

大型灯泡贯流泵装置 导叶出口安放角智能优化设计研究

刘 军¹, 施 伟¹, 王希晨¹, 夏臣智¹, 杨 港², 张德胜^{2*}

(1. 南水北调东线江苏水源有限责任公司, 江苏 南京 210019;

2. 江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 目前贯流泵导叶设计与常规轴流泵导叶相同, 但是贯流泵导叶轮毂侧的扩散流动导致其流态与轴流泵导叶大不相同, 为了进一步改善灯泡体区域及导叶的水力性能, 贯流泵导叶的出口安放角作为优化目标, 对导叶出口安放角变化规律实现了参数化, 采用二次函数曲线拟合导叶出口安放角增量的变化规律, 用一种智能优化方法找到从轮毂到轮缘的最优的导叶出口安放角变化规律。采用了最优拉丁超立方、多层前馈神经网络和粒子群算法构建了多目标优化系统。结果表明, 泵装置的扬程提高了0.07 m, 装置效率提高了1.83%; 泵装置的总损失由0.761 m降低到0.624 m, 降低了0.137 m; 经优化后导叶内部速度分布更加均匀, 导叶出口处的脱流现象减缓明显, 导叶出口处及灯泡体内的流速分布较为均匀, 且流线分布光顺, 说明导叶体经优化后可较为理想地对叶轮出口的流动进行调节, 保证了导叶内及灯泡体内流动的稳定; 其次, 对比发现经优化后出水水道内的低速区减少明显, 流动紊乱程度降低, 从而导致导叶及灯泡体内流动损失的降低。

关键词: 灯泡贯流泵; 导叶出口安放角; 优化设计; 效率

中图分类号: S277.9; TH311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7839(2023)07-0001-0007

Research on intelligent optimization design of guide vane outlet placement angle for large bulb tubular pump

LIU Jun¹, SHI Wei¹, WANG Xichen¹, XIA Chenzhi¹, YANG Gang², ZHANG Desheng^{2*}

(1. The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Jiangsu Water Resource Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

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

Abstract: At present, the design method of the guide vane of the Bulb tubular pump is the same as that of the conventional axial flow pump. However, the flow pattern of the guide vane of the Bulb tubular pump is different from that of the axial flow pump because of the diffusion flow at the hub side. In order to further improve the sphere area and guide vane hydraulic performance, the guide vane outlet placement Angle of perforating pump was regarded as optimized goal, and the variation rule of guide vane outlet placement Angle was parameterized. Quadratic function

收稿日期: 2023-04-17

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021011); 江苏省科技项目(BE2021073)

作者简介: 刘军(1963—), 男, 研究员级高级工程师, 主要从事南水北调工程建设与运行管理、调水工程与流体机械研究。E-mail: JSNSBDLJ@sina.com

通信作者: 张德胜(1982—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事流体机械及工程研究。E-mail: zds@ujs.edu.cn

curve was used to fit the change rule of guide vane outlet placement Angle increment and intelligent optimization method was used to find the optimal change rule of guide vane outlet placement Angle from hub to rim. A multi-objective optimization system is constructed using Latin Hypercube, multilayer feedforward neural network and particle swarm optimization algorithm. The results show that the pump head increases by 0.07 m, and the pump efficiency increases by 1.83%. The total loss of the pump unit is reduced from 0.761 m to 0.624 m, which is reduced by 0.137 m. After optimization, the velocity distribution inside the guide vane is more uniform, the backflow phenomenon at the guide vane outlet is significantly slowed down, the velocity distribution of the guide vane outlet and the bulb is more uniform, and the streamline distribution is smoother, indicating that the optimized guide vane body can better regulate the flow at the impeller outlet and ensure the stability of the flow in the guide vane and bulb. Secondly, it is found that the low-speed zone of the outlet channel is significantly reduced after optimization, and the flow disturbance degree is reduced, which leads to the decrease of flow loss in the guide vane and the bulb.

Key words: bulb tubular pump; guide vane outlet placement angle; optimization design; efficiency

南水北调工程作为举世瞩目的跨流域调水工程,其东线工程是世界上规模最大的梯度泵站工程。灯泡贯流泵属于低水头、大流量的泵型,由于其流道直、水力损失小、装置效率高等突出优点,在南水北调东线工程中得到了广泛的应用。2020年,南水北调东线二期工程规划黄河以南干线输水梯级泵站共14座,其中约1/3为低扬程贯流泵装置^[1-2]。这种类型的泵结构尺寸一般较大,一旦启动将进行长时间运行,这对系统的稳定性和效率要求很高。而过流部件的不合理设计会导致内部不稳定流动,且容易造成装置内部的振动和噪声^[3],严重时会导致泵装置无法正常运行。

学者研究发现,灯泡的存在容易导致导叶区域和灯泡尾部的流动扩散,这些高度不稳定的流动将造成更多的能量损失,对系统的效率 and 安全性构成威胁^[4]。赵坤云等^[5]研究了进口导叶的安放角对轴流泵空化性能的影响,在大流量下,导叶的进口角为负值时可提高轴流泵的空化性能;蔡金来等^[6]研究了导叶出口水流的速度环量对大型泵装置不同出水流道方案水力性能的影响,对出水流道的优化、提高轴流泵装置效率具有重要的意义;赵万勇等^[7]通过对不同的潜水轴流泵的导叶进、出口过流断面面积比进行研究,确定了模型泵的最佳导叶流道形状。优化设计是解决该类待优化问题的重要手段,目前应用于流体机械领域的优化设计方法有:试验设计优化方法、近似模型优化方法、智能优化算法优化设计方法等。采用近似模型结合智能优化算法来解决优化设计问题是近年来被广泛运用的一种快速有效的优化方法^[8]。运用近似模型结合智能优化算法找到不同导叶扩散角条件下,从轮

毂到轮缘导叶出口安放角的最优变化规律,从而有效提高贯流泵整体效率。

导叶与贯流泵的匹配关系和导叶段水力损失对灯泡贯流泵的效率有很大的影响^[9]。目前对贯流泵导叶的优化设计,大部分是通过改变叶片数、调节导叶叶片的安放角以及改变叶轮与导叶的轴向间距等对导叶进行优化,用一种智能优化方法找到从轮毂到轮缘的最优的导叶出口安放角变化规律来改善灯泡贯流泵水力性能的研究较少。本文主要采用数值模拟的方法对优化前后的灯泡贯流泵进行模拟研究。

1 计算模型及数值方法

1.1 水力模型

本文优化对象是灯泡贯流泵,其流体区域包括:进水流道、叶轮、导叶、灯泡体、出水流道,如图1所示。多目标优化旨在改善灯泡体区域及导叶的水力性能,在额定工况点下对导叶出口安放角变化规律实现了参数化,采用二次函数曲线拟合导叶出口安放角增量的变化规律,用一种智能优化方法找到从轮毂到轮缘的最优的导叶出口安放角变化规律。三维模型详细参数见表1。



图1 灯泡贯流泵三维模型

1.2 数值模拟及网格无关性验证

使用ANSYS CFX中的SST湍流模型对灯泡贯流泵模型进行全流道数值模拟。通过有限元的有

表1 灯泡贯流泵详细参数

参数	数值
叶轮直径 D (mm)	300.0
叶轮叶片数 Z_1 (个)	3.0
导叶叶片数 Z_2 (个)	7.0
叶顶间隙 δ (mm)	0.3
转速 n (r·min ⁻¹)	1 450.0
设计流量 Q_{des} (m ³ ·h ⁻¹)	1 480.0
设计水头 H (m)	4.5

限体积方法对方程组进行离散,其中对流项采用 High Resolution,湍流项采用 Second Order Backward Euler^[10]。本文对贯流泵计算域的边界条件设定为:进口设置质量流量进口,出口设定为总压出口,参考压力为1个标准大气压。动静交界面在稳态计算时设置为 Frozen Rotor,在瞬态计算时设置为 Transient Rotor Stator,计算收敛精度设置为 10^{-5} 。在

瞬态计算中,时间步长取叶轮每旋转 3° 所用时间,叶轮转动1个周期时间步数为120,总的计算周期为8圈^[11]。

在对贯流泵进行数值计算时,为了防止网格疏密度对贯流泵性能产生影响,开展了贯流泵计算域的网格无关性研究。本次研究主要对贯流泵性能影响较明显的叶轮和导叶进行网格疏密调整。通过对叶轮和导叶节点数进行加密,共生成了6套节点数不同的网格方案。优化前和优化后模型的整个计算域的网格方案如表2所示。随后,对不同的方案分别进行数值计算。本文选取效率对贯流泵的性能进行网格无关性验证。从表2可以看出,当叶轮和导叶网格数分别超过 3.705×10^6 个和 3.033×10^6 个时,整体上网格数对贯流泵性能的影响较小,贯流泵原型和优化模型水力效率最大误差分别为0.16%,0.15%。为节省计算资源和减少计算时间,本文均选用 Mesh4 进行后续的数值计算和特性研究。

表2 叶轮、导叶网格划分方案

方案	优化前 叶轮网格节点数/个	优化后 叶轮网格节点数/个	Model A 导叶网格节点数/个	Model B 导叶网格节点数/个	优化前 效率/%	优化后 效率/%
Mesh 1	1.693×10^6	1.568×10^6	2.854×10^6	2.854×10^6	85.01	87.09
Mesh 2	1.774×10^6	1.687×10^6	2.854×10^6	2.854×10^6	85.52	87.57
Mesh 3	2.035×10^6	2.125×10^6	3.624×10^6	3.624×10^6	86.01	88.04
Mesh 4	3.705×10^6	3.033×10^6	3.624×10^6	3.624×10^6	86.65	88.48
Mesh 5	3.884×10^6	4.105×10^6	3.624×10^6	3.624×10^6	86.69	88.51
Mesh 6	6.936×10^6	5.327×10^6	4.835×10^6	5.625×10^6	86.73	88.59

2 多目标优化设计

本优化系统包括参数化出口角变化规律、最优拉丁超立方采样、近似模型、粒子群算法、计算流体动力学等,优化流程图如图2所示。

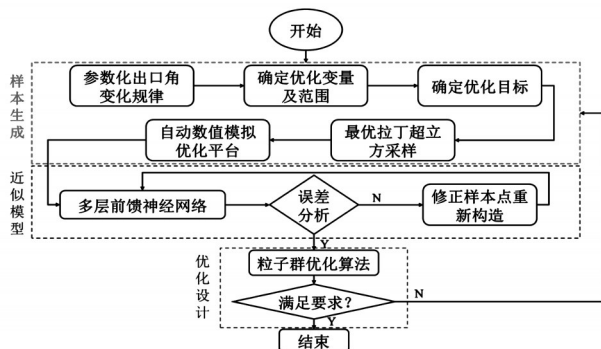


图2 智能优化设计流程

2.1 优化变量及范围的确定

优化设计参数的选择和范围的确定对接下来的优化工作是非常重要的,合适的参数和合理的范围将决定优化的最终效果。对导叶出口安放角变化规律实现了参数化,采用二次函数曲线拟合导叶出口安放角增量的变化规律,即导叶出口安放角从轮毂到轮缘的变化规律可由式(1)表示

$$\theta(r^*) = \theta_0 + a \cdot (r^*)^2 + b \cdot r^* \quad (1)$$

式中, θ_0 为导叶出口安放角靠近轮毂侧的起始值,其值根据导叶扩散角的不同而改变; r^* 为轮毂到轮缘的相对半径; a 和 b 均为方程系数。为了实现导叶出口安放角的变化规律与导叶扩散角相适应,选取 θ_0 、 a 和 b 作为优化设计变量,其中 θ_0 取值范围根据经验给定, a 和 b 则根据拟合的二次函数曲线特征给定范围,最终的优化设计变量范围由不等式(2)控制。

$$75 \leq \theta_0 \leq 85$$

$$\left\{ \begin{array}{l} a \geq 0 \\ b \geq 0 \\ 5 \leq a + b \leq 10 \end{array} \right\} \cup \left\{ \begin{array}{l} a \leq 0 \\ b \geq -2a \\ 5 \leq a + b \leq 10 \end{array} \right\} \quad (2)$$

2.2 优化目标函数

本作品优化的大型贯流泵模型机水力模型设计工况下流量为 $1\,480\text{ m}^3/\text{h}$, 优化设计的目标函数描述如下式所示:

$$\text{Maximum: } F(x) = F_1(x) \quad (3)$$

式中, x 为优化设计变量; F_1 为优化目标。

在优化设计中, 需要最大化优化目标函数来提高贯流泵水力性能, 优化目标是设计流量下的水力效率, 优化目标定义为:

$$F_1 = \eta \quad (4)$$

式中: η 为设计工况下的水力效率。

大型贯流泵设计工况下水力效率计算方法由式(5)给出

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta = \frac{\rho g Q H}{T \omega} \\ H = \frac{P_{\text{tout}} - P_{\text{tin}}}{\rho g} \end{array} \right. \quad (5)$$

式中, Q 为设计工况下的流量; T 为叶轮扭矩; ω 为叶轮角速度; P_{tout} 为泵出口总压; P_{tin} 为泵进口总压。

2.3 DOE 试验设计与数值模拟

Design of Experiments 简称 DOE, 试验设计 DOE 是数理统计学中的一部分, 在优化过程中是非常重要的步骤之一。本优化采用 DOE 试验设计中的最优拉丁超立方设计方法对上述 3 个优化变量在设计范围内采样 90 组样本数据, 为下节中的近似模型建立提供足够的样本点。

根据 90 组样本数据得到 90 个不同的导叶出口安放角变化规律方程如图 3 所示, 采用插值法将各导叶无量纲相对半径代入方程得到各相对半径位置的导叶出口安放角取值, 从而对导叶重新进行三维造型并进行数值模拟计算得到优化目标值。考虑到人为修改模型并进行数值模拟工作量庞大, 优化周期过长; 本优化采用 CFturbo 软件实现导叶三维参数化造型, 并基于 Isight 平台搭建了贯流泵自动数值模拟优化平台, 将 CFturbo、ICEM CFD、CFX 软件进行集成, 实现了从三维造型到数值模拟过程的自动化运行, 以快速得到 90 组样本数据所对应的优化目标值, 极大地缩短了优化周期, 提高了优化设计效率。软件集成图和软件运行框架示意图如图 4 所示。

2.4 近似模型的建立

利用上节中的贯流泵自动数值模拟优化平台

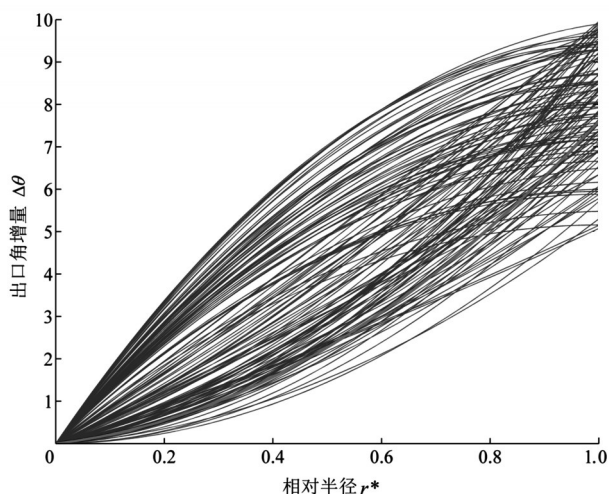


图3 导叶出口安放角变化规律方程采样

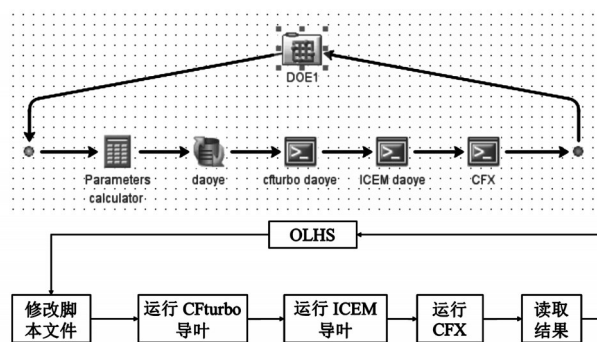


图4 软件集成和运行框架

得到了 90 组样本数据库, 本文采用多层前馈神经网络来拟合 3 个优化变量和优化目标值之间的关系, 多层人工神经网络模型具有很强的逼近复杂非线性函数的能力且不需要数学假设。

在 MATLAB 中编写了多层前馈神经网络代码, 以 3 个优化变量的值作为输入量, 对应的优化目标值作为输出量来训练前馈神经网络; 选用多层前馈神经网络含有 3 个隐藏层, 对应的神经元数目分别为 5、7、4; 将 70% 数据作为训练集, 15% 作为验证集, 15% 作为测试集用来测试神经网络的预测效果, 训练后的神经网络通过 R^2 值来进行误差分析, R^2 越接近 1 表示模型可信度越高, 训练效果越好, 从图 5 可以看出测试集 R^2 大于可接受水平 0.90, 即可视为此网络满足精度要求。

2.5 优化算法寻优

粒子群算法是近 20 年提出来的一种新型群智能全局优化算法。因其算法结构简单易行、收敛速度快和设置参数少等优点, 广泛应用于函数优化、神经网络训练、模糊系统控制以及其他遗传算法的应用领域, 同时也应用于能源、机械和化学等工程

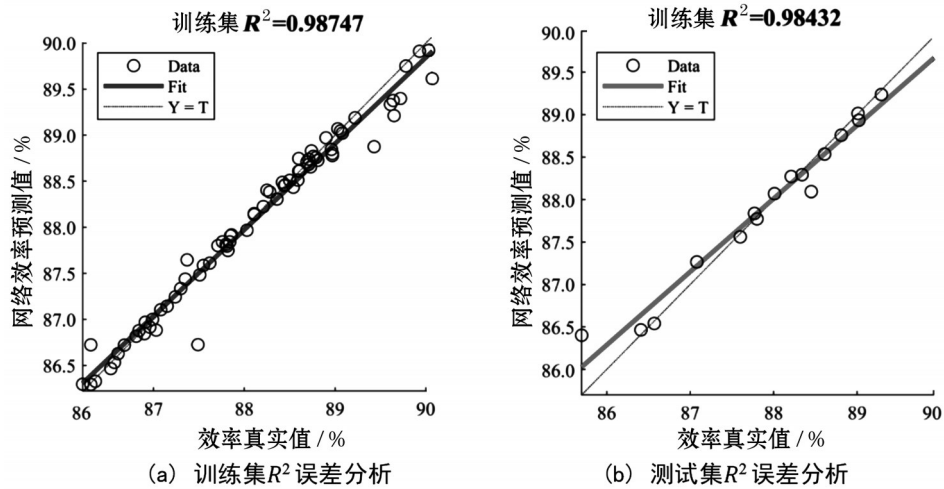


图5 多层前馈神经网络误差分析

领域,成为国际上优化算法的研究热点,是未来优化的重要方向之一。

粒子群优化算法是近些年来提出的一种智能全局优化算法,是 Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年首先提出,基本思想是受自然界内鸟群和鱼群搜索食物方式的启发,该算法在每一步的迭代中,粒子通过两个“极值”位置来更新自己的位置,一个为粒子

本身所得到的最优解称为个体极值,另一个极值是整个种群找到的最优解称为全局极值,粒子更新的速度和位置公式由式(6)、(7)给出;将训练好的多层前馈神经网络作为评价粒子群算法适应度值的响应模型,通过粒子群算法不断地改变前馈神经网络的适应度值,并寻找使得目标效率最高的最优参数组合,粒子群算法的参数设置如表3所示。

表3 粒子群算法参数设置

粒子群算法 参数设置	最大迭代 次数	粒子个数	惯性权重	全局增量	粒子增量	区域精度	最大收敛 步数	运行失败的 罚值	运行失败的 目标值
取值	100	24	0.9	0.8	0.9	0.1	5	10^{-4}	10^{-4}

$$v_{id} = \omega v_{id} + c_1 r_1 (p_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (p_{gd} - x_{id}) \quad (6)$$

$$x_{id} = x_{id} + v_{id} \quad (7)$$

式中, ω 为惯性因子,其值越大全局寻优能力越强; p_{id} 表示第*i*个变量的个体极值*d*维; p_{gd} 表示全局最优解的第*d*维; x_{id} 表示*d*时刻第*i*个粒子的位置; v_{id} 表示*d*时刻第*i*个粒子的速度; c_1 和 c_2 分别为自身认识学习速度和社会学习速度的学习因子,通常设置为常数2; r_1 和 r_2 为区间[0,1]上的随机因子。

3 结果与讨论

3.1 优化结果

通过粒子群算法与多层前馈神经网络相耦合,对后置灯泡贯流泵导叶出口安放角规律进行了自适应优化设计,经粒子群算法智能寻优后最终得到导叶出口安放角的变化规律如图6所示,优化得到导叶出口安放角靠近轮毂侧起始值 $\theta_0=81.8^\circ$,导叶出口安放角的增量 $\Delta\theta=7.6^\circ$,其导叶出口安放角增长规律为从导叶轮毂至轮缘先缓慢增加再迅速增

加。根据导叶出口安放角变化规律,结合导叶轴面图与翼型截面可得到优化导叶的二维翼型截面图,其与常规出口角 90° 导叶的翼型截面对比如图7所示。从图7可以看出,与常规导叶出口安放角相比,优化后的导叶在轮毂处减幅较大,在轮缘处基本接近 90° 。

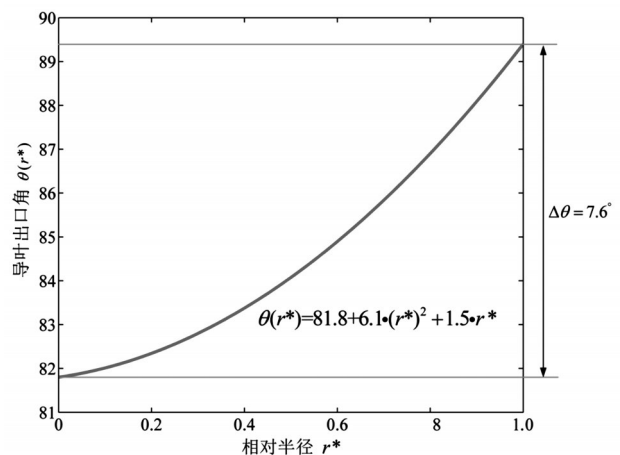


图6 优化后的导叶出口安放角变化规律

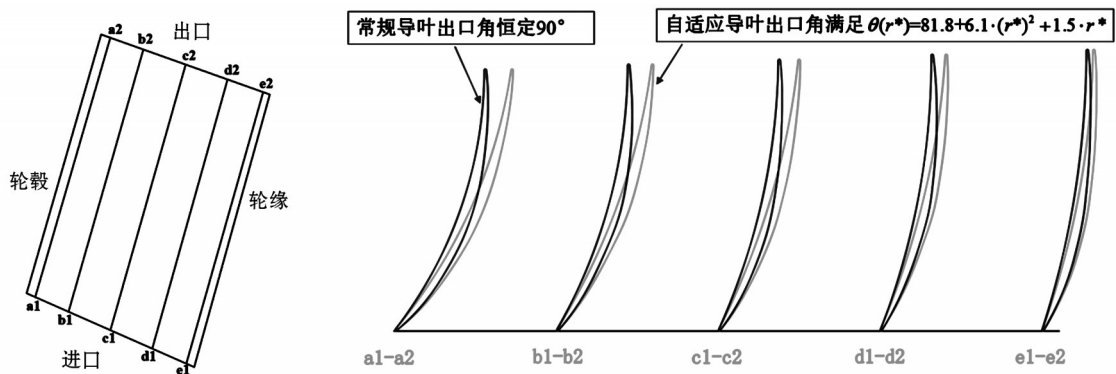


图7 导叶翼型截面对比

3.2 水力性能

基于导叶二维设计图,通过CFturbo生成对应的三维模型,基于前期采用的后置灯泡贯流泵装置模型,对优化设计后的导叶进行了全三维非定常数值模拟计算,并与常规90°导叶的水力性能进行了对比分析。表4和图8分别展示了优化前后泵装置的基本外特性及流动损失情况。从表4可以看出,导叶优化后泵装置的扬程提高了0.07 m,装置效率提高了1.83%,对于大型贯流泵装置来说,效率指标提升可观。从流动损失情况来看,泵装置的总损失由0.761 m降低到了0.624 m,对于损失降低贡献最大的部分是灯泡体内流动损失的降低,说明在叶轮不变的情况下,对导叶进行自适应智能优化可改善导叶对叶轮出口流动的控制能力及对速度能的回收能力,从而减小了导叶后灯泡体段的流动损失。

表4 优化前后贯流泵装置外特性对比

导叶方案	叶轮扬程/ m	叶轮效率/ %	装置扬程/ m	装置效率/ %
原始方案	5.12	94.62	4.71	86.65
优化方案	5.12	94.62	4.78	88.48

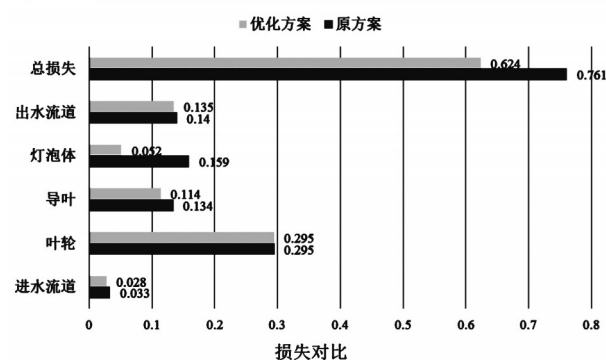
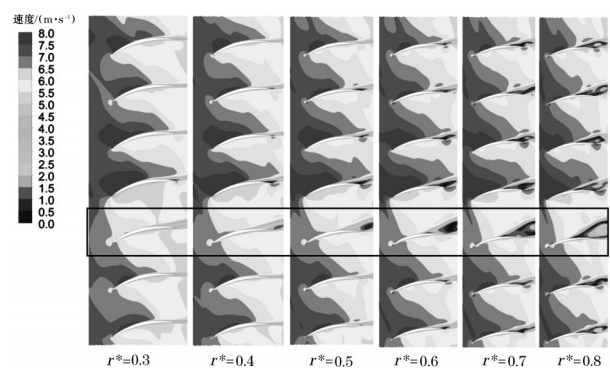
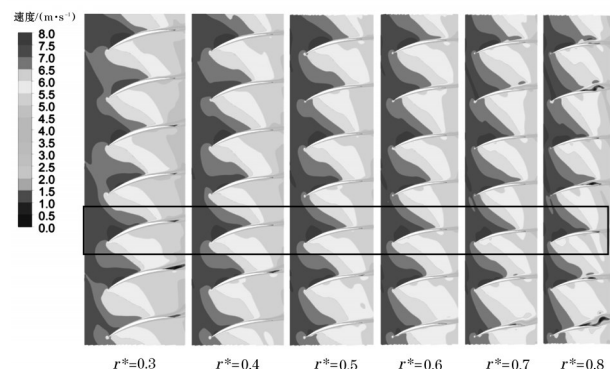


图8 优化前后贯流泵装置流动损失分析

图9展示了优化前后导叶轮毂至轮缘不同相对半径 r^* 处的速度分布展开图。优化前导叶各流面速度分布不均匀,导叶进口吸力面处速度梯度较大,从而导致导叶内的冲击损失较大。在导叶出口处,由于导叶体内的扩散流动,原始导叶对叶轮出口的流动控制并不理想,从而导致导叶出口处漩涡的产生及脱流现象的产生。导叶出口处流动的不稳定会进一步影响灯泡体及出水流道内的流动情况,致使泵装置内部的流动损失增加。图9(b)为经过自适应优化后的导叶速度云图,对比分析发现,经优化后导叶内部速度分布更加均匀,导叶出口处



(a) 原始模型



(b) 优化模型

图9 优化前后导叶展开面速度云图对比

的脱流现象减缓明显,从而导致导叶及灯泡体内流动损失的降低。

图10为优化前后泵装置典型截面流速对比,流体由泵装置进口流入,经旋转的叶轮进行能量施加后以较高的速度流出叶轮,在导叶段进行流动控制及速度能回收后进一步流向灯泡体及出水流动道中。对比分析发现,优化前后进水流道内流态均保持良好,优化前,灯泡体及出水流动道中的速度分布不均匀,尤其在出水流动道中,有大面积的低速区产生,结合图11中展示的流线分布可进一步发现,优化前导叶出口处的流动略微紊乱,而在灯泡体尾部及出水流动道内,流场紊乱较为剧烈,从而导致了出水流动道内的流动损失较大。从优化后的图10(b)及图11(b)可以看出,经导叶优化后,导叶出口处及灯泡体内的流速分布较为均匀,且流线分布光顺,说明导叶体经优化后可较为理想地对叶轮出口的流动进行调节,保证了导叶内及灯泡体内流动的稳定。其次,对比发现经优化后出水流动道内的低速区减少明显,流动紊乱程度降低,但优化后的出水流动道内仍存在部分低速区,流线仍有不同程度的波动,这是由于流体经灯泡体至出水流动道的过程中,流动面积突然扩散,导致边界对流体的约束能力降

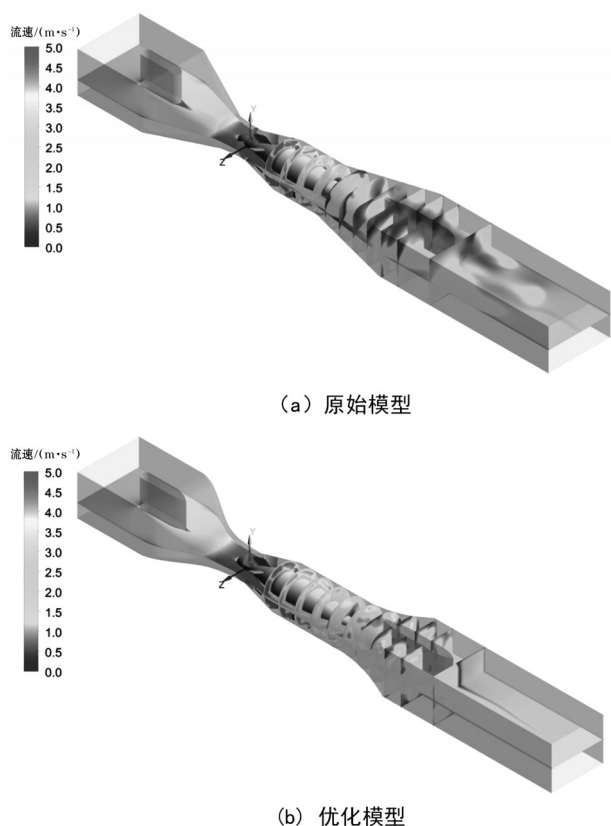


图10 优化前后典型截面流速对比

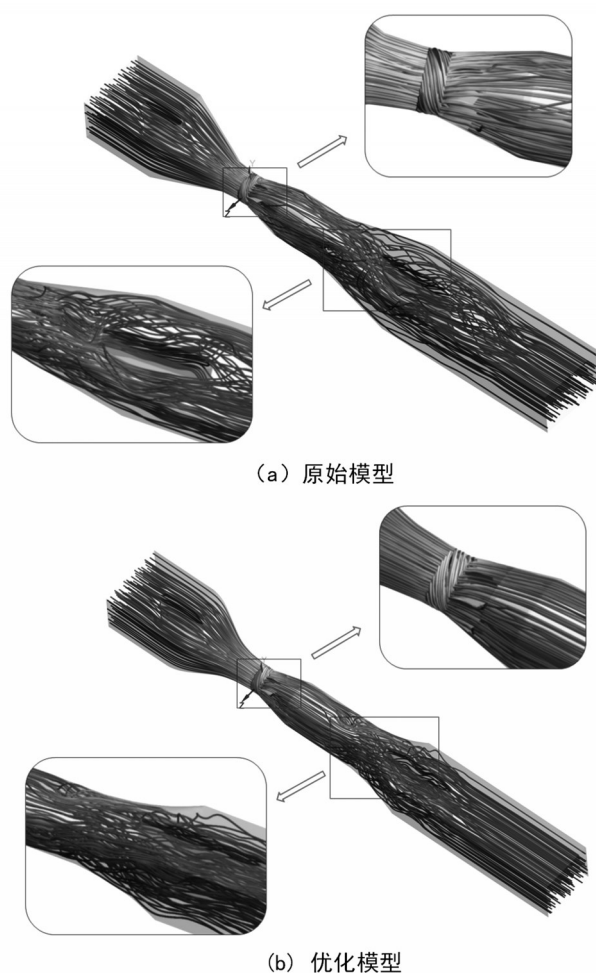


图11 优化前后贯流泵装置流线对比

低,进而导致流动的不稳定现象产生。总体来看,经导叶自适应智能优化后,整个泵装置的水力性能提升明显,流场脉动有所减。

4 结 语

本文以贯流泵导叶的出口安放角作为优化目标,最优拉丁超立方采样、近似模型、粒子群算法、计算流体动力学,对灯泡贯流泵水力性能开展了多目标优化研究,主要研究结论如下:

(1)对导叶出口安放角变化规律实现了参数化,采用二次函数曲线拟合导叶出口安放角增量的变化规律,采用DOE试验设计中的最优拉丁超立方设计方法对上述3个优化变量在设计范围内采样90组样本数据,以3个优化变量的值作为输入量,对应的优化目标值作为输出量来训练前馈神经网络,采用多层前馈神经网络来拟合3个优化变量和优化目标值之间的关系,测试集 R^2 为0.98432,大于可接

(下转第11页)

参考文献:

- [1] 高术仙. 河流典型弯段水流结构及动力特性研究[D]. 天津:天津大学,2007.
- [2] 李成光,槐文信,曾玉红,等. 强弯河道水流结构及离散特性研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2014,42(2):64-67.
- [3] 白玉川,李彬,徐海珏,等. 基岩弯曲河段洪水水流结构的试验研究[J]. 水科学进展,2022,33(1):108-109.
- [4] 吴芳,汪院生. 江苏省中小河流治理工程设计实践与思考[J]. 水利规划与设计,2013(7):64-66.
- [5] 吴青松,马军霞,左其亭,等. 塔里木河流域水资源-经济社会-生态环境耦合系统和谐程度量化分析[J]. 水资源保护,2021,37(2):55-62.
- [6] 左其亭. 人水关系学的基本原理及理论体系架构[J]. 水资源保护,2022,38(1):1-6.
- [7] 刘月琴,万艳春. 弯道水流紊动强度[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2003,31(12):91-93.
- [8] 王虹,王连接,邵学军,等. 连续弯道水流紊动特性试验研究[J]. 力学学报,2013,45(4):525-533.
- [9] 白向华. 三维视角下灌区弯道水流对工程影响的最不利位置研究[J]. 水利技术监督,2019(6):57-58.
- [10] 李润清. 关于强弯河道水流结构及离散特性分析[J]. 水利规划与设计,2017(6):94-95.
- [11] 周斌. 多流道式弯道在黄山洞水库溢洪道加固中的应用[J]. 水利规划与设计,2014(5):83-84.
- [12] 赵丹. 弯道水流调整池结构参数对流态改善能力的影响[J]. 水利技术监督,2018(3):99-101.
- [13] 王家琪,徐霖玉,张哲,等. 丁坝挑角对弯道防护的影响[J]. 水利科技与经济,2015,21(3):37-39.
- [14] 温文杰. 丁坝挑角对弯道水流流态影响的模型试验研究[J]. 水利技术监督,2022(10):231-233.
- [15] 于洋,艾丛芳,金生. 弯曲度对弯道水流结构影响的三维数值模拟研究[J]. 水利与建筑工程学报,2018,16(3):218-223.
- [16] 韩国其,汪德耀,许协庆. 潮汐河口三维水流数值模拟[J]. 水利学报,1990(6):54.
- [17] 丁君松,王树东. 漫滩水流的水流结构及其悬沙运动[J]. 泥沙研究,1989(1):82-87.

(上接第7页)

受水平0.90,表示模型可信度高,训练效果好。通过粒子群算法与多层前馈神经网络相耦合,最终得到导叶出口安放角的变化规律。

(2)基于寻优得到导叶出口安放角的变化规律,通过CFturbo生成对应的三维模型,对优化设计后的导叶进行了三维非定常数值模拟计算,并与常规90°导叶的水力性能进行了对比分析。优化后泵装置的扬程提高了0.07 m,装置效率提高了1.83%;泵装置的总损失由0.761 m降低到了0.624 m。导叶出口处及灯泡体内的流速分布较为均匀,且流线分布光顺,说明导叶优化后可较为理想地改善了导叶和灯泡体内的水流流态。

参考文献:

- [1] 刘辉. 南水北调东线工程回顾与展望[J]. 治淮,2020(12):23-26.
- [2] 张仁田,朱红耕,卜舸,等. 南水北调东线一期工程灯泡贯流泵性能分析[J]. 排灌机械工程学报,2017,35(1):32-41.
- [3] 唐学林,王秀叶,贾玉霞. 基于流固耦合的灯泡贯流泵叶轮强度分析[J]. 排灌机械工程学报,2014,32(11):921-926.
- [4] Sun Longyue, Pan Qiang, Zhang Desheng, et al. Numerical study of the energy loss in the bulb tubular pump system focusing on the off-design conditions based on combined energy analysis methods[J]. Energy, 2022, 258 (NOV.1):973-988.
- [5] 赵坤云,胡明健. 美国的生物护岸工程[J]. 水利水电快报,2000,21(24):8-10.
- [6] 蔡金来. 轴流泵出口环量对出水道损失影响的数值模拟研究[D]. 扬州:扬州大学,2009.
- [7] 赵万勇,谢超,高振义. 导叶过流断面面积的变化对潜水轴流泵水力性能的影响研究[J]. 煤矿机械,2022,43(4):51-54.
- [8] Yang Gang, Shen Xi, Shi Lei, et al. Numerical investigation of hump characteristic improvement in a large vertical centrifugal pump with special emphasis on energy loss mechanism[J]. Energy, 2023, 273.
- [9] BOUSSINESQ J. Essay on the theory of water flow. (Essai sur la théorie des eaux courantes.).
- [10] VERSTEEG H K, MALALASEKERA W. An introduction to computational fluid dynamics[M]. 1995.
- [11] DAVID C, WILCOX. Reassessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models [J]. AIAA Journal. 1988,26(11):1299.