

引用格式: 杨军, 王开金, 刘聪, 等. 架空地线共振除冰技术研究 [J]. 电子科技大学学报, 2025, 54(6): 832-839.

YANG J, WANG K J, LIU C, et al. Research on method and device of overhead ground wire resonance deicing[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2025, 54(6): 832-839.



架空地线共振除冰技术研究

杨 军*, 王开金, 刘 聪, 杜平安

(电子科技大学 机械与电气工程学院, 成都 611731)

摘要: 架空地线覆冰现象对电网安全运行构成严重威胁, 因此, 研究架空地线除冰技术已成为国内外学术界和工程领域关注的热点问题。该文构建了覆冰架空地线的复合结构有限元模型, 并通过预应力模态分析方法, 研究了覆冰架空地线的固有频率及振型, 明确了共振频率范围, 在共振频率范围内进行谐响应扫频分析, 确定了最佳激振频率, 探讨了激振力大小与激振位置对共振除冰效果的影响。设计并制造了一台共振除冰机原理样机, 并开展了缩尺寸架空地线共振除冰试验。试验结果表明, 该除冰机可在 8 min 内清除约 80% 的覆冰, 验证了共振除冰技术的可行性, 为架空地线共振除冰技术的发展提供了参考。

关键词: 架空地线; 覆冰; 共振; 模态分析; 谐响应分析

中图分类号: TM75 文献标志码: A DOI: 10.12178/1001-0548.2024273

Research on method and device of overhead ground wire resonance deicing

YANG Jun*, WANG Kaijin, LIU Cong, and DU Pingan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: The icing phenomenon of overhead grounding lines poses a serious threat to the safe operation of power grids. Therefore, the research on de-icing technology for overhead grounding lines has become an important focus in both academic and engineering fields domestically and internationally. This paper establishes a finite element model of the composite structure of the open line of the ice cover frame. By using prestressed modal analysis, the natural frequency and vibration modes of the open line of the ice cover frame are investigated, the resonant frequency range is determined, and within this range the harmonic response sweep frequency analysis is conducted to identify the optimal excitation frequency. Additionally, the impacts of both the magnitude of the excitation force and the excitation position on the resonant de-icing effect is discussed. A prototype of a resonance de-icing machine was designed and manufactured, and a reduced-scale resonance de-icing test was performed on an overhead ground wire. The test results indicate that the de-icing machine can remove approximately 80% of the ice cover within 8 minutes, demonstrating the feasibility of resonance de-icing technology and providing a reference for the development of resonance de-icing technology for overhead ground wires.

Key words: overhead ground wire; icing; resonance; modal analysis; harmonic response analysis

架空输电线路覆冰是影响电网安全的常见自然灾害^[1]。架空输电线路受覆冰影响而损坏的原因较多, 主要包括机械过载荷、覆冰舞动、脱冰跳跃与覆冰闪络^[2]。覆冰可能导致架空线缆断股、杆塔螺栓脱落, 严重时还可能导致杆塔下沉或倒塌, 进而使电力系统供电中断^[3-4]。据统计, 自 1932 年记录的第一起架空输电线路结冰事故以来, 输电线路结冰事故在国际上已发生了数千起^[5]。对架空输电线路

进行有效除冰, 对于保障架空输电线路的正常工作具有重要意义。

目前国内外对架空输电线路的除冰技术已有较多研究, 形成了热融除冰、被动除冰与机械除冰等方法。热融除冰使导线电流密度增大而发热, 使包裹在线缆外部的覆冰融化脱落^[6], 包括交流短路融冰方法与直流短路融冰方法^[7]。被动除冰在架空线缆上安装阻雪环、平衡锤及吸热器等装置, 利用自

收稿日期: 2024-10-05

基金项目: 中国南方电网有限责任公司创新项目 (GZKJXM20210485)

作者简介: 杨军, 主要从事电力系统自动化等方面的研究。

*通信作者 E-mail: yangjun@uestc.edu.cn

然存在的风、重力与太阳辐射等进行除冰^[8];或在线缆上涂装特殊材料阻止覆冰形成、降低覆冰附着强度、吸收光能使线缆表面升温而防冰^[9-10]。机械除冰通过人工或除冰机提供机械力进行除冰,有固定冲击、巡线铣削与碾压、敲击等方式^[11-13]。

架空地线铺设于高压与超高压输电线路中,主要起防雷作用,不承担电力传送,无电流热效应,因而覆冰问题更严重^[12]。架空地线本身不通电,无法实现交流短路融冰,而直流短路融冰需要对地线进行特殊改造,操作不便,且可能使架空地线丧失防雷作用。此外,对处于微地形与微气候中的架空地线,存在仅有少数档有覆冰的现象,进行直流短路融冰时需在整个线路中通电,会对没有覆冰的架空地线有所损伤,并造成能源浪费。被动除冰受环境影响存在较大随机性,多与主动除冰方法配合使用。人工除冰较危险,且受地形限制。利用除冰机除冰是未来研究的重点与发展趋势,现有的固定冲击式除冰机所需冲击力较大,可达数万牛,但巡线式除冰机存在安装、取能与控制不便等不足。

本文提出一种共振除冰方法,利用共振时覆冰架空地线系统吸收外界激励能量最多的现象进行除冰。覆冰架空地线受到频率与固有频率接近的周期性激励而发生共振,产生较大变形使覆冰破碎,再由惯性力作用使覆冰从地线脱落,达到除冰目的。本文首先建立覆冰架空地线的有限元模型,进行振动特性分析,设计除冰方案,并制造样机进行除冰试验,对除冰效果进行验证。

1 架空地线的有限元建模

1.1 架空地线几何建模

地线架空铺设时呈现的形状可由“悬链线”方程描述^[14],即:

$$y = \frac{\sigma_0}{\gamma} \operatorname{ch}\left(\frac{\gamma}{\sigma_0}(x+C_1)\right) + C_2 \quad (1)$$

式中, σ_0 为悬链线轴向水平应力; C_1 、 C_2 为常数; ch 为双曲余弦函数。 γ 为地线比载,计算方法为:

$$\gamma = \frac{qg}{A} \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中, q 为地线单位长度质量; g 为重力加速度; A 为地线截面积。

以型号为JLB20A-70-7的500 m单档地线为对象,地线两挂点等高,如图1所示。以最低点为坐标原点建立坐标系,以档距方向为 X 轴,以弧垂方

向为 Y 轴, Z 轴垂直于 XY 平面。地线参数见表1^[15]。

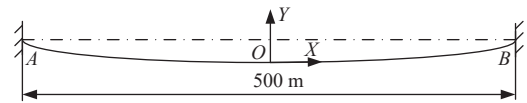


图1 架空地线示意图

表1 JLB20A-70-7的几何及材料参数^[15]

| 直径/mm | 密度/kg·m ⁻³ | 弹性模量/GPa | 水平应力/MPa | 截面积/mm ² |
|-------|-----------------------|----------|----------|---------------------|
| 10.8 | 6 590 | 153.9 | 423.04 | 71.3 |

建立“悬链线”方程时考虑了自重比载使架空地线内部各处存在应力,而以“悬链线”方程建立的几何模型进行架空地线有限元建模时,其内部应力不再存在。当对架空地线施加标准重力加速度时,地线弧垂再次增加,导致架空地线找形结果出现误差,为此需要对架空地线初始线形进行修正,方法如下:以式(3)求出架空地线无应力原长,再以式(4)反求出等效档距,最后将等效档距代入式(1)建立无应力原长等效方程,并在有限元分析时将档距拉伸到实际值。

$$L_0 = L \left(1 - \frac{\sigma_{av}}{E}\right) \quad (3)$$

式中, L 为整档架空地线的长度,由式(4)计算; σ_{av} 为整档架空地线平均应力,由式(5)计算:

$$L = l + \frac{\gamma^2 l^3}{24\sigma_0^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{av} = \sigma_0 + \frac{\gamma f_M}{3} \quad (5)$$

式中, f_M 为最大弧垂,计算方法为:

$$f_M = \frac{\gamma l^2}{8\sigma_0} + \frac{\gamma^3 l^4}{384\sigma_0^3} \quad (6)$$

1.2 覆冰架空地线有限元建模

覆冰可分为雨淞、雾淞、混合淞及湿雪等^[16],其中雨淞质地紧实、密度大、附着力强,对架空地线安全威胁最大,因此本文以雨淞作为覆冰进行分析。雨淞密度852 kg/m³,泊松比0.3,弹性模量5.2 GPa,抗拉强度1.5 MPa^[17]。当空气中的过冷却水随风运动撞击在架空地线上时,架空地线的迎风面将形成覆冰^[16],架空地线因扭矩失衡发生扭转,未覆冰的架空地线表面成为新的迎风面并进行覆冰,如此往复,最终形成近似圆柱形的覆冰,如图2所示^[18],因而将覆冰考虑为圆筒。



图 2 线缆覆冰图^[18]

将架空地线几何模型两次导入 ANSYS 中，分别赋予架空地线与覆冰的截面，以“form new part”使架空地线与覆冰共节点。设覆冰截面为内径 10.8 mm，外径 30.8 mm 的圆环，并以 Beam 单元模拟，地线截面为直径 10.8 mm 的圆，以 Cable280 单元模拟。将单元尺寸取为 1 m，形成覆冰架空地线有限元模型如图 3 所示。

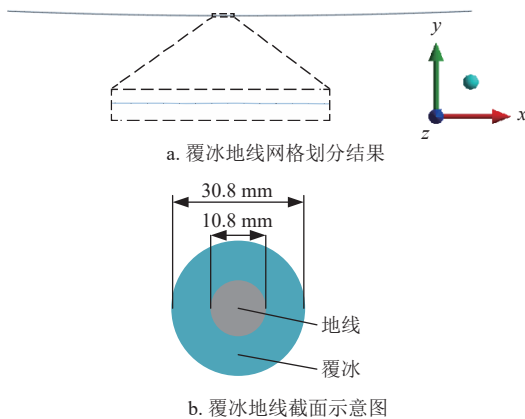


图 3 覆冰地线有限元模型

2 覆冰架空地线振动特性分析

2.1 模态分析

架空地线为张力索，横向刚度极低，固有频率受应力影响较大，因而需要进行预应力模态分析。先进行静力分析，将地线一端固定，另一端拉伸到固定档距，施加沿 Y 轴负方向的重力加速度，再进行模态分析。计算得到覆冰架空地线部分振型如图 4 所示。

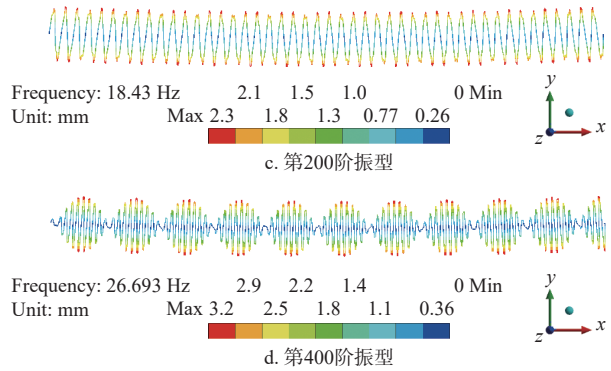
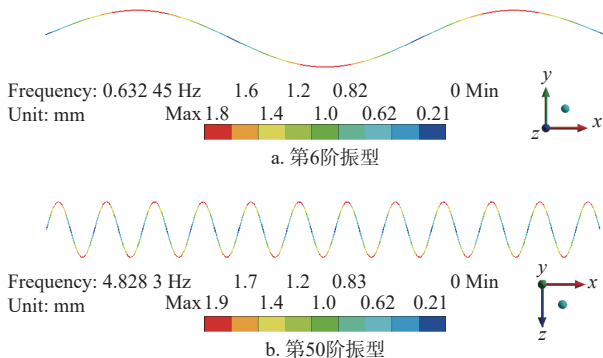


图 4 覆冰架空地线部分振型图

可以看出，覆冰架空地线的振型近似正弦波形，振动方向沿 Y 轴或 Z 轴，其低阶模态振型简单，在档内的波形数较少，如图 4a 所示。在振幅受限的情况下，覆冰架空地线在档距内的波形数量少，则覆冰弯曲时曲率小，覆冰因弯曲在内部产生的应力小，不利于覆冰破碎。随着阶次升高，档内波形数量增加，当阶次升至一定程度时，振型出现振幅不均匀现象，如图 4d 所示，不利于均匀除冰，影响除冰效率。综合考虑，将激振频率范围设为 5~26 Hz。因张力作用，架空地线在覆冰脱落后会产生沿 Y 轴方向的振动。为降低架空地线在除冰时舞动，使激振力沿 Y 轴方向。

2.2 谐响应分析

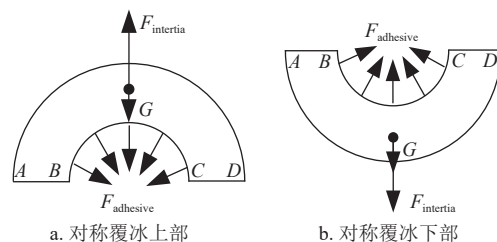
以谐响应分析评估架空地线在受简谐激励时的稳态响应。将阻尼考虑为瑞利阻尼，即：

$$C = \alpha M + \beta K \tag{7}$$

式中， α 为质量系数，取 0.1； β 为刚度系数，近似为 0^[17]。

除冰时，覆冰架空地线在外部激励作用下沿 Y 轴振动变形，覆冰变形时内部会产生应力使覆冰破碎，但覆冰破碎后仍会黏附在架空地线表面，需以惯性力将其“甩脱”。

覆冰随架空地线振动时的受力情况如图 5a 与图 5b 所示，当惯性力与重力的合力足以克服覆冰与架空地线表面的粘附力时，覆冰被甩脱。



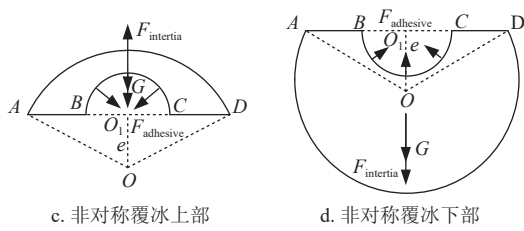


图 5 覆冰脱落判定准则示意图

覆冰从架空地线上是否脱落可由式 (8) 判定:

$$F_{inertia} \pm G \geq F_{adhesive} \quad (8)$$

其中:

$$F_{inertia} = \frac{\pi \rho_{ice} a L_{ice}}{8} (D^2 - D_{cable}^2) \quad (9)$$

$$G = \frac{\pi \rho_{ice} g L_{ice}}{8} (D^2 - D_{cable}^2) \quad (10)$$

$$F_{adhesive} = D_{cable} L_{ice} \sigma_{adhesive} \quad (11)$$

式中, G 为覆冰重力; $F_{inertia}$ 为惯性力; $F_{adhesive}$ 为架空地线与覆冰之间黏附力; ρ_{ice} 为覆冰密度; a 为覆冰加速度; L_{ice} 为覆冰长度; D 为覆冰外径; D_{cable} 为线缆直径; $\sigma_{adhesive}$ 为架空地线与覆冰之间的黏附应力。

由式 (8)~式 (11) 可推导覆冰脱落的临界加速度如式 (12) 所示。当覆冰位于上半部分时, 不等式左侧取“-”号, 覆冰位于下半部分时, 不等式左侧取“+”号。非对称覆冰时的受力分析如图 5c 与图 5d 所示, 其覆冰脱落的临界加速度如式 (13) 所示, 可发现对称覆冰是偏心距为 0 的一种特殊情况, 且偏心距不为 0 时, 覆冰脱落的临界加速度较小, 因而非对称覆冰更易被去除, 因此本文着重研究对称覆冰的情况。

$$a = \frac{8 D_{cable} \sigma_{adhesive}}{\pi \rho_{ice} (D^2 - D_{cable}^2)} mg \quad (12)$$

$$a = \frac{8 D_{cable} \sigma_{adhesive}}{\rho_{ice} \left(4e \sqrt{D^2 - 4e^2} + \frac{\pi D^2}{180} \arcsin \frac{2e}{D} + \pi (D^2 - D_{cable}^2) \right)} mg \quad (13)$$

式中, e 为偏心距。

为便于除冰机安装与控制, 将激励位置设置在距挂点 10 m 处。通过谐响应分析对覆冰架空地线在 5~26 Hz 范围内进行扫频激励, 激励大小 2 000 N, 计算出覆冰应力响应如图 6 所示。最大值出现在激励频率为 15.325 Hz 时, 此频率与覆冰地线的 163 阶固有频率接近, 其振型如图 7 所示,

在档内存在 37.5 个正弦波形, 每个波形的跨距约为 13.3 m。

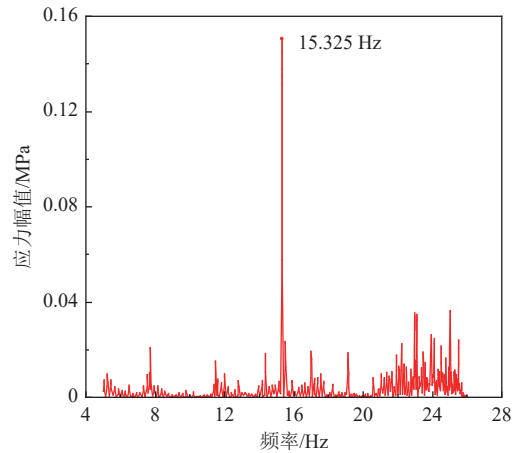


图 6 激励位置为 10 m 时覆冰的应力响应

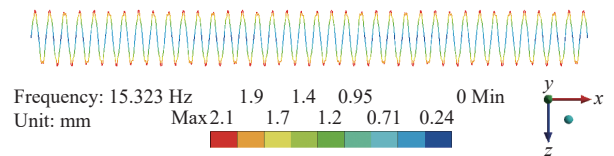


图 7 覆冰地线的 163 阶振型

当激励位置为波腹或波节时, 覆冰架空地线的响应可能发生变化。针对这一可能性, 结合可选的网格节点分别在距挂点 6.68 m (波节位置附近)、7.93 m (波节与波腹之间) 及 9.61 m (波腹位置附近) 施加幅值为 2 000 N 的激振力进行谐响应分析。观察覆冰的应力响应, 如图 8 所示。激励点位于 9.61 m 处时, 覆冰的应力响应的最大值高于激励点位于 6.68 m 及 7.93 m 时, 即当激励点位于波腹位置时覆冰应力响应最大, 更利于覆冰破碎。

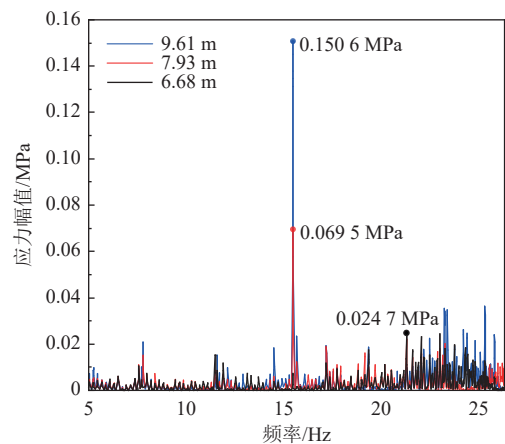


图 8 覆冰应力在各激励位置的响应曲线

不同大小的激振力会引起覆冰架空地线不同的振幅。在频率相同时, 覆冰地线的曲率与加速度随

振幅增加而增大, 除冰效果随之提高。为选择大小适宜的激振力, 需要确定激振力大小对覆冰脱落效果的影响。在模态分析的基础上进行有限元谐响应分析, 激振位置距挂点 9.61 m, 激振力大小与架空地线最大应力响应如表 2 所示, 其中激振力为 5 000 N 时, 架空地线的应力超出了许用应力^[19], 不予选用。因架空地线纵横比过大, 仿真时的除冰效果难以显示, 因而采用“图像描摹”方法对有限元仿真结果进行增强显示, 如图 9~图 10 所示, 分别为以应力与加速度为脱冰准则时的除冰效果, 覆冰在应力超出其抗拉强度时破碎, 在加速度超出临界加速度时脱落。由图 9 知, 当激振力达到 2 000 N 时, 覆冰即可破碎大部分, 但此时破碎的覆冰依然黏附在地线上未脱落(如图 10a 所示, 激振力为 3 000 N 时覆冰脱落依然较少)。当激振力达 4 000 N 时, 在波腹位置的覆冰被甩脱, 达到除冰效果, 验证了利用共振原理进行除冰的可行性。共振除冰所需激振力 4 000 N, 远小于冲击载荷除冰方法所需载荷(20~40 kN)^[17]。在前期的仿真及试验^[20]中发现, 除冰机安装前后对架空地线共振的振型及固有频率范围影响很小, 且除冰机本身的重力远小于除冰机产生的力, 在工程应用中可忽略, 因而本文未对架空地线与除冰机的耦合系统进行分析。

表 2 各激振力下地线的最大应力

| 激振力大小/N | 地线最大应力/MPa |
|---------|------------|
| 2 000 | 33.13 |
| 3 000 | 49.70 |
| 4 000 | 66.26 |
| 5 000 | 82.83 |

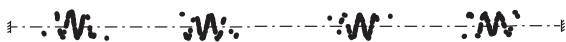


图 9 2 000 N 激振力下未破碎的覆冰



a. 3 000 N 时未脱落的覆冰图像描摹结果



b. 4 000 N 时未脱落的覆冰图像描摹结果

图 10 各激振力下未被甩脱的覆冰

3 除冰机设计与仿真

3.1 除冰机结构设计

根据以上激振力要求, 设计共振除冰机如图 11 所示。为使激振力集中沿 Y 轴方向, 且其他方向的

力和力矩尽可能小, 以避免除冰机在线上摆动, 将偏心轮呈双对称布置, 如图 11b 所示, 激振力大小由偏心轮质量和偏心距控制。电机输出转速并经减速器减速, 旋转运动经锥齿轮传递到传动轴上。传动轴两端的锥齿轮则带动偏心轮轴转动。偏心轮随偏心轮轴同步转动, 产生偏心力。此力作为激振力, 最后经与机架固定在一起的线夹传递到架空地线上。

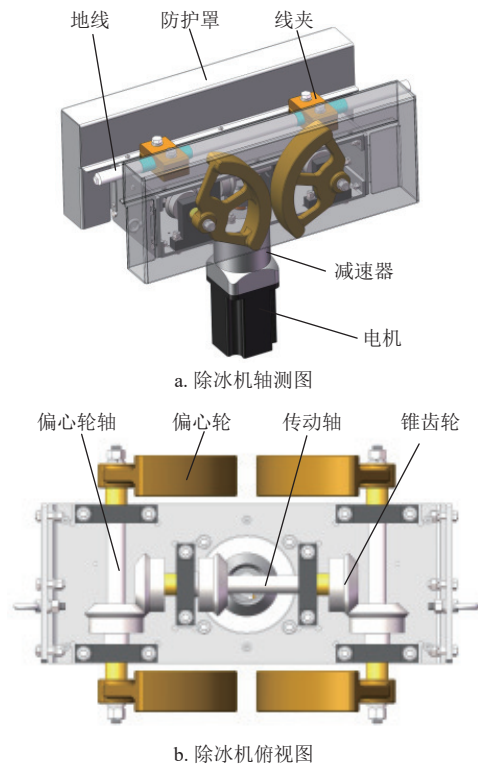


图 11 除冰机三维模型

3.2 除冰机动力学仿真

建立除冰机虚拟样机以评估设计参数的合理性。以函数 $2\pi \times 15.325$ (即激振频率为 15.325 Hz) 驱动与减速器相连的主动轮进行匀速转动。设置仿真时间 0.25 s, 步数 500 步, 计算出线夹处的力与力矩如图 12 所示。可以看出, 两线夹处的支反力基本相同, 因而只需观察其中一个线夹处的支反力。如图 12b 所示, 线夹处的支反力主要沿 Y 方向, 其他两个方向的力极小。图 12c 展示了 Y 方向的分力滤波后的结果, 其大致呈正弦波形, 其变化范围约为 $-2\ 100\text{ N} \sim 1\ 900\text{ N}$, 则两线夹的合力变化的幅值约为 4 000 N, 与设计相符。图 12d 说明除冰机工作时在线夹处的扭矩仅在某些时刻较大, 因而其影响较小。综上所述, 可认为除冰机工程样机的设计较为合理。

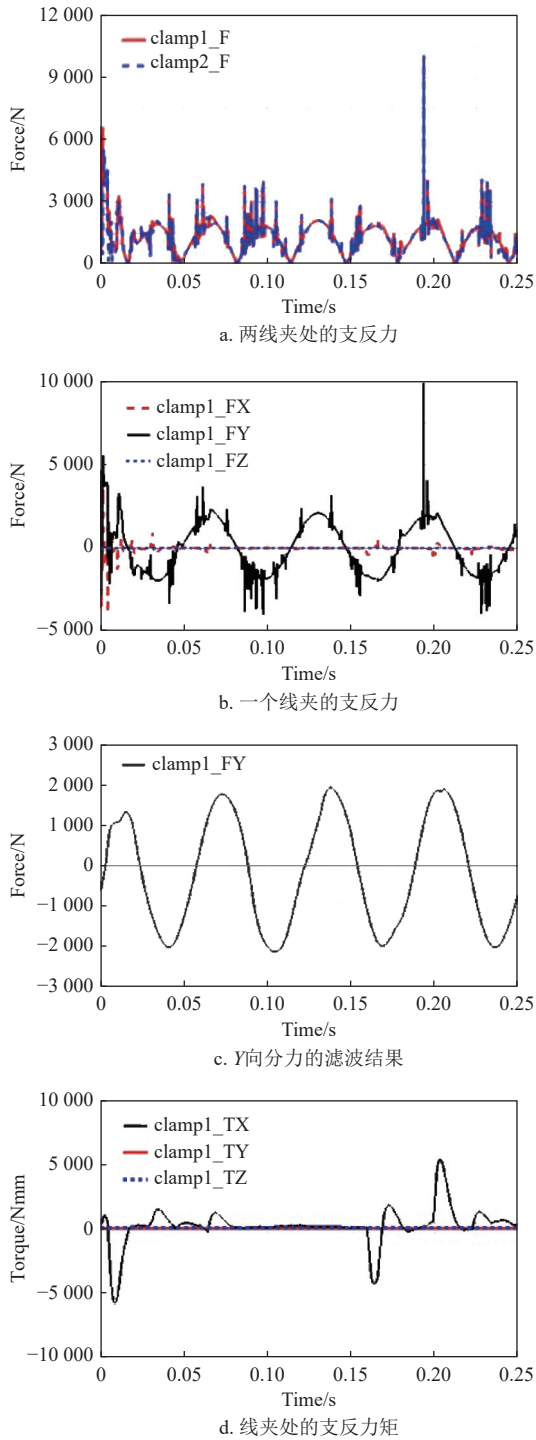


图 12 仿真时线夹的支反力与支反力矩

4 原理样机制造与除冰试验

实际架空地线档距大、挂点高、人为覆冰困难,且全尺寸架空地线与缩尺寸架空地线共振特性具有相似性^[20],因而进行缩尺寸架空地线除冰试验。缩尺寸架空地线型号选择 JLB20A-30-7,直径 6.9 mm,地线长度为 9 m,挂点张力 1 200 N,覆冰长度 7.5 m,覆冰外径约 33 mm,如图 13 所示。

制作了除冰机原理样机,如图 14 所示,并在冻库中进行除冰试验。经以第 2 节与第 3 节所述方法与过程对缩尺寸覆冰地线进行振动特性分析,并设计除冰机原理样机的偏心轮质量为 215 g,偏心距为 24.8 mm。

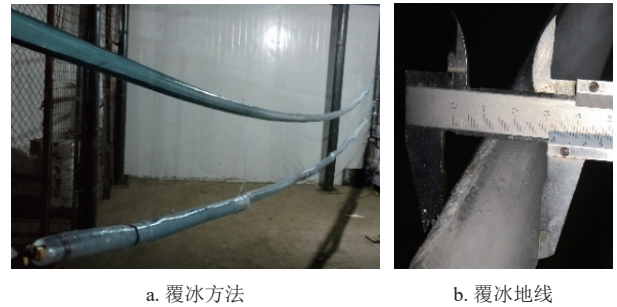


图 13 地线覆冰情况图

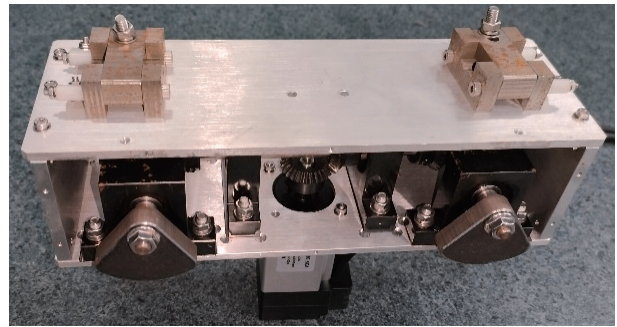
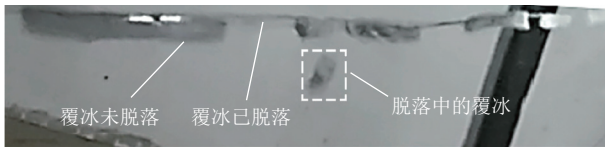


图 14 除冰机原理样机图

将原理样机安装在地线上,如图 15a 所示,并使其重心在架空地线弧垂面内。电机转速由低到高间歇变化,当转速达到 850 rpm 时,即频率约为 14.17 Hz,覆冰地线受迫振动时产生的振幅较大。此时除冰机产生的激振力约为 169 N,覆冰在此过程中先破碎(由透明状变为乳白色不透明状,部分产生裂纹),后随地线振动脱落,振动时间约 8 min,剩余覆冰长度约 1.5 m。图 15b 展示了覆冰脱落时的状态,最终除冰效果如图 15c 所示,除冰率约为 80%。验证了利用共振原理进行除冰的可行性。所设计的除冰机结构简单可靠,经缩尺寸与全尺寸挂线振动试验^[20-21],除冰机能在较长时间内稳定工作,且在缩尺寸架空地线除冰试验过程中,除冰机振动方向始终垂直于地面,未出现沿各方向的大幅摆动,验证了除冰机设计的合理性与稳定性。通过与电脉冲除冰方法^[22]的缩尺寸线缆除冰试验相比,如表 3 所示,共振除冰机所需功率小,除冰能力强。



a. 除冰前



b. 除冰中



c. 除冰后

图 15 除冰过程图

表 3 除冰试验对比表

| 除冰方法 | 电压/V | 覆冰厚度/mm | 覆冰类型 | 除冰长度/m |
|---------|-------|---------|------|--------|
| 共振除冰机 | 24 | 13 | 雨淞 | 6.0 |
| 圆形脉冲除冰器 | 1 300 | 10 | 混合淞 | 0.6 |
| 平板脉冲除冰器 | 1 300 | 10 | 混合淞 | 1.8 |

5 结束语

本文进行了覆冰架空地线的共振除冰技术研究。建立了覆冰架空地线的复合结构有限元模型并进行了振动特性分析,设计、制作了共振除冰机,并进行了缩尺寸除冰试验,得到以下结论。

1) 在一定频率范围内,覆冰架空地线共振的振型为沿 Y 轴方向的近似正弦波形。

2) 本文研究对象的最佳激振频率为 15.325 Hz,激振力为 4 000 N 较为适当,激振位置设置在波腹位置时激振效果最好。

3) 设计了一种呈双对称分布的四偏心轮式的除冰机,其产生的惯性力仅沿 Y 轴方向,使覆冰架空地线在铅锤平面上振动,有效避免地线在共振除冰过程中舞动。

4) 在冻库中进行了缩尺寸地线除冰试验,经约 8 min 的激振,覆冰被去除约 80%,验证了利用共振原理进行除冰的可行性。

参考文献

- [1] 李庆峰,范峥,吴穹,等.全国输电线路覆冰情况调研及事故分析[J].电网技术,2008(9): 33-36.
LI Q F, FAN Z, WU Q, et al. Investigation of ice-covered transmission lines and analysis on transmission line failures caused by ice-coating in China[J]. Power System Technology, 2008(9): 33-36.
- [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] 蒋明,赵汉棣,马小强.高压输电线路覆冰及防冰、除冰技术综述[J].电力安全技术,2020,22(4): 26-32.
JIANG M, ZHAO H D, MA X Q. Icing of HV transmission line and summary of anti-icing and de-icing technology[J]. Electric Safety Technology, 2020, 22(4): 26-32.
- [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(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]. Proceeding of the CSEE, 2008(6): 1-6.
- [5] LU J, ZENG M, ZENG X, et al. Analysis of ice-covering characteristics of china hunan power grid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3): 1997-2002.
- [6] 周凡.基于零序电流调节的配网在线融冰技术研究[D].武汉:华中科技大学,2022.
ZHOU F. Research on on-line ice-melting technology of distribution network based on zero-sequence current regulation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2022.
- [7] ZHI P Z, ZHEN Q L, YING L, et al. Study on overhead ground wire induced voltage of 500kV AC/DC transmission lines for ice melting[C]//2022 7th Asia Conference on Power and Electrical Engineering. [S.l.]: IEEE, 2022: 1704-1711.
- [8] AQUINO J, do PRADO J C, NAZARIPOUYA H, et al.

- Enhancing power grid resilience against ice storms: State-of-the-art, challenges, needs, and opportunities[J]. IEEE Access, 2023, 11, 60792-60806.
- [9] ZHANG Z, ZANG H, YUE S, et al. A review of icing and anti-icing technology for transmission lines[EB/OL]. [2024-09-30]. <https://doi.org/10.3390/en16020601>.
- [10] LI B, BAI J, HE J, et al. A review on superhydrophobic surface with anti-icing properties in overhead transmission lines[EB/OL]. [2024-09-30]. <https://doi.org/10.3390/coatings13020301>.
- [11] 翁盛槟, 聂晓根, 黄博贤, 等. 轻量化高速过障高压巡线除冰机器人研制[J]. 机械制造与自动化, 2016(3): 155-157.
- WENG S B, NIE X G, HUANG B X, et al. Development of a lightweight, high-speed obstacle negotiating robot for line-tracking and deicing along high voltage power transmission lines[J]. Machine Building & Automation, 2016(3): 155-157.
- [12] 胡琴, 姜涛, 蒋兴良, 等. 地线电磁脉冲除冰系统的振动加速度试验研究[EB/OL]. [2024-10-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20220429.1556.004.html>.
- HU Q, JIANG T, JIANG X L, et al. Experimental study on vibration acceleration of ground wire with electromagnetic pulse deicing system[EB/OL]. [2024-10-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2410.tm.20220429.1556.004.html>.
- [13] JI K, LIU B, CHENG Y, et al. Evaluation and optimization of a shock load de-icing method for transmission lines with combined ice failure criteria[J]. Cold Regions Science and Technology, 2019, 165: 102818.
- [14] 谢东升, 孙滔, 史卓鹏, 等. 无应力原长的覆冰输电线路找形研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(8): 183-189.
- XIE D S, SUN T, SHI Z P, et al. Study on form-finding analysis of transmission line with ice-coating based on unstressed initial length[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology (Natural Science), 2021, 35(8): 183-189.
- [15] 上海电缆研究所. 圆线同心绞架空导线: GB/T 1179-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Shanghai Electric Cable Research Institute. Round wire concentric lay overhead electrical stranded conductors: GB/T 1179-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [16] 李旭, 谭新玉. 输电线路防冰/除冰涂层技术发展与创新综述[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2023, 45(5): 142-152.
- LI X, TAN X Y. Review on development and innovation of anti-icing/de-icing coating for power transmission lines[J]. Journal of China Three Gorges University (Natural Science), 2023, 45(5): 142-152.
- [17] 张宏雁, 陈科全, 周松, 等. 冲击载荷作用下导线脱冰过程数值模拟[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28: 362-365.
- ZHANG H Y, CHEN K Q, ZHOU S, et al. Numerical simulation for dynamic response of transmission lines under mechanical deicing load[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2009, 28: 362-365.
- [18] ZHOU F, ZHU J, AN N, et al. The anti-icing and deicing robot system for electricity transmission line[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020(15): 593-600.
- [19] 中国电力企业联合会. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545-2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- China Electricity Council. Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line: GB 50545-2010[S]. Beijing: China Planning Press, 2010.
- [20] 毛先胤, 王开金, 杨旗, 等. 架空地线共振除冰机的仿真设计与试验研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(12): 190-193.
- MAO X Y, WANG K J, YANG Q, et al. Simulation design and experimental study of overhead ground resonant deicing machine[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(12): 190-193.
- [21] 毛先胤, 王开金, 杨旗, 等. 架空地线共振除冰安全性分析[J]. 机械, 2025, 52(5): 15-21.
- MAO X Y, WANG K J, YANG Q, et al. Safety analysis of overhead ground wire resonance deicing[J]. Machinery, 2025, 52(5): 15-21.
- [22] 姜涛. 架空地线电脉冲除冰器设计及除冰试验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- JIANG T. Design of electric pulse deicing device for overhead ground wire and experimental study on deicing[D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.

编辑 张莉