

基于 DBFNN 的后推设计及其在电力系统励磁控制中的应用

时海涛,安冬

(中国科学院半导体研究所神经网络实验室,北京 100083)

摘要: 本文采用后推设计算法为一类严格反馈系统设计了基于方向基函数神经网络(DBFNN)的自适应控制器。在后推算法中的每一步都引入一积分型的 Lyapunov 函数来设计一个虚拟控制器,并在最后一步为闭环系统综合设计了神经网络控制器。网络权值的调整基于所选择的 Lyapunov 函数,于是设计方案能保证整个闭环系统是最终一致有界的。把所设计控制方案用于带有未知参数和外部干扰的电力系统励磁控制中。仿真结果表明了所设计控制器的有效性。

关键词: 非线性自适应; 方向基神经网络; 励磁控制; 后推算法; 最终一致有界

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2004) 11-1766-04

DBFNN Based BackStepping Design and Its Application in Power Systems

SHI Hai-tao ,AN Dong

(Artificial Neural Networks Laboratory, Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: For a class of strict feedback nonlinear system, a nonlinear adaptive controller was first investigated. The design procedure used backstepping method based on DBFNN (Direction Basis Neural Network). In each step of backstepping a virtual controller was designed by introducing a suitable Lyapunov function. In the last step the singular-free real controller was synthesized. The tuning law of NN weights was derived from the selected integral Lyapunov function. So the stability of the closed loop can be guaranteed. Then the proposed scheme was applied to design an excitation controller for one power system with unknown disturbance and unknown parameters. The simulation shows the validity of the proposed method.

Key words: nonlinear adaptive; DBFNN; excitation control; backstepping; UUB

1 引言

严格反馈 (Strict Feedback) 系统是一类特殊的非线性系统,其控制器可采用一种后推设计算法 (Backstepping) 来设计^[1,2]。很多含有不确定性的非线性系统经过状态变换都可以变为带有不确定性非线性的严格反馈系统标准型。这样就可以通过 Backstepping 设计方案对其进行控制器设计。对于 n 阶 SISO 严格反馈系统 (见本文第二部分),设计过程包括 n 步,每一步的设计均基于一个合适的 Lyapunov 函数,在最后一步就可为系统设计一个控制器。因为控制器的设计是基于 Lyapunov 函数的,所以能保证闭环系统的稳定性。

神经网络以其特有的对非线性函数逼近能力而为不确定非线性系统的辨识和控制提供了新颖的途径^[2-5]。文[2]基于多层前向网络,讨论了 SISO 严格反馈系统的神经网络自适应控制器设计。文[6,7]提出的方向基函数网络 (DBF) 是一种新型的前向网络,因其快速的收敛性和易于硬件实现而广泛用于模式识别、非线性优化和控制等领域中。本文基于 DBF 神经网络,对 n 阶 SISO 严格反馈系统进行自适应 Backstepping 设计。网络的权值基于选定的 Lyapunov 函数在线的调整,从而

保证所设计的闭环系统是 UUB 的。单机 - 无穷大输电的动态系统^[8]通过状态变换可以转化为带有不确定性的严格反馈形式。应用所设计的控制方案,对该输电系统设计自适应励磁控制器,仿真结果表明所设计的励磁控制系统不仅有良好的跟踪性能,并且能有效地抑制外部干扰。

2 问题的描述

考虑如下严格反馈非线性系统的控制问题:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i) x_{i+1}, \\ \dot{x}_n = f_n(x) + g_n(x) u \\ y = x_1 \end{cases} \quad 1 \leq i \leq n-1 \quad (1)$$

这里 $\bar{x}_i = [x_1, x_2, \dots, x_i]^T \in R^i$, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in R^n$, $u \in R$, $y \in R$ 分别为状态变量,控制输入,系统输出。 $f_i(\cdot)$, $g_i(\cdot)$ $i = 1, \dots, n$, 均为未知的光滑函数。目标是设计一控制器使得系统输出跟踪一参考输出 y_d 。

假设 1 存在常数 $g_0 > 0$ 和未知光滑函数 $\bar{g}_i(\bar{x}_i)$ 使得 $g_0 \leq |g_i(\bar{x}_i)| \leq \bar{g}_i(\bar{x}_i)$, $\forall x \in R^n$ 。不失一般性,考虑 $g_0 \leq g_i(\bar{x}_i) \leq \bar{g}_i(\bar{x}_i)$, $\forall x \in R^n$ 的情况。

定义期望轨迹信号如下: $\bar{x}_d^i = [y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(i)}]^T \in R^{i+1}$,

$i=0, \dots, n-1$.

假设 2 期望轨迹 $\bar{x}_{di}, i=0, \dots, n-1$ 是连续的,且 $\bar{x}_{di} \in R^{i+1}, \bar{x}_{di}$ 为已知紧集.

DBF 网络的某个神经元可以表示为^[6]: $s_i(Z) = \exp\left(-\frac{1 - \cos \frac{Z \cdot b_i}{2}}{2}\right)$, 其中 Z 为输入矢量, b_i 为中心矢量, Z, b_i 表示 Z 和 b_i 夹角. 当映射到单位超球面上时,具有 n 维输入空间的 DBF 等价于具有 $n-1$ 维输入空间的 RBF 的网络. 此时:

$$s(Z) = \exp\left(-\frac{(Z - b_i)^T (Z - b_i)}{2}\right)$$

由神经网络逼近函数的原理,对于任意连续的非线性函数 $h(Z): R^m \rightarrow R$, 可适当的选取 DBF 神经网络参数对其逼近:

$$h(Z) = W^* S(Z) + \mu \quad (2)$$

其中 $Z \in R^m, \|\mu\| \leq \bar{\mu}, \bar{\mu}$ 为一紧集, $\bar{\mu}$ 为正常数. $S(Z) = [1, s_1, \dots, s_m]^T, W^* = [w_0^*, w_1^*, \dots, w_m^*]$ 为输出层理想权值与阈值向量, w_0^* 为对应输出节点阈值. 用权值的估计值 W 代替理想权 W^* 值时,有逼近误差:

$$e = W^T S(Z) - W^{*T} S(Z) - \mu = \tilde{W}^T S(Z) - \mu \quad (3)$$

3 Strict-Feedback 系统设计

对于 n 阶系统 (1), 定义正定函数: $\bar{g}_i(x_i) = \bar{g}_i(x_i) / g_i(x_i), i=2, \dots, n, h_i(Z_i)$ 为 Z_i 的未知光滑函数,用 DRBF 神经网络逼近,则有: $h_i(Z_i) = W_i^* S_i(Z_i) + \mu_i, \forall Z_i \in \Omega_i, i=1, \dots, n$. 且假设网络估计误差:

$$\tilde{e}_i = W_i^T S_i(Z_i) - h_i(Z_i) = \tilde{W}_i^T S_i(Z_i) - \mu_i \quad (4)$$

对于 n 阶系统,后推设计包括 n 步,每一步都借助一个 Lyapunov 函数 V_{sk} 来得到一中间控制 z_k . 设计过程如下:

第一步 考虑方程 (1) 中 $i=1$ 时, $\dot{x}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1) z_2$, 通过把 z_2 看作虚拟控制并选择误差变量 $Z_2 = x_2 - z_1$, 其中:

$$z_1 = 1/g_1(x_1) [-k_1(t) z_1 - W_1^T S_1(Z_1)] \quad (5)$$

则: $\dot{z}_1 = f_1(x_1) + g_1(x_1) (z_2 + z_1) - \dot{y}_d$, 令 $V_{z_1} = \frac{1}{2} z_1^2 + y_d d$, 于是可得:

$$\dot{V}_{z_1} = z_1 [\bar{g}_1(x_1) (z_2 + z_1) + h_1(Z_1)] - k_1(t) z_1^2 - \dot{y}_d z_1 + \dot{y}_d d \quad (6)$$

$h_1(Z_1) = f_1(x_1) + g_1(x_1) z_2 - \dot{y}_d$ 这里定义: $Z_1 = [x_1 \ y_d \ \dot{y}_d]^T \in R^3, k_1(t) = \frac{1}{2} (1 + \frac{1}{2} \bar{g}_1(x_1) d)$, 并构造权值调整率如下:

$$\dot{W}_1 = w_1 [S_1 z_1 - w_1 W_1], \quad w_1 = \frac{T}{W_1} > 0, \quad w_1 > 0.$$

第二步 $i=2$ 时,得: $\dot{x}_2 = f_2(\bar{x}_2) + g_2(\bar{x}_2) z_3$ 同样把 z_3 看作虚拟控制,为式 (6) 设计 z_2 , 令 $z_3 = x_3 - z_2$, 则:

$$z_2 = \dot{x}_2 - \dot{z}_1 = f_2(\bar{x}_2) + g_2(\bar{x}_2) (z_3 + z_2) - \dot{z}_1 \quad (8)$$

选择一个正定函数: $V_{s2} = V_{z_1} + \frac{1}{2} z_2^2(x_1, z_2) d$, 其时

间的导数为:

$$\dot{V}_{s2} = \dot{V}_{z_1} + z_2 \frac{\partial}{\partial x_1} z_2 + \frac{\partial}{\partial x_1} z_2(x_1, z_2) z_1 + \frac{\partial}{\partial x_1} z_2(x_1, z_2) z_1 d \quad (9)$$

由

$$(1) \quad \dot{z}_2 = \frac{\partial}{\partial x_1} z_2(x_1, z_2) z_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} z_2(x_1, z_2) z_3 + \frac{\partial}{\partial x_1} z_2(x_1, z_2) z_1 d \quad (10a)$$

$$(2) \quad \dot{z}_1 = \frac{\partial}{\partial x_1} z_1 + \frac{\partial}{\partial x_{d1}} z_1 + \frac{\partial}{\partial W_1} z_1 \quad (10b)$$

则:

$$\dot{V}_{s2} = -k_1(t) z_1^2 - z_1 z_2 + z_1 g_1(\bar{x}_1) z_2 + z_2 [g_2(\bar{x}_2) (z_3 + z_2) + h_2(Z_2)] \quad (11)$$

$$h_2(Z_2) = \frac{\partial}{\partial x_1} z_2(x_1, z_2) z_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} z_2(x_1, z_2) z_3 + \frac{\partial}{\partial x_1} z_2(x_1, z_2) z_1 d \quad (12)$$

$Z_2 = [z_2^T, z_1, \frac{\partial}{\partial x_1} z_1, \frac{\partial}{\partial x_{d1}} z_1]^T \in R^5$, 现在选择控制:

$$z_2 = \frac{1}{g_2(\bar{x}_2)} [-g_1(\bar{x}_1) z_1 - k_2(t) z_2 - W_2^T S_2(Z_2)]$$
 这里, $k_2(t) = \frac{1}{2} (1 + \frac{1}{2} \bar{g}_2(x_1, z_2) d), k_2 > 0$. 网络权值如下调整:

$$\dot{W}_2 = w_2 [S_2 z_2 - w_2 W_2], \quad w_2 = \frac{T}{W_2} > 0, \quad w_2 > 0 \quad (13)$$

则利用上面的控制器且根据式 (12) 得:

$$\dot{V}_{s2} = - [k_j(t) z_j^2 + z_j z_{j+1}] + z_{j-1} \bar{g}_j(\bar{x}_j) z_j \quad (14)$$

第 k 步 $i=k$ 时, $3 \leq k \leq n-1, \dot{x}_k = f_k(\bar{x}_k) + g_k(\bar{x}_k) z_{k+1}$

$V_{sk} = V_{s(k-1)} + \frac{1}{2} z_k^2(\bar{x}_{k-1}, z_{k-1}) d$, 同样可构造控制函数 z_k 和权值调整率:

$$z_k = \frac{1}{g_k(\bar{x}_k)} [-g_{k-1}(\bar{x}_{k-1}) z_{k-1} - k_k(t) z_k - W_k^T S_k(Z_k)] \quad (15)$$

$$\dot{W}_k = w_k [S_k z_k - w_k W_k], \quad w_k = \frac{T}{W_k} > 0 \quad (16)$$

可得: $V_{sk} = - [k_j(t) z_j^2 + z_j z_{j+1}] + z_{j-1} \bar{g}_j(\bar{x}_j) z_j$.

第 n 步 考虑 $z_n = x_n - z_{n-1}$, 则有: $\dot{z}_n = \dot{x}_n - \dot{z}_{n-1} = f_n(x) + g_n(x) z_{n+1} - \dot{z}_{n-1}$, 取以下的 Lyapunov 函数:

$$V_{sn} = V_{s(n-1)} + \frac{1}{2} z_n^2(\bar{x}_{n-1}, z_{n-1}) d \quad (17)$$

其对时间的导数:

$$\dot{V}_{sn} = \dot{V}_{s(n-1)} + z_n \frac{\partial}{\partial x_n} z_n + \frac{\partial}{\partial x_{n-1}} z_n(x_{n-1}, z_{n-1}) \dot{x}_{n-1} + \frac{\partial}{\partial W_{n-1}} z_n(x_{n-1}, z_{n-1}) \dot{W}_{n-1} \quad (18)$$

$$\dot{x}_{n-1} = \frac{\partial}{\partial x_j} z_{n-1} z_j + \dot{z}_{n-1} = \frac{\partial}{\partial x_j} z_{n-1} z_j + \frac{\partial}{\partial x_j} z_{n-1} z_j + \frac{\partial}{\partial x_j} z_{n-1} z_j \quad (19)$$

$$\dot{z}_{n-1} = \frac{\partial}{\partial x_{dj}} z_{n-1} z_{dj} + \frac{\partial}{\partial W_j} z_{n-1} z_{dj} \quad (20)$$

其中: $\dot{W}_j, j=1, \dots, n-1$ 由前 $n-1$ 步设定. 则根据第二步的

式(9)~(11)得:

$$\dot{V}_{sn} = - \sum_{j=1}^{n-1} [k_j(t) z_j^2 + jz_j] + z_{n-1} \bar{g}_{n-1}(\bar{x}_{n-1}) z_n + z_n [\bar{g}_n(x) u + h_n(Z_n)] \quad (21)$$

这里,

$$h_n(n) = \frac{1}{n} \frac{\partial_n(x_{n-1}, z_n + z_{n-1})}{\partial x_{n-1}} \cdot x_{n-1} d \quad (22)$$

$Z_n = [x_n^T, \dots, z_n^T]^T, Z_n \in R^{2n+1}$ 现在选择如下的控制器:

$$U = \frac{1}{g_n(x)} [- \bar{g}_{n-1}(\bar{x}_{n-1}) z_{n-1} - k_n(t) z_n - W_n^T S_n(Z_n)] \quad (23)$$

$$k_n(t) = \frac{1}{n} (1 + \frac{1}{g_n(\bar{x}_{n-1}, z_n + z_{n-1})} d), n > 0 \quad (24)$$

$$\dot{W}_n = W_n [S_n(Z_n) z_n - W_n^T \dot{W}_n], W_n = \frac{T}{W_n} > 0 \quad (25)$$

$$\text{则最后得: } \dot{V}_{sn} = - \sum_{j=1}^{n-1} [k_j(t) z_j^2 + jz_j] \quad (26)$$

令: $V_s = V_{sn} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n W_i^T W_i$, 有如下定理.

定理 1 对于满足假设(1)的系统(1)如果按式(23)~(25)来设计控制器则:

(1) 在有界的初始条件下, 闭环系统的所有信号都是最终一致有界的, Z_j 限制在下面的紧集:

$$Z_j = \{ Z_j | \sum_{i=1}^n z_i^2(t) \leq c_0, \tilde{W}_i^2 \leq \frac{c_0}{\min(w_i)}, x_{dj} \} \quad (27)$$

(2) 有下面的不等式成立:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{j=1}^n z_j^2 \leq \frac{2}{1+g_0} c_i \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n z_i^2(t) \leq 2V_s(0) e^{-s t} + \frac{2}{s} c_i, \forall t > 0 \quad (29)$$

其中 $c_i, V_s(0), s$ 为正的常数. 分析方法类似文[2]中定理 4.1.

4 电力系统的励磁控制

考虑如下的具有励磁控制的单机-无穷大输电系统的鲁棒模型^[8]:

$$\begin{cases} \dot{\delta}(t) = \omega(t) - \omega_0 \\ \dot{\omega}(t) = \frac{1}{M} P_m - \frac{D}{M} (\omega(t) - \omega_0) - \frac{1}{Mx_d} E_q(t) V_s \sin(\delta(t) + \alpha) \\ \dot{E}_q(t) = \frac{1}{T_d} E_q(t) + \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x_d'}{x_d \Sigma} V_s \cos(\delta(t) + \alpha) + \frac{1}{T_{d0}} V_f(t) + u \end{cases} \quad (30)$$

这里, $\delta(t)$ 为发电机转子运行角(弧度), $\omega(t)$ 为发电机转子角速度(rad/s), $\omega_0 = 2\pi f_0, f_0$ 为额定频率, $E_q(t)$ 为 q 轴暂态电抗 x_d' 后的电势, $V_f(t)$ 为励磁绕组电压(控制变量), M 为发电机转子的转动惯量(s), D 为阻尼系数, V_s 为无穷大系统的电压幅值, T_{d0} 和 T_d 分别为发电机励磁绕组的时间常

数和定子绕组闭路时励磁绕组的时间常数(s), x_d 为定子绕组的自感抗, x_d' 为定子绕组的暂态感抗, x_T 为变压器电抗, x_L 输电线电抗, P_m 为机械功率, P_e 为发电机输出的有功功率, α_1, α_2 为干扰. 在此假设 $P_m = P_{m0}$ 且与初始有功功率 P_{e0} 相等, 即: $P_{e0} = E_{q0} V_s \sin \alpha_0 / x_{d\Sigma}$.

令: $x_1 = \delta, x_2 = \omega, x_3 = E_q - E_{q0}$, 则^[3]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = d_1 x_2 + d_2 x_3 + d_3 (x_3 + x_{30}) (\sin \alpha_0 - \sin(\alpha_0 + x_1)) + \alpha_1 \\ \dot{x}_3 = d_4 x_3 + d_5 \cos(\alpha_1 + \alpha_0) - d_5 \cos \alpha_0 + d_6 u + \alpha_2 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (31)$$

其中: $u = V_f - V_{f0}, d_1 = -\frac{D}{M}, d_2 = -\frac{1}{Mx_{d\Sigma}} \sin \alpha_0, d_3 = \frac{1}{Mx_{d\Sigma}}$,

$x_{30} = E_{q0}, d_4 = -\frac{1}{T_d}, d_5 = \frac{1}{T_{d0}} \frac{x_d - x_d'}{x_d \Sigma} V_s, d_6 = -\frac{1}{T_{d0}}, x_{d\Sigma} = x_d$

$+ x_T + x_L, x_{d\Sigma} = x_d + x_T + x_L, P_e = E_q V_s \sin \alpha / x_{d\Sigma}, T_d = \frac{x_d}{x_{d0}}$

T_{d0} . 各参数具体取值见文^[3]

结合第 3 部分的控制器设计, 为上面的三阶电力系统设计一自适应励磁控制器:

$$u = - \bar{g}_2 z_2 - k_3(t) z_3 - W_3^T S_3(Z_3) \quad (32)$$

$$z_1 = [- k_1(t) z_1 - W_1^T S_1(Z_1)] / \bar{g}_1,$$

$$z_2 = [- \bar{g}_1 z_1 - k_2(t) z_2 - W_2^T S_2(Z_2)] / \bar{g}_2 \quad (33)$$

这里 $z_1 = x_1 - y_d, z_2 = x_2 - \dot{y}_d, z_3 = x_3 - \ddot{y}_d, k_1(t) = 2.4, k_2(t) = 1.9, k_3(t) = 2.6, \bar{g}_1 = 1.0, \bar{g}_2 = 0.01, \bar{g}_3 = -0.12$. 三个网络隐含层节点数分别为 8, 16, 25. 权值初始化为 0, 调整率根据式(16).

仿真结果如下:

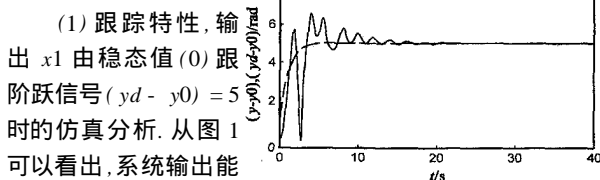


图 1 输出跟踪阶跃信号

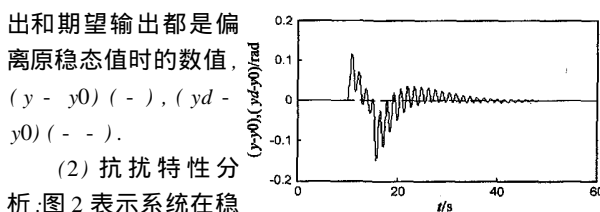


图 2 干扰 α_1, α_2 对系统输出影响

(1) 跟踪特性, 输出 x_1 由稳态值(0)跟踪阶跃信号 $(y_d - y_0) = 5$ 时的仿真分析. 从图 1 可以看出, 系统输出能很好地跟踪期望的阶跃信号. 图中的系统输出和期望输出都是偏离原稳态值时的数值, $(y - y_0) / (y_0), (y_d - y_0) / (y_0)$.

(2) 抗扰特性分析: 图 2 表示系统在稳态值时系统运行到 10 秒~15 秒间干扰 α_1 和 α_2 对系统输出的影响. 从系统输出对干扰的响应曲线可以看出, 闭环系统有良好的干扰抑制能力.

5 结论

本文基于 DBF 神经网络讨论了 SISO 非线性严格反馈系统采用 Backstpping(后推算法)设计自适应跟踪控制器的问

题,网络权值的调整基于引入的一种 Lyapunov 函数,从而保证闭环系统的信号是最终一致有界的.电力系统的复杂非线性建模的不确定性以及未知的干扰都给其控制器的设计带来了困难.本文把设计的控制方案用于一个单机-无穷大励磁控制输电系统中.仿真结果表明所设计的闭环系统具有良好的跟踪性能,且对干扰有良好的抑制作用.

参考文献:

- [1] Lu Qiang, Mei Shengwei, et al. Backstepping design of nonlinear infinity excitation controller[J]. Science In China, Series E 2000, 30(1): 69 - 78.
- [2] T Zhang, S S Ge, C C Hang. Adaptive neural network control for strict feedback nonlinear systems using backstepping design[J]. Automatica 2000, 36(12): 1835 - 1846.
- [3] Hunt K, Sbarbaro J D, Zbikowski R, Gawthrop P J. Neural networks for control systems—a survey[J]. Automatic, 1992, 28(6): 1083 - 1112.
- [4] M J Wills, G A Montague, et al. Artificial neural networks in process estimation and control[J]. Automatica, 1992, 28(6): 1181 - 1187.
- [5] Cao Wenning, Fenghao, Wang Shoujue. An adaptive controller for a class of nonlinear system using direction basis function[J]. Chinese

Journal of Electronics, 2002, 11(3): 303 - 306.

- [6] Wang Shoujue, Shi Jingpu. Direction basis function networks[A]. Paper # 58, IJCNN '98[C]. Washington, DC, 1998. 112-116.
- [7] CAO Wenming, FENG Hao, et al. Approximation with direction basis function neural networks[A]. Proceedings of IEEE TENCON '02[C]. Beijing, China, 2002. 1290 - 1293.
- [8] Lu Qiang, Sun Yuanzhang. Decentralized nonlinear optimal excitation control[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(4): 1957 - 1962.

作者简介:



时海涛 男, 1977 年 10 月出生于山东单县, 博士生, 主要研究方向基于神经网络的非线性动态优化, 神经网络非线性控制及模式识别等.

安冬女, 1977 年 1 月生于河北省石家庄市, 博士生, 主要研究方向为模式识别、人工神经网络、信号处理.