

一种基于神经网络解耦控制的多电机同步系统*

刘星桥, 陈冲, 刘国海, 赵亮

江苏大学电气信息工程学院, 镇江 212013

摘要: 本文以多变量、非线性、强耦合的两电机同步控制系统为研究对象, 针对电流跟踪型 SPWM 变频器供电的感应电机系统, 建立两电机同步系统的数学模型。采用 RBF 神经网络自适应 PID 控制器, 结合自适应神经元解耦补偿的解耦控制技术, 设计了两电机同步调速系统的神经网络控制器。实验结果表明, 采用该方法设计的控制器可以实现两电机同步系统中速度和张力的解耦控制, 系统具有良好的动态性能和跟随性能。

关键词: 两电机同步系统, 神经网络, 解耦控制, 速度, 张力

Multi-motor Synchronous System Based on Neural Network Decoupling Control

Liu Xingqiao, Chen Chong, Liu Guohai, Zhao Liang

School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, P. R. China

E-mail: dachong602@163.com

Abstract: Taking the multi-variable of synchronization system of the AC induction motors as study object, focusing on the system of induction motors powered by current-tract SPWM transducers, the mathematical model of the system of two motors is established. Combining decoupling technology of adaptive neuron decoupling compensator, RBF neural network adaptive PID controller is adopted to design the neural network controller of two-motor synchronous system. The experiment results show that the two-motor synchronous system is decoupled based on the controller designed with better dynamic and static characteristics and following performance.

Key words: Two-motor synchronous system, Neural network, Decoupling control, Speed, Tension

1 引言(Introduction)

多电机同步系统是现代工业生产中的应用比较广泛的电控系统, 它在工业生产、军事及航空等行业有着广阔的应用领域。自从 1980 年 Koren 提出交叉耦合控制以后^[1], 许多科学工作者围绕“多电轴协调控制”展开了进一步的研究, 1992 年 Tomizuka 等又把自适应前馈控制策略应用到交叉耦合控制器中, 提高瞬间响应和抗干扰能力^[2]。1998 年 Okada 等把热轧精炼系统看成 6 阶模型, 运用优化理论实现解耦控制^[3]。2000 年, Namho 等以速度、张力系统为例, 采用主从概念解决多系统的负载共享问题^[4]。2002 年, 中国江苏大学的刘国海教授与张浩应用神经网络 α 阶逆系统的方法成功实现了速度和张力的完全解耦控制^[5]。以上这些控制方法大多依赖系统的精确数学模型, 但交流电机是高阶、强耦合、非线性时变的复杂控制对象, 实际上很难获得它的精确的数学模型, 这使传统的线性定参数 PID 控制调节难以达到控制的要求。

本文针对电流跟踪型 SPWM 变频器供电的多电机同步系统, 建立了两台电机同步控制系统的数学模型。采用 RBF 神经网络整定的自适应 PID 控制器, 结合自适应神经元解耦补偿的解耦控制技术, 设计了神经网络控制器, 实现了两电机同步系统速度和张力的

解耦控制。该控制器结构简单, 具有自学习、自适应的能力, 能够适应环境的变化。

2 两电机同步系统的数学模型(Mathematic Model of Two-motor Synchronous System)

两台电机同步系统的速度和张力控制的物理模型如图 1 所示。根据虎克定律, 考虑前滑量, 张力具有以下形式, 即

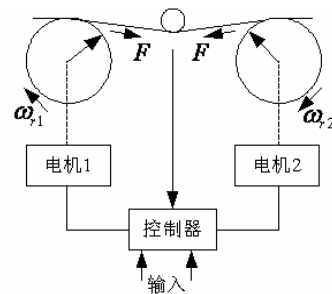


图 1 两电机同步控制系统模型

$$\begin{aligned}\dot{F} &= \frac{AE}{L_0} \left(\frac{1}{n_{p1}} r_1 k_1 \omega_{r1} - \frac{1}{n_{p2}} r_2 k_2 \omega_{r2} \right) - \frac{AV}{L_0} F \\ &= \frac{K}{T} \left(\frac{1}{n_{p1}} r_1 k_1 \omega_{r1} - \frac{1}{n_{p2}} r_2 k_2 \omega_{r2} \right) - \frac{F}{T}\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $K=E/V$ 为传递系数; $T=L_0/AV$ 为张力变化时间常数; F 为皮带的张力, r_1 、 k_1 、 ω_{r1} 分别为第一台皮带轮的半径、速比、电气角速度; r_2 、 k_2 、 ω_{r2} 分

*本课题受江苏省科技攻关(工业部分)(BE2006090)江苏大学科技创新基金(1293000240)和江苏省高校自然科学基金(05KJ470048)资助。型, 这使传统的线性定参数 PID 控制调节难以达到控

别为第二台皮带轮的半径、速比、电气角速度； A 为皮带的截面积； E 为皮带的杨氏弹性模量； L_0 为机架间的距离； V 为期望的速度。

3 两电机同步系统传统 PID 控制 (Traditional PID Control of Two-motor Synchronous System)

两电机同步系统传统 PID 控制框图如图 2 所示，图中 w_2^* 为主令电机的速度给定值， w_{r2} 为主令电机的速度实际值由光电编码器检测得到； F^* 为皮带张力的给定值， f 为皮带张力的实际值由张力传感器检测得到。由于张力本质上是由两台电机间的速度差决定，因此根据主令电机速度给定与张力 PID 控制器输出的差来调节从动电机的速度，从而实现对皮带张力的控制。

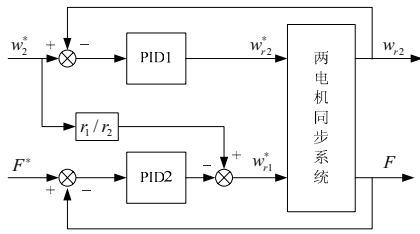


图 2 常规 PID 控制框图

但是，由于交流异步电机的数学模型为复杂的高阶、非线性、多变量系统，同时皮带的动力学特性复杂，张力环的广义对象数学模型不易描述，特别是张力和速度之间相互耦合，故对多电机同步控制系统采用常规 PID 调节常常顾此失彼，无法达到速度和张力的解耦控制，也无法实现高性能的同步控制，需要用研究新的控制方法。

4 两电机同步系统神经网络解耦控制 (Neural Network Decoupling Control of Two-motor Synchronous System)

针对一个具有双输入双输出的两电机同步控制系统，本文提出了一种基于神经网络的在线解耦控制方法，控制系统结构示意图如图 3 所示，整个神经网络控制器由基于 RBF 网络整定的自适应 PID 控制器和神经元解耦补偿器组成，该结构采用的是神经元解耦补偿器位于自适应 PID 控制器之后的串联解耦方案[6]。

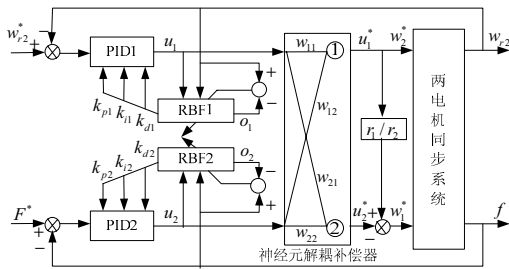


图 3 控制系统结构示意图

4.1 基于 RBF 网络整定的自适应 PID 控制器 (Adaptive PID Controller Based on RBF Network)

基于 RBF 网络整定 PID 的自适应控制器由两部分组成：

① 经典 PID 控制器。直接对被控对象进行闭环控制，并且三个参数 k_p 、 k_i 、 k_d 为在线整定。

$$u(k) = u(k-1) + k_p(e(k) - e(k-1)) + k_i e(k) + k_d(e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)) \quad (2)$$

② RBF 神经网络。RBF 网络是一种三层前向网络，输入层节点只是传递输入信号到隐含层，隐含层节点一般取高斯函数，该函数能对输入产生局部响应，隐含层节点到输出节点的映射是线性的。图 3 中用于整定 PID 控制器参数的自适应神经网络 NN1 和 NN2 都采用 3-6-1 结构的 RBF 网络。

在 RBF 网络结构中， $X = [x_1, x_2, x_3]^T$ 为网络的输入向量。设 RBF 网络的径向基向量 $H = [h_1, h_2, \dots, h_j, \dots, h_6]^T$ ，其中 h_j 为高斯基函数

$$h_j = \exp\left(-\frac{\|X - C_j\|^2}{2b_j^2}\right) \quad j = 1, 2, \dots, 6 \quad (3)$$

网络的第 j 个节点的中心矢量为 $C_j = [c_{j1} \dots c_{ji} \dots c_{j3}]^T$ ，其中 $i = 1, \dots, 3$ 设网络的基宽向量为

$$B = [b_1, b_2, \dots, b_j, \dots, b_6]^T \quad (4)$$

b_j 为节点 j 的基宽度参数，且为大于零的数。网络的权向量为

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_j, \dots, w_6]^T \quad (5)$$

辨识网络的输出为

$$y_m(k) = w_1 h_1 + w_2 h_2 + \dots + w_6 h_6 \quad (6)$$

辨识器的性能指标函数为

$$J = \frac{1}{2} (y(k) - y_m(k))^2 \quad (7)$$

根据梯度下降法，输出权、节点中心及节点基宽参数的迭代算法如下

$$w_j(k) = w_j(k-1) + \eta (y(k) - y_m(k)) h_j + \alpha (w_j(k-1) - w_j(k-2)) \quad (8)$$

$$\Delta b_j = (y(k) - y_m(k)) w_j h_j \frac{\|X - C_j\|^2}{b_j^3} \quad (9)$$

$$b_j(k) = b_j(k-1) + \eta \Delta b_j + \alpha (b_j(k-1) - b_j(k-2)) \quad (10)$$

$$\Delta c_{ji} = (y(k) - y_m(k)) w_j h_j \frac{x_i - c_{ji}}{b_j^2} \quad (11)$$

$$c_{ji}(k) = c_{ji}(k-1) + \eta \Delta c_{ji} + \alpha (c_{ji}(k-1) - c_{ji}(k-2)) \quad (12)$$

式中， η 为学习速率， α 为动量因子。

Jacobian 阵（即为对象的输出对控制输入的灵敏度信息）算法为

$$\frac{\partial y(k)}{\partial u(k)} \approx \frac{\partial y_m(k)}{\partial u(k)} = \sum_{j=1}^6 w_j h_j \frac{c_{ji} - u(k)}{b_j^2} \quad (13)$$

神经网络整定性能指标函数取为

$$E(k) = \frac{1}{2} (r(k) - y(k))^2 = \frac{1}{2} e(k)^2 \quad (14)$$

k_p, k_i, k_d 的调整采用梯度下降法

$$\Delta k_p = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_p} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_p} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x_c(1) \quad (15)$$

$$\Delta k_i = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_i} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_i} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x_c(2) \quad (16)$$

$$\Delta k_d = -\eta \frac{\partial E}{\partial k_d} = -\eta \frac{\partial E}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial k_d} = \eta e(k) \frac{\partial y}{\partial u} x_c(3) \quad (17)$$

式中, $\frac{\partial y}{\partial u}$ 为被控对象的 Jacobian 信息, 可通过前面的 RBF 网络的辨识得到。

4.2 多变量系统的自适应神经元解耦补偿(Adaptive Neuron Decoupling Compensator of Multi Variable System)

神经元解耦补偿器使用神经网络将来自其他通道的耦合影响视为可测干扰进行补偿, 通过训练网络权值, 使神经元解耦补偿器与被控对象组成的广义系统成为无耦合或耦合程度较小的系统。采用解耦补偿装置位于控制器之后的串联开环解耦方案在每对输入输出通上设置一个单神经元每个神经元有两个输入, 均接受两个自适应PID控制器的控制信号 u_1, u_2 。每个神经元的输出 u^* 作为补偿后的控制信号送至多变量系统。通过神经元权值的修正达到解耦目的。

图 3 中神经元解耦补偿器的算法为:

$$u_j^*(k) = \sum_{j=1}^2 w_{ij} u_j(k) \quad (18)$$

$$w_{ij}(k+1) = w_{ij}(k) + \eta (\bar{u}_i^*(k) - u_i^*(k)) u_j(k) \quad (19)$$

式中, 各神经元权值 w_{ij} 的初值选取为 $\begin{cases} w_{ij} = 1 (i = j) \\ w_{ij} = 0 (i \neq j) \end{cases}$

相当于无解耦状态; η 是学习速率; $u_j^*(k)$ 为神经元的实际输出; $\bar{u}_i^*(k)$ 为神经元的期望输出, 但这一信息是未知的, 为避开这一矛盾, 将神经元解耦补偿器与被控对象看作一个广义对象, 这样神经网络的训练准则就可以用系统输出误差 E_i 为目标函数, 采用梯度下降法进行搜索, 使得目标函数 E_i 最优。

5 两电机同步控制的系统实验结果(Experimental Results of Two-motor Synchronous System)

5.1 实验系统介绍(Introduction of Experimental System)

两电机同步控制系统基于 PROFIBUS-DP 网络, 采用可编程控制器和上位机两级控制结构, PLC 控制两台变频器执行多电机调速, 上位机监控系统运行。系统控制结构图 4 所示。S7-300PLC 作为主控单元, 其高速计数器模块结合光电编码器测量电机转速, 模拟量输入模块结合张力传感器采集皮带实际张力。上位机通过 CP5611 通讯卡实现与 PLC 之间的 MPI 数据通讯; PLC 与两台变频器之间通过 PROFIBUS-DP 进行现场通讯。本论文中 PLC 选用的 CPU 型号为

315-2DP, 该 CPU 对二进制和浮点数运算具有较高的处理能力, 通过编写多个功能和功能块程序可以实现神经网络控制算法。图 5 为多电机同步系统实验平台。

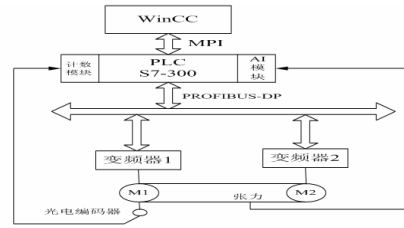


图 4 两电机控制系统结构组成图



图 5 多电机同步系统实验平台

5.2 实验波形与分析(Experimental Wave and Its Analysis)

主机速度给定 300r/min, 张力给定 10kgf, 在 100s 时速度给定做突加变化, 当采用 PID 控制时, 速度和张力的响应见图 6(a); 当采用神经网络控制时, 速度和张力的响应见图 6(b)。从图中可以看出: PID 控制下, 速度突变系统输出张力波形出现较大的尖峰抖动误差; 神经网络控制下, 速度突变系统输出张力波形仅出现微小的抖动误差。

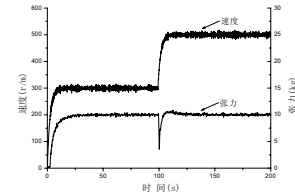


图 6(a) PID 控制张力恒定速度突加响应

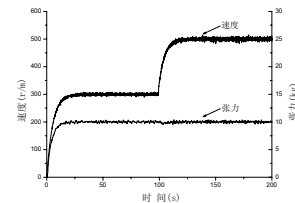


图 6(b) 神经网络控制张力恒定速度突加响应

主机速度给定 600r/min, 张力给定 20kgf, 在 100 秒时张力给定做突加变化, 当采用 PID 控制时, 张力和两台电机间的速度差的响应见图 7(a); 当采用神经网络控制时, 张力和两台电机间的速度差的响应见图 7(b)。因为张力本质上是由两台电机间的速度差决定, 因此通过张力突变速度差响应曲线可以间接看出张力突变对速度的影响。从图中可以看出神经网络控制下, 张力突变对速度差的影响是很小的。

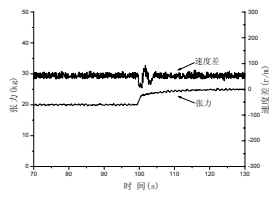


图 7 (a) PID 控制张力突加速度差响应

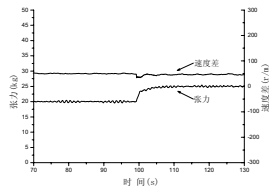


图 7 (b) 神经网络控制张力突加速度差响应

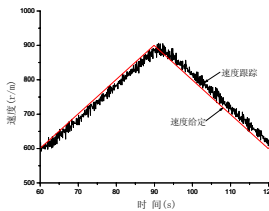


图 8 (a) PID 控制速度跟踪单周期三角波响应

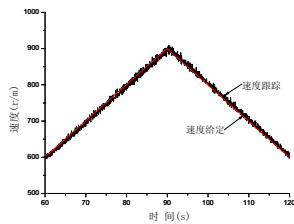


图 8 (b) 神经网络控制速度跟踪单周期三角波响应

图 8 (a) 和图 8 (b) 为速度单周期跟踪波形, 从图中可以看出, 神经网络控制下的跟随性明显优于 PID 控制, 采用传统 PID 控制时, 速度稳态误差为 $\pm 3.12\%$; 而采用神经网络控制时, 速度稳态误差为 $\pm 1.34\%$ 。

6 结论(Conclusion)

本文针对两电机同步控制系统, 采用 RBF 神经网络自适应 PID 控制器, 结合自适应神经元解耦补偿器的解耦控制技术, 设计了神经网络控制器。从以上试验波形可得结论: 采用该方法的试验波形在稳态性能和跟随性能方面均优于传统的 PID 控制器, 较好的实现了速度和张力的解耦, 可以满足实际生产的要求。

参考文献(References)

- [1] KOREN Y. Cross-coupled Biaxial Computer Control for Manufacturing System [J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 1980, 102(2): 256-272.
- [2] TOMIZUKA M, HU J, CHIU T. Synchronization of Tow Motion Control Axes Under Adaptive Feedforward Control [J]. ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 1992, 114(6): 198-203.
- [3] OKADA M, MURAYMA K, URANO A, IWASAKI Y. Optima; Control System for Hot Strip Finishing Mill [J]. Control Engineering Practice, 1998, 6(2): 1029-1034.
- [4] NAMHO H, KWANGHEE N. A Robust Load-Sharing Control Scheme for Parallel Connected Multi Systems [J]. IEEE Trans. On Industrial Electronics, 2000, 47(4): 871-879.
- [5] 张浩, 刘国海, 尤德同. 基于神经网络逆系统的感应电机变频系统解耦控制 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 88-91.
- [6] 董玲, 白焰. 多变量系统的神经元解耦控制 [J]. 现代电力, 1999, 16(1): 11-15.
- [7] 姜萍, 李遵基, 梁伟平. 一种基于神经元的解耦控制算法 [J]. 华北电力大学学报, 2004, 27(2): 47-51.