

基于 Fluent/ISIGHT 贯流式潜水泵流场与结构优化研究

刘国勇^{1†}, 徐培智¹, 王志明², 尹忠俊¹, 郝鹏鹏¹, 朱冬梅¹

(1. 北京科技大学机械工程学院, 北京 100083;

2. 湖北航天化学技术研究所, 湖北 襄阳 441001)

摘要:针对目前潜水泵体积笨重的问题,利用 Fluent 软件,对贯流式潜水泵进行全流场仿真模拟.基于 CFturbo 软件经验叶轮结构,对潜水泵流场特性进行定常仿真分析.基于 ISIGHT 优化平台通过 CFturbo 和 PumpLinx 实现叶轮结构的参数化建模和仿真过程,针对扬程、效率和轻量化 3 个优化目标,借助多岛遗传算法进行叶轮结构优化.优化后结果表明,在额定流量工况下,扬程提升 5.1%,水力效率提升 2.1%,叶轮直径减小 1.9%,不同流量工况下的潜水泵性能总体优于优化前的性能.根据现场测量的实验数据,在额定流量工况下,扬程误差为 0.31%,证明优化结果可靠,效果良好.

关键词:潜水泵;流场;Fluent;ISIGHT;遗传算法

中图分类号:TH312

文献标志码:A

Study on Flow Field Characteristics and Structure Optimization of Submersible Pump Based on Fluent and ISIGHT

LIU Guoyong^{1†}, XU Peizhi¹, WANG Zhiming², YIN Zhongjun¹, HAO Pengpeng¹, ZHU Dongmei¹

(1. School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Hubei Institute of Aerospace Chemical Technology, Xiangyang 441001, China)

Abstract: The software Fluent was used to simulate the full flow field of the submersible pump, to solve the bulky volume of submersible pumps. Based on the experience impeller structure of CFturbo software, the steady simulation analysis was conducted on the flow field characteristics of a submersible pump. The parametric modeling and simulation process of the impeller structure was realized by the ISIGHT optimization platform with CFturbo and PumpLinx. The impeller structure was optimized by using the Multi-island genetic algorithm for the three optimization objectives: head, efficiency, and volume. The optimized results show that the head is increased by 5.1%, the hydraulic efficiency is increased by 2.1%, and the impeller diameter is reduced by 1.9% under the rated flow condition. The performance of the submersible pump under different flow conditions is generally better than that before optimization. According to the experimental data measured in the field, under the rated flow condition, the head error is 0.3%, which proves that the optimization results are reliable and submersible pump performance is good.

Key words: submersible pumps; flow fields; Fluent; ISIGHT; genetic algorithms

* 收稿日期:2021-07-19

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFC0810500), National Key Research and Development Program of China(2018YFC0810500)

作者简介:刘国勇(1969—),男,湖北宣城人,北京科技大学副教授,博士

† 通信联系人, E-mail: gy_liu666@ustb.edu.cn

矿用潜水泵^[1]作为机电一体化新型排水设备,具有不怕水淹、高扬程、大流量等优势,在处理透水事故中发挥积极作用,是应对矿井水灾的重要抢险工具^[2].潜水泵的结构优化设计方法发展至今,从最初的速度系数法优化设计、损失极值法优化设计,衍化到如今结合计算机技术的计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)优化设计和多工况优化设计法^[3-4],大大缩短了泵的设计周期.董敏等^[5]选择多目标优化与数值模拟相结合的方法,利用遗传算法对目标函数进行多目标优化求解.王玉勤等^[6]建立以泵汽蚀余量为目标函数的优化数学模型,采用正交试验对离心泵进行优化设计.Wang等^[7]采用直接数值模拟方法,研究了单向耦合条件下平面湍流壁面射流中惯性粒子的分布和运动规律.邱勇等^[8]采用 Mixture 多相流模型对双叶片泵内部流动进行三维非定常模拟计算,分析了不同工况和颗粒物性下泵径向力特性的变化规律.曹卫东等^[9]基于 CFX 软件,采用标准 $k-\varepsilon$ 模型对装配了不同尺寸后盖板的叶轮、导叶、进出水段的矿用抢险多级排水泵的全流场模型进行了数值模拟.21 世纪以来,随着计算机技术的高速发展,CFD 也随之日趋成熟^[10].Wang 等^[11]采用混合多相流模型、RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型和协调一致压力耦合方程的半隐式方法(Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent, SIMPLEC)算法对离心泵的两相流进行了模拟,分析了颗粒尺寸对内部压力分布、固体体积分布和外部特性的影响.以上关于潜水泵的结构优化的研究仍然停留在对单一结构参数影响分析,对于泵内流场的复杂流域结构,必须综合多种结构参数整体分析结构影响特点,从而得出最优化的结果.

本文针对贯流式潜水泵的流场特性进行了系统分析,提出一种综合扬程、效率和轻量化目标的多结构参数整体优化方案,基于 Fluent 流体仿真软件建立贯流式潜水泵全流场仿真模型.分析叶轮结构参数对潜水泵流场流动特性的影响,通过 ISIGHT 优化平台实现参数化潜水泵建模仿真过程,采用智能优化算法对潜水泵结构参数进行多目标多因素优化,确定具体的优化结构.本文研究旨在优化出一种能满足矿井水突事故抢险救灾需求的大流量轻量化高效矿用潜水泵.

1 CFD 仿真模型建立

1.1 流场模型建立

贯流式潜水泵吸水方式是由下至上,在抢险吸水的过程中能够为电动机发热段提供持续冷却散热,保证电动机长时间工作的稳定性和安全性.在应对不同复杂抢险救灾环境时可以根据需求将多个潜水泵串联,实现增大扬程的效果,避免多级潜水泵的体型笨重和运输困难问题,可以柔性应用于各种复杂抢险情况.

贯流式潜水泵结构示意图如图 1 所示,主要包括导叶体、叶轮、进水段、电动机以及主轴等机械部件.基于这种贯流式潜水泵结构通过 SpaceClaim 中的体积抽取工具获取水体结构模型,体积抽取工具能够完好地获取流体机械内部的封闭流体域,然后对支撑结构进行简化,得到潜水泵的流场水体模型.贯流式潜水泵流场三维模型和截面图如图 2 所示.

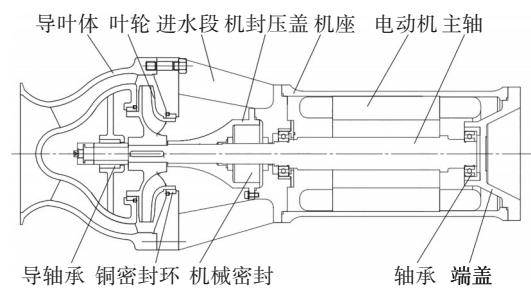
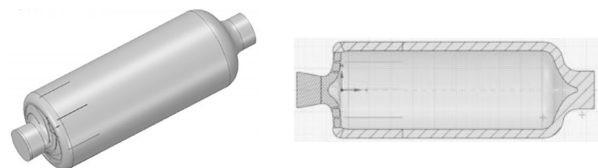


图 1 贯流式潜水泵结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the structure of a tubular submersible pump



(a) 贯流式潜水泵流场三维模型 (b) 三维模型截面图

图 2 贯流式潜水泵流场三维模型和截面图

Fig.2 Three-dimensional model of flow field and sectional view of tubular submersible pump

在潜水泵流体域中,为了引导叶轮水流旋转方向,在贯流式蜗壳结构与叶轮出水口外添加轴向导叶,将流体引流成轴向方向,提高流体结构的叶轮旋转能量利用效率,从而起到提高扬程和效率的作用.数值计算过程中将整体贯流式潜水泵水体结构划分为进水段、叶轮和外流道三部分,如图 3 所示.

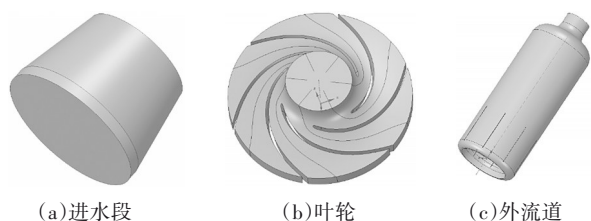


图 3 贯流式潜水泵水体结构三维模型

Fig.3 Three-dimensional model of water structure of tubular submersible pump

1.2 网格划分与无关性验证

采用 ICEM-CFD 软件分别对进水段、叶轮以及外流道流域进行网格划分. 进水段采用 O-Grid 方法划分为六面体结构网格, 因叶轮和外流道流域为不规则的空间曲面结构, 故采用非结构四面体网格, 然后通过 Make Polyhedra 功能转化为多面体网格. 各水体部分网格模型如图 4 所示.

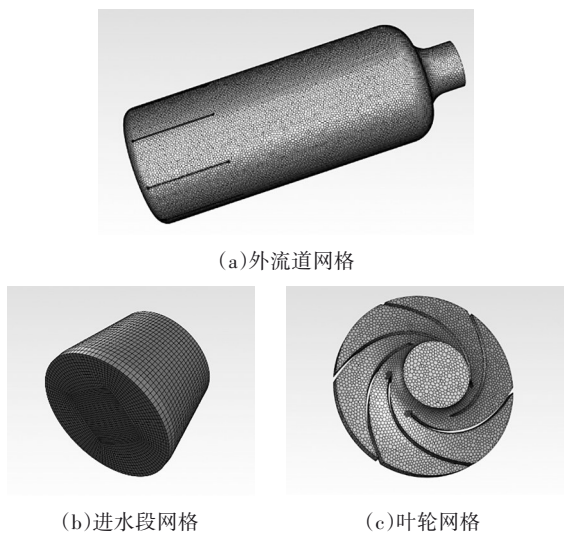


图 4 贯流式潜水泵流场网格模型

Fig.4 Grid model of flow field of tubular submersible pump

流场数值模拟精度受网格数量和质量的影响, 而网格数量和质量又受到计算机资源配置的限制. 因此, 需要进行网格独立性验证. 采用 Fluent 流体仿真软件对贯流式潜水泵进行稳态定常计算, 根据网格数量与扬程关系来验证网格无关性. 结果如表 1 所示.

由表 1 可知, 当网格数量大于 146 万时, 潜水泵扬程的误差值在 1.0% 以内, 基本可以认为网格数量达到 146 万后仿真结果与网格数量无关. 考虑计算准确性和计算资源配置合理性, 选取方案 d 作为后续仿真模拟的网格数量.

表 1 网格无关性验证

Tab.1 Grid independence validation

方案	网格数	扬程/m	误差/%
a	261 321	101.3	17.0
b	541 323	112.4	7.9
c	823 214	118.3	3.1
d	1 463 282	121.6	0.4
e	2 231 546	122.4	0.2
f	2 864 312	122.1	0

1.3 边界条件及求解器设置

采用 Fluent 软件对贯流式潜水泵进行全流场仿真, 全局设置重力加速度 9.81 m/s^2 , 方向为轴方向, 在稳态计算中, 叶轮流体区域设置为框架运动中的旋转运动, 旋转方向由右手定则确定, 转速 N 为 $3\ 600 \text{ r/min}$.

进水口: 本文的潜水泵设计额定流量为 $240 \text{ m}^3/\text{h}$, 采用速度入口, 速度大小 v 根据流量和入口截面确定:

$$v = \frac{Q}{\rho S} = \frac{Q}{\rho \pi R^2} \quad (1)$$

式中: Q 为泵的流量; ρ 为流体的密度; S 为截面面积; R 为截面半径.

出水口采用压力出口. 静壁面采用无滑移壁面, 选用标准粗糙模型, 粗糙度值设置为 0.025 mm . 旋转壁面的叶轮部分选用旋转运动, 采用无滑移壁面. 交界面选择进水段与叶轮进口的交界面及叶轮出口与贯流式外流道入口的交界面. 计算定常过程的流体主要为液态水, 选用压力基础求解器, 求解算法选用压力耦合方程的半隐式方法 (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations, SIMPLE) 算法, 插值计算方法平衡考虑精度和计算量后选用二阶迎风格式. 初始化进水口, 设定计算步数, 开始计算直到结果收敛.

2 计算结果与分析

2.1 叶轮结构参数定义

本文潜水泵水力性能的主要指标为扬程与水力效率, 叶轮为中心对称结构. 叶轮参数结构定义如图 5 所示.

由图 5 可知, 潜水泵的叶轮结构参数主要有 6 个: ①叶轮直径 d_2 , 叶轮的主要尺寸指标; ②叶片包角 φ , 叶片两端与轴心连线形成的夹角; ③出口安放

角 β_2 ,叶片出口切线与叶轮圆周法线夹角;④叶片厚度 s ,叶片厚度设为均匀厚度;⑤出口宽度 b_2 ,叶轮出口的宽度,也可以认为叶轮出口的厚度;⑥叶片数量 n .

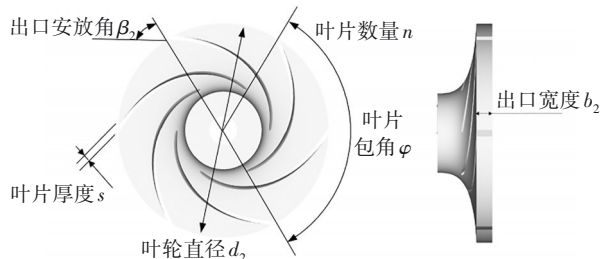


图5 叶轮结构参数定义

Fig.5 Impeller structure parameters definition

CFturbo 旋转机械建模软件按照实际潜水泵流量 240 m³/h、扬程 120 m、转速 3 600 r/min 要求得到叶轮结构经验参数,如表 2 所示.后续的叶轮结构参数在此基础上进行优化和分析.

表 2 CFturbo 叶轮结构经验参数

Tab.2 CFturbo experiential impeller structure parameters

叶轮直径 d_2/mm	出口宽度 b_2/mm	叶片数 量 n	叶片厚 度 s/mm	出口安放 角 $\beta_2/(\text{°})$	叶片包角 $\varphi/(\text{°})$
276	20	6	4.6	32	120

2.2 潜水泵性能参数

潜水泵的主要水力性能指标为扬程与水力效率,其详细说明如下.

1)扬程是指水泵能够扬水的高度,通常以符号 H 来表示,单位为 m,计算公式为:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (2)$$

式中: P_1 、 P_2 分别为潜水泵进、出口处液体总压力; v_1 、 v_2 分别为潜水泵进、出口处液体的绝对速度; Z_1 、 Z_2 分别为潜水泵进、出口处相对任一基准垂直方向距离的位置; g 为重力加速度.

2)水力效率为有效功率和轴功率之比,用 η 表示,其公式表达如下:

$$\eta = \frac{P_e}{P} = \frac{\rho g Q H}{M \omega} \quad (3)$$

式中: M 为叶轮轴输入力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; ω 为叶轮角速度, rad/s .

2.3 叶轮直径对潜水泵性能的影响

建立叶轮直径 d_2 分别为 266 mm、276 mm、286 mm 的仿真模型,通过潜水泵定常仿真模拟,分析不同叶轮直径的流场影响规律.

图 6 为不同流量工况下叶轮直径对扬程和水力效率影响曲线.由图 6 可知,当流量为 160~440 m³/h 时,随着流量增大,流速增大,导致水泵内部水流消耗扬程增加,有效扬程降低,所以扬程随着叶轮直径的增大而增大.当流量为 160~360 m³/h 时,水力效率随着叶轮直径增大而降低.当流量为 360~440 m³/h 时,水力效率基本随着叶轮直径增大而增大,水力效率极值点随着叶轮直径的增大逐渐向小流量区偏移.随着叶轮直径增大,叶片尺寸也增大,叶片扫掠面积增大,对于流体的驱动力更大,所以扬程会提升.当潜水泵中的流量逐渐增大时,叶轮中的流体速度增大,单位时间内流体和叶片表面接触的摩擦力增大,导致流体局部摩擦能量损失增加.由图 6(a)可以看出,公式(3)中流量和扬程的乘积大小是随着流量的增大而减小的,所以,叶轮在大流量范围的水力效率降低.

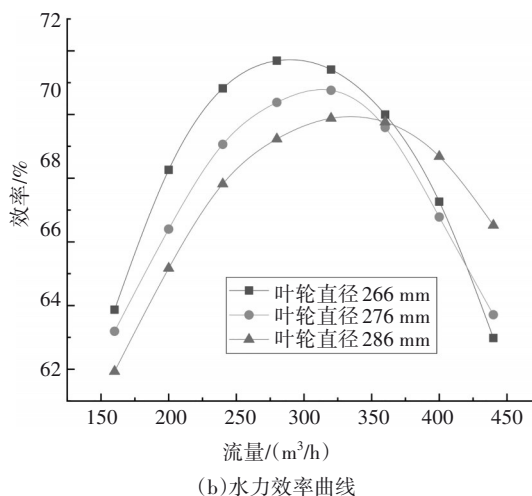
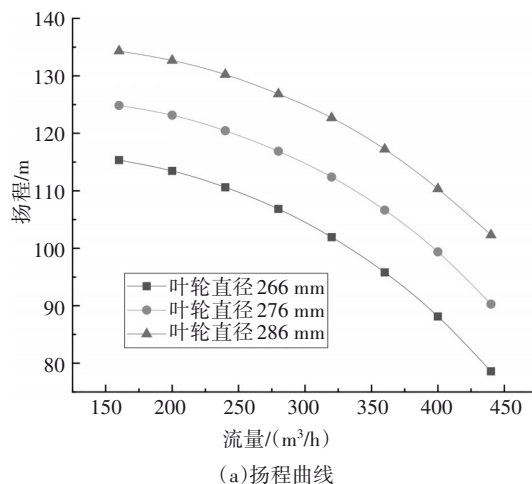


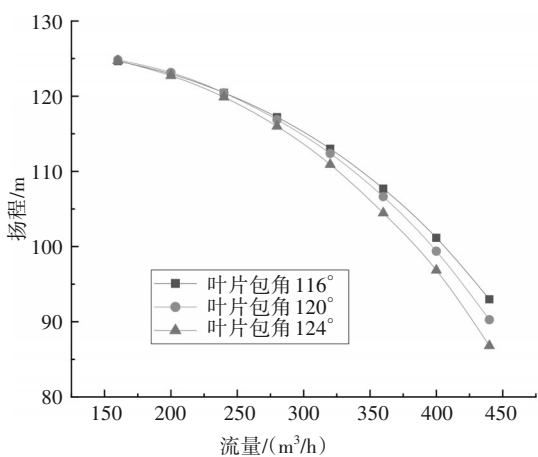
图 6 不同流量工况下叶轮直径对扬程和水力效率影响曲线

Fig.6 Influence curve of impeller diameter on head and efficiency under different flow conditions

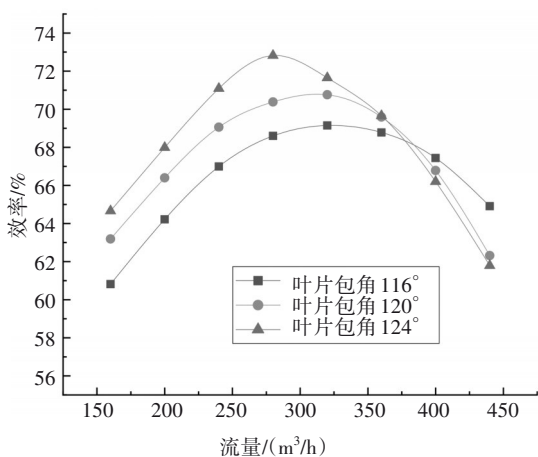
2.4 叶轮包角对潜水泵性能的影响

叶片包角是影响叶轮对流体控制能力的重要结构参数,为了分析叶轮结构的影响规律,建立叶片包角 φ 分别为 116° 、 120° 、 124° 的 3 组不同潜水泵全流场仿真模型.

图 7 为不同流量工况下叶片包角对扬程和水力效率影响曲线.由图 7 可知,当流量为 $160\sim 440\text{ m}^3/\text{h}$ 时,扬程随着叶片包角的增大而减小,随着流量增大而减小.这是因为叶片包角影响了叶轮出口液体的滑移,包角的增大使液体受到叶片更强的约束,滑移程度降低,随着流量增大,扬程下降速度加快.



(a)扬程曲线



(b)水力效率曲线

图 7 不同流量工况下叶片包角对扬程和水力效率影响曲线

Fig.7 Influence curve of impeller blade wrap angles on head and efficiency under different flow conditions

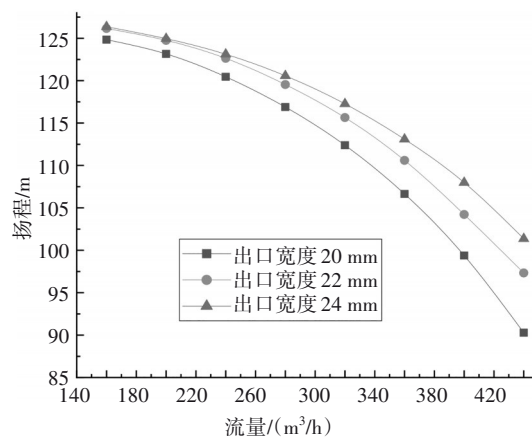
当流量为 $160\sim 360\text{ m}^3/\text{h}$ 时,水力效率随着叶片包角增大而升高;当流量为 $360\sim 440\text{ m}^3/\text{h}$ 时,水力效率基本随着叶片包角增大而降低,效率极值点随着叶片包角的增大逐渐向小流量区偏移.这主要是因为叶片扫掠接触面积增大,对进出口流体的控制力

更强,但是摩擦阻力耗能增加更明显.在小流量范围内,由于包角的增大,叶轮流道内的流动扩散减小,流动更贴近叶片形状,叶片控制力作用明显,水利损失较小,所以随着包角增大,能够提高潜水泵整体的效率;但是随着流量增大,单位时间内流体与叶片表面接触产生的摩擦力增大,摩擦能量损失增速加快,导致水力效率开始降低.

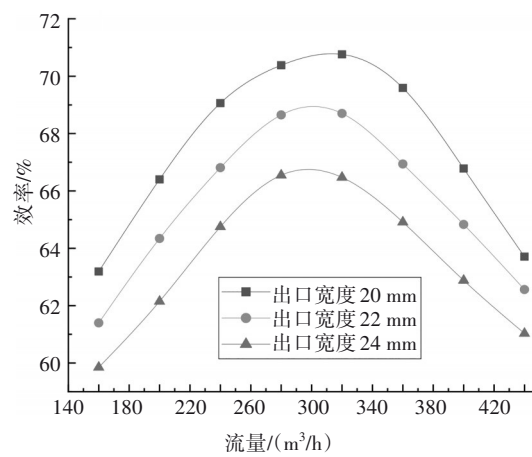
2.5 叶轮出口宽度对潜水泵性能的影响

叶轮出口宽度是控制叶轮流场空间的重要参数.建立出口宽度 b_2 分别为 20 mm 、 22 mm 、 24 mm 的 3 组不同叶轮流场仿真模型,对叶轮的出口宽度影响规律进行分析.

图 8 为不同流量工况下叶轮出口宽度对扬程和效率影响曲线.由图 8 可知,当流量为 $160\sim 440\text{ m}^3/\text{h}$ 时,扬程随着叶轮出口宽度的增大而增大,随着流量的增加而减小,叶轮出口宽度越大,扬程降低速率越小.当流量为 $160\sim 440\text{ m}^3/\text{h}$ 时,效率随着叶轮出口宽度增大而减小,效率极值点基本保持在 $300\text{ m}^3/\text{h}$ 左



(a)扬程曲线



(b)效率曲线

图 8 不同流量工况下叶轮出口宽度对扬程和效率影响曲线

Fig.8 Influence curve of impeller outlet width on head and efficiency under different flow conditions

右. 叶轮出口宽度的大小决定叶轮内部的流体空间和叶片轴向方向的宽度, 流体空间增大, 叶片与流体接触面积就会增大, 导致叶片表面的沿程阻力能量损失提高, 加上叶轮出口处的局部阻力能量损失提高, 产生了出口宽度越大, 潜水泵效率越低的现象.

2.6 叶片数量对潜水泵性能的影响

叶片数量的变化能够很明显的改变叶轮内部的流场结构. 建立叶片数量 n 分别为 4、5、6 的 3 组不同的叶轮流场仿真模型.

图 9 为不同叶片数量下扬程和水力效率随流量变化曲线. 由图 9 可知, 当流量为 160~440 m^3/h 时, 扬程随叶片数量的增加而增大, 但随着流量的增大, 扬程增加的幅度减小, 符合压力云图的入口负压值增大的流场特性. 当流量为 160~440 m^3/h 时, 水力效率随叶片数量增加而减小, 效率极值点随着叶片数量的增加逐渐向小流量区偏移. 叶片数量的增加能够显著提高叶轮对流体做功能力, 提高潜水泵的扬程特性. 但是, 由于增加了叶片数量, 导致叶轮中叶

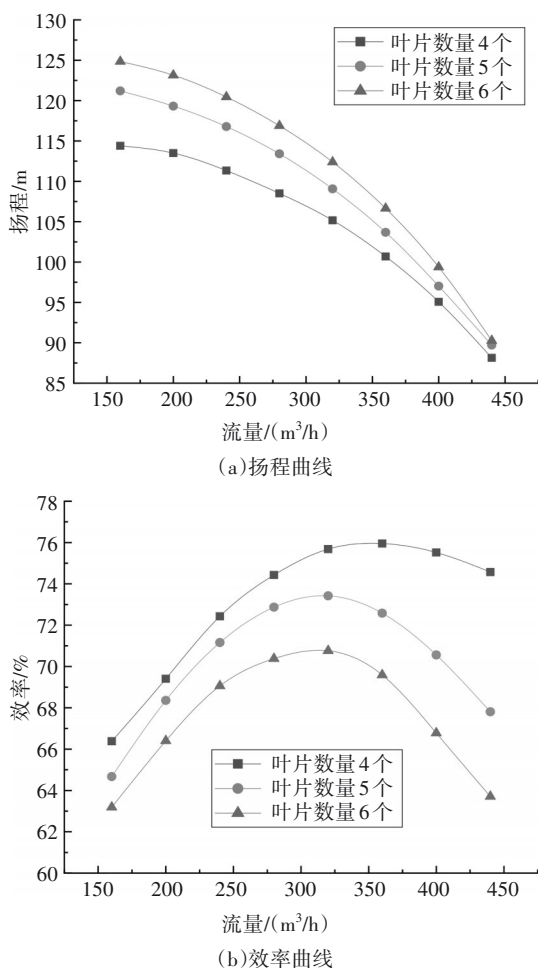


图 9 不同叶片数量下扬程和水力效率随流量变化曲线

Fig.9 Influence curve of impeller number on head and efficiency under different flow conditions

片与流体接触面积增大, 产生的沿程阻力耗能增加, 从而导致潜水泵整体的效率下降. 由图 9 可知, 较多的叶片能够提高扬程, 但是只适用于流量工况不是很大的情况.

3 叶轮结构参数优化

3.1 ISIGHT 优化流程

ISIGHT 优化平台是一个模块化的流程软件^[12], 可以通过调用其中的模块将多个外部软件集合到优化平台中. 本文选用 CFturbo 和 PumpLinx 作为 ISIGHT 优化平台中潜水泵叶轮结构建模和仿真软件. 主要原因是, CFturbo 和 PumpLinx 软件均能够把参数结构设置记录下来, 生成批处理文件 (batch 文件), 可以在结构优化过程中节省大量编写程式的时间. 同时, CFturbo 与 PumpLinx 之间具有非常优秀的接口关系, CFturbo 建立的潜水泵模型能够直接从 CFturbo 建模软件中启动 PumpLinx 流体仿真软件, 并且自动选择相应的泵模板和求解模型, 直接进入 PumpLinx 的计算阶段. ISIGHT 可以将其中的关键结构参数化, 便于智能算法进行结构优化和更改. 图 10 为 ISIGHT 优化流程.

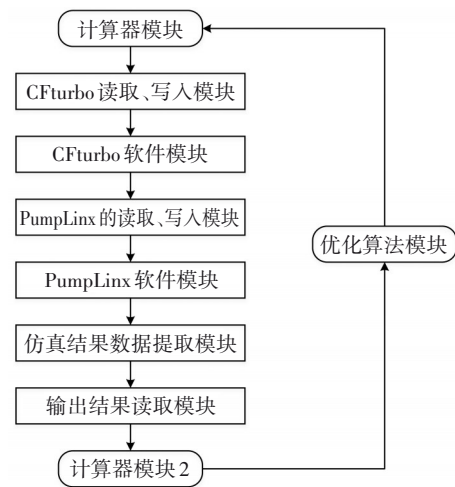


图 10 ISIGHT 优化流程

Fig.10 ISIGHT optimization flow

由图 10 可知, 计算器模块统一整个流程中的参数变量; CFturbo 读取写入模块负责 batch 文件的读取和写入; CFturbo 软件模块主要负责调用软件; PumpLinx 读取写入模块负责将 spro 文件读取和写入, 将其中的迭代步数、收敛条件和网格尺寸设置成参数变量; PumpLinx 软件模块调用软件; 仿真结果数据提取模块负责计算扬程和效率所需的进出口总压

和叶轮力矩;输出结果读取模块将输出的总压和力矩结果读取并参数化写入优化流程中;计算器模块 2 将结果转化为扬程和效率;优化算法模块能监测所有参数化的数据,并且设置叶轮结构参数的优化范围、约束条件和结果优化目标^[13]。

整个优化流程通过优化算法模块进行调控,仿真结束后提取关键数据计算扬程和效率,然后将性能结果输入优化模块中,通过智能算法计算下一步优化参数,从而继续修改叶轮结构参数,实现自动化、智能化的高效优化过程。

3.2 优化数值模型

3.2.1 目标函数

本文有 3 个优化目标:目标 1 是提高潜水泵设计工况下的扬程 $f_1(x)$,目标 2 是提高潜水泵设计工况下的效率 $f_2(x)$,目标 3 是减小潜水泵叶轮结构的体积从而实现轻量化 $f_3(x)$ 。因此,可以将整个优化流程简化为求极值的问题^[14]:

$$F(x) = \{ \max [f_1(x)] \& [f_2(x)] \} \& \{ \min [f_3(x)] \} \quad (4)$$

$$f_1(x) = \eta = \frac{\rho g Q H}{M \omega} \quad (5)$$

$$f_2(x) = H = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (Z_2 - Z_1) + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \quad (6)$$

$$f_3(x) = d_2 \quad (7)$$

3.2.2 设计变量

设计变量也就是潜水泵结构优化流程中的结构参数,包括叶轮直径、叶片包角、叶片出口安放角、叶片厚度、叶轮出口宽度和叶片数量。设计变量表达式为:

$$\mathbf{x} = \{ x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6 \}^T = \{ d_2, \varphi, \beta_2, s, b_2, n \}^T \quad (8)$$

3.2.3 约束条件

约束条件是优化过程中的必要限制,可以分为性能约束和侧面约束。在本文中,性能约束为潜水泵的基本性能要求,即扬程 120 m、效率 65%;侧面约束则是设计变量的优化范围,也就是给定的结构参数的优化范围。设计变量取值范围如表 3 所示。

3.3 优化结果分析

多岛遗传算法能够明显提升潜水泵轻量化,并且能够明显优化扬程和效率。基于本文轻量化优化目标,确定选用多岛遗传算法进行潜水泵性能优化和研究。

表 3 设计变量取值范围

Tab.3 Value range of design variables

取值范围	叶轮直径 d_2 / mm	出口宽度 b_2 / mm	叶片数量 n	叶片厚度 s /mm	出口安放角 β_2 / (°)	叶片包角 φ / (°)
最小值	260	18	4	4.1	18.9	100
初始值	276	22	6	4.3	30.0	112
最大值	280	25	8	5.0	33.8	130

通过多岛遗传算法设置 5 个岛,6 次遗传,10 次迭代优化,最终优化次数为 300 次。潜水泵优化结果散点分布图如图 11 所示。

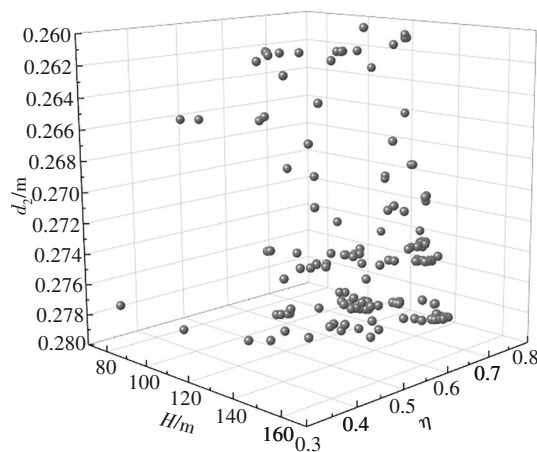


图 11 潜水泵优化结果散点分布图

Fig.11 Scatter distribution diagram of submersible pump optimization results

优化迭代后得到贯流式潜水泵优化仿真结果,扬程为 124.4 m、水力效率为 68.1%、叶轮直径为 270.7 mm。优化前后设计变量对比如表 4 所示。额定流量工况下,贯流式潜水泵扬程、水力效率、叶轮直径对比结果如表 5 所示,生成的外特性性能曲线如图 12 所示。

表 4 优化前后设计变量对比

Tab.4 Comparison of design variables before and after optimization

优化前后	叶轮直径 d_2 /mm	出口宽度 b_2 / mm	叶片数量 n	叶片厚度 s /mm	出口安放角 β_2 / (°)	叶片包角 φ / (°)
优化前	276.00	22.0	6	4.3	30.0	112.0
优化后	270.67	24.6	6	4.5	27.6	116.4

表5 优化前后贯流式潜水泵目标参数对比

Tab.5 Comparison of target parameters of tubular submersible pump before and after optimization

优化前后	扬程 H/m	水力效率 $\eta/\%$	叶轮直径 d_2/mm
优化前	118.0	66.7	276.00
优化后	124.4	68.1	270.67
差值/ $\%$	5.1	2.1	1.9

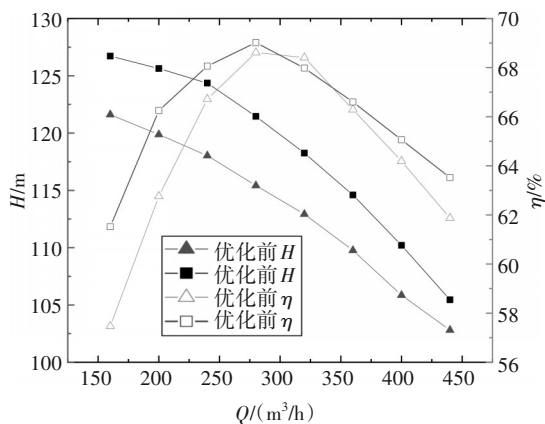


图12 优化前后潜水泵外特性性能曲线

Fig.12 The external characteristic curve of submersible pump before and after optimization

由表5可知,叶轮参数优化前后潜水泵额定流量工况的扬程提升5.1%,水力效率提升2.1%,叶轮直径减小1.9%,3个优化目标都有非常明显的优化提升.由图12可知,优化后的扬程在所有流量工况下都明显优于优化前,但是优化后扬程曲线在高流量工况下的下降趋势更快.优化后的水力效率曲线的极值点在280 m³/h流量附近,优化前的水力效率曲线的极值点在280~320 m³/h流量内;优化后的水力效率总体优于优化前,并且水力效率曲线的极值点更靠近240 m³/h的额定流量工况.

3.4 试验验证

为了验证数值模拟的精度及准确性,由潜水泵厂家根据优化结果设计生产了QW-240-120排水抢险潜水泵.使用流量计和压力表对该潜水泵进行现场测试(图13),在水温25℃时,测得流量为240.65 m³/h,进出口压差值为1.213 kPa,可计算得出扬程为124.78 m.优化后潜水泵结果与现场测试值对比如表6所示.

由表6可知,在流量误差为0.27%的情况下,扬程误差为0.31%,差值较小,可以说明优化结果良好,

潜水泵性能提升明显.



(a)流量数据

(b)压力数据

图13 QW-240-120潜水泵测量数据

Fig.13 QW-240-120 submersible pump measurement data

表6 试验值与优化值对比

Tab.6 Comparison of experimental values and optimized values

项目	扬程/m	流量/(m ³ /h)
试验值	124.78	240.65
优化值	124.40	240.00
差值/ $\%$	0.31	0.27

4 结论

基于Fluent流体软件建立贯流式潜水泵全流场仿真模型,在CFturbo旋转机械建模软件生成的经验叶轮结构基础上,对叶轮结构引起的流场特性和性能特性进行定常仿真模拟分析,得出结论如下:

1)叶轮直径增大能够显著提高潜水泵的扬程,提升大流量工况下潜水泵的水力效率,在保证潜水泵轻量化要求下,可以选用较大的叶轮直径.叶片包角增大会降低潜水泵的扬程,但是,在小流量工况下能够明显提升潜水泵的水力效率,并且最优效率点向小流量区偏移.由于叶轮出口宽度增大会增大潜水泵的扬程,降低水力效率,所以需要按照实际需求来选择合适的叶轮出口宽度.叶片数量增加能够明显提高潜水泵的扬程,但是,水力效率会降低,必须综合扬程和水力效率要求选择合适的叶片数量.

2)实现ISIGHT优化平台的集成参数化建模和智能算法多因素多目标参数优化方案,通过多岛遗传算法5个岛,6次遗传,10次迭代优化,总次数300次的参数优化过程,得到最优的叶轮参数结构为:叶轮直径270.67 mm、出口宽度24.6 mm、叶片数量6

个、叶片厚度4.5 mm、出口安放角 27.6° 、叶片包角 116.4° 。优化后结果在额定流量工况下扬程提升5.1%,水力效率提升2.1%,叶轮直径减小1.9%,不同流量工况下,优化后的潜水泵扬程和水力效率总体优于优化前。在额定流量为 $240\text{ m}^3/\text{h}$ 工况下,通过现场测定,得到进出口压差值为1.213 kPa、扬程为124.78 m,优化仿真扬程为124.4 m,差值仅为0.31%。说明通过ISIGHT优化平台得出的优化方案可靠,能够提升潜水泵性能。

参考文献

- [1] 蒋海江,彭树梁,张记,等. 大型矿用潜水泵在布沼坝露天煤矿防洪排水系统中的应用[J]. 露天采矿技术,2021,36(3):63-65.
JIANG H J, PENG S L, ZHANG J, *et al.* Application of large mining submersible pump in flood control and drainage system of Buzhaoba Open-pit Coal Mine[J]. Opencast Mining Technology, 2021, 36(3): 63-65. (In Chinese)
- [2] 井婷婷. 我国矿用应急潜水泵存在的主要问题及对策[J]. 矿业安全与环保,2018,45(1):112-115.
JING T T. Problems and countermeasures of mine emergency submersible pump in China[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2018, 45(1): 112-115. (In Chinese)
- [3] XIA B, KONG F Y, ZHANG H, *et al.* Investigation of axial thrust deviation between the theory and experiment for high-speed mine submersible pump [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10(8): 168781401878925.
- [4] ZHANG H, TANG L F, ZHAO Y T. Influence of blade profiles on plastic centrifugal pump performance [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020, 2020: 6665520.
- [5] 董敏,杨浩,陈铁桩. 离心泵多目标优化设计及数值模拟研究[J]. 中国农村水利水电,2019(4):154-157.
DONG M, YANG H, CHEN T Z. Multi-objective optimization design and numerical simulation of centrifugal pumps [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(4): 154-157. (In Chinese)
- [6] 王玉勤,丁泽文,霍新旺,等. 基于正交试验的离心泵空化性能优化设计[J]. 邵阳学院学报(自然科学版),2018,15(3):26-33.
WANG Y Q, DING Z W, HUO X W, *et al.* Optimization design of centrifugal pump cavitation performance based on orthogonal test [J]. Journal of Shaoyang University (Natural Science Edition), 2018, 15(3): 26-33. (In Chinese)
- [7] WANG X N, ZHENG X J, WANG P. Direct numerical simulation of particle-laden plane turbulent wall jet and the influence of Stokes number [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2017, 92: 82-92.
- [8] 邱勇,张可可,唐晓晨,等. 双叶片离心泵内固液两相流径向力特性研究[J]. 中国农村水利水电,2019(6):111-115.
QIU Y, ZHANG K K, TANG X C, *et al.* A study of radial force characteristics of solid-liquid two-phase flow double-blade centrifugal pump[J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(6): 111-115. (In Chinese)
- [9] 曹卫东,代珣,胡啟祥,等. 矿用抢险多级泵转子部件轴向力数值模拟及平衡方法研究[J]. 流体机械,2014,42(6):16-20.
CAO W D, DAI X, HU QX, *et al.* Numerical simulation and balance method research for axial force of rotation components on mine emergency multi-stage pump [J]. Fluid Machinery, 2014, 42(6): 16-20. (In Chinese)
- [10] 喻德辉,陈燕,王超,等. 蜗壳式离心泵外特性仿真与实验研究[J]. 中国农村水利水电,2020(1):181-184.
YU D H, CHEN Y, WANG C, *et al.* Simulation and experimental study on external performance of the volute centrifugal pumps [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(1): 181-184. (In Chinese)
- [11] WANG Y P, CHEN B Z, ZHOU Y, *et al.* Numerical simulation of fine particle solid-liquid two-phase flow in a centrifugal pump [J]. Shock and Vibration, 2021, 2021: 6631981.
- [12] 李佳霖,李劲松,李美. Isight平台理论与方法及其在产品结构设计中的应用研究[J]. 汽车实用技术,2021,46(8):63-67.
LI J L, LI J S, LI M. Isight platform theory and method and its application in product structure design and optimization [J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(8): 63-67. (In Chinese)
- [13] 杨敬江,何松,李先军. 基于Isight平台的蜗壳式混流泵多目标优化设计[J]. 中国农村水利水电,2019(12):176-180.
YANG J J, HE S, LI X J. Multi-objective optimization design of volute mixed flow pump based on isight platform [J]. China Rural Water and Hydropower, 2019(12): 176-180. (In Chinese)
- [14] 陈梓铭,郭鹏程,熊勇,等. 基于响应面模型的滑移门动力学特性多目标优化[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2019,46(4):17-24.
CHEN Z M, GUO P C, XIONG Y, *et al.* Multi-object optimization on dynamic characteristics of sliding door based on response surface model [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2019, 46(4): 17-24. (In Chinese)