

文章编号: 1000-8152(2002)01-0034-07

神经网络广义逆系统控制*

何丹 戴先中 王勤

(东南大学自动控制系·南京, 210096)

摘要: 提出适合于高阶非线性系统线性化解耦的广义逆系统. 它与被控系统复合后, 不但能实现原系统的线性化和解耦, 而且通过合理地设计逆系统, 可使伪线性复合系统的极点在复平面上任意配置. 进一步提出由静态神经网络和若干积分惯性等线性环节组成的神经网络广义逆系统, 为模型未知且内部状态不易测量的高阶非线性系统的线性化解耦控制提供一条有效途径, 进一步拓展了神经网络逆系统控制方法的适用范围.

关键词: 神经网络; 逆系统; 非线性系统控制; 线性化; 解耦

文献标识码: A

Generalized ANN Inverse Control Method

HE Dan, DAI Xianzhong and WANG Qin

(Department of Automatic Control Engineering, Southeast University · Nanjing, 210096, P. R. China)

Abstract: The paper presents extended inverse method for the linearization and decoupling control of high-order nonlinear system. Being rightly designed, generalized inverse can transform the controlled nonlinear system into a number of pseudo-linear SISO (single input and single output) subsystems with the poles of the pseudo-linear systems approaching to the expected positions. Furthermore, the paper proposes the construction of generalized ANN (artificial neural network) inverse consisting of a static ANN and a number of linear components such as integrator factors and inertial components. This generalized ANN inverse method provides a practical approach for the linearization and decoupling control of poorly-modeled high-order plants whose states are difficult to measure and so extends the application region of ANN inverse.

Key words: artificial neural networks; inverse system; nonlinear system control; linearization; decoupling

1 引言 (Introduction)

非线性系统控制一直是近年来控制领域的研究热点, 大范围线性化控制是其中一个很重要的研究方向, 目前这方面的理论研究成果已有不少, 如基于微分几何理论和基于逆系统思想的反馈线性化方法^[1-8], 其应用研究成果也不断涌现^[9]. 然而, 随着理论和应用研究的进一步深入, 这些方法的局限性越来越明显地暴露出来. 这些方法大都要求被控非线性系统的数学模型精确已知, 而工程实际中的非线性特性常常难以确切描述, 系统模型往往是部分甚至完全未知. 再者, 即使是一个模型已知的可线性化的系统, 要求用反馈实现也是非常困难的. 例如, 基于微分几何理论的状态反馈线性化需要解一组偏微分方程, 这对一般系统几乎是不可能的. 这些都限制了它的实际应用.

随着人工神经网络被引入控制领域, 近年来人

们针对线性或非线性离散被控系统, 已经提出了不少神经网络控制器结构. 这些控制器都具有这样的优点: 即不过分依赖于被控系统的精确模型和参数. 如果能将非线性连续系统的线性化控制理论与神经网络对未知非线性函数的逼近能力和自学习能力有机结合, 应能兼收两类方法之长, 实现优势互补. 基于这种思想, 作者近年来提出了一种连续动态神经网络结构^[10] (由静态神经网络与若干积分因子组成), 并用这种神经网络与逆系统思想结合, 提出了神经网络 α 阶逆系统方法, 它能有效地实现对模型未知的非线性系统的线性化和解耦.

我们知道, 基于一般逆系统思想对原系统进行线性化解耦后的各伪线性子系统是积分型 SISO 系统, 这种积分型系统本身不是稳定的系统. 如果被控系统状态易于测量, 则可用状态反馈方法对这些 SISO 积分型系统分别设计出优良的附加闭环线性控

* 基金项目: 国家自然科学基金(60174004)与国家杰出青年基金(59925718)资助项目.

收稿日期: 2000-03-15; 收修改稿日期: 2001-01-31.

制器,从而可构成稳定的复合控制系统.若原系统状态全部或部分不易测量,尽管可用超前滞后等频域方法设计附加控制器,但仅适用于低阶(一般不高于 2 阶)积分型系统,对高阶(高于 3 阶)积分型系统则很难设计附加线性控制器使整个控制系统稳定.

在原系统状态全部或部分不可观测的情况下,为了突破传统逆系统(同时也突破神经网络逆系统)对于系统阶数的限制,本文在对逆系统理论进行更深入研究的基础上,提出广义逆系统概念,并提出神经网络广义逆系统实现结构以及基于神经网络广义逆的线性化解耦控制方法.

2 广义逆系统方法(The generalized inverse system method)

2.1 广义逆系统概念(The generalized inverse)

从泛函分析的观点来看,一个控制系统 Σ 的动力学模型可用一个输入映射到输出的算子来表示.给定一个 q 维输入、 p 维输出的系统(线性或非线性) Σ ,其输入为 $u(t) = [u_1, u_2, \dots, u_q]^T$,输出为 $y(t) = [y_1, y_2, \dots, y_p]^T$,具有一组确定的初始状态 $x(t_0) = x_0$.记描述该映射关系的算子为 $\theta: u \rightarrow y$,即:

$$y(\cdot) = \theta[x_0, u(\cdot)] \text{ 或简写为 } y = \theta u. \quad (1)$$

定义 1(一般逆系统定义) 设 Π_a 为另一个 p 维输入、 q 维输出的系统,表示其传递关系的算子为 $\bar{\theta}_a: \varphi \rightarrow u_d$,其中 $\varphi(t) = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p]^T$, $u_d(t) = [u_{d1}, u_{d2}, \dots, u_{dq}]^T$, φ 为某域内任给的连续函数向量,并且在初始时刻 t_0 处满足一定的初始条件,如果取 $\varphi(t) = y_d^{(\alpha)}(t)$, $\alpha = [\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_p]$ ($\alpha_i \geq 0$),即 φ_i 为 y_{di} 的 α_i 阶导数,算子 $\bar{\theta}_a$ 满足下式:

$$\theta \bar{\theta}_a \varphi = \theta \bar{\theta}_a (y_d^{(\alpha)}) = \theta u_d = y_d. \quad (2)$$

则称原系统 Σ 是可逆的并称系统 Π_a 为原系统 Σ 的 α 阶积分逆系统,简称 α 阶逆系统,当 $\alpha = 0$ 时,称 α 阶逆系统为单位逆系统.

根据 α 阶逆系统定义,只要我们构造出 α 阶逆系统,可将 SISO 非线性系统线性化,将 MIMO (multiple input and multiple output) 非线性系统线性化解耦,从而可以按照线性控制理论来设计附加的线性控制器进行控制.但线性化和解耦后所得到的伪线性复合系统是积分型的,即 $s^{-\alpha}$ ($i = 1, 2, \dots,$

p), 从开环对数频率特性来看,积分型系统 $s^{-\alpha}$ ($\alpha_i > 2$) 的对数幅频特性穿越 0dB 线时,所对应的相频特性的相角小于 -180° (绝对值大于 180°).若系统内部状态不易于测量,则很难设计控制器使闭环系统稳定.但如果能构造这样一种逆系统,当它与原系统复合后,不但能实现原系统的线性化解耦,而且通过合理地设计逆系统,可使伪线性复合系统的极点在复平面上任意配置,从而得到较为理想的开环频率特性,附加闭环控制器的设计问题也就迎刃而解了.我们称这种逆系统为广义逆系统,给出定义如下:

定义 2(广义逆系统定义) 设 Π_g 为一个 p 维输入、 q 维输出的系统,表示其映射关系的算子为 $\bar{\theta}_g: \varphi \rightarrow u_d$,其中 $\varphi(t) = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p]^T$, $u_d(t) = [u_{d1}, u_{d2}, \dots, u_{dq}]^T$, $\varphi(t)$ 为取值于某域的有理解析函数向量,并且在 t_0 处满足一定的初始条件,如果 $\bar{\theta}_g$ 满足:

$$\theta \bar{\theta}_g \varphi = \theta u_d = y_d. \quad (3)$$

式中 y_d 为理想输出 ($y_d = [y_{d1}, y_{d2}, \dots, y_{dp}]^T$), 且

$$\varphi_i = a_{i0} y_{di}^{(\alpha_i)} + a_{i1} y_{di}^{(\alpha_i-1)} + a_{i2} y_{di}^{(\alpha_i-2)} + \dots + a_{i\alpha_i} y_{di}.$$

式中 $a_{i0}, a_{i1}, \dots, a_{i\alpha_i}$ 为实数且 $a_{i0} \neq 0, i \in p$, 系统 Π_g 就称为原系统 Σ 的 α 阶广义逆系统,简称为广义逆系统.

显然,若令 $a_{i2} = a_{i3} = \dots = a_{i\alpha_i} = 0$ 且 $a_{i0} = 1, i \in p$, 则有: $\varphi = y_d^{(\alpha)}$, 这时,广义逆系统就是 α 阶逆系统,因此 α 阶逆系统是广义逆系统的特例.

2.2 SISO 系统(SISO system)

考察输入输出微分方程表示的 SISO 非线性系统 Σ :

$$f(y^{(n)}, y^{(n-1)}, \dots, y, u^{(m)}, u^{(m-1)}, \dots, u) = 0. \quad (5)$$

系统初值为:

$$\begin{cases} u^{(i)}(t_0) = u_0^{(i)}, & i = 0, 1, \dots, m-1, \\ y^{(j)}(t_0) = y_0^{(j)}, & j = 0, 1, \dots, n-1. \end{cases}$$

$f(\cdot)$ 是局部解析函数.

定理 1^[11] 对于输入输出微分方程描述的 SISO 连续系统(5),若在某开集 D 上有 $\partial f / \partial u^{(m)} \neq 0$ 且在 D 上处处连续,则该系统在 D 上可逆并存在广义逆系统 Π_g (证明参见文献[11]).

事实上,如果定理 1 条件满足,由隐函数定理,式(6)必然存在:

$$u^{(m)} = \zeta(y^{(n)}, y^{(n-1)}, \dots, y, u^{(m-1)}, \dots, u). \quad (6)$$

如果令:

$$\begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \vdots \\ y^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{00} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{10} & a_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{n0} & a_{n1} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \vdots \\ y^{(n)} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中: A 为 $(n+1) \times (n+1)$ 非奇异下三角矩阵(对角线元素 $a_{ii} \neq 0, i = 0, 1, \dots, n$) 则有:

$$\begin{bmatrix} y \\ \dot{y} \\ \vdots \\ y^{(n)} \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将上式代入式(6),式(6)可重新表示为:

$$u^{(m)} = \sigma(z_n, z_{n-1}, \dots, z_0, u^{(m-1)}, \dots, u). \quad (9)$$

令 $\varphi = z_n$ 为输入, u 为输出,可得:

$$u^{(m)} = \sigma(\varphi, z_{n-1}, \dots, z_0, u^{(m-1)}, \dots, u) \quad (10)$$

表示的系统(参见图 1),将它串联到原 SISO 系统之前就得到一个伪线性复合系统,其输入输出传递函数为:

$$\frac{y(s)}{\varphi(s)} = \frac{1}{a_n s^n + \dots + a_{n1} s + a_{n0}}. \quad (11)$$

由广义逆系统定义,式(10)(或图 1)所示系统为原 SISO 连续系统(5)的一种广义逆系统.显然,通过调节矩阵 A 中的元素 $a_{n0}, a_{n1}, \dots, a_{nm}$,能合理配置复合系统的极点.例如,当 $n > 2$ 时,可先确定靠近虚轴的主导极点,然后配置其它极点并使它们远离虚轴,这样伪线性复合系统就可近似降阶为 1 阶或 2 阶线性系统,从而使附加线性闭环控制器的设计大大简化.

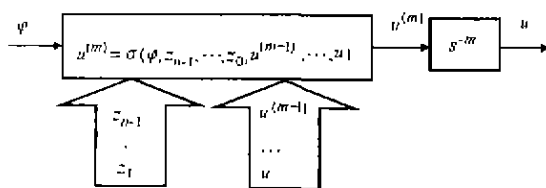


图 1 SISO 系统的一种广义逆系统实现框图
Fig. 1 Generalized inverse system of SISO system

2.3 MIMO 系统(MIMO system)

考察如下所示的 MIMO 系统 Σ_1 :

$$F(Y^{(N)}, X_Y, X_U, U^{(M)}) = 0, \quad (12)$$

具有初始条件:

$$\begin{cases} X_1(t_0) = X_{10}, \\ X_U(t_0) = X_{U0}. \end{cases}$$

其中符号:

$$N = (n_1, n_2, \dots, n_p), \quad M = (m_1, m_2, \dots, m_p),$$

$$Y^{(N)} = [y_1^{(n_1)}, y_2^{(n_2)}, \dots, y_p^{(n_p)}]^T,$$

$$U^{(M)} = [u_1^{(m_1)}, u_2^{(m_2)}, \dots, u_p^{(m_p)}]^T,$$

$$X_Y = [X_{Y1}, X_{Y2}, \dots, X_{Yp}]^T, \quad X_{Yi} = [y_i, \dot{y}_i, \dots, y_i^{(n_i-1)}],$$

$$X_U = [X_{U1}, X_{U2}, \dots, X_{Up}]^T, \quad X_{Ui} = [u_i, \dot{u}_i, \dots, u_i^{(m_i-1)}],$$

$i \in p$.

且 $F(\cdot)$ 是局部解析函数.

定理 2^[11] 对于输入输出微分方程描述的 MIMO 系统 Σ_1 (12),若 $\partial F / \partial U^{(M)}$ 在某开集 D 上非奇异且处处连续,则系统在 D 上可逆并存在广义逆系统 Π_g (证明参见文献[11]).

类似于 SISO 系统,只要定理 2 条件满足,同样根据隐函数存在定理,在 D 上必然有 $U^{(M)}$ 的唯一解:

$$U^{(M)} = \bar{\zeta}(Y^{(N)}, X_Y, X_U). \quad (13)$$

类似于 SISO 广义逆系统实现,令:

$$\begin{bmatrix} z_{i0} \\ z_{i1} \\ \vdots \\ z_{in_i} \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} y_i \\ \dot{y}_i \\ \vdots \\ y_i^{(n_i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{i00} & 0 & \cdots & 0 \\ a_{i10} & a_{i11} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ a_{in_i0} & a_{in_i1} & \cdots & a_{in_in_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i \\ \dot{y}_i \\ \vdots \\ y_i^{(n_i)} \end{bmatrix}, \quad i \in \underline{p}. \quad (14)$$

其中 A_i 为非奇异下三角阵.

将式(14)代入式(13),得:

$$U^{(M)} = \bar{\sigma}(Z_N, X_Z, X_U). \quad (15)$$

式中:

$$X_Z = [X_{Z1}, X_{Z2}, \dots, X_{Zp}]^T, \quad X_{Zi} = [z_{i0}, z_{i1}, \dots, z_{i(n_i-1)}],$$

$$X_U = [X_{U1}, X_{U2}, \dots, X_{Up}]^T, \quad X_{Ui} = [u_i, \dot{u}_i, \dots, u_i^{(m_i-1)}],$$

$$Z_N = [z_{1n_1}, z_{2n_2}, \dots, z_{pn_p}]^T,$$

$i \in \underline{p}$.

令 $\varphi = Z_N$ ($\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p]^T$) 为输入,可得到如图 2 虚线框内所示的 MIMO 系统的一种广义逆系统结构.

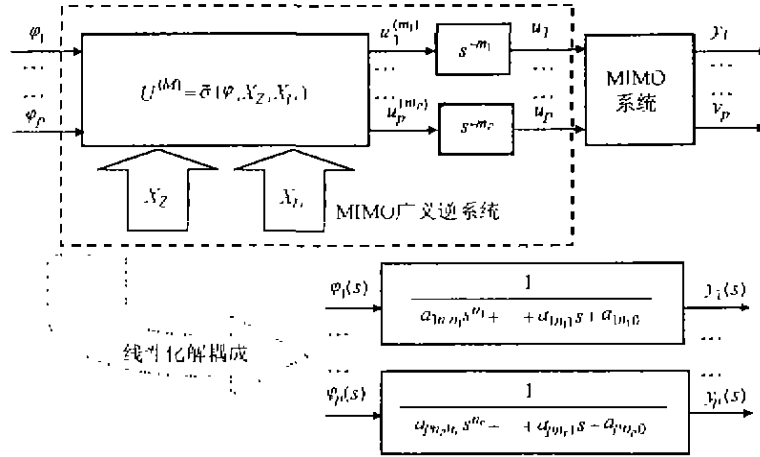


图2 基于MIMO广义逆系统的线性化解耦示意图

Fig. 2 Linearization and decoupling structure based on the generalized inversion of MIMO system

3 神经网络广义逆系统 (Generalized ANN inverse system)

3.1 广义逆系统实现的困难和神经网络广义逆系统提出 (The difficulty of the generalized inversion and the proposal of the ANN generalization Inversion)

由于非线性系统千差万别,很难找到一种统一而有效的解析方法来求解广义逆系统,即便借助于许多求解技巧,仍会有大量的解虽然存在但难以求出的情况.再者,工程中被控系统的精确模型通常无法获得,也就是说,常常得不到原系统的数学表达式,广义逆系统的求解更无从谈起.所以,只有另外寻求一些新的手段,借助这些手段来实现广义逆系统.

类似于作者提出的神经网络 α 阶逆系统^[10,11],本文采用一个静态神经网络和若干线性环节来构成一种动态神经网络,并用这种动态神经网络逼近广

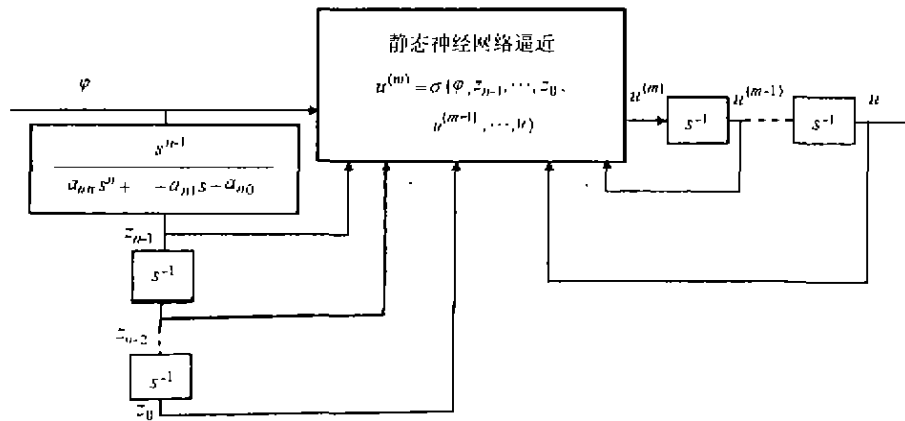
义逆系统,其中静态神经网络用来逼近方程式(9)或式(15)中的静态非线性函数 $\sigma(\cdot)$ 或 $\bar{\sigma}(\cdot)$,而用积分、惯性等线性环节来表征广义逆系统的动态特性,我们称这种基于神经网络的广义逆系统为神经网络广义逆系统.

为简化神经网络广义逆系统的构造,可将式(7)和式(14)中定义的矩阵 A 和 $A_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 分别简化为:

$$A = \begin{bmatrix} I_n & 0_{n \times 1} \\ a_{n0} \dots a_{n(n-1)} & a_{nn} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

$$A_i = \begin{bmatrix} I_{n_i} & 0_{n_i \times 1} \\ a_{i1,0} \dots a_{i1(n_i-1)} & a_{in_i} \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2, \dots, p). \quad (17)$$

式中: $0_{n \times 1}$ 和 $0_{n_i \times 1}$ 分别为 $n \times 1$ 和 $n_i \times 1$ 维零矩阵, I_n 和 I_{n_i} 分别是 $n \times n$ 和 $n_i \times n_i$ 维单位阵. 基于这种简化,我们可构造出一个结构简单的广义神经网络逆系统(如图3所示).



(a) SISO系统

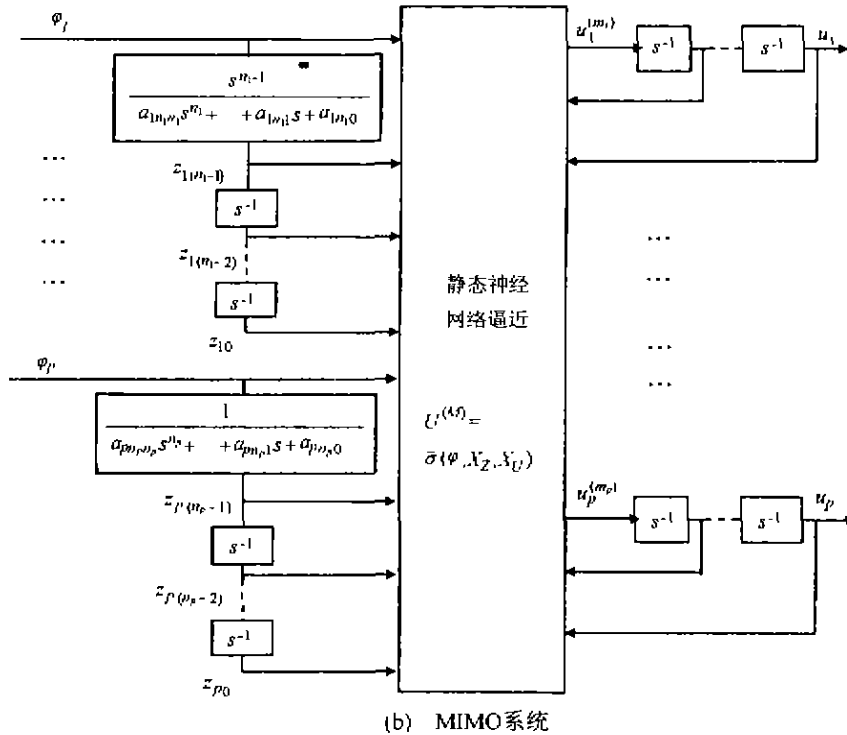


图 3 神经网络广义逆系统结构
Fig. 3 The ANN generalized inverse system

3.2 神经网络广义逆系统设计仿真实例 (Design and simulation example based on the ANN generalization inversion)

例 1 考察一非线性 SISO 连续系统

$$\ddot{y} + 1.8\dot{y} + 2.7y = u + \sin(u). \quad (18)$$

若输入量 u 的控制区间为 $(-\pi, \pi)$, 根据定理 1, 易知其广义逆系统存在. 假设原系统模型未知, 而仅有的先验知识为:

- 1) 原系统可逆;
- 2) 输出 y 和输入 u 的最高阶分为 3 和 0.

期望构造神经网络广义逆系统与原系统组成的伪线性复合系统极点配置情况为: 一对主导极点 $(-0.707 \pm 0.707j)$, 非主导极点为 (-10) . 相应的期望传递函数如下:

$$G(s) = \frac{1}{0.1s^3 + 1.1414s^2 + 1.514s + 1}. \quad (19)$$

因此, 矩阵 A 可确定为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1.514 & 1.1414 & 0.1 \end{bmatrix}. \quad (20)$$

用一个 4-8-1 结构的三层前馈神经网络和

3 个线性环节 $(\frac{s^2}{0.1s^3 + 1.1414s^2 + 1.514s + 1})$ 和 2 个积分环节 s^{-1} 来构造神经网络广义逆系统(参考图 3(a)). 本例中所用的静态神经网络是三层前馈网络, 它含有 4 个输入节点, 1 个输出节点, 5 个隐含节点.

对原系统输入激励信号(白噪声或其他的信号), 并对输入输出采样, 得 10000 组 $\{u, y\}$, 用采样所得数据离线求出 $\{\dot{y}, \ddot{y}, \ddot{y}\}$, 由

$$[z_0 \ z_1 \ z_2 \ z_3]^T = A_1 [y \ \dot{y} \ \ddot{y} \ \ddot{y}]^T \quad (21)$$

计算出神经网络训练输入数据集 $\{z_3, z_2, z_1, z_0\}$, 训练神经网络使输出逼近理想输出数据集 $\{u\}$, 达到一定所要求精度后, 令 $\varphi = z_3$ 为广义逆输入, 神经网络广义逆系统设计完毕.

这样设计的神经网络广义逆系统不但能将被控系统线性化, 而且能作为一非线性开环控制器直接使用. 由图 4 可看出, 该开环控制系统(即伪线性复合系统)的方波响应同期望线性系统的响应吻合得很好. 此外, 由于复合系统的一个极点 -10 远离主导极点, 该复合系统实际上已基本降阶为一个 2 阶线性系统 $\frac{1}{s^2 + 1.1414s + 1}$. 为增强控制系统鲁棒性, 还可很容易地设计出闭环控制器进行控制.

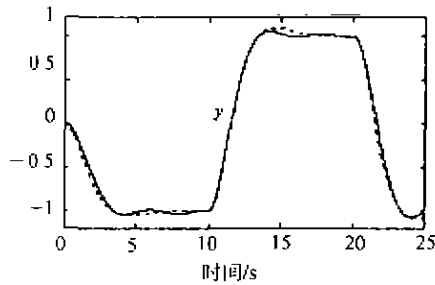
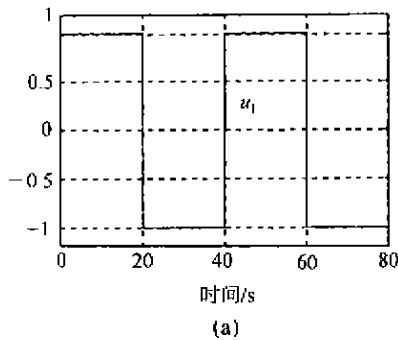
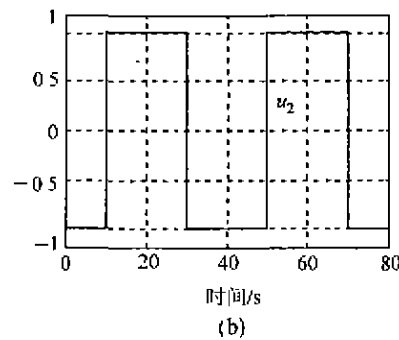


图 4 伪线性复合系统的方波响应 (实线) 及其期望响应 (虚线)

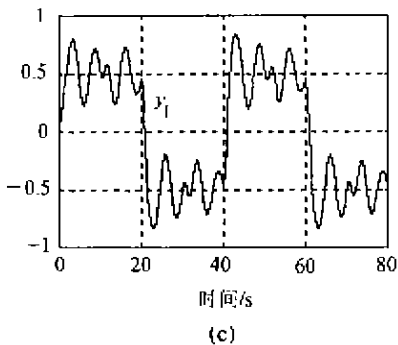
Fig 4 Square wave response (real line) and desired response (dotted line) of the pseudo-linear composite system



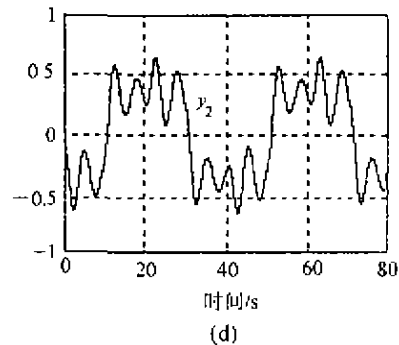
(a)



(b)



(c)



(d)

图 5 原系统对方波输入组 (a), (b) 的响应 (c), (d)

Fig 5 The responses (c), (d) and The square wave input (a), (b) of the original system

期望构造神经网络广义逆系统与原系统组成的线性化解耦系统传函为:

$$G(s) = \text{diag}\{G_{11}(s), G_{22}(s)\}. \quad (23)$$

其中:

$$G_{11}(s) = \frac{1}{s^2 + 1.1414s + 1}$$

$$G_{22}(s) = \frac{1}{0.1s^3 + 1.1414s^2 + 1.514s + 1}$$

因此确定矩阵 A_1 和 A_2 为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1.1414 & 1 \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1.514 & 1.1414 & 0.1 \end{bmatrix}. \quad (24)$$

例 2 考察一个非线性 MIMO 连续系统

$$\begin{cases} \dot{y}_1 + 0.8\dot{y}_1 + 2y_1 - \sin(\dot{y}_2) = u_1, \\ \dots \\ \dot{y}_2 + 1.8\dot{y}_2 + 2.5\dot{y}_2 + 3y_2 + 0.8\dot{y}_1 = u_2. \end{cases} \quad (22)$$

根据定理 2, 该系统的广义逆系统存在. 同样假设该系统的模型和参数未知, 仅有的先验知识如下:

- 1) 原系统可逆;
- 2) 原系统的两个输出 y_1 和 y_2 的最高阶数分别为 2 阶和 3 阶, 两个输入 u_1 和 u_2 的最高阶数都为 0 阶.

从图 5 的系统输入输出特性可看出原系统的是强耦合非线性的.

用一个 7-14-2 结构的三层前馈静态神经网络和 5 个线性环节来构造神经网络广义逆系统(参考图 3(b)), 五个线性环节依次为:

$\frac{s}{s^2 + 1.114s + 1}, \frac{1}{s}, 0.1s^3 + 1.1414s^2 + 1.514s + 1, \frac{1}{s}, \frac{1}{s}$
 采用两个有限功率的白噪声作为原系统的输入试验信号, 对系统输入输出采样得到 $\{u_1, u_2, y_1, y_2\}$, 离线计算 $\{\dot{y}_1, \ddot{y}_1, \dot{y}_2, \ddot{y}_2\}$, 再令

$$[z_{10} \ z_{11} \ z_{12}]^T = A_1[y_1 \ \dot{y}_1 \ \ddot{y}_1]^T, \quad (25)$$

$$[z_{20} \ z_{21} \ z_{22} \ z_{23}]^T = A_2[y_2 \ \dot{y}_2 \ \ddot{y}_2 \ \ddot{\ddot{y}}_2]^T, \quad (26)$$

计算出神经网络训练输入数据集 $\{z_{12}, z_{11}, z_{10}, z_{23}, z_{22}, z_{21}, z_{20}\}$, 训练神经网络使其逼近理想的输出样

本集 $|u_1, u_2|$, 达到要求精度. 令 $\varphi_1 = z_{12}, \varphi_2 = z_{23}$ 为广义逆的两个输入, MIMO系统的神经网络广义逆系统设计完毕.

将广义逆与原系统组成复合系统, 给复合系统输入图5(a)所示的方波组, 系统输出如图6所示. 从图中可以看出, 系统的两个输出之间几乎不存在耦合关系, 且各解耦子系统的响应特性与期望特性近似.

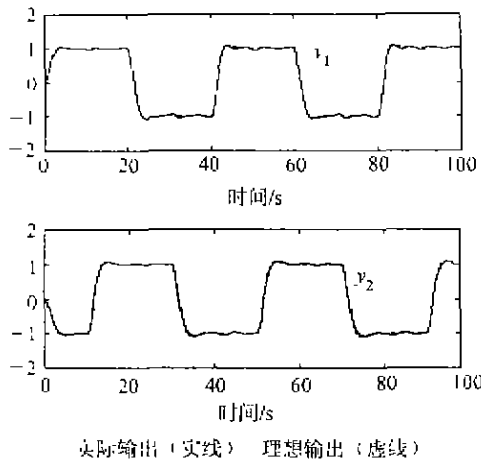


图6 伪线性复合系统对方波组输入的响应

Fig 6 The responses under the square wave input of the pseudo-linear composite system

4 小结(Conclusion)

由上分析和仿真结果可知, 本文提出的广义逆系统与神经网络广义逆系统适用于高阶非线性系统的线性化和解耦, 且本文提出的神经网络广义逆系统还具有以下一些重要特点: 1) 不需知道原系统的精确数学模型(仅仅需要知道被控系统输入输出的最高阶); 2) 无须测量被控系统内部状态; 3) 可任意配置伪线性复合系统的极点, 实现被控系统的线性化、解耦和降阶. 因此易于工程实现, 为模型未知的高阶非线性系统线性化和解耦控制找到了一条较理想的实现途径.

参考文献(References)

- [1] Cheng D, Tam T J and Isidori A. Global external linearization of nonlinear systems via feedback [J]. IEEE Trans Automatic Control, 1985, 30(8): 808-811
- [2] Cheng Daizhan. Geometry Theory of Nonlinear System [M]. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [3] Marino R & Tomei P. Nonlinear Control Design [M]. UK: Prentice Hall, 1995
- [4] Xia Xiaohua and Gao Weibing. Decoupling and Control of Nonlinear System [M]. Beijing: Science Press, 1993 (in Chinese)
- [5] Kotta U. Inversion Method in the Discrete-Time Nonlinear Control Systems Synthesis Problems [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1995
- [6] Conte G, Perdon A M and Moog C H. Nonlinear Control Design [M]. London: Springer-Verlag, 1999
- [7] Li Chunwen and Feng Yuankun. Inverse System Method for Multi-variable Nonlinear System Control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1991 (in Chinese)
- [8] Hirschorn R M. Invertibility of multivariable nonlinear control systems [J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1979, 24(8): 855-865
- [9] Gao L, Chen L and Fan Y, et al. DFL-nonlinear control design with applications in power systems [J]. Automatica, 1992, 28(5): 975-979
- [10] Dai Xianzhong, He Dan and Zhang Teng, et al. Novel method for decoupling nonlinear MIMO system with linearization (I) - Continuous-time system [J]. Control and Decision, 1999, 14(5): 403-406 (in Chinese)
- [11] He Dan. ANN inverse system method for nonlinear systems control [D]. Nanjing: Southeast University, 1999 (in Chinese)

本文作者简介

何丹 1970年生, 1999年毕业于东南大学, 获得博士学位. 当前主要研究方向为非线性控制, 神经网络, 计算机控制, 电力系统控制

戴先中 1954年生, 1986年毕业于清华大学, 获博士学位. 现为东南大学自控系教授, 博士生导师. 当前主要研究方向为非线性控制, 神经网络, 计算机控制, 机器人控制, 电力系统控制. Email: xz.dai@seu.edu.cn

王勤 1958年生, 1982年毕业于江苏理工大学, 获得学士学位, 现为东南大学自控系副教授. 当前主要研究方向为计算机应用, 自动控制, 神经网络