

UHVDC 输电线路低零值绝缘子带电检测方法

郑云龙¹, 罗日成¹, 邹明²

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 国网湖南省电力有限公司检修公司, 湖南 长沙 410018)

摘要:针对特高压直流输电线路绝缘子绝缘电阻在线带电检测的难题, 提出一种利用机械装置带电测量特高压直流输电线路绝缘子绝缘电阻的新方法, 并研发出一款输电线路低零值绝缘子检测机器人。该方法利用等电位作业的理念, 通过机器人的双臂以及机身对待测绝缘子搭建旁路回路, 避免泄露电流对检测回路的干扰, 提高测量的精度。利用机器人自身的机械结构设计以及硬件电路的配合, 完成对绝缘子阻值的测量、存储与传输; 同时, 建立离散拟合函数对数据精确化, 保证检测结果的准确性; 最后研制出样机进行对比试验。试验结果表明: 机器人测量法能准确地测量运行中的绝缘子阻值, 且误差控制在 5% 以内, 进而分辨绝缘子的优劣状况, 实现低零值绝缘子的在线预警。

关键词: 绝缘子; 带电作业; 检测机器人; 现场试验

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2022.01.023 中图分类号: TM216 文章编号: 1673-9140(2022)01-0197-08

Research on live detection method of zero insulator for UHVDC transmission line

ZHENG Yunlong¹, LUO Richeng¹, ZOU Ming²

(1. School of Electric & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Maintenance Company of State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410018, China)

Abstract: In order to solve the on-line detection problem of insulator insulation resistance for UHVDC transmission lines, a new method of measuring insulation resistance of UHVDC line insulators by using live robots is proposed, and a low zero value insulator detection robot for transmission lines is developed. By using the method of equipotential operation, a bypass circuit for the tested insulator is built with the arms and body of the robot. The interference of leakage current to the tested circuit is eliminated and the measurement accuracy is improved by using this method. The measurement, storage and transmission of insulator resistance information are completed by using the mechanical structure design of the robot itself and the cooperation of hardware circuit. Meanwhile, the discrete fitting function is established to accurately calculate the data, thus the accuracy of the test results is ensured. Finally, a prototype is developed for comparative test. The test results show that the robot measurement method can accurately measure the insulators resistance in operation, and the error is controlled within 5%. Then, the operating condition of insulators can be judged, and the online warning of low-zero insulators can be realized.

Key words: insulator; live working; detecting robot; field test

随着国民经济水平的快速发展以及物质水平的急剧提升,整个经济社会都对电力的需求变得愈发倚重^[1]。近半个世纪以来,中国的电力工业进入了快车道,得到了突飞猛进的发展,不仅是输电容量逐渐增大,输送距离不断增加,而且输电等级也在迅速提升,现如今中国的交流输电实际运行电压最高已达到了1 000 kV,并且直流方面±800 kV 直流输电线路已有多条实际投入运行^[2]。与此同时,伴随着输电容量逐渐增大,输送距离不断增加以及输电等级的迅速提升,使得电网输电范围不断扩大,对电网的安全可靠运行的要求也会越来越高。一旦电网发生运行故障,其所造成的影响范围会更广,对社会经济发展以及民众的社会生产生活造成的影响也随之扩大^[3-4]。特高压电网作为中国能源互联网输电线路的主干网架,其运行故障大都是由于输电线路的绝缘不良所引起的。绝缘子是特高压输电线路绝缘的薄弱环节,同时又是特高压输电线路中使用量最大的部件,虽然其结构简单,成本低廉,但重要性不逊于其他任何设备和器件。文献[1]通过对实际线路运行中的绝缘子进行调查分析,得出在自然环境中长期运行的绝缘子,因受到各种外力以及自然环境的影响,容易出现低、零值绝缘子(包括内部裂隙、伞裙表面破损、绝缘材质性能下降等),造成输电线路的杆塔某侧的绝缘子串的整体绝缘性能急剧下降,导致运行电压作用下发生输电线路绝缘闪络。若经常因此故障造成电网的非计划停运,这会对大电网的安全稳定运行构成极大的隐患并带来不可预估的社会经济损失。因此,在当前形势下,开展特高压输电线路绝缘子的检测工作刻不容缓。

目前,国内外对低零值绝缘子的技术检测手段主要分间接与直接检测2种。间接检测主要有观察法、超声波检测法、紫外成像法以及红外测温法等,直接检测法主要包括火花叉法、泄露电流检测法以及绝缘电阻测定法等。文献[2]指出,观察法只能发现绝缘子表面明显的缺陷,地面观察不可靠,不登塔难以发现内绝缘故障;文献[3]通过对超声波检测技术的说明,指出其存在环境声波耦合,声波衰减以及超声换能器本身的性能等问题,与此同时,嘈杂的环境会对绝缘子缺陷所发出的声波产生干扰,不适用于现场检测作业;文献[4]提出紫外成像技术适合检测绝缘子表面局部放电,具有较好的效果但设备价

格却过于昂贵,而红外成像法不仅材料设备费用高昂,而且容易受到外部自然环境的影响,对阳光、温度、湿度以及风速都有一定的要求,难以发现绝缘子早期的界面缺陷,无法保证检测的精度;文献[5]指出,由于受许多其他因素的干扰,测量泄露电流不能准确地判断绝缘子的裂化程度且泄露电流法的设备造价过高,不具有实际可行性。

本文通过研究特高压直流输电线路低零值绝缘子形成机理,结合目前已有研究技术的优劣^[4-6],提出一种新的在线带电检测绝缘子的方法,设计制造一款低零值绝缘子带电检测机器人,能够准确检测绝缘子阻值,精准识别输电线路绝缘子串中的零低值绝缘子,其不但可以大大地节约成本且能大幅度减少劳动力^[7-9],打破传统的人工测量难题,对后续带电作业的研究也具有一定的参考价值。

1 绝缘子劣化机理

瓷质悬式绝缘子主要由瓷件、铁帽、钢脚以及锌套等部件组成^[10]。其中的胶合剂主要包括水泥、石英石和瓷砂等主要成分,而瓷件的绝缘电阻率最大,是绝缘子中起电气绝缘的主要物质部件,它的电路等效图可看成是大电容,体电阻与表面电阻并联组成的,其电阻阻值远远大于500 MΩ^[11-13]。而对于直流输电线路而言,大部分电流主要流经阻性支路,仅小部分杂散电流流经容性支路。

研究表明,低零值绝缘子主要由制造工艺、工作环境和物理与化学反应等因素造成^[14-16]。实际运行中输电线路中的绝缘子会受到各种因素的影响(自然环境、线路的机械应力等),导致整个绝缘子串中易产生绝缘劣化的绝缘子,这将进一步降低绝缘子串的预留裕度甚至导致整条线路的绝缘性能大大降低,从而导致低零值绝缘子形成的速率进一步加快,对线路产生严重危害。在直流输电线路中,绝缘子等效电路以阻性阻抗为主,其体电阻流过的泄露电流随绝缘子串总电阻值变化而改变^[17-18]。特高压输电线路的绝缘子串电压降一般呈U型曲线,如图1所示。绝缘子串中存在零值绝缘子时每片绝缘子上的电压分布发生变化,导致每片的承受电压加大。零值绝缘子体电阻为零则表面电压降落也为零,其等同于导体,直接影响绝缘子串中的泄露电流^[19-20]。

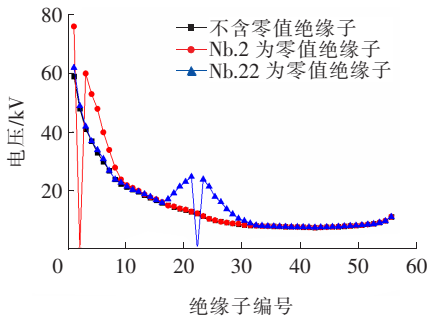


图 1 绝缘子电压降落

Figure 1 Voltage drop of insulators

2 机器人的结构与运动分解

2.1 整体的机械结构

低零值绝缘子带电检测机器人的整体机械结构可分为机械手臂、绝缘连杆、本体机身以及检测指针四部分,如图 2 所示。机械手臂采用齿轮齿杆式双手柄设计,通过驱动电机带动丝杆螺母的旋转(图 3(a)),完成抓紧与松开绝缘子钢帽的动作(图 3(b));其中机械手臂的夹爪部分采用的内弧形的凹槽设计(图 3(c)),通过与曲柄滑块的配合(图 3(d)),保证了机械手臂能够稳固可靠的夹持绝缘子钢帽凸槽,确保攀爬运动的安全;绝缘连杆与机械手臂的连接处,利用套杆与活动关节设计出一种柔性结构,可确保机器人在翻越运动中适用度更高;本体机身采用 EGPC204 环氧树脂材料制作而成,外表面均涂上导电漆,使整个机器人形成等电位,从而抑制外部强电场的干扰,并对各检测与驱动部件起承载作用。检测指针部件包括检测探针和工具座两部分,检测探针与绝缘子钢帽形成触点,可为测量电源提供输出支路,并将绝缘子与低零值绝缘子带电检测机器人构成的回路分为 2 个独立回路。

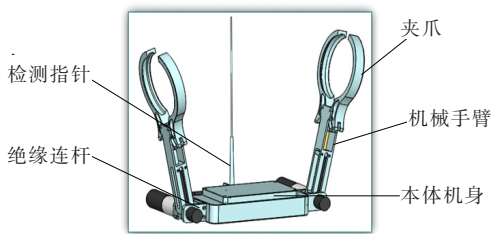


图 2 机器人机械结构

Figure 2 Mechanical structure diagram of robot

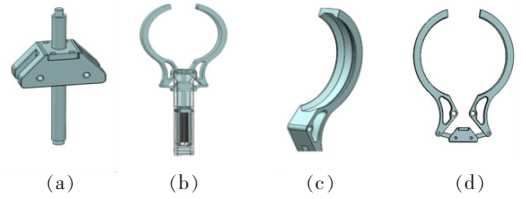


图 3 机械手臂

Figure 3 Robotic arm

2.2 动作分解

当开始检测时(图 4(a)),操控机器人的机械手臂 1 的夹爪闭合抓紧在待检测绝缘子串的第 1 片绝缘子钢帽上,然后再操控机械手臂 2 旋转(图 4(b)),让机械手臂 2 的夹爪闭合抓紧第 3 片绝缘子的钢帽(图 4(c)),同时机身本体电机开始工作带动机械连杆夹紧绝缘子钢帽(图 4(d)),然后机器人中间的检测指针开始启动,转动电压检测指针顶住中间绝缘子的钢帽处(图 4(e)),实现对地 1、2 片绝缘子的电阻测量(图 4(f)),同时完成绝缘子阻值以及位置的信息的储存传送,动作过程如图 4 所示。

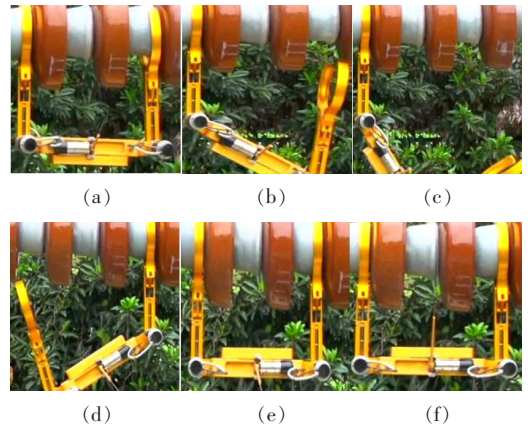


图 4 运动过程

Figure 4 Motion process

具体的动作分解如图 5 所示。机械手臂 1 紧抓第 1 片绝缘子钢帽首端,机械手臂 2 松开并与机身一起保持铅锤状态;绝缘连杆以环氧树脂板为中心,机械手 2 向外侧翻转 135°,使其保持在手臂的夹取状态;再启动机械手臂 1 的旋转电机,使其带动环氧树脂板向外侧翻转 90°,让机械手臂 2 保持在第 2 片绝缘子的钢帽处;紧接着再次启动机械手臂 1 使其反向翻转 45°,使机械夹爪 2 正对第 2 片绝缘子钢帽的凸起处同时夹紧。然后电压检测指针开始动作,电机驱动使其紧紧顶住中间绝缘子钢帽,完成对第 1、2 片绝缘子的检测作业。然后手臂 1 开始松开,

机械手臂2的旋转电机带动环氧树脂板向外侧翻转 90° ,使机械手臂1保持在夹取位置;接着机械手臂1向外翻转 90° ,回到5(a)的起始位置。机器人开始往复运动,完成对第3、4片绝缘子的检测工作,如此往复完成对整个绝缘子串的检测作业。同时,为了保证能监测机器人的作业状况,机身左右两侧嵌入针孔摄像头,将画面进行实时传输,保证机器人能够完全正常作业。

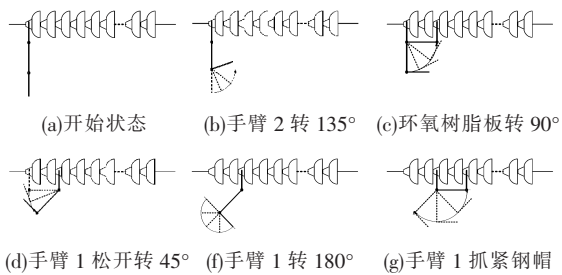


图5 装置动作分解

Figure 5 Decomposition of device movement

3 检测与控制系统

为满足特高压输电线路复杂环境,低零值绝缘子检测机器人需重量轻、省电且能在强电场和强干扰现场在线使用。根据以上所要求,实现检测电流的采集以及绝缘子阻值大小的测量,并通过无线传输的方式将测量数据实时的传输到通信机上,且可通过遥控器智能控制检测机器人的运动步态,系统主控制板如图6所示。同时,采用无线监控技术,在线观察现场环境和运动状态,杜绝测量中存在的隐患。



图6 控制板

Figure 6 Main control panel

3.1 检测原理

检测电路如图7所示,低零值绝缘子检测机器人2个机械手臂与本体机身将2片绝缘子短接,故绝缘子两端形成了等电压。由于绝缘子的绝缘阻值

远远大于采样电阻,则泄露电流主要从机械手臂流过而不会通过待检测的绝缘子。测量步骤如下:

1) 2 500 V 电源未接入独立回路,单片机采集的信号为绝缘子串上的泄露电流,绝缘子串上的电流 $I_0 = I_{A1} = -I_{B1}$,其中 I_{A1} 、 I_{B1} 分别可由采样电阻 R_4 、 R_5 两端上的电压与对应电阻的比值求得;

2) 闭合开关 K,将 2 500 V 电源接入独立回路,设流过绝缘子 R_1 上的电流为 I_a ,流过绝缘子 R_2 上的电流为 I_b 。此时流过采样电阻 R_4 上的电流 $I_{A2} = I_0 + I_a$,流过采样电阻 R_5 上的电流 $I_{B2} = I_b - I_0$ 。

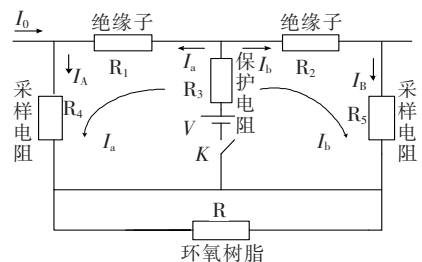


图7 检测电路原理示意

Figure 7 Detection circuit schematic diagram

根据步骤中测量的数值,经过单片机的程序算法可计算得出 I_a 和 I_b 。同时利用基尔霍夫第二定律可知:

$$V = I_a R_1 + (I_a + I_b) R_3 + I_{A2} R_4 \quad (1)$$

$$V = I_b R_2 + (I_a + I_b) R_3 + I_{B2} R_5 \quad (2)$$

其中, V 为内部电路检测电压,其余参数如图7标示,结合式(1)、(2),可求得电阻 R_1 、 R_2 值。依据检测原理图可知,低零值绝缘子检测机器人的支撑架必须采用绝缘性能良好材料,才能防止 I_0 、 I_a 和 I_b 电流经另一对称机械手臂流出检测机器人,以此来保证检测电路的正确性。

3.2 电源设计电路

检测机器人采用单一 24 V 锂电池供电,满电能情况下可持续供电 6 h。电源模块主要分为三部分:①电机驱动电压,输出 24 V;②经过降压、稳压芯片 MCT7805CT、HT7130,输出电压 3.3 V 作为单片机的工作电源,其中 MCT7805CT 输出的 5 V 电压还可为其他芯片供电;③给直流升压模块供电,采用 LD7535 进行电压的监测,采用 EEL19 变压器作为升压模块,最终可输出 50 V 的电压,再次通过多级运放电路,将输出电位抬升至 2 500 V,此电压作为测量绝缘子阻值时的检测电压。同时第三部分

高压加上光电隔离,防止外部相互干扰,电源模块如图 8 所示。

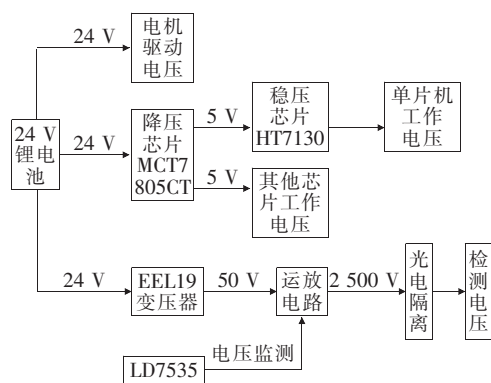


图 8 电源模块

Figure 8 Power-supply module

3.3 电机驱动模块

机器人使用的是瑞士 MaxonRE40 型号的直流石墨电刷电机,额定功率为 150 W,分别安装在两边机械手臂对称的驱动轴位置。同时为了提高装置攀爬时的平稳性,保证机器人翻转时的连贯性,驱动模块部分选取的是 L298N 芯片,其中包括了 H 桥的高电压大电流的 2 个全桥式驱动器。IRF 大功率的场效应管能够保证输出的电压质量,增大信号的转化效率。采取的标准逻辑电平信号控制有 2 个可控端口,能保证电路模块在一个端口工作的情况下,另一个端口不受输入输出的信号干扰,同时还可以高精度的调制 PWM 脉冲信号,通过它保证电机平稳过度完成正反转操作。

3.4 采集模块

由于 STM32 内置的 AD 采集芯片无法满足精度要求,采集泄露电流时将导致数据波动较大,因此,选用 16 位 A/D 转换器 AD7705,其电路模块如图 9 所示,它的工作电压为 3.3 V,拥有双通道全差分模拟输入的能力。在其采集电路中,转换器的主时钟信号使用的是外部晶振,同时在电压稳定与电路隔离的部分,选取的是 EL817 光电耦合器。为减小信号的误差,A/D 转换器处理采集信号时,使用差分模拟输入,寄存器的读/写操作通过自身的串行接口完成。选用 SCLK 串行进行时钟输入,传输数据方面选用 DIN 线向寄存器进行传输,保持 \overline{DRDY} 在低电平,才能使用 DOUT 线读取寄存器数值。

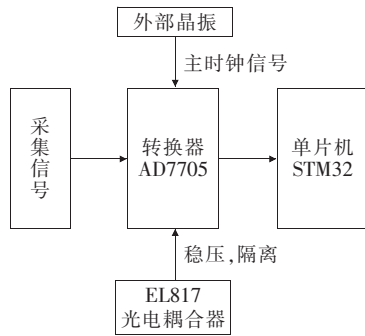


图 9 采集电路模块

Figure 9 Acquisition circuit module

3.5 通信模块

通信模块包括机器人本体的测控系统与地面基站之间的 Wi-Fi 通信和检测模块存储的数据传输。测控系统与地面遥控器之间使用无线传输,为避免电晕现象对无线电波的干扰,故控制器应该选用 RF 收发一体芯片 CC1010,其不仅功耗低,且搭载频率可调的 ISM 频段可有效抑制外界干扰。同时采用 RFX2401C 射端前置放大电路,其实际收发距离可达 300 m,可高效便捷的发送,接收信号。

信号传输方式为 CAN 总线结构(如图 10 所示),并且采用手持终端 Android 操作系统(如图 11 所示)进行机器人的操控。运动过程中可通过操作系统切换运动模式(自动或手动模式),配置运动参数以及采集数据的查看,实时测量出绝缘子的绝缘阻值与相关的参数,便于进一步的操作与控制。

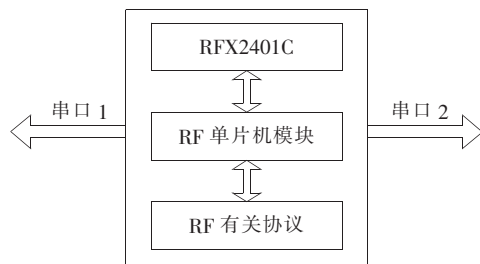


图 10 CAN 总线结构

Figure 10 Controller area network

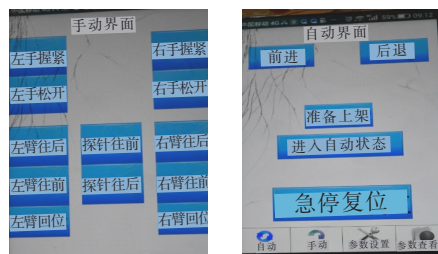


图 11 操作系统界面

Figure 11 Operating system interface

3.6 绝缘防护设计

特高压输电线路的电场环境复杂,将可能影响检测装置的绝缘性能,需将检测装置采取绝缘防护措施。由于本装置主要采取等电位屏蔽的方法,屏蔽箱的导线均用航天插头引出,导线均采用铝箔纸包裹,屏蔽外部强电场。同时主控模块与 CPU 采取电场屏蔽盒的方式,进一步加强对核心部件的防护,保持在零电场的环境中从而保证测量数据的精度。屏蔽箱的菱角均需设计成圆弧形,抑制尖端处的场强畸变,改善其周围电场分布。

4 检测数据处理

为保证检测机器人测量数据的准确性、可靠性,测量算法采用离散函数的拟合算法,从算法内部对检测结果进行优化修正,以保证检测的精准度。该方法通过对同一片绝缘子进行 20 次数据采集,采用比对算法去掉最大值与最小值,而后再利用最小二乘法将剩余的 18 个数据进行拟合,同时运用 Matlab 软件,描绘出大致函数曲线,最后从函数曲线中选取 100 个样点,通过误差分析得出优化函数,对结果保留 3 位小数。

根据 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》中的要求,在常温常压下,每片悬式绝缘子的绝缘电阻不应低于 300 MΩ,低于 300 MΩ 水平的悬式绝缘子一般就认为是低值或零值绝缘子^[19-20]。根据检测需要,实验室选取 200、300、400 MΩ 作为样本值,用以修正提高检测低零值绝缘子的精准度。

实验室设定 x 为测量值, y 为真实值, $\{(x_i, y_i)\}$ ($i=0,1,\dots,m$) 是函数 $f(x)$ 上一组离散点集, $S(x)$ 为拟合函数,记误差 $\delta = (\delta_0, \delta_1, \dots, \delta_m)$,其中

$$\delta_i = S(X_i) - f(X_i) \quad (3)$$

设 $\Phi_0(x), \Phi_1(x), \dots, \Phi_m(x)$ 是线性无关的函数组,在 Φ 中找一函数 $S^*(x)$,使得误差的平方和最小。其中

$$\Phi = \text{span}\{\Phi_0(x), \Phi_1(x), \dots, \Phi_m(x)\} \quad (4)$$

$$\|\delta\|_2^2 = \sum_{i=0}^m \delta_i^2 = \sum_{i=0}^m [S^*(X_i) -$$

$$f(X_i)]^2 = \min_{S(X) \in \Phi} \sum_{i=0}^m [S(X_i) - f(X_i)]^2 \quad (5)$$

$$S^*(X) = a_0 \Phi_0(X) +$$

$$a_1 \Phi_1(X) + \dots + a_n \Phi_n(X), n < m \quad (6)$$

这样就可将问题转化为求多元函数 $I(x_0, x_1, \dots, x_m)$ 的极小值所在的点 (a_0, a_1, \dots, a_n) 的问题。

$$I(a_0, a_1, \dots, a_n) =$$

$$\sum_{i=0}^m \omega(x_i) \left[\sum_j^n a_j \Phi_j(x_j) - f(x_j) \right]^2 \quad (7)$$

其中 $\omega(x_j)$ 为加权系数。设 300 MΩ 是判别低零值绝缘子的临界点,求取解时令权系数: $\omega(x_1) = \omega(x_2) = \omega(x_3) = \omega(x_4) = 2$,同时,令其他权系数 $\omega(x_0) = \omega(x_5) = \omega(x_6) = \omega(x_7) = \dots = \omega(x_m) = 1$,经计算求得拟合方程为 $S(X) = 0.956x + 4.0$ 。因此,存储器存储的数据需带入拟合方程改善化,并将数据求平均值取得最精确的测量值^[1]。

5 实验分析

本试验选用 9 个已运行过的悬式瓷质绝缘子,将其依次编号,其中 1、3、5、7、8 为劣化绝缘子,2、4、6、9 为正常绝缘。如图 12 所示,绝缘子串的分布情况模拟实际运行的状态,并用钢脚架固定在地面上,先通过数字式兆欧表依次检测各绝缘子的阻值,再将检测机器人安装上线,进行正常的攀爬检测,记录数值。检测结果如表 1 所示,可以得出结论:在不带电检测的情况下,机器人可以准确地检测出低零值绝缘子并实现报警。

为进一步验证机器人的精准度与实用性,作业人员也在某省宾金线特高压直流输电线路进行了试验,如图 13 所示。通过对比分析第 1 到 10 号的绝缘子阻值可知,在带电作业的情况下,机器人仍能准确地测量出绝缘子阻值且误差范围不超过 $\pm 5\%$,试验结果如图 14 所示。



图 12 检测装置试验

Figure 12 Testing device experiment

表 1 机器人不带电检测绝缘子阻值

Table 1 Insulator resistances of robot off-line test

编号	兆欧表		检测装置	
	阻值/M Ω	状态	阻值/M Ω	状态
1	211	劣化	219	劣化
2	752	完好	555	完好
3	135	劣化	145	劣化
4	621	完好	623	完好
5	276	劣化	280	劣化
6	514	完好	723	完好
7	233	劣化	239	劣化
8	248	劣化	254	劣化
9	591	完好	594	完好

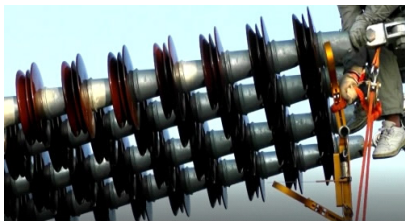


图 13 现场试验

Figure 13 Field test

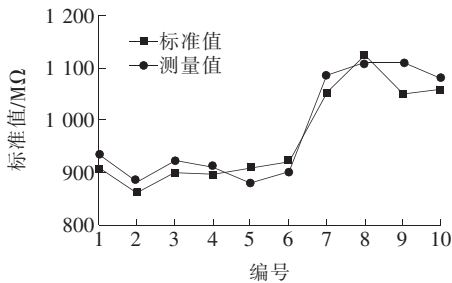


图 14 对比结果

Figure 14 Contrast result

6 结语

现场试验证明:低零值绝缘子带电检测机器人完成一个检测周期的时间为 40 s,能够高效解决绝缘子在线检测耗时耗力的难题;在带电或不带电的情况下,阻值范围 200~400 M Ω 的绝缘子测量误差均在 5%以内,能够完成对绝缘子阻值的检测,进而判断出低零值绝缘子同时完成对绝缘子串数据分析,评估整串绝缘子的绝缘性能优劣。

根据特高压直流输电线路绝缘子串引起电气参数的变化,采用低零值绝缘子带电检测机器人的检

测方法,该方法满足以下功能:①能测量出特高压直流输电线路绝缘子串的泄露电流大小;②能带电检测出每片绝缘子的阻值;③能确保不受泄漏电流的干扰。低零值绝缘子带电检测机器人利用等电位的理念,排除泄漏电流对检测结果的影响,通过机器人自身软硬件的配合,计算出绝缘子的阻值并进行位置预警,同时记录其阻值与位置的信息,为现场操作人员提供有价值运维信息。此装置结构简单、成本低、测量准确,具有很强的实用性和很大的工程使用价值。

参考文献:

- [1] 宗方蕊,万书亭,李娜,等.激振—拾振距离对 220 kV 瓷支柱绝缘子振动检测的影响研究[J].仪器仪表学报,2021,42(10):138-147.
ZONG Fangrui, WAN Shuting, LI Na, et al. Research on the influence of vibration-pickup distance on vibration detection of 220 kV porcelain post insulator[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(10): 138-147.
- [2] 张斌.劣化绝缘子检测技术的国内外研究现状[J].电网技术,2006,30(1):275-278.
ZHANG Bin. Research status of degraded insulator detection technology at home and abroad[J]. Power System Technology, 2006, 30(1): 275-278.
- [3] FIERRO-CHAVEZ J L, RAMIREZ-VAZQUEZ I, Montoya-Tena G. On-line leakage current monitoring of 400 kV insulator strings in polluted areas[J]. IEE Proceeding-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(6): 560-564.
- [4] 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, YU Yianjie, et al. Method of degradation diagnosis of composite insulators based on unmanned aerial vehicle with infrared detection [J]. Electric Engineering, 2020(9): 132-134.
- [5] 胡丹晖,周学明,易福明,等.在役瓷绝缘子串温度梯度分布相关性分析[J].电力科学与技术学报,2021,36(2):172-179.
HU Danhui, ZHOU Xueming, YI Fuming, et al. Correlation analysis of temperature gradients distribution of porcelain insulator strings in service[J]. Journal of Electric Power Sci-

- ence and Technology, 2021, 36(2): 172-179.
- [6] 朱虎,李卫国. 绝缘子检测方法的现状与发展[J]. 电瓷避雷器, 2006(6): 13-17.
ZHU Hu, LI Weiguo. Present and future development of detection methods for composite insulator[J]. Insulators and Surge Arresters, 2006(6): 13-17.
- [7] 胡岳,仲雁兵. 无线通信式低零值绝缘子手持检测仪[J]. 高电压技术, 2008, 34(2): 280-284.
HU Yue, ZHONG Yanbing. Design of a hand-held faulty insulator detector based on wireless communication [J]. High Voltage Technology, 2008, 34(2): 280-284.
- [8] 金光熙,郎成. 故障绝缘子的发热机理及其红外热像检测[J]. 电瓷避雷器, 2011(5): 12-15.
JIN Guangxi, LANG Cheng. Heating mechanism and infrared thermography detection of failure insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(5): 12-15.
- [9] 李璟延,司马文霞,姚陈果,等. 染污绝缘子安全区泄漏电流检测中去除信号干扰方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5): 85-89.
LI Jingyan, SIMA Wenxia, YAO Chenguo, et al. Application of de-noise methods used in monitoring leakage current in safety stage of contamination insulators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(5): 85-89.
- [10] 刘洋,陆倚鹏,高嵩,等. 边缘检测在盘形悬式瓷绝缘子串红外图像上的应用[J]. 电瓷避雷器, 2020(1): 198-203.
LIU Yang, YU Yipeng, GAO Song, et al. Edge detection on infrared image of high voltage porcelain disc type suspension insulator strings[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(1): 198-203.
- [11] 石凯,徐文洋,雷东云,等. ± 800 kV 特高压直流输电线路带电作业方式[J]. 电瓷避雷器, 2016(2): 6-11.
SHI Kai, XU Wenyang, LEI Dongyun, et al. Live working ways for ± 800 kV UHVDC transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(2): 6-11.
- [12] 何为,陈涛,刘晓明,等. 基于紫外脉冲法的非接触式低值(零值)绝缘子在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 69-74.
HE Wei, CHEN Tao, LIU Xiaoming, et al. On-line monitoring system of faulty insulator based on non-touching UV pulse method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 69-74.
- [13] 丁玉剑,宋刚,陈稼苗,等. 500 kV 同塔双回垂直排列紧凑型输电线路带电作业试验研究[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3281-3287.
DING Yujian, SONG Gang, CHEN Jiamiao, et al. Experimental research on live working carried on double circuit vertically arranged 500 kV compact transmission lines on the same tower[J]. Power System Technology, 2013, 37(11): 3281-3287.
- [14] SALA T P. Electric field modelling of non-ceramic high voltage insulators[J]. Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2008, 4(3): 239-248.
- [15] ZENG R, ZHANG Y, CHEN W Y, et al. Measurement of electric field distribution along composite insulators by integrated optical electric field sensor [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(1): 302-310.
- [16] ROSS G G. Effect of electric charge accumulation on low energy ion implantation in insulators[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2005, 230(14): 386-390.
- [17] PHILLIPS A J, KUFFEL J, BAKER A, et al. Electric fields on AC composite transmission line insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 823-830.
- [18] 蒋兴良. 劣化绝缘子对悬垂串电场分布特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 118-124.
JIANG Xingliang. Influence of deteriorated insulator on the electric field distribution of overhang string[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 118-124.
- [19] 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.
- [20] 万亚玲,李娜,李唐兵,等. 应用盘面特征识别红外检测盲区的零值绝缘子[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(3): 89-95.
WAN Yaling, LI Na, LI Tangbing, et al. Identification of zero-value insulators in infrared detection blind zone using disk characteristics[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2019, 31(3): 89-95.