

DOI: 10.7667/PSPC180715

# 基于递推最小二乘离散辨识法的飞轮储能系统 无位置控制方法

张文元

(山西国际能源集团有限公司, 山西 太原 030022)

**摘要:** 为了提高飞轮储能系统无位置传感器控制性能, 飞轮电机必须具有参数辨识和参数自整定的功能。因此, 提出一种基于递推最小二乘离散法在线辨识未知参数的转子位置扩张观测器, 以使位置观测环节具有较强的鲁棒性能。首先, 建立飞轮电机数学模型并进行离散化分析, 在此基础上, 采用通过将反电动势估算值反馈引入到非线性扩张观测器计算中的转子位置估算方法。随后, 将基于递推最小二乘辨识算法应用于飞轮电机离散模型并可同时辨识定子电阻、交直流电感等关键电磁参数, 以便消除因飞轮电机模型误差引起的转子位置估算误差, 提高系统无位置检测性能。最后, 搭建基于 DSP2812 的硬件实验平台。仿真和实验结果表明所提算法对未知参数的辨识具有一定的准确性和实时性, 可实现对飞轮储能系统的无位置传感器运行控制。

**关键词:** 储能系统; 飞轮电机; 递推最小二乘法; 离散模型; 非线性扩张观测器; 无位置传感器

## Research on FESS sensorless control based on recursive least-squares discrete identification

ZHANG Wenyuan

(Shanxi International Electricity Group Limited Company, Taiyuan 030022, China)

**Abstract:** In order to improve the control performance of a position-sensorless in a flywheel energy storage system, a flywheel motor necessarily has functions of parameter identification and parameter self-tuning. This paper provides a rotor position extension observer on the basis of online identifying an unknown parameter by means of a recursive least squares discrete identification method, such that a position observation link has relatively high robust performance. Firstly, the mathematical model of flywheel motor is established and discretized. On this basis, rotor position estimation method is adopted by introducing back EMF estimation value into the calculation of nonlinear expansion observer. Then, recursive least square identification algorithm is applied to flywheel motor discrete model and key electromagnetic parameters such as stator resistance and AC-DC axis inductance can be identified at the same time, so as to eliminate rotor position estimation error caused by flywheel motor model error and improve system position-free detection performance. Finally, a hardware experimental platform based on DSP2812 is established. Simulation and experimental results show that the mentioned algorithm has certain accuracy and a certain real-time feature for the identification of the unknown parameter, and can achieve the operation control of the position-sensorless in the flywheel energy storage system.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777197).

**Key words:** energy storage system; flywheel motor; recursive least-squares identification; discrete model; nonlinear extended state observer; sensorless control

## 0 引言

飞轮储能的概念是通过传动装置把能量传送到飞轮转子中, 飞轮转子<sup>[1-4]</sup>以符合要求条件的转速将

能量以机械能的形态进行储存的方法。整个系统主要由飞轮转子、支撑轴承、发电机、电力电子变换电路等部件组合而成。因为永磁同步电机的构造简洁、运行稳定、损耗小, 同时工作效率相对其他类型的电机也显得比较好, 因此成为飞轮储能系统中优选的电机类型。但是为了对飞轮转子的运行位置

和速率进行更为精确的监控,一般会在转子转轴上配置类似像光电编码器这样的机械传感器,根据这些机械传感器的特质势必会进行更多的系统接线,而这就会直接影响到飞轮储能系统的整体稳定,再加上高频脉冲对电能输出信号的干扰,加剧了系统的不稳定性。因此,目前国内外学者普遍研究引入无位置传感器技术来优化电机的稳定性,提升飞轮储能系统的综合性能,图1即为飞轮储能系统的原理图<sup>[5-8]</sup>。

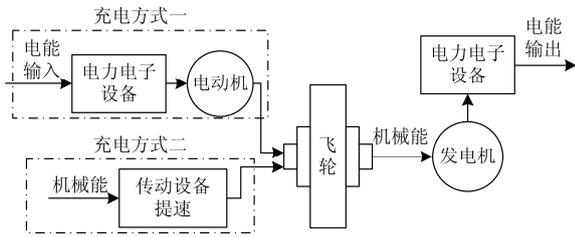


图1 飞轮储能系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of the flywheel energy storage system

当前永磁同步电机无传感器技术主要有两种:一种是运用在低速和零速下的基于磁路不对称的高频电压注入法<sup>[9-11]</sup>。另一种是运用在中高速下的基于电机数学模型的技术,比较具有代表性的有非线性状态观测器<sup>[12]</sup>、扩展卡尔曼滤波<sup>[13]</sup>、模型参考自适应观测器<sup>[14]</sup>、滑模观测器<sup>[15-16]</sup>等。

扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)是构成自抗扰控制<sup>[16]</sup>等非线性控制系统的主要子系统之一,能够实时监测反馈整个系统中出现的不可测情况和未知扰动,此技术方式计算量不大,反馈迅捷,同时在应对扰动的变化上体现出较好的鲁棒性,也因为这些特质,被较多地运用在永磁同步电机的无传感器技术中。文献[17]把扩展反电动势划归为未知扰动,运用扩张状态观测器进行估计,但未关注因参数摄动而造成的电机模型误差;文献[18]设计了应用在电流内环的扩张状态观测器,使其不再过度依靠永磁体磁链参数,但对系统的扰动反应很敏感,鲁棒性较差。

综上所述,为具体实现飞轮电机无位置跟踪性能的稳定优化,本文在建立永磁同步电机反电动势模型的基础上,实现了一种基于扩张状态观测器的无传感器技术的检测方法,同时为了最小化由于系统参数扰动而产生的转子位置估算误差,采用了离散化递推最小二乘法辨识方法校正电机模型误差。仿真及实验结果证明了所提方法能够有效辨识飞轮电机关键电磁参数,实现飞轮电机无位置传感器运行状态下的位置准确跟踪。

## 1 基于 ESO 的位置检测策略

### 1.1 飞轮电机数学模型

在  $\alpha$ - $\beta$  旋转坐标系中飞轮电机的扩展反电动势电压方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} L_0 \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \lambda_\mu \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = K_E \begin{bmatrix} -\sin \theta_r \\ \cos \theta_r \end{bmatrix} \\ K_E = \omega [(L_d - L_q) + \psi_f] - (L_d - L_q) p i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$ 和 $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ 分别表示定子电压和电流在 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系下的分量;  $L_q$ 、 $L_d$ 分别表示交轴和直轴电感;  $R_s$ 、 $\psi_f$ 分别为定子电阻和永磁磁链;  $\omega$ 、 $\theta_r$ 分别为转子速度和位置;  $p$ 为微分算子,用于表示动态过程。同时,为进一步准确获取电机交直流动态数学模型,基于磁场定向理论,可得

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (u_d - R_s i_d + \omega L_q i_q) \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q} (u_q - R_s i_q - \omega L_d i_d - \omega \psi_f) \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = 1.5 n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

式中:  $i_d$ 、 $i_q$ 分别为定子电流矢量在 $d$ - $q$ 坐标系下的分量;  $n_p$ 为电机极对数。

### 1.2 ESO 的设计

在飞轮电机无位置传感器控制系统中,由于  $\theta_r$  无法通过测量直接得到,不能通过坐标变换获取实际的  $d$ - $q$  坐标系下的电压、电流值。为准确观测实际转子位置,系统采用一个以估计速度  $\hat{\omega}$  旋转的坐标系  $\gamma\delta$ , 作为矢量控制的变换坐标系。图 2 即为  $dq$  坐标系与  $\gamma\delta$  坐标系之间的矢量关系。

$\gamma\delta$  坐标系下的电机扩展反电动势可表示为

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} u_\gamma \\ u_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_d & -\hat{\omega}L_q \\ \hat{\omega}L_q & R_s + pL_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} e_\gamma \\ e_\delta \end{bmatrix} = E_{ex} \begin{bmatrix} -\sin \theta_r \\ \cos \theta_r \end{bmatrix} + (\omega - \hat{\omega}) L_q \begin{bmatrix} -i_\gamma \\ i_\delta \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4)$$

$\Delta\theta_r$  为两个坐标系的角差,即

$$\Delta\theta_r = \theta_r - \hat{\theta}_r \quad (5)$$

经过上述变换, 交流扰动  $[e_\alpha \ e_\beta]^\top$  变为直流扰动  $[e_\gamma \ e_\delta]^\top$ 。当  $\hat{\omega} = \omega$  时,  $\Delta\theta_r$  可表示为

$$\Delta\theta_r = \arctan\left(\frac{-e_\gamma}{e_\delta}\right) \quad (6)$$

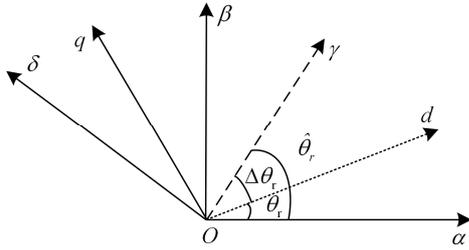


图2  $\gamma\delta$  坐标系与  $dq$  坐标系  
Fig. 2  $\gamma\delta$  frame and  $dq$  frame

由式(6)可见, 若将  $e_\gamma$  和  $e_\delta$  视为存在于电流控制内环的扰动, 系统可利用 ESO 性能实现对扩展反电动势的准确观测, 则可推导出定子电流 ESO 模型即为

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_\gamma \\ p\hat{i}_\gamma \\ f_{s\gamma} \\ pw_\gamma \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\gamma - i_\gamma \\ f_{s\gamma} + \frac{1}{L_d}u_\gamma + w_\gamma - \beta_{\gamma 1}\varepsilon_\gamma \\ -\frac{R_s}{L_d}i_\gamma + \hat{\omega}\frac{L_d}{L_q}i_\gamma \\ -\beta_{\gamma 2}\varepsilon_\gamma \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_\delta \\ p\hat{i}_\delta \\ f_{s\delta} \\ pw_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\delta - i_\delta \\ f_{s\delta} + \frac{1}{L_d}u_\delta + w_\delta - \beta_\delta\varepsilon_\delta \\ -\frac{R_s}{L_d}i_\delta + \hat{\omega}\frac{L_d}{L_q}i_\delta \\ -\beta_{\delta 2}\varepsilon_\delta \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $f_{s\gamma}$  和  $f_{s\delta}$  为系统的已知扰动;  $w_\gamma$  和  $w_\delta$  分别为  $e_\gamma$  和  $e_\delta$  的估计量; 为获得已知扰动, 系统需要确定  $R_s$ 、 $L_{dq}$ 。图 3 为 ESO 位置检测原理图。

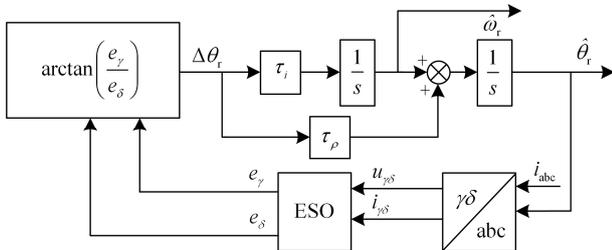


图3 ESO位置检测原理图

Fig. 3 Position detection schematic diagram of nonlinear expansion observe

## 2 基于离散模型的递推最小二乘法辨识方法

### 2.1 递推最小二乘法辨识原理

ESO 的设计优劣是飞轮电机能否实现无位置准确跟踪的重要因素, 由式(7)和(8)可以看出, 其中飞轮电机电磁参数  $R_s$ 、 $L_{dq}$  是对 ESO 设计影响最为直接的参数, 因此本节采用递推最小二乘法对飞轮电机电阻和电感进行在线辨识。

根据最小二乘格式为<sup>[19-21]</sup>

$$\varphi_t = \Phi_t^\top Y_t \quad (9)$$

式中:  $\varphi_t$ 、 $\Phi_t^\top$  分别表示系统输出、输入序列;  $Y$  为待辨识的参数。

递推思想引入到式(9)中去, 即把最小二乘法展开为离散化递推最小二乘法。在  $t$  时刻的估计值  $\hat{\varphi}(t)$  为

$$\hat{\varphi}(t) = (\Phi_t^\top \Phi_t)^{-1} \Phi_t^\top Y_t \quad (10)$$

$$\text{式中, } \Phi_t = \begin{bmatrix} \Phi_{t-1} \\ \varphi^\top(t) \end{bmatrix}, Y_k = \begin{bmatrix} Y_{t-1} \\ y(t) \end{bmatrix}.$$

令

$$P(t) = (\Phi_t^\top \Phi_t)^{-1} = [\Phi_{t-1}^\top \Phi_{t-1} + \varphi(t)\varphi^\top(t)]^{-1} = [P^{-1}(t-1) + \varphi(t)\varphi^\top(t)]^{-1}$$

则

$$P^{-1}(t) = P^{-1}(t-1) + \varphi(t)\varphi^\top(t) \quad (11)$$

再由式(11), 可得

$$\hat{\varphi}(t-1) = (\Phi_{t-1}^\top \Phi_{t-1})^{-1} \Phi_{t-1}^\top Y_{t-1} = P(t-1)\Phi_{t-1}^\top Y_{t-1} \quad (12)$$

由式(11)和式(12)可得

$$\Phi_{t-1}^\top Y_{t-1} = P^{-1}(t-1)\hat{\varphi}(t-1) = [P^{-1}(t) - \varphi(t)\varphi^\top(t)]\hat{\varphi}(t-1) \quad (13)$$

因此,  $t$  时刻的估计值为

$$\hat{\varphi}(t) = P(t)\Phi_t^\top Y_t = \hat{\varphi}(t-1) + K(t)[y(t) - \varphi^\top(t)\hat{\varphi}(t-1)] \quad (14)$$

式中

$$K(t) = P(t)\varphi(t) \quad (15)$$

式(15)已成为递推算法的表示方式了, 但  $P(t)$ (或  $K(t)$ )的递推方程还需要推导出来。

$$P(t) = P(t-1) - P(t-1)\varphi(t) \left[1 + \varphi^\top(t)P(t-1)\varphi(t)\right]^{-1} \varphi^\top(t)P(t-1) \quad (16)$$

将式(16)代入式(15), 得

$$K(t) = \frac{P(t-1)\varphi(t)}{1 + \varphi^\top(t)P(t-1)\varphi(t)} \quad (17)$$

由式(15)与式(17)可得

$$P(t) = [I - K(t)\phi^T(t)]P(t-1) \quad (18)$$

总结式(15)、式(17)以及式(18), 可以写出参数最小二乘估计  $\hat{\phi}$  的离散递推公式为

$$\begin{cases} \hat{\phi}(t) = \hat{\phi}(t-1) + K(t)[y(t) - \phi^T(t)\hat{\phi}(t-1)] \\ K(t) = \frac{P(t-1)\phi(t)}{1 + \phi^T(t)P(t-1)\phi(t)} \\ P(t) = [I - K(t)\phi^T(t)]P(t-1) \end{cases} \quad (19)$$

### 2.2 基于离散模型的参数辨识算法

根据上述离散最小二乘法估计原理, 应用于飞轮电机离散模型, 首先, 通过式(4)可变换出电机的状态方程:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{\omega L_q}{L_d} \\ \frac{\omega L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d \\ u_q - \omega\psi_f \end{bmatrix} \quad (20)$$

随之, 将  $di_d/dt$  离散化出力, 可得  $di_d/dt = [i_d(k+1) - i_d(k)]/T$ , 式中,  $T$  为辨识间隔时间, 可以得到

$$i_d(k+1) = (1 - \frac{R_s T}{L_d})i_d(k) + \frac{\omega L_q T}{L_d}i_q(k) + \frac{T}{L_d}u_d(k) \quad (21)$$

同理可以求得

$$i_q(k+1) = -\frac{\omega L_d T}{L_q}i_d(k) + (1 - \frac{R_s T}{L_q})i_q(k) + \frac{T}{L_q}(u_q - \omega\psi_f) \quad (22)$$

以此得到状态方程的离散化的形式为

$$\begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R_s T}{L_d} & \frac{\omega L_q T}{L_d} \\ -\frac{\omega L_d T}{L_q} & 1 - \frac{R_s T}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_d(k) \\ u_q(k) - \omega\psi_f \end{bmatrix} \quad (23)$$

将式(23)化为最小二乘法形式并进行简化, 可得

$$i_d(k+1) = \begin{bmatrix} i_d(k) & i_q(k)\omega(k) & u_d(k) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 - \frac{TR_s}{L} \\ T \\ \frac{T}{L} \end{bmatrix} \quad (24)$$

令  $a(k) = 1 - \frac{T(k)R_s(k)}{L(k)}$ ,  $b(k) = \frac{T(k)}{L(k)}$ , 此时算法模型为

$$\begin{bmatrix} a(k) \\ T(k) \\ b(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a(k-1) \\ T(k-1) \\ b(k-1) \end{bmatrix} + K(k) \begin{bmatrix} y(k) - \phi^T(k) \\ T(k-1) \\ b(k-1) \end{bmatrix} \quad (25)$$

式中:  $y(k) = i_d(k+1)$ ;  $\phi(k) = \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k)\omega(k) \\ u_d(k) \end{bmatrix}$ ;  $K(k) = \frac{P(k-1)\phi(k)}{\lambda + \phi^T(k)P(k-1)\phi(k)}$ ;  $P(k) = \frac{1}{\lambda} [I - K(k)\phi^T(k)]P(k-1)$ 。

就可以由关系式辨识定子电阻  $R_s$  和交直流电感  $L_{dq}$  实现在线辨识电机参数。图 4 即为基于递推最小二乘法在线辨识的无位置框图。

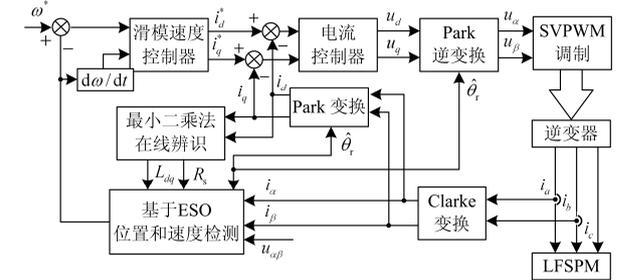


图 4 基于递推最小二乘法离散辨识的无位置框图

Fig. 4 Block diagram of sensorless control system with recursive least-squares discrete identification

### 3 仿真和实验

为了充分验证所提方法的有效性和准确性, 在一台飞轮电机上搭建如图 5 所示的驱动控制平台进行实验研究。整个控制系统硬件部分由 DSP2812, 功率开关器件 IPM, LCR 检测装置、机械式位置传感器(编码器)等部分组成, 实验波形的采集使 DSP2812 软件建立的上位机实时监测。其中飞轮电机参数如表 1 所示。

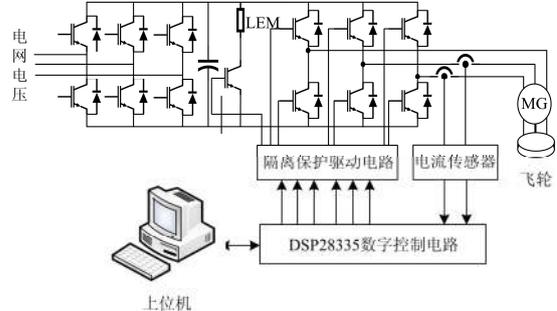


图 5 飞轮电机控制系统的硬件结构图

Fig. 5 Photograph of servo system flywheel motor experiment set

表 1 飞轮电机参数

Table 1 Parameters of flywheel motor

参数	数值
额定电压 $U/V$	380
极对数	20
额定转速 $n/(r/min)$	1 500
额定功率 $P_n/kW$	20
定子电阻 $R_s/\Omega$	0.8
直轴电感 $L_d/mH$	9.2
交轴电感 $L_q/mH$	8.0

### 3.1 仿真分析

基于 Simulink/Matlab 平台建立仿真模型，图 6 和图 7 为采用基于飞轮电机离散模型的递推最小二乘法辨识法所获取的  $dq$  轴电感仿真值，可见该法可有效在线辨识  $dq$  轴电感的暂态量，跟随电感变化，具有较强的实时性。

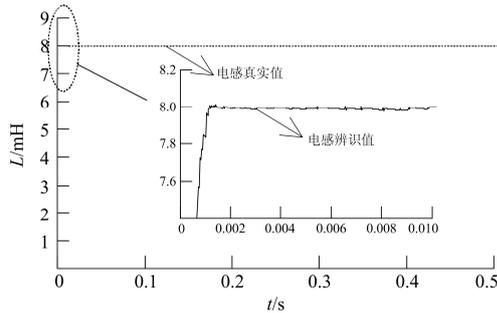


图 6 最小二乘离散法辨识  $q$  轴电感仿真值  
Fig. 6  $L_q$  simulation value with least-squares discrete identification

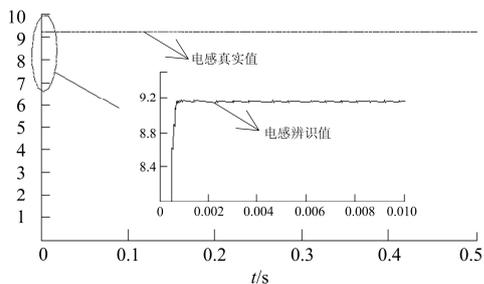


图 7 最小二乘离散法辨识  $d$  轴电感仿真值  
Fig. 7  $L_d$  simulation value with least-squares discrete identification

从上图的辨识结果能够看出，在速度和转矩不变的情况下，采用递推最小二乘法对基于飞轮电机离散模型的交直流电感参数进行辨识可以迅速收敛到真实值，同时稳态时误差很小，辨识的精确度高，而且整个算法辨识在 0.002 s 内完成，辨识速度快。

### 3.2 实验验证

图 8—图 10 分别为飞轮储能系统运行在恒速

(1 500 r/min)、加速 (500~1 500 r/min) 以及减速 (1 500~500 r/min) 工况下的编码器实测值和转子位置估计值对比曲线，可见采用基于递推最小二乘离散辨识法的 ESO 无位置传感器控制策略运行可靠，估算位置和实际位置误差较小，验证了本文所提无位置检测方法的正确性，实现飞轮储能系统在全速状态下的稳定运行。

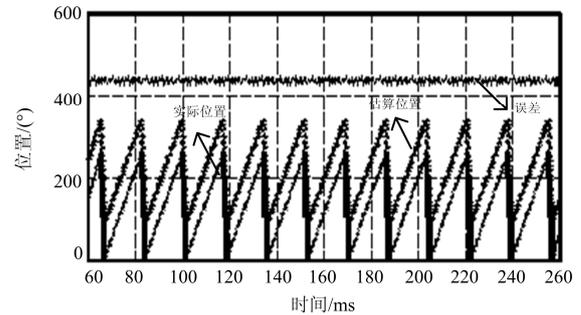


图 8 1 500 r/min 恒速时转子位置估计值与编码器实测值曲线  
Fig. 8 Actual and estimated rotor position in 1 500 r/min

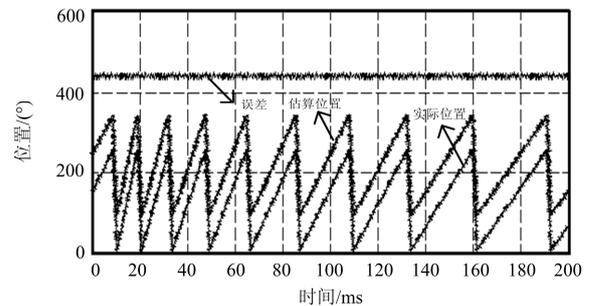


图 9 1 500~500 r/min 减速运行时转子位置估计值与光栅尺实测值曲线  
Fig. 9 Actual and estimated rotor position from 1 500~500 r/min

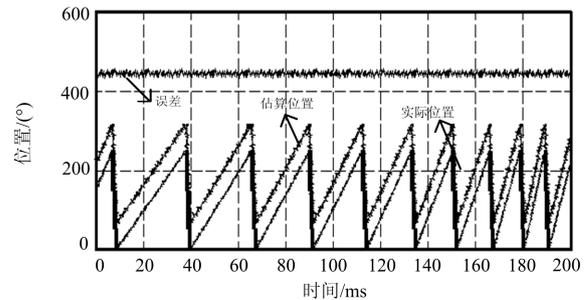


图 10 500~1 500r/min 加速运行时转子位置估计值与光栅尺实测值曲线  
Fig. 10 Actual and estimated rotor position from 500~1 500 r/min

最后，为验证飞轮电机无位置运行下的位置跟随动态性及抗扰动性，图 11 和图 12 分别给出了加入基于递推最小二乘法离散辨识法前后的位置跟踪

波形, 对比可知, 加入辨识算法之前的位置跟随性能较差, 而引入后的飞轮电机位置跟随精度高, 抗扰动性能强, 观测抖振小, 具有良好的跟踪性能。

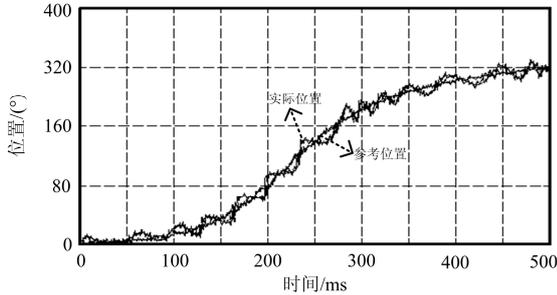


图 11 采用递推最小二乘法离散辨识法前位置跟随波形  
Fig. 11 Position tracking waveform without recursive least-squares discrete identification

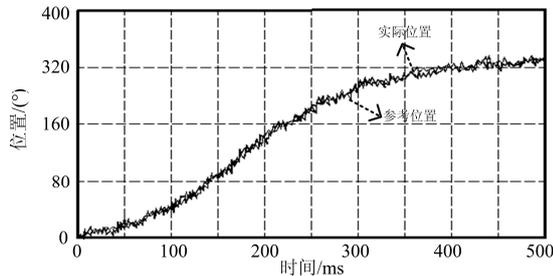


图 12 采用递推最小二乘离散辨识法后位置跟随波形  
Fig. 12 Position tracking waveform with recursive least-squares discrete identification

### 4 结论

本文提出一种基于递推最小二乘法在线辨识未知参数的转子位置非线性扩张观测器, 以使位置观测环节具有较强的鲁棒性能。即基于飞轮电机离散化数学模型, 将递推最小二乘算法用于定子电阻、交直流电感等关键电磁参数的辨识, 并采用将反电动势估算值反馈引入到非线性扩张观测器的检测方法, 以便准确估算转子位置。仿真与实验结果验证了所提方法在提高系统无位置检测性能的同时可实现对飞轮储能系统的无位置传感器准确跟踪。

本文所提的基于递推最小二乘离散辨识参数的ESO 转子位置检测方法具有一定的适应性和扩展性, 可以为相似结构的飞轮电机无位置传感器控制提供一定的参考。

### 参考文献

[1] 叶鹏, 李山, 何淼, 等. 风储孤网系统运行与控制研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 163-170.  
YE Peng, LI Shan, HE Miao, et al. Review of operation and control of the wind storage isolated network

system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 163-170.

[2] DE ANDRADE R. Voltage sags compensation using a superconducting flywheel energy storage system[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2005, 15(2): 2265-2268.

[3] ZHANG X, YANG J Q. A robust flywheel energy storage system discharge strategy for wide speed range operation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 7862-7873.

[4] 张文娟, 马浩淼, 高蕊. 引入比例谐振调节器的双馈电机转子电流无速度传感器控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 108-112.  
ZHANG Wenjuan, MA Haomiao, GAO Rui. Rotor current speed sensorless control of doubly-fed induction generator based on proportional resonant regulator[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 108-112.

[5] 李树胜, 付永领, 刘平, 等. 磁悬浮飞轮储能UPS系统集成应用及充放电控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 170-176.  
LI Shusheng, FU Yongling, LIU Ping, et al. Research on integrated application and charging-discharging control method for the magnetically suspended flywheel storage-based UPS system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 170-176.

[6] 邓小文, 潘巧波, 高庆水. 永磁直驱机组叶轮质量不平衡故障建模及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 35-40.  
DENG Xiaowen, PAN Qiaobo, GAO Qingshui. Research on the modeling and simulation of permanent magnet direct-driven wind turbine rotor imbalance fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 35-40.

[7] 刘文军, 周龙, 唐西胜, 等. 基于改进型滑模观测器的飞轮储能系统控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 71-78.  
LIU Wenjun, ZHOU Long, TANG Xisheng, et al. Research on FESS control based on the improved sliding-mode observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 71-78.

[8] 孟高军, 刘海涛, 伏祥运, 等. 基于混合观测器的飞轮储能系统控制方法[J]. 电力建设, 2018, 39(4): 22-28.  
MENG Gaojun, LIU Haitao, FU Xiangyun, et al. Flywheel energy storage system control method based on hybrid observer[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(4): 22-28.

[9] ZHU Z Q, GONG L M. Investigation of effectiveness of sensorless operation in carrier signal injection based sensorless control methods[J]. IEEE Transactions on

- Industrial Electronics, 2011, 58(8): 3431-3439.
- [10] 吕晓源, 刘刚, 毛琨, 等. 基于虚拟脉振高频注入法的永磁电机初始位置检测[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 34-41.  
LÜ Xiaoyuan, LIU Gang, MAO Kun, et al. Initial position detection of permanent magnet motor based on virtual pulsating high-frequency injection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(23): 34-41.
- [11] 刘海东, 周波, 郭鸿浩, 等. 脉振高频信号注入法误差分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(6): 38-44.  
LIU Haidong, ZHOU Bo, GUO Honghao, et al. Error analysis of high frequency pulsating signal injection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(6): 38-44.
- [12] 毛永乐, 杨家强, 赵寿华, 等. 带负载转矩估算的非线性观测器内嵌式永磁同步电机无位置传感器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2252-2259.  
MAO Yongle, YANG Jiaqiang, ZHAO Shouhua, et al. Nonlinear observer with load-torque estimation for sensorless control strategy of interior permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2252-2259.
- [13] QUANG N K, HIEU N T. FPGA-based sensorless PMSM speed control using reduced-order extended Kalman filters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6574-6582.
- [14] ZHAO Yue, QIAO Wei, WU Long. Improved rotor position and speed estimators for sensorless control of interior permanent-magnet synchronous machines[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 3(2): 627-639.
- [15] 陈勇, 高玉文, 陈章勇. 一种自适应同步滤波器和正交锁相环相结合的滑模观测器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 265-274.  
CHEN Yong, GAO Yuwen, CHEN Zhangyong. A sliding mode observer based on combination of adaptive synchronization filter and quadrature phase locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 265-274.
- [16] 文建平, 曹秉刚. 无速度传感器的内嵌式永磁同步电机自抗扰控制调速系统[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 58-62.  
WEN Jianping, CAO Binggang. Active disturbances rejection control speed control system for sensorless IPMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(30): 58-62.
- [17] 杜博超, 韩守亮, 张超, 等. 基于自抗扰控制器的内置式永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 105-112.  
DU Bochao, HAN Shouliang, ZHANG Chao, et al. Sensorless control of interior permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection controller[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 105-112.
- [18] 孙凯, 许镇琳, 邹积勇. 基于自抗扰控制器的永磁同步电机无位置传感器矢量控制系统[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 18-22.  
SUN Kai, XU Zhenlin, ZOU Jiyong. A novel approach to position sensorless vector control of PMSM based on active-disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 18-22.
- [19] 秦余钢, 马勇, 李腾飞. 基于改进最小二乘算法的船舶操纵性参数辨识[J]. 吉林大学学报, 2016, 46(3): 898-903.  
QIN Yugang, MA Yong, LI Tengfei. Parameter identification of ship's maneuvering motion based on improved least square method[J]. Journal of Jilin University, 2016, 46(3): 898-903.
- [20] RASHED M, MACCONNELL P F A, STRONACH A F, et al. Sensorless indirect-rotor-field-orientation speed control of a permanent-magnet synchronous motor with stator-resistance estimation[J]. IEEE Transactions on Industrial Application, 2017, 54(3): 1664-1675.
- [21] 董召强, 徐秋霞, 高谨. 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[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 57-62.  
DONG Zhaoqiang, XU Qiuxia, GAO Jin. Parameters identification of PMSM based on recurrence least square and hardware in the loop platform[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(6): 57-62.

收稿日期: 2018-06-12; 修回日期: 2018-07-22

作者简介:

张文元(1967—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行控制、现场维护和测试。E-mail: sxzszwy@163.com

(编辑 葛艳娜)