

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

刘旭东¹, 李珂¹, 孙静^{1,2}, 符晓玲^{1,3}, 张承慧^{1†}

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250061;

2. 山东工商学院 信息与电子工程学院, 山东 烟台 264005; 3. 昌吉学院 物理系, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 在电动汽车等工况复杂的系统中, 实现永磁同步电机驱动系统的快响应和强鲁棒性控制历来是研究的重点和难题. 预测控制策略可实现快速的动态响应, 但依赖电机的数学模型. 本文结合广义预测控制理论和扩展状态观测器, 提出了一种新型的永磁同步电机转速跟踪控制方法. 首先基于连续时间非线性系统的广义预测控制方法, 设计了速度跟踪控制器; 然后针对外部扰动引起的电机性能下降问题, 设计了扩展状态观测器估计系统扰动, 通过对扰动量的补偿, 提高了鲁棒性; 而且控制器参数容易调节. 试验结果表明, 电机从静止到 1000 r/min, 与 PI 控制相比, 超调量小, 响应速度快. 特别是在电机运行过程中外加负载扰动时, 转速跌落更小, 且更快的恢复到给定值.

关键词: 电动汽车驱动; 永磁同步电机; 广义预测控制; 扩展状态观测器

中图分类号: TM341 文献标识码: A

Generalized predictive control based on extended state observer for permanent magnet synchronous motor system

LIU Xu-dong¹, LI Ke¹, SUN Jing^{1,2}, FU Xiao-ling^{1,3}, ZHANG Cheng-hui^{1†}

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan Shandong 250061, China;

2. School of Information and Electronic Engineering, Shandong Institute of Business and Technology, Yantai Shandong 264005, China;

3. Department of Physics, Changji University, Changji Xinjiang 831100, China)

Abstract: For a permanent magnet synchronous motor, the design of a drive system with fast response and strong robustness has always been the key and difficult problem in complicate working conditions. The predictive control strategy provides a fast dynamical response, but it depends on the mathematical model of the motor. Combining the generalized predictive control theory and the extended state observer, we propose a novel speed tracking control method for the permanent magnet synchronous motor. Firstly, based on the generalized predictive control theory of continue time nonlinear system, we design a speed tracking controller. Then, to deal with the problem of degradation in control performance due to the large perturbation, we design an extended state observer to estimate the disturbance and improve the robustness by compensating for the disturbance, thus making the controller parameters easy to be adjusted. When compared with the PI control method, the proposed controller has the smaller overshoot and the faster response when the motor starts from 0 r/min to 1000 r/min. When a load disturbance is added to the motor, the speed has the smaller depreciation and recovers to the given value in a shorter time length.

Key words: electric drive; permanent magnet synchronous motor; generalized predictive control; extended state observer

1 引言(Introduction)

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有效率高、比功率大、可靠性高和便于维护等优点, 目前已广泛应用于电动汽车, 具有替代异步电动机的巨大潜力^[1]. 如丰田普锐斯、本田思域等电动汽车均采用PMSM作为驱动电机. 据统计, 截至2009年, 在关于电动汽车研发的国家“863计划”

项目中, 78%的电驱动系统是采用永磁同步电机^[1]. 同时, 永磁同步电机在航空航天, 以及高铁等领域也具有很好的应用前景, 普通的交流感应电机向永磁同步电机转变已是大势所趋. 因此研究永磁同步电机的高性能转速和转矩控制具有重大的现实意义. 尤其是在电动汽车中, 运行环境复杂多变, 且频繁的起停、加减速等, 对驱动电机响应速度和抗扰动性提出了更高的

收稿日期: 2015-02-16; 录用日期: 2015-08-21.

†通信作者. E-mail: zchui@sdu.edu.cn; Tel.: +86 531-88395717.

国家重点基础研究发展计划(“973”计划)(2013CB035600), 国家自然科学基金重大国际(地区)合作研究项目(61320106011), 国家自然科学基金项目(51277116, 61304033, 61304029, 61403236)资助.

Supported by National Key Basic Research Problem of China (2013CB035600), Major International (Regional) Joint Research Project of the National Natural Science Foundation of China (61320106011) and National Natural Science Foundation of China (51277116, 61304033, 61304029, 61403236).

¹张承宁. 电动汽车电机驱动系统测试与评价情况报告, 北京理工大学, 2009.

要求. 此外, PMSM的控制易受电机参数、外部扰动, 以及非线性动态等不确定因素影响, 使得传统的比例积分(proportional integral, PI)控制方法已不能满足高性能控制的需求. 为此, 国内外学者在控制策略上做了大量的研究和探索, 如反馈线性化控制^[2]、滑模控制^[3]、反步控制^[4]、无源性控制^[5]等, 这些方法在不同方面提高了电机控制性能.

近年来, 模型预测控制方法备受关注^[6], 目前已广泛应用于机器人^[7]、电机^[8]、功率变换器^[9]等领域. 模型预测控制利用系统的输入输出数据预测未来时刻的输出, 通过优化成本函数, 得到控制律, 与其他控制方法相比, 具有控制效果好、对模型精确性要求不高等优点, 因此在永磁同步电机控制领域取得了大量的研究成果^[10-13]. 模型预测控制分为连续时间模型和离散时间模型预测控制两种方法, 上述文献普遍是基于离散时间模型的控制策略, 控制器的设计过程中受采样周期的影响较大, 过小的采样周期容易导致较大的预测时域, 进而计算量增加, 影响实时性, 而过大的采样周期又会导致系统抗扰动能力下降, 因此在实际应用中增加了控制器的设计难度. 文献[14-16]提出了一种新的非线性广义预测控制(generalized predictive control, GPC)方法, 从系统的连续时间模型出发, 在设计控制器的过程中, 建立预测模型时不需要模型的离散化, 而是通过对模型的泰勒级数展开得到预测的模型, 进而优化成本函数, 设计了目标跟踪控制器, 在控制器设计过程中, 采样时间的选择更为灵活, 且计算量更小.

另外, 值得指出的是: 模型预测控制仍是基于系统模型的控制方法, 在建模时并未考虑外部扰动, 不能直接处理系统扰动的影响. 当系统存在模型严重失配或较强扰动时, 如电机负载转矩的突然变化、参数扰动、未建模动态等, 控制精度会显著降低. 为解决这一难题, 本文提出了一种基于扩展状态观测器(extended state observer, ESO)^[17-19]的扰动估计方法, 将系统的总扰动作为一个新的状态变量, 构造状态观测器, 虽然系统的扰动量无法直接测量, 但可以通过观测器估计系统扰动值, 并将估计的扰动量用于广义预测控制器的前馈补偿. 最后搭建了基于dSPACE的永磁同步电机硬件在环试验平台, 通过仿真和试验验证了基于广义预测控制和扩展状态观测器的PMSM速度控制方法的有效性. 结果证明本文设计的速度控制器与PI方法相比, 响应速度更快、超调量小、抗负载扰动能力强, 且控制器中参数容易调节, 实用性强, 适用于电动汽车驱动系统等电机运行工况复杂的场合.

2 PMSM的数学模型(Mathematical model of PMSM)

永磁同步电机控制系统通常采用转速、电流双闭环控制结构. 本文采用基于连续时间系统的GPC方法

设计外环转速跟踪控制器, 使电机实际输出转速跟踪给定转速值. 因此, 首先需建立PMSM控制系统的数学模型. 按转子磁场定向理论, PMSM在dq轴同步旋转坐标系下的数学模型可表示为^[16]

$$\begin{cases} u_d = L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d - n_p \omega L_q i_q, \\ u_q = L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q + n_p \omega L_d i_d + n_p \omega \Phi, \end{cases} \quad (1)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = \tau_e - \tau_L - B\omega, \quad (2)$$

$$\tau_e = n_p [(L_d - L_q) i_d i_q + \Phi i_q], \quad (3)$$

式中: L_d 和 L_q 分别为dq轴同步旋转坐标系下的定子电感, i_d, i_q, u_d, u_q 分别为dq坐标系下的定子电流和电压, R_s 为定子电阻, n_p 为极对数, ω 为转子机械角速度, Φ 为永磁体产生的磁链, J 为转动惯量, τ_e 为电磁转矩, τ_L 为负载转矩, B 为摩擦系数.

通常, 在PMSM控制系统中采用 $i_d^* = 0$ 控制, 并通过设计转速控制器得到参考电流 i_q^* . 将负载转矩作为扰动变量, 令状态变量 $x = \omega$, 输入变量 $u = i_q$, 输出变量 $y = h(x) = \omega$. 则由式(2)和式(3)得: 不考虑扰动量的PMSM标称系统模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g_1(x)u, \\ y = h(x) = g_2(x)x, \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{aligned} f(x) &= -\frac{B}{J}\omega, \\ g_1(x) &= \frac{n_p [(L_d - L_q)i_d + \Phi]}{J}, \quad g_2(x) = 1. \end{aligned} \quad (5)$$

由此, 将PMSM的数学模型式(2)和式(3)表示成了标准非线性方程的形式, 而广义预测控制方法具有动态响应好、对模型精度要求不高等优点, 为实现非线性系统的高性能跟踪控制提供了有效途径, 特别适用于电机驱动系统等复杂工业控制中.

3 PMSM广义预测控制器设计(Design of generalized predictive controller for PMSM)

基于PMSM标称系统连续时间模型, 本节将研究和设计转速预测控制器, 以实现电机转速的快速稳定以及高精度的跟踪控制.

首先定义包含预测转速和参考转速的成本函数

$$J_a = \frac{1}{2} \int_0^{T_r} (\hat{\omega}(t + \tau) - \omega_r(t + \tau))^2 d\tau, \quad (6)$$

其中: T_r 为预测时域, $\hat{\omega}(t + \tau), \omega_r(t + \tau)$ 分别为预测的转速输出和参考转速, 成本函数 J_a 能够保证输出转速能够尽快的跟踪给定的参考转速.

根据文献[15], 输出量对输入量的相对阶 ρ 定义为输出量对时间的 n 次导数($n = 0, 1, 2, \dots$), 直到包含输入量为止, 因此, 本文中 $\rho = 1$. 输出 $\hat{\omega}(t)$ 对时间的0到 ρ 次导数为

$$\hat{\omega}(t) = L_f^\rho h(x), \quad (7)$$

$$\dot{\hat{\omega}}(t) = L_f h(x) + L_{g_1} h(x) u(t). \quad (8)$$

将预测输出 $\hat{\omega}(t + \tau)$ 在 t 时刻按泰勒级数展开得

$$\hat{\omega}(t + \tau) = \hat{\omega}(t) + \tau \dot{\hat{\omega}}(t), \quad (9)$$

则

$$\hat{\omega}(t + \tau) = [1 \ \tau] \begin{bmatrix} \hat{\omega}(t) \\ \dot{\hat{\omega}}(t) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

令 $\Gamma(\tau) = [1 \ \tau]$, $\bar{W}(t) = \begin{bmatrix} \hat{\omega}(t) \\ \dot{\hat{\omega}}(t) \end{bmatrix}$, 即

$$\hat{\omega}(t + \tau) = \Gamma(\tau) \bar{W}(t). \quad (11)$$

同理, 预测的参考转速由泰勒级数展开得

$$\omega_r(t + \tau) = \Gamma(\tau) \bar{W}_r(t), \quad (12)$$

其中: $\bar{W}_r(t) = [\omega_r(t) \ \dot{\omega}_r(t)]^T$, ω_r 为给定的参考转速值.

令 $\bar{\Gamma}(T_r) = \int_0^{T_r} \Gamma^T(\tau) \Gamma(\tau) d\tau$, 矩阵的各个元素表示为

$$\bar{\Gamma}(T_r)_{(i,j)} = \frac{1}{(i-1)!(j-1)!(i+j-1)} T_r^{i+j-1}, \quad (13)$$

$i, j = 1, 2, \dots, \rho + 1.$

因此, 根据式(11)和式(12), 成本函数式(6)可近似表示为

$$J_a = \frac{1}{2} [\bar{W}(t) - \bar{W}_r(t)]^T \bar{\Gamma}(T_r) [\bar{W}(t) - \bar{W}_r(t)]. \quad (14)$$

为了实现转速的跟踪控制, 需满足成本函数最小, 即满足 $\frac{\partial J_a}{\partial u} = 0$, 可得系统的广义预测控制律

$$u = -G^{-1}(x)(kM_\rho + L_f h(x) - \dot{\omega}_r), \quad (15)$$

式中:

$$G(x) = L_{g_1} L_f^{\rho-1} h(x) = L_{g_1} L_f^0 h(x) = L_{g_1} \omega = \frac{n_p [(L_d - L_q) i_d + \Phi]}{J},$$

$$L_f h(x) = f(x) = -\frac{B}{J} \omega,$$

$$M_\rho = [L_f^0 h(x) - \omega_r^0(t)] = \omega - \omega_r,$$

$$k = \bar{\Gamma}_{rr}^{-1} \bar{\Gamma}_{\rho r},$$

且

$$\bar{\Gamma}(T_r) = \begin{bmatrix} \bar{\Gamma}_{\rho\rho} & \bar{\Gamma}_{\rho r} \\ \bar{\Gamma}_{\rho r}^T & \bar{\Gamma}_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_r & \frac{T_r^2}{2} \\ \frac{T_r^2}{2} & \frac{T_r^3}{3} \end{bmatrix},$$

其中: $\bar{\Gamma}_{\rho\rho} \in \mathbb{R}$, $\bar{\Gamma}_{\rho r} \in \mathbb{R}$, $\bar{\Gamma}_{rr} \in \mathbb{R}$. 由此可得 $k = \frac{3}{2T_r}$.

由式(15)得PMSM转速控制律

$$u(t) = -\frac{J}{n_p [(L_d - L_q) i_d + \Phi]} \left[\frac{3}{2T_r} (\omega - \omega_r) - \frac{B}{J} \omega - \dot{\omega}_r \right]. \quad (16)$$

对于永磁同步电机控制系统, 式(16)中求得的控制量 $u(t)$ 即为速度控制器的输出 i_q^* .

值得指出的是, 该控制器是根据系统标称模型求得的, 在建立预测模型时忽略了负载转矩, 参数变化以及未建模动态的影响. 而在实际系统中, 外部扰动和参数变化是不可避免的. 当电机系统突加外部扰动较大或模型严重失配时, 系统的转速控制性能仍将显著下降, 不能完全消除扰动引起的稳态误差. 所以, 基于广义预测控制方法的鲁棒性控制问题亟待解决, 这对提高电机控制性能至关重要, 这正是本文研究重点.

4 扩展状态观测器设计 (Design of extended state observer)

提高PMSM控制系统抗扰动性的关键是增强广义预测转速跟踪控制器的鲁棒性. 为此提出了一种基于扩展状态观测器的扰动补偿方法^[10], 其基本思路是将系统中的扰动量作为一个状态量, 结合原有的状态变量, 构造扩展状态观测器, 利用系统中可测的信息, 如转速、电流等, 估计出系统不可测的扰动量, 藉此补偿扰动对系统的影响, 从而提高系统的抗扰动性. 具体设计过程如下:

考虑电机参数变化和负载扰动时, PMSM的机械运动方程可表示为

$$\dot{\omega} = (a + \Delta a) i_q - (b + \Delta b) \omega - (c + \Delta c) \tau_L, \quad (17)$$

式中: $a = \frac{n_p [(L_d - L_q) i_d + \Phi]}{J}$, $b = \frac{B}{J}$, $c = \frac{1}{J}$, Δa , Δb , Δc 表示电机参数的摄动量. 令

$$d(t) = \Delta a i_q - \Delta b \omega - (c + \Delta c) \tau_L + a(i_q - i_q^*), \quad (18)$$

$d(t)$ 表示总扰动向量, 进而式(17)可表示为

$$\dot{\omega} = a i_q^* - b \omega + d(t). \quad (19)$$

令 $x' = d(t)$ 为扩展的状态量, $c(t)$ 为扰动向量 $d(t)$ 的变化率, 则式(19)可扩展为

$$\begin{cases} \dot{x} = x' + a i_q^* - b x, \\ \dot{x}' = c(t). \end{cases} \quad (20)$$

根据文献[18-19], 构造扩展状态观测器如下所示:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + a i_q^* - b x + p_1(x - z_1), \\ \dot{z}_2 = p_2(x - z_1), \end{cases} \quad (21)$$

其中: z_1 为电机角速度 ω 的估计值, z_2 为扰动向量 $d(t)$ 的估计值.

令 $z = [z_1 \ z_2]^T$, $\tilde{y} = z_1$, 则式(21)可表示为

$$\begin{cases} \dot{z} = A z + [a \ 0]^T i_q^* + [p_1 \ p_2]^T (y - \tilde{y}) - [b x \ 0]^T, \\ \tilde{y} = C z, \end{cases} \quad (22)$$

式中: $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, $C = [1 \ 0]$.

令

$$\lambda_s = |sI - (A - [p_1 \ p_2]^T C)| = s^2 + p_1 s + p_2.$$

取 $p_1 = 2p$, $p_2 = p^2$, 其中 $-p(p > 0)$ 为扩展状态观测器的闭环期望极点. 由文献[18]的分析可得, z_2 可渐近地估计扰动 x' . 将由扩展状态观测器估计的扰动向量 z_2 作为电机转速环前馈补偿控制, 因此

$$u(t) = -\frac{J}{n_p[(L_d - L_q)i_d + \Phi]} \left[\frac{3}{2T_r}(\omega - \omega_r) - \frac{B}{J}\omega - \dot{\omega}_r \right] - \frac{z_2}{a}. \quad (23)$$

式(23)即为基于扩展状态观测器的PMSM广义预

测控制器. 显而易见, 新控制器与常规预测控制器式(16)相比, 新增了扰动补偿项 $\frac{z_2}{a}$, 可有效抑制外部扰动对系统的影响.

新控制器融合了广义预测控制和扩展状态观测器的优点, 而且控制器中只需调节预测时域 T_r 和扩展状态观测器增益 p , 参数容易调节. 控制系统结构框图如图1所示, 内环电流环采用PI控制方法, 外环转速环采用广义预测控制+扩展状态观测器(GPC+ESO)的设计方法, 反馈部分由GPC完成, 前馈部分由ESO完成, 通过对扰动量的估计实现对控制量 i_q^* 的补偿.

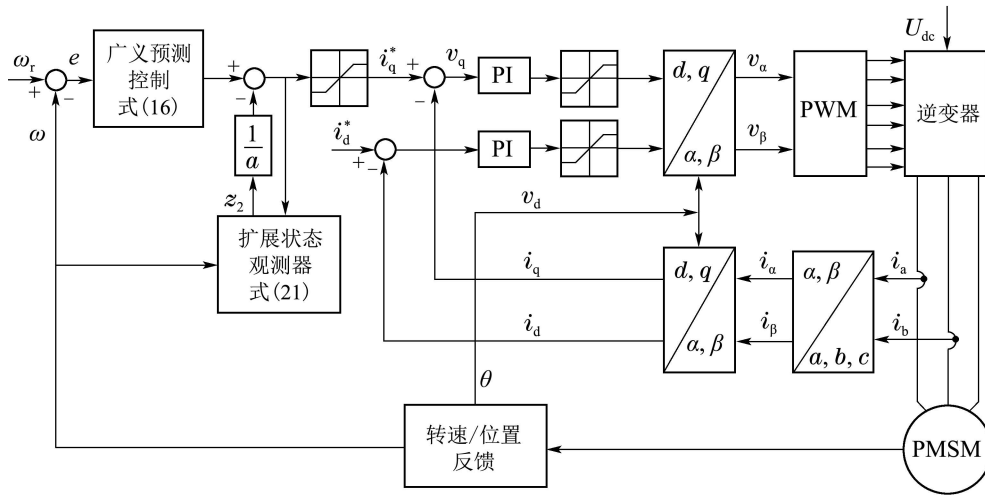


图1 PMSM控制系统结构框图

Fig. 1 Block diagram of PMSM control system

5 仿真与试验(Simulation and experiment)

5.1 仿真研究(Simulation research)

采用MATLAB/Simulink搭建了系统仿真模型, 选用PMSM的参数如表1所示.

表1 永磁同步电机参数

Table 1 PMSM model parameters

参数	数值
额定转速/(r · min ⁻¹)	3000
额定转矩/(N · m)	2.3
额定电流/A	1.85
转动惯量/(kg · m ²)	0.001
永磁体磁链/Wb	0.15
摩擦系数/(N · m · (s · rad ⁻¹))	0.001
阶跃响应时间常数/s	0.0092

为了更好的验证本文设计的GPC+ESO速度控制器的转速响应及抗扰动性能, 将其与工业过程中普遍采用的PI速度控制器以及常规的不含有扰动观测器的GPC速度控制器比较. 为了保证参考转速是光滑函数, 设计转速控制器时, 在给定转速后加入

了二阶线性滤波环节 $F(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$, 其中取 $\xi = 1$, $\omega_n = 100$. 在以上3种控制方法中电流环采用相同的控制参数, 其中: 比例系数 $p_c = 20$, 积分系数 $I_c = 800$, 采样周期为 $T_s = 0.0001$ s. 在PI方法中, 利用MATLAB优化工具箱, 并通过多次调节择优选取PI参数, 取速度环比例系数 $p_s = 0.5$, 积分系数 $I_s = 6$; 在GPC中, 预测时域 $T_r = 0.001$ s; 在GPC+ESO中, 预测时域 $T_r = 0.001$ s, $p = 50$. 给定电机转速 $n = 1000$ r/min, 图2为3种控制方法对应的转速响应曲线, 图3为GPC+ESO控制对应的dq轴电流响应曲线. 电机转速稳定之后, 在 $t = 0.5$ s时, 给电机突加1 N · m的负载扰动, 图4为3种方法对应的转速变化曲线, 图5为采用GPC+ESO控制对应的dq轴电流变化曲线.

3种控制方法对应的电机转速性能比较如表2所示. 从仿真结果看出, 基于广义预测控制和扩展状态观测器的PMSM转速跟踪控制方法与PI方法相比, 具有响应速度快、超调量小、抗扰动能力强等优点.

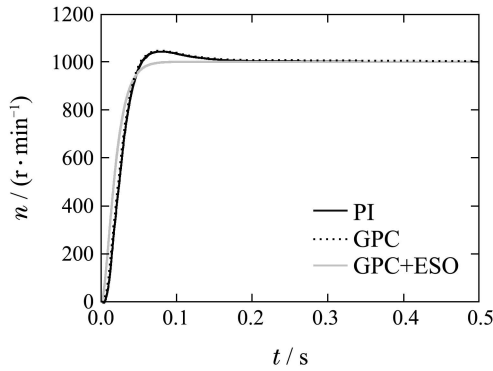


图 2 3种方法对应转速响应仿真曲线

Fig. 2 Simulation speed response curves of three methods

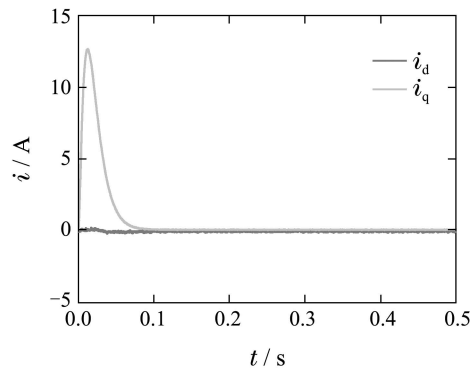


图 3 GPC+ESO对应dq轴电流仿真曲线

Fig. 3 Simulation dq-axis current curves of GPC+ESO

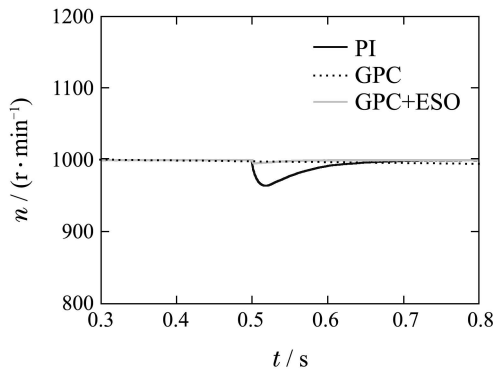


图 4 负载扰动时3种方法对应转速仿真曲线

Fig. 4 Simulation speed curves of three methods with load disturbance

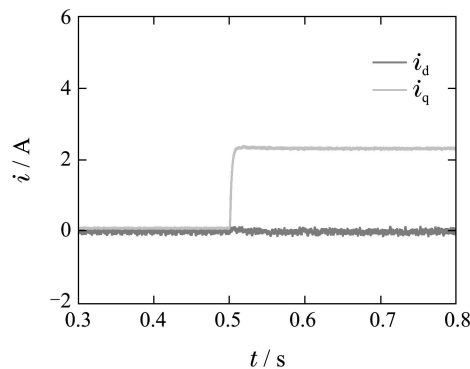


图 5 负载扰动时GPC+ESO对应dq轴电流仿真曲线
Fig. 5 Simulation dq-axis current curves of GPC+ESO with load disturbance

表 2 3种方法的仿真结果比较

Table 2 Comparison of simulation results in three methods

方法	性能比较			
	起动时超调量/%	起动时响应速度/s	加负载后转速跌落/恢复时间慢 (r · min ⁻¹)	加负载后稳态误差/ (r · min ⁻¹)
PI	~ 5	~ 0.2	~ 35	0
GPC	0	~ 0.1	~ 5	~ 5
GPC+ESO	0	~ 0.1	~ 5	0

5.2 试验验证(Experimental verification)

利用dSPACE公司的MicroAutobox作为电机控制器,通过搭建快速控制原型,完成了试验验证,试验现场如图6所示,系统包括永磁同步电机、dSPACE控制器、功率变换器、磁滞测功机以及测功机控制器.试验用永磁同步电机参数如表1所示.

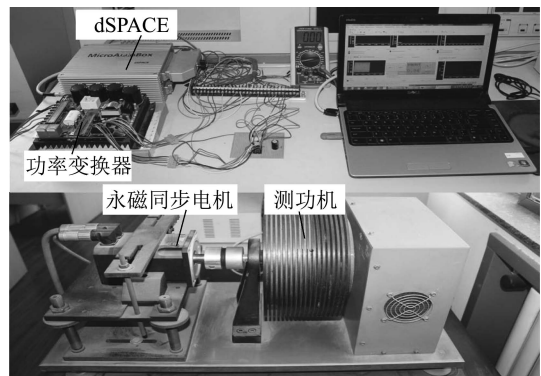


图 6 PMSM控制系统试验现场

Fig. 6 Photograph of experimental ground for PMSM control system

取采样周期为 $T_s = 0.0001$ s,在广义预测控制中,取预测时域 $T_f = 0.006$ s,分别采用PI控制, GPC以及GPC+ESO3种方法完成了试验验证及对比,试验结果如图7-10所示.图7为给定电机转速为 $n = 1000$ r/min,3种控制方法对应的转速响应曲线,图8为采用GPC+ESO方法对应的电机dq轴电流曲线.电机转速稳定之后,在 $t = 2$ s时,通过测功机给电机突加 1 N · m的负载转矩(额定转矩的43%),图9为负载变化时3种控制方法对应的转速变化曲线,图10为采用GPC+ESO方法对应的电机dq轴电流变化曲线.

在电机起动过程中和加负载扰动时,3种控制方法对应的电机转速性能比较如表3所示,从表中看出,试验特性与仿真结果一致,采用本文提出的转速跟踪控制方法,转速超调量小.特别是在负载转矩变化时,转速跌落更小,且能迅速恢复到给定转速.

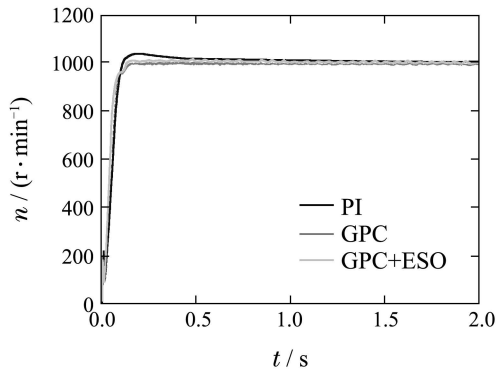


图7 3种方法对应转速响应试验曲线

Fig. 7 Experimental speed response curves of three methods

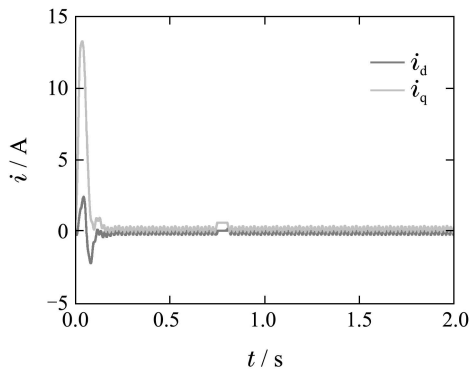


图8 GPC+ESO对应dq轴电流试验曲线

Fig. 8 Experimental dq-axis current curves of GPC+ESO

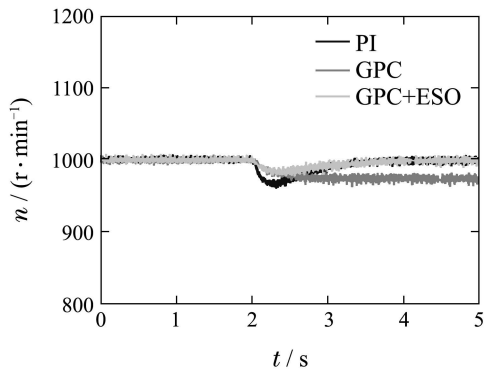


图9 负载扰动时3种方法对应转速试验曲线

Fig. 9 Experimental speed curves of three methods with load disturbance

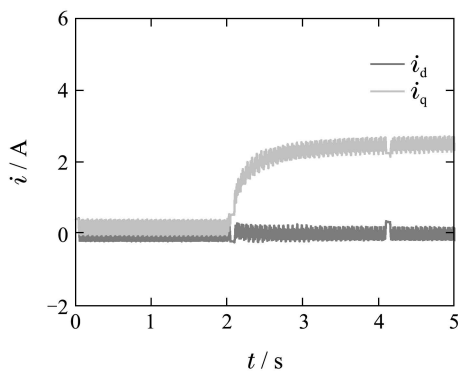


图10 负载扰动时GPC+ESO对应dq轴电流试验曲线

Fig. 10 Experimental dq-axis current curves of GPC+ESO with load disturbance

表3 3种方法的试验结果比较

Table 3 Comparison of experimental results in three methods

方法	性能比较			
	起动时超调量/%	起动时响应速度/s	加负载后转速跌落/恢复时间慢 (r·min ⁻¹)	加负载后稳态误差/ (r·min ⁻¹)
PI	~ 4	~ 0.7	~ 35 恢复时间慢	0
GPC	0	~ 0.2	~ 30	~ 30
GPC+ESO	~ 0.5	~ 0.2	~ 20 恢复时间快	0

为了进一步验证该方法的有效性,将文献[10]中提出的预测函数控制方法(PFC+ESO)用于本文的电机控制系统中,并与本文提出的方法相比较。图11为电机起动时,两种方法对应的转速响应曲线,图12为在 $t = 2$ s时,给电机突加 $1 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的负载扰动时的转速变化曲线。

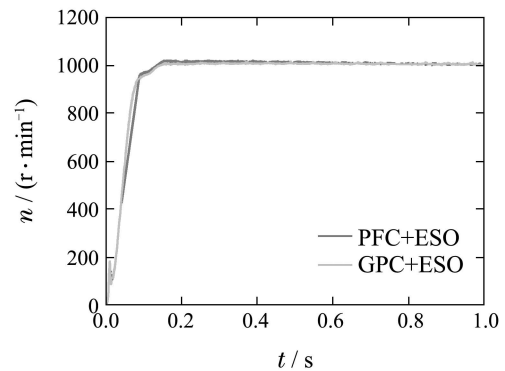


图11 GPC+ESO与PFC+ESO的转速响应试验曲线

Fig. 11 Experimental speed response curves of GPC+ESO and PFC+ESO

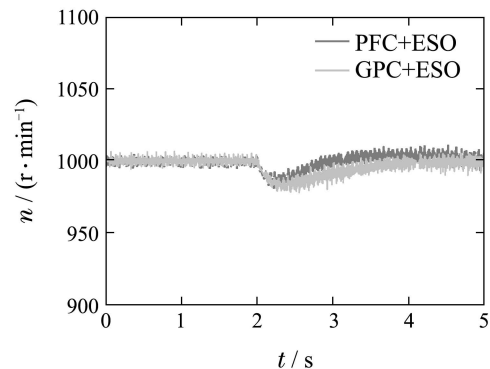


图12 负载扰动时GPC+ESO与PFC+ESO的转速试验曲线

Fig. 12 Experimental speed curves of GPC+ESO and PFC+ESO with load disturbance

从试验结果看出,两种方法都具有良好的起动性能和抗扰动性,但GPC+ESO方法响应速度更快;在加上负载扰动之后,PFC+ESO方法转速跌落小,抗扰动能力更强。

6 结论(Conclusions)

本文提出了一种新型的永磁同步电机转速跟踪控制方法。首先将基于连续时间模型的广义预测控制方法应用在PMSM的转速控制中, 设计了转速跟踪控制器。进而, 针对系统负载扰动等给电机导致的性能下降问题, 设计了基于扩展状态观测器的扰动估计方法, 该观测器能够有效的估计电机负载变化, 建模误差等引起的系统扰动。最后, 利用搭建的基于dSPACE MicroAutoBox的PMSM控制平台完成了试验验证, 通过对电机起动过程和负载突变时的电机运行状况测试, 并与传统的PI控制方法, 常规的广义预测控制方法, 以及基于ESO的预测函数控制方法对比。结果证明本文提出的控制方法具有良好的转速跟踪性能, 响应速度快, 特别是在负载突变时, 转速跌落较小, 鲁棒性强, 明显优于PI控制和常规广义预测控制方法。另外, 该方法中控制器参数容易调节, 实用性较强, 在电动汽车等领域具有良好的应用前景。

下一步工作是将本文方法应用于实验室AVL电动汽车驱动系统试验平台中, 完成电动汽车用PMSM的转速控制, 验证该控制器的有效性。

参考文献(References):

- [1] EHSANI M, GAO Y M, EMADI A. 现代电动汽车、混合动力电动汽车和燃料电池车——基本原理、理论和设计 [M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2012: 128 – 130.
- [2] EHSANI M, GAO Y M, EMADI A. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles—Fundamentals, Theory, and Design* [M]. 2nd edition. Beijing: China Machine Press, 2012: 128 – 130.
- [3] GRCAR B, CAFUTA P, ZNIDARIC M. Nonlinear control of synchronous servo drive [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1996, 4(2): 177 – 184.
- [4] 张碧陶, 皮佑国. 基于分数阶滑模控制技术的永磁同步电机控制 [J]. 控制理论与应用, 2012, 29(9): 1193 – 1197. (ZHANG Bitao, PI Youguo. Fractional order sliding-mode control for permanent magnet synchronous motor [J]. *Control Theory & Applications*, 2012, 29(9): 1193 – 1197.)
- [5] KARABACAK M, ESKIKURT H I. Speed and current regulation of a permanent magnet synchronous motor via nonlinear and adaptive backstepping control [J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011, 53(9/10): 2015 – 2030.
- [6] 孙静, 张承慧, 刘旭东, 等. 基于Hamilton系统理论的电动汽车用永磁同步电机 H_∞ 控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 163 – 169. (SUN Jing, ZHANG Chenghui, LIU Xudong, et al. H-infinity control of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle Based on hamiltonian system theory [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(11): 163 – 169.)
- [7] WANG L P. *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB* [M]. London: Springer, 2009.
- [8] SUNG J Y, YOON H C, JIN B P. Generalized predictive control based on self-recurrent wavelet neural network for stable path tracking of mobile robots: adaptive learning rates approach [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 2006, 53(6): 1381 – 1394.
- [9] JAROSLAW G, HAITHAM A R. Speed sensorless induction motor drive with predictive current controller [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(2): 609 – 709.
- [10] 杨勇, 阮毅, 叶斌英. 三相并网逆变器无差拍电流预测控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 40 – 46. (YANG Yong, RUAN Yi, YE Binying. Deadbeat predictive current control method for three-phase grid-connected inverters [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(33): 40 – 46.)
- [11] LIU H X, LI S H. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(2): 1171 – 1183.
- [12] 王伟华, 肖曦, 丁有爽. 永磁同步电机改进电流预测控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 50 – 55. (WANG Weihua, XIAO Xi, DING Youshuang. An improved predictive current control method for permanent magnet synchronous motors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(3): 50 – 55.)
- [13] CHAI S, WANG L P, ROGERS E. A cascade MPC control structure for a PMSM with speed ripple minimization [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(8): 2978 – 2987.
- [14] 邓永停, 李洪文, 王建立, 等. 基于预测函数控制和扰动观测器的永磁同步电机速度控制 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1598 – 1605. (DENG Yongting, LI Hongwen, WANG Jianli, et al. Speed control for PMSM based on predictive functional control and disturbance observer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(6): 1598 – 1605.)
- [15] CHEN W H, BALANCE D J, GAWTHROP P J, et al. Nonlinear PID predictive controller [J]. *IEE Proceedings Control Theory application*, 1999, 146(6): 603 – 611.
- [16] CHEN W H, BALANCE D J, GAWTHROP P J. Optimal control of nonlinear systems: a predictive control approach [J]. *Automatic*, 2003, 39(4): 633 – 641.
- [17] ERROUSSI R, OUHROUCHE M, CHEN W H. Robust cascaded nonlinear predictive control of a permanent magnet synchronous motor with antiwindup compensator [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(8): 3078 – 3088.
- [18] 孙振兴, 李世华, 张兴华. 基于扩张状态观测器和有限时间控制的感应电机直接转矩控制 [J]. 控制理论与应用, 2014, 31(6): 748 – 756. (SUN Zhenxing, LI Shihua, ZHANG Xinghua. Direct torque control of induction motor based on extended state observer and finite time control scheme [J]. *Control Theory & Applications*, 2014, 31(6): 748 – 756.)
- [19] YOO D C, YAU S S, GAO Z Q. On convergence of the linear extended state observer [C] // *IEEE International Symposium on Intelligent Control*. Munich, Germany: IEEE, 2006: 1645 – 1650.
- [20] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术 [J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13 – 18. (HAN Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique [J]. *Control Engineering of China*, 2002, 9(3): 13 – 18.)

作者简介:

刘旭东 (1987-), 男, 博士研究生, 目前研究方向为电动汽车电驱动系统、非线性控制, E-mail: xudong19871982@163.com;

李珂 (1979-), 男, 副教授, 硕士生导师, 目前研究方向为电动汽车电驱动系统、新能源技术、变频调速及节能技术, E-mail: like@sdu.edu.cn;

孙静 (1979-), 女, 讲师, 博士研究生, 目前研究方向为电动汽车电驱动系统、Hamilton系统理论、最优控制, E-mail: sunjing@sdu.edu.cn;

符晓玲 (1979-), 女, 讲师, 博士研究生, 目前研究方向为电动汽车能量管理及驱动系统控制, E-mail: fxl@sdu.edu.cn;

张承慧 (1963-), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为新能源技术、优化控制、电气传动, E-mail: zchui@sdu.edu.cn.