

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.01.028

基于无人机的绝缘子带电零值检测技术

张东东¹, 万武艺¹, 刘欣¹, 黄宵宁¹, 高拓宇², 张志劲³

(1. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167;

2. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司, 江苏 南京 211102;

3. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044)

摘要:为提高输电线路零值绝缘子的检测效率,利用无人机装载电场探测装置可实现免登塔带电检测。文中首先建立220 kV瓷绝缘子串1:1仿真模型,通过Comsol有限元数值仿真,分析研究串型、路径抖动、无人机及电场探头对绝缘子串空间电场分布的影响;继而建立零值绝缘子识别方法及其后台检测系统;最后进行实验室及现场实测。研究表明:双联绝缘子串同时存在零值绝缘子时,其空间电场分布互不影响;无人机飞行过程中直线检测路径的偏移距离应小于50 mm;绝缘子串的空间电场分布不受无人机及电场探头影响。利用文中所提的零值绝缘子检测方法,通过无人机搭载电场探测装置,可实现零值绝缘子的现场检测。

关键词:有限元仿真;绝缘子;零值;空间电场;无人机;非接触式检测

中图分类号:TM216.1

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)01-0234-09

0 引言

随着国内超、特高压的快速发展,输电走廊不断延伸,投入运行的绝缘子数量增长迅速。绝缘子在架空输电线路中起到支撑固定、电气绝缘的关键作用,为电网安全平稳运行提供重要保障^[1],因此绝缘子的运行可靠性备受重视。电气外绝缘设备的运行环境较为恶劣,在冷热交替、污秽腐蚀、机电负载等多重作用下,其电气、机械性能下降,会出现低值、零值绝缘子^[2]。其中零值绝缘子存在较多,且对输电线路安全运行影响更大,局部地区应加强线路巡视,减少由零值绝缘子引发的线路故障^[3-4]。

目前,国内外学者相继提出了绝缘电阻法、火花间隙法等接触式检测方法以及紫外成像法、红外成像法、超声波法等非接触式检测方法^[5-6]。然而绝缘子的运行环境较为复杂,且考虑到实际检测结果的可靠性,技术人员当下仍采用接触式检测方法,但该类方法步骤繁琐,且须登塔作业,危险系数较高。鉴于此,相关科研机构对零值绝缘子的非接触式检测方法开展了大量研究。文献[7-10]基于红外成像法进行仿真试验,研究了风速、温湿度、加压时间对红外法检测零值绝缘子结果的影响,得出了温度、湿度、风速对零值绝缘子检测结果均有不同程度影响的结论;文献[11-13]基于紫外成像法评估了绝缘子的绝缘状态,并仿真分析风力、角度、距离等因素对紫外成像结果的影响,得出了角度和风力

对绝缘子放电影响较小的结论;文献[14-16]基于超声波、微波对绝缘子的内部缺陷进行检测,仿真分析了其在绝缘子内部的传播特性,建立了传播数学模型,验证了超声波、微波在瓷绝缘子劣化检测上的可行性。但上述非接触式检测方法大都在室内进行,现场检测的可靠性有待考量。

现有研究表明,无人机搭载电场传感器进行非接触式检测的可靠性较高,因此有许多学者提出了基于无人机的非接触式电场检测方法^[17-18]。相比于传统检测方法,该方法的优点在于不用人工登塔作业,通过分析绝缘子沿串电场分布曲线即可清楚了解绝缘子的缺陷位置,且检测设备都是模块化、集成化的,现场安装测试方便,受环境场地限制小,检测精度较高^[19-20]。文献[21]利用机器人装载电场探测装置代替人力进行零值绝缘子检测,检测效果较好;文献[22-24]通过搭建无人机巡检平台,可对输电线路绝缘子进行带电检测,且研究表明基于无人机巡检平台的测量系统能有效检测出绝缘子缺陷部位,有利于推进无人机平台在绝缘子检测领域的应用。

综上,基于电场分布的非接触式检测方法简单有效,利用无人机搭载电场探测装置在零值绝缘子检测方面具有良好的应用前景。因此,文中研究了基于无人机的零值绝缘子检测方法,首先仿真分析了串型、路径抖动对零值绝缘子检测结果的影响;继而提出了基于无人机的零值绝缘子识别算法,并开展零值绝缘子的现场检测验证试验。研究结果可为架空线路的运行维护提供技术支撑。

收稿日期:2022-08-21;修回日期:2022-11-24

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077018)

1 无人机检测路径仿真分析

1.1 仿真模型

以某 220 kV 线路使用的 XP-160 瓷绝缘子为仿真对象,考虑杆塔、导线、横担的影响,建立了 1:1 三维仿真模型,通过 Comsol 有限元数值仿真软件,分析含零值绝缘子串的空间电场分布特性。仿真模型示意如图 1 所示,结构参数如表 1 所示。

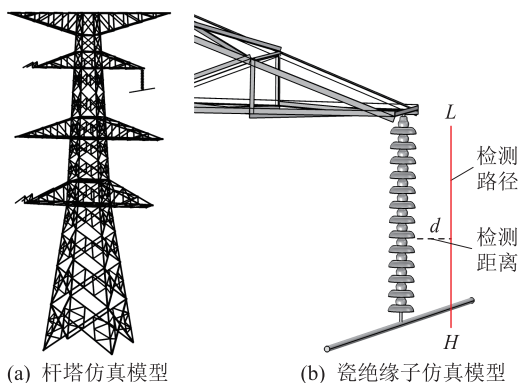


图 1 绝缘子及杆塔示意

Fig.1 Schematic diagram of insulator sample and its tower

表 1 绝缘子参数

参数	数值
结构高度	146
盘径	255
钢脚长度	62
钢脚直径	20
钢帽高度	128
上(下)钢帽直径	74(107)

仿真设置环境大气压强为 101.325 kPa,环境温度为 26 ℃,湿度为 56 %,无空气流动,绝缘子表面干燥。对绝缘子进行编号,检测起始点记为第 1 片,检测终止点记为第 13 片;检测路径与绝缘子串中轴间的距离记为检测距离 d 。模型边界条件设置为:绝缘子串低压端金具、杆塔以及空气域下表面接地;绝缘子串高压端金具以及导线设置电压为 179.6 kV。模型材料中空气介质相对介电常数为 1,瓷的相对介电常数为 6,水泥的相对介电常数为 5。针对零值绝缘子,将钢脚与钢帽间的瓷件与水泥贯通,对其单独设置相对介电常数进行模拟,如图 2 所示。

1.2 串型的影响分析

架空线路中绝缘子串的布置方式多样,如耐张型、双联型等。当双联绝缘子串的其中一串出现零

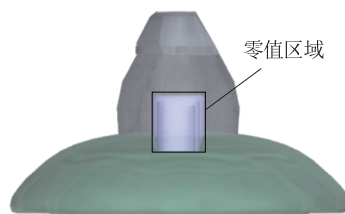


图 2 零值绝缘子示意

Fig.2 Schematic diagram of zero value insulator

值绝缘子时可能会影响另一串绝缘子的电场分布,导致零值检测结果的可靠性降低。因此,文中建立如图 3 所示的双联绝缘子串、耐张绝缘子串模型,研究不同布置方式下零值绝缘子对绝缘子串电场分布的影响。

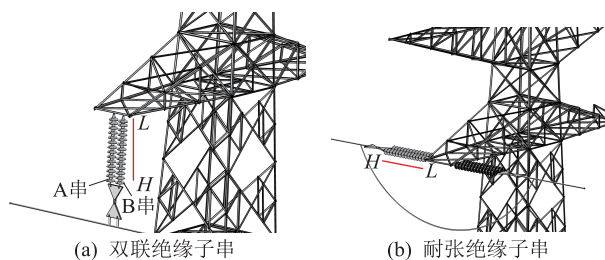


图 3 双联、耐张绝缘子串仿真模型

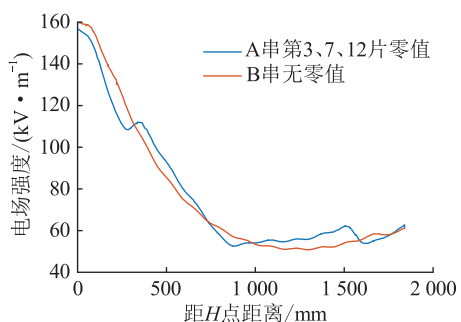
Fig.3 Double-linked, tensile insulator string simulation models

根据 1.1 节中仿真参数设定,针对双联绝缘子串,分别仿真分析 A、B 串单独含有零值绝缘子时另一串的空间电场分布特性,以及 A、B 串同时存在零值绝缘子时是否互相影响;针对耐张绝缘子串,仿真分析不同位置下零值绝缘子对其空间电场分布的影响。其中检测路径为 $H-L$,检测起始点为 H ,高压端第一片绝缘子记为第 1 片,在分别距离双串绝缘子中轴 200 mm 下,仿真结果如图 4 所示。

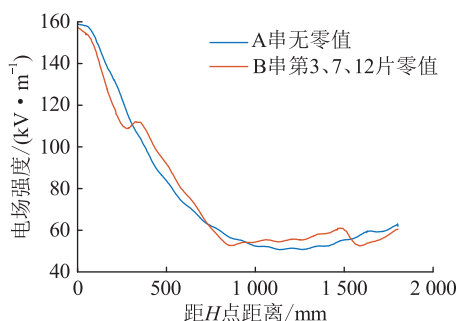
由图 4 可知,当 A 串第 3 片、第 7 片、第 12 片为零值绝缘子时,B 串电场仍为 U 型分布;当 B 串第 3 片、第 7 片、第 12 片为零值绝缘子时,A 串电场仍为 U 型分布。因此,当双联绝缘子串其中一串存在零值绝缘子时,不影响另一串的电场分布。而当 A、B 串同时存在零值绝缘子且零值绝缘子位置相近时,零值绝缘子引起的电场畸变不会相互作用。因此,当双联绝缘子串其中一串存在零值绝缘子时,不会影响另一串零值绝缘子的检测。同时,双联绝缘子串、耐张绝缘子串均可通过测量其空间电场分布来进行零值绝缘子检测。

1.3 无人机及电场探头对电场分布的影响

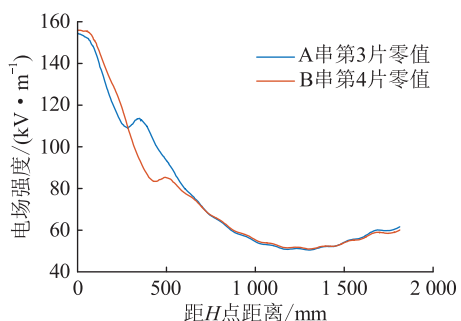
为研究无人机飞入时,无人机本体及电场探头对绝缘子串周围电场分布的影响,文中建立无人机



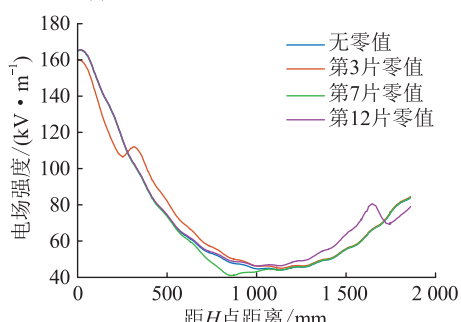
(a) A串含零值时的电场分布



(b) B串含零值时的电场分布



(c) A、B串同时含零值时的电场分布



(d) 耐张绝缘子串电场分布

图4 双联、耐张绝缘子串空间电场分布

Fig.4 Spatial electric field distribution of double-linked and tensile insulator strings

三维仿真模型,无人机本体及电场探头绝缘部分、探头表面电极相对介电常数分别取 8、1 000。由文献[25]可得有效检测距离为距绝缘子串中轴 200~300 mm,故仿真分析无人机携带电场探头飞入时,距离绝缘子串中轴 200 mm、300 mm 情况下绝缘子串周围的电场分布特性,结果如图 5 所示。由图 5 可知,无人机携带电场探头飞入时,绝缘子串周围电场仍为 U 型分布,且与无无人机情况下的数值差

异较小,因此对绝缘子串的空间电场分布无影响。

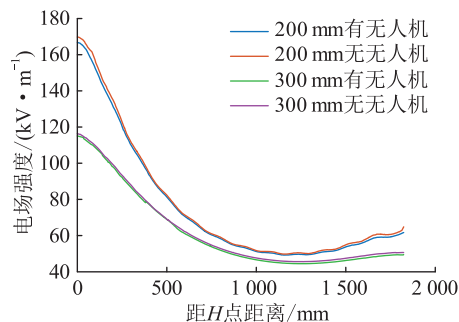


图5 绝缘子串空间电场分布

Fig.5 Spatial electric field distribution of insulator string

1.4 路径抖动的影响分析

无人机的检测路径为 $H-L$,但由于风力等因素影响,无法实现完全直线飞行。假设在飞行过程中突然发生偏移,以距离绝缘子串中轴 200 mm 为基准,分别设置水平偏移距离为 10 mm、30 mm、50 mm,如图 6 所示。在此 3 种情况下仿真分析含零值绝缘子的电场分布特性,结果如图 7 所示。

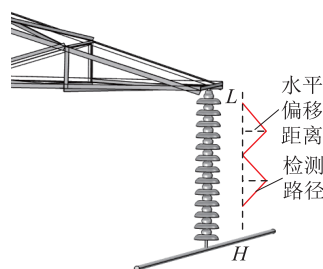
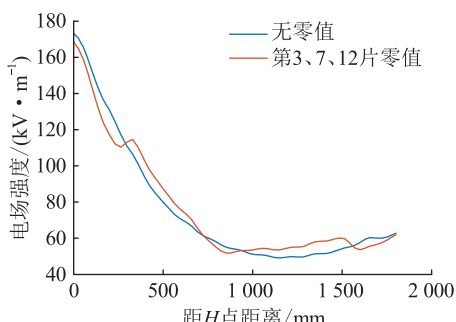
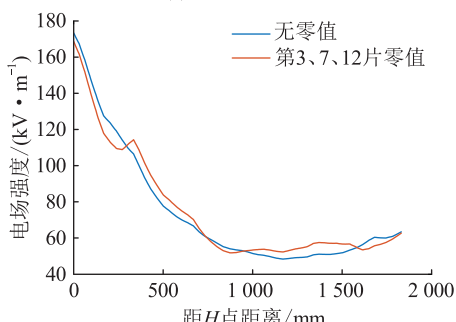


图6 路径抖动示意

Fig.6 Schematic diagram of path jitter



(a) 水平偏移10 mm



(b) 水平偏移30 mm

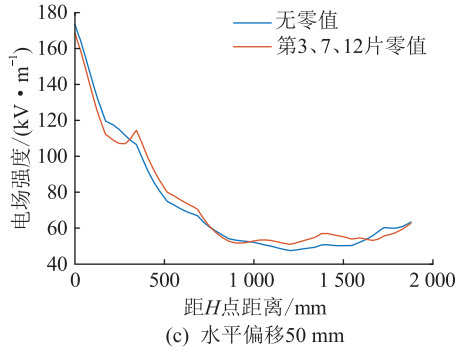


图7 路径抖动下绝缘子串电场分布

Fig.7 Distribution of electric field of insulator string under path jitter

由图7可知,在水平偏移距离为10 mm、30 mm的情况下,零值绝缘子引起的电场畸变依然明显;当水平偏移距离达到50 mm时,设置低压端第12片绝缘子开始偏移,其零值特征不再明显,影响了检测结果的可靠性。因此,检测路径的水平偏移距离应控制在50 mm以内。

2 零值绝缘子识别算法

无人机现场实测沿串飞行期间,探头测得的是一系列以时间为顺序的电场信号数据点,且这些数据点会由于白噪声干扰而杂散波动。为利用这一系列数据点识别零值片的电场变化特征,并且直接得到零值片对应的位置序号,文中提出相应的零值绝缘子识别算法以及建立Labview后台检测系统。方法如下。

(1) 统一数据长度。检测中无人机的飞行速率、路径等因素造成后台接收的有效数据点个数会有差异。为排除该因素,采用三次样条插值对原始数据进行长度统一,统一至 Np 个数据点。其中 N 为绝缘子片数; p 为每片绝缘子数据点数。根据实际线路情况,文中设置 N 为13, p 为30。

假设,接收到电场强度离散数据为数组 $E[n]$,其数据个数为 n ,则将 $1 \sim Np$ 均分成 n 个点,记为 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$),其中 $x_1 = 1, x_n = Np$ 。然后,对 $x_i - E[n]$ 进行三次样条插值法求解,其边界条件为:

$$\begin{cases} S_{i-1}(x_{i-1}) = E[i-1] \\ S_{i-1}(x_i) = E[i] \\ S'_{i-1}(x_i) = S'_i(x_i) = E'[i-1] \\ S''_{i-1}(x_i) = S''_i(x_i) = E''[i] \end{cases} \quad (1)$$

将 $i = 1, 2, \dots, n$ 代入式(1)依次求解,可得样条函数 $S_{i-1}(x_i)$,分别对应 $[1, x_2], [x_2, x_3], \dots, [x_{n-1}, Np]$ 共 $n-1$ 个自变量区间。继而,将 $x_i = 0, 1, \dots, Np$ 代入样条函数,得到 Np 个数值,形成

$E'[n]$ ($n = 1, 2, \dots, Np$)。

(2) 数据去噪。为使曲线平滑、滤除外部环境干扰引起的毛刺,采用离散小波分解与重构算法对检测数据的数组进行分解与重构,滤除高频分量。以统一数据长度后的数组为例,为保证滤波效果与计算速度,以DB5小波基为小波函数,对数组进行分解。

通过DB5小波基函数将 $E'[t]$ ($t = 1, 2, \dots, Np$)在不同尺度度量空间 j 上进行分解,得到 $j-1$ 下的系数 $A_1(k)$ 和 $D_1(k)$ 。设 $\Phi_{j,k}(t)$ 为基函数; $\Phi_{j-1,k}(t)$ 为第一层分解后的尺度函数; $\omega_{j-1,k}(t)$ 为第一层分解后的小波函数,即:

$$E'[t] = \sum_k A_0(k) \Phi_{j,k}(t) =$$

$$\sum_k A_1(k) \Phi_{j-1,k}(t) + \sum_k D_1(k) \omega_{j-1,k}(t) \quad (2)$$

式中: $A_0(k)$ 为原始信号, k 为位置指标,由小波基的滤波器系数决定。

对式(2)进行多层分解后,得到最终的尺度函数,剔除小波分量,从而保留检测数据的主要信息,滤除外部环境干扰引起的毛刺。

分解层数决定了对信号重构的效果,若分解层数过多则零值绝缘子的零值特征会被滤除,若分解层数过少则去噪、滤波效果会较差。第2片零值时小波分解的结果如图8所示。

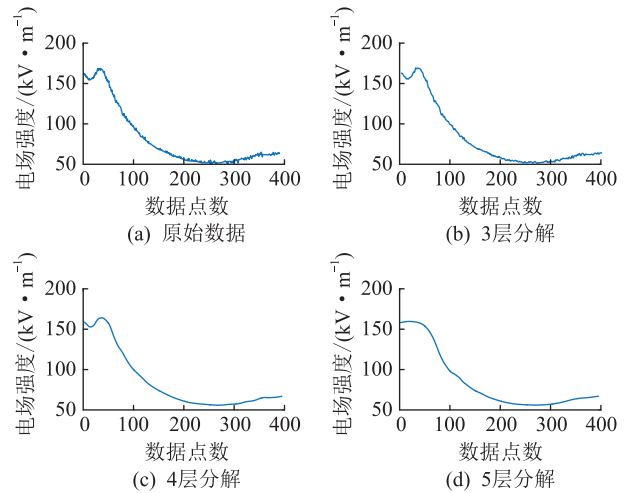


图8 小波分解结果

Fig.8 Results of wavelet decomposition

对于添加了典型白噪声的原始电场分布数据,4层分解时,曲线光滑程度较好,同时也保留了零值绝缘子的电场曲线分布特征;5层分解时,零值绝缘子的零值特征消失;而3层分解时,曲线依然存在噪声、毛刺现象。因此,文中采取4层分解,则有:

$$E''[t] = \sum_k A_4(k) \Phi_{j-4,k}(t) \quad (3)$$

根据尺度函数的多元线性回归方程 (multiple regression analysis, MRA), 有:

$$\Phi_{j,k}(t) = \sum_{n=1}^k h_0(n-2k)\Phi_{j-1,n}(t) \quad (4)$$

式中: $h_0(\cdot)$ 为低通滤波系数, 由 DB5 小波基函数得到, 继而可得:

$$A_j(k) = \sum_{n=1}^k A_{j-1}(n)h_0(n-2k) \quad (5)$$

通过式(5)迭代计算可以得到 $A_4(k)$, 代入式(3)可得去噪、消除毛刺数据的电场结果 $E''[t]$ 。

(3) 电场分布曲线重构。经去噪后, 得到光滑曲线 $E''[t]$, 为把电场分布曲线转换为绝缘子对应的位置信息, 将曲线分为 N 段, 将每段数据的平均值作为特征量反映绝缘子的零值信息, 如式(6)所示, 其中, α 受终端接受数据的时间影响, 数值越小, 数据接受的时间越早, $\alpha = 2, 3, \dots, 13$ 。处理后的结果如图 9 所示。

$$\begin{cases} \overline{E''_1} = \frac{E''_1[1, 2, \dots, p]}{p} \\ \overline{E''_\alpha} = \frac{E''_\alpha[(\alpha-1)p+1, (\alpha-1)p+2, \dots, \alpha p]}{p} \end{cases} \quad (6)$$

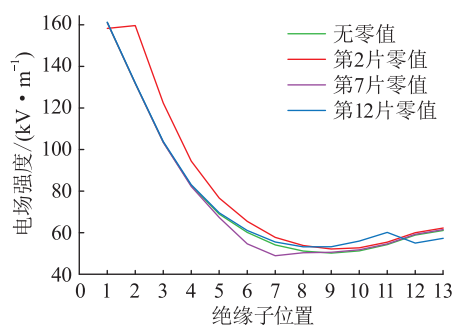


图 9 含零值绝缘子电场分布

Fig.9 Electric field distribution of insulator with zero value

由图 9 可以知道, 良好绝缘子串的电场分布相对光滑, 而零值绝缘子串的电场分布存在明显的尖点特征, 由此得到包含绝缘子位置信息的电场分布曲线。

(4) 零值片特征阈值提取与识别。图 9 中, 零值片与其相邻两片构成的电场畸变尖点为凹陷或者变平特征, 而不是凸起。因此, 为进一步对零值片的特征阈值进行提取与识别, 在图 9 的基础上, 计算相邻区间的电场变化系数以反映尖点形状特征, 并计算变化系数的差值以反映尖点的幅度。以第 a 片绝缘为例, 计算相邻区间电场变化系数 $\Delta E_{(a,a-1)}$ 、 $\Delta E_{(a,a+1)}$ 与其差值 σ , 表达式如式(7)所示。

$$\begin{cases} E_a = \overline{E''_\alpha} \\ \Delta E_{(a,a-1)} = 100(E_a - E_{a-1})/E_a \\ \Delta E_{(a,a+1)} = 100(E_a - E_{a+1})/E_a \\ \sigma = ||\Delta E_{(a,a+1)}| - |\Delta E_{(a,a-1)}|| \end{cases} \quad (7)$$

式中: a 为待算绝缘子序号; $a-1$ 、 $a+1$ 为相邻区间绝缘子序号。

依据仿真结果, 可得沿 $H-L$ 检测的第 1 片至第 13 片绝缘子的区间电场变化系数, 如表 2 所示。

表 2 绝缘子区间电场变化系数差值

Table 2 Difference of electric field variation coefficient between insulator zones

a	第 a 片绝缘子正常		第 a 片绝缘子为零值	
	变化系数	σ	变化系数	σ
1	$\Delta E_{(1,2)} = 14.46$		$\Delta E_{(1,2)} = 21.67$	
2	$\Delta E_{(2,1)} = -15.67$	0.73	$\Delta E_{(2,1)} = -0.63$	22.49
	$\Delta E_{(2,3)} = 16.40$		$\Delta E_{(2,3)} = 23.12$	
3	$\Delta E_{(3,2)} = -15.22$	0.15	$\Delta E_{(3,2)} = -5.18$	12.09
	$\Delta E_{(3,4)} = 15.37$		$\Delta E_{(3,4)} = 17.27$	
4	$\Delta E_{(4,3)} = -14.59$	1.14	$\Delta E_{(4,3)} = -6.80$	4.18
	$\Delta E_{(4,5)} = 15.73$		$\Delta E_{(4,5)} = 10.98$	
5	$\Delta E_{(5,4)} = -16.09$	0.27	$\Delta E_{(5,4)} = -9.60$	6.02
	$\Delta E_{(5,6)} = 15.82$		$\Delta E_{(5,6)} = -3.58$	
6	$\Delta E_{(6,5)} = -14.70$	0.39	$\Delta E_{(6,5)} = 8.90$	7.09
	$\Delta E_{(6,7)} = 15.09$		$\Delta E_{(6,7)} = -1.81$	
7	$\Delta E_{(7,6)} = -13.23$	2.94	$\Delta E_{(7,6)} = -12.50$	8.33
	$\Delta E_{(7,8)} = 16.17$		$\Delta E_{(7,8)} = 4.17$	
8	$\Delta E_{(8,7)} = -15.89$	1.10	$\Delta E_{(8,7)} = -13.64$	5.55
	$\Delta E_{(8,9)} = 16.99$		$\Delta E_{(8,9)} = 8.09$	
9	$\Delta E_{(9,8)} = -15.05$	0.98	$\Delta E_{(9,8)} = -11.36$	4.27
	$\Delta E_{(9,10)} = -14.07$		$\Delta E_{(9,10)} = 7.09$	
10	$\Delta E_{(10,9)} = 16.02$	2.11	$\Delta E_{(10,9)} = -8.89$	4.44
	$\Delta E_{(10,11)} = -13.91$		$\Delta E_{(10,11)} = 13.33$	
11	$\Delta E_{(11,10)} = 15.58$	0.90	$\Delta E_{(11,10)} = -8.33$	6.25
	$\Delta E_{(11,12)} = -16.48$		$\Delta E_{(11,12)} = 14.58$	
12	$\Delta E_{(12,11)} = 15.82$	1.03	$\Delta E_{(12,11)} = -9.09$	5.45
	$\Delta E_{(12,13)} = -14.79$		$\Delta E_{(12,13)} = -3.64$	
13	$\Delta E_{(13,12)} = 13.21$		$\Delta E_{(13,12)} = 21.67$	

由图 9、表 2 可知, 当某片绝缘子为零值时, 其电场畸变特性有共同特征, 即 $\Delta E_{(a,a-1)}$ 、 $\Delta E_{(a,a+1)}$ 同为负数或异号, 这反映了尖点的形状; 对应的电场变化系数差值 σ 均大于 4, 这反映了尖点的幅度。对于第一片与最后一块绝缘子, 无差值 σ , 其电场变化系数大于 20 则可判定为零值绝缘子。因此, 文中零值绝缘子的识别方法可概括为: 在统一数据长度、信号去噪、获得包含绝缘子位置信息的空间电场分布曲线后, 计算其相邻区间的电场变化系数 $\Delta E_{(a,a-1)}$ 、 $\Delta E_{(a,a+1)}$ 以及 σ , 根据相应阈值进行零值识别。

3 实验室及现场检测验证

为验证上述检测方法的可靠性,基于文中所提的零值绝缘子识别方法搭建后台检测系统,并在实验室以及现场进行测试。

3.1 电场探头校准

利用电场探头在平行电极板中进行测量校准,示波器采样所得波形如图 10(a)所示。其中电场探头的工作原理为:探头处于工频电场中时,其电极表面产生感应电荷,处理感应电荷可得与其所处电场成比例关系的微弱电压信号,从而得到待测点的电场强度。校准结果如图 10(b)所示,可知电场探测装置测得的电场强度与实际值的误差远低于 9%,满足工程运用要求。

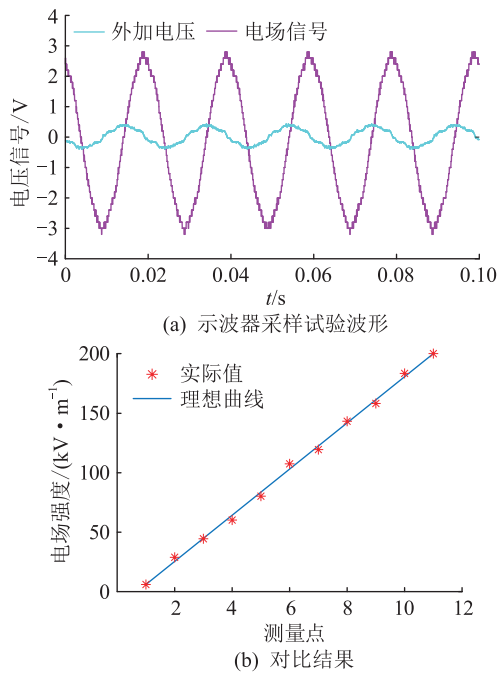


图 10 校准试验

Fig.10 Calibration experiment

3.2 实验室检测

将 8 片 XP-160 瓷绝缘子成悬垂串挂至横担,预先设置低压端第 7 片为零值绝缘子,如图 11 所示。由于实验室条件限制且电压等级及绝缘子片数不影响绝缘子串周围的空间电场分布,试验施加电压为 90 kV。根据文献[20],控制牵引绳与绝缘子串中轴距离约为 200 mm,电场探测装置通过滑轮与牵引绳固定。实验过程中检测装置的检测路径为 $L-H$,检测起始点绝缘子序号按照传输数据的时间前后进行编号,由后台系统接收电场探测装置传送的数据,并采用文中算法进行分析识别,检测结果如图 12 所示。

由图 12 可知,在文中识别算法处理过的零值绝



1. 滑轮 2. 电场探测装置 3. 模拟零值绝缘子

图 11 实验室检测设置

Fig.11 Laboratory testing setup

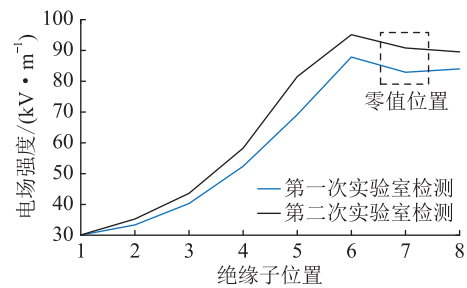


图 12 零值绝缘子实验室检测结果

Fig.12 Laboratory test results of zero value insulator

缘子串电场分布曲线中,其零值片附近的电场强度畸变明显,且在 2 次检测结果下,第 7 片绝缘子处的电场变化系数差值 σ 分别为 5.93、5.54,序号 7 对应的 $\Delta E_{(7,6)}$ 、 $\Delta E_{(7,8)}$ 同为负数,则认定该片绝缘子为零值绝缘子。2 次检测识别的输出结果与实际情况相同。

3.3 现场检测

现场检测采用 A680POR 型号四旋翼无人机,其底部加装吊仓及伸缩式探测杆,电场探头固定在伸缩杆前端,如图 13 所示。



1. 无人机本体 2. 吊舱 3. 空间电场探头
4. 测距模块 5. 检测主板 6. 手持终端
7. 锂电池

图 13 无人机探测系统

Fig.13 UAV detection system

采用该结构是为了使无人机与高压端保持足够的安全距离,同时考虑机身、荷载的配重平衡,从

而保证无人机飞行平稳。无人机零值检测流程如图 14 所示。当无人机飞至绝缘子串附近时,由地面站操作员控制伸缩杆向绝缘子靠近,同时操作界面会显示与绝缘子伞裙外沿的距离,控制检测距离不变,无人机的检测路径为绝缘子串低压端起始点 L 至高压端结束点 H 。

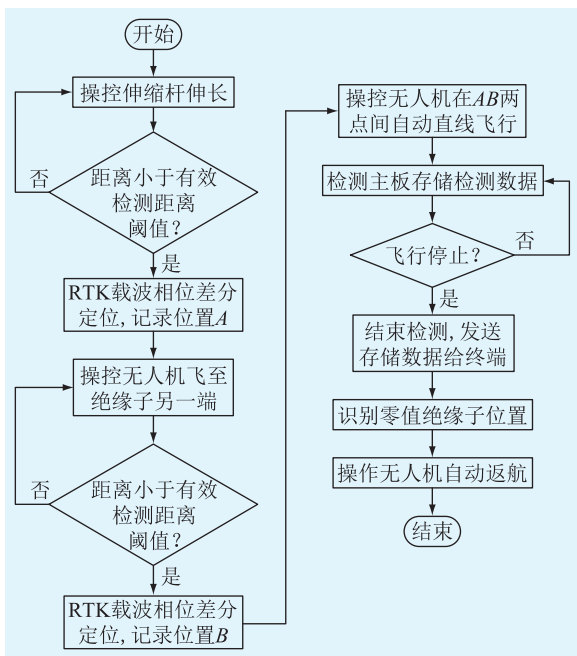


图 14 无人机零值检测流程

Fig.14 UAV zero-value detection process

利用无人机装载电场探测装置,选择某 220 kV 线路双联、耐张绝缘子串进行 2 次现场实测。该线路绝缘子片数为每串 20 片,型号为 XP-70。该杆塔在例行检修时已用火化间隙检测出零值绝缘子,位置处于外侧第 7 片。

考虑到路径抖动的影响,在无风环境下开展无人机检测试验,并通过在无人机主体安装的实时动态(real-time kinematic, RTK)载波相位差分定位技术模块,将悬停时的位移控制在 30 mm 以内。利用手持终端与无人机控制主板通信,控制无人机飞行路径由低压端定位点自动水平飞行至绝缘子串中部定位点,根据文献[20]使检测距离控制在 250 mm 左右。通过后台检测系统读取由电场探测装置传送的检测信息。

出于技术成熟度及运行安全角度,飞行检测时的路径并未完全到达高压端,选择了低压端为起始点,到中部第 13 片绝缘子为结束点进行水平飞行。按照文中所提算法进行分析识别,2 次典型的检测结果如图 15 所示。

图 15 中,对于第一次现场检测结果,其第 7 片绝缘子对应差值 σ 为 6.41,且 $\Delta E_{(7,6)} > 0, \Delta E_{(7,8)} < 0$,

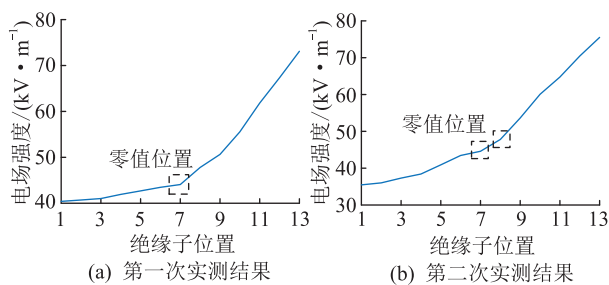


图 15 零值绝缘子现场检测结果

Fig.15 Field test results of zero value insulator

满足判定条件,识别到其为零值绝缘子;第二次检测结果中,第 7 片绝缘子的 σ 为 4.16, $\Delta E_{(7,6)} > 0, \Delta E_{(7,8)} < 0$,第 8 片绝缘子的 σ 为 4.15, $\Delta E_{(8,7)} > 0, \Delta E_{(8,9)} < 0$,识别到第 7、8 片为零值绝缘子。检测结果误差在 1 片以内,证明文中提出的基于无人机的绝缘子带电零值检测方法在现场中有一定的效果。分析认为,2 次检测结果存在偏差是因为在实际飞行操作过程中,RTK 载波相位差分定位模块自身存在误差,不同次的检测路径会有一定偏移,难以保持一致,造成检测曲线存在偏差。

4 结论

为实现基于无人机的零值绝缘子非接触式检测,文中研究了绝缘子串型、路径抖动、无人机本体对零值绝缘子检测的影响,提出了基于无人机的零值绝缘子识别算法,开展了现场检测试验,得到结论如下:

(1) 针对双联绝缘子串,其中一串产生零值绝缘子时不会影响另一串的电场分布;当 2 串同时产生零值绝缘子时,由其引起的电场波动不会相互影响;绝缘子串的布置方式不会影响零值绝缘子的检测;

(2) 利用无人机进行检测时,检测路径水平偏移不应超过 50 mm,且无人机本体及电场探测装置不会影响绝缘子串的空间电场分布;

(3) 文中通过数据预处理、小波去噪及特征参量提取完成零值绝缘子识别算法,并通过实验室检测和现场检测,证明该方法可行、误差小。

文中所提方法仍有一定的改进空间,考虑到现场绝缘子表面污秽状态的影响,建议选择干燥晴朗天气进行检测;考虑到无人机检测过程中姿态扰动等问题,后续可采取全线激光点云技术,建立毫米级的三维模型,使无人机沿对应点位自主飞行检测,控制检测路径的偏差;针对文中方法对低值绝缘子进行检测会出现漏检的问题,后续会提高检测设备的精度,避免漏检现象的出现。

参考文献:

- [1] 关志成,刘瑛岩,周远翔. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
GUAN Zhicheng, LIU Yingyan, ZHOU Yuanxiang. Insulator and external insulation of power transmission and transformation equipment[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2006.
- [2] 曾磊磊,张宇,曾鑫,等. 复合绝缘子硅橡胶伞裙老化状态评估方法综述[J]. 电瓷避雷器,2022(2):139-145,152.
ZENG Leilei, ZHANG Yu, ZENG Xin, et al. Aging state evaluation methods for silicone rubber sheds of composite insulators[J]. Insulators and Surge Arresters,2022(2):139-145,152.
- [3] 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.
- [4] 姜云土,韩军,丁建,等. 基于多特征融合的玻璃绝缘子识别及自爆缺陷的诊断[J]. 中国电力,2017,50(5):52-58,64.
JIANG Yuntu, HAN Jun, DING Jian, et al. The identification and diagnosis of self-blast defects of glass insulators based on multi-feature fusion[J]. Electric Power,2017,50(5):52-58,64.
- [5] 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.
- [6] 律方成,牛雷雷,王胜辉,等. 基于紫外成像和改进YOLOv3的瓷悬式绝缘子放电严重程度评估[J]. 高电压技术,2021,47(2):377-386.
LYU Fangcheng, NIU Leilei, WANG Shenghui, et al. Discharge severity assessment of porcelain suspension insulators based on UV images and improved YOLOv3[J]. High Voltage Engineering,2021,47(2):377-386.
- [7] 李特,陶瑞祥,张锐,等. 典型发热缺陷复合绝缘子红外特征及无人机红外测试参数选择[J]. 高电压技术,2022,48(3):865-875.
LI Te, TAO Ruixiang, ZHANG Rui, et al. Infrared characteristic of typical composite insulator heating defects and selection of field unmanned aerial vehicle infrared test parameters[J]. High Voltage Engineering,2022,48(3):865-875.
- [8] 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.
- [9] 彭子健,李宁,李娜,等. 风速和温度对红外热像检测绝缘子的影响分析[J]. 电瓷避雷器,2019(3):197-203.
PENG Zijian, LI Ning, LI Na, et al. Analysis of effect of wind speed and temperature on infrared thermal image detection of insulators[J]. Insulators and Surge Arresters,2019(3):197-203.
- [10] HE H Y, HU Z, WANG B Z, et al. A contactless zero-value insulators detection method based on infrared images matching[J]. IEEE Access,8:133882-133889.
- [11] 王胜辉,牛雷雷,李浩,等. 基于放电紫外成像特征的污秽线路盘形绝缘子绝缘状态评估[J]. 高压电器,2019,55(2):201-207.
WANG Shenghui, NIU Leilei, LI Hao, et al. Insulation condition evaluation of contaminated disc insulator for transmission lines based on the characteristic of discharge UV imaging characteristics[J]. High Voltage Apparatus,2019,55(2):201-207.
- [12] 贾志东,王林军,尚晓光,等. 基于紫外成像技术的瓷绝缘子串放电程度量化评估[J]. 高电压技术,2017,43(5):1467-1475.
JIA Zhidong, WANG Linjun, SHANG Xiaoguang, et al. Quantitative assessment of porcelain insulator string discharge degree based on UV imaging technology[J]. High Voltage Engineering,2017,43(5):1467-1475.
- [13] ZHANG Z J, ZHANG W, ZHANG D D, et al. Comparison of different characteristic parameters acquired by UV imager in detecting corona discharge[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(3):1597-1604.
- [14] 马君鹏,李硕,孙兴涛,等. 基于超声导波的盆式绝缘子缺陷检测技术可行性研究[J]. 南方电网技术,2018,12(10):7-13.
MA Junpeng, LI Shuo, SUN Xingtao, et al. Feasibility research of defect testing for basin insulator based on ultrasonic guided wave[J]. Southern Power System Technology,2018,12(10):7-13.
- [15] 马君鹏,孙兴涛,李硕,等. 基于超声导波的盆式绝缘子缺陷检测及定位[J]. 高电压技术,2019,45(12):3941-3948.
MA Junpeng, SUN Xingtao, LI Shuo, et al. Detection and location for defects of basin-type insulator based on ultrasonic guided wave[J]. High Voltage Engineering,2019,45(12):3941-3948.
- [16] 万勋,刘正庭,龚政雄,等. 基于微波透射法的瓷质绝缘子XWP-70劣化检测[J]. 电瓷避雷器,2020(4):207-214.
WAN Xun, LIU Zhengting, GONG Zhengxiong, et al. Microwave transmission method for detecting deteriorated ceramic insulators[J]. Insulators and Surge Arresters,2020(4):207-214.
- [17] 王力农,简思亮,宋斌,等. 基于电场分布测量法的输电线路劣化绝缘子检测研究[J]. 电瓷避雷器,2019(4):199-205,212.
WANG Linong, JIAN Siliang, SONG Bin, et al. Research on the detection of faulty insulator in transmission line based on electric field distribution measurement[J]. Insulators and Surge Arresters,2019(4):199-205,212.
- [18] 曹雯,栾明杰,申巍,等. 绝缘子芯棒碳化对其电场分布特性的影响[J]. 电机与控制学报,2018,22(11):89-95.

- CAO Wen, LUAN Mingjie, SHEN Wei, et al. Effects of carbonization of insulator core rod on properties of electric field distribution [J]. Electric Machines and Control, 2018, 22 (11): 89-95.
- [19] 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.
- [20] 王力农, 李小春, 宋斌, 等. 输电线路劣化绝缘子电场分布仿真与检测研究[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 49-55, 62.
WANG Linong, LI Xiaochun, SONG Bin, et al. Researches of simulation and detection for electric field distribution along faulty insulator on transmission line [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 49-55, 62.
- [21] 王海涛, 郑雷, 李健, 等. 500 kV 瓷绝缘子串的分体式低/零值检测机器人优化设计与实测[J]. 高电压技术, 2020, 46 (9): 3035-3043.
WANG Haitao, ZHENG Lei, LI Jian, et al. Optimization design and measurement test of a split low/zero insulator detection robot for 500 kV porcelain insulator strings [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3035-3043.
- [22] 蔡炜, 郑雷, 殷鹏翔, 等. 分体式绝缘子检测机器人的电场分析及测试试验[J]. 中国电力, 2018, 51(7): 43-48, 127.
CAI Wei, ZHENG Lei, YIN Pengxiang, et al. The electric field analysis and testing experiments of split-type insulator detection robot [J]. Electric Power, 2018, 51(7): 43-48, 127.
- [23] 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.
- [24] 白建军, 张宏嘉, 余彦杰, 等. 基于无人机红外检测的复合绝缘子劣化诊断方法[J]. 电工技术, 2020(9): 132-134.
BAI Jianjun, ZHANG Hongjia, SHE Yanjie, et al. Method of degradation diagnosis of composite insulators based on unmanned aerial vehicle with infrared detection [J]. Electric Engineering, 2020(9): 132-134.
- [25] 黄宵宁, 刘锦, 杨成顺, 等. 典型表面状态下的绝缘子空间电场特性研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 144-150.
HUANG Xiaoning, LIU Jin, YANG Chengshun, et al. Electric field characteristics of polluted insulator space under typical surface state [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 144-150.

作者简介:



张东东

张东东(1991),男,博士,讲师,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: zhangdd@njit.edu.cn);

万武艺(1998),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术;

刘欣(1993),男,硕士在读,研究方向为输配电外绝缘。

Live zero value detection technology of insulator string based on UAV

ZHANG Dongdong¹, WAN Wuyi¹, LIU Xin¹, HUANG Xiaoning¹, GAO Tuoyu², ZHANG Zhijin³

(1. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Extra-high Voltage Branch Company, Nanjing 211102, China; 3. State Key Laboratory of Transmission and Distribution Equipment and System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to improve the detection efficiency of zero value insulator of transmission line, the unmanned aerial vehicles (UAV) equipped with an electric field detection device can realize live detection without climbing the tower. Firstly, the 1:1 simulation model of 220 kV porcelain insulator string is established. Through Comsol finite element numerical simulation, the influence of string type, path jitter, UAV and electric field probe on the spatial electric field distribution of insulator string is analyzed. Then, the identification model and background detection system of zero value insulator are established. Finally, the laboratory and field measurements are carried out. The results show that when double insulator strings have zero value insulators at the same time, their spatial electric field distribution does not affect each other. The offset distance of straight line detection path should be less than 50 mm during UAV flight. The space electric field distribution of insulator string is not affected by UAV and electric field probe. Using the zero-value insulator detection algorithm proposed in this paper, the field detection of zero-value insulators is realized by the UAV equipped with an electric field detection device.

Keywords: finite element simulation; insulator; zero-value; spatial electric field; unmanned aerial vehicles; non-contact detection

(编辑 陆海霞)