

PT1300 型局部闭链式码垛机器人动力学分析

张良安¹, 单家正¹, 马寅东¹, 刘凤臣², 解安东¹, 刘黎明²

(1. 安徽工业大学 机械工程学院 安徽 马鞍山 243000; 2. 杭州娃哈哈集团研究院 浙江 杭州 310009)

摘要:码垛机器人的整机动态特性对于其负载、运行速度和稳定性具有重要意义,而动态性能提高的基础是其动力学模型的准确性。基于 D-H 法和凯恩法分别建立了 PT1300 型码垛机器人的运动学、刚体逆动力学模型,并采用基于理论动力学模型的 Matlab 方法和基于虚拟样机的 Solidworks Motion 机械仿真方法,得到码垛机器人主臂与前臂驱动力矩曲线。经对比分析,两种方法所得结果吻合,验证了动力学模型的合理性,为码垛机器人尺度参数优化以及电机参数预估提供理论依据。

关键词:码垛机器人;仿真;运动学;动力学

中图分类号:TH246;TP242.3

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2013)02-0079-06

Dynamic Analysis on PT1300 Type Palletizing Robot Containing Closed-loop

Zhang Liang'an¹, Shan Jiazheng¹, Ma Yindong¹, Liu Fengchen², Xie Andong¹, Liu Liming²

(1. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan, Anhui 243000, China;

2. Research Institute of Wahaha Group, Hangzhou, Zhejiang 310009, China)

Abstract: A palletizing robot's dynamic properties, whose improvement basis is the accuracy of dynamic model, are important for its load, speed and stability performance. In the paper, based on the D-H method and Kane method, the rigid body kinematics and inverse dynamics models of PT1300 type palletizing robot were established, and the driving torque curves of main arm and forearm were obtained by the dynamic simulation done with the virtual prototype in Solidworks Motion and theoretical model of kinematics in Matlab. Through the comparison of the two methods, their results agree with each other, verifying the reasonability of the dynamics model and providing the theory foundation for dimension synthesis and estimating the motor parameters.

Key words: palletizing robot; simulation; kinematics; dynamics

目前,国内码垛机器人方面的研究多侧重于机构设计以及运动学分析^[1-3],对码垛机器人动力学相关研究较少,而码垛机器人动力学模型的建立对其整机动态特性研究、尺度参数优化以及控制系统研究都具有重要意义。中国农业大学汤修映等^[4]和北京航空航天大学宁凤艳^[5]分别采用拉格朗日法建立了 HT120 型焊接机器人和 MJR120 型轻载线性驱动式码垛机器人动力学模型,但由于拉格朗日法涉及大量偏微分方程的推导和运算,表达形式较为复杂。而 Kane 法无需拆解闭链,避免求解拆解处约束力与力矩,降低了建模难度与计算量^[6-7]。

综上所述,国内目前对于重载码垛机器人动力学的相关研究仍不完善。因而,以天津大学、安徽工业大学联合杭州娃哈哈集团研究院共同研发的 PT1300 型码垛机器人(图 1)为研究对象,采用 Kane 法建立其刚体逆动力学模型,并使用理论推导与虚拟样机验证相结合的方法,验证该模型的准确性。

收稿日期:2012-11-06

基金项目:高档数控机床与基础制造装备科技重大专项(2011ZX04013-011)

作者简介:张良安(1981—),男,浙江杭州人,讲师,博士,主要从事工业机器人及自动化生产线方面的研究。

E-mail:robotlab@qq.com

1 码垛机器人运动学分析

1.1 机构简介

PT1300 型码垛机器人由机座、主臂、前臂、前臂驱动臂、前臂驱动连杆、水平保持连杆、水平调节三角臂、腕部安装法兰等组成,如图 2 所示。该型码垛机器人具有四个自由度,相应的四个驱动关节分别为:位于机座上可绕垂直方向旋转的腰关节,位于主臂可绕垂直于纸面方向转动的肩关节,位于前臂与肩关节旋转方向相同的肘关节,位于执行器末端可绕垂直方向旋转的腕关节。

1.2 数学模型的建立

码垛机器人可视为由旋转关节连接的开式运动链,如图 3 所示。因此,可采用 D-H(Denavit-Hartenberg)法确定每个关节的参考坐标系,进而确立相邻坐标系之间的变换关系。



图 1 PT1300 型码垛机器人样机图

Fig. 1 Prototype of PT1300 palletizing robot



图 2 码垛机器人虚拟样机图

Fig. 2 Virtual prototyping model of the palletizing robot

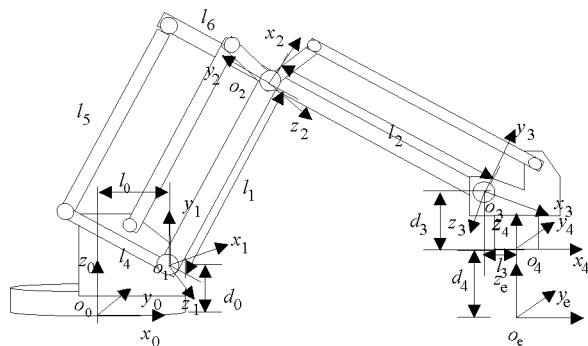


图 3 码垛机器人连杆坐标系示意图

Fig. 3 Link-pole coordinate system schematic diagram of the palletizing robot

1.3 正运动学问题

正运动学问题指已知各运动副的运动参数和杆件的结构参数,求末端执行器相对于参考坐标系的位置和姿态。由 D-H法可知,相邻坐标系变换矩阵 A 以及基坐标系与机器人末端坐标系之间的变换关系:

$${}^0T_e = {}^0A_1 \times {}^1A_2 \times {}^2A_3 \times {}^3A_4 \times {}^4A_e \quad (1)$$

代入杆件参数,得出基坐标系与末端执行器坐标系之间的变换矩阵:

$$T_e = \begin{bmatrix} c_{1+4} & -s_{1+4} & 0 & c_1(l_3 + l_2c_{2+3} + l_1c_2 + l_0) \\ s_{1+4} & c_{1+4} & 0 & s_1(l_3 + l_2c_{2+3} + l_1c_2 + l_0) \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 - d_4 + l_2s_{2+3} + l_1s_2 + d_0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $\sin \theta_i = s_i, \cos \theta_i = c_i, \cos(\theta_i + \theta_j) = c_{ij}, \sin(\theta_i + \theta_j) = s_{ij}, l_i$ —杆件 i 的长度, d_i —坐标系 O_i 与 O_{i+1}

之间 x 轴方向的距离; $i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, 3, 4$ 。

由于码垛机器人姿态支链的作用,使得基准坐标系到末端坐标系仅围绕竖直方向旋转,故变换矩阵又可写成:

$$\mathbf{T}_e = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & x \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可以得出该型码垛机器人的运动学正解矩阵:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_1(l_3 + l_2 c_{2+3} + l_1 c_2 + l_0) \\ s_1(l_3 + l_2 c_{2+3} + l_1 c_2 + l_0) \\ -d_3 - d_4 + l_2 s_{2+3} + l_1 s_2 + d_0 \\ \theta_1 + \theta_4 \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.4 逆运动学问题

所谓逆运动学即已知末端位置和姿态,求解各个运动副的运动参数。对于该型码垛机器人,即求解各个关节的转角变量。逆运动学问题是机器人轨迹规划和运动控制的重要依据。由式(4)反解,并依据机器人的装配样式以及除去不合理的解,可得:

$$\begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \\ \theta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \arctan 2(y, x) \\ 2\arctan 2(d + \sqrt{c^2 + d^2 - g^2}, c - g) \\ 2\arctan 2(f - \sqrt{f^2 + e^2 - h^2}, e - h) - \theta_2 \\ \theta - \theta_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中: $a = \sqrt{x^2 + y^2} - l_0 - l_3$; $b = z - d_0 + d_3 + d_4$; $c = 2al_1$; $d = 2bl_1$; $e = 2al_2$; $f = 2bl_2$; $h = -a^2 - b^2 + l_1^2 - l_2^2$ 。

2 动力学分析

动力学特性指机器人各个关节位置、关节速度、加速度与各关节驱动力矩之间的关系,亦包含正问题和逆问题。本研究采用 Kane 法建立刚体逆动力学模型^[8-11],在广义坐标系数学模型基础上,仅一步就推出最终的动力学方程。

式(6)为基于 Kane 方程的动力学算法递推公式:

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\omega}_i^i &= \mathbf{R}_{i-1}^i \boldsymbol{\omega}_{i-1}^{i-1} + \dot{\theta}_i \mathbf{k}_i^i \\ \boldsymbol{\omega}_{i\dot{\theta}_j}^i &= \boldsymbol{\omega}_i^i, \quad \dot{\theta}_j = 1, \dot{\theta}_j = 0 \\ \mathbf{v}_i^i &= \mathbf{R}_{i-1}^i (\boldsymbol{\omega}_{i-1}^{i-1} \times \mathbf{L}_i^{i-1} + \mathbf{v}_{i-1}^{i-1}) \\ \mathbf{v}_{c_i}^i &= \mathbf{v}_i^i + \boldsymbol{\omega}_i^i \times \mathbf{d}_{c_i}^i \\ \mathbf{v}_{c_i\dot{\theta}_j}^i &= \mathbf{v}_{c_i}^i, \quad \dot{\theta}_j = 1, \dot{\theta}_j = 0 \\ \dot{\mathbf{v}}_i^i &= \mathbf{R}_{i-1}^i (\dot{\mathbf{v}}_{i-1}^{i-1} + \boldsymbol{\omega}_{i-1}^{i-1} \times \mathbf{L}_i^{i-1} + \boldsymbol{\omega}_{i-1}^{i-1} \times (\boldsymbol{\omega}_{i-1}^{i-1} \times \mathbf{L}_i^{i-1})) \\ \dot{\mathbf{v}}_{c_i}^i &= \dot{\mathbf{v}}_i^i + \dot{\boldsymbol{\omega}}_i^i \times \mathbf{d}_{c_i}^i + \boldsymbol{\omega}_i^i \times (\boldsymbol{\omega}_i^i \times \mathbf{d}_{c_i}^i) \\ \mathbf{N}_i^i &= \mathbf{I}_i \dot{\boldsymbol{\omega}}_i^i + \boldsymbol{\omega}_i^i \times \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i^i \\ \mathbf{M}_{i\dot{\theta}_j} &= m_i \mathbf{v}_{c_i}^i \mathbf{v}_{c_i\dot{\theta}_j}^i + \mathbf{N}_i^i \boldsymbol{\omega}_{i\dot{\theta}_j}^i - \mathbf{F}_{c_i}^i \mathbf{v}_{c_i\dot{\theta}_j}^i - \mathbf{M}_{c_i}^i \boldsymbol{\omega}_{i\dot{\theta}_j}^i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中: $\boldsymbol{\omega}_i^i$ —杆 i 角速度, $\boldsymbol{\omega}_{i\dot{\theta}_j}^i$ —杆 i 角偏角速度; \mathbf{v}_i^i —杆 i 线速度, $\mathbf{v}_{c_i}^i$ —杆 i 质心线速度, $\mathbf{v}_{c_i\dot{\theta}_j}^i$ —杆 i 质心相对于 $\dot{\theta}_j$ 的偏线速度, $\dot{\mathbf{v}}_i^i$ —杆 i 加速度, $\dot{\mathbf{v}}_{c_i}^i$ —杆 i 质心加速度, $\mathbf{v}_{i\dot{\theta}_j}^i$ —杆 i 相对于 $\dot{\theta}_j$ 偏线速度; \mathbf{L}_i^{i-1} —杆 $i-1$ 坐标系原点与杆 i 坐标系原点的距离向量, $\mathbf{d}_{c_i}^i$ —杆 i 坐标系原点到杆 i 质心的距离向量; \mathbf{R}_{i-1}^i —杆 $i-1$ 坐标系原点

到杆 i 坐标系的旋转变换矩阵, k_i^i — 杆 i 坐标系的单位向量; I_i — 杆 i 的质心的惯性张量; θ_i — 杆 i 的关节变量; $M_{\dot{\theta}_j}$ — 杆 i 关节驱动力矩; N_i^i — 杆 i 的惯性力矩; $F_{c_i}^i$ — 作用在杆 i 质心上的主动力。

2.1 分解运动链

为使机器人机构模型符合 Kane 法的建模规则, 首先对其运动链进行分解。其机构简图如图 4 所示, 考虑机器人的运动特性, 在不影响动力学建模精度的前提下可忽略 θ_4, θ_5 , 将负载与末端执行器直接固定在前臂的末端, 并将机器人的闭链结构拆分成左右两条开链, 可得图 5 所示的运动链等效分解示意图。由机器人的机械机构可知: $l_2 = l_3, l_2' = l_4', \theta_4' = \theta_3$, 且两开链通过运动学正解所得的末端执行器的位姿应相同, 故得出各个关节转角之间的相互关系: $\dot{\theta}_{3'} = \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_{2'}, \dot{\theta}_{4'} = \dot{\theta}_3 = \dot{\theta}_{2'} - \dot{\theta}_2$ 。

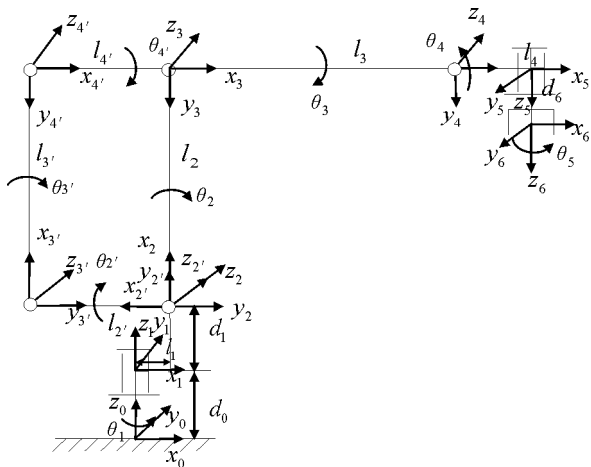


图 4 PT1300 型码垛机器人结构简图

Fig. 4 Mechanism diagram of PT1300 palletizing robot

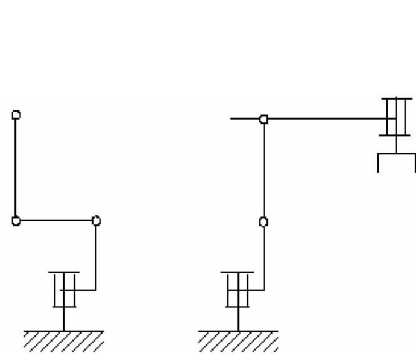


图 5 运动链等效分解示意图

Fig. 5 Equivalent open-chain schematic diagram

2.2 动力学方程

令 $\tau_i (i = 1, 2, 2')$ 表示关节 i 的驱动力矩, 得到系统的刚体逆动力学方程

$$\tau_i = \sum_{j=i} M_{ij} \dot{\theta}_j = \tau_{a_i} + \tau_{v_i} + \tau_{g_i}, j = 1, 2, 2', 3, 3', 4. \quad (7)$$

其中: $\tau_{a_i}, \tau_{v_i}, \tau_{g_i}$ 分别为关节驱动力矩中的惯性项——离心力、哥氏力和重力项。

3 算例及仿真验证

码垛机器人常用在抓放货物的场合, 故设定算例运动路径为起始点抓取物料并提升至指定高度行至终点放下, 运动路径起始点为 $[1800, 0, 800]$, 终点为 $[1800, 0, 1500]$, 采用修正梯形运动规律, 所抓取物料质量 300 kg, 运动路径如图 6 所示。分别采用基于理论动力学模型的 Matlab 程序语言及基于虚拟样机的 Solidworks Motion 机械运动仿真平台对该型码垛机器人进行动力学仿真^[12-13], 得出主臂与前臂力矩曲线, 其结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 两种方法得到的主臂与前臂力矩曲线峰值与变化趋势基本吻合, 主臂力矩峰值位于 0.12 s, 前臂力矩峰值位于 0.36 s, 验证了动力学模型的合理性。



图 6 算例运动路径示意图

Fig. 6 Simulation schematic diagram of the palletizing robot

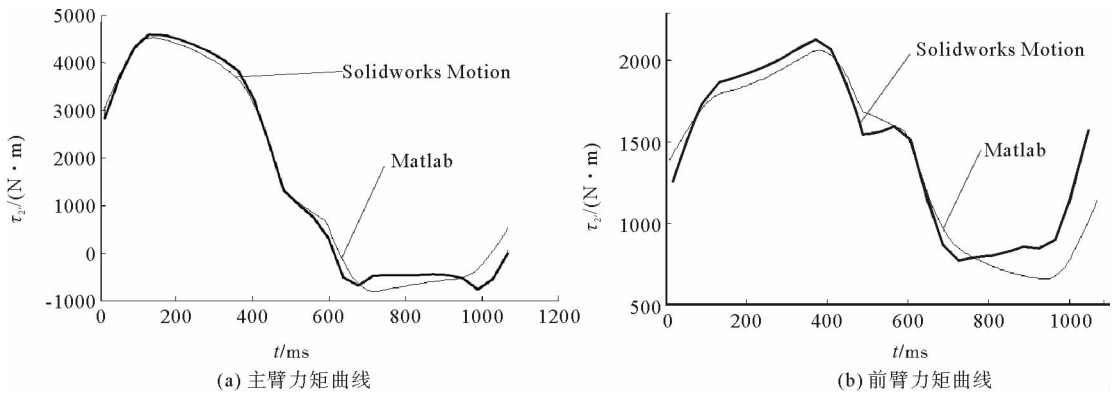


图 7 主臂与前臂力矩仿真结果图

Fig. 7 Simulation results of main arm and small forearm moment

4 结论

研究了 PT1300 重载码垛机器人的动力学问题,取得如下成果:

- 1) 采用 D-H 法推导出该型码垛机器人的正、逆运动学解;采用基于凯恩方程的动力学算法建立了其刚体逆动力学模型。
- 2) 分别通过基于理论动力学模型的 Matlab 程序语言及基于虚拟样机的 Solidworks Motion 机械运动仿真平台进行仿真分析,两种方法结果吻合,验证了动力学模型的合理性。

参考文献:

- [1] 姚猛,韩宝玲,罗庆生,等. 工业码垛机器人机构设计与运动分析[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011, 5(5): 31-34.
Yao Meng, Han Baoling, Luo Qingsheng, et al. Mechanical design and kinematic analysis of a new kind of palletizing robot [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011, 5(5): 31-34.
- [2] 李成伟, 俞超. 码垛机器人机构设计与运动学研究[J]. 机械设计与制造, 2009, 6(6): 181-183.
Li Chengwei, Yun Chao. Stacking robot kinematics design and research institutions [J]. Machinery Design & Manufacture, 2009, 6(6): 181-183.
- [3] 李传龙, 郭钢, 朱海宁. 四自由度混联码垛机器人运动学分析与仿真[J]. 中国制造业信息化, 2011, 40(23): 46-49.
Li Chuanlong, Guo Gang, Zhu Haining. Kinematics analysis and simulation of the 4-dof hybrid stacking robot [J]. Manufacturing Information Engineering of China, 2011, 40(23): 46-49.
- [4] 汤修映, 李伟, 张铁中, 等. 平行四杆机构在点焊机器人中的作用[J]. 中国农业大学学报, 2003, 8(4): 36-40.
Tang Xiuying, Li Wei, Zhang Tiezhong, et al. Effect of parallel four-bar mechanism on spot welding robot [J]. Journal of China Agricultural University, 2003, 8(4): 36-40.
- [5] 宁凤艳. 码垛机器人动力学建模与滑移模糊控制[J]. 机械设计与研究, 2010, 26(1): 44-47.
Ning Fengyan. Dynamic modeling and sliding-mode fuzzy control for robot palletizer [J]. Machine Design & Research, 2010, 26(1): 44-47.
- [6] 胡洪国, 高建华, 杨汝清. 码垛技术综述[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2006(6): 7-9.
Hu Hongguo, Gao Jianhua, Yang Ruqing. The development of palletizing technology [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2006(6): 7-9.
- [7] 胡明, 原所先, 蔡光起. 三杆并联平动机器人机构动力学[J]. 东北大学学报, 2006, 27(1): 32-36.
Hu Ming, Yuan Suoxian, Cai Guangqi. Dynamic study on three-leg parallel robot [J]. Journal of Northeastern University, 2006, 27(1): 32-36.
- [8] 冯志友, 张燕, 杨廷力, 等. 基于牛顿欧拉法的 2UPS-2RPS 并联机构逆动力学分析[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 193-197.
Feng Zhiyou, Zhang Yan, Yang Tingli, et al. Inverse dynamics of a 2UPS-2RPS parallel mechanism by Newton-Euler formu-

- lation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 193-197.
- [9] 石炜, 郝安民, 张玉宝. 基于凯恩方法的机器人动力学建模与仿真[J]. 微计算机信息, 2008, 24(29): 222.
Shi Wei, Xi Anmin, Zhang Yubao. Robot dynamics modeling and simulation based on kane[J]. Microcomputer Information, 2008, 24(29): 222.
- [10] Zhang L G, Mei J P, Zhao X M, et al. Layout analysis and path planning of a robot palletizing production line[C]//IEEE International Conference on Automation and Logistics, Sep. 1-3, 2008: 2420-2425.
- [11] 路敦民, 张立勋, 杨向东, 等. 基于 Kane 法的五杆式人机合作机器人动力学分析及仿真[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(6): 1734-1738.
Lu Dunmin, Zhang Lixun, Yang Xiangdong, et al. Dynamics analysis and simulation of five bar robot based on Kane method [J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(6): 1734-1738.
- [12] Huang T, Mei J P. A method for estimating servomotor parameters of a parallel robot for rapid pick-and-place operations [J]. ASME Journal of Mechanical Design, 2005, 127: 596-601.
- [13] 李金泉, 段冰蕾, 南倩. TH50 型码垛机器人动态静力学分析[J]. 北京科技大学学报, 2011, 33(4): 504-508.
Li Jinquan, Duan Binglei, Nan Qian. Kineto-static analysis on a TH50 type palletizing robot[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(4): 504-508.

(责任编辑: 吕文红)

“机器人与智能技术”研究专栏征稿

征稿范围:

- ◇ 机器人理论与控制技术
- ◇ 人工智能与智能控制技术
- ◇ 移动机器人及自主导航技术
- ◇ 机器人传感技术、智能传感器
- ◇ 机器视觉、图像处理与模式识别技术
- ◇ 智能系统建模与控制
- ◇ 机器人结构设计
- ◇ 多机器人系统
- ◇ 特种机器人
- ◇ 机器学习

欢迎相关领域专家、学者和工程技术人员踊跃投稿, 来稿请注明“机器人与智能技术”专栏。稿件经专家评审通过后优先发表。

投稿平台: http://xuebao.sdust.edu.cn/index_z.asp

电子邮箱: xbgjcl@126.com; zklwh@sdust.edu.cn

联系电话: 0532-86057826

山东科技大学学报(自然科学版)编辑部