

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2020.03.009

# 基于改进遗传算法的柔性抛光 工业机器人抛光时间优化

朱天宝<sup>1</sup>, 金晓怡<sup>1\*</sup>, 王川<sup>1</sup>, 奚鹰<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620;  
2. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:**为实现抛光时间最优的目标,课题组对自主研发的柔性抛光工业机器人抛光轨迹进行了合理规划。从表壳的表耳处取得一系列工业机器人机械臂工作的位置点,通过求解逆运动学方程得到相应的关节位置,采用三次B样条曲线拟合的方法得到各关节的轨迹曲线;用B样条曲线的控制点约束代替运动学约束,并基于改进的遗传算法,求解出时间最优的时间节点;在此基础上,规划得到满足时间最优的非线性轨迹曲线。研究表明:基于改进的遗传算法,能够很好地避免传统遗传算法的“退化”现象,更快地求得最优解,即抛光工业机器人的抛光工作时间达到最优。

**关键词:**工业机器人;柔性抛光;改进的遗传算法;三次B样条曲线;非线性轨迹曲线

中图分类号:TP241.2;TH165 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2020)03-0043-06

## Flexible Polishing Industry Based on Improved Genetic Algorithm Robot Polishing Time Optimization

ZHU Tianbao<sup>1</sup>, JIN Xiaoyi<sup>1\*</sup>, WANG Chuan<sup>1</sup>, XI Ying<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In this paper, the self-developed flexible polishing industrial robot was taken as the research object, and the polishing trajectory was rationally planned to achieve the best polishing time. A series of industrial robot manipulators were obtained from the lugs of the case, and the corresponding joint positions were obtained by solving the inverse kinematics equation. The trajectory curves of each joint were obtained by the method of cubic B-spline curve fitting. The control points of the B-spline curve were used instead of the kinematic constraints, and the time-optimal time nodes were solved based on the improved genetic algorithm. On this basis, the plan obtained a nonlinear trajectory curve that satisfied the time optimum. The research shows that based on the improved genetic algorithm, the "degeneration" phenomenon of traditional genetic algorithm can be avoided well, and the optimal solution can be obtained faster, that the polishing working time of the polished industrial robot is optimal.

**Keywords:** industrial robot; flexible polishing; improved genetic algorithm; cubic B-spline curve; nonlinear trajectory curve

工业机器人轨迹规划是基于机器人要完成的任务,确保机器人实现期望的空间运动<sup>[1]</sup>。曲面轨迹规划主要分为规则曲面和复杂曲面轨迹规划。目前,针对复杂曲面的抛光轨迹规划和研究相对较少,为了满

足日益增多的复杂曲面产品的需求,课题组对复杂曲面柔性抛光工业机器人抛光轨迹进行规划并优化,从而提高抛光效率。机器人的轨迹规划首先要已知轨迹经过的几个路径点,再根据逆运动学求解各个关节的

收稿日期:2019-10-25;修回日期:2020-03-19

基金项目:江西省赣州市科技重大专项项目(TGS2018-01-02)。

第一作者简介:朱天宝(1994),男,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向为机器人学和机构学。通信作者:金晓怡(1966),女,江苏常州人,工学博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为仿生机器人、机构学和摩擦学。E-mail:teacherjxy@126.com

角度值,然后在关节空间内运用插值算法来规划每个关节的位移、速度和加速度等参数曲线,根据约束条件的不同,选择不同类型的插值函数,对各关节之间进行插值。常见的插值方法包括多项式插值、三次样条及用抛物线过渡的线性插值等<sup>[2-5]</sup>。在插值时,需满足相应速度、冲击等约束条件,其最大值不能超过设定的上限,以得到各个关节连续的、平滑的运动轨迹曲线,实现工作空间内的任务要求,从而确保机器人能够平稳可靠地运行,为柔性抛光机器人的高效工作提供有力的保障。

### 1 三次 B 样条轨迹方程的建立

机械臂在关节空间有一系列型值点  $W_1, W_2, \dots, W_m$ , 从连续条件和边界条件获得  $m+2$  个控制顶点  $V_0, V_1, V_2, \dots, V_{m+1}$ , 整个轨迹被划分成  $m+1$  段, 每段分别用 B 样条曲线规划; 前一段的末端是下一段的开始, 每一段的起始端和末端都是连续的<sup>[6]</sup>。第  $i$  段 B 样条曲线连接型值点  $W_i$  和  $W_{i+1}$ ,  $V_{i-1}, V_i, V_{i+1}, V_{i+2}$  共 4 个控制顶点控制这段曲线, 则四阶三次均匀 B 样条函数表达式为

$$\theta_i(e) = X_0(e)V_{i-1} + X_1(e)V_i + X_2(e)V_{i+1} + X_3(e)V_{i+2} \quad (1)$$

式中:  $e$  为参数,  $0 \leq e \leq 1$ ;  $X_i(e)$  为参数多项式;  $\theta_i(e)$  为第  $i$  段 B 样条曲线, 即为该段 B 样条轨迹曲线。

B 样条轨迹曲线两端分别是第  $i-1$  段轨迹曲线的末端与第  $i+1$  段轨迹曲线的始端, 因此在连接点处的矢量相等, 并且矢量的斜率也相等。

控制顶点的求解直接影响关于型值点的轨迹规划。轨迹规划中的型值点就是目标轨迹中的节点, 通过运动学求逆解获得。已知目标规划中的若干型值点, 才可以对机器人执行轨迹规划<sup>[7]</sup>。要想确定 B 样条曲线, 必须先求出控制顶点这些未知量。

求解方程为:

$$\left. \begin{aligned} \theta_{i-1}(1) &= \theta_i(0) = p_i, (i=1, 2, \dots, m-1); \\ \theta_{i-1}(1) &= \theta_i(0) = \frac{1}{6}(V_{i-1} + 4V_i + V_{i+1}) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(2)中有  $m$  个方程和  $m+2$  个未知数, 还需要增加 2 个约束条件的方程, 才能求解出所有未知数, 2 个约束条件为

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= V_0; \\ V_{m+1} &= V_m \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)确定唯一的一组  $V_i$  值, 从而确定三次均匀 B 样条曲线。

## 2 建立优化模型

### 2.1 目标函数

目标函数为:

$$T = \min \sum_{i=1}^{m-1} l_i \quad (4)$$

式中:  $T$  为完成整个轨迹的总时间;  $l_i$  为完成每段样条轨迹的时间;  $m$  为型值点的个数。

### 2.2 约束条件

运动学和动力学是影响机器人 B 样条轨迹优化的重要因素<sup>[8]</sup>, 由于运动学约束对机器人关节运动影响较大, 因此进行优化时只考虑前者的约束。

#### 1) 角速度约束

机械臂第  $i$  段 B 样条轨迹曲线关节角速度为

$$\dot{\theta}_i(u) = \frac{q'}{t'},$$

在  $t_i$  时刻或者  $(t_i, t_{i+1})$  时间区间能够产生最大的关节速度

$$\dot{\theta} = \max \{ |\dot{\theta}_i|, |\dot{\theta}_{iu}| \} \quad (5)$$

式中:  $\dot{\theta}$  为实际情况下发生的最大关节角速度;  $|\dot{\theta}_i|$  为  $t_i$  时刻某关节角速度的绝对值;  $|\dot{\theta}_{iu}|$  为  $(t_i, t_{i+1})$  时间区间内某个时刻关节角速度最大值的绝对值,  $i=1, 2, \dots, m-1$ 。

利用黄金分割法在  $(0, 1)$  区间内求解  $|\dot{\theta}_{iu}|$ 。由此可得, 机器人关节角速度的约束条件为

$$\dot{\theta} \leq \dot{\theta}_{\max} \quad (6)$$

#### 2) 角加速约束条件

第  $i$  个轨迹曲线机器人关节角加速度为

$$\ddot{\theta}_i(u) = \frac{d\dot{\theta}(u)}{dt} = \frac{d\dot{\theta}_i(u)}{dk} \frac{dk}{dt} = \frac{q''t' - q't''}{t'^3} \quad (7)$$

关节角加速度的最大值可能出现在  $t_i$  时刻或者在区间  $(t_i, t_{i+1})$  内, 其表达式为

$$\ddot{\theta} = \max \{ |\ddot{\theta}_i|, |\ddot{\theta}_{iu}| \} \quad (8)$$

式中:  $\ddot{\theta}$  为实际情况下生成的最大关节角加速度;  $|\ddot{\theta}_i|$  为  $t_i$  时刻某关节产生的关节角加速度的绝对值;  $|\ddot{\theta}_{iu}|$  为  $(t_i, t_{i+1})$  时间区间内某时刻产生的关节角加速度最大值的绝对值 ( $i=1, 2, \dots, m-1$ )。

利用黄金分割法来对  $|\ddot{\theta}_{iu}|$  进行求解, 因此, 机器人关节角加速度的约束条件为

$$\ddot{\theta} \leq \ddot{\theta}_{\max} \quad (9)$$

因此, 三次 B 样条轨迹优化的模型为:

$$\left. \begin{aligned} \min T &= \sum_{i=1}^9 l_i; \\ \text{find } [l_1, l_2, \dots, l_9] & \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

满足约束条件:

$$\left. \begin{aligned} \theta &\leq \theta_{\max}; \\ \dot{\theta} &\leq \dot{\theta}_{\max} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

### 3 基于改进的遗传算法的时间最优求解

传统遗传算法的自适应度比例是按照轮盘赌的方法选择个体,利用生物进化理论和搜索全局功能,分析设定的目标适应度函数。遗传算法淘汰适应度较低的值,筛选出较高的值,以得到更加适合的解区间,在一定程度上能够选出系统最优解。但该方法容易产生“退化”现象,即选中优良亲本<sup>[9-11]</sup>。为避免退化现象的发生,采用将个体按照适应度大小进行排列。剔除适应度小的个体,这类个体占有所有个体的 1/4,将适应度大的前 1/4 的个体直接选中作为下一代的父本个体;保留中间的 1/2 的个体并进行相应的计算<sup>[12-14]</sup>,从而更高效地引导种群的进化方向,便于更快地求得最优解。

根据计算的个体选择概率,按照轮盘赌方法进行选择:

$$\left. \begin{aligned} p_a^M &= Q^M (1 - q^M)^{a-1}; \\ Q^M &= \frac{q^M}{1 - (1 - q^M)^{N/2}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: $p_a^M$  为第  $a$  个个体在第  $M$  代的选择概率; $Q^M$  为个体的选择概率; $a$  是个体在 1/2 种群中的排列序号; $q$  是最佳个体的选择概率。

对于最佳个体而言,在进化初期的种群中,由于个体的差异性,应将大的选择概率赋予适应度较大的个体。如此一来,种群之间的差异会随着进化的进行而逐渐变小,最佳个体的选择概率也将发生一定程度上的减小。因此,提出依据迭代次数变化的  $q$  值:

$$q^M = q_y - (q_y - q_s) \times \frac{M-1}{Z-1} \quad (13)$$

式中: $q_y$  为最佳个体的选择概率; $q_s$  为最差个体的选择概率; $Z$  为最大迭代次数。

交叉和变异相比于其它遗传操作,更为重要。为了保护优良的个体,需要对交叉概率和变异概率及时修正,选取更为合理的计算公式:

$$P_c = \begin{cases} k_1 \left( 1 - \frac{\arcsin(f_{ave}/f_{max})}{\pi/2} \right), \arcsin(f_{ave}/f_{max}) \geq \pi/6; \\ k_4 \cdot \frac{\arcsin(f_{ave}/f_{max})}{\pi/2}, \arcsin(f_{ave}/f_{max}) < \pi/6. \end{cases} \quad (14)$$

$$P_z = \begin{cases} k_3 \left( 1 - \frac{\arcsin(f_{ave}/f_{max})}{\pi/2} \right), \arcsin(f_{ave}/f_{max}) < \pi/6; \\ k_2 \cdot \frac{\arcsin(f_{ave}/f_{max})}{\pi/2}, \arcsin(f_{ave}/f_{max}) \geq \pi/6. \end{cases} \quad (15)$$

式中: $P_c$  为交叉概率; $P_z$  为变异概率; $f_{max}$  为种群的最大适应度; $f_{ave}$  为种群的适应度平均值; $k_1, k_2, k_3$  和  $k_4$  分别为 1.00, 0.05, 0.02 和 2.00。

为了更合理地判断种群适应度的分散程度,结合  $\arcsin(f_{ave}/f_{max})$  的变化程度比  $f_{ave}$  的变化程度更快的特点,当适应度逐渐靠近适应度最大值时,  $\arcsin(f_{ave}/f_{max}) \geq \pi/6$ ,  $f_{ave}/f_{max} \geq 1/2$ , 此时,种群逼近最大适应度集中分布。

### 4 优化结果与分析

课题组基于自主研发的柔性抛光工业机器人,对表壳类工件进行复杂曲面抛光,图 1 所示为机械臂抓取表壳进行抛光的示意图。表耳外侧抛光曲面如图 2 所示。对待抛光曲面进行合理的取点,本次共取 10 个位置点,经逆运动学求解,获得 6 个关节的空间角度如表 1 所示。



图 1 表壳抛光方式

Figure 1 Case polishing method

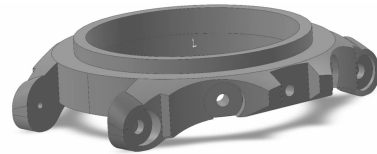


图 2 表耳加工部分曲面

Figure 2 Surface of lugs processing part

利用反算控制顶点的方法,将目标路径上选取的 10 个型值点转化为 12 个控制顶点,具体如表 2 所示。

根据上述改进的遗传算法,在 MATLAB 软件中编写程序并进行仿真,实现目标的优化。根据 IRB1600 机器人的技术参数可获得各关节的约束条件如表 3 所示。得到了各个关节(以关节 2 为例)时间优化前和优化后的角位移、角速度和角加速度曲线如图 3~8 所示。从图 3~8 中可以看出,关节 2 的角位移、角速度和角加速度等曲线优化前后变动不大,符合复杂曲面抛光的实际工况。但角加速度存在一定程度上的突变,该模型及仿真结果可为后续角加速度的研究提供一定的参考。

表1 各型值点的运动学逆解

Table 1 Inverse kinematic solution of each type value points

| 关节<br>序号 | 关节位置/(°) |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | $W_0$    | $W_1$    | $W_2$    | $W_3$    | $W_4$    | $W_5$    | $W_6$    | $W_7$    | $W_8$    | $W_9$    |
| 1        | -0.047 6 | -0.047 8 | -0.048 1 | -0.048 2 | -0.048 1 | -0.048 8 | -0.048 9 | -0.048 8 | -0.048 5 | -0.048 1 |
| 2        | -2.230 5 | -2.276 9 | -2.825 2 | -2.800 9 | -2.318 4 | -2.412 0 | -2.333 2 | -2.775 2 | -2.172 9 | -2.125 8 |
| 3        | -1.496 8 | -1.507 0 | -1.624 1 | -1.619 4 | -1.517 1 | -1.542 6 | -1.529 5 | -1.625 0 | -1.497 8 | -1.486 0 |
| 4        | 21.991 1 | 0.000 0  | 3.141 6  | -3.141 6 | -3.141 6 | 0.000 0  | 3.141 6  | -3.141 6 | 3.141 6  | 0.000 0  |
| 5        | 0.733 7  | -0.769 8 | 1.201 1  | 1.181 5  | 0.801 3  | -0.869 3 | 0.803 7  | 1.150 1  | 0.675 1  | -0.639 8 |
| 6        | 59.737 8 | 0.047 8  | -3.093 5 | -3.093 4 | -3.093 5 | 0.048 8  | -3.092 7 | -3.092 8 | -3.093 1 | 0.048 1  |

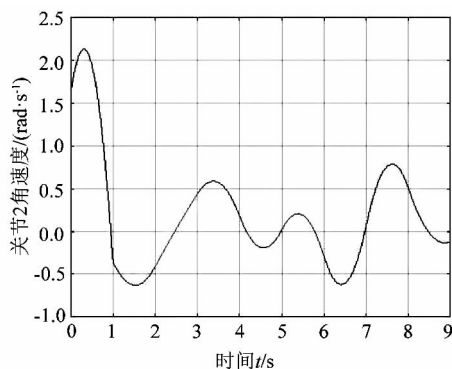
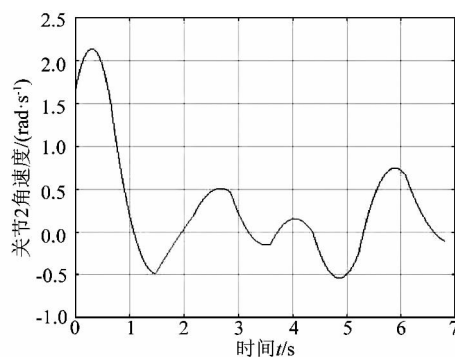
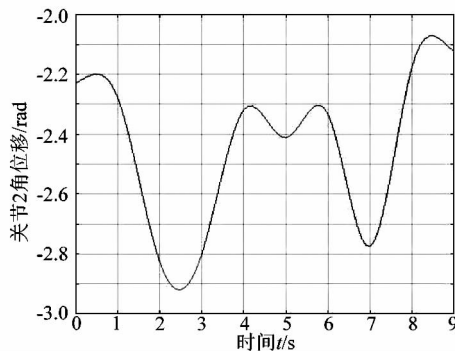
表2 反算后的控制顶点

Table 2 Control vertices of inversion

| 关节<br>序号 | 控制顶点/(°) |          |           |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------|----------|----------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|          | $V_0$    | $V_1$    | $V_2$     | $V_3$    | $V_4$    | $V_5$    | $V_6$    | $V_7$    | $V_8$    | $V_9$    | $V_{10}$ | $V_{11}$ |
| 1        | -0.047 5 | -0.047 5 | -0.047 8  | -0.048 1 | -0.048 3 | -0.047 8 | -0.049 0 | -0.048 8 | -0.048 9 | -0.048 5 | -0.048 0 | -0.048 0 |
| 2        | -2.255 2 | -2.255 2 | -2.107 0  | -2.978 1 | -2.931 6 | -2.100 6 | -2.576 7 | -2.064 3 | -3.165 0 | -1.926 8 | -2.165 6 | -2.165 6 |
| 3        | -1.501 9 | -1.501 9 | -1.470 9  | -1.656 5 | -1.647 7 | -1.469 1 | -1.578 5 | -1.472 6 | -1.707 8 | -1.446 3 | -1.494 0 | -1.494 0 |
| 4        | 28.227 7 | 28.227 7 | -9.191 7  | 8.539 2  | -6.115 5 | -2.926 9 | -1.026 4 | 7.032 4  | -8.253 6 | 7.132 4  | -1.426 5 | -1.426 5 |
| 5        | 1.279 4  | 1.279 4  | -1.994 7  | 2.080 5  | 0.879 4  | 1.490 9  | -2.035 1 | 1.433 4  | 1.123 8  | 0.972 3  | -0.962 2 | -0.962 2 |
| 6        | 75.500 7 | 75.500 7 | -19.076 3 | 1.091 5  | -3.850 6 | -4.249 3 | 2.286 8  | -4.605 2 | -2.422 5 | -4.261 6 | 0.910 0  | 0.910 0  |

表3 各关约束条件  
Table 3 Each joint constraints

| 关节序号 | 角速度/(rad · s <sup>-1</sup> ) | 角加速度/(rad · s <sup>-2</sup> ) |
|------|------------------------------|-------------------------------|
| 1    | 180                          | 65                            |
| 2    | 180                          | 65                            |
| 3    | 185                          | 80                            |
| 4    | 385                          | 120                           |
| 5    | 400                          | 140                           |
| 6    | 460                          | 150                           |

图3 三次B样条规划关节2的角速度曲线  
Figure 3 Angular speed curve of joint 2 planned by cubic B-spline图4 优化后三次B样条规划关节2的角速度曲线  
Figure 4 Angular speed curve of joint 2 optimized by cubic B-splines图5 三次B样条规划关节2的角位移曲线  
Figure 5 Angular displacement curve of joint 2 planned by cubic B-spline

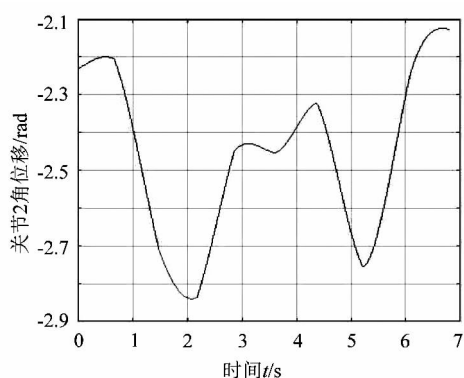


图6 优化后三次B样条规划关节2的角位移曲线

Figure 6 Angular displacement curve of joint 2 optimized by cubic B-splines

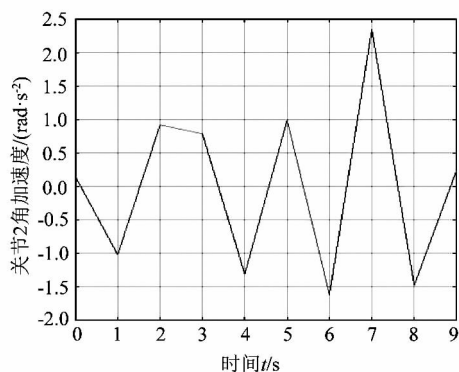


图7 三次B样条规划关节2的角加速度曲线

Figure 7 Angular acceleration curve of joint 2 planned by cubic B-spline

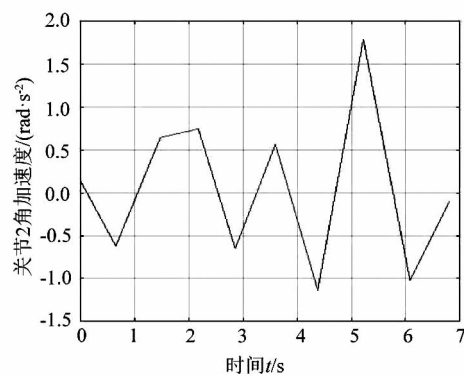


图8 优化后三次B样条规划关节2的角加速度曲线

Figure 8 Angular acceleration curve of joint 2 optimized by cubic B-spline

改进后的遗传算法优化后的最优时间间隔如表4所示,时间精度为0.001 s。由表4可知,在机器人关节角速度和角加速度满足自身约束的前提下,抛光工

业机器人的6个关节完成整个轨迹曲线需要的时间为6.81 s,相比于优化前,时间减少了2.19 s,较好地实现了时间最优的轨迹优化。

表4 最优时间间隔优化结果

Table 4 Optimization results of optimal time interval

| 名称  | 时间间隔/s |       |       |       |       |       |       |       |       | 总时间/s |
|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | $l_1$  | $l_2$ | $l_3$ | $l_4$ | $l_5$ | $l_6$ | $l_7$ | $l_8$ | $l_9$ |       |
| 优化前 | 1.00   | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 1.00  | 9.00  |
| 优化后 | 0.66   | 0.82  | 0.70  | 0.68  | 0.74  | 0.78  | 0.84  | 0.86  | 0.73  | 6.81  |

## 5 结论

基于自主研发的复杂曲面柔性抛光工业机器人,课题组以优化抛光时间为实验目标,提出了采用一种改进的遗传算法进行时间最优轨迹规划,研究表明:

1) 采用改进的遗传算法,能够避免传统遗传算法的“退化”现象,从而更高效地引导种群的进化方向,便于更快地求得最优解。

2) 基于B样条曲线的特性,将各运动学约束转化为轨迹曲线的控制顶点约束,并采用改进后的遗传算法求解出了时间最优解;相比优化前,抛光时间有了较大的缩减。

3) 三次B样条曲线优化方案一定程度上保证了抛光的平稳性且达到了轨迹规划时间最优的目的,但在角加速度方面仍有一定的缺陷,可通过采用更高次B样条曲线对抛光轨迹规划做进一步研究,从而达到改善和避免角加速度突变的情况。

## 参考文献:

- [1] 殷际英,何立婷. HP6 机器人运动学动力学分析及运动仿真研究[J]. 机械与制造,2009,3(3):189-194.
- [2] KOHLI D, OSVACTIC M. Inverse kinematics of general of 6R and 5RP serial manipulator[J]. Journal of Mechanical Design,1993,115(4):922-931.
- [3] 由畅宇,韩建达. 机器人操作臂跟踪动态目标的轨迹方法[J]. 微计算机信息,2007,23(9):253-256.
- [4] 廖志炜,张俊,卢宗兴,等. 基于组合函数的脚踝康复机器人轨迹规划[J]. 机电工程,2018,35(3):302-309.
- [5] 张志松. 基于双S形速度曲线的混联码垛机器人轨迹规划[J]. 机电工程,2018,35(3):330-334.
- [6] 王幼民. 机器人关节空间Bezier曲线轨迹优化设计[J]. 机械科学与技术,2001,20(3):350-352.
- [7] 林峰,汪地. 三次非均匀样条曲线插补算法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2012(8):32-35.
- [8] 王卫忠,赵杰,高永生,等. 机器人的平面曲线轨迹规划方法[J]. 哈尔滨工业大学学报,2008,40(3):390-392.
- [9] DE JONG K A. An analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems[D]. Michigan: University of Michigan,1975:42-45.

(下转第52页)