

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.02.010

针对柱上变压器的无人机绝缘喷涂技术研究

韩俊康,郝思鹏,何嘉铭,李思源,荆启文

(南京工程学院,江苏 南京 211167)

摘要:柱上变压器分接头处易发生金属裸露故障,对其进行绝缘喷涂可以提高供电的可靠性。基于无人机的带电绝缘喷涂系统能保证人身安全,提高作业效率,基于 SolidWorks 和 ANSYS 仿真平台,设计 10 kV 柱上变压器的绝缘喷涂方案,拟定喷涂参数。设定喷嘴喷涂压力范围为 0.2~0.4 MPa、喷涂时间为 1 s,采用点射喷涂以优化喷涂效果。设置喷嘴扩散角度、喷涂角度和距离为变量进行仿真。研究表明:当喷嘴扩散角度 30°、喷涂角度 15°、喷嘴距设备距离 0.65 m 时,其喷涂覆盖率最佳。通过现场喷涂作业,验证了喷涂方案的仿真结果,喷涂后柱上变压器的关键部位得到了有效的绝缘保护,提高了电力设备供电的稳定性和安全性。

关键词:SolidWorks;ANSYS;无人机喷涂;10 kV 柱上设备;柱上变压器绝缘

中图分类号:TM75;TP27 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2026)02-0050-06

Drone Insulation Spraying for Pole-mounted Transformers

HAN Junkang,HAO Sipeng,HE Jiaming,LI Siyuan,JING Qiwen

(Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Insulating coating application to pole-mounted transformer tap changers prone to metal exposure faults can enhance the reliability of power supply, and the live insulating spraying system based on drones ensures personnel safety and improves operational efficiency. An insulation spraying scheme for 10 kV pole-mounted transformers was designed on SolidWorks and ANSYS simulation platforms, and spraying parameters were set. The nozzle spraying pressure range was set between 0.2–0.4 MPa, with spraying time in 1 second, and in application of point spraying to optimize the spraying effect. The nozzle diffusion angle, spraying angle, and distance were set as variables for simulation. The research results show that the best spraying coverage is achieved when the nozzle diffusion angle is 30°, the spraying angle is 15°, and the nozzle distance from the equipment is 0.65 m. The spraying scheme was validated through on-site spraying operations, confirming that the critical parts of the pole-mounted transformer received effective insulation protection after spraying, which enhances the stability and safety of the power supply.

Keywords: SolidWorks; ANSYS; drone spraying; 10 kV pole-mounted equipment; pole-mounted transformer insulation

0 引言

随着近年来电力需求的快速增长,对配电网运行可靠性的要求也日益提高^[1-3]。10 kV 柱上设备在日常运行时,绝缘护套会因为鸟爪、树枝、雨水锈蚀等干扰而破损,进而产生金属裸露点^[4-5]。为保证电力设施的安全可靠,需要对柱上设备进行绝缘化处理。传统的电力设施绝缘化维护方式如人工喷涂、人工更换绝缘护套效率低下且安全风险高,在必要情况下还需停电作业^[6],属于电力设备事故维修,而非预防检修^[7-9]。而无人机带电绝缘喷涂技术通过自动化操作,能够有效提升作业效率和作业安全,契合新型电力系统的发展。

柱上变压器位于 10 kV 柱上杆塔上,其金属

裸露点通常集中在变压器分接头与电线的连接处^[10]。若发生故障会影响 10 kV 输电线路的正常运行与供电稳定性^[11-12],因此需通过不停电作业的方式对柱上变压器进行绝缘喷涂作业处理^[13]。

目前,针对 10 kV 柱上设备的绝缘喷涂研究相对较少,对柱上变压器的绝缘喷涂缺少相应的规定与要求。刘若溪等^[14]分析了 10 kV 柱上变压器的分接头处故障的原因,展示了变压器分接头处积水、烧毁等故障类型,说明了对柱上变压器进行绝缘喷涂处理的必要性。潘明等^[15]对 10 kV 变压器的整体外壳进行绝缘研究,但仅局限于变压器电场强度,无实际绝缘喷涂仿真进行验证。贾元峥等^[16]研究了通过绝缘手套作业法在短时间内更换故障的柱上变压器,但该方案所需的现场

基金项目:江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2022105)

第一作者简介:韩俊康(2001—),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为机电控制及自动化,2353185192@qq.com。

工作人员较多,检修设备和作业流程较繁琐。陈兴等^[17]提出通过无人机监测电力设备,以确保电力设备的安全问题,并表明基于无人机的电力设备监测和检修的可行性。

综上所述,需提出一种全新的自动化喷涂方案,针对柱上变压器的进行绝缘化处理。本文基于 SolidWorks 和 ANSYS 仿真平台,针对 10 kV 柱上设备中的柱上变压器进行绝缘喷涂的设计,拟定相关喷涂参数,并通过仿真模型加以验证。

1 无人机绝缘喷涂设计

1.1 柱上变压器的特性与喷涂要求

10 kV 柱上设备通常分为以下几类:柱上开关、柱上变压器、电压互感器、线夹、熔断器、避雷器和 U 型挂环,设备种类繁多且相互间距离较近,构成了紧凑的电力分配网络。由于安装环境和需求的不同,设备的组合方式并不唯一,必须根据设备的特点采用合适的喷涂方法,进行绝缘化处理,以确保设备的安全性和功能性。

柱上变压器广泛应用于农村、郊区及城市的配电网中,为居民和商业用户提供稳定的电力供应,其通常位于 10 kV 柱上设备中心位置,体积较大^[18]。其金属裸露点主要集中在 7 个分接头上,这些分接头是电力连接的关键节点,同时也是最容易产生电气泄漏的区域^[19]如图 1 所示。因此,在进行绝缘处理时,必须对这些裸露的金属部分进行重点保护。柱上变压器更适合采用点射喷涂作业。这种方式能精准地覆盖裸露的金属点,确保每一个分接头都能得到充分的绝缘保护,防止电气事故的发生。同时,点射喷涂还可以避免过多的绝缘材料浪费,经济且高效。



图 1 10 kV 柱上变压器现场采集图

柱上变压器的单次点射喷涂时间为 1 s 左右,这样既能针对单个金属裸露点进行有效喷涂,同时能够最大限度地避免涂料浪费。喷嘴的喷涂压力拟定为 0.2~0.4 MPa,柱上变压器特性与喷涂模

式如表 1 所示。

表 1 柱上变压器特性与喷涂模式

10 kV 柱上设备名称	设备绝缘特性	喷涂模式	喷涂时间/s	喷涂压力/MPa
柱上变压器	金属裸露点集中在分接头上	准平面点射	1	0.2~0.4

1.2 喷涂作业飞控参数

为保障绝缘喷涂的安全性、可靠性与经济性,本研究设计针对柱上变压器的无人机绝缘喷涂的飞控参数如下。

无人机飞行高度需不低于 10 kV 电线杆塔的高度即 10~12 m。喷涂完毕一处绝缘破损后,无人机需调整飞行姿态后悬停进行下一次喷涂,飞行速度不宜过快,为 0.6~0.8 m/s。导线附近有较强的电场影响^[20],喷嘴距导线的距离应大于 0.3 m。同时,为保障无人机的飞行安全,无人机距离导线的最近距离应大于 0.8 m。

1.3 喷嘴参数

1) 喷嘴选择

当前无人机喷涂所用的喷嘴类型多样,按照喷雾形状的类型可以分为扇形喷嘴和圆锥形喷嘴两种^[21];按照喷雾原理的类型可分为压力式喷嘴和离心式喷嘴两种^[22]。

扇形喷嘴适用于点射喷涂作业,其精准控制和灵活调整的特性适合对小面积或特定区域进行喷涂;圆锥形喷嘴适用于连射喷涂作业,其大面积覆盖和均匀喷涂的特性适合覆盖广泛区域的喷涂任务^[23-24]。而压力式喷嘴比离心式喷嘴的抗漂移能力更强^[25],考虑到无人机喷涂的精确性与稳定性,本研究选择扇形压力式喷嘴对柱上变压器进行绝缘喷涂研究,并分析其结构作为后续仿真的基础。

2) 喷嘴结构

扇形压力式喷嘴的结构参数包括切槽深度 H ,切槽角度 α ,偏心距 e ,球头面直径 D 和孔边距 h 等。对于扇形压力式喷嘴,其相对切深 H_f 和切槽角度 α 是影响无人机绝缘喷涂喷雾角的重要参数^[26],相对切深和切槽角度成反比,相对切深 H_f 计算如式(1)所示:

$$H_f = \frac{D}{2} \times (H-h) \approx \frac{R-e}{R} \quad (1)$$

当相对切深较小时,该扇形喷嘴的喷雾角随着切槽角度的增大而无规律增大。而当相对切深达到阈值后,喷雾角随着相对切深的增加而减小^[27-28]。

3) 喷嘴三维模型

由于无人机绝缘喷涂作业附近电场较强,为保护铜质金属扇形喷头,本研究在喷头外侧安装绝缘护套,以保障喷嘴的性能。在 SolidWorks 中对扇形压力式喷嘴进行三维模型的构建,如图 2 所示。



图 2 扇形压力式喷嘴三维模型

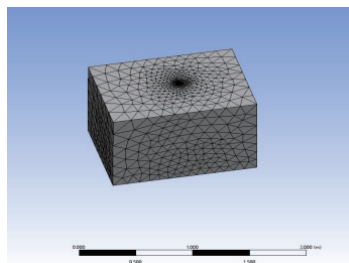


图 3 柱上变压器喷涂流场域网格

2 针对 10 kV 柱上变压器的喷涂仿真

2.1 柱上变压器喷涂模型创建与网格划分

将在 SolidWorks 中装配好的柱上变压器喷涂模型导入 Workbench 中 Fluent 模块中,并进行体积抽取。与实物比例为 1:1。通过 Workbench 对柱上变压器喷涂模型进行整体网格划分,选择捕获邻近度,从而自动调整网格密度,并对网格质量较差的网格节点进行调整,提升整体喷涂模型的网格质量,柱上变压器喷涂流场域网格如图 3 所示。

2.2 仿真分析

首先在 Fluent 中添加喷涂材料。本研究选用的绝缘喷涂涂料为沙石混合物,密度为 1.2 g/cm^3 ,黏度为 $1.72 \text{ Pa} \cdot \text{s}$,液滴表面张力为 0.7 N/m ,该种涂料能够有效阻止铜铝接线处的氧化与锈蚀。

本研究的仿真设置了喷嘴扩散角度、喷涂角度和喷嘴与柱上变压器的距离这 3 组变量,其中喷嘴扩散角度对喷涂效果的影响最大,需优先进行讨论。

1) 不同喷嘴扩散角度下的喷涂覆盖率

保持垂直喷涂角度为 0° ,即垂直喷涂,同时按照现场施工经验,拟定喷嘴与柱上变的距离为 0.65 m ,此时分别设置喷嘴扩散角度为 30° 、 45° 和 60° ,在 Fluent 中进行模拟喷涂仿真实验,实验结果如图 4—图 6 所示。

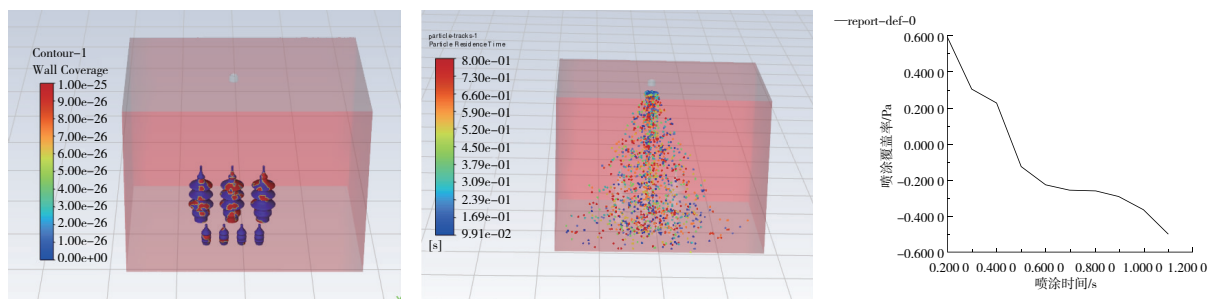


图 4 扩散角为 30° 时的覆盖云图、喷涂颗粒轨迹和覆盖率

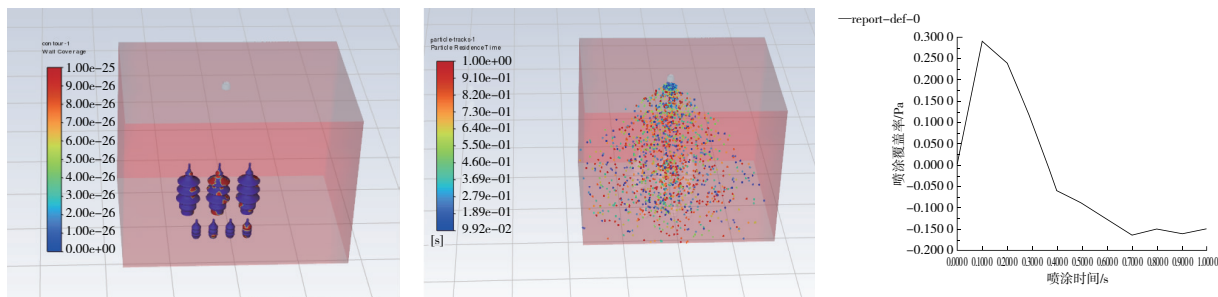


图 5 扩散角为 45° 时的覆盖云图、喷涂颗粒轨迹和覆盖率

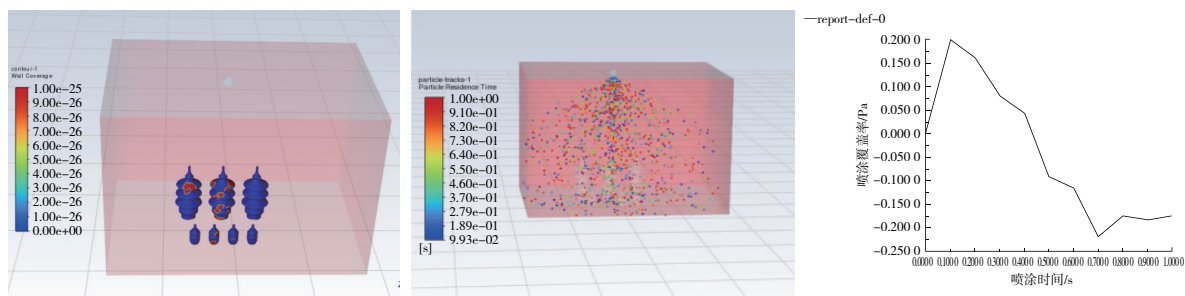


图6 扩散角为60°时的覆盖云图、喷涂颗粒轨迹和覆盖率

通过仿真实验发现,喷嘴扩散角度对喷涂覆盖率的影响较为明显。当喷嘴扩散角度为30°时,对柱上变压器1s内的喷涂覆盖率为50.0%;而当喷嘴扩散角度为45°和60°时,喷涂覆盖率下降非常明显,仅为17.7%和17.5%。由此得出,本研究喷嘴扩散角度选定为30°时,绝缘喷涂效果

较好。

2) 不同喷涂角度下的喷涂覆盖率

保持喷嘴扩散角度为30°,喷嘴与柱上变的距离为0.65 m,此时分别设置不同的喷涂角度为0°(垂直喷涂)、15°和30°,在Fluent中进行模拟喷涂仿真实验,实验结果如图7—图8所示。

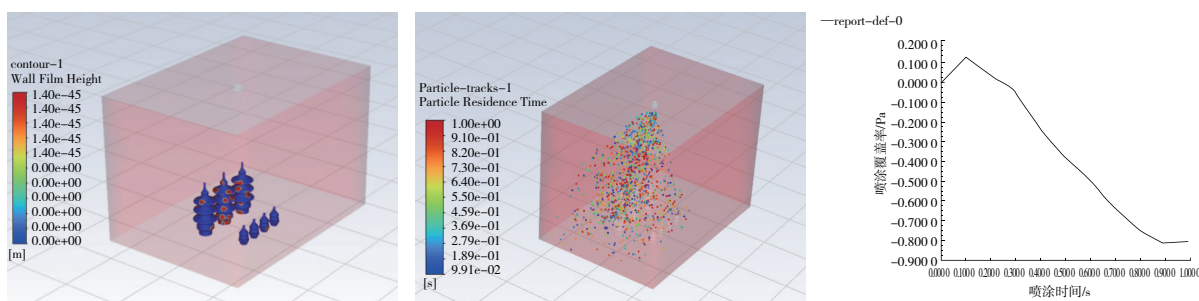


图7 喷涂角为15°时的覆盖云图、喷涂颗粒轨迹和覆盖率

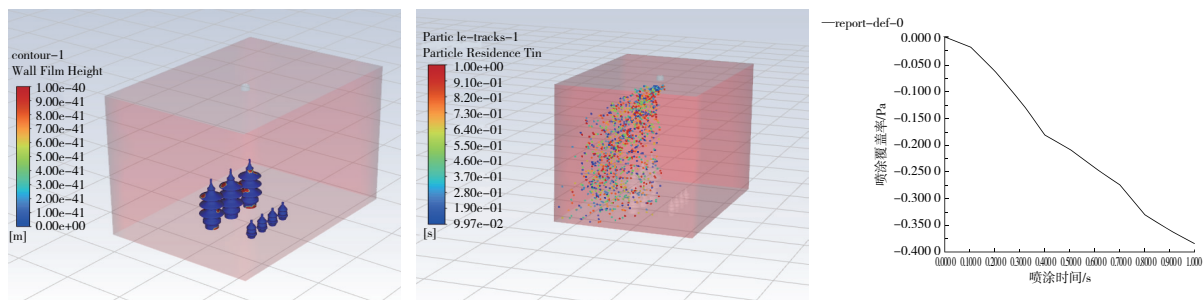


图8 喷涂角为30°时的覆盖云图、喷涂颗粒轨迹和覆盖率

此时喷嘴扩散角度为30°、距离为0.65 m,此喷涂工况的仿真云图在上节中已展示,如图4所示,此时对柱上变压器1s内的喷涂覆盖率为50.0%。

通过仿真实验发现,当喷涂角度分别为0°、15°和30°时,对柱上变压器1s内的喷涂覆盖率分别为50.0%、75.0%和37.3%。由此得出,在进行无人机绝缘喷涂时,需要设定一定的喷涂角度,而非于正上方进行垂直喷涂,喷涂角度为15°较为合适。

3) 不同距离下的喷涂覆盖率

根据现场施工的经验,本研究设定扇形喷嘴与柱上变压器的距离为0.65 m。由于喷涂为带电作业,根据电线附近电场的影响,喷涂距离需大于安全距离0.3 m。因此在保持喷嘴扩散角度为30°和喷涂角度为15°的条件下,设定0.5 m和0.65 m两组距离对照,验证绝缘喷涂覆盖率是否高效。

a) 喷涂距离为0.5 m,喷涂仿真结果如图9所示。

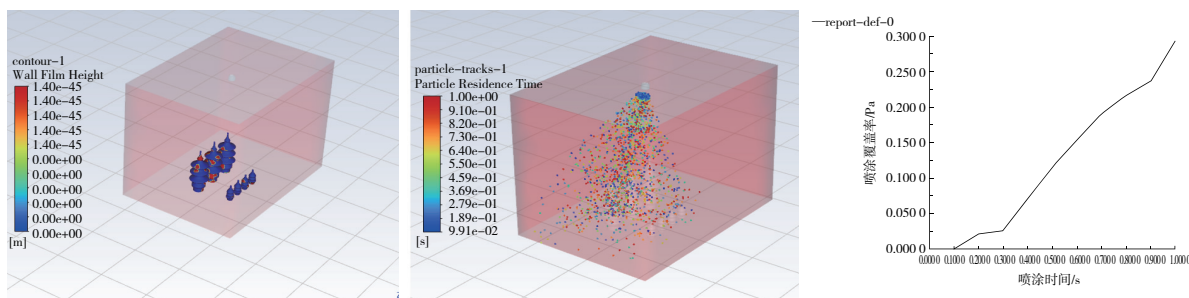


图9 喷涂距离为0.5 m时喷涂仿真结果

b) 喷涂距离为0.65 m

此时喷嘴扩散角度为 30° 、喷涂角度为 15° ,此喷涂工况的仿真云图在上节中已展示,如图7所示,此时的喷涂覆盖率为75.0%。

通过仿真实验发现,当喷涂距离分别为0.5 m和0.65 m时,对柱上变压器1 s内的喷涂覆盖率分别为29.8%和75.0%。由此得出本研究无人机对柱上变压器绝缘喷涂的最佳工况为喷嘴扩散角度为 30° 、喷涂角度为 15° 和喷嘴距柱上变压器的距离为0.65 m,此时的喷涂覆盖率较高,通过多次的1 s点射喷涂,能够有效地对柱上变压器,特别是分接头处进行绝缘化处理,保障10 kV柱上设备的供电可靠性。

3 现场喷涂应用

基于本研究对喷涂工况的分析,在某供电公司现场进行了实物喷涂试验。无人机型号选用大疆T20植保机,安装折叠喷杆和扇形喷嘴加以改装。按照本研究设定的喷涂工况,对现场的柱上变压器及其他柱上设备进行了绝缘喷涂作业施工。根据无人机航拍图像如图10所示,柱上变压器的分接头部分明显被白色绝缘涂料有效覆盖,从而保障了柱上变压器的安全性,有助于10 kV输电线路的稳定运行。(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)



图10 无人机绝缘喷涂成套装置及喷涂成果

4 结语

本研究选取扇形压力式喷嘴,设置喷嘴扩散角度、喷涂角度和喷涂距离3组变量,基于SolidWorks和ANSYS平台对10 kV柱上变压器设备的绝缘喷涂进行仿真研究,并在实际操作中进行实物喷涂验证。研究结果表明:当喷嘴扩散角度为 30° 、喷涂角度为 15° 、喷涂距离为0.65 m时,1 s内的喷涂覆盖率为75.0%,通过多次1 s点射喷涂能够有效对柱上变压器进行绝缘,保证10 kV输电线路的供电可靠性。同时,通过无人机对电力设备进行绝缘喷涂作业,这有效规避了人工作业的安全风险,提升了作业效率,对未来电力系统绝缘化处理提出了自动化的方案,以满足新型电

力系统的需求。

参考文献:

- [1] 王倩,李维展,李丰君,等. 计及源荷不确定性的配电网可靠性高效评估方法[J]. 电工电能新技术,2024,43(9):74-81.
- [2] 李春燕,赵晨宇,胡博,等. 面向可靠性评估的两阶段聚类风-光-荷典型场景生成方法[J]. 电工电能新技术,2021,40(5):1-9.
- [3] SU S, XIE Q Y, MA P F, et al. A single-phase ground fault line selection method in active distribution networks based on transformer grounding mode modification[J]. Energies, 2024, 17(18):4743.
- [4] 贺馨仪,董明,刘文君,等. 面向调控领域多源数据融合的电力变压器态势感知与预警方法研究[J]. 电工电能新技术,2023,42(4):48-58.

- [5] AGARWAL H K, MUKHERJEE K, BARNA P. Partially and fully insulated conductor systems for low and medium voltage overhead distribution lines [C]//2013 IEEE 1 st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON). Kolkata, India: IEEE, 2013: 100-104.
- [6] 崔琦. 电力电气设备的维护检修技术探讨[J]. 中国设备工程, 2024(17): 170-172.
- [7] 李刚, 张博, 赵文清, 等. 电力设备状态评估中的数据科学问题: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 10-20, 177.
- [8] ZHUZ C, XIANG Y S, LI M Y, et al. Preventive maintenance subject to equipment unavailability [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2019, 68(3): 1009-1020.
- [9] 赵仕策, 赵洪山, 寿佩瑶. 智能电力设备关键技术及运维探讨[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(20): 1-10.
- [10] 陈朋, 张帆, 乔春来, 等. 10 kV 柱上变压器台肘型电缆接头烧毁故障的分析[J]. 变压器, 2020, 57(7): 71-74.
- [11] 陈湘安. 电力设备中的变压器运行检修和维护研究[J]. 中国设备工程, 2024(S2): 224-226.
- [12] 徐文华, 和文龙, 陈继忠, 等. 10 kV 配电线路雷电感应过电压在线监测装置及其应用[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 77-83.
- [13] 王俊伟, 纪海平. 10 kV 配网不停电作业旁路技术分析[J]. 电工电气, 2022(12): 51-56.
- [14] 刘若溪, 刘宏亮, 王智晖, 等. 10 kV 柱上变压器肘型电缆接头故障原因分析[J]. 变压器, 2022, 59(7): 55-60.
- [15] 潘明, 高浩, 顾小虎, 等. 基于有限元软件的 10 kV 干式变压器外壳绝缘性能研究[J]. 变压器, 2023, 60(11): 18-22.
- [16] 贾元峥, 田静, 于金滔, 等. 绝缘手套作业法更换柱上变压器技术探讨[J]. 农村电气化, 2024(9): 50-53.
- [17] 陈兴, 邴超. 面向电力设施的无人机多目标监测与反制系统[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(2): 220-224.
- [18] HEJ H, HE K, CUI L F. Charge-simulation-based electric field analysis and electrical tree propagation model with defects in 10 kV XLPE cable joint [J]. Energies, 2019, 12(23): 4519.
- [19] CHANG W Z, DU F, BI J G, et al. Assessment of creeping discharge initiated by metal particles on the silicone rubber/XLPE interface in cable joints [J]. Journal of Electrical Engineering, 2019, 70(5): 370-378.
- [20] 蔡焕青, 付晶, 杨宁, 等. 500 kV 变电站无人机巡检作业安全距离[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 3199-3208.
- [21] 孙振民. 基于 SLM 技术的植保无人机雾化喷嘴的性能研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2020.
- [22] 王雨欣, 王志文, 张梦洁, 等. 高压喷嘴流动机理与结构优化设计研究[J]. 真空科学与技术学报, 2024, 44(11): 962-968.
- [23] ZAREE M, PARASHKOOHI M G, GHAFORI H, et al. Investigation of flow pattern in an innovative nozzle: an experimental and numerical study in agricultural systems [J]. Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences, 2024, 23(3): 212-218.
- [24] LIU H, DOU Z C, MA Y, et al. Effects of nozzle types and spraying volume on the control of hypera postica gyllenhal by using an unmanned aerial vehicle [J]. Agronomy, 2023, 13(9): 2287.
- [25] YU S H, KANG Y, LEE C G. Comparison of the spray effects of air induction nozzles and flat fan nozzles installed on agricultural drones [J]. Applied Sciences, 2023, 13(20): 11552.
- [26] 蒋小平, 王帅, 陈建华, 等. 喷射参数对扇形喷嘴雾化特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(10): 1065-1071.
- [27] 高伟. 基于 SolidWorks 和 ANSYS 的植保无人机喷头结构参数设计与仿真 [J]. 农业技术与装备, 2023(8): 40-42.
- [28] PARAFINIUK S, NOWAKOWSKI T, KOSZEL M, et al. Influence of chosen working parameters of sprayer on coefficient of variation of transverse liquid distribution for twin fan nozzle [J]. Acta Technologica Agriculturae, 2024, 27(3): 173-178.

收稿日期: 2024-10-29