

自补偿定位J型线夹安装工具的设计

王海霖¹,谭海铭²,危秋珍²,覃明生²,李成信¹,韦维¹,覃仕星²

(1. 广西电网有限责任公司河池环江供电局,广西 河池 547100;

2. 广西电网有限责任公司河池供电局,广西 河池 547000)

摘要:为提高带电情况下架空绝缘线带电接火作业的安全性,设计一种用于对完成架空绝缘线铁塔接线的自补偿定位J型线夹安装工具。该工具由J型线夹、拧紧装置、夹持机构和控制通信系统组成,采用绝缘耐压、自动控制和防电磁干扰等技术,创新设计一种J型线夹的自补偿夹持结构。通过现场测试和实验结果表明:该装置能够平稳实现主线与引流线的压接,并且效果良好。

关键词:高压带电接火;线夹安装工具;自补偿定位;J型线夹

中图分类号:TM203 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0193-04

Design of Self-compensation Positioning J-clamp Installation Tool

WANG Hailin¹, TAN Haiming², WEI Qiuzhen², QIN Mingsheng², LI Chengxin¹, WEI Wei¹, QIN Shixing²

(1. Hechi Huanjiang Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Hechi 547100, China;

2. Hechi Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Hechi 547000, China)

Abstract: In order to enhance the safety of overhead insulated wire live fire connection operation under live conditions, a self-compensation positioning J-clamp installation tool for completing the overhead insulated cable tower connection is designed, which consists of J-clamp, tightening device, clamping is designed. The field test and experimental results show that the device can smoothly mechanism and control communication system. With the adoption of insulation withstand voltage, automatic control and anti-electromagnetic interference and other technologies, an innovative self-compensation clamping structure of J-clamp realize the crimping of main line and drainage line with good effect.

Keywords: high voltage belt ignition; clamp installation tools; self-compensation positioning; J-clamp

0 引言

随着科技的发展和人民生活水平的不断提高,社会对供电的可靠性和稳定性有着更高要求,供电公司常需要在带电情况下完成架空绝缘线带电接火作业,以满足社会生产、生活电力供应需求^[1-2]。配电线路带电接火是一种常见的接火操作方式。

目前带电接火作业有绝缘手套法和绝缘操作杆法两种,需要两个人共同上杆作业,操作难度高,作业效率低,存在不安全隐患等,不能满足电力稳定供应需求。另一种使用穿刺线夹的带电剪接火方式,由于穿刺线夹本身会破坏导线电芯结构和护套绝缘层,降低了导体载流量,使接触电阻变大,增加了接触处起火的风险^[3-7]。为避免人员与高压输电线的直接接触,降低人工带电接火作业的难度和风险,提高输电的稳定可靠性,本文设计了一种自动化、轻便化的J型线夹安装装置。

1 J型线夹安装装置设计方案

根据现场实际需求,自动接火线夹装置需要完成10kV架空绝缘线的搭接、J型线夹夹紧和线夹拧紧后整

体装置的脱落。首先操作人员站在主线下,将J型线夹和副线均手动固定在线夹安装器上,再将J型线夹通过线夹安装器钩挂在主干线上;之后,通过打击部自动旋紧J型线夹处拉紧螺母,使J型线夹的两个导块产生彼此相向动作,以便实现J型线夹相对引流线路及主干线的同时紧固功能;最后,分离线夹安装器与J型线夹,即完成整套安装流程。然而,在上述安装过程中,由于线夹安装器的打击套筒是直接通过打击电机驱动并产生回转动作的,即仅具备绕自身轴线的回转动作。当套筒与拉紧螺母咬合并旋转拉紧螺母时,两个导块在夹紧的过程中做相对平移甚至晃动,同时拉紧螺母沿拉紧螺栓旋转上行。在此过程中,全程保持线夹的位置恒定性,尤其是确保上导块的位置恒定性极为重要。一旦在打击部工作过程中,线夹产生晃动,会导致螺套无法继续带动拉紧螺母旋转和线夹受力歪斜而产生拉紧螺母与拉紧螺栓之间抱死等问题,从而造成线夹夹紧失败等状况。为解决这个问题设计了一种自补偿式的线夹安装工具,根据所需实现的功能将整个装置分为4个部分:J型线夹、控制通信系统、夹持机构、拧紧装置。

控制系统主要控制打击电机和辅助系统电机的启停。拧紧装置由打击电机、打击套筒和打击安装部组成,主要完成J型线夹螺栓的拧紧,保证线夹紧密贴合和固结。夹

持机构由两个直线推杆电机和定位机构组成,起到调整固定机构,完成线夹的固定和定位。整体流程如图1所示。

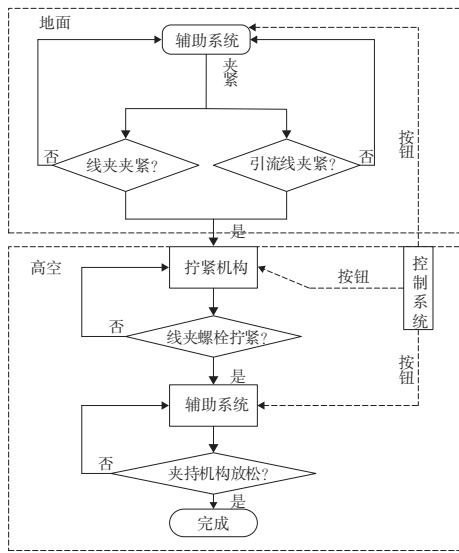


图1 线夹工具整体方案图

2 J型线夹安装装置的总体设计

2.1 控制和通信系统设计

J型线夹安装装置采用嵌入式控制系统,主控芯片采用STM32,主要集成了电机控制、电流电压检测、传感器信号检测等,如图2所示。

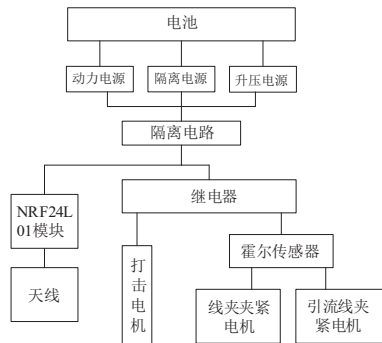


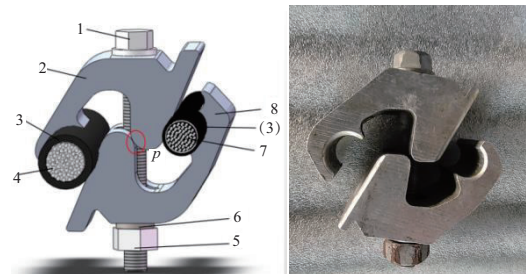
图2 控制和通信拓扑图

本装置的通信系统采用 NRF24L01 模块,该模块功耗极低,大大延长了电池的续航能力。另外在数据传输距离方面比 WiFi 更远,加上本装置传输的数据量比较小,所以选用该模块。

在整个线夹安装装置中共有 3 个电机,1 个打击电机和 2 个直线推杆电机。整个系统需要控制电机的转速、启停和正反转。打击电机通过 PWM 控制 mos 管的导通达到控制电机转速的目的,直线推杆电机的转速是恒定的,接上电源后以恒定的转速工作。在控制启停方面,打击电机是通过实验的方法找到一个螺栓拧紧最小预紧力,计算拧紧时间,确定这个时间阈值约为 5 s,从而控制电机停止转动。推杆电机的启停由霍尔元件检测通过电机的电压改变来控制。当直线推杆电机运行到达行程末端后,电机堵转,电流瞬间增大,电压减小,电机停止转动。电机的正反转控制通过继电器组成的半桥电路来实现。

2.2 J型线夹工作机制分析及其影响因素

J型线夹是一种非承力链接的线夹,用于 10kV 电力线路的分支线路与主干线的连接。J型线夹的外形参照图3(b)所示,型号 JYLYJ-150。包括两个相互咬合的 J型的导块 2、8 以及引导两个导块产生相近动作的拉紧螺栓 1 和拉紧螺母 5 组成。工作时打击套筒和螺母连接,由打击电机提供动力,线夹收紧从而夹住各规格线缆如表 1 所示。线夹夹紧过程对线缆会产生挤压,产生相对位移量,进而改变其电流分布和温度分布。通过以下计算合理地设计拧紧机构和夹持机构。



(a) 三维模型 (b) 实物图

1—螺栓;2—上线夹;3—绝缘层;4—火线;
5—螺母;6—弹簧垫圈;7—引流线;8—下线夹。

图3 J型线夹三维模型及实物图

表1 线缆规格参数表

型号规格	绝缘线缆类型/mm	导体外径/mm	内屏蔽厚度/mm	绝缘厚度/mm	电缆外径/mm	电缆计算质量/(kg/km)	绝缘体积电阻/(MΩ/km)	20℃导体直流电阻/(Ω/km)	导体计算拉断力/N	浸水1h耐压电压/kV	允许载流量/A
JYLYJ-50	7/3.06	8.30	0.80	3.40	16.70	290.8	1 500	0.641	≥7 011	18	180
JYLYJ-70	14/2.57	10.00	0.80	3.40	18.40	365.7	1 500	0.443	≥10 354	18	226
JYLYJ-95	19/2.57	11.60	0.80	3.40	20.00	495.2	1 500	0.320	≥13 227	18	276
JYLYJ-120	36/2.21	13.00	0.80	3.40	21.40	543.6	1 500	0.253	≥17 399	18	320
JYLYJ-150	30/2.57	14.60	0.80	3.40	23.00	648.7	1 500	0.206	≥21 033	18	366

当线夹与导线夹紧接触时,线夹会产生点、线、面3种接触形式,并会改变其接触电阻值。点接触主要影响收缩电阻,面接触主要影响膜电阻,线电阻则介于两者之间。而接触压力对接触电阻的变化影响十分明显。可以通过增加接触点的有效接触面积来增加接触压力,从而降低接触电阻。当接触点的压力超过一定值时,与接触点相连接的材料产生塑性形变,表面被压碎,增大了金属的接触面,使接触电阻迅速下降。接触电阻的变化直接影响接触面间电流的大小,会产生不同的焦耳热,进而影响温度的分布。线夹与火线和引流线、上下线夹间、螺母与线夹间在压力作用下紧密接触,在压力作用下线夹与火线和引流线等部位产生应力,并伴随着塑性应变,可通过胡克定律根据应变计算位移量。

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot d_b = f \quad (1)$$

$$S = C[\varepsilon - (\varepsilon_0 + \varepsilon_{th} + \varepsilon_{hs} + \varepsilon_{pl} + \varepsilon_{er})] \quad (2)$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{2}[(\nabla u)^T + \nabla u] \quad (3)$$

式中: ρ 为密度; d_a 为阻尼系数; u 、 d_b 、 f 分别为位移、表面张力系数和体积力; S 、 C 分别为应力矩阵和弹性矩阵; ε 、 ε_0 、 ε_{th} 分别为弹性应变、预应变和热应变; ε_{hs} 、 ε_{pl} 、 ε_{er} 分别为浸润膨胀、塑性应变和蠕变; ε_y 为总应变。

压力将改变材料的电属性和热属性,会导致其发热功率高于其他部位。计算过程中需结合接触压力的影响来计算接触表面的电导率和热导率。用文献[2]的增广拉格朗日接触方法,设定接触压力,可以计算整体模型的应力大小与分布,然后将所得到的结果作为电热场的初始值,通过瞬态分析得到不同时刻下的电流分布和温度分布。

$$J_1 = h_c(V_1 - V_2) \quad (4)$$

$$J_2 = h_c(V_2 - V_1) \quad (5)$$

$$h_c = 1.25 \sigma_{\text{contact}} \frac{m_{\text{asp}}}{\sigma_{\text{asp}}} \left(\frac{p}{H_c} \right) \times 0.95 \quad (6)$$

$$\frac{2}{\sigma_{\text{contact}}} = \frac{1}{(\sigma_1 n_d) \cdot n_d} + \frac{1}{(\sigma_2 n_d) \cdot n_d} \quad (7)$$

$$q_1 = h(T_2 - T_1) \quad (8)$$

$$q_2 = h(T_1 - T_2) \quad (9)$$

$$h = h_c + h_g + h_r \quad (10)$$

式中: J_1 、 J_2 分别为两个面上的电流密度; σ_1 、 σ_2 、 σ_{contact} 分别为两物体的电导率和接触电导率; V_1 、 V_2 分别为两个面上的电势; σ_{asp} 、 m_{asp} 分别为材料表面粗糙平均高度和平均斜率; p 为接触压力; H_c 为微硬度; q_1 、 q_2 为传热量; h 为传热系数; h_c 、 h_g 、 h_r 分别为收缩电导率、间隙热导率、辐射热导率。

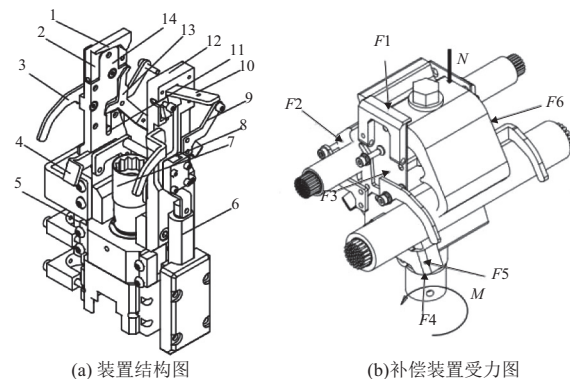
J型线夹的正应力和切应力主要集中在 p 点。由表2带入计算得到平均总位移量约为0.87mm。电流传递主要发生于线夹凹槽部位,且引、火线凹槽与线夹的接触面利用率并不高,电流传递集中在接触面约25%区域,其余接触面上电流传递几乎没有。温度较高的区域均集中在线夹与引、火线接触面,其中火线凹槽接触面温度上升最高。这时线夹安装装置要尽可能沿螺栓垂直方向下压,需要一种自补偿夹持结构辅助完成,且打击部件提供的转矩不宜过大,不然会造成线夹温度升高、输电损耗功率大。

表2 线夹计量表

参数	数值
导线和线夹的比定压热容/(J(kg·K) ⁻¹)	380/900
导线和线夹的电导率/(ms·m ⁻¹)	60/30
导线和线夹的弹性模量/GPa	126/69
微硬度/GPa	3
粗糙平均斜率	0.5
导线和线夹的泊松比	0.33/0.33
导线和线夹的密度/(kg·m ⁻³)	8 900/2 500
表面辐射率	0.96
导线和线夹的导热率/(W(m·K) ⁻¹)	390/206
粗糙平均高度/mm	0.000 98

2.3 自补偿定位机构受力分析及实现原理

为了实现J型线夹在并线安装过程中螺母始终随拉紧螺母同步动作,直至线夹完全并沟夹紧,并同步确保线夹在整个并沟过程中的位置稳定性,对J型线夹进行了受力分析并设计了3个轴向自补偿夹持机构,为提升线夹并沟的精确性、稳定性和效率性提供了有效保证。整体如图4(a)所示。



1—定位挡块;2—固定板;3—挂钩;4—下定位块;5—左推杠电机;6—右推杠电机;7—打击套筒;8—锁舌;9—定位杆;10—锁紧滑销;11—定位销;12—外导套;13—引流线从动锁钩;14—左夹杆。

图4 补偿装置结构和补偿装置受力图

1) 自补偿定位机构受力分析

由自补偿定位机构夹持J型线夹的受力分析图可知(图4(b)),在3个轴向方向上受力且受力平衡, $F_1 = F_4$; $F_3 = F_6$; $F_2 = F_5$,即 $\Sigma F = 0$ 。当打击电机开始工作时会产生一个逆时针方向的转矩 M ,为了达到矩平衡,由 F_3 和 F_6 提供一个反向矩 M_1 和 M 平衡,即 $\Sigma M = 0$ 。随着打击电机的转动,线夹上导块在螺栓上沿着 N 方向作铅垂运动。

2) 轴向补偿定位机构实现原理

参照图4(a)可知左右夹杆设计的间距为线夹的宽度,为了保证线夹在安装时的左右定位,设计了锁紧滑销10,凸起端铰接在固定板2上,另一端和压簧铰接,保证其复位。当线夹安装上去的时候压紧锁紧滑销,凸起顶端紧线夹上导块,确保线夹上导块的固定,另一端被锁舌8锁

住,保持其线夹上导块的锁紧固定动作。锁舌通过动力件控制从而产生相对外套的径向往复直线动作;当锁紧滑销处于下压的初始工作位置时,锁舌伸出,从而与锁紧滑销之间形成单向止口配合;当锁紧滑销处于复位回弹时,锁舌在动力件控制下回缩;所述动力件为推杠电机,锁舌与动力件之间通过复位压簧衔接彼此,以便动力件启动时,复位压簧受力压缩从而驱使锁舌产生回缩动作;锁舌顶部的上角端布置倒角,以便在环形凸起产生下行动作时,压迫复位压簧产生受力压缩动作。

线夹的螺母和螺栓配合,并与打击部件的套筒连接,确保线夹自下而上轴向固定。在左固定块上水平铰接一个定位挡块1,定位挡块和扭簧连接使定位挡块一直保持和固定块的平行贴合,产生由上而下铰接动作并压紧在上导块的上表面。当线夹上导块的上表面和定位挡块贴合后,下压锁紧滑销从而固定线夹上导块。

为了保证线夹在前后位置的补偿定位,设计了下定位块和引流线锁定机构。引流线锁定机构包括引流线从动锁钩13以及定位杆9,定位杆杆体倾斜地固定在夹杆上,从而形成开口朝上的夹口结构并配合副锁杆的动作来咬合引流线;左夹杆14内侧面上设有L型凹槽,L型槽的长槽段轴线铅垂布置,且该长槽段水平贯穿左夹杆从而形成孔型长度铅垂布置的腰形孔状的铅垂导向孔,铅垂导向板处水平向铅垂导向孔内延伸有水平拨杆,L型槽的短槽段向引流线从动锁钩所在方向延伸并贯穿夹杆侧壁。从动锁钩通过支耳水平铰接在左夹杆上,从动锁钩的长杆段铅垂向上延伸并构成用于配合定位杆的锁止段,从动锁钩的短杆段沿L型槽的短槽段向内水平延伸,并与水平拨杆间形成配合关系,从而可在水平拨杆产生上行动作时拨动所述短杆段上行,进而驱动副锁杆产生相对副线的锁定动作。

2.4 拧紧装置

拧紧装置由打击电机和打击部组成,主要完成线夹螺栓的拧紧。打击电机选用博世的有刷直流电机,根据上述平均位移量0.87 mm,考虑到功率损耗和保证绝对拧紧,线夹需要100 N·m的转矩才能拧紧。根据电机转矩计算公式

$$T = \frac{9550P}{n} = \frac{9550UI}{n} \quad (11)$$

式中:T为电机输出转矩;U为电机电压;I为电机电流;n为转速。

从式(11)中可知在电机电压和转速不变的情况下,通过电机的电流越大,电机的转矩就越大。电机供电12 V转速为2 300 r/min,当电流达到2 A时拧紧转矩约为100 N·m。

打击部包括用于旋紧线夹处拉紧螺母的打击套筒,打击套筒通过打击电机驱动从而产生同轴回转动作,打击部还包括在打击套筒产生回转动作的同时,用于驱动螺套产生相对拉紧螺母的轴向相近动作的补偿组件。

3 实验与测试

根据设计方案,J型线夹安装工具不仅要质量轻还要保证其绝缘性。为了减轻装置整体质量,承受载荷较大的结构选用质量较轻的6061铝合金,其余包围材料采用绝

缘的复合材料。本装置整备质量为2.3 kg,满足实际使用要求。本装置采用了等电位作业方式,并进行多级绝缘和防电磁干扰设计,本装置和绝缘杆连接且外壳采用一体化设计,减少拼接处的缝隙,保证其密封性,另外所有外接控制与控制芯片信号采用光耦隔离。图5为所制作的样机现场实验。通过表3实验数据表明,J型线夹安装工具安装的成功率高达96%,且能够平稳、快速地完成绝缘架空线缆的带电接火作业。

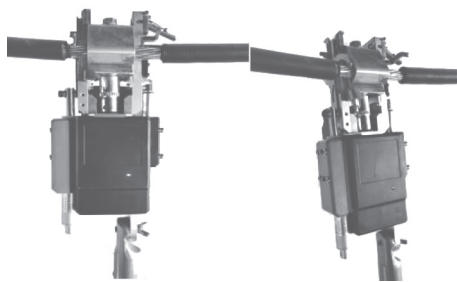


图5 线夹安装工具实验

表3 现场实验数据及结果

序号	主副线导体 外径/mm	位移量/mm	允许载流量/A	实验结果
1	14.60/8.30	0.86	180/366	成功
2	14.62/8.15	0.81	180/366	成功
3	14.40/8.31	0.77	180/366	成功
4	14.65/8.30	0.83	180/366	成功
5	14.55/8.27	0.83	180/366	成功
6	14.60/8.34	0.79	180/366	成功
8	14.50/8.15	0.88	180/366	成功
9	14.52/8.25	0.72	180/366	成功
10	14.61/8.33	0.97	180/366	成功
11	14.39/8.26	0.94	180/366	成功
12	14.59/8.21	0.92	180/366	失败
13	14.56/8.20	0.83	180/366	成功
14	14.43/8.37	0.82	180/366	成功
15	14.66/8.23	0.85	180/366	成功
16	14.60/8.34	0.75	180/366	成功
17	14.48/8.31	0.76	180/366	成功
18	14.45/8.25	0.88	180/366	成功
19	14.57/8.35	0.84	180/366	成功
20	14.53/8.31	0.86	180/366	成功
21	14.61/8.31	0.86	180/366	成功
22	14.46/8.30	0.91	180/366	成功
23	14.60/8.27	0.79	180/366	成功
24	14.68/8.36	0.84	180/366	成功
25	14.44/8.18	0.81	180/366	成功

(下转第224页)

4 结语

经测试发现,目前电力设施的无人机多目标监测和反制方法存在计算速度慢、召回率低、平均交并比低等问题,为此提出基于智能感知系统的电力设施无人机多目标监测与反制方法。该方法首先设计出多个模块组成的硬件系统,其次设计出图像预处理、监测和反制程序。将其综合后实现电力设施的无人机多目标监测与反制,减少计算时间的同时提高了召回率和平均交并比。

参考文献:

[1] 邝浩欣,夏黄蓉,李宝,等. 基于电力线载波技术的军工科研院所设备仪器智能化管理研究与应用[J]. 科技管理研究, 2020,40(13):55-61.

[2] 张继贤,刘飞,王坚. 轻小型无人机测绘遥感系统研究进展[J]. 遥感学报,2021,25(3):708-724.
[3] 陈飞,崔健,王郑. 垂起固定翼无人机激光雷达的电力巡检应用[J]. 测绘科学,2020,45(12):77-80,125.
[4] 彭继慎,孙礼鑫,王凯,等. 基于模型压缩的 ED-YOLO 电力巡检无人机避障目标检测算法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(10):161-170.
[5] 江亮,郑恩辉,童景哲. 基于电力杆塔巡检的无人机重定位拍照系统设计[J]. 科技通报,2020,36(10):33-35,40.
[6] 吕侃徽,张大兴. 基于自适应直方图均衡化耦合拉普拉斯变换的红外图像增强算法[J]. 光学技术,2021,47(6):747-753.
[7] 王福斌,孙志林,王尚政. 飞秒激光烧蚀光斑灰度特征的小波处理与分析[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(18):418-426.

收稿日期:2022-04-07

(上接第 215 页)

4 结语

本文基于 Android 设备,设计了某型燃气轮机监控系统,该系统与燃气轮机控制柜和遥控站进行数据通信,实现了燃气轮机机旁和遥控模式下的人机交互功能。利用 SQLite 数据库设计燃气轮机的参数记录和历史参数回调功能,并提出了燃气轮机参数偏离度概念,实现燃气轮机的故障诊断和健康管理。目前,基于 Android 的该型监控系统已用于燃气轮机的总装试验,运行稳定,操作便捷,为燃气轮机运行维护提供了科学保障。

参考文献:

[1] 闻雪友,任兰学,祁龙,等. 舰船燃气轮机发展现状、方向及关键技术[J]. 推进技术,2020,41(11):2401-2407.
[2] 王凤月. 燃气轮机故障诊断技术综述展望[J]. 内燃机与配件,2017(19):63.
[3] 吴珊. Android 的系统及应用的架构[J]. 电子技术与软件工程,2019(3):148.

[4] 张睿锐. Android 内核移植及在远程监控中的应用[J]. 中国新通信,2019,21(3):115.
[5] 罗尹奇,刘力银. 基于 JNI 的 Java 串口通信系统的设计与实现——以 Windows 平台为例[J]. 电脑知识与技术,2017,13(34):51-56.
[6] 李佐彬. Android 开发入门与实战体验[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
[7] 刘波. 基于 Android 的智能家居终端的设计与研究[J]. 移动通信,2016,40(10):88-90.
[8] 史梦安,王志勃. 基于 Android 系统的 TCP/IP 客户端异步通信模块研究[J]. 软件导刊,2014,13(10):115-118.
[9] 崔娜. Android 平台的 SQLite 数据库编程探析[J]. 信息与电脑(理论版),2014(6):147-148.
[10] 孔祥宇. 燃气轮机气路故障诊断技术探讨[J]. 科学技术创新,2019(6):192-193.

收稿日期:2022-04-22

(上接第 196 页)

4 结语

本文设计的自补偿定位 J 型线夹安装工具独特的自补偿定位方法有效地保证了 J 型线夹在打击过程中打击套筒始终随拉紧螺母同步动作,直至线夹完全并沟夹紧,并同步确保线夹在整个并沟过程中的位置稳定性。

该工具能够有效可靠地替代人工手动操作,完成架空绝缘线缆的带电接火作业,极大地提高了工作效率,减少了人工上杆所带来的风险。

在 J 型线夹安装工具加上自动剥皮机构,可以自动完成主线的剥皮,这样可以和 J 型线夹安装工具配合直接完成主线和引流线的接火工作,更进一步地提高接火作业的安全性和装置的功能性。

参考文献:

[1] 凌松,吴少雷,冯玉. 一种便携式架空配电路带电剪接火自

动装置的设计[J]. 机械工程师,2017(4):116-118.
[2] 吴勤斌,马冬二,邹德华,等. 基于多物理场耦合的 J 型线夹仿真分析[J]. 南方电网技术,2021,15(5):115-121.
[3] 宋清刚. 一起电缆穿刺线夹火灾的调查分析[J]. 消防科学与技术,2015,34(7):975-977.
[4] 国家电网公司. 带电作业操作方法(第 1 分册):输电线路[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
[5] 李二霞,亢超群,李玉凌,等. 基于设备状态评价和电网损失风险的配电网检修计划优化模型[J]. 高电压技术,2018,44(11):3751-3759.
[6] 欧相林,邓鹤鸣,王力农,等. 10 kV 配电线路带电作业安全综合评价应用分析[J]. 高压电器,2013,49(2):55-60.
[7] 张铜,张黎明,徐善军,等. 带电作业机器人 J 型线夹安装工具的研制与 TCP 位置标定方法[J]. 机械工程师,2021(2):105-107,110.

收稿日期:2021-11-17