

考虑高差覆冰输电线路链式脱冰振动

晏致涛^{1,2†}, 李孟珠¹, 熊辉¹, 游溢^{1,3}

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆科技学院 建筑工程学院, 重庆, 401331;
3. 国网新疆电力公司 电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐, 830011)

摘要:输电线路是电网中重要的生命线工程,覆冰荷载是输电线路最大威胁之一.以国网新疆电力科学研究院某工程为研究对象,采用商业软件 ANSYS 进行输电线路的有限元数值仿真,通过冰单元生死技术实现对覆冰输电线路链式和同时脱冰振动的有限元分析,得到等高差和有高差下单跨输电线路脱冰跳跃高度的规律,由此与缩尺模型实验结果进行对比分析.研究表明:链式和同时覆冰导线脱冰模拟结果与实验吻合很好,相差在 5% 以内,证明了模拟方式的准确性;在等高差链式脱冰下,随着脱冰速度的增大,最大脱冰跳跃高度会增大逼近到一个定值,而最大轴力不随脱冰速度变化而变化.有高差链式脱冰情况下,保持初张力不变时,随着高差的增大,跨中最大脱冰跳跃高度近似指数增大,链式脱冰的最大跳跃高度逐渐逼近同时脱冰的跳跃高度值;高差的存在会加剧输电线路的上翻情况,也即是脱冰跳跃最大高度大于覆冰后的垂度,可以通过降低输电线路的初张力或者覆冰厚度来减少上翻情况的发生,降低安全隐患.

关键词:架空输电线路;数值仿真;覆冰;跳跃高度;振动

中图分类号: TM75

文献标志码: A

Zippered Deicing Vibration of an Iced Transmission Line Considering Altitude Difference

YAN Zhitao^{1,2†}, LI Mengzhu¹, XIONG Hui¹, YOU Yi^{1,3}

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. School of Architecture and Engineering, Chongqing University of Science & Technology, Chongqing 401331, China;

3. State Grid Xinjiang Electric Power Company Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, China)

Abstract: Overhead transmission lines are lifeline projects, and ice load is one of the greatest threat to transmission lines safety. On the basis of the project of Chinese Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, the finite element numerical simulation models of overhead transmission lines were established by means of ANSYS software. Using the technique of birth and death of the element for ices, the finite element analyses of zippered and simultaneous ice-shedding vibrations were carried out. By analyzing the modeling parameters of the overhead transmission lines, the influence of altitude difference on the vibration response of single-span ice overhead transmission lines was studied, and compared with the results of the experiment of the scaled model. The results show that the simulations of the zippered and simultaneous ice-shedding are well matched with the experimental results and the discrepancies are less

* 收稿日期:2019-01-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51778097), National Natural Science Foundation of China(51778097); 重庆市科委自然科学基金重点项目

作者简介:晏致涛(1978—),男,江西南昌人,重庆大学教授,博士

† 通讯联系人, E-mail: yanzhitao@cqu.edu.cn

than 5%, which proves the accuracy of the simulation method. If the altitude of two suspension points is the same, the maximum jumping height first increases with the deicing speed and then is maintained at a constant value, while the maximum force is not affected by the deicing speed. If the altitude of the two suspension points is different, the maximum jumping height increases exponentially with the increase of altitude, and the jumping height of the zippered ice-shedding gradually approaches the value of simultaneous ice-shedding when the initial stress is constant. The existence of altitude aggravates the upturn of lines, and the maximum jumping height is greater than the sag of iced line. Meanwhile, the occurrence of upturn can be reduced by decreasing the initial stress and icing thickness of transmission lines.

Key words: overhead transmission lines; numerical simulation; ice shedding; jump height; vibration

覆冰输电导线的脱冰作为一种突加荷载,很可能使得输电导线在脱冰面内引起大幅度的振动,也就是常说的“冰跳”现象.这种现象容易对正常的输电线路造成闪络、烧伤、烧断等危害,同时极易使导线断股、绝缘子串断裂情况发生,严重时可能会导致输电塔倒塔,这些危害都会带来巨大经济损失^[1].输电线路的覆冰脱冰过程不仅涉及到了多学科的交叉,比如气象学、结构力学和空气动力学等^[2],而且在脱冰过程中输电导线表现出显著的几何非线性特点.

在理论上国内外研究者对输电线路脱冰问题进行了大量研究.最初是关于覆冰输电导线振动方程的研究,通过伽辽金方法,肖锡武等^[3]完成脱冰导线的非线性偏微分振动方程,在此基础上进行了输电线脱冰振动与幅频曲线关系的分析研究.之后利用软件建模分析,候镭等^[4]通过中心差分法,完成了覆冰输电线路脱冰与脱冰量、档距组合、均匀与非均匀脱冰方式的关系.在考虑了输电线脱冰振动的几何非线性下,晏致涛等^[5]得到了脱冰情况下导线跳跃高度、最大水平张力、绝缘子内力和摆动位移、支座反力等的变化规律.Jamaleddine 等^[6]在商业软件 ADINA 的基础上,通过利用突然卸载的方式模拟覆冰输电导线的脱冰过程.Laszlo 等^[7]在 ADINA 软件中通过改变导线的密度属性实现单跨的覆冰输电导线脱冰过程来研究脱冰振动.利用有限元方法,李永平等^[8]对单档的大跨距覆冰输电导线脱冰跳跃进行了动力响应的分析,得到了输电线脱冰过程中的跳跃高度和张力的变化规律.为了简化模型,鲁元兵等^[9]用单根导线来模拟分裂导线,完成了对三档覆冰输电导线不均匀脱冰过程的数值模拟.同样采用有限元法,王昕等^[10]完成了导线脱冰中脱冰档数、导线张力和档距等的参数分析.

除了振动跳跃的规律研究外,国内外的研究者还对脱冰振动控制进行了研究.如刘和云^[11]在覆冰模型和相应的数学模型基础上对导线的覆冰和脱冰跳跃进行了实验和计算机模拟的研究.李黎等^[12]利用 ANSYS/LS-DYNA 软件,采用非线性时程分析法,对覆冰输电导线的脱冰的振动进行了振动控制的研究,杜运兴等^[13,14]又对输电塔线体系及覆冰脱落进行了研究.

自然界中,输电线的脱冰过程更像是一个链式过程,而目前的已有研究几乎都是以同时脱冰为前提进行仿真分析,对链式脱冰的研究比较少,王璋奇等^[15,16]对架空线非同时脱冰跳跃进行了实验研究,同时从动张力的角度研究了脱冰速度对覆冰导线脱冰后导线动张力的变化规律;沈国辉等^[17]人也以数值仿真的方法研究了链式脱冰中脱冰速度对输电线路的脱冰影响规律;但他们都没有考虑到实际地形中的大高差对于输电线脱冰振动的响应影响.尽管有些学者已经简单研究了关于高差对脱冰的影响,如陈科全等^[18]研究的超高压输电线脱冰动力响应数值模拟,研究了高差对导线脱冰后最大冰跳高度的影响规律,但是并没有考虑链式脱冰和大高差对脱冰振动以及悬垂绝缘子运动的影响.所以目前对输电线脱冰问题仍需进一步的认识,对覆冰输电导线的脱冰跳跃响应和脱冰过程中导线的各种参数都有待广泛及深入的研究.

本文利用 3 自由度的索单元,建立单跨覆冰输电导线模型,通过 ANSYS 的生死单元,来模拟覆冰导线的同时脱冰和链式脱冰过程,并与缩尺模型实验得到的结论进行了对比,证明了链式脱冰和同时脱冰的准确性,最后在此基础上研究了高差对线路脱冰响应的影响.

1 缩尺模型脱冰试验

进行了单跨导线缩尺模型链式脱冰试验.试验的几何相似比为 1 : 30,原型档距为 270 m,所以模型的档距为 9 m,为了保证输电线路的拉伸刚度,使用抗侧弯刚度能力低的碳素线作为模拟导线的材料.为了保证动力相似,实验采用 Froude,Cauchy 和 Reynolds 数相似.采用 12 个集中质量等效覆冰的质量模拟输电线路的覆冰,实验中通过 PCL 电路图依次控制电磁铁吸盘的磁性来实现集中质量的脱落顺序及脱落的时间间隔来完成覆冰脱落的过程,以此来研究不同的脱冰速度下覆冰输电线路脱冰的过程,利用 DIC-3D 高速摄像机来记录单跨跨中的导线脱冰之后跳跃高度的变化.

该试验的模型以及原型的参数如表 1 所示.因为试验中要用到电磁铁吸盘,将电磁铁吸盘均匀分布在输电线上,而此时的电磁铁吸盘质量刚好满足了输电线路的配重质量.覆冰采用悬挂集中小铁块方法,其中小铁块可以吸附在电磁铁吸盘上,可以控制电磁铁磁性来完成脱冰的过程.试验中的链式脱冰是通过试验中的时间继电器来实现的,通过在时间继电器上设置时间间隔来实现电磁铁吸盘依次失去磁性,而两个小铁块的距离除以时间继电器的时间间隔就是脱冰速度.

表 1 导线原型与模型参数

Tab.1 Parameter of the conductor and model

参数名称	原型	模型
档距/m	270	9
垂度/m	2.9038	0.0968
刚度 E_s/N	1.565×10^{14}	5.796×10^9

其中 PCL 电路图如图 1,右侧电路为从中间到两边的控制电磁铁磁性的释放一次回路图,即是从中间到两边控制释放电路的执行电路图;左侧电路为从中间到两边的控制电磁铁磁性的释放二次回路图,即是从中间到两边控制释放电路的控制电路图.图中符号的含义:FU 代表熔断器,SB 代表控制按钮,KM 代表接触器,KT 代表时间继电器,M 代表电磁铁. KM2,KM3,KM4,KM5 是具有四对触点的接触器,其余的接触器为具有两对触点的接触器.试验中只要设定下时间继电器的时间 KT1,然后按下动作按钮就可以实现链式脱冰的过程.

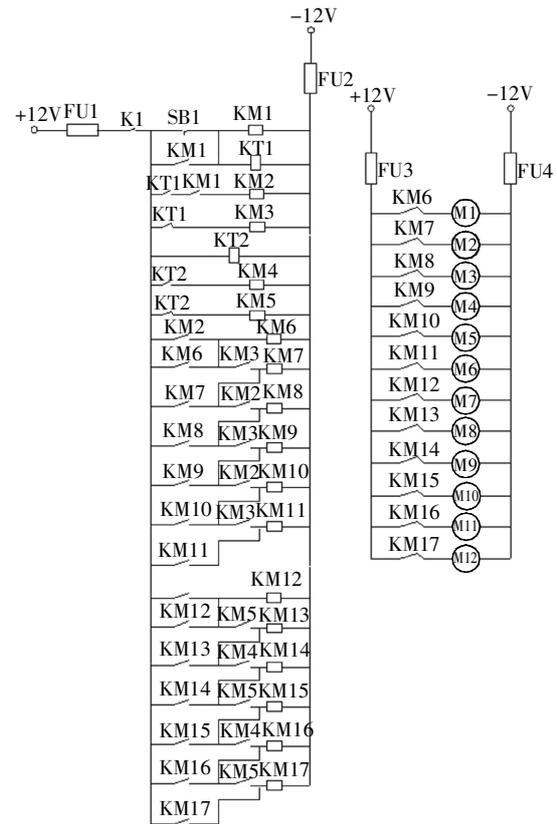


图 1 PCL 电路图

Fig.1 PCL circuit diagram

2 输电线路有限元模拟

2.1 导线建模

由于架空输电导线是由多股细金属的钢芯铝绞线绞合而成的,其截面尺寸大小远小于架空导线的档距,所以可以有以下的假定:1)悬索为只承受拉力,不能承受压力及弯矩的理想柔性结构;2)材料特性满足胡克定律.在有限元软件 ANSYS 中,Link10 单元仅受拉或受压,且支持大变形效应,将单元剖分足够细时,适合作为模拟柔性导线的索单元.在进行导线的建模时,实际的输电线为分裂导线,由于由分裂导线进行建模得到的模拟结果与单根导线差值不大^[9],所以这里采用单根导线来等效分裂导线.将导线分为 100 个单元.有限元模型相关设置参数见表 2.

2.2 绝缘子建模

输电导线中的绝缘子作用是悬挂导线,当绝缘子两侧输电导线拉力不平衡时,绝缘子会绕悬挂点发生偏转,本文采用 Link10 单元进行建模.由于脱冰时塔头顺线向位移较小,量级约为 0.1 m^[4],远小于线路档距;且输电塔自振基频要远大于导线自振基频^[15].因此,不考虑输电塔的刚度对覆冰输电导线脱

冰造成的影响,采用固支来模拟绝缘子在塔架端的自由度约束.

表 2 有限元模型相关参数

Tab.2 Related parameters of finite element model

(a)导线特性参数

参数名称	数值
档距/m	270
泊松比	0.3
杨氏模量/GPa	
截面积/mm ²	2484
初应力/Mpa	89.2
有限元单元	Link10
导线阻尼比/($\times 10^{-3}$)	8.2
导线单位长度质量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	7.676

(b)导线覆冰特性参数

参数名称	数值
垂度/m	4.509
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	900
等效厚度/mm	30
有限元单元	Mass21
覆冰后应力/MPa	119
覆冰单位长度质量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	7.315

2.3 覆冰脱冰模拟

通常让覆冰模型简化为新月形截面包裹在输电导线的外面^[6],将覆冰等效为荷载离散地分布在输电导线的若干点上,分为集中荷载和均匀荷载如图2所示. Jamaledine^[6]等人已经验证了利用集中荷载和均匀荷载时覆冰输电导线的脱冰跳跃响应基本吻合,所以本文采用集中荷载的方法即通过冰单元模拟集中荷载覆冰,同时通过杀死冰单元来实现覆冰输电导线的脱冰现象.脱冰方式如图3所示.在分析建模时直接将覆冰模拟为单元节点处的集中质量,采用 Mass21 单元模拟集中质量.在模拟脱冰时,相应的卸载该单元处的等效质量块,通过控制单元生死来模拟覆冰的同时和链式脱落过程.

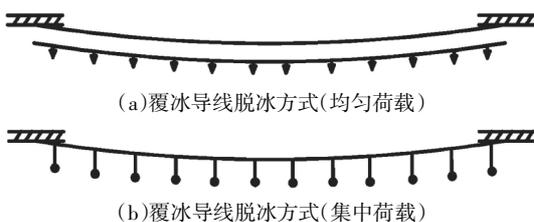


图 2 覆冰等效荷载模型

Fig.2 Icing equivalent load model

覆冰模型中,我们等分成 12 个集中荷载,每一个集中荷载的质量为: $M = 270/12 \times$ 覆冰单位长度质量 = 165 kg.

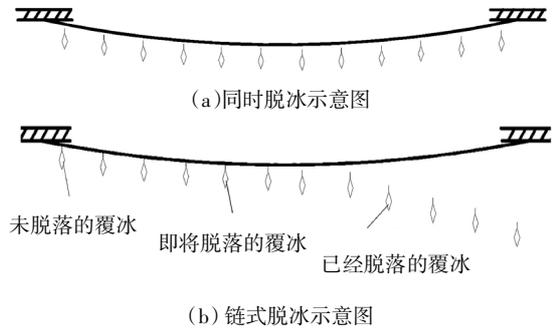


图 3 覆冰输电线的脱冰方式

Fig.3 Deicing mode of ice overhead transmission lines

3 导线找形

导线找形分为导线的自重找形和导线覆冰后找形.导线自重找形采用在悬链形基础上直接迭代法.首先利用悬链线方程在两个悬点之间建立一条直线,之后对该悬链线进行网格划分为一定数量的 Link10 单元.悬链线的两端点采用全约束,通过材料的实际特性来设置悬链线的属性,实常数以及初应变,再施加重力荷载来逐步更新覆冰输电导线的有限元模型,以导线的张力作收敛条件进行迭代,最终找形结果就是输电导线自重荷载情况下的初始变形.导线覆冰后的找形同样利用荷载的逐步迭代进行.覆冰采取等效集中荷载方法进行模拟,在导线覆冰找形时以荷载步方式施加荷载,确定覆冰导线最终形状如图4所示.

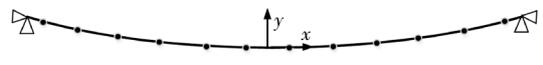


图 4 导线找形后的最终形状

Fig.4 Final shape of conductor after form-finding

4 链式脱冰模拟及参数分析

覆冰输电线的脱冰模拟工况如表3所示.下面将分别讨论脱冰速度、倾角高差、覆冰厚度以及初张力的影响.

4.1 不同脱冰速度响应分析

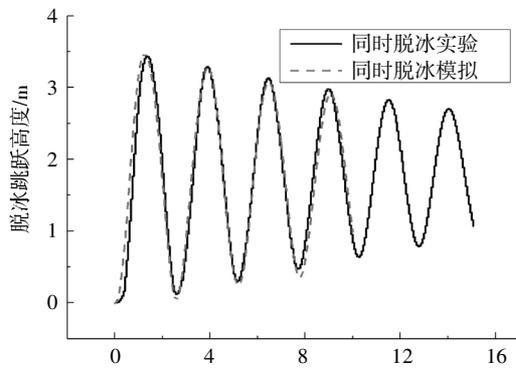
通过试验和模拟研究等高差下脱冰速度分别为 7.5 m/s, 3.75 m/s 和 1.875 m/s 的链式脱冰及同时脱冰,脱冰方向全都设置为从中间到两边脱冰,各脱

冰工况下导线的初应力 89.2 MPa 不变,覆冰厚度 30 mm,得到不同脱冰速度下跨中跳跃高度数值仿真和试验的时程对比(图5)。图中显示吻合效果完好,证明了模拟的准确性,在此基础上又全面研究了脱冰速度对输电线路脱冰跳跃响应的影响。

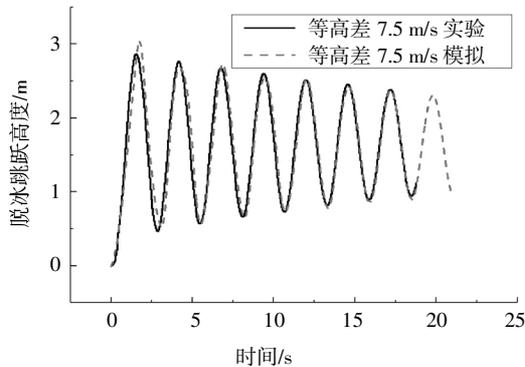
表3 覆冰输电线路脱冰模拟工况

Tab.3 Ice-covered transmission line deicing simulation conditions

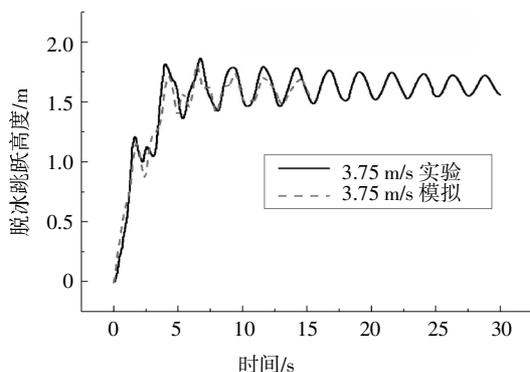
脱冰速度	倾角高差/(°)	覆冰厚度/mm	初张力/kN
同时脱冰	0	10	90
7.5 m/s 链式	14,30	20	110
3.75 m/s 链式	48,59	30	150
1.875 m/s 链式	71,78	—	—



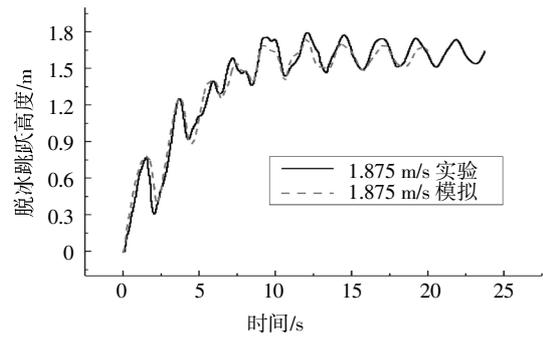
(a)同时脱冰模拟



(b)7.5 m/s 链式脱冰



(c)3.75 m/s 链式脱冰



(d)1.875 m/s 链式脱冰

图5 不同脱冰速度下跨中跳跃高度数值仿真与试验时程响应对比图

Fig.5 Comparison of numerical simulation and experimental time history response of mid-span jump height in different deicing speeds

由图6和图7可以看出脱冰位移响应和动力响应曲线随脱冰速度的增大,曲线的频率逐渐增大.显然,当脱冰速度增大到一定程度,最大脱冰跳跃高度会逼近收敛到一个定值.图8中跨中的脱冰跳跃高度和轴力表明脱冰跳跃最大高度随着脱冰速度的增大先逐渐增大,然后趋于不变.此时的脱冰跳跃最大高度近似是覆冰后垂度的76.5%.脱冰跳跃的最大轴力始终为初始覆冰后的轴力值,与脱冰速度无关。

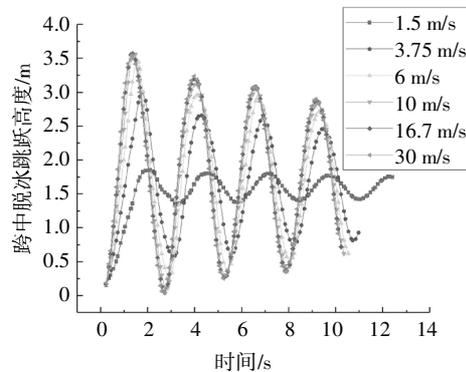


图6 不同脱冰速度的位移响应时程曲线

Fig.6 The displacement response time history curves of different deicing speeds

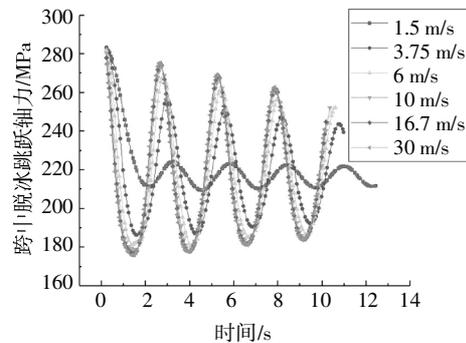


图7 不同脱冰速度的动力响应时程曲线

Fig.7 Dynamic response time history curves of different deicing speeds

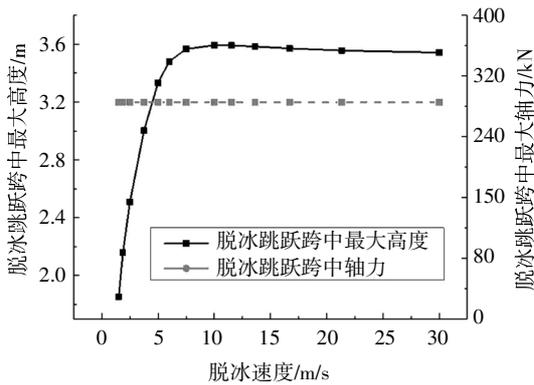


图8 不同脱冰速度下脱冰跳跃高度及轴力变化
Fig.8 The height and axial force of ice-shedding jump under different deicing speeds

4.2 有高差不同倾角的影响

这里考虑两端挂点不同有高差线路的脱冰振动分析.线路水平档距仍为 270 m,其高差通过两端挂点与水平夹角来表征.分析模拟了有高差下不同倾角工况来研究高差对于脱冰跳跃响应的影响,设置脱冰方向为从中间到两边,保持脱冰速度 7.5 m/s、覆冰厚度 30 mm 和初应力 89.2 MPa 为不变量进行分析,通过试验证明模拟准确性后,研究高差对脱冰的影响,得到以下同时脱冰和链式脱冰下跨中脱冰跳跃高度随高差变化的曲线图.

由图 9 可知,当保持输电线的初应力和覆冰厚度为 10 mm 不变时,跨中最大跳跃高度随着高差的增大近似成指数增大;这里再次验证了同时脱冰的最大跳跃高度是大于链式脱冰的最大跳跃高度,同时从图中的分析还可以知道,随着高差的增大,链式脱冰的跨中最大跳跃高度逐渐逼近同时脱冰的最大跳跃高度.

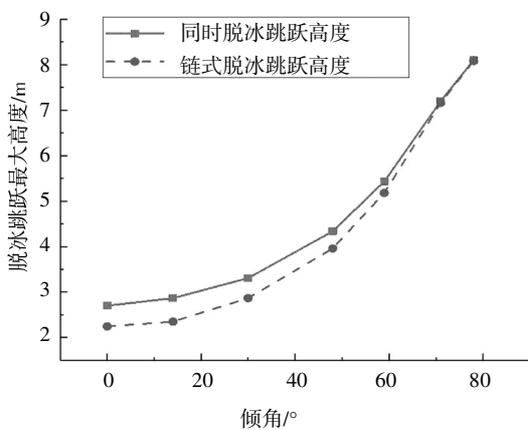


图9 跨中最大跳跃高度随倾角变化图
Fig.9 Diagram of variation of maximum jump heights mid-span with the different angle

在前面所述基础上又分别研究了在有高差和无高差情况下,覆冰厚度和初张力对覆冰后垂度和脱冰跳跃高度的影响,如图 10 和图 11 所示.当覆冰厚度较大或者初张力较大时,不论是有高差还是没有高差都会出现脱冰跳跃的高度大于覆冰后的垂度的情况,也就是输电线出现上翻的情况,但是同样条件下有高差造成的上翻情况更加危险;当覆冰厚度较大或者初张力较大时,覆冰后的垂度与链式脱冰跳跃的高度差值在有高差时明显要大,同时增长要快,所以高差会加剧脱冰跳跃的上翻,就更容易造成输电线的短线闪络情况,给电网的安全带来严重的隐患,所以在进行输电线路设计中要考虑高差带来的影响,减少不必要的危险发生.

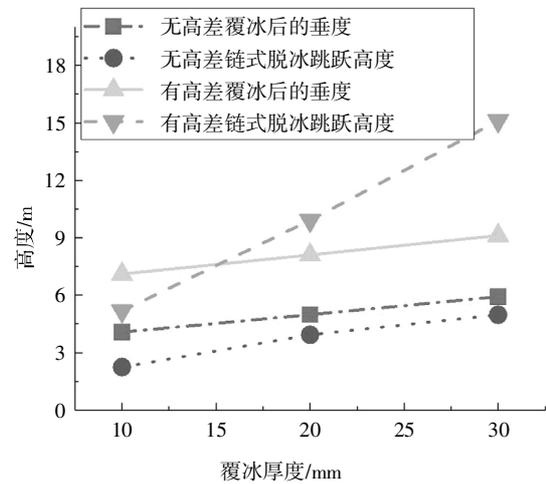


图 10 不同覆冰厚度下跨中垂度和最大脱冰跳跃高度
Fig.10 The sag of iced conductor and maximum jump of the mid-span under different icing thicknesses

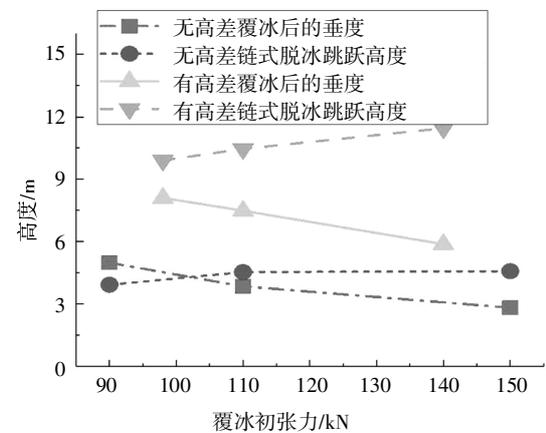


图 11 不同覆冰初张力下跨中垂度和最大脱冰跳跃高度
Fig.11 The sag of iced conductor and maximum jump heights of the mid-span under different axial force

5 结论

输电线路脱冰振动是输电线路的一大威胁.实际工程中输电线路脱冰是基于链式脱冰,并往往存在大高差.本文基于 Ansys 软件,在采用杀死冰单元方法模拟并验证的基础上,研究了覆冰输电线路链式脱冰情况下的响应及高差对脱冰的影响,得出了以下结论:

1)同时脱冰和链式脱冰模拟和试验结果吻合较好,证明模拟的准确性.

2)等高差链式脱冰下,随着脱冰速度的增大,脱冰跳跃最大位移先增大,然后趋于不变.导线的轴力与脱冰速度无关.

3)初应力不变情况下,跨中的脱冰跳跃最大高度随着高差的增大近似指数增大,链式脱冰最大跳跃高度随着高差增大逐渐逼近同时脱冰的最大跳跃高度.

4)当覆冰厚度较大或者初张力较大时,都会出现输电线的上翻情况(跳跃高度大于覆冰后垂度),高差的存在加剧了上翻情况的发生,需要在设计中加以考虑.

参考文献

- [1] FARZANEH M. Atmospheric icing of power networks [M]. Berlin: Springer, 2008: 1—29.
- [2] 蒋兴良,易辉.输电线路覆冰及防护[M].北京:中国电力出版社, 2002: 1—57.
JIANG X L, YI H. Ice-coating and prevention of transmission line [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002: 1—57. (In Chinese)
- [3] 肖锡武,杨军,DRUEZ J,等.悬垂缆线的非线性振动[J].振动:测试与诊断,2003,23(2):110—113.
XIAO X W, YANG J, DRUEZ J, et al. Nonlinear oscillations of a suspended cable[J]. Journal of Vibration Measurement & Diagnosis, 2003, 23(2): 110—113. (In Chinese)
- [4] 侯镭,王黎明,朱普轩,等.特高压线路覆冰脱落跳跃的动力计算[J].中国电机工程学报,2008,28(6):1—6.
HOU L, WANG L M, ZHU P X, et al. Dynamic behavior computation of ice shedding of UHV overhead transmission lines [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 1—6. (In Chinese)
- [5] 晏致涛,张海峰,李正良.基于增量谐波平衡法的覆冰输电线路舞动分析[J].振动工程学报,2012,25(2):161—165.
YAN Z T, ZHANG H F, LI Z L. Galloping analysis of iced transmission lines based on incremental harmonic balance method [J]. Journal of Vibration Engineering, 2012, 25 (2): 161—166. (In Chinese)
- [6] JAMALEDDINE A, MCCLUREI G, ROUSSELET J. Simulation of ice-shedding on electrical transmission lines using ADINA [J]. Computers and Structures, 1993, 47(4/5): 523—536.
- [7] LASZLO E, FARZANEH M. Vibration of bundled conductors following ice shedding [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 1097—1104.
- [8] 李永平,苏攀,郑毅.架空导线覆冰及脱冰的数值模拟研究[J].水电能源科学,2010,28(12):133—135.
LI Y P, SU P, ZHENG Y. Research on icing and ice-shedding numerical simulation of overhead conductors [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(12): 133—135. (In Chinese)
- [9] 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 Y B, LOU W J, LI H L. Whole process analysis for non-uniform ice shedding of transmission lines [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(9): 47—50. (In Chinese)
- [10] 王昕,楼文娟.多跨输电线路脱冰动力响应研究[J].工程力学,2011,28(1):226—232.
WANG X, LOU W J. Dynamic response analysis of multi-span transmission line to ice-shedding shock [J]. Engineering Mechanics, 2011, 28(1): 226—232. (In Chinese)
- [11] 刘和云.架空线覆冰和脱冰机理的研究[D].武汉:华中科技大学,2001:1—60.
LIU H Y. Theories and applications of ice-coating and its prevention on overhead transmission line [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2001: 1—60. (In Chinese)
- [12] 李黎,张行,尹鹏.大跨越输电线路脱冰跳跃反应的控制研究[J].振动与冲击,2008,27(10):61—64.
LI L, ZHANG X, YIN P. Investigation on control over leap of long span transmission line due to ice-shedding shock [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(10): 61—64. (In Chinese)
- [13] 杜运兴,卢心龙.输电塔线体系风致覆冰脱落动力响应的研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(11):88—94.
DU Y X, LU X L. Research on dynamic response of ice wind-induced ice-shedding of transmission tower-line system [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2015, 42(11): 88—94. (In Chinese)
- [14] 杜运兴,卢心龙,聂逸悠.线路覆冰分层脱落动力响应的研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2017,44(7):104—110.
DU Y X, LU X L, NIE Y Y. Research on dynamic response of ice layer shedding in line system [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2017, 44(7): 104—110. (In Chinese)
- [15] 王璋奇,王剑,齐立忠.同期脱冰架空输电导线的动张力特性实验研究[J].噪声与振动控制,2016,36(1):157—162.
WANG Z Q, WANG J, QI L Z. Experimental study on the dynamic tension characteristics of the overhead transmission conductor under synchronous ice shedding [J]. Noise and Vibration Control, 2016, 36(1): 157—162. (In Chinese)
- [16] 王璋奇,齐立忠,王剑,等.架空输电线路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 Z Q, QI L Z, WANG J, 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. (In Chinese)
- [17] 沈国辉,袁光辉,孙炳楠,等.考虑脱冰速度效应的输电线路脱冰模拟[J].重庆大学学报,2010,33(9):132—138.
SHEN H, YUAN G H, SUN B N, et al. Simulation of ice-shedding on transmission lines considering ice-shedding velocity effect [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33 (9): 132—138. (In Chinese)
- [18] 陈科全,严波,郭跃明,等.超高压输电线路脱冰动力响应数值模拟[J].重庆大学学报,2009,32(11):1306—1310.
CHEN K Q, YAN B, GUO Y M, et al. Dynamic responses of ultra-high voltage transmission line ice shedding [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(11): 1306—1310. (In Chinese)
- [19] ZHANG Q, POPPLEWELL N, SHAH A H. Galloping of bundle conductor [J]. Journal of Sound and Vibration, 2000, 234(1): 115—134.