

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.019

机械智能辅助750 kV同塔双回线路带电作业技术可行性研究

石刚¹, 刘锋², 王文卓², 张振²

(1. 甘肃同兴智能科技发展有限公司, 兰州 730050; 2. 国网甘肃省电力公司, 兰州 730030)

摘要: 针对750 kV同塔双回线路杆塔高、横担尺寸长、上中下三相导线垂直排列布置复杂,对带电作业人员要求高、登塔爬线难度大等问题,研究机械智能辅助相间带电作业技术可行性是十分必要的。文中选取750 kV同塔双回线路的典型塔型和导线布置,建立真型无人机、杆塔和导线的三维仿真模型,计算表明无人机从2 m到0.5 m接近导线抛绳作业时,对导线周围电场影响不大,加大了无人机自身周围电场,理论上此时无人机表面仍然没有起晕,无人机抛绳作业是安全可行的。并且实际测试验证了无人机抛投绝缘绳结合电动升降装置辅助人员进出等电位作业是可行的,为750 kV同塔双回线路智能辅助带电作业的开展提供理论参考。

关键词: 750 kV同塔双回线路; 带电作业; 机械智能辅助; 抛绳作业

Feasibility Study on Live Working Technology Assisted by Mechanical Intelligence for 750 kV Double Circuit Transmission Lines on the Same Tower

SHI Gang¹, LIU Feng², WANG Wenzhuo², ZHANG Zhen²

(1. Gansu Tongxing Intelligent Technology Development Co., Ltd., Lanzhou 730050, China; 2. State Grid Gansu Electric Power Company, Lanzhou 730030, China)

Abstract: In view of such issues as high tower height, long cross arm size, complex vertical arrangement of upper, middle, and lower three-phase conductors, high requirements for live working personnel and high difficulty in climbing towers and lines for 750 kV double-circuit transmission line on the same tower, it is highly necessary to study the feasibility of phase-to-phase live working technology assisted by mechanical intelligence. In this paper typical tower type and wire layout of a 750 kV double circuit line on the same tower is selected and a three-dimensional simulation model of the true type drone, tower, and wire is set up. The calculation shows that when the drone approaches the wire rope throwing from a distance of 2 m to 0.5 m, the impact on the electric field around the wire is not significant, and the electric field around the drone itself is increased. Theoretically, no corona occurs on the drone surface at this time, indicating that the drone rope throwing operation is safe and feasible. In addition, the actual testing has verified the feasibility of drone throwing insulation ropes combined with electric lifting devices to assist personnel in entering and exiting equipotential operations, providing theoretical reference for the intelligent assisted live working of 750 kV double-circuit lines on the same tower.

Key words: 750 kV double circuit line on the same tower; live working; mechanical intelligent assistance; rope throwing operation

0 引言

紧凑型同塔双回输电线路的广泛应用解决了输电线路走廊日趋紧张与输电容量日益增长的矛盾,提升了单位走廊的输电容量,但其安全运行水

平要求更高,带电作业技术应用也更为普遍,带电开展同塔双回线路带电检修作业,对保障特高压电网安全稳定运行意义重大^[1-3]。同塔双回线路的杆塔为紧凑型塔、导线相间间距小,对于垂直排列的线路采用传统的吊篮法、绝缘软梯法等作业方式无

收稿日期:2025-09-24; 修回日期:2025-12-10

基金项目:甘肃电网科技项目(基于机械智能辅助的同塔双回线路相间带电作业工法研究及应用)。

Project Supported by Science and Technology Project of Gansu Power Grid(Research and Application of Phase-to-phase Live Working Technology for Double-circuit Transmission Lines on the Same Tower Assisted by Mechanical Intelligence).

法直接从地面或从空中进(出)“中”相等电位开展检修作业,直升机吊篮法、平台法等电位作业时存在从相间穿越的安全风险;采用电动升降装置(“小飞人”)新型带电作业方式提升作业人员过程中存在相间作业间隙不够精准的安全风险;在极限作业条件下,也存在作业人员或工具不慎跌落悬挂在两相之间的安全隐患。

750 kV同塔双回线路主要分布在陕西、甘肃、青海、宁夏、山西等西北5个省份,是中国主电网架的枢纽工程,也是西北水、火、风电打捆实施“西电东送”战略的主通道。国网甘肃省内750 kV线路共49条6 669.559 km,同塔双回线路24条2 033 km,其中省间联络线8条620 km。目前国内主要针对吊篮摆入法从塔身进入等电位的相一地作业技术开展过研究,采用电动升降装置和无人机从地面、空中免登塔的机械智能辅助开展相间带电作业技术研究尚处于空白^[4-6]。

750 kV同塔双回线路的电压等级高、杆塔高(60~100 m)、横担尺寸长、导线离地高度高(最下相导线离地面高度50 m以上),三相导线上中下垂直排列较为密集、位置关系复杂,高压强电磁场环境对辅助作业无人机的影响、无人机和电动升降装置辅助作业是否可行等尚缺少理论研究和数据支撑^[7-9]。因此,文中针对750 kV同塔双回线路的典型塔型和导线布置,建立真型无人机、杆塔和导线的三维仿真模型,计算无人机位于导线不同距离时无人机和导线附近空间电磁场分布特征,研究分析智能辅助带电作业的可行性,解决传统带电检修作业安全风险大、劳动强度大、效率低等问题,为750 kV线路相间智能化带电作业的开展提供理论参考。

1 750 kV输电线路电场分析

针对750 kV输电线路,文中选用型号6×LGJ-400/50钢芯铝绞线,绝缘子采用典型玻璃绝缘子,按常见的I级污区布置,绝缘子片数取42,玻璃介电常数取6。杆塔尺寸图和1/2对称简化模型见图1。

双联玻璃绝缘子串三维仿真模型见图2。

首先计算中相绝缘子附近电场分布情况,电源施加方法与前述相同,对中相绝缘子导线施加最高运行电压,即 $750/1.732=433$ kV,其余两相加载电压为 $-0.5\times 433=-216.5$ kV。模型电场分布见图3。

对导线外侧和下方3、5、10、15 m处分别进行测量。对于中相,只计算3 m和5 m区域范围电场强度,其电场强度见表1。

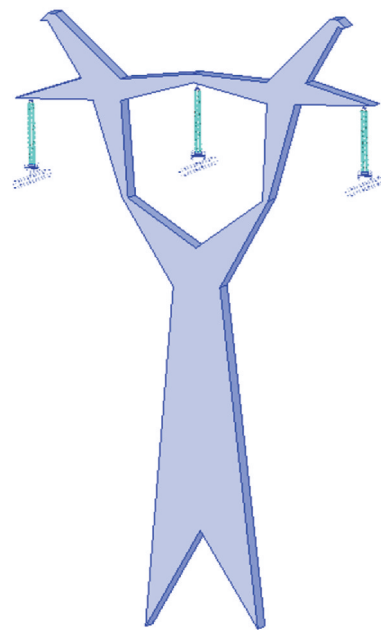
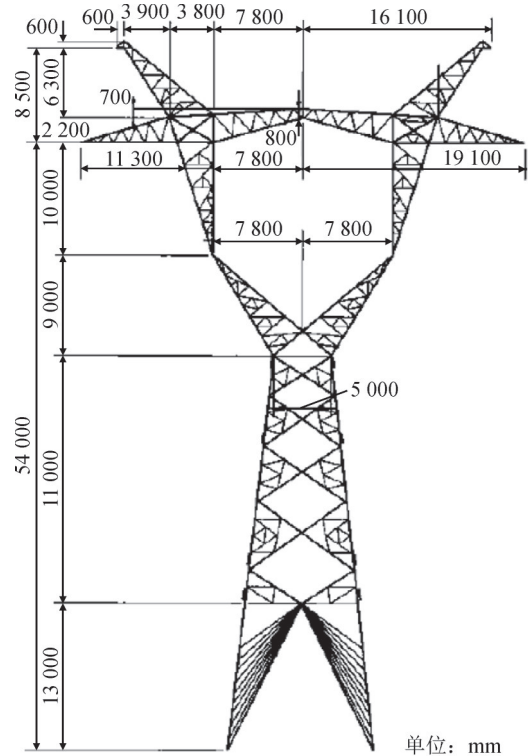


图1 750 kV输电线路杆塔模型

Fig. 1 750 kV transmission line tower model



图2 绝缘子串三维仿真模型

Fig. 2 3D simulation model of insulator string

2 无人机、杆塔和导线的三维仿真模型

无人机是一种先进的无人驾驶自行飞行器,具备高空、远距离、快速、自行作业能力,可以穿越高

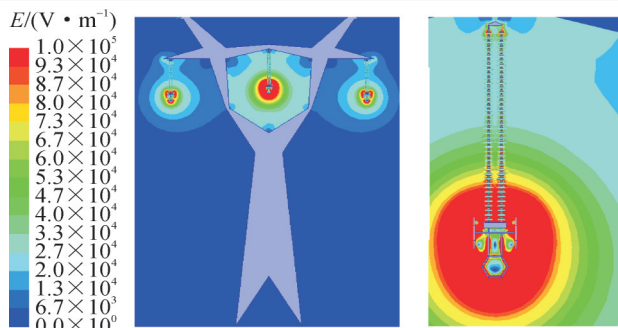


图3 模型电场分布图

Fig. 3 Model electric field distribution diagram

表1 750 kV单回输电线路空间电场分布

Table 1 Spatial electric field distribution of 750 kV single circuit transmission line

位置	电场强度/(V·m ⁻¹)	
	3 m	5 m
中相	导线侧面	55 147.02
	导线下方	49 564.77
边相	导线侧面	57 851.02
	导线下方	31 526.45

山、河流对输电线路进行快速巡线,对架空线的铁塔、支架、导线、绝缘子、防震锤、耐张线夹、悬垂线夹等进行全光谱快速摄像和故障监测,大大提高输电维护和检修的速度和效率。“无人机抛绳结合电动升降装置”辅助带电作业技术,是指采用无人机将绝缘绳抛到分裂导线的两侧后,将绝缘绳释放到地面来固定电动升降装置,通过升降装置的上下提升将作业人员送到导线上不同的作业位置,实现免登塔、机械智能辅助带电作业^[10-12],提高了带电作业人员的安全,见图4。采用抛绳上线的方法使设备可在导线所在处随上随下,另设备后上线绳与设备脱离,设备与地面联系完全脱离使得设备可以跨越河流树林等障碍。

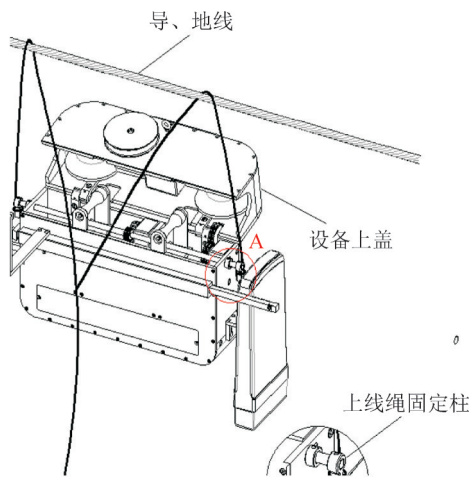


图4 无人机抛绳示意图

Fig. 4 Schematic diagram of drone rope throwing

为研究分析高压强电磁场环境下无人机抛绳作业安全性,首先针对无人机抛绳工况进行分析,建立真型无人机—杆塔—导线的三维仿真模型,分析无人机抛绳作业距导线不同距离处的电场分布特征^[13-14]。

选取750 kV同塔双回线路的典型塔型ZGU218,塔型图见图5,导线布置及相序排列方式见图6。无人机采用DJ御2,简化模型见图7。绝缘子型号为FXBW-750/300,两端配有均压环,其简化结构见图8。

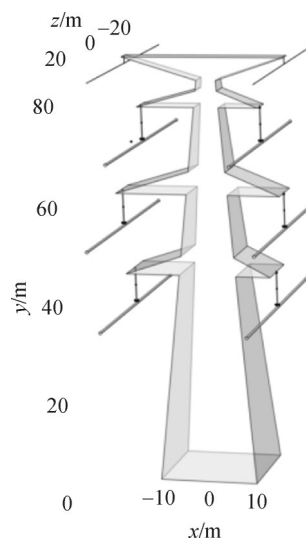


图5 750 kV同塔双回线路的典型塔型ZGU218塔型图
Fig. 5 Typical tower type ZGU218 of 750 kV double circuit line on the same tower

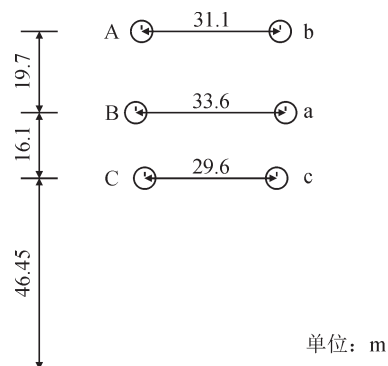


图6 导线布置及相序排列方式图

Fig. 6 Wire layout and phase sequence arrangement

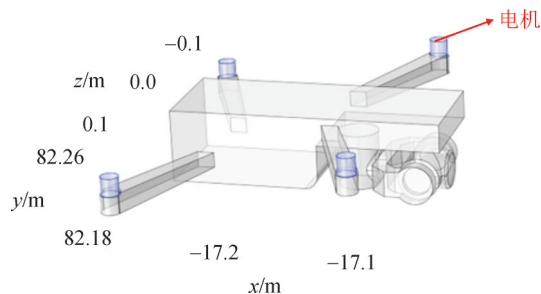


图7 DJ御2无人机简化模型图

Fig. 7 Simplified model of DJ Yu2 UAV

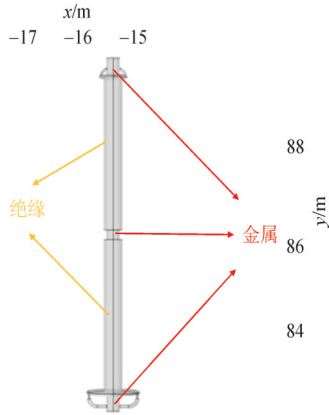


图8 两端配有均压环的FXBW-750/300绝缘子简化结构图
Fig. 8 Simplified structure of FXBW-750/300 insulator with equalizing rings at both ends

除两端与接地极或高压端直接相连的玻璃绝缘子外,处于中间的绝缘子金属部分电位处于悬浮状态,见图8,不能直接对其进行求解^[15-17]。有限元电场分析计算中关于悬浮电位的处理方法常用的有:电荷守恒法、部分电容法、最小能量法和虚拟大介电常数法,其中虚拟大介电常数法所求解区域里的电位差相对值一般小于0.1%^[18-20]。实际做法是,在仿真模型里将悬浮导体的相对介电常数设置成一个很大值即可,计算中取值为9 000^[21-24]。

三相导线型号为6×JL/G1A-400×35,为便于仿真,将分裂导线进行简化,导线的等效半径计算为

$$r_{\text{eq}} = \sqrt[n]{rd_{12}d_{13}\cdots d_{1n}} \quad (1)$$

式(1)中: r_{eq} 为导线的等效半径,mm; r 为单根分裂导线的半径,mm; d_{12} 、 d_{13} 、 \cdots 、 d_{1n} 为第1根子导线与第2、3、 \cdots 、 $(n-1)$ 根子导线之间的距离,mm。

建立了无人机、杆塔和导线的三维仿真模型,见图9。仿真时,无人机机臂上的4个电机设置为金属材料,相对介电常数设为无穷大的数;无人机机身其余部分设置为塑料材质,相对介电常数设为2.0;塔身全部设置为金属材料,相对介电常数设为无穷大的数;绝缘子的连接部分和均压环设置为金属材料,相对介电常数设为无穷大的数,中间的绝缘子串部分设置为绝缘材质,相对介电常数设为4.2。

选用半径200 m,高度100 m的半圆柱体作为外边界。设置A相导线电压为:750 kV $\times 1.1 \times \sqrt{2}/\sqrt{3} = 673.6$ kV,B相和C相按相序依次相差120°进行设置。无限长导线电场方向垂直于导线,故与导线垂直的前后两面边界条件为

$$n \cdot D = 0 \quad (2)$$

接地面电势为0,边界侧面由于距离较远可近似为电势0,即

$$\varphi = 0 \quad (3)$$

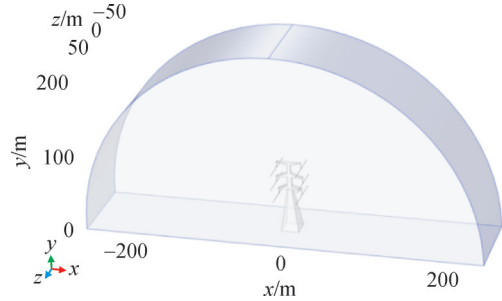


图9 无人机、杆塔和导线的三维仿真模型图
Fig. 9 3D simulation model diagram of UAV, tower, and wire

由于外边界、导线、无人机的尺寸相差很大,为保证计算结果更加准确,对无人机局部区域进行了细化剖分,见图10。

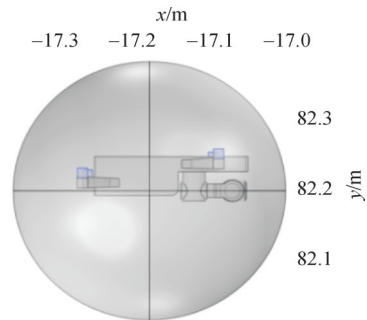


图10 无人机剖分区域示意图

Fig. 10 Schematic diagram of UAV segmentation area

3 电场计算结果分析与讨论

仿真计算了没有无人机、无人机位于导线外侧不同距离时的电场分布。取导线所在的 xz 平面定义为绘制截面,取 y 为46.45、62.55、82.25 m 3个截面。之后在这个截面上选取适当的长度并且相切于电机的一条线段,再去仿真计算出这条线段上的各处电场模。二维电场模图的横坐标是与 x 轴平行的,但 z 方向取了一点数值保证线段能切到电机,弧长总共取了60 m。

没有无人机时的电场分布图见图11。将无人机分别放置在A、B两相附近,距离依次设置为0.5、1、1.5、2 m进行仿真分析。放置无人机后,无人机电机切面和导线附近的电场分布见图12,不同距离下无人机和导线表面最大场强见表2。

由图7可知,最大场强仍然出现在导线附近。图8结合表1中综合不同塔型、不同方位、不同距离的仿真结果看,无人机表面最大场强随其与导线距离减小而增大,导线表面最大场强无明显变化趋势,说明无人机的存在对导线周围电场影响不大,只是加大了无人机周围的电场。

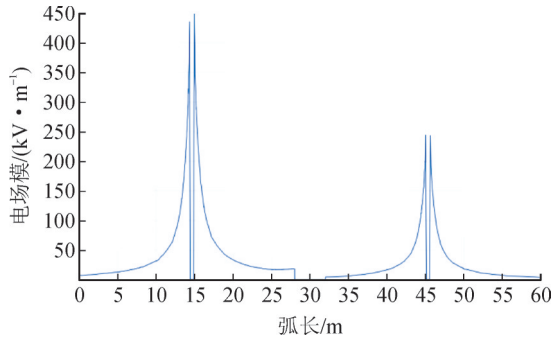


图11 没有无人机时的电场分布(A-B相)

Fig. 11 Electric field distribution without UAV(A-B Phase)

4 作业可行性分析及测试验证

根据上述仿真计算分析可知,无人机距离导线不同位置进行抛绳作业时,对导线周围电场影响不大,但加大了无人机自身周围电场,当无人机距离导线0.5~1.0 m(未考虑安全裕度的纯空气间隙)时,

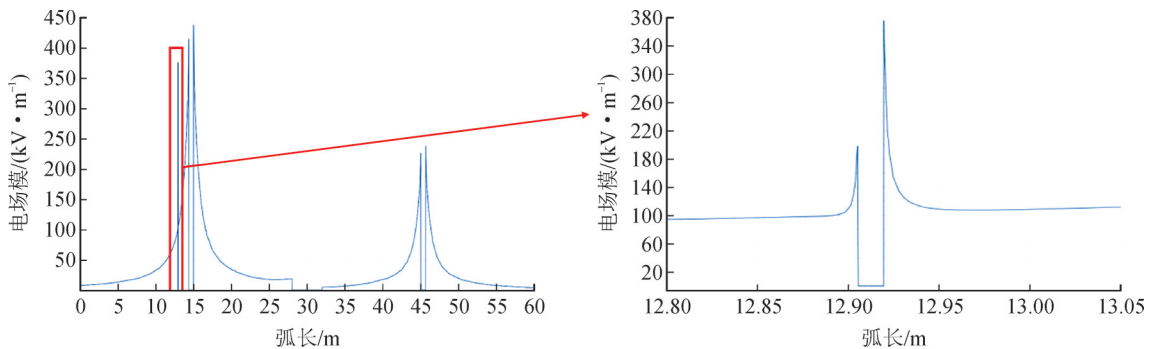


图12 有无人机时电场分布

Fig. 12 Electric field distribution with UAV

表2 不同距离下无人机和导线表面最大场强

Table 2 Maximum field strength on the surface of UAV and conductors at different distances

无人机位置/m	最大场强/(V·m ⁻¹)	
	无人机	附近导线
置于A相 导线外侧	0.5	7.82×10 ⁵
	1.0	4.39×10 ⁵
	1.5	4.03×10 ⁵
	2.0	3.06×10 ⁵
置于B相导 线外侧	0.5	6.96×10 ⁵
	1.0	4.50×10 ⁵
	1.5	2.42×10 ⁵
	2.0	1.90×10 ⁵

4)无人机操作人员检查抛绳无人机合格后,向工作负责人申请起飞。

5)工作负责人确认工作区域安全后,操作人员控制无人机携带抛绳器(绳子长度是待挂到导线高度的2倍)到达抛投位置处,进行抛投绳作业。

无人机表面最大场强未超过30 kV/cm。30 kV/cm为空气间隙在均匀电场下的临界起晕场强^[25],理论上此时无人机表面仍然没有起晕,无人机距离导线一定距离处悬停开展抛绳作业是安全可行的。

选取750 kV同塔双回线路段开展了无人机抛绳作业测试验证,无人机结合电动升降装置进出等电位作业的现场示意图见图13。主要测试步骤为:

1)按相关要求提前办理空域审批手续及计划报备,填写无人机抛绳作业工单,配置作业无人机、绝缘绳和牵引绳、抛绳用铅锤、电动升降装置、电位转移棒工具、屏蔽服、工器具和仪表等带电作业用设备设施,检查作业无人机处于适航状态,作业工器具完好。

2)作业前,测量现场环境风速温湿度等气象条件,确保满足带电作业气象要求。

3)牵引绳连接铅锤安装到抛绳器上。

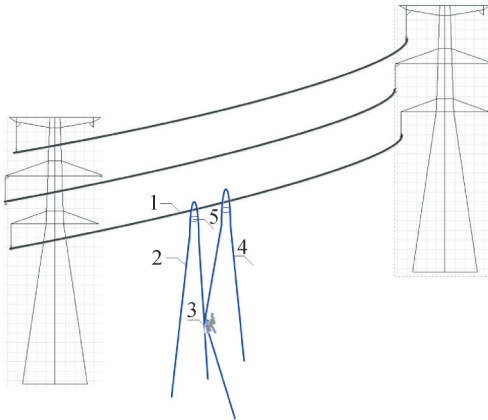
6)当牵引绳应搭落在整相导线两侧、抛投后重锤应落至地面,抛绳作业完成后,无人机按规划的飞行路径降落,抛绳作业结束,见图14。

经测试验证表明,采用无人机抛投绝缘绳结合电动升降装置辅助提升开展750 kV同塔双回线路相间带电作业是可行的,为开展相间修补导线、更换防振锤等相间作业开展奠定基础。

5 结论

文中针对750 kV同塔双回线路的典型塔型和导线布置,通过真型无人机、杆塔和导线的三维仿真计算和测试验证,研究了机械智能辅助带电作业技术可行性,得到结论如下:

1)当不考虑无人机操控人员和无人机的操控相应时延,以及现场环境突发大风等恶劣天气等外在情况,未考虑安全裕度的纯空气间隙时,无人机从2 m到0.5 m接近导线抛绳作业时,对导线周围电场



1—导线；2—牵引绳；3—电动升降装置；4—后备保护环；5—绳扣和自锁环。

图13 无人机结合电动升降装置进出等电位作业的现场示意图

Fig. 13 Field schematic diagram of equipotential operation in and out of unmanned aerial vehicle combined with electric lifting device



图14 无人机抛绳结合电动升降装置现场图

Fig. 14 Field diagram of drone rope throwing combined with electric lifting device

影响不大,加大了无人机自身周围电场。理论上此时无人机表面仍然没有起晕,无人机距离导线一定距离处悬停抛绳作业是安全可行的。

2)测试验证表明采用无人机抛投绝缘绳结合电动升降装置辅助进出750 kV同塔双回线路等电位作业是可行的,为750 kV线路相间智能化带电作业的开展提供理论参考。

在文中无人机抛绳作业技术研究基础上,需进一步深入研究作业人员乘坐电动升降装置在相间穿越作业技术及安全性,促进750 kV同塔双回线路相间作业应用。

参考文献:

- [1] 张一睿,陶劲松,申政,等.输电线路杆塔周围人身安全风险评估与接地装置结构优化[J].智慧电力,2025,53(6):78-84.
ZHANG Yirui, TAO Jinsong, SHEN Zheng, et al. Assessment of personal safety risks around transmission line towers and structural optimization of grounding devices[J]. Smart Power, 2025, 53(6): 78-84.
- [2] GELA G, HOTTE P W, CHAREST M. IEC method of calculation of minimum approach distances for live working[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 15(2):635-641.
- [3] 陶留海,孙超,李雪奎,等.±1 100 kV特高压直流输电线路带电作业实用化技术研究[J].中国电机工程学报,2020,40(s1):134-139.
TAO Liuhai, SUN Chao, LI Xuekui, et al. Study on the practical technology for ±1 100 kV UHVDC transmission line live working [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(s1): 134-139.
- [4] IWAMA T, KITO K, NAITO K. Ultra-high strength suspension insulators and insulator string assemblies for UHV transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(10):3780-3789.
- [5] 杜勇,刘铁,涂明,等.直升机平台带电作业在超高压输电线路中的应用[J].湖北电力,2012,36(4):36-38.
DU Yong, LIU Tie, TU Ming, et al. Application of helicopter platform method live working in extra high voltage[J]. Hubei Electric Power, 2012, 36(4):36-38.
- [6] DING Yujian, LI Jiawei, SUN Wenxiu, et al. Electric field characteristics of UHV DC tension string during insulator replacement by two workers[J]. IET Science Measurement & Technology, 2022, 16(2):78-89.
- [7] 卓浩泽,张驰,李泰霖,等.面向电力作业无人机的位姿估计与目标感知方法[J].南方电网技术,2025,19(7):142-151.
ZHUO Haoze, ZHANG Chi, LI Tailin, et al. Pose estimation and target perception methods for electric power operation unmanned aerial vehicles[J]. Southern Power System Technology, 2025, 19(7): 142-151.
- [8] MCDERMID W. Investigation of FRP hot stick performance for 500 kV DC applications under conditions of pollution or non-uniform wetting[C]//2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application. China: IEEE, 2009:36-39.
- [9] 刘超,阮江军,杜志叶,等.不同导线排列下500 kV输电线路路直升机带电作业平台侵入路径[J].电力自动化设备,2017,37(1):151-156.
LIU Chao, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Invasion path of helicopter live working platform on 500 kV transmission line under different wire arrangements[J]. Power Automation Equipment, 2017, 37(1):151-156.
- [10] JIANG Chilong, ZOU Dehua, LI Jinliang, et al. Research on electric field distribution of UHVDC transmission lines and body surface during live working[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, 23(1):4-12.
- [11] 李嘉伟. ±1 100 kV耐张串双人带电作业安全距离与电场分布特性研究[D].北京:华北电力大学,2022.
LI Jiawei. Research on the safety distance and electric field distribution characteristics of ±1 100 kV tension string two person live working[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022.
- [12] GHASSEMI M, FARZANEH M, CHISHOLM W A. Three-dimensional FEM electrical field calculation for FRP hot stick during

- EHV live-line work[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(6):2531-2540.
- [13] 彭平. ± 1 100 kV 输电线路带电作业技术研究[D]. 成都: 西华大学, 2022.
- PENG Ping. Research on live working technology for ± 1 100 kV transmission lines[D]. Chengdu: Xihua University, 2022.
- [14] LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. Helicopter live-line work on 1 000 kV UHV transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):982-989.
- [15] MCDERMID W, BROMLEY J C, DODDS D J, et al. Investigation of the flashover of a FRP hot stick while in use for live line work at 500 kV[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1158-1166.
- [16] 董彦武. 带电加装、更换 500 kV 紧凑型输电线路相间间隔棒技术研究[J]. 山西电力, 2013(3):62-65.
- DONG Yanwu. Research on live line installation and replacement of phase-to-phase spacer on 500 kV compact transmission lines[J]. Shanxi Electric Power, 2013(3):62-65.
- [17] ZHANG Bo, HAN Shejiao, HE Jinliang, et al. Numerical analysis of electric-field distribution around composite insulator and head of transmission tower[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2):959-965.
- [18] 张赟, 曾嵘, 张波. 750 kV 同塔双回输电线路相序排列方式的研究[J]. 陕西电力, 2008, 36(6):1-5.
- ZHANG Yun, ZENG Rong, ZHANG Bo. Study on phase-order arrangement of 750 kV double circuit transmission line in same tower[J]. Shaanxi Electric Power, 2008, 36(6):1-5.
- [19] 王岩, 胡聪, 石俏, 等. 一种基于液压传动发电技术的综合制冷系统[J]. 广东电力, 2021, 34(9):120-128.
- WANG Yan, HU Cong, SHI Qiao, et al. An integrated refrigeration system based on hydraulic transmission power generation technology[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(9):120-128.
- [20] HE Jinliang, ZENG Rong, CHEN Shuiming, et al. Potential distribution analysis of suspended-type metal-oxide surge arresters[J]. IEEE Power Engineering Review, 2002, 22(10):62-62.
- [21] 陈富国, 赵盼盼, 牛博, 等. 输电线路带电作业机器人的电磁分析与防护设计[J]. 高压电器, 2023, 59(2):81-88.
- CHEN Fuguo, ZHAO Panpan, NIU Bo, et al. Electromagnetic analysis and protection design of live working robot on transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2):81-88.
- [22] 吴田, 刘仕奇, 曹探深, 等. 基于先导放电理论的等电位作业人员初始放电附着点位置模拟[J]. 高压电器, 2022, 58(12):85-91.
- WU Tian, LIU Shiqi, CAO Tanshen, et al. Simulation of the initial discharge attachment point position of equal-potential worker based on leader discharge theory[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12):85-91.
- [23] 盛金马, 李鸿鹏, 张丹丹, 等. 220 kV 同塔双回钻跨一体线路带电作业人体体表场强分析[J]. 高压电器, 2022, 58(8):252-258.
- SHENG Jinma, LI Hongpeng, ZHANG Dandan, et al. Analysis of live operator's body surface field strength of 220 kV drilling and spanning tower with double-circuit transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8):252-258.
- [24] 普子恒, 徐晨, 赵伟, 等. 带电更换 1 000 kV 耐张绝缘子时的工器具和人体电场分布研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5):84-92.
- PU Ziheng, XU Chen, ZHAO Wei, et al. Study on tools for live replacement of 1 000 kV tension insulator and body surface electric field distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5):84-92.
- [25] 刘壮, 杜勇, 陈怡, 等. ± 500 kV 直流输电线路直线塔无人机巡检安全距离仿真与试验[J]. 高电压技术, 2019, 45(2):426-432.
- LIU Zhuang, DU Yong, CHEN Yi, et al. Simulation and experiment on the safety distance of typical ± 500 kV DC transmission lines and towers for UAV inspection[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2):426-432.

石刚(1980—),男,高级工程师,硕士,研究方向为输变电设备运维检修(E-mail:18693716666@163.com)。

刘锋(1974—),男,高级工程师,本科,研究方向为输变电设备运维检修(通信作者)(E-mail:624514238@qq.com)。