

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.03.008

带扰动观测器的永磁同步电机非线性预测跟踪控制

沈绍博^{1,2} 李涛^{1,2} 祖晖² 章国宝³

(1. 南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016; 2. 张家港智能柔性输电技术研究所, 张家港, 215600;
3. 东南大学自动化学院, 南京, 210096)

摘要:针对永磁同步电机系统转速跟踪控制问题, 基于非线性预测控制方法设计控制系统, 使该系统满足高性能控制要求。并将负载转矩作为未知扰动来考虑, 利用扰动观测器得到其估计值, 从而提高系统鲁棒性。仿真实验结果表明, 本文方法能够快速准确地实现转速跟踪, 并提高系统对负载转矩扰动的鲁棒性。

关键词:永磁同步电机; 非线性预测控制; 转速跟踪; 扰动观测器

中图分类号: TM351 文献标志码: A 文章编号: 1005-2615(2015)03-0367-05

Nonlinear Predictive Tracking Controller for Permanent Magnet Synchronous Motor with Disturbance Observer

Shen Shaobo^{1,2}, Li Tao^{1,2}, Zu Hui², Zhang Guobao³

(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;
2. Zhangjiagang Research Institute of Smart Grid, Zhangjiagang, 215600, China;
3. School of Automation, Southeast University, Nanjing, 210096, China)

Abstract: To satisfy the high performance control demand for speed tracking, a nonlinear predictive controller for a permanent magnetic synchronous motor (PMSM) is designed. The load torque is also considered as the unknown perturbation and a disturbance observer is designed to get the estimated value of load torque, thus improving the robustness. Finally, simulation results show that the quick and accurate speed tracking is realized as well as the stronger robustness against load torque perturbations.

Key words: permanent magnetic synchronous motor (PMSM); nonlinear predictive control (NPC); speed tracking; disturbance observer

永磁同步电机(Permanent magnetic synchronous motor, PMSM)以其结构简单、运行可靠、体积小、损耗低、效率高等特点, 在风力发电、电动汽车、机器人等领域得到广泛应用^[1-3]。针对 PMSM 控制问题, 目前普遍采用的控制手段是基于转子磁场定向的矢量控制技术, 将转速和电流解耦后分别进行控制。所使用的控制方法包括经典线性控制方法, 例如 PI 控制^[4-5]、基于直接反馈线性化^[6]等方法, 也有文献使用非线性控制方法, 例如自适应控制^[7-8], H_∞ 控制^[9]等。但由于 PMSM 系统具有

强非线性且存在未知扰动的作用, 上述方法无法满足高性能控制的要求, 或因为较高的计算量而难以实现。

预测控制是基于最优控制理论的鲁棒控制算法, 能够有效处理非线性系统, 提高系统鲁棒性, 从而得到广泛应用^[10-12]。文献[13]将预测控制运用到 PMSM 系统中, 运用电流与电压的解耦得到线性模型, 但将负载转矩作为已知扰动来处理。文献[14, 15]运用模型预测控制(Model predictive control, MPC)方法对 PMSM 系统进行控制, 但

基金项目: 国家自然科学基金(61473079, 61374116)资助项目; 江苏省自然科学基金(Bk201212211)资助项目。

收稿日期: 2015-03-02; 修订日期: 2015-04-23

通信作者: 李涛, 男, 副教授, E-mail: autolitao@nuaa.edu.cn。

MPC方法需要大量的在线计算,不易于工程实现。本文针对PMSM系统,采用 $i_d=0$ 控制策略,运用非线性预测控制方法(Nonlinear predictive control, NPC)实现电机的转速跟踪控制,并将负载转矩作为未知扰动考虑,设计扰动观测器得到其观测值,提高系统针对扰动干扰的鲁棒性。仿真结果表明本文方法能使电机转速准确跟踪给定值,具有较强的鲁棒性。

1 PMSM 数学模型

PMSM系统在旋转坐标系下的微分方程如下

$$\begin{cases} L_d \dot{i}_d = -R_s i_d + L_q \omega_r i_q - u_d \\ L_q \dot{i}_q = -R_s i_q - L_d \omega_r i_d + \varphi \omega_r - u_q \\ J \dot{\omega}_r = -B \omega_r + p(\varphi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) - T_L \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 和 u_q 为 d, q 轴电压分量; i_d 和 i_q 为 d, q 轴电流分量; L_d 和 L_q 为 d, q 轴等效电感; ω_r 为转子角速度; φ 为永磁体磁链; T_L 为负载转矩。选取 $\mathbf{x} = [i_d \ i_q \ \omega_r]^T$ 为状态向量,则可得如下状态方程

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_1 \mathbf{u}(t) + \mathbf{g}_2 T_L(t) \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{式中: } \mathbf{g}_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_d} & 0 \end{bmatrix}^T, \mathbf{g}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{J} \end{bmatrix}^T,$$

$$\mathbf{y} = [i_d \ \omega_r]^T, \mathbf{f}(\mathbf{x}) =$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p \omega_r i_q \\ -\frac{R_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p \omega_r i_d - \frac{\varphi p \omega_r}{L_q} \\ \frac{p}{J} (\varphi i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) - \frac{B}{J} \omega_r \end{bmatrix}$$

2 非线性预测控制器设计

跟踪问题要求设计一个控制器使闭环系统渐近稳定,并使系统输出 $\mathbf{y}(t)$ 能够最大限度地跟踪给定参考值 $\mathbf{y}_r(t)$ 。针对永磁同步电机系统,常用的控制方法为 $i_d=0$ 控制,即控制 d 轴电流为0,使转子转速 ω_r 与给定值保持一致。

非线性预测控制方法的设计目标是找到最优的控制律,使系统将来某时刻的预测输出 $\mathbf{y}(t+\tau)$ 能够跟踪给定的参考值 $\mathbf{y}_r(t+\tau)$, $0 < \tau < \tau_r$ (τ_r 为预测时间),在形式上可通过如下滚动时域中的代价函数最小化问题来描述^[16]。

$$\gamma = \frac{1}{2} \int_0^{\tau_r} [\mathbf{y}(t+\tau) - \mathbf{y}_r(t+\tau)]^T [\mathbf{y}(t+\tau) -$$

$$\mathbf{y}_r(t+\tau)] d\tau \quad (3)$$

$$\text{式中: } \mathbf{y}(t+\tau) = \begin{bmatrix} y_1(t+\tau) \\ y_2(t+\tau) \end{bmatrix}, \mathbf{y}_r(t+\tau) = \begin{bmatrix} y_{1r}(t+\tau) \\ y_{2r}(t+\tau) \end{bmatrix}。$$

然后运用泰勒级数来近似表示预测输出 $\mathbf{y}(t+\tau)$ 和预测参考输出 $\mathbf{y}_r(t+\tau)$,可得

$$\begin{cases} [y_1(t+\tau) \ y_2(t+\tau)]^T = \mathbf{T}(\tau) \mathbf{Y}(t) \\ [y_{1r}(t+\tau) \ y_{2r}(t+\tau)]^T = \mathbf{T}(\tau) \mathbf{Y}_r(t) \end{cases}$$

$$\text{其中: } \mathbf{T}(\tau) = \begin{bmatrix} 1 & \tau & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \tau & \frac{\tau^2}{2} \end{bmatrix}, \mathbf{Y}(t) =$$

$[y_1(t) \ \dot{y}_1(t) \ y_2(t) \ \dot{y}_2(t) \ \ddot{y}_2(t)]^T, \mathbf{Y}_r(t) = [y_{1r}(t) \ \dot{y}_{1r}(t) \ y_{2r}(t) \ \dot{y}_{2r}(t) \ \ddot{y}_{2r}(t)]^T$ 。再利用 $L_f g(x)$ 表示 $g(x)$ 在向量域 $f(x)$ 上的Lie导数,则系统输出的各阶导数分别计算如下

$$\dot{y}_1(t) = L_f h_1(x) + L_{g_1} h_1(x) u(t) + L_{g_2} h_1(x) T_L(t)$$

$$\dot{y}_2(t) = L_f h_2(x) + L_{g_1} h_2(x) u(t) + L_{g_2} h_2(x) T_L(t)$$

$$\ddot{y}_2(t) = L_f^2 h_2(x) + L_{g_1} L_f h_2(x) u(t) +$$

$$L_{g_2} L_f h_2(x) T_L(t)$$

可以看出,PMSM系统输出相对阶 $r=3=n$,所以系统不存在零动态问题。

将 $\dot{y}_i(t)$ ($i=1,2$)和 $\ddot{y}_2(t)$ 代入代价函数 γ 并求导,根据代价函数最小化的条件 $\frac{d\gamma}{du} = 0$,可求得

最优控制律如下

$$\mathbf{u}(t) = - \begin{bmatrix} L_{g_1} h_1(x) \\ L_{g_1} L_f h_2(x) \end{bmatrix}^{-1} \times \left[\begin{array}{l} \frac{3}{2\tau_r} [h_1(x) - y_{1r}] + [L_f h_1(x) - \dot{y}_{1r}] \\ \frac{10}{3\tau_r^2} [h_2(x) - y_{2r}] + \frac{5}{2\tau_r} [L_f h_2(x) - \dot{y}_{2r}] + [L_f^2 h_2(x) - \ddot{y}_{2r}] \\ 0 \\ L_{g_2} L_f h_2(x) + \frac{5}{2\tau_r} L_{g_2} h_2(x) \end{array} \right]^T T_L \quad (4)$$

由式(4)可见,非线性预测控制律只取决于各系统模型参数与预测时间,实际计算上只包含比例、积分、微分3种运算,且不需要大量的在线计算,易于工程实现。

3 扰动观测器

由于控制器(4)中包含负载转矩 T_L ,而一般情况下将 T_L 作为不可测量的扰动来考虑,因此对式(4)中控制器的使用产生限制。本节针对该问题

设计了一个扰动观测器,用观测器获得的负载转矩的估计值 \hat{T}_L 来代替实际值。

由 PMSM 系统方程(2)可得

$$\mathbf{g}_2 \mathbf{T}_L(t) = \dot{\mathbf{x}}(t) - f(\mathbf{x}) - \mathbf{g}\mathbf{u}(t) \quad (5)$$

故设计初始的扰动观测器如下

$$\dot{\hat{T}}_L(t) = -l(x)\mathbf{g}_2 \hat{T}_L + l(x)[\dot{\mathbf{x}}(t) - f(\mathbf{x}) - \mathbf{g}\mathbf{u}(t)] \quad (6)$$

式中 $l(x)$ 为所设计的观测器增益函数。再定义观测器误差 $e_L = T_L - \hat{T}_L$, 建立如下误差方程

$$\dot{e}_L(t) + l(x)\mathbf{g}_2 e_L(t) = 0 \quad (7)$$

根据文献[17]中所使用的方法,增益函数 $l(x)$ 取值为

$$l(x) = \frac{\partial p(x)}{\partial x}$$

其中: $p(x) = p_0[\frac{5}{2\tau_r}h_2(x) + L_j h_2(x)]$, 并且 p_0 为大于 0 的常数。则有

$$l(x)\mathbf{g}_2 = p_0[L_{g_2} L_j h_2(x) + \frac{5}{2\tau_r} L_{g_2} h_2(x)]$$

$$l(x)\dot{\mathbf{x}}(t) = p_0(\frac{5}{2\tau_r}\dot{y}_2 + \ddot{y}_2)$$

$$l(x)f(\mathbf{x}) = p_0[L_j^2 h_2(x) + \frac{5}{2\tau_r} L_j h_2(x)]$$

$$l(x)\mathbf{g}_1 = p_0 L_{g_1} L_j h_2(x)$$

将其代入式(7)可得

$$\dot{\hat{T}}_L(t) = p_0[\frac{10}{3\tau_r^2}e_{y_2}(\tau) + \frac{5}{2\tau_r}\dot{e}_{y_2}(t) + \ddot{e}_{y_2}(t)] \quad (8)$$

式中 $e_{y_2} = y_2 - y_{2r}$ 为速度跟踪误差。对式(8)求解,则负载转矩观测值 \hat{T}_L 可由下式得到

$$\hat{T}_L(t) = p_0[\frac{10}{3\tau_r^2} \int_0^t e_{y_2}(\tau) d\tau + \frac{5}{2\tau_r} e_{y_2}(t) + \dot{e}_{y_2}(t)] + T'_L(0)$$

式中, $T'_L(0) = \hat{T}_L(0) - p_0[\frac{5}{2\tau_r}\dot{e}_{y_2}(0) + \dot{e}_{y_2}(0)]$ 。

假设观测扰动的初始虚拟值 $\hat{T}_L(0) = p_0[\frac{5}{2\tau_r}e_{y_2}(0) + \dot{e}_{y_2}(0)]$, 则可得如下观测器方程

$$\hat{T}_L(t) = p_0[\frac{10}{3\tau_r^2} \int_0^t e_{y_2}(\tau) d\tau + \frac{5}{2\tau_r} e_{y_2}(t) + \dot{e}_{y_2}(t)] \quad (9)$$

由观测器方程(9)可见,只需要测量得到系统实际转速,观测器就可以利用实际转速与给定转速的误差值得到负载转矩估计值 \hat{T}_L 。在系统受到未知负载转矩扰动的作用时,便可将观测值 \hat{T}_L 代入到控制器中,提高系统对负载扰动的鲁棒性。

4 仿真结果

本节通过两组 Matlab 中 Simulink 仿真实验来分别验证本文方法的转速跟踪性能与鲁棒性。实验中对 PMSM 系统采用 $i_d = 0$ 控制策略,控制系统框图如图 1 所示,其中 ω_r^* , i_d^* 表示给定转速与电流。不失一般性,所选用电机参数如表 1 所示。

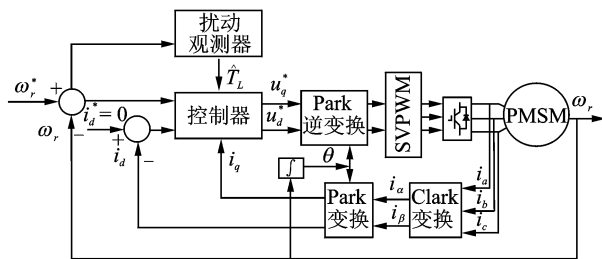


图 1 控制框图

Fig. 1 Control scheme

表 1 电动机参数

Tab. 1 Motor parameters

电机参数	参数取值
发电机转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	2.45×10^5
发电机极对数 p	28
发电机摩擦因数 $B_s/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$	15.1
磁链系数 φ/Wb	5.438 8
定子电阻 R_s/Ω	0.006
d, q 轴等效电感 L/mH	2.56
额定功率 P/MW	1.3
额定线电压 U/V	690

实验 1: 不考虑负载转矩的影响,来验证 PMSM 系统转速跟踪性能。

实验中采用 $i_d = 0$ 控制策略,即保持电流 i_d 为 0,使电机转速跟踪给定值。如图 1 所示,利用 Clark 变换与 Park 变换,将测量得到的 PMSM 三相电流 i_a, i_b, i_c 转换为 $d-q$ 坐标系下的等效电流 i_d, i_q 。将电流与转速值代入控制器可得到控制量 u_d 与 u_q ,从而实现电机转速的控制。本文所采用 NPC 方法实验中的 d, q 轴电流值如图 2 所示,可见系统稳定运行后, d 轴电流能够稳定在 0 值附近,表明 NPC 方法对电流具有较好的控制效果。

图 3 为本文 NPC 方法的转速跟踪仿真结果,而图 4 为 PID 方法的仿真结果。实验中,当 PMSM 转速达到稳定后,使给定转速由 70 rad/s 上升至 85 rad/s,来验证转速跟踪性能。由图 3 和图 4 仿真结果对比可见,在转速两次达到稳定之前,PID 方

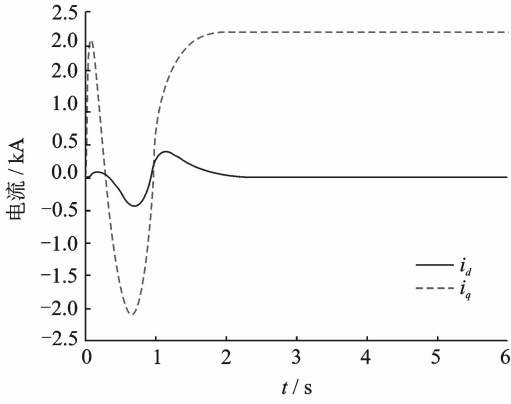
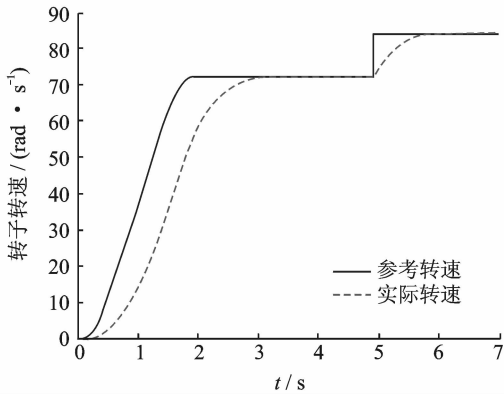
图2 d, q 轴电流Fig. 2 Current of $d-q$ axis

图3 NPC方法的转速跟踪轨迹

Fig. 3 Speed tracking trajectory of NPC

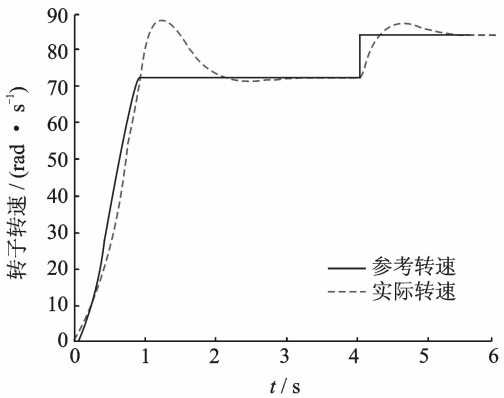


图4 PID方法的转速跟踪轨迹

Fig. 4 Speed tracking trajectory of PID

法分别产生了约 20 rad/s 和 5 rad/s 的超调量,对系统性能产生影响。而运用本文 NPC 方法, PMSM 实际转速能够无超调,更快速准确地跟踪给定转速,跟踪效果明显优于 PID 方法。

实验 2:验证系统在负载转矩扰动的影响下,扰动观测器的估计性能以及系统鲁棒性。

首先,验证观测器对负载转矩的估计性能。实

验中在系统稳定运行后,在 $t = 1.5 \text{ s}$ 时,施加大小为 $5 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载转矩,负载转矩实际值 T_L 与运用扰动观测器得到的估计值如图 5 所示。可见,在产生了较小的超调之后,本文所设计观测器能够较准确地估计出负载转矩的值,然后验证扰动观测器对系统鲁棒性能的影响。在受到转矩扰动的影响后,具有扰动观测器系统与不具有扰动观测器系统的转速跟踪误差如图 6 所示。

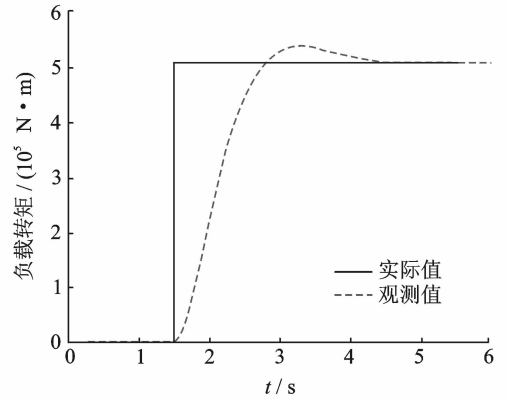


图5 负载转矩

Fig. 5 Load torque

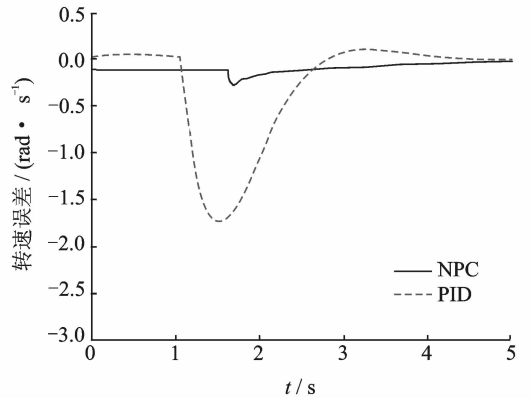


图6 扰动作用下转速跟踪误差

Fig. 6 Speed tracking error affected by perturbation

由图可见,不具有扰动观测器的系统在转矩扰动的作用下,转子转速实际值与给定值产生了最大约为 1.8 rad/s 的偏差。而具有观测器的系统受到扰动影响较小,只产生了很小的转速误差,实际转速仍可以较为准确地跟踪给定值,跟踪效果明显优于不具有扰动观测器的系统。这是由于观测器能够准确估计出当前的扰动值,并补偿到控制器中,使控制器输出更准确的控制量,进而使电机转速与给定值一致,提高了系统针对负载转矩扰动的鲁棒性。

5 结束语

本文基于非线性预测控制方法,针对 PMSM 转速跟踪问题,采用 $i_d = 0$ 控制策略,设计了具有扰动观测器的控制系统。仿真实验表明本文方法能够快速准确地实现转速跟踪,观测器的使用提高了系统对负载转矩扰动的鲁棒性。另外,相对于其他一些非线性控制方法,本文方法结构较为简单,易于工程实现。

参考文献:

- [1] Accetta A, Cirrincione M, Pucci M, et al. Sensorless control of PMSM fractional horsepower drives by signal injection and neural adaptive-band filtering [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(3): 1355-1366.
- [2] 刘昇,卢广山,徐瑜,等. 基于改进型滑模观测器的 PMSM 无位置控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(4): 474-478.
Liu Sheng, Lu Guangshan, Xu Yu, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor Based on improved sliding-mode observer[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45(4): 474-478.
- [3] 卢东斌,欧阳明高,谷靖,等. 电动汽车永磁同步电机最优制动能量回馈控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 83-91.
Lu Dongbin, Ouyang Minggao, Gu Jing, et al. Optimal regenerative braking control for permanent magnet synchronous motors in electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 83-91.
- [4] Rashed M, MacConnell P F A, Stronach A F, et al. Sensorless indirect-rotor-field-orientation speed control of a permanent-magnet synchronous motor with stator-resistance estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(3): 1664-1675.
- [5] 陈冉,陈志辉,陈杰,等. 一种变速风力机全风速范围发电策略[J]. 南京航空航天大学学报, 2012, 44(2): 211-216.
Chen Ran, Chen Zhahua, Chen Jie, et al. Full range control strategy of variable speed wind turbines[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(2): 211-216.
- [6] 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.
Liu Xiaohu, Wang Hehua. Feedback linearization control of PMSM based on SVPWM[J]. Modern E-
- lectronics Technique, 2013, 36(12): 159-162.
- [7] Underwood S J, Husain I. Online parameter estimation and adaptive control of permanent-magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2435-2443.
- [8] 王庆龙,张兴,张崇巍. 永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 897-902.
Wang Qinglong, Zhang Xing, Zhang Chongwei. Double sliding-mode model reference adaptive system speed identification for vector control of permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 897-902.
- [9] Ghafari-Kashani A R, Faiz J, Yazdanpanah M J. Integration of non-linear H_∞ and sliding mode control techniques for motion control of a permanent magnet synchronous motor[J]. IET Electric Power Applications, 2010, 4(4): 267-280.
- [10] Wu W, Xu J P, Hwang J J. Multi-loop nonlinear predictive control scheme for a simplistic hybrid energy system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(9): 3953-3964.
- [11] Gálvez-Carrillo M, De Keyser R, Ionescu C. Nonlinear predictive control with dead-time compensator: Application to a solar power plant[J]. Solar Energy, 2009, 83(5): 743-752.
- [12] Manenti F. Considerations on nonlinear model predictive control techniques[J]. Computers & Chemical Engineering, 2011, 35(11): 2491-2509.
- [13] Li L B, Sun H, Chu J D, et al. The predictive control of PMSM based on state space[C]// Proceedings of IEEE Conference on Machine Learning and Cybernetics. Xi'an: IEEE, 2003: 859-862.
- [14] 孔小兵,刘向杰. 永磁同步电机高效非线性模型预测控制[J]. 自动化学报, 2014, 40(9): 1958-1966.
Kong Xiaobing, Liu Xiangjie. Efficient nonlinear model predictive control for permanent magnet synchronous motor[J]. Acta Automatica Sinica, 2014, 40(9): 1958-1966.
- [15] Preindl M, Bolognani S. Model predictive direct speed control with finite control set of PMSM drive systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(2): 1007-1015.
- [16] Chen W H, Ballance D J, Gawthrop P J. Optimal control of nonlinear systems: A predictive control approach[J]. Automatica, 2003, 39(4): 633-641.
- [17] Errouissi R, Ouhrouche M. Nonlinear predictive controller for a permanent magnet synchronous motor drive[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2010, 81(2): 394-406.