

# 伺服系统在摩擦条件下的 模拟复合正交神经网络控制

叶 军

(绍兴文理学院机电系, 浙江省 绍兴市 312000)

## AN ANALOG COMPOUND ORTHOGONAL NEURAL NETWORK CONTROL OF THE SERVO SYSTEM IN FRICTION CONDITION

YE Jun

(Department of Mechatronic Engineering, Shaoxing College of Arts and Sciences,  
Shaoxing 312000, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** An analog compound orthogonal neural network was presented on the basis of the digital compound orthogonal neural network and was applied in the control of the servo system with nonlinearity. In the flight simulator servo system of DC motor with nonlinear friction torque, the control system was based on the parallel control method of the PD feedback control and the feedforward control of the neural network. The affect of nonlinear friction torque was rejected by use of the neural network. The analog compound orthogonal neural network was obtained by means of a continuous algorithm treatment for a digital compound orthogonal neural network, and was used as the feedforward controller. The servo control of DC motor with nonlinear friction torque was simulated by means of the parallel control and the single PD control. The simulation results prove that the compound control has better real-time control performance, faster response velocity, and higher tracking precision than the single PD control. The position and speed tracking control obtain satisfactory effects. The analog neural controller can be applicable to the control of uncertain objects and provides a novel approach for the type of an uncertain control system.

**KEY WORDS:** Servo system; DC motor; Nonlinear friction torque; Analog compound orthogonal neural network; Parallel control; PD controller; Neural network controller

**摘要:** 在数字复合正交神经网络的基础上提出一种模拟复合正交神经网络, 并用于非线性伺服系统控制中。在带有非线性摩擦转矩的直流电机飞行模拟转台伺服系统中, 控制系统是基于 PD 控制加神经网络前馈控制的并行控制方法, 使用

神经网络是用来消除非线性摩擦转矩的影响。通过数字复合正交神经网络的连续化算法处理获得了一种模拟复合正交神经网络, 并作为前馈控制器。用并行控制与单一的 PD 控制对带有非线性摩擦转矩的直流电机伺服控制作了仿真研究。仿真结果表明复合控制比单一的 PD 控制具有实时性好、响应速度快、跟踪精度高, 位置与速度跟踪控制获得了满意的效果。该模拟神经控制器能用于不确定对象的控制, 为不确定系统控制提供了一种新的途径。

**关键词:** 伺服系统; 直流电机; 非线性摩擦转矩; 模拟复合正交神经网络; 并行控制; PD 控制器; 神经网络控制器

## 1 引言

在运动控制应用中, 存在着大量的以电机作为执行机构的机械系统速度和位置的控制。执行机构在低速情况下具有较强的摩擦现象, 此时控制对象就变为非线性, 很难用传统控制方法达到高精度控制。因此, 电气传动控制策略的研究引起了人们的广泛关注, 已提出了许多控制方法, 如对偶自校正 PID 控制<sup>[1]</sup>、基于重复控制原理的动态补偿方法<sup>[2]</sup>、速度鲁棒跟踪控制<sup>[3]</sup>、鲁棒自适应摩擦补偿方法<sup>[4]</sup>和 PID 加迭代学习的复合控制方法<sup>[5]</sup>等, 现有这些控制方法在一定条件下取得了良好的控制效果, 但缺乏广泛的工程适用性。神经网络以它的自学习和任意逼近非线性函数的特点, 可以用来解决由常规方法很难处理的非线性问题。近年来神经网络在控制领域中的研究有了很大的进展<sup>[6-12]</sup>, 而正交神经网络具有学习算法简单, 具有逼近任意线性和非线性函数的良好性能, 从而引起了控制界的关注。目

基金项目: 浙江省自然科学基金项目 (M603070)。

前,在直传动系统中的神经网络控制大都采用数字控制方式,即通过计算机用软件编程的方法来实现。近几年发达国家开始注重对神经元芯片的研究,并获得了多项专利,说明神经网络的硬件化、模拟化是今后的一个重要研究方向。模拟电路实现的神经元控制器将具有模拟电路系统的许多优点,如较低的硬件成本,较强的抗干扰能力和调试容易等,同时它可以实现神经元权值的连续自动调节,因此研究模拟神经网络具有十分重要的理论和现实意义。

本文在数字复合正交神经网络的基础上提出一种具有单隐层的三层模拟复合正交神经网络,并用于直流伺服电机的控制。非线性伺服系统的模拟复合正交神经网络控制法是一种新的尝试,这种控制方法就是在传统控制器(如PID)的基础上,再增加一个模拟复合正交神经网络控制器。此时神经网络控制器实际是一个前馈控制器,因此它建立的是被控对象的逆模型。当被控对象的解析模型未知或部分未知时,复合正交神经网络能快速在线连续自学习,不仅可确保控制系统的稳定性和鲁棒性,而且可有效地提高系统的精确度和自适应能力。由于模拟神经网络可望用模拟电路实现硬件化,因此在工程应用中具有现实意义。

## 2 神经网络与 PD 并行控制方法

### 2.1 神经网络与 PD 并行控制

采用神经网络加 PD 的并行控制是一种较好的自适应控制方法,以飞行模拟转台伺服系统的神经网络控制为例,给出任意框的神经网络前馈控制框图如图 1 所示。其特点为:

(1) 神经网络控制器实现前馈控制,实现被控对象的逆动态模型。

(2) 常规控制器实现反馈控制,保证系统的稳定性,且抑制扰动。

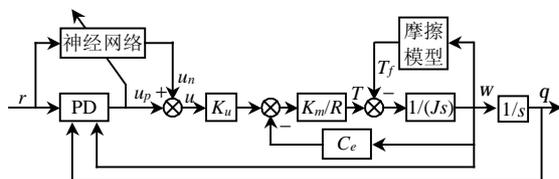


图 1 神经网络与 PD 并行控制结构图  
Fig. 1 The parallel control configuration of neural network and PD

由图 1 容易看出,神经网络控制器通过向传统控制器的输出进行学习,在线连续调整自己,目标

是使反馈误差  $e(t)$  或  $u_p(t)$  趋近于零,从而使自己逐渐在控制作用下占据主导地位,以便最终取消反馈控制器的作用。但还可以看出,这里的反馈控制器仍然是存在的,一旦系统出现干扰,反馈控制器仍然可以重新起作用。因此采用这种前馈加反馈的监督控制方法,不仅可确保控制系统的稳定性和鲁棒性,而且可有效地提高系统的精确度和自适应能力。该系统的控制算法为

$$u(t) = u_n(t) + u_p(t) \quad (1)$$

式中  $u_n(t)$  为网络产生相应的输出;  $u_p(t)$  为常规控制器 PD 产生的输出。

### 2.2 伺服系统描述

飞行模拟转台伺服系统是三轴伺服系统,该系统采用直流电机,忽略电枢电感,并假设电流环和速度环为开环。正常情况下可简化为线性二阶环节的系统,在低速情况下具有较强的摩擦现象,此时控制对象就变为非线性,很难用传统控制方法达到高精度控制。

根据伺服系统的结构,飞行模拟转台位置状态方程<sup>[7]</sup>可描述如下

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{K_m C_e}{JR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_u \frac{K_m}{JR} \end{bmatrix} u(t) - \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} T_f(t) \quad (2)$$

其中,  $K_u$  为 PWM 功率放大系统;  $R$  为电枢电阻;  $K_m$  为电机力矩系数;  $C_e$  为电压反馈系数;  $J$  为该框的转动惯量;  $x_1(t) = q(t)$  为转角;  $x_2(t) = w(t)$  为转速;  $T_f$  为动静摩擦力矩,一个与速度成指数关系的摩擦力模型<sup>[7]</sup>为

$$T_f = [T_c + (T_m - T_c)e^{-a|w|}] \text{sign} w \quad (3)$$

其中,  $T_m$  为静摩擦力矩,  $T_c$  为库仑摩擦力矩,  $a$  为时间常数。在一般的直流伺服电机模型中,含有一个线性部分和一个非线性部分,第一部分代表忽略了所有的非线性电机机械电路特性,第二部分描述在电机转子角位移中的非线性的影响,而非线性影响可看作干扰力矩  $T_f$  加在线性模型的输出力矩上来实现。

### 2.3 数字复合正交神经网络的模拟化

考虑单输入单输出三层前向神经网络,对于数字复合正交神经网络的输出为

$$u_n(k) = \sum_{i=1}^m w_i(k) \cdot p_i(k) \quad (4)$$

其中，隐含层第  $p_i$  个神经元（或称节点）的函数为 Chebyshev 正交多项式<sup>[8]</sup>，即  $p_1 = 1$ ,  $p_2 = X$ ,  $p_i = 2X \cdot p_{i-1} - p_{i-2}$  ( $i = 3, 4, \dots, m$ )。取  $X$  为单极性  $S$  函数

$$X = \frac{1}{1 + e^{-s \cdot r}}$$

单极性  $S$  函数可以把输入从区间  $[-\infty, +\infty]$  变换成  $[0, 1]$  区间输出，并可通过修改参数  $s$  来改变  $S$  函数的倾斜度，以提高网络的学习适应性， $r$  为网络的输入信号。复合正交神经网络的输入层至隐层联接权值恒为 1，隐层第  $i$  个神经元到输出层神经元之间的连接权值为  $w_i$  ( $i = 1, 2, \dots, m$ )， $m$  为隐层神经元个数。

复合正交神经网络调整指标为

$$E(k) = \frac{1}{2} [u(k) - u_n(k)]^2 \quad (5)$$

$$\Delta w(k) = h[u(k) - u_n(k)]P(k) = hu_p(k)P(k) \quad (6)$$

$$w(k) = w(k-1) + hu_p(k)P(k) \quad (7)$$

式中  $w = [w_1, w_2, \dots, w_m]^T$ ,  $P = [p_1, p_2, \dots, p_m]^T$ ;  $h$  为网络学习速率,  $h \in (0, 1)$ 。

为了获得一种模拟神经网络，将式(7)变形为

$$w_i(k) - w_i(k-1) = hu_p(k)p_i(k), \quad i=1, 2, \dots, m \quad (8)$$

将式(8)两边同除以采样周期  $T$ ，并将  $h/T$  记为  $h'$ ，当  $T \rightarrow 0$  时可得

$$\frac{dw_i(t)}{dt} = h'u_p(t)p_i(t) \quad (9)$$

将式(9)两边积分得

$$w_i(t) = w_i(0) + \int_0^t h'u_p(t)p_i(t)dt \quad (10)$$

将式(10)与式(4)相结合便可得到模拟神经网络控制器的表达式

$$u_n(t) = \sum_{i=1}^m w_i(t) \cdot p_i(t) \quad (11)$$

### 3 仿真实验

本文仿真所应用的是 Matlab 下的 Simulink 工具箱，运用 Simulink 模块库建立此模拟控制系统的仿真模型<sup>[10]</sup>，并对转台某框伺服系统作模拟仿真实验。仿真所用的电机参数<sup>[7]</sup>如下：

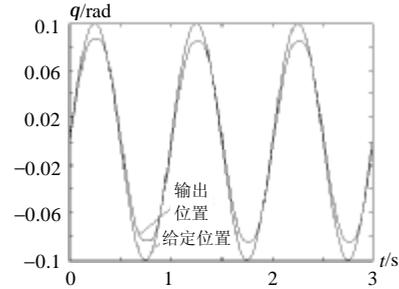
$R=7.77\Omega$ ,  $K_m=6\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$ ,  $C_e=1.2\text{V}/(\text{rad}/\text{s})$ ,  $J=0.6\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  $K_u=11\text{V}/\text{V}$ ,  $T_c=1.5\text{N}\cdot\text{m}$ ,  $T_m=50\text{N}\cdot\text{m}$ ,  $a=1$ 。

本仿真选取低速正弦跟踪信号指令为  $r(t)$ ,

$r(t) = 0.1 \sin 2\pi t$ 。PD 控制为

$$u_p(t) = 180e(t) + 50\dot{e}(t)$$

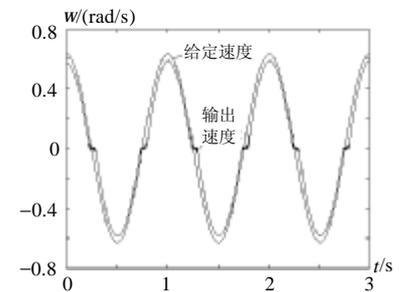
带有摩擦环节的 PD 控制跟踪结果如图 2 和图 3 所示。仿真结果表明在带有摩擦条件下，位置跟踪存在“平顶”现象，速度跟踪存在“死区”现象。采用 PD 控制鲁棒性差，不能达到高精度跟踪。



注：PD 控制

图 2 带摩擦时位置跟踪

Fig. 2 Position tracking with friction

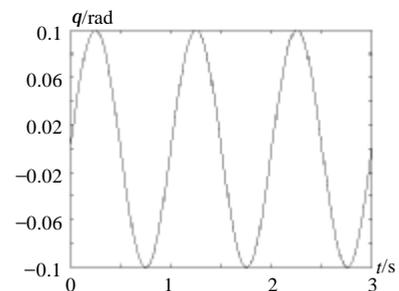


注：PD 控制

图 3 带摩擦时速度跟踪

Fig. 3 Speed tracking with friction

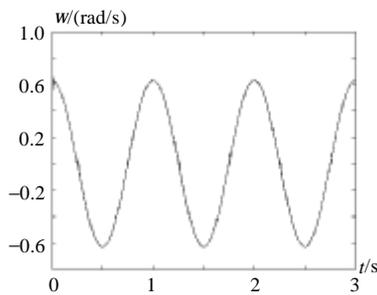
带有摩擦环节的 PD 加模拟复合正交神经网络的并联控制跟踪结果如图 4 和图 5 所示。这里模拟复合正交神经网络结构为  $N_{1 \times 5 \times 1}$ ，网络参数取  $s=5$ ,  $h'=300$ 。仿真结果表明在带有摩擦条件下，位置跟踪不存在“平顶”现象，速度跟踪几乎不存在“死区”现象。采用 PD 加模拟复合正交神经网络并联控制鲁棒性好，能达到高精度跟踪。



注：PD 加模拟复合正交神经网络控制

图 4 带摩擦时位置跟踪

Fig. 4 Position tracking with friction



注: PD 加模拟复合正交神经网络控制

图5 带摩擦时速度跟踪

Fig. 5 Speed tracking with friction

## 4 结论

本文通过数字复合正交神经网络连续化处理后获得了一种模拟正交神经网络,并用于直流伺服系统控制。非线性伺服系统的模拟复合正交神经网络控制法是一种新的尝试,文中给出的 PD 控制器加模拟复合正交神经网络前馈控制是对带摩擦干扰伺服系统的一种可行的实施,用神经网络来消除非线性摩擦力矩的影响,可以获得期望的动态特性。实验结果表明,相对于常规控制,此控制策略能够使系统达到更高的性能指标。由于该神经网络控制器可望用模拟电路实现硬件化,又可适合于不确定被控对象的控制,因此具有很好的工程应用价值。

## 参考文献

- [1] 郑言海, 杨智民, 庄显义. 大型目标模拟器方位伺服电机的对偶自校正 PID 控制[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 84-88.  
Zhen Yanhai, Yang Zhimin, Zhuang Xianyi. Dual self-tuning PID control of azimuthal servo DC of large objective simulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 84-88.
- [2] 张东纯, 曾鸣, 苏宝库. 基于重复控制的动态补偿器及其在恒速调节系统中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 95-97.  
Zhang Dongchun, Zeng Ming, Su Baoku. Dynamic compensator based on repetitive control and its application to constant speed regulating system[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 95-97.
- [3] 方一鸣, 王乐, 王益群, 等. 具有电枢反应非线性不确定性的直流电机速度鲁棒跟踪控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 136-139.  
Fang Yiming, Wang Le, Wang Yiqun *et al.* The research of speed robust tracking control on DC motor considering the nonlinear of armature reaction[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 136-139.
- [4] 克晶, 苏宝库, 曾鸣. 考虑模型不确定性的基于分解控制直流电机系统的摩擦补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 119-124.  
Ke Jing, Su Baoku, Zeng Ming. Decomposition-based friction compensation for DC motors with model uncertainties[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 119-124.
- [5] 王明彦, 郭奔. 基于迭代学习控制的电动伺服负载模拟器[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 123-126.  
Wang Mingyan, Guo Ben. Electric servo load simulator based on iterative learning control[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 123-126.
- [6] 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.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [8] 叶军, 张新华. 多层前向神经网络的快速学习算法及其在应用[J]. 控制与决策, 2002, 17(Suppl.): 817-819.  
Ye Jun, Zhang Xinhua. High speed learning algorithm for a multilayer feedforward neural network and its application[J]. Control and Decision, 2002, 17(Suppl.): 817-819.
- [9] 叶军. 基于复合正交神经网络的自适应逆控制系统[J]. 计算机仿真, 2004, 21(2): 92-94.  
Ye Jun. Adaptive inverse control system based on compound orthogonal neural network[J]. Computer Simulation, 2004, 21(2): 92-94.
- [10] 焦斌, 董枫, 樊秀芬. 神经元控制器在直流调速系统中的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2004, 21(8): 118-120.  
Jiao Bin, Dong Feng, Fan Xiufen. Simulation research of neuro controller in DC drive system[J]. Computer Simulation, 2004, 21(8): 118-120.
- [11] Hornig J H. Neural adaptive tracking control of a DC motor [J]. Information Science, 1999, 118: 1-13.
- [12] Yang S S, Tseng C S. An orthogonal neural network for function approximation[J]. IEEE Transactions on System, Man and Cybernetics, 1996, 26(B5): 779-785.

收稿日期: 2005-05-07。

作者简介:

叶军 (1959-), 男, 副教授, 硕士生导师, 从事智能控制和机器人技术研究。