

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.032

架空输电线路移动式地线除冰装置研制

毛先胤^{1,2}, 邹雕^{1,2}, 杨旗^{1,2}, 吴刚³, 鲁彩江³

(1. 贵州电网有限责任公司 电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002;

2. 中国南方电网防冰减灾联合实验室, 贵州 六盘水 553600;

3. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要:传统直流融冰技术难以适用于现行架空地线除冰, 因此, 利用机械振动装置在线上自动除冰成为一种必要手段。研制一种用于架空地线的移动式除冰装置, 装置结构包括行走机构、压紧机构、取能机构以及冲击除冰机构, 具有行走和除冰作业两种状态; 利用连杆结构将夹紧机构和除冰机构的运动结合, 实现除冰装置的轻量化; 采用机载冲击除冰代替传统除冰方式, 提高除冰效率与操控性。该装置可代替人工, 实现在地线上的局部除冰作业, 避免因地线覆冰过厚而导致的线路舞动、闪络、烧伤甚至断线倒杆等, 保证了输电线路的供电稳定性。

关键词:高压输电线路; 架空地线; 除冰装置; 冲击除冰; 结构设计

中图分类号:TH248 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0167-05

Development of Mobile Ground Wire Deicing Device for Overhead Transmission Lines

MAO Xianyin^{1,2}, ZOU Diao^{1,2}, YANG Qi^{1,2}, WU Gang³, LU Caijiang³

(1. Electric Power Science Research Institute, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;

2. Anti-ice and Disaster Reduction Joint Laboratory of China Southern Power Grid, Liupanshui 553600, China;

3. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: As the traditional DC deicing technology is difficult to be applied to the existing overhead ground line deicing, the automatic deicing by mechanical vibration device on line becomes a necessary means. This paper develops a mobile deicing device for overhead ground wire, whose structure includes a walking mechanism, a pressing mechanism, an energy taking mechanism and an impact deicing mechanism, in two states of walking and deicing. The linkage structure is used to combine the movement of the clamping mechanism and the deicing mechanism to realize the lightweight of the deicing device. Traditional deicing method is replaced by airborne impact deicing, which improves the deicing efficiency and maneuverability. The developed device, replacing the manual, realizes the local deicing operation on the ground wire, which avoids line dancing, flashover, burn and line breaking and falling pole caused by over thick ground ice, thus the power supply stability of the transmission line being ensured.

Keywords: high voltage transmission line; overhead ground wire; deicing device; impact deicing; structural design

0 引言

每年 11 月份至次年 2 月份, 我国大部分地区会出现大风、暴雪等极端天气, 这些气候环境容易导致输电线路形成厚重的冰雪层, 这不仅会造成设备损坏和停电, 甚至会导致导线断线和杆塔倾斜等^[1-3], 对安全运行带来严重威胁。虽然架空地线与同塔架设的导线处于相同的地理环境和天气条件下^[4], 但因地线无负荷电流通过, 不能够产生电流焦耳热效应以抵御部分冰冻, 因此架空

地线上的覆冰厚度一般情况下会超过输电导线。且地线都在塔架的最高处, 维修难度及成本相对较大, 因此架空地线除冰方法及技术的研究具有很高的实用价值。

当前, 输电线路架空地线的除冰方法包括以下几种: 融冰法^[5-7]、人工除冰法^[8]、化学除冰法^[9-10]、自然脱冰法^[11]以及机器人除冰^[12-15]。这几种方法都存在不可避免的缺陷。地线融冰方法需要对架空地线和杆塔连接处进行改造, 工作量大, 实际工程应用不多; 人工除冰存在除冰不及

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合成果[2023]一般099); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GZKJXM20210485)

第一作者简介: 毛先胤(1984—), 男, 贵州瓮安人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为高压输变电设备技术, yinxianmao@126.com。

时、作业危险系数大、除冰效率低等问题^[16];化学除冰法对环境的污染较为严重;自然脱冰法具有一定的偶然性;而采用适用于架空地线的除冰装置可以较好地弥补其他方式的不足,但现有对地线除冰的除冰装置研究较少。

地线除冰装置研究的重难点在于如何减轻机器人质量以及提高除冰效率。因此本文研制一种用于架空地线的除冰装置,该装置具备行走、在线取能和振动除冰等功能。该装置结构简单可靠,采用旋转轮式且可随时自锁抱死从而实现装置在导线上自主爬行;设计了以直线推杆为动力的取能模块,运用电磁感应原理^[17]实现了除冰装置在线取能,解决了地线除冰机器人的续航问题;采用微型气泵驱动的气动敲击锤提供的冲击载荷进行除冰^[18],提高了除冰效率;同时采用杠杆原理将夹紧结构与除冰机构结合在一起,实现了除冰装置的小型化与轻量化。

1 除冰装置机械结构设计

1.1 整体结构设计

本文根据架空地线的结构以及除冰作业要求,对国内外此类型机器人机械结构的优缺点加以分析和优化后,提出一种新型机械结构方案。该除冰装置整体结构如图1所示。该除冰装置采用对称式模块化设计,包含行走模块、夹紧模块、取能模块以及除冰模块。除冰装置的两个机械臂左、右分布在基座两端,解决了采用一侧挂线的电力机器人配重难的问题。同时通过压紧轮与行走轮一上一下包裹输电线的配合,可有效避免在大风天气或除冰作业时装置发生侧翻等事故^[19]。

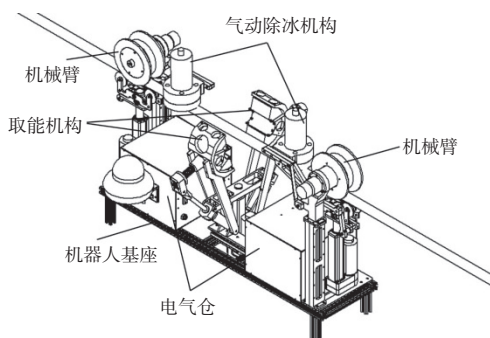


图1 除冰装置整体结构设计

除冰装置结构大部分采用铝合金材料,如机械臂、电气仓等,该材料密度低且有较好的力学性能。除此之外,行走轮、压紧轮等结构采用光敏树脂3D打印而成,以减轻除冰装置整体质量。

脂3D打印而成,以减轻除冰装置整体质量。

1.2 行走结构设计

行走轮结构如图2所示。由于除冰装置需在覆冰的架空地线上行走,为避免待机状态时除冰装置在导线上产生滑动或在爬坡时打滑,因此轮毂电机选用带刹车器的直流无刷减速电机,在行走时能实现迅速刹停,具有较高的可控性。

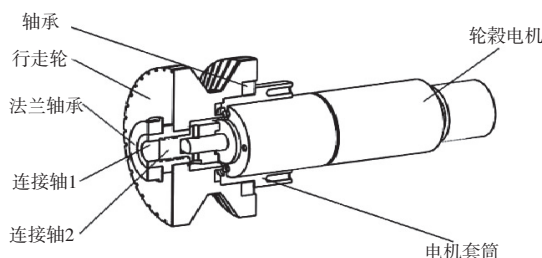


图2 行走模块剖视图

除冰装置需要保持轻量化设计,且架空地线直径远小于同塔杆其他导线,因此选用6189薄壁深沟球轴承,其在具有较好负荷承载能力的同时又尽可能地减少行走轮尺寸。行走轮最外侧设有防滑纹并且对其进行聚氨酯包胶处理,可以在增大摩擦因数的同时减少其对导线的磨损。

1.3 取能模块设计

取能模块结构设计如图3所示。当除冰装置自带蓄电池的电量低于阈值时,需要进行取电操作。此时,除冰装置电动推杆升高,推动抬升杆上升。由于抬升杆始终与电动推杆垂直,左、右两边的纵向直线轴承会同时沿滑杆向上移动,同时线圈支撑架绕底座的转动副旋转,左、右电磁感应磁芯合并,当其合并后进行充电作业。

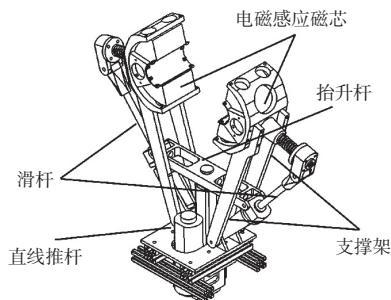


图3 取能模块

为增大取电装置开合角度,方便除冰装置上线,推杆选用150 mm行程的24 V直流电动推杆。该推杆电机内置限位开关且具有很大的自锁力,能够满足在线取电作业要求。轴承选取LMH10UU

直线轴承,价格便宜且具有较大的承载力。为避免在磁芯贴合后推杆继续上升而产生刚性应力,在滑杆末端与磁芯之间设有弹簧。磁芯贴合后,电动推杆继续上升,此时弹簧开始被横向直线轴承压缩,磁芯贴合更紧密。

1.4 夹紧模块设计

除冰装置在架空地线上进行振动除冰作业时,很容易因为振动而导致除冰装置晃动,甚至出现脱线坠落,存在安全隐患,因此设计夹紧模块以防止装置在除冰作业过程中产生剧烈晃动显得非常重要。

夹紧模块的结构包括固定板、推杆电机、压紧轮等。推杆行程 100 mm,给除冰装置上下线留出足够的离线空间,同时实现夹紧松开的作业方式仅为电动推杆的下降与上升,结构简单且便于控制。

夹紧轮与推杆之间使用弹簧,使夹紧轮在压紧导线后具有缓冲作用,能够避免在夹紧导线时产生刚性力而损坏夹紧装置。其次,由于地线弧垂的存在,除冰装置在工作过程中会与导线形成一定角度,且由于自然条件下覆冰形状并不规则,凹凸不平的下冰面会导致压紧轮悬空,因此在设计压紧轮时要使其具有一定的偏转能力(图 4)。这样在除冰作业时,压紧轮可以更好地贴合地线,保证装置在除冰作业时的安全性和稳定性。

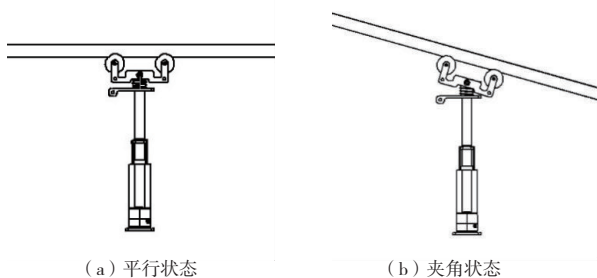
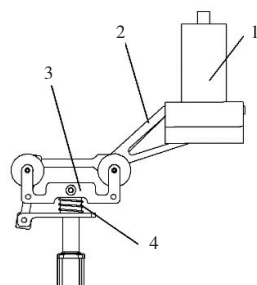


图 4 压紧轮两种工作状态

1.5 除冰模块设计

除冰方法采用机械冲击方法,该除冰方法已被论证具有有效性和可行性。

如图 5 所示,除冰机构包括气动锤和转向架,转向架一端与夹紧机构连接,一端用来固定气动锤,并且转向架中间通过转动副固接在轮毂电机固定架上形成杠杆机构,压紧轮上有弹簧连接用于缓冲,避免产生刚性力而破坏结构。



1—气动锤;2—转向架;3—夹紧机构;4—弹簧。

图 5 除冰机构

地线除冰装置需小型化和轻量化。为减轻除冰装置的质量,在设计过程中将夹紧机构和除冰机构的主动件通过机械结构结合在一起,通过结构优化,从原理上减少主动件的个数,从而减轻装置质量且使结构更加紧凑。除冰机构的工作流程如图 6 所示,夹紧机构的直线推杆伸长,带动夹紧轮升高与行走轮共同作用压紧导线,压紧轮底座的升高带动除冰装置的转向架绕着固定节点向下旋转,从而使激振器与导线贴合。当气动锤与导线接触时,压紧轮恰好压紧导线,此时启动气动冲击锤,压紧轮压紧导线便可避免除冰装置因为自身晃动而发生坠落事故。

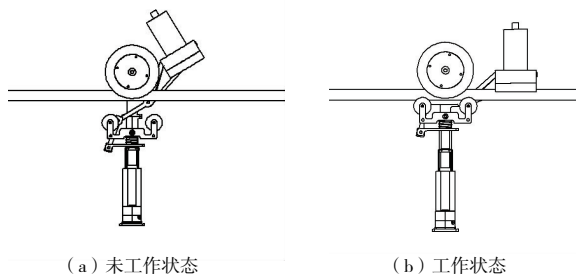


图 6 除冰模块工作流程

2 关键零部件静力学分析

在除冰装置的结构设计中,材料主要采用 6063 铝合金、白色光敏树脂材料以及 45 钢,其材料属性如表 1 所示。

表 1 材料属性

材料	密度/ (g/cm ³)	泊松比	屈服强度/ MPa	弹性模量/ MPa
铝合金	2.69	0.33	50	69 000
光敏树脂	1.15	0.30	33	2 178
45 钢	7.85	0.28	355	205 000

取安全系数为 2,则材料的许用应力(单位:MPa)为:

$$[\sigma]_{\text{aluminium}} = \frac{\sigma_s}{S} = 27.6 \quad (1)$$

$$[\sigma]_{\text{resin}} = \frac{\sigma_s}{S} = 16.5 \quad (2)$$

$$[\sigma]_{45\#} = \frac{\sigma_s}{S} = 177.5 \quad (3)$$

2.1 行走轮静力学分析

除冰装置的行走轮采用光敏树脂材料,将其导入 Workbench 中进行分析。采用 1 阶四面体网格,并在底部与导线接触的位置适当加密网格。为简化模型,将轮轴柱面固定约束,并将导线对行走轮的作用等效为远端力,作用面为导线与行走轮接触的部分,作用点为实际模型中导线中心位置,调整球形域的大小使其覆盖接触面。所得结果如图 7 所示。

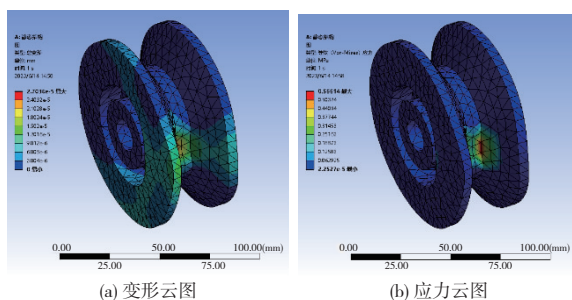


图 7 行走轮有限元分析

行走轮的形变最大值为 0.000 2 mm,发生在行走轮与地线接触面上;应力最大为 0.57 MPa,小于光敏树脂的许用应力。因此,行走轮的强度满足要求。

2.2 底座连接板静力学分析

底座是除冰装置的机械臂与底部型材框架的唯一连接件,因此,对底座的仿真分析十分有必要。底座选用铝合金材料,使用 1 阶六面体网格,提升精度。将固定约束等效添加在底板与型材架通过螺栓连接的 4 个通孔中,在底板与机械臂的连接处添加垂直于底板面的 100 N 的力载荷。

仿真结果如图 8 所示,底板的最大变形为 0.006 mm,最大应力值为 17.9 MPa,小于铝合金的许用应力(式(1)),可见底板强度满足工作要求。

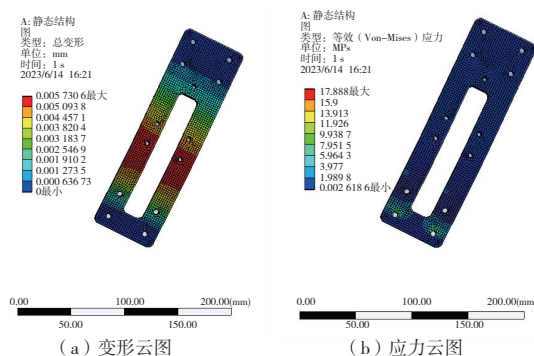


图 8 底板有限元分析

2.3 连接轴静力学分析

连接轴连接除冰模块转向架与轮毂电机支撑件以形成转动副,考虑到其需要较高的强度和较好的切削加工性,因此加工材料选用 45 钢。连接轴的一端固定在电机支撑件上,因此该部分施加固定约束^[20];在转向架与连接轴的接触面添加轴承力,仿真结果如图 9 所示。

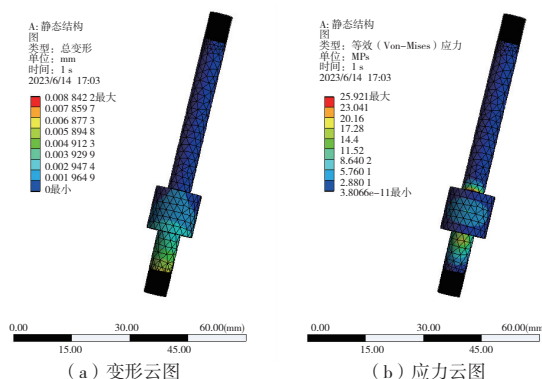


图 9 连接轴有限元仿真

从图 9 可知,连接轴最大形变发生在与转向架形成转动副附近,最大形变为 0.009 mm;连接轴所受最大等效应力为 25.9 MPa,远小于 45 钢的许用应力,因此连接轴的强度满足设计要求。

3 冲击式除冰实验验证

文献[21]利用 Abaqus 模拟研究覆冰导线在冲击载荷作用下的除冰过程和除冰效果,结果显示加载档的除冰效率最大,且随冲击载荷幅值的增加而增大^[21]。因此,输电线路冲击式除冰在理论上是可行的。

基于此结论,本文在实验室环境下对导线进行覆冰,以此来模拟实际情况下的覆冰导线。将覆冰导线放在除冰装置行走轮下方进行除冰模拟实验,如图 10 所示。

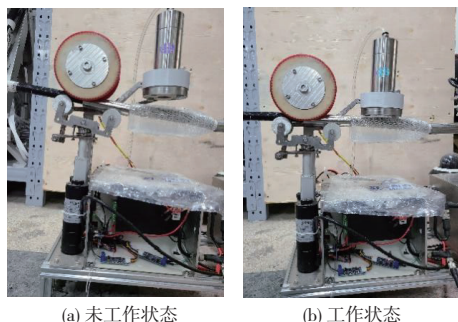


图 10 除冰模拟实验

实验结果如图 11 所示,在气动冲击锤的敲击下,模拟导线的一段覆冰脱落,因此采用冲击除冰方式具有可行性。

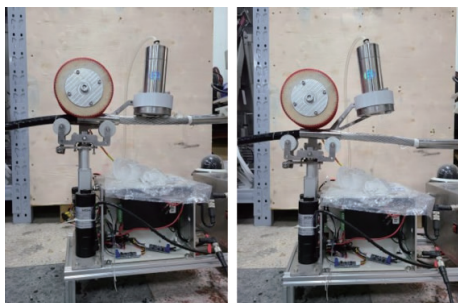


图 11 实验结果

4 结语

本文提出了一种基于感应取能的移动式地线除冰装置的机械结构设计。在分析其作业要求以及工作环境对其影响后,提出了总体机械设计方案。由总体方案确定了行走机构、取能模块、夹紧机构以及除冰机构的详细设计;对关键零部件进行了静力学仿真,验证结构强度的可靠性;阐明了输电线路机械式冲击除冰的可行性并对其进行了实验。结果显示,此除冰装置的除冰性能良好。

在后续设计中,除冰装置的研究将围绕冲击载荷大小以及实际除冰作业实施等问题进行,应不断提高地线除冰装置的实用性与可靠性,实现完全替代传统方法清除地线覆冰并将生产样机投入到实际工作中。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘建伟,周娅,黄祖钦,等. 高压输电线路除冰技术综述[J]. 机械设计与制造,2012(5):285-287.
- [3] 王勇,苗虹,莫思特,等. 高压架空输电线路防冰、融冰、除冰技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制,

2020,48(18):178-187.

- [4] 吕伟桃,邓海辉,王斌,等. 电力架空地线除冰技术分析[J]. 电子世界,2013(16):70-71.
- [5] 曾华荣,杨旗,马覃峰,等. 输电线路智能融冰辅助决策关键技术研究实现[J]. 电力大数据,2023,26(2):24-33.
- [6] 杨国林,蒋兴良,王茂政,等. 输电线路单导线覆冰形状对直流大电流融冰时间的影响[J]. 电工技术学报,2024,39(9):2916-2924.
- [7] 马国平. 采用涡流自热环防止输电线路冰雪灾害的方法研究[J]. 科技创新与生产力,2023(11):136-138.
- [8] 吴旭杰,赵骞,张川,等. 架空输电线路振动除冰装置设计[J]. 机电信息,2025(5):44-47.
- [9] FAN C J, JIANG X L. Analysis of the icing accretion performance of conductors and its normalized characterization method of icing degree for various ice types in natural environments [J]. Energies, 2018, 11(10):2678.
- [10] XU F, LI D Y, GAO P, et al. Numerical simulation of two-dimensional transmission line icing and analysis of factors that influence icing [J]. Journal of fluids and structures, 2023, 118:103858.
- [11] 江全才,朱博云,吴金辉,等. 风速对架空输电线路导线脱冰跳跃的影响[J]. 广东电力,2015,28(9):127-130.
- [12] 庄红军,杨永谦,陈友坤,等. 输电线路双向除冰机器人系统设计[J]. 自动化与仪器仪表,2020(10):141-144.
- [13] 庄红军,彭赤,陈友坤,等. 高压输电线路主动防冰/除冰机器人控制系统设计[J]. 电力大数据,2021,24(3):34-41.
- [14] 谢云鹏. 输电线路防冰除冰机器人交互式远程操控系统设计[D]. 成都:西南交通大学,2022.
- [15] 张瑞坤,朱誉,唐海晏,等. 输电线路除冰机器人设计与研究[J]. 重庆电力高等专科学校学报,2024,29(6):1-4.
- [16] 余飞虎. 输电线路防冰除冰机器人系统设计与分析[D]. 成都:西南交通大学,2021.
- [17] 何柏娜,代维汉,荣博,等. 高压输电线路电磁感应取能电源优化设计[J]. 电工技术,2024(5):174-179.
- [18] 陈科全,严波,刘小会,等. 覆冰导线机械式冲击除冰模拟研究[J]. 振动与冲击,2012,31(17):129-133.
- [19] 华强. LGJ-185/30 型架空输电线路断股修补机器人研制[D]. 成都:西南交通大学,2022.
- [20] 朱英博. 螺旋锥齿轮专用数控铣齿机有限元分析与多目标优化设计[D]. 长春:吉林大学,2017.
- [21] 刘铠乐. 冲击载荷作用下导线覆冰破裂特性及脱冰动力响应研究[D]. 北京:华北电力大学,2024.

收稿日期:2023-08-25