

基于遗传算法的电容装盘机器人轨迹规划

钟飞, 黄振

(湖北工业大学, 武汉 430068)

摘要: **目的** 为了改变电容人工装盘方式, 提高电容装盘自动化程度及效率, 选用 SCARA 型机器人代替人工方式, 并对其进行轨迹规划, 避免运动冲击影响电容装盘稳定性以及精确性。 **方法** 首先介绍 SCARA 机器人的结构和电容装盘过程, 然后利用五次非均匀 B 样条曲线完成轨迹曲线的构造, 最后提出带罚函数的遗传算法, 以实现时间最优的机器人轨迹规划过程。 **结果** 仿真结果表明, 机器人装盘时间用时更短, 且运动平稳无冲击, 验证了算法的有效性。 **结论** 该轨迹规划方法能够满足实际生产要求, 提高了电容搬运装盘质量及效率。

关键词: 电容装盘机器人; 轨迹规划; 时间最优; 带罚函数遗传算法

中图分类号: TB486 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2019)09-0185-07

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.09.030

Trajectory Planning of Capacitor Loading Robot Based on Genetic Algorithm

ZHONG Fei, HUANG Zhen

(Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

ABSTRACT: The paper aims to change the mode of manual capacitor loading and improve the automation degree and efficiency of capacitor loading. SCARA robot was selected to replace the manual mode and carry out trajectory planning to avoid motion impact affecting the stability and accuracy of capacitor loading. The structure of SCARA robot and the process of capacitor loading were introduced, and then the trajectory curve was constructed with five non-uniform b-spline curves. Finally, a genetic algorithm with penalty function was proposed to realize the trajectory planning process of robots with optimal time. The simulation results showed that the robot loading was shorter and the motion was smooth without impact, which verified the effectiveness of the algorithm. The trajectory planning method can meet the actual production requirements and improve the quality and efficiency of capacitor handing and loading.

KEY WORDS: capacitor loading robot; trajectory planning; optimal time; genetic algorithm with penalty function

当前, 电容器已成为我国现代化工业生产中必不可少的电子元件^[1], 用量大且使用范围广泛, 比较常见的电容器包括电解、有机薄膜和陶瓷 3 种, 其中铝电解电容的产量占比达到 50%, 可见其重要地位。我国铝电解电容的生产普遍采用自动化的生产方式, 但由于电容引线易弯折及出现其他新增缺陷, 电解电容的搬运装盘、装箱一般采用手工作业, 生产效率低、劳动强度大且故障率高。电容搬运装盘过程是整条生

产线^[2-5]的关键和耗时最长的过程, 而 SCARA 型机器人广泛应用于汽车、食品、制药、电子等领域^[6], 此种机器人能在平面的运动方向上平稳工作, 垂直方向上刚性大, 且结构简单, 具有高速度、高精度、工作范围空间小、运转灵活等特点^[7], 广泛应用于自动化生产线上的高效率的装配及搬运作业。由于其运转速度快, 加速度及加加速度易出现突变, 这样会对机器人造成很大的冲击, 且影响机器人作业精度, 故需

收稿日期: 2019-01-17

基金项目: 湖北省技术创新专项(重大项目)(2018AAA026)

作者简介: 钟飞(1970—), 男, 博士, 湖北工业大学教授, 主要研究方向为包装机械制造及其自动化。

要选择合适的曲线对其作轨迹规划，以达到运行平稳、无冲击的目的。

文中以 SCARA 型机器人为研究对象完成电容搬运装盘过程,利用五次非均匀 B 样条曲线完成轨迹规划,并利用带惩罚函数的遗传算法对运行时间优化,完成快速且稳定无冲击的电容吸取搬运装盘过程。

1 电容装盘机器人

1.1 电容搬运装盘过程

料仓下部的直线振动电机将电容传送到传送带上,传送带将电容运送到视觉检测区域,电容装盘机器人^[8]通过机器视觉识别将其吸取放入电容模子盘中,旋转工作台对应的分别为电容装盘、缺陷检测、针脚整形、电容装箱 4 个工位。其中电容搬运装盘(见图 1)是后续过程的基础,装盘的精确性及快速性决定了后续工序的质量和效率。电容搬运装盘机器人采用 SCARA 型机器人。

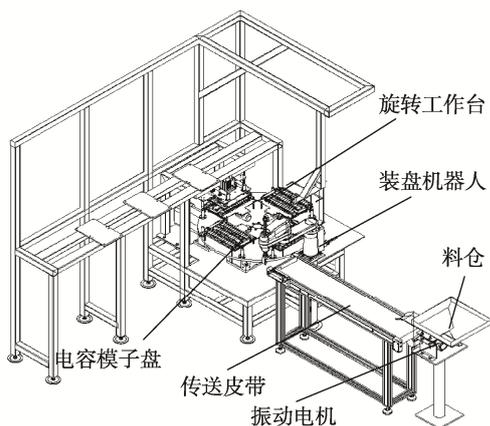


图 1 电容搬运装盘过程
Fig.1 Diagram for capacitor handling and loading

1.2 机器人模型的建立

利用 Matlab 中 Robotics Toolbox 工具箱中 link 函数,运用改进 D-H 参数空间模型,完成电容搬运装盘机器人连杆模型的建立,见图 2。该机器人具有 4 个自由度,由 4 个关节组成,大臂(第 1 关节)、小臂(第 2 关节)以及第 4 关节为旋转关节,可完成绕 Z 轴的旋转运动,第 3 关节为移动关节,可完成沿 Z 轴的上下移动。

2 轨迹曲线的构造

在机器人轨迹规划中,低阶次(如三次)的插值方法无法保证其加速度的连续性,传统的多项式插值^[9-10]或者样条插值不具备局部可控性,即在机器人运动过程中关节位置节点改变一个就会对整个运动

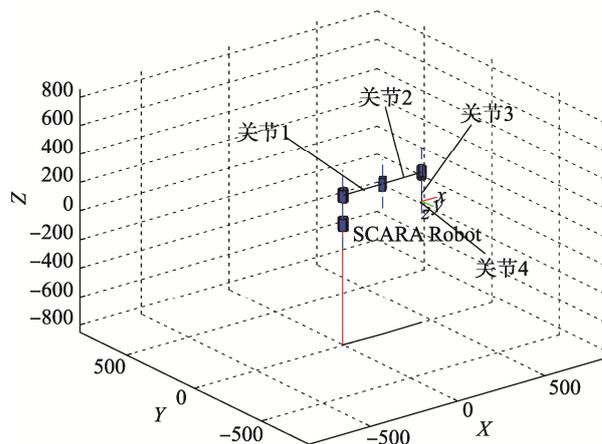


图 2 电容装盘机器人模型
Fig.2 Robot model of capacitor loading

轨迹造成影响,不利于对机器人的运动控制。在轨迹规划中,曲线至少 C³ 连续才能保证不仅速度、加速度连续,加加速度也可实现连续,故一般选取五次曲线来做轨迹规划。B 样条曲线由于其特有的凸包性、局部支撑性等性质,被越来越广泛地运用到机器人轨迹规划中。综上,文中采用五次非均匀 B 样条曲线来完成机器人关节轨迹的构造。

B 样条曲线的一般表示形式如下:

$$p(U) = \sum_{i=1}^n Q_i N_{ik}(U) \tag{1}$$

式中: Q_i 表示型值点; N_{ik}(U) 表示第 i 个 k 次样条基函数。

若要构造 B 样条插值曲线,就要确定 3 个条件: B 样条曲线的次数; B 样条曲线的型值点 Q_i; 时间节点矢量 U。

节点矢量 U 为归一化时间变量,其首末重复度为 k+1,故:

$$\begin{aligned} u &\in [u_j, u_{j+1}] \subseteq [u_5, u_{n+1}] \subseteq [u_0, u_{n+6}] \\ u &= [u_0, u_1, \dots, u_{n+10}] \\ u_0 &= u_1 = \dots = u_5 = 0 \\ u_{n+5} &= u_{n+6} = \dots = u_{n+10} = 0 \\ u_j &= u_{j-1} + \frac{|\Delta t_{j-6}|}{\sum_{s=0}^{n-1} |\Delta t_s|} \end{aligned} \tag{2}$$

式中, j=6,7...n+4, 由关节变量-时间序列列出 n+1 个方程:

$$p(u) = \sum_{i=j}^{j+5} Q_i N_{i,5}(u_{j+5}) \quad j=0, 1 \dots n \tag{3}$$

德布尔-考克斯递推公式可求出五次 B 样条一阶、二阶、三阶曲线,分别对应速度、加速度、加加速度曲线表达式。

$$p^{(c)}(u) = \sum_{i=j-5+c}^j Q_i^{(c)} N_{i,k-c}(u) \quad c=1, 2, 3 \tag{4}$$

$$Q_i^{(c)} = (6-c) \frac{Q_i^{l-1} - Q_{i-1}^{l-1}}{u_{i+6-l} - u_i} \quad i=j-5+l, \dots, j, l=1, 2 \dots n \quad (5)$$

假设始末速度、加速度为 0，得到 4 个方程，联立式 (4) 可反求出型值点矢量，由型值点矢量和时间节点矢量便可完成轨迹的构造。

3 带罚函数的遗传算法时间最优规划

3.1 运动学约束条件

由于机器人自身结构及运行精度的限制，各关节在运动时速度、加速度及加加速度需在一定的范围内运行，即为各关节运行约束条件：

$$\begin{cases} \dot{p}_i \leq v_c \\ \ddot{p}_i \leq a_c \\ \dddot{p}_i \leq j_c \end{cases} \quad (6)$$

式中， v_c, a_c 和 j_c 分别代表速度、加速度和加加速度的最大值。

3.2 目标函数的确立

装盘机器人轨迹最优的情况下，建立各节点间的之和的最小值为目标函数：

$$f_i = \min \sum_{i=1}^n t_i \quad (7)$$

3.3 遗传算法寻优

为了解决遗传算法易陷入局部最优解的问题，运用带惩罚函数的目标函数进行寻优。其对时间寻优^[11-13]的过程如下：

1) 编码与初始种群的生成。对每一段时间间隔进行二进制编码，可行解的精度为 0.001。其中，编码长度为节点数目减 1，且每一段时间均需满足约束条件。确定一定规模的初始种群作为最早的一代。

2) 种群适应度函数的确定。通过对不满足相应约束条件的个体加以惩罚，使迭代点往可行域方向行进。其表达式如下：

$$f_i = \min \sum_1^n t_i + \sigma \bar{f}(t) \quad (8)$$

$$\bar{f}(t) = \sum_{i=1}^n |\max(v_i)| + \sum_{i=1}^n |\max(a_i)| + \sum_{i=1}^n |\max(j_i)| \quad (9)$$

式中： σ 为惩罚因子； $\bar{f}(t)$ 为惩罚项。当速度、加速度和加加速度满足条件时 $\bar{f}(t)$ 不变，当不满足条件时，该值会很大被惩罚去除。

3) 选择、交叉、变异。采用轮盘赌选择法进行选择，保留优秀个体，克服过早收敛，也可保持个体的多样性。选用离散重组方式交叉，对 2 个父代种群交叉。选用离散变异算子进行变异操作。

4) 判断是否达到最大迭代次数。生成新的种群，与优化指标对比，是否满足优化条件，满足则输出结果，不满足则返回继续重新寻优。

4 仿真结果及分析

选取笛卡尔空间（直角坐标空间）中的一系列点作为电容装盘机器人运行轨迹中经过的关键节点，利用工具箱中的 ikine 函数，由运动学逆解可以得到在每一个节点处各关节所对应的位置坐标^[14]，相应的结果见表 1，各关节的运动学约束参考文献 [15]，见表 2。

表 1 各关节位置序列
Tab.1 Position sequence of each joint

节点	关节 1/(°)	关节 2/(°)	关节 3/mm	关节 4/(°)
P_0	76.44	67.87	-40	64.32
P_1	66.31	56.37	-52	43.73
P_2	35.88	-2.70	-60	16.57
P_3	15.60	-36.82	-78	2.69
P_4	5.48	-52.84	-84	0
P_5	25.74	-19.84	-70	32.86
P_6	46.02	14.60	-62	48.77
P_7	72.85	75.07	-34	52.86

表 2 各关节运动学约束
Tab.2 Kinematic constraints for each joint

约束	关节 1	关节 2	关节 3	关节 4
速度约束	120 (°)/s	160 (°)/s	650 mm/s	300 (°)/s
加速度约束	600 (°)/s ²	800 (°)/s ²	3250 mm/s ²	1500 (°)/s ²
加加速度约束	4800 (°)/s ³	6400 (°)/s ³	26 000 mm/s ³	12 000 (°)/s ³

设定关节启停速度和加速度为 0，利用带罚函数的遗传算法得到的最优时间为 1.324 s，其迭代收敛图见图 3。每一段的最优结果为 $t=(0.1667 \ 0.1855 \ 0.2688$

$0.1378 \ 0.1960 \ 0.1276 \ 0.2422)$ ，时间节点归一化后的节点矢量 $u=(0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0.1258 \ 0.2659 \ 0.4688 \ 0.5729 \ 0.7208 \ 0.8172 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1)$ 。时间最优机器人运动轨迹

型值点见表3。

电容搬运装盘机器人时间最优轨迹规划的各关节位置、速度、加速度、加加速度曲线分别见图4—7。在图4中,各关节经过了所需经过的节点(图中用点标出),选取的节点为装盘机器人吸取电容装盘和回位的过程;在图5中,各关节最大速度均出现在后半段,保证了前半段吸取装盘的平稳性和后半段回位的快速性,且速度均在约束范围内;在图6和7中,各关节相应的值均在约束范围内,且轨迹平滑,无突变,保证了运动的平稳性。传统的电容人工装盘每一个需2 s左右的时间,优化后只需1.324 s,且运动平滑无冲击。

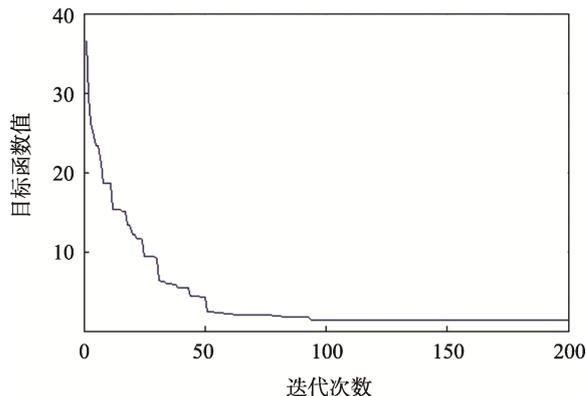


图3 迭代收敛
Fig.3 Iterative convergence graph

表3 轨迹型值点
Tab.3 Locus value points

节点	关节 1/(°)	关节 2/(°)	关节 3/mm	关节 4/(°)
Q_0	76.44	67.87	-40.00	64.32
Q_1	76.44	67.87	-40.00	64.32
Q_2	76.44	67.87	-40.00	64.32
Q_3	62.59	64.65	-71.20	18.95
Q_4	13.51	-57.87	-49.93	10.78
Q_5	37.34	5.16	-70.97	15.77
Q_6	-15.74	-91.41	-99.96	-21.97
Q_7	30.86	-5.58	-59.97	41.07
Q_8	40.30	-6.67	-79.76	53.61
Q_9	72.85	75.07	-34.00	52.86
Q_{10}	72.85	75.07	-34.00	52.86
Q_{11}	72.85	75.07	-34.00	52.86

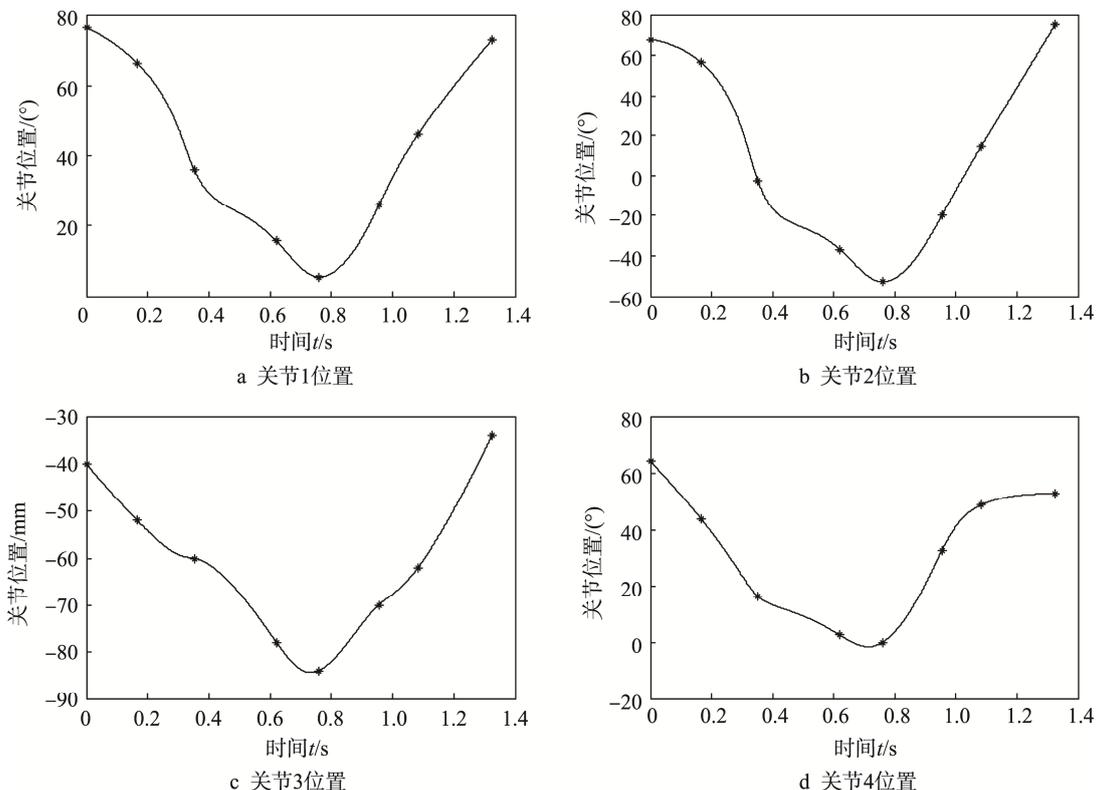


图4 各关节位置
Fig.4 Joint locations

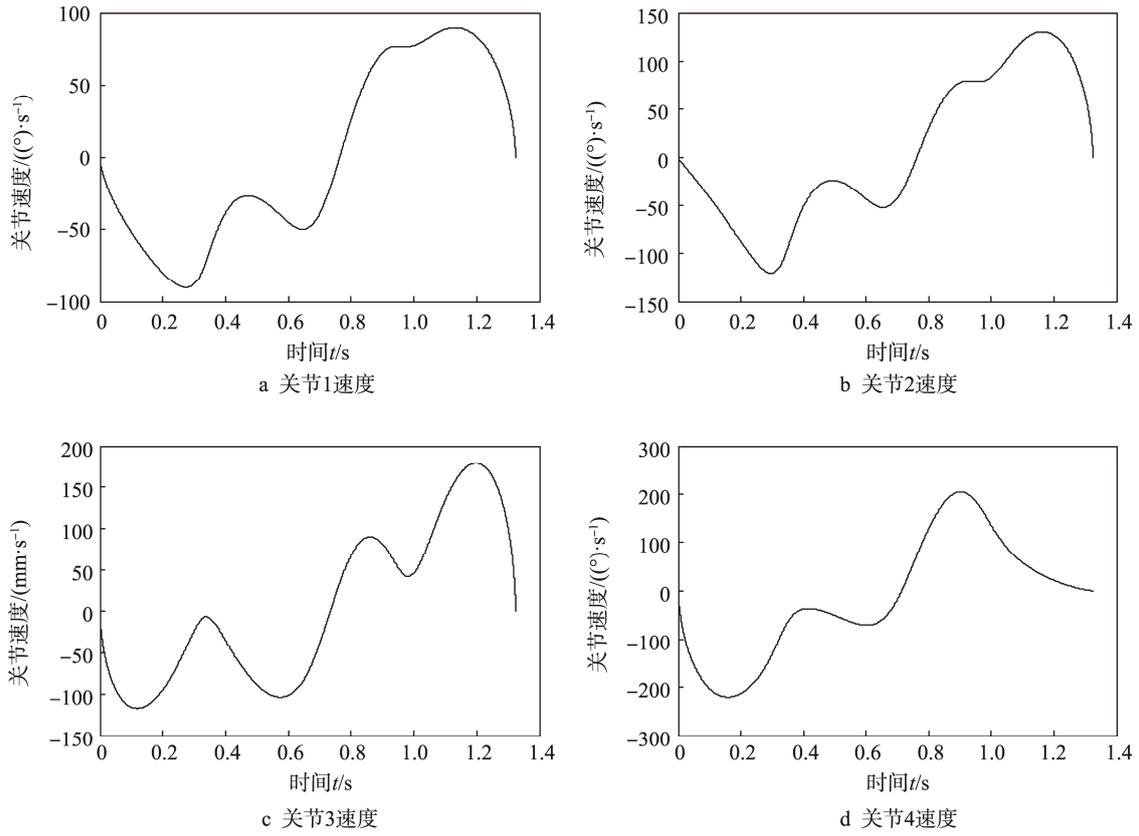


图 5 各关节速度
Fig.5 Velocity diagram of each joint

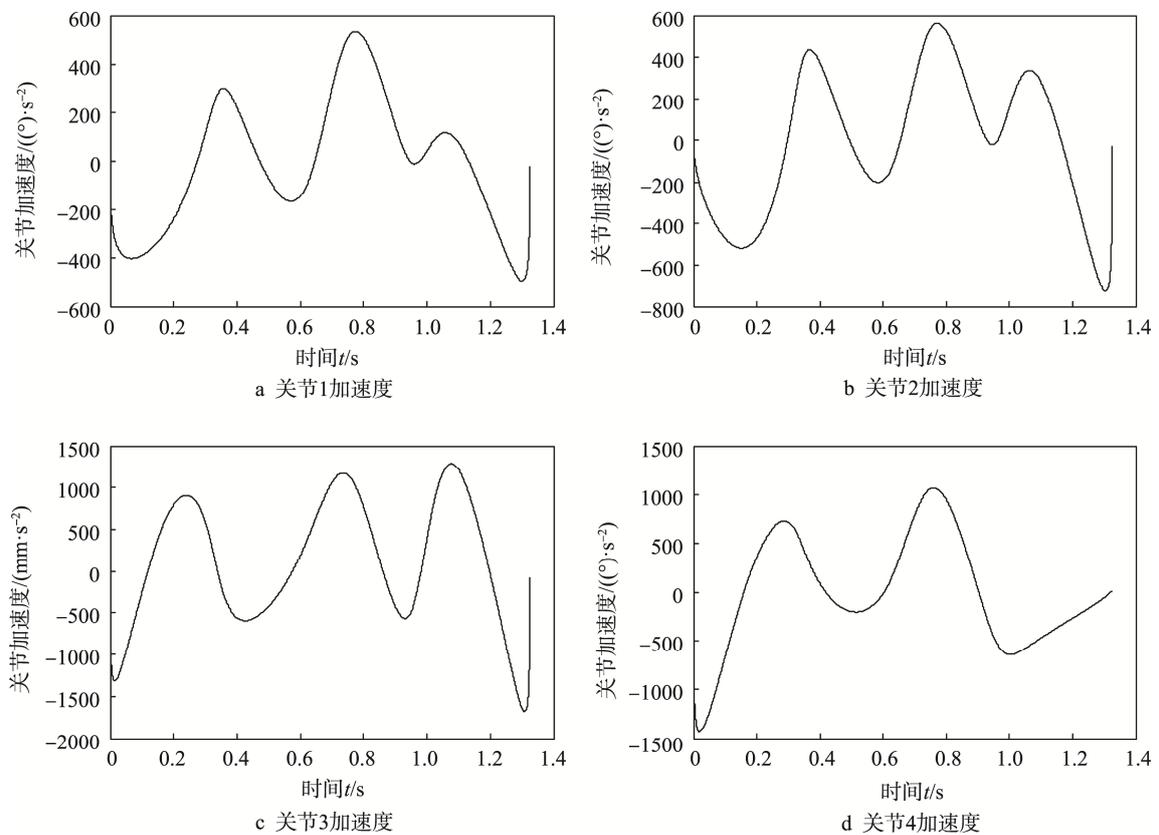


图 6 各关节加速度
Fig.6 Acceleration diagram of each joint

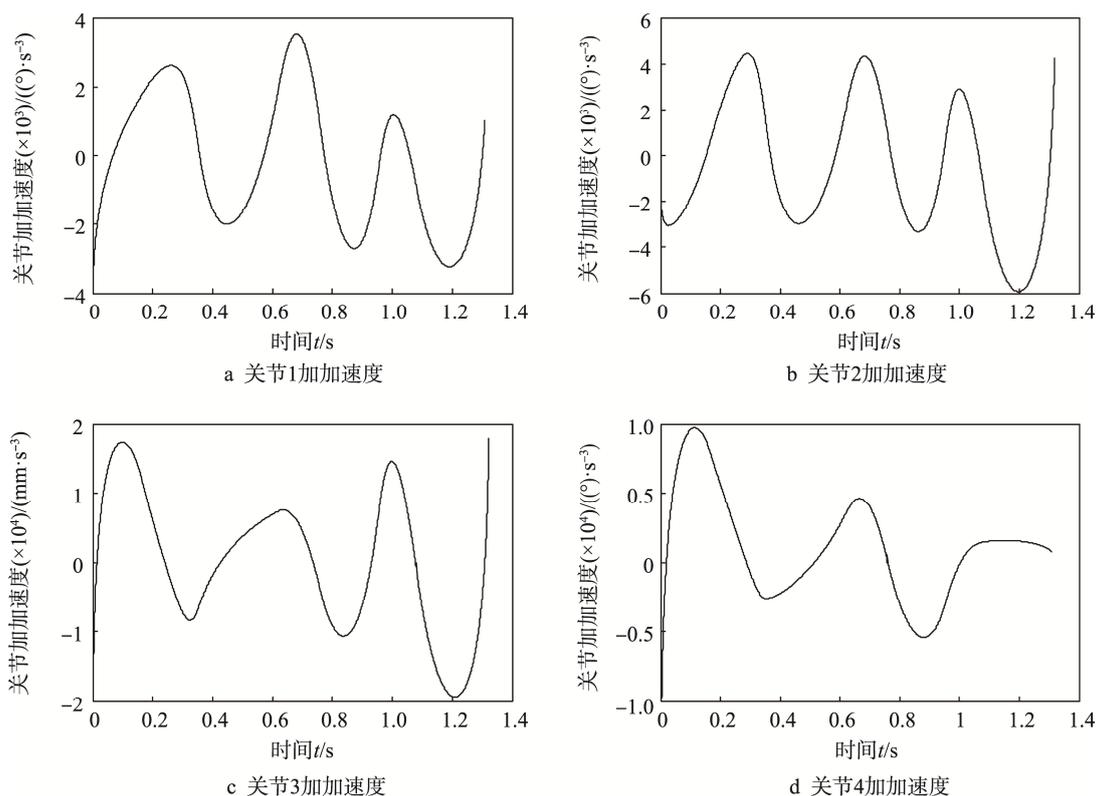


图7 各关节加加速度

Fig.7 Accelerated acceleration diagram of each joint

5 结语

包装和搬运行业快速发展,逐步取代了传统的人工作业方式。以电容搬运装盘机器人(SCARA型机器人)为研究对象,利用五次非均匀B样条曲线完成了轨迹规划,利用带罚函数的遗传算法以最优时间为目标,得到的结果与人工相比电容装盘时间更优,且满足各关节的速度、加速度、加加速度约束条件,运动平稳,减少了机器人之间的磨损,很好地实现了机器代替人工的目标,提高了电容搬运装盘质量及效率。

参考文献:

- [1] 何海峰. 铝电解电容器技术应用及发展研究[J]. 科学与财富, 2017(7): 61—61.
HE Hai-feng. Application and Development of Aluminum Electrolytic Capacitor Technology[J]. Science and Wealth, 2017(7): 61—61.
- [2] 尹章伟, 毛中彦. 包装机械[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
YIN Zhang-wei, MAO Zhong-yan. Packaging Machinery[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010.
- [3] JEFFREY Y, VALERIY V, GERALD W. Control and Hardware-in-the-loop Simulation of Fruit Packing Machine with IEC 61499[J]. IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics, 2013(3): 923—928.
- [4] CATHERINE O. Case Packing Made Better With Machine Vision[J]. Quality, 2012(5): 24—25.
- [5] 赵伟, 李响, 郭爱华, 等. 工业机器人码垛线的设计[J]. 制造业自动化, 2011, 33(10): 117—120.
ZHAO Wei, LI Xiang, GUO Ai-hua, et al. The Design of Industrial Robot Palletizing System[J]. Manufacturing Automation, 2011, 33(10): 117—120.
- [6] 田涛, 邓双城, 杨朝岚, 等. 工业机器人的研究现状与发展趋势[J]. 新技术新工艺, 2015(3): 92—96.
TIAN Tao, DENG Shuang-cheng, YANG Zhao-lan, et al. Research Status and Development Trend of Industrial Robot[J]. New Technology & New Process, 2015(3): 92—96.
- [7] 闫昊. SCARA 机器人动力学分析及鲁棒性控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
YAN Hao. Dynamics Analysis and Robustness Control of SCARA Robots[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [8] 唐建业, 张建军, 王晓慧. 一种新型高速码垛机械手的设计与实现[J]. 北京理工大学学报, 2007, 27(1): 17—20.
TANG Jian-ye, ZHANG Jian-jun, WANG Xiao-hui. Novel Design and Implement of a High-speed Palletizing Manipulator[J]. Transaction of Beijing Institute of Technology, 2007, 27(1): 17—20.
- [9] 孙玥, 魏欣. 基于五次多项式的码垛机器人轨迹规

- 划[J]. 包装工程, 2017, 38(21): 159—163.
SUN Yue, WEI Xin. Trajectory Planning of Palletizing Robot Based on Quintic Polynomial[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(21): 159—163.
- [10] 李红斌, 徐弈辰, 鲁湛. 基于S曲线的包装码垛机器人轨迹优化[J]. 包装工程, 2018, 39(17): 187—191.
LI Hong-bin, XU Yi-chen, LU Zhan. Trajectory Optimization of Packaging Palletizing Robot Based on Scurve[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(17): 187—191.
- [11] 方健, 宋宇, 朱茂飞, 等. 基于时间最优的码垛机器人轨迹规划[J]. 控制工程, 2018, 25(1): 93—99.
FANG Jian, SONG Yu, ZHU Mao-fei, et al. Timeoptimal Trajectory Planning for Palletizing Robots[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(1): 93—99.
- [12] 殷凤健, 梁庆华, 程旭, 等. 基于时间最优的机械臂关节空间轨迹规划算法[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(5): 12—15.
YIN Feng-jian, LIANG Qing-hua, CHENG Xu, et al. Research on Mechanical Arm Joint Space Trajectory Planning Algorithm Based on Optimal Time[J]. Machine Design & Research, 2017, 33(5): 12—15.
- [13] 徐海黎, 解祥荣, 庄键, 等. 工业机器人的最优时间与最优能量轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2010, 46(9): 19—25.
XU Hai-li, XIE Xiang-rong, ZHUANG Jian, et al. Global Time-energy Optimal Planning of Industrial Robot Trajectories[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(9): 19—25.
- [14] HADDAD M, KHALIL W, LEHTIHET H E. Trajectory Planning of Unicycle Mobile Robots with a Trapezoidal-velocity Constraint[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(5): 954—962.
- [15] 赵登步, 白瑞林, 沈程慧, 等. SCARA机器人点对点运动轨迹规划方法[J]. 计算机工程, 2015, 41(8): 306—312.
ZHAO Deng-bu, BAI Rui-lin, SHEN Cheng-hui, et al. Trajectory Planning Method of Point-to-Point Motion for SCARA Robot[J]. Computer Engineering, 2015, 41(8): 306—312.