

基于 SIMULINK 的灌装臂动力学分析

赵加洋, 石秀东, 薛兵财, 张丹静, 梁小龙

(江南大学, 无锡 214122)

摘要: 根据拉格朗日方程, 建立了灌装机械臂的动力学方程, 再通过 MATLAB/Simulink 仿真计算了各关节的力矩曲线。由分析结果可知, 选用的驱动装置满足使用要求。建立了灌装臂的三维实体模型, 导入 ADAMS 中进行了动力学仿真分析。仿真结果表明, 理论分析结果正确可靠, 可为灌装机械臂的设计提供理论依据。

关键词: 灌装; 机械手; 动力学仿真

中图分类号: TB486⁺.0 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2013)05-0056-04

Dynamics Analysis of Filling Manipulator Based on Simulink

ZHAO Jia-yang, SHI Xiu-dong, XUE Bing-cai, ZHANG Dan-jing, LIANG Xiao-long

(Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: According to the Lagrange equation, the dynamics equation of filling manipulator was established. Then each joint's torque curve was obtained by MATLAB/Simulink. The analysis results showed that the drive devices meet the requirements. Three-dimensional model of the filling manipulator was established by 3D software, and then dynamics simulation analysis was implemented in the ADAMS. Comparing the two kinds of results, it is concluded that the results of theoretical analysis was correct and reliable. The purpose was to provide a theoretical basis for filling manipulator design.

Key words: filling; manipulator; dynamics simulation

直线式灌装机广泛应用于食品、医药和化工等领域, 灌装机械臂是直线式灌装机的关键部件, 其主要功能是带动灌装头实时跟随灌装瓶灌装。灌装机械臂的稳定性和运动精度, 是决定灌装机性能的主要因素^[1-2]。灌装臂的动力特性直接影响灌装头的运动精度、电机功率消耗、负载特性以及使用寿命, 因此, 对灌装机械臂的动力特性进行分析显得尤为重要。

在机器人领域, 动力学分析不仅是机器人操作机设计和动态性能分析的基础, 还是机器人控制器设计、动态仿真的基础。对于机械臂动力学, 国内外学者都进行了一定的研究。李宏强、底剑豪采用 D-H 法建立运动学模型的平面三自由度旋转关节操作臂, 应用牛顿-欧拉方程对其动力学进行研究^[3]; 夏链、肖传清等人基于 ADAMS 对多连杆机械式压力机的动力学进行分析研究^[4]; 宗晓萍、李月月基于 ADAMS 和 MATLAB 对机械臂控制进行分析研究^[5]; 潘博、于登云等人对大型空间机械臂动力学进行分析研究^[6]。对于灌装

机械臂动态性能的研究很少, 文中正是针对灌装机械臂, 研究和分析其动态特性, 对灌装机控制器的设计具有十分重要的现实意义。

1 灌装机械臂动力学分析

1.1 灌装机械臂模型

灌装机械手的机构示意图 1, 该机构主要包括

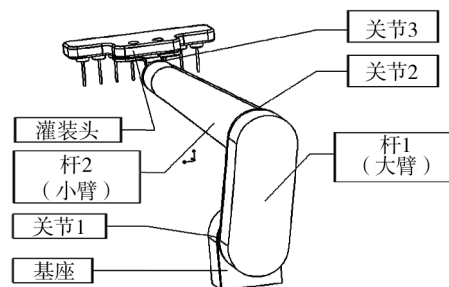


图 1 灌装机械臂三维模型

Fig. 1 Three-dimensional model of filling manipulator

收稿日期: 2013-01-03

作者简介: 赵加洋(1987-), 男, 江苏宿迁人, 江南大学硕士生, 主攻装备动态设计。

基座、大臂、小臂、灌装头、电机 1(位于关节 1 处)、电机 2(位于关节 2 处)以及电机 3(位于关节 3 处)。电机参数见表 1,在电机 1 和电机 2 均安装了 1:50 减速比的减速器。

表 1 电机参数

Tab. 1 Motor parameters

项目	额定功率 /W	最大扭矩 /(N·m)	额定扭矩 /(N·m)	质量 /kg
电机 1	200	1.9	0.64	1.6
电机 2	100	0.95	0.32	0.86
电机 3	100	0.95	0.32	0.86

1.2 灌装机械臂运动特性

灌装头运动轨迹见图 2,灌装机械臂带动灌装头

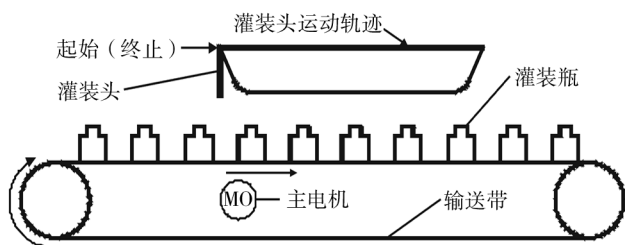


图 2 灌装头运动轨迹

Fig. 2 Movement path of filling head

沿图 2 中的轨迹运动,且灌装头始终保持垂直状态。将从起始位置运动到终止位置的过程作为一个周期,一个周期完成的动作主要包括加速至与输送带同步、灌装头插入瓶口、同步灌装、灌装头拔出瓶口、减速并回程等工序。根据灌装头运动轨迹,再利用几何解析方法可得到各关节的运动参数。

1.3 灌装机械臂动力学微分方程

研究的 3R 机械手,其中 2 个关节的电机作为驱动电机,另一个关节的电机只需维持杆的平衡,不需要驱动杆转动,因此需要提供的力矩很小,故将模型简化为 2R 机械手进行数学建模。简化后的模型见图 3,取 2 杆的角位移 θ_1, θ_2 为广义坐标,杆 1 的长为 L_1 ,杆 2 的长度为 L_2 , m_0 为杆 3 和杆 2 末端电机的质量之和, m_2 为杆 2 的质量, m_1 为杆 1 末端的驱动元件质量, m_{11} 为杆 1 的质量。

拉格朗日方程是分析力学的核心,其表达式如式

(1):

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial E_K}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial E_K}{\partial q_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = F_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

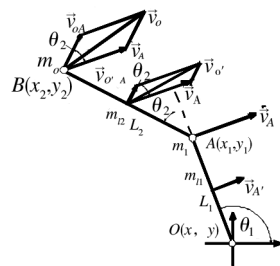


图 3 两自由度机器人手臂

Fig. 3 Manipulator of 2 DOF

式中: E_K 为系统的动能; E_p 为系统的势能; q_i 为广义坐标; F_i 为广义力; n 为系统的广义力坐标数。以拉格朗日方程为基础,经推导可得到灌装机械手的动力学微分方程组:

$$\begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{111} & D_{122} \\ D_{211} & D_{222} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1^2 \\ \dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{112} & D_{121} \\ D_{212} & D_{221} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中各个系数具有一定的物理意义: D_{ii} 称为关节 i 的有效惯量,因为关节 i 的加速度 $\ddot{\theta}_i$ 将在关节 i 上产生一个等于 $D_{ii}\ddot{\theta}_i$ 的惯性力矩; D_{ij} 称为关节 i 和 j 间的耦合惯量,因为关节 i 或 j 的加速度 $\ddot{\theta}_i$ 或 $\ddot{\theta}_j$ 将在关节 j 或 i 上分别产生一个等于 $D_{ij}\ddot{\theta}_i$ 或 $D_{ij}\ddot{\theta}_j$ 的惯性力矩; $D_{ij}\dot{\theta}_j^2$ 项是由于关节 j 的速度 $\dot{\theta}_j$ 在关节 i 处引起的向心力; $(D_{ijk}\dot{\theta}_j\dot{\theta}_k + D_{ikj}\dot{\theta}_k\dot{\theta}_j)$ 组合项是由于关节 j 和 k 处的速度 $\dot{\theta}_j$ 和 $\dot{\theta}_k$ 引起的作用于关节 i 处的科氏力; D_i 表示关节 i 处的重力影响项。

上面所有的系数均为广义坐标 θ_1 和 θ_2 的函数,同时也与杆的质量、杆端的集中质量以及 2 杆的长度有关。在机械手的参数-质量和臂长确定之后,若要是机械手实现给定运动规律 $\theta_1(t)$ 和 $\theta_2(t)$,则可由方程(2)求出需要施加于关节 A, B 处的控制力矩 $M_1(t)$ 和 $M_2(t)$ 。

2 灌装机械臂动力学分析

Simulink 是用于 MATLAB 下建立系统框图和仿

真的环境。它可以把一系列模块连接起来,构成复杂的系统模块,用于计算机仿真。在 Simulink 中建立的系统模型很直观,且不容易出错,这使它成为仿真领域首选的计算机环境。

根据式(2),在 Simulink 中建立系统的仿真模型,见图4。其中,杆1的长度 L_1 和杆2的长度 L_2 均为 260 mm,杆1的质量 m_1 和杆2的质量 m_2 分别为 4.2 kg 和 2.7 kg,杆1的末端负载质量 m_1 (关节2处驱动

电机及减速器的质量)为 1.2kg,杆2末端负载质量 m_0 (主要为灌装头及关节3处驱动电机的质量)为1.8 kg。

图4中,out1输出端为 θ_1 的角位移曲线,out2输出端为 θ_2 的角位移曲线,out3输出端为杆1的长度 L_1 ,out4输出端为杆2的长度 L_1 ,Subsystem 为求解角位移的子系统,见图5。

在 Simulink 仿真完成后,可得到各关节所需驱动

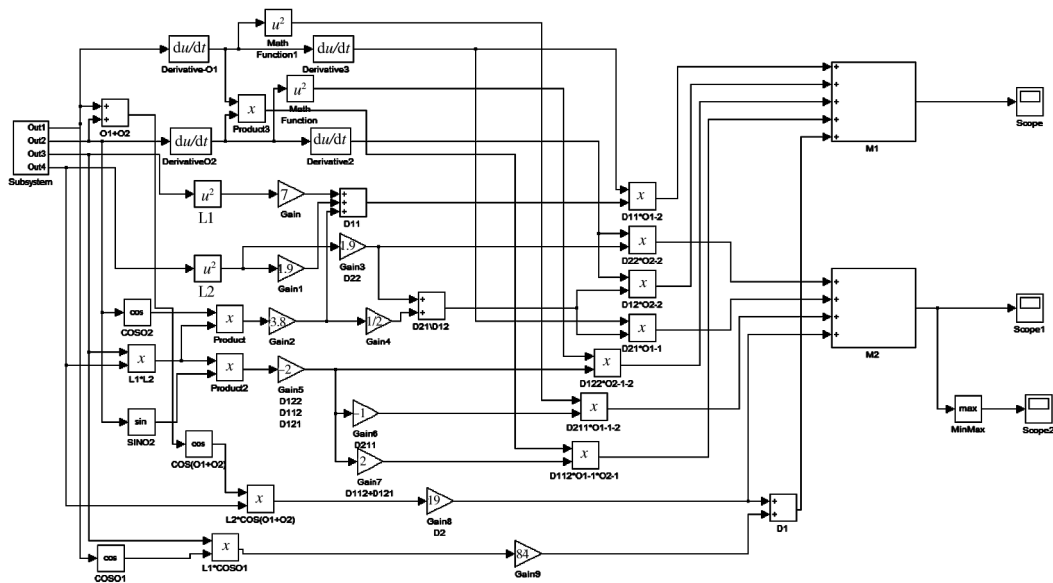


图4 主程序框图

Fig.4 Block diagram of main program

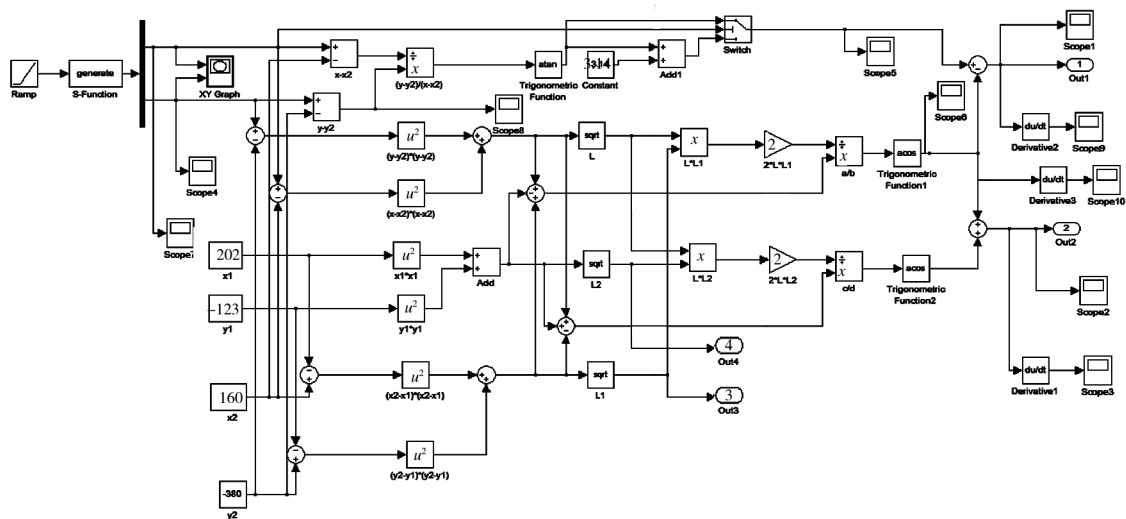


图5 子程序框图

Fig.5 Block diagram of subsystem program

力矩曲线,见图6。

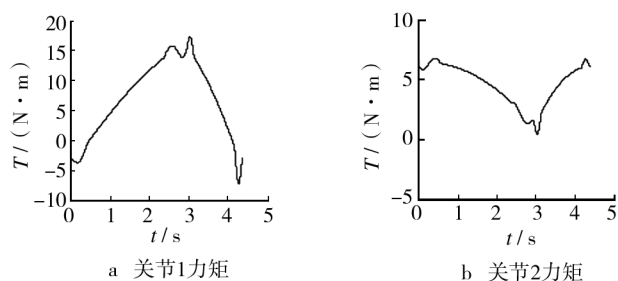


图6 各个关节力矩计算结果

Fig. 6 Torque of each joints

从图6可以得到,a中扭矩的最大值为 $18.1 \text{ N} \cdot \text{m}$,关节1处驱动装置所能提供的驱动力矩为 $32 \text{ N} \cdot \text{m}$;图b中扭矩的最大值为 $7.1 \text{ N} \cdot \text{m}$,关节2处驱动装置所能提供的驱动力矩为 $16 \text{ N} \cdot \text{m}$,因此可以确定选择的电机符合要求。曲线变化均匀,不存在突变,说明运动是可以实现的。

3 实体建模仿真分析

根据电机外型尺寸与灌装机械臂安装要求,在Pro/E中建立了灌装机械手的三维实体模型。多体动力学分析软件ADAMS提供了CAD模型数据接口来导入CAD软件的模型,将Pro/E中建立的模型保存为Parasolid格式,即可导入到ADAMS中进行动力学分析。

在ADAMS/View中添加运动副、约束、驱动,并设置各零件的质量信息,该机构在ADAMS中设置完成后的虚拟样机见图7。动力学仿真完成后,在后处理

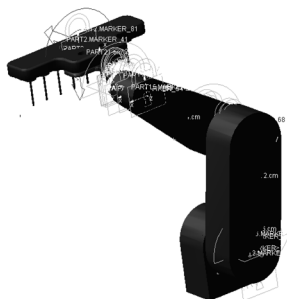


图7 灌装机构的虚拟样机

Fig. 7 Virtual prototype of the filling machine

模块(Post-process 模块)中得到各关节所需的驱动力矩,然后通过绘图软件绘出各个关节的力矩曲线,见图8。

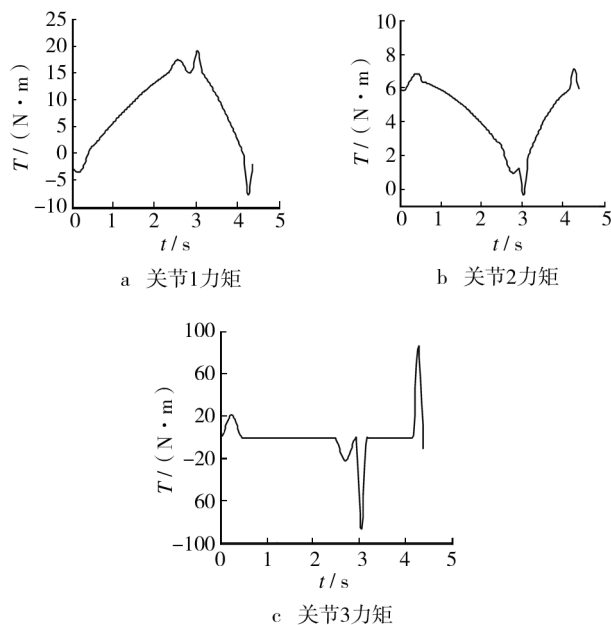


图8 各个关节力矩仿真结果

Fig. 8 Torque of each joints by simulation

对比图6和8可知,关节1和2曲线的变化趋势基本吻合,但是各个时刻的数值不同。其原因是:数学建模时,将灌装臂近似地认为是匀质杆件,且认为质量集中于质心,这样的假设导致数学建模计算结果与实体建模计算结果存在差值,但是两者相差很小。由此可见,数学建模分析的结果是正确的。图8c中,关节3的最大力矩小于 $0.1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ($100 \text{ N} \cdot \text{mm}$),可见关节3处需要的驱动力矩很小,与之前分析吻合。

4 结论

利用拉格朗日方程,建立灌装机械臂的动力学方程,并进行仿真计算,计算结果表明:所选驱动装置满足使用要求,每个关节的力矩连续变化,运动可实现。建立了三维实体模型,并导入ADAMS进行动力学分析,分析结果表明,数学建模分析结果正确可靠。研究结果对灌装机械臂的设计具有一定的参考意义。

参考文献:

- [1] 杨忠. 基于PLC的电子灌装计量系统设计[J]. 包装工程, 2011, 32(17): 87-90.
YANG Zhong. Design of PLC-based Electronic Measurement Filling System[J]. Packaging Engineering, 2011, 32(17): 87-90.

- [10] 赵江. BOPP 烟膜的检测重点[J]. 中国包装, 2010(10): 43-45.
ZHAO Jiang. The Key Point of Detection on BOPP Tobacco Film[J]. Chinese Packaging, 2010(10): 43-45.
- [11] 张纯旺. 软盒硬包卷烟透明纸包装技术探析[C]//中国烟草学会. 中国烟草学会 2010 年学术年会论文集. 北京: 中国烟草学报, 2010.
ZHANG Chun-wang. Research on the Soft Hard Package Box of Film Packaging Technology[C]//China Tobacco Society. 2010 Annual Meeting of China Tobacco Society. Beijing: China Tobacco Journal, 2010.
- [12] 董世谦. Focke350 包装机小包透明纸起皱现象的消除[J]. 烟草科技, 2001(2): 22-23.
DONG Shi-qian. The Elimination of Focke350 Packet Film Wrinkling Phenomenon[J]. Tobacco Science and Technology, 2001(2): 22-23.
- [13] 张文, 龚建川, 刘毅. 提高 X2 小包透明纸侧封平整度[C]//中国烟草学会. 中国烟草学会 2009 年学术年会论文集. 北京: 中国烟草学报, 2009.

(上接第 49 页)

- [2] PERN F J, GLICK S H. Adhesion Strength Study of EVA Encapsulants on Glass Substrates[C]. Presented at the National Center for Photovoltaics and Solar Program Review Meeting. Denver, Colorado. March 24-26, 2003.
- [3] PERN F J, GLICK S H. Photothermal Stability of Encapsulated Si Solar Cells and Encapsulation Materials Upon Accelerated Exposures[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2000, 61: 153-188.
- [4] 江海亮, 应丽艳, 雷大喜, 等. 硅烷偶联剂对化学交联 EVA 及其性能的影响[J]. 塑料工业, 2010, 38(3): 63-

(上接第 59 页)

- [2] 贺兵. 基于虚拟样机技术的包装机械系统仿真研究[J]. 包装工程, 2008, 29(2): 47-49.
HE Bing. Simulation Study of Packaging Machine Based on Virtual Prototyping[J]. Packaging Engineering, 2008, 29(2): 47-49.
- [3] 李宏强, 底剑豪. 平面 3R 操作臂动力学分析[J]. 机械, 2011, 38(12): 47-50.
LI Hong-qiang, DI Jian-hao. Dynamics Analysis of 3R Planar Manipulator[J]. Machinery, 2011, 38(12): 47-50.
- [4] 夏铤, 肖传清, 韩江, 等. 基于 Adams 的多连杆机械式压力机动力学分析[J]. 重型机械, 2011(6): 67-70.
XIA Lian, XIAO Chuan-qing, HAN Jiang, et al. Adams-

ZHANG Wen, GONG Jian-chuan, LIU Yi. Improved X2 Packet Film Side Seal Flatness[C]//China Tobacco Society. 2009 Annual Meeting of China Tobacco Society. Beijing: China Tobacco Journal, 2009.

- [14] 王明江. GDX2 翻盖硬盒薄膜收缩装置的设计应用[J]. 烟草科技, 2006(5): 16-17.
WANG Ming-jiang. Design and Application of GDX2 Flip Hard Box Film Contraction Device[J]. Tobacco Science and Technology, 2006(5): 16-17.
- [15] 舒芳誉, 王道宽, 林志平, 等. HXD 气流干燥过程工艺气流传热分析[J]. 烟草科技, 2006(3): 5-8.
SHU Fang-yu, WANG Dao-kuan, LIN Zhi-ping, et al. Analysis of HXD Pneumatic Drying Process Flow Heat Transfer[J]. Tobacco Science and Technology, 2006(3): 5-8.
- [16] 姜怀业. 双通道超高速条烟提升机的设计与应用[J]. 烟草科技, 2012(4): 25-27.
JIANG Huai-ye. Design and Application of Double Channel High Speed Package Lifting Machine[J]. Tobacco Science and Technology, 2012(4): 25-27.

66.

- [5] RADHAKRISHNAN C K, SUJITH A, UNNIKRISHNAN G, et al. Effects of the Blend Ratio and Crosslinking Systems on the Curing Behaviour, Morphology, and Mechanical Properties of Styrene-butadiene Rubber/poly(ethylene-co-vinylacetate) Blends[J]. J Appl Polym Sci, 2004, 94: 827-837.
- [6] 李连春. 太阳能用耐老化 EVA 封装胶膜的制备、结构与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2005.
- [7] 余鹏, 李伟博, 唐舫成, 汪加胜. 太阳能电池封装材料研究进展[J]. 广州化工, 2011(3): 34-36.

based Analysis of Dynamics for Multi-link Mechanical Press[J]. Heavy Machinery, 2011(6): 67-70.

- [5] 宗晓萍, 李月月. 基于 ADAMS 和 MATLAB 的机械臂控制仿真[J]. 微计算机信息, 2009, 35: 29-30.
ZONG Xiao-ping, LI Yue-yue. The Two Degrees of Freedom Manipulator Control Simulation Based on ADAMS and MATLAB[J]. Microcomputer Information, 2009, 35: 29-30.
- [6] 潘博, 于登云, 孙京. 大型空间机械臂关节动力学建模与分析研究[J]. 宇航学报, 2011, 31(11): 2248-2255.
PAN Bo, YU Deng-yun, SUN Jing. Research on Dynamic Modeling and Analysis of Joint in Large Space Manipulator[J]. Journal of Astronautics, 2011, 31(11): 2248-2255.