

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.12.005

基于 RBF 神经网络的电磁轴承 基础激励主动控制研究*

赵宏凯, 蒋科坚*

(浙江理工大学 信息学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对安装在移动载体上的电磁轴承系统往往会受到来自其承载基础激励干扰的问题, 对移动载体上电磁轴承系统在基础激励干扰下的转子加速度、转子动位移和定子动位移进行了研究。通过对基础激励下单自由度电磁轴承系统进行动力学建模, 提出了一种基于 RBF 神经网络的 PID 控制算法, 并分析了该方法在非随机基础激励和随机基础激励下轴承转子的振动特性; 通过 MATLAB 对所建模型进行了仿真实验与控制分析。研究结果表明: 该方法能够有效抑制移动载体上基础激励引起的轴承转子的振动, 可以实现电磁轴承控制系统在移动载体上的控制参数的自适应调整, 在基础激励干扰下轴承转子仍能保持稳定悬浮。

关键词: 电磁轴承; 基础激励; 神经网络; 主动控制

中图分类号: TH133.3; TH113

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2020)12-1425-07

Active control for the base motion of active magnetic bearings based on RBF neural network

ZHAO Hong-kai, JIANG Ke-jian

(School of Information Science and Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the problem that active magnetic bearing system installed on a moving carrier was often subject to excitation interference from its bearing foundation, the rotor acceleration, rotor dynamic displacement and stator dynamic displacement of magnetic bearings under basic excitation interference were studied. Through the dynamic model of single-degree-of-freedom magnetic bearing system under basic excitation, a PID control algorithm based on RBF neural network was proposed, the vibration characteristic of the magnetic bearing under non-random and random excitation was analyzed as well. Numerical simulation was established by MATLAB to analyze the control performance of magnetic bearing. The results indicate that the method can effectively suppress the vibration of the magnetic bearing rotor on the moving carrier, the adaptive adjustment of the control parameters of the AMB control system on the moving carrier is realized, and the bearing rotor can keep stable suspension under the disturbance of the basic excitation.

Key words: active magnetic bearings (AMB); base motion; neural network; active control

0 引 言

主动电磁轴承(AMB)也可称为电磁轴承,是一种新型的转子悬浮支承技术。与滚动轴承和滑膜轴承相比,电磁轴承不但可以无接触地支承转子,还可以有效

避免传统机械轴承耗损大、不耐磨、能效低等问题。在某些高性能要求环境下,例如高转速机械等领域有着广泛的应用,电磁轴承还可以通过控制策略实现对支承特性的有效调节,达到对电磁轴承转子系统的主动控制。

收稿日期:2020-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11272288);浙江省自然科学基金资助项目(LY18E050017)

作者简介:赵宏凯(1995-),男,浙江宁波人,硕士研究生,主要从事电磁轴承控制方面的研究。E-mail:496692249@qq.com

通信联系人:蒋科坚,男,教授,硕士生导师。E-mail:jkjofzju@163.com

电磁轴承的动力学建模是研究电磁轴承的前提之一,其控制方法的优良和控制器设计的好坏是决定电磁轴承系统旋转精度、动态性能和稳定性能的关键。

目前,学者们在电磁轴承动力学建模和控制算法的研究上,已取得了不少成果。田拥胜等^[1]针对一台 4 000 r/min、50 kW 的高转速电磁轴承转子系统进行承载力建模,并对其刚度阻尼和系统性能进行了分析,给出了高转速下电磁轴承的运行规律;SUN Z 等^[2]提出了一种单元映射的全局分析方法,在获取电磁轴承全局结构的同时,研究了各参数对性能的影响。胡永等^[3]将电磁轴承的动力学内容与传统机械轴承进行了对比,并在磁力轴承 API617 标准下进行了动力特征分析,得出两者的不同之处;莫逆等^[4]通过有限元方法,计算了转子在外扰力作用下的传递频率响应、位移响应及动态力响应,并与滚珠轴承进行了对比,考察了电磁轴承的振动传递特性;LYU M 等^[5]在电磁轴承系统响应识别的基础上,提出了一种阻尼系数整定 PID 控制方法,有效地抑制了转子振动;YUAN Y 等^[6]选取控制电流和目标平衡位置,在不涉及任何模型信息的基础上,提出了一种三自由度电磁轴承无模型自适应控制方法,简化了模型分析过程;蒋科坚等^[7]提出了一种基于基础加速度信号为参考信号,包含自适应滤波器的电磁轴承-刚性转子系统的基础激励响应抑制方法,有效抑制了基础激励造成的转子振动响应,但基础激励仅为平稳振动时才有效。

随着现代控制技术的发展,神经网络智能控制方法被广泛应用于高精度、高效率的控制器设计中,有效提高了系统的控制性能。KUMAR P 等^[8]针对未知非线性 SISO 非仿射系统,基于 Lyapunov 稳定性理论,提出了一种 RBF 网络估计等效仿射非线性系统的控制方法;罗隆等^[9]提出了一种渐近稳定的自适应神经控制方法,在连续的自适应鲁棒控制项中,实现了闭环系统的渐近跟踪,减轻了控制输入的颤振问题;SUN Y G 等^[10]在磁悬浮非线性仿射的数学模型上,设计了一种基于 RBF 神经网络的滑模控制器,并采用最小参数学习法代替网络的权重,证明了控制方法的有界性和收敛性。

在电磁轴承系统的动力学分析中,虽然有大量的研究成果,但在建模过程中,通常假设转子系统安装在静止载体的基础上。然而,在实际应用当中,电磁轴承转子系统往往安装在移动载体上,此时转子系统必然会受到来自外部基础激励的干扰,引起电磁轴承转子的振动响应。因此,在静止基础上得到的动力学模型,难以满足移动载体上的电磁轴承控制设计要求。

笔者在考虑移动载体下电磁轴承的动态变化基础上,对电磁轴承转子系统进行受力分析,提出一种基于 RBF 神经网络的 PID 控制算法,来对由系统引起的振动响应进行抑制;在移动载体上电磁轴动力学模型的基础上,通过 RBF 神经网络实时调节 PID 控制参数,实现在非随机和随机基础激励下电磁轴承转子系统的稳定悬浮。

1 基础激励下电磁轴承系统动力学建模

笔者对电磁轴承支承特性的研究,沿用了传统机械轴承-转子系统等效刚度和等效阻尼的分析方法。对于电磁轴承控制系统,其支承特性总可以用支承的等效刚度和等效阻尼来表示。在线性范围内,由于单自由度电磁轴承模型能够较好地反映基础激励下系统的主要性能,笔者将电磁轴承的电磁力等效为一个单自由度的质量-弹簧-阻尼系统。

在忽略转子陀螺效应的前提下,笔者建立了基础激励下的单自由度电磁轴承支承系统,如图 1 所示。

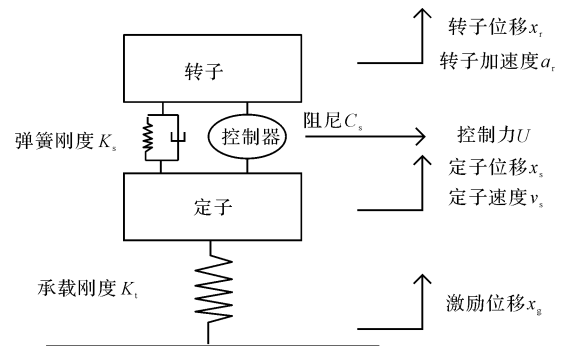


图 1 基础激励下的电磁轴承支承系统

在基础激励下,根据牛顿定理,笔者建立数学模型表达式如下:

$$m_r \ddot{x}_r = U - K_s(x_r - x_s) - C_s(\dot{x}_r - \dot{x}_s) \quad (1)$$

$$m_s \ddot{x}_s = -U + K_s(x_r - x_s) - K_t(x_g - x_s) + C_s(\dot{x}_r - \dot{x}_s) \quad (2)$$

式中: m_r —转子质量; m_s —定子质量; K_s —等效弹簧刚度系数; C_s —等效弹簧阻尼系数; K_t —定子刚度系数; U —外加控制力。

根据空间状态变量的一般表达式,有:
$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}$$

可得电磁轴承系统的状态向量为:

$$X = [\dot{x}_r \quad \dot{x}_s \quad x_r \quad x_s]^T \quad (3)$$

结合式(1,2),可得基础激励下电磁轴承系统的空间状态变量表达式为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_r \\ \ddot{x}_s \\ \dot{x}_r \\ \dot{x}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_s}{m_r} & \frac{C_s}{m_r} & -\frac{K_s}{m_r} & \frac{K_s}{m_r} \\ \frac{C_s}{m_s} & -\frac{C_s}{m_s} & \frac{K_s}{m_s} & \frac{K_t - K_s}{m_s} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{x}_s \\ x_r \\ x_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_t}{m_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} x_g + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_r} \\ -\frac{1}{m_s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (4)$$

由式(4)可得状态方程的系统矩阵 A 和输入矩阵 B 为:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{C_s}{m_r} & \frac{C_s}{m_r} & -\frac{K_s}{m_r} & \frac{K_s}{m_r} \\ \frac{C_s}{m_s} & -\frac{C_s}{m_s} & \frac{K_s}{m_s} & \frac{K_t - K_s}{m_s} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_r} \\ -\frac{K_t}{m_s} & -\frac{1}{m_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

选取转子竖直向上的加速度 \ddot{x}_r 、转子动位移 $x_r - x_s$ 和定子的动位移 $x_s - x_g$ 为输出观察量,则输出向量表达式为:

$$Y = [\ddot{x}_r \quad x_s - x_g \quad x_r - x_s] \quad (7)$$

计算可得电磁轴承系统的输出向量表达式为:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x}_r \\ x_s - x_g \\ x_r - x_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{C_s}{m_r} & \frac{C_s}{m_r} & -\frac{K_s}{m_r} & \frac{K_s}{m_r} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_r \\ \dot{x}_s \\ x_r \\ x_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} x_g + \begin{bmatrix} \frac{1}{m_r} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (8)$$

由式(8)可得状态方程的输出矩阵 C 和直接传递矩阵 D 为:

$$C = \begin{bmatrix} -\frac{C_s}{m_r} & \frac{C_s}{m_r} & -\frac{K_s}{m_r} & \frac{K_s}{m_r} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_r} \\ -1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

为观测移动载体上单自由度电磁轴承转子控制系统构造的基本特性,需要结合式(5,6)和式(9,10)进行系统能控性和能观性的判定。

根据状态能控和能观的判定定理^[11],当 $K_s \neq K_t \neq 0$,且 m_r, m_s 不为 0 情况下,可得:

$$\text{rank}(\Gamma_c[A, B]) = \text{rank}([B \quad AB \quad A^2B \quad A^3B]) = 4 \quad (11)$$

由式(11)可知,系统能控性矩阵的秩等于4,与系统的阶数相等,即电磁轴承转子系统是能控的。这意味着当定子上的转子稍稍偏离平衡位置时,总可以通过在定子-转子间施加一个适当的外力,使得将转子稳定在平衡位置,即:

$$\text{rank}(\Gamma_o[A, C]) = \text{rank} \begin{pmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ CA^3 \end{pmatrix} = 4 \quad (12)$$

由式(12)可知,系统能观性矩阵的列向量秩为4,为列满秩,即电磁轴承转子系统是能观的。这意味着,可以通过观测其转子的位移信号来确定系统中转子的速度、定子的位移量和速度等信息。

由于移动载体上电磁轴承转子系统具有可控性和可观性,则必定可以设计状态反馈控制器,来使系统保持稳定。

2 基础激励模型

在移动载体上运行时,电磁轴承所受到的基础激励有多种形式,例如随机激励和非随机激励、确定激励和非确定激励、周期激励和非周期激励等。载体以及外部环境对基础激励的大小及变化影响很大。

笔者以车辆作为移动载体,研究分析随机和非随机基础激励下的电磁轴承支承特性。其中,非随机激励选取正弦信号和方波信号;在随机激励选取上,由于得到完整全面的路面轮廓数据的难度很大。为方便实验分析,采用高斯白噪声通过一个积分器来产生随机路面不平度时间轮廓的方法。

在垂直方向上的移动载体外部激励输入模型的表达式为:

$$\dot{x}_g = -2\pi f_0 x_g + 2\pi \sqrt{G_0 v_0} \omega \quad (13)$$

式中: f_0 —下截止频率,Hz; G_0 —路面不平度系数,

m^3/cycle ; v_0 —前进速度, m/s ; ω —数字期望为零的高斯白噪声。

车辆载体在进行过程中,由于存在前后轮轴距,后轮与前轮之间的外部基础激励在时间上存在一定的偏差。为方便仿真分析,此处忽略后车轮相对于前车轮的基础激励产生的时滞,将其视为同一个外部激励。

电磁轴承的非随机和随机基础激励曲线如图 2 所示。

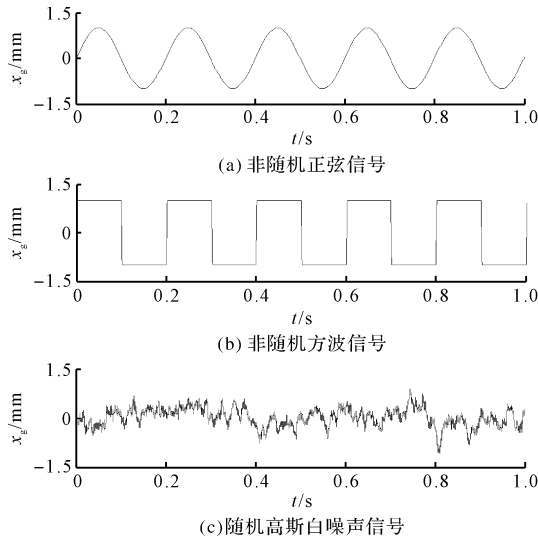


图 2 非随机和随机基础激励曲线

由图 2 可知:在非随机信号选择上,采用频率为 5 Hz,幅值为 1 的正弦信号和占空比为 50%,频率为 5 Hz 的方波信号;在随机信号选择上,选取 $G_0 = 16 \times 10^{-6}$, $v_0 = 60 \text{ km/h}$,采样时间为 0.05 s,仿真时间为 1 s 的随机高斯白噪声信号。

3 基于 RBF 神经网络的 PID 控制器

3.1 RBF 神经网络

RBF 神经网络通常分为 3 层,依次为输入层、隐含层和输出层。相较于 BP 神经网络^[12],在映射过程中 RBF 不会陷入局部最小,有较好的拟合效果。

RBF 神经网络结构如图 3 所示。

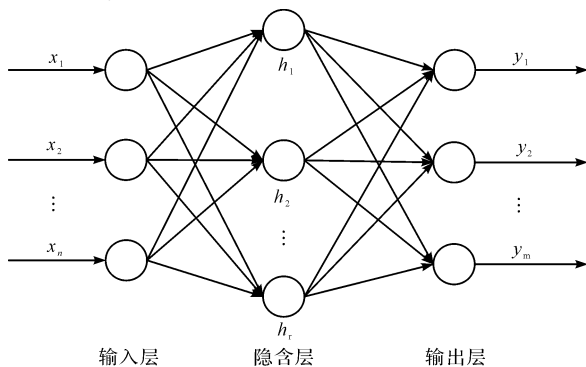


图 3 RBF 神经网络结构模型

RBF 神经网络的隐含层采用径向基高斯函数作为激活函数,通过对各个输入数据相乘相加的计算,来实现输入向量的非线性变换,通过隐含层的多个神经元实现对任意函数的逼近。

隐含层中所用的激活函数的表达式为:

$$h_j = \exp\left[-\frac{\|x - c_j\|^2}{2b_j^2}\right] \quad (14)$$

式中: c_j —第 j 个隐含层节点的中心径向基矢量; b_j —第 j 个隐含层节点的基宽系数; h_j —第 j 个隐含层节点的输出向量。

RBF 神经网络的输入与输出之间的关系可表示为:

$$y_m = \sum_{j=1}^r w_{ij} u_j \quad j = 1, 2, \dots, r \quad (15)$$

式中: w_{ij} —第 i 个输入层节点与第 j 个隐含层节点之间的权重系数; u_j —第 j 个输出层节点的输入量; y_m —第 m 个输出层节点的输出量。

在网络的梯度下降算法的迭代中,通过评估性能指标函数 $J = \frac{1}{2}(y - y_m)^2$ 来依次更新中心矢量、权重系数和基宽系数,直到获得网络性能最佳的参数。

具体的迭代计算过程如下:

$$\begin{cases} \Delta c(k) = \eta(y(k) - y_m(k)) w_j \frac{x_i - c_j}{b_j^2} \\ \Delta w(k) = \eta(y(k) - y_m(k)) h_j \\ \Delta b(k) = \eta(y(k) - y_m(k)) w_j h_j \frac{\|x_i - c_j\|^2}{b_j^3} \end{cases} \quad (16)$$

结合式(14,15)可得被控对象的输出与控制输入的比值,即 Jacobian 辨识信息矩阵为:

$$\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} = \sum_{j=1}^n w_j h_j \frac{c_j - \Delta u(k)}{b_j^2} \quad (17)$$

3.2 RBF 神经网络控制器

在电磁轴承转子系统的模型基础上,笔者采用 RBF 神经网络控制 PID 的原理如图 4 所示。

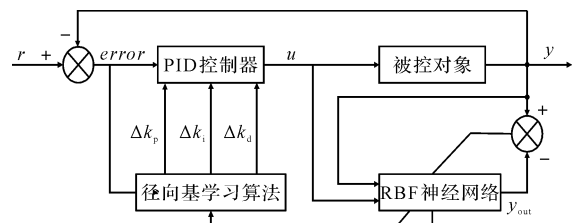


图 4 RBF 神经网络控制原理

笔者首先设计 PID 控制器,以降低转子竖直方向上的加速度为控制目标,将转子加速度的真实值和期

望值之间的差值输入至 PID 控制器当中;在外部激励的干扰下,PID 控制算法的参数不可动态调节。

笔者将 PID 控制方法与 RBF 神经网络相结合,利用 RBF 神经网络实现对 PID 参数的实时整定,以满足移动载体下电磁轴承转子系统的稳定控制。

控制偏差为 $e(k)$ 下的 RBF 神经网络 PID 控制器的算法为:

$$\Delta u(k) = k_p(e(k) - e(k - 1)) + k_i e(k) + k_d(e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)) \quad (18)$$

根据神经网络的性能计算指标 $E = \frac{1}{2}(e(k))^2$,

笔者采用梯度下降法来更新权值系数,结合式(16, 17),最终可得反向迭代后的 PID 控制系数 k_p, k_i, k_d 。

具体计算过程如下:

$$\begin{cases} \Delta k_p = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} x_1 \\ \Delta k_i = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} x_2 \\ \Delta k_d = \eta e(k) \frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)} x_3 \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\frac{\partial y(k)}{\partial \Delta u(k)}$ — 神经网络辨识后得到的被控对象 Jacobian 矩阵信息。

其中: $x_1 = e(k) - e(k - 1); x_2 = e(k); x_3 = e(k) - 2e(k - 1) + e(k - 2)$ 。

4 仿真及结果分析

利用 MATLAB,笔者对移动载体上电磁轴承的基础激励控制系统进行仿真实验。

电磁轴承的基本参数如表 1 所示。

表 1 电磁轴承的基本参数

模型参数	符号	数值	单位
转子质量	m_r	5.8	kg
气隙长度	x_0	0.88	mm
定子质量	m_s	10	kg
磁轴承刚度	K_s	20	kN/m
磁轴承阻尼	C_s	1 500	N/(s · m ⁻¹)
支承底座刚度	K_1	192	kN/m

根据移动载体上的电磁轴承支承模型和 PID 控制器模型,笔者采用基于 RBF 神经网络的参数自整定控制方法进行仿真。

其中,RBF 神经网络的结构为 3 - 6 - 1,学习速率为 0.5,动量因子为 0.05,初始 PID 控制参数为 $k_p = 0.01, k_i = 0.01, k_d = 0.01$,仿真可得非随机输入信号为正弦信号的控制响应曲线,如图 5 所示。

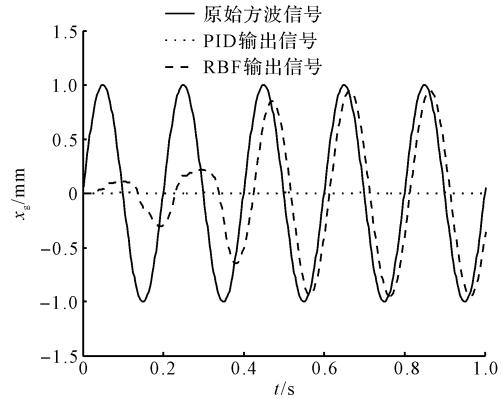


图 5 正弦信号控制响应曲线

从图 5 中可见:由于 PID 控制算法的参数固定,不能随着输入波形进行实时调参,单单采用 PID 控制方法,在未调参的情况下,控制效果非常不理想。

RBF 神经网络通过对 PID 参数的实时调整,在正弦信号的第 3 个周期,输出信号就可基本跟随输入信号,明显提高了系统的输出跟踪能力。

非随机正弦信号的控制参数调节曲线如图 6 所示。

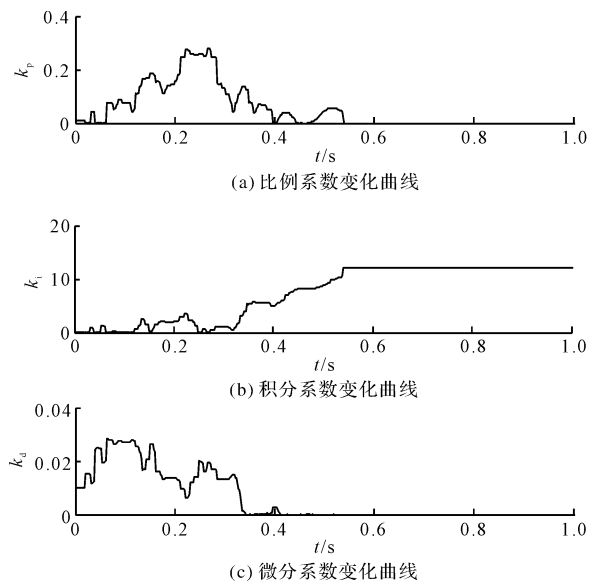


图 6 正弦信号控制参数调节曲线

从图 6 中可知:在控制初期,比例系数、积分系数和微分系数的变化波动较为明显;在 0.5 s 后,控制参数不再变化,达到稳定状态。

在相同条件下,仿真可得非随机输入信号为方波信号的控制响应曲线,如图 7 所示。

在非随机方波信号下,笔者采用 RBF 神经网络,同样实现了控制参数的实时调整,在不进行人为参数调整的情况下,及时遵循输入信号的动态过程,输出信号在第 2 个周期就可基本跟随输入信号。

控制参数调节曲线如图 8 所示。

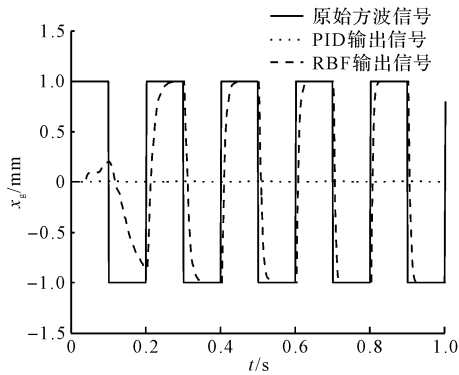


图 7 方波信号控制响应曲线

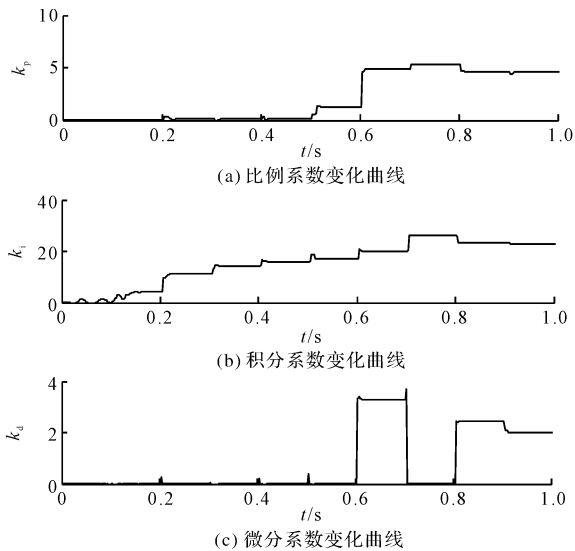


图 8 控制参数自适应调节曲线

由图 8 可见,控制参数在方波信号下的调节呈现阶梯状,控制初期的参数变化较为平缓,在 0.5 s 后,比例系数和微分系数产生较大变化,并最终可得非随机方波信号的比例系数、积分系数和微分系数分别为 4.5、24 和 2。

根据电磁轴承在移动载体上的支承模型与 RBF 神经网络控制模型,笔者将控制力 U 和随机基础激励信号 x_g 作为输入变量,以降低最能反应转子悬浮性能的转子加速度为控制目标,通过 MATLAB 建模仿真,得到了移动载体下电磁轴承的转子加速度、转子动位移和定子动位移的振动响应,如图 9 所示。

从图 9 可以发现:采用 RBF 神经网络控制方法比采用单一 PID 控制方法有着更小的动态范围,控制性能也有较大地提高;

在电磁轴承转子系统的转子加速度、转子和定子动位移指标上,对于随机基础激励的振动抑制效果明显。

电磁轴承转子控制性能的均方根值如表 2 所示。

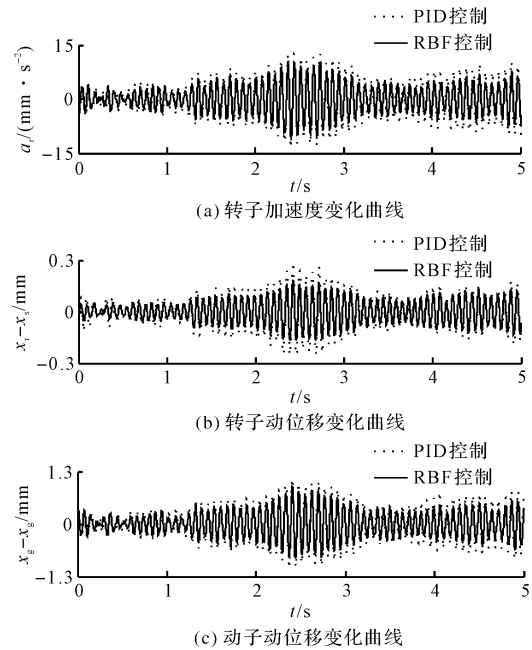


图 9 随机激励下的振动响应曲线

表 2 电磁轴承转子控制性能的均方根值

性能指标	转子加速度 /($\text{mm} \cdot \text{s}^{-2}$)	转子动位移 /mm	定子动位移 /mm
PID 控制	5.023 8	$8.359 9 \times 10^{-3}$	$4.046 9 \times 10^{-1}$
RBF 控制	4.175 7	$5.471 8 \times 10^{-3}$	$3.317 0 \times 10^{-1}$
优化比	16.88%	34.55%	18.04%

由表 2 可得:在随机基础激励下,相比于 PID 控制方法,采用 RBF 神经网络控制方法在转子加速度、转子动位移和定子动位移的优化比分别为 16.88%、34.55%、18.04%,有效改善了电磁轴承系统的动态变化,提高转子的悬浮稳定性。

笔者对移动载体上电磁轴承转子系统进行功率谱分析,可得到随机激励下的转子加速度、转子动位移和定子动位移的功率谱幅值曲线,如图 10 所示。

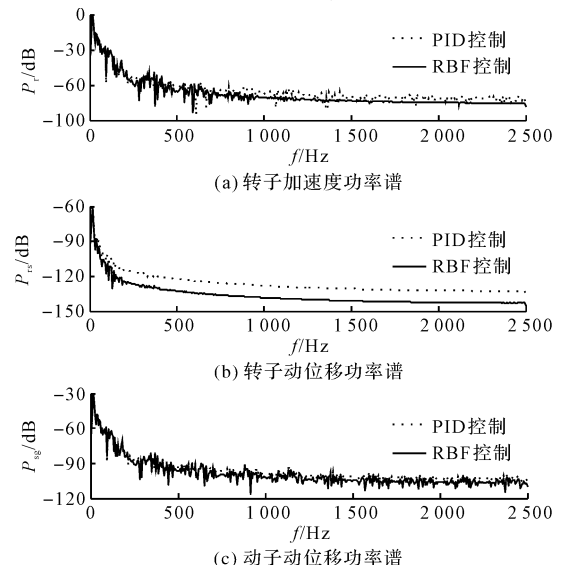


图 10 随机激励下的功率谱

图 10 中,对比两种控制方法下的功率谱曲线可以看出:

(1)在移动载体上,相比于采用 PID 控制方法,电磁轴承转子系统采用 RBF 神经网络方法得到的幅值更低,说明该方法可以有效减小电磁轴承随机基础激励的振动;

(2)进一步观察可以发现,随机基础激励对电磁轴承转子系统的振动集中在低频部分,随着频率的增大,振动幅值逐渐降低,可见在基础激励下的电磁轴承转子系统的控制研究上,应当关注低频部分对其产生的影响。

5 结束语

笔者通过建立移动载体上的单自由度电磁轴承支承模型,研究了在非随机基础激励和随机基础激励下,采用 RBF 神经网络控制方法的情况下,电磁轴承系统的转子加速度、转子动位移和定子动位移的变化趋势,通过仿真分析,可得到如下结论:

(1)移动载体上的单自由度电磁轴承系统的空间状态模型具有可控性和可观性;

(2)在周期正弦信号和方波信号下,RBF 神经网络控制方法可以有效提高系统的控制性能,可自适应调节 PID 参数,使系统输出紧紧跟随期望输入;

(3)在随机高斯白噪声信号下,RBF 神经网络控制方法对转子的加速度、转子动位移和定子动位移改善明显,性能分别提升了 16.88%、34.55% 和 18.04%,使电磁轴承转子系统在随机基础激励下实现稳定悬浮;

(4)移动载体上的电磁轴承转子系统的振幅最大值出现在频率较小处,低频基础激励对电磁轴承系统的振动影响较大。

参考文献 (References):

[1] 田拥胜,孙岩桦,虞烈. 高速永磁电机电磁轴承转子系

统的动力学及实验研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(9):116-123,18.

[2] SUN Z, ZHANG X S, FAN T P, et al. Nonlinear dynamic characteristics analysis of magnetic bearing system based on cell mapping method with a case study[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**,2019,117(1):116-137.

[3] 胡永,肖忠会,王玉旌,等. 电磁轴承支撑系统转子动力学分析[C]. 第十六届沈阳科学学术年会论文集. 沈阳:沈阳市科学技术协会,2019.

[4] 莫逆,刘兴男,周燕,等. 电磁轴承振动传递特性研究[J]. 振动与冲击,2015,34(6):79-83.

[5] LYU M, LIU T, WANG Z X, et al. A control method of the rotor re-levitation for different orbit responses during touchdowns in active magnetic bearings[J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**,2018,105(1):241-260.

[6] YUAN Y, SUN Y K, XIANG Q W, et al. Model-free adaptive control for three-degree-of-freedom hybrid magnetic bearings[J]. **Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering**,2017,18(12):2035-2045.

[7] 蒋科坚,祝长生,乔晓利,等. 移动载体上电磁轴承-转子系统的基础激励振动主动抑制[J]. 机械工程学报,2014,50(11):108-118.

[8] KUMAR P, KUMAR N, PANWAR V. RBF neural control design for SISO nonaffine nonlinear systems[J]. **Procedia Computer Science**,2018,125(1):25-33.

[9] 罗隆,罗飞,许玉格. 不确定非线性系统全局渐近自适应神经网络控制[J]. 控制理论与应用,2014,31(9):1268-1273.

[10] SUN Y G, XU J Q, QIANG H Y, et al. Adaptive sliding mode control of maglev system based on RBF neural network minimum parameter learning method[J]. **Measurement**,2019,141(1):217-226.

[11] 俞立. 现代控制理论[M]. 北京:清华大学出版社,2007.

[12] 刘松,顾佳俊,汪颖,等. 基于超声波检测的 BP 神经网络缺陷识别方法设计[J]. 压力容器,2019,36(8):62-66,49.

[编辑:冯黎雅]

本文引用格式:

赵宏凯,蒋科坚. 基于 RBF 神经网络的电磁轴承基础激励主动控制研究[J]. 机电工程,2020,37(12):1425-1431.

ZHAO Hong-kai, JIANG Ke-jian. Active control for the base motion of active magnetic bearings based on RBF neural network[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(12):1425-1431.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>