高阶 Hopfield 型神经网络的定性分析

关治洪,孙德宝,沈建京
(华中理工大学控制科学与工程系,武汉 430074)

摘 要: 本文讨论高阶连续型 Hopfield 神经网络平衡态的性质,包括平衡态的存在唯一性和稳定性.借助于 Banach 不动点原理和 Lyapunov 方法得到了若干平稳态存在唯一和全局渐近稳定的充分条件.作为特例,获得了一阶连续型 Hopfield 神经网络稳定性的新判据.

关键词: Hopfield 型; 高阶神经网络; 平衡态; 定性分析
中图分类号: TP183 **文献标识码**: A **文章编号**: 0372-2112 (2000) 03-0077-04

Qualitative Analysis of High-Order Hopfield Neural Networks

GUAN Zhi-hong, SUN De-bao, SHEN Jian-jing
(Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Qualitative properties of a class of high-order Hopfield neural networks are studied in this paper. Several fundamental issues such as global exponential stability, existence, and uniqueness of the equilibrium of such networks are established by means of Liapunov function and Banach fixed point principle. As a special case, some new stability criteria are obtained for the corresponding one-order Hopfield neural networks.

Key words: Hopfield; high-order neural networks; equilibria; qualitative analysis

1 引言

由于高阶神经网络在网络的逼近能力、收敛速度、存储水平和容错能力等多方面较之一阶神经网络具有更强的功能,因而高阶神经网络的研究愈来愈受到人们的重视[1~7]. Hopfield 型神经网络是一类典型的神经网络,它在联想记忆和最优化计算等方面具有重要作用.根据其不同的应用,需对其平衡态作不同的定性分析.对于最优化计算神经网络,理想情形是有且只有一个全局渐近稳定平衡态[6],此时定性分析的目的在于寻求网络平衡态的存在唯一性条件和全局渐近稳定的判据.有鉴于此,本文讨论一类二阶 Hopfield 型神经网络平衡态的存在唯一性和全局渐近稳定性,得到了若干新判据.

2 网络模型

考虑具有下列形式的二阶 Hopfield 型神经网络[7]:

$$c_i \frac{du_i}{dt} = -\frac{u_i}{R_i} + \sum_{j=1}^{n} T_{ij} v_j + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} T_{ijk} v_j v_k + I_i$$
$$v_i = g_i(u_i), \qquad i = 1, \cdots, n \tag{1}$$

即

$$c_i \frac{du_i}{dt} = -\frac{u_i}{R_i} + \sum_{j=1}^{n} T_{ij} g_j(u_j) + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} T_{ijk} g_j(u_j) g_k(u_k) + I_i \tag{2}$$

其中 $c_i > 0$, $R_i > 0$ 和 I_i 分别为第 i 个神经元的电容常数、电阻常数和网络的外部输入, T_{ij} 和 T_{ijk} 分别为网络的一阶和二阶连接权, u_i 是第 i 个神经元的输入, $v_i = g_i(u_i)$ 为输出.

对 $g_i(u_i)$ 作基本假设:

$$0 < g_i'(u_i) \le \widetilde{M}_i, \; |g_i(u_i)| \le M_i \tag{3}$$

其中 M_i, $\widetilde{M}_i$ 为常数.条件(3)是容易满足的,如通常取

$$g_i(x) = \frac{a_i}{1 + e^{-b_i x}}$$

其中 $a_i > 0$, $b_i > 0$.易见 $0 < g_i'(x) \le (1/4) a_i b_i$, $|g_i(x)| \le a_i$.

由基本假设(3),得 $u_i = g_i^{-1}(v_i) \triangleq G_i(v_i)$,且 $\frac{1}{\widetilde{M}_i} \le G_i'(v_i)$,于是式(1)拓扑地等价于

$$c_i G_i'(v_i) \frac{dv_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n} T_{ij} v_j + \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} T_{ijk} v_j v_k - \frac{G_i(v_i)}{R_i} + I_i \tag{4}$$

故研究式(1)或(2)平衡态 $u_i = u_i^* = G_i(v_i^*)$ 的存在唯一性和稳定性等价于研究式(4)平衡态 $v_i = v_i^* = g_i(u_i^*)$ $(i = 1, \cdots, n)$ 的存在唯一性和稳定性.

3 平衡点的存在唯一性

本节讨论网络模型(2)的平衡态 $u_i = u_i^*$ $(i = 1, \cdots, n)$ 的存在唯一性,也即非线性方程组

收稿日期:1998-09-17;修订日期:1999-11-06
基金项目:国家自然科学基金(No.69774038)资助课题;华中理工大学科学基金资助课题

$$-\frac{u_i}{R_i}+\sum_{j=1}^{n}T_{ij}g_j(u_j)+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}T_{ijk}g_j(u_j)g_k(u_k)+I_i=0,$$
$$i=1,\cdots,n \tag{5}$$

解的存在唯一性.方便起见,引入记号:

$$\alpha^{+}=\begin{cases}0, & \alpha\le 0\\ \alpha, & \alpha>0\end{cases}\qquad \beta^{-}=\begin{cases}0, & \beta\ge 0\\ \beta, & \beta<0\end{cases} \tag{6}$$

定理 1 若下列条件之一成立,则式(2)存在唯一的平衡点.

i $T_{jj}^{+}+\sum_{i=1,i\neq j}^{n}|T_{ij}|+\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k<\frac{1}{R_j\tilde{M}_j}$, $j=1,\cdots,n$

ii $T_{ii}^{+}\tilde{M}_i+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}|T_{ij}|\tilde{M}_j+\sum_{j=1,k=1}^{n}|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\tilde{M}_j<\frac{1}{R_i}$, $i=1,\cdots,n$

其中 T_{jj}^{+} 的意义如式(6)所述.

证 记 $F=(F_1,\cdots,F_n)^T$, $u=(u_1,\cdots,u_n)^T$,其中

$$F_i(t,u)=-\frac{u_i}{R_i}+\sum_{j=1}^{n}T_{ij}g_j(u_j)+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}T_{ijk}g_j(u_j)g_k(u_k)+I_i.$$

易知 $F(t,u)$ 在区域:$a\le t\le b$, $\|u\|<+\infty$ 内处处连续,其中 a,b 为任意有限常数,$a<b$.在完备空间 $C([a,b],R^n)$ 中构造映照:

$$A:\phi\mapsto\phi-\frac{1}{l}F(t,\phi)$$

其中 $\phi\in C([a,b],R^n)$,常数 $l\neq 0$ 待定.显然 A 是到自身的映照.下面证明 A 是压缩映照.

对任意的 $\phi_1,\phi_2\in C([a,b],R^n)$,由 Taylor 公式知存在介于 ϕ_1 与 ϕ_2 之间的 ζ 使得

$$\begin{aligned}&\|(A\phi_2)(t)-(A\phi_1)(t)\|\\&=\left\|\phi_2(t)-\frac{1}{l}F(t,\phi_2(t))-\phi_1(t)+\frac{1}{l}F(t,\phi_1(t))\right\|\\&=\left\|\phi_2(t)-\phi_1(t)-\frac{1}{l}\frac{\partial F}{\partial u}(t,\zeta)(\phi_2(t)-\phi_1(t))\right\|\\&\le\left\|E-\frac{1}{l}\frac{\partial F}{\partial u}(t,\zeta)\right\|\,\|\phi_2(t)-\phi_1(t)\|\end{aligned} \tag{7}$$

其中 E 为单位矩阵,$\frac{\partial F}{\partial u}(t,\zeta)=\left(\frac{\partial F_i}{\partial u_j}(t,\zeta)\right)_{n\times n}$,而

$$\frac{\partial F_i}{\partial u_j}(t,\zeta)=\begin{cases}-\frac{1}{R_j}+T_{jj}g_j'(\zeta_j)+\sum_{k=1}^{n}(T_{jjk}+T_{jkj})g_k(\zeta_k)g_j'(\zeta_j), & i=j\\ T_{ij}g_j'(\zeta_j)+\sum_{k=1}^{n}(T_{ijk}+T_{ikj})g_k(\zeta_k)g_k'(\zeta_j), & i\neq j\end{cases} \tag{8}$$

若能证明

$$\left\|E-\frac{1}{l}\frac{\partial F}{\partial u}\right\|\le\alpha=\text{const},\quad 0\le\alpha<1 \tag{9}$$

则由式(7)知

$$\|(A\phi_2)(t)-(A\phi_1)(t)\|\le\alpha\|\phi_2(t)-\phi_1(t)\|$$

故

$$\|A\phi_2-A\phi_1\|\le\alpha\|\phi_2-\phi_1\|$$

这表明 A 是 $C([a,b],R^n)$ 中的压缩映照,故存在唯一的 $u^*=(u_1^*,\cdots,u_n^*)^T\in C([a,b],R^n)$ 使得 $Au^*=u^*$,即 $F(t,u^*(t))\equiv 0$, $t\in[a,b]$.注意到 a,b 的任意性和 F 的定义,可知非线性方程组(5)存在唯一解 $u_i(t)=u_i^*(t)$, $i=1,\cdots,n$,也即式(2)存在唯一平衡点.

下面证明当条件 i 或 ii 之一成立时,式(9)成立.

若取矩阵范数为 $\|\cdot\|=\|\cdot\|_1$,则由式(8)知

$$\begin{aligned}&\left\|E-\frac{1}{l}\left(\frac{\partial F_i}{\partial u_j}\right)_{n\times n}\right\|\\&=\max_j\left\{\frac{1}{|l|}\left(\left|l-\left[T_{jj}g_j'(\zeta_j)+\sum_{k=1}^{n}(T_{jjk}+T_{jkj})g_k(\zeta_k)g_j'(\zeta_j)-\frac{1}{R_j}\right]\right|\right.\right.\\&\left.\left.+\sum_{i=1,i\neq j}^{n}\left|T_{ij}g_j'(\zeta_j)+\sum_{k=1}^{n}(T_{ijk}+T_{ikj})g_k(\zeta_k)g_j'(\zeta_j)\right|\right)\right\}\end{aligned} \tag{10}$$

记 $\sigma_j=T_{jj}g_j'(\zeta_j)+\sum_{k=1}^{n}(T_{jjk}+T_{jkj})g_k(\zeta_k)g_j'(\zeta_j)-\frac{1}{R_j}$, $j=1,\cdots,n$

则

$$\sigma_j\le T_{jj}^{+}\tilde{M}_j+\sum_{k=1}^{n}|T_{jjk}+T_{jkj}|M_k\tilde{M}_j-\frac{1}{R_j}\triangleq b_j \tag{11}$$

$$\sigma_j\ge T_{jj}^{-}\tilde{M}_j-\sum_{k=1}^{n}|T_{jjk}+T_{jkj}|M_k\tilde{M}_j-\frac{1}{R_j}\triangleq a_j \tag{12}$$

其中 T_{jj}^{-} 如式(6)定义.式(11)与(12)即 $a_j\le\sigma_j\le b_j$,从而

$$l-a_j\ge l-\sigma_j\ge l-b_j \tag{13}$$

令取 $l<0$ 使得 $l-a_j<0$, $j=1,\cdots,n$.则由式(10)与(13)得

$$\left\|E-\frac{1}{l}\left(\frac{\partial F_i}{\partial u_j}\right)_{n\times n}\right\|\le\max_j\left\{\frac{1}{|l|}\left[b_j-l+\sum_{i=1,i\neq j}^{n}\left(|T_{ij}|+\sum_{k=1}^{n}|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)\tilde{M}_j\right]\right\}\triangleq\alpha \tag{14}$$

显然 $\alpha>0$,又由于

$$\frac{1}{|l|}\left[b_j-l+\sum_{i=1,i\neq j}^{n}\left(|T_{ij}|+\sum_{k=1}^{n}|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)\tilde{M}_j\right]<1$$

等价于

$$b_j+\sum_{i=1,i\neq j}^{n}\left(|T_{ij}|+\sum_{k=1}^{n}|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)\tilde{M}_j<0$$

即

$$T_{ij}^{+}+\sum_{i=1,i\neq j}^{n}|T_{ij}|+\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k<\frac{1}{R_j\tilde{M}_j},\ j=1,\cdots,n$$

故当条件 i 成立时,由式(14)定义的 α 满足 $0<\alpha<1$,即式(9)成立.

若取矩阵范数为 $\|\cdot\|=\|\cdot\|_\infty$,则由式(8)知

$$\begin{aligned}&\left\|E-\frac{1}{l}\left(\frac{\partial F_i}{\partial u_j}\right)_{n\times n}\right\|=\max_i\\&\left\{\frac{1}{|l|}\left(\left|l-\left[T_{ii}g_i'(\zeta_i)+\sum_{k=1}^{n}(T_{iik}+T_{iki})g_k(\zeta_k)g_k'(\zeta_j)-\frac{1}{R_i}\right]\right|\right.\right.\\&\left.\left.+\sum_{j=1,j\neq i}^{n}\left|T_{ij}g_j'(\zeta_j)+\sum_{k=1}^{n}(T_{ijk}+T_{ikj})g_k(\zeta_k)g_j'(\zeta_j)\right|\right)\right\}\end{aligned} \tag{15}$$

仍取 $l<0$ 使得 $l<a_j$, $j=1,\cdots,n$.则由式(13)和式(15)知

$$\left\|E-\frac{1}{l}\left(\frac{\partial F_i}{\partial u_j}\right)_{n\times n}\right\|\le\max_i\left\{\frac{1}{|l|}\left[b_i-l+\sum_{j=1,i\neq j}^{n}\left(|T_{ij}|+\sum_{k=1}^{n}|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)\tilde{M}_j\right]\right\}\triangleq\alpha \tag{16}$$

注意到 $\alpha>0$ 且

$$\frac{1}{|l|}\left[b_i - l + \sum_{j=1,j\neq i}^{n}\left(|T_{ij}| + \sum_{k=1}^{n}|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)\tilde{M}_j\right] < 1$$

等价于

$$b_i + \sum_{j=1,j\neq i}^n \left(|T_{ij}| + \sum_{k=1}^n |T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)\tilde M_j < 0$$

即

$$T_{ii}^+\tilde M_i + \sum_{j=1,j\neq i}^n |T_{ij}|\tilde M_j + \sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n |T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\tilde M_j < \frac{1}{R_i},\ i=1,\cdots,n$$

故当条件 ⅱ成立时,由式(16)定义的 α 满足 $0<\alpha<1$,即式(9)成立.证毕.

在定理 1 中,若 $g_j(u_j)$ 非负,由 σ_j 的定义,则式(11)和(12)变为

$$\sigma_j \le T_{jj}^+\tilde M_j + \sum_{k=1}^n (T_{jjk}+T_{jkj})^+ M_k\tilde M_j - \frac{1}{R_j} \triangleq \tilde b_j,$$

$$\sigma_j \ge T_{jj}^-\tilde M_j + \sum_{k=1}^n (T_{jjk}+T_{jkj})^- M_k \tilde M_j - \frac{1}{R_j}\triangleq \tilde a_j$$

其中 $(T_{jjk}+T_{jkj})^+$ 与 $(T_{jjk}+T_{jkj})^-$ 如式(6)定义.类似于定理 1 的证明,可得

定理 2　设 $g_j(u_j)$ 非负, $j=1,\cdots,n$.若下列条件之一成立,则式(2)存在唯一平衡点.

ⅰ $T_{jj}^+ + \sum_{k=1}^n (T_{jjk}+T_{jkj})^+M_k + \sum_{i=1,i\neq j}^n\left(|T_{ij}| + \sum_{k=1}^n |T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right) < \frac{1}{R_j\tilde M_j},\ j=1,\cdots,n.$

ⅱ $\left[T_{ii}^+ + \sum_{k=1}^n (T_{iik}+T_{iki})^+M_k\right]\tilde M_i + \sum_{j=1,j\neq i}^n\left(|T_{ij}| + \sum_{k=1}^n|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)\tilde M_j < \frac{1}{R_i},\ i=1,\cdots,n.$

4　平衡点的稳定性

下面讨论模型(2),也即模型(4)平衡态的稳定性.

设 $\mathrm{v}=\mathrm{v}^*$ 即 $v_i=v_i^*,\ i=1,\cdots,n$ 为式(4)的平衡点,则式(4)可改写为等价形式

$$c_iG_i'(v_i)\frac{d(v_i-v_i^*)}{dt} = \sum_{j=1}^n T_{ij}(v_j-v_j^*) + \sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n T_{ijk}(v_jv_k - v_j^*v_k^*) - \frac{G_i(v_i)-G_i(v_i^*)}{R_i},\ i=1,\cdots,n. \quad (17)$$

定理 3　若存在正数 $p_i>0,\ i=1,\cdots,n$ 使得

$$p_j\left(T_{jj} - \frac{1}{R_j\tilde M_j}\right) + \sum_{i=1,i\neq j}^n p_i|T_{ij}| + \sum_{i=1}^n p_i\left(\sum_{k=1}^n|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right) < 0,\quad j=1,\cdots,n, \quad (18)$$

则系统(17)的平衡点 $\mathrm v=\mathrm v^*$ 全局渐近稳定.

证　若式(18)成立,对式(17)构造 Liapunov 函数

$$w(\mathrm v) = \sum_{i=1}^n p_ic_i\left|\int_{v_i^*}^{v_i} G_i'(v_i)\,dv_i\right|$$

由于 $\left|\int_{v_i^*}^{+\infty} G_i'(v_i)\,dv_i\right| \ge \left|\int_{v_i^*}^{+\infty}\frac{1}{\tilde M_i}dv_i\right| = +\infty,\ i=1,\cdots,n$

故 $w(v)$ 为无穷大正定函数.沿式(17)的解对 $w(\mathrm v)$ 求 Dini 导数:

$$D^+w(\mathrm v)|_{(17)} = \sum_{i=1}^n p_i \left[-\frac{G_i(v_i)-G_i(v_i^*)}{R_i} + \sum_{j=1}^n T_{ij}(v_j-v_j^*) + \sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n T_{ijk}(v_kv_j - v_k^*v_j^*)\right]\mathrm{sgn}$$

$$\cdot(v_i-v_i^*) \le -\sum_{j=1}^n \frac{p_j}{R_j}G_j'(\eta_j)|v_j-v_j^*| + \sum_{j=1}^n\left[p_jT_{jj} + \sum_{i=1,i\neq j}^n p_i|T_{ij}|\right]$$

$$\cdot|v_j-v_j^*| + \sum_{i=1}^n p_i\left(\sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n T_{ijk}(v_kv_j - v_k^*v_j^*)\right)\mathrm{sgn}(v_i-v_i^*) \quad (19)$$

其中 η_j 介于 v_j 与 v_j^* 之间,由 Taylor 公式得

$$\sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n T_{ijk}(v_kv_j - v_k^*v_j^*) = \sum_{j=1}^n\left[\sum_{k=1}^n(T_{ijk}+T_{ikj})\zeta_k\right](v_j-v_j^*) \quad (20)$$

其中 ζ_k 介于 v_k 与 v_k^* 之间.故

$$\sum_{i=1}^n p_i\left(\sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n T_{ijk}(v_kv_j-v_k^*v_j^*)\right)\mathrm{sgn}(v_i-v_i^*)$$

$$\le \sum_{i=1}^n p_i\sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k|v_j-v_j^*|$$

$$= \sum_{j=1}^n\left(\sum_{i=1}^n\sum_{k=1}^n p_i|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)|v_j-v_j^*| \quad (21)$$

于是结合式(19)和(21)有

$$D^+w(\mathrm v)|_{(17)} \le -\sum_{j=1}^n\frac{p_j}{R_j}G_j'(\eta_j)|v_j-v_j^*| + \sum_{j=1}^n\left[p_jT_{jj} + \sum_{i=1,i\neq j}^n p_i|T_{ij}|\right]$$

$$\cdot|v_j-v_j^*| + \sum_{j=1}^n\left(\sum_{i=1}^n\sum_{k=1}^n p_i|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)|v_j-v_j^*|$$

$$\le \sum_{j=1}^n\left[p_j\left(T_{jj}-\frac{1}{R_j\tilde M_j}\right) + \sum_{i=1,i\neq j}^n p_i|T_{ij}| + \sum_{i=1}^n p_i\left(\sum_{k=1}^n|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k\right)\right]$$

$$\cdot|v_j-v_j^*|<0,\quad \text{当 } \mathrm v\neq \mathrm v^*.$$

因此式(17)的平衡点 $\mathrm v=\mathrm v^*$ 全局渐近稳定.

定理 4　若不等式

$$T_{ii} - \frac{1}{R_i\tilde M_i} + \sum_{j=1,j\neq i}^n|T_{ij}| + \sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n|T_{ijk}+T_{ikj}|M_k<0,$$

$$i=1,\cdots,n \quad (22)$$

成立,则系统(17)的平衡点 $\mathrm v=\mathrm v^*$ 全局渐近稳定.证毕.

证　若不等式(22)成立,则可构造 Liapunov 函数

$$w(\mathrm v) = \max_{1\le j\le n}|v_j-v_j^*| \triangleq |v_l-v_l^*|$$

显然 $w(\mathrm v)$ 为无穷大正定函数.注意到式(20)有

$$D^+w(\mathrm v)|_{(17)} = \frac{dv_l}{dt}\mathrm{sgn}(v_l-v_l^*) \le \frac{1}{c_lG_l'(v_l)}\left[\left(T_{ll} + \sum_{j=1,j\neq l}^n|T_{lj}|\right)\right.$$

$$\left.|v_l-v_l^*| + \left(\sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n|T_{ljk}+T_{lkj}|M_k\right)|v_l-v_l^*| - \frac{G(\eta_l)}{R_l}|v_l-v_l^*|\right]$$

$$\le \frac{1}{c_lG_l'(v_l)}\left[T_{ll} - \frac{1}{R_l\tilde M_l} + \sum_{j=1,j\neq l}^n|T_{lj}| + \sum_{j=1}^n\sum_{k=1}^n|T_{ljk}+T_{lkj}|M_k\right]$$

$$\cdot|v_l-v_l^*|<0,\ \text{当 } \mathrm v\neq\mathrm v^*$$

故定理 4 结论成立.证毕.

5　讨论

对于二阶模型(1),当 $T_{ijk}\equiv 0$ 时可得其特殊情形,即一阶 Hopfield 型网络

$$c_i\frac{du_i}{dt} = -\frac{u_i}{R_i} + \sum_{j=1}^n T_{ij}v_j,\quad v_i = g_i(u_i),\ i=1,\cdots,n \quad (23)$$

对于模型(23)全局渐近稳定性的充分条件已有许多研究,最

近文献[8,9]分别取得了更深刻的结果.

相对于模型(23),本文得到的全局渐近稳定性的充分条件之一(定理3的特例)为:

$$p_j(T_{jj}-1)+\sum_{i=1,i\neq j}^{n}p_i|T_{ij}|<0,\ j=1,\cdots,n \qquad (24)$$

其中 $p_j>0$ 为可调参数.为便于比较,这里取 $R_i=\widetilde{M}_i\equiv 1$.在(23)中,设 $T=\begin{pmatrix}-2 & 3.5\\ 5 & -5\end{pmatrix}$.若取 $p_1=1$, $p_2=\frac{59}{100}$,则条件(24)成立,但可以验证,此时文[8,9]的相应条件均不能满足.

值得说明的是,利用本文的方法来研究(23),定理1～4的条件还可以减弱,更详细的情况不再赘述.而对于高阶模型(1)而言,本文的结果都是新的.

参考文献

[1] Personnaz,L.,Guyon,I. & Dreyfus,G. High-order neural networks:Information storage without errors. Europhys. Lett.,1987,4:863～867

[2] Demetri Psaltis,Cheol Hoon Park & John Hong. Higher order associative memories and their optical implementations. Neural Networks,1988,1:149～163

[3] Chow,T. W. S.,et al. An analysis of higher-order multilayer feed-forward neural network. Proc. of Int. Confer. on Neural Information Processinng,Beijing,China,1995,2:851～854

[4] Dembo,A.,Farotimi,O. & Kailath,T. High-order absolutely stable neural networks. IEEE Trans. On Circuits and Systems,1991,38:57～65

[5] Su,J.,Hu,A. Q. & He Z. Y. Stability analysis of analogue neural networks. Electronics Letters,1997,33:506～507

[6] Sudharsanan,S. I. & Sundareshan,M. K. Exponential stability and a systematic synthesis of a neural network for quadratic minimization. Neural Networks,1991,4:599～613

[7] 焦李成.神经网络的应用与实现.西安:西安电子科技大学出版社,1995

[8] 廖晓昕. Hopfield 型神经网络的稳定性.中国科学(A辑),1993,23:1025～1035

[9] 梁学斌,吴立德. Hopfield 型神经网络的全局指数稳定性及其应用.中国科学(A辑),1995,25:523～532

关治洪 1955年生.1994年在华南理工大学自控理论及应用专业获博士学位,1996年10月在华南理工大学电子学与通信博士后流动站出站.现为华中理工大学控制科学与工程系教授,博士生导师.近期从事神经网络与非线性系统的控制理论、方法及应用研究.

孙德宝 1941年生.华中理工大学控制科学与工程系教授.主要从事智能控制与专家系统的研究.

沈建京 1961年生.1994年7月在华南理工大学自控理论及应用专业获博士学位.郑州解放军测绘学院副教授.现为华中理工大学控制科学与工程系高级访问学者.主要从事智能控制理论与应用研究.

(上接第100页)

参考文献

[1] 万顺山,谢求成.关于导弹命中误差测量系统的若干问题.无线电工程,1986,4:11～30

[2] D. Duven,W. Devereux. Multisensor Miss Distance Measurement System for Test & Evaluation of High Speed Intercepts. Proc. 49th Annual Meeting on Future Global Navigation and Guidance,1993:767～776

[3] T. M. Hattox,etc. Precision Determination of Trajectory and Miss Distance of ERIS Interceptor and Target. AIAA Missile Science Conference,1993

[4] 吴嗣亮.矢量脱靶量测量系统数据处理方法的研究与实践:博士后研究工作报告.北京理工大学,1998

[5] AD-A020087. Data Reduction and Analysis Techniques for Miss Distance Indicator (MDI) and Impact Scoring Systems. Aug. 1975

[6] J. I. Statman,E. R. Rodemich. Parameter Estimation Based on Doppler Frequency Shifts. IEEE Trans. on AES,1987,AES-23(1):31～39

[7] Y. T. Chan,J. J. Towers. Sequential Localization of a Radiating Source by Doppler-Shifted Frequency Measurements. IEEE Trans on AES,1992,28(4):1084～1089

[8] 赵哲.连续波多普勒脱靶量测量技术.无线电工程,1987,3:39～45

[9] 朱维奇.基于多普勒频率时间序列的脱靶量新算法.遥测遥控,1993,10:21～25

[10] 江帆,侯军华.用谱分析法从混杂有噪声的数据中提取脱靶量多普勒信号.无线电工程,1992,22(6):39～44

[11] 杨柳合.遥测矢量脱靶量测量系统.遥测遥控,1997,18(5):6～10

[12] 周晓丽.非实时大视角运动目标轨迹的测量方法:博士学位论文.北京理工大学,1995