第 24 卷 第 3 期 控 制 与 决 策 2009 年 3 月
Vol. 24 No. 3 Control and Decision Mar. 2009

文章编号: 1001-0920(2009)03-0408-05

基于全调节 RBF 神经网络的远程网络控制器设计

李 静[a], 左 斌[b], 胡云安[b]
(海军航空工程学院 a. 战略导弹工程系, b. 控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘 要: 针对一类具有参数不确定项的非线性网络控制系统,提出一种基于全调节 RBF 神经网络的反馈线性化与远程状态反馈控制方法相结合的控制策略. 该控制策略首先通过设计全调节 RBF 神经网络的权值 W,中心值 ϕ 和影响范围 σ 的调节律,在线补偿系统的非线性及参数不确定项;然后利用状态反馈控制解决时延条件下的网络控制问题. 通过 Lyapunov 稳定性理论给出了系统的稳定性定理,并通过仿真实验验证了该方法的有效性.

关键词: 网络控制系统; RBF 神经网络; Lyapunov 稳定性; 参数不确定性
中图分类号: TP183 **文献标识码**: A

Remote network controller design based on fully tuned RBF neural networks

LI Jing[a], *ZUO Bin*[b], *HU Yun-an*[b]
(a. Department of Strategic Missile Engineering, b. Department of Control Engineering, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China. Correspondent: LI Jing, E-mail: lijing19772006@yahoo.com.cn)

Abstract: For a class of networked control systems (NCS) with parameter uncertainty and nonlinearities, a control strategy is presented, which is based on fully tuned radial basis function (RBF) neural networks feedback linearization and remote state feedback control. Firstly, the weight W, center value ϕ and incidence σ of the fully tuned RBF neural networks are designed to compensate the nonlinearity terms and parameter uncertainty terms. Then the state feedback control is utilized to the NCS with time-delay, and the stability of NCS is effectively guaranteed by Lyapunov stability theory. Finally, simulation results show the effectiveness of this method.

Key words: Networked control systems; RBF neural network; Lyapunov stability; Parameter uncertainty

1 引 言

网络控制系统(NCS)是指利用通讯网络代替传统的点对点连接方式而构成的闭环控制系统,它是控制科学、计算机网络与通讯技术相结合的产物[1-3]. 目前,NCS 已成为控制领域的研究热点之一. 与点对点的控制模式相比,这种网络化的控制模式具有信息资源共享、连线大大减少、易于扩展和维护、高效和灵活等优点[4,5]. 然而,网络控制也存在明显的缺点:由于信息的传输采用分时发送,待发送的信息只有取得网络使用权后才能发送,因而不可避免地导致传输时延,而且该时延随着网络负载的变化而变化,具有不确定性,使得网络控制系统的分析和设计变得较为复杂. 在时延存在的情况下,如何设计出满足要求的网络控制器,便成为一个重要且亟待解决的问题.

网络环境下的新型控制系统不仅在复杂的工业控制领域应用广泛,而且在航空航天、机器人系统等具有很强的应用背景[5,6]. 目前,NCS 的研究对象多为线性系统[1-3,7-11]. 本文则以网络环境中一类具有参数不确定项的非线性系统为研究对象,运用全调节 RBF 神经网络和状态反馈控制,解决了时延条件下的网络控制问题,并用 Lyapunov 稳定性理论推导出系统的稳定性定理. 最后通过仿真结果对比验证了该方法的有效性.

2 理论基础 ——全调节 RBF 神经网络

RBF 神经网络是一种典型的局部逼近网络. 文献[12]提出了其改进型,在参数调节律的实现上采用了梯度优化算法,但是基于优化算法的设计并不

收稿日期: 2008-01-14; **修回日期**: 2008-05-07.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60674090).
作者简介: 李静 (1977 —),女,山东荣成人,博士生,从事网络控制、智能控制的研究; 胡云安(1966 —),男,湖北松滋人,教授,博士生导师,从事非线性控制、智能控制等研究.

能保证整个系统的稳定性[13].

本文的一个新颖之处在于:采用不同于普通设计的全调节 RBF 神经网络,处理非线性参数的不确定性,从而提高了神经网络的在线逼近能力.所谓全调节 RBF 神经网络,就是不仅调节 RBF 神经网络的权值,而且调节中心点值和影响范围.因此全调节 RBF 神经网络比一般 RBF 神经网络具有更强的在线逼近能力.

假设 1　对于任意一个函数矢量 $\Delta f:\Omega\to R^r$ (Ω 是属于 R^n 的一个紧子集),总能找到一个最优高斯基函数矢量 $\phi^*: R^n\to R^l$ 和一个最优权重矩阵 $W^*\in R^{l\times r}$,以任意精度 $\varepsilon=[\varepsilon_1,\varepsilon_2,\cdots,\varepsilon_r]^T>0$ 逼近它.即

$$\Delta f = W^{*T}\phi^* + \varepsilon,\quad \forall x\in\Omega. \tag{1}$$

其中

$$\phi^*=[\exp(-\|\zeta-\mu_1^*\|^2/\sigma_1^{*2}),\cdots,\exp(-\|\zeta-\mu_l^*\|^2/\sigma_l^{*2})]^T,$$

μ_i^* 为最优中心点,σ_i^* 为最优影响范围,l 为隐层节点数,$\zeta\in R^n$ 为 RBF 神经网络输入向量,ε为网络重构误差.

如果 Δf 未知,则系统设计中最优值 $W^*,\phi^*,\mu_i^*,\sigma_i^*$ 是得不到的,即最优值只有分析价值而没有应用价值.实际应用中,采用的是这些值的估计值,分别为 W,ϕ,μ_i,σ_i,它们可通过自适应调节律进行调整.这样,最优值与估计值之间的差异会对控制系统造成一定的影响.

下面将这些影响以引理 1 的形式给出.该引理在推导神经网络参数调节律时将起到重要作用.

引理 1　定义 $\overline{W}=W-W^*,\tilde\phi=\phi-\phi^*,\tilde\mu_i=\mu_i-\mu_i^*,\tilde\sigma_i=\sigma_i-\sigma_i^*,i=1,2,\cdots,l$,则全调节 RBF 网络逼近输出误差为

$$W^T\phi - W^{*T}\phi^* = \overline{W}^T(\phi-\phi_\mu\mu-\phi_\sigma\sigma) + W^T(\phi_\mu\tilde\mu+\phi_\sigma\tilde\sigma)+d_u,$$

其中残留项 d_u 的上界为

$$\|d_u\|\le \|\mu^*\|\|W^T\phi_\mu'\| + \|\sigma^*\|\|W^T\phi_\sigma'\| + \|W^{*T}\|\|\phi_\mu\mu\| + \|W^{*T}\|\|\phi_\sigma\sigma\| + \sqrt{l}\|W^{*T}\|. \tag{2}$$

上式各项的表达式为

$$\phi_\mu' \triangleq [\partial(\phi_1)/\partial\mu_1 \cdots \partial(\phi_l)/\partial\mu_l]^T,$$
$$\phi_\sigma' \triangleq [\partial(\phi_1)/\partial\sigma_1\cdots\partial(\phi_l)/\partial\sigma_l]^T,$$
$$\phi_\mu\mu \triangleq [(\partial(\phi_1)/\partial\mu_1^T)\mu_1 \cdots (\partial(\phi_l)/\partial\mu_l^T)\mu_l]^T,$$
$$\phi_\sigma\sigma \triangleq [(\partial(\phi_1)/\partial\sigma_1)\sigma_1\cdots(\partial(\phi_l)/\partial\sigma_l)\sigma_l]^T,$$
$$\phi_\mu\tilde\mu \triangleq [(\partial(\phi_1)/\partial\mu_1^T)\tilde\mu_1 \cdots (\partial(\phi_l)/\partial\mu_l^T)\tilde\mu_l]^T,$$
$$\phi_\sigma\tilde\sigma \triangleq [(\partial(\phi_1)/\partial\sigma_1)\tilde\sigma_1\cdots(\partial(\phi_l)/\partial\sigma_l)\tilde\sigma_l]^T.$$

证明　将 ϕ^* 在 (μ,σ) 附近泰勒级数展开,得

$$\phi^*=\phi-\phi_\mu\tilde\mu-\phi_\sigma\tilde\sigma-o(\tilde\mu)-o(\tilde\sigma),$$

其中 $o(\tilde\mu)$ 和 $o(\tilde\sigma)$ 分别为 $\tilde\mu$ 和 $\tilde\sigma$ 的高阶项.故有

$$\begin{aligned}W^T\phi-W^{*T}\phi^*&=\overline W^T\phi+W^{*T}(\phi-\phi^*)=\\&\overline W^T\phi+W^T(\phi_\mu\tilde\mu+\phi_\sigma\tilde\sigma)-\overline W^T(\phi_\mu\tilde\mu+\\&\phi_\sigma\tilde\sigma)+W^{*T}(o(\tilde\mu)+o(\tilde\sigma))=\\&\overline W^T(\phi-\phi_\mu\mu-\phi_\sigma\sigma)+W^T(\phi_\mu\tilde\mu+\phi_\sigma\tilde\sigma)+d_u.\end{aligned}$$

由上式知

$$d_u=W^T(\phi_\mu\mu^*+\phi_\sigma\sigma^*)-W^{*T}(\phi_\mu\mu+\phi_\sigma\sigma)+W^{*T}(\phi-\phi^*).$$

对残留项 d_u 两端同时取范数,便可得到式(2). □

注 1　证明中用到了 $\|\phi-\phi^*\|\le\sqrt{l}$,由 ϕ^* 和 ϕ 的定义很容易得出.

3 基于全调节 RBF 神经网络的远程网络控制器设计及稳定性分析

考虑如下多输入多输出具有参数不确定项的非线性系统:

$$\dot x=f(x)+b(x)u,\quad y=C^Tx. \tag{3}$$

其中:$x\in R^n$, $y\in R^m$, $u\in R^r$ 分别为系统的状态量、输出量和输入量.在实际系统中,令

$$f(x)=f_0(x)+\Delta f(x),$$
$$b(x)=b_0(x)+\Delta b(x).$$

式中:$f_0(x)\in R^n$ 和 $b_0(x)\in R^{n\times r}$ 表示标称系统的参数,且满足 $\mathrm{rank}(b_0)=n$;$\Delta f(x)$ 和 $\Delta b(x)$ 表示系统存在的不确定项.

具有参数不确定项的非线性网络控制系统结构如图 1 所示.

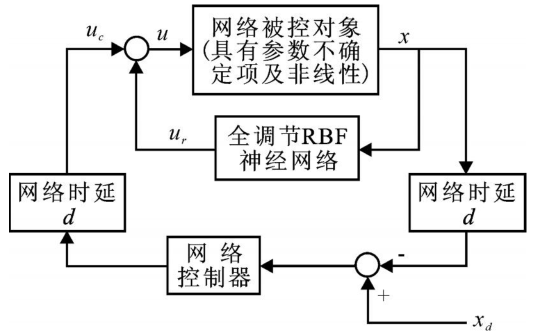

图 1　具有参数不确定项的非线性网络控制系统

假设 2　系统的输入通道和输出通道中存在的时延 $d(t)$ 是时变的,且满足 $d(t)\le d_m<1$.

于是,系统(2)的状态方程可转变为

$$\dot x=f_0(x)+b_0(x)u+\Delta, \tag{4}$$

其中 $\Delta=(\Delta f(x)+\Delta b(x)u)$ 为系统参数不确定项.

选择维数适当的正定矩阵 A_m,对于任意给定的正定对称矩阵 Q,存在唯一的正定对称矩阵 P,满足 Lyapunov 方程 $A_m^TP+PA_m=Q$.于是,式(4)可改写为

$$\dot{x} = -A_m x + b_0(x)u + [A_m x + f_0(x) + \Delta]. \tag{5}$$

根据文献[14]中引理 4.2 可知,采用全调节 RBF 神经网络可抵消系统的非线性项和不确定项 $A_m x + f_0(x) + \Delta$,即使不确定项 Δ 中包含控制输入 u. 由假设 1 中条件(1),式(5)可表示为

$$\dot{x} = -A_m x + b_0(x)u + (W^{*T}\phi^*(x) + \varepsilon). \tag{6}$$

为进行系统的非线性补偿,设系统控制输入为

$$u_r(t) = b_0^+(x)u_c(t-d(t)) - b_0^+(x)[W^T\phi(x) - v]. \tag{7}$$

其中:v 为引入的鲁棒项,$u_c(t-d(t))$ 为远程控制器输出 $u_c(t)$ 在时间上的滞后. 式(7)代入式(6),可得

$$\dot{x} = -A_m x + u_c(t-d(t)) - \overline{W}^T\tilde{\phi}(x) + v + \varepsilon. \tag{8}$$

以下讨论系统(8)的稳定性. 选取 Lyapunov 函数

$$V = x^T P x + \frac{1}{1-d_m}\int_{t-d(t)}^{t} x^T(\tau)Px(\tau)\,d\tau + \mathrm{tr}[\overline{W}^T\Gamma_W^{-1}\overline{W}] + \sum_{i=1}^{l}(\tilde{\mu}_i^T\Gamma_\mu^{-1}\tilde{\mu}_i) + \sum_{i=1}^{l}(\Gamma_\sigma^{-1}\tilde{\sigma}_i^2). \tag{9}$$

其中:$\Gamma_W = \Gamma_W^T > 0$, $\Gamma_\mu = \Gamma_\mu^T > 0$, $\Gamma_\sigma > 0$ 为设计参数,取值为较小的正定对称矩阵. 对 Lyapunov 函数 V 求时间导数,可得

$$\dot{V} = x^T P\dot{x} + \dot{x}^T Px + 2\mathrm{tr}[\overline{W}^T\Gamma_W^{-1}\dot{\overline{W}}] + 2\sum_{i=1}^{l}(\tilde{\mu}_i^T\Gamma_\mu^{-1}\dot{\tilde{\mu}}_i) + 2\sum_{i=1}^{l}(\Gamma_\sigma^{-1}\tilde{\sigma}_i\dot{\tilde{\sigma}}_i) + \frac{1}{1-d_m}x^T(t)Px(t) - \frac{1-\dot{d}(t)}{1-d_m}x^T(t-d(t))Px(t-d(t)). \tag{10}$$

远程控制器采用带时延的状态反馈控制律,其形式为

$$u_c(t-d(t)) = Kx(t-d(t)). \tag{11}$$

将式(8)和(11)代入式(10),并用下列不等式条件:

$$[x(t) - Kx(t-d(t))]^T P \times [x(t) - Kx(t-d(t))] \geq 0 \Rightarrow$$
$$x^T(t-d(t))K^T Px(t) + x^T(t)PKx(t-d(t)) \leq x^T(t)Px(t) + x^T(t-d(t))K^T PKx(t-d(t)),$$

可得

$$\dot{V} \leq x^T\left(-Q + P + \frac{P}{1-d_m}\right)x + x^T(t-d(t))\left(K^T PK - \frac{1-\dot{d}(t)}{1-d_m}P\right)x(t-d(t)) - x^T P\overline{W}^T\tilde{\phi}(x) + x^T Pv + x^T P\varepsilon - \tilde{\phi}^T(x)\overline{W}Px + v^T Px + \varepsilon^T Px + 2\mathrm{tr}[\overline{W}^T\Gamma_W^{-1}\dot{\overline{W}}] + 2\sum_{i=1}^{l}(\tilde{\mu}_i^T\Gamma_\mu^{-1}\dot{\tilde{\mu}}_i) + 2\sum_{i=1}^{l}(\Gamma_\sigma^{-1}\tilde{\sigma}_i\dot{\tilde{\sigma}}_i). \tag{12}$$

根据引理 1,得

$$x^T P\overline{W}^T\tilde{\phi} = x^T P\overline{W}^T(\phi - \phi_\mu\mu - \phi_\sigma\sigma) + x^T PW^T(\phi_\mu\tilde{\mu} + \phi_\sigma\tilde{\sigma}) + x^T Pd_u. \tag{13}$$

选择 RBF 神经网络参数自适应调节律

$$\dot{W} = \Gamma_W(\phi - \phi_\mu\mu - \phi_\sigma\sigma)Px^T - \Gamma_W\delta_W W, \tag{14}$$

$$\dot{\mu}_i = \Gamma_\mu\phi'_{\mu_i}(WPx)_i - \Gamma_\mu\delta_\mu\mu_i, \tag{15}$$

$$\dot{\sigma}_i = \Gamma_\sigma\phi'_{\sigma_i}(WPx)_i - \Gamma_\sigma\delta_\sigma\sigma_i. \tag{16}$$

其中:$\delta_W, \delta_\mu, \delta_\sigma > 0$ 为设计参数,取值较小;$\phi'_{\mu_i}, \phi'_{\sigma_i}$ 和 $(WPx)_i$ 分别表示 ϕ'_μ, ϕ'_σ 和 WPx 的第 i 行向量. 令引入的鲁棒项为

$$v = [-P^T x(\|W^T\phi'_\mu\|^2 + \|W^T\phi'_\sigma\|^2 + \|\phi_\mu\mu\|^2 + \|\phi_\sigma\sigma\|^2)/\eta] - \frac{P^T x}{2}\|x\|^{-2}\|P\|^{-2}\Big[\left(\frac{\eta}{2} + \delta_\mu\right)\|\mu^*\|^2 + \left(\frac{\eta}{2} + \delta_\sigma\right)\|\sigma^*\| + (\eta + l\eta/2 + \delta_W)\|W^*\|^2 + 4\|x\|^2\|P\|^2/\eta + \eta\varepsilon_H^2/2\Big], \tag{17}$$

其中 $\eta > 0$ 为一个小常数. 利用 $\dot{\overline{W}} = \dot{W}$, $\dot{\tilde{\mu}}_i = \dot{\mu}_i$, $\dot{\tilde{\sigma}}_i = \dot{\sigma}_i$,由引理 1 可知残留项 d_u 的上界. 令 $\|\varepsilon\| \leq \varepsilon_H$,利用如下不等式条件:

$$-x^T Pd_u - (x^T Pd_u)^T \leq 2\|x\|\|P\|\|d_u\|,$$
$$\|x\|\|P\|\|\mu^*\|\|W^T\phi'_\mu\| \leq \|x\|^2\|P\|^2\|W^T\phi'_\mu\|^2/\eta + \eta\|\mu^*\|^2/4,$$
$$\|x\|\|P\|\|\sigma^*\|\|W^T\phi'_\sigma\| \leq \|x\|^2\|P\|^2\|W^T\phi'_\sigma\|^2/\eta + \eta\|\sigma^*\|^2/4,$$
$$\|x\|\|P\|\|W^{*T}\|\|\phi_\mu\mu\| \leq \|x\|^2\|P\|^2\|\phi_\mu\mu\|^2/\eta + \eta\|W^{*T}\|^2/4,$$
$$\|x\|\|P\|\|W^{*T}\|\|\phi_\sigma\sigma\| \leq \|x\|^2\|P\|^2\|\phi_\sigma\sigma\|^2/\eta + \eta\|W^{*T}\|^2/4,$$
$$\|x\|\|P\|(\sqrt{l}\|W^{*T}\| + \varepsilon_H) \leq 2\|x\|^2\|P\|^2/\eta + l\eta\|W^{*T}\|^2/4 + \eta\varepsilon_H^2/4.$$

注意到

$$2\mathrm{tr}(\overline{W}^T W) \geq \|\overline{W}\|^2 - \|W^*\|^2,$$
$$2\sum_{i=1}^{l}\tilde{\mu}_i^T\mu_i \geq \sum_{i=1}^{l}(\|\tilde{\mu}_i\|^2 - \|\mu_i^*\|^2),$$
$$2\sum_{i=1}^{l}\tilde{\sigma}_i\sigma_i \geq \sum_{i=1}^{l}(\tilde{\sigma}_i^2 - \sigma_i^{*2}).$$

将式(13)~(17)代入式(12),可得

$$\dot V \le x^T\left(-Q+P+\frac{P}{1-d_m}\right)x + x^T(t-d(t))\left(K^T PK - \frac{1-\dot d(t)}{1-d_m}P\right)x(t-d(t)) - \delta_W\|\overline{W}\|^2 - \delta_\mu\|\tilde{\mu}_i\|^2 - \delta_\sigma\tilde{\sigma}_i^2. \quad (18)$$

令

$$L_1 = -Q+P+\frac{P}{1-d_m},$$

$$L_2 = K^T PK - \frac{1-\dot d(t)}{1-d_m}P.$$

如果 $\mathrm{Re}[\lambda_i(L_1)] < 0$ 且 $\mathrm{Re}[\lambda_i(L_2)] < 0$,则有 $\dot V < 0$,即系统(8) 渐近稳定. 因此可得如下定理:

定理 1　在假设 1,假设 2 及引理 1 的前提下,系统(3) 可转化为具有时延的闭环控制系统(8). 如果全调节 RBF 神经网络各参数调节律采用式(14) ~ (16) 的形式,并且选择远程控制器的反馈增益矩阵 K,对于任意给定的正定对称阵 Q,存在唯一的正定对称阵 P,使得矩阵

$$L_1 = -Q+P+P/(1-d_m),$$

$$L_2 = K^T PK - (1-\dot d(t))P/(1-d_m).$$

满足 $\mathrm{Re}[\lambda_i(L_1)] < 0$ 且 $\mathrm{Re}[\lambda_i(L_2)] < 0$,则系统(8) 渐近稳定.

注 2　设计参数 $\Gamma_W, \Gamma_\mu, \Gamma_\sigma$ 的选取必须适当,取值太小,将导致系统的收敛速度变慢;取值太大,可能使系统的收敛误差增大.

注 3　设计参数 $\delta_W, \delta_\mu, \delta_\sigma$ 的选取也应适当,取值过小,将缩小系统的稳定域;取值过大,所设计的 RBF 神经网络不能很好地补偿参数不确定项及非线性项.

注 4　$\Gamma_W, \Gamma_\mu, \Gamma_\sigma$ 和 $\delta_W, \delta_\mu, \delta_\sigma$ 的选取应结合具体系统,进行多次仿真来确定.

4　仿真分析

考虑具有参数不确定项的二阶非线性时变系统的状态方程

$$\begin{bmatrix}\dot x_1\\ \dot x_2\end{bmatrix} = A(x) + Bu + \Delta A\begin{bmatrix}x_1\\ x_2\end{bmatrix} + \Delta Bu.$$

其中

$$A(x) = \begin{bmatrix}0 & x_2\cos(2t)\\ 2x_1\sin(t) & 0.5x_2+\sin(5t)\end{bmatrix}$$

和 $B = [0 \quad 0.5]^T$ 表示标称系统的参数,ΔA 和 ΔB 表示系统存在的不确定项. 系统的采样周期为 $T = 10\,\mathrm{ms}$,网络控制系统的时延随机分布在 $[0 \quad T]$ 区间上.

采用基于全调节 RBF 神经网络远程控制器和一般的状态反馈控制器控制此网络对象,选取控制器参数分别为 $\Gamma_W = 0.5, \Gamma_\mu = 0.6, \Gamma_\sigma = 0.5, \delta_W = 0.01, \delta_\mu = 0.01, \delta_\sigma = 0.01, \eta = 1$,反馈系数均为 $K = [-1 \quad -4]$. 假设系统不确定项为

$$\Delta A = \begin{bmatrix}0 & -0.5\\ 0 & -0.5\end{bmatrix},\ \Delta B = \begin{bmatrix}0\\ 0\end{bmatrix}.$$

状态变量 x_1 跟踪幅值为 2 的阶跃信号,仿真结果对比如图 2 和图 3 所示.

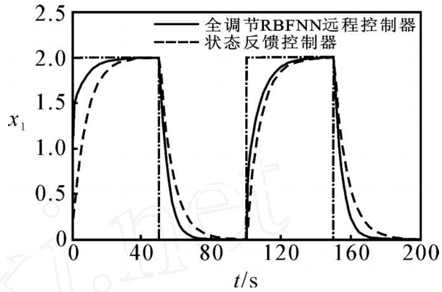

图 2　状态 x_1 的仿真结果对比

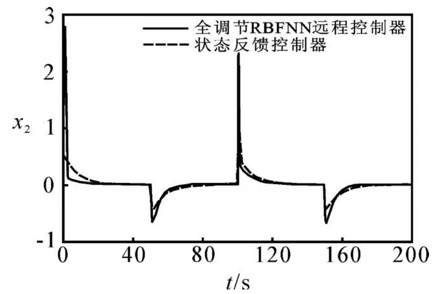

图 3　状态 x_2 的仿真结果对比

假定系统不确定项为

$$\Delta A = \begin{bmatrix}0 & -0.5+\sin(0.5t)\\ 0 & -0.5\end{bmatrix},$$

$$\Delta B = [0 \quad 0.5\sin(0.5t)]^T.$$

采用相同的控制器参数,状态变量 x_1 跟踪幅值为 2 的阶跃信号,仿真结果对比如图 4 和图 5 所示.

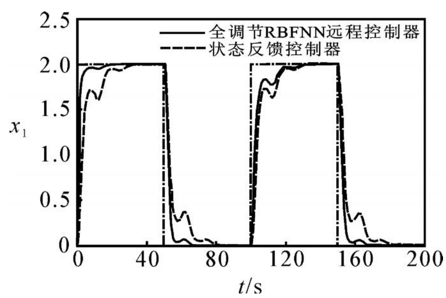

图 4　状态 x_1 的仿真结果对比

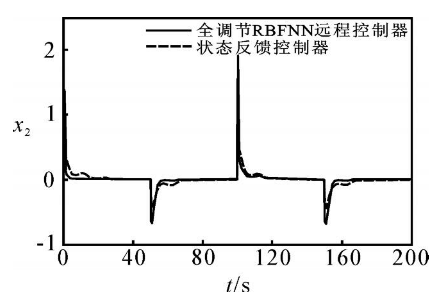

图 5　状态 x_2 的仿真结果对比

通过上述仿真结果可以看出,采用本文方法控制具有参数不确定项的非线性网络对象,无论是系统的收敛速度还是控制精度,都优于一般的状态反馈控制器. 对于不同类型的非线性网络控制系统,基于全调节 RBF 神经网络的远程网络控制方法都有较好的适应性.

5 结 论

本文针对具有参数不确定项的非线性网络被控对象,运用全调节 RBF 神经网络和状态反馈控制方法,设计出一种优化的控制方法. 利用全调节 RBF 神经网络补偿系统非线性及参数不确定项的影响,解决了在随机时延网络中的稳定性问题. 最后通过仿真实验验证了该控制策略的有效性.

参考文献(References)

[1] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 84-99.

[2] Walsh G C, Beldiman O, Bushnell L G. Asymptotic behavior of nonlinear networked control systems[J]. IEEE Trans on Automatic Contro1, 2001, 46(7): 1093-l097.

[3] Walsh G C, Ye H, Bushnell L. Stability analysis of networked control systems[C]. Proc of the American Control Conf. San Diego, 1999: 2876-2880.

[4] 白涛, 吴智铭, 杨根科. 网络化的控制系统[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 584-590.
(Bai T, Wu Z M, Yang G K. Networked control systems[J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(4): 584-590.)

[5] 黎善斌, 王智, 张卫东. 网络控制系统的研究现状与展望[J]. 信息与控制, 2003, 32(3): 239-244.
(Li S B, Wang Z, Zhang W D. Status and prospect of networked control system[J]. Information and Control, 2003, 32(3): 239-244.)

[6] Baruch J E F, Cox M J. Remote control and robots: An internet solution [J]. Computing & Control Engineering, 1996, 7(1): 39-45.

[7] 陈惠英, 管秋, 王万良. 长时滞网络控制系统的预估模糊控制器的设计[J]. 浙江工业大学学报, 2005, 33(4): 418-421.
(Chen H Y, Guan Q, Wang W L. Design of a fuzzy PI controller with Smith predictor for networked control systems with long time delay [J]. J of Zhejiang University of Technology, 2005, 33(4): 418-421.)

[8] Chow M Y, Tipsuwan Y. Network-based control systems: A tutorial[C]. Proc of the 27th Annual Conf of IEEE Industrial Electronics Society. Denver: IEEE Press, 2001: 257-261.

[9] Wang Z, Sun Y X. Fundamental problem of networked control systems from the view of control and scheduling [C]. Proc of IEEE 28th Annual Conf of IEEE Industrial Electronics Society. Seville, 2002, 3: 2503-2508.

[10] 樊卫华, 蔡骅. 时延网络控制系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 880-885.
(Fan W H, Cai H. Stability of networked control systems with time-delay [J]. Control Theory & Applications, 2004, 21(6): 880-885.)

[11] 朱其新. 网络控制系统的建模、分析与控制[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2004.
(Zhu Q X. Modeling, analysis and control of networked control systems [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.)

[12] Li Y, Sundararajan N, Saratchandran P. Neuro-controller design for nonlinear fighter aircraft maneuver using fully tuned RBF networks [J]. Automatica, 2001, 37(8): 1293-1301.

[13] Polycarpou M M. Stable adaptive neural control scheme for nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1996, 41(3): 447-451.

[14] 晋玉强. 块控不确定非线性系统鲁棒自适应控制研究[D]. 烟台: 海军航空工程学院, 2006.
(Jin Y Q. Research on the robust adaptive control of block control uncertain nonlinear systems[D]. Yantai: Naval Aeronautical Engineering Institute, 2006.)