

# 基于龙伯格扰动观测器的永磁同步电机 PWM 电流预测控制\*

薛峰<sup>1</sup>, 储建华<sup>1,2</sup>, 魏海峰<sup>1,2</sup>

(1. 莱克电气股份有限公司, 江苏 苏州 215009;

2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 211189)

**摘要:** 针对传统永磁同步电机(PMSM) PWM 电流预测控制中电机参数扰动造成的电流静差及振荡问题, 提出基于龙伯格(Luenberger)观测器的 PWM 电流预测控制。首先, 将系统参数扰动引入到电机电压方程, 构建在参数扰动中拥有优良性能的 Luenberger 观测器来观测系统扰动。其次, 离散化 Luenberger 扰动观测器, 通过极点配置分析系统稳定性。最后, 将观测器估计系统扰动引入含参数扰动项的电压方程中, 为 PWM 电流预测控制算法提供实时性扰动补偿。仿真结果表明, 所提算法能够快速无静差地观测出系统扰动, 有效避免参数扰动造成的电流静差及振荡问题, 提高电流预测算法的鲁棒性。

**关键词:** 永磁同步电机; PWM 电流预测控制; 龙伯格观测器; 扰动补偿

**中图分类号:** TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)11-0001-05

## PWM Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Luenberger Disturbance Observer\*

XUE Feng<sup>1</sup>, CHU Jianhua<sup>1,2</sup>, WEI Haifeng<sup>1,2</sup>

(1. KingClean Electric Co., Ltd., Suzhou 215009, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

**Abstract:** Since motor parameter disturbance could cause current static error and oscillation in PWM predictive current control of permanent magnet synchronous motor (PMSM), PWM predictive current control based on Luenberger observer was proposed. Firstly, system parameter disturbance was introduced into the motor voltage equation, and Luenberger observer with excellent performance in parameter perturbation was constructed to observe the system disturbance. Then, Luenberger disturbance observer was discretized, and system stability was analyzed by pole assignment. Finally, disturbance from the observer was introduced into the voltage equation with parameter disturbance to provide real-time disturbance compensation for the algorithm. Simulation results showed that the proposed algorithm could rapidly observe the disturbance of the system without static error, effectively avoid the current static error and oscillation caused by inductance parameter error, and improved the robustness of current prediction algorithm.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); PWM predictive current control; Luenberger observer; disturbance compensation

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61503161); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20161229); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016073-01)

作者简介: 薛峰(1967—), 男, 工程师, 研究方向为微特电机技术。

储建华(1982—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为微特电机与伺服控制技术。

魏海峰(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为微特电机与伺服控制技术。

## 0 引言

交流伺服系统中,电流环决定了系统的暂态和稳态性能,构造一个稳定性高、动态性能良好且控制精度高的电流环成为高性能伺服控制的关键,因此,具有优良暂态性的电流预测控制成为伺服控制的研究热点。电流预测控制精度依赖准确模型参数,预测过程须对参数扰动进行充分考虑。

由于 PWM 预测算法具有良好的电流动态性能,所以众多国内外学者致力于改进传统的 PWM 预测算法,通过结合扰动观测<sup>[1-3]</sup>、鲁棒控制<sup>[4-5]</sup>、模型参考自适应<sup>[6]</sup>等方法将 PWM 预测控制引入电流预测控制中,加强对参数扰动的鲁棒性。文献[1]基于无差拍思想推出预测方程,用龙伯格(Luenberger)观测器观测的电流构造鲁棒预测电流控制算法。文献[2-3]将扰动观测方法引入电机电流预测中,补偿参数误差引起电流预测误差。文献[4]通过引入两个电流权重系数,使系统在模型参数不准确时依然能保持大范围稳定。文献[5]在文献[4]鲁棒性算法的基础上,利用电流误差在线调节磁链参数以及增加积分环节以消除 dq 轴电流静差。文献[7]对传统预测电流控制进行延伸,不仅降低了电流纹波,也提高了系统对参数不确定性的鲁棒性。文献[8-9]提出了一种基于电流差分检测技术驱动系统,只利用定子电流以及对应于不同开关状态的逆变器的电流差异,提高电流跟踪性能。文献[10]结合广义预测控制理论和扩展状态观测器提出新型转速跟踪控制方法,通过对扰动量的补偿,提高了鲁棒性。

针对传统 PWM 电流预测控制存在的由电机参数扰动造成的电流静差及振荡问题,构建 Luenberger 观测控制系统扰动,对系统扰动进行实时补偿。仿真结果验证了基于 Luenberger 扰动观测器的 PWM 电流预测控制算法的有效性:观测器能够快速无静差地观测出系统扰动,为鲁棒性预测算法提供实时补偿,有效避免了参数扰动造成的电流静差及振荡问题。

## 1 Luenberger 扰动观测器的设计

转子磁场定向 dq 坐标系中,永磁同步电机(PMSM)电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_d, u_q, i_d, i_q$ ——定子电压矢量和电流矢量在 dq 轴上的分量;

$R$ ——定子电阻;

$\omega_e$ ——电角速度;

$\psi_f$ ——转子永磁体磁链;

$L_d, L_q$ ——dq 轴电感,对于表贴式电机来说,有  $L_d = L_q = L$ 。

实际系统运行时,电机参数会随着运行时间及工况变化而发生扰动,考虑系统参数扰动项,式

(1)电压方程变为

$$\begin{cases} u_d = (R_0 + \Delta R) i_d + (L_0 + \Delta L) \frac{di_d}{dt} - \omega_e (L_0 + \Delta L) i_q \\ u_q = (R_0 + \Delta R) i_q + (L_0 + \Delta L) \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_0 + \Delta L) i_d + \omega_e (\psi_{f0} + \Delta \psi_f) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $R_0, L_0, \psi_{f0}$ ——电机铭牌标称参数;

$\Delta R, \Delta L, \Delta \psi_f$ ——系统参数扰动。

针对式(2),提取 dq 轴电压方程上的参数扰动项:

$$\begin{cases} f_d = \Delta R i_d + \Delta L \frac{di_d}{dt} - \omega_e \Delta L i_q + T_d \\ f_q = \Delta R i_q + \Delta L \frac{di_q}{dt} + \omega_e \Delta L i_d + \omega_e \Delta \psi_f + T_q \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f_d, f_q$ ——dq 轴系统扰动;

$T_d, T_q$ ——dq 轴噪声干扰。

将式(3)代入式(2),得到含有系统扰动的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_0 i_d + L_0 \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_0 i_q + f_d \\ u_q = R_0 i_q + L_0 \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_0 i_d + \omega_e \psi_{f0} + f_q \end{cases} \quad (4)$$

假设 dq 轴系统扰动  $f_d, f_q$  变化率为零,即  $\dot{f}_d = \dot{f}_q = 0$ ,考虑到 dq 轴电流  $i_d, i_q$  易于测量,系统扰动需被观测,故选取 dq 轴电流以及系统扰动作为系统状态变量:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -R_0/L_0 & -\omega_e & -1/L_0 & 0 \\ \omega_e & -R_0/L_0 & 0 & -1/L_0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/L_0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/L_0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ \hat{f}_q \\ \hat{f}_d \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ \hat{f}_q \\ \hat{f}_d \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_q - \psi_{10}\omega_e \\ u_d \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

相应地,构建 Luenberger 扰动观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}u + \mathbf{H}(\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{其中: } \hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \hat{i}_q \\ \hat{i}_d \\ \hat{f}_q \\ \hat{f}_d \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{y}} = \begin{bmatrix} \hat{i}_q \\ \hat{i}_d \\ \hat{f}_q \\ \hat{f}_d \end{bmatrix}, \mathbf{H} = \begin{bmatrix} k_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_2 \end{bmatrix}.$$

式中:  $\mathbf{H}$ —状态反馈阵;

$k_1, k_2$ ——观测器增益,其取值大小影响系统稳定性。

对式(6) Luenberger 扰动观测器进行离散化:

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_q(k+1) \\ \hat{i}_d(k+1) \\ \hat{f}_q(k+1) \\ \hat{f}_d(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{E} \begin{bmatrix} \hat{i}_q(k) \\ \hat{i}_d(k) \\ \hat{f}_q(k) \\ \hat{f}_d(k) \end{bmatrix} + \frac{T_s}{L_0} u(k) + \begin{bmatrix} k_1 [i_q(k) - \hat{i}_q(k)] \\ k_1 [i_d(k) - \hat{i}_d(k)] \\ k_2 [i_q(k) - \hat{i}_q(k)] \\ k_2 [i_d(k) - \hat{i}_d(k)] \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{E} =$

$$\begin{bmatrix} 1 - T_s R_0/L_0 & -T_s \omega_e(k) & -T_s/L_0 & 0 \\ T_s \omega_e(k) & 1 - T_s R_0/L_0 & 0 & -T_s/L_0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$u(k) = \begin{bmatrix} u_q(k) - \psi_{10}\omega_e(k) \\ u_d(k) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

根据式(7),离散 Luenberger 扰动观测器结构图如图 1 所示。

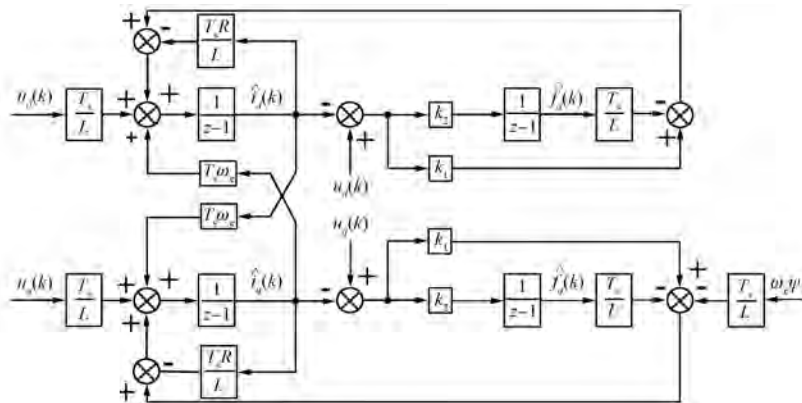


图 1 离散 Luenberger 扰动观测器结构图

## 2 系统稳定性分析

重新整理式(7),得到

$$\begin{bmatrix} \hat{i}_q(k+1) \\ \hat{i}_d(k+1) \\ \hat{f}_q(k+1) \\ \hat{f}_d(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{E}^1 \begin{bmatrix} \hat{i}_q(k) \\ \hat{i}_d(k) \\ \hat{f}_q(k) \\ \hat{f}_d(k) \end{bmatrix} + \frac{T_s}{L_0} u(k) + \begin{bmatrix} k_1 i_q(k) \\ k_1 i_d(k) \\ k_2 i_q(k) \\ k_2 i_d(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中:  $E^1 =$

$$\begin{bmatrix} 1 - \frac{T_s R}{L_0} - k_1 & -T_s \omega_e(k) & -\frac{T_s}{L_0} & 0 \\ T_s \omega_e(k) & 1 - \frac{T_s R}{L_0} - k_2 & 0 & -\frac{T_s}{L_0} \\ -k_1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -k_2 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

考虑到采样时间  $T_s$  足够小, 认为  $T_s R/L_0 = 0$ , 并且  $T_s \omega_e = 0$ , 系统状态观测器特征方程为

$$|\lambda I - E^1| = -[\lambda^2 + (k_1 - 2)\lambda + 1 - k_1 - T_s/L_0 k_2]^2 = 0 \quad (9)$$

求解特征方程, 得到观测器极点为

$$P(z) = 1 - k_1/2 \pm \sqrt{k_1^2 + 4k_2 T_s/L_0}/2 \quad (10)$$

根据系统稳定性条件, 当观测器极点均分布于  $z$  域单位圆内时, 系统稳定。由此推得观测器增益取值范围如下:

$$\begin{cases} 0 < k_1 < 4 \\ k_2 > -(4 + k_1)L_0/4T_s \end{cases} \quad (11)$$

考虑系统响应快速性以及噪声敏感性, 经过 MATLAB 多次仿真试验, 最终  $k_1$  取值为 1.5,  $k_2$  取值为 -40。

### 3 基于 Luenberger 观测器的电流预测控制

将上述 Luenberger 扰动观测器观测出的  $dq$  轴系统扰动引入含参数扰动的电压方程式 (4) 中, 对其离散化, 得到基于 Luenberger 扰动观测器的 PWM 电流预测控制算法:

$$\begin{cases} u_d(k) = R_0 i_d(k) + L_0 \frac{i_d^*(k+1) - i_d(k)}{T_s} - \omega_e(k) L_0 i_q(k) + \hat{f}_d(k) \\ u_q(k) = R_0 i_q(k) + L_0 \frac{i_q^*(k+1) - i_q(k)}{T_s} + \omega_e(k) L_0 i_d(k) + \omega_e(k) \psi_{f0} + \hat{f}_q(k) \end{cases} \quad (12)$$

基于 Luenberger 扰动观测器的鲁棒 PWM 电流预测控制算法框图如图 2 所示。速度环采用传统的 PI 控制, 电流环采用本文提出的基于 Luenberger 观测器的电流预测控制算法, 系统运行过程中 Luenberger 观测器可实时观测电机参数扰动造成的系统扰动  $f_d, f_q$ , 为 PWM 电流预测控制算法提供实时性扰动补偿, 避免参数扰动造成的电流静差及振荡问题。

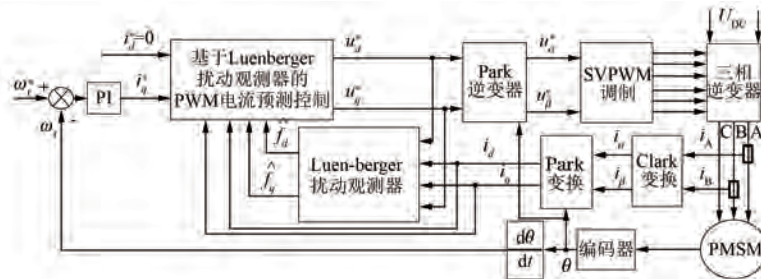


图 2 基于 Luenberger 扰动观测器的鲁棒 PWM 电流预测控制算法框图

### 4 算法仿真分析

为验证本文提出的基于 PWM 电流预测控制算法的有效性, 采用 MATLAB/Simulink 进行仿真。电机模型参数如下: 额定转速  $n_N = 3\ 000$  r/min, 定子电感  $L = 6.35$  mH, 定子电阻  $R = 2.2$   $\Omega$ , 输出额定转矩  $T_N = 2.39$  N·m, 额定电流  $I_N = 10$  A, 永磁体磁链  $\psi_f = 0.09$  Wb, 极对数  $p = 4$ , 采样频率设置为 10 Hz。

(1) 为验证 Luenberger 观测器的扰动观测性能及实时补偿性, 给定电机额定转速及负载工况,

算法电感初始值给定  $0.5L$ ,  $0.06$  s 时刻开始连续增至  $2L$ , 观测器观测到的  $dq$  轴系统总扰动及  $dq$  轴电流响应如图 3 所示, 图中  $f_d, f_q$  为扰动观测器观测出的扰动值,  $f_d^*, f_q^*$  为根据式 (3)  $dq$  轴系统扰动定义计算出的实际系统扰动值。可以看出, Luenberger 观测器可以快速无静差地观测出电机运行过程中电感参数扰动造成的  $dq$  轴系统扰动, 为改进电流预测控制算法提供实时性补偿, 有效避免电感值变化对  $dq$  轴电流的影响。

(2) 算法给定  $2L$  电感值, 图 4 为基于传统

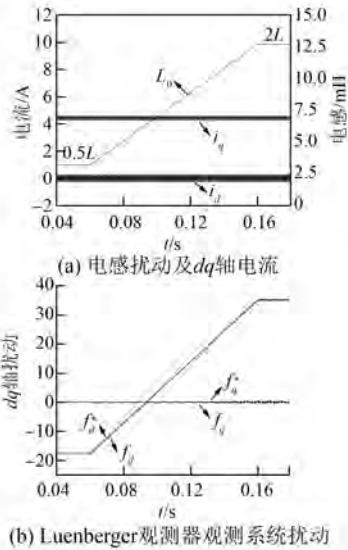


图3 电感扰动对dq轴电流的影响以及扰动观测

PWM 电流预测控制算法下的相电流及 FFT 频谱分析,图5为基于 Luenberger 观测器下的 PWM 电流预测控制算法下的相电流及频谱分析。由图4、图5可明显看出基于 Luenberger 观测器电流预测控制下的相电流正弦度较传统预测算法较好,谐波含量低,Luenberger 扰动观测增强了系统鲁棒性。

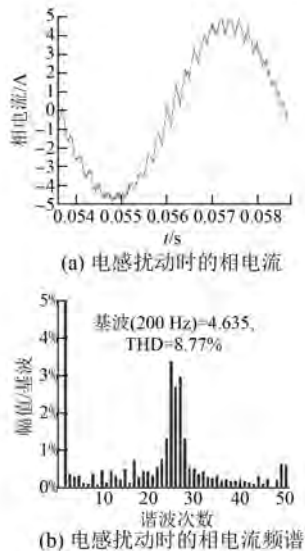


图4 传统 PWM 电流预测控制算法下的相电流及频谱

## 5 结 语

本文提出一种基于 Luenberger 扰动观测器的永磁同步电机 PWM 电流预测控制算法,通过 Luenberger 扰动观测器对电机运行过程中的系统

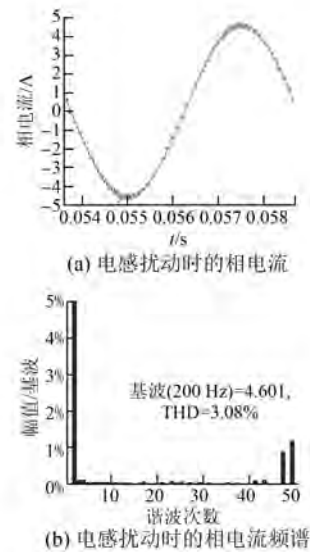


图5 新型 PWM 电流预测控制算法下的相电流及频谱

扰动进行实时性补偿。仿真结果表明,本文提出的新型 PWM 电流预测控制算法对于电机参数扰动具有较宽的容忍度,能够快速无静差地观测出系统扰动,为鲁棒性预测算法提供实时补偿,避免参数扰动造成的电流静差以及振荡问题。

## 【参考文献】

- [1] 牛里,杨明,王庚,等.基于无差拍控制的永磁同步电机鲁棒电流控制算法研究[J].中国电机工程学报,2013,33(15): 78-85.
- [2] MOHAMED Y A R I, ELSAADANY E F. Robust high bandwidth discrete-time predictive current control with predictive internal model—a unified approach for voltage-source PWM converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 126-136.
- [3] XIA C, WANG M, SONGO Z, et al. Robust model predictive current control of three-phase voltage source PWM rectifier with online disturbance observation [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 8(3): 459-471.
- [4] 牛里,杨明,刘可述,等.永磁同步电机电流预测控制算法[J].中国电机工程学报,2012,32(6): 131-137.
- [5] 王庚,杨明,牛里,等.永磁同步电机电流预测控制电流静差消除算法[J].中国电机工程学报,2015, 35(10): 2544-2551.

(下转第 11 页)

因子取值不够精确,希望在日后的仿真中加以改进,使 BLDCM 转速调节控制更加精准。

### 【参考文献】

- [ 1 ] 夏长亮.无刷直流电机控制系统[M].北京:科学出版社,2009.
- [ 2 ] CHENG K Y, TZOU Y Y. Design of a sensorless commutation IC for BLDC motors [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronic ( S0885-8993 ), 2013,18(6): 1365-1375.
- [ 3 ] 夏长亮,方红伟.永磁无刷直流电机及其控制[J].电工技术学报,2012,27(3): 25-34.
- [ 4 ] 温嘉斌,麻宸伟.无刷直流电机模糊 PI 控制系统设计[J].电机与控制学报,2016,20(3): 102-108.
- [ 5 ] 史冬琳,李芸芸,张博超.基于模糊 PID 控制器的磨煤机控制系统设计[J].东北电力大学学报(自然科学版),2009,29(2): 20-23.
- [ 6 ] 王葳,张永科,刘鹏鹏.无刷直流电机模糊 PID 控制系统研究与仿真[J].计算机仿真,2014,29(4): 196-199.
- [ 7 ] 李洪兴.变论域自适应模糊控制器[J].中国科学 E 辑,1999,29(1): 33-42.
- [ 8 ] 李洪兴.非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制器[J].中国科学 E 辑,2004,32(2): 211-223.
- [ 9 ] 龙祖强.变论域模糊控制器的若干重要问题研究[D].长沙:中南大学,2011.
- [ 10 ] LIYE S, JISHEN P. The study of fuzzy-PI controler of permanent magnet synchronous motor [ J ]. IEEE Intertational Power,2009(5): 32-34.
- [ 11 ] 陈伟,周小波,王群京.基于模糊优化的 PID 直流无刷电机控制[J].电子设计工程,2010,18(6): 146-149.
- [ 12 ] 李军伟,崔师,李连强,等.基于模糊 PID 的无刷直流电机控制系统设计开发[J].机械设计与制造,2013(2): 77-79.
- [ 13 ] 窦艳艳,钱蕾,冯金龙.基于 Matlab 的模糊 PID 控制系统设计及仿真[J].电子科技,2015(2): 119-122.
- [ 14 ] HU J Q, LI T S, GUO C. Design of GA-based fuzzy control for ship steering[J].The Sixth World Congress on,2006(1): 3594-3598.
- [ 15 ] 杨贞富.基于 Matlab Simulink 的变论域模糊控制算法仿真方法[J].科技展望,2016,25(12): 155.
- [ 16 ] 谭兵文,李春文.几种变论域伸缩因子选择方法的比较研究[J].科学技术与工程,2013,13(2): 909-911.
- [ 17 ] JIAN Y, LUO J, CHEN Z P. Variable universe adaptive fuzzy control for liquid level [ C ] // 2008 International Symposium on Computational Intelligence and Design,IEEE,2008: 158-161.
- [ 18 ] 王华强,过一涵.温室温度变论域 Mamdani 控制器的设计[J].化工自动化及仪表,2016,43(1): 12-15.
- [ 19 ] 刘海珊,陈宇晨.无刷直流电机 PID 控制系统仿真及实验研究[J].系统仿真学报,2009,21(8): 157-160.
- [ 20 ] 刘慧博,王静,吴彦合.无刷直流电机模糊自适应 PID 控制研究与仿真[J].控制工程,2014,21(7): 583-587.
- [ 21 ] 凡庆,许渝峰,闫宽宽.无刷直流电机双闭环控制的仿真研究[J].汽车实用技术,2016(3): 16-19.

收稿日期: 2017 -03 -06

(上接第 5 页)

- [ 6 ] WANG W, XIAO X, DING Y. An adaptive incremental predictive current control method of PMSM [ C ] // Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on IEEE, 2013: 1-8.
- [ 7 ] SIAMI M, KHABURI D A, ABBASZADEH A, et al. Robustness improvement of predictive current control using prediction error correction for permanent-magnet synchronous machines [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2016,63(6): 3458-3466.
- [ 8 ] LIN C K, LIU T H, FU L C, et al. Model-free predictive current control for interior permanent-magnet synchronous motor drives based on current difference detection technique [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2014,61(2): 667-681.
- [ 9 ] LIN C K, LAI Y S, YU H C, et al. Simplified model-free predictive current control for interior permanent magnet synchronous motors [ J ]. Electronics Letters,2016,52(1): 49-50.
- [ 10 ] 刘旭东,李珂,孙静,等.基于广义预测控制和扩展状态观测器的永磁同步电机控制[J].控制理论与应用,2015,32(12): 1613-1619.

收稿日期: 2017 -03 -06