

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2415541

基于力柔顺控制的断路器轴孔零件装配算法<sup>\*</sup>丁雨<sup>1,2</sup> 舒亮<sup>1,2</sup> 周浩<sup>1,2</sup> 包志舟<sup>3</sup> 林振权<sup>2</sup>(1.温州大学浙江省低压电器工程技术研究中心 温州 325207; 2.温州大学乐清工业研究院 温州 325606;  
3.浙江人民电器有限公司 温州 325035)

**摘要:** 针对双臂机器人断路器轴孔零件装配操作任务,研究了一种两阶段轴孔装配轨迹规划策略,为了提高双臂协调装配作业的柔顺性和精确性,提出一种 FAIC 控制算法,实现精确的力跟踪。首先建立轴和孔接触状态力学模型,开展轴孔装配机理研究,根据双臂末端受力平衡,提出了一种操作空间轴孔装配的双臂运动轨迹规划方法。基于阻抗控制实现柔顺轴孔装配,采用模糊控制器在线辨识阻抗控制最优参数,提高装配操作质量。实验结果表明,在双臂协作轴孔装配策略结合 FAIC 算法作用下,轴孔间接触力控制在 3 N 以内,装配效率提高 36.5%。综上所述,本文提出的 FAIC 算法与装配策略在双臂协同断路器装配作业中有效地缩短磁组件的装配时间,提高装配效率与精度。

**关键词:** 轴孔装配;柔顺控制;双臂机器人;断路器

**中图分类号:** TP242;TN05 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

## Assembly algorithm for circuit breaker shaft hole parts based on force compliance control

Ding Yu<sup>1,2</sup> Shu Liang<sup>1,2</sup> Zhou Hao<sup>1,2</sup> Bao Zhizhou<sup>3</sup> Lin Zhenquan<sup>2</sup>(1. Low Voltage Apparatus Technology Research Center of Zhejiang, Wenzhou University, Wenzhou 325207, China;  
2. Technology Institute of Wenzhou University in Yueqing, Wenzhou University, Wenzhou 325606, China;  
3. Zhejiang Renmin Electric Appliance Co., Ltd., Wenzhou 325035, China)

**Abstract:** A two-stage shaft hole assembly trajectory planning strategy was studied for the assembly operation task of circuit breaker shaft hole parts in dual arm robots. In order to improve the flexibility and accuracy of coordinated assembly operations with both arms, a FAIC control algorithm was proposed to achieve accurate force tracking. Firstly, a mechanical model of the contact state between the shaft and the hole is established, and the mechanism of shaft hole assembly is studied. Based on the force balance at the end of the two arms, a dual arm motion trajectory planning method for operating space shaft hole assembly is proposed. Based on impedance control, flexible shaft hole assembly is achieved, and a fuzzy controller is used to identify the optimal impedance control parameters online, improving the quality of assembly operations. The experimental results show that under the action of the dual arm collaborative shaft hole assembly strategy combined with the FAIC algorithm, the indirect contact force of the shaft hole is controlled within 3N, and the assembly efficiency is improved by 36.5%. In summary, the FAIC algorithm and assembly strategy proposed in this article effectively shorten the assembly time of magnetic components, improve assembly efficiency and accuracy in the assembly operation of dual arm collaborative circuit breakers.

**Keywords:** assembly of shaft holes; flexibility control; double armed robot; circuit breaker

## 0 引言

断路器的磁组件由铁芯和线圈组成,为典型的轴孔结构,磁组件在断路器中扮演着关键的角色,通过产生磁场实

现断路器的开合操作,也起到过载保护、短路保护、控制和调节等功能,确保电路的安全运行和设备的正常工作。对于装配系统来说,由于装配过程轴孔间形成闭链产生接触力约束与位置约束,轴孔零件的装配具有耗时长、调整位姿

收稿日期:2024-02-27

<sup>\*</sup> 基金项目:浙江省重点研发计划项目(2021C01046)、温州市重大科技专项(ZG2021026)、温州市新能源智能电器创新联合体项目(ZG2022002)、温州市重大科技创新攻关项目(ZZG2023011)资助

归一化困难、装配工艺复杂、精度高等特点,同时轴孔类零件装配为装配作业中最典型的工作模式,约占整个装配作业的 36%<sup>[1]</sup>,是研究其他装配作业方式的基础<sup>[2]</sup>。为了避免装配过程中轴孔间相互作用力过大造成零件或机器人的损坏,同时提高装配精度,从而使用柔顺控制策略减小装配过程中的接触力,提升了机器人的适应性。当前利用机器人进行轴孔柔顺装配的控制策略主要有被动柔顺策略和主动柔顺策略两种。被动柔顺策略通过机器人末端机械装置形变来顺从外界环境变化,如远心柔顺法(remote center compliance, RCC)<sup>[3]</sup>、主动远心柔顺法(active remote center compliance, ARCC)<sup>[4]</sup>。但随着复杂零件高效柔顺装配需求的增加,机器人必须具备感知环境的能力,并根据实时采集的环境信息,做出相应的调整来实现对环境的柔顺运动,因此越来越多的学者将研究重点聚焦在主动柔顺策略上。主动柔顺策略通过传感器感知机器人与环境的接触信息,设计相应控制算法改变机器人末端执行器位姿来实现与环境的柔顺交互。程朋乐<sup>[5]</sup>提出了一种视觉检测方法进行毛刺检测,实验表明针对微小零件毛刺的影响,方法有效提高了零件装配质量。这种装配策略依赖基于视觉建立的装配模型,但在面对磁组件等形状不规则轴孔零件存在一定的局限性,其中阻抗控制具有鲁棒性高、适应性强等优点被众多学者采用<sup>[6]</sup>。董恣等<sup>[7]</sup>提出适合于多销孔对接的力柔顺阻抗控制,实现了微重力环境下机器人关节快速响应。Zhao 等<sup>[8]</sup>提出的大模型数据强化学习方法,提出最大熵强化学习架构训练机器人装配策略,采用阻抗控制进行装配控制,这种在线估计算法需要进行大量接触力实验来拟合环境等效刚度,并且对环境适应差。Xu 等<sup>[9]</sup>提出了基于离散时间的自适应增益滑膜控制方法,解决了环境干扰导致的模型不确定问题,该方法适用于双压电晶片微夹持器的力控制,但对计算机算力要求高、训练数据量大。

伴随着工业自动化、智能化、数字化升级,机器人逐渐推广并代替人力、气缸作用于产品制造中。当前工业装配单元多为独立工位工作的单臂机器人与气缸相互配合,<sup>[10]</sup>这种方式部署的机械臂只能适应特定的工作环境,并且需要依赖于专用的工装夹具以及适配的姿态调整辅助机构,无法适应多种复杂零件的高效柔性化装配生产需求。对比单臂机器人,双臂机器人的优势更加突出。双臂机器人可以通过交互调整零件位姿进而高效率的完成复杂轴孔零件的装配,由于单臂机器人在交互控制、装配等方面的制约,相关研究重心逐渐转向双臂机器人。Lee 等<sup>[11]</sup>提出了双臂机器人轴孔装配系统,轨迹规划算法采用实时调整控制规避互相干扰、碰撞,最终完成双臂协作装配任务。庞尧锋等<sup>[12]</sup>提出了协作机械臂平台,并结合三次多项式插值得到机械臂轨迹规划,实验表明提高了计算机硬盘产线中螺丝轴孔拧紧工作生产效率。陈漫勋<sup>[13]</sup>提出一种基于双臂机器人轴孔标定的方法,通过 Baxter 双臂机器人进行协调控制,实现了轴孔装配的实验。在双臂机器人轴孔装配任

务中,位置控制可能会因为测量误差、定位精度低导致装配失败,严重会损坏装配工件,并且在现阶段轴孔装配多采用随机搜索孔方式,在寻孔阶段效率低下,从而延长装配时间。

综上所述,独立工位工作的单臂机器人进行轴孔类零件装配效率低下,同时给整条装配线生产优化配置、调整节拍带来较大挑战。双机器人协作装配可以实现该类零件装配效率与质量的提高。但是现阶段双臂控制研究的资料文献中没有考虑到轴孔类零件特殊接触状态模型等难点问题,也没有针对该类问题进行自适应力柔顺控制优化研究。

针对上述问题,本文通过对磁组件装配过程中的接触状态进行力学建模,进而研究双臂装配策略,结合机器人柔顺控制算法,开展对双臂机器人轴孔柔顺装配任务的探索。为了解决装配过程机器人刚度过高、装配时间较长等问题,装配过程分为两阶段轴孔装配,同时根据机器人末端受力情况进行双臂协调运动,其次,针对传统柔顺定参数控制算法对系统刚度适应性差的缺点,提出一种基于模糊自适应阻抗控制算法(fuzzy adaptive impedance control, FAIC),对阻抗控制参数进行实时调节,并进行仿真和断路器磁组件装配试验研究。

## 1 轴孔装配轨迹规划

利用两台珞石 XB4 机械臂搭建双臂机器人轴孔装配研究平台,每个机械臂具有 6 个自由度(6-DOF);当双臂协作完成轴孔装配任务时,左机械臂末端夹爪控制轴进行运动,右机械臂末端夹爪抓取孔进行运动,双臂系统示意如图 1 所示。图中  $\{X_w Y_w Z_w\}$  作为装配系统的世界坐标系,  $\{X_{o1} Y_{o1} Z_{o1}\}$  和  $\{X_{o2} Y_{o2} Z_{o2}\}$  分别为左右机器人的基坐标系,  $\{X_{e1} Y_{e1} Z_{e1}\}$  和  $\{X_{e2} Y_{e2} Z_{e2}\}$  分别为两机器人末端法兰兰坐标系,  $\{X_d Y_d Z_d\}$  和  $\{X_r Y_r Z_r\}$  分别表示孔和轴的质心坐标系。

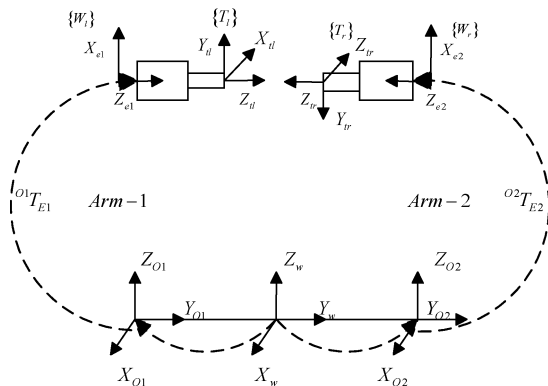


图 1 各坐标系拓扑图

### 1.1 轴孔装配接触模型分析

断路器<sup>[14]</sup>是配电系统中的重要元器件,用于保障终端用电安全,每年的使用数量高达数十亿。装配作业是断路器生产制造重要的工序环节之一,典型的小型断路器结构

含有一类轴孔零件即磁组件,磁组件由铁芯与线圈组成,该零件需要先取铁芯插入线圈形成磁组件,即铁芯为轴,线圈为孔,磁组件装配可等效为轴孔装配模型进行分析,磁组件如图2所示。

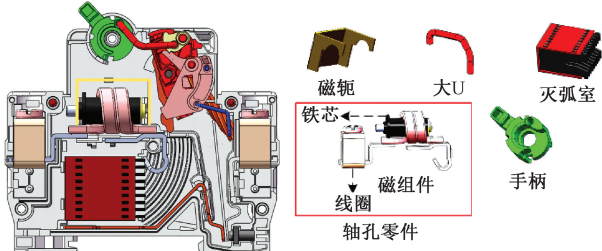


图2 磁组件结构图

磁组件装配可等效为轴孔装配模型进行分析,装配过程根据轴和孔接触关系分为4个阶段:孔外单点接触阶段、孔外两点接触阶段、孔内单点接触阶段、孔内两点接触阶段,其中轴孔相对位置关系影响机器人末端接触力与力矩大小。由于在装配接触前阶段轴孔间无作用力产生,故作用力分析主要针对双臂系统轴孔装配接触过程。建立孔外单点接触、孔外两点接触、孔内单点接触以及孔内两点接触受力模型如图3、4所示。

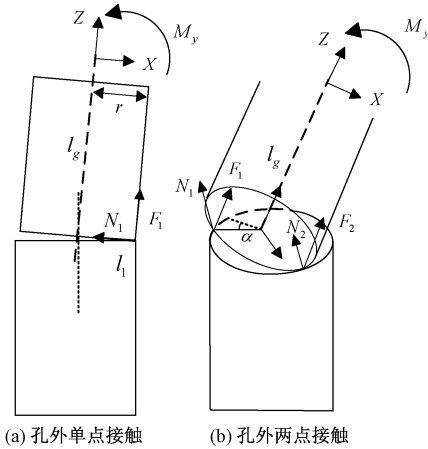


图3 孔外作用力模型

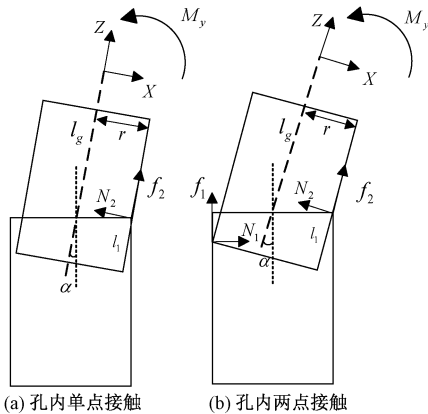


图4 孔内作用力模型

分析轴孔的接触状态,  $\alpha$  夹角过小对作用力平衡分解影响忽略不计, 轴与孔接触力通过重力补偿分析<sup>[15]</sup> 转换为末端夹爪坐标系下的力与力矩值  $F_x$ 、 $F_z$  和  $M_y$ ;  $N_1$  和  $N_2$  是轴孔存在小倾斜引起的沿着  $X$  方向上的受力;  $F_1$  和  $F_2$  是轴孔在孔外端面接触时引起的沿  $z$  轴方向上的受力;  $f_1$ 、 $f_2$  分别为轴孔在接触时引起的沿着  $z$  方向的摩擦力;  $r$  为轴半径;  $l_g$  为  $\{W\}$  坐标系到  $\{T\}$  坐标系之间的距离;  $l$  为表示轴顺着  $Z$  方向插入孔中的长度。作用点根据受到的力与力矩平衡公式, 孔外单点接触与两点接触对应受力平衡方程如下所示。

$$\begin{cases} F_x = -N_1 \\ F_z = F_1 \\ M_y = F_1 l_g - F_1 r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_x = -N_1 - N_2 \\ F_z = F_1 + F_2 \\ M_y = F_1 l_g - (F_1 + F_2) r \sin(\beta) \end{cases} \quad (2)$$

孔内单点接触与两点接触受力与力矩关系式:

$$\begin{cases} F_x = -N_2 \\ F_z = f_2 \\ M_y = F_1 l_g - N_2 l_g - f_2 r \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} F_x = N_1 \cos \alpha - f_1 \sin \alpha - N_2 \\ F_z = f_1 \sec \alpha + N_1 \sin \alpha + f_2 \\ M_y = F_1 l_g + (f_1 \cos \alpha + N_1 \sin \alpha) r - f_2 r - N_2 l_1 \end{cases} \quad (4)$$

## 1.2 操作空间轨迹规划

磁组件装配过程分为孔外孔内两阶段。孔外阶段双臂分别控制铁芯和线圈从起点从各自坐标系  $Z$  轴和  $Y$  轴方向运动, 直至孔外两点接触进入孔内装配阶段, 左臂作为从臂停止运动, 右臂作为主机机械臂控制铁芯通过轴孔之间力与力矩变化计算下一个装配目标点。力传感器在  $Y$  轴的受力  $F_y$  作为各个阶段的判断依据(由于实际末端夹爪建立的坐标系不同, 等同于接触模型分析时  $Z$  轴的受力  $F_z$ )。  $\dot{F}_y$  表示  $F_y$  在某时刻下相邻采样点的瞬时变化值, 公式为:

$$\dot{F}_y = F_y(t + \Delta t) - F_y(t) \quad (5)$$

在磁组件装配过程中, 关键在于根据力  $\dot{F}_y$  和  $F_y$  的数值判断装配阶段, 这包括轴孔接触前、孔外接触和孔内接触阶段。孔外接触阶段时,  $F_y$  的绝对值大于阈值  $A$  而  $\dot{F}_y$  不大于  $B$ , 否则处于孔内接触阶段; 当铁芯插入线圈预定深度完成装配时, 力传感器测得力值为零。在孔外调整阶段装配需要进行位置调整和姿态调整, 在此阶段重点对铁芯在  $X$  和  $Y$  方向接触力进行控制, 确保轴与孔的准确对位以减小位置偏差。在孔内调整阶段, 由式(4)可知, 随着插孔深度的增大, 接触力矩也会逐步变大, 容易引发楔紧现象, 为避免这种情况的发生此时机械臂重点调整  $X$  和  $Y$  旋转方向, 并根据当前装配反馈的  $M_y$  和  $M_x$  信息下判断铁芯与线圈的旋转角度。磁组件装配流程如图5所示, 图中  $A$  表示

实验值 1;  $B$  为实验值 2;  $D$  为实验值 3;  $E$  为实验值 4;  $F$  为实验值 5;  $G$  为实验值 6。

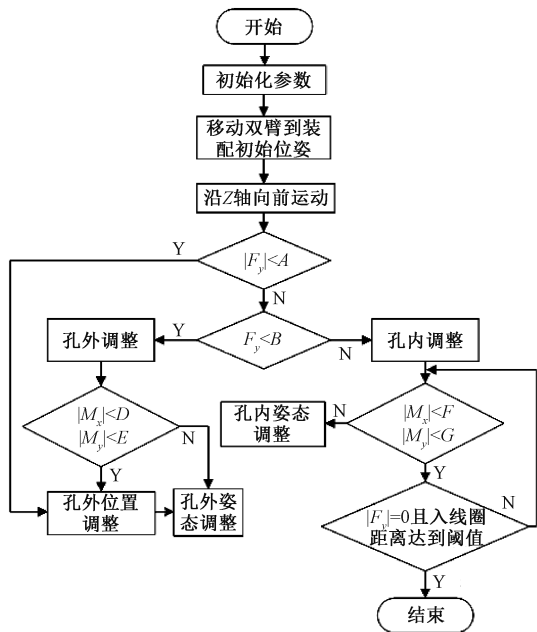


图 5 装配流程图

## 2 双臂柔顺装配控制算法

力控制在机器人协作装配领域有着重要应用,断路器轴孔零件装配过程中会形成接触力闭环约束,这样的复杂场景下实际机器人末端位置以及环境刚度获取精确数值存在困难,且轴孔接触环境是曲面,环境刚度随着装配阶段变化而变化,传统阻抗控制方法难以处理工作环境中不同刚度的情况,当机器人与环境接触时,刚性差异会导致控制的不稳定性,影响装配精度和效率,以及基于固定的阻抗参数,难以适应工作环境中动态变化的情况,导致力跟踪性能较差,特别是在双臂协作轴孔装配等复杂接触条件下,这一问题尤为显著,本文设计了一种 FAIC 算法。算法在传统阻抗控制基础上增加模糊自适应控制器进行阻抗参数自调节,阻抗控制模型采用基于位置的内环和力控制的外环策略,力传感器测得轴孔间接触力通过一个二阶阻抗模型,计算得到一个附加位置变化,此附加位置再去修正预先设定的轨迹,最终完成两阶段轴孔柔顺装配。在线参数调整模型通过模糊控制器用于阻抗模型参数的实时调整以改善力跟踪性能。

### 2.1 基于位置的阻抗控制

基于位置的阻抗控制将动态的力误差转换成位置误差,通过调整位姿来顺应外界环境的作用力,由于不需要动力学模型,作为机器人主动柔顺控制方式得到了广泛的应用,并且传统工业机器人不提供力矩控制接口,不支持关节的力控制,因此,本文将阻抗控制器作为机器人的柔顺控制器,控制框图如图 6 所示。检测系统与外界的接触力变化

关系通过一个二阶线性微分方程描述,关系表达式为:

$$f_e - f_d = m(\ddot{x}_d - \ddot{x}_r) + b(\dot{x}_d - \dot{x}_r) + k(x_d - x_r) \quad (6)$$

式中:  $x_r$  为机械臂末端参考位置,  $x_d$  为通过阻抗模型补偿后机械臂末端期望位置,  $f_d$ 、 $f_e$  分别为机械臂末端工具与环境之间接触力的期望值和真实值,真实值通过六维力传感器精确获得,  $m$ 、 $b$ 、 $k$  分别为阻抗模型的惯性、阻尼、刚度系数。

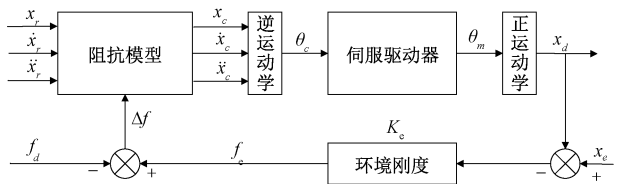


图 6 阻抗控制框图

分析图 6 所示系统控制模型,假设机器人在笛卡尔空间的六维信息是解耦的,以机器人操作空间某一维阻抗关系为例分析机器人末端夹爪与轴孔的动态接触力模型,力跟踪误差  $\Delta f$  可以表示为:

$$\Delta f = f_d + k_e x_e - k_e (x_d - e) \quad (7)$$

式中:  $e$  为机器人末端实际位置与期望位置的误差,  $x_e$  为机器人末端位置。将式(7)进行拉氏变换,可以得到:

$$\Delta f(ms^2 + bs + k + k_e) = (ms^2 + bs + k) \cdot [f_d - k_e(x_r - x_e)] \quad (8)$$

由式(8)可知系统稳定时力跟踪误差为:

$$\Delta f_{ss} = \frac{k}{k + k_e} [f_d - k_e(x_r - x_e)] \quad (9)$$

令  $\Delta f_{ss} = 0$ , 得到:

$$k = 0 \quad (10)$$

或者:

$$x_r = x_e + \frac{f_d}{k_e} \quad (11)$$

式(10)使力跟踪误差为 0, 进而满足机器人控制需求。因为当  $k = 0$  时,机械臂的阻抗模型刚度为 0。这种情况下的机械臂适合协作拖动,在与环境接触时会有较大的振动<sup>[16]</sup>。

阻抗控制方式可以使系统表现出  $m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F_e$  的阻抗特性,其中  $m$ 、 $b$ 、 $k$  3 个参数数值选取对阻抗特性有着重要影响。通过对搭建的阻抗模型进行控制变量仿真,从而得到阻抗参数变化对系统稳定性的影响,因为双臂机器人参数一致,故使用单臂仿真进行阻抗参数特性分析即可,根据选取不同的阻抗参数,对比参数取值及位置跟踪曲线,得到阻抗参数对系统力跟踪的影响规律。

在仿真中设定  $b = 100$ ,  $k = 1\ 000$ , 将  $m$  分别取值为 0.5、1、5、10、30, 仿真位置响应如图 7 所示。可知随着  $m$  逐渐增大,系统超调量、调整时间以及振荡都会变大,  $m$  越小,系统振荡越小,研究发现,当  $m$  小于一定值时,对系统



的影响变化很小。在仿真实验中,当  $m$  取值为 0.5 和 1 时,系统的位置响应曲线基本重合,表明  $m$  的变化对系统性能的影响较小。为了确保接触过程中阻抗系统具有较好的动态性能,应选择较小的惯性参数。选择适当的惯性参数可以使系统在接触过程中更快速、更精确地响应,提高系统的动态性能和稳定性。

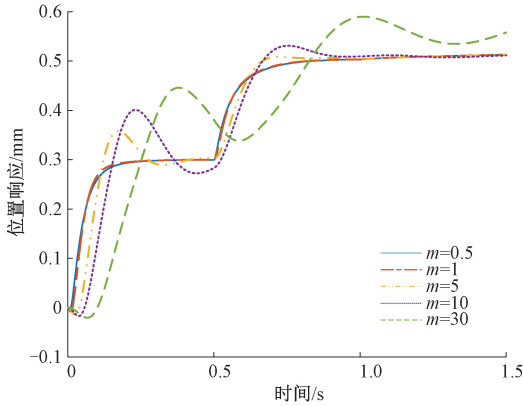


图7 改变惯性系数  $m$  的位置响应曲线

在仿真中设定  $m=10, k=1\,000$ , 将  $b$  分别取值为 30、50、100、150、200, 仿真位置响应如图 8 所示。可知  $b$  越小, 系统的振荡和超调量越大, 随着  $b$  取值增大, 系统超调量会逐渐减小到零, 同时调整时间变长。通过根据跟踪误差大小灵活选择参数  $b$  来调节速度或抑制超调, 可以有效提高控制系统的性能。当跟踪误差较小时, 采用较小的  $b$  值可以加快系统的响应速度, 减少调整时间; 而当跟踪误差较大时, 选择较大的  $b$  值可以有效抑制超调, 提高系统的稳定性。

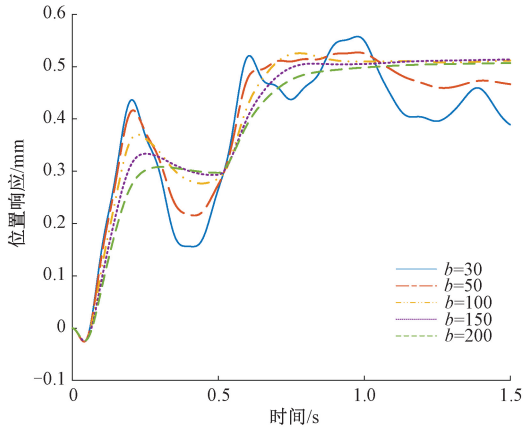


图8 改变阻尼系数  $b$  的位置响应曲线

经实验发现,在双臂较大幅度位置控制与姿态调整中,刚度系数对系统动态性能并无影响,但对系统稳态误差有一定影响。一般来说,在位置控制方向上,应选取较大的  $k$  值以提高位置控制精度;而在力控制方向上,应选取较小的  $k$  值以提高力跟踪精度。通过调整刚度系数的大小,可以满足双臂在位置控制和力控制方向上的不同需求,从而优

化装配过程中的控制性能。

## 2.2 模糊自适应阻抗控制

轴孔装配过程中,不同装配点处夹取末端法向量不同、法向装配力的波动、目标零件刚度不同、期望力不同,双臂姿态调整和位置变化对应的最优阻抗参数也不同,同时实时调节惯性和阻尼是解决力跟踪超调和振荡的有效途径,由于质量系数对动态响应比较敏感,并且降低控制系统复杂程度,只对阻尼系数进行调整,通过模糊控制器在线调整阻尼系数以改善力跟踪性能。模糊控制器根据反馈的力误差信息进行调节阻抗模型参数,FAIC 算法框图如图 9 所示。

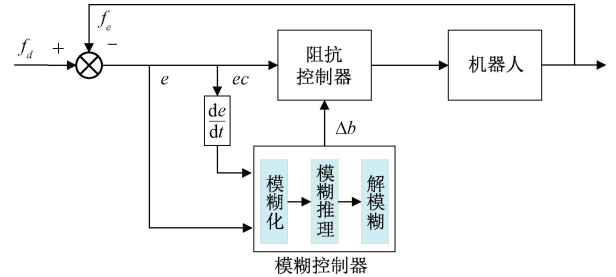


图9 模糊自适应控制框图

模糊控制器输入变量:

$$\begin{cases} e = k_1(f_d - f_e) \\ ec = k_2(\frac{f_d - f_e}{\Delta t}) \end{cases} \quad (12)$$

阻抗参数的调节规律如下:

$$b = c_1 \Delta b + b_0 \quad (13)$$

上述公式中  $b_0$  分别为惯性和阻尼的初始参数值,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $c_1$  为量化因子。模糊控制系统主要有 3 个步骤组成,具体实施过程如下所示。

首先对变量进行模糊化处理,对于输入、输出具体变量,需要通过模糊化处理才能进行下一步的模糊运算,采用三角形隶属度函数来表示模糊变量的隶属关系,具体模糊子集由 NB 到 PB 依次增大。接着建立模糊推理以及模糊规则,当力误差及力误差率较大时,阻尼系数应该较大,减小振荡和超调,加快控制系统响应速度,即模糊控制器输出  $\Delta b$  为较大的正值;当力误差及力误差率较小时阻尼系数应该较小,从而减少控制系统的超调量,  $\Delta b$  为较小的正值。根据以上原则,建立了如表 1 所示的阻尼系数调节模糊控制规则。

最后进行解模糊,通过模糊规则得到推理结果后,采用重心法解模糊,表达式如下:

$$\Delta b = \frac{\sum_{i=1}^n u_i R_i(e, ec)}{\sum_{i=1}^n R_i(e, ec)} \quad (14)$$

其中,  $u_i$  为第  $i$  个模糊输出的隶属度,  $R_i(e, ec)$  为由模糊规则得到的模糊输出。通过模糊控制器的输出带



为 1 s。将传统阻抗控制参数设置为  $m=5, b=50, k=30$ , 模糊阻抗控制器参数为  $m=5, b=50, k=30$ , 机械臂六个关节都采用相同的阻抗参数, 对于模糊控制器中的阻尼参数波动范围为  $[-100, 100]$ , 量化因子  $c=0.1$ , 力误差  $e$  与控制误差率  $ec$  范围分别设定为  $[-0.5, 0.5]$  和  $[-1, 1]$ 。仿真结果如图 14、15 所示。

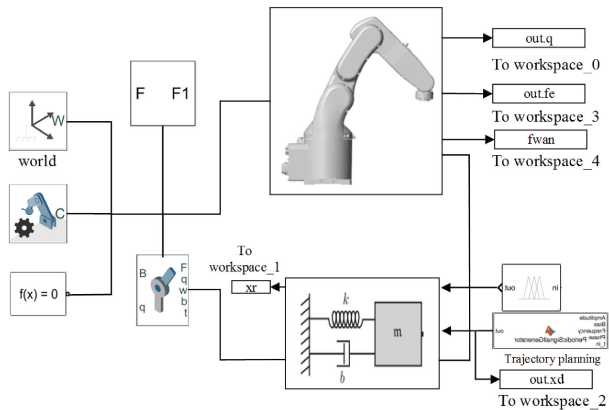


图 12 仿真控制模型

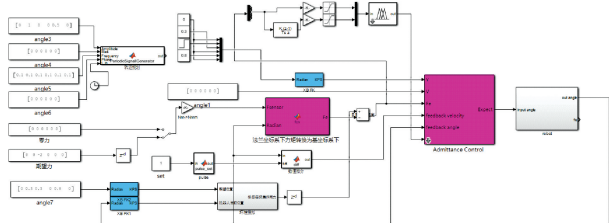


图 13 模糊自适应阻抗仿真

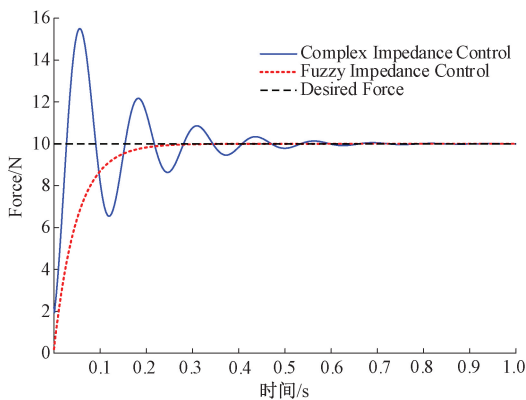


图 14 力跟踪响应曲线

通过对比阻抗控制和 FAIC 算法的力跟踪与阻尼参数变化曲线, 模糊自适应算法缩短了控制系统 0.4 s 调整时间, 同时将传统阻抗控制超调量降为零, 有效改善了力跟踪性能, 缩短调整时间, 并减小系统振荡。

### 3 实验平台搭建与验证

采用 XB4 机械臂搭建如图 16、17 所示双臂协作装配系统硬件及软件架构平台, 平台包括一台上位机、一台交

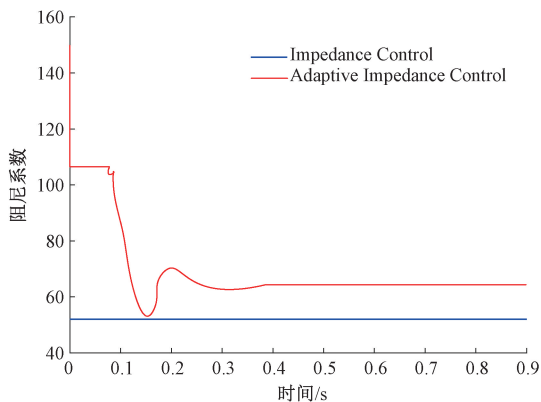


图 15 阻尼参数变化曲线

换机、两台 XB4 机械臂、两台机器人伺服驱动、一台控制器、两套蓝点触控 WRIST 系列六维力传感器、两套末端执行器夹爪。末端夹爪由机器人控制器上 IO 通过开关气缸控制进行夹取; 六维力传感器精度指标为量程范围的 0.2%, X、Y 方向力量程为 200 N, Z 方向 400 N, 绕 X、Y、Z 轴的旋转轴的力矩量程均为 10 N·m; 其中上位工控机配置 Intel i7-8559U CPU, 搭载 Linux 系统, 控制器配置 Intel (R) Celeron CPU J900, 搭载 Ubuntu+preempt 系统, 工控机通过以太网与机器人控制器、力传感器建立通信, 并加入交换机进行集中式通讯管理。

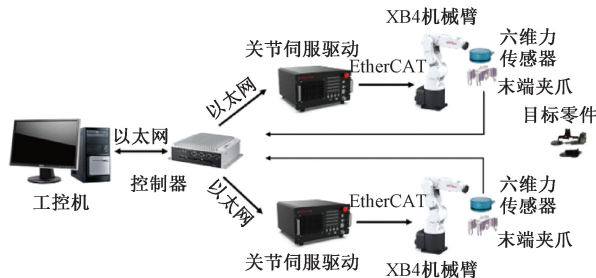


图 16 双臂协作系统硬件架构

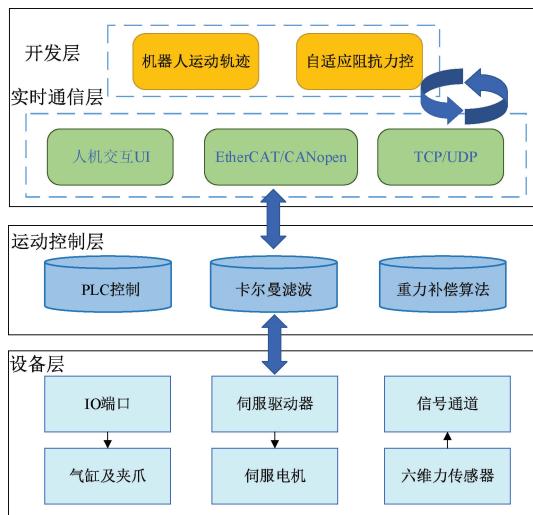


图 17 双臂协作系统软件控制架构



为了验证本文提出的模糊自适应阻抗控制算法以及双臂协作柔顺装配单元控制系统的可行性,设计两组对比实验,第 1 组实验使用传统单机机器人装配单元与双臂协作柔顺装配单元进行断路器零件装配,传统装配方案中单机械臂使用位置控制,通过对比装配时长验证双臂协同系统效率的提升;第 2 组实验使用断路器装配策略结合 FAIC 算法对比双臂位置控制装配,验证复杂环境下具有更好的力跟踪响应,提高了装配精度。两组实验以断路器装配难度最大的磁组件为实验对象,磁组件尺寸大小如图 18 所示,线圈内径 7.98 mm,铁芯长 23.22 mm,轴孔间隙为 0.5 mm,实验设置磁组件装配深度 16.9 mm。

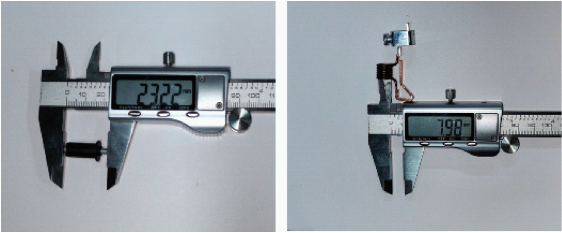


图 18 磁组件结构图

传统装配单元由于单个机械臂自身结构和工作台面的限制,机器人在进行零件位姿调整时,对于随机多姿态下零件姿态调整装配,需要使用零件姿态辅助调整机构辅助机械臂完成零件装配任务,传统柔性装配单元结构如图 19 所示。实验装配过程中单机械臂首先夹取线圈调整位姿放至辅助机构卡槽中,再夹取铁芯运动并控制插入线圈完成装配。单臂装配实验过程机械臂各轴位置变化如图 20、21 所示,单臂装配实验用时 13.8 s,接着进行第二组实验进行对比。

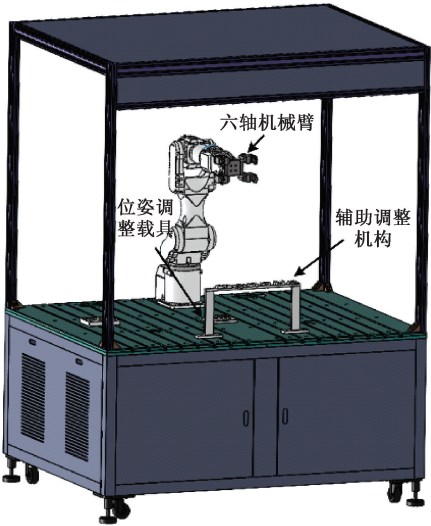


图 19 单臂装配平台

第 2 组实验平台使用本文设计的双臂协作装配单元,如图 22 所示,控制算法采用 FAIC,装配策略运用提出的两阶段轴孔装配以及相对应的工艺要素。实验中,对机械

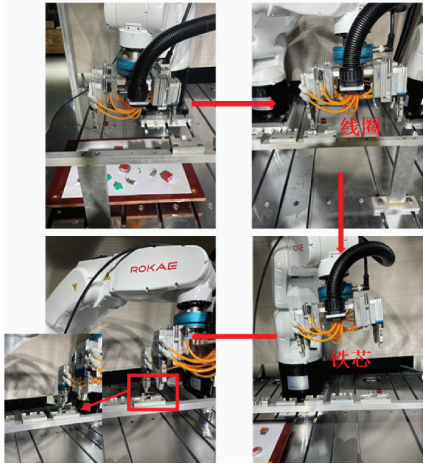


图 20 单臂装配过程

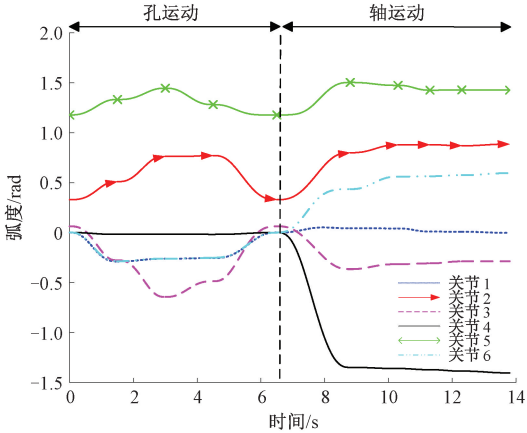


图 21 单臂各关节位置变化

臂 X、Y、Z、绕 X 轴旋转、绕 Y 轴旋转各方向上进行接触力控制,各关节的阻抗参数如表 2 所示,模糊控制器中阻尼控制参数调节输出量范围为 $[-400, 400]$ ,系统输入的力误差及力误差率的基本论域分别为 $[-0.5, 0.5]$ , $[-1, 1]$ ,双臂协作装配实验过程如图 23 所示。

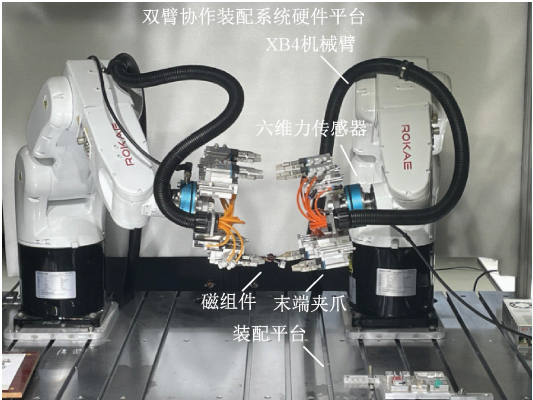


图 22 双臂协作装配系统平台

双臂协同装配各轴随时间变化弧度如图 24、25 所示,图 24 表示左机械臂夹取线圈运动 6 个关节位置变化,图 25



表 2 磁组件装配过程阻抗参数

| 方向  | $m_1$ | $b_1$   | $k_1$ |
|-----|-------|---------|-------|
| X、Y | 10    | 500     | 100   |
| Z   | 20    | 700     | 0     |
| A、B | 10    | 632/800 | 100   |

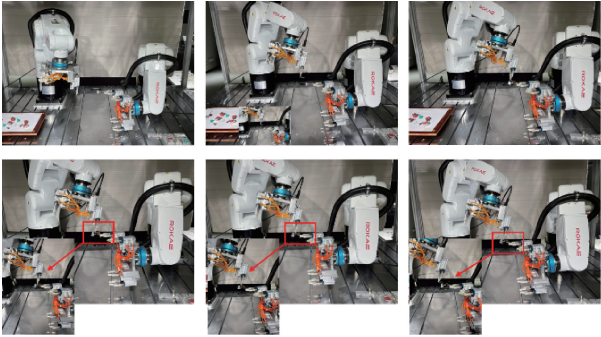


图 23 双臂协作装配过程

表示右机械臂夹取铁芯运动 6 个关节位置变化,左臂作为协作机械臂运动时长 4.82 s,右臂作为主机机械臂运动时长 8.75 s,故双臂协作实验磁组件装配共用时 8.75 s,对比单臂磁组件装配用时 13.8 s 效率提高了 36.5%。

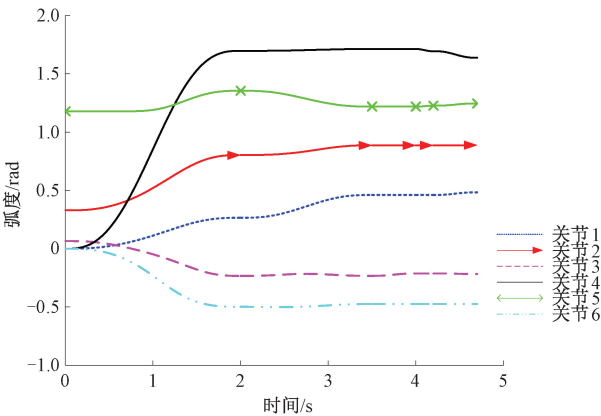


图 24 左臂各关节位置变化

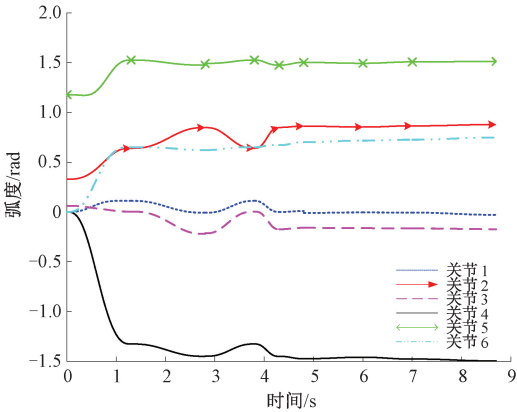
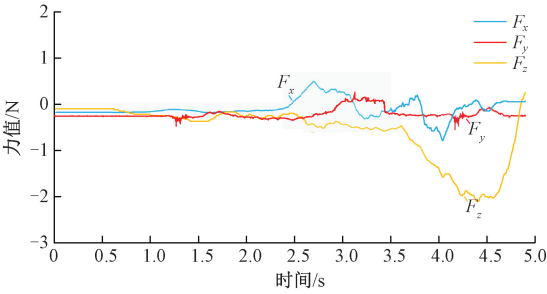
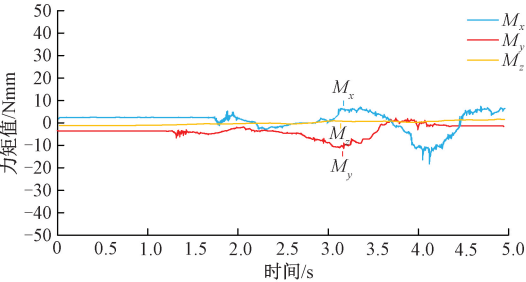


图 25 右臂各关节位置变化

柔顺装配过程中左臂接触力、力矩变化如图 26 所示,装配过程前 3.5 s 为孔外接触阶段,左机械臂夹取线圈运动寻找铁芯,右臂关节 2 与关节 4 位姿变化较大,3.5 s 后为孔外单点接触到孔内两点接触阶段,接触力与力矩曲线会随着铁芯和线圈接触碰撞而产生波动,此时双臂接触力维持在期望力 2 N 附近。孔内接触阶段到装配结束,左臂作为从机械臂配合,4.82 s 后左臂停止运动,等待作为主机机械臂进行力柔顺插孔。



(a) 左臂力变化曲线



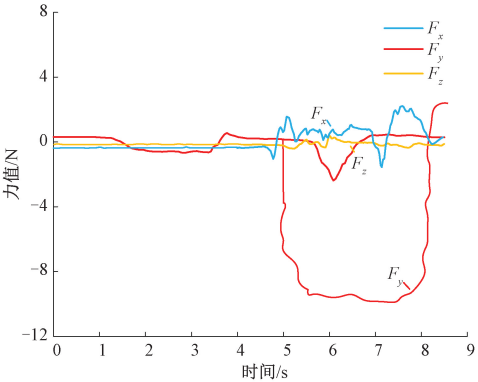
(b) 左臂力矩变化曲线

图 26 左臂力与力矩变化

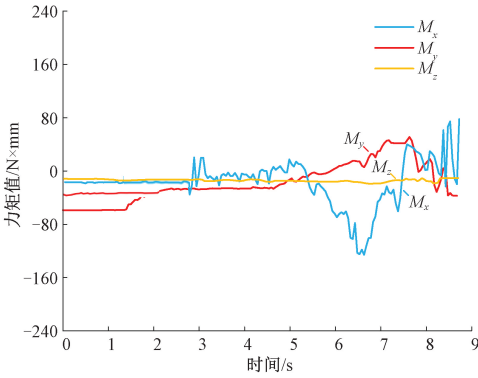
当右臂未使用力控算法,在位置控制下磁组件装配阶段力与力矩变化如图 27 所示。3.5 s 后进入孔内单点装配阶段,由于未使用 FAIC 算法,轴孔间接触力有较大波动,Y 方向最大接触力达 10 N 左右。在孔内两点接触阶段,机械臂没有及时调整位姿补偿位置偏差从而导致轴孔卡阻,严重时损坏零件及夹爪,如图 28 所示,铁芯插入线圈后力/力矩没有减小到 0 值。

右臂 Arm2 开启力控后在不同磁组件装配阶段力与力矩变化如图 28 所示。在装配过程中,0~3.5 s 为孔外装配阶段,双臂运动到装配初始点位。3.5~5 s 范围为孔内接触阶段。5 s 后进入孔内插孔调整阶段直到装配结束,磁组件装配的深度可由机械臂 Z 轴位姿变化幅值表示,最终达到预定装配深度 16.9 mm。遇到卡阻现象,通过 FAIC 算法及时调整姿态重新进行装配,确保装配的顺利进行。对比单臂装配优化后节省了 5.05 s 时间且装配过程接触力保持在 3 N 以内,本文提出的 FAIC 算法优化了接触力的控制,提高了装配效率,同时降低了磁组件装配失败率;轴孔装配策略为磁组件装配过程带来了更高的稳定性和精准性。

同时对比单臂机器人装配与双臂协调装配采用阻抗

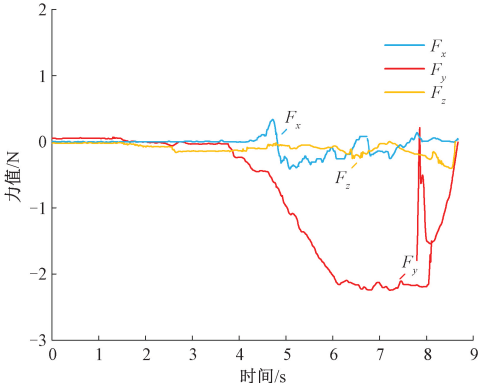


(a) 右臂力变化曲线

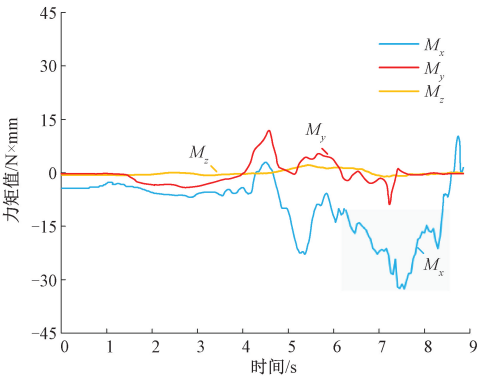


(b) 右臂力矩变化曲线

图 27 未开启力控时右臂力与力矩变化



(a) 右臂力变化曲线



(b) 右臂力矩变化曲线

图 28 开启力控时右臂力与力矩变化

控制与 FAIC 算法分别连续做 30 次实验,得到磁组件装配实验成功率、平均装配时间如表 3 所示,单臂机器人装配成功率最高,但耗时最长,基于 FAIC 算法的双臂机器人装配效率比较两种分别提升 36%和 2.2%,装配成功率比采用阻抗控制的双臂机器人提升 7%。

表 3 轴孔装配测试结果

| 装配策略         | 平均装配<br>时长/s | 成功率/<br>% |
|--------------|--------------|-----------|
| 单臂机器人装配      | 14           | 96        |
| 双臂协调+阻抗控制    | 9.1          | 86        |
| 双臂协调+自适应阻抗控制 | 8.9          | 93        |

4 结 论

本文提出一种 FAIC 算法与两阶段轴孔装配策略,通过引入模糊控制机制,实现实时力误差反馈调整控制参数,以适应磁组件动态变换的环境条件,从而提高系统对外界力的跟踪表现,解决了双臂磁组件协作装配存在的协作效率低、装配失败率高的问题。

针对传统断路器生产方式刚度大、精度低,其中单机机器人装配单元只能完成单一零件装配且效率低下等问题,搭建并开发了双臂协作柔顺装配单元硬件与软件控制系统,实现断路器零部件柔顺化装配,通过设计对比实验验证了双臂协作单元的可行性。

参考文献

[1] LIU S, XU D, ZHANG D P, et al. High precision automatic assembly based on microscopic vision and force information [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2016, 13(1): 382-393.

[2] XU J, HOU Z M, WANG W, et al. Feedback deep deterministic policy gradient with fuzzy reward for robotic multiple peg-in-hole assembly tasks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1658-1667.

[3] 贾计东, 张明路. 人机安全交互技术研究进展及发展趋势[J]. 机械工程学报, 2020, 56(3): 16-30.

[4] 张国龙, 张杰, 蒋亚南, 等. 机器人力控末端执行器综述[J]. 工程设计学报, 2018, 25(6): 617-629.

[5] 程朋乐. 面向装配的微小型零件视觉检测技术[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(2): 151-155.

[6] 张磊. 基于阻抗控制的空间机械臂辅助对接研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学航天学院, 2013.

[7] 董恣, 张立建, 易旺民, 等. 基于动力学前馈的空间机器人多销孔装配力柔顺控制[J]. 机械工程学报, 2019, 55(4): 207-217.

- [8] ZHAO X, ZHAO H, CHEN P, et al. Model accelerated reinforcement learning for high precision robotic assembly [J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2020, 4: 202-216.
- [9] XU Q. Adaptive discrete-time sliding mode impedance control of a piezoelectric microgripper [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2013, 29(3): 663-673.
- [10] 郑养龙. 基于力传感器的双臂机器人轴孔柔顺装配策略与方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [11] LEE J, CHANG P H, JAMISOLA R S. Relative Impedance Control for Dual-Arm Robots Performing Asymmetric Bimanual Tasks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(7): 3786-3796.
- [12] 庞党锋, 崔世钢, 张永立. 装配生产线机器人螺丝锁紧工作站设计[J]. 国外电子测量技术, 2022, 41(3): 114-118.
- [13] 陈勋漫. 基于手眼视觉的 Baxter 双臂机器人轴孔抓取与装配方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [14] 王凌浩, 舒亮, 钱祺. 基于断路器柔性装配的移动机器人路径规划[J]. 电子测量技术, 2023, 46(5): 121-128.
- [15] 张春涛, 王勇. 工业机器人六维力传感器在线标定方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(6): 161-168.
- [16] 李海源, 刘畅, 严鲁涛, 等. 上肢外骨骼机器人的阻抗控制与关节实验研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(19): 200-209.
- [17] 甘亚辉, 段晋军, 戴先中. 非结构环境下的机器人自适应变阻抗力跟踪控制方法[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2134-2142.

## 作者简介

丁雨, 硕士研究生, 主要研究方向为电器智能化。

E-mail: 271913797@qq.com

舒亮, 博士研究生, 主要研究方向为机电系统设计与仿真。

E-mail: shuliangalbert@163.com