

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.015

基于滑模观测器的永磁同步电机模型 预测电流控制研究

田桢楠, 夏 鯤*

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要: 针对永磁同步电机无位置传感器高动态性能控制问题, 对传统矢量控制存在电流内环 PI 控制器对系统性能的影响以及传统滑模观测器中动态转子位置角估计不准、稳态转速估计不精确等观测器性能进行了改进, 提出了一种基于改进滑模观测器的永磁同步电机模型预测电流控制方法。根据永磁同步电机在同步旋转坐标系下的数学模型, 选择了电机 d 、 q 电流作为状态变量, 利用前向欧拉法推导出永磁同步电机 d 、 q 轴电流的预测模型。通过实时评估价值函数选出使得下一时刻电流跟踪效果最好的电压矢量, 将其对应的开关状态作用于逆变器。同时, 推导表贴式永磁同步电机的滑模观测器模型并对其观测出的转子位置角和转速进行补偿, 得到较为精确的估算值。最后将算法在 Matlab/Simulink 进行了仿真试验。研究结果表明: 所提出的控制方法动态性能好、稳态精度高。

关键词: 永磁同步电机; 模型预测电流控制; 滑模观测器; 无位置传感器控制

中图分类号: TH39; TM34

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1162-06

Research on model predictive current control of PMSM based on sliding mode observer

TIAN Ya-nan, XIA Kun

(School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for
Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the sensorless high dynamic performance control of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the influence of current PI controller on the performance of traditional vector control system and the inaccuracy of the estimation of rotor position angle and rotor speed in the traditional sliding mode observer (SMO) were improved. A model predictive current control (MPCC) method for PMSM based on improved SMO was proposed in this paper. According to the mathematical model of PMSM in the synchronous rotating coordinate axis, the motor d , q current were selected as the state variables to deduce the prediction model of d , q current with forward Euler. By evaluating the cost function in real time, the voltage vector which has a perfect current tracking effect of the next moment was selected to acts on the inverter with its switching state. Moreover, the sliding mode observer model of surface mounted permanent magnet synchronous motor (SPMSM) was derived, and the rotor position angle and speed that observed by SMO were compensated in this paper, which would obtain the accurate estimation value. The proposed algorithm was tested in Matlab/Simulink. The results indicate that the proposed control method has nice dynamic performance and high steady-state accuracy.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); model predictive current control (MPCC); sliding mode observer (SMO); sensorless control

收稿日期: 2017-01-04

作者简介: 田桢楠(1993-), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 主要从事电力电子变换与电机驱动技术方面的研究。E-mail: usst_tyn@163.com

通信联系人: 夏 鯤(1980-), 男, 副教授, 硕士生导师。E-mail: xiakun@usst.edu.cn

0 引言

永磁同步电机具有体积小、效率高、功率密度大的特点,作为一种高效节能的电机,被广泛应用于航空航天、智能机器人、伺服机床等领域^[1]。目前广泛应用的高性能永磁同步电机控制技术主要有矢量控制技术(VC)和直接转矩控制(DTC)^[2]。

近年来,有学者提出将模型预测控制(MPC)应用于电机调速系统。MPC 具有控制思想简单,灵活性好,处理非线性约束的适应能力强等优点,吸引了国内外学者的广泛关注^[3-4]。模型预测控制(model predictive control, MPC)最早由 RICHLET 和 CULTER 等人提出。在 1973 年模型预测控制的方法在工业控制中得到应用^[5]。但是,由于模型预测控制需要在线实时求解,对控制器的性能要求较高,过去受微处理器计算能力限制,使其在电机驱动领域少有实际应用^[6]。而随着数字信号处理器(DSP 和 FPGA 等)计算性能的大幅提高和价格的大幅降低,使得 MPC 计算量大的问题不再是限制其发展的因素^[7]。与 VC 相比, MPC 无需电流环 PI 调节,采用目标函数易于实现控制目标的扩展。与 DTC 相比, MPC 利用电机的数学模型进行最优电压矢量选择,矢量选择的准确性更高。有限控制集模型预测控制(FCS-MPC)利用逆变器的离散开关状态进行优化。通过估计每一个开关状态的对电机的影响,并对其进行比较,选择出对于控制目标而言最优的电压矢量。由于 FCS-MPC 直接把变换器的离散开关状态与控制目标联系起来,不需进行 PWM 调制,成为目前最流行的一种 MPC 方法^[8]。

目前,无速度传感器技术多用于 VC 和 DTC 调速系统中,与 MPC 结合的研究尚不多见。为了促进 MPC 技术在电机驱动领域的发展,需要研究适用于 MPC 的无速度传感器技术。无速度传感器控制技术通过电压、电流等可测量量利用电机的数学模型获得电机运行中需要的速度和转子位置信息^[9]。典型的无速度传感器控制方法有:模型参考自适应法^[10]、扩展卡尔曼滤波器法^[11]、磁链观测器法^[12]、滑模观测器法^[13]。滑模观测器具有对参数变化和扰动不敏感,鲁棒性强,动态响应快等特点^[14]。传统的滑模观测器以实测的定子电流与估计定子电流误差作为滑模面,sign 函数作为控制函数。通过滑模观测器得到含有高频成分的反电动势等效信号,经过低通滤波器才能得到用于计算转子位置的反电动势^[15]。但是低通滤波器会造成延时,所以有学者提出用锁相环取代反电动势,避免了延时^[16]。文献[17]还提出一种改

进的滑模控制方式,为了削弱抖振,用 sigmoid 函数取代了 sign 函,同时构建反电动势观测器,并把反电动势的等效信号作为输入,由此除去高频信号,这种方法大大地改善了系统性能;而文献[18]还考虑了负载变化对观测器的影响,提出了一种滑模观测器参数自适应的控制方式;文献[19]提出高阶滑模观测器来削弱高频抖振。

笔者提出基于改进滑模观测器的永磁同步电机模型预测电流控制方法。

1 PMSM 模型预测电流控制方法

1.1 PMSM 数学模型

永磁同步电机是一个强耦合、非线性的系统,为了避免讨论定转子间相对位移及电磁的复杂关系,方便研究主要问题,本研究假设铁心不饱和、不计涡流效应和磁滞损耗,转子每相气隙磁动势空间正弦分布。PMSM 在同步旋转坐标系下的定子电压方程为:

$$\begin{aligned} u_d &= R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ u_q &= R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{aligned} \quad (1)$$

式中: u_d , u_q —定子 d 、 q 轴的电压; i_d , i_q —定子 d 、 q 轴的电流; R_s —电机的定子电阻; L_d , L_q —定子 d 、 q 轴电感; ψ_f —电机永磁体磁链; ω_r —转子电角速度。

1.2 PMSM 电流预测算法

模型预测电流控制与传统矢量控制相比,外环同样是转速环,通过 PI 调节获得 q 轴电流的参考值。所不同的是模型预测电流控制采用价值函数代替了传统矢量控制中的双电流环,可以实现对系统在线优化控制。通过价值函数最小评估出最优的开关矢量,最后将该开关矢量作用于逆变器。

根据电压方程,选择电机电流为状态变量,得到 PMSM 在同步旋转坐标系的状态方程:

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_q + \frac{1}{L_d} u_d \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \omega_r i_d + \frac{1}{L_q} u_q - \omega_r \frac{\psi_f}{L_q} \end{aligned} \quad (2)$$

为预测电流下一时刻的值,可采用一阶前向欧拉法对式(2)进行离散化。前向欧拉离散化方法可以近似地表示为:

$$\frac{dx}{dt} \approx \frac{x(k+1) - x(k)}{T_s} \quad (3)$$

式中: T_s —系统的采样周期。

可得电机 d 、 q 轴电流的预测模型为:

$$\begin{aligned}
 i_d^p(k+1) &= \left(1 - \frac{R_s}{L_d} T_s\right) i_d(k) + \frac{L_q}{L_d} \omega_r T_s i_q(k) + \frac{T_s}{L_d} u_d(k) \\
 i_q^p(k+1) &= \left(1 - \frac{R_s}{L_q} T_s\right) i_q(k) - \frac{L_d}{L_q} \omega_r T_s i_d(k) + \\
 &\quad \frac{T_s}{L_q} u_q(k) - \omega_r T_s \frac{\psi_f}{L_q}
 \end{aligned} \quad (4)$$

在一个控制周期内,有 8 个开关状态可供选择。在第 i 个开关状态作用下,由式 (4) 可以得到预测的 d 、 q 轴电流。

模型预测控制能够灵活地将控制目标引入到价值函数中进行优化控制,MPCC 的控制目标是期望电机 d 、 q 轴电流能够快速地跟随其参考给定,可以定子电流 d 、 q 分量相对于参考给定的偏差作为价值函数:

$$J = \left| i_d^* - i_d^p(k+1) \right|^2 + \left| i_q^* - i_q^p(k+1) \right|^2 \quad (5)$$

式中: i_d^* , i_q^* —电机 d 、 q 轴电流参考值; $i_d^p(k+1)$, $i_q^p(k+1)$ —下一时刻电机 d 、 q 轴电流的预测值。

通过实时计算最小价值函数,得到最优的逆变器开关状态。

MPCC 算法主要包括以下几个步骤:

(1) 对当前时刻的定子电流 $i_{a,b,c}(k)$ 、直流母线电压 $U_{dc}(k)$ 和电机转速 $\omega_r(k)$ 进行采样;

(2) 利用 8 个开关状态重构电压矢量,再通过式 (4) 的预测模型对 d 、 q 电流进行预测,然后计算相应的价值函数式 (5) 的值;

(3) 通过比较得到最小的价值函数;

(4) 选择出价值函数最小的电压矢量,即最优的开关状态,最终作用于逆变器。然后返回第一步,进行下一次循环。

当采样周期较小时,可以忽略测量、预测计算延时的影响。MPC 理想开关状态如图 1 所示。

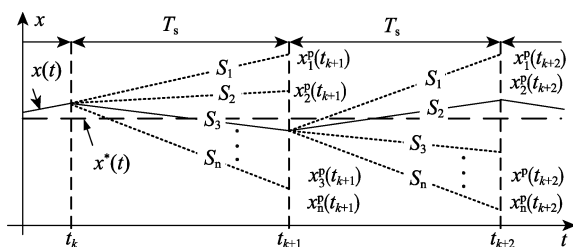


图 1 MPC 期望开关状态

预测值 $x_3^p(t_{k+1})$ 是最接近参考值 $x^*(t_{k+1})$, 选择 S_3 并应用于 $t=t_k$ 时刻。按照相同的规则, S_2 被选择并应用于 $t=t_{k+1}$ 时刻。由于数字控制中固有的采样、滤波延时等因素的影响,控制器的输出滞后于系统电流的变化^[20]。文献[21]考虑了一拍延时补偿,利用二阶欧拉离散法,

根据采样的 $k-1$ 时刻的电流以及开关状态重构的电压矢量,计算出 k 时刻的电流。然后以该电流为初始条件,预测 $k+1$ 时刻的电流,补偿了一拍延时。在控制周期较大时,采用延时补偿可以有效减小电机电流谐波。

两电平 PWM 逆变器驱动系统如图 2 所示。

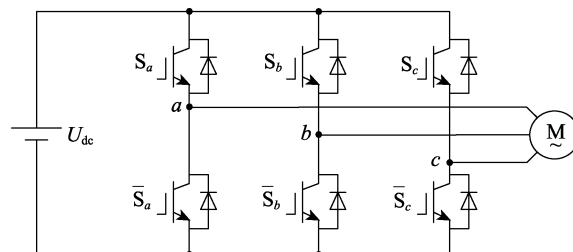


图 2 两电平 PWM 逆变器驱动系统

两电平 PWM 逆变器驱动系统结构中,每个桥臂上下 2 个开关管状态互补,则逆变器共有 8 种不同的开关状态,如表 1 所示。

表 1 逆变器开关状态

序号	S_a	S_b	S_c
0	0	0	0
1	0	0	1
2	0	1	0
3	0	1	1
4	1	0	0
5	1	0	1
6	1	1	0
7	1	1	1

2 改进的滑模观测器

SMO 估算转子位置和速度的示意图如图 3 所示。

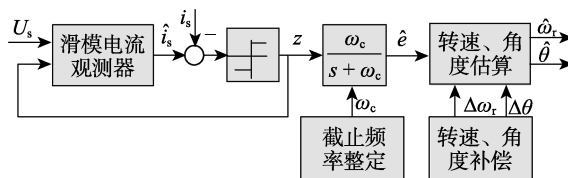


图 3 转子电角速度和转子位置估算框图

永磁同步电机端电压和相电流经坐标变换转化为 α 、 β 坐标系的电压和电流,输入到滑模变结构观测器,再通过电流估计值与测量值之间的偏差来修正模型,使两者之间的偏差逐渐消失,可以估算出转子位置和转速。

对于面贴式永磁同步电动机 (SPMSM), 定子电感参数有 $L_\alpha=L_\beta=L$ 。根据 SPMSM 在 α 、 β 静止坐标系下的数学模型,构造传统滑模观测器如下:

图 5 PMSM 不同情况运行结果

仿真条件设定为:电机空载启动,给定初始转速是 500 r/min; 0.3 s 时转速阶跃给定为 1 000 r/min; 0.45 s 时负载转矩由空载突加至额定负载 9.55 N·m; 0.6 s 时转速再次阶跃为额定转速 1 500 r/min; 0.9 s 时负载转矩由额定转矩变为空载; 1 s 时转速由额定转速降为 800 r/min。仿真时间为 1.2 s。从图中可以看出,电机启动后快速地向给定速度加速,此时电磁转矩也快速上升并达到最大值。转速到达给定值后稳定,且稳定误差小;转矩在加速、减速时达到最大值使得系统反应快速。

电机 d 、 q 轴电流波形如图 6 所示。

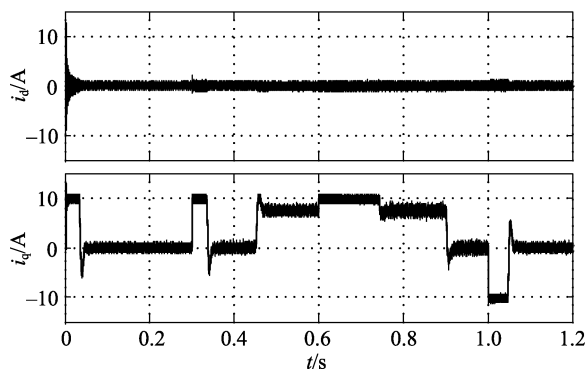


图 6 电机 d 、 q 轴电流

其中, d 轴电流给定为 0, q 轴电流由转速环得到。模型预测控制根据电流给定, 预测出最优开关矢量。从图中可知, d 轴电流稳定在 0 附近; q 轴电流与电磁转矩成正比, 可以快速地跟随给定值变化。而且, 该控制算法可以消除 d 、 q 轴电流的非线性耦合。总体上看, 系统的稳定性能良好。

将滑模观测器估算出的 α 轴电流与实际电流进行比较, 如图 7 所示。

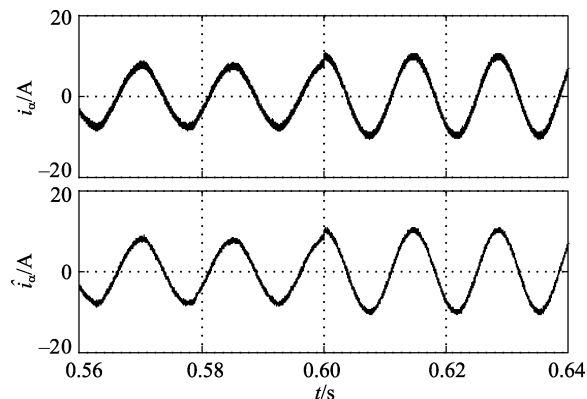


图 7 滑模观测器 α 轴电流估计

图 7 中估算电流很好地追踪着实际电流, 并且在滑模面上作滑模运动, 其中估算电流沿着实际值上下振荡是滑模观测器固有的抖振现象。将滑模面开关信号经过低通滤波器得到平滑的估算反电动势, 如图 8 所示。

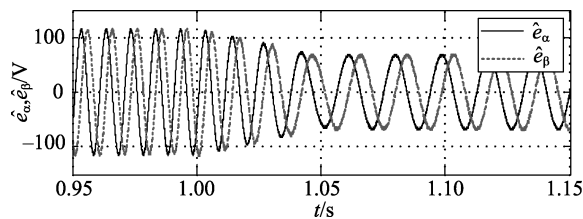


图 8 滑模观测器电机反电动势估计

由上述分析可知, 滑模面开关信号中包含着反电动势信息, 反电动势则包含着转子磁场转速和位置的信息。在本文中, 电机调速范围为 500 r/min ~ 1 500 r/min, 其调速范围较小, 因此滤波器的截止频率并未随着电机转速的变化而变化, 而是设置成固定值 ($\omega_c = 1\,000$ Hz), 对整个调速范围适用。从图 8 可以明显看到反电动势具有很好的正余弦特性, 电机运行性能好。

电机的实际转速与滑模观测器估算出的转速波形图如图 9 所示。

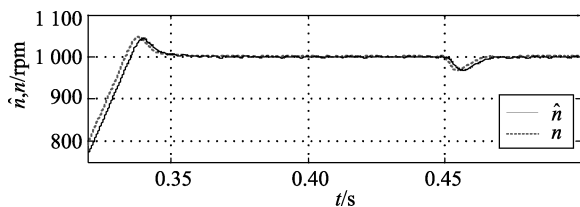


图 9 滑模观测器转速估计 $\hat{n}/(\text{r/min})$

从图 9 中可以看出, 电机的估算速度在初始阶段也具有非常好的跟踪性能; 转速稳定运行后, 所设计的滑模观测器观测得到电机转速较为平滑, 可以快速跟踪转速变化, 进入稳定阶段的转速估计误差很小, 动态变化时估算的转速较实际转速有较小的滞后。

部分实际位置角与滑模观测器估算出的位置角波形图如图 10 所示。

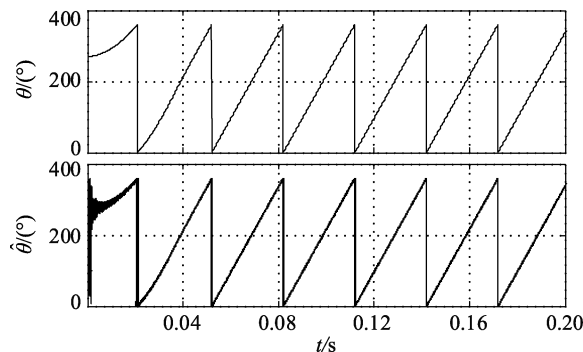


图 10 滑模观测器位置角估计

从图 10 中可知, 在电机的启动初期, 该观测器能通过误差调节快速跟踪启动位置角; 在不同转速、转矩动态切换过程中, 估算的位置角能快速跟踪实际位置角, 整个变速过程估算角度与实际角度几乎保持一致, 表明该滑模观测器具有良好的动态性能。

4 结束语

本研究提出了基于滑模观测器的永磁同步电机模型预测电流控制方法, 对传统矢量控制进行改进。采用预测电流控制算法来选择最优开关矢量, 相对于电流环 PI 调节器, 该算法可在实现对电流指令快速跟踪的同时避免出现超调及振荡调整过程, 动态性能显著提高; 改进传统滑模观测器实现高性能无传感器控制, 在启动、加、减速, 加、减负载等动态过程中表现出良好的观测性能。

本研究通过仿真验证了所提出控制方法的有效性。但预测控制存在的开关不固定的问题会在一定程度上对该滑模观测器造成影响, 可以进一步研究。

参考文献(References):

- [1] 朱喜华, 李颖晖, 张敬. 基于一种新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 6-10.
- [2] 魏香龙. 基于模型预测控制的永磁同步电机控制研究[D]. 北京: 北方工业大学机电工程学院, 2014.
- [3] RODRIGUEZ J, CORTES P. Predictive control of power converters and electrical drives[J]. **Predictive Control of Power Converters & Electrical Drives**, 2012, 6(4): 1785-1786.
- [4] KOURO S, CORTÉS P, VARGAS R, et al. Model predictive control—a simple and powerful method to control power converters[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2009, 56(6): 1826-1838.
- [5] 王献忠, 杜维. 模型预测控制发展概况[J]. 自动化与仪器仪表, 1999(4): 4-9.
- [6] RODRIGUEZ J, KENNEL R M, ESPINOZA J R, et al. High-performance control strategies for electrical drives: an experimental assessment[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2012, 59(2): 812-820.
- [7] BUCCELLA C, CECATI C, LATAFAT H. Digital control of power converters—a survey[J]. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2012, 8(3): 437-447.
- [8] ZHANG Y, XIE W, LI Z, et al. Low-complexity model predictive power control: double-vector-based approach[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2014, 61(11): 5871-5880.
- [9] 谷善茂, 何凤有, 谭国俊, 等. 永磁同步电动机无传感器控制技术现状与发展[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 14-20.
- [10] XI X, YONG D L, MENG Z, et al. A sensorless control based on MRAS method in interior permanent-magnet machine drive[C]. International Conference on Power Electronics and Drives Systems, Kuala Lumpur: IEEE, 2006.
- [11] SMIDL V, PEROUTKA Z. Advantages of square-root extended kalman filter for sensorless control of AC drives[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2012, 59(11): 4189-4196.
- [12] FOO G H B, RAHMAN M F. Direct torque control of an IPM-synchronous motor drive at very low speed using a sliding-mode stator flux observer[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2010, 25(4): 933-942.
- [13] ZHANG Z, ZHAO Y, QIAO W, et al. A space-vector modulated sensorless direct-torque control for direct-drive PMSG wind turbines[J]. **IEEE Transactions on Industry Applications**, 2012, 50(4): 1-7.
- [14] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真: Sliding mode control design and MATLAB simulation[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [15] RIVERA D J, NVARRETE A, MEZA M A, et al. Digital sliding-mode sensorless control for surface-mounted PMSM[J]. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, 2013, 10(1): 1-15.
- [16] WANG G, YANG R, XU D. DSP-based control of sensorless IPMSM drives for wide-speed-range operation[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2013, 60(2): 720-727.
- [17] QIAO Z, SHI T, WANG Y, et al. New sliding-mode observer for position sensorless control of permanent-magnet synchronous motor[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2013, 60(2): 710-719.
- [18] ZHAO Y, QIAO W, WU L. An adaptive quasi-sliding-mode rotor position observer-based sensorless control for interior permanent magnet synchronous machines[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2013, 28(12): 5618-5629.
- [19] WANG G, LI Z, ZHANG G, et al. Quadrature PLL-based high-order sliding-mode observer for IPMSM sensorless control with online MTPA control strategy[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2013, 28(1): 214-224.
- [20] BIBIAN S, JIN H. Time delay compensation of digital control for DC switchmode power supplies using prediction techniques[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2000, 15(5): 835-842.
- [21] 张永昌, 高素雨. 考虑延时补偿的永磁同步电机电流预测控制[J]. 电气工程学报, 2016, 11(3): 13-20.
- [22] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [23] 贾涛. 基于双曲正切函数的永磁同步电动机无传感器速度位置辨识[D]. 天津: 天津大学电气与自动化工程学院, 2012.
- [24] 王成山, 何伟, 卢小敏. 全自动蝶式圆台扭结包装机研发[J]. 包装与食品机械, 2016, 34(1): 70-72.
- [25] 张耀中. 基于改进型滑模观测器的变频洗衣机用 PMSM 无位置传感器控制[J]. 轻工机械, 2015, 33(3): 44-47.
- [26] 李冉. 永磁同步电机无位置传感器运行控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2012.

[编辑: 张豪]

本文引用格式:

田桢楠, 夏鲲. 基于滑模观测器的永磁同步电机模型预测电流控制研究[J]. 机电工程, 2017, 34(10): 1162-1167.

TIAN Ya-nan, XIA Kun. Research on model predictive current control of PMSM based on sliding mode observer[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 34(10): 1162-1167.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>