

控制与决策

Control and Decision

永磁直线电机扰动估计与补偿的位置反步控制

曹伟, 乔金杰, 孙明

引用本文:

曹伟, 乔金杰, 孙明. 永磁直线电机扰动估计与补偿的位置反步控制[J]. *控制与决策*, 2020, 35(6): 1409–1414.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.1302>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[带有非匹配扰动的连铸结晶器振动位移系统自适应反步滑模控制](#)

Adaptive backstepping sliding mode control for oscillation displacement system of continuous casting mold with unmatched perturbations

控制与决策. 2020, 35(3): 578–586 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0761>

[基于非奇异快速终端滑模的轧机液压伺服位置系统反步控制](#)

Backstepping control of rolling mill hydraulic servo position system based on nonsingular fast terminal sliding mode

控制与决策. 2018, 33(9): 1649–1656 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.1001>

[考虑边端效应的直线感应电机投影自适应指令滤波反推控制](#)

Projection-based adaptive command-filtered backstepping control for linear induction motor considering end effect

控制与决策. 2018, 33(8): 1399–1406 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0423>

[基于扩张状态观测器的永磁同步电机PWM电流预测控制](#)

PWM predictive current control of permanent magnet synchronous motor based on extended state observer

控制与决策. 2018, 33(2): 351–355 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2016.1533>

[考虑参数和负载不确定性的内置式永磁同步电机自适应反步控制](#)

Adaptive backstepping control of interior permanent magnet synchronous motors considering parameter and load uncertainties

控制与决策. 2016, 31(8): 1509–1512 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2015.0587>

永磁直线电机扰动估计与补偿的位置反步控制

曹 伟^{1†}, 乔金杰², 孙 明¹

(1. 齐齐哈尔大学 计算机与控制工程学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006;

2. 齐齐哈尔大学 经济与管理学院, 黑龙江 齐齐哈尔 161006)

摘 要: 由于永磁直线同步电机直接驱动负载, 负载突变、摩擦力和推力波动等各种干扰也将无缓冲地直接作用于电机动子上, 如果不加以考虑, 将会严重影响伺服系统的精度. 为了克服不确定性扰动给永磁直线同步电机位置伺服系统带来的不良影响, 提出一种鲁棒反步控制策略. 首先, 对永磁直线同步电机的数学模型进行分析, 将负载阻力、推力波动和摩擦力等作为总干扰; 然后, 设计一种观测器对总干扰进行估计, 将干扰的估计值引入到反步控制律中, 起到对扰动进行补偿的作用, 并利用 Lyapunov 函数分析系统的稳定性; 最后, 通过与不带扰动补偿的反步控制进行仿真比较, 结果表明所提出的控制策略能够有效消除不确定性扰动对系统的影响, 增强伺服系统的鲁棒性, 提高电机位置的跟踪精度.

关键词: 永磁直线电机; 反步控制; 干扰估计; 位置跟踪; 鲁棒性; 扰动补偿

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Backstepping control of disturbance estimation and compensation for permanent magnet linear motor

CAO Wei^{1†}, QIAO Jin-jie², SUN Ming¹

(1. College of Computer and Control Engineering, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China; 2. College of Economics and Management, Qiqihar University, Qiqihar 161006, China)

Abstract: Due to direct drive load of permanent magnet linear synchronous motor, various disturbances such as sudden load changes, friction and thrust fluctuations will also act directly on the motor mover without buffering. If not considered, the accuracy of the servo system will be seriously affected. In order to solve the adverse impact of the uncertain disturbance on the position servo system of the permanent magnet linear synchronous motor, the paper proposes a kind of robust backstepping control strategy. Firstly, the load force, thrust fluctuation and friction force are taken as total disturbance after analyzing the mathematic model of the permanent magnet linear synchronous motor. Then, the paper designs a kind of observer to estimate the total disturbance. The estimated value is introduced into the backstepping controller as a role of compensation of the disturbance. The paper also uses Lyapunov function to analyze the stability of the system. Finally, compared with the backstepping control without disturbance compensation, the simulation results show that the proposed control strategy can effectively eliminate the adverse effects, enhance the robustness of the servo system and improve the position tracking accuracy of the motor.

Keywords: permanent magnet linear motor; backstepping control; disturbance estimation; position tracking; robustness; disturbance compensation

0 引 言

由于永磁直线同步电机(permanent magnet linear synchronous motor, PMLSM)具有结构简单、高能量密度和高精度等优点^[1], 近年来在XY平台驱动、数控机床和机器人控制等直接驱动设备上得到了广泛应用^[2-4]. 永磁直线同步电机与旋转电机相比, 省去了间接机械传动装置, 提高了伺服系统的响应速度和控制

精度. 但是, 由于永磁直线同步电机直接驱动负载, 负载突变、摩擦力和推力波动等各种干扰也将无缓冲地直接作用于电机动子上^[5], 如果不加以考虑, 将会严重影响伺服系统的精度. 因此, 必须设计出鲁棒性更强的控制器, 才能进一步提高永磁直线同步电机的控制精度.

为了消除上述不确定性干扰带来的不利影响,

收稿日期: 2018-09-24; 修回日期: 2019-02-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71803095, 61672304); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(18YJC790130).

责任编辑: 柴利.

[†]通讯作者. E-mail: yiyuqq168@163.com.

国内外研究者提出了许多先进控制方法,如滑模控制^[6]、自适应控制^[7]、神经网络控制^[8]和模糊控制^[9]等.然而,这些先进控制方法也存在一些不足之处,如滑模控制抖振现象较为明显;针对某个参数建立自适应机制的自适应控制,使系统过于复杂、实现困难;神经网络控制中过多的隐含层结点,带来巨大的计算量,同时还需要选取网络初始值和对网络进行训练,如此复杂的计算限制了其实际应用;模糊控制中模糊规则表的确定比较困难,且存在计算工作量比较大的在线模糊推理过程.20世纪90年代初提出的反步控制^[10]是一种静态补偿思想,针对具有严格反馈形式的不确定性非线性系统,通过后边子系统中的虚拟控制实现前面子系统镇定的目的,这样通过逐步递推的方式完成整个控制器的设计.由于反步控制器具有结构简单、鲁棒性强、可调参数少和易于工程实现等优点,被广泛应用于电机控制系统中^[11-17].如文献^[11]首先在电机控制系统中应用反步法设计控制器;文献^[12]针对无刷直流电机,设计了一种反步控制与滑模控制相结合的控制策略,提高了伺服系统的鲁棒性;文献^[13]通过自适应观测器估计出电机转子位置和速度的方法,提出了一种鲁棒反步控制策略,提高了永磁同步电机的跟踪精度,增强了伺服系统的鲁棒性;文献^[14]为了提高永磁直线同步电机的鲁棒性和计算效率,在不使用坐标变换的情况下,提出了一种自适应模糊神经网络和反步控制相结合的控制方法;文献^[15]设计一种自适应变速反步滑模控制器来控制永磁直线同步电机,实现了伺服系统平台的高精度定位控制.然而,针对实际应用中的永磁直线同步电机,除参数摄动和负载扰动外,还不可避免地会存在摩擦力和推力波动等各种扰动,如果不对这些扰动进行估计和补偿,将直接影响反步控制的控制精度甚至失效.目前,对不确定性扰动进行估计并补偿的研究成果较多^[18-20],但针对永磁直线同步电机,将负载阻力、推力波动和摩擦力等扰动的估计值引入到反步控制律进行补偿的策略却鲜有报道.

鉴于以上分析,本文针对负载阻力、推力波动和摩擦力等扰动严重影响永磁直线同步电机位置跟踪精度的问题,提出一种带有扰动估计与补偿的反步控制方法.首先,在分析永磁直线同步电机数学模型基础上,设计出一种扰动估计器,对负载阻力、推力波动和摩擦力等扰动进行估计;然后,利用干扰估计值设计出一种反步控制器,设计的控制器对不确定性扰动具有强鲁棒性,能够显著提高电机位置的定位精度;

最后,通过仿真实验验证所提方法的有效性.

1 PMLSM的数学模型

在正弦反电动势基础上,假设永磁体无阻尼作用,且初级上也无阻尼绕组,同时忽略铁芯饱和,不计涡流和磁滞损耗,仅考虑基波分量PMLSM的 d - q 轴(d 轴为直轴, q 轴为交轴)数学模型^[18]为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - \omega_r \lambda_q, \\ u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q - \omega_r \lambda_d. \end{cases} \quad (1)$$

其中: u_d 和 u_q 分别为直轴和交轴的电压; $\lambda_q = L_s i_q$, $\lambda_d = L_s i_d + \lambda_{PM}$, λ_d 和 λ_q 分别为直轴和交轴的磁链, λ_{PM} 为定子永磁体产生的励磁磁链, i_d 和 i_q 分别为直轴和交轴的电流, L_s 为电机的同步电感; $\omega_r = \pi v / \tau$, τ 为极距, v 为线速度; R_s 为定子相电阻.

对电流内环,采用励磁分量 $i_d = 0$ 控制策略,即让动子电流矢量与定子永磁体磁场在空间上正交.因此,电磁推力 F_e 为

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} \lambda_{PM} i_q = K_f i_q, \quad (2)$$

其中 K_f 为电磁推力系数.机械运动方程为

$$M \dot{v} = F_e - F_d. \quad (3)$$

其中: v 为直线电机的运行速度, \dot{v} 为其一阶导数; M 为动子质量; $F_d = F_1 + F_{ef} + F_f$ 为总阻力, F_f 为摩擦力, F_{ef} 为由端部效应引起的推力波动, F_1 为负载阻力. F_{ef} 和 F_f 的表达式分别如下:

$$F_{ef} = A \sin(\omega x + \varphi), \quad (4)$$

$$F_f = (f_c + (f_s - f_c) e^{-(v/v_s)^2}) \text{sign}(v) + Bv. \quad (5)$$

其中: φ 是初始相位, x 是电机位移, ω 是以位移为变量的角速度, A 是推力波动幅值, B 是粘性摩擦系数, v_s 是润滑系数, f_s 是静摩擦力, f_c 是滑动摩擦力.在直线电机运行时,最主要的干扰是粘滞摩擦力 Bv ,因此将除粘滞摩擦力以外的其他非线性因素均看作干扰 F_L ,即 $F_L = F_d - Bv$,则由式(2)和(3)可得PMLSM的线性方程为

$$\ddot{x} = -\frac{B}{M} \dot{x} + \frac{K_f}{M} \dot{i}_q - \frac{1}{M} F_L, \quad (6)$$

其中 x 为直线电机的实际位置.根据上述分析和式(6),令 $b = B/M$, $a = K_f/M$, $d = F_L/M$,系统输出 $y = x$,则有

$$\begin{cases} \dot{x} = v, \\ \dot{v} = -bv + ai_q - d, \\ y = x. \end{cases} \quad (7)$$

2 具有扰动补偿的反步控制器设计

对实际应用中的永磁直线同步电机,不可避免地会存在摩擦力、推力波动和负载突变等各种扰动,如果不对这些扰动进行估计和补偿,将直接影响直线电机的位置跟踪精度. 因此,本文的控制目标是将摩擦力、推力波动和负载突变作为电机的总扰动,设计一个扰动估计器来估计总扰动,并将其估计值引入到反步控制律中进行补偿,以达到消除不确定性干扰对跟踪精度的影响.

2.1 反步控制器设计

根据永磁直线同步电机数学模型(7),控制器设计过程如下.

step 1: 定义直线电机的位置误差为

$$e_1 = y - y_d, \quad (8)$$

其中 y_d 为直线电机的期望位置. 对式(8)两边求导,可得

$$\dot{e}_1 = \dot{y} - \dot{y}_d = v - \dot{y}_d. \quad (9)$$

定义虚拟控制量

$$u_1 = -k_1 e_1 + \dot{y}_d, \quad (10)$$

其中反馈增益 $k_1 > 0$. 定义

$$e_2 = v - u_1, \quad (11)$$

选取Lyapunov函数

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2, \quad (12)$$

对式(12)两边求导,可得

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1(v - \dot{y}_d) = e_1(e_2 + u_1 - \dot{y}_d). \quad (13)$$

将式(10)代入(13),可得

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2. \quad (14)$$

要使 $\dot{V}_1 \leq 0$,需要进行下一步设计使 $e_2 = 0$.

step 2: 选取Lyapunov函数

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2. \quad (15)$$

对式(11)两边求导,可得

$$\dot{e}_2 = \dot{v} - \dot{u}_1 = -bv + ai_q - d + k_1 \dot{e}_1 - \ddot{y}_d. \quad (16)$$

对式(15)两边求导,并结合式(14)和(16),可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 = \\ &= -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2(-bv + ai_q - d + k_1 \dot{e}_1 - \ddot{y}_d). \end{aligned} \quad (17)$$

为使 $\dot{V}_2 \leq 0$,需设计控制律为

$$i_q = \frac{1}{a}(bv - k_2 e_2 - e_1 - k_1 \dot{e}_1 + \dot{y}_d + \hat{d}). \quad (18)$$

其中: \hat{d} 为扰动估计器对直线电机总扰动 d 的估计,反馈增益 $k_2 > 0$. 将式(18)代入(17),可得

$$\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_2 \tilde{d}, \quad (19)$$

其中 $\tilde{d} = \hat{d} - d$ 是估计器对扰动 d 的估计误差.

2.2 扰动估计器设计

由Lyapunov稳定性理论和式(17)可知,为使Lyapunov函数 $\dot{V}_2 \leq 0$,需要对直线电机的负载阻力、摩擦力和推力波动等总扰动进行估计. 为此,根据永磁直线同步电机的数学模型和控制律(18),提出如下扰动估计器,在线估计直线电机的不确定性扰动:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{\hat{d}} \\ \dot{\hat{e}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{d} \\ \hat{e} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} (\ddot{y}_d + bv) + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ -a \end{bmatrix} i_q + \begin{bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \end{bmatrix} (-\dot{e}_1 - \hat{e}) + \\ &+ \begin{bmatrix} -\beta_3 \\ 0 \end{bmatrix} (v + k_1 x - k_1 y_d - \dot{y}_d). \end{aligned} \quad (20)$$

其中: β_1 、 β_2 、 β_3 均为大于零的调节参数, \hat{e} 为对 $-\dot{e}_1$ 的估计. 令 $\tilde{\varepsilon} = -\dot{e}_1 - \hat{e}$,则式(20)可改写为

$$\begin{cases} \dot{\hat{d}} = \beta_1 \tilde{\varepsilon} - \beta_3(v + k_1 x - k_1 y_d - \dot{y}_d), \\ \dot{\hat{e}} = \hat{d} - ai_q + \beta_2 \tilde{\varepsilon} + \dot{y}_d + bv. \end{cases} \quad (21)$$

2.3 稳定性分析

为使设计的具有扰动补偿的反步控制器稳定,构造如下Lyapunov函数:

$$V = V_2 + V_3 = V_1 + \frac{1}{2} e_2^2 + \frac{1}{2\beta_1} \tilde{d}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\varepsilon}^2. \quad (22)$$

其中

$$\begin{aligned} V_2 &= V_1 + \frac{1}{2} e_2^2, \\ V_3 &= \frac{1}{2\beta_1} \tilde{d}^2 + \frac{1}{2} \tilde{\varepsilon}^2. \end{aligned}$$

对 V_3 求导,可得

$$\dot{V}_3 = \frac{1}{\beta_1} \tilde{d} \dot{\tilde{d}} + \tilde{\varepsilon} \dot{\tilde{\varepsilon}} = \frac{1}{\beta_1} \tilde{d}(\dot{\hat{d}} - \dot{d}) + \tilde{\varepsilon}(-\dot{e}_1 - \dot{\hat{e}}). \quad (23)$$

将式(21)代入(23),并假设直线电机的总扰动为慢时变信号,即 $\dot{d} = 0$,可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \\ &= \frac{1}{\beta_1} \tilde{d} \dot{\hat{d}} + \tilde{\varepsilon}(-\dot{e}_1 - \dot{\hat{e}}) = \\ &= \frac{1}{\beta_1} \tilde{d}(\beta_1 \tilde{\varepsilon} - \beta_3(v + k_1 x - k_1 y_d - \dot{y}_d)) + \\ &+ \tilde{\varepsilon}(\ddot{y}_d + bv - ai_q + d - (\hat{d} - ai_q + \beta_2 \tilde{\varepsilon} + \dot{y}_d + bv)) = \\ &= \tilde{\varepsilon} \tilde{d} - \frac{\beta_3}{\beta_1} \tilde{d}(v + k_1 x - k_1 y_d - \dot{y}_d) + \tilde{\varepsilon}(-\tilde{d} - \beta_2 \tilde{\varepsilon}) = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\varepsilon} \dot{d} - \frac{\beta_3}{\beta_1} e_2 \tilde{d} - \tilde{\varepsilon} \dot{d} - \beta_2 \tilde{\varepsilon}^2 = \\ - \frac{\beta_3}{\beta_1} e_2 \tilde{d} - \beta_2 \tilde{\varepsilon}^2. \end{aligned} \quad (24)$$

其中

$$e_2 = v - u_1 = v + k_1 x - k_1 y_d - \dot{y}_d.$$

对式(22)两边求导,并将式(19)和(24)代入,可得

$$\dot{V} = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_2 \tilde{d} - \frac{\beta_3}{\beta_1} e_2 \tilde{d} - \beta_2 \tilde{\varepsilon}^2. \quad (25)$$

由上面的设计过程可知, $k_1, k_2, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 均为大于零的设计参数,因此由式(25)可知,只需令 $\beta_1 = \beta_3$ 就可以使 $\dot{V} \leq 0$. 由此,由构造的 Lyapunov 函数(22)和(25)易知,误差 e_1 和 e_2 按指数方式收敛于零,即永磁直线同步电机的实际位置按指数方式收敛于期望位置.

3 仿真实验

为了验证本文提出控制策略的有效性,针对永磁直线同步电机的位置跟踪情况进行 Matlab 仿真分析,并与不带扰动估计补偿的传统反步控制进行比较. 永磁直线同步电机的具体仿真参数设置为: 静摩擦力 $f_s = 20 \text{ N}$, 滑动摩擦力 $f_c = 10 \text{ N}$, 润滑系数 $v_s = 0.5$, 粘性摩擦系数 $B = 8 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, 负载阻力 $F_1 = 100 \text{ N}$, 电磁推力系数 $K_f = 15 \text{ N/A}$, 转子质量 $M = 10 \text{ kg}$, 由端部效应引起的推力波动 $F_{ef} = 30 \sin(25x)$. 选取扰动估计器(21)中的参数 $\beta_1 = \beta_3 = 1000, \beta_2 = 10000$; 选取控制器(18)中的反馈增益 $k_1 = 5, k_2 = 35$; 假设永磁直线同步电机的初始位置 $x(0) = 0$, 期望位置轨迹为 $y_d = \sin t, 0 \leq t \leq 10 \text{ s}$, 采样周期 $h = 0.001 \text{ s}$. 仿真结果如图1~图5所示.

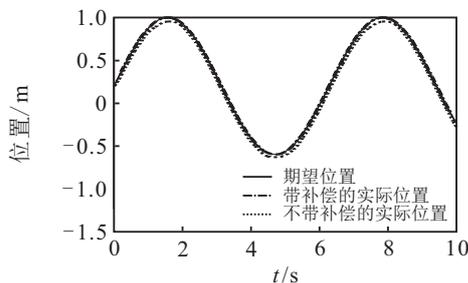


图1 带扰动补偿和带扰动补偿的反步控制跟踪曲线

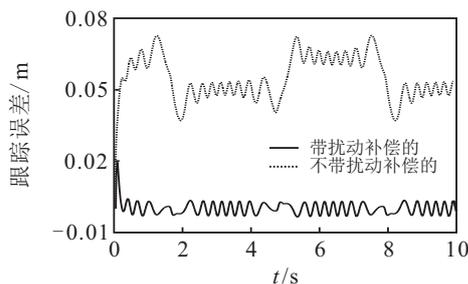


图2 不带扰动补偿和带扰动补偿的位置跟踪误差

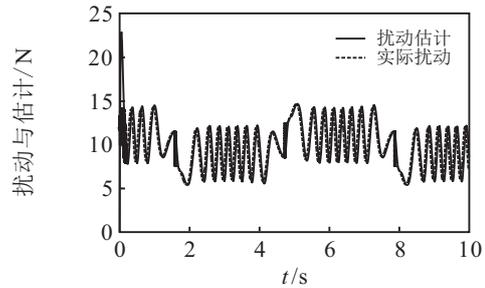


图3 实际扰动与估计值

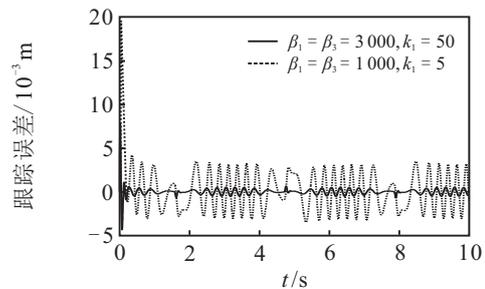


图4 参数不同时位置跟踪误差

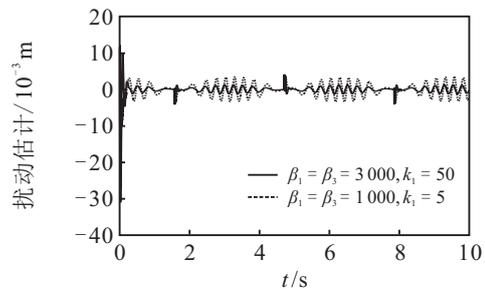


图5 参数不同时扰动估计误差

本文中容许的误差范围为 $[-0.01, 0.08]$, 可以根据实际工程需要调节跟踪误差的大小, 具体调节方法见后文对图1和图2的误差分析部分.

在反馈增益相同的条件下, 只采用传统反步控制的位置跟踪效果如图1中的虚线所示. 由于永磁直线同步电机受负载阻力、推力波动和摩擦力等扰动的影响, 电机实际位置不能精确跟踪期望位置. 利用本文设计的具有补偿作用的反步控制器的位置跟踪效果如图1中点线所示, 可以看出点线与实线所示的期望位置完全重合. 虽然直线电机存在负载阻力、推力波动和摩擦力等扰动, 但由于通过设计的扰动估计器精确估计出了该扰动, 并将其估计值引入到反步控制律中进行了补偿, 该控制策略增强了伺服系统的鲁棒性, 提高了跟踪精度, 实现了电机实际位置对期望位置的精确跟踪. 同时, 从图3也可以看出, 设计的扰动估计器精确估计出了电机的实际扰动. 图2为不带扰动补偿和带有扰动补偿的反步控制的位置跟踪误差.

由图1和图2可以看出, 本文提出的控制方法虽然能够较为精确地跟踪期望位置, 但还是存在一定的误差. 其原因在于: 本文设计的控制器(18)中需要用

到总干扰 d 的估计值 \hat{d} , 估计值 \hat{d} 的准确度直接影响到控制器对位置的跟踪精度, 而估计值 \hat{d} 则来源于干扰估计器 (21), 式 (21) 中的参数 $\beta_1 = \beta_3$ 和 β_2 大小的选择又直接影响到估计值的准确度, 其中 $\beta_1 = \beta_3$ 影响较为显著, 且 $\beta_1 = \beta_3$ 的值越大, 估计误差越小, β_2 影响不显著. 同时, 式 (18) 中反馈增益 k_1 和 k_2 大小的设置也影响位置跟踪精度, 其中 k_1 影响显著, 且 k_1 越大位置跟踪误差越小, k_2 影响不显著. 总之, 只要增大参数 k_1 和 $\beta_1 = \beta_3$ 的值, 就会减小位置跟踪误差.

为了更清楚地分析跟踪误差情况, 将不带扰动补偿和带扰动补偿的位置跟踪误差在几个时间点上的数据列在表 1 中.

表 1 不带扰动补偿和带扰动补偿的位置跟踪误差

时间/s	不带补偿的误差/m	带补偿的误差/m
0	0	0
1	0.060 1	0.002 9
2	0.038 1	-0.001 2
3	0.047 7	-0.002 9
4	0.051 0	0.000 7
5	0.052 1	0.002 1
6	0.066 4	-0.003 2
7	0.065 1	-0.000 8
8	0.048 9	-0.002 7
9	0.046 6	-0.003 0
10	0.048 9	-0.000 9

为了更形象说明带扰动补偿的反步控制器参数对跟踪误差的影响, 当参数分别取不同值时作仿真比较. 在此分别取两组参数: $\beta_1 = \beta_3 = 1\,000, k_1 = 5; \beta_1 = \beta_3 = 3\,000, k_1 = 50$. 参数 β_2 和 k_2 两次仿真取相同值, 即 $\beta_2 = 10\,000, k_2 = 35$. 仿真结果如图 4 和图 5 所示, 图 4 是控制器和估计器参数取值不同时位置跟踪误差, 图 5 是控制器和观测器参数取值不同时扰动估计误差.

4 结 论

本文针对永磁直线同步电机, 设计出一种扰动估计器, 对负载阻力、推力波动和摩擦力等干扰进行估计, 并利用扰动估计值设计出一种反步控制器. 研究表明: 本文设计的扰动估计器能够有效估计不确定性干扰, 经过扰动补偿的反步控制器消除了不确定性扰动对伺服系统的影响, 增强了伺服系统的鲁棒性, 提高了电机位置的跟踪精度.

本文贡献在于将负载扰动、由端部效应引起的推力波动和摩擦力(粘性摩擦力、润滑系数、静摩擦力、滑动摩擦力)等干扰作为总干扰进行估计, 并将估计

值引入到设计的反步控制器中进行补偿, 从而进一步提高了电机的位置跟踪精度, 弥补了现有文献针对永磁直线同步电机设计的反步控制器没能全面考虑电机干扰对位置跟踪精度影响的不足. 同时, 本文设计的控制器结构简单、可调参数少(干扰观测器只需要调节两个参数, 反步控制器也只需要调节两个反馈增益), 便于工程实现. 在今后的工作中, 将进一步研究如何使得控制器中的反馈增益为最优值, 以便加快收敛速度和进一步提高跟踪精度.

参考文献(References)

- [1] Shin K H, Lee S H, Cho H W, et al. Analysis on the pitching moment in permanent-magnet linear synchronous motor for linear motion stage systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1-4.
- [2] 王丽梅, 李兵. 直线电机驱动 XY 平台的速度场轨迹规划与控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 438-444.
(Wang L M, Li B. Research on trajectory planning of contour control for a linear motor drive XY table based on velocity field[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 438-444.)
- [3] 刘春芳, 杜昭童. 数控机床永磁同步直线伺服系统免疫控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2015(1): 1-5.
(Liu C F, Du Z T. Immune control for permanent magnet synchronous linear servo system of CNC machine[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015(1): 1-5.)
- [4] Ting C S, Chang Y N, Shi B W. Adaptive backstepping control for permanent magnet linear synchronous motor servo drive[J]. Electric Power Applications Iet, 2015, 9(3): 265-279.
- [5] Lu S W, Tang X Q, Song B, et al. Identification and compensation of force ripple in PMSLM using a JITL technique[J]. Asian Journal of Control, 2015, 17(3): 1-10.
- [6] Gennaro S D, Domínguez J R, Meza M A. Sensorless high order sliding mode control of induction motors with core loss[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(6): 2678-2689.
- [7] Xiao G Y, Zhang H G, Luo Y H. Online optimal control of unknown discrete-time nonlinear systems by using time-based adaptive dynamic programming[J]. Neurocomputing, 2015, 165: 163-170.
- [8] 王一光, 李晓杰, 陈兴林. 基于永磁直线同步电机的光刻机掩模台鲁棒自适应神经网络控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 38-46.
(Wang Y G, Li X J, Chen X L. A robust adaptive neural network control method based on permanent magnetic linear synchronous motor for the reticle stage

- of lithography[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 38-46.)
- [9] 陆华才, 徐月同, 杨伟民, 等. 永磁直线同步电机进给系统模糊PID控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 59-63.
(Lu H C, Xu Y T, Yang W M, et al. Fuzzy PID controller design for a permanent magnet linear synchronous motor feeding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(4): 59-63.)
- [10] Kanellakopoulos I, Kokotovic P V, Morse A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1991, 36(11): 1241-1253.
- [11] Kanellakopoulos I, Krein P T, Disilvestro F. Nonlinear flux-observer-based control of induction motors[C]. Proceedings of the 1992 American Control Conference. Chicago: IEEE, 1992: 1700-1704.
- [12] Wang F, Su Y X, Min H, et al. Sliding mode control of servo system with brushless DC motor based on nominal model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 391: 415-419.
- [13] Mohamed A H, Alain G, Jesus de L. Robust integral backstepping control for sensorless IPM synchronous motor controller[J]. Journal of the Franklin Institute, 2012, 349(5): 1734-1757.
- [14] Ting C S, Lieu J F, Liu C S, et al. An adaptive FNN control design of PMLSM in stationary reference frame[J]. Journal of Control Automation and Electrical Systems, 2016, 27(4): 391-405.
- [15] Chen M Y, Lu J S. Application of adaptive variable speed back-stepping sliding mode controller for PMLSM position control[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2014, 22(3): 392-403.
- [16] 张兴华, 唐其太. 考虑参数和负载不确定性的内置式永磁同步电机自适应反步控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1509-1512.
(Zhang X H, Tang Q T. Adaptive backstepping control of interior permanent magnet synchronous motors considering parameter and load uncertainties[J]. Control and Decision, 2016, 31(8): 1509-1512.)
- [17] 张庆超, 马瑞卿. 无刷直流电机转速伺服系统反步高阶滑模控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 961-968.
(Zhang Q C, Ma R Q. Backstepping high order sliding mode control for brushless DC motor speed servo control system[J]. Control and Decision, 2016, 31(6): 961-968.)
- [18] 陈松林, 单梅林, 王丽斌. 基于干扰观测器的飞行仿真转台完全跟踪控制[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(1): 113-118.
(Chen S L, Shan M L, Wang L B. Disturbance observer-based robust perfect tracking control for flight simulator[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(1): 113-118.)
- [19] 张翔, 叶佩青, 张辉. 基于组合继电反馈的永磁同步直线电机力波动辨识方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 1-9.
(Zhang X, Ye P Q, Zhang H. An identification method of force ripple in permanent magnet synchronous linear motors based on the combined relay apparatus[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 1-9.)
- [20] 张代林, 陈幼平, 艾武, 等. 基于观测器模型的直线电机干扰抑制技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(12): 14-18.
(Zhang D L, Chen Y P, Ai W, et al. Research on disturbance suppression technology for linear motors based on a disturbance observer model[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(12): 14-18.)

作者简介

曹伟(1977—), 男, 副教授, 博士, 从事迭代学习控制等研究, E-mail: yiyuqq168@163.com;

乔金杰(1979—), 女, 副教授, 博士, 从系统工程等研究, E-mail: qiaojinjie-2002@163.com;

孙明(1979—), 男, 教授, 博士, 从事神经网络与优化控制等研究, E-mail: gjg1998@126.com.

(责任编辑: 齐 霁)