

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2024.02.049

# 无轴承永磁同步电主轴的模糊滑模位移控制

白郭蒙,单文桃,恽之恒

(江苏理工学院 机械工程学院,江苏 常州 213001)

**摘要:**为满足无轴承永磁同步电主轴高性能转子位移控制要求,结合遗传算法寻优快及模糊控制能柔化控制信号的优点,设计一种将滑模等效控制、模糊控制和遗传算法有机结合的电主轴转子位移控制策略,在滑模控制中引入模糊切换增益,并通过遗传算法对模糊滑模控制器参数进行优化,从而获得最佳控制效果。结果表明:模糊滑模控制降低了系统在传统滑模控制下的抖振,遗传算法优化后模糊滑模控制下的不同轴向稳态转子振动峰值较优化前分别减小了53%和27.5%。

**关键词:**无轴承永磁同步电主轴;位移控制;滑模控制;模糊控制;遗传算法

**中图分类号:**TM301.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2024)02-0234-05

## Fuzzy Sliding Mode Displacement Control of BPMSMS

BAI Guomeng, SHAN Wentao, YUN Zhiheng

(Institute of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China)

**Abstract:** To meet the requirements of high performance rotor displacement control of bearingless permanent magnet synchronous motorized spindles, and by integrating the advantages of fast genetic algorithm and softening control signal, a rotor displacement control strategy which organically combines sliding mode equivalent control, fuzzy control and genetic algorithm is proposed. The fuzzy switching gain is introduced in the sliding mode control. The fuzzy sliding mode controller parameters are optimized by genetic algorithm to obtain the best control effect. The results show that the fuzzy sliding mode control reduces the chattering of the system under the traditional sliding mode control. The peak-to-peak values of different axial steady-state rotor vibrations under fuzzy sliding mode control optimized by the genetic algorithm are reduced by 53% and 27.5% respectively.

**Keywords:** bearingless permanent magnet synchronous motorized spindle; displacement control; sliding mode control; fuzzy control; genetic algorithm

## 0 引言

高速电主轴作为数控机床的核心功能部件之一,具有高转速、高精度和高效率等特点<sup>[1-2]</sup>。随着无轴承电机研究的不断发展,以无轴承电机为内核的无轴承永磁同步电主轴将具有更加重要的研究意义。无轴承永磁同步电主轴(bearingless permanent magnet synchronous motorized spindle, BPMSMS)既继承了永磁同步电主轴的优良特性,又加入了无轴承永磁同步电机的转子悬浮功能,可以通过悬浮绕组通电产生悬浮力控制转子位移,进一步避免了实际工况中因转子振动而导致的主轴温升、噪声等问题。在实际生产加工过程中,电主轴常用转子磁场定向控制,故无轴承永磁同步电主轴可沿用 $i_{Md}^*=0$ 的转子磁场定向控制并

配合使用位移-电流双闭环控制<sup>[3]</sup>,转矩绕组和悬浮力绕组通入相同频率的电流,并且两绕组极数相差一时,电机内部可以产生稳定的可控悬浮力。

针对无轴承电机位移控制方法的研究,国内外学者提出了诸多控制方案和改进措施。文献[4]提出采用模糊PID控制器代替传统PID控制器的方法,解决了传统PID控制器不能在线实时整定参数的问题。文献[5]设计了基于自抗扰控制的转速控制器和位移控制器,虽有效地克服了比例、积分、微分控制的先天不足,但缺点是控制器参数较多,实际加工中调参困难,难以应用。文献[6]中针对悬浮控制系统提出了一种 $H_\infty$ 鲁棒控制,虽然加强了对外部干扰的抑制作用,但是其灵敏度加权函数在实际情况中的选取存在一定

**基金项目:**江苏省青蓝工程中青年学术带头人项目(KYQ20004);江苏省研究生实践创新计划项目(SJCX21\_1299)

**第一作者简介:**白郭蒙(1997—),男,江苏泰州人,硕士研究生,研究方向为无轴承永磁同步电主轴控制技术, baiguomeng1997@163.com。

困难。而文献[7]中采用了滑模控制策略(sliding mode control, SMC),其具有动态响应较快、对外部扰动不敏感等特点,控制器设计过程也较为简单,虽存在抖振问题,但可以选择合适的趋近律或结合智能控制算法柔化控制信号,达到降低抖振的目的。

本文为实现表贴式无轴承永磁同步电主轴的高精度位移控制,首先根据转子运动方程设计了滑模等效位移控制器;其次,为降低系统抖振引入了模糊切换增益,设计了模糊滑模控制器(fuzzy sliding mode control, FSMC);然后提出一种基于遗传算法优化的模糊滑模控制(fuzzy sliding mode control optimized by genetic algorithm, GAFSMC)方法,进一步优化控制参数,提高系统控制性能;最后,对传统滑模控制、模糊滑模控制和遗传算法优化的模糊滑模控制分别进行了仿真对比分析,验证了遗传算法优化的模糊滑模控制的可行性和优越性。

## 1 无轴承永磁同步电主轴数学模型

无轴承永磁同步电主轴与无轴承电机一样,都具有旋转部分和磁悬浮部分。在建立其数学模型时,通常将其数学模型分为转矩模型和悬浮力模型,表贴式无轴承永磁同步电主轴在两相静止坐标系( $\alpha$ - $\beta$ 轴)下的磁链方程如下式所示<sup>[8]</sup>。

$$\begin{bmatrix} \psi_{M\alpha} \\ \psi_{M\beta} \\ \psi_{B\alpha} \\ \psi_{B\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & Mx & -My \\ 0 & L_M & My & Mx \\ Mx & My & L_B & 0 \\ -My & Mx & 0 & L_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{M\alpha} \\ i_{M\beta} \\ i_{B\alpha} \\ i_{B\beta} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $L_M$ 为转矩绕组自感; $L_B$ 为悬浮绕组的自感; $M$ 为两套绕组的互感系数;转矩绕组和悬浮力绕组对应磁链和电流分量所在轴系分别由下标 $\alpha$ 、 $\beta$ 表示,其中 $i_{M\alpha}$ 、 $i_{M\beta}$ 包含永磁体等效励磁电流分量; $x$ 、 $y$ 为沿位移传感器方向建立的 $x$ - $y$ 静止坐标系下的转子径向位移。

通过一系列变换可推得以 $d$ - $q$ 轴电流描述的悬浮力表达式<sup>[9-10]</sup>:

$$\begin{cases} F_x = M[(i_{Md} + i_f)i_{Bd} + i_{Mq}i_{Bq}] \\ F_y = M[i_{Bd}i_{Mq} - (i_{Md} + i_f)i_{Bq}] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_f$ 为永磁体等效励磁电流; $i_{Bd}$ 、 $i_{Bq}$ 分别为悬浮绕组电流在 $d$ - $q$ 轴上的分量; $i_{Md}$ 、 $i_{Mq}$ 分别为转矩绕组电流在 $d$ - $q$ 轴上的分量; $F_x$ 和 $F_y$ 分别为静止坐标系下径向悬浮力。

在转子磁场定向控制下稳定运行时,表贴式

电主轴的电磁转矩方程可写为<sup>[11]</sup>

$$T_e = p_M \psi_{Md} i_{Mq} \quad (3)$$

转子运动方程简化为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = F_x + f_{xd} \\ m\ddot{y} = F_y + f_{yd} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f_{xd}$ 包含不可控单边磁拉力和外部扰动; $f_{yd}$ 包含不可控单边磁拉力、重力和外部扰动; $m$ 为转子质量。

## 2 基于 GA 优化的模糊滑模位移控制

### 2.1 滑模控制器设计

参考转子运动方程,以 $x$ 轴向运动为例,令:

$$\begin{cases} \dot{e} = x^* - x \\ \dot{e} = -\dot{x} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $x^*$ 为参考位移; $x$ 为实际位移。

定义系统的滑模面函数为

$$s = ce + \dot{e} \quad (6)$$

式中 $c$ 为常数, $c > 0$ 。

对式(6)求导,再结合式(4)可得

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = -c\dot{x} - \frac{F_x + f_{xd}}{m} \quad (7)$$

令 $u = F_x$ ,

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} = -c\dot{x} - \frac{1}{m}u - \frac{1}{m}f_{xd} \quad (8)$$

根据等效控制法<sup>[12]</sup>,在不考虑干扰和不确定性情况下,通过取 $\dot{s} = 0$ ,先求得滑模等效控制项 $u_{eq}$ :

$$u_{eq} = -cm\dot{x} \quad (9)$$

设计切换控制项 $u_{sw}$ 为

$$u_{sw} = K(t) \operatorname{sgn}(s) \quad (10)$$

取切换增益为

$$K(t) = \max |f_{xd}| + \eta \quad (11)$$

式中 $\eta > 0$ 。

结合式(9)和式(10)可得滑模等效控制率:

$$u = u_{eq} + u_{sw} = -cm\dot{x} + K(t) \operatorname{sgn}(s) \quad (12)$$

同理可推得 $y$ 轴向滑模控制率。

对系统进行稳定性分析,取 Lyapunov 函数为 $V = 0.5s^2$ ,则

$$\begin{aligned} \dot{V} = s\dot{s} &= s \left( -c\dot{x} - \frac{1}{m}u - \frac{1}{m}f_{xd} \right) = \\ s \left[ -\frac{1}{m}K(t) \operatorname{sgn}(s) - \frac{1}{m}f_{xd} \right] &\leq -\frac{\eta}{m} |s| < 0 \end{aligned} \quad (13)$$

由上式可知,满足滑模可达性条件。

### 2.2 模糊控制器设计

由上述内容可知,合适的切换增益  $K(t)$  能够保证系统运动得以到达滑模面,即  $K(t)$  的值必须能抵消不确定项的影响。在外部干扰时变时,切换增益也应时变,但是切换增益的变化也会造成系统不同程度的抖振。为抑制系统的抖振,可在滑模控制中加入模糊切换增益<sup>[13]</sup>,建立模糊滑模控制器。 $K(t)$  的变化规则如下:

如果  $ss > 0$ , 则  $K(t)$  增大; 如果  $ss < 0$ , 则  $K(t)$  减小。

由此可设计关于  $ss$  和  $\Delta K(t)$  的模糊系统, 定义  $ss$  为输入,  $\Delta K(t)$  为输出, 对应的详细模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊规则表

$ss$	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
$\Delta K(t)$	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB

本文使用的模糊控制器为单输入、单输出控制器,对系统计算要求不高,模糊逻辑决策采用 max-min 进行合成,解模糊化处理采用重心法。 $ss$  的模糊论域为  $[-6, 6]$ , 隶属度函数如图 1 所示;  $\Delta K(t)$  的模糊论域为  $[-1, 1]$ , 隶属度函数如图 2 所示(本刊黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

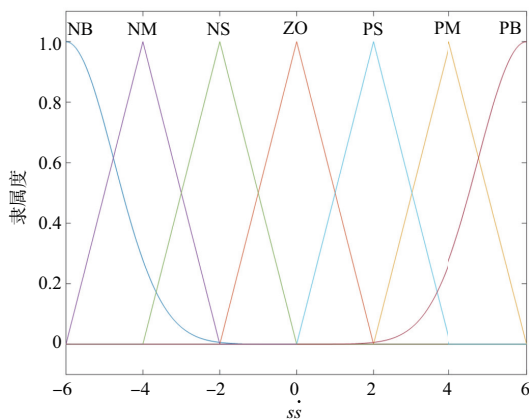


图 1 模糊输入隶属度函数

对模糊输出  $\Delta K(t)$  采用积分的方法估计  $K(t)$  的上界:

$$\hat{K}(t) = k \int_0^t \Delta K(t) dt \quad (14)$$

式中  $k$  为比例系数,  $k > 0$ 。

将得到的上界估计  $\hat{K}(t)$  替换原来滑模控制器

中的  $K(t)$ , 可得新控制率:

$$u = -cm\dot{x} + \hat{K}(t) \operatorname{sgn}(s) \quad (15)$$

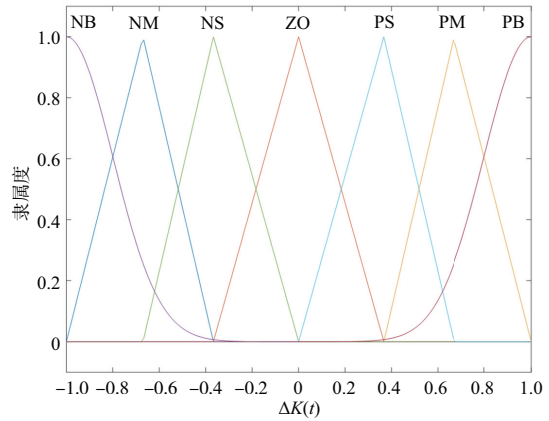


图 2 模糊输出隶属度函数

### 2.3 GA 优化的模糊滑模控制器设计

由于模糊滑模控制中  $c, k$  值的变化对控制效果影响较明显,并且都是根据经验确定,在实际控制中无法得到最佳控制参数。为取得最佳控制参数  $c, k$ , 本文选用较为成熟的遗传算法 (genetic algorithm, GA) 对参数进行优化。选用误差性能指标 ITAE 作为适应度函数,  $e(t)$  为转子位移误差, 此函数兼顾了系统响应快速性和稳定性的评估, 其函数方程为

$$J_{ITAE} = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (16)$$

基于遗传算法优化的模糊滑模控制原理框图如图 3 所示。

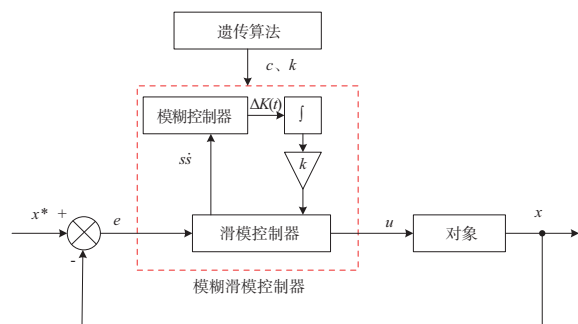


图 3 GAFSMC 原理框图

## 3 仿真实验及结果分析

在 MATLAB/Simulink 中建立表贴式无轴承永磁同步电主轴仿真模型, 控制系统原理图如图 4 所示, 电主轴仿真参数如表 2 所示。

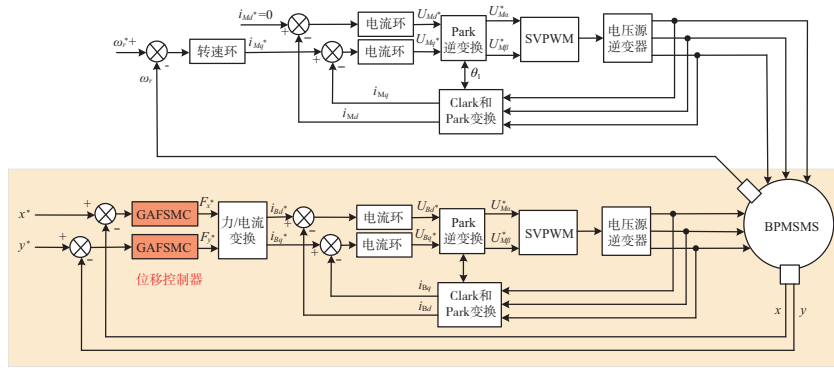


图4 BPMSMS 系统控制原理图

表2 无轴承永磁同步电主轴参数

参数名称	取值	参数名称	取值
直流侧电压/V	540	转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )	0.015
气隙长度/mm	0.5	R <sub>B</sub> /Ω	1.8
永磁体磁链/Wb	0.11	L <sub>B</sub> /mH	2.8
R <sub>M</sub> /Ω	0.15	转矩绕组极对数	2
L <sub>M</sub> /mH	2.8	悬浮绕组极对数	1

系统仿真时间为2s时,给定转速为10 000 r/min,设定初始位移 $x_0 = -0.1$  mm,  $y_0 = -0.2$  mm,转子质量为1 kg,转子在 $x$ 方向始终承受大小为0.5 N的随机干扰力, $y$ 方向承受重力。图5为矢量控制下的表贴式无轴承永磁同步电主轴转速、转矩曲线图,电主轴在1s内到达指定转速。

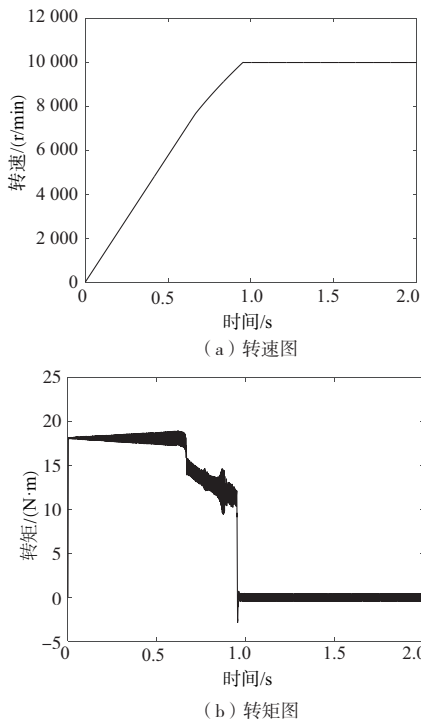


图5 BPMSMS 转速、转矩图

为方便对比分析,取0~0.2s内的转子轴向位移曲线进行分析,由图6可知,模糊切换增益滑模控制下的转子位移波动更小,即模糊切换增益的引入降低了转子位移控制时的抖振。

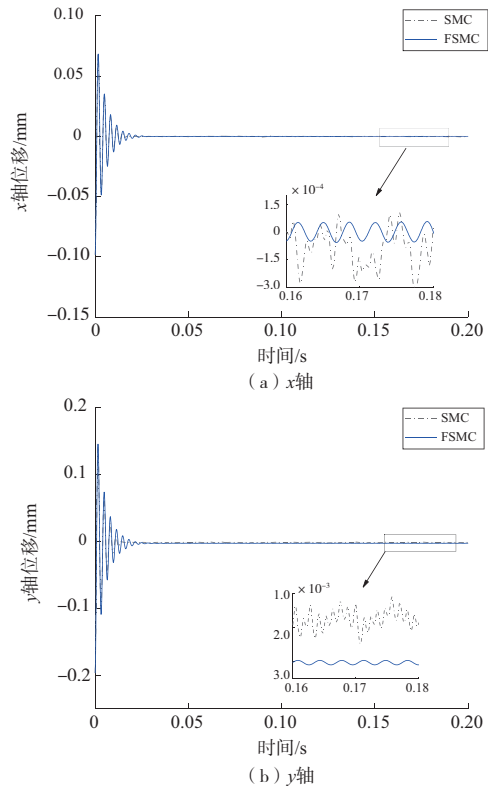


图6 SMC/FSMC 下转子不同轴向位移

采用遗传算法优化时,相关参数设置如表3所示。

表3 遗传算法相关参数

迭代次数	种群数	交叉概率	变异概率
20	10	0.7	0.01

使用遗传算法前,预调参确定 $c$ 、 $k$ 的寻优范围分别为[100,5 000]和[0.5,60]。由图7可知,



遗传算法优化后的模糊滑模控制下的  $x$ - $y$  轴向位移曲线几乎没有超调量,在到达参考位置后的转子振动较优化前也得到进一步抑制。遗传算法优化前后的转子位移相关性能指数如表 4 所示。

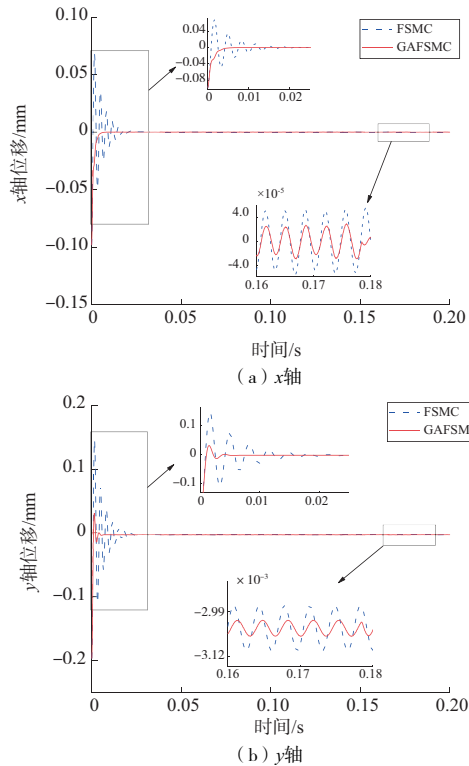


图 7 FSMC/GA-FSMC 下转子不同轴向位移

表 4 优化前后转子位移相关性能数据

参数名称	x 轴		y 轴	
	优化前	优化后	优化前	优化后
最大峰值 ( $\times 10^{-2}$ )/mm	6.850 00	0.004 97	14.50	3.08
调整 时间/ms	25	2	25	8
稳态波动范 围( $\times 10^{-3}$ )/mm	[-0.083 3, 0.079 5]	[-0.038 0, 0.038 5]	[-3.40, -3.00]	[-3.10, -2.81]

通过计算分析可得,与优化前的模糊滑模控制相比,遗传算法优化后的模糊滑模控制下转子  $x$ 、 $y$  轴向最大位移分别减小了 0.068 4 mm 和 0.114 mm,转子稳态振动峰峰值分别减小了 53% 和 27.5%。

综上所述,针对无轴承永磁同步电主轴转子运行非线性及不确定等特点,遗传算法优化的模糊滑模位移控制具有较高的控制精度以及优良的动态性能。

#### 4 结语

本文为实现表贴式无轴承永磁同步电主轴高

精度转子位移控制,提出了一种遗传算法优化的模糊滑模控制方法。得到以下结论:模糊切换增益的引入柔化了滑模悬浮力控制信号,不同轴向滑模控制中的抖振都得到了有效抑制;通过使用遗传算法可进一步优化模糊滑模控制效果,根据相应适应度函数获得最优控制参数,提高系统响应速度。但转子位移适应度函数以及模糊规则表达存在多种形式,如何针对电主轴选择合适的表达方式,以及其对优化结果的影响还需要进一步深入研究,同时还需要设计相关实验进一步验证结论。

#### 参考文献:

- [1] 单刚,单文桃,芮晓倩. 电主轴关键技术研究综述[J]. 数码设计,2017(6):103-105,111.
- [2] 单文桃,王鑫. 基于模糊滑模切换控制的 PMSMS 弱磁调速控制策略[J]. 振动与冲击,2020,39(4):222-228.
- [3] ZHU H Q, YUAN J F, JV J. A novel single winding structure and closed loop control of the suspension force vector of bearingless permanent magnet synchronous motors[J]. Energies,2016,9(5):377.
- [4] 严欣平. 无轴承永磁同步电机电磁设计与控制策略研究[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [5] ZHANG W, ZHU H Q, XU Y, et al. Direct control of bearingless permanent magnet slice motor based on active disturbance rejection control[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2020,30(4):1-5.
- [6] 周媛. 永磁型无轴承电机的运行控制研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [7] YANG Z B, ZHANG D, SUN X D, et al. Nonsingular fast terminal sliding mode control for a bearingless induction motor[J]. IEEE Access,2017,5:16656-16664.
- [8] 朱焜秋,成秋良,王成波. 基于机械/电气坐标系变换的无轴承永磁同步电机建模[J]. 中国科学 E 辑,2010,40(1):52-58.
- [9] WANG X, ZHU H Q. Vibration compensation control of BPMSM with dead-time effect based on adaptive neural network band-pass filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2022,37(6):7145-7155.
- [10] 王宝国. 无轴承电机磁悬浮机理及其控制方法研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2002.
- [11] 朱焜秋,秦英,鞠金涛,等. 基于磁链耦合分析的无轴承永磁同步电机通用数学模型[J]. 振动与冲击,2015,34(17):191-198.
- [12] 周向阳,李玲玲,赵立波. 基于扩张状态观测器的稳定平台非奇异终端滑模控制[J]. 仪器仪表学报,2018,39(5):161-169.
- [13] 周向阳,舒通通,吕子豪,等. 基于模糊切换增益调节的惯性稳定平台滑模控制[J]. 仪器仪表学报,2021,42(12):263-271.

收稿日期:2022-10-19