

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0170

## 输电线路爆破除冰动态特性\*

谢东升<sup>1</sup>, 孙滔<sup>1</sup>, 史卓鹏<sup>1</sup>, 智生龙<sup>1</sup>, 史淋升<sup>2</sup>, 李海涛<sup>2</sup>

(1. 国网山西省电力公司经济技术研究院, 山西 太原 030002;

2. 中北大学理学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 为研究输电线路爆破除冰效果及动态特性, 进行了 50 m 孤立档输电线路爆破除冰模型实验, 采用人工覆冰方式, 通过引爆预设于输电线下侧的导爆索去除部分线路覆冰, 测量了爆破除冰过程中三种输电线路档中位移和端部动张力, 并将爆破载荷简化为三角波载荷, 利用有限元软件 ABAQUS 对实验工况进行了模拟验证; 进一步利用模拟方法研究了爆破除冰量为 20% 时除冰位置对跳跃幅值和动张力的影响。结果表明: 对于雨淞, 爆破作用只会引起输电线路爆破区域的覆冰脱落; 爆破除冰时跳跃幅值和动张力幅值均大于相同位置自然脱冰, 而随除冰位置的变化趋势与自然脱冰相似; 与导线相比, 地线光缆的跳跃幅值受爆破作用影响更显著。

**关键词:** 输电线路; 爆破除冰; 有限元方法; 跳跃幅值; 动张力

中图分类号: O329; TM751

国标学科代码: 13020

文献标志码: A

## Dynamic characteristics of electric transmission lines undergone blasting de-icing

XIE Dongsheng<sup>1</sup>, SUN Tao<sup>1</sup>, SHI Zhuopeng<sup>1</sup>, ZHI Shenglong<sup>1</sup>, SHI Linsheng<sup>2</sup>, LI Haitao<sup>2</sup>

(1. State Grid Shanxi Economic and Technical Research Institute, Taiyuan 030002, Shanxi, China;

2. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic characteristics of electric transmission lines undergone blasting de-icing and the corresponding de-icing effects, model experiments on the isolated transmission lines with a span of 50 m were carried out. The artificial icing was performed out and the detonating cords preset at the lower sides of the transmission lines were detonated to remove partial ice covers of the transmission lines. The displacements and dynamic tensions of three kinds of transmission lines were measured during blasting de-icing. The blasting load was simplified as a triangular wave load, and the experimental conditions were simulated and verified by the finite element software ABAQUS. Furthermore, the effects of the de-icing positions on the jumping height and dynamic tension were explored when the ice was removed by twenty percent. The results show that for glaze ice, the blasting action can only cause the ice to fall off in the blasting area of the transmission lines. The amplitudes of the jumping and dynamic tension induced by blasting de-icing are greater than those by natural de-icing at the same locations, and their changing trends with de-icing location are similar to those by natural de-icing. Compared with the conductor, the jump amplitudes of the ground wire and the optical cable are more significantly affected by blasting.

**Keywords:** transmission line; blasting de-icing; finite element method; jumping amplitude; dynamic tension

电力系统是重要的生命线工程, 保证它的安全稳定运行具有重要意义。输电线路覆冰是威胁电力系统安全的重要因素之一, 严重覆冰造成的线路过载和脱冰引起的导线舞动可能导致相间闪络、金具

\* 收稿日期: 2020-05-29; 修回日期: 2020-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(11902294); 山西省应用研究基础计划(201801D221037);  
国网山西电力公司科技项目(520533170007)

第一作者: 谢东升(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 504125662@qq.com

通信作者: 李海涛(1977—), 男, 博士, 副教授, lhtlx95@nuc.edu.cn

损坏、跳闸停电等故障,甚至断线倒塔等严重事故<sup>[1-2]</sup>。因此,覆冰输电线路的除冰防治技术是电网建设中急需解决的重要课题之一。

目前,实际应用的输电线路除冰方法主要有热力融冰、机械除冰和被动除冰三类<sup>[3]</sup>。热力融冰是利用附加热源或导线自身发热,使冰雪无法在导线上积累生长或使覆冰融化,热力融冰虽然除冰效果明显,但换流设备费用高且能耗较大;机械除冰利用机械外力使导线上的覆冰破碎脱落,除冰能耗小、费用低,但除冰效率低且需要人工参与<sup>[4]</sup>;被动除冰通过在导线上安装阻雪环、平衡锤等装置,在覆冰达到一定厚度时,在风力、温度和重力等作用下使覆冰自然脱落,该方法除冰偶然性大,无法实现可靠除冰。此外,机器人除冰<sup>[5]</sup>、激光除冰<sup>[6]</sup>、超声波除冰<sup>[7]</sup>等除冰技术也取得了一定的成效,但目前尚缺乏一种经济高效、操作简便的除冰技术。

近年来,宋巍等<sup>[8]</sup>、谢东升等<sup>[9]</sup>提出了将线性装药预设于输电线路,通过爆破的方法去除部分线路覆冰的新思路,并通过小尺寸覆冰输电线路的爆破实验和数值模拟研究了药量和装药间距对除冰效果的影响,初步验证了爆破除冰的可行性,但未考虑除冰时脱冰振荡对输电线路的影响。覆冰脱落会引发输电线路大幅振荡,可能会诱使其他位置的覆冰陆续脱落,除冰不当容易引发安全事故,因此有必要进一步对爆破载荷作用下输电线路的动力效应进行研究。

目前,已有实验<sup>[10-12]</sup>和数值模拟<sup>[13-15]</sup>对输电线路覆冰脱落的一系列研究,主要针对输电线路覆冰自然脱落的情形,对爆破载荷作用下线路脱冰的研究却鲜有报道。本文中,设计单档输电线路爆破除冰模型实验,使用实际的钢芯铝绞线、钢绞线和光纤复合地线,采用爆破方式将输电线路的人工覆冰部分去除,模拟输电线路在爆破载荷作用下的脱冰振荡。测量覆冰脱落过程中的档中位移和端部张力,得到输电线路爆破除冰的动力特性。此外,利用有限元方法对实验工况进行数值模拟,将模拟结果与实验数据进行验证,在确定模拟方法合理性的基础上,进一步利用模拟模型研究脱冰位置对输电线路爆破除冰动力特性的影响。

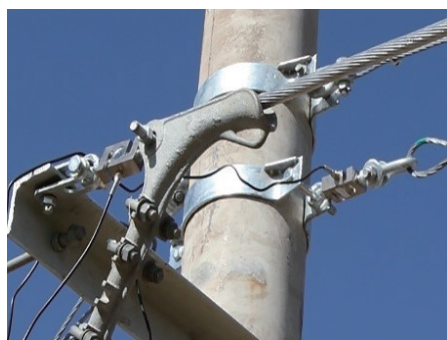
## 1 实验过程

设计了档距为 50 m 的孤立档输电线路爆破除冰模型,输电线路采用 2 根 LGJ-240/30 型钢芯铝绞线、1 根 GJ-50 钢绞线和 1 根 OPGW-24B1-50 光缆,输电线路有关参数见表 1。输电线路两端串入拉力传感器悬挂在两侧的水泥电杆(导线通过横担悬挂)上,在输电线路档中测点引出细钢丝绳,连接测点正下方固定在地面的拉线位移传感器,实验中钢丝绳始终处于拉紧状态。利用拉力传感器和位移传感器即可记录除冰过程中输电线路的动张力和档中位移的变化情况,传感器及安装位置如图 1 所示,实验模型如图 2 所示。

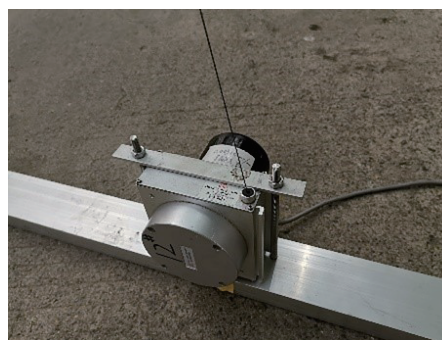
表 1 输电线路物理参数

Table 1 Physical parameters of transmission lines

输电线路	直径/mm	截面积/mm <sup>2</sup>	线密度/(kg·m <sup>-1</sup> )	杨氏模量/GPa
LGJ-240/30	21.6	275.96	0.9222	73
GJ-50	9.0	49.48	0.4119	185
OPGW-24B1-50	9.6	48.25	0.345	162



(a) Tension sensor



(b) Pull line displacement sensor

图 1 传感器及安装

Fig. 1 Installation of sensors

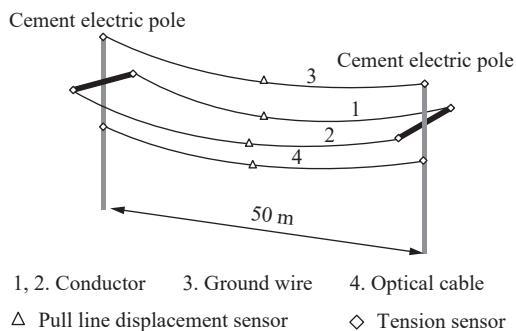


图 2 实验模型

Fig. 2 Experimental model

拉线位移传感器为 EY503-5000 系列, 量程 5 000 mm, 传感器精度 5 mm; 拉力传感器为 STC-1 500 kg, 并利用 DH3820 高速静态应变测试分析系统采集并输出实验数据, 采样频率为 50 Hz。

在输电线爆破除冰实验中, 先在输电线指定位置敷设导爆索, 然后采用人工方式使输电线表面真实覆冰, 当覆冰达到一定厚度时通过引爆导爆索去除单根输电线指定位置的覆冰, 观察除冰效果及输电线振荡对线路其他位置覆冰的影响, 并测量脱冰振荡过程中输电线位移和张力的变化。将导爆索敷设在导线 1、地线 3 和光缆 4 上, 导线 2 不敷设导爆索, 用于观察同档输电线爆破除冰时对该导线覆冰的影响。自然条件下, 在较长线路进行人工覆冰很难准确控制覆冰的均匀程度, 不便于在相同覆冰条件下进行重复实验, 因此分别对三种输电线进行一次爆破除冰实验, 通过有限元方法对实验工况进行模拟验证, 再进一步利用数值模拟研究爆破位置对动态特性的影响。实验中, 为消除爆破位置特殊性对实验结果的影响, 输电线上的导爆索采用随机敷设, 导线、地线和光缆分别间隔敷设 3 段、2 段和 1 段导爆索, 同一输电线上导爆索之间使用导爆管连接, 且通过导爆管雷管进行引爆, 输电线上导爆索敷设位置如图 3 所示, 实验工况见表 2。

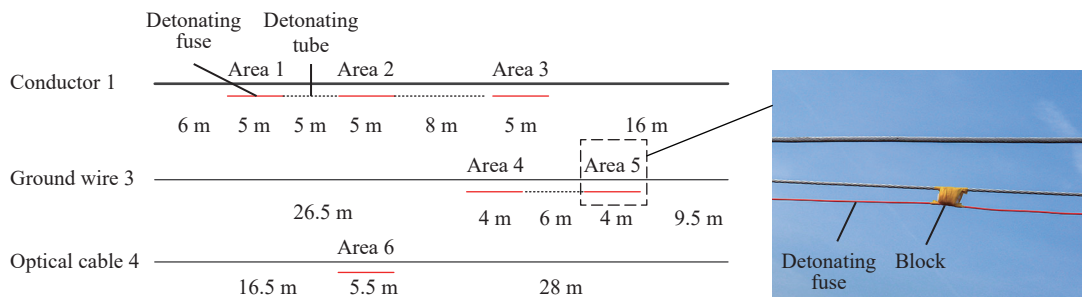


图 3 导爆索敷设

Fig. 3 Setting of detonating cord

表 2 实验工况

Table 2 Conditions of experiment

工况	脱冰区域
1	导线 1 区域 1、2、3 同时爆破除冰
2	地线 3 区域 4、5 同时爆破除冰
3	光缆 4 区域 6 爆破除冰

采用塑料导爆索太安装药 (PETN), 外径为 5 mm, 装药线密度约为 11 g/m。导爆索等间距平行敷设在导线下方, 间距为 50 mm。导爆索敷设完成后, 对输电线进行人工覆冰。在室外环境 -15~-10 °C 条件下, 利用高压喷雾装置在线路附近缓慢均匀喷射 0 °C 水雾, 连续作业 2~3 h, 完成模型线路覆冰。由于人工覆冰的线路较长,

且覆冰情况受气温、风速等气象条件的影响, 线路覆冰并不均匀, 厚度最大 25 mm、最小 10 mm, 且形成了冰挂, 类似冻雨天气下输电线上形成的雨淞, 如图 4 所示。为与预敷导爆索的输电线自然覆冰情况相符, 在人工覆冰过程中未对导爆索进行防护, 因此导爆索表面也被覆冰包裹。覆冰完成后, 采用单点起爆方式对输电线进行爆破除冰实验, 观察各工况下爆破除冰效果, 并获得了测点位移和动张力的时程响应。

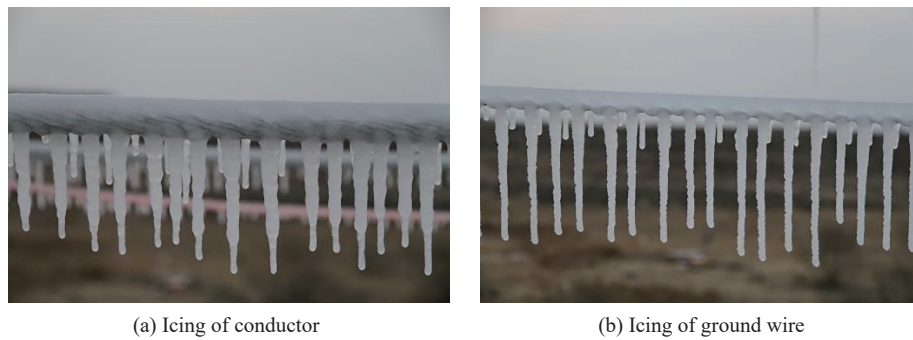


图 4 架空线表面人工覆冰  
Fig. 4 Artificial icing on surface of overhead transmission line

## 2 有限元数值模拟

为了对实验结果的准确性进行验证,进一步分析实验现象以及爆破载荷作用下覆冰脱落的动力效应,使用有限元软件 ABAQUS 对实验线路进行建模,通过数值模拟对各实验工况输电线档中位移和端部张力进行比较验证;进一步研究除冰位置对输电线脱冰动力效应的影响,并与相同条件下自然脱冰的动力效应进行对比分析。

在有限元软件 ABAQUS 中,采用梁单元模拟角钢横担,采用不可压缩混合杆单元 T3D2H 模拟输电线,忽略水泥电杆的变形并简化为刚体,采用附加冰单元法模拟输电线覆冰脱落,忽略覆冰的不均匀性,覆冰截面形状简化为等截面圆环,用 B31 管梁单元模拟,冰单元与导线单元采用共节点绑定,覆冰密度设为  $0.92 \text{ g/cm}^3$ ,弹性模量设为  $1 \text{ GPa}$ 。按照实验模型相关参数信息建立有限元模型,并依据覆冰前测量的输电线档中弧垂(见表 3)对线路进行找形分析,确定输电线自重作用下的形态。再在输电线模型上添加覆冰单元,根据覆冰前后档中弧垂的变化,确定了覆冰单元的等效厚度以及输电线覆冰后的形态。

表 3 覆冰前后输电线档中弧垂及等效覆冰厚度  
Table 3 Sag of mid-point and equivalent thickness of transmission line before and after icing

输电线	档中弧垂/m		等效覆冰厚度/mm
	覆冰前	覆冰后	
导线	1.14	1.15	12.5
地线	0.86	0.91	10.0
光缆	0.66	0.72	10.0

模拟中,爆破载荷采用在单元节点上施加爆炸三角波载荷实现,三角波载荷利用 CONWEP<sup>[16]</sup>方法计算得到,忽略了导爆索覆冰对爆炸效果的影响。该计算方法通过装药量和爆炸传播距离得到爆炸载荷的峰值以及持续时间。实验所用导爆索装药密度为  $11 \text{ g/m}$ ,导爆索与导线的间距为  $50 \text{ mm}$ ,计算得到简化爆炸三角波的峰值为  $80 \text{ kN/m}^2$ ,正压持续时间约为  $20 \mu\text{s}$ 。

爆破载荷作用下覆冰脱落与否采用内聚力黏附力判定准则<sup>[17]</sup>进行判别,即覆冰受到的铅垂方向惯性力大于覆冰与输电线接触面的黏附力或覆冰内部的内聚力时脱离输电线。加速度形式的覆冰脱落判定准则为<sup>[17]</sup>:

$$a_{\text{critical}} = \frac{8[D_{\text{cable}}\tau_{\text{ad}} + (D - D_{\text{cable}})\tau_{\text{co}}]}{\pi\rho_{\text{ice}}(D^2 - D_{\text{cable}}^2)} \pm g \quad (1)$$

式中:  $D_{\text{cable}}$  为输电线的外径(m);  $D$  为覆冰输电线的总外径(m);  $\tau_{\text{ad}}$  和  $\tau_{\text{co}}$  为覆冰单元的黏结应力和内聚应力(Pa);  $\rho_{\text{ice}}$  为覆冰密度( $\text{kg/m}^3$ )。当覆冰的铅垂方向加速度达到临界加速度  $a_{\text{critical}}$  时,判定覆冰单元失效。根据实验中输电线的相关参数,且人工覆冰的内聚强度和黏结强度分别取  $0.03$  和  $0.2 \text{ MPa}$ <sup>[18]</sup>,由式(1)可计算得到导线、地线和光缆的临界加速度  $a_{\text{critical}}$  分别为  $8382$ 、 $8439$  和  $8409 \text{ m/s}^2$ 。为充分考虑脱冰对输电线路的影响,出于安全考虑,模拟中选三者最小值( $8382 \text{ m/s}^2$ )作为覆冰脱落准则的临界加速度。

模拟中,覆冰脱落判定通过 ABAQUS 软件中的场变量子程序 USDFLD 来实现,将式(1)作为判定条件



写入自定义子程序, 作为覆冰单元脱落与否的判定。有限元分析过程中, 子程序通过调用主程序中各单元的节点位移和时间增量, 计算该时刻覆冰单元的加速度, 并与设定的临界加速度进行比较, 以此决定覆冰是否脱落。进一步, 子程序将判定为脱落的覆冰单元密度和刚度变为零, 从而实现输电线覆冰载荷的改变。

基于建立的实验线路有限元模型, 模拟输电线自然脱冰时, 覆冰脱落采用单元生死的方法实现, 即在动力分析中, 使用关键字 Model Change 使脱冰区域的覆冰单元失效, 且模拟时间步长为  $0.01 \text{ s}$ <sup>[19]</sup>。

### 3 结果与分析

#### 3.1 除冰效果

三种工况的实验结果表明, 在除冰线路振荡停止后, 输电线爆破区域的覆冰完全去除, 非爆破区域的覆冰依然附着在输电线上。观察脱落的覆冰可以看出: 爆破区域迎爆面的覆冰在爆破作用下直接粉碎; 且覆冰内部形成了贯穿型裂纹, 背部覆冰以块状解体脱落; 非爆破区域的覆冰仅产生了细微裂纹, 线路振荡并未使其脱落, 即未发生诱发脱冰现象, 如图 5 所示。此外, 除冰时的爆破作用也未引起临近输电线的覆冰脱落。爆破除冰后输电线表面未发现任何可见伤痕, 说明导爆索爆炸载荷及导爆索覆冰破碎形成的颗粒并未对输电线表面造成损伤。

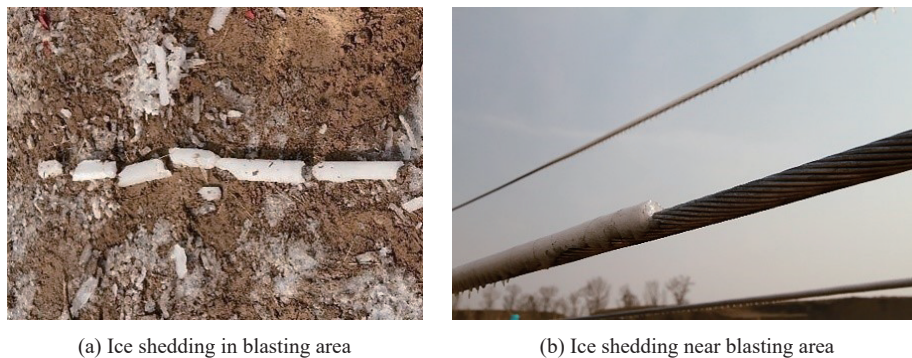


图 5 爆破后的线路覆冰情况

Fig. 5 Icing situation of overhead transmission line after blasting

各工况的模拟结果也显示仅爆破区域的覆冰发生脱落, 脱冰情况与实验结果相吻合。以工况 3 为例, 图 6 为爆破除冰过程中不同时刻导线加速度随位置的变化曲线。在起爆时刻爆破区域覆冰的加速度达到了  $233 \text{ km/s}^2$ , 远大于覆冰脱落的临界加速度  $8382 \text{ m/s}^2$ , 因此爆破区域覆冰脱落失效; 除冰振荡过程中非爆破区域输电线加速度在  $8.29 \text{ ms}$  时达到最大值  $108.8 \text{ m/s}^2$ , 小于临界加速度, 所以输电线振荡未引起非爆破区域的覆冰脱落。

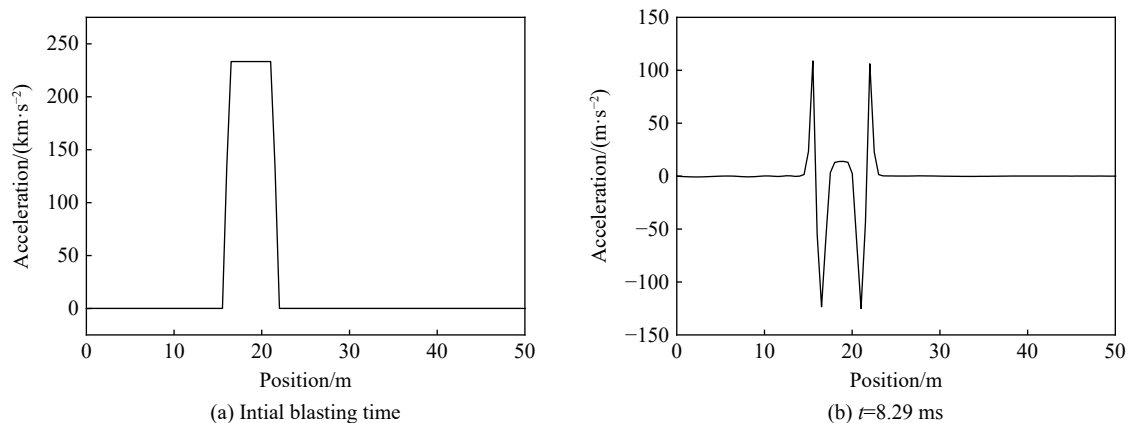


图 6 不同时刻导线加速度随位置的变化

Fig. 6 Acceleration curves of conductor with position at different times

### 3.2 跳跃高度和动张力

对爆破除冰过程中输电线的跳跃幅值和端部动张力进行分析, 除冰开始时刻设置为 1 s。图 7~9 为三种工况输电线的档中位移和动张力曲线, 图中同时给出了数值模拟结果。由图可见: 档中位移模拟曲线与实验结果基本吻合, 模拟得到的跳跃幅值与实验值接近, 误差均小于 6%; 动张力模拟结果在脱冰振荡初期与实验结果符合较好, 动张力峰值及出现时刻与实验结果较一致。这说明, 除冰过程中导爆索覆冰破碎对输电线动态特性的影响较小, 可忽略影响。模拟结果与实验的差异主要因模拟中采用均匀覆冰模型及对爆破载荷进行简化所致。

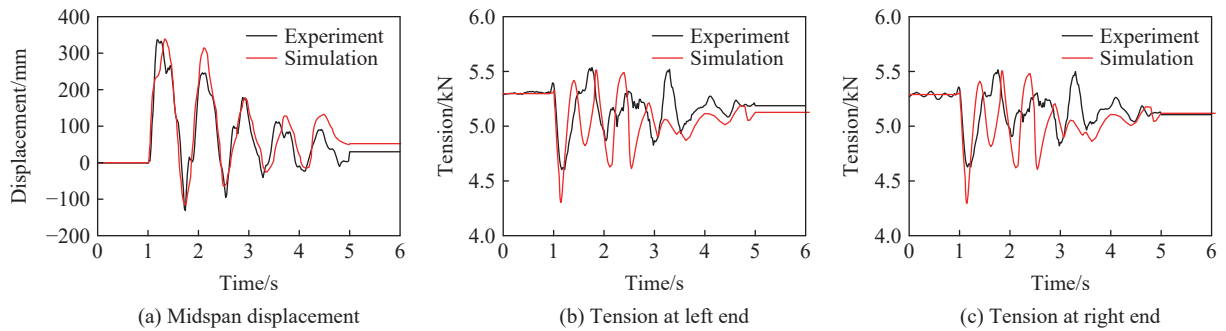


图 7 工况 1 档中位移和端部张力

Fig. 7 Mid-point displacement and end tensions under condition 1

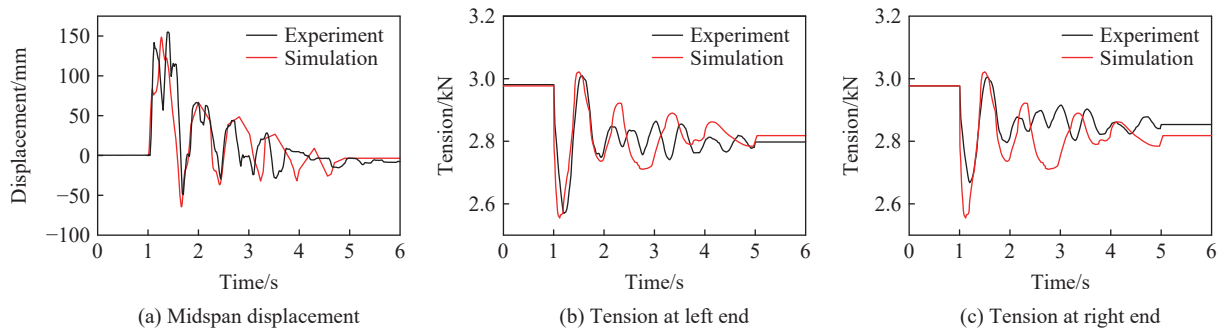


图 8 工况 2 档中位移和端部张力

Fig. 8 Mid-point displacement and end tensions under condition 2

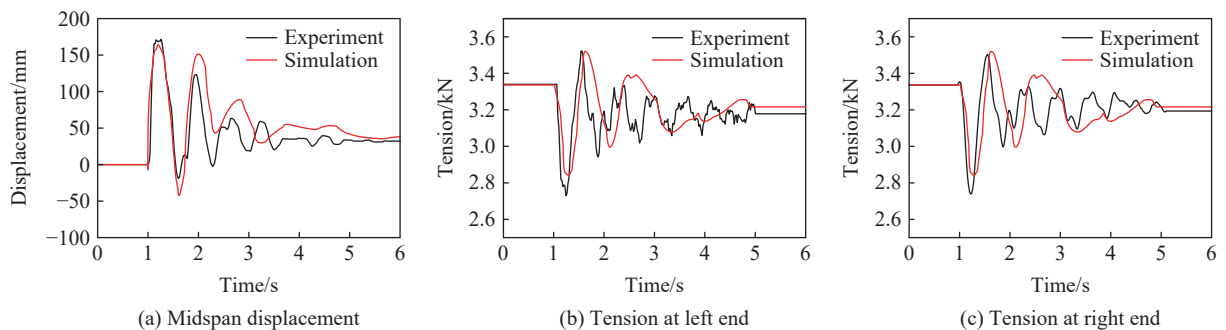


图 9 工况 3 档中位移和端部张力

Fig. 9 Mid-point displacement and end tensions under condition 3

爆破除冰时, 爆破作用使爆破区域的覆冰脱落, 由该区域覆冰而蓄积在输电线中的弹性势能得到释放; 另外, 爆破载荷的冲击作用使爆破区域输电线获得了向上的初始速度。两方面的作用使输电线快速向上运动, 运动过程中弹性势能、动能和重力势能相互转化, 引发输电线往复振荡, 与相同条件的自然脱冰相比, 爆破冲击作用使输电线的振荡更剧烈。由图 7~9 可知, 输电线的跳跃幅值及动张力最大最小

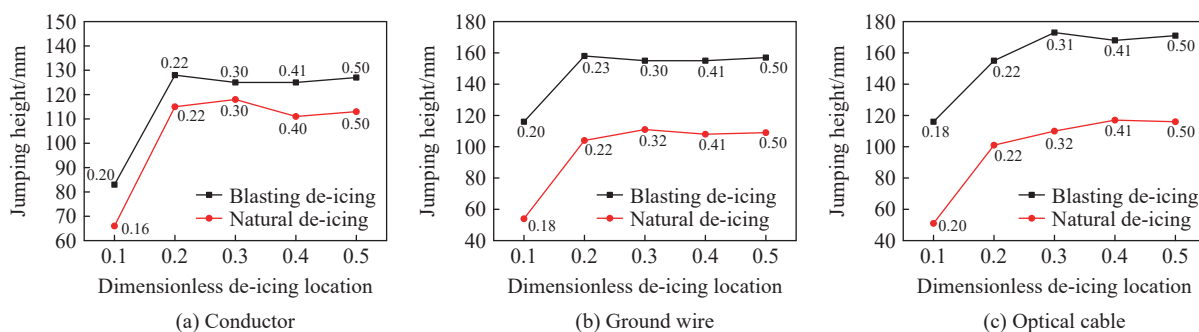
值均出现在第一个振荡周期内, 档中最大反向位移明显大于覆冰后的静态位移, 相对应地, 动张力峰值与静态张力相比也有显著增大。

### 3.3 爆破位置对动态特性的影响

自然脱冰条件下输电线跳跃幅值及动张力幅值均随脱冰量增加而增大<sup>[20-21]</sup>, 而爆破除冰时输电线动力效应较自然脱冰更显著, 因此采用爆破方法除冰时单次脱冰量不宜过大。当脱冰量一定时, 为确定更安全的爆破除冰方式, 有必要分析爆破位置对除冰动态特性的影响。

基于建立的实验线路有限元模型, 参考实验工况的爆破长度, 选取爆破除冰量为 20%, 覆冰厚度设为 12.5 mm, 模拟了不同位置施加爆破载荷的除冰过程, 并与相同条件下自然脱冰的模拟结果进行对比。

比较两种脱冰方式下输电线的跳跃幅值, 如图 10 所示。其中, 输电线脱冰位置和跳跃最高点位置为归一化后的数值, 即为脱冰段中点到最左端的距离与档距的比值。两种脱冰方式下输电线的跳跃幅值随脱冰位置的变化趋势较相似: 脱冰位置不在端部时, 跳跃最大点均出现在脱冰段中点附近, 且不同脱冰位置跳跃幅值接近; 脱冰位置在端部时, 跳跃最大点位于脱冰段靠近档中一侧边缘附近, 且跳跃幅值最小, 这是由于靠近挂点处输电线刚度较大。相同位置脱冰时, 爆破除冰的跳跃幅值均大于自然脱冰, 且除冰位置在端部时, 爆破作用使跳跃幅值增长最明显。三类输电线中, 地线和光缆重量较轻, 爆破作用对跳跃幅值的影响更显著, 与相同位置自然脱冰相比跳跃幅值增幅均超过了 40%, 最大增幅超过了 110%, 而导线最大增幅仅为 26%。



Data in the figure: dimensionless position of the highest jumping point

图 10 不同脱冰位置输电线的跳跃幅值

Fig. 10 Jumping amplitude of conductor at different de-icing positions

图 11 为两种脱冰方式下动张力峰值随脱冰位置的变化。由图可知, 爆破除冰时动张力峰值随脱冰位置的变化趋势与自然脱冰时相似, 即脱冰位置越靠近档中, 动张力峰值越小。相同位置脱冰时, 爆破除冰的动张力峰值均大于自然脱冰; 而脱冰位置对两种方式动张力峰值的变化幅值影响较小, 各工况下动张力峰值的变化均在 4.5%~10.5%。除档中位置外, 三种输电线其他位置爆破时动张力峰值均大于除冰前的静态张力。

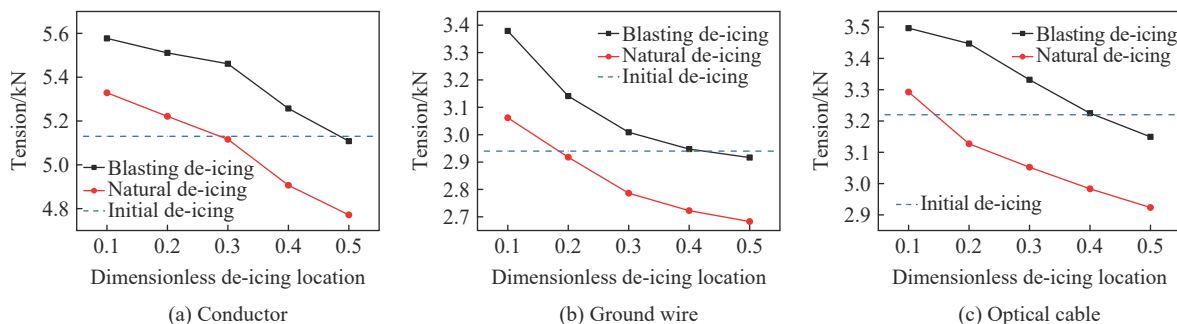


图 11 不同脱冰位置输电线动张力峰值

Fig. 11 Peak values of dynamic tension of transmission line at different de-icing positions

## 4 结 论

建立了档距为 50 m 的孤立档输电线路模型, 进行了爆破除冰实验, 利用有限元软件对实验工况进行了模拟, 实验和模拟结果一致, 验证了模拟方法的正确性。在此基础上, 研究了 20% 脱冰量的情况下, 脱冰位置对输电线路动态效应的影响, 得到以下结论。

(1) 对于雨淞及黏结强度大的覆冰, 适当条件下进行爆破除冰, 只会引起输电线爆破区域的覆冰发生脱落, 利用此性质, 可以控制输电线的脱冰量, 避免由于不可控的诱发脱冰造成事故。

(2) 爆破除冰时, 输电线的跳跃幅值及动张力最大、最小值均出现在第一个振荡周期内, 档中最大反向位移大于覆冰后的静态位移。

(3) 输电线爆破除冰的跳跃幅值均大于相同位置的自然脱冰, 跳跃幅值随位置的变化趋势与自然脱冰相似。三种输电线中, 地线和光缆的跳跃幅值受爆破作用影响更显著。

(4) 爆破位置越靠近档中, 输电线动张力峰值越小。相同位置除冰时, 爆破作用使动张力峰值大于自然脱冰的, 且增长程度受脱冰位置影响较小。除档中位置外, 输电线爆破除冰的动张力峰值均大于除冰前的静态张力。

## 参考文献:

- [1] 刘春城, 李宏男, 刘佼. 高压输电线路抗冰灾的研究现状与发展趋势 [J]. *自然灾害学报*, 2012, 21(1): 155–162. DOI: 10.13577/j.jnd.2012.0123.  
LIU C C, LI H N, LIU J. Present status and trend of icing disaster resistance of high-voltage transmission lines [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2012, 21(1): 155–162. DOI: 10.13577/j.jnd.2012.0123.
- [2] 黄新波, 刘家兵, 蔡伟, 等. 电力架空线路覆冰雪的国内外研究现状 [J]. *电网技术*, 2008, 32(4): 23–28.  
HUANG X B, LIU J B, CAI W, et al. Present research situation of icing and snowing of overhead transmission lines in china and foreign countries [J]. *Power System Technology*, 2008, 32(4): 23–28.
- [3] 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, 24. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.001.  
CHAO Y F, YUE Y S, WANG C, et al. De-icing techniques for ice-covered transmission lines: a review [J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(11): 1–9, 24. DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2016.11.001.
- [4] 陈科全, 严波, 吕欣, 等. 四分裂导线机械式除冰装置及可行性研究 [J]. *振动与冲击*, 2013, 32(20): 48–54. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.20.036.  
CHEN K Q, YAN B, LYU X, et al. A mechanical de-icing device for iced quad-bundled conductors and its feasibility [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2013, 32(20): 48–54. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2013.20.036.
- [5] PAUL S, CHANG J. Design of novel electromagnetic energy harvester to power a deicing robot and monitoring sensors for transmission lines [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 197: 111868. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111868.
- [6] 刘智颖, 穆竺, 王加科, 等. 激光除冰光学系统的设计与参数分析 [J]. *光子学报*, 2018, 47(8): 0822001. DOI: 10.3788/gzxb20184708.0822001.  
LIU Z Y, MU Z, WANG J K, et al. Design and parameter analysis of laser deicing optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, 47(8): 0822001. DOI: 10.3788/gzxb20184708.0822001.
- [7] WANG Y B, XU Y M, SU F. Damage accumulation model of ice detach behavior in ultrasonic de-icing technology [J]. *Renewable Energy*, 2020, 153: 1396–1405. DOI: 10.1016/j.renene.2020.02.069.
- [8] 宋巍, 谢东升, 黄铁铮, 等. 线性装药爆破去除输电线覆冰研究 [J]. *高压物理学报*, 2019, 33(4): 045901. DOI: 10.11858/gywlxb.20180605.  
SONG W, XIE D S, HUANG T Z, et al. De-icing power line by linear shaped explosive blast [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2019, 33(4): 045901. DOI: 10.11858/gywlxb.20180605.
- [9] 谢东升, 宋巍, 王玮, 等. 高压输电线路覆冰清除爆破参数研究 [J]. *中北大学学报 (自然科学版)*, 2018, 39(6): 746–751. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2018.06.018.  
XIE D S, SONG W, WANG W, et al. Study on blasting parameters of high voltage transmission line coated by ice [J]. *Journal*



- of North University of China (Natural Science Edition), 2018, 39(6): 746–751. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3193.2018.06.018.
- [10] 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. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.22.010.  
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. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.22.010.
- [11] 李宏男, 吴育炎. 输电线路覆冰脱落动力效应试验研究 [J]. *土木工程学报*, 2019, 52(5): 35–46, 100. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.05.004.  
LI H N, WU Y Y. Experimental study on dynamic responses of transmission lines caused by ice shedding [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2019, 52(5): 35–46, 100. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2019.05.004.
- [12] 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. DOI: 10.11776/cjam.34.05.B071.  
XIE X Z, LI D, HUANG W, 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. DOI: 10.11776/cjam.34.05.B071.
- [13] YAN B, CHEN K Q, GUO Y M, et al. Numerical simulation study on jump height of iced transmission lines after ice shedding [J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2013, 28(1): 216–225. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2219324.
- [14] 张欢, 李炜, 张亚军, 等. 输电线路档距组合对覆冰导线动态特性的影响分析 [J]. *高电压技术*, 2013, 39(3): 755–761. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.03.036.  
ZHANG H, LI W, ZHANG Y J, et al. Impact analysis of transmission line span combination on dynamic characteristics of iced conductor [J]. *High Voltage Engineering*, 2013, 39(3): 755–761. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6520.2013.03.036.
- [15] 杨风利, 杨靖波, 李正, 等. 覆冰输电线路脱冰跳跃及抑制方法研究 [J]. *振动与冲击*, 2010, 29(5): 20–25, 30. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2010.05.005.  
YANG F L, YANG J B, LI Z, et al. Ice shedding and vibration suppression of a transmission line system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2010, 29(5): 20–25, 30. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3835.2010.05.005.
- [16] 钟巍, 寿列枫, 何增, 等. 钢化玻璃冲击波毁伤效应测试结果分析 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(5): 1071–1082. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0070.  
ZHONG W, SHOU L F, HE Z, et al. On experimental blast parameters for damage effect of monolithic tempered glass subjected to blast loading [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(5): 1071–1082. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0070.
- [17] JI K P, RUI X M, LI L, et al. A novel ice-shedding model for overhead power line conductors with the consideration of adhesive/cohesive forces [J]. *Computers and Structures*, 2015, 157: 153–164. DOI: 10.1016/j.compstruc.2015.05.014.
- [18] FORTIN G, PERRON J. Ice adhesion models to predict shear stress at shedding [J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012, 26(4–5): 523–553. DOI: 10.1163/016942411X574835.
- [19] 李黎, 夏正春, 付国祥, 等. 大跨越输电塔-线在线路脱冰作用下的振动 [J]. *振动与冲击*, 2008, 27(9): 32–34, 50. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.09.038.  
LI L, XIA Z C, FU G X, et al. Ice-shedding induced vibration of a long-span electric transmission tower-line system [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(9): 32–34, 50. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2008.09.038.
- [20] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1335.2016.01.034.  
WANG Z Q, WANG J, QI L Z. Experimental study on the dynamic tension characteristics of the overhead transmission conductor under asynchronous ice shedding [J]. *Noise and Vibration Control*, 2016, 36(1): 157–162. DOI: 10.3969/j.issn.1006-1335.2016.01.034.
- [21] 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. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2009.28.019.  
CHEN Y, HU W, WANG L M, et al. Research on ice-shedding characteristic of icing conductor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(28): 115–121. DOI: 10.3321/j.issn:0258-8013.2009.28.019.

(责任编辑 丁峰)