

文章编号: 2095-2163(2023)11-0155-06

中图分类号: TP183

文献标志码: A

# 基于BP神经网络的中包车液压同步系统仿真分析

白李浩, 朱学彪, 戎雪飞

(武汉科技大学 机械自动化学院, 武汉 430081)

**摘要:** 中包车是连铸机的关键设备, 中包车控制系统同步性优化对于施工人员的安全以及减少设备损失都具有至关重要的作用。对中包车液压原理进行分析, 利用 Matlab 进行液压控制系统的稳定性分析, 采用一种 PID 控制和 BP 神经网络结合的方法进行液压同步控制精度优化并进行了仿真分析, 大幅提升了连铸机中包车液压同步控制系统的稳定性和精度, 为实际工程应用提供了有力支持。

**关键词:** BP 神经网络; 液压同步系统; 中包车; Matlab

## Simulation and analysis of hydraulic synchronous system of medium sized charter car based on BP neural network

BAI Lihao, ZHU Xuebiao, RONG Xuefei

(College of Machinery and Automation, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** The tundish is the key equipment of the continuous casting machine, and the synchronization optimization of the tundish control system plays a vital role in the safety of construction personnel and the reduction of equipment losses. The hydraulic principle of the tundish is analyzed, the stability of the hydraulic control system is analyzed using Matlab, and the hydraulic synchronization control accuracy is optimized using a combination of PID control and BP neural network. It greatly improves the stability and accuracy of the hydraulic synchronous control system of the ladle car in the continuous casting machine, and provides strong support for practical engineering applications.

**Key words:** BP neural network; hydraulic synchronization system; medium charter car; Matlab

## 0 引言

中包车是一种广泛应用于钢铁冶炼连铸技术的复杂设备, 其液压升降平台同步精度、控制方法等都对实际工程应用有着巨大的影响, 现有某钢厂中包车动作不正常直接导致单流及全产线停机, 存在满载升降同步性差、中间包满载时平移推力不足对中度差、机构卡阻等问题。本文旨在利用 PID 控制的液压伺服阀改进中包车, 并利用改进后的 BP 神经网络进行 PID 参数的整定。神经网络算法是智能算法之一, 具有自学习、自适应的能力, 而且神经网络能够直接对系统参数进行在线计算, 改造后的中包车液压同步控制系统鲁棒性、同步性提高。并且具有控制过程中实时改变 PID 参数调整控制对象的能力。

## 1 液压系统原理分析

### 1.1 原连铸机中包车液压同步系统

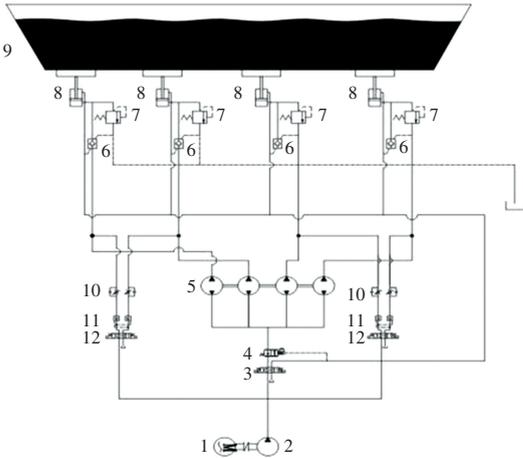
现以某钢厂连铸机中包车液压系统为研究对象, 是由一个同步马达和 4 个升降油缸控制升降的控制系统, 在液压多缸运动回路中属于采用同步马达的同步运动回路, 图 1 中采用了相同结构和排量的液压马达, 且其轴刚性连接, 因此可把等量的压力油分别输入 4 个尺寸相同的液压缸中, 使得 4 个液压缸同步。然而在实际生产过程中, 此液压系统运行功能、升降功能、横移对中功能、称量功能等出现了问题。根据液压系统暴露出来的问题, 认为故障的根源在于同步方式和同步精度不够。故设计一种液压伺服阀控液压同步回路, 利用液压缸上安装的位移传感器检测液压缸活塞位移进行反馈控制。

**作者简介:** 白李浩(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 液压同步与伺服控制。

**通讯作者:** 朱学彪(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 机电耦合与液压伺服控制。Email: 1287312099@qq.com

收稿日期: 2022-12-03

哈尔滨工业大学主办 ◆ 系统开发与应用



1-电机; 2-柱塞泵; 3-比例换向阀; 4-平衡阀; 5-同步马达; 6-液控单向阀; 7-溢流阀; 8-同步液压缸; 9-中包车; 10-单向节流阀; 11-液压锁; 12-换向阀

图1 原连铸机中包车液压原理图

Fig. 1 Hydraulic schematic diagram of the original caster middle ladle car

### 1.2 改进后的液压同步系统

改进后的液压系统添加了PID控制器对伺服阀控液压同步系统进行反馈控制,由于伺服阀可以根据不同信号流实时改变阀口大小进而改变通过流量大小,所以理论上给出相同的信号便可输出相同的流量。2个液压缸位置实际上是位置控制。液压原理如图2所示,位置闭环控制框图如图3所示。

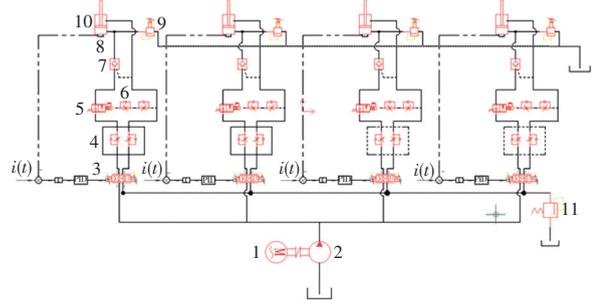


图2 改进后液压同步系统原理图

Fig. 2 Schematic diagram of improved hydraulic synchronization system

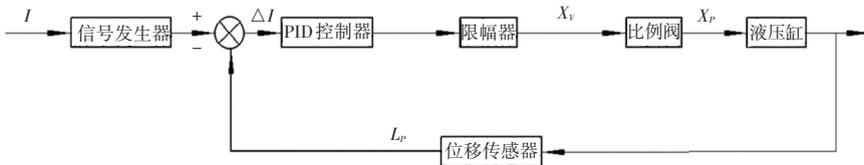


图3 位置闭环控制系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of position closed loop control system

此类同步控制系统,当发生误操作行为时,选择在伺服阀的前后加上液控单向阀以防止中包车误升降。并且必须选择具有滑阀位置反馈的高性能伺服阀。

## 2 液压控制系统稳定性分析

稳定性在控制系统中是极重要的,在此连铸机液压同步系统中使用的是电液伺服控制系统中的电液位置控制系统,伺服阀控制液压缸的形式经过简化可看作一种阀控缸模型,经典阀控缸原理如图4所示,对液压同步系统各个环节进行稳定性分析。

### 2.1 液压缸-负载

液压缸的技术参数为:活塞直径  $D = 0.160 \text{ m}$ , 活塞杆直径  $d = 0.100 \text{ m}$ , 活塞工作行程为  $0.500 \text{ m}$ , 若忽略液压缸死区面积,则活塞行程  $L = 0.500 \text{ m}$ , 由于在同步液压系统中采用同步液压缸,液压参数均一致,因此可对液压缸-负载部分进行以下数学分析:

$$A_p = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) = 2.83 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (1)$$

$$V_t = L A_p + V_{\text{管}} = 2.2 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2)$$

其中,  $V_t$  表示系统总的压缩容积;  $A_p$  表示液压缸有效工作面积;  $V_{\text{管}}$  表示液压缸相连的管路容积。阀的线性化流量方程表示为:

$$q_L = K_q x_v - K_c p_L \quad (3)$$

液压力元件连续性流量方程:

$$Q_1 = C_{ip} + A_p \dot{x}_p + \frac{V_t}{4\beta_e} \dot{p}_L \quad (4)$$

液压缸输出力平衡关系:

$$A_p p_L = m \ddot{x}_p + B_p \dot{x}_p + K x_p + F_L \quad (5)$$

其中,  $m$  表示活塞与负载质量;  $B_p$  表示粘性阻

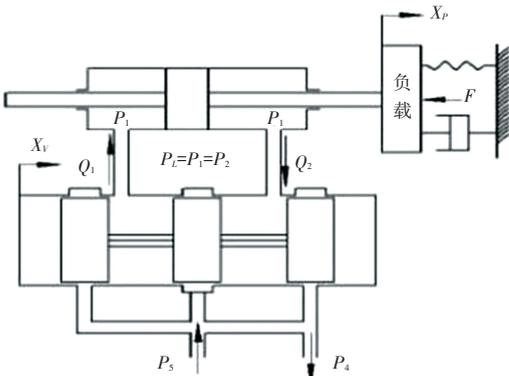


图4 阀控缸-负载原理图

Fig. 4 Valve control cylinder - load schematic diagram

尼系数;  $K$  表示负载弹簧刚度;  $F_L$  表示外负载力。

对式(3)~(5)做拉式变换, 消去中间变量得到液压缸-负载环节的传递函数为:

$$G(s) = \frac{X_p(s)}{Q_L(s)} = \frac{1/A_p}{s(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_n}s + 1)} \quad (6)$$

其中,  $Q_L$  表示液压缸活塞负载流量;  $X_p$  表示液压缸活塞位移。

若取液压油的等效弹性模量  $\beta_e = 7 \times 10^8$ , 则液压-负载环节的固有频率可以求出:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{4\beta_e A_p^2}{V_t m}} \approx 101 \text{ rad/s} \quad (7)$$

由于液压缸-负载环节粘性阻尼系数和涉及的

伺服阀流量压力系数较小, 因此在此控制系统中依据经验选取  $\zeta_h = 0.2$ , 可求得液压缸-负载环节的传递函数:

$$G(s) = \frac{X_p(s)}{Q_L(s)} = \frac{1}{2.83 \times 10^{-3} s(\frac{s^2}{101^2} + \frac{2 \times 0.2}{101}s + 1)} \quad (8)$$

### 2.2 电液伺服阀

实验中采用的 TR-H7/20F-0.6 动圈位置反馈电液式伺服阀技术参数见表 1。在实验室中对伺服阀进行信号处理、数据收集, 可绘制出伺服阀阶跃响应特性曲线如图 5 所示。

表 1 伺服阀技术参数

Tab. 1 Technical parameters of servo valves

额定电流/ A	供油压力/ MPa	额定流量/ ( $10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	零位泄露流量/ ( $10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	线圈电阻/ $\Omega$	震颤电流幅值/ A	频率/ Hz
0.3	4.5	0.5	8.3	40	0.025	50

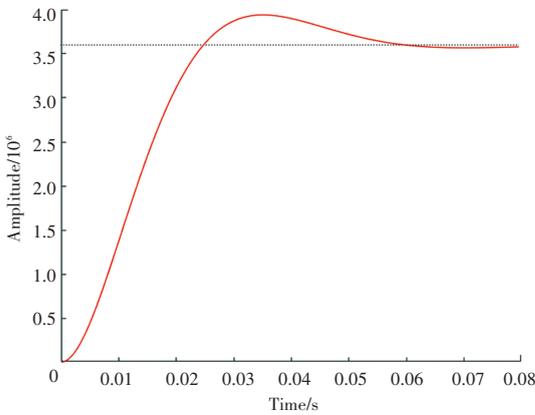


图 5 伺服阀阶跃响应特性曲线

Fig. 5 Step response characteristic curve of servo valves

根据实验曲线求出伺服阀的峰值时间  $t_p$ :

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \approx 0.035 \text{ s} \quad (9)$$

由于伺服阀可看作一个二阶振荡环节, 此时误差带  $\Delta = 0.05$ , 即调节时间  $t_s$  可得:

$$t_s = \frac{3}{\omega_n} \approx 0.06 \text{ s} \quad (10)$$

最大超调量  $M_p$  为:

$$M_p = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \approx 9.5\% \quad (11)$$

由式(9)~(11)可求得此伺服阀的阻尼比和固有频率, 因此可知此伺服阀的传递函数为:

$$G(s) = \frac{Q_L(s)}{\Delta I(s)} = \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\zeta_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1} = \frac{1.67 \times 10^{-3}}{\frac{s^2}{112^2} + \frac{2 \times 0.6}{112}s + 1} \quad (12)$$

通常考虑到伺服阀电感的影响, 电流信号会经过电流放大器, 当放大器有足够高的输出电阻, 线圈电路的时间常数减小, 由式(8)、式(12)可得该控制系统的框图如图 6 所示。

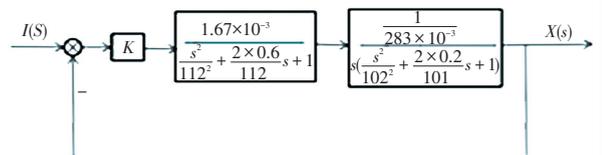


图 6 控制系统框图

Fig. 6 Block diagram of control system

### 2.3 闭环控制系统稳定性校核

稳定性是闭环控制系统必须满足的条件, 控制系统传递框图见图 6, 此控制系统开环增益  $K_i$  与电流放大器增益  $K$  有关, 若取开环增益  $K_i = 10$ , 进行时域和频域分析, 利用 Matlab 求出图 6 的系统开环伯德图如图 7 所示。

由图 7 可知, 该系统稳定, 且具有幅值裕量 11.9 dB、相位裕量 81.4°。因此, 只要电流放大器的增益  $K$  合适, 该控制系统稳定。

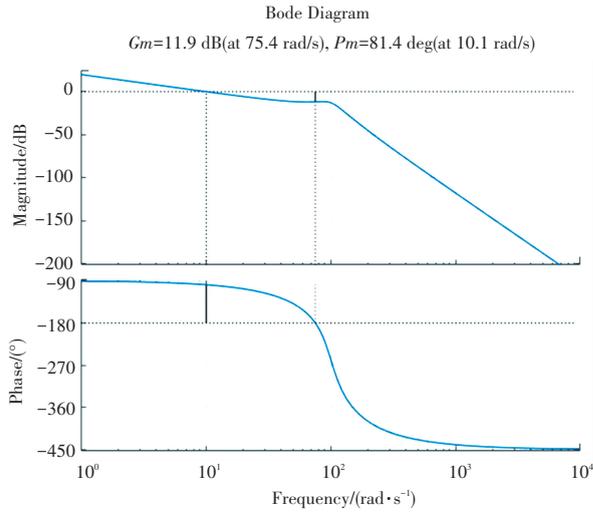


图 7 系统开环伯德图

Fig. 7 Open loop bode diagram of the system

### 3 液压同步精度优化

液压同步控制系统是一种位置反馈式控制系统,由于传统控制思想中采用 PID 控制器进行自动控制中的反馈控制会出现 PID 的各环参数校正问题,因此利用 BP 神经网络自适应的特点设计一种 BP-PID 控制器进行液压同步系统的精度优化, PID 控制器数学模型具体见式(13):

$$u(t) = K_p [\varepsilon(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon(t) d\tau + T_d \frac{d}{dt} \varepsilon(t)] \quad (13)$$

其中,  $K_p$  为比例系数;  $T_i$  为积分时间常数;  $T_d$  为微分时间常数。

确定了 PID 控制器的数学模型后,需要将 BP 神经网络应用于 PID 控制器,设计 BP-PID 控制器。BP 神经网络结构如图 8 所示。

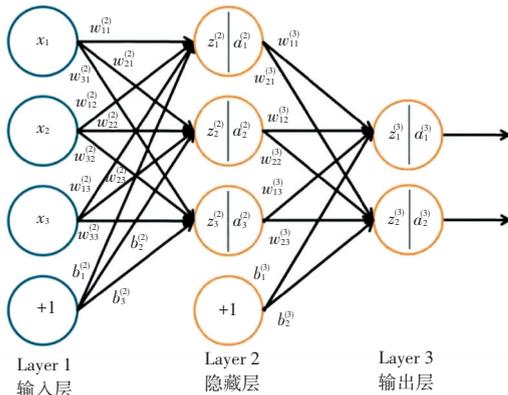


图 8 BP 神经网络结构

Fig. 8 BP neural network structure

(1)BP-PID 控制器 Layer1 输出为:

$$O_j^{(1)}(k) = x_j(k) \quad (14)$$

$$O_4^{(1)}(k) = 1, j = 1, 2, 3$$

其中,字母  $O$  表示输出,上标表示对应层数。

(2)BP-PID 控制器 Layer2 输入、输出:

$$O_i^{(2)}(k) = f(\text{net}_i^{(2)}(k)) \quad (15)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 9$$

其中,  $f(x)$  为激活函数,在 Layer2 中选择 sigmoid 函数为激活函数。

(3)BP-PID 控制器 Layer3 输入、输出:

$$\begin{cases} \text{net}_l^{(3)}(k) = \sum_{j=0}^8 w_{lj}^{(3)} O_j^{(2)}(k) \\ O_l^{(3)}(k) = g(\text{net}_l^{(3)}(k)) \end{cases} \quad l = 1, 2, 3 \quad (16)$$

其中,  $\omega$  是权重系数矩阵;在 Layer3 中选择激活函数  $g(x)$  为 tanh 函数,字母  $O$  对应 3 个结点,即是 PID 控制器中的  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  三个系数。又因为 BP 神经网络采用的是梯度下降法进行权重系数优化,故选择性能指标函数,即 Loss 函数来修正权重数,如式(17)所示:

$$E_k = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^3 (\text{net}_j^1(k) - O_j^3(K))^2 \quad (17)$$

其中,  $E_k$  是性能指标函数。

当给定一定学习速率时,BP 神经网络可以通过自适应的方式不断修正 PID 控制器的系数,最后达到提高中包车液压同步系统控制精度的效果。BP-PID 控制器的结构如图 9 所示。

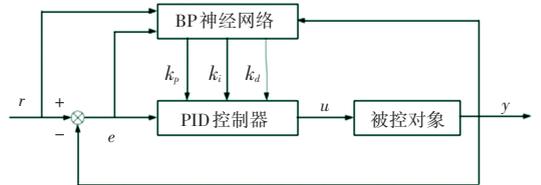


图 9 BP-PID 控制器结构简图

Fig. 9 Structure diagram of BP-PID controller

为了验证 BP-PID 控制器对液压同步系统精度优化的作用,选择以下模型为例:

$$G(s) = \frac{1250}{s^2 + 50s + 1250} \quad (18)$$

根据已经设计好的 BP-PID 控制器,利用 Matlab 进行 Simulink 仿真,仿真模型如图 10 所示。

设定初始输入信号为阶跃信号,选择初始权重矩阵  $\omega_0$  为 [30, 40, 10]。记录仅使用 PID 时和使用 BP-PID 控制器时模型响应曲线分别如图 11、图 12 所示。将两者绘制曲线图进行对比,对比结果见图 13。由图 13 可以发现,响应曲线的调节时间,超调

量等参数都得到了明显改善。由图 13 可知,当仅仅使用 PID 控制器时,系统的上升时间为 0.133 s,经过大约 0.954 s 系统达到稳定,此时系统超调量远超过工业界规定的标准,模型显然并不理想。

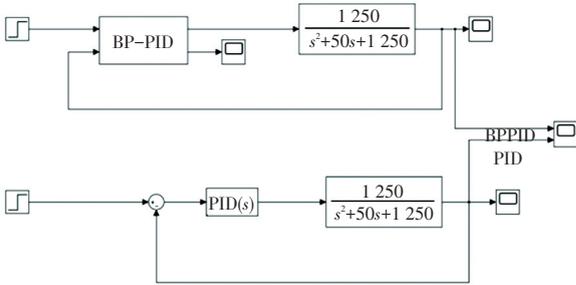


图 10 BP-PID 仿真模型

Fig. 10 BP-PID simulation model

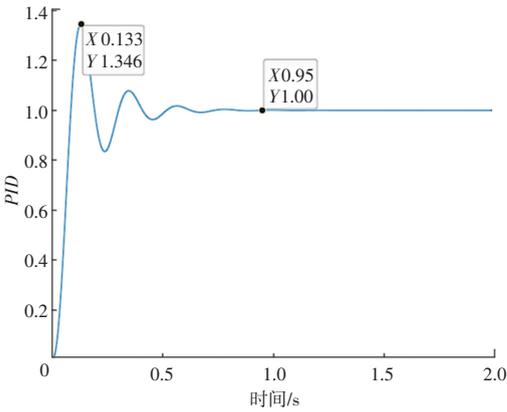


图 11 PID 控制器响应曲线图

Fig. 11 PID controller response curve

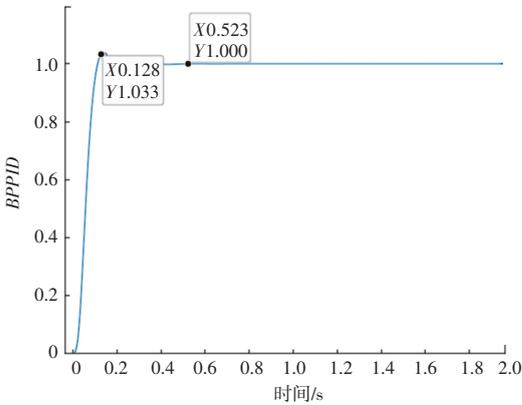


图 12 BP-PID 控制器响应曲线图

Fig. 12 BP-PID controller response curve

当使用 BP-PID 控制器时,系统的上升时间为 0.128 s,且系统仅仅通过 0.523 s 就达到稳定,此时系统的超调量为 3.3%,远小于工业界的标准,由此可见利用 BP-PID 控制器的模型在仿真结果上比使用 PID 控制器的模型得到了极大的提升。

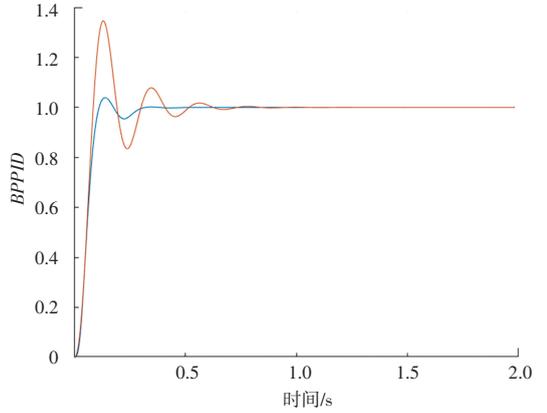


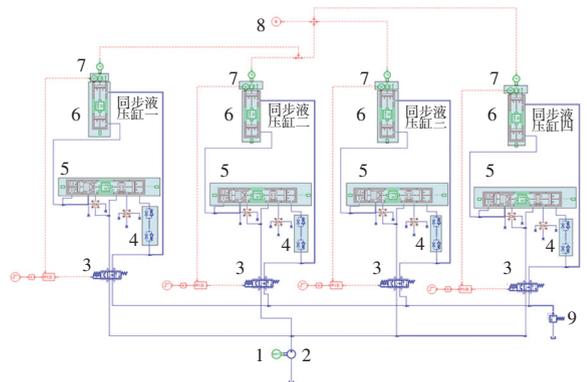
图 13 BP 控制器与 BP-PID 控制器对比图

Fig. 13 Comparison diagram of BP controller and BP - PID controller

所以采用 BP-PID 控制器提升连铸机中包车的液压同步系统的精度是完全可行的。

### 4 仿真实验

将利用 BP 神经网络改进过后的液压同步系统应用到连铸机中包车实际生产中,在 AMESim 中建立的仿真模型如图 14 所示。进行 Simulink - AMESim 联合仿真过程中,利用负载信号源 8 模拟中包车液压系统判断 BP 神经网络改进后液压同步控制系统在不同负载下的稳定性和同步精度。同时可以给定 PID 控制器不同的的信号源,判断当需要液压缸不同位移时,此同步控制系统的稳定性和同步精度。由于根据统计数据知道此控制系统中液压缸伸出位移通常不会超过 0.3 m,负载  $m$  通常不会超出 500 kg,当给定期望位移参见图 15 时,可得液压缸实际位移如图 16 所示。



1-电机; 2-柱塞泵; 3-比例换向阀; 4-单向节流阀; 5-平衡阀; 6-同步液压缸; 7-位移传感器; 8-负载信号源; 9-溢流阀

图 14 改进后的中包车液压系统模型

Fig. 14 Improved hydraulic system model of the medium charter car

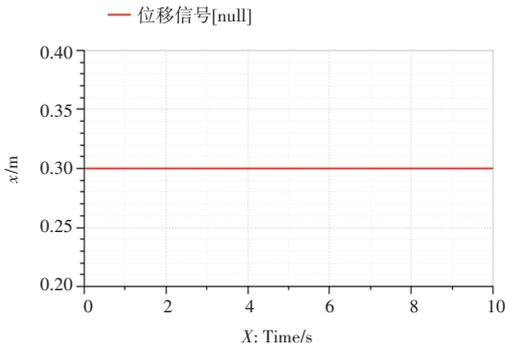


图15 液压缸期望位移

Fig. 15 Desired displacement of hydraulic cylinder

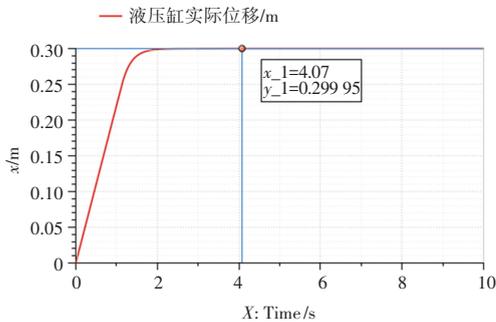


图16 液压缸实际位移图

Fig. 16 Actual displacement of hydraulic cylinder

由图15可知,当期望位移为0.30 m时,BP神经网络改进后的液压同步控制精度可达到0.299 999 5 m,此精度可以完美满足工业界的要求。证明BP神经网络

改进后的液压同步控制系统能够大大提升液压同步控制精度。

## 5 结束语

以连铸机中包车液压系统为例子,设计了一种BP神经网络改进后的液压同步控制系统,经过实验验证了可以大大提高液压同步控制精度。

## 参考文献

- [1] 王贵桥,高扬,张福波,等. 基于同步马达的液压多缸同步提升系统仿真研究[J]. 机床与液压,2020,50(19):148-152.
- [2] 汤波,方敏,张森,等. 基于AMESim的抗流量饱和和多路阀设计及仿真分析[J]. 液压气动与密封,2022,42(9):63-68.
- [3] 柳艳琴,李霞,王聪,等. 飞机千斤顶同步液压系统设计[J]. 液压气动与密封,2022,42(9):82-85.
- [4] 刘锡焜,卞永明,陈启凡,等. 基于图像识别的液压同步提升系统漏油在线检测[J]. 中国工程机械学报,2022,20(3):257-262.
- [5] 李东北. 钢模板液压同步提升技术研究[D]. 长春:长春工业大学,2022.
- [6] 顾海涛,孙常新,朱文杰. 某风洞两缸同步液压开环控制系统分析与改进[J]. 机床与液压,2022,50(6):124-128.
- [7] 黄雅静,廖爱华,丁亚琦,等. 多尺度CNN结合自注意力特征融合机制的轴承故障诊断方法[J]. 智能计算机与应用,2022,12(9):37-44.
- [8] 陈青,杨晶东,王晗,等. 一种有效神经网络训练优化方法[J]. 智能计算机与应用,2022,12(9):56-64.