

# 永磁同步电机的改进模型预测自抗扰前馈控制

殷凯轩, 高琳, 付文华, 刘坤

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

**摘要:** 针对永磁同步电机无差拍电流预测控制系统受参数扰动后会引起稳态误差和剧烈抖振的问题,采用一种前馈控制与无差拍控制相结合的改进控制策略,降低了参数扰动引起的电流和转矩脉动。在前馈通路中采用滑模扰动观测器与分数阶积分补偿相结合的快速响应控制策略,解决引入普通前馈控制带来的稳态误差增大问题。滑模观测器的滑模面采用以  $\text{sgn}$  函数为基础的二阶趋近律,进一步抑制除参数扰动外的干扰项。对传统的无差拍电流预测模型,引入普通前馈控制策略的电流预测模型以及在前馈通路中添加滑模扰动观测器与分数阶补偿策略的改进预测模型进行仿真对比。仿真结果表明:所提策略在不同工况下均可有效消除参数扰动引起的稳态误差并降低电流抖动,永磁同步电机调速系统的鲁棒性和动态性能得到了有效提高。

**关键词:** 永磁同步电机;无差拍电流预测;参数扰动;前馈控制;滑模扰动观测器;分数阶积分

**中图分类号:** TM341 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.7652/xjtuxb202104004 **文章编号:** 0253-987X(2021)04-0029-10



OSID 码

## An Improved Prediction Control Model for PMSM with Active Disturbance Rejection and Feed-Forward Control Strategy

YIN Kaixuan, GAO Lin, FU Wenhua, LIU Shen

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** An improved control strategy combining feedforward control and deadbeat control is adopted to solve the problem of steady-state error and severe chattering caused by parameter perturbation in the deadbeat current predictive control system of permanent magnet synchronous motor (PMSM) and to reduce the current and torque pulsation caused by parameter perturbation. A fast dynamical response strategy combining sliding-mode disturbance observer and fractional integral compensation is proposed to solve the problem of steady-state error increasing caused by introducing ordinary feed-forward control strategy. The second-order sliding mode approach law based on the  $\text{sgn}$  function is adopted to the sliding mode surface of the observer to further suppress the interference terms except for the parameter disturbance. The traditional deadbeat current predictive control model, the improved current predictive model with the common feedforward control strategy, and the improved prediction model with the sliding mode disturbance observer in the feedforward path and the fractional order integral compensation strategy are simulated and compared. Simulation results show that the effectiveness of the proposed model in eliminating the steady-state error caused by parameter disturbances and in reducing the current pulsation is verified under various working conditions, and both the

robustness and the dynamic performance of the PMSM speed regulation system are effectively improved.

**Keywords:** permanent magnet synchronous motor; deadbeat current control; parameter disturbance; feed-forward control; sliding mode disturbance observer; fractional order integral

永磁同步电机(PMSM)是一种强耦合、非线性的高阶系统,具有结构简单、功率密度高等优点,是伺服系统执行电机的首选。传统矢量控制方案在电流环控制中普遍采用PI调节器,其原理简单且易于实现,但受限于响应速度慢,以及超调大等问题,难以满足高性能伺服系统对电流环动态特性的要求。

模型预测控制可以实现对指令电流无超调的快速跟随。传统的有限集模型预测,以代价函数为核心,选取有限个开关状态,得到使代价函数误差最小的电压矢量。刘坤等引入虚拟电压矢量将电压矢量空间划分为13个扇区,有效减少了定子电流畸变率<sup>[1]</sup>。但该方法计算量大,而且以代价函数的复杂度决定系统精度,控制效果易受到影响。基于无差拍电流预测的控制方案,结合空间调制技术,使控制频率固定,具有响应速度快、电流跟随精度高等优点,但受限于控制对象的数学模型,存在对系统内部参数敏感的问题<sup>[2]</sup>。

针对电感失配问题,可以设计一种改进型电流预测控制算法,以预测值和采样值间的偏差为参考依据,引入补偿因子,对参考电压偏差进行补偿<sup>[3]</sup>。该算法虽可减小转矩脉动,但忽略了各参数间的耦合问题,参数敏感问题仍然存在。王庚等通过给d轴电流引入误差积分,根据q轴电流响应,动态调整了磁链参数,但忽略了电阻变化带来的稳态误差<sup>[4]</sup>。谢传林等在误差积分的基础上,引入离散积分的概念,进一步提高了跟踪精度,但仅依赖积分环节会对动态性能造成影响<sup>[5]</sup>。王伟华等以预测控制系统本身延时为切入点,改进占空比策略,进而降低系统参数敏感性,提高电流环动态性能,但电流的抖振没有得到解决<sup>[6]</sup>。周智丰等针对扰动引起的电流脉动,设计了扰动观测器,将扰动作为补偿反馈给控制电压,以此减小静差,提高算法的鲁棒性<sup>[7-10]</sup>。Wang等尝试将不同的观测器与扩张状态观测器(ESO)相结合,有效提高了自抗扰控制器的控制性能,响应速度明显提升<sup>[11-14]</sup>。

分数阶微积分理论在近70年得到飞速发展,许多电机领域的学者试图在仿真中引入分数阶微积分来改善控制效果<sup>[15-18]</sup>。Ladaci等提出了将分数阶

应用于自适应内模控制器<sup>[19]</sup>,Efe分析了滑动模态区域采用分数阶控制的充分条件<sup>[20]</sup>。但目前还未见到将分数阶积分应用于扰动补偿的报道。

本文设计一种基于无差拍的闭环控制方案,区别于近年来的相关研究。Zhang等仅通过扰动补偿在将滑模扰动观测器的性能进一步优化,同时减小了稳态误差和系统抖振<sup>[21]</sup>。本文以表贴式永磁同步电机为对象,旨在通过控制器的最优组合,达到减小系统抖振的同时完全消除稳态误差的目的。在传统的无差拍电流预测模型中,加入前馈控制环节,可改善参数扰动后系统的动态响应。为消除电机参数扰动对模型预测控制造成的电流静差,前馈通路中采用滑模扰动观测器与分数阶积分补偿相结合的控制策略,利用分数阶的遗忘特性与滑模扰动观测器的强鲁棒性,提高系统的抗干扰能力。

## 1 永磁同步电机的预测模型

### 1.1 表贴式PMSM的数学模型

表贴式PMSM在同步旋转坐标系下的状态方程为

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= -\frac{R}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{u_d}{L} \\ \frac{di_q}{dt} &= -\frac{R}{L}i_q - \omega_e i_d + \frac{u_q}{L} - \frac{\psi_f}{L}\omega_e \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $u_d$ 、 $u_q$ 分别为定子d、q轴电压; $i_d$ 、 $i_q$ 分别为定子d、q轴电流; $L$ 为定子d、q轴电感; $R$ 为定子电阻; $\omega_e$ 为电角速度; $\psi_f$ 为永磁体磁链。

电磁转矩方程为

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

式中: $T_e$ 为电磁转矩; $p_n$ 为极对数。

### 1.2 无差拍电流预测控制

对式(1)进行离散化,得到

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \frac{i_d(k+1) - i_d(k)}{T} \\ \frac{di_q}{dt} &= \frac{i_q(k+1) - i_q(k)}{T} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1),得到离散化的电流预测模型

$$\mathbf{i}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{i}(k) + \mathbf{GU}(k) + \mathbf{d}(k) \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{i}(k) = [i_d(k) \ i_q(k)]^T; \mathbf{G} = \begin{bmatrix} \frac{T}{L} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L} \end{bmatrix}; \mathbf{U}(k) = [u_d(k) \ u_q(k)]^T; \mathbf{d}(k) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{T\psi_f\omega_e(k)}{L} \end{bmatrix}^T; \mathbf{A}(k) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{TR}{L} & T\omega_e(k) \\ -T\omega_e(k) & 1 - \frac{TR}{L} \end{bmatrix}, \text{其中 } T \text{ 为采样周期。}$$

将给定电流作为预测电流,由式(4)可知,经过1个周期后,反馈电流可以较好地跟随给定电流。由式(4)可以求得控制电压为

$$\mathbf{U}(k) = \mathbf{G}^{-1}[\mathbf{i}^*(k) - \mathbf{A}(k)\mathbf{i}(k) - \mathbf{d}(k)] \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{i}^*(k)$  为给定电流;  $\mathbf{i}(k)$  为实际电流。

将计算出的电压矢量经过空间矢量脉宽调制(SVPWM)模块调制后应用于逆变器中。图1为无差拍控制框图。

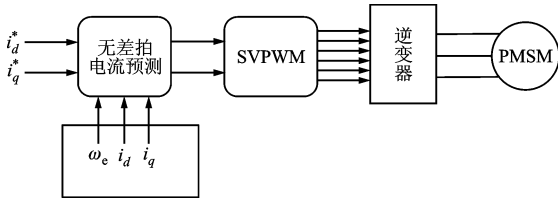


图1 无差拍控制框图

Fig. 1 Block diagram of deadbeat control

## 2 引入普通前馈控制的电流预测模型

### 2.1 控制策略分析

由式(5)可知,电流控制器依赖于电机参数。如果所用电机参数与实际的电机参数不匹配,会带来电流的抖动,无法输出稳定的电磁转矩,因此引入前馈量  $\mathbf{i}^*(k)$  对反馈电流进行修正

$$\mathbf{U}(k) = \mathbf{G}^{-1}[\mathbf{i}^*(k) - \mathbf{A}(k)\mathbf{i}_F(k) - \mathbf{d}(k)] \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{i}_F(k)$  为修正之后的电流,表达式为

$$\mathbf{i}_F(k) = q\mathbf{i}(k) + (1-q)\mathbf{i}^*(k-1) \quad (7)$$

其中  $q$  为加权系数,取值范围为  $[0,1]$ 。

当  $q=0$  时为前馈控制,当  $q=1$  时则为无差拍预测控制。前馈控制通过电机运行状态直接计算控制电流指令,而预测控制通过电机电压矢量反馈对电流进行调节。选择合理的  $q$  值,可以降低参数变化对系统的扰动,减小电流和转矩脉动,并在保证响应速度的同时,提高系统的鲁棒性。图2为引入前馈的无差拍控制框图。

### 2.2 预测模型的参数敏感性分析

无差拍电流预测控制依赖电机参数的准确性,

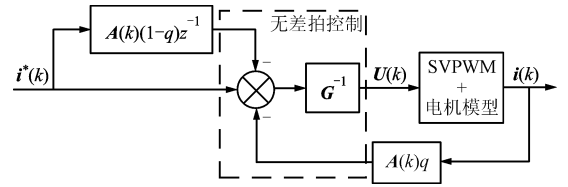


图2 引入前馈的无差拍控制框图

Fig. 2 Block diagram of deadbeat control with feed forward

当控制算法中参数与电机参数不匹配时,会造成电流的静态误差甚至发散<sup>[22]</sup>。由于系统稳态性能受电阻变化的扰动不明显,这里仅分析电感、磁链变化对其的影响。假设  $R$  不变,忽略  $d$ 、 $q$  轴之间的交叉耦合,对于传统的无差拍电流预测,式(6)可改写为

$$\left. \begin{aligned} u_d(k) &= \frac{L}{T}i_d^*(k) + \left(R - \frac{L}{T}\right)i_d(k) - \omega_e(k)Li_q(k) \\ u_q(k) &= \frac{L}{T}i_q^*(k) + \left(R - \frac{L}{T}\right)i_q(k) + \omega_e(k)Li_d(k) + \omega_e(k)\psi_f \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

在参数扰动时,实际的反馈电流为

$$\left. \begin{aligned} u_d(k) &= \frac{\hat{L}}{T}i_d(k+1) + \left(R - \frac{\hat{L}}{T}\right)i_d(k) - \omega_e(k)\hat{L}i_q(k) \\ u_q(k) &= \frac{\hat{L}}{T}i_q(k+1) + \left(R - \frac{\hat{L}}{T}\right)i_q(k) + \omega_e(k)\hat{L}i_d(k) + \omega_e(k)\hat{\psi}_f \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式(8)与式(9)相减,得到反馈电流和给定电流之间的稳态误差

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d^*(k) &= \frac{T}{L}\omega_e(k)\Delta Li_q(k) \\ \Delta i_q^*(k) &= -\frac{T}{L}\omega_e(k)[\Delta Li_d(k) + \Delta\psi_f] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

同理,电感与磁链变化时,对于引入前馈的电流预测控制,有

$$\begin{aligned} i_d(k+1) - \frac{L}{\hat{L}}i_d^*(k) &= i_d(k-1) - \frac{L}{\hat{L}}i_d^*(k-1) - q\left[i_d(k-1) - \frac{L}{\hat{L}}i_d^*(k-1)\right] + \\ &\quad \frac{\Delta L(1+q)}{\hat{L}}\omega_e(k)i_q(k-1)T \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} i_q(k+1) - \frac{L}{\hat{L}}i_q^*(k) &= i_q(k-1) - \frac{L}{\hat{L}}i_q^*(k-1) - q\left[i_q(k-1) - \frac{L}{\hat{L}}i_q^*(k-1)\right] + \\ &\quad \frac{\Delta L(1+q)}{\hat{L}}\omega_e(k)i_d(k-1)T + \frac{\Delta\psi_f(1+q)}{\hat{L}}\omega_e(k)T \end{aligned} \quad (12)$$

在稳态情况下,可近似认为

$$\left. \begin{aligned} i_d(k+1) &= i_d(k) = i_d(k-1); i_d^*(k-1) = i_d^*(k) \\ i_q(k+1) &= i_q(k) = i_q(k-1); i_q^*(k-1) = i_q^*(k) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

因此式(11)和式(12)可写为

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_d^*(k) &= \frac{T(1+q)}{Lq} \omega_e(k) \Delta L i_q(k) \\ \Delta i_q^*(k) &= -\frac{T(1+q)}{Lq} \omega_e(k) [\Delta L i_d(k) + \Delta \psi_f] \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

与传统的无差拍电流预测控制相比,电感变化造成的稳态误差扩大了 $(1+q)/q$ 倍,持续的稳态误差使得转矩达不到要求,造成系统无法采用。可见,引入前馈控制的改进的无差拍控制方法,虽然可以通过合理地选择 $q$ 值来降低参数变化对系统的扰动,但需要解决稳态误差增大的问题。

### 3 改进自抗扰前馈控制

为了提高响应精度,消除普通前馈控制方法中由电感参数偏差引起的稳态误差问题,本文在前馈通路中引入滑模扰动观测器与分数阶积分补偿相结合的快速响应控制策略。

#### 3.1 滑模扰动观测器

采用滑模变结构设计观测器,将参数扰动作为补偿量 $f$ 反馈给控制电压。当电机参数存在偏差时,根据式(1)可得

$$\left. \begin{aligned} u_d &= L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega_e Li_q + f_d \\ \frac{df_d}{dt} &= F_d \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

$$\left. \begin{aligned} u_q &= L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega_e Li_d + \omega_e \psi_f + f_q \\ \frac{df_q}{dt} &= F_q \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: $f_d, f_q$ 为参数扰动时 $d, q$ 轴电压的扰动量; $F_d, F_q$ 为参数扰动时 $d, q$ 轴电压的变化率。

将式(15)(16)与式(1)相减,可以求得电压扰动量 $f_d, f_q$ 的表达式

$$\left. \begin{aligned} f_d &\approx \Delta L \frac{di_d}{dt} + \Delta Ri_d - \Delta L \omega_e i_q \\ f_q &\approx \Delta L \frac{di_q}{dt} + \Delta Ri_q + \Delta L \omega_e i_d + \Delta \psi_f \omega_e \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式中: $\Delta L, \Delta R, \Delta \psi_f$ 分别为电机电感、定子电阻、永磁体磁链的变化量。

为了得到电流以及参数扰动后的估计值,采用滑模扰动观测器(SMDO),并引入滑模控制律以有

效提高系统趋近运动的能力。滑模控制率由等效控制率 $f$ 和切换控制率 $F$ 构成。建立如下状态方程

$$\left. \begin{aligned} u_d &= L \frac{d\hat{i}_d}{dt} + R\hat{i}_d + \hat{f}_d + F_{ds} - L\omega_e \hat{i}_q \\ \frac{d\hat{f}_d}{dt} &= k_d F_{ds} \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

$$\left. \begin{aligned} u_q &= L \frac{d\hat{i}_q}{dt} + R\hat{i}_q + \hat{f}_q + F_{qs} + L\omega_e \hat{i}_d + \omega_e \psi_f \\ \frac{d\hat{f}_q}{dt} &= k_q F_{qs} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: $\hat{i}_d, \hat{i}_q$ 为 $d, q$ 轴电流估计值; $\hat{f}_d, \hat{f}_q$ 为电机参数偏差导致的 $d, q$ 轴电压变化估计量; $F_{ds}, F_{qs}$ 为 $d, q$ 轴切换控制律; $k_d, k_q$ 为 $d, q$ 轴滑模参数。

分别用式(18)减去式(15),用式(19)减去式(16),得

$$\left. \begin{aligned} \frac{de_1}{dt} &= -\frac{R}{L}e_1 - \frac{1}{L}e_2 - \frac{1}{L}F_{ds} \\ \frac{de_2}{dt} &= k_d F_{ds} - F_d \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{de_3}{dt} &= -\frac{R}{L}e_3 - \frac{1}{L}e_4 - \frac{1}{L}F_{qs} \\ \frac{de_4}{dt} &= k_q F_{qs} - F_q \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

式中: $e_1 = \hat{i}_d - i_d, e_3 = \hat{i}_q - i_q$ 分别为 $d, q$ 轴的电流估计偏差; $e_2 = \hat{f}_d - f_d, e_4 = \hat{f}_q - f_q$ 分别为 $d, q$ 轴的电压估计偏差。

选取线性滑模面

$$\left. \begin{aligned} s_d &= \hat{i}_d - i_d \\ s_q &= \hat{i}_q - i_q \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

将趋近律改进为以 $\text{sgn}$ 函数为基础的二阶趋近律

$$\frac{ds}{dt} = -k_1 |s|^{0.5} \text{sgn}(s) - k_2 \int \text{sgn}(s) dt - k_3 s \quad (23)$$

式中: $k_1, k_2, k_3$ 为趋近增益,其中 $k_1, k_2$ 用于减小抖动,稳定系统, $k_3$ 为控制系统的收敛速度。二阶滑模趋近律的设计旨在抑制除参数扰动外的干扰项。

由于 $e_2, e_4$ 包含在控制函数 $F_{ds}, F_{qs}$ 中,因此可近似得到

$$\left. \begin{aligned} F_{ds} &= (k_{d3}L - R)e_1 + k_{d1} |e_1|^{0.5} L \text{sgn}(e_1) + \\ &\quad k_{d2} L \int \text{sgn}(e_1) dt \\ F_{qs} &= (k_{q3}L - R)e_3 + k_{q1} |e_3|^{0.5} L \text{sgn}(e_3) + \\ &\quad k_{q2} L \int \text{sgn}(e_3) dt \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

将观测器状态方程离散化得

$$\left. \begin{aligned} \hat{i}_d(k+1) &= \left(1 - \frac{RT}{L}\right) \hat{i}_d(k) + \frac{T}{L} u_d(k) + \\ &\quad T \omega_e(k) \hat{i}_q(k) - \frac{T}{L} \hat{f}_d(k) - \\ &\quad \frac{T}{L} F_{ds}(k) \\ \hat{f}_d(k+1) &= \hat{f}_d(k) + Tk_d F_{ds}(k) \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$\left. \begin{aligned} \hat{i}_q(k+1) &= \left(1 - \frac{RT}{L}\right) \hat{i}_q(k) + \frac{T}{L} u_q(k) - \\ &\quad T \omega_e(k) \hat{i}_d(k) - \frac{T}{L} \hat{f}_q(k) - \\ &\quad \frac{T}{L} F_{qs}(k) - \frac{T \psi_f}{L} \omega_e(k) \\ \hat{f}_q(k+1) &= \hat{f}_q(k) + Tk_q F_{qs}(k) \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

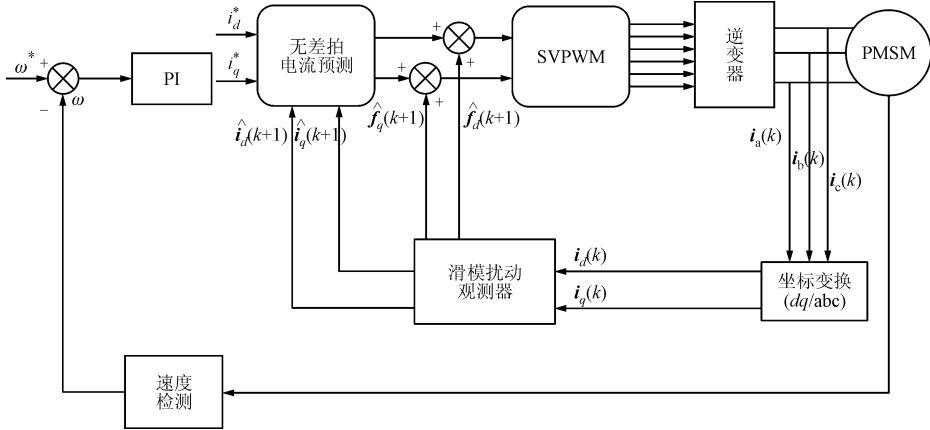


图3 基于扰动观测器的闭环控制系统框图

Fig. 3 Block diagram of closed loop control system based on disturbance observer

忽略  $d$ 、 $q$  轴之间的交叉耦合,无差拍控制相当于高增益的 P 环节,将积分环节引入无差拍控制中,也可以起消除静差的作用。但传统积分器会出现积分饱和现象,导致电流出现超调,响应速度变慢,甚至影响系统稳定性。这里引入分数阶积分,即运算阶次为分数的微积分运算,以加权的形式对函数的全局信息进行处理。

函数  $f(t)$  的  $\alpha$  阶微积分表达形式如下

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt}, & \alpha > 0 \\ 1, & \alpha = 0 \\ \int_a^t (d\tau)^{-\alpha}, & \alpha < 0 \end{cases} \quad (27)$$

式中: $a$  和  $t$  分别表示上、下限; $\alpha$  为分数阶次, $\alpha > 0$  为分数阶微分, $\alpha < 0$  则为分数阶积分。

当  $\alpha$  固定为  $-1$  时为整数阶积分,与分数阶积分相比,采用整数阶积分时的补偿效果有限且无法调整;分数阶积分中的  $\alpha$  被扩展到实数域,增加了补偿器的灵活性。通过合理地选择  $\alpha$  值,可以改善补

式中: $\hat{i}_d(k+1)$ 、 $\hat{i}_q(k+1)$  分别为观测器得到的  $d$ 、 $q$  轴估计值,代替  $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$  作为无差拍电流控制的输入; $\hat{f}_d(k+1)$ 、 $\hat{f}_q(k+1)$  是估计得到的  $d$ 、 $q$  轴电压变化量,用于补偿无差拍电流预测控制器得到的电压矢量。图 3 为基于扰动观测器的闭环控制系统框图。

### 3.2 分数阶积分补偿

滑模扰动观测器的趋近增益,决定了实际电流跟随指令电流的响应速度,但趋近速度的增加势必造成系统的抖振,导致电流跟踪存在延迟。在前馈中加入分数阶积分补偿,可以在提高跟踪速率的基础上保证系统的鲁棒性。

偿效果。

分数阶积分的 Riemann-Liouville 定义为

$${}_a D_t^{-\sigma} u(t) = \frac{1}{\Gamma(\sigma)} \int_a^t (t-\tau)^{\sigma-1} u(\tau) d\tau \quad (28)$$

式中: $\Gamma(\sigma)$  是无穷区间上的反常积分,现有方法无法对其精确求解。因此,通常采用逼近的方式,以有限的整数阶信息来近似分数阶的精确数值。目前,逼近分数阶的数值实现方法有很多,这里采用 Oustaloup 算法,其具有计算精度高、运算简单等优点<sup>[23]</sup>。

Oustaloup 滤波器是一种在指定频段内对分数阶算子进行近似的算法。假设频带范围为  $(\omega_1, \omega_2)$ , 则  $\sigma$  阶积分可以近似为

$$s^\sigma \approx G(s) = \omega_2^\sigma \prod_{i=-n}^n \frac{s + \omega_i'}{s + \omega_i} \quad (29)$$

式中

$$\omega_i = \omega_1 \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^{(i+n+\frac{1+\sigma}{2})/(2n+1)}$$

$$\omega_i' = \omega_1 \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right)^{(i+n+\frac{1-\sigma}{2})/(2n+1)}$$

其中  $n$  为正整数,表示近似后整数阶传递函数的阶数,阶数越大,近似的精度越高。

相比于整数阶积分,式(28)可以看作  $u(t)$  的加权积分, $(t-\tau)^{\sigma-1}$  相当于积分权函数,对于  $0<\sigma<1$  的积分器来说,权函数如图 4 所示。由图 4 可以看出,积分权值随  $\tau$  的增大而增大,陈旧数据被逐渐舍弃,新数据占比逐渐增加,即分数阶具有遗忘特性。相较于整数阶积分,这一特性可以削弱较早的误差在积分项的比例,一定程度上可以抑制积分饱和。同时,由于新数据占较大权重,还可以增强系统的实时性。

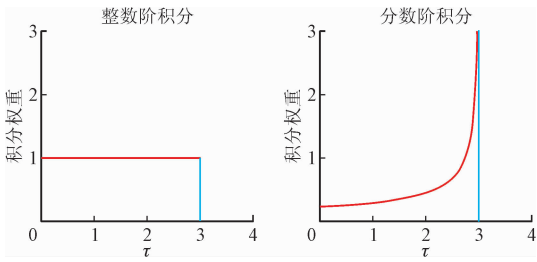


图 4 积分权重对比  
Fig. 4 Comparison of integral weight

用分数阶积分对电压进行补偿,在进一步消除静差的同时可抑制积分饱和,使无差拍控制具有更好的动态性能,并弥补滑模扰动观测器追求补偿精度带来的电流跟踪速率慢等问题。以给定电流和估计电流的差值作为分数阶积分器的输入,经过分数阶积分,输出的补偿值作用于电压矢量,原理如图 5 所示。图中,  $K_i$  为分数阶积分补偿环节的积分系数,决定了扰动补偿的速率,  $\lambda$  为分数阶积分的阶数,在抑制积分饱和的同时,将补偿精度扩展到实数域,极大程度地提高了补偿器的自由度。

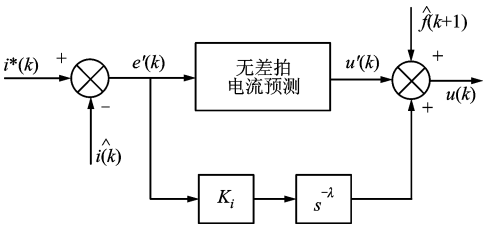


图 5 分数阶积分补偿系统  
Fig. 5 Fractional integral compensation system

## 4 仿真实验

在 MATLAB/Simulink 环境中搭建  $i_d=0$  控制策略下的永磁同步电机无差拍控制模型。电机参数见表 1。控制周期  $T=100\ \mu\text{s}$ ,取加权系数  $q=0.25$ ,分数阶积分的积分系数  $K_i$  为  $300R$ ,阶数  $\lambda$  为

0.4。

给定转速  $n=300\ \text{r/min}$ ,电机空载起动,在 0.1 s 和 0.3 s 分别突加  $3\ \text{N}\cdot\text{m}$  和  $6\ \text{N}\cdot\text{m}$  的负载转矩,采样周期 0.000 1 s,速度环采用传统的 PI 控制器。由于电感参数对控制系统影响最明显,本文主要在电阻、磁链不变条件下,探究电机电感变化对电流控制效果的影响,并进行仿真验证。

表 1 电机主要参数<sup>[24]</sup>

Table 1 Main parameters of the motor

| 参数       | 数值  | 参数                          | 数值    |
|----------|-----|-----------------------------|-------|
| 额定功率/kW  | 1.1 | 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 1 500 |
| 额定电流/A   | 8   | 额定转矩/(N·m)                  | 7     |
| q 轴电感/mH | 8.5 | 定子电阻/Ω                      | 2.875 |
| d 轴电感/mH | 8.5 | 永磁体磁链/Wb                    | 0.175 |
| 极对数      | 4   | 转动惯量/(kg·m <sup>2</sup> )   | 0.003 |

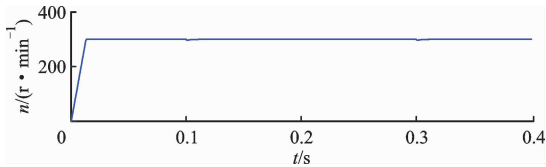
具体的仿真策略如下:

- (1)采用传统无差拍模型预测;
- (2)采用引入前馈控制的无差拍模型预测;
- (3)引入前馈控制的模型预测,采用滑模扰动观测器;
- (4)引入前馈控制的模型预测,同时前馈通路中采用滑模扰动观测器和分数阶积分补偿。

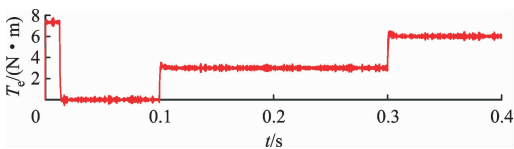
本文在设定控制策略中所用电机的电阻和磁链参数与实际电机参数相匹配的条件下,探究电机电感不匹配对电流控制效果的影响。仿真中,考虑到电机参数测量偏差以及运行时的磁路饱和效应,控制策略所用电机的  $d$ 、 $q$  轴电感同时变为电机实际电感的 0.5 倍,其他参数与电机保持一致。仿真结果如图 6~图 9 所示。

由图 6 可知,对于传统无差拍电流预测,当电感参数不匹配时,电流和电磁转矩抖振剧烈,存在稳态误差。

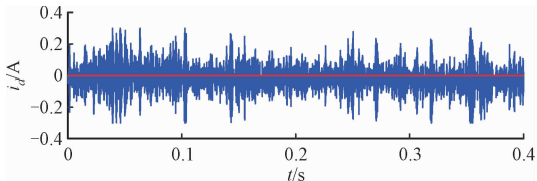
采取引入前馈的无差拍控制后,系统对参数的



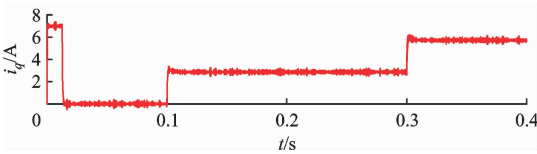
(a) 转速响应曲线



(b) 转矩响应曲线



(c)  $d$  轴电流响应曲线

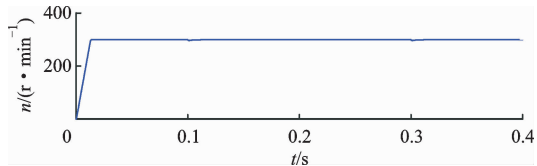


(d)  $q$  轴电流响应曲线

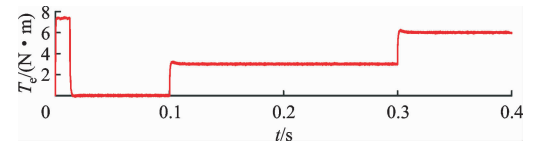
图 6 传统的无差拍预测控制

Fig. 6 Traditional deadbeat predictive control

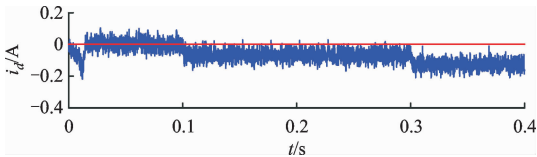
敏感性大幅降低,但加载后稳态误差会增大,如图 7 所示,0.1 s 时电机轻载运行,稳态误差开始增加;仿真至 0.3 s,低速重载工况下,载荷为 85.7%,稳态误差达到最大,特别是  $d$  轴电流。选取  $q=0.25$ ,在抖振减小的同时,系统的稳态误差扩大到原来的 5 倍,因此无法满足精度要求。



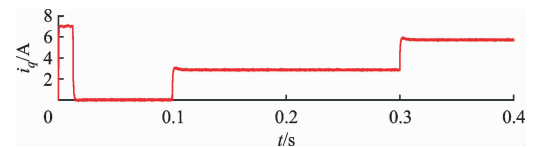
(a) 转速响应曲线



(b) 转矩响应曲线



(c)  $d$  轴电流响应曲线

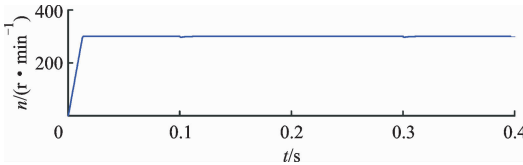


(d)  $q$  轴电流响应曲线

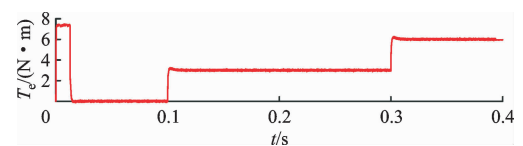
图 7 引入前馈的无差拍控制

Fig. 7 Deadbeat control with feed-forward

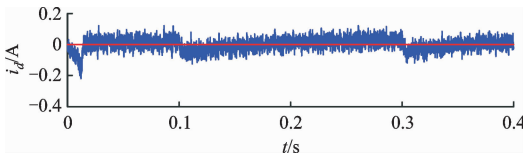
为进一步消除普通前馈无差拍控制中存在的稳态误差,在前馈通路中加入滑模扰动观测器,采用以  $\text{sgn}$  函数为基础的二阶趋近律,使电流能够较好地跟随给定,轻、重载工况下均能完全消除稳态误差,而且能够大幅降低系统抖振。 $d$ 、 $q$  轴的电流波形如图 8 所示。可以看出,在滑模面降低抖振的同时,带来了响应速度的问题,电流完全消除静差需要较长时间。



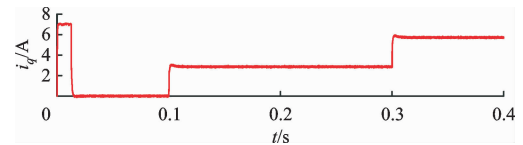
(a) 转速响应曲线



(b) 转矩响应曲线



(c)  $d$  轴电流响应曲线



(d)  $q$  轴电流响应曲线

图 8 前馈通路引入滑模扰动观测器的无差拍控制

Fig. 8 Deadbeat control with sliding mode disturbance observer in feed-forward path

为提高响应速度,采用分数阶积分补偿,仿真得到的电流波形如图 9 所示,可以看到在完全消除稳态误差的同时,电流跟踪速度明显增加。

采用式(30)计算  $N$  个采样周期内电机转矩脉动的平均值,定量对比 3 种控制方式的电机稳态性能:

$$T_{rip} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [T_e(i) - T_e^*]^2} \quad (30)$$

式中: $N$  为采样周期数; $T_{rip}$  为平均转矩脉动; $T_e(i)$  为第  $i$  个采样周期的电磁转矩; $T_e^*$  为平均电磁转矩。表 2 给出了从 0.3 s 至 0.4 s 不同控制策略下



当电感参数不匹配时电机稳态性能的对比。表中的定子电流畸变率由快速傅里叶变换分析得到。

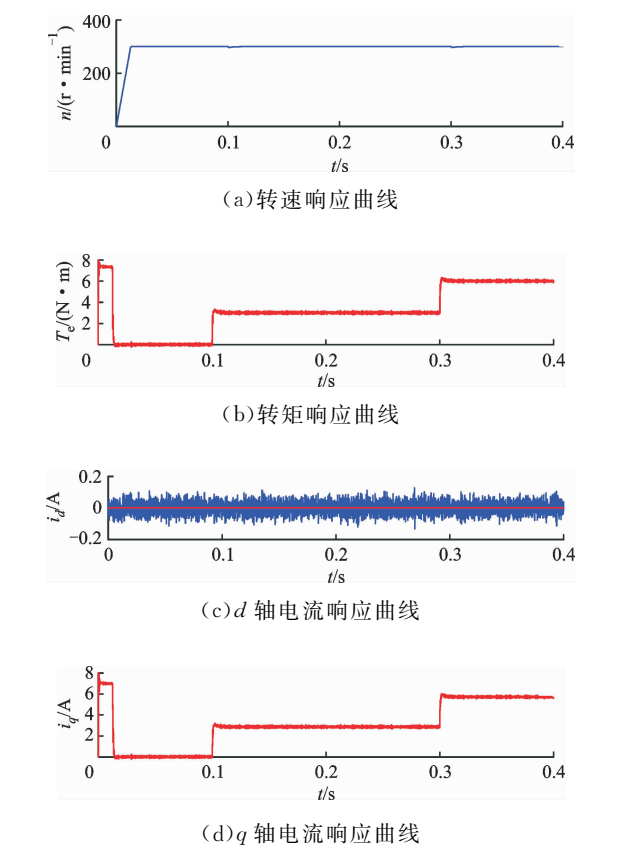


图 9 引入扰动观测器和分数阶积分补偿的无差拍控制

Fig. 9 Deadbeat control with disturbance observer and fractional order integral compensation

表 2 电感参数不匹配时电机稳态性能对比

Table 2 Comparison of steady-state performance of the motor with mismatched inductance parameters

| 控制方式      | $T_{rip}/$<br>(N·m) | 总谐波<br>失真率<br>/% | 定子电<br>流幅值<br>/A | 是否消<br>除稳态<br>误差 |
|-----------|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| 无差拍电流预测   | 0.132 9             | 2.71             | 5.733            | 否                |
| 普通前馈无差拍控制 | 0.052 8             | 1.01             | 5.736            | 否                |
| 改进自抗扰前馈控制 | 0.060 2             | 1.16             | 5.727            | 是                |

从表 2 可以看出,当控制策略中所用电感与电机实际电感不匹配时,本文提出的改进自抗扰前馈控制能够较好地抑制转矩脉动和电流畸变,其转矩脉动和电流畸变率分别只有无差拍预测的 45.29% 和 42.8%。相较于普通前馈无差拍控制,本文提出的改进前馈控制策略虽然在转矩脉动与相电流的正弦性上略差,却能够完全消除稳态误差,需要的输入电流减少,提高了运行效率。

给定转速 1 000 r/min,其他仿真条件不变,探究高速工况下本文所提策略的有效性。由式(14)定量计算了仅考虑参数失配所产生的电流稳态误差,当电感产生偏差时,误差与转速成正比,所以电机在高速运行时,电流的稳态误差会增大。按前文所述仿真顺序,图 10 中给出 4 种控制策略下的  $d$  轴电流波形。由图 10 可以看出,在电感失配、高速重载的极端工况下,本文所提改进策略仍可以有效消除稳态误差,抑制电流的畸变。

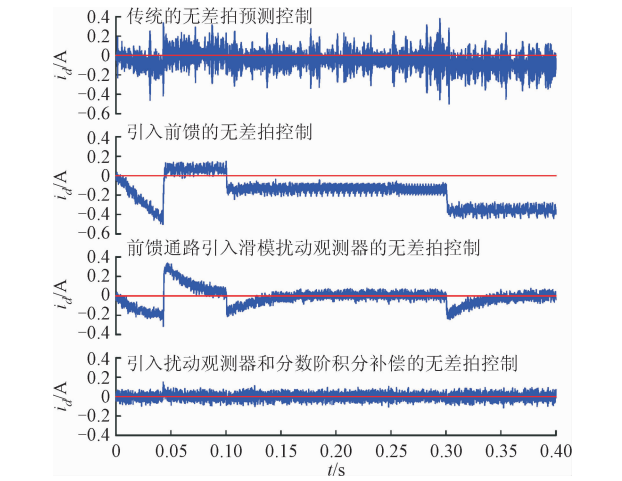


图 10 4 种控制策略下的  $d$  轴电流波形

Fig. 10 Current curves of  $d$ -axis under different strategies

## 5 结 论

本文研究了永磁同步电机无差拍电流控制系统中参数敏感性问题。基于传统无差拍控制原理,提出了前馈控制与无差拍控制相结合的控制方法,减小了控制系统中由于参数扰动引起的定子电流和电磁转矩的抖振。针对加载后控制策略中所用电感参数与电机实际电感参数不匹配时电流稳态误差增大的问题,进一步提出了在前馈通路中采用滑模扰动观测器与分数阶积分补偿相结合的方法,在高、低速,轻、重载工况下均消除了电流的稳态误差,并且提高了电流的跟踪速度。仿真结果表明,本文提出的方法能够提高模型预测控制系统的鲁棒性,减小定子电流的畸变率,消除稳态误差,同时保持系统的快速响应。

### 参考文献:

[1] 刘坤,高琳. 永磁同步电机的改进模型预测直接转矩控制 [J]. 电机与控制学报, 2020, 24(1): 10-17.

LIU Shen, GAO Lin. Improved model of predictive direct torque control for permanent magnet synchronous



- motor [J]. *Electric Machines and Control*, 2020, 24(1): 10-17.
- [2] TÜRKER T, YANIK G, BUYUKKELES U, et al. A discrete-time nonlinear robust controller for current regulation in PMSM drives [J]. *Engineering & Technology*, 2017, 12(4): 1537-1547.
- [3] 肖海峰. 永磁同步电机改进型电流预测控制策略研究 [J]. *微特电机*, 2019, 47(4): 52-55, 65.  
XIAO Haifeng. Research on improved current prediction control strategy of permanent magnet synchronous motor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2019, 47(4): 52-55, 65.
- [4] 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.
- [5] 谢传林, 曾岳南, 王发良, 等. 永磁同步电机无差拍电流控制电流稳态误差消除算法 [J]. *电机与控制应用*, 2018, 45(11): 34-38, 55.  
XIE Chuanlin, ZENG Yuenan, WANG Faliang, et al. Current steady error elimination algorithm for permanent magnet synchronous motor dead-beat current control [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2018, 45(11): 34-38, 55.
- [6] 王伟华, 肖曦. 永磁同步电机高动态响应电流控制方法研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(21): 117-123, 200.  
WANG Weihua, XIAO Xi. A current control method for permanent magnet synchronous motors with high dynamic performance [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(21): 117-123, 200.
- [7] 周智丰, 刘向辰, 杨沛豪. 采用双扰动观测器的PMSM电流预测控制系统 [J]. *电力电子技术*, 2019, 53(10): 18-22.  
ZHOU Zhifeng, LIU Xiangchen, YANG Peihao. Research on PMSM current predictive control system with double disturbance observer [J]. *Power Electronics*, 2019, 53(10): 18-22.
- [8] 殷海双, 朱哲. 基于双Luenberger观测器的永磁同步电机预测控制研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2020, 39(4): 26-31.  
YIN Haishuang, ZHU Zhe. Study on predictive control of permanent magnet synchronous motor based on two-Luenberger observers [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2020, 39(4): 26-31.
- [9] 熊聪, 许海平, 关涛, 等. 基于增强型扰动观测器的五相永磁同步电机鲁棒电流控制策略 [J]. *电工技术学报*, 2020, 35(6): 1219-1230.  
XIONG Cong, XU Haiping, GUAN Tao, et al. A robust current control scheme for five-phase permanent magnet synchronous motor based on enhanced disturbance observer [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(6): 1219-1230.
- [10] 赵峰, 罗雯, 高锋阳, 等. 考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(6): 28-35.  
ZHAO Feng, LUO Wen, GAO Fengyang, et al. An improved sliding mode control for PMSM considering sliding mode chattering and disturbance compensation [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(6): 28-35.
- [11] WANG Minghui, XU Yongxiang, ZOU Jibin. Sliding mode control with open-switch fault diagnosis and sensorless estimation based on PI observer for PMSM drive connected with an LC filter [J]. *IET Power Electronics*, 2020, 13(11): 2334-2341.
- [12] GAO Peng, ZHANG Guangming, LV Xiaodong, et al. A novel compound nonlinear state error feedback super-twisting fractional-order sliding mode control of PMSM speed regulation system based on extended state observer [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 2020: 1-15.
- [13] 陈凌翔, 李月超. 基于模型预测控制的永磁同步电机改进自抗扰控制研究 [J]. *微特电机*, 2018, 46(10): 70-74.  
CHEN Lingxiang, LI Yuechao. Research on improved active disturbance rejection controller of PMSM based on MPC [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2018, 46(10): 70-74.
- [14] 柯伟煌, 钱胜南, 张艺, 等. 基于扰动观测器的永磁同步电动机无差拍电流预测控制仿真 [J]. *电气技术*, 2019, 20(8): 1-5.  
KE Weihuang, QIAN Shengnan, ZHANG Yi, et al. Simulation of deadbeat predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on disturbance observer [J]. *Electrical Engineering*, 2019, 20(8): 1-5.
- [15] ÇELİK E. Design of new fractional order PI-fractional order PD cascade controller through dragonfly search algorithm for advanced load frequency control of power systems [J]. *Soft Computing*, 2021: 1193-1217.
- [16] YANG Zhanying, ZHANG Jie. Global stabilization of fractional-order bidirectional associative memory neural

- networks with mixed time delays via adaptive feedback control [J]. *International Journal of Computer Mathematics*, 2020, 97(10): 2074-2090.
- [17] KHAN M W, ABID M, KHAN A Q, et al. Controller design for a fractional-order nonlinear glucose-insulin system using feedback linearization [J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2020, 42(13): 2372-2381.
- [18] 张亮, 王国宏, 张顺义, 等. 一种分数阶域的密集假目标干扰抑制算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(12): 79-87.
- ZHANG Liang, WANG Guohong, ZHANG Shunyi, et al. An algorithm for suppressing jamming of dense false targets in fractional Fourier transform domain [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(12): 79-87.
- [19] LADACI S, CHAREF A. On fractional adaptive control [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2006, 43(4): 365-378.
- [20] EFE M Ö. A sufficient condition for checking the attractiveness of a sliding manifold in fractional order sliding mode control [J]. *Asian Journal of Control*, 2012, 14(4): 1118-1122.
- [21] ZHANG Xiaoguang, HOU Benshuai, MEI Yang. Deadbeat predictive current control of permanent-magnet synchronous motors with stator current and disturbance observer [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(5): 3818-3834.
- [22] TOSO F, DE SORICELLIS M, BOLOGNANI S. Simple and robust model predictive control of PMSM with moving horizon estimator for disturbance compensation [J]. *The Journal of Engineering*, 2019, 2019(17): 4380-4385.
- [23] LI Y, WANG X, LU S. Fractional order parameter identification of PMSM based on improved Levenberg-Marquardt algorithm [C] // 2019 Chinese Automation Congress. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2019: 4219-4223.
- [24] 袁雷, 胡冰新, 魏克银. 现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2016: 13-19.

### [本刊相关文献链接]

- 程博, 潘光, 毛昭勇. 轴向磁通电机中 Halbach 阵列永磁体的解析优化方法. 2020, 54(10): 77-83. [doi: 10.7652/xjtuxb202010009]
- 宋哲, 杨军, 梅雪松, 等. 永磁同步电机抗惯量扰动自适应速度控制. 2020, 54(12): 14-21. [doi: 10.7652/xjtuxb202012002]
- 邓旭斌, 姜歌东, 孙铮, 等. 永磁同步电机的高带宽鲁棒容错电流预测控制. 2020, 54(10): 84-93. [doi: 10.7652/xjtuxb202010010]
- 赵峰, 罗雯, 高峰阳, 等. 考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制. 2020, 54(6): 28-35. [doi: 10.7652/xjtuxb202006004]
- 徐会风, 苏少平, 杜庆诚. 一种新型零矢量的二三导通无刷直流电机直接转矩控制系统研究. 2020, 54(4): 85-92. [doi: 10.7652/xjtuxb202004011]
- 程伟, 杜钦君, 张铭, 等. 三次谐波抑制的五相永磁电机容错控制策略及仿真分析. 2020, 54(2): 95-102, 136. [doi: 10.7652/xjtuxb202002012]
- 程勇, 毕训训, 张怡龙, 等. 结合随机空间矢量脉宽调制的静止无功发生器双序控制策略. 2019, 53(12): 120-130. [doi: 10.7652/xjtuxb201912016]
- 顾万里, 胡云峰, 张森, 等. 有刷直流电机自适应滑模控制器设计与实验. 2017, 51(9): 112-117. [doi: 10.7652/xjtuxb201709016]
- 刘小勇, 郑爱红, 蒋峰, 等. 一种提高异步电动机转矩性能的直接转矩控制方法. 2016, 50(12): 12-17. [doi: 10.7652/xjtuxb201612003]
- 宋金龙, 刘勇智, 周政, 等. 中低速开关磁阻电机转矩优化策略研究. 2016, 50(11): 83-90. [doi: 10.7652/xjtuxb201611013]

(编辑 亢列梅)