

磁悬浮的控制研究与仿真

缪敏娜, 孙培德, 张红申

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 201620)

摘要:单自由度磁悬浮控制研究是研究多自由度磁悬浮基础。首先介绍基于单自由度磁悬浮控制实验系统及其工作原理, 并建立数学模型。基于磁悬浮系统数学模型复杂性, 主要研究如何更好地控制其悬浮性能。从基本控制方法入手, 分别给出各种控制方法下数学模型, 利用劳斯判据等方法进行参数整定以及比较各个控制方法仿真结果及其控制效果和对系统产生影响。最后, 介绍模糊自整定 PID 控制方法原理, 根据系统特点, 设计并利用 matlab 软件对其进行仿真, 其仿真结果说明智能控制方法在此非线性系统控制上具有一定优势, 也是今后研究方向。

关键词:控制器; 模糊控制; 主动磁悬浮; 仿真

中图分类号: TP273 **文献标识码:** B

Research and Simulation of Magnetic Floating Control

MIAO Min-na, SUN Pei-de, ZHANG Hong-shen

(College of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 201620, China)

ABSTRACT: The research of single degree of freedom magnetic floating control system is the base of multi degree of freedom magnetic floating control system. Based on the principle of the control system, the paper introduces an experimental system, founds the mathematical modeling of single degree of freedom magnetic floating control system. Because of the complexity of the model, the paper mainly studies how to improve the properties of the levitation. First, the paper studies the basic method and gives out the methods for adjusting parameters and the simulation results. Then, the paper introduces the method of self-adjusting fuzzy-PID control and its simulation result. Comparing to the simulation results, the advantage of intelligence control method is obvious, so it will be the main investigative method for the future study.

KEYWORDS: Controller; Fuzzy control; Active magnetic floating; Simulation

1 引言

磁悬浮技术的发展, 带动了磁悬浮轴承的广泛应用。由于传统的轴承存在很多不足: 易磨损, 存在噪音和污染等。高效率、高安全性、无机械摩擦和高转速的磁悬浮轴承将被广泛应用于能源、交通、航空航天等领域^[1]。磁悬浮轴承主要有 3 大类: 有源磁悬浮轴承, 即主动磁轴承; 无源磁悬浮轴承, 即被动轴承; 混合磁悬浮轴承。磁悬浮轴承主要被用于支撑元件、减振器、动力吸振器等。现在磁悬浮轴承最为一个研究热点, 多是以基本控制方式入手, 而且在工业运用中, 也是 PID 控制方法为主导。本文研究的是单自由度的磁悬浮实验系统与工作原理。单自由度磁悬浮控制系统数学模型是轴向磁力轴承控制的基础, 在一定条件下也是径向磁力轴承控制的基础, 对研究径向 4 自由度的磁悬浮有一定的指导意义。文中除了从经典控制方法对其实现悬浮之外, 另外

从智能控制方法为手段对其性能提高有很大提高。

2 磁悬浮实验系统介绍

磁悬浮实验系统主要由铁心、线圈、涡流传感器、控制器、功率放大器以及被控对象等元器件组成, 如图 1 所示。

其工作原理: 被控对象上方的电磁铁产生能够抵消被控对象自身重力的电磁力, 从而使被控对象悬浮在空中; 当受到外界干扰或控制精度的影响时, 被控对象产生一定位移, 通过位移传感器检测到其变化, 再由控制器控制电磁铁上的电流变化, 从而产生一个变化的电磁力, 使得被控对象保持在平衡位置。

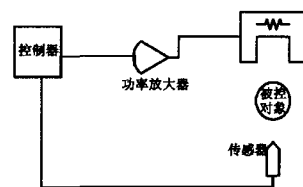


图1 单自由度磁悬浮轴承的简化模型

3 磁悬浮实验系统的数学模型

在实验中,采用差动励磁方式。所谓差动励磁就是在磁铁中有2个作用力方向相反的电磁铁在工作,这种布局使得系统既能产生正向力,又能产生反向力。当转子偏离参考位置时,由传感器测出其偏离位移,再通过控制器产生控制电流,经过功率放大器的作用,使一个电磁铁的电流为偏置电流与控制电流之和,而另一个为偏置电流与控制电流之差,从而分别改变2个电磁铁产生的吸力大小,使被控对象能稳定在给定位置,如图2所示。图中: x_0 和 x 分别为转子的气隙半径和转子的偏心距离; $i_1 = i_0 + i_x$ 和 $i_2 = i_0 - i_x$ 分别为2个线圈的激励电流, i_0 为偏置电流, i_x 为控制电流; F_1 和 F_2 分别为2个电磁铁产生的电磁力。

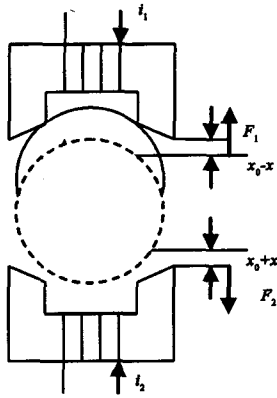


图2 受力模型

以被控对象的受力情况,由牛顿定律可以列出单自由度运动方程的力学模型:

$$P(t) + F - mg = m d^2x/dt^2 \quad (1)$$

式中: P 为干扰力, t 为干扰力的作用时间, m 为质量, g 为重力加速度, F 为电磁合力。由麦克斯韦公式得到电磁力表达式:

$$f = ki^2/x^2; k = \mu_0 N^2 A/4 \quad (2)$$

式中: N 为线圈匝数; A 为磁场有效面积, m^2 ; μ_0 为真空磁导率; i 为线圈电流, A 。因此,电磁合力为

$$F = k \left[\frac{(i_0 + i_x)^2}{(x_0 - x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(x_0 + x)^2} \right] \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),可得

$$P(t) + k \left[\frac{(i_0 + i_x)^2}{(x_0 - x)^2} - \frac{(i_0 - i_x)^2}{(x_0 + x)^2} \right] - mg = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (4)$$

此数学模型为一个二次非线性微分方程,而实际工程控制系统一般都采用线性控制理论。因此,为了便于对控制系统的设计与分析,需要对电磁力公式进行线性化^[1]。

可得到实验系统在以位移 X 为输出,电流 I 为输入的传递函数模型,即

$$G(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{k_i}{ms^2 - k_x} \quad (5)$$

式中: $k_x = \mu_0 N^2 A i_0^2 / (2x_0^3)$ 为位移刚度, $k_i = \mu_0 N^2 A i_0 / (2x_0^2)$ 为

电流刚度。

4 控制器的设计

控制系统是系统的最关键部分,系统动态性能的好坏主要取决于所采用的控制器的控制规律。目前,工业上应用最为广泛的是PID控制,它是在经典控制理论的基础上,通过长期的工程实践总结形成的一种控制方法,其结构改变比较灵活,鲁棒性较强,易于实现,在大多数工业生产过程中控制效果较为显著。

由式(5)可以看出该对象有2个实数极点,其中一个在正半平面,故是一个不稳定系统,必须通过闭环控制,即加一个负反馈控制。由于磁悬浮轴承系统本身不是一个自平衡系统,控制器的最重要目的就是使系统稳定。选用劳斯-霍尔维茨判据来确定系统的稳定范围,然后在稳定域内寻找满足系统性能品质的控制参数。

4.1 PI控制

假设PI控制器的传递函数为

$$G_C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} \right)$$

式中: K_p 为比例系数, T_I 为积分时间常数。

以下推导都是建立在忽略功率放大器和位移传感器的惯性假设之下,则系统地闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{k_i k_1 K_p (T_I s + 1)}{m T_I s^3 - k_x T_I s + k_1 k_2 k_i K_p T_I s + k_1 k_2 k_i K_p} \quad (9)$$

式中: k_1 为功率放大器的增益, k_2 为位移传感器的增益。

根据劳斯判据,式(9)的特征方程为,

$$m T_I s^3 - k_x T_I s + k_1 k_2 k_i K_p T_I s + k_1 k_2 k_i K_p = 0$$

则劳斯矩阵的形式见表1。

表1 劳斯矩阵

劳斯阵列表		
s^3	$m T_I$	$k_1 k_2 k_i K_p - k_x T_I$
s^2	0	$k_1 k_2 k_i K_p$
s	$-\infty$	
s^0		

劳斯判据稳定性的条件:劳斯阵的第一列元素全为正数。因此,PI调节器不能满足系统的稳定性要求。

考虑到系统的特殊性,只能采用带有微分环节的控制。当采用PD控制器时,系统会产生一个静态误差,故在工程中,往往采用经典PID。

4.2 PD控制器

假设控制器的传递函数为

$$G_C(s) = K_p (1 + T_D s)$$

式中: T_D 为微分时间常数。此时,系统的闭环传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{k_i k_1 K_p (T_D s + 1)}{ms^2 + k_1 k_2 k_i K_p T_D s + k_1 k_2 k_i K_p - k_x} \quad (10)$$

令 $k = k_1 k_2 k_i K_p - k_x$ 为磁力轴承刚度,一般选取 $k = (1 \sim 9)k_x$ 。

式(10)的特征方程为

$$\Delta = ms^2 + k_1 k_2 k_i K_p T_D s + k_1 k_2 k_i K_p - k_x$$

令

$$\omega_n = \sqrt{k/m}$$

$$\varepsilon = k_1 k_2 k_i K_p T_D / (2 \sqrt{mk})$$

一般 $\varepsilon = 0.5 \sim 1.0$,工程设计上常常以 $\varepsilon \approx 0.707$ 作为设计依据。由此,可以推出 T_D 和 K_p (此时 $k = 6k_x$)。

4.3 PID 控制器

4.3.1 PID 控制系统的模型建立

设 PID 控制器的传递函数为

$$G_c(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s)$$

则系统的闭环传递函数:

$$\Phi(s) = k_1 k_i K_p (T_I T_D s^2 + T_I s + 1) / [T_I m s^3 + k_1 k_2 k_i K_p T_D T_I s^2 + (k_1 k_2 K_p T_I k_i - T_I k_x) s + k_1 k_2 k_i K_p]$$

它的特征方程为

$$\Delta = T_I m s^3 + k_1 k_2 k_i K_p T_D T_I s^2 + (k_1 k_2 K_p T_I k_i - T_I k_x) s + k_1 k_2 k_i K_p$$

4.3.2 PID 控制器 K_p 、 T_I 和 T_D 3 个参数的调整

主要根据三参数对系统动态特性的影响对其进行调整^[2]。

比例系数 K_p 对控制系统性能的影响:若 K_p 过大,则系统趋向于不稳定状态;若过小,又会使系统的动作时间延长。

积分时间常数 T_I 对控制系统性能的影响:积分时间常数通常会影响到系统的稳定性。 T_I 太小,系统会不稳定;太大,对系统性能的影响减少。当 T_I 取合适值时,过渡特性比较理想。

微分时间常数 T_D 对控制系统性能的影响: T_D 偏大,会导致超调量增大,加大调节时间;偏小,超调量也较大,调节时间也较长。只有取值合适时,才能有比较满意的过渡过程。

综上所述,可先根据 4.2 节对 PD 控制器分析时,根据最佳阻尼比推算出来 T_D 和 K_p ,再实时调积分增益 K_i 参数,以获得理想控制效果。本实验中,最终取 $T_D = 0.02$, $K_p = 0.8$, $K_i = 8$ 。

4.3.3 临界灵敏度法^[3]

当已知系统的临界比例增益 K_c 和振荡周期 T_c 时,也可以用经验整定公式来确定 PID 控制器的参数:

$$K_p = 0.6 K_c, T_I = 0.5 T_c, T_D = 0.125 T_c。$$

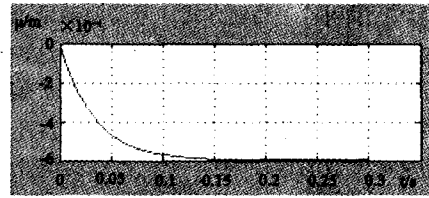
其中,特征参数 T_c 和 K_c 一般由系统整定实验确定;或者用频率特性分析算法根据受控过程 $G(s)$ 直接算定,即由增益裕量 g_m 确定 K_c ,由相位剪切频率 ω_c 确定 T_c ,即

$$T_c = 2\pi/\omega_c, K_c = 10^{(g_m/20)}$$

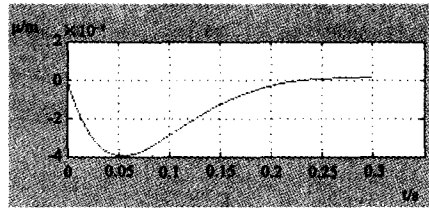
4.4 实验仿真

本实验的系统参数:偏磁电流 $I_0 = 1$ A,平衡气隙 $x_0 = 1$ mm,磁极面积 $S = 600$ mm²,功率放大器 $G(s) = 1$,位移传感器 $G(s) = 5000$,铁球质量 $m = 1.8$ kg,线圈匝数 $N = 790$ 。实

验仿真图如图 3 和 4 所示,其中 μ 表示位移 l 表示时间。

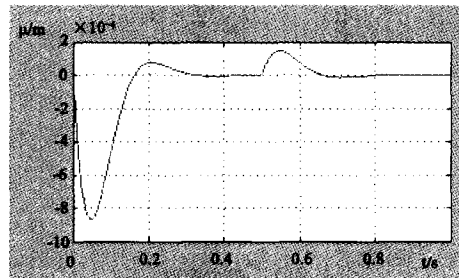


(a) PD

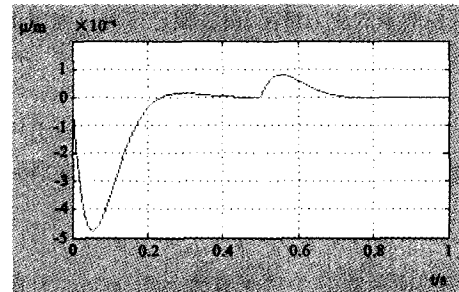


(b) PID

图 3 在只有重力情况下的仿真曲线



(a) 临界灵敏度法



(b) 依据经验推算劳斯判据

图 4 0.5 s 处受到 0.36 N 外干扰力曲线

4.5 模糊自适应整定 PID 控制器

虽然经典 PID 控制能够达到预期目标,但它依赖于模型的数学表达式。而磁悬浮被控对象的数学模型是一个比较复杂的系统,它往往在忽略了导磁体的磁阻、漏磁、线圈损耗等影响的基础上建立出数学模型;而且随着负荷变化或干扰因素以及系统本身参数的变化(如结构变化),数学模型的精确度都会受到影响。自适应控制可以再现辨识对象特征参数,实时改变控制策略,使系统品质指标保持在最佳范围内。因此,考虑采用智能控制与 PID 控制相结合的方式,实现系统的最佳控制。模糊自适应整定 PID 控制就是其中的一种^[4]。

它把规则的条件、操作用模糊集来表示,并把这些模糊控制规则以及有关信息(如评价指标、初始PID参数等)作为知识存入计算机知识库中,计算机根据控制系统的实际响应情况,运用模糊推理,即可自动实现对PID参数的最佳调整,这就是模糊自适应PID控制。

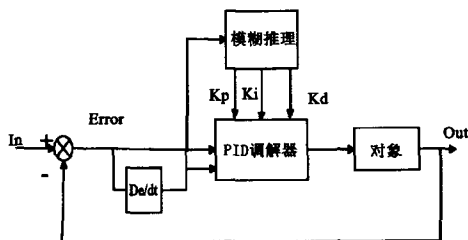


图5 PID模糊自整定的原理框图

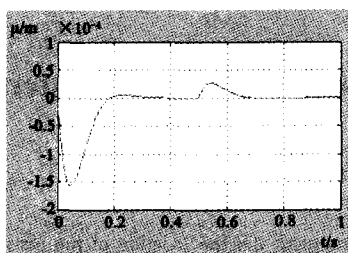


图6 0.5s处受到0.36N干扰力的仿真曲线

模糊自适应整定PID控制器以误差 e 和误差变化 Δe 作为输入,可以利用模糊控制规则实现PID参数在线自整定。模糊控制器的输入为 e 和 Δe ,输出为比例系数 K_p 、积分增益 K_i 和微分增益 K_d 。为了保证适当精度,5个变量都定义了7个语言变量:负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZE)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB)。在选择隶属函数时,由于三角形隶属度函数MF(Membership Function)的形式简单,计算效率高,特别是在实时实现的场合,此处选择三角形MF,

量化因子 $k_e = 6/60 = 1/10$,模糊推理采用“IF-THEN”语句^[5],解模糊法采用了加权平均法。

PID模糊自整定的结构图如图5所示,图6为模糊控制器的仿真图。与PID仿真图形比较,可以看出模糊控制的超调量更小,且在外界扰动作用下系统波动更小。

5 结语

PD存在静态误差,在工程应用中不被采纳,而PID是广泛应用的控制方法,但对于复杂的难以得到精确系统模型的系统来说,PID的参数整定相对比较麻烦。因此,智能加PID控制更适用于复杂系统,控制效果也更好。传统的控制方法依赖于系统数学模型的准确度,而智能控制方法灵活性比较好,对复杂系统更实用。

参考文献:

- [1] 胡业发,周祖德,江征风. 磁力轴承的基础理论与应用[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] 任彦硕. 自动控制原理[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [3] 陶永华. 新型PID控制及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [4] 张智星,孙春在,水谷英二. 神经-模糊和软计算[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- [5] 曾光奇. 模糊控制理论与工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2006.



[作者简介]

缪敏娜(1982-),女(汉族),江苏无锡人,硕士生,研究方向为电力电子与电力传动;

孙培德(1961-),男(汉族),江苏常州人,东华大学副教授,研究方向为电力电子与电力传动、智能控制等;

张红申(1981-),男(汉族),河南南阳人,东华大学硕士研究生,研究方向为控制理论与控制工程。

(上接第160页)

- [5] A K Ghosh. A real-time intrusion detection system based on learning program behavior. Recent Advances in Intrusion Detection (RIAD 2000)[J]. Toulouse: Springer Verlag, 2000.
- [6] W Lee, S J Stolfo. A data mining framework for building intrusion detection model[J]. CA: IEEE Computer Society Press, 1999.
- [7] 刘新浙. 几种人工智能技术在入侵检测系统中的应用[J]. 计算机应用, 2004, 13(8): 23-25.
- [8] 王晓瑜. 基于支持向量机的入侵检测技术[D]. 重庆大学工程硕士学位论文, 2005.
- [9] J C Platt. Fast training of support vector machines using sequential minimal optimization. Advances in kernel method - support vector learning[D]. America: MIT Press, 1999. 185-208.

- [10] DU SHU-XIN, CHEN SHENG-TAN. Weighted support vector machine for classification[D]. Hawaii: 2005 IEEE International Conference on Systems, 2005.



[作者简介]

朱芳芳(1982-),女(汉族),江苏泰州人,计算机应用技术专业硕士研究生;

李志华(1969-),男(汉族),湖南保靖人,副教授,主要研究方向:人工智能,模式识别,生物信息,计算机网络;

王士同(1964-),男(汉族),江苏扬州人,教授,博士生导师,主要从事人工智能、模式识别、图像处理以及生物信息学等研究。