

永磁直线同步电机插入式积分滑模控制

张 戟, 纪铁生, 王乃福, 吴志友

(中车大连电力牵引研发中心有限公司, 辽宁 大连 116022)

摘 要: 永磁直线同步电机(PMLSM)因具有高速、高动态响应等优点而备受关注。参数变化、端部效应和摩擦力等不确定因素将会降低直线电机控制系统应有的性能。为了提高系统的鲁棒性,提出了一种插入式积分滑模控制。该滑模控制将原有控制器的输出量加入到所设计的滑模面中,使得控制系统在不改变原有控制器结构和性能的情况下,获得较强的鲁棒性。同时,以连续的超螺旋控制替换积分滑模控制中原有的不连续部分,削弱了滑模固有的抖振。MATLAB/Simulink 仿真结果证实了所提方法的有效性。

关键词: 永磁直线同步电机; 插入式积分滑模控制; 超螺旋控制; 滑模面; 抖振; 鲁棒性

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)09-0029-05

doi: 10.12177/emca.2020.094

Plug-In Integral Sliding Mode Control of Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

ZHANG Ji, JI Tiesheng, WANG Naifu, WU Zhiyou

(CRRC Dalian R&D Co., Ltd., Dalian 116022, China)

Abstract: Permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) has attracted much attention because of its high speed and high dynamic response. The uncertain factors such as parameter change, end effect and friction force will reduce the control system performance of PMLSM. In order to improve the robustness of the system, a plug-in integral sliding mode control is proposed. The output of the original controller is added to the designed sliding surface in the sliding mode control, which makes the control system obtain strong robustness without changing the structure and performance of the original controller. At the same time, the continuous super-twisting control is used to replace the original discontinuous part in the integral sliding mode control, which weakens the inherent chattering in the sliding mode. The MATLAB/Simulink simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); plug-in integral sliding mode control; super-twisting control; sliding surface; chattering; robustness

0 引 言

永磁直线同步电机(PMLSM)因其结构简单、摩擦力小、推力密度大、具有更高的加速和减速能力以及较低的热损失等特点广泛应用在精密运动控制中^[1]。为了实现直线电机的高速和高精度控制,需要时因参数变化导致的模型不确定性、一些非线性干扰如摩擦力及直线电机固有的端部效应等因素进行补偿或者抑制。因而,设计具有强鲁

棒性的控制器使直线电机驱动系统具有良好的动态性能,并且消除不确定性对系统造成的影响就显得尤为重要。

许多控制算法被设计以解决上述问题,如模型参考自适应、神经网络控制、模糊控制、自抗扰控制、滑模控制(SMC)^[2-6]等现代控制方法。其中,SMC以其强鲁棒性以及系统信息要求少等优点得到较快的发展和更多的重视,并在电机控制中得到广泛应用^[7-10]。但SMC在实际系统中

收稿日期: 2020-05-08; 收到修改稿日期: 2020-07-04

作者简介: 张 戟(1990—),男,硕士,工程师,研究方向为电力电子与电力传动。

应用时,由于切换过程中的延迟和滞后等因素,系统容易产生抖振,因而抖振的削弱成为首要解决的问题。文献[7-8]在 SMC 中加入边界层,边界层的厚度可依据系统当下状态在线调整,在一定程度上削弱了抖振。然而,边界层厚度如果取值较小或者控制量较大,抖振可能会因为执行器存在的惯性而产生。边界层厚度取值如果较大,不仅会降低系统的鲁棒性,而且会增大系统的稳态静差。文献[9-10]涉及的滑模控制器是采用动态滑模面来设计的,将传统 SMC 中的切换函数经由微分环节构成新的切换函数,使系统具有快速性、稳定性。虽然该方法能够减少扰动对伺服系统的影响,但设计动态滑模面时需要将状态量的微分量引入,而这会引入高频噪声,从而降低控制器的性能。

文献[11-13]涉及了二阶 SMC,超螺旋算法在众多算法中较佳。该算法被开发用以削弱 SMC 的抖振。超螺旋算法是一种连续控制,能够确保系统所有主要性质与有界的不确定性和干扰能够进行平滑匹配。超螺旋算法在二阶滑模面上使系统状态轨迹围绕平衡零点螺旋式逼近,且能够在有限时间内到达平衡零点。基于此,本文利用积分 SMC 的两部分具有设计独立性的特点,选取含有原始控制律的滑模面提出了插入式积分 SMC。积分 SMC 的等效控制部分设计为所需要的控制策略,而超螺旋控制替代原有不连续控制插入到控制系统中,由此可实现期望控制性能与鲁棒性共存的控制效果。

1 PMLSM 数学模型

PMLSM 电磁推力表达式为

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1)$$

式中: τ 为极距; p 为极对数; i_d, i_q 为 d, q 轴定子电流; ψ_f 为定子永磁体磁链; L_d, L_q 为 d, q 轴定子电感。

该电机为表贴磁钢, $L_d = L_q$, 当只考虑基波分量时,电流内环采用 $i_d = 0$ 的控制策略,此时产生电磁推力为

$$F_e = \frac{3\pi}{2\tau} p \psi_f i_q = k_f i_q \quad (2)$$

式中: k_f 为电磁推力系数。

则 PMLSM 的机械运动方程为

$$M \frac{dv}{dt} = F_e - B_v v - d \quad (3)$$

式中: M 为转子和负载的总质量; v 为动子线速度; B_v 为黏滞摩擦系数; d 为总扰动力。

选取动子的线位移 x_1 和线速度 x_2 为系统的状态变量,则 PMLSM 的动力学模型可以近似表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{B_v}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_f}{M} \end{bmatrix} (i_q + d) \quad (4)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

2 插入式积分滑模控制器设计

2.1 不连续控制与超螺旋控制

2.1.1 以 $\text{sign}(x)$ 为干扰观测器

考虑如下二阶系统:

$$\dot{x} = u + d \quad (5)$$

式中: x 为系统状态, $x \in R$; u, d 为控制输入和匹配的非消失性干扰, $u = -k\text{sign}(x) \in R, d \in R$ 。

文献[14]已经表明,系统轨迹在有限时间内收敛于原点,与有界扰动无关,而唯一的条件是增益 k 的大小应大于扰动的最大界限。使用正则化方法,当 $x = 0$ 时,那么控制的等效值 $\dot{x} = 0$, 即 $d = [k\text{sign}(x)]_{\text{eq}}$ 。同时,这也说明了通过使不连续控制信号通过低通滤波器,实际上可以估计扰动值。因此,当系统处于滑动模式, $x = 0$ 时, $k\text{sign}(x)$ 充当干扰观测器。过去所有的积分 SMC 均是基于这一原则而发展起来的。但是,控制率中存在的不连续项使其在实际应用中受到限制。为了克服这一主要缺点,对扰动具有同样观测能力的,并且是连续控制的超螺旋控制被用以替换原有的不连续部分。

2.1.2 以超螺旋控制为干扰观测器

在二阶 SMC 中,超螺旋控制是一种受到深度关注的算法之一,具有避免抖振的优势,其控制率可表示为

$$\begin{cases} u_{\text{ste}} = -\lambda |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma) + v \\ \dot{v} = -\gamma \text{sign}(\sigma) \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)中,可得:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = -\lambda |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma) + v + d \\ \dot{v} = -\gamma \text{sign}(\sigma) \end{cases} \quad (7)$$

令 $z=v+d$, 则有 $\dot{z}=\dot{v}+\dot{d}$, 那么式(7)可写成:

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = -\lambda |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma) + z \\ \dot{z} = -\gamma \text{sign}(\sigma) + d \end{cases} \quad (8)$$

式(8)被称为高阶 SMC 中的超螺旋算法, 如果选择 λ 和 γ 的值适当, 则使用二次 Lyapunov 函数可证明在有限时间内 $\sigma=z=0$ [15]。当 $z=0$ 时, 则 $d=-v$ 。这说明, 当系统状态处于滑动模式时, 超螺旋控制输出量与干扰相抵消。由此可知, 如果系统存在干扰, 那么 u_{stc} 将会对其进行补偿。

2.2 插入式积分 SMC

考虑到如下二阶不确定性系统:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B(u + d) \\ y = Cx \end{cases} \quad (9)$$

式中: x 、 A 、 B 、 C 、 u 、 d 分别为系统状态、系统矩阵、输入矩阵、输出矩阵、控制输入及匹配干扰, $x \in R^{2 \times 1}$, $A \in R^{2 \times 2}$, $B \in R^{2 \times 1}$, $C \in R^{1 \times 2}$, $u \in R$, $d \in R$ 。

式(9)所描述的系统的控制输入为

$$u = u_{\text{nominal}} + u_{\text{stc}} \quad (10)$$

式中: u_{stc} 为超螺旋控制。

$$\begin{cases} u_{\text{stc}} = (GB)^{-1} (k_1 |\sigma|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(\sigma) + v) \\ \dot{v} = -k_2 \text{sign}(\sigma) \end{cases} \quad (11)$$

式中: G 为常数矩阵; k_1 、 k_2 为常系数; σ 为所设计的滑模面。

针对式(9)的滑模面设计为

$$\sigma = G \left[e(t) - e(t_0) - \int_0^t (Ae(t) + Bu_{\text{nominal}}) d\tau \right] \quad (12)$$

式中: $e(t)$ 系统误差向量; $e(t_0)$ 为系统误差的初始条件向量, 且滑模面的设计使得系统状态由滑模面开始。

误差动态值为

$$\dot{e} = Ae + B(u + d) \quad (13)$$

对滑模面 σ 求导:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= G[Ae + B(u + d) - Ae - Bu_{\text{nominal}}] = \\ &G[Ae + B(u_{\text{nominal}} + u_{\text{stc}} + d) - Ae - Bu_{\text{nominal}}] = \\ &GB[u_{\text{stc}} + d] \end{aligned} \quad (14)$$

为了不失一般性, 令 $GB=1$, 则可得:

$$\dot{\sigma} = u_{\text{stc}} + d \quad (15)$$

u_{nominal} 的设计与 u_{stc} 独立, 可按所需要的控制

性能选取相应的控制策略, 如线性反馈控制、PID 控制、最优控制等。本文为了说明所提方法的有效性将积分 SMC 中的等效控制部分 u_{nominal} 设计为较为简单的 PID 控制, 而不连续控制部分则设计为超螺旋控制 u_{stc} 。

PMLSM 插入式积分 SMC 系统设计框图如图 1 所示。

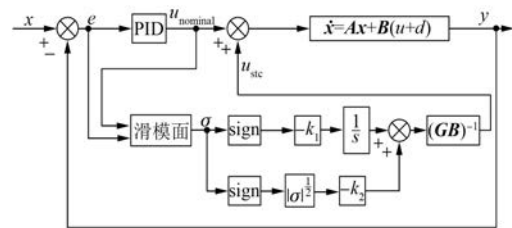


图 1 插入式积分滑模控制系统设计框图

其中, 滑模面设计框图如图 2 所示。

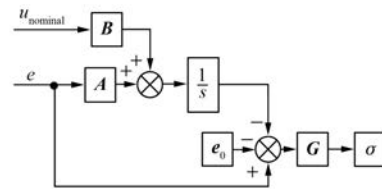


图 2 滑模面设计框图

3 仿真结果及分析

为了证明所提方法在去抖振方面具有的优越性, 设计不连续控制如下:

$$u_{\text{dc}} = (GB)^{-1} [-k_3 \text{sign}(\sigma)] \quad (16)$$

此处的 GB 取值与超螺旋控制相同, 滑模面的设计选取与上文一样, 而 k_3 为可调参数, 且 $k_3 > 0$ 。

仿真选用 Kollmorgen 公司的无铁心 PMLSM, 参数如表 1 所示。

为了验证本文提出方法的有效性, 使用 MATLAB/Simulink 进行仿真。

(1) 超螺旋 PID 控制参数。

对比式(4)和式(9)及电机参数可得: $A=$

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.001/0.32 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 28.5/0.32 \end{bmatrix}; \text{ 又 } GB=1, \\ G = \begin{bmatrix} 1 & 0.32/28.5 \end{bmatrix}; k_1=30, k_2=45。$$

PID 参数: $K_p=200, K_i=800, K_d=1.3$ 。

表 1 PMLSM 参数

参数名称	参数值
峰值推力/N	200
持续推力/N	61
额定功率/W	83
额定速度/(m·s ⁻¹)	1.36
额定电流/A	2.1
电磁推力系数/(N·A ⁻¹)	28.5
黏滞摩擦系数/(N·s·m ⁻¹)	0.001
极距/mm	16
转子质量/kg	0.32
转子电阻/Ω	8.6
电感/mL	3

(2) 不连续 PID 控制参数。

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.001/0.32 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 28.5/0.32 \end{bmatrix}, G =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0.32/28.5 \end{bmatrix}; k_3 = 26。$$

PID 参数: $K_p = 200, K_i = 800, K_d = 1.3。$

(3) PID 参数。

$K_p = 200, K_i = 5\ 500, K_d = 1.3。$

PMLSM 空载起动,阶跃响应位置给定信号为 $l=0.1\text{ m}$,经过反复的参数调整得到系统的最佳运行状态。

图 3 和图 4 为式 (16) 和式 (11) 下的 q 轴电流仿真曲线。从曲线可以看出,超螺旋控制下滑模固有的抖振明显小于传统符号函数下的抖振,体现了超螺旋控制的优越性。

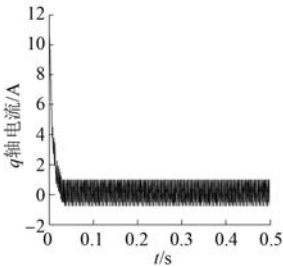


图 3 不连续控制的 i_q 电流波形

图 5 为转子质量参数变化后加负载时滑模面相平面轨迹。可以看出,系统具有较好的抗扰能力和降低抖振幅度的能力。

图 6 为在 0.25 s 时突加 50 N 负载后的滑模面 σ 的仿真曲线图。从图 6 可以看出,突加负载后滑模变量经过短暂下落后又恢复到之前的状态,保持了 SMC 系统的稳定性,也体现了系统的强鲁棒性。

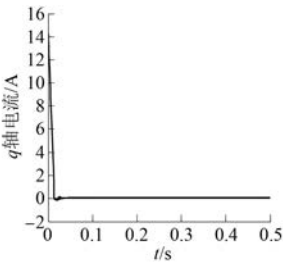


图 4 超螺旋控制的 i_q 电流波形

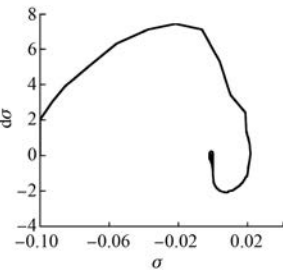


图 5 滑模面相平面轨迹

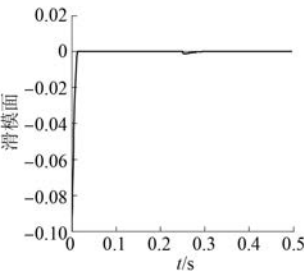


图 6 突加负载后的滑模面

图 7 为 0.25 s 时突加 50 N 负载后的 q 轴电流的仿真曲线图。从图 7 可以看出,电机在突加负载后,能后快速实现相应的电流输出。

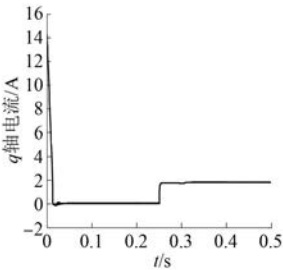


图 7 突加负载后的 q 轴电流

图 8 为给定参考阶跃信号下,PID 控制和超螺旋 PID 控制的阶跃信号响应曲线。可以看出,增加超螺旋控制的 PID 控制超调量要比 PID 控制小 0.002 6 m;在 0.25 s 加入 50 N 扰动后,PID

控制下落幅度约为 0.009 3 m, 恢复时间约为 0.15 s; 而超螺旋 PID 控制的下落幅度为 0.001 7 m, 恢复时间约为 0.05 s。可见插入超螺旋控制后, 系统的抗扰能力比 PID 控制有所提升。

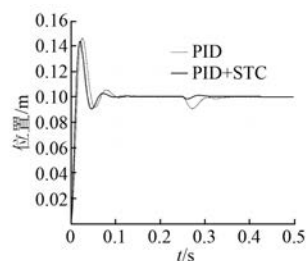


图8 PID控制与超螺旋PID控制

4 结 语

本文针对 PMLSM 的位置控制问题提出一种插入式积分 SMC。由于直线电机在运行时受到各方面的因素影响, 为了使得系统可按照预设的控制算法获得良好的控制效果, 减少外界对直线电机的干扰, 设计了一种可以插入到已有的控制系统中而不改变原有控制器的 SMC。该 SMC 将预设的控制输出加入到所设计的滑模面中, 使得整个控制系统不但可以具有预设的控制效果, 而且具有良好的鲁棒性。通过仿真可以看出, 所设计的插入式 SMC 具有比传统不连续控制更小的抖振, 且与 PID 控制相结合后其抗扰能力有了明显提升。结果验证了所提出算法的有效性。

【参考文献】

- [1] CHOW H W, CHEUNG N C. Disturbance and response time improvement of submicrometer precision linear motion system by using modified disturbance compensator and internal model reference control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 139.
- [2] 孔龙涛, 程明, 张邦富. 基于模型参考自适应系统的模块化磁通切换永磁直线电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 132.
- [3] LIN C H. Hybrid recurrent wavelet neural network control of PMSM servo-drive system for electric scooter [J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2014, 12: 177.
- [4] SHI H. Servo control for PMLSM based on T-S fuzzy model and LQR[C]//2016 35th Chinese Control Conference (CCC), 2016.
- [5] HUANG Y, ZOU J, WANG M, et al. Active disturbances rejection controller for position servo control of PMSM[C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2019.
- [6] JIN H, ZHAO X. Approach angle-based saturation function of modified complementary sliding mode control for PMLSM [J]. IEEE Access, 2019, 7: 126014.
- [7] SURYAWANSHI P V, SHENDGE P D, PHADKE S B. A boundary layer sliding mode control design for chatter reduction using uncertainty and disturbance estimator[J]. International Journal of Dynamics and Control, 2016, 4: 456.
- [8] ZHANG B, PI Y. Enhanced sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor servo drive[C]//2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 2011.
- [9] 张晓光, 孙力, 赵克. 基于负载转矩滑模观测的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(3): 111.
- [10] 刘颖, 周波, 方斯琛. 基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 80.
- [11] MORENO J A, OSORIO M. A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers [C]//47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008.
- [12] YANG R, WANG M, LI L, et al. Thrust ripple compensation of PMLSM based on second-order sliding mode observer with super-twisting algorithm [C]//IECON 2017-43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2017.
- [13] KASHIF M, MURSHID S, SINGH B, et al. Super twisting SMC based speed sensorless PMSM driven solar PV water pumping system[C]//2018 8th IEEE India International Conference on Power Electronics (IICPE), 2018.
- [14] UTKIN V, GULDNER J, SHI J. Sliding Mode Control in Electro-Mechanical Systems [M]. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.
- [15] MORENO J A, OSORIO M. A Lyapunov approach to second-order sliding mode controllers and observers [C]//2008 47th IEEE Conference on Decision and Control, 2008.