

基于梯度算法的永磁伺服系统惯量辨识性能研究

梁骄雁, 胡育文*, 鲁文其

南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 210016

摘要: 为抑制惯量扰动对高性能伺服驱动系统性能的影响, 系统应具有惯量辨识和控制器参数自整定的功能, 而精准、快速地辨识出系统实时转动惯量值是其需要首先解决的关键技术。本文针对惯量辨识展开了研究, 推导出永磁同步电机(PMSM)惯量辨识的梯度公式, 并研究了影响惯量辨识收敛速度和精度的因素。通过仿真和实验表明, 梯度算法用于永磁伺服系统的惯量实时辨识是有效的, 惯量辨识的收敛速度较快, 最快可控制在 5 s 左右, 且给定速度周期越短、转速变化范围越大, 惯量辨识的实时性越好, 这为下一步进行系统速度控制器参数自整定提供了基础。

关键词: 高性能; 永磁同步电机; 伺服系统; 惯量辨识; 梯度算法; 辨识性能

中图分类号: V242.5; TM351 **文献标识码:** A

随着电力电子技术、电机控制技术以及稀土永磁材料的发展, 永磁同步电机(PMSM)在航空航天领域显示出广泛的应用前景和强大的生命力。但在电机运行过程中, 常因转动惯量的变化影响到系统的控制性能。譬如说, 飞机在空中加油时, 空中加油机需将输油软管放出机外, 以便与受油机的受油管衔接, 实现空中加油, 但软管的伸缩会改变加油机与受油机的转动惯量, 从而影响到其控制性能, 降低了空中加油的成功率; 又如, 人造地球卫星在轨道环境中, 由于太阳翼变形引起的转动惯量改变, 也将影响控制性能。可见, 如何观测出系统转动惯量的变化, 对于航空航天中运动体的精准控制具有很实际的意义。

目前, 现代控制领域和电机控制领域的众多学者针对这个基础性问题做了大量研究, 如 Landau 离散时间递推参数辨识算法^[1-2]、拓展卢恩伯格观测器^[3-4]、递归最小二乘法^[5-6]、卡尔曼滤波器^[7]、状态观测器(ESO)^[8]等。文献^[2]基于离散

模型参考自适应理论, 通过仿真和实验, 对异步电机伺服系统的机械参数进行了在线辨识, 并提出了自调整速度控制的方法; 文献^[3]提出了采用降阶拓展卢恩伯格观测器(ROELO)进行惯量辨识, 该方法通常用于异步电机系统来减少计算量; 美国电气电子工程师学会(IEEE)成员曾使用具有遗忘因子的递推最小二乘法对直流伺服电机的转动惯量进行辨识^[5], 但该类算法需使用高阶滤波器, 增加了算法的复杂性, 且需大量的计算内存, 适合一些数学模型比较简单的系统。

这些实时估计参数的文献几乎均未采用梯度算法, 究其原因主要是梯度算法本身的收敛时间长, 而最小二乘法、Landau 辨识算法等收敛时间短。但通过对诸多算法进行对比研究后发现: 一种算法用于系统参数辨识时, 它的整体使用时间不是仅由算法本身的收敛时间决定, 与系统的复杂程度也有关, 由每次的计算时间和算法本身的收敛时间之和决定。其中计算时间与两个部分相

收稿日期: 2010-06-22; 退修日期: 2010-07-20; 录用日期: 2010-09-09; 网络出版时间: 2010-11-11 09:14

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101111.0914.027.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20101111.0914.027

* 通讯作者. Tel.: 025-84890382 E-mail: huyuwen@nuaa.edu.cn

引用格式: 梁骄雁, 胡育文, 鲁文其. 基于梯度算法的永磁伺服系统惯量辨识性能研究[J]. 航空学报, 2011, 32(3): 488-496. Liang Jiaoyan, Hu Yuwen, Lu Wenqi. Research on inertia identification performance of permanent magnet servo systems based on gradient algorithm[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(3): 488-496.

关:惯量辨识算法在系统控制器中实现的执行语句长短和惯量辨识算法完成运算的辨识周期,前者与算法的实时计算量大小有关,而后者与系统的复杂程度(硬件和软件)密切相关。研究发现,采用梯度算法对惯量进行辨识时,仅涉及一个向量的运算,每次实时计算量很小。系统越复杂,算法的计算时间就会越长;当采用不同的惯量辨识算法时,算法在系统控制器中编程实现的执行语句越短,实现同样算法的计算时间也会越短,惯量辨识的整体使用时间也就越短。所以,尽管该算法本身的收敛不是很快,但每次计算加收敛的整体时间却较短。当其用于一些复杂系统的参数辨识时,表现出了优良的性能。因此,像 PMSM 这种多变量、强耦合、非线性、变参数的复杂对象,选择梯度算法进行参数辨识是较适宜的。

本文立足于这种观点,针对时变惯量系统,将梯度算法引入到 PMSM 伺服系统中,进行转动惯量实时辨识的相关研究,为获得高性能的控制算法提供参数自整定的依据。首先理论分析了基于梯度思想的惯量辨识机理,接着以一台面贴式 PMSM 为对象,对影响惯量辨识收敛速度和精度的因素进行了仿真研究及实验验证。

1 永磁伺服系统的惯量辨识原理分析

1.1 PMSM 的数学模型

电机运动学方程为

$$J d\omega_m/dt + B_m \omega_m + T_L = T_e \quad (1)$$

式中: J 为转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; ω_m 为转子机械角速度, rad/s ; T_L 为负载扰动转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; T_e 为电机输出转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; B_m 为黏性阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}$ 。

将式(1)进行傅里叶变换,并对信号进行采样,然后经一零阶保持器保持。零阶保持器函数为

$$G_0(s) = (1 - e^{-sT_c})/s \quad (2)$$

式中: T_c 为采样周期。

忽略黏性阻尼系数 B_m , 电机运动方程可以简单离散化为

$$\omega_m(k) - e^{-B_m T_c/J} \omega_m(k-1) = \frac{1 - e^{-B_m T_c/J}}{B_m} (T_e(k-1) - T_L(k-1)) \quad (3)$$

令 $a = (1 + b)/B_m$, $b = -e^{-B_m T_c/J}$ 和 $c = a T_L(k-1)$, 可将式(3)转换为

$$\omega_m(k) = a T_e(k-1) - b \omega_m(k-1) - c \quad (4)$$

定义 $y(k) = \omega_m(k)$, $\boldsymbol{\varphi}^T(k-1) = [T_e(k-1) - \omega_m(k-1) \quad -1]$, $\boldsymbol{\theta}(k) = [a \quad b \quad c]^T$, 则式(4)可写为

$$y(k) = \boldsymbol{\varphi}^T(k-1) \boldsymbol{\theta}(k) \quad (5)$$

1.2 参数估计梯度算法的惯量辨识原理

(1) 梯度算法的基本原理^[9]

设确定性系统由式(6)描述:

$$y(k) = -a_1 y(k-1) - a_2 y(k-2) - \dots - a_{n_a} y(k-n_a) + b_0 u(k-d) + b_1 u(k-d-1) + \dots + b_{n_b} u(k-d-n_b) = \boldsymbol{\varphi}^T(k-1) \boldsymbol{\theta}(k) \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{\varphi}^T(k-1) = [-y(k-1) \quad -y(k-2) \quad \dots \quad -y(k-n_a) \quad u(k-d) \quad u(k-d-1) \quad \dots \quad u(k-d-n_b)]$; $\boldsymbol{\theta}(k) = [a_1 \quad a_2 \quad \dots \quad a_{n_a} \quad b_0 \quad b_1 \quad \dots \quad b_{n_b}]^T$ 。

设 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 为 $\boldsymbol{\theta}(k)$ 的辨识值, 若已经获得 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)$ 和 $y(k)$, 当约束条件为

$$\varepsilon(k) = y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k-1) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = 0 \quad (7)$$

时, 求使如式(8)所示目标函数 M 为极小时的 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 。

$$M = \frac{1}{2} \|\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) - \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)\|^2 =$$

$$\frac{1}{2} (\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) - \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1))^T (\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) - \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)) \quad (8)$$

利用 Lagrange 乘数法则, 构造一个扩展的目标函数:

$$M_a = \frac{1}{2} \|\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) - \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)\|^2 + \lambda (y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k-1) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k)) \quad (9)$$

由极小值条件:

$$\partial M_a / \partial \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \mathbf{0}, \partial M_a / \partial \lambda = 0 \quad (10)$$

有

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) - \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) - \lambda \boldsymbol{\varphi}(k-1) = \mathbf{0} \quad (11)$$

$$y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k-1) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = 0 \quad (12)$$

解得

$$\lambda = \frac{y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k-1) \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)}{\boldsymbol{\varphi}^T(k-1) \boldsymbol{\varphi}(k-1)} \quad (13)$$

则递推梯度算法可写为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \frac{\boldsymbol{\varphi}(k-1)}{\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)} \cdot (y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)) \quad (14)$$

(2) 梯度算法的收敛性分析

参考文献[10],对该算法的收敛性进行了深入分析。

定义参数估计误差为

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k) - \boldsymbol{\theta}(k) \quad (15)$$

和随机 Lyapunov 函数

$$T(k) \triangleq \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(k)\|^2 = \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T(k)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(k) \quad (16)$$

将式(14)代入式(15),可得

$$\tilde{\boldsymbol{\theta}}(k) = \tilde{\boldsymbol{\theta}}(k-1) - \tilde{y}(k) \frac{\boldsymbol{\varphi}(k-1)}{\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)} \quad (17)$$

式中: $\tilde{y}(k) = \hat{y}(k) - y(k) = \boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(k)$

将式(17)代入式(16),可得

$$T(k) = \tilde{\boldsymbol{\theta}}^T(k)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(k) = T(k-1) - \frac{(\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(k-1))^2}{\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)} \quad (18)$$

令 F_k 为由 t 及之前时刻的观测生成的 ρ 代数序列 ($F_k, k \in \mathbb{N}$), 即 $F_k = \rho(y(k), u(k), y(k-1), u(k-1), \dots, y(0), u(0))$, F_0 包含所有初始条件信息。考虑到 F_{k-1} 是可测的, 式(18)两边对 F_{k-1} 取条件期望, 可得

$$E(T(k) | F_{k-1}) = T(k-1) - \frac{(\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(k-1))^2}{\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)} \quad (19)$$

应用鞅收敛定理知 $T(k)$ 几乎肯定 (almost surely, 简写 a. s.) 收敛于一有界随机变量 T_0 , 即

$$T(k) = \|\tilde{\boldsymbol{\theta}}(k)\|^2 \rightarrow T_0 < \infty, \text{ a. s.} \quad (20)$$

$$\sum_{i=0}^k \frac{(\boldsymbol{\varphi}^T(i-1)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(i-1))^2}{\boldsymbol{\varphi}^T(i-1)\boldsymbol{\varphi}(i-1)} < \infty, \text{ a. s.}, k > 0 \quad (21)$$

将 Kronecker 引理应用于式(21), 可得

$$\frac{1}{\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)} \cdot$$

$$\sum_{i=0}^k (\boldsymbol{\varphi}^T(i-1)\tilde{\boldsymbol{\theta}}(i-1))^2 \rightarrow 0, \text{ a. s.}$$

式(20)说明在没有持续激励条件的假设下,

梯度算法的参数估计误差一致有界。

如果要使梯度算法的参数估计误差一致收敛于零, 必须加上持续激励条件, 如式(22)所示。限于篇幅, 该部分的证明本文将不做展开。

$$\eta \mathbf{I} \leq \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \boldsymbol{\varphi}(k-i)\boldsymbol{\varphi}^T(k-i) \leq \xi \mathbf{I}, \text{ a. s.} \quad (22)$$

($0 < \eta \leq \xi < \infty, N \geq k$)

(3) 梯度算法的参数选取规则

因式(14)右边第2项的分母 $\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)$ 为标量, 并且是变化的, 它有可能为零, 这样会使修正项变得很大, 进而使估计值 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 剧烈变化。为了改变这一状况, 需对其进行修改, 修改的规则有: ①使式(14)分母不为零, 并使修改后的公式尽量与原式的变化收敛速度一致; ②保证修正项的方向不变。引入两个修正参数 α 和 σ , 构成如下满足两个规则的实用公式:

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \frac{\alpha \boldsymbol{\varphi}(k-1)}{\sigma + \boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)} \cdot (y(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)) \quad (23)$$

原公式(式(14))中的修正项系数 $l > 0$ ($l = \boldsymbol{\varphi}(k-1)\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)/\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)$), 在计算式(23)时, 需要有初始条件 $\boldsymbol{\varphi}(0)$ 和 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(0)$ 。但是, 这两个初值在递推计算过程中所起的作用随着时间的增加而按指数规律 $|l'|^{(k-1)T_c}$ ($l' = \alpha \boldsymbol{\varphi}(k-1)\boldsymbol{\varphi}^T(k-1)/(\sigma + \boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1))$) 衰减。因此, 如果模值 $|l'| < 1$, 初值可以任选, 对预测结果没有多大影响^[11-12]。综上知 $0 < l' < 1$, 推导可得式(23)中 $0 < \alpha < 2$ 且 $\sigma > 0$ 。

(4) 基于梯度算法的惯量辨识

将式(5)代入式(23), 可得基于梯度算法的永磁伺服系统惯量辨识公式为

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}(k) = \hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1) + \frac{\alpha \boldsymbol{\varphi}(k-1)}{\sigma + \boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\boldsymbol{\varphi}(k-1)} \cdot (\omega_m(k) - \boldsymbol{\varphi}^T(k-1)\hat{\boldsymbol{\theta}}(k-1)) \quad (24)$$

又因 T_c 为惯量辨识算法的控制周期, 也为梯度算法对转速、电流的采样周期。实践中, 由于辨识算法的控制周期很小, 所以采样频率很高, 离散化带来的失真可以近似忽略, 因而 $\hat{\boldsymbol{\theta}}(k)$ 中的各项可以简化为 $\hat{a} \approx T_c/J, \hat{b} \approx -1$ 和 $\hat{c} \approx \hat{T}_L(k-1) \cdot T_c/J$, 其中 \hat{a} 为待辨识值, 根据 \hat{a} 可求出系统转动惯量 \hat{J} 。

2 永磁交流伺服系统惯量辨识控制框图

本文提出的永磁交流伺服系统惯量辨识的控制框图如图 1 所示:系统采用电流内环、速度外环

的两环矢量控制结构,速度和位置信号由光电编码器反馈;电流环和速度环均采用积分分离的比例-积分(PI)调节器进行控制;惯量的施加通过控制磁粉离合器的励磁电源来实现。

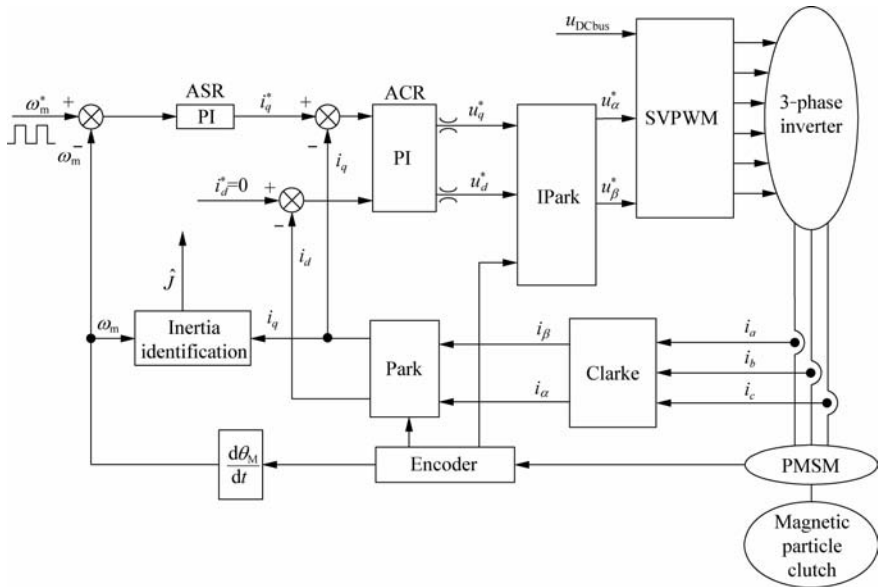


图 1 伺服系统惯量辨识的控制原理框图

Fig. 1 Schematic control block diagram for inertia identification of servo system

图 1 中:ASR 表示速度调节器;ACR 表示电流调节器;Park 表示直角坐标系的旋转变换,即“ $\alpha\beta/dq$ 变换”;Clarke 表示三相系统变换成二相系统,即“ $abc/\alpha\beta$ 变换”;Ipark 表示 Park 的反变换,即“ $\alpha\beta/dq$ 反变换”; ω_m^* 为电机的给定转速; i_d^* 、 i_q^* 、 i_d 和 i_q 分别为给定直轴和交轴电流、实际直轴和交轴电流; u_d^* 和 u_q^* 分别为给定直轴和交轴电压; u_α^* 和 u_β^* 分别为给定 α 轴和 β 轴电压; i_α 和 i_β 分别为实际的 α 轴和 β 轴电流; i_a 、 i_b 和 i_c 为实际的电机三相电流; u_{DCbus} 为直流母线电压; θ_M 为电机的机械角速度。

3 仿真研究

为了研究梯度算法的辨识性能,采用一台面贴式 PMSM 搭建 MATLAB 的 Simulink 仿真模型,其转子转动惯量的标称值为 $J = 3.240 \text{ g} \cdot \text{m}^2$ 。

由电机运动方程式(1)知, J 与 $d\omega_m/dt$ 以乘积形式出现,所以计算惯量 J 时必须保证 $d\omega_m/dt$ 不为零,即当且仅当电机角速度发生一定变化时才能辨识出惯量值 J 。所以系统进行辨识时,给

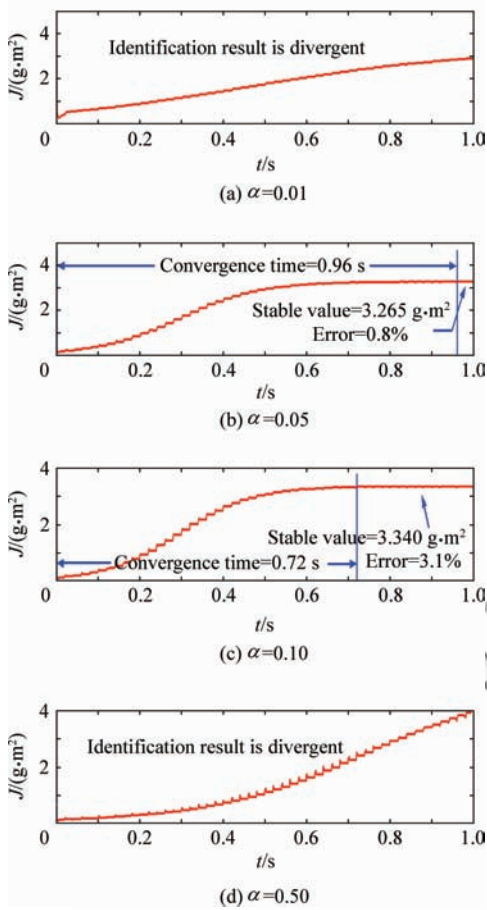
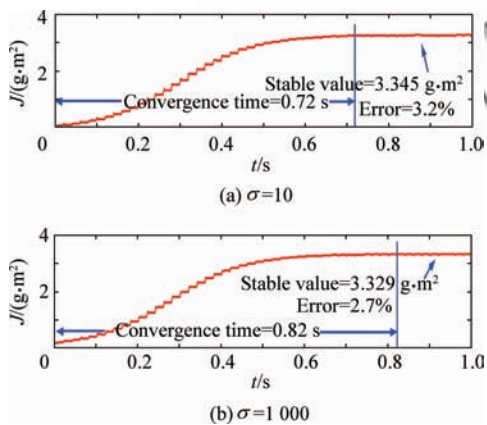
定速度信号为方波,幅值在 $250 \sim 500 \text{ r/min}$ 间变化,变化的频率为 25 Hz 。

3.1 辨识参数 α 和 σ 值的选取

为了测试系统在给定惯量下辨识参数 α 和 σ 的取值对辨识结果的影响,进行如下仿真:选定 α (或 σ) 不变,改变 σ (或 α) 的值,并观察辨识结果。系统空载启动时,负载转动惯量为零,总转动惯量仅为电机转子转动惯量。

图 2 为保持 $\sigma=100$ 不变,改变 α 大小所得的仿真波形,通过比较可以看出:在 $0.01 < \alpha < 0.50$ 范围内,随着 α 的增大,系统辨识的响应速度越来越快,收敛时间也随之变短,但辨识精度会变低; α 过大或过小时,系统辨识的响应变得很慢,辨识结果发散。

选定 $\alpha=0.10$ 并保持不变,调节 σ 大小,仿真结果如图 2(c)和图 3 所示。可以看到 σ 对辨识结果的影响不是很大; $\sigma > 0$ 时, σ 越小,辨识精度越低,系统辨识响应会稍微变快一点;但当 $0 < \sigma < 100$ 时,再减小 σ ,辨识精度依然会变差,但辨识收敛时间不再减小。

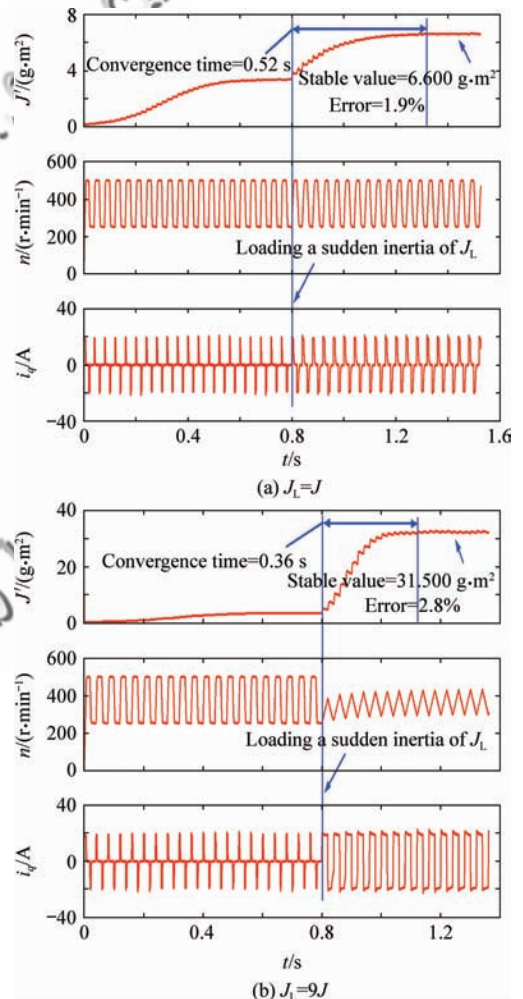
图2 $\sigma=100, \alpha$ 取值不同时的仿真结果Fig. 2 Simulation results of various α while $\sigma=100$ 图3 $\alpha=0.10, \sigma$ 取值不同时的仿真结果Fig. 3 Simulation results of various σ while $\alpha=0.10$

综合考虑辨识收敛时间和精度,取 $\alpha=0.10$ 、 $\sigma=100$,此时,辨识结果建立时间为 0.72 s ,辨识结果为 $3.340\text{ g}\cdot\text{m}^2$,稳态偏差约为 3.1% 。

3.2 变惯量的系统仿真

为了测试该算法对时变惯量系统的辨识能力,空载运行到 0.8 s 时,突加负载转动惯量 J_L ,则系统转动惯量为电机转子转动惯量和负载转动惯量之和: $J'=J+J_L$ 。

图4为负载转动惯量 J_L 分别为电机转子转动惯量 J 的1倍、9倍时,即系统转动惯量分别为 $J'_1=6.480\text{ g}\cdot\text{m}^2$ 和 $J'_2=32.400\text{ g}\cdot\text{m}^2$ 时的仿真结果。图中 n 为电机转速。

图4 0.8 s 时突加负载转动惯量 J_L 的仿真结果Fig. 4 Simulation results of loading a sudden inertia J_L at time 0.8 s

从图4可以看出:在 0.8 s 时刻加载后,电机转速 n 的跟踪性能变差,交轴电流 i_q 也发生较大变化;所加的负载转动惯量越大,速度的上升时间和调节时间均越长,快速性越差,跟踪效果越差;

但惯量辨识性能却一直很好,且系统转动惯量变化越大,系统辨识收敛时间越短。比较图 4(a)和图 4(b),突加负载惯量由 J 增大到 $9J$ 时,辨识收敛时间从 0.52 s 缩短到 0.36 s ;辨识误差稍微增大,但仍低于 3% 。

4 系统实验

4.1 实验平台设计

为了验证参数估计梯度辨识算法的有效性,设计了如图 5 所示的实验平台。该实验平台分为 4 个部分,从右往左依次为伺服电机、联轴器、磁粉离合器和碟式制动器。开始时令制动器处于制动状态,磁粉离合器不通激磁电流,此时伺服电机经过联轴器拖动磁粉离合器前级旋转。为改变转动惯量,使制动器处于非制动状态,并同时给磁粉离合器通激磁电流,实现磁粉离合器前级与后级的同步旋转。伺服电机参数为:额定功率 2.3 kW ,额定转矩 $15\text{ N}\cdot\text{m}$,交直流电感 3.675 mH ,额定转速 1500 r/min ,相绕组电阻 $0.47\ \Omega$,极对数 4。

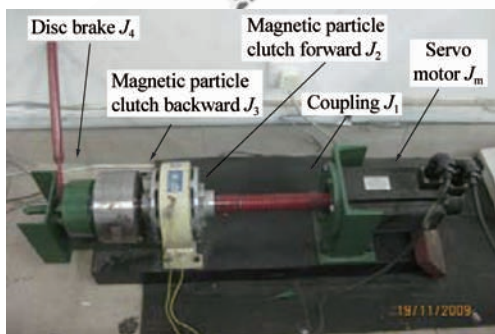


图 5 实验平台

Fig. 5 Experimental platform

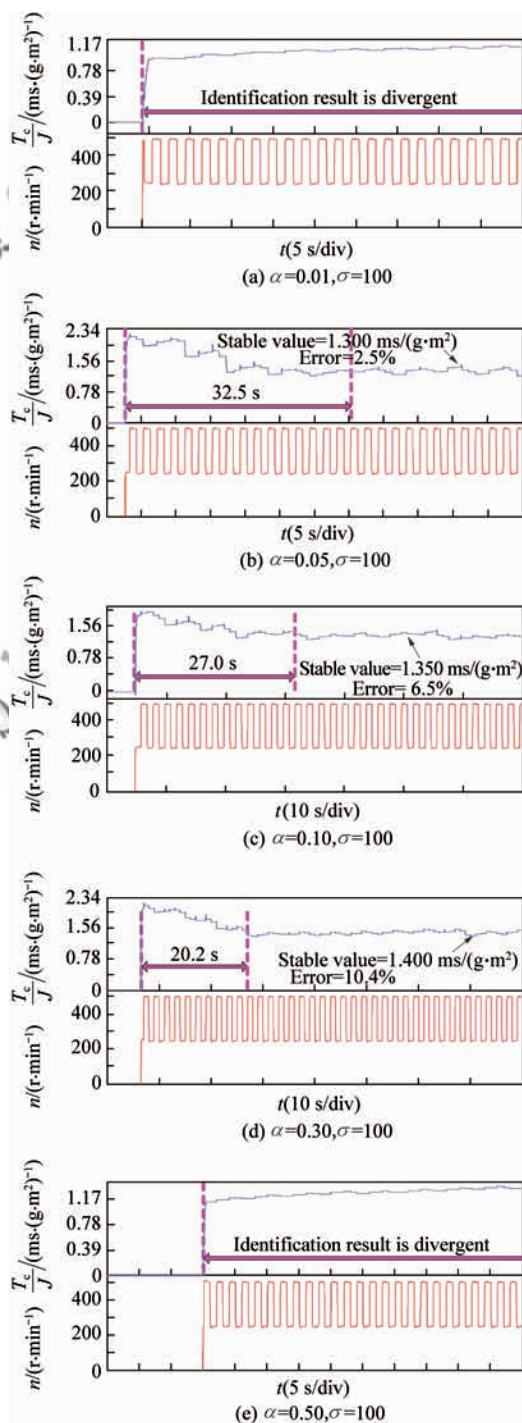
4.2 定惯量辨识实验

(1) 参数 α 和 σ 的取值对辨识性能的影响

实验时,参考仿真得到的最佳辨识参数 $\alpha=0.10$ 、 $\sigma=100$,在该值附近调节,选择了参数辨识收敛时间最短、辨识精度最高的一组参数。

伺服电机空载起动,实验中电机转动惯量较大,加速过程较慢,为了使电机有充裕的时间加速到给定转速,取给定速度周期 T_v 为 2.0 s ,速度在

$250\sim 500\text{ r/min}$ 间变化(即速度变化范围 $\Delta v_{pp}=250\text{ r/min}$)。由于惯量辨识周期 $T_c=6\text{ ms}$,系统突加惯量前,折合到电机转子上的总转动惯量值为 $J=J_m+J_1+J_2=4.730\text{ g}\cdot\text{m}^2$,所以辨识值 T_c/J 的理论值为 $1.268\text{ ms}/(\text{g}\cdot\text{m}^2)$ 。图 6 为辨识参数 α 和 σ 取值不同时,梯度算法在电机起动过程中的实验结果。



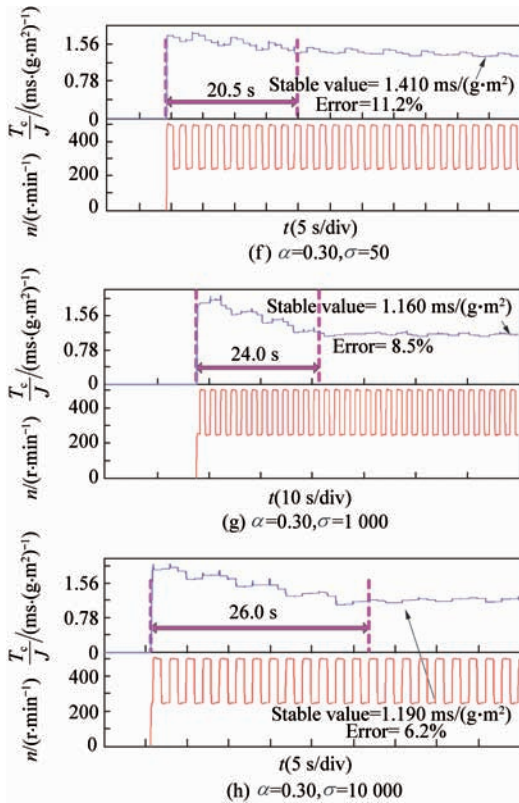


图6 $T_v=2.0$ s, α 和 σ 取值不同时的实验结果
Fig. 6 Experimental results for various α and σ at $T_v=2.0$ s

$\alpha=0.10$, $\sigma=100$ 时得到如图 6(c) 所示的实验波形, 大约经过 27 s, 辨识值稳定在 $1.350 \text{ ms}/(\text{g} \cdot \text{m}^2)$, 误差为 6.5%。保持 $\sigma=100$ 不变, 在 0.10 附近调节 α 的值: 考虑到仿真结果中, 在 $0.01 < \alpha < 0.50$ 范围内, 收敛时间随辨识参数 α 的增大而缩短, 可以适当增大 α 值, 这使得辨识的响应速度变快, 但辨识精度却随之降低, 如图 6(b)~图 6(d) 所示; 跟仿真结果一致, 当 α 太大或太小时, 辨识结果均发散, 不能收敛, 如图 6(a) 和图 6(e) 所示。为了保证辨识的实时性, 此处选取参数 $\alpha=0.30$, 该组辨识收敛时间最短, 为 20.2 s。

由仿真结果知, 保持 $\alpha=0.30$ 不变, 在 $\sigma \geq 100$ 范围内调节 σ 的大小, σ 越小, 辨识收敛时间越短, 辨识误差越高, 实验结果如图 6(d)、图 6(g) 和图 6(h) 所示; 但当 $\sigma < 100$, σ 继续减小时, 辨识收敛时间不再减小, 但辨识误差继续增大, 如图 6(f) 所示。

以上实验结果均与仿真得到的变化规律一致, 但辨识收敛时间和精度却不如仿真结果理

想, 这主要是由于实际系统会受到各种外界干扰, 实验中信号处理实时性和测量模块精度不如仿真高, 控制芯片定点运算以及给定速度周期较大。折中考虑辨识参数对辨识收敛时间和辨识精度的影响, 选定 $\alpha=0.30$, $\sigma=100$, 电机经历约 10 个测试信号周期 (20.2 s) 转动惯量辨识机制基本收敛, 如图 6(d) 所示, 此时辨识值 T_c/J 为 $1.400 \text{ ms}/(\text{g} \cdot \text{m}^2)$, 辨识误差为 10.4%。

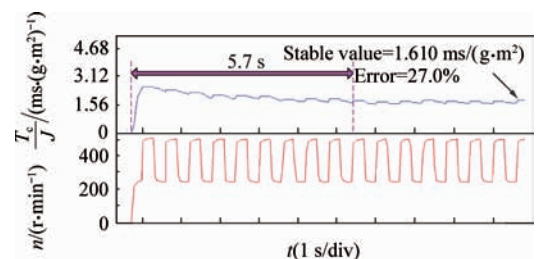
(2) 给定速度对辨识性能的影响

从上一组实验结果可以看出, 当给定速度保持不变时, 改变梯度算法的参数会对辨识结果产生一定的影响。为了测试给定速度 (速度周期和转速变化范围) 对系统辨识性能的影响, 保持梯度算法的参数为 $\alpha=0.30$, $\sigma=100$ 不变, 进行了如下实验。

图 7(a) 为给定速度周期 T_v 为 0.6 s、转速在 250~500 r/min 间变化 (即 $\Delta v_{pp}=250 \text{ r/min}$) 时的实验波形, 辨识值 T_c/J 约经 5.7 s 收敛到 $1.610 \text{ ms}/(\text{g} \cdot \text{m}^2)$, 辨识误差为 27.0%。与给定速度周期 T_v 为 2 s 时的实验波形图 6(d) 比较发现: 随着给定速度周期变短, 速度的跟踪效果变差, 惯量辨识精度降低, 但辨识收敛时间却明显减少, 使辨识更具实时性。

图 7(b) 为给定速度周期 T_v 为 2.0 s、转速在 0~500 r/min 间变化 (即 $\Delta v_{pp}=500 \text{ r/min}$) 时的实验波形, 约经 11.1 s 辨识值 T_c/J 收敛到 $1.010 \text{ ms}/(\text{g} \cdot \text{m}^2)$, 辨识误差为 20.3%。与速度变化范围 $\Delta v_{pp}=250 \text{ r/min}$ 时的实验波形图 6(d) 比较发现: 速度变化范围越大, 辨识收敛时间越短, 辨识结果脉动变大, 辨识精度越差。

所以, 给定速度对惯量辨识的精度和收敛时间都有显著影响: 给定速度周期越短或转速变化范围越大, 辨识收敛时间越短, 但辨识精度不高; 速度变化越慢或转速变化范围越小, 辨识收敛时间变长, 但辨识精度提高。



(a) $T_v=0.6$ s, $\Delta v_{pp}=250$ r/min

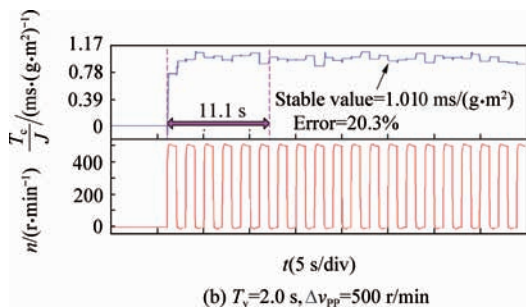
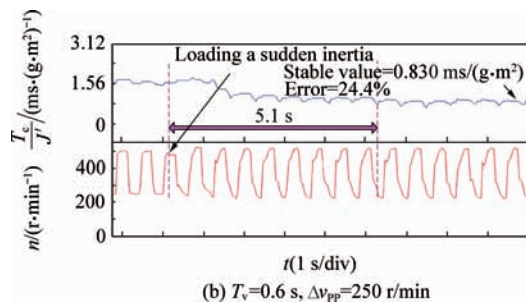
图7 不同 T_v 和 Δv_{pp} 时实验结果Fig. 7 Experimental results for various T_v and Δv_{pp} 

图8 变惯量实验

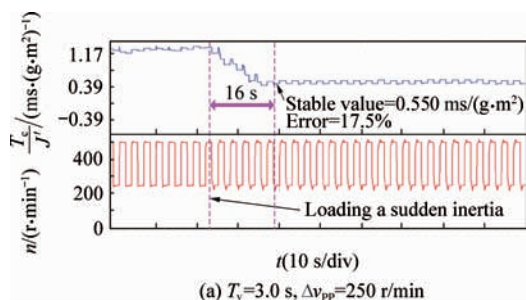
Fig. 8 Experiments of variable inertias

4.3 变惯量辨识实验

为了说明给定速度对变惯量系统辨识性能的影响,分别在给定速度周期 T_v 为 3.0 s 和 0.6 s 时作了相关研究。伺服电机依然空载起动,给定速度在 250~500 r/min 间变化,梯度算法的参数为 $\alpha=0.30$ 、 $\sigma=100$ 。实验过程中,手动控制励磁电源使电机的惯量由标称值变为原来的近似 1.9 倍,即折合到电机转子上总转动惯量值为 $J' = J_m + J_1 + J_2 + J_3 + J_4 = 8.990 \text{ g} \cdot \text{m}^2$, 辨识值 T_c/J' 为 $0.667 \text{ ms}/(\text{g} \cdot \text{m}^2)$ 。

给定速度周期 T_v 为 3.0 s 和 0.6 s 时的变惯量实验结果如图 8 所示,突加惯量时刻,辨识值立即发生变化: T_v 为 3.0 s 时系统约经 16 s 达到稳定值 $0.550 \text{ ms}/(\text{g} \cdot \text{m}^2)$, 辨识误差为 17.5%, 如图 8(a) 所示; T_v 为 0.6 s 时,辨识值 T_c/J' 经 5.1 s 达到稳定,辨识误差为 24.4%, 如图 8(b) 所示。

可见,电机运行时,不管其转动惯量保持恒定还是发生变化,均有:给定速度周期变短时系统速度跟踪效果和辨识精度都会变差,但辨识收敛时间却能明显减少,使辨识更具实时性。所以,给定速度周期决定了系统惯量辨识的精度和收敛时间。

(a) $T_v=3.0 \text{ s}$, $\Delta v_{pp}=250 \text{ r/min}$

5 结论

本文采用参数估计的梯度算法对 PMSM 伺服系统的转动惯量进行辨识研究,仿真和实验结果显示:

- (1) 梯度算法能对定惯量系统、变惯量系统都能进行准确、实时的惯量辨识。
- (2) 算法的辨识性能受到辨识参数和给定速度的显著影响。辨识参数 $\alpha=0.30$ 、 $\sigma=100$ 时,变惯量辨识收敛时间最快可控制在 5.1 s、精度为 24.4%,且给定速度周期越短、转速变化范围越大,辨识的实时性越好。
- (3) 该辨识算法适合于一些参数变化较慢、而且对快速性要求不是很高的系统。

参考文献

- [1] Fujita K, Sado K. Instantaneous speed detection with parameter identification for AC servo systems[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 28(4): 864-872.
- [2] Guo Y J, Huang L P, Muramatsu M. Research on inertia identification and auto-tuning of speed controller for AC servo system[C]// Proceedings of the Power Conversion Conference-Osaka, 2002, 2: 896-901.
- [3] Lee K B, Yoo J Y, Song J H, et al. Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2004, 151(1): 116-120.
- [4] Cao X Q, Bi M. Extended Luenberger observer based on dynamic neural network for inertia identification in PMSM servo system[C]// 2009 Fifth International Conference on Natural Computation, 2009, 2: 48-52.
- [5] Dessaint L A, Hebert B J, Le-Huy H, et al. A DSP-based adaptive controller for a smooth positioning system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1990, 37(5): 372-377.

- [6] 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]. 电机与控制应用, 2008, 35(12): 13-17. Liu Yongqin, Shen Yanxia, Ji Zhicheng. Induction motor inertia identification based on improved least square method[J]. Electric Machines & Control Application, 2008, 35(12): 13-17. (in Chinese)
- [7] de Campos M, Caratti E G, Grundling H A. Design of a position servo with induction motor using self-tuning regulator and Kalman filter[C] // Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. 2000, 3: 1613-1618.
- [8] Li S H, Liu Z G. Adaptive speed control for permanent magnet synchronous motor system with variations of load inertia[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(8): 3050-3059.
- [9] 徐湘元. 自适应控制理论与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007: 21-23. Xu Xiangyuan. Theory and application of adaptive control [M]. Beijing: Electrical Industry Press, 2007: 21-23. (in Chinese)
- [10] 丁锋, 杨慧中. 基于梯度的扰动时变系统辨识算法及其收敛性[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2005, 4(3): 221-226. Ding Feng, Yang Huizhong. Gradient based identification algorithm and its convergence for disturbance time-varying systems[J]. Journal of Southern Yangtze University: Natural Science Edition, 2005, 4(3): 221-226. (in Chinese)
- [11] L. 雍 T. 索德斯图姆. 递推辨识的理论与实践[M]. 北京: 科学出版社, 1989. Lennart Ljung Torsten Söderström. Theory and practice of recursive identification [M]. Beijing: Science Press, 1989. (in Chinese)
- [12] 胡寿松. 多变量系统参数辨识的相关分析法[J]. 航空学报, 1990, 11(7): 400-404. Hu Shousong. Identification of parameters of MIMO system by correlation analysis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1990, 11(7): 400-404. (in Chinese)

作者简介:

梁骄雁(1985—) 女, 硕士研究生。主要研究方向: 电力电子与电力传动。

Tel: 025-84890382

E-mail: dancngjo@163.com

胡育文(1944—) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 电机控制、调速系统与发电系统电力电子变换。

Tel: 025-84890382

E-mail: huyuwen@nuaa.edu.cn

Research on Inertia Identification Performance of Permanent Magnet Servo Systems Based on Gradient Algorithm

LIANG Jiaoyan, HU Yuwen^{*}, LU Wenqi

College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China

Abstract: In order to suppress the influence of inertia disturbance on a high performance servo drive system, the system should possess the function of inertia identification and self-tuning of controller parameters. Among them, identifying the real-time inertia value accurately and rapidly should be solved first as the key. Research on inertia identification is conducted in this paper, which derives an inertia identification gradient formula of the permanent magnet synchronous motor (PMSM), and analyzes factors influencing the convergence time and precision of inertia identification. Simulation and experiments demonstrate that the gradient algorithm is effective. The convergence time of identification is short and it can be limited to around five seconds. The shorter the period and the larger the given range of a given velocity, the better is the real-time property of inertia identification. This study can provide basis for the parameter self-tuning of the speed controller.

Key words: high performance; permanent magnet synchronous motor; servo system; inertia identification; gradient methods; identification performance

Received: 2010-06-22; Revised: 2010-07-20; Accepted: 2010-09-09; Published online: 2010-11-11 09:14

URL: www.cnki.net/kcms/detail/11.1929.V.20101111.0914.027.html

DOI: CNKI:11-1929/V.20101111.0914.027

^{*} Corresponding author. Tel.: 025-84890382 E-mail: huyuwen@nuaa.edu.cn