

DOI: 10.20271/j.cnki.1673-9833.2026.1010

基于变频启动特性的离心泵水力性能实验 与神经网络模型预测

黄辉凡¹, 孙 晓¹, 张玉良², 贾晓奇³

(1. 湖南工业大学 机械工程学院, 湖南 株洲 412007; 2. 衢州学院 机械工程学院, 浙江 衢州 324000;
3. 浙江理工大学 浙江省流体传输技术重点实验室, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 为揭示离心泵在变频开机过程中的水力特性, 在6种非额定工况下对一台低比转速开式叶轮离心泵进行了变频开机实验, 测量参数包括入口与出口静压、流量、扬程、转速及轴功率等。对比分析了前馈神经网络(FFN)、级联前馈神经网络(CFNN)与多层感知机(MLP)3种模型对瞬态流量与扬程的拟合与预测效果。结果显示, 在变频启动期间, 入口静压呈“降-升-降”变化趋势, 出口静压迅速上升后趋于平稳, 流量与扬程的稳定值随相对流量增大而减小。CFNN模型在预测精度上表现最优。

关键词: 离心泵; 变频; 瞬态外特性; 性能预测

中图分类号: TP183

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2026)01-0072-07

引文格式: 黄辉凡, 孙 晓, 张玉良, 等. 基于变频启动特性的离心泵水力性能实验与神经网络模型预测[J]. 湖南工业大学学报, 2026, 40(1): 72-78.

Research on the Hydraulic Performance Experiment of Centrifugal Pumps Based on Variable Frequency Drive Characteristics and Neural Network Model Prediction

HUANG Huifan¹, SUN Xiao¹, ZHANG Yulian², JIA Xiaoqi³

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. College of Mechanical Engineering, Quzhou University, Quzhou Zhejiang 324000, China; 3. The Zhejiang Provincial Key Lab of Fluid Transmission Technology, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: To reveal the hydraulic characteristics of a centrifugal pump during variable frequency start-up, experiments were conducted on a low-specific-speed open impeller centrifugal pump under six off-design conditions. Measured parameters included inlet and outlet static pressures, flow rate, head, speed, and shaft power. The study compared the transient flow and head prediction performance of three models: Feedforward Neural Network (FFN), Cascaded Feedforward Neural Network (CFNN), and Multi-Layer Perceptron (MLP). Results showed that during variable frequency start-up, inlet static pressure followed a “drop-rise-drop” trend, while outlet static pressure quickly rose and stabilized. Stable values of flow rate and head decreased with increasing relative flow. The CFNN model demonstrated the best prediction accuracy.

Keywords: centrifugal pump; variable frequency; transient external characteristics; performance prediction

收稿日期: 2024-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(51876103)

作者简介: 黄辉凡, 男, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为流体机械流动计算等, E-mail: m23080200011@stu.hut.edu.cn

通信作者: 张玉良, 男, 衢州学院教授, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为流体机械优化设计与内流特性预测,
E-mail: zhang002@sina.com

0 引言

离心泵作为工业生产和日常生活中的关键流体输送设备,其运行效率直接影响着整个系统的能耗与稳定性^[1],特别是离心泵内部水力损失的增加,将导致其运行效率显著下降^[2]。故而随着对能源利用效率的日益重视和技术的进步,提高泵的运行效率成为研究的重点方向。然而,传统离心泵在启动过程中往往采用直接满负荷启动方式,这种方式不仅会造成电网电压瞬间下降,影响其他电气设备正常运行,而且还会导致泵内部件的磨损加剧,缩短泵的使用寿命^[3]。为此,变频技术作为一种有效的方法被广泛应用于泵的启动过程^[4],它能够在保证泵平稳启动的同时,减少对电网的冲击,并且降低设备的机械应力。

在泵特性研究领域,科研工作者们已取得系列成果。Zheng F. C. 等^[5]通过数值实验分析了轴流式水喷射泵在快速启动过程中出现的强烈瞬态效应机制,并揭示了鞍区与瞬态效应之间的关系。Jin F. Y. 等^[6]针对可逆泵水轮机的泵模式启动过程进行了瞬态模拟。Fu S. F. 等^[7]通过实验与数值方法研究了启动过程中轴流泵的瞬态特性,旨在探索非规范运行条件下瞬态流动对泵站系统的冲击载荷及瞬时流体压力的影响。在泵停机的研究方面,Feng J. J. 等^[8]探讨了离心泵在停机过程中的瞬态特性。Fu X. L. 等^[9]结合数值模拟与实验,研究了断电后水泵导叶与球阀的同步关闭过程。此外,亦有研究将启动与停机特性相结合。F. Ahmed 等^[10]扩展了对往复泵的研究,探究了其快速启动与停机过程中的瞬态与稳态特性。Zhang Y. L. 等^[11]则分析了黏度对离心泵启动与停止阶段瞬态行为的影响。

尽管变频技术在泵类设备中应用广泛^[12-15],但针对低比转速离心泵变频开机水力性能的实验研究仍存在不足,如实际工况复杂导致实验台难复刻所有场景,数据普适性不足,且瞬态测试成本高、周期长,难以响应突发工况需求,还有泵瞬态特性呈强非线性等^[16]。因此,仅靠实验拟合难以建立普适性预测模型,基于此,需要新的方法来解决这一问题。

目前,随着大数据和机器学习技术的发展,先进的神经网络架构在数据拟合与预测方面优势显著^[17]。这不仅可帮助学者们更好地理解 and 模拟复杂系统的行为,还能够为未来的设计和优化提供强有力支持。因此本研究尝试利用神经网络模型对泵瞬态流量与瞬态扬程的特性进行拟合与预测未测工况。当前发展较快的为卷积神经网络(CNN)和循环神经网络(RNN),特别是在图像识别、自然语言处理领域

的研究众多、优势明显,但前馈神经网络(FFN)、级联前馈网络(CFNN)、多层感知机(MLP)这3种基础网络模型比较经典。FFN的结构简单、易于实现^[20];CFNN通过动态权重机制增强学习能力^[21];MLP凭借隐藏层结构可处理复杂非线性问题^[22]。因此本研究考虑引入所提神经网络技术进行预测,它可凭数据拟合能力扩展未测工况,快速计算参数,还能揭示特性演化规律,弥补实验短板,为泵站运行优化提供高效工具。

因此,本研究首先重点探讨一台小型低比转速离心泵在6种非额定工况下变频开机过程中的瞬态外特性表现,包括入口静压、出口静压、流量、扬程、转速及轴功率的瞬态特性,可以为离心泵的设计和提供操作提供更加准确的数据支持;其次通过对FFN、CFNN、MLP这3种基本神经网络模型进行对比分析,考察它们对泵瞬态流量与瞬态扬程特性的拟合与预测效能,进而探索并设计出更适用于泵外部特性性能预测的新型网络模型。这不仅为泵性能预测提供模型选择依据,更为专用神经网络开发奠定基础,以促进泵站运行向智能化方向发展。

2 实验装置与测试泵

2.1 实验装置

本研究搭建的离心泵外特性瞬态性能实验台严格依据文献[21]标准设计建造,其系统组成如图1所示,实验台主要由以下4个核心模块构成。



图1 实验台装置

Fig. 1 Test bench

1) 离心泵机组: 包含4.0 kW变频驱动电机、JC0型转矩转速传感器(量程为0~50 N·m,精度为 $\pm 0.25\%$)以及待测模型泵;

2) 测量系统: 采用OPTIFLUX2100C电磁流量计(量程为0~30 m³/h,精度为 $\pm 0.2\%$)和WIKA S-10压力传感器(进口压力为-1.0~1.0 MPa,出口压力为0~1.6 MPa,精度为 $\pm 0.1\%$);

3) 循环系统: 包括储水箱和配套管路;

Q/Q_r 为 1.837 时出口压强稳定时刻约为 1.891 s 外, 其余情况下的压强稳定时间皆在 2.296 s 附近, 说明较大相对流量值能使出口静压更早地达到稳定。

图 5 为变频启动过程中泵瞬态流量的特性曲线。各工况下的稳定流量值分别为 1.043, 3.092, 5.084, 7.064, 9.036, 11.019 m^3/h , 与期望流量值接近。各相对流量下的流量稳定时刻分别约为 0.609, 1.644, 1.808, 2.015, 2.103, 2.156 s, 这表明随着相对流量增大, 流量稳定时刻逐渐增加。

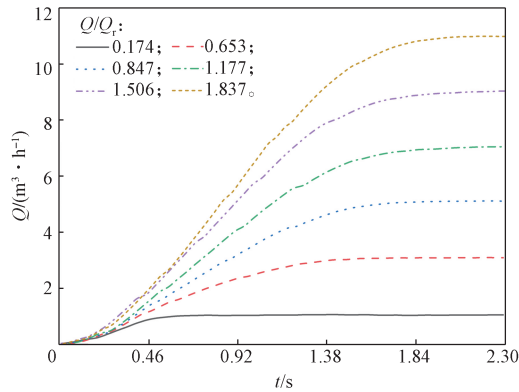


图 5 变频启动过程中瞬态流量特性曲线

Fig. 5 Transient flow rate characteristics curves during variable frequency startup

基于泵的几何参数以及静态压力和流速的实验结果, 计算出瞬时扬程, 如图 6 所示。

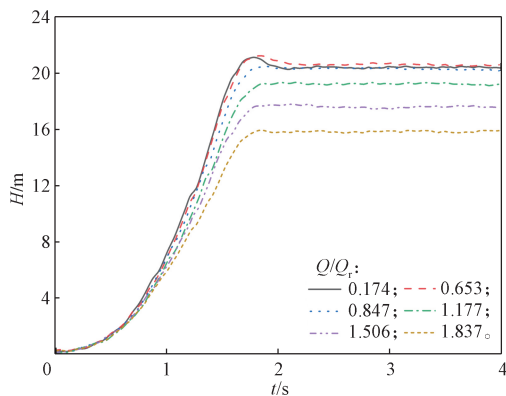


图 6 变频启动过程中瞬态扬程特性曲线

Fig. 6 Transient head characteristics curves during variable frequency startup

图 6 描述了变频启动期间瞬态扬程的特性, 结合图 4 可知其与图 4 中出口静压瞬态特性一致, 这是由于静态压力产生的静态扬程是泵扬程的主要组成部分, 泵出口处的静态压力主要决定了静态扬程。即泵的扬程特性基本上取决于泵出口处的静态压力。各相对流量下扬程稳定值分别为 20.433, 20.592, 20.280, 19.244, 17.628, 15.862 m, 说明随着相对流量的增加, 扬程稳定值逐渐减少。

图 7 为变频启动过程中泵瞬态转速的特性曲线。

由图可知, 所有转速曲线皆在 0.906~1.180 s 内产生了一个冲击现象, 这是由于系统具有一定的机械惯性, 当系统从较低转速向较高转速过渡时, 系统需要克服惯性力, 这会导致瞬时的振动或冲击, 从而产生该冲击现象。而在历经冲击现象后, 各曲线都达到了一个相对稳定的状态。各相对流量下, 转速稳定值分别为 2 213.411, 2 213.193, 2 211.504, 2 209.388, 2 208.940, 2 205.140 r/min , 可见随相对流量的增加, 转速稳定值逐渐减小, 这是由于随着流量的增大, 系统需要克服更大阻力。

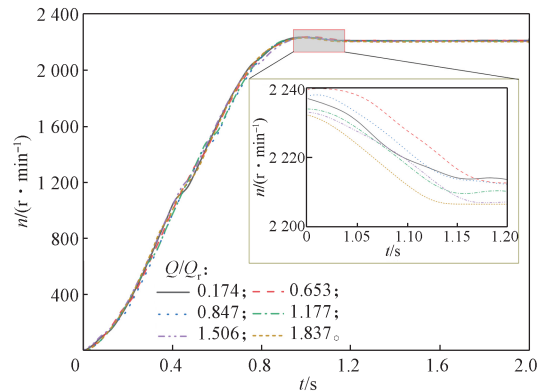


图 7 变频启动过程中瞬态转速特性曲线

Fig. 7 Transient speed characteristics curves during variable frequency startup

图 8 描述了变频启动过程中泵瞬态轴功率的特性, 结合图 7 中的转速曲线分析, 可知轴功率曲线的时间响应与其保持良好同步, 此同步性主要归因于二者皆由相同设备进行测量。各相对流量下, 轴功率稳定值分别为 0.704, 0.740, 0.818, 0.945, 1.042, 1.101 kW。由此可见, 随着相对流量增加, 轴功率逐渐增加, 这与转速的表现相反。

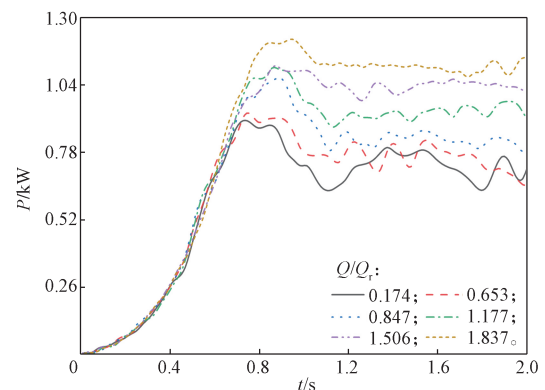


图 8 变频启动过程中瞬态轴功率特性曲线

Fig. 8 Transient shaft power characteristics curves during variable frequency startup

3.2 外特性曲线预测分析

前馈神经网络是一种基本的神经网络, 其信息流仅沿单一方向从前向后传递, 不形成任何回路。它

由输入层、一个或多个隐藏层和输出层组成^[22-23]。级联前馈神经网络是一种特殊的前馈网络架构^[24]，它通过逐步增加新的隐藏层或节点来扩展网络，从而提升模型的学习能力。这种级联的方式使得网络能够在训练过程中动态地调整其复杂度，以适应不同的任务需求。多层感知机是一种特定类型的前馈神经网络，它包括一个输入层、一个输出层和至少一个使用非线性激活函数的隐藏层^[25-26]。多层感知机通过这些隐藏层中的神经元学习复杂的特征映射，从而能够处理复杂的、非线性的决策边界问题。采用相对流量值为 0.174, 0.653, 0.847, 1.177, 1.506 的流量曲线与扬程曲线，分别对用于流量预测以及扬程预测的前馈神经网络、级联前馈神经网络和多层感知机模型进行训练。随后，利用上述 3 种模型对相对流量为 1.837 时的流量与扬程曲线进行了预测。所得预测结果如图 9 所示。其中，前馈神经网络、级联前馈神经网络及多层感知机模型对流量的预测结果分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 ；而对扬程的预测结果则相应地记为 H_1 、 H_2 、 H_3 。

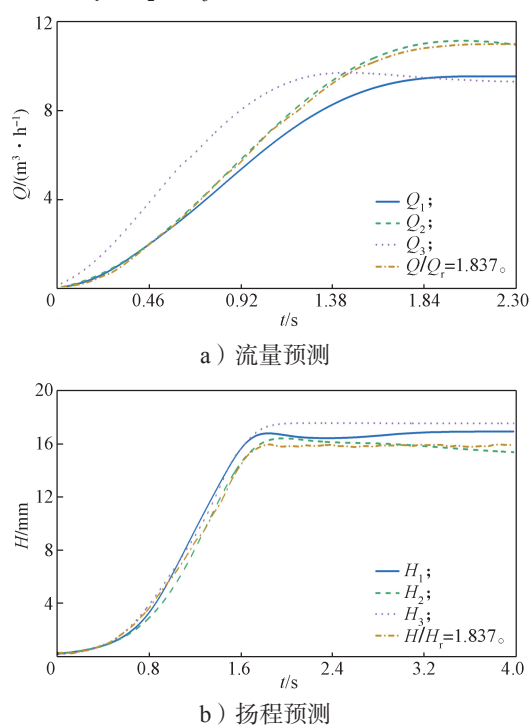


图 9 外特性曲线预测结果

Fig. 9 Predicted results of the pump's external characteristic curves

为了评估预测精度，采用欧几里得距离作为评价指标之一^[27]。对于任意两个同维向量 $\mathbf{a}=(a_1, a_2, \dots, a_n)$ 与 $\mathbf{b}=(b_1, b_2, \dots, b_n)$ 期间的欧几里得距离 $d(\mathbf{a}, \mathbf{b})$ 可表示为

$$d(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2}, \quad (1)$$

此外，相对偏差绝对值的平均值也用作另一项评估标准^[28]。对于预测值 $\hat{x}_i$ 与真实值 x_i ，相对偏差 r_i 定义为

$$r_i = \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right|, \quad (2)$$

则相对偏差绝对值的平均值 R 为

$$R = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right|. \quad (3)$$

在此研究中，计算了各流量预测曲线与在相对流量为 1.837 下的实际流量曲线之间的总欧几里得距离，分别为 218.584 6, 83.475 3, 297.491 4，并计算了基于原始数据的相对偏差绝对值的平均值，分别为 0.104 3, 0.064 5, 0.661 2。此外，还计算了各扬程预测曲线与在相同相对流量条件下（即相对流量为 1.837）的实际扬程曲线之间的总欧几里得距离，结果分别为 490.965 2, 279.582 4, 628.795 6，以及基于原始数据的相对偏差绝对值的平均值，分别为 0.077 9, 0.056 8, 0.093 5。

对于流量与扬程的预测，上述计算表明，与原始数据相比，最小的欧几里得距离和相对偏差均对应于级联前馈神经网络模型所预测的曲线数据，其次是前馈神经网络模型预测的曲线数据，再次则是多层感知机模型预测的曲线数据。这是由于 MLP 结构固定，可能无法如 CFNN 灵活适应复杂的非线性关系。此外，FFNN 在处理高维或复杂数据时可能会因全局优化问题而遇到困难。相反，CFNN 通过逐步增加网络层次或节点数的方式构建，这种动态增长的结构能够更好地适应复杂的数据模式，从而提高模型的预测精度。

这一发现表明，级联前馈神经网络模型在预测泵的流量和扬程瞬态特性方面表现最优，其次是前馈神经网络模型，而多层感知机模型在预测泵的外部特性方面的表现相对较差。因此，选择以级联前馈神经网络作为基础来开发适用于泵外部特性数值预测的方法是较为理想的选择。

4 结论

本研究通过变频开机实验，系统研究了一台小型低比转速离心泵在 6 种非额定工况下的瞬态外特性，包括进出口压强、流量、扬程、转速及轴功率的动态变化规律，并对比分析了 FFN、CFNN 和 MLP 3 种模型对瞬态流量与扬程的预测性能，结果发现：

1) 泵在不同工况下变频启动时，入口静压最初表现一致，随后经历先降后升再降的过程，最终趋于稳定，且相对流量增加时，最终稳定状态下的入口静压值会减小。出口静压初期快速上升后趋于稳定，

小流量时会出现显著冲击,稳定后的出口静压随相对流量增加而降低。流量随启动时间渐进稳定,且稳定时刻随相对流量增大而延迟。扬程特性与出口静压特性一致,稳定值随相对流量增加而减少。启动过程中转速出现短暂冲击后趋于稳定状态,转速稳定值随相对流量增加而略有下降。轴功率随启动过程逐渐增加并稳定,且相对流量越大,轴功率稳定值越高。

2)在预测泵的流量和扬程特性时,级联前馈神经网络模型表现出最优的准确性,其预测曲线与实际数据间的欧几里得距离和相对偏差最小。其次是前馈神经网络模型,而多层感知机模型的预测效果最差。因此,级联前馈神经网络是预测泵外部特性最佳的选择。

参考文献:

- [1] 王田田,李俊宏,南玲博,等.可变形磨损模型下的微型离心泵复合磨损研究[J/OL].农业机械学报,2024:1-12.(2024-02-29).<http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?Filename=NYJX20240227004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
WANG Tiantian, LI Junhong, NAN Lingbo, et al. Study on Composite Wear of Micro Centrifugal Pump Based on Deformable Wear Model[J/OL]. China Industrial Economics, 2024: 1-12. (2024-02-29). <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?filename=NYJX20240227004&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [2] 陈晓丹,吴澳,赵睿杰,等.磁悬浮无轴离心泵叶轮转子动力学特性[J].浙江大学学报(工学版),2023,57(8):1680-1688.
CHEN Xiaodan, WU Ao, ZHAO Ruijie, et al. Rotor Dynamics of Impeller in a Magnetic Suspension Bearingless Centrifugal Pump[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2023, 57(8): 1680-1688.
- [3] 龚波,袁寿其,骆寅,等.离心泵负载下的电机定子电流特性研究[J].振动测试与诊断,2020,40(5):904-910,1022.
GONG Bo, YUAN Shouqi, LUO Yin, et al. Characteristics of Induction Motor Current Signature for Centrifugal Pump Load[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(5): 904-910, 1022.
- [4] 葛磊,杨飞,权龙,等.基于转矩控制的定排量恒压电液动力源运行特性[J].机械工程学报,2022,58(20):453-460.
GE Lei, YANG Fei, QUAN Long, et al. Pressure Controlling Performance of Constant Displacement Electro-Hydraulic Power Source Based on Direct Torque Control[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20): 453-460.
- [5] ZHENG F C, ZHANG X P, CHEN T R, et al. Strong Transient Characteristics in Axial Flow Waterjet Pump During Rapid Starting Period with Special Emphasis on Saddle Zone[J]. Ocean Engineering, 2023, 269: 113506.
- [6] JIN F Y, LUO Y Y, BI H L, et al. Transient Simulation of Reversible Pump Turbine During Pump Mode's Starting up[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 68: 107678.
- [7] FU S F, ZHENG Y, KAN K, et al. Numerical Simulation and Experimental Study of Transient Characteristics in an Axial Flow Pump During Start-Up[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 1879-1887.
- [8] FENG J J, GE Z G, ZHANG Y, et al. Numerical Investigation on Characteristics of Transient Process in Centrifugal Pumps During Power Failure[J]. Renewable Energy, 2021, 170: 267-276.
- [9] FU X L, LI D Y, SONG Y C, et al. Pressure Fluctuations During the Pump Power-Trip of a Low-Head Pump-Turbine with the Co-Closing of Guide Vane and Ball Valve[J]. Journal of Energy Storage, 2023, 59: 106470.
- [10] AHMED F, EAMES I, AZARBADEGAN A, et al. Acoustics and Vibrations in a Complex Piping Network with Pump Startup-Shutdown Transients[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2022, 227: 107357.
- [11] ZHANG Y L, ZHU Z C, LI W G, et al. Effects of Viscosity on Transient Behavior of a Low Specific Speed Centrifugal Pump in Starting and Stopping Periods[J]. Fluid Mechanics Research, 2018, 45(1): 1-20.
- [12] 丁超.综采工作面乳化液泵远程集中智能供液系统研究[J].能源与节能,2024(8):64-67.
DING Chao. Remote Centralized Intelligent Liquid Supply System of Emulsion Pump in Fully-Mechanized Mining Face[J]. Energy and Energy Conservation, 2024(8): 64-67.
- [13] 孔繁余,张勇,邵飞,等.高速磁力泵隔离套的磁涡流损失[J].农业工程学报,2012,28(1):61-65,295.
KONG Fanyu, ZHANG Yong, SHAO Fei, et al. Eddy Current Loss of Containment Shell of High-Speed Magnetic Driving Pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(1): 61-65, 295.
- [14] 柏宇星,孔繁余,赵飞,等.新型矿用高速抢险泵的设计与性能分析[J].机械工程学报,2020,56(18):244-253.
BAI Yuxing, KONG Fanyu, ZHAO Fei, et al. Design and Performance Analysis of New Type of Mine High Speed Rescue Pump[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(18): 244-253.
- [15] 何亮,解明.基于变频技术的主泵电气系统改进

- 设计[J]. 核动力工程, 2013, 34(增刊1): 172-174.
- HE Liang, XIE Ming. Discussion on Improved Design of RCP Electrical System Based on Frequency-Conversion Technology[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(S1): 172-174.
- [16] 李 嘉, 李华聪, 张 伟, 等. 高压燃油离心泵压力脉动及非定常流动分析[J]. 西北工业大学学报, 2022, 40(1): 199-205.
- LI Jia, LI Huacong, ZHANG Wei, et al. Transient Flow Structures and Pressure Pulsations of a High-Pressure Aero-Fuel Centrifugal Pump[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2022, 40(1): 199-205.
- [17] 田十方, 李 彪. 基于梯度优化物理信息神经网络求解复杂非线性问题[J]. 物理学报, 2023, 72(10): 15-25.
- TIAN Shifang, LI Biao. Solving Complex Nonlinear Problems Based on Gradient-Optimized Physics-Informed Neural Networks[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(10): 15-25.
- [18] 陈宏伟, 于振明, 张 天, 等. 光子神经网络发展与挑战[J]. 中国激光, 2020, 47(5): 0500004.
- CHEN Hongwei, YU Zhenming, ZHANG Tian, et al. Advances and Challenges of Optical Neural Networks[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(5): 0500004.
- [19] 申金媛, 韩应哲, 常胜江, 等. 非线性荧光光谱的神经网络分析及其应用[J]. 光学学报, 2004, 24(7): 1000-1003.
- SHEN Jinyuan, HAN Yingzhe, CHANG Shengjiang, et al. Neural Network Analysis and Application of Nonlinear Fluorescence Spectra[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(7): 1000-1003.
- [20] 郝石磊, 王志海, 刘海洋. 基于局部梯度和二进制模式的时间序列分类算法[J]. 软件学报, 2022, 33(5): 1817-1832.
- HAO Shilei, WANG Zhihai, LIU Haiyang. Time Series Classification Algorithm Based on Local Gradient and Binary Pattern[J]. Journal of Software, 2022, 33(5): 1817-1832.
- [21] ZHANG Y L, ZHU Z C, LI W G. Experiments on Transient Performance of a Low Specific Speed Centrifugal Pump with Open Impeller[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2016, 230(7): 648-659.
- [22] 施文俊, 王 鹏, 汪 卫. 时间序列上的变化查询的高效处理算法[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(7): 25-33.
- SHI Wenjun, WANG Peng, WANG Wei. Fast Query Methods of Finding Subsequences of Satisfied Changes on Time Series[J]. Computer Applications and Software, 2024, 41(7): 25-33.
- [23] 刘 军, 施 伟, 王希晨, 等. 大型灯泡贯流泵装置导叶出口安放角智能优化设计研究[J]. 江苏水利, 2023(7): 1-7, 11.
- LIU Jun, SHI Wei, WANG Xichen, et al. Research on Intelligent Optimization Design of Guide Vane Outlet Placement Angle for Large Bulb Tubular Pump[J]. Jiangsu Water Resources, 2023(7): 1-7, 11.
- [24] 李文萱. 采用前馈神经网络控制的变速泵压力控制仿真研究[J]. 重庆科技大学学报(自然科学版), 2022, 24(2): 75-78.
- LI Wenxuan. Simulation of Variable Speed Pump Pressure Control Based on Feedforward Neural Network Control[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology (Natural Sciences Edition), 2022, 24(2): 75-78.
- [25] 邓 阳, 戴春春, 王瑞金, 等. 疲劳寿命预测的机器学习模型研究进展[J]. 自然杂志, 2024, 46(4): 247-260.
- DENG Yang, DAI Chunchun, WANG Ruijin, et al. Advances in Machine Learning Model for Fatigue Life Prediction[J]. Chinese Journal of Nature, 2024, 46(4): 247-260.
- [26] ALI SAUD ALTOBI M, BEVAN G, WALLACE P, et al. Fault Diagnosis of a Centrifugal Pump Using MLP-GABP and SVM with CWT[J]. Engineering Science and Technology an International Journal, 2019, 22(3): 854-861.
- [27] 邓飞跃, 陈 哲, 郝如江, 等. 基于MsTCN-Transformer模型的轴承剩余使用寿命预测研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43(4): 279-287.
- DENG Feiyue, CHEN Zhe, HAO Rujiang, et al. Research on Bearing Remaining Useful Life Prediction Based on an MSTCN-Transformer Model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(4): 279-287.
- [28] 刘厚林, 吴贤芳, 王 勇, 等. 基于BP神经网络的离心泵关死点功率预测[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 45-49.
- LIU Houlin, WU Xianfang, WANG Yong, et al. Power Prediction for Centrifugal Pumps at Shut off Condition Based on BP Neural Network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(11): 45-49.

(责任编辑: 姜利民)