

码垛机器人连杆参数的变化对工作空间的影响

郎咸强¹, 杨传民², 马豪¹, 黄邵祥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** 分析机器人的连杆 $2(l_2)$ 、连杆 $3(l_3)$ 的长度和 l_2 的关节转角 θ_3 的角度取不同值时, 机器人工作空间的变化情况。**方法** 建立机器人的连杆坐标系, 根据连杆参数表用D-H法建立机器人的运动学方程。根据运动学方程, 用Matlab仿真工作空间。改变 l_2 和 l_3 的长度以及 l_3 的关节转角 θ_3 , 得到连杆取不同参数时和原参数时机器人工作空间的 xOy 和 xOz 平面对比图, 并把对比图插入AutoCAD画出对比图的边界。通过分析对比图边界的变化来研究仿真平面图形的变化。**结果** 获得了不同参数时机器人工作空间的 xOy 和 xOz 仿真投影图。**结论** 连杆参数不同时, 工作空间有不同的变化, 为机器人连杆参数的优化和运动控制奠定了基础。

关键词: 码垛机器人; 工作空间; 连杆参数

中图分类号: TB486; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2017)05-0063-05

Influence of Change in Linkage Parameters of Palletizing Robot on the Workspace

LANG Xian-qiang¹, YANG Chuan-min², MA Hao¹, HUANG Shao-xiang²

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

ABSTRACT: The work aims to analyze the change of the robot's workspace when different length values of linkage 2 (l_2) and linkage 3 (l_3) and different joint rotation angles θ_3 of l_2 are taken. The linkage coordinate system of the robot was established. The kinematics equation of the robot was established in D-H method according to the linkage parameter table. Based on the kinematics equation, Matlab was used to simulate the workspace. After changing the lengths of l_2 and l_3 as well as the joint rotation angle θ_3 of l_3 , the comparison chart of the xOy and xOz planes of the robot's workspace was obtained when different linkage parameters were taken. And the boundary of comparison chart was drawn after inserting the comparison chart into the AutoCAD. The change in the simulated plane figures was studied by analyzing the change in the boundary of the comparison chart. The simulated projection drawings of xOy and xOz of the robot's workspace were acquired when different parameters were taken. When the linkage parameters are different, the workspace will differ accordingly, which lays a foundation for linkage parameter optimization and motion control of the robot.

KEY WORDS: palletizing robot; workspace; link parameter

码垛机器人在工业生产中完成对包装件的获取、搬运、码垛、拆垛等任务。随着社会的进步, 高效率与低成本成为企业生产追求的目标, 而码垛机器人^[1]以其高柔性、高处理能力及高可靠性的“三高”特性正在成为一种流行趋势。码垛机器人被广泛应用于化工、建材、饮料、食品等行业, 具有广泛的应用前景^[2]。运动学仿真和连杆参数的变化对码垛机器人的结构设计和编程控制有重要作用, 文中研究码垛机器人

连杆参数的变化对工作空间的影响, 并对工作空间进行仿真。

1 码垛机器人数学模型的建立

参照 GB/T 12642—90^[3], 机器人的回转台、大臂、小臂的几何参数决定工作空间。码垛机器人是一种混联机器人, 要研究机器人的末端执行器的位姿, 需要

收稿日期: 2016-07-07

基金项目: “十二五”科技支撑计划(2011BAD24B01)

作者简介: 郎咸强(1989—), 男, 河北工业大学硕士生, 主攻包装机械。

通讯作者: 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。

先简化机器人结构成串联机器人,便于机器人的运动学建模。在每个连杆上固接一个坐标系,用齐次变换矩阵来表示相邻坐标系及其连杆的关系,再通过矩阵运算推导出末端执行器相对于基座坐标系(参考系)的位姿。Denavit 和 Hartenberg^[4]提出的 D-H 参数法是建立机器人连杆坐标系的通用方法。文中使用 D-H 参数法来建立该机器人的连杆坐标系,见图 1。 θ_i 为绕 z_{i-1} 轴(右手规则)由 x_{i-1} 轴向 x_i 轴的关节角; d_i 为从第 $i-1$ 坐标系的原点到 z_{i-1} 轴和 X_i 轴的交点沿 z_{i-1} 轴的距离; 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(是 z_{i-1} 轴和 z_i 轴间的最小距离); α_i 为绕 x_i 轴(右手规则)由 z_{i-1} 轴转向 z_i 轴的偏角^[5]。根据杆件参数的定义,确定码垛机器人连杆参数,见表 1,其中 d_i 均为 0。

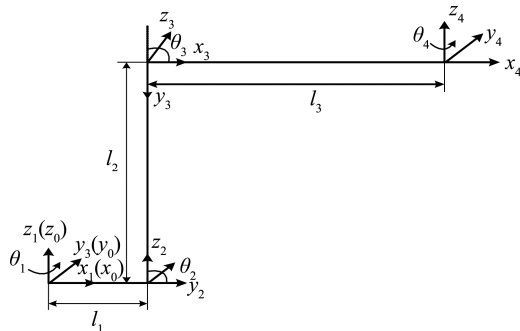


图 1 机器人的连杆坐标系

Fig.1 The connecting rod coordinate system of the robot

表 1 机器人连杆参数

Tab.1 The link parameters of the robot

连杆 <i>i</i>	关节转角 θ_i	a_{i-1}	α_i	关节转角 θ_i 转动范围
1	θ_1	0	0	$-155^\circ \sim 155^\circ$
2	θ_2	l_1	-90°	$-120^\circ \sim -15^\circ$
3	θ_3	l_2	0	$20^\circ \sim 160^\circ$
4	θ_4	l_3	0	$-180^\circ \sim 180^\circ$

$l_1=200$ mm, $l_2=1200$ mm, $l_3=1200$ mm, 关节转角 θ_3 不是独立变量,为了避免连杆发生干涉,需要转角 θ_2 来约束 θ_3 ^[6]。 θ_3 与 θ_2 的关系见图 2。

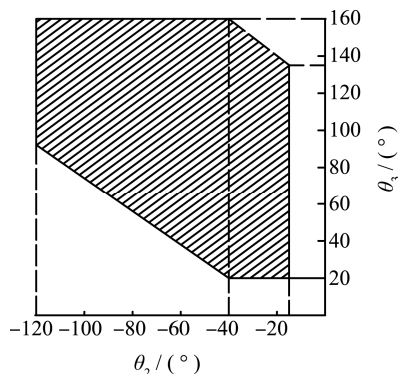


图 2 θ_3 与 θ_2 的关系

Fig.2 The relationship between θ_3 and θ_2

2 机器人运动学分析

机器人运动学分析是已知机器人结构的主要尺寸参数求解关节变量与操作空间变量的位置^[7],通常运动学问题可归结为正、逆 2 类问题。

2.1 正运动学

机器人正向运动学,即给定连杆的各项参数求解末端连杆坐标系相对于基坐标系的位姿^[8-9]。根据连杆坐标系和 D-H 参数表,机器人运动学方程可描述为:

$${}^0T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 \quad (1)$$

式中: ${}^i_{i-1}T$ 表示第 i 个连杆坐标系相对于第 $i-1$ 个连杆坐标系的齐次变换矩阵。可得:

$${}^i_{i-1}T = \begin{bmatrix} c\theta_i & -s\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ s\theta_i c\alpha_{i-1} & c\theta_i c\alpha_{i-1} & -s\alpha_{i-1} & -d_i s\alpha_{i-1} \\ s\theta_i s\alpha_{i-1} & c\theta_i s\alpha_{i-1} & c\alpha_{i-1} & d_i c\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $c\theta_i = \cos \theta_i$; $s\theta_i = \sin \theta_i$; $c\alpha_i = \cos \alpha_i$; $s\alpha_i = \sin \alpha_i$ ($i=1, 2, 3, 4$)。

由齐次变换矩阵连乘 ${}^4T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4$, 可得到简化机构末端执行器坐标系原点在基坐标系中的向量为:

$$\begin{aligned} p_x &= l_3 \cos \theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \cos \theta_1 \cos \theta_2 + l_1 \cos \theta_1 \\ p_y &= l_3 \sin \theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) + l_2 \sin \theta_1 \sin \theta_2 + l_1 \sin \theta_1 \\ p_z &= -l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) - l_2 \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 逆运动学

机器人的运动学逆解是指在给定机器人末端执行器位姿的情况下,求解得到该位形的各关节转角^[10]。根据 pieper 原则,假设机器人最后一个连杆的姿态是 4T , 在求解运动学逆解时,从 4T 开始求解关节位置。其他 3 个参数可由其他 T 变换矩阵来求解。

3 分析连杆长度变化对工作空间的影响

机械臂的工作空间是指其末端参考点所能达到的空间点集合^[11-13]。根据建立的 D-H 参数坐标, l_2 和 l_3 原始值为 1200 mm,采用数值方法,使用 Matlab^[14] 对机器人同一连杆取 2 个不同参数时的工作空间进行仿真,得到 2 个不同的仿真图。将 Matlab 的 2 个仿真图插入 AutoCAD,通过 AutoCAD 描出仿真图的边界以便分析连杆参数的变化对工作空间的影响^[15]。

3.1 l_2 的长度变化对工作空间的影响

3.1.1 l_2 变长时

使用 Matlab 仿真连杆 l_2 长度为 1200 和 1500 mm 时的工作空间,将所得到的仿真图插入 AutoCAD 描出工作空间的 xOz 平面的边界对比,见图 3。

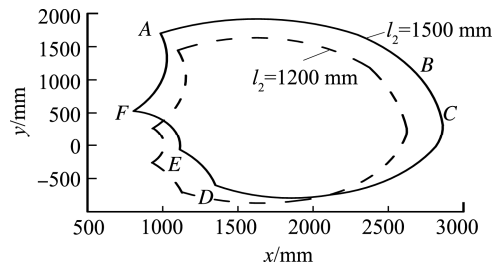


图 3 杆长 l_2 变化时的 xOz 平面图
Fig.3 xOz plane when l_2 is different

使用同样的方法处理仿真图后还得到 l_2 为 1500 与 1700 mm 的边界对比图, 图形的变化趋势都和图 3 相同, 连杆 l_2 的长度增大时, 工作空间的 xOz 平面的边界变化为 AB 段、 BC 段、 CD 段、 AF 段向外凸, 而 DE 段、 EF 段向内凹。根据图 3 曲线的变化可知, 当连杆 l_2 长度变长后, 码垛机器人的工作空间也随之增大, 并且长度越长时机器人的工作空间与机器人机身的距离就越远。

3.1.2 l_2 变短时

使用相同的方法处理仿真图后得到 l_2 为 800 和 1000 mm 的边界对比, 见图 4。

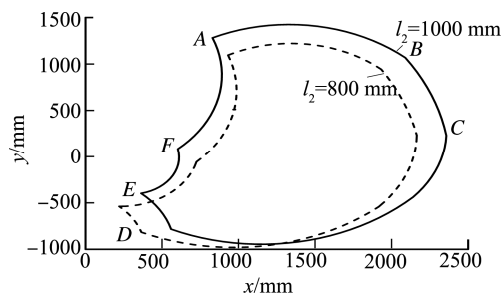


图 4 杆长 l_2 为 800 和 1000 mm 时的 xOz 平面图
Fig.4 xOz plane when l_2 is 800 and 1000 mm

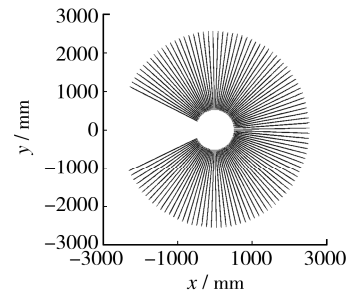
使用相同的方法还得到了 l_2 为 1200 和 1000 mm 的边界对比图, 与图 4 的变化一样, 由图 4 可得, 减小连杆 l_2 的长度时, 工作空间的 xOz 平面的变化为 AB 段、 BC 段、 CD 段、 EF 段、 AF 段向内凹, 而 DE 段向外凸。连杆 l_2 的长度变短时码垛机器人的工作空间相应地减小。

上述变化为码垛机器人工作空间的剖面图的变化情况, 连杆 l_2 参数变化时, 码垛机器人立体工作空间在 xOy 的投影空间也有所变化, 使用 Matlab 仿真机器人的立体工作空间, 得到杆长 l_2 变化前后的工作空间在 xOy 平面的投影, 见图 5。

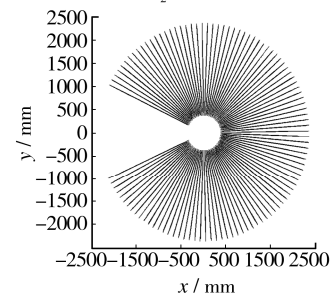
3.2 l_3 的长度变化对工作空间的影响

3.2.1 l_3 变长时

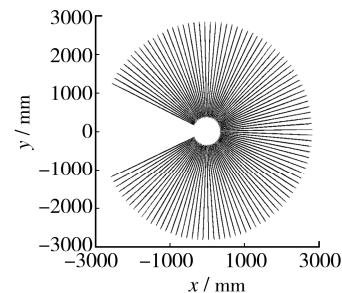
使用相同的方法处理仿真图, 得到当 l_3 为 1200 和 1500 mm 时工作空间的 xOz 平面图的边界对比, 见图 6。



a l_2 为 1200 mm



b l_2 为 1000 mm



c l_2 为 1500 mm

图 5 杆长 l_2 改变前后 xOy 平面图的对比
Fig.5 The comparison of xOy plane before and after changing l_2 length

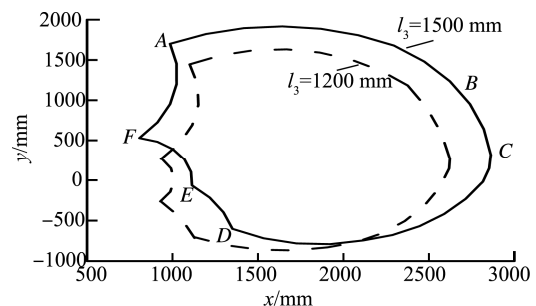


图 6 杆长 l_3 为 1200 和 1500 mm 时的 xOz 平面图
Fig.6 xOz plane when l_3 is 1200 and 1500 mm

使用相同的方法还得到了连杆 l_3 为 1500 和 1700 mm 的边界对比图, 边界变化与图 6 相同, 由图 6 可得, 连杆 l_3 的长度增大时, 工作空间的 xOz 平面的变化为 AB 段、 BC 段、 CD 段、 DE 段向外凸, 而 EF 段、 AF 段向内凹。码垛机器人的工作空间大小与 l_3 的长度成正比关系。

3.2.2 l_3 长度变短时

使用 Matlab 和 AutoCAD 处理后得到 l_3 为 1000 和 800 mm 时的工作空间的仿真图的边界对比, 见图 7。

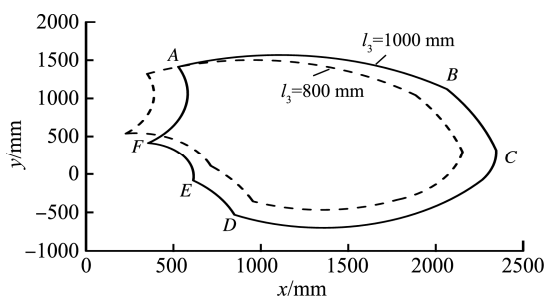


图7 杆长 l_3 为800和1000 mm时的 xOz 平面图
Fig.7 xOz plane when l_3 is 800 and 1000 mm

同时处理连杆 l_3 为1200和1000 mm的边界对比图,变化与图7相同,由图7得,连杆 l_3 的长度变短时,工作空间中的 AB 段、 BC 段、 CD 段、 DE 段、 EF 段向内凹,而 AF 段向外凸。码垛机器人的工作空间的体积随着连杆 l_3 长度的减小而减小。使用 Matlab 仿真机器人的立体工作空间,得到杆长 l_3 变化前后的工作空间在 xOy 平面的投影,见图8。

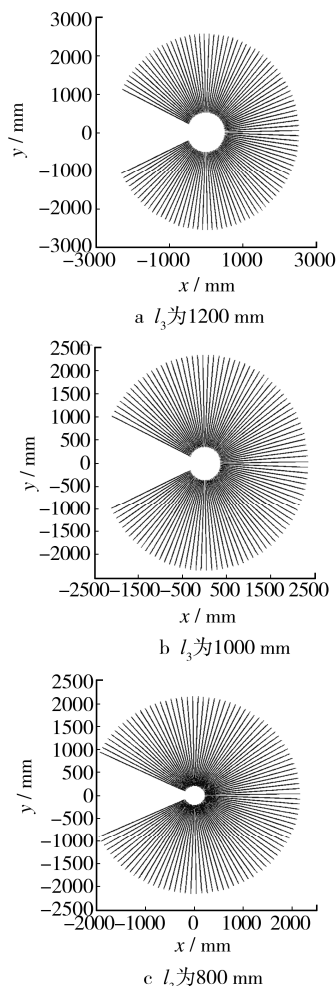


图8 杆长 l_3 改变前后 xOy 平面图的对比
Fig.8 The comparison of xOy plane before and after changing l_3 length

4 θ_3 变化范围

θ_3 的取值范围越大,码垛机器人的工作空间就越

大。为了避免法兰盘上货物的边缘与机器人的大臂干扰, θ_3 的最大值会变小,因此这里只研究 θ_3 的最大值减小对工作空间的影响。令 θ_3 的取值范围为 $20^\circ \sim 140^\circ$ 和 $20^\circ \sim 160^\circ$,则可得到 θ_3 取值范围不同的对比,见图9。

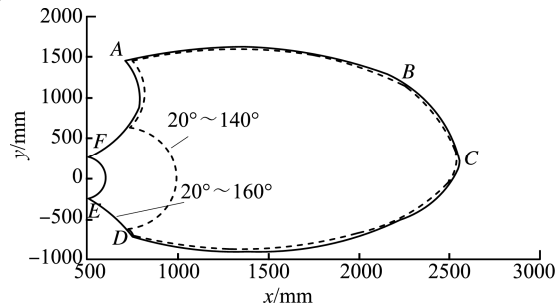


图9 θ_3 为 $20^\circ \sim 140^\circ$ 和 $20^\circ \sim 160^\circ$ 时的 xOz 平面图
Fig.9 xOz plane when θ_3 is between $20^\circ \sim 140^\circ$ and $20^\circ \sim 160^\circ$

使用相同的处理方法得到 θ_3 为 $20^\circ \sim 140^\circ$ 和 $20^\circ \sim 130^\circ$ 的对比图,变化和图9相同,由图9可得, θ_3 的最大值减小,即取值范围减小时工作空间的 xOz 平面变化为 DE 段、 EF 段、 AF 段向内凹,随着 θ_3 取值范围的减小,码垛机器人工作空间体积减小。得到 θ_3 变化前后的工作空间在 xOy 平面的投影图,见图10。

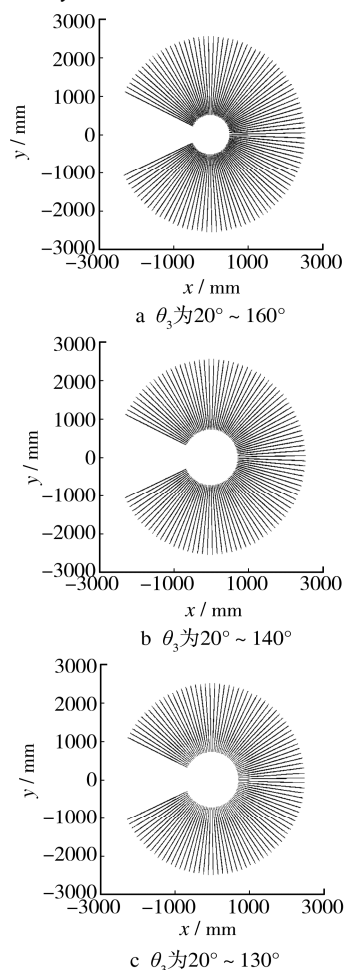


图10 θ_3 改变前后 xOy 平面图的对比
Fig.10 The comparison of xOy plane before and after changing θ_3

5 结语

对码垛机器人的结构进行了简化,并用 D-H 法对该机器人进行了运动学建模,获得了机器人末端的运动学方程,通过 Matlab 得到了机器人的 xOy 和 xOz 的工作空间范围,使用 AutoCAD 得到了同一连杆取不同参数时的边界对比图,并分析了连杆参数的变化对工作空间的影响。最后得到的分析结果为以后的机器人连杆参数设计和运动控制奠定了基础。

参考文献:

- [1] 付铁, 李金泉, 杨向东, 等. 新型码垛机械手的动态载荷计算与选型[J]. 北京理工大学学报, 2008, 28(1): 24—26.
FU Tie, LI Jin-quan, YANG Xiang-dong, et al. Dynamic Computation and Type-Selection Design of Palletizing Manipulator[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2008, 28(1): 24—26.
- [2] 杨延栋, 管会生. 码垛机器人运动学与动力学仿真[J]. 起重运输机械, 2013(1): 60—63.
YANG Yan-dong, GUAN Hui-sheng. Perform Kinematics and Dynamics Simulations for the Palletizing Robot[J]. Hoisting and Convey Machinery, 2013(1): 60—63.
- [3] GB/T 12642—90, 工业机器人性能规范[S].
GB/T 12642—90, Industrial Robots Performance Criteria[S].
- [4] DENAVIT J, HARTENBERG R S. A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanisms Based on Matrices[J]. Journal of Applied Mechanics, 1995(2): 210—225.
- [5] 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
CAI Zi-xing. Robotics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [6] 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. Kinematics Simulation of Palletizing Robot[J]. Machinery, 2015(1): 62—66.
- [7] 刑玉明. 码垛机器人的动态特性分析[D]. 天津: 天津大学, 2009.
XING Yu-ming. Dynamic Characteristics Analysis of Palletizing Robot[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [8] 臧庆凯, 李春贵, 闫向磊. 基于 Matlab 的 PUMA560 机器人运动仿真研究[J]. 广西科学院学报, 2010, 26(4): 397—400.
ZANG Qing-kai, LI Chun-gui, YAN Xiang-lei. Study on the Simulation of PUMA560 Robot Motion Based on Matlab[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2010, 26(4): 397—400.
- [9] 张明, 何庆中, 郭帅. 酒箱码垛机器人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.
- [10] 张进伟. 四自由度平面关节型机器人结构分析与优化[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
ZHANG Jin-wei. Analysis and Optimization of the Structure of 4-DOF SCARA Robot[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [11] 田海波, 马宏涛, 魏娟. 串联机器人机械臂工作空间与结构参数研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(4): 196—201.
TIAN Hai-bo, MA Hong-tao, WEI Juan. Workspace and Structural Parameters Analysis for Manipulator of Serial Robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2013, 44(4): 196—201.
- [12] CAO Y, AI S P, LU K, et al. Shape and Size Computation of Planar Robot Workspace[C]// WRI Word Congress on Computer Science and Information Engineering, 2009.
- [13] DUAN B L, SHI L P, LI J Q. Analysis on the Influence of Structure Parameters on Workspace of a Novel Palletizing Robot[C]// 2011 Second International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 2011.
- [14] 刘浩, 韩晶. Matlab R2014a 完全自学一本通[D]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
LIU Hao, HAN Jing. Completely Self a Pass of Matlab R2014a[D]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [15] 朱素霞. IRB660 型码垛机器人的运动学与动力学分析[D]. 北京: 北京邮电大学, 2013.
ZHU Su-xia. Kinematics and Dynamics Analysis on IRB600 Robot Palletizer[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2013.