

doi: 10.6041/j.issn.1000-1298.2022.04.013

# 基于BP神经网络的立式离心泵导叶与蜗壳优化设计

张德胜 杨港 赵旭涛 杨雪琪 高雄发

(江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 镇江 212013)

**摘要:** 立式离心泵是大型灌溉和长距离调水工程的核心动力装备, 单机配套功率能够达到 40 MW 级。为了降低立式离心泵的运行能耗, 以效率指标为优化目标, 基于 BP(反向传播)神经网络模型与多岛遗传算法对其多个过流部件进行优化设计。考虑到各过流部件的匹配性, 采用 Plackett - Burman 试验设计从导叶与蜗壳的 10 个设计参数中筛选出优化设计变量。运用最优拉丁超立方采样方法设计了 106 组方案, 并搭建了立式离心泵自动数值模拟优化平台。基于 BP 神经网络模型构建了优化设计变量和优化目标之间的高精度非线性关系, 最终通过多岛遗传算法得到导叶与蜗壳的最优参数组合。研究表明, 运用 SST  $k - \omega$  湍流模型能够准确地预测立式离心泵的性能参数; BP 神经网络是映射泵设计参数和性能参数间内在联系的有效方法; 优化后模型设计工况下效率达到 90.21%, 较原始模型提高了 3.61 个百分点; 优化后的导叶与蜗壳对立式离心泵设计工况和小流量工况下的性能影响更为显著; 优化后导叶与其他过流部件匹配性提高, 导叶与蜗壳内部流动特性得到明显改善。

**关键词:** 立式离心泵; 过流部件匹配; 自动优化; BP 神经网络; 多岛遗传算法

中图分类号: TH311 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)04-0130-10

OSID:



## Optimization Design of Vane Diffuser and Volute in Vertical Centrifugal Pump Based on Back Propagation Neural Network

ZHANG Desheng YANG Gang ZHAO Xutao YANG Xueqi GAO Xiongf

(National Research Center of Pumps and Pumping System, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Vertical centrifugal pump is a high specific speed centrifugal pump, which is usually with radial vane diffuser structure. As the core power equipment for large-scale irrigation projects and long-distance water transfer, the matching motor power for vertical centrifugal pump is huge and can reach 40 MW, and the efficiency directly determines its operating energy consumption. In order to reduce the energy consumption of vertical centrifugal pumps, an optimization on multi-components was proposed based on back propagation neural network (BPNN) and multi-island genetic algorithm (MIGA). The matching of the hydraulic components was taken into account and the Plackett - Burman test design was used to screen out the optimal design variables from the 10 design parameters of the vane diffuser and the volute. Then, totally 106 sets of cases were sampled by using optimal Latin hypercube sampling (OLHS), and an automatic numerical simulation optimization platform for the vertical centrifugal pump was built to quickly obtain the optimization objective values corresponding to each set of case. The BPNN was used to construct the high-precision nonlinear relationship between the optimization variables and the optimization objective. Finally, the optimal parameter combination of vane diffuser and volute was obtained through MIGA. The results showed that the performance parameters of vertical centrifugal pump could be more accurately predicted by using SST  $k - \omega$  turbulence model. BPNN was an effective method to construct high-precision nonlinear relationship between pump design parameters and performance parameters. The efficiency of the optimized model under design condition reached 90.21%, which was 3.61 percentage points higher than that of the original model. The optimized vane diffuser and volute had a more obvious influence on the performance of vertical centrifugal pumps under design condition and part-load conditions. The matching between the vane diffuser and other hydraulic components was better,

收稿日期: 2021-05-17 修回日期: 2021-06-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(51979125)、江苏省重点研发计划项目(BE2019089)和江苏省普通高校研究生实践创新计划项目(SJCX21\_1682)

作者简介: 张德胜(1982—),男,研究员,博士生导师,主要从事流体机械设计理论及流动特性研究,E-mail: zds@ujs.edu.cn

and the internal flow pattern of the vane diffuser was significantly improved after optimization. The optimization method proposed could provide a certain reference for the optimization design of centrifugal pumps.

**Key words:** vertical centrifugal pump; matching of hydraulic components; automatic optimization; back propagation neural network; multi-island genetic algorithm

## 0 引言

近年来南水北调、地区灌溉等长距离调水和大型灌溉工程缓解了水资源分布不均和农业灌溉用水问题。立式离心泵凭借其流量大、扬程高的优势在该领域发挥着重要作用。流量大、扬程高的特点导致立式离心泵装机功率大,长时间运行能耗极高,提升其水力性能是减少该类泵能耗的重要手段。然而,为了满足更多的运行要求和更好的结构要求,该类泵通常带有径向导叶结构<sup>[1-2]</sup>;导叶与叶轮和蜗壳的匹配性较低是其产生较大水力损失的重要因素之一,因此提升各过流部件的匹配性是改善其性能的有效手段<sup>[3-4]</sup>。

近年来,近似模型被广泛运用于流体机械的优化设计中<sup>[5-7]</sup>,其对非线性关系的高精度拟合能力成为提高优化设计精度和效率的关键,人工神经网络模型在众多近似模型中表现出更好的对泵性能参数的预测能力<sup>[8-10]</sup>。利用近似模型结合智能优化算法的优化设计方法已成为流体机械领域快速、有效的优化设计方法。文献[11]对蜗壳的4个设计变量做了多目标优化设计,采用均匀试验设计、流固耦合计算、BP神经网络和多目标遗传算法组合的方法提高了双流道泵的水力性能和结构性能;文献[12]利用贝塞尔曲线拟合管道泵肘形进水管的形状,采用人工神经网络、拉丁方试验设计方法和多目标遗传算法,以3个工况下的效率最优为目标优化了肘形进水管的形状;文献[13]搭建了轴流泵自动优化平台,采用径向基神经网络与多岛遗传算法相结合,将轴流泵的水力效率提升了4.46%;文献[14]选取了混流泵导叶的4个设计变量进行优化设计,采用拉丁超立方采样、径向基神经网络和序列二次规划算法结合的方法将混流泵设计工况下的水力效率提升了9.75%;文献[15]以设计工况下效率为目标,采用径向基神经网络和遗传算法相结合,对一余热排出泵的叶轮轴面投影图进行了优化设计,优化后的叶轮性能改善明显;文献[16]以泵工况和水轮机工况下的效率为目标,采用基于帕累托的遗传算法对水泵水轮机叶轮进行优化,优化后的模型在泵和水轮机工况下的效率分别提高了0.27%和16.3%。

上述研究成果可见,针对静止过流部件及旋转过流部件的设计,近似模型与优化算法相结合的方法都在流体机械优化设计领域得到了成功的应用,但多数研究都是对单个过流部件进行优化设计,从多个过流部件的匹配性考虑对立式离心泵进行优化设计的研究相对缺乏。因此,本文针对立式离心泵各过流部件间的匹配性,采用BP神经网络和多岛遗传算法相结合的方法,重点提高其设计工况下的水力效率,以降低泵的运行能耗,达到节能运行的目标。

## 1 计算模型与数值模拟方法

### 1.1 立式离心泵水力模型及参数

本文的立式离心泵计算模型由原型泵水力模型通过相似换算得到。过流部件由肘形进水管、离心式叶轮、活动导叶、固定导叶以及螺旋形蜗壳组合而成。其基本设计参数:设计流量 $Q_{des}$ 为 $0.214 \text{ m}^3/\text{s}$ ,扬程 $H$ 为 $18 \text{ m}$ ,额定转速 $n$ 为 $1150 \text{ r}/\text{min}$ ,比转数 $n_s$ 为 $215$ ;其主要结构参数为:叶轮出口直径 $D_2$ 为 $360 \text{ mm}$ ,叶轮出口宽度 $b_2$ 为 $70.3 \text{ mm}$ ,叶轮叶片数 $Z$ 为 $7$ ,固定导叶叶片数 $Z_s$ 为 $20$ ,活动导叶叶片数 $Z_g$ 为 $20$ 。

采用三维造型软件构建立式离心泵模型机水力模型得到本文的原始计算模型,如图1所示。活动导叶和固定导叶位于叶轮与蜗壳之间的重要位置,是连接叶轮与蜗壳的重要过流部件,其主要的作用是控制流量及调节最优工况点。

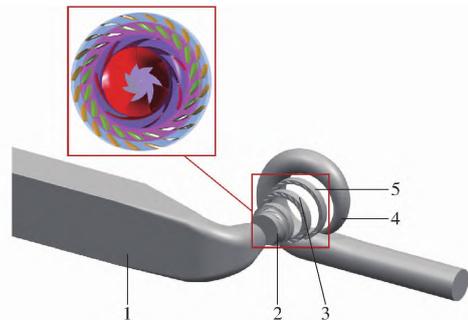


图1 立式离心泵计算模型

Fig. 1 Calculation model of vertical centrifugal pump

1. 进水管 2. 叶轮 3. 活动导叶 4. 蜗壳 5. 固定导叶

### 1.2 网格划分

对进水管、叶轮、活动导叶、固定导叶和蜗壳5

个过流部件进行了六面体结构网格划分,对近壁面处的网格作精细化处理,其 $y^+$ 值(无量纲值,表示距离壁面第1层网格的高度)小于50,满足湍流模型的要求。划分后的网格如图2所示;通过设置7组不同数量的流体计算域网格来进行网格无关性验证,其结果如图3所示。

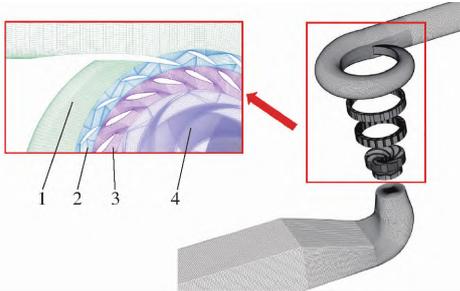


图2 立式离心泵计算域网格

Fig. 2 Grid of vertical centrifugal pump

1. 蜗壳 2. 固定导叶 3. 活动导叶 4. 叶轮

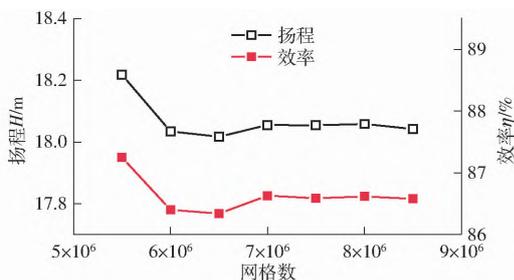


图3 网格无关性验证

Fig. 3 Mesh independence

由图3可知,当网格数大于700万时,随着网格数的增加,对应的扬程和效率浮动趋于稳定,即网格数对最终的性能指标已几乎不产生影响。考虑到计算时长和计算精度,最终将总网格数定为700万左右,其中进水管网格数约为103万,叶轮网格数约为174万,活动导叶网格数约为155万,固定导叶网格数约为82万,蜗壳网格数约为186万。

### 1.3 数值模拟方法及设置

在商业软件 ANSYS CFX 中求解稳定的三维 RANS 方程来预测立式离心泵的性能参数。SST(剪切应力传输) $k-\omega$  湍流模型在标准的 $k-\omega$  湍流模型基础上改进了涡黏性的定义来考虑湍流主切应力运输的影响,从而改进了对逆压梯度流动的预测<sup>[17-18]</sup>。在大型水泵数值模拟过程中采用此湍流模型来封闭 N-S 方程,可以较为准确地预测其内部流动特性,因此本文选用此湍流模型来计算立式离心泵中的流动特性。

本文的边界条件设置为:入口边界条件设置总压为1个标准大气压,出口边界条件设置为质量流量,根据工况的不同而改变;设置叶轮的转速为1150 r/min,旋转域和静止域间的交界面设置为冻

结转子;固体壁面满足无滑移条件设置为无滑移壁面;叶轮与进水管和径向导叶的相交面设置为动-静交界面,其余各部件交界面均为静-静交界面;收敛精度定义为 $10^{-4}$ 。

### 1.4 试验验证

通过对原始模型泵进行外特性试验,来验证本文数值模拟方法的准确性,原始模型的外特性试验在水利部天津中水北方勘测设计研究院的立式水泵闭式试验台上进行,图4为试验台的运行系统,图5为叶轮与立式离心泵闭式试验台的实物图。

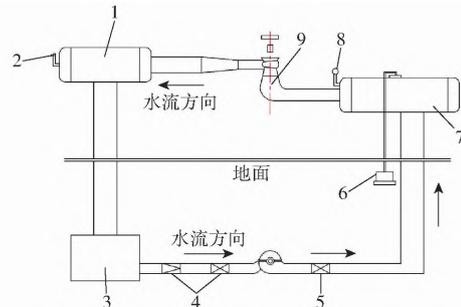


图4 试验装置运行系统

Fig. 4 System diagram of test devices

1. 高压罐 2. 空气阀 3. 蓄水池 4,5. 阀门 6. 真空泵 7. 低压罐 8. 压力表 9. 试验泵



图5 叶轮与立式离心泵闭式试验台实物图

Fig. 5 Impeller and closed test rig of vertical centrifugal pump

试验所得泵外特性曲线与数值模拟结果对比如图6所示。从图6可以看出,CFD(计算流体力学)模拟结果与试验所得外特性曲线趋势较为一致,性能参数的计算值与试验值最大偏差小于5%,在可接受误差范围内,说明本文采用的数值模拟方法较为准确。

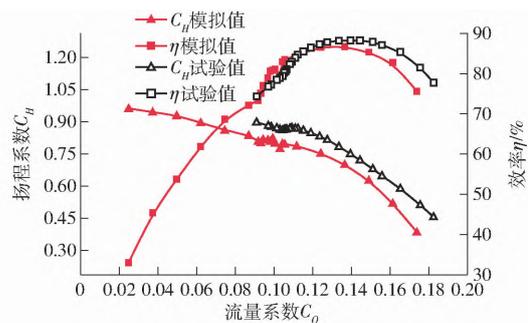


图6 外特性模拟曲线与试验曲线

Fig. 6 Performance curves of simulation and experiment

图6中对扬程和流量进行无量纲化,得到相应的扬程系数和流量系数,其中本文设计工况对应的

流量系数为 0.124, 设计扬程对应的扬程系数为 0.751, 流量系数和扬程系数定义为

$$C_Q = \frac{Q}{\pi D_2 b_2 u_2} \quad (1)$$

$$C_H = \frac{2gH}{u_2^2} \quad (2)$$

式中  $g$ ——重力加速度,  $m/s^2$   
 $Q$ ——泵的流量,  $m^3/s$   
 $u_2$ ——叶轮出口圆周速度,  $m/s$

## 2 优化设计方法与应用

本文旨在改善过流部件匹配性以提高立式离心泵水力性能, 优化设计过程如图 7 所示, 以设计工况下的水力效率为优化目标, 首先对原始模型导叶结构进行了改进, 对改进后的模型选取导叶与蜗壳各设计参数进行 Plackett - Burman 筛选试验, 以减少优化设计变量; 然后采用最优拉丁超立方采样在设计范围内采样 106 组样本, 并搭建了自动数值模拟优化平台以快速得到样本点相应的优化目标值; 通过 BP 神经网络模型来构建优化设计变量和优化目标之间的非线性关系; 最终通过多岛遗传优化算法求解非线性函数得到导叶与蜗壳的最优参数组合。

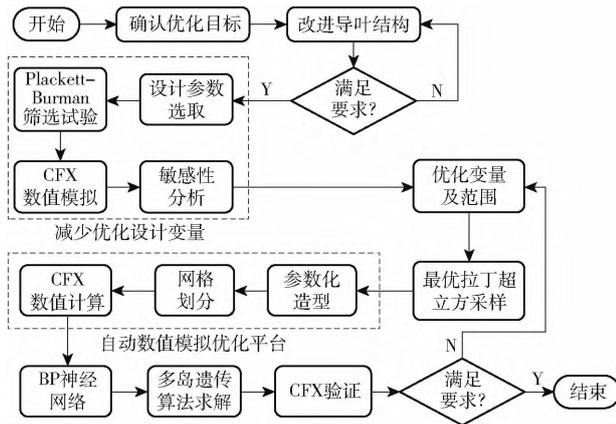


图 7 立式离心泵优化流程图

Fig. 7 Optimization flow chart of vertical centrifugal pump

### 2.1 优化目标

为尽可能多地降低能耗, 本文的优化设计目标选取  $Q_{des}$  工况下的模型泵水力效率, 通过定常数值模拟计算得到, 即

$$\eta = \frac{\rho g Q_{des} H}{T \omega} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $T$ ——叶轮扭矩,  $N \cdot m$   
 $\omega$ ——叶轮角速度,  $rad/s$   
 $\rho$ ——密度,  $kg/m^3$

### 2.2 导叶结构改进

立式离心泵中的径向导叶结构又称为叶片式扩

压器, 是将叶轮内流出的高速水流过渡到蜗壳中的关键水力部件, 本文将原始模型的活动导叶和固定导叶简化为一层固定导叶, 固定导叶依然可以起到引导水流的作用, 这不仅简化了模型结构, 还能够降低水流在两层导叶中的损失从而提高泵工况运行的效率和稳定性。同时考虑到动静干涉作用, 导叶数和叶轮叶片数需互为质数, 因此将固定导叶的数目从原来的 20 片减少到 13 片来增大导叶间水流的过流面积, 上述改进后的模型较原始模型在设计工况下效率提升 1 个百分点, 达到 87.6%; 扬程提升 0.57 m, 达到 18.57 m。

改进后的模型较原始模型扬程和效率都有所提高, 模型性能得到了明显改进; 改进后模型导叶与蜗壳的基本设计参数: 导叶进口直径  $D_3$  为 379.8 mm, 导叶出口直径  $D_4$  为 434 mm, 导叶进出口宽度  $b_3$  保持一致均为 75.6 mm, 导叶进口安放角  $\beta_3$  为  $27^\circ$ , 固定导叶叶片数  $Z_s$  减少为 13 片, 蜗壳基圆直径  $D_5$  为 440 mm, 蜗壳进口宽度  $b_4$  为 118 mm, 蜗壳出口直径  $D_6$  为 330 mm。

此外, 改进后模型效率只提升 1 个百分点左右, 尚有较大提升空间, 由于改进过程只是将活动导叶结构去除, 并未考虑到导叶与叶轮和蜗壳的匹配性, 但导叶结构处于特殊位置, 其与叶轮和蜗壳的匹配性是影响立式离心泵性能的关键因素之一, 因此本文针对过流部件匹配性进行下一阶段的优化设计。

### 2.3 设计参数优化

导叶的设计参数极大地影响其与叶轮和蜗壳的匹配程度, 因此本文选取导叶主要的 6 个设计参数作为初始优化变量, 分别为:  $D_3$ 、 $D_4$ 、导叶包角  $\varphi$ 、 $\beta_3$ 、导叶出口安放角  $\beta_4$ 、 $b_3$ ; 具体设计参数如图 8 所示。

与此同时, 本文选取蜗壳中的 4 个设计参数作为优化设计变量来进一步考虑导叶与蜗壳的匹配性, 分别为:  $S_8$ 、 $D_6$ 、蜗壳扩散管高度  $L$ 、 $b_4$ ; 具体设计参数如图 9 所示。其中第 8 断面又称蜗壳喉部, 其面积是蜗壳设计中的核心参数, 本文在改变蜗壳喉部面积时, 其他各断面面积也随之改变, 具体定义方法为

$$S_\varphi = \frac{\varphi_8}{360} S_8 \quad (4)$$

式中  $S_\varphi$ ——计算断面面积,  $mm^2$   
 $\varphi_8$ ——计算断面与第 8 断面间夹角, ( $^\circ$ )  
 $S_8$ ——蜗壳喉部面积,  $mm^2$

### 2.4 Plackett - Burman 试验设计

Plackett - Burman 试验设计<sup>[19]</sup>能够从多个因素中筛选出对试验指标有显著影响的因素, 该试验研

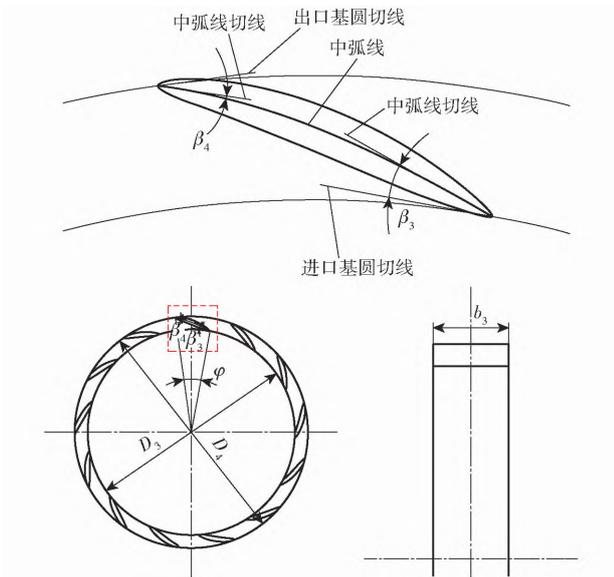


图8 导叶主要优化参数定义

Fig.8 Definition of main geometry variables of vane diffuser

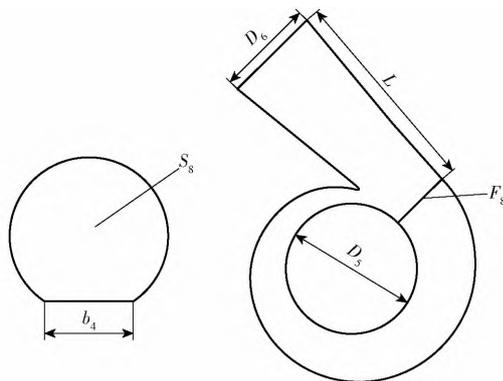


图9 蜗壳主要优化参数定义

Fig.9 Definition of main geometry variables of volute

究  $(N - 1)$  个因素仅需要进行  $N$  次试验,其中  $N$  为 4 的倍数,可以以较少的试验次数筛选出对试验指标具有显著影响的因素。对立式离心泵导叶和蜗壳的 10 个设计参数选取高低两组设计水平进行 Plackett - Burman 试验设计,表 1 给出了试验设计因素及水平。

表 1 Plackett - Burman 设计因素及水平

Tab.1 Range of different factors investigated with Plackett - Burman

因素	低水平(-)	高水平(+)
导叶进出口宽度/mm	71	90
导叶进口直径/mm	374	384
导叶出口直径/mm	426	434
导叶进口安放角/(°)	20	30
导叶出口安放角/(°)	10	20
导叶包角/(°)	16	22
蜗壳进口宽度/mm	100	130
蜗壳扩散管高度/mm	600	800
蜗壳出口直径/mm	300	350
蜗壳喉部面积/mm <sup>2</sup>	50 000	60 000

Plackett - Burman 试验设计共进行 12 次,采用 CFX 软件数值计算得到各方案对应的水力效率作为 Plackett - Burman 试验设计的试验指标。根据得出的 12 组计算结果,建立了以效率为评价指标的回归方程。表 2 显示了设计点效率和 10 个设计参数之间的皮尔逊相关系数和显著性检验单尾概率  $P$  值,皮尔逊相关系数的绝对值越大则相关性越大,而  $P$  值在 0.05 以下为显著影响,在 0.05 和 0.1 之间为次显著影响。

表 2 效率显著性分析结果

Tab.2 Significance analysis results of efficiency

因素	皮尔逊相关系数	$P$
导叶进出口宽度	-0.035	0.457
导叶进口直径	0.615	0.017
导叶出口直径	0.117	0.358
导叶进口安放角	0.343	0.138
导叶出口安放角	0.205	0.261
导叶包角	0.150	0.321
蜗壳进口宽度	-0.372	0.117
蜗壳扩散管高度	-0.268	0.199
蜗壳出口直径	0.088	0.393
蜗壳喉部面积	-0.434	0.079

从表 2 中可以看出,导叶进口直径  $D_3$  的相关系数达到 0.615,显著性  $P$  值只有 0.017,说明  $D_3$  对效率影响最大,为显著性影响因素,且为正影响,其次蜗壳喉部面积对效率的相关系数为 -0.434,且显著性  $P$  值为 0.079,是对水力效率影响第二大的因素,为次显著性影响因素,且为负影响;同理还可以发现,蜗壳进口宽度和导叶进口安放角对效率影响也较大。因此,本文选取上述 4 个设计参数作为最终的优化设计变量。

### 2.5 最优拉丁超立方采样(OLHS)

为了构建高精度的近似模型,需在样本设计空间内选取合适的样本点,最优拉丁超立方采样是一种分层采样方法<sup>[20]</sup>,能够以较少的采样次数充分反映设计空间样本特性;对 4 个优化设计变量在设计空间内采样 106 组样本点,样本点数量远大于构建近似模型所需的样本数量,采样空间范围见表 3。

表 3 采样空间范围

Tab.3 Range of sampling space

优化设计变量	下限	上限	原始值
$D_3$ /mm	374	390	379.8
$\beta_3$ /(°)	25	40	27
$b_4$ /mm	100	150	118
$S_8$ /mm <sup>2</sup>	30 000	60 000	50 650

### 2.6 自动数值模拟优化平台

在 Isight 软件中通过批处理命令将 CFTurbo、

ICEM CFD 和 CFX 软件进行集成, 搭建了立式离心泵从设计到仿真一体化的自动数值模拟优化平台, 以保证数值模拟的准确性和一致性, 同时缩短了优化周期, 软件集成运行框架如图 10 所示。

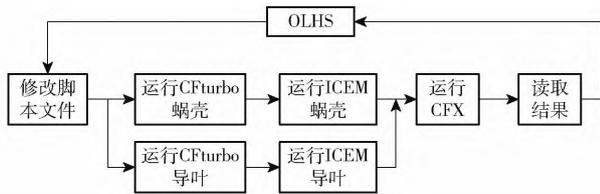


图 10 软件集成运行框架  
Fig. 10 Software integration framework

通过此自动优化平台得到 106 组方案对应的优化目标值。采用旋转机械设计软件 CFturbo 对立式离心泵导叶和蜗壳实现参数化设计; 将导叶与蜗壳的三维模型分别导入 ICEM CFD, 启用脚本程序自动进行网格划分, 最终再一起导入 CFX 软件自动完成数值模拟设置和计算。

### 2.7 BP 神经网络模型

构建优化设计变量与优化目标之间关系是优化设计过程中的关键步骤, 也是关系到最终优化结果准确性的重要因素之一, 人工神经网络模型 (Artificial neural network, ANN) 是实现上述目标的有效手段。人工神经网络按照拓扑结构的不同又分为前馈神经网络和反馈神经网络, 其中 BP 神经网络是前馈神经网络中的常见类型, 近年来在众多工程领域中被广泛运用<sup>[21-23]</sup>。

BP 神经网络具有很强的拟合非线性函数关系的能力, 其分为输入层、隐藏层和输出层, 通过逐层映射来构建变量与目标值之间的关系, 其网络结构如图 11 所示。

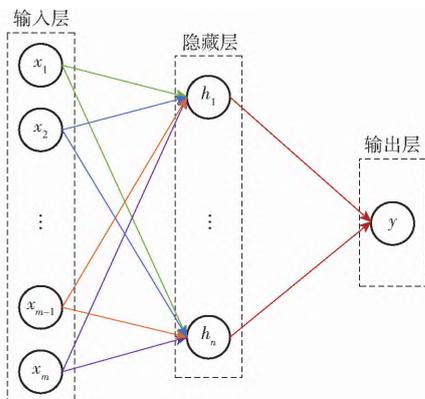


图 11 BP 神经网络结构图  
Fig. 11 Structure of back propagation neural network model

运用上述得到的 106 组样本数据, 采用 BP 神经网络构建优化设计变量和优化目标之间的非线性关系。因此输入层中含有 4 个神经元, 输出层中含有 1 个神经元且隐藏层设置 10 个神经元。将 85%

的数据用于训练神经网络, 15% 的数据用来检验拟合精度, 拟合精度由决定系数  $R^2$  决定, 从图 12 中可以看出, 本文构建的神经网络模型  $R^2$  达到 0.988 1, 拟合精度较高。

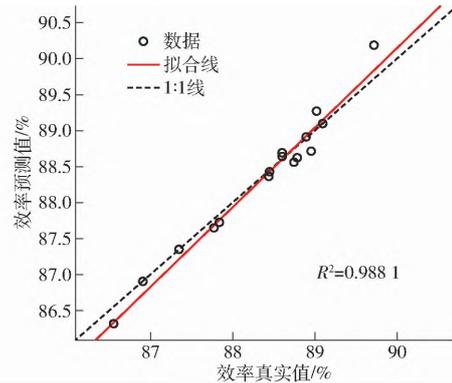


图 12  $R^2$  误差分析

Fig. 12  $R^2$  error analysis

### 2.8 多岛遗传算法 (MIGA)

遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 是一种经典的全局优化算法, 在算法的运行过程中将优化问题的解当作染色体, 采用选择、交叉、变异等方法不断地迭代出新的种群从而得到最优解, 这与生物进化过程中的遗传机制十分类似<sup>[24]</sup>。

多岛遗传算法则是对传统遗传算法进行改进的一种全局优化算法<sup>[25]</sup>, 如图 13 所示, 将一个种群分解为多个小的子种群称为“岛”, 子种群依然使用遗传算法进行求解, 但是各个子种群中的个体在不断地“迁移”使得个体更具多样性; 多岛遗传算法与传统的遗传算法相比收敛更快且全局寻优能力更强。

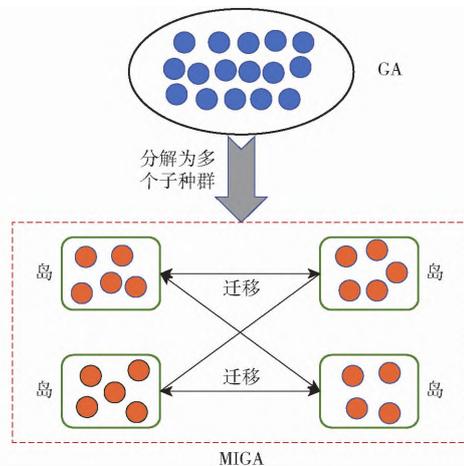


图 13 多岛遗传算法

Fig. 13 Multi-island genetic algorithm

本文运用该算法结合上文中训练完成的 BP 神经网络对立式离心泵的优化问题进行求解, 算法设置为: 子种群个数为 12, 岛的个数为 12, 交叉率为 0.9, 岛间迁移率和变异概率为 0.01, 迁移间隔代数 5 代。

### 3 结果与分析

#### 3.1 外特性分析

在规定步数的迭代计算后,多岛遗传算法给出了优化后的变量值,采用优化后的变量对导叶与蜗壳重新进行三维造型和数值计算,得到优化后模型设计工况下的水力性能参数;优化前后的设计参数及性能参数对比如表4所示。从表4可以看出,优化后导叶进口直径增大,即叶轮与导叶间的无叶区范围扩大,导叶进口安放角与蜗壳进口宽度也有所增大,而蜗壳喉部面积明显减小,即其他断面过流面积也随之减小;优化后模型设计点效率达到90.21%,较原始模型提高3.61个百分点,较改进后模型提高2.61个百分点。同时,BP神经网络给出的最优效率预测值为90.53%,与数值模拟实际值相差0.32个百分点,进一步证明了神经网络模型的高精度。

表4 优化前后参数对比

Tab.4 Comparison of parameters between original and optimized model

类别	$D_3$ /mm	$\beta_3$ /( $^\circ$ )	$b_4$ /mm	$S_8$ /mm <sup>2</sup>	$\eta$ /%	$H$ /m
改进后模型	379.8	27.0	118.0	50 650	87.60	18.58
优化后模型	389.2	30.8	129.8	42 797	90.21	19.01

为了进一步分析优化后模型多工况下性能参数的变化情况,优化后模型、改进后模型和原始模型的外特性曲线如图14所示。从图14可以看出,优化后模型多工况下的效率和扬程都明显高于原始模型,在设计点水力效率得到明显提升。改进后的模型主要在设计工况和大流量工况下效率有所提升,但在小流量工况下效率提升不明显,且最优效率点偏向大流量工况;而优化后模型相比于改进后模型,在设计流量和小流量下的效率和扬程有明显的提升,虽然优化后模型在大流量下效率和扬程有所下降,但相比于原始模型依然有显著提升,并且解决了

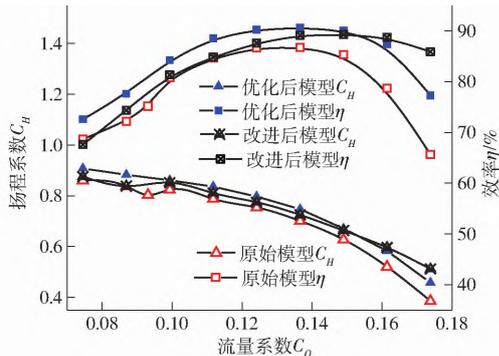


图14 优化前后模型外特性对比

Fig.14 Comparison of pump performance before and after optimization

最优效率点向大流量工况偏移的问题。

改进后模型在大流量下的性能提高,可能是由于导叶层数的减少和导叶叶片数减少导致导叶内过流面积的增大使其更加适应大流量工况,而优化后模型在设计流量和小流量工况下的性能提升,可能是由于优化后模型导叶与叶轮和蜗壳的匹配性提高;优化后的导叶与蜗壳对立式离心泵设计流量和小流量工况下的性能影响更加显著。

#### 3.2 内部流场分析

为了探究过流部件的匹配性对立式离心泵内部流场的影响,对改进后模型与优化后模型的内部流场进行对比分析;图15给出了导叶不同高度位置的示意图,其中Span值0.1为靠近前盖板位置,Span值0.9为靠近后盖板位置;改进后模型与优化后模型在设计流量下导叶各高度位置的速度流线分布如图16所示。

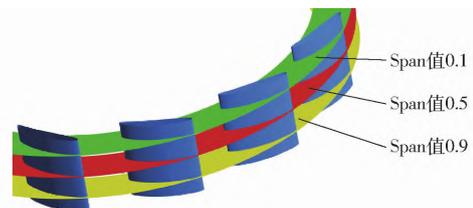


图15 导叶不同高度位置示意图

Fig.15 Schematic at different spans of diffuser

从图16可以看出,改进后模型导叶内的流动较为不稳定,多个导叶流道内存在大面积低速区,且不同导叶高度位置流动分布不均匀,Span值0.5位置部分流道内漩涡的产生导致流道堵塞,迫使流体向相邻流道或导叶其他高度位置流动,从而增大了导叶内的水力损失。优化后模型导叶内的速度和流线分布在各流道和不同高度位置分布更加均匀且大面积低速区和局部漩涡消失,仅在部分导叶后缘存在轻微的流动分离现象;这是因为优化后的导叶进口直径与进口安放角都较改进后模型增大,导叶与叶轮的匹配性提高,从而改善了导叶内的流态。

采用阻塞系数来描述优化前后导叶各流道内的阻塞情况,导叶流道示意图如图17所示,阻塞系数小于1时,流道内存在阻塞情况,阻塞系数小说明流道内的阻塞情况越严重,定义阻塞系数小于0.95为严重堵塞情况,图18给出了改进后模型和优化后模型在设计工况下导叶内各流道的阻塞系数对比,其中阻塞系数定义为

$$B_D = \frac{Q_D}{\frac{1}{13}Q_m} \quad (5)$$

式中  $B_D$ ——导叶内阻塞系数

$Q_D$ ——导叶单个流道质量流量,kg/s

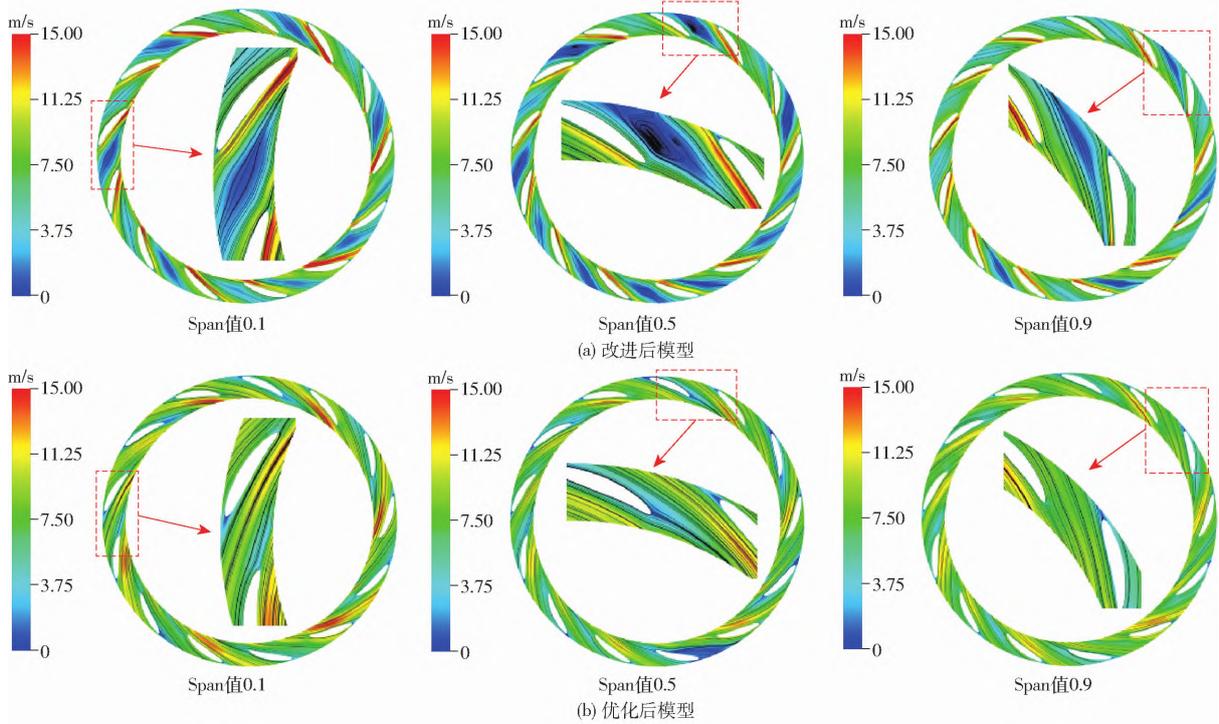


图 16 导叶不同高度位置速度流线分布

Fig. 16 Velocity and streamline distributions of vane diffuser at different spans

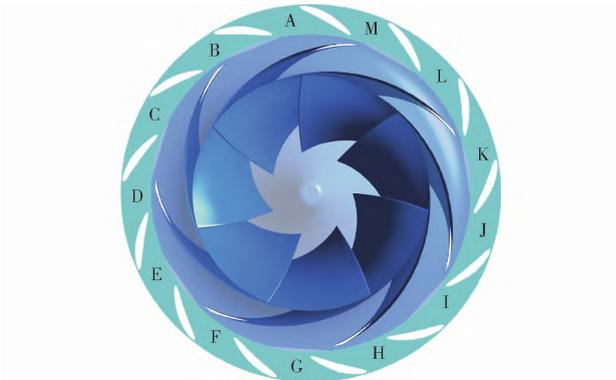


图 17 导叶通道示意图

Fig. 17 Definition of vane diffuser channel

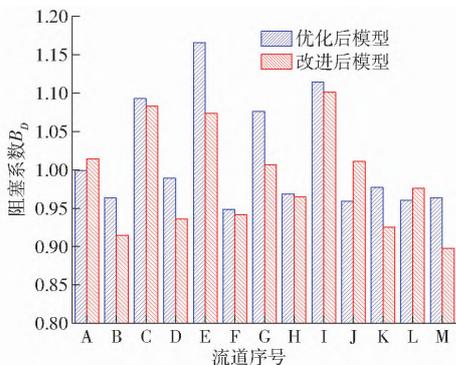


图 18 导叶内阻塞系数对比

Fig. 18 Comparison of blocking coefficients in vane diffuser

$Q_m$ ——设计工况质量流量, kg/s

从图 18 可以看出,优化前后导叶内的阻塞系数存在较大变化,改进后模型相邻导叶流道阻塞系数差值较大,多个流道存在严重堵塞情况,这与

图 16a 中的速度流线分布相对应,流道内漩涡的产生使流道堵塞情况严重,过流能力严重降低,并迫使流体流向相邻流道,导致相邻流道阻塞系数明显升高;优化后的模型导叶流道内无明显严重堵塞情况,原本阻塞严重的导叶流道阻塞系数都得到显著提升,这是由于图 16b 中优化后导叶内的速度流线分布更加均匀;综合来看,优化后导叶内的阻塞情况有所改善,导叶与叶轮的匹配性提高,使得导叶内的流动更加稳定,水力损失减小,从而提高了立式离心泵的水力效率。

为了进一步探究导叶与蜗壳的匹配性对立式离心泵水力性能的影响,给出了改进后模型和优化后模型设计工况下导叶与蜗壳内的速度流线分布。如图 19a 所示,改进后模型蜗壳内速度分布不均且流速较小,蜗壳进口与出口位置速度差不明显,蜗壳内各断面与出口管处的流线分布也较为不均,蜗壳断面面积较小侧流线反而更加密集,这是因为部分导叶流道存在低速区产生漩涡阻塞流道,而相邻导叶流道为高速流动,导致各导叶流道的出流速度和出流量都存在较大差异,且导叶与蜗壳匹配性较低,导叶内的出流方向与蜗壳螺旋形状不符,从而影响到蜗壳的内部流动产生较大水力损失;如图 19b 所示,优化后模型蜗壳断面面积减小,蜗壳进口宽度增大,蜗壳内速度分布较为均匀且蜗壳进口和出口位置速度差明显,说明优化后的蜗壳能够更好地将速度能转换为压力能,同时蜗壳内的流线分布与各断面面

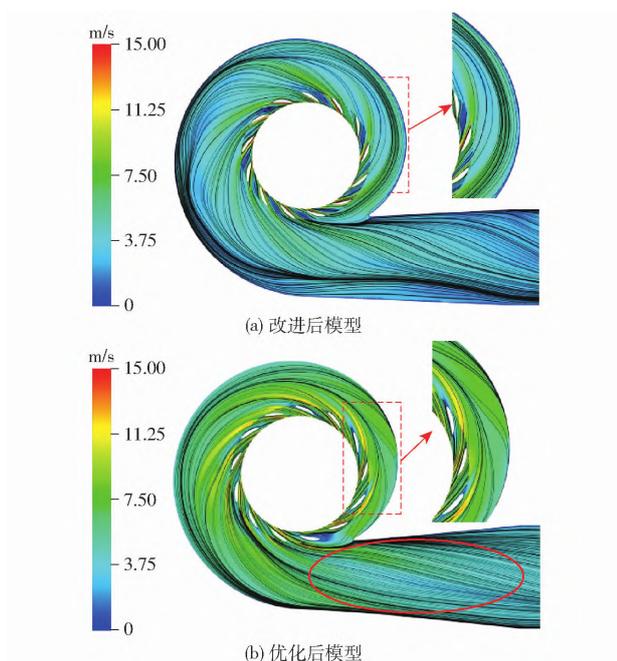


图 19 导叶与蜗壳速度流线分布

Fig. 19 Velocity and streamline distributions of vane diffuser and volute

积变化规律较为一致且导叶出口处的流线方向与蜗壳螺旋形状更加贴合,蜗壳出口处的流线分布也得到了极大改善;上述现象说明优化后导叶与蜗壳的

匹配性更好,导叶内的流动改善,使得蜗壳内的流态也随之改善,因此导叶与蜗壳的匹配性提升也是立式离心泵性能改善的重要原因之一。

#### 4 结论

(1) 进行 Plackett - Burman 筛选试验后发现,导叶进口直径  $D_3$  和蜗壳喉部面积  $S_8$  对立式离心泵水力性能影响较大。

(2) 训练的 BP 神经网络  $R^2$  达到 0.988 1,且优化后的网络预测效率与数值模拟计算效率仅相差 0.32 个百分点,说明 BP 神经网络能够较为准确地映射出泵设计参数与性能参数间的内在联系。

(3) 通过外特性分析发现,优化后模型多工况下水力效率和扬程都有所提高,设计工况下效率达到 90.21%,较原始模型提高 3.61 个百分点,较改进后模型提高 2.61 个百分点,优化后的导叶与蜗壳对设计流量和小流量工况下的泵性能影响更加明显。

(4) 通过内部流场分析发现,优化后模型导叶与叶轮和蜗壳的匹配性显著提高,优化后导叶流道内的阻塞情况有所改善,蜗壳进出口位置速度差更大,蜗壳断面面积较小侧与出口处流线分布更加均匀。

#### 参 考 文 献

- [1] GAO Z X, ZHU W R, LU L, et al. Numerical and experimental study of unsteady flow in a large centrifugal pump with stay vanes [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2014, 136(7): 071101.
- [2] 江伟,李挺,王玉川,等. 导叶式离心泵内部流场数值模拟与试验 [J]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 121 - 128.  
JIANG Wei, LI Ting, WANG Yuchuan, et al. Numerical simulation and experiment of flow field in centrifugal pump with vane diffuser [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 121 - 128. (in Chinese)
- [3] 阳君,袁寿其,裴吉,等. 带导叶离心泵内部旋转失速研究进展 [J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(5): 369 - 373.  
YANG Jun, YUAN Shouqi, PEI Ji, et al. Overview of rotating stall in centrifugal pumps with vaned diffuser [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2015, 33(5): 369 - 373. (in Chinese)
- [4] 朱相源,王凤鸣,谢昌成,等. 大流量下动静干涉对离心泵叶轮做功的影响 [J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3): 12 - 17.  
ZHU Xiangyuan, WANG Fengming, XIE Changcheng, et al. Influence of rotor stator interaction on impeller work for centrifugal pump [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 48(3): 12 - 17. (in Chinese)
- [5] 邓文剑,楚武利,吴艳辉,等. 基于试验设计近似模型优化方法及其在离心泵上的应用 [J]. *西北工业大学学报*, 2008, 26(6): 707 - 711.  
DENG Wenjian, CHU Wuli, WU Yanhui, et al. An optimization method based on design of experiments and its application to centrifugal pumps [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2008, 26(6): 707 - 711. (in Chinese)
- [6] WANG W J, PEI J, YUAN S Q, et al. Optimization of the diffuser in a centrifugal pump by combining response surface method with multi-island genetic algorithm [J]. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2017, 231(2): 191 - 201.
- [7] 王春林,叶剑,曾成,等. 基于 NSGA - II 遗传算法高比转速混流泵多目标优化设计 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(18): 100 - 106.  
WANG Chunlin, YE Jian, ZENG Cheng, et al. Multi-objective optimum design of high specific speed mixed-flow pump based on NSGA - II genetic algorithm [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(18): 100 - 106. (in Chinese)
- [8] 裴吉,甘星城,王文杰,等. 基于人工神经网络的管道泵进水流道性能优化 [J]. *农业机械学报*, 2018, 49(9): 130 - 137.  
PEI Ji, GAN Xingcheng, WANG Wenjie, et al. Hydraulic optimization on inlet pipe of vertical inline pump based on artificial neural network [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(9): 130 - 137. (in Chinese)

- [9] MENG F, LI Y J, YUAN S Q, et al. Multiobjective combination optimization of an impeller and diffuser in a reversible axial-flow pump based on a two-layer artificial neural network [J]. *Processes*, 2020, 8(3): 1–26.
- [10] 童哲铭, 陈尧, 童水光, 等. 基于NSGA-III算法的低比转速离心泵多目标优化设计[J]. *中国机械工程*, 2020, 31(18): 2239–2246.  
TONG Zheming, CHEN Yao, TONG Shuiguang, et al. Multi-objective optimization design of low specific speed centrifugal pumps [J]. *China Mechanical Engineering*, 2020, 31(18): 2239–2246. (in Chinese)
- [11] 赵斌娟, 仇晶, 赵尤飞, 等. 双流道泵蜗壳多目标多学科设计优化[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(12): 96–101.  
ZHAO Binjuan, QIU Jing, ZHAO Youfei, et al. Multi-objective and multidisciplinary optimization of double-channel pump [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12): 96–101. (in Chinese)
- [12] PEI J, GAN X C, WANG W J, et al. Multi-objective shape optimization on the inlet pipe of a vertical inline pump [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2019, 141(6): 061108.
- [13] 陆荣, 袁建平, 李彦军, 等. 基于神经网络模型和CFD的轴流泵自动优化[J]. *排灌机械工程学报*, 2017, 35(6): 481–487.  
LU Rong, YUAN Jianping, LI Yanjun, et al. Automatic optimization of axial flow pump based on radial basis functions neural network and CFD [J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2017, 35(6): 481–487. (in Chinese)
- [14] KIM J H, KIM K Y. Analysis and optimization of a vaned diffuser in a mixed flow pump to improved hydrodynamic performance [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2012, 134(7): 071104.
- [15] 王文杰, 裴吉, 袁寿其, 等. 基于径向神经网络的叶轮轴面投影图优化[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(6): 78–83.  
WANG Wenjie, PEI Ji, YUAN Shouqi, et al. Optimization of impeller meridional shape based on radial basis neural network [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(6): 78–83. (in Chinese)
- [16] WANG L Y, ASOMANI S N, YUAN J P, et al. Geometrical optimization of pump-as-turbine (PAT) impellers for enhancing energy efficiency with 1-D theory [J]. *Energies*, 2020, 13(16): 4120.
- [17] MENTER F R. Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective [J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, 23(4): 305–316.
- [18] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [19] 王春林, 胡蓓蓓, 冯一鸣, 等. 基于径向神经网络与粒子群算法的双叶片泵多目标优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 25–32.  
WANG Chunlin, HU Beibei, FENG Yiming, et al. Multi-objective optimization of double vane pump based on radial basis neural network and particle swarm [J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(2): 25–32. (in Chinese)
- [20] 赖宇阳. Isight 参数优化理论与实例讲解[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012.
- [21] ROSSI M, RENZI M. A general methodology for performance prediction of pumps-as-turbines using artificial neural networks [J]. *Renewable Energy*, 2018, 128(29): 265–274.
- [22] 陈俊英, 姚志华, 张智韬, 等. 大田葵花土壤含盐量无人机遥感反演研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 178–191.  
CHEN Junying, YAO Zhihua, ZHANG Zhitao, et al. UAV remote sensing inversion of soil salinity in field of sunflower [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(7): 178–191. (in Chinese)
- [23] 黄宝洲, 杨俊华, 卢思灵, 等. 基于改进粒子群算法优化神经网络算法的波浪捕获功率预测[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(2): 302–307.  
HUANG Baozhou, YANG Junhua, LU Siling, et al. Wave capture power forecasting based on improved particle swarm optimization neural network algorithm [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(2): 302–307. (in Chinese)
- [24] 马永杰, 云文霞. 遗传算法研究进展[J]. *计算机应用研究*, 2012, 29(4): 1201–1210.  
MA Yongjie, YUN Wenxia. Research progress of genetic algorithm [J]. *Application Research of Computers*, 2012, 29(4): 1201–1210. (in Chinese)
- [25] LIANG T, LU H. A novel method based on multi-island genetic algorithm improved variational mode decomposition and multi-features for fault diagnosis of rolling bearing [J]. *Entropy*, 2020, 22(9): 995.