

文章编号: 1671-7848(2006)06-0533-04

基于 ANN 逆模型补偿的复合控制系统仿真

曲东才, 何友

(海军航空工程学院 自动控制系统, 山东 烟台 264001)



摘 要: 为对复杂非线性系统进行辨识建模和实施有效控制, 分析了基于神经网络的非线性系统逆模型的辨识和控制原理, 研究了基于神经网络的非线性系统逆模型补偿的复合控制方法。基于复合控制思想, 对常规 PID 控制器 + 前馈神经网络逆模型补偿的复合控制结构方案进行了仿真。仿真结果表明, 基于神经网络的非线性系统逆模型补偿的复合控制结构方案是有效的、相对简单的网络结构, 可提高逆模型的泛化能力和非线性系统的控制精度。

关键词: 神经网络; 非线性系统; 逆模型; 复合控制; 仿真

中图分类号: TP 183 文献标识码: A

Simulation of Compound Control Systems Based on Compensation of ANN Inverse Model

QU Dong-cai, HE You

(Department of Automatic Control, Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China)

Abstract: In order to identify, model, effectively control to complicated nonlinear systems, the principle of identification and control of the inverse model for nonlinear system based on artificial neural network(ANN) is analyzed. The compound control structure scheme of inverse model offset for nonlinear system based on ANN is studied. Simulation study is done for the compound control scheme of the conventional PID control method with offset of the inverse model of multilayer feedforward network ANN. The simulation results show that the compound control structure scheme designed is successful and relatively simple network architecture, the generalization ability of the inverse model and the control precision for nonlinear systems can be raised.

Key words: neural networks; nonlinear system; inverse model; compound control; simulation

1 引言

系统逆模型辨识及其控制方法为设计智能控制系统开辟了新途径, 已在线性系统及某些非线性系统的设计中获得成功应用。但在实际应用中, 对大量复杂的、未知的和不确定的非线性系统, 是否能对其逆模型进行辨识建模, 仍是困扰逆模型辨识与控制的应用的主要问题。利用神经网络(ANN)的非线性逼近等优良性能, 基于各种成熟算法, 获得结构优化的 ANN 逆模型; 然后基于复合控制思想, 在开环系统中加入闭环控制, 形成复合控制系统, 即将 ANN 逆模型用于开环控制器, 补偿常规闭环控制信号, 则可有效提高非线性系统的控制精度。

2 基于 ANN 的非线性系统逆模型辨识和控制方案分析

为实现非线性系统逆模型控制, 需要首先辨识

非线性系统逆模型。直接逆模型辨识建模原理, 如图 1 所示。

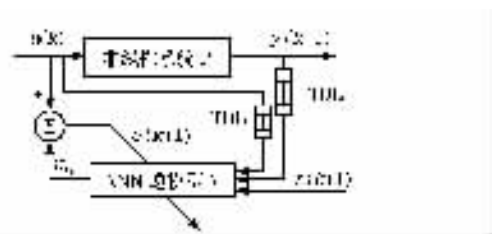


图 1 直接逆模型辨识建模原理

采用输入误差泛函形式的性能指标如下:

$$J(\theta) = \sum_{k=1}^N (u(k) - \hat{u}_m(k))^2 \quad (1)$$

但该辨识方案缺少教师监督, 给网络的实际训练增加困难^[1]。为此, 可首先辨识非线性系统的一个正向网络模型, 将其输出作为预测输出, 与非线性系统实际输出比较产生辨识误差, 并将该误差作

为逆模型的训练修正信号, 变成具有监督学习的正-逆模型辨识结构方案, 如图 2 所示。

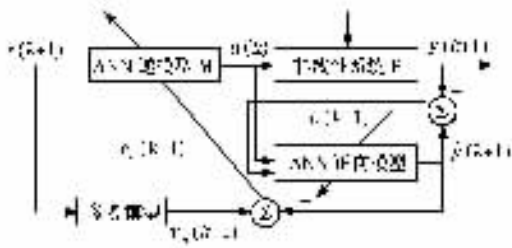


图 2 正-逆模型辨识建模原理

对图 2 辨识结构方案, 需要首先对正向模型进行训练, 并通过辨识误差信号 $e(k)$ 修正逆模型控制器权系数, 在经过充分训练后, $e(k)$ 趋近于 0, 即可得到非线性系统的 ANN 逆模型, 并用于对非线性系统进行自适应智能控制。

采用非线性系统逆模型控制的原理, 如图 3 所示^[2,3]。

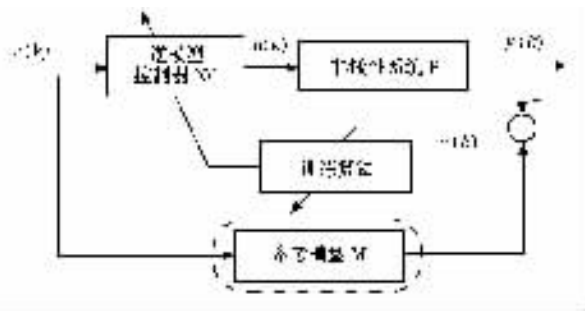


图 3 非线性系统逆模型控制原理

采用非线性系统 P 的逆模型 NC 作为控制器来控制非线性系统 P, 由于所控制非线性对象 P 是未知的, 所以首先需要辨识非线性系统对象 P 的逆, 并采用某种自适应算法调节控制器 NC 参数。在控制器控制下, 使非线性系统对象 P 输出 $y(k)$ 与参考模型 M 输出的误差 $e(k)$ 在某种性能指标意义下取得极小, 即使控制器输出的控制信号 $u(k)$ 取得最优。

如果参考模型 M 的传递函数为 1, 则非线性系统输出 $y(k)$ 跟上参考输入信号 $r(k)$ 理想情况下, $e(k) = 0$, 便成为直接逆控制; 如果 M 的传递函数不为 1, 而是某种形式的滤波器, 并且要求非线性系统对象跟踪 M 输出信号, 则系统成为模型参考自适应控制系统。参考模型动态响应选择与非线性对象期望的动态响应一致。当误差趋向于 0 时, 对象便跟上了 M, M 的性能指标便是对象的性能指标。

系统逆模型控制原理与传统反馈控制和自适应控制原理有根本不同^[2], 逆模型控制中的反馈是局部反馈, 在自适应迭代过程中, 只用于改变模型参数, 并不直接控制主回路中的信号流动, 也没有输

出到输入的闭环, 因此属于一种开环控制。

3 基于 ANN 的非线性系统逆模型补偿的复合控制

复合控制的实质是一种按不变性原理进行控制的方式, 如果系统参数选择恰当, 则可大大提高系统的控制精度。复合控制系统中的开环控制即为系统的前馈补偿控制部分。目前的高精度控制系统中, 诸如高速火炮控制系统、飞行器姿态控制系统中, 复合控制得到了广泛应用。而对具有一定智能的机器人等对象的控制, 采用神经网络等智能控制结构方案将更为有效, 如神经网络直接逆控制结构就被应用在机器人等部件的控制系统中。

如果采用 ANN 逆模型, 对系统进行输入前馈补偿, 并与原来的闭环控制器一起形成控制信号, 对系统施加控制, 以达到系统输出的优化, 则可形成一种基于 ANN 逆模型补偿的非线性系统辨识和控制结构方案, 其原理如图 4 所示。

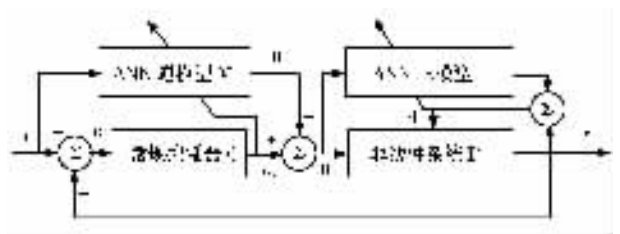


图 4 逆模型前馈补偿的控制原理

该控制结构方案中的闭环控制器 C 可选择 PID 等常规控制器形式, 也可选择其他类型的 ANN 控制器、模糊控制器形式^[3], 其输出为 u_f , 并且 u_f 信号作为 ANN 逆模型的误差信号进行学习; 非线性系统 P 的 ANN 逆模型 M 作为前馈控制器, 输出为 u_c , 则非线性系统 P 的输入控制量为 $u = u_f + u_c$ 。采用某种 ANN 学习算法, 网络逆模型在经过一定次数的迭代学习后, $u_f \rightarrow 0$, $u_c \rightarrow u$, 此时, $e \rightarrow 0$, $y \rightarrow r$, 反馈控制不再起作用, 此时非线性系统逆模型训练结束, 并依训练好的逆模型对非线性系统施加控制作用。非线性系统逆模型的训练通常是在线进行的, 也可采用离线训练方式^[4]。

该控制方案特点是对逆模型网络训练初值不敏感^[5], 这是因为训练开始时, 即使逆模型网络初值选择不当, 但由于有常规控制器 C 的作用, 仍能使非线性控制系统稳定工作; 该控制方案还是一种“目标导向”的监督学习方式, 是一种较合理的逆模型训练方案; 对常规控制器 C 的设计不要求最优性, 只要事先设计的常规控制器 C 能够使非线性系统稳定工作即可, 而设计这样的常规控制器也是相

对容易的。

如采用 PID 控制器作为常规控制器 C，则其控制规律为

$$u_f(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

式中 K_p, K_i, K_D 为 PID 控制器参数； $e(t)$ 为控制器输入偏差信号； $u_f(t)$ 为控制信号。

在实际控制系统中，由于纯微分环节作用难以实现，将其设计为一个带有惯性环节的微分环节，式(2)控制规律传递函数近似为

$$u_f(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_D s}{1 + \alpha T_D s} \right) e(s) \quad (3)$$

式中 T_i, T_D 分别为积分和微分时间常数。

ANN 网络模型采用 BP MFN。设计网络结构为三层 BP MFN 网络，网络目标函数采用 MSE 形式，优化算法采用 L-M 算法。通过对非线性系统 P 的正、逆模型辨识建模后，采用辨识得到的正模型输出作为非线性系统的预测输出，逆模型作为前馈控制器，对非线性系统的控制进行补偿。

4 仿真研究

非线性系统的数学描述为

$$\dot{y}(t) + 1.15\dot{y}(t) + 1.05(y(t) + \sin(y(t))) + 0.85y^3(t) = u(t) \quad (4)$$

对 PID 参数进行设置： $K_p = 70.65, T_D = 1.5, T_i = 16.75, \alpha = 0.1$ 。仿真采样时间 0.05 s 。由式(4)所辨识建模的非线性系统逆模型为二阶系统，为使网络结构简单，设计一个三层 BP MFN 网络，网络输入采用 1 个过去的控制输出 $u(t-1)$ 2 个系统过去输入 $y(t-1), y(t)$ ，1 个系统当前输出 $y(t+1)$ ，网络逆模型输出为当前网络输出 $u(t)$ ，即 ANN 逆模型控制器输出 $u_c(t)$ 。

网络隐层节点传函取双曲正切函数，输出节点传函取线性函数，隐层维数为 5 维，其逆模型网络结构，如图 5 所示^[6]。

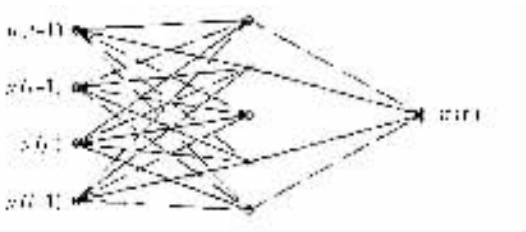


图 5 MFN 逆模型网络结构

为考察不同隐层维数的 MFN 结构网络的辨识建模和控制精度，同时对隐层维数 10 维和 15 维进行了仿真。对 ANN 逆模型进行 400 次训练后，获

得非线性系统的网络逆模型，然后将该网络逆模型作为前馈补偿控制器，与 PID 常规控制器一起形成控制信号： $u(t) = u_c(t) + u_f(t)$ ，对非线性系统实施控制。其仿真结果，如图 6~图 8 所示。

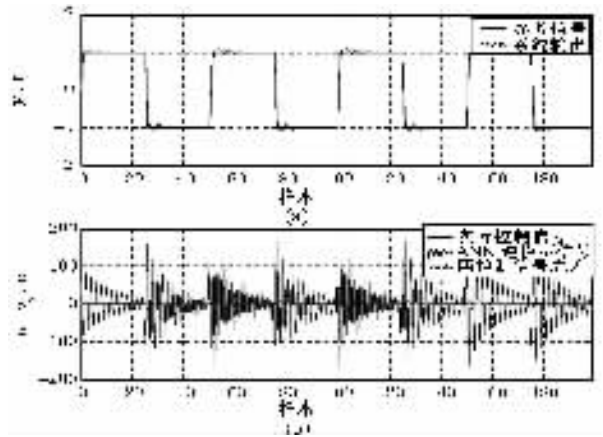


图 6 逆模型前馈补偿的 PID 控制算法仿真、控制信号及误差曲线 ($n = 5$)

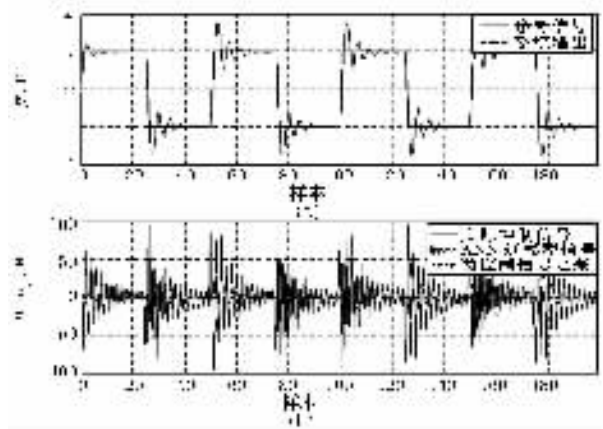


图 7 逆模型前馈补偿的 PID 控制算法仿真、控制信号及误差曲线 ($n = 10$)

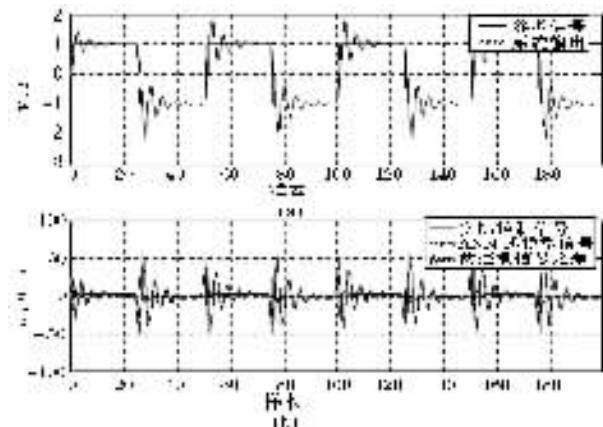


图 8 逆模型前馈补偿的 PID 控制算法仿真、控制信号及误差曲线 ($n = 15$)

(下转第 566 页)