

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2016.11.003

高压线路四臂移动作业机器人 BP 网络联动控制

江 维, 吴功平, 樊 飞, 张 颀
(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 针对完全依靠人工带电拧紧高压输电线路耐张跳线引流板螺栓作业效率低、劳动强度大、高空、高压危险的不足设计了一种四臂移动作业机器人. 为提高作业效率, 提出了基于 BP 神经网络的机器人双臂联动控制算法, 将机器人的联动抽象为轨迹跟踪控制问题. 在 Matlab 环境下对机械手末端从 3 个方向进行了位姿跟踪仿真分析, 最后在实际线路上进行机器人带电拧紧引流板螺栓试验. 仿真分析和现场试验都验证了四臂移动作业机器人联动控制方法可行有效且具有较强的工程实用性, 达到了提高作业效率的设计要求.

关 键 词: 移动作业机器人; BP 神经网络; 螺栓拧紧; 轨迹跟踪; 联动控制

中图分类号: TP 242.3 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2016)11-1530-06

Four Arm Mobile Working Robot Linkage Control for High Voltage Transmission Line Based on BP Neural Network

JIANG Wei, WU Gong-ping, FAN Fei, ZHANG Jie
(School of Power & Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China. Corresponding author: WU Gong-ping, E-mail: gpwu@whu.edu.cn)

Abstract: In response to the shortage of tension clamp drainage board bolt tighten for high voltage transmission line on artificial low operation efficiency, labor-intensive, high-altitude, and high risk, a four arm mobile working robot was designed. In order to improve the operation efficiency, a robot arm linkage control algorithm was proposed based on BP neural network. The linkage control of the robot was abstracted into trajectory tracking control problem. In the Matlab environment, robot manipulator end tracking simulations were carried out from three directions. Finally the robot charged tighten bolt was tested on the actual line. Simulation and field tests verified that the proposed four arms mobile work robot linkage control method is feasible and effective with a strong engineering practicality which meet the design requirements of improving the operation efficiency.

Key words: mobile working robot; BP neural networks; bolt tighten; trajectory tracking; linkage control

耐张跳线是架空高压输电线路的重要组成部分,耐张杆塔两侧的输电导线是通过耐张跳线和引流板连接起来,从而形成电流等输送通道,然而由于外力震动、施工工艺等因素易导致引流板连接处螺栓松动,使得引流板接触不良,引流板过热,引流板长期过热运行可能会引起耐张跳线烧伤、变形,甚至造成导线损伤、断股、断裂等事故发生,影响整条输电线路的安全可靠运行^[1-6]. 因此

定期拧紧输电线路引流板螺栓是电力部门的一项常规性任务,它为电能的稳定传输提供了有力保障. 传统的引流板螺栓拧紧是靠人工完成的,然而高空、高压作业环境使得完全依靠人工进行螺栓拧紧作业不仅效率低下而且具有很大的危险性,因此研究面向高压输电线路引流板螺栓拧紧带电作业机器人来代替人工作业具有重要意义. 基于此,本文提出了一种面向高压输电线路螺栓紧固

的四臂移动作业机器人构型,通过移动机器人搭载的两个机械手和末端工具,实现了关键位置的定位,替代人工完成了螺栓紧固作业任务.为进一步提高输电线路四臂移动作业机器人的作业效率,目前机器人的多轴联动与轨迹跟踪控制,国内外的研究大多集中在工业机器人和地面移动机器人^[7-10].而高压输电线路方面的研究和应用较少,因此,本文提出了一种基于 BP 神经网络的输电线路四臂移动作业机器人双臂联动轨迹跟踪控制方法.通过空间坐标系的建立,将螺栓螺母的对准问题抽象为机器人双机械手的轨迹跟踪控制问题,利用神经网络的非线性逼近特性,实现了机器人双臂联动控制,双机械手末端与引流板螺栓螺帽的快速对准与定位,并获得了较好的控制效果.

1 四臂移动作业机器人的实体构型

四臂移动作业机器人的 4 个机械臂指的是 2 个固定臂和 2 个移动臂,其中 2 个固定臂被称为奇臂和偶臂,2 个移动臂被称为作业臂 1 和作业臂 2.2 个机械手末端以移动机器人的 2 个移动臂为载体,移动机器人本体由控制箱、双作业臂、双行走轮及其夹爪和等电位轮组成,2 个固定臂对称地分布在机体中间,行走轮分别与 2 个固定臂相连接,行走于输电导线上,双固定臂上分别有夹爪装置以夹紧导线提高机器人作业的安全性.为了满足机器人等电位作业能力,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.作业臂 1,2 及其作业末端,在机体两侧对称布置,四臂移动作业机器人的末端执行机构由螺栓固定装置和螺母拧紧装置构成,通过各关节协同工作,将末端执行机构带到或离开工作平面实现引流板螺栓紧固作业.四臂移动作业机器人实体结构如图 1 所示.

2 螺栓紧固作业原理和作业流程

图 2 为引流板结构模型图,输电导线和耐张引流线通过引流板相连接,其中连接部分通过螺栓固定起来.在进行引流板螺栓紧固作业时,首先由机械手 1 将螺栓头固定,然后在机械手 2 套筒套住螺母后可开始拧紧作业.

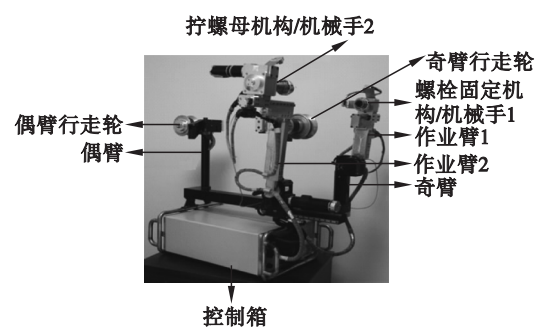


图 1 四臂移动作业机器人实体结构图
Fig. 1 Entity structure of mobile working robot

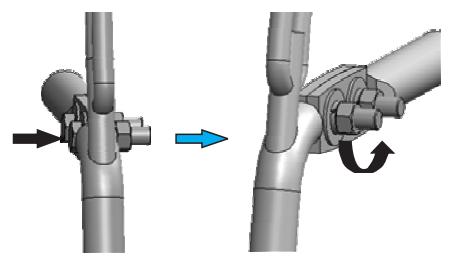


图 2 引流板结构模型图
Fig. 2 Structure model of drainage board

机器人完成引流板螺栓紧固作业的整个过程主要包含机器人上线作业前的准备工作,上线后机器人机械手 1 末端固定螺栓头,机械手 2 末端与螺母的对准、对接及拧紧螺母,机器人作业完成恢复至初始位姿后下线几个部分.作业流程为机械臂调整至合适姿态上线→机械臂 1 末端固定螺栓+机械臂 2 末端拧紧螺母→机械臂恢复至初始位姿→机器人吊装下线.在整个过程中作业关键是机器人双机械手及其末端与螺栓螺母的对准、对接,它直接关系到机器人的作业效率.

3 机器人的神经网络联动控制方法

3.1 四臂移动作业机器人的控制体系结构

机器人进行引流板螺栓紧固作业任务时,首先机器人行走于输电导线,奇臂行走轮定位到压接管,为进一步提高机器人的作业效率,可通过双臂双机械手联动控制实现螺栓头和螺母的对准定位,对准后可以固定螺栓头执行拧螺母操作.整个作业过程的控制可分解为移动机器人本体、作业末端、联动控制 3 个部分.其中移动机器人的控制是针对机械臂和行走机构的控制,末端控制是针对机械手的控制,联动控制是机械臂和机械手控制的混合控制,四臂移动作业机器人控制体系结构如图 3 所示.

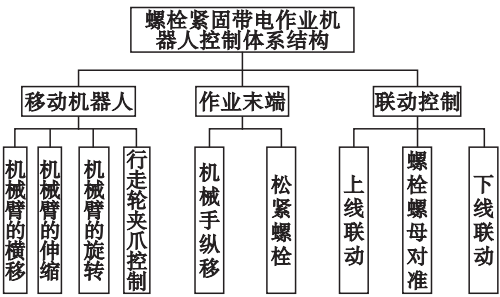


图 3 机器人控制体系结构
Fig. 3 Control architecture of the robot

3.2 螺栓螺母对准双臂联动控制模型的建立

为便于分析,以定位到压接管的机器人奇臂行走轮为空间坐标原点,沿导线方向为 X 轴、机械臂伸缩方向为 Y 轴、机械手纵移方向为 Z 轴建立空间坐标系,设机器人机械手末端在空间坐标系中的坐标为 $P_{0i}(x_{0i}, y_{0i}, z_{0i})$ ($i=1$ 时表示机械手 1, $i=2$ 时表示机械手 2),将 P_{0i} 定义为机器人双机械手的初始位姿,如图 4a 所示,设引流板螺栓螺母在空间坐标系中的坐标为 $P_{ri} = (x_{ri}, y_{ri}, z_{ri})$ ($i=1$ 时表示机械手 1, $i=2$ 时表示机械手 2). 将 P_{ri} 定义为机器人双机械手的理想位姿,如图 4b 所示,机器人联动控制实现螺栓螺母对准的目标就是通过机械臂的旋转、伸缩和机械手的纵移三种基本动作完成两个机械手末端与引流板螺栓螺母的对准、对接. 通过上述分析可知,机器人机械手末端由初始位姿到螺栓螺母的对准状态整个过程可抽象为机器人机械手轨迹跟踪控制问题,其实质是机械手在空间坐标系中由初始位姿 P_{0i} 通过机器人机械臂的旋转、伸缩、机械手的纵移调节机器人机械手在空间坐标系中的位姿,不断逼近理想位姿 P_{ri} 的过程.

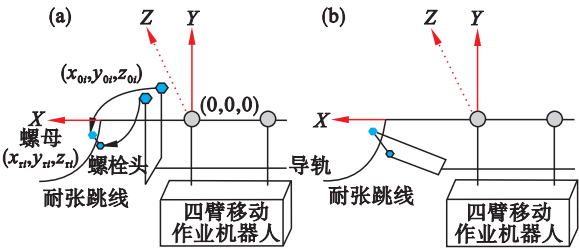


图 4 机器人双机械手位姿
Fig. 4 Double manipulator pose of robot
(a) — 初始位姿; (b) — 理想位姿.

设旋转电机、伸缩电机、纵移电机的实际转速为 $\omega_1^i, \omega_2^i, \omega_3^i$, 对应的理想转速为 $\omega_{1r}^i, \omega_{2r}^i, \omega_{3r}^i$, 则转速误差为 $\omega_{e1}^i = \omega_1^i - \omega_{1r}^i, \omega_{e2}^i = \omega_2^i - \omega_{2r}^i, \omega_{e3}^i = \omega_3^i - \omega_{3r}^i$, 由于机械手位姿和关节电机转速可以通过微分和积分相互转换, 设机器人机械手的实际

位姿为 $P_i = [x_i, y_i, z_i]^T$, 理想位姿为 $P_{ri} = [x_{ri}, y_{ri}, z_{ri}]^T$, 则位姿误差为 $x_{ei} = x_i - x_{ri}, y_{ei} = y_i - y_{ri}, z_{ei} = z_i - z_{ri}$. 机器人双机械手螺栓螺母对准联动控制问题可描述为, 对于任意给定速度和确定的机器人初始位姿, 经过机器人控制器调节后机械手关节电机转速和位姿都能够跟踪到理想速度和理想位姿, 并使得 $\lim_{t \rightarrow t_0} [\omega_{e1}^i, \omega_{e2}^i, \omega_{e3}^i]^T = 0, \lim_{t \rightarrow t_0} [x_{ei}, y_{ei}, z_{ei}]^T = 0$. 上述各表达式中 $i=1$ 代表机械臂 1 或机械手 1, $i=2$ 代表机械臂 2 或机械手 2. 机器人机械手螺栓螺母对准流程如图 5 所示.

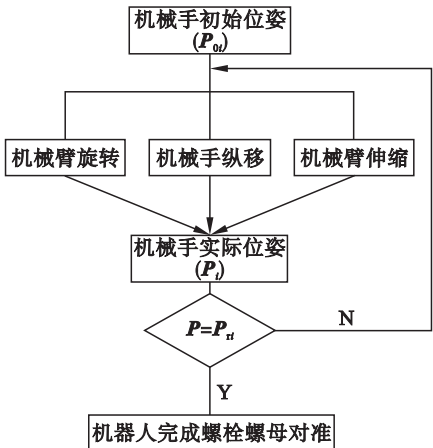


图 5 机械手螺栓螺母对准流程图
Fig. 5 The flowchart of manipulator bolt and nut alignment

3.3 四臂移动作业机器人神经网络联动控制原理

由 3.2 分析可知, 机器人双臂联动实现机械手末端与螺栓螺母的对准其本质是机器人机械手末端在空间坐标系中由初始位姿不断逼近理想位姿的过程, 由于神经网络对非线性系统具有较强映射能力, 它可以以较高的精度逼近非线性系统, 所以在联动控制中引入神经网络控制器, 可以更好地实现机器人机械手末端由初始位姿到理想位姿的逼近. 机器人神经网络联动控制系统结构如图 6 所示, 神经网络控制器以机械手关节电机转速误差为输入, 通过神经网络的学习动态调节控制机器人机械臂的旋转、伸缩和机械手的纵移电机转速并通过积分位姿变换得到机械手的实际位姿, 然后再与理想位姿比较得到位姿误差, 通过位姿误差微分变换得到关节电机转速误差, 并作为控制器的输入, 而形成的一个闭环控制系统. 通过控制器的动态调节, 当机械手的实际位姿逼近到理想位姿, 位姿误差为 0 时整个动态调节过程结束, 机械手末端对准到螺栓螺母.

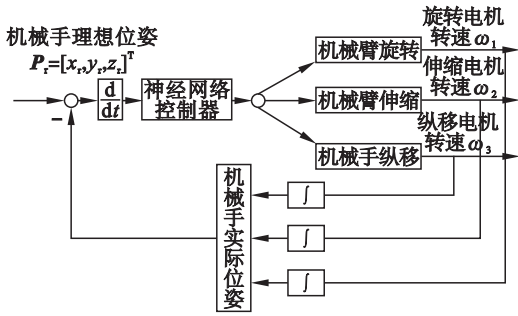


图 6 机器人神经网络联动控制结构图

Fig. 6 The structure of the robot linkage control based on neural net work

BP 神经网络是一种由输入层、隐含层、输出层所构成的三层前向网络,理论上讲三层 BP 网络能以任意精度逼近任何非线性系统^[11],因此本文采用了标准的三层 BP 神经网络,其结构如图 7 所示。BP 神经网络的输入为机械手在空间坐标系中 3 个方向的位姿误差导数 $\dot{x}_e, \dot{y}_e, \dot{z}_e$,输出为关节电机转速 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$,用于控制机械臂的旋转、机械臂的伸缩、机械手的纵移动作,通过 BP 神经网络的训练学习不断调节机器人机械手在空间坐标系中的位姿,直到位姿误差达到性能指标的要求,机器人机械手末端实现螺母帽对准定位。

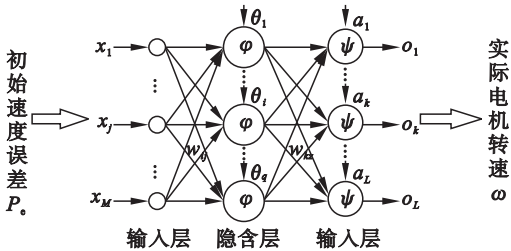


图 7 BP 神经网络结构示意图

Fig. 7 Structure of BP neural network

图 7 中: w_{ij} 为隐含层节点 i 到输入层节点 j 间的权值 ($j = 1, 2, 3$); θ_i 为隐含层节点 i 阈值; $\varphi(x)$ 为隐含层激励函数; w_{ki} 为输出层节点 k 到隐含层节点 i 间的权值 ($k = 1, 2, 3$); a_k 为输出层节点 k 阈值 ($k = 1, 2, 3$); $\psi(x)$ 为输出层激励函数; O_k 为输出层节点 k 输出 ($k = 1, 2, 3$)。

3.4 BP 网络联动控制算法的设计

BP 网络联动控制算法的设计其本质为 BP 网络训练学习的过程,它包括两个方面的内容:其一信号前向传播;其二和误差反向传播。在计算网络输出时由输入到输出方向进行,而阈值与权值的修正由输出到输入方向进行。机器人 BP 网络联动控制算法流程如图 8 所示。

1) 信号前向传播过程。隐含层节点 i 输入 net_i 为

$$\text{net}_i = \sum_{j=1}^M w_{ij}x_j + \theta_i. \quad (1)$$

隐含层节点 i 输出 y_i 为

$$y_i = \varphi(\text{net}_i) = \varphi\left(\sum_{j=1}^M w_{ij}x_j + \theta_i\right). \quad (2)$$

输出层节点 k 输入 net_k 为

$$\text{net}_k = \sum_{i=1}^q w_{ki}y_i + a_k = \sum_{i=1}^q w_{ki}\varphi\left(\sum_{j=1}^M w_{ij}x_j + \theta_i\right) + a_k. \quad (3)$$

输出层节点 k 输出 o_k 为

$$o_k = \psi(\text{net}_k) = \psi\left(\sum_{i=1}^q w_{ki}y_i + a_k\right) = \psi\left(\sum_{i=1}^q w_{ki}\varphi\left(\sum_{j=1}^M w_{ij}x_j + \theta_i\right) + a_k\right). \quad (4)$$

2) 误差反向传播过程。网络训练过程中,输出层先逐层计算网络各层的输出误差,然后依据梯度下降法来逐步调节各层的阈值和权值,并使得训练后网络的输出逼近到期望值。

对于每一个样本 p 的二次型误差函数 E_p 为

$$E_p = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L (T_k - o_k)^2. \quad (5)$$

系统 p 个训练样本总误差函数为

$$E = \frac{1}{2} \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p)^2. \quad (6)$$

根据误差梯度下降法依次修正输出层权值的修正量 Δw_{ki} ,输出层阈值的修正量 Δa_k ,隐含层权值的修正量 Δw_{ij} ,隐含层阈值的修正量 $\Delta \theta_i$ 。

$$\left. \begin{aligned} \Delta w_{ki} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ki}}, \Delta a_k = -\eta \frac{\partial E}{\partial a_k}; \\ \Delta w_{ij} &= -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}}, \Delta \theta_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial \theta_i}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

输出层权值调整为

$$\Delta w_{ki} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ki}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} \frac{\partial \text{net}_k}{\partial w_{ki}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial o_k} \frac{\partial o_k}{\partial \text{net}_k} \frac{\partial \text{net}_k}{\partial w_{ki}}. \quad (8)$$

输出层阈值调整为

$$\Delta a_k = -\eta \frac{\partial E}{\partial a_k} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} \frac{\partial \text{net}_k}{\partial a_k} = -\mu \frac{\partial E}{\partial o_k} \frac{\partial o_k}{\partial \text{net}_k} \frac{\partial \text{net}_k}{\partial a_k}. \quad (9)$$

隐含层权值调整为

$$\Delta w_{ij} = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_{ij}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \text{net}_i} \frac{\partial \text{net}_i}{\partial w_{ij}} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y_i} \frac{\partial y_i}{\partial \text{net}_i} \frac{\partial \text{net}_i}{\partial w_{ij}}. \quad (10)$$

隐含层阈值调整为

$$\Delta\theta_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial \theta_i} = -\eta \frac{\partial E}{\partial \text{net}_i} \frac{\partial \text{net}_i}{\partial \theta_i} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y_i} \frac{\partial y_i}{\partial \text{net}_i} \frac{\partial \text{net}_i}{\partial \theta_i} .$$

(11)

由于

$$\frac{\partial E}{\partial o_k} = - \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) ,$$

(12)

$$\frac{\partial \text{net}_k}{\partial w_{ki}} = y_i, \frac{\partial \text{net}_k}{\partial a_k} = 1, \frac{\partial \text{net}_i}{\partial w_{ij}} = x_j, \frac{\partial \text{net}_i}{\partial \theta_i} = 1 ,$$

(13)

$$\frac{\partial E}{\partial y_i} = - \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) \cdot \psi'(\text{net}_k) \cdot w_{ki} ,$$

(14)

$$\frac{\partial y_i}{\partial \text{net}_i} = \varphi'(\text{net}_i) ,$$

(15)

$$\frac{\partial o_k}{\partial \text{net}_k} = \psi'(\text{net}_k) .$$

(16)

所以可得到 BP 神经网络隐含层和输出层权值和阈值的调节公式为

$$\Delta w_{ki} = \eta \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) \cdot \psi'(\text{net}_k) \cdot y_i ,$$

(17)

$$\Delta a_k = \eta \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) \cdot \psi'(\text{net}_k) ,$$

(18)

$$\Delta w_{ij} = \eta \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) \cdot \psi'(\text{net}_k) \cdot w_{ki} \cdot \varphi'(\text{net}_i) \cdot x_j ,$$

(19)

$$\Delta \theta_i = \eta \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^L (T_k^p - o_k^p) \cdot \psi'(\text{net}_k) \cdot w_{ki} \cdot \varphi'(\text{net}_i) .$$

(20)

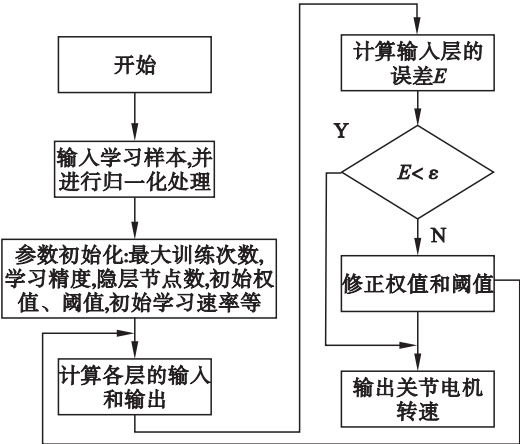


图 8 BP 神经网络联动控制算法流程
Fig. 8 The flowchart of BP neural network linkage control

4 试 验

4.1 仿真实验

为验证本文机器人 BP 神经网络联动控制算法的有效性,以机械手 2 螺母对准联动控制为例,

将机械手 2 螺母对准联动控制问题分解为 X、Y、Z 3 个方向的轨迹跟踪控制,机器人机械手 2 由初始位姿 P_{02} 到理想位姿 P_{t2} ,利用 BP 神经网络控制器在 3 个方向上进行位姿跟踪仿真,其中 BP 神经网络训练采用的是 L - M 算法,网络最大训练次数设置为 500 次,网络训练优化目标设置为 10^{-3} ,BP 网络训练结果及三个方向上的位姿跟踪误差曲线如图 9 所示。

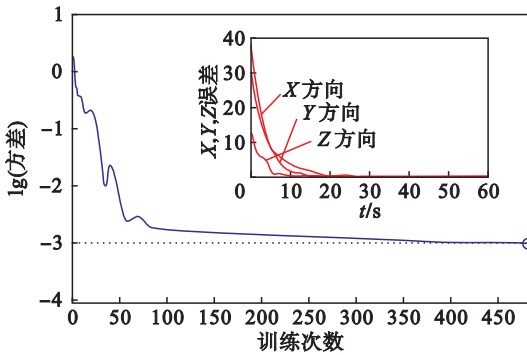


图 9 BP 神经网络训练曲线
Fig. 9 The training curve of BP neural network

由仿真结果可知,BP 神经网络在经过 482 次训练后系统性能指标达到预定目标值,机器人机械手 2 在 3 个方向上的初始误差为 40,29,12.5 cm,通过机器人联动控制约 35 s 后 3 个方向的位姿误差都收敛到了 0,由此可知本文所提出神经网络机器人联动控制器满足了控制系统响应速度快、跟踪误差小和系统稳定的设计要求。

4.2 现场试验

为进一步验证机器人神经网络联动控制器的工程实用性,利用本文所提出的控制算法在实际线路上进行带电作业机器人引流板螺栓紧固作业试验,机器人奇臂行走轮定位到压接管后,机械手由初始位姿到理想位姿过程分别采用机器人双臂联动和单臂操作实现螺栓螺母的对准对接,其作业现场如图 10 所示。

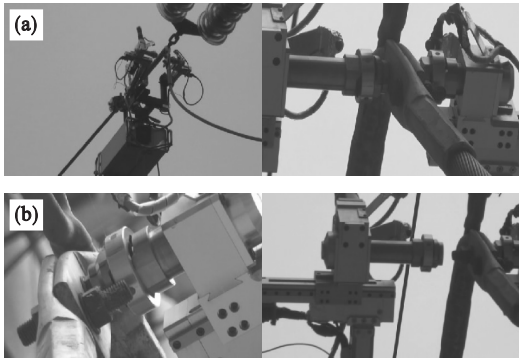


图 10 机器人现场作业试验
Fig. 10 Robot field operation test
(a) —双臂联动; (b) —单臂运动。

通过现场试验可知,机器人单臂运动操作实现螺栓螺母的对准对接大约需要 5 min,而通过神经网络控制算法实现的双臂联动控制螺栓螺母对准大约只需要 1 min,由此可见神经网络双臂联动控制算法大大提高了机器人的作业效率,并且进一步体现了机器人作业的智能性。

5 结 论

1) 提出了面向高压输电线路引流板螺栓紧固作业任务的四臂移动作业机器人的基本构型并开发了试验样机。

2) 在高压输电线路四臂移动作业机器人引流板螺栓紧固作业中 BP 神经网络双臂联动控制较单臂单关节运动作业大大提高了机器人的作业效率。

3) Matlab 仿真实验验证了本文设计的 BP 神经网络联动控制算法的有效性。

4) 现场机器人带电作业试验进一步验证了本文设计的 BP 神经网络联动控制算法的工程实用性。

参考文献：

[1] 胡家瑞,谢亿,刘纯,等. 输电线路耐张线夹典型缺陷探析 [J]. 华北电力技术,2013(4):34 - 38.
(Hu Jia-rui, Xie Yi, Liu Chun, et al. Research on transmission line clamp typical defects [J]. *North China Electric Power Technology*, 2013(4):34 - 38.)

[2] 刘永志,屈以军. 带负荷检修处理输电线路耐张跳线引流板过热缺陷 [J]. 安徽电力,2014(6):12 - 20.
(Liu Yong-zhi, Qu Yi-jun. With load inspection processing transmission line jumper drainage board overheating defects [J]. *Anhui Power*, 2014(6):12 - 20.)

[3] Dixon W E, Dawson D M, Zhang F, et al. Global exponential tracking control of a mobile robot system via a PE condition

[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2000, 30(1):129 - 142.

[4] Dixon W E, Dawson D M, Zergeroglu E. Tracking and regulation control of a mobile robot system with kinematic disturbances; a variable structure-like approach [J]. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 2000, 12(2):616 - 620.

[5] Kumar U, Sukavanam N. Backstepping based trajectory tracking control of a four wheeled mobile robot [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2008, 5(4):403 - 410.

[6] Ghommam J, Mehrjerdi H, Saad M. Formation path following control of unicycle type mobile robots [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2010, 58(5):727 - 736.

[7] Singh J, Gandhi K, Kapoor M, et al. New approaches for live wire maintenance of transmission lines [J]. *MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*, 2013, 3(2):67 - 71.

[8] Banthia V, Maddahi Y, Balakrishnan S, et al. Haptic enabled teleoperation of base-excited hydraulic manipulators applied to live line maintenance [C] // *Intelligent Robots and Systems (IROS 2014)*, 2014 IEEE/RSJ International Conference on IEEE. Chicago, 2014:1222 - 1229.

[9] Debenest P, Guarnieri M. Expliner-from prototype towards a practical robot for inspection of high-voltage lines [C] // *1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry*. Piscataway, 2010:1 - 6.

[10] 毛新涛,包钢,杨庆俊,等. 3 自由度气动串联机械手的关节控制 [J]. 机械工程学报,2008,44(12):254 - 260.
(Mao Xin-tao, Bao Gang, Yang Qing-jun, et al. Joints control of 3-DOF pneumatic serial manipulator [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2008, 44(12):254 - 260.)

[11] 吴宝强,孙炜,曹成. 柔性和摩擦力不确定条件下 BP 神经网络自适应轨迹跟踪方法 [J]. 机械工程学报,2012,48(19):23 - 28.
(Wu Bao-qiang, Sun Wei, Cao Cheng, et al. Flexible and friction under conditions of uncertainty BP neural network adaptive tracking method [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(19):23 - 28.)