doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.05.005

基于神经网络的低比转速离心泵停机瞬态过程研究

童江波[1]，孙　晓[1]，张玉良[2]，许晓威[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：为揭示离心泵在停机瞬态过程中的水力特性，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停机实验，获得了其转速、进出口压力、扬程、流量和轴功率等外特性参数随时间的实时演化特性。同时，建立了基于 BP 神经网络模型的停机工况拟合模型，为泵站断电停机等意外工况的保护提供了仿真测试平台。通过研究发现：叶轮转速在停机初期呈线性快速下降；流量在停机初期受惯性作用和叶轮作用缓慢下降，随着出口阀门开度增大，流量下降所需时间更长；轴功率在停机瞬间呈现波动式快速下降趋势。结果表明拟合模型能准确展示泵停机瞬时过程中的水力性能。

关键词：离心泵；停机；外特性；BP 神经网络

中图分类号：TH311　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-9833(2025)05-0031-08

引文格式：童江波，孙　晓，张玉良，等 . 基于神经网络的低比转速离心泵停机瞬态过程研究 [J]. 湖南工业大学学报，2025，39(5)：31-38.

A Neural Network-Based Study on the Transient Shutdown Process of a Low Specific Speed Centrifugal Pump

TONG Jiangbo[1]，SUN Xiao[1]，ZHANG Yuliang[2]，XU Xiaowei[2]，JIA Xiaoqi[3]

（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：In order to reveal the hydraulic characteristics of centrifugal pumps in the transient shutdown process，a shutdown experiment has been carried out on a low specific speed open impeller centrifugal pump under six non-rated conditions, thus obtaining the real-time evolution characteristics of the external characteristic parameters such as rotational speed, inlet and outlet pressures, head, flow rate, and shaft power over time. Meanwhile, a fitting model is established for the shutdown conditions based on the BP neural network model providing a simulation test platform for the protection of the pump station under unexpected conditions such as pump station power failure or shutdown. Based on the simulation analysis it is found that the impeller speed shows a linear and rapid decline in the initial stage of shutdown, while the flow rate decreases slowly due to the inertia and impeller effects; with an increase in the opening of outlet valves，the time required for the flow rate to decline is prolonged as well, with the shaft power showing

收稿日期：2024-07-15

基金项目：湖南省研究生科研创新基金资助项目（QL20230263）；湖南省重点领域研发计划基金资助项目（2022GK2068）；浙江省基础公益研究计划基金资助项目（LZY21E050001）

作者简介：童江波，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：m22080200004@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

a fluctuating and rapidly declining trend in the initial stage of shutdown. The results show that the proposed model accurately presents the hydraulic performance in the transient pump shutdown process.

Keywords：centrifugal pump；shutdown；external characteristic；BP neural network

0 引言

离心泵作为一种通用流体输送装置，广泛被用于电力、冶金、煤炭等行业[1−3]。当其稳定工作时，泵内流体流动平稳且各性能参数保持在一个相对稳定的水平，一般应用也只考虑其稳态参数。与流体机械稳定工况研究相比，瞬态过程研究更为复杂[4−7]。如离心泵在停机过程中，各性能参数在短时间内剧烈变化，泵内部能量变化迅速、复杂，引起水锤冲击等，对泵的安全运行造成威胁[8−10]。因此，获悉离心泵在停机过渡过程中的瞬态参数变化对防治停泵水锤和提高运行安全性具有重要的意义。

针对泵停机过程的瞬态特性，国内外学者已通过数值模拟与实验开展了系统性研究。在理论和数值研究方面，H. Tsukamoto等[11]通过理论推导与实验验证，指出了压力脉动及滞后效应是瞬态特性偏离准稳态的主因。Zhang Y. L. 等[12]基于无量纲分析和准稳态方法，证实了相似定律可预测小流量工况下的低速停机性能。Ma Y. L. 等[13]的 CFD（computational fluid dynamincs）研究表明，混合泵的瞬态扬程普遍低于准稳态值。Liu J. 等[14]采用标准的 k–ε 湍流模型耦合 VOF（volume of fluid）方法，比较成功地模拟了径向流泵快速停机时的瞬态流动。H. A. Shourkaei[15]的理论研究则揭示了停机参数随时间呈非线性衰减的特征。

在研究方法创新方面，Liu Y. F. 等[16]开发的新型 CFD 算法实现了轴流泵停机过程的精确仿真。Kan K. 等[17]通过数值－实验联合分析，发现管式泵断电后流场全域失稳现象。Zhang Y. L. 等[18−21]的系列研究系统探究了阀门开度、停机方式、流体黏度等因素的影响，提出了无量纲分析法可有效表征瞬态行为。Wu D. Z. 等[19]的实验证实流体惯性会导致瞬态压力超调现象。Feng J. J. 等[22]通过角动量方程迭代求解，实现了外特性曲线的准确预测。Wu P. 等[23]引入飞轮装置，证实转动惯量可延缓停机过程。

现有研究虽在瞬态性能与内流机理方面取得进展较多，但水力性能预测模型的研究仍存在不足，且稳定工况下的性能曲线预测方法[24−28]难以直接适用于瞬态过程。为此，本研究以低比转速离心泵为对象，通过 6 种非额定工况实验，获取了压力、转速、扬程等全参数的瞬态数据集，为水锤防治系统设计提供理论基础支撑。进一步基于神经网络构建停泵仿真模型，实现对 5 种工况水力性能的智能预测，该成果有望提升输水系统的安全防护水平，降低意外停泵时的风险。

1 实验装置与测试泵

1.1 测试装置

本实验中所搭建的离心泵外特性瞬态性能测试实验台与文献 [29] 一致，主要由离心泵机组、测试系统、水箱以及循环管路系统组成，如图 1 所示。其中泵机组由变频电机、转矩转速传感器和待测试模型泵组成。变频电机额定功率为 4.0 kW。JC0 型转矩转速传感器用于瞬时转速和转矩，量程为 0~50 N·m，转速和转矩的不确定度均为 ±0.25%。OPTIFLUX2100C 型电磁流量计用于测量瞬时流量，其量程为 0~30 m^3/h，不确定度为 ±0.2%。WIKAS-10 型压力传感器用于获取泵入口和出口的瞬时压力，其测量范围分别为 −1.0~1.0 MPa 和 0~1.6 MPa，传感器的不确定度均为 ±0.1%。其中数据采集频率为 1.0 kHz，确保信号的可还原性。

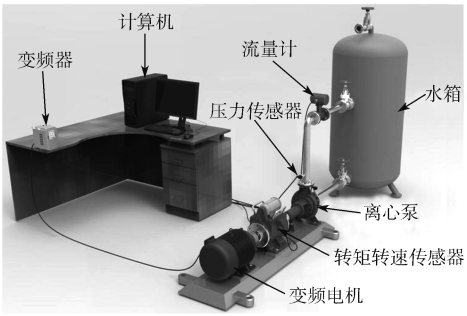


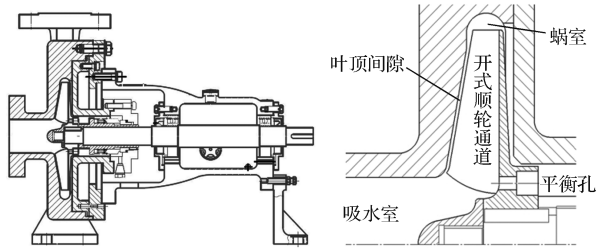
图 1 试验设备示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the test experiment

1.2 实验泵

本研究待测试泵为一台低比转速离心泵，叶轮形式为非典型性开式叶轮结构，如图 2 和图 3 所示，图中尺寸单位为 mm。设计参数如下：流量 Q_r=6 m^3/h，扬程 H_d=8 m，转速 n_r=1 450 r/min，详细几何参数见文献 [29]。电机的转速调节通过变频器实现，且变频器不带制动功能。本文中，停机前的稳定转速是

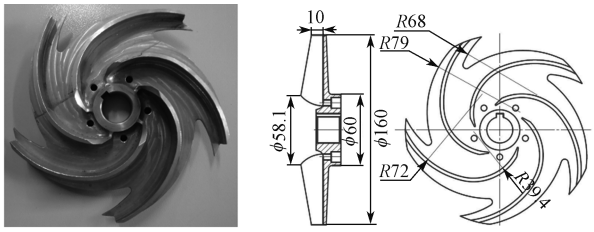
2 200 r/min，在该转速下，运行状态不同于额定设计工况，属于非额定工况。停机前的稳定流量通过泵出口阀预先设置，分别为 1，3, 5, 7, 9, 11 m^3/h。



a）实验泵　　b）流道

图 2　实验泵轴面与流道轴面图

Fig. 2　Test pump and flow channel axial surfaces



a）叶轮实物　　b）叶轮尺寸

图 3　离心叶轮示意图

Fig. 3　Schematic diagram of the centrifugal impeller

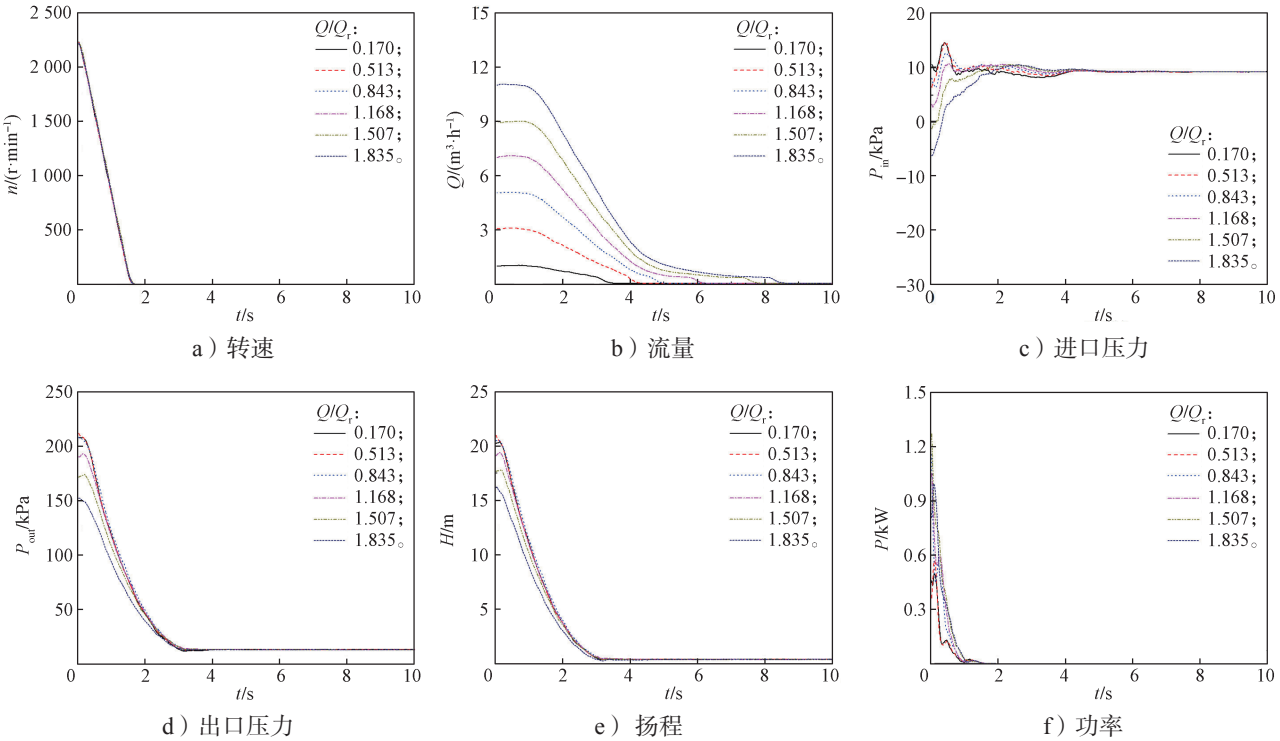
2　结果与分析

2.1　瞬态特性

实验泵在稳态流量比分别为 Q/Q_r=0.170, 0.513, 0.843, 1.168, 1.507, 1.835 时，停机过程中瞬态特性转速、流量、进口压力、出口压力、扬尘、功率等如图 4 所示。

由图 4a 可以得知，无论阀门开度如何，转速均呈现快速下降的趋势。如 Q/Q_r=1.507 时，叶轮转速在停机前为 2 205 r/min，仅 1.78 s 后，叶轮转速便快速下降为 0 r/min，可见，叶轮转速对停机响应非常迅速。多次实验表明，各开度下的转速曲线几乎重合、差异极小。在工频停机下，停机后的转速衰减主要受水体阻力影响。而本文各停机试验均在变频模式下进行，各流量下的叶轮转速由电机转速决定，而电机转速又由变频器的频率决定，因此本文各转速曲线差异极小。

由图 4b 可以得知，在高流量比下，流量曲线变化存在 4 个阶段。流量在停机初期保持相对稳定，并没有立即下降；一段时间后，流量迅速下降；再经历一段时间后，流量缓慢下降；最后，流量再次迅速下降并降至 0 m^3/h。如 Q/Q_r=1.835 时，在 t=0~0.75 s 时，流量保持相对稳定；在 t=0.75~5.07 s 期间，流量从 11.008 m^3/h 迅速下降至 1.050 m^3/h；在 t=5.07~8.17 s 时，流量从 1.050 m^3/h 缓慢下降至 0.342 m^3/h；最后，至 t=8.69 s，流量在停机后期快速下降为 0 m^3/h，泵达到完全停机状态。而在低流量比下，流量曲线变化仅存在 3 个阶段：流量保持稳定、再缓慢下降、最后快速降至 0 m^3/h。



a）转速　　b）流量　　c）进口压力

d）出口压力　　e）扬程　　f）功率

图 4　停机过程中的瞬时特性曲线

Fig. 4　Transient characteristics curves during shutdown

如图 4b 所示，当 Q/Q_r=0.170，且 t=0~0.985 s 时，流量始终保持约 1.020 m^3/h；在 t=0.985~3.050 s 时，流量从 1.020 m^3/h 缓慢下降至 0.370 m^3/h；最后，在停机末期，流量迅速下降，于 t=3.63 s 时下降为 0 m^3/h。可以发现，无论流量比的大小与否，流量均在停机初期维持一段时间的稳定。原因在于，变频停机时的电机虽转速下降但其仍自主转动并带动叶轮转动，对维持流量稳定有一定作用。此外，受流动惯性影响，流量也能维持短时间的稳定。同时还发现，随着停机前的稳定流量比增大，流量维持稳定的时间缩短，停机响应更为敏感。在稳态流量比 Q/Q_r=0.170, 0.843, 1.835 时，对应的稳定流量维持时间分别约为 0.92, 0.73, 0.69 s。还发现，稳态流量比 Q/Q_r=0.170, 0.513, 0.843, 1.168, 1.507, 1.835 时，停机流量稳定至 0 m^3/h 的时间分别为 3.63, 4.53, 5.16, 6.47, 8.11, 8.69 s。随着流量比增大，完全停机所需时间明显延长。

由图 4c 可知，进口静压由安装在泵进口管路处的压力传感器测量所得，进口压力数值较小。随着离心泵开始停机，叶轮转速快速下降，内部能量变化复杂，不同稳态流量比情形下的进口压力在停机初期均波动剧烈，但最终都趋于一个稳定值。不同流量比情形下的进口压力变化存在明显差异：低流量比下的静压波动变化至稳定值，而中高流量比下的静压波动式上升至稳定值。如低流量比 Q/Q_r=0.170 时，初始压力为 10.60 kPa，后经波动变化达到稳定值，约 9.40 kPa，二者相差 1.20 kPa。而高流量比 Q/Q_r=1.835 时，由初始压力 −6.10 kPa 经相同时间达到相同稳定值，二者相差 15.50 kPa，压力上升迅速。随着叶轮转速不断下降并停止转动，进口压力波动也逐渐减小，最终各流量下进口压力均在 t=5.00 s 左右达到最终稳定值，9.40 kPa 左右。

由图 4d 可知，出口静压由安装在泵出口管路处的压力传感器测得，远高于进口静压。各流量下的出口压力曲线均呈现快速下降至稳定值的演化特征。t=2.0 s 之前的各曲线下降迅速，而 t=2.0 s 至达到稳定值期间的各曲线则相对较为平缓。随着叶轮的转速不断下降并停止转动，叶轮对水体从减小做功到不做功，各出口静压均趋于最终稳定值 12.90 kPa 左右。同时发现，在 6 种不同稳态流量比下，各出口压力也均约在 t=3.50 s 时达稳定值。停机前稳定流量的大小对出口压力以及进口压力趋于稳定的时间几乎没有影响。

由图 4e 可知，在停机阶段，6 种不同流量比情形下的扬程曲线均呈现快速下降至稳定值的趋势，扬程的停机响应较为敏感。对比图 4d 和图 4e 发现，扬程曲线与出口压力曲线的变化特征基本一致，几乎同时趋于稳定值，可见扬程的变化趋势和大小主要取决于出口压力。对于该叶轮离心泵，受叶轮做功作用，泵出口静压值远高于进口静压值、且进口静压绝对数值总体较小，导致泵的扬程变化特性主要由出口静压的变化特性决定，故同一条件下的扬程与出口静压变化特性基本一致。同时发现，6 种情形下的扬程曲线均约在 t=3.50 s 时下降到稳定值 0.35 m 左右，出现 0.35 m 扬程的原因是试验中进出口压力传感器安装位置所致。

扭矩转速传感器安装于试验泵和电动机之间，瞬时轴功率由试验获得的瞬时扭矩和转速计算所得。6 种不同工况下的叶轮转速均由变频器控制，由图 4f 可知，转速在停机初期迅速下降，各轴功率曲线均在停机瞬间迅速下降，并伴随剧烈波动，最终降至 0 kW。如稳态流量比 Q/Q_r=1.835 时，停机瞬间轴功率曲线近乎垂直下降，仅在 0.75 s 内就由 1.017 kW 降至 0.118 kW，下降了 0.899 kW。由此可见，轴功率比其它性能参数对停机的响应更加敏感，受停机时影响也更严重。

2.2 BP 神经网络的仿真拟合

BP 神经网络模型 [30−32] 是一种常用的人工神经网络模型，其基于误差反向传播算法，不断调整网络参数使网络输出不断逼近期望值。因其强大的泛化能力和拟合能力，BP 神经网络常被用于处理复杂的映射关系。BP 神经网络结构如图 5 所示 [33]，由输入层、隐藏层和输出层 3 部分组成。

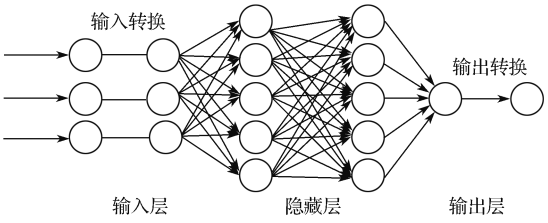


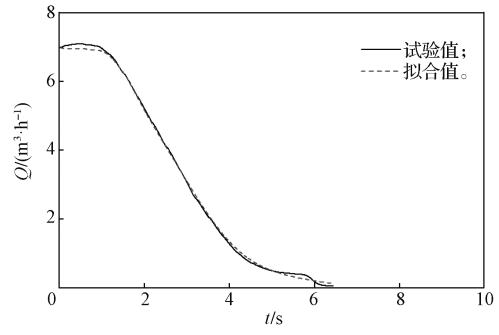
图 5 BP 神经网络结构

Fig. 5 The structure of BP neural network

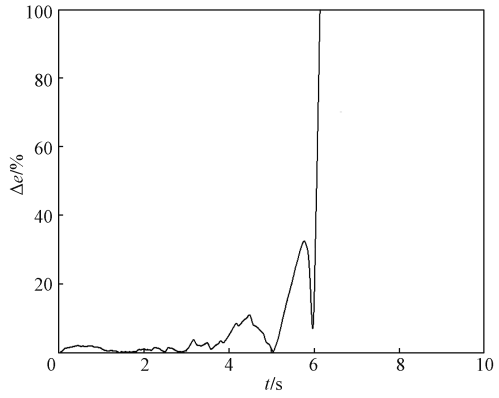
流量和扬程是离心泵性能的两个重要参数。本文考虑到流量和扬程曲线在泵停机过程中演化的复杂性，故基于 BP 神经网络模型对停机下的瞬时流量和瞬时扬程进行拟合和预测，为今后止回阀、空气阀的准确动作提供参考依据。

本实验中，泵特性在停机过程受停机前稳定流量（取决于事先调定的阀门开度）、转速变化、停机时间影响，故本文拟表征停机前稳态流量比、瞬时转速、停机时长与瞬时流量和瞬时扬程的关系，构建了 8 个隐藏层节点数的 BP 神经网络拟合模型。设置稳态流

量比、瞬时转速、停机时长为输入层，瞬时流量和瞬时扬程为输出层。采用稳态流量比 Q/Q_r=0.170, 0.513, 0.843, 1.507, 1.835 下的 5 条流量曲线和 5 条扬程曲线上的样本点作为瞬时流量拟合训练集，分别以 Q/Q_r=1.168 下的流量曲线和扬程曲线上的点作为测试集，以检验预测结果的准确性。模型通过训练计算后，在 Q/Q_r=1.168 时，停机条件下的瞬时流量计算结果如图 6 所示。



a）试验流量与拟合流量



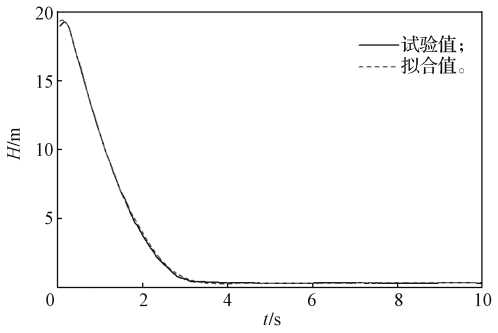
b）拟合误差率

图 6　瞬时流量拟合值与试验值对比

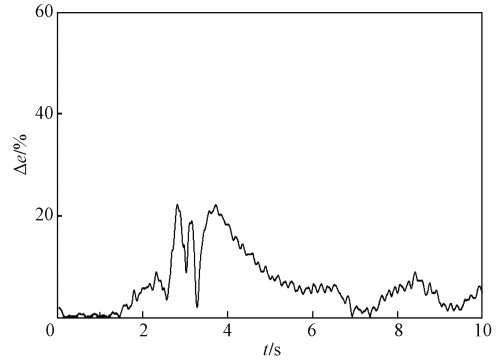
Fig. 6　Comparison of fitted and tested values of instantaneous flow rate

由图 6 可知，在停机初期的流量维持稳定阶段，拟合值与试验值有偏差。在 t=0~1.15 s 期间，试验曲线略有起伏，预测曲线相对平缓。最大偏差值出现在 t=0.50 s，约为 0.128 m^3/h，但因该阶段的流量测试值较大，误差率较小。对于停机末期，预测曲线与试验曲线也匹配较差，且因停机末期的流量测试值较小，停机末期的预测误差率极大。此外，停机末期的流量试验曲线呈先缓慢下降后快速下降趋势，而预测曲线均呈缓慢下降趋势。但整体而言，预测准确度较高。在 t=1.15~5.17 s 期间，预测曲线与试验曲线高度匹配，变化趋势一致，最大误差率约为 11.06%。综合而言，在整个停机过程中，绝大停机期间的误差率在 10% 以下，神经网络预测结果的可信度较高。

在 Q/Q_r=1.168 时，停机条件下的瞬时扬程预测曲线与试验曲线如图 7 所示。



a）试验扬程与拟合扬程



b）拟合误差率

图 7　瞬时扬程拟合值与试验值对比（Q/Q_r=1.168）

Fig. 7　Comparison of fitted and tested values of instantaneous head (Q/Q_r=1.168)

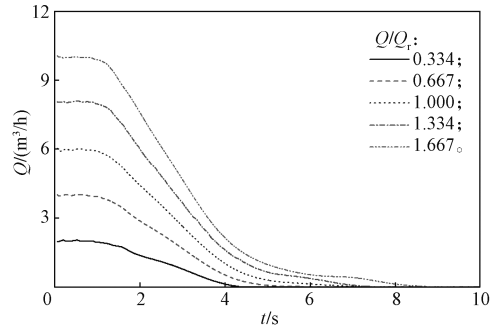
由图 7 可以得知，总体而言，瞬时扬程预测曲线与试验曲线吻合度较高，变化趋势一致、偏差较小。在 t=0~1.47 s 期间，即停机前中期，预测扬程与试验扬程最为接近，最大误差率仅约 1.85%。但在 t=2.65~4.89 s 期间，预测误差率较高，最大误差率约 21.97%。此外，训练的神经网络模型对于扬程稳定时间的预测也较为准确，预测扬程与试验扬程均约在 t=3.50 s 时达到稳定值。可见，建立的 BP 神经网络模型能较为准确地预测停机阶段的水力性能，所预测数据的可信度较高。

经上述预测准确性检测，发现训练的 BP 神经网络模型能够较为准确地对停机下的水力性能进行预测，故对 Q/Q_r=0.334, 0.667, 1.000, 1.334, 1.667（即停机前的稳定流量分别为 2, 4, 6, 8, 10 m^3/h）下的瞬时扬程和瞬时流量变化情况进行预测。图 8 所示为训练所得 BP 神经网络模型预测的流量和扬程随时间变化关系曲线。

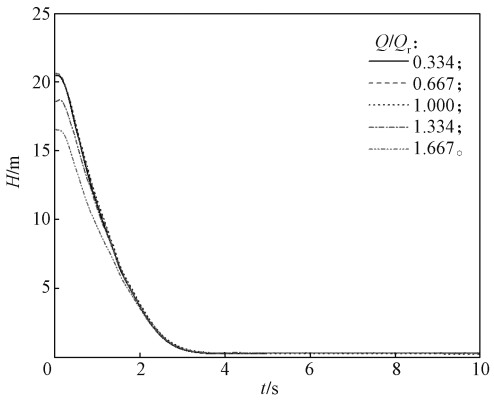
由图 8a 可知，高流量比下，流量在停机初期保持相对稳定，一段时间后，流量迅速下降，再经历一段时间后，流量缓慢下降至 0 m^3/h。而在低流量比下，流量在停机初期保持一段时间稳定后缓慢下

降至 0 m^3/h。整体而言，各工况下所预测的流量变化趋势与上述试验流量变化趋势一致，仅在停机末期存在较大差别。训练的 BP 神经网络模型对停机末期的流量骤降情况和完全停机所需时间的预测误差较大，因此对于局部特征的拟合有待在下一步工作中优化。但经上述预测准确性验证，除停机末期外，其他阶段的流量预测结果还是可靠的。

由图 8b 可以发现，与上述其它试验工况下的扬程曲线相同，预测工况下的扬程曲线也均呈现快速下降至稳定值的趋势，且稳定时间均约在 t=3.50 s。此外还发现，当预测工况大于离心泵设计工况时，随着预测工况增大，对应工况下的初始扬程也明显下降，这也与离心泵性能曲线相符 [34−35]。



a）流量



b）扬程

图 8 预测的停机流量和扬程特性曲线

Fig. 8 Predicted head characteristics curves during shutdown

3 结论

本文对单级低比转速开式叶轮离心泵在停机过渡过程中的外特性进行了实验研究，并基于 BP 神经网络建立了停机工况拟合模型，结果发现：

1）转速在停机初期呈线性快速下降，各工况下的转速曲线几乎重合、无较大差异，叶轮近乎同时停止转动。

2）流量受惯性作用和叶轮作用在停机初期仍保持相对稳定、存在延迟下降现象，流动完全停止所需时间随着出口阀门开度的增大而增长。

3）经准确性验证发现，基于 BP 神经网络建立的停机工况拟合模型能较为准确地预测离心泵在停机过程中的水力性能，BP 神经网络模型可适用于泵停机过程中的水力性能预测。

4）预测情形下的水力性能曲线变化趋势大体上与实验情形下的水力性能曲线变化趋势一致，可反映出真实的离心泵停机特性，为今后水力组件的安全应用提供了理论基础。

参考文献：

[1] LI X J，CHEN B，LUO X W，et al. Effects of Flow Pattern on Hydraulic Performance and Energy Conversion Characterisation in a Centrifugal Pump[J]. Renewable Energy，2020，151：475−487.

[2] 王宇杰，梁 钟，王 军，等 . 蜗壳型线切割对小型离心泵性能和流场影响的数值研究 [J]. 排灌机械工程学报，2023，41(12)：1212−1218.
WANG Yujie，LIANG Zhong，WANG Jun，et al. Numerical Study on Effect of Cutting Volute Profile on Performance and Flow Field of Small Centrifugal Pumps[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2023，41(12)：1212−1218.

[3] 王 凯，柳涵宇，王李科，等 . 颗粒体积浓度对半开式叶轮离心泵泄漏涡和磨损的影响 [J]. 农业工程学报，2023，39(16)：44−53.
WANG Kai，LIU Hanyu，WANG Like，et al. Effects of Particle Volume Concentration on the Leakage Vortex and Erosion Characteristics of Semi-Open Centrifugal Pumps[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2023，39(16)：44−53.

[4] KAN K，YANG Z X，LYU P，et al. Numerical Study of Turbulent Flow Past a Rotating Axial-Flow Pump Based on a Level-Set Immersed Boundary Method[J]. Renewable Energy，2021，168：960−971.

[5] JIA X Q，SHEN S J，ZHANG S K，et al. Influence of Tip Clearance on Internal Energy Loss Characteristics of Axial Flow Pumps Under Different Operating Conditions[J]. 2024，36(1)：015102.

[6] LIU Y B，TAN L. Spatial-Temporal Evolution of Tip Leakage Vortex in a Mixed-Flow Pump with Tip Clearance[J]. Journal of Fluids Engineering，2019，141(8)：081302.

[7] LIN T，ZHU Z C，LI X J，et al. Theoretical，Experimental，and Numerical Methods to Predict the Best Efficiency Point of Centrifugal Pump as Turbine[J]. Renewable Energy，2021，168：31−44.

[8] 邓安利，蒋 劲，兰 刚，等 . 长距离输水工程停泵

水锤的空气罐防护特性 [J]. 武汉大学学报 (工学版)，2015，48(3)：402−406.
DENG Anli，JIANG Jin，LAN Gang，et al. Research on Protective Properties of Air Vessel for Pump-Stopping Water Hammer Protection of Long Distance Pipelines[J]. Engineering Journal of Wuhan University，2015，48(3)：402−406.

[9] 黄玉毅，李建刚，符向前，等 . 长距离输水工程停泵水锤的空气罐与气阀防护比较研究 [J]. 中国农村水利水电，2014(8)：186−188，192.
HUANG Yuyi，LI Jiangang，FU Xiangqian，et al. Research on the Comparison of Air Vessel and Air Valve on Pump-Stopping Water Hammer Protection of Long-Distance Pipeline[J]. China Rural Water and Hydropower，2014(8)：186−188，192.

[10] 刘梅清，梁　兴，刘志勇，等 . 长管道事故停泵水锤现场测试与信号分析 [J]. 排灌机械工程学报，2012，30(3)：249−253.
LIU Meiqing，LIANG Xing，LIU Zhiyong，et al. Field Measurement of Water Hammer and Signal Analysis at Pump-Stop Due to Power Failure in Long Water-Supply Pipeline[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2012，30(3)：249−253.

[11] TSUKAMOTO H，MATSUNAGA S，YONEDA H，et al. Transient Characteristics of a Centrifugal Pump During Stopping Period[J]. Journal of Fluids Engineering，1986，108(4)：392−399.

[12] ZHANG Y L，JI Y Y，ZHAO Y J. Deep Analysis of the Transient Behavior of Centrifugal Pumps During Startup and Shutdown[J]. Measurement and Control，2022，55(3/4)：155−163.

[13] MA Y L，LIU J T，WANG L Q. Numerical Simulation of the Transient Process of Power Failure in a Mixed Pump[J]. Advances in Mechanical Engineering，2013，5：743201.

[14] LIU J，LI Z，WANG L，et al. Numerical Simulation of the Transient Flow in a Radial Flow Pump During Stopping Period[J]. Journal of Fluids Engineering，2011，133：1−7.

[15] SHOURKAEI H A. Transient Performance During Stopping the Research Reactor Primary Loop Pump[J]. Kerntechnik，2015，80(1)：40−44.

[16] LIU Y F，ZHOU J X，ZHOU D Q. Transient Flow Analysis in Axial-Flow Pump System During Stoppage[J]. Advances in Mechanical Engineering，2017，9(9). DOI：10.1177/1687814017723280.

[17] KAN K，ZHENG Y，CHEN H X，et al. Numerical Simulation of Transient Flow in a Shaft Extension Tubular Pump Unit During Runaway Process Caused by Power Failure[J]. Renewable Energy，2020，154：1153−1164.

[18] ZHANG Y L，ZHU Z C，SHENG Y N，et al. Experimental Study on a Prototype Centrifugal Pump with Open Impeller During Stopping Period[J]. International Journal of Fluid Mechanics Research，2016，43(1)：18−27.

[19] WU D Z，WU P，YANG S，et al. Transient Characteristics of a Closed-Loop Pipe System During Pump Stopping Periods[J]. Journal of Pressure Vessel Technology，2014，136(2)：021301.

[20] ZHANG Y L，ZHU Z C，LI W G，et al. Non-Inertial Stopping Characteristics of a Prototype Pump[J]. Advances in Mechanical Engineering，2019，11(4). DOI：10.1177/1687814019844649.

[21] 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]. International Journal of Fluid Mechanics Research，2018，45(1)：1−20.

[22] 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.

[23] WU P，WU D Z，HUANG B，et al. Experimental Study on the Running Down Process of a Centrifugal Pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics，2010，31：21−24.

[24] 罗会灿，周佩剑，吴登昊，等 . 基于遗传 − 支持向量回归的离心泵性能曲线预测 [J]. 水力发电学报，2022，41(3)：83−91.
LUO Huican，ZHOU Peijian，WU Denghao，et al. Prediction of Centrifugal Pump Performance Curves Based on Genetic-Support Vector Regression[J]. Journal of Hydroelectric Engineering，2022，41(3)：83−91.

[25] 侯国鑫，刘梅清，梁　兴，等 . 基于神经网络的轴流泵性能曲线拟合研究 [J]. 中国农村水利水电，2020(8)：102−104.
HOU Guoxin，LIU Meiqing，LIANG Xing，et al. Research on the Curve Fit of Axial Flow Pump Based on Neural Network[J]. China Rural Water and Hydropower，2020(8)：102−104.

[26] HUANG R F，ZHANG Z，ZHANG W，et al. Energy Performance Prediction of the Centrifugal Pumps by Using a Hybrid Neural Network[J]. Energy，2020，213：119005.

[27] 李　君，陈佳文，廖伟丽，等 . 基于小波神经网络的轴流泵性能预测 [J]. 农业工程学报，2016，32(10)：47−53.
LI Jun，CHEN Jiawen，LIAO Weili，et al. Performance Prediction of Axial Pump Based on Wavelet Neural Network[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2016，32(10)：47−53.

[28] 汤　跃，肖　妹，汤玲迪 . 泵性能测试曲线分段最小

二乘多项式拟合算法 [J]. 排灌机械工程学报，2017，35(9)：744−748.
TANG Yue，XIAO Mei，TANG Lingdi. Piecewise Least Squares Polynomial Curve Fitting Algorithm for Tested Pump Performance Data[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering，2017，35(9)：744−748.

[29] 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，2016，230(7)：648−659.

[30] 黄靓钰，阳军生，张 聪，等 . 基于 BP 神经网络的水下岩溶地层盾构掘进参数预测与分析 [J]. 土木工程学报，2020，53(增刊 1)：75−80，98.
HUANG Liangyu，YANG Junsheng，ZHANG Cong，et al. Prediction and Analysis of Shield Tunneling Parameters in Underwater Karst Stratum Based on BP Neural Network[J]. China Civil Engineering Journal，2020，53(S1)：75−80，98.

[31] 朱苗苗，潘伟杰，刘 翔，等 . 基于 BP 神经网络代理模型的交互式遗传算法 [J]. 计算机工程与应用，2020，56(2)：146−151.
ZHU Miaomiao，PAN Weijie，LIU Xiang，et al. Interactive Genetic Algorithm Based on BP Neural Network and User Cognitive Surrogate Model[J]. Computer Engineering and Applications，2020，56(2)：146−151.

[32] 左付山，李政原，吕 晓，等 . 基于 BP 神经网络的汽油机尾气排放预测 [J]. 江苏大学学报 (自然科学版)，2020，41(3)：307−313.
ZUO Fushan，LI Zhengyuan，LÜ Xiao，et al. Prediction of Gasoline Engine Exhaust Emission Based on BP Neural Network[J]. Journal of Jiangsu University (Natural Science Edition)，2020，41(3)：307−313.

[33] 石晨阳，袁晓燕，江志成 . 遗传模拟退火算法优化 BP 神经网络的 GPS 高程拟合 [J]. 全球定位系统，2021，46(5)：55−59.
SHI Chenyang，YUAN Xiaoyan，JIANG Zhicheng. GPS Elevation Fitting of BP Neural Network Optimized by Genetic Simulated Annealing Algorithm[J]. GNSS World of China，2021，46(5)：55−59.

[34] 张玉良，朱祖超，李文广，等 . 低比转速复合叶轮离心泵停机过程水力特性 [J]. 农业工程学报，2018，34(12)：95−103.
ZHANG Yuliang，ZHU Zuchao，LI Wenguang，et al. Hydraulic Performance of Low Specific-Speed Centrifugal Pump with Compound Impeller During Stopping Period[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2018，34(12)：95−103.

[35] DENG H Y，XIA Z S，SUN Z N，et al. Multistage Hybrid Model for Performance Prediction of Centrifugal Pump[J]. Advances in Engineering Software，2022，174：103302.

(责任编辑：姜利民)