

基于BP神经网络的磁轴承PID控制算法研究

郝建胜,谢振宇,陈李成,吴炎

(南京航空航天大学 直升机传动技术重点实验室,江苏 南京 210016)

摘要:为解决单一PID控制时参数不可调、动态性能较差等问题,开发了BPPID控制算法。利用BP神经网络具有自学习和适应性强的特点,动态实时调整PID控制参数,改善磁轴承控制效果。通过仿真分析和试验研究,对比了BPPID控制算法和不完全微分PID控制算法的控制效果。研究表明,与不完全微分PID控制算法相比,BPPID控制算法具有较强的适应能力和良好的动态性能,在额定转速下转子振动量减小。

关键词:磁轴承;BP神经网络;PID控制;动态性能

中图分类号:TP273 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)02-0127-04

Research on PID Control Algorithm of Magnetic Bearing Based on BP Neural Network

HAO Jiansheng, XIE Zhenyu, CHEN Licheng, WU Yan,

(National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract:In order to address the problem of unadjustable parameters and poor dynamic performance when using PID control algorithm, BPPID control algorithm was developed. With the advantages of self-learning and strong adaptability of BP neural network, PID control parameters was dynamically adjusted in real-time to improve the control effect of magnetic bearing. By simulation analysis and experimental study, the control effect of BPPID control algorithm and incomplete differential PID control algorithm were compared. The results show that BPPID control algorithm, in comparison with the incomplete differential PID control one, enjoys strong adaptability and conducts good dynamic performance, and the rotor vibration decreases at the rated speed.

Keywords: magnetic bearing; BP neural network; PID control; dynamic performance

0 引言

主动磁悬浮轴承(以下简称磁轴承)利用可控的电磁力使转子悬浮于设定位置,具有无接触、无摩擦、使用寿命长等优点,因此广泛应用于高速旋转机械中^[1]。

磁轴承本身具有非线性和不稳定性,因此要采用合适的控制方法才能使其稳定悬浮^[2]。国内外大量学者提出了针对磁轴承的控制算法,如,鲁棒控制、模糊控制、人工蜂群算法控制等^[3-4],并且大量研究表明,BP神经网络算法对复杂非线性控制对象具有良好的控制效果,可以提高系统的动态性能^[5]。

本文将BP神经网络与传统PID算法相结合,开发了BPPID控制算法,利用BP神经网络具有非线性映射、强自适应能力、感知知识并学习推理的特点^[6],在磁轴承工作过程中实时调整PID参数,弥补了磁轴承本身所具有的非线性和不稳定性等不足,从而改善磁轴承的动态性能。

1 试验系统及各环节传递函数

本文试验用磁悬浮飞轮系统包括机械和电气控制两个部分,机械部分包含飞轮转子、磁轴承和内置电机等,电气控制部分包含传感器、控制器和功率放大器等。系统机

械结构如图1所示。

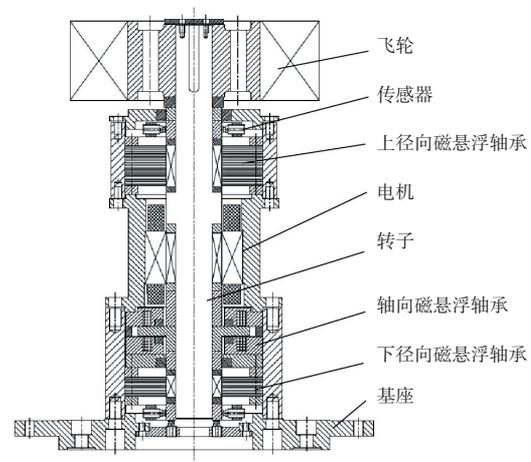


图1 磁悬浮飞轮机械结构

磁悬浮飞轮系统控制原理如图2所示。

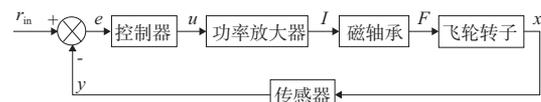


图2 系统控制原理图

第一作者简介:郝建胜(1994—),男,河北张家口人,硕士研究生,研究方向为磁悬浮轴承技术。

传感器实时检测飞轮转子的位置信号 x , 并经过传感器内部电路处理后得到位置信号 y , 与转子悬浮时平衡位置 r_{in} 比较得到位置偏差量 e , 经控制器计算后得到控制量 u , 使得功率放大器产生控制电流 I , 进而磁轴承产生电磁力 F , 拉动转子回到平衡位置。

传感器的传递函数可用一阶惯性环节表示, A_s 为传感器放大系数, 由于转子受保护轴承的限制, 其最大位移量为 0.3 mm , 对应传感器电路输出为 $0\sim 5\text{ V}$, 则 $A_s = 16\ 667\text{ V/m}$; 磁悬浮飞轮用传感器通带 f 为 3.2 kHz , 时间常数 $T_s = 1/2\pi f$, 则 T_s 为 $4.97 \times 10^{-5}\text{ s}$, 则传感器传递函数为: $W_s(s) = \frac{A_s}{1 + T_s s} = \frac{16\ 667}{1 + 4.97 \times 10^{-5} s}$ 。

控制信号 u 的变化范围为 $-5\text{ V} \sim 5\text{ V}$, 功率放大器经过信号 u 控制后, 对应的线性电流变化范围为 $0\sim 4\text{ A}$ 。因此, 功率放大器采用比例环节表示, 比例系数为 0.4 。

磁悬浮轴承承载力 F 与线圈电流 i 和气隙长度 s 的关系为:

$$F = \frac{\mu_0 N^2 A i^2}{4s^2} \quad (1)$$

式中: 真空磁导率 μ_0 为 $4\pi \times 10^{-7}\text{ Vs/Am}$; 线圈匝数 N 为 120 匝; 磁悬浮轴承单磁极面积 A 为 320 mm^2 。

将式(1)在点 $i = i_0 = 2\text{ A}$, $s = s_0 = 0.2\text{ mm}$ 的邻域内, 按照二元函数的泰勒级数展开并忽略高次项, 有:

$$F(I, s) \approx F(I_0, s_0) + k_1(I - I_0) + k_s(s - s_0)$$

式中: $F(I_0, s_0)$ 为静态工作点 (I_0, s_0) 处的电磁力; $k_1 = \frac{\partial F(I_0, s_0)}{\partial I}$ 为磁悬浮轴承的电流刚度; $k_s = \frac{\partial F(I_0, s_0)}{\partial s}$ 为位移刚度。

根据牛顿运动定律, 当外力为 0 时, 可以得到转子受力为:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - k_1(I - I_0) + k_s(s - s_0) + mg = F(I_0, s_0)$$

转子质量 m 为 14.12 kg , 对上式进行拉普拉斯变换, 有:

$$ms^2 X(s) - k_1 I(s) + k_s X(s) = 0$$

于是, 可以得到磁悬浮轴承传递函数:

$$W(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{16.64}{s^2 - 13\ 310}$$

2 BPPID 控制算法

人工神经元是神经网络最基本的处理单元, 与生物神经元相似, 一个 n 输入的人工神经元模型如图 3 所示, 主要包括连接权值、求和单元及激活函数 3 个部分^[7]。

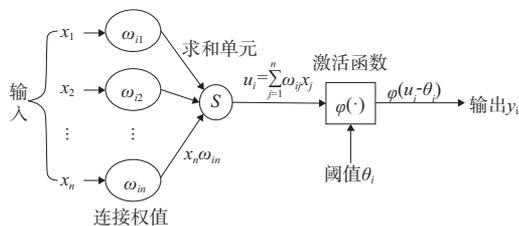


图3 人工神经元模型

图 3 中: x_1, x_2, \dots, x_n 为神经元 i 的 n 个输入; $\omega_{i1}, \omega_{i2}, \dots, \omega_{in}$ 为 n 个连接权值; 求和单元将输入与权值以 $\sum_{j=1}^n \omega_{ij} x_j$ 的形式作为激活函数 $\varphi(\cdot)$ 的输入; 输出 y_i 为 u_i 和阈值 θ_i 经过激活函数后的输出, 即 $y_i = \varphi(u_i - \theta_i)$ 。

单一人工神经元结构非常简单, 但大量神经元通过特殊方式联结在一起后, 就组成了类似生物神经网络的复杂信息处理网—BP 神经网络, 本文采用 3-5-3 的结构, 如图 4 所示。

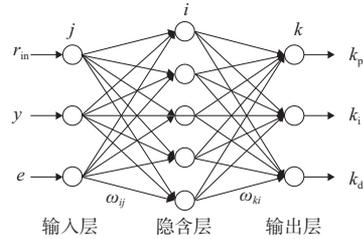


图4 BP神经网络结构

将 BP 神经网络算法与 PID 算法结合, 构成 BPPID 控制算法, BPPID 算法结构如图 5 所示。

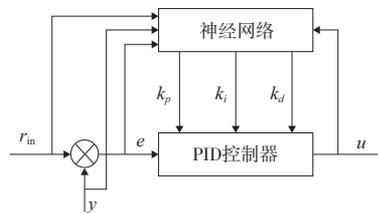


图5 BPPID 结构图

图 5 中: r_{in} 为参考输入; y 为系统输出; e 为位置偏差; u 为控制器输出; k_p, k_i, k_d 为神经网络的输出。BP 神经网络 PID 控制算法的流程如图 6 所示。

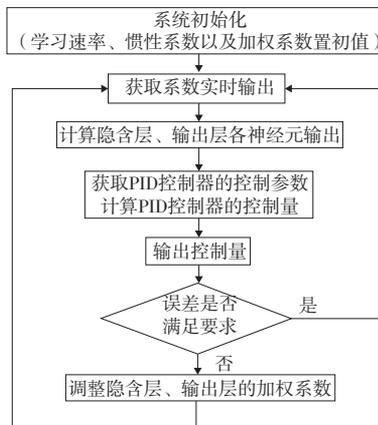


图6 BPPID 控制算法流程图

3 系统仿真研究

根据磁轴承各环节的传递函数, 对单自由度磁悬浮轴承-转子系统进行仿真分析。在 Matlab/Simulink 环境下, 建立 BPPID 算法仿真模型和不完全微分 PID 控制算法仿

真模型,分别如图7、图8所示。

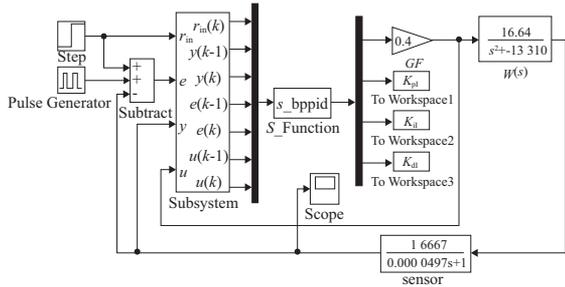
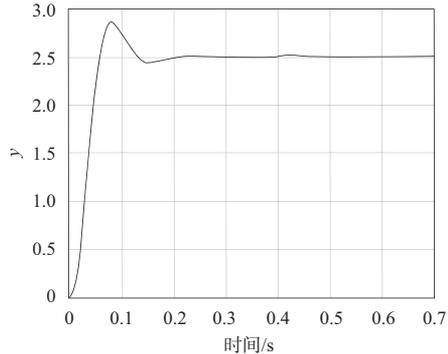


图7 BPPID控制算法仿真模型



(c) BPPID控制算法系统响应

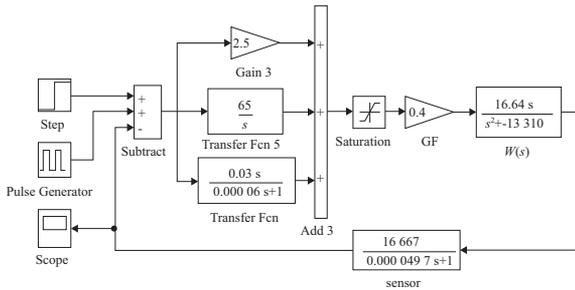
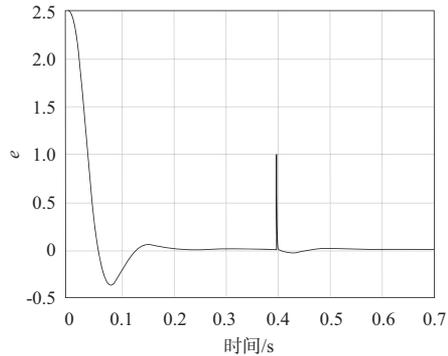
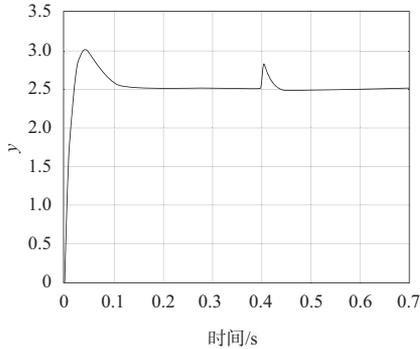


图8 不完全微分PID控制算法仿真模型

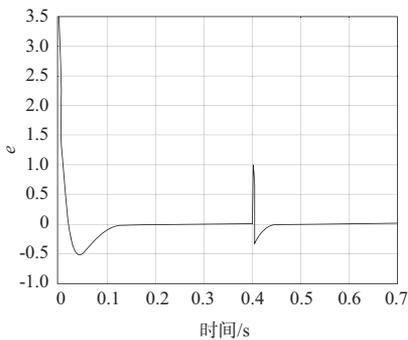


(d) BPPID控制算法位置偏差e变化情况

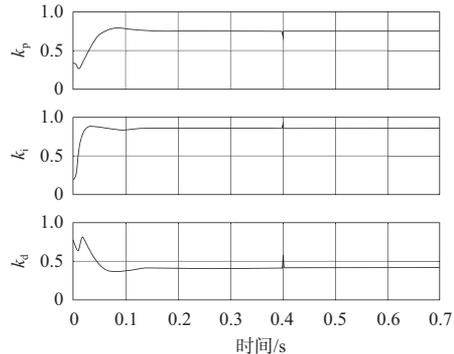
对磁轴承-转子系统的起浮特性及抗干扰性能进行仿真研究,比较两种不同控制策略的优劣。初始时加入2.5V的Step阶跃信号用以模拟转子的起伏特性,在响应稳定后,加入1V的Pulse脉冲激励信号,模拟转子受到的冲击,两种控制算法对阶跃信号和脉冲激励信号的响应情况如图9所示。



(a) 不完全微分PID控制算法系统响应



(b) 不完全微分PID控制算法位置偏差e变化情况



(c) BPPID控制算法各控制参数变化情况

图9 系统仿真分析结果

从仿真分析结果看,由于BPPID控制算法具有自学习的特点,与不完全微分PID算法相比,初始阶跃响应的调节时间较长。在0.4s时加入脉冲激励信号,与不完全微分PID算法相比,BPPID控制算法表现出较好的适应性,系统输出y只有微弱的变化,并且抗冲击调节时间短,系统抗冲击能力强,稳定性好,适应能力强。

4 系统悬浮及高速旋转试验

基于上述系统的仿真分析,在控制参数不变的情况下,借助磁悬浮飞轮试验台进行控制策略的验证,磁悬浮飞轮试验系统原理图如图10所示。

利用示波器监测转子位移及线圈电流的变化情况。两种算法控制下,转子起伏响应如图11、图12所示。

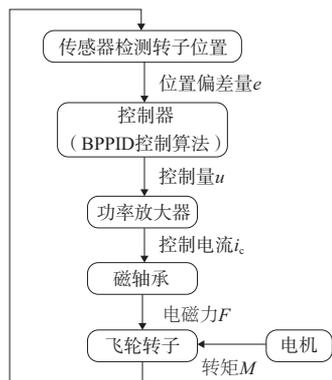
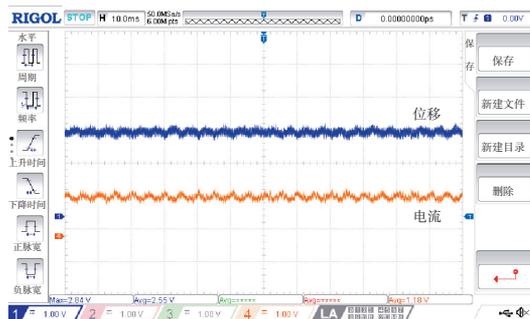
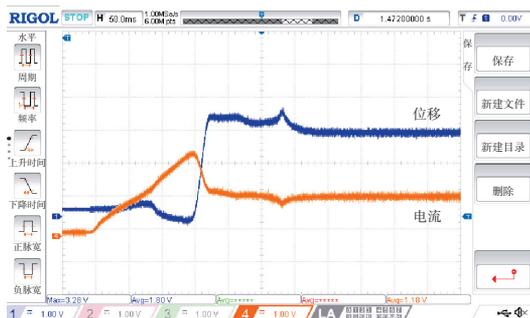
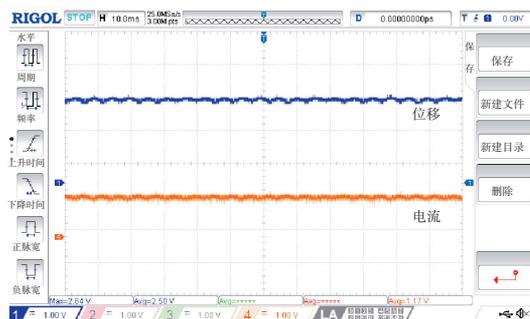
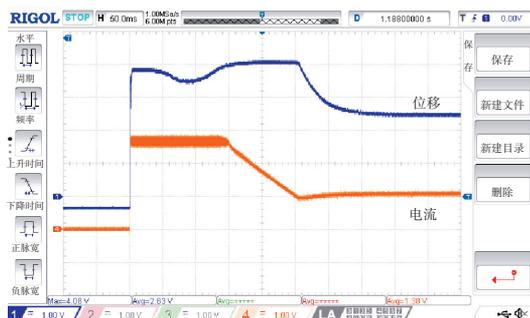


图 10 磁悬浮飞轮试验系统原理图

电流波动明显减小,并能使系统高速稳定运行。

图 13 额定转速转子位移和线圈电流波形
(不完全微分 PID 控制算法)图 11 转子悬浮位移和线圈电流波形
(不完全微分 PID 控制算法)图 14 额定转速转子位移和线圈电流波形
(BPPID 控制算法)图 12 转子悬浮位移和线圈电流波形
(BPPID 控制算法)

示波器波形稳定后,电流均显示约为 1.3 V,电流转换系数 1.5 A/V,转子位置均显示为 2.5 V,位移传感器比例为 0.06 mm/V。即稳定后线圈电流为 2 A,转子位于 0.15 mm 处,转子悬浮于中间位置。

利用变频器驱动内置电机,使转子稳定上升至额定工作转速 12 000 r/min,磁轴承的电流和转子的位移变化情况如图 13、图 14 所示。

转子在额定转速高速旋转时,采用不完全微分 PID 控制算法,转子的振动峰峰值约为 0.4 V,即 0.024 mm,电流波动值为 0.4 V,即 0.6 A。而采用 BPPID 控制算法,转子的振动峰峰值约为 0.2 V,即 0.012 mm,电流波动值为 0.2 V,即 0.3 A。

采用 BPPID 控制算法,转子的振动量和磁轴承线圈

5 结语

针对单一 PID 控制时参数不可调的问题,开发了 BPPID 控制算法,改善了磁轴承控制效果。仿真和试验结果表明,BPPID 控制算法具有较强的适应能力和良好的动态性能,系统可以在额定转速下运行,并且转子振动量减小。

参考文献:

- [1] 刘强,赵明师,韩邦成,等.磁悬浮框架飞轮磁轴承技术研究与发展现状[J].宇航学报,2019,40(11):1251-1261.
- [2] 宋朋飞,张建生.内模 PID 控制在磁悬浮轴承中的应用[J].机械制造与自动化,2014,43(3):42-44.
- [3] MYSTKOWSKI A. Energy saving robust control of active magnetic bearings in flywheel[J]. Acta Mechanica et Automatica,2012,6(3):72-75.
- [4] 韩万木,蒋启龙,刘东.基于改进人工蜂群算法的磁轴承 PID 控制器参数优化[J].微电机,2017,50(9):55-58.
- [5] 张震,赵文豪,张晨宇,等.基于 MATLAB 的 PID 参数整定的仿真与分析[J].装备制造技术,2019(3):79-81,85.
- [6] 赵亮.基于神经网络的无刷直流电机控制系统设计[J].内燃机与配件,2019(6):78-80.
- [7] 聂文都,蔡锦凡.基于人工神经网络的二分类方法[J].现代计算机,2019(28):15-19,56.

收稿日期:2020-03-02