

位置闭环黏滑特性实验方法

周武平, 袁柳斌, 任儒, 张微, 毛军红

(西安交通大学润滑理论与轴承研究所, 710049, 西安)

摘要: 提出了一种基于直线电机位置闭环伺服系统的黏滑特性实验方法. 该方法采用弹簧质量块的模型, 与传统黏滑实验设备中的参数被等效至位置闭环伺服系统控制程序中的变量不同, 可以在不改变硬件装置的前提下任意改变弹簧刚度、输入端速度等参数, 方便地实现不同刚度和运动速度时摩擦副黏滑特性的测试. 与传统黏滑实验方法相比, 此方法具有适应性好、测量精度高、成本低等优点. 利用直线电机位置闭环伺服系统, 通过仿真与实验验证分析了工作台质量、弹簧刚度、动静摩擦系数差及弹簧自由端拉伸速度等因素对黏滑现象的影响, 得到减小质量、增大弹簧刚度、减小动静摩擦系数差及增大拉伸速度等都可以抑制黏滑现象的结论, 同时也证明了此方法的可行性.

关键词: 黏滑; 摩擦; 位置伺服系统; 闭环; 直线电机

中图分类号: TH133 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2011)08-0113-05

Stick-Slip Experimental Method Based on Closed Loop Positioning System

ZHOU Wuping, YUAN Liubin, REN Ru, ZHANG Wei, MAO Junhong

(Theory of Lubrication & Bearing Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A novel stick-slip experimental method is proposed, which is equivalent to the traditional "spring-mass" stick-slip experimental device, based on closed loop linear motor positioning system. The spring stiffness and input velocity in the traditional stick-slip experimental device now are regarded as the parameters in the equivalent linear motor servo controlling system which can be easily tuned without any hardware change. Experiments are carried out on the linear motor stage to investigate the factors affecting stick-slip, such as the mover mass, spring stiffness and friction coefficient. It is found that with the decrease of mass and difference of static friction and coulomb friction, or the increase of spring stiffness and input velocity, the stick-slip gets suppressed.

Keywords: stick-slip; friction; position servo system; closed loop; linear motor

黏滑现象降低了运动系统的稳定性、快速性和精度^[1]. 通常采用弹簧-质量块等效机械设备运动副的摩擦力, 对其黏滑现象进行研究分析^[2-5], 而对于液压、气动等设备, 如气缸活塞运动, 常采用含有阻尼的弹簧-质量块进行黏滑研究^[6-8]. 当下摩擦副固定, 恒速驱动装置通过弹簧带动上摩擦副进行运

动^[3,4,6]; 当上摩擦副通过弹簧连接固定在基座上, 恒速驱动装置带动下摩擦副运动^[2,5,7]. 弹簧通常选用刚度保持值较好的片簧, 恒速驱动装置是一套性能良好的速度闭环伺服系统硬件、软件, 并由高精度位置检测装置检测运动部件的位置信息进行黏滑分析. 由于摩擦力的非线性特性, 往往需要对具有不同

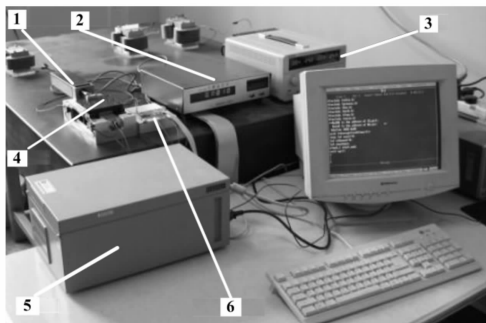
刚度和运动速度时的运动副黏滑现象进行分析和测试,这时需更换片簧和恒速驱动系统控制程序甚至硬件,使得此类设备很难进行全面的黏滑分析和测试,实验成本高,适应性差,精度低。

本文基于位置闭环伺服系统,提出了弹簧-质量块实验设备的闭环等效方法。等效系统与原弹簧-质量块系统模型完全相同,等效后,原系统中的弹簧刚度、输入端速度等都可以通程序修改,而不再需要更改相应的硬件设备,因而等效系统具有更好的适应性和精度,并降低了实验成本。

1 直线电机位置伺服系统与建模

1.1 直线电机伺服系统硬件构成

图1为实验室现有的永磁同步直线电机驱动单自由度平动工作台^[9],行程为27 mm,直线滚柱导轨导向。烧结钕铁硼永磁体构成常规永磁阵列^[10]安装于动子下侧,两相定子电枢线圈固定于基座。工作台闭环驱动系统由工控机、D/A卡PCL726、功率放大器、直线电机、光栅及GS-20A光栅数显仪、数字I/O卡PCL731、行程开关、直流稳压电源等组成,其中光栅式位移传感器的量程为100 mm,位移信号处理设备光栅数显仪的分辨率为0.5 μm 。



1:光栅; 2:光栅数显仪; 3:电源; 4:工作台;
5:工控机; 6:功率放大器

图1 直线电机驱动工作台

1.2 直线电机伺服系统数学模型的建立

电磁推力方程

$$F_e = B_\delta L_\delta I = K_f I \quad (1)$$

式中: F_e 为电磁推力; B_δ 、 L_δ 为气隙磁场感应强度和线圈切割磁力线长度,它们由电机结构决定; K_f 为力常数; I 为线圈电流。

反电势方程

$$E_a = B_\delta L_\delta \dot{x} = K_b \dot{x} \quad (2)$$

式中: E_a 为反电势; K_b 为反电势常数,其值与 K_f 相等; $\dot{x}$ 为速度。

回路电压平衡方程

$$U = E_a + I_a R + L_a \frac{dI_a}{dt} \quad (3)$$

式中: U 为回路输入电压; I_a 为回路电流; L_a 为回路电感; R 为回路电阻。

动件力平衡方程

$$m\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = F - f - F_C \quad (4)$$

式中: m 为动件质量; B 为工作台阻尼; K 为工作台刚度; x 为工作台位移; F 为电磁推力; f 为摩擦力; F_C 为载荷。

将式(1)~式(3)代入式(4),忽略电感 L_a 、载荷 F_C 和阻尼 B ,可得电机模型微分方程

$$m\ddot{x} + \frac{K_f K_b}{R} \dot{x} = \frac{K_f}{R} U - f \quad (5)$$

2 闭环等效

传统黏滑实验设备弹簧-质量块系统的微分方程为

$$m\ddot{x} = k(y - x) - f = k(v_0 t - x) - f \quad (6)$$

式中: $\ddot{x}$ 为加速度; k 为弹簧刚度; y 为输入端位移; v_0 为输入端速度; t 为时间; f 为摩擦力。

比较式(5)与式(6),令

$$k(v_0 t - x) - f = \frac{K_f}{R} U - \frac{K_f K_b}{R} \dot{x} - f$$

即

$$U = \frac{Rk(v_0 t - x)}{K_f} + K_b \dot{x} \quad (7)$$

则式(5)与式(6)将完全等价。定义 $e = v_0 t - x$ 、 $\dot{e} = (v_0 t - x)' = v_0 - \dot{x}$ 表示系统的误差和误差速率,进一步分析式(7),可得

$$U = \frac{kR}{K_f} e + (-K_b)\dot{e} + K_b v_0$$

令 $K_P = \frac{kR}{K_f}$,则弹簧的刚度由位置闭环系统的参数决定,即

$$k = \frac{K_P K_f}{R} \quad (8)$$

利用式(7),实现了“弹簧+质量块”黏滑实验装置的闭环等效。该等效模型为工作台的位置闭环PD控制(式(7)),并且 k 、 v_0 可由控制程序进行更改,而不再需要增加或更换相应系统硬件。等效系统的基本控制结构如图2所示。

4.2 弹簧刚度对黏滑的影响

实验参数取 $v_0 = 0.003 \text{ m/s}$, 得到不同弹簧刚度下的工作台位移响应曲线, 如图 6 所示。

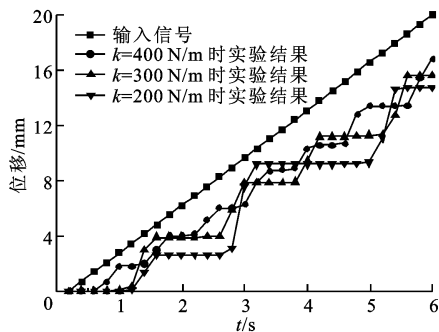


图 6 弹簧刚度 k 对黏滑影响的实验曲线

从实验结果可以看出, 随着弹簧刚度的增加, 实验曲线因黏滑现象而振动的幅度越小, 位移响应曲线与输入位移曲线越接近, 位移响应误差越小, 表明弹簧刚度越大, 工作台黏滑现象就越不明显. 因此, 可通过增大弹簧刚度来抑制黏滑。

4.3 摩擦系数对黏滑的影响

为了分析动静摩擦系数对黏滑的影响, 将问题处理为分析动摩擦系数 μ_k 及 $\Delta\mu$ 对黏滑的影响, 其中 $\Delta\mu = \mu_s - \mu_k$ 。

4.3.1 μ_k 对黏滑的影响 仿真参数取 $m = 1.4 \text{ kg}$, $v_d = 0.003 \text{ m/s}$, $k = 400 \text{ N/m}$, $\Delta\mu = 0.02$, μ_k 为 0.04、0.05、0.06, 系统的响应曲线如图 7 所示. 可以看出, 在不同动摩擦系数下, 响应曲线的形状几乎一样, 振动幅度、黏滞时间都相同, 只是有不同程度的滞后. 这是因为最大静摩擦力不同, 引起工作台第一次由黏滞状态进入滑动状态的时刻也不同. 图 7 的曲线说明, 动摩擦系数对黏滑影响很小, 因此单纯地通过减小动摩擦系数并不能减小黏滑。

4.3.2 $\Delta\mu$ 对黏滑的影响 取 $k = 400 \text{ N/m}$, $\mu_k = 0.05$, $\Delta\mu$ 为 0.01、0.02、0.03, 系统的响应曲线如图 8 所示. 可以看出, 动静摩擦系数差越大, 则因黏

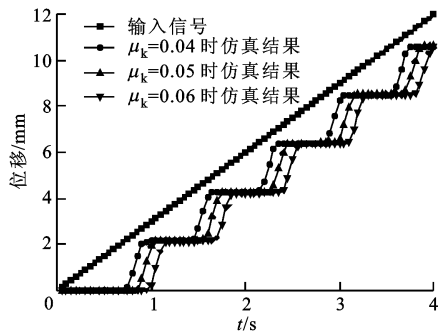


图 7 μ_k 对黏滑影响的仿真曲线

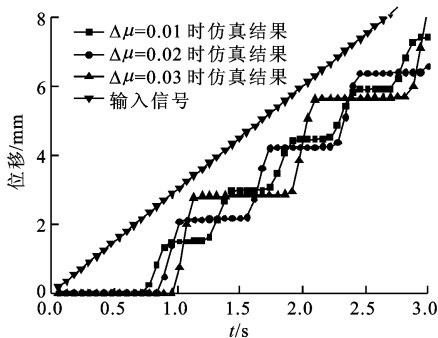


图 8 位移仿真曲线

滑而产生的位移振动幅度越大, 黏滞时间越长, 黏滑现象越明显. 因此, 可通过减小动静摩擦系数差来减小黏滑。

4.4 拉伸速度对黏滑的影响

刚度固定, 取 $k = 300 \text{ N/m}$, 实验得到不同 v_0 下工作台的位移曲线, 如图 9 所示. 从实验结果可知, v_0 越大, 则位移曲线的振动幅度越小, 黏滞时间越短, 位移响应误差越大, 黏滑现象越不明显. 因此, 可以通过增大拉伸速度来减小黏滑。

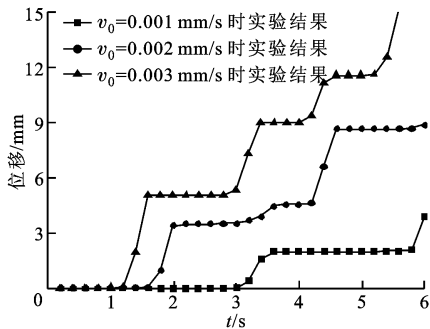


图 9 拉伸速度 v_0 对黏滑影响的实验曲线

综上分析, 影响工作台位置伺服系统黏滑的主要因素是工作台质量、弹簧刚度、动静摩擦系数差及弹簧自由端拉伸速度, 可通过减小质量、增大弹簧刚度、减小动静摩擦系数差及增大拉伸速度等方法来减小黏滑。

5 结论与展望

(1) 基于位置闭环伺服控制的黏滑分析测试方法采用弹簧-质量块模型, 通过修改位置闭环伺服系统的控制参数, 可以获得运动副不同速度和刚度时的黏滑特性。

(2) 基于此闭环实验方法, 实验和仿真分析了工作台质量、弹簧刚度、动静摩擦系数差及弹簧自由端拉伸速度等因素对黏滑现象的影响情况, 得到减小质量、增大弹簧刚度、减小动静摩擦系数差及增大拉

伸速度等都可以抑制黏滑现象的结论。

(3)由于本文的实验装置采用滚柱导轨,难以获得不同的摩擦系数,因此没有进行摩擦系数对黏滑影响的实验研究。在以后的研究中将采用平面接触摩擦替代现有的滚动接触摩擦,通过表面镀膜获得不同的摩擦系数,进而研究摩擦系数对黏滑的影响。

参考文献:

- [1] ARMSTRONG-HÉLOUVRY B. Stick slip and control in low-speed motion[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(10): 1083-1138.
- [2] VAN DE VELDE F, DE BAETS P, DEGRIECK J. The friction force during stick-slip with velocity reversal[J]. Wear, 1998, 216 (2): 138-149.
- [3] DJUIDJE KENMOE G, KENFACK JIOTSA A, KOFANE T C. Nonlinear spring model for frictional stick-slip motion[J]. The European Physical Journal: B, 2009, 70(3): 353-361.
- [4] KLEIN J. Frictional dissipation in stick-slip sliding[J/OL]. Physical Review Letters, 2007, 98(5), 056101 [2010-12-12]. <http://prl.aps.org/pdf/PRL/v98/i5/e056101>
- [5] VAN DE VELDE F, DE BAETS P. The relation between friction force and relative speed during the slip-phase of a stick-slip cycle[J]. Wear, 1998, 219(2): 220-226.
- [6] 黄俊, 李小宁. 气缸爬行现象的建模与仿真[J]. 液压与气动, 2004, 6(1): 20-23.
HUANG Jun, LI Xiaoning. Modelling and simulation of stick-slip motion in pneumatic cylinder[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2004, 6(1): 20-23.
- [7] 卢泽声, 曹东海. 爬行物理模型的建立与仿真分析[J]. 机械工程学报, 2004, 40(11): 107-112.
LU Zesheng, CAO Donghai. Simulation analysis for physical model of stick-slip[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(11): 107-112.
- [8] 黄俊. 气缸低速爬行特性及其特征判据的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2006.
- [9] 毛军红, 罗俊航, 姜强, 等. 一种永磁直线电机的永磁体阵列设计[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 53-57.
MAO Junhong, LUO Junhang, JIANG Qiang, et al. Design of magnet arrays for a permanent magnetic linear motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41(3): 53-57.
- [10] 罗俊航. 用于精密工作台驱动的永磁直线直流电机的设计与实验研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.

(编辑 杜秀杰)