

基于特征模型和跟踪微分器的主动磁轴承 自适应控制方法

纪 历 陈美豪*

杭州电子科技大学信息工程学院,杭州,311305

摘要: 为了提高主动磁轴承(AMB)系统在面对噪声干扰和外部冲击时的鲁棒性,提出了一种基于特征模型和跟踪微分器的自适应控制方法。通过控制系统的输入和输出数据在线辨识 AMB 系统的特征模型参数,并基于辨识得到的特征模型设计了黄金分割自适应控制器。该方法推导了 AMB 系统的特征参数范围,采用带非线性饱和函数的投影梯度法进行系统的参数辨识,并且利用跟踪微分器对控制系统的量测数据进行跟踪滤波,进一步提高了 AMB 系统在面对噪声干扰时的鲁棒性。在高速磁悬浮电机试验平台上对所提控制方法进行实验验证,结果表明,跟踪微分器可有效滤除外部噪声对量测数据的干扰;相较于常用的不完全微分 PID 控制方法,所提自适应控制方法能够有效提高 AMB 系统的控制精度和鲁棒性能,磁悬浮转子在升速过程中的振动峰值最大降低了 51.4%。

关键词: 特征模型;跟踪微分器;主动磁轴承;自适应控制

中图分类号: TP273

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.024

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Adaptive Control Method of AMB Based on Characteristic Model and Tracking Differentiator

JI Li CHEN Meihao*

Information Engineering College, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou, 311305

Abstract: In order to improve the robustness of AMB systems in the face of noise interference and external shocks, an adaptive control method was proposed based on characteristic model and tracking differentiator. The characteristic model parameters of AMB systems were identified online through the input and output data of the control system, and the golden section adaptive controller was designed based on the identified characteristic model. The range of characteristic parameters of AMB systems was derived, the projection gradient method with nonlinear saturation function was used to identify the parameters of the systems, and the tracking differentiator was used to track and filter the measurement data of the control system, which further improved the robustness of AMB systems in the face of noise interference. The proposed control method was tested on the test platform of high-speed magnetic levitation motor. The experimental results show that the tracking differentiator may effectively filter out the interference of external noises on the measured data. Compared with the commonly used incomplete differential PID control method, the proposed adaptive control method may effectively improve the control accuracy and robustness of AMB systems, and the vibration peak values of the magnetic suspension rotor are reduced by 51.4%.

Key words: characteristic model; tracking differentiator; active magnetic bearing(AMB); adaptive control

0 引言

主动磁轴承(active magnetic bearing, AMB)是一种利用可控电磁力使转子稳定悬浮于设定位置的新型轴承。AMB 的性能极其依赖控制器的设计,改进控制算法是提高 AMB 整体性能最直接的方式。

PID 控制方法不依赖对象模型,结构简单,在

AMB 控制器中使用最为广泛^[1-2],然而该方法很难保证系统在非理想工况下的控制性能。为了适应 AMB 动态特性和环境条件的变化,学者们将模糊控制^[3-4]、神经网络^[5-6]等方法与自适应控制相结合来设计控制器,但这些方法在提高系统鲁棒性的同时也使控制器的设计变得复杂,增加了大量的待调参数,且对于非线性与不确定性不可参数化的系统自适应控制很容易失效^[7]。

基于特征模型的全系数自适应控制方法由吴

宏鑫等^[8]提出,其核心思想在于以低阶离散差分方程的形式来描述复杂的高阶非线性系统。已有研究将基于特征模型的全系数自适应控制方法应用于磁悬浮飞轮系统中^[9],证明了该方法具有强大的闭环稳定性与鲁棒性。

对 AMB 系统进行特征建模时,开关功率放大器的电磁噪声、位移信号在传输过程中携带的环境干扰等都会被压缩到系统的特征参数中,使其不能反映被控对象的真实状态,如何从带噪的量测数据中提炼出有效的特征模型是控制器设计时无法回避的问题。

本文推导了以功率放大器、AMB、位移采样电路为广义被控对象的二阶特征模型,并且引入跟踪微分器(tracking differentiator, TD)对量测信号进行跟踪滤波,以辨识得到的特征模型为依据设计了黄金分割自适应(golden section adaptive, GSA)控制器,通过仿真和试验证明了所提控制方法的有效性。

1 AMB 系统的特征建模

AMB 系统的工作原理如图 1 所示。其中, REF 为系统给定的参考量;控制器输出用于矫正转子位置的控制量 u ;功率放大器输出励磁电流 $I_0 \pm i$;磁悬浮轴承在励磁电流的作用下为磁悬浮转子提供差动电磁力,使其能够稳定悬浮于轴承间的中心位置;位移采样电路将转子位移 x 转换为电信号 y 以后反馈到控制器。

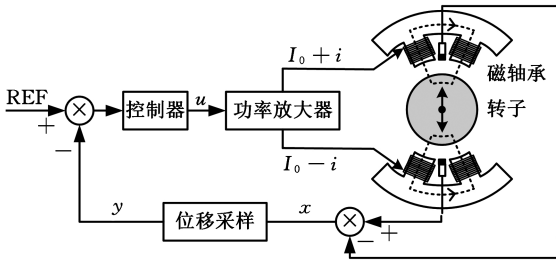


图 1 单自由度 AMB 系统工作原理图
Fig.1 Schematic diagram of single degree of freedom AMB system

在设计控制系统时,通常将功率放大器等效为增益环节,考虑到功放噪声 v_a 的影响,该环节可以描述为

$$i = K_a u + v_a \tag{1}$$

式中: K_a 为功率放大器增益。

考虑到传输路径中存在的量测噪声 v_s ,位移采样环节可以描述为

$$y = K_s x + v_s \tag{2}$$

式中: K_s 为位移采样增益。

控制器需要对转子三维空间中的五个自由度

进行控制,在合理的机械结构下,每个自由度上转子的受力情况基本相同。以转子径向单自由度为例,其受力情况如图 2 所示。根据等效磁路法可以推导出轴承与转子之间的动力学关系为

$$F_x - m\ddot{x} - mg = 0$$

$$F_x = \left(\frac{\mu_0 AN^2 \cos \alpha}{4} \right) \left[\frac{(I_0 + i)^2}{(\delta_0 - x \cos \alpha)^2} - \frac{(I_0 - i)^2}{(\delta_0 + x \cos \alpha)^2} \right] \tag{3}$$

式中: α 为磁极中心与 X 方向之间的夹角; F_x 为转子在 X 方向上受到的电磁力合力; μ_0 为真空磁导率; A 为磁极面积; N 为磁轴承的绕线匝数; m 为转子在该自由度上的等效质量; g 为重力加速度; δ_0 为转子处于平衡位置时与磁极的间距。

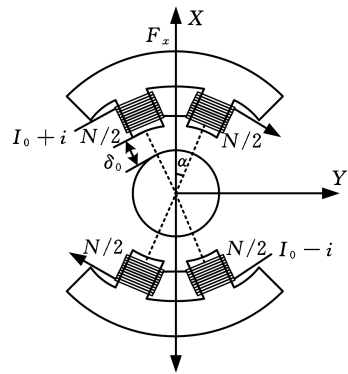


图 2 单自由度下磁悬浮转子的受力图

Fig.2 Force diagram of magnetic suspension rotor under freedom

数字控制器根据量测数据来明确系统当前时刻的状态,进而作出相应的控制行为,因此可建立以功率放大器、AMB、位移传感器为广义被控对象的非线性模型。令

$$f(x, u) = \frac{\mu_0 AN^2 (I_0^2 + (K_a u)^2) \cos \alpha}{4m} \left[1/(\delta_0 - x \cos \alpha)^2 - 1/(\delta_0 + x \cos \alpha)^2 \right] - g$$

$$g(x) = \frac{\mu_0 AN^2 I_0 K_a \cos \alpha}{2m} \left[1/(\delta_0 - x \cos \alpha)^2 + 1/(\delta_0 + x \cos \alpha)^2 \right] \tag{4}$$

则 AMB 系统在单自由度上的广义非线性模型可以描述为

$$\left. \begin{aligned} x_1(t) &= x(t) \\ \dot{x}_1(t) &= x_2(t) \\ \dot{x}_2(t) &= f(x_1, u) + g(x_1)u(t) + p(t) \\ y(t) &= K_s x_1(t) \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

式中: x_1, x_2 为系统的状态变量; $p(t)$ 为转子各自由度间耦合作用和功放噪声引起的扰动项。

对于式(5)所述的广义被控对象,以径向单自由度为例,其状态变量 x_1 的范围为径向保护轴承的双边间隙,即 $x_1 \in [-0.1, 0.1]$ mm。由式(4)可知,函数 $f(x_1, u)$ 和 $g(x_1)$ 满足以下条件:

1) 系统函数 $f(x_1, u)$ 是有界的, 即存在一个正常数 M_1 , 使得函数 $f(x_1, u)$ 满足

$$|f(x_1, u)| \leq M_1 \quad (6)$$

2) 控制增益函数 $g(x_1)$ 是有界的, 即存在正常数 $b_2 > b_1 > 0$, 使得函数 $g(x_1)$ 满足

$$0 < b_1 \leq |g(x_1)| \leq b_2 \quad (7)$$

根据特征建模理论的基本思想, 对式(5) 所表示的广义被控对象模型进行精确离散化, 得到系统的精确离散模型如下:

$$\left. \begin{aligned} x_1(k+1) &= x_1(k) + \int_{kT}^{(k+1)T} x_2(t) dt \\ x_2(k+1) &= x_2(k) + \int_{kT}^{(k+1)T} (f(x_1, u) + g(x_1)u(t) + p(t)) dt \\ y(k) &= K_s x_1(k) + v_s(k) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

对式(8) 中的第一项进行向右一个采样周期 T 的偏移并与原式作差, 即 $x_1(k+1) - x_1(k)$, 可以得到

$$x_1(k+1) = 2x_1(k) - x_1(k-1) + \int_{kT}^{(k+1)T} x_2(t) dt - \int_{(k-1)T}^{kT} x_2(t) dt \quad (9)$$

由式(8) 中的第三项可以进一步得到

$$\begin{aligned} y(k+1) &= 2y(k) - y(k-1) + \int_{kT}^{(k+1)T} K_s x_2(t) dt - \int_{(k-1)T}^{kT} K_s x_2(t) dt + v(k) \\ v(k) &= v_s(k+1) - v_s(k) \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $v(k)$ 为位移采样误差在一个采样周期内的差值。

假设系统扰动项 $p(t)$ 和量测噪声的差值 $v(k)$ 有界, 即存在正常数 M_2, M_3 , 使得

$$\left. \begin{aligned} |p(t)| &\leq M_2 \\ |v(k)| &\leq M_3, k \in \mathbf{N}_+ \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

取 $\tau = t + T$, 对式(10) 中的积分项进行变量替换, 可以得到以下结果:

$$\left. \begin{aligned} \int_{(k-1)T}^{kT} x_2(t) dt &= \int_{kT}^{(k+1)T} x_2(\tau - T) d\tau \\ x_2(t) &= x_2(t - T) + \int_{t-T}^t f(x_1, u) + g(x_1)u(t) + p(t) d\xi \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

考虑到 $u(t)$ 具有分段连续性, 在同一控制周期 T 内控制器的输出控制量为常数, 则由式(10) 和式(12) 可以进一步得到

$$\begin{aligned} y(k+1) &= 2y(k) - y(k-1) + K_s \int_{kT}^{(k+1)T} (x_2(t) - x_2(t-T)) dt + v(k) = 2y(k) - y(k-1) + \\ &K_s \int_{kT}^{(k+1)T} \int_{kT}^t g(x_1) d\xi dt u(k) + \\ &K_s \int_{kT}^{(k+1)T} \int_{t-T}^{kT} g(x_1) d\xi dt u(k-1) + \\ &K_s \int_{kT}^{(k+1)T} \int_{t-T}^t (f(x_1, u) + p(t)) d\xi dt + v(k) \end{aligned} \quad (13)$$

式(13) 可以写为

$$\left. \begin{aligned} y(k+1) &= 2y(k) - y(k-1) + g_0(k)u(k) + g_1(k)u(k-1) + \eta_1(k) \\ g_0(k) &= K_s \int_{kT}^{(k+1)T} \int_{kT}^t g(x_1) d\xi dt \\ g_1(k) &= K_s \int_{kT}^{(k+1)T} \int_{t-T}^{kT} g(x_1) d\xi dt \\ \eta_1(k) &= K_s \int_{kT}^{(k+1)T} \int_{t-T}^t (f(x_1, u) + p(t)) d\xi dt + v(k) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

由式(6)、式(7) 和式(11) 可知

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{2}b_1 T^2 &\leq g_0(k) \leq \frac{1}{2}b_2 T^2 \\ \frac{1}{2}b_1 T^2 &\leq g_1(k) \leq \frac{1}{2}b_2 T^2 \\ |\eta_1(k)| &\leq K_s(M_1 + M_2)T^2 + M_3 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

根据二阶特征模型的基本形式, 可将式(14) 中的 $\eta_1(k)$ 分配到系统输出项 $y(k)$ 和 $y(k-1)$ 前的系数当中, 即

$$\left. \begin{aligned} y(k+1) &= (2 + a_1 \eta_1(k))y(k) + (-1 + a_2 \eta_1(k))y(k-1) + g_0(k)u(k) + g_1(k)u(k-1) + a_3 \eta_1(k) \\ a_1 &= \frac{y(k)}{y^2(k) + y^2(k-1) + \varepsilon} \\ a_2 &= \frac{y(k-1)}{y^2(k) + y^2(k-1) + \varepsilon} \\ a_3 &= \frac{\varepsilon}{y^2(k) + y^2(k-1) + \varepsilon} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: ε 为一正常数。

由此得到 AMB 系统的二阶广义特征模型为

$$\left. \begin{aligned} y(k+1) &= f_1(k)y(k) + f_2(k)y(k-1) + g_0(k)u(k) + g_1(k)u(k-1) + \eta(k) \\ f_1(k) &= 2 + a_1 \eta_1(k) \\ f_2(k) &= -1 + a_2 \eta_1(k) \\ \eta(k) &= a_3 \eta_1(k) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

对于式(17) 所述的特征模型, 其特征模型系数的范围 Ω 可以由式(15) 和式(16) 提前确定:

$$\begin{aligned} \Omega &= \{\theta(k) \in \mathbf{R}^4 \mid f_1(k) \in [2 - LT^2, 2 + LT^2], \\ &f_2(k) \in [-1 - LT^2, -1 + LT^2], \\ &g_0(k) \in [\frac{1}{2}b_1 T^2, \frac{1}{2}b_2 T^2], \\ &g_1(k) \in [\frac{1}{2}b_1 T^2, \frac{1}{2}b_2 T^2]\} \end{aligned} \quad (18)$$

其中, L 为与函数 $f(x_1, u)$ 上界以及扰动上界相关的正常数。

2 基于特征模型的黄金分割自适应控制

基于特征模型和跟踪微分器的 AMB 控制系统结构如图 3 所示, 图中, $y_r(k)$ 为系统的参考输入; $e(k)$ 为系统的跟踪控制误差; $\theta(k)$ 为在线辨识的特征参数; PGD 为投影梯度下降辨识算法,

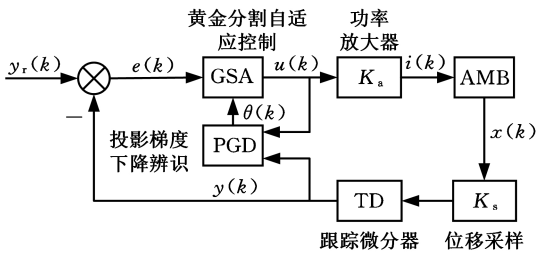


图3 基于特征模型和跟踪微分器的自适应控制结构

Fig.3 Adaptive control structure based on characteristic model and tracking differentiator

用于辨识特征参数。

首先将式(17)改写为

$$\left. \begin{aligned} y(k+1) &= \theta^T(k)\varphi(k) + \eta(k) \\ \theta(k) &= (f_1(k), f_2(k), g_0(k), g_1(k))^T \\ \varphi(k) &= (y(k), y(k-1), u(k), u(k-1))^T \end{aligned} \right\} (19)$$

式中: $\theta(k)$ 为待辨识的特征参数向量; $\varphi(k)$ 为系统的状态向量。

定义模型估计误差为

$$e_0(k) = y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)\varphi(k-1) \quad (20)$$

定义辨识模型的代价函数为

$$J(k) = (e_0(k))^2 = (y(k) - \hat{\theta}^T(k-1)\varphi(k-1))^2 \quad (21)$$

利用梯度下降的思想迭代搜索最合适的特征参数向量 $\hat{\theta}(k)$, 再将结果投影到提前确定的参数范围 Ω 中, 该过程的表达式为

$$\hat{\theta}(k) = \pi_{\Omega} \left\{ \hat{\theta}(k-1) + \frac{\rho_1 \varphi(k-1)e_0(k)}{\rho_2 + \varphi^T(k-1)\varphi(k-1)} \right\} \quad (22)$$

其中, ρ_1, ρ_2 为控制迭代步长的可调参数, 其取值范围一般为 $\rho_1 < 1, 0 < \rho_2 < 4$; $\pi_{\Omega}\{\cdot\}$ 表示辨识结果在已知的特征参数范围 Ω 上作正交投影。

文献[7]提出在模型估计误差 $e_0(k)$ 的基础上引入非线性饱和函数可以提高参数辨识算法的收敛性, 即

$$e_{0\Delta}(k) = e_0(k) - \sigma \text{sat} \left(\frac{e_0(k)}{\sigma} \right) \quad (23)$$

其中, σ 为一正常数, $\text{sat}(\cdot)$ 为饱和函数。综上, 参数辨识算法的最终表达式为

$$\hat{\theta}(k) = \pi_{\Omega} \left\{ \hat{\theta}(k-1) + \frac{\rho_1 \varphi(k-1)e_{0\Delta}(k)}{\rho_2 + \varphi^T(k-1)\varphi(k-1)} \right\} \quad (24)$$

为保证特征参数未完全收敛时闭环系统的稳定性^[9], 设计黄金分割自适应控制律为

$$u_g(k) = - \frac{l_1 f_1(k)y(k) + l_2 f_2(k)y(k-1)}{g_0(k) + \lambda} \quad (25)$$

其中, λ 为可调参数, 其作用是防止因 $g_0(k)$ 项过小而出现过大的控制量; l_1, l_2 为黄金分割系数, $l_1 = 0.382, l_2 = 0.618$ 。

为了进一步改善系统的动态性能, 同时消除系统进入稳态后存在的静态误差, 可在黄金分割

控制律的基础上加入微分控制量和积分控制量:

$$\left. \begin{aligned} u_d(k) &= k_d(e(k) - e(k-1)) \\ u_i(k) &= u_i(k-1) + k_i e(k) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

式中: k_d 为微分系数; k_i 为积分系数。

由式(16)可以看出, 量测噪声也将被压缩到特征参数内, 因此, 本文引入了跟踪微分器对量测信号进行跟踪滤波。

跟踪微分器是自抗扰控制器中(ADRC)的经典环节^[10], 其作用在于从不连续或是夹带随机噪声的量测信号中提取出有效的连续信号及其微分项, 在机电系统中有着广泛的应用^[11-12]。

非线性跟踪微分器的离散化形式为

$$\left. \begin{aligned} x_1(k+1) &= x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) &= x_2(k) + hfhan(x_1 - y(k), x_2, r, c_0 h) \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

其中, $y(k)$ 为 TD 要跟踪的输入信号; c_0 为滤波因子; r 为跟踪速度; $x_1(k)$ 为输入信号的跟踪结果; $x_2(k)$ 为跟踪输入信号得到的近似微分; h 为系统的采样步长; $fhan(x_1, x_2, r, c_0 h)$ 为经典的 TD 最速综合控制函数, 其表达式为

$$\left. \begin{aligned} d &= rh \\ d_0 &= hd \\ y &= x_1 + hx_2 \\ a_0 &= \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a &= \begin{cases} x_2 + \text{sign}(y)(a_0 - d)/2 & |y| > d_0 \\ x_2 + y/h & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ fhan &= - \begin{cases} r \text{sign}(a) & |a| > d \\ ra/d & |a| \leq d \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

文献[12]提出可以用提前预报的方法来克服跟踪信号的相位滞后, 改进后的跟踪微分器为

$$\left. \begin{aligned} x_1(k+1) &= x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) &= x_2(k) + hfhan(x_1 - y(k), x_2, r, c_0 h) \\ x'_1(k+1) &= x_1(k+1) + r_2 hx_2(k+1) \\ x'_2(k+1) &= x_2(k+1) + r_2 hfhan(x_1 - y(k), x_2, r, c_0 h) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

式中: r_2 为提前预报的步数, 一般为滤波因子 c_0 的 $1 \sim 2$ 倍; $x'_1(k)$ 为预报后的跟踪结果; $x'_2(k)$ 为预报后的近似微分。

3 仿真与实验

在 MATLAB/Simulink 中建立图 3 所示的 AMB 控制系统, 分别采用黄金分割自适应控制器和不完全微分 PID 控制器对磁悬浮转子的位移进行闭环控制, 经大量的仿真和实验调试后确定黄金分割自适应控制器和不完全微分 PID 控制器的控制参数。其中, 黄金分割自适应控制器的控制

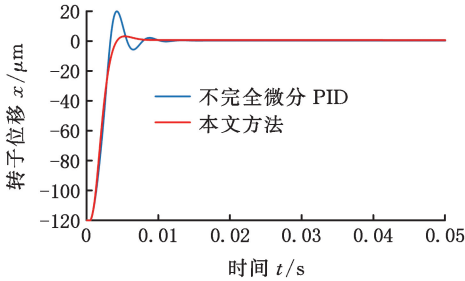
参数如表 1 所示,不完全微分 PID 控制器的控制参数设置为: $K_P=1.8, K_I=0.0001, K_D=20, f_H=4$ kHz。其中: K_P 为比例系数; K_I 为积分系数; K_D 为微分系数; f_H 为上限截止频率。

表 1 黄金分割自适应控制器的参数取值

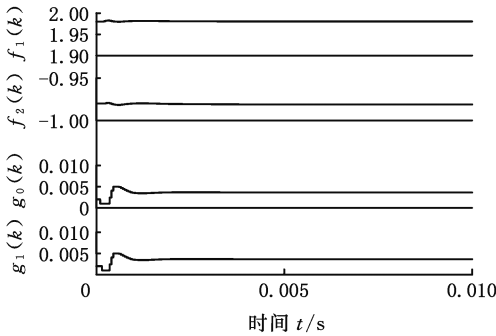
Tab.1 Parameter selection of GSA controller

控制参数	取值	控制参数	取值
λ	0.15	c_0	4
k_i	0.0001	r_2	4
k_d	10	ρ_1	0.6
r	4×10^6	ρ_2	1.2

首先观察单自由度 AMB 系统的阶跃响应,得到的系统响应如图 4 所示。在无外界干扰的情况下,不完全微分 PID 和本文方法均能保证 AMB 系统在启动阶段有较好的动态性能,系统的特征参数在经过 1.2 ms 后收敛至稳定值,满足特征模型理论中全系数之和约等于 1 的特点。



(a) 系统的阶跃响应曲线



(b) 系统的特征参数辨识过程

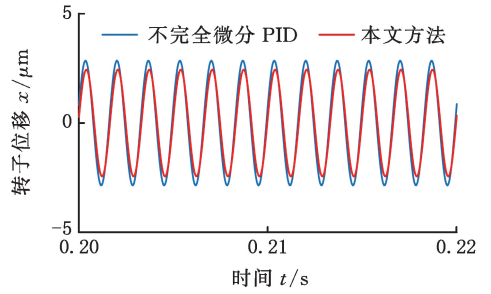
图 4 无干扰情况下的系统阶跃响应

Fig.4 Step response of the system without interference

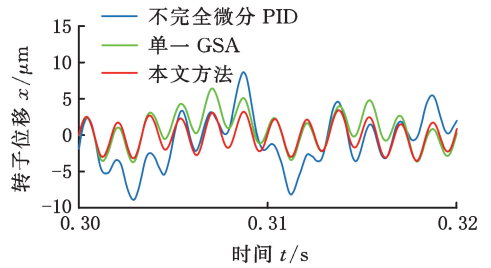
当转子位置进入稳态之后,在转子所受电磁力的基础上加入幅值为 300 N、频率为 500 Hz 的正弦干扰力,转子的振动情况如图 5a 所示。两种控制方法对正弦扰动均具有较好的抑制能力,其中不完全微分 PID 控制下的振动幅值为 $2.8 \mu\text{m}$,本文方法控制下的振动幅值为 $2.4 \mu\text{m}$ 。

在控制系统的采样反馈信号中混入信号强度为 0.03 的白噪声之后,转子的振动情况如图 5b 所示,几种控制方法下的转子均出现了不同程度的位移波动。其中不完全微分 PID 控制下的转

子位移峰值为 $8.67 \mu\text{m}$,GSA 控制下的转子位移峰值为 $6.43 \mu\text{m}$,而本文所提方法控制下的转子位移峰值仅为 $3.44 \mu\text{m}$ 。由此可以看出,当采用跟踪微分器对转子的位移信号进行跟踪滤波后,GSA 控制下的转子振动情况得到了很大的改善。



(a) 正弦干扰力



(b) 正弦干扰力+白噪声

图 5 外加扰动下的转子位移对比

Fig.5 Comparison of rotor displacement under external disturbance

为了检验本文所提方法对提高 AMB 控制系统鲁棒性和控制精度的有效性,建立了由变频器、高速永磁同步电机(内部采用主动磁轴承,电机额定转速为 30 000 r/min)、数字控制器所构成的 AMB 系统试验平台,试验平台的具体结构如图 6 所示,AMB 系统的相关参数如表 2 所示。

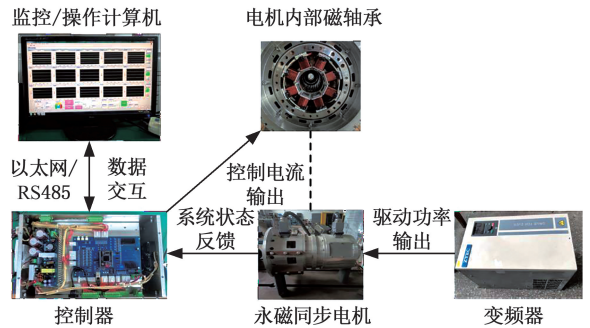


图 6 主动磁轴承系统试验台

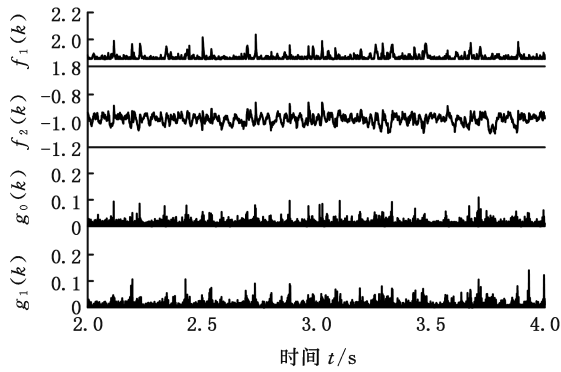
Fig.6 Active magnetic bearing system test bench

由于功放电路中的电磁噪声和信号传输路径中的环境噪声对采样信号有干扰,反馈信号的采样结果存在着一定程度的跳动,从而使得 AMB 闭环系统难以满足特征模型理论中系统参数慢时变的条件。TD 处理前后系统的特征参数辨识情况如图 7 所示。当采用系统的原始量测数据来辨

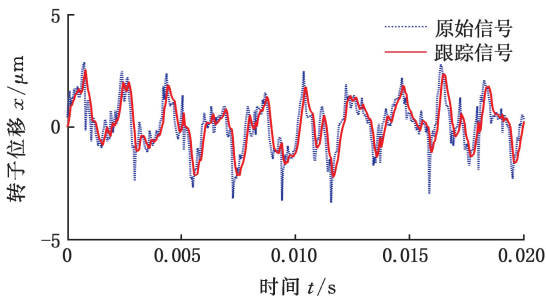
表 2 主动磁轴承系统的相关参数

Tab.2 Parameters of AMB system

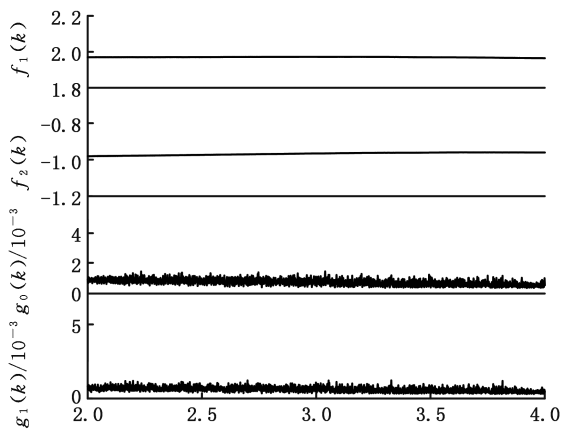
部件参数	取值
转子单自由度上的当量质量 m/kg	8
磁轴承的双边间隙 δ_0/mm	0.3
磁悬浮线圈的匝数 N	180
电磁铁上的偏置电流 I/A	2
磁轴承的磁极面积 A/m^2	653.6×10^{-6}
真空磁导率 $\mu_0/(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	$4\pi \times 10^{-7}$
功放增益 K_a	1/450
位移采样增益 K_s	6.825×10^6
DSP 的采样频率 f_s/kHz	20
DSP 的控制周期 $T/\mu\text{s}$	50



(a) 直接辨识出的特征参数



(b) TD 对位移量测信号的处理效果



(c) TD 处理后辨识出的特征参数

图 7 TD 处理前后系统的特征参数辨识情况

Fig.7 Identification of characteristic parameters of the system before and after TD processing

识其特征参数时,辨识过程如图7a所示,特征参数在预设的参数范围内激烈变化,辨识结果一直无

法到达收敛状态,导致控制器输出的控制量也随之快速变化,此时特征参数的辨识环节已然失效。当加入跟踪微分器对转子位移的量测数据进行预处理之后,量测信号中的野值基本上被剔除,特征参数的辨识结果趋于稳定,如图 7b 和图 7c 所示。

将磁悬浮转子从静态悬浮状态逐渐加速至 500 Hz 额定转速的高速旋转状态,转子在升速过程中的位移峰值曲线见图 8。由于转子本身存在刚性模态,当转速接近 100 Hz 时,转子的振动量达到峰值,相比于不完全微分 PID 控制,本文所提控制方法作用下转子五个自由度上的位移峰值分别下降了 47.9%、24.2%、46.1%、34.6%、51.4%。磁悬浮转子在额定转速下的位移曲线、频率特性和轴心轨迹如图 9 所示,本文所提控制方法作用下转子的轴心轨迹更集中于平衡位置,各频率分量上的转子振动幅度更小,具有优于传统不完全微分 PID 控制器的控制精度和稳定性。

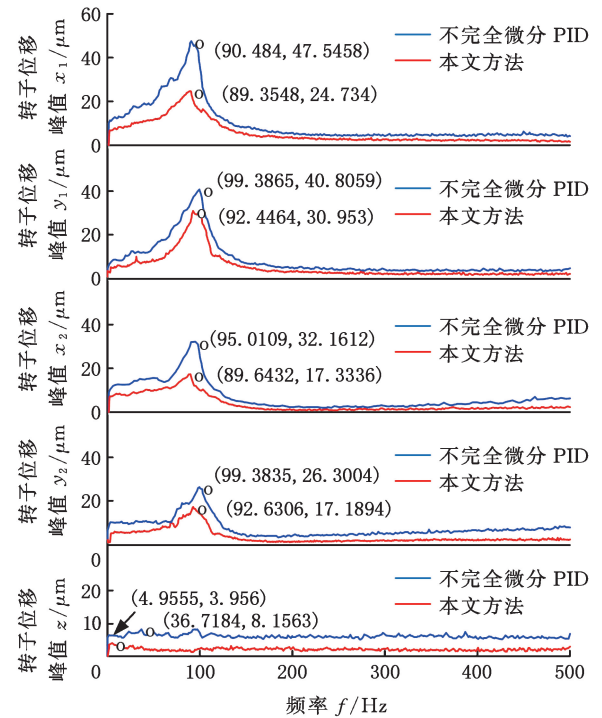
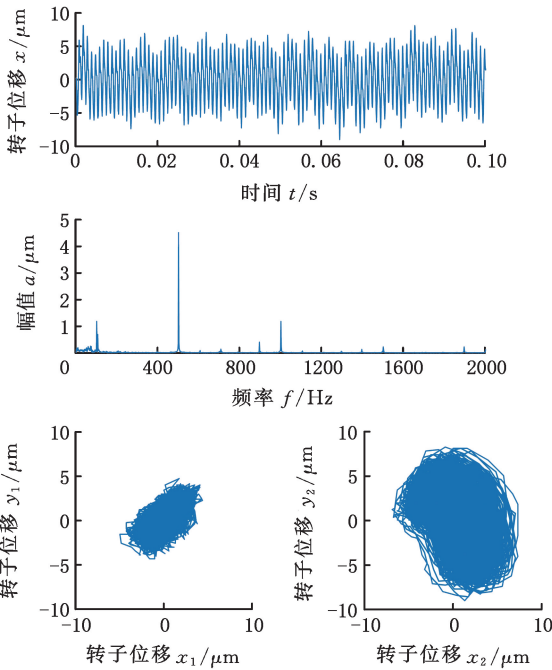


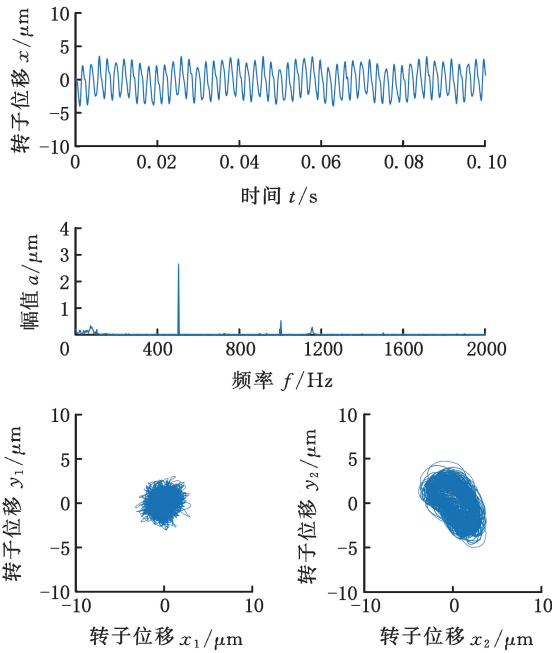
图 8 转子五个自由度在升速过程中的位移峰值曲线

Fig.8 Peak displacement curve of rotor's five freedoms during acceleration

为了验证本文所设计控制器的鲁棒性能,当转子处于静态悬浮状态时从轴向对其施加力度为 200 N 的撞击力,模拟 AMB 系统在运行过程中遇到的突发冲击。图 10 为转子轴向自由度遭受外界冲击时的位移曲线,本文方法控制下的转子遭受突发冲击时,转子的位移波动相较于不完全微分 PID 更小,由此可见本文所提的控制策略具有更好的鲁棒性能。



(a)不完全微分 PID



(b)本文方法

图 9 转子在额定转速下的振动情况

Fig.9 The vibration of rotor at rated speed

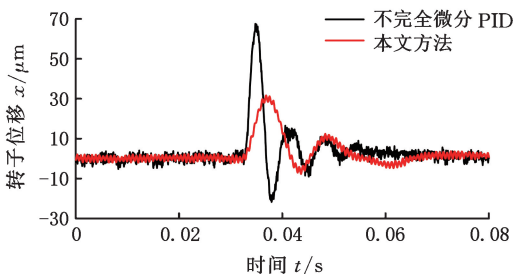


图 10 转子遭受轴向撞击时的位移曲线

Fig.10 Displacement curve of rotor subjected to axial impact

4 结论

本文针对带有非线性和不确定性的主动磁轴承系统进行了特征建模,将主动磁轴承系统等效为一个二阶的差分方程,在此基础上设计了黄金分割自适应控制器对磁悬浮转子的五个自由度作分散控制。同时,为了削弱噪声对控制系统性能的不利影响,引入跟踪微分器对位移量测信号进行了跟踪滤波。系列实验证明,跟踪微分器可有效剔除量测信号中的野值,并解决特征参数辨识失效的问题。本文所提控制方法能保证转子在 0~30 000 r/min 的全转速范围内实现稳定悬浮,相比于不完全微分 PID 控制,在转子的升速过程中振动峰值最高下降了 51.4%。在面对外界的突发冲击时,本文所提控制方法能显著降低转子位移的波动幅度,证明了该方法能够有效提高主动磁轴承控制系统的鲁棒性。

参考文献:

[1] LALDINGLIANA J, BISWAS P K. Artificial Intelligence Based Fractional Order PID Control Strategy for Active Magnetic Bearing[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2022, 17(6): 3389-3398.

[2] GUPTA S, DEBNATH S, BISWAS P K. Control of an Active Magnetic Bearing System Using Swarm Intelligence Based Optimization Techniques [J]. Electrical Engineering, 2023, 105(2):935-952.

[3] MA Zhihao, LIU Gai, LIU Yichen, et al. Research of a Six-pole Active Magnetic Bearing System Based on a Fuzzy Active Controller[J]. Electronics, 2022, 11(11):1723.

[4] NAGI F H, INAYAT-HUSSAIN J I, AHMED S K. Fuzzy Bang-Bang Relay Control of a Rigid Rotor Supported by Active Magnetic Bearings[J]. Energies, 2022, 15(11):3975.

[5] LUNGU R, LUNGU M, EFRIM C. Adaptive Control of DGMSCMG Using Dynamic Inversion and Neural Networks[J]. Advances in Space Research, 2021, 68(8):3478-3494.

[6] YOO S J, KIM S, CHO K H, et al. Data-driven Self-sensing Technique for Active Magnetic Bearing [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2021, 22(6):1031-1038.

[7] 常亚菲. 一类不确定非线性系统基于特征模型的复合自适应控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(7): 1137-1146.

CHANG Yafei. Characteristic Model-based Composite Adaptive Control for a Class of Uncertain

Nonlinear Systems[J]. Control Theory and Applications, 2019, 36(7):1137-1146.

- [8] 吴宏鑫, 胡军, 解永春. 基于特征模型的智能自适应控制[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009: 8-36.

WU Hongxin, HU Jun, XIE Yongchun. Characteristic Model-based Intelligent Adaptive Control[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2009: 8-36.

- [9] LYU Xujun, DI Long, LIN Zongli, et al. Characteristic Model Based All-coefficient Adaptive Control of an AMB Suspended Energy Storage Flywheel Test Rig[J]. Science China-information Sciences, 2018, 61(11):1-15.

- [10] 韩京清. 自抗扰控制技术: 估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008: 66-73.

HAN Jingqing. Active Disturbance Rejection Control Technology: the Technique for Estimating and Compensating the Uncertainties[M]. Beijing: Academic Press, 2008: 66-73.

- [11] YANG Hongjiu, CHENG Lei, ZHANG Jinhui, et al. Leader Follower Trajectory Control for Quadro-

tors via Tracking Differentiators and Disturbance Observers[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2021, 51(1): 601-609.

- [12] 刘怡恒, 张和洪, 龙志强, 等. 基于改进跟踪微分器的磁浮列车悬浮控制研究[J]. 机车电传动, 2023(2):113-122.

LIU Yiheng, ZHANG Hehong, LONG Zhiqiang, et al. Research on Suspension Control of Maglev Train via Enhanced Tracking Differentiator[J]. Electric Drive for Locomotives, 2023(2):113-122.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 纪 历, 男, 1984 年生, 副教授。研究方向为磁悬浮高速电机设计与控制。E-mail: jili198504@hdu.edu.cn。陈美豪* (通信作者), 男, 1999 年生, 硕士研究生。研究方向为磁悬浮高速电机控制技术。E-mail: Cmhedu@outlook.com。

本文引用格式:

纪历, 陈美豪. 基于特征模型和跟踪微分器的主动磁轴承自适应控制方法[J]. 中国机械工程, 2025, 36(6): 1363-1370.

Ji Li, CHEN Meihao. Adaptive Control Method of AMB Based on Characteristic Model and Tracking Differentiator[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6): 1363-1370.

(上接第 1362 页)

CHEN Huizhen. Research on Heat Transfer in the Human Body Chemical Protective Clothing Environment System Based on CFD [D]. Suzhou: Suzhou University, 2022: 20-60.

- [23] 蔡杰. 空气过滤 ABC[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 1-100.

CAI Jie. Air Filtration ABC [M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2002: 1-100.

- [24] 李茂德, 卢希红. 热电制冷过程中散热强度对制冷参数的影响分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2002, 30(7): 811-813.

LI Maode, LU Xihong. Analysis of the Influence of Heat Dissipation Intensity on Refrigeration Parameters during Thermoelectric Refrigeration Process[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2002, 30(7): 811-813.

- [25] 赵运生, 胡骏, 屠宝锋, 等. 雷诺数对大涵道比涡扇发动机性能的影响仿真[J]. 中国机械工程, 2013, 24(21): 2867-2871.

ZHAO Yunsheng, HU Jun, TU Baofeng, et al. Simulation of the Effect of Reynolds Number on the Performance of High Bypass Ratio Turbofan Engines[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(21): 2867-2871.

(编辑 王艳丽)

作者简介: 侯雨雷, 男, 1980 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为复杂机电系统, 医疗机器人。发表论文 100 余篇。E-mail: ylhou@ysu.edu.cn。曾达幸* (通信作者), 男, 1978 年生, 教授、博士研究生导师。研究方向为机构学, 医疗机器人, 发表论文 100 余篇。E-mail: zengdx@dgut.edu.cn。

本文引用格式:

侯雨雷, 李希萌, 索槐, 等. 正压防护服供气背包设计及其数值模拟与实验[J]. 中国机械工程, 2025, 36(6): 1352-1362.

HOU Yulei, LI Ximeng, SUO Huai, et al. Design and Numerical Simulation and Experiments of Gas Supply Backpacks for Positive Pressure Protective Clothing[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6): 1352-1362.