

基于鲁棒递推最小二乘法的 SynRM 参数 在线辨识方法

刘江¹, 王方一^{1*}, 宋佳佳², 孙产刚³

(1. 武汉工程大学 电气信息学院, 湖北 武汉 430205;

2. 宁波安信数控技术有限公司, 浙江 宁波 315800;

3. 海天塑机集团有限公司, 浙江 宁波 315800)

Online Identification Method for Synchronous Reluctance Motor Parameters Based on Robust Recursive Least Squares

LIU Jiang¹, WANG Fangyi^{1*}, SONG Jiajia², SUN Chan'gang³

(1. School of Electrical and Information Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China;

2. Ningbo Anson CNC Technology Co., Ltd., Ningbo 315800, China;

3. Haitian Plastics Machinery Group Co., Ltd., Ningbo 315800, China)

Abstract: [Objective] Aiming at the nonlinear distortion of d - q axis inductance caused by magnetic saturation effects in the operation of synchronous reluctance motor (SynRM) drive systems, this paper proposes an online inductance parameter identification strategy based on robust recursive least square (RRLS). [Methods] Firstly, the predicted voltage difference was calculated to construct a historical prediction residual sequence, and rolling optimization was performed during motor operation to effectively reduce steady-state estimation errors caused by random data. Secondly, the predicted standard deviation was used as a robust scale to construct a robust loss function, which enhanced the algorithm's ability to resist load disturbances without significantly increasing the computational burden. Then, an approximate equilibrium condition was combined with an adaptive mechanism with a variable forgetting factor for recursive estimation, and accurate parameter values were obtained through multiple iterations. Finally, a SynRM control and parameter identification system was built in Matlab/Simulink, and the RRLS algorithm was compared with the traditional variable forgetting factor recursive least square (VFFRLS) under different operating conditions.

基金项目: 中国创新挑战赛(宁波)重大专项(2024T004);
武汉市科技局重点研发项目(2024060702030146)

Major Special Project of China Innovation Challenge (Ningbo)
(2024T004); Key R&D Program of Wuhan Municipal Bureau of
Science and Technology (2024060702030146)

[Results] The simulation results showed that under no-load and load disturbance conditions, the proposed RRLS algorithm had lower identification errors. The steady-state error of the d -axis inductance was less than 0.5%, and the steady-state error of the q -axis inductance was less than 4%. During the dynamic process, the d -axis overshoot was reduced from 25 mH by the VFFRLS algorithm to 12 mH by the proposed RRLS algorithm, and the q -axis overshoot was reduced from 33 mH to 13 mH. **[Conclusion]** Compared with the traditional VFFRLS algorithm, the RRLS algorithm proposed in this paper achieves high steady-state identification accuracy, reduces overshoot during dynamic processes, and demonstrates excellent online identification performance under load disturbances, with high system robustness.

Key words: synchronous reluctance motor; magnetic saturation effect; robust recursive least square; robust loss function

摘要:【目的】针对同步磁阻电机(SynRM)驱动系统运行过程中磁饱和和效应引起的 d - q 轴电感非线性畸变问题,提出一种基于鲁棒递推最小二乘法(RRLS)的在线电感参数辨识策略。【方法】首先,计算预测电压差构建历史预测残差序列,在电机运行过程中滚动优化,有效降低偶然数据导致的稳态估计误差。其次,使用预测标准差作为鲁棒尺度来构建鲁棒损失函数,增强算法抗负载扰动能力,且未显著增大计算量。然后,利用近似平衡条件结合带可变遗忘因子的自适应机制递推,多次迭代得到准

确的参数估计值。最后,在 Matlab/Simulink 中搭建 SynRM 控制及参数辨识系统,并在不同运行条件下,将 RRLS 算法与传统变遗忘因子递推最小二乘法(VFFRLS)进行对比分析。【结果】仿真结果表明,在空载与负载扰动条件下,所提 RRLS 算法具有更低的辨识误差, d 轴电感稳态误差小于 0.5%, q 轴电感稳态误差小于 4%。在动态过程中,所提 RRLS 算法将 d 轴超调量由 VFFRLS 算法的 25 mH 降至 12 mH,将 q 轴超调量由 VFFRLS 算法的 33 mH 降低至 13 mH。【结论】与传统 VFFRLS 算法相比,本文所提 RRLS 算法的电机参数在线辨识方法可实现稳态高辨识精度,降低动态过程中超调量,且在负载扰动下在线辨识结果良好,系统鲁棒性高。

关键词: 同步磁阻电机;磁饱和效应;鲁棒递推最小二乘法;鲁棒损失函数

0 引言

同步磁阻电机(Synchronous Reluctance Motor, SynRM)采用硅钢片叠压转子结构,无需永磁体励磁,具备结构简单^[1]、成本低^[2]、无高温退磁风险^[3]及效率高等优势,因此在高效驱动领域受到广泛关注^[4]。然而,由于铁磁材料的非线性特性,SynRM 在运行过程中表现出强烈的磁饱和和效应,导致其 d - q 轴电感参数随电流幅值、负载条件及磁饱和程度发生显著变化^[5]。这种参数的非线性特性严重影响电机控制系统的精度与动态性能。同时,SynRM 的高性能控制严重依赖电机参数的准确性,因此,实现 SynRM 参数的高精度在线辨识,对于提升系统控制性能、增强其对运行条件变化的适应能力具有重要意义^[6]。

目前,SynRM 的参数辨识方法主要分为离线辨识与在线辨识两类。离线辨识通常在电机静止状态下通过注入激励信号获取参数,虽能获得初始参数,但无法实时响应运行中因温度、磁饱和等引起的参数变化,常需结合查表法使用^[7],存在适应性不足的问题。在线辨识则利用电机运行时的电压、电流和转速等实时信息,通过辨识算法动态更新参数,并反馈至控制器以实现自适应调节,具备更强的工程实用价值^[8]。例如,递推最小二乘法^[9](Recursive Least Square, RLS)、模型参考自适应系统^[10](Model Reference Adaptive System, MRAS)等,但其测量方式不易实现。

近年来,国内外学者围绕电机参数在线辨识

方法展开广泛研究,提出了诸如最小二乘法^[11]、随机梯度法、随机逼近法及智能控制算法^[12]等多种策略。例如,文献[13]采用高频注入结合 RLS 算法,在无传感器控制中提升了参数鲁棒性,但对计算资源要求较高;文献[14]提出自适应遗忘因子 RLS 方法,在永磁同步电机中实现了参数快速跟踪,但其算法复杂度高,难以应用于工程实际;文献[15]利用改进灰狼算法优化扩展卡尔曼滤波,虽提升了收敛速度与抗干扰能力,但计算负担大、依赖初始参数设定,工程应用受限;文献[16]提出的 MRAS 虽具备良好实时性,却因忽略电感非线性而影响其辨识精度;文献[17]利用改进金枪鱼群优化算法避免了局部最优,进一步提升了收敛精度,但是需要较高的算力,难以低成本应用。

综上所述,离线辨识难以应对工况变化,智能算法依赖初始化设置,传统 RLS 方法在计算复杂度与辨识精度之间难以兼顾。为此,本文提出一种基于变遗忘因子的鲁棒递推最小二乘法(Robust RLS, RRLS)的 SynRM 电感参数在线辨识策略,旨在保证计算效率的同时,提升辨识系统对磁饱和模型^[18]的鲁棒性与动态跟踪能力。

1 基于时变电感的 SynRM 数学模型

1.1 电机数学模型

SynRM 定子结构与传统三相交流电机相同,而转子结构特殊,具有较强的凸极性,通过 d - q 轴的磁阻差异来产生转矩,实现电机驱动。其转矩表达式为^[19]

$$T_e = \frac{3}{2}p(L_d - L_q)i_d i_q \quad (1)$$

式中: p 为电机极对数; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; i_d 、 i_q 分别为定子电流 d 、 q 轴分量。

转子磁链定向 d - q 轴坐标系下的定子电压方程可描述为^[20]

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴定子电压; ω_e 为转子电角速度; R_s 为定子电阻; ψ_d 、 ψ_q 分别为 d 、 q 轴磁链,其方程为^[21]

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入式(1),可得:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e L_d i_d \end{cases} \quad (4)$$

不考虑磁饱和时, L_d 、 L_q 为固定常数,且二者不随运行工况发生变化,此时 $L_d = d\psi_d/di_d$ 、 $L_q = d\psi_q/di_q$ 。考虑磁饱和时, L_d 、 L_q 随着 dq 轴定子电流的变化产生非线性畸变。此时, $L_d \neq d\psi_d/di_d$ 、 $L_q \neq d\psi_q/di_q$ 。

在电感变化的动态过程中,可根据磁链与定子电流的关系将电感分为视在电感与增量电感,增量电感与视在电感的变化趋势如图 1 所示。

增量电感与视在电感可表示为^[22]

$$\begin{cases} L_{app} = \psi/i \\ L_{inc} = d\psi/di \end{cases} \quad (5)$$

式中: L_{app} 为视在电感; L_{inc} 为增量电感。

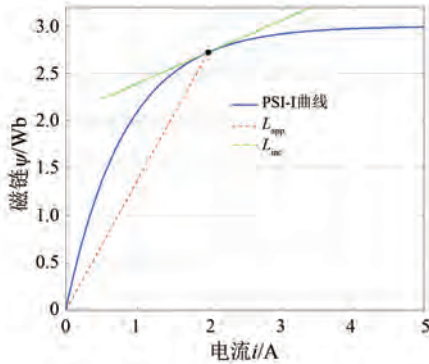


图 1 增量电感与视在电感示意图

Fig.1 Schematic diagram of incremental inductance and apparent inductance

若电机模型与实际对象未加区分,将导致失配,不仅限制控制精度,还可能引入难以观测的系统性误差。

同时,视在电感与增量电感的畸变程度会有所不同。因此,构建考虑磁饱和效应的模型,此时 SynRM 的定子定压方程可表示为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_{d,inc} \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_{q,app} i_q \\ u_q = R_s i_q + L_{q,inc} \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_{d,app} i_d \end{cases} \quad (6)$$

1.2 电感非线性数学模型

为了进一步研究 SynRM 的电感特性,根据文献[23],绘制 SynRM 的 d - q 轴视在电感 $L_{d,app}$ 和 $L_{q,app}$ 的关系曲线,如图 2 所示。

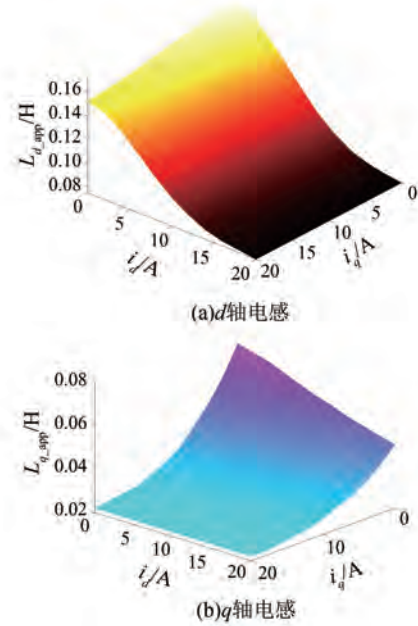


图 2 d - q 轴电感三维示意图

Fig.2 3D schematic diagram of d - q axis inductance

由图 2 可知,受磁饱和效应的影响, d 轴电感主要受同轴电流影响,当 i_d 增大时, $L_{d,app}$ 随 i_d 的增大而减小,同时受到交叉饱和的影响, $L_{d,app}$ 随 i_q 的增大而减小。但是同轴电流对电感的影响大于异轴电流对电感的影响,即磁饱和效应影响强于交叉耦合效应。反之,这一规律对 q 轴电感也成立。

通过建立 SynRM 的电流-磁链非线性数学模型,替代传统固定电感值的假设,可有效验证 SynRM 算法的可行性,并在此基础上提高控制算法的精度。基于测试数据进行参数辨识,可简化调试时间并简化数据处理过程。

由于 d - q 轴的视在电感 $L_{d,app}$ 与 $L_{q,app}$ 受到磁饱和与交叉耦合效应的影响,呈现出非线性变化,则:

$$\begin{cases} L_{d,app} = L_d(i_d, i_q) \\ L_{q,app} = L_q(i_d, i_q) \end{cases} \quad (7)$$

此时,将式(7)代入电机转矩计算式,可得 SynRM 动态电机转矩的表达式为

$$T_e = \frac{3}{2} p [L_d(i_d, i_q) - L_q(i_d, i_q)] i_d i_q \quad (8)$$

使用曲面拟合工具对有限元仿真得到的 d - q 轴电感参数进行多项式数据拟合, 可得:

$$L_d(i_d, i_q) = p_{00} + p_{10}i_d + p_{01}i_q + p_{11}i_d i_q + p_{02}i_q^2 + p_{20}i_d^2 + p_{21}i_d^2 i_q + p_{12}i_d i_q^2 + p_{30}i_d^3 + p_{03}i_q^3 + p_{31}i_d^3 i_q + p_{13}i_d i_q^3 + p_{40}i_d^4 + p_{04}i_q^4 \quad (9)$$

对于 d - q 轴电感 $L_d(i_d, i_q)$ 、 $L_q(i_d, i_q)$, 经过数据拟合, 令 i_d 、 i_q 最高项均为 4 次, 即可获得拟合函数, 拟合效果如图 3 所示。

其中, d - q 轴电感的 4 阶多项式拟合曲面与试验

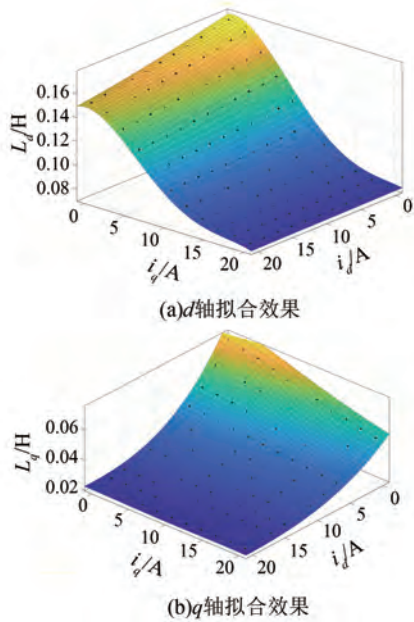


图 3 d - q 轴拟合效果图

Fig. 3 Fitting results of d - q axis inductance

数据点高度吻合。拟合优度指标显示, d - q 轴电感拟合的 R^2 分别为 0.999 9、0.999 5, 均接近 1, 表明该多项式模型能够较为精确地描述电感随电流变化的非线性规律, 验证了所提模型的有效性与准确性。

由于 SynRM 转子材料无永磁体励磁, 因此励磁电压必不可少, 传统 $i_d=0$ 控制方法难以直接使用。为此, 选择最大转矩电流比 (Maximum Torque Per Ampere, MTPA) 控制作为 SynRM 的电流分配方法。

为了在给定电流幅值 $I_s^2 = i_d^2 + i_q^2$ 条件下得到最大转矩, 需要求解优化问题。将上述的限制条件与式 (8) 联立, 通过拉格朗日乘数法求解极值^[24-25], 可得:

$$\begin{cases} i_d = I_s \cos \beta \\ i_q = I_s \sin \beta \end{cases}, \quad i_d = -|i_q| \quad (10)$$

同样地, 也可表示为

$$\tan \beta = \sqrt{\frac{L_d}{L_q}} \quad (11)$$

因此系统采用的的电流分配方式为

$$i_d = -|i_q| = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{\frac{2T_e}{3p(L_d - L_q)}} \quad (12)$$

通过位置传感器可以获得精准的转子位置角, 永磁同步电机的矢量控制算法^[26]也同样适用于 SynRM, 以实现 i_d 与 i_q 的解耦控制, 其矢量控制算法框图如图 4 所示。图中, ω^* 为给定转速; ω_m 为机械转速; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 d 、 q 轴参考电流; ASR 为转速调节器; ACR 为电流调节器; θ_m 、 θ_e 分别为机械位置角、电磁位置角。

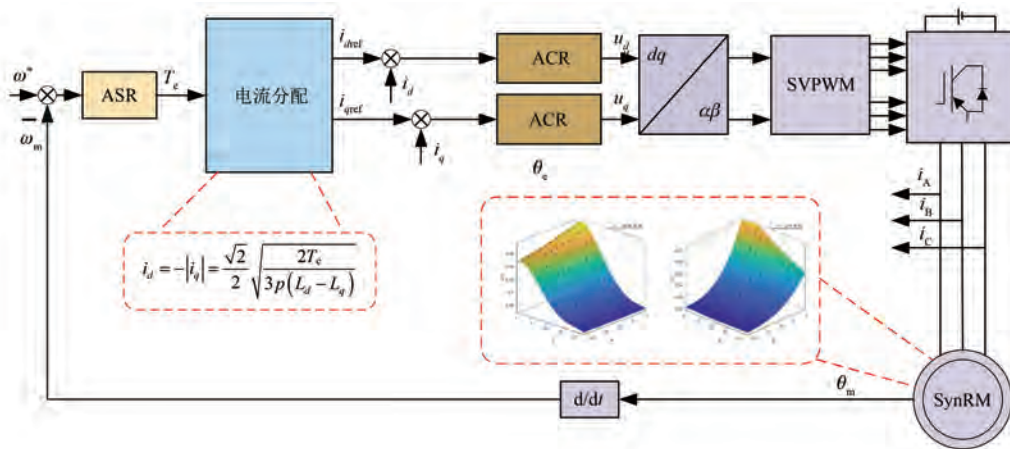


图 4 SynRM 矢量控制结构框图

Fig. 4 Structure block diagram of vector control of SynRM

2 RRLS 设计

2.1 基于变遗忘因子 RLS

传统的变遗忘因子递推最小二乘法 (Variable Forgetting Factor RLS, VFFRLS) 核心思想为采用特定的自适应律对旧参数估计值进行修正, 获得新参数估计值, 参数估计表达式为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t) = [\boldsymbol{\phi}^T(t)\boldsymbol{\phi}(t)]^{-1}\boldsymbol{\phi}^T(t)\mathbf{Y}(t) \quad (13)$$

式中: $\boldsymbol{\phi}(t) = [\boldsymbol{\phi}(t-1)/\boldsymbol{\phi}^T(t)]$; $\mathbf{Y}(t) = [\mathbf{Y}(t-1)/\mathbf{y}(t)]$ 。

令 $\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}^{-1}(t-1) - \boldsymbol{\phi}(t)\boldsymbol{\phi}^T(t)$, 由式 (13) 可得:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) = \mathbf{P}(t-1)\boldsymbol{\phi}^T(t-1)\mathbf{Y}(t-1) \quad (14)$$

由式 (13)、(14) 可得:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\phi}^T(t-1)\mathbf{Y}(t-1) &= \mathbf{P}^{-1}(t-1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(t-1) = \\ &[\mathbf{P}^{-1}(t-1) - \boldsymbol{\phi}(t)\boldsymbol{\phi}^T(t)]\boldsymbol{\theta}(t-1) \end{aligned} \quad (15)$$

且 t 时刻的估计值为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}(t) &= \mathbf{P}(t)\boldsymbol{\phi}^T(t)\mathbf{Y}(t) = \boldsymbol{\theta}(t-1) + \\ &\mathbf{K}(t)[\mathbf{y}(t-1) - \boldsymbol{\phi}^T(t)\boldsymbol{\theta}(t-1)] \end{aligned} \quad (16)$$

对式 (16) 进行求逆运算, 可得:

$$\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}(t-1) - \frac{\mathbf{P}(t-1)\boldsymbol{\phi}(t)\boldsymbol{\phi}^T(t)\mathbf{P}(t-1)}{1 + \boldsymbol{\phi}^T(t)\mathbf{P}(t-1)\boldsymbol{\phi}(t)} \quad (17)$$

式 (17) 两边同时乘以 $\boldsymbol{\phi}(t)$, 同时令 $\mathbf{K}(t) = \mathbf{P}(t)\boldsymbol{\phi}(t)$, 为降低旧数据在辨识过程中的权重, 引入固定遗忘因子的 RLS 辨识算法, 递推方程为

$$\begin{cases} \mathbf{P}(t) = \frac{1}{\lambda}[I - \mathbf{K}(t)\boldsymbol{\phi}(t)]\mathbf{P}(t-1) \\ \mathbf{K}(t) = \frac{\boldsymbol{\phi}^T(t)\mathbf{P}(t-1)}{\lambda + \boldsymbol{\phi}(t)\mathbf{P}(t-1)\boldsymbol{\phi}^T(t)} \\ \boldsymbol{\theta}(t) = \boldsymbol{\theta}(t-1) + \mathbf{K}(t)[\mathbf{y}(t) - \boldsymbol{\phi}^T(t)\boldsymbol{\theta}(t-1)] \end{cases} \quad (18)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}(t)$ 、 $\boldsymbol{\theta}(t-1)$ 分别为第 t 次、 $t-1$ 次的参数辨识结果; $\mathbf{P}(t)$ 、 $\mathbf{K}(t)$ 分别为协方差矩阵、增益矩阵; $\mathbf{y}(t)$ 、 $\boldsymbol{\phi}^T(t)$ 为输入变量矩阵; λ 为遗忘因子。

基于固定遗忘因子的 RLS 辨识算法虽然降低了旧数据权重, 保证了新数据对辨识矩阵的修正效果, 但在运行工况发生突变时, 受新数据影响, 辨识精度也发生变化。较高的取值可以获得较好的收敛速度和稳定性, 而较低的取值可以提高辨识算法的跟踪能力。

但是, 当系统的激励信号幅值较小时, 固定的遗忘因子可能导致协方差矩阵迅速增大, 从而增大参数估计误差。因此, 为了兼顾算法的抗干扰性和收敛速度, 可以使用一种随系统工况变化而改变的变遗忘因子, 其函数计算式为

$$\begin{cases} \lambda(t) = \alpha + (1 - \alpha)e^{\kappa}, 0.9 \leq \alpha \leq 1 \\ \kappa(t) = \text{round}(A\sigma^2), \end{cases} \quad (19)$$

式中: $\lambda(t)$ 为第 t 个采样周期的变遗忘因子; $\kappa(t)$ 为第 t 个采样周期的变遗忘因子幂指数; e 为取值为 0-1 的系数; $\text{round}(x)$ 为取整函数; $A > 0$ 为灵敏度增益; σ^2 为残差的平方。

传统 VFFRLS 根据自适应律动态调整遗忘因子, 存在两大缺陷: 一是未利用历史预测残差信息, 对负载扰动引发的突发误差抑制不足; 二是协方差矩阵易因激励信号微弱而发散, 导致稳态误差增大。因此, 需从误差补偿与鲁棒性优化两个方面改进算法。

2.2 RRLS

当电机稳定运行后, 其速度变化较小, 电流变化率近似为 0, 可将定子电压方程的微分项 $L_{inc} \cdot di_d/dt$ 视为零, 此时可将其视为电压微分扰动, 定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega_e L_{q_app} i_q \\ u_q = R_s i_q + \omega_e L_{d_app} i_d \end{cases} \quad (20)$$

将此稳态方程作为平衡条件, 求第 t 个采样周期的预测电压差, 可得:

$$y_t = u_d - R_s i_d \quad (21)$$

式中: y_t 为预测电压差。

保留连续 N 个采样周期的预测电压差作为预测电压差矩阵 \mathbf{Y}_t , 其表达式为

$$\mathbf{Y}_t = [y_1, y_2, \dots, y_N] \quad (22)$$

式中: y_N 为第 N 个采样周期的预测电压差, N 取 10。

求第 t 个采样周期的预测残差, 则:

$$\varepsilon_t = y_t - x_t \hat{L}(t-1) \quad (23)$$

式中: ε_t 为第 t 个采样周期的预测残差; y_t 为第 t 个采样周期的辨识误差, 当电机起动过程中可将电感初始值代入; $x_t = \omega_e i$ 为第 t 个采样周期的中间变量; $\hat{L}(t-1)$ 为上一采样周期的电感估计值。

预测标准差为

$$\hat{\sigma}_t = \frac{\text{Mid}|\mathbf{Y}_t - \text{Mid}(\mathbf{Y}_t)|}{c} \quad (24)$$

式中: $\text{Mid}(x)$ 为中位数运算; c 为估计系数, 取 0.674 5, 使得高斯数据无偏。

根据预测标准差的值构建鲁棒损失函数, 则:

$$\rho_t(\varepsilon_t) = \begin{cases} \varepsilon_t^2/2, & |\varepsilon_t| > \Delta \cdot \hat{\sigma}_t \\ (\Delta \cdot \hat{\sigma}_t)^2/2, & |\varepsilon_t| \leq \Delta \cdot \hat{\sigma}_t \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\rho_t(\varepsilon_t)$ 为鲁棒损失函数; $\Delta > 0$ 为异常值边界常数, 取 $\Delta = 3$ 。

此时, 递推表达式为

$$\begin{cases} \mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t-1} \mathbf{x}_t^T / [\lambda_t + \rho_t''(\varepsilon_t) \mathbf{x}_t \mathbf{P}_{t-1} \mathbf{x}_t^T] \\ \mathbf{P}_t = [\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \mathbf{x}_t \rho_t''(\varepsilon_t)] \mathbf{P}_{t-1} / \lambda_t \\ \hat{\mathbf{L}}(t) = \hat{\mathbf{L}}(t-1) + \mathbf{K}_t \rho_t'(\varepsilon_t) \end{cases} \quad (26)$$

式中: \mathbf{K}_t 为第 t 个采样周期的增益矩阵; ρ_t'' 为第 t 个采样周期鲁棒损失函数的二阶导数; \mathbf{x}_t^T 为 \mathbf{x}_t 的转置; \mathbf{P}_{t-1} 为上一采样周期的协方差矩阵; $\hat{\mathbf{L}}(t)$ 为第 t 个采样周期的参数估计; \mathbf{I} 为单位矩阵。

参数在线辨识流程图如图 5 所示。

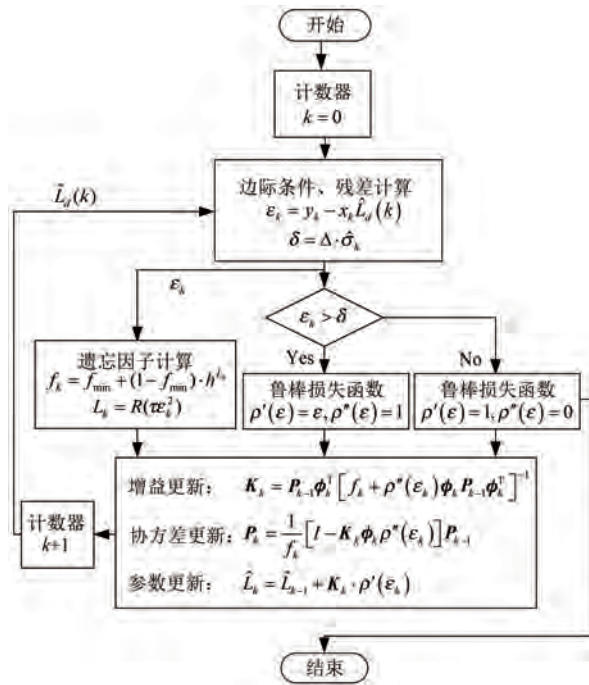


图 5 参数辨识算法流程图

Fig. 5 Parameter identification algorithm flowchart

3 仿真分析

3.1 仿真模型

为了验证所提 RRLS 算法的正确性, 在 Matlab/Simulink 中搭建 SynRM 仿真模型, 并与基于 RLS 与 VFFRLS 设计的参数辨识算法进行对比

验证。具体参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab. 1 Simulation parameters	
参数名称	参数值
额定功率 P/kW	5.5
额定电流 I/A	13.5
直轴电感 L_d/mH	75~173
交轴电感 L_q/mH	22~73
极对数 p	2
转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.002
阻尼系数 $B/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s})$	0.01
定子电阻 R_s/Ω	0.55
额定转速 $\omega/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	1 000

为公平对比算法的优劣势, 在 Matlab/Simulink 仿真中, 所有算法采用相同的运行条件。设置参数遗忘因子 $\alpha = 0.995$, 取系数 $A = 50$, 本文所提 RRLS 算法的控制框图如图 6 所示。

3.2 仿真结果分析

(1) 抗电压微分项扰动结果

为验证所提算法的有效性, 基于已建立的 SynRM 非线性驱动系统模型, 将初始转速设置为 1 000 r/min, 空载起动, 观察算法的收敛效果。RRLS 算法 d 、 q 轴的跟踪效果分别如图 7、8 所示。

由图 7 可知, d 轴参数辨识算法从系统开始运行到算法收敛需要 0.12 s, 稳态时 d 轴峰值误差为 1.5 mH, 此时的误差率为 0.2%。

由图 8 可知, q 轴参数辨识算法从系统开始运行到算法收敛需要 0.12 s, 稳态时 q 轴峰值误差为 0.75 mH, 此时的误差率为 1%。

(2) 抗负载扰动性能结果

为了估计参数观测算法对系统抗负载扰动的性能, 将 SynRM 的初始转速设置为 1 000 r/min, 带载起动。在 $t = 0$ 时施加 2 N·m 负载, $t = 1.5$ s 时突增至 8 N·m, 持续 1 s 后恢复至 2 N·m。通过分析 RRLS 算法对 d 轴电感参数的估计性能, 验证其鲁棒性, 如图 9 所示。RRLS 算法估计 q 轴电感参数抗负载扰动性能结果如图 10 所示。

由图 9 可知, 系统突加负载扰动时, RRLS 可以快速跟踪 d 轴给定值。 $t = 1.5$ s 时突加负载扰

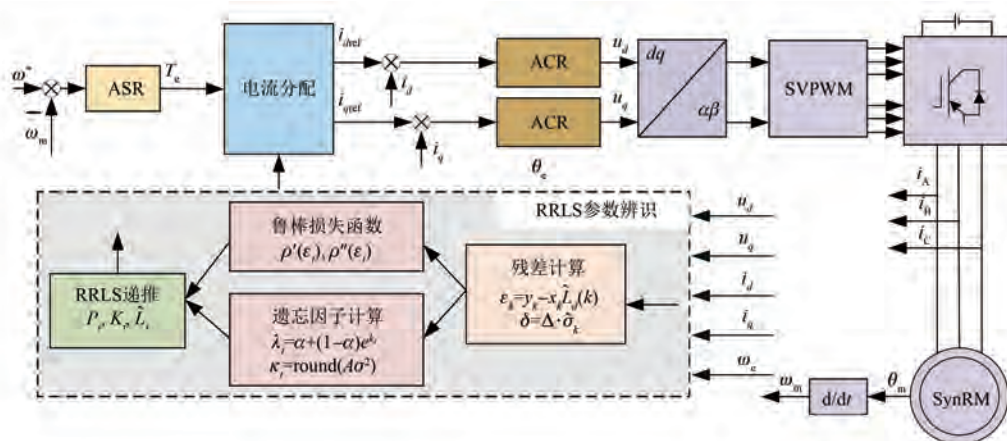


图 6 RRLS 算法结构框图

Fig. 6 RRLS algorithm structure block diagram

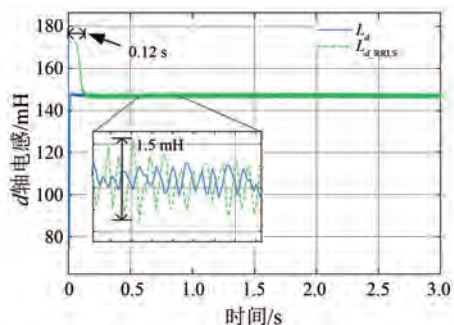


图 7 d 轴辨识效果图

Fig. 7 The d-axis identification performance diagram

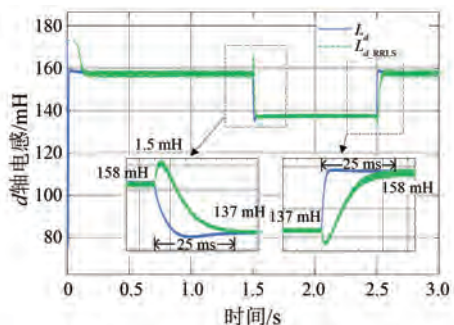


图 9 d 轴抗负载扰动性能

Fig. 9 The d-axis anti-load disturbance performance

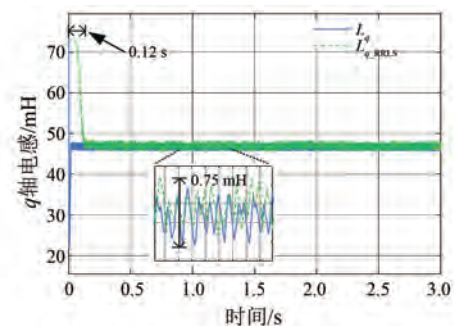


图 8 q 轴辨识效果图

Fig. 8 The q-axis identification performance diagram

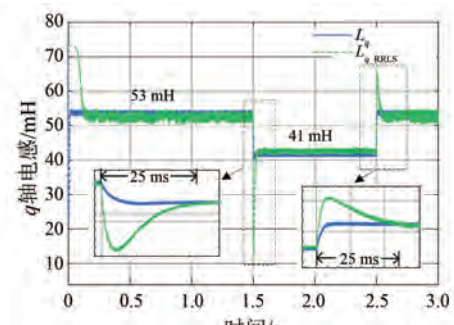


图 10 q 轴抗负载扰动性能

Fig. 10 The q-axis anti-load disturbance performance

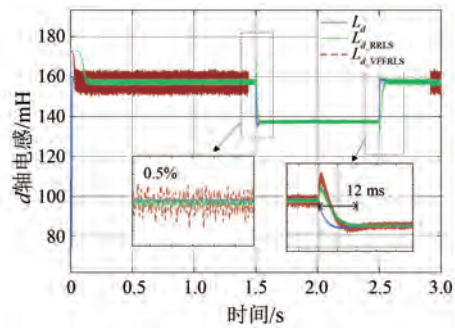
动,电流增大, d 轴电感随之减小,在 25 ms 收敛到稳态值,稳态误差范围在 4 mH 以内,误差率为 0.5%; $t=2.5$ s 时突减扰动负载,电流减小, d 轴电感增大,在 25 ms 收敛到稳态值,稳态误差小于 0.5%。

由图 10 可知,系统突加负载扰动时,RRLS 可以快速跟踪 q 轴给定值。 $t=1.5$ s 和 $t=2.5$ s 时突加负载,经过 25 ms 均能收敛到稳态值,稳态误差

(3) 传统方法对比效果

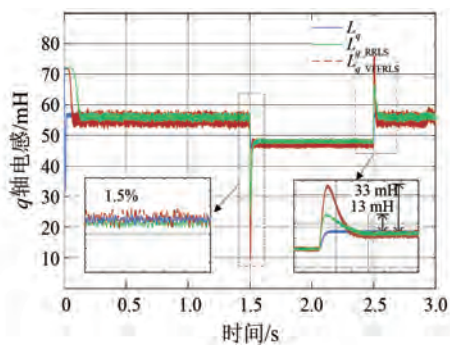
为了验证所提 RRLS 算法的改进效果,在负载阶跃变化的工况下将所提 RRLS 算法与传统 VFFRLS 算法进行对比, d 、 q 轴仿真波形分别如图 11、12 所示。

由图 11 可知,RRLS 的 d 轴电感稳态误差率为 0.5%,优于 VFFRLS,且其波形平整度优于

图 11 d 轴仿真波形Fig. 11 The d -axis simulation waveforms

VFFRLS。传统方法均在 12 ms 左右实现收敛,收敛速度略优于 RRLS,但 RRLS 动态调节过程的超调量较小,具有更强的鲁棒性。

由图 12 可知,RRLS 的 q 轴电感稳态误差率为 1.5%,优于 VFFRLS 的 4%,且其波形平整度优于 VFFRLS。RRLS 动态调节过程在 0.12 s 收敛,超调量为 13 mH,其调节过程更为平缓,在收敛速度和超调量方面均优于 VFFRLS 算法。

图 12 q 轴仿真波形Fig. 12 The q -axis simulation waveforms

4 结语

针对 SynRM 受磁饱和效应产生的电感参数畸变,本文在分析磁饱和 SynRM 数学模型与电流—电压特性基础上,提出了一种基于 RRLS 电感参数在线辨识算法。通过对 SynRM 驱动系统进行建模,并结合控制策略和仿真验证,可得出以下结论。

(1) 本文所提 RRLS 算法通过引入预测残差作为估计的误差补偿,实现了对系统电机参数的高精度在线辨识, d 轴空载稳态估计误差在 0.5% 以内, q 轴空载稳态估计误差在 4% 以内。

(2) 将负载作为系统主扰动,所提 RRLS 算法

有效抑制了带载情况下的参数估计误差,提升了参数辨识的动态响应,降低了稳态误差。 d 轴带载稳态估计误差在 0.5% 以内, q 轴带载稳态估计误差在 1.5% 以内,提升了算法鲁棒性。

(3) 本文所提 RRLS 算法在突变负载扰动与参数失配的运行工况下,将动态过程中超调量由 33 mH 降至 13 mH,具有更强的动态性能。

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

刘江进行了方案设计,王方一进行了论文撰写和仿真研究,宋佳佳进行了内容总结,孙产刚参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme was designed by Liu Jiang. The paper was written and the simulation research was conducted by Wang Fangyi. The content was summarized by Song Jiajia. The paper was reviewed and revised by Sun Chan'gang. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 王建渊,王海啸,尹忠刚,等. 基于一阶线性自抗扰控制器的同步磁阻电机无速度传感器控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4405-4421.
Wang J Y, Wang H X, Yin Z G, et al. Sensorless control of synchronous reluctance motor based on first order linear active disturbance rejection controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4405-4421.
- [2] Murataliyev M, Degano M, Di Nardo M, et al. Synchronous reluctance machines: A comprehensive review and technology comparison [J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(3): 382-399.
- [3] 龚佳乐,李明,郑继鑫. 过载对屏蔽式永磁同步电机性能的影响[J]. 电机与控制应用, 2025, 52(4): 412-421.
Gong J L, Li M, Zheng J X. Effect of overload on

- performance of canned permanent magnet synchronous motors [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(4): 412-421.
- [4] 彭一峰. 同步磁阻电机动态仿真分析与控制策略研究[D]. 济南: 山东大学, 2024.
- Peng Y F. Research on dynamic simulation analysis and control strategy of synchronous reluctance motor [D]. Ji'nan: Shandong University, 2024.
- [5] 康辉. 考虑磁饱和的同步磁阻电机 MTPA 与弱磁控制[D]. 西安: 西安理工大学, 2022.
- Kang H. MTPA and flux weakening control of synchronous reluctance motor considering magnetic saturation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2022.
- [6] 鲍崇, 隋宇, 孙海纳, 等. 同步磁阻电机交叉饱和和特性参数辨识与建模[J]. *南京航空航天大学学报*, 2024, 56(5): 834-846.
- Bao C, Sui Y, Sun H N, et al. Parameter identification and modeling of cross-saturated synchronous reluctance motor [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2024, 56(5): 834-846.
- [7] 李苗. 永磁同步电机参数辨识及模型预测控制研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2024.
- Li M. Research on parameter identification and model predictive control of permanent magnet synchronous motor [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [8] 李婕, 杨淑英, 谢震, 等. 基于有效信息迭代快速粒子群优化算法的永磁同步电机参数在线辨识[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(18): 4604-4613.
- Li J, Yang S Y, Xie Z, et al. Online parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on fast particle swarm optimization algorithm with effective information iterated [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(18): 4604-4613.
- [9] 石建飞, 戈宝军, 吕艳玲, 等. 永磁同步电机在线参数辨识方法研究[J]. *电机与控制学报*, 2018, 22(3): 17-24.
- Shi J F, Ge B J, Lyv Y L, et al. Research of parameter identification of permanent magnet synchronous motor on line [J]. *Electric Machines and Control*, 2018, 22(3): 17-24.
- [10] 朱雅, 贺昱曜, 许宇豪, 等. 基于级联 MRAS 的 PMSM 参数在线辨识算法[J]. *西北工业大学学报*, 2017, 35(3): 486-493.
- Zhu Y, He Y Y, Xu Y H, et al. Online identification of PMSM parameters based on cascade MRAS [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2017, 35(3): 486-493.
- [11] 方八零, 李伟, 陈达伟, 等. 基于多新息递推最小二乘和多新息扩展卡尔曼滤波算法的永磁同步电机参数辨识[J/OL]. *上海交通大学学报*, 2026-01-17. <https://link.cnki.net/doi/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.134>.
- Fang B L, Li W, Chen D W, et al. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on multi-innovation recursive least squares and multi-innovation extended Kalman filter algorithms [J/OL]. *Journal of Shanghai Jiao tong University*, 2026-01-17. <https://link.cnki.net/doi/10.16183/j.cnki.jsjtu.2025.134>.
- [12] Ullah K, Guzinski J, Mirza A F. Critical review on robust speed control techniques for permanent magnet synchronous motor (PMSM) speed regulation [J]. *Energies*, 2022, 15(3): 1235.
- [13] Kim H-S, Lee K. Model predictive current control with online parameter estimation for synchronous reluctance machine controlled by high-frequency signal injection position-sensorless [J]. *Access*, 2022, 10: 25267-25277.
- [14] 王刚毅, 余志浩, 李中启. 基于自适应递归最小二乘法永磁同步电机在线参数辨识与转矩优化[J]. *电气时代*, 2025(10): 148-157.
- Wang G Y, Yu Z H, Li Z Q. Online parameter identification and torque optimization of permanent magnet synchronous motor based on adaptive recursive least squares algorithm [J]. *Electric Age*, 2025(10): 148-157.
- [15] 姚磊, 郑子健, 李天皓, 等. 基于 IGWO-AEKF 的永磁同步电机参数辨识[J/OL]. *系统仿真学报*, 2026-01-15. <https://link.cnki.net/doi/10.16182/j.issn1004731x.joss.25-0634>.
- Yao L, Zheng Z J, Li T H, et al. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on IGWO-AEKF [J/OL]. *Journal of System Simulation*, 2026-01-15. <https://link.cnki.net/doi/10.16182/j.issn1004731x.joss.25-0634>.
- [16] 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.
- [17] 邵克勇, 陈威杰, 郝晓伟. 改进金枪鱼群算法的永磁同步电机多参数辨识[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(10): 1097-1107.
- Shao K Y, Chen W J, Hao X W. Multi parameter identification of permanent magnet synchronous motor with improved tuna swarm optimization algorithm [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(10): 1097-1107.
- [18] 宋雨生, 郭长兴, 李凤姣, 等. 考虑磁饱和效应的同步磁阻电机倾斜角补偿的无传感器低速控制策略[J/OL]. *电源学报*, 2026-03-07. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20250306.1537.011>.
- Song Y S, Guo C X, Li F J, et al. Sensorless low-speed control strategy for synchronous reluctance motor with tilt angle compensation considering magnetic saturation effect [J/OL]. *Journal of Power Supply*, 2026-03-07. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.tm.20250306.1537.011>.
- [19] 王奇维, 赖芷璇, 李斌兴, 等. 考虑饱和及耦合特性的同步磁阻电机零低速运行位置观测方法[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(24): 7958-7968.
- Wang Q W, Lai Z X, Li B X, et al. Position observation method for synchronous reluctance motor at zero and low speeds considering saturation and coupling characteristics [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(24): 7958-7968.
- [20] 项润华. 基于有效磁链观测的同步磁阻电机无传感器控制策略[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- Xiang R H. Active flux observer based sensorless SynRM drives strategy [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2022.
- [21] 仇一鸣, 康琦, 汪镭, 等. 同步磁阻电机 dq 轴交叉耦合饱和和电感模型参数寻优方法[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(4): 85-92.
- Qiu Y M, Kang Q, Wang L, et al. A parameter optimization method for dq axis inductance model of synchronous reluctance motors considering cross-coupling magnetic saturation [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(4): 85-92.
- [22] 陈赓, 杨淑英, 张兴. 考虑磁饱和效应的永磁同步电机在线参数辨识[J/OL]. *电源学报*, 2026-01-13. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20240426.1156.058>.
- Chen G, Yang S Y, Zhang X. Online parameters identification of permanent magnet synchronous motor considering magnetic saturation effect. *Journal of Power Supply*, 2026-01-13. <https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20240426.1156.058>.
- [23] Hinkkanen M, Pescetto P, Mölsä E, et al. Sensorless self-commissioning of synchronous reluctance motors at standstill without rotor locking [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 53(3): 2120-2129.
- [24] Sun T F, Koç M, Wang J B. MTPA control of IPMSM drives based on virtual signal injection considering machine parameter variations [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8): 6089-6098.
- [25] 王子昭, 费骏韬, 史林军, 等. 永磁同步电机电流控制策略比较分析[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(5): 64-71.
- Wang Z Z, Fei J T, Shi L J, et al. Comparative analysis on current control methods of permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2019, 46(5): 64-71.
- [26] 孙东, 孙士奇, 王彤辉, 等. 并联永磁同步电机系统统一坐标系建模及其矢量控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2025, 52(5): 501-512.
- Sun D, Sun S Q, Wang T H, et al. Unified coordinate system modeling and vector control strategy for parallel permanent magnet synchronous motor systems [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2025, 52(5): 501-512.

收稿日期:2025-12-29

收到修改稿日期:2026-01-29

作者简介:

刘江(1987—),男,博士,副教授,研究方向为电力电子与电气传动,liujiang@wit.edu.cn;

*通信作者:王方一(2000—),男,硕士研究生,研究方向为电机控制,15613619001@163.com。