

基于BP-Adaboost的变转速泵控缸系统位移软测量

许弘焜,张树忠,国钰,王亚兵,凌泽懿,阮玉镇

(福建理工大学机械与汽车工程学院,福建福州350118)

摘要:针对传统位移传感器测量液压缸位移存在的不足以及变转速泵控差动缸系统的非线性特征,采用基于自适应提升算法与反向传播神经网络相结合(back propagation neural network-adaptive boosting algorithm, BP-Adaboost)的方法进行位移软测量。首先,利用MATLAB/Simulink搭建变转速泵控差动缸液压系统模型和机械臂机械模型,并与试验结果对比,证明了模型的准确性。其次,基于软测量原理分别搭建BP神经网络软测量模型和BP-Adaboost神经网络软测量模型;将已验证的泵控缸模型与20 t挖掘机机械模型相结合,以该挖掘机铲斗的装卸不同物料为例,通过批量仿真获取数据集。最后,对所搭建的两个神经网络模型的铲斗位移软测量结果进行对比分析。结果表明:BP-Adaboost神经网络在约800 mm的行程中的位移软测量的平均误差和最大误差分别为0.9 mm和9.6 mm,与BP相比分别降低了47.1%和50.8%,提高了预测的鲁棒性和泛化性。

关键词:位移软测量;变转速泵控系统;反向传播神经网络;自适应提升算法;液压挖掘机

中图分类号:TH137

文献标志码:A

文章编号:2097-3853(2026)01-0090-05

Position soft-sensing of variable speed pump-controlled differential cylinder system based on BP-Adaboost

XU Hongkun, ZHANG Shuzhong, GUO Yu, WANG Yabing, LING Zeyi, RUAN Yuzhen

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Aiming at a series of shortcomings of traditional position sensors in measuring the hydraulic cylinders' position and the nonlinear characteristics of the variable speed pump-controlled differential cylinder system, a position soft-sensing method based on the combination of adaptive boosting algorithm and back propagation neural network (BP-Adaboost) is adopted. Firstly, a model consisting of a variable speed pump-controlled differential cylinder system and a mechanical boom is built with MATLAB/Simulink, and its accuracy is proved by comparison with the test results. Secondly, the BP neural network position soft-sensing model and the BP-Adaboost position neural network soft-sensing model are constructed based on the soft-sensing principle respectively; the verified pump-controlled cylinder model is coupled with the mechanical model of a 20-ton hydraulic excavator, and the loading and unloading of different materials in the bucket of this excavator is taken as an example. The data set is obtained through batch simulation. Finally, the results of the bucket position soft-sensing of the two neural network models are compared and analyzed. Results show that the average and maximum errors of the BP-Adaboost neural network are 0.9 mm and 9.6 mm for the position soft-sensing over a stroke of about 800 mm, which are 47.1% and 50.8% lower than those of the BP, respectively, and the robustness of the prediction and generalization are improved.

Keywords: position soft-sensing; variable speed pump-controlled system; back propagation neural network; adaptive boosting algorithm; hydraulic excavator

收稿日期:2025-02-18

基金项目:福建省自然科学基金项目(2025J01985)

第一作者简介:许弘焜(2000—),男,福建泉州人,硕士研究生,研究方向:机电液控制技术。

通信作者:张树忠(1980—),男,福建周宁人,教授,博士,研究方向:机电液智能控制与驱动。

液压系统的状态监测、故障诊断、位置控制等功能,均需依赖精确的液压缸位移信号。针对传统位移传感器在液压缸应用中的固有缺陷,权龙等^[1]设计了一种基于霍尔传感器的位移检测方法,采用非接触式测量避免了传感器的机械运动,从而提高了其耐用性和适用性,而且测量范围广。路勇等^[2]采用超声波技术测量液压缸活塞的位移,不仅满足了液压缸在较大位移范围内的测量需求,同时提高了测量精度和速度。樊焯男等^[3]设计了外置式磁感应位移传感器,通过对液压缸缸筒的磁场变化的检测实现了位移的测量。时航等^[4]设计了一种以 STM32 为核心的位移测量系统,在保障测量精度的前提下,实现了成本的有效控制。Serdal A 等^[5]利用 FMCW 雷达传感器来检测液压缸活塞的位置,有效提高了检测精度。然而,位移传感器在测量时,不仅增加安装成本,而且在恶劣环境下更易受到污染、损坏。

针对具有强非线性特点的变转速泵控液压系统^[6-7],国内外学者结合非位移传感器信息和开发算法,对位移进行间接估计测量。Tatiana 等^[8]在叉车上通过估算电机驱动泵输出到液压缸累积流量虚拟出液压缸的位移,位置控制的最大误差为 1.8%。Tom 等^[9]建立温度、转速与位移的二维表,通过查表和计算相结合的方式来估计一台矿用装载机的动臂和铲斗液压缸位置,在单个周期内达到 mm 的精度。张兰等^[10]针对直驱液压系统,利用电机转速、转矩信息,结合系统相关参数建立一种考虑位移补偿的液压执行器位移软测量模型,软测量最大误差为 0.04 cm。文献[11]提出一种基于 BP (back-propagation) 神经网络的位移软测量方法,软测量误差在 $\pm 2.5\%$ 以内。综上所述,现有位移软测量方法主要有流量积分法、查表法及 BP 神经网络法。然而,这些方法各有其固有缺陷:流量积分法易受油液泄漏和压缩性影响,导致累积误差;查表法依赖大量精确标定,泛化能力差,难以适应未预标的工况;标准的 BP 神经网络则存在训练不稳定、易陷入局部最优及过拟合等问题,在系统强非线性和负载大范围扰动下,其泛化能力和鲁棒性均显不足。

为了有效克服现有方法的局限性,本研究提出自适应提升算法 (adaptive boosting algorithm,

Adaboost) 与反向传播神经网络 (BP) 相结合 (BP-Adaboost),应用于变转速泵控差动缸系统的位移软测量,旨在利用 Adaboost 的集成学习框架,通过迭代训练多个 BP 弱学习器并赋予不同权重,可以显著增强 BP 网络模型的泛化能力、预测稳定性和对复杂非线性/变负载模式的适应性^[12-14],理论上能有效抑制过拟合、降低方差误差,从而获得更高的综合预测精度。

1 变转速泵控液压系统的建模与试验验证

1.1 变转速泵控液压系统平台建模

本研究所提变转速单泵控差动缸系统由液压缸、伺服电机、定量泵、蓄能器、液控单向阀以及安全阀组成,通过两个液控单向阀来实现差动缸流量的匹配,如图 1 所示。当伺服电机正值负载时,伺服电机驱动液压泵,将低压油液增压送到高压侧,系统对外做功;当伺服电机负值负载时,高压油液驱动液压泵运行在马达工况,带动伺服电机发电,实现能量回收。

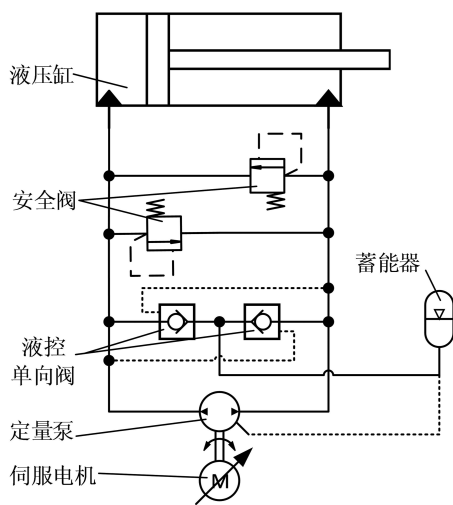


图 1 变转速泵控液压系统原理图

Fig.1 Schematics of variable speed pump-controlled system

根据文献[15],在 MATLAB/Simulink 中搭建了变转速泵控差动缸系统模型和机械臂机械模型 (见图 2),基于如图 3 所示的试验台开展试验来验证所搭建模型的可行性。模型中,油液体积弹性模量为系统压力和油液中自由气体相对含量的函数^[15],忽略温度变化对油液黏度的影响以及管路弹性变形。

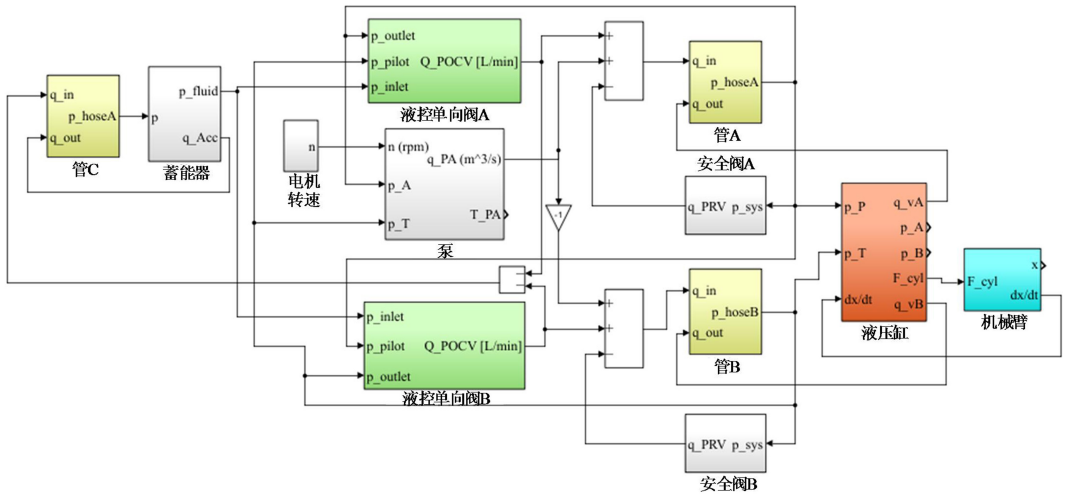


图 2 变转速泵控系统 与机械臂

Fig.2 Combined model of variable speed pump-controlled system and mechanical boom

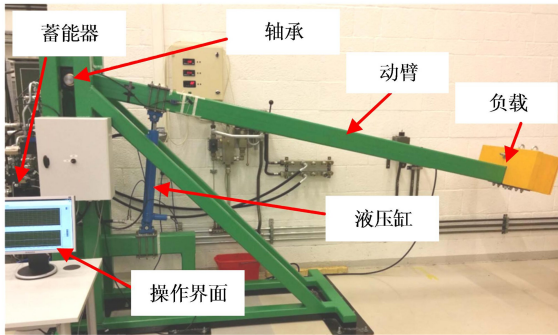


图 3 机械臂试验台^[15]

Fig.3 Boom test bench^[15]

1.2 试验验证

在验证了系统模型准确性的基础上,即可利用该模型生成大量数据以构建软测量模型。液压缸的位移与缸的两腔压力及电机转速间存在复杂的非线性关系,如图 4 所示。以试验测得的电机转速 n 作为仿真模型输入进行仿真,将仿真位移输出与试验所测得的位移 s 曲线进行对比,仿真的最大位移误差为 7.6 mm。

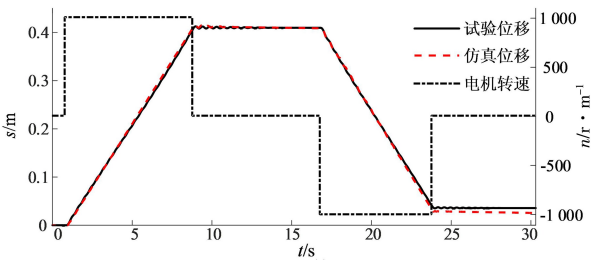
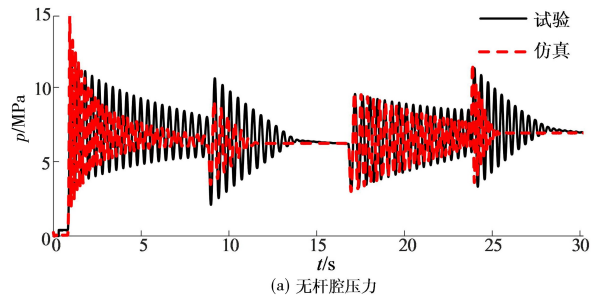


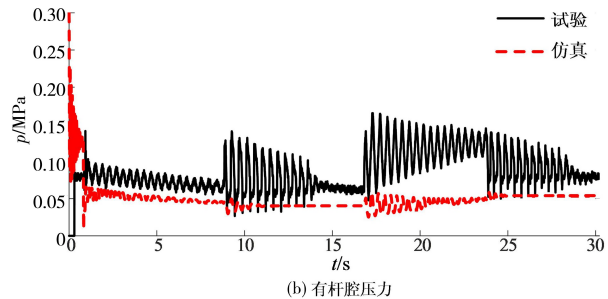
图 4 电机转速及系统位移对比

Fig.4 Comparison of motor speed and system position

为深入验证仿真模型的准确性,分别对液压缸无杆腔、有杆腔压力 p 进行对比验证,结果如图 5 所示。通过对比可知,各部分压力的仿真结果与试验结果基本一致,验证了仿真模型的准确性。



(a) 无杆腔压力



(b) 有杆腔压力

图 5 仿真与试验的液压缸压力

Fig.5 Simulated and experimental cylinder pressures

2 位移软测量的原理

液压缸的位移与液压缸的两腔压力变化以及电机的速度之间存在着一定的非线性关系。神经网络在处理非线性问题上具有强大的能力和独特的优势,其深层架构能有效捕捉数据的复杂非线性

性特征。通过训练优化网络参数,神经网络能精准拟合各类非线性函数,成为解决实际问题的有力工具,在诸多领域得到广泛应用。为此,针对变转速泵控系统的特性,提出了一种基于 BP-Adaboost 的位移软测量方法,其原理如图 6 所示。该方法利用电机转速以及液压缸的有杆腔压力和无杆腔压力作为输入集,通过 BP-Adaboost 神经网络进行训练,最终将活塞总位移作为输出集输出。

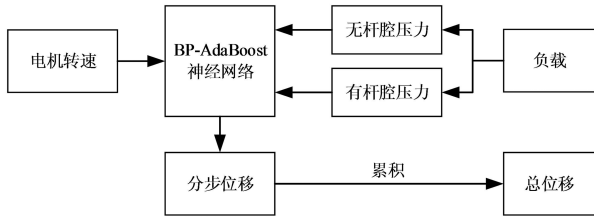


图 6 BP-Adaboost 位移软测量原理图

Fig.6 Schematics of BP-Adaboost position soft-sensing

3 数据准备

为验证所提软测量方法在真实工程机械中的性能,将已验证的泵控缸液压系统模型与 20 t 挖掘机机械模型相结合,以该挖掘机铲斗装卸不同物料为例^[16],通过批量仿真获取数据集。

该挖掘机工作装置液压缸参数如表 1 所示。

铲斗的平装土壤容量为 0.80 m³,但在实际作业中,铲斗所装土壤会超出平装量,形成堆尖。按照国家标准土方机械、液压挖掘机和挖掘装载机的反铲斗和抓铲斗容量的标定计算方法^[17],堆尖部分的宽高比例设定为 2 : 1,据此计算,实际挖土的体积约为 1.14 m³。

表 1 挖掘机液压缸参数

Tab.1 Excavator cylinder parameters

组件	全缩长度/mm	m/kg
动臂油缸	1 759	340
斗杆油缸	2 040	256
铲斗油缸	1 590	146

由位移软测量原理可知,液压缸两腔压力和电机的转速作为软测量模型的输入集,而活塞位移作为输出集。考虑到铲斗在不同负载下的运动特性变化,为此根据实际挖掘作业中常见的土质

条件来计算铲斗的挖掘负载,如式(1)所示。不同土质条件的最大承载情况如表 2 所示。

$$F_{load} = V \times \rho \times g \quad (1)$$

式中, V 表示铲斗挖掘时最大容纳体积; ρ 表示土壤密度; g 表示重力加速度。

表 2 不同物料下铲斗的最大承载力

Tab.2 Maximum bucket loads for different materials

土质名称	密度/kg · m ⁻³	最大质量/t	最大负载/kN
泥土	1 650	1.88	18.4
沙石	1 950	2.22	21.8
沙子	2 000	2.27	22.3
泥土与碎石	2 100	2.39	23.4
多孔砂岩	2 500	2.84	27.8
石灰岩	2 600	2.96	29.0
胶结砂岩	2 650	3.01	29.5

根据变转速泵控系统仿真所产生的神经网络训练数据。图 7 为不同负载下的活塞位移。在装载阶段(2.73~5.60 s)铲斗负载逐渐增大,在卸载阶段(9.90~12.685 s)铲斗负载逐渐变小,并影响两腔压力。随着负载的增加或减少,液压缸两腔的压力波动明显,随即反映在活塞的位置状态上,如图 7 中的局部放大图 A 和 B 所示。

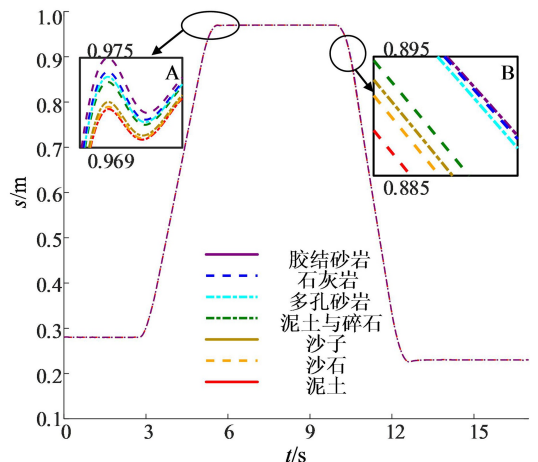


图 7 不同负载下的活塞位移

Fig.7 Piston position under different loads

将仿真所得到的约 370 000 组训练数据按照 3 : 1 的比例随机划分为训练集与测试集,并通过 mapminmax 函数对数据进行归一化处理,使得输

入数据最终被映射到 $[-1, 1]$ 内。

4 仿真分析

分别采用 BP 神经网络和 BP-Adaboost 神经网络软测量模型来预测不同物料中多孔砂岩土质条件下的铲斗位置,其预测结果如图 8 和图 9 所示。

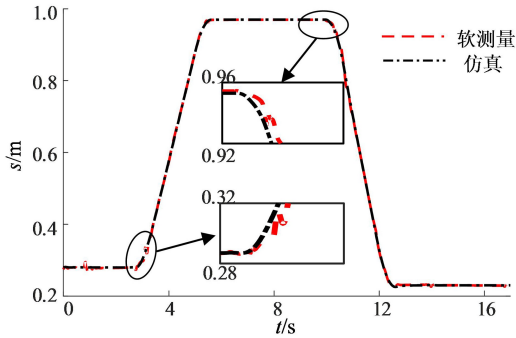


图 8 BP 神经网络的预测结果

Fig.8 Prediction results by BP neural networks

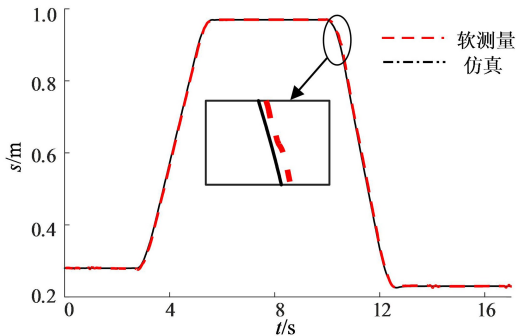


图 9 BP-Adaboost 神经网络的预测结果

Fig.9 Prediction results by BP-Adaboost neural network

铲斗卸载阶段出现最大位移误差,两个软测量模型的误差如表 3 所示。其中,BP 神经网络的平均误差为 1.7 mm,最大误差为 19.5 mm。BP-Adaboost 神经网络的平均误差为 0.9 mm,最大误差为 9.6 mm,相对于 BP 分别降低了 47.1%和 50.8%。由此可以看出,BP-Adaboost 神经网络的效果更好。

表 3 不同软测量模型误差

Tab.3 Errors of different soft-sensing models

模型	平均误差/mm	最大误差/mm
BP 软测量	1.7	19.5
BP-Adaboost 软测量	0.9	9.6

5 结论

本研究提出了一种基于 BP-Adaboost 神经网络的位移软测量方法,用于实现变转速泵控差动缸系统的无传感器位移估计。研究表明:

1) 相较于 BP 神经网络模型,所提的 BP-Adaboost 模型显著提升了位移软测量精度。在模拟 20 t 挖掘机铲斗装卸多种物料(最大负载为 18.4~29.5 kN)的动态工况下,行程约 800 mm 时,BP-Adaboost 位移软测量的平均误差和最大误差分别为 0.9 mm 和 9.6 mm,相对于 BP 分别降低了 47.1%和 50.8%。

2) 位移软测量精度的提升,表明了 Adaboost 集成策略的有效性,增强了算法处理系统强非线性和应对大范围动态负载变化的能力,提高了预测的鲁棒性和泛化性。

参考文献:

- [1] 权龙,杨德荣,李凤兰. 应用霍尔开关元件检测液压缸位移原理的研究[J]. 电子测量与仪器学报,2002,16(4):11-15.
- [2] 路勇,权龙. 超声波在液压缸活塞位移测量中的应用[J]. 太原理工大学学报,2003,34(5):550-551,554.
- [3] 樊焯男,高飞,廉自生,等. 液压缸用外置式磁感应位移传感器设计[J]. 机电工程,2022,39(6):775-782.
- [4] 时航,李明华,周京博,等. 基于 STM32 的液压缸位移测量系统设计[J]. 工业仪表与自动化装置,2023(1):9-15.
- [5] AYHAN S, SCHERR S, PAULI M, et al. FMCW radar in oil-filled waveguides for range detection in hydraulic cylinders[C] //9th European Radar Conference, 2012. Amsterdam: IEEE, 2013:63-66.
- [6] 王波,郝云晓,权龙,等. 分腔独立变转速泵控电液伺服系统特性研究[J]. 机械工程学报,2020,56(18):235-243.
- [7] 沈伟,崔霞. 变转速泵控马达自抗扰控制[J]. 液压气动与密封,2023,43(4):39-45.
- [8] MINAV T A, LAURILA L I E, PYRHÖNEN J J. Relative position control in an electro-hydraulic forklift[J]. International Review of Automatic Control, 2013,1(6):54-61.

- [3] ZHANG M, LIU S F, HOU X R, et al. Reliability modeling and analysis of a diesel engine design phase based on 4F integration technology[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6513.
- [4] FAKHRAVAR H. Application of failure modes and effects analysis in the engineering design process[D]. Norfolk, VA, USA: Old Dominion University, 2020.
- [5] SINGH J, SINGH S, SINGH A. Distribution transformer failure modes, effects and criticality analysis (FMECA)[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2019, 99: 180–191.
- [6] 杨波, 刘振, 卫新洁, 等. 一种针对嵌入式系统的安全性分析方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(8): 1930–1939.
- [7] 欧阳中辉, 胡道畅, 陈青华, 等. 基于模糊集理论和 TOPSIS 的 FMEA 分析方法[J]. *兵器装备工程学报*, 2020, 41(11): 117–123.
- [8] DONG Q, ZHANG G H, ZHAO Y Q, et al. Reliability analysis of FMECA threshing and cleaning system based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. *INMATEH Agricultural Engineering*, 2023: 173–184.
- [9] Facility energy system resilience and reliability: UFC 3–520–02[S]. Washington, DC: Department of Defense, 2023–07–27 (Change 1, 2025–01–29).
- [10] 李果, 刘俊博, 周惠敏, 等. 航空发动机限寿命件高效失效概率算法研究综述[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(11): 2398–2407.
- [11] 魏朗, 周文财, 田顺, 等. 强化试验技术在车辆可靠性试验中的应用[J]. *机械设计*, 2020, 37(1): 1–9.
- [12] International Electrotechnical Commission. Environmental testing—Part 2–6: Tests—Test Fc: Vibration (sinusoidal): IEC 60068–2–6: 2007[S]. International Electrotechnical Commission, 2007.
- [13] DUBROV G M, YERSHOV Y M, LEVIN Y I, et al. Expert estimates in scientific and technical forecasting[M]. Kyiv: Naukova Dumka, 1994.
- [14] 唐少波, 王田宇, 温业堃, 等. 基于 FMECA 的产品可靠性分析方法[J]. *电子产品可靠性与环境试验*, 2022, 40(5): 61–63.

(责任编辑: 马晓磊)

(上接第 94 页)

- [9] SOURANDER T, PIETOLA M, MINAV T, et al. Sensorless position estimation of simulated direct driven hydraulic actuators[C] // *Proceedings of the 15th Scandinavian International Conference on Fluid Power*. Linköping, Sweden: Linköping University Electronic Press, 2017(144): 148–159.
- [10] 张树忠, 张兰, 刘喜涛, 等. 伺服电动机驱动泵控缸的位移软测量方法[J]. *液压与气动*, 2021, 45(7): 116–120.
- [11] ZHANG S Z, CHEN T Y, MINAV T, et al. Position soft-sensing of direct-driven hydraulic system based on back propagation neural network[J]. *Actuators*, 2021, 10(12): 322.
- [12] 李泽林, 刘成颖. 基于 Adaboost 算法的环抛机盘面钝化程度分类[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2021, 61(9): 986–993.
- [13] 顾玉磊, 马晖, 王愚勤, 等. 基于 BP-Adaboost 与 TOPSIS 的航空装备供应商评价[J]. *山东大学学报(工学版)*, 2024, 54(1): 63–73.
- [14] 陈世平, 谢俊, 罗小, 等. 基于 BP-Adaboost 算法的数控机床材料切削能耗预测研究[J]. *制造技术与机床*, 2020(12): 20–24.
- [15] SÅ, RENSEN J K, HANSEN M R, EBBESEN M K. Numerical and experimental study of a novel concept for hydraulically controlled negative loads[J]. *Modeling, Identification and Control: a Norwegian Research Bulletin*, 2016, 37(4): 195–211.
- [16] 国钰, 张树忠, 王亚兵, 等. 中型挖掘机泵控系统 with 阀控系统的能效对比[J]. *液压与气动*, 2024, 48(7): 129–134.
- [17] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会. 土方机械 液压挖掘机和挖掘装载机的反铲斗和抓铲斗容量标定: GB/T 21941—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

(责任编辑: 方素华)