

基于干扰观测器的多直线电机终端滑模交叉耦合控制

丁波¹, 颜文旭¹, 倪宏宇²

(1. 江南大学物联网工程学院, 江苏 无锡 214122;

2. 国网绍兴供电公司, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 为了实现多永磁直线同步电机高精度协同控制, 设计了基于相邻交叉耦合和干扰观测器的终端滑模控制方法。首先, 建立了单个永磁直线同步电机的动力学模型。其次, 考虑到系统的同步性能, 引入了一种改进的相邻交叉耦合控制, 以减少电机之间的同步误差。然后引入了终端滑模控制策略, 增强系统的稳定性和鲁棒性。在实际系统中存在不可避免的扰动, 会影响系统跟踪性能, 本文引入了干扰观测器来估计扰动, 并将其作为控制器的前馈补偿。然后, 利用李雅普诺夫稳定性理论验证了该方法的有效性。最后, 以三台电机为例, 在基于 dSPACE 控制器的永磁直线同步电机实验平台上进行了实验。实验结果表明, 该方法具有良好的同步控制性能。

关键词: 永磁直线同步电机; 交叉耦合控制; 终端滑模; 干扰观测器

DOI: 10.12067/ATEEE2009009

文章编号: 1003-3076(2021)04-0068-06

中图分类号: TP273

1 引言

近年来, 直线电机以其高精度、低损耗的特点在工业上得到了广泛的应用。传统的旋转电机通过齿轮等机械传动装置来产生直线运动, 而直线电机不需要中间转换装置就能产生直线运动, 减小了机械损耗^[1,2]。在众多的直线电机中, 永磁直线同步电机 (Permanent Magnet Linear Synchronous Motor, PMLSM) 由于结构简单、高速、高推力等优点在工业中备受关注^[3]。随着制造工艺和产品质量的需求不断提高, 单台电机很难满足工业生产的要求。高精度协调控制在零部件加工、零部件装配等工业生产中的应用越来越广泛^[4,5]。因此, 改进多电机同步控制技术对工业生产意义重大。然而, 电机在运行时存在不可避免的外部负载和非线性摩擦力, 会影响电机的同步控制, 降低系统跟踪性能, 这增加了多电机同步控制器设计的难度。

同步控制技术包括控制结构和控制算法两个方面。主从控制结构是一种传统的多电机系统控制结构, 它的特点是每台电机的速度信号由前一台电机提供, 因此存在同步延迟^[6,7]。主从控制只适用于

对电机实时同步要求较低的场合。为了获得更好的同步性能, 有学者提出了交叉耦合技术以减少同步误差。文献[8]和文献[9]在双电机系统中采用并联交叉耦合结构, 实现了精确的跟踪性能。该结构抗干扰能力强, 但不适用于两台以上电机的控制。为了解决这个问题, 有学者提出了相邻交叉耦合控制, 取得了良好的同步性能^[10,11]。相邻交叉耦合是一种基于最小相关轴数目的控制方法, 每个电机只考虑与相邻电机的同步^[12]。每台电机都包含跟踪控制器和同步控制器, 当系统中电机数量增加时, 系统的计算量增加, 系统的同步性能降低。本文参考相邻交叉耦合结构, 将跟踪误差和同步误差结合, 得到一个新的综合误差, 并将跟踪控制器和同步控制器简化为一个控制器, 从而减少算法的计算量。

同步控制不仅依赖有效的控制结构, 也需要有效的控制算法。滑模控制 (Sliding Mode Control, SMC) 在电机驱动中应用广泛, 具有较强的鲁棒性和抗干扰能力^[13-15]。然而传统的滑模控制只能使跟踪误差渐进地收敛到零。近年来, 有学者提出终端滑模控制 (Terminal Sliding Mode Control TSMC), 其采用了非线性滑模面, 可以让跟踪误差能够在有限

收稿日期: 2020-09-05

基金项目: 国网浙江省电力公司集体企业科技项目 (SX-JT-KJ-2019-01)

作者简介: 丁波 (1995-), 男, 浙江籍, 硕士, 研究方向为永磁直线同步电机控制;

颜文旭 (1971-), 男, 福建籍, 教授, 博士, 研究方向为电力电子技术及智能控制、电力系统及其自动化。

时间内收敛到零^[16]。当外部扰动作用于电机上时, 滑模控制通常需要比较大的开关增益来保证速度的稳定, 然而, 这种开关切换策略通常会引起抖振现象。本文引入了干扰观测器对系统不确定性进行估计, 并前馈补偿给滑模控制器, 从而降低扰动对跟踪性能的影响。

综上所述, 为了实现多 PMLSM 系统的同步控制, 本文提出了一种基于干扰观测器的终端滑模交叉耦合控制策略。首先为了获得精确的同步性能, 引入了交叉耦合控制结构。为了增强系统的鲁棒性并且让系统跟踪误差能够快速收敛, 提出了终端滑模和交叉耦合的控制策略。然后, 考虑到系统中存在未知的扰动, 引入了干扰观测器来估计扰动, 并将观测值补偿给滑模控制器, 使系统具有更强的抗干扰能力。最后, 以三台电机系统为例通过实验验证了所提算法的有效性和优越性。

2 永磁直线同步电机数学模型

PMLSM 的结构如图 1 所示, 它由初级和次级组成, 初级包含了滑块和绕组, 次级包括永磁体和轨道。PMLSM 可以看作是永磁同步电机切开再展平, 它的初级和次级类似于永磁同步电机的定子和转子。当电流通过绕组, 会产生水平方向的磁场, 被称为行波磁场, 它和永磁体的磁场相互作用, 产生了电磁推力, 从而使电机产生运动。

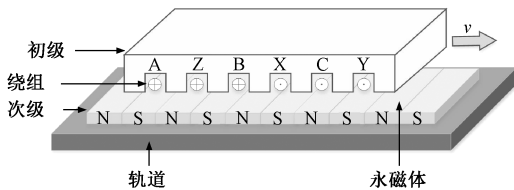


图 1 永磁直线同步电机结构图

Fig.1 Structure diagram of PMLSM

基于矢量控制的原理, PMLSM 在同步旋转坐标系下的电流状态方程可表示为:

$$\begin{cases} \dot{i}_d = (-R_s i_d + L\omega_e i_q + u_d) / L \\ \dot{i}_q = (-R_s i_q - L\omega_e i_d - \lambda_f \omega_e + u_q) / L \\ \omega_e = p_n \pi v / \tau \end{cases} \quad (1)$$

式中, i_d 、 i_q 、 u_d 、 u_q 分别为 d-q 轴的定子电流和电压; R_s 为定子电阻; L 为定子电感; ω_e 为定子角频率; λ_f 为永磁体磁链, p_n 为极对数; v 为电机线速度; τ 为极距。永磁直线同步电机的电磁推力方程表示如下:

$$F_e = K_t i_q = M \dot{v} + Bv + F \quad (2)$$

式中, F_e 为电机电磁推力; K_t 为推力系数; M 为电机质量; B 为摩擦系数; F 为扰动的集合, 包括外部扰动、摩擦力、参数摄动等干扰。为了便于表述, 状态方程可以写成:

$$\dot{v} = K_M i_q + B_M v + F_M \quad (3)$$

式中, $K_M = K_t / M$, $B_M = B / M$, $F_M = F / M$ 。

3 控制器设计

根据矢量控制的原理, PMLSM 控制系统可以解耦成速度环和电流环, 本文重点设计速度环控制器, 电流环则直接采用 PI 控制器。本节通过相邻交叉耦合控制结构、干扰观测器和终端滑模控制器三个方面逐步描述控制器的设计过程。

3.1 交叉耦合控制

相邻交叉耦合控制的核心思想是只考虑相邻电机的运动对每台电机的影响, 简化了控制方式和耦合程度。本文研究了多直线永磁同步电动机的速度跟踪和同步问题。首先, 定义电机 i 的速度跟踪误差:

$$e_i = v_i - v^* \quad (4)$$

式中, v_i 为第 i 台电机的线速度; v^* 为参考速度。定义相邻电机的同步误差如下:

$$\begin{cases} \varepsilon_1 = e_1 - e_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_i = e_i - e_{i+1} \\ \vdots \\ \varepsilon_n = e_n - e_1 \end{cases} \quad (5)$$

将跟踪误差和同步误差结合, 定义新的综合误差如下:

$$\sigma_i = e_i + c\varepsilon_i \quad (6)$$

式中, $c > 0$ 是一个正常数。综合误差是本文的控制目标, 将其写成矩阵形式如下:

$$AE = N \quad (7)$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} c+1 & -1 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots \\ 0 & & c+1 & -1 & \cdots & 0 \\ \vdots & & & & \ddots & \\ -1 & \cdots & & & \cdots & c+1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$E = [e_1 \quad \cdots \quad e_i \quad \cdots \quad e_n]^T \quad (9)$$

$$N = [\sigma_1 \cdots \sigma_i \cdots \sigma_n]^T \quad (10)$$

不难发现 A 是一个非奇异矩阵,如果令 $N = 0$,可以得到 $E = 0$,即速度跟踪误差会趋于零,进一步可以得到 $\varepsilon_1 = \cdots \varepsilon_i = \cdots \varepsilon_n = 0$,即同步误差也将趋于零。相邻交叉耦合控制的控制框图如图2所示。

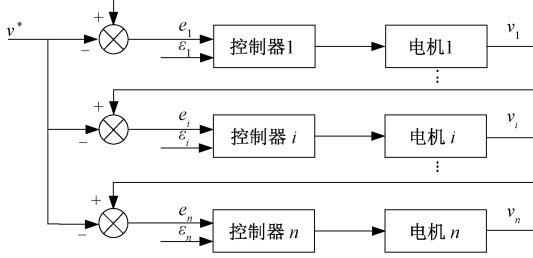


图2 相邻交叉耦合控制结构图

Fig.2 Diagram of cross-coupled control structure

3.2 干扰观测器

为了降低未知扰动对系统跟踪性能和同步性能的影响,本文引入干扰观测器对未知扰动进行估计。针对电机运动系统,定义干扰观测器如下:

$$\hat{F} = y + lv \quad (11)$$

$$\dot{y} = -l(K_i i_q + Bv + \hat{F})/M$$

式中, l 为观测器增益 $l > 0$; y 为观测器状态变量。假设扰动是慢时变的,定义观测器误差为:

$$\tilde{F} = F - \hat{F} \quad (12)$$

为了证明观测器的有效性,定义李雅普诺夫函数如下:

$$V_0 = \frac{1}{2} \tilde{F}^2 \quad (13)$$

求微分可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_0 &= \tilde{F} \dot{\tilde{F}} = \tilde{F} (\dot{F} - \dot{\hat{F}}) \\ &= \tilde{F} (\dot{y} - l\dot{v}) \\ &= \tilde{F} [l(\dot{v} - \tilde{F}/M) - l\dot{v}] \\ &= -l\tilde{F}^2/M \leq 0 \end{aligned} \quad (14)$$

因此观测器误差将会趋于零,扰动可以被观测,观测值将会补偿给终端滑模控制器。

3.3 终端滑模控制器

终端滑模控制器的目的是使综合误差趋于零,进而使跟踪误差和同步误差都趋于零。设计滑模切换函数为

$$s_i = \int_0^t \sigma_i d\tau + \beta \sigma_i^{p/q} \quad (15)$$

式中, β 为正常数; p, q 为正奇数,且 $p > q$ 。定义李雅普诺夫函数为:

$$V_i = \frac{1}{2} s_i^2 \quad (16)$$

求微分可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= s \dot{s} = s(\sigma_i + \beta p/q \cdot \sigma_i^{p/q-1} \dot{\sigma}_i) \\ &= s \{ \sigma_i + \beta p/q \cdot \sigma_i^{p/q-1} [(1+c)(\dot{v}_i - \dot{v}^*) - c\dot{e}_{i+1}] \} \\ &= s \{ \sigma_i + \beta p/q \cdot \sigma_i^{p/q-1} [K_M(1+c)i_q + \Lambda] \} \end{aligned} \quad (17)$$

式中, $\Lambda = (1+c)(B_M v + F_M - \dot{v}^*) - c\dot{e}_{i+1}$, 控制器可以设计如下:

$$i_{qi}^* = \frac{1}{K_M(1+c)} \left[-\Lambda - \frac{q}{\beta p} \sigma_i^{2-(p/q)} - k_1 \text{Sat}(\sigma_i) \right] \quad (18)$$

式中, $k_1 > 0$ 为控制器增益; $\text{Sat}(\cdot)$ 为饱和函数,其定义如下:

$$\text{Sat}(s) = \begin{cases} 1 & s > z \\ (1/z)s & |s| \leq z \\ -1 & s < -z \end{cases} \quad (19)$$

式中, z 为边界层,因此 \dot{V}_i 可以表达为:

$$\begin{aligned} \dot{V}_i &= s \left[\sigma_i + \frac{\beta p}{q} \sigma_i^{(p/q)-1} \left(-\frac{q}{\beta p} \sigma_i^{2-(p/q)} - k_1 \text{Sat}(s) \right) \right] \\ &= -k_1 \beta p/q \cdot \sigma_i^{p/q-1} s \cdot \text{Sat}(s) \leq 0 \end{aligned} \quad (20)$$

根据李雅普诺夫稳定性理论,系统的速度环是渐进稳定的。为了更加清楚地表达控制器的结构,本文列出单个 PMLSM 的整体控制系统结构如图3所示。

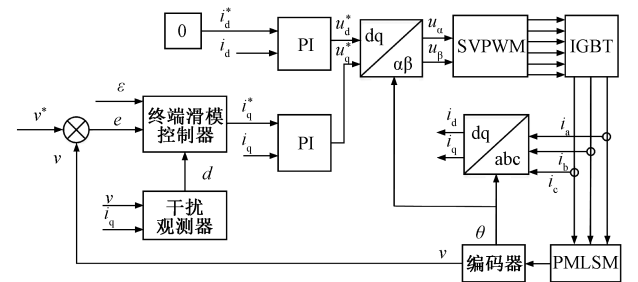


图3 基于干扰观测器的终端滑模控制结构

Fig.3 Control structure diagram of terminal sliding mode control based on disturbance observer

4 实验结果

为了验证本文所提算法的有效性,本文搭建了基于 dSPACE 控制器的直线电机实验控制平台如图4所示。dSPACE 是一个半实物实时仿真平台,它可

以将 MATLAB 仿真进行编译并转换成 C 代码,并下载到硬件控制器中。所有的控制算法均在 dSPACE 中实现。dSPACE 拥有丰富的接口资源,包括编码器接口和模数转换接口,分别用于读取增量式编码器的信号和电流传感器信号。电机轨道上安装了磁栅尺,电机上安装了增量式编码器来读取电机的位置信号,驱动器包含电流传感器来获取电机的电流信号。

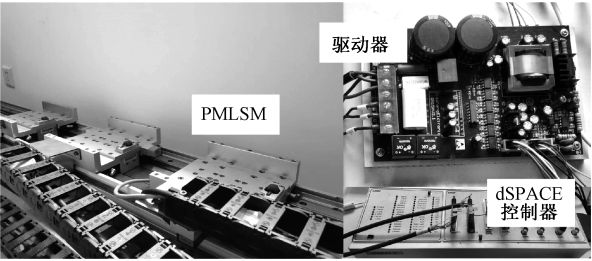


图 4 实验平台

Fig.4 Experimental platform

PMLSM 参数如表 1 所示。本文以三台 PMLSM 为例进行实验验证。系统的参考信号为 0.5 m/s 的阶跃信号,第一台电机的负载为 5 N,第二台电机的负载为 5 N,在 0.5 s 时突增到 10 N,第三台电机的负载为 10 N。本文将所提出的算法和传统的 PI 控制进行对比,其中 PI 控制采用主从控制结构。三台电机的控制器参数选择均一致,其中 PI 控制器的参数为 $K_p=20, K_i=20$,所提出的控制器的参数为 $c=5, \beta=0.1, p=5, q=3, k_1=500, l=100$ 。

表 1 永磁直线同步电机参数

Tab.1 Parameters of PMLSM

电机参数	数值	电机参数	数值
额定电压/V	220	定子电阻/ Ω	9.7
动子质量/kg	3.2	定子电感/H	0.0433
粘滞系数/($N \cdot s/m$)	0.5	磁链/Wb	0.165
极距/mm	27	极对数	2

实验结果如图 5~图 11 所示,具体的实验数据如表 2 所示。图 5 和图 6 分别是所提出的算法和主从 PI 控制的速度响应曲线,可以看到所提出的算法具有较快的响应速度和较小的超调。当负载突然增大时,通过干扰观测器的补偿,所提出的算法速度下降比较小,速度恢复所用时间也比较短。图 7 和图 8 为两种方法的速度跟踪误差曲线,可以看到两者稳态误差比较接近,但所提出的算法误差收敛更快。图 9 和图 10 是三个电机之间的同步误差,可以看出不管是在电机启动中、稳态运行时还是受到突加负

载,所提出的算法的同步误差均远远小于主从 PI 控制算法。图 11 为第二台电机的给定负载和干扰观测器的估计值,可以看到干扰观测器能精确地观测到扰动的值。

表 2 实验数据

Tab.2 Experiment data

控制方法	指标	电机 1	电机 2	电机 3
提出的控制方法	超调(%)	1.1	0.5	0.2
	速度下降/(m/s)	0.007	0.009	0.006
	稳态跟踪误差/(m/s)	0.001 7	0.001 6	0.001 6
	稳态同步误差/(m/s)	0.000 5	0.000 6	0.000 5
主从 PI 控制方法	超调(%)	6.0	12.0	16.0
	速度下降/(m/s)	0	0.015	0.015
	稳态跟踪误差/(m/s)	0.001 5	0.002 3	0.002
	稳态同步误差/(m/s)	0.001 6	0.001	0.0018

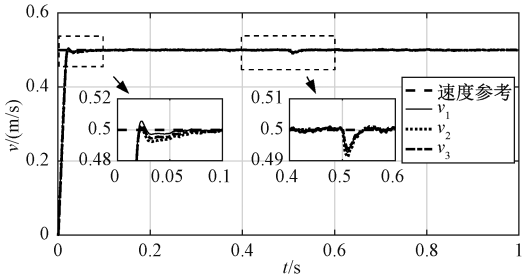


图 5 所提出方法的速度响应

Fig.5 Speed response of proposed method

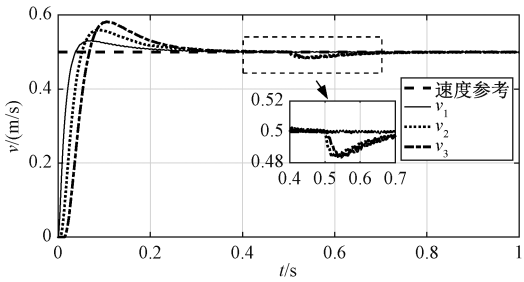


图 6 主从 PI 控制的速度响应

Fig.6 Speed response of master-slave PI control

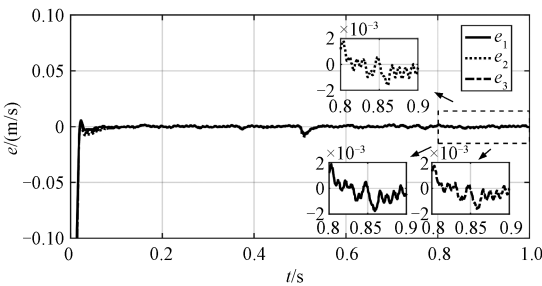


图 7 所提出方法的速度跟踪误差

Fig.7 Speed tracking error of proposed method

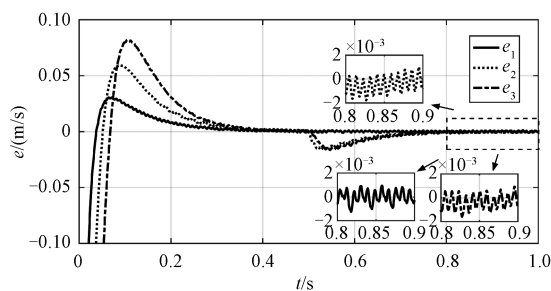


图8 主从PI控制的速度跟踪误差

Fig.8 Speed tracking error of master-slave PI control

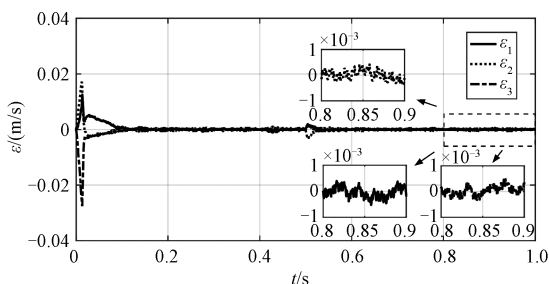


图9 所提出方法的同步误差

Fig.9 Synchronization error of proposed method

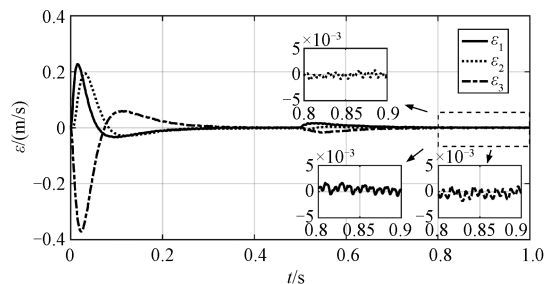


图10 主从PI控制的同步误差

Fig.10 Synchronization error of master-slave PI control

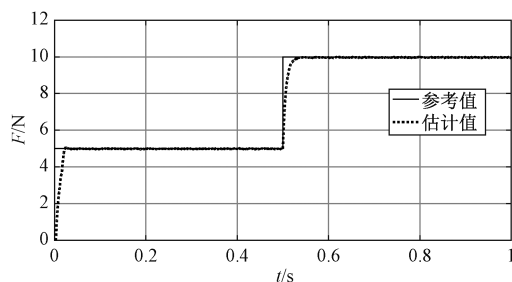


图11 第二台电机扰动给定值和估计值

Fig.11 Disturbance and estimation of motor 2

5 结论

本文针对多 PMLSM 系统的速度同步控制,设计了一种基于干扰观测器的终端滑模交叉耦合控制

方法。交叉耦合控制结构保证了各个电机之间有更好的同步性,终端滑模控制加快了系统的响应速度并且增强了系统的鲁棒性,干扰观测器增加了系统的抗干扰能力。通过实验表明了所提出的算法的有效性,该算法比传统的主从 PI 控制具有更好的跟踪性能和抗干扰能力。

参考文献 (References):

- [1] Liu Y, Zhang X, Niu S. Permanent magnet linear motor with complementary flux and its optimization [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55 (6): 1-5.
- [2] 颜文旭, 黄杰, 许德智 (Yan Wenxu, Huang Jie, Xu Dezhi). 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) [J]. 控制与决策 (Control and Decision), 2018, 33 (8): 1399-1406.
- [3] 康凯, 徐伟东, 徐蓉, 等 (Kang Kai, Xu Weidong, Xu Rong, et al.). 不同初始温度下脉冲大电流直线电机驱动性能研究 (Study on driving performance of high current linear motor with different initial temperature) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (11): 69-75.
- [4] Zhao D, Li C, Ren J. Speed synchronisation of multiple induction motors with adjacent cross-coupling control [J]. IET Control Theory & Applications, 2010, 4 (1): 119-128.
- [5] Zeng X, Wang Y, Song D, et al. Coordinated control algorithm of a dual motor for an electric variable transmission hybrid system [J]. IEEE Access, 2018, 6: 35669-35682.
- [6] Li X. Study on master-slave control of telerobot based on load impedance identifier [A]. 2009 International Conference on Mechatronics and Automation [C]. Changchun, China, 2009.
- [7] Talapur G, Suryawanshi H, Shitole A, et al. Master-slave control based reliable micro-grid with back-to-back voltage source converter as master DG. [A]. IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society [C]. Beijing, China, 2017.
- [8] Lin F, Chou P, Chen C, et al. DSP-based cross-coupled synchronous control for dual linear motors via intelligent complementary sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (2): 1061-1073.
- [9] He F, Wang C. Cross-coupling synchronous control of du-

- al-motor networked motion control system [A]. 2017 36th Chinese Control Conference [C]. Dalian, China, 2017. 7628-7633.
- [10] Zhao D, Li C, Ren J. Speed synchronisation of multiple induction motors with adjacent cross-coupling control [J]. IET Control Theory & Applications, 2010, 4 (1): 119-128.
- [11] Huang Z, Li Y, Song G, et al. Speed and phase adjacent cross-coupling synchronous control of multi-excitors in vibration system considering material influence [J]. IEEE Access, 2019, 7: 63204-63216.
- [12] 曹玲芝, 李春文, 牛超, 等 (Cao Lingzhi, Li Chunwen, Niu Chao, et al.). 基于相邻交叉耦合的多感应电机滑模同步控制 (Synchronized sliding mode control for multi induction motors based on adjacent cross-coupling) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2008, 12 (5): 586-592.
- [13] 孙鹏琨, 葛琼璇, 张波, 等 (Sun Pengkun, Ge Qiong-xuan, Zhang Bo, et al.). 基于滑模观测器的高速磁浮无传感器控制 (Sensorless control of high-speed maglev based on sliding mode observer) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 39 (4): 22-29.
- [14] Guo S, Lin-Shi X, Allard B, et al. Digital sliding-mode controller for high-frequency DC/DC SMPS [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25 (5): 1120-1123.
- [15] Incremona G, Rubagotti M, Ferrara A. Sliding mode control of constrained nonlinear systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62 (6): 2965-2972.
- [16] Xu S, Chen C, Wu Z. Study of nonsingular fast terminal sliding-mode fault-tolerant control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62 (6): 3906-3913.

Disturbance observer based cross-coupled control for multiple linear motors via terminal sliding mode control

DING Bo¹, YAN Wen-xu¹, NI Hong-yu²

(1. School of Internet of Things, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China)

Abstract: To solve the cooperative control problem of multiple permanent magnet linear synchronous motor (multi-PMLSM), this paper proposes a novel control strategy combined with adjacent cross-coupling control and terminal sliding mode control (TSMC) based on disturbance observer (DOB). First, the dynamic model of single permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) is established. Considering the synchronization performance of the system, a modified adjacent cross-coupling control is introduced to reduce the synchronization error between the multiple motors. Then a terminal sliding mode control is proposed to ensure the stability and robustness of the system. And it can accelerate the convergence of the system. There are uncertain dynamics in practical system which are unavoidable, so to prevent the influence of the disturbance on system stability, this paper introduces a disturbance observer which is used to estimate the disturbance. The proposed approach is verified by the Lyapunov stability theory. Finally, taking the three-motor system as an example, experiments are carried out in the experimental platform based on dSPACE. The experimental results prove the proposed method has a good synchronous control performance.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor; cross-coupled control; terminal sliding mode control; disturbance observer