

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.10.016

输电线路绝缘子更换带电作业机器人控制方法

邹德华¹, 江 维², 吴功平², 严 宇¹, 刘夏清¹

(1. 国网湖南省电力公司带电作业中心, 长沙 410100; 2. 武汉大学动力与机械学院, 武汉 430072)

摘要: 针对完全依靠人工带电更换高压输电线路悬垂绝缘子串作业效率低、劳动强度大、高空、高压危险的不足, 设计了一种双臂、双机械手的绝缘子串更换带电作业机器人构型, 提出了速度、位置混合控制模式下基于电磁传感器的机器人定位控制方法, 给出了机器人更换绝缘子串的作业流程, 最后对机器人进行工频耐压试验并在实际线路上进行机器人带电更换绝缘子试验, 结果验证了机器人具有较强的抗电磁干扰的能力, 且文中所提出的绝缘子串更换带电作业机器人控制方法可行有效, 进一步提高了作业效率和安全性。

关键词: 绝缘子串; 更换; 机器人; 定位控制

Robot Control Method of Live Working for Transmission Line Insulator Replacement

ZOU Dehua¹, JIANG Wei², WU Gongping², YAN Yu¹, LIU Xiaqing¹

(1. Live Working Center, State Grid Hunan Electric Power Company, Changsha 410100, China;

2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In response to the shortage of entirely artificial replacement for high voltage transmission line suspending insulator strings of low operating efficiency, labor-intensive, high height and high risk, a double arms and a double manipulators insulator string replacement with live working robot configuration is designed. The velocity position mixed control mode is proposed based on the electromagnetic sensor robot locating control method. The process of robot replacing the insulator strings is given. Finally, the power frequency voltage withstand test and the robot replacement insulator test on actual live line are carried out. The results validate that the robot has a strong ability of anti-electromagnetic interference and the proposed insulator string replace live working robot control method is feasible and effective. In addition, the operational efficiency and safety is improved.

Key words: insulator string; replace; robot; location control

0 引言

绝缘子串是架空高压输电线路的一个重要组成部分, 它起着支撑导线和防止电流回地的重要作用。绝缘子在自然条件下受粉尘、二氧化硫、氮氧化物等大气环境的影响容易造成它的质量不稳定、产生低值或零值、降低整条串绝缘子的绝缘强度^[1], 此外绝缘子在大雾中闪络^[2]时, 短路电流使得绝缘子瓷瓶发热, 严重时甚至会导致绝缘子钢帽的炸裂、绝缘子串断串、导线落地等情况的发生。上述各种因素都会影响整条输电线路的正常运行, 因此更换

输电线路上有缺陷、损坏、残旧、零值等不合格绝缘子防止输电线路故障和事故的发生就成为电力部门的一项常规性任务。传统绝缘子串更换作业^[3-10]主要是通过携带工器具、卡具登塔完全依靠人工独立完成的, 然而高空、高压的作业环境使得完全依靠人工进行更换不仅劳动强度大、效率低、而且具有很大的危险性, 因此研究面向高压输电线路绝缘子串更换带电作业机器人来辅助或替代人工作业具有重要意义。基于此, 笔者提出了一种面向高压输电线路绝缘子串更换作业带电作业机器人的基本构想, 通过对移动机器人搭载的两个机械手及其末端在速度、位置混合模式控制下基于电磁传感

收稿日期: 2016-03-13; 修回日期: 2016-05-21

基金项目: 国家高新技术研究发展计划(863计划)(2006AA04Z202)。

Project Supported by Development Plan of State New Technology Study(863 Plan)(2006AA04202).

器的机器人定位控制方法,完成了作业关键位置的粗定位和精定位,并在人工辅助下实现了绝缘子串的更换。

1 绝缘子串更换带电作业机器人的实体结构

绝缘子串更换带电作业机器人实体结构见图 1。机器人的两个机械手以移动机器人为载体,移动机器人由机体、机械臂、行走轮机构、夹爪以及等电位轮构成。两机械臂在机体中间以固定的距离反对称布置,行走轮机构与机械臂相连,沿导线行走,两个机械臂末端各有一个能夹紧导线的夹爪装置,在机器人行走时护线为机器人在作业过程中的安全性提供了保障。在高压带电作业情况下,为了满足机器人等电位作业要求,采用等电位技术,在行走轮一侧安装有等电位轮,保证机器人始终与导线等电位。机器人本体携带两个机械手,位于机体两侧布置,分别为 3-DOF、4-DOF 机构,两个旋转关节可在竖直平面内转动,两个伸缩关节可以带动末端执行机构实现垂直方向的升降;两个纵向移动关节可以分别调整末端执行机构的中心面相对于碗头挂板中心面和绝缘子串中心面的位置。机械手 1 固定于机体上,机械手 2 另有一横向移动关节,可沿机体横向移动。各关节协同工作,将末端执行机构带到或离开工作平面完成作业任务。

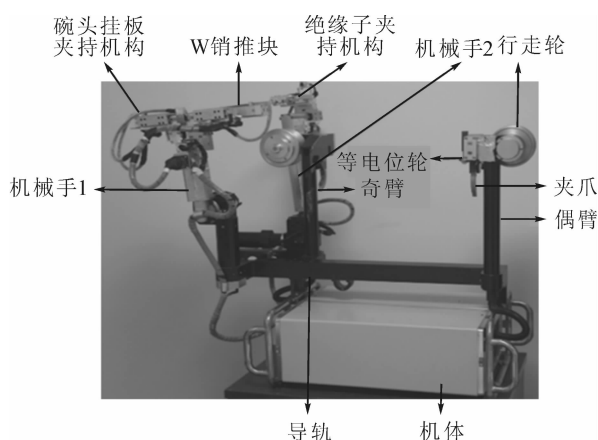


图 1 绝缘子串更换带电作业机器人实体结构图

Fig. 1 Entity structure of insulator string replacement live working robot

机器人的末端执行机构分别由 W 销推送机构和绝缘子串推送机构构成。W 销拔插装置由三个横向移动关节组成,一个移动关节携带夹爪实现碗头挂板的夹持,另两个移动关节分别实现 W 销的推出和推入。绝缘子串取装机构主要由前端的以曲柄摇杆机构为工作原理的夹爪对钢帽进行夹持。该夹持机

构由横移关节的前后运动对绝缘子串推出和装入。

2 绝缘子串更换作业原理分析

悬挂于单分裂输电导线上的单联悬垂绝缘子串的联接结构见图 2。悬垂绝缘子串上端通过球头挂环悬挂于杆塔横担上,下端通过 W 销与碗头挂板联接,碗头挂板通过悬垂线夹联接接到输电导线上,自然状态下绝缘子串两端都是固定的,因此要实现绝缘子串更换作业的关键是推出位于碗头挂板凹槽内的联接部件 W 销,然后将绝缘子串的球头从碗头挂板凹槽内推出,使得绝缘子串的下端处于自由状态,见图 3,这样便于人工辅助更换。更换完后将下端处于自由状态的新绝缘子球头推入碗头挂板内槽,并推入 W 销固定即完成一次完整更换。在这个过程中带电作业机器人的两个机械手末端主要负责碗头挂板的夹持、绝缘子的夹持、W 销的推进与推出、球头的推进与推出,人工主要负责收紧导线、放松导线、更换绝缘子串,通过这种人机交互协调工作的方式实现绝缘子串的更换。由于机器人在带电作业过程中,至少需短路了一片绝缘子,缩小了绝缘子串的绝缘距离,为消除这一不利影响可通过人工收紧导线来克服此缺陷。

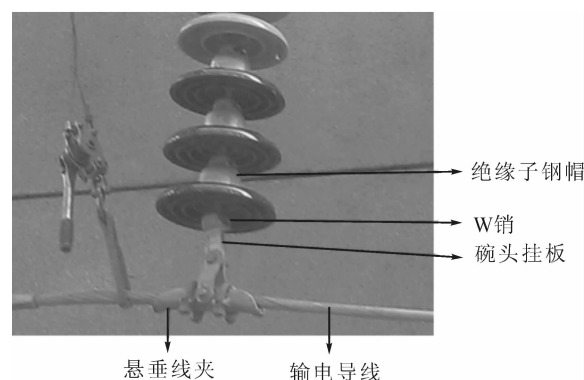


图 2 悬垂绝缘子串结构图

Fig. 2 Suspension insulator string structure

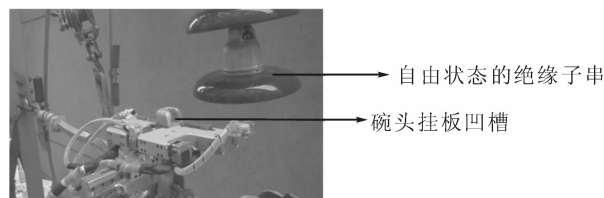


图 3 自由状态的绝缘子串

Fig. 3 Free state of insulator string

3 绝缘子串更换作业流程

机器人完成绝缘子串更换作业的过程主要包括:①机器人上线作业前的准备工作;②上线后机

器人开始作业取下绝缘子串;③人工更换绝缘子串;④机器人置入新绝缘子串后下线几个主要环节,其作业流程见图 4。其中上下线是通过人工吊装的方式进行,旧绝缘子串的取出和新绝缘子串的置入是以机器人作业为主,人工辅以紧线和松线操作,绝缘子的更换由人工操作完成。

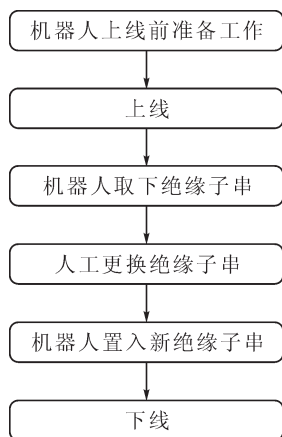


图 4 绝缘子串更换作业流程图

Fig. 4 Insulator string replacement flow chart

3.1 机器人作业前的准备工作

机器人上线作业前的准备工作包括:①准备好紧线器并将其末端固定于机器人上线对侧,收缩紧线器,释放绝缘子串牵引力,至绝缘子略有松动为止;②启动机器人自检程序确定电机、传感器、摄像头是否正常工作;③为保证机器人在上线过程中与作业环境不发生干涉,可通过联动控制将机器人机械手调整至合适的上线姿态。

3.2 机器人取下绝缘子串的过程

上线后机器人开始作业取下绝缘子串的过程主要包括:①机器人定位悬垂线夹后两个机械手进入作业区,调整两个机械手和末端至作业位姿,控制机械手 1 末端夹持机构定位并夹持碗头挂板;②机械手 2 末端夹持机构定位并夹持绝缘子钢帽;③机械手 1 末端上的 W 销推块推出位于碗头挂板凹槽内的 W 销;④人工紧线后控制 2 臂横向移动将绝缘子串球头从碗头挂板凹槽内推出,使绝缘子串底端处于自由状态以便人工更换。

塔上工作人员更换底端处于自由状态的旧绝缘子串,更换完毕后并将新绝缘子串放至悬挂位置上方,尽量减小新绝缘子串晃动的幅度,以利于 2 臂绝缘子夹持机构夹持新绝缘子钢帽,为新绝缘子球头的推入做好准备。

3.3 机器人置入新绝缘子串的过程

机器人置入新绝缘子串的过程主要包括:①控

制机器人 2 臂绝缘子夹持机构定位并夹持新绝缘子串钢帽,并通过 2 臂横移机构将新绝缘子串球头推入碗头挂板凹槽内;②人工松线后使得球头位于碗头挂板凹槽顶部,此时推进 W 销使得新绝缘子的底端由自由状态变为固定状态通过悬垂线夹连接到输电导线上;③完成绝缘子的更换后机器人退出作业区,机械手调整至初始姿态准备下线。

4 绝缘子串更换作业控制方法

4.1 绝缘子串更换作业控制体系结构

在绝缘子串更换机器人作业过程中,悬垂线夹的定位、碗头挂板的定位和夹持、绝缘子钢帽的定位和夹持、W 销的定位和推进推出、绝缘子球头的推进推出等关键动作是机器人能否顺利完成更换绝缘子串作业任务的必要前提。在这些关键动作的控制上对机器人机械手末端的定位精度要求很高,机器人关键动作的定位精度直接关系到作业的顺利完成与作业效率的高低。为满足机械手末端精确定位的要求,文中提出了速度、位置混合模式控制下基于电磁传感器的机器人定位控制方法,机器人的控制框图见图 5。从图 5 可看出,此系统是通过速度、位置模式控制机器人机械手、机械臂、行走轮,实际位姿通过位姿反馈与机器人理想位姿进行比较,以确定机器人下一步的动作而形成的一个闭环控制系统。

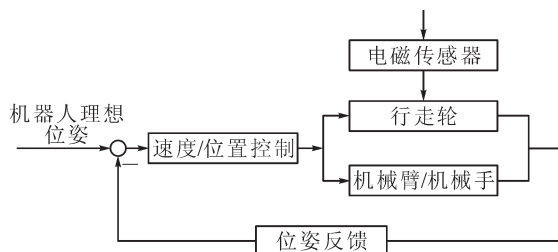


图 5 机器人控制框图

Fig. 5 Robot control block

在上述各种关键位置定位中,首要的是机器人悬垂线夹的定位,它是后续其他定位控制的基础,在整个机器人的控制过程中起着至关重要的作用。悬垂线夹的定位主要是通过安装在两个行走轮上的电磁传感器^[16-18]来实现的。完成悬垂线夹定位后,以机器人奇臂行走轮为空间坐标原点,结合悬垂线夹及其绝缘子串标准参数库所获得的先验知识,可规划机器人末端的运动轨迹和参数,再结合摄像机视频交互,利用速度位置相结合的控制模式可实现其他关键位置的定位,为整个作业的顺利完成提供有力保证。绝缘子串更换作业控制体系结构见图 6。

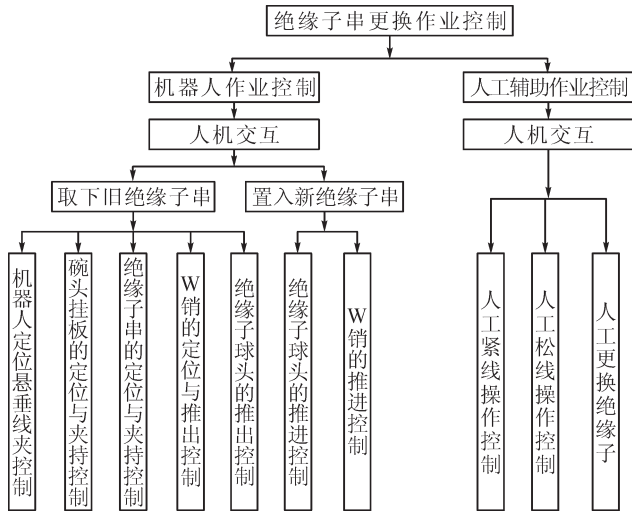


图6 绝缘子更换控制体系结构图

Fig. 6 Insulator replacement control architecture

4.2 悬垂线夹的定位控制

机器人上线后沿输电导线低速前进逐渐靠近绝缘子串,首先需要定位悬垂线夹,当机器人定位到悬垂线夹后,机器人即进入工作位,双机械手及其末端可开始准备作业。悬垂线夹的定位是通过行走轮的碰检、行走轮电机的伺服控制以及安装在机器人两个行走轮上电磁传感器3个方面来实现的,定位原理为机器人通过检测电磁传感器线圈在输电导线交变磁场中感应电动势的变化以及其相对于导线的距离和夹角来获取机器人的位姿,进而控制机器人的下一步动作,电磁传感器的定位原理见图7。

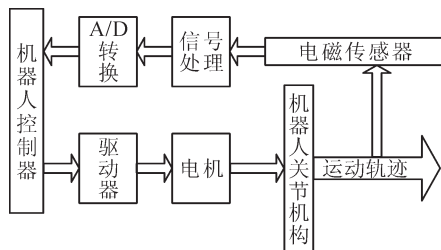


图7 电磁传感器定位原理示意图

Fig. 7 Electromagnetic sensor localization principle

理想情况下高压输电导线可视为通有交变电流的无限长直导线,由电流的磁效应理论可知输电导线周围的磁感应强度 B 可由式(1)计算得到。

$$B = \int_{\theta_2}^{\theta_1} \frac{\mu_0 I}{4\pi r} \sin\theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r} (\cos\theta_1 - \cos\theta_2) \quad (1)$$

式(1)中: i 为导线电流; r 为传感器线圈与导线的距离; μ_0 为真空中的磁导率。电磁传感器结构见图8,电磁传感器与导线磁场位置关系见图9。

对于无限长直输电导线, $\theta_1=0$ 、 $\theta_2=\pi$, 所以输电

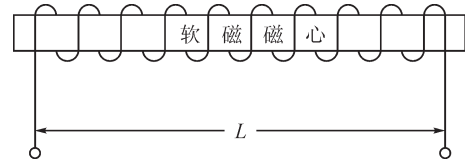


图8 电磁传感器的结构图

Fig. 8 The structure of electromagnetic sensor

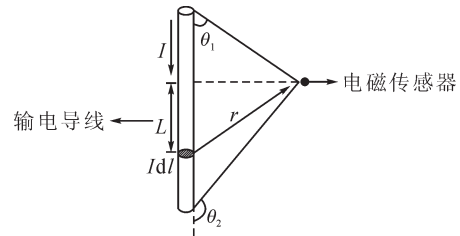


图9 电磁传感器与导线磁场位置关系示意图

Fig. 9 Positional relationship between electromagnetic sensor and wire schematic

导线周围的磁场可简化为式(2)。

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \quad (2)$$

当交流磁通穿过电磁传感器铁心时,线圈上会感应出交流电动势,而交流磁通量 Φ 可由式(3)计算得到,其中 S 为线圈截面积, θ 为线圈轴线与导线的夹角。

$$\Phi = BS \cos\theta \quad (3)$$

由法拉第电磁感应定律电磁传感器线圈感应电动势 ε 可由式(4)计算得到,将式(2)代入式(3)后再代入式(4)可得式(5)。

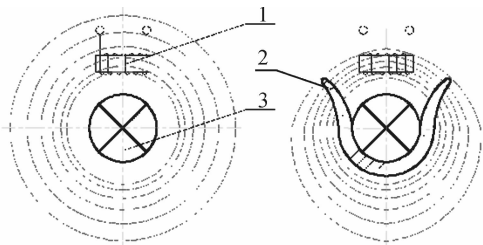
$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (4)$$

$$\varepsilon = -\frac{NS\mu_0}{2\pi r} \frac{di}{dt} \cos\theta \quad (5)$$

由式(5)可知,当机器人行驶于高压输电导线,安装在行走轮上的电磁传感器线圈感应电动势 ε 的大小与导线电流的变化率 di/dt 、线圈匝数 N 、线圈截面积 S 、线圈截面法线与磁场方向夹角 θ 的余弦值成正比,与线圈与导线的距离 r 成反比。

由于悬垂线夹的连接管为铁质材料,它包裹了高压输电导线的绝大部分区域,极大地增强了连接处导线周围的磁场强度,尤其是高出导线的两侧臂间的区域,磁力线密度得到显著增强,悬垂线夹对导线磁场的影响示意图见图10。

当机器人在无障碍物的输电导线上行驶时,远离和靠近悬垂线夹的两个传感器的输出基本相等;当机器人接近悬垂线夹时,安装在奇臂行走轮上的电磁传感器的输出变大,而安装在偶臂行走轮上的电磁传感器的输出基本不变,机器人定位悬垂线夹



1—电磁传感器；2—悬垂线夹；3—输电导线。

图 10 悬垂线夹对导线磁场的影响

Fig. 10 The impact on the wire magnetic field by suspension clamp

时传感器输出信号见图 11。

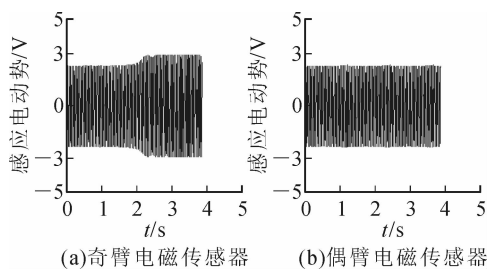


图 11 悬垂线夹处传感器信号图

Fig. 11 The sensor signal chart at suspension clamp

根据电磁传感器输出信号可以实现悬垂线夹的定位控制,当机器人定位到悬垂线夹后奇臂电磁传感器线圈的感应电动势 ε 会增大,因此可通过机器人实时监测 ε ,当检测到 ε 增大时自动执行刹车动作,此时可认为机器人已准确定位到悬垂线夹,机器人定位悬垂线夹流程见图 12。

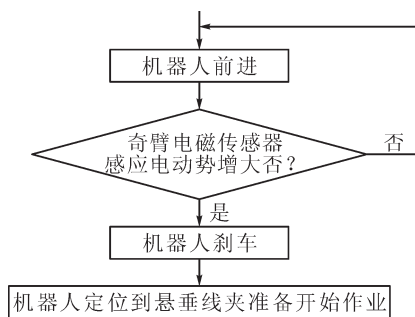


图 12 机器人定位悬垂线夹流程图

Fig. 12 Robot localization suspension clamp flowchart

4.3 碗头挂板的定位控制

碗头挂板的定位控制主要包含两个部分:①碗头挂板夹持机构所在平面与碗头挂板所在平面之间夹角的定位;②碗头挂板夹持机构两个夹爪之间的空间与碗头挂板位置的定位。只有当碗头挂板夹持机构所在平面与碗头挂板所在平面垂直时,夹持机构才可以两端平衡的夹持碗头挂板,在控制上可

通过位置模式精细调节 1 臂旋转关节使此角度接近 90° ;只有当碗头挂板正好在碗头挂板夹持机构两个夹爪之间的空间内,在碗头挂板夹持时才不会出现末端执行机构与作业环境的干涉,由于 1 臂没有横移关节,因此可以通过位置模式控制行走轮,来实现横移功能至碗头挂板正好在夹持机构两夹爪空间内,实现上述二者定位后可 1 臂内移,夹持碗头挂板;如果碗头挂板与机械手末端之间无干涉,则可实现碗头挂板的定位夹持。如果有干涉则可重复上述过程进行精细调节直至无干涉为止后进行碗头挂板的夹持。碗头挂板的定位效果见图 13。



图 13 碗头挂板的定位效果图

Fig. 13 Bowl head hanging plate localization effect

4.4 绝缘子串钢帽的定位控制

绝缘子串钢帽的定位控制主要包含两个部分:①绝缘子串钢帽夹持机构所在平面与钢帽所在平面之间夹角的定位;②绝缘子串钢帽夹持机构两个夹爪之间的空间与钢帽位置的定位。只有当绝缘子串夹持机构所在平面与钢帽所在平面垂直时,夹持机构才可以两端平衡的夹持钢帽,在控制上可通过位置模式精细调节 2 臂旋转关节使此角度接近 90° ;只有当钢帽正好在碗头挂板夹持机构两个夹爪之间的空间内,在钢帽夹持时才不会出现末端执行机构与作业环境的干涉,所以可以通过位置模式控制 2 臂横移关节至钢帽正好在夹持机构两夹爪空间内,实现上述二者定位后可 2 臂内移,同时可位置模式调节 2 臂伸缩电机使得绝缘子串夹爪位于合适的位置,如果绝缘子串钢帽与机械手末端之间无干涉,则可对绝缘子串钢帽进行夹持。如果有干涉则可重复上述过程进行精细调节直至无干涉为止后进行绝缘子钢帽的夹持。绝缘子串钢帽的定位见图 14。

4.5 W 销的定位控制

在碗头挂板夹持和绝缘子串夹持完成后,就需要定位 W 销与 W 销两个推块之间的位置关系,只有当两个 W 销推块与 W 销在同一个平面上时,才



图 14 绝缘子串钢帽的定位效果图

Fig. 14 Insulator string steel cap localization effect

能准确够推出或推进 W 销, W 销的定位可通过安装在 1 臂末端两个 W 销推块后的摄像机来进行视频交互控制, 调节时可位置模式松开碗头挂板夹持机构, 位置模式伸缩 1 臂, 使得 W 销和两个推块保持在同一个水平面上后再重新夹紧碗头挂板, 此时可以开始 W 销的推出。W 销与推块对准定位效果见图 15。



(a)W销的推出定位



(b)W销的推入定位

图 15 W 销的定位和对准效果图

Fig. 15 The W pin localization and alignment effect

5 试验

5.1 工频耐压试验

机器人工作于高压环境下, 为验证机器人的抗强电磁干扰能力, 在高压大厅对机器人进行工频耐压试验, 测得的机器人紫外成像见图 16, 机器人的运行效果见表 1。

从表 1 可知, 在 220、330 kV 高电压情况下, 机器人各项指标都正常, 机器人能够实时准确接收响



图 16 机器人紫外成像图

Fig. 16 Robot ultraviolet imaging map

表 1 机器人工频耐压试验结果

Table 1 Robot frequency voltage withstand test results

项目	试验参数及结果	
施加电压大小/kV	220	330
试验持续时间/min	45	45
机器人本体工作情况	正常	正常
地面基站工作情况	正常	正常
摄像头工作情况	正常	正常

应地面基站的控制信号, 地面基站能够实时准确接收机器人的状态反馈信息, 4 个摄像机正常工作, 图像视频信息传递清晰流畅。

5.2 现场试验

为进一步验证机器人绝缘子更换控制方法的有效性, 在国网某电力公司带电作业中心 220 kV 培训线路上进行机器人带电更换绝缘子试验, 其关键位置定位控制过程见图 17。

在 220 kV 培训线路上绝缘子更换作业过程中, 依照文中提出的作业流程利用文中提出的控制方法, 机器人机械手末端对碗头挂板的夹持、绝缘子串钢帽的夹持、W 销的推进和推出、球头的推进和推出等关键作业动作定位准确, 大约 30 min 即可完成一次绝缘子更换作业任务, 相比纯人工登塔作业提高了效率、减轻了劳动强度, 并且大大降低了电力工人高空带电作业的危险性。

6 结语

文中提出了一种速度、位置混合模式下基于电磁传感器的绝缘子串更换带电作业机器人控制方法, 并通过实际带电作业试验验证了该控制方法的有效性。在后续的研究中可针对不同的作业对象设计开发不同的机械手作业末端, 进一步拓展机器人的作业功能; 此外基于机器视觉研究机器人的自动或联动控制以提高机器人作业的智能化程度和作

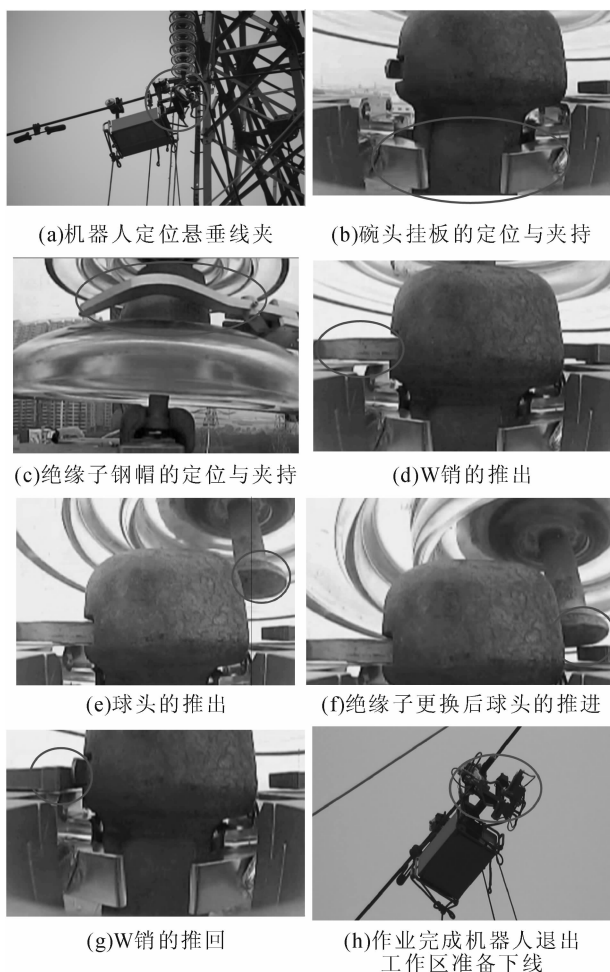


图17 绝缘子更换过程

Fig. 17 The insulator replacement process

业效率是机器人今后研究的热点之一。

参考文献:

- [1] TAKAOKA K, YOKOYAMA K, WAKISAKO H, et al. Development of the fully automatic live line maintenance robot phase III[C]//Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on assembly and Task Planning Soft Research Park. Fukuoka, Japan: IEEE, 2001: 28-29.
- [2] ARACIL R, EPINTO E, FERRE N. Robots for live power lines maintenance and inspection task[C]//15th Triennial Work Congress Conference. Barcelona, Spain: IEEE, 2002: 118-120.
- [3] WANG Xi, YU Zhangqing, HE Jinliang. Breakdown process experiments of 110~500 kV insulator strings under short tail lightning impulse[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 5(29): 2394-2401.
- [4] LU Shouyin, MA Peisun, QI Hui, et al. Research on high voltage electric power live line working robot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 56-58.
- [5] 肖春伟, 孙君录, 申思勉. 带电更换高压输电线路耐张绝缘子方法探讨[J]. 河南电力, 2014(4): 37-39.
- [6] 陈忠华, 邹伟华, 沈佳. 新型绝缘子锁紧销拔销器的研制[J]. 浙江电力, 2014(1): 26-29.
- [7] 张海兵, 景文炳, 胡应华, 等. 特高压直流线路带电更换绝缘子卡具的设计[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2013, 32(6): 73-78.
- [8] 赵玉良, 李运厂, 戚辉, 等. 高压输电线路带电作业智能化自动工具研究[J]. 制造业自动化, 2012, 2(34): 12-14.
- [9] 李俊峰, 刘红伟, 姜国庆, 等. 1 000 kV 特高压输电线路检修专用绝缘子卡具的研制[J]. 电力建设, 2010, 7(31): 33-40.
- [10] 史磊, 曹志全, 李晓兵, 等. 带电更换 750 kV 线路直线单串复合绝缘子技术实践与改进[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(9): 41-44.
- [11] 胡毅, 刘凯. 超/特高压交直流输电线路带电作业[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [12] 鲁守银, 史向东, 苏建军. 10 kV 配电带电作业机器人绝缘防护设计[J]. 高压电器, 2006, 42(1): 8-10.
- [13] KATRASNİK J, PERNUS F, LIKAR B. A survey of mobile robots for distribution power line inspection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(1): 485-493.

(下转第 107 页)

- transient electric power of dry type air core shunt reactor [J], Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014(6):93-97.
- [16] 赵延山. 空心电抗器电场及电力问题分析[D]. 济南:山东大学, 2012.
- ZHAO Yanshan. Analysis on electric field and electromagnetic force of air-core reactor[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [17] STEINBIGLER H, HALLER D, WOLF A. Comparative analysis of methods for computing 2D and 3D electric fields[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation. 1991, 26(3):529-536.
- [18] 倪学锋, 林 浩, 沈 静, 等. 干式并联电抗器包封进水对运行可靠性影响的试验研究[J]. 电力设备, 2006, 7(12):4-6.
- NI Xuefeng, LIN Hao, SHEN Jing, et al. Research of influence of watered sealing of dry-type shunt reactor on operation reliability[J]. Electrical Equipment, 2006, 7(12):4-6.
- [19] 叶占刚. 干式空心电抗器的温升试验与绕组温升的计算[J]. 变压器, 1999, 36(9):6-12.
- YE Zhangang. Temperature rise test of dry-type air-core reactor and calculation of its winding temperature rise[J]. Transformer, 1999, 36(9):6-12.
- [20] CRISTINA D A, CAIUBY A D, ROBERTO D C, et al. Electromagnetic environment measurement under steady-state conditions in utility substations[C]// Transmission & Distribution Conference and Exposition. Latin America[s.n.]: 2006:1-6.
- 吴彦霖(1991—), 女, 硕士, 研究方向为变压器以及配网技术。
- 谭向宇(1980—), 男, 博士, 从事高压试验研究工作。
-
- (上接第 98 页)
- [14] 李 豫, 李 靖. 直升机带电作业的现状、技术难点和发展趋势[J]. 华中电力, 2011, 24(1):18-22.
- LI Yu, LI Jing. Status quo, technical difficulties and development tendency of helicopter live-line maintenance [J]. Central China Electric Power, 2011, 24(1): 18-22.
- [15] 胡 毅. 输配电线路带电作业技术的研究与发展[J]. 高电压技术, 2006, 32(11):1-10.
- HU Yi. Research and development of live working technology on transmission and distribution lines [J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(11): 1-10.
- [16] 王 伟, 白玉成, 吴功平, 等. 一种基于信息融合的巡线机器人电磁导航方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 73-79.
- WANG Wei, BAI Yucheng, WU Gongping, et al. An electromagnetic navigation method based on information fusion for inspection robot[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 73-79.
- [17] 陈中伟, 肖 华, 吴功平, 等. 高压巡线机器人电磁传感导航方法[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(9):33-35.
- CHEN Zhongwei, XIAO Hua, WU Gongping, et al. Electromagnetic sensor navigation system of robot for high-voltage transmission line inspection[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2006, 25(9): 33-35.
- [18] 伍 洲, 方彦军. 高压巡线机器人电磁导航系统研究与设计[J]. 高电压技术, 2008, 34(9):1959-1963.
- WU Zhou, FANG Yanjun. Research and design of electromagnetic navigation system of power transmission line inspection robot[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1959-1963.
- 邹德华(1967—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为输电线路带电作业。
- 江 维(1984—), 男, 博士研究生, 研究方向为带电作业机器人控制方法。