

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)02-0109-07

基于无人机的超高压零值绝缘子检测及仿真

乔竹生¹, 张东东¹, 万武艺¹, 宋恒东², 韩学春², 高拓宇²

(1. 南京工程学院 电力工程学院, 江苏 南京 211100; 2. 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起到保证输电线路对地绝缘的作用。零值绝缘子的存在将会严重影响输配电的安全性与电能质量。使用四翼轻质无人机对绝缘子进行局部电场检测, 可识别零值绝缘子, 继而保证电网安全。为弄清四翼无人机机构架本体对绝缘子空间电场分布的影响, 并提高检测精度。提出一种用于绝缘子零值检测的四翼无人机研制方法, 并建立 500 kV 钟罩式绝缘子串及四翼无人机的仿真三维模型, 仿真分析无人机构架在绝缘子串不同位置的畸变特征, 得到合成场、轴向电场、径向电场的绝缘子零值和完好情况下的分布特点。通过调节检测距离, 详细对比检测板附近径向场的幅值变化情况, 结果表明绝缘子零值时径向电场的标准差远低于完好, 据此特征提出基于空间电场法及无人机检测技术的绝缘子零值检测方法及其判别依据。研究结果可为输配电外绝缘智慧运维提供技术支持。

关键词: 零值绝缘子; 无人机; 空间电场; 带电检测; 检测探头

中图分类号: TP277; TP391.9; TM407

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)02-0109-07

Detection and simulation of ultra-high voltage zero-value insulators based on UAV

QIAO Zhusheng¹, ZHANG Dongdong¹, WAN Wuyi¹, SONG Hengdong², HAN Xuechun², GAO Tuoyu²

(1. School of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211100, Jiangsu, China;

2. State Grid Jiangsu UHV Company, Nanjing 211102, Jiangsu, China)

Abstract: Insulators play a role in the power system to ensure the insulation of transmission lines to the ground. The existence of zero-value insulators seriously affect the safety and power quality of transmission and distribution. The use of a four-wing lightweight UAV to detect the local electric field of insulators can identify zero-value insulators and ensure the safety of the power grid. In order to understand the influence of the four-wing unmanned mechanism frame on the distribution of electric field in the insulator space, and improve the detection accuracy. In this paper, a four-wing UAV for insulator zero value detection is proposed, and a simulation three-dimensional model of 500kV bell insulator string and quadruple UAV is established, and the distortion characteristics of the unmanned mechanism frame at different positions of the insulator string are simulated and analyzed, and the distribution characteristics of the insulator zero value and intact condition of the synthetic field, axial electric field and radial electric field are obtained. By adjusting the detection distance and comparing the amplitude change of the radial field near the detection plate in detail, the results show that the standard deviation of the radial electric field is much lower than that of the intact when the insulator is zero. The research results can provide technical support for the intelligent operation and maintenance of external insulation of transmission and distribution.

Keywords: zero-value insulator; UAV; spatial electric field; charged detection; detection probes

绝缘子作为电力系统输配电中不可或缺的组成部分, 起到保持导线与杆塔绝缘的作用。近年来, 随着我国电力事业的飞速发展, 输电走廊不断扩大, 在超、特高压交直流输电的大背景下, 绝缘子串所需个数也越来越多。由于良好的机械性能, 高压架空线路的耐张串多采用瓷质绝缘子。但在实际的输电线路运行过程中, 但随着其运行年限

的逐步增加, 绝缘子的阻值将不断减小, 工程实际中一般认定, 当绝缘子电阻值低于 5 MΩ 时, 该绝缘子被称为零值绝缘子^[1]。绝缘子一旦发生本体劣化、零值、造成其绝缘性能下降, 会导致闪络等事故的发生, 严重危害了输电线路的运行安全^[2-3]。故对劣化绝缘子的定期检测与更换极端重要。

收稿日期: 2024-03-20; 录用日期: 2024-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(52077018); 国网江苏超高压公司科技项目(CGY-2023006); 国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023087); 江苏省大学生科技创新训练项目(202311276029Z)

作者简介: 乔竹生(2003—), 男, 本科, 研究方向: 高电压与绝缘技术。

通信作者: 张东东(1991—), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 高电压与绝缘技术。

引用本文: 乔竹生, 张东东, 万武艺, 等. 基于无人机的超高压零值绝缘子检测及仿真[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(2): 109-115 (QIAO Zhusheng, ZHANG Dongdong, WAN Wuyi, et al. Detection and simulation of ultra-high voltage zero-value insulators based on UAV[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(2): 109-115)

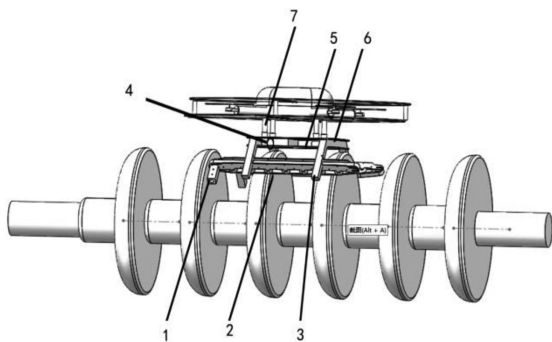
零值绝缘子的检测办法分为接触式与非接触式两类^[4-6],作为接触式检测法的代表,绝缘电阻法、火花间隙法早期备受人们的关注。这类方法虽然能够准确表征劣化情况,但是需要人为登塔作业,危险系数高,在超特高压的电力系统中缺乏现实可行性^[7-9]。目前广泛应用非接触式方法有红外成像法、紫外成像法、空间电场分布法等,红(紫)外成像法虽能弥补直接接触式方法的一部分缺陷,但其检测效果也受到自身劣化状态与外界环境条件影响,且稳定性较差,精度有待提高^[10-13]。作为电学检测方法的空间电场法一直广受人们的关注^[14-16],文献[17]采用小型化的空间电场传感器,通过无人机巡检平台电场测量信号传输实现复合绝缘子芯棒局部导通的带电检测试验。文献[18]对检测状态协议进行配置支撑调试,并结合软硬件运行模块,实现无人机定位下绝缘子劣化状态检测系统的应用。

采用无人机电场检测的方式可以解决免登塔高效率的零值绝缘子检测问题,但是目前相关研究较少,尤其针对检测方式和识别判据尚未统一^[19-24]。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,分析了无人机检测过程时绝缘子串电场分布特征,研究了不同检测距离、检测位置下的零值绝缘子局部特征电场畸变特征,最终形成了基于四旋翼无人机的零值检测判别方法。研究结果可以为输配电外绝缘智慧运维提供技术支撑。

1 结构设计及仿真建模方法

1.1 履带式零值检测无人机结构

如图1所示,本文设计的零值绝缘子带电检测无人机,通过四旋翼与履带结构相结合的方式实现了耐张绝缘子串的快速、免登塔零值检测,其包括检测无人机的履带结构与绝缘子直接接触,机架主体3通过无人机下的连接器7相连并供电,这样使得零值绝缘子检测装置能与无人机紧密相扣,在检测运行中稳定工作。检测工作时打开总开关6,检测终端控制器给控制系统4发射指令信号,控制电机1带动履带2顺时针或逆时针转动,使其零值绝缘子检测无人机向前、向后、向左、向右运动完成检测工作。



1. 电机、2. 履带、3. 机架主体、4. 控制系统、5. 零值检测主板、
6. 总开关、7. 连接器
(a) 零值检测无人机结构



(b) 实物图

图1 零值检测无人机示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a zero-value detection UAV

其中检测主板5主要由电场检测探头、硅板、外壳组成。装置的外壳采用塑料具有良好的绝缘性能,检测装置的外壳尺寸:长150 mm,宽100 mm,高40 mm;电路板尺寸:长150 mm,宽90 mm,高2 mm;检测板长150 mm,宽10 mm,高2 mm,用于固定电场探头。检测装置尺寸如图2所示。

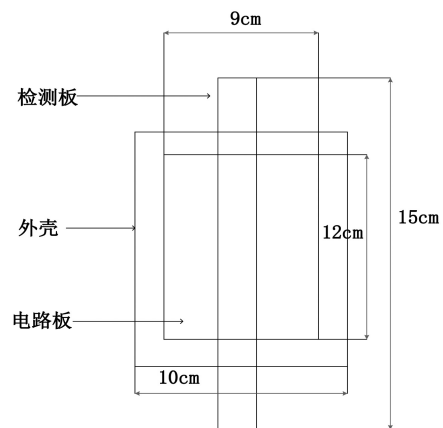


图2 检测主板模型

Fig. 2 Detection of motherboard model

1.2 零值检测电场仿真模型

本文基于comsol静电场接口,以500 kV的24片型号为FC-160P/155瓷绝缘子串作为研究对象,为了提高仿真的准确性,考虑钢脚、钢帽、导线等因素的影响,建立1:1三维仿真模型,进行静电场仿真,绝缘子的相关结构参数见表1,模型中的相关材料的介电常数见表2。绝缘子串本为无界域,而静电场仿真在有界域条件下进行,故在实际计算中用8 000×8 000×12 000 mm的长方体覆盖住绝缘子串作为空气域,边界条件设置为空气域的边界接地以及与横担所连接的金具接地,导线的电压按照单相导线的相电压幅值,设置为408.3 kV,最终其相关模型如图3所示。与此同时,为提高计算机的计算速度,将绝缘子串空气域网络作较细化处理,对绝缘子串及导线作超细化处理。通过迭代法得到相应结果及判据。

表1 钟罩式绝缘子相关尺寸

Tab. 1 Relevant dimensions of bell-shaped insulators

结构高度/mm	盘径/mm	钢帽长度/mm	金具长度/mm
3 455.6	330	105	90

表 2 材料属性表
Tab. 2 Material properties

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

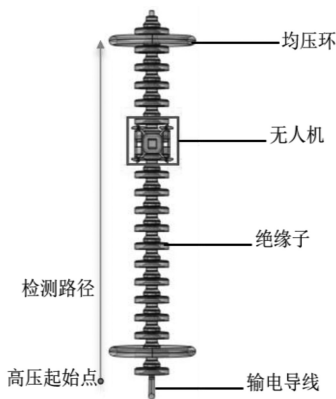


图 3 无人机带机器人仿真模型

Fig. 3 Simulation model of a UAV inspecting an insulator string

2 电场分布影响

2.1 含无人机构架的整体电场分布

将无人机稳定在中压端(第十片)的位置,如图 3 所示,检测直线是从高压端作为测量起点,一直延伸到低压端。如图 4 所示,取检测板距离伞裙的距离为 $d = 80 \text{ mm}$ 。

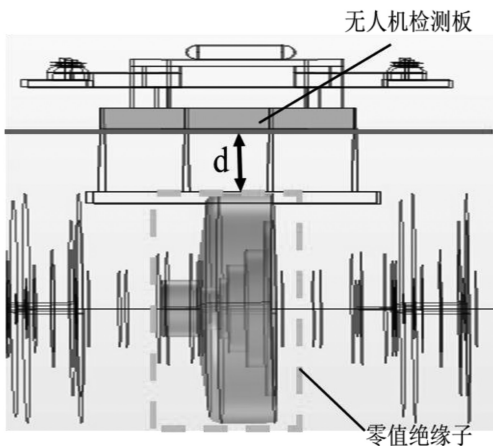


图 4 检测板距离与检测线示意图

Fig. 4 Schematic of detection plate distance and detection line

下图分别为无人机在第十片绝缘子零值和完好的情况下,是否有无人机构架时的电场分布对比图。

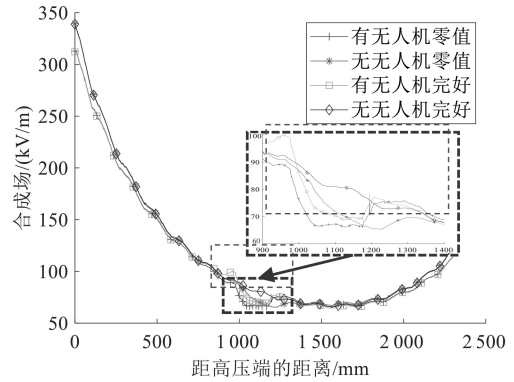


图 5 绝缘子串整体电场分布

Fig. 5 The overall electric field distribution of the insulator string

由图 5 可知,无人机的存在对整串电场分布的影响只体现在其构架本体的两个端部。当第十片为非零值时,检测线上靠近无人机构架端部的场强先上升后下降,但是下降幅度并不是很显著,大约在 15%–25%;当第十片为零值时,与非零值相比较,不论存在无人机与否,第十片位置处的局部电场分布都有所改变,存在先抖降、再上升的畸变特性。类似地,检测线上靠近无人机构架端部的场强的降低和上升的幅度大约在 20%。由此可见,无人机本体构架造成的电场畸变对零值绝缘子检测的影响只体现在其端部,而其中的电场分布仍能反映零值绝缘子造成的局部电场变化。虽然有一定的影响,但是总体并不影响测量结果,并不会造成所谓的误判,故无人机本体造成的影响可忽略不计。

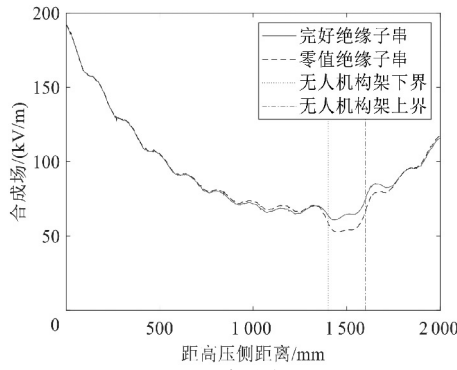
2.2 不同电场分量特性分析

研究无人机在低压侧(第 18 片)处典型位置,零值、完好绝缘子局部电场分布特性的差异,对比合成场,轴向电场(沿检测直线方向)及径向电场。检测直线从高压端延伸至低压端,检测距离伞裙边为 70 mm。

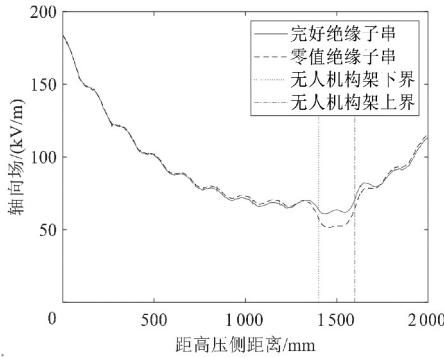
由图 6 可知,无人机的存在可以观测到零值绝缘子的空间场强的畸变,在零值情况下,相比于完好绝缘子,合成场、轴向场的值有明显的下降。径向场的变化率较小,曲线更加平缓。相比于前两者,其变化特征最明显。无人机构架在此处(距离高压端 1 400–1 600 mm)效果较好。无人机在此区域不仅能反映径向电场变化程度,也能反映径向场值的相对大小,故在后续研究中,将这种能反映此相对变化关系的区域视为无人机最佳零值识别位置。

3 零值绝缘子检测局部电场特征

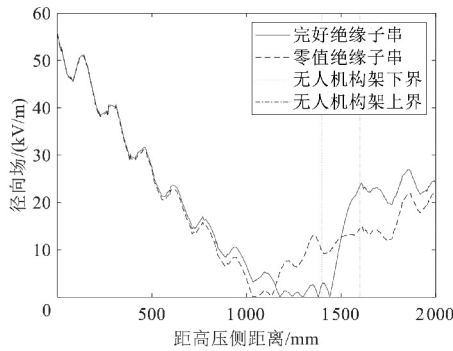
由于零值绝缘子存在时,径向电场对电场强度的趋势影响占主导,因此下文仅对检测板区域的局部径向场进行研究分析,研究无人机在高、中、低压侧(第 7 片,第 10 片,第 18 片)的径向场分布情况,依次取无人机正对钢帽、正对伞裙、正对钢脚三类情况(如图 7 所示)加以对比,检测板距离分别以 $d = 50, 100 \text{ mm}$ 为代表展开相关研究。



(a) 合成场



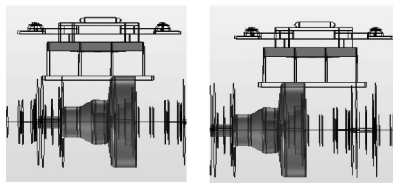
(b) 轴向场



(c) 径向场

图6 绝缘子串局部电场分布

Fig. 6 Insulator string local electric field distribution



(a) 正对钢帽 (b) 正对钢脚

图7 不同检测位置示意图(深色表示劣化绝缘子片)

Fig. 7 Schematic diagram of different detection locations

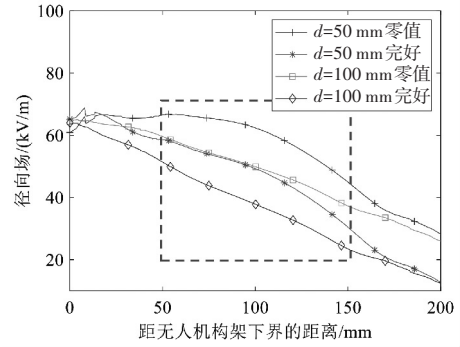
(blue indicates deterioration of insulator sheets)

3.1 零值片位于高压侧

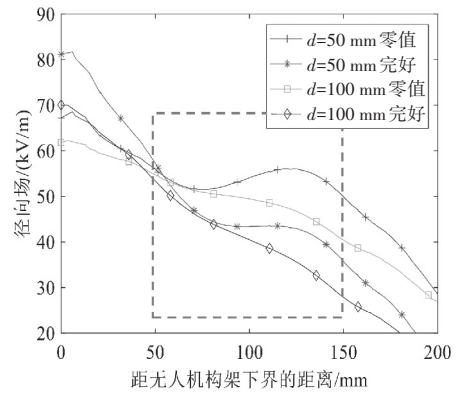
以第七片绝缘子为例,分析无人机在不同位置检测到的电场分布情况,先后取检测距离为 $d = 50$ 、 100 mm,仿真结果如下图所示。

如图8(a)所示,无人机正对高压端钢帽时,零值与非零值对比,在检测板范围内,两者变化趋势均是单调下降的,且只能看出零值情况下,绝缘子的径向场强大小高于非零值,但是没有看出任何可区分的特征。故此区域不作

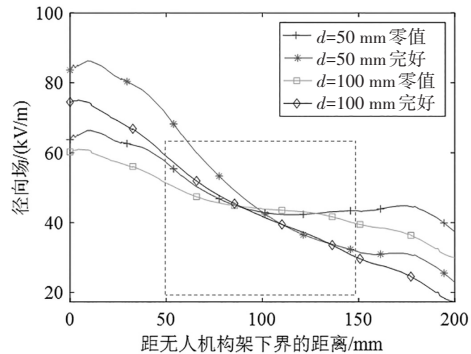
为可供辨识的区域。



(a) 正对钢帽



(b) 正对伞裙



(c) 正对钢脚

图8 零值片位于高压端的局部电场变化情况

Fig. 8 Variation of the local electric field of the zero-value slice located at the high-voltage end of the slice

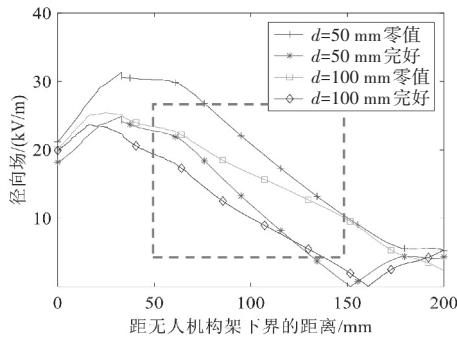
如图8(b)所示,无人机正对高压端伞裙时,在检测板范围内, $d = 50$ mm时,非零值的径向电场幅值下降,其变化率呈现先抖、后缓、再抖的变化趋势。而零值的径向电场变化幅值的变化明显较缓,电场呈现先降后升的变化状态。 $d = 100$ mm时,完好绝缘子径向电场幅值变化幅度为 $55\text{--}26.3$ kV/m,呈下降趋势,下降幅度大于 $d = 50$ mm的情况,而在零值状态下,径向电场完全单调减,变化幅度为 $55.6\text{--}39.1$ kV/m。

如图8(c)所示,无人机正对高压端钢脚时,在检测板范围内, $d = 50$ mm时,非零值的径向电场单调递减,零值的径向电场先降后升,且变化幅度明显小于完好状态。 $d = 100$ mm时,非零值的径向电场单调下降,变化幅度为 $61.4\text{--}28.6$ kV/m。零值的径向电场单调下降,变化幅度为 $52.9\text{--}38.9$ kV/m。对比发现在该区域绝缘子零值电场

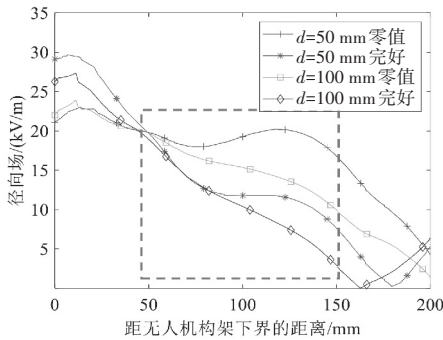
变化较为明显。但是 $d = 50\text{ mm}$ 时伞裙处在一定程度上也能反映一些特征,而 $d = 100\text{ mm}$ 时几乎只能在钢脚处观察,故距离越远,检测方位会有向高压端移的趋势。

3.2 零值片位于中压侧

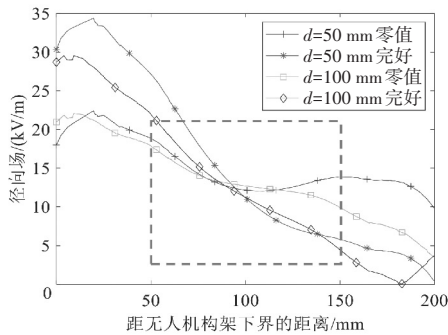
以第十片绝缘子为例,分析无人机在不同位置检测到的电场分布情况仿真结果如下图所示。



(a) 正对钢帽



(b) 正对伞裙



(c) 正对钢脚

图9 零值片位于中压端的局部电场变化情况

Fig. 9 Variation of the local electric field of the zero-value slice located at the middle-voltage end of the slice

在图9(a)中,在检测板范围内,明显径向电场只有数值差异,没有明显可辨别的特征。

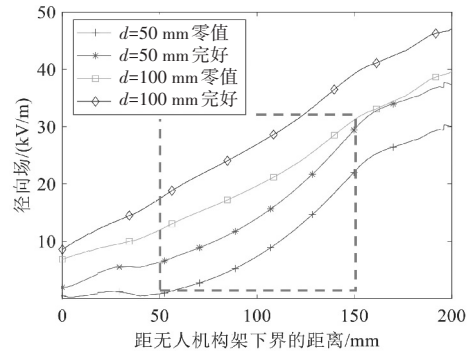
如图9(b)所示,类似地, $d = 50\text{ mm}$ 时,非零值径向电场幅值单调减,其变化率呈现先抖后缓再抖的变化趋势。而零值径向电场幅值的变化明显放缓,电场呈现先降后升的变化状态。 $d = 100\text{ mm}$ 时,完好绝缘子与零值绝缘子径向电场都是完全单调减,相较于完好,零值的变化率明显较小。

如图9(c)所示,在检测板范围内, $d = 50\text{ mm}$ 时,非零值的径向电场变化趋势是单调递减的。零值的径向电场

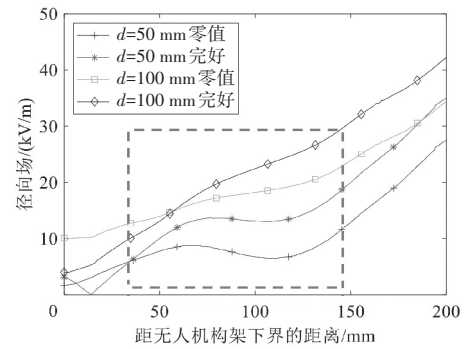
先降后升,且变化幅度明显小于完好状态。 $d = 100\text{ mm}$ 时,非零值径向电场单调下降,幅度较大。零值的径向电场单调下降且幅度小。

3.3 零值片位于低压侧

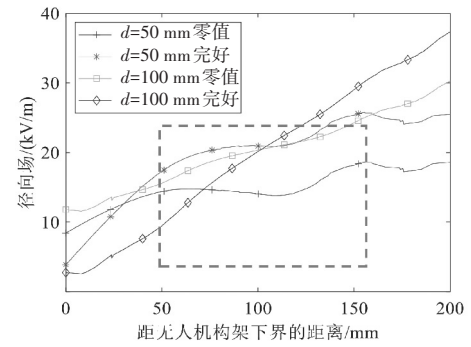
以第十八片绝缘子为例,分析无人机在不同位置检测到的电场分布情况仿真结果如下图所示。



(a) 正对钢帽



(b) 正对伞裙



(c) 正对钢脚

图10 零值片位于低压端的局部电场变化情况

Fig. 10 Variation of the local electric field of the zero-value slice located at the low-voltage end of the slice

同前文述,在图10(a)中,在检测板范围内,明显径向电场只有数值差异,没有明显可辨别的特征。

如图10(b)所示, $d = 50\text{ mm}$ 时,非零值径向电场与零值径向电场幅值的变化均呈现先升后降的变化趋势。 $d = 100\text{ mm}$ 时,完好与零值绝缘子径向电场均呈完全上升趋势,完好变化幅度较大。

如图10(c)所示, $d = 50\text{ mm}$ 时,非零值与零值的径向电场幅值均单调递增。 $d = 100\text{ mm}$ 时,和前面的情况相类似,非零值与零值径向电场大小都单调上升,且零值上升幅度明显小于非零值。

4 检测方法及判据分析

前文研究了检测机器人处于沿串不同位置时,检测板区域的电场分布规律。研究表明,不论是在高压端还是中压、低压端,当被检测绝缘子为零值时,其径向电场在数值上和变化趋势上都有明显改变,尤其是对于伞裙和钢脚位置,存在明显的可辨别区分的特征,从而可以为零值的判别提供依据。

传统的电场检测法都是布置单个电场探头,然后通过扫描,得到整体电场分布,再依据整体变化趋势进行零值识别判断。该方法虽可行,但是对实际操作要求高,需要保证探头从绝缘子串的一端,完整、匀速地移动到另一端。

传统方法忽视了零值绝缘子造成的共性的局部电场畸变规律。按照前文分析结果,完全可以通过局部的电场变化趋势,直接进行零值的识别检测,而不需要获得整体的电场分布曲线。本文设置检测板长度为15 cm,仿真得到的特征区域长度大约为8-10 cm,因此可以在检测板上等间距布置多个电场探头,根据数值的变化趋势进行零值识别。

设检测点总长为 L ,探头数量为 N ,最小布置间距为 l ,如图11所示。为了方便检测,减小电路的冗余,希望 N 越小越好,而 L 则不能过小,否则将无法反应特征区域内的变化趋势,从而造成误判。

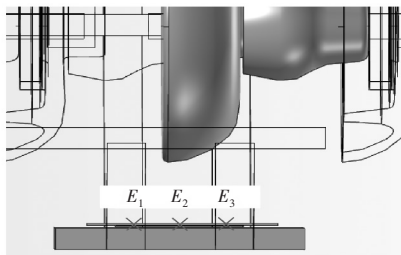


图11 电场强度数值取点示意图

Fig. 11 Schematic diagram of sampling points electric field intensity values

根据前文的仿真结果可知, L 可取8 cm,而电场探头本身宽度大约为1.5 cm,因此 N 可取3。得到3探头下特征区域检测线上的径向电场数值,并计算其标准差作为变化趋势的识别判据,结果如表3、表4、表5所示。

表3 $d = 50$ mm 电场强度数值

Tab. 3 Electric field intensity values for $d = 50$ mm

场强大小		E_1	E_2	E_3
高压端伞裙	零值	52.1	54.4	53.7
	非零值	48.6	43.4	39.9
高压端钢脚	零值	45.9	42.7	42.4
	非零值	51.4	41.6	36.3
中压端伞裙	零值	18.3	19.3	19.2
	非零值	14.9	11.8	10.3
中压端钢脚	零值	13.2	12.1	12.4
	非零值	15.4	10.6	7.7
低压端伞裙	零值	8.7	6.6	7.9
	非零值	13.0	13.1	14.8
低压端钢脚	零值	14.4	13.9	15.0
	非零值	20.8	20.9	22.2

表4 $d = 100$ mm 时电场强度数值

Tab. 4 Electric field intensity values for $d = 100$ mm

场强大小		E_1	E_2	E_3
高压端伞裙	零值	51.7	49.3	43.9
	非零值	47.2	40.2	31.9
高压端钢脚	零值	45.1	43.8	43.1
	非零值	46.2	41.0	37.2
中压端伞裙	零值	17.7	15.2	12.0
	非零值	15.2	10.1	5.4
中压端钢脚	零值	13.4	12.6	12.1
	非零值	13.6	11.0	8.7
低压端伞裙	零值	16.1	18.3	20.2
	非零值	17.3	22.6	26.1
低压端钢脚	零值	19.5	20.7	21.9
	非零值	17.7	21.3	24.6

表5 标准差汇总

Tab. 5 Summary of standard deviations

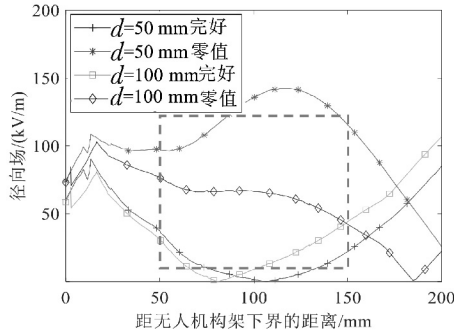
标准差 σ		$d = 50$ mm (E_2 和 E_3)	$d = 100$ mm (E_1, E_2, E_3)
高压端伞裙	零值	0.6	4.0
	非零值	2.5	7.6
高压端钢脚	零值	2.5	1.0
	非零值	10.7	4.5
中压端伞裙	零值	0.1	2.8
	非零值	1.1	4.9
中压端钢脚	零值	0.6	0.7
	非零值	5.5	2.5
低压端伞裙	零值	0.9	2.0
	非零值	1.2	4.5
低压端钢脚	零值	0.8	1.2
	非零值	0.9	3.4

很显然,当三个探头检测得到电场数值的标准差小于1.3、或 E_2, E_3 的标准偏差小于1.0时,则可认为当前检测位置的绝缘子为零值片。

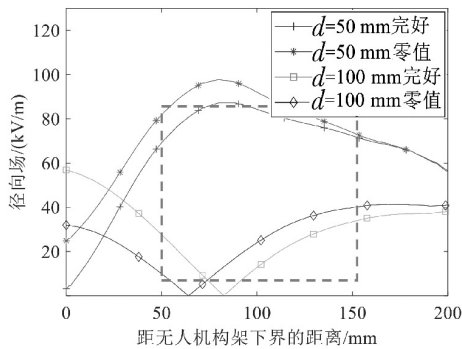
5 判据验证

如果零值绝缘子发生在高压端或低压端的端部,考虑到端部效应,径向电场会出现反向状况。造成电场幅值过零。当绝缘子发生零值时,也同样可以通过检测径向电场的零值状况及时发现。径向电场分布如图12所示。图中 $d = 50$ mm取的是正对伞裙的位置, $d = 100$ mm是正对钢脚的位置。

经验证,该判据能够较好地反映绝缘子零值情况,图12及表6中的数据及变化趋势与前文大体相当,有一定的支撑作用。



(a) 零值处于高压端部



(b) 零值处于低压端部

图 12 零值片位于端部的局部电场变化情况

Fig. 12 Local electric field variation at the end where the zero-value plate is located

表 6 标准差汇总

Tab. 6 Summary of standard deviations

标准差 σ		$d = 50 \text{ mm} (E_2 \text{ 和 } E_3)$	$d = 100 \text{ mm} (E_1, E_2, E_3)$
高压端部	零值	1.0	1.3
	非零值	4.5	6.8
低压端部	零值	0.6	0.8
	非零值	6.7	15

6 结论

本文通过多物理场仿真分析了 500 kV 钟罩式瓷绝缘子劣化后空间电场分布特性,研究无人机构架对其电场分布的影响,通过对比得到相关检测识别方法,结论如下。

1) 无人机构架对电场的改变影响较小,只在其端部造成电场幅值有 15% 到 20% 的数值差异,但不影响电场幅值的变化规律,并仍能准确反映零值与完好情况下电场变化的差异。

2) 对比发现,当 $d \leq 50 \text{ mm}$ 时,无人机检测到径向电场呈现非单调分布,而当 $d \geq 100 \text{ mm}$ 时,无人机所检测到的电场单调分布且零值径向电场幅值变化比完好平缓。

3) 在 $d = 50 \text{ mm}$ 、 $d = 100 \text{ mm}$ 时,零值绝缘子径向电场的畸变较合成电场,轴向电场明显,故也验证了其测量径向电场判别的合理性。通过对结果的分析,发现当 $d = 50 \text{ mm}$ 时,无人机在正对伞裙的位置测量电场幅值标准差

小于 1.3,当 $d = 100 \text{ mm}$ 时,无人机在正对钢脚的位置测量电场幅值标准差小于 1,故随着距离增大,检测位置往高压端(钢脚)处移动。

参考文献

- [1]常波,张启哲,王胜辉,等. 动车组车顶隔离开关用支柱绝缘子污秽状态下的电场分布特性研究[J]. 电测与仪表, 2024, 61(4):81-85.
- [2]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.
- [3]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.
- [4]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, 217(1):61-65.
- [5]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.
- [6]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.
- [7]许义,路健,朱先启,等. 一种非接触式零值绝缘子检测方法及装置[J]. 广东电力, 2021, 34(3):130-136.
- [8]周学明,阙毅,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.
- [9]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.
- [10]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.
- [11]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
- [12]杨磊,李爱华,李宜平,等. 输配线路零值绝缘子红外检测技术研究[J]. 电工技术, 2022(13):79-82.
- [13]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]. 电磁避雷器, 2020(1):149-155.
- [14]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.
- [15]国伟辉,闫帅,荆林远,等. 电场法在支柱绝缘子检测中的应用探讨[J]. 科技视界, 2018(28):33-35.
- [16]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.
- [17]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.
- [18]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.
- [19]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.
- [20]俸波,黄志都,田树军,等. 绝缘子检测机器人攀爬机构研究现状分析[J]. 广西电力, 2021, 44(3):29-34.
- [21]董军,李博,翟洪达,等. 基于多旋翼无人机的复合绝缘子憎水性带电检测装置研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6):171-179.
- [22]张迪,张珣,辛巍,等. 一种特高压输电线路带电绝缘子检测机器人[J]. 现代制造技术与装备, 2023, 59(7):191-193.
- [23]王赵明,李明亮,齐亚楠,等. 基于卫星与无人机遥感技术的沥青路面大变形智能监测[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(10):94-97, 153.
- [24]花国祥,王华建,李鹏,等. 一种特定爪具的带电更换绝缘子作业机器人系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2023(11):65-72.