

## 不同代价函数下永磁同步电机模型预测控制参数失配可视化分析

### 用户与研究成果简介：

郑州轻工业大学郭磊磊（副教授）科研团队提出一种永磁同步电机模型预测控制参数灵敏性可视化分析方法，以“可视化”的方式详细分析了使用不同代价函数时电机电阻、电感、磁链等参数失配对最优电压矢量选择规律的影响，为实现模型预测控制预测误差补偿控制提供了坚实的理论依据。最后，利用上海远宽的 StarSim 电力电子小步长实时仿真器在永磁同步电机上进行了实验研究，验证了所提分析方法的可行性和分析结果的正确性，并把成果总结发表于《电工技术学报》。

郭磊磊,王朋帅,李琰琰等. 不同代价函数下永磁同步电机模型预测控制参数失配可视化分析 [J]. 电工技术学报, 2023, 38 (04): 903-914. DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.220074

### 研究意义与现状

永磁同步电机（Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM）以其结构简单、效率高、功率密度大等优点，在电动汽车、飞轮储能、风力发电等领域得到了广泛的应用。近年来，磁链定向矢量控制和直接转矩控制由于可以提高 PMSM 控制性能而得到广泛的研究与应用。然而，PMSM 的磁链定向矢量控制虽然可以实现转矩和磁链解耦控制，但其动态和稳态控制性能依赖于比例积分控制器。直接转矩控制虽然是一种简单有效的 PMSM 控制方法，但开关频率不恒定，稳态控制性能较差。

随着现代控制理论以及微处理器技术的快速发展，越来越多的新型控制策略被广泛研究以解决 PMSM 常规控制策略所存在的不足，包括滑模控制、自抗扰控制、神经网络控制、模型预测控制等。其中，模型预测控制具有概念清晰、实现简单、并能同时控制多个非线性目标等优点。因此，近年来，诸多学者开展了 PMSM 的模型预测控制研究。然而，电流预测模型中的电阻、电感等参数易受到非线性因素以及工作负载变化的影响，从而产生模型参数失配问题，最终会削弱电流模型预测控制的鲁棒性和动态响应能力。

现有的 PMSM 模型预测控制参数灵敏性分析方法仅仅通过利用 PMSM 的数学模型推导参数失配时的电流预测误差，往往忽略了逆变器仅具有有限个开关状态的特征。对 PMSM 模型预测控制而言，参数失配会影响最优电压矢量的选择，而最优电压矢量的选择才会进一步影响电流控制误差。因此，有必要研究参数失配对最优电压矢量选择规律的影响。

本文针对 PMSM 模型预测控制中模型参数失配问题，提出了一种可视化分析方法，分别研究了不同参

数失配对不同代价函数下 PMSM 模型预测控制系统的影响，给出了不同条件下最优矢量选择的变化规律。同时，本文利用 Matlab 算法对所有参考电压下所选最优电压矢量进行可视化表达，通过可视化方法分析参数失配对不同代价函数下最优电压矢量选择的影响和区别，为实现模型预测误差补偿控制提供坚实的理论依据。StarSim 实验研究验证了所提分析方法的可行性和有效性。

## PMSM 常规模型预测电流控制策略

图 1 所示为两电平电压源逆变器驱动 PMSM 的拓扑结构，图中， $u_{dc}$  为直流母线电压， $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为三相电流。两电平电压源逆变器有 8 种不同的开关状态，可得 8 种对应的电压矢量，如图 2 所示。

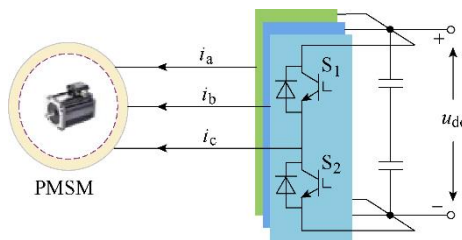


图 1 PMSM 驱动系统的拓扑

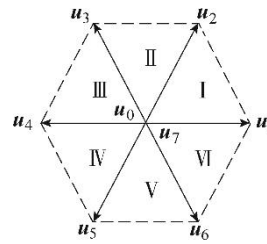


图 2 电压矢量

假设采样周期为  $T_s$ ，根据 PMSM 的数学模型可得预测电流表达式为

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta}(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) \mathbf{i}_{\alpha\beta}(k) + \frac{T_s}{L_s} [\mathbf{u}_{\alpha\beta}(k) - \mathbf{e}_{\alpha\beta}(k)] \quad (1)$$

为了补偿一阶延迟效应，首先将上一周期应用的最优电压矢量  $\mathbf{u}_k$  代入式 (1)，计算  $k+1$  时刻的电流  $\mathbf{i}_{\alpha\beta}(k+1)$ ，其中  $\mathbf{u}_k = [u_{\alpha}(k) \ u_{\beta}(k)]^T$ 。然后，将图 2 中所示的 8 个电压矢量代入式 (2)，预测第  $k+2$  时刻的电流  $\mathbf{i}_{\alpha\beta}(k+2)$  为

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta}(k+2) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) \mathbf{i}_{\alpha\beta}(k+1) + \frac{T_s}{L_s} [\mathbf{u}_{\alpha\beta}(k+1) - \mathbf{e}_{\alpha\beta}(k+1)] \quad (2)$$

为了得到最优电压矢量，需要建立一个代价函数，以评估其控制误差。然后通过对 8 个电压矢量遍历寻优得到使代价函数最小的电压矢量作为最优电压矢量，用于下一周期的 PMSM 控制。通常会选取三种形式的代价函数进行误差评估，有

$$g_m = |i_{\alpha}^* - i_{\alpha}(k+2)| + |i_{\beta}^* - i_{\beta}(k+2)| \quad (3)$$

$$g_n = [i_{\alpha}^* - i_{\alpha}(k+2)]^2 + [i_{\beta}^* - i_{\beta}(k+2)]^2 \quad (4)$$

$$g_k = \sqrt{[i_{\alpha}^* - i_{\alpha}(k+2)]^2 + [i_{\beta}^* - i_{\beta}(k+2)]^2} \quad (5)$$

式中， $i_{\alpha}^*$ 、 $i_{\beta}^*$  为参考电流。整个算法的控制框图与文献[5]所示传统模型预测控制框图一致。

## PMSM 模型参数匹配的可视化分析

图 3 所示为三相两电平逆变器的 7 种电压矢量在  $\alpha\beta$  平面的原始泰森多边形分割图，对应理想的最优电压矢量分布规律。电压矢量  $u_0 \sim u_7$  在  $\alpha\beta$  复平面上构成泰森多边形图的一组点（位）。相邻两个区域相交的黑色线段与最近两个点的距离相等；相邻 3 个区域相交的结点到最近 3 个点的距离相等。

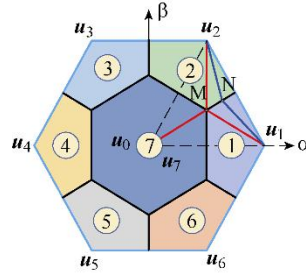


图 3 原始泰森多边形分割图

以原始泰森多边形分割图作为所有参考电压矢量下最优电压矢量的标准区域分布，进而在参数匹配情况下，利用所提可视化方法分析模型预测控制中不同代价函数对最优电压矢量选择的差异。首先，采用前向差分法可得：

$$\frac{i_{\alpha\beta}(k+2) - i_{\alpha\beta}(k+1)}{T_s} = -\frac{R_s}{L_s} i_{\alpha\beta}(k+1) + \frac{u_{\alpha\beta}(k+1)}{L_s} - \frac{e_{\alpha\beta}(k+1)}{L_s} \quad (6)$$

结合无差拍理论可知，为了保证  $k+2$  时刻电流控制误差为零，需满足

$$i_{\alpha\beta}(k+2) = i_{\alpha\beta}^* \quad (7)$$

将式 (7) 代入式 (6) 可得参考电压矢量表达式，满足

$$u_{\alpha\beta}^* = R_s i_{\alpha\beta}^*(k+1) + e_{\alpha\beta}(k+1) + L_s \frac{i_{\alpha\beta}^* - i_{\alpha\beta}(k+1)}{T_s} \quad (8)$$

式中， $u_{\alpha\beta}^*$  为参考电压矢量。

其次，将三种电流误差代价函数与式 (2)、式 (8) 联立可得

$$g_m = \frac{T_s}{L_s} \left[ |u_{\alpha}^* - u_{\alpha}(k+2)| + |u_{\beta}^* - u_{\beta}(k+2)| \right] \quad (9)$$

$$g_n = \left( \frac{T_s}{L_s} \right)^2 \left\{ [u_{\alpha}^* - u_{\alpha}(k+2)]^2 + [u_{\beta}^* - u_{\beta}(k+2)]^2 \right\} \quad (10)$$

$$g_k = \frac{T_s}{L_s} \sqrt{[u_{\alpha}^* - u_{\alpha}(k+2)]^2 + [u_{\beta}^* - u_{\beta}(k+2)]^2} \quad (11)$$

因此，结合无差拍原理可将式 (3) ~ 式 (5) 所示电流误差代价函数等价转化为电压误差代价函数。

然后，定义  $g_{m\omega}$ 、 $g_{n\omega}$ 、 $g_{k\omega}$  为电压矢量  $u_i$  作用时对应的模和、欧氏范数平方、欧氏范数三种形式的代价

函数。单矢量模型预测代价函数几何分析如图 4 所示，以参考电压矢量  $u^*$  位于扇区 I 为例，利用三种代价函数分别对扇区 I 内电压矢量  $u_0$ 、 $u_1$ 、 $u_2$  进行最优选择，即选择使代价函数最小的电压矢量，有

$$G_1 = \min(g_{mu0}, g_{mu1}, g_{mu2}) \quad (12)$$

$$G_2 = \min(g_{nu0}, g_{nu1}, g_{nu2}) \quad (13)$$

$$G_3 = \min(g_{ku0}, g_{ku1}, g_{ku2}) \quad (14)$$

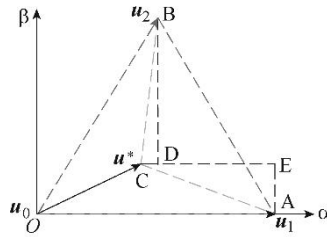


图 4 单矢量模型预测代价函数几何分析

最后，代入电机参数，并利用 Matlab 算法分别画出扇区 I 内所有参考电压矢量下基于三种代价函数所选最优电压矢量的可视化平面图，如图 5 所示。其中，黑色实线为原始泰森多边形分割线，红色区域内电压矢量  $u_0$  控制最优，绿色区域内电压矢量  $u_1$  控制最优，蓝色区域内电压矢量  $u_2$  控制最优。由图 5 可见，模型预测控制中不同代价函数对最优电压矢量的选择存在差异。其中，式 (10) 和式 (11) 所示两种欧氏范数形式的代价函数控制效果相同。

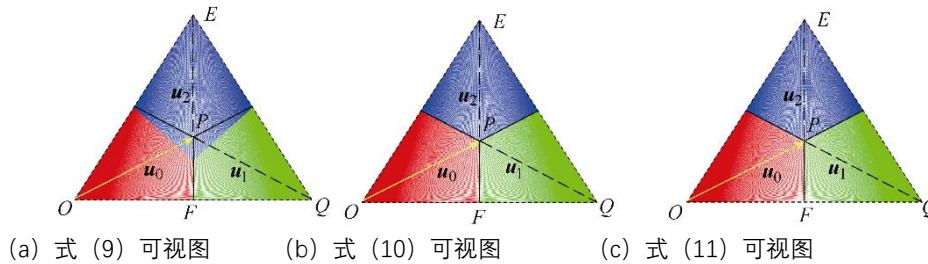


图 5 三种代价函数的模型预测控制可视化算法（扇区 I）

同理，当参考电压矢量位于所有扇区内任意位置时，利用相同的方法，可以分别得到三种代价函数对 7 种电压矢量最优选择的可视化表达，如图 6 所示。

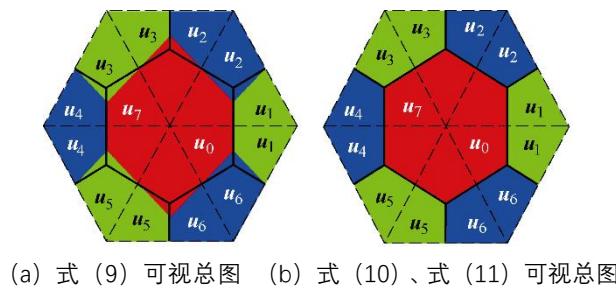


图 6 三种代价函数的模型预测控制可视化总平面图

通过对比可知，两种欧氏范数形式的代价函数使得每个扇区所对应的 3 个电压矢量利用率相等，与上述泰森多边形分割图一致。而模和代价函数下最优电压矢量的区域划分与泰森多边形分割并不完全相同，相比较而言，矢量  $u_1$  和  $u_4$  的利用率较低。因此，从最优电压矢量区域划分可见，两种欧氏范数形式的代价函数的控制效果较好。

## PMSM 模型参数不匹配误差分析

### 定子电感不匹配误差分析

由于模型参数电感  $L_s$  与参考电压矢量呈正相关，因此，当电感增大或减小时，参考电压也随之增大或减小。电感不匹配的参考电压矢量空间位置变化如图 7 所示，当电感偏大时，参考电压矢量  $u^*$  空间位置将变化至  $u'$ 。同理，当电感偏小时，参考电压矢量  $u^*$  空间位置将变化至  $u''$ 。此时，代价函数在最优电压矢量选择上将产生偏差。

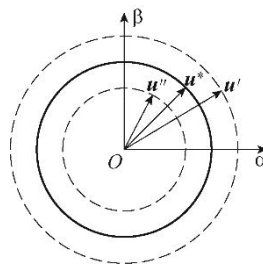


图 7 电感不匹配的参考电压矢量空间位置变化

本文同样采用所提可视化方法对该误差进行分析，结果如图 8、图 9 所示。

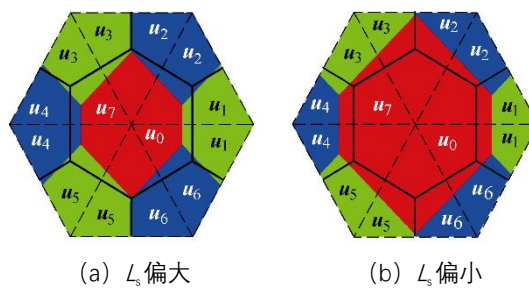


图 8 式 (9) 的电感不匹配模型预测控制可视化算法

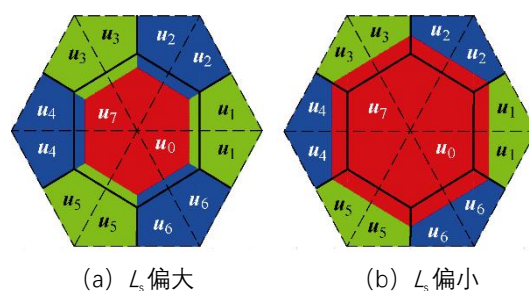


图9 式(10)和式(11)的电感不匹配模型预测控制可视化算法

图8a、图9a所示为当电感偏大导致参考电压矢量增大为正常值的1.2倍时，最优电压矢量区域分布的可视化算法。可见，零矢量选择区域均匀减小，非零矢量选择区域则均匀增大。相反，当电感偏小导致参考电压矢量减小为正常值的0.8倍时，零矢量选择区域将会均匀增大，非零矢量选择区域将会均匀减小。同时，两类代价函数对矢量选择同样存在差异。例如，在原始泰森多边形 $u_1$ 控制最优区域内，当 $L_s$ 偏小时，两种欧氏范数代价函数下电压矢量 $u_1$ 利用率较高。从最优电压矢量区域的整体偏移位置可见，两种欧氏范数代价函数下最优电压矢量区域划分更接近原始泰森多边形分割，而模和代价函数所选最优电压矢量区域划分偏移较大，因此，模和代价函数的控制效果较差。

### 电机磁链不匹配误差分析

首先，由PMSM模型可知，同步速度 $\omega_r$ 与电机反电动势成正比例关系，同步速度 $\omega_r$ 越大，磁链不匹配对系统的影响也越大。因此，磁链不匹配对高速状态下的电机系统影响较大，而对低速状态的电机系统影响较小。

其次，反电动势波形示意图如图10所示，当转子角 $\theta_r$ 位于 $[0, \pi/2]$ 区间时，反电动势分量 $e_\alpha < 0$ ， $e_\beta > 0$ ，此时，电机磁链与参考电压矢量 $\alpha$ 轴分量呈负相关，与 $\beta$ 轴分量呈正相关。相反，当转子角 $\theta_r$ 位于 $[\pi, 3\pi/2]$ 区间时，反电动势分量 $e_\alpha > 0$ ， $e_\beta < 0$ ，此时，电机磁链与参考电压矢量 $\alpha$ 轴分量转变为正相关，与 $\beta$ 轴分量转变为负相关。

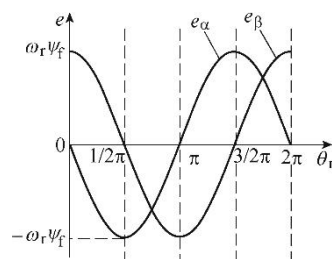


图10 反电动势波形示意图

图11为当磁链不匹配时，参考电压矢量在转子角 $\theta_r$ 位于 $[0, \pi/2]$ 和 $[\pi, 3\pi/2]$ 区间内的空间位置变化。当 $[0, \pi/2]$ 区间磁链偏大或者 $[\pi, 3\pi/2]$ 区间磁链偏小时，参考电压矢量 $u^*$ 空间位置将变化至 $u'$ ，同时变化范围受同步速度 $\omega_r$ 影响。相反，当 $[0, \pi/2]$ 区间磁链偏小或者 $[\pi, 3\pi/2]$ 区间磁链偏大时，参考电压矢量 $u^*$ 空间位置将变化至 $u''$ ，变化范围同样受同步速度 $\omega_r$ 影响。基于参考电压矢量 $u'$ 和 $u''$ 采用所提可视化方法分析，结果如图12、图13所示。

由图12a和图13a可见，当磁链不匹配引起参考电压矢量 $\alpha$ 轴分量偏小、 $\beta$ 轴分量偏大时，零矢量选择区域按照左右方向增大、上下方向缩小进行变化，非零矢量则根据零矢量变化而变化，其变化范围受同步

速度 $\omega$ 影响。同理，根据图 12b 和图 13b 可知，当磁链不匹配引起参考电压矢量 $\alpha$  轴分量偏大、 $\beta$  轴分量偏小时，上述变化则相反。同时，该结果同样表明两类代价函数对矢量选择存在差异。从最优电压矢量区域的整体偏移位置可见，两种欧氏范数代价函数下最优电压矢量区域划分同样更接近原始泰森多边形分割，因此，欧氏范数代价函数的控制效果较优。

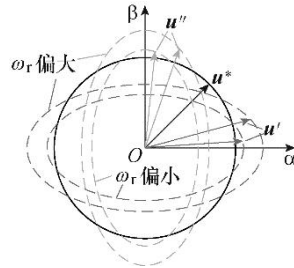
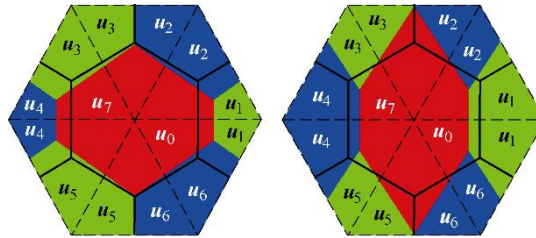
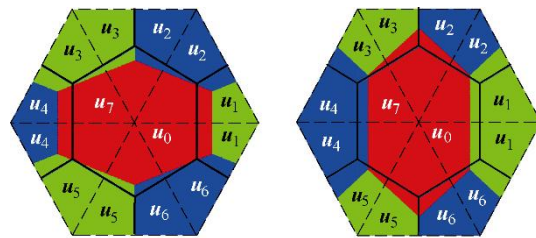


图 11 磁链不匹配的参考电压矢量空间位置变化



(a)  $[0, \pi/2] \psi_f$  偏大或  $[\pi, 3\pi/2] \psi_f$  偏小 (b)  $[0, \pi/2] \psi_f$  偏小或  $[\pi, 3\pi/2] \psi_f$  偏大

图 12 式 (9) 的磁链不匹配模型预测控制可视化算法



(a)  $[0, \pi/2] \psi_f$  偏大或  $[\pi, 3\pi/2] \psi_f$  偏小 (b)  $[0, \pi/2] \psi_f$  偏小或  $[\pi, 3\pi/2] \psi_f$  偏大 图 13 式 (10) 和式 (11) 的磁链不匹配模型预测控制可视化算法

此外，当转子角 $\theta_r$ 位于 $[\pi/2, \pi]$ 和 $[3\pi/2, 2\pi]$ 区间时，电机磁链与参考电压矢量分别呈负相关和正相关。此时，电机磁链对参考电压矢量的影响与电感类似，因此，图 8 和图 9 所示电感参数不匹配下最优电压矢量的偏移状态也可用来表示该条件下磁链不匹配影响，其变化范围同样受到同步速度 $\omega_r$ 影响。综上所述，磁链不匹配对参考电压矢量的影响较为复杂，本文所提可视化方法证明了磁链不匹配对系统的多种影响。

### 实验验证

为了验证本文所提可视化方法的有效性和可行性，搭建了如图 14 所示 StarSim HIL 测试实验平台。实验中，采样频率均为 10kHz。

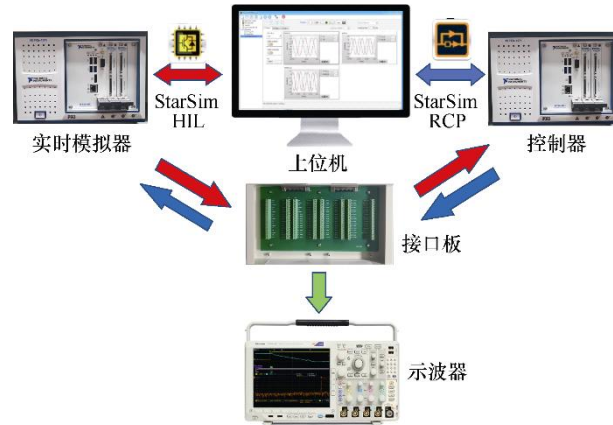


图 14 StarSim HIL 测试实验平台

为了验证本文所提方法的有效性，本节在转速环下进行电感和磁链失配时的实验对比研究。此外，为了便于在实验中更清晰地对比模型参数不匹配时模型预测控制在两类代价函数下控制误差的区别，本文定义式 (15) 所示总电流误差。通过研究模型预测控制在两类代价函数下的总电流误差即可对比相应的控制误差。

$$i_0 = \sqrt{[i_{\alpha\text{ref}} - i_{\alpha}(k)]^2 + [i_{\beta\text{ref}} - i_{\beta}(k)]^2} \quad (15)$$

式中， $i_{\alpha\text{ref}}$ 、 $i_{\beta\text{ref}}$  为参考电流； $i_{\alpha}(k)$ 、 $i_{\beta}(k)$  为实际电流。

图 15 所示为负载转矩在 10N·m 时，PMSM 在参数匹配情况下参考转速由 150r/min 突增到额定转速 1 000r/min 的转速动态响应性能。图 16 对比研究了 PMSM 在相同的转矩、转速工况下电感参数不匹配的转速动态响应性能，其中，图 16a 电感参数增大两倍，图 16b 电感参数缩小一半。对比图 15 和图 16 可见，当电感偏大时，电流波形明显变粗；当电感偏小时，电流波形有较大畸变。此外，两种情况其总电流误差有效值  $i_{0\text{RMS}}$  也均大于参数匹配的电流误差有效值。实验结果与可视化分析结果一致，表明电感参数偏大或偏小对系统均有较大影响。

同时，对比图 15 和图 16 可见，在相同条件下，PMSM 模型预测控制在两类代价函数下具有近似的转速跟随性能。然而，在动态过程中，两种欧氏范数代价函数的模型预测控制方法电流纹波稍小。对比两类代价函数下的总电流误差可见，参数匹配和失配条件下欧氏范数代价函数的总电流误差有效值均小于模和代价函数。结果表明，欧氏范数代价函数有较好的控制效果。实验结果验证了本文所提可视化方法的正确性与有效性。



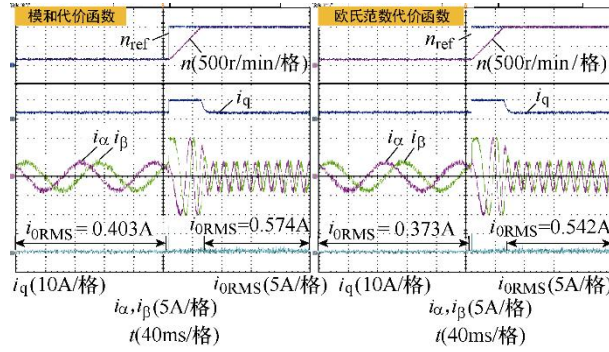
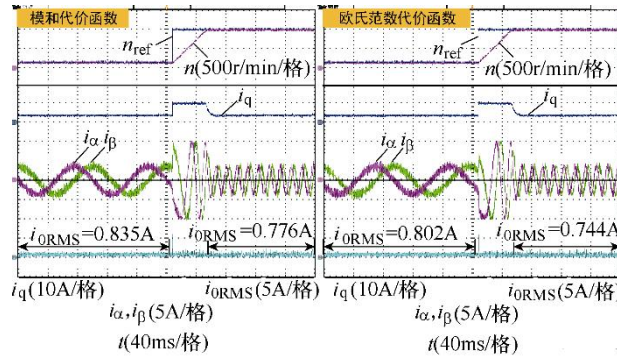
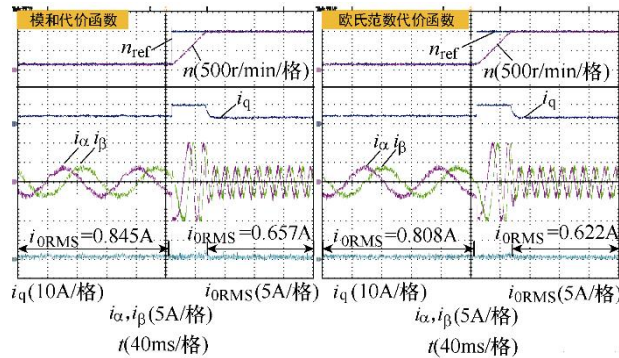


图 15 参数匹配的转速环加速实验结果



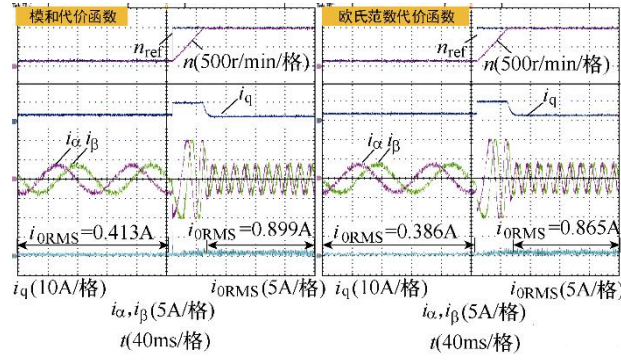
(a)  $L_s$  偏大



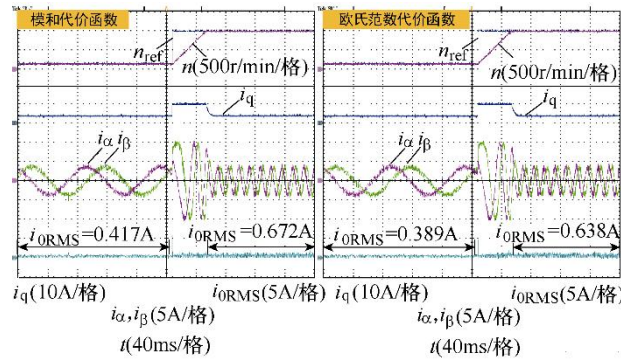
(b)  $L_s$  偏小

图 16 电感失配的转速环加速实验结果

图 17 对比研究了 PMSM 在与参数匹配相同的转矩、转速工况下，磁链参数不匹配的转速动态响应性能，其中，图 17a 磁链参数增大两倍，图 17b 磁链参数缩小一半。对比图 15 和图 17 可见，在低速情况下，电机在磁链不匹配时的电流纹波与磁链匹配时近似，其总电流误差有效值  $i_{0RMS}$  仅稍大于磁链匹配的电流误差有效值。然而，在高速情况下，电机在磁链不匹配时的电流纹波明显较磁链匹配时大，其总电流误差有效值也明显大于磁链匹配的电流误差有效值。同时，对比图 17a 和图 17b 在不同代价函数下的电流波形以及总电流误差可见，欧氏范数代价函数同样有较好的控制效果。实验结果与可视化分析结果一致，表明了本文所提可视化方法的正确性与有效性。



(a)  $\psi$  偏大



(b)  $\psi$  偏小

图 17 磁链失配的转速环加速实验结果

此外，为了进一步验证所提可视化方法的正确性与有效性，本文对突加负载实验进行了对比研究。

图 18 给出了参数匹配时，在额定转速 1000r/min 下电机从空载到满载（25N·m）再到空载的动态实验结果对比。图 19 所示为电机在相同的转速和加载条件下，电感参数不匹配的电流动态响应性能，其参数变化同加速实验一致。对比图 18 和图 19 可见，在突加、突减负载时，电机转速都分别略有降低和升高，但均能快速回到给定值。然而，对比电流纹波及总电流误差可见，电感参数失配对电机系统有明显较大的影响。同时，两种欧氏范数代价函数下的电流纹波及总电流误差有效值均较模和代价函数小。因此，欧氏范数代价函数有更好的控制效果。实验结果同样验证了本文所提可视化方法的正确性与有效性。

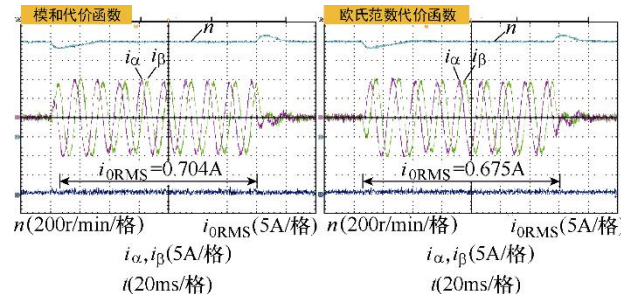
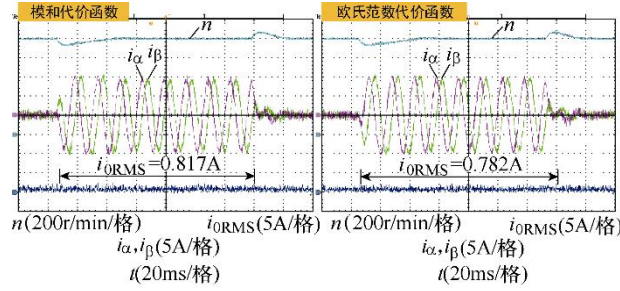
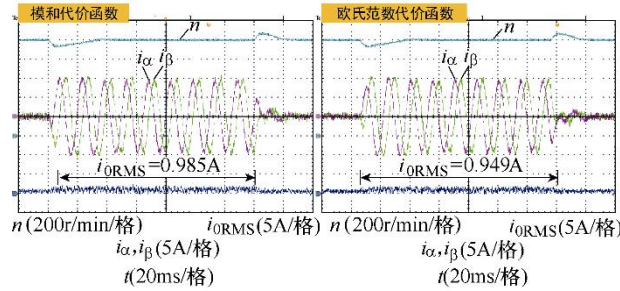


图 18 参数匹配的转速环突加负载实验结果



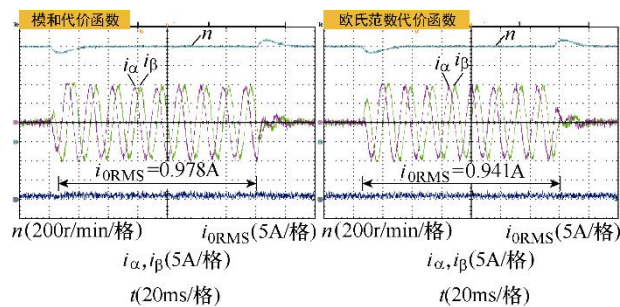
(a)  $L_s$  偏大



(b)  $L_s$  偏小

图 19 电感参数失配的转速环突加负载实验结果

图 20 所示为磁链参数不匹配时，同样在额定转速 1000r/min 下电机从空载到满载（25N·m）再到空载的动态实验结果对比，其参数变化同加速实验一致。对比图 18 和图 20 可见，磁链参数不匹配的电流纹波及总电流误差均较参数匹配时的大，这是由于加载实验在额定转速下进行，磁链不匹配对系统的影响也会较大。此外，在相同的磁链失配条件下，不同代价函数的模型预测控制在突加、突减负载时均有近似的动态响应性能。然而，对比电流纹波及总电流误差可见，两种欧氏范数代价函数下的电流纹波及总电流误差有效值同样较模和代价函数小。结果同样表明了欧氏范数代价函数有更好的控制效果。实验结果进一步验证了本文所提可视化分析方法的正确性与有效性。



(a)  $\psi_r$  偏大

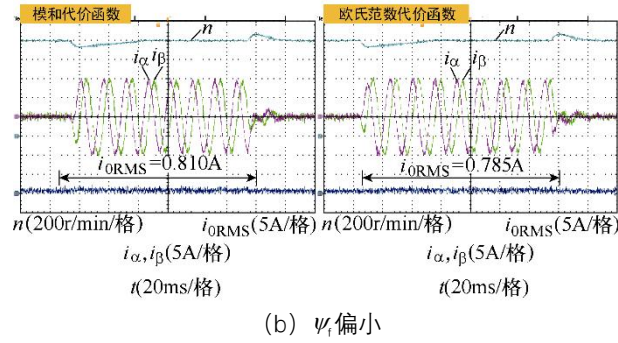


图 20 磁链参数失配的转速环突加载实验结果

## 结论

本文结合无差拍控制原理针对 PMSM 模型预测控制中模型参数失配问题提出了一种可视化分析方法，分别研究了电阻、电感以及磁链等不同模型参数失配对参考电压矢量的关系及其影响。所得主要结论包括：

- 1) 论文首次提出了基于可视化分析的永磁同步电机模型预测控制参数失配分析方法，给出了不同参数失配下最优电压矢量选择规律的变化机理；
- 2) 分析结果表明，不同参数失配下最优电压矢量（零矢量及非零矢量）的分布规律会发生变化，进而影响零矢量及非零矢量的选择次数，进而会增大电流纹波（如  $L_s$  偏大时）或增大电流畸变（如  $L_s$  偏小时）；
- 3) 所提参数失配可视化分析方法可进一步扩展到多矢量模型预测控制领域；
- 4) 所提参数失配可视化分析方法可为进一步研究鲁棒模型预测控制策略提供一定的研究基础。