

基于改进模型参考自适应系统的永磁同步电机参数辨识

李垣江[†], 董 鑫, 魏海峰, 张 懿, 刘维亭

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘要: 针对永磁同步电机多参数辨识时, 数学模型存在的欠秩问题, 提出一种改进模型参考自适应系统的分步在线辨识方法. 该方法采用Popov超稳定性理论设置自适应律, 可以保证辨识时系统的稳定性; 在改进的模型参考自适应系统中, 首先辨识定子电阻、转子磁链, 待两个参数辨识结果稳定后, 再辨识直交轴电感. 这样在同一个模型中实现多个参数辨识, 克服了由于数学模型欠秩问题而导致辨识结果的不确定性. 仿真结果表明, 本文设计的方法辨识速度较快, 辨识度高, 具有一定的实用性.

关键词: 永磁同步电机; 参数辨识; 模型参考自适应系统; 在线辨识; 模型欠秩

引用格式: 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. 控制理论与应用, 2020, 37(9): 1983 – 1988

DOI: 10.7641/CTA.2020.90654

Parameter identification method of permanent magnet synchronous motor based on improved model reference adaptive system

LI Yuan-jiang[†], DONG Xin, WEI Hai-feng, ZHANG Yi, LIU Wei-ting

(College of Electronic Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang Jiangsu 212003, China)

Abstract: Aiming at the under-ranking problem of the mathematical model during multi-parameter identification of permanent magnet synchronous motors, a step-by-step online identification method to improve the model reference adaptive system is proposed. This method uses Popov hyperstability theory to set the adaptive law, which can ensure the identification stability of the system. In the improved model reference adaptive system, the stator resistance and the rotor flux are first identified, and after the two parameter identification results are stable, the orthogonal axis inductance is identified. In this way, multiple parameters are implemented in the same model. The identification overcomes the uncertainty of the identification result due to the underranking problem of the mathematical model. The simulation results show that the method designed in this paper has fast identification speed, high identification degree, and has certain practicability.

Key words: permanent magnet synchronous motor; parameter identification; model reference adaptive system; online identification; model underrank

Citation: LI Yuanjiang, DONG Xin, WEI Haifeng, et al. Parameter identification method of permanent magnet synchronous motor based on improved model reference adaptive system. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(9): 1983 – 1988

1 引言

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 具有体积小、功率因数高、起动力矩大等特点, 特别是由于近几年国家对稀土资源非常重视, 使得永磁同步电机的制造成本逐渐降低, 得到越来越多发展空间, 广泛应用在伺服控制系统, 以及国家大力推广的新能源汽车领域和轨道交通领域等.

永磁同步电机的控制系统是一个多变量时变系统,

实际的控制方法取决于搭建的电机数学模型. 但是电机在实际运行时, 会受到各种各样不确定因素的干扰, 电气参数会发生变化, 就会导致电机的实际电气参数与模型中的电气参数不相匹配, 影响整个系统的控制性能. 所以, 研究如何实时获取电气参数, 来提高永磁同步电机的控制性能, 一直是近年来众多学者研究的热点.

永磁同步电机参数辨识方法可分为离线辨识和在

收稿日期: 2019-08-05; 录用日期: 2020-03-18.

[†]通信作者. E-mail: liyuanjiang@just.edu.cn; Tel.: +86 15952891572.

本文责任编辑: 陈增强.

国家自然科学基金项目(51977101), 江苏省省重点研发计划产业前瞻与共性关键技术重点项目(BE2018007)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51977101) and the Key Research and Development Program Industry Prospect and Common Key Technological Key Projects of Jiangsu (BE2018007).

线辨识. 为了实现对电机的实时检测与控制, 显然在线辨识更能满足精准的控制要求^[1]. 由永磁同步电机在dq坐标系下的数学模型可知, 影响永磁同步电机精准控制的电气参数主要有定子电阻、直交轴电感、转子磁链. 而dq坐标系下仅有两个方程, 当辨识3个参数时, 存在状态方程欠秩问题. 文献[2]针对永磁同步电机方程欠秩问题, 在q轴电压方程的基础上, 构造多个稳态情况, 并结合遗忘因子递推最小二乘法, 可有效辨识出电机参数, 但构造多个稳态过程较为繁琐. 文献[3]在传统的最小二乘法的基础上, 引入“折息因子”, 使参数辨识误差进一步减小, 且提高了收敛速度, 但是只能辨识电阻和直交轴电感两个参数. 除此之外, 还有学者用卡尔曼滤波算法^[4-6]和神经网络智能算法^[7-10]进行辨识, 但大多数的算法只能辨识两个参数, 且计算量较大, 尤其用智能算法生成的结果具有不确定性. 文献[11]利用模型参考自适应系统(model reference adaptive system, MRAS)对永磁同步电机的直交轴电感、定子电阻和转子磁链进行同时辨识, 但是忽略了在dq坐标系下状态方程的欠秩问题^[12], 不能保证辨识结果的唯一性. 文献[13]利用模型参考自适应系统辨识多参数, 但开始时就用了额定电阻和磁链进行参数辨识, 这样会带来误差, 会导致整个系统辨识度不高. 文献[14]和文献[15], 通过级联两个模型参考自适应系统来解决状态方程的欠秩问题, 但增加了方法的计算量, 且应用第一个模型参考自适应系统进行参数辨识时, 采用离线辨识的方法解决状态方程欠秩问题.

本文针对永磁同步电机多参数在线辨识时存在的状态方程欠秩问题, 提出一种改进模型参考自适应系统的分步在线辨识方法. 该方法以永磁同步电机作为参考模型, 首先辨识定子电阻和转子磁链, 等到这两个参数值稳定后, 将其作为已知量输入到第2个可变模型中, 再辨识电感, 解决了状态方程欠秩问题, 保证了结果的唯一性. 仿真结果表明, 本文所提出的辨识方法, 辨识速度较快, 准确度高, 具有一定的实用性.

2 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机是典型的多变量时变系统, 且其中大部分元件具有非线性特性. 为研究方便, 假设磁场正弦分布, 忽略磁滞、磁饱和与涡流现象等, 则永磁同步电机在dq坐标系下的动态电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega_e \psi_q + p\psi_d, \\ u_q = R_s i_q + \omega_e \psi_d + p\psi_q. \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f, \\ \psi_q = L_q i_q, \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d, u_q 和 i_d, i_q 为定子dq轴坐标系上电压和电流, L_d, L_q 为dq轴上电感, R_s 为定子电阻, ψ_f, ψ_d, ψ_q 为

转子磁链、dq轴上磁链, ω_e 为转子电角速度, p 为微分算子.

将式(2)代入式(1)得

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

针对于表贴式永磁同步电机, 其dq轴电感相等, 即 $L_d = L_q = L$, 所以最终的数学模型为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{u_d}{L} + \omega_e i_q - \frac{R_s}{L} i_d, \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{u_q}{L} - \omega_e i_d - \frac{R_s}{L} i_q - \frac{\psi_f}{L} \omega_e. \end{cases} \quad (4)$$

永磁同步电机所需的辨识参数包括定子电阻 R_s 、直交轴电感 L 和转子磁链 ψ_f . 然而, 从式(4)可知, 要从数学模型为二维的方程中对3个未知量进行求解, 肯定有结果, 但是不唯一, 即方程欠秩. 所以, 辨识3个参数时, 只能先固定1个, 再辨识其他2个参数; 或者再添加1个线性无关的方程, 进行3个参数辨识.

3 改进模型参考自适应系统的在线辨识

3.1 典型模型参考自适应系统

一个典型模型参考自适应系统结构包含参考模型、可变模型和自适应律3部分, 其系统结构如图1所示. 基本原理是构造两个具有相同输出量的模型, 其中将含有待估参数的模型作为可变模型. 然后设计自适应律使输出误差收敛到零, 使参考模型和可变模型参数保持一致.

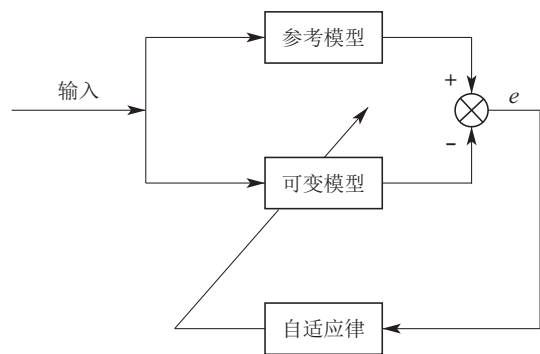


图1 典型模型参考自适应系统结构框图

Fig. 1 Structural block diagram of typical model reference adaptive system

模型参考自适应系统的自适应律设计对整个系统的收敛性具有很大影响. 通常有两种设计方法: 基于Lyapunov稳定性理论的方法和基于Popov超稳定性理论的方法. 其中, Lyapunov稳定性理论可以成功地用于设计稳定模型参考自适应系统, 但是其应用总是受到某种限制, 因为一般不知道怎么去扩大合适的Lyapunov函数类以导出较大的自适应律族. 这是很重要的问题, 因为在实际系统设计时, 通常要得到保证系统稳定的最大可能的自适应律族, 然后从中选择与

实际对象最合适的自适应律. 另外, 需要选择适当的Lyapunov函数, 如果没有一定的理论知识和实践经验, 就很难对具体系统选出满意的Lyapunov函数, 因而也就不易获得较好的自适应律.

为解决上述问题, 本文采用基于Popov超稳定性理论的模型参考自适应系统设计方法. 它不仅不需要选择Lyapunov函数, 而且能给出一族自适应律, 从而有利于结合实际系统比较灵活地选择合适的自适应律.

3.2 改进模型参考自适应系统

针对永磁同步电机参数辨识时, 状态方程的欠秩问题, 本文在典型模型参考自适应系统的基础上, 设计了一种改进方法, 其结构框图如图2所示, 其中参考模型为永磁同步电机本身, 也就是式(4).

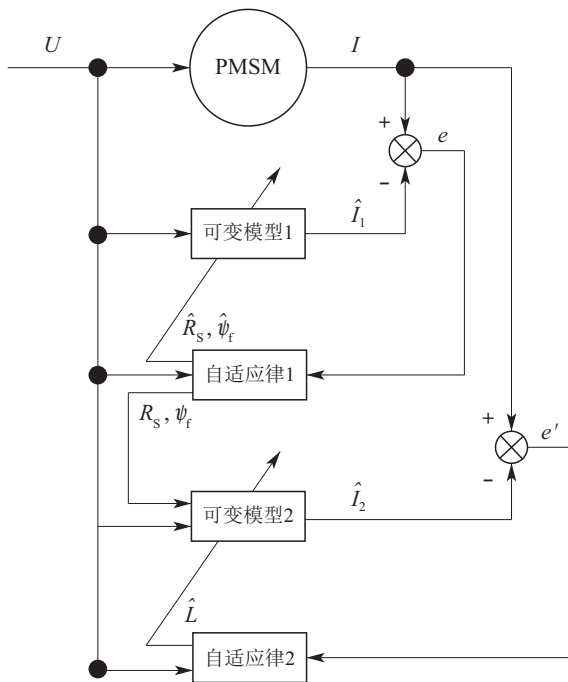


图2 改进模型参考自适应系统辨识参数框图

Fig. 2 Improved model reference adaptive system identification parameter block diagram

具体的辨识步骤如下:

1) 固定电感L. 由前文分析, 可以先固定一个参数, 然后再辨识其他两个参数. 在本文中, 提出两种固定方式: a) 直接从电机手册中获得; b) 通过辨识获得. 通过观察式(4)中的第1个等式, 在d轴方程中只存在两个未知参数: R_s 和 L ; 当采用 $i_d = 0$ 的矢量控制时, 最后一项 $(R_s/L)i_d$ 将会对整个式子没有影响, 其中 R_s 的大小不影响最终的结果, 只剩下一个未知数 L , 故可以确定 L 的大小. 而本文采用的是第1种固定方式, 根据电机手册获得其值.

2) 辨识参数 R_s 和 ψ_f . 以永磁同步电机在dq坐标系下的数学模型作为参考模型, 将上一步中 L 的作为已知量, 设计可变模型, 此时只有两个未知量, 方程有唯一解. 再设计自适应律进行辨识参数 R_s 和 ψ_f .

3) 辨识参数 L . 等到上一步中的 R_s 和 ψ_f 值稳定时, 作为已知量输入到第2个可变模型中, 设计自适应律辨识电感 L .

4 参数辨识的实现

4.1 确定参考模型和可变模型

将电机的参考模型式(4)写为如下形式:

$$pI = AI + BU + CW, \quad (5)$$

式中:

$$I = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ -\beta & \alpha \end{bmatrix},$$

$$B = \frac{1}{L}, \quad U = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix}, \quad C = -\frac{\psi_f}{L},$$

$$W = \begin{bmatrix} 0 \\ \beta \end{bmatrix}, \quad \alpha = -\frac{R_s}{L}, \quad \beta = \omega_e.$$

可变模型可写为

$$p\hat{I}_1 = \hat{A}\hat{I}_1 + BU + \hat{C}W, \quad (6)$$

即对应辨识框图中的可变模型1. 式中:

$$\hat{I}_1 = \begin{bmatrix} \hat{i}_d \\ \hat{i}_q \end{bmatrix}, \quad \hat{A} = \begin{bmatrix} \hat{\alpha} & \beta \\ -\beta & \hat{\alpha} \end{bmatrix}, \quad \hat{C} = -\frac{\hat{\psi}_f}{L}, \quad \hat{\alpha} = -\frac{\hat{R}_s}{L},$$

则差值表达式为 $e = I - \hat{I}_1 = [e_1 \ e_2]^T$, 式中:

$$e_1 = i_d - \hat{i}_d, \quad e_2 = i_q - \hat{i}_q.$$

将差值写为描述误差的状态方程

$$pe = pI - p\hat{I}_1 =$$

$$(AI - \hat{A}\hat{I}_1) + (BU - BU) + (CW - \hat{C}W) =$$

$$(AI - A\hat{I}_1) + (A\hat{I}_1 - \hat{A}\hat{I}_1) + hW =$$

$$Ae + a\hat{I}_1 + hW, \quad (7)$$

式中: $a = A - \hat{A}$, $h = C - \hat{C}$.

记 $\varphi^T = [a \ h]$, $s = [\hat{I}_1 \ W]$, 则式(7)可以写为

$$pe = Ae + \varphi s. \quad (8)$$

4.2 自适应律设计

根据误差状态方程, 引入线性补偿矩阵 D , 转化为等效非线性反馈系统, 如图3所示. 根据Popov超稳定性理论, 模型参考自适应系统全局渐近稳定的条件是其正向通路的线性定常传递函数严格正实, 反馈通路的非线性环节满足Popov不等式.

系统的正向线性环节和非线性反馈环节描述为

$$\begin{cases} pe = Ae + \varphi s = Ae + E(-w), \\ V = De. \end{cases} \quad (9)$$

引入正实引理来保证前向回路的正实性. 一个严格正实系统传递函数矩阵如下:

$$\begin{cases} \dot{p}x(t) = Ax(t) + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t) + Du(t), \end{cases} \quad (10)$$

式中: $x(t)$ 为状态矢量; $u(t), y(t)$ 分别为输入、输出矢量; A, B, C, D 为相应维数的常数矩阵, 并且 (A, B) 完全可控, (A, C) 完全可观, 其传递函数矩阵为

$$G(s) = D + C(sE - A)^{-1}B. \quad (11)$$

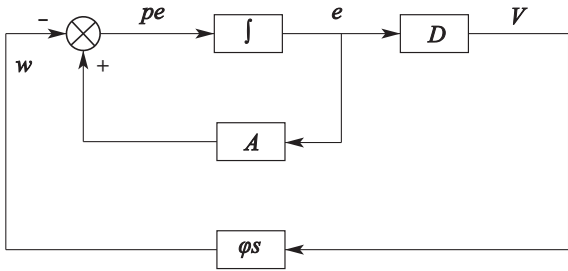


图3 非线性反馈系统

Fig. 3 Nonlinear feedback system

若系统(8)的传递函数 $G(s)$ 是正实的, 当且仅当存在对称正定矩阵 P 、实矩阵 K 和 L , 并且满足

$$\begin{cases} PA + A^T P = -LL^T, \\ B^T P + K^T L^T = C, \\ K^T K = D + D^T, \end{cases} \quad (12)$$

则对于本系统而言, 其正实条件可简化为

$$\begin{cases} PA + A^T P = -LL^T, \\ E^T P = D, \end{cases} \quad (13)$$

其传递函数为

$$G(s) = D(sE - A)^{-1}E. \quad (14)$$

取正定对称矩阵 $P = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$, 代入式(13)得

$$\begin{cases} PA + A^T P = \begin{bmatrix} -\frac{2R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{2R}{L} \end{bmatrix} = -Q, \\ E^T P = D = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (15)$$

显然, Q 为半正定矩阵, (A, E) 完全可控, (A, D) 完全可观, 即表明系统传递函数(14)为严格正实传递函数, 前向线性定常模块同样严格正实。

根据Popov超稳理论, 若使这个系统渐进稳定, 其中的非线性时变反馈环节必须满足下述积分方程不等式:

$$\eta(0, t_1) = \int_0^{t_1} v^T w dt \geq -\gamma_0^2, \quad t_1 \geq 0, \quad (16)$$

其中: η 是输入输出内积的积分, 它表示输入输出积的平均值大于某一个负常数, 且允许输入输出积在某些

时刻可小于零; v 为反馈环节的输入矢量; w 为输出矢量; γ_0 为与 t_1 互相独立的任意有限正数。

将该系统的输入矢量和输出矢量代入得

$$\begin{aligned} \eta(0, t_1) &= - \int_0^{t_1} (De)^T (a\hat{I}_1 + hW) dt = \\ &= - \int_0^{t_1} e^T (a\hat{I}_1 + hW) dt \geq -\gamma_0^2. \end{aligned} \quad (17)$$

将其拆解为

$$\begin{cases} \eta_1(0, t_1) = - \int_0^{t_1} e^T a\hat{I}_1 dt \geq -\gamma_1^2, \\ \eta_2(0, t_1) = - \int_0^{t_1} e^T hW dt \geq -\gamma_2^2. \end{cases} \quad (18)$$

在此, 证明式(18)中的 $\eta_1(0, t_1)$ 成立。

证 将式(18)整理得

$$\begin{aligned} \eta_1(0, t_1) &= - \int_0^{t_1} e^T a\hat{I}_1 dt = \\ &= \int_0^{t_1} e^T \hat{I}_1 \left(\frac{R_s}{L} - \frac{\hat{R}_s}{L} \right) dt \geq -\gamma_1^2. \end{aligned} \quad (19)$$

以PI形式设置相应的自适应律为

$$\begin{aligned} \frac{\hat{R}_s}{L} &= \frac{R_s}{L} - \int_0^t K_1 (e_1 \hat{i}_d + e_2 \hat{i}_q) dt - \\ &= K_2 (e_1 \hat{i}_d + e_2 \hat{i}_q), \end{aligned} \quad (20)$$

其中 K_1, K_2 为比例积分常数。

将式(20)代入到式(19), 则式(19)可化为

$$\begin{aligned} \eta_1(0, t_1) &= \\ &= \int_0^{t_1} e^T \hat{I}_1 \left(\int_0^t K_1 (e_1 \hat{i}_d + e_2 \hat{i}_q) dt \right) dt + \\ &= \int_0^{t_1} e^T \hat{I}_1 (K_2 (e_1 \hat{i}_d + e_2 \hat{i}_q)) dt \geq -\gamma_1^2. \end{aligned} \quad (21)$$

将上式拆为两部分

$$\begin{cases} \eta_{11}(0, t_1) = \\ \int_0^{t_1} e^T \hat{I}_1 \left(\int_0^t K_1 (e_1 \hat{i}_d + e_2 \hat{i}_q) dt \right) dt \geq -\gamma_{11}^2, \\ \eta_{12}(0, t_1) = \\ \int_0^{t_1} e^T \hat{I}_1 (K_2 (e_1 \hat{i}_d + e_2 \hat{i}_q)) dt \geq -\gamma_{12}^2. \end{cases} \quad (22)$$

根据不等式

$$\int_0^t f(t)pf(t)dt = \frac{1}{2}[f^2(t) - f^2(0)] \geq -\frac{1}{2}f^2(0), \quad (23)$$

则由上式可以证明式(22)成立, 即满足Popov稳定性的要求, 基于PI自适应律成立。证毕。

同理, 根据式(18)中的 $\eta_2(0, t_1)$, 可得 ψ_f 的自适应律为

$$\frac{\hat{\psi}_f}{L} = \frac{\psi_f}{L} - K'_1 \int_0^t \omega_e e_2 dt - K'_2 \omega_e e_2, \quad (24)$$

可得自适应律1为式(20)和式(24)。

最后从电机手册中获得电感 L 值, 作为已知量进行参数 R_s 和 ψ_f 的辨识.

4.3 辨识电感 L

当参数 R_s 和 ψ_f 辨识稳定以后, 作为已知量输入到可变模型 2, 如下式:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}'_d}{dt} = \frac{u_d}{\hat{L}} + \omega_e \hat{i}'_q - \frac{R_s}{\hat{L}} \hat{i}'_d, \\ \frac{d\hat{i}'_q}{dt} = \frac{u_q}{\hat{L}} - \omega_e \hat{i}'_d - \frac{R_s}{\hat{L}} \hat{i}'_q - \frac{\psi_f}{\hat{L}} \omega_e. \end{cases} \quad (25)$$

其余计算过程与前文一致, 此处不再推导. 最终可得 L 的自适应律为

$$\frac{1}{\hat{L}} = \frac{1}{L} + \int_0^t K_1''(e'_1 u_d + e'_2 u_q) dt - K_2''(e'_1 u_d + e'_2 u_q). \quad (26)$$

5 仿真结果分析

利用 MATLAB/Simulink 仿真来验证本文所设计的辨识模型. 根据改进后的模型参考自适应系统特点, 本文采用 $i_d = 0$ 的矢量控制方法, 将闭环反馈的 dq 轴电流、电压作为系统辨识的输入信息. 电机参数如表 1 所示, 仿真结果如图 4-9 所示.

其中: 图 4-6 是没有添加负载时的辨识结果, 通过结果可知, 在 0.24 s 左右, 磁链和电阻达到稳定, 转子磁链稳定在 0.88 Wb 附近, 误差为 1.15%; 定子电阻稳定在 0.54 Ω 附近, 误差为 1.82%. 电感从 0.24 s 以后开始辨识, 在 0.46 s 左右, 电感值稳定在 0.99 mH 附近, 误差为 1.0%. 图 7-9 是添加额定负载以后的辨识结果, 在加入负载以后, 整个系统仍然可以在短时间进行辨识, 快速进入新的稳态. 分析结果可知, 本文设计的改进方法, 辨识结果较好, 并且整个辨识过程用时较短, 证明设计的参数自适应律可行.

表 1 实验电机参数

Table 1 Parameters of experiment motor

参数	数值
额定功率/W	60
额定电压/V	24
额定电流/A	3.3
额定转矩/(N·M)	0.18
额定转速/(r·min ⁻¹)	3000
定子电阻/ Ω	0.55
dq 轴电感/mH	1.00
极对数/对	2
转子永磁磁链/Wb	0.87

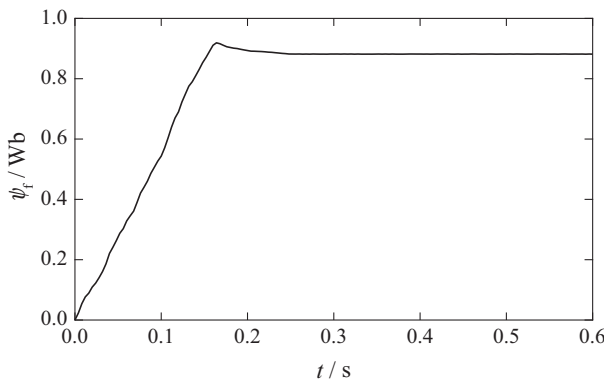


图 4 磁链辨识结果

Fig. 4 Magnetic flux identification result

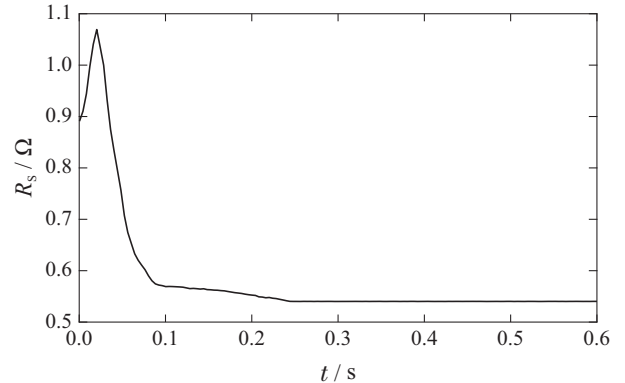


图 5 电阻辨识结果

Fig. 5 Resistance identification result

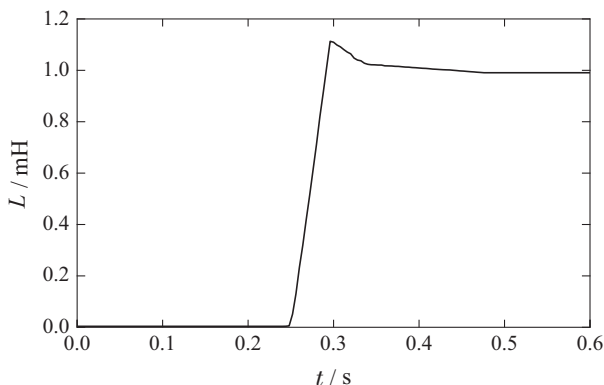


图 6 电感辨识结果

Fig. 6 Inductance identification result

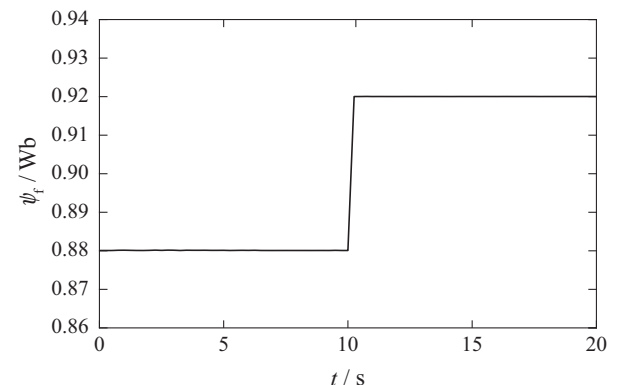


图 7 加入负载后磁链辨识结果

Fig. 7 Result of flux identification after adding load

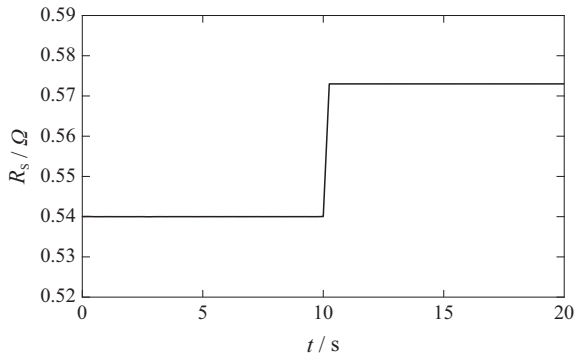


图8 加入负载后电阻辨识结果

Fig. 8 Result of resistance identification after adding load

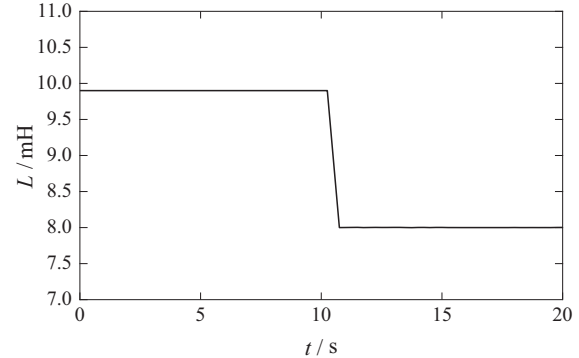


图9 加入负载后感应辨识结果

Fig. 9 Result of inductance identification after adding load

6 总结

本文针对辨识永磁同步电机多个参数时,在 dq 坐标系下数学模型存在的欠秩问题,提出了一种改进模型参考自适应系统的分步在线辨识方法.该方法采用分步辨识,首先辨识定子电阻和磁链,再辨识电感,解决了多参数在线辨识时的方程欠秩问题,保证辨识结果的唯一性;采用Popov超稳定性理论设置对应PI自适应律,保证系统的稳定性.仿真结果表明,该方法辨识速度较快,准确度高,适合于工程应用,具有一定的实用性.

参考文献:

- [1] WANG Song. *Study on the Parameters Identification and Control Strategies of Permanent Magnet Synchronous Motor*. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
(王松. 永磁同步电机的参数辨识及控制策略研究. 北京: 北京交通大学, 2011.)
- [2] LIU Jinhai, CHEN Wei. Online multi-parameter identification for surface-mounted permanent magnet synchronous motors under quasi-steady-state. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(17): 154–160.
(刘金海, 陈为. 表贴式永磁同步电机准稳态多参数在线辨识. 电工技术学报, 2016, 31(17): 154–160.)
- [3] SHI Jianfei, GE Baojun, LÜ Yanling, et al. Research of parameter identification of permanent magnet synchronous motor on line. *Electric Machines and Control*, 2018, 22(3): 17–24.
(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. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 17–24.)
- [4] LI Hongyu, WANG Qunjing, LI Guoli, et al. Electromagnetic parameter identification algorithm of AC motor based on extended kalman filter. *Journal of Electrical Engineering*, 2015, 10(5): 34–42.
(李洪宇, 王群京, 李国丽, 等. 基于扩展卡尔曼滤波器的电机参数辨识算法. 电气工程学报, 2015, 10(5): 34–42.)
- [5] WANG Lei, LI Hong, WU Mingzhu, et al. Parameters identification of PMSM based on extended kalman filter. *Small & Special Electrical Machines*, 2012, 40(7): 19–22.
(王磊, 李宏, 武明珠, 等. 基于扩展卡尔曼滤波器的永磁同步电动机参数辨识. 微特电机, 2012, 40(7): 19–22.)
- [6] WANG Song, LIU Mingguang, SHI Shuangshuang, et al. Identification of PMSM based on EKF and elman neural network. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2010, 34(2): 124–127, 136.
(王松, 刘明光, 石双双, 等. 基于卡尔曼滤波和神经网络的永磁同步电机参数辨识. 北京交通大学学报, 2010, 34(2): 124–127, 136.)
- [7] AHN S, PARK B, KIM R, et al. Fault diagnosis for open-phase faults of permanent magnet synchronous motor drives using Extended Kalman Filter. *IECON 2010 – the 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Glendale, AZ, USA: IEEE, 2010: 835–840.

- [8] ZHANG Liwei, ZHANG Peng, LIU Yuefeng, et al. Parameter identification of permanent magnet synchronous motor based on variable step-size adaline neural network. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(S2): 377–384.
(张立伟, 张鹏, 刘曰锋, 等. 基于变步长Adaline神经网络的永磁同步电机参数辨识. 电工技术学报, 2018, 33(S2): 377–384.)
- [9] RAHIMI A, BAVAFA F, AGHABABAEI S, et al. The online parameter identification of chaotic behaviour in permanent magnet synchronous motor by self-adaptive learning batinspired algorithm. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2016, 78(6): 285–291.
- [10] YOUSRI D A, ALLAM D, ETEIBA M B. Chaotic whaleoptimizer variants for parameters estimation of the chaotic behavior in permanent magnet synchronous motor. *Applied Soft Computing*, 2018, 74: 479–503.
- [11] ZHANG Huaqiang, YAN Hongfeng, LENG Yanli, et al. Study on online identification of PMSM based on MRAS. *Electric Drive*, 2015, 45(12): 3–7, 16.
(张华强, 严洪峰, 冷艳礼, 等. 基于模型参考自适应的永磁同步电机在线辨识研究. 电气传动, 2015, 45(12): 3–7, 16.)
- [12] ZHANG Jinjing, TANG Ningping. The review of inductance parameters of measurement permanent magnet synchronous motor. *Electrical Engineering*, 2018, 19(2): 1–5.
(章金晶, 汤宁平. 永磁同步电动机电感参数测量的研究综述. 电气技术, 2018, 19(2): 1–5.)
- [13] ZHANG Y, YIN Z, SUN X, et al. On-line identification methods of parameters for permanent magnet synchronous motors based on cascade MRAS. *2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia*. Seoul, Korea: IEEE, 2015: 345–350.
- [14] YIN Zhonggang, ZHANG Yanqing, SUN Xiangdong, et al. On-line identification methods for the parameters of PMSM based on cascade MRAS. *Electric Drive*, 2015, 45(4): 19–24.
(尹忠刚, 张延庆, 孙向东, 等. 基于级联MRAS的PMSM参数在线辨识方法研究. 电气传动, 2015, 45(4): 19–24.)
- [15] ZHU Ya, HE Yuyao, XU Yuhao, et al. Online identification of PMSM parameters based on cascade MRAS. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2017, 35(3): 486–493.
(朱雅, 贺昱曜, 许宇豪, 等. 基于级联MRAS的PMSM参数在线辨识算法. 西北工业大学学报, 2017, 35(3): 486–493.)

作者简介:

李垣江 副教授, 目前研究方向为电机及其控制, E-mail: liyuanjiang@just.edu.cn;

董鑫 硕士, 目前研究方向为电机控制, E-mail: dx0708@qq.com;

魏海峰 副教授, 目前研究方向为电机控制, E-mail: whf21@126.com;

张懿 副教授, 目前研究方向为电机控制, E-mail: zyi82@126.com;

刘维亭 教授, 目前研究方向为控制理论与控制工程, E-mail: lwt_just@163.com.