

文章编号: 1000-5013(2010)01-0016-04

# 直线超声波电机伺服系统建模及鲁棒控制

唐 苹, 刘 强

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 为解决超声波电机精确建模的问题,将二阶传递函数作为名义模型,通过频域辨识建立超声波伺服系统的线性模型. 引入干扰观测器,以抑制各种外部力扰动,并增强伺服系统对参数变化的鲁棒性. 以直线超声波电机为例进行仿真和实验,结果表明,控制方法对外部力扰动和参数变化均具有很强的鲁棒性,可以提高超声波电机的运动控制精度.

**关键词:** 超声波电机; 干扰观测器; 系统辨识; 线性模型; 鲁棒控制

**中图分类号:** TM 359.901.2

**文献标识码:** A

超声波电机是一种直接驱动的新型微特电机,它具有很多传统电磁电机无法比拟的优越性能,如低速大转矩、体积小、不受电磁场的影响、掉电自锁、设计自由度大等<sup>[1]</sup>. 在非连续运动和精密控制领域,超声波电机要比传统电磁电机性能优越. 目前,超声波电机还没有精确的数学模型,在分析运动控制时通常都采用一些不需要对象精确模型的控制方法. 国内外存在的控制策略,主要有 PI 控制、自适应控制、模糊逻辑控制、神经网络控制、遗传算法,以及这些控制策略的组合. 这些控制方法各有其优缺点,而研究新的控制方法,实现超声电机的快速、准确、稳定的控制,是超声波电机控制策略的研究方向. 日本学者 Ohnishi<sup>[2]</sup>提出了基于干扰观测器的鲁棒运动控制方法,并广泛应用于高精度伺服系统. 干扰观测器能有效地抑制各种外部干扰,以及非线性环节对伺服系统性能的影响,使系统线性化<sup>[3]</sup>. 目前,该方法已经成功应用于各类电动高精度伺服系统<sup>[4-6]</sup>. 本文利用频域辨识法建立超声波电机的名义模型,提出了基于干扰观测器的超声波电机控制.

## 1 直线超声波电机近似线性模型

超声波电机(NM 电机,以色列 Nanomotion 公司)的控制电压和输出速度近似为线性关系,驱动类似于直流电机,其简化控制框图,如图 1 所示. 图 1 中: $U_{in}$ 为输入电压(V), $K_f$ 为力常数( $N \cdot V^{-1}$ ), $m$ 为质量(g), $K_{fv}$ 为速度阻尼因素( $N \cdot s \cdot m^{-1}$ ), $U_{ini}$ 为启动电压(V), $\omega_{out}$ 为输出转速( $r \cdot min^{-1}$ ), $X_0$ 为输出位移(m), $s$ 为拉普拉斯算子. 当控制电压超过启动电压值时,NM 电机启动. 由图 1 可知,超声波电机模型由一个惯性环节和一个积分环节组成.

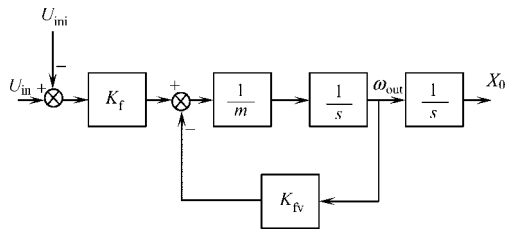


图 1 电机控制系统简化框图

Fig. 1 Simplified diagram of motor control system

## 2 基于干扰观测器的鲁棒控制

### 2.1 控制器结构

干扰观测器方法的原理是,将建模误差、参数摄动及各种外部干扰均折算到控制信号端,并等效为外部干扰,进而引入相应的补偿. 基于干扰观测器的鲁棒控制由最优控制器和干扰观测器 2 个部分组

收稿日期: 2008-06-12

通信作者: 刘 强(1974-),男,副教授,主要从事高精度运动控制的研究. E-mail:liuqiang@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(E0510023);福建省高校新世纪优秀人才计划项目(E0510023)

成, 结构如图 2 所示. 图 2 中:  $r$  为参考输入,  $y$  为位置输出,  $d$  为等效干扰,  $n$  为测量噪声. 虚线框内为干扰观测器部分,  $G(s)$  为控制对象,  $G_n^{-1}$  名义模型的逆  $\hat{d}$  为等效干扰  $d$  的估计值,  $Q(s)$  为低通滤波器. 在实际系统中, 控制对象名义模型的逆  $G_n^{-1}$  不可实现, 如果  $Q(s)$  的相对阶次大于或等于  $Q_n(s)$  的相对阶次, 则  $Q(s) G_n^{-1}$  正则, 在物理上变得可实现. 同时,  $Q(s)$  可减少测量噪声. 点划线框内为位置闭环最优控制器,  $k_1, k_2$  为最优控制反馈增益.

2.2 干扰观测器设计

由图 2 分别求出系统输出对控制  $u_2$ 、干扰  $d$ 、测量噪声  $n$  的传递函数为

$$y = G_{UY}(s) u_2(s) + G_{DY}(s) d(s) + G_{NY}(s) n(s), \quad (1)$$

$$G_{UY}(s) = \frac{y(s)}{u_2(s)} = \frac{G(s) G_n(s)}{G_n(s) + Q(s) [G(s) - G_n(s)]}, \quad (2)$$

$$G_{DY}(s) = \frac{y(s)}{d(s)} = \frac{G(s) G_n(s) [1 - Q(s)]}{G_n(s) + Q(s) [G(s) - G_n(s)]}, \quad (3)$$

$$G_{NY}(s) = \frac{y(s)}{n(s)} = \frac{G(s) Q(s)}{G_n(s) + Q(s) [G(s) - G_n(s)]}. \quad (4)$$

设  $Q$  的带宽为  $f_q$ , 当  $f \ll f_q$  时,  $Q \approx 1, G_{UY}(s) \approx G_n, G_{DY}(s) \approx 0, G_{NY}(s) \approx 1$ ; 当  $f > f_q$  时,  $Q \approx 0, G_{UY}(s) \approx G_p, G_{DY}(s) \approx G_p, G_{NY}(s) \approx 0$ . 说明在  $Q(s)$  带宽范围内, 干扰观测器使系统的特性与名义模型的特性近似相等, 对各种干扰及参数摄动有很强的抑制作用.

通过选择  $G_n(s)$  和设计  $Q(s)$ , 可折中干扰抑制性能、系统的鲁棒稳定性及对测量噪声的灵敏性. 另外,  $Q(s)$  的选择应使  $\frac{Q(s)}{G_n(s)}$  正则.  $Q(s)$  通常设计低通滤波器<sup>[7]</sup>为

$$Q(s) = [1 + \sum_{k=1}^{N-r} k(s)^k] / [1 + \sum_{k=1}^N k(s)^k]. \quad (5)$$

式(5)中:  $k = \frac{N!}{k!(N-k)!}$  是二项式系数,  $N$  为干扰观测器的阶数,  $k$  为系数,  $\tau$  为时间常数,  $r$  为相对阶次. 设计三阶干扰观测器, 取

$$Q(s) = (3s + 1) / [(s)^3 + 3(s)^2 + 3s + 1], \quad (6)$$

系统不确定对象的集合, 可以用乘积摄动来描述<sup>[8]</sup>, 即

$$G(s) = G_n(s) (1 + \Delta(s)). \quad (7)$$

式(7)中:  $\Delta(s)$  为可变的传递函数.

2.3 位置闭环最优控制

位置闭环采用线性二次型最优控制, 具体的二次型性能指标  $J$  和线性控制率  $u(t)$  分别为

$$J = \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt, \quad u(t) = -Kx(t) + r(t). \quad (8)$$

式(8)中:  $r(t)$  为给定信号,  $x$  为  $n$  维状态矢量,  $u$  为  $r$  维控制矢量,  $Q$  为  $n \times n$  维正定实对称常数矩阵,  $R$  为  $r \times r$  为正定实对称常数矩阵,  $K$  为  $r \times n$  维反馈增益矩阵. 最优控制的目标就是求取  $u(t)$ , 使得性能指标  $J$  达到最小值.

3 仿真实验

以直线超声波电机为研究对象, 在其移动平台上装有光栅尺, 通过测量其数据, 可求出平台的位移. 在二次型最优控制中, 要首先确定其反馈增益矩阵.

利用 MATLAB 命令 LQR(A, B, Q, R), 求反馈律  $K$  因此, 要先确定  $Q$  和  $R$ , 它们是由于平衡状态量和输入量的权重, 理论上可以取任意正定实对称常数矩阵. 通过调整矩阵  $Q$  和  $R$  来获得满意的响应效果, 经过多次仿真, 当  $R = 1, Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 \\ 0 & 0.72 \end{bmatrix}$  时, 超声波电机输出位置能准确地跟踪输入信号, 此时, 系统的反馈增益矩阵  $K = (0.027\ 7, 0.848\ 5)$ .

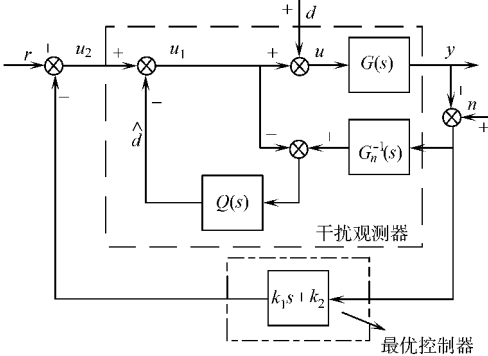


图 2 闭环鲁棒控制框图  
Fig. 2 Block diagram of closed-loop robust control

在干扰观测器设计中,先确定名义对象  $G_n(s)$ . 为此,用随机信号作为激励,由该伺服系统的输入输出响应,通过频域辨识求出系统的频率特性,如图 3 中实线所示. 名义模型通过对低频段频率特性的拟合得到,如图 3 中点划线所示. 名义模型为  $G_n(s) = 6\,000/[s(s+1\,000)]$ .

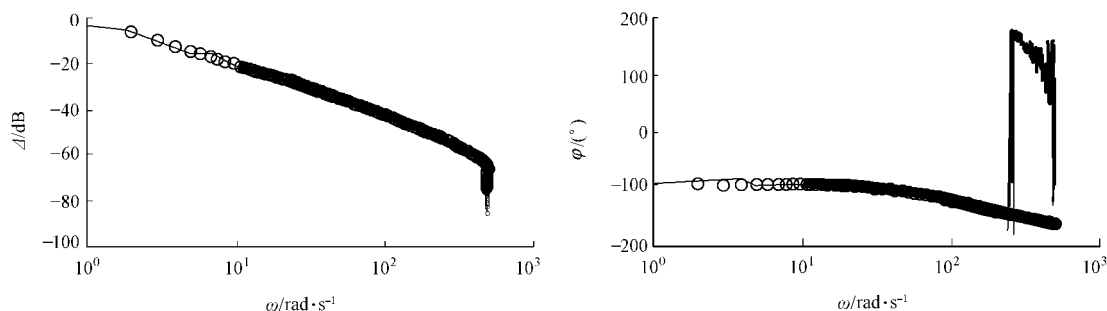
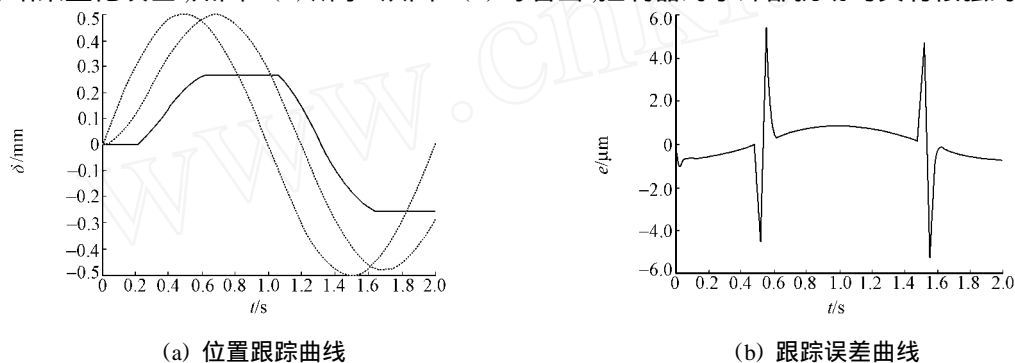


图 3 频率特性曲线

Fig. 3 Frequency characteristic curves

给定输入信号  $r = 0.5 \sin(t)$ . 为考察本文控制器的优越性,对伺服系统采用最优控制器及干扰观测器进行仿真,结果如图 4 所示. 图 4(a) 中:点划线为给定输入信号,虚线为采用干扰观测器系统输出信号,实线为采用最优控制器系统输出信号;  $\delta$  为位移,  $e$  为误差.

比较图 4(a) 可看出,采用干扰观测器可以很好地抑制平顶现象,实现良好的跟踪性能. 为考察控制器的鲁棒性,对如下两种情况进行仿真. (1) 理想情况,即没有外部扰动; (2) 存在外部扰动. 两种情况的跟踪结果量化误差,如图 4(b) 所示. 从图 4(b) 可看出,控制器对于外部扰动均具有很强的鲁棒性.



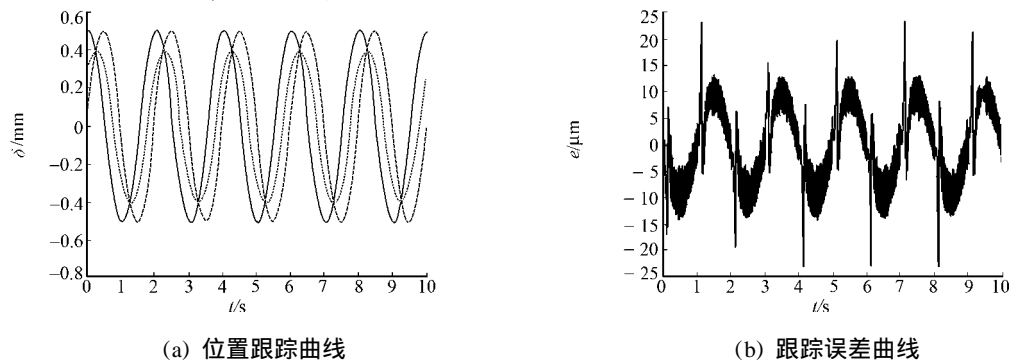
(a) 位置跟踪曲线

(b) 跟踪误差曲线

图 4 直线超声波电机仿真结果

Fig. 4 Simulation result of linear ultrasonic motor

实验研究对象为 HR-2 型直线超声波电机(以色列 Nanomotion 公司),使用配套的 AB1A 型驱动器为电机提供高频交流电压;PCL-728D/A 卡,PCL-833 型编码器/计数器卡(Advatech 公司);反馈系统为采用分辨率为 50 nm 的 RGH24 H30D30A 型光栅编码器(英国 RENISHAW 公司). 系统的实验结果,如图 5 所示. 图 5(a) 中:虚线为给定输入信号,点划线为使用最优控制位置跟踪曲线,实线为使用干扰观测器位置跟踪曲线;  $\delta$  为位移,  $e$  为误差.



(a) 位置跟踪曲线

(b) 跟踪误差曲线

图 5 直线超声波电机实验结果

Fig. 5 Experiment result of linear ultrasonic motor

从图 5(a) 可以看出, 干扰观测器比最优控制有更好的跟踪性能. 系统在引入恒定负载情况下, 系统跟踪误差如图 5(b) 所示. 由图 5(b) 可知, 采用干扰观测器, 伺服系统的跟踪误差保持在  $25\text{ }\mu\text{m}$  内, 即系统跟踪性能良好, 伺服系统对外部扰动有很好的鲁棒性.

## 5 结束语

建立了超声波电机伺服系统的线性模型, 在此基础上提出基于干扰观测器的动态鲁棒控制方法. 通过与常规最优控制器比较, 显示了该线性模型的优越性. 所提出的控制方法鲁棒性强、实时性好, 具有一定的应用价值.

### 参考文献:

- [1] 金 龙, 褚国伟, 胡敏强, 等. 超声波电机速度与定位控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 132-135.
- [2] OHNISHI K. A new servo method in mechatronics[J]. Trans Jpn Soc Elect Eng, 1987, 107(4): 83-86.
- [3] SHAHRUZ S M. Performance enhancement of a class of nonlinear systems by disturbance observers[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2000, 5(3): 319-323.
- [4] SU Wei-te, LIAW Chang-ming. Adaptive positioning control for a LPMSM drive based on adapted inverse model and robust disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2006, 21(2): 505-517.
- [5] WHITE M T. Improved track following in magnetic disk drives using a disturbance observer[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2000, 5(1): 3-11.
- [6] KATSURA S, MATSUMOTO Y, OHNISHI K. Modeling of force sensing and validation of disturbance observer for force control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 530-538.
- [7] TESFA YE A. A sensitivity optimization approach to design of a disturbance observer in digital motion control systems[J]. IEEE Transactions on Mechatronics, 2000, 5(1): 32-38.
- [8] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 176-177.

## Study of Modeling and Robust Control of Linear Ultrasonic Motor Servo System

TANG Ping, LIU Qiang

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** To solve the problem of precise modeling of ultrasonic motor (USM), the linear model of its servo system is built using frequency domain identification method and regarding the second-order transfer function as the nominal model. Disturbance observer is introduced in the controller design to decrease all kinds of external force disturbance, and improve the robustness to parameter uncertainties. Computer simulation and experiment were developed for USM, and the results show that the proposed control method has strong robustness to parameter variation and external disturbance, and can improve the motion control accuracy.

**Keywords:** ultrasonic motor; disturbance observer; system identification; linear modeling; robust control

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 郑亚青)