

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.06.019

# 带积分补偿器的永磁直线同步电机滑模控制研究

柳应全, 卢琴芬, 叶云岳\*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 为了解决传统滑模变结构中存在的低频抖振现象和抗扰动能力较低问题,提出了在控制对象前端引入积分环节的带补偿器方案。在对永磁直线同步电机(PMLSM)的数学模型进行分析的基础上建立了位置环滑模变结构控制状态方程和等效控制模型,提出了更为精确全面的控制参数和等效模型参数的确定方法;以平板式直线永磁同步电机的电机参数为例进行了计算机仿真实验,仿真结果验证了带积分补偿器结构的可行性和有效性。研究表明,与传统的滑模变结构相比较,带积分补偿器结构能够较好地克服系统受外力干扰和负载变化所产生的振荡现象,有效地削弱了滑模变结构的抖振现象;通过分析可知,该结构还能克服系统转子质量和永磁铁磁链的扰动产生的系统振荡,提高系统的鲁棒性和控制精度。

**关键词:** 永磁直线同步电机; 滑模控制; 积分补偿器; 伺服控制

中图分类号: TM341; TP359.4; TH39 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)06-0717-04

## Sliding mode control with integral compensator structure for permanent magnet linear synchronous machine

LIU Ying-quan, LU Qin-fen, YE Yun-yue

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Aiming at solving the high-frequency chattering and low anti-disturbance capacity in conventional variable structure control (VSC) method with sliding mode, a compensator scheme by introducing integral structure before control object was proposed. Based on the analysis of the permanent magnet linear synchronous machine (PMLSM) mathematical model, the position loop VSC state equations and equivalent control model were established and more accurate and comprehensive method for determining the control parameters and the equivalent model parameters was analyzed. Computer simulation with the motor parameters of a plate PMLSM verifies the feasibility and effectiveness of the compensator structure. The results indicate that the proposed structure, compared with the conventional VSC, can solve the vibration caused by external disturbance and load variations, and attenuate effectively the chattering. Through the analysis, the proposed structure can also overcome the system oscillations generated by mover mass and permanent magnet flux linkage, and improve the robustness and control precision of the system.

**Key words:** permanent magnet linear synchronous machine (PMLSM); sliding mode control; integral compensator; servo control

## 0 引 言

永磁直线同步电机具有推力强度高、传输效率高、响应快速等一系列优点,因而在高速、高精运动控制领域得到了日益广泛应用<sup>[1]</sup>。传统的电机控制方法要求系统是一个精确的、线性的低阶系统。对于普通的工业应用而言,研究者可以通过对电机方程进

行降阶近似处理<sup>[2]</sup>,使其满足这些条件。然而,随着数字处理器计算速度的不断提升和现代机床业发展的微米级乃至纳米级加工要求,传统的PI控制、预估控制等算法对系统所做的近似处理已经越来越无法满足现代控制的需求。高速度、低成本控制器的大规模应用催生着现代控制理论在电机控制中的不断进步,诸如模型自适应控制<sup>[3]</sup>、滑模变结构控制<sup>[4-5]</sup>、神

收稿日期: 2012-11-29

作者简介: 柳应全(1988-),男,安徽安庆人,主要从事直线电机及其控制技术方面的研究。E-mail: navy.victor@gmail.com

通信联系人: 叶云岳,男,教授,博士生导师。E-mail: yeyunyue@yahoo.com.cn



为了削弱抖动,平滑推力,提高系统的抗扰动能力,在位置环滑模控制器和控制对象之间引入积分补偿环节:

$$i_{qref} = \int ((\psi_1 + A_1)x_1 + (\psi_2 + A_2)x_2) dt = (\psi_1 + A_1) \int x_1 dt + (\psi_2 + A_2)x_1 \quad (11)$$

加入积分补偿环节后,位置环滑模变结构控制器的结构图如图2所示。

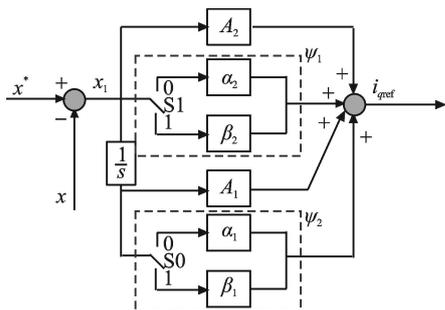


图2 位置环滑模变结构控制器结构图

从图2可以看出,滑模变结构控制器其实是一个PI参数可以离散跳变的变结构PI控制器:

$$\begin{cases} k_p = A_2 + \psi_2 \\ k_i = A_1 + \psi_1 \end{cases} \quad (12)$$

$k_p, k_i$  的跳变条件是  $x_2, x_1, s$  的符号发生变化。

### 2.4 切换参数的确定

将式(6)代入式(3),可得控制系统的特征方程为:

$$\begin{cases} |\lambda I - A| = \lambda^2 + b\lambda + c \\ \lambda_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4c}}{2} \\ b = \frac{k_f}{M} \psi_2 + C \\ c = \frac{k_f \psi_1}{M} \end{cases} \quad (13)$$

显然,系统的特征根正负是与  $b、c$  系数的取值相关的,可以得出如下关系如表1所示。

表1 系统特征根取值分布表

区间	sign(b)	sign(c)	$\lambda_{1,2}$
I	1	1	两负实根,或负实部虚根
II	1	1	两负实根,或负实部虚根
III	1	0	一正一负两实根
IV	1	1	两负实根,或负实部虚根
V	1	1	两负实根,或负实部虚根
VI	1	0	一正一负两实根

表1中状态空间的区间划分如图3所示。

结合2阶系统的相轨迹图,为使系统在空间所有位置均能满足滑模的能达性<sup>[10]</sup>条件,且在到达滑模状态后能稳定滑动到平衡点,切换函数应取在直线

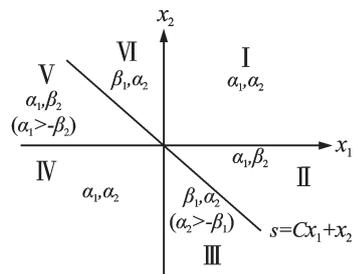


图3 状态空间的区间划分

$x_2 = 0$  和  $x_2 = \lambda_{min} x_1$  之间,  $\lambda_{min} = \text{MIN}\{\lambda_1, \lambda_2\}$ 。可确定切换参数  $C$  的取值范围为:

$$-k_f \beta_2 / M < C < |\lambda_{min}| \quad (14)$$

## 3 仿真实验分析

### 3.1 位置环滑模控制器的参数选择

利用式(1,3)的关系式,可以很方便地搭建永磁直线同步电机的滑模变结构控制模型,添加积分补偿环节后可以将SLMC模块等效为一个变PI控制器。根据式(10,14)的关系式,可以选择位置环滑模变结构控制器的控制参数如表2(右侧)所示。

表2 电机参数和控制参数

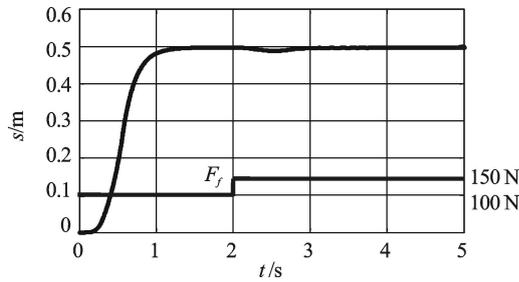
参数	数值	参数	数值
电阻 $R_f / \Omega$	2.3	$\alpha_1$	20
电感 $L_d / \text{mH}$	32.98	$\beta_1$	-10
电感 $L_q / \text{mH}$	40.03	$\alpha_2$	12
磁链 $\Psi_{fd} / \text{T}$	0.145	$\beta_2$	-6
极距 $\tau / \text{mm}$	24	$C$	6
质量 $M / \text{kg}$	50	$A_1$	0
推力 $k_f / (\text{N} \cdot \text{A}^{-1})$	28.5	$A_2$	10

### 3.2 仿真实验研究

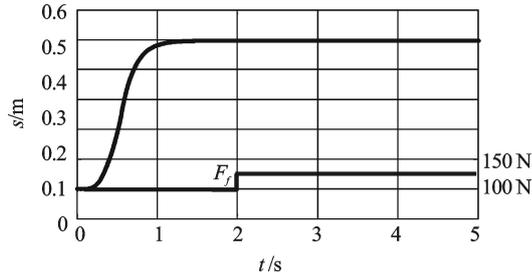
以平板式永磁直线同步电机的Simulink模型为例,电机参数如表2(左侧)所示,本研究在计算机上对所提出的带积分补偿器的滑模变结构控制策略的有效性进行仿真验证。为了便于比较,同时也对传统的滑模变结构进行了仿真。设定电机的负载力为100 N,给定电机位移量为0.5 m。

本研究为了验证提出结构的抗扰动性能,在  $t = 2 \text{ s}$  时,将负载力增大到150 N,可以得到在两种结构控制情况下,电机的位置阶跃响应曲线、相轨迹图分别如图4、图5所示。

相轨迹图是评价滑模结构性能的一个很直观的标准,其横、纵坐标轴分别表示控制系统的两个状态变量:位置误差  $x_1$  和位置误差变化率  $x_2$ ,从图5可以看出,在所选择控制参数情况下,两种结构均能很好地趋向滑模线  $s(t)$  并沿着滑模线渐近稳定于系统的平衡点,随着系统状态变量在滑模线上的变化,切换函

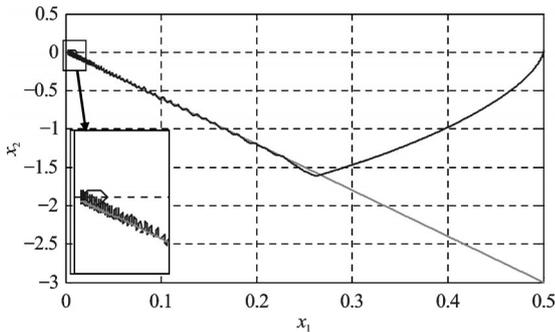


(a) 传统结构位置阶跃响应曲线

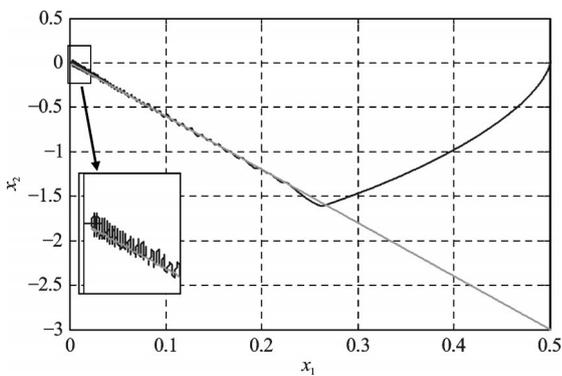


(b) 带积分补偿器结构位置阶跃响应曲线

图4 两种结构下的位置阶跃响应曲线



(a) 传统结构相轨迹图



(b) 带积分补偿器结构相轨迹图

图5 两种结构下的相轨迹图

数  $s(t)$  和切换开关  $x_1s$  和  $x_2s$  也不断发生变化,切换开关的变化带来控制信号的不断调节,从而使得系统的相轨迹能够不断地沿着滑模线渐近稳定。

相对于传统的PID控制而言,滑模变结构控制策略能避免系统的超调响应,而相对于传统的滑模结构而言,带积分补偿器的滑模结构能较好地增强系统的鲁棒性,由图4和图5均能看出,在负载增大时,传统滑模结构表现出一定的调节过程,从图5左下角的放大图中可以看出,传统结构相轨迹出现沿顺时针方向

运动重新趋于渐近稳定的抖振过程,而带积分补偿器结果调节动作较小,从图4(b)中能明显看出位置阶跃响应曲线无明显变化。由于动子质量和永磁铁磁链的变化表现为广义负载扰动,本研究所提出的结构能够较好地克服系统负载扰动和质量、磁链参数的变化,增强系统的鲁棒性和抗干扰能力。

## 4 结束语

仿真实验结果表明,采用带积分补偿器结构的位置环滑模控制能够明显削弱系统的抖振现象,提高伺服系统对质量、磁链参数摄动和外干扰的鲁棒性,从而大大提高了系统的稳态精度和控制性能,对永磁直线伺服系统的精密控制和平滑推力有较大的贡献。

本研究所采用的位置环滑模变结构控制策略设计方法简单,且用一个位置环替代了传统PI控制结构中的两个环,提高了系统的响应速度,避免了传统PID控制器的超调现象。通过引入等效控制结构也能很大程度上削弱趋稳过程中的振荡幅度,有利于永磁直线伺服系统的高精度快响应控制,该结构的提出和验证将为永磁直线交流伺服系统在高精度、高性能领域的发展提供较为可行的优质控制方案。

## 参考文献(References):

- [1] TAN K K, LEE T H, HUANG S N. 精密运动控制:设计与实现 [M]. 2版. 韩兵,译. 北京:机械工业出版社,2011.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统:运动控制系统 [M]. 3版. 北京:机械工业出版社,2003.
- [3] 尚喆,赵荣祥,窦汝振. 基于自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制研究[J]. 电机工程学报, 2007, 27(3): 23-27.
- [4] 刘伯春. 滑模变结构及PID组合调节器在PWM伺服系统中的应用[J]. 电气传动自动化, 1994, 16(3): 21-26.
- [5] LIN F J, SHYU K K, LIN C H. Incremental motion control of linear synchronous motor [J]. **IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System**, 2002, 28 (3): 1011-1022.
- [6] 孙宜标,郭庆鼎. 基于神经网络推力观测器的滑模控制在抑制直线伺服系统推力波动中的应用[J]. 电气传动, 2002(3): 19-22.
- [7] 廖晓钟,刘向东. 自动控制系统 [M]. 2版. 北京:北京理工大学出版社,2011.
- [8] 孙宜标,郭庆鼎,石丽梅. 基于推力观测器的直线式交流伺服系统滑模变结构控制[J]. 电工技术学报, 1998, 13(2): 1-5.
- [9] 王丰尧. 滑模变结构控制 [M]. 北京:机械工业出版社, 1995.
- [10] 舒志兵,周玮,李运华,等. 交流伺服运动控制系统 [M]. 北京:清华大学出版社,2006.

[编辑:张翔]