

4-16-2019

## Predictive Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on IMC Observer

Zhiling Ren

*School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;*

Zhongbao Zhang

*School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;*

Limin Hou

*School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;*

Guangquan Zhang

*School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Predictive Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on IMC Observer

## Abstract

**Abstract:** Predictive control strategy is applied to permanent magnet synchronous motor control system, it can achieve fast dynamic response and high-precision tracking control, but depending on the mathematical model of the motor, the load disturbance will affect the control performance of system. *A new control method combining an observer based on internal model control (IMC) and predictive control was presented. The inner-loop current controller and the outer-loop speed controller based separately on model predictive control algorithm and deadbeat current predictive control algorithm were designed to form dual-loop predictive control system. An IMC observer is designed to estimate the load disturbance, and torque-current compensation is produced as feedforward of speed loop to attenuate the disturbance.* The simulation results show that the proposed method can improve the dynamic response performance and steady-state precision of the control system, and the robustness is greatly enhanced.

## Keywords

permanent magnet synchronous motor, model predictive control, deadbeat predictive control, internal model control, observer

## Authors

Zhiling Ren, Zhongbao Zhang, Limin Hou, Guangquan Zhang, Lin Dong, and Zhao Xing

## Recommended Citation

Ren Zhiling, Zhang Zhongbao, Hou Limin, Zhang Guangquan, Lin Dong, Zhao Xing. Predictive Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on IMC Observer[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(1): 94-101.

# 基于 IMC 观测器的永磁同步电机预测控制

任志玲, 张钟保, 侯利民, 张广全, 林冬, 赵星

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

**摘要:** 预测控制策略应用于永磁同步电机控制系统中可以实现快速的动态响应和高精度的跟踪控制, 但依赖电机的数学模型, 负载扰动会影响系统的控制性能。提出一种基于内模控制(IMC)的观测器与预测控制相结合的控制方法, 基于模型预测控制算法和无差拍电流预测控制算法设计速度外环控制器和电流内环控制器以构成双环预测控制系统, 设计 IMC 观测器估计负载扰动, 据此产生转矩电流补偿量作为速度环的前馈补偿, 实现扰动抑制。仿真结果表明, 所提出的方法能够提高控制系统的动态响应性能和稳态精度, 增强系统的鲁棒性。

**关键词:** 永磁同步电机; 模型预测控制; 无差拍预测控制; 内模控制; 观测器

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 01-0094-08

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0072

## Predictive Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on IMC Observer

Ren Zhiling, Zhang Zhongbao, Hou Limin, Zhang Guangquan, Lin Dong, Zhao Xing

(School of Electrical and Control Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** Predictive control strategy is applied to permanent magnet synchronous motor control system, it can achieve fast dynamic response and high-precision tracking control, but depending on the mathematical model of the motor, the load disturbance will affect the control performance of system. A new control method combining an observer based on internal model control (IMC) and predictive control was presented. The inner-loop current controller and the outer-loop speed controller based separately on model predictive control algorithm and deadbeat current predictive control algorithm were designed to form dual-loop predictive control system. An IMC observer is designed to estimate the load disturbance, and torque-current compensation is produced as feedforward of speed loop to attenuate the disturbance. The simulation results show that the proposed method can improve the dynamic response performance and steady-state precision of the control system, and the robustness is greatly enhanced.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; model predictive control; deadbeat predictive control; internal model control; observer

## 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous



收稿日期: 2017-02-03 修回日期: 2017-04-06;  
基金项目: 辽宁省自然科学基金(201602350), 辽宁省高等学校优秀人才支持计划(LR2013013);  
作者简介: 任志玲(1971-), 女, 辽宁阜新, 博士, 副教授, 研究方向为控制理论与控制工程; 张钟保(1991-), 男, 云南曲靖, 硕士生, 研究方向为电机控制理论与应用。

Motor, PMSM)以其高效率、高功率密度等优点被广泛应用于航空航天、轨道交通以及风力发电等领域, 由于在各方面的大量运用, 需要其达到高位置精度、高频率响应、低转矩脉动和强鲁棒性以适应不同的工况环境。而传统控制策略例如 PI 控制, 并不能满足高性能控制的要求。为此, 国内外学者将不少先进的控制策略引入到 PMSM 控制系统

中, 如预测控制<sup>[1]</sup>、内模控制<sup>[2-3]</sup>、滑模控制<sup>[4]</sup>等, 这些控制方法从不同方面提高了电机的控制性能。

其中, 预测控制理论在近近年来得到了快速发展并且在工业控制中应用越来越广泛<sup>[5]</sup>, 后将模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)算法应用到永磁同步电机的速度控制中<sup>[6]</sup>, 充分利用其滚动优化和反馈校正的特点, 使控制器表现出较好的鲁棒性, 同时它具有结构简单、易于实现、对过程模型要求低等优点, 因而在 PMSM 控制领域取得了显著的控制效果<sup>[7-8]</sup>, 文献[7]针对非线性永磁同步电机模型采用输入-输出反馈线性化来实现预测控制, 有效抑制了转矩脉动; 文献[8]提出了有限集模型预测直接速度控制算法, 克服了传统级联控制器有限带宽的局限, 提高了系统的动、静态性能。在电流控制方面, 为了提高永磁同步电机电流环的动态响应能力和稳态性能, 相关研究人员也展开了电流环预测控制的研究。文献[9]提出模型预测电流控制算法, 消除了交直流电流的非线性耦合, 改善了电流控制的动态性能; 文献[10-11]将无差拍预测控制算法应用到电机的电流环控制中, 使系统获得了良好的动稳态性能。由于无差拍预测控制算法能为控制系统提供低转矩脉动和高电流频率响应, 因此是永磁同步电机电流预测的较理想控制方式。

上述文献根据预测控制理论分别对电机速度环和电流环的控制做了各个方面的改进, 但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, 不能直接处理受扰动情况下的影响, 当系统存在模型严重失配或较强负载扰动时, 预测误差将会变大, 从而影响整个系统的控制性能。针对该问题, 很多文献对 PMSM 预测控制系统采用了不同的抗扰动策略进行改进<sup>[12-14]</sup>。由于内模控制(Internal Model Control, IMC)具有结构简单、在线调节参数少、鲁棒性强等优点, 因此, 本文提出一种基于内模控制(IMC)观测器<sup>[15]</sup>的扰动补偿方法来提高预测控制系统的抗扰动性能, 首先将模型预测控制算法用于速度控制器的设计, 再结合无差拍电流预测控制算法设计的电流控制器构建双环预

测控制系统, 然后针对电机转速环设计 IMC 观测器以补偿外部扰动等因素的影响。最后通过仿真验证了所提方法的可行性和有效性。

## 1 PMSM 数学模型

永磁同步电机是一个多变量、强耦合、非线性的系统, 为了方便研究主要问题, 忽略铁心饱和、涡流和磁滞损耗, 假设转子每相气隙磁势在空间呈正弦分布。PMSM 控制系统采用  $i_d=0$  的矢量控制策略, 则 PMSM 在两相同步旋转坐标系下的数学模型为:

$$u_d = Ri_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_s L_q i_q \quad (1)$$

$$u_q = Ri_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_s L_d i_d + \omega_s \psi_f \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_e - B\omega_r - T_L \quad (3)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_n \psi_f i_q \quad (4)$$

式中:  $u_d$ 、 $u_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$  分别为定子直交轴电压和电流;  $L_d$ 、 $L_q$  分别为直交轴电感;  $R$  为定子电阻;  $\psi_f$  为永磁体磁链;  $P_n$  为电机极对数;  $B$  为摩擦系数;  $J$  为转动惯量;  $T_e$  为电磁转矩;  $T_L$  为负载转矩, 其包含由电机空载损耗产生的电机空载转矩;  $\omega_r$  为转子机械角速度;  $\omega_s$  为转子电角速度, 其中  $\omega_s = P_n \omega_r$ 。

## 2 无差拍电流预测控制

无差拍电流预测控制也称为 PWM 电流预测控制<sup>[16]</sup>, 它利用电流指令值和本时刻采样得到的电机电流、位置信息, 精确计算出下一控制周期应作用的电压矢量, 使得作用该电压矢量的一个周期后, 电机电流能精确跟随指令电流值, 从而使电机电流获得良好的动态响应和稳态响应。本节基于 PMSM 的电压方程来构造无差拍电流预测模型, 其设计过程如下:

根据式(1)和式(2), 选择电机电流为状态变量, 当电机为表贴式永磁同步电机时有  $L_d=L_q=L$ , 可得如下状态方程:

$$\frac{di}{dt} = \mathbf{A}i + \mathbf{B}u + \mathbf{D} \quad (5)$$

$$\text{式中: } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -R/L & \omega_s \\ -\omega_s & -R/L \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\psi_f \omega_s / L \end{bmatrix}; \quad \mathbf{i} = [i_d \quad i_q]^T; \quad \mathbf{u} = [u_d \quad u_q]^T.$$

在控制周期  $T_s$  足够短的情况下, 系统的输入电压  $\mathbf{u}$  及反电势  $\mathbf{D}$  在一个控制周期( $kT_s$  到  $(k+1)T_s$ ) 之间认为保持恒定。在此条件下, 对状态方程(5)离散化求解可得电流预测模型:

$$\mathbf{i}(k+1) = \mathbf{F}(k) \cdot \mathbf{i}(k) + \mathbf{G} \cdot \mathbf{u}(k) + \mathbf{M}(k) \quad (6)$$

$$\text{式中: } \mathbf{i}(k) = [i_d(k) \quad i_q(k)]^T; \quad \mathbf{u}(k) = [u_d(k) \quad u_q(k)]^T;$$

$$\mathbf{M}(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ -T_s \psi_f \omega_s(k) / L \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G} = \begin{bmatrix} T_s / L & 0 \\ 0 & T_s / L \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 - T_s R / L & T_s \omega_s(k) \\ -T_s \omega_s(k) & 1 - T_s R / L \end{bmatrix}.$$

根据无差拍电流预测控制原理, 以速度环输出作为下一时刻的电流指令值  $\mathbf{i}^*(k+1)$ , 并将其与电流采样获得的当前电机运行状态值  $\mathbf{i}(k)$  带入(6)式, 以计算出使电机电流精确跟随指令所需作用的电压矢量  $\mathbf{u}(k)$ 。将电压矢量通过 SVPWM 调制, 生成所需要的开关信号作用于逆变器。

无差拍电流预测控制计算电压矢量的方程如式(7)所示:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{G}^{-1} \cdot [\mathbf{i}^*(k+1) - \mathbf{F}(k) \cdot \mathbf{i}(k) - \mathbf{M}(k)] \quad (7)$$

### 3 基于 MPC 的速度控制

按照预测控制基本原理, 由 3 个步骤“预测系统未来动态→求解优化问题→解的第一个元素作用于系统”和“滚动时域, 重复进行”的机制, 推导 PMSM 的预测模型, 建立优化目标函数, 求解最优控制律。本文为方便 MPC 算法实现, 其在线滚动优化过程中的预测时域和控制时域均取一个周期数进行计算。

#### 3.1 预测模型

在不考虑负载扰动  $T_L$  的情况下, 根据式(3)和式(4)得到电机的转速传递函数:

$$G(s) = \frac{W_r(s)}{I_q(s)} = \frac{1.5P_n \psi_f}{Js + B} \quad (8)$$

对式(8)离散化处理得差分方程:

$$\omega_r(k) = a_0 i_q(k-1) - b_0 \omega_r(k-1) \quad (9)$$

$$\omega_r(k+1) = a_0 i_q(k) - b_0 \omega_r(k) \quad (10)$$

式中:  $a_0 = 1.5P_n \psi_f (1 - e^{-TB/J}) / B$ ,  $b_0 = -e^{-TB/J}$ ,  $T$  为速度环采样周期,  $\omega_r(k)$  为  $kT$  时刻电机实测转速。

将式(9)与式(10)相减可得转速预测模型:

$$\omega_{rm}(k+1) = (1 - b_0)\omega_r(k) + b_0 \omega_r(k-1) + a_0 \Delta i_q^*(k) \quad (11)$$

式中:  $\Delta i_q^*(k)$  为  $kT$  时刻电机的  $q$  轴电流控制增量。

#### 3.2 闭环预测

考虑未建模动态过程及干扰等不确定因素对输出的影响, 根据式(11)可得在  $(k+1)T$  时刻系统的闭环预测输出:

$$\omega_{rp}(k+1) = \omega_{rm}(k+1) + e(k) \quad (12)$$

式中: 预测误差  $e(k) = \omega_r(k) - \omega_{rm}(k)$ 。

#### 3.3 参考轨迹

参考轨迹是从当前实际出发向设定值光滑过渡的系统期望输出, 一般取一阶指数变化的形式, 表达式如下:

$$y_r(k+1) = \alpha \omega_r(k) + (1 - \alpha) \omega_{ref}(k) \quad (13)$$

式中:  $\alpha$  为柔化系数,  $0 < \alpha < 1$ ;  $\omega_{ref}(k)$  为系统的设定值。

#### 3.4 优化准则

控制过程中, 期望未来时刻闭环预测输出  $\omega_{rp}(k+1)$  尽可能接近参考轨迹决定的期望输出  $y_r(k+1)$ , 同时能够保证控制增量  $\Delta i_q^*(k)$  变化不至于剧烈, 因此, 根据式(12)~(13)设计二次性能指标:

$$J_p = \lambda [\omega_{rp}(k+1) - y_r(k+1)]^2 + \beta [\Delta i_q^*(k)]^2 \quad (14)$$

式中:  $\lambda$ ,  $\beta$  为加权系数, 分别表示对跟踪误差和控制量变化的抑制程度。

对  $\partial J_p / \partial \Delta i_q^*(k) = 0$  求解得系统最优控制律:

$$\Delta i_q^*(k) = -\frac{\lambda a_0}{\lambda a_0^2 + \beta} [(1 - b_0)\omega_r(k) + b_0 \omega_r(k-1) + e(k) - y_r(k+1)] \quad (15)$$

则  $kT$  时刻  $q$  轴电流给定值为:

$$i_q^*(k) = i_q(k-1) + \Delta i_q^*(k) \quad (16)$$

上述模型预测控制的程序结构如图 1 所示。预测模型根据之前的状态量  $\omega_r$  和控制量  $i_q^*$ , 对后续的状态变量进行预测。经反馈校正后, 将电机转速的预测值和期望值通过二次性能指标优化得出其优化后的控制量, 从而实现对受控对象的最优控制。

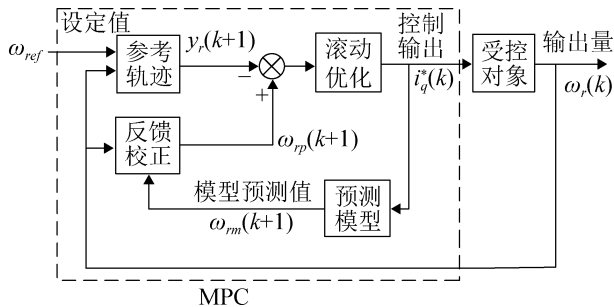


图 1 模型预测控制算法结构框图

Fig. 1 Block diagram of model predictive control algorithm

在 PMSM 闭环控制系统中, 基于 MPC 的速度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以及未建模动态的影响, 而在实际系统中, 外部扰动变化是不可避免的。当电机系统突加负载较大或模型严重失配时, 系统的转速控制性能仍将下降, 所以, 基于预测控制策略的鲁棒性问题亟待解决, 这对提高电机控制性能至关重要, 这正是本文研究的重点。

## 4 IMC 观测器设计

提高 PMSM 控制系统抗扰动性的关键是增强速度预测控制器的鲁棒性。为此提出一种基于 IMC 观测器的扰动补偿方法, 其基本思路是首先构造转速环模型状态方程, 利用 IMC 方法设计转速环观测器并通过状态反馈原理获得观测器控制律, 然后运用极点配置方法优化观测器参数, 最终实现外部扰动补偿控制, 提高系统抗扰动性能。具体设计过程如下:

将转速环模型式(3)用状态方程描述:

$$\dot{x} = ax + b(u - d) \quad (17)$$

式中:  $x = \omega_r$ ;  $u = T_e$ ;  $a = -B/J$ ;  $b = 1/J$ ;  $d = T_L$ 。

根据式(17)建立状态观测方程:

$$\dot{\hat{x}} = a\hat{x} + b(u - \hat{d}) \quad (18)$$

式中:  $\hat{x}$  和  $\hat{d}$  分别为  $x$  和  $d$  的估计变量。

定义误差变量  $\tilde{x} = x - \hat{x}$  和  $\tilde{d} = d - \hat{d}$ , 由式(17)和式(18)相减得到新的状态方程:

$$\begin{cases} \dot{\tilde{x}} = a\tilde{x} - b\tilde{d} \\ y = \tilde{x} \end{cases} \quad (19)$$

式(19)表示估计值与实际值之间的误差状态方程。利用 IMC 设计原理, 对式(19)可假设一个参考输入为 0,  $\tilde{d}$  视为待设计的控制量。则式(19)的跟踪误差  $e$  为:

$$\begin{cases} e = 0 - y \\ \dot{e} = -\dot{y} = -\dot{\tilde{x}} \end{cases} \quad (20)$$

引入两个新的状态变量  $z_1$  和  $z_2$ , 令  $z_1 = \dot{\tilde{x}}$ ,  $z_2 = \tilde{d}$ 。则有:

$$\dot{z}_1 = \ddot{\tilde{x}} = az_1 - bz_2 \quad (21)$$

由式(20)和式(21)构成新的增广系统方程:

$$\dot{Z} = AZ + Bz_2 \quad (22)$$

式中:  $A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 0 & a \end{bmatrix}$ ;  $B = [0 \quad -b]^T$ ;  $Z = [e \quad z_1]^T$ 。

由式(22)可控判别矩阵  $\text{rank}[B \quad AB] = 2$ , 则式(22)完全可控。根据状态反馈原理, 可实现状态反馈控制, 令  $z_2 = KZ$ ,  $K = [k_1 \quad k_2]$ , 使得被控式(22)实现渐进稳定, 则由式(20)和式(22)可得控制量  $z_2$  为:

$$z_2 = k_1 e + k_2 z_1 = -k_1 \tilde{x} + k_2 \dot{\tilde{x}} = \hat{d} \quad (23)$$

式中:  $k_1, k_2$  为待优化的参数。同时在控制系统的的一个采样周期内,  $d$  值视为不变, 即有  $\dot{d} = 0$ , 则式(23)可进一步表示为:

$$\hat{d} = k_1 \tilde{x} - k_2 \dot{\tilde{x}} \quad (24)$$

根据式(18)和式(24)组成 IMC 观测器方程。由式(22)实现状态反馈后的闭环系统矩阵为  $A - BK$ , 令  $\lambda = |sI - (A - BK)| = s^2 - (a + k_2 b)s + k_1 b$ 。取  $k_1 = p_1 p_2 / b$ ,  $k_2 = (p_1 + p_2 - a) / b$ , 其中  $p_1, p_2$  为 IMC 观测器的闭环期望极点, 通过对  $A - BK$  进行合适的极点配置来优化反馈矩阵  $K$  的参数  $k_1$ ,

$k_2$ 。由此确定了 IMC 观测器的控制律。同时,由状态反馈理论可知<sup>[17]</sup>,被控式(22)在反馈控制量式(24)作用下,当系统进入稳态时,即  $t \rightarrow \infty$  时,状态变量  $\mathbf{Z}$  的稳态值  $\mathbf{Z}_s \rightarrow 0$ ,则有对应的状态变量  $e$  和  $z_1$  的稳态值  $e_s \rightarrow 0$  和  $z_{1s} \rightarrow 0$ ,即  $\dot{\hat{x}}_s \rightarrow 0$  和  $\dot{\hat{x}}_s \rightarrow 0$ ,由式(19)可知,必然不确定量  $\tilde{d}$  的稳态值  $\tilde{d}_s = d_s - \hat{d}_s \rightarrow 0$ ,且由于在较短周期内  $\dot{d} = 0$ ,则实际系统不确定量  $d$  的稳态值  $d_s = d$ 。因此,有  $\hat{d}_s \rightarrow d$ ,可见 IMC 观测器可实现无稳态误差估计系统实际不确定量。根据式(18)和式(24)可将此观测器设计为如图 2 所示的结构。

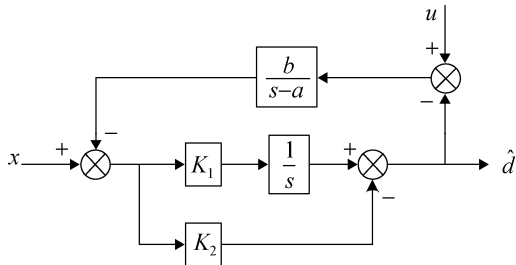


图 2 IMC 观测器结构框图

Fig. 2 Block diagram of IMC observer

将 IMC 观测器离散化后估计的扰动变量  $\hat{d}$  作为电机转速环前馈补偿控制,因此:

$$i_q^*(k) = i_q^*(k-1) + \Delta i_q^*(k) + \frac{\hat{d}}{c} \quad (25)$$

其中  $c$  为补偿系数,式(25)即为基于 IMC 观测器的速度模型预测控制器。由此可见,新控制器与常规模型预测控制算法中的式(16)相比,新增了扰

动补偿项  $\hat{d}/c$ ,可有效抑制负载扰动对系统的影响。

PMSM 控制系统结构框图如图 3 所示,整个调速系统的输出量为电机转速  $\omega_r$ ,在控制系统中电流内环根据式(7)采用无差拍电流预测控制方法,转速外环采用模型预测控制+内模控制观测器(MPC+IMC)的设计方法,其中反馈部分由 MPC 完成,前馈部分由 IMC 观测器完成,通过对扰动量的估计实现对控制量  $i_q^*$  的补偿。

## 5 仿真分析

采用 Matlab/Simulink 软件搭建系统仿真模型,其中电机参数如表 1 所示。

为了验证本文设计的基于 IMC 观测器的 PMSM 预测控制效果,将其与传统的 PI 控制方法(简称方法 1)、MPC 速度控制+PI 电流控制的方法(简称方法 2)以及 MPC 速度控制+无差拍电流预测控制的双预测控制方法(简称方法 3)进行仿真比较。在以上 4 种控制方法中,基于 PI 控制的速度环控制器比例系数  $K_p=0.1$ ,积分系数  $K_i=80$ ,电流环控制器比例系数  $K_p=1500$ ,积分系数  $K_i=2875$ 。基于无差拍电流预测控制的电流环控制周期为  $0.2 \mu s$ 。除方法 1 外,在其余 3 种控制方法中转速外环均采用基于 MPC 的速度控制器,并且参数设置相同:其采样周期为  $0.127 ms$ ,柔化系数  $\alpha=0.998$ ,加权系数  $\lambda:\beta=300:1$ 。IMC 观测器的参数取  $K_1=-0.0001$ ,  $K_2=-0.008$ ,补偿系数  $c=0.92$ 。

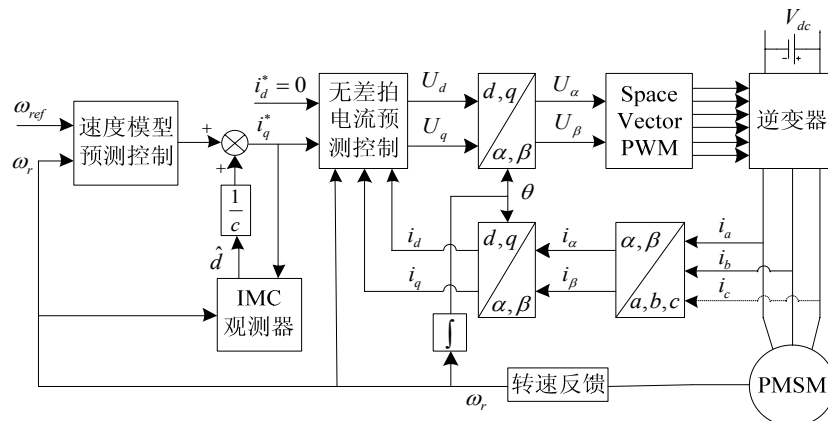


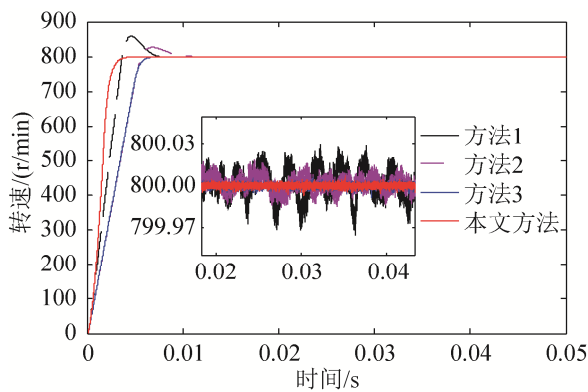
图 3 PMSM 控制系统结构框图

Fig. 3 Block diagram of the PMSM control system

表 1 永磁同步电机参数  
Tab. 1 Parameters of the PMSM

参数	取值
直流母线电压/V	380
极对数	4
定子电感/H	$5.25 \times 10^{-3}$
定子电阻/ $\Omega$	0.958 5
转动惯量/( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )	$6.329 \times 10^{-4}$
永磁体磁链/Wb	0.182 7
摩擦系数/[ $\text{N} \cdot \text{m} \cdot (\text{s} \cdot \text{rad}^{-1})$ ]	$3 \times 10^{-6}$

图 4 为 4 种控制方法对应的速度响应曲线, 当给定转速为 800 r/min 时, 与方法 1、方法 2 相比, 方法 3 和本文基于 IMC 观测器的预测控制方法均能实现快速无超调响应, 稳态运行时转速波动小, 且本文所用方法控制精度高, 响应速度更快, 调节时间更短。

图 4 4 种控制方法的转速响应仿真曲线  
Fig. 4 Simulation speed response curves of four control methods

当电机空载以 800 r/min 稳速运行时, 在 0.02 s 时刻突加 10 N·m 的负载扰动, 其速度变化曲线如图 5 所示。图 5 中可以看出, 在相同负载扰动情况下, 方法 1 所采用的 PI 控制策略会产生较大转速波动, 抗扰性较差。另外 3 种方法采用了预测控制策略后转速波动很小, 并且能够快速恢复到给定值, 但是本文方法与其它方法相比, 转速跌落更小, 对负载扰动具有比较好的鲁棒性。

图 6 和图 7 分别是在本文控制方法下对应的  $q$  轴电流阶跃响应曲线和变化曲线, 从图中可以看出, 无论是以 800 r/min 阶跃启动, 还是突加 10 N·m

额定负载时, 系统的交直流轴电流反馈可以理想地跟随给定变化, 并且电流波动范围小稳态精度高。这表明本文提出的基于 IMC 观测器的预测控制方法在系统的动静态过程中都能够获得理想的控制效果。

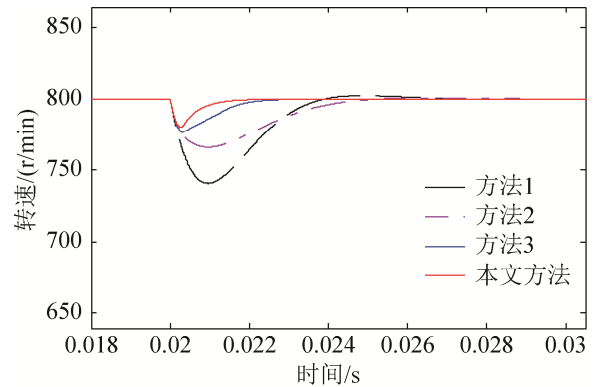
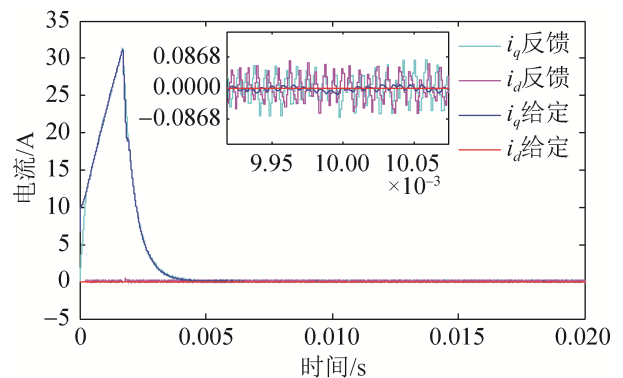
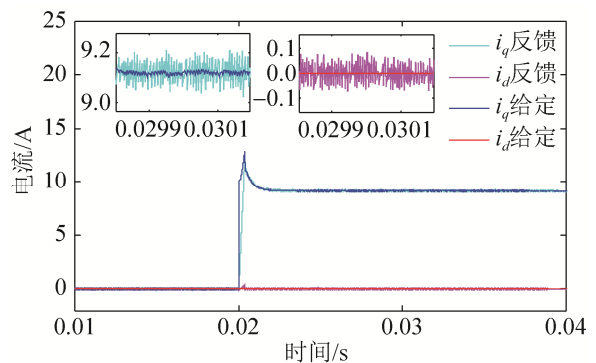
图 5 负载扰动时 4 种控制方法的转速仿真曲线  
Fig. 5 Simulation speed curves of four control methods with load disturbance图 6  $dq$  轴电流阶跃响应仿真曲线  
Fig. 6 Simulation step response curves of  $dq$ -axis current图 7 负载扰动时  $dq$  轴电流仿真曲线  
Fig. 7 Simulation curves of  $dq$ -axis current with load disturbance



图 8 为 IMC 观测器对负载干扰的估计情况,从图中可以看出,观测器对负载扰动的观测平稳且快速,最后收敛于扰动的实际值,验证了本文设计的 IMC 观测器的有效性。

4 种控制方法对应的电机性能比较如表 2 所示,从表中可以看出,基于 IMC 观测器的 PMSM 预测控制方法与文中其它 3 种控制方法相比,具有响应速度快,无超调,抗扰动能力强等优点。

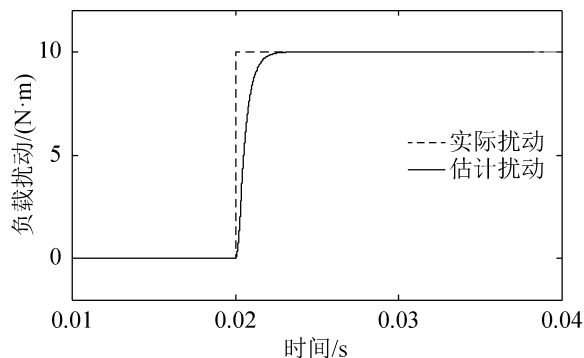


图 8 IMC 观测器的估计结果  
Fig. 8 Result estimated by IMC observer

表 2 4 种控制方法的仿真结果  
Tab. 2 Simulation results of four control methods

控制方法	性能比较			
	速度超调量/(r·min <sup>-1</sup> )	响应时间/ms	加负载后速度波动/(r·min <sup>-1</sup> )	加负载后恢复时间/ms
方法 1	+65	13	-60	8
方法 2	+30	13	-35	7
方法 3	0	6.5	-24	3.5
本文方法	0	4.5	-20	2.5

## 6 结论

高性能伺服系统必须有快速的动态响应能力和良好的抗干扰性能。本文基于 MPC 算法和无差拍算法设计了永磁同步电机双环预测控制系统,针对 MPC 抗扰动问题,通过 IMC 观测器估计负载扰动,实现速度环前馈补偿控制,仿真结果表明,与传统 PI 控制方法以及常规的预测控制方法相比,本文提出的基于 IMC 观测器的双环预测控制方法响应速度快,控制精度高,抗负载扰动能力强,具有更好的动、静态性能和鲁棒性。

## 参考文献:

[1] Mynar Z, Vesely L, Vaclavek P. PMSM Model Predictive Control With Field-Weakening Implementation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2016, 63(8): 5156-5166.  
[2] 赵志诚, 桑海, 张井岗. 永磁同步电机速度伺服系统的分数阶内模控制[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(2): 384-388.  
Zhao Zhicheng, Sang Hai, Zhang Jinggang. Fractional Order Internal Model Control of PMSM Speed Servo System[J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(2):

384-388.

[3] Liu G H, Chen L L, Zhao W X, et al. Internal Model Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Using Support Vector Machine Generalized Inverse[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics (S1551-3203), 2013, 9(2): 890-898.  
[4] 侯利民, 王怀震, 李勇, 等. 级联式滑模观测器的永磁同步电机鲁棒滑模控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(11): 2071-2076.  
Hou Limin, Wang Huaizhen, Li Yong, et al. Robust Sliding Mode Control of PMSM Based on Cascaded Sliding Mode Observers[J]. Control and Decision, 2016, 31(11): 2071-2076.  
[5] Lindscheid C, Haßkerl D, Meyer A, et al. Parallelization of Modes of the Multi-Level Iteration Scheme for Nonlinear Model-Predictive Control of an Industrial Process[C]// 2016 IEEE Conference on Control Applications (CCA), Buenos Aires, Argentina: IEEE, 2016: 1506-1512.  
[6] 邱忠才, 肖建, 郭冀岭, 等. 永磁同步电机速度预测电流解耦控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 648-654.  
Qiu Zhongcai, Xiao Jian, Guo Jiling, et al. PMSM Control System Based on Speed Predictive Controller and Current Decouple Controller[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(5): 648-654.

- [7] 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.
- [8] Preindl M, Bolognani S. Model Predictive Direct Speed Control with Finite Control Set of PMSM Drive Systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics (S0885-8993), 2013, 28(2): 1007-1015.
- [9] 王东文, 李崇坚, 吴尧, 等. 永磁同步电机的模型预测电流控制器研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 73-79.  
Wang Dongwen, Li Chongjian, Wu Yao, et al. Model Predictive Current Control Scheme for Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 73-79.
- [10] 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.  
Wang Geng, Yang Ming, Niu Li, et al. A Static Current Error Elimination Algorithm for PMSM Predictive Current Control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2544-2551.
- [11] 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.  
Niu Li, Yang Ming, Wang Geng, et al. Research on the Robust Current Control Algorithm of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Deadbeat Control Principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(15): 78-85.
- [12] 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 (S0278-0046), 2012, 59(2): 1171-1183.
- [13] 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.  
Liu Xudong, Li Ke, Sun Jing, et al. Generalized Predictive Control Based on Extended State Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor System[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(12): 1613-1619.
- [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] 黄宴委, 熊少华. 基于内模控制的永磁同步电机电流环观测器设计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 3070-3075.  
Huang Yanwei, Xiong Shaohua. An Internal Model Control-Based Observer for Current Loops in Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(11): 3070-3075.
- [16] Morel F, Lin-Shi X F, Rétif J M, et al. A Comparative Study of Predictive Current Control Schemes for a Permanent-Magnet Synchronous Machine Drive[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics (S0278-0046), 2009, 56(7): 2715-2728.
- [17] Zhang H W, Lewis F L, Das A. Optimal Design for Synchronization of Cooperative Systems: State Feedback, Observer and Output Feedback[J]. IEEE Transactions on Automatic Control (S0018-9286), 2011, 56(8): 1948-1952.