

# 基于 SolidWorks 与 ADAMS 的工业机器人动力学仿真

贾磊<sup>1</sup>, 朱彦齐<sup>2</sup>

(1.黄河水利职业技术学院, 河南 开封 475004; 2.开封技师学院, 河南 开封 475004)

**摘要:** **目的** 工业码垛机器人因其负载大、自动化程度高等优点, 被广泛应用于食品、药品、化肥等生产线中, 但是机器人动力学模型的建立较为困难, 为了得到码垛机器人设计参数, 运用 SolidWorks 与 Matlab 联合仿真。**方法** 通过 SolidWorks 建立码垛机器人实体模型, 并将其导入到 ADAMS 中, 在仿真软件中通过设置具体参数, 得到机器人动力学仿真模型。**结果** 通过 SolidWorks 与 ADAMS 的结合仿真, 可以大大缩短设计周期, 有效地获得码垛机器人的动力学特性参数。**结论** 运用 SolidWorks 与 Matlab 联合仿真, 可以形象直观地模拟机器人的三维运动情况, 并获取其动力学特性参数。

**关键词:** 码垛机器人; 动力学模型; SolidWorks; ADAMS; 仿真

中图分类号: TP242 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2020)03-0207-04

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2020.03.032

## Dynamic Simulation of Industrial Robot Based on SolidWorks and ADAMS

JIA Lei<sup>1</sup>, ZHU Yan-qi<sup>2</sup>

(1.Yellow River Conservancy Technical Institute, Kaifeng 475004, China;

2.Kaifeng Technician College, Kaifeng 475004, China)

**ABSTRACT:** The industrial palletizing robot is widely used in food, medicine, chemical fertilizer and other production lines because of its large load and high automation. However, it is hard to set up the dynamic model of the robot. This paper aims to get the design parameters of the palletizing robot through joint simulation with SolidWork and Matlab. A solid model of palletizing robot was built with SolidWorks and then imported into ADAMS. Specific parameters were set in the simulation software to obtain the dynamics simulation model of the robot. The combination of SolidWorks and ADAMS can greatly shorten the design cycle and effectively obtain the dynamic parameters of the palletizing robot. The joint simulation with SolidWorks and Matlab can directly simulate the three-dimensional motion of the robot and obtain its dynamic parameters.

**KEY WORDS:** palletizing robot; dynamic model; SolidWorks; ADAMS; simulation

码垛机器人是机械与计算机技术相结合而生成的一种高度自动化设备, 因其具有生产效率高、节省工作空间等优点, 在包装、农业、化工等领域被广泛应用<sup>[1-5]</sup>。

随着现代化水平的不断提高, 企业的发展呈现出生产规模化, 这就要求码垛机器人不断提高其工作能力, 促使其正朝着高速、重载、低成本、高精度的方向发展。目前, 国外码垛作业绝大多数是由机器人来

完成的, 且国外码垛机器人占有码垛市场已超过 90%, 性能指标也已达到较高水平<sup>[6-10]</sup>。与国外机器人相比, 我国码垛机器人在定位精度、载荷能力以及控制器处理速度等方面存在很大差距。高性能、成本低的码垛机器人, 将具有广阔的市场前景。

对于机械系统进行虚拟动力学分析时, 传统方法是通过 Matlab 仿真软件得到机器人的位移、速度以及加速度等曲线, 但其在几何建模和控制系统设计上

收稿日期: 2019-04-30

作者简介: 贾磊 (1975—), 男, 硕士, 黄河水利职业技术学院副教授, 主要研究方向为自动化控制、机电一体化技术应用。

存在缺陷。文中将设计的四自由度关节型码垛机器人作为研究对象,利用 SolidWorks 软件建立码垛机器人三维空间模型,由 SolidWorks 和 ADAMS 软件接口将简化后的码垛机器人模型导入到 ADAMS 中,进而完成码垛机器人的动力学仿真,并由此得到机器人按照所设定的速度、加速度预定轨迹运行时的动力学特性参数,为后续的机器人轨迹规划、运动控制等提供理论基础。

### 1 机器人运动学模型

在码垛机器人各连杆中建立 D-H 坐标系,并利用坐标变换得到相邻 2 个连杆的坐标变换矩阵  $T_n^{n-1}$  :

$$T_n^{n-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_n & -\sin \theta_n \cos \alpha_n & -\sin \theta_n \sin \alpha_n & q_n \cos \theta_n \\ \sin \theta_n & \cos \theta_n \cos \alpha_n & \cos \theta_n \sin \alpha_n & q_n \sin \theta_n \\ 0 & \sin \alpha_n & \cos \alpha_n & d_n \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中:  $q_n$  和  $\alpha_n$  分别为机器人连杆的长度、扭角;  $\theta_n$  为相邻 2 个连杆之间的夹角;将连杆的坐标变换相乘便可得到基座坐标变换矩阵:

$$T_3^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 = T_1^0(\theta_1) T_2^1(\theta_2) T_3^2(\theta_3) \quad (2)$$

由式(1)可知,如果得到  $T_1^0, T_2^1, T_3^2$ , 便可得到码垛机器人末端抓手相对于底座的相对坐标变换:

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & 0 & \sin \theta_1 & 0 \\ \sin \theta_1 & 0 & -\cos \theta_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & l_2 \cos \theta_2 \\ \sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & l_2 \sin \theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & l_3 \cos \theta_3 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & l_3 \sin \theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

可得变换矩阵  $T_3^0$  :

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_1 c_2 c_3 - c_1 s_2 s_3 & -c_1 s_2 c_3 - c_1 c_2 s_3 & s_1 & l_2 c_1 c_2 + l_3 c_1 c_2 c_3 - l_3 c_1 s_2 s_3 \\ s_1 c_2 c_3 - s_1 s_2 s_3 & -s_1 s_2 c_3 - s_1 c_2 s_3 & -c_1 & l_2 s_1 c_2 + l_3 s_1 c_2 c_3 - l_3 s_1 s_2 s_3 \\ s_2 c_3 + c_2 s_3 & c_2 c_3 & 0 & l_1 + l_2 s_2 + l_3 s_2 c_3 + l_3 c_2 s_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $s_i$  表示  $\sin \theta_i$ ,  $c_i$  表示  $\cos \theta_i$ ,  $i=1, 2, 3, 4$ 。机器人连杆参数见表 1。

表 1 码垛机器人 D-H 参数  
Tab.1 D-H parameters of palletizing robot

连杆 $i$	变量 $\theta_i / (^\circ)$	连杆扭角 $\alpha_{i-1} / (^\circ)$	连杆长度 $L_{i-1} / \text{mm}$
1	$\theta_1$	-90	$l_1=150$
2	$\theta_2$	0	$l_2=500$
3	$\theta_3$	0	$l_3=360$
4	$\theta_4$	90	$l_4=90$

### 2 机器人 SolidWorks 模型建立

SolidWorks 是一款三维机械设计软件,具有丰富的 Windows 操作界面,继承和完善了大型机械设计软件 CAD。由于 SolidWorks 具有特征的图形生成特点以及继承了 CAD 的大部分功能,由此可以参考 CAD 原理,可以根据需要进行二次开发。SolidWorks 的这些特有的优点与其他三维软件相比,在二次开发中具有更高的优势,因此在公司机械设备的设计上以及高校实验室中都被广泛使用<sup>[10-16]</sup>。设计的码垛机器人拥有 4 个自由度,主要由底座、腰臂、大臂、小臂以及腕部等结构组成。为了方便后续仿真模块的分析,需要对三维模型进行简化处理:以各关节为分界点对机器人装配体进行分割处理,将各节点间零部件组成与之对应的子装配体;合理分配机器人本体上的零件以及各子装配体之间的关系;为了方便数据、图像等的分析处理,需要设置一个合理的世界坐标系与装配体坐标系之间的相对坐标系。

首先启动 SolidWorks 软件,并通过软件建立一个新的工作空间,然后选择“文件”、“打开”,在打开的文件中选取“Add-In (\*.dll)”类型,然后将已经设置的参数化模块建模并插入程序“参数化建模”,见图 1。

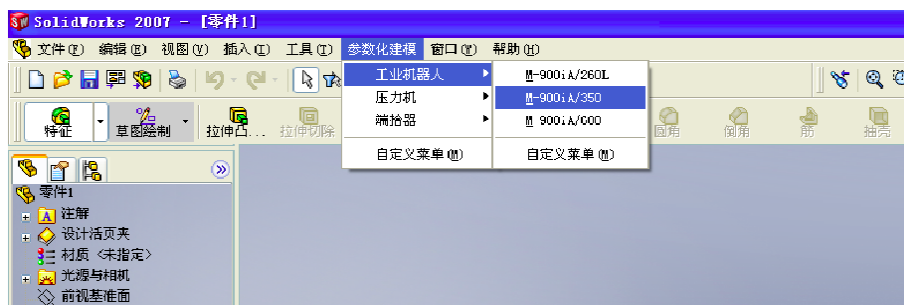


图 1 参数化建模  
Fig.1 Parametric modeling

为了后续数据处理，将机器人模型进行简化处理，将机器人本体上的零件进行简化处理，然后将简化后的各轴模型按照实际装配图在 SolidWorks 环境中进行合理装配。装配后的机器人各关节活动范围需要跟简化前一致，简化装配后的机器人模型见图 2。利用 SolidWorks 装配软件中的“Motion”模块进行运动仿真分析，经过仿真得到简化后的机器人各关节运动范围同简化后的关节运动范围一致。

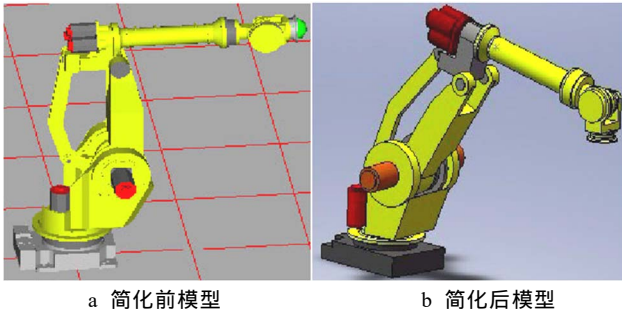


图 2 简化前后模型对比

Fig.2 Model comparison before and after simplification

### 3 仿真分析

为模拟码垛机器人作业过程中负载的变化，在模型中添加负载。其变化为：在 0~1, 1.0~3.0 s 负载为 0~1000 N，表示机器人抓取物体进行码放的过程，方向为竖直向下；从 3.0~5.0 s 负载为 0，表示码垛机器人完成物体的码放，回到初始位置的过程。负载变化采用 Step 函数，其变化函数关系式为：

$$\text{Step}(\text{time}, 0, 0, 0.5, 50) + \text{Step}(\text{time}, 0.5, 0, 1.0, 1000) + \text{Step}(\text{time}, 3.0, 0, 3.5, -1000) \quad (6)$$

第 2 部分中采用 SolidWorks 软件，完成了码垛机器人三维模型的建立。在此基础上将码垛机器人进行结构简化，删掉部分轴承、轴承端盖、螺钉等附属零部件，仅保留机器人的主要部件。将简化后的三维模型转换为 Parasolid 格式，通过接口模块将简化后的 SolidWorks 中的三维实体模型导入 ADAMS 中进行分析，建立 ADAMS 环境下的虚拟样机，得出机器人相应驱动关节的动力学的仿真曲线，见图 3 和图 4。

由图 3 可以看出，机器人在 0~0.5 s 运动到抓取物体位置，此阶段机器人末端执行器负载为 0；0.5~1.0 s 完成物体的抓取，此阶段末端执行器负载由 0 递增到 1000 N；1.0~3.0 s 机器人完成物体的位置转变，此刻腕部负载不发生变化，一直保持在 1000 N；3.0~3.5 s 完成物体的下放工作，此时负载由 1000 N 减为 0；3.5~5 s 机器人空载，返回初始位置。在机器人的整个模拟工作过程中，负载的变化与实际工作时保持一致。

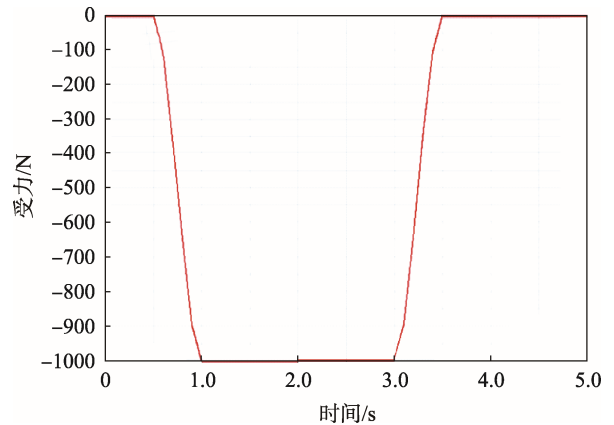


图 3 腕部负载变化曲线

Fig.3 Wrist load change curve

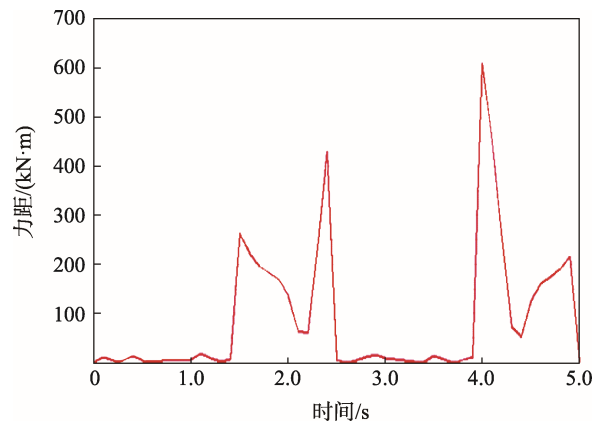


图 4 底座旋转驱动力矩曲线

Fig.4 Rotary driving torque curve of base

通过图 4，可以看出码垛机器人作业过程中各个关节所需的最大驱动力。在 1.5~2.5 s 时刻及 4.0~5.0 s 时刻，机器人处于高速旋转状态，此时所需的旋转驱动力矩较大，在图 4 中会出现凸起；在 1.5~2.5 s 时刻机器人旋转速度较慢，而在 4.0~5.0 s 时刻由于机器人是处于高速返回状态，故在 4.0~5.0 s 时刻的旋转力矩要大于 1.5~2.5 s 时的力矩。

### 4 结语

针对自动化生产线上常用的码垛机器人，按照模型简化处理原则将原有的码垛机器人三维空间模型，经过 SolidWorks 软件进行了建模装配。通过 SolidWorks 建立了码垛机器人实体模型，并将其导入到 ADAMS 中，在仿真软件中通过设置具体参数，得到了机器人动力学仿真模型。经过动力学仿真可以得到机器人的各种设计参数，从而可以合理选择各轴驱动电机，也为后续机器人轨迹规划、运动控制等提供了理论基础。

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(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(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(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(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] 贾鹤鸣, 程相勤, 张利军, 等. 基于自适应 Backstepping 的欠驱动 AUV 三维航迹跟踪控制[J]. 控制与决策, 2012, 27(5): 652—657.
- JIA He-ming, CHENG Xiang-qin, ZHANG Li-jun, et al. Three-dimensional Path Tracking Control for under Actuated AUV Based on Adaptive Backstepping[J]. Control and Decision, 2012, 27(5): 652—657.
- [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, 杨猛, 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] 彭斌, 方圆力. 运动副间隙对涡旋压缩机动力特性的影响[J]. 流体机械, 2019, 47(5): 1—6.
- PENG Bin, FANG Yuan-li. Effect of Clearance of Motion Pair on Dynamic Characteristics of Scroll Compressor[J]. Fluid Machinery, 2019, 47(5): 1—6.
- [13] 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.
- [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] 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.
- [16] 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.