

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2019.03.021

基于扰动观测器和推力观测器的永磁 直线同步电机推力控制研究*

季明丽¹, 钱厚亮²

(1. 江苏海事职业技术学院 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 211170;

2. 南京工程学院 工业中心, 江苏 南京 211170)

摘要:针对高精度永磁直线同步电机存在参数变化、负载扰动、摩擦力和端部效应等不确定性而引起推力波动的问题,提出了一种将扰动观测器(DOB)和推力观测器(TFOB)相结合的推力控制方法。采用了 DOB 作为内环控制器抑制并补偿不确定性因素对系统的影响,减小了测量噪声对系统的影响;同时,设计了 TFOB 作为外环控制器确保 DOB 输入的准确性,解决了 DOB 无法彻底抑制 PMLSM 系统存在的推力波动问题;建立了环境接触模型,对引起推力波动的参数进行了离线辨识,提高了推力控制带宽。研究表明:与 DOB 控制方法相比,无论是电机平稳运行情况还是突发扰动情况,基于 DOB 和 TFOB 的推力控制方法都取得了较为优越的控制性能。

关键词:永磁直线同步电机;推力波动;扰动观测器;推力观测器

中图分类号:TH39;TM3;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2019)03-0333-05

Thrust force control of PMLSM based on disturbance observer and thrust force observer

Ji Ming-li¹, Qian Hou-liang²

(1. College of Electric Engineering and Automation, Jiangsu Maritime Institute, Nanjing 211170, China;

2. Industrial Center, Nanjing Institute of Engineering, Nanjing 211170, China)

Abstract: In order to solve the thrust ripple caused by uncertainties of high precision permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM), such as parameter variations, external disturbances, friction forces and ending effects, a method combining disturbance observer (DOB) with thrust force observer (TFOB) was proposed. DOB was used as an inner loop controller to suppress and compensate the influence of uncertainties on the system, and to reduce the influence of measurement noise on the system. At the same time, TFOB was designed as an outer loop controller to solve the problem that DOB cannot suppress the thrust ripple of PMLSM system, and ensure the accuracy of DOB input. The environmental contact model was established to identify the parameters causing thrust ripple offline, thus improving the thrust control bandwidth. The experimental results show that compared with DOB control method, the thrust force control method based on DOB and TFOB achieves better control performance in both smooth operation and sudden disturbance condition.

Key words: permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM); thrust ripple; disturbance observer(DOB); thrust force observer(TFOB)

0 引 言

随着数控加工领域的快速发展,高精度定位技术

受到广泛关注^[1]。永磁直线同步电机(PMLSM)直驱系统作为精密定位技术的代表,以其高精高速的性能在数控领域占据重要地位。但 PMLSM 存在的负载扰动、参数变化、端部效应等产生的推力波动会严重影响

收稿日期:2018-09-25

基金项目:江苏省教育科学“十二五”规划课题资助项目(B-h/2015/03/076)

作者简介:季明丽(1976-),女,江苏南通人,硕士,副教授,主要从事电气自动化方面的研究。E-mail:jiminglijimingli@163.com

伺服性能,因此抑制推力波动成为 PMLSM 控制的一大难题^[2]。

针对推力波动影响 PMLSM 伺服性能这一问题,国内外学者主要提出了两种解决方法:

(1)从电机设计角度出发。文献[3-4]提出了电机次级长度优化的方法,降低端部效应,进而减小推力波动;文献[5]采用了优化磁场分布的方法,通过减小齿槽效应来提高其性能;

(2)从电机控制角度出发。文献[6]提出了直接推力控制方法,采用传统 PI 控制,但该方法需不断进行复杂的 PI 参数整定以保证系统性能;文献[7]将无模型自适应理论应用于 PMLSM 推力控制系统中,采用动态线性时变模型等效非线性系统,虽获得较好的推力响应,但需在线估计伪偏导数,计算过程复杂;文献[8]对 PMLSM 的直接推力控制进行了优化,采用 SVPWM 代替开关状态选择表,有效提高了系统的抗干扰性能和稳定性,但在系统动态响应速度方面存在不足;文献[9]将滑模变结构控制与直接推理控制相结合,改善了推力控制性能,但没有解决滑模控制中由切换函数引起的系统抖振问题。

为减小推力波动对系统的影响,本文将提出一种将扰动观测器(DOB)与推力观测器(TFOB)相结合的方法。

1 PMLSM 数学模型

PMLSM 的机械运动方程为:

$$F_e = M_m \ddot{x}_m + F_m^{fric} + F_m^{load} + F_m^{rip} = K_F I_m \quad (1)$$

式中: F_e —电磁推力; M_m —动子质量; x_m —动子位置; F_m^{fric} —摩擦力; F_m^{load} —负载扰动; F_m^{rip} —端部效应产生的推力波动; K_F —电磁推力系数; I_m —电流。

F_m^{fric} 的数学模型为:

$$F_m^{fric} = k_{vsc} \dot{x}_m + k_{clmb} \zeta(\dot{x}_m) \quad (2)$$

式中: k_{vsc} —粘性摩擦系数; k_{clmb} —库伦摩擦系数; $\zeta(\dot{x}_m)$ —近似库伦摩擦模型。

2 基于 DOB 和 TFOB 的 PMLSM 推力控制系统设计

由于 PMLSM 取消了传统旋转电机的滚珠丝杠、联轴器等中间传动机构,PMLSM 易受参数变化、外部

扰动以及端部效应的影响,具有强耦合、参数时变及非线性特点,对电机推力和推力波动产生严重影响。为减小推力波动,本研究采用 DOB 和 TFOB 相结合的方法,利用 DOB 从扰动直接出发,抑制并补偿引起推力波动的不确定性因素。但由于 DOB 受到频率带宽的限制,无法彻底抑制推力波动,需要设计与 DOB 相类似的 TFOB 作为外环控制器,辨识系统参数并提高系统的推力控制带宽,改善系统的推力控制性能。

2.1 DOB 设计

DOB 从系统直接扰动出发,在其带宽范围内,对 PMLSM 伺服系统中存在的参数变化、外部扰动、摩擦力以及端部效应等引起推力波动的因素进行补偿。

基于 TFOB 和 DOB 的 PMLSM 伺服系统框图如图 1 所示。

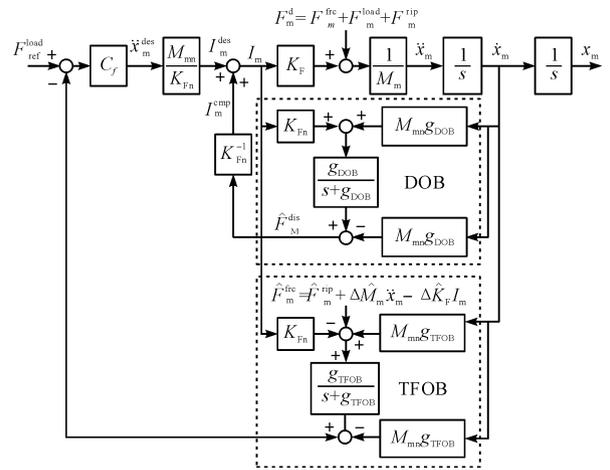


图 1 基于 TFOB 和 DOB 的 PMLSM 伺服系统框图

C_f —比例推力增益; F_{ref}^{load} —给定推力值; x_m^{des} , I_m^{des} —给定位置、给定电流; M_{mn} —标称动子质量; K_{Fn} —标称推力系数; F_m^d —系统总扰动; I_m^{cmp} —补偿电流; g_{DOB} , g_v —DOB 的截止频率、速度测量截止频率; x_m^{noise} —速度测量噪声; F_m^{fric} , F_m^{load} —摩擦力、负载阻力的估计值; ΔM_m , ΔK_F —动子质量和推力系数的估计值; g_{TFOB} —TFOB 的截止频率

若 g_v 趋于无穷,则 DOB 结构框图中传递函数为:

$$\ddot{x}_m = \alpha \frac{s + g_{DOB}}{s + \alpha g_{DOB}} \ddot{x}_m^{des} - \frac{1}{M_m} T_{Sen}(s) F_m^d + T_{CoSen} s \dot{x}_m^{noise} \quad (3)$$

其中:

$$\alpha = \frac{M_{mn} K_F}{M_m K_{Fn}}$$

$$\begin{aligned} T_{\text{Sen}}(s) &= \frac{1}{1} + L_{\text{DOB}}(s) \\ T_{\text{CoSen}}(s) &= \frac{L_{\text{DOB}}(s)}{1 + L_{\text{DOB}}(s)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $T_{\text{Sen}}(s), T_{\text{CoSen}}(s)$ —灵敏度函数、补灵敏度函数, 且 $L_{\text{DOB}}(s) = \alpha \frac{g_{\text{DOB}}}{s}$ 。

若 g_v 为有界值, 则:

$$\begin{aligned} \ddot{x}_m &= \alpha \frac{(s + g_v)(s + g_{\text{DOB}})}{s^2 + g_v s + \alpha g_v g_{\text{DOB}}} \ddot{x}_m^{\text{des}} - \\ &\frac{1}{M_m} T_{\text{Sen}}(s) F_m^{\text{d}} + T_{\text{CoSen}} s \dot{x}_m^{\text{noise}} \end{aligned} \quad (5)$$

从式(5)可以看出: \dot{x}_m^{noise} 可影响系统位置输出, 尽管低频时影响较小可忽略不计, 但高频时 DOB 对扰动和噪声却十分敏感。因此, 若 g_v 为有限值, α 和 g_{DOB} 不能随意取值。

定义 $g_v = \kappa g_{\text{DOB}}$, 则:

$$\begin{aligned} T_{\text{Sen}} &= \frac{s(s + \kappa g_{\text{DOB}})}{s^2 + \kappa g_{\text{DOB}} s + \alpha \kappa g_{\text{DOB}}^2} \\ T_{\text{CoSen}} &= \frac{\alpha \kappa g_{\text{DOB}}^2}{s^2 + \kappa g_{\text{DOB}} s + \alpha \kappa g_{\text{DOB}}^2} \end{aligned} \quad (6)$$

令: $\omega_n = \sqrt{\alpha \kappa} g_{\text{DOB}}, \xi = 0.5 \sqrt{\frac{\kappa}{\alpha}}$, 其中: ω_n, ξ —二

阶特征多项式的自然频率和阻尼系数, 可将式(6)写成特征方程的形式。为限定 T_{Sen} 和 T_{CoSen} 的界限, 假定 $\xi \geq 0.707$, 则 α 和 g_{DOB} 的范围为:

$$\kappa \geq 2\alpha, \alpha g_{\text{DOB}} \leq \frac{g_v}{2} \quad (7)$$

2.2 TFOB 设计

TFOB 为外环控制器, 通过参数辨识, 减小 DOB 输入的不确定性, 并提高推力控制带宽, 从而抑制推力波动对系统的影响, 确保系统的强鲁棒性和推力响应速度。

建立环境接触模型如下:

$$F_m^{\text{load}} = D_{\text{env}}(\dot{x}_m - \dot{x}_{\text{env}}) + K_{\text{env}}(x_m - x_{\text{env}}) \quad (8)$$

式中: $D_{\text{env}}, K_{\text{env}}$ —环境阻尼、刚度系数; $x_{\text{env}}, \dot{x}_{\text{env}}$ —等效位移、等效速度。

F_m^{load} 和 \hat{F}_m^{load} 之间的传递函数为:

$$\frac{F_m^{\text{load}}}{\hat{F}_m^{\text{load}}} = \frac{L_{\text{TFOB}}(s)}{1 + L_{\text{TFOB}}(s)} \quad (9)$$

其中, 开环传递函为:

$$L_{\text{TFOB}}(s) = C_f C_{\text{cmp}}(s)$$

$$\frac{g_{\text{TFOB}} \frac{M_{\text{mn}}}{K_{\text{Fn}}} \varphi(s)}{s \{ M_m s(s + \alpha g_{\text{DOB}}) + (D_{\text{env}} s + K_{\text{env}}) \}} \quad (10)$$

$$C_{\text{cmp}}(s) = \frac{s + g_{\text{DOB}}}{s + g_{\text{TFOB}}}$$

$$\varphi(s) = (M_m \hat{K}_F - \hat{M}_m K_F) s^2 + \hat{K}_F D_{\text{env}} s + \hat{K}_F K_{\text{env}} \quad (11)$$

式中: $C_{\text{cmp}}(s)$ —相位超前滞后补偿器; \hat{K}_F, \hat{M}_m —推力系数、质量的估计值, 且 $\hat{K}_F = K_{\text{Fn}} + \Delta \hat{K}_F, \hat{M}_m = M_{\text{mn}} + \Delta \hat{M}_m$ 。

当 $L_{\text{TFOB}}(s)$ 为 1 时, 系统根轨迹渐近线在 180° 处, 假设 $\beta = M_{\text{mn}} \hat{K}_F / \hat{M}_m K_{\text{Fn}}$, 若 $\beta < \alpha$, 开环传递函数有右半平面零点, 此时系统处于不稳定状态, 控制性能变差; 若 $\beta = \alpha$, 则式(9)为:

$$L_{\text{TFOB}}(s) = C_f C_{\text{cmp}}(s) \frac{g M_m \alpha (D_{\text{env}} s + K_{\text{env}})}{s \{ M_m s(s + \alpha g) + (D_{\text{env}} s + K_{\text{env}}) \}} \quad (12)$$

当 $L_{\text{TFOB}}(s)$ 为 2 时, 系统根轨迹渐近线在 $\pm 90^\circ$ 处, 从式(11, 12) 中可以看出, 系统参数辨识的好坏影响系统的稳定性。系统参数辨识可以分为在线辨识和离线辨识两种, 在线辨识易受环境或试验设备的影响, 影响系统的瞬态响应时间; 离线辨识可以提高控制方法的有效性, 保证 PMLSM 伺服系统的推力响应速度和推力跟踪性能。

在鲁棒控制系统中, 通常将 g_{DOB} 和 g_{TFOB} 设定为相同值。假设 $g_{\text{DOB}} = g_{\text{TFOB}} = g$, 则 $C_{\text{cmp}}(s) = 1$ 时, 式(10)可改写为:

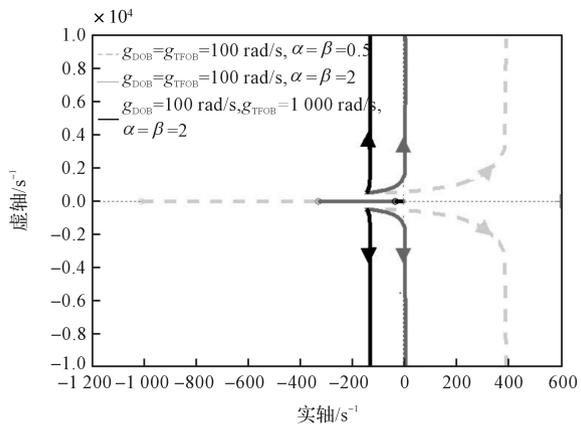
$$L_{\text{TFOB}}(s) = C_f \frac{g M_m \alpha (D_{\text{env}} s + K_{\text{env}})}{s \{ M_m s(s + \alpha g) + (D_{\text{env}} s + K_{\text{env}}) \}} \quad (13)$$

实际上, 由于在很多应用场合 PMLSM 的加速度较小, 可以将质量辨识误差忽略不计, 本文通过假定 $\hat{M}_m \leq M_m$ 和 $\hat{K}_F = K_F$ 来提高系统稳定性。

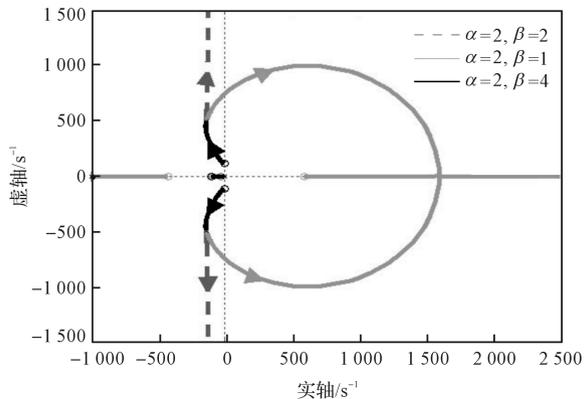
3 实验及结果分析

本研究选择型号为 TMS320 F2812A 的 DSP 作为控制算法核心, 基于 DSP 的 PMLSM 控制系统实验装置图主要包括: PMLSM、PC + DSP 运算控制单元、IPM 主回路功率变换单元、定子电流检测单元、推力检测单元和直线光栅尺位置检测单元等。

本文采用的直线电机参数为： $M_m = 0.81 \text{ kg}$, $K_f = 0.5 \text{ N/A}$, $g_v = 1000 \text{ rad/s}$ ；采样时间取为 0.1 ms 。笔者通过 Matlab 仿真软件对该控制方法进行根轨迹分析。推力控制系统稳定性分析曲线如图 2 所示。



(a) $\alpha=\beta$ 条件下根轨迹曲线



(b) $g_{\text{DOB}}=100 \text{ rad/s}$, $g_{\text{TFOB}}=1000 \text{ rad/s}$ 条件下根轨迹曲线

图 2 推力控制系统稳定性分析曲线

通过图 2 可以看出：(1) 提高 α 和 g_{TFOB} 的值, 系统根轨迹逐渐向左半平面移动, 系统稳定性提高；(2) 系统辨识结果的好坏影响系统稳定性, 因此在设计 TFOB 时需保证 $\alpha \leq \beta$, 即 $\hat{M}_m \leq M_m$ 。

对 PMLSM 伺服系统给定 1 N 的推力阶跃信号, 将开环增益设为固定值: $C_f \alpha = 2.5$, $\alpha = \beta = 2$ 。基于 DOB 和 DOB + TFOB 的推力曲线如图 3 所示。

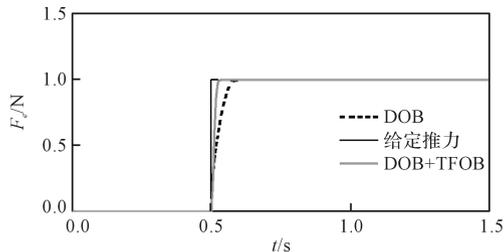


图 3 推力响应曲线

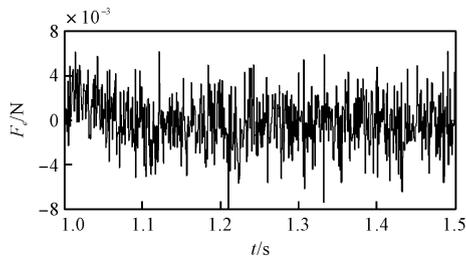
从图 3 中可以看出：在 DOB 控制下系统响应时间约为 0.1 s ；而基于 DOB 和 TFOB 的推力响应时间约为 0.05 s , 响应速度明显优于 DOB 控制。

为便于比较该控制器的优越性, 取 $1 \text{ s} \sim 1.5 \text{ s}$ 系统达到稳定状态时的推力跟踪误差曲线分别进行对比, 如图 4 所示。

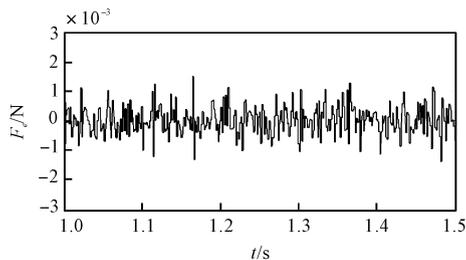
如图 4 可以看出：在 DOB 控制下, 推力误差约为 $-8 \times 10^{-3} \text{ N} \sim 6 \times 10^{-3} \text{ N}$ 之间波动；在 DOB 和 TFOB 控制下, 推力误差约为 $-1.2 \times 10^{-3} \text{ N} \sim 1.5 \times 10^{-3} \text{ N}$ 。

另外, 为验证所提方法的抗扰性能, 本研究在图 2 所示的阶跃信号下的 1 s 时突加 5 N 扰动, 两种控制方法下的推力响应曲线如图 5 所示。

从图 5 可看出：在 1 s 系统受到干扰时, 在 DOB 控制下的推力响应曲线具有较大的瞬时降落, 约为 0.04 N ；而在 DOB 和 TFOB 控制下的 PMLSM 伺服系统推力瞬时降落约为 0.02 N , 明显优于 DOB 控制下的推力。



(a) 基于 DOB 的推力误差曲线



(b) 基于 DOB 和 TFOB 的推力误差曲线

图 4 推力误差曲线

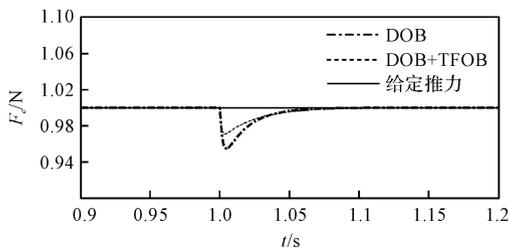


图 5 突加干扰时推力响应曲线

综上所述,可以得出结论:基于 DOB 和 TFOB 的推力控制方法切实可行,既可确保系统的推力响应速度,又可保证系统的推力跟踪精度。

4 结束语

由于 PMLSM 易受外部扰动、参数变化和端部效应等不确定性因素影响,引起推力波动,导致系统控制性能下降,本文提出了一种基于 DOB 和 TFOB 的无传感器推力控制方法,采用了 DOB 作为内环控制器补偿不确定性因素对系统的影响,同时设计了 TFOB 作为外环控制器,提高了推力控制带宽,确保了 DOB 输入的准确性。

实验结果表明:所提方案有效抑制了推力波动,保证了系统推力响应的快速性。

参考文献 (References):

[1] DAO Han W, YU-WU Zhu, SANG Geon. Optimal design of permanent magnet linear synchronous motor for ultra low force pulsations[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2012(39):965-971.

[2] CHO K, KIM J, CHOI S B, et al. A high-precision motion control based on a periodic adaptive disturbance observer in a PMLSM [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2015,20(5):2158-2171.

[3] PANAH P G, ATA EI M, MIRZAEIAN B, et al. A robust adaptive sliding mode control for PMLSM with variable velocity profile over wide range [J]. *Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology*, 2015,10(9):997-1006.

[4] 夏加宽,董 婷,王贵子. 抑制永磁直线电机推力波动的电流补偿控制策略[J]. *沈阳工业大学学报*, 2006,28(4):379-383.

[5] 杨开明,叶佩青,尹文生. 精密工作台直线电机推力波动补偿研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2005(8):32-33.

[6] 赵镜红,张俊洪. 永磁直线同步电机扰动观测器仿真研究[J]. *武汉理工大学学报:交通科学与工程版*, 2007,31(2):224-227.

[7] 崔皆凡,闫 红,单宝钰. 永磁直线同步电机无模型自适应直接推力控制[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2013(6):47-49.

[8] MOHAM A, PARSA L. SVM-based direct thrust control of permanent magnet linear synchronous motor with reduced force ripple [J]. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 2011,19(6):756-760.

[9] YANG J, HE G, CUI J. Sliding Mode Variable-structure direct thrust control of PMLSM using SVM [J]. *Eighth International Conference on Electrical Machine*, 2016(2):1655-1658.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

季明丽,钱厚亮. 基于扰动观测器和推力观测器的永磁直线同步电机推力控制研究[J]. *机电工程*, 2019,36(3):333-337.

JI Ming-li, QIAN Hou-liang. Thrust force control of PMLSM based on disturbance observer and thrust force observer[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2019,36(3):333-337.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>