

包装机械

伺服驱动凸轮滑块分离装置联合仿真研究

潘愈康, 王文格, 肖振乾
(湖南大学, 长沙 410082)

摘要: **目的** 研究某包装机械凸轮滑块分离装置的性能, 利用机电联合仿真方法对伺服驱动凸轮滑块分离装置系统进行有效的性能预测。**方法** 提出一种独立伺服驱动凸轮滑块分离装置机电联合仿真分析方法。建立分离装置的动力学模型, 并研究其动力学特性; 对控制系统进行分析, 建立三环控制模型, 整定控制参数; 进行 ADAMS/Matlab 联合仿真研究。**结果** 从仿真结果可知, 由于系统存在负载波动, 导致最大位置跟随误差达到 4.1709° 。对控制系统进行改进后, 最大位置跟随误差减小到 0.0440° 。系统稳态跟随误差在允许范围之内, 与仿真结果基本一致。**结论** 利用机电联合仿真方法能够对伺服驱动凸轮滑块分离装置系统进行有效的性能预测。

关键词: 伺服驱动; 分离装置; 动力学模型; 联合仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2016)17-0150-07

Electromechanical Co-simulation of Servo Drive Cam-slider Separation Device

PAN Yu-kang, WANG Wen-ge, XIAO Zhen-qian
(Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: The work aims to study the performance of the cam-slider separation device of packing machinery, and use electromechanical co-simulation method to predict the performance of the servo driven cam-slider separation device system. A electromechanical co-simulation analysis method of independent servo driven cam-slider separation device was presented. A dynamic model of the separation device was established and its dynamic characteristics were analyzed. Via analyzing the control system, the three-loop control model was established and parameters were set up. The electromechanical co-simulation model based on ADAMS/Matlab was built up. The simulation results showed that the maximum tracking error reached 4.1709° because of the system load fluctuation. According to the analysis of results, the control system was improved, and the maximum position tracking error was reduced to 0.0440° . The experimental results showed that the system steady-state error was within the allowable range, and the results were basically consistent with the simulation results. In conclusion, using electromechanical co-simulation method can effectively predict the performance of the servo driven cam-slider separation device system.

KEY WORDS: servo driven; separation device; dynamic model; co-simulation

伺服驱动已广泛应用于机器人、航空航天、精密机床等领域, 其不仅能够简化机械传动链, 还能提高系统的控制精度。在传统的研发过程中, 伺服

驱动系统大多遵循“设计→制造→测试→修改设计→制造”的流程, 研发周期长且效率低, “需要多学科知识”和“在设计阶段进行性能预测并改进

收稿日期: 2016-03-01

基金项目: 国家自然科学基金(51275162)

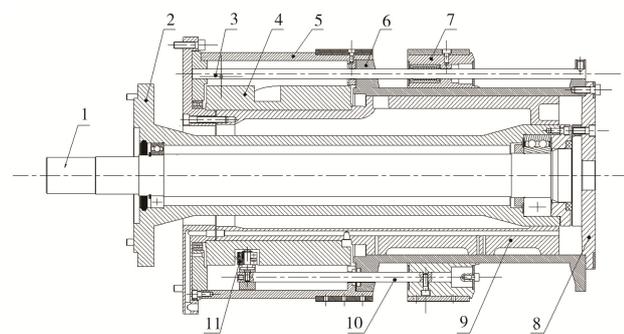
作者简介: 潘愈康(1991—), 男, 湖南娄底人, 湖南大学硕士生, 主攻方向为机电一体化。

通讯作者: 王文格(1966—), 男, 湖南华容人, 博士, 湖南大学教授, 主要研究方向为机电控制、运动控制、烟草机械。

设计缺陷”是伺服驱动系统研发过程中亟需解决的 2 个问题^[1-2]。目前，在对机电系统进行研究时，国内外学者大多着重考虑系统电控部分或者机械部分，文献[3]采用联合仿真的方式得到了 AUV 发动机关键部件的运动曲线、受力情况和关键部件之间的间隙对运动与受力的影响，并指出了间隙上限^[3]，但是缺少对电控方面的研究。文献[4]运用遗传算法整定系统的 PID 参数，而机械系统则是简化为一个数学模型^[4]。相比于只着重考虑机电系统的控制部分或者机械部分而将另一方面简化的研究方式，机电联合仿真能够在统一模型下模拟机械部分的负载特性和控制部分的控制效果^[2]，既能提高设计效率，又能对系统进行准确的性能预测。文中以某包装机械的伺服驱动凸轮滑块分离装置为研究对象，提出一种机电联合建模仿真分析方法，对该系统进行仿真分析和性能预测，为机电系统的研发和优化提供理论参考。

1 凸轮滑块分离装置介绍

凸轮滑块分离装置的作用是接收经过二次分切后的双倍长产品，通过轮体旋转将产品分离出一段距离，以便在下一道工序中进行调头操作。分离装置的基本结构见图 1。



1.主轴 2.轴承座 3.导杆 4.圆柱凸轮 5.左轮体 6.右轮体 7.滑块 8.法兰 9.配气座 10.推杆 11.滚子

图 1 凸轮滑块分离装置
Fig.1 The cam-slider separation device

分离装置工作过程中，由配气座向滑块提供负压。滑块与左轮体保持在靠拢位置时，负压工作，以保证能够可靠地接收产品^[5]；随着轮体旋转，滑块由凸轮控制沿导杆进行轴向运动，将被分切的产品分离至要求的间距，完成分离动作，滑块保持在分离位置，在负压停止的同时将产品交出到下一道工序；最后在凸轮控制下，滑块沿轴向靠拢，回复

到接收产品的位置。

2 分离装置三维模型及动力学分析

分离装置采用直接伺服驱动，装置的负载特性对系统的控制精度有重要影响，文中运用 ADAMS 软件研究分离装置的负载特性。分离装置的稳态转速为 200 r/min，运动精度要求为 0.057°。根据分析可知，装置的主要负载来源于运动过程中的摩擦阻力矩和圆柱凸轮引起的阻力矩。

2.1 分离装置三维模型

分离装置通过圆柱凸轮机构实现分离运动。为使装置具有良好的综合动力学性能，行程过程无冲击^[6-9]，文中采用改进正弦加速度运动规律进行设计。如图 2 所示，圆柱凸轮基圆半径 $R_b = 110 \text{ mm}$ ，滚子半径 $R_r = 12 \text{ mm}$ ，凸轮理论曲线最低点到凸轮底面的距离为 h_0 。由文献[10]可知，圆柱凸轮的压力角 α 计算公式为：

$$\tan \alpha = \frac{1}{R_b} \times \frac{dh}{d\varphi} \tag{1}$$

理论轮廓曲线方程为：

$$\begin{cases} x_t = R_b \cos \varphi \\ y_t = R_b \sin \varphi \\ z_t = Sh + h_0 \end{cases} \tag{2}$$

$$\text{令 } L(\varphi) = \frac{R_b \varphi - \lambda R_r \sin \alpha}{R_b}$$

实际轮廓曲线方程为：

$$\begin{cases} x = R_b \cos [L(\varphi)] \\ y = R_b \sin [L(\varphi)] \\ z = h_0 + Sh + \lambda R_r \cos \alpha \end{cases} \tag{3}$$

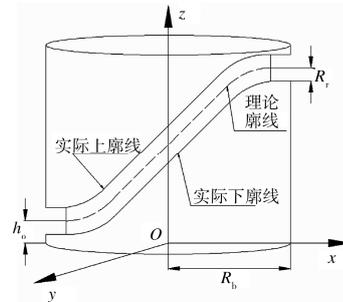


图 2 圆柱凸轮轮廓曲线
Fig.2 Cylindrical cam profile curve

式中： h 为凸轮推程， $h = 140 \text{ mm}$ ； φ 为凸轮转角，当 $\lambda = 1$ 时，所求为实际上轮廓曲线，当 $\lambda = -1$

时, 所求为实际下轮廓曲线。

由以上得到的凸轮实际轮廓方程, 运用 Matlab 和 Pro/E 软件建立圆柱凸轮和整个滑块轮式分离装置的三维模型, 见图 3。

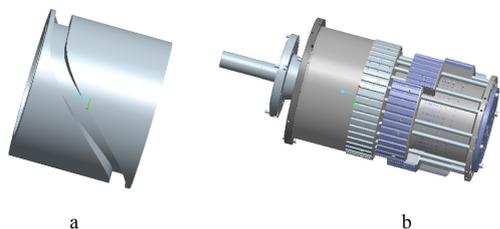


图 3 凸轮、分离装置三维模型

Fig.3 The three-dimensional models of cam and separation device

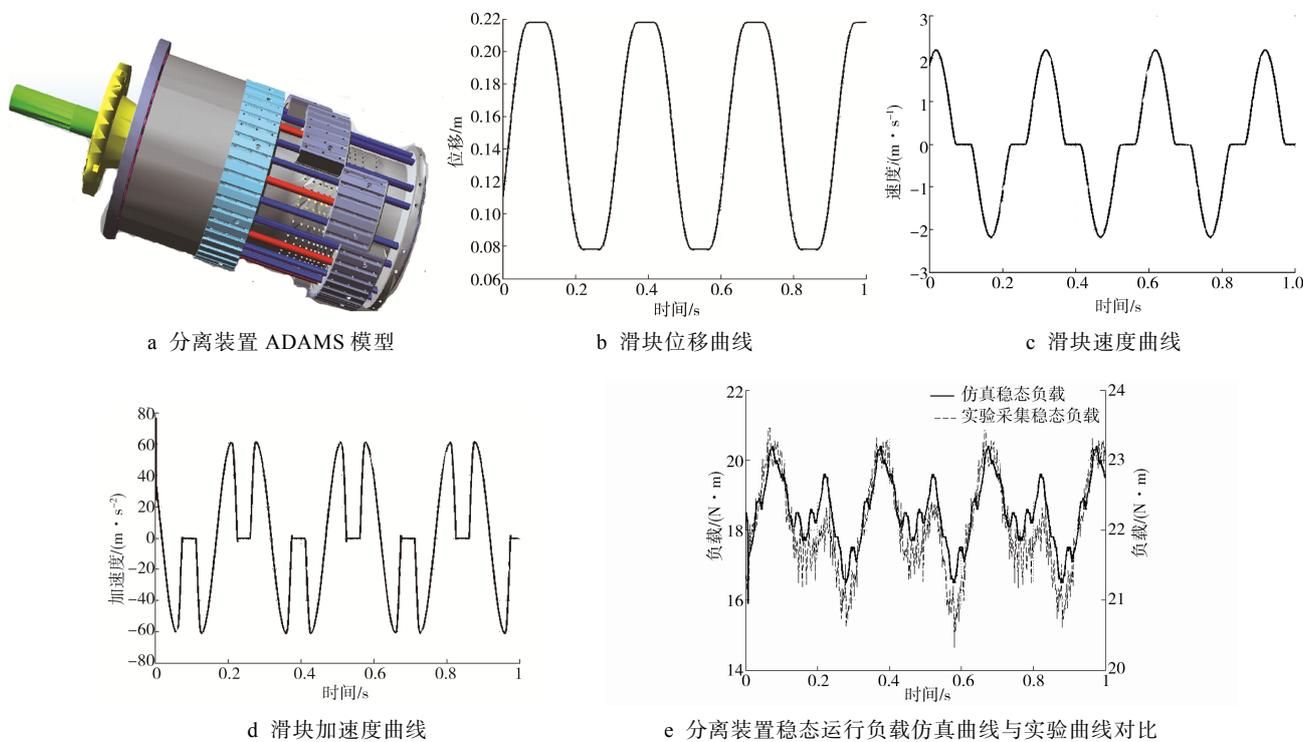


图 4 仿真结果曲线

Fig.4 The simulation result curves

载波动范围为 16.5 ~ 20.6 N·m, 而实验采集所得到的稳态运行负载变化范围为 20.3268 ~ 23.4638 N·m。经对比可知, 2 条负载曲线的波动趋势能够较好的吻合, 大小相近, 故可认为所建立的仿真模型可信度高, 可用于后续的仿真研究。

3 伺服控制系统模型建立

3.1 永磁同步电机 (PMSM) 数学模型

假设磁路不饱和, 空间磁场呈正弦分布, 不计

2.2 动力学仿真分析

分离装置三维模型在 Pro/E 中装配好后, 加载到 ADAMS 中, 对模型进行合理简化, 设定零件名称, 根据实际机构添加零件材料属性^[11], 定义运动副, 滚子中心与凸轮理论轮廓曲线之间添加点线约束, 并根据实际情况, 在旋转副和移动副上施加摩擦力。分离装置在 ADAMS 中仿真得到的滑块的位移、速度、加速度以及稳态运行状态下负载曲线见图 4。

从仿真结果可知, 分离装置上滑块的位移、速度以及加速度曲线都能够与改进正弦加速度曲线的运动规律相吻合。由于圆柱凸轮机构的存在, 分离装置在运行过程中存在负载波动, 仿真条件下负

磁滞和涡流损耗影响, PMSM 转子为圆筒形, 采用 $i_d=0$ 的矢量控制方法, 转矩与定子电流的幅值成正比, 从而实现 PMSM 解耦控制^[12]。这时, PMSM 的电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_a i_d + L_a \frac{di_d}{dt} - \omega L_a i_q \\ u_q = R_a i_q + L_a \frac{di_q}{dt} + \omega L_a i_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (4)$$

电磁转矩方程为:

$$T_e = p_n \psi_f i_q = K_t i_q \quad (5)$$

机械运动方程为：

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (6)$$

式中： u_d, u_q, i_d, i_q 分别为轴定子电压与电流分量； ω 为转子角速度； L_a 为定子绕组等效电感； R_a 为定子电阻； ψ_f 为磁链； T_L 为负载转矩； J 为转子转动惯量； p_n 为极对数； B 为转子等效阻尼系数； K_t 为力矩常数。

进行 Laplace 变换可以得到永磁同步电机的传递函数，在 Matlab/Simulink 中建立电机模型见图 5。

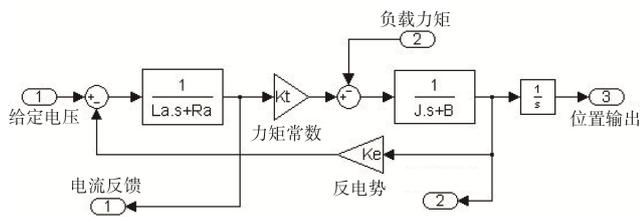


图 5 永磁同步电机传递函数模型
Fig.5 PMSM transfer function model

3.2 控制系统结构模型

分离装置采用三环控制系统，由里向外依次为电流环、速度环和位置环^[13-14]。其中，为保证较快的响应速度、消除静差，降低调节过程的复杂程度，电流环、速度环均采用 PI 调节器进行控制，而位置环不能出现超调，采用 P 调节器进行控制。对系统三环控制参数进行整定，建立的三环控制模型见图 6。

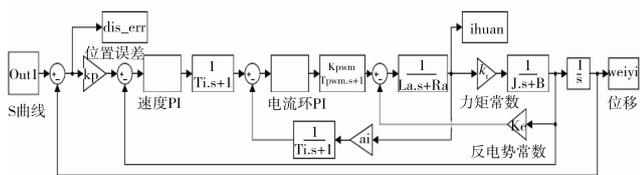


图 6 三环控制模型
Fig.6 The three-loop control model

4 分离装置 ADAMS/matlab 联合仿真

4.1 联合仿真机械子系统模块的建立

在 ADAMS 软件中定义机械模型的输入与输出变量，输入变量为驱动力矩 IN_Torque，输出变量为主轴角速度 OUT_ANG_VEL，滑块的位移 OUT_DIS、速度 OUT_VEL、加速度 OUT_ACC。在主轴上施加驱动力矩并使之参数化，运用 VARVAL（）函数从变量 IN_Torque 中实时取值，

同时将主轴角速度 OUT_ANG_VEL 的值实时输出到控制系统中进行反馈，实现 2 个子系统之间的数据交换。运用 ADAMS/Control 导出机械子模块，生成 *.m、*.cmd、*.adm 3 个文件，用于与控制系统的通讯^[15]。在 Matlab 中调用 *.m 文件，生成机械系统子模块的 SIMULINK 模型，见图 7。

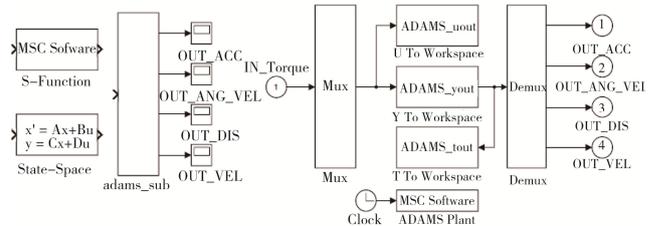


图 7 机械系统子模块
Fig.7 Mechanical system submodule

4.2 加速规律曲线设计

加速规律对系统过渡过程的误差有直接的影响。该研究设计分离装置在过渡过程中采用三次 S 型加速规律曲线，其表达式见式(7)：

$$\text{STEP}(t, \omega_0, t_1, \omega_1) = \omega_0 + (\omega_1 - \omega_0) \left(\frac{t}{t_1} \right)^2 \left(3 - 2 \frac{t}{t_1} \right) \quad (7)$$

$$0 \leq t \leq t_1$$

式中： t 为时间变量； t_1 为加速时间； ω_0 和 ω_1 分别为初始转速与目标转速。

分离装置目标转速 $\omega_1=200$ r/min，加速时间 $t_1=3$ s，初始转速 $\omega_0=0$ 。代入上式后可得加速规律曲线，在 Matlab 中积分后即控制系统位置指令。

4.3 联合仿真模型的建立

伺服驱动凸轮滑块分离装置联合仿真模型由机械系统子模块和控制系统子模块构成，其仿真控制在 Matlab 中进行。将上文所述从 ADAMS 中导出的机械系统子模块添加到 Matlab 中已完成的控制系统中，替换负载模块，完成包含机械系统的三环分离装置机电联合仿真模型的构建。联合仿真模型见图 8。

4.4 仿真结果分析

4.4.1 三环控制仿真

在 Matlab 中设置通讯时间间隔为 0.001 s，仿真时间为 6 s。通过仿真计算得到分离装置系统的相关运动数据见图 9。由图 9a 可知，滑块能够按

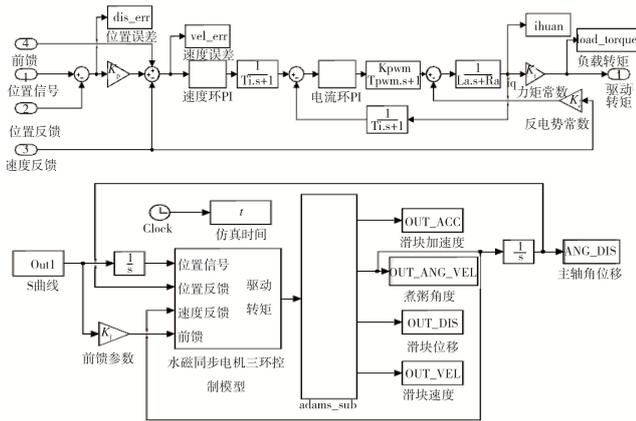


图8 联合仿真模型

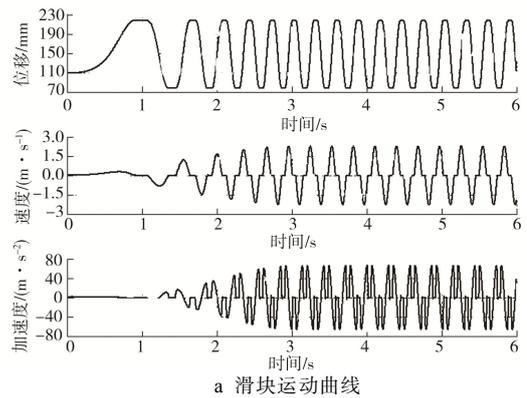
Fig.8 Electromechanical co-simulation model

照设计的改进正弦加速度运动规律进行运动,实现推程为 $h=140\text{ mm}$ 的分离运动。图 9b 为负载转矩变化曲线,从图中可以看出分离装置在加速时,负载转矩有 2 处值较大,分别在动静摩擦转换处和加速度最大处。由 Karnopp 摩擦模型可知,当旋转装置的角速度从开始增大到临界角速度并跨越临界角速度的过程中,存在从静摩擦到动摩擦的转变,从而导致负载力矩在启动阶段急剧上升,并在极短的时间内突变减小,而后随着装置加速度增大而增大。此外,由于分离装置中存在圆柱凸轮,从而导致负载力矩在加速以及稳态阶段均存在有规律的波动。图 9c 为位置跟随误差曲线,图 9d 为稳态放大图,从图中可知,位置跟随误差随着主轴转速增大而增大,并在稳态时达到最大,最大误差为 4.1709° ,远大于所要求的运动精度 0.057° ,且系统存在明显的超调,需要对控制系统进行改进。

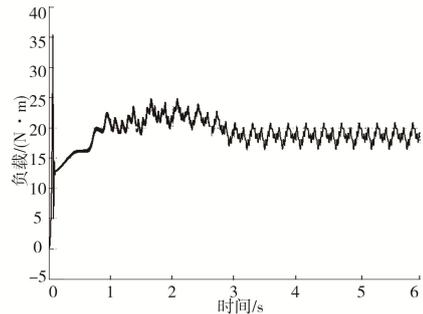
4.4.2 加入前馈控制的仿真

从上述分析可知,系统位置跟随误差较大,未达到精度要求,文中通过采用前馈控制对系统跟随性能进行改进。前馈控制是利用有关控制对象的特性来改善指令信号的响应,可以削弱由控制器调整不当带来的影响,减小超调,提高响应速度。前馈控制结构见图 10, K_f 为前馈参数。

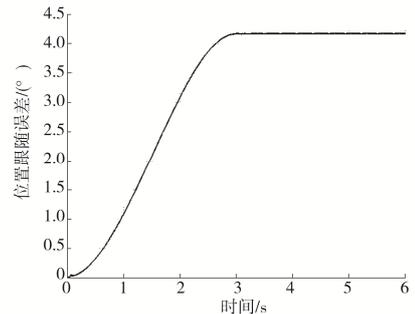
在联合仿真模型中加入速度前馈,进行仿真。图 11 为采用速度前馈控制后的位置跟随误差曲线。从图中可知,采用前馈控制后,位置跟随误差最大值出现在系统启动阶段,最大误差减小为 0.044° ,稳态误差呈现为有规律的波动,最大稳态误差为 -0.0048° 。采用前馈控制后,系统跟随性能得到显著的改善,位置跟随误差减小,在允许的误差范围之内。



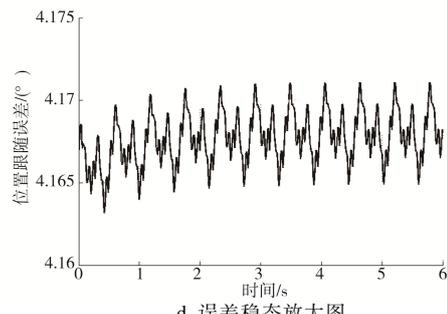
a 滑块运动曲线



b 负载转矩曲线



c 位置误差曲线



d 误差稳态放大图

图9 仿真结果

Fig.9 The simulation results

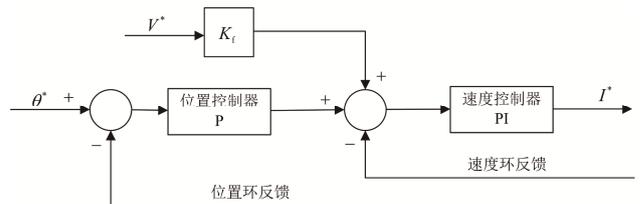


图10 速度前馈控制

Fig.10 Velocity forward feed controller

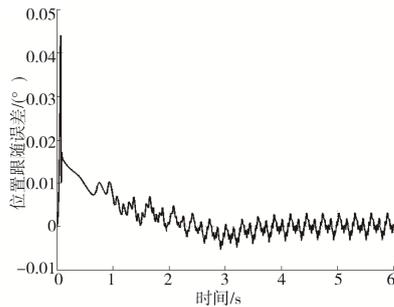


图 11 位置跟随误差

Fig.11 Position tracking error

5 实验验证

实验平台采用型号为 C1020 的 BECKHOFF 控制器作为主控制器,并通过以太网总线实现控制器与上位机之间的通讯,下接西门子运动控制系统。实验平台结构见图 12。

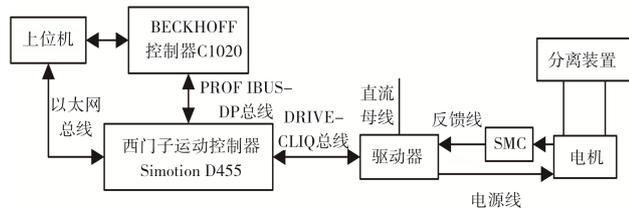


图 12 实验平台结构

Fig.12 Experimental platform structure

分离装置在实验条件下设定的转速为 200 r/min,实验采集的系统稳态位置跟随误差见图 13。

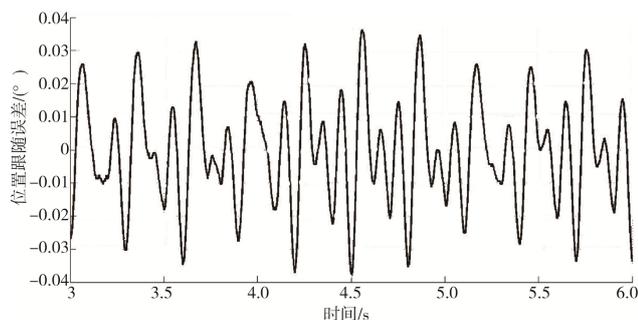


图 13 位置跟随误差

Fig.13 Position tracking error

从实验结果可知,稳态阶段的跟随误差存在有规律的波动,且波动情况与仿真得到的结果基本一致,最大稳态误差为 -0.038° ,在允许的误差范围之内。

6 结语

文中建立了基于 Matlab/ADAMS 的联合仿真模型,并进行仿真分析。仿真结果表明,凸轮滑块分离装置在运行的加速以及稳态阶段均存在较大

的负载,且负载呈周期性波动;前馈控制对系统跟随性能有显著的改善作用,采用前馈控制后,系统最大位置跟随误差得到明显的减小。通过实验验证得到系统的稳态跟随误差在允许的范围之内,且呈现与仿真结果基本一致的波动规律。文中通过联合仿真研究凸轮滑块分离装置系统,机械系统与电控系统并行设计,对系统进行了有效的性能预测,为机电系统的研发提供了理论参考。

参考文献:

- [1] ABERDEEN G. System Design: New Product Development for Mechatronics[M]. US: Boston United States, 2008.
- [2] 黑沫,张连超,廖洪波,等.机电联合建模在直驱伺服系统设计中的应用[J].光学精密工程,2014,22(9):2416—2422.
- [3] HEI Mo, ZHANG Lian-chao, LIAO Hong-bo, et al. Application of Mechatronic Modeling to Design of Direct Drive Servo System[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2416—2422.
- [4] 李斌茂,钱志博,程洪杰,等. AUV发动机的ADAMS/MATLAB联合仿真研究[J].系统仿真学报,2010,22(7):1668—1673.
- [5] LI Bin-mao, QIAN Zhi-bo, CHENG Hong-jie, et al. Co-simulation of Engine for AUV in ADAMS and MATLAB[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(7): 1668—1673.
- [6] 王靓,宁奎伟,李明辉.基于遗传算法的贮液缸液位PID控制参数整定[J].包装工程,2014,35(23):89—93.
- [7] WANG Jing, NING Kui-wei, LI Ming-hui. Tuning of PID Control Parameter for Liquid Level of Liquid Storage Cylinder Based on Genetic Algorithm[J]. Packing Engineering, 2014, 35(23): 89—93.
- [8] 刘敏,吕程,刘子建.高速滑块轮式分离系统动态分析及结构参数设计[J].机械科学与技术,2013,32(2):246—251.
- [9] LIU Min, LYU Cheng, LIU Zi-jian. Dynamic Analysis and Structural Parameter Design of the High-speed Slider-cam Separation System[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2013, 32(2): 246—251.
- [10] 罗敏,龚青山,常治斌,等.弧面凸轮铣削宏指令的开发[J].制造业自动化,2013,35(3):48—51.
- [11] LUO Min, GONG Qin-shan, CHANG Zhi-bin, et al. Developing Globoidal Cam Milling Macro Instruction[J]. Manufacturing Automation, 2013, 35(3): 48—51.
- [12] 石永刚,吴央芳.凸轮机构设计与应用创新[M].机械工业出版社,2007.
- [13] SHI Yong-gang, WU Yang-fang. Design and Application Innovation of Cam Mechanism[M]. China Machine Press, 2007.

- [8] 周奎, 王文格, 肖博. 多轴鼓轮系统同步控制机电联合仿真研究[J]. 工程设计学报, 2013, 20(5): 368—374.
ZHOU-Kui, WANG Wen-ge, XIAO Bo. Research on electromechanical Co-simulation of Multi-axis Drums System Synchronization Control[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2013, 20(5): 368—374.
- [9] 肖国伟, 李光. 柔性杆件系统虚拟样机设计及其动力学仿真分析[J]. 湖南工业大学学报, 2009, 23(4): 62—64.
XIAO Guo-wei, LI Guang. Design of Virtual Prototype for Flexible Member Systems and Its Dynamics Simulation Analysis[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2009, 23(4): 62—64.
- [10] 于爽, 付庄, 闫维新, 等. 弹载消旋平台双模控制与仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(3): 689—691.
YU Shuang, FU Zhuang, YAN Wei-xin, et al. Study on Double Model Control and Simulation for Missile-borne Eliminating Rotation Platform[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(3): 689—691.
- [11] PAULO F. A Computational Approach for Cam Size Optimization of Disc Cam-Follower Mechanisms with Translating Roller Followers[J]. Journal of Mechanisms and Robotics, 2013, 5(4): 1585—1606.
- [12] BRAVO H R, FLOCKER F W. Optimizing Cam Profiles Using the Particle Swarm Technique[J]. Journal of Mechanical Design, 2011, 133(9): 243—272.
- [13] 王宣银, 程佳. 基于相关耦合的并联四轴电动伺服平台鲁棒控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6): 117—121.
WANG Xuan-yin, CHENG Jia. Robust Control of Parallel Four-axis Electric Servo Platform Based on Relative Coupling Error[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6): 117—121.
- [14] 王靓, 宁奎伟, 李明辉. 基于遗传算法的贮液缸液位PID控制参数整定[J]. 包装工程, 2014, 35(23): 89—93.
WANG Jing, NING Kui-wei, LI Ming-hui. Tuning of PID Control Parameter for Liquid Level of Liquid Storage Cylinder Based on Genetic Algorithm[J]. Packing Engineering, 2014, 35(23): 89—93.
- [15] 刘雄心. 凸轮机构从动件等速运动规律的改进[J]. 包装工程, 2010, 31(19): 63—66.
LIU Xiong-xin. Improvement to Regular Pattern of Uniform Motion for Cam Gear Follower[J]. Packing Engineering, 2010, 31(19): 63—66.