

非均匀覆冰下输电导线的非均匀脱冰动力特性

王 爽^{1,2}, 马天缘^{1,2}, 唐 波^{1,2}, 刘 铃^{1,2}, 江 娜³, 姚俊伟⁴

(1. 三峡大学湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 湖北省超能电力有限责任公司, 武汉 430051; 4. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 非均匀覆冰和脱冰跳跃对输电线路安全运行构成了极大的威胁, 在微地形、微气象区域尤为显著。为此, 文中根据线路非均匀覆冰特点, 设计了两种典型的非均匀覆冰形式, 运用有限元方法建立了连续五档覆冰输电导线脱冰跳跃分析模型, 计算得到了非均匀和均匀覆冰导线在不同非均匀脱冰形式下的动力特性, 探究了档距、高差、档数等参数对非均匀覆冰条件下导线非均匀脱冰的最大跳跃高度及其发生位置的影响规律。结果表明: 在不同的覆冰形式下, 导线中部脱冰时的跳跃高度总是最大, 且非均匀覆冰条件下导线的脱冰动力响应更加剧烈; 导线最大跳跃高度所在位置受脱冰形式的影响显著, 总体来看, 非均匀脱冰时最大跳跃高度位置主要分布在 0.39~0.62 倍档距范围内。研究结论可为输电线路抗冰设计和除冰方案制定提供参考。

关键词: 输电线路; 非均匀覆冰; 非均匀脱冰; 最大跳跃高度; 动力特性

Dynamic Characteristics of Non-uniform Ice-shedding of Transmission Lines Under Non-uniform Icing

WANG Shuang^{1,2}, MA Tianyuan^{1,2}, TANG Bo^{1,2}, LIU Ling^{1,2}, JIANG Na³, YAO Junwei⁴

(1. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. Hubei Chaoneng Electric Power Co., Ltd., Wuhan 430051, China; 4. State Grid Hubei Yichang Power Supply Company, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: Non-uniform icing and ice-shedding posed a significant threat to the safe operation of transmission lines, especially in micro-topography and micro-meteorological areas. Therefore, based on the characteristics of non-uniform icing on the line, this paper designed two typical forms of non-uniform icing. The finite element method was employed to establish the ice-shedding jump analysis model for continuous five-span iced transmission lines. The dynamic characteristics of non-uniform and uniform iced conductors under different non-uniform ice-shedding forms were calculated. The influence of parameters such as span, height difference, and span number on the maximum jump height and position of non-uniform ice-shedding of conductors under non-uniform ice-shedding conditions was explored. The result indicate that under different icing forms, the jump height of ice-shedding in the middle of the conductor is always the largest. Moreover, non-uniform icing conditions result in a significantly more severe dynamic response of ice-shedding. The form of ice-shedding significantly affects the position of the conductor's maximum jump height. In general, the maximum jump height during non-uniform ice-shedding is primarily found at 0.39 to 0.62 times the span. The research conclusions can provide reference for the anti-icing design of transmission lines and the formulation of de-icing schemes.

Key words: transmission line; non-uniform icing; non-uniform ice-shedding; maximum jump height; dynamic characteristics

0 引言

线路覆冰是指雨滴在接触到寒冷的空气后, 凝结在输电线路, 导致电线被大范围冰冻的现象。线路在低温、潮湿的自然环境中容易形成覆冰, 特别是在微地形、微气象区域极易形成不均匀覆冰, 线路覆冰严重威胁电网的安全运行。中国地域广阔, 气候变化多样, 是全球输电线路覆冰现象最为严重的地区之一。在气温上升、

基金项目:湖北省重点研发计划(2020BAB110); 湖北省输电线路工程技术研究中心(三峡大学)开放基金(2022KXL04).
Project Supported by Key Research and Development Projects of Hubei Province(2020BAB110), Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University(2022KXL04).

自然风力或外部力量的影响下，线路上的覆冰会发生脱落，引发线路大幅振荡，导致输电线路安全间隙不足，极易发生闪络、跳闸等安全事故；线路覆冰脱落还会增大档间的不平衡张力，损坏线路上的绝缘子串和金具，极端情况下甚至可能造成断线、倒塔等事故，引发线路大范围停电从而影响电力系统的安全运行^[1-5]。因此为了保证电力系统的安全运行，需要对输电线路脱冰后的动力特性进行研究，探明不同参数对脱冰跳跃动力特性的影响规律。

目前，对输电线路脱冰动力特性的研究主要有试验研究和数值模拟两种方法。在试验研究方面，Mogran 等^[6]将覆冰重量等效为集中荷载来模拟覆冰和脱冰，并利用这种方法进行试验测量了导线的脱冰跳跃高度。Jamaledine 等^[7]在实验室搭建了输电线路缩尺模型，用来研究线路脱冰跳跃高度的变化规律。国内陈勇等^[8]分别搭建了长 235 m 的孤立档和连续 2 档试验模型，研究导线在均匀脱冰和非均匀脱冰形式下的动力特性。谢献忠等^[9]以实际线路为原型搭建了 1:20 的两档塔线体系缩比模型，采用集中荷载法模拟覆冰并利用程序控制覆冰脱落，模拟了 6 种不同的脱冰工况，结果表明整档同时脱冰最为危险。王璋奇等^[10-11]研制了脱冰实验系统，并利用该系统研究了不同非同期脱冰方式对导线动张力的影响，发现从档中往两端脱冰在所有脱冰方式下产生的动张力最大。随着计算机技术的快速发展，有限元仿真软件越来越成熟，同时由于数值模拟相对于试验研究具有成本低廉、计算效率高等优点，因此众多研究人员利用数值模拟技术分析输电线路在脱冰过程中的动力特性。Kollár 等^[12-13]利用 ADINA 软件建立了分裂导线模型，研究了单根子导线在脱冰过程中的动力响应。鲁元兵等^[14]模拟了导线不均匀脱冰的全过程，发现不均匀脱冰会使绝缘子串张力增大，且会使导线产生不平衡张力。王黎明等^[15]研究了导线在随机非均匀脱冰下的跳跃规律，证明了非均匀脱冰比均匀脱冰时的脱冰动力响应更加剧烈，且非均匀脱冰时最大跳跃高度点不一定位于跨中。楼文娟等^[16]研究了不同参数组合对导线脱冰跳跃动力响应的影响，考虑局部非均匀脱冰效应，改进了脱冰跳跃高度计算公式。张宇卓等^[17]建立连续档有限元模型，分析了不同参数对不均匀脱冰跳跃高度的影响规律，提出不均匀脱冰跳跃高度计算公式。此外，晏致涛、许燕飞等^[18-20]针对均匀覆冰的导线，在不同非均匀和非同步脱冰情况下，研究了其跳跃动力特性，并分析了各参数对脱冰跳跃高度变化的影响规律。对于非均匀覆冰，Zhou 等^[21]提出了一种单跨和多跨导线在不均匀覆冰下不平衡张力的数值计算方法，研究了不同参数对导线不平衡张力的影响。Wu 等^[22]提出了均匀覆冰和非均匀覆冰的孤立档输电线路在脱冰后动力响应的模拟方法，并利用该方法研究了输电线路的动力响应。王金锁等^[23]建立了单档导线模型，研究导线在不同覆冰形式下的脱冰动力特性，结果表明最大脱冰跳跃高度与覆冰形式密切相关，非均匀覆冰时跳跃高度可能更大。郭裕钧等^[24]研究了大档距、大高差线路在不同非均匀覆冰形式下的脱冰动力响应，探究不同参数对导线最大跳跃高度的影响规律，结果表明非均匀覆冰形式对导线脱冰跳跃动力特性影响显著，且非均匀覆冰时导线脱冰最大跳跃高度点可能不在档距中点。

综上所述，国内外对于非均匀覆冰、非均匀脱冰下导线的脱冰动力响应研究已得到一定结论。但以上研究大多集中在导线均匀覆冰下的非均匀脱冰特性或非均匀覆冰下的均匀脱冰特性，现有输电线路设计规范也只考

考虑均匀覆冰的情况，缺乏对输电线路非均匀覆冰下非均匀脱冰动力特性的深入研究。实际工程中，输电线路不可避免的会跨越高山、峡谷等区域，这些区域往往由于气候多变、环境复杂，存在微地形和微气象的特点，输电线路覆冰常呈现同一档内导线覆冰厚度随海拔高度增加而增大的非均匀覆冰形式，同时这些区域经常出现覆冰局部脱落的现象。因此，为给输电线路的抗冰设计和除冰方案制定提供参考，保障其安全运行，有必要对输电线路非均匀覆冰下的非均匀脱冰动力特性进行深入研究。

文中采用有限元方法建立连续 5 档输电导线分析模型，针对高山、峡谷等微地形、微气象区域覆冰特性设计两种典型的非均匀覆冰形式，研究其不同非均匀脱冰形式下的动力特性，并在非均匀覆冰非均匀脱冰形式下探究档距、档数、高差等关键参数对导线脱冰最大跳跃高度及最大跳跃高度点出现位置的影响规律。

1 输电导线脱冰跳跃计算模型

1.1 输电导线悬链线模型

实际工程中，输电导线的线长远远大于其直径，导线的刚性对其空间形状影响较小。因此，在分析输电导线相关问题时，通常假设导线为理想柔性索链，只承受拉力，不承受压力和弯矩，且导线材料遵循胡克定律，其自重荷载沿线长均匀分布。由这些假设可知，输电导线在自重荷载作用下的形状呈悬链线型。输电导线不等高悬点的悬链线模型见图 1^[25]。

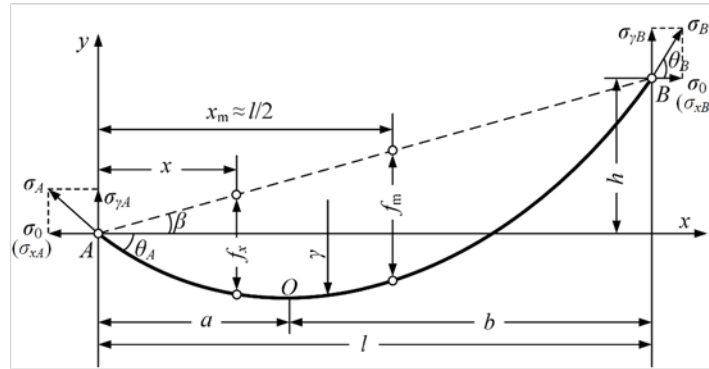


图 1 不等高悬点的悬链线模型

Fig. 1 Catenary model of unequal height suspension point

则不等高悬点输电导线左侧悬挂点为坐标原点的悬链线方程为

$$y = \frac{h}{L_{h=0}} \left[\frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{ch} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right] - \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \left[\frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma x}{2\sigma_0} \operatorname{sh} \frac{\gamma(l-x)}{2\sigma_0} \right] \quad (1)$$

式(1)中：

$$L_{h=0} = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \operatorname{sh} \frac{\gamma l}{2\sigma_0} \quad \gamma = \frac{qg}{A} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式(2)中: σ_0 为弧垂最低点的轴向应力, 也即档内任一点处轴向应力的水平分量, MPa; q 为导线的单位长度质量, kg/km; γ 为自重比载, MPa/m; $L_{h=0}$ 为等高悬点导线的悬链线长度, m; h 为输电导线的高差, m; A 为导线的截面积, mm^2 。

1.2 连续档输电导线有限元模型

文中以某 220 kV 线路为研究对象, 导线采用 LGJ-240/40 二分裂导线, 分裂间距 0.4 m, 具体参数见表 1。现有研究表明, 输电铁塔对导线脱冰跳跃的影响很小, 可忽略不计^[26]。因此, 在文中建模和计算过程中, 铁塔刚度未被考虑, 有限元模型仅包含导线、绝缘子串、间隔棒等部件。

表 1 LGJ-240/40 导线参数

Table 1 Parameters of LGJ-240/40 conductor

导线参数	设计值
截面积/ mm^2	277.75
外径/mm	21.66
弹性模量/MPa	76 000
单位长度质量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	0.964 3
额定拉断力/kN	83.370

文中在建模过程中, 利用 ANSYS 软件中的 LINK10 单元来模拟导线, 该单元具有双线性刚度矩阵, 可通过单元输入参数设置为仅受拉杆单元, 是模拟导线的理想单元。绝缘子串、线夹、间隔棒和防振锤均使用 BEAM188 梁单元进行模拟。绝缘子串采用 I 型绝缘子串; 间隔棒采用 FJQ 型间隔棒, 在档内每隔 50 m 安装一个; 防振锤采用 FD 型防振锤, 在档距的两端各安装一个, 其具体位置根据文[25]中相关公式进行计算。在建模时, 将绝缘子串简化为直杆, 将线夹、间隔棒和防振锤简化为框架, 各部件的等效密度可根据各部件的实际重量与截面积进行计算^[27]。

在有限元模型中, 导线两端边界采用固定约束, 悬垂绝缘子串约束其悬挂点的平动自由度、释放其转动自由度, 以保证悬垂串可以绕悬挂点转动; 导线与悬垂绝缘子串、线夹、间隔棒等的连接均采用节点耦合方式。使用 ANSYS 软件, 按照上述方法, 建立连续 5 档导线有限元模型, 见图 2。其中, 脱冰档(第 3 档)的档距为 400 m, 高差为 40 m, 其余各档的档距为 200 m, 无高差。

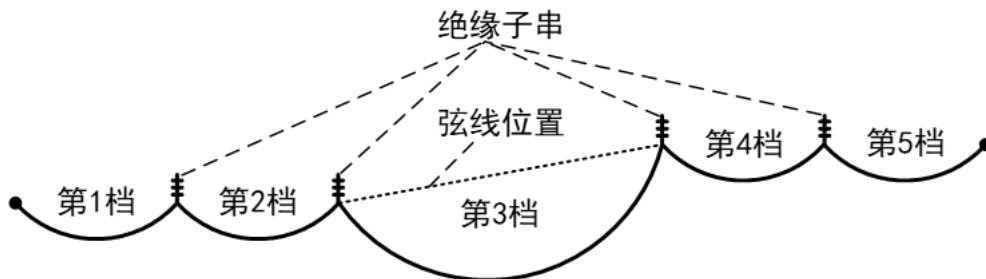


图 2 连续 5 档导线有限元模型

Fig. 2 Finite element model of continuous 5-span conductor

1.3 输电导线找形分析

确定输电导线的初始形态是进行输电导线脱冰跳跃动力分析的基础和前提，在进行动力分析前，必须先进行找形分析找到输电导线在自重下的初始形态。文中采用找形分析法进行找形，该方法迭代次数少、节约时间、但设置较复杂。以图 2 中的脱冰档导线为例，先在导线的弦线位置建立模型，对其施加较大的初应变和较小的弹性模量，在自重荷载作用下进行非线性求解，求解后更新各节点的坐标。然后恢复导线的实际弹性模量和实际初应变，以导线的水平张力作为收敛条件进行非线性迭代，最终模型即为导线在自重下的初始形态。提取有限元计算结果最大弧垂和对应张力并与 1.1 节中悬链线模型的解析解计算结果进行对比，见表 2。由表 2 可知，有限元计算结果与悬链线方程计算结果差值很小，误差在 2%之内，这说明导线找形准确，有限元模型可用于后续动力学分析。

表 2 导线找形结果对比
Table 2 Comparison of conductor form-finding results

弧垂/m		误差/%	张力/kN		误差/%
仿真值	理论值		仿真值	理论值	
11.585	11.412	1.52	16.644	16.674	0.18

1.4 覆冰荷载模拟

对于输电导线覆冰模拟，目前主要有改变密度法、生死单元法和等效载荷法 3 种方法^[28-30]。等效载荷法简单方便，通过控制载荷的大小及卸载的范围可以模拟不同的覆冰、脱冰形式，文中采用此方法来模拟导线覆冰脱冰。各节点所施加等效集中载荷 F 的大小可按照式(3)计算

$$F = \rho \pi b (D + b) L g \times 10^{-6} / n \tag{3}$$

式(3)中： ρ 为覆冰密度，取 900 kg/m^3 ； g 为重力加速度，取 9.8 m/s^2 ； b 为覆冰厚度，mm； D 为架空线的外径，mm； L 为导线长度，m； n 为节点数量。

中国幅员辽阔，地形复杂，输电线路的覆冰往往呈现非均匀覆冰的形式，特别是在微地形、微气象区域，覆冰厚度常随着海拔高度的升高而逐渐增加。为了模拟实际输电导线的非均匀覆冰，设计了阶梯覆冰和中部集中覆冰两种不同的非均匀覆冰形式，见图 3。

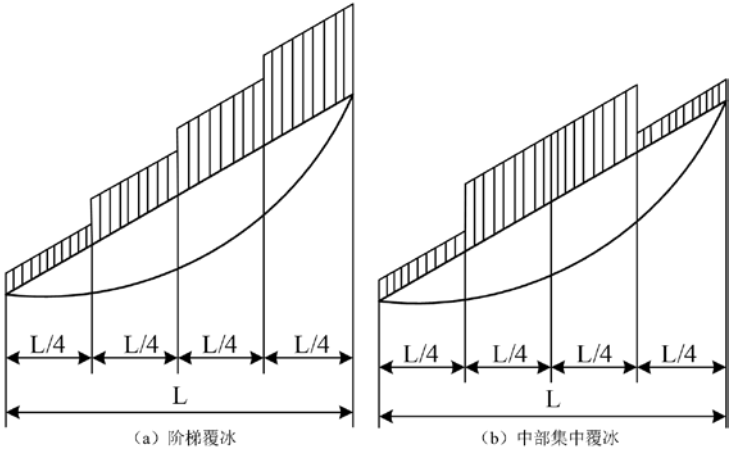


图 3 非均匀覆冰形式

Fig. 3 Pattern of non-uniform icing

阶梯覆冰考虑覆冰荷载随海拔升高而递增的情况，常在连续上山档中出现^[23]，见图 3(a)，将档距 L 均分为 4 段，低悬挂点所在的一段覆冰厚度最小为 10 mm，高悬挂点所在的一段覆冰厚度最大为 15 mm，中间两段的覆冰厚度依次递增。中部集中覆冰考虑导线局部极端覆冰的情况^[24]，见图 3(b)，中间两段的覆冰厚度为 15 mm，低悬挂点和高悬挂点所在的两段覆冰厚度为 10 mm。为了控制档内的覆冰总重量相同，定义等效覆冰厚度为非均匀覆冰总重量与均匀覆冰总重量相同时的均匀覆冰厚度，阶梯覆冰和中部集中覆冰的等效覆冰厚度均为 12.5 mm。如上所述，先确定各段的覆冰厚度，然后利用式(3)计算出各段各节点的等效集中力，从而模拟不同的非均匀覆冰形式。

阻尼是结构动力学分析中的重要参数，是评价系统动态特性的主要指标，阻尼的形式与大小直接影响着系统的动态性能。由于输电导线的阻尼难以确定，文中在分析时参照文献采用瑞利阻尼^[31]模型，见式(4)

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{2\xi\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad \beta = \frac{2\xi}{\omega_1 + \omega_2} \quad (5)$$

式(4)、(5)中： C 为阻尼矩阵； M 为质量矩阵； K 为刚度矩阵； α 为质量阻尼系数； β 为刚度阻尼系数； ω_1 、 ω_2 分别为导线第一阶和第二阶的振动频率； ξ 为阻尼比，覆冰导线取 10%，未覆冰导线取 2%。

1.5 有限元模型验证

为验证有限元模型的准确性，利用文[8]中的脱冰试验结果进行对比分析。模拟试验的基本情况为：孤立档档距 235 m，导线型号为 LGJ-300/40，外径为 23.94 mm，截面积为 338.99 mm²，重量为 1.133 kg/m，弹性模量为 73 000 MPa，额定拉断力为 87.6 kN，覆冰形式为均匀覆冰，覆冰厚度为 15 mm，脱冰率为 100%。试验时沿导线均匀分布 10 个集中荷载用来模拟覆冰，利用遥控装置同时释放重物来模拟导线脱冰。

按照试验参数，利用 ANSYS 软件建立孤立档导线脱冰试验有限元模型，进行脱冰跳跃动力学分析，提取计算结果并与文献试验结果进行对比，见图 4 和表 3。从图 4 和表 3 可以看出，文中的最大跳跃高度计算结果与文献试验结果的误差为 6.96%，文中的最大动张力计算结果与文献试验结果的误差为 5.82%，两者吻合良好，验证了文中建模方法及覆冰、脱冰模拟方法的准确性。

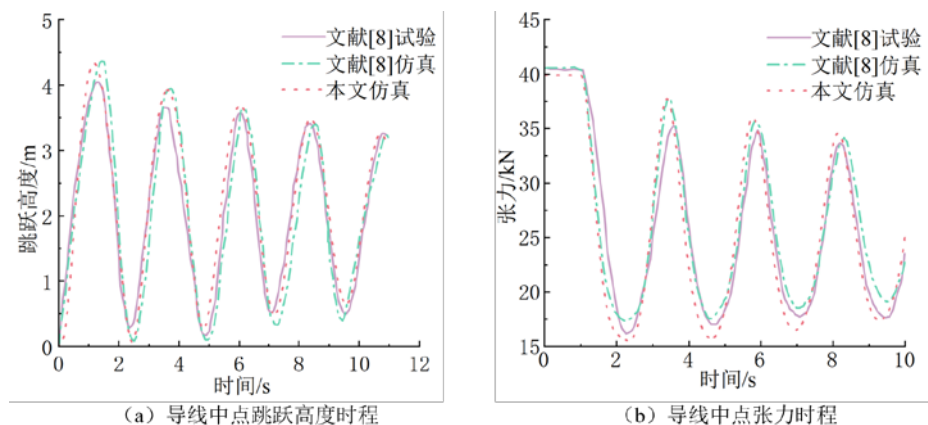


图 4 文中仿真结果与文献结果对比

Fig. 4 Comparison of the simulation results in this article and literature results

表 3 仿真结果与文献结果对比

Table 3 Comparison of the simulation results and literature results

参数	文[8]试验值	文[8]仿真值	文中仿真值	相对误差(文中仿真与文[8]试验)/%
最大跳跃高度/m	4.049	4.369	4.331	6.96
最大动张力/kN	35.490	37.654	37.556	5.82

2 脱冰动力响应分析

分裂导线脱冰时，子导线往往是不同期脱冰的。为了分析分裂子导线不同期脱冰对脱冰跳跃动力响应的影响，分别计算了单根子导线脱冰和两根子导线同时脱冰时的脱冰动力响应，计算结果见图 5。相应的工况为：均匀覆冰、整档脱冰，脱冰率为 100%。

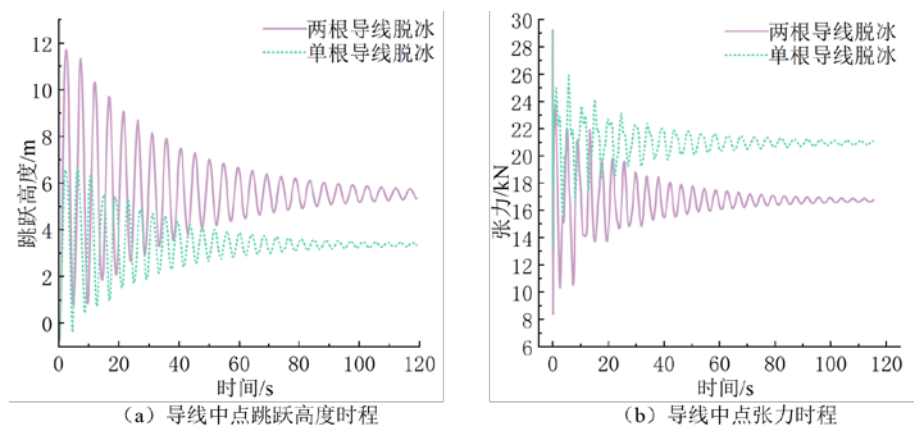


图 5 不同子导线脱冰时的动力响应

Fig. 5 Dynamic response of different sub-conductors during de-icing

由图 5 可知，与单根子导线脱冰相比，两根子导线同时脱冰时的跳跃高度更大，张力更小。分析原因，跳跃高度更大是因为随着脱冰子导线数量的增加，脱冰导线覆冰总重量增加，导致势能增加，势能转化为动能也随之增加；张力更小则是因为脱冰子导线越多，导线脱冰后残余覆冰总重量越小。

导线脱冰跳跃最大高度对铁塔塔头尺寸设计、导地线布置方式、线路投运后融冰方案制定有直接影响,因此,文中在后续的研究中重点研究导线脱冰跳跃最剧烈(跳跃高度最高)的情况,也即分裂子导线同时脱冰这一工况,进而为线路设计和运维提供参考。

2.1 不同覆冰形式下的导线脱冰动力响应

实际线路的自然脱冰或人为除冰中,覆冰并不一定是均匀脱落,也可能是非均匀脱落。本节对阶梯覆冰、中部集中覆冰两种非均匀覆冰形式下的导线进行非均匀脱冰分析,研究不同非均匀覆冰、脱冰形式对导线脱冰跳跃的影响。由于线路非均匀脱冰位置具有不确定性,因此设计了中部脱冰、两侧脱冰、高侧脱冰、低侧脱冰 4 种不同的非均匀脱冰形式,见图 6。

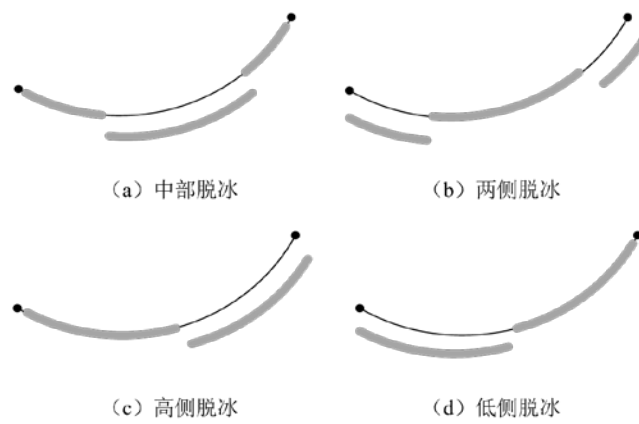


图 6 非均匀脱冰形式

Fig. 6 Non-uniform ice-shedding modes

线路第 3 档设置为脱冰档,脱冰段长度为 50%,覆冰形式为非均匀覆冰,其余非脱冰档均匀覆冰。计算两种非均匀覆冰形式下导线的脱冰动力响应,并将其与均匀覆冰形式下导线的脱冰动力响应进行对比,3 种覆冰形式下导线脱冰跳跃高度最大的节点的位移时程曲线见图 7。

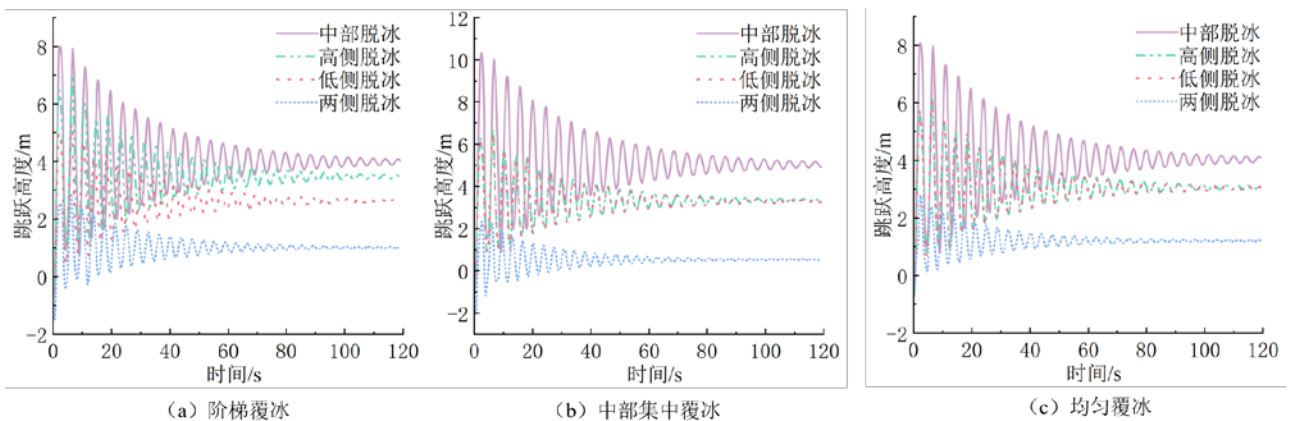


图 7 不同覆冰形式下的导线脱冰动力响应

Fig. 7 Dynamic response of conductor de-icing under different icing modes

由图 7 可知,导线跳跃高度随着时间的增大逐渐衰减并最终趋于稳定。在不同的覆冰形式下,中部脱冰时的跳跃高度均大于另外 3 种脱冰形式下的跳跃高度,其中中部集中覆冰形式下的跳跃高度最大为 10.349 m,

比均匀覆冰时的跳跃高度增大了 28%；因此在非均匀脱冰时，应重视跨中部脱冰的情况，以防相间间距不足而引发事故。阶梯覆冰时，高侧脱冰和低侧脱冰两种脱冰形式下的跳跃高度时程曲线差别很大，而均匀覆冰和中部集中覆冰时两者几乎重合。出现上述规律的原因是均匀覆冰和中部集中覆冰时覆冰厚度关于跨中对称，高侧和低侧两种脱冰形式下的脱冰量相同，而阶梯覆冰时高低两侧的脱冰量不同，说明在脱冰量相同时，低侧和高侧脱冰对跳跃高度基本无影响。

为分析非均匀覆冰和脱冰对不平衡张力和导线张力的影响规律，提取脱冰档与左端邻档的档间最大不平衡张力和导线左端最大张力，具体数据见表 4。由表 4 可知，最大不平衡张力和导线最大张力受脱冰形式的影响显著，低侧脱冰和两侧脱冰在各种覆冰形式下的最大不平衡张力均较小，低侧脱冰和高侧脱冰时最大不平衡张力相差达 32.3%；两侧脱冰在各种覆冰形式下的导线最大张力均大于其他脱冰方式，两侧脱冰和中部脱冰时导线最大张力相差达 17.5%。此外可以看出，阶梯覆冰和均匀覆冰在各种脱冰形式下的最大不平衡张力和导线最大张力差距较小，中部集中覆冰在各种脱冰形式下的最大不平衡张力和导线最大张力均大于另两种覆冰形式。因此，在进行除冰工作时，应对线路中部极端覆冰的情况给予重视，避免导线因超过受力极限而发生断股和断线，影响输电线路正常运行。

表 4 不同工况下的最大不平衡张力及最大张力

Table 4 The maximum unbalanced tension and the maximum tension under diverse working conditions

覆冰形式	脱冰形式	最大不平衡张力/kN	导线最大张力/kN
阶梯覆冰	中部脱冰	2.011	27.074
	高侧脱冰	2.192	28.543
	低侧脱冰	1.699	29.168
	两侧脱冰	1.808	29.727
中部集中覆冰	中部脱冰	2.433	27.427
	高侧脱冰	2.561	30.056
	低侧脱冰	2.249	30.040
	两侧脱冰	2.401	32.227
均匀覆冰	中部脱冰	2.124	27.183
	高侧脱冰	2.334	28.839
	低侧脱冰	1.764	28.819
	两侧脱冰	1.855	29.737

2.2 最大跳跃高度所在位置分析

输电导线脱冰跳跃可能会导致导线相间、相地安全间隙不足而引发闪络、跳闸等事故，影响电力系统的正常运行。为了保证导线发生脱冰时不造成闪络跳闸事故，需要确定导线脱冰跳跃最大高度及其发生位置，进而为塔头尺寸的设计和各相导线位置的合理布置提供依据。目前关于脱冰跳跃的研究，大多关注导线档距中央的跳跃高度，但当考虑非均匀覆冰和非均匀脱冰时，导线脱冰跳跃最大高度发生位置不一定位于档距中央。因此，只考虑档距中央的跳跃高度不够全面，还需要对导线的脱冰跳跃高度进行更深入的研究，探究最大导线脱冰跳跃高度出现位置的规律。

提取图 7 所示各种工况下导线最大跳跃高度，并确定其在档内的位置，见表 5。表 5 中： $H_{\max}$ 为最大跳跃高度； $L_{\max}$ 为最大跳跃高度位置到低悬挂点的距离； θ 为 $L_{\max}$ 与档距 L 的比值。

表 5 不同工况下的脱冰跳跃最大高度及其位置

Table 5 The maximum height and position of ice-shedding jump under diverse working conditions

覆冰形式	脱冰形式	$H_{\max}/\text{m}$	$L_{\max}/\text{m}$	θ
阶梯覆冰	中部脱冰	8.003	196	0.490
	高侧脱冰	6.978	246	0.615
	低侧脱冰	5.319	160	0.400
	两侧脱冰	2.895	248	0.620
中部集中覆冰	中部脱冰	10.349	200	0.500
	高侧脱冰	6.673	242	0.605
	低侧脱冰	6.565	156	0.390
	两侧脱冰	2.336	199	0.498
均匀覆冰	中部脱冰	8.078	200	0.500
	高侧脱冰	6.177	243	0.608
	低侧脱冰	6.076	157	0.393
	两侧脱冰	2.799	95	0.238

由表 5 可知，输电导线脱冰跳跃最大高度所在位置受脱冰形式的影响显著。中部脱冰时脱冰跳跃最大高度点位于跨中附近；高侧和低侧脱冰时，最大跳跃高度点分别向高、低悬挂点侧移动；两侧脱冰时，跳跃高度相对较小，最大跳跃高度点出现的位置不固定，受覆冰形式的影响较大。总体来看，非均匀脱冰时最大跳跃高度点主要分布在档距的 0.39~0.62 倍范围内。因此，在非均匀脱冰时，应重点关注线路该档距范围内的安全间隙是否满足要求。

3 影响因素分析

由上节可知，在不同的覆冰形式下，中部脱冰和高侧脱冰引起的脱冰动力响应较为剧烈，尤其是在中部集中覆冰时，两种脱冰形式引起的动力响应最为剧烈。脱冰动力响应越剧烈，跳跃高度越高，越容易发生闪络放电事故。因此文中着重研究中部集中覆冰时，输电导线在中部脱冰和高侧脱冰两种非均匀脱冰形式下的动力响应，分析档距、高差、档数等参数对导线最大跳跃高度及最大跳跃高度所在位置的影响规律。计算的基本工况为：脱冰档档距为 400 m，高差为 40 m，覆冰形式为中部集中覆冰，脱冰形式为中部脱冰和高侧脱冰，脱冰段长度为 50%。

3.1 档距

其它参数不变，仅改变档距，分别计算脱冰档档距为 200、300、400、500、600 m 时的脱冰动力响应。计算结果见图 8，不同档距时的最大跳跃高度位置见表 6。

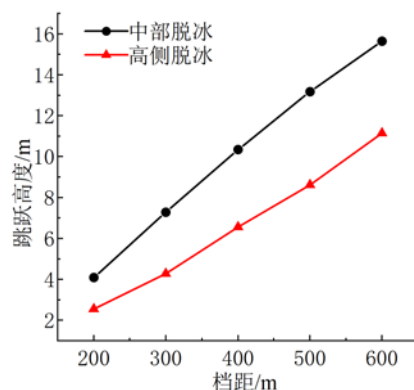


图 8 档距对最大跳跃高度的影响

Fig. 8 The effect of span on the maximum jump height

表 6 不同档距时最大跳跃高度位置

Table 6 The maximum jump height position at different spans

档距/m	中部脱冰		高侧脱冰	
	$L_{\max}/\text{m}$	θ	$L_{\max}/\text{m}$	θ
200	99	0.495	111	0.555
300	150	0.500	174	0.580
400	200	0.500	242	0.605
500	250	0.500	305	0.610
600	300	0.500	375	0.625

由图 8 可知, 两种非均匀脱冰形式下导线的最大跳跃高度均随着档距的增大而增大, 且呈现线性增加的趋势。这是因为随着档距的增大, 脱冰档导线覆冰总重量增加, 导线脱冰时的弹性势能随之增加, 导致导线的脱冰动力响应更加剧烈。由表 6 可知, 中部脱冰时最大跳跃高度点位于跨中附近, 档距的改变对其几乎无影响。高侧脱冰时最大跳跃高度点随着档距的增大逐渐向高悬挂点侧移动。

3.2 高差

为了研究高差对导线脱冰最大跳跃高度的影响, 分别计算高差为 0、40、80、120、160、200 m 时的脱冰动力响应。不同高差时的最大跳跃高度及最大跳跃高度位置见图 9 和表 7。

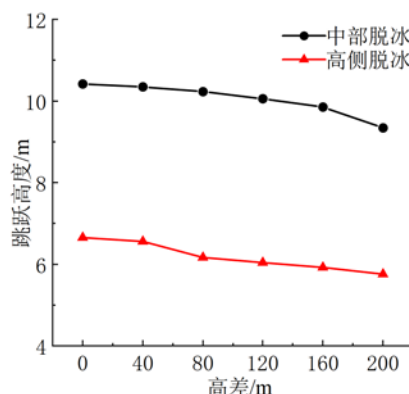


图 9 高差对最大跳跃高度的影响

Fig. 9 The effect of elevation difference on the maximum jump height

表 7 不同高差时最大跳跃高度位置

Table 7 The maximum jump height position at different elevation differences

高差/m	中部脱冰		高侧脱冰	
	$L_{\max}/\text{m}$	θ	$L_{\max}/\text{m}$	θ
0	200	0.500	244	0.610
40	200	0.500	242	0.605
80	199	0.498	244	0.610
120	198	0.495	243	0.608
160	198	0.495	229	0.573
200	196	0.490	239	0.598

由图 9 可知,随着高差的增大,两种脱冰形式下导线的最大跳跃高度反而减小。两者的下降趋势相似,从无高差到高差为 200 m,中部脱冰时的最大跳跃高度降低了 10.3%,高侧脱冰时的最大跳跃高度降低了 13.5%,由此说明,高差对最大跳跃高度的影响相对较小。出现上述现象的原因是,高差增大,导线张力的竖直分量会增加,从而阻碍导线向上跳跃。由表 7 可知,高差的改变对最大跳跃高度出现的位置影响较小,中部脱冰时最大跳跃高度点位于跨中附近,高侧脱冰时最大跳跃高度点主要分布在档距总长的 0.6 倍位置附近。

3.3 档数

其他条件不变,分别计算档数为 1、3、5、7 档时的脱冰动力响应。不同档数时导线的最大跳跃高度及最大跳跃高度出现位置见图 10 和表 8。

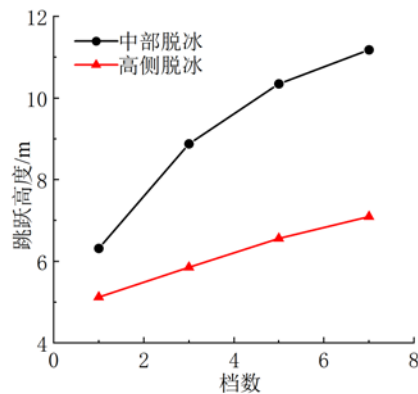


图 10 档数对最大跳跃高度的影响

Fig. 10 The effect of span numbers on the maximum jump height

表 8 不同档数时最大跳跃高度位置

Table 8 The maximum jump height position at different span numbers

档数	中部脱冰		高侧脱冰	
	$L_{\max}/\text{m}$	θ	$L_{\max}/\text{m}$	θ
1	199	0.498	256	0.640
3	200	0.500	248	0.620
5	200	0.500	242	0.605
7	199	0.498	240	0.600

由图 10 可知,随着档数的增加,两种脱冰形式下导线的最大跳跃高度逐渐增加,中部脱冰时最大跳跃高度的增涨幅度逐渐减小,而高侧脱冰时最大跳跃高度的增涨幅度无明显变化。此外,两种非均匀脱冰形式均在

档数为孤立档时的跳跃高度最小，这是因为孤立档时导线两端固定约束，比连续档时脱冰档导线两端的约束更加充分，抑制了导线的脱冰跳跃高度。孤立档以外最大跳跃高度随档数增加逐渐增大，分析其原因是随着档数的增加，脱冰档导线的约束条件不变，但脱冰档所在的耐张段两端离脱冰档越来越远，其对导线冰跳的抑制作用逐渐减弱，导致导线跳跃高度逐渐增大。由表 8 可知，中部脱冰时最大跳跃高度点对档数的变化不敏感，位于跨中附近；高侧脱冰时最大跳跃高度点位于档距总长的 0.6~0.64 倍范围内，且随着档数的增加逐渐向跨中移动。

3.4 脱冰段长度

在中部脱冰和高侧脱冰两种非均匀脱冰形式下，分别计算脱冰段长度为 50%、60%、70%、80%、90%、100%时的脱冰动力响应。最大跳跃高度的计算结果见图 11，最大跳跃高度所在位置见表 9。

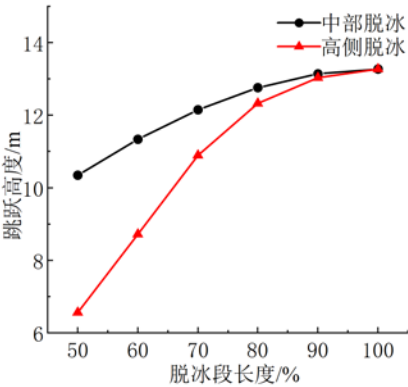


图 11 脱冰段长度对最大跳跃高度的影响

Fig. 11 The effect of the length of ice-shedding segment on the maximum jump height

表 9 不同脱冰段长度时最大跳跃高度位置

Table 9 The maximum jump height position at different ice-shedding segment lengths

脱冰段长度/%	中部脱冰		高侧脱冰	
	$L_{\max}/\text{m}$	θ	$L_{\max}/\text{m}$	θ
50	200	0.500	242	0.605
60	199	0.498	225	0.563
70	199	0.498	204	0.510
80	199	0.498	203	0.508
90	199	0.498	200	0.500
100	199	0.498	199	0.498

由图 11 可知，两种非均匀脱冰形式下导线的最大跳跃高度均随着脱冰段长度的增大而增大，且两种形式下最大跳跃高度的差值逐渐减小，当脱冰段长度为 100%时，两种脱冰形式下的最大跳跃高度相同。这是因为脱冰段长度增大，两种非均匀脱冰形式下的脱冰量均增大，两者脱冰总量的差值逐渐减小，当脱冰段长度为 100%时，两者均为整档脱冰，脱冰总量相同。由表 9 可知，中部脱冰时最大跳跃高度点位于跨中附近，脱冰段长度的改变对其几乎无影响。高侧脱冰时最大跳跃高度点随着脱冰段长度的增大逐渐向跨中移动，且当脱冰段长度为档距总长的 70%~100%时，最大跳跃高度点位于档距中央附近。

3.5 等效覆冰厚度

其他参数不变，仅改变等效覆冰厚度，分别计算脱冰档等效覆冰厚度为 12.5、15、18、20 mm 时的脱冰动力响应。最大跳跃高度的计算结果见图 12，最大跳跃高度所在位置见表 10。

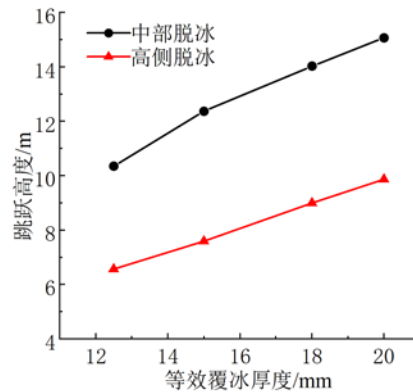


图 12 等效覆冰厚度对最大跳跃高度的影响

Fig. 12 The effect of equivalent icing thickness on the maximum jump height

表 10 不同等效覆冰厚度时最大跳跃高度位置

Table 10 The maximum jump height position at different equivalent ice thickness

等效覆冰厚度/mm	中部脱冰		高侧脱冰	
	$L_{\max}/\text{m}$	θ	$L_{\max}/\text{m}$	θ
12.5	200	0.5	242	0.605
15.0	200	0.5	242	0.605
18.0	200	0.5	244	0.610
20.0	200	0.5	246	0.615

由图 12 可知，两种脱冰形式下导线的最大跳跃高度均随着等效覆冰厚度的增大而增大。分析原因是因为覆冰厚度越大，相同脱冰段长度下的脱冰量越多，导致脱冰动力响应越剧烈。由表 10 可知，等效覆冰厚度的改变对最大跳跃高度点出现的位置几乎无影响，中部脱冰时最大跳跃高度点位于跨中附近，高侧脱冰时最大跳跃高度点位于档距总长的 0.6 倍位置附近。

3.6 导线型号

其他条件不变，仅改变导线型号，分别计算 1 号(LGJ-240/40)、2 号(LGJ-300/40)、3 号(LGJ-500/45)、4 号(LGJ-630/45)导线的脱冰动力响应。最大跳跃高度的计算结果见图 13，最大跳跃高度所在位置见表 11。

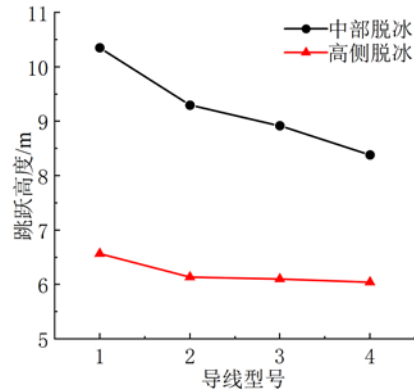


图 13 导线型号对最大跳跃高度的影响

Fig. 13 The effect of wire type on the maximum jump height

表 11 不同导线型号时最大跳跃高度位置

Table 11 The maximum jump height position at different wire type

导线型号	中部脱冰		高侧脱冰	
	$L_{\max}/\text{m}$	θ	$L_{\max}/\text{m}$	θ
1 号(LGJ-240/40)	200	0.500	242	0.605
2 号(LGJ-300/40)	199	0.498	250	0.625
3 号(LGJ-500/45)	211	0.528	252	0.630
4 号(LGJ-630/45)	198	0.495	258	0.645

由图 13 可知,两种脱冰形式下不同型号导线的最大跳跃高度有所不同,1 号(LGJ-240/40)导线的跳跃高度最大,4 号(LGJ-630/45)导线的跳跃高度最小,跳跃高度随着导线直径的增大而减小。这表明虽然随着直径的增大,导线自重和覆冰重量都会增加,但导线自重对脱冰跳跃的抑制作用大于覆冰重量对脱冰跳跃的促进作用,从而导致脱冰跳跃高度减小。由表 11 可知,不同型号的导线对中部脱冰时最大跳跃高度点出现的位置几乎无影响,但会影响高侧脱冰时最大跳跃高度点出现的位置。

4 结论

文中基于 ANSYS 软件建立了连续 5 档输电导线分析模型,研究导线在非均匀覆冰形式下的非均匀脱冰动力特性,分析了导线最大跳跃高度及最大跳跃高度所在位置随各影响因素的变化规律,得到的主要结论如下:

1)非均匀覆冰时的脱冰动力响应更加剧烈,且在不同的覆冰形式下,中部脱冰时的跳跃高度总是最大,高侧和低侧脱冰次之,两侧脱冰时的跳跃高度最小。

2)导线最大跳跃高度所在位置受脱冰形式的影响显著。中部脱冰时脱冰跳跃最大高度点位于跨中附近,高侧和低侧脱冰时,最大跳跃高度点分别向高、低悬挂点侧移动。总体来看,非均匀脱冰时最大跳跃高度点主要分布在档距的 0.39~0.62 倍范围内,线路设计时应重点校验该段范围内导线的安全间隙是否满足要求。

3)档数、档距、脱冰段长度和等效覆冰厚度增大,中部脱冰和高侧脱冰时的导线最大跳跃高度均随之增大。高差的变化对最大跳跃高度的影响较小,从无高差到高差为 200 m,两种脱冰形式下的最大跳跃高度仅降低了 10%左右。

4)中部脱冰时,最大跳跃高度点位于跨中附近,档数、档距、高差、脱冰段长度和等效覆冰厚度的变化对其几乎无影响;高悬挂点侧脱冰时,最大跳跃高度点随档距的增大逐渐向高悬挂点侧移动、随脱冰段长度的增大逐渐向跨中移动,档数、高差和等效覆冰厚度的变化对高悬挂点侧脱冰最大跳跃高度位置的影响较小,档数、高差和等效覆冰厚度变化时最大跳跃高度点主要分布在档距总长的 0.6 倍位置附近。

参考文献:

[1] 巢亚锋, 岳一石, 王 成, 等. 输电线路融冰、除冰技术研究综述[J]. 高压电器, 2016, 52(11): 1-9.

CHAO Yafeng, YUE Yishi, WANG Cheng, et al. De-icing Techniques for Ice-covered Transmission Lines: a Review[J]. High Voltage

- Apparatus, 2016, 52(11): 1-9.
- [2] 李梦丽, 柏晓路, 李 清, 等. 大截面导线重覆冰区不均匀冰纵向荷载特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 183-188.
LI Mengli, BAI Xiaolu, LI Qing, et al. Analysis on longitudinal load of uneven ice-shed for large cross-section conductor in heavy icing area[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 183-188.
- [3] 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.
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.
- [4] 王 勇, 苗 虹, 莫思特, 等. 高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 178-187.
WANG Yong, MIAO Hong, MO Site, et al. Summary of research on anti-ice, ice melting and de-icing of high voltage overhead transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 178-187.
- [5] 杨风利, 李清华, 邵 帅, 等. 脱冰工况下特高压输电铁塔地线横担受力特征及破坏模式[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-11[2024-12-13].<https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240329.1057.001>.
YANG Fengli, LI Qinghua, SHAO Shuai, et al. Mechanical characteristics and destroyed modes for cross-arm supporting ground wires of uhv transmission tower under ice shedding[J/OL]. Proceedings of the CSEE : 1-11[2024-12-13]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240329.1057.001>.
- [6] MORGAN V T, SWIFT D A. Jump height of overhead line conductors after the sudden release of ice loads[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 2010, 111(10): 1736-1746.
- [7] JAMALEDDINE A, MCCLURE G, ROUSSELET J, et al. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using adina[J]. Computers & Structures, 1993, 47(4/5): 523-536.
- [8] 陈 勇, 胡 伟, 王黎明, 等. 覆冰导线脱冰跳跃特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 115-121.
CHEN Yong, HU Wei, WANG Liming, et al. Research on ice-shedding characteristic of icing conductor[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 115-121.
- [9] 谢献忠, 李 丹, 黄 伟, 等. 塔线体系脱冰跳跃动力特性实验研究[J]. 应用力学学报, 2017, 34(5): 855-861.
XIE Xianzhong, LI Dan, HUANG Wei, et al. Experimental study on dynamical properties of tower-line systems induced by ice-shedding[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2017, 34(5): 855-861.
- [10] 王璋奇, 齐立忠, 王 孟, 等. 架空输电导线脱冰跳跃实验系统[J]. 电力建设, 2016, 37(6): 109-115.
WANG Zhangqi, QI Lizhong, WANG Meng, et al. Ice shedding experimental system for overhead transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(6): 109-115.
- [11] 王璋奇, 齐立忠, 王 剑, 等. 架空输电线非同期脱冰跳跃张力实验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(22): 61-65.
WANG Zhangqi, QI Lizhong, WANG Jian, et al. Experiments on the dynamic tension of an overhead conductor under the asynchronous ice shedding[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(22): 61-65.
- [12] KOLLAR L E, FARZANEH M. Vibration of bundled conductors following ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1097-1104.
- [13] KOLLÁR L E, OLQMA O, FARZANEH M. Natural wet-snow shedding from overhead cables[J]. Cold Regions Science and Technology, 2010, 60(1): 40-50.
- [14] 鲁元兵, 楼文娟, 李焕龙. 输电导线不均匀脱冰的全过程模拟分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(9): 47-50.
LU Yuanbing, LOU Wenjuan, LI Huanlong. Whole process analysis for non-uniform ice shedding of transmission lines[J]. Journal of

Vibration and Shock, 2010, 29(9): 47-50.

[15]王黎明, 曹 露, 高亚云, 等. 输电线路非均匀脱冰严重工况的规律[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2442-2449.

WANG Liming, CAO Lu, GAO Yayun, et al. Law of sever conditions of non-uniform ice-shedding jumping of transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2442-2449.

[16]张跃龙, 楼文娟, 黄赐荣, 等. 局部脱冰对导线跳跃高度影响的参数化分析及局部脱冰效应系数研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(10): 3959-3966.

ZHANG Yuelong, LOU Wenjuan, HUANG Cirong, et al. Parametric analysis of the effect of partial ice shedding on conductor jump height and study of the partial shedding effect factor[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(10): 3959-3966.

[17]张宇卓, 江 岳, 李小亭, 等. 架空输电导线不均匀脱冰跳跃高度计算[J]. 振动与冲击, 2023, 42(11): 75-86.

ZHANG Yuzhuo, JIANG Yue, LI Xiaoting, et al. Calculation of jump height for uneven ice-shedding of overhead transmission lines[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(11): 75-86.

[18]晏致涛, 李孟珠, 熊 辉, 等. 考虑高差覆冰输电线路链式脱冰振动[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 115-121.

YAN Zhitao, LI Mengzhu, XIONG Hui, et al. Zippered deicing vibration of an iced transmission line considering altitude difference[J]. Journal of Hunan University Natural Sciences, 2020, 47(3): 115-121.

[19]许燕飞, 徐 鹏, 李海涛, 等. 连续档架空输电线路非均匀脱冰动力响应分析[J]. 测试技术学报, 2022, 36(3): 244-251.

XU Yanfei, XU Peng, LI Haitao, et al. Dynamic response analysis of non-uniform ice-shedding of continuous transmission lines[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2022, 36(3): 244-251.

[20]谢东升, 孙 滔, 史卓鹏, 等. 输电线路拉链式脱冰振动特性试验研究[J]. 兵器装备工程学报, 2021, 42(7): 134-141.

XIE Dongsheng, SUN Tao, SHI Zhuopeng, et al. Experimental study on vibration characteristic of transmission lines under unzipping ice shedding[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2021, 42(7): 134-141.

[21]ZHOU Wenwu, ZHANG Xiaoli, LI Xiaoting, et al. Computational analysis on unbalanced tension in overhead power lines under non-uniform accreted ice[J]. Electric Power Systems Research, 2022(202): 107606.

[22]WU Kaiwen, YAN Bo, YANG Hanxu, et al. Dynamic response characteristics of isolated-span transmission lines after ice-shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(5): 3519-3530.

[23]王金锁, 刘美瑶, 岳华刚, 等. 不同覆冰形式的导线脱冰动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(20): 193-199.

WANG Jinsuo, LIU Meiyao, YUE Huagang, et al. A study of dynamic response characteristic of ice-shedding on conductors for overhead lines under different ice-coating types[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(20): 193-199.

[24]郭裕钧, 闫向龙, 黄桂灶, 等. 非均匀覆冰下输电导线的脱冰跳跃动力特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4411-4420.

GUO Yujun, YAN Xianglong, HUANG Guizao, et al. Dynamic characteristics of transmission line conductors with non-uniform accreted ice after ice-shedding[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4411-4420.

[25]孟遂民, 孔 伟, 唐 波. 架空输电线路设计[M]. 第2版. 北京: 中国电力出版社, 2015.

MENG Suimin, KONG Wei, TANG Bo. Design of overhead transmission lines[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2015.

[26]李 黎, 杨 斌, 赵 鑫, 等. 输电线路脱冰参数化有限元法的实现及应用[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(4): 68-73.

LI Li, YANG Bin, ZHAO Xin, et al. Implementation and application of parametric finite element method of ice-shedding on transmission lines[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(4): 68-73.

- [27]祝 贺, 王玮琦, 邢宏超, 等. 四分裂导线—间隔棒体系直流融冰时子导线不同步脱冰动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(1): 282-291.
- ZHU He, WANG Weiqi, XING Hongchao, et al. Dynamic response analysis of sub-conductor non-synchronous deicing during DC ice-melting of four-bundle conductor spacer system[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(1): 282-291.
- [28]HUANG Guizao, YAN Bo, WEN Nan, et al. Study on jump height of transmission lines after ice-shedding by reduced-scale modeling test[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019(165): 102781.
- [29]MIRSHAFIEI F, MCCLURE G, FARZANEH M. Modelling the dynamic response of iced transmission lines subjected to cable rupture and ice shedding[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 948-954.
- [30]张 健, 张宇卓, 王金锁, 等. 750 kV 输电导线不均匀覆冰弧垂变化与脱冰跳跃研究[J]. 应用力学学报, 2023, 40(3): 558-570.
- ZHANG Jian, ZHANG Yuzhuo, WANG Jinsuo, et al. Research on uneven iced transmission lines and the dynamic response after ice-shedding[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2023, 40(3): 558-570.
- [31]FEKR M R, MCCLURE G. Numerical modeling of the dynamic response of ice-shedding on electric transmission lines[J]. Atmospheric Research, 1998, 46(1/2): 1-11.

王 爽(1987—), 男, 博士, 研究生导师, 主要从事输变电设备智能运维和健康管理相关研究(通信作者)(E-mail: wangshuang@ctgu.edu.cn)。

马天缘(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事输电线路结构分析与动力特性相关研究(E-mail: 2656608709@qq.com)。