

基于 3D 刚体摆的模糊控制器的设计与试验研究*

刁兆江, 厉虹

(北京信息科技大学 自动化学院, 北京 100192)

摘要: 基于 MATLAB 构造 3D 刚体摆数学模型, 以 3D 刚体摆试验平台为依托, 利用模糊控制或模糊控制与 P 控制策略相结合, 对永磁同步电机(PMSM)和 3D 刚体摆姿态进行控制, 并通过 LABVIEW 软件对模糊控制算法编程设计, 上位机实时监测摆控制曲线。试验结果表明模糊控制在实际工程中对 3D 刚体摆系统的控制具有有效性。

关键词: 3D 刚体摆; 姿态控制; 伺服系统; 模糊控制

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)01-0035-06

Fuzzy Controller Design and Experimental Research on 3D Rigid Pendulum*

DIAO Zhaojiang, LI Hong

(School of Automation, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China)

Abstract: Mathematical model of the 3D rigid pendulum constructed by MATLAB, based on experimental platform, fuzzy controller or it combined with the P controller controlled (permanent magnet synchronous motor, PMSM) and posture of 3D rigid pendulum, fuzzy controller programming was edited through LABVIEW, and we could observe control curve of 3D rigid pendulum in PC. The results showed that the fuzzy control strategy was effective for 3D rigid pendulum in actual engineering.

Key words: 3D rigid pendulum; posture control; servo system; fuzzy control

0 引言

航天器姿态控制是实现太空探索的关键技术之一。为此,国内外学者将地球静止轨道(GEO)航天器^[1]抽象为一个广义三自由度刚体摆模型^[2](文中称 3D 刚体摆),以该模型为基础,在地面上开展对航天器姿态控制问题的研究。

3D 刚体摆的前身是美国密歇根大学早期研究的三轴姿态控制平台(TACT),Santillo 等人采用角速度闭环负反馈实现了 TACT 稳定^[3];Nalin 和 Harris 在欠驱动情况下设计了对于悬挂刚体摆的稳定性控制器,以及在倒立情况下用部分角速度和姿态反馈来稳定刚体摆^[4]。国内,邹奎、戈新生根据 Lyapunov 稳定性理论,对 3D 刚体摆姿态

进行稳定性控制,获得良好效果^[5];边珺等人采用自适应滑模控制确保 3D 刚体摆姿态控制系统渐进稳定^[6]。但大多数的研究,只限于对 3D 刚体摆数学模型控制器的设计和稳定性分析,缺少对 3D 刚体摆伺服系统的研究。

3D 刚体摆伺服系统由驱动器、飞轮、电机以及 3D 摆组成^[7]。由于永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)^[8]在航空航天及机器人等高科技领域应用越来越广泛,性能愈发突出,故系统中的伺服电机通常采用 PMSM。永磁同步位置伺服系统的控制主要有 PID 控制^[9]、无源控制^[10]、自抗扰控制^[11]、反馈线性化控制^[12]等,在诸多场合都曾取得较好的控制效果。经过多年的发展,智能控制算法飞速发展,在

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(11472058)

作者简介: 刁兆江(1991-),男,硕士研究生,研究方向为高性能电机控制方法。

厉虹(1959-),女,教授,研究方向为高性能电气传动控制系统。

多种场合不断显示自己的优越性能。

本文基于航天器动力学与运动学方程对 3D 刚体摆建立数学模型,通过采用 PD 控制模拟 3D 刚体摆姿态稳定所需转矩的大小。在实际应用中,3D 摆系统伺服电机采用模糊控制或模糊加 P 控制,验证电机电磁转矩输出曲线是否满足 3D 刚体摆实际所需。最后,进行 3D 刚体摆平台试验,设计模糊控制算法,通过 3D 刚体摆的姿态角和姿态角速度输出曲线验证模糊控制的有效性。

1 3D 刚体摆姿态控制系统模型的建立

1.1 3D 刚体摆姿态控制系统数学模型

根据航天器动力学特性,未受控的 3D 刚体摆的动力学方程^[13-14]为

$$J\dot{\omega} = J\omega \times \omega + mg\rho \times R^T e_3 \quad (1)$$

而 3D 刚体摆的运动学方程则是

$$\dot{R} = R \times \omega \quad (2)$$

式中: J ——摆转动惯量矩阵, $J = \text{diag}(J_x, J_y, J_z)$;

ω ——本体坐标系摆角速度矢量, $\omega \in R^3$;

m ——摆质量;

ρ ——原点与摆质心之间的矢量, $\rho = (0, 0, l)^T$;

e_3 —— z 轴单位向量, $e_3 = (0, 0, 1)^T$;

R ——方向余弦矩阵^[15]。

1.2 3D 刚体摆姿态控制器设计

被控对象实际所需力矩由姿态控制器输出得到。若能真实模拟实际转矩所需曲线,便可实现对摆系统的控制。对 3D 刚体摆数学模型可通过式(3)实现动态解耦(此处设计 PD 控制器^[16]):

$$\begin{cases} u_1 = k_{p1}\alpha + k_{d1}\omega_x \\ u_2 = k_{p2}\beta + k_{d2}\omega_y \\ u_3 = k_{p3}\gamma + k_{d3}\omega_z \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_1, u_2, u_3 ——3D 刚体摆力矩输入;

β, γ ——姿态角;

$\omega_x, \omega_y, \omega_z$ ——姿态角速度。

其中: $k_p = \text{diag}(212, 242, 235)$, $k_d = \text{diag}(400, 375, 312)$ 。

系统 3D 刚体摆质量 $m = 140$ kg, 惯量矩阵 $J = \text{diag}(30, 40, 50)$ g·m², $l = 0.1$ m, 设定 3D 刚体摆

的初始状态姿态角 $(\alpha, \beta, \gamma) = (5, 5, -5)^T$ rad, 姿态角速度 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z) = (0, 0, 0)^T$ rad/s。得到 3D 刚体摆输出的力矩和角度、角速度响应曲线分别如图 1(a) 和图 1(b) 所示。

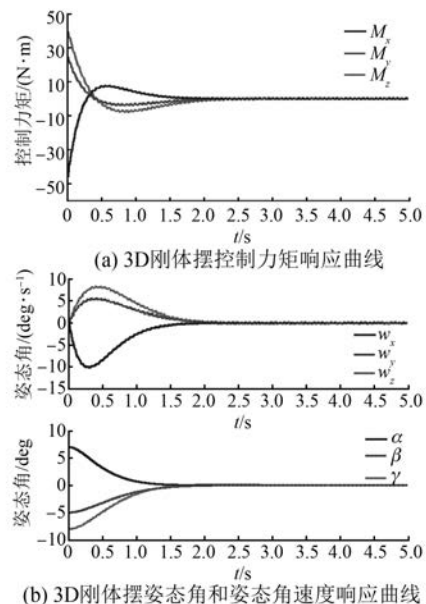


图 1 3D 刚体摆输出响应曲线

图 1 表明,控制 3D 刚体摆系统到达指定姿态,可通过采用 PD 控制,如果电机可以产生如图 1(a)中的力矩大小,便可控制摆姿态由图 1(b)起始位置到最终位置并保持稳定。图 1(a)力矩响应曲线就是系统所期待输入,如何控制伺服系统为 3D 刚体摆产生期望力矩是实现试验平台姿态控制的关键。

2 3D 刚体摆伺服系统模糊控制器设计

3D 刚体摆伺服系统是一个非常复杂的非线性系统,外界负载及自身参数的变化,使得在运行过程中对其控制更加困难。模糊控制器不依赖于被控对象的精确模型,利用模糊规则对控制器参数进行整定,以便在线修改,有利于控制器在工程实际中的应用^[17]。对于位置伺服控制需要考虑系统的稳态精度、响应速度及超调量等因素。为了加快系统的响应速度,可以采取模糊控制和 PD 控制相结合的控制策略。

模糊控制器设计涉及的关键步骤:输入变量借助隶属度函数完成精确值到模糊量的过渡;将

输入变量的精确值模糊化,根据输入变量及控制规则,得到模糊控制量,利用去模糊化方法,输出精确量。

模糊控制器设计原理框图如图 2 所示。

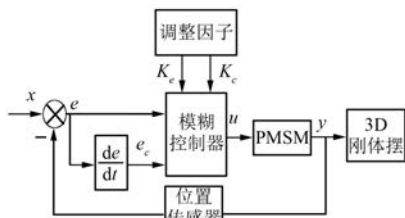


图 2 模糊控制器结构框图

该伺服控制系统中,把位置偏差即姿态角度误差 $[e]$ 及位置偏差的变化率 $[e_c]$ 即姿态角速度,作为控制器输入,控制器输出控制量为 u ,归一化论域均设为 $[-3,3]$,设计出一个二维模糊控制器^[18]。根据系统实际运行状态 $[e_{\max}, e_{\min}]$, $[e_{c\max}, e_{c\min}]$, $[u_{\max}, u_{\min}]$ 确定量化因子及比例因子^[19]。

模糊控制器设计规则一般来源于生活实际,如:

if e is PB and e_c is NB, Then u is NS

当位置误差大(PB),误差变化率负大(NB),即与期望位置相差很大,电机反转且速度较大,按照生活经验,之后的进程中位置误差会越来越小,转速需要减小。

将输入变量和输出变量一起,模糊子集为{NB,NM,NS,Z,PS,PM,PB}七个语言变量。根据生活经验及理论推导得出模糊控制规则表,如表1所示。正确构造适合的隶属度函数是模糊控制器控制效果好坏的关键因素之一。

表 1 模糊控制规则表

e	e_c						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	NS	PS
NM	NB	NM	NM	NM	NS	Z	PS
NS	NM	NM	NS	NS	Z	PS	PM
Z	NM	NS	NS	Z	PS	PS	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PM
PM	NS	Z	PS	PM	PM	PM	PB
PB	NS	PS	PM	PM	PM	PM	PB

隶属度函数的选取应当是客观的,但是由于每个人的经验及对模糊控制认识的程度,所以选择的隶属度函数会有不同,本文选择三角隶属度函数。根据归纳的控制规则表,得出 49 条规则。根据规则表,在工具箱中编辑控制规则,利用重心法得到不同输出值。

3 3D 刚体摆位置伺服系统试验

3.1 仿真验证试验

基于 3D 刚体摆伺服系统矢量控制系统结构如图 3 所示。

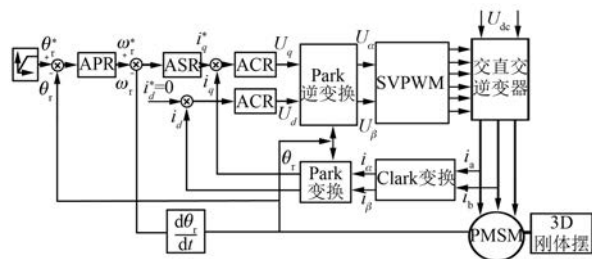


图3 PMSM 矢量控制位置伺服系统结构图

图3所示位置伺服系统中,位置环性能的好坏取决于系统内环尤其是电流环的稳定,提高电流环的快速性,可以实现定转子电流对矢量控制指令的准确跟踪,使伺服系统的动态特性得以提高。

控制器环节采用两种方法进行验证:第1种只含有模糊控制器系统,位置环和速度环调节采用模糊控制, d 、 q 轴电流调节均采用P控制;第2种采用模糊控制器和P控制器相结合,位置环和速度环调节采用模糊加P控制, d 、 q 轴电流调节均采用P控制。其余结构不变。

仿真试验参照 3D 刚体摆试验平台选择 PMSM 作为控制对象,并将 PD 控制器作用下的所需期望控制力矩作为负载转矩输入,选择电机极对数 $p=4$,转动惯量 $J=0.6\times 10^{-3}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,额定转速 $n_r^*=1\,500\text{ r/min}$,其余量采用默认值。仿真试验结果如果表明在模糊控制器作用下,3D 刚体摆系统可以由起始位置过渡到期望位置,同时电磁转矩满足负载力矩所需大小,则证明该控制策略有效。

试验中,仿真试验系统最终输出的转速、转矩和位置响应曲线如图 4(a)~(c)所示。

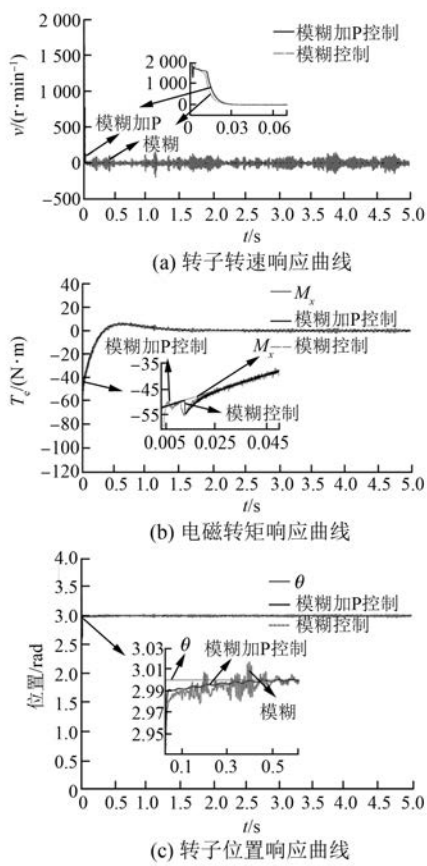


图 4 位置伺服系统输出响应曲线

图 4(a) 的转速响应曲线显示,位置环不论采用模糊控制还是模糊控制和 P 控制相结合,在经历电机动态阶段超调现象以后,都可以在到达期望位置之前使电机转速很快稳定在 1 500 r/min,在转子的转角达到图 4(c) 所示的期望位置过程中,转速下降并最终为零,达到期望的效果。但由于模糊控制本身的缺陷,相对于模糊控制和 P 控制相结合而言,电机转速波动范围较大。

图 4(b) 是两种控制模式下电磁转矩响应曲线,电机起动时立即跟踪负载转矩,达到期望位置经历短时间的抖动,很快恢复到稳定状态,说明电磁转矩对负载转矩的响应速度满足系统的动态要求。但是,从电磁转矩响应效果分析,模糊控制和 P 控制相结合的转矩脉动更小,在同样的干扰情况下,过渡时间更短,说明稳定性更强,跟踪负载转矩输入效果更好。

图 4(c) 是两种控制模式下的位置响应曲线,转子在短时间内就能达到指定位置并稳定,P 控制策略可以提高系统的灵敏性,对系统起到快速

调节的作用,从伺服系统性能指标来看,也体现出这一优点。二者比较而言,模糊控制和 P 控制相结合更优。控制系统的性能指标如表 2 所示。

表 2 3D 刚体摆伺服系统性能指标

控制策略性能指标	模糊控制	模糊加 P 控制
上升时间(稳态值的 10% 上升到 90% 所需要的时间) t_r/s	0.02	0.014
调节时间 t_s/s	0.58	0.40
超调量 $\delta/\%$	0.6	0
定位精度	准确	准确

3.2 系统平台试验

3.2.1 平台组成

3D 刚体摆试验平台组成如图 5 所示^[20]。系统主要功能部分由伺服电机和惯性飞轮组成。图 5 中显示 6 台电机和 3 组惯性飞轮,每台电机控制 1 组飞轮,其余 3 台电机控制 3 组风扇。

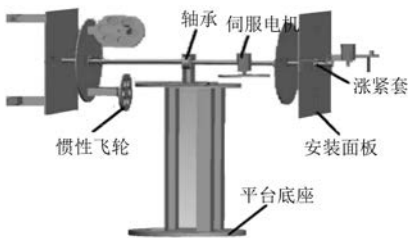


图 5 3D 刚体摆模拟装置

3.2.2 软件设计

基于 LABVIEW 软件编写实现 3D 刚体摆伺服系统的模糊控制算法。软件设计流程如图 6 所示。

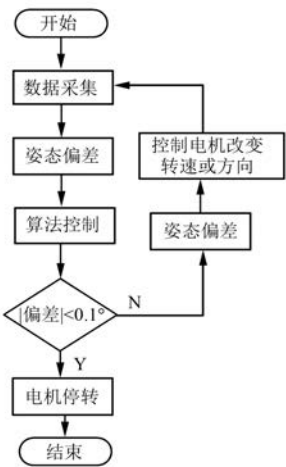


图 6 3D 刚体摆软件设计流程图

上位机通过串口与 3D 刚体摆系统进行信息交互。系统应用 MTI 姿态传感器采集当前系统的欧拉角和欧拉角速度,经过处理作为模糊控制器的输入;模糊控制器输出经 DAQ 助手送到数据采集卡,完成数字量到模拟量的转换。这样控制电机转速从而调整其姿态。

选择其中的一个通道,应用模糊控制器, LABVIEW 软件中程序设计如图 7 所示。

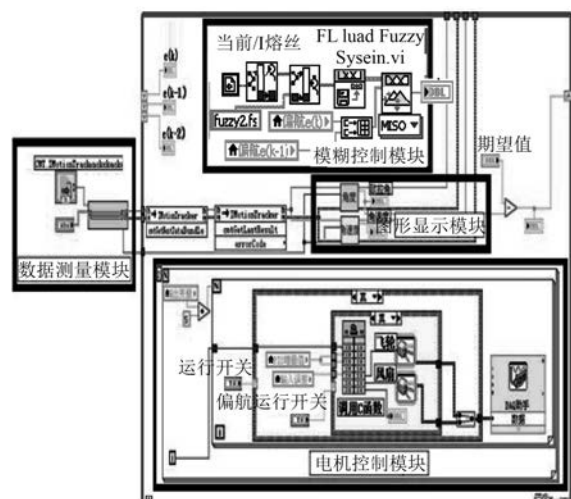


图 7 通道(偏航)程序设计

4 试验结果分析

3D 刚体摆试验台的起始姿态角 $\alpha = 7^\circ, \beta = -6^\circ, \gamma = -8^\circ$ 。MTI 姿态传感器采集系统当前的姿态角及角速度变化曲线如图 8 所示。

图 8 表明,3D 刚体摆系统运行后,模糊控制器控制 PMSM 产生期望转矩,摆从起始姿态慢慢调节到期望姿态。为验证模糊控制器在实际应用过程中的效果,在 58 s 时加入干扰力矩,结果证实模糊控制器下的 3D 刚体摆系统具有一定的抗干扰能力,表明了模糊控制策略对 3D 刚体摆系统的控制是有效的。

将平台试验图 8(a) 和仿真试验图 2(a) 的结果进行对比,仿真试验无论是从调节时间还是稳定性的角度都要优于平台试验,这是由于仿真试验建立数学模型时忽略许多因素,如驱动电机的转子阻尼以及系统数据采集等的影响。3D 刚体摆在实际运行过程中不可避免地还要受到自身重力及摩擦力等因素影响,数据采集也会影响系统响应速度,造成最终的结果与仿真试验存在一定的差异。

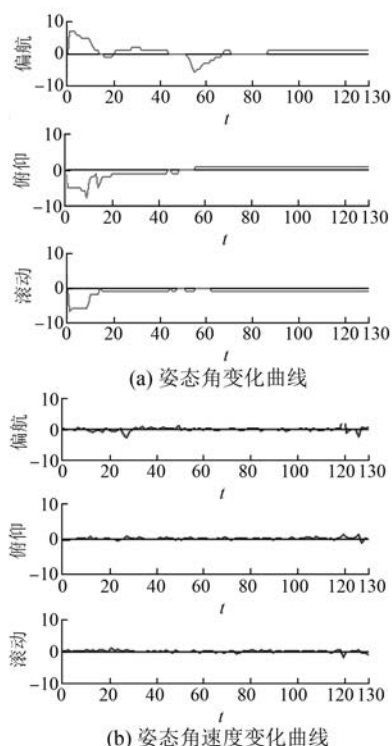


图 8 3D 刚体摆伺服系统输出曲线

5 结 语

本文建立 3D 刚体摆数学模型,通过仿真试验,得到 3D 刚体摆在 PD 控制器作用下实际所需控制力矩。该力矩作为 3D 刚体摆伺服系统负载转矩输入,设计模糊控制策略对摆位置伺服控制系统进行控制,取得良好控制效果;通过 3D 刚体摆试验平台,结合 LABVIEW 软件实现模糊控制算法对 3D 刚体摆系统的控制,通过 MTI 姿态传感器采集当前信息,实时准确地反映控制结果。无论仿真试验还是平台试验,最终都表明模糊控制策略对 3D 刚体摆系统的控制是有效的。

【参考文献】

- [1] 梁斌,徐文福.地球静止轨道在轨服务技术研究现状与发展趋势[J].宇航学报,2010,31(1): 1-11.
- [2] CHANG J, GE X S. Chaotic attitude motion of the 3D Rigid Pendulum[C]//Proceeding of 3rd International Conference on Advanced Computer Control. 2011: 470-472.
- [3] BACCONI F. Spacecraft attitude dynamics and control [D]. Florence: Florence University, 2005-2006.

- [4] FABIO B. Spacecraft attitude dynamics and control [M]. Italy: University degli Studi di Firenze, 2006.
- [5] 邹奎, 戈新生. 基于滑模控制的 3D 刚体摆姿态稳定性[J]. 动力学与控制学报, 2013, 11(2): 178-181.
- [6] 边珩, 戈新生. 3D 刚体摆姿态稳定性的自适应滑模控制[J]. 北京信息科技大学学报, 2014, 29(3): 33-37.
- [7] 于翠. 飞轮控制系统的控制与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [8] 李德和. 基于 DSP 的永磁同步电机伺服控制系统研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [9] 李明. 永磁同步伺服电机二自由度控制[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(10): 1-5.
- [10] 侯利民, 王巍. 无速度传感器的表面式永磁同步电机无源控制策略[J]. 控制与决策, 2013, 28(10): 1578-1582.
- [11] 孙凯, 许镇琳, 盖廓, 等. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机位置伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 43-46.
- [12] 刘小河, 王鹤华. 基于 SVPWM 永磁同步电机反馈线性化控制[J]. 现代电子技术, 2013, 36(12): 159-162.
- [13] 李金, 戈新生. 3D 刚体摆的鲁棒控制器设计和比较分析[J]. 北京信息科技大学学报, 2015, 30(1): 26-30.
- [14] 吴忠, 黄丽雅. 航天器姿态自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1617-1622.
- [15] 钟丽. 航天器姿态模糊 PD+ 控制算法研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- [16] 周黎妮, 唐国金, 罗亚中. 基于 MATLAB/Simulink 的航天器姿态动力学与控制仿真框架[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(10): 2517-2520.
- [17] 薛薇, 路雅立. 永磁同步电机调速系统的模糊自抗扰控制[J]. 电机与控制应用, 2013, 40(8): 57-65.
- [18] 李明, 程启明, 陈根, 等. 永磁同步伺服电机二自由度控制[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(10): 1-5.
- [19] 崔家瑞, 李擎, 张波, 等. 永磁同步电机变论域自适应模糊 PID 控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(增刊): 190-194.
- [20] 边珩, 戈新生. 3D 刚体摆姿态稳定性的自适应滑模控制[J]. 北京信息科技大学学报, 2014, 29(3): 33-37.

收稿日期: 2017-06-04

(上接第 17 页)

系统轻阻尼时响应快和重阻尼大时响应慢的特性, 既保证了系统的快速性又防止了出现超调现象, 同时通过更准确的扰动特性建模和观测器估计, 实现了电机伺服系统的精准定位控制。

【参考文献】

- [1] 邹金红, 朱玉川. 基于复合前馈控制的交流位置伺服系统动态特性[J]. 电机与控制应用, 2011, 38(1): 29-32, 42.
- [2] 余智胜, 赵燕伟. 皮革数控裁剪机伺服进给系统的设计与仿真[J]. 机电工程, 2013, 30(4): 464-467.
- [3] HEERTJES M, SCHUURBIERS X, NIJMEIJER H. Performance-improved design of N-PID controlled motion systems with applications to wafer stages[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(5): 1347-1355.
- [4] SHIN H B, PARK J G. Anti-windup PID controller with integral state predictor for variable-speed motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1509-1516.
- [5] HUNNEKENS B, DEWOUW N V, HEERTJES M, et al. Synthesis of variable gain integral controllers for linear motion systems [J]. IEEE Trans. Control Syst. Technol., 2015, 23(1): 139-149.
- [6] 文建刚, 周亚军, 张竞飞, 等. 基于自适应速度前馈补偿的快速伺服系统研究. 电机与控制应用, 2016, 43(11): 1-5.
- [7] 滕福林, 胡育文, 李宏胜. 基于自抗扰控制器的交流位置伺服系统[J]. 电气传动, 2013, 43(8): 52-56.
- [8] 胡金高, 程国扬. 鲁棒近似时间最优控制及其在电机伺服系统的应用[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 163-172.
- [9] 刘伯育. 交流电机位置伺服系统的扰动补偿控制[J]. 机电工程, 2014, 31(1): 97-100.
- [10] 程国扬, 黄宴委. 双惯性伺服传动系统的抗扰动复合非线性控制[J]. 控制理论与应用, 2014, 31(11): 1539-1547.
- [11] 孟吉红, 徐军, 邓海波, 等. 三阶 Butterworth 型极点配置方法的改进[J]. 控制工程, 2007, 14(1): 70-72, 114.

收稿日期: 2017-05-17