

码垛机器人的连杆参数优化

袁成志¹, 杨传民², 蔚俊², 邢炯², 龚国腾²

(1.河北工业大学, 天津 300131; 2.天津商业大学, 天津 300134)

摘要: **目的** 对码垛机器人的连杆参数进行优化, 以保证垛型完全位于码垛机器人工作空间内。**方法** 通过改变连杆长度 l_2 、 l_3 、关节转角 θ_3 的值, 根据运动学方程, 利用 Matlab 编程计算得到码垛机器人工作空间的三维立体图以及 xOz 平面投影图, 经过对比分析选取符合条件的连杆参数。**结果** θ_3 的范围满足要求, 无需优化。当 l_2 和 l_3 长度为 2290 mm 时, 码垛机器人的最大工作空间包含任务工作空间。**结论** 对连杆参数进行了优化设计, 机器人的工作空间符合工作要求。

关键词: 码垛机器人; 工作空间; 连杆参数; 优化

中图分类号: TB486; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2021)13-0225-05

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.13.031

Optimization of Linkage Parameters of Palletizing Robot

YUAN Cheng-zhi¹, YANG Chuan-min², YU Jun², XING Jiong², GONG Guo-teng²

(1.Hebei University of Technology, Tianjin 300131, China; 2.Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: This paper optimizes the linkage parameters of the palletizing robot to ensure that the stack is completely located in the working space of the robot. By changing the values of l_2 , l_3 and joint angle θ_3 , the workspace measurements of xyz , xOz of the robot were calculated by Matlab programming according to the kinematics equation, and the linkage parameters that meet the conditions were selected through comparison and analysis. The results show that the range of θ_3 coincides the requirements, so it is no need to be optimized. And when the length of l_2 and l_3 is 2290 mm, the maximum workspace of palletizing robot contains the task workspace. After the optimized design of linkage parameters, the workspace of the robot can meet work requirements.

KEY WORDS: palletizing robot; workspace; linkage parameters; optimization

随着我国经济的腾飞, 物流运输行业发展迅速。装卸作为物流运输的重要环节, 发挥着关键作用, 但也面临着装卸从业人员数量少、成本高和装卸效率低等问题^[1]。目前, 国内对于装卸机械的应用研究主要集中于智能叉车或者 AGV 小车, 并且已经广泛应用于车间物料传输、装卸等方面^[2-4], 而使用码垛机器人进行装卸还没有先例。如果要实现较大空间的码垛, 应使码垛机器人任务工作空间包含在最大工作空间内, 这就需要对其连杆参数进行优化。文中首先对码垛机器人进行运动学分析, 然后对其任务工作空间

进行分析, 最后重新设计码垛机器人连杆参数, 使其满足任务工作空间的要求。

1 码垛机器人类型选择与参数设定

文中选用四自由度码垛机器人, 它由基座、腰部、大臂、小臂和末端执行器等部分组成, 其中, 大小臂使用平行四边形机构, 各关节均为旋转关节。对于码垛机器人各个连杆之间相互的运动和位姿关系的研究, 通常使用一种标准通用的方法——D-H 法^[5]。该

收稿日期: 2020-11-20

基金项目: “十二五”科技支撑计划 (2011BAD24B01)

作者简介: 袁成志 (1996—), 男, 河北工业大学硕士生, 主攻包装机械。

通信作者: 杨传民 (1959—), 男, 天津商业大学教授、博导, 主要研究方向为包装机械和包装材料。

方法由 Denavit 和 Hartenberg^[6]首次提出, 首先将连杆坐标系固连在各关节上, 然后用四阶矩阵表示前后连杆之间的相对位置和姿态关系, 这些矩阵的乘积即为机器人末端与基座之间空间关系的等价齐次变换矩阵, 最后通过该矩阵建立运动学方程。文中使用 D-H 参数法来建立码垛机器人的连杆坐标系, 见图 1。

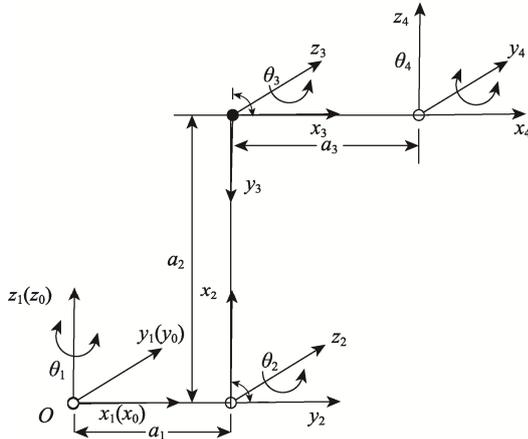


图 1 连杆坐标系示意

Fig.1 Diagram of linkage coordinate system

根据右手定则, 关节转角 θ_i 为绕 z_{i-1} 轴由 x_{i-1} 轴向 x_i 轴的关节角; d_i 为在 z_{i-1} 轴方向上从第 $i-1$ 坐标系的原点到 z_i 轴和 x_i 轴的交点之间的距离; a_i 为从 z_{i-1} 轴和 x_i 轴的交点到第 i 坐标系原点沿 x_i 轴的偏移距离; α_i 为绕 x_i 轴由 z_{i-1} 轴转向 z_i 轴的偏角。根据上述杆件参数的定义, 确定码垛机器人连杆参数, 见表 1。

表 1 码垛机器人连杆参数

Tab.1 Linkage parameters of the palletizing robot

连杆 i	$\theta_i/(\circ)$	$\alpha_{i-1}/(\circ)$	a_{i-1}	d_i
1	-155~155	0°	0	0
2	-120~-15	-90	l_1	0
3	20~160	0°	l_2	0
4	-180~180	0°	l_3	0

连杆长度初始值 $l_1=200$ mm, $l_2=1200$ mm, $l_3=1200$ mm, 为避免连杆发生干涉, 故不将 θ_3 视为独立变量, 需要由 θ_2 来约束 θ_3 ^[7]。根据 θ_2 和 θ_3 的取值范围, 以及关节干涉约束条件 $-20^\circ \leq \theta_2 + \theta_3 \leq 120^\circ$, 可得到 θ_2 与 θ_3 的关系, 见图 2。

2 机器人运动学分析

机器人运动学分析指在已知机器人相关参数的情况下, 对各关节的位移、速度和加速度等变量进行分析研究^[8], 运动学分析的主要分为正向运动学和逆向运动学两大类问题。

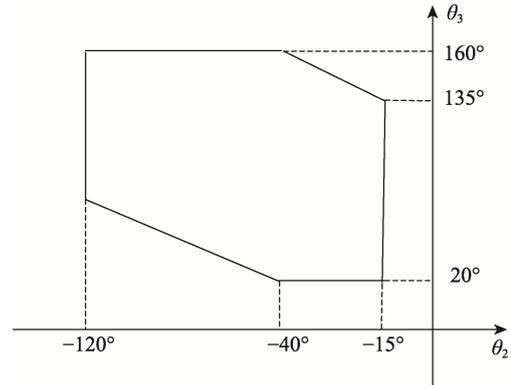


图 2 θ_2, θ_3 函数关系

Fig.2 Function diagram of θ_2 and θ_3

2.1 机器人的正向运动学分析

相邻两连杆构成一个旋转关节, 在给定两连杆相对位置时求解码垛机器人抓手相对于固定坐标系的位姿, 这就是正向运动学分析^[9-10]。通常, 用 ${}_{i-1}^i T$ 表示前后 2 个连杆坐标系的齐次变换矩阵, 因此, 机器人运动学方程可由相邻两连杆之间的齐次变换矩阵相乘得到, 其公式为:

$${}^4_0 T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^1_0 T {}^2_1 T {}^3_2 T {}^4_3 T \quad (1)$$

则码垛机器人抓手中心点在固定坐标系中的坐标为:

$$\begin{aligned} p_x &= l_3 \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_1 \cos \theta_1 \\ p_y &= l_3 \sin \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + l_1 \sin \theta_1 \\ p_z &= -l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - l_2 \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (2)$$

2.2 机器人逆向运动学分析

根据码垛机器人抓手的位置和姿态, 求解此时各关节的全部关节变量即为逆向运动学分析^[11]。假设已知机器人末端执行器相对于基座坐标系的位姿由 ${}^4_0 T$ 表示, 那么在式 (2) 两端分别左乘 ${}_{i-1}^i T$ 的逆矩阵, 即可求得其逆解。

3 码垛机器人任务工作空间

文中假设托盘与货物尺寸基本相等, 将其视为一个整体 (模块), 利用码垛机器人将这些规格相同的模块码放至车盘上。根据 GB/T 2934—1996 可知, 托盘有 1200 mm×1000 mm, 1200 mm×800 mm, 1140 mm×1140 mm, 1219 mm×1016 mm 等 4 种规格, 文中选取长 l 为 1200 mm, 宽 w 为 800 mm 的托盘。仓储行业规定托盘上货物的重心高度不应超过托盘宽度的三分之二, 为保证搬运过程中的安全, 计算可得货物高度应小于 1067 mm, 故选取模块高度 h 为 800 mm。以车厢长为 13 m 仓棚车为例, 其装载有效长度为 12.9 m, 有效宽度为 2.4 m, 可装货物高度为 2.5 m。

根据托盘尺寸与模块高度, 选取运输车辆满载时的车厢长宽高尺寸分别为: $L=12000\text{ mm}$, $W=2400\text{ mm}$, $H=2400\text{ mm}$ 。

末端执行器在固定坐标系中能够到达的所有点, 这些点共同构成了工作空间。工作空间一般用水平面和垂直面的投影表示^[12-13]。将规划出的垛型尺寸作为机器人任务工作空间, 那么, 码垛机器人工作空间应略大于任务工作空间, 因此, 工作空间大小应该由任务工作空间确定, 才能使优化连杆参数以符合工作空间要求。如图 3 所示, 在车盘上建立直角坐标系, 然后确定 xoy 平面的长和宽。将模块码放到车厢上时, 托盘中心与车厢长度方向的边缘距离为托盘宽度的一半, 即为 400 mm 。托盘中心与车厢宽度方向的边缘距离为托盘长度的一半, 即 600 mm 。文中要求码垛机器人能够最多在 y 方向上并列码放 6 个托盘。考虑到码垛机器人工作空间在长度方向的余量 R_l 为 200 mm , 在宽度方向上的余量 R_w 为 100 mm , 则任务工作空间的长 L_{rw} 和宽 W_{rw} 公式为:

$$L_{rw} = 6 \times l - 2 \times 600 + 2 \times R_l \quad (3)$$

$$W_{rw} = W - 2 \times 400 + 2 \times R_w \quad (4)$$

由式 (3) 和式 (4) 可得 $L_{rw}=6400\text{ mm}$, $W_{rw}=1800\text{ mm}$ 。任务工作空间高度为车盘上最底层模块上表面到满载货物的运输车的最大高度, 且应有余量 $R_h=100\text{ mm}$, 则任务空间高度 H_{rw} 公式为:

$$H_{rw} = H - h + R_h \quad (5)$$

由此可得到任务工作空间高度为 1700 mm , 最终可得到机器人任务工作空间见图 3。

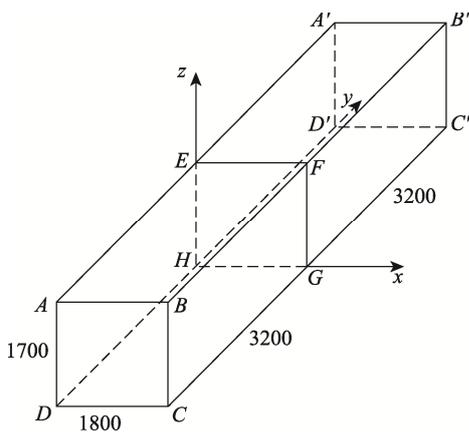


图 3 机器人任务空间示意

Fig.3 Schematic diagram of robot's task workspace

工作要求机器人实现的任务工作空间是实线所包含的区域, 见图 4。按图 4 布置时, 当机器人的工作空间完全包含其任务空间时, 即满足工作要求, 此时, 判断码垛机器人工作空间是否满足要求主要有如下 2 个条件^[14]。

1) 最大工作空间在 xOy 平面的投影完全包含任务空间区域 (实线矩形区域)。

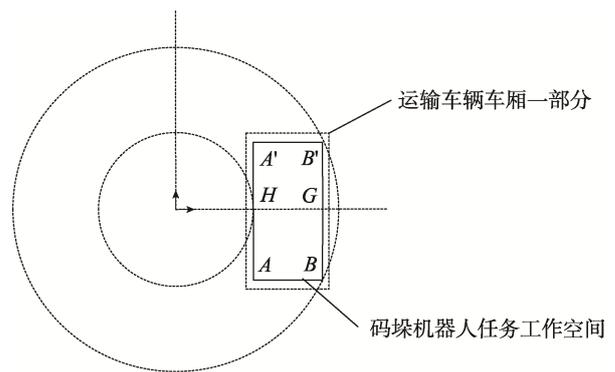


图 4 工作空间分析

Fig.4 Analysis chart of workspace

2) 最大工作空间在 xOz , yOz 平面的投影也要完全包含其任务空间。

由图 4 可知, 工作空间关于 GH 对称, 因此只需要对立方体 $EHGF-B'C'D'A'$ 进行研究即可。条件 2 可以转化为检验 $EB'C'H$ 面是否被码垛机器人工作空间所包含。

4 码垛机器人的连杆参数优化

4.1 最大工作空间条件的确定

已知初始值 $l_1=200\text{ mm}$, $l_2=1200\text{ mm}$, $l_3=1200\text{ mm}$, 根据运动学方程, 利用 Matlab^[15] 软件对其进行工作空间仿真, 即可得到其三维空间立体图和在 xOz 平面的投影图。再将 $EB'C'H$ 面投影到工作空间在 xOz 平面的投影图上, 可得到在 xOz 平面的工作空间坐标示意图, 见图 5。

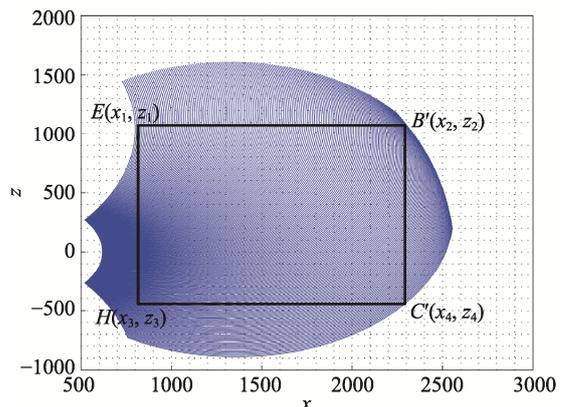


图 5 xOz 平面的工作空间坐标示意

Fig.5 Coordinate sketch of workspace in the xOz plan

根据图 5 的坐标值和图 4 的位置关系, 可知检验 $EB'C'H$ 面是否被码垛机器人最大工作空间所包含, 只需最远点 C' 与机器人旋转中心的距离小于 x_4 , 且 B' 与 C' 在高度方向的差值大于等于 1700 mm 即可。

已知 E 点坐标为 $(x_1, 0, z_1)$, 可得 C' 点坐标为 $(x_1+1800, 3200, z_3)$, 则 C' 与机器人旋转中心的距离为:

$$L_{C'} = \sqrt{x_{C'}^2 + y_{C'}^2} = \sqrt{(x_1 + 1800)^2 + 3200^2} \quad (6)$$

只有当 $L_{C'} < x_4$ 且 $z_2 - z_4 \geq 1700$ 时, 码垛机器人最大工作空间满足任务工作空间。

4.2 θ_3 取值范围的优化

由第 1 节可知, 关节转角 θ_3 需要通过 θ_2 进行间接约束, 从而避免干涉。已知连杆初始长度为 $l_1=200$ mm, $l_2=1200$ mm, $l_3=1200$ mm。每次将 l_2, l_3 的长度增加 100 mm, 根据 Matlab 生成的工作空间仿真图获得各点坐标, 并根据式 (6) 计算 $L_{C'}$, 验证是否符合上述条件。经多次计算验证, 初步得到 l_2, l_3 符合条件的长度为 2300 mm。

根据图 2, 为避免抓手上的货物与机器人手臂发生干涉, 当 $l_2=l_3=2300$ mm 时, 应使连杆长度与 $\sin(180^\circ - \theta_3)$ 的乘积大于等于垛盘长度的一半, 则可解得 θ_3 最大值为 163.9° 。该型号机器人的 θ_3 范围为 $20^\circ \sim 160^\circ$, 故 θ_3 的值无需优化。

4.3 连杆 l_2 和 l_3 长度的优化

角度优化后, 根据 l_2, l_3 的初选长度 2300 mm, 将长度范围定在 2200~2400 mm, 步长改为 10 mm 进

行二次优化。通过改变 l_2 和 l_3 的长度, 根据 Matlab 生成的工作空间仿真图获得各点坐标, 并根据式 (6) 计算 $L_{C'}$, 验证是否符合上述条件。

经过多次验证, 当 $l_2=l_3=2290$ mm 时, 提取所得各点坐标见表 2。

表 2 各点提取坐标值
Tab.2 Coordinate values extracted from each point

点编号 i	x_i/mm	z_i/mm
1	1345	1400
2	4490	1394
3	1344	-377.3
4	4487	-375.1

由此可知 E 点坐标为 (1345, 0, 1400), 计算可得 C' 点坐标为 (3145, 3200, -375.1), C' 与机器人旋转中心的距离为: $L_{C'} = \sqrt{x_{C'}^2 + y_{C'}^2} = 4486.8 < x_4 = 4487$ mm, $y_2 - y_4 = 1769.1 > 1700$, 则其最大工作空间尺寸为 $6400 \text{ mm} \times 3145 \text{ mm} \times 1769.1 \text{ mm}$, 符合条件。

优化前后的码垛机器人的三维工作空间见图 6, xOz 平面投影见图 7。经对比可知, 优化后的工作空

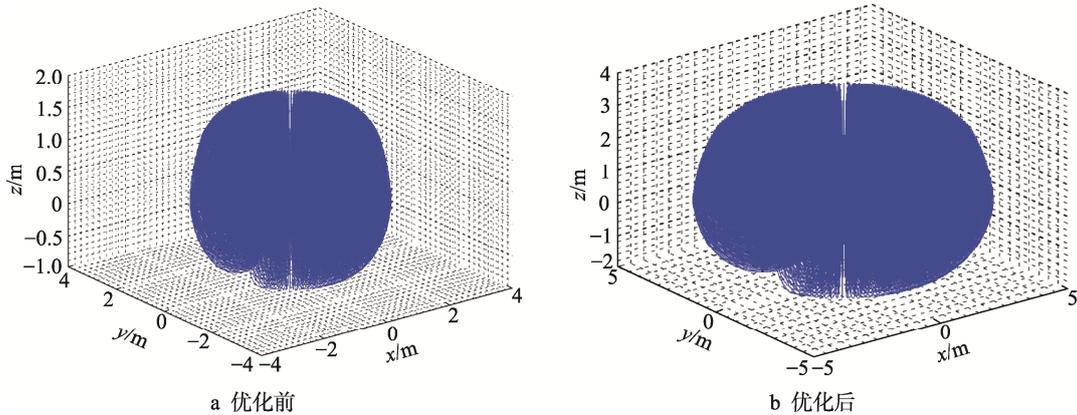


图 6 码垛机器人三维工作空间
Fig. 6 Three-dimensional workspace of palletizing robot

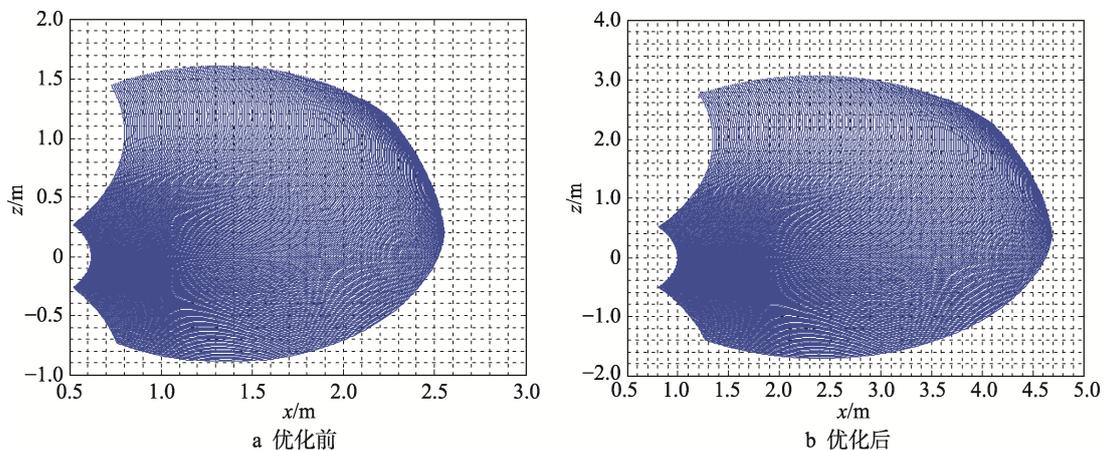


图 7 xOz 投影图
Fig.7 Projection of xOz plane

间范围比优化前明显增大,且所得工作空间能够满足大空间码垛的需要。根据 Matlab 平面投影图,利用描点方法所得各点坐标与计算所得坐标基本一致,说明文中方法具有准确性,以及将连杆参数优化用于较大空间码垛的可行性。

5 结语

利用 D-H 法对 DJM-1200 型码垛机器人进行运动学建模,然后对码垛机器人的任务空间尺寸进行了分析计算。根据运动学方程,利用 Matlab 编程计算得到机器人的工作空间范围,对连杆参数进行了优化,从而使码垛机器人能够满足较大工作空间码垛的需求。文中运用描点方法所得坐标与计算所得坐标基本一致,说明了该方法的准确性,也为实现大空间码垛的机器人编程控制奠定了基础。

参考文献:

- [1] 赵全赏. 哈尔滨局集团公司装卸管理方式优化对策[J]. 铁道货运, 2020, 38(10): 1—4.
ZHAO Quan-shang. Countermeasures for Optimizing Loading and Unloading Management Methods of Harbin Bureau Group Corporation[J]. Railway Freight, 2020, 38(10): 1—4.
- [2] 张曹林, 汤剑松. 智能装卸车系统在民爆成品药仓储运输的应用[J]. 现代矿业, 2020, 36(9): 170—172.
ZHANG Cao-lin, TANG Jian-song. The Application of Intelligent Loading and Unloading Truck System in the Storage and Transportation of Civil Explosive Products[J]. Modern Mining, 2020, 36(9): 170—172.
- [3] 吕吟雪, 周穆新, 王超驹, 等. AGV 小车在物流运输行业中的应用研究[J]. 机电信息, 2020(14): 37.
LU Yin-xue, ZHOU Mu-xin, WANG Chao-ju, et al. Application Research of AGV in the Logistics Transportation Industry[J]. Electromechanical Information, 2020(14): 37.
- [4] 吴胜军. 叉车远程智能控制系统研究[J]. 信息记录材料, 2020, 21(7): 194—195.
WU Sheng-jun. Research on Forklift Remote Intelligent Control System[J]. Information Recording Materials, 2020, 21(7): 194—195.
- [5] 唐越, 郑金辉, 门正兴, 等. 工业机器人 D-H 建模与运动仿真[J]. 中国重型装备, 2020(1): 31—32.
TANG Yue, ZHENG Jin-hui, MEN Zheng-xing, et al. D-H Modeling and Motion Simulation of Industrial Robots[J]. China Heavy Equipment, 2020(1): 31—32.
- [6] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices[J]. Journal of Applied Mechanics, 1955, 22: 215—211.
- [7] 熊艳梅, 杨延栋. 码垛机器人运动学分析与仿真[J]. 机械, 2015(1): 62—66.
XIONG Yan-mei, YANG Yan-dong. Kinematic Analysis and Simulation of Palletizing Robot[J]. Machinery, 2015(1): 62—66.
- [8] 马佰胜, 金嘉琦. 机器人运动学分析[J]. 煤矿机械, 2018, 39(5): 69—70.
MA Bai-sheng, JIN Jia-qi. Kinematics Analysis of Robot[J]. Coal Mining Machinery, 2018, 39(5): 69—70.
- [9] 张程, 张卓. 码垛机器人运动学分析及关节空间轨迹规划研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(2): 19—21.
ZHANG Cheng, ZHANG Zhuo. Research on Kinematics Analysis and Joint Space Trajectory Planning of Palletizing Robot[J]. Modular Machine Tool and Automated Processing Technology, 2020(2): 19—21.
- [10] 曹成涛, 许伦辉, 孙永嘉, 等. 工业码垛机器人运动学与轨迹插值算法研究[J]. 机械设计与制造, 2017(3): 254—257.
CAO Cheng-tao, XU Lun-hui, SUN Yong-jia et al. Research on Kinematics and Trajectory Interpolation Algorithm of Industrial Palletizing Robots[J]. Machine Design and Manufacturing, 2017(3): 254—257.
- [11] 王洪欣. 机械原理[M]. 南京: 东南大学出版社, 2005: 164—167.
WANG Hong-xin. Mechanical Principle[M]. Nanjing: Southeast University Press, 2005: 164—167.
- [12] 李凯悦, 徐威. 一类六自由度串联机器人路径规划与模型仿真[J]. 制造业自动化, 2019, 41(2): 86—88.
LI Kai-yue, XU Wei. Path Planning and Model Simulation of a Class of 6-DOF Serial Robots[J]. Manufacturing Automation, 2019, 41(2): 86—88.
- [13] 朱庆浩, 臧强, 岳华, 等. 6R 工业机器人的运动学分析与仿真[J]. 中国科技论文, 2020, 15(8): 953—958.
ZHU Qing-hao, ZANG Qiang, YUE Hua, et al. Kinematics Analysis and Simulation of 6R Industrial Robot[J]. Chinese Science and Technology Paper, 2020, 15(8): 953—958.
- [14] 乔正. 码垛机器人运动控制方法及多机协作策略研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2014: 31—34.
QIAO Zheng. Research on Motion Control Method and Multi Machine Cooperation Strategy of Palletizing Robot[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2014: 31—34.
- [15] 刘浩, 韩晶. MATLAB R2016a 完全自学一本通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2016: 109—189.
LIU Hao, HAN Jing. MATLAB R2016a is a Self-taught All-in-One[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2016: 109—189.