

基于逆系统方法的内模控制在伺服系统 低速问题中的研究

董翠英 陈 娟

(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘 要: 针对常规控制方法对伺服系统低速抖动补偿效果不理想的问题,采用基于神经网络逆系统的内模控制方法对伺服系统进行控制。仿真结果表明,基于神经网络逆系统方法的内模控制能有效的改善低速性能,具有良好的控制效果,且控制器设计简单。

关键词: 伺服系统; 逆系统方法; 神经网络; 内模控制

中图分类号: TP13

伺服系统低速时受到以非线性摩擦力矩为主的扰动力矩的影响,出现低速抖动现象,严重影响了系统的跟踪和定位精度。目前,对低速运动时摩擦的补偿方法主要有前馈补偿^[1]、自适应控制^[2]等。这些方法多是对摩擦模型进行线性化或分段线性化处理,是对摩擦进行近似补偿。神经网络与逆系统方法^[3]相结合的神经网络前馈补偿控制应用于低速问题研究中取得了一定的成果^[4],但跟踪精度不高。

本文针对伺服系统低速问题,采用内模控制^[5]与神经网络逆系统相结合的方法对系统进行控制,仿真结果表明采用这种控制方法的速度伺服系统达到了满意的跟踪精度和较强的鲁棒性。

1 控制对象

在电动伺服执行机构中,电机采用的是直流电动机。电机方框图如图 1 所示。

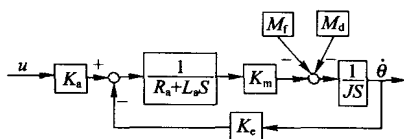


图 1 电机方框

Fig. 1 Block diagram of motor

图中 K_a 为功率放大器放大倍数, K_c 和 K_m 分

别为伺服电机反电势常数和力矩常数, R_a 和 L_a 分别为电枢回路电阻和电感, $\dot{\theta}$ 为电机角速度, J 为转动惯量, M_f 为摩擦力矩, M_d 为扰动力矩。在带有测速反馈的伺服控制系统中,低速运行时,摩擦力矩和速度之间呈一定的非线性,摩擦力矩模型为

$$M_f = [M_c + (M_s - M_c) \exp(-|\dot{\theta}|/\dot{\theta}_s)]^2 + K_v |\dot{\theta}| J \operatorname{sgn}(\dot{\theta}) \quad (1)$$

其中, M_c 为库仑摩擦力矩, M_s 为最大静摩擦力矩, K_v 为黏滞摩擦系数, $\dot{\theta}_s$ 为临界角速度。

2 逆系统方法

2.1 逆模型

对于 n 阶积分逆系统,设非线性系统的动力学模型(其输入量为 u ,输出量为 y),可以用一个输入量到输出量的非线性映射算子 σ 表示为: $y = \sigma u$,若系统 σ 满足可逆条件,则其逆系统 σ^{-1} 的输出量 u_d 与输入量 y_d 可表示为: $u_d = \sigma^{-1} y_d$,其中 σ^{-1} 为非线性逆映射算子,则称 σ^{-1} 为 σ 的单位逆系统。

设 σ 为另一系统,表示输出量 u_d 到输入量 y 之间的关系可用一个非线性映射算子 τ 表示为: $y = \tau u_d$,如果 $\tau = y_d^{(n)} (y_d^{(n)}$ 为 y_d 的 n 阶导数),算子 τ 满足: $\tau \sigma^{-1} y_d = y_d = u_d = y_d$,则称 τ 系统为 σ 系统的 n 阶积分逆系统,单位逆系统是 $n=0$ 时 n 阶逆系统的特例。

2.2 神经网络 n 阶逆系统

2.2.1 神经网络的选择 对于非线性系统,传统的辨识方法,在理论研究和实际应用中都存在极大的

收稿日期: 2003-12-26

第一作者: 女,1976 年出生,硕士生

E-mail: dongcuiying@163.com

困难。多层前向神经网络能够以任意精度逼近任意非线性映射,给复杂的非线性系统建模带来了一种新的、非传统的建模方法。鉴于函数逼近能力好和速度快等优点,选用 RBF 神经网络作为研究对象。

2.2.2 RBF 神经网络辨识被控对象逆的结构 系统逆模型的精度直接影响着整个逆系统的控制性能,所以逆模型的辨识尤为重要。本文内模控制中逆模型的辨识采用的是直接逆建模。如图 2 所示,神经网络 阶逆系统中,静态神经网络仅用来逼近非线性函数,动态特性由微分或积分来反映。其中 PID 控制器的目的是保证在系统稳定的情况下用神经网络辨识控制对象的 阶逆。

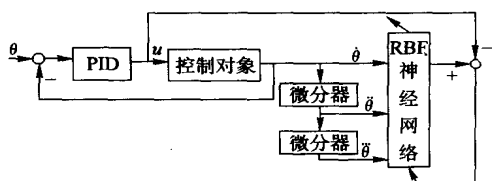


图 2 神经网络辨识被控对象的 阶逆的结构图

Fig. 2 Structure diagram of TH-order inverse discriminated in neural network

3 基于阶积分逆系统的内模控制

用上述方法辨识出的神经网络 阶积分逆与被控对象复合成为伪线性系统函数 $G(s)$ 。以 $G(s)$ 为对象,采用内模控制方法,结构如图 3 所示,其中 d 为外部扰动因子, e 为控制系统误差。

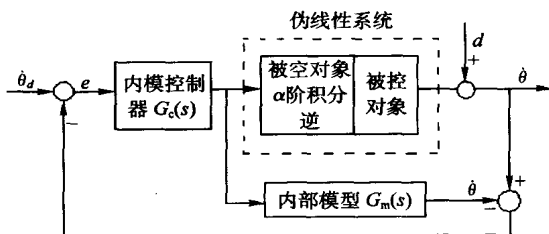


图 3 基于逆系统方法的内模控制结构图

Fig. 3 Structure diagram of internal model control based on inverse system

因为伪线性系统具有 阶积分特性,所以取内部模型为 $G_m(s) = \frac{1}{s}$;内模控制器函数表达式为 $G_c(s) = F(s) G_m^{-1}(s)$ 。

由图 3 可得闭环系统的误差方程为(设扰动误差函数 $d(s) = 0$)

$$E(s) = \frac{(1 - F(s))}{1 + F(s) G_m^{-1}(s) (G(s) - G_m(s))} d(s) \quad (2)$$

1) 采用一型滤波器函数 $F(s) = \frac{1}{(s+1)^n}$,当输入为阶跃信号时,控制系统可无静差跟踪阶跃信号。

2) 采用 n 型滤波器函数表达式为 $F(s) = \frac{n s + 1}{(s+1)^n}$ (这里 $n \geq 2$),同理可推得无静差跟踪阶跃和斜坡信号。为滤波器参数,滤波器参数越小,系统响应速度越快,但易引起超调;滤波器参数越大,系统响应速度变慢,增强了系统的鲁棒性。

4 仿真

对于实验的速度伺服系统,采用图 1 的电机结构,其中 $K_m = 12.71 \text{ (Nm/A)}$ 。 $K_e = 2 \text{ (V/rad)}$, $M_s = 9.96 \text{ kgm}$, $M_c = 5.86 \text{ kgm}$, $J = 451 \text{ kgm}^2$ 。

在 MATLAB 中进行仿真,对图 2 的结构输入速度信号为 $\dot{\theta}_d(t) = 0.1 \sin(2 - 0.05 t) + 0.1 t$,在 $t = 0 \sim 10 \text{ s}$ 内,取采样时间为 0.001 s ,每隔 15 个采样点取一组数据。由于电机为二阶系统,所以 阶逆模型中 取 2,并计算输出 的一阶和二阶导数,得到 667 个训练样本集 $\{ \theta_d, \dot{\theta}_d, \ddot{\theta}_d \}$ 。用样本数据训练 RBF 网络,得到电机的 2 阶积分逆模型。

将训练好的 2 阶积分逆模型与电机模型复合,构成伪线性系统。对伪线性系统采用内模控制,其中内部模型表达式为 $G_m(s) = \frac{1}{s^2}$,滤波器取为 3 型滤波器,滤波器参数选为 $\alpha = 0.1$,即: $F(s) = \frac{0.3s+1}{(0.1s+1)^3}$,内模控制器函数 $G_c(s) = F(s) G_m^{-1}(s) = s^2 F(s)$ 。

4.1 速度信号跟踪

对图 3 所示的控制结构,取测试速度信号分别为:正弦信号 $\dot{\theta}_d(t) = 0.1 \sin(2 - 0.05 t)$,斜坡信号 $\dot{\theta}_d(t) = 0.1 t$,基于神经网络 2 阶逆的内模控制系统的响应和误差如图 4 和图 5 所示,由仿真结果可得,此方法对信号跟踪效果较好,跟踪误差较小。

4.2 控制系统对外部不确定干扰的抑制能力

输入为正弦信号 $\dot{\theta}_d(t) = 0.05 \sin(2 - 0.05 t)$ 时,在 $t = 5 \text{ s}$ 时系统受到外部幅值为 0.01 的阶跃信号的强干扰,如图 6 所示。可以发现,在 $t = 5 \text{ s}$ 时输出误差增大。由于内模控制系统有良好的鲁棒性,

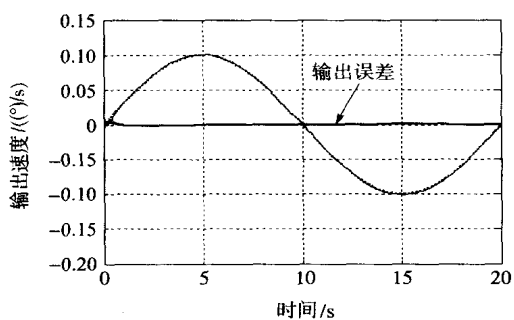


图4 系统的正弦响应

Fig. 4 Sine wave response of system

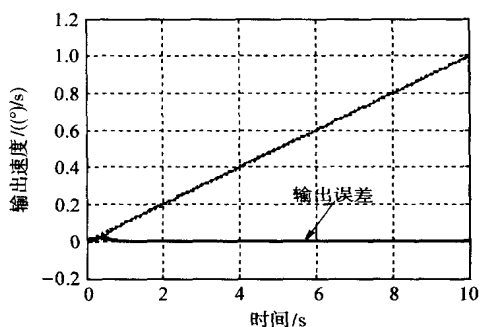


图5 系统的斜坡响应

Fig. 5 Oblique wave response of system

对扰动有较强的抑制作用,能够保证对输入误差的跟踪。

5 结论

本文采用 RBF 神经网络逼近电机模型的阶逆模型,并将电机模型的神经网络逆与内模控制

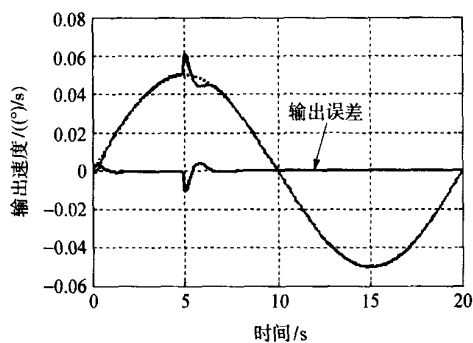


图6 控制系统受到外部阶跃扰动时的响应

Fig. 6 System response of step disturbance

相结合用于伺服系统低速控制。这种方法结构简单调节方便。仿真结果表明这种方法改善了控制系统的动态性能、提高了跟踪精度,且在系统受到外部其他干扰如阶跃扰动时有较强的鲁棒性。

参 考 文 献

- [1] 杨元凯. 精密转台中摩擦力矩的动态补偿[J]. 自动化学报, 1983, 9(4): 248 - 252
- [2] 冯国楠. 一种神经元控制最优自适应伺服系统[J]. 控制与决策, 1997, 12(4): 312 ~ 316
- [3] 李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991
- [4] 从爽. 神经网络、模糊系统及其在运动控制中的应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001
- [5] Martin Pottman, Peter Jorgl H. Radial basis function network for internal model control[J]. Applied Mathematics and Computation, 1995, 70(2): 283 - 298

Low velocity problems in a servo system by internal model control based on an inverse system method

DONG Cui-ying CHEN Juan

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Internal model control(IMC) based on neural networks inverse system method was used to control a servo system, for the compensation of results of a conventional method is not desired to the servo system with low velocity jittering. Simulation results show that the method used has improved the low velocity properties of the servo system, with high accuracy and simple design.

Key words: servo system; inverse system method; neural network; internal model control

(责任编辑 刘同帅)