

二自由度交流主动磁轴承最小二乘支持向量机解耦控制

朱焜秋, 李媛媛[†]

(江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要: 采用最小二乘支持向量机(LS-SVM)理论, 研究了二自由度交流主动磁轴承这一多变量、非线性、强耦合的控制对象的动态解耦问题. 根据主动磁轴承的基本结构, 利用等效磁路法推导了悬浮力模型, 建立了系统的状态方程, 并对其进行了可逆性分析; 应用LS-SVM辨识原理推导出系统的逆模型; 将逆模型与原系统串联, 从而将原非线性耦合系统解耦成伪线性系统, 并设计了附加控制器; 采用MATLAB软件平台构建了磁轴承仿真系统, 对系统进行了拟合、起浮、干扰及解耦仿真试验并进行了分析; 最后构建了交流主动磁轴承实验平台, 对转子起浮和解耦性能进行了实验. 研究表明: 采用LS-SVM逆解耦控制策略, 能够实现交流主动磁轴承的动态解耦, 系统具有良好的动静态性能.

关键词: 主动磁轴承; 支持向量机; 逆系统; 解耦控制

中图分类号: TM133 **文献标识码:** A

Decoupling control of 2 degrees-of-freedom alternating current active magnetic bearing using least squares support vector machines

ZHU Huang-qiu, LI Yuan-yuan[†]

(School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang Jiangsu 212013, China)

Abstract: Using the least squares support vector machines (LS-SVM), we investigate the dynamic decoupling of the 2 degrees-of-freedom (DOF) alternating current (AC) active magnetic bearing (AMB) system which is a multivariable, nonlinear and strong coupling object. According to the basic structure of the AMB system, we use the equivalent magnetic circuit method to develop the mathematical model for the suspension forces and setup the state-space equation for the 2 DOF AC AMB system. After the invertability analysis, we derive the inverse model of the system based on the identification principle of LS-SVM. By connecting the inverse system in series with the original system, we decouple the original nonlinear system into quasi-linear systems, for which additional controllers are designed. The simulation of the AMB system is carried out on the MATLAB software platform. On this platform, we perform the tests of set up, fitting, floating, disturbing and decoupling; the results are analyzed. Finally, the experimental platform of the AMB was established, on which the suspension of the rotor and the decoupling performance test are performed. The research results show that the control strategy based on LS-SVM can realize dynamic decoupling control for the 2 DOF AC AMB system with desirable dynamic and static performances.

Key words: active magnetic bearing; support vector machines; inverse system; decoupling control

1 引言(Introduction)

交流主动磁轴承是集机、电和磁于一体的高度非线性被控系统, 其机械结构简单, 易于实现数字控制, 但各自由度之间存在磁力与电流和位移之间复杂的耦合关系, 如果不采取有效的解耦措施, 则难以实现磁轴承系统的高速高精度稳定运行^[1-2]. 因此, 研究其解耦控制方法有着重要的理论及应用价值.

国内外许多专家学者针对多变量、非线性、强耦合系统提出了多种解耦控制策略, 促进了解耦控制领

域的研究和发展. 文献[3]在无轴承磁阻电机前串接前馈补偿控制器对系统进行解耦, 解耦矩阵计算简单, 但是磁饱和现象容易影响前馈补偿控制器中的参数, 仅能实现电磁转矩和径向悬浮力之间的静态解耦, 并没有实现完全意义上的动态解耦; 文献[4]提出了基于 α 阶逆系统理论的动态解耦控制策略, 但是这种方法要求被控对象的数学模型和具体的系统参数已知, 并要精确求得逆模型的解析表达式, 而实际在工程应用中常常难以确切描述系统的非线性特性, 即使建模

收稿日期: 2012-12-03; 收修改稿日期: 2013-04-03.

[†]通信作者. E-mail: liyuanyuan2010@126.com; Tel.: +86 18752967965.

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2012707); 江苏省“六大人才高峰”资助项目(2011-ZBZZ026); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发(2011)6号).

成功,又极难求逆模型的解析解.文献[5]针对离散时间动态系统的不确定性非线性多变量的特点,提出神经网络自适应解耦控制法,将开环解耦补偿、广义最小方差自适应方案与神经网络相结合,实现了完全动态解耦.而在很多实际情况下,神经网络解耦控制时,很难获得所需的训练样本数据,且网络权值的调整方法存在局限性.近年来Johan A. K. Suykens等人提出的最小二乘支持向量机(LS-SVM)在非线性、强耦合系统辨识和控制中得到了较大的发展^[6],把LS-SVM与逆系统方法相结合进行动态解耦控制的研究,无需确切知道系统的物理机理,采用现场测试动态建模,训练只需求解一个线性方程组,可以极大的提高控制系统的工作效率.

本文根据LS-SVM的逆模辨识和解耦控制原理,以二自由度交流主动磁轴承为研究对象.分析了磁轴承逆系统的存在性,采用SVM的拟合特性,离线辨识和在线矫正得到LS-SVM逆模型,将逆模型串联在原系统之前,将磁轴承系统解耦成伪线性系统,设计了PID附加控制器,并进行了仿真和实验研究.

2 二自由度交流主动磁轴承结构与数学模型(Structure and mathematical model of 2 degrees-of-freedom of alternating current active magnetic bearing)

2.1 基本结构(Basic structure)

三相交流主动磁轴承基本结构如图1所示,由定子、转子和径向控制线圈组成.3个磁极沿圆周均匀分布,3个控制线圈分别绕在定子3个磁极上,采用星形联结方式,由三相功率逆变器进行驱动控制.

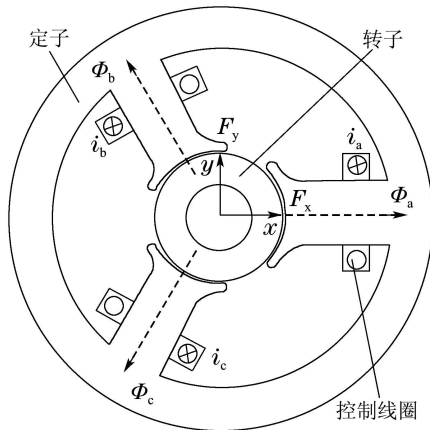


图1 三极交流主动磁轴承结构示意图

Fig. 1 Structure of 3-pole AC active magnetic bearing (AMB)

图1中 Φ_a 、 Φ_b 和 Φ_c 为三相绕组通入电流 i_a 、 i_b 和 i_c 产生的磁通, i_x 、 i_y 是 i_a 、 i_b 和 i_c 在 x 、 y 轴等效绕组电流.转子在磁通 Φ_a 、 Φ_b 和 Φ_c 作用下,处于平衡位置,若转子受到外界扰动则可通过改变电流 i_x 、 i_y 的大小和方向来改变磁通 Φ_a 、 Φ_b 和 Φ_c ,从而使转子回到平衡位置.

2.2 数学模型(Mathematical model)

设转子相对于平衡位置沿 x 和 y 方向的位移分别

为 x 、 y ,转子在 x 和 y 方向上所受的悬浮力为 F_x 和 F_y .

采用等效磁路法,推导出转子所受3个磁极的吸力在 x 和 y 方向上的分量,并在平衡位置附近用泰勒公式展开,略去二阶以上无穷小量,得到径向磁轴承悬浮力模型为

$$\begin{cases} F_x = \\ \frac{3N_r^2\mu_0S_r(i_{x0}^2+i_{y0}^2)}{8\delta_0^3}x - \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{y0}}{4\delta_0^2}(i_x-i_{x0}) - \\ \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{x0}}{4\delta_0^2}(i_y-i_{y0}) - \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{x0}i_{y0}}{4\delta_0^2}, \\ F_y = \\ \frac{3N_r^2\mu_0S_r(i_{x0}^2+i_{y0}^2)}{8\delta_0^3}y - \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{x0}}{4\delta_0^2}(i_x-i_{x0}) + \\ \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{y0}}{4\delta_0^2}(i_y-i_{y0}) + \frac{3N_r^2\mu_0S_r(i_{y0}^2-i_{x0}^2)}{8\delta_0^2}, \end{cases} \quad (1)$$

式中: S_r 为径向磁极面积; N_r 为两相静止坐标系下径向磁轴承控制线圈 N_3 的等效匝数; μ_0 为空气的气隙磁导率; δ_0 为转子未发生偏心时的气隙长度, i_{x0} 和 i_{y0} 为 x 和 y 方向的偏磁电流.

设转子重力为 G ,根据转子动力学理论,不考虑扰动时,系统的运动方程为

$$\begin{cases} \ddot{x} = F_x, \\ \ddot{y} = F_y - G. \end{cases} \quad (2)$$

选取系统的状态变量

$$X = (x_1, x_2, x_3, x_4)^T = (x, y, \dot{x}, \dot{y})^T. \quad (3)$$

输入变量

$$U = (u_1, u_2)^T = (i_x, i_y)^T. \quad (4)$$

输出变量

$$Y = (y_1, y_2)^T = (x, y)^T. \quad (5)$$

根据式(1)–(5)可以得出系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3, \dot{x}_2 = x_4, \\ \dot{x}_3 = \\ \frac{3N_r^2\mu_0S_r(i_{x0}^2+i_{y0}^2)}{8\delta_0^3m}x_1 - \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{y0}}{4\delta_0^2m}u_1 - \\ \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{x0}}{4\delta_0^2m}u_2 + \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{x0}i_{y0}}{4\delta_0^2m}, \\ \dot{x}_4 = \\ \frac{3N_r^2\mu_0S_r(i_{x0}^2+i_{y0}^2)}{8\delta_0^3m}x_2 - \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{x0}}{4\delta_0^2m}u_1 + \\ \frac{3N_r^2\mu_0S_ri_{y0}}{4\delta_0^2m}u_2 + \frac{3N_r^2\mu_0S_r(i_{x0}^2-i_{y0}^2)}{8\delta_0^2m} - g. \end{cases} \quad (6)$$

由式(5)–(6)可以得到,二自由度交流主动磁轴承系统是一个具有4个状态变量的非线性、强耦合的2输入、2输出系统,直接对其进行控制存在一定困难.

3 最小二乘支持向量机逆解耦控制(Decoupling control based on LS-SVM)

3.1 可逆性分析(Reversibility analysis)

根据Interactor算法, 分析系统的可逆性^[7], 计算输出 $Y = (y_1, y_2)^T$ 对时间的导数, 直到显含 $U = (u_1, u_2)^T$ 为止, 得到

$$A = \begin{bmatrix} \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3N_r^2 \mu_0 S_r (i_{x0}^2 + i_{y0}^2)}{8\delta_0^3 m} x_1 - \frac{3N_r^2 \mu_0 S_r i_{y0}}{4\delta_0^2 m} u_1 - \frac{3N_r^2 \mu_0 S_r i_{x0}}{4\delta_0^2 m} u_2 + \frac{3N_r^2 \mu_0 S_r i_{x0} i_{y0}}{4\delta_0^2 m} \\ \frac{3N_r^2 \mu_0 S_r (i_{x0}^2 + i_{y0}^2)}{8\delta_0^3 m} x_2 - \frac{3N_r^2 \mu_0 S_r i_{x0}}{4\delta_0^2 m} u_1 + \frac{3N_r^2 \mu_0 S_r i_{y0}}{4\delta_0^2 m} u_2 + \frac{3N_r^2 \mu_0 S_r (i_{x0}^2 - i_{y0}^2)}{8\delta_0^2 m} - g \end{bmatrix}. \quad (7)$$

计算得 $\text{rank} \left[\frac{\partial A}{\partial u} \right] = 2$, $\frac{\partial A}{\partial u}$ 非奇异, 系统的相

对阶数为 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2) = (2, 2)$, 可以得出 $\sum_{i=1}^r \alpha_i =$

4, 又系统的状态方程为4阶, 即 $\sum_{i=1}^r \alpha_i \leq n$, 满足系统

可逆条件, 所以系统可逆. 由隐函数存在定理及式(1)–(7), 可知二自由度主动磁轴承逆模解析形式为

$$u = \varphi(i_x, i_y) = \xi(x, y, \dot{x}, \dot{y}, \ddot{x}, \ddot{y}). \quad (8)$$

3.2 LS-SVM逆模型(Inverse model of LS-SVM)

把SVM应用于对非线性、强耦合、多变量等复杂系统的控制, 主要原因就是其对非线性函数的逼近能力. 对输入输出样本的训练可以看作是一个非线性函数的逼近问题^[8]. LS-SVM通过直接学习系统的输入、输出数据而对非线性系统进行辨识, 目的是使得所要求的目标函数达到最小, 从而归纳出隐藏在系统输入和输出数据中的关系. 在这里, 将之与逆系统方法结合构成LS-SVM逆系统可以很好的应用于多变量、非线性系统的解耦控制. 将LS-SVM直接用于构建复杂非线性系统的逆模型原理如图2所示.

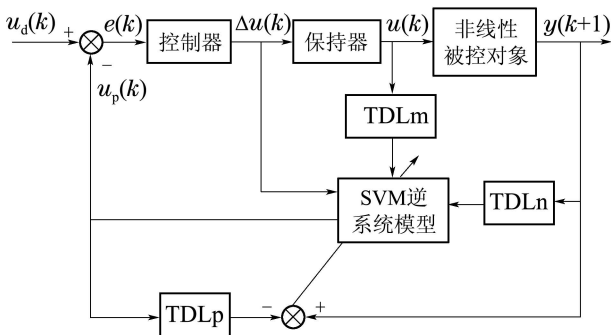


图 2 支持向量机逆系统模型
Fig. 2 Inverse system model of SVM

对给定训练样本集 (x_n, y_n) , $n = 1, 2, \dots, d$, 输入 $x_n \in \mathbb{R}^n$, 输出 $y_n \in \mathbb{R}$, LS-SVM非线性回归逼近函数为

$$y(x) = \mathbf{w}^T \varphi(x) + b, \quad (9)$$

式中: 权向量 $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^n$, 阈值 $b \in \mathbb{R}$, 非线性映射 $\varphi(\cdot)$

将样本从原空间映射到高维特征空间.

求最优分类面问题可以转化为如下的优化问题:

$$\min_{\mathbf{w}, \xi} J(\mathbf{w}, \xi) = \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \left(\sum_{n=1}^d \xi_n \right). \quad (10)$$

约束条件:

$$y_n = \mathbf{w}^T \varphi(x_n) + b + \xi_n, \quad (11)$$

式中: C 为惩罚因子, ξ_n 为松弛因子. 根据最优化理论, 这一问题存在唯一全局最小解. 应用Lagrange乘子法并满足KKT(Karush-kuhn-Tucher)条件, 定义Lagrange函数为

$$L(\mathbf{w}, b, \xi, a) = J(\mathbf{w}, \xi) - \sum_{n=1}^d a_n [\mathbf{w}^T \varphi(x_n) + b + \xi_n - y_n], \quad (12)$$

式中: $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_d)^T \in \mathbb{R}^d$ 为Lagrange乘子, $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_d)^T \in \mathbb{R}^d$.

对式(12)求 \mathbf{w} , b , ξ_n , a_n 的偏导数, 消去变量 \mathbf{w} 和 ξ_n , 得到如下方程:

$$\begin{pmatrix} 0 & \mathbf{1}_v^T \\ \mathbf{1}_v & \boldsymbol{\Omega} + \gamma^{-1} \mathbf{I} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} b \\ \mathbf{a} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \mathbf{y} \end{pmatrix}, \quad (13)$$

式中: $\mathbf{1}_v = [1 \ 1 \ \dots \ 1]^T$, $\mathbf{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_d]^T$, $\boldsymbol{\Omega} = \{\Omega_{ij}\} = \varphi^T(x_i) \cdot \varphi(x_j)$, $i, j = 1, 2, \dots, d$. 根据mercer条件, 存在映射函数 φ 和核函数 $\mathbf{K} = (\cdot, \cdot)$, 使得

$$\mathbf{K}(x_i, x_j) = \varphi^T(x_i) \varphi(x_j), \quad (14)$$

选用径向基函数(RBF)核函数:

$$\mathbf{K}(x_i, x_j) = \exp[-\|x_i - x_j\|^2 / (2\sigma^2)], \quad (15)$$

式中 σ 为核宽度. 由式(13)用最小二乘法求得 a_n 和 b , 再由式(12)求出 \mathbf{w} , 最终得到系统的LS-SVM的函数逼近为^[9]

$$y(x) = \sum_{n=1}^d a_n \mathbf{K}(x, x_k) + b. \quad (16)$$

对于二自由度交流主动磁悬浮轴承, 系统的微分方程可表述为

$$\begin{cases} f_{\alpha_1}(\ddot{x}, \dot{x}, x, i_x) = 0, \\ f_{\alpha_2}(\ddot{y}, \dot{y}, y, i_y) = 0. \end{cases} \quad (17)$$

系统的输入阶次 $\sigma_i = 0$, 输出阶次 $\varepsilon_i = 2$, 相对阶次 $\alpha_i = \varepsilon_i - \sigma_i = 2, i = 1, 2$. 为辨识出二自由度交流主动磁轴承这一复杂非线性系统的逆系统, 由文献[10]及式(17)可确定其对应的2个支持向量机的拟合因子为

$$\begin{cases} \mathbf{X}_1 = [\ddot{x} \ \dot{x} \ i_x \ x \ y], \\ \mathbf{X}_2 = [\ddot{y} \ \dot{y} \ i_y \ x \ y]. \end{cases} \quad (18)$$

根据LS-SVM逆系统解耦原理, 通过对输入输出样本 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, d$ 数据的训练, 获得相应的Lagrange乘子 a_i 和 b , 再由当前输入可辨识出轴承系统对应的逆系统, 表达式如下:

$$\begin{cases} u_1 = \sum_{i=1}^d a_i^1 \mathbf{K}(x_i^1, \mathbf{X}_1) + b_1, \\ u_2 = \sum_{i=1}^d a_i^2 \mathbf{K}(x_i^2, \mathbf{X}_2) + b_2, \end{cases} \quad (19)$$

式中: u_1, u_2 分别为原系统的输入 i_x, i_y , 而 a^1, a^2, b_1, b_2 分别是相应的输入向量系数和阈值. 将求得的逆系统式(19)串联在二自由度磁轴承系统之前构成伪线性复合系统, 从而将磁轴承这个复杂的被控对象解耦成相对独立的伪线性子系统, 实现各自由度之间的解耦控制^[11].

但是由于有各种因素影响, 该逆系统与被控系

统复合而成的伪线性系统并不是一个理想的线性系统, 因此需要附加控制器, 本文选用PID控制器.

4 仿真试验(Simulation test)

将随机的激励信号输入到二自由度磁轴承仿真模型以获取样本集 $\{x, y, i_x, i_y\}$. 然后在MATLAB 7.0环境下采用最小二乘法对SVM进行训练, 获得相应的Lagrange乘子 a_i^r 和阈值 b , 建立系统的初始逆模型. 初始SVM性能参数 σ 和 C 取经验值为10和0.414. 根据系统输入与逆模输出的偏差信息, 采用蚁群算法在线优化SVM的性能参数. 将训练后的LS-SVM逆模型与原系统复合, 构成伪线性复合系统, 从而把二自由度磁轴承这一双输入双输出系统解耦成两个线性积分子系统.

系统仿真框图如图3所示, 其中 i_u, i_v, i_w 是 i_x, i_y 经过2/3变换后的电流跟踪型逆变器的输入电流. 二自由度交流主动磁轴承相关参数如下: 控制线圈匝数 $N_3 = 318$ 匝, 径向磁极面积 $S_r = 835 \text{ mm}^2$, 气隙长度 $\delta_0 = 0.5 \text{ mm}$, 空气磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$, 转子质量 $m = 1.7 \text{ kg}$, 偏磁电流 $i_{x0} = 0 \text{ A}, i_{y0} = 0.3 \text{ A}$. PID控制器参数: $K_p = 150, K_i = 0.1, K_d = 0.3$.

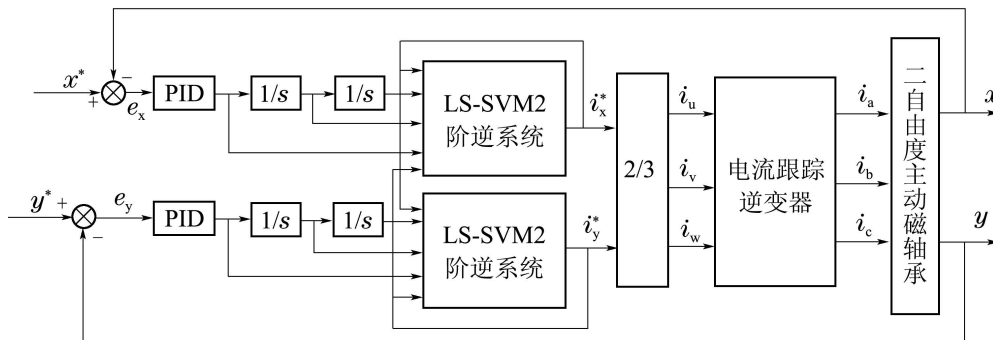


图3 LS-SVM逆系统系统仿真框图

Fig. 3 Simulation diagram based on LS-SVM inverse system

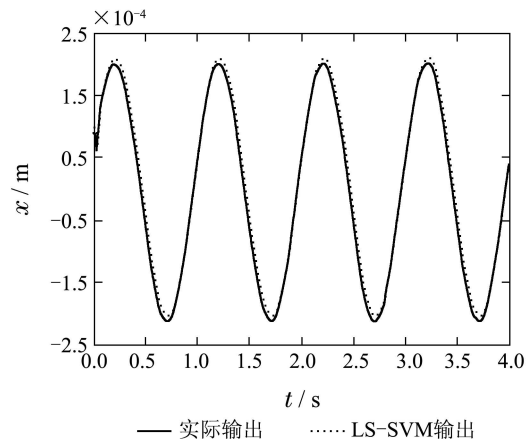
4.1 拟合试验(Fitting test)

在LS-SVM逆模结构确定后, 为验证逆模型的辨识精度, 对逆模型施加

$$\varphi_1(t) = 0.6 \sin(2\pi t) + 0.1 \cos(2\pi t),$$

$$\varphi_2(t) = -0.6 \sin(2\pi t) - 0.1 \cos(2\pi t)$$

信号作为测试逆模系统 x 和 y 方向的扰动信号, 输出波形如图4所示. 可以看出基于LS-SVM逆模型的跟踪输出(点线)和转子实际径向位移(实线)几乎重合, 表明LS-SVM逆模型对非线性系统取得了很好的辨识效果.



— 实际输出 LS-SVM输出

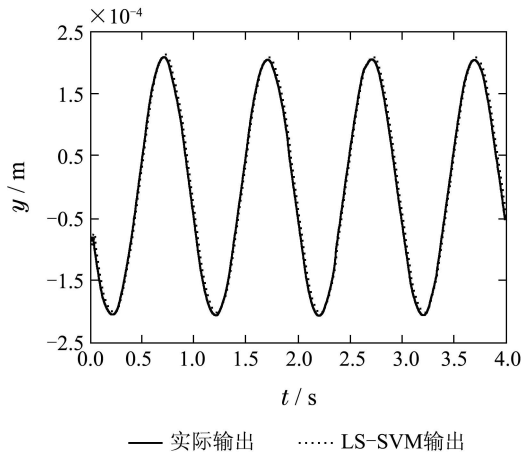


图 4 LS-SVM逆系统拟合特性曲线

Fig. 4 Fitting characteristics curves of LS-SVM inverse system

4.2 起浮试验(Floating test)

设转子的初始位置为: $x = -0.2 \text{ mm}$, $y = -0.15 \text{ mm}$, 参考位置为: $x = 0 \text{ mm}$, $y = 0 \text{ mm}$. 图 5 为转子由初始位置空载起浮时 x 和 y 方向的位移曲线, 可以看出, 响应曲线比较平滑, 转子经 40 ms 后回到平衡位置, 各自由度耦合性很小, 超调量小于 0.05 mm, 几乎无静差.

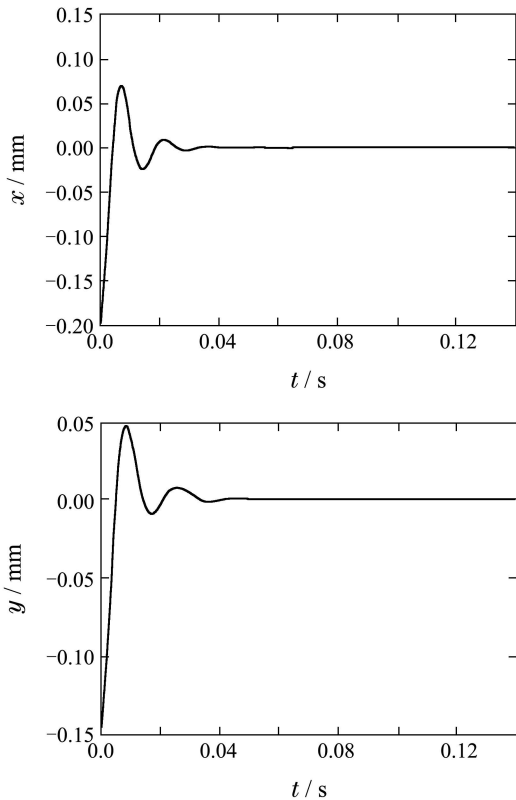


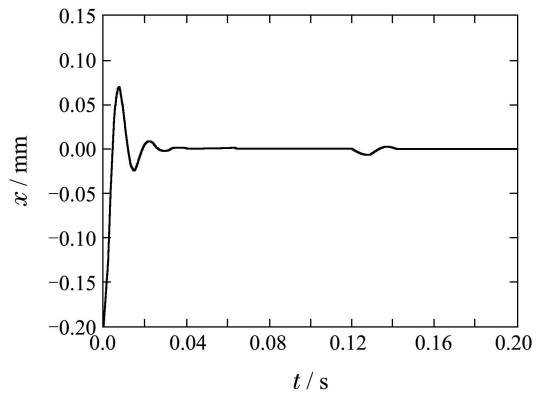
图 5 转子起浮特性曲线

Fig. 5 Floating curves of rotor

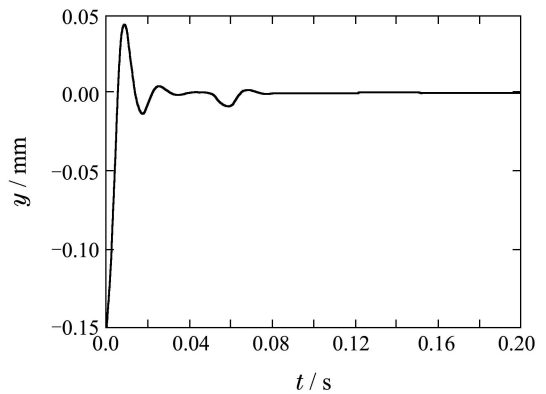
4.3 干扰试验(Disturbance test)

图 6 是在转子自由起浮过程中, 在 0.05 s 时突然

在 y 方向施加 45 N 的扰动力, 同样在 0.12 ms 时在 x 方向施加 35 N 的扰动力, 转子在 x 和 y 方向上的位移响应, 如图 6(a)-(b). 从仿真结果看出在 x 方向上所施加的力只对 x 方向上的位移有影响, 而对 y 方向的位移几乎没有影响, 在 y 方向上所施加的力只对 y 方向上的位移有影响, 而对 x 方向的位移几乎没有影响. 且系统各方向受扰动影响时间只有 20 ms 左右, 很快就能回到平衡位置, 这表明系统的抗干扰能力较强, 实现了动态解耦.



(a)



(b)

图 6 y 和 x 方向加干扰力时 x 和 y 方向响应曲线

Fig. 6 Displacement curves in the x - and y -direction with disturbing force exerted in the x - and y -direction

4.4 解耦试验(Decoupling test)

为了研究径向两自由度之间的耦合, 可以在某一自由度上施加一个快速变化的激励信号, 观察另一方向的动态响应. 这里, 当转子稳定悬浮时, 在磁轴承 x 方向施加位移从 0 mm 阶跃到 0.2 mm 的激励信号, 观察有解耦控制器和无解耦控制器的两种控制方法对应的 x , y 方向位移响应曲线. 由图 7(a) 可以看出, LS-SVM 控制器响应速度快, 控制过程中产生超调量较小, 控制效果明显优于传统的 PID 控制.

图 7(b) 为此时磁轴承转子 y 方向的位移响应曲线, y 方向受影响波动在 0.02 mm 以内, 系统一个自

由度上的输入对另一自由度上的输出影响非常小,表明LS-SVM逆系统解耦控制策略成功的实现了将磁轴承这一非线性系统解耦成近似的线性系统.

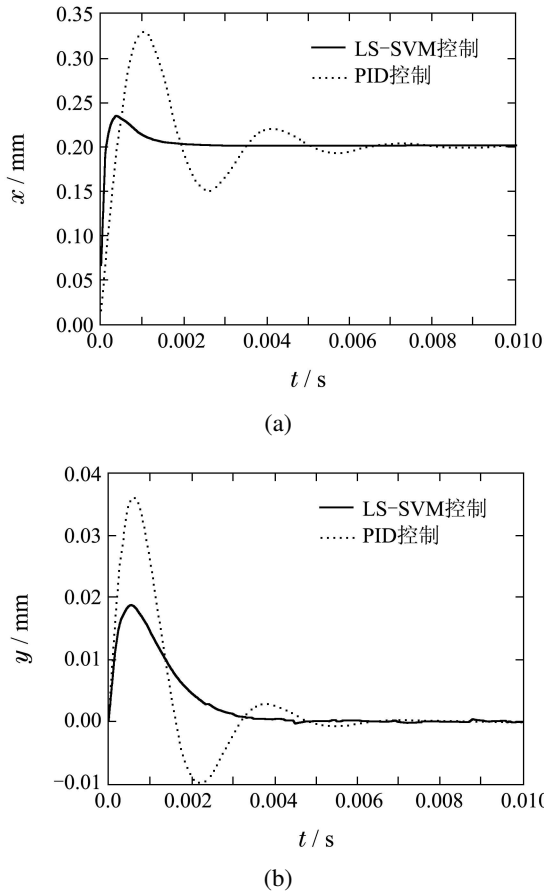


图7 x 方向加阶跃信号输入时, x, y 方向响应曲线
Fig. 7 Displacement curves in the x - and y -direction with step signal exerted in the x -direction

5 实验研究(Experimental research)

为了验证本控制方法的实用性,以二自由度交流磁轴承为实验对象,采用TI公司的TMS320F2812设计双闭环的PWM数字控制系统,通过人机交互界面在线调整系统控制参数.实验平台如图8所示.

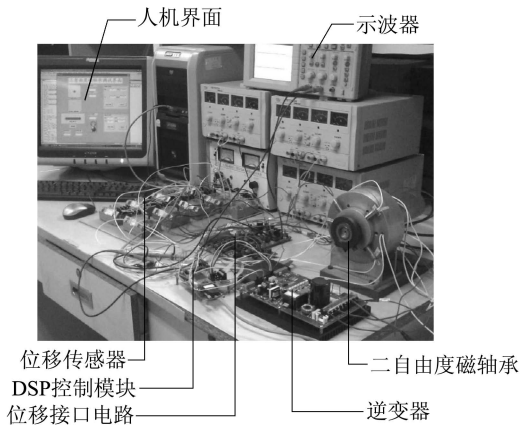


图8 实验调试平台
Fig. 8 Test and debug platform

通过分析系统的起浮曲线,可以检测系统的动态稳定性.图9为转子径向起浮时, x, y 两个方向的起浮波形.起浮前,转子在 x 方向处于0.17 mm的位置,在 y 方向上处于0.18 mm的位置.在0.43s时给系统施加控制信号,转子经过约0.02 s的调节时间稳定悬浮在平衡位置, x 和 y 方向上的误差只有15 μm 左右,表明所设计的控制系统满足性能要求.

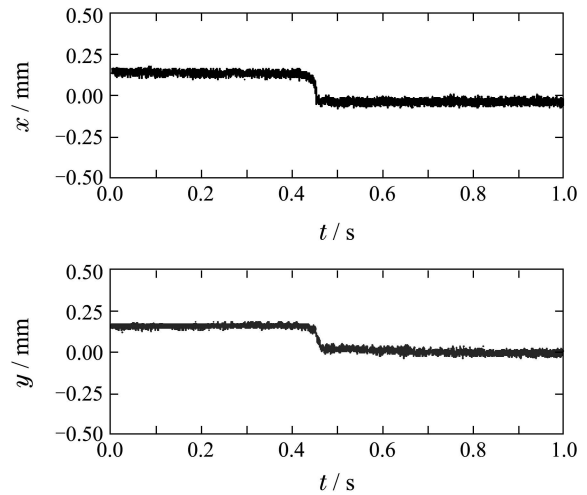


图9 磁轴承转子起浮位移曲线
Fig. 9 Floating displacement curves of AMB's rotor

图10为转子稳定悬浮后在0.34 s时突然给 x 方向施加一个约为150 N并持续0.2 s的扰动力时, x, y 方向上的位移波形.如图所示,转子在 x 方向受到扰动力时位移波形发生0.24 mm的突变,而 y 方向的位移只有约20 μm 的微小变化,撤去外扰力后,转子在两个方向上经过0.02 s就能回到原平衡位置.表明该系统在受到外界干扰时,能够快速稳定到平衡位置,且 x, y 方向耦合很小.

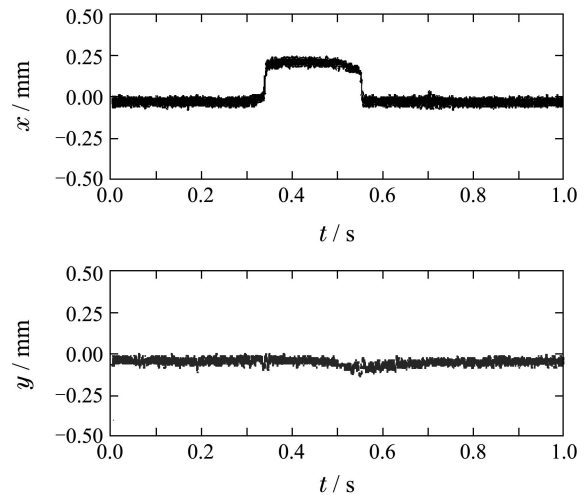


图10 磁轴承转子加扰动位移曲线
Fig. 10 Displacement curves of AMB's rotor with disturbing force

6 结语(Conclusion)

在建立二自由度交流主动磁轴承悬浮力方程的基础上, 采用最小二乘支持向量机 α 阶逆系统方法, 不需要知道原系统的精确数学模型, 只需少量的输入输出数据, 就可以实现对连续非线性系统 α 阶逆模型的辨识, 从而解决了传统逆系统方法对系统精确模型的依赖性, 成功地实现了磁轴承系统解耦控制. 通过MATLAB平台对伪线性系统进行了综合仿真. 最后在数字控制实验平台上进行相关实验. 仿真和实验均表明LS-SVM解耦控制系统能够实现转子的稳定悬浮, 抗干扰能力强, 二自由度交流主动磁轴承这个多变量强耦合系统可以被解耦成基本线性化的伪线性系统, 通过附加控制器, 实现径向位移 x 和 y 之间的独立控制, 系统具有良好的动静态性能.

参考文献(References):

- [1] 张丹红, 陈建华, 苏义鑫, 等. 主动磁力轴承系统的模糊逆建模 [J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 126 – 130.
(ZHANG Danhong, CHEN Jianhua, SU Yixin, et al. Fuzzy inverse modeling for active magnetic bearing systems [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(14): 126 – 130.)
- [2] MAZENC F, QUEIROZ M S, MALISOFF M, et al. Further results on active magnetic bearing control with input saturation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(5): 914 – 919.
- [3] MICHIOKA C, SAKAMOTO T, ICHIKAWA O, et al. A decoupling control method of reluctance-type bearingless motors considering magnetic saturation [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1996, 32(5): 1204 – 1210.
- [4] 张婷婷, 朱焯秋. 无轴承同步磁阻电机逆系统解耦控制 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(4): 545 – 550.
(ZHANG Tingting, ZHU Huangqiu. Decoupling control based on inverse system for bearingless synchronous reluctance motor [J]. *Control Theory & Applications*, 2011, 28(4): 545 – 550.)
- [5] CHAI T Y, FU Y. Neural network based nonlinear adaptive dynamical decoupling control [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 2007, 3(18): 921 – 925.
- [6] SNYKENS J A K. Support vector machines: a nonlinear modeling and control perspective [J]. *European Journal of Control*, 2001, 7(2/3): 311 – 327.
- [7] 何丹, 戴先中, 王勤. 神经网络广义逆系统控制 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 34 – 40.
(HE Dan, DAI Xianzhong, WANG Qin. Generalized ANN inverse control method [J]. *Control Theory & Applications*, 2002, 19(1): 34 – 40.)
- [8] MAN G A, UPADHYAYA B R. Model predictive control of an sp-100 space reactor using support vector regression and genetic optimization [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 2006, 53(4): 2318 – 2327.
- [9] 孙玉坤, 朱志莹. 三自由度混合磁轴承最小二乘支持向量机逆辨识与解耦控制 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(15): 112 – 117.
(SUN Yukun, ZHU Zhiying. Inverse-model identification and decoupling control based on least squares support vector machine for 3 degree-of-freedom hybrid magnetic bearing [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(15): 112 – 117.)
- [10] 宋夫华, 李平. 支持向量机 α 阶逆系统解耦控制方法 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(2): 226 – 229.
(SONG Fuhua, LI Ping. α -th-order inverse decoupling control method based on support vector machines [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2007, 41(2): 226 – 229.)
- [11] FANG J C, ZHENG S Q, HAN B C. Attitude sensing and dynamic decoupling based on active magnetic bearing of MSDGCMG [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2012, 61(2): 338 – 348.

作者简介:

朱焯秋 (1964–), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 目前研究方向为磁悬浮轴承高速传动技术、无轴承电机、特种电机非线性控制等, E-mail: zhuhuangqiu@ujs.edu.cn;

李媛媛 (1986–), 女, 硕士研究生, 目前研究方向为磁悬浮轴承的非线性解耦控制, E-mail: liyuanyuan2010@126.com.