

输电线路带电作业机器人机械手 RBF 神经网络控制

江 维¹, 吴功平¹, 曹 琪², 杨 松²

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072;

2. 国网吉林省电力有限公司 白山供电公司, 吉林 白山 134300)

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、高空高压危险设计了一种双臂、双机械手的螺栓紧固带电作业机器人。在整个作业过程中着重对螺栓拧紧的关键问题进行了理论分析,建立了螺栓拧紧过程控制的 RBF 神经网络模型。将机器人的螺栓拧紧过程抽象为神经网络的非线性逼近控制问题,提出了基于 RBF 神经网络的机器人螺栓拧紧状态监测控制方法。最后带电作业试验结果显示经过该控制方法机器人拧紧的螺栓联接可靠性增强,验证了所提出方法具有较强的工程实用性,同时进一步提高了作业效率、作业安全性及作业可操作性。

关 键 词: 引流板螺栓; RBF 神经网络; 带电作业机器人; 机械手; 拧紧控制

中图分类号: TP 242.3

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)10-1388-07

RBF Neural Network Control of Live Operation Robot Manipulator for High Voltage Transmission Line

JIANG Wei¹, WU Gong-ping¹, CAO Qi², YANG Song²

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Baishan Power Supply Bureau, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Baishan 134300, China. Corresponding author: JIANG Wei, E-mail: jiangwei2013@whu.edu.cn)

Abstract: Due to the shortage of manual tension clamp drainage board bolt tighten for high voltage transmission line, such as low operation efficiency, labor-intensive, high-altitude and high risk, an bolt tighten live operation robot was designed which had double arms and double manipulators. The key issues of bolt tighten was analyzed theoretically during the entire operation process, and a RBF neural network model of bolt tighten process control was established. The robot bolt tighten process was abstracted into nonlinear approximation, and a robot bolt tighten status monitoring control method based on the RBF neural network was proposed. Finally the live operation result showed that the connection reliability of the robot tighten bolts is greatly enhanced by using the proposed method that has strong engineering practicability, and the operation efficiency, operation safety and operation operability are all improved.

Key words: drainage board bolt; RBF neural networks; live operation robot; manipulator; tighten control

耐张杆塔是高压输电线路的主要组成部分之一,位于这类杆塔两侧的高压输电导线都是由耐张跳线和引流板两个关键部件联接起来的。由于恶劣自然环境下的外力震动及杆塔的施工工艺等各种因素容易造成引流板的螺栓发生松动导致接

触不良后其接头处电阻变大,引流板的温度会大幅升高,在过热环境下长期运行的引流板不但会造成电能的损耗还会使过热耐张跳线发生形变,严重时甚至可能导致输电导线断股和断裂的严重事故,对整条输电线路安全可靠运行产生不利影

响^[1-2]。所以,需要不定期地进行拧紧引流板螺栓作业。传统方式是由人工登塔在等电位下作业完成螺栓拧紧,然而高压、强电磁干扰的恶劣作业环境造成人工螺栓拧紧作业不仅作业效率低而且危险性高,并且拧紧状态也因人而异,作业效果无法保证。在日本九州公司^[3]、加拿大魁北克电力研究所^[4]及山东电科院^[5]等机构开展了机器人的带电作业研究工作,虽然已经有所进展,但在高压输电线路耐张线夹螺栓紧固作业方面研究很少。基于上述分析,本文开发了一种用于高压输电线路引流板螺栓紧固作业的机器人,通过移动平台携带两个作业末端工具,代替人工进行螺栓紧固作业任务。针对螺栓紧固作业过程中容易出现螺栓欠紧固和过紧固状态,以及螺栓拧紧状态和最佳预紧力不易确定的问题^[6-9],本文建立了螺栓紧固过程的 RBF 神经网络模型。将机器人的螺栓拧紧过程抽象为神经网络的非线性逼近控制问题,提出了基于 RBF 神经网络的机器人螺栓拧紧控制方法,有效避免了螺栓欠紧固和过紧固状态的发生,获得了较好的控制效果,进一步提高了引流板螺栓联接的和机器人作业的可靠性。

1 高压线路螺栓紧固作业机器人的实体构型

面向螺栓紧固作业任务的带电作业机器人主要包括双行走臂、双作业臂及机器人控制箱,实体结构如图 1 所示。行走臂通过末端复合的行走轮行走于输电导线并具有定位功能;作业臂 1 由旋

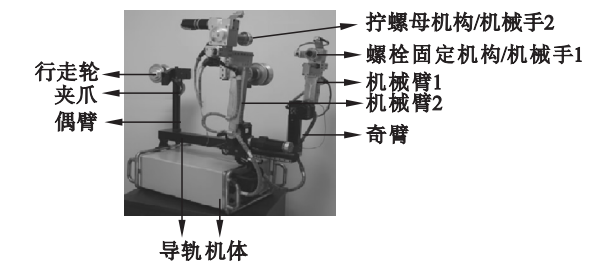


图 1 螺栓紧固作业机器人实体结构图
Fig. 1 Entity structure of bolt tighten operation robot

转、伸缩、纵移 3 个关节构成;机械臂 2 具有除作业臂 1 的 3 个关节外,还另有一个横移关节,双臂总共 7 个自由度。双臂携带机械手通过各关节协调运动在线路上有足够裕度,能够满足双作业手的运动空间与作业空间的需求。

螺栓紧固作业末端由燕尾槽固定在双作业臂的纵移关节上,其中拧螺母作业末端具有大功率的电机,可以实现拧螺母作业。两个作业末端均采

用了六角套筒的形式,保证了套筒和螺栓具有足够大的接触面;另外,在两个末端的内部都设有具有复位功能的弹簧虎克铰,因此,在引流板螺栓位姿异常情况下,可以减小在紧固螺栓作业过程中对末端所产生的内应力,通过机器人各关节协调运动将机械手送至工作区完成作业功能。

2 引流板螺栓紧固作业原理和作业流程

2.1 引流板螺栓紧固作业原理

引流板的结构模型图如图 2 所示,输电导线和耐张引流线是通过引流板联接在一起的,其中联接部分是由螺栓固定起来的。在进行螺栓紧固作业时,作业手 1 将螺栓头固定,再通过作业手 2 套筒套住螺母,并通过末端电机的转速和转向调节实现螺栓的松开和拧紧操作。

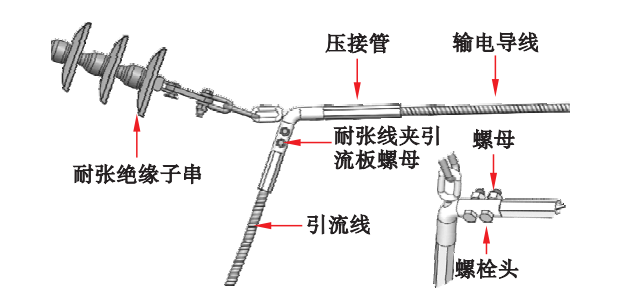


图 2 引流板结构模型图
Fig. 2 Structure model of drainage board

2.2 引流板螺栓紧固作业流程

引流板螺栓紧固作业的关键是双机械手与螺栓头/螺母的对准与对接。这个过程可以分为两个关键环节:机械手套筒中心线与螺栓/螺母中心线的对准;机械手内六角套筒棱边与螺栓/螺母六角棱边的平行。任意初始状态下螺栓中心线与机械手套筒一般不在同一条直线上,通过作业臂关节运动调整机械手位姿使得螺栓中心线与机械手套筒在同一条直线上,在中心线对准的基础上通过微调拧螺母电机的转动使得机械手套筒内六角棱边与六角螺母/螺栓棱边平行对准定位,在完成这两个关键环节后可以通过向内纵移实现机械手套筒与螺栓/螺母的对接。螺栓紧固作业完全由机器人机械手完成,在整个作业过程中除通过地面基站操控外,无需任何人工辅助干预。

3 螺栓拧紧过程关键问题分析

3.1 螺栓拧紧过程中拧紧力矩的分配

螺栓紧固机器人双机械手末端工具与引流板

螺栓头螺母对准并完成对接后,机器人可以开始执行拧螺母操作.螺栓拧紧过程的本质是机械手末端拧螺母装置克服摩擦的过程,在这个过程中摩擦主要包括螺纹副摩擦及支撑面摩擦.一般情况下,拧紧力矩的约 80% ~ 90% 都消耗在螺纹副摩擦与支撑面摩擦上,只有约 10% ~ 20% 转化为螺栓轴向预紧力,螺栓拧紧过程力矩分配如图 3 所示.

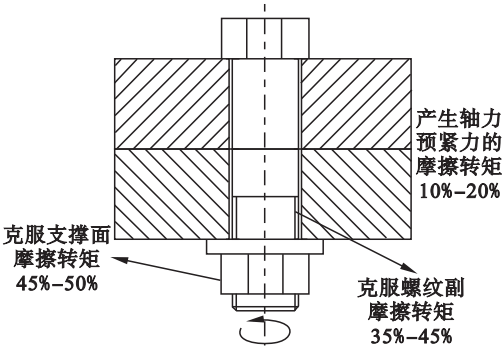


图 3 螺栓拧紧力矩分配图

Fig. 3 Torque allocation of bolt tighten

3.2 螺栓拧紧预紧力与螺母转角的关系

机器人机械手末端工具在螺栓拧紧操作时,螺栓杆被拉伸,联接构件被压缩.设螺栓轴向预紧力为 F ,螺栓的弹性系数为 k_1 ,伸长量为 x_1 ;联接构件的弹性系数为 k_2 ,压缩量为 x_2 ,由胡克定律有

$$F = k_1 x_1 = k_2 x_2. \tag{1}$$

螺母的旋进量为 $x_1 + x_2$,则螺母的旋转角度为

$$\theta = 2\pi \cdot \frac{x_1 + x_2}{p}. \tag{2}$$

式中, p 为螺纹导程.

联立式(1)与式(2),可得

$$\theta = \frac{2\pi}{p} \left(\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \right) F. \tag{3}$$

由式(3)可得预紧力与螺母转角的关系:

$$F = \frac{p}{2\pi} \cdot \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} \cdot \theta. \tag{4}$$

设末端电机的减速比为 σ ,则末端电机转速 ω 与螺母转角 θ 关系为

$$\theta = \sigma \omega t. \tag{5}$$

将式(5)代入式(4):

$$F = \frac{1}{2\pi} \cdot \sigma \cdot \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2} \cdot p \omega t. \tag{6}$$

令 $C = \sigma \cdot \frac{k_1 \cdot k_2}{k_1 + k_2}$, C 定义为被联接件的总刚度,则式(6)可转化为

$$F = \frac{C p \omega t}{2\pi}. \tag{7}$$

3.3 螺栓拧紧力矩与轴向预紧力的关系

由 3.1 节可知,机器人拧螺母末端工具施加在螺母上的拧紧力矩 T 主要由克服支撑面摩擦的转矩 T_1 、克服螺纹副摩擦的转矩 T_2 及产生轴向预紧力的转矩 T_3 三个部分所构成.设 F 为拧紧螺栓的预紧力, N 为螺栓螺纹法向力, μ 为螺纹摩擦系数, μ_1 为螺母与垫片间的摩擦系数, α 为螺纹升角, β 为螺牙半角, d 为螺栓公称直径, d_1 为螺纹中径, d_k 为垫片孔直径, D 为螺母内切角直径. T_1, T_2, T_3 的计算式分别为

$$T_1 = \frac{D^2 + D d_k + d_k^2}{D + d_k} \cdot F \mu_1, \tag{8}$$

$$T_2 = \frac{\cos \alpha}{\cos \beta \cos \alpha - \mu \sin \alpha} \cdot \frac{F \mu d_1}{2}, \tag{9}$$

$$T_3 = \frac{\cos \beta \cos \alpha}{\cos \beta \cos \alpha - \mu \sin \alpha} \cdot \frac{F \mu d_1}{2}. \tag{10}$$

$$T = T_1 + T_2 + T_3 =$$

$$\left[\frac{\mu \cos \alpha + \mu \cos \beta \cos \alpha}{\cos \beta \cos \alpha - \mu \sin \alpha} \cdot \frac{d_1}{2d} + \frac{\mu_1}{d} \cdot \frac{D^2 + D d_k + d_k^2}{D + d_k} \right] d F. \tag{11}$$

$$\text{令 } K = \frac{\mu \cos \alpha + \mu \cos \beta \cos \alpha}{\cos \beta \cos \alpha - \mu \sin \alpha} \cdot \frac{d_1}{2d} + \frac{\mu_1}{d}.$$

$\frac{D^2 + D d_k + d_k^2}{D + d_k}$, 则式(11)可简化为

$$T = K d F. \tag{12}$$

式中, K 为螺栓拧紧力矩系数.由式(12)可知确定的螺栓拧紧力矩系数 K ,就可由所要求的预紧力计算获得相应的拧紧力矩.

将式(7)式代入式(12):

$$T = \frac{K d p \omega}{2\pi} \cdot C t. \tag{13}$$

令 $K_t = \frac{dT}{dt}$, 为扭矩随时间变化的斜率, 则

$$K_t = \frac{dT}{dt} = \frac{K d p \omega}{2\pi} \cdot \frac{dCt}{dt} = \frac{K d p \omega}{2\pi} \left(C + t \cdot \frac{dC}{dt} \right). \tag{14}$$

若联接部件为定刚度系统, 即 $\frac{dC}{dt} = 0$, 则式

(14)可转化为

$$K_t = \frac{K C d p \omega}{2\pi}. \tag{15}$$

由式(15)可得

$$K = \frac{2\pi K_t}{C d p \omega}. \tag{16}$$

将式(16)代入式(13)可得

$$T = \frac{2\pi K_t}{C p \omega} F. \tag{17}$$

由式(17)可知在系统刚度已知的情况下,根据力矩随时间变化的斜率也可计算出预紧力对应的转矩,当转矩达到控制转矩时,末端电机停止转动,预紧力达到设定值。

4 基于 RBF 神经网络的机器人螺栓拧紧控制方法

4.1 机器人神经网络螺栓拧紧控制原理

螺栓拧紧的三个基本要求为螺母与联接件紧密贴合、能承受一定的动载荷、有足够的压紧力。螺栓拧紧控制的关键是拧紧力矩、轴向预紧力、螺母转角,三者由于一些因素会发生偏差增加了控制难度,但三者又有着动态联系,三个控制量过大或过小都不利于螺栓紧固,对这三个控制量大小和精度的控制是螺栓紧固达到最佳状态的关键。设螺栓拧紧理想转矩为 T_i ,理想轴向预紧力为 F_i ,螺母理想转角为 θ_i ;实际转矩为 T ,实际轴向预紧力为 F ,螺母实际转角为 θ ,理想情况下则可定义螺栓紧固的三种状态:

- 1) 当 $T < T_i, F < F_i, \theta < \theta_i$,此时螺栓处于欠拧紧状态。
- 2) 当 $T = T_i, F = F_i, \theta = \theta_i$,此时螺栓处于正好拧紧状态。
- 3) 当 $T > T_i, F > F_i, \theta > \theta_i$,此时螺栓处于过拧紧状态。

因此机器人螺栓拧紧其实质是对于任意螺栓初始状态通过不断调节机械手末端工具电机转速和方向从而控制拧紧转矩、预紧力、螺栓转角,使它们不断逼近理想值。神经网络具有较强的非线性逼近能力^[10],引入神经网络后能够更好地控制机器人拧紧螺栓作业。

在控制过程中需要利用转矩传感器对转矩、轴向力传感器对预紧力进行实时、连续监测,以获得转矩、预紧力的实时值。螺母转角可通过编码器获得,不需要专用传感器。螺栓拧紧力矩的理想值可以利用力矩扳手测得,力矩系数可以根据多次试验结合人工经验获得。通过理论计算可以得到预紧力和螺母转角的理想值,从而获得神经网络控制器的三个输入。螺栓拧紧神经网络控制系统框图如图 4 所示。初始拧紧力矩误差、初始轴向预紧力误差、初始螺母转角误差通过神经网络的调节后输出实际拧紧转矩、实际轴向预紧力、实际螺母转角,当误差达到设定值时,神经网络控制器动态调节过程结束,输出的最佳拧紧力矩、最佳轴向预紧力、最佳螺母转角使得机器人末端拧紧螺母装

置恰好达到拧紧螺栓的状态。

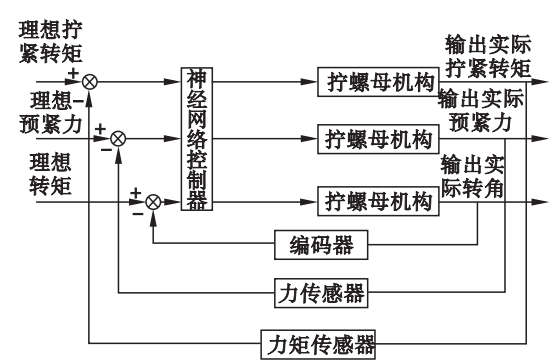


图 4 螺栓拧紧神经网络控制结构图
Fig. 4 Neural network control structure of bolt tighten

4.2 RBF 神经网络结构的设计

RBF 网络是一种隐层节点由径向基函数所构成的三层前向神经网络,输入信号由输入节点传送至隐层,输出层和隐层是线性关系。相比 BP 网络,它不仅收敛比提高了上千倍,而且具有优良的泛化能力,该网络可以在设定的结构及参数下以任意精度对任何非线性系统进行逼近^[11]。

本文采用三层 RBF 网络构建螺栓拧紧过程控制的神经网络模型。输入层主要是根据影响螺栓拧紧的因素确定输入层的节点个数,由于影响螺栓紧固的主要因素有拧紧力矩、轴向预紧力、螺母转角,因此输入层选定为三个节点分别与拧紧力矩误差、轴向预紧力误差、螺母转角误差对应。输出层的三个节点分别为实际拧紧力矩、实际轴向预紧力、实际螺母转角。隐层节点的数目没有固定的计算公式,但其数目的多少对网络的性能都会产生不同影响。隐层节点数目一般是根据经验或者通过多次实验比较来确定。通常情况下隐层节点个数需要满足^[12]

$$m = \sqrt{x + y} + R(10) \quad (18)$$

式中: m 为隐层节点数; x 为输出节点数; y 为输入节点数; $R(10)$ 为 1 到 10 间的随机数。根据经验公式隐层可选取 5 个节点,因此本文所建立的螺栓紧固过程神经网络控制模型为 3 个输入节点、5 个隐含节点、3 个输出节点的 3-5-3 型 RBF 神经网络,如图 5 所示。通过 RBF 神经网络的训练学习不断调节机器人机械手末端拧紧螺栓的状态,直到恰好拧紧为止。

4.3 RBF 神经网络控制算法的设计

螺栓紧固神经网络控制算法的设计其本质就是 RBF 神经网络训练的过程,RBF 神经网络大都是离线的学习方式,其学习过程被分为几个相对独立的阶段。首先,通过不同方式的聚类方法从样本中获得网络的结构,然后,对网络各隐层单元的

“中心”和“宽度”进行调整,最后对神经网络输出层的权值进行校正.

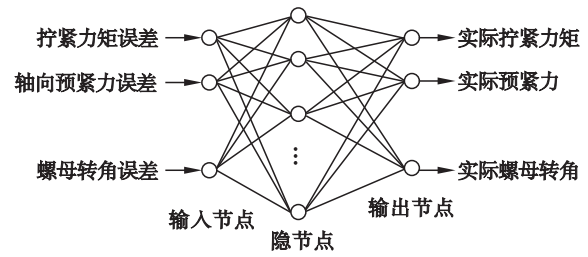


图 5 螺栓紧固神经网络控制模型

Fig. 5 Neural network control model of bolt tighten

在 RBF 网络结构中, $\varphi(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c}_j)$ 是 RBF 函数, \boldsymbol{c}_j 为 RBF 函数的第 j 个聚类中心, 网络第 j 个节点的中心向量为 $\boldsymbol{c}_j = [\boldsymbol{c}_{j1}, \boldsymbol{c}_{j2}, \cdots, \boldsymbol{c}_{jn}]$. 设网络基宽向量为 $\boldsymbol{B} = [b_1, b_2, \cdots, b_m]^T$, 令

$$h_j = \varphi(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{c}_j) = \exp\left(-\frac{\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}_j\|}{2b_j^2}\right), j = 1, 2, \cdots, m,$$

(19)

则 RBF 神经网络的输出为

$$y_m(t) = f(x) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \cdots + w_m h_m.$$

(20)

取 RBF 神经网络性能指标为

$$E = \frac{1}{2} [\boldsymbol{r}_{in}(t) - \boldsymbol{y}_{out}(t)]^2.$$

(21)

其中, $\boldsymbol{r}_{in}(t)$ 为螺栓紧固过程的三个影响因子; $\boldsymbol{y}_{out}(t)$ 为机器人经 RBF 神经网络控制后输出的实际拧紧转矩、轴向预紧力、螺母转角向量. 依据梯度下降法, RBF 神经网络权值调整算法为

$$w_j = w_j(t-1) + \eta [\boldsymbol{r}_{in}(t) - \boldsymbol{y}_{out}(t)] h_j + \phi [w_j(t-1) - w_j(t-2)].$$

(22)

其中径向基函数的基宽向量参数的迭代算法为

$$\Delta b_j = [\boldsymbol{r}_{in}(t) - \boldsymbol{y}_{out}(t)] w_j h_j \frac{\|\boldsymbol{x} - \boldsymbol{c}_j\|}{b_j^3},$$

(23)

$$b_j(t) = b_j(t-1) + \eta \Delta b_j + \phi [b_j(t-1) - b_j(t-2)].$$

(24)

式中: η 是网络学习速率; ϕ 是网络动量因子. 则 RBF 网络的节点中心参数的调整策略为

$$\Delta \boldsymbol{c}_{ji} = [\boldsymbol{r}_{in}(t) - \boldsymbol{y}_{out}(t)] w_j \frac{\boldsymbol{x}_j - \boldsymbol{c}_{ji}}{b_j^2},$$

(25)

$$\boldsymbol{c}_{ji}(t) = \boldsymbol{c}_{ji}(t-1) + \eta \Delta \boldsymbol{c}_{ji} + \phi [\boldsymbol{c}_{ji}(t-1) - \boldsymbol{c}_{ji}(t-2)].$$

(26)

综上所述螺栓紧固过程机器人 RBF 神经网络控制器在选定的性能指标下, 网络权值调整算法为式 (22), 宽度参数迭代算法为式 (23) 与式 (24), 中心参数的迭代算法为式 (25) 与式 (26). 因此, 式 (22) ~ 式 (26) 为所设计的螺栓紧固过程

机器人神经网络控制算法.

5 试 验

5.1 仿真实验

为了对本文所提出的机器人螺栓拧紧 RBF 神经网络控制算法的有效性进行验证, 取学习速率 $\eta = 0.8$, 动量因子 $\phi = 0.5$, 在 Matlab 环境下对本文所设计的 RBF 神经网络进行仿真研究. 其中主要参数设置: 最大训练次数为 100 次, 训练优化目标误差为 10^{-10} , RBF 神经网络误差收敛曲线如图 6 所示. 可知, 约 50 步神经网络的误差就收敛到了设定值, 证明该算法具有较快的收敛速度, 满足了控制系统设计响应速度快的设计要求.

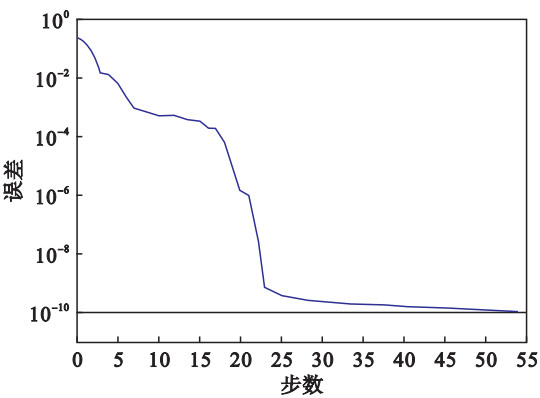


图 6 神经网络误差收敛曲线

Fig. 6 Error convergence curve of neural network

5.2 螺栓预紧力试验

螺栓预紧力是螺栓联接状态控制的关键, 拧紧过程中施加合适的预紧力对于获得优良的联接状态具有重要作用. 在进行仿真研究时, 分别设定理想预紧力为 120, 150, 180 N, 可计算得到理想的拧螺母电机转角, 以此为控制量控制拧螺母电机, 分别对螺母执行 8 次拧紧操作, 对所得数据进行仿真可得在不同理想预紧力下实际预紧力与实际转矩曲线, 如图 7 所示.

由图 7 可知, 在螺栓拧紧转矩偏差较大的情况下, 螺栓拧紧预紧力依然获得了较小的控制偏差, 满足了控制系统设计控制精度高的设计要求, 进一步保证了螺栓拧紧的可靠性和机器人的可操作性.

5.3 现场试验

为进一步验证 RBF 神经网络机器人螺栓拧紧控制效果和工程实用性, 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, 机械手采用机器人双臂联动实现螺栓螺母的对准对

接和拧螺母操作,其作业现场如图 8 所示。

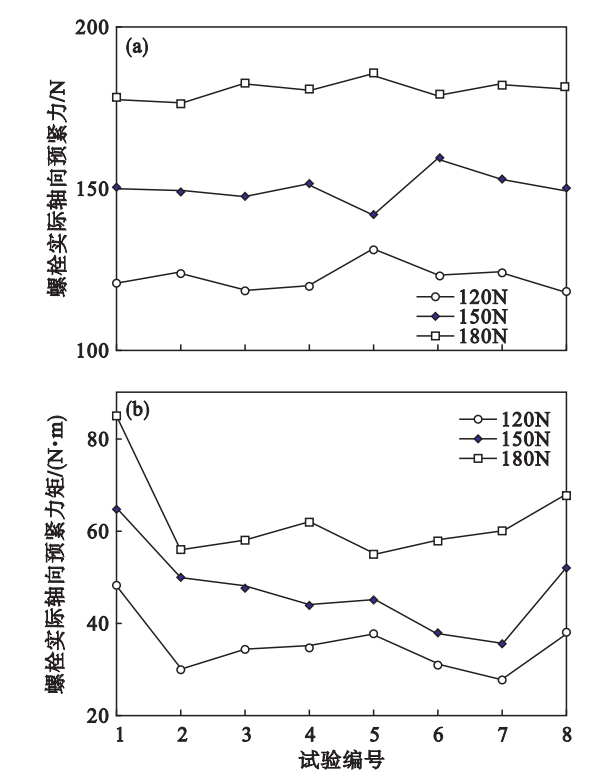


图 7 实际输出预紧力与拧紧力矩曲线
Fig. 7 Actual output pre-tightening force and tightening torque curves

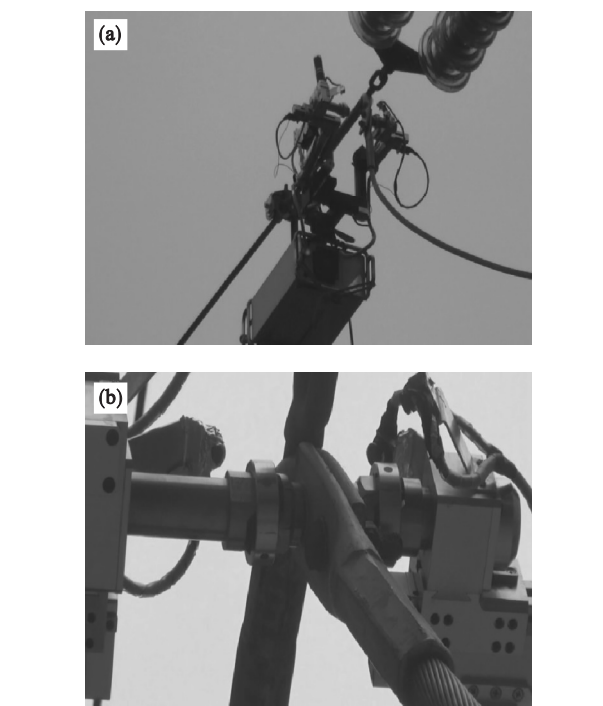


图 8 机器人拧螺栓现场试验
Fig. 8 Field test of bolt tighten robot
(a)—机器人作业初始姿态;(b)—机器人执行拧螺母操作。

在现场作业试验完成后检验引流板螺栓的联接状态,没有出现欠拧紧和过拧紧情况发生,螺栓联接具有较高的可靠性,满足了控制系统设计稳

定性的要求.上述结果表明机器人神经网络螺栓拧紧控制方法具有较好的工程实用性,进一步提高了机器人的作业效率和安全性。

6 结 论

- 1) 提出并设计了面向高压输电线路耐张跳线引流板螺栓紧固四臂移动作业机器人的基本构型。
- 2) 推导了螺栓拧紧过程中拧紧转矩与轴向预紧力、螺母转角之间的关系,并分析了它们对螺栓拧紧状态的影响,预紧力的控制是螺栓拧紧的关键。
- 3) 建立了螺栓拧紧过程的神经网络控制模型,提出了一种基于 RBF 神经网络的机器人引流板螺栓紧固控制方法,较常规方法,神经网络控制较大的螺栓拧紧力矩偏差获得了较小的预紧力偏差,提高了控制的精度,带电作业试验也验证了控制方法的工程实用性。

参考文献:

[1] 胡加瑞,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):34-37.
(Hu Jia-rui,Xie Yi,Liu Chun,et al. Research on transmission line clamp typical defects [J]. North China Electric Power Technology,2013(4):34-37.)

[2] Chithamacharyulu P V, Sashanka D P, Kiran G U, et al. Design of automated hotline maintenance robot using haptic technology [J]. International Journal of Scientific and Research Publications,2014,4(1):1-6.

[3] Yokoyama H, Mukaida M, Uchiyama A, et al. Manipulator system for constructing overhead distribution lines [C]// Transmission and Distribution Construction and Live Line Maintenance. New York:IEEE,1993:213-219.

[4] 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.

[5] 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.
(Zhao Yu-liang,Li Yun-chang,Qi Hui,et al. The study of high-voltage transmission lines live working intelligent automatic tool[J]. Manufacturing Automation,2012,2(34):12-14.)

[6] Huang Y H,Liu L,Yeung T W,et al. Real-time monitoring of clamping force of a bolted joint by use of automatic digital image correlation[J]. Optics & Laser Technology,2008,8:1-7.

[7] Du H K. Effect of scatter of pre-tension stress on fatigue life of bolt[J]. Compressor Technology,2006,5:21-23.