

DOI: 10.7511/jslx20230618002

基于CR法的覆冰四分裂导线诱发脱冰算法研究

鲁佳帛^{*1,2}, 王家林¹, 吕中宾³, 黄瞻¹, 范理¹, 伍川³, 刘小会¹

(1. 重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 2. 重庆交通大学 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 3. 国网河南电力公司电力科学研究院, 郑州 450052)

摘要:为了更真实快速地模拟覆冰分裂导线的诱发脱冰过程,本文基于Co-rotational理论法开发了梁单元有限元计算程序,从而快速准确地模拟间隔棒的大位移几何非线性问题;将梁单元退化为杆单元,该单元可以快速准确地计算覆冰导线空间大范围的运动,通过算例验证了方法的可靠性;最后定义了覆冰脱落加速度判定准则,建立了覆冰四分裂导线的诱发脱冰有限元模型。针对该有限元模型研究了不同子导线在不同覆冰厚度、初始脱冰位置和临界加速度时各子导线的脱冰跳跃高度及变化规律。结果表明,不同子导线初始脱冰产生的诱发脱冰效应会产生不同的冰跳效应,接近非诱发脱冰模式的1.25倍;下子导线引起的诱发效应远大于上子导线;覆冰厚度越厚,初始脱冰位置越靠近中点,临界加速度越小,引起的诱发效应越大。本文模拟结果可为重冰区输电线路设计提供参考,本文提出的模拟方法可为分裂导线脱冰、除冰的仿真提供一种新的研究思路。

关键词:四分裂导线;诱发脱冰;子导线;动力响应

中图分类号:TM752;O242.21

文献标志码:A

文章编号:1007-4708(2024)06-1116-08

1 引言

输电线路覆冰是一种常见现象。在合适的温度、风力和冲击荷载等条件下,覆冰脱冰会引起输电线路剧烈地振动,容易造成相间闪络,同时由于增大导线内部张力,容易导致线路断裂、金具磨损、绝缘子串破裂,严重时会引起倒塔事故的发生^[1]。

针对导线脱冰跳跃问题,国内外学者进行了几十年的研究。在20世纪40年代文献[2]就提出了非常近似的实用模型,并对这些模型进行了改进,并对一段132 kV五档试验线路开展了覆冰脱落的模拟试验研究,并根据试验结果提出覆冰后弧垂及脱冰跳跃高度的计算公式。随着数值模拟技术和有限元分析的发展,文献[3]使用商业有限元软件对输电线结冰后的非线性动态响应进行建模,通过突然释放悬挂在钢丝上的重物来模拟冰的脱落,并针对不同脱冰工况进行了研究。文献[4]首次在国内进行了导线脱冰跳跃试验,并与有限元软件仿真结果对比,验证了有限元仿真的准确性。文献[5]将分裂导线等效合成单导线进行计算,并提出

分裂导线合成单导线时的等效计算方法。文献[6]分析了六分裂导线-间隔棒体系中子导线不同步脱冰时,分裂导线体系的跳跃高度和扭转角度。文献[7]进行了导线脱冰的缩尺试验并与数值模拟结果进行对比验证,对导线最大脱冰跳跃高度计算公式进行了改进。文献[8]分析了分裂导线各子导线单独脱冰时分裂导线体系的冰跳高度,并改善了脱冰跳跃经验公式。文献[9]分析了四分裂导线-间隔棒体系在直流融冰时子导线不同步脱冰时,分裂导线体系的冰跳高度。

由于实际中最为常见的是导线某处的覆冰先脱落,在导线振动过程中导致其他位置覆冰相继脱落的情况。文献[10]考虑积冰的轴向和弯曲应力,第一次提出了应力准则以判断积冰是否脱落。文献[11]提出应变准则以判断是否脱冰,其中应变准则比应力准则的效果更贴近实验结果。文献[12]提出了覆冰脱落判据,并通过有限元软件ADINA仿真了孤立档输电线诱发脱冰效应,证明了模型的有效性。文献[13]在此基础上进行了一系列覆冰输电线路在典型冲击荷载下的动力响应研究。文

收稿日期:2023-06-18;修改稿收到日期:2023-08-03.

基金项目:重庆市自然科学基金面上项目(cstc2021jcyj-msxmX0166);重庆市研究生导师团队建设项目(JDDSTD2022003)资助.

作者简介:刘小会*(1981-),男,博士,教授(E-mail:cqdxlxh@126.com).

引用本文:鲁佳帛,王家林,吕中宾,等.基于CR法的覆冰四分裂导线诱发脱冰算法研究[J].计算力学学报,2024,41(6):1116-1123.

LU Jia-bo, WANG Jia-lin, LÜ Zhong-bin, et al. Research on icing four-split wire-induced de-icing algorithm based on CR method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2024, 41(6): 1116-1123.

献[14]针对孤立档和连续档输电线脱冰动态模型进行了一系列工况的诱发脱冰的动态响应研究。

分裂导线脱冰过程过于复杂,往往存在子导线不同步脱冰的现象,此时利用有限元软件仿真难以模拟真实场景的诱发脱冰动态响应,且建模操作复杂,计算易出错且效率低。为解决以上问题,本文首先基于CR法建立了梁杆单元,并通过算例,验证了本文方法的有效性。在此基础上建立了输电线脱冰动态模型,可以用于分裂导线覆冰脱落的动态响应研究,并与单档试验结果进行对比,验证了建模方法及覆冰荷载模拟方法的可靠性。随后建立了四分裂导线-间隔棒体系的有限元模型,研究分裂导线不同子导线在诱发脱冰时导线的跳跃高度的变化规律,以此为分裂导线-间隔棒体系的诱发脱冰跳跃研究提供参考。

2 CR梁单元理论基础

2.1 基于CR法的梁单元刚度矩阵

根据共旋理论^[15]的主要思想,梁单元从初始构型到最终构型的运动可以分为刚体运动和变形。而为了分离这两部分,梁单元的定义涉及多个坐标系,梁运动学坐标系如图1所示。

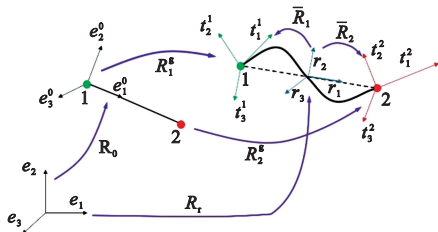


图1 梁运动学坐标系
Fig.1 Beam kinematics coordinate system

首先由三个单位正交向量 $e_j (j=1,2,3)$ 建立整体坐标系,选择与单元一起连续旋转和平移的局部坐标系,局部坐标系的正交基向量由 $r_j (j=1,2,3)$ 表示。在初始(未变形)构型中,局部坐标系由三个单位正交向量 $e_j^0 (j=1,2,3)$ 定义。单元移动后的局部坐标轴由式(1)定义

$$r_1 = \frac{x_1^0 + u_1^0 - x_1^1 - u_1^1}{l_n}; l_n = |x_1^0 + u_1^0 - x_1^1 - u_1^1| \quad (1)$$

式中 x_i^0 表示初始构型中 i 节点坐标, u_i^0 表示节点 i 的位移, l_n 表示单元长度,单元移动后的另外两个体坐标轴 r_2 和 r_3 可以根据辅助向量 q 来确定。在初始构型中辅助向量 q 方向与 e_2^0 方向一致,在变形后的构型中, q_1 和 q_2 分别表示变形后节点 1 和节点 2 的 e_2^0 轴的矢量方向,可以通过式(2)计算。

$$q_i = R_i^T R_0 [0 \ 1 \ 0]^T; q = \frac{1}{2} (q_1 + q_2) \quad (2)$$

式中 $i=1,2, R_1^0$ 和 R_2^0 分别是节点 1 和节点 2 的旋转矩阵, R_0 表示初始构型中梁单元局部坐标系的方向矩阵。计算得到 q 向量即可方便地计算变形后的单元局部坐标系的另外两个坐标轴

$$r_3 = \frac{r_1 \times q}{\|r_1 \times q\|}; r_2 = r_3 \times r_1 \quad (3)$$

根据得到的 3 个坐标轴 r_1, r_2 和 r_3 建立描述单元刚性旋转的矩阵

$$R_r = [r_1 \ r_2 \ r_3] \quad (4)$$

获得描述单元刚性旋转的矩阵 R_r 是非常重要的,根据刚性旋转矩阵可以容易得到描述梁单元变形的转动矩阵

$$\bar{R}_i = R_r^T R_i^0 R_0 \quad (i=1,2) \quad (5)$$

式中 \bar{R}_i 为描述 i 节点由于变形引起的转动,根据描述节点变形的转动矩阵可以计算得到单元的全局切线刚度矩阵

$$K_g = B_g^T K_a B_g + K_m \quad (6)$$

式中 K_m 为非线性刚度矩阵, B_g 为从局部坐标系转化到全局坐标下的转化矩阵。在小变形的情况下, K_a 可以近似等于 K_l, K_l 代表局部切线刚度矩阵。

2.2 基于隐式动力学方法的动力学方程求解

在隐式时间积分中含有平衡迭代时间 $t + \Delta t$ 的有限元动力学方程为

$${}^{t+\Delta t}M \ddot{x}^{(i)} + {}^{t+\Delta t}C \dot{x}^{(i)} + {}^{t+\Delta t}K \Delta x^{(i)} = {}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}F^{(i-1)} \quad (7)$$

式中 ${}^{t+\Delta t} \ddot{x}^{(i)}, {}^{t+\Delta t} \dot{x}^{(i)}, {}^{t+\Delta t} \Delta x^{(i)}$ 分别为在时间步 t 时迭代步为 i 的加速度矢量、速度矢量和增量位移矢量, ${}^{t+\Delta t}M$ 为质量矩阵, ${}^{t+\Delta t}C$ 为阻尼矩阵, ${}^{t+\Delta t}K$ 为刚度矩阵, ${}^{t+\Delta t}R$ 为外力施加节点荷载的矢量, ${}^{t+\Delta t}F^{(i-1)}$ 为迭代步 i 时对应的单元内力的矢量。

质量矩阵选用一致单元质量矩阵 M_U , 其形式为

$$M_U = \begin{bmatrix} m_U^{(1,1)} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & m_U^{(2,2)} \end{bmatrix} \in R^{6 \times 6} \quad (8)$$

式中 $\mathbf{0}$ 为三阶零矩阵。

$$m_U^{(1,1)} = \frac{1}{t^2 \beta} \left\{ \int_{[0,L]} A_\rho N_I(S) N_J(S) dS \right\} \text{Diag}[1,1,1] \quad (9)$$

$$m_U^{(2,2)} = \int_{[0,L]} \left[-A_{n+1}^{(i)} (J_\rho A_{n+1}^{(i)} + W_{n+1}^{(i)} \times J_\rho W_{n+1}^{(i)})^v + \frac{1}{t^2 \beta} A_{n+1}^{(i)} (J_\rho - h\gamma (J_\rho W_{n+1}^{(i)})^v + t\gamma \tilde{W}_{n+1}^{(i)} J_\rho) \right] \cdot A_n^T(\theta_{n+1}^{(i)}) N_I(S) N_J(S) dS \quad (10)$$

式中 t 为时间步长, 本文取 $0.01, \beta=0.2525, \gamma=0.505, A_\rho$ 为横截面面积, J_ρ 为截面惯性矩, 其他参

数参见文献[16]。

系统的阻尼用 Rayleigh 阻尼进行描述,即 $C = \lambda M + \mu K$ 。文献[17]在对导线脱冰跳跃问题进行数值模拟研究时,提出裸导线的阻尼为临界阻尼的 2%,覆冰导线则取临界阻尼的 10%。因此,本文取 $\lambda = 0.136, \mu = 0.003$ 。

2.3 梁单元算例验证

图 2 是基于文献[16]的经典直角悬臂梁模型,用以验证本文大位移几何非线性动力算法的可靠性。直角悬臂梁承受施加在直角处面外集中荷载,荷载随时间变化曲线如图 3 所示。悬臂的每个构件的长度为 $L = 10 \text{ m}$ 。材料属性为 $GA = EA = 10^6, GJ = EI = 10^3$ 。初始构型中梁的单位长度质量和横截面的惯性矩为 $A_\rho = 1, J_\rho = \text{Diag}(20, 10, 10)$ 。

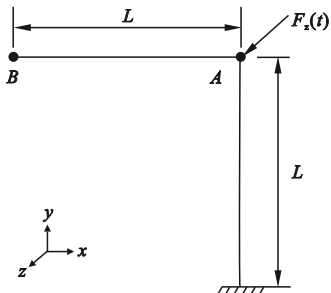


图 2 直角悬臂梁-几何模型
Fig. 2 Right angle cantilever beam-geometric data

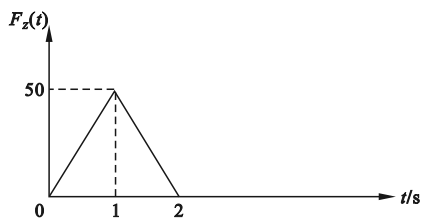


图 3 直角悬臂梁-荷载历程
Fig. 3 Right angle cantilever beam-load history

本文编写程序计算获得的直角悬臂梁点 A 和点 B 位移如图 4 所示,与文献结果进行对比可以看出两者的曲线基本吻合,最大误差为 5%,说明了本文梁单元模拟方法的可靠性。

2.4 基于 CR 法演化的索单元及验证

考虑到分裂导线由导线和间隔棒组成,导线直径与跨度比值较小,数值仿真采用杆单元或者索单元。间隔棒相对刚硬,数值仿真采用梁单元模拟。为了便于基于 CR 法的梁单元模拟覆冰分裂导线,本文将梁单元演化为杆单元模拟导线。当不考虑梁单元的三个旋转自由度时,就可以将其演化为具有三个平动自由度 (x, y, z) 的杆单元。

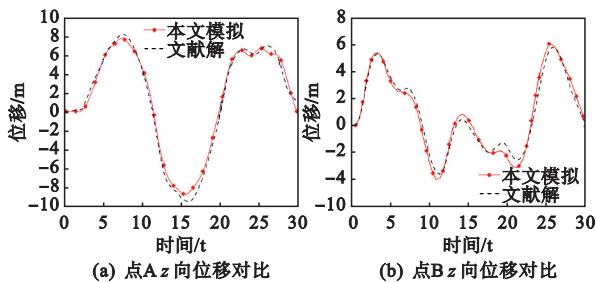


图 4 直角悬臂梁位移对比
Fig. 4 Comparison of displacements of right-angle cantilever beams

为进一步验算本程序以及覆冰载荷模拟方法的有效性,选用国网电力科学研究院^[18]在一段全尺寸线路上进行的脱冰试验为算例,对单档线路 100%脱冰工况进行对比,导线最低点的张力随时间变化的曲线如图 5 所示。从中可以看出,仿真所得张力与试验测量值吻合度非常高,最大差别仅为 4.4%。

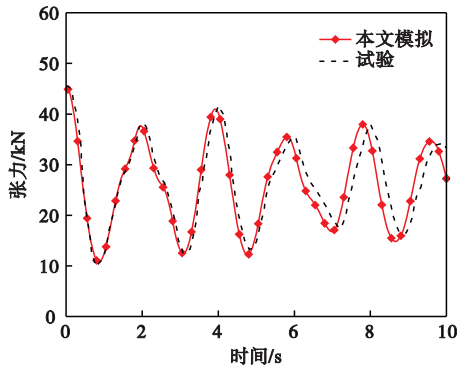


图 5 导线中点的张力
Fig. 5 Tension at the midpoint of the wire

3 覆冰诱发脱落判定及其有限元实现

3.1 冰单元设计

本文采用冰单元的生死来模拟分裂导线的覆冰和脱冰。覆冰单元采用与导线平行且共节点的杆单元来模拟。覆冰单元和杆单元共用两端节点,如图 6 所示。文献[19]说明覆冰的力学特性会因覆冰的形成条件和测试条件等的差异而在较大范围离散,很难给出统一适用的数值。所以,本文设计的冰单元只考虑冰的质量,不考虑冰刚度对导线的影响,冰的密度取 900 kg/m^3 ,泊松比取 0.3。

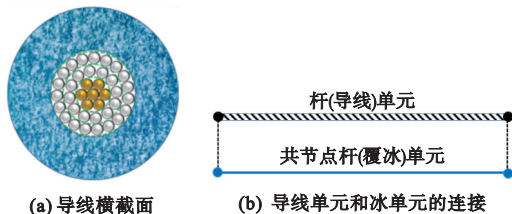


图 6 数值模拟中的导线单元和冰单元
Fig. 6 Wire elements and ice elements in numerical simulation

3.2 覆冰诱发脱落准则

考虑到输电线覆冰形状种类比较多,本文选取输电线路覆冰为圆环的覆冰为例,其受力如图7所示。

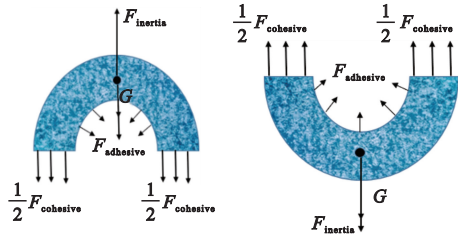


图7 覆冰受力
Fig.7 Schematic diagram of icing forces

文献[14]的覆冰脱落判定准则认为当导线振动时,在覆冰上的惯性力和重力大于覆冰内部的内聚力和覆冰导线间的粘聚力时,该区域覆冰被甩掉,如式(1,2)。对于同心覆冰的下半部分

$$F_{inertia} + G \geq F_{cohesive} + F_{adhesive} \quad (11)$$

对于同心覆冰的上半部分

$$F_{inertia} - G \leq F_{cohesive} + F_{adhesive} \quad (12)$$

式(1,2)中, $F_{inertia}$ 为惯性力, G 为覆冰重力, $F_{adhesive}$ 描述冰与导线之间的粘附力, $F_{cohesive}$ 描述冰的内聚力。将式(1,2)中的各项参数用加速度表示,最终求出覆冰诱发脱落的临界加速度值判定为

$$a_{critical} > \frac{8[(D - D_{cable})\tau_{cohesive} + D\tau_{adhesive}]}{\pi\rho_{ice}(D^2 - D_{cable}^2)} \pm g \quad (13)$$

式中 ρ_{ice} 为冰的密度, D 为覆冰导线外径, D_{cable} 为导线的直径, $\tau_{cohesive}$ 为内聚强度系数, $\tau_{adhesive}$ 为粘附强度系数, g 为重力加速度。当式(3)选取+时,对应上半部分的脱冰计算,当式(3)选取-时,对应下半部分的脱冰计算。将式(3)作为临界加速度的判定条件,在本文编写的程序中判定覆冰单元的生死。当单元的加速度大于临界加速度时,将该单元对应的覆冰脱掉,并修改质量矩阵、阻尼矩阵,使之变为0,求解流程如图8所示。

3.3 诱发脱冰算例验证

文献[13]利用 ADINA 在此基础上对某100 m 试验线路进行算例计算。该算例冰厚12.7 mm,导线直径 12.7 mm,设定 500 个单元,并假定该档线路上覆冰总量(88 m)中有 50%突然整体从档中部脱落,据此对该线路进行脱冰动力响应分析。本文通过覆冰加速度脱落判断准则对此算例进行分析对比,结果如图9所示。结果最大误差仅为1.4%,说明了本文诱发脱冰模拟方法的可靠性。

4 四分裂导线诱发脱冰振动特征分析

4.1 四分裂-间隔棒体系的有限元建模

以某特高压线路中单档四分裂导线为研究对象,脱冰计算档距 500 m,覆冰厚度 15 mm,每根子导线划分 200 个单元。按照工程设计,导线自重下的初始张力为 20%的拉断力,子导线间距 0.45 m,导线型号为 4×LGJ300-40,其参数列入表1。

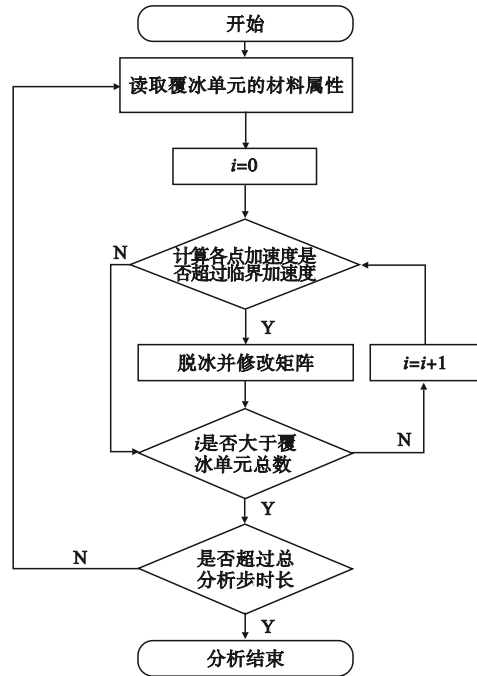


图8 诱发脱冰的求解流程
Fig.8 Solution procedure for induced deicing

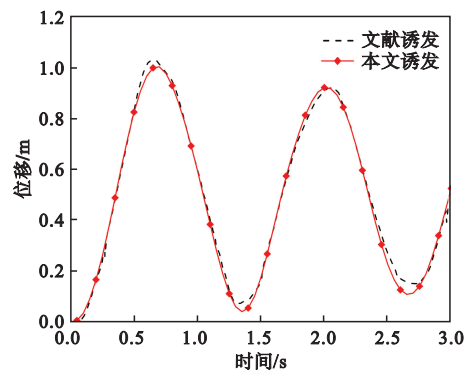


图9 中点位移对比
Fig.9 Comparison of midpoint displacements

表1 单根导线参数
Tab.1 Single wire parameters

参数类型	参数值
直径/mm	23.94
截面积/mm ²	338.99
单位质量/kg·m ⁻¹	1.133
计算拉断力/kN	92.2
弹性模量/N·mm ⁻²	73000

本文的间隔棒采用梁单元进行模拟。每个间隔棒重量为 11.3 kg,等效后的截面积为 362 mm²,密度取 7800 kg/m³。本文间隔棒为等间距安装,设置间距为 45 m,间隔棒数为 10 个。四分裂导线-间隔棒体系的有限元计算模型如图 10 所示。

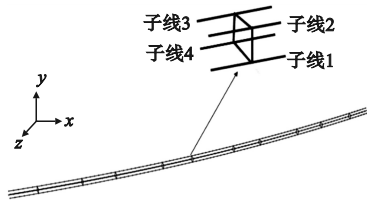


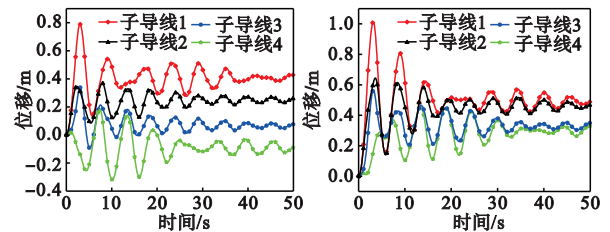
图 10 四分裂导线有限元模型
Fig. 10 Simulation model of four bundled conductor-spacers system

4.2 不同子导线诱发脱冰振动特性分析

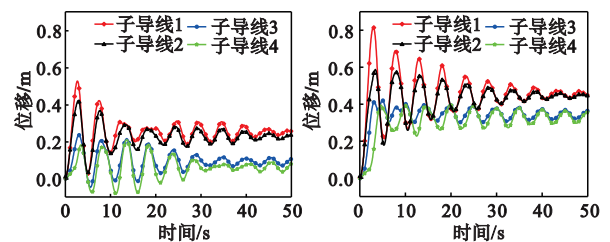
利用本文程序对不同子导线整体脱冰情况下其他子导线诱发脱冰引起的振动情况,判定加速度设置为 $a_{critical}=10 \text{ m/s}^2$ 。图 11(a)为子导线 1 整档脱冰引起各个子导线的冰跳高度。图 11(b)为各子导线设置诱发脱冰,导线 1 整档脱冰时各子导线中点的竖向位移时程曲线。当子导线 2 整档脱冰时,所有导线设置无诱发脱冰,此时各子导线的冰跳高度如图 11(c)所示。当子导线 2 整档脱冰时,所有导线设置诱发脱冰,此时各子导线的冰跳高度如图

11(d)所示。图 11 均选取导线中点的竖向位移。

从表 2 可以看出在诱发脱冰模式下,子导线 1 脱冰引起冰跳高度大于非诱发脱冰模式下的高度,接近非诱发脱冰模式的 1.25 倍;在诱发脱冰模式下子导线 2 脱冰引起冰跳高度大于非诱发脱冰模式下的高度,接近非诱发脱冰模式的 1.28 倍。



(a) 子导线1脱冰(无诱发脱冰模式) (b) 子导线1脱冰(诱发脱冰模式)



(c) 子导线2脱冰(无诱发脱冰模式) (d) 子导线2脱冰(诱发脱冰模式)

图 11 不同子导线脱冰引起的导线跳高度

Fig.11 Conductor jump height caused by deicing of different sub-conductors

表 2 各子导线最大冰跳高度

Tab. 2 Maximum ice jump height of each sub-conductor

工况	初始脱冰位置		覆冰厚度/ mm	临界加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	最大冰跳高度/m			
	子线 1	子线 2			子线 1	子线 2	子线 3	子线 4
4.2-a	100%	0%	15	无	0.79	0.36	0.34	0.18
4.2-b	100%	0%	15	10	1.01	0.64	0.56	0.45
4.2-c	0%	100%	15	无	0.42	0.53	0.21	0.23
4.2-d	0%	100%	15	10	0.59	0.81	0.40	0.42

4.3 脱冰临界加速度取值对诱发脱冰跳高度影响

为了进一步研究冰跳高度对判断脱冰的临界加速度的敏感性,由文献[14]可知,临界加速度数值很小的变化会对导线的冰跳高度造成很大的影响。所以,本文分别选取了 4 种判断脱冰的临界加速度 $a_{critical1}=10 \text{ m/s}^2$, $a_{critical2}=10.4 \text{ m/s}^2$, $a_{critical3}=11 \text{ m/s}^2$ 和 $a_{critical4}=11.4 \text{ m/s}^2$ 。首先假设子导线 1 整档脱冰,采用有限元程序数值仿真在诱发脱冰模式下子导线 2 中点的冰跳高度,如图 12 所示。

由图 12 可以发现随着判定加速度的增大,子导线 2 的诱发效应会随之变小,直到达到临界值后就不会再发生变化。在实际情况中,不同形态的冰脱冰需要的临界力是不一致的,内部粘结力越小就

越易脱落,所以该结果是符合实际情况的。

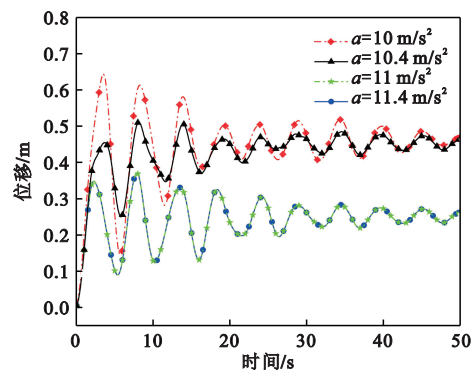


图 12 脱冰临界加速度对冰跳高度影响

Fig. 12 Influence of deicing critical acceleration on ice jump height

4.4 覆冰厚度对诱发脱冰冰跳高度影响

为了研究覆冰厚度对诱发脱冰情况下冰跳高度的影响,本文分别设定了3种覆冰厚度,即5 mm,10 mm和15 mm,判定加速度设置为 $a_{critical}=10\text{ m/s}^2$ 。首先假设子导线1整档脱冰,采用有限元程序数值仿真在诱发脱冰模式下子导线2中点的冰跳高度,如图13所示。

由图13可以发现,随着覆冰厚度的增大,子导线2的冰跳会随之变大,且诱发效应也会增大。在实际情况下,覆冰越厚,脱冰后产生的冲击力会越大,导致导线内部张力增大,会让子导线2的诱发效应增大,本文所得结论符合这个规律。

4.5 初始脱冰位置对诱发脱冰冰跳高度影响

为了研究不同初始脱冰位置对诱发脱冰情况

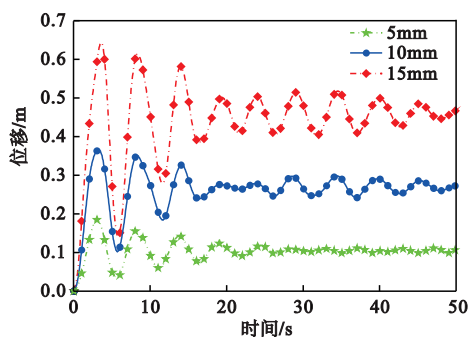


图13 不同覆冰厚度下诱发脱冰冰跳位移
Fig. 13 Deicing displacement induced by different ice

下冰跳高度的影响,本文分别选取了3组初始脱落单元0-60,60-120,120-180(子导线1的单元为0-200),判定加速度设置为 $a_{critical}=10\text{ m/s}^2$ 。首先假设子导线1中设置的初始脱冰单元脱冰,采用有限元程序数值仿真在诱发脱冰模式下子导线2中点的冰跳高度,如图14所示。

由图14可知,初始脱冰位置的不同会导致冰跳高度有明显差异,但总体的频率是一致的。初始脱冰位置越靠近导线中央处,该导线的冰跳高度越高,越容易产生诱发脱冰效应。

为了更直观分析子导线2产生诱发脱冰效应时其冰跳高度的变化,表3详细给出了各工况下子导线2的最大冰跳高度的数值。

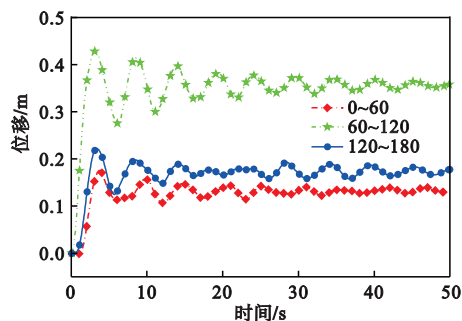


图14 不同初始脱冰位置下诱发脱冰冰跳位移
Fig. 14 Induced deicing displacement map under different initial deicing positions

表3 子导线2最大冰跳高度值

Tab. 3 Maximum ice jump height of sub-conductor 2

工况	子线1的初始脱冰位置	覆冰厚度/mm	临界加速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	最大冰跳高度/m
4.3-a	0-200 单元	15	10	0.65
4.3-b	0-200 单元	15	10.4	0.51
4.3-c	0-200 单元	15	11	0.36
4.3-d	0-200 单元	15	11.4	0.36
4.4-a	0-200 单元	5	10	0.19
4.4-b	0-200 单元	10	10	0.37
4.5-a	0-60 单元	15	10	0.17
4.5-b	60-120 单元	15	10	0.43
4.5-c	120-180 单元	15	10	0.22

5 结 论

本文基于CR法建立了输电线覆冰荷载下的动态模型,与现有文献的数据进行对比,验证了该方法的可靠性,分析了诱发脱冰效应对四分分裂-间隔棒体系冰跳的影响,得到如下结论。

(1)四分分裂-间隔棒体系子导线不同步脱冰时,诱发脱冰模式下子导线的跳跃高度为无诱发模式

的1.25~1.28倍。以往不考虑诱发脱冰效应,严重低估了初始脱冰冲击可能对输电线路造成的不利影响。因此,加入诱发脱冰效应去分析分裂导线的脱冰效应是有必要的,可以获得更接近真实情况的输电线路脱冰动力响应。

(2)分裂导线讨论诱发脱冰效应时,下方子导线脱冰引起的该子导线跳跃高度约为上方子导线脱冰引起的该子导线跳跃高度的1.247倍。下方

子导线初始脱冰,引起子导线的诱发效应会更危险。

(3)分裂导线随着脱冰临界加速度设定值的增加,诱发脱冰率显著下降,脱冰跳跃高度降低。随着覆冰厚度的增加,子导线的脱冰跳跃高度增加。初始脱冰位置越靠近导线中央位置,引起子导线的跳跃高度会越大。

(4)实际应用中,可以根据相关脱冰工况,通过模拟计算具体初始脱冰量大小及合适的位置去进行除冰,可以有效减少安全隐患和成本。本文提出的模拟方法可为重冰区分裂导线除冰应用提供合理参考。

参考文献(References):

- [1] 蒋兴良,张志劲,胡 琴,等.再次面临电网冰雪灾害的反思与思考[J].高电压技术,2018,44(2):463-469. (JIANG Xing-liang,ZHANG Zhi-jin,HU Qin,et al. Thinkings on the restrrike of ice and snow disaster to the power grid[J]. *High Voltage Engineering*, 2018,44(2):463-469. (in Chinese))
- [2] 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*, 1964,111(10):1736.
- [3] Jamaledine 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.
- [4] 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 Li-ming,et al. Study on de-icing jumping characteristics of iced conductor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29 (28): 115-121.
- [5] 沈国辉,徐 亮,徐晓斌,等.分裂导线-间隔棒体系的覆冰脱落研究[J].电网技术,2012,36(1):201-206. (SHEN Guo-hui,XU Liang,XU Xiao-bin,et al. Study on icing shedding of split wire-spacer bar system[J]. *Power System Technology*, 2012,36(1):201-206. (in Chinese))
- [6] 董永星,武怡帆,芮晓明,等.分裂导线不同步脱冰动力响应研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2018,45(1):86-91,100. (DONG Yong-xing,WU Yi-fan,RUI Xiao-ming, et al. Research on dynamic response of bundled conductor after non-synchronous ice shedding [J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2018, 45(1):86-91,100. (in Chinese))
- [7] Huang G Z, Yan B, Wen N, 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.
- [8] 翟 彬,张思祥,刘凯铭,等.输电线路多分裂导线脱冰动力响应分析[J].山东大学学报(工学版),2021,51(4):111-117,123. (ZHAI Bin,ZHANG Si-xiang, LIU Kai-ming, et al. Analysis on the dynamic response of multi-bundle transmission line subjected to ice-shedding [J]. *Journal of Shandong University (Engineering Science)*, 2021, 51(4): 111-117, 123. (in Chinese))
- [9] 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 Wei-qi,XING Hong-chao, 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. (in Chinese))
- [10] Kálmán T. Dynamic Behavior of Iced Overhead Cables Subjected to Mechanical Shocks[D]. Université du Québec a Chicoutimi, 2007.
- [11] Mirshafiei F. Modelling the dynamic response of overhead line conductors subjected to shock-induced ice shedding[D]. McGill University, 2010.
- [12] Ji K P, Rui X M, Li L, et al. The time-varying characteristics of overhead electric transmission lines considering the induced-ice-shedding effect [J]. *Shock and Vibration*, 2015,2015:635230.
- [13] 姬昆鹏.冲击载荷下覆冰架空输电线路动力响应研究[D].华北电力大学,2016. (JI Kun-peng. Study on Dynamic Response of Ice-Covered Overhead Transmission Lines under Impact Load[D]. North China Electric Power University, 2016. (in Chinese))
- [14] 唐 锐.输电线路脱冰动态模型建立及其在诱发脱冰中的应用[D].南京理工大学,2017. (TANG Rui. Establishment of Dynamic Model of Transmission Line Deicing and Its Application in Induced Deicing [D]. Nanjing University of Science and Technology, 2017. (in Chinese))
- [15] Battini J M. Co-Rotational Beam Elements in Instability Problems[D]. KTH, 2002.
- [16] Simo J C, Vu-Quoc L. On the dynamics in space of rods undergoing large motions—A geometrically exact approach[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 1988,66(2):125-161.
- [17] Roshan Fekr M., McClure G. Numerical modelling of the dynamic response of ice-shedding on electrical

- transmission lines[J]. *Atmospheric Research*, 1998, **46** (1-2):1-11.
- [18] Meng X B, Wang L M, Hou L, et al. Dynamic characteristic of ice-shedding on UHV overhead transmission lines[J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2011, **66**(1):44-52.
- [19] Mirshafiei F. Modelling the Dynamic Response of Overhead Line Conductors Subjected to Shock-Induced Ice Shedding[D]. McGill University, 2010.

Research on icing four-split wire-induced de-icing algorithm based on CR method

LU Jia-bo^{* 1,2}, WANG Jia-lin¹, LÜ Zhong-bin³, HUANG Zhan¹, FAN Li¹, WU Chuan³, LIU Xiao-hui¹

(1. School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. State Key Laboratory of Bridge and Tunnel Engineering in Mountain Areas, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

3. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: In order to more realistically and quickly simulate the induced de-icing process of ice-coated and split conductors, this paper develops a beam element calculation program based on the Corotational method, which can quickly and accurately simulate the large-displacement geometrically nonlinear problem of spacers. The beam element is degenerated into a rod element, which can quickly and accurately calculate the large-scale motion of the ice-coated wire space, and the reliability of the method is verified by an example. Finally, the judging criterion of the ice-coated shedding acceleration is defined, and the finite element model of the ice-coated four-split conductor induced de-icing is established. According to the finite element model, the de-icing jump height and variation law of each sub-conductor under different ice thickness, initial de-icing position and critical acceleration are studied. The results show that: the induced de-icing effect of different sub-conductors will produce different ice jump effects, which are close to 1.25 times of the non-induced de-icing mode; the induced effect caused by the lower sub-conductor is much larger than that of the upper sub-conductor; thicker or the closer the initial deicing position is to the midpoint, the smaller the critical acceleration, and the greater the induced effect. The simulation results in this paper can provide a reference for the design of transmission lines in heavy ice areas, and the simulation method proposed in this paper can provide a new research idea for the simulation of deicing and deicing of split conductors.

Key words: quad bundle conductors; ice-shedding induce effect; sub-conductor; dynamic response