

磁气组合轴承的模糊PID控制算法设计

陈李成,谢振宇,郝建胜,吴炎

(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:为了提高磁气组合轴承的动态性能,利用模糊控制可对PID参数实时自调整的特性,研究了应用于磁气组合轴承的模糊PID控制算法。仿真结果表明,模糊PID控制算法可有效改善系统的调节时间和超调量,使磁气组合轴承具有良好的控制精度。

关键词:磁气组合轴承;模糊PID算法;MATLAB仿真

中图分类号:TH133.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)02-0143-05

Design of Fuzzy PID Control Algorithm for Magnetic-Gas Bearing

CHEN Licheng, XIE Zhenyu, HAO Jiansheng, WU Yan

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

Abstract: In order to improve the dynamic performance of magnetic-gas bearing, the fuzzy PID control algorithm was applied to magnetic-gas bearing with the characteristics of PID parameters adjusted in real time by fuzzy control. The simulation results show that the fuzzy PID control algorithm can effectively improve the adjusting time and overshoot of the system in benefit of magnetic-gas bearing with high control accuracy.

Keywords: magnetic-gas bearing; fuzzy PID algorithm; MATLAB simulation

0 引言

随着航空、航天、医疗、化工、石油、汽车等行业的发展,普通轴承的性能已经不能满足复杂、苛刻的使用需求。磁轴承和气体轴承因为具有无磨损、转速高、功耗低、噪声小、寿命长等优点,特别适合用于高速度、高精度旋转机械。国内外对于磁轴承和气体轴承已经开展了大量的研究工作,磁轴承和气体轴承的应用也日渐成熟,但是在精度要求、刚度要求、承载要求更高的场合,单一的磁轴承或者气体轴承难以满足使用需求。因此,磁气组合轴承便逐渐吸引了国内外许多科研人员的关注。

在磁气组合轴承的控制算法方面,应用最多且最成熟的是PID控制,除此之外研究的都是现代控制理论^[1],例如模糊控制、滑模变结构控制、神经网络控制、鲁棒控制、线性二次型最优控制以及自适应控制等。模糊控制是现代智能控制的一个分支,是以模糊集合理论、模糊语言变量、模糊逻辑推理及解模糊化为基础的计算机数字控制方法。简单来说就是使计算机能够像人一样对被控对象进行逻辑判断控制。

气体轴承的引入导致了磁气组合轴承的工况更加复杂,而成熟的PID控制在复杂工况下又无法实现参数的自适应整定。因此,本文在考虑了气体轴承动态承载力的情况下,研究了应用于磁气组合轴承的模糊PID控制算法。

1 磁气组合轴承转子系统各环节的数学模型

图1为采用差动控制策略的轴向磁气组合轴承转子系统受力图,磁轴承的电磁力可表示为^[2]

$$F_{磁} = F_{磁2} - F_{磁1} = 2k_i i_z - 2k_z z \quad (1)$$

其中: k_i 为电流刚度; k_z 为位移刚度。

气体轴承的承载力 $F_{气} = F_{气2} - F_{气1}$, 则根据牛顿第二定律,磁气组合轴承的传递函数可表示为

$$Z(s) = \frac{1}{ms^2} (2k_i i_z - 2k_z z + F_{气}) \quad (2)$$

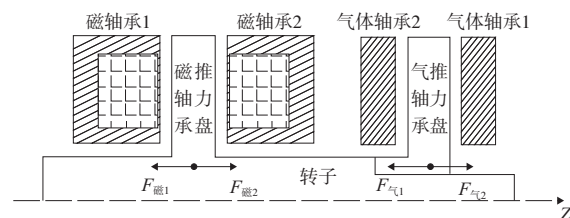


图1 轴向磁气组合轴承转子系统受力图

本文采用电涡流位移传感器,其传递函数可以用一阶惯性环节来表示,即

$$G_s(s) = \frac{A_s}{1+T_s s} = \frac{50\ 000}{1+1.59 \times 10^{-4} s}$$

功率放大器采用电流差动控制的输出方式,其传递函

第一作者简介:陈李成(1994—),男,江苏宿迁人,硕士研究生,研究方向为磁轴承、气体轴承。

数用一阶惯性环节来表示:

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

本文采用模糊 PID 控制器,模糊算法的具体设计将在下文详细论述,这里仅简要说明 PID 控制器的数学模型,其传递函数可表示成如下形式:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right)$$

式中: K_p 为比例系数; τ_i 为积分时间常数; τ_d 为微分时间常数; $U(s)$ 为控制量; $E(s)$ 为控制偏差。

2 基于 PID 控制器的控制算法设计与仿真

2.1 PID 控制系统的设计

磁气组合轴承控制系统传递函数框图如图 2 所示,其中传感器 $G_s(s)$ 、控制器 $G_c(s)$ 、功率放大器 $G_p(s)$ 以及磁气组合轴承的传递函数在上文中已经写明。现将其转换为 Simulink 的系统仿真模型,轴向磁气组合轴承 PID 控制系统离散仿真模型如图 3 所示。图中各环节传递函数都已搭建完成,其中,气体轴承只有在转子高速转动的情况下才会

产生承载力,故用 sin 函数来描述转子的转速以及振动幅值,其动态承载力用 S-Function 模块编写的程序加载到仿真模型中。该仿真模型是基于 PID 控制器来设计的,其中 P 为比例 (proportion)、I 为积分 (integration)、D 为微分 (differentiation),比例可调节系统响应速度,积分可减小系统的稳态误差,微分可改善系统的动态性能。

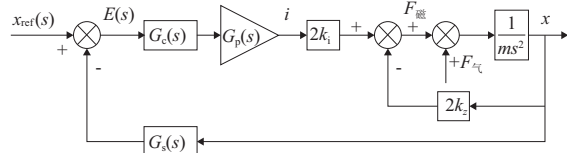


图 2 轴向磁气组合轴承控制系统传递函数框

目前,PID 控制器^[3]以其结构简单、鲁棒性好、应用成熟等优势成为工业上应用最广泛的控制器。PID 控制器最关键的一个环节是 K_p 、 K_i 、 K_d 等相关参数的确定。

本文利用 MATLAB Simulink 自带的 PID 模块对其相关参数进行自整定,获得较好的参数后,对图 3 所示的磁气组合轴承 PID 控制系统仿真模型进行仿真,得到了如图 4 所示的磁气组合轴承 PID 控制系统响应图。从图 4 可以看出,系统响应的超调量较小,大概为 0.25 V,调节时间也较短,大概为 0.02 s。

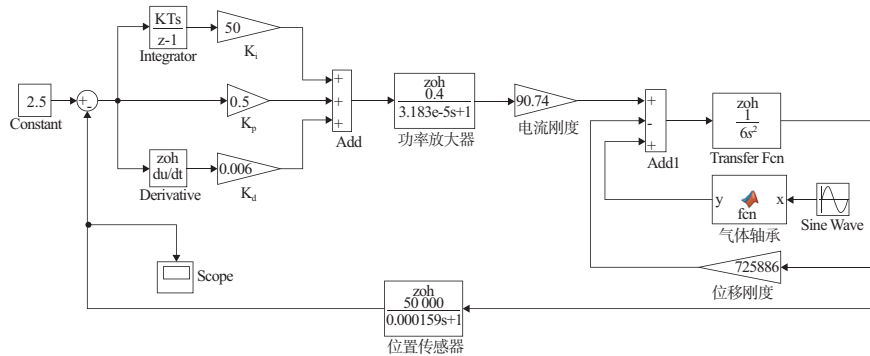


图 3 磁气组合轴承 PID 控制系统离散仿真模型

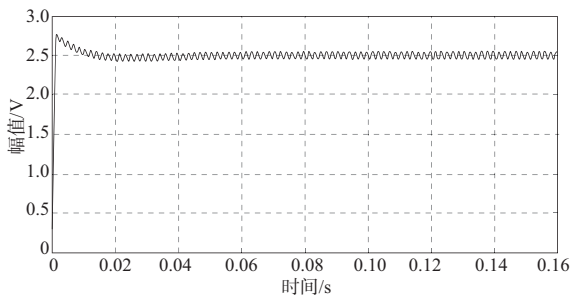


图 4 磁气组合轴承 PID 控制系统响应图

2.2 偏差及偏差变化率的波动范围

下文要将系统的偏差 e 以及偏差变化率 ec 作为模糊控制器的输入,模糊控制器的模糊论域一般为定值,本文的模糊论域取 $[-3, 3]$ 。然而,偏差 e 以及偏差变化率 ec 的波动范围未必在模糊论域内,这时需要相应的量化因子,使得偏差以及偏差变化率乘以量化因子后能够包含于

模糊论域内。因此,需要根据系统的偏差以及偏差变化率的波动范围,来初步确定模糊控制器的量化因子。

图 5 为偏差的波动范围,从图中可以看出,在阶跃信号下,偏差的波动范围为 $-0.25 \text{ V} \sim 2.5 \text{ V}$,稳定后,偏差在 $\pm 0.05 \text{ V}$ 左右波动。图 6 为偏差变化率的波动范围,从图中可以看出,在阶跃信号下,偏差变化率的波动范围为 $-0.07 \text{ V} \sim 0.01 \text{ V}$,稳定后,偏差变化率在 $\pm 0.0025 \text{ V}$ 左右波动。

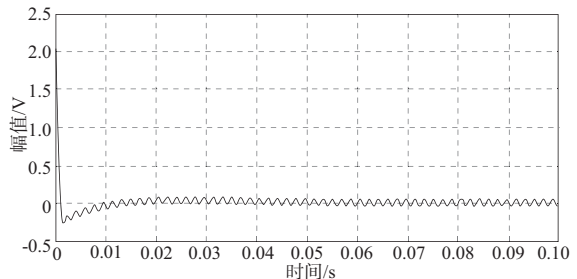


图 5 偏差波动范围

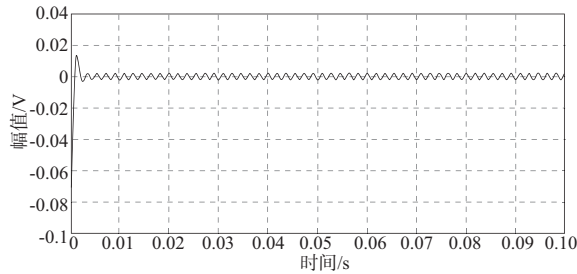


图6 偏差变化率波动范围

3 基于模糊PID控制器的系统设计

模糊控制器的设计流程主要包括以下几个步骤:确定模糊控制器的结构、确定模糊论域、确定输入量的量化因子、确定模糊控制规则、确定解模糊化的方法、确定输出量的比例因子。下文会具体阐述以上关键步骤的详细内容。

3.1 模糊控制器的结构设计

结合本文研究的磁气组合轴承,模糊PID控制器^[4]结构如图7所示。图中,模糊控制器通过对轴向磁气组合轴承控制系统的偏差 e 以及偏差变化率 ec 进行运算处理后,得到了比例、积分、微分的调节量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,再通过此调节量实时调整PID控制器中的相应参数,最终实现了模糊PID自适应整定的控制。

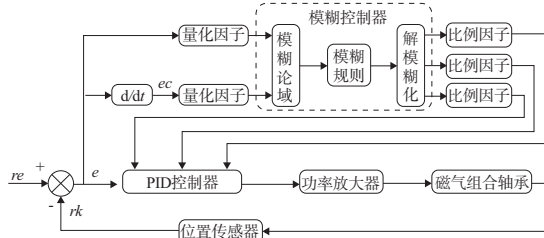


图7 模糊PID控制器结构图

3.2 输入变量的量化因子确定

由图7可知,模糊PID控制器的输入量为偏差 e 以及偏差变化率 ec ,本文的模糊论域设定为 $[-3,3]$, re 为参考信号,设定为 $2.5V$, rk 为传感器输出的位置信号,其输出范围为 $0\sim 5V$,则偏差信号的范围为 $[-2.5,2.5]$ 。据此可以推断偏差 e 的量化因子为 $3/2.5$ 。另外考虑到安全因素,对偏差进行限幅,最终偏差 e 的量化因子取2。关于偏差变化率的量化因子可参考图6来初步确定,在阶跃信号下,其波动范围为 $-0.07V\sim 0.01V$,因此,偏差变化率 ec 的量化因子为 $3/0.07$,同样对偏差变化率进行限幅,最终偏差变化率 ec 的量化因子取100。

3.3 模糊化

量化因子确定后,偏差 e 以及偏差变化率 ec 通过量化因子转换成变量 E 和 EC ,假设 E 与 EC 在其模糊论域上定义了 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 7个模糊子集,即负

大、负中、负小、零、正小、正中、正大。另外,上文已经提到过模糊论域设定为 $[-3,3]$,则NB对应为 -3 ,NM对应为 -2 ,NS对应为 -1 ,ZO对应为 0 ,PS对应为 1 ,PM对应为 2 ,PB对应为 3 。

模糊子集确定后,需要确定隶属函数。MATLAB Simulink的模糊控制工具箱中给出了11种隶属函数,本文选用的隶属函数为三角形隶属函数。图8为三角形隶属函数的一般形式,通常三角形隶属函数由图中的 a 、 b 、 c 3个参数确定,其表达式如下所示:

$$\text{trimf}(a, b, c) = \begin{cases} 0, & x < a \text{ 或 } x > c \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \end{cases}$$

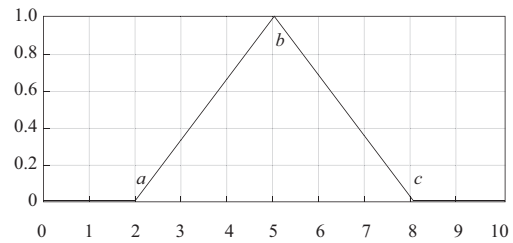


图8 三角形隶属函数

3.4 模糊控制器的规则设计

模糊PID控制器的规则是依据理论经验以及调试经验来确定的^[5-6]。当系统的偏差 e 以及偏差变化率 ec 发生变化时,PID的参数也要及时做出相应调整。一般的调整经验如下:当 $|e|$ 较大时,比例系数 P 要相应地增大,同时减小微分系数 D 来防止微分过饱和;当 $|e|$ 较小时,减小比例系数 P ,增加积分系数 I 来获得更好的稳态性能,在这种情况下,若 $|ec|$ 较大,则减小微分系数 D 来增加系统抗干扰能力,若 $|ec|$ 较小,则增加微分系数;当 $|ec|$ 较大时,偏差变化的速率非常大,此时需要减小比例系数 P ,增加积分系数 I 来防止偏差急速地变化。

按照PID控制器的控制规律以及调试经验,考虑 K_p 、 K_i 、 K_d 三个系数与 e 、 ec 的关系,设计模糊控制规则。如表1-表3所示,分别为比例系数 K_p 模糊控制规则表、积分系数 K_i 模糊控制规则表、微分系数 K_d 模糊控制规则表。

表1 比例系数 K_p 模糊控制规则表

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

表2 积分系数 K_i 模糊控制规则表

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

表3 微分系数 K_d 模糊控制规则表

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

3.5 解模糊化

解模糊化是获得精确控制量的过程,使用较多的解模糊化方法有质心法、最大隶属度法以及系数加权平均法。

本文选取的解模糊化方法为质心法(centroid)。质心法是将隶属度函数与横坐标围成面积的质心作为解模糊化的输出值,质心法的输出控制比较灵敏,即使有较小的输入量,输出量也会发生变化。质心法的离散公式如下:

$$u_0 = \frac{\sum_{k=1}^m u_k \mu_u(u_k)}{\sum_{k=1}^m \mu_u(u_k)}$$

其中: u_k 为模糊规则表的相应参数,即 NB、NM、NS、ZO、PS、PM、PB; $\mu_u(u_k)$ 为属于 u_k 的隶属度乘积。

3.6 输出的比例因子确定

比例因子是对模糊控制器的输出量进行缩放的系数。本文的模糊控制器输出如图9-图11所示,分别为比例调节量 ΔK_p 、积分调节量 ΔK_i 、微分调节量 ΔK_d 。

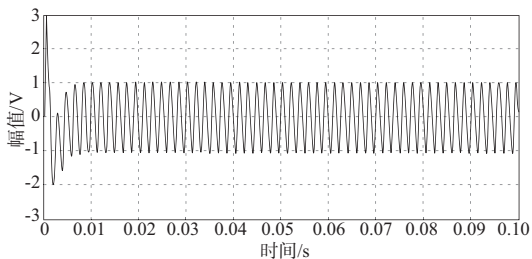


图9 比例调节量 ΔK_p 的波动范围

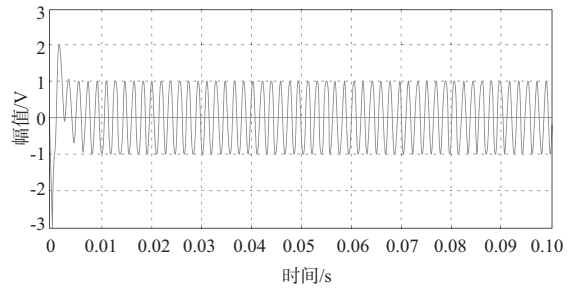


图10 积分调节量 ΔK_i 的波动范围

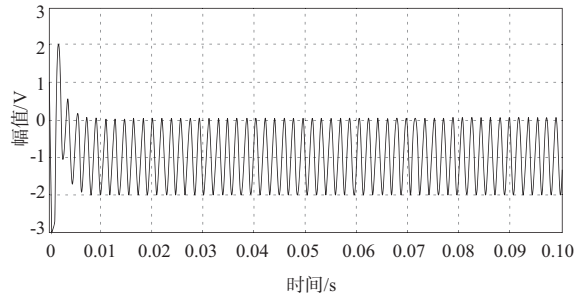


图11 微分调节量 ΔK_d 的波动范围

根据输出量的波动范围以及 MATLAB Simulink 的仿真可以初步确定比例因子的大小,输出值的比例因子会影响整个系统的响应性能,比例因子越大,模糊控制输出的调节参数对 PID 参数的影响就越大。

4 轴向磁气组合轴承模糊PID控制系统仿真

轴向磁气组合轴承模糊PID控制系统离散仿真模型如图12所示。图中使用了 S-Function 模块对模糊控制器,即 fuzzy_control 进行了 m 语言编程。

由图12可知,系统的偏差以及偏差变化率经过模糊控制器运算输出调节量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ;3个调节量经过比例因子缩放后与PID控制器的初始参数 K_p 、 K_i 、 K_d 相加得到整定后的3个参数;在通过PID控制器运算输出控制信号;控制信号通过控制功率放大器对磁气组合轴承进行实时控制,从而使转子稳定悬浮。

模糊PID的控制参数如表4所示。从表中可以看出,模糊控制器输出的比例调节量 ΔK_p 经过比例因子缩放后对比例系数 K_p 最大会产生75%的影响;同样,积分调节量 ΔK_i 经过比例因子缩放后对积分系数 K_i 最大会产生20%的影响;微分调节量 ΔK_d 经过比例因子缩放后对微分系数 K_d 最大会产生17%的影响。由此可以看出,模糊控制器对PID控制器所起的调节作用还是比较大的。

表4 模糊PID控制参数

控制量	取值	调节系数取值范围	比例因子	影响系数/%
K_p	0.5	$\Delta K_p [-3, 3]$	0.016 7×7.5	75
K_i	50	$\Delta K_i [-3, 3]$	1.67×2	20
K_d	0.006	$\Delta K_d [-3, 3]$	0.000 17×2	17

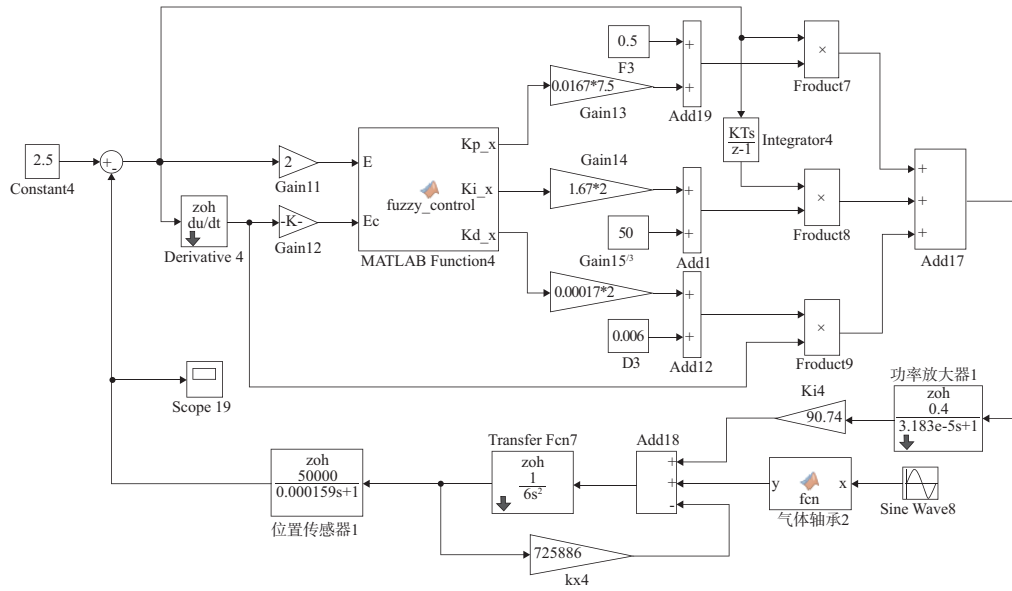


图 12 磁气组合轴承模糊 PID 控制系统离散仿真模型

轴向磁气组合轴承模糊 PID 与普通 PID 控制系统响应对比图如图 13 所示。图中 1 号波形是 PID 控制系统仿真模型得到的系统响应图,2 号波形是模糊 PID 控制系统仿真模型得到的系统响应图。从图中可以看出,模糊 PID 控制器与 PID 控制器相比,得到的系统响应波形超调量极小,约为 0.05 V,调节时间也极短,约为 0.002 s。因此,本文设计的模糊 PID 控制器具有较好的自整定能力,使得系统具有较好的控制性能。

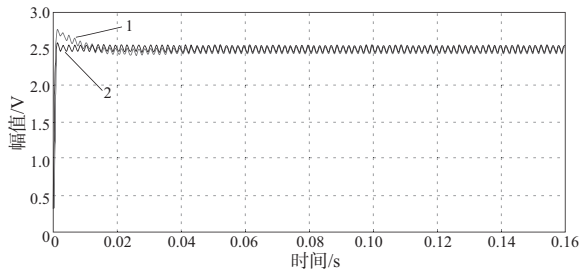


图 13 模糊 PID 与普通 PID 控制系统响应对比图

5 结语

与普通 PID 控制相比,模糊 PID 控制具有参数自调整特性。仿真结果表明,模糊 PID 控制算法可有效改善磁气组合轴承系统的动态性能,减少调节时间,减小超调量,提高系统的控制精度。

参考文献:

- [1] 王国军,陈松乔. 自动控制理论发展综述[J]. 微型机与应用, 2000,19(6):4-7.
- [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] RAJ R,MOHAN B M. General structure of Interval Type-2 fuzzy PI/PD controller of Takagi - Sugeno type [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2020,87:103273.
- [4] 王述彦,师宇,冯忠绪.基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术,2011,30(1):166-172.
- [5] 曹广忠,潘剑飞,黄苏丹. 磁悬浮系统控制算法及实现[M]. 北京:清华大学出版社,2013.
- [6] 李晓丹.模糊 PID 控制器的设计研究[D]. 天津:天津大学,2005.

收稿日期:2020-03-09