

基于模糊控制的磁轴承PID控制算法研究

李超,谢振宇,吴传响,王一建

(南京航空航天大学 直升机传动技术重点实验室,江苏 南京 210016)

摘要:因磁轴承具有强非线性,单一的PID参数难以实现满意的控制效果。模糊控制具有较佳的鲁棒性、适应性及容错性。结合PID的控制简单、使用方便等优点,设计磁轴承的模糊PID控制算法,实时修正PID控制参数,改善磁轴承的控制效果。通过仿真分析和试验研究,对比模糊PID控制算法和不完全微分PID控制算法的控制效果。研究表明:与不完全微分PID控制算法相比,模糊PID控制算法具有更好的控制效果。

关键词:磁轴承;模糊PID控制;动态性能

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)02-0038-04

Research on PID Control Algorithm of Magnetic Bearing Based on Fuzzy Control

LI Chao, XIE Zhenyu, WU Chuanxiang, WANG Yijian

(National Key Laboratory of Science and Technology on Helicopter Transmission, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: With a single PID parameter, it is difficult for active magnetic bearing to achieve satisfactory control effects due to its strong nonlinearity, while fuzzy control has better robustness, adaptability and better fault tolerance. Therefore, with the advantages of simple control and easy use by PID, the fuzzy PID control algorithm of the magnetic bearing is designed, the PID control parameters is modified in real time, and the control effect of the magnetic bearing is improved. Through simulation analysis and experimental research, the control effects of fuzzy PID control algorithm and incomplete derivative PID control algorithm are compared. The research results show that the fuzzy PID control algorithm, in comparison with the incomplete derivative PID control algorithm, achieves better control effect.

Keywords: active magnetic bearing; fuzzy PID control; dynamic performance

0 引言

主动式磁悬浮轴承(简称磁轴承)利用可控电磁力实现转子无接触支承,具有无磨损、寿命长、可靠性高、支承刚度和支承阻尼可调等优点,可实现在线检测和故障诊断,具有智能机械的潜力,被视为支承领域的一次技术革命,广泛应用于各类旋转机械^[1-2]。

磁轴承本质上是不稳定的,必须施加控制才能实现转子的稳定控制,而控制器的性能优劣则决定了磁轴承的支承性能。国内外都成功将各类控制方法应用于磁轴承领域,如PID控制、滑模控制、鲁棒控制、模糊控制、神经网络控制等^[3]。

模糊控制模拟人的思维方式,不需要建立系统准确的数学模型,为解决复杂非线性、时变性及不确定性等控制难题提供了一种新的方式,具有较强的鲁棒性^[4]。

本文综合模糊控制与PID控制的优点,设计磁轴承的模糊PID控制算法,既能发挥PID的控制简单、使用方便等优点,也能模拟专家经验,达到良好的控制效果。

1 试验系统及各环节传递函数

磁轴承作为一种机电一体化产品,包括系统的机械结构和复杂的电控系统。机械结构主要包括转子、磁轴承、电机和基座等;电控系统主要包括位移传感器、控制器、功率放大器等环节。

本文所用的磁轴承试验台的总体结构如图1所示。

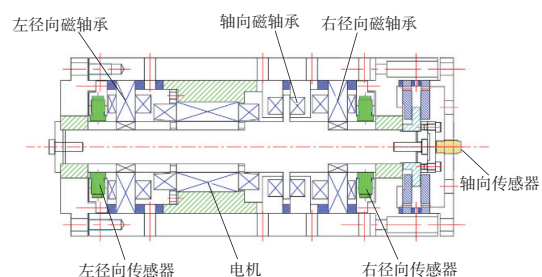


图1 磁轴承试验台机械结构

磁轴承控制系统原理如图2所示。

第一作者简介:李超(1995—),男,山东枣庄人,硕士研究生,研究方向为磁悬浮轴承技术。

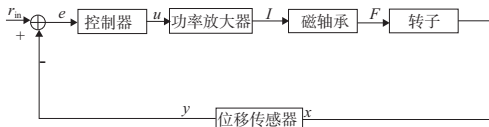


图2 磁轴承控制原理

位移传感器实时检测转子的位置,经过二次电路与给定值比较得到转子的偏差信号,控制器产生对应的控制信号,由功率放大器处理后输出电流至电磁铁产生电磁力,使转子返回设定位置。

采用实验室研制的电涡流位移传感器,其灵敏度高、线性范围大、抗干扰能力强,完全满足工业精度要求。经测试,其通频带为 10 kHz,时间常数为 1.59×10^{-4} s。设计的径向保护气隙为 0.3 mm,对应传感器二次电路的最大输出 5 V,故其放大倍数为 16 667 V/m。电涡流位移传感器的传递函数可用一阶惯性环节表示为

$$G_s(s) = \frac{A_s}{1+T_s S} = \frac{16\ 667}{1+1.59 \times 10^{-4} s}$$

所设计的磁轴承的偏置电流为 2 A,则线圈中的电流范围为 0~4 A,控制器输出的控制信号为 -5~+5 V。因此,功率放大器的放大倍数为 0.4 A/V。经测试,功率放大器的时间常数为 3.183×10^{-5} s。功率放大器的传递函数可用一阶惯性环节表示为

$$G_p(s) = \frac{A_p}{1+T_p s} = \frac{0.4}{1+3.183 \times 10^{-5} s}$$

所设计的磁轴承部分参数如表 1 所示。

表1 磁轴承部分参数

符号	参数名称	参数取值
N	磁极数	8
N_r	线圈匝数	60
I_0	偏置电流/A	2
P_r	磁极宽度/m	7×10^{-3}
b_r	磁轴承轴向宽度/m	17×10^{-3}
s_0	磁轴承平均气隙/m	2.5×10^{-4}
c_{r0}	保护轴承总气隙/m	3×10^{-5}
k_i	电流刚度系数/(N/A)	63.7
k_s	位移刚度系数/(N/m)	510 000

通常采用差动控制方式实现转子任意位置的控制,其电磁力表达式为

$$F = k \left[\frac{(I_0 + I_c)^2}{(s_0 + s)^2} - \frac{(I_0 - I_c)^2}{(s_0 - s)^2} \right] \cos \alpha$$

在悬浮中心进行泰勒级数展开并忽略高次项,得磁轴承的线性化磁力表达式为

$$F = k_i I_c + k_s s$$

式中:

$$k_i = \frac{\mu_0 A_0 N_r^2 I_0}{s_0^2} \cos \alpha; k_s = -\frac{\mu_0 A_0 N_r^2 I_0^2}{s_0^3} \cos \alpha$$

其中: k_i 为磁轴承的电流刚度; k_s 为磁轴承的位移刚度; α

为电磁力与中心线夹角,与磁极数有关。

根据牛顿运动定律,当外力为 0 时,可以得到转子受力为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} - k_i(I - I_0) + k_s(s - s_0) + mg = F(I_0, s_0)$$

对上式进行拉普拉斯变换,可以得到磁轴承传递函数:

$$G(s) = \frac{k_i}{ms^2 + k_s} = \frac{63.7}{5s^2 - 510\ 000}$$

2 控制算法设计及仿真

工业控制中通常在 PID 控制器中引入一阶低通滤波器,构成不完全微分 PID 控制器,避免微分项的高频干扰,以应对过程中的时变不确定性等因素。

磁轴承的不完全微分 PID 控制框图如图 3 所示。

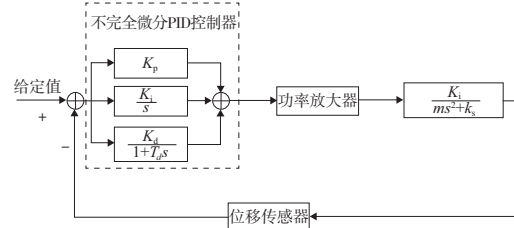


图3 磁轴承不完全微分PID控制框图

在 Simulink 搭建的不完全微分 PID 控制器仿真模型如图 4 所示。

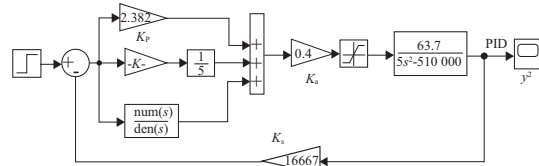


图4 磁轴承不完全微分PID控制仿真模型

模糊 PID 控制器根据模糊控制规则进行模糊推理,对常规 PID 参数进行调整,以满足系统对控制参数的要求。磁轴承的模糊 PID 控制器结构如图 5 所示。

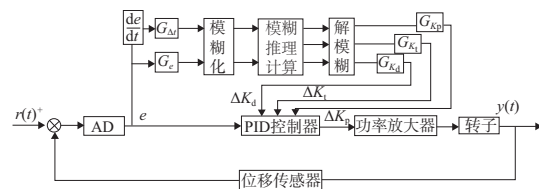


图5 磁轴承模糊PID控制器框图

取偏差和偏差变化率作为系统的输入变量。传感器二次电路的输出电压范围为 [0, 5], 则偏差的基本论域为 [-2.5, 2.5], 取偏差变换率的基本论域为 [-8, 8]。取偏差和偏差变化率的模糊论域为 [-6, 6], 模糊控制器的三个输出模糊论域也取为 [-6, 6], 取模糊子集均为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}。

选择三角形隶属函数作为输入输出量的隶属函数。

其对输入变化反应迅速、控制分辨率高、灵敏度高、计算方便快捷。

选用重心法作为输出量的解模糊化方法。其能够综合所有元素的信息,具有更好的控制效果。

模糊控制规则是对专业知识和实践经验的概括和抽象。根据偏差和偏差变化率选择控制参数的原则^[5-6],并结合实际调试经验,建立模糊控制规则表。设计思想是在保证系统稳定的前提下,使系统具有较小的超调量和较快的响应速度。其中 ΔK_p 的模糊控制规则表如表 2 所示。

表 2 ΔK_p 模糊控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

Simulink 中搭建的磁轴承模糊 PID 控制器的仿真框图如图 6 所示,与不完全微分 PID 仿真对比如图 7 所示。

图 7 中曲线 1 为模糊 PID 控制器的仿真曲线,曲线 2 为不完全微分 PID 控制器的仿真曲线。不完全微分控制器下,转子的超调量为 20%,调整时间为 0.075 s;模糊 PID 控制器下,转子的超调量为 6%,恢复时间为 0.02 s。虽然两种控制方式都能实现转子的稳定控制,但是模糊 PID 控制器具有更好的控制性能。

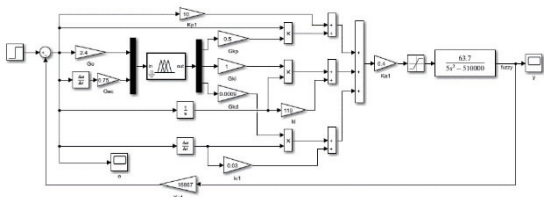


图 6 磁轴承模糊 PID 控制仿真模型

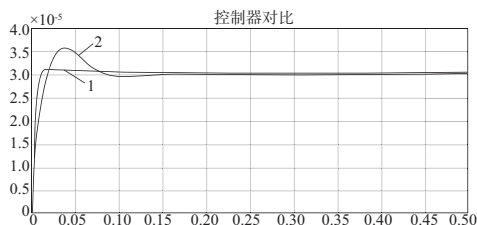


图 7 仿真结果对比

3 模糊控制器 FPGA 实现

本文设计的模糊 PID 控制器主要包括 AD 控制模块、模糊 PID 控制模块、PI 模块和 PWM 模块。FPGA 内的程序流程图如图 8 所示。

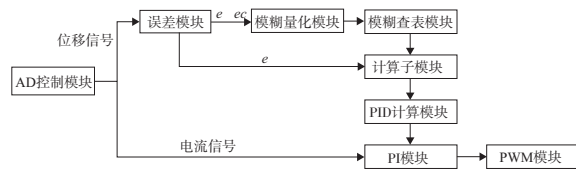


图 8 FPGA 内部程序流程

3.1 AD 控制模块

本文选用 AD7938 作为模数转换芯片。AD7938 为 12 位高速并行 ADC,采用片内基准电压作为参考电压,最大输入为 5 V,对应数字量 4 095,则其采样精度为 1.22 mV,满足本课题需要。

为了保证转换的数据稳定,设计采用 25 个时钟周期为一次读写操作时序。AD7938 的采样时钟由 FPGA 提供,本文设置的工作频率为 25 MHz,则单通道采样频率为 200 kHz。转子额定转速为 200 Hz,完全满足采样要求。

3.2 模糊 PID 算法模块

模糊控制算法逻辑复杂,若直接设计硬件电路,将占用大量的资源,需要较长的运算时间,导致采样不能及时反馈,造成控制失稳。本文采用离线制表、在线查表的方式设计模糊 PID 控制器。借助模糊工具箱设计模糊控制系统,在 MATLAB 中得到模糊查询表,将其存储于 FPGA 芯片中,通过实时查询该表输出控制。

模糊 PID 算法模块包括误差计算模块、模糊控制模块、计算模块和 PID 运算模块四个子模块。其中,模糊子模块包括模糊量化和模糊查表两个子模块。

1) 误差计算子模块

本模块主要求解偏差和偏差变化率,涉及输入值与给定值的减法计算、偏差的寄存和偏差变化率的计算。

2) 模糊量子模块

采用十三级对偏差和偏差变化率进行量化,并采用四位二进制编码对其编码。偏差和偏差变化率的地址编码一起构成八位查表地址,其中高四位为偏差 e 编码,低四位为偏差变化率 ec 的编码。八位地址可查询 256 个空间存储。假设偏差输入为 0.5,偏差变化率输入为 2,按照划分,偏差位于区间 $[0.2, 0.6)$,对应的量化等级为 1,论域编码为 0001,偏差变化率位于区间 $[1.5, 2.5)$,量化等级为 2,编码为 0010,则寻址地址为 0001_0010。

3) 模糊查表子模块

按照设计的模糊控制系统,在 MATLAB 中得到三个输出变量的模糊查询表。在 Quartus II 中调用 ROM IP 核存储三个模糊查询表。由于实际得到的控制值存在小数部分,为简化计算,本文对其放大 64 倍取整后存入 ROM,在后续计算中通过移位操作缩放即可。

4) 计算子模块

由于模糊控制模块的运算需要时间,为了保证偏差与 PID 参数对应,需要设计延时模块。本模块完成延时、模糊输出值的缩小、PID 参数运算,以及 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 的计算。延时主要通过计数器完成;缩放通过移位操作完成;PID 参数运算计算公式如下式所示,注意扩

展一位,避免数据位溢出; $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 和 $e(k-2)$ 的计算主要通过寄存完成:

$$K_p = K_{p0} + \Delta K_p$$

$$K_i = K_{i0} + \Delta K_i$$

$$K_d = K_{d0} + \Delta K_d$$

5) PID 计算子模块

目前使用的数字 PID 算法主要有位置型算法和增量型算法两种。本文选择增量型数字 PID 算法。因其不易产生误差累计,能够实现更好的控制效果,数学表达式为

$$\Delta u(k) = Ae(k) + Be(k-1) + Ce(k-2)$$

其中: $A=K_p+K_i+K_d$; $B=-K_p-2K_d$; $C=K_d$ 。

使用图 9 所示的结构进行增量型数字 PID 算法设计。其中 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 、 A 、 B 、 C 均由前述计算子模块计算输入。

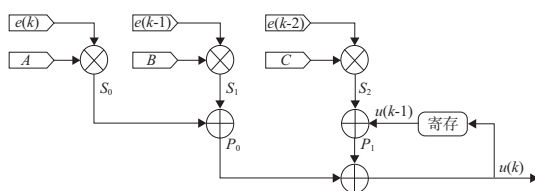


图 9 增量型数字 PID 设计结构图

FPGA 的乘法运算,占用资源较多且运算速度较慢。本文通过调用乘法和加法 IP 核完成乘法和加法运算。

3.3 PI 模块

本模块的设计目的是保证电流跟随控制信号变化,同时生成差动控制的两个控制信号。当积分饱和时,控制量在饱和区域停留时间较长,不利于控制。针对该现象,设计抗积分饱和算法。在计算 $u(k)$ 时,先确定 $u(k-1)$ 是否超限,当其大于最大值时,只累加负偏差;小于最小值时,只累加正偏差,避免执行机构到达极限位置。

3.4 PWM 模块

本模块将 PI 模块产生的控制信号与三角波比较以获得驱动信号。通过计数器完成数字三角波设计。计数器的时钟频率为 50 MHz,计数 5 000 为一个周期,对应的三角波频率即为 10 kHz。为实现差动控制,将差动的两路信号与互补的三角波比较,输出差动 PWM 波。同时,设计死区时间避免 IGBT 误导通烧毁器件。

4 试验验证

本文使用图 10 所示试验系统完成模糊 PID 控制器的试验验证。其中,变频器驱动内置电机带动转子高速旋转;电控系统采用设计的模糊 PID 控制器,实现转子的五自由度支承。

利用示波器检测转子位移和线圈电流。借助数字采集卡及实验室开发的虚拟数据采集仪,记录升速过程转子振动情况。利用 origin 绘制转子的同频振幅曲线如图 11 所示。

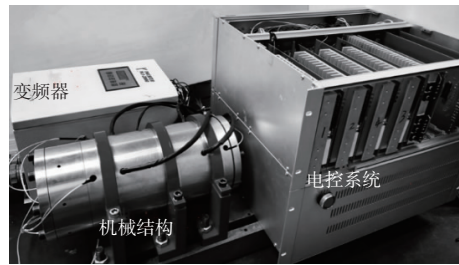


图 10 试验系统

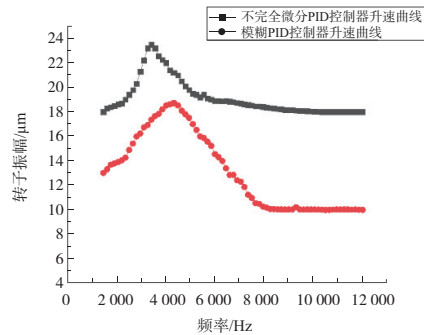


图 11 两种控制算法转子同频振幅曲线

从图 11 可以看出,采用两种控制算法均能实现转子的稳定悬浮和旋转。采用不完全微分 PID 控制器时,转子在额定转速 12 000 r/min 稳定旋转时,转子的振动量为 18 μm ;采用模糊 PID 控制器时,转子在额定转速下稳定旋转时,转子振动量为 10 μm 。

5 结语

本文针对磁轴承采用不完全微分 PID 控制器难以实现理想的控制效果,设计了模糊 PID 控制系统。在 Simulink 中搭建了两种控制器的仿真模型,仿真结果表明,模糊 PID 控制器能达到更好的控制效果。搭建了五自由度磁轴承试验台,实现了转子的高速旋转,对比转子的同频振幅曲线。结果表明:模糊 PID 控制器确能减小转子振动,实现更好的控制效果。

参考文献:

- [1] SCHWEITZER G, BLEULER H, TRAXLER A. Active magnetic bearings: basics, properties and application of active magnetic bearings[M]. Switzerland: ETH, 1994.
- [2] 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.
- [3] 李媛媛,朱焜秋,朱利东,等. 磁悬浮轴承发展及关键技术研究现状[J]. 微电机,2014,47(6):69-73,82.
- [4] 范军芳,王伟,许晓飞. 模糊控制[M]. 北京:国防工业出版社,2017.
- [5] HUNG J Y. Magnetic bearing control using fuzzy logic[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995,31(6):1492-1497.
- [6] 张云聪,谢振宇,程伟超,等. 飞轮电池模糊控制策略研究[J]. 机械制造与自动化,2020,49(4):149-153,157.

收稿日期:2021-01-12