文章编号: 1000-8152(2007)03-0449-04

永磁直线同步电动机推力波动抑制策略

林家春¹,李 伟¹,赵 彤²,王先逵²,刘成颖²

(1. 中国农业大学工学院,北京100083; 2. 清华大学精密仪器与机械学系,北京100084)

摘要: 永磁直线同步电动机自身存在的推力波动是阻碍其获得平稳的速度响应的一个重要因素, 如何抑制推力 波动的影响是系统控制器设计中必须考虑的一个问题.本文在分析了直线电动机推力波动特点的基础上, 对其进行 了测量. 然后通过对推力波动测量结果进行频谱分析, 找出其所包含的主要谐波, 建立了推力波动的数学模型. 最 后基于所建立的模型, 对推力波动进行了前馈补偿.当速度环采用滑模控制时, 用实验验证了该方法的可行性. 实 验结果表明对推力波动进行建模和前馈补偿可以显著地改善速度环的响应性能. 当系统以0.1 m/s运行时, 稳态速度 波动范围下降到1.83%.

关键词: 直线电动机; 推力波动; 滑模控制 中图分类号: TP359.4 文献标识码: A

Force ripple suppression strategy in permanent magnet linear synchronous motor

LIN Jia-chun¹, LI Wei¹, ZHAO Tong², WANG Xian-kui², LIU Cheng-ying²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Force ripple in permanent magnet synchronous linear motor (PMLSM) is an important factor which prevents it from acquiring smooth velocity response. To eliminate its influence is a problem which must be considered in controller design process. Firstly, the characteristic of the force ripple in linear motor is analyzed and its value is measured. Then, spectral analysis is done on the measured result, and the main harmonics are obtained. Thus the mathematical model of the force ripple is built. Furthermore, based on the built model, feedforward compensation of the force ripple is carried out. Finally, experiment on velocity loop with a sliding mode controller is done to verify the feasibility of the approach. The experiment results indicate that the force ripple compensation is an effective way to improve the performance of the linear motor servo system. When the reference velocity is 0.1 m/s, the fluctuant value of the steady state velocity response is reduced to 1.83%.

Key words: linear motor; force ripple; sliding mode control

1 引言 (Introduction)

直线电动机由于取消了中间传动环节直接产生 直线运动,因而具有高速、高精度、响应快、无反向 间隙等优点,近年来获得越来越广泛的应用.直线电 动机在结构上的简化,却增加了其在控制上的复杂 性,因为各种扰动不经过中间缓冲而直接作用在电 动机动子上.直线电动机自身存在的推力波动是其 获得更高精度的一个障碍,为了充分发挥直线电动 机的优点,必须采取措施减小推力波动对电动机性 能的影响.

国内外研究人员在直线电动机推力波动抑制方 面做了大量的工作.其方法主要有两类,一类是采取 减小推力波动的设计方法^[1~5],如通过初级长度优 化来减少端部力,通过磁极斜排来减少齿槽力等;另一类是从控制算法上入手,对推力波动进行补偿和抑制. 文献[6]通过辨识建立了直线电动机推力波动的一阶模型,并在位置环对其进行了前馈补偿,得出为了获得需要的跟踪精度进行推力波动补偿是必须的;文献[7]对周期性的推力波动建立了基于傅立叶序列近似的数学模型并进行了补偿;文献[8]采用了高速高精密直线电动机的自适应鲁棒控制算法来克服推力波动及其他扰动;文献[9,10]对在PID反馈控制的基础上对直线电动机的推力波动进行了自适应前馈补偿.可以看出,所有这些控制算法基本都是基于模型的补偿方式,因而推力波动数学模型好坏对最终的控制效果有着直接到影响.

收稿日期: 2005-10-29; 收修改稿日期: 2006-02-23.

基金项目:国家"十五"科技攻关计划资助项目(2001BA203B04).

本文在推力波动分析的基础上,对直线电动机的 推力波动进行了测量.通过对测量结果进行频谱分 析分析建立了推力波动的非线性数学模型.最后通 过前馈方式对推力波动进行了补偿.实验表明,该方 法有效地减小了直线电动机推力波动的影响.

2 直线电动机推力波动分析 (Force ripple analysis of linear motor)

永磁同步直线电动机的齿槽力和端部力合称为 定位力,是在电枢绕组不通电的状态下,永磁铁产生 的磁场分别同电枢铁心的齿槽和端部作用而产生的 推力,它总是试图将铁心固定在某些位置,因此称为 定位力.定位力是电动机装配完成后就固有的,只跟 电动机的结构和初、次级的相对位置有关,跟载荷 无关,是电动机产生推力波动的一个重要原因.

永磁同步直线电动机的齿槽力是由于铁芯开槽 后,永磁体磁场对齿槽两边作用力不一致而引起的. 本文所控制的电动机采用采用了永磁体斜排的方 式,齿槽力基本可以忽略不计,因此本文主要考虑端 部力的影响.

永磁同步直线电动机的端部力是铁心的两个端 部受永磁体磁场的磁力差造成的. 在某些位置初级 左右两端受力刚好大小相等, 方向相反, 电动机动子 就倾向于固定于这些位置. 端部力与电动机初级长 度和极弧系数有关, 其变化周期为极距. 铁心的长度 大于6极时, 可以认为两个端部互相不影响, 分别单 独分析. 同时分析时忽略齿槽效应, 即把铁心看成实 心的整体. 这样就得到如图1所示的简化单端直线电 动机模型.





对该模型进行有限元分析,可以得到左端端部力曲线:

$$F_{\rm el} = F(x). \tag{1}$$

右端端部力曲线与左端端部力曲线大小互成镜 像,而方向相反,即

$$F_{\rm er} = -F(-(x+\Delta)). \tag{2}$$

式中: $\Delta = L - k\tau$ 是铁心实际长度, τ 是极距, k是任意整数. 铁心所受的总端部力等于左右两端部力之和, 即

$$F_{\rm e} = F_{\rm el} + F_{\rm er} = F(x) - F(-(x + \Delta)).$$
 (3)

分别对左端端部力和右端端部力展开成成傅立 叶级数,可得到端部力合力为

$$F_{\rm e} = F_{\rm el} + F_{\rm er} = \sum_{n=1}^{\infty} F_n \sin \frac{2\pi n}{\tau} \left(x + \frac{\Delta}{2} \right).$$
(4)

由上式可见端部力的基波是以极距为周期的.

当一个物体从静止到运动状态,其所受摩擦力是 复杂的非线性函数.此处暂不考虑摩擦力的非线性 因素,只考虑库仑摩擦力.永磁同步直线电动机的摩 擦力是由初级所受重力和永磁体对初级的法向吸力 引起的.由摩擦力计算公式:

$$f = \mu N, \tag{5}$$

其中: μ 为摩擦系数, $N = F_N + mg$ 为正压力.由 图2有限元分析结果知, 直线电动机的法向吸力 F_N 是也是周期性变化的, 其变化周期也为一个极距.因 此摩擦力在运动过程中也不是常量, 其变化规律与 法向吸力变化规律一致.



图 2 法向吸引力有限元分析结果

Fig. 2 Finite element analysis result of the normal component of the attractive force

3 直线电动机推力波动测量及建模 (Force ripple measuring and model building)

利用图3所示测力平台. 在直线电动机不通电的 情况下,利用旋转伺服电动机通过蜗轮蜗杆结构勾 速拖动直线电动机初级,控制重物的重量G保证电 动机初级不随定位力的波动而左右窜动. 当电动机 初级左右移动时,力传感器记录了电动机初级移动 过程中钢丝绳拉力的变化,它是直线电动机定位力 的直接反应.



图 3 直线电动机推力波动测试实验台

Fig. 3 Test-bed for force ripple measurement in linear motor

当直线电动机初级向左匀速运动时,

$$F_{\rm L} = F_{\rm D}(x) + G + f_{\rm L},\tag{6}$$

其中: F_L 为力传感器测得的力, F_D(x)为电动机定位力, G为重物所受重力, f_L为直线电动机初级所受摩擦力.

当直线电动机初级向右匀速运动时,

$$F_{\mathbf{R}} = F_{\mathbf{D}}(x) + G - f_{\mathbf{R}},\tag{7}$$

其中: *F*_R 为力传感器测得的力, *f*_R为直线电动机初级所受摩擦力.可以认为电动机向左和向右运动时,所有摩擦力大小是相等的,则电动机的定位力可表示为

$$F_{\rm D}(x) = (F_{\rm L} + F_{\rm R})/2 - G.$$
 (8)

实验得到的直线电动机在某段行程内的推力波动曲线如图6中原始数据所示.

直线电动机的推力波动大小依赖于电动机初级 相对于次级的位置,且以极距为周期,也就是说电动 机动子相对于定子每移动180°电角度,电动机的推 力波动就重复一次.因此,可以以电角度为变量,建 立推力波动的数学模型.这样只要知道了电动机动 子某时刻的电角度信息,也就知道了该位置推力波 动的大小.

首先对测得的扰动力进行傅立叶频谱分析,其频 谱图如图4所示,基波周期为一个极距.



由频谱分析知,推力波动曲线中,0.9992,2.7854, 3.6761倍次谐波为主要谐波,其他谐波幅值较小可 以忽略不计因此推力波动曲线方程可用下列方程来 表示:

$$F_{\rm dis} = A_1 \sin 0.9992x + A_2 \sin 2.7854x + A_3 \sin 3.6761x, \tag{9}$$

其中: $x = \frac{\pi \theta_e}{90}$, θ_e 为当前位置的电角度值. 依据所 建立数学模型计算出的推力波动值与实测推力波动 的吻合程度如图5所示.



4 速度环控制器设计与实验 (Velocity loop controller design and experiment)

滑模控制器具有对参数变化和外界扰动不敏感 等优良品质,因此适合用于直线交流伺服系统的控 制.由于在直线交流伺服系统,电气响应时间比机械 响应时间要短得多,因此可以认为电动机的输出力 与电动机力分量给定值(即速度调节器输出量)成正 比.为了削弱滑模控制的抖动,在速度滑模控制器之 后插入积分环节,两者一起构成速度调节器.图6是 直线电动机速度闭环的简化结构框图.



图 6 速度环控制结构框图

Fig. 6 Velocity loop control diagram

取状态变量 $x_1 = v_{ref} - v, x_2 = \dot{x}_1$,在速度目标 值的二阶导数为零 $\frac{d^2 v_{ref}}{dt^2} = 0$ 时,得速度闭环的状态 方程:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -\frac{K_F}{M}u. \end{cases}$$
(10)

令速度滑模线为: $\delta_{s} = C_{s} x_{1} + x_{2}$, 取指数趋近 率 $\dot{\delta}_{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn} \delta_{s} - k \delta_{s}, \varepsilon > 0, k > 0$. 可以解出控制 量为:

$$u = \frac{M}{K_F} (\varepsilon \operatorname{sgn} \delta_{\mathrm{s}} + k \delta_{\mathrm{s}} + C_{\mathrm{s}} x_2).$$
(11)

带推力波动补偿的直线电动机伺服系统速度环 控制结构如图7所示.当电动机动子处于某个位置 时,由反馈元件获得当前的电角度值,通过计算得到 该位置的推力波动的大小,并对其进行前馈补偿.

图8为给定速度为0.1 m/s时,不加推力波动补偿和加推力波动补偿的阶跃响应曲线.进行推力波动补偿后,稳态速度波动范围从10.07%下降到1.83%.改进效果非常明显.





5 结论 (Conclusion)

本文在分析直线电动机自身推力波动及其特点的基础上,通过对推力波动曲线的测量和分析,建立 了推力波动的非线性数学模型.该数学模型是电角 度的函数,因而在控制过程中可以根据电角度值计 算出该位置推力波动的大小,从而实现推力波动的 前馈补偿.当速度环采用滑模控制器时,加入推力波 动补偿后,稳态时速度响应波动幅度大大减小.因此 在直线交流伺服系统中,对推力波动进行测量、建 模和前馈补偿,可以明显改善系统速度响应的性能.

参考文献 (References):

 HOR P J, ZHU Z Q, HOWE D, et al. Minimization of cogging force in a linear permanent magnet motor[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1998, 34(5): 3544 – 3547.

- [2] CRUISE R J, LANDY C F. Reduction of cogging forces in linear synchronous motors[C]// IEEE AFRICON Conference. Cape Town: IEEE Press, 1999: 623 – 626.
- [3] ZHU Z O, XIA Z P, HOWE D, et al. Reduction of cogging force in slotless linear permanent magnet motors[J]. *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, 1997, 144(4): 277 – 282.
- [4] BIANCHI N, BOLOGNANI S, CAPPELLO A. Reduction of cogging force in PM linear motors by pole-shifting[J]. *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, 2005, 152(3): 703 – 709.
- [5] KI-CHAE L, JOON-KEUN W, GYU-HONG K, et al. Detent force minimization techniques in permanent magnet linear synchronous motors[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 2002, 38(2): 1157 – 1160.
- [6] BRAEMBUSSCHE P V D, SWEVERS J, BRUSSEL H V, et al. Accurate tracking control of linear synchronous motor machine tool axes[J]. *Mechatronics*, 1996, 6(5): 507 – 521.
- [7] ROHRIG C, JOCHHEIM A. Identification and compensation of force ripple in linear permanent magnet motors[C] //Proc of American Control Conference. Arlington: IEEE Press, 2001: 2161 – 2166.
- [8] YAO B, XU L. Adaptive robust motion control of linear motors for precision manufacturing[J]. *Mechatronics*, 2002, 12(4): 595 – 616.
- [9] TAN K K, LEE T H, DOU H, et al. Force ripple suppression in ironcore permanent magnet linear motors using an adaptive dither[J]. J of the Franklin Institute-Engineering and Applied Mathematics, 2004, 341(4): 375 – 390.
- [10] ZHAO S, TAN K K. Adaptive feedforward compensation of force ripples in linear motors[J]. *Control Engineering Practice*, 2005, 13(9): 1081 – 1092.

作者简介:

林家春 (1978—), 男, 博士, 主要研究方向为永磁直线同步电 动机控制, 数字图像处理, E-mail: linjc@bj1860.net;

李 伟 (1958—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向 计算机虚拟仿真、数字图像处理技术及其应用等, E-mail: gxy5@cau. edu.cn;

赵 彤 (1973—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为直线电动机 技术等;

王先逵 (1935—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为先进制造技术、计算机辅助制造技术等;

刘成颖 (1935—), 女, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为直 线电动机在机床上的应用等.