

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2023.03.002

螺丝锁付装置取放料时间寻优轨迹规划

徐杰¹, 韩建海¹, 郭冰菁¹, 李向攀¹, 邓毅²

(1. 河南科技大学机电工程学院, 河南 洛阳 471000; 2. 常州铂电机器人有限公司, 江苏 常州 213002)

摘要:为提高螺丝锁付装置的锁付效率,课题组针对锁付过程中最频繁的取放料操作进行时间寻优轨迹规划。课题组以旋量理论建立运动学模型,基于运动合成的思想,采用多段六次多项式插值算法进行规划轨迹,并结合改进粒子群算法得到时间插值节点的优化解。仿真实验结果表明:采用改进粒子群算法,在迭代约40次时算法达到收敛,轨迹所需时间相对于优化前缩短了约30%;关节空间下各关节的位置、速度和加速度曲线连续平滑,无明显突变,末端笛卡尔空间下轨迹满足取放料轨迹的设计要求。该方法有效提高了螺丝锁付装置的工作效率。

关键词:螺丝锁付;轨迹规划;旋量理论;改进粒子群算法;六次多项式插值算法

中图分类号:TP242;TH112.1 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2023)03-0009-07

Trajectory Planning for Optimizing Material Picking and Placing Time of Screw Locking Device

XU Jie¹, HAN Jianhai¹, GUO Bingjing¹, LI Xiangpan¹, DENG Yi²

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471000, China;

2. Changzhou Bodian Robot Co., Ltd., Changzhou, Jiangsu 213002, China)

Abstract: In order to improve the locking efficiency of screw locking device, time-optimized trajectory planning was carried out for the most frequent feeding and discharging operations in the locking process. The kinematics model was established based on the screw theory. With the idea of motion synthesis, multi-segment 6-degree polynomial interpolation was used to plan the trajectory, and the optimized solution of time interpolation node was obtained by combining the improved particle swarm algorithm. The simulation results show that the improved particle swarm optimization algorithm can converge after 40 iterations, and the trajectory time is shortened by about 30% compared with the initial time. The position, speed and acceleration curves of each joint in joint space are continuous and smooth without obvious abrupt change. The lower trajectory of Cartesian space at the end meets the design requirements of feeding and discharging trajectory. The time-optimized trajectory planning method can effectively improve the working efficiency of screw locking device.

Keywords: screw locking; trajectory planning; spinor theory; improved particle swarm optimization algorithm; 6-degree polynomial interpolation algorithm

在制造装配过程中,螺纹联接由于其操作简单、工作可靠和成本低廉等特点,在制造业中得到了广泛应用^[1]。但传统人工手动锁付螺丝的方式由于锁付效率低、装配精度不高和质量参差不齐等缺点,难以满足行业日渐增长的生产需求。因此越来越多的企业开始采用自动化螺丝锁付设备代替人工锁付。选择顺应性

机器人手臂(selective compliance assembly robot arm, SCARA)是一种广泛应用于高速装配搬运场合的工业机械手臂,具有动作灵活、定位精度高和作业空间范围大等特点。因此将SCARA机器人与拧紧机构结合是螺纹锁付问题的一种可行方案。如秦国栋等^[2]将基于SCARA机器人开发的锁付装置应用于交流接触器

收稿日期:2022-12-04;修回日期:2023-01-12

基金项目:河南省科技攻关项目(212102310890);河南省科技攻关项目(212102310249)。

第一作者简介:徐杰(1996),男,河南新乡人,硕士研究生,主要研究方向为机器人技术。E-mail:1418421924@qq.com

的生产线上;童震^[3]将 SCARA 螺钉锁付机器人与机器视觉相结合,实现了自动化螺丝锁付。

在螺丝锁付的整个工作流程中,取放料是锁付装置最为频繁的操作,决定着锁付作业的工作效率。苏婷婷等^[4]在笛卡尔空间下采用毕达哥拉斯速端曲线平滑直角过渡,获取过渡平滑且曲率差最小的取放料轨迹,但轨迹计算复杂,不利于工程化。在关节空间下针对多点连续的轨迹规划问题,出现了如三次、五次多项式插值^[5]和 3-4-3、4-4-5 等^[6]混合多项式插值以及 B 样条插值^[7]等一系列轨迹规划算法。与此同时针对轨迹规划的某些特定指标,如时间、能耗和冲击等的一些智能算法也开始应用其中。李纯艳等^[8]采用七次 B 样条曲线规划关节空间下的轨迹,并通过麻雀算法优化后获得耗能最优的运动轨迹。辛玉红等^[9]利用遗传算法并通过染色体变异的改进方式,得到时间间隔最优的足端轨迹。

课题组针对螺丝锁付装置 3、4 关节为拧紧关节的特点,采用六次多项式插值的方式合成取放料轨迹,并通过改进粒子群算法优化时间间隔,得到时间优化的取放料轨迹,提高了装置锁付效率。

1 螺丝锁付装置结构

基于 SCARA 机器人开发的螺丝锁付装置,各个关节的传动链为:1 关节为旋转关节,伺服电机安装在基座上,通过谐波减速器带动大臂运动;2 关节为旋转关节,伺服电机安装在小臂上,通过谐波减速器带动小臂运动;3 关节为移动关节,伺服电机安装在小臂上,通过丝杠螺母,带动套筒进行上下直线运动;4 关节为旋转关节,伺服电机被放置在套筒内,电机输出轴与批杆相连。螺丝锁付装置结构如图 1 和 2 所示。

拧紧机构安装在螺丝锁付装置末端,通过真空吸附的方式,经吸气口、套管和鸟咀,从供料器中吸取螺丝。当拧紧机构到达螺丝孔上方时,拧紧机构下压,弹簧 1 和弹簧 2 均被压缩,与此同时批杆伸出鸟咀。拧紧机构中的批杆与 4 关节电机直接相连。拧紧过程中,通过采集 4 关节电机的电流和编码器数值,从而获取力矩和角度变化信息。在 3、4 关节电机的配合下,批杆进行螺旋运动,完成螺丝的拧紧动作。拧紧机构原理如图 3 所示。

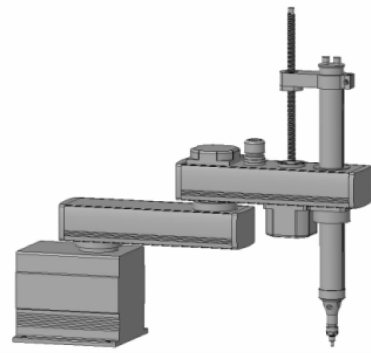


图 1 螺丝锁付装置模型

Figure 1 Screw locking device model

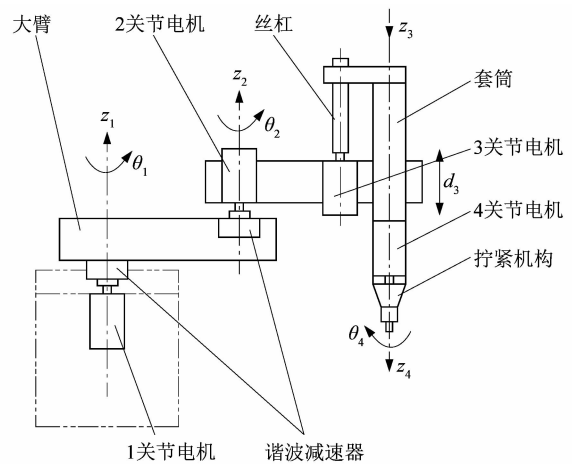


图 2 螺丝锁付装置结构

Figure 2 Screw locking device structure

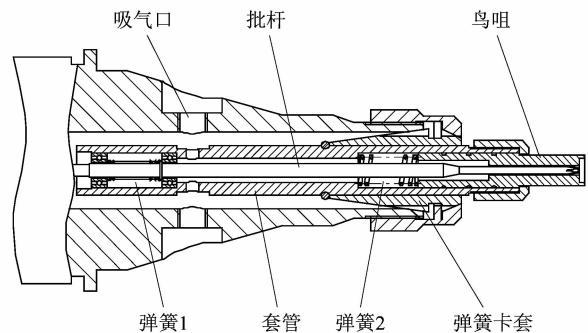


图 3 拧紧机构原理图

Figure 3 Schematic diagram of tight tening mechanism

2 运动学建模分析

课题组利用旋量理论对螺丝锁付装置进行运动学建模,与传统 D-H 参数法相比,省去了建立局部坐标系的步骤,简化了模型建立过程,且具有明确的几何物

理意义^[10]。可快速获得各个关节运动与拧紧机构末端的关系。

机器人大臂小臂杆长分别为: $L_1 = 250 \text{ mm}$, $L_2 = 250 \text{ mm}$ 。拧紧机构初始离地高度为 $L_0 = 100 \text{ mm}$ 。建立世界坐标系 $\{S\}$ 与工具坐标系 $\{T\}$, 4 个关节轴线均竖直向上, 即可根据右手法则确定各关节的运动方向。螺丝锁付装置构型如图 4 所示。

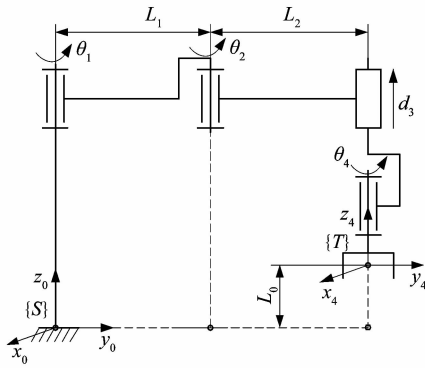


图 4 螺丝锁付装置构型

Figure 4 Configuration of screw locking device

由于关节 1, 2, 4 为旋转关节, 关节 3 为移动关节, 则设关节运动矢量为:

$$\varphi = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad d_3 \quad \theta_4]^T.$$

取 $\varphi = 0$ 为机器人完全展开时的位姿, 则此时工具坐标系 $\{T\}$ 相对于世界坐标系 $\{S\}$ 的位姿为:

$$\mathbf{T}_{st}(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_3 & \mathbf{P} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中: $\mathbf{P} = [0 \quad L_1 + L_2 \quad L_0]^T$; \mathbf{I}_3 为三阶单位阵。

对于旋转关节, 其运动旋量 δ_i 的方向矢量为:

$$\omega_1 = \omega_2 = \omega_4 = [0 \quad 0 \quad 1]^T.$$

取各转轴上的一点作矢径, 则有:

$$\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ L_1 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{r}_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ L_1 + L_2 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

则各运动旋量 δ_i 可表示为:

$$[\delta_i] = \begin{bmatrix} [\omega_i] & \mathbf{v}_i \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, i = 1, 2, 4.$$

式中: $[\omega_i]$ 为方向矢量 ω_i 对应的反对称矩阵; 位置矢量 $\mathbf{v}_i = \omega_i \times \mathbf{r}_i$ 。

对于移动关节, 其运动旋量 δ_3 的方向矢量为 0, 位置矢量为:

$$\mathbf{v}_3 = [0 \quad 0 \quad 1]^T.$$

则运动旋量 δ_3 的矩阵形式为:

$$[\delta_3] = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{v}_3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

则旋量表示下的运动学正解为:

$$\mathbf{T}_{st}(\varphi) = e^{[\delta_1]\theta_1} e^{[\delta_2]\theta_2} e^{[\delta_3]d_3} e^{[\delta_4]\theta_4} \mathbf{T}_{st}(0) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}(\varphi) & \mathbf{P}(\varphi) \\ 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

式中:

$$e^{[\delta_1]\theta_1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$e^{[\delta_2]\theta_2} = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & L_1 \sin \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & L_1 (1 - \cos \theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$e^{[\delta_3]d_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$e^{[\delta_4]\theta_4} = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & (L_1 + L_2) \sin \theta_4 \\ \sin \theta_4 & \cos \theta_4 & 0 & (L_1 + L_2) (1 - \cos \theta_4) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{R}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & 0 \\ \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_4) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{P}(\varphi) = \begin{bmatrix} -L_1 \sin \theta_1 - L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \\ L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ L_0 + d_3 \end{bmatrix}.$$

可通过末端的位姿矩阵,根据代数法^[11]求得装置运动学逆解。

3 取放料轨迹规划

螺丝锁付的整个流程中,取料、放料动作是螺丝锁付装置最频繁的操作。取放料的轨迹形状类似于“门型”,如图 5 所示。

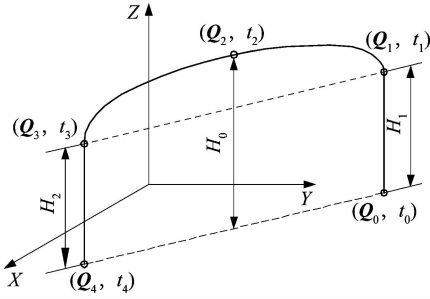


图 5 取放料轨迹示意图

Figure 5 Schematic diagram of material picking and placing track

螺丝锁付装置的 3 轴、4 轴为拧紧轴。由于 4 轴与批杆直接相连,故在取放料操作时不考虑其角度变化,视为平面二连杆与竖直导轨的组合。因此规划取放料轨迹时,对平面二连杆 1 轴、2 轴和导轨 3 轴分别进行规划。装置进行锁付动作时,在笛卡尔空间下,拧紧机构需要由取料点 $Q_0 = [Q_{0,x} \quad Q_{0,y} \quad Q_{0,z}]^T$ 竖直上升 H_1 的高度后到达提升点 Q_1 ,经避障点 Q_2 移动至下降点 Q_3 ,其中避障点的高度为 H_0 ,最后竖直下降 H_2 的高度后到达锁付点 $Q_4 = [Q_{4,x} \quad Q_{4,y} \quad Q_{4,z}]^T$ 。则可得到离散的坐标序列如下:

$$\begin{aligned} Q_0 &= [Q_{0,x} \quad Q_{0,y} \quad Q_{0,z}]^T; \\ Q_1 &= [Q_{0,x} \quad Q_{0,y} \quad Q_{0,z} + H_1]^T; \\ Q_2 &= [Q_{0,x} - d \cos \gamma \quad Q_{0,y} - d \cos \gamma \quad Q_{0,z} + H_0]^T; \\ Q_3 &= [Q_{4,x} \quad Q_{4,y} \quad Q_{4,z} + H_2]^T; \\ Q_4 &= [Q_{4,x} \quad Q_{4,y} \quad Q_{4,z}]^T. \end{aligned}$$

其中:

$$\gamma = \text{atan2}(Q_{0,y} - Q_{4,y}, Q_{0,x} - Q_{4,x});$$

$$d = \sqrt{(Q_{0,x} - Q_{4,x})^2 + (Q_{0,y} - Q_{4,y})^2}.$$

通过逆运动学将坐标-时间节点序列 $\{(Q_j, t_j) \mid j = 0, 1, \dots, 4\}$ 转换为关节空间下对应的位置-时间节点序列: $\{(P_j, t_j) \mid j = 0, 1, \dots, 4\}$ 。

其中: $P_j = [\theta_{1j} \quad \theta_{2j} \quad d_{3j}]^T$, $\theta_{1j}, \theta_{2j}, d_{3j}$ 分别为 1, 2, 3 关节下对应的第 j 个位置离散点,即装置末端位于坐标 Q_j 时,1 关节、2 关节和 3 关节此时的位置为 $\theta_{1j}, \theta_{2j}, d_{3j}$ 。

3.1 旋转关节的轨迹规划

平面二连杆 1、2 轴经过的位置-时间节点序列为 $\{(p_j, t_j) \mid j = 0, 1, \dots, 4\}$, 其中 $p_j = [\theta_{1j} \quad \theta_{2j}]^T$ 。

由于 $p_0 = p_1, p_3 = p_4$, 因此对于关节 1, 2 而言只需过 p_1, p_2, p_3 即可。考虑到关节 1, 2 位于 p_1, p_3 时,速度加速度都为零。所以采用 6 次多项式分别对 p_1, p_2, p_3 进行插值,函数表达式为:

$$\begin{cases} \theta_{j1}(t) = \theta_{j0}, t \in [t_0, t_1]; \\ \theta_{j2}(t) = a_{j6}t^6 + a_{j5}t^5 + \dots + a_{j0}, t \in [t_1, t_3]; \\ \theta_{j3}(t) = \theta_{j4}, t \in [t_3, t_4]. \end{cases}$$

式中 $j = 1, 2$ 。

由边界条件:

$$\begin{aligned} \theta_{j2}(t_1) &= \theta_{j1}; \\ \theta_{j2}(t_2) &= \theta_{j2}; \\ \theta_{j2}(t_3) &= \theta_{j3}; \\ \dot{\theta}_{j2}(t_1) &= 0; \\ \dot{\theta}_{j2}(t_3) &= 0; \\ \ddot{\theta}_{j2}(t_1) &= 0; \\ \ddot{\theta}_{j2}(t_3) &= 0. \end{aligned}$$

至此,可求得 6 次多项式的系数。

3.2 移动关节的轨迹规划

3 轴竖直移动关节经过的位置-时间节点序列为 $\{(d_{3j}, t_j) \mid j = 0, 1, \dots, 4\}$ 。

考虑到竖直移动关节位于 d_{30}, d_{32}, d_{34} 时的速度、加速度为零,且经过 d_{31}, d_{33} 。因此采用 2 段 6 次多项式进行插值。其函数表达式为:

$$\begin{cases} d_{31}(t) = a_{16}t^6 + a_{15}t^5 + \dots + a_{10}, t \in [t_0, t_2]; \\ d_{32}(t) = a_{26}t^6 + a_{25}t^5 + \dots + a_{20}, t \in [t_2, t_4]. \end{cases}$$

当 $t \in [t_0, t_2]$ 时,其边界条件为:

$$\begin{aligned} d_{31}(t_0) &= d_{31}; \\ d_{31}(t_2) &= d_{32}; \\ d_{31}(t_1) &= d_{31}; \\ \dot{d}_{31}(t_0) &= 0; \end{aligned}$$

$$\dot{d}_{31}(t_2) = 0;$$

$$\ddot{d}_{31}(t_0) = 0;$$

$$\ddot{d}_{31}(t_2) = 0。$$

可求得六次多项式 $d_{31}(t)$ 的系数,同理可得 $d_{32}(t)$ 的系数。

4 改进的粒子群算法寻优

粒子群优化算法(PSO)是一种模仿鸟类捕食的智能算法^[12-13]。PSO中惯性权重系数 ε 用以调整粒子的当前速度, ε 较大时,全局搜索能力比较强,反之则局部收敛能力比较好;学习因子 c_1 决定了粒子本身的认知能力, c_1 越大粒子对自身的认知越强;学习因子 c_2 决定了粒子之间信息共享的能力, c_2 越大粒子全局共享能力越强。传统PSO中的惯性权重 ε 以及学习因子 c_1, c_2 是定值或线性变化的。为了达到在前期增强算法的全局搜索能力以及强化粒子自我认知能力,在后期增强算法的局部收敛速度以及粒子之间的信息共享能力的目的,采用了动态因子进行调节。各因子表达式为:

$$\varepsilon(n) = \varepsilon_0 - \varepsilon_r e^{(1-n/N)};$$

$$c_1(n) = c_{10} \cos^2\left(\frac{\pi n}{2N}\right);$$

$$c_2(n) = c_{20} \sin^2\left(\frac{\pi n}{2N}\right)。$$

式中: $\varepsilon_0, c_{10}, c_{20}$ 分别为惯性权重系数和学习因子的初始值; ε_r 为权重衰减系数; n 为当前迭代次数; N 为最大迭代次数。

根据工程实际需要,希望锁付装置作业效率最高,取放料时间最短。因此可通过对时间节点序列 $\{t_i | i = 0, 1, \dots, 4\}$ 进行调节,优化关节曲线的性能,从而使其在运动学约束下运行时间最短。则构造优化目标如下:

$$T = \min \left[\sum_{l=0}^3 t_{l+1} - t_l \right]。$$

满足以下约束:

$$\dot{\theta}_{\max} < V_{\max}; \ddot{\theta}_{\max} < A_{\max}。$$

式中: T 为机器人完成取放料轨迹所需要的时间; V_{\max} , A_{\max} 为关节速度、加速度的最大值。

采用粒子群算法优化取放料轨迹时间节点的步骤如下:

1) 初始化粒子群,将4段插值时间作为搜索空间,随机生成 m 个粒子作为时间节点序列,并初始化粒子速度和时间;

2) 将粒子代表的时间序列代入多项式,求解多项式系数值;

3) 依据求解后的多项式,分别获得每个关节的最大速度、加速度;

4) 将轨迹运行总时间作为粒子的适应度值,若关节的最大速度、加速度大于约束值,则将该粒子的适应度设置为极大常数,以确保该粒子不会作为最优粒子;

5) 比较每个粒子的适应度,并选出个体最优粒子和群体最优粒子;

6) 根据个体最优粒子和群体最优粒子的位置,更新每个粒子的位置和速度,以生成新的种群;

7) 判断是否满足迭代条件,若满足则停止迭代寻优,若不满足则返回步骤2)。

5 轨迹规划验证与结果分析

为验证规划后的取放料轨迹,课题组在末端拧紧机构主要工作工件进行取点验证。设置取放料轨迹参数如下:取料点 $Q_0 = [-20.35 \quad 351.82 \quad 100]^T$;放料点 $Q_4 = [324.17 \quad 42.73 \quad 100]^T$;取料侧提升高度 $H_1 = 0.050$ m;放料侧下降高度 $H_2 = 0.050$ m;避障高度 $H_0 = 0.025$ m。根据取放料轨迹参数,可得笛卡尔空间下各个路径点位置。通过运动学逆解,获取各个关节路径点位置如表1所示。

表1 取放料路径点

Table 1 Material picking and placing path points

P_j	θ_{1j}/rad	θ_{2j}/rad	d_{3j}/m
P_0	0.834	1.577	0.300
P_1	0.834	1.577	0.250
P_2	-0.135	2.099	0.225
P_3	-0.727	1.716	0.250
P_4	-0.727	1.716	0.300

在考虑装置实际工况的速度和加速度约束的情况下,关节1最大角速度为5.87 rad/s、关节2最大角速度为6.14 rad/s、关节3最大速度为0.25 m/s,关节1最大角加速度为31.23 rad/s²、关节2最大角加速度为32.62 rad/s²、关节3最大加速度为2.43 m/s²。设置初始粒子种群大小为50,时间节点的初始迭代值为

1.500 s, 迭代次数为 100。每次迭代后, 将最短的取放料时间作为群体的最优适应度, 通过改进的粒子群算法对时间节点序列进行算法寻优。改进粒子群算法优化迭代过程中最优适应度变化情况如图 6 所示。

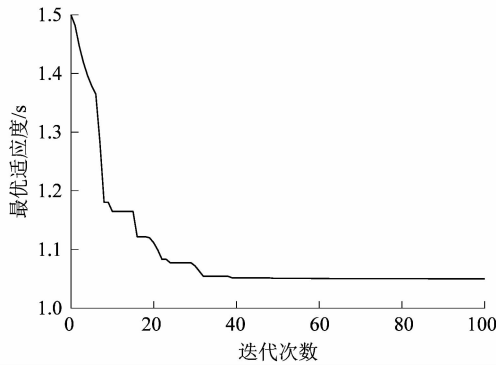


图 6 最优适应度迭代图

Figure 6 Iterative graph of optimal fitness

可以看出优化算法在迭代 40 次左右最优适应度达到收敛, 并得到取放料轨迹中的优化时间节点序列值为: $t_1 = 0.256$ s, $t_2 = 0.567$ s, $t_3 = 0.845$ s 和 $t_4 = 1.050$ s。与初始迭代值 1.500 s 相比, 缩短了 0.450 s, 验证了粒子群算法寻优的有效性。

课题组通过 MATLAB 对优化后的时间节点进行仿真验证, 得到各个关节的位置、速度、加速度曲线以及末端拧紧机构的空间轨迹如图 7~10 所示。

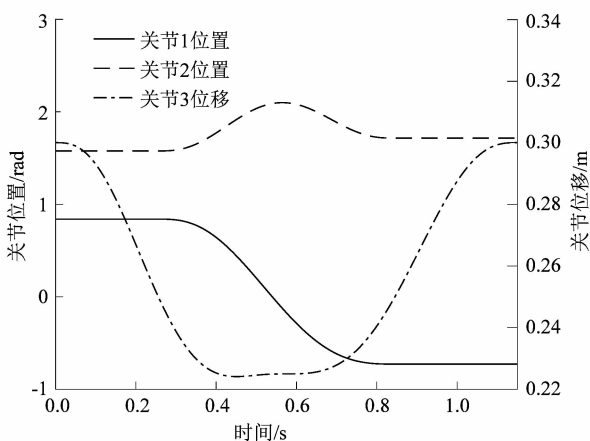


图 7 关节位置变化曲线

Figure 7 Joint position change curves

可以看出各个关节的运行曲线平稳, 速度、加速度连续且无突变。在笛卡尔空间下, 目标轨迹与设计轨迹一致, 能够按照要求依次通过取放料路径点, 满足末

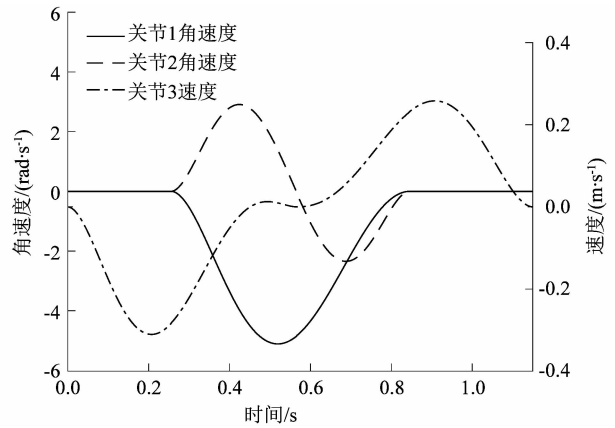


图 8 关节速度变化曲线

Figure 8 Joint speed change curves

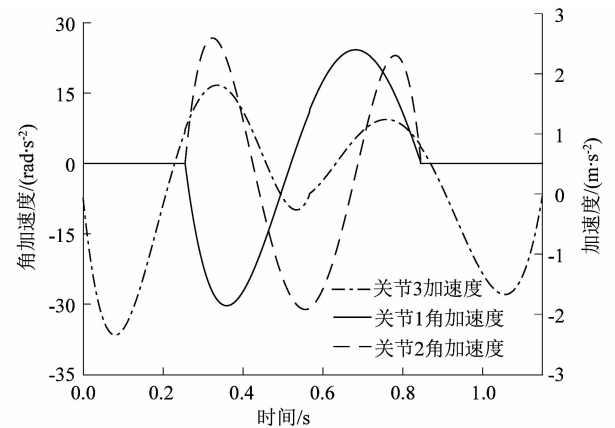


图 9 关节加速度变化曲线

Figure 9 Joint acceleration change curves

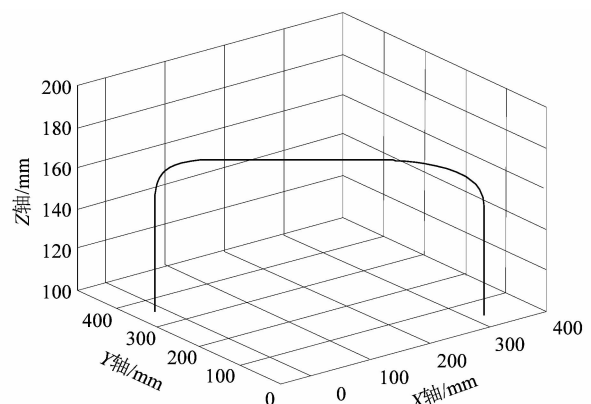


图 10 取放料轨迹

Figure 10 Material picking and placing trajectory

端拧紧机构取放料的要求, 且在满足运动学约束的条件下, 单次取放料耗时达 1.050 s, 有效验证了课题组规划轨迹的可行性。

6 结语

课题组以螺丝锁付装置为研究对象,利用旋量理论建立运动学模型;针对螺丝锁付装置的时间寻优取放料轨迹规划问题,采用运动合成的方式,在关节空间下使用多段六次多项式进行轨迹插值,得到机器人运动轨迹。该轨迹在保证起始、终止时刻的速度和加速度都为零的同时,能够按照要求进行避障。在运动学约束下,以取放料运动的总时间作为优化目标,通过改进粒子群算法优化时间序列节点,得到优化时间后的取放料轨迹,相较于未优化前的总时间缩短了约30%。通过仿真实验可看出,关节空间下该算法生成的插值曲线光滑顺畅,各关节位置、速度曲线光滑连续,且加速度曲线亦无冲击突变。该规划算法能够满足螺丝锁付装置平滑、高效运行的需求,可有效提高装置的工作效率。下一步研究应引入动力学约束,以机器人高速运动情况下各关节的关节脉动为优化目标,进一步提高轨迹平滑度以及电机运行寿命。

参考文献:

- [1] 崔云峰,卢晟曦,巩悦. 螺纹联接及拧紧控制研究[J]. 自动化应用,2022(5):140-142.
- [2] 秦国栋,黄磊. SCARA 机器人在螺丝锁付机中的应用[J]. 现代工业经济和信息化,2022,12(1):152-154.
- [3] 童震. 基于机器视觉的螺丝锁付 SCARA 机器人关键技术研究[D]. 马鞍山:安徽工业大学,2018:29.
- [4] 苏婷婷,张好剑,王云宽,等. 基于 PH 曲线的 Delta 机器人轨迹规划方法[J]. 机器人,2018,40(1):46-55.
- [5] HUANG T, WANG P F, MEI J P, et al. Time mini-mum trajectory planning of a 2-DOF translational parallel robot for pick-and-place operations[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2007, 56(1):365-368.
- [6] PETRINEC K, KOVACIC Z. Trajectory planning algorithm based on the continuity of jerk[C]// Mediterranean Conference on Control and Automation. Athens:IEEE Press,2007:1-5.
- [7] 杨轶焯,刘建群,高伟强. 基于非均匀 B 样条曲线的机器人轨迹过渡算法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022(2):20-24.
- [8] 李纯艳,晁永生,陈帅,等. 基于改进麻雀搜索算法的机器人能耗最优轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022(6):180-182.
- [9] 辛玉红,章永年. 基于最优时间间隔的足式机器人足端轨迹规划[J]. 制造技术与机床,2022(5):23-28.
- [10] 王红旗,王庆林. 基于旋量理论的移动机器人建模与控制[J]. 控制工程,2010,17(3):384-387.
- [11] 王科. 基于旋量和李群李代数的 SCARA 工业机器人研究[D]. 杭州:浙江大学,2010:20.
- [12] 王纯,韩加好,吉庆. 基于改进粒子群算法的齿轮传动优化设计研究[J]. 机电工程,2021,38(2):239-244.
- [13] 傅阳光,周成平,丁明跃. 标准粒子群优化算法的收敛性分析[J]. 应用数学,2011,24(1):187-194.

《轻工机械》2023 年征订启事

《轻工机械》杂志(刊号:CN 33-1180/TH, ISSN 1005-2895),创刊于1983年,由中国轻工机械协会、中国联合装备集团有限公司与轻工业杭州机电设计研究院联合主办,是一份在国内有较高影响力、历史悠久的轻工机械领域的专业性科技期刊,以报道轻工机械、自动化技术、机电一体化、工艺设计及其应用为特色。

- 双月刊,大16开,每册定价10.00元,全年60.00元。
- 邮局订阅(代号32-39),也可直接向本编辑部邮购(另加邮费2元/本)。
- 编辑部地址:杭州市余杭区高教路970-1号西溪联合科技广场4号楼711 邮编:311121
- 电话:(0571)85186130 85187520 E-mail: qgjxzz@126.com
- 网址:www.qgjxzz.com
- 开户银行:工行杭州建国北路支行
- 户头:轻工业杭州机电设计研究院有限公司 帐号:1202022209014428297 税号:913300007236292912

本刊系中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”“万方数据资源系统”“中文科技期刊数据库”,并被《中国学术期刊文摘》、英国《科学文摘》(SA, INSPEC)、美国化学文摘(CA)、美国剑桥科学文摘(CSA)、美国乌利希期刊指南(Ulrich)和美国 EBSCO 数据库等收录。

欢迎订阅 ● 欢迎刊登广告 ● 欢迎赐稿