

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407650

基于信号注入法的永磁同步电机参数辨识对比分析*

杨公德^{1,2} 陈宇翔^{1,2} 王 朋³
(1. 福州大学电气工程与自动化学院 福州 350108; 2. 福建省新能源发电与电能变换重点实验室 福州 350108;
3. 谢菲尔德大学电子电气工程学院 谢菲尔德 S1 3JD)

摘 要:为揭示信号注入法中不同信号类型及其频率幅值对永磁同步电机参数辨识精度和控制性能的影响,对方波、梯形波、三角波和正弦波4种信号注入法进行了仿真及实验对比分析。首先,根据注入信号特点将方波和梯形波归为局部恒定信号,将三角波和正弦波归为全局时变信号,并基于遗忘因子递推最小二乘法构建两类信号注入法的参数辨识模型。其次,仿真分析两类注入信号频率和幅值对待辨识参数的辨识结果影响,综合考虑各待辨识参数的辨识精度,合理选取注入信号的频率和幅值。在此基础上,对比分析4种信号注入法的参数辨识结果,并评估系统控制性能。最后,搭建实验平台进行参数辨识实验验证。结果表明:局部恒定信号注入的参数辨识精度高于全局时变信号注入的参数辨识精度,但前者对系统控制性能影响大于后者对系统控制性能影响,其中梯形波注入具有最高的辨识精度,三角波注入对系统控制性能的影响最小。

关键词:参数辨识;信号注入法;局部恒定信号;全局时变信号;遗忘因子递推最小二乘法

中图分类号: TN964.3; TM351 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8060

Comparative analysis of parameter identification for permanent magnet synchronous motor based on signal injection method

Yang Gongde^{1,2} Chen Yuxiang^{1,2} Wang Peng³
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
2. Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion, Fuzhou 350108, China;
3. Department of Electronic and Electrical Engineering, University of Sheffield, S1 3JD, UK)

Abstract:To reveal the effects of different signal types, as well as their frequencies and amplitudes, on the accuracy of parameter identification and control performance in the signal injection method for permanent magnet synchronous motor, a comparative analysis through simulation and experimentation was conducted on four signal injection methods: square wave, trapezoidal wave, triangular wave, and sinusoidal wave. Firstly, according to the characteristics of the injected signals, square and trapezoidal waves are categorized as locally constant signals, whereas triangular and sinusoidal waves are categorized as globally time-varying signals. Based on the forgetting factor recursive least square, two categories of parameter identification models for signal injection methods are constructed. Secondly, simulation analysis is performed to investigate the effects of the frequency and amplitude of the two categories of injected signals on the identification results of the parameters pending identification. Comprehensively considering the identification accuracy of each parameter requiring identification, the frequency and amplitude of the injected signals is judiciously chosen. On this basis, comparative analysis of the parameter identification results is conducted and the control performance of the system is evaluated among the four signal injection methods. Finally, an experimental platform is set up to validate the parameter identification through experiments. The outcomes demonstrate that although parameter identification accuracy of locally constant signal injection is higher than that of globally time-varying signal injection, the former has a greater influence on control performance of the system compared to the latter. Among the tested signal injection methods, trapezoidal wave injection achieves the highest identification accuracy, while triangular wave injection has the least effects on the control performance of the system.

Keywords: parameter identification; signal injection method; locally constant signal; globally time-varying signal; forgotten factor recursive least squares

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)具有体积小、结构简单、高功率密度和高效率等优点,广泛应用于新能源汽车、轨道交通和无人机等领域^[1-3]。PMSM 的高性能控制通常需要获取准确的电机参数,如定子电阻、交轴电感、直轴电感与永磁磁链^[4-6]。但 PMSM 在实际运行中,电机参数受到温度以及磁路饱和等影响会发生变化,导致控制系统出现参数失配,降低了电机的控制性能,甚至危及控制系统的稳定性^[7-8]。为使 PMSM 获得良好控制性能并避免控制系统失稳,需实时精确辨识电机参数。

PMSM 参数辨识可分为离线参数辨识和在线参数辨识两类。前者只能获取电机在非运行状态下的电机参数,而后者能够获取电机在运行状态下的电机参数,可满足电机高性能控制要求^[9]。在线参数辨识中,由于 PMSM 在两相旋转坐标系下仅有两个电压方程,而有定子电阻、交轴电感、直轴电感与永磁磁链 4 个待辨识参数,存在着欠秩问题,无法保证辨识结果收敛到实际值^[10]。为解决这一问题,研究者主要采用减少待辨识参数或增加辨识模型秩两类方法。减少待辨识参数通常是将一部分参数设定为已知量,使得待辨识参数满足满秩条件。文献[11]将离线辨识得到的永磁磁链代入电压方程中,进而实现电阻和电感的在线辨识;文献[12]将 PMSM 的参数分为直轴电感、交轴电感和定子电阻、永磁磁链两组,在已知一组参数初值的基础上,将每一组的辨识结果作为已知量用于另一组的辨识,使得两组的辨识均满足满秩条件。减少待辨识参数需提前获取一部分参数初值,且初值精确与否会对辨识结果产生较大影响。增加辨识模型秩的方法可分为无信号注入和信号注入法,无信号注入通常需要利用电磁转矩、温度等信息,如文献[13]通过电磁转矩与交轴电流构建方程,增加了辨识模型的秩;文献[14]通过实验获取定子电阻与温度、永磁磁链与温度和交直流电流的关系表达式,额外增加了两个方程,使辨识模型达到满秩条件;文献[15]利用谐波反电势构建方程,在无需任何信号注入的情况下,增加了辨识模型的秩。根据注入信号的频率,信号注入法可分为高频信号注入法和低频信号注入法^[16]。对于高频信号注入法,文献[17]通过注入高频正弦电压信号先辨识直、交轴电感,再将电感辨识结果用于定子电阻和永磁磁链在线辨识。高频信号注入法不仅需要额外电压传

感器来测量高频电压响应,而且对控制器的带宽要求较高^[18]。常见低频信号注入法包括电流信号注入法和位置角信号注入法。对于位置角信号注入法,文献[19]通过向转子位置角注入方波信号,在无死区影响的情况下辨识电感与永磁磁链;文献[20]通过注入正负对称三角波信号,消除了逆变器非线性对永磁磁链辨识结果影响;文献[21]通过注入零、正、负位置角信号,根据电机 3 种运行状态同时辨识直、交轴电感和永磁磁链。对于电流信号注入法,由于直轴电流对电磁转矩的影响较小,故一般将信号注入到直轴电流参考值。文献[22]注入方波电流信号,文献[23]注入梯形波电流信号,通过获取电机在两组稳态下的电压方程,达到参数辨识满秩要求。文献[24]注入三角波电流信号,文献[25]注入正弦波电流信号,利用电机运行状态变化时的多工作点来解决欠秩问题,实现 PMSM 参数的在线辨识。电流信号注入法注入的信号对电机控制性能有一定影响,但其无需额外硬件,也无需提前获取部分待辨识参数,可同时在线辨识 PMSM 的 4 个参数^[16]。

除解决欠秩问题外,在线参数辨识还需采用合适的实现算法,常用在线参数辨识算法包括遗忘因子递推最小二乘法(forgetting factor recursive least square, FFRLS)、扩展卡尔曼滤波(extended kalman filter, EKF)、模型参考自适应法(model reference adaptive system, MRAS)等^[10]。FFRLS 原理简单、计算量小,易于实现,在参数辨识领域应用广泛^[26];EKF 抗噪声干扰能力强,参数辨识精度高,但计算量大,且某些参数设定较为困难^[27];MRAS 结构简单,计算量较小,但需要设定待辨识参数的初值,并分析自适应律的稳定性以确保参数辨识过程收敛^[28]。

信号注入法解决了参数辨识模型欠秩问题,能够实现 PMSM 的多参数辨识。目前,相关文献仅涉及某一种信号的注入,而对于不同信号注入对参数辨识结果和系统控制性能对比分析的研究鲜有报道,因此对方波、梯形波、三角波和正弦波电流信号注入法开展 PMSM 参数辨识对比分析研究。根据注入信号特点将方波和梯形波归为局部恒定信号,将三角波与正弦波归为全局时变信号,并基于 FFRLS 构建两类信号注入法对应的参数辨识模型,仿真分析两类信号频率和幅值对参数辨识结果影响,合理选取注入信号频率和幅值,对比分析 4 种信号注入法的参数辨识结果,并评估各注入信号对系统控制性能影响,为信号注入法中选取合适信号类型及其频率幅值提供了实用参考。

1 信号注入法参数辨识模型

根据注入信号特点,将方波和梯形波归为局部恒定信号,将三角波和正弦波归为全局时变信号。根据局部恒定信号和全局时变信号特点,分析对应参数辨识原理,并基于 FFRLS 构建参数辨识模型。

1.1 局部恒定信号注入参数辨识模型

PMSM 的直、交轴电压方程为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d p i_d - L_q i_q \omega_e \\ u_q = R_s i_q + L_q p i_q + L_d i_d \omega_e + \psi_f \omega_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为直、交轴电压, i_d 、 i_q 分别为直、交轴电流, R_s 为定子电阻, L_d 、 L_q 分别为直、交轴电感, ψ_f 为永磁磁链, ω_e 为电角速度, p 为微分算子。

将局部恒定信号注入到直轴电流参考值,电机在信号恒定时处于稳定运行状态,可忽略式(1)中的电流微分项,再将其离散化为:

$$\begin{cases} u_d(k) = R_s i_d(k) - L_q i_q(k) \omega_e(k) \\ u_q(k) = R_s i_q(k) + L_d i_d(k) \omega_e(k) + \psi_f \omega_e(k) \end{cases} \quad (2)$$

局部恒定信号的两个恒定状态使得电机运行在两种稳定状态,通过获取两组稳态数据,可构成的电压方程组为:

$$\begin{cases} u_d(k_1) = R_s i_d(k_1) - L_q i_q(k_1) \omega_e(k_1) \\ u_q(k_1) = R_s i_q(k_1) + L_d i_d(k_1) \omega_e(k_1) + \psi_f \omega_e(k_1) \\ u_d(k_2) = R_s i_d(k_2) - L_q i_q(k_2) \omega_e(k_2) \\ u_q(k_2) = R_s i_q(k_2) + L_d i_d(k_2) \omega_e(k_2) + \psi_f \omega_e(k_2) \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)改写成矩阵形式为:

$$\mathbf{Y}_{4 \times 1} = \mathbf{X}_{4 \times 4} \boldsymbol{\theta}_{4 \times 1} \quad (4)$$

$$\text{其中, } \mathbf{Y}_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} u_d(k_1) \\ u_q(k_1) \\ u_d(k_2) \\ u_q(k_2) \end{bmatrix}, \boldsymbol{\theta}_{4 \times 1} = \begin{bmatrix} R_s \\ L_d \\ L_q \\ \psi_f \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{X}_{4 \times 4} =$$

$$\begin{bmatrix} i_d(k_1) & 0 & -i_q(k_1) \omega_e(k_1) & 0 \\ i_q(k_1) & i_d(k_1) \omega_e(k_1) & 0 & \omega_e(k_1) \\ i_d(k_2) & 0 & -i_q(k_2) \omega_e(k_2) & 0 \\ i_q(k_2) & i_d(k_2) \omega_e(k_2) & 0 & \omega_e(k_2) \end{bmatrix}$$

为使待辨识参数矩阵 $\boldsymbol{\theta}_{4 \times 1}$ 存在唯一解,系数矩阵 $\mathbf{X}_{4 \times 4}$ 需达成满秩条件为:

$$\begin{cases} i_d(k_1) \neq i_d(k_2) \\ i_d(k_1) i_q(k_2) \neq i_d(k_2) i_q(k_1) \end{cases} \quad (5)$$

当仅注入局部恒定信号到直轴电流参考值时,电机两组稳态数据必定满足式(5)所示满秩条件。

FFRLS 的迭代公式为:

$$\begin{cases} \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \mathbf{K}(k) [\mathbf{y}(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)] \\ \mathbf{K}(k) = \frac{\mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)}{\lambda + \boldsymbol{\varphi}^T(k) \mathbf{P}(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k)} \\ \mathbf{P}(k) = [\mathbf{I} - \mathbf{K}(k) \boldsymbol{\varphi}^T(k)] \mathbf{P}(k-1) / \lambda \end{cases} \quad (6)$$

其中, $\mathbf{K}(k)$ 为增益矩阵, $\mathbf{P}(k)$ 为协方差矩阵, $\boldsymbol{\varphi}(k)$ 为输入量, $\mathbf{y}(k)$ 为输出量, λ 为遗忘因子, $\mathbf{I}$ 为单位矩阵。

基于 FFRLS,构建局部恒定信号注入的参数辨识模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{y}(k) = [u_d(k) \quad u_q(k)]^T \\ \boldsymbol{\varphi}^T(k) = \begin{bmatrix} i_d(k) & 0 & -i_q(k) \omega_e(k) & 0 \\ i_q(k) & i_d(k) \omega_e(k) & 0 & \omega_e(k) \end{bmatrix} \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = [\hat{R}_s \hat{L}_d \hat{L}_q \hat{\psi}_f]^T \end{cases} \quad (7)$$

1.2 全局时变信号注入参数辨识模型

全局时变信号时刻变化,注入时不能忽略电流微分项,离散化后的直、交轴电压方程为:

$$\begin{cases} u_d(k) = R_s i_d(k) + L_d p i_d(k) - L_q i_q(k) \omega_e(k) \\ u_q(k) = R_s i_q(k) + L_q p i_q(k) + L_d i_d(k) \omega_e(k) + \psi_f \omega_e(k) \end{cases} \quad (8)$$

电机运行状态随全局时变信号发生改变,存在多个工作点,易于达到满秩条件。交轴电压方程包含待辨识的四个参数,可仅用交轴电压方程进行参数辨识。基于 FFRLS,构建全局时变信号的参数辨识模型为:

$$\begin{cases} \mathbf{y}(k) = u_q(k) \\ \boldsymbol{\varphi}^T(k) = \begin{bmatrix} i_q(k) & \omega_e(k) i_d(k) & \frac{i_q(k) - i_q(k-1)}{T_s} & \omega_e(k) \end{bmatrix} \\ \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = [\hat{R}_s \hat{L}_d \hat{L}_q \hat{\psi}_f]^T \end{cases} \quad (9)$$

2 仿真对比分析

PMSM 参数辨识系统如图 1 所示,采用 $i_d^* = 0$ 控制,在电机稳定运行后分别将一定频率和幅值的方波、梯形波、三角波及正弦波信号注入到直轴电流参考值,并采用 FFRLS 进行参数辨识,得到待辨识参数的辨识值为 $\hat{R}_s$ 、 $\hat{L}_d$ 、 $\hat{L}_q$ 和 $\hat{\psi}_f$ 。仿真中使用的 PMSM 主要参数如表 1 所示。

2.1 注入信号频率和幅值选取

注入信号频率和幅值均会对辨识结果产生影响,为保证较高辨识精度,对不同频率和幅值的注入信号进行

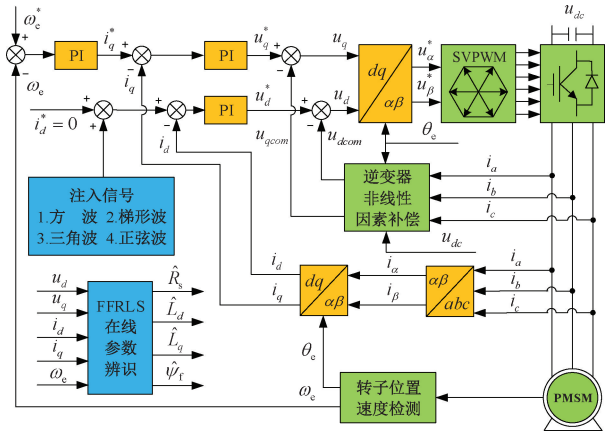


图 1 PMSM 参数辨识系统

Fig. 1 Parameter identification system of PMSM

参数辨识仿真分析。

表 1 PMSM 主要参数

Table 1 Main parameters of PMSM

参数	符号	数值	单位
额定转速	n_N	3 000	r/min
极对数	n_p	5	
额定转矩	T_N	8.34	N · m
转动惯量	J	0.001 94	kg · m ²
定子电阻	R_s	0.7	Ω
直轴电感	L_d	7.2	mH
交轴电感	L_q	8.1	mH
永磁磁链	ψ_f	0.123	Wb

1) 注入信号频率选取

方波和梯形波均为局部恒定信号,以方波信号为例,对不同频率下局部恒定信号注入的参数辨识结果进行仿真分析。设定方波幅值为 2 A,频率分别为 0.625、1.25、2.5、5、10、20、40、80、160 和 320 Hz 时的参数辨识结果如表 2 所示,表中“ $\delta(i)$ ”表示辨识值与实际值的相对误差绝对值, i 代表待辨识参数 R_s 、 L_d 、 L_q 或 ψ_f ;“//”表示辨识值达到了设置的限定值,辨识误差过大。

由表 2 可知,局部恒定信号频率在 2.5~20 Hz 时,4 个待辨识参数的辨识精度均较高。随着局部恒定信号频率从 20 Hz 逐步增大,交轴电感辨识精度始终较高,但定子电阻辨识精度明显下降,永磁磁链和直轴电感辨识精度也有所下降。这是由于局部恒定信号频率增大后,会更频繁地采集状态切换过程数据,且在每个信号注入周期内的有效采样数减少,导致待辨识参数的辨识误差增大。

随着局部恒定信号频率从 2.5 Hz 逐步减小,部分待辨识参数的辨识结果出现发散现象,以注入频率为 0.625 Hz 的方波信号为例,得到 ψ_f 辨识结果如图 2 所示。根据式(3),基于局部恒定信号注入的参数辨识需

要两组电机稳态运行数据以达成满秩条件。当局部恒定信号注入频率过低时,会使电机在一种稳态工况下的运行时间较长,由于 FFRLS 算法中遗忘因子的作用,使得上一组电机稳态数据被逐渐遗忘,从而破坏了两组稳态数据构成的参数辨识满秩条件,导致辨识结果发散。

表 2 不同频率方波信号注入的参数辨识结果

Table 2 Parameter identification results under square wave signal injection at different frequencies

方波频率/Hz	$\delta(R_s)/\%$	$\delta(L_d)/\%$	$\delta(L_q)/\%$	$\delta(\psi_f)/\%$
0.625	52.51	10.04	1.48	16.24
1.25	16.80	1.90	0.02	2.05
2.5	1.81	3.10	0.07	1.03
5	0.69	0.55	0.18	0.77
10	0.44	1.43	0.16	0.68
20	1.07	2.10	0.04	0.85
40	11.63	0.73	0.11	1.28
80	22.37	4.59	0.13	2.48
160	72.37	7.82	0.30	8.29
320	//	11.57	0.29	29.91

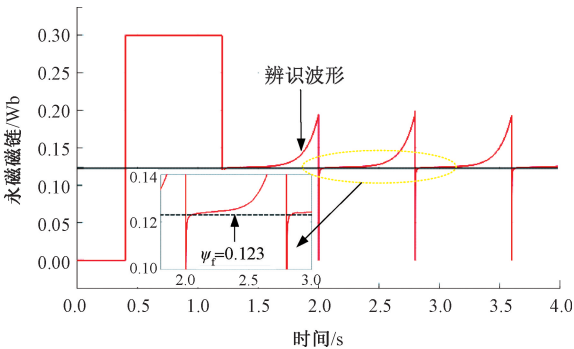


图 2 0.625 Hz 方波信号注入的 ψ_f 辨识结果

Fig. 2 Identification result of ψ_f under square wave signal injection of 0.625 Hz

三角波和正弦波均为全局时变信号,以正弦波信号为例,对全局时变信号注入参数辨识结果受不同频率影响进行仿真分析。设定正弦波幅值为 2 A,频率分别为 0.625、1.25、2.5、5、10、20、40、80、160 和 320 Hz 时的参数辨识结果如表 3 所示。

由表 3 可知,全局时变信号频率在 5~20 Hz 时,4 个待辨识参数的辨识精度较高。随着全局时变信号频率从 20 Hz 逐步增大,直、交轴电感有着较高的辨识精度,但定子电阻辨识精度明显下降,永磁磁链辨识精度也有所下降。当全局时变信号频率增大时,对控制系统的动态响应速度要求也相应增高,若无法快速且准确跟随注入的电流信号参考值,容易导致辨识误差增大。随着全局时变信号频率从 5 Hz 逐步减小,永磁磁链和直、交轴电感的辨识误差明显增大。当全局时变信号频率减小时,注

入电流信号的变化率也随之减小,控制系统更难分辨相邻采样点的数据变化,使得辨识模型不易满足满秩条件,可能造成辨识结果误收敛或发散。综上所述,局部恒定信号和全局时变信号的频率均不宜过低或过高,综合考虑不同频率下各信号注入法的辨识精度,选取 5 Hz 作为后续使用的注入信号频率。

表 3 不同频率正弦波信号注入的参数辨识结果
Table 3 Parameter identification results under sinusoidal wave signal injection at different frequencies

正弦波频率/Hz	$\delta(R_s)/\%$	$\delta(L_d)/\%$	$\delta(L_q)/\%$	$\delta(\psi_f)/\%$
0.625	74.10	10.41	1.14	9.57
1.25	28.30	4.98	0.05	3.16
2.5	10.41	2.41	0.20	2.14
5	0.33	1.18	0.14	0.17
10	1.99	0.49	0.11	1.45
20	1.18	2.37	0.02	1.03
40	11.71	0.06	0.14	1.37
80	20.41	1.82	0.16	2.48
160	54.44	2.57	0.13	6.24
320	//	1.16	0.25	20.85

2) 注入信号幅值选取

为研究局部恒定信号与全局时变信号注入参数辨识结果受注入信号幅值的影响,分别以方波和正弦波信号为例进行仿真分析。设定方波和正弦波频率均为 5 Hz,幅值分别为 0.125、0.25、0.5、1、2、3 和 4 A 时两种信号的参数辨识结果分别如表 4 和 5 所示。

表 4 不同幅值方波信号注入的参数辨识结果
Table 4 Parameter identification results under square wave signal injection at different amplitudes

方波幅值/A	$\delta(R_s)/\%$	$\delta(L_d)/\%$	$\delta(L_q)/\%$	$\delta(\psi_f)/\%$
0.125	//	30.17	10.24	0.17
0.25	88.94	10.17	1.20	0.24
0.5	41.04	4.70	1.35	0.12
1	0.74	2.74	1.63	0.30
2	0.69	0.77	0.55	0.20
3	1.43	1.20	0.65	0.25
4	1.11	1.03	0.06	0.16

表 5 不同幅值正弦波信号注入的参数辨识结果
Table 5 Parameter identification results under sinusoidal wave signal injection at different amplitudes

正弦波幅值/A	$\delta(R_s)/\%$	$\delta(L_d)/\%$	$\delta(L_q)/\%$	$\delta(\psi_f)/\%$
0.125	//	38.73	0.13	51.37
0.25	//	6.06	0.11	13.33
0.5	29.31	6.73	0.02	3.33
1	10.16	0.18	0.20	1.20
2	0.69	0.55	0.18	0.77
3	0.77	0.47	0.21	0.17
4	0.23	0.16	0.16	0.09

由表 4 和 5 可知,局部恒定信号幅值在 1 A 及以上而全局时变信号在 2 A 及以上时,两类辨识方法的辨识精度均较高。随着幅值逐步减小,两类辨识方法的交轴电感辨识误差变化较小,而电阻、永磁磁链和直轴电感误差逐渐增大。随着注入信号幅值逐步增大,局部恒定信号的两组稳态数据区别更加明显,全局时变信号相邻采样点之间的数据差别也更大,更容易满足辨识模型满秩条件,辨识精度较高。然而注入信号幅值越大意味着扰动增大,对系统控制性能的影响也随之增大。综合考虑不同幅值下各信号注入法的辨识精度及注入信号对系统控制性能的影响,选取 2 A 作为后续使用的注入信号幅值。

2.2 4 种信号注入法参数辨识结果对比分析

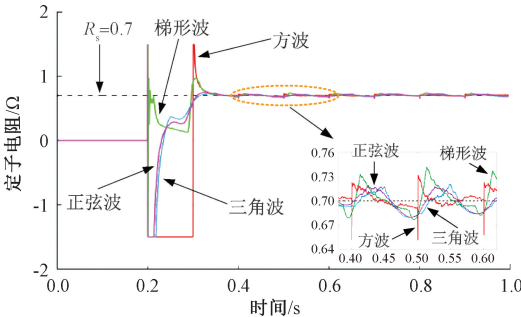
0.2 s 时分别注入频率为 5 Hz 且幅值为 2 A 的方波、梯形波、三角波和正弦波信号到直轴电流参考值,得到 4 种信号注入法的参数辨识结果如图 3(a)~(d)所示。对于局部恒定信号,在 0.3 s 前辨识模型未达到满秩条件,各待辨识参数辨识结果处于发散状态。0.3 s 后辨识模型达成满秩条件,各待辨识参数开始收敛至实际值。对于全局时变信号,理论上只需几组采样点即可使辨识模型达到满秩条件,因此全局时变信号注入参数辨识结果从 0.2 s 时便开始收敛,在 0.3 s 附近收敛至实际值,略快于局部恒定信号注入。

由图 3 可知,方波与梯形波注入的辨识结果在 0.2~0.3 s 中有着较明显区别。方波注入的辨识结果发散且辨识值会达到限定值,而梯形波注入的辨识结果处于一个误收敛过程,辨识值相对更接近实际值。这是由于方波注入在 0.2~0.3 s 内仅有一组稳态下的数据,存在着欠秩问题,造成了辨识的发散;而梯形波存在一段斜变部分,该部分数据与恒定部分数据达成满秩条件,但斜变部分的数据并不满足稳态辨识模型,造成了辨识的误收敛。

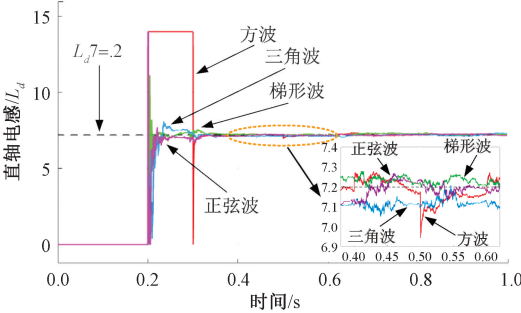
图 4(a)和(b)为方波与梯形波注入的 u_d 和 u_q 波形,可见梯形波信号注入后的 u_d 和 u_q 波形均不存在电压尖峰;而方波注入后 u_d 和 u_q 在信号阶跃瞬间存在很大的电压尖峰,该部分数据的采集导致方波注入的辨识结果也出现了周期性的尖峰。三角波与正弦波注入在辨识精度与收敛时间上相似,在起始收敛速度上略有差异。

2.3 信号注入对系统控制性能影响

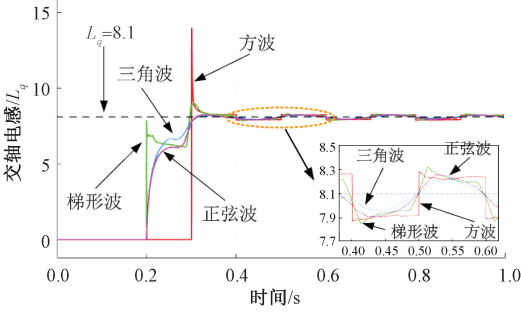
在直轴注入方波、梯形波、三角波或正弦波信号进行参数辨识,除分析在参数辨识精度外,还需评估各信号注入对系统控制性能影响。在直轴电流参考值中分别注入频率为 5 Hz 且幅值为 2 A 的方波、梯形波、三角波和正弦波信号,计算信号注入前后系统的各控制性能参数如直轴电流波动量(Δi_d)、交轴电流波动量(Δi_q)、转矩脉动(ΔT)以及 α 相电流谐波畸变率(THD),其中 Δi_d 与 Δi_q



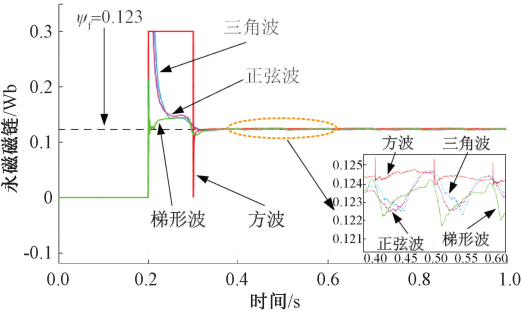
(a) R_s 辨识结果
(a) Identification result of R_s



(b) L_d 辨识结果
(b) Identification result of L_d



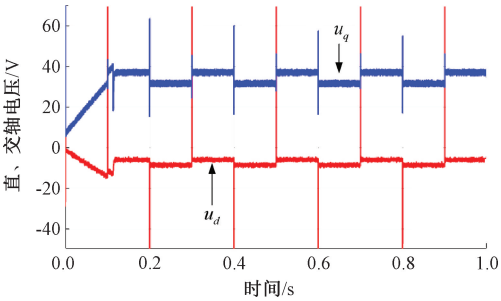
(c) L_q 辨识结果
(c) Identification result of L_q



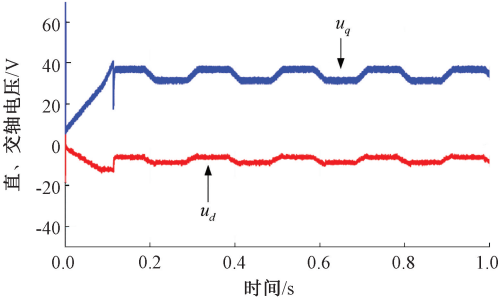
(d) ψ_f 辨识结果
(d) Identification result of ψ_f

图 3 待辨识参数的辨识结果对比

Fig. 3 Comparison of the identification results for parameters requiring identification



(a) 方波信号注入
(a) Square wave signal injection



(b) 梯形波信号注入
(b) Trapezoid wave signal injection

图 4 u_d 和 u_q 波形

Fig. 4 Waveform of u_d and u_q

表 6 不同信号注入对系统控制性能影响

Table 6 The effect of different signal injections on control performance of the system

注入信号	$\Delta i_d / A$	$\Delta i_q / A$	$\Delta T / \%$	THD / %
无注入	0.012 0	0.015 9	1.22	3.32
方波	1.997 2	0.073 7	16.41	27.71
梯形波	1.823 4	0.064 9	1.41	25.43
三角波	1.159 1	0.043 0	1.34	16.44
正弦波	1.417 3	0.051 6	1.27	20.02

由表 6 可知,注入方波、梯形波、三角波或正弦波信号均会对系统控制性能产生一定影响,4 种信号注入对控制系统的 Δi_d 、 Δi_q 、 ΔT 及 THD 影响基本满足方波>梯形波>正弦波>三角波的关系。注入方波信号后,电磁转矩中出现了周期性的尖峰,转矩脉动较大,而其他信号注入的转矩脉动均较小。综合 Δi_d 、 Δi_q 、 ΔT 及 THD 可见,局部恒定信号注入对系统控制性能影响大于全局时变信号,其中方波注入对系统控制性能影响最大,三角波注入影响最小。

3 实验对比分析

为对比分析方波、梯形波、三角波和正弦波 4 种信号注入时的参数辨识效果及对系统控制性能影响,搭建如图 5 所示的 PMSM 参数辨识系统实验平台进行实验验证。

采用标准差来衡量,计算结果如表 6 所示。

证。该实验平台主要由 RTU-BOX204 半实物仿真控制器、直流电源、功率变换器、上位机、示波器、磁粉制动器、PMSM 等部分组成。其中, PMSM 主要参数如表 1 所示。

在 PMSM 参数辨识实验中, PWM 频率为 10 kHz, 采用 $i_d^* = 0$ 控制运行电机。在电机稳定运行后, 分别将频率为 5 Hz 且幅值为 2 A 的方波、梯形波、三角波及正弦波信号注入到直轴电流参考值, 同时启用参数辨识算法, 得到 i_d 及各参数辨识值波形如图 6 所示。

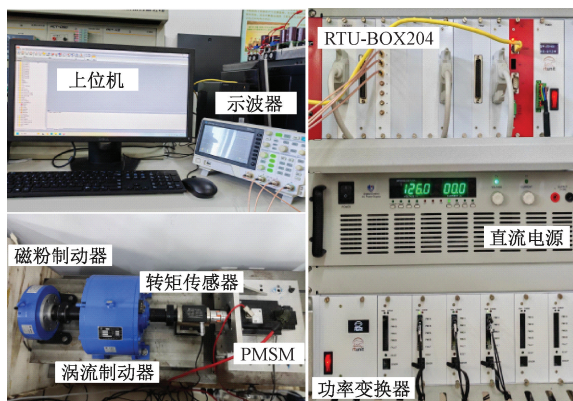
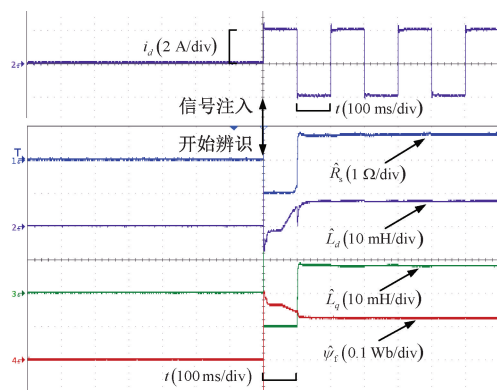
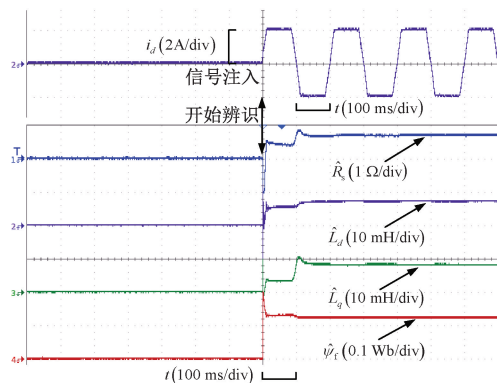


图 5 PMSM 参数辨识系统实验平台

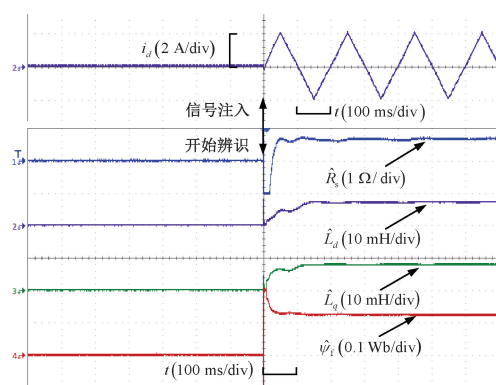
Fig. 5 Experimental platform for parameter identification system of PMSM



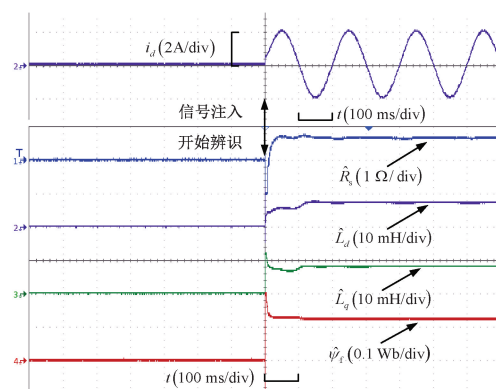
(a) 方波信号注入
(a) Square wave signal injection



(b) 梯形波信号注入
(b) Trapezoid wave signal injection



(c) 三角波信号注入
(c) Triangular wave signal injection



(d) 正弦波信号注入
(d) Sinusoidal wave signal injection

图 6 i_d 及参数辨识值波形

Fig. 6 Waveform of i_d and parameter identification values

由图 6(a) 和 (b) 可知, 在局部恒定信号开始注入的前半个周期, 各参数的辨识结果无法收敛至实际值。其中, 方波信号注入的辨识结果发散, 易达到设置的限定值, 而梯形波信号注入的辨识结果误收敛。在局部恒定信号开始注入的后半个信号周期, 辨识结果迅速收敛至实际值, 从信号注入时刻开始至完成收敛所需时间长于半个信号周期 (100 ms), 与仿真分析结果一致。由图 6 (c) 和 (d) 可知, 从全局时变信号注入开始, 各待辨识参数的辨识结果便出现收敛趋势, 部分待辨识参数在半个信号周期内便收敛至实际值附近, 正弦波注入的起始收敛速度快于三角波。

为更直观比较分析方波、梯形波、三角波和正弦波 4 种信号注入的参数辨识精度, 将图 6 的实验数据通过示波器导出, 分析各待辨识参数的辨识结果如表 7 所示。由表 7 可得, 局部恒定信号注入的辨识精度高于全局时变信号注入的辨识精度, 其中梯形波注入的辨识精度最高, 均在 2% 以内, 三角波与正弦波注入的部分待辨识参数存在 5% 以上的辨识误差。

表 7 4 种信号注入的参数辨识结果

Table 7 Parameter identification results under four kinds of signal injections

辨识结果	方波	梯形波	三角波	正弦波
$\hat{R}_s/\Omega$	0.717	0.689	0.657	0.654
$\delta(R_s)/\%$	2.428	1.571	6.143	6.571
$\hat{L}_d/\text{Wb}$	7.293	7.173	7.095	7.171
$\delta(L_d)/\%$	1.292	0.375	1.458	0.403
$\hat{L}_q/\text{mH}$	7.998	8.011	7.689	7.981
$\delta(L_q)/\%$	1.259	1.099	5.074	1.469
$\hat{\psi}_f/\text{mH}$	0.123 8	0.122 3	0.123 8	0.123 5
$\delta(\psi_f)/\%$	0.651	0.569	0.651	0.407

为分析信号注入后对系统控制性能的影响,计算得到的 Δi_d 、 Δi_q 、 ΔT 及THD如表8所示。由表8可得,4种信号注入均会对系统控制性能产生一定影响, Δi_d 、 Δi_q 、 ΔT 及THD受4种信号注入影响的程度均满足方波>梯形波>正弦波>三角波的关系。局部恒定信号注入对系统控制性能的影响均大于全局时变信号注入,其中方波注入的影响最大,三角波注入的影响最小。

表 8 不同信号注入对系统控制性能影响

Table 8 The effect of different signal injections on control performance of the system

注入信号	$\Delta i_d/\text{A}$	$\Delta i_q/\text{A}$	$\Delta T/\%$	THD/%
无注入	0.079 5	0.404 2	9.94	3.64
方波	2.008 1	0.898 1	62.13	61.85
梯形波	1.824 3	0.829 7	57.81	54.15
三角波	1.156 2	0.551 7	44.36	38.42
正弦波	1.410 7	0.639 6	48.77	44.12

4 结 论

为揭示信号注入法中不同信号类型及其频率幅值对PMSM参数辨识精度和控制性能的影响,对方波、梯形波、三角波和正弦波4种常用信号注入法进行了仿真及实验对比分析。将各注入信号频率和幅值对电机参数辨识的影响进行了详细研究,合理选取注入信号频率和幅值,通过仿真和实验对比分析4种信号注入法的参数辨识结果,并评估各注入信号对系统控制性能影响。结果表明:受电流环带宽限制,注入信号频率过大易导致待辨识参数辨识精度降低,过小易导致待辨识参数辨识结果误收敛或发散;注入信号幅值过大会降低系统控制性能,过小易导致待辨识参数辨识结果误收敛或发散。局部恒

定信号注入的辨识精度高于全局时变信号注入的辨识精度,其中梯形波注入的辨识精度最高,三角波与正弦波注入的部分待辨识参数存在较大辨识误差。局部恒定信号注入的参数辨识对系统控制性能的影响大于全局时变信号注入的影响。其中,方波注入法对系统控制性能影响最大,而三角波注入法对系统控制性能影响最小。研究结果揭示了不同信号类型及其频率幅值对电机参数辨识精度和控制性能的影响,为选取合适信号类型及其频率幅值提供了实用参考。

参考文献

[1] HUANG ZH R, LIN CH, XING J L. A parameter-independent optimal field-weakening control strategy of IPMSM for electric vehicles over full speed range[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 36(4): 4659-4671.

[2] 卢志远,柏受军,江明,等. 改进的线性自抗扰永磁同步电机转速控制器设计[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(4): 73-81.

LU ZH Y, BAI SH J, JIANG M, et al. Improved design of linear self-turbulent permanent magnet synchronous motor speed controller [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36 (4): 73-81.

[3] 邓聪颖,舒杰,陈翔,等. 多参数变化下基于参数辨识的永磁同步电机偏差解耦控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(6): 260-268.

DENG C Y, SHU J, CHEN X, et al. A deviation decoupling control method of permanent magnet synchronous motor based on parameter identification under multi-parameter variation[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(6): 260-268.

[4] 匡萃璋,汪华章. 一种非线性自抗扰控制的PMSM速度控制策略研究[J]. 电子测量技术, 2022, 45(8): 35-40.

KUANG C ZH, WANG H ZH. Research on PMSM speed control strategy of nonlinear active disturbance rejection control[J]. Electronic Measurement Technology, 2022, 45(8): 35-40.

[5] 陈德海,李明,曾东红,等. 基于改进双滑模的永磁同步电机无传感器控制[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(4): 16-22.

CHEN D H, LI M, ZENG D H, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on improved dual sliding mode [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(4): 16-22.

[6] 赵凯辉, 譙梦洁, 吕玉映, 等. PMSM 无模型超螺旋

- 快速积分终端滑模控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(5): 64-74.
- ZHAO K H, QIAO M J, LYU Y Y, et al. Model-free super-twisting fast integral terminal sliding mode control for PMSM[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(5): 64-74.
- [7] FENG G D, LAI C Y, KAR N C. A novel current injection-based online parameter estimation method for PMSMs considering magnetic saturation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(7): 1-4.
- [8] 何静,李希宇,贾林. 考虑磁链变化率的永磁同步电机失磁故障复合容错控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(3): 1-11.
- HE J, LI X Y, JIA L. Compound fault tolerance control of permanent magnet synchronous motor with magnetic flux change rate considered[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(3): 1-11.
- [9] 刘细平,胡卫平,丁卫中,等. 永磁同步电机多参数辨识方法研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1198-1207.
- LIU X P, HU W P, DING W ZH, et al. Research on multi-parameter identification method of permanent magnet synchronous motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(6): 1198-1207.
- [10] ZHU Z Q, LIANG D W, LIU K. Online parameter estimation for permanent magnet synchronous machines: An overview[J]. IEEE Access, 2021, 9: 59059-59084.
- [11] RAFAQ M S, JUNG J W. A comprehensive review of state-of-the-art parameter estimation techniques for permanent magnet synchronous motors in wide speed range[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(7): 4747-4758.
- [12] DANG D Q, RAFAQ M S, CHOI H H, et al. Online parameter estimation technique for adaptive control applications of interior PM synchronous motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(3): 1438-1449.
- [13] TEBALDI D. Efficiency map-based PMSM parameters estimation using power-oriented modeling [J]. IEEE Access, 2022, 10: 45954-45961.
- [14] 连传强,肖飞,高山,等. 基于实验标定及双时间尺度随机逼近理论的内置式永磁同步电机参数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4892-4898.
- LIAN CH Q, XIAO F, GAO SH, et al. Parameter identification for interior permanent magnet synchronous motor based on experimental calibration and stochastic approximation theory with two time scales [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4892-4898.
- [15] WANG T, HUANG JIN, YE M, et al. An EMF observer for PMSM sensorless drives adaptive to stator resistance and rotor flux linkage[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2019, 7(3): 1899-1913.
- [16] 李红梅,陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 638-647.
- LI H M, CHEN T. Review of research on parameter identification of PMSM [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(5): 638-647.
- [17] 吴春,赵宇伟,孙明轩. 采用测量电压的永磁同步电机多参数在线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4329-4340.
- WU CH, ZHAO Y W, SUN M X. Multiparameter online identification for permanent magnet synchronous machines using voltage measurements [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(13): 4329-4340.
- [18] 伍锡坤. 基于 ARM 与 FPGA 永磁同步电机无位置传感器控制技术研究[D]. 南京:东南大学, 2022.
- WU X K. Research on sensorless control for PMSM based on ARM and FPGA [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [19] WANG P, LIN K M, ZHANG X, et al. An online estimation method for both stator inductance and rotor flux linkage of SPMSM without dead-time influence[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(2): 1627-1638.
- [20] 姜燕,刘思美,吴轩,等. 基于位置三角信号注入的永磁同步电机磁链在线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 845-856.
- JIANG Y, LIU S M, WU X, et al. Online identification of the rotor flux linkage in permanent magnet synchronous motors with position triangular signal injection [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 845-856.
- [21] WANG P, ZHU Z Q, LIANG D W. Improved position-offset based online parameter estimation of PMSMs under constant and variable speed operations [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2024, 39(2): 1325-1340.
- [22] LIU K, ZHU Z Q, STONE D A. Parameter estimation for condition monitoring of PMSM stator winding and rotor permanent magnets[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(12): 5902-5913.
- [23] 杨公德,王朋,刘宝谨. 梯形波电流注入法的 IPMSM 多参数在线辨识[J]. 电机与控制学报, 2022,

26(5): 96-103.

YANG G D, WANG P, LIU B J. Multi-parameter online identification of IPMSM based on trapezoidal-wave current injection [J]. *Electric Machines and Control*, 2022, 26(5): 96-103.

- [24] 俞烨隆. 基于平均模型/开关模型的永磁同步电机电气参数在线辨识及其应用 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.

YU Y L. Online identification of electrical parameters and its applications for PMSMs based on average model/switching model [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023.

- [25] LIU X G, DU Y H. Torque control of interior permanent magnet synchronous motor based on online parameter identification using sinusoidal current injection [J]. *IEEE Access*, 2022, 10: 40517-40524.

- [26] 荀倩, 王培良, 李祖欣, 等. 基于递推最小二乘法的永磁伺服系统参数辨识 [J]. *电工技术学报*, 2016, 31(17): 161-169.

XUN Q, WANG P L, LI Z X, et al. PMSM parameters identification based on recursive least square method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(17): 161-169.

- [27] LI X Y, KENNEL R. General formulation of kalman-filter-based online parameter identification methods for VSI-fed PMSM [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(4): 2856-2864.

- [28] 严洪峰. 永磁同步电机参数在线辨识算法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.

YAN H F. Study on online parameters identification of permanent magnet synchronous motor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

作者简介



杨公德 (通信作者), 2019 年于东南大学获得博士学位, 现为福州大学副教授、硕士生导师, 主要研究方向为永磁电机驱动控制技术。

E-mail: gdyang@fzu.edu.cn

Yang Gongde (Corresponding author)

received his Ph. D. from Southeast University in 2019. He is currently an associate professor and master's supervisor at Fuzhou University. His main research interests include the drive control technology of permanent magnet motors.



陈宇翔, 2018 年于浙江科技学院获得学士学位, 现为福州大学硕士研究生, 主要研究方向为永磁同步电机在线参数辨识。

E-mail: cyx010118@163.com

Chen Yuxiang received his B. Sc. from

Zhejiang University of Science and Technology in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Fuzhou University. His main research interest includes online parameter estimation of permanent magnet synchronous machines.



王朋, 2018 年于南京工程学院获得学士学位, 2021 年于东南大学获得硕士学位, 现为谢菲尔德大学博士研究生, 主要研究方向为永磁同步电机的无传感器控制和在线参数辨识等。

E-mail: pwang44@sheffield.ac.uk

Wang Peng received his B. Sc. from Nanjing Institute of Technology in 2018 and M. Sc. from Southeast University in 2021. He is currently a Ph. D. candidate at University of Sheffield. His main research interests include sensorless control and online parameter estimation of permanent magnet synchronous machines.