

DOI:10.16356/j.1005-2615.2023.03.005

## 电化学加工机器人动态性能设计与优化研究

陈远龙, 蒋立军, 温信宇, 完颜绍旗, 周家瑞

(合肥工业大学机械工程学院, 合肥 230009)

**摘要:** 工业机器人工作空间大、姿态灵活、可配置性高,且成本低,广泛应用于搬运、装配、喷涂和焊接等多个领域。但由于机器人末端轨迹精度不高,低速波动大,在电化学加工领域的应用很少。根据电化学加工低速、高轨迹精度特点,提出采用象限法设定电化学加工机器人工作区域,建立电化学加工机器人动力学优化函数,采用第三代非支配遗传算法 NSGA-III 求解各设计参数最优 Pareto 解集,通过仿真和实验进行了动态性能测试验证。结果表明在设定工作区域内,电化学加工机器人直线轨迹精度可达 0.073 mm,圆弧轨迹精度可达 0.145 mm,低速工况下轨迹精度相比传统工业机器人提高近 10 倍。

**关键词:** 电化学加工; 机器人; 动态性能; 轨迹精度

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2023)03-0410-08

## Dynamic Performance Design and Optimization of Electrochemical Machining Robot

CHEN Yuanlong, JIANG Lijun, WEN Xinyu, WANYAN Shaoqi, ZHOU Jiarui

(School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Due to the large workspace, flexible posture, high configurability and low cost, industrial robots are widely used in various fields such as transportation, assembly, spraying, welding, etc. Because of the low precision of robot end track and the large fluctuation at low speed, it is rarely used in the field of electrochemical machining. According to the characteristics of low speed and high trajectory accuracy of electrochemical machining, a quadrant method is proposed to set the working area of the electrochemical machining robot and the dynamic optimization function of the electrochemical machining robot is established. The third-generation non-dominated genetic algorithm NSGA-III is used to solve the optimal Pareto solution set of each design parameter. The dynamic performance test is carried out through simulation and experiment. The results show that within the set working area, the straight track accuracy of the electrochemical machining robot can reach 0.073 mm, the arc trajectory accuracy can reach 0.145 mm, and the trajectory accuracy under low-speed conditions is nearly 10 times higher than that of traditional industrial robots.

**Key words:** electrochemical machining; robot; dynamic performance; track accuracy

电化学加工技术利用金属在电解液中发生阳极溶解的原理对零件进行减材加工,具有无切削力、无工具磨损、与材料硬度无关等许多独特优点<sup>[1-3]</sup>。传统拷贝式电解加工加工复杂零件,所用

工具阴极多,设计周期长,因此采用形状简单的棒状阴极,发展柔性电化学加工技术日益受到重视,是电解加工技术方向的研究热点<sup>[4-6]</sup>。

工业机器人具有灵活性好、可配置性高、成本

收稿日期:2022-06-07;修订日期:2022-12-11

通信作者:陈远龙,男,教授,博士生导师,E-mail:chenyuanlong@sina.com。

引用格式:陈远龙,蒋立军,温信宇,等. 电化学加工机器人动态性能设计与优化研究[J]. 南京航空航天大学学报,2023, 55(3):410-417. CHEN Yuanlong, JIANG Lijun, WEN Xinyu, et al. Research on dynamic performance design and optimization of electrochemical machining robot[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(3): 410-417.

低的优点,广泛应用于工业生产的各个领域<sup>[7-8]</sup>。目前,工业机器人开发多面向快速运动设计,轨迹精度普遍不高。轨迹精度是评价机器人动态性能的关键指标,影响因素包括杆件变形、关节间隙和控制系统响应等,建模补偿较为困难<sup>[9-10]</sup>。卢远等<sup>[11]</sup>针对工业机器人轨迹精度低的问题,提出一种力前馈控制-位置反馈控制复合补偿方法,力前馈控制可超前补偿由外部负载力引起的位置偏差,位置反馈控制用于补偿机器人内部因素导致的位置偏差。高贯斌等<sup>[12]</sup>为提高机器人轨迹精度,提出一种基于机器人运动学标定和关节空间插值误差补偿的方法,运用机器人微分运动学理论建立末端位置误差模型和轨迹误差模型,将某型号工业机器人轨迹精度由2.532 mm提高了1.464 mm。崔旭东等<sup>[13]</sup>针对运动指令与实际位置间的迟滞带来的机器人末端轮廓精度低的问题,结合机器人运动学、动力学和PID控制理论,研究了六关节机器人位置域控制算法。唐尧等<sup>[14]</sup>以SR4C六自由度工业机器人为对象,提出一种基于运动学分析的工业机器人轨迹精度补偿方法,建立了曲线运动轨迹偏差与运动学模型参数误差映射的机器人运动轨迹误差数学模型。洪鹏等<sup>[15]</sup>采用空间网格化变参数技术对KUKA工业机器人进行误差补偿,将绝对位置精度平均值从0.901 mm提高到0.115 mm,但对轨迹精度提升有限。

上述文献中对于轨迹精度的研究主要针对高速运动的工业机器人。电化学加工过程中,机器人末端工作速度远低于常用工业机器人设计速度,致使工业机器人在电化学加工方面的应用较少。南洋理工大学的Abd EI<sup>[16]</sup>通过在工业机器人末端安装力控制执行器,组成宏微型机器人控制单元,机器人根据工件对末端微型机器人进行粗定位,控制阴极进行低速高精度电解加工,有效降低了复杂零件表面粗糙度,但结构较为复杂,对场景空间要求高,难以推广。Jiang等<sup>[17]</sup>通过分析机器人末端轨迹误差与电化学加工电流之间的关系,建立了简单阴极法向误差、加工电压和移动速度对材料去除的理论模型,并进行了相关测试,但受限于工业机器人轨迹精度低等原因,容易发生电极短路,加工可靠性较低。

通过分析电化学加工工艺特征,得出电化学加工机器人具有以下特点:(1)加工过程中,阴极、阳极间通过电解液进行电流传导和材料去除,其工作空间极少出现在机器人上方。因此,可采用限定工作区域的方式,使位置关节和连杆受重力导致的变形方向保持一致,从而使得杆件柔性变形和关节传动误差连续,促使误差标定补偿更为准确;(2)电

化学加工工作速度远低于目前工业机器人设计速度,可根据其低速运动特点,对机器人关节电机转速和减速比进行优化设计,合理调节各关节刚度,避免低速抖动问题。

本文结合电化学加工低速、高精度、工作空间紧凑的特点,在明确目标机器人运动特性的基础上,采用象限法设定工作区域,设计一种轨迹精度高、低速性能好的电化学加工专用机器人,从而将电化学加工与工业机器人的优势相融合,以达到低成本电化学加工复杂形状零件的目标。

## 1 电化学加工机器人运动学和动力学分析

### 1.1 电化学加工机器人运动学分析

本文所设计电化学加工机器人由6个转动关节串联组成,如图1所示。

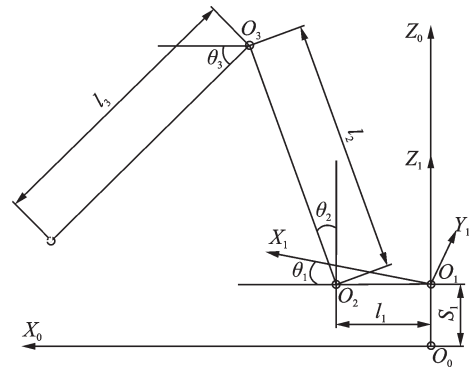


图1 电化学加工机器人运动学模型

Fig.1 Kinematic model of electrochemical machining robot

图1中,1、2、3关节确定末端工作空间和速度,4、5、6关节确定末端姿态,对末端速度影响较小,运动学描述时可忽略。 $S_1$ 为连杆1距基座原点高度,与机器人运动无关。根据关节几何关系,建立机器人运动学模型为

$$\begin{cases} x = (l_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \cos \theta_3) \cos \theta_1 \\ y = (l_1 + l_2 \sin \theta_2 + l_3 \cos \theta_3) \sin \theta_1 \\ z = S_1 + l_2 \cos \theta_2 - l_3 \sin \theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为机器人末端工具中心点(Tool centre point, TCP)点在全局工作空间的位置坐标; $l_1$ 、 $l_2$ 、 $l_3$ 为连杆1、2、3的长度; $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、 $\theta_3$ 为连杆1、2、3的运动角度。对式(1)进行微分运算,得到机器人末端位置到关节空间的速度关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中机构雅克比矩阵 $J$ 为

$$J = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1(l_1 + l_2\cos\theta_2 - l_3\cos\theta_3) - l_2\cos\theta_1\sin\theta_2 & l_3\cos\theta_1\sin\theta_3 & 0 \\ \cos\theta_1(l_1 + l_2\cos\theta_2 - l_3\cos\theta_3) - l_2\sin\theta_1\sin\theta_2 & l_3\sin\theta_1\sin\theta_3 & 0 \\ 0 & l_2\cos\theta_2 & -l_3\cos\theta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据电化学加工工艺特点<sup>[1]</sup>,电化学加工机器人运动学参数包括工作空间、速度范围及速度稳定性。

(1)工作空间。机器人关节运动经过坐标象限时,由于重力影响会引起杆件变形和关节间隙突变,导致不同象限运动精度和动力学性能差别很大,采用象限法设定电化学加工机器人工作空间,规定连杆2始终位于第1象限,连杆3始终位于第4象限,如图2所示。图中 $T_{g2}$ 为关节2重力矩; $G_2$ 为关节2重力; $T_{g3}$ 为关节3重力矩; $G_3$ 为关节3重力。关节2重力矩保持顺时针方向,连杆2处于压缩状态;关节3重力矩保持顺时针方向,连杆3处于拉伸状态。方向的一致性保证了关节和连杆误差的连续性。

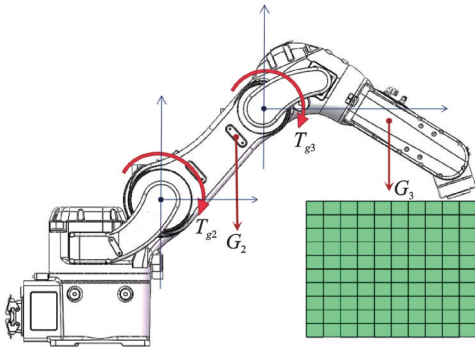


图2 电化学加工机器人工作空间

Fig.2 Electrochemical machining robot workspace

考虑1轴旋转的对称性,工作空间设定为

$$x_{pmin} \leq x_p \leq x_{pmax}, \quad z_{pmin} \leq z_p \leq z_{pmax} \quad (4)$$

式中 $x_p, z_p$ 为电化学加工机器人工作空间纵截面长度和高度。

(2)速度范围。棒状阴极电化学加工速度通

$$\begin{cases} T_m = J_m \ddot{\theta}_m + K_J(I^{-1}\theta_m - \theta_1) \\ \begin{Bmatrix} K_J(I^{-1}\theta_m - \theta_1) \\ 0 \end{Bmatrix} = M(\theta_1, \xi) \begin{Bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\xi} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ K_\lambda \xi \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} g_1(\theta_1) \\ 0 \end{Bmatrix} \end{cases} \quad (9)$$

式中

$$M(\theta_1, \xi) = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $T_m, \theta_m$ 为各轴电机力矩和角位移矩阵; $M(\theta_1, \xi)$ 为系统惯量矩阵; $K_J$ 为关节刚度矩阵; $K_\lambda$ 为连杆刚度矩阵; $I$ 为关节减速比矩阵; $\theta_1$ 为关节角位移; $\xi$ 为连杆柔性模态矩阵。

低速运动时轨迹精度与动力学方程中机构刚度和惯量相关,动力学优化指标包括结构静刚度和惯量耦合。根据机器人动力学方程,分别建立动力

常在1~10 mm/min,建立关节角速度与末端线速度关系如下

$$\lambda_{min} \|v_{max}\|^2 \leq \|\omega_j\|^2 \leq \lambda_{max} \|v_{max}\|^2 \quad (5)$$

式中: $\lambda_{min}, \lambda_{max}$ 为矩阵 $J^T J$ 的最小特征值和最大特征值; $\omega_j (j=1, 2, 3)$ 为关节转角的函数,同时考虑驱动伺服电机的限制,关节速度需满足

$$\|\omega_j\|^2 \leq \frac{3V_m^2}{i_j^2} \quad (6)$$

式中: $V_m$ 为关节伺服电机的最大转速; $i_j (j=1, 2, 3)$ 为关节减速机的减速比。

综上,关节速度约束可表示为

$$\|\omega_j\|_{max}^2 = \max_{\theta_1, \theta_2, \theta_3} (\lambda_{max}(\theta_1, \theta_2, \theta_3)) \leq 3 \left( \frac{V_m}{i} \right)^2 \quad (7)$$

(3)速度稳定性。假设关节端角速度偏差为 $\|\delta\omega_j\|$ ,末端线速度偏差为 $\|\delta V_e\|$ ,关节角速度偏差与末端线速度偏差的关系如下

$$\frac{\|\delta V_e\|}{\|V_e\|} \leq \|J^{-1}\| \cdot \|J\| \cdot \frac{\|\delta\omega_j\|}{\|\omega_j\|} \quad (8)$$

式中 $\|(J^T)^{-1}\| \cdot \|J^T\|$ 为运动学方程雅克比矩阵 $J$ 的条件数。

因伺服电机齿槽效应,低转速时扭矩和速度存在波动,关节角速度波动在机器人末端会被放大,末端速度波动会造成电化学加工表面质量下降,设计时应使 $\|(J^T)^{-1}\| \cdot \|J^T\|$ 尽可能小。

## 1.2 电化学加工机器人动力学分析

由于电化学加工机器人工作速度低,动力学方程可忽略离心力、柯氏力、惯性力等速度因素,采用Lagrange法建立刚柔耦合动力学模型如下

学约束条件如下。

(1)机构静刚度。关节和连杆的柔性变形直接影响末端精度,将机器人最小静刚度作为动力学约束条件,在工作空间内机器人静刚度应满足

$$\min_{\theta_1, \theta_2, \theta_3} \left( \left\| \sqrt{\lambda_{K_{smax}}}(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \right\| \right) \geq K_{smin} \quad (11)$$

式中 $K_{smin}$ 为设计要求的机构最小刚度。

(2)惯量指标。杆件自身惯量会引起控制响应迟滞导致精度下降,耦合惯量会使机器人动力学方程中的惯量矩阵 $M(\theta_1, \xi)$ 变的非线性,引起伺服控制难度增加导致轨迹精度下降,优化设计应使惯

量矩阵最小,建立约束如下

$$\begin{cases} \text{Min: } \|m_{23}\| = \|m_{32}\| \leq \|m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 - m_2 l_2 l_3 - m_3 l_2 l_3 - m_{\text{load}} l_2 l_3\| \\ \text{Min: } \max_{\theta_1, \theta_2, \theta_3} m_{11} + m_{22} + m_{33} \end{cases} \quad (12)$$

式中  $m_1 = l_1 \cdot A_1 \cdot \rho_1$ ;  $m_2 = l_2 \cdot A_2 \cdot \rho_2$ ;  $m_3 = l_3 \cdot A_3 \cdot \rho_3$ , 其中  $A_1, A_2, A_3$  分别为连杆 1、2、3 的横截面积,  $\rho_1, \rho_2, \rho_3$  分别为连杆材料平均密度。

## 2 电化学加工机器人多目标优化设计

根据运动学及动力学分析,建立电化学加工机器人多目标优化模型如下

$$\begin{cases} \text{Min: } f_1 = \|(J^T)^{-1} \cdot \| J^T \| \\ \text{Min: } f_2 = \|m_2 l_2^2 + m_3 l_3^2 - m_2 l_2 l_3 - m_3 l_2 l_3 - m_{\text{load}} l_2 l_3\| \\ \text{Min: } f_3 = \max_{\theta_1, \theta_2} m_{11} + m_{22} + m_{33} \\ \text{s.t.1 } \begin{cases} x_{\text{pmin}} \leq x_p \leq x_{\text{pmax}} \\ z_{\text{pmin}} \leq z_p \leq z_{\text{pmax}} \end{cases} \\ \text{s.t.2 } \max_{\theta_1, \theta_2, \theta_3} (\lambda_{\text{max}}(\theta_1, \theta_2, \theta_3)) \leq 3 \cdot \left(\frac{V_m}{i}\right)^2 \\ \text{s.t.3 } \min_{\theta_1, \theta_2, \theta_3} (\|\sqrt{\lambda_{K, \text{max}}}(\theta_1, \theta_2, \theta_3)\|) \geq K_{\text{smmin}} \end{cases} \quad (13)$$

多目标优化设计模型存在 3 个目标函数,传统求解方法将多目标转换成一个含有权重的单目标,存在主观性而引起局部最优。多目标非支配遗传算法 NSGA-II 在对 3 个及 3 个以上的目标优化时存在收敛性不好或陷入局部最优。NSGA-III 算法在 NSGA-II 的基础上采用基于参考点对个体进行选择。优点是当目标数目大于等于 3 时,利用参考点保持种群的多样性,避免了无法收敛或局部最优,NSGA-III 算法进化过程如图 3 所示。 $P_i$  为父代种群;  $Q_i$  为子代种群;  $R_i$  为混合种群;  $N$  为种群个数;  $F_1, F_2, \dots$ , 为种群等级序列;  $S_i$  为参考种群;  $P_{i+1}$  为下一代父代种群。

根据工程经验,初选设计参数如表 1 所示。以降低连杆 1、2、3 的质量为优化目标,将连杆视为密度均匀部件,因此,将连杆长度  $l_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 和截面积  $A_i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 作为优化目标,此外,  $i_1, i_2, i_3$  分别为关节 1、2、3 的减速比。种群数量设为 200, 进化迭代次数为 50 代,利用 Matlab 软件对式(13)进行求解,最终得到 Pareto 解集如图 4 所示。

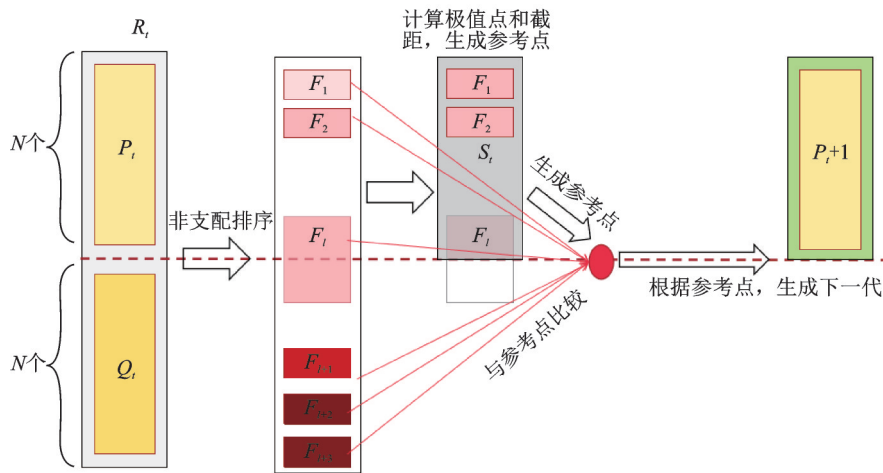


图 3 NSGA-III 种群进化过程图

Fig.3 Map of population evolution for NSGA-III

表 1 初选设计参数

Table 1 Original design parameters

$l_1/\text{mm}$	$l_2/\text{mm}$	$l_3/\text{mm}$	$A_1/\text{mm}^2$	$A_2/\text{mm}^2$	$A_3/\text{mm}^2$	$i_1$	$i_2$	$i_3$	$Z_p/\text{mm}$	$V_m/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	$K_{\text{smmin}}/(\text{N} \cdot \text{mm}^{-1})$
200	450	500	5 000	4 000	3 000	800	800	600	50~450	3 000	100

以速度矩阵雅克比条件数  $f_1$  为第一指标,从 Pareto 解集中选择出 6 组参数进行最终选择,如表 2 所示。可以看出,6 组参数的第 1 目标函数雅克比矩阵  $J$  的条件数  $f_1$  相对稳定,均在 2.45~3.6  $\text{kg} \cdot \text{m}^2$  之间。

综合考虑惯量耦合指标和机械设计简易性、易制造性和美观性,使  $l_2 > l_3, A_2 > A_3$ , 且其比值  $0.8 \leq l_3/l_2 \leq 0.95$ , 综合比较后选取第 4 组参数作为电化学加工机器人优化设计结果。

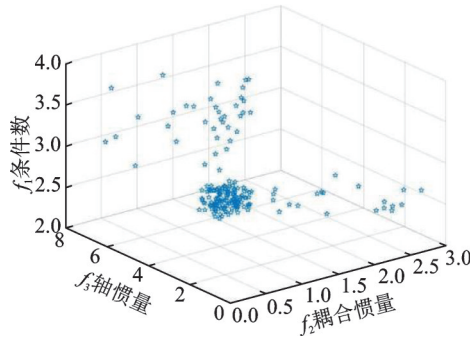


图4 含有3个优化目标的Pareto解集

Fig.4 Pareto solution set with three optimization objectives

表2 待选的Pareto解集

Table 2 Selected pareto solution set

No.	$f_1/(kg \cdot m^2)$	$f_2/(kg \cdot m^2)$	$f_3/(kg \cdot m^2)$	$l_1/mm$	$l_2/mm$	$l_3/mm$	$A_1/mm^2$	$A_2/mm^2$	$A_3/mm^2$	$i_1$	$i_2$	$i_3$
0	4.346	1.452	7.894	200	450	500	5 000	4 000	3 000	800	800	600
1	3.635	1.648	5.432	195.28	455.82	438.92	4 865.94	3 798.29	2 865.76	890	883	752
2	3.547	1.712	5.198	189.67	441.06	430.74	4 672.64	3 587.31	2 876.73	1 196	1 083	936
3	3.268	1.753	3.279	186.28	447.92	427.17	4 398.83	3 367.04	2 597.82	1 464	1 365	1 137
4	2.528	1.468	4.861	180.92	431.93	405.52	4 105.03	3 196.34	2 108.56	1 639	1 598	1 285
5	2.449	1.519	4.953	175.39	432.78	391.53	4 000.27	2 908.94	2 256.83	1 672	1 661	1 428
6	2.583	1.646	5.911	176.30	436.28	409.76	3 997.11	3 097.11	2 581.27	1 496	1 683	1 539

### 3 实验验证与数据分析

为验证上述优化模型及计算方法的合理性,基于优化后的电化学加工机器人设计参数,制造机器人样机,并采用Leica-AT930激光跟踪仪为测量设备,搭建性能测试平台,对机器人各项性能进行了测试验证,实验平台如图5所示。

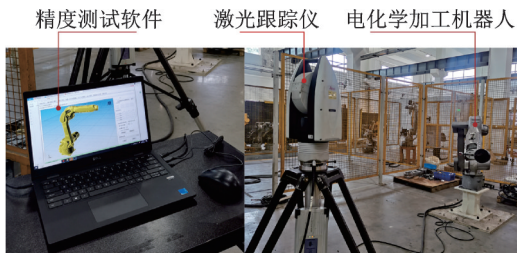


图5 电化学加工机器人性能测试平台

Fig.5 Performance test platform of electrochemical machining robot

#### 3.1 全局静刚度测试

全局静刚度是机器人本体基本特性,对机器人控制性能和末端抖动有直接影响。因此,首先进行电化学加工机器人样机全局静刚度测试,对比优化前、优化后及实验样机这两项指标,考虑到机器人1轴旋转的对称性,静刚度测试可用工作空间纵截面代表全部空间。因此全局静刚度测试位置取点如下:工作空间纵截面X方向上距离1轴旋转中心最近、中间和最远3个区域,Z方向上以均匀间隔取10个末端位置,如图6(a)所示。优化前、后及样机

实际测试的全局静刚度变化曲线如图6(b)所示。可以看出:在设定的工作区域内,优化前机器人全局最小静刚度101.83 N/mm,优化后全局最小静刚度提高到110.63 N/mm,且在设定工作空间静刚度均

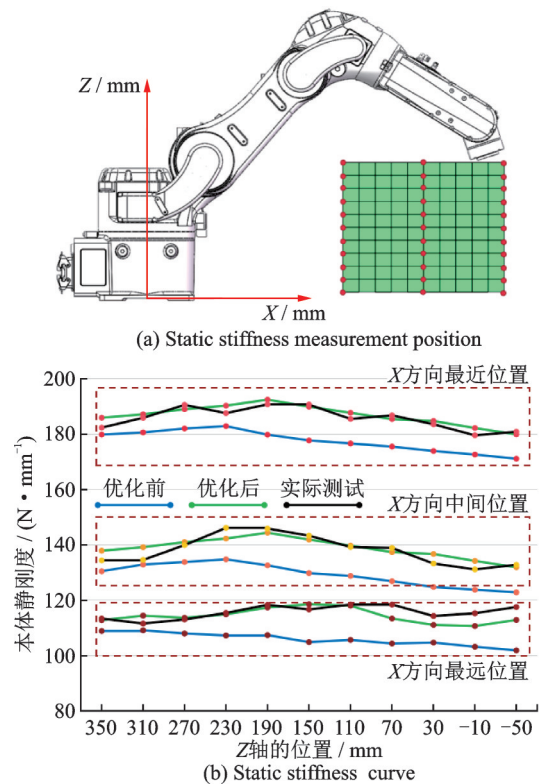


图6 工作区域内本体静刚度对比

Fig.6 Comparison of body static stiffness in working area

有提升,优化模型对静刚度的提高作用明显。

### 3.2 机器人动态性能测试

为验证所设计电化学加工机器人性能可以满足电化学加工工艺要求,利用 Leica-AT930 激光跟踪仪对电化学加工机器人在设定工作空间内的运动特性进行测试,内容包括:速度稳定性、轨迹准确度和轨迹重复度。

依据 GB/T 12642-2013 工业机器人性能规范及其试验方法,在机器人设定工作空间内选取对角线平面建立测量平面,如图 7 所示。 $P_1$  为测量平面中心, $P_2P_3P_4P_5$  为测量平面内矩形,其边长设为工作空间边长的 80%,以直线  $P_2P_4$  为基准进行直线轨迹精度测试;以  $P_1$  为圆心、 $R$  为半径的圆进行圆弧轨迹精度测试,圆弧半径  $R$  设为工作空间边长的 40%,可综合反应机器人在整个工作空间的性能。测试内容如图 7 所示。

#### 3.2.1 机器人误差标定及位置精度测试

因机器人在加工零件和装配过程不可避免地存在误差,基于工业机器人通用 D-H 模型<sup>[18]</sup>,利用激光跟踪仪对机器人各关节角度和杆长进行误差

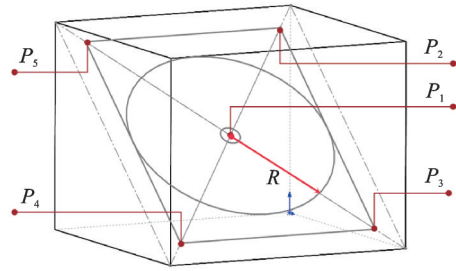


图 7 电化学加工机器人性能测试平面

Fig.7 Test plane of electrochemical machining robot performance

标定和补偿,以减小机器人残差和提高位置定位精度。激光跟踪仪测量得到工具靶球中心坐标在跟踪仪测量坐标系的位置  $P_1$ ,机器人控制器设定的末端坐标是在机器人坐标系的位置  $R$ ,根据 D-H 坐标矩阵建立机器人坐标系到测量坐标系的位姿变换矩阵  ${}^i T$ ,可以得到  $R$  在测量坐标系的理论位置  $P_r$ ,比较  $P_r$  与  $P_1$ ,对电化学加工机器人加工和装配误差标定和补偿,补偿后电化学加工机器人各关节 D-H 坐标参数及残差如表 3 所示。

表 3 电化学加工机器人误差标定结果

Table 3 Error calibration results of electrochemical machining robot

Joint	$\alpha/(\circ)$	$\theta/(\circ)$	$a/\text{mm}$	$l/\text{mm}$	$\beta/(\circ)$
Joint 1	0.000	90.00	430.00	179.563	0.000
Joint 2	90.182	0.00	-0.38	405.22	0.000
Joint 3	1.070	90.00	0.00	160.233	0.208
Joint 4	179.734	90.00	431.65	0.000	0.000
Joint 5	180.445	90.00	0.00	0.000	0.000
Joint 6	0.000	0.00	116.00	0.000	0.000
标定后机器人残差均值/mm		0.099 1	标定后机器人残差最大值/mm		0.015 3

首先对如图 2 所示工作空间横截面上 100 个网格点的位置精度进行检测,每个网格点测量 5 次,最终得到工作空间截面内各网格点最大位置误差 0.072 mm,平均位置误差 0.048 6 mm,如图 8 所

示。结果表明,采用象限法设定工作区与多目标优化方法结合将机器人静态位置精度提升到 0.1 mm 以内,其为动态轨迹精度建立了基础。

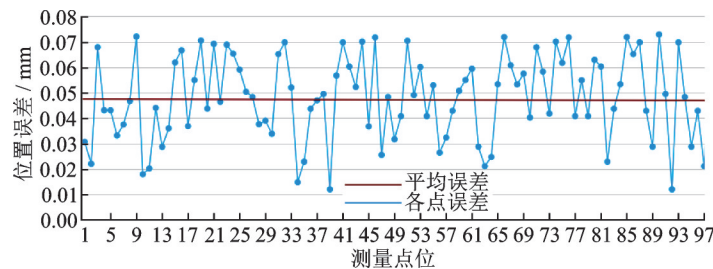


图 8 工作空间截面内位置精度误差

Fig.8 Position accuracy in workspace section

#### 3.2.2 直线轨迹精度

直线轨迹精度包括轨迹准确度和轨迹重复度 2 项,其中轨迹准确度表示轨迹绝对坐标的准确性,

轨迹重复度表示多条轨迹之间的重复精度。选取图 7 中  $P_4P_5$  直线作为理论直线轨迹,沿直线  $P_4P_5$  重复运行 30 次,采集运行过程中机器人末端位置,得

到电化学加工机器人直线轨迹准确度0.073 mm, 直线轨迹重复度达到0.012 mm, 如图9所示。测试结果表明, 面向低速工况的动力学优化算法可显著提升机器人直线精度, 相比文献[12]中的工业机器人轨迹精度(1.464 mm)提高10倍以上, 可以满足电化学加工要求的直线精度。

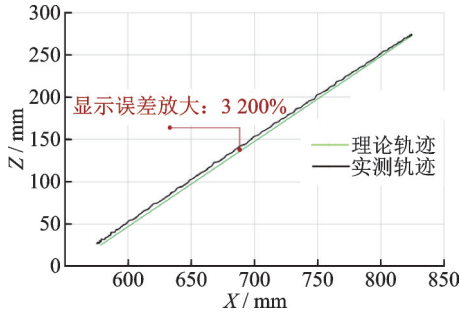


图9 直线轨迹精度

Fig.9 Linear trajectory accuracy

### 3.2.3 圆弧轨迹精度

圆弧轨迹精度也包括轨迹准确度和轨迹重复度, 选取图7中半径为 $R$ 的圆作为理论轨迹, 沿圆周重复运行30次, 采集运行过程中机器人末端位置, 得到电化学加工机器人圆弧轨迹准确度0.145 mm, 圆弧轨迹重复度达到0.062 mm, 如图10所示。测试结果表明, 低速运行工况下圆弧轨迹精度相比直线轨迹精度较差, 误差较大位置出现在圆弧象限过度处, 但与文献[12]中的工业机器人轨迹精度相比, 圆弧轨迹精度提升接近一个量级, 可以满足电化学加工要求。

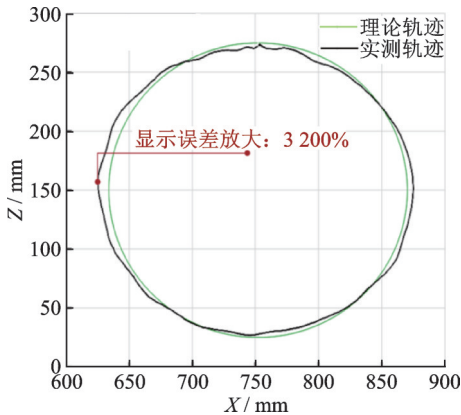


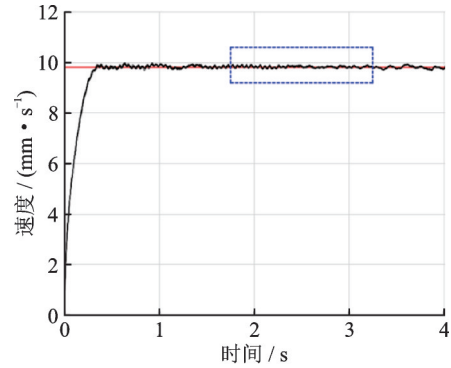
图10 圆弧轨迹精度

Fig.10 Circle trajectory accuracy

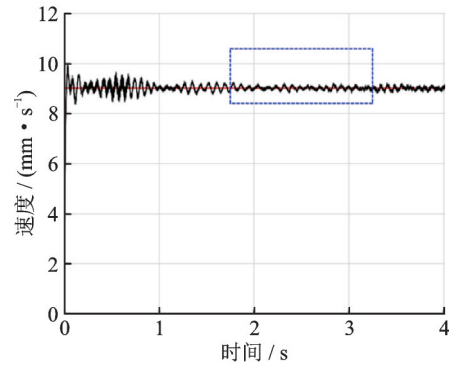
### 3.2.4 轨迹速度特性

设定机器人末端移动速度10 mm/min, 以 $P_2P_4$ 直线作为理论运行轨迹, 沿直线 $P_2P_4$ 运行10次, 分析直线轨迹速度特性, 与同等条件下一般工业机器人速度特性曲线进行对比, 结果如图11所示。结果显示, 在10 mm/min低速运行时, 电化学加工机

器人加速时间约0.35 s, 达到设定速度后可维持在10 mm/min稳定运行, 速度波动小于 $\pm 3\%$ 。工业机器人可瞬间达到设定速度, 但波动较大, 上下波动约10%。测试结果表明, 多目标优化算法有效提高了电化学加工机器人的轨迹速度稳定性, 满足了电化学加工对速度均匀性的要求。



(a) Electrochemical machining robot



(b) Normal industry robot

图11 轨迹速度特性

Fig.11 Characteristic of trajectory velocity

## 4 结 论

(1) 电化学加工机器人在过象限位置处会发生关节及连杆误差突变, 致使机器人末端轨迹误差过大且难以补偿。本文提出采用象限法设计电化学加工机器人工作区域, 区域内关节和连杆受重力导致的变形方向保持一致, 使得杆件柔性变形和关节传动误差连续, 降低了机器人动态控制难度, 提升了末端轨迹精度。

(2) 根据电化学加工低速、高轨迹精度的工艺特点, 以提高机器人末端速度稳定性、降低各轴惯量和耦合惯量为优化目标, 以工作空间、运动速度范围、机构静刚度为约束条件, 建立了电化学加工机器人动态性能优化模型。采用多目标非支配遗传算法NSGA-III对优化模型进行求解, 并根据优化结果制造了电化学加工机器人样机。

(3) 搭建了电化学加工机器人动态性能测试平台, 测试结果显示, 优化后的电化学加工机器人在特定工作空间内低速稳定性显著优于现役工业机器人,

其直线轨迹、圆弧轨迹准确度分别达到0.073 mm和0.145 mm,轨迹精度较现役工业机器人提高近10倍。

#### 参考文献:

- [1] GUANLIN Z, XIEERYAZIDAN A, ZHONGSHENG S. Effect of different parameters on processing efficiency in electrochemical machining[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023. DOI: 10.1088/17426596/2419/1/012044.
- [2] 朱肖飞, 樊双蛟, 闫兆彬, 等. 扫描式阴极电化学光整加工对车削外圆面边缘毛刺的去除[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 111-118.  
ZHU Xiaofei, FAN Shuangjiao, YAN Zhaobin, et al. Scanning cathode electrochemical finishing for removal of burrs on edge of turning cylindrical surfaces[J]. Surface Technology, 2021, 50(12): 111-118.
- [3] SU U K, GWON K K, UNG S K, et al. Analysis of electrochemical machining characteristics using electrode tools fabricated by 3D printing[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2022, 37(1): 333-339.
- [4] LIU Yajun, ZI Bin, WANG Zhengyu, et al. Adaptive lead-through teaching control for spray-painting robot with closed control system[J]. Robotica, 2023, 41: 1295-1312.
- [5] CHEN Yuanlong, JIANG Lijun, FANG Ming, et al. Multi-time scale simulation of pulse electrochemical machining process with multi-physical model[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110(7): 2203-2210.
- [6] CHEN Yuanlong, MING Fang, JIANG Lijun. Multi-physics simulation of the material removal process in pulse electrochemical machining (PECM)[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 91: 2455-2464.
- [7] 周健, 郑联语, 樊伟, 等. 工业机器人定位误差在线自适应补偿[J]. 机械工程学报, 2023, 2: 1-14.  
ZHOU Jian, ZHENG Lianyu, FAN Wei, et al. Adaptive online compensation for industrial robot positioning error[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 2: 1-14.
- [8] 杨真真, 李明富, 张黎明, 等. 基于模型预测控制的工业机器人曲面跟踪方法研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(19): 24-33.  
YANG Zhenzhen, LI Mingfu, ZHANG Liming, et al. Research on surface tracking method of industrial robot based on model predictive control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(19): 24-33.
- [9] 刘目坤, 张飞斌, 王天杨, 等. 多质心有限质点法及其在工业机器人动力学建模的应用[J]. 振动与冲击, 2022, 41(18): 1-8.  
LIU Mukun, ZHANG Feibin, WANG Tianyang, et al. Multi-centroid finite point method and its application to the dynamic modeling of industrial robots[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41(18): 1-8.
- [10] 杨靖, 张小俭, 吴毅, 等. 基于刚度定向的工业机器人铣削姿态优化研究[J]. 中国机械工程, 2022, 33(16): 1957-1964.  
YANG Jing, ZHANG Xiaojian, WU Yi, et al. Posture optimization based on stiffness orientation method for industrial robotic milling[J]. China Mechanical Engineering, 2022, 33(16): 1957-1964.
- [11] 卢远, 国凯, 孙杰. 工业机器人轨迹精度力-位置复合补偿方法[J]. 机械工程学报, 2022, 58(14): 181-189.  
LU Yuan, GUO Kai, SUN Jie. Force-position composite control method for trajectory accuracy compensation of industrial robots[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(14): 181-189.
- [12] 高贯斌, 张石文, 那靖, 等. 基于标定和关节空间插值的工业机器人轨迹误差补偿[J]. 机械工程学报, 2021, 57(21): 55-67.  
GAO Guanbin, ZHANG Shiwen, NA Jing, et al. Compensation of trajectory error for industrial robots by interpolation and calibration method in the joint space[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(21): 55-67.
- [13] 崔旭东, 邓少丰, 王平江. 面向六关节机器人的位置域控制[J]. 工程科学学报, 2022, 44(2): 244-253.  
CUI Xudong, DENG Shaofeng, WANG Pingjiang. Position domain control technology for six-joint robots[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(2): 244-253.
- [14] 唐尧, 张恩政, 陈本永, 等. 基于运动学分析的工业机器人轨迹精度补偿方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 175-183.  
TANG Yao, ZHANG Enzheng, CHEN Benyong, et al. Trajectory precision compensation method for industrial robot based on kinematics analysis[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(3): 175-183.
- [15] 洪鹏, 田威, 梅东棋, 等. 空间网格化的机器人变参数精度补偿技术[J]. 机器人, 2015, 37(3): 327-335.  
HONG Peng, TIAN Wei, MEI Dongqi, et al. Robotic variable parameter accuracy compensation using space grid[J]. Robot, 2015, 37(3): 327-335.
- [16] KHALICK MOHAMMAD A E, HONG Jie, WANG Danwei, et al. Synergistic integrated design of an electrochemical mechanical polishing end-effector for robotic polishing applications[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2019, 55: 65-75.
- [17] JIANG Lijun, MING Fang, CHEN Yuanlong, et al. Influence of industrial robot trajectory on electrochemical machining quality[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022(17): 220746.
- [18] 叶泉, 王建华. 基于D-H参数的ABB IRB2600机器人运动学分析与仿真[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(5): 114-117.  
YE Qian, WANG Jianhua. Kinematics analysis and simulation of ABB IRB2600 robot based on D-H parameters[J]. Machine Building & Automation, 2022, 51(5): 114-117.