

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003765

# 基于状态转移约束的永磁同步电机 模型预测控制策略\*

高俊<sup>1</sup> 张河山<sup>2</sup> 彭志远<sup>3</sup> 蒋飞<sup>3</sup>

(1. 重庆电子工程职业学院 智能制造与汽车学院 重庆 401331; 2. 重庆交通大学 交通运输学院 重庆 400074;  
3. 重庆长安新能源汽车科技有限公司 重庆 401120)

**摘要:**针对车用永磁同步电机传统模型预测控制方法存在转矩波动和转速波动较大,从而影响汽车乘坐舒适性的问题,提出了一种新型的考虑永磁同步电机开关切换状态转移概率的改进型模型预测控制方法。通过永磁同步电机工作中开关切换状态的历史数据计算状态转移概率矩阵。在获得转移概率的基础上,根据当前的开关状态和状态转移矩阵得到状态转移约束误差。接着在模型预测控制算法中制定包含状态转移约束误差项的代价函数,通过代价函数对下一时刻的开关状态进行在线寻优以获得最优的控制变量。并基于MATLAB平台对该改进型模型预测控制策略进行仿真分析,仿真结果表明,改进型模型预测控制策略具有更好的转矩和转速响应特性,从而表明基于状态转移的模型预测控制方法能够用于车用永磁同步电机的控制中,并且对于改善汽车的乘坐舒适性具有重要意义。

**关键词:**模型预测控制;状态转移约束;马尔可夫链;电机控制

**中图分类号:** TM623.3      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Model predictive control method of permanent magnet synchronous motor based on state transition constraint

Gao Jun<sup>1</sup> Zhang Heshan<sup>2</sup> Peng Zhiyuan<sup>3</sup> Jiang Fei<sup>3</sup>

(1. Intelligent Manufacturing and Automobile School, Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing 401331, China;  
2. College of Traffic and Transportation, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
3. Chongqing Changan New Energy Vehicle Technology Ltd., Chongqing 401120, China)

**Abstract:** Conventional model predictive control method of permanent magnet synchronous motor (PMSM) suffers from high torque ripple and speed fluctuation, which affects the ride comfort of vehicle. A model predictive control method based on state transition constraint of a PMSM is proposed. First, the state transition probability matrix is calculated based on the historical data of the switching state of the PMSM. Secondly, the constraint error is obtained according to the current switch state and state transition probability matrix. This constraint error can limit the switching state of the switch at the next moment. Then, the cost function including the state transition constraint error is formulated in the model predictive control algorithm. The optimal switching state at the next moment is searched according to the cost function. The results of simulation study and experiment show that the improved model predictive control strategy proposed in this paper has better torque and speed response characteristics in terms of speed ripple and torque fluctuation. The results show that the proposed model predictive control method based on state transition can be used in the control of vehicle PMSM. It is essential to improve the ride comfort of the vehicle.

**Keywords:** model predictive control; state transition constraints; Markov chain; motor control

收稿日期: 2020-12-11      Received Date: 2020-12-11

\* 基金项目: 重庆市自然科学基金博士后基金(cstc2020jcyj-bsh0129)、基于机器学习的纯电动汽车电驱系统预测控制策略(XJZK201911)项目资助

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)由于其具有尺寸小和功率密度高等特点而得到广泛的运用,尤其是在纯电动汽车的驱动系统方面具有足够的发展前景,而其控制系统直接影响电机乃至整车的驾乘性能,因此对永磁同步电机的控制系统提出了更高的要求<sup>[1-3]</sup>。

模型预测控制(MPC)是一种广泛运用于工业控制中的高级控制算法,它采用控制对象的数学模型通过滚动预测的方式来控制电机的运动趋势。采用性能指标函数来寻找使实际响应变量与预测量之间误差最小的控制量<sup>[4-9]</sup>。文献[10]提出了基于单环模型预测和遗忘因子的转动惯量识别控制方法,相比于传统模型预测具有良好的动态性能。文献[11]提出了一种通过历史定子电压、电流估计的反电动势(EMF)来预测电流的模型预测控制方法,该种控制方法在保持较好动态特性的同时,具有较好的稳态特性。文献[12]提出了一种基于改进型的转矩预测控制方法,该方法具有避免传统转矩预测控制中权重因子选取困难的特点。文献[13]提出了一种简化的有限控制集的永磁同步电机控制方法,该方法解决了传统有限控制集计算量大的问题。文献[14]提出了一种能够减少转矩纹波和转速波动的增强型无差拍电流预测控制方法。

综上所述,一方面传统电机控制策略多依赖开发人员的经验;另一方面交流电机作为被控对象,具有强非线性、耦合、多变量以及电机参数动态变化等特点,使得传统控制方法在电机调速过程中出现控制性能下降等问题,进而影响系统的及时响应特性和稳定性<sup>[15-16]</sup>。而在电流预测控制的模型预测控制方法中,通过代价函数寻找优化的开关切换序列,此种电流预测控制方法存在一个非常严重的问题是预测控制获得的开关状态直接作为控制变量会引起电机输出转矩、转速波动过大,导致汽车一系列的振动、噪声问题,从而影响驾乘人员的乘坐舒适性。再者电机控制过程中还存在着一些随机扰动因素,这种随机因素无法建立准确的数学模型,且考虑影响开关切换序列随机因素的电机控制方法尚未见报道。

因此本研究提出了一种改进型模型预测控制方法,该控制方法的显著特点在于加入了考虑开关切换序列的约束模块,通过该约束模块可以有效的减少电机的输出转矩波动、转速波动,从而提高汽车的驾乘性能。即在电机控制系统中增加开关切换序列的随机转移约束模块,该随机转移约束模块根据系统的当前开关状态和转移概率矩阵得到状态转移误差,在代价函数中增加状态转移误差项对电机运行过程中的开关序列进行限制,从而使电机的工作状态得到优化,增强永磁同步电机的转矩响

应特性和转速响应特性。

## 1 电机模型以及随机转移预测控制原理

### 1.1 永磁同步电机状态空间模型

永磁同步电机状态空间模型用于预测未来时间域内状态空间变量的取值,可以表示为<sup>[17]</sup>:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu + E \quad (1)$$

其中,状态变量  $x = [i_d, i_q]^T$ , 状态矩阵表示为<sup>[18]</sup>:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \frac{L_q \omega}{L_d} \\ -\frac{L_d \omega}{L_q} & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{\psi}{L_q} \omega \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $R$  为电机定子电阻;  $L_d$  和  $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电感;  $\omega$  是电机转速;  $\psi$  为永磁铁磁通。

在 PMSM 电机的控制中  $d$ 、 $q$  电流是直接控制变量,状态变量  $x$  与输出变量  $y$  相同。控制变量  $u = [u_d, u_q]^T = MDU$  将功率器件的开关状态和受控变量的预测值关联起来。开关状态  $U$  用三相可表示为  $\{a \rightarrow, b \rightarrow, c \rightarrow\}$ , 转换矩阵  $M$  和  $D$  用于将开关状态转换为  $\{\vec{\alpha}, \vec{\beta}\}$  形式和  $\{\vec{d}, \vec{q}\}$  形式,其中:

$$M = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

$$D = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $U = [\Gamma_a, \Gamma_b, \Gamma_c]^T$ ,  $\theta$  为电机电气角度。 $\Gamma$  可用直流电源的电压和开关状态  $T$  来表示:

$$\Gamma_x = [\text{sign}(T_x) - \text{sign}(T_x')]V, T_x = 1, 2, 3 \quad (4)$$

其中  $\text{sign}(T_x)$  为开关状态的符号,  $T_x$  为 1, 则  $T_x'$  为 0,  $V$  为直流电源的电压值。

电机的电磁转矩可以表示为:

$$T_{em} = \frac{3}{2}p(\psi i_q + (L_d - L_q)i_d i_q) \quad (5)$$

电机的模型可表示为:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{B_v}{J_m} \omega + \frac{p}{J_m}(T_{em} - T_l) \quad (6)$$

电流预测的数学模型可以表示为:

$$i_d^{k+Np} = i_d + \frac{1}{L_s}(-R_s i_d + \omega_e L_s i_d^k + u_d) \quad (7)$$

$$i_q^{k+Np} = i_q + \frac{1}{L_s}(-R_s i_q - \omega_e L_s i_q^k + u_q - \omega \psi_f) \quad (8)$$

式中： $p$  为电机的极数； $T_l$  为电机负载转矩； $B_v$  和  $J_m$  分别为电机的转动惯量和阻尼系数； $i_d, i_q$  分别为电机  $d$  轴和  $q$  的电流分量； $N_p$  为预测步长； $L_s$  为定子电感； $R_s$  为定子电阻； $\omega_e$  为电机转子电角度。

### 1.2 代价函数和状态转移矩阵

通过构造基于状态转移的目标函数  $g$  来对输出的基本电压矢量进行滚动优化,从而选择下一个周期内的开关状态,如此往复运行便可获得一段时间内开关状态的历史数据序列。

模型预测控制中所使用的代价函数如下:

$$g = C_D + C_Q + C_R + C_T \quad (9)$$

式中： $C_D = \lambda_{id}(i_d)^2$  为驱动项误差,主要由  $d$  轴电流的误差所决定； $C_Q = \lambda_{iq}(i_d^* - i_q)^2$  为跟随误差,主要由  $q$  轴电流误差所决定， $i_q^*$  是  $q$  轴参考电流； $C_R$  是约束误差,要求  $d$  轴和  $q$  轴电流的平方和小于电流阈值  $I_{max}$ ； $\lambda(\dots)$  为权重系数,通常按照工程经验进行选取。 $C_D, C_Q, C_R$  的选取可参考文献[19]。

$C_T$  是转移约束,由状态转移矩阵决定,当转移概率较大时取较小值,当转移概率较小时取较大值,  $C_T$  作为开关状态切换约束项可以表示为:

$$C_T = \lambda_T * P_{ij} \quad (10)$$

$P_{ij}$  为状态转移矩阵,通过马尔可夫链进行计算,  $\lambda_T$  为状态转移的权重系数,其选择可以按照经验进行选取,本文将其设置为线性函数,如图 1 所示。

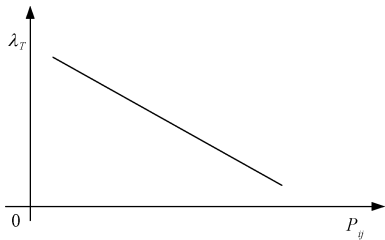


图 1 转移约束项权重系数的选择

Fig. 1 Weight coefficient of state transition constraint

随机过程理论是研究随机现象变化过程的概率规律性,马尔可夫是一个随机过程,简称马尔可夫过程 (Markov process),马尔可夫链模型是一个随机变量序列,它与某个系统的状态相对应,而此系统某个时刻的状态只依赖于前一时刻的状态,因此能够根据当前状态推断未来任何时刻的状态,而与过去的历史状态无直接关系<sup>[20]</sup>。

随机过程:

$$\{X^{(n)}, n = 0, 1, 2, \dots\} \quad (11)$$

它的取值为一个有限或可数的集合  $M$ 。假设存在一个独立于时间的固定概率  $P_{ij}$  使得:

$$P(X^{(n+1)} = i | X^{(n)} = j, X^{(n-1)} = i_{n-1}, \dots, X^{(0)} = i_0) = P_{ij}, n \geq 0 \quad (12)$$

其中  $i, j, i_0, i_{n-1} \in M$ , 则称此随机过程为马尔可夫链。

$$\begin{cases} P_{ij} = \frac{m_{ij}}{m_i} \\ m_i = \sum_{j=1}^n m_{ij} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $m_{ij}$  是由状态  $i$  转移到状态  $j$  的次数； $m_i$  为状态  $i$  转移次数总和。

由转移概率  $P_{ij}$  组成的矩阵:

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \dots \\ P_{10} & P_{11} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (14)$$

由于三相永磁同步电机仅有 8 种开关状态,因此在马尔可夫链的转移过程中有 8 种转移状态,将其分别编号为状态 1、2、3、4、5、6、7、8。这 8 种状态之间可以相互转移,转移方向和转移对象按照转移概率执行,即将当前时刻的状态按照最大转移概率进行转移,转移到的状态作为下一时刻的状态。图 2 所示为状态转移的示意图,图中箭头的指向为能够转移的方向。

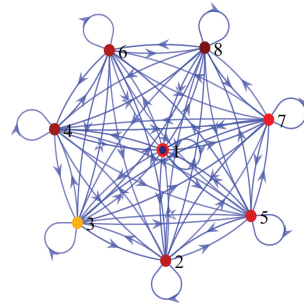


图 2 状态转移示意图

Fig. 2 State transition diagram

针对某一特定开关切换历史数据求得的转移概率,多个这样的转移概率将组成一个状态转移矩阵,状态转移概率为实时更新量,如图 3 所示 (红色方框),部分状态下的转移概率接近于 1,即从当前状态 2 转移到状态 3 的概率是 0.996 1。

改进型模型预测控制策略代价函数的计算流程如图 4 所示。首先,通过历史开关状态的切换序列计算状态转移概率矩阵;其次,电机在运行过程中随着开关状态不断的切换,而某一时刻的开关状态是唯一确定的,可根据当前工作状态和状态转移矩阵,确定一下时刻可能的转

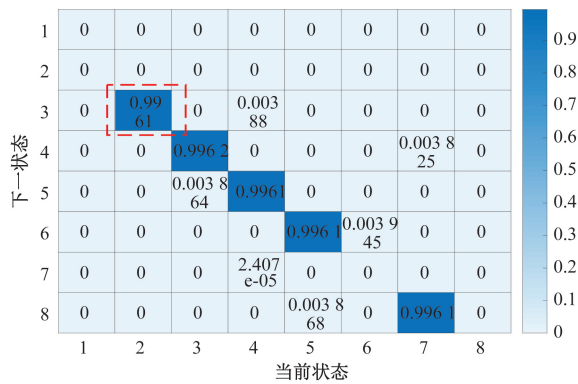


图 3 状态转移概率矩阵

Fig. 3 State transition probability matrix

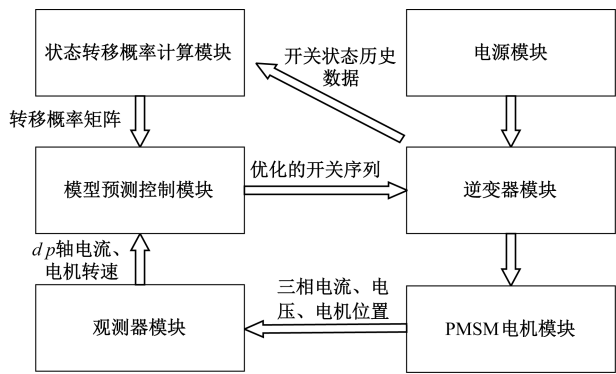


图 5 永磁同步电机改进型模型预测控制策略

Fig. 5 Improved MPC strategy for PMSM

移误差,即按照式(10)便可获得状态转移约束模块。最后,将转移误差作为模型预测模块的输入项,输入到模型预测控制的代价函数中。同样的,将  $d$  轴、 $q$  轴的参考电流和反馈电流,电机转速以及电机转角输入到模型预测模块中便可以求得驱动误差、跟随误差、以及约束误差,将以上误差以及转移约束误差代入代价函数中,便可以求得目标函数的取值大小,最终选择使目标函数取值最小的切换序列作为下一周期的实际开关输出。

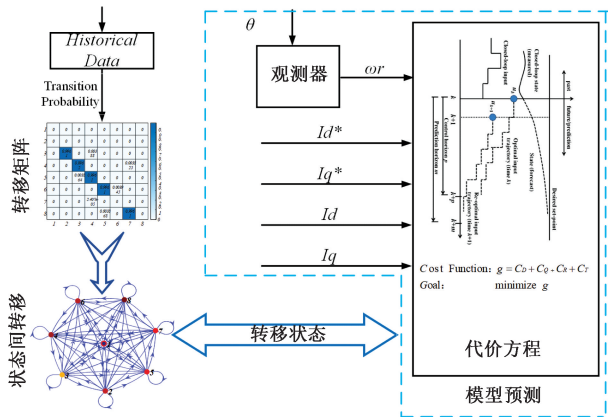


图 4 改进型模型预测控制

Fig. 4 Improved MPC

## 2 仿真研究

在 MATLAB/Simulink 环境下对传统模型预测控制策略以及提出的改进型模型预测控制策略进行仿真分析,仿真流程如图 5 所示,其中包含了模型预测控制模块、逆变器模块、电机本体模块、历史数据收集模块、状态转移矩阵计算模块、以及观测器模块。

其中模型预测模块输出功率开关管的开关状态,该状态作为下一个控制周期逆变器的输入信号,同时该开关状态会存入存储器,随着工作时间的累积,该数据集越来越大,计算的转移概率会越来越接近理想工作状态,

另外该数据集的大小可以根据实际需求按照经验进行选取;逆变器模块是功率级开关管,可以将模型预测控制或者 PWM 波输出的控制信号作为开关管的导通和断开信号,最终按照需求为永磁同步电机提供能量输出;功率供应模块为动力电池,输出为直流电,通过逆变器的作用输出交流电,使永磁同步电机运转;通过霍尔元件采集永磁同步电机三相电流后,输入到观测器模块,然后将处理后的数据经过 Clark 变换和 Park 变换得到反馈的  $d$  轴电流和  $q$  轴电流;同时反馈的电机角度、电机转速、期望转速、转矩将被输入到观测器模块,然后得到  $d$  轴和  $q$  轴的参考电流,并将其作为模型预测模块的输入。

表 1 永磁同步电机参数

Table 1 Parameters of PMSM

电机参数	描述	数值
$P$	电机极数	2
$R_s$	电机定子电阻	0.087
$L_s$	电机定子电感	$1.58 \times 10^{-3}$
$\psi$	转子磁通	1
$B_v$	电机转动惯量	1.87
$J_m$	电机阻尼系数	0.01

本仿真试验中电机及控制系统的参数如表 1 所示,传统的模型预测控制以及改进型模型预测控制的转矩响应特性如图 6 和 7 所示,电机目标转速为 10 rad/s,且负载转矩为 150 N·m,在 0.55 s 负载转矩降为 50 N·m。对比可以看出传统模型预测控制策略的转矩响应速度较改进型模型预测控制缓慢,且电流波动较大,原因是传统的模型预测控制,仅考虑了电流的驱动误差、跟随误差,而基于状态转移修正的模型预测控制策略会根据大量的历史数据对状态转移进行限制,即将驱动误差、跟随误差、电流的响应速度、转矩的波动情况等都会通过综合转移概率进行修正,而该转移概率矩阵是对随机过程中无法直接捕捉的影响因素通过马尔可夫链进行了概率统计,因此基于状态转移的模型预测控制策略的稳定性能

更好。

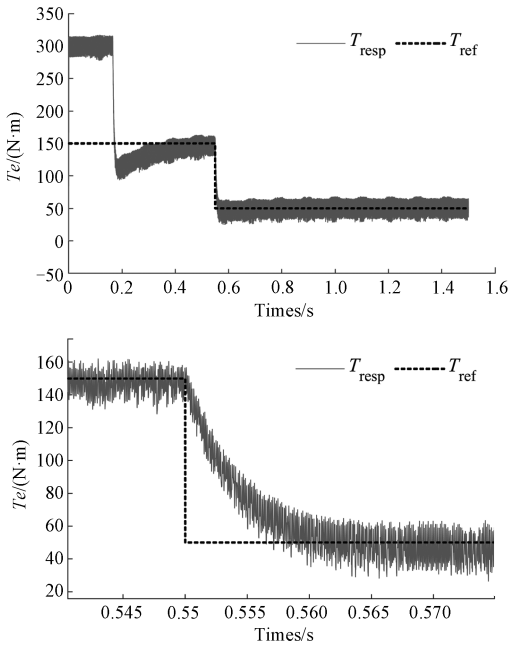


图 6 传统模型预测控制算法的转矩响应曲线  
Fig. 6 Torque response of traditional MPC

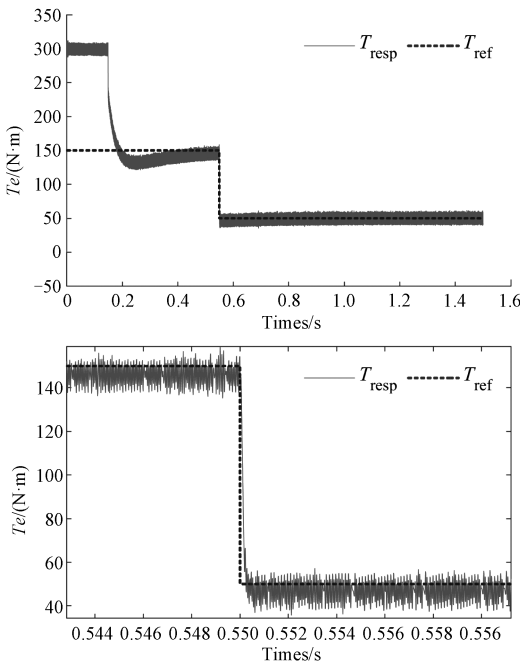


图 7 改进型模型预测控制算法的转矩响应曲线  
Fig. 7 Torque response of improved MPC

流的波动幅度较大,而改进型模型预测控制的  $q$  轴电流波动较小。图 9 所示为  $d$  轴电流响应曲线,对比可以看出改进型模型预测控制的  $d$  轴电流更接近于 0,传统模型预测控制的  $d$  轴电流波动幅度相对较大。

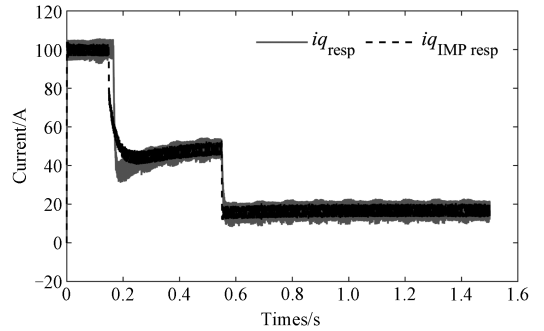


图 8  $q$  轴电流响应曲线  
Fig. 8  $q$ -axis response current

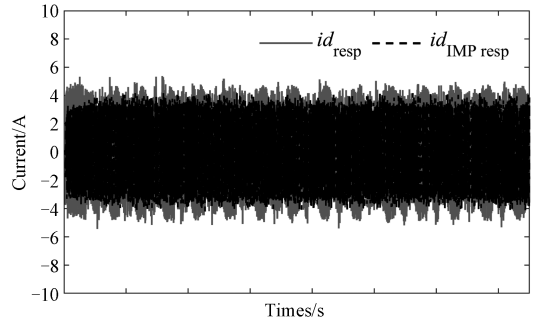


图 9  $d$  轴电流响应曲线  
Fig. 9  $d$ -axis response current

图 10 所示为三相电流的仿真结果,从仿真结果可以看出,两种控制方法均能按照需求的转矩进行三相电流输出,并且两者都能快速的进行电流响应,但是基于改进型模型预测控制方法的控制策略,电流波动更小。

图 11 所示为电机的目标转速与实际转速响应曲线对比,其中  $Spd_{ref}$  为目标转速,  $SpdMthd1_{resp}$  为传统模型预测控制方法的转速响应曲线,  $SpdMthd2_{resp}$  为改进型模型预测控制方法的转速响应曲线。从图中可以看出两种模型预测控制方法都能快速响应需求转速,在 0.2 s 附近时转速波动达到最大值,但改进型模型预测控制方法在速度响应过程中的转速波动更小。在 0.55 s 时随着负载转矩的改变,两种控制方法均出现了小幅度的转速波动,从两者波动的图像对比可以看出传统模型预测控制方法的转速波动范围较改进型模型预测控制方法的波动大。

综上,通过仿真分析可以看出改进型模型预测控制方法在转速波动和转矩波动方面均较传统的模型预测控制方法更优。

$q$  轴电流的响应曲线如图 8 所示,其中实线为传统模型预测控制的  $q$  轴电流响应曲线,虚线为改进型模型预测控制的  $q$  轴电流曲线,对比可以看出两者均能按照期望的目标转矩进行输出,传统模型预测控制的  $q$  轴电

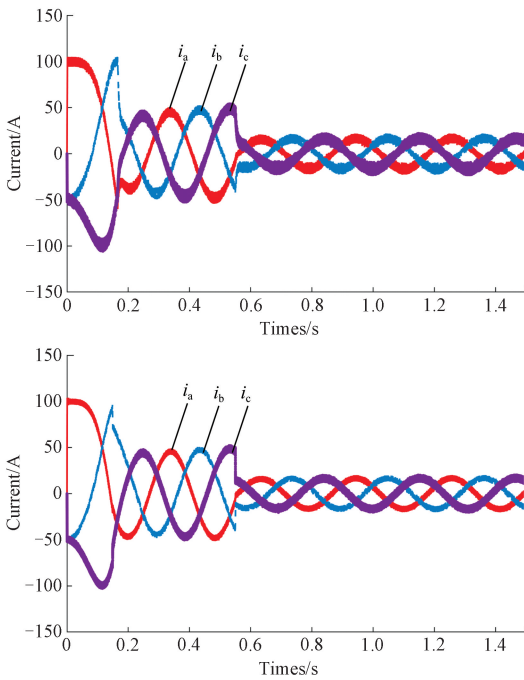


图 10 (a)传统模型预测控制的三相电流;  
(b)改进型模型预测控制的三相电流

Fig. 10 (a) Three-phase current of traditional MPC;  
(b) three-phase current of improved MPC

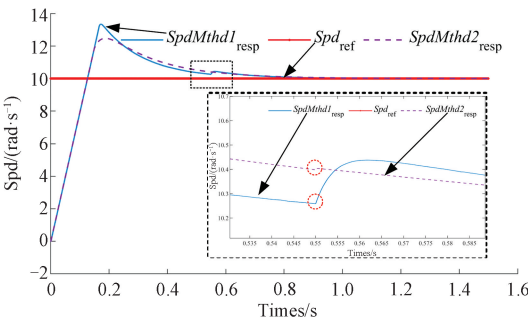


图 11 电机的目标转速与实际响应转速

Fig. 11 The target speed and actual response speed of the motor

### 3 结 论

在分析现有永磁同步电机控制方法的基础之上,针对传统模型预测控制策略转速及转矩波动较大的问题,并基于 PMSM 离散化模型和模型预测控制策略,提出了一个基于开关状态随机转移约束的模型预测控制策略,通过开关状态历史数据计算开关切换序列的转移概率,并获得状态转移概率矩阵,然后通过当前开关状态以及状态转移矩阵获得转移约束误差项,将该误差项作为代价函数的一个约束项,再结合驱动误差项、跟随误差项等通过代价函数对下一时刻的控制变量寻优,获得优化的

开关切换状态。分别针对传统模型预测控制策略和改进型模型预测控制策略进行了仿真分析,仿真结果表明本研究所提出的改进型模型预测控制策略较传统模型预测控制策略具有更好的转矩、转速响应特性,验证了本文所提出的改进型模型预测控制策略能够在减小转速波动和转矩波动方面的有效性和可行性,为进一步研究纯电动汽车乘坐舒适性提供了理论依据。

### 参考文献

[ 1 ] CHENG M, SUN L, BUJA G, et al. Advanced electrical machines and machine-based systems for electric and hybrid vehicles [ J ]. Energies, 2015, 8 ( 9 ): 9541-9564.

[ 2 ] HU S, LIANG Z P, ZHANG W, et al. Research on the integration of hybrid energy storage system and dual three-phase PMSM drive in EV [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 65(8) : 6602-6611.

[ 3 ] FODOREAN D, IDOUMGHAR L, BRÉVILLIERS M, et al. Hybrid differential evolution algorithm employed for the optimum design of a high-speed PMSM used for EV propulsion [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64( 12 ): 9824-9833.

[ 4 ] MOREL F, LIN-SHI X F, RETIF 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, 2009, 56(7) : 2715-2728.

[ 5 ] BOLOGNANI S, BOLOGNANI S, PERETTI L, et al. Design and implementation of model predictive control for electrical motor drives [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 56(6) : 1925-1936.

[ 6 ] WANG F X, MEI X Z, RODRIGUEZ J, et al. Model predictive control for electrical drive systems-an overview [ J ]. CES Transactions on Electrical Machines and Systems, 2017, 1(3) : 219-230.

[ 7 ] ACIEGO J J, PRIETO I G, DURAN M J. Model predictive control of six-phase induction motor drives using virtual voltage vectors [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 7(1) : 321-330.

[ 8 ] CIMINI G, BERNARDINI D, LEVIJOKI S, et al. Embedded model predictive control with certified real-time optimization for synchronous motors [ J ]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, DOI: 10.1109/tcst.2020.2977295.

[ 9 ] BARRERO F, BERMÚDEZ M, MARTÍN C, et al. Predictive current control in electrical drives: an illustrated review with case examples using a five-phase induction motor drive with distributed windings [ J ]. IET

- Electric Power Applications, 2020, 14(8): 1291-1310.
- [10] LIU F Y, KANG E L, CUI N Z. Single - loop model prediction control of PMSM with moment of inertia identification. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2020, 15(4): 577-583.
- [11] ZHANG Y C, XU D L, LIU J L, et al. Performance Improvement of Model-Predictive Current Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53 ( 4 ): 3683-3695.
- [12] ZHANG, Y, YANG H. Two-vector-based model predictive torque control without weighting factors for induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(2): 1381-1390.
- [13] SIAMI M, ARAB KHABURI D, RODRIGUEZ J. Simplified finite control set-model predictive control for matrix converters-fed PMSM drives [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 ( 3 ): 2438-2446.
- [14] YUAN X, ZHANG S, ZHANG C N, et al. Enhanced robust deadbeat predictive current control for PMSM drives[J]. IEEE Access, 2019(7): 148218-148230.
- [15] 申永鹏, 郑竹风, 王耀南, 等. 基于 PLL 自适应滑模观测器的 PMSM 无传感器控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 22-29.  
SHEN Y, ZHENG Z, WANG Y, et al. Adaptive sliding mode observer based on PLL in sensorless control of PMSM [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 ( 8 ): 22-29
- [16] 齐晓东, 高锋阳, 李晓峰, 等. 表贴式永磁同步电机新型偏心磁极优化设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(8): 93-100.  
QI X D, GAO F Y, LI X F, et al. Optimal design of new eccentric magnet pole for surface mounted permanent magnet synchronous motors [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34 ( 8 ): 93-100.
- [17] Rodriguez J, Kazmierkowski P M, Espinoza R J, et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 9(2): 1003-1016.
- [18] MIRANDA H, CORTES P, YUZ J I, et al. Predictive torque control of induction machines based on state-space models [ J ]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6): 1916-1924.
- [19] PANAGIOTIS K, ABU-RUB H. Predictive speed control with short prediction horizon for permanent magnet synchronous motor drives [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(3): 2740-2750.
- [20] LOGOFET D, EKATERINA V. The mathematics of Markov models: what Markov chains can really predict in forest successions [ J ]. Ecological modelling, 2000, 126 (2-3): 285-298.

### 作者简介



高俊(通信作者), 2015 年于西南大学获得学士学位, 2018 年于重庆大学获得硕士学位, 现为重庆电子工程职业学院教师, 主要研究方向为汽车动力传动系统及其综合控制、新能源汽车驱动控制。

E-mail: gaoj315@gmail.com

**Gao Jun** (Corresponding author) received his B. Sc. degree in 2015 from Southwest University, received his M. Sc. degree in 2018 from Chongqing University. Now he is a teacher of Chongqing College of Electronic Engineering. His main research interests include research on automotive powertrain and its integrated control, electric vehicle drive control.