

基于BP神经网络的高速开关阀多级电压控制策略

刘浩¹ 赵丁选² 张祝新² 王立新² 樊晓璇²

(1. 吉林大学机械与航空航天工程学院, 长春 130025; 2. 燕山大学机械工程学院, 秦皇岛 066044)

摘要: 为了提高液压系统控制精度,通过分析几种常用驱动策略下阀芯的动态特性以及进油口压力对动态特性的影响,提出了一种可适应进油口压力变化的多级电压激励驱动策略,与常用的双电压激励策略相比具有更好的动态特性,阀芯开启、关闭时间分别降至2.2、1.7 ms,线圈热功率降低了68.5%。设计了一种通过PWM调制、可输出0~60 V之间任一电压的驱动电路。采用BP神经网络对PID参数进行整定,可实现液压缸位移的精确控制。在自适应电压激励与BP神经网络联合控制策略下,恒流量液压系统液压缸位移误差在-0.3~0.3 mm之间,变流量液压系统液压缸位移误差在-0.5~0.5 mm之间。

关键词: 高速开关阀; 动态特性; BP神经网络; 控制策略

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0420-07

Control Strategy of High-speed Switch Valve under Multistage Adaptive Voltage Based on BP Neural Network

LIU Hao¹ ZHAO Dingxuan² ZHANG Zhuxin² WANG Lixin² FAN Xiaoxuan²

(1. School of Mechanical and Aerospace Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China

2. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066044, China)

Abstract: In order to improve the control precision of hydraulic system, the following two aspects were done. Firstly, in terms of driving strategy, the driving strategy was considered and the dynamic characteristics of the valve core under several common driving strategies were analyzed. After considering the following aspects, a multi-stage adaptive voltage excitation driving strategy was put forward accordingly. The strategy had better dynamic characteristics than the commonly used dual voltage excitation strategy. Under this multi-stage adaptive voltage excitation driving strategy, the valve core and the closing time were reduced to 2.2 ms and 1.7 ms, respectively. At the same time, the coil thermal power was reduced by 68.5%. Moreover, a driving circuit which can output any voltage between 0 V and 60 V through PWM modulation was designed. Secondly, in terms of control strategy, the BP neural network was used to adjust the PID parameters to achieve precise control of hydraulic cylinder displacement. The network PID controller of BP neural had the characteristics of short response time, small overshoot and good robustness and so on. Under the combined control of adaptive voltage excitation and BP neural network, the hydraulic cylinder displacement error of constant flow hydraulic system was controlled within -0.3~0.3 mm. Meanwhile, thanks to the combined control of adaptive voltage excitation and BP neural network, the hydraulic cylinder displacement error of variable flow hydraulic system was controlled within -0.5~0.5 mm. The research had a great promotion to the study of this field.

Key words: high-speed switch valve; dynamic characteristics; BP neural network; control strategy

0 引言

液压系统具有时变性、大惯性、高度非线性、无

法获得精确的数学模型等特点^[1-2],这些都制约着液压系统控制的精确性。在高精度液压系统中,大多采用伺服阀与比例阀,但两者不仅价格昂贵,且无

收稿日期: 2018-09-30 修回日期: 2018-11-13

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2009AA044403)

作者简介: 刘浩(1989—),男,博士生,主要从事混合动力工程机械研究,E-mail: liuhao19890815@126.com

通信作者: 赵丁选(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事混合动力工程机械研究,E-mail: zdx-yw@ysu.edu.cn

法应用于空间紧凑的安装场合。高速开关阀是一种启闭特性快、价格低廉、体积较小、重复精度高的电液数字阀^[3-5],通过控制流量离散化可实现伺服阀、比例阀同等控制效果^[6]。提高液压系统控制精度的主要方法有提升高速开关阀动态特性^[7-9]和设计更先进的控制算法^[10]。国内外学者针对这两个方向进行了大量的研究。向忠等^[11]通过减小衔铁质量,提出 ϵ 型衔铁的理论模型,提高了阀芯的动态响应;卡特彼勒公司研制了一种响应频率高达 500 Hz 的高速开关阀;孔晓武^[12]将线圈拆为均匀几股并联在一起,同样起到了提高工作响频的作用;高钦和等^[13]提出采用 PWM-PFM 联合调制,可以有效补偿高速开关阀的死区与饱和区的流量损失;贺娟等^[14]将脉宽调制技术应用于液压缸位移控制中,同样利用了反馈补偿的方式对高速开关阀动态响应不足所导致的控制误差进行修正。

本文提出一种多级自适应电压激励与 BP 神经网络联合控制策略,通过建模与仿真、搭建实验平台进行实验论证。

1 多级自适应电压激励策略

1.1 结构与工作原理

图 1 为 HSV 型两位三通型高速开关阀,该阀用球阀代替锥阀并去掉复位弹簧。当脉冲信号变为高电平时,电磁线圈通电,电磁力克服供油球阀所受的进油口压力,分离销、供油球阀、回油球阀向右运动,停靠至阀座密封面中,此时进油口 P 与工作油口 A 相通,回油口 T 与工作油口 A 处于断开状态;当脉冲信号为低电平时,电磁阀处于断电状态,供油球阀受液压力作用向左运动,最终停靠在阀座密封面上,此时进油口 P 与工作油口 A 处于断开状态,回油口 T 与工作油口 A 二者相通。

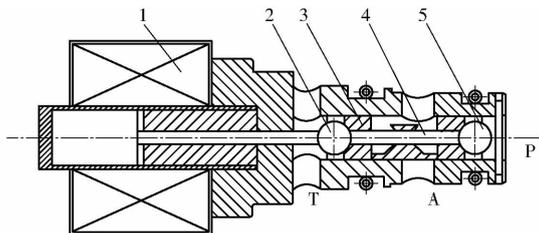


图 1 高速开关阀结构简图

Fig. 1 Brief diagram of high-speed switch valve structure

1. 电磁铁 2. 回油球阀 3. 球阀阀座 4. 分离销 5. 供油球阀

1.2 数学模型构建

高速开关阀的电-机转换数学模型为

$$U = IR + L(x) \frac{dI}{dt} + I \frac{dL(x)}{dt} \quad (1)$$

式中 U ——激励电压

I ——流经线圈电流 x ——阀芯位移

R ——等效电阻 $L(x)$ ——等效电感

空载条件下,对高速开关阀建立运动学方程^[15]

$$F_m - F_s - f - p_s A = m \dot{x} + c \ddot{x} \quad (2)$$

式中 F_s ——液动力 f ——摩擦力

m ——阀芯与衔铁总质量

p_s ——进油口压力

A ——球阀截面积

c ——粘性阻尼系数

线圈内瞬态电流可以表示为

$$I_t = I_i + \left(1 - \exp \left(-t \frac{R}{L(x)} \right) \right) \left(\frac{U}{R} - I_i \right) \quad (3)$$

式中 I_t ——瞬态电流

I_i ——初始电流

由式(1)、(3)可推导出高速开关阀开启、闭合滞后时间^[16-17]

$$t_{od} = \frac{L_o}{R} \ln \frac{U - I_o R}{U - I_i R} \quad (4)$$

$$t_{cd} = \frac{L_c}{R} \ln \frac{U - I_c R}{U - I_i R} \quad (5)$$

式中 t_{od} ——开启滞后时间

L_o ——开启时等效电感

t_{cd} ——关闭滞后时间

L_c ——关闭时等效电感

I_o ——临界开启电流

I_c ——临界关闭电流

由式(4)、(5)可以得出,当高速开关阀开启时,激励电压越高,电流越大,开启滞后时间越短;当高速开关阀关闭时,激励电压越低,电流越小,关闭滞后时间越短。由式(2)、(4)、(5)可以得出,较高的激励电压、较大的电流、较小的进油口压力都可以缩短开启时间;较低的激励电压、较小的电流、较大的进油口压力都可以缩短关闭时间。此外,高速开关阀工作时反复受较高的电压持续激励,内部线圈温升极快,这将降低高速开关阀的使用寿命与可靠性。其中,线圈热功率计算式为

$$P \sum_{i=0}^n t_i = \sum_{i=0}^n I_i^2 R t_i \quad (6)$$

式中 P ——线圈热功率 t_i ——采样时间

1.3 驱动电路设计

图 2 是高速开关阀的 PWM 驱动电路,其工作方式:单片机输出 PWM 控制波形经过光耦隔离电路,保护了单片机端口,之后经过一个反相器,使 PWM 波形极性翻转,驱动 MOSFET 工作在饱和与截止区,从而输出控制电压,控制电压经过 RC 滤波,最后通过由运算放大器组成的功率放大电路,为高

速开关阀提供控制电压,当需要不同幅值电压时,通过调整输入 PWM 波的占空比即可,表 1 为不同占空比下的输出电压。

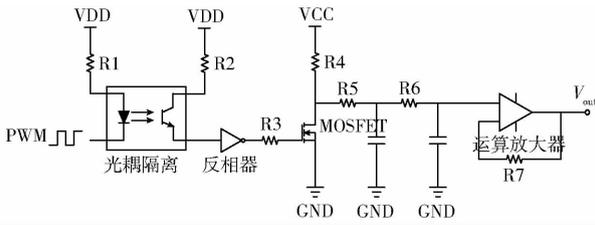


图 2 PWM 控制电路

Fig.2 PWM control circuit

表 1 不同 PWM 占空比时输出电压

Tab.1 Output voltage value under different PWM vacancy ratios

占空比/%	电压/V
10	1.701
20	10.467
30	16.801
40	23.178
50	29.657
60	36.197
70	43.225
80	51.782
90	60.393

图 3 为负电压控制输出电路,为高速开关阀关断时提供反向电压,该电路工作原理如下:当单片机向光耦隔离电路的 V_{in} 端口输入低电平,电路导通,此时电阻 R2 与 R4 进行分压, MOSFET 导通输出电压,然后通过运算放大器组成的反向电路,从而输出负电压,其中 R5 与 R6 电阻相等。

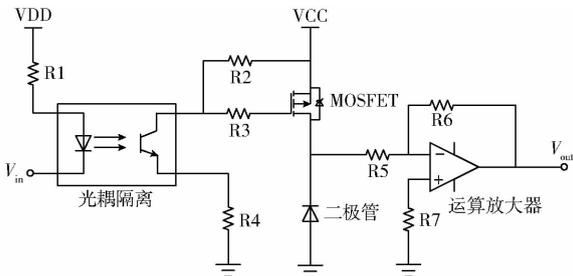


图 3 -48 V 输出电路

Fig.3 Output circuit of -48 V

1.4 基于电流、压力反馈的自适应电压激励策略

当前,成熟的高速开关阀驱动策略主要为单电压激励与双电压激励。但两种驱动策略下高速开关阀的动态特性较差,降低了液压系统的控制精确性,且耗能较高、温升快,缩短了开关阀的使用寿命。本文在单电压激励与双电压激励两种激励策略的基础上,提出自适应多级电压激励控制策略:接入较高的激励电压 U_1 ,加快阀芯启动过程;阀芯到位后,接入较低的维持电压 U_2 ,使开关阀处于开启状态;高速

开关阀关闭前接入反向高电压 U_3 ,加快阀芯关闭过程。其中, U_1 、 U_2 并非定值,而是随着进油口压力的变化而随时修正的,选取合理的 U_1 、 U_2 是实现该驱动策略的关键。

外部输入信号为 PWM 信号,当控制器检测到信号上升沿时,由压力传感器采集的压力选取对应的激励电压 U_1 并接入回路,线圈内电流迅速上升。当电流达到开启电流阈值时,阀芯启动,同样由压力传感器采集的压力选取对应的维持电压 U_2 并将其接入回路,理论上 U_2 应略高于关闭电流阈值与等效电阻的乘积。当信号转为下降沿时,接入反向激励电压 U_3 ,当电流下降至关闭电流阈值时,阀芯开始关闭,接入 0 V 电压,高速开关阀处于关闭状态,直至下一个信号周期中上升沿,流程如图 4 所示。

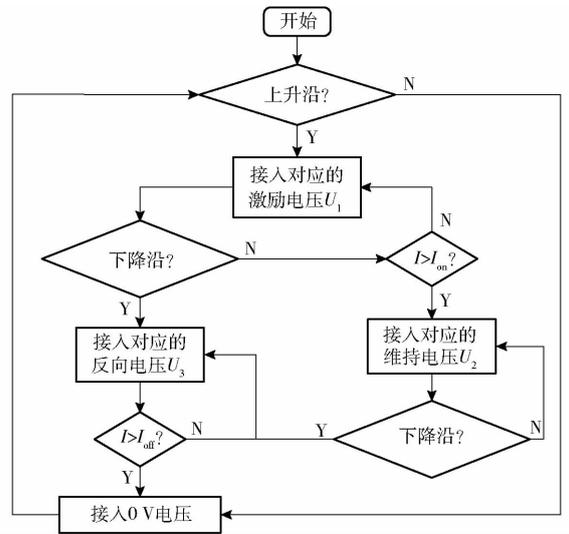


图 4 自适应电压激励控制策略工作流程图

Fig.4 Flow chart of adaptive voltage excitation control strategy

1.5 系统建模、仿真与结果分析

为了探究自适应电压激励策略中高速开关阀的动态特性,搭建了该驱动策略下的仿真模型,参数如表 2 所示,仿真平台为 AMESim,仿真模型如图 5 所示。

表 2 高速开关阀结构、仿真参数

Tab.2 High speed switch valve structure and simulation parameters

参数	数值
钢球与分离销质量之和/g	19
钢球直径/mm	2.5
初始气隙/mm	0.35
钢球最大行程/mm	0.25
线圈电阻/ Ω	9.6
线圈匝数	450
最大流量系数	0.6
阀口直径/mm	0.8

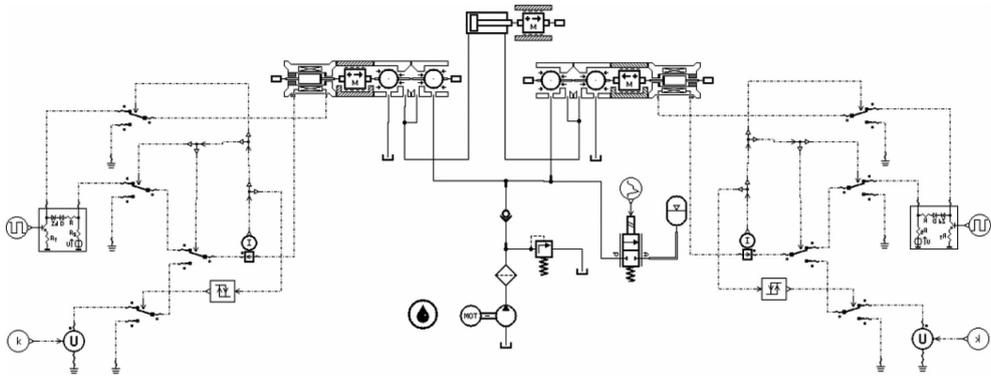


图 5 自适应电压激励策略仿真模型

Fig. 5 Simulation model of adaptive voltage incentive strategy

首先对高速开关阀分别进行单电压 24 V 驱动、双电压 24 V / -24 V 驱动、自适应电压驱动,输入占空比为 60%、频率为 20 Hz 的 PWM 控制信号,液压系统中溢流阀压力设置为 20 MPa。在自适应电压

驱动策略中,为了保证阀芯可以完全开启闭合,由式(1)、(5)进行计算,切换至维持电压的触发电流设为 2.5 A,由反向电压切换至 0 V 电压的触发电流设为 0.4 A。仿真得动态特性如图 6 所示。

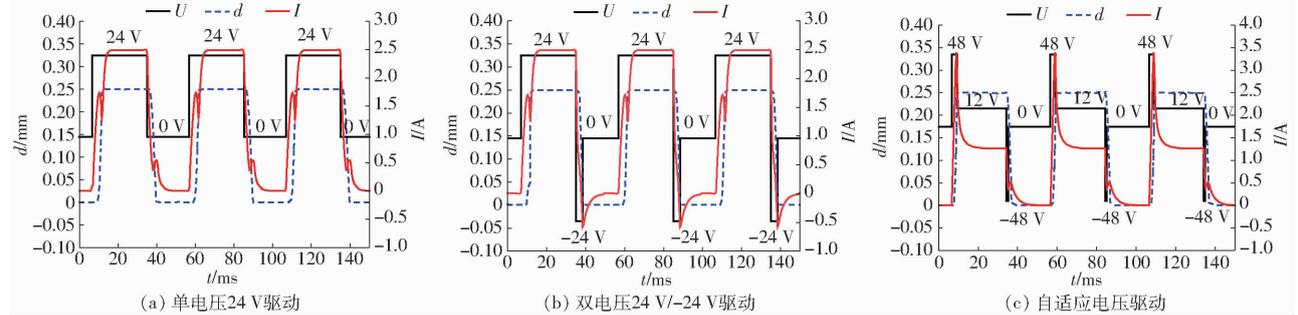


图 6 阀芯动态特性

Fig. 6 Dynamic characteristics of valve images

由图 6 可得,与传统单电压驱动策略相比^[13],双电压驱动策略有效缩减了开关阀关闭滞后时间^[14-15]。这是由于反向 24 V 驱动电压加快了线圈内电流下降速度,使其迅速下降至阀关闭电流阈值,关闭滞后时间缩短。

自适应驱动策略在双电压驱动策略的基础上,提升了高速开关阀的动态特性。开启滞后时间降至 0.7 ms,这是因为较高的驱动电压会加快线圈内电流上升速度,电流迅速达到开启电流阈值。开启时间缩至 2.2 ms,较高的电压激发出更大的电流,电磁力的增大加快了阀芯开启过程。关闭滞后时间降至 0.4 ms,在接收到驱动信号下降沿前,由于维持电压已有效降低了线圈内电流,在阀关闭前电流下降的幅值减小,此外, -48 V 电压也加快了电流下降的速度,所以关闭滞后时间大幅缩短,阀芯闭合总时间降至 1.7 ms。在系统压力为 20 MPa 的前提下,基于图 6b、6c 中电流曲线与式(6),计算得双电压 24 V / -24 V 驱动策略下线圈热功率为 27 W,而在自适应多级电压驱动策略下,热功率仅为 8.5 W,降低了 68.5%。

2 BP 神经网络整定 PID 控制策略

对于时变性高、被控对象复杂的液压系统,传统 PID 控制无法保证系统的控制精度与稳定性,利用 BP 神经网络的在线学习能力实时整定控制参数,实现 PID 参数的最优组合,进而提高了系统的稳定性、精确性。

2.1 BP 神经网络结构

采用梯度搜索技术^[18-19],沿位移期望值与实际值之差 e 的反梯度方向不断改变权值与阈值,直至 e 达到极小值的优化计算过程即 BP 神经网络的学习过程。本文采用结构为 4-5-3 的 3 层神经网络(图 7),输入神经元分别为位移设定值、位移实际值、偏差、单位;输出神经元分别为 K_p 、 K_i 、 K_d 。网络输入层的输入可表示为

$$O_j^{(1)} = x(j) \quad (j = 1, 2, 3, 4) \quad (7)$$

隐含层输入与输出分别为^[20]

$$\begin{cases} net_i^{(2)}(k) = \sum_{j=1}^4 W_{ij}^{(2)} O_j^{(1)}(k) \\ O_i^{(2)}(k) = f(net_i^{(2)}(k)) \quad (i = 1, 2, 3, 4, 5) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $W_{ij}^{(2)}$ —— 隐含层权重
 $f(\cdot)$ —— 隐含层神经元活化函数

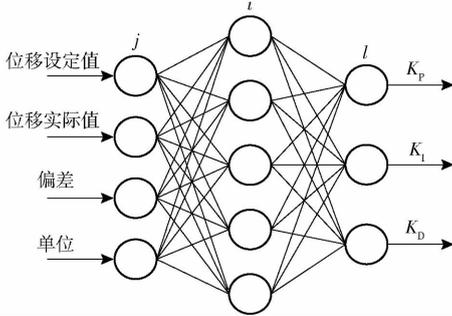


图7 BP神经网络结构

Fig.7 BP neural network structure

隐含层神经元的激发函数取正负对称的 sigmoid 函数

$$f(x) = \tanh(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x}) \quad (9)$$

神经网络输出层输入和输出分别为

$$\begin{cases} net_i^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^Q W_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(k) \\ O_i^{(3)}(k) = g(net_i^{(3)}(k)) \\ K_p = O_1^{(3)}(k) \\ K_i = O_2^{(3)}(k) \\ K_d = O_3^{(3)}(k) \end{cases} \quad (10)$$

式中 $g(\cdot)$ —— 输出层神经元活化函数

实验中,以液压缸为被控对象、位移为调整参数,上位机设定液压缸位移,由位移传感器实时采集液压缸实际位移。将 BP 神经网络整定 PID 控制算法作为子程序加入到控制程序中,以 PWM 调制作为调节手段控制高速开关阀的开启与闭合,并辅以多级自适应电压激励策略,实现对液压缸位移的精确控制。控制结构如图 8 所示。

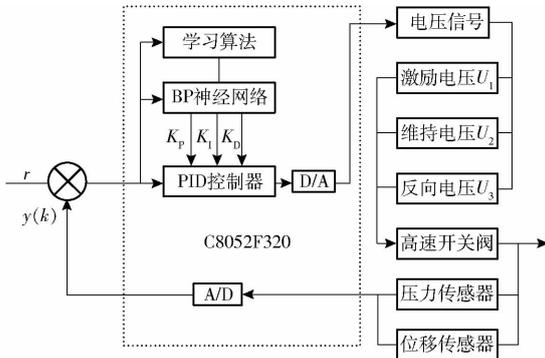


图8 多级自适应电压激励与 BP 神经网络联合控制策略

Fig.8 Combined control strategy of multistage adaptive voltage excitation and BP neural network

设定被控对象的近似数学模型为

$$y_{out}(k) = \frac{a(k)y_{out}(k-1)}{1 + y_{out}^2(k-1)} + u(k-1)$$

其中 $a(k) = 1.2(1 - 0.8e^{-0.1k})$ (11)

2.2 联合控制策略仿真与实验

设定惯性系 $\alpha = 0.04$, 学习效率 $\eta = 0.28$, 权重初始值设定为 $[-0.5, 0.5]$ 间的随机数, 输入信号为 $r_{in}(k) = 1.0$ 。所得阶跃响应曲线如图 9 所示。

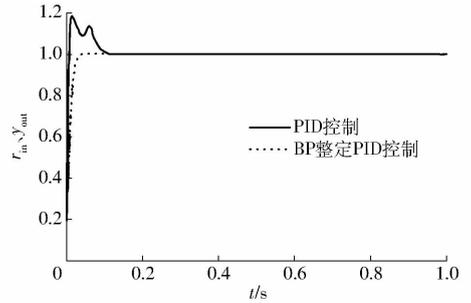


图9 阶跃跟踪曲线

Fig.9 Step tracking curves

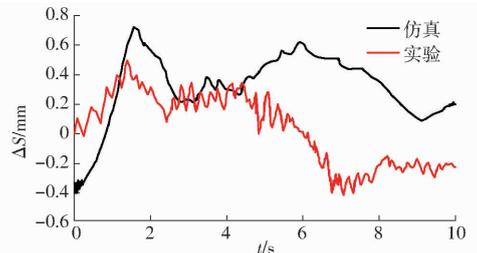
根据图 5 的仿真模型对液压缸位移进行仿真,并根据图 8 中的控制原理搭建实验平台(图 10)。首先,设定溢流阀压力为 20 MPa,由额定流量为 2 mL/r 的齿轮泵(电机转速为 3 000 r/min)驱动液压缸运行(液压系统流量基本恒定),分别采用传统 PID 控制策略与联合控制策略对液压系统进行驱动,实验结果如图 11 所示;随后,将蓄能器压力调至 30 MPa,由蓄能器内油液直接驱动液压缸运行(变



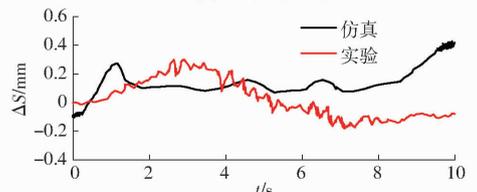
图10 实验系统实物图

Fig.10 Physical map of test system

1. 压力传感器 2. 连接块 3. 换向块 4. 位移传感器



(a) PID控制策略



(b) 联合控制策略

图11 恒压系统液压缸位移误差

Fig.11 Displacement error of hydraulic cylinder in constant pressure system

流量液压系统),分别采用传统PID控制策略与联合控制策略对液压系统进行驱动,实验结果如图12所示。

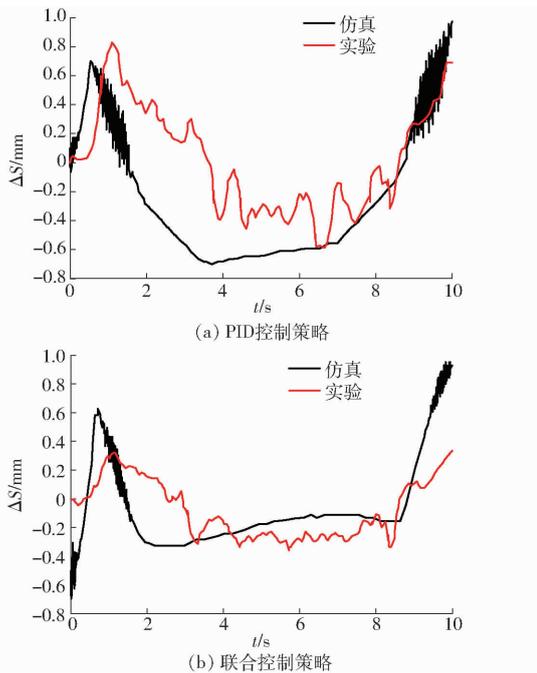


图12 变压系统液压缸位移误差

Fig. 12 Displacement error of hydraulic cylinder in variable pressure system

由图11、12(图中 ΔS 为位移误差)可以得出,无论采用哪种控制策略,变流量、变压力系统(即蓄能器供油至液压缸)位移误差均大于恒流量、恒压液压系统的液压误差。多级自适应电压激励与BP神经网络联合控制策略,恒流量液压系统液压缸位移误差在 $-0.3 \sim 0.3$ mm之间,变流量液压系统液压缸位移误差控制在 $-0.5 \sim 0.5$ mm之间,控制精度大幅提升。

3 结束语

提出了一种多级自适应电压激励驱动策略,阀芯开启、关闭时间分别降至2.2、1.7 ms,线圈热功率下降了68.5%,与双电压驱动策略相比,阀芯动态特性大幅提升。设计了一种通过PWM调制、可输出0~60 V之间任一电压的驱动电路。利用BP神经网络的在线学习能力,实时对PID参数进行整定,实现了液压缸位移的精确控制。在该联合控制策略下,恒流量液压系统液压缸位移误差在 $-0.3 \sim 0.3$ mm之间,变流量液压系统液压缸位移误差控制在 $-0.5 \sim 0.5$ mm之间。

参 考 文 献

- [1] GIOUSOUF M, KOVACS G. Dielectric elastomer actuators used for pneumatic valve technology [J]. Smart Materials and Structures, 2013, 22(10): 104–110.
- [2] KONG Xiaowu, LI Shizhen. Dynamic performance of high speed solenoid valve with parallel coils [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2014, 27(4): 816–821.
- [3] TU H, RANNOU M B, WANG M, et al. Modeling and validation of a high speed rotary PWM on/off valve [C] // Proceeding of the ASME Dynamic Systems and Control Conference, 2009: 629–636.
- [4] 苏明. 电磁高速开关阀控制特性方法研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2010.
SU Ming. Study on control characteristics and method of high speed on/off solenoid valve [D]. Guiyang: Guizhou University, 2010. (in Chinese)
- [5] 黄卫春, 苏利杰. PWM高速开关阀驱动电路仿真设计 [J]. 制造业自动化, 2010, 32(6): 168–171.
HUANG Weichun, SU Lijie. Simulation design of driver circuit for the PWM high speed on-off valve [J]. Manufacturing Automation, 2010, 32(6): 168–171. (in Chinese)
- [6] LIU Yugang, SU Ming. Design of switch valve control system to adapt the pressure of the fuel supply port [J]. Application of Electronic Technique, 2012, 38(10): 65–67.
- [7] 詹仲强, 余金, 郭志, 等. 基于自组织映射的改进BP神经网络短期光伏出力预测研究 [J]. 四川电力技术, 2018, 41(2): 24–28, 67.
ZHAN Zhongqiang, YU Jin, GUO Zhi, et al. Study on prediction of short-term photovoltaic output power with improved BP neural network based on self-organizing mapping [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(2): 24–28, 67. (in Chinese)
- [8] LAJUNEN A. Evaluation of energy storage system requirements for hybrid mining loader [C] // IEEE Computer Society, Chicago, USA, 2011.
- [9] SUN Hui, JING Junqing. Research on the system configuration and energy control strategy for parallel hydraulic hybrid loader [J]. Automation in Construction, 2010, 19(2): 213–220.
- [10] HUANG Li, HUANG Jian, WANG Wei. The sustainable development assessment of reservoir resettlement based on a BP neural network [J]. International Journal of Environmental Research & Public Health, 2018, 15(1): 146–152.
- [11] 向忠, 陶国良, 谢建蔚, 等. 气动高速开关阀动态压力特性仿真与试验研究 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2008, 42(5): 845–849.

- XIANG Zhong, TAO Guoliang, XIE Jianwei, et al. Simulation and experimental investigation on pressure dynamics of pneumatic high-speed on/off valve[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2008, 42(5): 845 - 849. (in Chinese)
- [12] 孔晓武. 高速开关阀动态性能试验装置及其应用研究[J]. 机电工程, 2005, 22(8): 41 - 43.
KONG Xiaowu. Dynamic performance test device for high speed on/off valve and its application[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2005, 22(8): 41 - 43. (in Chinese)
- [13] 高钦和, 刘志浩, 牛海龙, 等. 高速开关阀控液压缸的位置控制[J]. 中国机械工程, 2014, 25(20): 2775 - 2781.
GAO Qinhe, LIU Zhihao, NIU Hailong, et al. Position control of high speed on-off valve controlled hydraulic cylinder[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(20): 2775 - 2781. (in Chinese)
- [14] 贺娟, 袁颂岳. 基于 DSP 的高速开关阀控液压缸位置控制系统研究[J]. 中国机械工程, 2010, 21(24): 2929 - 2931.
HE Juan, YUAN Songyue. High speed on/off valve hydraulic position control system based on DSP[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(24): 2929 - 2931. (in Chinese)
- [15] 易继锴, 候媛彬. 智能控制技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2007.
- [16] 赵泽昆, 韩晓娟, 马会萌. 基于 BP 神经网络的储能电池衰减容量预测[J]. 电器与能效管理技术, 2016(19): 68 - 72.
ZHAO Zekun, HAN Xiaojuan, MA Huimeng. Capacity fade prediction model of battery energy storage system based on BP neural network[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2016(19): 68 - 72. (in Chinese)
- [17] 张珂斐, 郭江, 聂德鑫, 等. 基于化学反应优化神经网络与融合 DGA 算法的油浸式变压器模型研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1275 - 1281.
ZHANG Kefei, GUO Jiang, NIE Dexin, et al. Diagnosis model for transformer fault based on CRO - BP neural network and fusion DGA method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1275 - 1281. (in Chinese)
- [18] 李明生, 叶进, 谢斌, 等. 双泵合流系统电-液联控合流阀设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(9): 353 - 360.
LI Mingsheng, YE Jin, XIE Bin, et al. Design and test of electric hydraulic confluence valve in double pump confluence system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 353 - 360. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20180941&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.041. (in Chinese)
- [19] RADER T. Method and device for driving a solenoid valve: USA, 6504699B1[P]. 2003-07-01.
- [20] 王新, 候风艳. 基于改进的 PSO - BP 神经网络的无刷直流电机控制[J]. 电子测量技术, 2017, 40(2): 10 - 14.
WANG Xin, HOU Fengyan. Control of brushless DC motor based on improved PSO - BP neural network[J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(2): 10 - 14. (in Chinese)
- [21] 陈龙, 朱斌, 孙晓东, 等. 基于模型预测控制的多电机驱动系统能量最优分配策略[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 403 - 409.
CHEN Long, ZHU Bin, SUN Xiaodong, et al. Optimal allocation strategy for multi-motor drive system based on model predictive control[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 403 - 409. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20181047&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.047. (in Chinese)
- [22] 王权, 李军, 戴立. 基于 BP 神经网络的电动伺服加载算法研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017(2): 8 - 13.
WANG Quan, LI Jun, DAI Li. Research on electric servo loading algorithm based on BP neural network[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2017(2): 8 - 13. (in Chinese)
- [23] 孙成伟, 初亮, 郭建华, 等. 电磁阀阶梯减压控制方法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(12): 380 - 385.
SUN Chengwei, CHU Liang, GUO Jianhua, et al. Stepped decompression control method of solenoid valve[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(12): 380 - 385. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20171247&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.12.047. (in Chinese)