

# 永磁直线同步电机的 自适应 Backstepping 滑模控制研究

谭 潇, 谷爱昱

(广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 针对永磁直线同步电机(PMLSM)控制系统的不确定性因素,提出了自适应 Backstepping 滑模控制器,实现运动跟踪。建立 PMLSM 系统模型,采用 Backstepping 设计,在滑模控制的基础上,基于 Lyapunov 函数设计自适应率,改善控制性能。仿真结果表明,系统具有稳定快速的跟踪性能,考虑实际系统中参数不确定性因素,控制器仍具有较强鲁棒性。

**关键词:** 永磁直线同步电机;自适应 Backstepping 滑模控制;不确定性

## Research on adaptive Backstepping sliding mode control of permanent magnet linear synchronous motor

TAN Xiao, GU Ai Yu

(College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** An adaptive backstepping sliding mode controller is proposed to realize the motion tracking for the uncertainty of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM). The model of PMLSM is developed. Based on the conventional sliding mode control, an adaptive law is designed based on the Lyapunov function to improve the control performance. The simulation results show that the system obviously improves stable and fast tracking performance. Furthermore, it keeps robust concerning the uncertainty of parameters in actual control system.

**Key words:** PMLSM; adaptive backstepping sliding mode control; uncertainty

现代直线伺服系统正向着高速、高精度的方向发展。当定位精度超过 0.01mm/s 时,传统的“旋转电机+滚珠丝杠副”构成的直线运动系统便不能满足这种要求。由直线电机构成的直接驱动系统取消了从电机到工作台之间的一切中间传动环节,将进给传动链的长度缩短为零,其在精度、快速性、耐久性等方面具有明显优势。而永磁直线同步电机(PMLSM)更具有推力大、惯性低、响应快、发热少、精度高等优点,已经在数控机床、工业机器人等场合得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。

由于直线电机采用“零传动”技术,系统的参数摄动、负载扰动等不确定因素的影响将直接反映到直线电机的运动控制中,没有任何中间环节的缓冲,增加了控制难度。此外,直线电机系统是一个多变量、非线性、强耦合的系统,存在摩擦力、负载力、齿槽效应和端部效应引起的气隙磁场密度不均匀、不对称而造成的纹波推力,以及电流谐波带来的电磁谐波推力干扰等问题<sup>[2]</sup>。

因此,必须采取有效的控制策略来削弱扰动对系统性能的影响。近年来不少研究者致力于将先进的控制方法应用于 PMLSM(Permanent magnet linear synchronous Motor)伺服系统中。Sugiura 等人<sup>[3]</sup>研究了直线电机 PID 控制策略,并取得了较好的控制性能,但对负载扰动大及位置、速度跟踪精度要求高的场合,PID 控制器不能提供令人满意的性能。针对系统存在较大干扰的情况,文献[4]中提出了利用干扰观测器消除直线电机的电磁推力的干扰。但是在直线电机控制过程中受到的干扰力无法用一个完全确定的模型来描述,所以此种方法在实际应用过程不能达到对干扰的完全补偿,而且由于直线电机干扰的阶数过高<sup>[5]</sup>,调试工作有一定的困难。

自适应反推控制<sup>[6]</sup>是针对对象特性的变化、漂移及环境干扰的影响而提出的一种新控制方法。它采用非线性系统的递归设计方法,很好地解决了对象

参数不确定的鲁棒控制问题。自适应反推控制的基本思想是通过反复选择的合适的状态空间函数作为其控制输入，每个反推过程结果将产生一个基于先前过程的控制量输出，当迭代终止时，基于 Lyapunov 函数的优化目标，控制系统就可获得实际控制器输入。对于滑模控制，当系统在滑动模态运行时具有很强的鲁棒性。

本文在建立 PMLSM 系统模型的基础上，建立了控制实验系统。分析了系统中因参数改变而引起的不确定性，设计了适应 Backstepping 的滑模控制，提高了系统鲁棒性和响应的快速性，从而使控制器满足实际焊接控制的要求。

## 1 PMLSM 数学模型及分析

通过 Park 变换，在 dq 坐标下 PMLSM 的机械运动方程为：

$$\frac{ds}{dt} = v \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{P}{M} [(L_d - L_q) i_d + \phi_f] i_q - \frac{B_v}{M} v - \frac{F_L}{M}$$

式中： $i_d, i_q$ ——d、q 轴动子电流

$L_d, L_q$ ——d、q 轴动子电感

$\phi_f$ ——定子永磁体磁链

$s$ ——动子的线位移

$v$ ——动子线速度

$F_L$ ——包括端部应力在内的负载阻力

$M$ ——动子和负载的总质量

$B_v$ ——粘滞摩擦系数

$p$ ——极对数

令状态  $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2]^T = [s \ v]^T$ ，输入  $\mathbf{u} = [u_1 \ u_2]^T = [i_d \ i_q]^T$ ，并假设  $i_d = 0$ ，则 PMLSM 系统的数学模型可简化为：

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2)$$

$$\dot{x}_2 = k_1 i_q + k_2 x_2 - \frac{F_L}{M}$$

$$\text{式中：} k_1 = \frac{P}{M} \phi_f, k_2 = -\frac{B_v}{M}$$

控制系统设计的目标是构造一个鲁棒位置控制器，保证在出现参数和阻力变化时，系统运行的位移和速度能精确跟踪参考信号；同时系统具有良好的鲁棒性，满足实际系统工作的需要。

在实际的控制系统中，由于 DSP 具有高速运行速度和高信号处理能力而广泛应用于控制器的设计中。本实验系统以 TMS320LF2812 为核心构建了 PMLSM 伺服系统，系统主要由永磁直线同步电动机、PC+DSP 运算控制单元、IPM 主回路功率变换单元、动子电流检测单元和直线光栅尺速度检测单元等组成。其硬件结构如图 1 所示。

## 2 Backstepping 控制器的设计

对于被控对象 PMLSM，写成标准形式：

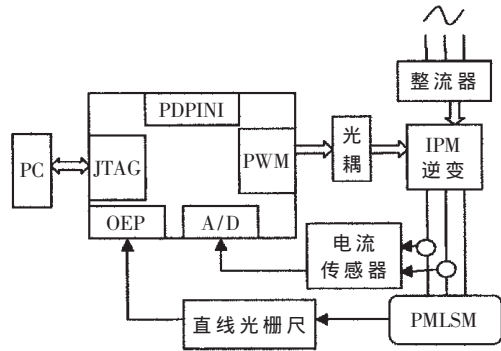


图 1 基于 DSP 的永磁直线同步电机控制系统硬件结构图

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (3)$$

$$\dot{x}_2 = f(\mathbf{x}, t) + g(\mathbf{x}, t)u$$

其中： $f(\mathbf{x}, t) = k_2 x_2 - \frac{F_L}{M}$ ， $g(\mathbf{x}, t) = k_1 \neq 0$ 。

定义位置误差：

$$z_1 = x_1 - z_d \quad (4)$$

其中  $z_d$  为指令信号，则：

$$\dot{z}_1 = \dot{x}_1 - \dot{z}_d = x_2 - \dot{z}_d \quad (5)$$

定义控制量：

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 + \dot{z}_d \quad (6)$$

其中： $c_1 > 0$

定义：

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (7)$$

定义 Lyapunov 函数：

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (8)$$

则：

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1 (x_2 - \dot{z}_d) = z_1 (z_2 + \alpha_1 - \dot{z}_d) = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2$$

若  $z_2 = 0$ ，则  $\dot{V}_1 \leq 0$ 。

定义 Lyapunov 函数：

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 \quad (9)$$

由于：

$$\dot{z}_2 = \dot{x}_2 - \dot{\alpha}_1 = f(\mathbf{x}, t) + g(\mathbf{x}, t)u - c_1 \dot{z}_1 + \ddot{z}_d$$

则：

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 [f(\mathbf{x}, t) + g(\mathbf{x}, t)u - c_1 \dot{z}_1 + \ddot{z}_d]$$

设计控制器：

$$u = \frac{1}{g(\mathbf{x}, t)} [-f(\mathbf{x}, t) - c_2 z_2 - z_1 - c_1 \dot{z}_1 + \ddot{z}_d] \quad (10)$$

其中： $c_2 > 0$ 。

因此：

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 \leq 0 \quad (11)$$

由 Lyapunov 稳定性理论<sup>[7]</sup>可知， $z_1, z_2$  分别以指数形式渐进稳定，系统以全局渐进稳定。

### 3 自适应 Backstepping 滑模控制器的设计

在实际的 PMLSM 伺服系统中, 存在较多参数和结构的不确定性以及外加干扰, 通常由于边端效应、齿槽效应等引起推力变化。上述基于确定系统设计的 Backstepping 控制器, 在实际控制中存在较大程度的不适应, 因此要设计具有鲁棒性的控制器, 满足实际系统中存在的干扰及不确定性因素的影响。

考虑式(2)所示的 PMLSM 系统, 若其存在干扰及不确定性因素, 其系统可描述成如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= (k_2 + \Delta k_2)x_2 + (k_1 + \Delta k_1)\dot{i}_q - \frac{F_L}{M} + d(t) \end{aligned} \quad (12)$$

$$y = x_1$$

式中:  $\Delta k_2$ 、 $\Delta k_1$  是系统建模不确定性,  $d(t)$  为外加干扰。

因此:

$$\dot{x}_2 = k_1 \dot{i}_q + k_2 x_2 + \Delta k_2 x_2 + \Delta k_1 \dot{i}_q - \frac{F_L}{M} + d(t) \quad (13)$$

令:  $F = \Delta k_2 x_2 + \Delta k_1 \dot{i}_q - \frac{F_L}{M} + d(t)$  为总的总的不确定, 假设其变化是

缓慢的, 则  $\dot{F} = 0$ 。

设位置指令为  $y_d$ , 则跟踪误差为:

$$z_1 = y - y_d \quad (14)$$

定义稳定项:

$$\alpha_1 = c_1 z_1, \quad c_1 > 0 \quad (15)$$

按照 PMLSM 模型的思路, 定义 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (16)$$

定义:

$$z_2 = \dot{z}_1 + \alpha_1 \quad (17)$$

则:

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (18)$$

定义 Lyapunov 函数:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} \sigma^2 \quad (19)$$

其中:  $\sigma$  为切换函数

定义切换函数为:

$$\sigma = k z_1 + z_2 \quad k > 0 \quad (20)$$

则:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + \sigma \dot{\sigma} = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \\ &\sigma [k(z_2 - c_1 z_1) + k_2(z_2 + \dot{y}_d - \alpha_1) + k_1 u + F - \ddot{y}_d - \dot{\alpha}_1] \end{aligned}$$

设计控制器时要取  $F$  的上界, 因为  $F$  未知, 容易造成控制器抖振。可采用自适应算法对  $F$  进行估计。

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2\gamma} \hat{F}^2 \quad (21)$$

其中,  $\hat{F}$  为  $F$  的估计值,  $\gamma > 0$ ,  $F$  的估计误差为  $\bar{F} = F^* - \hat{F}$  则:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + \frac{1}{\gamma} \hat{F} \dot{\hat{F}} = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 + \sigma [k(z_2 - c_1 z_1) \\ &+ k_2(z_2 + \dot{y}_d - \alpha_1) + k_1 u + \bar{F} - \ddot{y}_d - \dot{\alpha}_1] - \frac{1}{\gamma} \hat{F} (\dot{\hat{F}} - \gamma \sigma) \end{aligned}$$

设计自适应控制器:

$$\begin{aligned} u &= \frac{1}{k_1} [-k(z_2 - c_1 z_1) - k_2(z_2 + \dot{y}_d - \alpha_1) \\ &- \bar{F} - \ddot{y}_d - \dot{\alpha}_1 - h(\sigma + \beta \text{sgn}(\sigma))] \end{aligned} \quad (22)$$

设计自适应律为:

$$\dot{\hat{F}} = \gamma \sigma \quad (23)$$

所以:  $\dot{V}_3 = z_1 z_2 - c_1 z_1^2 - h\sigma^2 - h\beta|\sigma|$

取:

$$Q = \begin{bmatrix} c_1 + h k_1^2 & h k_1 - \frac{1}{2} \\ h k_1 - \frac{1}{2} & h \end{bmatrix}, \quad z = [z_1 \quad z_2]$$

通过选取  $h$ 、 $c_1$  和  $k_1$  的值, 使得  $|Q| > 0$ , 从而保证  $Q$  为正定矩阵。则:

$$\dot{V}_3 = -z^T Q z - h\beta|\sigma| \leq 0 \quad (24)$$

由 Lyapunov 稳定性理论可知, 在系统存在不确定性因素及干扰的情况下, 全局渐进是稳定的。控制器设计满足系统要求。

### 4 仿真结果及分析

通过仿真验证自适应 Backstepping 控制在 PMLSM 系统控制中应用的有效性, 其参数标称值为<sup>[8]</sup>:

永磁直线同步电机的仿真参数:  $R_s = 18.7\Omega$ ,  $L_d = L_q = L = 26.82\text{mH}$ ,  $M_n = 11\text{kg}$ ,  $p = 3$ ,  $\phi_f = 0.171 \text{ 7Wb}$ ,  $B_m = 1.2\text{N} \cdot \text{s/m}$ ,  $F_{en} = 100\text{N}$ 。系统在精确建模的基础上, 采用 Backstepping 设计。系统跟踪正弦曲线, 结果显示在很短时间内达到期望轨迹, 响应速度快且跟踪误差极小。图 2 是相应的速度变化, 证明了基于 Backstepping 的控制器较为合理,

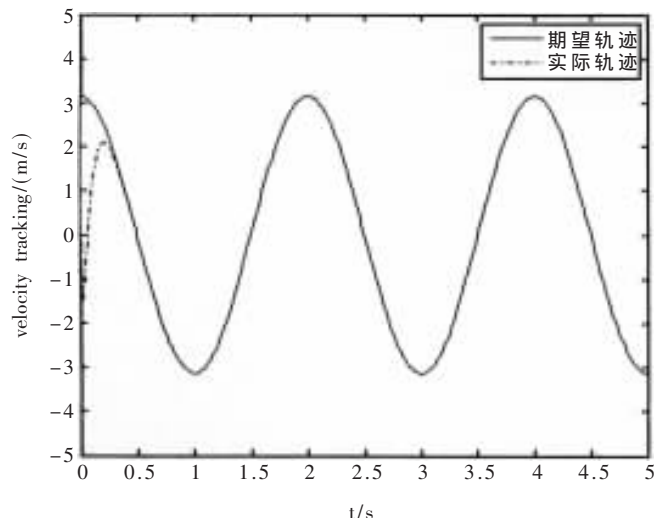


图 2 理想情况下 PMLSM 系统速度响应曲线

满足系统稳定、快速响应的要求。对电机的位置控制而言是较为理想的控制算法,但其对具有模型不确定性和干扰的影响不具有鲁棒性。

自适应 Backstepping 滑模控制器在 Backstepping 设计方法的基础上集合了滑模控制的鲁棒性和自适应控制的智能性,使得控制器的设计满足 PMLSM 系统位置跟踪控制的要求。由于不确定因素存在,因此  $F=F_m+5\sin(t)$ , 其中  $5\sin(t)$  为外部干扰力。取  $r=20, h=12, c_1=50, k=30$ , 其跟踪误差如图 3 所示。由图 3 可以看出,跟踪误差在  $-0.04\sim+0.04$  之间,误差较小,基本满足控制系统精度的要求。图 4 是控制量的变化曲线,可以看出控制器输入值变化平稳。图 5 是模型不确定因素的估计。

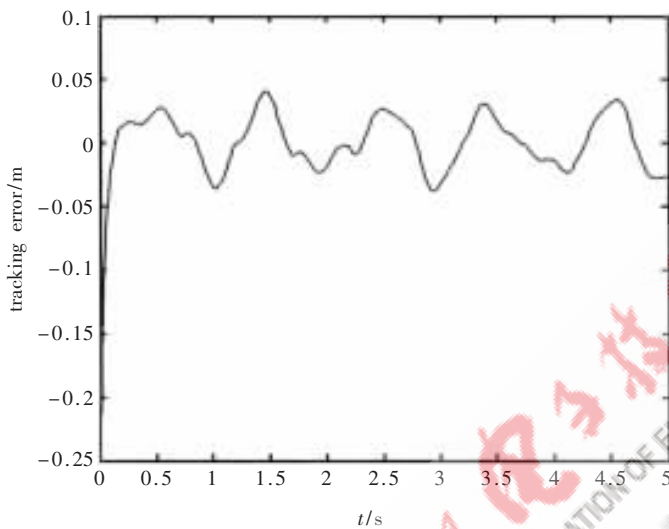


图 3 位置跟踪误差曲线

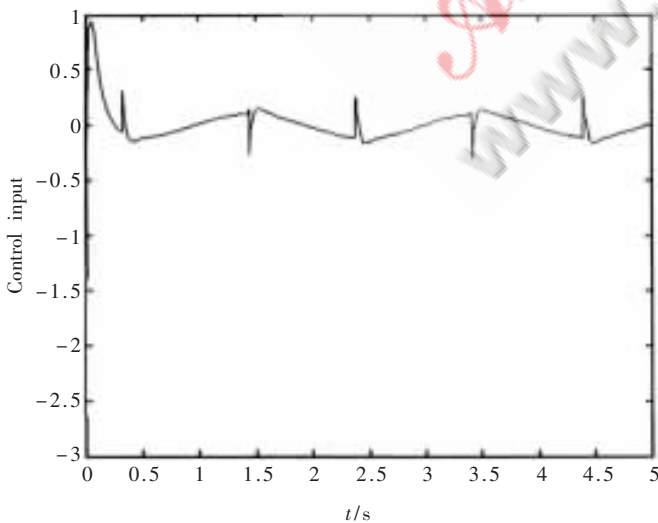


图 4 控制输入

仿真表明,该控制器克服了不确定干扰或摩擦等对象参数的不确定性,控制系统具有较强的鲁棒性。本文提出的新型控制器为实际转台系统调试提供了很好的理论基础。

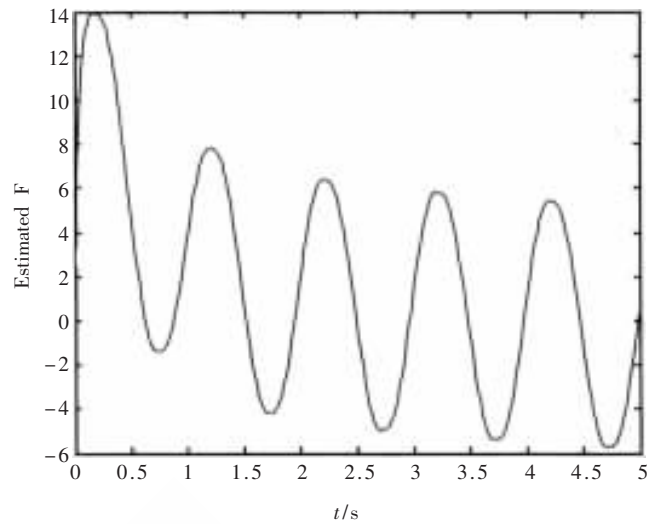


图 5 模型不确定因素估计

本文针对 PMLSM 系统的外界干扰及参数摄动等各种不确定因素,提出了一种自适应反推滑模控制方法。该控制器结构简单,跟踪性能好。通过对某一实际 PMLSM 系统仿真表明,该方法收敛速度快,控制系统具有很强的鲁棒性。

### 参考文献

- [1] 郭庆鼎,王元成,周美文,等.直线交流伺服系统的精密控制技术[M].北京:机械工业出版社,2000.
- [2] 许振伟,蒋静坪,骆再飞.模糊模型算法控制的永磁同步电动机位置伺服系统[J].电工技术学报,2003,18(4): 99-102.
- [3] SUGIURA M, YAMAMOTO. The basic characteristics of two-degree-of-freedom PID position controller using a simple design method for linear servo motor drives[C]. Advanced Motion Control, AMC'96-MIE, 1996: 59-64.
- [4] TAN K K. Precision motion control with disturbance observer for pulse width-modulated-driven permanent-magnet linear motors[J]. IEEE Trans. Magnetics, 2003, 39(3): 1813-1818.
- [5] 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.
- [6] SHIEH H J, SHYU K K. Nonlinear sliding mode torque control with adaptive backstepping approach for induction motor drive, IEEE Trans, 1999, IE-46: 380-389.
- [7] SLOTINE J E, Li W. 应用非线性控制[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [8] 孙宜标,杨雪,夏加宽.基于二阶滑模的永磁直线同步电机的鲁棒速度控制[J].电工技术学报,2007,22(10): 36-39.

(收稿日期:2008-06-11)