

用于永磁同步直线电机无传感器控制的新型滑模观测器^①

陆华才^② 提娟 缪碧云 孙路路 魏利胜

(安徽工程大学电气工程学院 芜湖市 241000)

摘要 为实时检测永磁同步直线电机(PMSLM)的速度和磁极位置以实现 PMSLM 直接驱动系统的无传感器控制,基于滑模变结构控制理论,设计了一种新型高速滑模观测器,该滑模观测器利用 Sigmoid 函数作为控制律中的切换函数,能有效地消除滑模抖振和提高运算效率。仿真和实验结果表明,这种基于 Sigmoid 函数的滑模观测器能够高速、精确地估计电机速度和磁极位置,从而代替机械传感器实现高性能的 PMSLM 无速度传感器控制。

关键词 永磁同步直线电机(PMSLM),无传感器控制,滑模观测器(SMO),Sigmoid 函数

0 引言

由于直线电机伺服驱动系统省去了从旋转运动到直线运动的中间传动环节,实现了所谓的“零传动”,提高了传动刚度、传动精度和定位精度,具有更大的加速度,且行程不受限制,因而在数控机床进给传动中得到了广泛应用^[1]。而永磁同步直线电机(permanent magnet synchronous linear motor, PMSLM)由于其结构紧凑、推力密度大、惯性低、响应速度快等优点,在直接驱动技术中更受青睐^[2]。但是要实现高性能 PMSLM 直接驱动系统的控制,必须用机械传感器实时检测电机的速度和磁极位置,而机械传感器的使用不仅增加了系统成本,且使得安装维护不便,降低了系统可靠性^[3]。因此,近年来国内外许多学者开展了无传感器控制研究,形成了不少估计电机速度和位置的方法,主要形成了以下三类方法:(1)基于反电势积分的直接估算法^[4,5],此类方法要通过反电势积分得到磁链后再作进一步估计,会受到直流偏移及积分漂移影响,另外反电势的大小和速度成正比,在低速时很难准确估计电机的速度和位置;(2)高频信号注入法^[6,7],该方法是在电枢绕组中注入高频信号激励信号,然后从高频响应信号中提取位置信息,在电机低速甚至零速时都能较好地估计速度和位置信

息,但只能用于具有凸极性的电机,若不作凸极改造,无法应用于表面式 PMSLM;(3)基于状态方程的状态观测法^[8,9],如 Luenberger 观测器和扩展卡尔曼滤波(EKF)观测器,此类方法不受直流偏移量的影响,对测量误差也不敏感,能够有效地抑制噪声,而且具有良好的低速性能,但是算法较为复杂、运算量大,一般处理器很难满足控制的实时性要求。本研究利用滑模变结构控制原理,构建了反电势滑模观测器(sliding-mode observer, SMO),该观测器首先根据容易检测的电机端电流、端电压信号以及电机结构参数,对难以检测的反电势进行观测,再利用反电势中包含的速度和位置信息,进一步估计出电机的速度和位置信号,从而实现高性能的 PMSLM 无传感器控制。在设计滑模观测器时,利用 Sigmoid 函数作为滑模切换函数,有效地削弱了滑模抖振,不仅提高了运算效率,也提高了估计结果准确性。

1 PMSLM 数学模型

为了运用基于滑模观测方法的无传感器控制技术,首先需要建立基于定子静止坐标系下的状态方程。忽略磁饱和,假设反电势是正弦的,电枢绕组为三相对称的星型连接,根据 PMSLM 理论,由电机三相电压平衡方程和 Clark 变换,可以得到两相静止 $\alpha-\beta$ 坐标系下的 PMSLM 数学模型^[10]:

① 国家自然科学基金(61203033),安徽省自然科学基金(10040606Q06)和安徽省高校省级自然科学研究重点项目(KJ2011A028)资助项目。

② 男,1975年生,博士,副教授,硕士生导师;研究方向:电机控制理论与应用,机电一体化;联系人,E-mail:luhuacai@163.com (收稿日期:2013-05-19)

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L}i_\alpha - \frac{k_e}{L}e_\alpha + \frac{1}{L}u_\alpha \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R}{L}i_\beta - \frac{k_e}{L}e_\beta + \frac{1}{L}u_\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中, u_α 和 u_β 分别为 α 、 β 轴电压; i_α 和 i_β 分别为 α 、 β 轴电流; R 为电枢电阻, L 为电感; ω 为电机角速度, $\omega = \pi/\tau$, v 为动子速度, τ 为极距; e_α 和 e_β 分别为 α 、 β 轴反电势, $e_\alpha = -\omega \sin\theta$, $e_\beta = \omega \cos\theta$, θ 为磁极位置角。

2 传统的滑模观测器

滑模变结构控制策略与其他控制的不同之处在于系统的“结构”不固定,而是在动态过程中,根据系统当前的状态,迫使系统按照预定“滑动模态”的状态轨迹运动。

根据上述 PMSLM 在 α - β 两相静止坐标系下数学模型可以构造如下滑模观测器:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L}(u_\alpha - z_\alpha) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L}(u_\beta - z_\beta) \end{cases} \quad (2)$$

式中上标“ $\hat{\cdot}$ ”表示对应量的估计值, z_α 、 z_β 为包含反电势信息的开关信号,如下式所示。

$$\begin{cases} z_\alpha = k \operatorname{sgn}(\Delta i_\alpha) \\ z_\beta = k \operatorname{sgn}(\Delta i_\beta) \end{cases} \quad (3)$$

式中 k 为滑模系数, Δi_α 、 Δi_β 分别为 α 、 β 电流估计偏差,表达式为

$$\begin{cases} \Delta i_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \Delta i_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta \end{cases} \quad (4)$$

包含反电势信号的 z_α 和 z_β 通过如式

$$\begin{cases} \hat{e}_\alpha = \frac{1}{1+T_s} k \operatorname{sgn}(\Delta i_\alpha) \\ \hat{e}_\beta = \frac{1}{1+T_s} k \operatorname{sgn}(\Delta i_\beta) \end{cases} \quad (5)$$

所示的低通滤波后即可得到反电势估计值 \hat{e}_α 和 \hat{e}_β 。

根据反电势与电机磁极位置的关系可以得到磁极位置的估计值 $\hat{\theta}$, 进而得到速度估计值 $\hat{\omega}$, 两者用不式表示:

$$\begin{cases} \hat{\theta} = \arctan\left(-\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta}\right) \\ \hat{\omega} = \frac{d\hat{\theta}}{dt} \end{cases} \quad (6)$$

上述传统的滑模观测器,采用符号函数 sgn 作为控制律中的切换函数,当状态轨迹到达滑模面后,

不是严格地沿着滑模面向着平衡点运动,而是在滑模面两侧来回摆动,不可避免地产生“抖动”和滞后现象。因此,需要用低通滤波器消除“抖动”,低通滤波器的引入又进一步使滞后严重,这就需要增加角度补偿 $\Delta\hat{\theta}$, 式为

$$\Delta\hat{\theta} = \arctan\left(\frac{\hat{\omega}}{\omega_c}\right) \quad (7)$$

图 1 所示为传统滑模观测器(SMO)的无传感估计系统,图中下标 n 表示 α 、 β 。

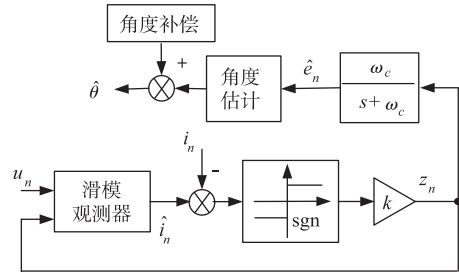


图 1 传统 SMO 的无传感器估计系统

3 基于 Sigmoid 函数的高速滑模观测器

Slotine 等人在滑模控制设计中,引入了“准滑动模态”和“边界层”的思想来削弱滑模抖动问题,用饱和函数代替开关切换函数,即在边界层内为连续控制,边界层外为切换控制^[11]。这种边界层法能够有效地削弱滑模抖动问题。本文基于这一思想,利用非线性函数 Sigmoid 函数代替切换函数来设计滑模观测器, Sigmoid 函数输出是限制在两个有限值之间的连续非减函数,如下式所示:

$$f(t) = \frac{1}{a + be^{c-dt}} - m \quad (8)$$

通过改变 Sigmoid 函数中的参数,可以控制其突变的时间和幅度。其中 a 和 b 值控制输出值突变的幅度, c 值控制输出值突变的时间, d 值调节 Sigmoid 函数的斜度, m 值控制跳变的范围。当式中 $a = b = 0.5$, $c = 0$, $d = 1$, $m = 1$ 时, Sigmoid 函数的曲线见图 2。 d 值越大越接近开关函数,但不会像开关函数那样单值跳变。

利用 Sigmoid 函数作为切换函数,可以设计如下 PMSLM 滑模观测器:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L}u_\alpha - \frac{1}{L}kf(\Delta i_\alpha) \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L}u_\beta - \frac{1}{L}kf(\Delta i_\beta) \end{cases} \quad (9)$$

式中 k 为滑模系数, f 函数为 Sigmoid 函数, $f(\Delta i_\alpha)$ 、 $f(\Delta i_\beta)$ 由下式表示:

转坐标变换角度来自 SMO 估计模块。PMSLM 矢量控制调速系统仿真模型各模块的构建方法参见文献 [12]。基于 Sigmoid 函数的速度和磁极位置角度 SMO 仿真模块如图 5 所示。仿真用 PMSLM 参数 R

$= 2.65\Omega, L = 2.67\text{mH}, k_e = 59.5, \tau = 16\text{mm}$ 。仿真时速度给定值为 500mm/s , 滑模系数按照滑模存在条件设为 10000, 滤波器截止频率设为 5kHz , 调节 Sigmoid 函数的斜度 d 设为 500。

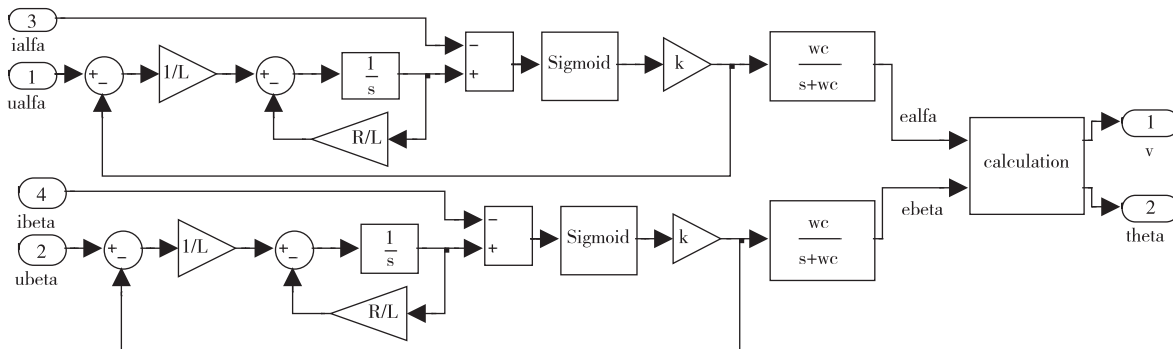


图 5 基于 Sigmoid 函数滑模观测器仿真模型

仿真结果如图 6 至图 10 所示。图 6 为反电势估计结果, 从中可以看出 Sigmoid 函数用做切换函数, 消除了滑模抖振。仿真研究时, 分别做了有机械传感器时的开环估计和无机械传感器时的闭环控制。有机械传感器仿真, 即 PMSLM 调速系统的反馈量直接来自光栅传感器, 而 SMO 观测结果不作为反馈量。无机械传感器仿真, 即调速系统的反馈量就是通过 SMO 估计得到。图 7 有机械传感器时速

度估计与实际速度响应结果, 图 8 是其对应的估计误差。图 9 是无传感器控制时速度估计与实际速度响应结果, 图 10 是其对应的估计误差。

从仿真结果可以看出, 无传感器情况下, 电机起动瞬间速度估计误差为 1%, 而稳态时估计误差为 0.06%; 有传感器情况下, 电机起动瞬间速度估计误差为 1.2%, 而稳态时估计误差为 0.08%。另外, 仿真过程表明采用 Sigmoid 函数代替符合函数作切换

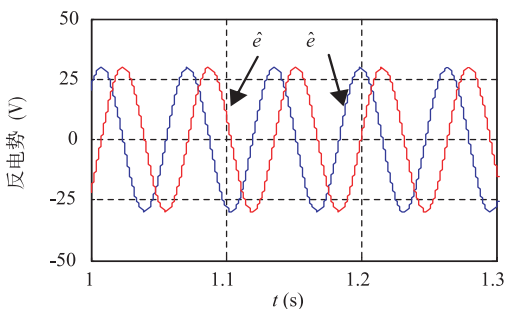


图 6 反电势估计结果

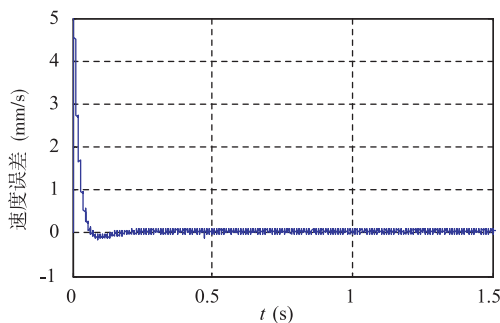


图 8 有传感器时速度估计误差

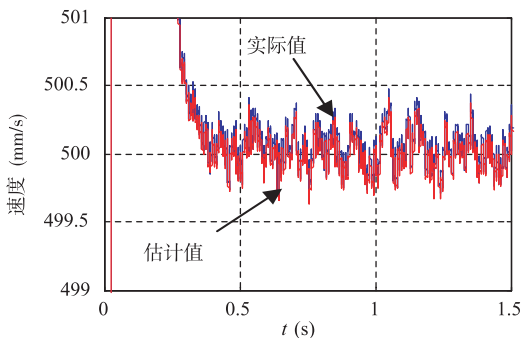


图 7 有传感器时速度估计结果

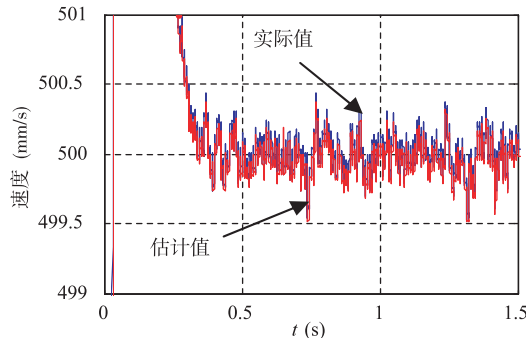


图 9 无传感器时速度估计结果

函数,运算效率有了明显提高。

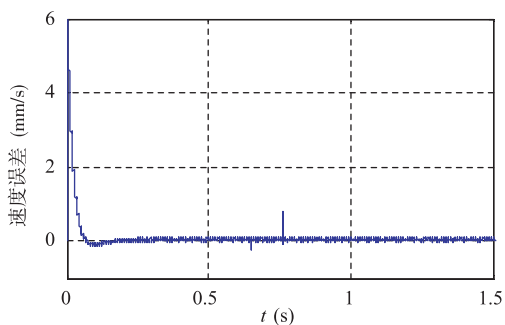


图 10 无传感器时速度估计误差

6 实验

为了进一步验证基于 Sigmoid 函数的滑模观测

器在无速度传感器控制时的有效性,针对一台 PMLSM 矢量控制系统进行了无速度传感器控制实验,图 11 为无速度传感器估计系统,图 12 为电机往返速度为 600mm/s 时的实验结果。实验结果表明估计结果能够满足一般伺服系统的精确度要求,控制系统具有良好的跟踪效果。

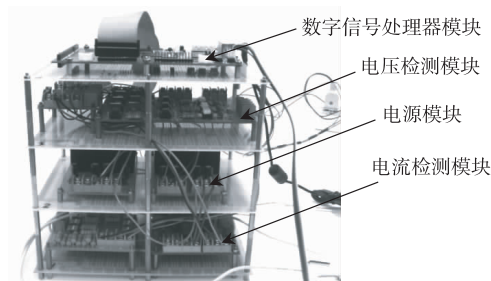
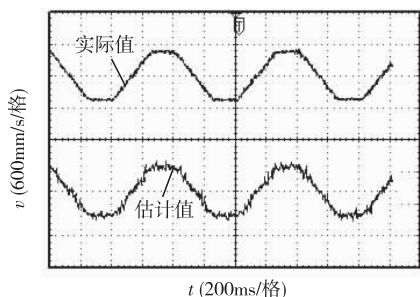
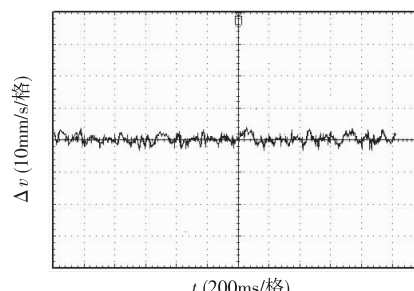


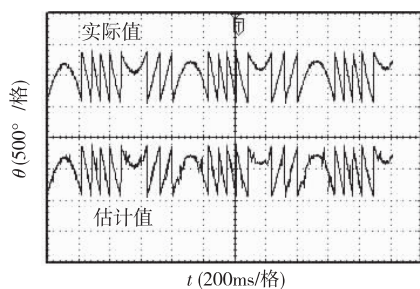
图 11 无位置传感器 AEKF 估计系统



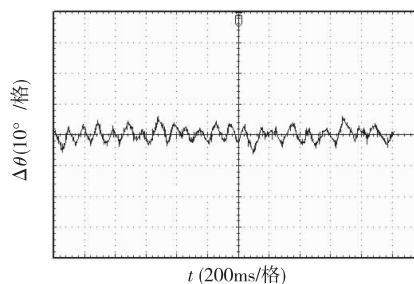
(a) 速度



(b) 速度估计偏差



(c) 位置



(d) 位置估计偏差

图 12 全速无位置传感器估计实验结果

7 结论

本文根据滑模变结构控制理论,构建了 PMLSM 调速系统的速度和位置滑模观测器,并利用 Sigmoid 函数作用控制律中的切换函数,消除了滑模抖振问题,该滑模观测器具有较高的响应速度和鲁棒稳定性,能够快速、精确地估计出电机速度和磁极位置,从而实现高性能的 PMLSM 无传感器控制。

参考文献

- [1] 汪木兰,张崇巍,林健等. 数控机床用直线电机伺服试验平台开发及应用. 中国机械工程,2012,23(3):274-278
- [2] 石忠东,王先逵,陈定积. 永磁交流电动机直接驱动伺服控制技术. 微特电机,2002,30(3):8-9
- [3] 陆华才,徐月同. 基于 AEKF 的永磁直线同步电机速度和位置估计算法. 中国电机工程学报,2009,(33):90-94
- [4] Tursini M, Petrella R, Scafati A. Speed and position estimation for PM synchronous motor with back-EMF observ-

- er. In: Proceedings of the 40th IAS Annual Meeting on Industry Applications Conference, Hong Kong, China, 2005, 3. 2083-2090
- [5] Genduso F, Miceli R, Rando C. Back EMF sensorless control algorithm for high-dynamic performance PMSM. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(6): 2092-2100
- [6] Corley M J, Lorenz R D. Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous machine at standstill and high speed. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 1998, 34(4): 784-789
- [7] Ogasawara S, Akagi H. Implementation and position control performance of a position-sensorless IPM motor drive system based on magnetic saliency. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 1998, 34(4): 806-812
- [8] Parasiliti F. Sensorless speed control of a PMSM based on sliding mode observer and extended Kalman filter. In: Proceedings of the 36th IAS Annual Meeting, IEEE Conference on Industry Applications, Chicago, USA, 2001, 533-540
- [9] Kyo-Beum Lee. Reduced-order extended luenberger observer based sensorless vector control driven by matrix converter with nonlinearity compensation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006, 53(1): 66-75
- [10] 王成元, 夏加宽, 孙宜标. 现代电机控制技术. 北京: 机械工业出版社, 2009
- [11] Slotine J J, Sastry S S. Tracking control of nonlinear systems using sliding surfaces with application to robot manipulator. *International Journal of Control*, 1983, 38(2): 465-49
- [12] 陆华才. 无位置传感器永磁直线同步电机进给系统初始位置估计及控制研究: [博士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2008. 28-32

A new sliding mode observer for sensorless control of permanent magnet synchronous linear motors

Lu Huacai, Ti Juan, Miao Biyun, Sun Lulu, Wei Lisheng

(College of Electrical Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000)

Abstract

In order to conduct the real-time measurement of a permanent magnet synchronous linear motor (PMSLM)'s speed and position so as to achieve the sensorless control of its direct drive system, a new high-speed sliding mode observer was designed and implemented based on the sliding mode variable structure theory. The sliding mode observer uses a Sigmoid function as the switching function of the control law, so it can effectively eliminate the sliding mode chattering and improve its response rate. The results of the simulation experiments show that the proposed sliding mode observer based on Sigmoid function can be used to estimate the motor speed and position accurately and rapidly, to realize the high-performance sensorless control for PMSLMs.

Key word: permanent magnet synchronous linear motor (PMSLM), sensorless control, sliding-mode observer (SMO), Sigmoid function