数依据国家标准《圆线同心绞架空导线》(GB/T 1179-2017)获取,具体数据见表 1。

表 1 LGJ-300/40 导线参数

Tab. 1 LGJ-300/40 conductor parameters

截面积/ mm ²	拉断力/ kN	单位长度质量/ (kg/km)	弹性模量/ GPa	泊松比
339	92.36	1132	73	0.3

导线弧垂 f 的计算方法如下^[19]:

$$f = Kl^2 \quad (1)$$

$$K = \frac{\gamma}{8\sigma_0} \quad (2)$$

式中: K 为弧垂模板值, 其数量级为 10^{-5} , 单位为 $1/\text{m}$; γ 为导线单位长度的重量; σ_0 为导线水平张力; l 为导线的档距。

导线轴向许用拉应力 (σ) 计算方法如下:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

式中: F 为导线的拉断力; A 为导线的截面积。

导线档距长度为 150 m, 在自重及预紧拉应力作用下, 由计算可知其初始弧垂为 1.575 m, 轴向许用拉应力为 272 MPa, 对应的初始预紧拉应力为 59.6 MPa。导线本构模型采用线弹性形式, 阻尼采用瑞利阻尼模型 (其中 $\alpha = 0.1, \beta = 0$)^[20]。覆雪凇截面形状为抛物面状, 覆盖于导线上表面, 其具体几何形态如图 1 所示。

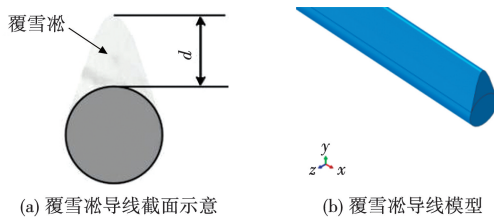


图 1 覆雪凇导线截面及模型

Fig. 1 Freezing snow-covered conductor cross-section and modeling

1.2 覆雪凇脱落判据

Drucker-Prager 模型是在 20 世纪 50 年代由 Drucker 和 Prager 提出的。该模型旨在克服 Mohr-Coulomb 准则在描述岩土材料的屈服和破坏行为时存在的一些局限性。随着时间的推移, DP 模型不断得到改进和完善, 被广泛应用于各种工程领域。DP 模型基于屈服准则和流动法则来描述材料的弹塑性行为^[21]。

屈服准则: DP 屈服准则是一种基于应力不变量的准则, 它考虑了材料的静水压力和偏应力对屈服的影响。其表达式通常为:

$$f = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (4)$$

式中: I_1 为应力张量的第一不变量, 表示静水压力; J_2 为应力偏张量的第二不变量; α 和 k 为与材料摩擦角和内聚力相关的常数。

流动法则: DP 模型通常采用非关联流动法则,

即塑性应变增量的方向与屈服面不垂直。

覆雪凇本构模型采用 DP 模型作为基础框架, 用于模拟不同类型覆雪凇的力学行为。通过精细调整 DP 模型的内聚力参数 (与雪凇层内部结构强度和抗剪切能力直接相关), 可实现对不同覆雪凇类型力学性能的准确描述^[22]。为全面表征覆雪凇的物理力学特性, 需配置以下关键参数: 密度 (表征质量分布)、弹性模量 (刚度指标)、摩擦角 (界面摩擦特性)、流应力比 (塑性变形阶段应力关系)、膨胀角 (塑性流动体积变化) 以及剪切屈服应力 (塑性变形临界值)^[23], 这些参数的精确标定对模拟覆雪凇在风荷载、温度变化及重力作用下的响应至关重要。

针对覆雪凇撞击后的脱落过程, 模型引入了剪切损伤演化机制。该机制通过断裂应变 (材料失效前最大应变阈值) 和失效位移 (损伤至断裂的位移量) 参数, 如表 2 所示, 精确描述材料内部微裂纹萌生、扩展直至宏观断裂的动态过程^[24-25], 覆雪凇脱落的流程框图如图 2 所示。

表 2 剪切损伤演化模型参数

Tab. 2 Parameters of the shear damage evolution model

断裂应变	剪应力比	应变率	失效位移/m
1×10^{-14}	0	0	1×10^{-5}

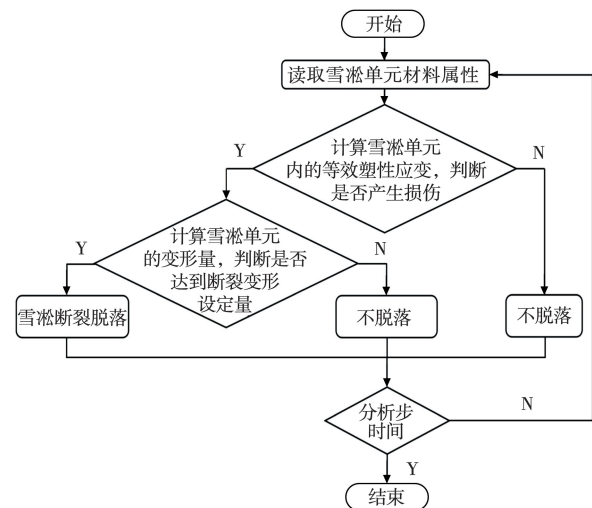


图 2 覆雪凇脱落判据流程图

Fig. 2 Flowchart of freezing snow covering and shedding criteria

1.3 模型荷载施加

选取了干雪、湿雪、软雾凇三种覆雪凇形态, 结合 10 mm、20 mm、35 mm 三种典型覆雪凇厚度构建了分析样本, 覆雪凇模型的具体参数设置见表 3。

表 3 覆雪凇模型参数

Tab. 3 Model parameters for freezing snow covering

覆雪 凇 类型	内聚 力/ kPa	密度/ (kg/m ³)	弹性 模量/ MPa	摩擦 角/ °	流应 力比	膨胀 角/ °	剪切屈 服应力 /Pa
干雪	10	200	13.79	22.53	1	0	5 773
湿雪	20	250	13.79	22.53	1	0	11 547
软雾凇	30	400	13.79	22.53	1	0	17 321

对几何模型不同部位施加相应的材料属性,采用三维八节点缩减积分单元进行实体网格划分,如图 3 所示,模型中使用通用接触设置,法相采用赫兹接触,摩擦系数为 0.1。

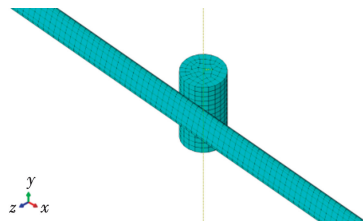


图 3 撞击模型的网格划分

Fig. 3 Mesh delineation for impact modeling

仿真过程分为两个阶段:再平衡找形阶段与撞击阶段。鉴于导线初始弧垂和预紧力 s 仅基于自重计算得出,未计入覆雪凇载荷影响,需先对不同覆雪凇特性下的导线进行找形分析,获取模型的再平衡形态、几何构型及预紧力分布,并以此作为撞击分析的初始条件^[26],撞击模型如图 4 所示。

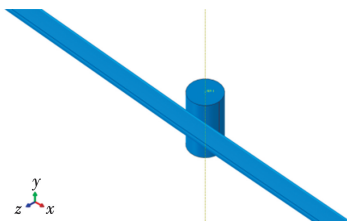


图 4 除雪凇棒撞击覆雪凇导线模型

Fig. 4 Modeling of snow removal freezing rods impacting snow-covered freezing conductor

各阶段边界条件设置如下:

- 1) 找形阶段:静力学分析步,输电线两端固定,模型添加重力加速度,除雪凇棒固定;
- 2) 撞击阶段:显示动力学分析步,输电线两端固定,模型添加重力加速度,除雪凇棒添加初速度。

2 仿真结果与分析

2.1 覆雪凇导线找形

针对 110 kV 输电线路自然下垂形态,采用参数

化建模方法系统分析覆雪凇空间分布、材料属性及厚度参数对导线弧垂位移与轴向拉应力的耦合影响规律。结合数值模拟定量评估覆雪凇荷载作用下导线的非线性力学响应,覆雪凇找形结果为基于冲击动力学的除雪凇棒撞击仿真提供了初始计算状态。

由图 5 和图 6 可知,在相同覆雪凇厚度条件下,随内聚力参数递增(覆雪凇类型由干雪向湿雪、软雾凇演变),导线初始预紧拉应力与弧垂呈现阶梯式增长,表明线路张力逐步增强。此现象源于覆雪凇密度随类型变化显著提升,导致单位体积质量增加。当覆雪凇类型固定时,厚度增加通过线性提升积雪凇体积,使总质量持续累积,进而引发预紧拉应力与弧垂的同步上升。

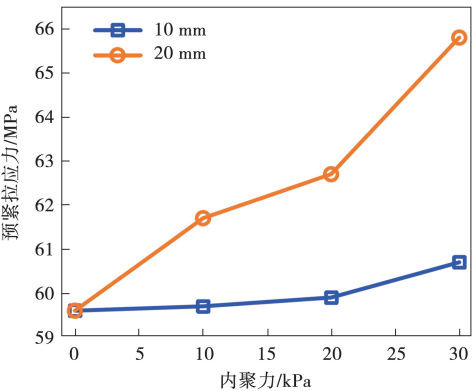


图 5 不同覆雪凇特性下导线预紧拉应力变化

Fig. 5 Variation of conductor preload tensile stress under different characteristics of freezing snow covering

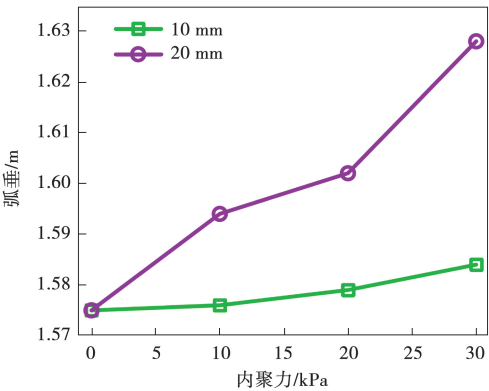


图 6 不同覆雪凇特性下导线弧垂变化

Fig. 6 Variation of conductor arc sag under different snow-covered freezing characteristics

2.2 覆雪凇导线除雪凇效果分析

本研究将影响除雪凇效果的关键参数系统划分为两类进行系统分析:撞击参数包括除雪凇棒质量与撞击速度;覆雪凇特性涵盖内聚力特性与厚度指标。

2.2.1 撞击参数对导线除雪凇效果的影响

在 110 kV 输电线路除雪凇操作中,除雪凇棒位置被精确设定于导线跨中,即弧垂最低点,该布局设计通过力学优化实现除雪凇效率最大化与操作安全性保障,具体空间位姿如图 7 所示。

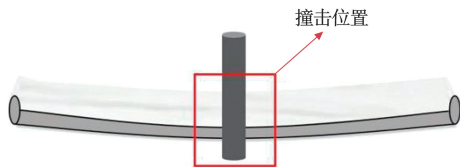


图 7 除雪凇棒撞击位置示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the impact position of the snow removal freezing rod

针对 10 mm 厚软雾凇工况,共设置 16 组除雪凇棒撞击导线仿真参数,除雪凇棒质量选用 2.75 kg、4.12 kg、5.5 kg、6.87 kg 四个等级,撞击速度涵盖 2 m/s、4 m/s、6 m/s、8 m/s 四个梯度。由于除雪凇棒撞击位置位于导线中间,输电导线存在着对称性,因此,除雪凇率计算只需考虑导线一侧的覆雪凇脱落情况。根据覆雪凇模型撞击前后的形状变化,找出导线上覆雪凇脱落的临界点并利用有限元软件的节点坐标查询工具得出覆雪凇脱落距离,再除以档距的一半计算出除雪凇率,以下给出了 2.75 kg 除雪凇棒以 8 m/s 速度撞击输电导线后的除雪凇效果图,见图 8 所示。

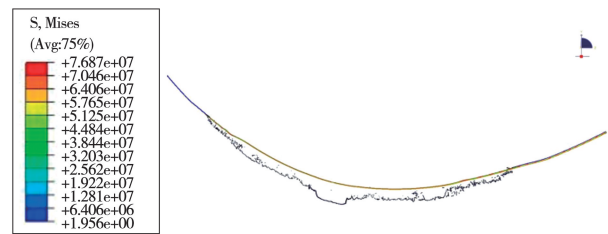


图 8 撞击模型除雪凇效果图
Fig. 8 Impact model snow removal freezing effect drawing

110 kV 输电导线除雪凇率结果见表 4 和表 5。表 4 和表 5 中展示了两种不同棒重下,不同厚度不同内聚力覆雪凇在不同撞击初速度下的除雪凇率。

针对撞击参数,由表 4 和表 5 可知,总共 9 种积雪凇类型中(覆雪凇内聚力-覆雪凇厚度),干雪(内聚力 10 kPa)及厚度 35 mm 的 5 种类型对撞击初速度和撞击棒质量不敏感,而对于剩余的积雪凇类型,随着撞击初速度越大,除雪凇率越高。

表 4 6.87 kg 棒重除雪凇率
Tab. 4 6.87 kg rod weight snow removal freezing rate

覆雪凇类型	内聚力/ kPa	厚度/ mm	飞行速度/(m/s)			
			2	4	6	8
干雪	10	10	100	100	100	100
		20	-	100	100	100
		35	100	100	100	100
湿雪	20	10	-	38.6	67.5	77.3
		20	-	83.7	96	100
		35	100	100	100	100
软雾凇	30	10	17.3	41.7	73.2	80.7
		20	-	94.6	99	100
		35	100	100	100	100

表 5 2.75 kg 棒重除雪凇率
Tab. 5 2.75 kg rod weight snow removal freezing rate

覆雪凇类型	内聚力/ kPa	厚度/ mm	飞行速度/(m/s)			
			2	4	6	8
干雪	10	10	100	100	100	100
		20	-	100	100	100
		35	100	100	100	100
湿雪	20	10	-	28.5	51.2	69.8
		20	-	43	96	100
		35	100	100	100	100
软雾凇	30	10	17.2	41.6	66.8	71.3
		20	-	71.6	98	100
		35	100	100	100	100

由图 9 可知,对于内聚力 30 kPa、厚度 10 mm 的覆雪凇导线,除雪凇棒质量对除雪凇率的影响呈现两阶段特征:在 2 m/s~4 m/s 速度区间,质量变化对除雪凇率无显著影响;在 4 m/s~8 m/s 区间,除雪凇率随质量增大产生 0.2%~13.2% 的增幅。当除雪凇棒质量恒定时,除雪凇效率随撞击速度提升呈现非线性增长特征,增速在高速区段显著趋缓,在棒重为 6.87 kg 的条件下,撞击速度为 8 m/s 时的除雪凇效率比 2 m/s 时提高了三倍以上,这表明无人机飞行速度是影响导线除雪凇效果的关键因素。

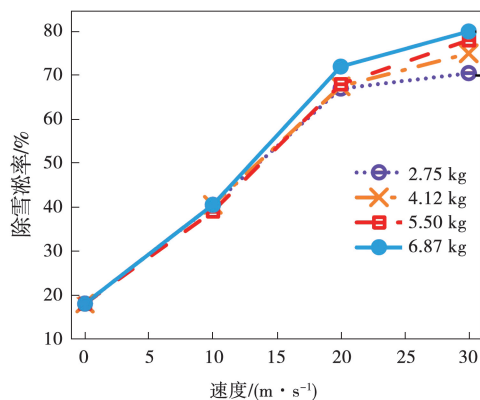


图 9 10 mm 软雾凇导线除雪凇效果对比

Fig. 9 Comparison of the effect of 10 mm soft freezing conductor in removing freezing snow

2.2.2 覆雪凇特性对导线除雪凇效果的影响

以下将从覆雪凇厚度和覆雪凇类型两个方面入手研究其对导线除雪凇效果的影响规律。图 10、图 11 为覆雪凇内聚力和除雪凇率之间的关系,其中图 10 的除雪凇棒质量为 6.87 kg,覆雪凇厚度为 20 mm;图 11 的除雪凇棒质量为 6.87 kg,覆雪凇厚度为 10 mm。

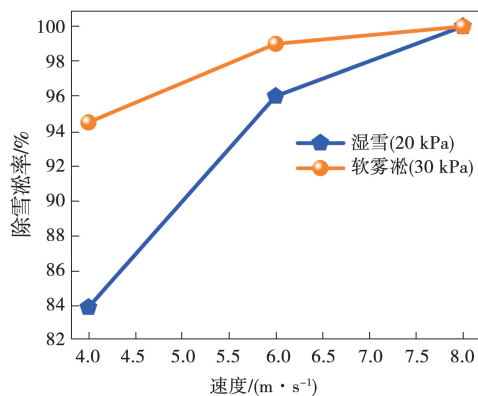


图 10 6.87 kg 除雪凇棒撞击 20 mm 覆雪凇导线除雪凇效果对比

Fig. 10 Comparison of the effect of 6.87 kg freezing snow removal rod hitting 20 mm snow-covered freezing conductor in removing freezing snow

图 10 与图 11 表明,对于 10 mm 和 20 mm 覆雪凇厚度工况,在除雪凇棒质量恒定条件下,覆雪凇内聚力从 20 kPa 增至 30 kPa 时除雪凇效率提升。其机理可解释为:软雾凇因密度更高导致同厚度下质量更大,致使导线找形后形成更大的初始弧垂和

轴向拉应力,由此积聚更高的弹性势能。当受到相同速度撞击时,软雾凇导线因势能释放产生更剧烈的失稳摆动,通过增强的振荡效应实现更高效的覆雪凇剥离。

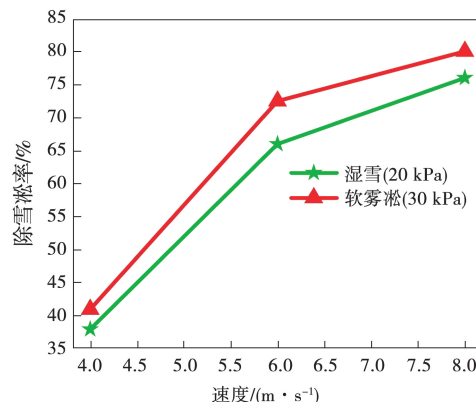


图 11 6.87 kg 除雪凇棒撞击 10 mm 覆雪凇导线除雪凇效果对比

Fig. 11 Comparison of the effect of removing freezing snow by 6.87 kg freezing rod and 10 mm snow-covered freezing conductor

图 12、图 13 揭示了覆雪凇厚度与除雪凇效率的非线性相关性,其中图 12 对应除雪凇棒质量为 6.87 kg,覆雪凇内聚力为 20 kPa 的工况;图 13 则为保持相同撞击质量,覆雪凇内聚力增至 30 kPa 的工况。

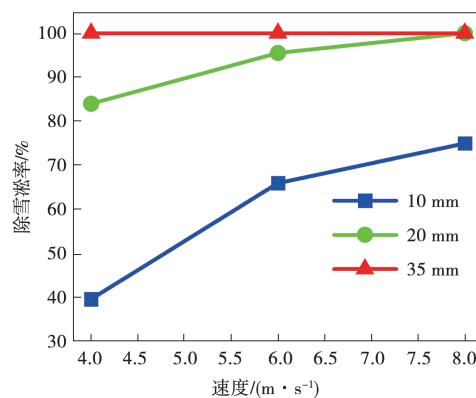


图 12 6.87 kg 除雪凇棒撞击湿雪导线除雪凇效果对比

Fig. 12 Comparison of the effect of a 6.87 kg freezing rod hitting a wet snow guide line to remove freezing snow

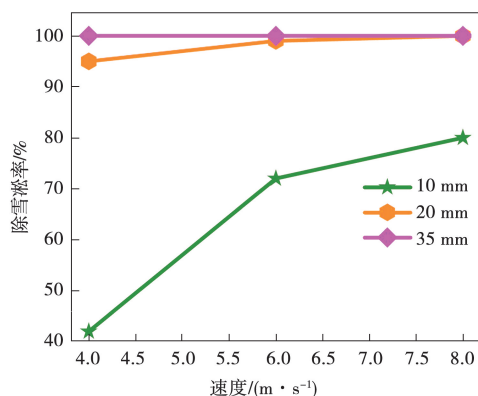


图 13 6.87 kg 除雪冰棒撞击软雾凇
导线除雪凇效果对比

Fig. 13 Comparison of the effect of the 6.87 kg
freezing rod on the soft freezing conductor
in removing freezing snow

由图 12、图 13 可知,在不同覆雪凇厚度工况下,除雪凇效率随厚度增加呈正相关趋势。其机理在于:覆雪凇质量随厚度增长显著提升,致使覆雪凇导线找形后产生更大初始弧垂与轴向拉应力,系统弹性势能储备随之增加。当覆雪凇类型为软雾凇且承受同等撞击速度时,势能释放引发更剧烈的导线失稳振荡,通过增强的振荡效应实现更显著的覆雪凇剥离效果。通过以上的仿真结果发现覆雪凇厚度和内聚力的增大均会使覆雪凇导线积聚较大的弹性势能,同时导线受撞击后的失稳能力增强,从而导线可以通过自身的强烈振荡使得大量覆雪凇脱落。

2.3 导线除雪凇撞击参数匹配研究

基于撞击参数和覆雪凇特性对导线除雪凇效果的影响规律,将除雪凇率达到 80% 及以上和导线轴向拉应力小于 272 MPa 作为判据,通过仿真计算制定了无人机搭载除雪冰棒的最优配置方案(见表 6),该方案可为复杂覆雪凇环境下的输电线路除雪凇作业提供科学、高效的实施指导。

以 10 mm 软雾凇为例,当除雪冰棒重量为 6.87 kg,撞击速度为 8 m/s 时,其除雪凇率达到了 80.7%,导线轴向最大拉应力为 73.55 MPa,如图 14 所示,符合上述判据要求。因此,对于 < 10 mm 软雾凇的轻雪凇区,给出无人机搭载除雪冰棒的配置建议为 4 kg ~ 6 kg 的除雪冰棒和 6 m/s ~ 7 m/s 的撞击速度。

表 6 除雪冰棒撞击参数配置建议

Tab. 6 Snow removal freezing rod impact parameter
configuration suggestions

覆雪凇 类型	厚度 /mm	除雪冰 棒长度 /m	除雪冰 棒重量/ kg	撞击 位置	撞击 速度/ (m/s)
干雪	轻雪凇区	< 10	1	2 ~ 3	导线跨中 2 ~ 3
	中雪凇区	10 ~ 20	1	2 ~ 3	导线跨中 3 ~ 4
	重雪凇区	> 20	1	1 ~ 2	导线跨中 1 ~ 2
湿雪	轻雪凇区	< 10	1	3 ~ 4	导线跨中 4 ~ 6
	中雪凇区	10 ~ 20	1	4 ~ 5	导线跨中 5 ~ 6
	重雪凇区	> 20	1	1 ~ 2	导线跨中 1 ~ 2
软雾凇	轻雪凇区	< 10	1	4 ~ 6	导线跨中 6 ~ 7
	中雪凇区	10 ~ 20	1	4 ~ 6	导线跨中 6 ~ 8
	重雪凇区	> 20	1	1 ~ 2	导线跨中 1 ~ 2

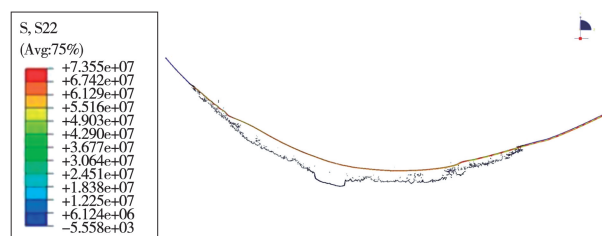


图 14 6.87 kg 除雪冰棒撞击 10 mm
软雾凇导线拉应力云图

Fig. 14 Tensile stress map of 10 mm soft freezing
conductor impacted by 6.87 kg snow removal rod

3 结论

基于 DP 弹塑性本构模型,结合剪切损伤演化机制,对无人机搭载除雪冰棒撞击输电导线的动态过程进行数值模拟,主要得出以下结论:

1) 覆雪凇内聚力参数的递增(即覆雪凇类型从干雪向湿雪、软雾凇转变)及覆雪凇厚度的增大,均会导致导线初始预紧拉应力与弧垂值显著上升。

2) 除雪冰棒质量增加可提升线路除雪凇效率,但其影响程度随撞击速度提高呈递减趋势。当撞击速度达到临界阈值时,质量增量不再产生显著除雪凇效果增益。研究表明,撞击速度是决定线路除雪凇效能的关键控制参数。

3) 覆雪凇密度与厚度的增加均通过质量累积效应导致线路弧垂和拉应力上升,进而增强系统弹性势能储备,最终促进雪凇层脱离。

4)通过综合考量除雪凇率与导线轴向拉应力双重要求建立了评价体系,提出了无人机搭载除雪凇棒撞击110 kV覆雪凇输电线路的最优配置方案,对于20 mm厚度及以下的干雪导线,除雪凇棒重量建议值为2 kg~3 kg,撞击速度为2 m/s~4 m/s;对于20 mm厚度及以下的湿雪导线,除雪凇棒重量建议值为3 kg~5 kg,撞击速度为4 m/s~6 m/s;对于20 mm厚度及以下的软雾凇导线,除雪凇棒重量建议值为4 kg~6 kg,撞击速度为6 m/s~8 m/s;对于20 mm厚度以上的三种覆雪凇导线,除雪凇棒重量建议值为1 kg~2 kg,撞击速度为1 m/s~2 m/s。其方法框架可为其他电压等级的应用提供技术参照。

参 考 文 献

- [1] 谢静,肖韩,刘志坚,等. 基于多模态改进残差网络的输电线路绝缘子覆冰类型识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2026, 54(1): 130-142.
XIE Jing, XIAO Han, LIU Zhijian, et al. A multimodal enhanced ResNet-based method for identifying icing type on transmission line insulators[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(1): 130-142.
- [2] 刘春城,姜涛,王梦. 四分裂导线输电线路覆冰舞动控制研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(24): 1-13, 23.
LIU Chuncheng, JIANG Tao, WANG Meng. Study on galloping control of iced quad-bundle conductor transmission lines[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(24): 1-13, 23.
- [3] 邓颖,蒋兴良,张志劲,等. 基于DEM分析的输电线路覆冰微地形分类识别及验证方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 4971-4980.
DENG Ying, JIANG Xingliang, ZHANG Zhijin, et al. Icing micro-terrain identification and verification method of transmission line based on DEM analysis[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4971-4980.
- [4] 王传琦,伍历文,邓志斌,等. 时间累积架空输电线路覆冰预测模型与算法综述[J]. 中国电力, 2024, 57(6): 153-164, 234.
WANG Chuanqi, WU Liwen, DENG Zhibin, et al. Review of icing prediction model and algorithm for overhead transmission lines considering time cumulative effects[J]. Electric Power, 2024, 57(6): 153-164, 234.
- [5] 沈锋,艾永俊,周朝荣,等. 输电线路防冰及除冰技术研究现状[J]. 云南电力技术, 2023, 51(1): 18-22, 26.
SHEN Feng, AI Yongjun, ZHOU Chaorong, et al. Research status of transmission line anti-icing and de-icing technology[J]. Yunnan Electric Power, 2023, 51(1): 18-22, 26.
- [6] 张璐,李新民,李伟,等. 特高压直流线路带电融冰系统研制及工程应用[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 214-222, 228.
ZHANG Lu, LI Xinmin, LI Wei, et al. Development and project application of live Ice-melting system for UHVDC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 214-222, 228.
- [7] 姚磊,迟兴江,张雷,等. 基于小型移动机器人的高压架空输电线路融冰技术[J]. 电测与仪表, 2024, 61(12): 34-41.
YAO Lei, CHI Xingjiang, ZHANG Lei, et al. Melting technology for high-voltage overhead transmission lines based on small mobile robot[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(12): 34-41.
- [8] 赵威,彭巍屹,周非凡,等. 输电线路覆冰机理、预测及融冰技术研究综述[J]. 浙江电力, 2026, 45(2): 126-136.
ZHAO Wei, PENG Weiyi, ZHOU Feifan, et al. A review of research on transmission line icing mechanisms, prediction, and deicing technology[J]. Zhejiang Electric Power, 2026, 45(2): 126-136.
- [9] 潘浩,周仿荣,耿浩,等. 双导体加热地线融冰电流与融冰时间计算方法[J]. 智慧电力, 2025, 53(3): 62-68.
PAN Hao, ZHOU Fangrong, GENG Hao, et al. Calculation method for de-icing current and de-icing time of dual-conductor heating ground wire[J]. Smart Power, 2025, 53(3): 62-68.
- [10] 马钺,兰璐. 应用于超(特)高压输电线路智能巡检无人机的技术研究[J]. 电气应用, 2024, 43(7): 21-26.
MA Zheng, LAN Lu. Technical research on intelligent inspection drones applied to ultra-high voltage transmission lines[J]. Electrotechnical Application, 2024, 43(7): 21-26.
- [11] 付子峰,吴启进,刘继承,等. 人工智能除冰技术在输电线路中的应用[J]. 湖北电力, 2018, 42(3): 15-18.
FU Zifeng, WU Qijin, LIU Jicheng, et al. Application of AI deicing technology to power transmission lines[J]. Hubei Electric Power, 2018, 42(3): 15-18.
- [12] 电力十足的小冠. 全网最详解:电力架空线路-除冰技术全景探析与实战应用[EB/OL]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/684578047>, 2024-02-29/2025-05-26.
A small crown full of electricity. The most detailed explanation of the whole network: power overhead lines - panoramic analysis and practical application of de-icing technology [EB/OL]. <https://zhuanlan.zhihu.com/p/684578047>, 2024-02-29/2025-05-26.
- [13] 安响,吴继伟,童贤德,等. 输电线路机械震动除冰装置的研究与运用[J]. 电气技术与经济, 2024(12): 83-86.
AN Yang, WU Jiwei, TONG Xiande, et al. Research and application of mechanical vibration de-icing device for transmission lines[J]. Electrical Equipment and Econo-

- my, 2024(12): 83-86.
- [14]李哲, 谭志超, 刘良才, 等. 新型配网线路主动除冰机器人设计[J]. 机械设计与制造工程, 2025, 54(1): 55-60.
LI Zhe, TAN Zhichao, LIU Liangcai, et al. Design of a new active deicing robot for power lines[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2025, 54(1): 55-60.
- [15]JI K, LIU B, CHENG Y, et al. Evaluation and optimization of a shock load de-icing method for transmission lines with combined ice failure criteria[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 165: 102818-102818.
- [16]吴磊, 徐梦楠, 张华鹏, 等. 电气化铁路接触网冲击振动除冰仿真分析[J]. 铁道学报, 2025, 47(1): 47-53.
WU Lei, XU Mengnan, ZHANG Huapeng, et al. Simulation analysis of impact vibration de-icing for overhead catenary of electrified railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2025, 47(1): 47-53.
- [17]吴迪. 智能除冰技术在输电线路中的应用[J]. 电子技术, 2024, 53(11): 258-259.
WU Di. Application of intelligent de-icing technology in transmission lines[J]. Electronic Technology, 2024, 53(11): 258-259.
- [18]王一博, 韩巧丽, 刘海洋, 等. 风电机组叶片的无人机除冰控制系统设计与优化[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 641-647.
WANG Yibo, HAN Qiaoli, LIU Haiyang, et al. Design and optimization of UAV deicing control system for wind turbine blades[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(7): 641-647.
- [19]田利, 刘凯铭, 张思遥, 等. 基于 ABAQUS 的输电线找形与分裂导线模拟研究[J]. 山东电力技术, 2024, 51(9): 1-8.
TIAN Li, LIU Kaiming, ZHANG Siyao, et al. Form-finding method of transmission line and the simulation of bundle conductor based on ABAQUS[J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(9): 1-8.
- [20]张佳沁, 杨文刚, 杨国林, 等. 输电线路脱冰动力响应及脱冰方式对塔线系统影响的分析[J]. 高电压技术, 2025, 51(5): 2458-2467.
ZHANG Jiaqin, YANG Wengang, YANG Guolin, et al. Analysis of ice-shedding dynamic response on transmission line and ice-shedding mode effect on tower-line system[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2458-2467.
- [21]王磊佳, 祝明桥, 董嘉睿. 基于改进 Drucker-Prager 准则的 GFRP 管约束高强混凝土短柱单轴压缩分析模型[J]. 应用力学学报, 2023, 40(2): 397-404.
WANG Leijia, ZHU Mingqiao, DONG Jiarui. The uniaxial compression analysis model of high-strength concrete constrained by GFRP tubes based on improved Drucker-Prager criterion[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(2): 397-404.
- [22]LEE H J. A new indentation model for snow[J]. Journal of Terramechanics, 2009, 46(1): 1-13.
- [23]张璐珂, 张峰, 赵国浩. FRP 约束混凝土柱的修正 Drucker-Prager 模型[J]. 复合材料科学与工程, 2023(10): 60-68, 86.
ZHANG Luke, ZHANG Feng, ZHAO Guohao. Modified Drucker-Prager model for circular concrete columns confined with FRP[J]. Composites Science and Engineering, 2023(10): 60-68, 86.
- [24]董建鹏, 王时龙, 周杰, 等. 基于修正 GTN 模型的不锈钢管剪切过程韧性断裂准则研究[J]. 工程力学, 2021, 38(3): 239-247.
DONG Jianpeng, WANG Shilong, ZHOU Jie, et al. The ductile fracture criterion of stainless-steel tubes in the shearing process based on modified GTN model[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(3): 239-247.
- [25]范沁红, 高宏伟, 楚志兵. 金属材料损伤理论模型的研究综述[J]. 太原理工大学学报, 2023, 54(2): 225-234.
FAN Qinrong, GAO Hongwei, CHU Zhibing. Research review on the damage theoretical model of metal materials[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, 54(2): 225-234.
- [26]李劲松, 王帅, 关少平, 等. 导线覆冰脱冰响应及脱冰高度预测模型研究[J]. 电测与仪表, 2025, 62(8): 75-84.
LI Jinsong, WANG Shuai, GUAN Shaoping, et al. Research on response of conductor icing and de-icing and prediction model of de-icing height[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(8): 75-84.

收稿日期: 2025-04-28; 修回日期: 2026-02-23

作者简介:

吴晨磊(2001—),男,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术。E-mail:chenllywu619@126.com

杨昊(1988—),男,通信作者,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为高电压工程新技术。
E-mail:yanghao@xpu.edu.cn

吴芊嫻(2001—),女,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术。

司渭滨(1980—),男,博士,高级工程师,研究方向为状态检测与评估技术。

张璐(1987—),男,博士,高级工程师,研究方向为输变电设备智能运检技术。

朱明曦(1990—),男,博士,高级工程师,研究方向为高压设备沿面放电。

(编辑 杜景飞)