

doi: 10.7690/bgzdh.2014.04.012

## 交流伺服系统负载转矩的辨识方法

张强<sup>1</sup>, 叶林<sup>2</sup>, 石航飞<sup>1</sup>, 许永衡<sup>1</sup>

(1. 中国兵器工业第五八研究所数控技术部, 四川 绵阳 621000;  
2. 成都晋林工业制造有限责任公司技术中心, 成都 611930)

**摘要:** 为提高交流伺服系统负载转矩辨识收敛快速性, 提出一种新型的降维观测器模型。在参考一种降维负载转矩观测器的基础上, 提出一种新型的降维观测器模型, 对负载转矩进行辨识, 并仿真分析改进降维负载观测器的有效性。仿真结果表明: 该方法是有用的, 能明显提高辨识的快速性。

**关键词:** 交流伺服系统; 负载转矩; 降维观测器

**中图分类号:** TP272 **文献标志码:** A

## Estimation Algorithm of Load Torque for AC Servo System

Zhang Qiang<sup>1</sup>, Ye Lin<sup>2</sup>, Shi Hangfei<sup>1</sup>, Xu Yongheng<sup>1</sup>

(1. Department of CNC Technology, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China;  
2. Technology Center, Chengdu Jinlin Industrial Manufacturing Co., Ltd., Chengdu 611930, China)

**Abstract:** For accelerating estimation speed of the load torque for AC servo system, a new model of the reduce-order observer is brought up. Based on the reduced-order observer, a new model of the reduce-order observer is brought up and estimate the load torque, its validity is analyzed by the simulation. The simulation result shows that the model is valid and can obviously improve the convergent speed of estimation algorithm.

**Keywords:** AC servo system; load torque; reduced-order observer

### 0 引言

随着现代社会工业化程度越来越高, 交流伺服系统的应用也越来越广泛, 同时对交流伺服系统的性能要求也越来越高。目前, 为抑制负载阻力变化和惯量变化对永磁同步电机交流伺服系统的影响, 国内外研究学者提出了许多种方法。一类从改变PID结构出发的抗扰动方法, 如自抗扰观测器<sup>[1-2]</sup>、滑模观测器<sup>[3-4]</sup>、内模控制<sup>[5-6]</sup>、二自由度PID<sup>[7-8]</sup>控制等。另一种基于传统PID控制结构的参数整定方法, 分为基于智能控制的PID参数整定方法<sup>[9-12]</sup>和基于现代控制理论的PID参数整定方法<sup>[13-14]</sup>。基于现代控制理论的PID参数整定方法是目前抑制负载扰动和惯量扰动问题的主流技术之一。为抑制某种扰动, 采用有针对性的先辨识扰动再补偿或调整控制器参数的方法, 参数整定的时间只受参数辨识收敛时间的限制, 只要收敛时间很快, 系统整定的时间也很快; 但在交流伺服系统某些应用场合中, 惯量扰动已知而负载扰动变化很大, 需要很快的在线辨识负载转矩并实时地补偿, 对负载转矩的辨识收敛快速性提出了很高要求。

### 1 降维负载力矩观测器

由电机学原理可知, 电机的运动学方程为:

$$J \frac{dw_m}{dt} + B_m w_m + T_L = T_e \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} = w_m \quad (2)$$

其中:  $w_m$  为转子机械角速度;  $\theta_m$  为机械角位置;  $B_m$  为粘性阻尼系数;  $T_L$  为负载扰动转矩;  $T_e$  为电机输出转矩;  $J$  为转动惯量。

由于控制器采样频率大大高于扰动转矩的变化时间, 所以负载扰动转矩作为一个状态变量, 可假定它是一个恒值, 即:

$$\frac{dT_L}{dt} = 0 \quad (3)$$

在以永磁同步电动机作为伺服电机的交流伺服系统中, 系统的位置和速度都可以通过传感器得到, 不需要对其进行估算, 只需要对负载转矩进行估算。文献[14]对电机的全维电机动力学方程进行降维。

由式(1)和式(3)得到电机的动力学方程式:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (4)$$

收稿日期: 2013-12-02; 修回日期: 2014-01-16

作者简介: 张强(1989—), 男, 四川人, 硕士, 从事伺服电机控制方面的研究。

其中  $A = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 1 \\ J \end{bmatrix}$ ,  $x = \begin{bmatrix} w_m \\ T_L \end{bmatrix}$ ,

$C = [1 \ 0]$ ,  $u = T_L$ ,  $y = w_m$ 。

由系统的状态方程和输出方程可得到系统能观测矩阵:

$$N = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{B_m}{J} & -\frac{1}{J} \end{bmatrix} \quad (5)$$

上式证明了系统的能观测矩阵是可逆的, 由此可知, 该系统的状态是完全能被观测的<sup>[15]</sup>。用动力学状态等式, 可建立一个降维负载力矩观测器:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + K(y - \hat{y}) \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\hat{x} = [\hat{w}_m \ \hat{T}_L]^T$  为被估计的状态变量;  $K = [k_1 \ k_2]^T$  为状态反馈矩阵。同理, 由式 (4) 和式 (6) 可得:

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = (A - KC)\tilde{x} \quad (7)$$

其中  $\tilde{x} = x - \hat{x}$  为观测误差, 其特征方程为

$$\det[sI - (A - KC)] = s^2 + (k_1 + \frac{B_m}{J})s - \frac{k_2}{J} = 0 \quad (8)$$

假定  $B_m = 0$ , 系统的特征根为  $\alpha$ 、 $\beta$ , 根据李雅普诺夫第一法<sup>[12]</sup>, 该线性系统在李雅普诺夫意义下稳定的充分必要条件是其特征方程的特征值具有负实部的共轭根, 即  $\alpha < 0$ ,  $\beta < 0$  得到状态反馈系数的值:

$$\begin{cases} k_1 = -(\alpha + \beta) > 0 \\ k_2 = -J \times \alpha \times \beta < 0 \end{cases} \quad (9)$$

降维观测器的公式为:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{w}_m}{dt} = -\hat{w}_m \times \frac{B_m}{J} - \frac{\hat{T}_L}{J} + \frac{T_c}{J} + k_1 \times (w_m - \hat{w}_m) \\ \frac{d\hat{T}_L}{dt} = k_2 \times (w_m - \hat{w}_m) \end{cases} \quad (10)$$

降维观测器的结构如图 1 所示。

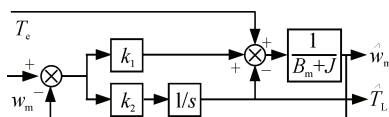


图 1 降维负载力矩观测器原理

由图可知, 该方法以积分形式对负载转矩进行辨识, 收敛速度比较缓慢<sup>[16]</sup>。

## 2 改进的降维负载力矩观测器

为了提高负载转矩辨识的收敛速度, 笔者提出一种改进的降维负载力矩观测器, 将式 (4) 重写为:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (11)$$

其中  $A = \begin{bmatrix} -\frac{B_m}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $B = \begin{bmatrix} 1 \\ J \end{bmatrix}$ ,  $x = \begin{bmatrix} w_m \\ T_L \end{bmatrix}$ ,

$C = [1 \ 0]^T$ ,  $u = T_L$ ,  $y = w_m$ 。

构建负载力矩观测器:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + K_1(y - \hat{y}) + K_2 \frac{d(y - \hat{y})}{dt} \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (12)$$

其中  $\hat{x} = [\hat{w}_m \ \hat{T}_L]^T$  为被估计的状态向量;  $K_1 = [k_3 \ k_4]^T$ ,  $K_2 = [k_5 \ k_6]^T$  为状态反馈矩阵, 由式(11)、式 (12) 可得:

$$\frac{d\tilde{x}}{dt} = \frac{(A - K_1C)}{sI + K_2C} \tilde{x} \quad (13)$$

其中  $\tilde{x} = x - \hat{x}$  为观测误差, 其特征方程为:

$$\det[sI - \frac{(A - K_1C)}{sI + K_2C}] = s^2 - [\frac{1}{1+k_5} \times (-\frac{B_m}{J} - k_3 + \frac{k_6}{J})]s - \frac{k_4}{1+k_5} \times \frac{1}{J} = 0 \quad (14)$$

系统的特征根  $\alpha < 0$ ,  $\beta < 0$ , 得到状态反馈系数的值:

$$\begin{cases} \frac{1}{1+k_5} \times (-\frac{B_m}{J} - k_3 + \frac{k_6}{J}) = (\alpha + \beta) \\ \frac{k_4}{1+k_5} \times \frac{1}{J} = -\alpha \times \beta \end{cases} \quad (15)$$

假定  $B_m = 0$ , 设计  $k_6 = k_8 = 0$ , 则状态反馈系数的值为:

$$\begin{cases} k_6 = J \times (\alpha + \beta) < 0 \\ k_4 = -J \times \alpha \times \beta < 0 \end{cases} \quad (16)$$

降维观测器的公式为:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{w}_m}{dt} = -\hat{w}_m \times \frac{B_m}{J} - \frac{\hat{T}_L}{J} + \frac{T_c}{J} \\ \frac{d\hat{T}_L}{dt} = k_4 \times (w_m - \hat{w}_m) + k_6 \times \frac{d(w_m - \hat{w}_m)}{dt} \end{cases} \quad (17)$$

降维观测器的结构如图 2 所示。

对比传统降维负载力矩观测器原理与改进降维负载力矩观测器原理可知,改进的降维负载在证明辨识收敛性前提下,将比例和积分加入到负载转矩的辨识中,相比传统的负载力矩观测器只用积分辨识负载转矩,该方法可明显提高辨识的收敛性。

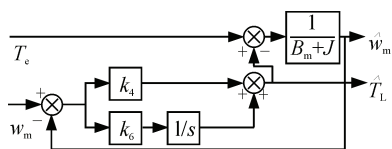


图2 改进的负载力矩观测器原理

### 3 仿真分析

为验证该改进降维负载观测器的有效性,对给定阶跃及正弦负载下系统辨识收敛性与传统降维观测器的收敛速度进行仿真分析,结果如图3~图4所示。

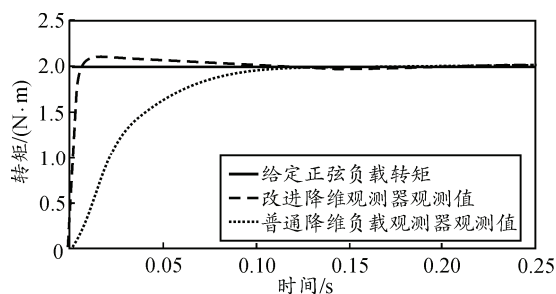


图3 给定阶跃负载转矩时2种观测器对比

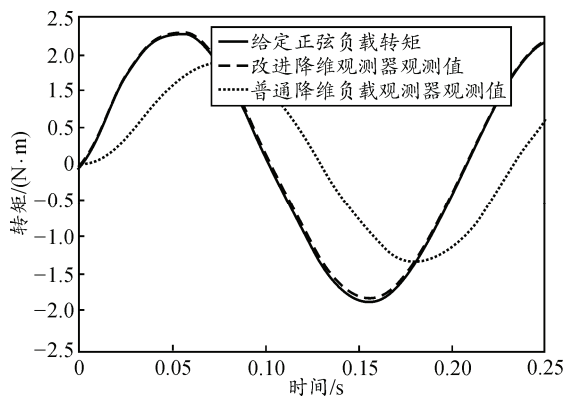


图4 给定正弦负载转矩时2种观测器对比

由图3和图4可知,相较于传统降维负载力矩观测器,该改进的降维负载力矩观测器无论在给定阶跃负载还是正弦负载下,其辨识速度均大幅提高。

### 4 结束语

在以永磁同步电机作为伺服电机的交流伺服系

统基础上,笔者根据交流伺服电动力学模型,介绍了一种降维负载力矩观测器,根据它的收敛性较慢的问题提出了一种新型的降维观测器模型。仿真结果证明了该模型的收敛性以及收敛的快速性。

### 参考文献:

- [1] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
- [2] 韩京清. 从PID技术到自抗扰控制技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
- [3] 蔚永强, 郭宏, 谢占明. 直驱式伺服系统的神经网络自适应滑模控制[J]. 电工技术学报, 2009, 3(24): 74-79.
- [4] Wai R J. Total sliding mode controller for PM synchronous servo motor drive using recurrent fuzzy neural network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(5): 926-944.
- [5] Rivera D E, Morari M, Skogestad S. Internal model control 4 PID controller design Ind[J]. Eng. Chem. Pro. Des. Dev., 1986, 25: 252-265.
- [6] 龚晓峰, 高裕畅, 周春辉. 时滞系统PID控制器内模整定方法的扩展[J]. 控制与决策, 1998, 13(4): 337-341.
- [7] 张志峰, 赵希梅, 郭庆鼎. 基于 $H_{\infty}$ 方法的永磁直线同步电机鲁棒第二自由度控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(21): 53-58.
- [8] 张井刚, 刘志运, 裴润. 交流伺服系统的二自由度内模控制[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 45-48.
- [9] 程启明, 王勇浩. 基于Smith预估的模糊/PID串级主气温控制系统仿真[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 136-140.
- [10] 胡一倩, 吕剑虹, 张铁军. 一类自适应模糊控制方法研究及在锅炉气温控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 136-140.
- [11] 张向南, 周丽娟, 李全俊. 模糊自适应PID在气液增压缸压力控制中的应用[J]. 兵工自动化, 2013, 32(8): 71-74.
- [12] 李言俊, 张科. 自适应控制理论及应用[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 1-346.
- [13] 刘用钦, 沈艳霞, 纪志成. 改进型最小二乘法在PMSM参数辨识中的应用[J]. 微特电机, 2008, 36(11): 19-22.
- [14] 鲁文其. 永磁同步电机伺服系统若干关键技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010: 73-76.
- [15] 魏克新, 王云亮, 陈志敏. Matlab语言与控制系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社: 89-103.
- [16] 周文, 李长红, 韩耀鹏, 等. 高瞬态响应指标的伺服系统设计方法[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(5): 91-95.