

引用格式: 乔竹生, 顾孙彤, 张东东, 等. 基于四旋翼无人机的零值绝缘子局部电场检测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2026, 41(1): 277-288.

Citation: QIAO Zhusheng, GU Sun tong, ZHANG Dongdong, et al. Local electric field detection method for zero-value insulators based on quadcopter[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2026, 41(1): 277-288.

# 基于四旋翼无人机的零值绝缘子局部电场检测方法

乔竹生<sup>1,2</sup>, 顾孙彤<sup>2</sup>, 张东东<sup>2</sup>, 余佶成<sup>3</sup>, 韩 奥<sup>2</sup>, 张 翼<sup>2</sup>, 宋恒东<sup>4</sup>

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京工程学院电力工程学院、沈国荣学院, 江苏 南京 211167;

3. 中国电力科学研究院有限公司, 湖北 武汉 430074; 4. 国网江苏超高压公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 绝缘子在电力系统中承担着保证导线对地绝缘的作用, 是输配电外绝缘的重要设备, 也是电力系统安全稳定的可靠保障。绝缘子发生零值故障会对电力系统运行造成严重困扰, 通过四旋翼无人机检测局部电场, 可以判断绝缘子是否为零值绝缘子。为研究合理的检测距离并给出快速识别判据, 提出一种基于四旋翼无人机的绝缘子检测方法, 设计了500 kV绝缘子串及四旋翼无人机等效模型。通过仿真分析四旋翼无人机在不同检测距离下的检测结果, 划定出合理的检测距离范围; 分析不同方向的检测电场, 提出效果最好的检测方案, 并结合反向传播(back propagation, BP)神经网络算法, 将所测离散数据准确拟合出径向电场分布图。研究表明, 当检测距离为70~200 mm, 图像曲线斜率绝对值的最小值小于0.015时, 即可断定零值; 当检测距离小于70 mm, 图像电场幅值方差小于55时, 则绝缘子片发生零值。该方法的判据准确度达98.5%以上, 可为输配电外绝缘运维提供技术支撑。

**关键词:** 零值绝缘子; 四旋翼无人机; 空间电场; 带电检测; BP神经网络

**DOI:** 10.19781/j.issn.1673-9140.2026.01.026 **中图分类号:** TM712 **文章编号:** 1673-9140(2026)01-0277-12

## Local electric field detection method for zero-value insulators based on quadcopter

QIAO Zhusheng<sup>1,2</sup>, GU Sun tong<sup>2</sup>, ZHANG Dongdong<sup>2</sup>, YU Jicheng<sup>3</sup>,  
HAN Ao<sup>2</sup>, ZHANG Yi<sup>2</sup>, SONG Hengdong<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. School of Electric Power Engineering, School of Shen Guorong, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 3. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 4. State Grid Jiangsu UHV Company, Nanjing 211102, China)

**Abstract:** Insulators play the role of ensuring the insulation of conductors to the ground in the power system, which is an important piece of equipment for the external insulation of transmission and distribution, as well as a reliable guarantee for the safety and stability of the power system. Zero-value faults in insulators can cause serious problems in the operation of the power system. By detecting the local electric field by quadcopter, it is possible to determine whether the insulator is a zero-value unit. In order to figure out the reasonable detection distance and propose a rapid identification criterion, an insulator detection and device structure method based on a quadcopter is proposed, and the equivalent model of a 500 kV insulator string and quadcopter is designed. The detection results of the quadcopter at different detection distances are simulated and analyzed, so as to delineate a reasonable detection distance range. By analyzing the detected electric fields in different directions, an optimal detection method is proposed. By combining with the back propagation (BP) neural network algorithm, the measured discrete data are accurately fitted to the radial electric field distribution plot. Research results show that when the detection distance is 70 ~ 200 mm, and the minimum absolute value of the slope of the image curve is less than 0.015, the insulator can be determined as a zero-value unit. When the detection distance is less than 70 mm, and the variance of the electric field amplitude of the image is less than 55, the insulator is determined as a zero-value unit. The criterion accuracy of the method is more than 98.5%, and this achievement can provide technical support for the operation and maintenance of external insulation of transmission and distribution.

**Key words:** zero-value insulator; quadcopter; spatial electric field; charged detection; BP neural network

收稿日期: 2024-11-06; 修回日期: 2025-06-04

基金项目: 江苏高校“青蓝工程”资助项目(SJS202414); 湖北省自然科学基金(2023AFB074); 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2022097)

通信作者: 张东东(1991—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高电压与绝缘技术研究; E-mail: zhangdd@njit.edu.cn

随着国民经济和社会的不断发展,电力能源的需求量日益增长,瓷质绝缘子作为超高压、特高压输电系统线路中不可或缺的元素,在电网中起到了极大的作用<sup>[1]</sup>。在绝缘子的运行过程中,随着使用时间的增长,其电气性能和机械性能逐渐下降,继而发生老化、劣化,最终导致绝缘能力丧失的现象称为零值现象<sup>[2-4]</sup>。零值绝缘子如果不被及时检出并更换,将会导致绝缘子沿面闪络、掉串等一系列事故的发生<sup>[5-6]</sup>,严重危害电力系统的安全稳定运行,故对零值绝缘子的定期检测与更换具有重大的工程意义<sup>[7-11]</sup>。

零值绝缘子的检测方法分为接触式检测法与非接触式检测法<sup>[12-14]</sup>。利用接触式方法来检测劣化绝缘子虽然能够准确测得相关参数,表征劣化情况,但是需要人为登塔作业,安全风险较高,给工作人员带来极大的不便,且在检测过程中需要配合线路停电操作,大大降低了电力系统的可靠性,故接触式检测法在超特高压骨干输电网络中的应用受到极大的限制<sup>[15-17]</sup>。现有的根据绝缘子本体运行温升特性的非接触式检测法受环境温度影响较大,检测精度有待提高,故无法在现场大规模使用<sup>[18-21]</sup>。此外,现有融合计算机视觉的测零方法对图像清晰度要求较高,无法大规模投入使用<sup>[22-24]</sup>。经大量研究发现,通过检测绝缘子的局部电场,可较好地评估绝缘子的健康运行状况,且该检测方法受外界环境影响较小,具有成本低、精度高的诸多优势,故基于空间电场分布的测零方法一直广受人们的关注<sup>[25-28]</sup>。

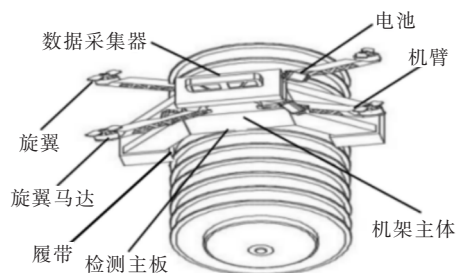
结合无人机的空间电场检测方法具有免登塔、高效率的特点<sup>[29-30]</sup>,然而现有的测量方法往往采用无人机搭载探头扫测,外部环境造成的路线偏移会影响测量精度,同时未有明确、统一的检测判据<sup>[31]</sup>。本文设计了一款四旋翼零值检测无人机,并建立了500 kV耐张绝缘子串与无人机的电场仿真模型,研究了零值绝缘子不同方向电场的畸变情况,提出无人机测量零值绝缘子的合理距离范围,继而探究不同检测位置下的零值绝缘子局部特征电场畸变特征。通过反向传播(back propagation, BP)神经网络算法将无人机所采样到的离散的径向电场幅值节点拟合成为连续的径向电场幅值分布曲线,继而分别在近距离与远距离检测的情况下,通过分析得到测零判据。

## 1 四旋翼测零无人机设计与仿真

### 1.1 四旋翼测零无人机结构设计

零值检测无人机如图1所示,主要由机架主体、机臂、旋翼马达、旋翼、电池、数据采集器、检测主板

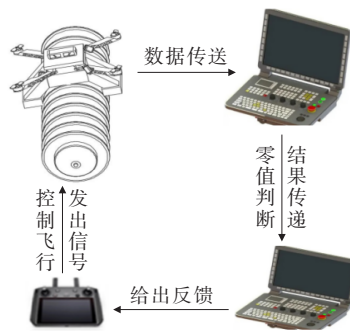
和履带组成。机架主体通常由塑料绝缘板或玻纤板制成,介电常数为2.4左右。无人机总重2.5 kg左右,机臂由轻质塑料制成,中间镂空,以便减轻重量。旋翼马达供电电压为12 kV,功率2 W,最大扭矩12 N·m,最大转速9 000 r/min。考虑飞行稳定性,马达重量可为40 g,电池5可为12.6 V锂电池,电池容量为5 000 mA·h。



(a)零值检测无人机结构



(b)实物展示



(c)实际操作过程

图1 零值检测无人机

Figure 1 Unmanned aerial vehicle with zero-value detection

检测装置工作时,检测主板接到飞行命令,旋翼马达逆时针旋转带动旋翼转动使无人机获得较大升力可供飞行,数据采集器负责实时记录数据节点,履带可以实现无人机在绝缘子串上行走的功能,以便进行低距离检测,从而开展相关检测工作。在检测过程中,无人机检测效率可达3 s/片,因此可推断单片绝缘子检测用时不超过4 s,能够达到快速、高效的效果。

无人机检测系统由无人机、地面控制机构、上位机系统和下位机系统组成。在实际操作中,工作

人员可以通过地面控制装置控制无人机的升降与飞行,地面控制机构与无人机之间采用有线或蓝牙的通讯方式与无人机控制主板进行交互,无人机采样得到数据节点后,由数据采集器通过 433 无线透传通讯模式将数据节点传送给上位机,上位机使用 BP 神经网络对离散的电场幅值数据节点进行拟合处理,并通过相关判据进行零值判断,最终将测零结果反送给下位机,下位机根据判断结果通知工作人员做出相应决策。相关过程如图 1(c)所示。

传统的无人机定位是通过北斗卫星实现的,其卫星导航定位系统发出差分信号到无人机流动站,可实现高精度定位、导航与授时的相关服务,但是在实际运行过程中,由于高空电磁波的传送,卫星与无人机存在一定时差,且电磁波在空中受楼房等障碍物的影响,将经历多次反射,这一系列的因素都将造成定位偏差,误差可达 2~10 m。现有的实时动态差分(real-time kinematic, RTK)技术以无人机作为流动站,利用无人机接收北斗卫星发送的电磁波,同时也接收地面基站向其输送的电磁波,无人机通过两者所传输的数据实现差分计算,从而计算出地面基站与无人机流动站的相对位置。然而,在输电网络的强磁干扰下,该项技术中的无人机罗盘无法精准定位航向。本文采用大疆无人机的双天线测向技术,在无人机主控器两侧分别装上高增益天线,将一路天线所得数据作为基准,对另一路所得数据进行校正,从而获得两天线之间的相对矢量,以完成二维信息的精准定位。无人机 RTK 双天线测向技术原理如图 2 所示。

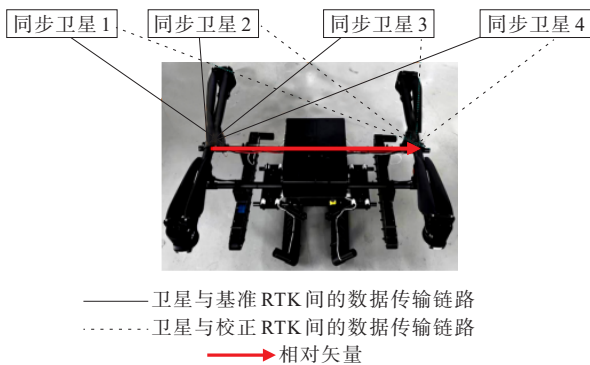


图 2 无人机 RTK 双天线测向技术原理

Figure 2 RTK dual-antenna direction-finding technical principle for unmanned aerial vehicles

### 1.2 零值检测电场仿真模型

本文对 500 kV 的 24 片某钟罩式瓷绝缘子耐张串建立 1:1 三维仿真模型,采用有限元分析法,将外部环境由无界域转换成有界计算域,并开展静电场

仿真分析。绝缘子的相关尺寸如表 1 所示,模型中绝缘子串的各材料属性如表 2 所示。在仿真过程中,空气域外边界设置为零电位,同时将横担所连接的金具也设置为零电位,导线电压设置为 408.3 kV,对应单相导线的相电压幅值,相关仿真模型如图 3 所示。

表 1 钟罩式绝缘子的相关尺寸

Table 1 Relevant dimensions of bell-type insulators mm

结构高度	盘径	钢帽长度	金具长度
3 455.6	330	105	90

表 2 材料属性

Table 2 Material properties

介质材料	相对介电常数	电导率/(S·m <sup>-1</sup> )
钢帽、钢脚	8 000	6×10 <sup>6</sup>
空气	1	1×10 <sup>-13</sup>
陶瓷	6	1×10 <sup>-11</sup>
水泥	14	1×10 <sup>-11</sup>
均压环	70	1×10 <sup>7</sup>
检测板	11.7	1.88
马达	2.6	5.62×10 <sup>7</sup>
机翼	1.5	1×10 <sup>-8</sup>
无人机构架	2.4	1×10 <sup>-8</sup>

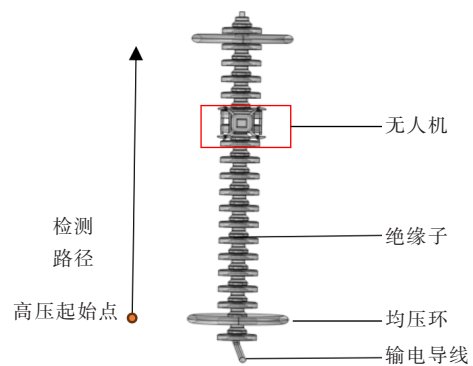


图 3 无人机检测绝缘子串的仿真模型

Figure 3 Simulation model of unmanned aerial vehicle detecting insulator string

## 2 零值绝缘子串电场分布概况

### 2.1 不同检测距离下的电场分布

本文将无人机与伞裙外缘的距离  $d$  分别设为 100、150、200 mm,为清楚地分析高、中、低压侧绝缘子零值的电场畸变情况,将距导线第 4 片、第 10 片、第 18 片绝缘子设为零值片,并用无人机对零值绝缘子合成场沿如图 3 所示的检测线进行扫测。不同距离下钟罩式绝缘子零值电场分布情况如图 4 所示,其中虚线框为零值片所在位置。

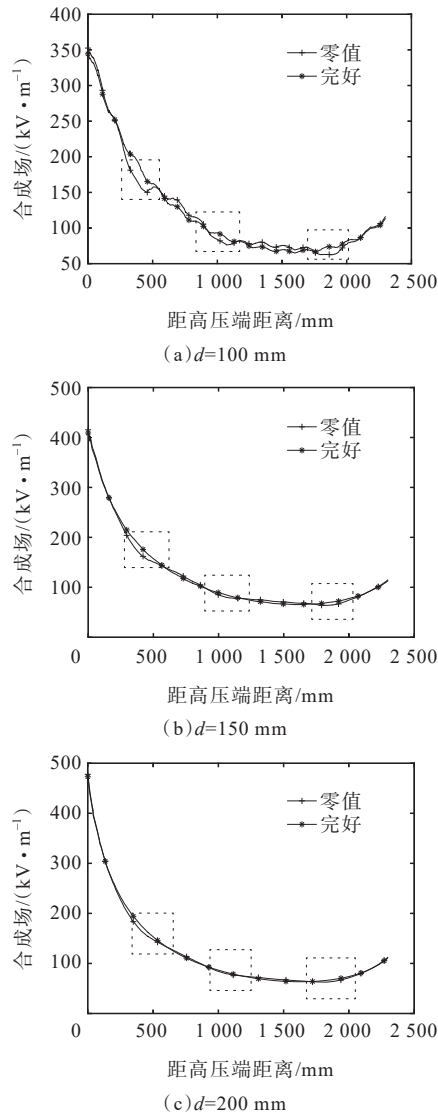


图4 不同距离下钟罩式绝缘子零值电场分布情况

Figure 4 Distribution of zero-value electric field of bell-type insulators at different distances

本文定义零值绝缘子位置处电场变化率为

$$\Delta E = \frac{|E_d - E_n|}{E_n} \quad (1)$$

式中,  $\Delta E$  为电场变化率;  $E_d$  为零值绝缘子位置处电场值的最低值或最高值;  $E_n$  为  $E_d$  对应位置处正常点的电场值。由此得到不同检测距离下钟罩式绝缘子的电场变化率如表3所示。

表3 不同检测距离下钟罩式绝缘子的电场变化率

Table 3 Electric field change rate of bell-type insulators at different detection distances

$d / \text{mm}$	变化率/%		
	高压	中压	低压
100	14.96	11.33	15.08
150	8.72	6.09	7.21
200	6.06	3.23	5.72

在钟罩式绝缘子串中,随着  $d$  的增加,曲线呈U型,幅值总体降低,当绝缘子发生零值时,检测距离越小,其局部电场的畸变越明显。表3展示了不同位置的绝缘子发生零值时,在不同检测距离下局部电场的畸变程度,可以发现,高压侧的零值绝缘子局部电场畸变程度最大,其次为低压侧,中压侧畸变程度最低。当检测距离大于200 mm时,零值绝缘子局部电场相较于完好绝缘子已不再有明显区别,故本文将检测距离在200 mm以内作为零值检测的约束条件,以便获得更加明显的电场畸变特征。

## 2.2 不同电场分量的特性分析

为了提出绝缘子劣化识别方法,本文对第4片、第10片、第18片绝缘子进行相应的零值设置,对比了绝缘子在完好与零值条件下的合成场、轴向电场及径向电场(正对无人机检测极板方向)。绝缘子串局部电场分布如图5所示,检测距离设置为70 mm。

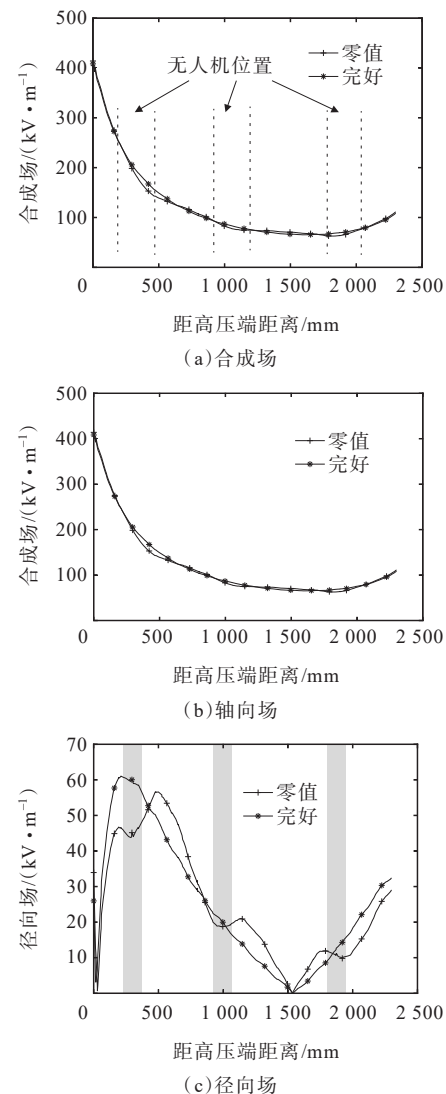


图5 绝缘子串局部电场分布

Figure 5 Local electric field distribution of insulator strings

由图 5 可知,在零值情况下,径向电场的幅值变化率更加明显,且当绝缘子发生零值时,径向电场的幅值变化曲线将变得扁平。由图 5(c)可知,当绝缘子发生零值时,阴影区域的径向电场畸变最为明显,长度约为 80 mm,故本文在后续研究中,将这种带有可供辨识的电场畸变特征区域视为无人机最佳零值识别位置。

### 3 零值绝缘子检测局部电场特征

由上述分析可以得到,当瓷质绝缘子发生零值时,径向电场的畸变最为明显,且检测距离要在某个合理的范围内方可取得最优的检测效果。本文以第 7 片绝缘子发生零值为例,通过调节无人机与零值片的相对位置,将检测板分别在正对钢帽、正对伞裙、正对钢脚的位置进行测量(如图 6 所示),并选取检测距离  $d$  分别为 50、70、80、100 mm 这 4 种情况作为典型距离,钟罩式零值片位于中压端的局部电场变化情况如图 7~9 所示,其中虚线框为检测区域。

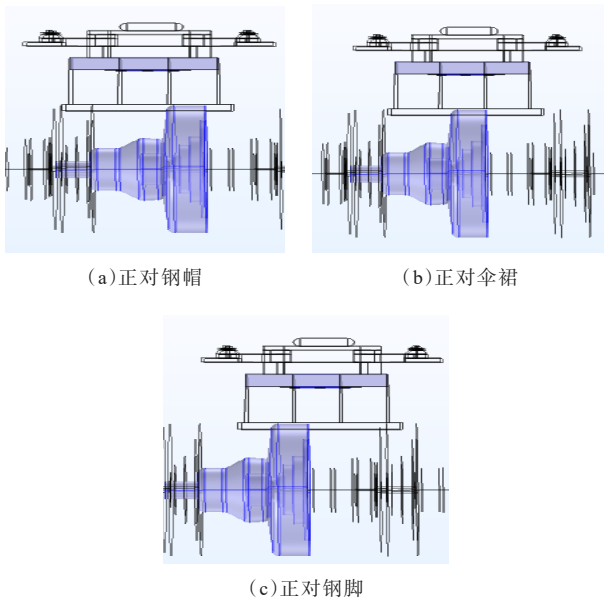


图 6 不同检测位置示意

Figure 6 Different detection positions

如图 7 所示,无人机正对绝缘子钢帽时,对比零值与非零值可以发现,两者的径向电场幅值曲线只存在略微的数值差异,而变化趋势大体相同,故没有前文所述的可供辨识的畸变特征。

如图 8 所示,无人机正对绝缘子伞裙时,在检测板范围内,当  $d=50$  mm 或  $d=70$  mm 时,绝缘子的径向电场幅值变化情况呈现先降低后升高再降低的特点,此外,零值绝缘子的径向电场幅值曲线的

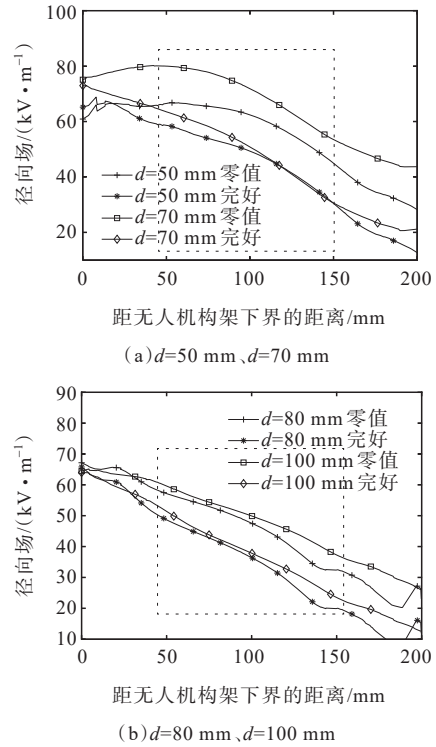


图 7 钟罩式零值片位于中压端的局部电场变化情况(正对钢帽)

Figure 7 Change of local electric field of bell-type zero-value piece at medium voltage end (facing steel cap)

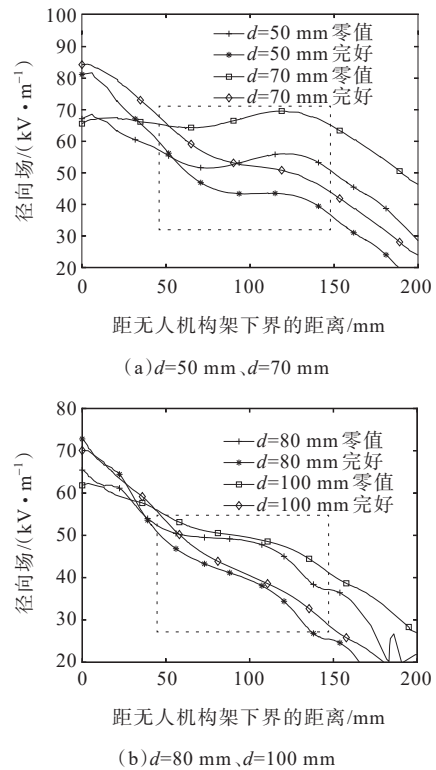


图 8 钟罩式零值片位于中压端的局部电场变化情况(正对伞裙)

Figure 8 Change of local electric field of bell-type zero-value piece at medium voltage end (facing shed)

变化率低于完好状态。当 $d=80\text{ mm}$ 或 $d=100\text{ mm}$ 时,绝缘子的局部电场呈现递减态势,且零值绝缘子的径向电场幅值变化较小。

如图9所示,无人机正对绝缘子钢脚时,二者径向电场的畸变特性与正对伞裙相当。对比发现,当 $d\leq 70\text{ mm}$ 时,零值绝缘子呈现非单调的畸变特性;当 $d>70\text{ mm}$ 时,零值绝缘子呈现单调的畸变特性。但无论检测距离如何调整,零值状态径向电场放缓都是共性。

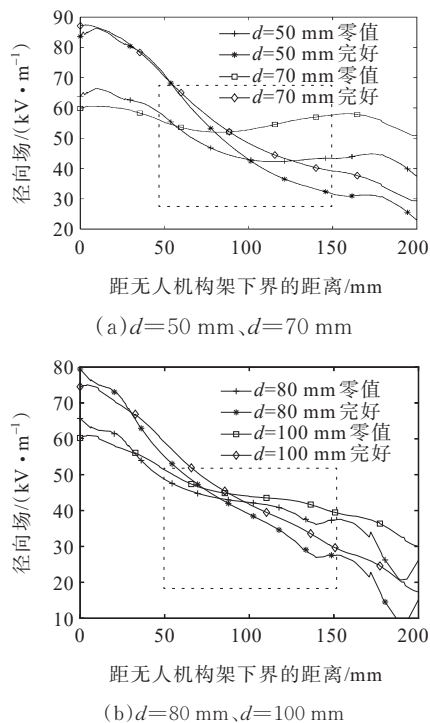


图9 钟罩式零值片位于中压端的局部电场变化情况(正对钢脚)

Figure 9 Change of local electric field of bell-type zero-value piece at medium voltage end (facing steel pin)

本文采用类似的方法对500 kV 24片型号为某双伞形绝缘子耐张串展开研究,双伞式绝缘子局部模型如图10所示。以第14片为例,研究结果如图11~13所示,其中虚线框为检测区域。

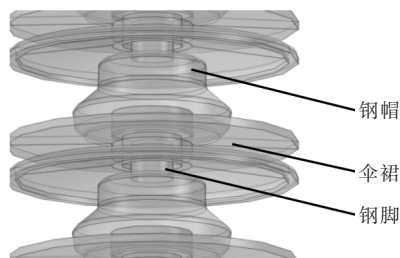


图10 双伞式绝缘子串局部模型

Figure 10 Local model of double-umbrella-type insulator string

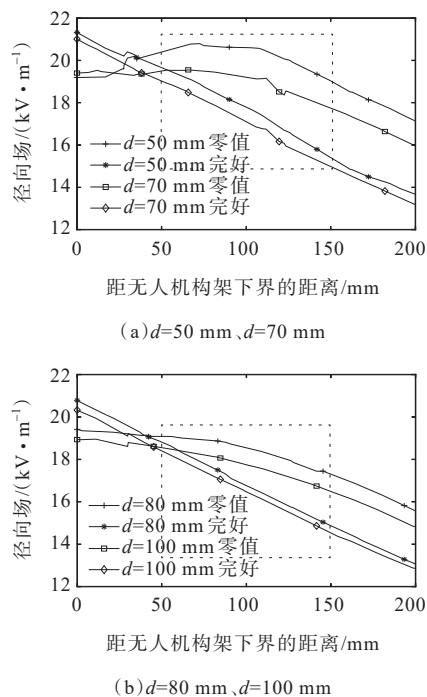


图11 双伞式零值片位于中压端的局部电场变化情况(正对钢帽)

Figure 11 Change of local electric field of double-umbrella-type zero-value piece at medium voltage end (facing steel cap)

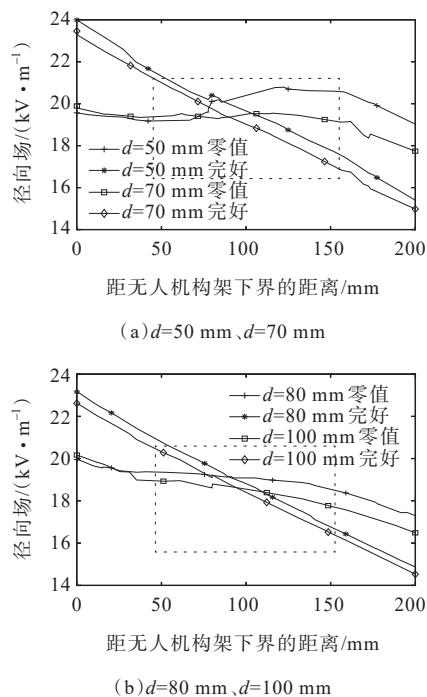


图12 双伞式零值片位于中压端的局部电场变化情况(正对伞裙)

Figure 12 Change of local electric field of double-umbrella-type zero-value piece at medium voltage end (facing shed)

双伞式绝缘子与钟罩式绝缘子结构有异,但是在零值片出现时,两者所表现出的径向电场幅值随距无人机结构下界距离的变化趋势大体相同,说明

其电场分布在变化趋势上有一定的共性,为下文判断的提出提供了理论基础。

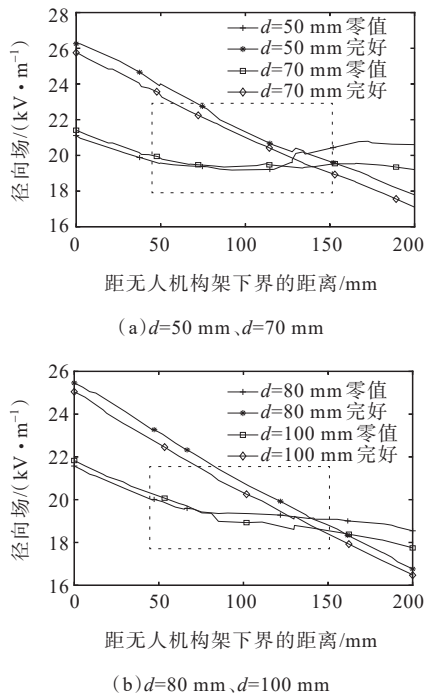


图 13 双伞式零值片位于中压端的局部电场变化情况(正对钢脚)

Figure 13 Change of local electric field of double-umbrella-type zero-value piece at medium voltage end (facing steel pin)

### 4 结合神经网络的零值检测算法

无人机检测原理如图 14 所示。无人机探头由电场传感器构成,本文采用 D-dot 电场传感器实现工频电场中的信号接收。当空间存在电场时,电场的变化会引起传感器内部的感应电极上电荷的分布变化。D-dot 传感器中的感应电极可以看作是一个电容器元件,D-dot 电场传感器在工频电场中受到静电感应的作用会在板间产生感应电荷,电荷电压线性公式为  $Q=CU$ ,其中  $Q$  表示传感器感应电极间产生的感应电荷量, $C$  表示传感器感应电极的等值电容, $U$  表示感应电极极板间的电势差。电场变化导致电极上电荷量改变,进而产生电压变化。这个电压变化和外部电场的变化率相关,通过检测电压信号并经过适当的信号处理电路,就可以得到与电场强度相关的信息。

如图 14 所示,本文在无人机的检测主板上均匀安装了 3 个电场探头阵列模块,将 3 个电场探头阵列模块所测得的径向电场数值作为神经网络原始输入的数据节点,以供神经网络训练,继而为后续生成拟合径向电场分布图提供支持。图 14 中,在  $t$

时刻,电场探头周边的电场强度为  $E_0(t)$ ,通过上述的 D-dot 电场传感器生成电场幅值过程可知,此时传感器极板等效电容  $C_M$  两端将会生成电势差  $U_M(t)$ ,电势差经过相应处理,即可还原得到电场传感器待测的电场幅值大小。

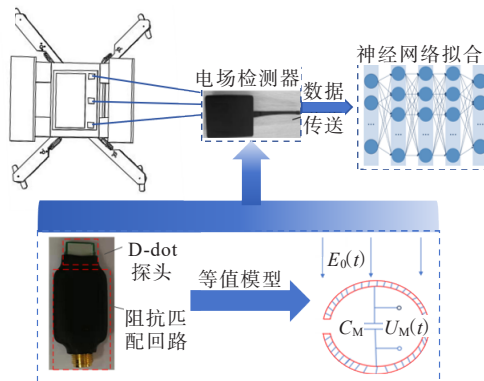


图 14 无人机检测原理

Figure 14 Detection principle of unmanned aerial vehicle

设每次所能测得的数据为数组  $E[n]$ ,其中  $E$  表示径向电场幅值, $n$  表示接收到数据的个数。接收完后将该数组作为输入向量输送给上位机的神经网络系统,通过合理设置隐藏层对 BP 神经网络加以训练,而后得到拟合函数,以局部反映全部,将电场探测器所测的离散数据节点拟合成连续的电场分布图,具体步骤如下。

- 1) 对网络各项参数实施初始化操作,并预先设定最大迭代次数与目标误差容限。
- 2) 依次将训练样本输入网络,通过前向传播计算输出结果及其误差,继而执行误差反向传播算法,以此调整并更新各层的权重与偏置参数,调整相应的权重阈值。
- 3) 对模型的整体误差水平进行判定,若已达到预设精度要求,则中止训练并保存网络参数;若未达标但尚未达到最大迭代次数,则继续采用后续样本进行训练。
- 4) 判断训练是否达到最大迭代次数,若达到则训练结束,若没有达到则进行下一次循环训练。

设输入向量为  $X=(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)$ ,其中  $x_i(i=1, 2, \dots, n)$  代表该处距无人机装置下边界的距离,隐层输出向量为  $Y=(y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_n)$ ,输出层输出向量  $E'=(e'_1, e'_2, \dots, e'_k, \dots, e'_n)$ ,其中  $e'_k(k=1, 2, \dots, n)$  代表  $x_k$  处所对应的经神经网络拟合的径向电场幅值的大小,期望输出向量为  $E=(e_1, e_2, \dots, e_k, \dots, e_n)$ , $e_k$  表示探头所测第  $k$  个数据节点的实际径向电场测量值。输入层到隐层之间

的权值矩阵用  $V$  表示,  $V=(v_1, v_2, \dots, v_j, \dots, v_n)$ , 其中,  $v_j$  为隐层第  $j$  个神经元对应的权向量; 隐层到输出层之间的权值矩阵用  $W$  表示,  $W=(w_1, w_2, \dots, w_k, \dots, w_n)$ , 其中  $w_k$  为隐层第  $k$  个神经元对应的权向量。

将双曲正切函数作为激活函数, 其表达式为

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (2)$$

式中, 上一层神经元的输出  $x$  经过本层神经元激活函数  $f(x)$  计算处理后, 其激活值作为输入传递至下一层神经元, 用以后续网络的训练与网络参数优化。

当 BP 神经网络的实际输出  $e'_k$  与期望输出  $e_k$  不等时, 证明网络存在输出误差, 误差  $E_{ss}$  定义为

$$E_{ss} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (e_k - e'_k) \quad (3)$$

将式(3)展开至隐层:

$$E_{ss} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (e_k - e'_k) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (e_k - f(\omega_{jk} y_j))^2 \quad (4)$$

式中,  $\omega_{jk}$  为第  $j$  个隐藏层神经元对第  $k$  个输出层神经元的权重;  $y_j$  为第  $j$  个隐藏层神经元的输出。

进一步展开至输入层:

$$E_{ss} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (e_k - e'_k) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (e_k - f(\omega_{jk} \sum_{i=0}^m f(v_{ij} x_i) y_j))^2 \quad (5)$$

式中,  $v_{ij}$  为第  $i$  个输入层神经元对第  $j$  个隐藏层神经元的权重, 误差在此处呈现, 所谓拟合的优化就是在减小误差方面进行标衡, 直至取得最优效果。

由式(4)可直观地认为  $E_{ss} = g(\omega_{jk}, v_{ij})$ , 即  $E_{ss}$  为一个关于权值的多元函数, 通过调整神经网络内部权值可减小系统拟合误差。神经网络算法通常采取梯度下降的算法, 使权值调整量与误差梯度成正比, 循环迭代从而减小误差:

$$\Delta \omega_{jk} = -\eta \frac{\partial E_{ss}}{\partial \omega_{jk}} \quad (6)$$

$$\Delta v_{ij} = -\eta \frac{\partial E_{ss}}{\partial v_{ij}} \quad (7)$$

式中,  $\eta$  为一个 0、1 之间的常数, 代表机器学习效率, 负号代表梯度下降, 当误差满足要求且最大迭代数已达到后, 可结束相关操作, 即网络训练已完成, 而后模型根据生成的拟合函数, 拟合出径向电场分布图, 从而达到检测零值绝缘子的效果。

## 5 算例分析

以中压端第 10 片绝缘子发生零值为例, 当绝缘子发生零值时, 无人机在距伞裙边缘 100 mm 正对钢脚的位置进行悬停测量, 将实际测得的数据节点作为神经网络拟合函数的训练集。对于一个空间电场传感器来说, 正常情况下一次检测可传输 25 个数据节点到数据采集器中, 3 个数据采集器就有  $3 \times 25 = 75$  个数据节点, 这些数据将作为原始数据授予神经网络进行网络训练并生成电场分布图。

BP 神经网络测零算法是为了拟合径向电场幅值与距无人机构架下边界距离的变化趋势, 所以与无人机构架下边界的距离是自变量, 径向电场幅值为因变量, 输入输出神经元节点数为 1, 为了满足训练要求, 将最大迭代次数设为 1 000, 拟合值与实测数据节点的误差设为 0.000 1, 学习速率设为 0.1, 并将空间电场检测器所检测到的数据点作为神经网络原始样本点。经过反复测试, 测试结果按照参照结果收敛, 从而确定最佳隐藏层节点数为 4。

神经网络拟合的训练函数有 3 种, 分别是 Levenverg-Marquardt 法训练、贝叶斯正则化训练、量化共轭梯度训练。三者各有千秋, Levenverg-Marquardt 法训练具有速度快特点, 贝叶斯正则化训练速度较慢, 但是泛化能力强, 量化共轭梯度训练内存效率高, 但是误差较大。本文对 3 个训练函数进行比较, 从而分析出各方法的性能特点, 训练算法性能比较如图 15 所示。

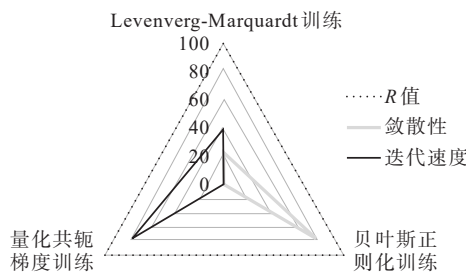


图 15 训练算法性能比较

Figure 15 Comparison of training algorithm performance

从图 15 可以看出, 本文采用  $R$  值来衡量拟合值与测量值之间的相关性, 用均方根误差的倒数来衡量算法敛散性, 用迭代次数的倒数来衡量算法的快速性。经过比较得出, Levenverg-Marquardt 法在迭代速度方面呈现出较大优势, 虽然精度略低于贝叶斯正则化, 但是总体相差较小, 并不影响结果。量化共轭梯度训练精度存在较大的问题, 故应选择

Levenberg-Marquardt法作为神经网络的训练算法。

均方误差最佳验证结果如图 16 所示。本文经过均方根误差的验证发现,模型已具备很好的敛散性,在第 7 轮训练时,模型达到了最佳收敛效果,均方误差为 0.000 48,有较好的收敛性。

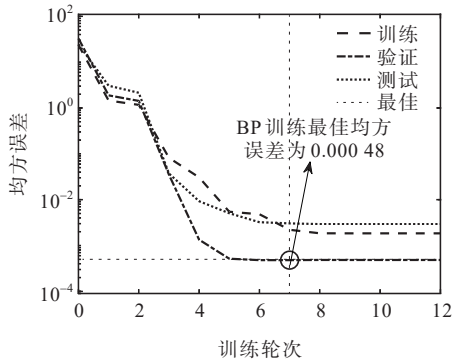


图 16 均方误差最佳验证

Figure 16 Optimal verification of mean square error

拟合性能结果如图 17 所示。 $Y$  表示输出值, $T$  表示目标值, $Y$  和  $T$  越接近,表示拟合效果约好。拟合  $R$  值表示拟合值与真实值之间的相关性, $R$  值越接近 1,则相关性越好,图 17 中训练集、验证集、测试集的  $R$  值均在 99.9% 以上,有较好的拟合效果。

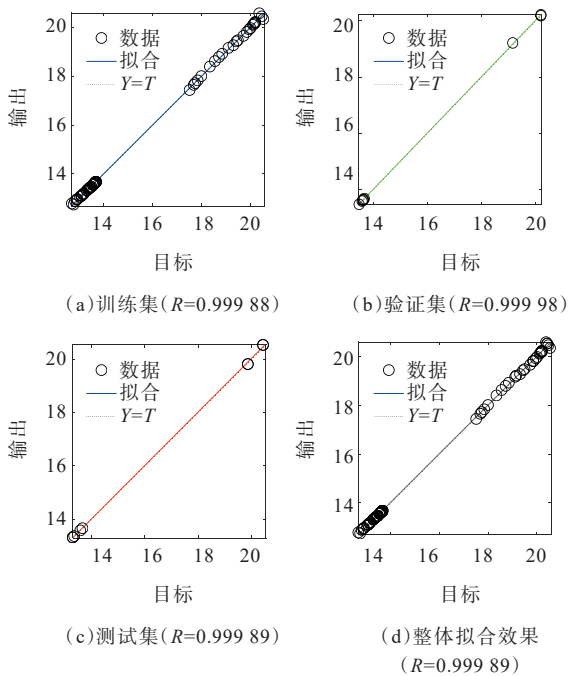


图 17 拟合性能结果

Figure 17 Fitting performance results

检测板域径向场拟合结果与误差分布如图 18 所示。通过训练验证与测试发现,检测板之间的电场分布趋势与实测大体相当,实测节点都落在拟合曲线上,目标与输出的误差较小,证明准确性良好,

能满足相应的精度要求。

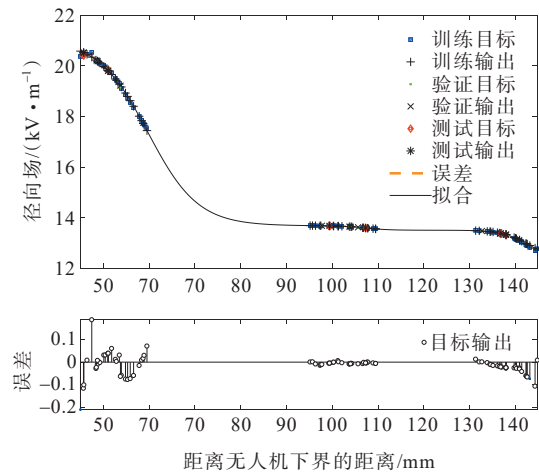


图 18 检测板域径向场拟合结果与误差分布

Figure 18 Fitting results and error distribution of radial field in detection plate domain

拟合与实际径向电场分布如图 19 所示。将拟合值与实际值客观比对发现,两个电场分布曲线近似重合,总体误差不超过 1.5%。通过图 19 可知,零值区域的电场分布图径向电场变化缓慢,甚至图线区域扁平,且神经网络所拟合的电场分布图能正确反映客观规律,起到很好的检测效果。通过神经网络拟合得到的图像与下文的判据相结合,可以减少判据误判的可能,提高检测的精确度,做到有图有真相。

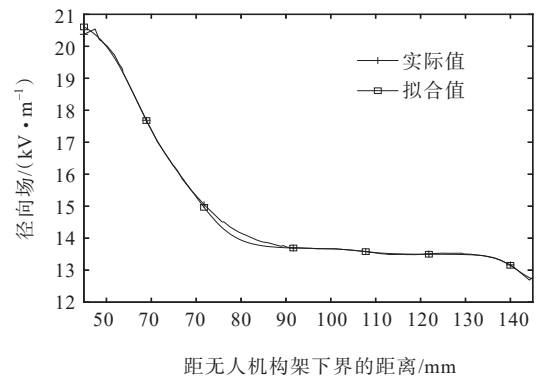


图 19 拟合与实际径向电场分布

Figure 19 Fitted and actual radial electric field distribution

## 6 算例辨识

当绝缘子发生零值时,其电场变化明显放缓,即电场分布图的斜率有明显下降,在检测距离为 70 mm 以外的区域,电场分布图有抖动小、变化单调的特征。在得到神经网络拟合的径向电场分布图后,可通过求出该图斜率绝对值的最小值  $|dE'/dx|_{\min}$

得到判据,故本文选取 80 mm 和 100 mm 作为典型检测距离,求得径向电场分布图斜率绝对值的最小值,如表 4 所示。

由表 4 可知,当零值发生时,若要实现高距离探测,选择以斜率绝对值的最小值作为判断依据有很好的效果。当该值小于 0.015 时,可认为当前检测位置的绝缘子为零值片。

表 4 径向电场分布图中的斜率绝对值的最小值

Table 4 Summary of minimum absolute values of slope in radial electric field distribution plot

d/mm	斜率绝对值的最小值											
	高压端伞裙		高压端钢脚		中压端伞裙		中压端钢脚		低压端伞裙		低压端钢脚	
	零值	非零值	零值	非零值	零值	非零值	零值	非零值	零值	非零值	零值	非零值
80	0.001 1	0.017 0	0.002 5	0.016 8	0.000 3	0.021 8	0.000 1	0.029 7	0.000 7	0.038 5	0.011 8	0.047 1
100	0.001 9	0.106 3	0.002 0	0.021 8	0.003 2	0.025 0	0.011 0	0.089 2	0.001 0	0.044 9	0.015 0	0.045 0

表 5 径向电场分布图中的电场幅值方差

Table 5 Variance summary of electric field amplitude in radial electric field distribution plot

d/mm	电场幅值方差											
	高压端伞裙		高压端钢脚		中压端伞裙		中压端钢脚		低压端伞裙		低压端钢脚	
	零值	非零值	零值	非零值	零值	非零值	零值	非零值	零值	非零值	零值	非零值
50	51.96	239.26	48.39	387.70	16.03	70.46	9.36	97.45	31.67	62.91	5.99	65.56
70	25.76	235.58	7.23	297.47	9.16	65.47	8.58	93.45	11.09	56.91	2.35	60.72

由表 5 可知,当零值发生时,如果想要低距离探测,就要抓住电场分布图中电场幅值方差下降的特点,故当检测无人机检测板内测得电场幅值方差低于 55 时,可判定零值已发生。

## 7 结语

本文基于有限元法,分析了 500 kV 钟罩式瓷绝缘子劣化后的空间电场分布特性,研究了无人机检测零值绝缘子的合理测量距离范围,并结合神经网络拟合算法,总结得到相关检测识别方法,结论如下。

1) 零值绝缘子的电场畸变有一个有限的观测范围。随着检测距离的增大,其畸变的明显程度会逐渐下降,当检测距离超过 200 mm 时,畸变特征不再明显。

2) 对比发现,当  $d \leq 70$  mm 时,无人机检测到径向电场呈现非单调分布,而当  $d > 70$  mm 时,无人机所检测到的电场单调分布,但检测得到的共性特征是零值径向电场幅值变化比完好平缓,且无论是钟罩式绝缘子还是双伞式绝缘子,在变化趋势上都呈现此共性。

3) 采用 Levenverg-Marquardt 法对神经网络加

对于 70 mm 以内的检测范围来说,当绝缘子发生零值时,其电场径向幅值的变化呈现非单调且变化放缓的趋势,故采取对检测板范围内的电场幅值求方差的方法作为低距离检测判据,使得判据更具有鲁棒性。本文以检测距离 50 mm 与 70 mm 为例展开研究,径向电场分布图中的电场幅值方差如表 5 所示。

以训练,其快速性可以得到极大程度地提升,本文将电场探测器所测得的离散数据节点进行拟合,继而描绘出径向电场分布,其拟合精度较高,为 98.5% 左右。通过对比发现,对于高距离的检测,即检测距离  $d > 70$  mm 时,电场分布曲线单调平滑,斜率低,当斜率绝对值的最小值小于 0.015 时,可判断测量对象发生零值。对于低距离的检测,即  $d < 70$  mm 时,电场分布曲线呈现非单调特性,但是当零值发生时,其变化幅度会有所放缓,故采用方差判据,当曲线整体方差低于 55 时,即可判为零值。

## 参考文献:

- [1] 王平,李抗,耿江海,等. 110 kV 劣化瓷质悬式绝缘子空间电场研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 93-98.  
WANG Ping, LI Kang, GENG Jianghai, et al. Study on space electric field of 110 kV faulty porcelain suspension insulator[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 93-98.
- [2] 伍箴燎,吴正平,孙水发. 基于改进 YOLOv5 算法的绝缘子多缺陷检测[J]. 高压电器, 2024, 60(12): 95-102+112.  
WU Zhenliao, WU Zhengping, SUN Shuifa. Multiple defect detection of insulators based on improved

- YOLOv5 algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(12): 95-102+112.
- [3] 于子涵,王赫鸣,王建凯,等. 基于无人机巡检的输电线路绝缘子及其异物检测算法[J]. 发电技术, 2025, 46(3): 532-540.  
YU Zihan, WANG Heming, WANG Jiankai, et al. Detection algorithm for insulators and foreign objects on transmission lines based on unmanned aerial vehicle inspection[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(3): 532-540.
- [4] 汪晓,陈垚,单军,等. 新型高压输电线路绝缘子检测机器人研发方案[J]. 电力建设, 2015, 36(6): 77-83.  
WANG Xiao, CHEN Yao, SHAN Jun, et al. A novel design of insulator detecting robot for HV transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(6): 77-83.
- [5] 张涛,田峰,王英军,等. 一起 220 kV 线路瓷绝缘子耐张串断裂故障分析[J]. 电瓷避雷器, 2020(6): 187-191.  
ZHANG Tao, TIAN Feng, WANG Yingjun, et al. Analysis on a fracture fault of porcelain insulator tension string in 220 kV transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(6): 187-191.
- [6] 李岩,彭玉金,时海刚,等. 绝缘子运行性能分析与选型研究[J]. 国网技术学院学报, 2018, 21(1): 5-8+15.  
LI Yan, PENG Yujin, SHI Haigang, et al. Study on performance analysis and type selection of electrical insulators[J]. Journal of State Grid Technology College, 2018, 21(1): 5-8+15.
- [7] 徐德智,崔俊杰,袁冬,等. 基于高光谱技术的绝缘子污秽等级检测[J]. 电网与清洁能源, 2025, 41(8): 40-45.  
XU Dezhi, CUI Junjie, YUAN Dong, et al. Insulation contamination grade detection based on hyper spectral technology[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(8): 40-45.
- [8] 陶玉宁,方春华. 考虑环境相对湿度和污秽度的零值绝缘子红外检测方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 141-148.  
TAO Yuning, FANG Chunhua. Infrared detection method of zero value insulator considering relative humidity and pollution degree[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 141-148.
- [9] 白卫,黎业欣,甘徐,等. 绝缘子劣化状态检测技术研究[J]. 科技与创新, 2020(15): 1-3+6.  
BAI Wei, LI Yexin, GAN Xu, et al. Research on detection technology of insulator deterioration state[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(15): 1-3+6.
- [10] 刘洪吉,耿三平,王军,等. 特高压交流输电线路瓷绝缘子劣化分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(6): 159-164.  
LIU Hongji, GENG Sanping, WANG Jun, et al. Aging analysis of porcelain insulators used in UHV AC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6): 159-164.
- [11] 芦肇基,沈艳霞,谭永强. 基于多结构融合 WGAN 的模糊绝缘子图像复原方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(22): 166-175.  
LU Zhaoji, SHEN Yanxia, TAN Yongqiang. A WGAN blur insulator image restoration method based on multi-structure fusion[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 166-175.
- [12] 王晓康,何帅,张浩然,等. 零值绝缘子带电检测方法探讨[J]. 宁夏电力, 2021(1): 61-65.  
WANG Xiaokang, HE Shuai, ZHANG Haoran, et al. Live detection method of the zero value insulators[J]. Ningxia Electric Power, 2021(1): 61-65.
- [13] 高拓宇,汪仁杰,包翔,等. 超高压 V 型绝缘子串含零值绝缘子的空间电场畸变特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(2): 182-188.  
GAO Tuoyu, WANG Renjie, BAO Xiang, et al. Spatial electric field distortion characteristics of EHV V type insulator string with zero value insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(2): 182-188.
- [14] 郑云龙,罗日成,邹明. UHVDC 输电线路低零值绝缘子带电检测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 197-204.  
ZHENG Yunlong, LUO Richeng, ZOU Ming. Research on live detection method of zero insulator for UHVDC transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 197-204.
- [15] 许义,路健,朱先启,等. 一种非接触式零值绝缘子检测方法及其装置[J]. 广东电力, 2021, 34(3): 130-136.  
XU Yi, LU Jian, ZHU Xianqi, et al. A non-contact zero-value insulator detection method and device[J]. Guangdong Electric Power, 2021, 34(3): 130-136.
- [16] 周学明,阚毅,李籽剑,等. 便携式特高压零值绝缘子检测装置设计与研究[J]. 湖北电力, 2021, 45(1): 20-27.  
ZHOU Xueming, KAN Yi, LI Zijian, et al. Design and research of portable UHV zero-value insulator detection device[J]. Hubei Electric Power, 2021, 45(1): 20-27.
- [17] 贺成才,彭昊,肖燃阳. 输电线路瓷质绝缘子停电登塔零值检测技术[J]. 电子技术, 2020, 49(6): 130-131.  
HE Chengcai, PENG Hao, XIAO Ranyang. Zero value detection of transmission line porcelain insulator climbing tower after power failure[J]. Electronic Technology, 2020, 49(6): 130-131.
- [18] 程洋,夏令志,李志飞,等. 基于红外成像法的零值瓷绝缘子检测[J]. 绝缘材料, 2019, 52(3): 74-79.  
CHENG Yang, XIA Lingzhi, LI Zhifei, et al. Detection of faulty porcelain insulator based on infrared imaging method[J]. Insulating Materials, 2019, 52(3): 74-79.
- [19] 尹林,胡京,王文彬,等. 环境条件对基于无人机红外检测的零值绝缘子检测判据的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(5): 171-177.  
YIN Lin, HU Jing, WANG Wenbin, et al. Influence of

- environmental conditions on zero-value insulator detection criteria based on infrared detection through UAV[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2023(5): 171-177.
- [20] 杨磊, 李爱华, 李宜平, 等. 输电线路零值绝缘子红外检测技术研究[J]. *电工技术*, 2022(13): 79-82.  
YANG Lei, LI Aihua, LI Yiping, et al. Study on infrared detection technology of zero resistance insulators on transmission and distribution line[J]. *Electric Engineering*, 2022(13): 79-82.
- [21] 周友维, 姚建刚, 王欣, 等. 基于时间序列模型的劣化绝缘子红外热像检测方法[J]. *电瓷避雷器*, 2020(1): 149-155.  
ZHOU Youwei, YAO Jiangan, WANG Xin, et al. Infrared image detection for faulty insulators based on time series model[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2020(1): 149-155.
- [22] 郑维刚, 唐红, 朱义东, 等. 220 kV 低零值绝缘子红外检测技术应用研究[J]. *东北电力技术*, 2019, 40(11): 10-12.  
ZHENG Weigang, TANG Hong, ZHU Yidong, et al. Research on infrared detection technology application for 220 kV low-value zero-value insulator[J]. *Northeast Electric Power Technology*, 2019, 40(11): 10-12.
- [23] 陈楠, 陈高洋, 李鸿泽, 等. 低值瓷绝缘子红外检测温差阈值研究[J]. *电力工程技术*, 2019, 38(1): 102-106.  
CHEN Nan, CHEN Gaoyang, LI Hongze, et al. Temperature difference threshold of infrared detection of low value porcelain insulators[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2019, 38(1): 102-106.
- [24] MISHRA A P, GORUR R S, VENKATARAMAN S. Evaluation of porcelain and toughened glass suspension insulators removed from service[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(2): 467-475.
- [25] 邱刚, 陈杰, 张迺龙, 等. 基于 YOLOv3 和 HSV 颜色空间的绝缘子低/零值故障诊断研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(1): 148-153.  
QIU Gang, CHEN Jie, ZHANG Nailong, et al. Research of low/zero defect diagnosis of porcelain insulator based on YOLOv3 and HSV color space image processing technology[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(1): 148-153.
- [26] 张东东, 万武艺, 黄宵宁, 等. 屏蔽极板对劣化复合绝缘子电场检测的影响[J]. *广东电力*, 2022, 35(5): 93-100.  
ZHANG Dongdong, WAN Wuyi, HUANG Xiaoning, et al. Effect of shielded pole plate on electric field detection of degraded composite insulators[J]. *Guangdong Electric Power*, 2022, 35(5): 93-100.
- [27] 张东东, 江成洲, 张金华, 等. 基于改进自适应滤波的隧道磁电阻传感器外磁场干扰抑制方法[J]. *高电压技术*, 2023, 49(10): 4327-4334.  
ZHANG Dongdong, JIANG Chengzhou, ZHANG Jinhua, et al. External magnetic field interference suppression method for tunnel magnetoresistive sensor based on improved adaptive filtering[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(10): 4327-4334.
- [28] 张东东, 万武艺, 刘欣, 等. 基于无人机的绝缘子带电零值检测技术[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(1): 234-242.  
ZHANG Dongdong, WAN Wuyi, LIU Xin, et al. Live zero value detection technology of insulator string based on UAV[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2023, 42(1): 234-242.
- [29] 张志猛, 李抗, 刘杰, 等. 基于无人机巡检平台的劣化绝缘子带电检测技术[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(21): 8616-8621.  
ZHANG Zhimeng, LI Kang, LIU Jie, et al. Live detection technology of deteriorated insulator based on unmanned aerial vehicle inspection platform[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(21): 8616-8621.
- [30] 李京, 黄良, 王博禹, 等. 无人机定位下绝缘子劣化状态检测系统设计[J]. *电子设计工程*, 2019, 27(19): 15-18+24.  
LI Jing, HUANG Liang, WANG Boyu, et al. Design of insulator deterioration state detection system under UAV positioning[J]. *Electronic Design Engineering*, 2019, 27(19): 15-18+24.
- [31] 仲亮, 李勇, 任志刚, 等. 机器人电场法检测绝缘子的影响因素分析[J]. *电瓷避雷器*, 2017(2): 148-155.  
ZHONG Liang, LI Yong, REN Zhigang, et al. Analysis on the influence factor of insulators detection by robots and electric field method[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2017(2): 148-155.