

单臂 SCARA 手的动力学建模与参数辨识

赵 彬^{1,2,4}, 邹凤山^{1,3}, 刘晓帆^{1,2}, 刘振宇^{2,3}

(1.沈阳新松机器人自动化股份有限公司 辽宁 沈阳 110168 2.沈阳工业大学 信息科学与工程学院 辽宁 沈阳 110870 ;
3.中国科学院 沈阳自动化研究所 辽宁 沈阳 110016 4.东北财经大学 工商管理学院 辽宁 大连 116025)

摘 要 :针对单臂 SCARA 手臂机械结构,获取单臂高速大气机械手的动态特性对于机器人的精确运动和动力学控制有着重要的意义。首先将 SCARA 型机械手动力学分为上升、旋转和伸缩三个模块进行讨论。然后提出了其等效的运动学模型,并求出运动学的正反解,同时用拉格朗日法求出了动力学方程。最后利用参数辨识的方法求解出摩擦系数。利用了 MATLAB 机器人工具箱对机械手的运动学和动力学进行了仿真实验,通过比较整个动态转矩和电机转矩证明了算法的有效性。经过实际测试,该动力学可靠有效。

关键词 :真空机械手;参数辨识;拉格朗日;动力学

中图分类号:TH16;TP242.3 文献标识码:A 文章编号:1001-3997(2016)03-0082-04

Dynamics Modeling and Parameter Identification of Single Arm SCARA Manipulator

ZHAO Bin^{1,2,4}, ZOU Feng-shan^{1,3}, LIU Xiao-fan^{1,2}, LIU Zhen-yu^{2,3}

(1.SIASUN Robot & Automation Co., Ltd., Liaoning Shenyang 110168, China ;
2.Information Science and Engineering School, Shenyang University of Technology, Liaoning Shenyang 110870, China ;
3.Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Liaoning Shenyang 110016, China ;
4.Dongbei University of Finance and Economic, College of Business Administration, Liaoning Dalian 116025, China)

Abstract :According to mechanical structure problem of single arm SCARA manipulator, and obtaining the structure characteristics of single arm atmospheric manipulator has important significance for accurate kinematics and dynamic control. Firstly, it divides robot into three modules of rising, rotation and stretch axis. Then puts forward to the positive and negative solution of kinematics, and calculates the dynamic equation with Lagrange method. Finally, using the method of parameter identification solves coefficient of friction. Using MATLAB robot toolbox executes kinematics and dynamics simulation experiment. It compares the dynamic torque and motor torque to prove the validity of algorithm. Through the actual test, kinematics and dynamic is reliable and efficient.

Key Words :Vacuum Manipulator ;Parameter Identification ;Lagrange ;Dynamic

1 引言

SCARA 机器人在晶圆加工过程中承担着定位和传输晶圆到指定腔室两项关键任务,是 IC 装备的核心关键技术之一^[1]。因为加工晶圆的工作环境和生产加工的工序要求,机器人必须在高速的条件下保持手臂稳定持有晶圆时,避免由于加速度的原因而造成硅片的飞出损坏,从而影响作业的正常执行和生产率,导致真空设备的洁净度下降报废率增加。鉴于此,单臂 SCARA 机器人要求特别苛刻,特别是清洁度、控制精度、运动性能、稳定性和可靠性。因此,对加工晶圆传输的机械手研究其运动

学和动力学等其关键技术是对 IC 产业的蓬勃发展的重要保证。

近年来,动力学技术已经从理论阶段逐步走向应用阶段。文献^[2]提出了一种全方位轮式移动机器人的动态模型。文献^[3]提出一种基于三维运动测量系统的柔性关节模块机器人动力学模型参数辨识方法。文献^[4]以应用为例,建立了其在非惯性系下的动力学模型,并用动力学仿真软件进行了验证。文献^[5]运用牛顿-欧拉递推法对工业机器人进行了动力学分析,并建立了接近实际的六自由度工业机器人的动力学仿真模型。文献^[6]提出了一种基于动力学模型的高速轮式移动机器人漂移运动控制方法。

来稿日期:2015-09-25

基金项目:国家高技术研究发展 863 计划(2012AA041405) 沈阳市工业科技攻关项目(F12-010-2-00);

国家科技重大专项—硅片集成传输系统研发和示范应用(2014ZX02103)

作者简介:赵 彬(1987)男,辽宁沈阳人,硕士研究生,工程师,主要研究方向:机器人及自动化,视觉伺服信息处理;

刘振宇(1973)男,辽宁复县人,博士研究生,硕士生导师,副教授,主要研究方向:视觉伺服及离线编程

将单臂机械手分为三个部分 求解出了单臂 SCARA 手的运动学模型和动力学 同时利用了参数辨识的方法得到了机械手的动力学的摩擦系数。经过一系列对比试验证明 将机器人的运动学和动力学加入到 SCARA 机器人当中,可以有效的提高本身的精确度和动力控制。

2 单臂 SCARA 机器人概述

2.1 机械结构

单臂 SCARA 机械手执行的过程很像人手臂的取物和送物过程^[7] 如图 1 所示。SCARA 系列类型的机器人主要组件包括:

(1)上升轴 类似于人类的站起和蹲下,可以上升和下降到指定的高度,以便到达与目标同一高度。(2)旋转轴 类似于人类的腰部,可以转身,以便旋转到目标的大概位置。(3)伸缩轴 类似于人类的手部,可以伸缩,以便准确的定位到目标的位置。



图 1 单臂高速机械手

Fig.1 Single Arm Manipulator with High-Speed

2.2 运动学建模

单臂 SCARA 真空手坐标系分布 如图 2 所示。

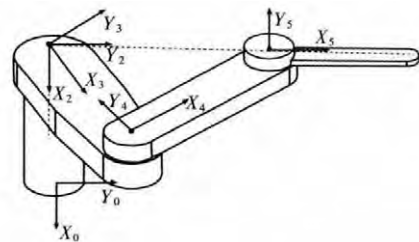


图 2 SCARA 机器杆件坐标系

Fig.2 Cartesian Coordinate System of SCARA Robot

其 MDH 参数 如表 1 所示。表中 α_{i-1} —连杆的长度,是 z_{i-1} 与 z_i 之间的公垂线 α_i —连杆的转角,是 z_{i-1} 与 z_i 之间的角度 d_i —连杆的偏距,表示 z_i 轴上两条相邻的公垂线之间的距离^[8] θ_{i-1} —关节角,使 x_{i-1} 与 x_i 相互平行绕 z 轴旋转的角度。

表 1 SCARA 机器人的 MDH 杆件坐标系
Tab.1 MDH Coordinate System of SCARA Robot

关节轴	连杆转角	连杆长度	连杆偏距	关节角
i	α_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	0°	0	d_1	$0(0^\circ)$
2	0°	0	0	$\theta_2(0^\circ)$
3	0°	0	d_3	$\theta_3(0^\circ)$
4	0°	L_3	d_4	$\theta_4(180^\circ)$
5	0°	L_4	d_5	$\theta_5(-90^\circ)$
工具	0°	L_5	0	$0(0^\circ)$

角度关系(解耦方程)

$$\begin{cases} \theta_4 = 180^\circ - 2\theta_3 \\ \theta_5 = -90^\circ + \theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

运动学正解:

$${}^0_E T = \begin{bmatrix} c_{2345} & -s_{2345} & 0 & L_3c_{23}+L_4c_{234}+L_5c_{2345} \\ s_{2345} & c_{2345} & 0 & L_3s_{23}+L_4s_{234}+L_5s_{2345} \\ 0 & 0 & 1 & d_1+d_3+d_4+d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s_2 & -c_2 & 0 & L_3(c(\theta_2+\theta_3)-c(\theta_2-\theta_3))-L_5s(\theta_2) \\ c_2 & -s_2 & 0 & L_3(s(\theta_2+\theta_3)-s(\theta_2-\theta_3))+L_5c(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & d_1+d_3+d_4+d_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

运动学反解:

$$\begin{cases} raise = p_z - d_4 - d_5 \\ \theta_2 = \arctg(-n_x/n_y) \parallel \theta_2 = 180 + \arctg(-n_x/n_y) \\ \theta_3 = \arcsin\left(\frac{-s_2 p_x + c_2 p_y}{2L_3}\right) \\ \theta_4 = 180^\circ - 2\theta_3 \\ \theta_5 = -90^\circ - \theta_3 \end{cases} \quad (3)$$

3 大气机械手的动力学建模

在控制精度和动态控制指标的要求下,传统的控制效果很差 难以满足较高的性能指标的晶圆传送需求^[9]。要实现优异的运动效果 必须对机器人本机进行动力学分析。鉴于此,引入动力学的控制是一条有效的途径。采用力矩前馈控制(动力学前馈补偿)法,可有效的改善机器人的性能^[10]。

在大气机械手传送晶圆的工作过程中,升降运动、旋转运动和水平伸缩运动都是单独进行运动的,也就是说其中一个运动模块运动时,其它模块是保持不运动的。运用拉格朗日动力学将上升、旋转和伸缩进行了动力学的三个部分解耦,可以有效的简化动力学方程的复杂度^[9-10]。下面将从三个方面来分别计算动力学的方程。

3.1 升降轴动力学

升降轴运动:当单臂 SCARA 机器人进行升降运动时,旋转和伸缩是不运动的。一般来说对于升降轴,使用式(4)计算动力学:

$$\tau = m_1 \ddot{h} + m_1 g + c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + v \dot{\theta} \quad (4)$$

式中 $c \operatorname{sgn}(\dot{\theta})$ —库伦摩擦力,与速度方向相关 $v \dot{\theta}$ —粘性摩擦力;
 c, v —对应的摩擦系数 τ —升降关节电机提供的扭矩。由上述可以得到公式:

$$\tau_1 = (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5) \ddot{d}_1 + (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5) g \quad (5)$$

经过与 Matlab 工具箱验证,这个结论是正确的。

3.2 旋转轴动力学

一般来说对于旋转轴,使用如下式(6)计算动力学:

$$\tau = M_i \ddot{\theta} + c \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) + v \dot{\theta} \quad (6)$$

描述,其中 c 包含静摩擦力和克服真空隔离装置的摩擦系数 τ 为旋转关节电机提供的扭矩。由上述可以得到结论式(7):

$$\tau_2 = (I_{2z} + I_{3z} + I_{4z} + I_{5z}) \ddot{\theta}_2 + \left(m_2 l_{m_2}^2 + m_3 l_{m_3}^2 + m_4 l_{m_4}^2 + m_5 l_{m_5}^2 - 2m_4 l_{m_4} l_{m_5} c(2\theta_3) \right) \ddot{\theta}_2 \quad (7)$$

3.3 伸缩轴动力学

新松自主研发的真空机械手水平连杆的上半部三个关节中只有一个主动关节,即关节3。其余连杆关节为皮带轮传动的从动关节,其传送的角度比为 $\theta_3, \theta_4, \theta_5=1:-2:1$ 。根据水平连杆 l_3 和 l_4 的对称性和关节的运动特点,可以有效简化动力学方程。若坐标系原点在连杆的端点,且位于在轴的中部(高度),使 y 轴、 z 轴都对称成为对角阵,将连杆的惯性张量用式(8)表示。

$$I_{ij} = \begin{bmatrix} I_{ix} & 0 & 0 \\ 0 & I_{iy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{iz} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将拉格朗日动力学表达式以矩阵的形式表示,如式(9)所示。可以得到真空机械手各个关节的扭矩。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) = \tau \quad (9)$$

$M \in R^{n \times n}$ 关节空间惯性力项(对称、正定);

$C \in R^{n \times n}$ 耦合力项,包括向心力和(哥氏力)科里奥利力;

$G \in R^{n \times 1}$ 重力项;

$\tau \in R^{n \times 1}$ 力矩向量;

从物理意义上来讲是重力不影响真空机械手的水平运动,所以 $G(\theta)$ 为0。其余参数表示如下:关节空间惯性力项 M 的总体表达式:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} m_{33} & m_{34} & m_{35} \\ m_{43} & m_{44} & m_{45} \\ m_{53} & m_{54} & m_{55} \end{bmatrix} \quad (10)$$

向心力和(哥氏力)科里奥利力 C 的总体表达式:

$$C = \begin{bmatrix} c_{33} & c_{34} & c_{35} \\ c_{43} & c_{44} & c_{45} \\ c_{53} & c_{54} & c_{55} \end{bmatrix} \quad (11)$$

鉴于此,可以求得各个关节力矩为:

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_3 \\ \tau_4 \\ \tau_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{31} & m_{32} & m_{33} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} \\ m_{51} & m_{52} & m_{53} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_3 \\ \ddot{\theta}_4 \\ \ddot{\theta}_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{31} & c_{32} & c_{33} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_3 \\ \dot{\theta}_4 \\ \dot{\theta}_5 \end{bmatrix} \quad (12)$$

4 摩擦力矩辨识

在实际应用中,即使洁净度够高,但是摩擦力仍然是一种不可忽略的力,所有机构都必然受到摩擦力的影响。所以将摩擦力模型附加到动力学中,可以得到一个完美模型,如式(13):

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G(\theta) + F(\theta, \dot{\theta}) \quad (13)$$

其中,摩擦力可分解为滑动摩擦(与速度方向有关)和粘性摩擦(与速度成比例)。

$$T = F_v \dot{q} + F_s \operatorname{sgn}(\dot{q}) \quad (14)$$

采用摩擦辨识的方法。也就是采用最小二乘法对摩擦力矩曲线做拟合。利用 LUST 软件获取不同速度下驱动器的各个参数值,包含位置、速度、力矩等。采集不同速度下的码盘值、速度值、力矩值,如图3所示。通过从驱动器获取的力矩与 Matlab 仿真出来的动力学力矩之间的差值,很容易得到摩擦力矩。

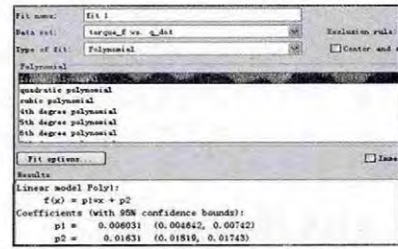


图3 最小二乘法求解摩擦力矩系数示意图
Fig.3 Least Squares Method Solves the Coefficient of Friction Torque Diagram

5 实验结果及分析

5.1 计算值和工具箱值对比实验

动力学计算值与工具箱值对比曲线,如图4所示。实验采用文中描述的算法对履带上采集的工件图像序列进行分析。

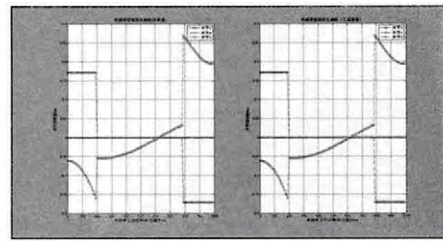


图4 动力学计算值与工具箱值对比曲线

Fig.4 Contrast Curve Based on Dynamics Calculation and Tools Value

5.2 动力学对比实验

上升轴、旋转轴及伸缩轴跟踪差示意图,如图5~图7所示。加入速度前馈与没加入前馈的曲线相似,可以近似看作一条曲线。效果实验结论如下:

(1)跟踪差平稳时间缩短:在加速过程中,加入动力学比没加入动力学,从开始到跟踪差平稳时间缩短到64.7%,如表2所示。

表2 跟踪差平稳时间对比

Tab.2 Contrast Time Curve Based on Tracking Difference

轴	跟踪差平稳时间	动力学跟踪差平稳时间
上升轴	336ms	240ms
旋转轴	320ms	160ms
伸缩轴	176ms	144ms

(2)减速时间:上升轴:未加入动力学时间496ms,加入动力学时间288ms,如图5所示。旋转轴:未加入动力学时间400ms,加入动力学时间144ms,如图6所示。伸缩轴:未加入动力学时间304ms,加入动力学时间144ms,如图7所示。

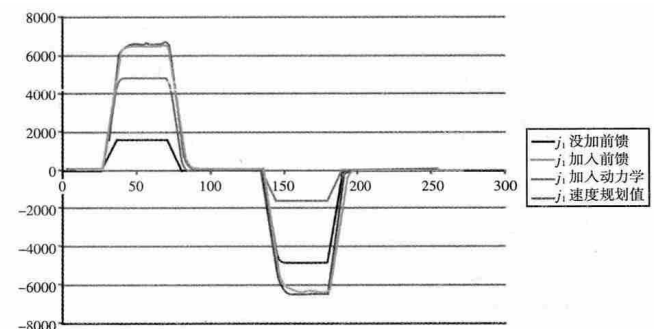


图5 上升轴跟踪差示意图

Fig.5 Rising Axis Tracking Difference Diagram

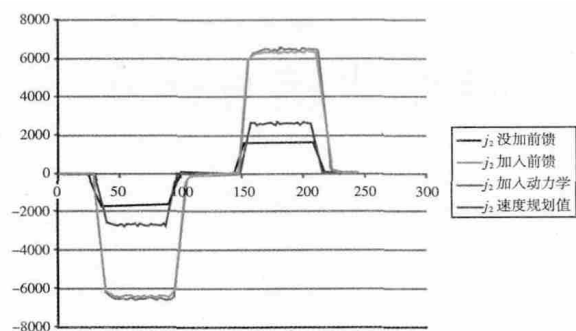


图6 旋转轴跟踪差示意图

Fig.6 Rotation Axis Tracking Difference Diagram

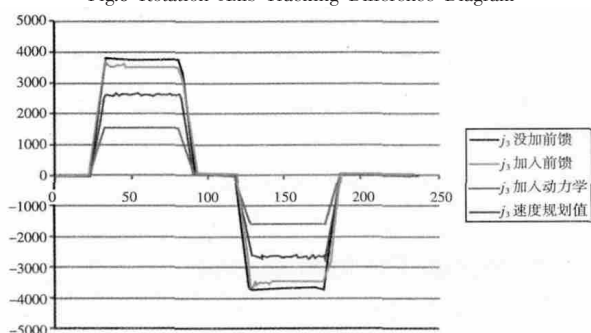


图7 伸缩轴跟踪差示意图

Fig.7 Stretch Axis Tracking Difference Diagram

(3)跟踪差减少 在跟踪差上 加入动力学比没加入动力学,跟踪差减小较为明显 控制效果更为理想。

(4)归于平稳时间 从图上看也快了許多。

(5)加入动力学的跟踪差曲线与速度规划曲线趋势一直 而且 RC 速度规划曲线速度归零时 加入动力学的跟踪差曲线也会归零。

6 结论

针对单臂 SCARA 机械手平稳快速运行的问题 将其运动学和动力学技术应用到该机器人当中去。同时采用力矩前馈控制(动力学前馈补偿)法 对机械手的动力学进行了仿真求解。然后 利用参数辨识的方法 从驱动器采集来的力矩曲线 对摩擦力曲线进行最小二乘法的曲线拟合 最终求得摩擦力矩系数。实验表明 动力学补偿可以有效的抑制波动 降低位置跟踪误差。

参考文献

[1]刘振宇 赵彬 朱海波.六自由度机械臂分拣系统仿真平台研究[J].机

械设计与制造 2013(2) 210-213.

(Liu Zhen-yu Zhao Bin Zhu Hai-bo.Sorting experimental platform research on Six-DOF manipulator[J].Machinery Design & Manufacture , 2013(2) 210-213.)

[2] Williams R.L. Carter B.E. Gallina Paolo.Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots [J].IEEE Transactions on Robotics and Automation 2002 ,18(3) 285-293.

[3]周军 余跃庆.考虑关节柔性的模块机器人动力学参数辨识[J].机器人 2011 ,33(4) 400-448.

(Zhou Jun ,Yu Yue-qing.Dynamic parameter identification of modular robot with flexible joints[J].Robot 2011 ,33(4) 400-448.)

[4]耿明超 赵铁石 赵飞.非惯性系下弹性欠驱动机器人动力学建模及应用[J].中国机械工程 2014 25(15) 2080-2085.

(Geng Ming-chao Zhao Tie-shi Zhao Fei.Dynamics model of elastic underactuated robot in a non-inertial frame and its application [J]. Mechanical Engineering 2014 25(15) 2080-2085.)

[5]王航 祁行行 姚建涛.工业机器人动力学建模与联合仿真[J].制造业自动化 2014 36(9) 73-76.

(Wang Hang Qi Hang -hang Yao Jian -tao.Dynamic analysis and coordinated simulation of industrial robot[J].Manufacturing Automation , 2014 36(9) 73-76.)

[6]赵磊 王鸿鹏 董良.一种基于动力学模型的高速轮式移动机器人漂移运动控制方法[J].机器人 2014 36(9) 73-76.

(Zhao Lei Wang Hong-peng Dong Liang.A dynamic model of the wheeled mobile robot based drift motion control method[J].Robot 2014 36(9) 73-76.)

[7] Gautier M. Janot A. Vandanjon P.-O.A new closed-loop output error method for parameter identification of robot dynamics[J].IEEE Transactions on Control Systems Technology ,2013 21(2) 428-444.

[8] Haneda A. Okada K. Inaba M.Interpreter based interactive robot simulator to realize dynamics effects caused by robot kinematic actions [C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation ,2008 : 994-999.

[9] Nandy S. Shome S.N. Chakraborty G. Kumar C.S..A modular approach to detailed dynamic formulation and control of wheeled mobile robot [C]. 2011 International Conference on Mechatronics and Automation 2011 : 1471-1478.

[10] Jaeoh Lee Seongik Han Jangmyung Lee.Decoupled dynamic control for pitch and roll axes of the unicycle robot [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics 2012 60(9) 3814-3822.

(上接第 81 页)

[6] Fuglsang P ,Madsen H A.Optimization method for wind turbine rotors[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics ,1999 80(1): 191-206.

[7] Xudong W ,Shen W Z ,Zhu W J.Shape optimization of wind turbine blades [J].Wind Energy 2009 ,12(8) 781-803.

[8] 韩中合 贾亚雷 李恒凡.风力机分离式尾缘襟翼气动性能[J].农业工程学报 2014 30(20) 58-64.

(Han Zhong-he Jia Ya-lei Li Heng -fan.Aerodynamic performance of discrete trailing edge flaps of wind turbine airfoil [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE) ,

2014 30(20) 58-64.)

[9] 毕长飞.风力机叶片气动载荷的优化研究[J].机械设计与制造 2014 (10) 130-132.

(Bi Chang-fei.Research on Optimization of aerodynamic loads of wind turbine blade[J].Machinery Design & Manufacture 2014(10) 130-132.)

[10] Hand M M Simms D A Fingersh L.J.Unsteady Aerodynamics Experiment Phase VI :Wind Tunnel Test Configurations and Available Data Campaigns[R].Colorado :National Renewable Energy Laboratory 2001.

[11] Somers D M.Design and Experimental Results of S809 Airfoils[R].Colorado :National Renewable Energy Laboratory ,1989.