

磁轴承基于扩展卡尔曼滤波的改进 PID 控制算法研究^{*}

姜 豪, 苏振中, 王 东

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 湖北 武汉 430033)

摘 要: 提出了一种基于扩展卡尔曼滤波的改进 PID 控制算法。该算法以传感器测量的转子位移信号为量测量, 功率放大器的输出电流为输入量, 通过系统状态方程和噪声统计特性估计转子的实际偏心位移, 有效解决了信号噪声对控制精度的影响问题。最后, 通过仿真和试验, 对比验证了算法的有效性。

关键词: 磁轴承; 非线性; 扩展卡尔曼滤波; PID 控制; 转子位移精度

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)03-0072-06

Improvement of Magnetic Bearing Based on Extended Kalman Filter Research on PID Control Algorithm^{*}

JIANG Hao, SU Zhenzhong, WANG Dong

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: An improving PID control algorithm based on extended Kalman filter was proposed. The algorithm uses the eddy current sensor to measure the rotor displacement as the amount of measurement, and the output current of the power amplifier as the amount of input, the actual eccentric displacement of the rotor was estimated by the system state equation and the noise statistical characteristic, which effectively solves the problem of the influence of the signal noise on the control accuracy. The result of simulation and experiment prove the proposed algorithm to be feasible and effective.

Key words: magnetic bearing; nonlinear; extended Kalman filter; PID control; rotor displacement accuracy

0 引 言

主动磁悬浮轴承 (Active Magnetic Bearing, AMB) 具有无磨损、低功耗、工作寿命长等优点, 广泛应用于飞轮储能、航天姿态控制等领域。一个完整的 AMB 系统主要包括 AMB 本体、传感器、功率放大器、控制系统以及支承的转子等^[1]。由于具有开环本质不稳定特性, 且实际应用中基于 AMB 支承的转子系统机电耦合特性较为复杂, 故设计合理的控制系统是优化 AMB 动态特性、提高

系统运行稳定性的关键。

PID 控制器具有结构简单、参数易于整定、可靠性好等优点, 目前仍是 AMB 领域应用最广泛的控制器类型。其中, 比例反馈用以调节 AMB 的刚度, 微分环节用以调节阻尼特性, 积分环节则用来消除系统的静态偏差^[2]。为提供 AMB 稳定工作时的阻尼作用, 微分控制环节必不可少。然而, 微分环节易引入功率放大器带来的开关噪声和位移传感器中的测量误差^[3], 激励转子振动, 降低系统的稳定性, 甚至导致系统失稳。此外, 由于 AMB 系

^{*} 基金项目: 国家重点基础研究发展项目(973 计划)(2013CB035601); 国家自然科学基金项目(511370005)

作者简介: 姜 豪(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁轴承及其控制系统。

王 东(1978—), 男, 教授, 研究方向为电力集成技术。

统具有模型的不确定性和非线性等特点,使得经典 PID 控制器在实时性和鲁棒性等方面都存在较为明显的缺陷,使其难以满足系统控制精度和稳定性要求^[4],限制了 AMB 转子系统的运转速度、各环节响应速度以及转子位置控制精度的提高。

为了弥补经典 PID 控制的上述缺陷,国内外学者提出了较多的改进控制算法。国内学者苏义鑫等人^[5]为了解决固定 PID 参数的方法,在远离平衡点非线性特征明显时控制精度不能满足要求的问题,提出了一种变参数的 PID 控制方法,分析并给出了控制参数的动态调整原则,动态性能得到明显提升,但该方法对于 AMB 系统难以建立统一的调整规则。哈尔滨工业大学富宏亚教授等人^[6]设计了一种基于 BP 和 GA 算法的 PID 神经网络控制器,理论推导和仿真验证了该算法应用于 AMB 系统的可行性,有效克服了非线性问题,具备较好的鲁棒性,但该算法的实际效果有待进一步试验验证。为了降低噪声对 PID 控制器控制精度的影响,伊朗学者 S. Mahdi Darbandi 等人^[7]提出了一种积分自适应观测器来识别传感器噪声中的直流分量和谐波分量,通过状态反馈进行补偿,进而估计出系统的状态,并通过试验验证了该方法的有效性,但该方法在不平衡扰动下依然存在较大的误差。针对强噪声干扰问题,德国学者 Li Li 等人^[8]设计了一种基于模糊控制和神经网络控制相结合的软计算方法来辨识系统参数,采用卡尔曼滤波方法进行系统状态估计,并通过仿真验证了该算法具有良好的噪声滤除效果,但只限于恒定干扰条件下的 AMB 系统。

为解决信号中的高频随机噪声对 AMB 系统性能的影响问题,本文在经典 PID 控制算法的基础上,以单自由度轴向 AMB 为研究对象,提出一种基于扩展卡尔曼滤波器 (Extended Kalman Filter, EKF) 的改进 PID 控制算法。利用卡尔曼滤波算法计算量小、实时性高、存储量低等优点设计控制系统来滤除信号噪声。基于 AMB 系统的状态方程、观测方程以及白噪声激励的统计特性,建立了围绕最优状态估计的线性化卡尔曼滤波方程,设计了递推算法实时估算转子的位移,实现了对转子位置信号中高频噪声的抑制,改善了系统性能。通过仿真和试验验证了该算法的有效性。

1 AMB 模型与扩展卡尔曼滤波理论

1.1 AMB 模型

AMB 控制原理如图 1 所示。为获得线性化性能,AMB 通常采用差动工作和偏置电流驱动方式,即通过两个对称的差动定子磁铁共同控制,经过功率放大器后产生正向和反向作用的电磁力来调整转子的位置。

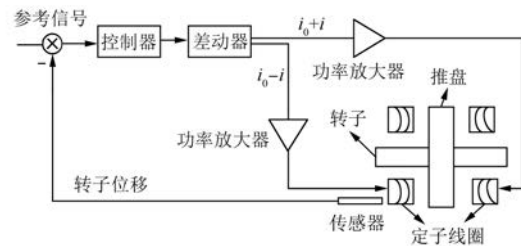


图 1 AMB 控制原理图

由 AMB 电磁力计算公式^[1]可知,在忽略漏磁、磁滞和涡流等因素的影响时,单个电磁铁对转子的电磁力 f 的大小与气隙长度 s 和线圈电流 i 有关,满足关系:

$$f(i, s) = k_f \frac{i^2}{s^2} \quad (1)$$

其中, $k_f = u_0 N^2 A / 4$ 。

式中: u_0 ——真空条件下的磁导率;

N ——绕组线圈的匝数;

A ——气隙有效截面积。

AMB 采用差动和偏置电流驱动方式, i_0 和 x_0 分别表示偏置电流和平衡位置气隙, i_x 和 x 分别表示控制电流和转子的位移,转子受到的两个定子磁铁的电磁力 f_+ 、 f_- 的合力为

$$f_{\text{mag}} = f_+ - f_- = k_f \left[\frac{(i_0 + i_x)^2}{(x_0 - x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(x_0 + x)^2} \right] \quad (2)$$

本文以单自由度轴向 AMB 为研究对象,其典型三维结构如图 2 所示。根据轴向 AMB 结构和牛顿第二定律,得到转子沿轴向方向的运动方程:

$$f_{\text{dis}} + f_{\text{mag}} = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3)$$

式中: m ——转子质量;

f_{mag} ——轴承电磁力;

f_{dis} ——轴向系统噪声。

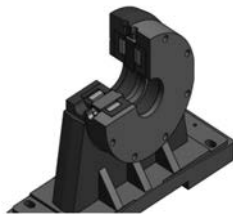


图2 轴向AMB结构示意图

式(2)为非线性方程,不利于轴向AMB系统的控制与设计,因此需对电磁力进行线性化处理,为后文的扩展卡尔曼滤波理论提供基础。

为此,将式(2)在 (i_0, x_0) 处一阶泰勒级数展开,得到线性化电磁力的计算公式为

$$f_{\text{mag}} \approx k_i i_x - k_x x \quad (4)$$

其中,电流系数 $k_i = \frac{4k_i i_0}{x_0^2}$,位移系数 $k_x =$

$$-\frac{4k_i i_0^2}{x_0^3}$$

1.2 扩展卡尔曼滤波器理论

卡尔曼滤波本质是一种最小方差估计,采用递推算法对观测量进行序贯处理,从系统信息中估计出所需的估计。

由于卡尔曼滤波仅适用于线性系统,不能直接解决非线性系统的估计问题,因此对于AMB系统采用扩展卡尔曼滤波方法,先利用泰勒级数对系统进行线性化处理,然后用离散卡尔曼滤波算法对转子位移状态进行估计。在估计的过程中,需要掌握系统方程、观测方程以及观测噪声等统计特性,每个递推周期主要依靠时间更新和量测更新两个步骤来实现估计^[9]。卡尔曼滤波的具体算法流程如图3所示。

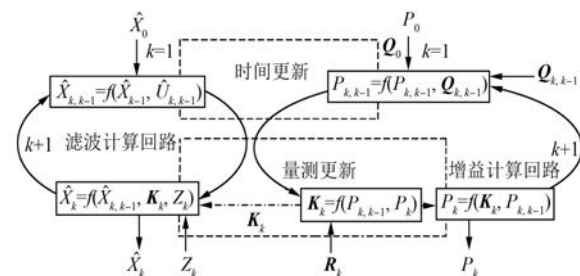


图3 卡尔曼滤波算法流程图

其中, k 为时间步数; $\hat{X}_k, \hat{X}_{k,k-1}$ 分别表示状态估计量和预测量; $P_k, P_{k,k-1}$ 分别为估计均方误差

和预测均方误差; $U_{k,k-1}$ 为系统的输入; Z_k 为系统状态的观测量; K_k 为滤波增益矩阵; $R_k, Q_{k,k-1}$ 分别为测量噪声和系统噪声的方差阵。

2 轴向AMB的扩展卡尔曼滤波模型

轴向AMB的扩展卡尔曼滤波控制原理图如图4所示。轴向AMB控制系统由PID控制器、功率放大器以及传感器组成。为了抑制噪声的干扰,引入扩展卡尔曼滤波器,将传感器的输出转子位移 z 作为量测信号,利用系统与噪声的状态空间模型,实时递推计算来估计转子的位移。

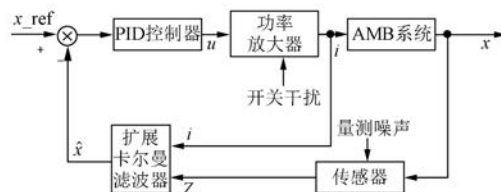


图4 轴向AMB的扩展卡尔曼滤波控制原理图

2.1 系统状态方程

根据式(3)和式(4),对AMB的电磁力进行线性化处理,转子沿轴向的运动方程可以表示为

$$m\ddot{x} = f_{\text{dis}} + f_{\text{mag}} \approx f_{\text{dis}} + k_i i_x - k_x x \quad (5)$$

设转子的轴向速度为 v ,因此得到转子的轴向运动微分方程为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \\ \dot{v} &= \frac{k_i i_x - k_x x}{m} + \frac{f_{\text{dis}}}{m} \end{aligned} \quad (6)$$

令 $x = (x, v)^T$,根据状态空间理论^[10],得到转子在连续时间下的状态方程为

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B\hat{i}_x + Gf_{\text{dis}} \quad (7)$$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_x}{m} & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k_i}{m} \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{m} \end{bmatrix}。$$

2.2 系统状态方程的离散化

由于实际AMB控制系统采用数字控制装置,需要将连续时间系统转化为等价离散时间系统。根据离散和连续线性系统的转换关系^[10],将状态方程进行离散化处理,原理如图5所示。

设采样时间为 T, x_k, v_k 分别为轴向AMB在 k 时刻的位移和速度,令 $X_k = (x_k, v_k)^T$,得到轴向AMB系统的离散空间状态表达式为

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + B_{k,k-1} \hat{i}_{x|k-1} + G_{k,k-1} f_{\text{dis}|k-1} \quad (8)$$

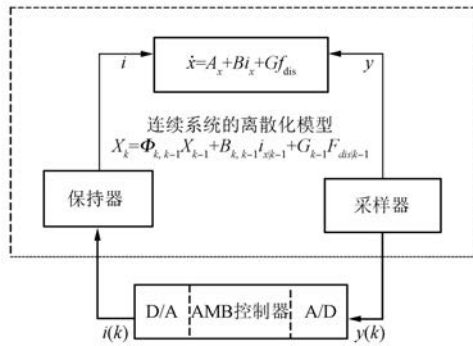


图5 AMB 离散时间控制系统原理图

离散系统由 $k-1$ 到 k 时刻的状态转移矩阵 $\Phi_{k,k-1}$, 输入状态的控制矩阵 $B_{k,k-1}$ 以及噪声驱动矩阵 $G_{k,k-1}$ 分别满足以下关系:

$$\Phi_{k,k-1} = e^{AT} \approx I + AT + \frac{(AT)^2}{2} \quad (9)$$

$$B_{k,k-1} = \left(\int_0^T e^{At} dt \right) B = A^{-1} e^{At} \Big|_0^T B \approx A^{-1} \left[AT + \frac{(AT)^2}{2} \right] B = \left(TI + \frac{AT^2}{2} \right) B \quad (10)$$

$$G_{k,k-1} = \left(\int_0^T e^{At} dt \right) G = A^{-1} e^{At} \Big|_0^T G \approx A^{-1} \left[AT + \frac{(AT)^2}{2} \right] G = \left(TI + \frac{AT^2}{2} \right) G \quad (11)$$

因此可以得

$$\Phi_{k,k-1} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{k_x T^2}{2m} & T \\ -\frac{k_x T}{m} & 1 - \frac{k_x T^2}{2m} \end{bmatrix},$$

$$B_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \frac{k_i T^2}{2m} \\ \frac{k_i T}{m} \end{bmatrix}, G_{k,k-1} = \begin{bmatrix} \frac{T^2}{2m} \\ \frac{T}{m} \end{bmatrix}$$

2.3 系统观测方程

采用电涡流传感器测量转子的位置信号, 设 Z_k 为 k 时刻的测量值。由于传感器受到材料、温度以及其他环境因素的影响, 测量信号中含有噪声, 因此系统的观测方程可以描述为

$$Z_k = x_k + V_k \quad (12)$$

式中: V_k ——传感器信号的测量噪声。

因此, 整理得到系统的观测方程为

$$Z_k = H_k X_k + V_k \quad (13)$$

式中: H_k ——系统的观测矩阵, $H_k = [1 \ 0]$ 。

2.4 系统卡尔曼滤波方程

根据系统方程和卡尔曼滤波理论^[9], 得到轴向 AMB 的离散型卡尔曼滤波方程如下:

状态一步预测方程

$$\hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} + B_{k,k-1} i_{x|k-1} \quad (14)$$

一步预测均方差方程

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + G_{k,k-1} Q_{k,k-1} G_{k,k-1}^T \quad (15)$$

滤波增益方程

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T (H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (16)$$

状态估计方程

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k (Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}) \quad (17)$$

估计均方差误差方程

$$P_k = (I - K_k H_k) P_{k,k-1} \quad (18)$$

其中, R 、 Q 分别为测量噪声 V_k 和系统噪声 f_{dis} 的方差阵, 近似为非相关的高斯白噪声。因此, 基于以上的卡尔曼滤波基本方程, 只要给定初值 X_0, P_0 , 就可以递推计算 k 时刻的轴向 AMB 的状态估计值。

3 仿真和试验验证

为了验证上述算法的有效性, 本文采用 SIMULINK 对经典 PID 控制, 以及基于扩展卡尔曼滤波的改进 PID 控制两种算法进行了对比仿真, 并利用实际 AMB 系统进行了试验验证。表 1 给出轴向 AMB 系统的主要参数。

表1 轴向 AMB 的主要参数

参数	数值	参数	数值
转子质量/kg	281	气隙/mm	0.75
电流刚度/(N·A ⁻¹)	5 143	位移刚度/(N·mm ⁻¹)	-4 594.1
最大电流/A	10	比例系数	3
积分系数	10	微分系数	0.022

在扩展卡尔曼滤波算法中, 将系统噪声近似为高斯白噪声, 设置采样周期为 0.1 ms, 基于试验数据的统计分析, 并经过参数整定, 给定轴向 AMB 状态和估计均方误差初值如下:

$$X_0 = [-0.75, 0],$$

$$P_0 = \begin{bmatrix} 8.37 \times 10^{-16} & 1.67 \times 10^{-11} \\ 1.67 \times 10^{-11} & 3.34 \times 10^{-7} \end{bmatrix}$$

3.1 MATLAB 仿真试验

本文通过 MATLAB/Simulink 工具箱,建立了两种控制算法的仿真模型,分别如图 6 和图 7 所示。其中,转子参考位置设为 0,电流环采用传递函数表示,经参数辨识得到

$$G(s)=\frac{0.1034s^2+2234s+7.237\times10^5}{s^2+2713s+7.43\times10^5}$$

两个模型的 PID 控制参数、控制对象模型参数以及设置的控制和量测噪声参数相同。扩展卡尔曼滤波器采用 S 函数设计。

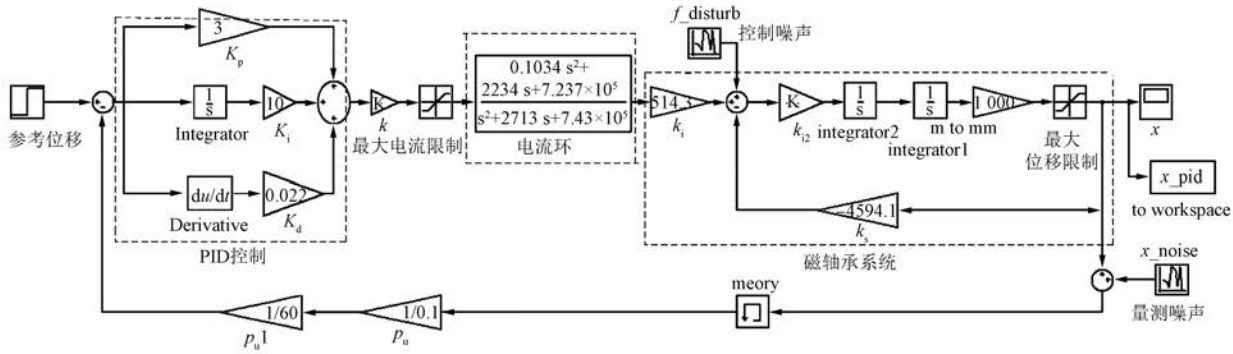


图 6 轴向磁轴承的 PID 控制算法仿真

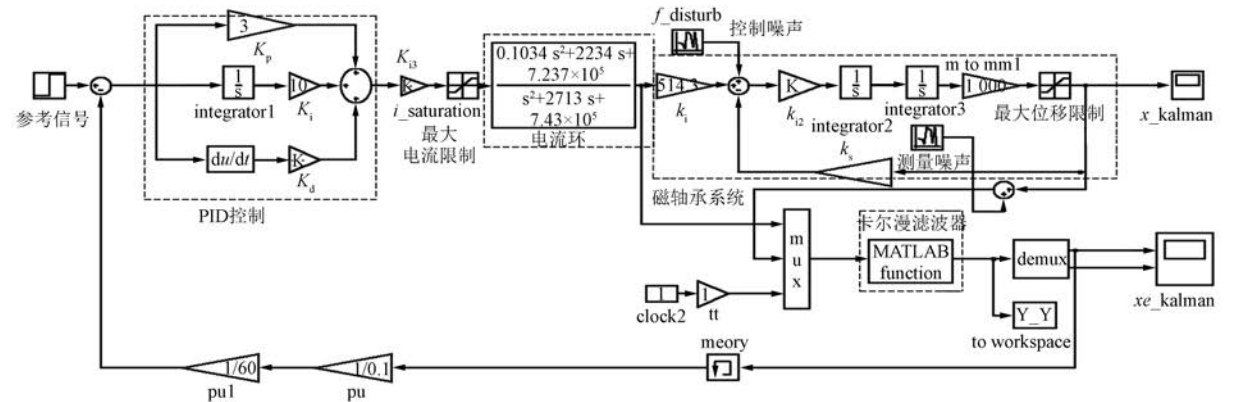


图 7 轴向 AMB 的扩展卡尔曼滤波控制算法仿真

根据所建立的模型进行转子起浮特性仿真,得到了两种算法下转子偏心位移变化曲线的仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知,相对于 PID 控制,采用基于扩展卡尔曼滤波器的改进 PID 算法对应的转子起浮过程更加平滑和稳定,超调量明显降低,稳定悬浮的

精度更高。
3.2 AMB 平台试验
为进一步验证所提算法的有效性,以 DSP (TM320F28335)+FPGA (EP4C30) 为核心搭建了硬件控制平台,采用 Labview 上位机实时采集 AMB 转子的位移信号,在实验室的卧式电 AMB 样机装置上进行了试验验证。

AMB 系统样机装置照片如图 9 所示。

图 10、图 11 分别给出了转子起浮过程和稳定悬浮时两种算法对应的转子偏心位移曲线试验结果。可知,两种算法下 AMB 系统的调节时间基本一致;经典 PID 控制算法下转子位移超调量约为 64%,且起浮过程中出现振荡。基于扩展卡尔曼滤波的改进 PID 控制算法超调量约为 14%,起

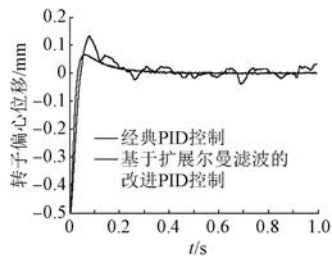


图 8 两种算法下仿真的转子偏心位移

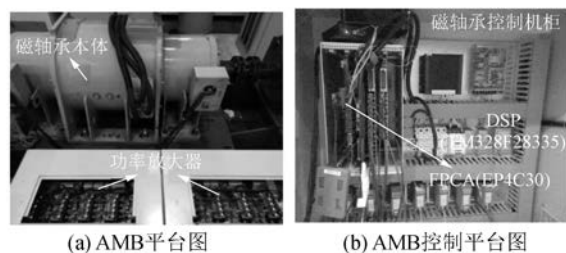


图9 AMB系统

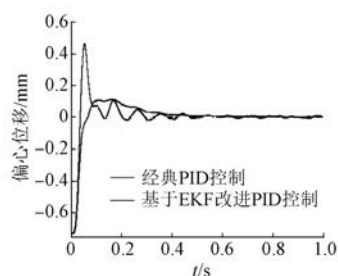


图10 起浮过程中,两种算法下试验的转子偏心位移

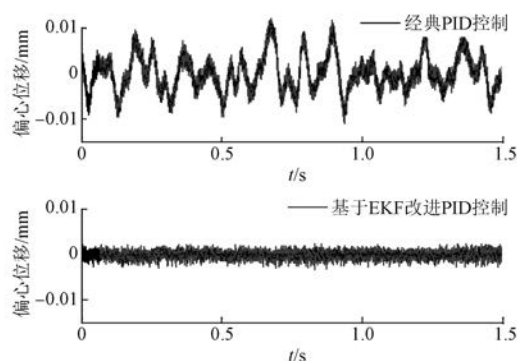


图11 稳定悬浮,两种算法下试验的转子偏心位移

浮过程没有振荡;通过观察和比较两种算法下的稳态精度,可以明显看出改进算法在稳定悬浮时的转子位移精度相对于经典PID算法提高了3~4倍。经分析,由于实际的AMB系统噪声不完全为白噪声,因而无法采用改进PID算法完全滤除,滤波后的转子位移仍然存在一定的误差。

4 结 语

本文从AMB的经典PID控制出发,考虑噪声对转子位置的干扰,提出了一种基于扩展卡尔曼滤波的PID改进算法。以轴向AMB为研究对象建立了转子运动方程,通过电磁力的非线性化和状态方程的离散化,得到AMB的扩展卡尔曼滤波

模型。通过对该算法与经典PID控制算法的对比仿真和试验研究,得出的结果表明:采用扩展卡尔曼滤波的改进PID算法,能够明显改善转子起浮过程中的动态性能,减小超调量,避免转子位移的振荡;同时,系统能够有效抑制噪声的干扰,转子位移控制的稳态精度得到显著提高,由此充分验证了该算法的可行性,且具备较好的鲁棒性。

【参考文献】

- [1] SCHWEITZER G, MASLEN E H. Magnetic Bearing: theory, design, and application to rotating machinery [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [2] PSONIS T K, NIKOLAKOPOULOS P G, MITRONIKAS E. Design of a PID controller for a linearized magnetic bearing [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2015(10): 1-12.
- [3] YAO D, WANG J W, LIU Y. Enhancing working performance of active magnetic bearings using improved fuzzy control and Kalman-LMS filter [J]. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 29(4): 1343-1353.
- [4] KUSEYRI İ S. Robust control and unbalance compensation of rotor active magnetic bearing systems [J]. Journal of Vibration & Control, 2012, 18(6): 817-832.
- [5] 苏义鑫,王娟,胡业发.磁悬浮轴承的变参数PID控制[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2004, 26(2): 35-37.
- [6] FU H Y, LIU P F, ZHANG Q C, et al. Neural network analysis of the magnetic bearing systems [J]. Applied Mechanics & Materials, 2010, 29-32(8): 17-41.
- [7] DARBANDI S M, HABIBOLLAHI A, BEGZAD M, et al. Sensor runout compensation in active magnetic bearings via an integral adaptive observer [J]. Control Engineering Practice, 2016(48): 111-118.
- [8] LI L, KÄSTNER W, WORLITZ F. Adaptive Kalman filter for active magnetic bearings using softcomputing [C] // 14th International Symposium on Magnetic Bearings, Linz, Austria, 2014: 91-96.
- [9] 秦永元,张洪钺,汪叔华.卡尔曼滤波与组合导航原理[M].西安:西北工业大学出版社, 2015.
- [10] 郑大钟.线性系统理论[M].北京:清华大学出版社, 2002.

收稿日期: 2017-07-10