

包装搬运机器人运动轨迹优化设计

李远, 农秉茂

(漯河职业技术学院, 河南 漯河 462002)

摘要: **目的** 为提高包装搬运机器人的运动精度, 提出基于改进 S 型曲线的包装机器人轨迹曲线的规划方法。**方法** 首先分析包装搬运机器人的工艺要求, 以码垛机器人为研究对象, 重点讨论轨迹规划问题, 采用改进 S 型曲线实现了码垛机器人轨迹规划。为进一步提高机器人运行效率, 基于遗传算法对整个运动过程所需时间进行优化并给出了具体优化过程。最后, 搭建实验平台并进行相关实验研究。**结果** 实验结果表明, 基于所述轨迹规划方法, 码垛机器人的重复定位精度可以达到 0.5 mm, 运动过程无速度和加速度突变, 机器人运行平稳。**结论** 该控制系统有效提高了包装机器人的运行效率, 对于机器人稳定可靠运行具有重要意义。

关键词: 包装搬运机器人; S 曲线; 遗传算法; 轨迹规划

中图分类号: TB486; TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2020)01-0123-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.01.019

Optimization Design of Moving Trajectory for Packaging Handling Robot

LI Yuan, NONG Bing-mao

(Luohe Vocational Technology College, Luohe 462002, China)

ABSTRACT: The paper aims to propose a planning method of packaging robot trajectory curve based on improved s-curve to improve the motion precision of packaging handling robot. Firstly, the technological requirements of packaging handling robot were analyzed. Taking the palletizing robot as the research object, the trajectory planning of the palletizing robot was mainly discussed. To further improve the operation efficiency of the robot, the time required for the whole motion process was optimized based on the genetic algorithm. Finally, the experimental platform was built to conduct relevant experimental research. The experimental results showed that, based on the trajectory planning method, the repetitive positioning accuracy of the stacking robot could reach 0.5 mm; and the movement process had no abrupt changes in speed and acceleration; and the robot ran smoothly. The control system effectively improves the operation efficiency of the packaging robot, which is of great significance for stable and reliable operation of the robot.

KEY WORDS: packaging handling robot; s-curve; genetic algorithm; trajectory planning

通常情况下, 可将轻工业行业中普遍使用的用于产品分拣、整理、包装的工业机器人, 定义为包装搬运机器人。该类机器人不仅能够提高生产效率、保证产品一致性、节约企业成本, 而且可以解放劳动力, 在食品、药品领域的应用最为广泛。另外, 包装搬运机器人需在以下几个方面满足流水作业要求: 负载能

力、作业空间、运转速度、定位精度等。大体来说, 常用的搬运机器人包括: 码垛机器人、直角坐标机器人、SCARA 机器人、DELTA 机器人等。码垛机器人具有柔性好、可靠性高、负载能力强等优点, 是一种典型的串联机器人, 特别适合整袋货物的包装、码垛和搬运。直角坐标机器人可实现空间坐标内任意一点

收稿日期: 2019-03-05

作者简介: 李远 (1985—), 女, 硕士, 漯河职业技术学院讲师, 主要研究方向为工业机器人及其电气自动化。

的定位,具有结构简单、成本低廉、运动轨迹简单等特点。SCARA 机器人应用灵活,具有高精度、速度快、扩展性良好等特点,其作业空间类似扇形,适合平面以及垂直空间内零件的拾取、包装,在搬运、密封、装配等领域的应用十分广泛。DELTA 机器人是一种比较常见的并联机器人,主要用于药品、食品的快速分拣、抓取、摆放,不过需要配合智能图像识别系统进行物体检测、识别;同时,在 3D 打印领域的应用也比较广泛,虽然运动精度高,但是存在运动耦合复杂、作业空间小、结构不便分析等问题。

任何一种包装机器人都无法避免轨迹规划以及分析等问题,而且具有一定的共性,文中以码垛机器人为研究对象,重点讨论其轨迹规划、优化方法并进行实验验证。

1 机器人作业过程分析

在实际使用过程中,包装搬运机器人(包括码垛机器人)大多与其他辅助设备或流水线配合作业。传统包装过程主要依靠人工实现各工位点物料的搬运、包装,整个过程中最多的动作就是物料的拾取和放置,所以轻工机器人的主要工作就是实现物料的拾取和放置。

包装作业过程见图 1,整个作业空间可简化为 2 条传送带、包装机器人、物料、托盘等。一条传送带用于待包装或待码放的物料有条不紊地向前传送;另一条传送带用于将已包装或已码放的物料传送到下一个工序。整个传送过程中,一旦物料进入机器人工作空间,外部传感器就会响应物料,此时主控制器根据设定程序遵循示教结果,使包装机器人运动到相应拾取点;完成抓取后,将物料搬运至不同放置点,至此完成一次作业过程。搬运机器人负责拾取一条传送带上的物料,然后码放到另一条传送带上。

根据流水线工作特点,不仅要求包装机器人工作空间大、占地面积小,而且必须具有非常高的重复定位精度。为实现此要求,机器人运动轨迹规划至关重要,因此文中重点论述此问题。

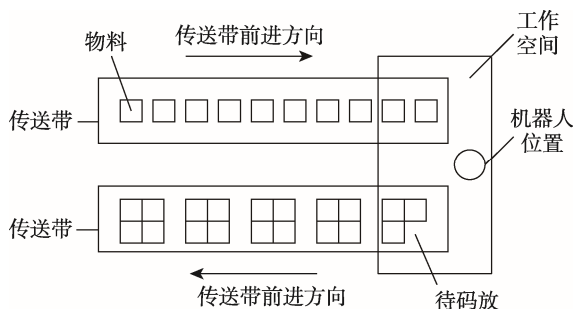


图 1 包装作业过程

Fig.1 Packaging process

2 码垛机器人轨迹规划

2.1 S 型曲线

以末端执行器空间轨迹规划为研究对象,包装过程中,码垛机器人既要高速运行又要频繁地启动、停止、变换方向,所以加减速控制就显得十分关键。加减速曲线要平滑,不可出现加速度突变,所以需要设计合适的运动轨迹曲线,这样能够减小机械冲击,提高运动效率。文中以 S 型曲线为基础进行轨迹规划,其速度、加速度、加加速度曲线见图 2。

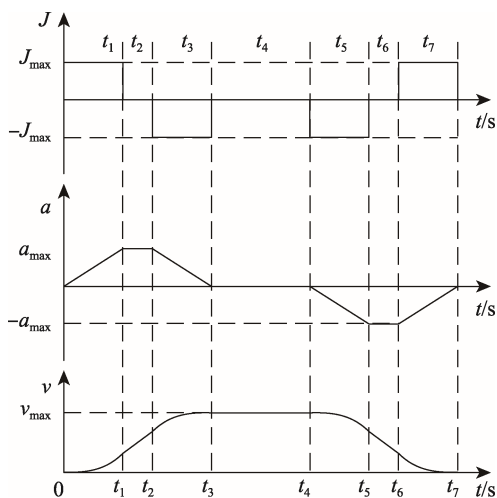


图 2 速度、加速度、加加速度曲线

Fig.2 Velocity, acceleration, jerk curve

从图 2 可以看出,传统 S 型曲线包括 7 段,即加速段、匀加速段、减加速段、匀速段、减减速段、匀减速段、加减速段。各段的加加速度可用常数表示,各段加速度可用一次函数表示,各段速度可用二次函数表示,如此就可以在在一定程度上减小对电机的冲击,避免振动现象出现。

定义加加速度的最大值为 $J_{\max}$,加速度的最大值为 $a_{\max}$,速度的最大值为 $v_{\max}$ 。理想情况下,可认为电机正反转的驱动能力是相同的,所以假定电机正反转的最大加速度相等,即 $a_+ = a_- = a_{\max}$ 。

为便于分析,文中假定加速度从 0 增加到 $a_{\max}$ 所用时间,与其从 $a_{\max}$ 减小到 0 所用时间一致,即存在 $t_1 = t_3$, $t_5 = t_7$ 。另外,假设电机正反转的加加速度大小是一致的,即存在 $t_1 = t_3 = t_5 = t_7 = a_{\max} / J_{\max}$ 。

综上所述,传统 S 型曲线的加加速度、加速度、速度可表示为:

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

$$a(t) = \begin{cases} J_{\max} t & 0 < t \leq t_1 \\ a_{\max} & t_1 < t \leq t_2 \\ a_{\max} - J_{\max}(t - t_2) & t_2 < t \leq t_3 \\ 0 & t_3 < t \leq t_4 \\ -J_{\max}(t - t_4) & t_4 < t \leq t_5 \\ -a_{\max} & t_5 < t \leq t_6 \\ -a_{\max} - J_{\max}(t - t_6) & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (2)$$

$$v(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} J_{\max} t & 0 < t \leq t_1 \\ v(t_1) + a_{\max}(t - t_1) & t_1 < t \leq t_2 \\ v(t_2) + a_{\max}(t - t_2) - \frac{1}{2} J_{\max}(t - t_2)^2 & t_2 < t \leq t_3 \\ v_{\max} & t_3 < t \leq t_4 \\ v_{\max} - \frac{1}{2} J_{\max}(t - t_4)^2 & t_4 < t \leq t_5 \\ v(t_5) - a_{\max}(t - t_5) & t_5 < t \leq t_6 \\ v(t_6) - a_{\max}(t - t_6) + \frac{1}{2} J_{\max}(t - t_6)^2 & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (3)$$

从上述推导过程可以看出：要确定 S 型曲线，需要明确匀速速度大小、最大加速度大小、最大加加速度大小，但是 S 型曲线的加加速度并不连续，在转折点处仍存在突变，所以在运动过程中整个系统依旧无法完全避免振动。为解决此问题，可考虑使用三角函数曲线确保加加速度连续，以获取更好的加减速效果。

2.2 曲线改进

考虑到正弦（余弦）函数无论如何求导都是连续的，因此速度曲线可用式（4）表示：

$$v = \frac{1}{2} v_{\max} \left[1 - \cos\left(\frac{t}{t_j} \pi\right) \right] \quad (4)$$

式中： t_j 为加/减速时间。

那么与其相对应的加速度、加加速度曲线可分别表示为：

$$a = \frac{\pi}{2t_j} v_{\max} \sin\left(\frac{t\pi}{t_j}\right) \quad (5)$$

$$J = \frac{\pi^2}{2t_j^2} v_{\max} \cos\left(\frac{t\pi}{t_j}\right) \quad (6)$$

改进后的升降速过程同样分为 3 段，即升速段、恒速段和减速段，但是速度、加速度、加加速度均为三角函数，不存在任何突变，不会对系统造成冲击。理论上，能够获取比传统 S 型曲线更加理想的运动性能，但是三角函数计算过程比较复杂，系统响应时间会有所增加。改进后的曲线见图 3。

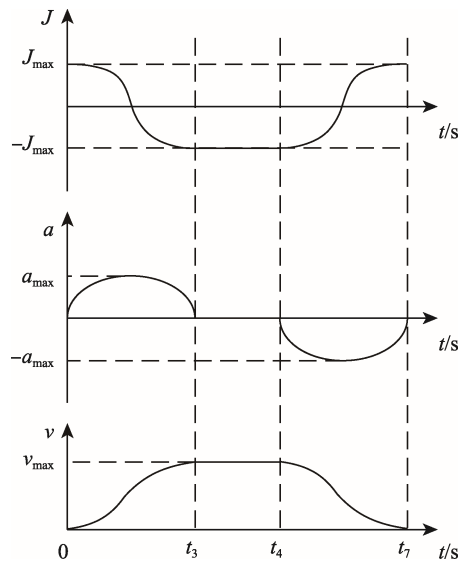


图 3 改进后的曲线

Fig.3 Modified curve

3 基于遗传算法的时间优化

如上所述，如果采用改进的 S 型曲线，系统响应时间会有所增加，因此有必要对每段运行时间进行优化。综合考虑，为减小完成轨迹所需时间，文中基于遗传算法设计了一种优化方案，该方案可简要描述如下。

1) 编码。以二进制形式实现各段轨迹曲线耗时编码，同时设置编码长度，确保解的精度能够达到 0.001。

2) 种群初始化。在时间值域范围内，随机抽取一定数量个体。为便于分析、计算，可假设数量为 m ， m 为奇数且满足。

3) 确定适应度函数。通常情况下，个体适应度函数可用式（7）表示：

$$Fit(t) = \frac{1}{P(t, \sigma)} \quad (7)$$

满足：

$$P(t, \sigma) = T_{\min} + \sigma \bar{P}(t) \quad (8)$$

式中： $T_{\min}$ 为优化目标； $\bar{P}(t)$ 为惩罚项； σ 为惩罚因子。在算法逐渐趋近最优值过程中，个体适应度值之间的差异会比较小，导致寻优暂停。为解决此问题，文中对上述适应度函数进行调整，即：

$$F(t) = \frac{Fit(t) + Fit(t)_{\min}}{Fit(t)_{\max} + Fit(t)_{\min} + \delta} \quad (9)$$

式中： $Fit(t)_{\min}$ 和 $Fit(t)_{\max}$ 分别表示适应度函数的下界和上界； δ 为实数且满足 $0 < \delta < 1$ 。

4) 选择和交叉。假设第 s 代种群包含个体数目为 n ，则有 $P_n^s = (p_1^s, p_2^s \cdots p_n^s)$ 。以其中相邻 2 个个体为例，进行交叉运算，即：

$$\begin{cases} z_1^s = rp_1^s + (1-r)p_2^s \\ z_2^s = (1-r)p_1^s + rp_2^s \end{cases} \quad (10)$$

式中： r 为实数，且满足 $0 < r < 1$ ； z_1^s 和 z_2^s 表示新个体。新生成的子种群可定义为 $z_n^s = (z_1^s, z_2^s \cdots z_n^s)$ ，2 个种群合并，同时按适应值大小排序就会得到一个有序种群，即：

$$X_{m+n}^s = (x_1^s, x_2^s \cdots x_m^s, x_{m+1}^s \cdots x_{m+n}^s) \quad (11)$$

将有序种群进行划分，首先确定划分界限，即 $F_{\min}$ ， F_{m1} ， F_{m2} ， $F_{\max}$ ，其中 $F_{\min} = F(x_1^s)$ ， $F_{m1} = (F_{\min} + F_{\text{mid}})/2$ ， $F_{m2} = (F_{\max} + F_{\text{mid}})/2$ ， $F_{\max} = F(x_{m+n}^s)$ ，而 $F_{\text{mid}} = (F(x_m^s) + F(x_{m+1}^s))/2$ 。新的子群结构可表示为：

$$\begin{cases} Y_{\min}^s = (Y_{\min,1}^s, Y_{\min,2}^s \cdots Y_{\min,(m+n)/3}^s), \\ F_{\min} \leq F(Y_{\min,e}^s) \leq F_{m1} \\ Y_{\text{mid}}^s = (Y_{\text{mid},1}^s, Y_{\text{mid},2}^s \cdots Y_{\text{mid},(m+n)/3}^s), \\ F_{m1} \leq F(Y_{\text{mid},f}^s) \leq F_{m2} \\ Y_{\max}^s = (Y_{\max,1}^s, Y_{\max,2}^s \cdots Y_{\max,(m+n)/3}^s), \\ F_{m2} \leq F(Y_{\max,g}^s) \leq F_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $e, f, g \in [1, 2 \cdots (m+n)/3]$ 。为确保优良模式能够持续，需从 $Y_{\max}^s$ 中选取适应度值最大的个体；另外， $(m-1)$ 个个体可从 $Y_{\min}^s$ 和 Y_{mid}^s 中选取，具体选择方式为轮盘赌。如此，新一代种群可表示为：

$$Y_m^s = (y_1^s, y_2^s \cdots y_m^s) \quad (13)$$

5) 变异。通常情况下，进入寻优后期，迭代算法往往会停滞不前，收敛速度明显减慢。为提高算法局部搜索能力，设计了一种改进变异算子。定义一个阈值 η ，如果 $Y_{\text{new}}^{s+1} - Y_{\text{new}}^s < \eta$ ，那么需要构建一个新个体 Y_{new}^{s+1} 。利用新个体 Y_{new}^{s+1} 代替旧个体 Y_{max}^{s+1} ，即：

$$Y_{\text{new}}^{s+1} = (y_1 + \varepsilon_1, y_2 + \varepsilon_2 \cdots y_m + \varepsilon_m) \quad (14)$$

式中： $\varepsilon_1 \sim \varepsilon_m$ 为二进制数，满足独立正态分布。

经仿真计算，优化后完成轨迹所需时间大幅减少；与优化前比较，所需时间约减小 40%，系统响应速度明显提高。综上所述，所述遗传算法能够缩小搜索范围，不仅可以提高局部搜索能力，而且可以防止算法陷入局部最优。另外，后期寻优效率大大提高。

4 实验研究

4.1 平台搭建

为验证所述方法的可行性和有效性，进行了相关实验。首先，以 XY-sr130 码垛机器人为基础搭建实验平台。整个控制系统包括如下几个部分：码垛机

人控制模块、回原点控制模块、传送带控制模块、设备保护监测模块。主控器型号为 MAC1600，是一种四轴运动控制器，具有 2 个 RS485 接口、1 个 10/100M 以太网通信接口；支持单轴、多轴控制；支持多轴同步控制算法；支持直线插补、圆弧插补等运动控制算法。支持速度和位置控制 2 种功能，具体控制方式为高速脉冲的形式。该控制器可在最大程度上满足码垛机器人的控制需求。

利用 PLC_CONFIG 软件实现梯形程序设计、编译、烧录，完成主要逻辑控制，包括轨迹规划、运动控制、伺服驱动、外部 I/O 信号处理、模拟数据采集等。主要电机选型见表 1。

表 1 电机选型
Tab.1 Motor selection

位置	型号	额定功率/kW	额定转速/(r·min ⁻¹)	额定转矩/(N·m)	额定电流/A
手爪		1.0	3000	3.2	4.0
竖直	ACSM150 系列	1.5	2000	7.0	7.0
水平		1.5	2000	5.5	7.0
腰部		3.7	2000	15.5	15

4.2 结果

为验证所述轨迹规划方法在定位精度方面的优越性，针对码垛机器人开展了重复定位精度实验研究。所谓重复定位是指机器人能否准确地到达上一次的运动位置。通过激光仪对末端执行器进行跟踪，进而获取其位置。以上述实验平台为基础，对比方法包括传统 S 型曲线插值和改进 S 型曲线插值。实测重复定位结果见表 2。

表 2 重复定位结果
Tab.2 Results of repeat positioning

序号	传统 S 型曲线插值/mm	改进 S 型曲线插值/mm
1	1.1	0.6
2	1.0	0.4
3	1.3	0.5
4	0.9	0.5
5	1.1	0.5
6	0.9	0.6
7	0.8	0.3
8	1.2	0.5
9	1.1	0.5
10	0.9	0.7
平均值	1.03	0.51

通过表2可以看出：基于所述改进S型曲线轨迹规划方法，码垛机器人的重复定位误差平均值仅有0.51 mm；对比而言，传统S型曲线轨迹规划方法的重复定位误差平均值为1.03 mm，其定位精度明显不如改进S型曲线。另外，整个码垛过程机器人运行平稳，速度和加速度并没有发生突变。实验结果表明，文中所述轻工机器人轨迹规划方法完全能够满足包装、分拣等工艺要求。

5 结语

以包装搬运机器人之一的码垛机器人为研究对象，重点讨论了其轨迹规划问题。基于传统S型曲线实现了轨迹规划，为解决加速度突变问题，引入了三角函数。采用遗传算法实现运行时间优化。通过实验验证了所述方法的有效性，实验结果表明，所述轻工机器人轨迹规划方法完全能够满足包装、分拣等工艺要求，对包装搬运机器人轨迹规划具有一定的借鉴意义。

参考文献：

- [1] 陈学峰. 码垛机器人轨迹规划算法研究[J]. 控制工程, 2018, 25(5): 925—929.
CHEN Xue-feng. Research on the Trajectory Planning Algorithm of Palletizing Robots[J]. Control Engineering of China, 2018, 25(5): 925—929.
- [2] 赵亮, 仲崇权, 郑飞翔. 一种机器人最优加速度轨迹规划算法研究[J]. 大连理工大学学报, 2017, 57(2): 177—183.
ZHAO Liang, ZHONG Chong-quan, ZHENG Fei-xiang. Research on Robot Trajectory Planning Algorithm with Optimal Acceleration[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2017, 57(2): 177—183.
- [3] 张志强, 臧冀原, 负超. 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.
- [4] 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.
- [5] SUN W, PATIL S, ALTEROVITZ R. High-frequency Replanning under Uncertainty Using Parallel Sampling Based Motion Planning[J]. Robotics IEEE Transactions on Robot, 2015, 31(1): 104—116.
- [6] 王占军, 赵玉刚, 刘新玉. 码垛机器人结构设计与模态分析[J]. 机械设计与制造, 2014(8): 164—166.
WANG Zhan-jun, ZHAO Yu-gang, LIU Xin-yu. Structural Design and Modal Analysis of Palletizing Robot[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(8): 147—149.
- [7] 杜巧连, 陈旭辉, 舒柏和. 一种改进的机器人轨迹规划方法[J]. 机械设计, 2017, 34(3): 31—35.
DU Qiao-lian, CHEN Xu-hui, SHU Bai-he. An Improved Study of Robot Trajectory Planning Method[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(3): 31—35.
- [8] 张树刚, 赵佳. 基于S型曲线的包装堆垛机器人轨迹规划[J]. 包装工程, 2018, 39(1): 136—140.
ZHANG Shu-gang, ZHAO Jia. Trajectory Planning of Packaging Palletizing Robot Based on S-curve[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(1): 136—140.
- [9] ZHAO D, LI S, ZHU Q. Adaptive Synchronised Tracking Control for Multiple Robotic Manipulators with Uncertain Kinematics and Dynamics[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(4): 791—804.
- [10] 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.
- [11] 张铁, 罗业才. 空气包覆纱机上横动电机速度曲线规划[J]. 机械设计与制造, 2014(9): 29—32.
ZHANG Tie, LUO Ye-cai. Speeding Curve on Traverse Motor of Air Covered Yarn Machine[J]. Machinery Design & Manufacture, 2014(9): 29—32.
- [12] 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.
- [13] 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.
ZHANG Zhi-song. Trajectory Planning of Palletizing Robot Based on Double S-shaped Velocity Curve[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(3): 330—334.
- [14] 郑为凑. 包装搬运机器人专用运动控制系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2015.
ZHENG Wei-cou. Study on Dedicated Motion Control System for Light Packaging Robot[D]. Changsha: Central South University, 2015.
- [15] 张明, 何庆中, 郭帅. 酒箱码垛机器人的机构设计与运动仿真分析[J]. 包装工程, 2013, 34(1): 83—87.
ZHANG Ming, HE Qing-zhong, GUO Shuai. Mechanical Design and Motion Simulation Analysis of Liquor Automated Production Line Palletizing Robot[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(1): 83—87.