

基于 S 曲线的包装码垛机器人轨迹优化

李红斌¹, 徐弈辰¹, 鲁湛²

(1.苏州健雄职业技术学院, 太仓 215411; 2.太仓光电技术研究所, 太仓 215400)

摘要: **目的** 为了提高包装搬运机器人的码放效率, 提升机器人运动轨迹的平滑性, 降低机器人运动过程中因加速度突变出现的振动。**方法** 针对包装码垛机器人的运动轨迹特点, 在机器人最大运动速度恒定的前提下, 提出一种以时间和冲击为优化指标的五阶 S 曲线优化方法, 将可变化参数引入优化冲击力中, 在保证冲击力最小的情况下大大缩短机器人加速时间。**结果** 仿真结果表明, 经过五阶 S 曲线优化的机器人加减速时间明显缩短, 机器人的加速度曲线更加平滑。**结论** 该优化方法大大降低了机器人因速度突变出现的振动, 有效提升了包装码垛机器人的工作效率。

关键词: 包装码垛机器人; S 曲线; 加速度; 仿真

中图分类号: TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2018)17-0187-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2018.17.031

Trajectory Optimization of Packaging Palletizing Robot Based on S-curve

LI Hong-bin¹, XU Yi-chen¹, LU Zhan²

(1.Suzhou Chien-Shiung Institute of Technology, Taicang 215411, China;

2.Photo Electricity Research Institute in Taicang, Taicang 215400, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the stacking efficiency and motion trajectory smoothness of the package handling robot and reduce the vibration caused by the suddenly changed acceleration in the robot motion. With respect to the trajectory characteristics of package palletizing robot, on the premise that the maximum motion velocity of robot was constant, a fifth order S curve optimization method was put forward with the time and impact as optimization indexes. The variable parameters were introduced into the optimized impact force, and the acceleration time of the robot was greatly shortened when the minimal impact was ensured. The simulation results showed that the acceleration and deceleration time of the robot was obviously shortened and the acceleration curve was smoother after fifth order S curve optimization. The optimization method significantly reduces the vibration of the robot due to the sudden change of speed, and effectively improves the working efficiency of the packaging palletizing robot.

KEY WORDS: packaging palletizing robot; S curve; acceleration; simulation

随着工业自动化技术的飞速发展, 码垛机器人已成为企业自动化加工生产的重要标志, 特别是在包装、搬运、物流等工作简单繁重, 需要投入大量劳动力的工作岗位上^[1-5]。随着企业生产规模的不断扩大和自动化水平的不断提高, 对码垛机器人的工作效率提出了更高的要求, 同时要求码垛机器人在按照预定轨迹上能够稳定可靠运行, 因此码垛机器人轨迹规划的好坏对机器人能否稳定、高效运行越来越重要^[6-10]。

包装码垛机器人是包装流水线上较为关键的装

备之一, 其主要作用是实现包装物体精确整齐的摆放到固定区域。码垛机器人是通过多个轴协调运动完成自动码放任务的柔性关节机器人, 各个大臂通过伺服电机以及减速器进行直接驱动, 由于码垛机器人需要带动夹手和物品, 二者通常质量较大, 因此在高速度的运动过程中不可避免的出现振动, 振动的存在一方面降低了物品码放精度, 另一方面加快了机器人各零部件的磨损, 大大降低了机器人的使用寿命, 因此在高速度的运动过程中, 必须对机器人的振动进行抑

收稿日期: 2017-10-31

基金项目: 太仓市科技计划 (TC2017DYDS02)

作者简介: 李红斌 (1984—), 女, 硕士, 苏州健雄职业技术学院讲师, 主要研究方向为机电控制技术。

制。机器人振动的产生，通常是由于机器人在运动过程中加速度产生突变，导致机器人各关节臂受力发生突变，因此为了有效抑制机器人振动的产生，需要对机器人运动轨迹上的加速度进行优化。常用机器人的速度规划方法是在机器人末端执行器的起始位置点和结束位置点之间用多项式函数来“逼近”或者“内插”设定的路径，在起始位置点和结束位置点之间根据实际精度的要求设定一系列的路径点。再根据机器人的逆运动学的求解方法将笛卡尔坐标系空间下的路径点转换成机器人关节空间的变化量^[11-15]。

文中针对包装码垛机器人运动轨迹特性，提出一种五阶 S 曲线的机器人轨迹规划方法，并根据最优控制方法得到了曲线的数学模型，并基于时间最优和冲击力最小，对五阶 S 曲线进行了优化。

1 码垛机器人轨迹描述

文中按照设计的码垛机器人的运动轨迹见图 1， P_0 为流水线上的抓取点，机器人垂直轴单独向上运动到 P_1 点，然后腰部、水平、垂直轴采用多项式插补方式经过 P_2 点运动到 P_3 点，插补的圆心为 O_1 ，半径为 O_1P_1 ，最后一段是垂直轴和腕部轴的运动，使机器人手部运动到托盘上的放置点，同时调整好机器人手部相对于托盘的位姿。从抓取点运动到目标点，机器人腰部转过的角度为 α 。

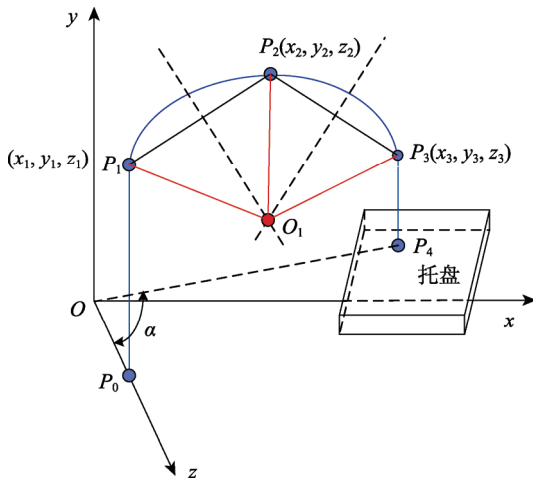


图 1 码垛机器人圆弧插补运动轨迹
Fig.1 Circular interpolation motion trajectory of palletizing robot

运用插补算法规划码垛机器人的运动轨迹时，选取的 4 个关键点分别为初始点 P_0 、提升点 P_1 、下降点 P_3 以及目标点 P_4 ， P_2 为 P_1P_3 段圆弧插补的中间路径点，这 4 个关键点是根据机器人的作业空间以及实际工作环境要求进行选择的，考虑到机器人作业空间的范围，在整个运动过程中，需保证 P_0P_2 或 P_2P_4 在 y 方向上的距离小于 1300 mm， P_1P_3 在 x 方向上的距

离小于 1240 mm。

2 S 曲线速度控制

S 曲线是指机器人在运动过程中其速度变化形状类似为 S 形，而对加速度进行求导得到一个常数，通过控制这个常数可以有效地降低机器人的振动。S 曲线通常由多个阶段构成，主要包括加速阶段、匀速阶段以及减速阶段，机器人 S 型运动曲线见图 2。

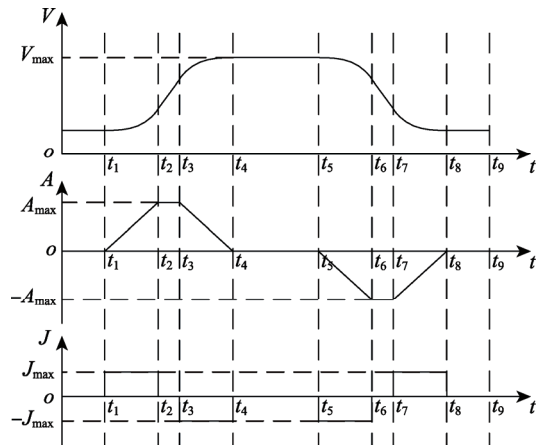


图 2 S 型曲线
Fig.2 S-curve

假设加减速过程中的加速度一阶导数最大值为 J_{max} ，减速度一阶导数最大值为 $-J_{max}$

$$J(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_1 \\ J_{max}, & t_1 \leq t < t_2 \\ 0, & t_2 \leq t < t_3 \\ -J_{max}, & t_3 \leq t < t_4 \\ 0, & t_4 \leq t < t_5 \\ -J_{max}, & t_5 \leq t < t_6 \\ 0, & t_6 \leq t < t_7 \\ J_{max}, & t_7 \leq t < t_8 \\ 0, & t_8 \leq t < t_9 \end{cases} \quad (1)$$

对式 (1) 进行微积分，可得机器人加速度为：

$$a(\tau) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < t_1 \\ J_{max}\tau_2, & t_1 \leq t < t_2 \\ A_{max}, & t_2 \leq t < t_3 \\ A_{max} - J_{max}\tau_4, & t_3 \leq t < t_4 \\ 0, & t_4 \leq t < t_5 \\ -J_{max}\tau_6, & t_5 \leq t < t_6 \\ -A_{max}, & t_6 \leq t < t_7 \\ -A_{max} + J_{max}\tau_8, & t_7 \leq t < t_8 \\ 0, & t_8 \leq t < t_9 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\tau_i = t_i - t_{i-1}$ ； A_{max} 为最大加速度。对式 (2) 的加速度进行微积分，可得机器人速度表达式为：

$$v(\tau) = \begin{cases} V_s, & 0 \leq t < t_1 \\ V_1 = V_s + \frac{1}{2} J_{\max} \tau_2^2, & t_1 \leq t < t_2 \\ V_2 = V_1 + A_{\max} \tau_3, & t_2 \leq t < t_3 \\ V_3 = V_2 + A_{\max} \tau_4 - \frac{1}{2} J_{\max} \tau_4^2, & t_3 \leq t < t_4 \\ V_4 = V_{\max}, & t_4 \leq t < t_5 \\ V_5 = V_4 - \frac{1}{2} J_{\max} \tau_6^2, & t_5 \leq t < t_6 \\ V_6 = V_5 - A_{\max} \tau_7, & t_6 \leq t < t_7 \\ V_7 = V_6 - A_{\max} \tau_8 + \frac{1}{2} J_{\max} \tau_8^2, & t_7 \leq t < t_8 \\ V_s, & t_8 \leq t < t_9 \end{cases} \quad (3)$$

式中：\$V_s\$ 为起始速度。

由上述分析可以看出，传统五阶 S 曲线轨迹规划方法的参数较多，从而造成算法结构过于复杂，实现过程较为困难，为此文中在传统五阶 S 曲线基础上对其进行了改进，改进后的 S 曲线只包括加速阶段、匀速阶段以及减速阶段，改进后的 S 曲线数学模型为：

$$\begin{cases} d(t) = d_0 + ht \\ j(t) = j_0 + d_0 t + \frac{1}{2} ht^2 \\ a(t) = a_0 + j_0 t + \frac{1}{2} d_0 t^2 + \frac{1}{6} ht^3 \\ v(t) = v_0 + a_0 t + \frac{1}{2} j_0 t^2 + \frac{1}{6} d_0 t^3 + \frac{1}{24} ht^4 \\ s(t) = s_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a_0 t^2 + \frac{1}{6} j_0 t^3 + \frac{1}{24} d_0 t^4 + \frac{1}{120} ht^5 \end{cases} \quad (4)$$

式中：\$h\$ 为加速度的 3 阶导数；\$s_0, -v_0, -a_0\$ 分别为机器人的初始位移、初始速度以及初始加速度；\$j_0-d_0\$ 分别为机器人加速度的一阶和二阶导数。

3 五阶 S 曲线优化

为了进一步提高机器人的运行效率，文中提出了一种减少机器人加速阶段所用时间的方法，但单纯减少加速阶段所用时间，又会导致机器人出现刚性冲击，因此文中以时间和冲击力为优化指标对 S 曲线进行了优化。

假设优化指标函数为：

$$\min J = \int_{t_0}^{t_f} \left(1 + \frac{1}{2} \rho \ddot{s}^2 \right) dt \quad (5)$$

式中：\$s\$ 为位移；\$\rho\$ 为可变参数，在要求 \$t_f\$ 最小时，加速度 \$J\$ 最小，即加速度突变最小，从而保证机器人在加速过程中冲击力最小。边界条件满足：

$$\begin{cases} s(t_0) = \dot{s}(t_0) = \ddot{s}(t_0) = 0 \\ s(t_f) = l_s \\ \dot{s}(t_f) = \ddot{s}(t_f) = 0 \\ t_0 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

假设标量函数为：

$$L(t, s, \dot{s}, \ddot{s}) = 1 + \frac{1}{2} \rho \ddot{s}^2 \quad (7)$$

对式 (7) 进行欧拉变换可得：

$$\frac{\partial L}{\partial s} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{s}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial L}{\partial \ddot{s}} \right) - \frac{d^3}{dt^3} \left(\frac{\partial L}{\partial \ddot{s}} \right) = 0 \quad (8)$$

由式 (7) 和式 (8) 可得：

$$\frac{d^6 s}{dt^6} = 0 \quad (9)$$

由积分法可以得到机器人位移各阶导数为：

$$\begin{cases} s^{(6)}(t) = 0 \\ s^{(5)}(t) = c_5 \\ s^{(4)}(t) = c_5 t + c_4 \\ \ddot{s}(t) = \frac{1}{2} c_5 t^2 + c_4 t + c_3 \\ \dot{s}(t) = \frac{1}{6} c_5 t^3 + \frac{1}{2} c_4 t^2 + c_3 t + c_2 \\ s(t) = \frac{1}{24} c_5 t^4 + \frac{1}{6} c_4 t^3 + \frac{1}{2} c_3 t^2 + c_2 t + c_1 \\ s(t) = \frac{1}{120} c_5 t^5 + \frac{1}{24} c_4 t^4 + \frac{1}{6} c_3 t^3 + \frac{1}{2} c_2 t^2 + c_1 t + c_0 \end{cases} \quad (10)$$

式中 \$c_0, c_1, c_2, c_3, c_4\$ 和 \$c_5\$ 均为待定系数。为了求解上述待定参数，需要采用变分法得到横截条件：

$$\left\{ \begin{aligned} & L - \dot{s} \left[\frac{\partial L}{\partial \dot{s}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \ddot{s}} \right) + \frac{d^2}{dt^2} \left(\frac{\partial L}{\partial \ddot{s}} \right) \right] - \\ & \ddot{s} \left[\frac{\partial L}{\partial \ddot{s}} - \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \ddot{s}} \right) \right] - \ddot{s} \frac{\partial L}{\partial \ddot{s}} \end{aligned} \right\} \Bigg|_{t_f} = 0 \quad (11)$$

根据边界条件 \$\dot{s}(t_f) = \ddot{s}(t_f) = 0\$ 可得：

$$\ddot{s}(t_f) = \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (12)$$

由以上各式可求得各待定系数为：

$$\begin{cases} c_0 = c_1 = c_2 = 0 \\ c_3 = \frac{60l_s}{t_f^3} \\ c_4 = -\frac{360l_s}{t_f^4} \\ c_5 = \frac{720l_s}{t_f^5} \end{cases} \quad (13)$$

那么改进型 S 曲线的位置优化方程为：

$$s(t) = \frac{6l_s}{t_f^5} t^5 - \frac{15l_s}{t_f^4} t^4 + \frac{10l_s}{t_f^3} t^3 \quad (14)$$

其中加减速过程时间 \$t_f\$ 可由方程 \$t_f^3 + pt_f + q = 0\$ 求得，即：

$$t_f = \sqrt[3]{-\frac{1}{2}q + \sqrt{\Delta}} + \sqrt[3]{-\frac{1}{2}q - \sqrt{\Delta}} \quad (15)$$

式中：\$\Delta = \frac{\rho}{2} \left[(30l_s)^2 + \frac{(12v_s)^3}{\sqrt{\frac{2}{\rho}}} \right]\$；\$l_s\$ 为加减速过程

的位移量, v_s 为目标速度, 即 t_f 由 l_s , v_s 和 ρ 共同决定。

4 仿真分析

为了验证文中提出的改进型五阶 S 曲线优化方法的有效性, 文中采用 Matlab 仿真软件对传统五阶 S 曲线和改进五阶 S 曲线分别进行了仿真。机器人初始参数: 机器人单轴由 0 增加到 2 m/s, 加速度阶段的位移为 1 m, $\rho=0.01$ 。机器人经过不同方法规划后的位移、速度以及加速度曲线见图 3。由图 3 各曲线可以看出, 采用改进后的五阶 S 曲线规划的机器人加速时间为 0.5 s, 最大加速度为 4.6 m/s^2 , 与传统五阶 S 曲线相比, 加速时间大大缩短, 且曲线更加平滑。

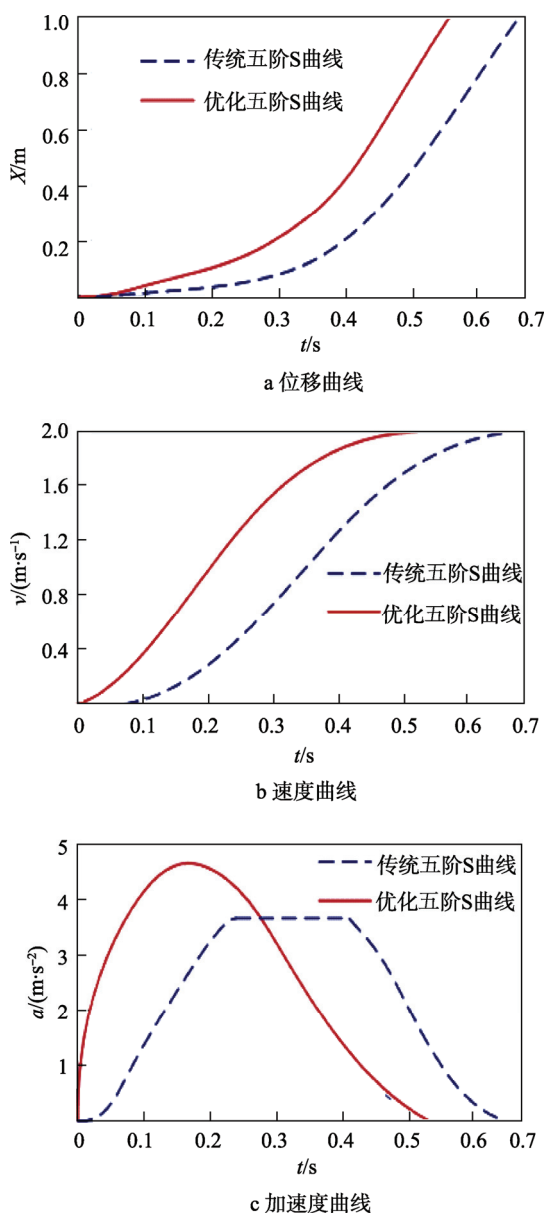


图3 位移、速度、加速度仿真曲线

Fig.3 Simulation curves of displacement, velocity and acceleration

5 结语

为了提高包装码垛机器人运动效率, 降低机器人运动过程中因加速度突变出现的振动, 文中在传统五阶 S 曲线基础上, 提出了一种基于时间和冲击力最优的五阶 S 曲线包装码垛机器人轨迹规划方法。在机器人最大运动速度恒定的前提下, 提出了一种以时间和冲击为优化指标的五阶 S 曲线优化方法, 将可变化参数引入到优化冲击力中, 在保证冲击力最小的情况下大大缩短了机器人加速时间。仿真结果表明, 改进的机器人加速度时间大大缩短, 有效提高了机器人的运动效率, 机器人加速度曲线更加平滑, 从而使机器人运动过程中更加稳定, 有效提高了机器人搬运包装品的定位精度。

参考文献:

- [1] 许德群, 肖衡. 我国包装与食品机械发展现状及趋势[J]. 包装与食品机械, 2011, 29(5): 47—50.
XU De-qun, XIAO Heng. Development Status and Trend of Packaging and Food Machinery in China[J]. Packaging and Food Machinery, 2011, 29(5): 47—50.
- [2] 戴宏民, 戴佩燕, 周均. 世界包装机械的发展趋势及中国包装机械的发展对策[J]. 包装学报, 2012, 4(2): 46—51.
DAI Hong-min, DAI Pei-yan, ZHOU Jun. Trend of World Packaging Machinery Development and the Countermeasure of China Packaging Machinery Development[J]. Packaging Journal, 2012, 4(2): 46—51.
- [3] 杜巧连, 陈旭辉, 舒柏和. 自动化包装机械控制系统的设计方法研究[J]. 机械管理开发, 2015, 30(6): 27—32.
DU Qiao-lian, CHEN Xu-hui, SHU Bai-he. Study on the Design Method of Packaging Machinery Automation Control System[J]. Mechanical Management and Development, 2015, 30(6): 27—32.
- [4] 潘海鸿, 杨微, 陈琳, 等. 全程 S 曲线加减速控制的自适应分段 NURBS 曲线插补算法[J]. 中国机械工程, 2010, 21(2): 190—195.
PAN Hai-hong, YANG Wei, CHEN Lin, et al. Adaptive Piecewise NURBS Curve Interpolator Algorithm for Entireness Process S-curve ACC/DEC Control[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(2): 190—195.
- [5] 穆海华, 周云飞, 严思杰, 等. 超精密点对点运动 4 阶轨迹规划算法研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(19): 2346—2354.
MU Hai-hua, ZHOU Yun-fei, YAN Si-jie, et al. Research on Fourth-order Profile Planning Algorithm for High Accuracy Point-to-point Motion System[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(19): 2346—2354.
- [6] 陈绪兵, 熊蔡华, 熊有伦. S 曲线加减速模式下的加工轨迹效率评价[J]. 华中科技大学学报(自然科学

- 版), 2008, 36(2): 1—4.
- CHEN Xu-bing, XIONG Cai-hua, XIONG You-lun. Efficiency Evaluation of Machining Trajectories by Using S Curve Acceleration Mode[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2008, 36(2): 1—4.
- [7] 贾松涛, 朱煜, 尹文生, 等. 超精密工作台运动轨迹规划[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2007(10): 14—21.
- JIA Song-tao, ZHU Yu, YIN Wen-sheng, et al. Trajectory Planning for Ultra-precision Stages[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2007(10): 14—21.
- [8] 王田苗, 陶永. 我国工业机器人技术现状与产业化发展战略[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9): 1—13.
- WANG Tian-miao, TAO Yong. Research Status and Industrialization Development Strategy of Chinese Industrial Robot[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(9): 1—13.
- [9] 张志强, 臧冀原, 俞超. 混联码垛机器人运动学分析及仿真[J]. 机械设计, 2010, 27(11): 47—51.
- ZHANG Zhi-qiang, ZANG Ji-yuan, YUN Chao. Kinematics Analysis and Simulation of the Hybrid Stacking Robot[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(11): 47—51.
- [10] 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.
- [11] 杨传民, 田少龙, 杨锰, 等. 码垛机器人末端执行器的设计[J]. 包装工程, 2014, 35(3): 60—63.
- YANG Chuan-min, TIAN Shao-long, YANG Meng, et al. Design of End of Palletizing Robots[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(3): 60—63.
- [12] 张斌, 方强, 柯映林. 大型刚体调姿系统最优时间轨迹规划[J]. 机械工程学报, 2008, 44(8): 248—252.
- ZHANG Bin, FANG Qiang, KE Ying-lin. Optimal Time Trajectory Planning Method for a Kind of Posture Aligning System of Large Rigid Bodies[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(8): 248—252.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] CHWA D, JUNHO K, JIN Y C. Online Trajectory Planning of Robot Arms for Interception of Fast Maneuvering Object Under Torque and Velocity Constraints[J]. IEEE Transactions on Systems, Man And Cybernetics, 2005, 35(6): 831—843.