

直线电机位置伺服系统的增强复合非线性控制^{*}

刘阳阳, 程国扬

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350116)

摘要: 针对高性能机电系统中常用的直线伺服电机, 设计了一个能实现快速与准确的定点运动的位置控制器。控制器采用线性控制律与平滑非线性控制律相结合的方案, 并利用一个降阶线性状态观测器对电机运动速度(未量测)加以估计。为了消除未知扰动带来的稳态误差, 控制律中嵌入了积分控制作用。整个控制律采用全参数化设计, 可实现动态增益控制, 方便了在线参数整定与性能优化。控制方案应用于一个实际的永磁直线电机位置伺服系统, 基于 TMS320F28335 DSC 进行了试验测试, 结果表明系统能对各目标位置进行准确的跟踪, 且具有理想的瞬态性能。

关键词: 直线电机; 伺服系统; 复合非线性控制; 观测器; 参数化

中图分类号: TP 273:TM 381 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2019)12-0022-05

Enhanced Composite Nonlinear Control of a Linear Motor Position Servo System^{*}

LIU Yangyang, CHENG Guoyang

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: A position controller design was proposed to achieve fast and accurate set-point motion in linear servo motors typically used in high-performance mechatronics systems. The controller adopted a combination of linear control and smooth nonlinear control. A reduced-order linear state observer was adopted to estimate the un-measured motor speed. An integral action was also inserted to remove the steady-state error induced by unknown disturbance. The controller design was fully parameterized and could implement dynamic gain control, which facilitated the online tuning of parameters for performance optimization. The control scheme was applied to a permanent magnet linear motor servo system, and experimental verification using a TMS320F28335 DSC was conducted. The results show that the servo system is capable of tracking various target positions accurately with a desirable transient performance.

Key words: linear motor; servo system; composite nonlinear control; observer; parameterization

0 引言

《中国制造 2025》提出“推进制造过程智能化”和“促进制造工艺的仿真优化、数字化控制、状态信息实时监测和自适应控制”^[1], 而伺服控制系统是实现工业自动化和智能制造的基础设施。在高性能的伺服应用(如数控机床、雕刻机)中, 越来越多地采用直线电机作为传动装置。直线电机伺服避免了机械传动环节(如滚珠丝杠、减速齿轮等)的一

些不利因素, 具有快速响应和高精度等优点。但直线电机的齿槽、端部效应等因素对伺服控制器的设计也带来了新的挑战^[2-3]。

伺服控制普遍采用 PID 技术。PID 控制器的优势在于不必依赖系统模型而设计, 且有一定的鲁棒性, 缺点是具有性能局限性。为此, 各种改进方案不断涌现。文献[4]根据系统模型, 对积分器状态进行预测, 实现了对交流电机的抗饱和 PI 控制。文献[5]研究了在满足预期稳定裕度下优化闭环性

^{*} 基金项目: 福建省自然科学基金项目(2017J01747)

作者简介: 刘阳阳(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高性能伺服控制。

程国扬(1970—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为控制工程与自动化、电气传动系统。

能指标的 PID 参数整定方法。文献[6]采用变增益积分控制器来改善运动控制系统的瞬态性能。文献[7]在 PID 控制律中加入对未建模动态(非线性,时变)的基于数据驱动的预测与补偿机制。文献[8]在交流电机速度 PI 控制律基础上引入扰动观测器进行动态补偿。近年来,分数阶控制器作为一类特殊的非线性控制器,得到越来越多研究者的关注,也有一些成功的应用^[9-10]。

由于电机伺服系统通常具有清晰的物理结构,通过机理分析和系统辨识技术可以建立其数学模型,然后采用基于数学模型的更有效的控制技术,不必仅仅依赖于 PID 之类控制技术。特别是,在控制量受限条件下进行大范围的点对点运动控制的场合,固定参数的 PID 控制器难以兼顾系统响应的快速性与平稳性,而且在不同负载或给定目标下其瞬态性能会出现较大的偏差,在实际应用中通常需要引入分段增益系数。文献[11]在线性反馈控制的基础上,加入一个非线性反馈来动态改变闭环极点的阻尼系数,从而构成复合非线性反馈(CNF)控制。这种 CNF 控制系统,性能在初始阶段类似于一个轻阻尼系统,能快速响应和趋向给定目标;但当其逼近目标时,系统的阻尼系数逐步增大,变成一个重阻尼系统,从而抑制超调量,最终对一个定点目标进行快速且平稳的跟踪。该 CNF 控制方案未考虑扰动补偿措施,不能保证带扰动系统的输出量准确跟踪目标值。为此,文献[12]提出在 CNF 中嵌入积分控制来消除常值扰动的影响,从而实现准确的定位。这种控制方案称为增强 CNF(ECNF)控制。文献[13]采用参数化方法来设计 ECNF 控制律,并成功应用于硬盘磁头伺服控制系统。

本文针对工业应用对高性能伺服控制的实际需求,利用文献[13]的技术来设计位置控制器,并在 1 台永磁直线电机(PMLM)上进行试验研究。PMLM 常用作高端数控机床的伺服执行机构。常规的伺服系统采用电流-速度-位置三环串级 PID 控制结构。本文基于矢量控制的模式,以电机的机械运动子系统(包含位置和速度 2 个状态量)作为受控对象,以力矩电流作为控制输入量,位置作为受控输出量,设计了 ECNF 控制律。该控制律以闭环主导极点的阻尼系数和自然频率等关键参数作为可调参数,可灵活地用于性

能调优。在仅有位置可量测的条件下,设计一个降阶状态观测器来估计电机速度,用于反馈控制。所设计的控制器通过 TI 公司的 TMS320F28335 DSC 开发系统上编程实现,在一个直线滑动平台上进行了验证。

1 直线位置伺服系统数学模型

本文研究所用的是 1 台永磁同步交流直线电机,其在 dq 坐标系下的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{dy}{dt} = v \\ \frac{dv}{dt} = \frac{K_f}{M}i_q - \frac{K_b}{M}v - \frac{F_L}{M} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - \frac{\pi}{\tau}vi_d - \frac{\pi\psi}{\tau L}v + \frac{1}{L}u_q \\ \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + \frac{\pi}{\tau}vi_q + \frac{1}{L}u_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: y, v ——电机转子的位置和速度;

K_f ——推力系数;

M ——转子质量;

u_d, u_q, i_d, i_q —— d, q 轴的电压和电流;

K_b ——黏滞摩擦因数;

F_L ——负载阻力;

R ——转子相电阻;

L —— d, q 轴的电感值;

τ ——极距;

ψ ——定子基波磁链过转子绕组的磁链。

本文采用基于 $i_d=0$ 的磁场定向控制方式,把电机转子位置 y 当成是系统的受控输出量(可量测),电流 i_q 作为控制输入量 u (电流内环的给定信号,即电流指令),则直线电机的机械运动子系统可转换为二阶状态空间模型:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot [\text{sat}(u) + d] \\ \mathbf{y} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $\mathbf{x} = \begin{bmatrix} y \\ v \end{bmatrix}$; $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & a \end{bmatrix}$; $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ b \end{bmatrix}$; $\mathbf{C} = [1 \ 0]$; $b = \frac{K_f}{M}$; $a = -\frac{K_b}{M}$ 。

式中: d ——由阻力、负载和模型不确定性等因素

综合而成的输入扰动, $d = -\frac{F_L}{K_f}$ 。

饱和限幅函数 $\text{sat}(u)$ 可表示为

$$\text{sat}(u) = \text{sign}(u) \cdot \min\{u_{\max}, |u|\} \quad (3)$$

式中: $\text{sign}(\cdot)$ ——符号函数;

u_{\max} ——控制量的最大允许值。

2 位置控制律设计

针对上述电机位置伺服系统,采用 ECNF 控制技术来设计控制器,使系统输出量快速且准确地跟踪位置目标信号 r 。

首先利用系统跟踪误差 $e = y - r$ 进行积分的增广:

$$\dot{x}_i = k_i e = k_i(y - r) \quad (4)$$

式中: x_i ——积分变量;

k_i ——积分增益 $k_i > 0$ 。

定义增广状态向量 $\bar{x} = \begin{bmatrix} x_i \\ x \end{bmatrix}$, 可得增广系统

模型:

$$\begin{cases} \dot{\bar{x}} = \bar{A} \cdot \bar{x} + \bar{B} \cdot \text{sat}(u) + \bar{B}_r r + \bar{B} \cdot d \\ y = \bar{C} \cdot \bar{x} \end{cases} \quad (5)$$

其中: $\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & k_i C \\ \mathbf{0} & A \end{bmatrix}$; $\bar{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ B \end{bmatrix}$; $\bar{B}_r = \begin{bmatrix} -k_i \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$; $\bar{C} =$

$[0 \ C]$ 。

基于增广模型式(5),设计线性反馈控制律:

$$u_L = F\bar{x} + f_1 \cdot r \quad (6)$$

$$P = \begin{bmatrix} (1 + \gamma)f_1/k_i & * & * \\ \gamma f_1 f_2 + \frac{(1 + \eta)f_1}{b f_2} & f_1 f_2 - \frac{\gamma k_i f_1}{b} + \frac{(1 + \eta)f_1^2}{b f_2} & * \\ \frac{\gamma f_1}{b} & \frac{f_1}{b} & \frac{(1 + \eta)f_1}{b^2 f_2} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: *——矩阵的对称元素。

则可得非线性反馈的增益矩阵:

$$F_n = \bar{B}^T P = \left[\gamma f_1 \quad f_1 \quad \frac{(1 + \eta)f_1}{b f_2} \right] \quad (10)$$

则非线性反馈律设计为

$$u_N = \rho(e) F_n (\bar{x} - \bar{x}_e) \quad (11)$$

其中: $\bar{x}_e = \begin{bmatrix} 0 \\ r \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

$\rho(e)$ 是关于误差 e 的非线性平滑非正函数,可选取为

$$\rho(e) = -\frac{\beta}{1 + \alpha \alpha_0 |e|} \quad (12)$$

其中: $F = -\begin{bmatrix} f_i & f_1 & f_2 + \frac{a}{b} \end{bmatrix}$; $f_i = \frac{\lambda \omega^2}{b k_i}$; $f_1 = \frac{2\zeta \omega \lambda + \omega^2}{b}$; $f_2 = \frac{\lambda + 2\zeta \omega}{b}$ 。

上述线性控制律把闭环极点配置在 $-\lambda$ 和 $-\zeta \omega \pm j\omega \sqrt{1 - \zeta^2}$ 。其中参数 $\zeta \in (0, 1]$ 和 $\omega > 0$ 是闭环主导极点的阻尼和自然频率,而参数 $\lambda > 0$ 则与积分控制的强度相关。

选取一个对角正定矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} 2\gamma f_1^2 & & & \\ & 2\left[f_1^2 - \gamma k_i f_1 f_2 - \frac{(1 + \eta)k_i f_1 f_1}{b f_2}\right] & & \\ & & & \frac{2\eta f_1}{b} \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中: $0 < \eta < \frac{b f_1 f_2}{k_i f_1} - 1$, $0 < \gamma < \frac{f_1^2}{k_i f_1 f_2} - \frac{(1 + \eta)f_1}{b f_2^2}$ 。

求解 Lyapunov 方程:

$$(\bar{A} + \bar{B}F)^T P + P(\bar{A} + \bar{B}F) = -W \quad (8)$$

可得正定矩阵 P :

式中: α, β ——非负的可调参数。

α_0 与初始误差 $e(0)$ 相关,用于对误差进行归一化:

$$\alpha_0 = \begin{cases} \frac{1}{|e(0)|} & e(0) \neq 0 \\ 1 & e(0) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

由于仅需估计 x_2 ,所以可设计如下的降阶状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = -w_0 x_c + b \cdot \text{sat}(u) - w_0(a + w_0)y \\ \hat{x}_2 = x_c + (w_0 + a)y \end{cases} \quad (14)$$

式中: x_c ——观测器的内部状态量;

\hat{x}_2 ——估计值;

w_0 ——观测器的带宽, $w_0 > 0$ 。

把线性与非线性控制律与观测器相结合,形成最终的控制律:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = k_i(y - r) \\ \dot{x}_c = -w_0 x_c + b \cdot \text{sat}(u) - w_0(a + w_0)y \end{cases} \quad (15)$$

$$u = [\mathbf{F} + \rho(e)\mathbf{F}_n] \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y - r \\ x_c + (w_0 + a)y \end{bmatrix} \quad (16)$$

3 试验研究

把设计的位置伺服控制律应用于一个永磁直线同步伺服电机驱动的滑动平台。该试验平台由深圳 Inoservo 公司制造,配置了 Copley Controls 伺服驱动器 (ACJ-055-18)、Maglin 公司的磁栅编码器(分辨率为 1 μm),如图 1 所示。

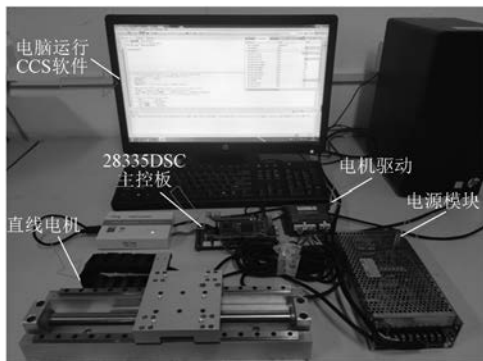


图 1 直线电机位置伺服系统的实物图

首先利用组态软件,把 Copley 驱动器设置为工作在电流(力矩)命令模式。则直线伺服滑台(包括电机本体和驱动器)可看成是以力矩电流(单位 A)作为控制输入,以位置(单位 m)作为输出量的动态系统,即式(2)所示的那一类系统,其中位置信号可测量,控制信号(电流命令) u 的饱和限幅值为 $u_{\max} = 1.4 \text{ A}$, d 是未知扰动。模型参数经系统辨识,其值为 $a = -2, b = 12$ 。

采用前文介绍的 ECNF 控制律来进行位置控制,其可调参数选择为 $k_i = 0.5, \lambda = 0.1, \zeta = 0.2, \omega = 45, \gamma = 3, \eta = 0.1, \alpha = 10, \beta = 0.2, w_0 = 90$ 。

控制算法在具有浮点运算功能的 TMS320F28335 DSC 上编程和运行,利用 Code Composer Studio 软件系统对控制算法进行编程和试验操作,其中位置控制算法需先进行离散

化,选取离散采样周期 $T_s = 0.001 \text{ s}$,采用欧拉前向差分离散法,可得可编程实现的数字式控制律:

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_i(k) + k_i T_s [y(k) - r] \\ x_c(k+1) = (1 - w_0 T_s) \cdot x_c(k) + \\ b T_s \cdot \text{sat}[u(k)] - w_0(a + w_0) T_s \cdot y(k) \end{cases} \quad (17)$$

$$u(k) = \{\mathbf{F} + \rho[e(k)]\mathbf{F}_n\} \cdot \begin{bmatrix} x_i(k) \\ y(k) - r \\ x_c(k) + (w_0 + a)y(k) \end{bmatrix} \quad (18)$$

为了保证离散控制算法的稳定性,应注意确保 $0 < 1 - w_0 T_s < 1$ 成立,即: $0 < w_0 T_s < 1$ 。

计算得到的控制量 $u(k)$ 由 DSC 系统以 PWM 波形(频率为 10 kHz)和正负极性信号提供给 Copley 驱动器作为电流指令。转子位置则由磁栅编码器加以检测,产生 A、B 双路正交脉冲信号提供给 DSC 进行解码以便推算位置信息。

分别针对 2 种位移量(0.03 m 和 0.08 m)进行控制试验。位置目标信号 r 采用方波的形式,使得电机在跟踪一个完整方波后能回归到原来的位置。图 2 和图 3 所示为对应的电机位置(为了清楚显示,改用 cm 为单位)、速度(估计值)和控制信号(电流指令)的试验波形。由图 2、图 3 可以看出,伺服系统能对各种位置目标进行快速且准确的跟踪,2 种位移量的调节时间(误差范围为 2%)分别为 0.10 s 和 0.12 s。

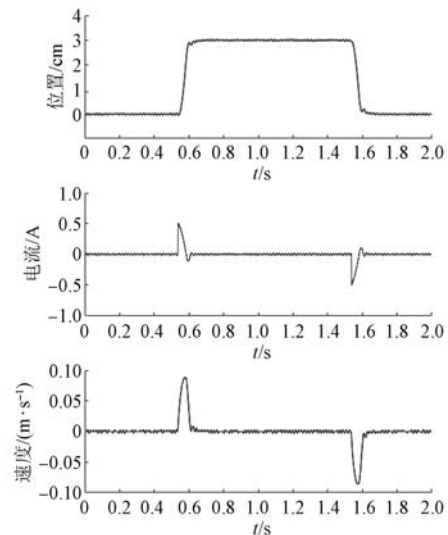


图 2 位移量为 0.03 m 的 ECNF 控制试验结果

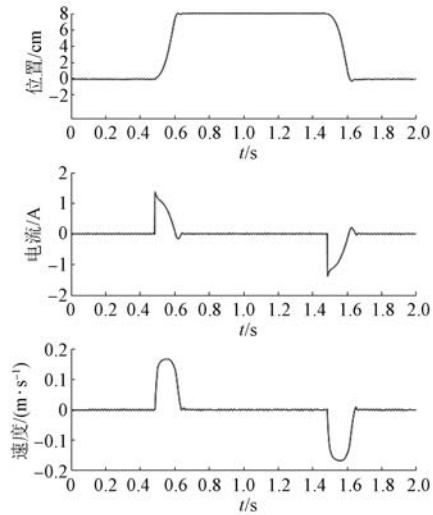


图3 位移量为 0.08 m 的 ECNF 控制试验结果

图 4 所示为位移量为 0.05 m 时采用纯线性控制(令 $\beta = 0$) 和 ECNF 控制的控制结果比较。可以看出,采用纯线性控制时,如果闭环主导极点的阻尼值偏小(试验中为 0.2),则系统的位置响应较快,但出现明显超调。ECNF 通过引入非线性反馈,可在取得快速响应的同时抑制超调量,得到理想的瞬态性能。

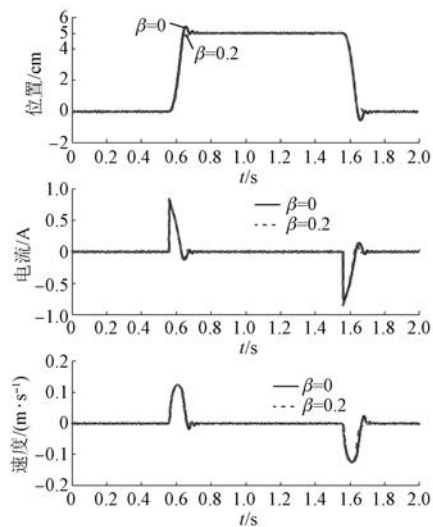


图4 位移量为 0.05 m 的试验结果比较

综合以上试验结果可以看出,采用 ECNF 能取得较为理想的性能,未知扰动的影响受到了有效的抑制,而且由于采用参数化设计,可方便地进行试验测试、分析比较不同控制方案及其参数值所带来的性能影响。这种参数化控制律可方便地

推广到各种实际的工业伺服系统。

4 结 语

针对控制量饱和和受限的直线电机位置伺服系统,采用增强复合非线性控制技术,设计了一个参数化的位置控制器;利用降阶状态观测器技术,从电机位置测量信号中估计出速度,用于反馈控制;通过嵌入积分作用,进行扰动补偿。设计的控制器通过 TMS320F28335 DSC 编程,在 1 台直线电机滑动平台进行了验证。结果表明,该控制器可对各种位置目标实现快速和准确的伺服控制,而且其参数化设计方便了试验调试,适用于工业伺服系统,如数控机床和机械臂的位置进给伺服机构。

【参考文献】

- [1] 国发[2015]28号.中国制造 2025[EB/OL].(2015-05-08)http://www.gov.cn/.
- [2] 董家臣,高钦和.永磁直线同步电机电流环新型线性自抗扰控制[J].电机与控制应用,2019,46(1): 1.
- [3] 冀相,许金,黄垂兵,等.永磁直线同步电机推力脉动削弱方法综述[J].电机与控制应用,2019,46(1): 70.
- [4] SHIN H B, PARK J G. Anti-windup PID controller with integral state predictor for variable-speed motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1509.
- [5] LI K. PID tuning for optimal closed-loop performance with specified gain and phase margins [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(3): 1024.
- [6] HUNNEKENS B, WOUW N V D, HEERTJES M, et al. Synthesis of variable gain integral controllers for linear motion systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(1): 139.
- [7] ZHANG Y, JIA Y, CHAI T, et al. Data-driven PID controller and its application to pulp neutralization process [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(3): 828.
- [8] ERROUSSI R, AL-DURRA A, MUYEEN S M. Experimental validation of a novel PI speed controller for ac motor drives with improved transient performances [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2018, 26(4): 1414.

(下转第 54 页)

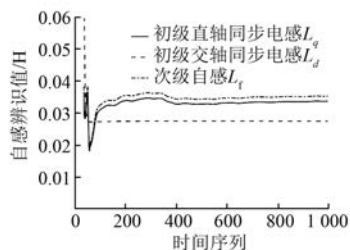


图7 自感辨识值(当噪声方差为 0.01 时)

5 结 语

(1) 相对较高幅值的逆 M 序列辨识输入激励信号,有助于提高辨识算法的收敛速度,但工程应用时需要注意逆变器的过电流保护。

(2) 输出电流测量信号中白噪声的方差增加时,辨识算法收敛速度有所减慢,辨识精度有所降低。在实际工程应用中需要采用低通滤波器尽量滤除电流测量信号的噪声干扰。

(3) 本文所研究的 MSEE-TPLSM 参数辨识算法为间接辨识算法,即先用递推最小二乘算法辨识出中间参数 $[a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5]^T$, 然后由中间参数依据式(27)~式(34)经过 2 次计算得到 MSEE-TPLSM 参数。因为该过程存在 2 次误差累积,所以在工程应用时需要尽量提高中间参数的辨识精度。

【参考文献】

[1] 张虎,李正熙,童朝南.基于递推最小二乘算法的感应电动机参数离线辨识[J].中国电机工程学报, 2011,31(18): 79.

[2] 李建军,盛洁波,王翠,等.异步电机定转子参数的辨识方法研究[J].电工技术学报,2006,21(1): 70.

[3] 王明渝,冼成渝,惠娅倩.感应电动机矢量控制参数离线辨识技术[J].电工技术学报,2006,21(8): 90.

[4] 刘鹏,吴文进,苏建徽.一种异步电动机静止状态下参数辨识的改进方法[J].电工技术学报,2015,30(5): 42.

[5] 贺艳晖,王跃,王兆安.异步电机参数离线辨识改进算法[J].电工技术学报,2011,26(6): 73.

[6] 邹伯敏.自动控制理论[M].3版.北京:机械工业出版社,2007.

[7] 杨承志,孙棣华,张长胜.系统辨识与自适应控制[M].重庆:重庆大学出版社,2003.

[8] 柴天佑,岳恒.自适应控制[M].北京:清华大学出版社,2016.

[9] 庞中华,崔红.系统辨识与自适应控制 MATLAB 仿真[M].3版.北京:北京航空航天大学出版社, 2017.

收稿日期: 2019-09-23

(上接第 26 页)

[9] YU W, LUO Y, PI Y. Fractional order modeling and control for permanent magnet synchronous motor velocity servo system [J]. Mechatronics, 2013, 23 (7): 813.

[10] ZHONG J, LI L. Tuning fractional-order PI^λD^μ controllers for a solid-core magnetic bearing system [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(4): 1648.

[11] CHEN B M, LEE T H, PENG K, et al. Composite nonlinear feedback control for linear systems with input saturation: theory and an application[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003, 48 (3):

427.

[12] PENG K, CHEN B M, CHENG G, et al. Modeling and compensation of nonlinearities and friction in a micro hard disk drive servo system with nonlinear feedback control [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(5): 708.

[13] CHENG G Y, JIN W G. Parameterized design of nonlinear feedback controllers for servo positioning systems [J]. Journal of System Engineering and Electronics, 2006, 17(3): 593.

收稿日期: 2019-09-10