磁悬浮直线进给单元系统的自适应模糊PID控制

针对磁悬浮直线进给单元的工作特点，提出了一种自适应模糊PID控制方法。在分析了其原理的基础上，以误差*E*及其变化率*EC*、PID参数整定值作为模糊控制器的输入输出，并结合自适应控制，构建了自适应模糊PID的结构模型并进行仿真实验。结果表明自适应模糊PID控制响应速度快，受扰动影响小，与常规PID控制相比具有更好的稳定性和自适应能力。自适应模糊PID控制是目前磁悬浮直线进给单元系统一种较为有效的控制方法。

施佳余[1] 侯文斌[1] 茅靖峰[1] 张旭东[2] 吴国庆[1,2]/1.南通大学电气工程学院 2.江苏省风能应用技术工程中心

施佳余/硕士研究生

关键词/Keywords

磁悬浮·
直线进给单元·
数学模型·
自适应模糊PID控制·

随着工业的转型升级，现代加工制造业不断向着高速度、高准确度和绿色化方向发展。为了满足这些要求，对高切削速度和高性能直线进给机构的研究就显得尤为重要。传统的直线进给单元所使用的机械支承方式因为存在摩擦，定位和运动准确度均受到限制。而磁悬浮直线进给单元则利用电磁力将平台无接触地悬浮于导轨上，克服了传统工作平台运行中的诸多不利因素，在现代精密加工领域得到越来越多的应用[1]。

对磁悬浮直线进给单元而言，控制器的设计是关键，控制算法的选取是核心，这直接决定了磁悬浮平台能否实现高效、可靠的控制同时满足速度与准确度的双重要求。目前常用控制方法是以悬浮间隙作为位移偏差信号，经过PID调节实现平台的悬浮[2]。这种方法设计简便，但受外界扰动影响较大，无法满足磁悬浮直线进给单元系统的快速性、稳定性和抗干扰性的要求。本文在传统PID控制方法的基础上，结合模糊控制算法，设计了一个二维模糊PID控制器。在此基础上加上自适应环节，根据系统偏差和偏差的变化率对PID参数进行在线整定，以适应运行条件的变化。实验表明自适应模糊PID控制能够兼顾系统动态与静态特性，在抑制超调、消除静态误差和抗干扰能力方面均有所提高。

国家自然科学基金（61273151,61004053），江苏省自然科学基金（BK20141238）。

磁悬浮直线进给单元工作原理及数学模型

1. 工作原理

磁悬浮直线进给单元主要由电磁铁、悬浮工作台、控制器、位移传感器和功率放大器组成[3]，其平面结构如图1所示。

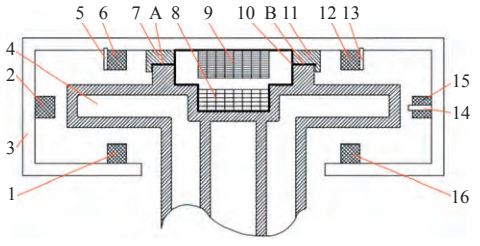

图1 磁悬浮直线进给单元剖面结构

1、6、12、16—垂直电磁铁 2、15—水平电磁铁
3—支承导轨 4—工作台 5、13—垂直传感器
7、11—支承块 8—直线电动机动子 9—直线电动机定子
10—隔磁罩 14—水平位移传感器

悬浮平台套装在支承导轨外围，六对电磁铁分布于平台四周（其中四对位于垂直方向，两对位于水平方向），通过电磁力的作用实现平台的稳定悬浮和准确导向。7、11为辅助支承块，面A、

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

B为其支承面，当平台处于未悬浮状态时起到辅助支承的作用，避免电磁铁与衔铁接触磨损，延长元件使用寿命[4]。图中共有三个位移传感器，分布于平台的上方和侧面，用于接收间隙位移信号。当工作台通电后，上电磁铁产生向下的电磁力F_1，下电磁铁产生向上的电磁力F_2，采用差动控制来平衡平台自身重力，使之悬浮于导轨之上。一旦工作台偏离平衡位置，传感器自动检测位移偏差量并反馈给控制器，经过一定的控制算法后生成控制电压，再由功率放大器作用将电压信号转化成电流信号，使上、下电磁铁中产生大小相同、方向相反的控制电流，从而迫使工作台重新回到平衡位置。

待工作台稳定悬浮后，由直线电动机提供所需牵引力，使整个工作台沿固定导轨做快速直线进给运动。其定子和动子分别安装在导轨和悬浮平台上，并且在动子和定子外侧分别设有隔磁罩，起到保护平台的作用。

2. 数学模型

为了便于研究，通常将二自由度以上的系统解耦，讨论单自由度系统的磁力支承控制问题，由此建立单自由度数学模型。以垂直方向为例，图2为系统结构原理图，采用电流差动控制方式，将偏置电流I_0与控制电流i_c相叠加，即一个电磁铁中以电流（I_0+i_c）激磁，另一个以电流（I_0-i_c）激磁[5]，使工作台处于平衡状态。

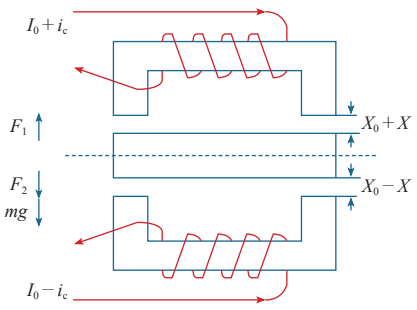

图2　单自由度磁悬浮支承结构原理图

当转子偏离平衡位置时，即假设向上的偏移量为x，为了使转子再次稳定，必须外加控制作用，使向上的力F_1减小，而向下的力F_2增大。此时

$$F_1=\frac{\mu_0 SN^2(I_0+i_c)^2}{4(x_0+x)^2} \tag{1}$$

$$F_2=\frac{\mu_0 SN^2(I_0-i_c)^2}{4(x_0-x)^2} \tag{2}$$

由于$x\ll x_0$，转子所受合力可近似表示为

$$F=F_1-F_2\approx\frac{\mu_0 SN^2 I_0^2}{x_0^3}x+\frac{\mu_0 SN^2 I_0^2}{x_0^2}i_c \tag{3}$$

令

$$F=k_x x+k_i i \tag{4}$$

式中，k_i为磁悬浮直线进给单元的电流系数；k_x为磁悬浮直线进给单元的位移系数。

根据牛顿第二运动定律，忽略外界阻力，则有

$$mx=k_x x+k_i i-mg \tag{5}$$

对上式两端作拉普拉斯变换得，可得到以$I(s)$为系统输入，$X(s)$为系统输出的控制对象的传递函数

$$G(s)=\frac{X(s)}{I(s)}=\frac{k_i}{ms^2+k_x} \tag{6}$$

由式（6）可见，在不加任何控制作用的情况下，系统是不稳定的，因此采用合适的控制策略进行闭环控制至关重要。

自适应模糊PID控制器的设计

模糊PID控制是一种典型的智能控制方法，能够兼顾系统动态与静态特性。但在对象参数骤变或突加干扰情况下，系统将难以适应，不能正常运行。因此，加入自适应环节，在模糊控制的基础上设计自适应模糊PID控制器，使得对象参数的变化对控制效果的影响降至最低，提高系统自适应能力。

1. 模糊PID控制器的设计

模糊控制的设计一般分为三步：输入、输出量的模糊量化；建立模糊控制规则表；输出信息的去模糊化。

在磁悬浮直线进给单元中，将位置偏差信号E和偏差的变化率EC作为模糊控制器的输入，将PID参数的整定值ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D作为模糊控制器的输出，构成一个二输入三输出的模糊控制器，实现对PID参数的在线整定。根据磁悬浮直线进给

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

单元系统的工作特性，确定上述五个变量的变化范围，由此确定它们的基本论域[6]。在本系统中取E和EC的论域为{−3,−2,−1,0,1,2,3}，取比例参数K_P论域为{−0.5,−0.3,−0.1,0,0.1,0.3,0.5}；K_I论域为{−0.05,−0.03,−0.01,0,0.01,0.03,0.05}；K_D论域为{−3,−2,−1,0,1,2,3}。为了保证模糊控制的控制效果，将这五个语言值分为{NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB}七个等级，并建立相应的隶属度函数。对于隶属度函数可以选取吊钟形、三角形和梯形三种，但在磁悬浮支承系统的控制中常选取灵敏度较高的三角函数。

在整个模糊控制环节中，模糊推理是关键，因此模糊控制规则表的建立至关重要。在磁悬浮直线进给单元系统中，当系统偏差较大时，需选取较大的K_P值，加快系统响应，同时要防止系统超调，通常忽略积分作用，取$K_I=0$；当偏差中大时，K_P取值略有下降，而K_I、K_D要选择适当，确保系统的响应速度；当偏差较小时，适当增加K_I的值，同时要抑制系统过分振荡，选取适当的K_D值，使系统具有较好的稳定性和抗干扰能力[7]。根据这三个参数对系统的影响，可以得到其模糊关系R_P、R_I和R_D。应用模糊推理合成规则，得到相应的ΔK_P、ΔK_I和ΔK_D的模糊集合分别为

$$\begin{aligned}\Delta K'_P&=(E\times EC)R_P\\ \Delta K'_I&=(E\times EC)R_I\\ \Delta K'_D&=(E\times EC)R_D\end{aligned}\tag{7}$$

由模糊推理得出的输出是论域上的模糊集，使用加权平均法去模糊化可以将模糊量转化为准确的控制量[8]，实现对PID参数的在线整定。

2. 自适应模糊PID控制器的设计

考虑到诸多不确定因素对系统性能的影响，在原有控制方法的基础上加上自适应控制，即加入性能测量、控制量校正和控制规则修改三个模块，构成自适应模糊PID控制器。自适应模糊控制原理如图3所示。

图3中，K_e、K_{ec}为量化因子；K_u为比例因子，在磁悬浮直线进给单元运行过程中对系统性能影响很大，因此对这三个因子的自调整是自适应模糊控制中一种较为有效的方法。根据偏差及偏差

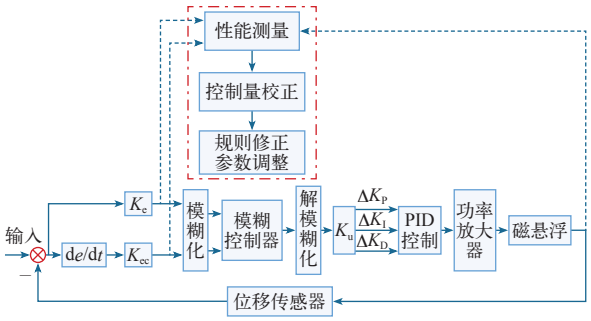

图3 自适应模糊PID控制原理图

变化率对这三个因子的影响，进行在线修正，可以得到如下修正式

$$\begin{aligned}\Delta K_e(t)&=\Delta K_e(t-1)+K_e\\ \Delta K_{ec}(t)&=\Delta K_{ec}(t-1)+K_{ec}\\ \Delta K_u(t)&=\Delta K_u(t-1)+K_u\end{aligned}\tag{8}$$

式中，$\Delta K_e(t)$、$\Delta K_{ec}(t)$和$\Delta K_u(t)$为三个因子的调整值，则任意时刻$K_e(t)$、$K_{ec}(t)$和$K_u(t)$的计算式为

$$\begin{aligned}K_e&=K_{e0}+\Delta K_e(t)\\ K_{ec}&=K_{ec0}+\Delta K_{ec}(t)\\ K_u&=K_{u0}+\Delta K_u(t)\end{aligned}\tag{9}$$

式中，$K_{e0}(t)$、$K_{ec0}(t)$和$K_u(t)$为初始值。

当系统参数或运行环境变化时，模糊控制器通过实际输入量与期望值相比较，就能测量系统性能，从而为控制规则提供修正信息，进行控制量校正，以适应磁悬浮系统当前工作环境。

仿真分析

下表给出了磁悬浮直线进给单元系统的主要参数。

表 磁悬浮直线进给单元参数

参数名称	参数值
悬浮平台质量/kg	8
磁极面积/m^2	860×10^{-6}
线圈匝数	120
偏置电流/A	2
位移刚度/(N/m)	230 550
电流刚度/(N/A)	346.83
功率放大器增益/(A/V)	1
传感器系数/(V/m)	5 000

根据上述参数采用Matlab软件进行仿真实验。在Simulink环境下分别设计了PID和自适应模糊PID

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

控制的系统仿真模型，仿真结果如图4～图7所示。

在单位阶跃信号的作用下，针对转子的起浮进行仿真对比实验，结果如图4和图5所示。从图中可以看出，常规的PID控制超调量大，在1.5 s后系统才能趋于稳定状态。而加入自适应模糊控制环节后系统几乎无超调，到达稳态的时间也大大缩短。由此可以看出本文所设计的控制方法在响应时间和稳定性方面均优于常规的PID控制。

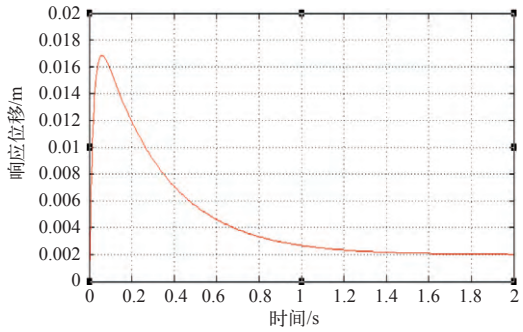

图4 PID控制位移响应曲线

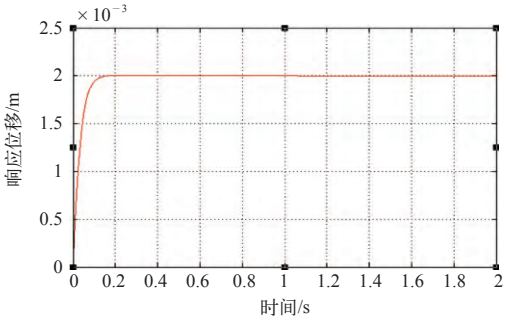

图5 自适应模糊PID控制位移响应曲线

图6和图7为磁悬浮直线进给单元系统在突加扰动时的实验结果。结果显示PID控制和自适应模糊PID控制都可使系统趋于稳定，但自适应模糊PID控制对扰动的冲击小，恢复到平衡状态的时间短，具有更强的抗干扰能力。

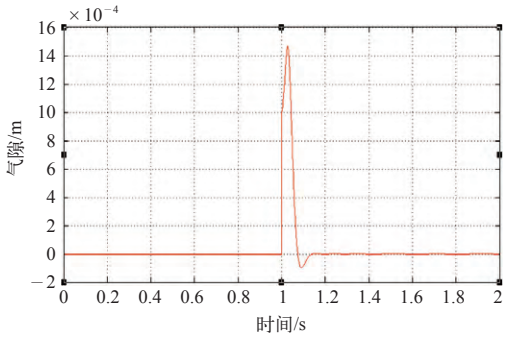

图6 PID控制扰动响应曲线

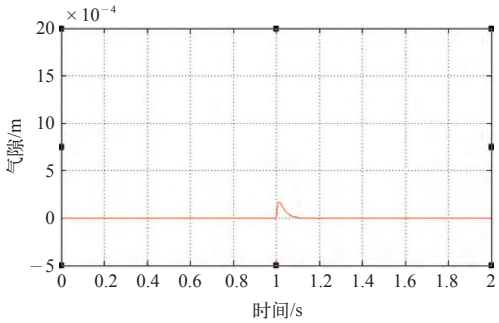

图7 自适应模糊PID控制扰动响应曲线

实验结果

在控制器设计与分析的基础上，对磁悬浮支承平台进行实验验证。通过示波器捕捉磁悬浮工作台在自适应模糊PID控制下的起浮响应及受到干扰后的曲线波形，如图8、图9所示。从图中可见，该磁悬浮工作台起浮波动小、几乎无超调且稳定性好，并在在扰动情况下自适应能力强。因而采用自适应模糊PID控制在磁悬浮直线进给单元中是切实可行的。

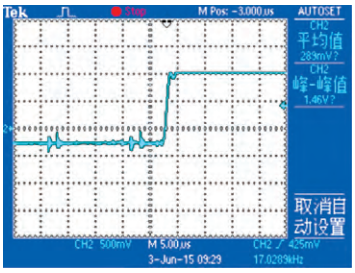

图8 起浮位移响应波形

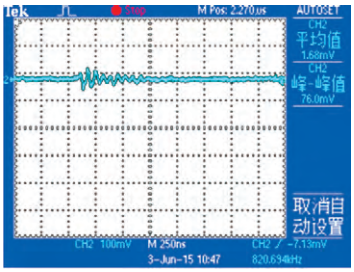

图9 施加扰动后的位移响应波形图

结束语

本文所研究的磁悬浮直线进给单元是一个非线性不稳定系统，必须采用适合的控制算法对其实行有效控制，使其能在较短的时间内到达平衡位置，而且在扰动时能快速恢复到稳定状态。针对这一目标，本文在模糊控制技术的基础上，结

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

合模糊控制算法和常规PID控制方法，实现了磁悬浮系统的模糊自适应控制。通过仿真与实验表明在自适应模糊PID控制下，系统位移响应快，不会产生太大超调，稳定性好。并且模糊控制能够对PID的三个参数进行在线整定，使系统在受到扰动的情况下能很快恢复到原平衡状态，提高了系统的自适应能力。

参考文献

[1] 景敏卿，刘恒，梁金星，等．二维高准确度磁悬浮定位平台的研究 [J]．西安交通大学学报，2008，42 (18)：1377-1381．

[2] Zhong Z X，Zhu C S．Vibration of flexible rotor systems with two-degree-of-freedom PID controller of active magnetic bearings [J]．Journal of Vibroengineering，2013，15 (3)：1302-1310．

[3] 茅靖峰，程莹，吴国庆，等．主动磁悬浮支承系统的建模与电磁设计研究 [J]．机床与液压，2014，42 (17)：27-32．

[4] 孙后全，吴国庆，沙征远，等．磁悬浮直线进给单元拼接衔铁的电磁场分析 [J]．组合机床与自动化加工技术，2014，2 (2)：4-7．

[5] 秦红玲，李志雄，袁松．磁悬浮轴承系统的模糊滑模变结构控制研究 [J]．计算机仿真，2011 (28)：185-192．

[6] Xu Chunguang，Lü Dongming，Hao Juan．Design method for the magnetic bearing control system with fuzzy-PID approach [J]．Journal of Beijing Institute of Technology，2008，17 (3)：270-273．

[7] 李明然，贺建军．模糊自适应PID算法在磁悬浮实时控制系统中的应用研究 [J]．计算机测量与控制，2012，20 (10)：2690-2692．

[8] Mansour S E，Kember G C，Dubay R，et al．Online optimization of fuzzy logic-PID of a thermal process [J]．ISA Transaction，2005，44 (4)：305-314．

（收稿日期：2015－06－05）EA

(上接第69页)

缘子闪络电压预测模型 [J]．高电压技术，2009 (3)：591-596．

[6] Huang C M，Wang F L．An RBF network with OLS and EPSO algorithms for real-time power dispatch [J]．IEEE Transactions on Power Systems，2007，22 (1)：96-104．

[7] Liao C C．Enhanced RBF network for recognizing noise-riding power quality events [J]．IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement，2010，59 (6)：1550-1561．

[8] Chang W Y．Estimation of the state of charge for a LFP battery using a hybrid method that combines a RBF neural network，an OLS algorithm and AGA [J]．International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2013，53 (12)：603-611．

[9] Lee J C，Lin W M，Liao G C，et al．Quantum genetic algorithm for dynamic economic dispatch with valve-point effects and including wind power system [J]．International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2011，33 (2)：189-197．

[10] Liao G C．Solve environmental economic dispatch of Smart MicroGrid containing distributed generation system–using chaotic quantum genetic algorithm [J]．International Journal of Electrical Power & Energy Systems，2012，43 (1)：779-787．

[11] 焦嵩鸣，韩璞，黄宇，等．模糊量子遗传算法及其在热工过程模型辨识中的应用 [J]．中国电机工程学报，2007，27 (5)：87-92．

[12] 邢焕来，潘炜，邹喜华．一种解决组合优化问题的改进型量子遗传算法 [J]．电子学报，2007，35 (10)：1999-2002．

[13] 王凌，吴昊，唐芳，等．混合量子遗传算法及其性能分析 [J]．控制与决策，2005，20 (2)：156-159．

（收稿日期：2015－03－19）EA

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net