

基于 USDFLD 二次开发的导线爆破除冰法的适用性研究

史淋升¹, 孙华东¹, 曹咏弘¹, 李海涛¹, 谢东升²

(1. 中北大学 理学院, 太原 030051; 2. 国网山西省电力公司 经济技术研究院, 太原 030000)

摘要:基于 ABAQUS 二次开发的子程序 USDFLD, 定义了覆冰脱落加速度判定准则, 对覆冰的诱发脱落进行了有限元模拟。针对一种爆破除冰方法, 模拟计算了除冰时, 导线端部脱冰以及导线中部脱冰工况下的导线跳跃的高度和导线脱冰率。结果发现: 利用爆破载荷作用时间短(20 μs 左右)的特性, 能够有效抑制一般重冰区的覆冰诱发脱落, 使脱冰区域、脱冰量能够人为控制, 从而结合工程设置需要使导线的脱冰跳跃响应处于安全范围。模拟方法及结论可为爆破除冰的应用提供设计依据。

关键词:诱发脱冰; 爆破除冰; 脱冰跳跃; 有限元

本文引用格式:史淋升, 孙华东, 曹咏弘, 等. 基于 USDFLD 二次开发的导线爆破除冰法的适用性研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(10): 211-215, 228.

Citation format: SHI Linsheng, SUN Huadong, CAO Yonghong, et al. Applicability of Wire Alasting De-Icing Method Based on USDFLD Secondary Development[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40(10): 211-215, 228.

中图分类号: TM743

文献标识码: A

文章编号: 2096-2304(2019)10-0211-05

Applicability of Wire Alasting De-Icing Method Based on USDFLD Secondary Development

SHI Linsheng¹, SUN Huadong¹, CAO Yonghong¹, LI Haitao¹, XIE Dongsheng²

(1. School of Science, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. State Grid Shanxi Economic Research Institute, Taiyuan 030000, China)

Abstract: The secondary development subroutine USDFLD of ABAQUS was used to define the criterion of ice shedding acceleration, and the finite element simulation of ice shedding was realized. For a blasting de-icing method, the deicing rate was induced by the wire and the jumping height of the wire under different deicing conditions were simulated. The results show: the blasting load action time is short (20 μs), which can effectively inhibit the ice induced shedding in the general heavy ice area, and make the de-icing area more accurate, so that the de-icing jump response of the wire can be within the safe range in combination with the setting of different de-icing conditions. The simulation method and conclusion can provide the design basis for the application of blasting de-icing.

Key words: ice-shedding induce effect; blasting deice; ice shedding; finite element

严重覆冰容易造成塔线体系因过载而失稳, 损害输电设备, 威胁电网系统的正常运行^[1]。因此, 研究线路的除冰技

术对电网的安全运行具有重要意义。目前输电线路的除冰方法可归为四类^[2]: 改变导线的温度使覆冰融化的热力融冰

收稿日期: 2019-03-14; 修回日期: 2019-04-23

基金项目: 国网山西省电力公司科技项目(520533170007)

作者简介: 史淋升(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事线路除冰技术研究, E-mail: 504125662@qq.com。

通讯作者: 孙华东(1965—), 男, 硕士生导师, 主要从事计算力学及其应用研究, E-mail: 22611722@qq.com。

法;依靠风力等使覆冰脱落的被动除冰法;使用机械力,使覆冰发生断裂从导线上脱落的机械除冰法;此外还有通过改变电线材质等辅助手段去除覆冰。虽然这些方法目前已经取得了一定的成效,但是针对山区地形的覆冰类型,存在一定的局限性。为此提出一种商用线装药爆破除冰新思路,即达到除冰条件时引爆预先敷设在输电线路上的少量线装炸药,利用炸药爆破去除覆冰。

在对线路进行爆破除冰时,关心的问题主要有两个方面:一是爆炸冲击是否会对导线产生损伤;二是爆破作用下,导线脱冰时的动力响应是否在安全范围。对于前者,谢东升等^[3]在缩尺寸覆冰导线模型上进行了爆破试验。相关实验表明:合理的设置炸药药量和炸药导线间的距离能够使炸药去除覆冰的同时对导线不产生损伤。对于爆破后导线的动力响应问题,缩尺寸试验的结果并不理想。以往有众多学者进行了导线的脱冰动力响应研究^[4-7],然而,相比以往的脱冰方法,爆破除冰虽然速度快,但导线脱冰时产生的跳跃动力响应也更剧烈。此外,导线的脱冰动力响应和脱冰量有关,可通过研究在极短爆破时间内的脱冰率来确定爆破除冰时的动力响应是否在安全范围内。

为了系统研究爆破除冰机理和实施策略,本文利用ABAQUS有限元软件在一段三跨导线上模拟计算了爆破作用下导线的脱冰率,同时进行了不同脱冰工况下,导线的脱冰跳跃特性研究。为工程线路的爆破除冰方法实施提供一定的参考。

1 爆破作用下导线脱冰机理

用于导线爆破除冰装置示意图及其脱冰机理如图1所示,该装置的工作原理为:预先在导线下端敷设一种线装炸药,当导线结冰后,覆冰将线装炸药和导线包裹在一起,通过引爆炸药,利用爆炸冲击来去除导线覆冰。对于导线上的覆冰,脱落过程为:炸药敷设区的覆冰会在爆炸冲击的作用下直接发生损毁;对于非爆破区域的覆冰,当导线受到炸药冲击力后会发生舞动,进而导致这部分的覆冰被“甩掉”,即诱发脱冰现象(图1)。

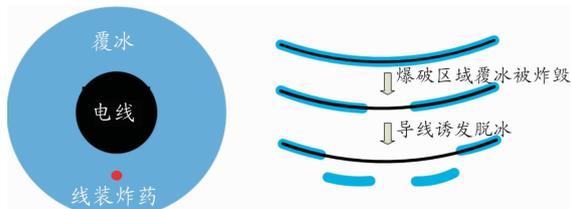


图1 爆破除冰脱冰机理示意图

采用预先敷设在输电线路上的线装炸药爆破的方法去除导线覆冰是一种成本低、效率高的除冰方法。保障电网和输电线路安全的同时,电网还能不间断运行,实现了资源和能源利用的最大化。

2 覆冰诱发脱落判定及其有限元实现

在对覆冰导线进行爆破除冰时,爆破区域的覆冰会因爆炸冲击而破坏。对于非爆破区域的覆冰则认为导线振动施加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黏结力时,该区域覆冰被“甩掉”,如式(1)^[8]。覆冰受力如图2所示。

$$F_{inertia} \pm G \geq F_{cohesive} + F_{adhesive} \quad (1)$$

式(1)中: $F_{inertia}$ 为惯性力, G 为覆冰重力, $F_{adhesive}$ 为黏结力, $F_{cohesive}$ 为内聚力;“+”“-”号分别表示上半部分和下半部分覆冰。

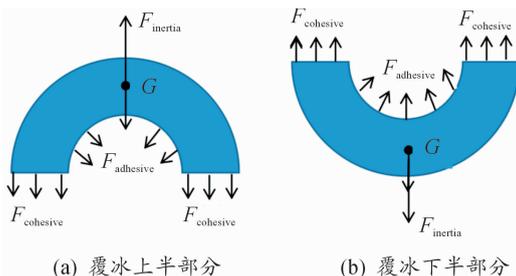


图2 覆冰受力示意图

将式(1)中的各项参数用加速度表示,最终求出覆冰脱落的临界加速度值判定为

$$a > \frac{8[D_{cable}\tau_{ad} + (D - D_{cable})\tau_{co}]}{\pi\rho_{ice}(D^2 - D_{cable}^2)} \pm g \quad (2)$$

其中: D 为覆冰导线直径, D_{cable} 为导线直径。将式(2)作为判定条件,写入场变量子程序USDFLD来判定覆冰单元“生死”。在有限元主程序求解的每一个时间增量内,通过调用子程序,对覆冰单元的加速度进行检测,若大于临界加速度,则定义该覆冰单元质量和刚度矩阵为“0”。脱落的流程框图如图3。

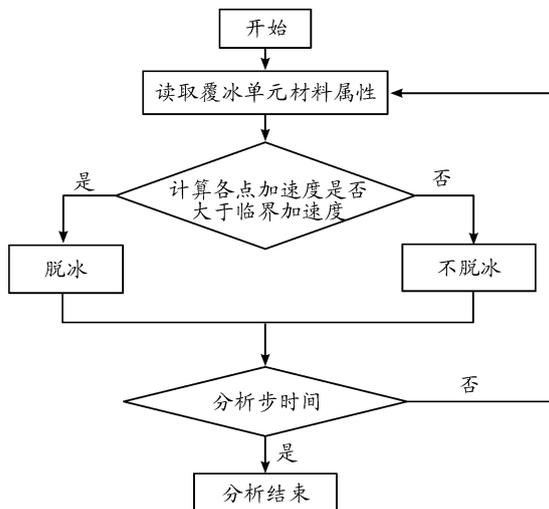


图3 覆冰脱落判定流程框图

为了验证模拟方法的正确性,需要用模型试验对模拟结果进行验证。由于诱发脱冰实验受外界因素影响比较多,试验可重复性差。加拿大魁北克水电研究院在一段档距 100 m 的单档覆冰导线上进行的冲击式机械除冰实验是目前仅有的文献详细记载的全尺寸脱冰试验^[9]。姬昆鹏等^[10]利用 ADINA 对该试验进行了模拟,实验模拟结果与文献[9]一致。本文通过覆冰加速度脱落判定准则对文献[10]中的一个算例进行了分析计算,结果如表 1 所示。其中脱冰率的计算见式(3)。相关工况描述见文献[10]。结果相差不大,说明了本文模拟方法的可靠性。

$$\text{脱冰率} = \frac{\text{脱冰量}}{\text{脱冰前导线整体覆冰量}} \times 100\% \quad (3)$$

表 1 文献结果与计算结果

工况	脱冰率/%		最大跳跃高度/m	
	文献	本文计算	文献	本文计算
1	31.6	33	0.43	0.44
2	58.5	60	1.08	1.10
3	75.8	77	1.83	1.85
4	63.3	65	1.36	1.40
5	65.5	68	1.39	1.44

3 实例分析

3.1 基本假定和有限元建模

为了讨论实际爆破除冰过程中的导线动力响应。模拟建立了如图 4 所示的一段三跨覆冰导线模型。导线的档距为 100 m。冰厚取 30 mm。覆冰类型为雾凇状覆冰。模拟中,首先对爆破作用下,导线的除冰率进行分析。在此基础上,对不同的爆破工况下导线跳跃响应进行研究。

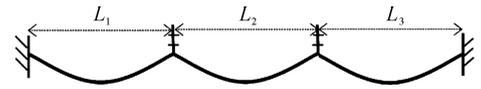


图 4 三跨覆冰导线模型

模拟中,为了相对试验方法更为简单高效,分别对塔线体系进行了简化处理。导线用理想不可压缩的杆单元离散。由于耐张塔的加固设计以及直线塔上竖直绝缘子串在脱冰过程中的摆动,其动力响应并不明显^[11],因此杆塔简化为固定支座处理。

导线在自重状态下呈悬链线形,通过施加初始预应力的方式进行覆冰导线的找形^[12]。导线单元和覆冰单元之间的连接方式为共节点绑定连接。覆冰导线阻尼用 Rayleigh 阻尼来描述,模拟中阻尼系数 α 取 0.14, β 近似取值 0^[13]。模型的相关参数如表 2 所示。

表 2 有限元模型相关参数

	杨氏模量/ Pa	密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	截面积/ mm^2	泊松比
导线	73e9	3 341	275.96	0.3
绝缘子串	206e9	7 800	2 000	0.3
覆冰	1e9	900	/	0.3

覆冰脱落的临界加速度根据 GuyFortin 等^[14]对雾凇的粘结内聚强度研究,利用式(2)计算取值为 $14\ 000\ \text{m/s}^2$ 。对应的覆冰粘结内聚强度为 0.8 MPa 和 0.2 MPa。

3.2 爆破载荷作用下导线的脱冰率分析

首先进行爆破载荷下的导线脱冰率分析,爆炸波的幅值大小如图 5(a)。模拟了每档导线中部脱冰和导线端部脱冰的工况,计算了各种工况下导线总体脱冰率。为了充分研究导线脱冰率的影响因素,同时计算了另外两种冲击载荷下导线的脱冰率,以及改变临界加速度值后的导线脱冰率。模拟结果如表 3 和表 4 所示。

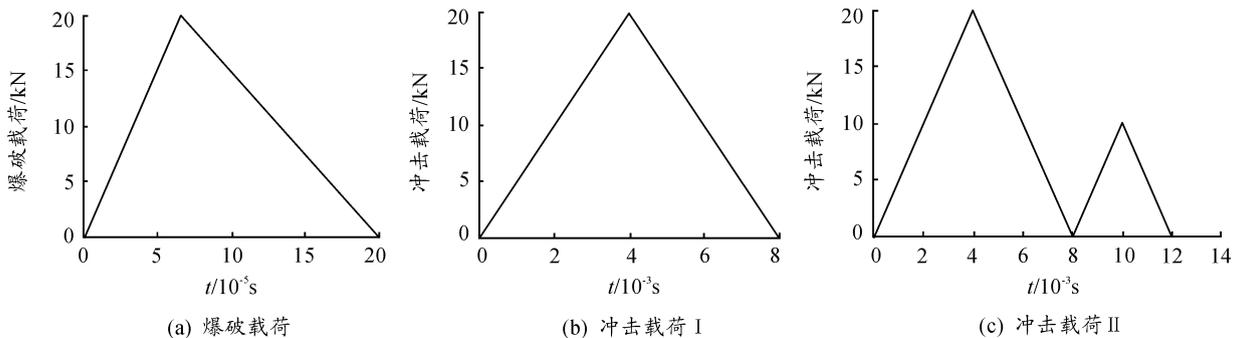


图 5 载荷作用时间历程

从表 3 可以看出:对于雾凇这种类型的覆冰,应用爆破的方式进行除冰时,不论是那种脱冰工况,都不会发生诱发脱冰。一方面,这是由于爆破本身持续时间比较短(μs 量级)造成的。相同工况下,增加冲击载荷时长(ms量级)时,

导线的脱冰率则有了明显的提高。唐锐、姬昆鹏等人的研究得到了类似的结论^[15],这里不再赘述。另一方面,由于雾凇脱落的临界加速度值很大,即其和导线间的粘结力以及自身的内聚力较大(0.8 MPa),基于这种原因,覆冰很难从导线上

被“甩掉”。从表4中可以看出:当脱落临界加速度值减小的时候,导线的脱冰率随之增加,即覆冰的粘结力越小,覆冰越容易被甩掉,这与常识相符合。综上两方面可以说明模拟结果的可靠性。

表3 不同冲击载荷下导线的脱冰率($a = 14\ 000\ \text{m/s}^2$)

脱冰工况	爆破	冲击	冲击
	载荷	载荷I	载荷II
I. 导线中间脱冰 5 m	5%	10%	14%
II. 导线中间脱冰 10 m	10%	17%	22%
III. 导线中间脱冰 20 m	20%	27%	35%
IV. 导线端部脱冰 5 m	10%	33%	48%
V. 导线端部脱冰 10 m	20%	47%	76%
VI. 导线端部脱冰 20 m	40%	82%	91%
	无诱发 脱冰现象	有明显诱发 脱冰现象	有明显诱发 脱冰现象

表4 爆破载荷不同临界加速度值下导线的脱冰率

脱冰工况	加速度	加速度	加速度
	14 000 m/s^2	2 500 m/s^2	2 000 m/s^2
VII. 导线中间脱冰 5 m	5%	5%	66%
VIII. 导线中间脱冰 10 m	10%	12%	82%
IX. 导线中间脱冰 20 m	20%	23%	100%
X. 导线端部脱冰 5 m	10%	15%	100%
XI. 导线端部脱冰 10 m	20%	27%	100%
XII. 导线端部脱冰 20 m	40%	49%	100%
	无诱发 脱冰现象	诱发脱 冰量很小	有明显诱发 脱冰现象

当覆冰脱落临界加速度值为 $2\ 500\ \text{m/s}^2$ 时,爆破载荷下的覆冰导线开始有了很小的诱发脱冰现象,此时根据式(2)求出此时覆冰的粘结强度为 $0.03\ \text{MPa}$ 。根据文献[14]列出的不同覆冰粘结强度表,可以得出对于大部分覆冰类型(水冰、混合冰等),在对其用爆破的方法进行除冰时,均不会发生明显诱发脱冰现象。当覆冰和导线间的粘聚力很小时(粘结强度 $0.002\ \text{MPa}$),这种情况下,覆冰的脱落加速度值很小(小于 $2\ 000\ \text{m/s}^2$),甚至能够自然脱落。此时,对其应用爆破的方法除冰时,容易引起覆冰大面积脱落,造成冰跳事故。对于这种情况可不予以爆破的方法除冰。

与以往的冲击式除冰方法相比,爆破除冰在实际应用过程中,可以根据爆破载荷这种持续时间短、诱发脱冰量少的特性,来人为的控制其导线跳跃高度,从而使除冰方案更加安全。

3.3 爆破载荷下脱冰工况分析

用爆破的方法对导线进行除冰时,根据线装炸药的爆炸

传播速度,100 m 档距的覆冰在 $0.7\ \text{s}$ 左右就可以全部爆破掉。导线的这种短时间载荷变化容易引起张力发生突变,从而使导线发生很大的跳跃。为了充分研究脱冰时间和导线的跳跃关系,进行了 L_2 档导线中间 50 m 覆冰在不同脱冰时间下的导线跳跃模拟。结果如图6所示的跳跃曲线。

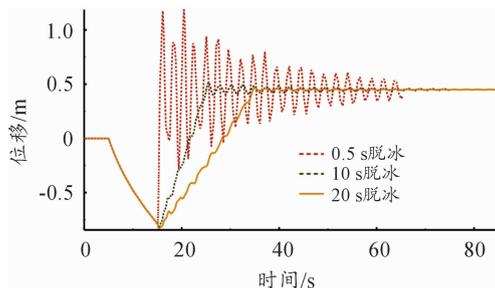


图6 不同脱冰时间下导线跳跃曲线

从图6可以看出:脱冰时间越短,导线的跳跃高度越大。这是由于爆破作用下的覆冰脱落类似于一种载荷“瞬时卸载”,导线在极短时间内发生的这种重力改变会使其发生很大的跳跃。基于这种原因,在对覆冰导线进行爆破除冰时,需要严格设置脱冰工况使其脱冰跳跃高度处于安全范围之内。

针对图4所示的三跨输电线路模型,从脱冰线段、一档导线内脱冰位置两个方面进行考虑设计了如表5所示的脱冰工况。模拟计算了每种爆破工况下,导线的最大跳跃高度。

表5 脱冰工况

不同线段内一整档导线全部脱冰	工况 A: L_1 、 L_2 、 L_3 同时脱冰
	工况 B: L_2 先脱,再脱 L_1 和 L_3
	工况 C: L_1 、 L_3 同时脱,再脱 L_2
L_2 档(直线档)导线分区域脱冰	工况 D: L_2 档导线中间脱 20 m
	工况 E: L_2 档导线左端脱 20 m
	工况 F: L_2 档导线左右两端同时脱 10 m
L_1 档(耐张档)导线分区域脱冰	工况 G: L_2 档导线左端脱 10 m 后,再在左端脱 10 m
	工况 H: L_1 档导线左右两端各脱 10 m
	工况 I: L_1 档导线左端脱 10 m 后,在覆冰段左端再脱 10 m
	工况 G: L_1 档导线左端脱 10 m

图7为不同线段内一整档导线全部脱冰下的 L_2 档导线跨中节点跳跃曲线。

从图7可以看出:先进行耐张段脱冰,再进行直线段脱冰时,导线的跳跃幅度最大(5 m)。由于耐张段导线 L_1 、 L_3 档脱冰后中间直线段 L_2 档由于竖直绝缘子串的摆动,会下垂一定距离,如图8所示。此时再对 L_2 档导线进行脱冰时,由于直线档导线两端的 L_1 、 L_3 档已经没有了覆冰载荷,导致

其对 L_2 档导线的拉力变小,从而使得 L_2 档导线在脱冰时发生了更大的跳跃。

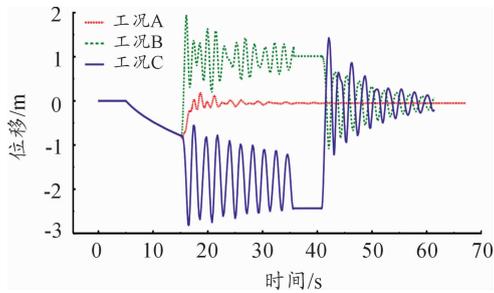


图7 一整档导线全部脱冰导线跳跃曲线

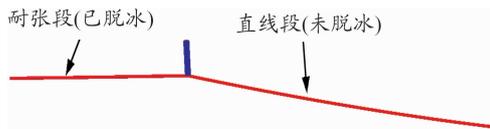


图8 耐张段脱冰后绝缘子串偏移

通过对比表5前三种脱冰工况可以得出:在对三档导线同时进行脱冰时,导线的跳跃高度是最小的。然而在实际应用中,由于导线的档距一般都在百米级别,这种脱冰工况实际操作起来不容易实现。因此脱冰时,应当优先考虑先脱直线档的覆冰。

图9为直线档 L_2 脱冰工况下,导线跨中节点的最大跳跃位移曲线。

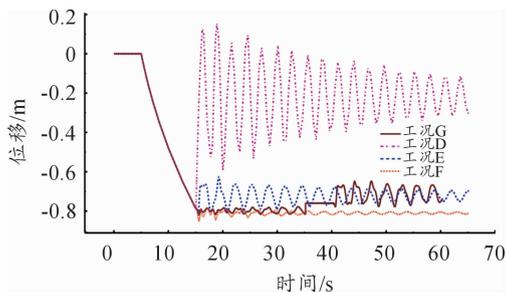


图9 直线档分区域脱冰工况下的导线跨中节点的最大跳跃位移曲线

从图9可以看出:相同脱冰量下,脱冰位置位于导线中间时,导线的跳跃高度最大;直线档的左右两端同时进行除冰时,导线的跳跃高度是最小的。在对导线进行脱冰时,在同一脱冰区域进行分区脱冰,能有效的减低导线跳跃高度。如工况E中,导线左端进行了一次20m脱冰,工况G中,导线左端进行了两次脱冰,每次脱冰量为10m。两种工况下,总的脱冰量相同,但是工况G的跳跃高度明显小于工况E下的跳跃高度。

图10为耐张档 L_1 脱冰工况下,导线跨中节点的最大跳跃位移曲线。

可以看出:跟直线档相同,脱冰位置位于导线两端时,导

线的跳跃高度最小,在同一脱冰区域进行分区脱冰,能有效的降低导线跳跃高度。

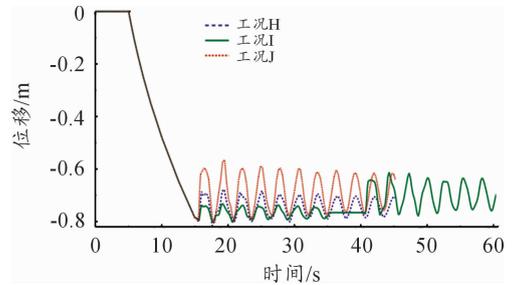


图10 耐张档分区域脱冰工况下的导线跨中节点的最大跳跃位移曲线

实际上,对导线进行单独一档脱冰后,导线的不平衡张力急剧增大,容易造成危险^[16]。以工况B为例,优先在 L_2 档导线脱冰后,由于 L_1 、 L_3 档还存在有覆冰,此时 L_2 档导线将承受很大的拉力。为了使导线间的不平衡张力减小,可以进行在 L_2 档导线脱冰时同时在 L_1 、 L_3 档导线上也去除一部分覆冰的组合脱冰工况。实际应用中,可根据相关脱冰安全规范来具体设计脱冰量和脱冰位置。

4 结论

1) 针对一般重冰区覆冰类型,其覆冰诱发脱落现象与机械除冰时的外载荷持续时间有关,持续时间越长,导线的诱发脱冰率越高。运用线装炸药爆破的方法去除导线覆冰是一种效率高、见效快的方法。该方法载荷作用时间极短,能够有效的抑制覆冰诱发脱落现象,从而使除冰区域更加精准,能够消除由于覆冰诱发脱落带来的导线动力危险响应。

2) 覆冰脱落时,导线的跳跃高度跟脱冰时间有关。同一脱冰量下,脱冰时间越短,导线的跳跃高度越高。爆破除冰方法下,由于爆炸传播速度极快,百米脱冰时间在0.7s左右。这种方法下,容易造成导线跳跃高度过大。采用合理的脱冰工况设置能够控制导线的脱冰跳跃高度。对于文中提到的三跨输电线路,应当优先考虑进行直线档脱冰,再进行耐张档脱冰。选择在导线两端除冰的方式对一档线路除冰时,导线的跳跃高度最小。在同一脱冰区域进行分区脱冰,能有效的减低导线跳跃高度。

3) 实际应用中,可以根据相关脱冰安全规范,通过模拟计算具体每档导线的脱冰量大小来消除相邻导线间的不平衡张力。本文提出的模拟方法可为爆破除冰应用提供合理参考。

参考文献:

- [1] 刘春城,李宏男. 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.