

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.11.013

基于 LSM 的磁轴承自传感方法及其特性研究*

胡雄心, 胥芳*, 谭大鹏

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对磁轴承自传感系统结构复杂和精度不高的问题,对基于最小二乘法的电感计算方法,以及转子位移估计方法、幅度解调法和直接电流测量法等磁轴承自传感系统结构等进行了研究。首先提出了基于最小二乘法的磁轴承线圈电流直接估计转子位移方法和位置控制系统模型,其次基于 TMS320F2812 和柔性铰链微动位移结构搭建了单自由度磁轴承实验台,最后对该自传感方法的估计位移及其估计误差进行了测试。研究表明:在 0 ~ 250 μm 量程范围内,该方法估计位移最大绝对误差的仿真结果为 -3.49 μm ,相对误差为 1.39%;而估计位移最大绝对误差的实验结果为 2.41 μm ,相对误差为 0.96%;该位移估计法不仅提高了估计精度,而且当简化自传感系统结构后,自传感磁轴承运行状态良好。

关键词:自传感;磁轴承;位置估计;最小二乘法

中图分类号:TH133.3;O241.2

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)11-1335-05

Self-sensing and characteristic of magnetic bearing based on least squares method

HU Xiong-xin, XU Fang, TAN Da-peng

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province,
Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the complex structure and the lower precision of the self-sensing active magnetic bearings (AMBs), the inductance calculation method based on the least square method, the rotor displacement estimation method, the amplitude demodulation method and the direct current measurement method are studied. Firstly, a method for direct estimation of rotor displacement and the model of position control system based on the least square method was proposed. Secondly, based on TMS320F2812 and flexure hinge micro displacement structure, a single degree of freedom magnetic bearing experimental platform was built to test the estimated displacement and error of the self-sensing method. Finally, the position controller of a 1-DOF AMB was implemented in the real-time rig which consists of the digital signal processor TMS320F2812 and micro-position platform based on flexible hinge. The results indicate that the relative error is about 1.39% as the simulation result of absolute error is -3.49 μm , and the relative error in test is achieved about 0.96% as the simulation absolute error is 2.41 μm within position range of 0 ~ 250 μm . The displacement estimation method does not only improve the estimation accuracy, but also works well when the structure of the self-sensing system is simplified.

Key words: self-sensing; magnetic bearing; position estimation; least squares method (LSM)

收稿日期:2020-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51775501);国家重点研发计划资助项目(2018YFB1309404);浙江省自然科学基金资助项目(LR16E050001)

作者简介:胡雄心(1974-),男,浙江永康人,讲师,主要从事磁悬浮轴承方面的研究。E-mail:huxx007@126.com

通信联系人:胥芳,女,教授,博士生导师。E-mail:Fangx@zjut.edu.cn

0 引 言

工业磁轴承通常使用脉宽调制开关功放,与模拟功率放大器相比,其功率器件上仅有很低的功耗,并且还提高了系统集成能力。因此,基于开关功放磁轴承的自传感理论和技术,成为工业磁轴承付之实践的重要研究内容。如何在理论上提高磁轴承的自传感位移精度,并且阐述相关的控制系统及方法,对磁轴承的稳定控制和自传感磁轴承等方面的研究有着重要意义^[1-2]。

到目前为止,已有大量研究报告了自传感磁轴承的参数估计方法。按功放类型划分,这些估计方法可分为 3 类:

(1) 基于线性功放的高频注入法。SIVADASAN K^[3],徐龙祥^[4],SCHAMMASS A^[5]等利用电流振幅变化对电感进行测量,即对悬浮对象的位置进行测量,适当地选择测试信号的频率可实现控制的去耦以及估算。这种方法的劣势是需要附加硬件来提供和评估这个测试信号;

(2) MIZUNO 和 HIRASAWA^[6]利用滞后开关功放,使得电流纹波幅度保持不变,将悬浮对象的位置从滞后功放的开关频率中推导出来,其中,开关频率通常由锁相环来测量。在估计位置信号的高动态变化时,这种方法缺乏精确的估计能力;

(3) 使用脉宽调制(PWM)控制的开关功放。其中,电压的平均值会受到占空比的影响。KUCERA L^[7],NOH M D & MASLEN E H^[8],孙宇新^[9],VAN SCHOOOR G^[10-12]等利用开关功放纹波和悬浮对象位置依赖关系,展开了对电压和电流信号的谐波分析,并利用电压和电流的基波分量进行了位置估计;祝长生^[13-15]和 JIANG Y X^[16]研究了占空比对估计的影响。

综上所述,导致基于谐波分析的估计方法精度不高的因素有:(1) 由于谐波在整体工作电流中只占很小的百分比,同时该方法会受滤波器噪声和干扰等因素的影响;(2) 谐波提取和分析处理的过程需要大量的滤波器,因而需要引入附加相移,而此举会导致自传感模型结构复杂。

与谐波分析相比,利用工作电流并结合最小二乘法(LSM)可以更细致地估计电感的实际值,从而推断位置估计值,以提高精度。

故笔者首先推导出 PWM 控制下工业磁轴承的实际工作电流和位移的关系模型,然后提出基于最小二乘估计的磁悬浮系统位移估计的计算方法,并构建控制系统模型,最后通过单自由度磁轴承平台,进行仿真

和实验,对估计位移的特性进行对比,并探讨相关的影响因素。

1 建模

1.1 基于 LSM 的自传感磁轴承模型

典型的单自由度磁轴承模型简图如图 1 所示。

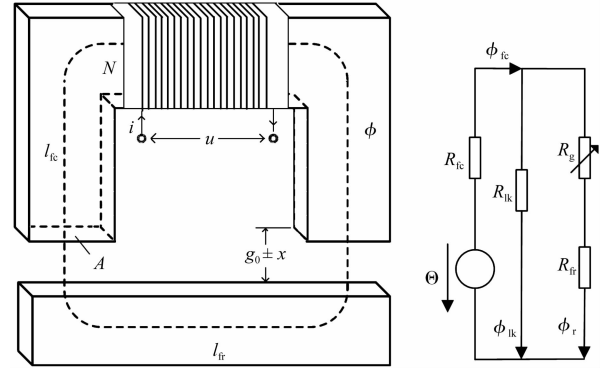


图 1 单自由度磁轴承模型简图

图 1 中,磁路阻抗由电磁铁芯 R_{fc} 、转子 R_{fr} 、气隙 R_g 和漏磁 R_{lk} 四部分组成。

忽略漏磁和边缘效应,则有:

$$R_m = R_{fc} + R_g + R_{fr} = \frac{1}{\mu_0 A} \left[2(g_0 \pm x) + \frac{(l_{fc} + l_{fr})}{\mu_r} \right] = \frac{x_g}{\mu_0 A} \quad (1)$$

式中: l_{fr}, l_{fc} —铁芯和转子磁路的平均长度; x —气隙变化量; g_0 —初始气隙长度; A —磁极面积; μ_0, μ_r —空气磁导率、铁磁材料磁导率,并记 $x_g = 2(g_0 \pm x) + \frac{(l_{fc} + l_{fr})}{\mu_r}$ 。

二电平 PWM 开关功放(开关周期为 $T = T_s$)的工作电流可以分为充电相和放电相,并近似为三角波。

实时电流采样示意图如图 2 所示。

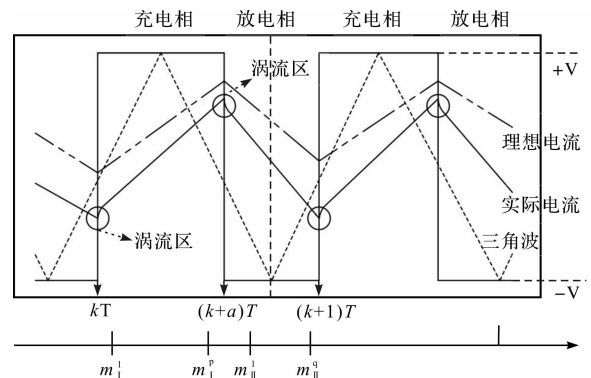


图 2 实时电流采样示意图

而每个采样时刻的电流则为:

$$i_j = i_l^m + \frac{j - m_l^1}{m_l^p - m_l^1} \Delta i_l \quad (2)$$

式中: j —离散时间点 $m_l^1, \dots, m_l^p$; Δi_l —电流差值 $i_{m_l^p} - i_{m_l^1}$ 。

据此可得电流 Δi_l 最小平方估算方程为:

$$\begin{bmatrix} i_{m_l^1} \\ i_{m_l^1+1} \\ \vdots \\ i_{m_l^p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{m_l^1 - m_l^1}{m_l^p - m_l^1} \\ 1 & \frac{m_l^1 + 1 - m_l^1}{m_l^p - m_l^1} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{m_l^p - m_l^1}{m_l^p - m_l^1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{m_l^1} \\ \Delta i_l \end{bmatrix} \quad (3)$$

则有 Δi_l 的求逆公式为:

$$\hat{\xi}_l = [(Q_l)^T Q_l]^{-1} (Q_l)^T h_l \quad (4)$$

由此可得充电相初始电流估计 $\hat{i}_{m_l^1} = \hat{\xi}_l^1$ 和电感估计:

$$\hat{L}_{k_l} = T_{sp} / \hat{\xi}_l^2 \quad (5)$$

式中: T_{sp} —采样时间间隔。

同理,可得放电相的估计电流 Δi_{ll} 和估计电感 $\hat{L}_{k_{ll}}$ 。

假定充电相和放电相的采样间隔相同,在 PWM 周期 $t_l^1 < t \leq t_l^1 + T_s$ 内,电感的时间变化率 dL/dt 是常数(不一定是零),则可求取一个 PWM 周期内的电感平均估计值为:

$$\hat{L}_k = \frac{\hat{L}_{k_l} \Delta t_{ll} + \hat{L}_{k_{ll}} \Delta t_l}{\Delta t_{ll} + \Delta t_l} \quad (6)$$

相应地可以求出估计位移为:

$$\hat{x}_g = \frac{K_N}{\hat{L}_k} \quad (7)$$

式中: K_N —系数 $\mu_0 N^2 A$ 。

这就是基于最小二乘法的估计电感求取的估计位移。应当指出的是,这个估计方法需要精确的电流测量,这就必然需要高精度的高速采样器,同时也会增加求解的计算量。

1.2 控制系统模型

基于 LSM 估计器及控制系统的结构图,如图 3 所示。

图 3 中,系统组成包括 PI 电流内环控制器、PID 位置外环控制器及其控制策略生成器;电涡流传感器为参考位置传感器。位置估计由快速 $\sum_{fast}^e$ 和慢速 $\sum_{slow}^e$ 两部分组成。快速 $\sum_{fast}^e$ 每次快速采样时间 T_{sp} 进行更

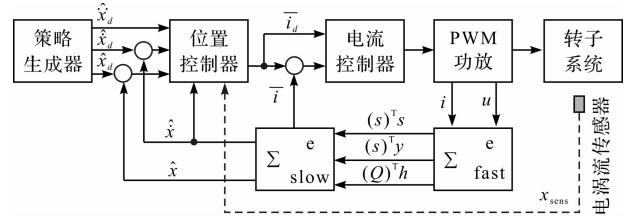


图 3 基于 LSM 估计器及控制系统的结构图

新并在每个开关周期 T_s 传输到慢速 $\sum_{slow}^e$; 估计位置和估计速度在慢速 $\sum_{slow}^e$ 中执行,并且每个 T_s 评估控制策略。

2 仿真和实验结果分析

PWM 功放驱动下的单自由度磁轴承实验装置如图 4 所示。



图 4 单自由度磁轴承实验装置

1—电涡流放大器;2—控制板;3—信号调理板;4—电源板;5—电流传感器;6—功放板;7—探头;8—转子;9—电磁铁

系统主要参数表如表 1 所示。

表 1 系统主要参数

参数	数值
开关频率 f_s/kHz	2
采样频率 f_{sp}/kHz	100
线圈内阻 R_0/Ω	0.2
名义电感 L_0/mH	13.2
初始气息 g_0/mm	0.5
转子质量 m/kg	0.324
工作电压 V/V	50
偏置电流 I_0/A	3

基于 LSM 估计模型、数字幅度解调法和直接电流测量法的自传感模型图,如图 5 所示。

基于 LSM 估计法、数字幅度解调法和直接电流测量法仿真和实验结果比对图,如图 6 所示。

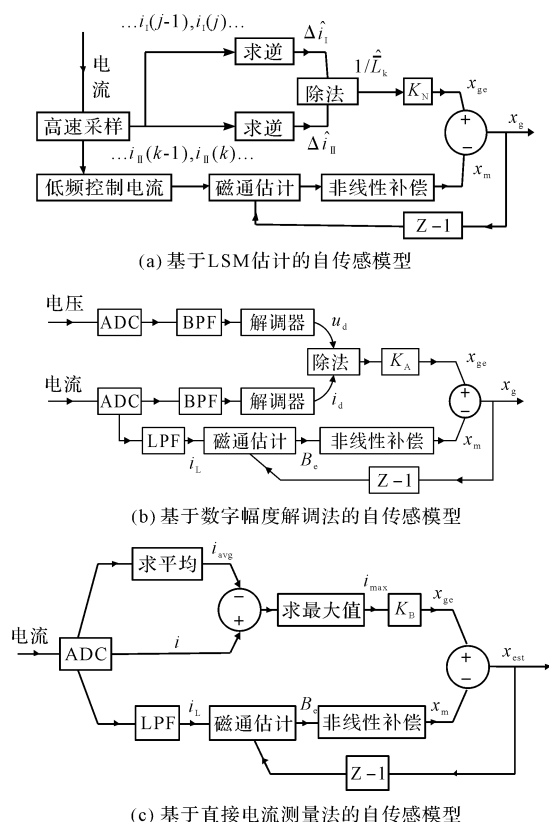


图5 3种自传感模型图

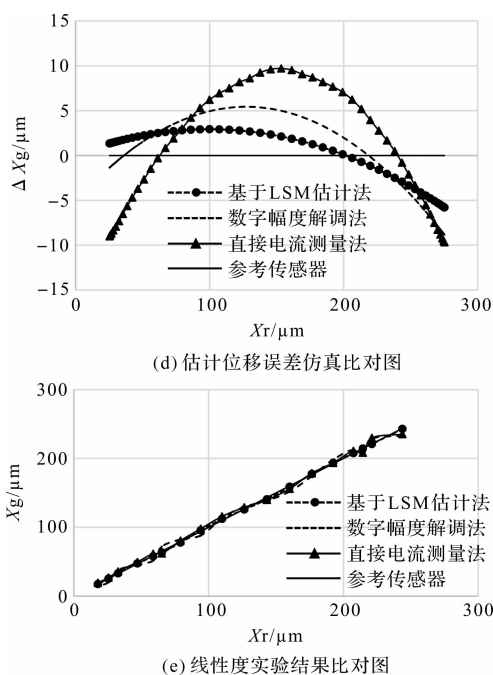
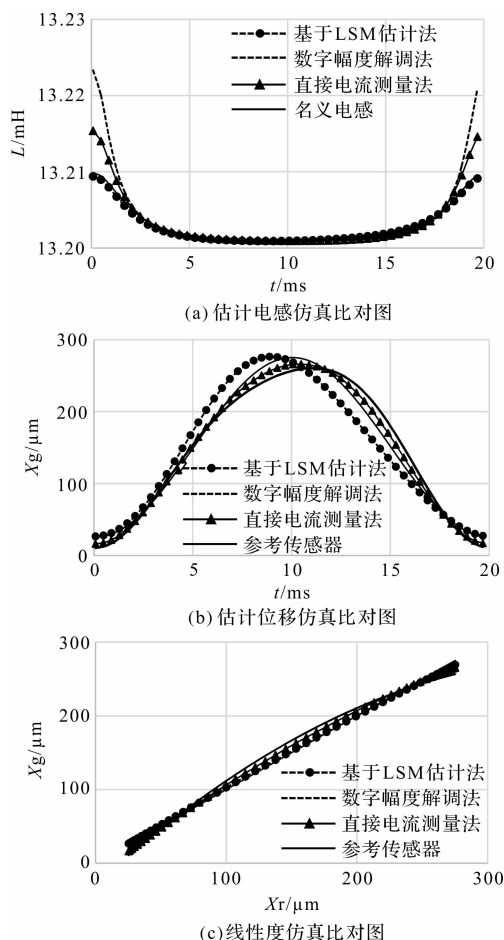


图6 仿真和实验结果比对比图

X_r —参考传感器输出

3种估计算法在 $0 \sim 250 \mu\text{m}$ 范围内的仿真在振幅为 $10 \mu\text{m}$ 、频率为 50 Hz 的正弦波激励下进行。在估计位移线性度的仿真比对比图中,由于各曲线相互之间很接近,对应的估计位移误差仿真比对比图更清晰地反映了在整个工作范围内的估计误差分布状况;

基于 LSM 估计法的位移估计误差最大绝对误差为 $-3.49 \mu\text{m}$,相对误差为 -1.39% ;而数字幅度解调法的最大估计误差为 $-8.83 \mu\text{m}$,相对误差为 -3.53% ;直接电流估计法的最大误差为 $-9.69 \mu\text{m}$,相对误差为 -3.88% 。由此可知:基于 LSM 估计法的精度优于其他两种估计器。

为了测试估计器的有效性,令转子气隙在 $0 \sim 250 \mu\text{m}$ 的范围内变化,笔者将位移估计器输出和电涡流传感器 HZ-891 进行了对比;为了保证单自由度磁轴承在水平横向位置的振动,实验装置选择四连杆结构的柔性铰链作为转子桁架的支承结构,构建了微动位移平台^[17];实验测试共设置了 18 个数据采集点。

实验结果表明:

(1) 基于 LSM 的估计位移在 $0 \sim 250 \mu\text{m}$ 线性度较好,估计最大绝对误差为 $2.41 \mu\text{m}$,相对误差为 0.96% ;而数字幅度解调法的最大估计误差为 $-10.54 \mu\text{m}$,相对误差为 -4.22% ;直接电流估计法的最大误差为 $8.82 \mu\text{m}$,相对误差为 3.53% ;

(2) 通过仿真和实验的结果相比较,结果表明,基于 LSM 估计法的精度较好。

仿真和实验数据略有不同的原因主要有:

(1) 实验电流中存在噪声和干扰,而仿真未考虑这些因素;

(2) 仿真中未计入电感动态特性(如涡流、电感直流电阻热效应等),而实验电流则会受到这些因素的影响。

3 结束语

笔者首先分析了 3 种不同的磁轴承位移估计器模型,然后通过仿真和实验验证了估计器的精度水平,研究表明:基于 LSM 估计法的位移估计精度在 1% 左右,优于数字幅度解调法和直接电流估计法。产生该结果的原因主要有:

(1) 从估计模型的结构上看,数字幅度解调法和直接电流估计法都依赖 PWM 的一次谐波最大幅度来估计,因此需要滤波器来提取磁轴承线圈工作电流和电压的一次谐波信号,并获取最大幅值进行位移估计;但这些滤波器限制系统带宽和引入额外的移相降低估计精度。而基于 LSM 估计器通过直接采用工作电流进行估计,几乎削减了上述滤波器,从而简化了估计模型的结构;

(2) 从估计算法上看,基于 LSM 估计法是在整个 PWM 周期内(充电相和放电相总计为 50 个电流采样数据)对电感进行的细致估计,而其他两种估计法都是在一个 PWM 周期内只做一次估计;基于 LSM 估计法还进一步作了平均估计,平滑了线圈感抗动态波动影响。

但由于大量的采样数据和估计计算需要消耗 CPU 时间,基于 LSM 估计法的自传感磁轴承系统会限制转子的的工作速度。

参考文献(References):

- [1] 施伟策 G,布鲁勒 H,特拉克斯勒 A. 主动磁轴承—基础、性能及应用[M]. 虞烈,袁崇军译. 北京:新时代出版社,1997.
- [2] SCHWEITZER G, MASLEN E. 磁悬浮轴承—理论、设计及旋转机械应用[M]. 1 版. 机械工业出版社,2012.
- [3] SIVADASAN K K. (1996). Analysis of self-sensing active magnetic bearings working on inductance measurement principle[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*,32(2),329-334.
- [4] 王 军,徐龙祥. 无传感器磁轴承转子位置检测与研究[J]. *机械工程与自动化*,2005(1):71-73,76.
- [5] SCHAMMASS A, HERZOG R, BUHLER P. New results for self-sensing active magnetic bearings using modulation approach[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*,2005,13(4):509-516.
- [6] MIZUNO T, Hirasawa Y. Self-sensing magnetic suspension using a hysteresis amplifier with a two-quadrant drive[C]. *Proceedings of the Sixth International Symposium on Magnetic Suspension Technology*. Tu-rin, Italy:[s. n.],2001.
- [7] KUCERA L. Robustness of self-sensing magnetic bearing[C]. *Proceeding of MAG97 Industrial Conference and Exhibition on Magnetic Bearings*. Alexandria, Virginia:[s. n.],1997.
- [8] NOH M D, MASLEN E H. Self-sensing magnetic bearings using parameter estimation[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*,1997,46(1):45-50.
- [9] 孙宇新,沈启康,叶海涵,等. 基于改进 UKF 的无轴承异步电机无速度传感器控制[J]. *农业工程学报*,2018,34(19):74-81.
- [10] NIEMANN A C, VAN SCHOOR G, DU RAND C P. A Self-sensing active magnetic bearing based on a direct current measurement approach[J]. *Sensors*,2013,13(9):12149-12165.
- [11] VAN SCHOOR G, NIEMANN A C, DU RAND C P. Evaluation of demodulation algorithms for robust self-sensing active magnetic bearings[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*,2013,189(1):441-450.
- [12] RANFT E O, VAN SCHOOR G, DU RAND C P. Self-sensing for electromagnetic actuators. Part II: Position estimation[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*,2011,172(2):410-419.
- [13] YU J, ZHU C S. Position estimation accuracy improvement based on accurate modeling of self-sensing active magnetic bearings[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2016,248:233-245.
- [14] 唐 明,祝长生. 基于占空比补偿的电磁轴承无传感器运行[J]. *浙江大学学报:工学版*,2013,47(8):1418-1423,1430.
- [15] 唐 明,祝长生,于 洁. 非磁饱和偏置下自传感主动电磁轴承的转子位移协同估计[J]. *电工技术学报*,2014,29(5):205-212.
- [16] JIANG Y X, WANG K, SUN M L, et al. Displacement Self-Sensing Method for AMB-Rotor Systems Using Current Ripple Demodulations Combined With PWM Command Signals[J]. *IEEE SENSORS JOURNAL*,2019,19(14):5460-5469.
- [17] 王 振,王兆强,罗一平,等. 混合排列结构化滑动轴承承载力数值研究[J]. *轻工机械*,2018,36(5):29-33.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

胡雄心,胥 芳,谭大鹏. 基于 LSM 的磁轴承自传感方法及其特性研究[J]. *机电工程*,2020,37(11):1335-1339.

HU Xiong-xin, XU Fang, TAN Da-peng. Self-sensing and characteristic of magnetic bearing based on least squares method[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*,2020,37(11):1335-1339.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>