

# 基于临近电流变化预测模型的永磁同步电机 模型预测电流控制

李耀华<sup>1</sup>, 王钦政<sup>1</sup>, 王自臣<sup>1</sup>, 高 赛<sup>1</sup>, 郭伟超<sup>1</sup>, 种国臣<sup>1</sup>, 吴步昊<sup>2\*</sup>

(1. 长安大学 汽车学院, 陕西 西安 710064;

2. 青海职业技术大学 青海省高原汽车电动化与智能化技术重点实验室,  
青海 西宁 810016)

## Model Predictive Current Control for PMSM Based on Near-Current-Variation Prediction Model

Li Yaohua<sup>1</sup>, Wang Qinzheng<sup>1</sup>, Wang Zichen<sup>1</sup>, Gao Sai<sup>1</sup>, Guo Weichao<sup>1</sup>,  
Chong Guochen<sup>1</sup>, Wu Buhao<sup>2\*</sup>

(1. School of Automotive, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Qinghai Plateau Key Laboratory of Automotive Electrification and Intelligentization Technology,  
Qinghai Vocational and Technical University, Xining 810016, China)

**Abstract:** [Objective] To address the strong parameter dependence of permanent magnet synchronous motor (PMSM) model predictive current control (MPCC), this paper proposes a near-current-variation-based prediction model, which eliminates the resistance and rotor flux parameters, thereby improving the parameter robustness of PMSM MPCC. [Methods] Based on the traditional current prediction model of PMSM and near-current-variation, the predicted current value for applying the same voltage vector  $V_n$  as the previous moment was first calculated. Then, using this as a reference value, the predicted values for applying other voltage vectors were derived, thereby establishing a near-current-variation-based prediction model. Finally, through simulations and experiments, the performance of PMSM MPCC based on the traditional current prediction model, incremental current prediction model, and near-current-variation prediction model was compared. [Results] The simulation and experimental results demonstrated that the proposed near-current-variation prediction model did not require stator resistance or rotor flux linkage parameters, and its control performance was comparable to that of both the traditional and incremental current prediction models. Moreover, the optimal voltage vector selections of the

three models were consistent. The proposed model relied solely on the stator  $d$ ,  $q$ -axis inductance, significantly reducing parameter dependency while maintaining stable system operation. [Conclusion] The proposed model provides a more simplified solution for PMSM MPCC.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; model predictive current control; near-current-variation prediction model; parameter robustness

**摘要:** [目的]为了解决永磁同步电机(PMSM)模型预测电流控制(MPCC)参数依赖性强的问题,本文提出了一种基于临近电流变化的预测模型,消除了电阻和转子磁链参数,提高了PMSM MPCC的参数鲁棒性。【方法】基于PMSM传统电流预测模型与临近电流变化,首先计算施加与上一时刻相同电压矢量 $V_n$ 的预测电流值。然后,以此为基准值,计算得出施加其他电压矢量的预测值,从而建立基于临近电流变化的预测模型。最后,通过仿真和试验,对比了基于传统电流预测模型、增量式电流预测模型和临近电流变化预测模型的PMSM MPCC性能。【结果】仿真和试验结果表明,本文所提临近电流变化预测模型无需定子电阻和转子磁链参数,其控制性能与传统及增量式电流预测模型相当,且三者最优电压矢量选择一致。该模型仅依赖定子 $d$ 、 $q$ 轴电感,显著降低了参数依赖性,系统运行稳定。【结论】本文所提模型为PMSM MPCC提供了更简化的解决方案。

**关键词:** 永磁同步电机;模型预测电流控制;临近电流变

**基金项目:** 青海职业技术大学青海省高原汽车电动化与智能化技术重点实验室开放基金资助(QZDSZ03-202502)

Open fund of Qinghai Plateau Key Laboratory of Automotive Electrification and Intelligentization Technology (QZDSZ03-202502)

化预测模型;参数鲁棒性

## 0 引言

模型预测电流控制 (Model Predictive Current Control, MPCC) 因其易于实现多目标控制、设计直观、控制性能优良等特性,近年来在永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 控制领域受到高度关注<sup>[1-5]</sup>。PMSM MPCC 基于电流预测模型以获取未来时刻的预测电流。在预测计算过程中,预测模型参数均视为常数。因此,模型参数的准确性决定模型的预测控制性能。由于测量误差、环境变化等因素,模型参数与实际参数并不一致,造成参数失配,导致预测值与实际值之间存在误差,影响电机的控制性能<sup>[6-8]</sup>。

为了降低参数失配对 MPCC 的影响,文献[9-11]基于超局部模型建立无参数模型,但超局部模型仍需标定与电机参数相关的新参数。文献[12-14]采用参数辨识方法对电机参数进行实

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k) + T_s \left[ \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k) i_q(k) + \frac{1}{L_d} u_d(k) \right] \\ i_q(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k) - T_s \left[ \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k) i_d(k) + \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k) - \frac{1}{L_q} u_q(k) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_d$ 、 $u_q$ 、 $i_d$ 、 $i_q$  和  $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴定子电压、电流和电感; $R_s$  为定子电阻; $\omega_e$  为电机角速度; $\psi_f$  为永磁体磁链。

由式(1)可知,传统电流预测模型需要定子电阻  $R_s$ 、定子  $d$ 、 $q$  轴电感  $L_d$ 、 $L_q$  和永磁体磁链  $\psi_f$  四个参数。

两电平电压源逆变器可产生 7 个备选电压矢量,如式(2)所示。其中,零电压矢量可由开关状态 111 或 000 生成,具体选择根据开关次数最小原则来确定。

$$V_s \in \{V_0, V_1, V_2, V_3, V_4, V_5, V_6\} \quad (2)$$

MPCC 的成本函数如式(3)所示。由于采样频率较高,近似认为当前时刻的参考值与下一时刻的参考值相同。

$$g = [i_d(k+1) - i_d^*(k)]^2 + [i_q(k+1) - i_q^*(k)]^2 \quad (3)$$

式中: $i_d^*$ 、 $i_q^*$  分别为当前时刻  $d$ 、 $q$  轴电流的参考值; $i_d(k+1)$ 、 $i_q(k+1)$  分别为下一时刻  $d$ 、 $q$  轴电流的预测值。

基于 Matlab/Simulink 平台,采用传统电流预

时辨识,但由于电流预测模型为双输入双输出系统,待辨识参数有四个,产生欠秩问题。

建立参数依赖性低的电流预测模型也是提高 MPCC 参数鲁棒性的有效方法之一。文献[15-18]通过对前后两个时刻电流预测模型求差,建立增量式电流预测模型,可消除转子磁链参数,降低对参数的依赖性,但此模型依然有三个参数。本文建立基于临近电流变化的预测模型,进一步消除电阻参数,仅需定子  $d$ 、 $q$  轴电感两个参数。仿真和试验结果表明,基于临近电流变化预测模型的 PMSM MPCC 运行良好,控制性能与传统及增量式电流预测模型基本相当,降低了 MPCC 的参数依赖性。

## 1 传统电流预测模型

在转子  $d$ - $q$  旋转坐标系下,采用一阶前向欧拉法对 PMSM 定子  $d$ 、 $q$  轴电压方程进行离散化,可推导出其传统电流预测模型,如式(1)所示:

测方法,构建 PMSM MPCC 仿真模型。该模型为离散模型,采样周期为  $1e-4$  s,离散化周期为  $1e-6$  s,直流母线电压为 110 V。转速环比比例积分控制器参数设置为: $K_p=0.05$ , $K_i=1.7$ , $q$  轴参考电流的输出上下限为  $[-5.5 \text{ A}, 5.5 \text{ A}]$ 。仿真条件设置如下:参考初始转速为 700 r/min,2 s 时阶跃至  $-700$  r/min;负载转矩初始值为  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,1 s 时阶跃至  $-1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,3 s 时再次阶跃至  $1 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,持续时长 4 s; $d$  轴参考电流为 0。仿真用 PMSM 参数如表 1 所示,仿真结果如图 1、2 所示。

表 1 仿真用 PMSM 参数

Tab. 1 Parameters of PMSM for simulation

参数名称	参数值
定子电阻 $R_s/\Omega$	2.615
$d$ 轴电感 $L_d/\text{H}$	0.006 55
$q$ 轴电感 $L_q/\text{H}$	0.005 20
转子磁链 $\psi_f/\text{Wb}$	0.101 256
极对数 $p$	4
额定转速 $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	2 000
额定转矩 $T_n/(\text{N}\cdot\text{m})$	3.5
额定功率 $P_n/\text{kW}$	0.75
转动惯量 $J/(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$	0.003
粘滞阻尼系数 $B/(\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s})$	0.002

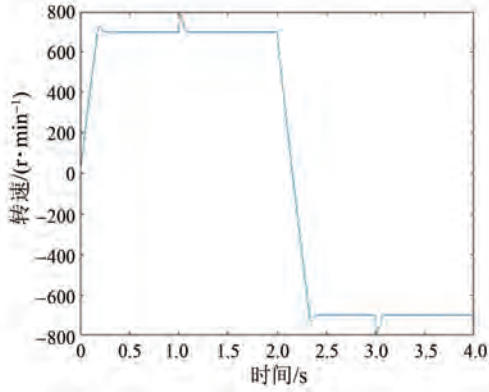


图1 基于传统电流预测模型仿真转速

Fig.1 Simulated speed based on traditional current prediction model

定义  $d$ 、 $q$  轴电流脉动均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 如式(4)、(5)所示:

$$i_{d\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (i_d - i_d^*)^2}{N}} \quad (4)$$

$$i_{q\_RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (i_q - i_q^*)^2}{N}} \quad (5)$$

式中:  $N$  为采样个数。

$$\begin{cases} i_d(k) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k-1) + T_s \left[ \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k-1) i_q(k-1) + \frac{1}{L_d} u_d(k-1) \right] \\ i_q(k) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k-1) - T_s \left[ \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k-1) i_d(k-1) + \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k-1) - \frac{1}{L_q} u_q(k-1) \right] \end{cases} \quad (6)$$

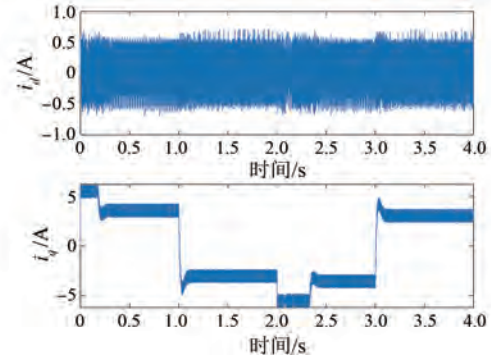
由于采样周期  $T_s$  极小,且转速惯性常数较大,可近似认为  $k$  时刻和  $k-1$  时刻转速相等。因此,式(6)可写为

$$\begin{cases} i_d(k) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k-1) + T_s \left[ \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k) i_q(k-1) + \frac{1}{L_d} u_d(k-1) \right] \\ i_q(k) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k-1) - T_s \left[ \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k) i_d(k-1) + \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k) - \frac{1}{L_q} u_q(k-1) \right] \end{cases} \quad (7)$$

将式(1)与式(7)作差,可得增量式电流预测方程,如式(8)所示:

$$\begin{cases} i_d(k+1) = \left(2 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k) - \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_d}\right) i_d(k-1) + T_s \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k) [i_q(k) - i_q(k-1)] + \frac{T_s}{L_d} [u_d(k) - u_d(k-1)] \\ i_q(k+1) = \left(2 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k) - \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_q}\right) i_q(k-1) - T_s \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k) [i_d(k) - i_d(k-1)] + \frac{T_s}{L_q} [u_q(k) - u_q(k-1)] \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知,增量式电流预测模型消除了转子磁链参数,只需要定子电阻  $R_s$ 、定子  $d$ 、 $q$  轴电感  $L_d$ 、 $L_q$  三个参数。

图2 基于传统电流预测模型仿真  $i_{dq}$ Fig.2 Simulated  $i_{dq}$  based on traditional current prediction model

基于传统电流预测模型的 PMSM MPC 性能如表 2 所示。

表2 基于传统电流预测模型的控制性能

Tab.2 Control performances based on conventional current prediction model

参数名称	$I_{d\_RMSE}/A$	$I_{q\_RMSE}/A$
参数值	0.277 9	0.364 7

## 2 增量式电流预测模型

由式(1)可得  $k$  时刻 PMSM 定子  $d$ 、 $q$  轴电流的表达式为

相同仿真条件下,基于增量式电流预测模型的 PMSM MPC 仿真结果如图 3、4 所示,控制性能如表 3 所示。

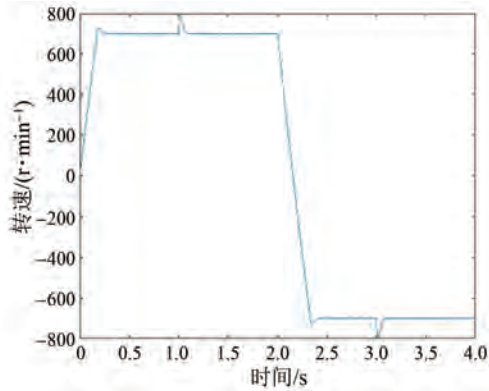


图 3 基于增量式电流预测模型仿真转速

Fig. 3 Simulated speed based on incremental current prediction model

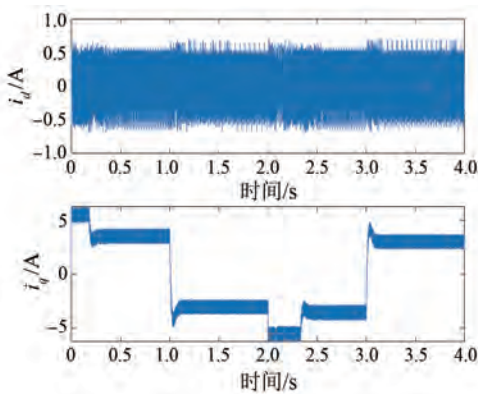
图 4 基于增量式电流预测模型仿真  $i_{dq}$ Fig. 4 Simulated  $i_{dq}$  based on incremental current prediction model

表 3 基于增量式电流预测模型的控制性能

Tab. 3 Control performance based on incremental current prediction model

参数名称	$I_{d\_RMSE}/A$	$I_{q\_RMSE}/A$
参数值	0.277 1	0.369 2

$$\begin{cases} \Delta i_d = i_d(k+1) - i_d(k) = -\frac{R_s T_s}{L_d} i_d(k) + T_s \left[ \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k) i_q(k) + \frac{1}{L_d} u_d(k) \right] \\ \Delta i_q = i_q(k+1) - i_q(k) = -\frac{R_s T_s}{L_q} i_q(k) - T_s \left[ \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k) i_d(k) + \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k) - \frac{1}{L_q} u_q(k) \right] \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可知,施加电压矢量引起的  $d$ 、 $q$  轴电流变化与以下因素有关:电压矢量的  $d$ 、 $q$  轴分量、定子  $d$ 、 $q$  轴电流以及转速。

假设上一时刻施加电压矢量  $V_n$ ,则其引起的定子  $d$ 、 $q$  轴电流变化如式(13)所示:

$$\begin{cases} \Delta i_d(k-1) = -\frac{R_s T_s}{L_d} i_d(k-1) + T_s \left[ \frac{L_q}{L_d} \omega_e(k-1) i_q(k-1) + \frac{1}{L_d} u_d(k-1) \right] \\ \Delta i_q(k-1) = -\frac{R_s T_s}{L_q} i_q(k-1) - T_s \left[ \frac{L_d}{L_q} \omega_e(k-1) i_d(k-1) + \frac{\psi_f}{L_q} \omega_e(k-1) - \frac{1}{L_q} u_q(k-1) \right] \end{cases} \quad (13)$$

运行基于增量式电流预测模型的 PMSM MPCC,同时并行输入基于传统电流预测模型的 PMSM MPCC,后者的输出仅用于与前者作比较。定义两者电压矢量一致率  $\eta_{V_s}$  的计算式如式(9)所示:

$$\eta_{V_s} = \frac{N_{\text{same}}}{N} \times 100\% \quad (9)$$

式中: $N_{\text{same}}$  为两者输出电压矢量相同的次数。

经统计,相同输入条件下,二者输出的电压矢量相同率为 96.64%。

### 3 基于临近电流变化的预测模型

由式(1)可知,施加电压矢量  $V_m$  和  $V_n$  后的预测电流差值如式(10)所示:

$$\begin{cases} i_d^m(k+1) - i_d^n(k+1) = \frac{T_s}{L_d} [u_d^m(k) - u_d^n(k)] \\ i_q^m(k+1) - i_q^n(k+1) = \frac{T_s}{L_q} [u_q^m(k) - u_q^n(k)] \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可得:

$$\begin{cases} i_d^m(k+1) = i_d^n(k+1) + \frac{T_s}{L_d} [u_d^m(k) - u_d^n(k)] \\ i_q^m(k+1) = i_q^n(k+1) + \frac{T_s}{L_q} [u_q^m(k) - u_q^n(k)] \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知,根据施加电压矢量  $V_n$  后的预测电流,则可计算得到施加其他电压矢量的预测值。

由式(1)可知,施加电压矢量引起的定子  $d$ 、 $q$  轴电流变化如式(12)所示:



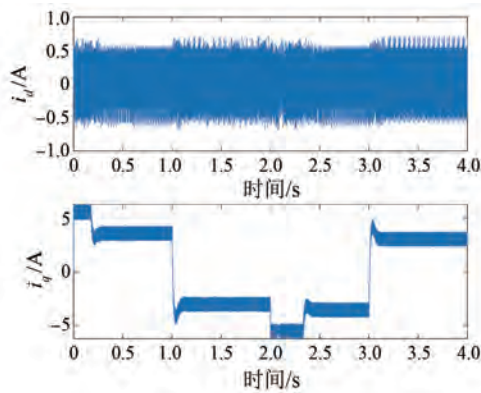


图 7 基于临近电流变化预测模型仿真  $i_{dq}$

Fig. 7 Simulated  $i_{dq}$  based on near-current-variation prediction model

## 4 试验验证

对基于传统、增量式电流预测模型和临近电流变化预测模型的 PMSM MPCC 进行试验验证。试验平台由被测电机、负载电机及其控制器组成, 如图 8 所示。负载电机采用电流单闭环矢量控制进行动态加载, 被测电机和负载电机的控制芯片均采用 STM32G431CBU6, 采样频率为 10 kHz, 两者逆变器均采用英飞凌 IKCM30F60GA 智能功率模块作为三相逆变桥, 死区时间为  $1 \mu\text{s}$ , 直流母线电压为 110 V。控制器通过高速串口将被测电机的转速、转矩及磁链信息发送至上位机。试验用电机参数与仿真实用电机参数完全相同。

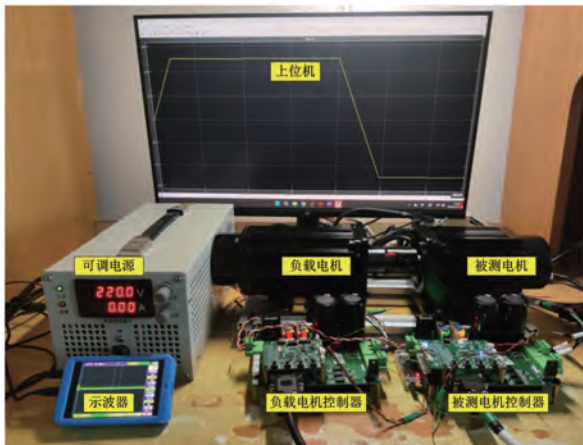


图 8 PMSM 试验平台

Fig. 8 Experimental platform of PMSM

在电机数字控制系统实际应用中, 脉宽调制控制寄存器仅在控制周期起始时刻更新。由于算法运算耗时, 导致本周期求解的最优电压矢量无

法同期写入寄存器, 需延迟至下一周期作用于电机。因此, 需采用延迟补偿,  $k$  时刻将  $k-1$  时刻最优电压矢量代入电流预测模型, 得到  $k+1$  时刻  $d$ 、 $q$  轴电流预测值; 再以此为初始条件, 遍历逆变器所有候选电压矢量, 求解  $k+2$  时刻对应的  $d$ 、 $q$  轴电流预测结果<sup>[19-20]</sup>, 如图 9 所示。

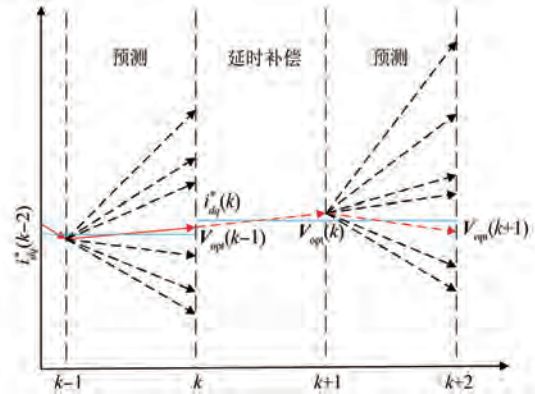


图 9 延时补偿控制

Fig. 9 Delay compensation control

### 4.1 传统电流预测模型

基于传统电流预测模型的 PMSM MPCC 试验波形如图 10、11 所示。

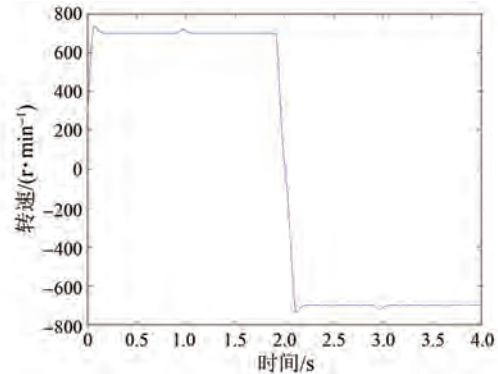


图 10 基于传统电流预测模型的试验转速

Fig. 10 Experimental speed based on traditional current prediction model

### 4.2 增量式电流预测模型

基于增量式电流预测模型的 PMSM MPCC 试验波形如图 12、13 所示。

### 4.3 基于临近电流变化的预测模型

基于临近电流变化预测模型的 PMSM MPCC 试验波形如图 14、15 所示。

基于传统电流预测模型、增量式电流预测模型和临近电流变化预测模型的 PMSM MPCC 的试验结果如表 5 所示。

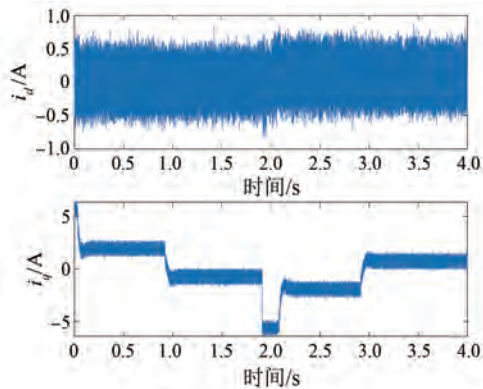
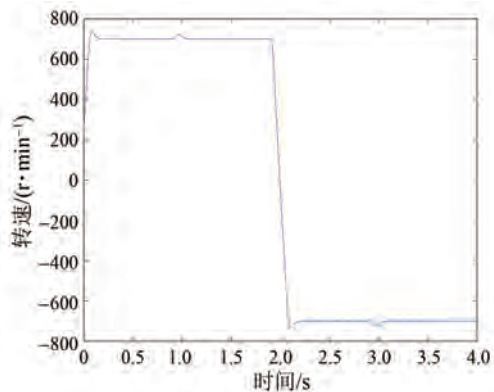
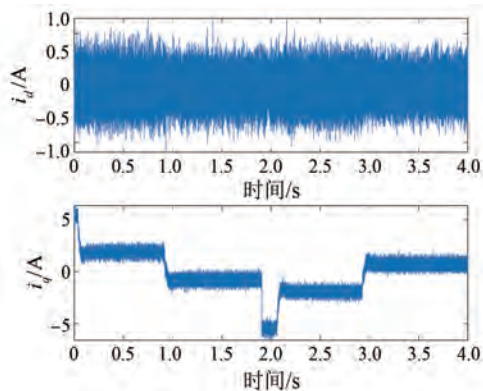
图 11 基于传统电流预测模型试验  $i_{dq}$ Fig. 11 Experimental  $i_{dq}$  based on traditional current prediction model

图 12 基于增量式电流预测模型试验转速

Fig. 12 Experimental speed based on incremental current prediction model

图 13 基于增量式电流预测模型试验  $i_{dq}$ Fig. 13 Experimental  $i_{dq}$  based on incremental current prediction model

试验结果表明,基于传统电流预测模型、增量式电流预测模型和临近电流变化预测模型的 PMSM MPCC 性能基本相当。

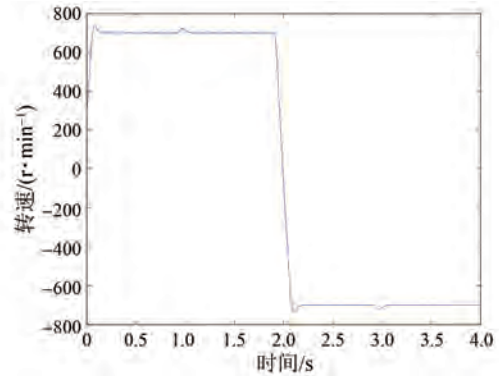


图 14 基于临近电流变化预测模型试验转速

Fig. 14 Experimental speed based on near-current-variation prediction model

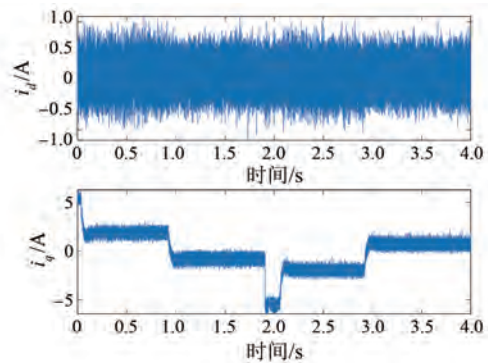
图 15 基于临近电流变化预测模型试验  $i_{dq}$ Fig. 15 Experimental  $i_{dq}$  based on near-current-variation prediction model

表 5 基于不同预测模型的 PMSM MPCC 试验结果

Tab. 5 Experimental results of PMSM MPCC based on different prediction models

预测模型	$I_{d\_RMSE}/A$	$I_{q\_RMSE}/A$
传统电流预测模型	0.293 9	0.349 3
增量式电流预测模型	0.335 4	0.374 6
临近电流变化预测模型	0.328 3	0.369 6

## 5 结语

(1) 基于临近电流变化预测模型的 PMSM MPCC 可行,系统运行良好。

(2) 基于传统电流预测模型、增量式电流预测模型和临近电流变化预测模型的 PMSM MPCC 性能基本相当。相同输入下,基于不同预测模型的 PMSM MPCC 选择的最优电压矢量基本一致。

(3) 基于临近电流变化的预测模型消除了转子磁链  $\psi_r$  和定子电阻  $R_s$ , 仅需定子  $d$ 、 $q$  轴电感  $L_d$ 、

$L_q$  两个参数,降低了 MPCC 的参数依赖性。

### 利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

### 作者贡献

李耀华进行了方案设计和论文撰写,王钦政、王自臣、高赛、郭伟超和种国臣进行了仿真研究,吴步昊进行了论文的审核和修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design and paper writing were carried out by Li Yaohua. The simulation was conducted by Wang Qinzheng, Wang Zichen, Gao Sai, Guo Weichao and Chong Guochen. The manuscript was revised by Wu Buhao. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

### 参考文献

- [ 1 ] Rodriguez J, Garcia C, Mora A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives—Part I: Basic concepts and advanced strategies [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(4): 3927-3942.
- [ 2 ] Rodriguez J, Garcia C, Mora A, et al. Latest advances of model predictive control in electrical drives—Part II: Applications and benchmarking with classical control methods [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 37(5): 5047-5061.
- [ 3 ] 柳志飞, 杜贵平, 杜发达. 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势[ J ]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 58-69.  
Liu Z F, Du G P, Du F D. Research status and development trend of finite control set model predictive control in power electronics [ J ]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 58-69.
- [ 4 ] 王治国, 郑泽东, 李永东, 等. 交流电机模型预测控制综述[ J ]. 电机与控制学报, 2022, 26 ( 11 ): 14-30.  
Wang Z G, Zheng Z D, Li Y D, et al. A review of model predictive control for AC motor [ J ]. Electric Machines and Control, 2022, 26(11): 14-30.
- [ 5 ] 李耀华, 种国臣, 郭伟超, 等. 永磁同步电机两步模型预测电流控制精简控制集研究[ J ]. 电机与控制应用, 2025, 52(5): 540-551.  
Li Y H, Chong G C, Guo W C, et al. Research on streamlined control sets for two-step model predictive current control in permanent magnet synchronous motors [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2025, 52(5): 540-551.
- [ 6 ] 李键, 牛峰, 黄晓艳, 等. 永磁同步电机有限控制集模型预测电流控制预测误差分析[ J ]. 电机与控制学报, 2019, 23(4): 1-7.  
Li J, Niu F, Huang X Y, et al. Prediction error analysis of finite-control-set model predictive current control for PMSMs [ J ]. Electric Machines and Control, 2019, 23(4): 1-7.
- [ 7 ] Zhang X G, Zhang L, Zhang Y C. Model predictive current control for PMSM drives with parameter robustness improvement [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1645-1657.
- [ 8 ] 郝剑奇, 何凤有, 陈俊磊. 模型失配永磁同步电机模型预测控制研究[ J ]. 电力电子技术, 2019, 53(10): 31-33+83.  
Hao J Q, He F Y, Chen J L. Research on model predictive control of model mismatch permanent magnet synchronous motor [ J ]. Power Electronics, 2019, 53(10): 31-33+83.
- [ 9 ] Zhou Y N, Li H M, Zhang H G. Model free deadbeat predictive speed control of surface-mounted permanent magnet synchronous motor drive system [ J ]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2019, 14: 265-274.
- [ 10 ] Zhang Y C, Jin J L, Huang L L. Model-free predictive current control of PMSM drives based on extended state observer using ultra local model [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(2): 993-1003.
- [ 11 ] 李耀华, 种国臣, 刘子焜, 等. 基于二阶超局部模型的永磁同步电机两步无模型预测电流控制[ J ]. 电机与控制应用, 2024, 51(12): 39-50.  
Li Y H, Chong G C, Liu Z K, et al. Two-step model-free predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on second-order ultralocal model [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(12): 39-50.
- [ 12 ] 李垣江, 董鑫, 魏海峰, 等. 基于改进模型参考自

- 适应系统的永磁同步电机参数辨识[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(9): 1983-1988.
- Li Y J, Dong X, Wei H F, et al. Parameter identification method of permanent magnet synchronous motor based on improved model reference adaptive system [J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(9): 1983-1988.
- [13] 汪琦, 王爽, 付俊永, 等. 基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机电流预测控制[J]. *电机与控制应用*, 2017, 44(7): 48-53.
- Wang Q, Wang S, Fu J Y, et al. Predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on model reference adaptive system parameter identification [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2017, 44(7): 48-53.
- [14] 李耀华, 郭伟超, 种国臣, 等. 基于模型参考自适应参数辨识的永磁同步电机有限状态集 MPC [J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(6): 596-607.
- Li Y H, Guo W C, Chong G C, et al. The FCS-MPC for PMSM based on MARS parameter identification [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(6): 596-607.
- [15] 张硕, 孙永禄, 赵明威, 等. PMSM 电流鲁棒性增量预测控制[J]. *北京理工大学学报*, 2022, 42(10): 1073-1079.
- Zhang S, Sun Y L, Zhao M W, et al. PMSM current robust incremental predictive control [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2022, 42(10): 1073-1079.
- [16] Li H F, Shao J Y, Liu Z Y. Incremental model predictive current control for PMSM with online compensation for parameter mismatch [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2023, 38(2): 1050-1059.
- [17] Zhang X G, Wang Z W. Simple robust model predictive current control for PMSM drives without flux-linkage parameter [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(4): 3515-3524.
- [18] 李耀华, 郭伟超, 王钦政, 等. 基于 MRAS 参数辨识的永磁同步电机增量式模型预测电流控制研究[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(10): 1050-1062.
- Li Y H, Guo W C, Wang Q Z, et al. Study on incremental model predictive current control for permanent magnet synchronous motor based on MRAS parameter identification [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(10): 1050-1062.
- [19] Rodriguez J, Cortes P. *Predictive control of power converters and electrical drives* [M]. New York: Wiley Press, 2012.
- [20] 何栋炜, 曾志伟, 蒋学程, 等. 带延时补偿的永磁同步电机自适应无差拍电流预测控制[J]. *电机与控制应用*, 2024, 51(2): 123-133.
- He D W, Zeng Z W, Jiang X C, et al. Adaptive deadbeat current predictive control of permanent magnet synchronous motor with delay compensation [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(2): 123-133.

---

收稿日期:2025-12-30

收到修改稿日期:2026-02-04

作者简介:

李耀华(1980—),男,博士,副教授,研究方向为电机电控与新能源汽车技术, nuaaliyaohua@126.com;

\* 通信作者:吴步昊(1996—),男,博士,助教,研究方向为车辆系统动力学, 1207688117@qq.com。