

基于 FFRLS 的永磁同步电机参数辨识

徐衍丰¹ 陈 桂¹ 周 磊¹ 倪 浩¹ 曹飞虎¹
XU Yanfeng CHEN Gui ZHOU Lei NI Hao CAO Feihu

摘 要

针对传统递推最小二乘法辨识永磁同步电机参数精度较差问题,为进一步减少过往数据对当前估计的影响,使辨识系统能够更快对参数进行辨识,并且提高精确性。文章采用带遗忘因子的递推最小二乘法,通过建立永磁同步电机数学模型,在 MATLAB/simulink 中搭建电流速度双闭环控制系统,构建系统参数辨识模型,分析比较传统最小二乘法与遗忘因子递推最小二乘法辨识效果,在固定负载与运行过程中突加负载两种情况下,验证辨识算法的抗干扰性能。仿真结果表明,遗忘因子递推最小二乘法可以实现电阻、电感、磁链的精确辨识,具有较好的快速性,验证了辨识算法的正确性。

关键词

永磁同步电机;最小二乘法;遗忘因子;参数辨识

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.02.046

0 引言

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)因其高效率、高功率密度和优异的动态性能,被广泛应用于电动车、工业自动化和家电等领域。在这些应用中,电机的性能直接影响到系统的整体效率和可靠性。因此,准确辨识电机的参数对于实现最佳控制和优化性能至关重要^[1]。电机参数辨识是通过测量电机的实际运行数据并使用数学模型估算其关键参数的过程。对于永磁同步电机,其参数包括电阻、电感、磁链等。通过参数的精确辨识,能显著提升电机的能效和动态响应能力,从而改善整体系统的性能。通过优化控制策略和实时参数辨识,PMSM 能够在不同应用场景中实现最佳运行状态,确保高效能和可靠性^[2]。

为更准确地估计参数,国内外研究者们采用了多种方式进行 PMSM 的参数辨识,其中包括卡尔曼滤波法^[3]、模型参考自适应法^[4]、智能算法^[5]、最小二乘法^[6]等。李英春等人^[7]采用一种改进的扩展卡尔曼滤波方法,用于永磁同步电机的参数辨识,在辨识器中引入转动惯量,以辨识出实时电感和实时磁链,但选择合适的 Q 、 R 矩阵需要借助人工经验以及复杂的计算。Huang 等人^[8]提出一种模型参考自适应法用于辨识参数,该方法在收敛速度方面优于一般算法。但设计其自适应率的过程相对复杂,需要选择适当的初始参数。孟治金等人^[9]提出迭代式粒子群优化辨识,永磁同步电机的实时温度估计精确度得到提高,但辨识算法较为复杂,不能实现实时辨识。罗小军等人^[10]通过施加直流电压激励信号,采用

递推最小二乘法(recursive least square, RLS)实现参数辨识,但输出电压误差未能完全补偿并且有较大噪声,导致辨识结果存在误差。林巨广等人^[11]提出一种改进的 RLS 辨识算法,将电流变化率引入动态算法,以达到消除辨识误差波动的效果。但会导致耦合效应的出现和增益矩阵 K 的显著波动。

本文将采用带遗忘因子的最小二乘法(forgetting factor recursive least squares, FFRLS)对永磁同步电机进行参数辨识,先通过电机控制系统控制电机启动并正常运转,将系统运行中的 d 、 q 轴电流、电压、转速等作为辨识模型的输入,通过参数辨识系统,辨识出永磁同步电机电阻 R_s 、电感 L_s 以及磁链 ψ_f 三项电气参数。该辨识方法以递推最小二乘法为基础,通过引入遗忘因子 λ ,使辨识速度更快,精度更高。

1 最小二乘法的原理

最小二乘法是一种重要的数据拟合技术,最早由高斯在 19 世纪提出。该方法凭借其简便性和直观性特点,迅速在科学和工程领域得到广泛应用,特别是在系统辨识领域表现突出。最小二乘法用于系统参数估算,通过最小化观测数据与模型预测之间的误差平方和,以获得最佳的参数估计^[12]。该方法应用简单,公式清晰,在实际场景中效果显著,其基本概念可以通过公式表示为:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \Delta(k) \quad (1)$$

式中: $\hat{\theta}(k)$ 代表在 k 时刻参数辨识的估计值; $\hat{\theta}(k-1)$ 代表在 $k-1$ 时刻的参数辨识估计值; $\Delta(k)$ 表示的是修正项。

递推最小二乘法(RLS)是一种广泛应用于动态系统的自适应参数估计算法,其核心思想是通过实时更新系统参数以适应变化的输入输出数据。传统的 RLS 方法在面对参数突

1. 南京工程学院自动化学院 江苏南京 211167

变时，通常会周期性地重置协方差矩阵 P 以确保准确的参数跟踪，并且在运行过程中，有新的数据不断输入输出，因此将最小二乘法采用递推公式进行迭代计算^[13]。递推形式的最小二乘法估计公式为：

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \\ K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{1 + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \\ P(k) = [I - K(k)\varphi^T(k)]P(k-1) \end{cases} \quad (2)$$

式中： $\hat{\theta}(k)$ 为待辨识矩阵； $\varphi(k)$ 为输入矩阵； $y(k)$ 为输出矩阵； $P(k)$ 为协方差矩阵； $K(k)$ 为增益矩阵； I 为单位矩阵。

在实时参数辨识中，协方差矩阵 P 和增益矩阵 K 是用于更新参数估计的重要工具，而系统参数变化时， P 、 K 矩阵会逐渐减小，导致数据饱和。数据饱和与参数迟滞是实时参数辨识中常见的问题，可能导致估计的不准确，为了解决这些问题，现代 RLS 算法引入了遗忘因子 λ 的概念。通过在每次迭代中对历史数据进行“遗忘”，即降低其权重，使算法能够适应数据变化，减少过往数据对当前估计的影响，从而提高实时性和灵活性。这种改进能够有效减小协方差矩阵的饱和度，从而增强新数据在参数估计中的作用。这一机制使得 RLS 在处理参数变化缓慢的情况下，仍能够保持较高的实时更新性能和收敛速度，而无需对噪声序列的概率特性有预先了解。其方程表达式为：

$$\begin{cases} \hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + K(k)[y(k) - \varphi^T(k)\hat{\theta}(k-1)] \\ K(k) = \frac{P(k-1)\varphi(k)}{\lambda + \varphi^T(k)P(k-1)\varphi(k)} \\ P(k) = \frac{1}{\lambda} [I - K(k)\varphi^T(k)]P(k-1) \end{cases} \quad (3)$$

在进行计算时的第一步，需要设置初始值 $P(0)$ 、 $\hat{\theta}(0)$ ，通常直接使用如下公式。

$$\begin{cases} P(0) = \alpha I \\ \hat{\theta}(0) = \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

式中： α 设定为足够大的正实数 ($10^4 \sim 10^{10}$)； ε 为零向量或足够小的正实向量。

图 1 为加入遗忘因子的递推最小二乘法的计算过程。

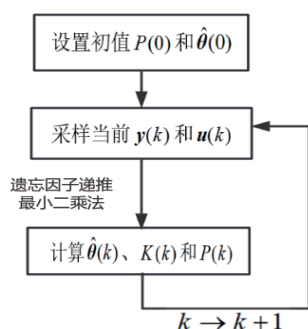


图 1 遗忘因子递推最小二乘法的计算过程图

2 永磁同步电机辨识模型

在 PMSM 的控制过程中，往往采用矢量控制的方法，实现电机的高性能运行。此方法通过将三相电流转换到两相直角坐标系 (d - q 坐标系)，从而将电机的控制问题转化为直流电机控制问题来简化控制策略和提高控制精度。永磁同步电机参数辨识矢量控制系统结构框图如图 2 所示。速度环部分，通过 PMSM 采集数据，计算速度与位置信息，将给定转速与计算得到的实际转速差值作为速度环输入，经过速度控制器得到 q 轴电流给定值。电流环部分，三项电流 i_a 、 i_b 、 i_c 通过坐标变换，即 Clark 变换与 Park 变换，变为两相电流，经过电流环与反 Park 变换得到 u_d 、 u_q ，再通过 SVPWM 模块，将驱动信号传至三相逆变器，产生电压，对永磁同步电机进行控制。

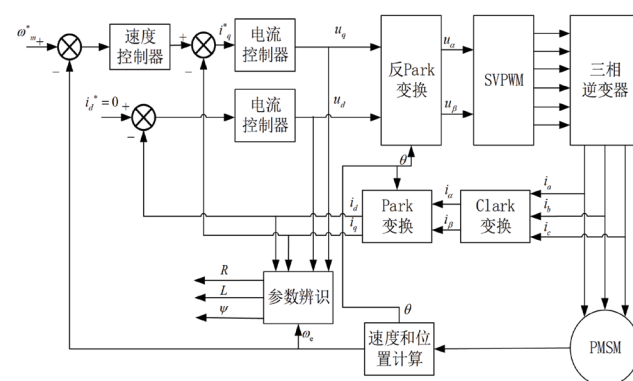


图 2 参数辨识矢量控制系统结构框图

PMSM 在 d - q 坐标系下，电压方程为：

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (5)$$

式中： u_d 、 u_q 分别为 d - q 坐标系下的电压； i_d 、 i_q 分别为 d - q 坐标系下的电流； L_d 、 L_q 分别为 d - q 坐标系下的电感； R_s 为定子相电阻； ψ_f 为电机转子的永磁体磁链； ω_e 为电机的电角速度。对于表贴式永磁同步电机， d 、 q 轴电感相等，即 $L_d = L_q = L$ 。

电磁转矩方程为：

$$T_e = 1.5 p_n i_q \psi_f \quad (6)$$

运动方程为：

$$J \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_L - B\omega_m \quad (7)$$

式中： p_n 为电机极对数； ω_m 为电机的机械角速度； J 为转动惯量； T_L 为负载转矩； B 为阻尼系数； T_e 为电磁转矩。

2.1 电阻与磁链的辨识

当永磁同步电机运行到稳定状态后， d - q 轴电流方程微

分项为零, $L_d = L_q = L = L_s$, 代入式中, 结合式 (5), 将含有 L_s 的项移到等式左边得到公式:

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

将式 (8) 的方程改写为矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} u_d + \omega_e i_q L_s \\ u_q - \omega_e i_d L_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_d & 0 \\ i_q & \omega_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_s \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (9)$$

系统的最小二乘法格式为:

$$y(k) = \theta^T(k)x \quad (10)$$

根据式 (9) 和式 (10) 得:

$$\begin{cases} y(k) = \begin{bmatrix} u_d + \omega_e i_q L_s \\ u_q - \omega_e i_d L_s \end{bmatrix} \\ \theta^T(k) = \begin{bmatrix} i_d & 0 \\ i_q & \omega_e \end{bmatrix} \\ x = \begin{bmatrix} R_s \\ \psi_f \end{bmatrix} \end{cases} \quad (11)$$

2.2 电感的辨识

结合式 (5), 将含有 L_s 的项移到等式左边得到:

$$\begin{cases} u_d - i_d R_s = -\omega_e i_q L_s \\ u_q - i_q R_s - \omega_e \psi_f = \omega_e i_d L_s \end{cases} \quad (12)$$

将式 (12) 的方程改写为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} u_d - i_d R_s \\ u_q - i_q R_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e i_q \\ \omega_e i_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据式 (10) 和式 (13) 得:

$$\begin{cases} y(k) = \begin{bmatrix} u_d - i_d R_s \\ u_q - i_q R_s \end{bmatrix} \\ \theta^T(k) = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_e i_q \\ \omega_e i_d & 0 \end{bmatrix} \\ x = \begin{bmatrix} L_d \\ L_q \end{bmatrix} \end{cases} \quad (14)$$

3 仿真验证

为了验证参数辨识算法的优越性, 本文使用 MATLAB/Simulink 对参数辨识系统进行仿真。本文采用电流、速度双闭环调速系统, 电流控制器与速度控制器采用 PI 控制器。仿真电机参数如表 1 所示, 仿真模型如图 3 所示。

表 1 PMSM 电机仿真参数

参数名称	数值
定子电阻 / Ω	0.4
定子电感 / H	0.000 38
永磁体磁链 / Wb	0.01
转动惯量 / $\text{kg} \cdot \text{m}^2$	0.000 025
阻尼系数 / $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$	0.000 03
极对数	4

3.1 定负载仿真

电机在额定功率下以 1000 r/min 启动, 仿真时长设置为 0.4 s, 全程加 0.3 N·m 的负载, 采样时间 1e-6s, FFRLS 遗忘因子 λ 取 0.97, 仿真结果如图 4 所示。

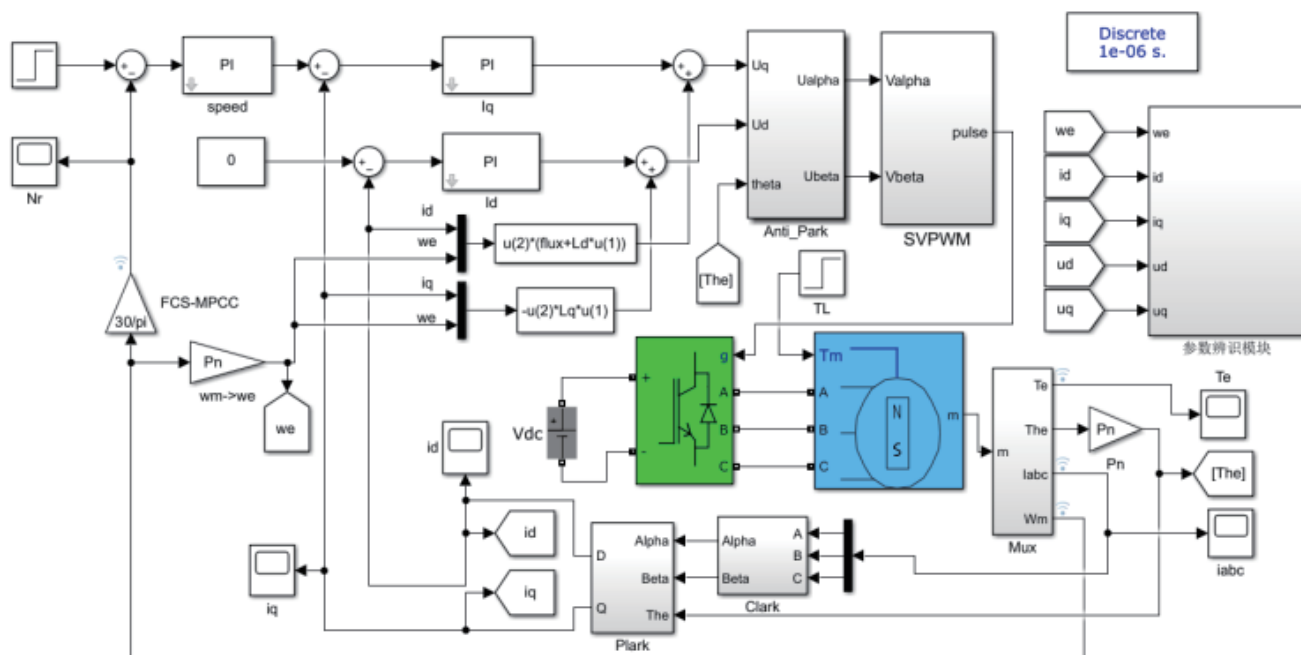
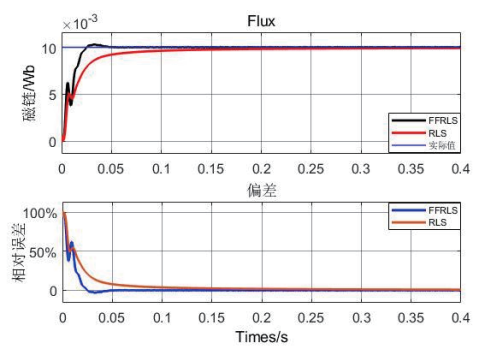
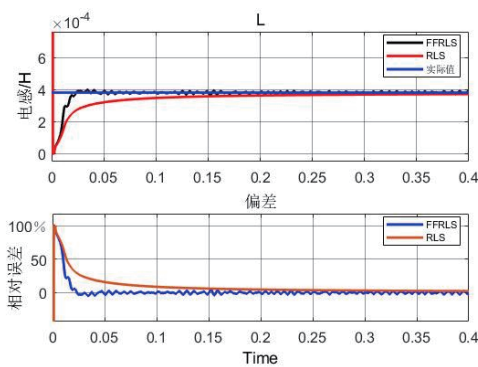


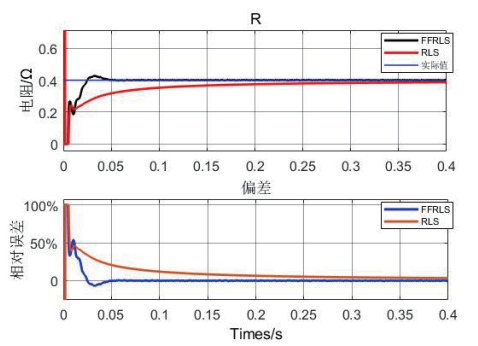
图 3 仿真模型



(a) 磁链辨识



(b) 电感辨识



(c) 电阻辨识

图 4 定负载参数辨识仿真结果

通过辨识曲线，可以发现辨识算法的动态响应效果较好，辨识结果可以在仿真时间内很快达到电机设定值。在同样仿真条件下，同时进行传统 RLS 的参数辨识，对比 FFRLS 与传统 RLS 辨识结果，辨识仿真结果数据如表 2 所示。

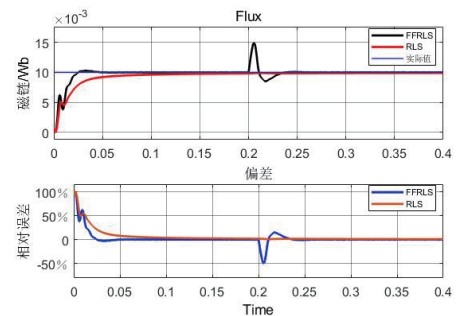
表 2 定负载参数辨识仿真数据

参数	真实值	方法	
		RLS	FFRLS
定子电阻 /Ω	0.4	0.386 6	0.399 7
电阻误差 /%	—	3.349	0.067 01
定子电感 /H	0.000 38	0.000 371	0.000 383 5
电感误差 /%	—	2.36	0.916
转子磁链 /Wb	0.01	0.009 911	0.009 997
磁链误差 /%	—	0.890 7	0.032 45

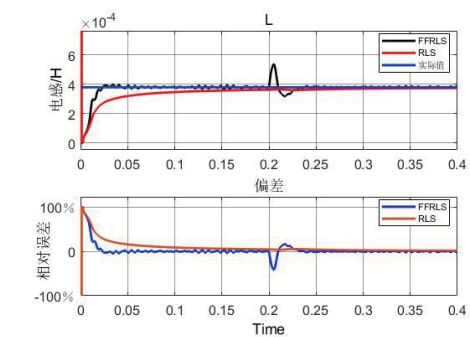
由表 2 得知，RLS、FFRLS 均可对电机参数进行辨识，对比两种方法，RLS 在辨识精度上有较大偏差，电阻、电感、磁链 3 项参数的辨识误差分别为 3.349%、2.36%、0.890 7%，电阻电感误差均大于 1%，磁链误差接近 1%；FFRLS 辨识准确性较高，电阻、电感、磁链 3 项参数的辨识结果与真实值相比，辨识误差分别为 0.067 01%、0.916%、0.032 45%，误差均小于 1%，并能在较短时间达到稳定。通过仿真结果证明，在辨识精度方面，FFRLS 辨识要比传统 RLS 辨识算法的辨识精度更高，辨识效果更好。

3.2 突加负载仿真

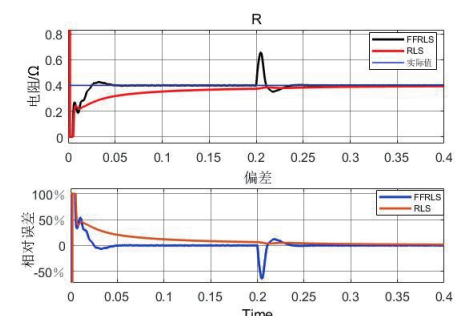
在电机正常工作过程中，负载并不会保持固定值，会随运行过程发生变化，因此在仿真过程中，设定电机在额定功率下以 1000 r/min 启动，仿真时长 0.4 s，开始设定运行负载为 0.3 N·m，在运行至 0.2 s 时，将负载转矩提高为 0.6 N·m，电阻、电感、磁链等参数保持不变，FFRLS 与 RLS 仿真结果如图 5 所示。



(a) 磁链辨识



(b) 电感辨识



(c) 电阻辨识

图 5 0.2 s 突加转矩参数辨识仿真结果

通过图 5 可以发现, 当在 0.2 s 时突加 0.63 N·m 的负载转矩, FFRLS 算法磁链电感电阻的辨识曲线在 0.2 s 时均产生一定的波动, 辨识效果会有一定影响, 但辨识曲线会在很短时间内恢复到稳定状态, 达到精准辨识。由表 3 可以得知, 面对复杂环境, FFRLS 辨识具有更好的抗干扰能力。

表 3 突加负载参数辨识仿真数据

参数	真实值	方法	
		RLS	FFRLS
定子电阻 /Ω	0.4	0.393 4	0.399 3
电阻误差 /%	—	1.645	0.173 4
定子电感 /H	0.000 38	0.000 374	0.000 381 7
电感误差 /%	—	1.584	0.453 1
转子磁链 /Wb	0.01	0.009 909	0.009 983
磁链误差 /%	—	0.913 6	0.165 9

4 结论

本文在矢量控制策略的基础上, 针对永磁同步电机运行中参数影响控制精度的问题, 进行了研究。针对传统 RLS 的不足, 本文采用一种遗忘因子递推最小二乘法的参数辨识方法, 以提高参数辨识的准确性。在 MATLAB 中进行仿真实验, 通过改变负载大小模拟不同工况下永磁同步电机运行情况, 对比不同仿真结果, 证明相较于一般最小二乘法, 带遗忘因子的最小二乘法具有更好的辨识效果, 并且具有较好的抗干扰能力, 在突加负载的情况下辨识曲线能较快恢复到稳定状态。

参考文献:

[1] 刘政, 庄佳林, 杨怀志, 等. 表贴式永磁同步电机多参数辨识研究[J]. 微电机, 2022, 55(9):32-38.

[2] 周鹏, 陈文强. 基于前馈控制的永磁同步电机参数在线辨识[C]//2020 年未来汽车技术大会暨重庆汽车行业第 33 届年会论文集. 重庆: 重庆汽车工程学会, 2020.

[3] ZHOU Y, ZHANG S, ZHANG C N, et al. Current prediction error based parameter identification method for SPMSM with deadbeat predictive current control[J]. IEEE transactions on energy conversion, 2021, 36(3) :1700-1710.

[4] 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.

[5] JIANG J B, CHEN Z M, WANG Y H et al. Parameter estimation for PMSM based on a back propagation neural net-

work optimized by chaotic artificial fish swarm algorithm[J]. International journal of computers, communications and control , 2019, 14(6): 615-632.

[6] 方桂花, 王鹤川, 高旭. 基于动态遗忘因子递推最小二乘法的永磁同步电机参数辨识算法[J]. 计算机应用与软件, 2021, 38(1): 280-283.

[7] 李英春, 侯金明, 王培瑞. 基于改进扩展卡尔曼滤波的 PMSM 在线参数辨识[J]. 中国测试, 2022, 48(11):47-53.

[8] HUANG G H, ZHANG N A. Loss minimization vector-controlled SPMSM based on online parameter identification[C/OL]//2021 33rd Chinese Control and Decision Conference(CCDC). Piscataway: IEEE, 2021[2024-07-19]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9602638>.

[9] 孟冶金, 刘宇阳, 陈俐. 基于迭代式粒子群优化的永磁同步电机热网络模型参数辨识研究[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(1):1-11.

[10] 罗小军, 陈天航, 朱思明, 等. 基于 RLS 的永磁同步电机参数辨识技术研究[J]. 自动化与仪表, 2019, 34(9): 71-74.

[11] 林巨广, 陈桐. 基于改进 RLS 算法的永磁同步电机参数辨识[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2019, 42(7): 876-880.

[12] 林立, 杨阳, 李亚楠, 等. 永磁同步电机多参数辨识研究[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2024, 21(2):18-27.

[13] 李祥功, 朱立军, 陈猛. 改进最小二乘法在永磁同步电机参数辨识中的应用[J]. 物联网技术, 2022, 12(7):107-110.

【作者简介】

徐衍丰(1999—), 男, 安徽滁州人, 硕士, 研究方向: 电机伺服控制。

陈桂(1973—), 女, 安徽旌德县人, 硕士, 教授, 研究方向: 运动控制技术。

周磊(1977—), 女, 江苏泰州人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向: 伺服控制、先进控制方法研究及应用。

倪浩(1999—), 男, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向: 电机伺服控制。

曹飞虎(1999—), 男, 江苏盐城人, 硕士, 研究方向: 运动控制与机器人技术。

(收稿日期: 2024-10-30)