

# 基于相似规律和神经网络的多级多相混输泵 气液增压性能预测\*

常亮, 杨晨宇, 苏筱斌, 戴晓宇, 徐强, 郭烈锦

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

(本刊编委郭烈锦来稿)

**摘要:** 准确预测多相混输泵的气液增压性能对油气生产的经济性和安全性至关重要. 当前气液增压预测模型与方法存在参数范围窄、增压级数低的局限. 该文搭建了工业参数级气液混输增压实验平台, 实验获得了 25 级离心式混输泵的气液增压特性. 提出了适用于高增压级数、变转速条件的混输泵气液增压性能预测方法. 首先, 构建了定转速、低增压级数混输泵气液增压人工神经网络; 其次, 采用相似规律, 将变转速条件气液增压转换至设计转速条件; 最后, 基于等温压缩假设进行级间流动参数更新和高增压级数混输泵性能预测. 不同级数 (3~25 级) 和转速条件 ( $2\ 500\sim 3\ 500\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ) 混输泵气液增压预测的相对误差低于 15%. 该方法能够应用于其他类型多相混输泵的增压预测, 为指导油气工业现场确定混输泵增压级数和生产评估提供有效方法.

**关键词:** 混输泵; 气液增压; 性能预测; 相似规律; 神经网络

**中图分类号:** O303 **文献标志码:** A **DOI:** 10.21656/1000-0887.430405

## Prediction of Gas-Liquid Pressurization Performances of Multistage Multiphase Pumps Based on Similarity Laws and Neural Networks

CHANG Liang, YANG Chenyu, SU Xiaobin,  
DAI Xiaoyu, XU Qiang, GUO Liejin

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering,  
Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, P.R.China)

(Contributed by GUO Liejin, M. AMM Editorial Board)

**Abstract:** It is very important to accurately predict the gas-liquid pressurization performance of multiphase pumps for the economy and safety of oil-gas production. Existent prediction models and methods are limited by narrow parameter ranges and low pump stages. A gas-liquid experimental platform at the industrial level was built, and the gas-liquid pressurization performances of a 25-stage centrifugal multiphase pump were obtained. A prediction method for gas-liquid pressurization performances was proposed for multiphase pumps with high stages at variable rotational speeds. Firstly, the artificial neural network of gas-liquid boosting pressure in the pump

\* 收稿日期: 2022-12-30; 修订日期: 2023-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51888103)

作者简介: 常亮(1991—),男,博士(E-mail: cl\_013@stu.xjtu.edu.cn);

郭烈锦(1963—),男,教授(通讯作者. E-mail: lj-guo@mail.xjtu.edu.cn).

引用格式: 常亮, 杨晨宇, 苏筱斌, 戴晓宇, 徐强, 郭烈锦. 基于相似规律和神经网络的多级多相混输泵气液增压性能预测[J]. 应用数学和力学, 2023, 44(6): 619-628.

with low stages at a constant rotational speed, was constructed. Then, the boosting pressures at variable rotational speeds were converted to the designed condition by the 2-phase similarity law. Finally, based on the isothermal compression hypothesis, the inter-stage flow parameters were updated and the boosting pressures in pumps with high stages were acquired. The relative errors of prediction results of gas-liquid pressurization were less than 15% in pumps with different stage numbers (3~25 stages) and rotational speeds ( $2\ 500\sim 3\ 500\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ). The proposed method can be applied to other types of multiphase pumps, to determine the stage numbers of multiphase pumps and make production evaluation in oil-gas industry.

**Key words:** multiphase pump; gas-liquid pressurization; performance prediction; similarity law; neural network

## 0 引 言

多相混输泵是指能够同时对气液固多相流体增压的流体机械装备.作为一种可靠的气液混输增压方法,多相混输泵被广泛应用在许多重要的工业过程中,如深海长距离油气混输、井下油气开采人工举升等<sup>[1-2]</sup>.在油田生产中后期,许多仍有开发潜力的油气井被迫关停,应用井下混输泵有助于降低井口回压、提高油气产量,有效延长油田生命周期<sup>[3]</sup>.在高温井中( $>175\ ^\circ\text{C}$ ),混输增压提高了井筒内液体的沸点,节约了添加抑制剂的高额成本<sup>[4]</sup>.然而,我国深海油气开发技术在总体上仍落后于发达国家,处于领先的高新技术占比率不超过30%,其中60%以上的技术处于跟踪状态<sup>[5-6]</sup>.油气产量与混输泵气液增压特性密切相关,准确预测和评估多相混输泵增压能力对于指导油气生产,改善油气开发经济性至关重要.

混输泵气液增压特性受多个参数影响,如气液流量、入口压力、转速、级数和工质物性等<sup>[7-8]</sup>.不同气液流量下,旋转叶轮内部气液流体在压力梯度力和离心力作用下容易发生相分离,表现为不同的气液流型<sup>[9-11]</sup>.气液流型与混输泵气液增压存在强相关关系,多种流型结构与其转变导致气液增压的准确预测十分困难.Turpin等<sup>[12]</sup>首先提出了混输泵气液两相扬程的经验预测关联式,并给出了区别稳定和非稳定流动的边界判别式.为了将预测范围向高含气率推广,Duran和Prado<sup>[13]</sup>提出了针对离散气泡流型和团聚气泡流型的气液增压预测关联式.Furuya<sup>[14]</sup>采用一维控制体方法根据叶轮内部离散气相和液相的相互作用力建立了动力学模型.当含气率低于20%时,预测最大相对误差为 $\pm 30\%$ ;当含气率高于30%时,最大相对误差为 $\pm 50\%$ .最近,在前人研究的基础上,Zhu等<sup>[15]</sup>从Euler理论扬程出发,考虑各项流动损失,建立了泡状流和气团流条件混输泵增压预测模型,对三种离心式混输泵均取得了较好的预测结果,误差在 $\pm 20\%$ 以内.

在长期研究和应用过程中,研究者们基于流体力学相似理论总结提出了水泵相似定律.然而,在油气混输工业现场,工质一般为气液两相或多相流体.Matsushita等<sup>[16]</sup>采用单级稠密双叶栅叶轮,从叶轮外径、叶片高度和转速三个方面,实验研究了空气-水两相条件下相似规律的适用性.直径为190 mm和235 mm的两种叶轮能较好地符合相似规律,转速为 $1\ 000\sim 1\ 600\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,气液流量比为 $0\sim 0.6$ .司乔瑞等<sup>[17]</sup>研究发现,在不同转速下( $1\ 800\sim 2\ 910\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ),当入口含气率低于0.03时,单级蜗壳式离心泵能较好地遵循两相相似规律.Patil和Morrison<sup>[18]</sup>采用流量系数和旋转Reynolds数对单相水条件的相似规律进行了修正,对离心泵在不同流体黏度条件下的扬程进行了预测,预测结果与实验测量值相符合.

人工神经网络具有强大的模式识别和数据拟合能力,基于物理经验模型构建约束,在页岩油田产量预测和油气生产安全评估等方面获得了广泛应用<sup>[19]</sup>.王沐晨等<sup>[20]</sup>采用径向基函数法进行训练集的数据降维,减少了神经网络待定参数的个数,有效提高了气动力降阶模型的预测精度.Gölcü<sup>[21]</sup>采用人工神经网络预测了深井泵分流叶片的扬程-流量曲线.网络采用梯度下降、动量梯度下降和Levenberg-Marquardt学习算法,获得了较好的预测结果.Huang等<sup>[22]</sup>提出了一种混合神经网络来预测离心泵单相条件下的能量性能(扬程、功率和效率),将理论损失模型纳入反向传播神经网络,通过自动确定隐层节点数来优化神经网络结构.当前,基于神经网络预测离心泵水力特性的研究主要集中在单相条件,气液两相条件下多相混输泵增压特性预测仍需要进一步研究.

气液两相间巨大的物性差异和高速旋转的叶轮使得气液相参数在时空分布上具有高度不均匀性,引起

混输泵两相增压特性随入口气液流量表现出强烈的非线性特征。当前研究建立的经验关联式和动力学模型适用区间狭窄,仅对于部分结构和特定流动参数范围内的气液增压有较好的预测精度,普适性较差。另外,分区域增压特性的预测方法往往在边界处会产生较大的误差。对于如何将低级数混输泵研究总结的相关规律向现场应用的高级数混输泵进行推广,相关报道仍较为欠缺。

本文研制了工业参数级多相混输实验平台和 25 级离心式多相混输泵,构建了定转速、低增压级数混输泵气液增压神经网络,结合变转速气液两相的相似规律和高增压级数混输泵内部气液流动参数更新,实现了高增压级数混输泵气液增压性能的预测。通过实验获得的多级离心式混输泵在不同入口气液流量下的气液增压数据,对以上预测方法进行了检验。

## 1 实验系统与多级混输泵结构

本文构建预测方法所需要的混输泵气液两相增压实验数据,通过动力工程多相流国家重点实验室自主研发的工业参数级深海油气采输管道流动实验平台获得。多相混输泵实验测试系统主要分为 4 个部分,包括液相管路、气相管路、混输泵测试段和数据采集部分,如图 1 所示。实验工质为空气和水,系统最高设计压力为 30 MPa。工质水经由两台同型号的高压柱塞泵从水箱增压输送,单台柱塞泵最大流量  $14 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 。水的流量采用科氏质量流量计测量(RHM30FET2),量程为  $0 \sim 600 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ ,测量精度为 0.15%。空气压缩机提供高压气源,经稳压罐稳定压力至 10 MPa,经过减压和质量流量计计量与液相混合进入混输泵测试段。低气相流量采用 RHM015L 型流量计,量程为  $0 \sim 0.6 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ ,精度为 0.5%。高气相流量采用 RHM06GET2 型流量计,量程为  $0 \sim 20 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ ,精度为 0.5%。混输泵入口压力通过安装在混输泵出口的气动调节阀进行调节。安装在管线末端的气液分离器能够稳定系统压力并实现气液分离,体积为  $1 \text{ m}^3$ 。空气经过气液分离器上部管路减压排入大气,水通过底部管路和气动调节阀减压后进入水箱完成循环。多相混输泵实验参数范围如表 1 所示。

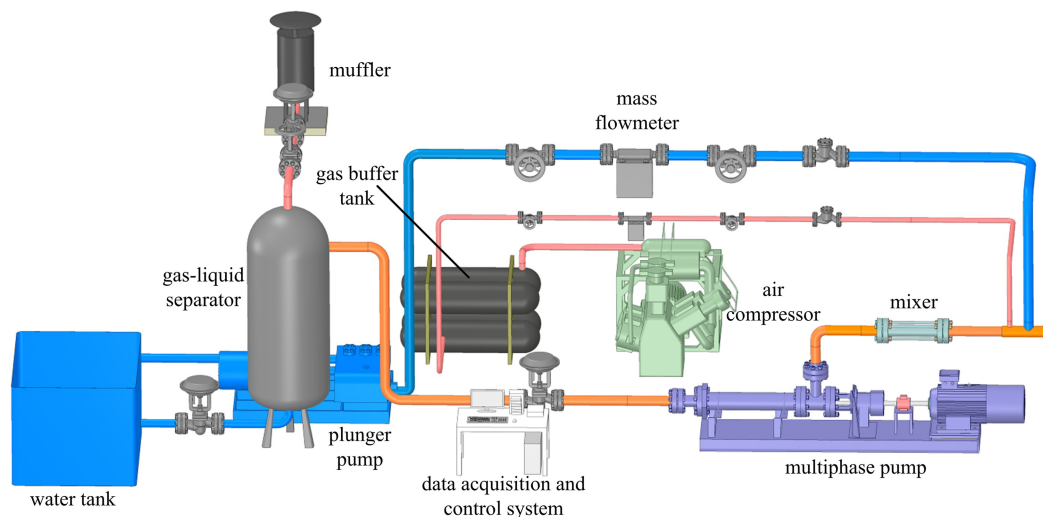


图 1 多相混输泵气液增压实验系统

Fig. 1 The gas-liquid pressurization experimental system for the multiphase pump

表 1 实验参数范围

Table 1 Ranges of experimental parameters

parameter	range
liquid mass flow rate $m_w / (\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	133.3~433
gas mass flow rate $m_a / (\text{kg} \cdot \text{min}^{-1})$	0~5.3
inlet gas volume fraction $\lambda / \%$	0~40
inlet temperature $T_m / ^\circ\text{C}$	15~30
inlet pressure $P_{in} / \text{MPa}$	0.5
rotational speed $n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2 500, 3 000, 3 500

本文研究的离心式多相混输泵由 25 个相同结构的增压级串联组成,如图 2 所示。每个增压级包含叶轮、

扩压器和连接的滑动轴承等部件。单相水条件下泵的最高效率设计点流量为  $28.5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 单级扬程为  $23.5 \text{ m}$ , 设计转速为  $3\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 比转速为  $107$ 。叶轮入口直径为  $65 \text{ mm}$ , 出口直径为  $127 \text{ mm}$ 。叶轮叶片入口角为  $30.7^\circ$ , 出口角为  $33.9^\circ$ , 叶片数为  $7$ 。

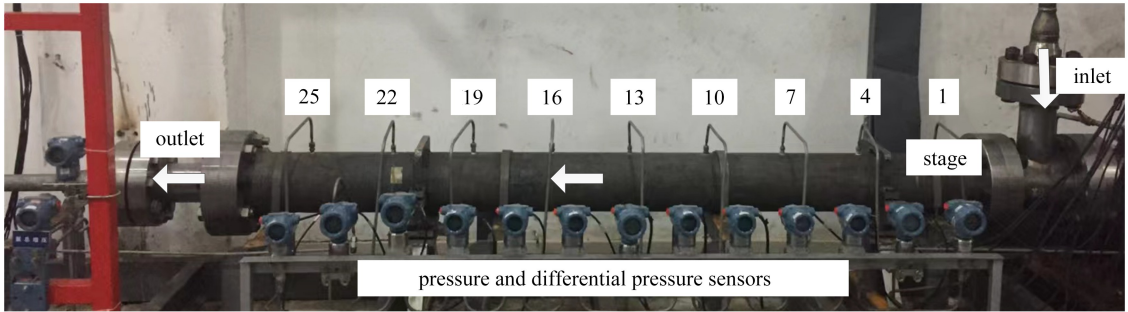


图2 多级多相混输泵与压力压差传感器布置

Fig. 2 The structure of the multistage multiphase pump and the arrangement of differential pressure sensors

为了实现仅采用低级数混输泵的气液增压数据预测高级数混输泵气液增压特性, 本文对  $25$  级混输泵划分了若干增压单元, 逐级测量级间压力和压差信号需要使用大量传感器。笔者之前的工作研究了相同叶型结构的  $3$  级混输泵气液增压特性<sup>[23]</sup>。因此, 本文采用每隔  $3$  级结构布置压力测点的方式, 即在第  $1$  级、第  $4$  级、……、第  $25$  级的扩压器中间位置分别布置压力测点, 划分了  $8$  个增压单元, 如  $1 \sim 3$  级、 $4 \sim 6$  级、……、 $22 \sim 25$  级。例如, 在第  $1$  级和第  $4$  级的两个压力测点处布置压差传感器, 获得了第  $1 \sim 3$  级的气液两相增压。混输泵内部沿流动方向的压力不断增加,  $8$  个增压单元的入口压力不同, 能够同时获得不同入口压力下增压单元的气液增压实验数据, 有助于减小实验测试工况。

## 2 混输泵气液两相增压预测方法

### 2.1 定转速低级数气液两相增压神经网络

根据之前三级多相混输泵气液增压特性的研究工作<sup>[23]</sup>, 在设计转速  $n = 3\,500 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  条件下, 无量纲气相流量  $q_a^*$  和液相流量  $q_w^*$  对气液增压的影响表现出高度非线性, 如图  $3$  所示。对于不同无量纲液相流量  $q_w^*$  (相对于泵自由出流的最大流量), 随入口含气率  $\lambda$  增大, 两相增压表现出明显的  $3$  个阶段增压恶化趋势。 $3$  个阶段分别对应混输泵内部不同的气液流型: ①泡状流、②气团流、③分层流, 处于相同的气液流型下具有相似的动力学特征。混输泵内部复杂的气液流动与其流型转变导致气液增压特性的准确预测较为困难。

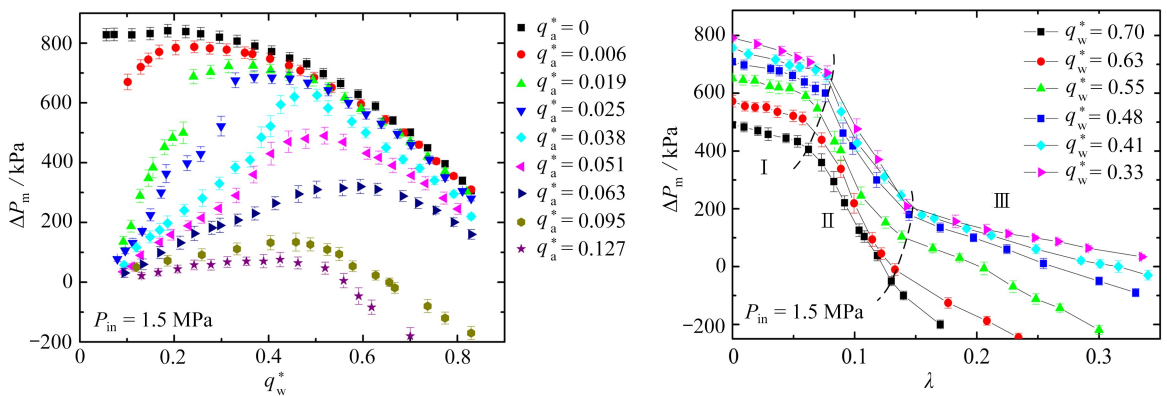


图3 混输泵气液两相增压特性<sup>[23]</sup>

Fig. 3 Gas-liquid 2-phase pressurization performances in multiphase pumps<sup>[23]</sup>

注 为了解释图中的颜色, 读者可以参考本文的电子网页版本, 后同。

径向基函数(RBF)网络是一种结构简单, 能够逼近任意非线性函数的人工神经网络。作为一种局部逼近网络, 对于输入空间的某个局部区域, 径向基函数网络只有少数几个连接权值影响输出, 对输入样本敏感性



不高.考虑到多相混输泵气液增压存在高度非线性和多参数影响的固有特征,结合神经网络的优势,本文建立了设计转速下三级混输泵气液两相增压神经网络.通过设计转速下三级混输泵在不同气相流量、液相流量和入口压力条件下的气液增压实验数据,构建了径向基函数神经网络  $\Delta P_{m,s}^*(\lambda, P_{in,s}^*, Q_w^*)$ .

为提高神经网络预测的准确度,需要对入口含气率、液相流量、转速和入口压力进行归一化处理.液相流量  $Q_w^*$ 、入口压力  $P_{in,s}^*$  和气液两相增压  $\Delta P_{m,s}^*$  分别以设计流量  $Q_{wd}$ 、最大级间入口压力  $\Delta P_{in,s,max}$  和设计转速下的三级最大单相增压  $\Delta P_{w,s,max}$  进行归一化处理.本文采用神经网络训练的样本为 25 级混输泵中不同气液增压单元的实验数据,转速  $n = 3\ 500\ \text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,液相流量  $Q_w = 14\sim 26\ \text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ,入口压力为  $0.5\sim 8\ \text{MPa}$ ,入口含气率为  $0\%\sim 44.0\%$ ,样本量为 520.选取不同级数混输泵气液两相增压的实验数据作为测试集,如 3 级、6 级、……、24 级混输泵.

$$Q_w^* = Q_w / Q_{wd}, \tag{1}$$

$$P_{in,s}^* = P_{in} / P_{in,s,max}, \tag{2}$$

$$\Delta P_{m,s}^* = \Delta P_{m,s} / \Delta P_{w,s,max}. \tag{3}$$

构建的径向基函数神经网络为包含输入层、隐含层和输出层的三层前向网络结构,如图 4 所示.通过将输入向量空间转换到隐含层空间,将原线性不可分的问题变为线性可分<sup>[24]</sup>.径向基函数的选择满足函数值仅与自变量范数有关,本文选用的径向基函数为 Gauss 分布函数.当第  $k$  个输入向量为  $\mathbf{X}_k = [x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{km}]$  时,网络第  $j$  个输出神经元计算结果为

$$y_{kj} = \sum_{i=1}^N \omega_{ij} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|\mathbf{X}_k - \mathbf{X}_i\|\right), \quad j = 1, 2, \dots, J. \tag{4}$$

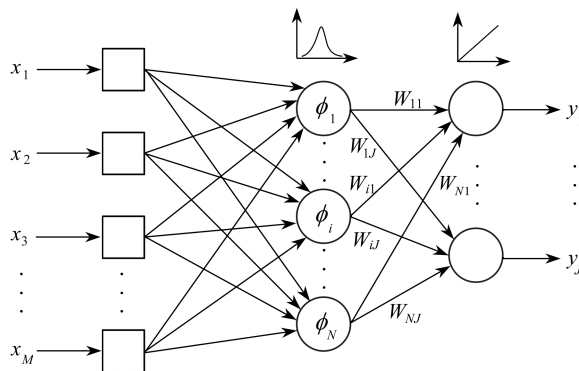


图 4 径向基函数神经网络结构

Fig. 4 The structure of the radial basis function neural network

采用随机选取样本中心的方法,为保证足够的预测准确度和泛化能力,需要确定合适的隐含层神经元数量和扩散速度.分别改变扩散速度和神经元数量,随机选取三级混输泵测试集(数目为 200),计算经过训练的神经网络对应的测试集输出.将上述步骤重复 100 次并将预测误差取均值,获得当平均相对误差最小时对应的扩散速度与神经元数量.本文采用试算法确定神经元数为 400,扩散速度为 0.2.

### 2.2 变转速条件气液增压能力计算

单相水条件下,对于离心式、混流式和轴流式水泵,在满足几何相似、运动相似和动力相似的基础上,实验泵和模型泵的水力性能也具有相似特征,学者们将其总结为水泵相似定律.其中,几何相似是运动相似和动力相似的前提.根据 Moody 图,高 Reynolds 数区域处于阻力平方区,在满足几何相似和速度相似条件下,可认为满足黏性力相似.因此,通常在单相水泵的研究中,主要根据几何与运动相似判断流动状态的相似<sup>[25]</sup>.

与单相水条件不同,由于叶轮旋转产生较大的离心加速度和压力梯度,在叶轮流道内部容易发生气液相分离,进而表现出具有不同界面结构的气液流型.不同气液流型对应不同的动力学状态.学者们通过旋转叶轮可视化实验揭示了叶轮内部气液流型转变诱发的增压恶化机制<sup>[9, 26-27]</sup>.Matsushita 等<sup>[16, 28]</sup>研究发现,处于相同气液流型条件下离心泵的两相扬程存在相似规律.仿照单相条件,下文将给出不同转速下满足气液两相相似的混输泵两相扬程计算方法.

在多级混输泵内部,由于对气体压缩作用显著,气相的可压缩性不能忽略.通常将气体假设为理想气体. $H_m$ 为气相等温压缩条件下混输泵的气液两相扬程,大小等于以气相质量分数为权重的气相扬程和液相扬程之和:

$$H_m = \frac{xR_a T}{g} \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) + (1-x) \frac{p_2 - p_1}{\rho_w g}. \quad (5)$$

仿照单相水泵,将混输泵两相流量 $Q_m$ 定义为当地状态下的气相体积流量与液相体积流量之和:

$$Q_m = Q_w + Q_a. \quad (6)$$

由于气体的可压缩性,从多级混输泵入口到出口,沿流动方向气相逐级压缩明显,气相体积显著变小,混输泵进出口的两相流量存在较大差别.图5为不同入口含气率下,混输泵两相流量随增压级数的变化规律.当增压级数较低时,两相流量随级数增大近似线性降低.因此,对于三级混输泵,将两相流量定义为混输泵进出口两相流量的算数平均值 $Q_m = (Q_{m1} + Q_{m2})/2$ .根据混输泵进出口气相和液相流量的质量守恒,混输泵进出口两相流量关系如下:

$$Q_{m2} = \frac{\rho_w(1-\lambda_1) + \rho_{a1}\lambda_1}{\rho_w(1-\lambda_2) + \rho_{a2}\lambda_2} Q_{m1}. \quad (7)$$

对于三级多相混输泵,在变转速条件下含气率分别为5%,10%,20%和30%,通过相似规律将两相扬程折算至设计转速条件的结果,如图6所示. $Q_{m,n_d}$ 和 $H_{m,n_d}$ 分别为折算至设计转速条件下的两相流量和两相扬程.不同转速条件下的实验数据点均能较好地遵循同一条曲线分布,符合两相相似规律.因此,可以通过设计转速条件下的混输泵气液增压特性计算其他转速条件下的两相扬程,进而获得两相增压特性:

$$Q_{m,n_d} = \frac{n_d}{n} Q_m, \quad (8)$$

$$H_{m,n_d} = \left(\frac{n_d}{n}\right)^2 H_m. \quad (9)$$

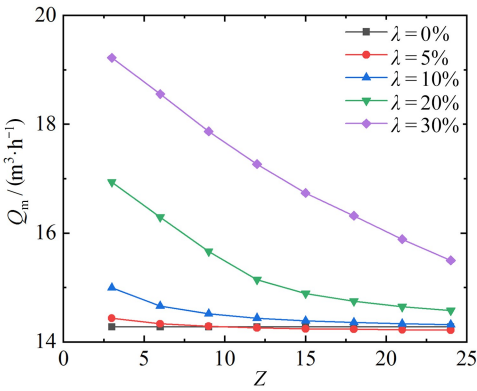


图5 不同入口含气率下,混输泵两相流量随增压级数的变化规律

Fig. 5 Variations of the 2-phase flow rate of the multiphase pump with the stage number under different inlet gas volume fractions

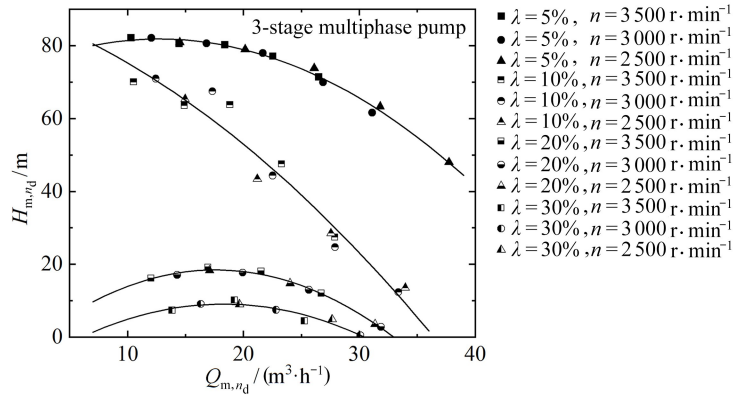


图6 变转速条件三级混输泵气液两相增压相似的验证

Fig. 6 Verification of similarity in gas-liquid pressurization under variable rotational speeds in a 3-stage multiphase pump

### 2.3 高增压级数流动参数更新

为获得更高增压级数混输泵的气液两相增压,采用人工神经网络完成三级增压结构的增压预测后,需要进行下一增压单元的入口流动参数更新,以便进行递推计算.本文基于等温压缩假设,对下一级增压单元的入口压力和入口含气率采用如下公式进行更新计算:

$$P_{in,Z+3} = P_{in,Z} + \Delta P_m, \quad (10)$$

其中, $P_{in,Z+3}$ 为下一增压单元的入口压力,Pa; $P_{in,Z}$ 为当前增压单元(三级结构)的入口压力,Pa; $\Delta P_m$ 为当前增压单元的气液两相增压,Pa; $Z$ 表示增压级数.



压的平均值和对应的标准差,如图8所示.图中实线代表采用样条曲线光滑后获得的不同转速下,混输泵气液增压实验性能曲线.从图中可以看出,不同转速下的三级混输泵气液增压预测值与实验曲线吻合度较好.当发生明显增压恶化,在混输泵气液增压快速下降的位置,由于样本点相对稀疏导致预测误差偏大.

下面将分析不同增压级数条件下,混输泵气液两相增压预测值与实验值的差别.同样重复测试100次,获得混输泵入口含气率间隔为0.05,不同级数混输泵气液两相增压的平均值和对应标准差,如图9所示.不同级数混输泵气液增压的预测值与实验曲线吻合度较好.随增压级数增大(3~21级),混输泵发生明显增压恶化的含气率逐渐增大.与三级混输泵类似,当气液增压发生明显恶化时,对应的气液两相增压预测误差逐渐增大.另外,预测误差随增压级数增大,表现出误差逐级增大的特点.因此,低增压级数混输泵性能的准确预测是提升高增压级数混输泵预测精度的前提.

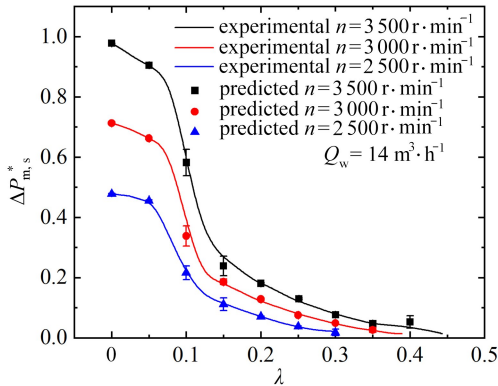


图8 不同转速下,三级混输泵气液增压预测值与实验值比较

Fig. 8 Comparison between the predicted and experimental values of gas-liquid pressurization performance of the 3-stage multiphase pump at different rotational speeds

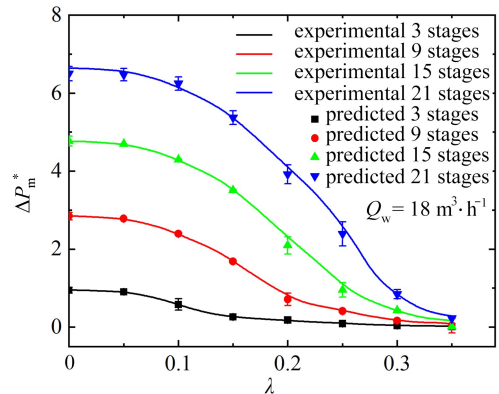


图9 不同增压级数混输泵气液两相增压预测值与实验值比较

Fig. 9 Comparison between the predicted and experimental values of gas-liquid pressurization performance of multiphase pumps with different stages

最后,综合对不同增压级数和转速条件的混输泵气液增压特性预测结果进行分析.液相流量范围为14~26 m³·h⁻¹,入口含气率为0%~44.0%,转速分别为2500 r·min⁻¹,3000 r·min⁻¹和3500 r·min⁻¹的多级混输泵实验测试样本数量为38,46和57.采用本文提出的预测方法获得的多级混输泵气液增压预测相对误差平均值如表2所示.随增压级数增加,由于计算中对增压单元两相增压的逐级叠加,导致误差放大.采用本文的预测方法对不同增压级数和转速条件混输泵气液增压预测的平均相对误差在15%以内.

表2 不同转速和增压级数混输泵气液增压平均预测相对误差

Table 2 The average relative errors for predicting gas-liquid pressurization performances of multiphase pumps with different stages under variable rotational speeds

$n / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	3 stages	9 stages	15 stages	21 stages
3 500	2.7%	6.2%	7.6%	8.5%
3 000	4.6%	7.5%	8.9%	12.5%
2 500	4.5%	5.3%	8.2%	13.4%

## 4 结 论

为实现高增压级数多相混输泵在变转速条件气液增压特性的准确预测,本文搭建了工业参数级多相混输气液增压实验平台,通过级间布置压力压差传感器,实验获得了25级离心式混输泵在不同转速和气液流量下的气液增压特性.提出了适用于高增压级数、变转速条件的混输泵气液增压预测方法.构建了定转速、低增压级数混输泵气液增压人工神经网络.采用相似规律将变转速条件的气液增压转换至设计转速条件.对多级混输泵划分增压单元,考虑气相可压缩性进行流动参数更新,实现了变转速、高级数混输泵气液增压的预测.气液增压预测误差在发生明显增压恶化的位置达到最大,并随级数增大逐级增大.低级数混输泵增压的准确预测是提升高级数混输泵预测精度的前提.对不同增压级数(3~25级)和转速条件(2500~3500 r·min⁻¹)混输泵



气液增压预测的平均相对误差在15%以内,该方法可以为其他类型混输泵的气液增压预测提供参考,能够指导油气输运现场计算确定混输增压级数,为评估和调控油气生产提供依据。

### 参考文献(References):

- [1] TAKACS G. *Electrical Submersible Pumps Manual: Design, Operations and Maintenance*[M]. MA, USA: Gulf Professional Publishing, 2017.
- [2] CORTES B, ARAUJO L R, PENIDO D R R. Electrical submersible pump system model to assist oil lifting studies[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2019, **174**: 1279-1289.
- [3] 薛敦松. 油气水多相混输泵与计量技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2017. (XUE Dunsong. *Oil-Gas-Water Multi-Phase Pump and Metering Technology*[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2017. (in Chinese))
- [4] AYDIN H, MEREY S. Design of electrical submersible pump system in geothermal wells: a case study from West Anatolia, Turkey[J]. *Energy*, 2021, **230**: 120891.
- [5] 贾承造, 庞雄奇, 姜福杰. 中国油气资源研究现状与发展方向[J]. 石油科学通报, 2016, **1**(1): 2-23. (JIA Chengzao, PANG Xiongqi, JIANG Fujie. Research status and development directions of hydrocarbon resources in China[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, **1**(1): 2-23. (in Chinese))
- [6] 刘超, 刘传岩, 刘健, 等. 水下油气生产系统概述及其发展现状[J]. 石油工程建设, 2021, **47**(6): 29-34. (LIU Chao, LIU Chuanyan, LIU Jian, et al. Overview and development status of subsea oil and gas production system[J]. *Petroleum Engineering Construction*, 2021, **47**(6): 29-34. (in Chinese))
- [7] ZHU J, ZHANG H Q. A review of experiments and modeling of gas-liquid flow in electrical submersible pumps [J]. *Energies*, 2018, **11**(1): 180.
- [8] OFUCHI E, CUBAS J, STEL H, et al. A new model to predict the head degradation of centrifugal pumps handling highly viscous flows[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, **187**: 106737.
- [9] PERISSINOTTO R M, VERDE W M, BIAZUSSI J L, et al. Flow visualization in centrifugal pumps: a review of methods and experimental studies[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, **203**: 108582.
- [10] HE D, ZHAO L, CHANG Z, et al. On the performance of a centrifugal pump under bubble inflow: effect of gas-liquid distribution in the impeller[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, **203**: 108587.
- [11] CUBAS J M, STEL H, OFUCHI E M, et al. Visualization of two-phase gas-liquid flow in a radial centrifugal pump with a vaned diffuser[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, **187**: 106848.
- [12] TURPIN J L, LEA J F, BEARDEN J L. Gas-liquid flow through centrifugal pumps-correlation of data[C]// *Proceedings of the 3rd International Pump Symposium*. Turbomachinery Laboratories, Department of Mechanical Engineering, Texas A&M University, 1986: 313-320.
- [13] DURAN J, PRADO M G. ESP stages air-water two-phase performance: modeling and experimental data[C]// *2004 SPE ESP Workshop*. Houston, TX, USA, 2004.
- [14] FURUYA O. An analytical model for prediction of two-phase (noncondensable) flow pump performance[J]. *Engineering*, 1985, **107**(1): 139-147.
- [15] ZHU H, ZHU J, ZHANG H Q. Mechanistic modeling of gas effect on multi-stage electrical submersible pump (ESP) performance with experimental validation[J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, **252**: 117288.
- [16] MATSUSHITA N, FURUKAWA A, WATANABE S, et al. Study on design of air-water two-phase flow centrifugal pump based on similarity law[J]. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 2009, **2**(2): 127-35.
- [17] 司乔瑞, 崔强磊, 袁寿其, 等. 气液两相条件下进口含气率对离心泵相似定律的影响[J]. 农业机械学报, 2018, **49**(2): 107-112. (SI Qiaorui, CUI Qianglei, YUAN Shouqi, et al. Influence of inlet gas volume fraction on similarity law in centrifugal pumps under gas-liquid two-phase condition[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, **49**(2): 107-112. (in Chinese))
- [18] PATIL A, MORRISON G. Affinity law modified to predict the pump head performance for different viscosities using the Morrison number[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2019, **141**(2): 021203.
- [19] 周济民, 张海晨, 王沫然. 基于物理经验模型约束的机器学习方法在页岩油产量预测中的应用[J]. 应用数学和

- 力学, 2021, **42**(9): 881-890.(ZHOU Jimin, ZHANG Haichen, WANG Moran. Machine learning with physical empirical model constraints for prediction of shale oil production[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2021, **42**(9): 881-890.(in Chinese))
- [20] 王沐晨, 李立州, 张珺, 等. 基于卷积神经网络气动力降阶模型的翼型优化方法[J]. 应用数学和力学, 2022, **43**(1): 77-83.(WANG Muchen, LI Lizhou, ZHANG Jun, et al. An airfoil optimization method based on the convolutional neural network aerodynamic reduced order model[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2022, **43**(1): 77-83.(in Chinese))
- [21] GÖLCÜ M. Neural network analysis of head-flow curves in deep well pumps[J]. *Energy Conversion and Management*, 2006, **47**(7/8): 992-1003.
- [22] HUANG R, ZHANG Z, ZHANG W, et al. Energy performance prediction of the centrifugal pumps by using a hybrid neural network[J]. *Energy*, 2020, **213**: 119005.
- [23] CHANG L, XU Q, YANG C, et al. Experimental study of gas-liquid pressurization performance and critical gas volume fractions of a multiphase pump[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2022, **144**(5): 051404.
- [24] MAJDISOVA Z, SKALA V. Radial basis function approximations: comparison and applications[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2017, **51**: 728-43.
- [25] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.(GUAN Xingfan. *Modern Pump Theory and Design*[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2011.(in Chinese))
- [26] STEL H, OFUCHI E M, ALVES R F, et al. Experimental analysis of gas-liquid flows in a centrifugal rotor[J]. *ASME Journal of Fluids Engineering*, 2020, **142**(3): 031101.
- [27] VERDE W M, BIAZUSSI J L, SASSIM N A, et al. Experimental study of gas-liquid two-phase flow patterns within centrifugal pumps impellers[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, **85**: 37-51.
- [28] MATSUSHITA N, WATANABE S, OKUMA K, et al. Similarity law of air-water two-phase flow performance of centrifugal pump[C]//*Fluids Engineering Division Summer Meeting*. 2007: 915-920.