

基于最小二乘法和硬件在环平台的 永磁同步电机参数辨识

董召强, 徐秋霞, 高 瑾

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 针对永磁同步电机多个参数同时辨识时会出现欠秩的情况, 介绍了在 dq 坐标系下采用最小二乘法将多个参数分开辨识的方法。在硬件在环平台上采用该方法对电阻、电感和磁链进行了辨识。最后进一步考虑到电阻和磁链受温度的影响较大, 进行了考虑温升的电阻和磁链的辨识。经验证, 该方法可以比较准确地辨识出电机参数。

关键词: 永磁同步电机; 最小二乘法; 参数辨识; 温升; 硬件在环

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0057-06

Parameters Identification of PMSM Based on Recurrence Least Square and Hardware in The Loop Platform

DONG Zhaoqiang, XU Qiuxia, GAO Jin

(School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: For the case that owe rank may be caused in the multiple Parameters Identification of PMSM, a method that multiple parameters were identified individually using least square method was introduced. Then the resistance, inductance and flux linkage were identified based on recurrence least square (RLS) and hardware in the loop (HIL) platform. Finally, considering the great temperature influence, the resistance and flux linkage were identified. The method was verified that it could accurately identify the motor parameters.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); recurrence least square (RLS); parameters identification; temperature; hardware in the loop (HIL)

0 引 言

由于永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有结构简单、功率密度大、故障率低和运行效率高等优点, 所以已广泛应用于工业伺服驱动、新能源汽车及能源发电等领域^[1-2]。上述应用领域对系统控制精度及可靠性有极高的要求, 但是 PMSM 由于自身结构及功率密度的限制, 电磁参数在不同的情况下会发生变化, 严重影响控制器的性能, 降低运行质量及控制器的稳定性。因此, 国内外学者结合现代控制

理论、系统辨识理论对电机参数的辨识问题做了大量的研究, 提出了各种辨识理论。文献[3]基于李雅普诺夫稳定性理论对定子电阻及电感进行在线辨识; 文献[4-6]介绍了基于卡尔曼滤波方法对永磁体磁链的在线辨识。以上辨识方法可以对电机参数进行辨识, 但方案复杂, 算法实现比较困难。文献[7]介绍了采用递推最小二乘法对电机电阻和电感进行辨识。最小二乘法具有算法简单、易于理解和易于实现等优点, 因此被广泛应用于系统辨识中。

目前, 对于 PMSM 参数辨识算法的研究主要

作者简介: 董召强 (1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为永磁同步电机参数辨识。

徐秋霞 (1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为永磁电机交流伺服控制技术。

高 瑾 (1972—), 男, 副教授, 研究方向为新能源汽车电驱动技术、硬件在环半实物实时仿真。

集中在不超过两个参数的辨识,通常在假定磁链为定值的情况下,对电阻和电感进行辨识,或者只辨识一个参数,这在实际情况中是不可能的。如果通过 dq 坐标系的电压状态方程对电阻、电感和磁链三个参数同时辨识,会导致辨识矩阵出现欠秩的情况。

本文采用递推最小二乘法算法,在硬件在环 (Hardware In The Loop, HIL) 平台上,采用分步辨识的方法,避免了同时辨识会出现欠秩的问题,辨识出三个参数:定子电阻 R_s 、电感 L_s 和永磁体磁链 Ψ_f ;其次考虑到随着电机长时间运行,温度会升高,会导致定子电阻 R_s 升高、永磁体磁链 Ψ_f 降低,进而在线辨识了 R_s 和 Ψ_f 。基于 HIL 平台对真实世界可能会出现某些极端情况进行参数辨识,而不会对硬件设备造成损坏。这对后续在实际情况中开发控制算法具有重要意义。

1 递推最小二乘法的原理

最小二乘法最早于 1975 年由高斯 (K. F. Gauss) 提出来,被广泛应用于系统辨识和参数估计,甚至在很多辨识方法失效的情况下,最小二乘法依然可以提供有效的解决方案。许多学者在原来的基础上又提出了:增广最小二乘法、广义最小二乘法、递推最小二乘法、辅助变量法和相关二步法等诸多最小二乘法算法。

系统的最小二乘法格式为

$$y(k) = \theta^T(k)x \quad (1)$$

式中: $y(k)$ ——系统输出序列;

$\theta^T(k)$ ——系统输入序列;

x ——待辨识的参数序列。

递推最小二乘算法,就是当被辨识系统在运行时,利用新引入的观测数据对前次估计的结果进行修正,得出新的参数估计值,减少估计误差。这样,随着新观测数据的逐次引入,一次接一次地进行参数估计,直到参数估计值达到满意的精确程度^[8]。递推最小二乘法的表达式如下:

$$\mathbf{x}_m = \mathbf{x}_{m-1} + \mathbf{K}_m [y_m - \theta_m^T \mathbf{x}_{m-1}] \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_m = \frac{\mathbf{P}_{m-1} \theta_m}{1 + \theta_m^T \mathbf{P}_{m-1} \theta_m} \quad (3)$$

$$\mathbf{P}_m = \mathbf{P}_{m-1} - \mathbf{K}_m \theta_m^T \mathbf{P}_{m-1} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{x}_m$ ——第 m 次参数辨识矢量;

$\mathbf{K}$ 、 $\mathbf{P}$ ——中间过程中的递推矩阵。

在递推之初,需要 $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{x}$ 的初始矩阵。初值 $\mathbf{P}(0)$ 和 $\mathbf{x}(0)$ 的选择有两种方法:第一种是根据已经采集的数据由基本最小二乘法计算出一组值;第二种是直接赋值,一般令:

$$\begin{cases} \mathbf{P}(0) = \alpha \mathbf{I} \\ \mathbf{x}(0) = \varepsilon \end{cases} \quad (5)$$

式中: α ——充分大的正实数 ($10^3 \sim 10^6$);

ε ——取零向量。

本文采用第二种方法, α 取 10^3 。

2 PMSM 数学模型

PMSM 是非线性、强耦合的多变量系统。为了在控制中实现近似解耦,采用转子磁链定向同步旋转坐标系 (dq 坐标系)。在忽略谐波、涡流和磁滞损耗的前提下, PMSM 在 dq 轴坐标系下建立的动态电压方程如下:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \omega_e i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d \omega_e i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (6)$$

当电机运行到稳定状态时, d 、 q 轴电流方程的微分项为零,此时,得到稳态状态下的电压方程如下:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - L_q \omega_e i_q \\ u_q = R_s i_q + L_d \omega_e i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (7)$$

式中: u_d 、 u_q —— d 、 q 轴上的定子电压;

i_d 、 i_q —— d 、 q 轴上的定子电流;

L_d 、 L_q —— d 、 q 轴上的定子电感;

Ψ_f ——永磁体转子的磁链;

R_s ——定子电阻;

ω_e ——转子旋转的电角速度。

3 参数辨识

本文所研究的电机是表贴式 PMSM,有直轴电感和交轴电感相等的特性,满足式(8),但还是需要辨识三个参数 Ψ_f 、 R_s 和 L_s 。

$$L_d = L_q = L_s \quad (8)$$

基于式(7)进行多参数同时在线辨识极易出现因系统工况变化而导致辨识精度下降甚至辨识结果不收敛问题,将对控制器造成很大的影响。电机多参数同时辨识精度下降的根本原因在于 PMSM 参数辨识方程的欠秩^[9]。

本文在其中一个参数已知的情况下,辨识其他两个参数,通过两个阶段的辨识完成三个参数的辨识。即分别通过后面的式(11)和式(14)中的两个方程来辨识三个参数,这样可以很好地避免出现欠秩的问题。

通过对三个参数 R_s 、 Ψ_f 、 L_s 的分析,可以发现电阻 R_s 的真实值可以在离线状态下通过仪器测量得到,测量方法简单,精度也较高;磁链 Ψ_f 的变化速率比较慢;电感 L_s 的变化较大,甚至转子处于不同的角度时,电感 L_s 都有较大的差异^[10]。综上所述,电阻和磁链变化比较慢,在短时间内可以认为是定值,而电感的变化是比较大的,所以本文分别在电阻或磁链已经辨识出的情况下,再辨识 Ψ_f 和 L_s 或 R_s 和 L_s 。辨识程序框图如图 1 所示。首次辨识时,电阻 R_s 为离线状态下测量得到的 R_0 ;非首次辨识时,使用 Switch-case 语句来选择辨识电阻和电感或者磁链和电感,此时,辨识磁链与电感时,电阻 R_s 为在线状态下辨识得到的 R_1 。

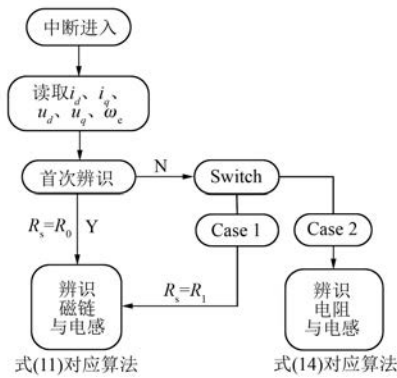


图 1 辨识程序流程框图

3.1 磁链与电感的辨识

在电阻 R_s 测量或辨识得到的情况下,辨识 Ψ_f 、 L_s 。结合式(7),将含有 R_s 的项移到等式左边得到式(9):

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

将式(9)写成矩阵形式可得到 PMSM 的最小二乘法格式数学模型:

$$\begin{bmatrix} u_d - R_s i_d \\ u_q - R_s i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_e i_q & 0 \\ \omega_e i_d & -\omega_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_s \\ \psi_f \end{bmatrix} \quad (10)$$

根据式(1)和式(10)可以得到:

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

3.2 电阻与电感的辨识

磁链 Ψ_f 由式(11)辨识得到之后,再辨识 R_s 、 L_s ,结合式(7),将 Ψ_f 项移到等式左边,得到式(12):

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

将式(12)变换成矩阵形式可得到 PMSM 的最小二乘格式的数学模型:

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

根据式(1)和式(13)可得到:

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

通过式(11)和式(14)采用递推最小二乘法算法可以完成对 PMSM 参数 R_s 、 Ψ_f 和 L_s 的辨识。

4 试验

4.1 考虑温升的 PMSM 实际参数测量

考虑到电机参数受温度的影响较大,本文采用电机对拖平台来分析温度对 R_s 、 Ψ_f 的影响。电机参数如表 1 所示。对拖平台如图 2 所示,其中电机 A 为采用直接转矩控制的发电机,电机 B 为采用 $i_d=0$ 的矢量控制的电动机。

表 1 SPMSM 主要参数

物理量	参数值	物理量	参数值
极对数	2	相电感/mH	2
永磁体磁链/Wb	0.014 28	额定电流/A	4
相电阻/ Ω	0.3	额定电压/V	24

为了分析温度对电机的影响,分别让发电机定子电流以 1、2、3、4 A 和 5 A 在稳态工况下运

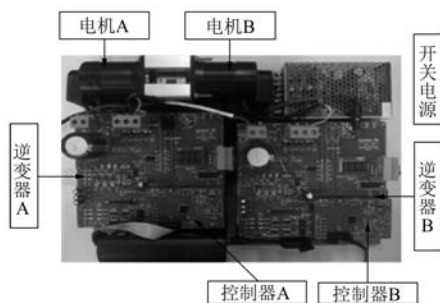


图2 对拖试验平台

行,每隔 15 min 测量发电机的反电势和转速。因为电机内部温度不能直接测量,故以电机定子电流为参照。根据焦耳定律,随着电流增大,温度是升高的,另外采用热电偶测量电机外壳温度。电阻 R_s 是利用毫欧表直接测量得到;转子磁链 Ψ_f 是利用反电势和转速计算得到如下:

$$\Psi_f = \frac{E}{w} = \frac{E_{line}}{\sqrt{3} \cdot 2\pi f} \quad (15)$$

式中: E ——相反电势;

E_{line} ——线反电势;

w ——机械角频率;

f ——转速频率。

通过上述试验,得到电阻 R_s 与转子磁链 Ψ_f 随温度升高(电流变大)的曲线如图3和图4所示。在本试验中,可以发现当温度变化了 25 °C 之后,电阻值变化将近 20%;永磁体磁链变化将近 10%,电阻和磁链受温度影响很大,故对于电机参数的在线辨识很有必要。

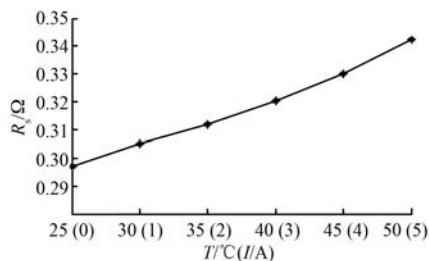


图3 电阻随温度的变化曲线

通过图3和图4,可以发现电阻随温度的升高而增大,磁链随温度的升高而减小,符合金属与磁性材料随温度的变化规律;进一步通过对比图3和图4的横坐标,可以发现电流越大,温度越高,该规律与文献[11-12]一致。

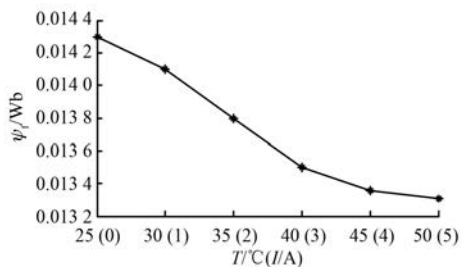


图4 磁链随温度的变化曲线

4.2 基于 HIL 平台的电机参数辨识

半实物仿真已广泛应用于无人机自动测试跟踪预设目标^[13]、飞行器姿态控制^[14]等领域。在电力传动领域,往往在项目设计初期,工程师通过建模的方式来模拟真实的控制对象(电机),以便集中更多的精力来研究算法。这种由真实控制器来控制虚拟对象的技术称为 HIL 技术。HIL 技术的优点包括:避免损坏真实器件,防止误操作或各种故障对实际设备造成损坏的风险;降低研发成本和人力资源等。由于以上优点,HIL 技术得到了广泛的应用。

本文采用的 HIL 平台主要由电机模型、控制器和上位机三个部分构成,如图5所示。

对图5中的各个部分的介绍如下:

(1) 电机模型——硬件采用 Altera 公司的 CycloneIII 系列 EP3C40Q240C8 芯片,软件采用 Verilog 编程以及 Quartus II9.0 内部 IP 核的调用,实现 PMSM 的建模;

(2) 控制器——采用 Freescale 公司的 8257DSC 芯片,采用 C 语言完成对电机控制程序和电机参数辨识程序的开发;

(3) 上位机——基于 LabVIEW 软件开发的上位机作为系统的通信平台,通过串口完成电机参数实时在线更新,参数包括逆变器直流侧母线电压,PMSM 的电阻、电感、永磁体磁链和负载转矩等。

本文所用的控制芯片为 Freescale 公司的 8257 DSC,这款芯片是 16 位的定点数字信号控制器,为了防止数据溢出和保证计算精度,在 DSC 控制器中,对所用到的参数采用标幺化处理和 Q12 格式进行计算。

辨识算法用到了大量的矩阵运算,矩阵运算在 DCS 控制器中的运算是比较耗时的,尤其是矩

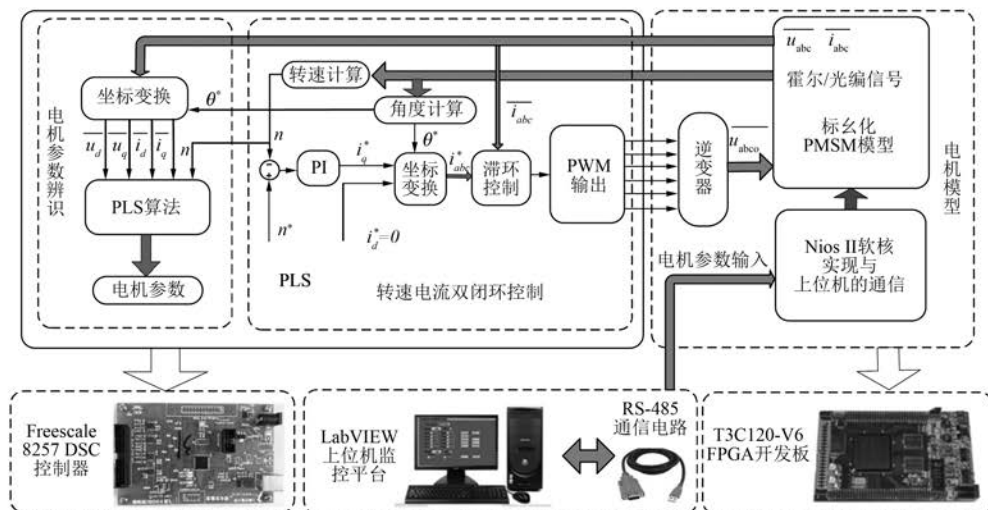
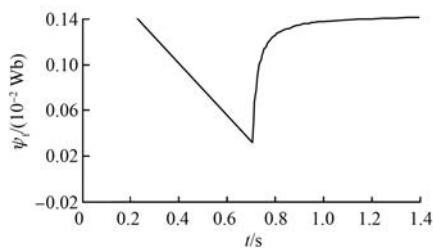


图5 硬件在环(HIL)平台结构图

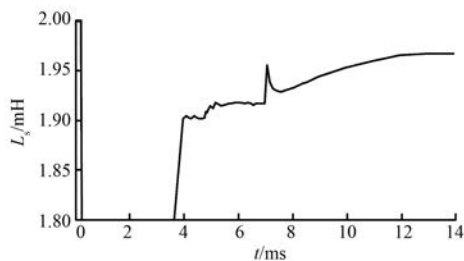
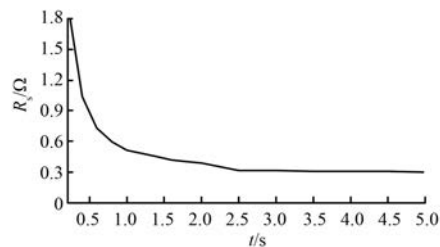
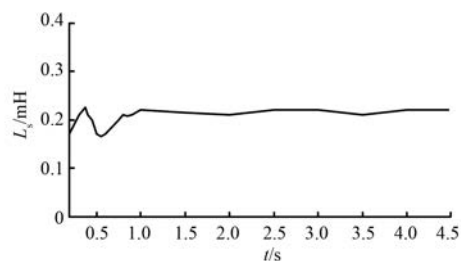
阵逆运算的过程。通过式(11)和式(14),可以发现 $\theta(k)$ 和 $\theta^T(k)$ 是 2×2 的矩阵,采用式(16)一种简便的方式完成对矩阵 $\theta(k)$ 的逆运算,大大减小了DSC的运算量。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{AD - BC} \begin{bmatrix} D & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \quad (16)$$

基于HIL平台,利用最小二乘法对PMSM参数 Ψ_f 、 R_s 、 L_s 进行参数辨识。DSC程序框图如图1所示,首先利用毫欧表测得实际电机参数 R_s ,再对 Ψ_f 和 L_s 进行辨识。图6和图7是按照式(11)对 Ψ_f 和 L_s 的辨识结果,可以看到磁链和电感的辨识结果与表1中的值基本一致。

图6 Ψ_f 辨识结果

考虑到实际情况中,电机在长时间的运行之后,电机温度会升高,电阻并非一个常数,所以需要电阻 R_s 进行辨识。图8和图9是在式(12)辨识出 Ψ_f 的条件下,按式(15)对 R_s 和 L_s 的辨识结果,可以看到电阻和电感的辨识结果与表1中的值基本一致。

图7 L_s 辨识结果图8 R_s 辨识结果图9 L_s 辨识结果

在HIL平台上,根据电阻与磁链随温度的变化曲线,通过上位机模拟实际环境改变电机的温

升,进而改变电机的电阻和磁链。再用本文的辨识方法对电机参数 R_s 、 Ψ_f 进行在线辨识,试验结果如图 10 和图 11 所示,可以看到电阻和磁链的辨识误差约为 2%。说明该辨识算法在电机参数改变的情况下,依旧可以比较准确地在线辨识出电机参数。

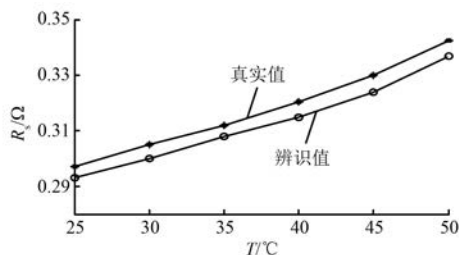


图 10 不同温度下定子电阻辨识值与真实值对比

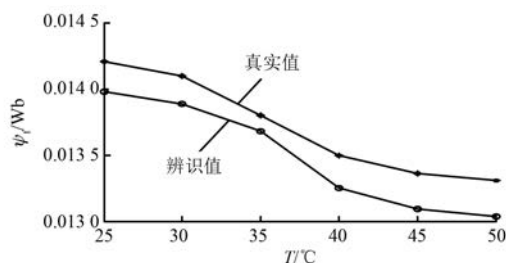


图 11 不同温度下定子磁链辨识值与真实值对比

5 结 语

本文首先介绍了采用递推最小二乘法对 PMSM 参数进行在线辨识方法。该方法可以有效地解决辨识矩阵欠秩的问题。最后以一台 PMSM 的基于 HIL 平台的试验,表明上述算法可以准确辨识电阻、电感和磁链。该方法实现比较简单,实用性强。

【参考文献】

[1] 秦斌,姜学想,周浩,等.基于 SVM 的永磁直驱风电系统滑模变桨距控制[J].仪器仪表学报,2014,35(7): 1525-1531.

[2] CHEN L, SUN X D, JIANG H B, et al. High performance control of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle applications[J]. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 2014, 11(3): 706-710.

[3] LIU L, CARTES D A. Synchronisation based adaptive parameter identification for permanent magnet synchronous motors [J]. IET Control Theory & Application, 2007, 1(4): 1015-1022.

[4] 肖曦,张猛,李永东.永磁同步电机永磁体状况在线监测[J].中国电机工程学报,2007,27(24): 43-47.

[5] XIAO X, ZHANG M, LI Y D. On-line estimation of permanent magnet flux linkage ripple for PMSM based on Kalman filter [C] // 32nd Conference on IEEE industrial Electronics, 2006: 1171-1175.

[6] XIAO X, CHEN C M, ZHANG M. Dynamic permanent magnet flux estimation of permanent magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Applied Supreconductivity, 2010, 20(30): 1085-1088.

[7] 张洪东,李宏,郑勇.基于递推最小二乘法的永磁同步电机参数辨识[J].微特电机,2011,39(11): 14-16.

[8] 刘永钦,沈艳霞,纪志成.基于改进型最小二乘法的感应电机转动惯量辨识[J].电机控制与应用, 2008,35(12): 13-17.

[9] 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.

[10] LEE J H, KIM J C, HYUN D S. Effect analysis of magnet on L_d and L_q inductance of permanent magnet assisted synchronous reluctance motor using finite element method [J]. IEEE Transactions on Magnetism, 1999, 35(3): 1199-1202.

[11] 邰永,刘赵森.感应电机全域三维瞬态温度场分析[J].中国电机工程学报,2010,30(30): 114-120.

[12] 曹君慈,李伟力,程树康.复合笼条转子感应电动机温度场计算及相关性分析[J].中国电机工程学报,2008,28(30): 96-102.

[13] LIN F, DONG X X, CHEN B M, et al. A robust real-time embedded vision system on an unmanned rotorcraft for ground target following [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1038-1048.

[14] JEON S W, JUNG S. Hardware-in-the-loop simulation for the reaction control system using PWM-based limit cycle analysis[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2012, 20(2): 538-545.

收稿日期: 2016-07-11