庞丽坤, 麻森权, 庞博中,等. 磁力轴承模糊控制系统设计与仿真[J]. 智能计算机与应用,2026,16(8):98-104. DOI:10.20169/j.issn.2095-2163.24022501

磁力轴承模糊控制系统设计与仿真

庞丽坤[1], 麻森权[2], 庞博中[3], 田兴强[1]
(1 贵州交通职业大学 汽车工程学院,贵阳 551400;2 中国电建集团贵州电力设计研究院有限公司,贵阳 550081;
3 东北大学 信息科学与工程学院,沈阳 110819)

摘 要: 磁力轴承是利用可控的电磁力使转子悬浮在空中的装置,相较于传统的轴承具有无接触、无磨损以及无需润滑的优点。本文针对磁力轴承系统数学模型不确定的特性,在传统 PID 控制器的基础上,根据控制器参数对系统特性的影响设计了模糊 PID 控制器。对传统 PID 控制与模糊 PID 控制两种方式开展仿真实验,结果表明模糊 PID 控制系统具备更优异的动态性能。

关键词: 磁力轴承; 数学模型; 模糊 PID 控制器
中图分类号: TP273+.4 **文献标志码**: A **文章编号**: 2095-2163(2026)08-0098-07

Design and simulation of fuzzy control system for magnetic bearing

PANG Likun[1], MA Senquan[2], PANG Bozhong[3], TIAN Xingqiang[1]
(1 School of Automotive Engineering, Guizhou Communications Polytechnic University, Guiyang 551400, China;
2 Power China Guizhou Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Guiyang 550081, China;
3 School of Information Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Magnetic bearing is a device that uses controlled electromagnetic force to suspend the rotor in the air, it has the advantages of non-contact, non-wear and lubrication-free. In view of the mathematical model uncertainty of magnetic bearing system, this paper designs a fuzzy PID controller according to the influence of controller parameters on the characteristics of the magnetic bearing system. The simulation results of traditional PID control and fuzzy PID control show that the fuzzy PID control system has superior dynamic performance.

Key words: magnetic bearing; mathematical model; fuzzy PID controller

0 引 言

随着电磁技术的高速发展,磁悬浮技术变得更加成熟并在生活中得到广泛应用[1]。目前该技术主要应用于两大领域:一是在磁悬浮列车上的应用,利用电磁力使车体悬浮在轨道之上,通过直线电机产生磁力牵引车体运行。Kemper[2]曾提出要使铁磁体实现稳定的悬浮,必须根据物体的悬浮状态不断地调节磁场力的大小,这一思想成为之后开展磁悬浮列车研究的主导思想;刘亚辉[3]针对悬挂式稀土永磁磁悬浮列车始终处于悬浮状态,结构比较复杂,行驶过程中易受到各种扰动等问题,提出了一种改进的遗传算法,以获得各项性能指标均较优的列车速度曲线。二是应用于旋转机械的轴承,利用电磁力使被控对象悬浮在空中,然后通过旋转电机的驱动作用使悬浮对象绕着固定轴做旋转运动,其被称为悬浮转子,在该情况下,这种磁悬浮支撑技术所起的作用与传统的滚珠机械轴承一样,因而也被称为磁力轴承技术[4]。针对磁力轴承的研究,邵传龙[5]就传统 PID 控制响应时间过长、磁力轴承系统不稳定的缺点提出了一种模糊控制方法,使得系统的响应速度变快。陈红燕等[6]针对非线性和开环不稳定的磁力轴承系统,建立了 T-S 模糊模型,利用并行分布补偿原理设计了整个系统的模糊状态反馈控制器,使系统获得较好的动态性和鲁棒性。

与传统的轴承相比较,磁力轴承具有高精度、无

基金项目: 贵州省交通运输厅科技项目(2021-321-020)。

作者简介: 庞丽坤(1994—),女,硕士,助教。主要研究方向:计算机控制,自动化技术。Email:1904134020@qq.com;麻森权(1992—),男,硕士,工程师。主要研究方向:电气控制。

收稿日期: 2024-02-25

摩擦、零损耗、使用寿命长等优点。基于以上特点，磁力轴承广泛应用于高新技术领域，在军用机电设备、医疗设备、航空航天等方面起着重要作用[7-9]。

由于磁力轴承系统数学模型不确定的特性，所以在磁力轴承控制系统中选择使用模糊 PID 控制策略[10-11]，设计出模糊 PID 控制器，与传统 PID 控制相比，其控制性能更优越、动态性能更好。

1　磁力轴承的工作原理及数学模型

1.1　磁力轴承-转子系统组成及原理

磁力轴承是依靠电磁力实现转子稳定悬浮，转子附近布置位移传感器，设备运行时，传感器会实时采集转子位移并输出反馈信号，反馈信号与参考信号之间相减后得到的偏差值会被送到磁力轴承系统控制器中，功率放大器将控制器产生的电压信号转变成控制电流，电流通入磁悬浮线圈产生电磁力实时调节转子位置，从而实现转子稳定悬浮[12-13]。

磁力轴承通常包含两套径向轴承与一套轴向轴承：径向轴承定子选用高导磁材料加工而成，线圈通电后产生电磁吸力，对转子起吸引的作用[14-15]。轴向轴承用于约束转子轴向窜动，两套径向轴承与一套轴向轴承共同构成完整磁力轴承支撑单元。

1.2　单自由度磁力轴承系统数学模型分析

对磁力轴承建模时可忽略 5 个自由度之间的相互耦合影响，同时不考虑绕组漏磁、磁滞等非线性因素的影响，仅针对单自由度开展受力建模分析[16-17]。图 1 为磁力轴承单自由度示意图，该系统由控制器、功率放大器、位移传感器与电磁执行机构构成典型的单自由度磁力轴承-转子系统。

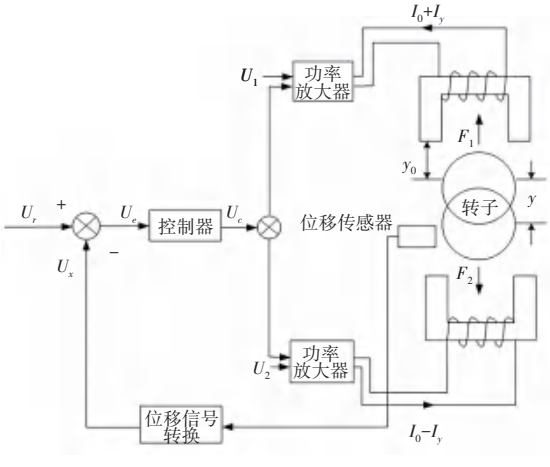


图 1　单自由度磁力轴承示意图

Fig. 1　Schematic of single-degree-of-freedom bearing magnetic bearing

本设计所研究的单自由度磁力轴承相关参数见表 1 所示。

表 1　单自由度磁力轴承参数

Table 1　Parameters of single-degree-of-freedom magnetic bearing

符号	参数名称	参数取值
m	转子质量	5 kg
N	线圈匝数	60
S	磁极面积	8.8×10^{-4} m^2
μ_0	真空磁导率	$4\pi\times10^{-7}$ V·s/(A·m)
y_0	轴承气隙	2.5×10^{-4} m
I_0	偏置电流	2 A
k_i	电流刚度系数	63.7 N/A
k_s	位移刚度系数	5.1×10^5 N/m
N_r	磁极数	8
P_r	磁极宽度	7×10^{-3} m
b_r	磁轴承轴向宽度	17×10^{-3} m

忽略磁力轴承-转子系统中铁芯回路磁损和线圈绕组漏磁的影响，把转子看作单质点进行处理[18]，则磁感应强度 B 的大小为：

$$B=\frac{\mu_0 NI_0}{2y_0} \tag{1}$$

其中，μ_0 为真空磁导率；N 为励磁线圈匝数；I_0 为线圈偏执电流；y_0 为转子额定平衡气隙。

根据麦克斯韦电磁理论，可以得出电磁铁与转子间的吸引力：

$$F=\frac{B^2S}{\mu_0} \tag{2}$$

其中，S 为电磁铁与转子间气隙的截面积；B 为气隙磁感应强度；F 为单侧电磁铁对转子的电磁吸力。

由式(1)和式(2)可得：

$$F=\frac{\mu_0 SNI_0^2}{4{y_0}^2} \tag{3}$$

从式(3)可以看出，电磁力 F 正比于 I_0^2，是非线性力。

当转子从平衡位置向下偏移 y 时，上下两端电磁场的磁感应强度均会发生改变，其值分别为：

$$B_1=\frac{\mu_0 N(I_0+I_y)}{2(y_0+y)} \tag{4}$$

$$B_2=\frac{\mu_0 N(I_0-I_y)}{2(y_0-y)} \tag{5}$$

根据式(2)、式(4)、式(5)可知，转子偏离平衡位置后，受到上下电磁铁产生的吸引力分别为：

$$F_1 = \frac{\mu_0 S N^2 (I_0 + I_y)^2}{4(y_0 + y)^2} \tag{6}$$

$$F_2 = \frac{\mu_0 S N^2 (I_0 - I_y)^2}{4(y_0 - y)^2} \tag{7}$$

转子采用差动控制方式,其受到的电磁合力为:

$$F = F_1 - F_2 = \frac{\mu_0 S N^2 (I_0 + I_y)^2}{4(y_0 + y)^2} - \frac{\mu_0 S N^2 (I_0 - I_y)^2}{4(y_0 - y)^2} = \frac{\mu_0 S N^2}{4}\left[\frac{(I_0 + I_y)^2}{(y_0 + y)^2} - \frac{(I_0 - I_y)^2}{(y_0 - y)^2}\right] \tag{8}$$

对转子进行受力分析可得:

$$m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}^2 t} = F - mg \tag{9}$$

其中, m 是转子的质量, g 是重力加速度。

联立式(8)—(9),可得单自由度转子的运动方程:

$$m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}^2 t} = \frac{\mu_0 S N^2}{4}\left[\frac{(I_0 + I_y)^2}{(y_0 + y)^2} - \frac{(I_0 - I_y^{\ 2}}{(y_0 - y)^2}\right] - mg \tag{10}$$

由上式可知,控制电流与转子的位移偏差之间是非线性关系。并且通常情况下磁力轴承转子偏离平衡位置的偏差很小,因此可以在平衡点处做线性化处理。对式(8)在平衡点处进行泰勒级数展开:

$$F(y, I_y) = F(y_0, I_0) + \frac{\partial F(y, I_y)}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial F(y, I_y)}{\partial I_y}(I_y - I_0) + \frac{1}{2!}\left[\frac{\partial^2 F(y, I_y)}{\partial y^2}(y - y_0)^2 + 2\frac{\partial^2 F(y, I_y)}{\partial y \partial I_y}(y - y_0)(I_y - I_0) + \frac{\partial^2 F(y, I_y)}{\partial I_y^2}(I_y - I_0)^2\right] + \cdots \tag{11}$$

为了将控制简化,将式(11)中的二阶导数及之后的量均省略,可得:

$$F(y, I_y) = F(y_0, I_0) + \frac{\partial F(y, I_y)}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial F(y, I_y)}{\partial I_y}(I_y - I_0) = F(y_0, I_0) + \frac{\mu_0 S N^2 I_0}{2y_0^2}(I_y - I_0) - \frac{\mu_0 S N^2 I_0^2}{2y_0^3}(y - y_0) = F(y_0, I_0) + K_i(I_y - I_0) + K_y(y - y_0) \tag{12}$$

其中, I_s 为控制电流;K_i 为电流刚度系数,$K_i = \frac{\mu_0 S N^2 I_0}{2y_0^2}$; K_y 为位移刚度系数,$K_y = \frac{\mu_0 S N^2 I_0^2}{2y_0^3}$。

在平衡点处 $F(y_0, I_0) = mg$, 因此将式(12)代入式(10)可得单自由度磁力轴承的数学模型:

$$m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = K_i I_y + K_y y \tag{13}$$

对式(13)作拉普拉斯变换,可得磁力轴承单自由度系统的传递函数为:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{I(s)} = \frac{K_i}{ms^2 - K_y} \tag{14}$$

由式(14)可以看出该传递函数的两个实数极点分别位于坐标平面的正负实轴上,根据自动控制原理相关知识可以判断该系统属于二阶开环不稳定系统,所以必须加入反馈环节使其构成闭环系统才能稳定工作。

2 模糊控制

2.1 模糊控制的产生及原理

模糊控制是一种综合控制方法[19-20]。大量研究表明,在被控对象的数学模型不精确的前提下,使用传统控制方式的控制精度很难得到保证,并且在对实际系统进行控制时,其往往更为复杂、系统变量多、难以定量表示,导致无法建立十分准确的数学模型,以至于在对性能进行检测时,许多控制指标都达不到满意的要求[21]。正因如此,在被控对象的数学模型不是十分精确时,模糊控制方法得到了更广泛的应用,其不需要被控对象有很精确的数学模型或动态变化信息,可基于自身模糊规则库中的规律进行模糊推理[22]。

在磁力轴承-转子系统中,电磁力本质为非线性,且磁轴承本身是一个非线性的不稳定系统,目前还没有精确的数学模型可用来精确描述磁力轴承,这对控制器的设计产生了一定的影响,而模糊控制器具有独特的控制优势,常被广泛应用在磁力轴承的控制系统[23-24]。

2.2 模糊控制系统的组成

模糊控制系统是依托计算机控制技术搭建闭环数字反馈架构,是以模糊语言变量、模糊逻辑推理、模糊数学理论为基础的自动控制系统[25-26],模糊控制系统组成原理如图 2 所示。

模糊控制的核心是模糊控制器,由模糊化、知识库、模糊推理和解模糊四部分组成。其可以将测量的数字量转化为模糊量,利用特定规则推理后,将推理结果解模糊为精确量后作用于系统[27-28]。

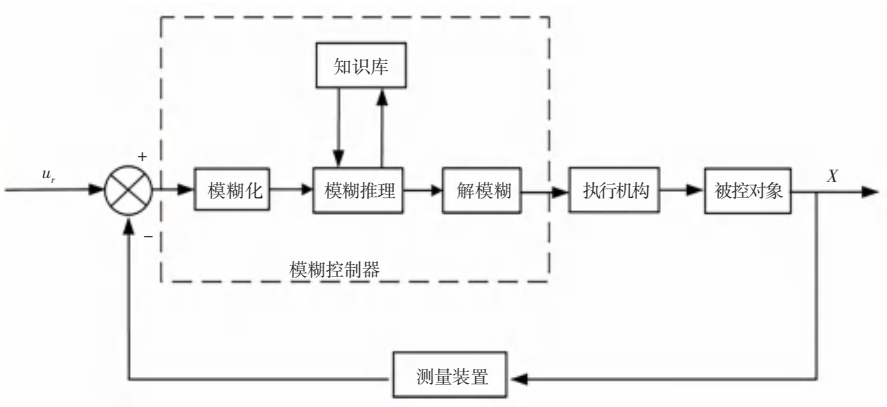


图 2　模糊控制系统组成原理

Fig. 2　Block diagram of fuzzy control system

3　磁力轴承控制系统模糊 PID 控制器设计

3.1　控制系统组成及原理

磁力轴承控制系统主要由功率放大器、控制器、位移传感器、磁力轴承执行机构和转子组成，控制系统的结构如图 3 所示。

图 3 中，U_r 是控制器的参考值，I 是作用于线圈的电流，F 是施加于转子上的电磁力，X 是转子的实际位置。系统工作时，位移传感器反馈的电压信号同转子处于期望悬浮高度时的参考电压信号之间的偏差会输入到控制器，控制器将电压的偏差信号转变成控制电压，功率放大器接收控制器的输出信号后调整线圈上的电流，改变施加于转子电磁力大小，使转子稳定悬浮。

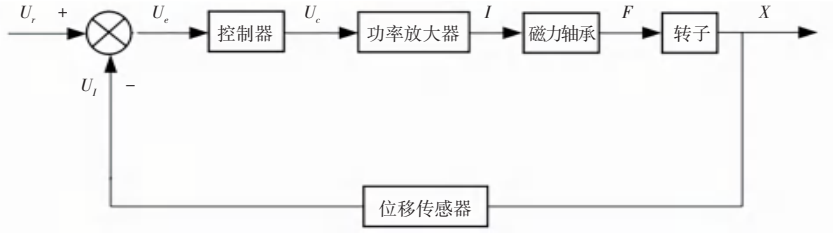


图 3　磁力轴承控制系统结构

Fig. 3　Structure diagram of magnetic bearing control system

3.2　磁力轴承模糊 PID 控制器设计

本文的磁力轴承系统使用双输入、三输出模糊自整定 PID 控制器。

模糊控制器选取位移偏差 e 与偏差变化率 ec 作为输入，这两者分别为通过反馈值与参考值之间的差值和对差值微分处理后形成的精确量。在磁力轴承-转子系统中，模糊控制器的输入量有两个，其一是转子处于期望高度时的参考电压与传感器反馈电压的偏差，其二是偏差的变化率，输出量是下一时刻 PID 控制器参数的校正量 ΔK_p、ΔK_i、ΔK_d，PID 参数的调整算法如下：

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \tag{15}$$

系统工作时，位移传感器采集转子位置反馈信号与参考信号做偏差，由偏差进一步计算得到偏差变化率；将偏差与偏差变化率送入模糊控制器，依次完成模糊化、模糊推理、解模糊运算，输出 PID 参数修正量，在线整定 PID 参数，由 PID 控制器输出控制信号实现系统闭环控制。

在磁力轴承系统中，若使用传统 PID 控制策略，为使转子长时间稳定悬浮，必须根据其状态手动调整 PID 参数，这一过程会使控制系统适应性减弱[29-30]。因此可以将传统 PID 控制与模糊控制相结合，对 PID 参数进行自适应整定，实时控制磁力轴承的转子，极大地提高控制器的自适应能力和系统的快速性、精准性。图 4 为模糊 PID 控制系统结构图。

经过多次试验调试，设计出模糊 PID 控制器（如图 5 所示）。其中 PID 的 3 个参数为：$K_p = 2.8$，$K_i = 110$，$K_d = 0.03$。

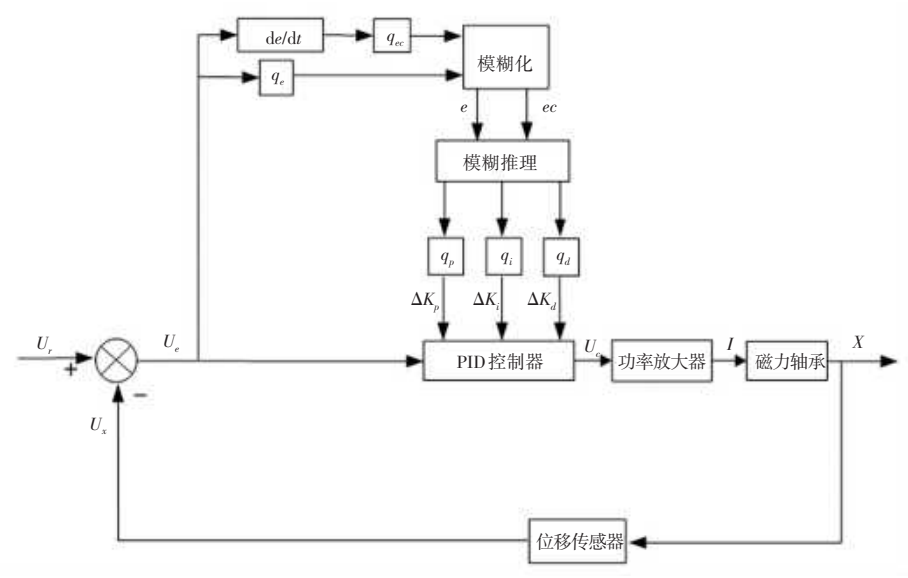


图 4 模糊 PID 控制系统结构图

Fig. 4 Structure diagram of fuzzy PID control system

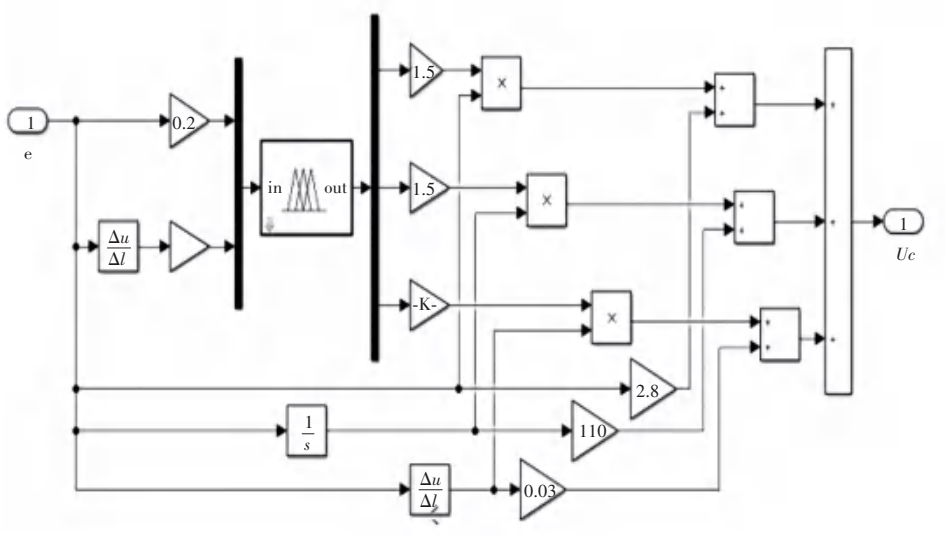


图 5 模糊 PID 控制器

Fig. 5 Fuzzy PID controller

4 磁力轴承控制系统模糊 PID 仿真

磁力轴承控制系统传统 PID、模糊 PID 仿真模型(如图 6 所示),在初始时刻给系统加阶跃信号使转子悬浮于一定高度,并对比传统 PID 控制和模糊 PID 控制的性能。此外,在 0.3 s 时给系统施加扰动,比较两种控制方法的控制效果与抗扰性能。

对图 6 所示的仿真系统进行仿真,得到了传统 PID 控制与模糊 PID 控制时转子位移曲线图与电压偏差图,分别如图 7—8 所示。从图 7 可以看出,使用传统 PID 控制时超调量为 40%左右,模糊 PID 控制的超调量相对有所减小,为 33.3%左右;在调节时间上,传统 PID 控制器的调节时间达到了 0.18 s,并且在达到稳定状态过程中有明显的波动产生,相比之下,使用模糊 PID 控制器调节时,系统经过 0.13 s 达到了稳定状态,转子稳定悬浮于 0.003 mm 处,其调节时间相比传统 PID 控制方式减少了大约 27.7%;同时没有出现明显的波动和振荡。在上升时间上,传统 PID 控制用时 0.02 s,模糊 PID 控制用时 0.018 s;在电压偏差方面,从图 8 可以看出,使用模糊 PID 控制时的系统电压值的最大偏差相较于传统 PID 控制减少了 5%,并且其消除偏差所用的时间更短。经过仿真可以发现,模糊 PID 控制动态性能相较于传统的 PID 控制更为优越。

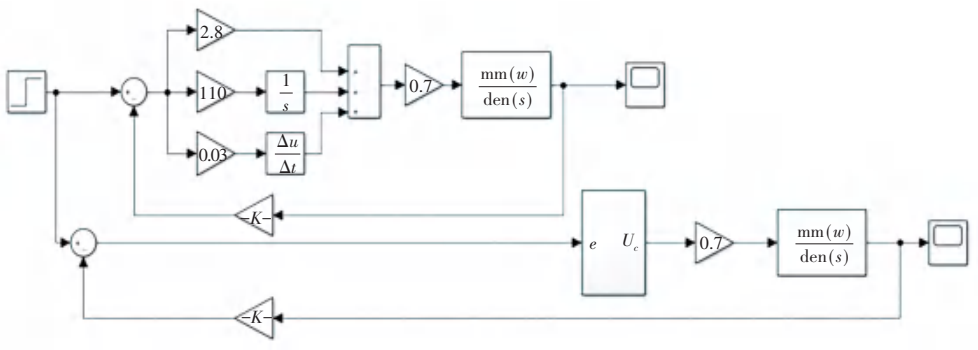


图 6　传统 PID、模糊 PID 仿真模型

Fig. 6　Traditional PID and fuzzy PID simulatin models

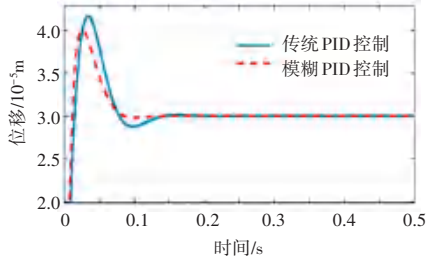


图 7　转子位移曲线图

Fig. 7　Rotor displacement curve diagram

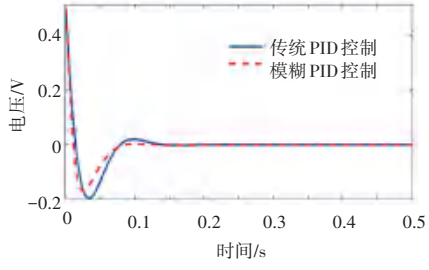


图 8　电压偏差图

Fig. 8　Voltage deviation diagram

在 0.3 s 时刻对仿真系统施加阶跃扰动信号，可以得到带扰动时传统 PID 控制与模糊 PID 控制的转子位移曲线图及转子位移曲线局部放大图，如图 9—10 所示。从图 9—10 可以看出，受扰动后，在传统 PID 控制方式下，转子产生的最大位移偏差量为 0.002 4 mm，调节时间为 0.14 s；在模糊 PID 控制方式下，转子发生的最大位移偏差量为 0.002 mm，调节时间为 0.1 s，虽然两种控制方式最终都能恢复到稳定位置，但模糊 PID 控制方式的抗扰性能明显优于传统 PID 控制方式。

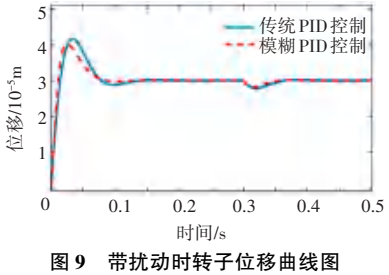


图 9　带扰动时转子位移曲线图

Fig. 9　Rotor displacement curve with disturbance

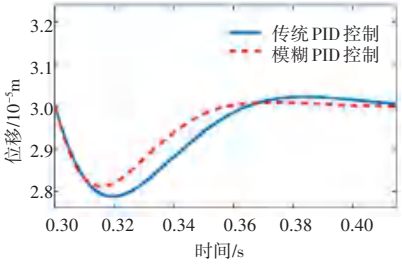


图 10　带扰动时转子位移曲线局部放大图

Fig. 10　Partial enlarged view of rotor displacement curve with disturbance

5　结束语

本文基于磁力轴承和模糊控制相关的理论知识设计了磁力轴承模糊 PID 控制器，对磁力轴承控制系统的传统 PID 控制与模糊 PID 控制两种方式进行仿真实验，通过对比两种方式下的转子位移曲线及电压偏差，证明了模糊 PID 控制器比传统 PID 控制器的控制效果更好，有效地改善了磁力轴承动态性能，加强了抗扰能力。

参考文献

[1] 王志强. 高速磁浮列车悬浮系统故障诊断与容错控制研究[D]. 长沙：国防科技大学，2019.

[2] Kemper H. Overhead suspension railway with wheelless vehicles employing magnetic suspension from iron rails：DE643316[P].

[3] 刘亚辉. 基于预测模糊 PID 控制算法的永磁磁悬浮列车速度跟踪控制研究[D]. 赣州：江西理工大学，2022.

[4] 吴华春，龙志强，周瑾等. 磁力轴承——过去、现在和未来[J]. 轴承，2024（7）：1-13.

[5] 邵传龙. 磁力轴承的模糊控制研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2012.

[6] 陈红燕，孙冬梅，赵萍. 磁轴承多目标模糊控制系统的设计[J]. 轴承，2015（3）：11-14.

[7] Anantachaisilp P，Lin Z. Fractional-oredr surge control of active magnetic bearing suspended compressor[J]. Actuators，2020，9（3）：75.

[8] Majumder G，Tiwari R. Transverse vibration of geared-rotor integrated with active magnetic bearings in identification of multiple faults[J]. Journal of Dynamic Systems，Measurement，

and Control, 2021, 143(9): 091003.
[9] Wei S T, Li Y, Zhou J X, et al. Stability control of high-speed magnetic levitation turbomolecular pumps with shock-excited disturbance[J]. ISA Transactions, 2023, 142: 585-593.
[10]尹浪,贺福强,陈发江. 基于控制参数自调整的异步电机转速控制研究[J]. 智能计算机与应用, 2024, 14 (6): 134-139.
[11]唐宇龙, 付猛, 张皓天, 等. 自适应模糊 PID 的乒乓球发球机控制系统研究 [J]. 智能计算机与应用, 2024, 14 (10): 33-40.
[12]刘明政, 葛萍萍, 张雁翔, 等. 非线性磁悬浮转子系统的不平衡响应分析[J]. 轴承, 2022(3): 47-52.
[13]Wang D X,Wang N X,Ye C,et al. Research on analytical bearing capacity model of active magnetic bearings based on magnetic saturation[J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(9): 1548-1557.
[14]孙云. 磁悬浮轴承控制系统研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014.
[15]葛卓樊,梅磊. 新型模块化永磁偏置磁轴承结构设计与磁场分析 [J]. 轴承, 2024(7): 87-94.
[16]李超,谢振宇,王一建. 基于模糊控制的磁轴承 PID 控制算法研究[J]. 机械制造与自动化, 2022, 51(2): 38-41.
[17] Blumenstock K, Brown G. Novel integrated radial and axial magnetic bearing [C]//Proceedings of the 7th International Symposium on Magnetic Bearings. 2000: 467-471.
[18]徐文婧. 主动磁悬浮轴承的仿真分析及设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
[19]房倩倩. 微型磁悬浮止推轴承设计与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
[20]Zhang C, Ning L, Mohammadzadeh A. Experimental investigation on an innovative stable and online trained type-3 fuzzy controller for structural vibrations [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2025, 200: 109898.
[21]刘春艳, 陈梦涛. 锅炉汽包水位的模糊 PID 控制研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(3): 100-105.
[22]Han B C, Huang Z Y, Le Y. Design aspects of a large scale turbomolecular pump with active magnetic bearings[J]. Vacuum, 2017, 142: 102-108.
[23]王晓玲,张广明. 变论域模糊 PID 磁悬浮轴承控制系统仿真[J]. 仪表技术与传感器, 2012(12): 144-147.
[24]张国荣,席光. 不同控制器对基础移动的电磁轴承-转子系统的减振效果[J]. 轴承, 2024(7): 52-61.
[25]肖朋. 磁力轴承的模糊控制[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2007(3): 245-247.
[26]Carmo Carvalho F, Fernandes de Oliveira M V, Lara-Molina F A, et al. Fuzzy robust control applied to rotor supported by active magnetic bearing[J]. Journal of Vibration and Control, 2021, 27(7/8): 998-1009.
[27]张玉全. 基于滑模变结构的磁悬浮轴承控制方法研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2019.
[28]杨光永, 牟奕铭, 徐天奇. 船舶无刷直流电机速度模糊 PID 控制算法 [J]. 舰船科学技术, 2025, 47(13): 157-161.
[29]Laldingliana J, Biswas P K. Artificial intelligence based fractional order PID control strategy for active magnetic bearing[J]. Journal of Electrical Engineering and Technology, 2022, 17(6): 3389-3398.
[30]成立. 基于模糊逆模型的磁力轴承逆控制系统的设计与仿真[J]. 工业控制计算机, 2016, 29(4): 6-7.