

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.09.011

基于 MRAI 的伺服系统转动惯量辨识及改进研究

董海军¹, 段剑文²

(1. 杭州桢正机器人科技有限公司, 浙江 杭州 311121; 2. 杭州职业技术学院 友嘉机电学院, 浙江 杭州 310018)

摘要:针对伺服系统控制参数自整定所需转动惯量参数的辨识问题,对基于模型参考自适应辨识(MRAI)思想的转动惯量辨识方法进行了研究。根据离散递推辨识机制构建了自适应辨识律,并通过分析辨识增益大小对惯量辨识响应的影响,提出了一种辨识增益自适应调整的改进算法;基于惯量辨识结果评价标准,建立了分段函数以实现辨识增益的动态调整;在仿真模型和实际系统中对不同辨识增益对惯量辨识的影响进行了对比测试。研究表明:改进的惯量辨识方法可以解决惯量辨识响应快速性和稳定性的矛盾,能够快速跟踪系统转动惯量的变化,可用于伺服控制参数的自整定。

关键词:伺服;惯量辨识;模型参考自适应

中图分类号:TH39;TP273

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)09-0959-05

Inertia identification and its improvement of servo system based on MRAI

DONG Hai-jun¹, DUAN Jian-wen²

(1. Hangzhou Zhenzheng Robot Technology Co., Ltd., Hangzhou 311121, China; 2. Fair Friend Institute of Electromechanics, Hangzhou Vocational and Technical College, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at the identification problem of the inertia, which is required by self-tuning of the servo control parameters, the method based on model reference adaptive identification (MRAI) was studied. The adaptive identification law was constructed according to the discrete recursive identification mechanism, and by analyzing the influence of the identifying gain size on the inertia identification response, an improved adaptive adjustment algorithm was proposed, which is based on the evaluation criteria of the identification result, and the piecewise function was established to realize the dynamic adjustment of the gain. In simulation model and actual system, the influence of different identifying gain was compared and tested. The results show that the improved method can solve the contradiction of the rapidity and stability of the inertia identification, and can quickly track the change of the inertia of the system, and can be used for the self-tuning of servo control parameters.

Key words: servo; inertia identification; model reference adaptive

0 引言

随着自动化水平的提高,伺服系统的使用越来越广泛,而控制参数的自整定非常有必要。为实现控制参数整定,通常需要知道整个机械系统的系统转动惯量^[1]。虽然可以通过机械部件的转动惯量折算来得到近似值,但是,当机械系统比较复杂时,转动惯量折算也容易出错,而且不一定准确。因此,转动惯量的辨识是实现控制参数自整定的首要问题。惯量辨识精度

将影响使用整定控制参数时伺服系统响应是否能达到期望效果。

根据辨识原理不同,转动惯量辨识主要有以下几种方法:(1)加减速法^[2-3]; (2)最小二乘法^[4-5]; (3)模型参考自适应法等^[6-9]。其中,加减速法的原理最为简单,实现方便;最小二乘法和模型参考自适应法的原理较复杂、计算量较大,但可实现实时辨识。

本文将基于模型参考自适应的转动惯量辨识方法进行推导分析,并针对方法中的关键参数即辨识增

收稿日期:2017-12-11

作者简介:董海军(1983-),男,浙江温州人,硕士,主要从事电机驱动和伺服控制技术方面的研究。E-mail:dhj_07@163.com

益提出一种自适应调整方法,以解决辨识响应快速性和稳定性的矛盾。

1 基于 MRAI 的转动惯量辨识及改进

1.1 模型参考自适应辨识算法

模型参考自适应辨识(MRAI)是由模型参考自适应控制的思想衍化而来的,其典型的 MRAI 的原理框图如图 1 所示。

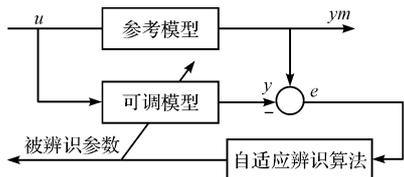


图 1 MRAI 的原理框图

设伺服电机的机械运动方程为:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} \quad (1)$$

式中: T_e —电磁转矩; T_L —负载转矩; J —系统转动惯量; ω —机械角速度; t —时间。

基于 POPOV 稳定性定理的惯量辨识算法如下:

$$\begin{aligned} \omega &= \int \frac{1}{J}(T_e - T_L) dt = \int b(T_e - T_L) dt \\ \bar{\omega} &= \int \frac{1}{J}(T_e - T_L) dt = \int \bar{b}(T_e - T_L) dt \\ \bar{b} &= K_I \int_0^t (\omega - \bar{\omega})(T_e - T_L) dt + \\ &K_P (\omega - \bar{\omega})(T_e - T_L) + \frac{1}{J(0)} \end{aligned} \quad (2)$$

以上 3 式分别作为参考模型、可调模型和自适应辨识律,自适应辨识律设计为比例积分型算法。

以上为连续模型,当在计算机或微控制器上实施模型参考自适应参数辨识时,需要导出离散时间域的自适应控制规律。离散化过程中会导致自适应控制回路中出现一个固定延时。因此,有必要对离散时间的模型参考系统直接建立一套控制算法。

由于 MRAI 算法是基于稳定性理论设计的,在保证被辨识参数渐进收敛的同时,并不需要考虑系统的稳定性,这就为研究带来了很大方便。

将式(1)离散化可得:

$$T_e(k-1) = T_L(k-1) + J \frac{\omega(k) - \omega(k-1)}{T} \quad (3)$$

式中: T —采样周期。

将相邻计算周期的运动方程相减可得:

$$\omega(k) = 2\omega(k-1) - \omega(k-2) +$$

$$\frac{T}{J} [T_e(k-1) - T_e(k-2) + T_L(k-1) - T_L(k-2)] \quad (4)$$

在快速响应的伺服系统中,采样频率很高,在一个采样周期内,可以认为负载转矩不变,则:

$$\omega(k) = 2\omega(k-1) - \omega(k-2) + b\Delta T_e(k-1) \quad (5)$$

其中: $\Delta T_e(k-1) = T_e(k-1) - T_e(k-2)$, $b = T/J$ 。将上式作为参考模型,可得可调模型方程为:

$$\bar{\omega}(k) = 2\bar{\omega}(k-1) - \bar{\omega}(k-2) + \bar{b}(k-1)\Delta T_e(k-1) \quad (6)$$

其中: $\bar{b}(k) = T/\bar{J}(k)$ 。

根据 Landau 离散时间递推参数的辨识机制,构建自适应辨识律为:

$$\bar{b}(k) = \bar{b}(k-1) + \beta \frac{\Delta T_e(k-1)}{1 + \beta \Delta T_e(k-1)^2} \varepsilon(k) \quad (7)$$

其中: $\varepsilon(k) = \omega(k) - \bar{\omega}(k)$ 。

式中: β —辨识增益。

1.2 辨识增益 β 的自适应调整

基于 MRAI 的转动惯量辨识方法中,辨识增益 β 为重要参数,辨识增益 β 的大小直接影响转动惯量发生变化时的惯量辨识速度和转动惯量维持稳定时的惯量辨识波动。辨识增益越大,转动惯量发生变化时惯量辨识速度越快,但是转动惯量维持稳定时惯量辨识波动越大;辨识增益越小,转动惯量发生变化时惯量辨识速度越慢,但是转动惯量维持稳定时惯量辨识波动越小。本研究为解决这个矛盾,建立辨识增益和当前辨识结果之间的关系,通过对当前辨识结果的分析,选择更合理的辨识增益,实现辨识增益的自适应调整,改进原辨识方法。

设当前为第 k 个辨识周期,则最新的 $n+1$ 个惯量辨识结果分别为:

$$J_{\text{est}}(k), J_{\text{est}}(k-1), \dots, J_{\text{est}}(k-n)。$$

基于上述辨识值,建立以下惯量辨识结果评价标准:

$$S = \frac{1}{J_M} \cdot \sum_{i=1}^n |J_{\text{est}}(k-i+1) - J_{\text{est}}(k-i)| \quad (8)$$

即为 n 个当前辨识结果和前一时刻辨识结果差值的绝对值之和与电机惯量的比值。基于辨识结果评价标准,建立辨识增益 β 的分段函数:

$$\beta = \begin{cases} h \cdot \beta_0, & S \geq b \\ \beta_0, & a < S < b, h > 1 \\ \frac{1}{h} \cdot \beta_0, & S \leq a \end{cases} \quad (9)$$

式中: β_0 —预设基准辨识增益; h —比例缩放因子。

当 $S \geq b$,即辨识结果还不稳定时,令辨识增益比

例放大为基准辨识增益的 h 倍;当 $S \leq a$, 即辨识结果稳定时, 令辨识增益比例缩小为基准辨识增益的 $1/h$ 倍;当 $a < S < b$, 即辨识结果稳定性处于中间位置时, 维持当前的基准辨识增益。

辨识算法框图如图2所示。

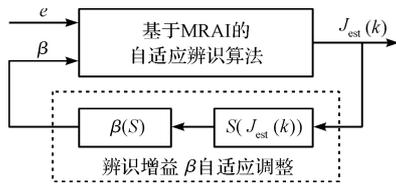


图2 辨识增益 β 自适应调整的 MRAI 辨识算法框图

基于上述辨识增益 β 的自适应调整方法, 当实际转动惯量变化较大时, 惯量辨识值可以快速跟随这种变化; 当实际转动惯量维持稳定, 系统控制指令变化时, 惯量辨识波动较小。

2 仿真分析

2.1 仿真模型建立

对于上述转动惯量辨识算法, 本研究使用 Matlab 建立了 Simulink 模型进行仿真实验分析。

其中, 对于永磁同步电动机的数学模型, 假设定子磁场为正弦分布, 不考虑谐波与饱和, 在 $d-q$ 坐标系下 PMSM 的电压方程和电磁转矩方程如下:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (10)$$

$$T_{em} = p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (11)$$

式中: u_d, u_q, i_d, i_q — d 轴、 q 轴的定子电压和定子电流; L_d, L_q — d 轴、 q 轴定子电感; R_s —定子绕组电阻; ω_e —转子电角速度; ψ_f —永磁体磁链; p_n —极对数。

仿真模型中使用的伺服电机采用矢量控制技术, 转动惯量辨识模块按照前述的模型参考自适应辨识方法进行搭建。电机参数如表1所示。

表1 电机参数

参数名称	参数值
极数	8
绕组线电阻/ Ω	2.66
绕组线电感/mH	16.10
电压常数/($V_{rms} \cdot krpm^{-1}$)	42.00
电机转动惯量 $J_M/(10^{-4} kg \cdot m^2)$	0.77
额定转矩/Nm	3.20
额定电流/Arms	5.00

实验分析时, 首先设置辨识增益 $\beta = 50$, 基于上述惯量辨识算法得到不同负载惯量时的惯量辨识结果,

验证了基于 MRAI 的转动惯量辨识方法的可行性; 然后, 分析了采用不同辨识增益时对惯量辨识响应的影响; 最后, 采用辨识增益 β 自适应调整的惯量辨识方法进行实验, 并将辨识响应结果与前述固定辨识增益的辨识方法进行了对比。

2.2 不同负载惯量时的辨识误差分析

为测试惯量辨识算法精确性, 本研究令负载转动惯量分别为 2~10 倍电机惯量, 辨识结果如表2所示。

表2 转动惯量辨识值及其误差分析

负载惯量比	总惯量实际值/ $(10^{-4} kg \cdot m^2)$	总惯量辨识值/ $(10^{-4} kg \cdot m^2)$	惯量辨识误差/ $(10^{-4} kg \cdot m^2)$	误差百分比/(%)
2	2.31	2.456 9	0.146 9	6.36
4	3.85	3.965 3	0.115 3	2.99
6	5.39	5.481 2	0.091 2	1.69
8	6.93	7.008 9	0.078 9	1.14
10	8.47	8.556 2	0.086 2	1.02

由表中数据可知: 当负载转动惯量在 2~10 倍 J_M 之间变化时, 转动惯量辨识的稳态误差在 10% 以内。可见辨识精度高, 可为控制参数自整定提供依据。

2.3 不同辨识增益对辨识性能的影响

使用模型参考自适应的方法来进行转动惯量辨识时, 自适应辨识增益 β 的大小将影响辨识算法对系统转动惯量变化的响应速度。

为分析辨识增益对辨识结果的影响, 本研究令负载转动惯量按下述方式变化: 当 $t = 0$ 时, 负载转动惯量 $J_L = 0$, 则系统惯量 $J_i = J_M + J_L = 0.000 077 kg \cdot m^2$; 当 $t = 0.5 s$ 时, 负载转动惯量 $J_L = 5 * J_M$, 则系统惯量 $J_i = 6 * J_M = 0.000 462 kg \cdot m^2$; 当 $t = 1.5 s$ 时, 负载转动惯量 $J_L = 0$, 则系统惯量 $J_i = 0.000 077 kg \cdot m^2$ 。

本研究分别设置自适应增益 β 为 5、50 和 500 进行惯量辨识, 得到的电机速度和转动惯量辨识值波形如图(3~5)所示。

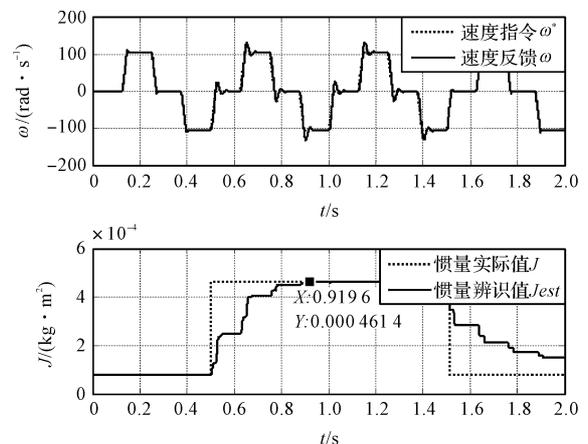


图3 $\beta = 5$ 时的电机速度和转动惯量辨识值波形

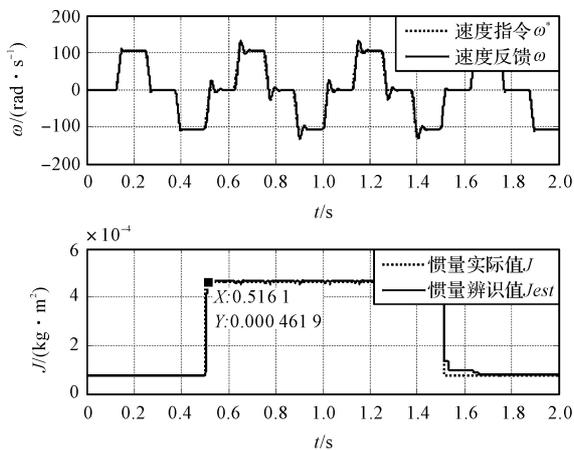


图 4 $\beta = 50$ 时的电机速度和转动惯量辨识值波形

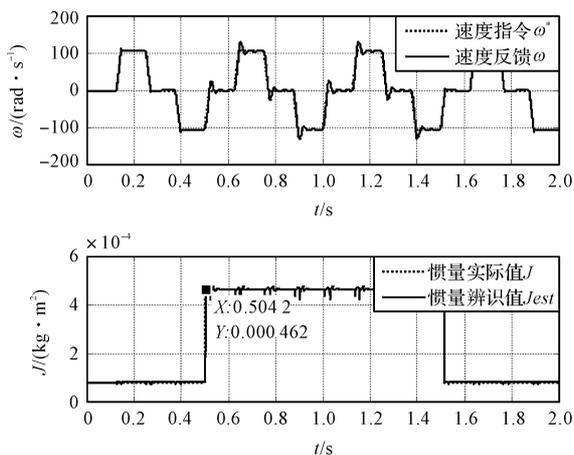


图 5 $\beta = 500$ 时的电机速度和转动惯量辨识值波形

测量图(3~5)中的惯量辨识稳定时间(即从负载惯量变化到惯量辨识值稳定的时间)、稳态辨识值和动态辨识误差,得到的数据如表 3 所示。

表 3 不同辨识增益 β 时的辨识性能

辨识增益	稳定时间 /s	稳态辨识值/ ($10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)	动态波动/ ($10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$)
5	0.419 6	4.634	4.627 ~ 4.636
50	0.016 1	4.650	4.549 ~ 4.688
500	0.004 2	4.650	4.213 ~ 4.763
自适应	0.008 8	4.623	4.586 ~ 4.628

辨识增益 $\beta = 5$ 时,辨识结果稳定所需时间最长,但是稳态时的惯量辨识值动态波动最小。辨识增益 $\beta = 500$ 时,辨识结果稳定所需时间最短,但是稳态时的惯量辨识值动态波动最大。辨识增益 $\beta = 50$ 时,则得到了一个折中的性能,但还不够好。

基于上述实验测试波形和数据,验证了辨识增益 β 对惯量辨识静态响应的影响:即辨识增益越大,则

惯量辨识收敛速度越快,但动态波动较大;辨识增益越小,则惯量辨识收敛速度越慢,但动态波动较小;辨识增益对稳态辨识值影响有限。

2.4 辨识增益自适应调整时的结果

相同实验条件下,本研究采用上文所述的辨识增益 β 自适应调整的惯量辨识方法,并取基准辨识增益为 50 进行测试,其中,电机速度和转动惯量辨识值波形如图 6 所示。

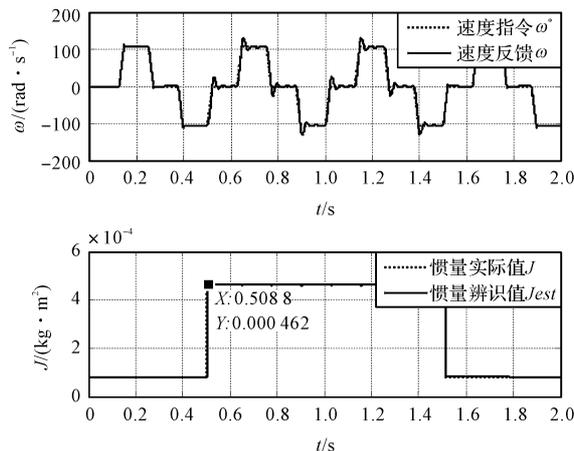


图 6 β 自适应时的电机速度和转动惯量辨识值波形

通过惯量波形和表 3 中性能数据的对比可知:当辨识增益 β 采用自适应调整规则时,辨识性能得到提升,惯量辨识值能快速又精确地跟随负载转动惯量的变化,验证了所提出辨识算法的优越性。

3 测试验证

为分析本文所提出方法在实际工程中的效果,笔者在实际伺服系统中进行测试。实际系统惯量为 $0.78 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。采用辨识增益固定和辨识增益自适应调整的惯量辨识方法分别测试,得到以下结果:辨识增益 $\beta = 2$ 固定时的转动惯量辨识值波形如图 7 所示。

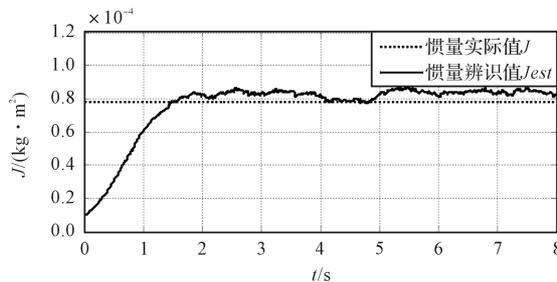


图 7 $\beta = 2$ 时的转动惯量辨识值波形

辨识增益 β 自适应时($\beta_0 = 2$)的转动惯量辨识值波形如图 8 所示。

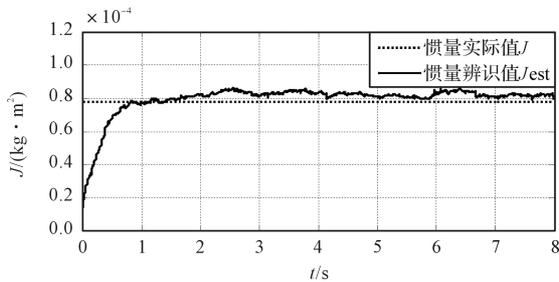


图8 β 自适应时($\beta_0 = 2$)的转动惯量辨识值波形

两者对比可知:

(1) 稳态响应。稳态波动上两者相差不大, 辨识增益 β 自适应时的波动幅度稍小一点。稳态误差基本上在 11% 以内;

(2) 暂态响应。辨识增益 β 自适应时, 经过 0.8 s 左右, 惯量辨识结果达到惯量实际值, 并趋于稳定, 其稳定时间明显小于辨识增益 $\beta = 2$ 时的 1.5 s。

4 结束语

本文提出了一种基于辨识增益 β 自适应调整的改进算法, 并对此辨识算法搭建了仿真模型, 进行了仿真测试和实际系统测试, 得到了不同辨识增益时的转动惯量辨识值波形和性能数据。

实验结果显示: 惯量辨识精度基本上在 11% 以内, 可以满足伺服控制参数自整定的需求; 而且在辨识值稳态波动变化不大的情况下, 采用辨识增益 β 自适应调整的惯量辨识方法, 辨识稳定时间可以减小将近 46%。

由此可见, 本文所提出的辨识改进算法可以明显改善惯量辨识响应, 具有良好的动态和稳态性能, 能够跟踪系统转动惯量的变化。

参考文献 (References):

- [1] NIU Li, XU Dian-guo, YANG Ming, et al. On-line inertia identification algorithm for PI parameters optimization in speed loop [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(2): 849-859.
- [2] 马立新, 徐镇乾, 范洪成, 等. PI 自整定永磁伺服系统转动惯量的辨识研究 [J]. *机电工程*, 2015, 32(8): 1128-1131.
- [3] XU Hai-bo, ZHU Xu-shen, LI Qi-jian, et al. Inertia identification of servo system based on improved acceleration deceleration method [J]. *8th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2016(2): 379-382.
- [4] 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.
- [5] 杨明, 刘子剑, 徐殿国. 基于遗忘因子递推平方根的在线转动惯量辨识 [J]. *微电机*, 2014, 47(10): 38-41.
- [6] ZHU Jian-guang, ZHANG Zhi-feng, TANG Ren yuan. Self-tuning PI controller based on neural network for permanent magnet synchronous motor [C]. *Fourth International Conference on Natural Computation*, Jinan: IEEE, 2008.
- [7] 刘辉, 王志成, 何平. 永磁同步电机转动惯量在线辨识关键技术研究 [J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2016(7): 45-48.
- [8] 赵希梅, 郭庆鼎. PMSM 伺服系统的转动惯量辨识和控制器参数优化 [J]. *控制与检测*, 2009(7): 75-77.
- [9] 郭宇婕, 黄立培, 邱阳. 交流伺服系统的转动惯量辨识及调节器参数自整定 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2002, 42(9): 1180-1183.

[编辑: 张 豪]

本文引用格式:

董海军, 段剑文. 基于 MRAI 的伺服系统转动惯量辨识及改进研究 [J]. *机电工程*, 2018, 35(9): 959-963.

DONG Hai-jun, DUAN Jian-wen. Inertia identification and its improvement of servo system based on MRAI [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(9): 959-963.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>