

基于模糊自适应的主动磁悬浮系统稳定性控制

肖闽进 张建生 钱显毅

(常州工学院电子信息与电气工程学院, 常州, 213002)

摘要:针对主动磁悬浮主轴非线性不稳定的系统特征,提出了一种模糊参数自适应 PID 控制方法。该方法根据系统状态,通过模糊推理过程,产生一组 PID 控制器最优控制参数,以实现系统的自适应控制。构建了磁悬浮主轴的闭环结构模型并进行了系统仿真实验,结果表明,模糊参数自适应 PID 控制方法超调控制性能优于常规方法 12.5%,并具有良好的抗扰动性能。

关键词:模糊控制;模型;自适应 PID 控制;磁悬浮系统;稳定性

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2013)03-0390-06

Stability Control of Active Magnetic Levitation System Based on Fuzzy Adaptive Theory

Xiao Minjin, Zhang Jiansheng, Qian Xianyi

(School of Electronic Information & Electrical Engineering, Changzhou Institute of Technology, Changzhou, 213002, China)

Abstract: Aiming at the nonlinearity and non-stability of the active magnetic levitation system, a fuzzy adaptive PID control method is proposed. According to the system state, a set of the most optimal control parameter for PID controller is produced through the fuzzy inference process, so as to realize the adaptive control. A closed-loop structure model of the magnetic suspension spindle is constructed and the system simulation experiments are carried out. The results show that the overshoot control performance of fuzzy parameters adaptive PID control method is better than that of the conventional method 12.5% and the method has good performance in the disturbance rejection.

Key words: fuzzy control; model; adaptive PID control; magnetic levitation system; stability

主动磁悬浮主轴系统中,控制器是影响系统性能的核心部件,其控制策略设计的合理性和有效性对系统的稳定性有直接的影响。常规的 PID 或状态反馈控制,对于主轴转速稳定或工作状态恒定时效果明显,当主轴模型参数有变化,控制器采用固定参数就不能满足磁悬浮轴承系统的实时控制^[1]。目前控制策略的改进有遗传算法、单神经元、变积分算法等。遗传算法优化了控制器参数,但如何选择优化参数具有难度;单神经元 PID 算法,其跟踪效果对实时性较高的系统并不理想;变积分算法会

在系统控制结构转换时引起一定的扰动^[2-3]。文中根据磁悬浮轴承对系统控制的要求和智能控制的特性,提出了主动磁悬浮轴承模糊参数自适应 PID 控制的实现方法,对超调抑制、静态误差消除、抗扰动等影响主动磁悬浮系统稳定控制的性能进行了仿真研究。

1 主动磁悬浮系统数学模型

主动磁悬浮主轴由两个径向磁悬浮轴承和一个轴向磁悬浮轴承构成,形成 2 个径向和一个轴向

的 5 自由度磁悬浮系统。对于刚性主轴,上述 5 自由度的磁悬浮系统可以解耦为 5 个单自由度磁悬浮轴承系统,实际的系统试验表明解耦处理能够满足系统控制性能^[4]。单自由度磁悬浮系统模型如图 1 所示。

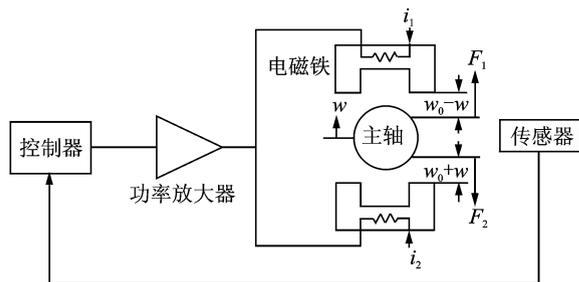


图 1 单自由度磁悬浮系统模型

图中, F_1 和 F_2 为两个电磁铁产生的电磁力, w_0 和 w 分别表示主轴的气隙半径和主轴的偏移距离。若以 i_0 为偏置电流, i 为控制电流, 则图中的 $i_1 = i_0 + i$, $i_2 = i_0 - i$ 分别表示两个线圈的激磁电流。为建立系统的开环控制模型, 当不考虑传感器的反馈环节时, 令 $F = F_1 - F_2$ 为主轴受到的电磁合力。根据牛顿定律, 有

$$F = mg + m \frac{d^2 w}{dt^2} \quad (1)$$

式中: m 为主轴质量, 根据电磁学理论, 电流 i 产生的磁力可确定为

$$F(i, w) = k \frac{i^2}{w^2} \quad (2)$$

式中: $k = \frac{\mu_0 n^2 A}{4}$, 其中 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空中的磁导率; A 为电磁铁磁极有效面积; i 为线圈电流; n 为线圈匝数。选择电磁合力 F 的方向与位移 w 方向一致, 并考虑两个线圈的激磁电流, 有

$$F(i, w) = k \left[\frac{(i_0 + i)^2}{(w_0 - w)^2} - \frac{(i_0 - i)^2}{(w_0 + w)^2} \right] \quad (3)$$

式中 w_0 为气隙长度。将式(3)代入式(1), 得到磁悬浮主轴单自由度精确运动方程为

$$k \left[\frac{(i_0 + i)^2}{(w_0 - w)^2} - \frac{(i_0 - i)^2}{(w_0 + w)^2} \right] = mg + m \frac{d^2 w}{dt^2} \quad (4)$$

以上精确数学模型为二次非线性微分方程, 电磁力与气隙及激磁电流为非线性关系, 对于实际系统控制, 这将在控制理论的应用上遇到困难。考虑到在磁悬浮主轴系统中, 气隙和激磁电流变化范围很小, 可以在气隙 w 和激磁电流 i 的静态工作点附

近进行线性化处理, 并据此建立线性化数学模型^[4]。将式(2)在静态工作点 $i = i_0$, $w = w_0$ 的领域内展开为泰勒级数

$$F(i, w) = F(i_0, w_0) + \frac{\partial F(i_0, w_0)}{\partial i} (i - i_0) + \frac{\partial F(i_0, w_0)}{\partial w} (w - w_0) + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 F(i_0, w_0)}{\partial i^2} (i - i_0)^2 \right] + \frac{\partial^2 F(i_0, w_0)}{\partial w \partial i} (w - w_0)(i - i_0) + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 F(i_0, w_0)}{\partial w^2} (w - w_0)^2 \right] + \dots$$

上式中忽略二次以上各项, 计算并代入偏导数

$$\frac{\partial F(i_0, w_0)}{\partial i} = -2k \frac{i_0^2}{w_0^3} = -\frac{\mu_0 n^2 A i_0^2}{2w_0^3} = -k_w$$

$$\frac{\partial F(i_0, w_0)}{\partial w} = 2k \frac{i_0}{w_0^2} = \frac{\mu_0 n^2 A i_0}{2w_0^2} = k_i$$

得到

$$F(i, w) \approx F(i_0, w_0) + k_i (i - i_0) - k_w (w - w_0) \quad (5)$$

取主轴在平衡位置时可得边界条件

$$F(i_0, w_0) = mg \quad (6)$$

将式(5,6)代入式(1), 并注意到 $k_i i_0 - k_w w_0 = 0$, 得到线性化后的磁悬浮系统开环数学模型

$$m \frac{d^2 w}{dt^2} = k_i i - k_w w \quad (7)$$

对式(7)进行拉氏变换, 得到以位移 W 为输出, 控制电流 I 为输入的系统开环传递函数

$$G(s) = \frac{W(s)}{I_w(s)} = \frac{k_i}{ms^2 + k_w} \quad (8)$$

上述传递函数式(8)在复平面右半平面上有一个极点, 根据系统稳定性判据, 磁悬浮系统是开环不稳定系统。必须设计一个反馈控制器, 保证磁悬浮系统稳定。图 1 中, 位置传感器将主轴位置信号实时反馈至控制器, 构成了闭环磁悬浮系统。对此闭环系统, 需要引入适当的控制策略以满足系统的稳定性特性^[5]。

2 磁悬浮系统的模糊参数自适应控制

2.1 模糊参数自适应 PID 控制结构与控制策略

模糊控制是建立在模糊集合论、模糊语言变量和模糊逻辑推理基础上的一种非线性控制策略。模糊控制系统根据控制过程中系统偏差及偏差变化率来实现对系统的控制。对于主动磁悬浮轴承

系统,此偏差和偏差变化率对应于主轴的位置偏差及位置偏差变化率。模糊参数自适应PID控制结构如图2所示。

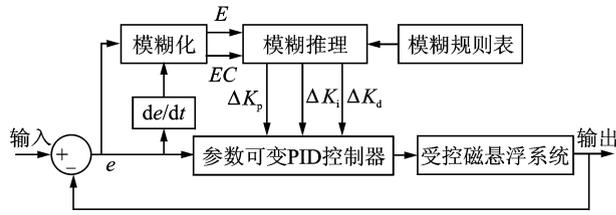


图2 模糊参数自适应PID控制结构

由图2可知,模糊参数自适应PID由模糊控制部分和参数可变PID部分组成。图中参数 e 及微分量 de/dt 分别表示偏差和偏差变化率,输出变量与PID参数的关系为

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (9)$$

式中: K_{p0} 、 K_{i0} 和 K_{d0} 为 K_p 、 K_i 和 K_d 参数的初始值; ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 是模糊控制器的输出。控制策略是在运行中实时检测 e 和 de/dt ,通过模糊化转变为模糊语言变量 E 和 EC ,连续计算PID参数与 E 和 EC 之间的模糊关系,根据模糊控制规则,对PID的比例系数 K_p 、积分时间常数 K_i 和微分时间常数 K_d 进行在线修正,以实现系统偏差的控制参数自适应调整,使磁悬浮系统具有良好的动态和静态特性^[6-8]。

2.2 控制参数模糊化过程及变量隶属函数的确定

磁悬浮轴承系统输入参数模糊化过程,就是对于主轴位置偏差 e 及偏差变化率 de/dt 精确量,经过适当量化后,将这两个变量定义为在其论域上的隶属度函数,计算其属于模糊集合的隶属度,得到模糊语言变量 E 和 EC 。具体设计中,对 e 和 de/dt ,在其模糊论域上定义7个模糊集合:[NB, NM, NS, Z0, PS, PM, PB]。其中NB, NM, NS, Z0, PS, PM, PB分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大。类似地,对于输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d ,考虑到适当的精度,分别定义为在其模糊论域上的7个模糊子集。模糊语言变量 E 和 EC 隶属度函数的选择:其中的NB及PB分别采用zmf函数和smf函数,其余采用三角形trimf函数,以提高计算效率^[9]。 E 和 EC 的隶属度函数如图3所示。

根据模糊论域确定量化因子及隶属度函数的

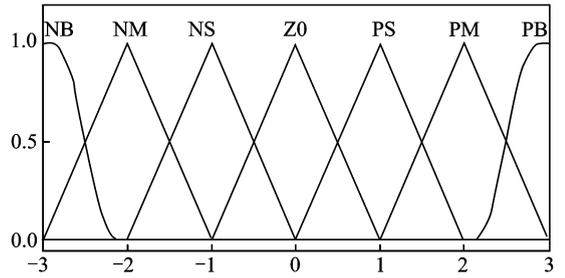


图3 变量 E 和 EC 的隶属度函数

方法是:若变量的基本论域为 $[-M, M]$,选定的模糊论域为 $[-N, N]$,则由 $M = K_L \times N$ 可以确定量化因子 K_L 。图3中模糊语言变量 E 和 EC 的模糊论域为 $[-3, 3]$ 。当 E 和 EC 的基本论域为已知时,根据选定的模糊论域可以确定量化因子 K_E 和 K_{EC} 。同理,可得到 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 的隶属度函数。

2.3 模糊控制规则表的建立

实现模糊控制器的关键是确定模糊控制规则表。模糊控制规则表是根据专家经验在参考大量手动控制实践基础上建立的一系列控制规则,这些规则本质上是参数 K_p 、 K_i 和 K_d 对系统控制性能影响的具体表述。 K_p 、 K_i 和 K_d 三个参数对系统动态特性、响应时间和稳态特性的影响为: K_p 的主要作用是调整响应速度; K_i 的主要作用是消除系统稳态误差; K_d 的主要作用是改善系统动态特性。

根据以上 K_p 、 K_i 和 K_d 参数对系统控制性能影响,得到输入与输出变量关系的模糊参数自适应控制原则如下:

(1)当偏差 $|e|$ 很大时,为提高响应速度,迅速降低误差, K_p 应取较大值,同时为防止微分过饱和, K_d 应取较小值。为避免系统因积分饱和和产生过大的超调,要限制积分作用,取 $K_i = 0$ 。

(2)当 $(e \times de/dt) < 0$ 时,系统输出有向稳态值变化的趋势, K_p 应取较大值,以尽快消除偏差,同时 K_i 和 K_d 取较小值。

(3)当 $(e \times de/dt) > 0$ 时,系统输出开始偏离稳态值,偏差向增大方向变化,为控制超调, K_d 应当取较大值, K_p 和 K_i 取较小值。

(4)偏差变化量 $|de/dt|$ 反映了偏差的变化速率, $|de/dt|$ 的数值越大, K_i 的取值应增大,同时 K_p 的取值应减小。

对于上述 K_p 、 K_i 和 K_d 参数对各种偏差和偏差变化量对控制作用,结合工程实践经验,得到磁悬浮轴承的模糊控制规则表如表1~3所示。

表 1 ΔK_p 的模糊规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z0	Z0
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z0	NS
NS	PM	PM	PM	PS	Z0	NS	NS
Z0	PM	PM	PS	Z0	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z0	NS	NS	NM	NM
PM	Z0	Z0	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z0	Z0	NM	NM	NM	NB	NB

表 2 ΔK_i 的模糊规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z0	Z0
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z0	Z0
NS	NB	NM	NS	NS	Z0	PS	PS
Z0	NM	NM	NS	Z0	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z0	PS	PS	PM	PB
PM	Z0	Z0	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z0	Z0	Z0	PM	PM	PB	PB

表 3 ΔK_d 的模糊规则表

E	EC						
	NB	NM	NS	Z0	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z0
NS	Z0	NS	NS	NM	NS	NS	Z0
Z0	Z0	NS	NS	NS	NS	NS	Z0
PS	Z0						
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

2.4 模糊推理与解模糊算法

模糊推理过程是对于输入模糊变量,根据模糊控制规则进行模糊推理或是求解模糊关系方程,得到模糊控制输出变量模糊子集的过程。与系统性能直接相关的模糊推理算法可以表述为

$$\text{If (Perform index is } A_{ij} \text{) then } (\Delta K_p \text{ is } A_{jk}) \text{ and } (\Delta K_i \text{ is } A_{il}) \text{ and } (\Delta K_d \text{ is } A_{lm}) \quad (10)$$

性能参数 Perform index 可以是任何可以观测的动静参数,如稳态误差、超调量等,其优点是调整精度较高。但由于性能参数的获得需要若干完整的控制过程,实际控制中实时性较差。本文设计的基于误差驱动的模糊推理算法为

$$\text{If } (E \text{ is } A_{11}) \text{ and } (EC \text{ is } A_{12}) \text{ then } (\Delta K_p \text{ is } A_{21}) \text{ and } (\Delta K_i \text{ is } A_{22}) \text{ and } (\Delta K_d \text{ is } A_{23}) \quad (11)$$

式(10)中 A_{ij} 取值为模糊值域[NB,NM,NS,Z0,PS,PM,PB]。若模糊变量 E 和 EC 各有 L 个模糊子集,则输出变量对应 L^2 条隶属度规则。根据表 1,3 及式(11),可以得到 3 个输出变量 $\Delta K_p, \Delta K_i$ 和 ΔK_d 对所有不同 E 和 EC 的模糊规则调整的隶属度。

模糊推理的结果是一组模糊矢量,不能直接作为控制变量,要经过解模糊化,得到的精确量才能作为输出控制量。解模糊化是模糊控制作用空间到精确控制作用空间的一个映射,解模糊有多种算法^[10],文中根据控制对象设计的加权平均算法为

$$\Delta K_v = \frac{\sum_{j=1}^L W_{vj} u_j (\Delta K'_v)}{\sum_{j=1}^L u_j (\Delta K'_v)} \quad (12)$$

式中: ΔK_v 为加权平均算法对于模糊集合 $\Delta K'_v$ 的判决结果; W_{vj} 为权重系数,取值于论域中的每个元素; $v \in (p, i, d)$; u_j 表示隶属度。加权平均算法在突出主要信息的同时又兼顾其余信息,实践表明,采用加权平均算法可以满足系统的控制要求^[11-12]。

3 工程应用仿真分析

对于图 1 所示的磁悬浮系统模型,其中功率放大器实际采用电压电流型功率放大器,增益为 K_a ,位移传感器采用电涡流传感器,增益为 K_s ,磁悬浮部分开环传递函数具有式(8)的形式,则闭环系统结构如图 4 所示。

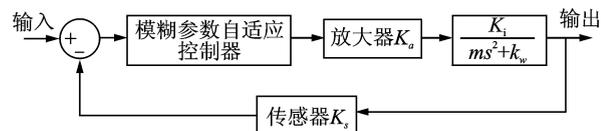


图 4 磁悬浮系统闭环结构图

采用一组工程实际数据进行 MATLAB/Simulink 仿真,磁悬浮主轴系统部分参数:主轴质量 12 kg,位移刚度 2.1028×10^6 N/m,电流刚度 420.56 N/A,放大器增益 3.6,位移传感器灵敏度 5 000 V/m。磁悬浮系统仿真电路如图 5 所示。仿真电路由模糊控制器、参数可变 PID 控制器 C-PID,磁悬浮轴承开环传递函数 AMB、放大器及传感器增益模块组成。

图 6 为主轴位移响应曲线,图中实线为常规 PID 控制响应曲线,虚线为模糊参数自适应 PID 控制响应曲线。信号源加阶跃信号,主轴从平衡位

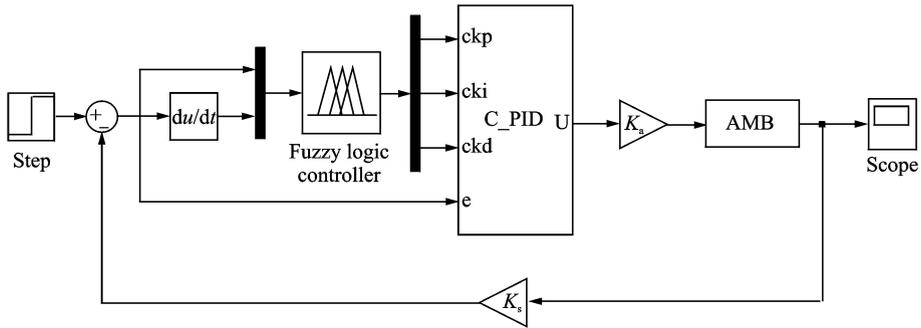


图5 模糊参数自适应控制仿真电路

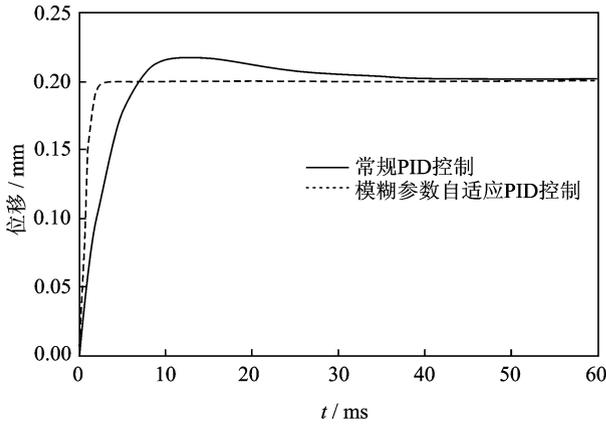


图6 主轴位移响应曲线

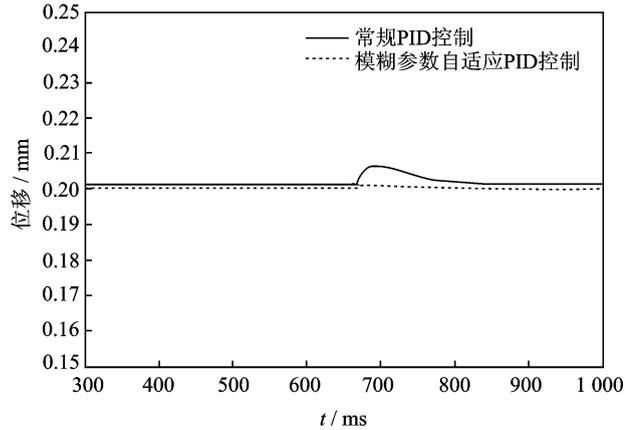


图7 扰动试验性能比较图

置起浮 0.2 mm 到达平衡位置,模糊参数自适应 PID 控制的上升时间小于 3 ms,位移无超调,不存在稳态偏差;常规 PID 上升时间 7 ms,达到稳态的时间大于 25 ms,超调量 12.5%,且存在稳态偏差。比较可见,模糊参数自适应 PID 控制在位移和时间域的控制稳定性均优于常规 PID 控制。

图 7 为磁悬浮系统扰动试验结果,图中,在 670 ms 处加一幅度为 0.08 mm 的干扰脉冲,由图可见,对于磁悬浮主轴在平衡点位置附近受到小偏差范围的扰动时,采用常规 PID 和模糊参数自适应 PID 控制都可以使系统趋于稳定,但模糊参数自适应 PID 控制受到干扰时,其控制参数能够快速响应并自适应调整输出量,使得出现的偏差极小,并且能够迅速恢复平衡位置,与常规 PID 控制相比,模糊参数自适应 PID 控制具有较强的抗干扰性能。

4 结束语

磁悬浮系统是非线性不稳定系统,系统控制的目标不仅要使磁悬浮主轴在其平衡位置能够稳定运行,而且要在主轴的起浮过程中,或是受到扰动时也能够快速进入稳定运行状态。针对这一目标,

文中运用模糊自适应方法,实现了磁悬浮系统的模糊参数自适应 PID 控制器。仿真结果表明,由于模糊参数自适应 PID 的三参数随着系统误差和误差变化率的改变而连续改变,使得模糊参数自适应 PID 控制具有良好的动态和稳态特性,其控制指标全面优于常规 PID 控制,有效地扩展了主动磁悬浮系统的稳定域;并且模糊参数自适应 PID 控制算法规则精简,运算量适中,有利于采用 DSP 或高性能单片机实现智能控制。

参考文献:

- [1] 汤洁,李训铭.单自由度磁悬浮系统的状态反馈控制[J].计算机测量与控制,2005,13(5):472-473.
Tang jie,Li Xunming. States feedback control of single-degree-freedom magnetism suspension system [J]. Computer Measurement & Control, 2005, 13 (5):472-473.
- [2] 邵敏强,陈卫东,徐庆华.基于 PID 控制方法的模糊变增益振动主动控制试验研究[J].南京航空航天大学学报,2012,44(1):20-24.
Shao Minqiang, Chen Weidong, Xu Qinghua. Experimental analysis of active vibration control based on PID method with variable fuzzy gain[J]. Journal of

- Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(1): 20-24.
- [3] 吴华春,胡业发,魏莉,等.磁悬浮磨削主轴综合试验研究[J].机械设计,2008,25(10):40-43.
Wu Huachun, Hu Yefa, Wei Li, et al. A study on the synthetical experiment for main spridle magnetic suspension grinding [J]. Journal of Machine Design, 2008, 25(10): 40-43.
- [4] 陆新江,段吉安,李群明.自调整PID控制算法及其在磁悬浮平台中的应用[J].工业仪表与自动化装置,2005(3):29-32.
Lu Xinjiang, Duan Ji'an, Li Qunming. Self-adjusting PID algorithm and its application to an electro-magnetic suspension platform[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2005(3): 29-32.
- [5] 张保强,郭勤涛,陈国平,等.基于复模态模型修正方法的磁悬浮轴承支承参数识别[J].南京航空航天大学学报,2010,42(6):748-752.
Zhang Baoqiang, Guo Qintao, Chen Guoping, et al. Parameter identification of active magnetic bearing support based on finite element model updating using complex modal data[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(6): 748-752.
- [6] Hajjajie H, Ouladsne M. Modeling and nonlinear control of magnetic levitation system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(8): 831-838.
- [7] Shamel I E, Khamesee M B, Huissoon J P. Nonlinear controller design for a magnetic levitation device[J]. Microsystem Technologies, 2007, 13(5): 831-835.
- [8] Hajjaji A E, Ouladsine M. Modeling and nonlinear control of magnetic levitation system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(4): 831-838.
- [9] 刘叔军,盖晓华,樊京,等. MATLAB7.0 控制系统应用与实例[M].北京:机械工业出版社,2006:330-338.
Liu Shujun, Gai Xiaohua, Fan jing, et al. MATLAB7.0 control system applications and experiments [M]. Beijing: China Machine Press, 2006: 330-338.
- [10] Callai T C, Santos J E S, Sumar R R. Applying the potentiality of using fuzzy logic in PID control design [J]. Advances in Soft Computing Methodologies and Applications, 2005, 32(1): 193-204.
- [11] Mansour S E, Kember G C, Dubay R, et al. Online optimization of fuzzy logic-PID of a thermal process[J]. ISA Transactions, 2005, 44(4): 305-314.
- [12] Michimasa K, Mario B, Takeshi I, et al. Construction of a fuzzy control system for a bioreactor using biomass support partivles[J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2002, 17(3): 207-213.