

DOI: 10.7652/xjtuxb201912020

阀控非对称缸系统神经网络 多逆模型切换控制研究

曾乐^{1,2}, 谭建平¹, 许文斌², 杨俊³

(1. 中南大学机电工程学院高性能复杂制造国家重点实验室, 410083, 长沙; 2. 长沙航空职业技术学院航空机械制造系, 410124, 长沙; 3. 湖南师范大学工程与设计学院, 410081, 长沙)

摘要: 为提高存在负叠合量的阀控非对称缸系统的控制性能,提出基于神经网络的逆系统控制方法,利用神经网络逼近的逆模型与原系统复合,将复杂非线性系统转变为线性系统进行控制,建立了阀控非对称缸系统的数学模型,系统在 (x_0,u) 的邻域内存在相对阶,证明了系统的可逆性;采用基于遗传算法改进的 BP 神经网络(GA-BP)求解逆模型,并针对伺服阀存在负叠合量,以及流态存在层流和紊流两种状态的问题,建立系统的多个逆模型集,提高了逆系统的求解精度。利用 AMESIM 和 Simulink 联合仿真平台,基于参考速度切换的原则,对系统采用比例-积分-微分(PID)闭环控制器。结果表明:普通 PID 控制的液压缸伸出运动响应和缩回运动响应不一致,伸出运动存在 0.20 mm 的稳态误差,误差波动范围为 0.06 mm,而缩回运动稳态误差较小,约为 0.02 mm,但误差波动较大,约为 0.09 mm;多逆系统复合控制的伸出缩回运动响应较一致,伸出和缩回运动均存在 0.02 mm 的稳态误差,误差波动范围为 0.04 mm,验证了多逆模型切换控制方法可以消除阀控非对称缸系统的非对称性,降低波动负载干扰影响,提高系统的响应精度。

关键词: 阀控非对称缸系统;神经网络逆系统;负叠合;多逆模型切换

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)12-0153-08

Multi-Inverse Model Switching Control for Valve-Controlled Asymmetric Cylinder Systems Based on Neural Network

ZENG Le^{1,2}, TAN Jianping¹, XU Wenbin², YANG Jun³

(1. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Aviation Machinery Manufacturing Department, Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, Changsha 410124, China; 3. College of Engineering and Design, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: A control method based on a neural network inverse system is proposed to improve the control performance of valve-controlled asymmetric cylinder systems with negative overlap. An inverse model of neural network approximation is used to transform the complex nonlinear system into a linear system. A mathematical model is established for the valve-controlled asymmetric cylinder system, and the system exists relative orders in the neighborhood of (x_0,u) , which proves the reversibility of the system. An improved BP neural network based on a genetic algorithm (GA-BP) is used to solve the inverse model. Aiming at the problems of the negative

overlap and the laminar and turbulent flow in the servo valve, several inverse models for the system are established to improve the accuracy of the inverse system. Finally, a simulation platform combined with AMESIM and Simulink is used, and a proportional-integral-derivative (PID) closed-loop controller is adopted for the system based on the principle of reference speed switching. Results show that the extending motion response and retracting motion response of the hydraulic cylinder controlled by ordinary PID are inconsistent. There is a steady error of 0.20 mm in the extending motion, and the error fluctuation range is 0.06 mm. There is only 0.02 mm steady error in the retracting motion, and the range of error fluctuation is 0.09 mm. While the responses of both the extending and retracting motion controlled by the multi-inverse system is comparatively consistent. Both the extending and retracting motion has a steady error of 0.02 mm, and the error fluctuation range is 0.04 mm. These results verify that the multi-inverse model switching control method can effectively eliminate the asymmetry of the valve-controlled asymmetric cylinder system, reduce the impact of fluctuating load disturbance and improve the response accuracy of the system.

Keywords: valve-controlled asymmetric cylinder system; neural network inverse system; negative overlap; multi-inverse model switching

伺服阀控非对称缸系统结构紧凑,工作空间小,且具有驱动能力强、响应速度快、定位功能良好等优点,因而广泛应用于工业、军事、海洋等领域。然而,伺服阀控非对称缸系统受到摩擦力、死区、油液压缩性、内泄漏等因素影响,且存在模型参数不确定、缸结构不对称问题,是一个参数不确定且非对称的时变非线性系统^[1-2]。

文献[3-4]对比了对称阀控非对称缸和非对称阀控非对称缸系统的压力特性、输出特性,证明非对称阀控制非对称缸的方式可以改善液压缸换向时的压力冲击,提高系统承载能力和系统性能。由于非对称液压阀基础理论和产品极其少见,尤其是非对称液压阀的学术思想尚未普及,目前工程实践中往往采用对称伺服阀控制非对称液压缸^[5]。

为了提高对称阀控非对称缸系统的响应性能,消除负载、结构引起的非对称响应,有学者设计压差补偿控制策略^[6-7];该策略能在一定程度上降低负载干扰的影响,提高系统的控制精度,且方法简单。伺服阀阀口台肩加工误差导致伺服阀均存在不同程度的负叠合量^[8],对于系统控制性能,尤其是精度具有一定的影响。文献[9-10]针对伺服阀的死区提出了补偿方法,提高了伺服阀死区流量线性度。伺服阀内部流态变化也是导致伺服阀流量非线性原因之一^[11-12]。然而,大部分的控制研究如反馈线性化控制^[13],忽略了死区和流态的影响,建立了近乎线性的伺服阀的数学模型,导致控制系统性能下降。

逆系统方法是反馈线性化控制的一个分支。东

南大学戴先中等提出利用神经网络逼近非线性函数的功能,将原系统的输入输出变量对调构造逆系统,与原系统串接成 α 阶积分伪线性复合系统,解决了非线性系统建模难、控制难的问题^[14-17]。姚建勇等利用已知的系统参数构建系统动态逆模型,并通过传统比例(P)-积分(I)-微分(D)(PID)复合控制提高了系统的跟踪性能和鲁棒性^[18],但是动态逆控制对建模误差非常敏感。Knohl等针对三位四通比例阀存在较大的死区影响,构建了系统的动态模型,该模型由死区静态非线性和其他线性部分组成,采用神经网络补偿静态非线性特性影响,有效地消除了伺服阀死区影响^[19]。Milić和Guo等对阀控非对称缸系统设计了鲁棒控制策略,提高了液压伺服系统的响应性能,且控制策略对于参数多变和系统强干扰具有较强的鲁棒性^[20-21]。

本文的研究对象为对称伺服阀控非对称缸系统,文中提及的阀均为对称阀。125 MN挤压机、300 MN模锻水压机节流系统均采用阀控非对称缸系统驱动水阀阀芯开口度,从而控制模锻挤压速度。由于阀控非对称缸系统具有强非线性、非对称性、波动的拉力负载干扰,阀芯运动精度较差,挤压速度不稳定,挤压、锻压制品质量下降。本文针对阀控非对称缸的控制问题,提出一种基于神经网络多个逆模型切换的控制方法,将复杂非线性系统通过神经网络求逆补偿,变成二阶线性系统,采用成熟的线性控制策略提高系统的控制性能。

1 阀控非对称缸系统建模

1.1 系统描述

伺服阀滑阀由阀芯和阀套组成。存在负叠合量的伺服阀控非对称缸系统原理图如图 1 所示。所谓负叠合量,是指当阀芯位于阀套的中间位置时,阀芯台肩的 4 条工作棱边和阀套相应的方孔的工作边的轴向配合存在一定间隙(图 1 中的 $\Delta_{1R} \sim \Delta_{2S}$)。负叠合主要影响伺服阀的零位特性,如滞环、零位泄漏,也影响整个系统的控制精度和稳定性。系统的参数描述如表 1 所示。

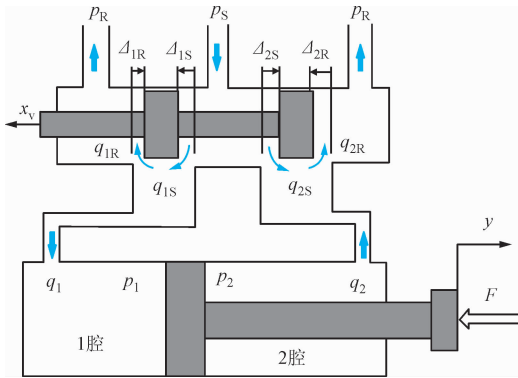


图 1 伺服阀控非对称缸原理图

1.2 节流口流量模型

流入 1 腔的节流口流量模型:

$$q_{1S} = \begin{cases} 0, & x_v \leq -\Delta_{1S} \\ a(p_S - p_1)^{1/2}(\Delta_{1S} + x_v), & -\Delta_{1S} \leq x_v \leq L - \Delta_{1S} \\ a(p_S - p_1)^{1/2}L, & L - \Delta_{1S} \leq x_v \end{cases} \quad (1)$$

式中: $a=C_d\omega\sqrt{2/\rho}$, C_d 一般取常数,约为 0.68。

流出 1 腔的节流口流量模型

$$q_{1R} = \begin{cases} 0, & -x_v \leq -\Delta_{1R} \\ a(p_1 - p_R)^{1/2}(\Delta_{1R} - x_v), & -\epsilon_{1R} \leq -x_v \leq L - \Delta_{1R} \\ a(p_1 - p_R)^{1/2}L, & L - \Delta_{1R} \leq -x_v \end{cases} \quad (2)$$

设定饱和函数

$$z(x, \Delta, L) = \begin{cases} 0, & x \leq -\Delta \\ x + \Delta, & -\Delta \leq x \leq L - \Delta \\ L, & L - \Delta \leq x \end{cases} \quad (3)$$

根据式(1)~(3),1 腔总的流量模型表示为

$$q_1 = q_{1S} - q_{1R} = a(p_S - p_1)^{1/2}z(x_v, -\Delta_{1S}, L) - a(p_1 - p_R)^{1/2}z(-x_v, \Delta_{1R}, L) \quad (4)$$

表 1 系统参数描述

参数符号	描述
p_S	系统的供油压力
p_R	系统的回油压力
p_1	液压缸无杆腔压力
p_2	液压缸有杆腔压力
C_d	流量系数
$\Delta_{1S}, \Delta_{1R}, \Delta_{2S}, \Delta_{2R}$	伺服阀芯叠合量
ω	伺服阀面积梯度
f_N	伺服阀固有频率
t	时间
ρ	油液介质密度
x_v	伺服阀芯位移
L	伺服阀阀芯最大位移
G	伺服阀放大系数
I_N	伺服阀参考输入电流
u	伺服阀归一化输入信号
Q_N	伺服阀名义输出流量
P_N	伺服阀名义阀口压差
B	黏性阻尼系数
E	油液弹性模量
y	液压杆位移
q_{1S}	泵流入无杆腔的流量
q_{2S}	泵流入有杆腔的流量
q_{1R}	无杆腔流入油箱的流量
q_{2R}	有杆腔流入油箱的流量
A_1	无杆腔的作用面积
A_2	有杆腔的作用面积
D	液压缸活塞直径
d	液压缸杆径
V_{10}	无杆腔的初始液压体积
V_{20}	有杆腔的初始液压体积
E	液压油的体积模量
C_i	液压缸内泄漏系数
C_e	液压缸外泄漏系数
n	非对称液压缸的面积比
F	液压缸外部负载
m	液压缸驱动的惯性质量
F_f	液压杆运动的摩擦力
Re_c	临界雷诺数
ν	油液的运动黏度
x	系统状态变量集
$G(s)$	配置后的系统传递函数

同理,2 腔总的流量模型可以表示为

$$q_2 = q_{2R} - q_{2S} = a(p_2 - p_R)^{1/2}z(x_v, -\Delta_{2R}, L) - a(p_S - p_2)^{1/2}z(-x_v, \Delta_{2S}, L) \quad (5)$$

伺服阀位移与输入信号的关系近似线性关系, 可以表示为

$$x_v = Gu \quad (6)$$

1.3 液压缸模型

液压缸的负载力平衡方程可表示为

$$A_1 p_1(t) = m\ddot{y}(t) + B\dot{y}(t) + A_2 p_2(t) + F_L + F_f \quad (7)$$

液压缸的流量连续方程

$$\dot{p}_1(t) = \frac{E}{V_1(t)}\{q_1(t) - A_1\dot{y} - C_i[p_1(t) - p_2(t)] - C_e p_1(t)\} \quad (8)$$

$$\dot{p}_2(t) = \frac{E}{V_2(t)}\{-q_2(t) + A_1\dot{y} + C_i[p_1(t) - p_2(t)] - C_e p_1(t)\} \quad (9)$$

式中: $V_1(t) = V_{10} + A_1 y$; $V_2(t) = V_{20} - A_2 y$ 。

1.4 系统模型状态空间描述

根据式(1)~(9), 选择系统位移、速度、液压缸两腔压力为状态变量, 即

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T = [y, \dot{y}, p_1, p_2]^T$$

综合式(1)~(9), 可得系统的非线性状态模型如式(10)所示:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{m}(-Bx_2 + A_1x_3 - nA_1x_4 - F_f - F_L) \\ \dot{x}_3 &= -\frac{EA_1}{V_{10} + A_1x_1}x_2 - \frac{E(C_i + C_e)}{V_{10} + A_1x_1}x_3 + \frac{EC_i}{V_{10} + A_1x_1}x_4 + g_1(x) \\ \dot{x}_4 &= \frac{nA_1E}{V_{20} - A_2x_1}x_2 + \frac{E(C_i - C_e)}{V_{20} - A_2x_1}x_3 - \frac{EC_i}{V_{20} - A_2x_1}x_4 - g_1(x) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: $g_1(x) = \frac{aE}{V_{10} + A_1x_1}[(p_S - x_3)^{1/2}z(Gu, -\Delta_{1S}, L) - (x_3 - p_R)^{1/2}z(-Gu, \Delta_{1R}, L)]$; $g_2(x) = \frac{aE}{V_{20} - A_2x_1}[(x_4 - p_R)^{1/2}z(Gu, -\Delta_{2R}, L) - (p_S - x_4)^{1/2}z(-Gu, \Delta_{2S}, L)]$ 。

2 阀控非对称缸系统的逆系统构造

根据相对阶的定义, 对阀控非对称缸系统输出函数 $y = x_1$ 求导, 使得显含 u , 可得

$$\left. \begin{aligned} \dot{y} &= \dot{x}_1 = x_2 \\ \ddot{y} &= \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(-Bx_2 + A_1x_3 - nA_1x_4 - F_f - F_L) \\ \dddot{y} &= \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(-B\dot{x}_2 + A_1\dot{x}_3 - nA_1\dot{x}_4) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由式(11)可知, $\frac{\partial y}{\partial u} = \frac{\partial \dot{y}}{\partial u} = \frac{\partial \ddot{y}}{\partial u} = 0$, 而

$$\frac{\partial \ddot{y}}{\partial u} = \frac{A_1}{m} \frac{\partial g_1(x)}{\partial u} + \frac{nA_1}{m} \frac{\partial g_2(x)}{\partial u} \quad (12)$$

在阀开口的有效行程内, $\frac{\partial \ddot{y}}{\partial u} \neq 0$, 因此系统存在相对阶, 相对阶 $\alpha = 3$ 。

根据可逆定理, 系统在 (x_0, u) 的某个邻域内可逆的充分必要条件为在此邻域内存在相对阶 $\alpha = 3$, 故阀控非对称缸系统在 (x_0, u) 邻域内可逆^[22]。

在理论上可以得到基于状态方程描述的逆系统式为

$$u = \phi(\ddot{y}, \dot{y}, y, p_1, p_2) \quad (13)$$

为了降低系统阶数, 增加系统状态参数 $\dot{x}_3, \dot{x}_4$ 的反馈, 根据式(11)可知

$$\ddot{y} = \dot{x}_2 = \frac{1}{m}(-B\dot{x}_2 + A_1\dot{x}_3 - nA_1\dot{x}_4) \quad (14)$$

构造基于状态的逆系统方程

$$u = \varphi(\dot{y}, \dot{y}, y, p_1, p_2, \dot{p}_1, \dot{p}_2) \quad (15)$$

逆系统输入的变量为 $\{\dot{y}, \dot{y}, y, p_1, p_2, \dot{p}_1, \dot{p}_2\}$, 输入变量去掉了位移三阶导数 $\ddot{y}$, 增加状态反馈量 $\dot{p}_1, \dot{p}_2$, 输出变量为 u 。逆系统和原系统复合的示意图如图 2 所示, 系统转换成了二阶线性系统。

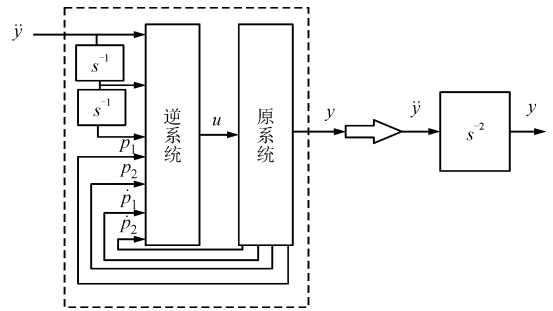


图 2 阀控非对称缸系统线性化示意图

3 基于 GA-BP 神经网络逆模型的训练仿真

3.1 AMESIM 仿真模型

针对阀控非对称缸系统伺服阀负叠合量非对称, 外部负载干扰特点, 建立 AMESIM 仿真模型, 设置外部负载拉力为 $-2\ 500\ \text{N}$, 以频率为 $1\ \text{Hz}$ 、幅

值为 500 N 的正弦波波动,设置伺服阀非对称的负叠合量,其中 Δ_{1S} 、 Δ_{2R} 为阀最大行程的 0.05, Δ_{1R} 、 Δ_{2S} 为阀最大行程的 0.03,模型参数如表 2 所示。

表 2 阀控非对称缸系统 AMESIM 的模型参数

参数	数值	参数	数值
P_S/MPa	5	P_N/MPa	3
I_N/mA	1	$Q_N/(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	9
Re_c	1 000	$B/(\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1})$	2 000
D/m	0.5	f_N/Hz	100
d/m	0.028	Δ_{1S}, Δ_{2R}	0.05, 0.05
m/kg	50	Δ_{1R}, Δ_{2S}	0.03, 0.03

3.2 基于 GA-BP 的神经网络逆系统训练

为解决神经网络在线学习和调整难以实现的问题,在工作区域内,充分激励原系统,采集数据样本,离线训练得到逆系统的模型。考虑到液压缸行程限制,为了充分激励系统,合理设置随机信号范围和时间,使得液压缸作往复运动。

采集间隔为 0.005 s,获得输入输出数据 $\{u, y, \dot{y}, p_1, p_2\}$,对数据 y, p_1, p_2 进行微分,得到 $\dot{y}, \dot{p}_1, \dot{p}_2$,构成了神经网络训练数据样本 $\{u, y, \dot{y}, \dot{p}_1, \dot{p}_2, p_1, p_2\}$ 。将 0~100 s 的样本数据用于训练神经网络,100~110 s 的样本数据用于验证神经网络。

设置 7 个逆系统输入变量,1 个输出变量,神经网络隐含层数为 10。由于输入变量多,且参数时变性大,采用普通的 BP 神经网络学习无法收敛。为了提高离线学习模型的准确性及收敛速度,采用遗传算法优化 BP 神经网络(GA-BP)的初始权值和阈值^[23],加速神经网络的收敛。采用 GA-BP 的神经网络求解的输出值与训练样本中实际的输出值对比,如图 3 所示。可以看出,GA-BP 神经网络能较准确地对系统求逆,且收敛速度快。

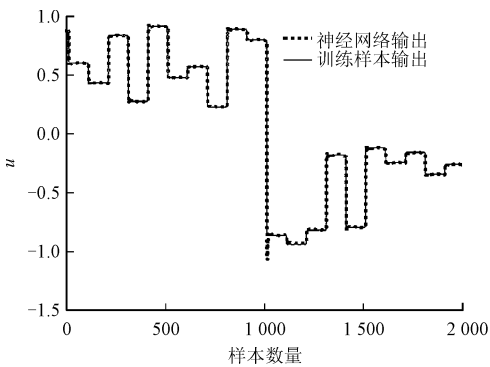


图 3 神经网络输出与训练样本输出变量值对比

3.3 逆系统分段模型建立

文献[11-12]表明,伺服阀开口或阀口压差较小时,阀口流动状态处于层流,其流量与阀开口度具有非线性关系。

$$q_{1S} = \sqrt{\frac{\kappa^2}{16} + a^2(p_S - p_1)(\Delta_{1S} + x_v)} - \frac{\kappa}{4}$$

(16)

式中: $\kappa = Re_c(\omega + x_v)\nu$ 。当阀开口 x_v 较小且压差 $(p_S - p_1)$ 较小时, $a^2(p_S - p_1)(\Delta_{1S} + x_v)$ 项值较小, κ 值不可忽略,流量非线性明显;当阀开口较大或压差较大时, $a^2(p_S - p_1)(\Delta_{1S} + x_v)$ 项值较大, κ 值影响小,流量非线性减弱,流量公式简化为式(1)。大部分研究流量建模不考虑流态引起的非线性影响,均采用式(1)经典流量模型^[6-7,20]。

当伺服阀阀口较小时,负叠合量和层流的非线性影响使得系统的数学模型与开口较大时相比,不确定性和非线性更强。图 3 中训练的神经网络逆模型求解伺服阀小开口状态的输出时误差较大,求解结果如图 4 所示。

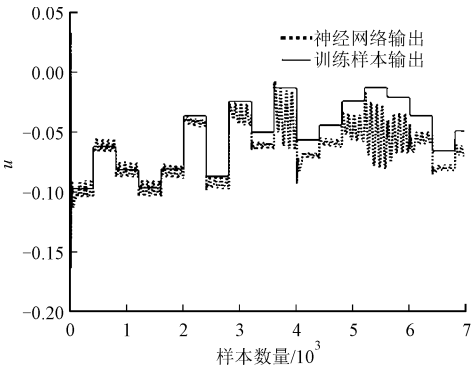


图 4 逆模型 A 对阀小开口状态输出拟合

针对伺服阀内部流态变化及叠合量影响,将系统模型根据伺服阀开口进行分段。设伺服阀大开口状态神经网络逆模型为 A,即 3.2 节所训练的神经网络模型,设阀小开口状态的神经网络逆模型为 B。对于不同的系统,伺服阀型号和工况不同,小开口状态的开口度范围不同。通过调试发现,将伺服阀输入信号范围缩小在 -0.1~0.1,根据其充分激励系统后的训练数据集样本进行学习训练,得到神经网络逆模型 B 能够较高精度求解伺服阀小开口状态输出值,效果如图 5 所示。

4 伪线性系统控制研究

为了使复合二阶系统稳定,配置一对主导极点

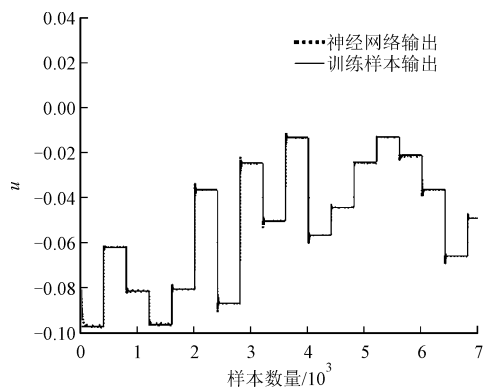


图5 逆模型 B 对阀小开口状态输出拟合

为 $-1.1 \pm j6.228$, 系统期望的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{0.025s^2 + 0.055s + 1} \quad (17)$$

基于二阶伪线性系统设计 PID 闭环控制器, 进一步提高系统的控制性能。由于逆模型是根据系统期望响应值及状态参数估计系统开口度, 逆模型 A 和 B 无法根据伺服阀开口进行切换, 而伺服阀开口度与系统速度紧密相关, 通过设置合理的参考速度实现逆模型切换。阀控非对称缸系统神经网络多逆模型控制结构如图 6 所示。

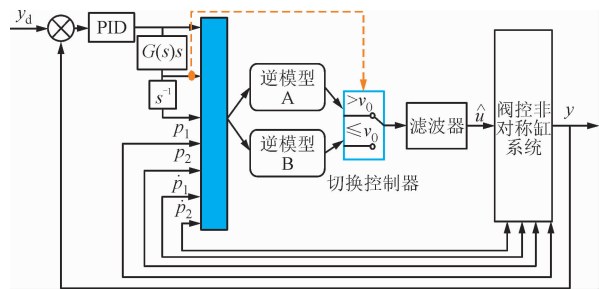
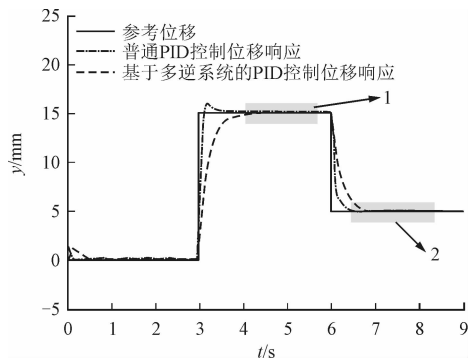


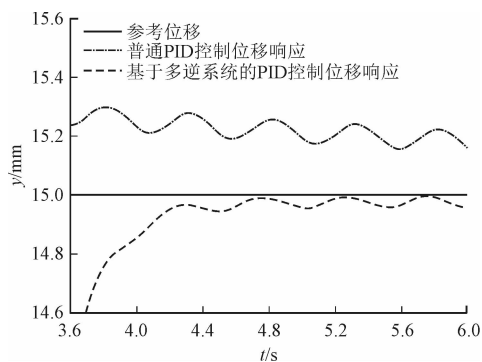
图6 阀控非对称缸系统的神经网络多逆模型切换控制结构图

搭建 AMESIM 与 Simulink 联合仿真平台, 通过多逆模型切换的 PID 闭环控制与普通的 PID 闭环控制对比, 结果如图 7 所示。多逆系统复合控制的液压缸伸出和缩回运动响应相比普通 PID 控制超调减小, 且响应时间均为 1.2 s。从控制精度上来看, 如图 7b、图 7c 所示: 普通 PID 控制液压缸伸出运动位移误差约为 0.20 mm, 误差波动约为 0.06 mm, 缩回运动运动误差约为 0.02 mm, 误差波动约为 0.09 mm; 多逆系统复合控制的伸出缩回运动位移稳态误差约为 0.02 mm, 误差在 0.04 mm 波动。可见, 多逆系统复合控制较普通 PID 控制稳态误差大大降低, 且误差波动随负载波动更小, 验证了多逆系统复合控制能够消除系统非对称响应特性, 补偿

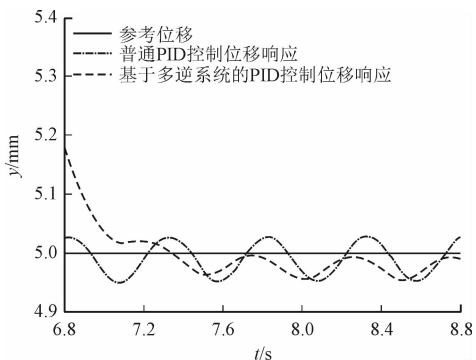
伺服阀负叠合对于系统精度的影响, 对于正弦负载干扰鲁棒性强于普通 PID 控制。



(a) 多逆系统 PID 控制与普通 PID 控制响应图



(b) 图 7a“1”处放大图



(c) 图 7a“2”处放大图

图7 液压缸运动响应仿真结果

5 结 论

针对阀控非对称缸系统结构非对称、模型参数不确定、伺服阀叠合量影响、波动负载干扰等问题, 提出了多个神经网络逆模型的建模方法, 将复杂非线性控制问题转化为线性系统控制问题。

(1) 通过阀控系统建模和可逆性分析, 在逆系统输入变量中去掉位移三阶导数 $\ddot{y}$ 变量, 增加状态参数 $\dot{p}_1$ 、 $\dot{p}_2$ 的反馈, 神经网络逆模型的输出与样本输出基本重合, 同时降低了复合系统的阶数, 便于系统

控制器的设计。

(2)根据伺服阀流动状态有层流和紊流两种状态及叠合量影响,建立基于伺服阀开口的分段逆模型,分段逆模型集提高了逆模型精度,使得实际样本输出信号与求解信号误差降低。

(3)搭建 AMESIM 与 Simulink 联合仿真平台,将阀控非对称缸系统采用普通 PID 控制和多逆模型切换控制结果进行对比,多逆模型切换控制在控制精度上明显优于普通 PID 控制,且消除了系统非对称特性和死区对控制性能的影响,提高了抗波动负载干扰的能力。

参考文献:

- [1] 杨军宏,尹自强,李圣怡. 阀控非对称缸的非线性建模及其反馈线性化 [J]. 机械工程学报, 2006, 42(5): 203-207.
YANG Junhong, YIN Ziqiang, LI Shengyi. Nonlinear modeling and feedback linearization of valve-controlled asymmetrical cylinder [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(5): 203-207.
- [2] 汪首坤,彭建敏. 带遗忘因子的预测迭代学习控制在阀控非对称缸系统中的应用研究 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(10): 191-198.
WANG Shoukun, PENG Jianmin. Forecast iterative learning control with forgetting factor and its application in valve-controlled asymmetric cylinder [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(10): 191-198.
- [3] 马立峰,韩贺永,黄庆学,等. 液压滚切剪液压系统的换向冲击分析 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2012, 42(6): 1396-1401.
MA Lifeng, HAN Heyong, HUANG Qingxue, et al. Analysis of commutation impact in hydraulic system of hydraulic rolling shear [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(6): 1396-1401.
- [4] 李洪人,王栋梁,李春萍. 非对称缸电液伺服系统的静态特性分析 [J]. 机械工程学报, 2003, 39(2): 18-22.
LI Hongren, WANG Dongliang, LI Chunping. Static property analysis of electrohydraulic single rod cylinder servo systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39(2): 18-22.
- [5] 阎耀保. 高端液压元件理论与实践 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2017: 222.
- [6] 柏艳红,权龙. 电液位置速度复合伺服系统控制策略 [J]. 机械工程学报, 2010, 46(24): 150-155.
BAI Yanhong, QUAN Long. Control strategy of the electro-hydraulic position and speed hybrid servo system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(24): 150-155.
- [7] 张飞,童朝南,彭开香,等. 液压位置控制系统的自适应补偿 [J]. 机械工程学报, 2005, 41(5): 94-97.
ZHANG Fei, TONG Chaonan, PENG Kaixang, et al. Adaptation compensation of hydraulic servo control system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(5): 94-97.
- [8] 潘旭东,王广林,邵东向,等. 伺服阀滑阀叠合量测量方法 [J]. 振动、测试与诊断, 2009, 29(4): 392-397, 475.
PAN Xudong, WANG Guanglin, SHAO Dongxiang, et al. Measurement of spool valve overlap value of servo valve [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2009, 29(4): 392-397, 475.
- [9] 张辉,刘江,关广丰,等. 伺服比例阀非线性校正方法研究 [J]. 机床与液压, 2010, 38(11): 1-3, 34.
ZHANG Hui, LIU Jiang, GUAN Guangfeng, et al. Approaches to non-linearity compensation of servo valve [J]. Machine Tool & Hydraulic, 2010, 38(11): 1-3, 34.
- [10] 李胜,阮健,孟彬,等. 空载流量特性死区的颤振补偿 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(18): 186-192.
LI Sheng, RUAN Jian, MENG Bin, et al. Dither compensation for dead zone of zero load flow of characteristics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(18): 186-192.
- [11] BORUTZKY W, BARNARD B, THOMA J. An orifice flow model for laminar and turbulent conditions [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2002, 10(3/4): 141-152.
- [12] PAN X, WANG G, LU Z. Flow field simulation and a flow model of servo-valve spool valve orifice [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(10): 3249-3256.
- [13] CERMÁN O, HUŠEK P. Adaptive fuzzy sliding mode control for electro-hydraulic servo mechanism [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(11): 10269-10277.
- [14] 陆翔,戴先中,张凯锋. 电力系统神经网络逆控制中的闭环控制器设计 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2004, 34(1): 117-121.
LU Xiang, DAI Xianzhong, ZHANG Kaifeng. Closed-loop controller design method in the ANN-inversion-based decoupling and linearizing control of power systems [J]. Journal of Southeast University (Natural

- Science Edition), 2004, 34(1): 117-121.
- [15] 戴先中, 刘军, 冯纯伯. 连续非线性系统的神经网络 α 阶逆系统控制方法 [J]. 自动化学报, 1998, 25(4): 33-38.
- DAI Xianzhong, LIU Jun, FENG Chunbo. Neural network α -th order inverse system method for the control of nonlinear continuous systems [J]. Acta Automatica Sinica, 1998, 24(4): 33-38.
- [16] 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 Xianzhong, ZHANG Xinghua, LIU Guohai, et al. Decoupling control of induction motor based on neural networks inverse [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 112-117.
- [17] 戴先中, 孟正大, 沈建强, 等. 神经网络 α 阶逆系统控制方法在机器人解耦控制中的应用 [J]. 机器人, 2001, 23(4): 363-367.
- DAI Xianzhong, MENG Zhengda, SHEN Jianqiang, et al. Robot decoupling control based on ANN α -th order inverse system method [J]. Robot, 2001, 23(4): 363-367.
- [18] 姚建勇, 焦宗夏, 黄澄. 基于动态逆模型的电液位置伺服系统复合控制 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(10): 145-151.
- YAO Jianyong, JIAO Zongxia, HUANG Cheng. Compound control for electro-hydraulic positioning servo system based on dynamic inverse model [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(10): 145-151.
- [19] KNOHL T, UNBEHAUEN H. Adaptive position control of electrohydraulic servo systems using ANN [J]. Mechatronics, 2000, 10(1/2): 127-143.
- [20] MILIĆ V, ŠITUM S, ESSERT M. Robust H^∞ position control synthesis of an electro-hydraulic servo system [J]. ISA Transactions, 2010, 49(4): 535-542.
- [21] GUO Q, YUT, JIANG D. Robust H^∞ positional control of 2-DOF robotic arm driven by electro-hydraulic servo system [J]. ISA Transactions, 2015, 59: 55-64.
- [22] 戴中天. 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: 122-124.
- [23] 田延岭, 包亚洲, 王福军, 等. 音圈电机驱动的柔性定位平台设计与控制 [J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版), 2017, 50(10): 1070-1076.
- TIAN Yanling, BAO Yazhou, WANG Fujun, et al. Design and control of a flexible positioning stage driven by voice coil motors [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2017, 50(10): 1070-1076.

(编辑 亢列梅)

(上接第 138 页)

- [15] SPIELMAN D, PAULRAJ A. Performance analysis of the MUSIC algorithm [C] // IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1986: 1909-1912.
- [16] SCHMIDT R. Multiple emitter location and signal parameter [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1986, 34(3): 276-280.
- [17] 曾浩, 张迎辉, 冯文江. 快速子空间谱峰搜索方法 [J]. 计算机应用, 2009, 29(9): 2546-2548.
- ZENG Hao, ZHANG Yinghui, FENG Wenjiang. New peak searching in subspace spectrum [J]. Journal of Computer Applications, 2009, 29(9): 2546-2548.
- [18] 王曙, 周希朗. 用 DFT 技术对阵列信号进行处理 [J]. 上海交通大学学报, 2000, 34(2): 247-249.
- WANG Shu, ZHOU Xilang. Array signal processing by DFT [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2000, 34(2): 247-249.
- [19] OPPENHEIM A V, SCHAFER R W, BUCK J R. Discrete-time signal processing [M]. 北京: 清华大学出版社, 2008: 656-661.
- [20] RABINER L, SCHAFER R, RADER C. The chirp z -transform algorithm [J]. IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics, 1969, 17(2): 86-92.

(编辑 刘杨)