文章编号：1000-8152(2001)05-0811-02

关于"基于 RBF 神经网络观测器的非线性系统鲁棒故障检测方法"一文的疑问

陈玉东　施颂椒

（上海交通大学自动化研究所·上海，200030）

摘要：指出了文献[1]中存在的问题，给出了改正结果.

关键词：故障检测；神经网络；观测器

文献标识码：A

Comment on "An Approach to Robust Fault Detection for Nonlinear System Based on RBF Neural Network Observer"

CHEN Yudong　and　SHI Songjiao

(Research Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University · Shanghai, 200030, P R. China)

Abstract: The mistake in reference paper[1] and its correction are given in this letter.

Key words: fault detection; neural network; observer

文[1]针对一类仿射非线性动态系统，提出了一种基于 RBF 神经网络非线性观测器的鲁棒故障检测与分离的新方法，为解决该类问题提供了一条很好的思路.系统具有如下形式

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t)) + g(x(t))u + \delta(t), \\ y(t) &= Cx(t), \end{aligned} \tag{1}$$

$x \in \mathbb{R}^n$、$u \in \mathbb{R}^m$ 和 $y \in \mathbb{R}^p$ 分别为系统的状态向量、控制输入向量和输出向量，$\delta \in \mathbb{R}^n$ 是有界故障向量，$\|\delta(t)\| \leqslant D$，$f(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 均为连续可微向量函数.而基于 RBF 神经网络的非线性观测器为

$$\dot{\hat{x}} = (A - LC)\hat{x} + Ly + Bu + \phi_{nn}(\hat{x}, u, t), \tag{2}$$

式中 $\phi_{nn}(\hat{x}, u, t)$ 是神经网络非线性估计器.但在文[1]中有如下不妥之处，提出来供讨论：

文[1]中定理 1 的结论及证明.该定理给出了 RBF 神经网络权值的调节规律.不难理解，当网络有 s 个隐节点、n 个输出时，其权值 W 为 $n \times s$ 维矩阵.而在文[1]中的权值调节律为

$$\dot{W} = -\eta \Psi^{\mathrm{T}}(\hat{x}, \rho) P \epsilon. \tag{3}$$

由文[1]可知，$\Psi^{\mathrm{T}}(\hat{x}, \rho)$ 为 s 维行向量，ϵ 为 n 维列向量，P 为一对称正定矩阵，所以式(3)中的运算维数不相容，显然式(3)不成立.这里给出本文的改正结果.

引理　对于 n 维单位阵 $I_{n\times n}$，必然存在 $M_a \in \mathbb{R}^{n\times s}$，$M_b \in \mathbb{R}^{s\times n}$，且 $s \geqslant n$，使得

$$I_{n\times n} = M_a \cdot M_b \tag{4}$$

成立.特别地，取

$$M_a = I_a = [I_{n\times n} \quad 0_{n\times(s-n)}],$$

$$M_b = I_b = \begin{bmatrix} I_{n\times n} \\ 0_{(s-n)\times n} \end{bmatrix}.$$

定理　对于非线性系统(1)，观测器(2)和给定的观测器增益矩阵 L，如果存在正定对称矩阵 P、Q 满足下述 Lyapunov 方程

$$(A - LC)^{\mathrm{T}}P + P(A - LC) = -Q \tag{5}$$

且 RBF 网络的权值按照如下规律进行调节

$$\dot{W} = -\left[\frac{\eta}{n}\epsilon^{\mathrm{T}}P \cdot I_a \cdot \Psi(\hat{x}, \rho)\right] \cdot I_b^{\mathrm{T}}, \tag{6}$$

那么观测器的估计误差渐近稳定，即 $\lim\limits_{t\to\infty}\epsilon = 0$.

当 RBF 网络有 s 个隐节点，n 个输出时，并且假定 $s \geqslant n$.不考虑网络参数 θ 时，权系数矩阵 W 为 $n \times s$ 维矩阵.下面证明定理.

证　选取如下 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2}\epsilon^{\mathrm{T}}P\epsilon + \frac{1}{2\eta}\mathrm{tr}(\tilde{W} \cdot \tilde{W}^{\mathrm{T}}), \tag{7}$$

式中 $\tilde{W} = W - W^*$，令 $\epsilon = \hat{x} - x$，则状态估计误差

收稿日期：2000-06-12；收修改稿日期：2001-04-16.

方程为

$$\dot{\varepsilon} = (A - LC)\varepsilon + \phi_{nn}(\hat{x},u,t) - \phi(x,u,t). \tag{8}$$

对式(7)双边求导数,得

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}P\dot{\varepsilon} + \frac{1}{2}\dot{\varepsilon}^{\mathrm{T}}P\varepsilon + \frac{1}{\eta}\mathrm{tr}(\widetilde{W}\cdot\dot{\widetilde{W}}^{\mathrm{T}}) = \\ &\frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}[(A-LC)^{\mathrm{T}}P + P(A-LC)]\varepsilon + \\ &\varepsilon^{\mathrm{T}}P[\phi_{nn}(\hat{x},u,t) - \phi(x,u,t)] + \\ &\frac{1}{\eta}\mathrm{tr}(\widetilde{W}\cdot\dot{\widetilde{W}}^{\mathrm{T}}) = \\ &-\frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}Q\varepsilon + \varepsilon^{\mathrm{T}}P[W\Psi(\hat{x},\rho) - \\ &W^{*}\Psi(\hat{x},\rho)] + \frac{1}{\eta}\mathrm{tr}(\widetilde{W}\cdot\dot{\widetilde{W}}^{\mathrm{T}}) = \\ &-\frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}Q\varepsilon + \varepsilon^{\mathrm{T}}P\widetilde{W}\Psi(\hat{x},\rho) + \\ &\frac{1}{\eta}\mathrm{tr}(\widetilde{W}\cdot\dot{W}^{\mathrm{T}}) = \\ &-\frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}Q\varepsilon + \frac{1}{\eta}\mathrm{tr}[\frac{\eta}{n}\varepsilon^{\mathrm{T}}P\widetilde{W}\Psi(\hat{x},\rho)\cdot \\ &I_{n\times n} + \widetilde{W}\cdot\dot{W}^{\mathrm{T}}] = \\ &-\frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}Q\varepsilon + \frac{1}{\eta}\mathrm{tr}[\frac{\eta}{n}\varepsilon^{\mathrm{T}}P\widetilde{W}\Psi(\hat{x},\rho)\cdot \\ &I_a\cdot I_b + \widetilde{W}\cdot\dot{W}^{\mathrm{T}}] = \\ &-\frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}Q\varepsilon + \frac{1}{\eta}\mathrm{tr}[\frac{\eta}{n}\varepsilon^{\mathrm{T}}P\cdot I_a\cdot \\ &\Psi(\hat{x},\rho)\cdot I_b\cdot\widetilde{W} + \dot{W}^{\mathrm{T}}\cdot\widetilde{W}] = \\ &-\frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}Q\varepsilon + \frac{1}{\eta}\mathrm{tr}[\frac{\eta}{n}\varepsilon^{\mathrm{T}}P\cdot I_a\cdot \\ &\Psi(\hat{x},\rho)\cdot I_b + \dot{W}^{\mathrm{T}})\cdot\widetilde{W}].\end{aligned}$$

当网络权系数按照式(6)进行调节时,下式成立

$$\frac{\eta}{n}\varepsilon^{\mathrm{T}}P\cdot I_a\cdot\Psi(\hat{x},\rho)\cdot I_b + \dot{W}^{\mathrm{T}} = 0, \tag{9}$$

那么有

$$\dot{V} = -\frac{1}{2}\varepsilon^{\mathrm{T}}Q\varepsilon \leqslant 0, \tag{10}$$

所以定理结论成立.

对于 $s < n$ 的情况,可得出形式相似的权值调节律,使得$\lim\limits_{t\to\infty}\varepsilon = 0$.

参考文献(References)

[1] Hu Shousong, Zhou Chuan and Hu Weili, et al. An approach to robust fault detection for nonlinear system based on RBF neural network observer [J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(6): 853 – 857

本文作者简介

陈玉东 1972年生. 博士研究生. 研究方向为工业过程的故障诊断与容错控制

施颂椒 见本刊2001年第1期第11页

新书《卡尔曼滤波与维纳滤波——现代时间序列分析方法》出版

邓自立教授的新著《卡尔曼滤波与维纳滤波——现代时间序列分析方法》,已于2001年7月由哈尔滨工业大学出版社出版. 这是邓自立教授继《最优滤波理论及其应用——现代时间序列分析方法》之后的又一著作. 该书系统地阐述了由著者提出的最优滤波新的方法论——现代时间序列分析方法及其在Kalmam滤波和Wiener滤波中的应用.

全书共4章:第一章介绍ARMA新息模型、状态空间模型、传递函数模型及它们的相互转化. 第二章介绍经典Kalman滤波的基本结果. 第三章首次提出了基于Kalman滤波的统一的白噪声估计理论及其在状态和信号最优估计中的应用. 第四章介绍基于ARMA新息模型的统一的白噪声估计理论及其在状态和信号最优估计中的应用. 书中含有大量算例和仿真例子.

本书适合作为控制理论与控制工程、信号处理、检测与估计等专业的研究生和本科生教材,也可供在信号处理、控制、通信、制导、雷达跟踪、油田地震勘探、卫星测控、图象处理、故障诊断、机器人、经济、生物医学等领域的科技人员参考.

该书大32开本,33.6万字,396页,每册定价19元. 欲购者请与哈尔滨工业大学出版社尹继荣同志联系.

地址:哈尔滨市南岗区教化街21号 邮编:150006 电话:0451-6414349 传真:0451-6414749