

基于双模控制算法的交流伺服电机的研究

刘彩霞

(包头职业技术学院 数控技术系, 内蒙古 包头 014030)

摘要: 为了提高伺服电机控制的实时性和精确性, 满足伺服系统高速度和高精度的控制要求, 提出一种自适应神经元模糊PID的交流伺服电机控制算法。该算法充分结合模糊PD控制的强鲁棒性和神经网络控制强大的自学习能力。通过对仿真结果对比分析, 结合后的控制算法相比单一的模糊PD算法和单神经元自适应算法, 系统的响应速度更快, 精度更高。

关键词: 双模控制; 模糊PD算法; 单神经元自适应PID算法; 交流伺服电机控制

中图分类号: TP29 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd19717

Research on AC Servo Motor Based on Dual Mode Control Algorithm

LIU Caixia

(Computer Numerical Control Technology Department, Baotou Vocational & Technical College,
Baotou 014030, Nei Monggol, China)

Abstract: In order to improve the real-time and accuracy of servo motor control and meet the requirements of servo system with high speed and high precision, an AC servo motor control algorithm combined with fuzzy PD and single neuron adaptive PID was proposed. This algorithm fully combines the strong robustness of fuzzy PD control and the strong self-learning ability of neural network control. By comparing and analyzing the simulation results, the combined control algorithm is faster than the single fuzzy PD algorithm and the single neuron adaptive algorithm, and the system's response speed is faster and the accuracy is higher.

Key words: dual mode control; fuzzy PD algorithm; single neuron adaptive PID algorithm; AC servo motor control

交流伺服控制系统由于响应速度快、静态和动态特性好、定位精度高等优点, 广泛应用于高端控制领域^[1-3]。伺服系统通常是一个非线性、时变性强、强耦合的复杂系统, 传统的PID反馈控制无法适应复杂多变的伺服控制系统。

电力电子、伺服电机和微处理器技术的迅速发展, 为实现伺服电机智能化控制提供了保证, 由于交流永磁伺服电机(permanent magnet servo motor, PMSM)具有参数耦合强、变量复杂、磁场非线性等特点, 其运行动态过程无法使用精确模型来描述^[4]。传统的PID控制器存在动态响应滞后、目标控制精确度不高等问题, 无法满足伺服系统对高控制精度和动态响应的要求。与传统伺服驱动系统相比, 智能控制策略能够解决非常复杂和高要求的伺服控制。智能控制主要包括模糊控制、神经网络控制及专家系统控制等。模

糊控制是一种不需要建立控制对象精确数学模型, 而是以人的控制经验作为控制知识模型, 以模糊逻辑推理作为控制算法的智能控制。智能控制中单神经元自适应PID控制算法是将传统PID控制规律融合进神经元控制网络, 使其内嵌于神经元结构中, 由于形成的PID控制处在神经网络中, 因此相对于传统的PID算法具有自学习、自适应的能力, 同时也弥补了传统PID控制系统中模型参数大、调节随动性差等缺点。将二者结合用于伺服系统的PID控制, 可以发挥2种控制策略的优点, 形成伺服系统的复合控制, 因此是处理控制系统中不精确性和不确定性的一种有效方法^[5-6]。

本文首先对模糊PD控制算法和单神经元自适应PID控制算法进行分析研究, 在此基础上提出双模控制算法, 并将该算法应用于对交流伺服

电机进行控制。最后,通过与采用单一控制算法的控制系统进行仿真对比分析,表明模糊PD和单神经元自适应PID结合的控制算法在实现交流伺服控制上具有更快的响应速度和更高的准确度^[7-8]。

1 模糊PD控制算法

模糊PD控制首先是将操作人员(专家)长期积累的经验按照控制规律模糊化,然后再运用模糊逻辑推理对PD中的比例系数和积分系数进行实时微调,达到控制系统最优化。传统的模糊PD控制算法其输入信号都是通过差分的方法实现,易受到噪声的干扰。文献[9-10]提出了一种非线性跟踪微分器(tracking differentiator, TD),改变传统的差分求解,极大地减小了噪声带来的干扰。文献[11]将TD和模糊PD控制算法相结合提了一种改进型的模糊PD控制算法,方便了算法工程的实现。图1和图2分别为传统模糊PD控制算法框图和基于SPID的模糊PD控制算法框图。

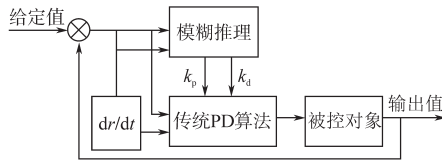


图1 传统模糊PD控制算法框图

Fig.1 Block diagram of traditional fuzzy PD control algorithm

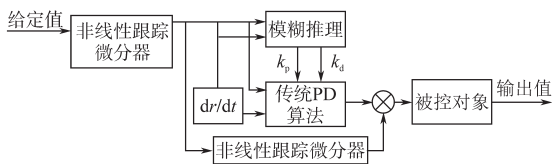


图2 基于SPID的模糊PD控制算法框图

Fig.2 Block diagram of fuzzy PD control algorithm based on SPID

对比分析图1和图2可以发现,改进的模糊PD控制利用非线性跟踪微分器将对输入信号求解微分的形式转化为对输入信号的求解积分,利用积分的方式获得输入信号的近似微分,使系统在抗干扰、收敛速度等方面得到极大改善。

对于一个给定参考输入信号 $R(t)$ 的系统来说,假设输入信号 $x_{(1)}$ 跟踪 $R(t)$ 、而 $x_{(2)}$ 是 $x_{(1)}$ 的微分,则可以称 $x_{(2)}$ 是 $R(t)$ 的“近似微分函数”,根据此定义可以得出以下2个定理:

定理1: 假设 $z(t)$ 为一个定义在 $[0, \infty]$ 上的

连续函数,而且满足 $\lim_{x \rightarrow \infty} z(t) = 0$,如果 $r(t) = z(Rt)$, $R > 0$,那么,对于任意给定的 $T > 0$,则均有:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \int_0^T |r(t)| dt = 0 \quad (1)$$

结合下式:

$$\begin{cases} s = t/R \\ x_1(s) = z_1(t) + c \\ x(s) = Rz_2(t) \end{cases} \quad (2)$$

可得定理2。

定理2:若系统,即

$$\begin{cases} dz_1/dt = z_2 \\ dz_2/dt = f(z_1, z_2) \end{cases} \quad (3)$$

其任意解都满足当 $t \rightarrow \infty$ 时, $z_1(t) \rightarrow 0$ 和 $z_2(t) \rightarrow 0$,则对任意固定的常数 c 和 $T (T > 0)$,系统即

$$\begin{cases} dx_1/dt = x_2 \\ dx_2/dt = R^2 f(x_1 - c, x_2/R) \end{cases} \quad (4)$$

其解均满足:

$$\lim_{x \rightarrow \infty} \int_0^T |x_1(t) - c| dt = 0$$

根据近似微分的定义,并结合定理1和定理2可以得出非线性微分跟踪器二阶离散形式,如下式所示:

$$\begin{cases} dx_1/dt = x_2 \\ dx_2/dt = -R \text{sat}(x_1 - x + x_2 |x_2|/2R, \delta) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\text{sat}(A, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(A) & |A| > 0 \\ A/\delta & |A| < 0, \delta > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\text{sat}(A, \delta)$ 为非线性饱和函数。

$\text{sign}(A)$ 和 $\text{sign}(A, \sigma)$ 函数图形如图3所示。

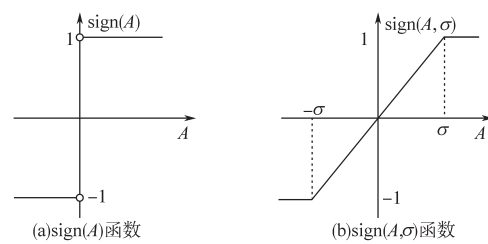


图3 $\text{sign}(A)$ 和 $\text{sign}(A, \sigma)$ 函数图形

Fig.3 Function graphs of $\text{sign}(A)$ and $\text{sign}(A, \sigma)$

2 单神经元自适应PID控制算法

神经网络具有自适应、自学习以及较强的容错能力,而PID算法控制简单、鲁棒性强、可靠性高^[12-14]。将两者相结合,能够继承各自的优点。因此利用单神经元自适应PID控制算法对复杂非线性、不确定性的系统建立精确的数学模型,且使PID的参数整定不依赖于数学模型。图4为单神经元自适应PID控制框图。

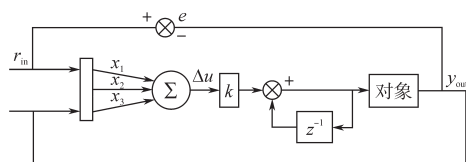


图4 单神经元自适应PID控制框图

Fig.4 Block diagram of single neuron adaptive PID control

单神经元自适应PID网络结构是动态的多层前向网络,其自适应学习有前向和反传2种方法。本文主要应用反传实现对神经网络权重值的修改,完成学习和记忆的功能。假设网络的训练输入矢量集合为 $\mathbf{X}=[X_1, X_2, \dots, X_m, \dots]$,实际输出矢量集合为 $\mathbf{Y}=[Y_1, Y_2, \dots, Y_m, \dots]^T$,反传学习主要是使网络实际输出和理想输出的对应时间序列的偏差平均值最小,即下式最小:

$$U = \frac{1}{L} \sum_{k=1}^L [y'(k) - y(k)]^2 \quad (7)$$

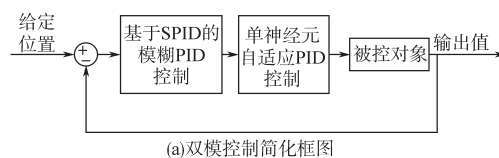
式中: L 为集合的数量; y' 为理想的输出。

通常是按照梯度法来调节网络的权重值。

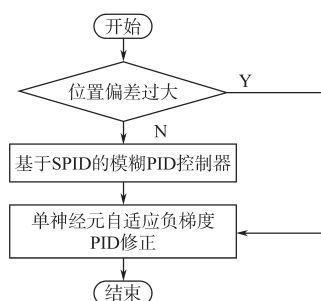
3 双模控制算法

双模控制算法是基于SPID的模糊PD控制和单神经元自适应PID控制相结合的一种控制算法。基于SPID的模糊PD控制不仅具有较强的鲁棒性,而且能够应对复杂多变的系统。另外,为保证控制的实时性,在进行算法研究时通常是先将连续的控制输入量离散化,然后在离线状态下计算出控制器输出量的查询表。单神经元自适应PID算法结构简单,具有良好的调整性和自适应性,且能根据运动过程来不断学习。

双模控制算法基本原理是:当利用非线性微分器计算被控对象位置偏差较大时,SPID的模糊PD控制器将首先起作用,此时 $L=L_1$;与此同时,基于单神经元自适应PID的控制器的连接权将沿着梯度方向实时修正,并自我学习,以此保证使 L_n 趋近 L_1 。在系统调节过程中基于SPID的模糊PD控制器能够加快伺服控制的响应速度,减小由神经网络PID带来的速度慢缺陷。随着位置偏差的减小,模糊PD控制器的作用慢慢减小,基于单神经元自适应PID的控制器开始起主要作用,此时 $L=L_2$,连接权也变为沿着梯度方向进行实时调整^[12-14]。另外,在伺服电机的参数发生变化时系统通过单神经元自适应PID算法完成自学习、自调整,进而获得精确的控制效果。图5为双模控制算法简化框图和流程图。



(a)双模控制简化框图



(b)双模控制流程图

图5 双模控制框图和流程图

Fig.5 Block diagram and flow chart of dual mode control

4 交流伺服电机控制系统

伺服控制能够实现被控对象在速度、位置、加速度上的精确控制,因此得到广泛应用。伺服系统采集伺服电机编码器实时状态,将反馈值与给定值进行比较,根据比较的结果修正伺服电机转子的角度。对于复杂的伺服控制系统,交流伺服电机需要软、硬件结合的多级控制,其中,第1级为交流驱动器,保障电机的闭环控制;第2级为上位机,主要对伺服控制系统的运动计算和线路规划;第3级为系统的核心,伺服控制系统的算法功能均是在第3级实现,其载体为数字处理芯片(digital signal processor, DSP),保证了伺服控制系统准确性、实时度。

本文主要研究的是伺服控制算法,重点分析第3级系统的算法,在分析研究模糊PD和单神经元网络的基础上提出一种新的伺服控制算法。图6为交流伺服电机控制系统原理图。

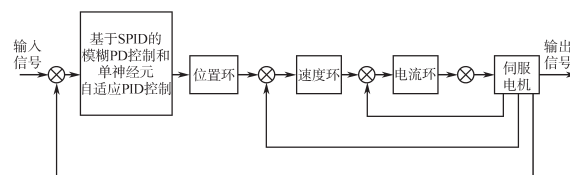


图6 交流伺服电机控制系统原理图

Fig.6 Schematic diagram of AC servo motor control system

图6中,电流环和速度环为伺服控制的内环,位置环为外环。内环控制主要依靠第1级的伺服驱动器,外环则依靠第3级DSP中的控制算法来实现。

5 仿真结果分析

为验证本文提出的模糊PD和单神经元自适应PID相结合算法对交流伺服电机的控制效果,利用Matlab/Simulink和LabVIEW搭建了基于该算法的系统仿真模型,模型参数设置如下式:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{K_m}{1 + T_m s} e^{-\tau s} \quad (8)$$

其中

$$\tau = NT$$

式中: $Y(s)$ 为输出变量; $V(s)$ 为输入变量; K_m 为放大系数; T_m 为时间常数; T 为系统采样周期; τ 为滞后时间。

首先,根据对时延一阶对象的控制,得到时延一阶传递函数式(8),对其经 z 变换后得:

$$G(z) = \frac{Y(z)}{V(z)} = \frac{(1 - e^{-T/T_m}) \cdot K_m z^{-1-N}}{1 - e^{-T/T_m} z^{-1}} \quad (9)$$

进一步得到控制对象的离散化计算公式为

$$y(k+1) = 0.368y(k) + 1.264v(k-10) \quad (10)$$

设仿真时学习步长 $\eta=0.02$, 每步采样点数 $m=200$, 按以上参数进行实时仿真, 通过分析并对比单一控制算法的仿真结果, 可以得出: 将模糊PD和单神经元自适应PID控制算法应用在交流伺服控制系统中, 可以极大提高伺服控制系统的响应速度和精度, 满足伺服控制中系统对实时性和精确性的高要求。图7为利用本文提出的算法搭建的交流伺服电机控制系统的仿真波形图。

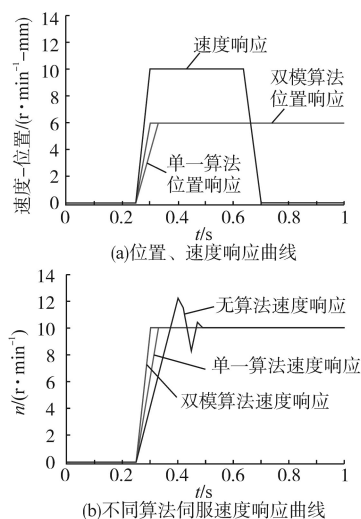


图7 交流伺服电机控制系统仿真图

Fig.7 Simulation diagram of AC servo motor control system

6 结论

智能化控制是实现伺服系统控制精确化的

主要发展趋势。本文对伺服控制的核心算法进行研究,分析模糊PD控制算法及其改进型、单神经元自适应PID算法以及SPID模糊PD控制和单神经元结合的混合算法,并搭建伺服控制系统仿真实验平台,利用Matlab和LabVIEW的混合编程对伺服控制系统进行了仿真测试。对比仿真测试的结果,可以得出以下结论:

1)采用基于SPID模糊PD控制和单神经元结合的混合算法能够有效减小系统响应的时间;

2)采用单一算法和混合算法的伺服控制系统能够有效抑制速度响应引起的延时以及震荡;

3)采用本文提出的混合算法能够及时响应位置控制器信号,能够提高位置环动态响应的精确性,满足高性能伺服控制应用。

参考文献

- [1] 陆朱卫,顾怀敏. 开关磁阻电机控制系统仿真研究[J]. 电子测试,2015,24(24):14-16.
- [2] 张巍,刘跟平,欧胜. 永磁同步电机前馈补偿和单神经元PID控制[J]. 电气传动,2016,46(12):12-18.
- [3] 汪书苹,赵争鸣. 带修正因子模糊PID控制的PMSM交流伺服系统[J]. 清华大学学报(自然科学版),2007,47(1):9-12.
- [4] 金宁治,王旭东. 电动汽车PMSM MTPA控制系统滑膜速度控制[J]. 电机与控制学报,2016,15(8):52-59.
- [5] 黄雷,崔迎. 基于滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制[J]. 机电工程,2015,29(11):1303-1305.
- [6] Vujicic V P. Minimization of Torque Ripple and Copper Losses in Switched Reluctance Drive [J]. IEEE Transactions Power Electronics,2012,27(1):388-399.
- [7] 鲁文其,胡育文. 永磁同步电机伺服系统抗扰动自适应控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(3):75-81.
- [8] 姚喆. 模糊自适应控制在压注机电液控制系统切换中应用研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
- [9] 张策. 基于MATLAB仿真的数字PID控制器设计方法[J]. 森林工程,2015,31(6):85-88.
- [10] 刘敏层,杨子毛,李阳,等. 一种优化的PID算法在伺服跟踪系统中应用[J]. 电气传动,2016,46(7):16-19.
- [11] 苏玉鑫,郑春红,段宝岩. 一种改进的模糊PD控制器[J]. 控制与决策,2012,19(2):175-178.
- [12] 王述彦,师宇,冯忠绪. 基于模糊PID控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术,2011,30(1):166-172.
- [13] 朱海峰,杨智,张名宙. 仪用PID参数自整定控制器设计与应用[J]. 自动化仪表,2005,26(7):10-12.
- [14] 王葳,张永科,刘鹏鹏,等. 无刷直流电机模糊PID控制系统研究与仿真[J]. 计算机仿真,2012,29(4):196-199.

收稿日期:2018-11-23

修改稿日期:2019-01-14