

文章编号: 1001-0920(2009)09-1390-04

一种新型神经网络广义逆系统

刘陆洲, 肖建, 刘杰

(西南交通大学 电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 提出一种新型带有反馈环节的广义逆系统方法, 并给出了其存在性的证明. 该方法首先利用神经网络构造被控对象的阶逆系统, 通过改变反馈环节参数可随时任意配置复合系统极点, 无需重新构造广义逆系统. 分别对 SISO 和 MIMO 非线性系统进行仿真研究. 仿真结果表明, 在配置极点变换时, 利用该方法构造的广义逆系统仍可对原系统实现有效的线性化和解耦.

关键词: 广义逆系统; 神经网络; 解耦; 非线性系统

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

A new type of generalized ANN inverse system

LIU Lurzhou, XIAO Jian, LIU Jie

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China. Correspondent: LIU Lurzhou, E-mail: llzh@mars.swjtu.edu.cn)

Abstract: A new type of generalized inverse system with feedback is proposed and its existence is proved. An ANN n -th order inverse system is established. The poles of the composite system can be assigned to the expected position by altering the parameters of the feedback part without reconstructing the generalized inverse system. The simulations of single input single output (SISO) system and multivariable input multivariable output (MIMO) system show that the new type of generalized inverse can linearize and decouple the original system efficiently when the poles change.

Key words: Generalized inverse system; Neural networks; Decouple; Nonlinear system

1 引言

利用反馈的方法将非线性系统变换为线性系统, 然后按照线性系统理论完成系统综合的方法称为反馈线性化, 逆系统方法是非线性反馈线性化方法中一种比较形象直观且易于理解的方法. 然而该方法要求被控对象的数学模型精确已知, 但在实际应用中, 非线性系统模型未知或部分未知, 从而限制了其在实际工程中的应用^[1].

由于人工神经网络、支持向量机等一些智能方法对未知非线性系统具有良好的逼近能力, 利用其构建逆系统可以弥补逆系统方法过分依赖精确的数学模型的不足^[2-6]. 戴先中等^[2,3]利用神经网络分别对离散系统和连续系统实现逆系统控制, 并提出了适合高阶系统解耦的广义逆系统, 进一步拓展了神经网络逆系统控制方法的适用范围^[4]. 宋夫华等^[5,6]则利用支持向量机无局部极小和推广性能好等优点设计逆系统, 进而根据线性系统理论对复合系统进

行综合.

在电机等复杂系统的解耦控制^[8,9]中, 简单地将逆系统或广义逆系统作为控制器, 实施开环控制, 其控制效果往往不佳. 因此必须针对复合后的伪线性子系统设计附加控制器, 以增强整个控制系统的鲁棒性. 附加控制器参数的选取必须与广义逆系统的配置极点相互配合, 使最终的控制系统达到满意效果. 传统广义逆系统只能将复合系统的极点配置到任意固定点, 当需调整复合系统期望极点以配合控制器参数时, 则必须重新辨识.

2 一种新型广义逆系统

传统的广义逆系统无法随时任意配置复合系统极点, 若能通过引入反馈环节, 将整个复合伪线性系统随时进行任意的极点配置, 将有利于与闭环控制器设计配合以提高系统的鲁棒性.

2.1 理想广义逆系统方法

新型广义逆系统思想是辨识得到被控对象的逆

收稿日期: 2008-10-16; 修回日期: 2009-01-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674057); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060613003).

作者简介: 刘陆洲(1982—), 男, 山东即墨人, 博士生, 从事非线性系统控制、智能控制的研究; 肖建(1950—), 男, 湖南衡阳人, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、鲁棒控制及计算机控制等研究.

系统,使复合伪线性系统的开环传函为纯积分形式;然后引入反馈 H ,使得整个闭环复合系统的传函为期望极点配置后的传函 G .以 SISO 连续系统为例,设期望闭环复合系统传递函数为

$$G(s) = \frac{y}{\hat{v}} = \frac{1}{a s + a_{(i-1)} s^{-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (1)$$

为使逆系统与被控对象复合后的开环传递函数为纯积分或纯时延形式,在逆系统前附加放大器,使得开环传递函数分母与期望闭环传递函数的最高次项形式相同.同时令闭环复合系统传递函数满足式(1),可得反馈环节 H 传递函数形式为

$$H = a_{(i-1)} s^{-1} + \dots + a_1 s + a_0 \quad (2)$$

这样,所得的反馈环节传递函数为期望传递函数分母的次高项形式.因此在闭环复合系统期望传递函数 G 变化时,只需改变开环放大器与反馈环节的参数即可,无需重新辨识广义逆系统.

将该逆系统方法推广到 MIMO 系统,如图 1 所示.实施解耦和极点配置后的复合系统传递函数为

$$G(s) = \text{diag}(G_{11}(s), \dots, G_{qq}(s)) = \text{diag}\left(\frac{1}{a_{1q} s^1 + a_{1(i-1)} s^{i-1} + \dots + a_{11} s + a_{10}}, \dots, \frac{1}{a_{q q} s^q + a_{q(i-1)} s^{q-1} + \dots + a_{q1} s + a_{q0}}\right) \quad (3)$$

其中

$$\hat{v}_i = y_i G_{ii}^{-1}, \quad i = 1, \dots, q; \quad (4)$$

$$H_i = a_{i(i-1)} s^{i-1} + \dots + a_{i1} s + a_{i0}, \quad i = 1, \dots, q. \quad (5)$$

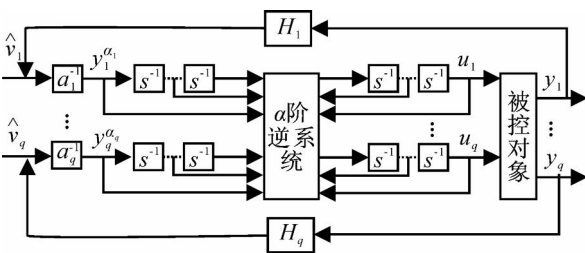


图 1 理想的新型广义逆系统与原系统复合结构

由以上结论可以看出,反馈环节的传递函数为微分形式.虽然在实际中可以通过数值方法或其他预测方法得到,但是系统受到噪声干扰时,数值方法会受较大影响,致使反馈失效.当 i 较大时则会给预测方法带来比较大的难度.因此,从系统的输出端直接反馈难度较大,不易实现.

2.2 改进的新型广义逆系统方法

由逆系统定理^[7],在一定的范围内,在逆系统输出阶次不变的情况下,只要被控对象的 α 阶逆系统的输入为 $y^{(\cdot)}$ 及其各积分项组成的向量形式,最终复合系统的输出即为 y .因此,从 α 阶逆系统的输入

端反馈代替直接从输出端反馈,可以起到上述理想的反馈环节的作用.以 MIMO 系统为例,实施解耦后的复合系统传递函数仍为式(3)所示.其改进后的新型广义逆系统如图 2 所示.

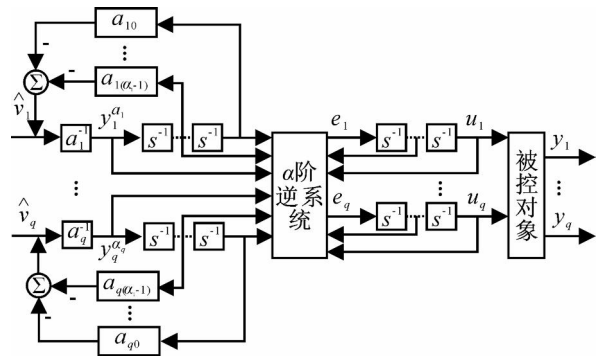


图 2 新型广义逆系统与原系统复合结构

定理 1 对于一类具有 q 维输入向量 $u = (u_1, u_2, \dots, u_q)^T \in R^q$ 和 q 维输出向量 $y = (y_1, y_2, \dots, y_q)^T \in R^q$ 的输入输出微分方程描述的系统

$$F(y^{(\cdot)T}, Y, u^{(\cdot)T}, U) = 0 \quad (6)$$

其中

$$\begin{aligned} F(\cdot) &= (f_1(\cdot), f_2(\cdot), \dots, f_q(\cdot))^T, \\ &= (1, \dots, q)^T, \quad \cdot = (1, \dots, q)^T, \\ y^{(\cdot)} &= (y_1^{(\cdot)}, y_2^{(\cdot)}, \dots, y_q^{(\cdot)})^T, \\ u^{(\cdot)} &= (u_1^{(\cdot)}, u_2^{(\cdot)}, \dots, u_q^{(\cdot)})^T, \\ Y &= (y_1^{(1-1)}, \dots, y_1, \dots, y_q^{(q-1)}, \dots, y_q), \\ U &= (u_1^{(1-1)}, \dots, u_1, \dots, u_q^{(q-1)}, \dots, u_q). \end{aligned}$$

如果在开集 D 内任意一点 $(y^{(\cdot)T}, Y, u^{(\cdot)T}, U) \in D$ 都存在

$$\det\left(\frac{\partial F}{\partial u^{(\cdot)T}}\right) \neq 0 \quad (7)$$

则该 MIMO 系统可逆,且可以构造出如图 2 所示的广义逆系统.

证明 由函数可控性定理和隐函数定理^[1]可知,若在开集 D 内任意一点均满足式(8),则在 D 上可得到 $u^{(\cdot)}$ 的唯一解为

$$u^{(\cdot)} = \Phi(y^{(\cdot)T}, Y, U) \quad (8)$$

可得到如下 α 阶逆系统:

$$\begin{cases} \dot{z}_i = A_i z_i + B_i v_i, & i = 1, \dots, q; \\ \dot{o}_i = C_i o_i + D_i e_i, & i = 1, \dots, q; \\ e = \Phi(v, z, o); \\ u = e^{(\cdot)}. \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$\begin{aligned} z_{i(j+1)} &= y_i^{(j)}, \quad i = 1, \dots, q, \quad j = 0, 1, \dots, i-1; \\ o_{i(j+1)} &= u_i^{(j)}, \quad i = 1, \dots, q, \quad j = 0, 1, \dots, i-1; \\ z &= (z_1^T, z_2^T, \dots, z_q^T)^T, \quad o = (o_1^T, o_2^T, \dots, o_q^T)^T, \end{aligned}$$

$$z_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{i_i})^T,$$

$$o_i = (o_{i1}, o_{i2}, \dots, o_{i_i})^T;$$

$u = (u_1, u_2, \dots, u_q)^T$ 为逆系统的输出; $v = (v_1, v_2, \dots, v_q)^T$ 为逆系统的输入, 且 $v_i = y_i^{(i)}$; $e_i = u_i^{(i)}$; (A_i, B_i) 和 (C_i, D_i) 分别是 i 阶和 i 阶的 Brunovsky 标准型矩阵, 且 $v_i = y_i^{(i)}$, $e_i = u_i^{(i)}$, $i = 1, \dots, q$, i 和 i 分别表示 y_i 和 u_i 导数的最高阶数; $e^{(-)} = (e_1^{(-)}, e_2^{(-)}, \dots, e_q^{(-)})^T$ 为 $e = (e_1, e_2, \dots, e_q)^T$ 的 $(-)$ 阶积分, 且有 $u = e^{(-)} = (o_{11}, o_{12}, \dots, o_{q1})^T$.

如图 2 所示, 系统输入为

$$\begin{aligned} \dot{v}_i = & a_{i_i} y_i^{(i)} + a_{i(i-1)} y_i^{(i-1)} + \dots + a_{i1} \dot{y}_i + a_{i0} y_i = \\ & a_{i_i} v_i + a_{i(i-1)} y_i^{(i-1)} + \dots + a_{i1} \dot{y}_i + a_{i0} y_i. \end{aligned} \quad (10)$$

将式(10)代入(9), 得到广义逆系统为

$$\begin{cases} \dot{z}_i = A_i z_i + B_i \dot{v}_i, & i = 1, \dots, q; \\ \dot{o}_i = C_i o_i + D_i e_i, & i = 1, \dots, q; \\ e = \Phi(v, z, o); \\ u = e^{(-)}. \end{cases} \quad (11)$$

其中

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \ddots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{a_{i0}}{a_{i_i}} & -\frac{a_{i1}}{a_{i_i}} & \dots & -\frac{a_{i(i-1)}}{a_{i_i}} \end{bmatrix},$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ 0 \\ \frac{1}{a_{i_i}} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

显然, 新构造系统(11)是原系统(9)的广义逆系统, 实现结构如图 2 所示.

值得注意的是, 改进的新型广义逆系统与传统的广义逆系统有明显的不同. 由于传统的广义逆系统, 对非线性映射辨识时采用的数据是系统的广义输入及 $y^{(i)}$ 的各积分组成的向量, 最终辨识结果与式(9)表示的 i 阶逆系统中非线性映射 Φ 不同. 而本文所提出的广义逆系统结构中的非线性映射结构与式(9)是完全相同的, 在整个复合系统期望配置极点变化时, 只需改变反馈环节的参数, 无需重新辨识广义逆系统, 为闭环控制器设计提供了便利.

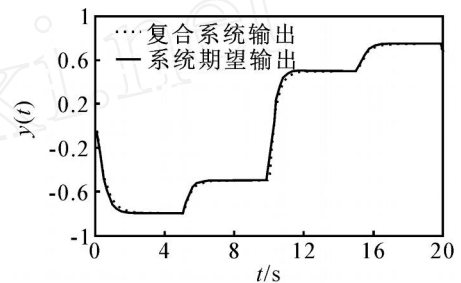
3 仿真研究

3.1 SISO 系统

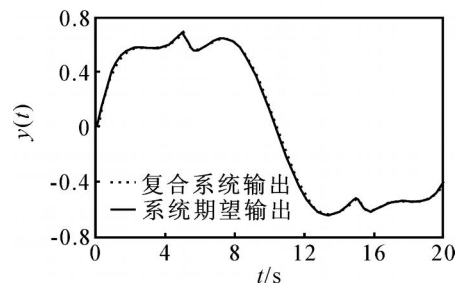
考察连续 SISO 非线性系统

$$\ddot{y} + 2y\dot{y} + 3y^3 = u, \quad \dot{y}(t_0) = y(t_0) = 0.$$

经检验该系统可逆, 且 $\mu = 2$. 为使得原系统能在较大范围内线性化, 选取白噪声作为激励信号. 设置采样时间为 0.01 s, 对系统输入输出进行采样, 用所得的 2000 组数据, 利用 5 点法离线求得输出的各阶微分, 并对数据进行归一化处理, 辨识得到神经网络阶逆系统. 给定复合系统参考输入 v 分别为方波信号和正弦叠加信号. 通过调整反馈环节参数, 首先将此复合系统极点配置到 $s_1 = 5, s_2 = 3$ 上, 分别在 $t = 5$ s 和 $t = 15$ s 时, 将复合系统极点配置到 $s_1 = 6, s_2 = 4$ 和 $s_1 = 4, s_2 = 4$. $t = 10$ s 为方波自然跳变, 复合系统输出与期望输出比较如图 3 所示. 当复合系统配置的极点发生变化时, 通过反馈形成的广义逆系统可以有效地补偿原系统, 使其精确跟踪期望输出.



(a) 输入为方波



(b) 输入为叠加正弦波

图 3 SISO 复合系统输出与期望输出

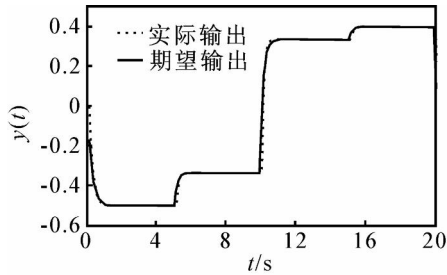
3.2 MIMO 系统

考察 MIMO 非线性系统

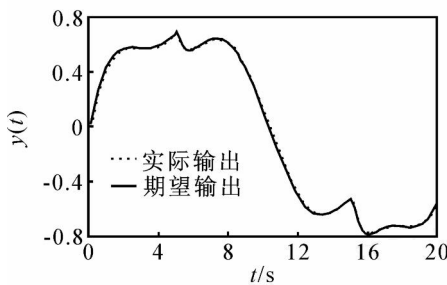
$$\begin{cases} \dot{y}_1 + 2y_1 + y_2^2 = u_1 + 2u_2, \\ y_1(t_0) = 0; \\ \ddot{y}_2 + 1.45\dot{y}_2 + 2y_2 = 1.6u_1 + u_2, \\ \dot{y}_2(t_0) = y_2(t_0) = 0. \end{cases}$$

以上 MIMO 系统相对阶 $\mu = (1, 2)$. 选用与 SISO 系统相同的方法构造 MIMO 系统的 i 阶逆系统, 并对其解耦. 为研究该方法在极点发生变化时的解耦效果, 给定两个解耦后的伪线性子系统不同的输入信号. 令第 1 个伪线性子系统输入方波信号, 其极点在 $t = 5$ s 和 $t = 15$ s 时, 将复合系统的极点从 $s_{11} = 4$ 配置到 $s_{11} = 6$ 和 $s_{11} = 5$; 令第 2 个伪线性子系统

输入为叠加正弦波,其极点在 $t = 5\text{ s}$ 和 $t = 15\text{ s}$ 时,将复合系统的极点从 $s_{21} = 5, s_{22} = 3$ 配置到 $s_{21} = 6, s_{22} = 4$ 和 $s_{21} = 3, s_{22} = 4$. 以上 2 个子系统极点变换时复合系统输出与期望输出如图 4 所示.



(a) 输入为方波



(b) 输入为叠加正弦波

图 4 MIMO 系统复合系统输出与期望输出

4 结 论

本文给出了一种新型广义逆系统设计方法,通过增加反馈环节达到复合系统极点配置的目的,并给出了该广义逆系统存在性的证明.比较了其与传统广义逆系统的区别,即只需改变反馈环节的参数即可改变复合系统配置极点,而无需重新辨识广义逆系统,方便简洁.仿真结果表明,在对原系统实施线性化和解耦过程中,通过改变反馈环节变化配置极点,该新型广义逆系统与原系统串联后的复合系统仍可保持很高的跟踪精度,为闭环控制器设计提供了方便.

参考文献(References)

[1] 戴先中. 多变量非线性系统的神经网络逆控制方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
(Dai X Z. Inverse control method of multivariable nonlinear system using neural networks [M]. Beijing: Science Press, 2005.)

[2] 戴先中, 何丹, 张兴华, 等. 非线性 MIMO 系统线性化解耦的一种新方法(I) ——连续时间系统[J]. 控制与决策, 1999, 14(5): 403-406.

(Dai X Z, He D, Zhang X H, et al. Novel method for decoupling nonlinear MIMO system with linearization (I) — Continuous-time system [J]. Control and Decision, 1999, 14(5): 403-406.)

[3] 何丹, 戴先中, 张兴华, 等. 非线性 MIMO 系统线性化解耦的一种新方法 (II) ——离散时间系统 [J]. 控制与决策, 1999, 14(6): 631-635.
(He D, Dai X Z, Zhang X H, et al. Novel method for decoupling MIMO nonlinear system with linearization (II) — Discrete-time system [J]. Control and Decision, 1999, 14(6): 631-635.)

[4] 何丹, 戴先中, 王勤. 神经网络广义逆系统 [J]. 控制理论与应用, 2002, 19(1): 34-40.
(He D, Dai X Z, Wang Q. Generalized ANN inverse control method [J]. Control Theory and Applications, 2002, 19(1): 34-40.)

[5] 宋夫华, 李平. 支持向量机 阶逆系统控制 ——离散非线性系统 [J]. 浙江大学学报, 2006, 40(12): 2008-2012.
(Song F H, Li P. Support vector machines th - order inverse control — Nonlinear discrete systems [J]. J of Zhejiang University, 2006, 40(12): 2008-2012.)

[6] 宋夫华, 李平. 支持向量机 阶逆系统控制 ——连续非线性系统 [J]. 浙江大学学报, 2007, 40(3): 386-389.
(Song F H, Li P. Support vector machines th - order inverse control — Nonlinear continuous systems [J]. J of Zhejiang University, 2007, 40(3): 386-389.)

[7] 李春文, 冯元琨. 多变量非线性系统的逆控制方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
(Li C W, Feng Y K. Inverse system method for multivariable nonlinear system control [M]. Beijing: Tshinghua University Press, 1991.)

[8] 戴先中, 张兴华, 刘国海, 等. 感应电机的神经网络逆系统线性化解耦控制 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 112-117.
(Dai X Z, Zhang X H, Liu G H, et al. Decoupling control of induction motor based on neural networks inverse [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 112-117.)

[9] 刘贤兴, 胡育文. 永磁同步电机的神经网络逆动态解耦控制 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 72-76.
(Liu X X, Hu Y W. Dynamic decoupling control of PMSM based on neural network inverse method [J]. Proc of the CSEE, 2007, 27(27): 72-76.)