

变结构模糊神经网络在交流解耦变结构系统中的应用*

邱焕耀 毛宗源

(华南理工大学自动控制系·广州, 510640)

摘要: 在感应电动机的控制中采用解耦变结构控制, 有效地简化了控制器的设计, 并提高了控制器的抗干扰性和鲁棒性, 交流解耦变结构系统中应用变结构模糊神经网络, 一方面使系统原来存在的抖振得以抑制, 另一方面又使系统具有自学习和自调整模糊规则的能力, 提高了控制系统的智能, 改善了控制系统的性能。

关键词: 变结构模糊神经网络; 交流解耦变结构; 抖振; 学习算法

The Application of Variable Structure Fuzzy Neural Network in AC Decoupling Variable System

Qiu Huanyao and Mao Zhongyuan

(Department of Automation, South China University of Technology · Guangzhou, 510640, P. R. China)

Abstract: The application of decoupling variable structure control in induction motor simplifies the design of controller effectively and enhances the robustness of the controller. The application of variable structure fuzzy neural network in AC decoupling variable system restrains the system quiver as well as enhances the system ability of self-learning and self-adjusting fuzzy rules. It makes the control system intelligent and enhances its performances.

Key words: variable structure fuzzy neural network; AC decoupling variable structure; quiver; learning algorithm

1 引言(Introduction)

感应电动机以其容量体积比高, 过载能力强, 输出转矩大, 无电刷, 无需经常维护等优点而越来越多地应用于机器人, 数控机床以及电动汽车等, 基于感应电动机解耦数学模型而提出的解耦变结构控制原理是一种新型的交流控制策略^[1,2]. 感应电动机是高阶、强耦合、非线性的复杂控制对象, 由于其参数时变、负载干扰以及非线性等因素, 实际上很难获得其精确的数学模型, 解耦变结构控制器的设计方法不需要控制对象精确的数学模型, 有很好的抗干扰性和很强的鲁棒性. 模糊控制在解耦变结构系统中的应用能有效地抑制和消除抖振, 提高控制系统的性能^[2].

模糊神经网络结合了模糊控制与神经网络两者的优势, 使控制系统具有模糊推理和自学习、自组织的能力, 变结构模糊神经网络通过在训练中不断调整网络结构, 一方面提高了网络的收敛速度, 找到网络的较佳结构, 另一方面又可以有效地克服一般神经网络容易陷入局部极值的难题.

2 交流解耦变结构及其模糊控制(AC decoupling variable structure and fuzzy control)

基于对称鼠笼式感应电动机在同步轴系中的数

学模型, 可以导出易于实现的解耦条件以及为实现定子侧的完全解耦所需的控制.

$$\begin{cases} i_{1d} = \text{const.}, \omega_{sl} = \frac{r_2}{L_2 \cdot i_{1d}} \cdot i_{1q}, \\ \begin{bmatrix} e_{1d} \\ e_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_1 & -L_\sigma \omega_s \\ L_1 \omega_s & r_1 + L_\sigma s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (1)$$

其中, i_{1d}, i_{1q} 为定子电流的 d, q 轴分量; ω_{sl} 为滑差频率; r_1, L_1 为定子电阻和电感; r_2, L_2 为转子电阻和电感; L_σ 为定转子间漏抗, 且 $L_\sigma = \sigma L_1, \sigma = 1 - k^2$, k 为定转子间耦合系数; ω_s 为电源频率; e_{1d}, e_{1q} 分别为电机电势在 d, q 轴的分量^[2,3].

由于 r_2 容易随温度变化而发生变化, 从而影响了解耦控制系统的性能, 转子电阻的变化对解耦控制的影响可以作为干扰量 h_1, h_2 . 感应电动机在完全解耦条件下的数学模型为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_{2d} \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{i}_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{r_2}{L_2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{D}{J} & \frac{K_g}{J} \\ 0 & 0 & -\frac{r_1}{L_\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{2d} \\ \omega_r \\ i_{1q} \end{bmatrix} +$$

* 广东省自然科学基金(960304)资助项目.

本文于 1998 年 4 月 10 日收到. 1999 年 1 月 25 日收到修改稿

$$\begin{bmatrix} \frac{Mr_2}{L_2 r_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_\sigma} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{1d}^{\text{ref}} \\ e_{1q}^{\text{ref}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{Mr_2}{L_2 r_1} h_1 \\ -\frac{1}{J} T_l \\ \frac{1}{L_\sigma} h_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, λ_{2d} 是转子磁链; 上标 ref 代表参考量; T_l 是阻力矩; $K_g = n_p \frac{M^2 i_{1d}^{\text{ref}}}{L_2}$, n_p 为极对数. 采用滑模变结构控制可克服系统参数变化对性能的影响. 根据系统性能要求选择滑动模方程为:

$$[S_1, S_2, S_3]^T = [\lambda_{2d} - \lambda_{2d}^{\text{ref}}, \omega_r - \omega_r^{\text{ref}}, i_{1q} - i_{1q}^{\text{ref}}]^T \quad (3)$$

解耦变结构控制策略采用如下的控制规律:

$$[e_{1d}^{\text{ref}}, i_{1q}^{\text{ref}}, e_{1q}^{\text{ref}}]^T = -C[S_1, S_2, S_3]^T - [u_{1f}, u_{2f}, u_{3f}]^T \quad (4)$$

式中, C 是控制参数阵, $u_{if} (i = 1, 2, 3)$ 是模糊控制量.

在采用模糊控制的解耦变结构系统中, 采用如下的模糊控制规则:

R_l : if S_1 is A_1^l and S_2 is A_2^l and S_3 is A_3^l and \dot{S}_1 is A_4^l and \dot{S}_2 is A_5^l and \dot{S}_3 is A_6^l ; then u_{1f} is B_1^l and u_{2f} is B_2^l and u_{3f} is B_3^l .
($l = 1, 2, \dots, M$).

其中, $A_1^l, A_2^l, A_3^l, A_4^l, A_5^l, A_6^l, B_1^l, B_2^l, B_3^l$ 是语言模糊集, M 是模糊规则总数, 设 $x^T = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6) = (S_1, S_2, S_3, \dot{S}_1, \dot{S}_2, \dot{S}_3)$, 在采用点模糊化、乘积推理和中心去模糊化的前提下模糊控制的输出为:

$$u_{if} = \theta_i^T \xi_i(x), \text{ 其中 } \xi_i(x) = \frac{\prod_{i=1}^6 \mu_{A_i^l}(x_i)}{\sum_{i=1}^M (\prod_{i=1}^6 \mu_{A_i^l}(x_i))}, \theta_i = (\bar{u}_{1f}^i, \bar{u}_{2f}^i, \dots, \bar{u}_{3f}^i)^T, \bar{u}_{if}^l (l = 1, \dots, M) \text{ 是模糊隶属函数}$$

$\mu_{A_i^l}(u_{if})$ 在域 V_i 中取得最大值 1 的点, 变量 x_i 对于模糊语言集 A_i 的隶属度为: $\mu_{A_i}(x_i) = \exp\left(\frac{-(x_i - \bar{x}_i)^2}{\sigma_i^2}\right)$.

选择李亚普诺夫函数 $V = \frac{1}{2} S^T S$, 求 V 对时间的导数:

$$\dot{V} = S^T \dot{S} = \sum_{i=1}^3 S_i \dot{S}_i \quad (5)$$

将式(2)代入式(5)得:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -S_1 \left[\left(\frac{r_2}{L_2} + \frac{Mr_2}{L_2 r_1} C_1 \right) S_1 + \frac{r_2}{L_2} \lambda_{2d}^{\text{ref}} - \frac{Mr_2}{L_2 r_1} h_1 + \right. \\ & \left. \frac{Mr_2}{L_2 r_1} \theta_1^T \xi_1(x) \right] - S_2 \frac{1}{J} [(D + K_g C_2) S_2 + \\ & D \omega_r^{\text{ref}} + T_l + K_g \theta_2^T \xi_2(x)] - S_3 \left[\left(\frac{r_1}{L_\sigma} + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{1}{L_\sigma} C_3 \right) S_3 + \frac{r_1}{L_\sigma} i_{1q}^{\text{ref}} - \frac{1}{L_\sigma} h_2 + \frac{1}{L_\sigma} \theta_3^T \xi_3(x) \right] \end{aligned}$$

根据李亚普诺夫稳定性定理, 令 $\dot{V} < 0$, 可得到闭环控制系统稳定的充分条件:

- 1) C 是正定阵;
- 2)

$$\begin{cases} \theta_1^T \xi_1(x) \begin{cases} > h_1 - (r_1 \lambda_{2d}^{\text{ref}}) / M, & \text{when } S_1 < 0, \\ < h_1 - (r_1 \lambda_{2d}^{\text{ref}}) / M, & \text{when } S_1 > 0, \end{cases} \\ \theta_2^T \xi_2(x) \begin{cases} > -(T_l + D \omega_r^{\text{ref}}) / K_g, & \text{when } S_2 < 0, \\ < -(T_l + D \omega_r^{\text{ref}}) / K_g, & \text{when } S_2 > 0, \end{cases} \\ \theta_3^T \xi_3(x) \begin{cases} > h_2 - r_1 i_{1q}^{\text{ref}}, & \text{when } S_3 < 0, \\ < h_2 - r_1 i_{1q}^{\text{ref}}, & \text{when } S_3 > 0. \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

模糊控制采用变结构模糊神经网络来实现, 采用变结构模糊神经网络的交流解耦变结构控制系统的结构如图 1, 变结构模糊神经网络控制器结构如图 2.

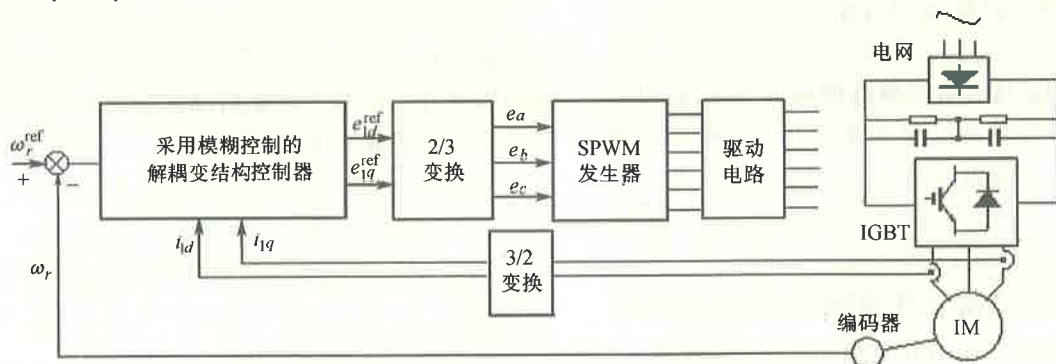


图 1 采用变结构模糊神经网络的交流解耦变结构控制系统
Fig. 1 AC decoupling variable structure control system with VS-FNN

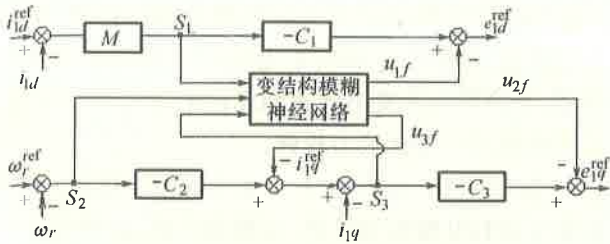


图 2 变结构模糊神经网络控制器结构
Fig. 2 Structure of VS-FNN controller

3 变结构模糊神经网络与模糊规则的调整 (VS-FNN and regulation of fuzzy rules)

变结构模糊神经网络 (VS-FNN) 控制器是三层前向网络, 由于隐层节点数影响神经网络的收敛速度以及神经网络是否收敛于局部极值点, 在神经网络学习过程中改变隐层节点的方法, 可以提高神经网络的收敛速度, 并有效地避免了神经网络陷入局部极值. 隐层的节点数由少到多的变结构过程是模糊规则由粗到精的学习过程, 体现了先粗略掌握学习对象的概貌, 然后不断细分, 不断提高学习精度的学习规律. 变结构模糊神经网络的结构如图 3 所示.

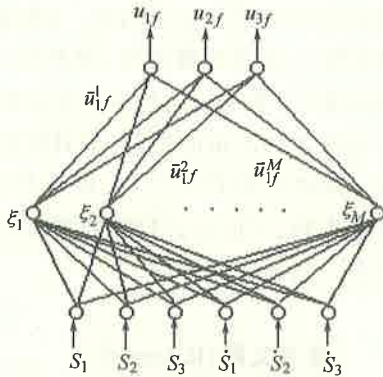


图 3 变结构模糊神经网络的结构
Fig. 3 Structure of VS-FNN

变结构模糊神经网络 (VS-FNN) 学习的目标是使输出误差函数 E 最小, $E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^k (u_{jf} - u_{jf}^d)^2$.

对于变结构模糊神经网络 (VS-FNN) 的隐层, 有输入输出方程:

$$\xi_l(x) = \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i)}{\sum_{l=1}^M \left(\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(x_i) \right)} \quad (8)$$

式中, $\mu_{A_i^l}(x_i) = \exp\left(-\frac{(x_i - \bar{x}_i)^2}{\sigma_i^2}\right)$.

对于变结构模糊神经网络 (VS-FNN) 的输出层, 有输入输出方程:

$$u_{jf} = \sum_{l=1}^M \theta_l \xi_l(x) \quad (9)$$

式中, $\theta_l = \bar{u}_{jf}^l, (l = 1, \dots, M)$.

计算变结构模糊神经网络 (VS-FNN) 的输出层参数 θ_l 的梯度, 有:

$$\frac{\partial E}{\partial \theta_l} = \delta_l = (u_{jf} - u_{jf}^d) \xi_l(x) \quad (10)$$

计算变结构模糊神经网络 (VS-FNN) 的输入层参数 \bar{x}_i 和 σ_i 的梯度, 有:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial \bar{x}_i} &= \delta \theta_l (1 - \xi_l) \frac{2(x_i - \bar{x}_i)}{\sigma_i^2}; \\ \frac{\partial E}{\partial \sigma_i} &= \delta \theta_l (1 - \xi_l) \frac{2(x_i - \bar{x}_i)^2}{\sigma_i^3}. \end{aligned} \quad (11)$$

设 T 为学习的步数, 参数 θ_l, \bar{x}_i 和 σ_i 的学习算法分别为:

$$\theta_l(T+1) = \theta_l(T) - \eta_\theta \delta_l, \quad (12)$$

$$\bar{x}_i(T+1) = \bar{x}_i(T) - \eta_{\bar{x}} \delta \theta_l (1 - \xi_l) \frac{2(x_i - \bar{x}_i)}{\sigma_i^2}, \quad (13)$$

$$\sigma_i(T+1) = \sigma_i(T) - \eta_\sigma \delta \theta_l (1 - \xi_l) \frac{2(x_i - \bar{x}_i)^2}{\sigma_i^3}. \quad (14)$$

设 ξ 为网络输出的误差平方和, D 是网络衰减率, 则有

$$\xi = \frac{1}{2} \sum_k \sum_i (y_{ik} - y_{ik}^d)^2; \quad D = \frac{\xi(N) - \xi(N+M)}{\xi(N)}. \quad (15)$$

式中, y_{ik}, y_{ik}^d 分别是输出层第 i 个节点的实际输出与期望输出, k 为训练样本序号, $\xi(N), \xi(N+M)$ 分别是第 N 步与第 $(N+M)$ 步训练的误差平方和. 设 E_p 为减去第 p 个节点后的误差平方和, 则有:

$$E_p = \sum_k \sum_i \left(\frac{y_{ei} \alpha}{y_{ei}(\alpha-1) + 1} - y_{ei}^d \right)^2 \quad (16)$$

式中, $\alpha = \exp(w_{pi}^{(2)} x_p^{(1)})$.

变结构学习算法可归纳为:

第 1 步 设定 $\epsilon > 0$ 为给定的误差平方和收敛阈值, $[D_1, D_2]$ 为网络衰减率的适度范围, 网络隐层节点数初值为 P_0 .

第 2 步 设第 N 步与第 $(N+M)$ 步训练后的误差平方和与衰减率分别为 $\xi(N), D(N)$ 与 $\xi(N+M), D(N+M)$. 在第 $(N+M)$ 步稳层结构应为:

- 1) 假如 $D(N+M) > D_2$, 表明网络收敛速度快, 网络结构保持不变;
- 2) 假如 $D(N+M) < D_1$, 表明网络收敛速度慢, 改变网络结构, 隐层节点数变为 $P_N + 1$;
- 3) 假如 $D(N+M) \in [D_1, D_2]$, 网络收敛速度

在适度范围,如果 $D(N+M) < D(N)$,隐层节点数变为 $P_N + 1$;否则网络结构保持不变。

第3步 假如 $\xi(N+M) < \epsilon$,试减去隐层中对输出影响最小的节点,即节点应满足 $q: E_q = \min_p E_p$,经 M 步训练后,如果 $\xi(N+M) < \epsilon$,则重复第3步,否则重复第2步。

一般改变网络结构会瞬间增大误差,因此新增节点的连接权值应取适当范围的随机值,假如增节点并经 M 步训练后 $D(N+M) < D_1$,则保持原结构不变。

4 仿真结果及结论 (Simulation results and conclusions)

本控制系统采用的感应电动机参数: $r_1 = 0.49\Omega$, $r_2 = 0.45\Omega$, $L_1 = 38.8\text{mH}$, $L_2 = 36.7\text{mH}$, $M = 35.4\text{mH}$, $J = 0.024\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2/\text{rad}$, $D = 0.0011\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}/\text{rad}$, $i_{1d} = 6.83\text{A}$, $i_{1q} = 11.54\text{A}$, 1kW , 100V , 8.4A , 60Hz , 4极, 1710rpm 。

我们采用计算机软件 MATLAB 对以上感应电动机进行了仿真实验,仿真结果分别如图4和图5所示。其中,图4是电机参数为额定值的仿真曲线,

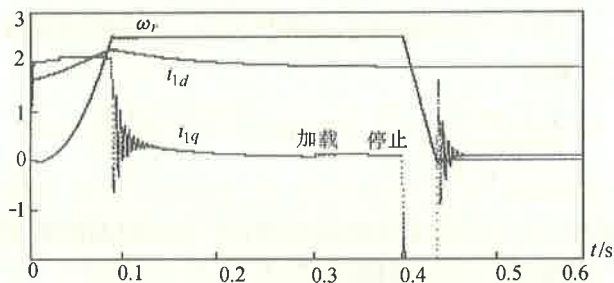


图4 电机参数为额定值的仿真曲线

Fig. 4 Simulation curves of control system with specified value of motor

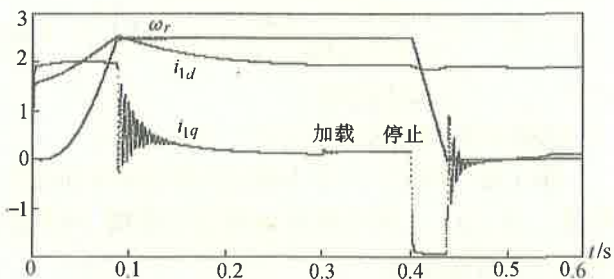


图5 转子电阻 r_2 上升1.5倍额定值的仿真曲线

Fig. 5 Simulation curves of control system with r_2 increasing 1.5 times specified value

图5则是由于发热使电机转子电阻 r_2 上升1.5倍额定值的仿真曲线。当电机参数为额定值时,起制动转速 ω_r 在接近最大转矩的作用下快速起动和制动,转速上升时间为 0.075s ,制动时间仅需 0.034s ,励磁电流 i_{1d} 上升时间极短,仅为 0.009s ,达到稳定后基本上保持稳定状态,即励磁基本保持不变。转速 ω_r 除

在起制动接近期望值时有短时较小的抖振外,基本上使转速、励磁电流和转矩电流的抖振得到有效的抑制,即使负载突变时转速和励磁电流仍保持不变,说明系统的抗干扰能力较强。

当电机转子电阻 r_2 上升1.5倍额定值时,系统仍能保持较好的控制性能。起制动转速 ω_r 在接近最大转矩的作用下快速起动和制动,转速上升时间为 0.078s ,制动时间仅需 0.037s ,励磁电流 i_{1d} 上升时间极短,仅为 0.01s ,达到稳定后基本上保持稳定状态,即励磁基本保持不变,仅超测量较电机参数为额定值时大 2.7% 。转速 ω_r 除在起制动接近期望值时有短时较小的抖振外,基本上使转速、励磁电流和转矩电流的抖振得到有效的抑制,仅时间较电机参数为额定值时略长 0.024s ,负载突变时转速和励磁电流同样保持不变,说明系统有较强的抗干扰能力。

本文采用变结构模糊神经网络实现了感应电动机的解耦变结构控制,利用神经网络的信息分布存储和并行快速计算能力,实现了模糊控制规则的自动提取和存储,并实现了并行模糊推理,系统具有模糊控制有效地抑制系统抖振的特性。本控制系统具有较高的智能性和很好的鲁棒性,有自学习和自调整模糊规则的能力,系统的动静态性能较好,实现了感应电动机的快速和简单的控制。本研究尚存不足,如果模糊神经网络用软件来实现,则其并行模糊推理的速度会受影响,不能保证控制的实时性,采用硬件实现方法是今后研究的方向。

参考文献 (References)

- 1 邱焕耀,毛宗源.采用模糊控制的感应电动机解耦变结构系统的研究.自动化学报,1998,24(3):391-394
- 2 毛宗源,邱焕耀.感应电动机解耦变结构控制系统抖振和消除的研究.自动化学报,1994,20(2):169-176
- 3 毛宗源,邱焕耀,姚菁.解耦变结构交流速度控制系统的研究.控制理论与应用,1992,9(5):512-518
- 4 毛宗源,姚菁,邱焕耀.解耦变结构调速系统的研究.冶金自动化,1992,16(5):47-48
- 5 王隆杰,毛宗源.利用神经网络进行推理的模糊控制器.控制理论与应用,1994,11(4):508-512
- 6 Wang Lixing. Adaptive Fuzzy System and Control, Design and Stability Analysis. London: PTR Prentice Hall, Inc., 1994

本文作者简介

邱焕耀 1966年生,1992年在华南理工大学取得工学硕士学位,现在华南理工大学攻读博士学位,并任职于广州市联合通信总公司。研究兴趣是模糊控制,神经网络,变结构控制。

毛宗源 见本刊1999年第1期第20页。